



申请上海交通大学博士学位论文

饱和软土高效固化剂及固化土强度特性研究

（国家自然科学基金资助项目：51379122）

（上海市科委资助项目：15DZ1204500）

学 院：船舶海洋与建筑工程学院

学 科：土木工程（岩土工程）

博士生：马 聪

学 号：0130109008

指导教师：陈龙珠教授

陈兵研究员

上海交通大学

2017年6月20日



*A Dissertation Submitted to the Graduate School of Shanghai Jiao Tong University in
Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil
Engineering*

**INVESTIGATION ON THE HIGH-EFFICIENCY
STABILIZER FOR SATURATED SOFT CLAY AND
STRENGTH CHARACTERISTICS OF STABILIZED CLAY**

**Supported by
National Nature Science Foundation of China (Grant No. 51379122)
The Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (Grant No. 15DZ1204500)**

By

Cong Ma

Specialty: Civil Engineering (Geotechnical Engineering)

Supervisor: Prof. Long-zhu Chen

Prof. Bing Chen

**Department of Civil Engineering
School of Naval Architecture, Ocean, and Civil Engineering
Shanghai Jiao Tong University
Shanghai, P. R. China
June, 2017**



饱和软土高效固化剂及固化土强度特性研究

摘要

饱和软土存在含水率高、强度低、压缩性大及常规无机胶凝材料固化处理效果欠佳等问题，工程中常用的解决方法是加大固化剂（水泥）掺量，导致工程成本增加，同时不利于环境友好。软土固化处理后，工程师常根据现场检测和经验公式计算得到的预期力学性能制订后续施工方案。但目前常用的固化土强度计算公式，准确度较低且同一公式无法适用于不同类型的土，从而引发因固化土强度估算不准确导致的工程安全隐患等问题。本文从软土固化处理的基础理论出发，研究高效水泥基软土固化剂，对固化剂各组分作用开展量化分析，并提出了软土有机质的反活性系数，借助固化土体基本物理性质指标的测试、分析结果，建立固化有机质土强度综合计算模型。基于以上研究，获得的主要创新性成果如下：

（1）以上海饱和软黏土为对象研究一种水泥与外加剂复合无机高效软土固化剂及其作用机理：在提高土 pH 值、改善固化土早期强度和中后期火山灰效应的基础上，结合化学沉淀理论，选定水玻璃、氯化钙与氢氧化钠作为外加剂改善饱和黏土及淤泥土的固化效果，确定氯化钙与氢氧化钠比例为 1:1 的复合激发剂，通过正交试验得到水泥基高效固化剂的基准配比为水泥:助剂:复合激发剂=5:1:2。掺入 12% 高效固化剂的固化土强度，基本与掺入 20% 水泥的固化土的各龄期强度相当。掺入高效固化剂的固化土中有更多的蜂窝状水化硅酸钙凝胶（C-S-H）生成，说明 C-S-H 的形态、数量及结构对固化土强度均有较大影响。

（2）提出外加剂的火山灰系数，量化分析外加剂对固化土强度的作用：将外加剂（助剂和复合激发剂）看作火山灰物质并定义其火山灰系数，其作用相当于外掺一定量的水泥。当量水泥量可由火山灰系数与外加剂掺量的乘积获得。基于水土灰比模型，多元拟合得到各龄期的助剂火山灰系数（ k_1 ）和复合激发剂火山灰系数（ k_2 ）。发现外加剂火山灰系数随养护龄期不断变化， k_1 随龄期的增加而降低， k_2 随龄期的增加而增大，其原因为助剂主要起早强作用，而复合激发剂的中后期火山灰作用更显著。外加剂作用的量化分析为改善水泥固化土的效果提供设计参考，建立固化土强度



综合计算模型提供理论依据。

(3) 研究粉煤灰的作用机理，基于分散与填充 (P&D) 系数分析粉煤灰对固化土强度的作用：固化土中难觅粉煤灰微米级以下微球体，证实了粉煤灰的火山灰与填充作用。此外，粉煤灰还将胶凝水化产物-土颗粒的大团簇分散为一些小团簇，有利于形成更多、更稳定的骨架结构，因此可知粉煤灰在固化土中的作用与水化产物生成量密切相关。将粉煤灰看作外掺一定量的高效固化剂，当量固化剂量可由 P&D 系数与粉煤灰掺量的乘积获得，其大小与固化剂用量和龄期密切相关，随龄期的增加大体呈现增加趋势，但增加速率有所降低。

(4) 量化腐殖酸对固化土强度的影响，考察固化材料用量与腐殖酸含量对固化土体物性指标的影响，建立固化有机质土的强度综合计算模型：基于腐殖酸反活性系数的计算，可得到固化有机质土的当量水泥总量 (C_{fh}) 与有效固化剂掺量 (C_{ec})。固化土体一定龄期孔隙比 (e_{tH}) 可表示为土体初始物性指标、 C_{ec} 和养护龄期的函数。分析固化有机质土强度与 e_{tH}/C_{fh} 的关系，最终建立基于土体基本物性参数的固化有机质土强度计算模型；测试了高效固化剂混掺粉煤灰固化滩涂淤泥各龄期的强度，同经固化有机质土强度计算模型得到的计算结果对比，可知强度计算模型用于滩涂淤泥仍具有较高的准确性。

关键词：饱和软土；高效固化剂；再造有机质土；强度特性；计算模型



STUDY ON THE HIGH-EFFICIENCY STABILIZER FOR SATURATED SOFT CLAY AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF STABILIZED CLAY

ABSTRACT

To solve the problems of the soft clay with characteristics of high water content, low strength, high compressibility and poor effectiveness of conventional cementing materials, different types of admixtures were selected and a Portland cement-based high-efficiency soil stabilizer was developed by single factor and orthogonal testing analysis. The influence of the addition of soil stabilizer and fly ash on the fundamental parameters of soft clay was investigated and the parameters were normalized. And then, the integrated strength-calculation models accounting for the quantitative analysis of the effects of soil stabilizer and fly ash were established. The mechanical properties of soft clay with different contents of organic matter stabilized with high-efficiency soil stabilizer and fly ash were tested and the anti-pozzolanic effect and factors were proposed. And the anti-pozzolanic factors were calculated by water-soil-stabilizer models. According to the experimental results, the integrated strength-calculation models for stabilized organic clay accounting for fundamental parameters were established. Based on the above study, the following innovation products can be achieved.

(1) A type of Portland cement-based high-efficiency soil stabilizer was developed and the mechanisms of the stabilizer were studied on Shanghai soft clay. On the basis of the theory of improving the pH value of the soil, increasing the early term strength and middle-long term pozzolanic effect, sodium silicate, calcium chloride and sodium hydroxide were selected to stabilize the soft clay and silt by chemical precipitation. The composite promoter was prepared by calcium chloride and sodium hydroxide at the mass ratio of 1:1. The final formula of the stabilizer (CSCN) was confirmed by orthogonal experiment and the mass ratio of the Portland cement, sodium silicate and composite promoter is 5:1:2. The experimental results indicate that the compressive strength of the specimens stabilized with 12% CSCN at different curing ages almost equaled to that of specimens stabilized with



20% cement. The mineral and microstructure characterization indicate that there were more cellular hydrated calcium silicate (C-S-H) gels produced in the CSCN stabilized specimen. This observation implied that the strength and structure of the stabilized soil might be influenced by the amounts, structures and types of C-S-H gels.

(2) The pozzolanic factors were proposed and the effects of admixtures on stabilized clay were quantitatively analyzed. Based on the definition of the pozzolanic materials, the admixtures in the stabilized clay can be regarded as pozzolanic materials. Hence, the use of the admixtures was assumed as the addition of a certain amount of cement. And the equivalent cement of the admixtures could be calculated by the product of the pozzolanic factors and the content of the admixtures. According to the water-soil-cement models, the values of the pozzolanic factors of admixtures (k_1 , k_2) could be obtained by multiple linear regression. In addition, the values of pozzolanic factors varied with curing time, and the k_1 values of the assistant agent decreased with curing time and the k_2 values of the composite promoter increased with curing time. The possible reason for this phenomenon was that the assistant agent plays a role of early strength agent and the long-strength pozzolanic effect of composite promoter was more remarkable.

(3) The mechanisms of fly ash in stabilized clay were investigated, and the pozzolanic and dispersing (P&D) effects were proposed. The application of fly ash in stabilized clay had several effects, such as pozzolanic and filling effects. In fact, the C-S-H gels could bond amounts of soil particles and some big gel-soil clusters were formed. Hence, the dispersing effect can be explained that the big clusters were dispersed into some small clusters by fly ash particles. Therefore, the effects of the fly ash in stabilized clay could be influenced by the amounts of the generation of the C-S-H gels. Fly ash is a type of pozzolanic material, and it can also be regarded as the addition of a certain amount of CSCN in the stabilized clay. The equivalent CSCN of fly ash can be achieved by the product of the P&D factors and fly ash content. The values of k_F were determined by the CSCN content and the curing time. The analysis results indicate that the P&D factors presented an increasing tendency with curing time. It's notable that the increasing rate decreased with curing time.

(4) The influence of organic matter (humic acid) in soft clay on the compressive strength of stabilized clay was analyzed quantitatively and the integrated strength-calculation models for CSCN-fly ash stabilized organic clay on the basis of fundamental parameters were obtained. Based on the calculation of the anti-pozzolanic factor of humic acid, the total cement content (C_{fh}) and effective stabilizer content (C_{ec}) were defined. The void ratio (e_{tH}) of stabilized organic soil at different curing times can be expressed by the fundamental parameters of the soft clay, C_{ec} and curing time. Based upon the above results,



these fundamental parameters were normalized by defining some variables. The relationship of compressive strength to e_{tH}/C_{fh} was analyzed, and the integrated models for calculating the strength of stabilized organic clay were established. In addition, the compressive strength of Lianjiang silt stabilized with CSCN and fly ash at different curing ages was measured. The testing results were compared with the predicted values calculated by the integrated strength-calculation models. It can be concluded that the strength-calculation models achieved from Shanghai soft clay is also suitable for silt.

KEY WORDS: Saturated clay, High-efficiency clay stabilizer, Artificial organic soil, Strength characteristics, The integrated strength-calculation models



目录

摘要	I
ABSTRACT.....	III
图录	IX
表录	XII
符号说明.....	XIV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 无机类土固化剂.....	2
1.2.2 固化土强度发展计算模型.....	6
1.2.3 活性掺料或外加剂作用的研究.....	8
1.2.4 固化剂作用机理及有机质影响机理的研究.....	10
1.3 问题的提出.....	13
1.4 研究目标、研究内容及拟解决的关键性问题.....	14
1.4.1 研究目标.....	14
1.4.2 研究内容.....	15
1.5 采取的研究方法及技术路线.....	16
1.5.1 采取的研究方法.....	16
1.5.2 技术路线.....	17
1.6 本文结构.....	17
第 2 章 水泥基高效固化剂的研究.....	19
2.1 引言.....	19
2.2 固化剂组成材料优选理论及对策.....	20
2.2.1 提高土体 pH 值.....	20
2.2.2 提高早期强度.....	21
2.2.3 化学沉淀理论.....	21
2.3 试验方法及内容.....	22
2.3.1 试验材料.....	22
2.3.2 试样制备.....	25
2.3.3 试验内容.....	25
2.4 外加剂单掺试验研究.....	27
2.4.1 试验方案.....	27
2.4.2 试验结果与分析.....	27
2.5 复合激发剂的研究.....	31
2.5.1 单一激发剂.....	31
2.5.2 复合激发剂.....	34
2.6 高效固化剂各组分比例的确定.....	38
2.6.1 正交试验.....	38



2.6.2 高效固化剂与硅酸盐水泥的固化作用对比.....	43
2.7 固化剂作用机理分析.....	47
2.8 本章小节.....	52
第3章 外加剂在固化土中作用的量化分析.....	54
3.1 引言.....	54
3.2 外加剂作用的定量化分析.....	55
3.2.1 理论基础.....	55
3.2.2 试验结果.....	56
3.2.3 量化分析与讨论.....	58
3.3 固化土强度随龄期的发展关系.....	62
3.3.1 理论基础.....	62
3.3.2 分析与讨论.....	63
3.4 基于外加剂作用量化分析的固化土体基本物性指标表征.....	65
3.4.1 理论基础.....	65
3.4.2 试验方案及结果.....	67
3.4.3 物性指标的标准化分析.....	67
3.4.4 高效固化剂固化土强度初步计算模型.....	76
3.5 本章小结.....	80
第4章 高效固化剂混掺粉煤灰的作用研究.....	82
4.1 引言.....	82
4.2 粉煤灰对高效固化剂固化土抗压强度的影响.....	83
4.2.1 试验方案及结果.....	83
4.2.2 固化土强度随龄期的变化.....	86
4.3 粉煤灰作用机理及量化分析.....	89
4.3.1 火山灰及分散效应.....	89
4.3.2 量化分析.....	91
4.4 粉煤灰对固化土体基本物性指标的影响.....	95
4.4.1 试验结果.....	95
4.4.2 基本指标的标准化分析.....	97
4.4.3 固化剂混掺粉煤灰固化土强度初步计算模型.....	103
4.5 本章小结.....	108
第5章 固化饱和有机质软土的强度特性与计算模型研究.....	110
5.1 引言.....	110
5.2 高效固化剂固化有机质土的强度特性.....	111
5.2.1 试验方案及结果.....	111
5.2.2 强度随龄期的变化关系.....	114
5.3 高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土的强度特性.....	117
5.3.1 试验方案及结果.....	117
5.3.2 强度随龄期的变化关系.....	120
5.3.3 量化分析.....	122



5.4 基于土体基本物性指标的固化有机质土强度综合计算模型 125

 5.4.1 试验方案及结果 125

 5.4.2 基本指标的标准化分析 127

 5.4.3 固化有机质土综合计算模型的建立 134

5.5 本章小结 136

第 6 章 沿海滩涂淤泥的固化处理 138

6.1 引言 138

6.2 高效固化剂固化处理滩涂淤泥及强度计算模型的对比应用 139

 6.2.1 高效固化剂固化处理滩涂淤泥 139

 6.2.2 高效固化剂混掺粉煤灰固化处理滩涂淤泥 143

6.3 水泥-废渣基无机土固化剂的制备 146

 6.3.1 固化材料单一因素试验分析 146

 6.3.2 正交试验 150

6.4 本章小结 156

第 7 章 结论与建议 158

7.1 主要结论 158

7.2 主要创新点 160

7.3 进一步研究的建议 160

参考文献 161

致谢 172

个人简历攻读博士学位期间的相关学术成果 173



图录

图 1-1 论文的技术路线图..... 17

图 2-1 第 2 章研究技术路线图 20

图 2-2 土样和粉煤灰的粒径分布曲线 23

图 2-3 腐植酸宏观图片 23

图 2-4 软土和粉煤灰的 SEM 图片 24

图 2-5 硅酸钠掺量对固化土强度的影响 28

图 2-6 氢氧化钠掺量对固化土强度的影响 28

图 2-7 氢氧化钙掺量对固化土强度的影响 29

图 2-8 氯化钙掺量对固化土强度的影响 30

图 2-9 偏铝酸钠掺量对固化土强度的影响 30

图 2-10 单掺氢氧化钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响 31

图 2-11 单掺氢氧化钙对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响 32

图 2-12 单掺氯化钙对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响 33

图 2-13 单掺偏铝酸钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响 34

图 2-14 按不同比例复合的氢氧化钙和氢氧化钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响..... 35

图 2-15 按不同比例复合的氯化钙与氢氧化钙对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响..... 36

图 2-16 按不同比例复合的氯化钙与氢氧化钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响..... 37

图 2-17 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 7d 强度对比..... 43

图 2-18 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 28d 强度对比..... 44

图 2-19 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 60d 强度对比..... 44

图 2-20 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 90d 强度对比..... 45

图 2-21 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 120d 强度对比..... 45

图 2-22 不同试样的 XRD 图谱..... 48

图 2-23 养护龄期为 28d 的固化土试样的 XRD 图谱 49

图 2-24 各固化土试样 pH 值的变化..... 50

图 2-25 各固化土试样 28d 的微观结构 52

图 3-1 第 3 章研究技术路线图 55

图 3-2 水泥固化土试样的 28d 应力应变曲线..... 57

图 3-3 基于水土灰比模型的水泥固化土强度的拟合曲线..... 59

图 3-4 高效固化剂固化土强度计算值与实测值的对比..... 62

图 3-5 高效固化剂固化土强度随龄期的变化关系..... 64

图 3-6 火山灰系数的拟合曲线 69

图 3-7 系列 I-1 的固化土抗压强度随当量水泥总量及养护龄期的变化关系 70

图 3-8 固化土试样容重比与养护龄期对数的关系..... 71

图 3-9 固化土试样容重比与当量水泥总量的关系..... 71

图 3-10 初始容重与含水率之间的拟合关系 72



图 3-11 固化土试样含水率比与养护龄期对数的关系.....73

图 3-12 固化土试样含水率比与当量水泥总量的关系.....73

图 3-13 固化土试样一定龄期的比重剂量比同当量水泥总量的关系.....74

图 3-14 固化土试样一定龄期的相对比重比与相对水泥含量的关系.....75

图 3-15 系列 I 固化土强度随孔隙率与当量水泥总量比值的变化关系76

图 3-16 K_C 的值与养护龄期的变化关系77

图 3-17 系列 II 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (3-34) 计算值的对比.....78

图 3-18 系列 I 固化土强度随孔隙比与当量水泥总量比值的变化关系79

图 3-19 K_L 的值与养护龄期的变化关系79

图 3-20 系列 II 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (3-37) 计算值的对比.....80

图 4-1 第 4 章研究技术路线图83

图 4-2 系列 FI-1 固化土试样强度随龄期的变化.....86

图 4-3 系列 FOII 固化土试样各龄期测试强度与计算强度的对比.....88

图 4-4 未处理软土、FS-1 及 FS-2 固化土试样的热重曲线90

图 4-5 养护 28d 的各试样 XRD 图谱90

图 4-6 养护 28d 的各试样的 SEM 图片91

图 4-7 基于水土灰比模型的系列 FI 固化土强度的拟合曲线93

图 4-8 系列 FOII 固化土试样各龄期强度计算值与实测值的对比.....95

图 4-9 P&D 系数的拟合曲线98

图 4-10 系列 FI70 的固化土抗压强度随当量固化剂总量及养护龄期的变化关系99

图 4-11 固化土试样容重比与养护龄期对数的关系.....100

图 4-12 固化土试样容重比与当量固化剂总量的关系.....100

图 4-13 固化土试样含水率比与养护龄期对数的关系.....101

图 4-14 固化土试样含水率比与当量固化剂总量的关系.....102

图 4-15 FI70 与 FI90 固化土试样一定龄期的相对比重比与相对水泥含量的关系.....103

图 4-16 系列 FI70 与 FI90 固化土强度随孔隙比与当量固化剂总量比值的幂函数关系.....104

图 4-17 K_{CF} 的值与养护龄期的变化关系104

图 4-18 系列 FOII 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (4-21) 计算值的对比.....105

图 4-19 系列 FI70 与 FI90 固化土强度随孔隙比与当量固化剂总量比值的幂函数关系.....106

图 4-20 K_{LF} 的值与养护龄期的变化关系107

图 4-21 系列 FI70 与 FI90 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (4-24) 计算值的对比107

图 5-1 第 5 章研究技术路线图111

图 5-2 系列 HI-1 固化土试样抗压强度及强度保留系数随腐殖酸掺量的变化113

图 5-3 系列 HI-2 固化土试样抗压强度及强度保留系数随腐殖酸掺量的变化113

图 5-4 系列 HI-3 固化土试样抗压强度及强度保留系数随腐殖酸掺量的变化114

图 5-5 系列 HI-1 固化土试样强度随龄期的变化114

图 5-6 系列 HOII-1 固化土试样各龄期测试强度与计算强度的对比.....116

图 5-7 系列 HFI-1 粉煤灰掺量为 8% 的固化土试样强度随龄期的变化.....120

图 5-8 系列 HFOII 固化土试样各龄期测试强度与计算强度的对比122

图 5-9 粉煤灰活性系数和腐殖酸反活性系数随养护龄期的变化关系.....124



图 5-10 系列 HFOII 试样强度的实测值与由式 (5-11) 得到计算值的对比 125

图 5-11 系列 FHVI70 的固化土抗压强度随当量水泥总量及养护龄期的变化关系 127

图 5-12 系列 FHVI90 的固化土抗压强度随当量水泥总量及养护龄期的变化关系 128

图 5-13 固化有机质土试样容重比与有效固化剂掺量的关系 129

图 5-14 固化有机质土试样容重比与腐殖酸含量的关系 129

图 5-15 固化有机质土试样容重比与养护龄期的关系 130

图 5-16 初始容重与腐殖酸含量和含水率之间的变化关系 130

图 5-17 含水率比与有效固化剂掺量的关系 131

图 5-18 含水率比与腐殖酸含量的关系 132

图 5-19 含水率比与养护龄期的关系 132

图 5-20 相对比重比与相对固化剂及腐殖酸掺量的关系 133

图 5-21 系列 FHVI70 与 FHVI90 固化土强度随孔隙比与当量固化剂总量比值的函数关系 134

图 5-22 K_{sh} 的值与养护龄期的变化关系 135

图 5-23 系列 HFVII 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (5-20) 计算值的对比 136

图 6-1 不同掺量高效固化剂固化处理淤泥土的抗压强度 140

图 6-2 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 1 d 强度对比 141

图 6-3 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 7 d 强度对比 141

图 6-4 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 28 d 强度对比 142

图 6-5 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 60 d 强度对比 142

图 6-6 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的各龄期强度 143

图 6-7 8% 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的实测强度与预测强度的对比 145

图 6-8 12% 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的实测强度与预测强度的对比 145

图 6-9 16% 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的实测强度与预测强度的对比 146

图 6-10 不同掺量粉煤灰对固化淤泥强度的影响 148

图 6-11 不同掺量磷石膏对固化淤泥强度的影响 149

图 6-12 不同掺量生石灰对固化淤泥强度的影响 150



表录

表 2-1 试验用土物理性质指标22

表 2-2 土样、水泥及粉煤灰的主要化学组成.....22

表 2-3 单掺试验基本配比27

表 2-4 正交试验方案的因素水平表39

表 2-5 正交试验设计表40

表 2-6 正交试验 7d 结果40

表 2-7 正交试验 28d 结果41

表 2-8 7d 试验结果的方差分析表.....42

表 2-9 28d 试验结果的方差分析表.....42

表 2-10 两种固化剂作用对比的基础配比43

表 2-11 用于固化剂作用机理分析的固化土配方.....47

表 3-1 不同掺量水泥固化土的各龄期强度56

表 3-2 正交试验各试样的抗压强度58

表 3-3 试样的各龄期当量水泥总量60

表 3-4 外加剂的当量水泥掺量及火山灰系数.....60

表 3-5 高效固化剂固化土双曲线模型的参数及相关系数值.....64

表 3-6 建立综合强度计算模型的试验配比67

表 3-7 各配方不同龄期的抗压强度67

表 4-1 试验配方表83

表 4-2 固化土不同龄期的抗压强度84

表 4-3 系列 FI 各固化土试样的双曲线模型的参数及相关系数值87

表 4-4 用于确认粉煤灰效应的固化土配方89

表 4-5 系列 FI 各固化土试样不同龄期的 k_F94

表 4-6 建立综合强度计算模型的试验配比96

表 4-7 FI70 与 FI90 各配方不同龄期的抗压强度.....96

表 5-1 试验配方表111

表 5-2 系列 HI 各固化土试样的双曲线模型的参数及相关系数值115

表 5-3 试验配方表117

表 5-4 系列 HFI-1 固化土试样的试验结果.....117

表 5-5 系列 HFI-2 固化土土试样的试验结果.....118

表 5-6 系列 HFI-3 固化土土试样的试验结果.....119

表 5-7 系列 HFI 各固化土试样的双曲线模型的参数及相关系数值121

表 5-8 试验配方表125

表 5-9 HFVI70 与 HFVI 90 系列各配方不同龄期的抗压强度.....126

表 6-1 单一因素分析试验基准配比147

表 6-2 单一因素分析试验详细配比147



表 6-3 正交试验方案的因素水平表	151
表 6-4 正交试验设计表	151
表 6-5 正交试验 7d 结果	152
表 6-6 正交试验 28d 结果	153
表 6-7 7d 正交试验结果的方差分析表	155
表 6-8 28d 正交试验结果的方差分析表	155



符号说明

C 固化剂当量水泥总量	k_{fh} 考虑腐殖酸的粉煤灰活性系数
$C1$ 硅酸钠实际用量	k_{CS} 固化剂对粉煤灰的影响系数
$C2$ 复合激发剂实际用量	k_F 考虑固化剂的粉煤灰作用系数
C_e 水泥实际用量	M_S 正交表方差
C_{ec} 固化有机质土的有效固化剂量	n 土体孔隙率
C_{eH} 粉煤灰与腐殖酸当量固化剂量	n_t 固化土某龄期孔隙率
C_{fh} 考虑腐殖酸的当量固化剂总量	$O C I_{fh}$ 腐殖酸的反活性系数
C_i 外加剂当量水泥量	q_u 水泥或高效固化剂固化土强度
C_{CS} 固化剂实际用量	q_{uF} 掺粉煤灰的固化剂固化土强度
C_{CF} 掺粉煤灰的当量固化剂总量	q_{uH} 固化有机质土强度
C_F 粉煤灰实际用量	$R C_n$ 强度保留系数
C_{HAP} 腐殖酸含量	S_S 正交表偏差平方和
df 正交表自由度	t 养护龄期
e 土体孔隙比	w^* 基准含水率
e_t 固化土某龄期孔隙比	w_c 固化土总含水率
e_{tF} 掺粉煤灰固化土某龄期孔隙比	w_{cH} 有机质土总含水率
e_{tH} 固化有机质土某龄期孔隙比	w_t 固化土某龄期含水率
F 正交表自由度	w_{tF} 掺粉煤灰固化土某龄期含水率
G_{s0} 土粒比重	w_{tH} 固化有机质土某龄期含水率
G_{st} 固化土粒比重	γ_0 土体容重
G_{stF} 掺粉煤灰的固化土粒比重	γ_{0H} 有机质土体容重
G_{stH} 固化有机质土粒比重	γ_t 固化土某龄期容重
$k1$ 硅酸钠火山灰系数	γ_{tF} 掺粉煤灰固化土某龄期容重
$k2$ 复合激发剂火山灰系数	γ_{tH} 固化有机质土某龄期容重
k_f 粉煤灰的固有作用系数	γ_w 水容重



第1章 绪论

1.1 研究背景

软土广泛分布于我国东南沿海，其具有孔隙比大、含水率高、强度低、压缩性强和渗透性差等诸多特点^[1-3]。实际工程中，此类土需经严格处理满足工程需求性能后方可使用。目前，常用的软土地基处理方法可划分为两大类：（1）软土改良（Soil Improvement）^[4]，即采取预压（或排水）法^[5]、夯实法^[6]、原位压实法^[7]、换填法^[8]等物理力学方法对原地基软土进行土质改良；（2）软土改性（Soil Stabilization），即利用水泥、石灰等^[9]土固化剂可生成能胶结土颗粒胶凝物质的原理对软土地基进行化学改性处理。

土固化剂种类繁多，可分为无机类固化剂和有机类固化剂两大类^[10]，其作用机理为固化剂与土混合后发生化学反应，反应产物填充土体孔隙并同土颗粒搭接形成稳定的骨架结构，进而提高土体的物理力学性能。普通硅酸盐水泥是我国岩土工程最常用的一种无机类固化剂^[11]。而水泥深层搅拌桩法是以水泥为土固化剂，采用深层搅拌法将水泥浆拌入深层土体，对软土基础进行加固处理^[12]。自上世纪八十年代初引入国内以来，此法已被广泛应用于公路、铁路、市政工程、港口码头及工业与民用建筑等行业中的软土基础处理加固工程^[13-16]。但由于各地软土的物理化学性质呈现巨大差异，导致水泥搅拌桩在各地的使用效果也出现较大偏差。基于此，国内外学者对适用于不同土质的水泥基土固化剂进行大量研究^[17-20]，推动了该方法在理论与应用上的发展。

在室内研究及实际应用过程中发现，软土中的有机质含量对固化土性能有较大的影响^[21,22]，因此有机质在加固软地基中的作用及相应的处理方法越来越受到工程人员的重视。目前，对高有机质大孔隙率软土固化的研究集中在以下几个方面：

（1）土固化剂的研究

基于不同类型土的化学组成、孔隙结构及有机质含量等指标，对水泥基土固化剂进行改性处理。常用改性剂包括工业废渣^[23-27]、碱性添加剂^[28]或小颗粒填充材料^[29]等，改性剂的使用不仅可以减少工程中水泥实际用量，还能改善固化土的力学性能。

（2）固化土强度发展计算模型的研究

通过室内试验分析固化土强度随含水率、养护时间及固化剂掺量的发展变化规律，建立基于多参数的强度计算模型，用以指导软土固化处理的工程设计与施工。



(3) 活性外掺料或添加剂作用效应的研究

常用活性外掺料主要有粉煤灰、矿渣及微硅粉^[23-27,29]等，常用添加剂有水玻璃、熟石灰、硫酸钠^[30-32]等。以粉煤灰为例，当前国内外关于粉煤灰在水泥固化土中所起作用的主流说法是火山灰效应，即粉煤灰活性在碱环境中得到激发，发生化学反应生成凝胶矿物。

(4) 固化剂作用机理及有机质影响机理的研究

对固化剂作用机理的研究集中在水泥固化土和水泥混合活性外掺料固化土两个方向，主要从离子交换、硬凝反应及碳酸化作用等角度出发进行研究^[9,33,34]。通过矿物组成及微观结构表征，分析水化产物生成量对固化土性能的影响。

已有研究表明，软土中的有机质会抑制水泥的水化作用，降低水化产物生成量，从而影响固化土的力学性能，但有机质含量对力学性能的影响存在极限含量^[35]。当前，主要通过掺入一定量腐植酸制备人工有机质土的方法研究有机质对固化土的作用机理，此法可用于有机质影响作用的定量分析。在工程界越来越重视软土地基固化处理技术的今天，对高效水泥基固化剂、有机质土固化处理及固化剂作用机理的进一步深入研究对工程设计和施工具有一定的指导意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 无机类土固化剂

与有机类土固化剂相比，无机类土固化剂具有原材料来源广、适用范围广、经济效益高等优点，成为当前应用最广泛的土固化剂。无机固化剂可分为水泥基固化剂、石灰基固化剂和水泥-石灰复合固化剂。近年来，国内外岩土工作者依据实际的工程需求和地质条件，对无机固化剂配方的优化处理进行了深入研究。

Kazemian 等^[30,31]采用水玻璃、氯化钙及偏高岭土等添加剂混掺水泥固化处理高含水率、高有机质泥炭土，研究了不同添加剂掺量对固化土一定龄期残余含水率、抗压及抗剪强度的影响，结果表明，当偏高岭土掺量由 0 增加到 40% 时，固化土的残余含水率不断降低，抗压抗剪强度增大，其中，40% 偏高岭土与 20% 水泥同时掺加 2% 水玻璃与 1% 氯化钙的固化土 30d 抗剪强度可达 135kPa 左右，比不掺偏高岭土的同龄期固化土强度高出了近 6 倍；当氯化钙掺量由 0 增加到 2% 时，固化土强度不断增加、残余含水率降低，当氯化钙掺量由 2% 增加到 6% 时，固化土强度有所降低、残余含水率升高，说明氯化钙在水泥固化土中存在最佳作用值，为 2% 左右；与氯化钙作用规律类似，水玻璃在水泥固化土中亦存在最佳作用值，为 3% 左右。



作为磷酸(盐)生产中用硫酸处理磷矿时产生的固体废渣,磷石膏的处理利用备受关注,一些学者提出将磷石膏用于软土地基处理工程,并对其开展了研究。Degirmenci 等^[36]以液塑限、塑性指数、抗压强度等作为评价指标,研究了不同掺量的磷石膏混配粉煤灰在水泥固化土中的作用。结果表明,一定掺量的磷石膏和粉煤灰显著降低了水泥土的塑性指数,5%水泥固化土的塑性指数为 21.4,而 5%水泥混掺 5%磷石膏固化土的塑性指数仅为 11.5;水泥掺量为 5%,磷石膏掺量为 0~15%时,随磷石膏掺量增加,固化土抗压强度亦不断提高。此外,对废渣类磷石膏与天然磷石膏的作用进行了对比^[37,38],发现当磷石膏掺量在 10%以内时,二者对水泥土的强度改善作用基本无差异,但当掺量大于 15%时,天然磷石膏对水泥土性能的改善作用要优于废渣类磷石膏。Shen 等^[39]采用石灰-粉煤灰-磷石膏(三灰渣)体系固化软土并同水泥固化土的作用效果进行了对比,研究发现三灰渣体系中的石灰、粉煤灰和磷石膏的占比分别为 10%、70%和 20%时为最佳,总掺量 30%的三灰渣固化土的 90d 强度可达近 10MPa,远高于 15%水泥固化土的同龄期强度。

水泥窑灰是回转窑系统的窑尾除尘器收集的粉尘,常作废料处理,其质轻且具有一定活性,因此,堆放处理会造成较严重的环境污染。近年来,国外学者将其作为活性掺料单独使用或混掺水泥固化处理软土地基,取得了一定的研究成果,并已有工程应用案例。Miller 等^[40]研究了单独使用水泥窑灰分别固化高液限黏土(CH)、低液限黏土(CL)及低液限粉土(ML)的作用效果,结果表明,随水泥窑灰掺量增加到 10%左右时,固化土 pH 值由 7.5 增加到 12.2 左右,但当水泥窑灰掺量继续增加时,固化土 pH 值基本处于稳定状态;固化高液限黏土的抗压强度随水泥窑灰掺量呈线性增加,但对固化低液限黏土和低液限粉土,水泥窑灰掺量低于 15%时,固化土抗压强度增幅有限,当掺量大于 15%时,抗压强度急剧增加。Peethamparan 等^[41]研究了四种水泥窑灰用于固化处理土的可行性,测试了不同种类水泥窑灰的水化产物矿物组成、微观结构及一定龄期的抗压强度,发现水泥窑灰的水化产物与普通硅酸盐水泥类似,氢氧化钙、钙矾石及钾石膏是其主要水化产物;游离氧化钙含量较低的水泥窑灰在水化各龄期有更高的抗压强度和水化温度;水泥窑灰可做成浆体固化处理软土。他们还对高含量游离氧化钙的水泥窑灰固化钠基膨润土的作用机理进行了系统研究^[42]。Srekrishnavilasam 等^[43]对比研究了两种未经堆放的水泥窑灰和一种经过长期堆积的水泥窑灰固化处理土的实际效果,结果表明,游离氧化钙范围在 2%~5%的未堆放水泥窑灰可以用于低含水率土体的固化处理;其他两种水泥窑灰仅含有微量的游离氧化钙,更适合用于高含水率的软土或淤泥土的固化;10%~20%掺量的水泥窑灰混掺 1%的水泥即可获得较好的抗压强度。Moon 等^[44,45]将水泥窑灰用来固化砷污染土(砷含



量为 1000mg/kg), 发现当水泥窑灰掺量为 15% 时, 固化污染土的重金属离子溶出量即小于 10mg/L, 固化机理为水泥窑灰同重金属离子发生反应生成亚硫酸钙水合物 ($\text{CaSeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 和硒基钙矾石 [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SeO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$]。

焚烧淤泥灰渣具有一定的活性, 与水泥窑灰类似, 淤泥灰渣也难以堆积置放, 因其细颗粒较多可作为固化土的填充材料使用。Lin 等^[46]研究了焚烧淤泥灰渣混掺熟石灰固化软黏土的力学性能, 发现淤泥灰渣的掺入能明显降低固化土的塑性指数并提高抗压强度, 固化机理主要是淤泥灰渣在固化土中生成了钙矾石矿物。Li 等^[47]以 4:1 的比例将淤泥灰渣与水泥混配, 以 2%~16% 的掺量固化软黏土, 测试了固化土的塑性指数、最佳含水率与最大干密度及无侧限抗压强度, 结果表明, 淤泥灰渣混掺水泥固化土的强度比原状土的强度提高了 3~7 倍, 膨胀性仅为原状土的 10~60%。Reynolds 等研究了淤泥灰渣-粉煤灰-生石灰三灰体系固化处理人造土的力学性能, 并考察了养护温度对三灰固化土强度的影响。

粉煤灰被认为是一种十分良好的水泥和混凝土外掺料, 可以改善水泥石或混凝土的内部孔隙结构, 降低水泥用量, 提高水泥石或混凝土性能。在地基处理工程中, 粉煤灰也早有应用, 如二灰土^[49]、三灰土^[50]等。二灰土、三灰土需进行夯实处理, 仅能用于公路工程、铁路工程, 难以应用于深层搅拌桩、淤泥土灌浆固化处理作业。而水泥-粉煤灰体系具有优秀的力学性能、经济适用性, 因此, 常用于单掺水泥固化处理软土性能难以满足工程需求的大孔隙率、高有机质软土固化处理工程。

Kolias 等^[51]、Sezer 等^[52]研究了高钙粉煤灰混掺水泥固化处理不同类型土的抗压强度和劈裂抗拉强度, 发现 10% 高钙灰与 2% 水泥固化土的 90 d 抗压强度较同龄期的 5% 高钙灰与 2% 水泥固化土的强度高出近一倍。Cokca^[53]、Phani Kumar 与 Sharma^[54]考察了 C 级粉煤灰用于固化膨胀土的可行性, 粉煤灰大幅降低了膨胀土的塑性指数和膨胀潜势, 主要作用机理是发生在粉煤灰和膨胀土间的阳离子交换反应。Kaniraj 等^[55]、Lo 等^[56]、Sobhan 与 Mashnad^[57]、Show 等^[58]、Prabakar 等^[59]、Edil 等^[60]、Horpibulsuk 等^[61]的研究表明, 适宜掺量粉煤灰降低了原状土的塑性指数, 能显著提高水泥固化土的抗压强度, 改善水泥固化土的耐水性及耐干湿循环性能, 并基于室内试验结果建立了无侧限抗压强度随养护龄期变化的数学模型。

为改善水泥固化土的韧性及耐久性能, Consoli 等^[62]、Tang 等^[63]对比研究了不同掺量水泥和纤维固化处理砂性土的性能, 得出固化土脆性随水泥掺量的增加而提高, 固化土塑性随纤维的增加而提高, 同时发现纤维的掺入显著提高了固化土的内摩擦角。Kaniraj 与 Havanagi^[64]将少量的纤维掺入水泥-粉煤灰固化土中, 一定程度上改善了固化土的抗压强度及抗剪强度, 同时使固化土由脆性破坏变为塑性破坏, 且掺入纤



纤维的固化土中后期强度的持续增进优于水泥-粉煤灰固化土体系。纤维提高水泥固化土强度的机理主要是水化掺入吸附在微细纤维表面，同土颗粒形成稳定的骨架结构^[63,65,66]。但是由于纤维在同水泥基固化剂浆体拌入土中时是随机分布的，且不具有流动性，容易出现聚集、分散不均匀等现象^[63,65]。

根据我国各地土的实际特点，国内岩土工作者对水泥基无机固化剂开展了大量研究并取得了丰富的科研成果及工程应用实例。刘和超^[67]向水泥固化土中掺入一定量的三乙醇胺（5~10%）、聚丙烯酰胺（5~15%）及滑石粉（10~15%），对固化土的早期强度有较大改善，但对中后期的强度改善作用有限。周振民^[68]将粉煤灰、生石灰、水玻璃、烧碱、石膏等用来取代硅酸盐水泥，制得水泥-粉煤灰无机固化剂体系，固化土的收缩率几乎为 0，耐热冷性能好，且不易开裂，解决了水泥固化土的干缩大、易开裂等问题。钱春香等^[69,70]以矿粉、粉煤灰和水泥为基材，辅以适量的碱性助剂、激发剂与表面活性剂，制备得到一种适用性广泛（对粉土等低黏性土质尤为适用）、经济性良好的土固化剂，并对其固化机理进行了研究。樊恒辉等^[71]将三聚磷酸钠、氢氧化钠、硅酸钠、聚丙烯酰胺等材料按一定比例掺入水泥制备水泥基高效固化剂，可大幅改善固化土的工程性能，使固化土体积更加稳定、更耐久。同时，基于土体基本物理性质指标变化分析了固化剂的作用机理及固化土强度影响因素^[72,73]。高建恩与孙胜利^[74]分别向水泥中掺入一定量的氧化铁绿或氧化铁红或氧化铁黄及矿渣、表面活性剂制得水泥基绿色或红色或黄色固化剂，氧化铁添加剂能与土颗粒形成多晶凝聚体，改善土体颗粒多相界面关系，使水泥固化土的强度、抗渗、抗冻性能都有较大提高。方祥位等^[75]以高钙灰和脱硫石膏为主料，生石灰、水泥、明矾等为辅助材料，制备得到 GT 型土固化剂，并进行了击实试验、直剪试验、压缩试验及渗透试验，各项性能明显优于石灰固化土。

郭印^[76]在分析软土有机质对固化土性能影响的基础上，研究了淤泥质土的固化对策，从减薄双电层厚度、添加膨胀组分、提高土 pH 值、提高早期强度及裂解有机质大分子结构等多方面出发，优选了氢氧化钠、生石膏、生石灰、水玻璃、三乙醇胺及高锰酸钾制备水泥基淤泥质土固化剂（GX07），结果表明，单掺 10% 水泥的固化土 28d 强度仅为 181kPa，而掺入 10% 水泥混合 12% GX07 固化土的 28d 强度为 742kPa，这表明基于固化对策制备的固化剂具有良好的淤泥质土应用效果；根据室内试验结果提出了有机质影响固化土强度发展的数学模型，具有较高的相关系数。

李雪刚^[77]基于杭州海相沉积软土成因、物化性质及工程特性的系统分析研究，优选生石膏、生石灰、碳酸钠、FDN、水玻璃及三乙醇胺等多种添加剂解决水泥固化有机质软土强度不高的问题，并利用响应面法对添加剂的各组分比例、掺量进行了系



统研究,考察了各组份对固化土强度的影响度,建立考虑固化土中有机质含量、水泥掺量、固化剂掺量及养护龄期的固化土综合强度计算模型。

如前所述,尽管目前的土固化剂种类繁多、组成复杂,但无机类固化剂均存在如下问题:(1)固化剂掺量大,对高含水率、大孔隙率的软黏土、淤泥土的固化处理,固化剂掺量常在20%以上;(2)适用性差,同一种固化剂固化处理不同类型的土时,性能差异较大;(3)水泥使用量大,由于多数固化剂都需要水泥水化提供足够的碱度,水泥使用量难以进一步降低。

1.2.2 固化土强度发展计算模型

影响固化土无侧限抗压强度发展的主要因素包括土固化剂掺量、含水率、养护龄期、孔隙率、有机质含量等。因固化土强度发展受多重因素影响,难以对上述因素进行综合分析。实际上,现有的固化土强度发展计算模型的建立多以单因子分析、双因子分析为主,三因子的综合分析研究并不多见。

最早的关于固化土强度随养护龄期发展的计算模型是线性的,即随养护龄期呈线性增长。线性模型虽能大致描述固化土强度随龄期的发展,但随后大量的室内试验和工程应用数据表明,线性模型同实际数据的关联度较低。近年来,Payal等^[78]提出的对数模型($f = a + blgt$, f 为抗压强度, t 为养护龄期, A 、 B 均为常数)不仅适用于混凝土、砂浆,在固化土强度随龄期变化的预测也有较多应用。但是,对数模型亦有其自身不足,主要表现为两点:(1)固化土初始强度无法通过对数模型计算得到(因 $lg0$ 没有意义);(2)当养护龄期很长甚至无穷大时,固化土强度也会无穷大,而事实上,中后期的固化土强度发展较慢,直至稳定。Horpibulsuk等^[79]的研究结果证实了对数模型中后期的计算结果与实际固化土强度有较大的差异。基于此,Kaniraj等^[55]提出了双曲线函数模型,与对数模型相比,双曲模型可计算得到固化土的初始强度,并且当养护龄期为无限大时,固化土强度为稳定值。此后,基于双曲模型的固化土强度预测的诸多研究表明^[80-85],双曲模型可更准确、更客观地描述固化土强度随养护龄期的发展规律。然而,双曲模型并未阐述固化土强度与其他影响因素之间的关联。

固化土强度随固化剂掺量的变化规律是固化土强度发展预测的基本模型,主要有线性模型和指数模型两种^[86,87]。对非黏性土、非淤泥土而言,固化剂掺量较低,线性模型可用来计算不同固化剂掺量下的固化土强度;对高含水率黏性土、淤泥土的固化,固化剂掺量往往较高,并且低掺量的固化剂可能固化效果不明显,指数模型更符合实际情况^[88]。含水率是影响固化土强度的重要因素之一,但关于固化土强度随单一含水率变化的研究较少。目前的主流研究方向为将固化土含水率与固化剂掺量看



作为一个整体,定义水土灰比(w_c/C , w_c 为固化土含水量与干土质量的比值, C 为固化剂掺量)参数,通过试验数据建立不同养护龄期的基于水土灰参数的固化土强度计算模型。含水率/胶凝材料掺量比值这一参数最早用于混凝土及砂浆的抗压强度预测^[89]。将水土灰参数引入固化土抗压强度的计算模型中, Horpibulsuk 等进行了一系列研究^[79,90-97],结果表明,基于水土灰比的强度计算模型具有很高的相关系数(多大于 0.9),可以准确地计算某含水率、某固化剂掺量下在一定龄期的固化土抗压强度。但需注意的是,固化土强度随养护龄期的变化是相对孤立的,基于水土灰参数的强度计算模型鲜有涉及养护龄期。

固化土孔隙率是影响固化土强度的重要因素。已有的研究中,关于固化土孔隙率的计算主要有两种,一是测试固化土在特定龄期的重度、含水率通过土体孔隙率计算公式计算得到固化土孔隙率,二是通过分别计算固化前土体、固化剂及其他掺料的重度结合固化前土粒比重、固化剂掺量等参数估算固化土的孔隙率。对第一种计算方法, Lorenzo 和 Bergado^[98,99]测试了不同水泥掺量固化不同含水率软黏土在不同养护龄期的孔隙率,考察了固化土孔隙率随养护龄期的变化关系,建立基于固化土孔隙率、养护龄期的强度计算模型。与前述研究的强度计算模型对比, Lorenzo 和 Bergado 建立的模型综合考虑了固化剂掺量、养护龄期、各龄期含水率等多个影响因子,提出采用 e_{ot}/a_w (e_{ot} 为固化土孔隙比; a_w 为固化剂掺量)。但是,在 Lorenzo 和 Bergado 的研究中,多个重要拟合方程的相关系数均为 0.7 左右,而最终强度计算模型的准确度也未经验证。根据第二种计算方法, Consoli 等^[100-107]开展了一系列研究,对水泥固化砂性土、水泥固化软黏土、水泥与粉煤灰固化软黏土、水泥与聚丙烯纤维固化软黏土、石灰固化土、石灰与粉煤灰固化土等进行了系统研究,并通过计算得到固化土的孔隙率,建立基于孔隙率、固化剂掺量的固化土强度计算模型($n/C_{iv}^{exponent}$, n 为孔隙率)。

需注意的是,第二种方法计算得到的固化土孔隙率是固定的,不随龄期变化,而事实上,固化土孔隙率是随养护龄期不断变化的^[98],因此, Consoli 等的研究也存在一定的缺陷。

有机质增大土体孔隙率、降低土 pH 值,显著影响了固化土的力学性能。对水泥固化高含水率、高有机质海相黏土的研究表明^[108-111],有机质含量对固化土抗压强度、弹性模量及压缩系数等多项指标均有较大的负面影响,但仅通过天然有机质土或淤泥土仅能对有机质在固化土中的作用进行定性评价。近年来,人工有机质土制备方法的提出和完善,为定量研究有机质在固化土中的影响作用提供了可能。Onitsuka 等^[112]、Yunus 等^[113]以强度损失率为评价指标考察了一定掺量腐植酸对石灰固化土的影



响,结果表明,对不同的石灰固化土,不同龄期强度均随腐植酸掺量增加而降低;同等掺量腐植酸对不同类型土的固化处理有不同程度的影响。此外,一维固结试验结果表明,随有机质含量的增加,固化土可压缩性及蠕变性增强^[114,115]。

国内学者对固化土强度计算模型亦开展了一系列研究,并取得了一定的研究成果。丁建文等^[116]测试了水泥固化高含水率疏浚淤泥的抗压强度,建立了固化淤泥强度随水泥掺量变化的线性模型,并考察了不同龄期强度与 28d 强度比值同龄期的对数关系。陈达等^[117]也采用对数模型考察了水泥固化土与养护龄期之间的关系。王志强等^[118]采用多元逐步回归分析方法研究了固化土强度与微结构参数的关系,认为二者之间存在较好的线性相关关系,其中影响作用较显著的几个微结构参数为颗粒粒度分维、颗粒定向分维、等效直径、扁圆度和面积比。王立峰与翟惠云^[119]采用纳米硅改性水泥土,通过正交试验确定纳米硅掺量、水泥掺量等参数的综合较佳值,并采用多元线性回归分析方法探讨了固化土抗压强度与纳米硅掺量、水泥掺量之间的关系。徐日庆等^[120]基于响应面法综合考察土初始含水量、有机质含量、固化剂掺量等因素对固化效果的影响,建立了固化土 28d 强度同各参数的综合量化模型,并未涉及养护龄期的影响作用。曹智国与章定文^[121]制备了高含水率的水泥加固土和低含水率的水泥稳定土,考察了水泥土的孔隙率、饱和度同抗压强度的变化规律,建立基于多参数的表征及预测水泥土强度的量化模型,认为在常用的水泥掺入量范围(5~20%)内,水泥土强度随水泥掺入量呈幂函数关系变化,与综合表征参数亦呈现幂函数关系。

尽管众多学者均提出了固化土强度计算模型,但已有模型均有以下不足:(1)不能真实反映固化土强度发展情况,大多模型均仅考虑了固化土早中期强度发展,并未考虑到长期甚至无穷龄期时的情况导致固化土强度计算模型的长期结果失真;(2)强度模型中涉及参数较少,未考虑到土体自身性质,导致强度模型适用性不强;(3)精度低,其中多数强度模型的相关系数均在 0.7 以下,与实际强度的误差在 20% 以上。

1.2.3 活性掺料或外加剂作用的研究

用于固化土的常见活性外掺料包括固体工业废渣(粉煤灰、矿渣微粉、磷石膏、高炉渣、电石渣等),常用的添加剂主要为碱性或中性添加剂,如熟石灰、生石灰、水玻璃、片碱、纯碱、三乙醇胺、减水剂等材料^[122]。使用掺料及外加剂的目的主要是在不降低固化土工程性能的前提下,降低固化土的工程成本、提高固化土的早中期性能。如前所述,国内外岩土工作者对外掺料或外加剂改善水泥固化土进行了大量的研究,在开展力学性能研究的基础上,考察了外掺料或外加剂在固化土中的作用效



应。

球状的微细玻璃质颗粒是粉煤灰的基本颗粒组成，其主要化学成分主要为三氧化二铝 (Al_2O_3)、二氧化硅 (SiO_2)，高钙粉煤灰中还含有较多的氧化钙 (CaO) 组分。通常，研究人员将粉煤灰在水泥混凝土中的作用效应归结为形态效应、火山灰效应和微集料效应。其中，对混凝土力学效应影响最大的为粉煤灰的火山灰效应。火山灰效应是指粉煤灰中的活性玻璃体在碱性环境下发生溶解，同环境中的 Ca^{2+} 和 OH^- 离子发生化学反应，生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质，具有增强作用。因此，火山灰效应通常也称作粉煤灰的活性效应。在 Sezer 等^[52]、Chang 等^[123]、Edil 等^[124]、Ferreira 等^[125]、Dermatas D 与 Meng X^[126]、Kumar 等^[127]、Nalbantoğlu^[128]、Prashanth 等^[129]、Cheriaf 等^[130]、Indraratna^[131] 等人的研究中，认为粉煤灰在固化处理土中的作用与粉煤灰在水泥混凝土中的作用类似^[132,133]，即主要以粉煤灰的火山灰效应 (pozzolanic effect) 为主。在上述研究中，主胶凝材料基本为石灰、水泥，在石灰、水泥的水化过程中生成一定量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。上述研究者认为，粉煤灰中活性矿物的活性可在固化土孔隙流体中存在的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作用下得以激发，生成一定量的胶凝水化产物，进而提高固化土强度。也有一些研究者认为，粉煤灰在固化土中的火山灰效应十分微弱，甚至可以忽略不计。主要原因归结为，对水泥固化土而言，常规水泥掺量较低，固化土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量较少，而土中的纳米级活性黏粒具有比粉煤灰玻璃体更高的活性，因此，这些纳米级活性黏粒更易于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应，此为土的火山灰效应。尽管固化土孔隙流体仍为碱性环境，但由于土火山灰反应的消耗以及缺少足够的钙相生成胶凝水化产物，导致粉煤灰在固化土中的火山灰作用十分微弱。

由于粉煤灰的自身活性较弱，即便是在固化土的碱性环境下 (pH 值约为 10.5~12)，粉煤灰玻璃体的溶解也需长期作用，即粉煤灰掺入固化土后，火山灰效应以水化的中后期为主。事实上，粉煤灰对水泥固化土的早中期性能 (1d~28d) 也有一定的改善。对此，Horpibulsuk 等^[93,134-136] 基于物相分析发现，养护一定龄期的水泥固化土中，基本探测不到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的存在迹象。对水泥掺粉煤灰固化土试样开展扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 试验，发现粉煤灰的球状玻璃体几乎未出现明显破坏，并多分布在土体颗粒孔隙间或胶凝水化产物间。因此，提出粉煤灰在水泥固化土中的分散效应，即粉煤灰的球状玻璃体将水化产物-土颗粒的较大聚集体分散为较小的聚集体，使胶凝水化产物胶结更多的土颗粒，从而改善水泥固化土的力学性能。实际上，对大孔隙、高含水率的软黏土及淤泥土而言，粉煤灰作为固化剂的组成部分还具有填充固化土孔隙、作为固化土部分骨架结构的作用，但对填充作用的研究尚较少。



此外,对活性掺料在固化土中作用的探讨多以定性研究为主,如仅评价活性掺料在固化土中的火山灰效应或分散效应,对粉煤灰作用效应量化的研究较少。仅有 Horpibulsuk 等^[93,137]定义粉煤灰的分散系数 (dispersing factors),并依据当量水泥原理将粉煤灰假定为掺入一定量的水泥,开展粉煤灰作用的定量研究,结果表明对不同类型的土,粉煤灰在水泥固化土中的分散作用有一定差异。这一手段为后来研究人员提供了一种科学有效的粉煤灰作用定量研究方法。

与活性掺料的高掺量特性不同,固化剂中的外加剂使用量往往较少(5%以内),却发挥着重要的作用。如水玻璃能使软土快速硬化,可用于抢修、急救工程^[138];三乙醇胺能提高固化土的早期性能,便于早期施工持续性^[139,140];片碱能显著提高固化土 pH 值,促进土的火山灰效应^[141,142];纯碱可与固化土孔隙流体中的游离钙相发生反应,生成碳酸钙沉淀,形成固化土骨架结构^[143,144];减水剂可改善固化土拌合物的施工性能,使灌注、搅拌作业更加便利^[145,146]。已有研究中,研究者对不同用量的外加剂在固化土中的作用进行了全面研究,认为多数外加剂在固化土中存在最佳用量,即当外加剂用量大于最佳值时,固化土力学性能随外加剂用量的增加而快速降低。对外加剂作用效应的研究主要从外加剂对水泥水化反应的影响开展,认为外加剂可加速水泥水化或同水泥水化产物进一步反应生成胶凝水化产物等。但是,对外加剂作用效应还几乎未见到量化研究。

1.2.4 固化剂作用机理及有机质影响机理的研究

对固化剂-土的搅拌物,力学性能(本文主要指无侧限抗压强度)的形成来源是多方面的。若固化剂为纯水泥,水泥固化土强度的来源主要是水泥水化反应及黏土颗粒与部分水化产物发生的火山灰反应^[147]。伴随而来的还有多重物理化学作用,如阳离子交换反应、絮凝作用等^[148]。若固化剂为水泥与活性掺料的混合物,除以上作用外,还会产生填充效应、分散效应等。

水泥与水拌合后,水泥由颗粒状变为浆体状,即水泥颗粒发生了溶解。在水的作用下,水泥熟料发生水解反应,如水泥的硅酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)矿物相与水反应生成水化硅酸钙(C-S-H)和氢氧化钙^[149,150]。水泥熟料含有不同的矿物,其反应活性也不相同,已有研究表明,水泥水化完全完成的时间可达数年之久。

固化土体系中有一部分水泥水化产物生成后,即可发生一系列的物理化学反应,分为未水化水泥熟料与水化产物之间的作用、水化产物之间的作用以及水化产物与土相的相互作用。水化产物之间相互搭桥形成的骨架结构是固化土强度的主要来源。水化产物同土相之间发生如下物理化学反应:



(1) 阳离子交换及絮凝作用

软土中含有一定量蒙脱石,分析蒙脱石晶体结构可知其自身电荷不平衡,表面富余的负电荷具有吸引阳离子正电荷的能力^[151]。当土相中不含水分时,蒙脱石矿物表面吸附有一定量阳离子,并保持稳定状态。当土相中含有一定量水分时,阳离子与水分子结合并游离到土颗粒表面,进而形成扩散双电层,即土颗粒表面带有一定量的 Na^+ 、 K^+ 及 H^+ 等低价态阳离子^[152,153]。

作为水泥水化产物的重要组成部分,氢氧化钙在固化土孔隙流体中以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 Ca^{2+} 、 OH^- 的形式共存^[147]。其中的一部分 Ca^{2+} 与土颗粒表面吸附的 Na^+ 、 K^+ 及 H^+ 等低价态阳离子发生离子交换作用,使初始双电层变薄,导致土颗粒间的排斥力低于吸引力,进而发生“絮凝作用”形成较大的土团粒^[154]。这些较大的土团粒在水化产物的作用下发生胶结作用或强吸附作用,形成的链状结构具有填充、封闭土体孔隙的作用,有助于固化土形成更稳定的骨架结构。

(2) 火山灰作用

如前所述,软土中含有少量的微纳米级、具有一定活性的黏粒。水泥的水化作用使固化土孔隙流体处于碱性状态,随着水化龄期的增长,长期处于碱性环境中的微纳米黏粒的活性得以激发,释放出具有较强反应活性的 HSiO_3^- 与 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, 同孔隙流体中的 Ca^{2+} 和 OH^- 发生化学反应,生成类似与胶凝水化产物的水化硅酸钙或水化铝酸钙^[155-157]。火山灰作用生成的水化矿物可以胶结微纳米级的土颗粒,改善固化土力学性能。

(3) 碳酸化作用

基于固化土孔隙流体中含有一定量的游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,一些学者提出固化土的碳酸化作用^[158,159]。即,固化土中的游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 同空气中的 CO_2 发生化学反应生成 CaCO_3 沉淀,进而提高固化土强度。而实际上,水泥掺量为正常值时,固化土孔隙流体中的游离 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的数量很少,几乎可以忽略。因此,相对于水泥水化反应及火山灰作用,碳酸化作用对固化土性能的贡献度很低。

上述分析可知,固化土孔隙流体中的 OH^- 离子浓度是影响水泥水化反应及土黏粒火山灰反应的重要因素,进而影响固化土中胶凝水化产物的数量。在固化剂掺量不变的情况下,土体的物理化学性质决定了固化土孔隙流体中的 OH^- 离子浓度,其中最重要的影响因素是有机质含量。

软土有机质的主要组成部分为腐殖质,腐殖质约占有机质组分的 50%~90%,而腐殖质的主要成分为腐殖酸^[159,160]。据文献研究,腐殖酸在腐殖质中的占比可达 60% 以上^[161]。腐殖酸,一种复合有机酸,是动植物遗体在土中经微生物长期分解与转化



作用,并经过一系列的化学过程积累起来的高分子有机物。与普通的有机酸不同,腐殖酸的分子结构复杂,且物理化学性质稳定^[162,163]。其基本结构是芳环和脂环,环上连有酚羟基、羟基、醇羟基、醌羟基、烯醇基、磺酸基、胺基、游离的醌基、半醌基、醌氧基、甲氧基等多种功能团,具有良好的吸附、络合、交换、螯合等功能。腐殖酸显酸性(根据纯度不同,酸碱度亦有所变化),黑色粉末物质,微溶于水,但由于自身是一种亲水性胶体,其表面可吸附相当自身重量高达 5 倍左右的水分,在中性或碱性状态下可与钙、镁、铁、铝等金属离子形成络合物沉淀,因此,有机质对土体及固化土的性能有较大影响^[164-166]。

目前,为准确考察有机质含量对土体及固化土性能的影响,制备人工有机质土(Artificial organic soil)是国内外岩土工作者常用的研究手段。考察了有机质含量对土体基本性质的影响,结果发现,有机质含量的增加显著增大了土的液限和塑限,主要原因是有机质吸附了较大量的水分^[167]。随后的研究发现,少量的有机质对土液塑限的影响不显著,而当有机质含量大于某一临界值(3%~4%)时,土液塑限才会明显增大^[168]。国内学者李生林^[169]等通过大量研究得出结论,有机质中的微生物也是影响土性质的重要因素,并发现微生物数量对液塑限亦会产生较大的影响,同时指出有机质含量的增加会增大土体压缩特性。随后,刘增永^[170]定量考察了土液塑限、干密度随有机质含量的变化关系,认为塑限随有机质含量具有线性增加的关系,而液限随有机质含量基本呈幂函数增加;土体含水率保持不变的情况下,土体干密度随有机质含量增加而降低。

有机质含量对固化土性能亦有较大影响。Kujala 等^[171]研究了土腐殖质含量对固化土力学性能的影响,腐殖质含量对水硬性胶凝材料固化土的强度影响较大,当腐殖质含量大于 2%时,水泥固化土的强度急剧衰退,几乎没有强度。随后的研究表明^[172],当腐殖质含量较大并低于 6%时,气硬性胶凝材料固化土的力学性能优于水硬性胶凝材料固化土;当腐殖质含量大于 8%时,水硬性胶凝材料固化土的力学性能优于气硬性胶凝材料固化土。Masaaki^[173]将有机质含量作为一项土的基本性质,综合研究了土有机质含量、pH 值、烧失量及黏粒含量等土基本物理化学性质对固化土力学性能的影响。

目前,对有机质在固化土中影响作用的研究主要有两种方法,一是采用腐殖酸作为软土有机质,制备人工有机质土;二是将多种不同的有机质掺入固化土,探讨不同有机质类型对固化土力学性能的影响。第一种方法是目前岩土工作者较常用的研究手段,主要考察腐殖酸掺量对固化土无侧限抗压强度、抗剪强度、压缩性能、蠕变性能的影响^[112-115,174-180]。根据对腐殖酸影响作用的研究,一些学者针对性的提出有效的



解决手段,主要化学手段有掺入碱性材料提高固化土碱度、采用水泥与石膏混合材料作为胶凝材料固化有机质土,物理手段有通过预压缩提高固化有机质土的力学性能^[181-185]。Tremblay 等^[186]研究了不同种类有机质对固化土性能的影响,测试了乙酸、苯甲酸、腐殖酸、丹宁酸、纤维素、淀粉、汽油、植物油、甲苯等 13 种有机物对不排水抗剪强度、孔隙流体 pH 值及多种离子浓度的影响,结果表明,仅腐殖酸、乙酸等酸性有机质会显著降低固化土孔隙流体的 pH 值,减少水泥水化产物的生成量,进而大幅降低固化土力学性能;而不溶于水的油类、纤维类及其他碳氢化合物并未明显降低固化土孔隙流体 pH 值,对最终的水泥水化产物数量及水化反应的影响较小,因此对固化土最终力学性能的影响也十分有限。对孔隙流体 Ca^{2+} 及 SO_4^{2-} 浓度的测试结果表明,当固化土孔隙流体 pH 值小于 9 或 SO_4^{2-} 浓度较高时,固化土力学性能基本丧失,而这一发现亦可作为土固化剂制备技术的理论基础。

早在上世纪九十年代初期,我国研究人员^[187]就得出腐殖酸为土体有机质中影响固化土力学性能的主要因素,并发现当腐殖酸含量大于 2% 时,应慎用纯水泥作为固化材料。随后的研究者^[188,189]大多对有机质含量在固化土中的作用进行定性分析,认为固化土强度随有机质含量的增加而显著降低,并提出采用高标号 525# 硅酸盐水泥掺入少量高效减水剂代替普通 425# 水泥作为有机质土固化材料,现场试验表明,该改善方法可行有效。范昭平等^[190,191]对有机质在固化土中影响作用开展了大量的研究,进行了初步量化分析,并认为有机质含量对固化土强度的影响分为两个阶段,当有机质含量低于某临界值时,固化土抗压强度随有机质含量呈线性降低的趋势;但当有机质含量大于某临界值时,随着有机质含量的继续增加,固化土强度未发生明显变化。随后的研究表明^[192,193],对不同类型的土,有机质临界掺量亦有所变化。陈慧娥^[194]研究了有机质含量对固化土抗剪强度的影响,认为有机质含量显著减小了固化土的内摩擦角,增大了固化土的黏聚力,但从总体上来看,有机质含量对固化土抗剪强度的影响是负面的。基于室内试验研究,一些学者提出了高含有机质固化土的无侧限抗压强度随有机质含量的量化模型,其中比较典型的有线性模型、对数模型等^[195-198]。然而,已有模型并不能将有机质在固化土中的影响作用完全量化。

1.3 问题的提出

基于上述调研分析,当前的国内外研究主要存在如下问题:

- (1) 水泥基土固化剂用于饱和软土或淤泥的固化处理时,存在固化剂掺量大、早期强度不足等问题;
- (2) 已有的固化土强度计算模型仅能计算水泥或水泥与粉煤灰固化土的强度,



对其他添加剂对强度发展的作用未量化研究；同一模型仅能计算固化土强度随某一参数的发展规律，不能综合评价固化土强度与多参数的内在联系；对有机质土（淤泥土）强度发展的研究不够深入，对有机质作用于固化土强度的定量研究较少；

（3）粉煤灰在固化土中发生多重作用，而火山灰效应主要发生在固化土的中后期；但粉煤灰对固化土早期性能亦有较大改善，这主要得益于粉煤灰的分散填充效应；关于粉煤灰在固化土中作用效应的研究尚不成熟，也未将分散效应与火山灰效应划分开来；

（4）对固化剂作用机理的研究偏重于水化产物生成量对固化土性能的影响；从胶凝材料学角度分析，水化产物形态、结构及元素组成均可影响其与土颗粒之间的胶结作用，但基于上述因素机理的研究还较少。

本论文基于对上海软黏土与福建连江滩涂淤泥的物化参数分析，以无侧限抗压强度为评价指标，研制水泥基高效黏土固化剂，实现两个基本目标，一是降低水泥用量，二是提高固化土早期强度并实现中后期强度的持续增长；同时，分析固化剂各组分在不同龄期对固化土力学性能的权重，考察其余组分对黏土活性矿物的火山灰效应；探究粉煤灰对高效固化剂固化土力学性能的影响，研究粉煤灰在固化土中的分散填充及火山灰作用；研究有机质对固化土性能的影响，建立基于固化土有机质含量与固化剂掺量的强度发展计算模型。固化机理分析及强度计算模型的建立可以更好指导工程中固化剂配方的设计，为软土地基加固技术服务，具有一定的理论和工程应用价值。

1.4 研究目标、研究内容及拟解决的关键性问题

1.4.1 研究目标

本论文的研究目标有：

（1）研制一种高效、相对环保的水泥基软土无机固化剂，相较同等掺量水泥，实现早期固化土强度显著提高，中后期强度明显提高；

（2）基于水土灰比模型，考察固化剂各组分对固化土力学性能的权重，量化分析外加剂对固化土的改善增强作用，并分析固化剂对固化土体基本物理性质指标的作用，建立物性指标与固化剂掺量的联系；

（3）探究粉煤灰对高效固化剂固化土强度特性的影响，深入考察粉煤灰作用机理，基于多重效应综合作用理论量化分析粉煤灰在固化土中的作用，并考察粉煤灰对固化土物性指标的影响；



(4) 采用人工再造有机质土技术研究不同含量有机质对固化土强度特性的影响, 定量分析有机质的影响作用, 考察固化土土体与固化材料用量和有机质含量的关系, 建立高效固化剂混掺粉煤灰固化人工有机质土抗压强度的综合计算模型。

1.4.2 研究内容

本论文的研究内容主要有:

(1) 高效固化剂的研究

基于软土的物化参数分析, 调研水泥基固化剂组成材料的优选理论及对策, 初步遴选可能改善水泥固化土性能的外加剂, 测试单掺外加剂对水泥固化土无侧限抗压强度的影响, 将不同外加剂分别划分为助剂与碱激发剂; 以此为基础, 制备复合激发剂并考察不同的复合激发剂对固化土强度的影响。通过单因素试验和正交试验, 确定高效固化剂的最终配方。

(2) 外加剂作用的量化分析

基于水土灰比及外加剂的火山灰效应理论, 将外加剂作为一定量的外掺水泥, 计算外加剂各组分的火山灰系数, 分析固化剂各组分对固化土性能的贡献, 计算各组分在不同龄期的当量水泥的数值。提出当量水泥总量的概念, 并建立基于固化土体基本物性指标与当量水泥总量的关系。

(3) 高效固化剂混掺粉煤灰的研究

研究不同掺量粉煤灰对固化土的改善作用, 探讨高效固化剂掺量对粉煤灰作用的影响。基于对各龄期粉煤灰对固化土力学性能权重的分析, 考察粉煤灰在不同龄期的火山灰效应及分散效应对固化土性能的贡献。测试固化土掺加粉煤灰前后的基本指标的变化, 考察基本指标同粉煤灰掺量的变化关系, 最终建立基于多指标的固化剂+粉煤灰固化土的抗压强度计算模型。

(4) 有机质对固化土性能影响作用的量化研究

制备人工有机质土, 基于无侧限抗压强度测试, 考察有机质含量对高效固化剂固化土力学性能的影响, 并利用水土灰比模型, 定量分析有机质在固化土中的作用效应。测试固化土掺加不同有机质含量的基本性质指标, 考察固化土体物性指标与固化材料掺量和有机质含量的关系, 最后建立基于土物性指标的固化有机质土的强度计算模型。

(5) 固化剂作用机理及有机质影响机理的研究

应用物相及微观结构表征手段, 观察软土掺入高效固化剂前后物相组成及微观结构的变化, 分析固化土内部可能存在的化学反应机理, 最终得到固化剂的作用机



理。考察有机质对固化土水化产物结构及数量的影响，扼要探讨有机质在固化土中的作用机理。

1.5 采取的研究方法及技术路线

1.5.1 采取的研究方法

本论文拟采取的研究方法主要有：

(1) 高效固化剂的制备

采用烘干、碾碎后的上海饱和软土，选用水玻璃、氢氧化钠、氢氧化钙等碱性材料混掺硅酸盐水泥对磨碎黏土进行固化处理，优选其中效果较优的材料作为研制高效固化剂的基材。以 7d、28d、60d 及 90d 的无侧限抗压强度为基本指标，通过单因素试验及正交试验研究，确定固化剂各组分的较佳比例。

(2) 外加剂作用的量化分析

高效固化剂包括水泥、碱激发剂、助剂三组分，因高效固化剂能显著提高固化土的早中后期性能，可以认为三组分对固化土的作用是协同或交互作用。通过正交试验确定三组分之间的交互作用；基于水土灰比模型，通过分析三组分对固化土力学性能（无侧限抗压强度、割线模量及破坏应变）的权重分析，确定其协同作用，并计算碱激发剂及助剂的当量水泥。需要注意的是，各组分对固化土力学性能的权重是随固化土养护龄期不断变化的。

(3) 高效固化剂固化土强度综合计算模型

测试不同掺量固化剂固化土在一定龄期的物性指标，包括重度、孔隙比、比重等指标，并提出当量水泥总量的概念，探讨上述指标同当量水泥总量和养护龄期的变化规律，得到相应的量化指标。以此量化指标为基础，建立高效固化剂固化土的抗压强度综合计算模型。

(4) 粉煤灰掺入固化土的作用研究

测试不同高效固化剂掺量下不同粉煤灰掺量对固化土力学性能的影响，探讨固化剂掺量对粉煤灰较优掺量的影响规律。分别分析粉煤灰掺量对固化土不同龄期力学性能的影响，计算粉煤灰对固化土力学性能的权重，并进行前中后期的对比考察，区别研究粉煤灰的分散效应及火山灰效应对固化土性能的影响。

(5) 固化机理分析

通过微观结构测试和化学表征揭示固化剂及其混掺粉煤灰后的作用机理。采用扫描电子显微镜（Scanning Electronic Microscopy, SEM）观察固化土的微观结构。采



用 X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)、红外光谱分析(Infrared Spectroscopic Analysis, IR)、能量色散 X 射线光谱分析 (Energy-dispersion X-ray Analysis, EDX) 及热重分析 (Thermogravimetric Analysis, TG-DTG) 进行固化土的化学成分分析。

借助 SEM 获得的固化土的微观结构分析不同结构的胶凝产物对黏土微颗粒的胶结作用的变化, 通过 EDX 得到的胶凝矿物的化学组成对比揭示固化剂组分对胶凝矿物微观结构的影响, 以阐释固化剂对黏土的胶结作用并揭示固化剂的作用机理。通过 TG-DTG 及 XRD 测试固化土中氢氧化钙的含量, 以此考察固化剂火山灰效应。

(6) 有机质影响作用的研究

为准确地定量研究有机质对固化土的影响作用, 采用掺加腐殖酸的方式制备人工有机质土, 测试固化有机质土在各龄期的无侧限抗压强度及基本物理性质指标, 定量分析各指标同有机质含量的关系。

1.5.2 技术路线

本文拟采用的技术路线如图 1-1 所示。

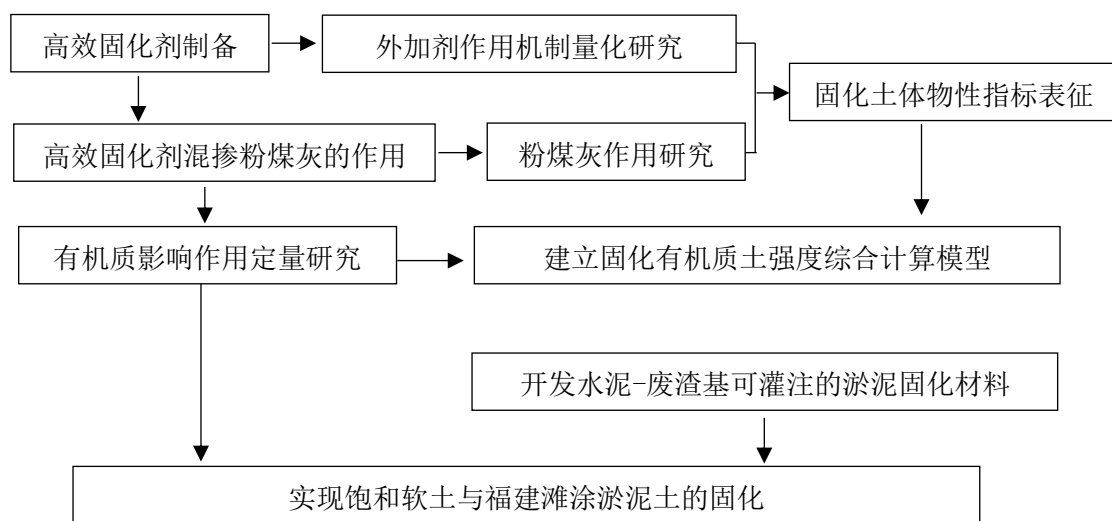


图 1-1 论文的技术路线图

Fig. 1-1 Schematic of research procedure for this paper

1.6 本文结构

本文由七章构成:

第 1 章为绪论。介绍本论文的研究背景、目的、内容及技术路线。

第 2 章为水泥基高效固化剂的研究。介绍试验方法与内容, 考察单掺与复掺外



加剂对水泥固化土的影响,制备复合激发剂,通过正交试验确定高效固化剂的最终配比;在对比水泥与高效固化剂作用效果的基础上,探讨固化剂的作用机理。

第 3 章为外加剂在固化土中作用的量化分析研究。首先介绍外加剂的火山灰效应及水土灰比模型两种理论基础,以此为基础,对外加剂作用进行量化分析与讨论;考察高效固化剂固化土强度随养护龄期的发展规律;测试固化剂对土体基本物性指标的影响,建立固化土体物性指标与固化剂掺量的关系,为后续研究提供理论基础。

第 4 章为高效固化剂混掺粉煤灰的作用研究。首先介绍不同掺量粉煤灰对高效固化剂固化土强度的影响,同样借助双曲线模型考察固化剂混掺粉煤灰固化土强度随养护龄期的变化规律;深入考察粉煤灰的作用机理,基于火山灰及分散作用理论与强度特性,定量分析粉煤灰在固化土中的作用,研究粉煤灰对固化土体基本物性指标的影响。

第 5 章为腐殖酸对固化土强度特性的作用研究。首先介绍以人工再造有机质土为原材料定量分析腐殖酸对固化土强度影响的研究。考察不同含量腐殖酸对高效固化剂固化土的影响,定义腐殖酸的反活性系数,以此为基础,定量研究腐殖酸对高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度的影响;随后考察腐殖酸对固化土体基本物性指标的影响,建立物性参数与固化材料用量、腐殖酸含量及龄期的关系,最终建立高效固化剂混掺粉煤灰固化人工有机质土抗压强度的综合计算模型。

第 6 章为强度计算模型用于固化淤泥土中的验证及水泥-废渣基固化剂的研究。测试高效固化剂及混掺粉煤灰固化淤泥的无侧限抗压强度,探讨强度综合计算模型的准确性及适用性。最后,以水泥、磷石膏、粉煤灰等材料制备得到水泥-废渣基无机固化剂。

第 7 章为结论与建议。总结本研究成果及创新点,对今后进一步的研究提出建议。



第 2 章 水泥基高效固化剂的研究

2.1 引言

饱和软黏土有含水率高、孔隙比大、承载力低及压缩性高等工程特性，同时多含大量有机质，且有机质含量常随土层深度增加而递增。同时我国东部沿海地区在整治和疏通江河湖泊时，用挖泥船和泥浆泵将江河湖泊底部的淤泥通过水力吹填经沉积形成的吹填土不仅有饱和软黏土诸多特点，且原土体结构遭到破坏导致其强度极低。已有工程经验表明，常规掺量（10%~18%，以湿土质量分数计）水泥固化处理深层饱和软土或吹填土形成的水泥土可能出现早期强度低、难以成桩、中后期强度发展有限等问题，大幅增加了处理成本或引发工程质量事故。因此，实际工程中，通常采用提高水泥掺量（18%~30%）的方式解决这一问题。

许多学者尝试将不同的外掺料或外加剂按一定比例掺入水泥制备水泥基土固化剂，一方面降低水泥的实际用量，另一方面提高水泥土的工程性能。然而，现有的水泥基固化剂存在如下问题：

（1）早期强度和后期强度增进效应不能兼顾。据前一章可知，水泥基固化剂可分为水泥与外掺料（工业废渣、硅粉等）体系与水泥与外加剂（减水剂、三乙醇胺、水玻璃等）体系。因工业废渣等外掺料的活性需经长期碱性环境才能激活，水泥与外掺料固化土具有较好的中后期强度增进效应。三乙醇胺等外加剂是常用的混凝土促凝剂，用于软土固化处理，能使固化土获得较好的早期强度，但固化土的中后期强度增进相对常规水泥固化土并无明显改善。

（2）固化剂掺量较高。工业废渣等外掺料活性远逊于水泥，为满足工程需求，工业废渣的掺入量往往较大。在水泥土搅拌桩施工过程中，固化剂掺量过大易出现大量浆体溢出等现象，造成资源浪费。对水泥与外加剂体系，典型应用有郭印^[76]研发的 GX07，虽有较好的固化效果，但外加剂总掺入量达 12.6%。

本章首先介绍土体固化处理的对策和新理论，并基于理论分析优选潜在的优秀外加剂。其次，通过试验研究单一外加剂混掺水泥固化土的作用，将多种不同外加剂划分为碱助剂和激发剂两类，并给出了复合激发剂的制备方法。随后，将水泥、碱助剂和复合激发剂掺量作为影响因素开展正交试验，确定高效固化剂固化上海饱和软黏土的最佳配比。基于上述研究，本章最后对比了不同掺量的高效固化剂固化土与水泥固化土不同龄期的抗压强度。本章的技术路线图如图 2-1 所示。

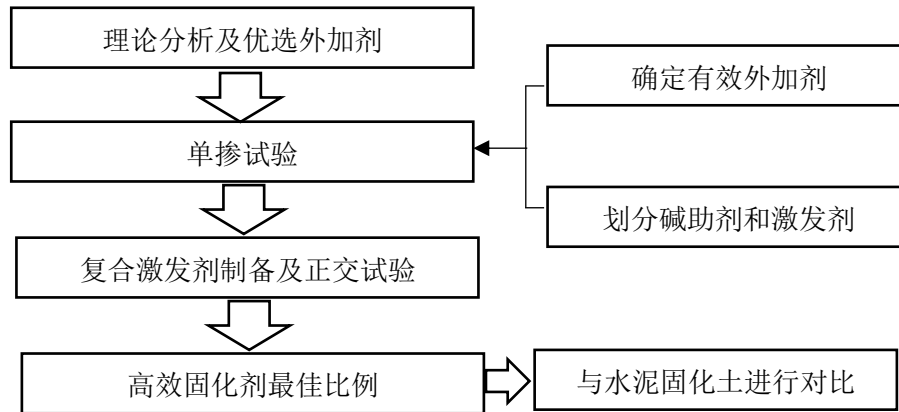


图 2-1 第 2 章研究技术路线图

Fig. 2-1 Schematic of research procedure for Chapter 2

2.2 固化剂组成材料优选理论及对策

2.2.1 提高土体 pH 值

文献^[199,200]指出, 固化土抗压强度随水泥掺入量的变化大致分为三个阶段: 非反应区、反应区和惰性区。非反应区是指, 当水泥掺入量低于 5% (对不同土质, 临界值亦不同) 时, 水泥土强度增长缓慢; 当水泥掺入量为 5%~25% 时, 水泥土强度随水泥掺量以几近幂函数关系快速增长, 为水泥掺量的反应区; 当水泥掺量继续增大时, 水泥土强度增长减缓^[90]。这主要是由固化土中胶凝水化产物的数量决定的。

固化土孔隙流体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的饱和程度是决定水泥胶凝水化产物数量的重要因素^[201]。已有研究表明^[202,203], 土体 pH 值影响固化土孔隙流体中的 Ca^{2+} 和 OH^- 的浓度, 当土体 pH 值较低时, 水泥水化生成的 OH^- 大部分与土体中原有的 H^+ 发生中和反应, 使孔隙流体中的 OH^- 浓度较低, 降低了胶凝水化产物的生成量, 导致固化度抗压强度较低; 当土体 pH 值较高时, 仅需消耗少量的 OH^- 即可中和土体中 H^+ , 促使较多的胶凝水化产物生成, 提高了抗压强度。

基于这一理论, 提高土体 pH 值是增加胶凝水化产物生成量及提高固化土抗压强度的有效途径。因此, 氢氧化钠 (NaOH)、水玻璃 ($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$)、熟石灰 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] 等强碱性材料可用来中和土体中的 H^+ , 保证固化土孔隙流体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度, 有利于胶凝水化产物的生成。



2.2.2 提高早期强度

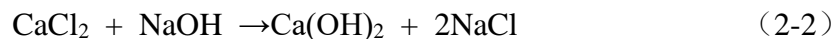
提高固化土早期强度有两个途径：一是加快水泥的水化反应，即掺加早强剂、促凝剂；二是掺加活性材料促使水化早期有更多的胶凝水化产物生成，如水玻璃等。偏铝酸钠 ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$) 常用作水泥、混凝土的促凝剂，可促进水泥早期水化反应，使浆体快速凝结硬化。此外，偏铝酸钠呈强碱性，用作固化土外加剂，可显著提高固化土的 pH 值。

水玻璃不仅具有提高固化土 pH 值的作用，还能加快水泥的早期水化反应，作用机理主要在于水玻璃与水泥水解生成的 Ca^{2+} 发生反应，生成凝胶状水化硅酸钙 ($\text{CaO}\cdot n\text{SiO}_2\cdot m\text{H}_2\text{O}$)，反应原理如下式：



2.2.3 化学沉淀理论

固化土中的化学沉淀理论指的是通过化学反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 具有更强的活性，化学反应得到的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 固化土的抗压强度远高于外掺同等当量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 固化土的强度。通常， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成方法主要有两个，一是由水泥的水化反应生成而来，二是通过外掺氯化钙 (CaCl_2) 溶液和氢氧化钠 (NaOH) 溶液在土中生成，反应方程式如下式：



由于固化土中水泥掺入量较少 (10%~15%)，且水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 难以量化。Thyagaraj 等^[204]研究了采用 CaCl_2 溶液和 NaOH 溶液固化膨胀土的早期抗压强度，认为 CaCl_2 与 NaOH 会渗入土体的微纳孔隙中，在孔隙中反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，并且先 CaCl_2 溶液后 NaOH 溶液的搅拌顺序具有相对更好的固化效果；化学沉淀法生成的 4.2% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 固化土的 7d 抗压强度可达 895kPa，数倍于 6%生石灰浆固化土的抗压强度。

根据化学沉淀理论，将 CaCl_2 溶液与 NaOH 溶液按一定比例先与土拌合，使 Ca^{2+} 与 OH^- 离子在土体孔隙流体中充分渗透并发生化学反应，这一过程产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可与后掺入的水泥发生协同作用。

基于以上分析，优选几种可以提高土体 pH 值、提高固化土早期强度且可发生化学沉淀效应的强碱或偏中性材料作为制备高性能水泥基固化剂的外加剂：水玻璃，氢氧化钠，偏铝酸钠，氢氧化钙，氯化钙。



2.3 试验方法及内容

2.3.1 试验材料

(1) 土样

试验用上海饱和软土取自上海交通大学(上海市闵行区)校园,取土深度为 6m,由附近农生学院大楼的岩土工程勘察资料,其为上海市③层淤泥质粉质黏土,其基本物理性质如表 2-1 所示。本试验采用烘干土样,碾碎过 2mm 筛。对烘干碾碎后的土样粒径分析知,该软土大约 80%过 0.075mm 筛,粒径分布曲线如图 2-2 所示。根据土的分类方法,试验用土属于低液限黏土(CL)。上海黏土的主要化学组成见表 2-2。

试验用淤泥土取自福建连江县可门工业园区的沿海滩涂,取土深度 4~5m,其基本物理性质如表 2-1 所示。根据土的分类方法,试验用淤泥属于低液限黏土。大于 80%的淤泥颗粒通过 0.075mm 筛,粒径分布曲线如图 2-2 所示。

表 2-1 试验用土物理性质指标

Table 2-1 Physical properties of soils used in this study

Soils	w (%)	γ_0 (kN/m ³)	G_{s0}	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	e	pH
Shanghai Clay	41.4	17.23	2.70	42.4	24.3	1.18	7.138
Coastal Silt	69.3	15.39	2.71	47.9	25.7	1.92	8.136

表 2-2 土样、水泥及粉煤灰的主要化学组成

Table 2-2 Chemical composition of Shanghai clay, Portland cement and fly ash

Composition	Content (%)		
	Clay	Fly ash	Cement
SiO ₂	57.02	54.90	21.60
CaO	3.63	8.70	64.44
Al ₂ O ₃	16.42	25.80	4.13
Fe ₂ O ₃	6.79	6.90	4.57
MgO	3.68	1.80	1.06
Na ₂ O	0.81	0.30	0.11
K ₂ O	3.59	0.10	0.56
SO ₃	0.05	0.60	1.74
LOI	6.43	0.2	0.76

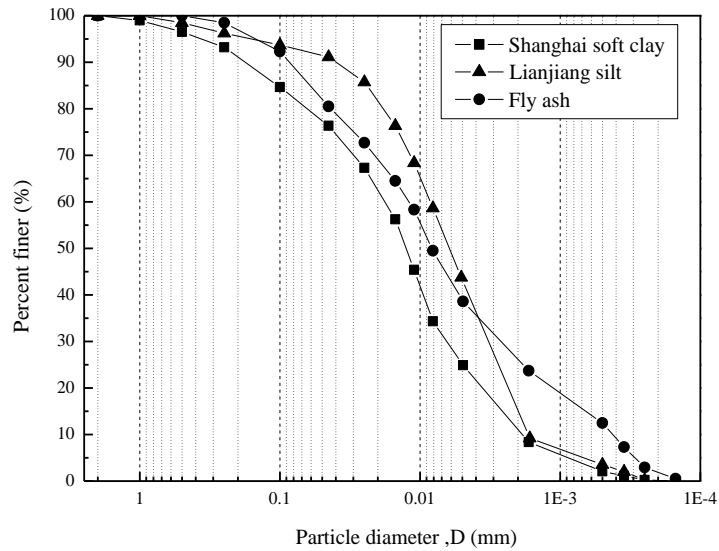


图 2-2 土样和粉煤灰的粒径分布曲线

Fig. 2-2 Grain size distribution curves of Shanghai soft clay, Lianjiang silt and fly ash

(2) 腐植酸

腐植酸用来制备人工有机质黏土。本文用腐植酸为一种复合有机酸，是动植物残害经微生物分解、转化及一系列化学过程形成的高分子有机物。其基本结构为芳环和脂环，环上连有多种官能团，具有较强的吸附、络合、交换、螯合作用。试验用腐植酸组成为：75%腐植酸（胡敏酸，自然含量），15%黄腐酸（富里酸），其余 10%为灰分及其他矿物成分。pH 值为 3.55（比重 1% 沉降 48 小时上清液实测值），黑色粉末（如图 2-3 所示），约 120 目左右，微溶于水，易溶于碱。

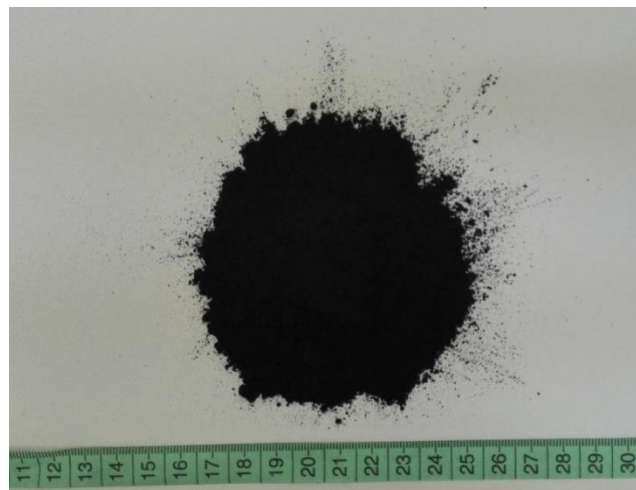


图 2-3 腐植酸宏观图片

Fig. 2-3 Photo of humic acid



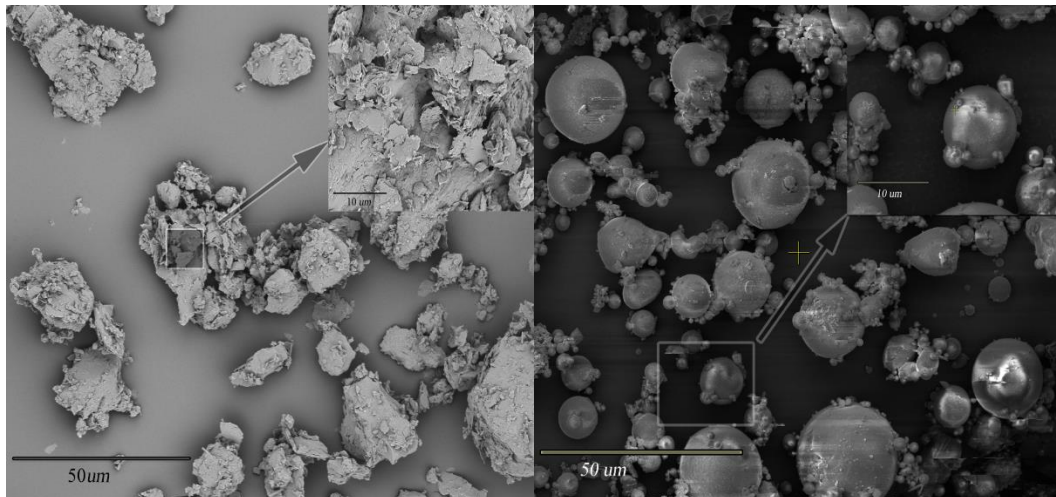
(3) 固化材料

1) 水泥

试验用水泥 (Ordinary Portland cement, OPC) 为海螺水泥厂生产的强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 其主要化学成分见表 2-2。其相对密度为 3.13, 比表面积为 $3630 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。

2) 粉煤灰

试验用粉煤灰 (Fly ash, FA) 为 F 类粉煤灰, 取自河南安阳火电厂, 相对密度为 2.26, 主要化学成分如表 2-2 所示。粉煤灰的粒径分析曲线如图 2-2 所示, 图 2-4 给出了上海黏土和粉煤灰的微观结构图, 可以看出, 软土结构组成复杂, 多为片状、块状结构, 而粉煤灰大多是球形的玻璃微珠。



(a) 软土

(b) 粉煤灰

图 2-4 软土和粉煤灰的 SEM 图片

Fig. 2-4 SEM photos of the soft clay and fly ash

3) 外加剂

液体硅酸钠/水玻璃 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 3.2\text{SiO}_2$, SS), 由浙江杭州余杭某水玻璃厂提供, 浓度为 39%, 分别为 29.48% 的 SiO_2 和 9.52% 的 Na_2O , 模数 (SiO_2 与 Na_2O 的摩尔比) 为 3.2。其相对密度和 pH 值分别为 1.43 和 11.98。

化学纯氢氧化钠 (NaOH , SH) 在常温下为片状固体, 由国药集团化学试剂有限公司提供, 用来提高固化土 pH 值并参与化学沉淀反应。

化学纯氢氧化钙 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$, CH] 为粉末状固体, 由国药集团化学试剂有限公司提供, 用来提高固化土 pH 值。

偏铝酸钠 ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$) 为白色粉末固体, 纯度 $\geq 98\%$, 由山东济南杰辉化工有限



公司提供, 用作水泥促凝剂。

化学纯氯化钙 (CaCl_2) 为白色粉末固体, 由国药集团化学试剂有限公司提供, 用来提供 Ca^{2+} 。

2.3.2 试样制备

水泥基高效固化剂的制备方法以上海黏土为研究对象。将黏土置入烘箱中, 烘 5~7 d, 将烘干的黏土碾碎后过 2mm 筛。本文目的是制备适用于饱和软黏土、吹填土的固化剂, 采用湿法制样法, 固化土用水分两步添加。根据计算用量, 掺入一定量的水 (以干土质量计, 若无特殊说明, 水与干土质量比为 0.7), 将土水混合物置入搅拌器内机械搅拌 2~4 min, 使其尽可能均匀。参考试验设计 (以已有研究为参照) 的水泥、外加剂及粉煤灰掺入量, 计算得到各组分的用量, 并掺入 50% (以固化材料质量计) 的水, 加入搅拌器继续拌合 6~8 min。将拌合均匀的固化土试样分三层倒入 PVC 模具中, 为使成型试样尽可能均匀且去除搅拌过程中带来的气体, 倒入每层试样后, 将模具放上混凝土振动台振动 40~60 s, 随后将模具置入标准养护箱中养护。养护箱温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $98 \pm 2\%$ 。养护 3d 后, 脱模, 将脱模后的试样继续放入养护箱中继续养护, 至特定龄期后, 取出进行无侧限抗压强度试验。每组取 3 个试样进行平行试验, 其平均值即为该配方下试样的无侧限抗压强度。

本文试验中各固化材料掺量均以干土质量分数计, 而实际工程中多以被加固软土的湿质量为基准, 依据《水泥土配合比设计规程》(JGJT 233-2011), 本文设计掺量与工程掺量的换算方法为: 工程掺量=本文设计掺量/(1+湿土含水率)。

在人工有机质土的制备过程中, 为使有机质土更加均匀、更符合有机质土的实际情况, 首先将干土与一定量腐殖酸混合干拌 2~3 min, 掺入设计含水率的水量后继续搅拌 5~7 min, 随后将人工有机质土放入聚乙烯塑料袋中密封养护 7d, 随后, 掺入设计掺量的水泥、外加剂及粉煤灰等固化材料制备固化土试样。制模、养护过程与普通软黏土试样的试验方法相同。

2.3.3 试验内容

(1) 无侧限抗压强度

采用不同龄期的无侧限抗压强度作为固化剂各组分及其他因素影响固化土固化效果的评价指标。无侧限抗压强度试验采用 MTS 工业系统有限公司生产的 SANS 电子万能试验机。测试前, 测量并计算试样的平均初始截面积 A_0 , 随后在试样两端抹一层薄黄油层, 将试样防灾下压板上, 开动电机使试样缓慢上升, 直至试样与上压板距离大约为 1mm 时, 调整下压板使其与试样上表面、上压板的平面完全平行, 继续



开动电机，使上压板与试样刚好接触（以肉眼看不到缝隙为准），将轴压计与位移计的读数清零，使上压板以 0.5mm/min 的速度下降，采用计算机采集应力应变关系数据。水泥固化土及水泥基固化剂固化土基本为加工软化型材料，因此，当轴力达到峰值（ ε_{max} ）后，再进行 2%~4% 的轴向变形即可关闭电机，记录试验数据。固化土的无侧限抗压强度可由下式计算：

$$q_u = \frac{\varepsilon_{max}}{A_0} \quad (2-3)$$

上式中， q_u (kPa) 为固化土的无侧限抗压强度， ε_{max} (kN) 为峰值轴应力， A_0 (m^2) 为固化土试样的承压面积。

(2) pH 值测试

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)，进行 pH 值测试试验。将经过强度试验的破碎试样进行研磨，取研磨后过 2mm 筛的试样 10g，放入广口瓶中，加蒸馏水 50mL，震荡 3~5min，静置 30min 后，采用 Orion DUAL STAR pH 测量仪测量澄清液的 pH 值，精确至 0.001，随后，根据酸碱度计算方法，由测试值得到实际值。

(3) 物相分析

采用三种微观分析技术进行固化土的物相分析，分别是 X 射线衍射分析(XRD)，扫描电镜分析(SEM)及热重分析(TG-DSC)。分析的样品取自强度测试破碎试样。

XRD 测试：选取一定龄期测试过抗压强度的固化土破碎试样，挑选其中的较中央部分放入小烧杯中，加入酒精终止水化反应，在玛瑙研钵中研磨后（最大粒径小于 45 μm ）放入真空恒温烘箱低温烘干。压片后用 D8 ADVANCE DA VINCI 多功能 X 射线衍射仪进行 X 射线衍射分析。2 θ 角扫描范围为 5~85°，步长为 0.02°。对 X 射线衍射图谱使用 X'Pert HighScore Plus 进行物相组成分析。

SEM 测试：理论上讲，表面起伏较小的固体断面更容易得到理想的扫描电镜图片。从一定龄期的抗压强度测试的固化土破碎试样中选取薄片状试样，尽量使其具有较平整表面。随后将试样浸泡在无水酒精中终止水化，并放入真空恒温烘箱低温烘干。因固化土薄片及颗粒属不导电材料，在扫描电镜测试时易产生电荷堆积现象，影响图象质量，因此，在测试前，需将试样置入真空镀膜仪中喷镀一层约 10nm 的金膜导电层。使用 NOVA NanoSEM 230 低真空超高分辨场发射扫描电子显微镜进行 2000~10000 倍的照片拍摄。

TG 测试：在加热过程中，试样质量会随温度升高出现不断变化，质量变化的大小及发生变化的温度节点与物质的化学组成和结构密切相关。因此，可通过热重分析测量试样的质量变化考察试样的化学组成。用 Pyris 1 TGA 热重分析仪进行测试。



2.4 外加剂单掺试验研究

2.4.1 试验方案

基于对水泥基固化剂组成材料优选理论及对策分析,选择水玻璃,氢氧化钠,偏铝酸钠,氢氧化钙,氯化钙作为外加剂。为初步确定各组分混配水泥固化软黏土效果的有效性及可能的掺量范围,测试不同掺量各外加剂对水泥固化土性能的影响。

为得到更具参考价值的试验结果,需确定固化土试样的基准配比。因固化剂制备的目的是为了固化处理沿海滩涂高含水率淤泥,而实际淤泥含水率为 69.3% (见表 2-1),因此,固化土制备试验的水土比固定为 0.7,即软土含水率为 70% (以干土质量计,下同)。上海软黏土固化处理实际工程中,水泥掺量通常为 10%~18%,湿法施工的水泥搅拌桩的水泥浆水灰比一般为 0.45~0.55。参照已有研究^[76],单掺试验以水泥掺量为 10%为基准掺量,水灰比为 0.5。将外加剂和水泥(固化剂)作为整体胶凝材料,最终的水胶比为 0.5。其中,水玻璃含水率为 61%,但由于水玻璃掺量较低,可将水玻璃看作是水胶比为 0.5 的材料。单掺试验的基准配比如表 2-3 所示,以固化土 28d 无侧限抗压强度为评价指标对各配比进行分析。

表 2-3 单掺试验基本配比

Table 2-3 The mix proportions for single-admixture experiments

Items	Soil	Cement slurry		Admixtures
	Water content	Cement content	Water cement ratio	Water additive ratio
Values	70%	10%	0.5	0.5

2.4.2 试验结果与分析

根据表 2-3 的试验配比,分别测试了不同种类外加剂在不同加量下对水泥固化土 28d 无侧限抗压强度的影响。

(1) 硅酸钠的影响

图 2-5 给出了不同掺量硅酸钠对水泥固化土无侧限抗压强度的影响。由图可见,当硅酸钠掺量由 0 增加到 4.5%时,固化土 28d 强度随硅酸钠掺量增加而增加;但当硅酸钠掺量大于 4.5%时,固化土强度有所降低。这一现象与 Kazemian 等^[30,31]的研究结果基本相符,主要是因为当硅酸钠掺量过多时,对水泥水化生成的 Ca^{2+} 产生过度消耗,通过反应式(2-1)生成凝胶状水化硅酸钙。已有研究表明^[205],由硅酸钠生成的水化硅酸钙的胶结强度低于水泥水化生成的水化硅酸钙的胶结强度。而硅酸钠对 Ca^{2+} 的过度消耗,降低了水泥水化硅酸钙的生成量。

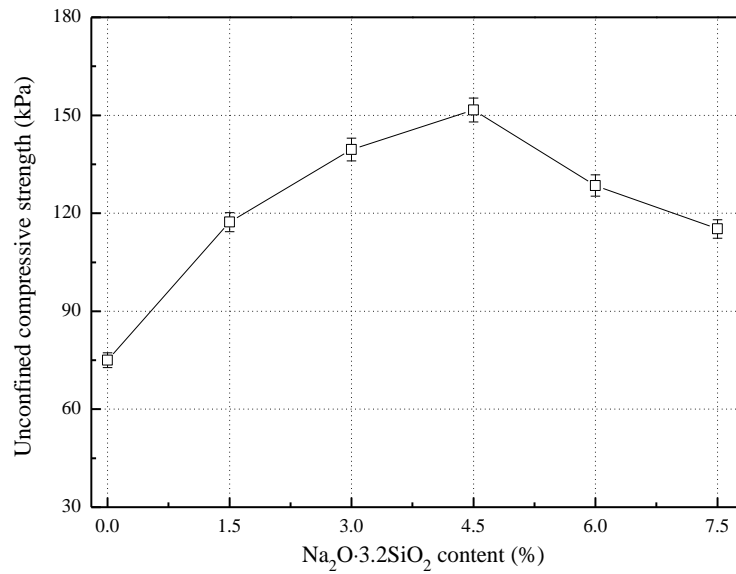


图 2-5 硅酸钠掺量对固化土强度的影响

Fig. 2-5 The effect of sodium silicate content on compressive strength of stabilized clay

(2) 氢氧化钠的影响

图 2-6 给出了不同掺量氢氧化钠对水泥固化土无侧限抗压强度的影响。由图可知，氢氧化钠对固化土强度的影响呈现出与硅酸钠作用于固化土的相似规律，当氢氧化钠掺量小于 1% 时，固化土强度随氢氧化钠掺量的增加而增加，当氢氧化钠掺量大于 1% 时，固化土强度快速降低，这一现象与杨爱武等^[206]的研究结果基本相符，而同等掺量氢氧化钠能使水泥固化高含有机质土强度提高数倍^[76]。

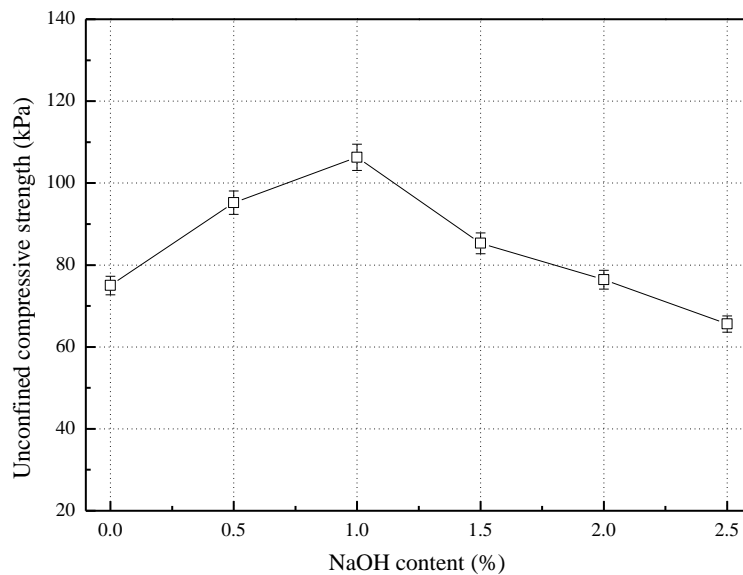


图 2-6 氢氧化钠掺量对固化土强度的影响

Fig. 2-6 The effect of sodium hydroxide content on compressive strength of stabilized clay



(3) 氢氧化钙的影响

图 2-7 给出了不同掺量氢氧化钙对水泥固化土无侧限抗压强度的影响。可以看出，氢氧化钙对固化土强度的影响与硅酸钠及氢氧化钠类似，当氢氧化钙掺量小于 1.5% 时，固化土强度随氢氧化钙掺量增加而增加，当氢氧化钙掺量大于 1.5% 时，固化土强度快速降低；当氢氧化钙掺量为 1.5% 时，其具有最佳作用。氢氧化钙对固化土的作用机理与氢氧化钠类似，少量的氢氧化钙可以提高土 pH 值，促进胶凝水化产物的生成；但过量的外掺氢氧化钙会使土体孔隙流体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处于过饱和状态，抑制了水泥的水解和水化反应，造成固化土强度的快速下降。

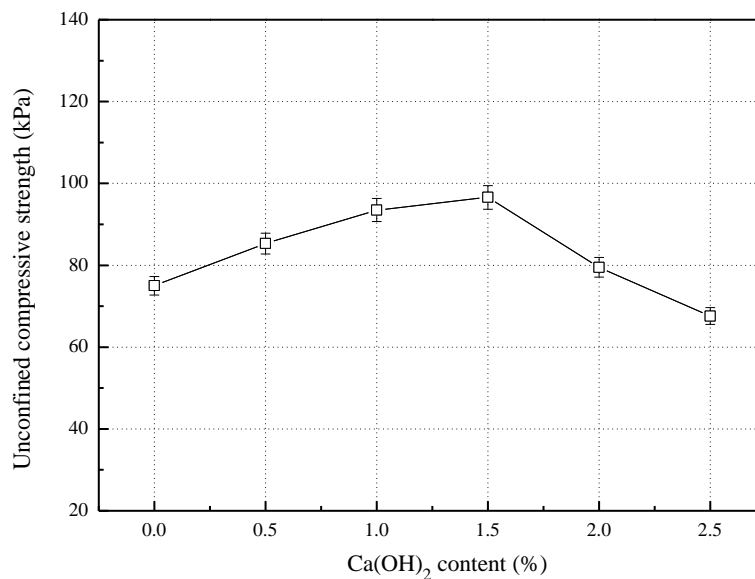


图 2-7 氢氧化钙掺量对固化土强度的影响

Fig. 2-7 The effect of calcium hydroxide content on compressive strength of stabilized clay

(4) 氯化钙的影响

图 2-8 给出了不同掺量氯化钙对水泥固化土无侧限抗压强度的影响。可以看出，在试验测试的范围内，氯化钙对固化土强度的影响较小，固化土强度随氯化钙掺量增加总体呈现递减趋势。

(5) 偏铝酸钠的影响

图 2-9 给出了偏铝酸钠对水泥固化土无侧限抗压强度的影响。由图可见，当偏铝酸钠掺量仅在 0~0.5% 时，对固化土强度具有改善作用；当偏铝酸钠大于 0.5% 时，固化土强度随偏铝酸钠掺量的增加迅速降低，掺入 2.5% 偏铝酸钠的固化土 28d 强度仅为水泥固化土强度的 40% 左右。

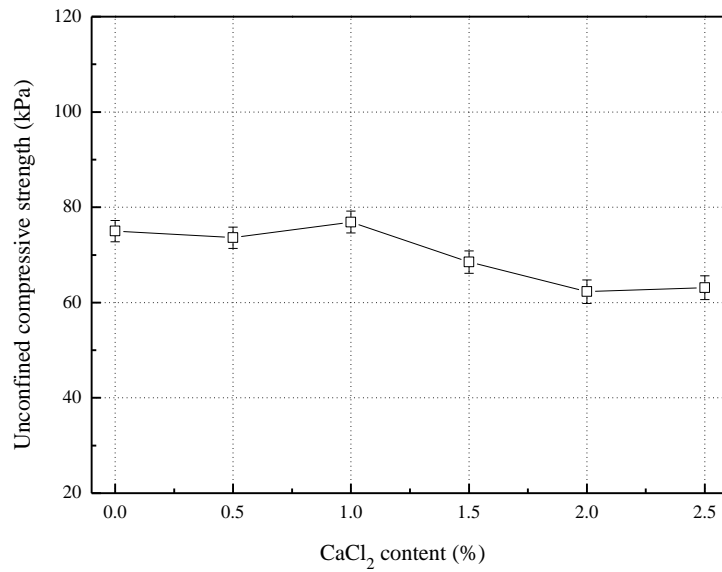


图 2-8 氯化钙掺量对固化土强度的影响

Fig. 2-8 The effect of calcium chloride content on compressive strength of stabilized clay

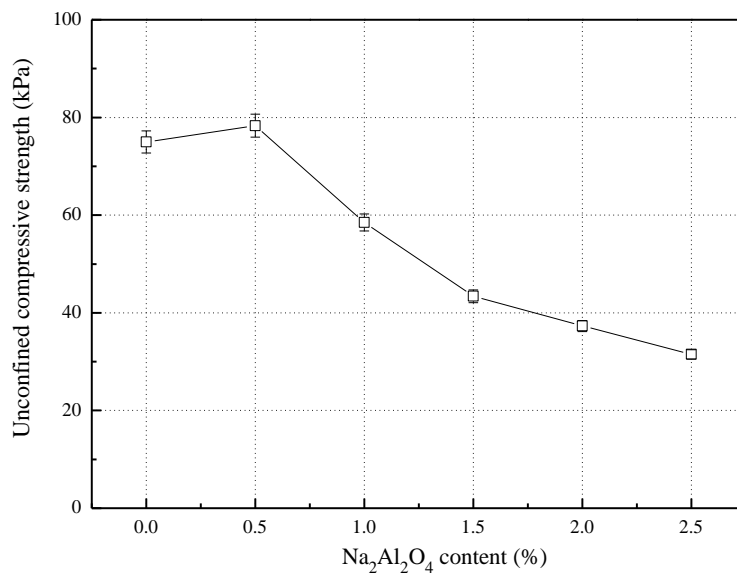


图 2-9 偏铝酸钠掺量对固化土强度的影响

Fig. 2-9 The effect of sodium metaaluminate content on compressive strength of stabilized clay

基于以上结果，硅酸钠掺量范围较大，且对水泥固化土强度有较大提高，而其他几种外加剂存在可掺加量变化范围小、作用效果随掺量变化显著等特点。此外，硅酸钠作用于水泥可增加胶凝水化产物的生成量，而其他外加剂不能显著增加胶凝水化产物生成量，但可以激发水泥水化反应或黏土活性矿物的火山灰反应。因此，将硅酸钠作为外加剂的助剂、其他组分作为激发剂来开展下一步试验。



2.5 复合激发剂的研究

基于外加剂单掺试验,开展助剂与激发剂共同使用的试验研究,考察激发剂与助剂混配对水泥固化土无侧限抗压强度的影响。综合单一激发剂的试验结果分析与前述的化学沉淀理论,探究复合激发剂制备的可行性与有效性。参考外加剂单掺试验的水泥掺量,本节试验的水泥掺量固定为 10%。若助剂(硅酸钠)掺量过大,其对固化土抗压强度的影响作用可能远大于激发剂的作用,不利于分析激发剂与助剂的协同作用,因此助剂应选用较低掺量。本节试验硅酸钠掺量固定为 1%。

2.5.1 单一激发剂

测试了不同掺量的单一激发剂对水泥与助剂固化土不同养护龄期抗压强度的影响,并对试验结果进行了分析讨论。

(1) 单一氢氧化钠

图 2-10 给出了不同掺量氢氧化钠对 10%水泥与 1%硅酸钠固化土不同龄期无侧限抗压强度的影响。由图可见,在试验范围内,中后期强度随氢氧化钠掺量的增加而增加,值得注意的是,当氢氧化钠掺量大于 1%时,固化土强度的增长率降低;与 12%水泥固化的 60d 抗压强度相比,10%水泥混合 1%硅酸钠与 1%氢氧化钠固化土的同龄期强度可达 450kPa。此外,掺 1.5%氢氧化钠的固化土中后期强度高于掺 1%氢氧化钠固化土的同龄期强度,并未出现外加剂单掺时氢氧化钠掺量超过 1%固化土强度降低的现象,这说明氢氧化钠作为激发剂与助剂复合使用具有协同作用。

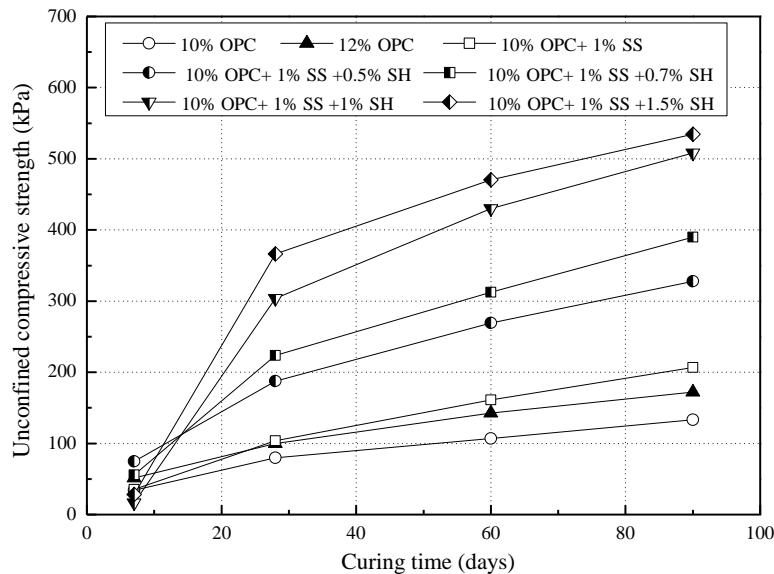


图 2-10 单掺氢氧化钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响

Fig. 2-10 Strength development in OPC-SS stabilized clay admixed with single NaOH



尽管一定量氢氧化钠可大幅提高水泥-硅酸钠固化土中后期强度，但却不同程度影响了固化土早期强度，甚至出现短期（3d 内）无强度的现象，因此单一氢氧化钠不能作为高效固化剂的独立组分。由于氢氧化钠可明显改善水泥-硅酸钠固化土的中后期强度，可将氢氧化钠作为复合激发剂的组分之一进行后续研究。

(2) 单一氢氧化钙

图 2-11 给出了不同掺量氢氧化钙对 10%水泥与 1%硅酸钠固化土不同龄期无侧限抗压强度的影响。可以看出，与氢氧化钠对水泥-硅酸钠固化土中后期抗压强度的改善作用类似，在试验掺量范围内，随氢氧化钙掺量的增加，固化土各龄期强度都有不同幅度的提高，这一现象与外加剂单掺试验中观察到的氢氧化钙对 10%水泥固化土的作用规律基本相符。

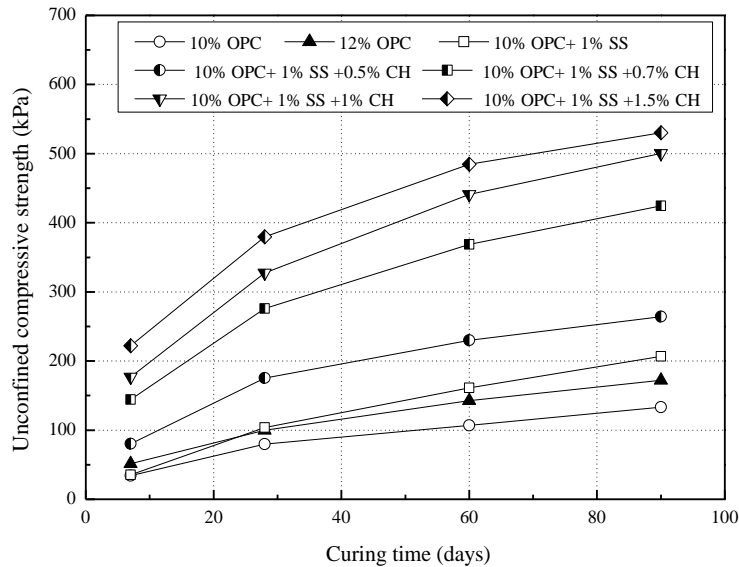


图 2-11 单掺氢氧化钙对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响

Fig. 2-11 Strength development in OPC-SS stabilized clay admixed with single Ca(OH)₂

当氢氧化钙掺量由 0.5%增加到 0.7%时，固化土强度有较大提高，0.7%氢氧化钙固化土的 28d 和 60d 强度为 276.1kPa 和 365.3kPa，比同龄期掺入 0.5%氢氧化钙的固化土强度分别高出 57.6%及 60.2%，这说明，对 10%水泥与 1%硅酸钠的固化剂体系，0.5%~0.7%是氢氧化钙作用的较敏感掺量区间；10%水泥混合 1%氢氧化钙与 1%硅酸钠固化土的 7d 和 60d 强度分别时 177kPa 和 441kPa，比 12%水泥固化土的同龄期强度分别提高了 240%、208%。

此外，单掺氢氧化钙的固化土试样也未出现单掺氢氧化钠试样短期无强度的现象。但需注意的是，单掺氢氧化钙极大影响了固化土和易性，使固化土混合物增稠，即便水固比高于 0.6，也给制样带来了一定的困难。



(3) 单一氯化钙

图 2-12 给出了不同掺量氯化钙对 10%水泥与 1%硅酸钠固化土不同龄期无侧限抗压强度的影响。由图可见，氯化钙对水泥-硅酸钠固化土的抗压强度具有一定的改善作用，但当氯化钙掺量大于 0.7%时，不同龄期的固化土抗压强度会有所降低；掺入 0.7%氯化钙的固化土的 60d 无侧限抗压强度较 10%水泥与 1%硅酸钠固化土同龄期强度提高了 21%。尽管氯化钙不能大幅提高水泥与硅酸钠固化土的抗压强度，但氯化钙作易溶性盐可为固化土提供一定量 Ca^{2+} ，发生离子交换作用，可作为制备复合碱激发剂的原料之一。此外，氯化钙同氢氧化钠同时使用可发生化学沉淀效应，可能对固化土强度有较大改善作用。

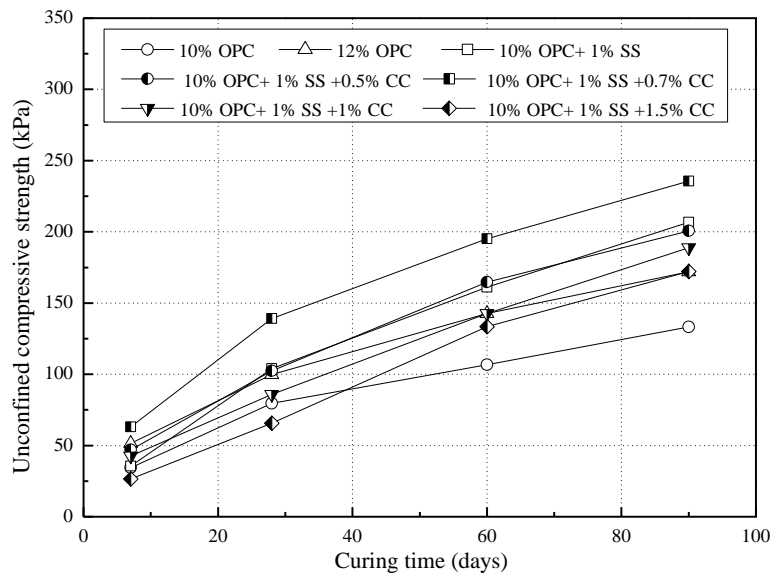


图 2-12 单掺氯化钙对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响

Fig. 2-12 Strength development in OPC-SS stabilized clay admixed with single CaCl_2

(4) 单一偏铝酸钠

图 2-13 给出了不同掺量偏铝酸钠对 10%水泥与 1%硅酸钠固化土不同龄期无侧限抗压强度的影响。可以看出，所有铝酸钠掺量下，水泥-硅酸钠固化土的各龄期抗压强度均出现不同程度的降低，综合对比图 2-8，可知偏铝酸钠不仅不能改善固化土性能，而且还不能与助剂产生协同效应。因此，在复合激发剂及高效固化剂制备过程中不考虑铝酸钠作为原材料。

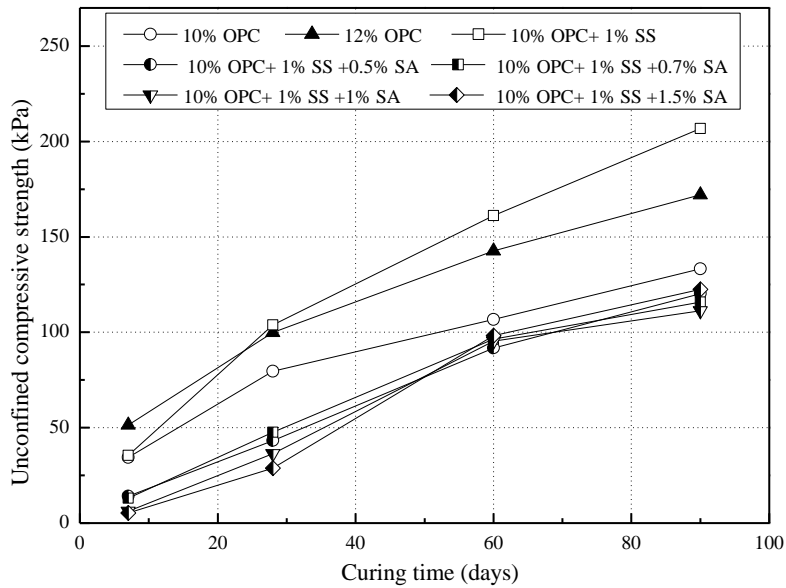


图 2-13 单掺偏铝酸钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响

Fig. 2-13 Strength development in OPC-SS stabilized clay admixed with single Na₂Al₂O₄

2.5.2 复合激发剂

对外加剂单掺试验及单一激发剂试验的结果分析表明，仅采用一种试剂作为激发剂不能满足固化土的多重工程性能需求，如早强、便利施工等。因此，考虑将两种激发剂同时使用，并测试复合激发剂对水泥-硅酸钠固化土不同龄期抗压强度的影响，考察多种复合激发剂与助剂（硅酸钠）的协同作用。本小节试验的基准配方为：10%水泥，1%硅酸钠及 1%复合激发剂，改变复合激发剂中两组分的不同比例。

(1) 氢氧化钙与氢氧化钠复合激发剂

图 2-14 给出了氢氧化钙与氢氧化钠按不同比例复合对 10%水泥与 1%硅酸钠固化土不同龄期无侧限抗压强度的影响。可以看出，掺 Ca(OH)₂ 和 NaOH 复合激发剂的固化土 7d 强度随 NaOH 组分的增加而呈降低趋势，当 Ca(OH)₂:NaOH>1:1 时，7d 强度降幅较小，但当 Ca(OH)₂:NaOH<1:1 时，7d 强度出现显著降低。可能原因为 NaOH 占比较低时，复合激发剂主要表现出 Ca(OH)₂ 的性能；NaOH 占比较高时，复合激发剂主要表现 NaOH 的性能，而 NaOH 的掺入显著影响了固化土的早期强度(图 2-10)，这表明 Ca(OH)₂ 和 NaOH 复合使用并未发生显著协同作用，在某一组分掺量占比大时，复合激发剂的性能表现以此组分性能为主。

固化土 28d 强度随 NaOH 占比的增大呈现先小幅降低后增加的趋势，掺入 Ca(OH)₂:NaOH 分别为 7:3, 2:3 及 3:7 复合激发剂的固化土 28d 强度分别为 349.6 kPa, 309.4kPa 及 326.5kPa。

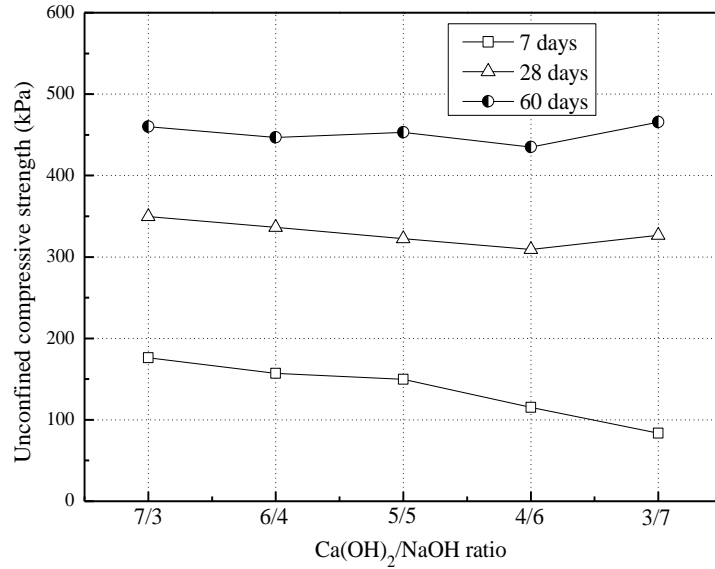


图 2-14 按不同比例复合的氢氧化钙和氢氧化钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响
 Fig. 2-14 Strength development in OPC-SS stabilized clay admixed with NaOH and Ca(OH)₂ composite promoter

Ca(OH)₂ 与 NaOH 的比例对固化土 60d 强度影响不显著, 掺入 Ca(OH)₂:NaOH 分别为 7:3, 1:1 及 3:7 复合激发剂的固化土 60d 强度分别为 460.2 kPa, 453.2kPa 及 465.7kPa。对比图 2-10 与 2-11 可知, Ca(OH)₂ 和 NaOH 复合总掺量为 1%时, 与单掺 1%Ca(OH)₂ 或 1%NaOH 对水泥与硅酸钠固化土的增强改善作用基本相当。

基于以上分析可知, Ca(OH)₂ 与 NaOH 按一定比例混配做复合激发剂主要有如下特点: ①二者混配基本无协同作用, 即占比大的组分在固化剂性能表现主导作用, NaOH 占比较大时, 早期强度低, 而 Ca(OH)₂ 占比较大时, 固化土混合试样稠度也较大; ②与同等掺量的单一激发剂相比, 复合激发剂对水泥与硅酸钠固化土的中后期强度的改善作用不具优势。

(2) 氯化钙与氢氧化钙复合激发剂

图 2-15 给出了氯化钙与氢氧化钙按不同比例复合对 10%水泥与 1%硅酸钠固化土各龄期无侧限抗压强度的影响。可以看出, 掺 CaCl₂ 和 Ca(OH)₂ 复合激发剂的固化土各龄期强度随 Ca(OH)₂ 占比的增加而增加, 掺入 CaCl₂:Ca(OH)₂ 分别为 7:3, 1:1 及 3:7 复合激发剂的固化土 7d 和 60d 强度分别为 52.7 kPa 和 178.4kPa, 95.1kPa 和 285.8 kPa 及 135.6kPa 和 413.6 kPa。

与图 2-8 和图 2-12 相比, 复合激发剂中 CaCl₂ 占比大于 Ca(OH)₂ 时, 复合激发剂对水泥与硅酸钠固化土强度改善作用较小, 掺入 CaCl₂:Ca(OH)₂ 为 7:3 复合激发剂的固化土 28d 强度为 126.4 kPa, 仅比 10%水泥与 1%硅酸钠固化土 28d 强度高 22%。

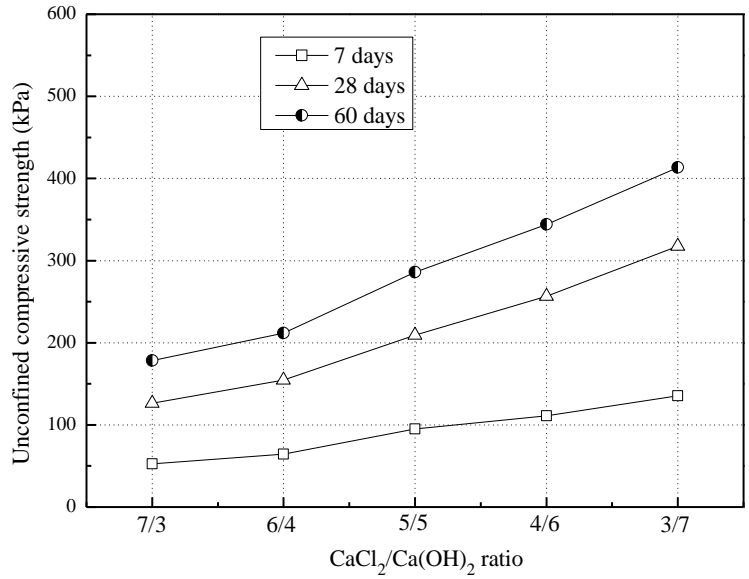


图 2-15 按不同比例复合的氯化钙与氢氧化钙对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响
 Fig. 2-15 Strength development in OPC-SS stabilized clay admixed with CaCl₂ and Ca(OH)₂ composite promoter

当 Ca(OH)₂ 占比大于 CaCl₂ 时, CaCl₂ 和 Ca(OH)₂ 复合激发剂能提高改善水泥与硅酸钠固化土各龄期的抗压强度, 但复合激发剂的作用稍弱于单掺 1%Ca(OH)₂ 的作用, 掺入 CaCl₂:Ca(OH)₂ 为 3:7 复合激发剂的固化土 28d 强度为 317.4 kPa, 而同龄期 10%水泥混掺 1%Ca(OH)₂ 和 1%硅酸钠固化土的强度为 327.6 kPa。

上述分析表明, CaCl₂ 与 Ca(OH)₂ 复合使用时, 复合激发剂的性能主要以其中某一组分为主导, 亦不具有协同作用, 表现为, CaCl₂ 占比大时, 复合激发剂对固化土强度改善作用有限, Ca(OH)₂ 占比大时, 复合激发剂显著提高固化土强度, 但弱于单掺 1%Ca(OH)₂ 的作用, 同时也出现固化土混合试样稠度较大的现象。

(3) 氯化钙与氢氧化钠复合激发剂

图 2-16 给出了氯化钙与氢氧化钠按不同比例复合对 10%水泥与 1%硅酸钠固化土不同龄期抗压强度的影响。可以看出, 随 CaCl₂:NaOH 的降低, 掺入 CaCl₂ 和 NaOH 复合激发剂的固化土各龄期强度呈现先增加后降低的趋势, 掺入 CaCl₂:NaOH 分别为 7:3, 1:1 及 3:7 复合激发剂的固化土 7d 和 60d 强度分别为 74.3 kPa 和 386.5kPa, 192.6kPa 和 497.7kPa 与 154.3kPa 和 410.7kPa。

与单一 CaCl₂ (图 2-12) 的作用相比, 10%水泥混掺 0.7%CaCl₂ 和 0.3%NaOH 和 1%硅酸钠固化土的 28d 强度为 241.3 kPa, 比 10%水泥混掺 0.7%CaCl₂ 与 1%硅酸钠固化土的同龄期强度高出 73.5%。

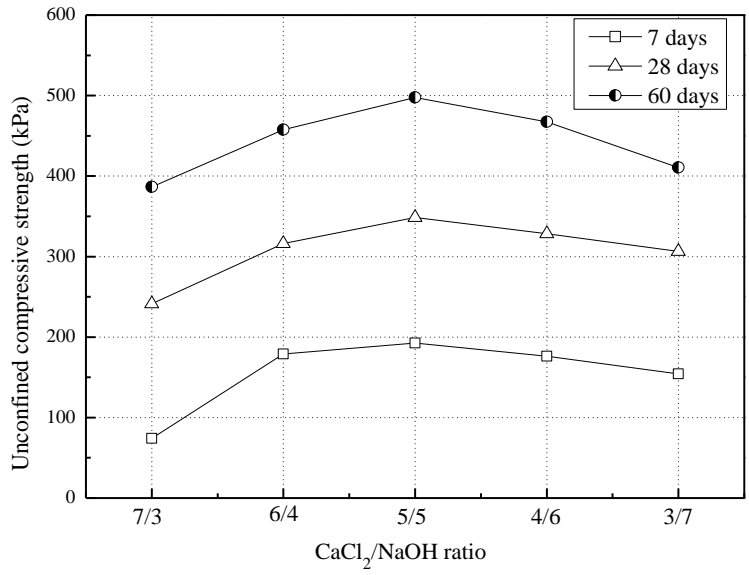
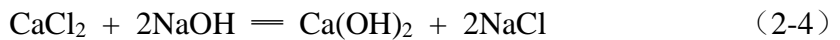


图 2-16 按不同比例复合的氯化钙与氢氧化钠对水泥-硅酸钠固化土抗压强度的影响
 Fig. 2-16 Strength development in OPC-SS stabilized clay admixed with CaCl₂ and NaOH composite promoter

这表明，NaOH 的引入显著提高了 CaCl₂ 对水泥与硅酸钠固化土的改善作用。参照图 2-10，10%水泥混掺 0.7%NaOH 和 1%硅酸钠固化土的 7d 强度为 55.9 kPa，仅为 10%水泥混掺 0.3%CaCl₂ 与 0.7%NaOH 与 1%硅酸钠固化土同龄期强度的 36.2%，这表明少量的 CaCl₂ 即可解决 NaOH 影响水泥与硅酸钠固化土早期强度的问题。此外，CaCl₂:NaOH 为 1:1 时，掺入复合激发剂的固化土 60d 强度与 10%水泥混掺 1%NaOH 与 1%硅酸钠固化土及 10%水泥混掺 1%Ca(OH)₂ 与 1%硅酸钠固化土的同龄期强度几乎相当，却不存在早期强度低、固化土混合试样稠度大等问题。

CaCl₂ 溶液与 NaOH 溶液与土样拌合后，可发生化学反应生成 Ca(OH)₂，如下式所示：



由式 (2-4) 可知，111gCaCl₂ 与 80g NaOH 可生成 74gCa(OH)₂。对本研究 0.5% CaCl₂ 与 0.5% NaOH 的复合激发剂，理论上假定某一组分 (CaCl₂) 完全反应，生成 $\frac{74}{111} \times 0.5\% = 0.33\%$ 的 Ca(OH)₂，剩余 0.14% NaOH。即，理论上 0.33% Ca(OH)₂ (沉淀) 与 0.14% NaOH 的作用与 1%Ca(OH)₂ (外掺) 的作用相当，这也证明了化学沉淀理论在本研究中的可行性。尽管 CaCl₂ 溶液与 NaOH 溶液是先于水泥与硅酸钠拌合，但事实上，CaCl₂ 难以反应完全，由 CaCl₂ 与 NaOH 反应生成的沉淀 Ca(OH)₂ 量小于 0.33%。因此，在固化土孔隙流体中，CaCl₂ 与 NaOH 的二组分复合激发剂实际上是



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCl_2 和 NaOH 的三组分激发剂。

根据上述分析,可认为 CaCl_2 与 NaOH 对水泥与硅酸钠固化土强度改善具有协同作用,可以作为复合激发剂的组分用以制备水泥基高效固化剂。

2.6 高效固化剂各组分比例的确定

2.6.1 正交试验

单一激发剂的试验研究结果表明,仅采用一种试剂作为激发剂不能满足固化土的多重工程性能需求,如早强、利于施工等。对复合激发剂作用于水泥与助剂(硅酸钠)固化土不同龄期的抗压强度进行了研究,发现氢氧化钠和氯化钙按一定比例复合具有协同加强作用。因此,在确定最终的高效固化剂各组分比例的试验中,将复合激发剂(氢氧化钠与氯化钙质量比为 1:1)作为一个整体,即高效固化剂的原材料包含三组分:水泥,助剂及复合激发剂。

为了对固化剂配比进行优选并最终确定理论的最佳比例,试验中应将固化剂某几组分之间的交互作用考虑在内,如助剂与复合激发剂可以发生理论上的化学反应,进而产生交互作用。由于可能存在的交互作用,需要对固化剂各组分的全部组合进行试验,即开展全面试验(全面试验法)。全面试验法可对每一因素进行单独剖析并全面揭示事物的内在规律,但若在本小节内容使用全面试验法,存在以下主要缺点:固化土试验龄期较长(通常需进行 28d 测试),如若每一组试验完成后再开展下一步试验,造成试验的空闲时间较长,拖后整个研究计划;全面试验需要对每一因素的不同水平开展试验,若影响因素较多,则工作量巨大,难以及时完成研究计划内的既定任务。因此,考虑采用其他试验方法代替全面试验法开展确定固化剂各组分较优比例的试验。

在长期的实践和科学研究过程中发现,正交试验设计方法也是一种研究多因素多水平的一种试验设计方法。它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,正交试验设计是分式析因设计的主要方法,是一种高效率、快速、经济的实验设计方法。

如前所述,正交试验设计法同样可以实现多因素试验同时进行、综合分析的目标,对既定因素和水平的数目,可以有相对应的正交表开展试验,通过少量的试验即可确定影响最大因素和不同因素的最优水平。

由外加剂单掺试验及复合激发剂制备试验的结果可知,各因素对固化土抗压强度的影响程度是有差异的,而且各影响因素的水平也不一致。为得到高效固化剂的各



组分间的最优比例,以无侧限抗压强度为评价指标,开展正交试验。对水泥基土固化剂,水泥掺量不存在最佳值,即随水泥掺量的增加,固化土强度始终保持增大趋势。初期试验表明,本文所选的助剂和复合激发剂在试验范围内存在最优掺量。正交试验设计为将水泥掺量作为其中的一项影响因素,因此,正交试验的因素有助剂掺量([A])、复合激发剂掺量([B])及二者交互作用([A]×[B])。变化助剂和复合激发剂的掺量作为四水平,可得正交试验方案的因素水平表,如表 2-4 所示。

在正交试验设计中,考虑碱助剂与复合激发剂的交互作用(即助剂×复合激发剂),并考虑误差(两列误差列为保证试验数据的准确性),对应的正交表是 $L_{16}(4^4)$,即根据正交试验表进行 16 组试验。正交试验设计如表 2-5 所示。

对表 2-5 中的试验配方进行试验,得到固化土试样的 7d 和 28d 无侧限抗压强度,结果分别如表 2-6、表 2-7 所示。

表 2-6、2-7 分别给出了各水平相对应的四次强度之和 K_1 、 K_2 、 K_3 及 K_4 和平均强度 \bar{K}_1 、 \bar{K}_2 、 \bar{K}_3 及 \bar{K}_4 ,其计算方法如下所示:

对表 2-6 的第一列(硅酸钠掺量)的 K_1 和 \bar{K}_1 值,

$K_1=192.55+213.81+312.69+299.09=1018.14$ (第 OA1、OA2、OA3 和 OA4 号试样的 7d 强度之和)

$K_2=277.28+312.29+489.15+347.51=1426.23$ (第 OA5、OA6、OA7 和 OA8 号试样的 7d 强度之和)

$K_3=217.27+359.31+325.7+345.1=1247.38$ (第 OA9、OA10、OA11 和 OA12 号试样的 7d 强度之和)

$K_4=5.27+25.56+162.66+138.75=332.24$ (第 OA13、OA14、OA15 和 OA16 号试样的 7d 强度之和)

其余各列(包括交互作用列和误差列)的 K_i 与 \bar{K}_i 值计算方法与第 1 列的计算方法相同。

表 2-4 正交试验方案的因素水平表

Table 2-4 Contents of orthogonal factors and levels

Levels	Factors	
	Sodium silicate content (%) [A]	Promoter content (%) [B]
1	1	1
2	2	2
3	3	4
4	4	6



表 2-5 正交试验设计表

Table 2-5 Orthogonal test design table

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	Error	Error
OA 1	A1(1%)	B1(1%)	1	1	1
OA 2	A1(1%)	B2(2%)	2	2	2
OA 3	A1(1%)	B3(4%)	3	3	3
OA 4	A1(1%)	B4(6%)	4	4	4
OA 5	A2(2%)	B1(1%)	2	3	4
OA 6	A2(2%)	B2(2%)	1	4	3
OA 7	A2(2%)	B3(4%)	4	1	2
OA 8	A2(2%)	B4(6%)	3	2	1
OA 9	A3(3%)	B1(1%)	3	4	2
OA 10	A3(3%)	B2(2%)	4	3	1
OA 11	A3(3%)	B3(4%)	1	2	4
OA 12	A3(3%)	B4(6%)	2	1	3
OA 13	A4(4%)	B1(1%)	4	2	3
OA 14	A4(4%)	B2(2%)	3	1	4
OA 15	A4(4%)	B3(4%)	2	4	1
OA 16	A4(4%)	B4(6%)	1	3	2

表 2-6 正交试验 7d 结果

Table 2-6 Experimental program of orthogonal analysis for 7 days of curing

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	Error	Error	7-day strength (kPa)
OA 1	A1	B1	1	1	1	192.55
OA2	A1	B2	2	2	2	213.81
OA3	A1	B3	3	3	3	312.69
OA4	A1	B4	4	4	4	299.09
OA5	A2	B1	2	3	4	277.28
OA6	A2	B2	1	4	3	312.29
OA7	A2	B3	4	1	2	489.15
OA8	A2	B4	3	2	1	347.51
OA9	A3	B1	3	4	2	217.27
OA10	A3	B2	4	3	1	359.31
OA11	A3	B3	1	2	4	325.7
OA12	A3	B4	2	1	3	345.1
OA13	A4	B1	4	2	3	5.27
OA14	A4	B2	3	1	4	25.56
OA15	A4	B3	2	4	1	162.66
OA16	A4	B4	1	3	2	138.75
K1	1018.14	692.37	969.29	1052.36	1062.03	



续表 2-6

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	Error	Error	7-day strength (kPa)
K2	1426.23	910.97	998.85	892.29	1058.98	
K3	1247.38	1290.2	903.03	1088.03	975.35	
K4	332.24	1130.45	1152.82	991.31	927.63	
$\bar{K}1$	254.535	173.09	242.32	263.09	265.51	
$\bar{K}2$	356.56	227.74	249.715	223.07	264.75	
$\bar{K}3$	311.85	322.55	225.765	272.015	243.84	
$\bar{K}4$	83.06	282.61	288.21	247.83	231.91	

表 2-7 正交试验 28d 结果

Table 2-7 Experimental program of orthogonal analysis for 28 days of curing

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	Error	Error	28-day strength (kPa)
OA 1	A1	B1	1	1	1	348.73
OA 2	A1	B2	2	2	2	436.61
OA 3	A1	B3	3	3	3	566.34
OA 4	A1	B4	4	4	4	627.85
OA 5	A2	B1	2	3	4	426.93
OA 6	A2	B2	1	4	3	546.71
OA 7	A2	B3	4	1	2	739.42
OA 8	A2	B4	3	2	1	717.25
OA 9	A3	B1	3	4	2	301.74
OA 10	A3	B2	4	3	1	456.35
OA 11	A3	B3	1	2	4	441.52
OA 12	A3	B4	2	1	3	474.45
OA 13	A4	B1	4	2	3	40.66
OA 14	A4	B2	3	1	4	105.33
OA 15	A4	B3	2	4	1	301.41
OA 16	A4	B4	1	3	2	266.86
K1	1979.53	1118.06	1603.82	1667.93	1823.74	
K2	2430.31	1545	1639.4	1636.04	1744.63	
K3	1674.06	2048.69	1690.66	1716.48	1628.16	
K4	714.26	2086.41	1864.28	1777.71	1601.63	
$\bar{K}1$	494.88	279.52	400.96	416.98	455.94	
$\bar{K}2$	607.58	386.25	409.85	409.01	436.16	
$\bar{K}3$	418.52	512.17	422.67	429.12	407.04	
$\bar{K}4$	178.67	521.60	466.07	444.43	400.41	



对正交试验结果进行进一步的方差分析,其结果如表 2-8 及表 2-9 所示,其中 S_S 为偏差平方和, df 为自由度, M_S 为方差, F 为构造统计量。

表 2-8 7d 试验结果的方差分析表

Table 2-8 ANOVA (analysis of variance) table of 7-day strength

Source	S_S	df	M_S	F	F_C	Significance
A	172239.37	3	57413.12	39.31	$F_{0.01}(3,6)=9.78$	**
B	50912.98	3	16970.99	11.62	$F_{0.05}(3,6)=4.76$	**
A*B	8389.42	3	2796.47	1.91	$F_{0.1}(3,6)=3.29$	
Error	8762.86	6	1460.48		$F_{0.2}(3,6)=2.1$	
Total	240304.6	15				

注: 符号**代表非常显著

表 2-9 28d 试验结果的方差分析表

Table 2-9 ANOVA (analysis of variance) table of 28-day strength

Source	S_S	df	M_S	F	F_C	Significance
A	395961.3	3	131987.1	72.70	$F_{0.01}(3,6)=9.78$	**
B	158393.9	3	52797.98	29.08	$F_{0.05}(3,6)=4.76$	**
A*B	9999.32	3	3333.11	1.84	$F_{0.1}(3,6)=3.29$	
Error	10892.29	6	1815.38		$F_{0.2}(3,6)=2.1$	
Total	575246.8	15				

注: 符号**代表非常显著

由表 2-8 与 2-9 的分析结果可以得出以下结论:

(1) 助剂及复合激发剂掺量对固化土的 7d 及 28d 无侧限抗压强度的影响均是十分显著的,与二者掺量变化的影响作用相比,二者交互作用及误差对固化土强度的影响较小,甚至可以忽略不计;

(2) 各因素在 7d 和 28d 的主次作用一致,主次顺序为: A (助剂掺量) → B (复合激发剂掺量) → A*B (助剂与复合激发剂的交互作用);

(3) 对比表 2-8 与表 2-9 的分析结果可知,助剂掺量对固化土 7d 强度的影响作用强于对 28d 强度的影响作用,这表明,助剂对前期强度的影响作用较强,随龄期增加,激发剂对中后期强度的影响作用增强;

综合表 2-6~表 2-9 可以看出, A2 (2%) 和 B3 (4%) 是助剂及复合激发剂的最佳掺量水平,即对本文试验的固化剂各组分掺量范围内,水泥掺量为 10% 时,硅酸钠及复合激发剂的掺量分别为 2% 和 4% 时,水泥-硅酸钠-复合激发剂固化土的抗压强度为最大。基于此,将水泥、硅酸钠与复合激发剂按 5:1:2 制备得到的混合材料作为本研究水泥基高效固化剂的最终配比,进而开展后续研究。



2.6.2 高效固化剂与硅酸盐水泥的固化作用对比

为全面对比高效固化剂（CSCN）与普通硅酸盐水泥（OPC）用以固化处理软土的作用，试验方案如表 2-10 所示。为更好观察二者固化作用的差异，高效固化剂和水泥掺量一致，均为 8%，10%，12%，14% 及 16%。制备参考试样，水泥掺量为 15%，20% 及 30%。

表 2-10 两种固化剂作用对比的基础配比

Specimens	Stabilizer	Content (%)	Curing time (d)
CSCN stabilized clay	CSCN	8, 10, 12, 14, 16	
OPC stabilized clay	OPC	8, 10, 12, 14, 16	7, 28, 60, 90, 120
Contrast samples	OPC	15, 20, 30	

不同掺量的 CSCN 固化土与 OPC 固化软土各龄期抗压强度的对比分别如图 2-17~图 2-21 所示。可以看出，当二者掺量相同时，高效固化剂固化土不同龄期的抗压强度都远高于水泥固化土的抗压强度。由图 2-17 可知，10% 高效固化剂（仅含 6.25% 水泥）固化土的 7d 强度为 124.36 kPa，比同龄期 10% 水泥固化土的强度高出 3 倍多，几乎与 15% 水泥固化土的强度相当。12% 与 16% 高效固化剂固化土的 7d 强度为 203.06 kPa 和 489.15 kPa，分别比 20% 与 30% 水泥固化土的 7d 强度高出 2.50% 和 26.82%。这说明，10% 水泥混掺 2% 硅酸钠和 4% 复合激发剂对软土的 7d 固化作用优于 30% 水泥，证明了自制固化剂的高效性。

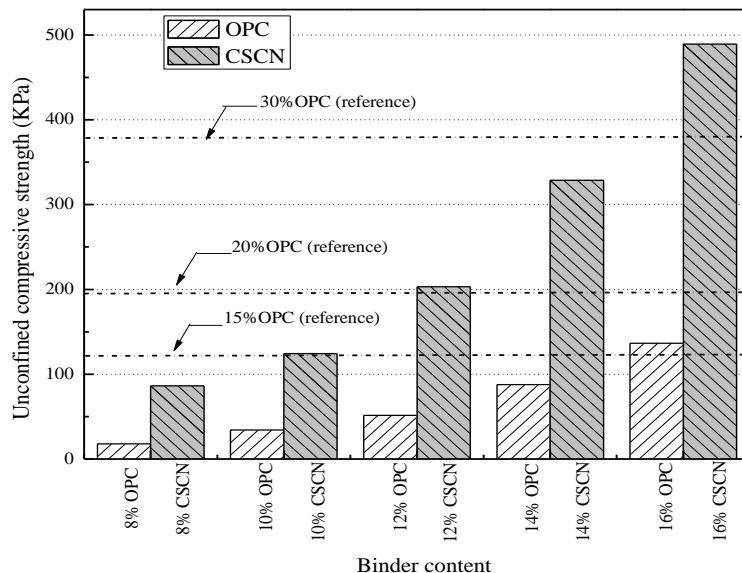


图 2-17 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 7d 强度对比

Fig. 2-17 Strength of OPC and CSCN stabilized specimens at different contents for 7 days of curing

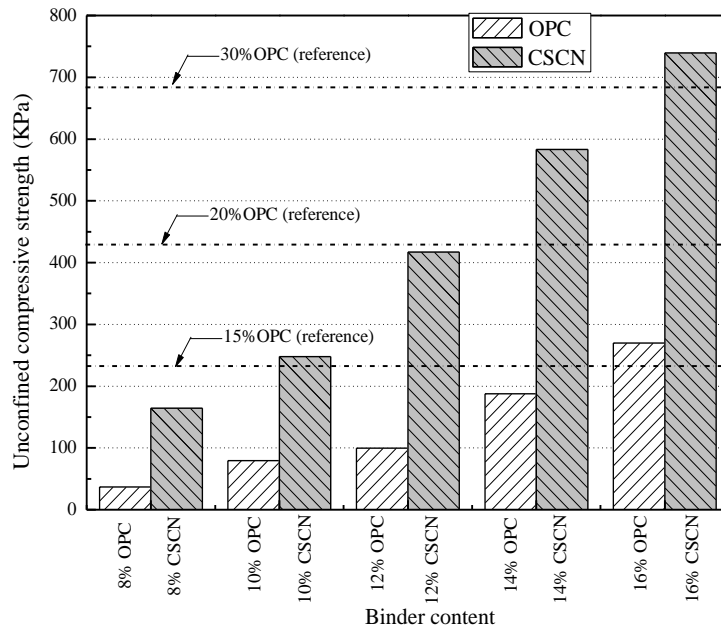


图 2-18 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 28d 强度对比

Fig. 2-18 Strength of OPC and CSCN stabilized specimens at different contents for 28 days of curing

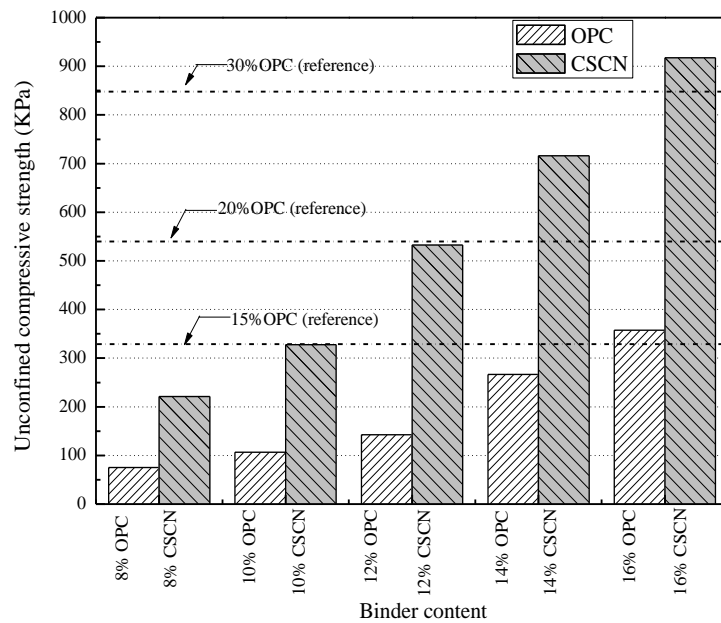


图 2-19 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 60d 强度对比

Fig. 2-19 Strength of OPC and CSCN stabilized specimens at different contents for 60 days of curing

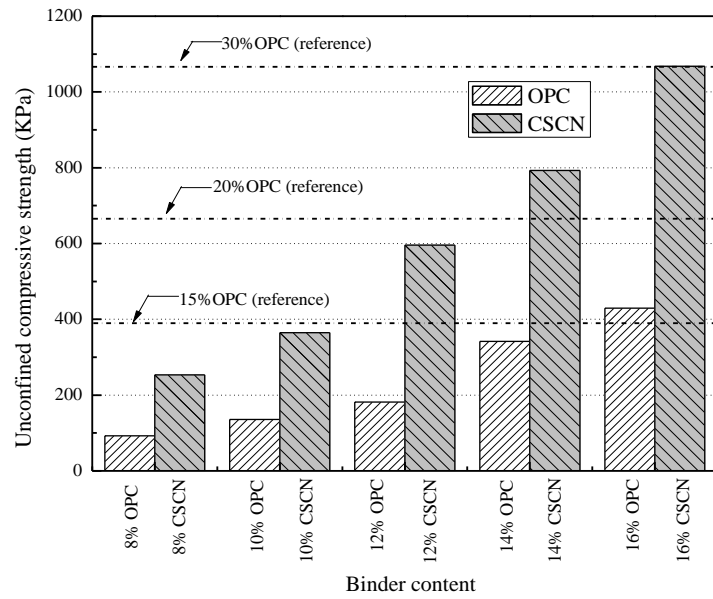


图 2-20 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 90d 强度对比

Fig. 2-20 Strength of OPC and CSCN stabilized specimens at different contents for 90 days of curing

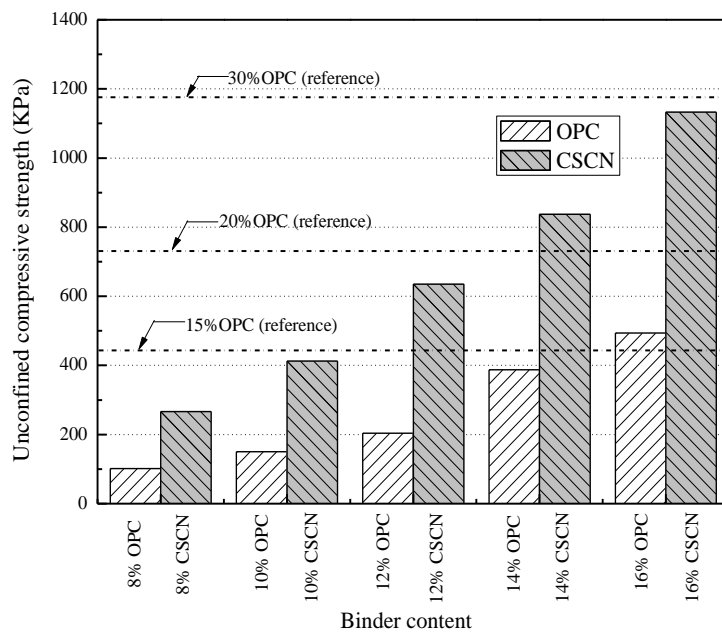


图 2-21 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化土的 120d 强度对比

Fig. 2-21 Strength of OPC and CSCN stabilized specimens at different contents for 120 days of curing

由图 2-18 可以看出, 与 7d 强度的规律类似, 10% 高效固化剂固化土的 28d 强度为 247.68 kPa, 可达 10% 水泥固化土强度的 3 倍多。10% 和 12% 高效固化剂固化土的



28d 强度与 15%和 20%水泥固化土的同龄期强度几乎相当,这与图 2-17 中呈现的规律基本相同。而 16%高效固化剂固化土的 28d 强度虽高于 30%水泥固化土的同龄期强度,却仅高出 8.1%,这说明,在 7~28d 养护龄期内,16%高效固化剂固化土与 30%水泥固化土的强度发展是不同步的。此外,14%高效固化剂固化土的 28d 强度为 583.36kPa,也仅比 20%水泥固化土的同龄期强度高出 34.8%。主要原因可能是水泥掺量较大时,固化土中有更多的胶凝水化产物和氢氧化钙生成,而这部分氢氧化钙会与土体活性物质发生火山灰反应,进一步提高固化土的抗压强度。事实上,氢氧化钙与土体活性矿物的火山灰反应过程是持续的、缓慢的,因此,水泥固化土的 7d 强度来源主要是水泥的胶凝水化产物,而 28d 的强度来源主要是水泥水化与火山灰反应生成胶凝水化产物的共同作用。

由图 2-19 可以看出,10%高效固化剂固化土的 60d 强度为 327.61kPa,几乎是 10%水泥固化土同龄期强度的 3 倍,这与图 2-17 与图 2-18 中所呈现的规律相一致。此外,10%和 12%高效固化剂固化土的 60d 强度与 15%和 20%水泥固化土的同龄期强度几乎相当。14%和 16%高效固化剂固化土的 60d 强度为 716.17 kPa 和 917.56 kPa,分别比 20%和 30%水泥固化土的同龄期强度高出 33.0%和 8.6%左右,与 28d 强度分析对比可知,在 28~60d 龄期内,14%高效固化剂固化土与 20%水泥固化土、16%高效固化剂固化土与 30%水泥固化土的强度发展是相对一致的。

造成这一现象的原因可能是土体活性矿物的反应活性有较大差异,其中的高活性矿物可在 28d 内发生火山灰反应,进而提高固化土强度,而低活性矿物需经一定时间的碱性作用才能溶解并发生活性反应。因此,尽管 20%和 30%水泥固化土的碱性更强,其在 28-60d 龄期内的强度增长仍主要来源于水泥水化反应及高活性矿物的产生的胶凝水化产物。

由图 2-20 和图 2-21 可以看出,10%高效固化剂固化土的 90d 和 120 强度为 364.9kPa 和 412.3 kPa,接近为 10%水泥固化土同龄期强度的 3 倍,这与固化土短中期强度所呈现的规律基本相符。10%和 16%高效固化剂固化土的 90d 强度与 15%和 30%水泥固化土的同龄期强度几乎相当;12%高效固化剂固化土的 90d 强度为 595.6 kPa,仅为 20%水泥固化土强度的 89.9%左右。10%高效固化剂固化土的 120d 强度与 15%水泥固化土的同龄期强度相当;12%和 16%高效固化剂固化土的 120d 强度为 635.2 kPa 和 1132.8 kPa,分别低于 20%和 30%水泥固化土的同龄期强度。14%高效固化剂固化土的 90d 和 120d 强度分别为 792.8 kPa 和 837.3 kPa,较 20%水泥固化土的同龄期强度仅高出 19.7%和 14.5%。

这说明在 60~120d 龄期内,20%和 30%水泥固化土强度的增长速率高于 12%、



14%和 16%高效固化剂固化土。主要原因可能是较高掺量的水泥水化生成较多的氢氧化钙,在较高碱性环境的长期作用下,土体部分低活性矿物的活性在 60-120d 龄期内得以激发,发生火山灰反应生成一定量的胶凝水化产物,大幅提高了固化土强度。

通过对高效固化剂和水泥固化土的对比,可以得到以下结论:

(1) 同等掺量下,高效固化剂固化土的各龄期强度远高于水泥固化土,低掺量时尤为显著。10%高效固化剂固化土的强度可达 10%水泥固化土强度的 3 倍左右。

(2) 在满足实际性能要求的情况下,高效固化剂可大幅降低水泥用量。若达到 15%水泥固化土的性能,仅需约 6.25%水泥、1.25%硅酸钠与 2.5%复合激发剂即可。

(3) 16%高效固化剂固化土的早中期性能优于 30%水泥固化土,后期强度几乎相当,主要原因是大掺量水泥生成更多氢氧化钙,产生较强的后期火山灰效应。

2.7 固化剂作用机理分析

高效固化剂包含水泥、硅酸钠及复合激发剂等组分,考察固化剂对软土的作用机理,不仅可以了解软土在固化处理前后的矿物相组成的变化,还有助于理解固化剂各组分在固化土中的作用。为更好的考察固化剂的作用机理,制备了 6 组不同的配方,如表 2-11 所示。由表可见,各配方的固化材料组成均不同, M1 与 M2 作为基准对比试样, M3~M6 试样用来考察外加剂的掺入对固化土物相组成、矿物结构及 pH 值的影响。

表 2-11 用于固化剂作用机理分析的固化土配方

Table 2-11 The formulas for mineralogical and microstructural characterization

No.	Formula (%)	Characterization	No.	Formula (%)	Characterization
M1	10OPC	XRD/SEM	M2	15OPC	XRD/SEM
M3	10OPC 1SS 1CH	XRD	M4	10OPC 1SS 1CN	XRD
M5	10CSCN	XRD/SEM	M6	15CSCN	XRD/SEM

注: OPC 为普通硅酸盐水泥, SS 为液体硅酸钠, CH 为氢氧化钙, CN 为氯化钙与氢氧化钠按 1:1 制备的复合激发剂, CSCN 为最终的高效固化剂

对比了未处理软土与 M2 和 M3 号固化土试样养护 60d 的 XRD 图谱,如图 2-22 所示。由图谱 (c) 可以看出,在未处理软土中,在 19-35° 2θ 的范围内可清楚地探测到二氧化硅、高岭石及伊利石等晶体矿物的衍射峰。对如图 2-22 的图谱 (a) 和 (b) 所示的固化土试样,在 22~32° 2θ 的范围内可以看出相对较宽的非晶体矿物(不定形矿物)的衍射峰,这表明在固化土中有不定形的凝胶矿物生成。

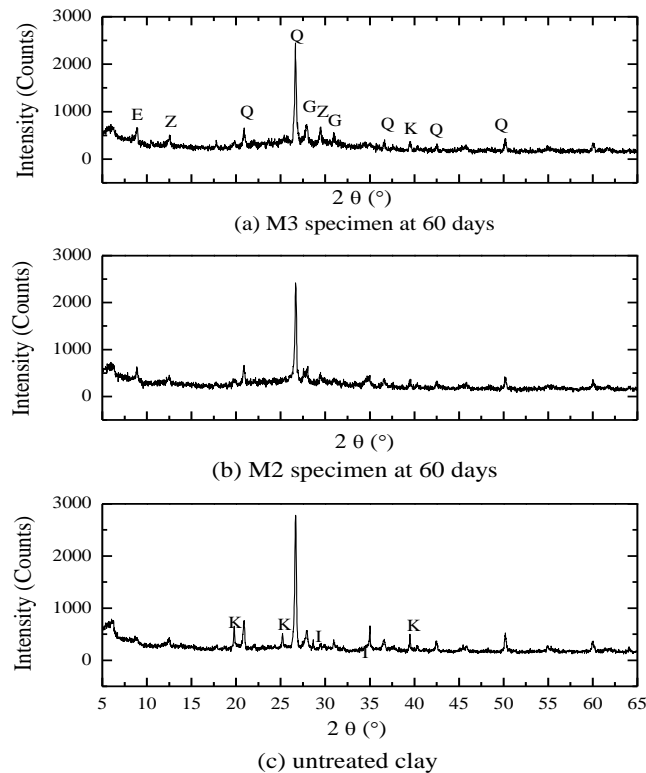


图 2-22 不同试样的 XRD 图谱 (Q: 二氧化硅晶体, K: 高岭石, I: 伊利石, G: 斜方钙沸石, Z: 沸石, E: 钙矾石)

Fig. 2-22 XRD patterns of several specimens (Q: SiO₂ quartz, K: kaolinite, I: illite, G: gismondine, Z: zeolites, E: ettringite)

对比未处理软土的图谱 (c), 可以发现, 固化土试样的高岭石及伊利石矿物的衍射峰强度显著降低, 沸石类及钙矾石矿物的衍射峰强度相应增加。不仅如此, 固化土试样中的二氧化硅晶体衍射峰也有一定程度的降低。上述现象表明固化剂的掺入使原土中的部分活性矿物发生化学反应 (火山灰反应) 被消耗, 并同水泥水化作用共同生成一定量的水化胶凝产物, 从而提高了固化土的抗压强度。

为进一步分析固化土矿物相组成的变化, 开展了对 M1、M4、M5 及 M6 固化土 28d 试样的 XRD 测试, 测试结果如图 2-23 所示。将图谱 (b) 和 (c) 与图谱 (d) 对比, 掺入硅酸钠或激发剂的固化土试样的晶体二氧化硅及高岭石衍射峰强度降低。将图谱 (a) 与其他图谱对比, 可以发现 15% CSCN 固化土的晶体二氧化硅衍射峰强度由明显的降低, 而多个沸石的衍射峰强度亦有显著提高。不仅如此, 在 22~32° 2θ 的范围内可以观测到较宽、较明显的非晶体矿物的衍射峰, 与 15% OPC 固化土 60d 试样的 XRD 结果类似。因此, 本文认为固化土强度发展可归因于固化土中胶凝水化产物的生成及胶凝水化产物同土颗粒的胶结作用。

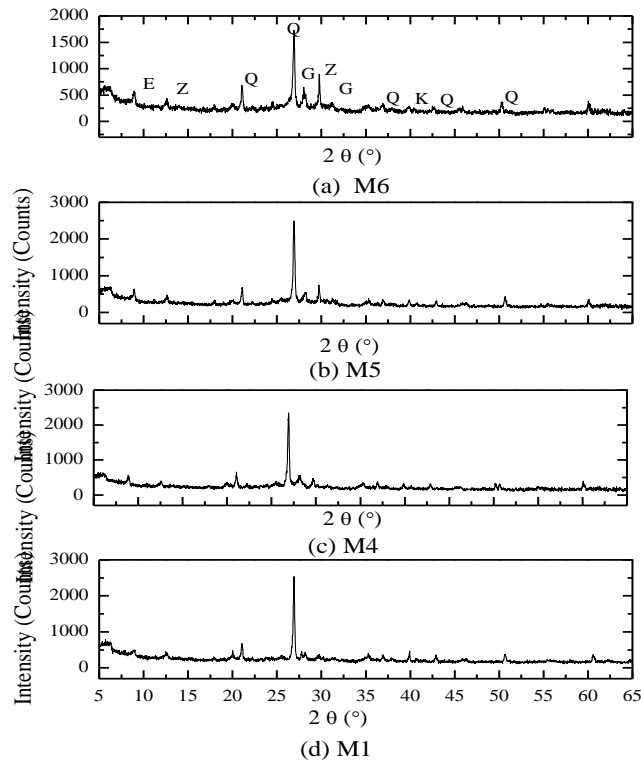
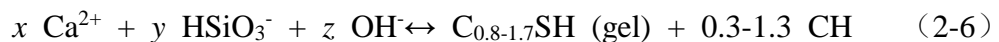
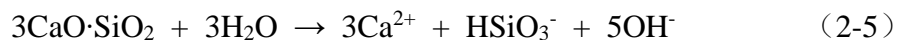


图 2-23 养护龄期为 28d 的固化土试样的 XRD 图谱
Fig. 2-23 XRD patterns of stabilized specimens at 28 days of curing

已有研究表明^[31,43], 土体无机固化剂种类及掺量决定了固化土的强度发展, 究其机理为不同固化剂种类及掺量决定了水化产物的数量及火山灰效应的强度。当无机固化剂为硅酸盐水泥基材料时, 水泥水化产物数量为固化土强度的决定因素。

硅酸盐水泥基材料与水混合后, 熟料中的硅酸三钙 (C_3S) 可被水分快速溶解, 并发生化学反应:



对纯水泥固化土 (M1 和 M2), 土颗粒扩散双电层吸附的 H^+ 与 K^+ 等低价离子会同式 (2-5) 生成的 Ca^{2+} 与 OH^- 发生离子交换及中和反应, 导致水化硅酸钙及氢氧化钙的生成量降低。对水泥混掺硅酸钠、氢氧化钠或氢氧化钙固化土 (M3 和 M4), 外加剂的引入增加了固化土孔隙流体中 OH^- 的数量, 可以满足原土颗粒吸附的 H^+ 对 OH^- 消耗, 促使化学反应 (2-6) 的向右进行, 从而生成更多的水化硅酸钙及氢氧化钙, 提高固化土强度。

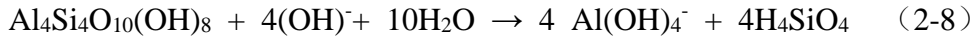
对土-水-水泥-硅酸钠混合物体系, 高模数的硅酸钠被混合物中的大量水分稀释并发生电离。在孔隙流体中有 Ca^{2+} 存在的情况下, 硅酸钠可与其发生化学聚合



反应生成难溶于水的凝胶状的水化硅酸钙，具有胶结土颗粒及填充土体孔隙的作用，反应式^[205]为：



如前所述，火山灰效应指的是土体活性矿物与碱性物质（氢氧化钙等）发生作用并生成胶凝水化产物的过程。据已有研究结果，当固化土孔隙流体的 pH 值大于 10.5 时，才会产生较明显的火山灰效应。高岭石矿物的火山灰效应可由化学反应式^[213]表示：



反应式 (2-8) 生成的 H₄SiO₄ 发生电离反应：



为观察表 2-11 中各固化土试样早期火山灰效应的强弱，测试了各试样固化土在 14d 内的 pH 值变化，如图 2-24 所示。由图 2-24 可知，各固化土试样的 14d 内的 pH 强度均大于 10.5，表明原土中的高岭石或伊利石等矿物可发生式 (2-8) 的溶解反应，这也解释了一定龄期的固化土试样中高岭石或伊利石矿物相的衍射峰强度几乎消失这一现象的原因（见图 2-22 与图 2-23）。不仅如此，土中的活性二氧化硅在碱性作用下亦会发生溶解反应，生成 HSiO₃⁻，导致固化土中的二氧化硅衍射峰强度大幅降低，化学反应式为：

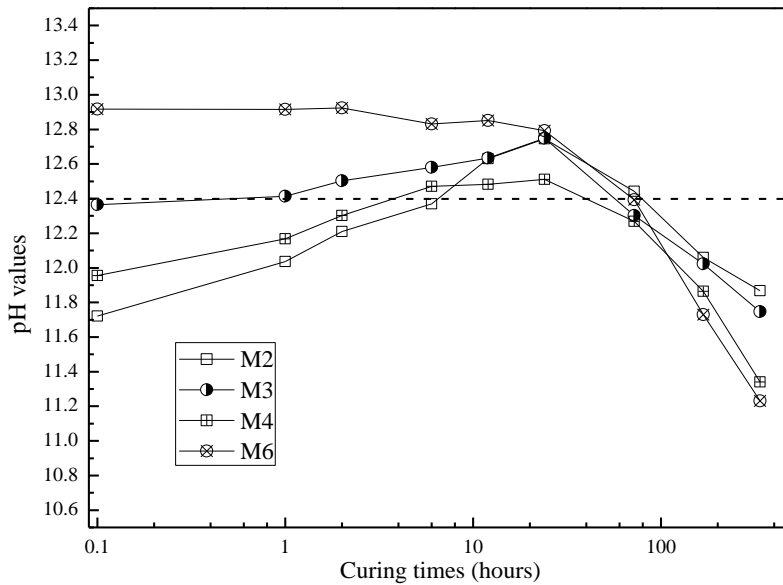
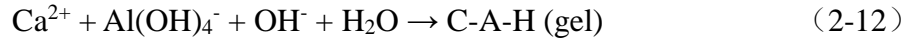
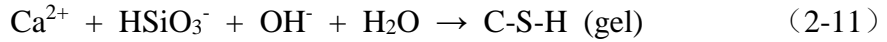


图 2-24 各固化土试样 pH 值的变化

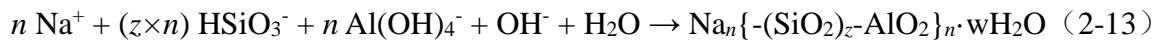
Fig. 2-24 The pH value development of stabilized specimens



当氢氧化钙溶液的 pH 值低于 12.4 时, 氢氧化钙在溶液中以 Ca^{2+} 与 OH^- 或液态 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的形式存在, 不会有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀析出。因此, 对表 2-11 各固化土试样, 水泥水化生成的氢氧化钙石 (CH) 基本以 Ca^{2+} 与 OH^- 的形式存在于固化土孔隙流体中。而当孔隙流体中含有一定量的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 与 HSiO_3^- 的情况下, Ca^{2+} 、 OH^- 同 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 、 HSiO_3^- 发生反应生成更多的水化硅酸钙或水化铝酸钙凝胶:



此外, 由于硅酸钠、氢氧化钠及活性二氧化硅、氧化铝同时存在, 固化土中可能含有一些对固化土强度具有增强作用的地质聚合反应产物。化学反应式为:



上式中, n 为地质聚合反应的聚合度, z 的值为 1、2 或 3。

基于以上分析, 本文各外加剂在固化土中的作用机理即可得到较好的解释。当氢氧化钠或氢氧化钙单独同水泥-硅酸钠使用时, 水泥水化反应及火山灰效应均有所增强, 有更多的胶凝水化产物生成, 从而提高了固化土强度 (图 2-10 与图 2-11)。当氯化钙单独使用时, 固化土可发生如 (2-7) 的化学反应, 而土中活性矿物未得到有效激发, 因此, 单掺氯化钙的固化土强度未发生明显提高 (图 2-11)。

测试了 M1、M4、M5 及 M6 固化土试样的 28d 微观结果变化, 如图 2-25 所示。对比图 2-25 (a) 与 (b) 可以看出, 15% 水泥固化土中有更多针状的 C-S-H 凝胶矿物。理论上讲, 高效固化剂固化土比水泥固化土具有更高强度, 应能观测到更多的针状 C-S-H 凝胶矿物。而事实上, 在高效固化剂固化土中 [图 2-25 (c) 和 (d)], 有较多蜂窝状的 C-S-H 凝胶矿物生成。尽管 15% 高效固化剂固化土试样的微观结构仍较粗糙, 但胶凝产物对土颗粒的胶结作用强于其他三个固化土试样, 固化土体孔隙的填充也更紧密。

根据水泥化学和胶凝材料学的相关理论可知, 水泥水化产物的 C-S-H 凝胶有多种形态, 大致可分为四种: I 型纤维状 (刺状、针状、柱状) 凝胶, II 型蜂窝网络状凝胶, III 型不规则大粒子状凝胶, IV 型皱皮状集合体凝胶。在水泥混凝土中, 中后期水化产物中多见 II、III 型 C-S-H 凝胶, I 型 C-S-H 凝胶多出现在水泥水化早期。不同形态 C-S-H 凝胶的钙/硅比有较大不同, 且中后期形态更加稳定。但对水泥固化土, 在不存在氢氧化钙晶核以及固化土孔隙流体 OH^- 浓度较低的情况下, 固化土早期形成的 C-S-H 凝胶便不再具备形态转变的环境。由此分析可知, 与水泥固化土中的针状 C-S-H 凝胶相比, 高效固化剂固化土中的蜂窝状 C-S-H 凝胶具有不同的化学组成和更好的胶结性能。

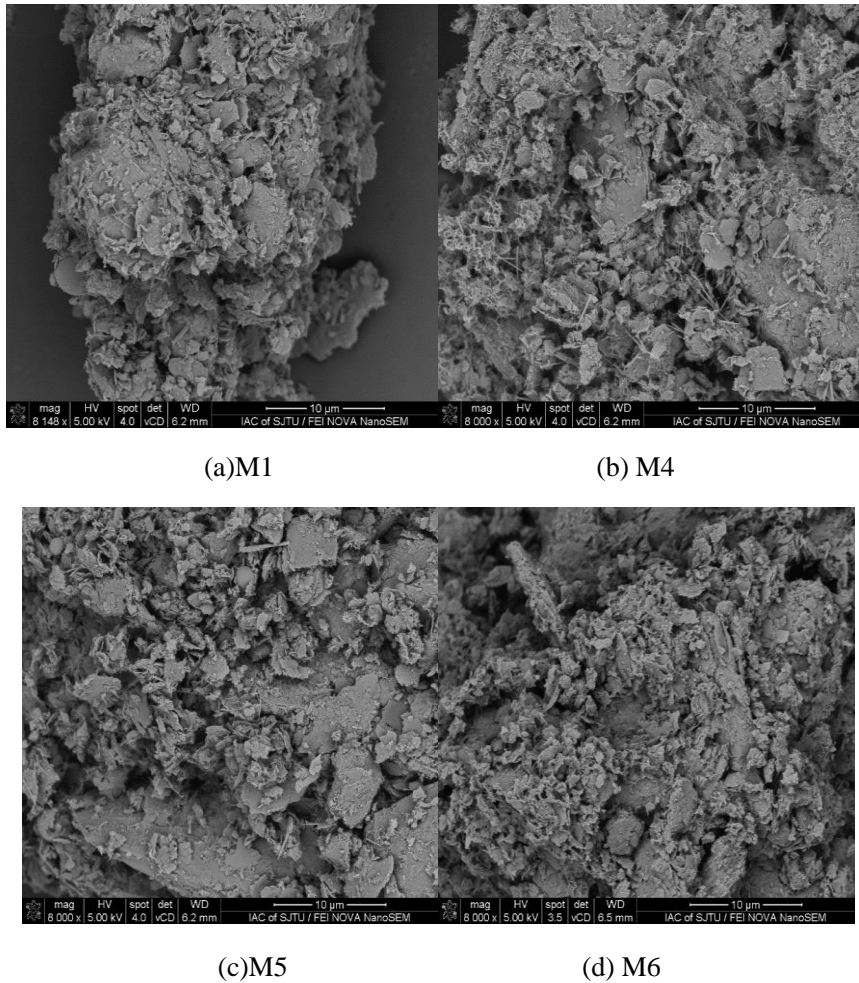


图 2-25 各固化土试样 28d 的微观结构

Fig. 2-25 SEM photos of stabilized specimens at 28 days of curing

2.8 本章小节

为制备水泥基高效固化剂，总结了固化剂组成材料的优选理论及对策，并优选多种活性材料作为固化剂的外加剂组分，测试了单掺外加剂对水泥固化土强度的影响；对外加剂的助剂和激发剂组分进行区分，分别考察了单一激发剂、复合激发剂对水泥与助剂固化土性能的影响；将助剂、复合激发剂分别作为一个因素，考虑二者之间的交互作用开展正交试验，对正交试验结果进行详细分析，并对比研究了同等掺量高效固化剂与水泥固化土不同龄期的抗压强度；最后，深入研究了固化剂的作用机理，得到以下结论：

(1) 与水泥混配的外加剂需满足三个条件之一：可提高土 pH 值，可提高固化土的早期强度或发生化学沉淀反应，因此，初步优选硅酸钠、氢氧化钠、氢氧化钙、



氯化钙、偏铝酸钠为外加剂。一定量的硅酸钠、氢氧化钠、氢氧化钙均能显著提高水泥固化土 28d 抗压强度，在 10%水泥掺量下，三者均存在最佳掺量；氯化钙对水泥固化土强度的影响较小，而偏铝酸钠显著降低了固化土强度。硅酸钠可掺量范围大、作用效果更加显著且对水泥水化及土火山灰作用均有增强作用，基于此，将硅酸钠作为外加剂的助剂组分。

(2) 氢氧化钙与氢氧化钠复合时并未发生协同作用，即复合激发剂中含某一组分含量较多时，此组分占主导作用，当氢氧化钠占比大时，固化土早期强度较低，当氢氧化钙占比大时，对固化土拌合物的和易性仍有较大影响；氯化钙与氢氧化钙复合时亦未产生协同效应，主要表现为氯化钙占比较大时，复合激发剂对固化土强度改善作用有限；氯化钙与氢氧化钠复合时，二者具有协同作用，表现为既能大幅提高固化土强度，还可消除氢氧化钠对固化土早期强度的影响。根据本论文试验研究结果，氯化钙与氢氧化钠用量为 1:1 时，复合激发剂具有最优作用。

(3) 正交试验结果表明，硅酸钠及复合激发剂掺量对固化土 7d 及 28d 无侧限抗压强度的影响均十分显著，且硅酸钠显著性高于复合激发剂；硅酸钠掺量对固化土 7d 强度的影响作用强于对 28d 强度的作用，这表明，助剂对早期强度的影响作用较强，随龄期增加，激发剂对中后期强度的影响作用增强；水泥掺量为 10% 时，硅酸钠及复合激发剂的掺量分别为 2% 和 4% 时，水泥-硅酸钠-复合激发剂固化土的抗压强度为最大。为便于后续研究，将水泥、硅酸钠与复合激发剂按 5:1:2 制备得到的混合材料作为本研究水泥基高效固化剂的最终配比。

(4) 10% 和 12% 高效固化剂固化土 7d 强度分别与 15% 和 20% 水泥固化土 7d 强度相当，而 16% 高效固化剂固化土 7d 强度远高于 30% 水泥固化土的同龄期强度；随着养护龄期的增长，10% 和 12% 高效固化剂固化土的 60d 强度仍分别与 15% 和 20% 水泥固化土的 60d 强度相当，但 16% 高效固化剂固化土的 60d 强度仅略高于 30% 水泥固化土的同龄期强度。

(5) 通过测试固化土一定龄期的物相变化、微观结构及早期 pH 值的发展变化，考察了固化剂的作用机理，认为固化土的强度发展机理主要是水泥的水化作用及土活性矿物的火山灰作用。将水泥水化产物大致分为水化硅酸钙凝胶等具有胶结作用的矿物与氢氧化钙或 OH⁻ 具有活性激发作用的矿物，并借助 XRD 获得的物相变化给出了固化土中可能发生的化学反应方程式。最终由 SEM 测试观察到固化土中有一定量针状或蜂窝状的水化硅酸钙，土颗粒在水化硅酸钙的胶结作用下形成具有一定强度的骨架结构。



第3章 外加剂在固化土中作用的量化分析

3.1 引言

目前, Horpibulsuk 等^[93,137]定义了粉煤灰的分散效应 (dispersing effect), 并将粉煤灰在水泥固化土中的作用看作外掺一定量水泥, 进而以无侧限抗压强度为指标考察粉煤灰在水泥-粉煤灰固化剂体系中的权重。一定掺量外加剂可显著改善水泥对软土的固化处理效果, 但对外加剂在水泥固化土中作用的定量研究 (即作用权重) 还未见报道。对于水泥混凝土材料, Papadakis 与 Tsimas^[207,208]认为外加剂及粉煤灰等活性辅助胶凝掺料可看作外掺一定量水泥, 并提出辅助胶凝材料的活性系数对其作用进行定量研究。

对水泥-粉煤灰固化剂体系, Horpibulsuk 等^[93,137]提出粉煤灰的分散系数 (dispersing factor), 从而将粉煤灰分散效应定量化, 获得粉煤灰的当量水泥掺量, 最终确定粉煤灰在固化剂体系中的权重, 其基本分析方法可表达为:

$$C_e = k \cdot C_F \quad (3-1)$$

上式中, C_e 为粉煤灰的当量水泥掺量, k 为粉煤灰的分散系数, C_F 为粉煤灰的实际掺量。

为得到分散系数的数值, Horpibulsuk 等^[90-93,137]根据已有研究提出水土灰比理论: 认为水泥固化土的无侧限抗压强度是由固化土总含水率与水泥灰分掺量的比值决定的, 且二者之间存在幂函数关系。

根据上一章的试验结果与分析, 首先, 提出外加剂的火山灰系数, 并借助水土灰比模型分别计算助剂和激发剂的火山灰系数, 进而定量分析外加剂在固化土中的作用, 为验证量化分析结果的准确性, 对比分析了基于量化分析结果的强度预测值和室内实测值的偏差。其次, 采用双曲线模型探讨固化土强度随龄期的变化关系, 得出各参数与水泥及外加剂掺量之间的关系式, 并对双曲线模型的强度-龄期关系式进行准确性验证。最后, 根据固化土不同龄期基本物性指标的测试结果, 探讨不同物性指标随龄期及当量水泥总量的变化关系, 以当量水泥总量与孔隙率和孔隙比的比值为基本参数, 建立固化土强度计算模型, 并对强度计算模型的准确性进行了验证。本章研究技术路线如图 3-1 所示。

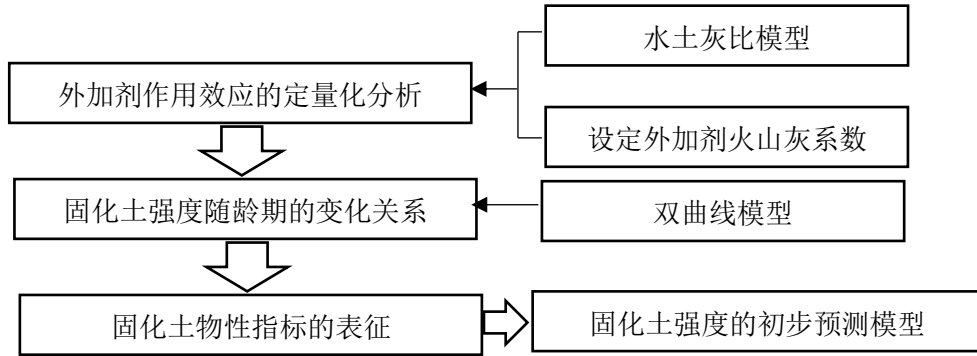


图 3-1 第 3 章研究技术路线图
 Fig. 3-1 Schematic of research procedure for Chapter 3

3.2 外加剂作用的定量化分析

3.2.1 理论基础

本节研究内容基于以下理论假设：

(1) 外加剂的火山灰效应

参照 ASTM C 595^[209]，对建筑用火山灰材料做出以下定义：一种硅基或铝基材料，本身不具有胶凝特性，其颗粒或粉末状矿物在碱性溶液环境下，可与氢氧化钙反应生成胶凝水化产物，进而具有一定的胶凝特性。对本文研究的高效固化剂，其包括水泥、助剂（硅酸钠）及复合激发剂三组分。根据火山灰材料定义，外加剂中的硅酸钠可以看作是一种可以发生火山灰反应的火山灰材料。复合激发剂本身虽不是火山灰材料，但其溶液与土水混合物拌合后，Ca²⁺和 OH⁻便会向土体微细孔隙渗透，并发生化学反应（2-4）生成一定量氢氧化钙，化学沉淀法生成的氢氧化钙具有更强的火山灰效应，因此，将复合激发剂作为类火山灰材料开展下一步研究。

为定量研究外加剂在固化土中的作用，参考已有对水泥-粉煤灰的研究结果^[81,85-91]，本论文将高效固化剂中的外加剂看作外掺入一定量的水泥，并根据上述分析定义助剂和复合激发剂的火山灰系数，因此，外加剂当量水泥量可由外加剂实际掺量与火山灰系数表示：

$$C_e = k_1 \cdot C_1 + k_2 \cdot C_2 \tag{3-2}$$

上式中，C_e为外加剂的当量水泥量，C₁、C₂分别为助剂（硅酸钠）与复合激发剂的实际用量，k₁、k₂分别为助剂与复合激发剂的火山灰系数。

固化土的当量水泥总量（C）为水泥实际掺量（C_i）与外加剂的当量水泥量（C_e）



的和, 如式(3-3)所示。由于外加剂的火山灰效应随龄期变化, 火山灰系数亦随之变化, 因此, 当量水泥量是随龄期变化的。

$$C = C_e + C_i \quad (3-3)$$

(2) 水土灰比模型

影响固化土抗压强度的因素有多方面, 如固化土水固比(含水率)、固化剂掺量、养护龄期及土体物化性质等。研究者对上述影响因素进行了大量试验研究, 并借鉴水泥科学领域的相关研究成果, 最终的研究结果认为一定养护龄期的固化土强度是由固化土总含水率与水泥灰分掺量的比值决定的, 且二者之间存在负幂函数关系, 可表达为:

$$q_u = \frac{A}{(w_c/C)^B} \quad (3-4)$$

上式中, q_u (kPa) 为水泥-粉煤灰固化土在某一龄期的无侧限抗压强度值; w_c (%) 为固化土总含水率, 即固化土总含水量与干土质量的比值; A 、 B 均为常数; C (%) 为当量水泥总量, 不同龄期的 C 值有所变化。即, 水土灰比模型中未考虑养护龄期对固化土强度的影响。

3.2.2 试验结果

基于外加剂火山灰效应的理论假设, 计算火山灰系数的必要条件是获得高效固化剂的当量水泥总量。因此, 需测试不同掺量水泥固化土在不同养护龄期的无侧限抗压强度, 基于水土灰比模型, 通过拟合得到纯水泥固化土的抗压强度随 w_c/C 的变化关系式。

表 3-1 给出了不同掺量水泥固化土在各养护龄期的无侧限抗压强度。可以看出, 随着水泥掺量的增加, 固化土各龄期的抗压强度显著增加; 因水泥以浆体形式掺入土体, 故而随水泥掺量增加, 固化土拌合物的总含水量亦有所增加, 具体表现为 w_c 随水泥掺量的增加而增加; 同时, w_c/C 随水泥掺量的增加而降低, 水泥掺量为 10% 时, w_c/C 的值为 7.5, 而当水泥掺量为 50% 时, w_c/C 的值为 1.9, 可见, 随 w_c/C 的降低, 固化土抗压强度大幅增大。

表 3-1 不同掺量水泥固化土的各龄期强度

Table 3-1 The compressive strength of cement stabilized clay at different curing ages

OPC (%)	w_c (%)	w_c/C	Compressive strength (kPa)				
			7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
10	75.0	7.50	34.4	79.7	106.8	123.5	136.7
12	76.0	6.33	51.4	99.8	142.7	165.2	179.8
15	77.5	5.17	120.0	232.7	335.9	391.3	445.6



续表 3-1

OPC (%)	w_c (%)	w_c/C	Compressive strength (kPa)				
			7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
20	80.0	4.00	198.1	432.9	538.6	662.5	730.1
25	82.5	3.30	286.6	565.3	736.8	895.4	993.2
30	85.0	2.83	385.7	683.9	845.2	1069.2	1178.7
40	90.0	2.25	706.6	1147.4	1577.0	1876.8	2095.3
50	95.0	1.90	1473.9	2376.3	2585.6	3064.1	3386.9
60	100.0	1.67	1556.8	3277.7	4253.7	4713.5	5192.4
70	105.0	1.50	2343.7	3687.3	5043.9	5664.5	6171.5
80	110.0	1.38	2663.4	4806.7	6242.2	6877.3	7446.2

图 3-2 给出了不同掺量水泥固化土试样在 28d 的应力应变曲线。可以看出，水泥固化土试样的破坏应变大致随水泥掺量的增加而降低，且随着水泥掺量的增加，水泥固化土试样的残余强度（应变为 5% 的轴向应力值）与抗压强度的比值呈现减小趋势，水泥掺量低于 50% 时，固化土残余强度基本为抗压强度的 60%~70% 左右，而当水泥掺量为 70% 时，残余强度仅为抗压强度的 50% 左右，这表明随水泥掺量的增加，固化土试样的脆性增加、塑性降低。

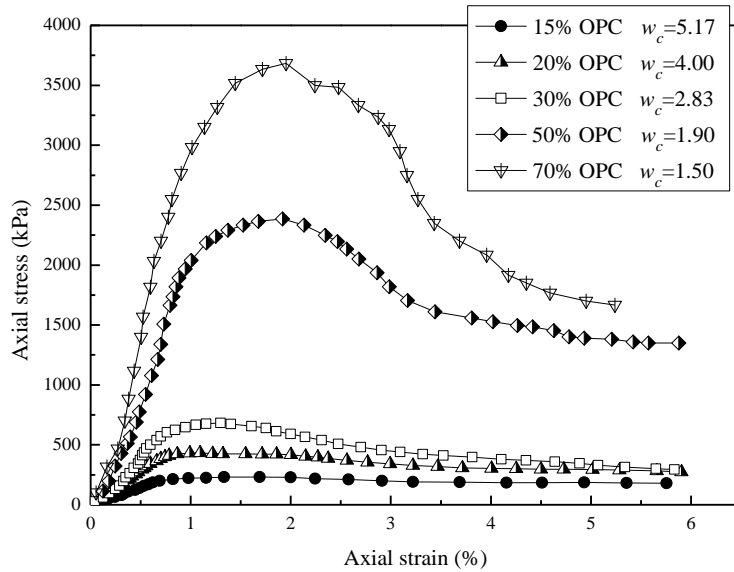


图 3-2 水泥固化土试样的 28d 应力应变曲线

Fig. 3-2 Stress-strain relationship of OPC stabilized specimens at 28 days of curing

上一章的正交试验结果用来定量分析外加剂在水泥固化土中的作用，测试了表 2-5 试验设计的固化土试样的长期强度，如表 3-2 所示。可以看出，固化土强度亦随养护龄期增长，且 120d 强度近似为 7d 强度的 3 倍左右；助剂（硅酸钠）对固化土



长期强度的影响强于复合激发剂对长期强度的影响，这说明硅酸钠的火山灰系数可能大于复合激发剂；值得注意的是，当助剂用量低于 2% 且激发剂用量低于 4% 时（水泥掺量为 10%），水泥与外加剂固化土的各龄期强度随外加剂掺量的增加出现大幅增加，但当外加剂用量超过临界值后，固化土强度出现显著降低。因此，对外加剂火山灰系数及当量水泥掺量的分析采用试样 OA 1-3 与 OA 5-7 试样的结果。

表 3-2 正交试验各试样的抗压强度

Table 3-2 The compressive strength of stabilized specimens for orthogonal test design

No.	OPC (%)	Sodium silicate (%)	Promoter (%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
					7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
OA 1	10	1	1	76.0	192.6	348.7	497.6	562.6	620.5
OA 2	10	1	2	76.5	213.8	436.6	548.0	647.9	708.8
OA 3	10	1	4	77.5	312.7	566.3	756.5	881.3	978.6
OA 4	10	1	6	78.5	299.1	627.9	697.8	825.6	933.1
OA 5	10	2	1	76.5	277.3	426.9	529.9	584.8	622.3
OA 6	10	2	2	77.0	312.3	546.7	627.8	732.3	805.5
OA 7	10	2	4	78.0	489.2	739.4	917.6	1067.5	1132.8
OA 8	10	2	6	79.0	347.5	717.3	817.7	934.3	1026.7
OA 9	10	3	1	77.0	217.3	301.7	386.5	491.5	576.8
OA 10	10	3	2	77.5	359.3	456.4	535.0	643.7	735.6
OA 11	10	3	4	78.5	325.7	441.5	568.6	683.9	805.3
OA 12	10	3	6	79.5	345.1	474.5	625.8	745.6	862.3
OA 13	10	4	1	77.5	5.3	40.7	--	--	--
OA 14	10	4	2	78.0	25.6	105.3	--	--	--
OA 15	10	4	4	79.0	162.7	301.4	--	--	--
OA 16	10	4	6	80.0	138.8	266.9	--	--	--

为对外加剂作用的量化分析结果进行准确性验证，测试了不同掺量（6%，8%，10%，12%，14%与16%）高效固化剂 CSCN（水泥：助剂：复合激发剂=5:1:2）固化土的各龄期强度。

3.2.3 量化分析与讨论

对表 3-1 中的试验数据采用水土灰比模型即式（3-4）进行拟合，拟合结果如图 3-3 所示，图中曲线相应的拟合式为：

$$q_{u(7\text{days})} = \frac{5958}{(w_c/c)^{2.5}}, R^2=0.997 \quad (3-5a)$$

$$q_{u(28\text{days})} = \frac{10601}{(w_c/c)^{2.5}}, R^2=0.998 \quad (3-5b)$$



$$q_{u(60days)} = \frac{13732}{(w_c/C)^{2.5}}, R^2=0.996 \tag{3-5c}$$

$$q_{u(60days)} = \frac{15601}{(w_c/C)^{2.5}}, R^2=0.995 \tag{3-5d}$$

$$q_{u(60days)} = \frac{17026}{(w_c/C)^{2.5}}, R^2=0.995 \tag{3-5e}$$

由上式可以看出,随养护龄期的增长,常数 A 的值不断增大,7d 的 A 值为 5958,而 120d 的 A 值可达 17026,因此养护龄期是 A 值的决定因素;常数 B 的值不随龄期变化,这与已有的研究结果基本一致^[95,96]。这表明,参数 A 为式 (3-5) 的主控参数,主要受养护龄期的影响。

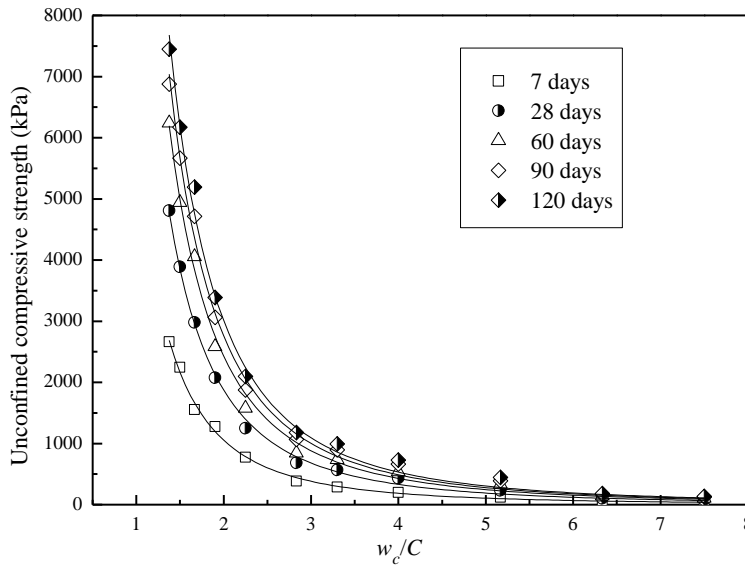


图 3-3 基于水土灰比模型的水泥固化土强度的拟合曲线

Fig. 3-3 Fitted curves of strength development in the OPC stabilized clay using the clay-water/cement ratio hypothesis

为获得水泥与外加剂的当量水泥总量,需将式 (3-4) 变形,由 q_u 反推 C, 得:

$$C = \frac{w_c}{\left(\frac{A}{q_u}\right)^{\frac{1}{B}}} \tag{3-6}$$

通过式 (3-6), 即可由固化土抗压强度计算得到水泥与外加剂的当量水泥总量。将试样 OA1-3 与 OA5-7 试样各养护龄期的抗压强度(如表 3-2 所示)代入式 (3-6) 中, 可得到各试样在各龄期的当量水泥总量, 结果如表 3-3 所示。可以看出, 同一试样不同龄期的当量水泥总量不同, 主要原因是外加剂引起的火山灰效应随龄期发生变化; 从总体趋势变化看, 当量水泥总量随养护龄期减小; 当助剂和复合激发剂掺量均为 1% 时, 当量水泥总量可达 20% 左右, 这表明少量的外加剂可获得与另加 10% 水



泥相当的固化效果；复合激发剂掺量相同，助剂掺量由 1% 增加到 2% 时，7d 当量水泥总量均提高了 3% 以上，而中长期当量水泥总量增加幅度远小于短期；复合激发剂掺量为 1%，助剂掺量由 1% 增加到 2% 时，120d 当量水泥总量由 20.21% 提高到 20.36%，仅增加 0.15%，而当复合激发剂掺量为 4%，助剂掺量由 1% 增加到 2% 时，120d 当量水泥总量由 24.72% 提高到 26.38%，增加了 1.66%，说明了助剂与复合激发剂之间存在协同作用。

表 3-3 试样的各龄期当量水泥总量

Table 3-3 Total cement content of stabilized specimens at different curing ages

No.	OPC (%)	Sodium silicate (%)	Promoter (%)	w_c (%)	Total cement content, C (%)				
					7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
OA 1	10	1	1	76.0	19.26	19.91	20.16	20.12	20.21
OA 2	10	1	2	76.5	20.21	21.90	21.09	21.43	21.45
OA 3	10	1	4	77.5	23.84	24.57	24.31	24.55	24.72
OA 5	10	2	1	76.5	22.43	21.71	20.81	20.57	20.36
OA 6	10	2	2	77.0	23.67	24.07	22.41	22.65	22.72
OA 7	10	2	4	78.0	28.67	27.45	26.43	26.68	26.38

对表 3-3 中的数据根据式 (3-3) 计算得到外加剂的当量水泥掺量，并根据式 (3-2) 采用多元线性拟合得到不同养护龄期的助剂火山灰系数 (k_1) 和复合激发剂火山灰系数 (k_2) 数值，如表 3-4 所示。可以看出，助剂火山灰系数随养护龄期依次减小，而复合激发剂火山灰系数随养护龄期依次增大；助剂 7d 火山灰系数为复合激发剂 7d 火山灰系数的 2 倍多，这说明之前根据试验现象得出助剂对固化土力学性能的早期作用远高于复合激发剂的推测是可信的。

表 3-4 外加剂的当量水泥掺量及火山灰系数

Table 3-4 The equivalent cement content and pozzolanic factors of the admixtures

No.	7days		28days		60days		90 days		120 days	
	C_e	Values	C_e	Values	C_e	Values	C_e	Values	C_e	Values
OA 1	9.26		9.91		10.16		10.12		10.21	
OA 2	10.21		11.90		11.09		11.43		11.45	
OA 3	13.84	$k_1=5.13$	14.57	$k_1=4.89$	24.31	$k_1=4.31$	14.55	$k_1=4.22$	14.72	$k_1=4.14$
OA 5	12.43	$k_2=2.19$	11.71	$k_2=2.35$	10.81	$k_2=2.39$	10.57	$k_2=2.50$	10.36	$k_2=2.53$
OA 6	13.67		14.07		12.41		12.65		12.72	
OA 7	18.67		17.45		16.43		16.68		16.38	

量化火山灰系数的意义在于分析外加剂在水泥与外加剂固化土体系中对强度的权重，即量化外加剂对固化土抗压强度的贡献度。对高效固化剂 CSCN 以及任一水



泥与外加剂体系（助剂用量低于水泥量 1/5，复合激发剂用量低于水泥量 2/5），固化剂的当量水泥总量均可由外加剂各龄期的火山灰系数表示，综合表 3-4 的结果及式 (3-2) 及式 (3-3) 可得：

$$C(7days)=C_i+5.13C_1+2.19C_2, R^2=0.993 \quad (3-7a)$$

$$C(28days)=C_i+4.89C_1+2.35C_2, R^2=0.978 \quad (3-7b)$$

$$C(60days)=C_i+4.31C_1+2.39C_2, R^2=0.969 \quad (3-7c)$$

$$C(90days)=C_i+4.22C_1+2.50C_2, R^2=0.969 \quad (3-7d)$$

$$C(120days)=C_i+4.14C_1+2.53C_2, R^2=0.966 \quad (3-7e)$$

根据式 (3-7) 可知，欲达到 20% 水泥固化土的作用效果，仅需使用约 8.5% 水泥、1.7% 硅酸钠与 3.4% 复合激发剂即可。

将式 (3-7) 代入式 (3-5) 可得基于外加剂火山灰系数的水泥与外加剂固化土各龄期抗压强度的计算公式：

$$q_{u(7days)} = \frac{5958}{\left(\frac{w_c}{C_i+5.13C_1+2.19C_2}\right)^{2.5}} \quad (3-8a)$$

$$q_{u(28days)} = \frac{10601}{\left(\frac{w_c}{C_i+4.89C_1+2.35C_2}\right)^{2.5}} \quad (3-8b)$$

$$q_{u(60days)} = \frac{13732}{\left(\frac{w_c}{C_i+4.31C_1+2.39C_2}\right)^{2.5}} \quad (3-8c)$$

$$q_{u(90days)} = \frac{15601}{\left(\frac{w_c}{C_i+4.22C_1+2.50C_2}\right)^{2.5}} \quad (3-8d)$$

$$q_{u(120days)} = \frac{17026}{\left(\frac{w_c}{C_i+4.14C_1+2.53C_2}\right)^{2.5}} \quad (3-8e)$$

对高效固化剂 CSCN 以及任一水泥与外加剂（助剂用量低于水泥量 1/5，复合激发剂用量低于水泥量 2/5）固化土，一定养护龄期的无侧限抗压强度均可由式 (3-8) 计算得出。

为验证外加剂作用量化分析结果的准确性，测试了不同掺量高效固化剂 CSCN 固化土不同龄期的抗压强度，并同式 (3-8) 的计算强度 (Calculated q_u) 进行了对比，如图 3-4 所示。可以看出，高效固化剂掺量为 6% 时，固化土各龄期强度均比计算强度高出 10% 以上；高效固化剂掺量为 8%、10% 及 12% 的固化土各龄期强度基本都在计算强度偏差的 10% 以内；当高效固化剂掺量为 14% 和 16% 时，固化土 7d 强度在计算强度偏差的 10% 以内，但随养护龄期增长，固化土实测强度比计算强度低了 10%



左右。总体上讲，由强度计算公式得到的计算强度与实际误差在 10%左右，认为计算值是准确的。因此判断基于固化土强度的外加剂作用量化分析结果是可靠的。

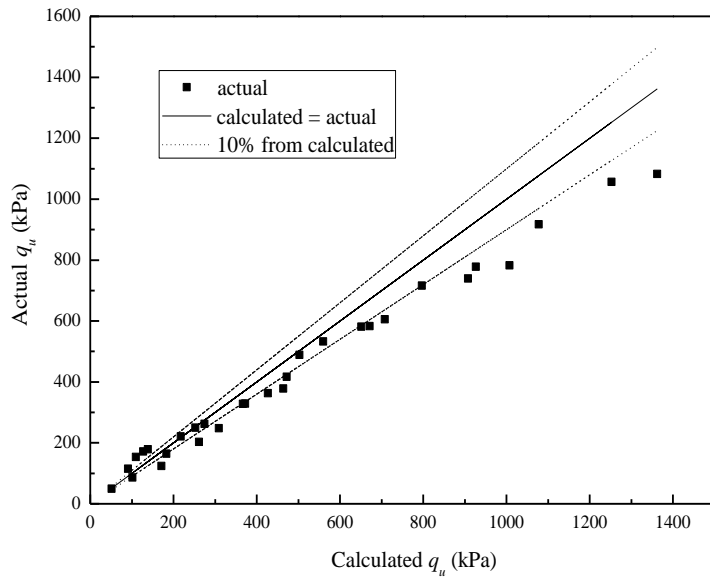


图 3-4 高效固化剂固化土强度计算值与实测值的对比

Fig. 3-4 Comparison of predicted and actual values of the strength of CSCN stabilized clay specimens

3.3 固化土强度随龄期的发展关系

3.3.1 理论基础

众多研究人员对固化土抗压强度随养护龄期的发展进行了大量研究，提出了多个数学模型，其中应用较多的有：

(1) 线性模型

固化土抗压强度随养护龄期呈直线增长，这一模型也是国内外固化土研究人员最早使用的强度计算模型。但在实际应用中，线性模型主要有以下不足：线性模型不能反映固化土强度在中后期增长较慢的特性，如水泥固化土 28d 强度接近 7d 强度的一倍，若要使 28d 强度增长一倍，养护龄期需达 90d 甚至更长；固化土强度的主要来源为水泥的水化作用，事实上，水泥的水化作用并不是无休止的，即线性模型模型不符合固化土强度的形成机理。

(2) 对数模型

Paya 等^[78]研究了水泥固化粉煤灰材料的抗压强度随养护龄期的发展规律，提出抗压强度随养护龄期的对数呈线性增长，二者关系式为：

$$f_u = a + b \cdot \lg t \tag{3-9}$$



上式中, f_u (MPa) 为水泥固化粉煤灰的抗压强度, t (day) 为试样的养护龄期, a 、 b 为常数。

随后, 一些岩土工作者便将此对数模型用于考察固化土强度随龄期的发展。但 Kaniraj 与 Havanagi^[55]指出对数模型亦有些许不足, 总结如下: 研究中发现 a 为负值时, 对数模型有很高的相关系数, 但当养护龄期为 1d 时, 固化土抗压强度值等于 a , 亦为负值, 明显不符合实际情况; 固化土的初始强度 (养护龄期为 0) 无法用对数模型表达, 因 0 的对数无意义; 与线性模型类似, 对数模型预测的固化土强度仍随养护龄期持续增长, 即当养护龄期为无穷大时, 固化土抗压强度亦为无穷大, 这一现象也是与实际不符。

(3) 双曲线模型

固化土强度随龄期发展的双曲线模型由 Kaniraj 与 Havanagi^[55]首次提出:

$$q_u = q_0 + \frac{t}{mt+c} \quad (3-10)$$

上式中, q_u (kPa) 为固化土的抗压强度, q_0 (kPa) 为固化土的初始抗压强度, m 、 c 为常数。对于本论文的固化土试样, 因总含水率 (w_c) 均在 70% 以上, 固化土初始状态均为流态或近似流态的拌合物, 因此, $t=0$ 时的 q_0 为 0。

与线性模型及对数模型相比, 双曲线模型具有如下突出优点: 可真实反映固化土的初始强度, 并将初始强度的测试值应用于公式拟合过程, 有利于提高拟合公式的精度; 双曲线模型可以准确表达出固化土强度在中后期增长较慢的特性; 当养护龄期无穷大时, 固化土的最终抗压强度值为 $1/m$, 符合实际的固化土强度预期。

3.3.2 分析与讨论

Kaniraj 与 Havanagi^[55]的研究中, 提出了 m 和 c 与水泥和粉煤灰掺量的函数关系, 认为两参数与水泥和粉煤灰掺量的关系呈多元线性或指数关系。采用不同掺量高效固化剂固化土的试验结果计算双曲线模型参数。根据上述关于双曲线模型两参数的假设, 以 m 为例, 其与水泥和外加剂掺量的关系可表示为:

$$m_l = M_{l0} + M_{l1} \cdot C_i + M_{l2} \cdot C_1 + M_{l3} \cdot C_2 \quad (3-11)$$

$$m_e = M_{e0} \cdot M_{e1}^{C_i} \cdot M_{e2}^{C_1} \cdot M_{e3}^{C_2} \quad (3-12)$$

上式中, m_l 为基于线性关系的参数, m_e 为基于幂函数关系的参数; M_{l0} 、 M_{l1} 、 M_{l2} 及 M_{l3} 分别为拟合系数; C_i 、 C_1 与 C_2 分别为水泥、助剂及复合激发剂掺量。

图 3-5 给出了基于双曲线模型的不同掺量高效固化剂固化土抗压强度随龄期发展的拟合曲线, 得到的拟合公式的两参数及相关系数的数值如表 3-5 所示。可以看



出，采用双曲线模型拟合高效固化剂固化土强度随龄期的发展规律具有很高的准确性，其相关系数亦均大于 0.9。

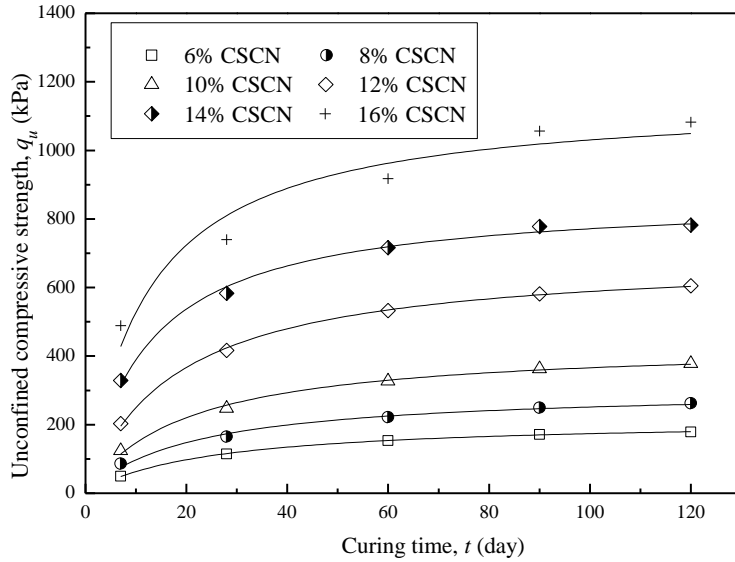


图 3-5 高效固化剂固化土强度随龄期的变化关系

Fig. 3-5 The relationship between compressive strength of CSCN stabilized soil and curing time on the basis of hyperbolic models

表 3-5 高效固化剂固化土双曲线模型的参数及相关系数值

Table 3-5 The values of coefficients of correlation and parameters for the fitted hyperbolic models

CSCN (%)	OPC (%)	Sodium silicate(%)	Promoter(%)	m	c	R^2
6	3.75	0.75	1.5	0.00463	0.1123	0.999
8	5	1	2	0.00328	0.0698	0.986
10	6.25	1.25	2.5	0.00228	0.0451	0.994
12	7.5	1.5	3	0.00144	0.0256	0.999
14	8.75	1.75	3.5	0.00116	0.0141	0.992
16	10	2	4	0.00087	0.0005	0.927

参考式 (3-11)，对表 3-5 中的数据进行多元线性拟合，得到 m 和 c 随水泥与外加剂掺量的关系：

$$m_i = 0.00636 + 0.04647 \cdot C_i - 0.16766 \cdot C_1 - 0.03383 \cdot C_2, R^2 = 0.806 \quad (3-13a)$$

$$c_i = 0.1617 + 0.0410 \cdot C_i - 0.1951 \cdot C_1 - 0.0475 \cdot C_2, R^2 = 0.848 \quad (3-13b)$$

参考式 (3-12)，对表 3-5 中的数据进行多元幂函数拟合，得到 m 和 c 随水泥与外加剂掺量的指数关系：



$$m_e = 0.01351 \times 1.06063^{C_i} \times 0.34099^{C_1} \times 0.72448^{C_2}, R^2 = 0.992 \quad (3-14a)$$

$$c_e = 0.5190 \times 0.8124^{C_i} \times 0.6185^{C_1} \times 0.7769^{C_2}, R^2 = 0.973 \quad (3-14a)$$

对比式(3-13)与(3-14)可知,采用多元幂函数拟合得到的结果具有更好的相关性。

3.4 基于外加剂作用量化分析的固化土体基本物性指标表征

3.4.1 理论基础

介绍了采用水土灰比模型及双曲线模型分别拟合固化土强度随 w_c/C 与养护龄期的发展变化规律,发现固化土强度与 w_c/C 和养护龄期的拟合曲线具有较高的相关系数。若仅以 w_c/C 与养护龄期为基本指标建立固化土强度的计算模型,存在以下几方面不足:① w_c/C 仅考虑了固化剂掺量及固化土初始含水率等静态指标,但并未涉及到各参数随龄期的动态变化;②式(3-4)与式(3-10)的强度计算模型仅以固化土初始含水率、固化剂掺量与养护龄期为基础参数,未考虑土体基本物理性质,如重度、比重及孔隙率等;③仅采用式(3-4)的幂函数关系式与式(3-10)的双曲线模型拟合固化土的强度发展,手段过于单一。

如前所述,土的基本物化性质是固化土强度的决定因素之一。其中,土体孔隙率(n)是综合反映土体物理性质的重要指标,Consoli等^[100-107,210-212]的研究认为,水泥固化土强度与孔隙率和水泥掺量的比值呈幂函数关系变化:

$$q_u = K_C \cdot \left(\frac{n}{C_i}\right)^{J_C} \quad (3-15)$$

上式中, q_u (kPa) 为固化土无侧限抗压强度, K_C 、 J_C 为常数, n 为土体孔隙率, C_i (%) 为水泥掺量。在 Consoli 等的研究中,固化土的 n 值由未经固化处理土体及水泥的物性指标加权平均计算获得。

Lorenzo 与 Bergado^[98,99]的研究结果表明,实验室测得的固化土孔隙比实际数值与加权平均计算得出的理论数值有较大的差异。因此,通过测试土体或固化土体基本的三相比例指标,进而计算土体或固化土体在一定养护龄期的孔隙率。根据土的三相指标换算关系,固化土孔隙率和孔隙比的计算式为:

$$n_t = \frac{e_t}{1+e_t} \quad (3-16)$$

$$e_t = \frac{(1+w_t) \cdot G_{st} \cdot \gamma_w}{\gamma_t} - 1 \quad (3-17)$$



上式中, n_t (%) 和 e_t 分别为固化土在一定养护龄期 (t) 的孔隙率与孔隙比; w_t 为固化土在一定养护龄期的含水率, 由无侧限抗压强度测试后的破碎试样进行烘干测试获得; γ_w (kN/m³) 为水容重; γ_t (kN/m³) 为固化土试样容重, 计算获得; G_{st} 为固化土在一定养护龄期的土颗粒相对密度, 由比重瓶法测得。

Lorenzo 与 Bergado 认为固化土无侧限抗压强度与孔隙比和水泥掺量的比值呈幂函数关系变化:

$$q_u = K_L \cdot e^{J_L(e_t/C_i)} \quad (3-18)$$

上式中, K_L 、 J_L 为常数。

将固化土的基本物性指标引入强度计算模型中, 有如下突出优点: ①考察了各参数随养护龄期的变化规律, 得出各参数随水泥掺量及初始含水率的动态变化关系, 最终得到的强度计算模型亦为动态强度计算模型; ②影响固化土抗压强度的因素众多, 基于土体物性指标的固化土强度计算模型综合考虑了水泥掺量、含水率、土颗粒比重、孔隙率等指标的变化对强度的影响, 已有研究表明, 强度计算模型涉及的固化土参数愈多, 计算模型的准确度越高, 其适用范围亦越广; ③综合计算模型可综合考虑幂函数关系、双曲线关系、对数关系、多元线性关系等多种函数关系, 进一步提高计算模型的准确度。

由式 (3-15) 与 (3-18) 可以看出, 决定固化土抗压强度的因素为 K_C 或 K_L 的值及 $(\frac{n_t}{C_i})^{J_C}$ 或 $e^{J_L(e_t/C_i)}$ 的大小, K_C 或 K_L 及 $(\frac{n_t}{C_i})^{J_C}$ 或 $e^{J_L(e_t/C_i)}$ 是随时间变化的。对于 K_C , Consoli 等的研究并未给出其与养护龄期的变化关系式; 对于 K_L , 曹智国与章定文^[121]认为, K_L 与时间的对数 ($\lg t$) 正相关。由于 n_t/C_i 与 e_t/C_i 的值随养护龄期的波动幅度远小于 K_C 与 K_L 的变化范围, 因此, 本文认为 K_C 或 K_L 为固化土一定养护龄期抗压强度的最重要影响因素。如若 K_C 或 K_L 与 $\lg t$ 成正比例关系, 随着养护龄期的增长, K_C 与 K_L 的值是不断增加的, 当养护龄期无限长时, K_C 与 K_L 的值也趋近于无穷大, 导致固化土的长期抗压强度预测值失真。这与本章 3.3 小节讨论的固化土强度随龄期的发展关系类似, K_C 与 K_L 随养护龄期变化关系可表示为:

$$K = K_0 + \frac{t}{m_K t + c_K} \quad (3-19)$$

上式中, K 为 K_C 或 K_L 的数值; K_0 为 K_C 或 K_L 的初始数值, 即养护龄期为 0 时的数值; m_K 与 c_K 为常数值。本文的高含水率固化土, 初始抗压强度为 0, 即 K_0 值亦为 0。

对高效固化剂 (CSCN) 固化土, 水泥仅为固化剂的组分之一, 结合本章 3.2 小节外加剂作用的定量分析, 采用当量水泥总量 (C) 作为参数之一建立高效固化剂固



化土的强度计算模型。因此，结合式 (3-2) 与 (3-3)，代入式 (3-15) 与 (3-18)，得出基于当量水泥总量假设的无侧限抗压强度与孔隙率和孔隙比的关系式：

$$q_u = K_C \cdot \left(\frac{n_t}{C_i + k_1 \cdot C_1 + k_2 \cdot C_2} \right)^{J_C} \quad (3-20)$$

$$q_u = K_L \cdot e^{J_L [e_t / (C_i + k_1 \cdot C_1 + k_2 \cdot C_2)]} \quad (3-21)$$

3.4.2 试验方案及结果

根据土的三相指标计算关系式可知，土容重、孔隙率、孔隙比等指标均与含水率相关。因此，为准确描述含水率对各参数的影响，本小节设计三种不同基准含水率的试验配方，并根据此三系列的试验结果考察一定养护龄期的固化土试样容重、含水率、比重与当量水泥总量、初始含水率和龄期的关系，最终建立基于多参数的固化土强度初步计算模型。此外，设计第四种初始含水率的配方以验证强度计算模型的精确度。试验配比如表 3-6 所示。

表 3-6 建立综合强度计算模型的试验配比

Table 3-6 Mixture compositions for establishing the integrated strength prediction models

Series	w^* (%)	CSCN content (%)	w_c (%)
I-1	70	6, 8, 10, 12, 14, 16	73, 74, 75, 76, 77, 78
I-2	90	6, 8, 10, 12, 14, 16	93, 94, 95, 96, 97, 98
I-3	110	6, 8, 10, 12, 14, 16	113, 114, 115, 116, 117, 118
II	100	8, 10, 12, 14, 16	104, 105, 106, 107, 108

注： w^* ，基准含水率，为剔除固化剂浆体中水分后的剩余水量与干土的质量比 (%)

测试表 3-6 中各配方不同养护龄期的无侧限抗压强度，结果如表 3-7 所示。可以看出，各系列固化土强度随龄期增长均呈现递增趋势；对同一系列固化土试样，低掺量固化剂固化土长期强度与高掺量固化剂固化土的早中期强度相当；当高效固化剂掺量相同时，同龄期的低含水率固化土抗压强度远高于同龄期的高含水率抗压强度。这说明，固化剂掺量、养护龄期及含水率均为影响固化土抗压强度的重要因素。

表 3-7 各配方不同龄期的抗压强度

Table 3-7 The compressive strength of stabilized specimens at different curing ages

Series	CSCN (%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
			7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
I-1	6	73	49.3	114.8	153.4	171.2	179.0
	8	74	86.3	164.5	221.4	253.5	266.3
	10	75	124.4	247.7	327.6	364.9	412.3
	12	76	203.1	416.9	532.7	595.6	635.2
	14	77	328.6	583.4	716.2	792.8	837.3



续表 3-7

Series	CSCN(%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
			7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
I-2	16	78	489.2	739.4	917.6	1067.5	1132.8
	6	93	26.8	47.5	53.7	63.2	67.0
	8	94	53.5	98.7	120.3	136.6	149.2
	10	95	96.3	173.5	205.2	233.1	252.5
	12	96	140.8	251.1	302.0	347.3	365.8
	14	97	197.9	366.8	429.4	505.1	531.6
	16	98	276.3	502.9	594.9	696.8	743.4
I-3	6	113	27.3	31.2	31.2	35.1	38.2
	8	114	31.4	59.1	69.8	81.2	88.2
	10	115	55.6	109.2	128.1	144.5	156.4
	12	116	90.6	165.9	196.7	224.2	244.9
	14	117	135.7	237.8	281.5	323.5	350.0
	16	118	182.7	326.4	387.7	439.5	475.6

3.4.3 物性指标的标准化分析

指标的标准化是指将各配方（含水率不同、固化剂掺量不同）、各养护龄期的固化土试样的基本物性指标用固化土试样的初始指标表达。即，在各指标的求解关系式中，所有的变量都是已知的、确定的。基本指标的标准化分析决定了最终强度计算模型的准确度，因此，指标标准化需要遵循以下基本原则：①拟合关系式应有较高的相关系数，不应低于 0.8；②参数的计算应简便，不宜繁琐；③所得关系式应尽可能与实际相符。

根据本章 3.2 小节中对外加剂作用的量化分析结果，可知不同龄期高效固化剂的当量水泥总量有所变化，主要原因是外加剂的火山灰系数随龄期变化。对此，应确定当量水泥总量（ C ）与养护龄期的变化关系。不同龄期当量水泥总量由助剂和激发剂的火山灰系数决定，助剂火山灰系数（ k_1 ）随养护龄期的增长而降低，激发剂火山灰系数（ k_2 ）随养护龄期的增长而增加。即，早强的助剂（硅酸钠）对固化土抗压强度的增强作用随时间降低，而激发剂对固化土抗压强度的增强作用随时间提高。对此，本文认为助剂与激发剂的火山灰系数与养护龄期具有幂函数的相关关系。基于此假设，对表 3-4 中的火山灰系数（ k_1 、 k_2 ）同养护龄期（ t ）之间的关系进行曲线拟合，拟合得到的曲线如图 3-12 所示。由拟合曲线可以得到火山灰系数与养护龄期的关系式：

$$k_1 = 6.08 \cdot t^{-0.0793}, R^2 = 0.891 \quad (3-22a)$$



$$k_2 = 1.983 \cdot t^{0.05}, R^2 = 0.957 \quad (3-22b)$$

由式 (3-22) 可以看出, 两拟合式具有较高的相关系数, 可以认为火山灰系数与养护龄期幂函数关系的假设基本成立。因此, 一定龄期的当量水泥总量可由养护龄期表示, 结合式 (3-3) 与 (3-22) 可得二者关系式:

$$C = C_i + 6.08 \cdot t^{-0.0793} \cdot C_1 + 1.983 \cdot t^{0.05} \cdot C_2 \quad (3-23)$$

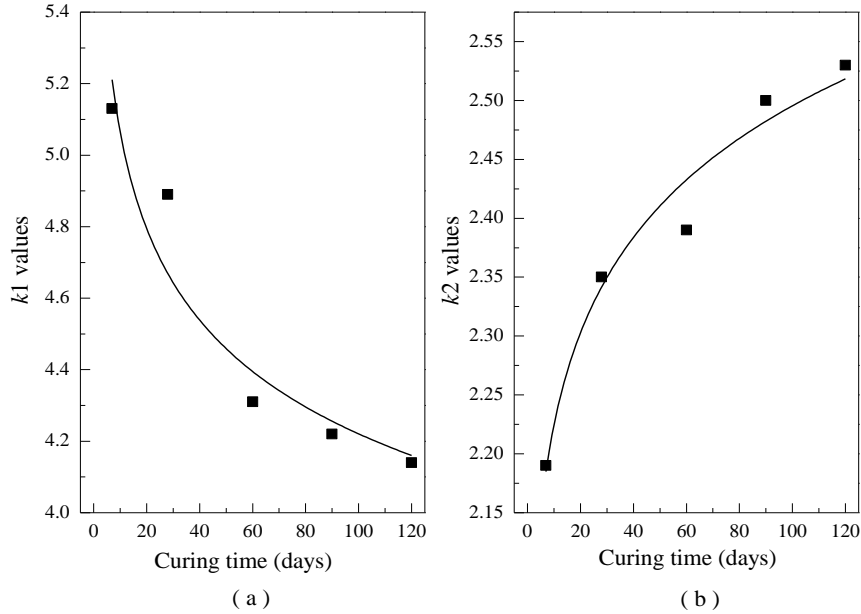


图 3-6 火山灰系数的拟合曲线

Fig. 3-6 The values and fitted curves for pozzolanic factors k_1 and k_2

由式 (3-23) 可计算得到系列 I 各配方的不同掺量固化剂的当量水泥总量值, 以系列 I-1 为例, 结合表 3-7 的抗压强度测试结果绘制强度-当量水泥总量曲线, 如图 3-7 所示。可以看出, 随当量水泥总量的增加, 固化土抗压强度不断增加, 且当当量水泥总量较大时, 强度的增加幅度亦较大, 这一现象符合“水泥掺量的反应区”理论, 即在水泥掺量的某一区间内, 固化土强度随水泥掺量快速增长; 当固化土初始含水率发生变化时, 强度随当量水泥总量的变化趋势并未发生明显变化, 这说明, 初始含水率与固化剂掺量对固化土强度的影响是相对独立的。由图 3-7 (b) 可知, 随养护龄期的不断增长, 固化土抗压强度的增长幅度降低, 28d 强度几乎可达 120d 强度的 70% 左右, 初始含水率的大幅增加并未明显改变这一规律, 这表明初始含水率与养护龄期对固化土强度的影响亦为相对独立的。因此, 固化土强度计算模型可为同时考虑初始含水率、固化剂掺量及养护龄期的函数。

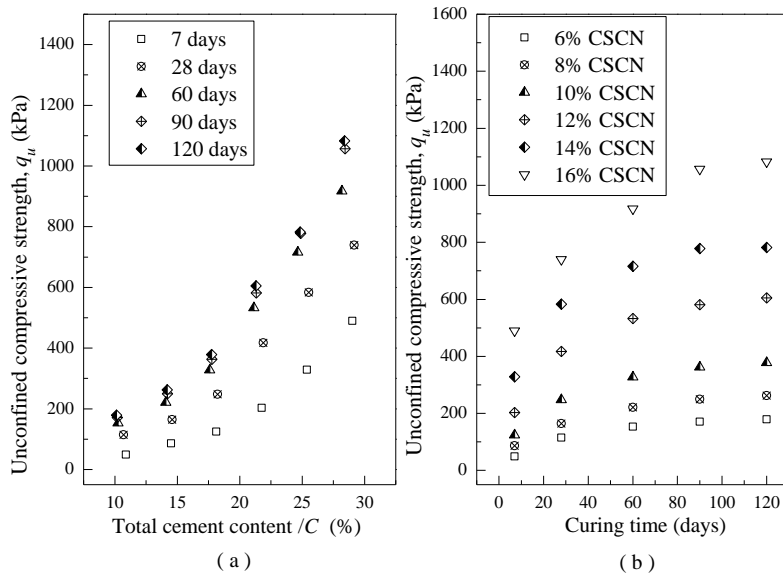


图 3-7 系列 I-1 的固化土抗压强度随当量水泥总量及养护龄期的变化关系

Fig. 3-7 The relationship of the strength of stabilized specimens Series I-1 with C and curing time

基于上述分析，固化剂掺量、养护龄期与初始含水率对固化土强度的影响是相互独立的，因此，以上三个初始指标可用来标准化分析固化土特定龄期的容重、颗粒比重及含水率。即，固化土体一定龄期的基本物性指标可由上述三个初始指标的函数表示。

由于基准含水率对固化土容重的显著影响，需考虑消除含水率的作用，因此，定义容重比 (γ_t/γ_0)，即固化土试样一定龄期的容重与未掺水泥时的土水混合物初始容重的比值。容重比可反映某一龄期、某一固化剂掺量下容重的变化，消除了含水率对容重的影响，便于对容重的标准化分析。

基于上述分析，可知养护龄期对固化土试样容重的影响作用较弱，而当量水泥总量的影响作用较强。故考察容重比与养护龄期对数的关系，二者变化关系如图 3-8 所示。可以看出，容重比与养护龄期的对数有较明显的线性关系。考察容重比同当量水泥总量之间的线性关系，二者变化关系及多元线性拟合曲线如图 3-9 所示。可以看出，容重比随当量水泥总量基本呈线性增加。因此，固化土试样的容重比可由养护龄期对数及当量水泥总量得出，拟合曲线具有较高的相关系数，拟合关系式为：

$$\gamma_t = \gamma_0 \cdot (0.002C + 0.00171 \lg t + 0.99), \quad R^2 = 0.993 \quad (3-24)$$

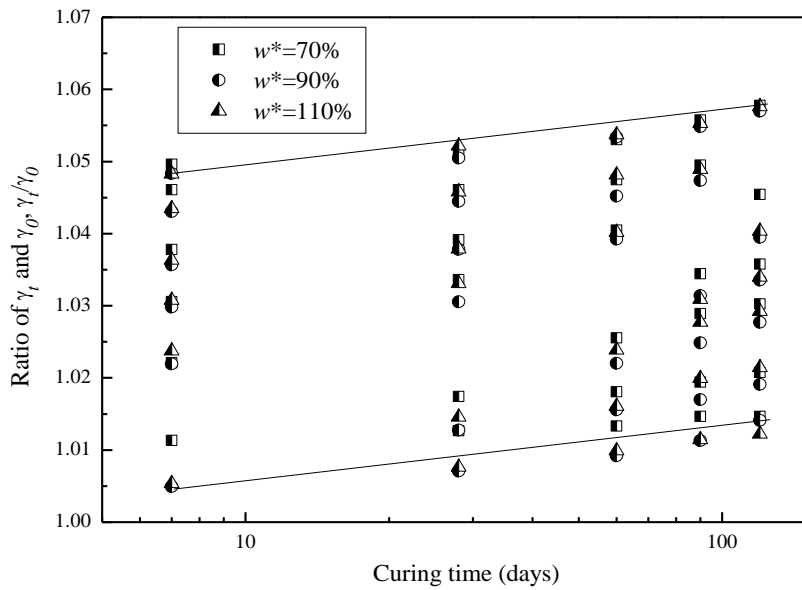


图 3-8 固化土试样容重比与养护龄期对数的关系

Fig. 3-8 The relationship of the ratio of γ_t and γ_0 with the logarithm of curing time

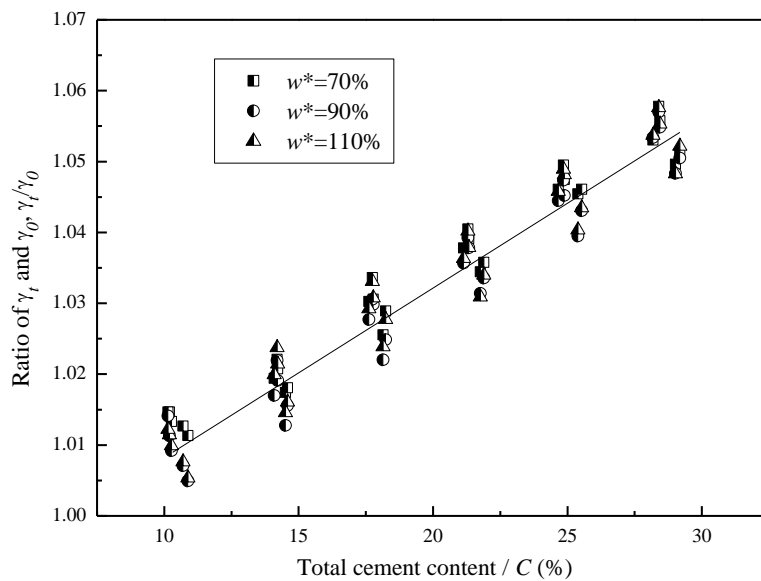


图 3-9 固化土试样容重比与当量水泥总量的关系

Fig. 3-9 The relationship of the ratio of γ_t and γ_0 with total cement content

由于含水率是影响容重的最显著因素，因此，考察初始含水率（初始含水率更准确反映固化土含水率）与 γ_0 的关系，拟合曲线如图 3-10 所示，二者关系式为：

$$\gamma_0 = 18.47 - 0.0473 \cdot w_c, \quad R^2 = 0.992 \quad (3-25)$$

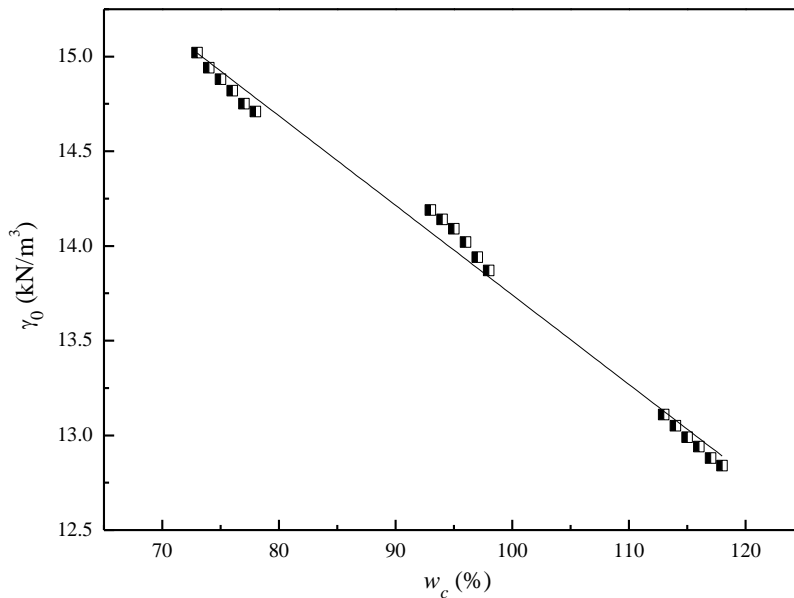


图 3-10 初始容重与含水率之间的拟合关系

Fig. 3-10 The fitted curve of γ_0 and w_c

参照容重的标准化分析，固化土一定龄期含水率的标准化同样需消除基准含水率（或初始含水率）的影响，定义含水率比（ w_t/w_c ），即固化土试样一定龄期的含水率与初始含水率的比值（因 w_t 为固化土测试含水率，宜采用相对应的 w_c ，同时还不引入新的参数）。含水率比不仅可消除初始含水率的影响，还能反映某一龄期、某一固化剂掺量下的含水率的相对改变，同时将初始含水率作为指标之一，有利于固化土含水率的标准化分析。

随养护龄期超过 120d，水化反应及火山灰反应可能减弱，从而使固化土含水率的减少速率降低。因此，同样考察含水率比与养护龄期对数的关系，二者变化关系如图 3-11 所示。可以看出，不同初始含水率的各固化土试样的含水率比与养护龄期对数大致呈线性关系。

考察含水率比与当量水泥总量之间的关系，二者变化关系与多元线性拟合关系如图 3-12 所示。可以看出，含水率比随当量水泥总量基本呈线性降低。因此，固化土试样的含水率比可由养护龄期对数及当量水泥总量得出，拟合曲线具有较高的相关系数，关系式如下式：

$$w_t = w_c \cdot (-0.0071C - 0.00941gt + 0.99), R^2 = 0.905 \quad (3-26)$$

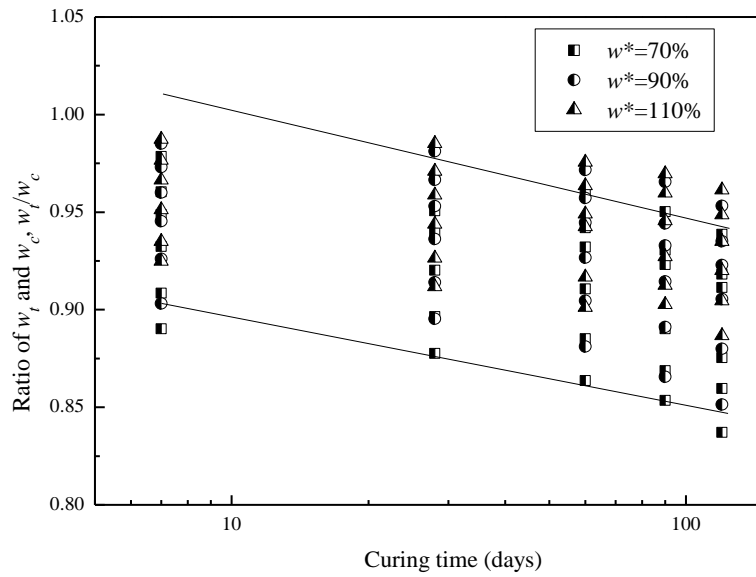


图 3-11 固化土试样含水率比与养护龄期对数的关系

Fig. 3-11 The relationship of the ratio of w_t and w_c with the logarithm of curing time

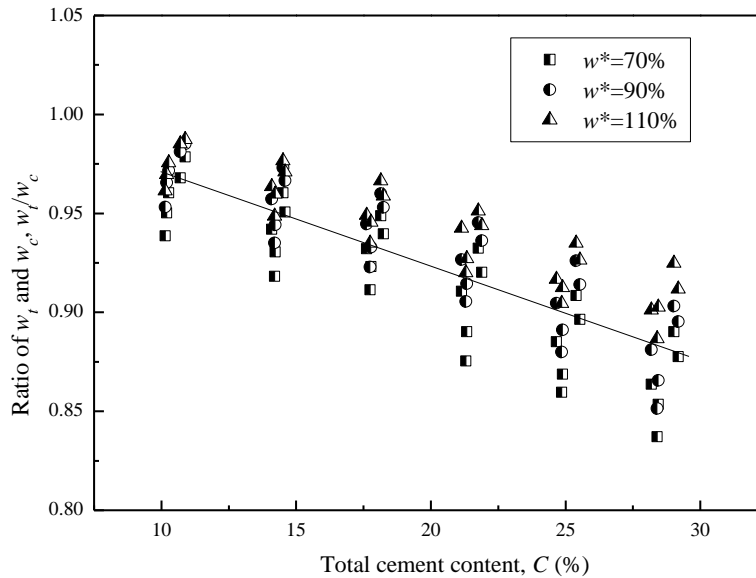


图 3-12 固化土试样含水率比与当量水泥总量的关系

Fig. 3-12 The relationship of the ratio of w_t and w_c with total cement content

土颗粒相对密度的大小取决于固相组成物质的种类和相对含量。未固化土的固相组成主要为二氧化硅、伊利石等晶体矿物，当水泥或水泥基无机固化剂掺入土体后，水化生成的胶凝水化产物胶结在土颗粒表面，而胶凝水化产物含有较多的结合水，进而使水化产物-土颗粒结合体的相对密度低于原土颗粒相对密度。此外，土中的部分黏粒发生火山灰反应，可等效于发生反应的黏粒被胶凝水化产物替代，进一步



降低了固化土颗粒的相对密度。含水率的增加对胶凝水化产物的生成数量及其对土颗粒的作用的影响较小，因此可判断含水率对固化土的各龄期比重未有显著影响。

养护早期，胶凝水化产物胶结土体黏粒，随养护龄期的增长，后生成的胶凝水化产物开始胶结土体大颗粒，对土固相组成再难以造成显著影响。基于以上分析可知，仅当量水泥掺量可显著影响固化土体的比重，含水率、养护龄期对固化土比重的影响并不明显。

若采用类似于固化土容重及含水率标准化分析的方法，将固化土一定龄期的比重与未处理土比重的比值作为参数，会发现二者比值随龄期及当量水泥掺量的分布依然较分散。鉴于此，定义比重剂量比 (G_{st}/C)，即固化土试样一定龄期的土颗粒相对密度与同龄期的当量水泥总量的比值。考察比重剂量比同当量水泥总量的变化关系，并对二者关系进行拟合，拟合曲线如图 3-13 所示，拟合关系式为：

$$G_{st} = 2.7C^{-0.0045}, R^2 = 0.999 \tag{3-27}$$

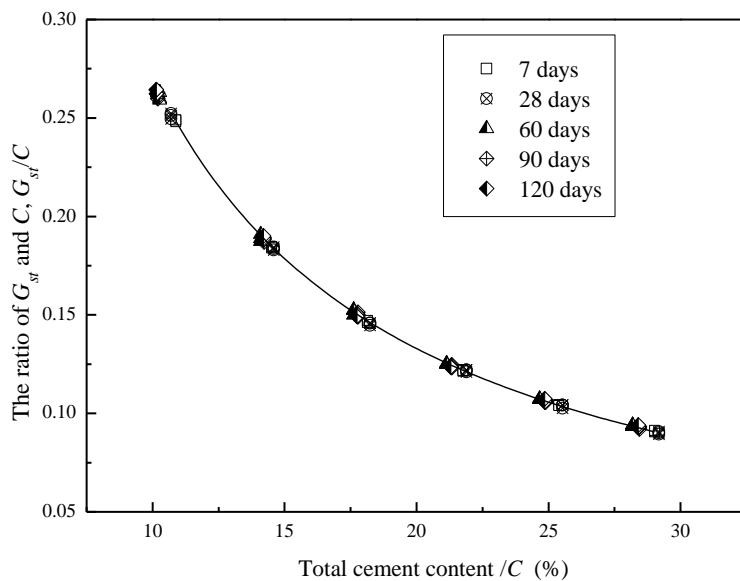


图 3-13 固化土试样一定龄期的比重剂量比同当量水泥总量的关系

Fig. 3-13 The relationship of the ratio of G_{st} and C of stabilized specimens Series I at different curing ages with total cement content

由式 (3-27) 可知，拟合关系式具有很高的相关系数。然而，当 C 为 0 时，拟合式无意义，即式 (3-27) 不适用于不掺固化剂的未处理土试样。对此，参考上述分析，定义相对水泥掺量 ($1-C/100$)，并考虑引入固化土一定龄期的比重与未处理土比重的比值 (G_{st}/G_{s0})，考察比重比与相对水泥掺量之间的关系，并对二者关系进行拟合，拟合曲线如图 3-14 所示。由拟合曲线得到固化土颗粒相对密度与当量水泥总量的关



系式:

$$G_{st} = G_{s0} \cdot \left(1 - \frac{C}{100}\right)^{0.0695}, R^2 = 0.994 \quad (3-28)$$

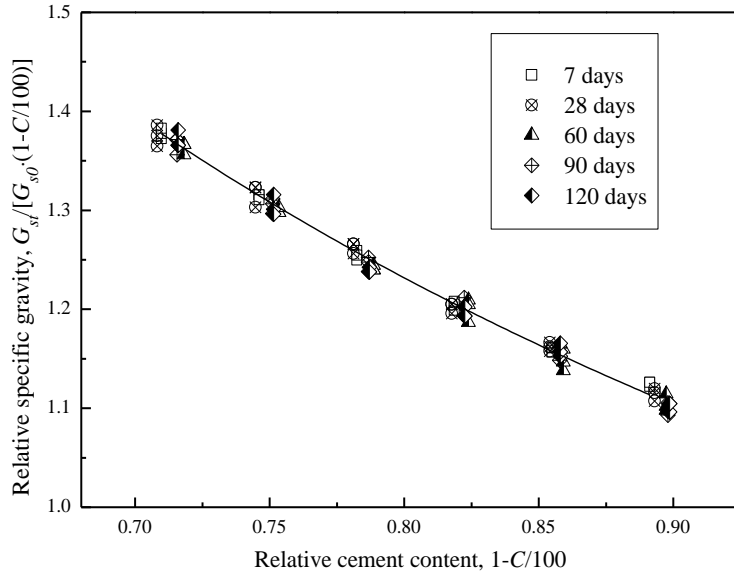


图 3-14 固化土试样一定龄期的相对比重比与相对水泥含量的关系

Fig. 3-14 The relationship and fitted curve of the relative specific gravity stabilized specimens Series I at different curing ages with relative cement content

基于对基本指标的标准化分析, 综合式 (3-17)、式 (3-24)、式 (3-26) 及式 (3-28) 可得由固化土初始参数以及养护龄期计算固化土一定龄期的孔隙比的公式:

$$e_t = \left(G_{s0} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_0} \cdot \frac{w_c}{100}\right) \cdot \frac{\left(\frac{100}{w_c} - 0.0071C - 0.0094lgt + 0.99\right) \cdot \left(1 - \frac{C}{100}\right)^{0.0695}}{0.002C + 0.0017lgt + 0.99} - 1 \quad (3-29)$$

由于 γ_0 亦为初始含水率的函数, 将式 (3-25) 代入上式可得孔隙比计算式:

$$e_t = \left(G_{s0} \cdot \frac{\gamma_w}{18.47 - 0.0473 \cdot w_c} \cdot \frac{w_c}{100}\right) \cdot \frac{\left(\frac{100}{w_c} - 0.0071C - 0.0094lgt + 0.99\right) \cdot \left(1 - \frac{C}{100}\right)^{0.0695}}{0.002C + 0.0017lgt + 0.99} - 1 \quad (3-30)$$

参考式 (3-16), 将式 (3-30) 变形可得固化土一定龄期孔隙率的计算公式:

$$n_t = \left\{ 1 - 1 / \left[\left(G_{s0} \cdot \frac{\gamma_w}{18.47 - 0.0473 \cdot w_c} \cdot \frac{w_c}{100}\right) \cdot \frac{\left(\frac{100}{w_c} - 0.0071C - 0.0094lgt + 0.99\right) \cdot \left(1 - \frac{C}{100}\right)^{0.0695}}{0.002C + 0.0017lgt + 0.99} \right] \right\} \times 100\% \quad (3-31)$$

对固化土基本物性指标的标准化意味着固化土强度初步计算模型中各参数均为固化土初始参数的函数, 反映了计算模型的动态变化特性, 有利于缩小计算模型的误差。



3.4.4 高效固化剂固化土强度初步计算模型

根据前文阐述，固化土无侧限抗压强度与固化土体孔隙率或孔隙比存在两种可能的指数关系，如式 (3-20) 与式 (3-21) 所示。本节拟对此两种模型分别开展研究，并将由计算模型得到的固化土强度计算值与室内实测值进行对比，探讨两固化土计算模型的准确性。

基于式 (3-20)，考察固化土强度与 n_t/C 的变化关系，并对二者关系进行拟合，拟合曲线如图 3-15 所示，可得强度与 n_t/C 的关系式：

$$q_{u7days} = 2882.2 \times \left(\frac{n_t}{C}\right)^{-2.5}, R^2 = 0.887 \quad (3-32a)$$

$$q_{u28days} = 4870.1 \times \left(\frac{n_t}{C}\right)^{-2.5}, R^2 = 0.901 \quad (3-32b)$$

$$q_{u60days} = 6449.5 \times \left(\frac{n_t}{C}\right)^{-2.5}, R^2 = 0.870 \quad (3-32c)$$

$$q_{u90days} = 7105.1 \times \left(\frac{n_t}{C}\right)^{-2.5}, R^2 = 0.890 \quad (3-32d)$$

$$q_{u120days} = 7378.7 \times \left(\frac{n_t}{C}\right)^{-2.5}, R^2 = 0.907 \quad (3-32e)$$

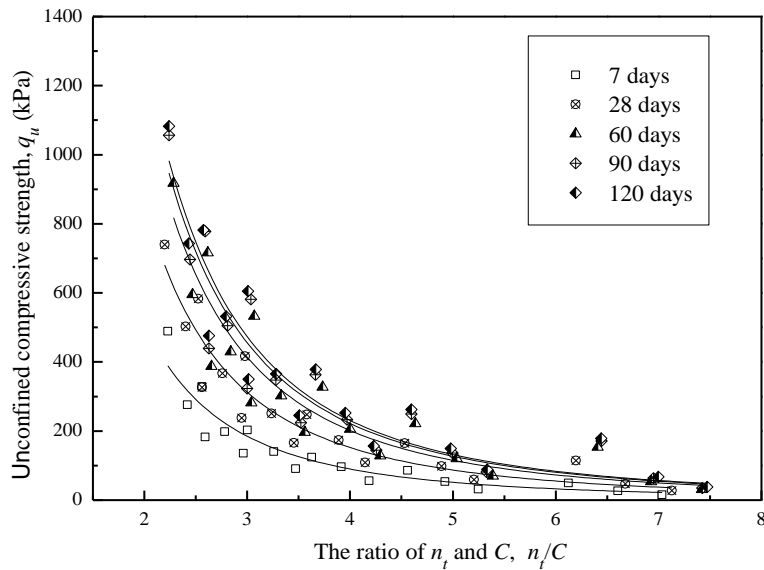


图 3-15 系列 I 固化土强度随孔隙率与当量水泥总量比值的变化关系

Fig. 3-15 The relationship of compressive strength of stabilized specimens Seiries I at different curing times with n_t/C

由式 (3-32) 可以看出，各拟合关系式均有较高的相关系数， K_C 的值随龄期增加，而 J_C 的值保持不变。

因 K_C 的值是决定固化土强度的关键参数，参考 3.3 小节的分析结果，使用双曲



线模型拟合 K_C 随养护龄期的变化, 拟合曲线如图 3-16 所示, 二者关系式为:

$$K_C = \frac{t}{1.22 \times 10^{-4} \cdot t + 1.92 \times 10^{-3}}, R^2 = 0.971 \quad (3-33)$$

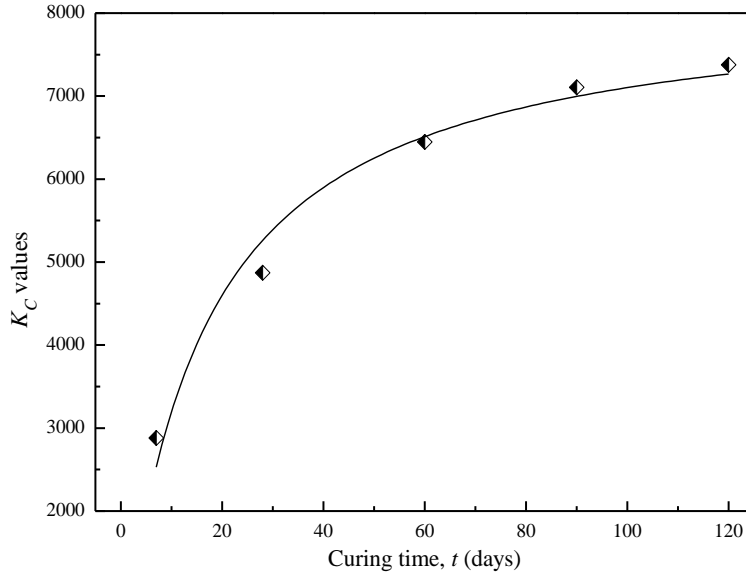


图 3-16 K_C 的值与养护龄期的变化关系

Fig. 3-16 The relationship of the K_C values with curing time

将式 (3-32)、式 (3-23) 与式 (3-33) 结合, 可得基于式 (3-20) 的固化土强度计算模型:

$$q_u = \frac{t}{1.22 \times 10^{-4} \cdot t + 1.92 \times 10^{-3}} \cdot \left(\frac{n_t}{C_t + 6.08 \cdot t^{0.0793} \cdot C_1 + 1.983 \cdot t^{0.05} \cdot C_2} \right)^{-2.5} \quad (3-34)$$

由式 (3-34) 可以看出, 固化土强度为养护龄期、固化剂掺量及孔隙率的函数, 一定龄期的固化土强度可由固化土的初始指标计算获得。将式 (3-31) 代入式 (3-34) 可得最终的基于式 (3-20) 的多参数的固化土强度初步计算模型。

固化土一定龄期的抗压强度为未处理土颗粒的相对密度、固化土的初始含水率、养护龄期、固化剂各组分掺量的函数。即, 理论上, 对任一初始含水率、水泥掺量、助剂及激发剂掺量的固化土, 各龄期计算强度均可由式 (3-34) 获得。

为验证基于孔隙率的固化土强度初步计算模型式 (3-34) 的准确性, 测试了表 3-6 中的系列 II 固化土试样的各龄期强度, 并将室内测试结果同由强度初步计算模型得到的计算结果对比, 对比结果如图 3-17 所示。可以看出, 尽管固化土强度实测值与计算值的大小有所差异, 但各龄期、各固化剂掺量固化土试样实测值的波动范围均在计算值的 $\pm 10\%$ 以内。对比图 3-4, 可以看出, 基于孔隙率的固化土强度初步计算模型具有更高的准确度。

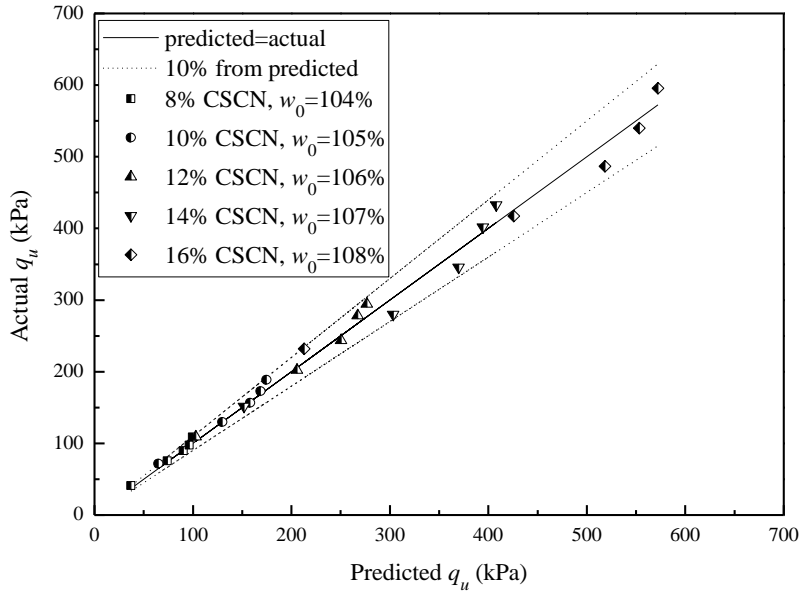


图 3-17 系列 II 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (3-34) 计算值的对比

Fig. 3-17 Comparison of predicted strength calculated from (3-34) and experimental results of stabilized specimens Series II with the initial water content of 100%

基于式 (3-21)，考察固化土强度与 e_t/C 的变化关系，并对二者关系进行拟合，拟合曲线如图 3-18 所示，可得强度与 e_t/C 的关系式：

$$q_{u7days} = 1451.0 \times e^{-0.2 \cdot (e_t/C)}, R^2 = 0.948 \quad (3-35a)$$

$$q_{u28days} = 2438.4 \times e^{-0.2 \cdot (e_t/C)}, R^2 = 0.982 \quad (3-35b)$$

$$q_{u60days} = 3136.8 \times e^{-0.2 \cdot (e_t/C)}, R^2 = 0.983 \quad (3-35c)$$

$$q_{u90days} = 3434.9 \times e^{-0.2 \cdot (e_t/C)}, R^2 = 0.981 \quad (3-35d)$$

$$q_{u120days} = 3502.7 \times e^{-0.2 \cdot (e_t/C)}, R^2 = 0.976 \quad (3-35e)$$

由式 (3-35) 可以看出，各拟合关系式均有较高的相关系数， K_L 的值随龄期增加，而 J_L 的值保持不变。对比式 (3-32) 与式 (3-35) 可以看出，基于孔隙比的强度计算模型具有更高的相关系数，但这并不能说明最终计算模型的计算强度与实测强度值更接近，还需进行进一步的探讨分析。

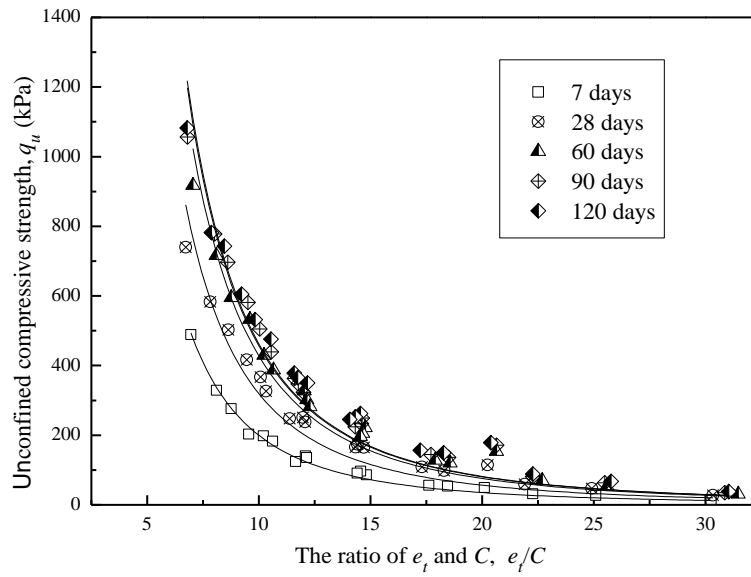


图 3-18 系列 I 固化土强度随孔隙比与当量水泥总量比值的变化关系

Fig. 3-18 The relationship of compressive strength of stabilized specimens Series I at different curing times with e_t/C

与对 K_C 值的分析方法类似，由于 K_L 的值是决定固化土强度的关键参数，同样采用双曲线模型拟合 K_L 随养护的龄期的变化，拟合曲线如图 3-19 所示，由拟合曲线得到的二者关系：

$$K_L = \frac{t}{2.58 \times 10^{-4} \cdot t + 3.5 \times 10^{-3}}, R^2 = 0.976 \quad (3-36)$$

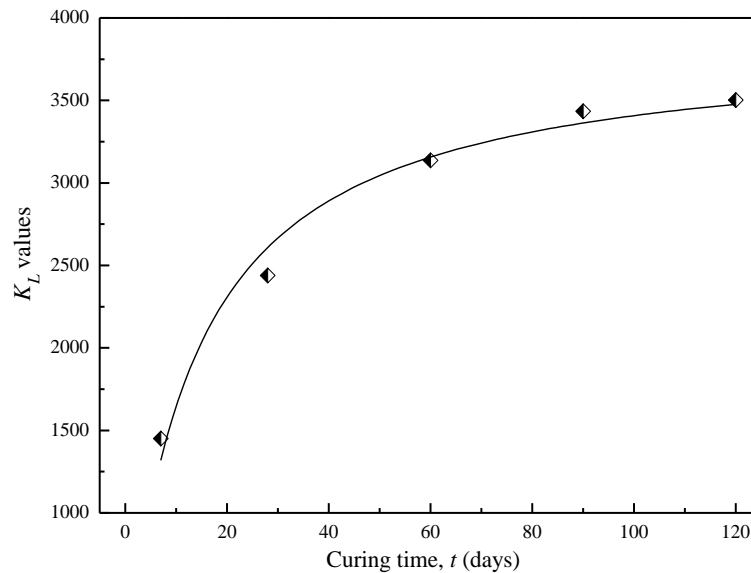


图 3-19 K_L 的值与养护龄期的变化关系

Fig. 3-19 The relationship of the K_L values with curing time



将式 (3-23)、式 (3-35) 与式 (3-36) 结合, 可得基于式 (3-21) 的固化土强度计算模型:

$$q_u = \frac{t}{2.58 \times 10^{-4} \cdot t + 3.5 \times 10^{-3}} e^{-0.2 \cdot [e_t / (C_i + 6.08 \cdot t^{0.0793} \cdot C_1 + 1.983 \cdot t^{0.05} \cdot C_2)]} \quad (3-37)$$

将式 (3-30) 代入式 (3-37) 可得基于式 (3-21) 的多参数的固化土强度初步计算模型。为验证基于孔隙比的固化土强度初步计算模型式 (3-39) 的准确性, 将室内测试结果同由强度初步计算模型得到的计算结果相对比, 对比结果如图 3-20 所示。由图 3-34 可以看出, 尽管固化土强度实测值与计算值的大小有所差异, 但各龄期、各固化剂掺量固化土试样实测值的波动范围基本在计算值的 ±10% 以内, 有很高的准确度。相对于前文研究的强度随龄期的强度模型及基于外加剂量化分析的简单强度计算模型, 基于土体物性指标的强度初步计算模型具有更高的准确度和更广泛的应用范围, 同时有助于现场工程师因地制宜的解决问题。

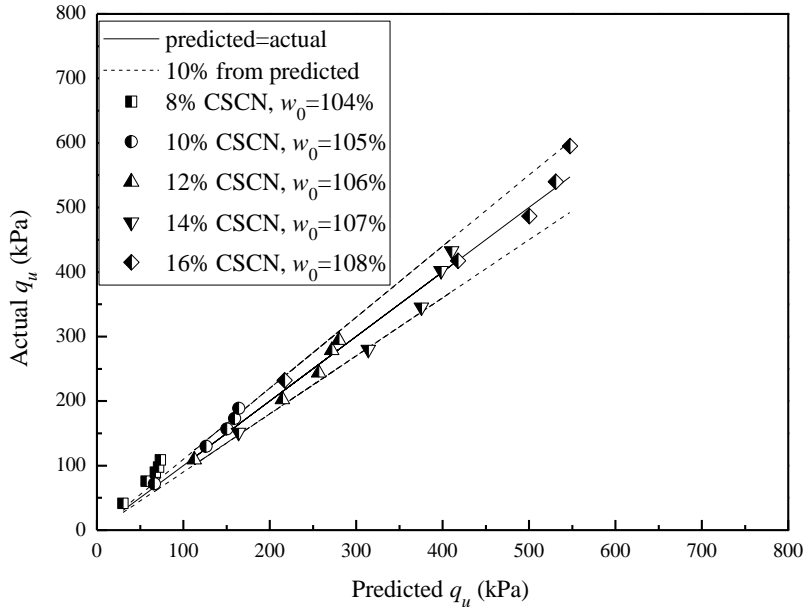


图 3-20 系列 II 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (3-37) 计算值的对比

Fig. 3-20 Comparison of predicted strength calculated from (3-37) and experimental results of stabilized specimens Series II with the initial water content of 100%

3.5 本章小结

根据固化剂作用机理分析, 参考水土灰比模型, 提出了外加剂的火山灰系数及外加剂在水泥固化土中的当量水泥理论, 并由水泥固化土的抗压强度测试结果定量分析外加剂对固化土强度的贡献权重; 测试了固化土试样不同龄期的试样容重、土颗粒相对密度及含水率, 考察了固化土体基本物性指标随当量水泥总量 (C) 与养护龄期



的变化关系，得到以下结论：

(1) 外加剂对固化土的作用可认为外掺一定量水泥，外加剂的当量水泥量可由外加剂掺量与外加剂相应火山灰系数的乘积获得。因此，高效固化剂(CSCN)的当量水泥总量为实际水泥掺量与外加剂当量水泥量之和。基于水泥固化土的水土灰比模型和正交试验结果，可得到外加剂各龄期火山灰系数，进而计算得到固化剂各龄期的当量水泥总量。如16% CSCN的28d和90d当量水泥总量分别为27.45%和26.68%。

(2) 固化剂的当量水泥总量随养护龄期发生变化，主要原因是外加剂的火山灰效应随龄期发生变化。根据计算结果，助剂火山灰系数(k_1)和复合激发剂火山灰系数(k_2)的数值可由多元线性分析得到。 k_1 的7d、28d和90d数值分别是5.13、4.89和4.22， k_2 的7d、28d和90d数值分别是2.19、2.35和2.50，可以看出，助剂火山灰系数随养护龄期依次减小，而复合激发剂火山灰系数随养护龄期依次增大。进一步分析认为， k_1 与 k_2 随养护龄期是呈指数关系变化的，并得到火山灰系数与养护龄期的数学表达式。

(3) 双曲线模型描述固化土强度随龄期的增长具有更高准确性，得到的数学表达式具有很高的相关系数(>0.90)，同时更符合养护龄期无穷大时固化土强度趋于稳定的实际情况；双曲线模型中 m 和 c 的数值随水泥、助剂及激发剂掺量变化，并建立了 m 和 c 与水泥、助剂及激发剂掺量的函数关系。

(4) 固化土试样的容重(γ_t)随当量水泥总量的增加而增加，随初始含水率的增加大幅降低。类似地，固化土试样的含水率(w_t)随当量水泥总量及养护龄期的增长而降低。对固化土颗粒相对密度(G_{st})，当量水泥总量为影响其数值变化的唯一因素。定义的容重比(γ_t/γ_0)、含水率比(w_t/w_c)及相对水泥掺量($1-C/100$)可对物性指标进行标准化分析，并得到固化土体基本物性指标与龄期的函数关系。基于此，可知各龄期的基准指标(n_t/C_i 与 e_t/C_i)，与双曲线模型拟合得到主控指标 K (K_C 和 K_L)的关系式相结合，获得基于土体基本物性指标的固化土强度初步计算模型。



第4章 高效固化剂混掺粉煤灰的作用研究

4.1 引言

在建筑材料领域，粉煤灰常作为一种优良的掺合料用于改善水泥砂浆或混凝土的性能，如强度、耐磨性、抗渗性、抗冻性等^[214,215]。此外，由于粉煤灰是在火力发电厂中煤燃烧后的烟气中收捕下来的细灰，具有来源广泛、数量巨大、价格低廉等突出优点，可一定程度上降低建筑工程的建造成本。长期以来，众多学者对粉煤灰在水泥混凝土中的作用机理开展了大量研究^[216-218]。其中，我国著名学者沈旦申^[219]于上世纪八十年代末提出了粉煤灰的“三大效应”理论，为粉煤灰的推广应用及作用机理研究奠定了理论基础。

“三大效应”分别是：①形态效应，显微形态下，粉煤灰中含有至少70%的玻璃微珠，表面光滑，可提高砂浆或混凝土拌合物的流变性能，具有一定的润滑作用；②火山灰效应，即活性效应，粉煤灰含有一定量的二氧化硅、氧化铝等活性矿物，在碱性环境下发生化学反应生成水化硅酸钙或水化铝酸钙凝胶，填充在硬化砂浆的毛细孔隙中，提高混凝土的强度、耐久性等性能；③微集料效应，粉煤灰中微米级的微珠和碎屑可看作未水化的水泥颗粒，这些极细小的微珠具有基本等同水泥颗粒的活性，明显增强混凝土的结构强度，提高均质性及致密性。

粉煤灰用于土体的固化处理已有较多应用，如二灰土、三灰土等。在水泥固化土或稳定土中掺入一定量的粉煤灰，有助于提高固化土或稳定土的密实度及抗压强度。如前文所述，粉煤灰在水泥固化土中的作用机理主要有填充作用、活性作用及分散作用。其中大多数学者认为粉煤灰在固化土中以活性作用为主，填充作用为辅。但也有学者研究发现水泥固化土的碱性弱于水泥混凝土，粉煤灰的活性难以激发，认为粉煤灰在固化土中仅具有分散作用。事实上，高活性的微米级微珠在低碱性下即可被激活，因此，在水泥-粉煤灰固化土体系中，微米级的粉煤灰颗粒可能发生火山灰反应。

为进一步提高固化土性能且降低高效固化剂成本，本章开展高效固化剂混掺粉煤灰的试验研究，研究不同掺量粉煤灰对固化土的改善作用，探讨固化剂掺量对粉煤灰作用的影响；探讨各龄期的粉煤灰对固化土力学性能的作用权重，考察粉煤灰在不同龄期的火山灰效应及分散效应对固化土性能的贡献；测试固化土掺加粉煤灰前后基本指标的变化，考察基本指标同粉煤灰掺量的变化关系，最终建立基于多指标的固化剂与粉煤灰固化土的抗压强度计算模型。本章的技术路线图如图4-1所示。

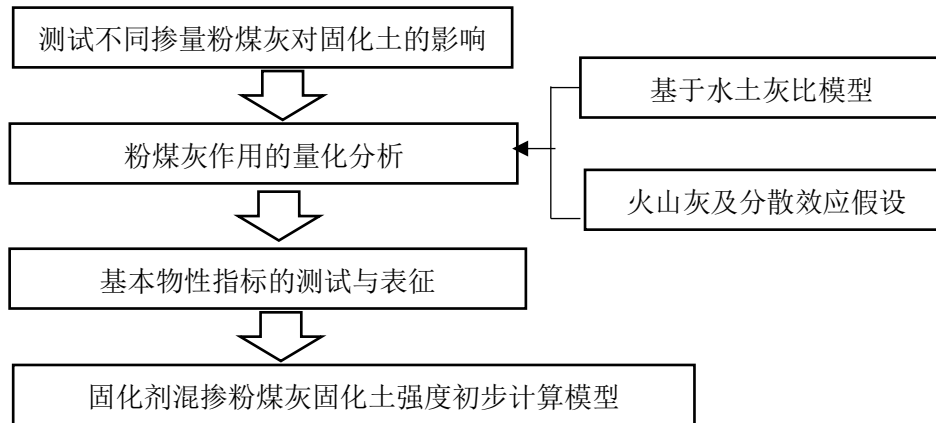


图 4-1 第 4 章研究技术路线图
 Fig. 4-1 Schematic of research procedure for Chapter 4

4.2 粉煤灰对高效固化剂固化土抗压强度的影响

4.2.1 试验方案及结果

已有研究认为^[111], 粉煤灰在水泥固化土中存在某一最佳掺量, 对不同类型的土, 粉煤灰的最佳掺量约在 10~30% 范围内变化。因此, 为准确研究粉煤灰对高效固化剂固化土抗压强度的影响, 横向的粉煤灰(FA)掺量为 2~16%, 纵向的高效固化剂(CSCN)掺量为 8~16%, 各试验配方如表 4-1 所示。

表 4-1 试验配方表
 Table 4-1 Mixture compositions

Series	Stabilizer content (%)	CSCN content(%)	FA content(%)
FI-1	8~24	8	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16
FI-2	10~26	10	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16
FI-3	12~28	12	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16
FI-4	14~30	14	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16
FI-5	16~32	16	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16
FOII	15	14.25, 13.5, 12.75, 12, 10.5, 9	0.75, 1.5, 2.25, 3, 4.5, 6

表 4-1 中各配方的基准含水率(即, 未添加固化材料的土水混合物含水率)均为 70%。仅由高效固化剂引入一部分水, 粉煤灰以固体状态掺入水泥浆。系列 FI 用以研究不同掺量粉煤灰对高效固化剂固化土抗压强度的影响, 系列 FOII 作为对比系列试样, 用以判断粉煤灰作用量化分析的准确性。



不同掺量粉煤灰混掺高效固化剂固化土不同龄期的抗压强度如表 2 所示。对系列 FI-1 的固化土试样（即，CSCN 掺量为 8% 时），当粉煤灰掺量不超过 8% 时，固化土早中期强度随粉煤灰掺量的增加而增大，当粉煤灰掺量大于 8% 时，早中期强度有所降低；对系列 FI-2 的固化土试样（即，CSCN 掺量为 10% 时），当粉煤灰掺量大于 8% 时，固化土早中期强度亦有显著降低；当 CSCN 掺量为 12% 时，可以看出当粉煤灰掺量大于 10% 时，固化土强度基本不再增加；当 CSCN 掺量为 14% 和 16% 时，固化土强度随粉煤灰掺量的增加而不断增大，但当粉煤灰掺量大于 10% 时，固化土强度的增加幅度降低。

对固化土早中期强度分析，可知粉煤灰在高效固化剂固化土中存在最佳掺量，且最佳掺量值随固化剂掺量发生变化，其原因可能是无结构的松散聚集程度发生了改变，这一发现与已有研究成果基本相符^[88]。

表 4-2 固化土不同龄期的抗压强度

Table 4-2 The compressive strength of CSCN and fly ash stabilized specimens

Series	FA content	Compressive strength (kPa)				
		7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
FI-1	0	86.3	124.4	203.1	328.6	489.2
	2	108.5	156.8	229.6	379.5	511.3
	4	113.3	187.2	268.5	422.1	546.7
	6	126.5	208.7	307.9	454.9	569.5
	8	139.7	218.1	326.7	487.2	585.9
	10	135.3	227.5	347.5	505.4	622.5
	12	125.5	215.7	353.5	544.5	636.3
	14	127.6	191.4	345.3	552.3	667.5
	16	108.5	187.5	347.8	565.3	695.8
FI-2	0	164.5	247.7	416.9	583.4	739.4
	2	201.3	307.1	435	675.7	852.5
	4	216.7	341.7	475.7	761.4	911.3
	6	234.6	367.1	524.2	809.3	944.5
	8	256.5	396.5	598.3	866.8	975.6
	10	242.1	439.2	631.6	895.2	1050.3
	12	239.6	409.6	649.3	956.7	1120.5
FI-3	14	242.7	290.5	643.5	972.5	1197.7
	16	221.3	305.7	652.3	961.4	1225.1
	0	221.4	327.6	532.7	716.2	917.6
	2	246	395.5	586.9	805.7	1076
	4	275.5	434.3	601.2	936.2	1163.3
	6	298.4	472.7	653.5	1021.5	1245.5



续表 4-2

Series	FA content	Compressive strength (kPa)				
		7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
FI-3	8	335.2	534.9	746.5	1134.1	1335.6
	10	319.5	545.5	813.4	1189.3	1369.5
	12	328.6	493.4	829.5	1243.5	1438.9
	14	337.4	447.5	838.5	1279.3	1499.3
	16	306.9	445.7	842.5	1233.5	1535.3
FI-4	0	253.5	364.9	595.6	792.8	1067.5
	2	301.2	462.8	672.1	901.5	1225.1
	4	312.7	495.4	735.3	1094.8	1326.7
	6	354.2	547.7	784.6	1165.5	1394.6
	8	389.5	615.6	865.3	1279.6	1535.3
	10	372.3	636.7	947.1	1351.4	1557
	12	376.4	619.4	954.5	1436.5	1667.7
	14	382.2	610.5	962.5	1467.6	1743.2
	16	343.5	601.3	981.5	1421.3	1779.5
	0	266.3	412.3	635.2	837.3	1132.8
FI-5	2	327.6	506.4	736.7	967.3	1322.3
	4	343.3	546	832.5	1205.4	1486.5
	6	393.1	601.5	870.5	1228.9	1575.4
	8	423.2	682	939.2	1453.5	1735.3
	10	431.7	712.5	1020.5	1571.2	1818.4
	12	416.5	705.4	1080.3	1625.2	1910.3
	14	435.5	709.5	1095.5	1673.4	2026.5
16	387.4	688.7	1134.1	1656.7	2057.4	

对系列 FI-1 的固化土试样,粉煤灰掺量大于 8%时,固化土长期强度未出现明显降低,这说明,随养护龄期的增长,粉煤灰的作用亦随之增强,抵消了过量粉煤灰对固化土早中期强度的负面影响;对系列 FI-2 的固化土试样,掺 14%与 16%粉煤灰的固化土 60d 强度显著低于掺 8%粉煤灰的固化土试样,随养护龄期由 60d 增长到 120d,掺 14%与 16%粉煤灰的固化土 120d 强度仅小幅低于掺 8%粉煤灰的固化土试样;在系列 FI-3 的固化土试样中,亦可发现类似的现象;对系列 FI-4 和 FI-5 的固化土试样,养护龄期较长时,当粉煤灰掺量小于 10%时,固化土长期强度随粉煤灰掺量有较大提高,而随着粉煤灰掺量的继续增加(由 10%增加到 16%时),固化土强度并未出现显著增大。为便于进一步粉煤灰作用的定量化分析,将各系列固化土试样的粉煤灰较佳掺量定为与高效固化剂掺量相等。



4.2.2 固化土强度随龄期的变化

与上一章对水泥固化土和高效固化剂固化土强度的分析类似，考察固化土强度随养护龄期的发展是混掺粉煤灰的固化土强度的计算模型前提条件。因此，上一小节的试验结果进行抗压强度随龄期变化规律的分析，以系列 FI-1 固化土试样为例，给出强度随龄期发展的拟合曲线，如图 4-2 所示。可以看出，与水泥固化土类似，双曲线模型基本符合水泥固化土抗压强度随龄期的发展规律，即固化土早期强度增长迅速，随着养护龄期的增加，固化土中长期强度增长速率降低，当养护龄期为无限长时，固化土强度趋近于稳定。

对比图 3-5 与图 4-2，可以看出，未掺粉煤灰的高效固化剂固化土的 120d 强度与拟合强度值差别较小，数据点与拟合曲线基本重合；而高效固化剂混掺粉煤灰固化土的 120d 强度基本都要高于拟合强度值，即，实测数据点在拟合曲线上方。这说明，掺入粉煤灰后的固化土 120d 强度有较大幅度的增长，其主要原因可能是粉煤灰的火山灰及分散填充效应。

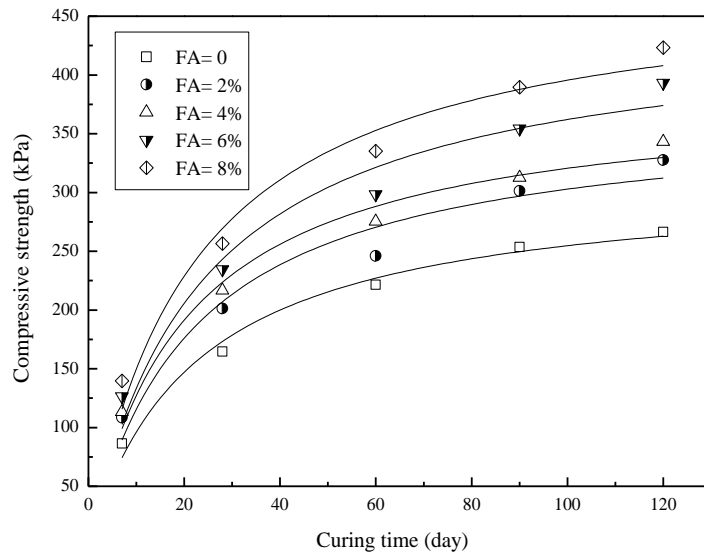


图 4-2 系列 FI-1 固化土试样强度随龄期的变化

Fig. 4-2 The relationship of compressive strength of specimens FI-1 with curing time

由各系列的拟合曲线，可以得到各固化土试样强度随龄期的拟合关系式，从中选取粉煤灰掺量与固化剂掺量相等试样的关系式：

$$q_{uF(\text{Series FI-1, FA=8\%})} = \frac{t}{0.0021t+0.046}, R^2=0.967 \tag{4-1a}$$

$$q_{uF(\text{Series FI-2, FA=10\%})} = \frac{t}{0.00125t+0.027}, R^2=0.961 \tag{4-1b}$$



$$q_{uF(\text{Series FI-3, FA=12\%})} = \frac{t}{0.00083t+0.018}, R^2=0.953 \quad (4-1c)$$

$$q_{uF(\text{Series FI-4, FA=14\%})} = \frac{t}{0.00053t+0.012}, R^2=0.943 \quad (4-1d)$$

$$q_{uF(\text{Series FI-5, FA=16\%})} = \frac{t}{0.00044t+0.009}, R^2=0.926 \quad (4-1e)$$

由拟合曲线得到的部分 m 和 c 的值如表 4-3 所示。可以看出，采用双曲线模型拟合固化土强度随龄期的发展规律具有较高的准确性，其相关系数均大于 0.9；在分析范围内，随抗压强度的升高， m 和 c 的数值均呈降低趋势； m 和 c 的值与高效固化剂及粉煤灰掺量有关，随高效固化剂及粉煤灰掺量的增加， m 和 c 的数值亦有所降低，这与本文上一章的研究结果相一致。

表 4-3 系列 FI 各固化土试样的双曲线模型的参数及相关系数值

Table 4-3 The values of coefficients of correlation and parameters for the fitted hyperbolic models

系列	FA 掺量 (%)	m_F	c_F	R^2
Series FI-1	2	0.00271	0.0594	0.945
	4	0.00259	0.0526	0.976
	6	0.00224	0.0525	0.954
	8	0.00207	0.0460	0.967
Series FI-2	2	0.00171	0.0408	0.973
	4	0.00165	0.0323	0.965
	6	0.00149	0.0305	0.954
	8	0.00127	0.0312	0.963
Series FI-3	2	0.00116	0.02876	0.975
	4	0.00105	0.02709	0.924
	6	0.00104	0.02129	0.923
	8	0.00096	0.01816	0.965
Series FI-4	2	0.00096	0.01326	0.975
	4	0.00076	0.01424	0.952
	6	0.00073	0.01235	0.973
	8	0.00062	0.0133	0.951
Series FI-5	2	0.00070	0.01114	0.950
	4	0.00062	0.01128	0.933
	6	0.00058	0.01117	0.936
	8	0.00051	0.01231	0.934

本章研究将高效固化剂看作一种整体材料，即不考虑高效固化剂各组分的影响。高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度龄期的双曲线模型的两参数 (m_F 和 c_F) 与高效固化剂和粉煤灰掺量存在多元线性或指数关系。对 m_F 和 c_F 的分析结果进行多元线性



拟合及多元指数拟合, 分别得到两参数同固化剂和粉煤灰掺量的关系式。两参数与固化剂掺量 (C_{CS}) 和粉煤灰掺量 (C_F) 的线性关系式为:

$$m_F = 3.77 \times 10^{-3} + 1.94 \times 10^{-4} \cdot C_{CS} - 3.39 \times 10^{-5} \cdot C_F, R^2 = 0.868 \quad (4-2a)$$

$$c_F = 0.0842 - 4.56 \times 10^{-4} \cdot C_{CS} - 5.14 \times 10^{-4} \cdot C_F, R^2 = 0.863 \quad (4-2b)$$

两参数与固化剂和粉煤灰掺量的指数关系式为:

$$m_F = 0.0133 \times 0.831^{C_{CS}} \times 0.95^{C_F}, R^2 = 0.984 \quad (4-3a)$$

$$c_F = 0.356 \times 0.813^{C_{CS}} \times 0.954^{C_F}, R^2 = 0.973 \quad (4-3b)$$

即, 已知各固化土试样高效固化剂及粉煤灰掺量的前提下, 各试样 m_F 和 c_F 的数值可由式 (4-2) 与式 (4-3) 计算获得。式 (4-3) 具有更高的相关系数, 推断由 m_F 和 c_F 指数关系式得到的各龄期强度更准确。

为验证上述计算式的准确性, 将 FOII 系列各配比代入式 (4-3) 可得强度公式的 m_F 和 c_F 的数值, 进而得到 FOII 系列的强度计算值, 其与实测值对比如图 4-3 所示。可以看出, 由强度计算公式得到的计算强度与实测强度有一定的误差, 但误差多在 10% 以内, 认为计算值是较准确的。因此, 可以认为由高效固化剂和粉煤灰掺量作为参数预测固化剂混掺粉煤灰固化土强度具有较高的准确度。

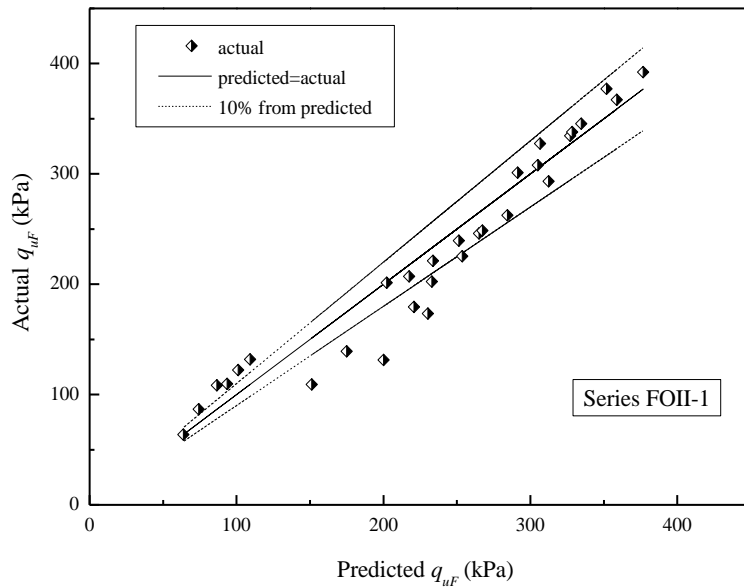


图 4-3 系列 FOII 固化土试样各龄期测试强度与计算强度的对比

Fig. 4-3 Comparison of predicted and actual values of compressive strength for Series FOII at different curing times



4.3 粉煤灰作用机理及量化分析

4.3.1 火山灰及分散效应

如前文所述,粉煤灰在水泥基固化剂固化土中具有多重作用,即为火山灰效应、填充效应及分散效应的综合作用。本质上,火山灰效应发生了化学反应,是一种化学效应;填充效应及分散效应都是由粉煤灰颗粒形态发生的效应,是一种物理效应。因此,将粉煤灰的作用分为火山灰效应和分散填充效应,将二者的共同作用定义为 P&D 效应。

对水泥-粉煤灰固化土,粉煤灰的火山灰反应的发生主要得益于固化土孔隙流体中存在一定量的氢氧化钙。对高效固化剂-粉煤灰固化土,少量的氢氧化钙来自于水泥水化反应和外加剂的沉淀反应。为确定粉煤灰在固化土中的 P&D 效应,测试了掺粉煤灰前后的高效固化剂固化土试样 28d 的微观结构和物相变化,固化土配方如表 4-4 所示。各配方的固化材料组成均不同,C-1 与 C-2 作为基准对比试样,FS-1 和 FS-2 用来分析粉煤灰在固化土中的作用机理。

表 4-4 用于确认粉煤灰效应的固化土配方

Table 4-4 The formulas for mineralogical and microstructural characterization

Sample No.	Formula (%)	Testing projects
C-1	10CSCN	XRD/SEM
FS-1	8CSCN+2FA	XRD/SEM/TGA
C-2	15CSCN	XRD/SEM
FS-2	12CSCN+3FA	XRD/SEM/TGA

可由热重分析(TG-DSC)曲线得到试样中氢氧化钙的含量,即由 300℃到 500℃的失重可认为是氢氧化钙的含量。图 4-4 给出了未处理软黏土、FS-1 固化土试样及 FS-2 固化土试样 28d 的 TG-DSC 曲线。可以看出,软黏土在 300℃到 500℃范围内的失重为 1.52%,而 FS-1、FS-2 固化土试样在同样温度范围内的失重分别为 1.43%和 1.48%,可见三试样的差别很小,这表明在养护龄期为 28d 的固化土试样中氢氧化钙的数量很少。高效固化剂混掺粉煤灰固化土中试样的火山灰反应包括两部分:黏土活性矿物的火山灰反应和粉煤灰高活性微珠的火山灰反应。其主要原因可能是由水泥水化反应及外加剂沉淀反应生成的大部分氢氧化钙与活性矿物在 28d 内发生了火山灰反应被消耗。

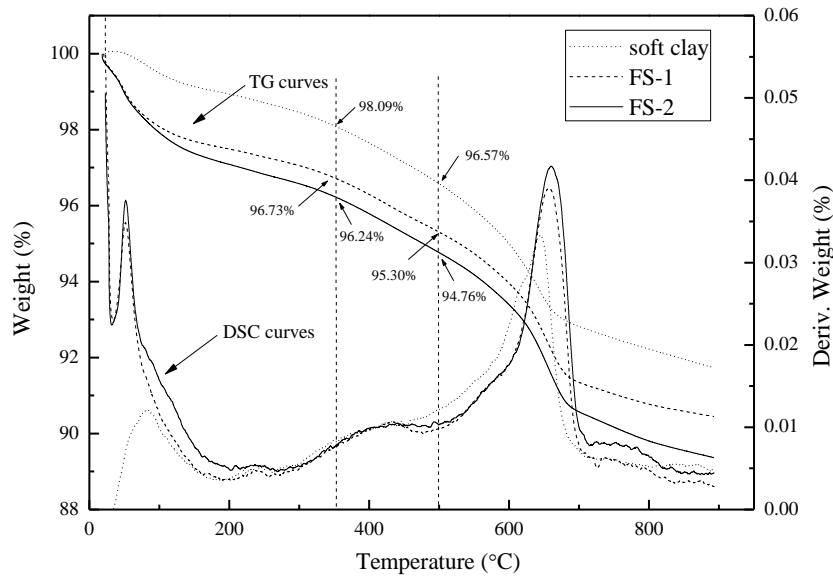


图 4-4 未处理软土、FS-1 及 FS-2 固化土试样的热重曲线

Fig. 4-4 TG-DSC curves of soft clay, specimens FS-1 and FS-2 at 28 days of curing

XRD 可以直接测试固化土试样中的氢氧化钙晶体含量。图 4-5 给出了不同试样的 XRD 图谱。可以看出，在 2θ 为 $22^\circ\sim 32^\circ$ 的范围内可以看出相对较宽的非晶体矿物的衍射峰，这表明在固化土中有不定形的 C-S-H 或 C-A-H 生成，这一现象与图 2-22、图 2-23 中得到的规律相符；各试样的 XRD 图谱均未发现氢氧化钙晶体的衍射峰，说明 28d 的固化土试样不存在氢氧化钙晶核。这一发现与 TG-DSC 结果相符，但由于固化土孔隙流体中仍有大量 OH 存在，潜在火山灰效应不可忽视。

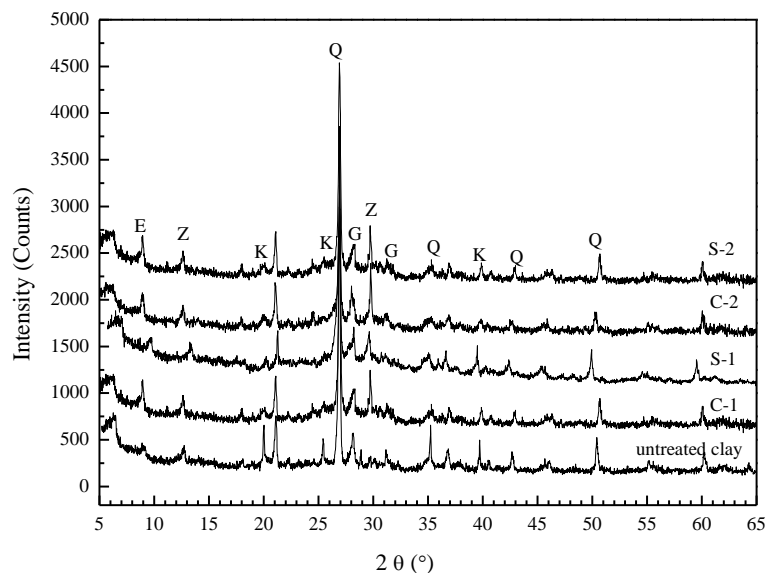


图 4-5 养护 28d 的各试样 XRD 图谱

Fig. 4-5 XRD patterns of specimens for 28 days of curing



SEM 分析可观察固化土微观结构的变化。图 4-6 给出了不同试样的 SEM 图片。可以看出, 高效固化剂混掺粉煤灰固化土试样中很难找到微米以下的球形微珠(如图 2-4 所示), 这说明微米级以下的粉煤灰微珠多数已被消耗; 微米级的粉煤灰微珠可以填充在固化土孔隙间, 起到一定的填充作用; 此外, 粉煤灰将胶凝水化产物分散开来, 使原来的胶凝产物-土颗粒的大团簇形成胶凝产物-粉煤灰-土颗粒连接的小团簇, 形成更多更稳定的骨架结构即, 粉煤灰在固化土中具有一定的分散作用。微观结构及物相分析结果表明, 粉煤灰在固化土中同时存在活性、填充及分散作用。

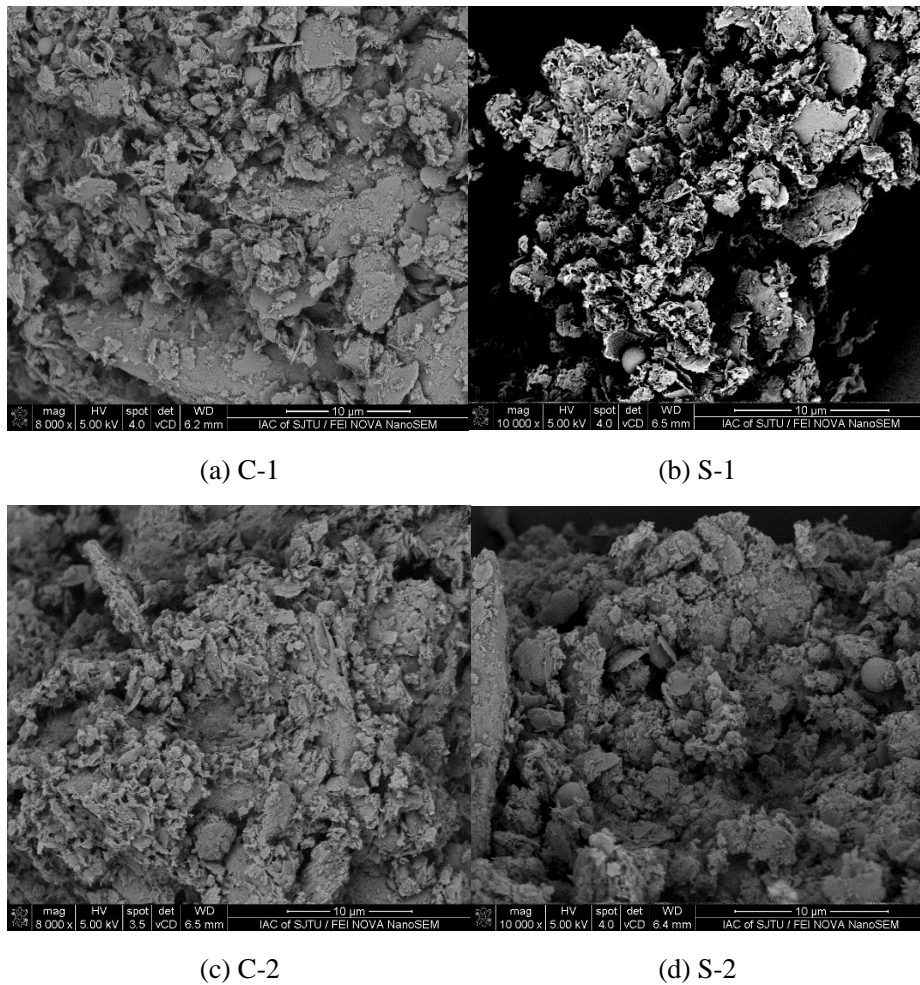


图 4-6 养护 28d 的各试样的 SEM 图片

Fig. 4-6 SEM photos of stabilized specimens for 28 days

4.3.2 量化分析

上一小节的粉煤灰作用机理分析确定了粉煤灰在固化土中的 P&D 效应, 为对 P&D 效应开展量化分析, 参考外加剂量化分析的研究方法, 将粉煤灰看作外掺入一



定量的高效固化剂，定义粉煤灰的 P&D 系数 k_F ，即，理论上的固化剂总量为：

$$C_{CF} = C_{CS} + k_F \cdot C_F \quad (4-4)$$

上式中， C_{CF} (%) 为高效固化剂混掺粉煤灰的当量固化剂总量， C_{CS} (%) 为高效固化剂实际掺量， k_F 为粉煤灰在一定龄期的 P&D 系数， C_F (%) 为粉煤灰实际掺量。

如前所述，粉煤灰的作用随养护龄期发生变化，同时，高效固化剂的掺量亦对粉煤灰作用效应产生一定的影响。即，粉煤灰的作用受养护龄期与高效固化剂掺量的双重影响。因此，P&D 系数被重新定义为高效固化剂的函数：

$$k_F = k_{CS} \cdot C_{CS} + k_f \quad (4-5)$$

上式中， k_{CS} 为固化剂掺量对粉煤灰作用效应的影响系数， k_f 为粉煤灰在一定龄期时的固有 P&D 系数。

由于粉煤灰在不同养护龄期时所起到的作用有所差异，因此，P&D 系数的数值随龄期有所变化。在随后的研究中，不仅要计算出 P&D 系数的大小，还要找出其随龄期的函数关系式。

由第 3 章分析可知，高效固化剂固化土各龄期强度与高效固化剂掺量符合水土比模型，将高效固化剂看作整体材料，因此，高效固化剂固化土的水土比模型为：

$$q_u = \frac{A_F}{(w_c/C_{CS})^{B_F}} \quad (4-6)$$

上式中， A_F 、 B_F 均为常数，根据第 3 章关于外加剂量化作用分析部分的研究结果， A_F 是主控指标且随龄期增长， B_F 为固定值 2.5， C_{CS} (%) 为高效固化剂实际掺量。

基于式 (4-6)，对不同高效固化剂掺量、不同基准含水率的固化土试样各龄期的试验结果进行拟合分析，拟合曲线如图 4-7 所示。由拟合曲线得到固化土各龄期抗压强度与土水比的关系式：

$$q_{u(7\text{days})} = \frac{23868}{(w_c/C_{CS})^{2.5}}, R^2=0.976 \quad (4-7a)$$

$$q_{u(28\text{days})} = \frac{40110}{(w_c/C_{CS})^{2.5}}, R^2=0.990 \quad (4-7b)$$

$$q_{u(60\text{days})} = \frac{50138}{(w_c/C_{CS})^{2.5}}, R^2=0.985 \quad (4-7c)$$

$$q_{u(90\text{days})} = \frac{56205}{(w_c/C_{CS})^{2.5}}, R^2=0.989 \quad (4-7d)$$

$$q_{u(120\text{days})} = \frac{57536}{(w_c/C_{CS})^{2.5}}, R^2=0.986 \quad (4-7e)$$

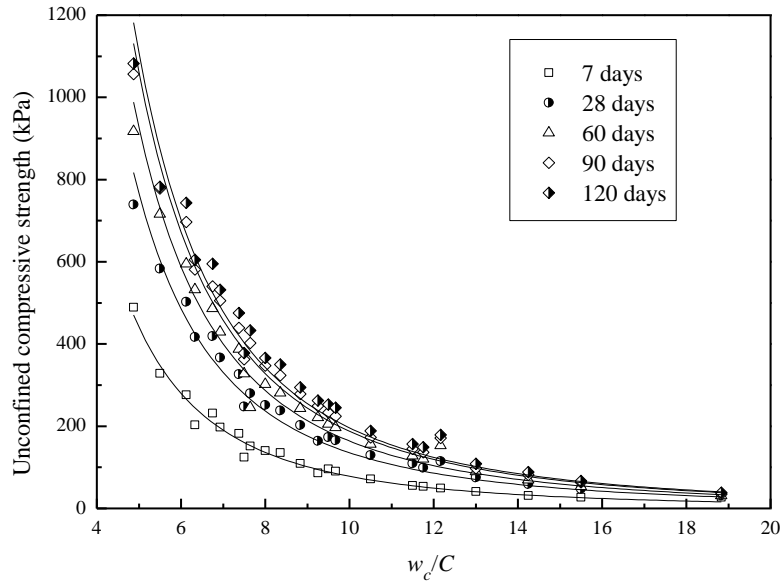


图 4-7 基于水土灰比模型的高效固化剂固化土强度的拟合曲线

Fig. 4-7 Fitted curves of compressive strength development of CSCN stabilized specimens at different curing ages

由式 (4-7) 可以看出, 各拟合式均有较高的相关系数, 且 A_F 随龄期有较大变化并随龄期的增长而不断增大, 为主控参数, 而 B_F 为固定常数且数值为 2.5, 这与第 3 章的研究结果基本一致。

将表 4-1 中各试样的不同龄期强度代入式 (4-7) 可得各龄期的 k_F 值, 见表 4-5。将表 4-5 中数据采用式 (4-5) 进行线性拟合, 得到 k_F 与高效固化剂掺量的关系式:

$$k_{F7days} = 0.009 \cdot C_{CS} + 0.1706 \tag{4-8a}$$

$$k_{F28days} = 0.0032 \cdot C_{CS} + 0.2877 \tag{4-8b}$$

$$k_{F60days} = 0.0037 \cdot C_{CS} + 0.2995 \tag{4-8c}$$

$$k_{F90days} = 0.0024 \cdot C_{CS} + 0.3383 \tag{4-8d}$$

$$k_{F120days} = 0.0069 \cdot C_{CS} + 0.3464 \tag{4-8e}$$

由式 (4-8) 可以看出, 固化剂掺量对粉煤灰作用的影响系数随龄期增加先减小后增大, 粉煤灰在一定龄期时的固有 P&D 系数则呈现小幅增加的趋势。这表明, 固化剂对粉煤灰作用的影响系数及其固有 P&D 系数均是随龄期变化的, 也验证了本小节的假设。



表 4-5 系列 FI 各固化土试样不同龄期的 k_F
 Table 4-5 The k_F values of spicmens Series FI at different curing ages

Series	FA content (%)	k_F				
		7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
Series FI-1	2	0.335	0.511	0.470	0.631	0.744
	4	0.235	0.354	0.370	0.382	0.449
	6	0.244	0.308	0.319	0.358	0.413
	8	0.247	0.292	0.315	0.334	0.367
Series FI-2	2	0.091	0.412	0.478	0.572	0.723
	4	0.268	0.361	0.381	0.401	0.488
	6	0.286	0.322	0.345	0.372	0.431
	8	0.260	0.308	0.356	0.373	0.425
Series FI-3	10	0.244	0.315	0.311	0.333	0.381
	2	0.008	0.303	0.498	0.554	0.736
	4	0.240	0.309	0.323	0.441	0.583
	6	0.311	0.323	0.320	0.385	0.463
Series FI-4	8	0.297	0.360	0.358	0.383	0.428
	10	0.292	0.339	0.358	0.382	0.414
	12	0.267	0.313	0.325	0.339	0.393
	2	0.441	0.615	0.473	0.467	0.609
Series FI-5	4	0.432	0.545	0.518	0.587	0.707
	6	0.402	0.465	0.476	0.496	0.529
	8	0.385	0.434	0.474	0.480	0.575
	10	0.354	0.392	0.436	0.446	0.542
Series FI-5	12	0.358	0.385	0.410	0.429	0.494
	14	0.330	0.355	0.383	0.396	0.458
	2	0.491	0.464	0.498	0.549	0.733
	4	0.416	0.401	0.439	0.469	0.634
	6	0.363	0.347	0.412	0.411	0.535
	8	0.327	0.318	0.404	0.428	0.526
Series FI-5	10	0.330	0.333	0.366	0.377	0.484
	12	0.309	0.339	0.358	0.381	0.460
	14	0.309	0.347	0.348	0.370	0.450
	16	0.307	0.331	0.333	0.351	0.418

将式 (4-8) 与式 (4-4) 结合代入式 (4-7) 可得固化土强度与固化剂和粉煤灰掺量及 w_c 之间的关系:

$$q_{uF(7days)} = \frac{23868}{(C_{CS} + (0.009C_{CS} + 0.1706)C_F)^{2.5}} \quad (4-9a)$$



$$q_{uF(28days)} = \frac{40110}{\left(\frac{w_c}{C_{CS} + (0.0032C_{CS} + 0.2877)C_F}\right)^{2.5}} \quad (4-9b)$$

$$q_{uF(60days)} = \frac{50138}{\left(\frac{w_c}{C_{CS} + (0.0037C_{CS} + 0.2995)C_F}\right)^{2.5}} \quad (4-9c)$$

$$q_{uF(90days)} = \frac{56205}{\left(\frac{w_c}{C_{CS} + (0.0024C_{CS} + 0.3383)C_F}\right)^{2.5}} \quad (4-9d)$$

$$q_{uF(120days)} = \frac{57536}{\left(\frac{w_c}{C_{CS} + (0.0069C_{CS} + 0.3464)C_F}\right)^{2.5}} \quad (4-9e)$$

由式 (4-9) 可以求得任一固化剂掺量、粉煤灰掺量及含水率的固化土在各龄期的理论抗压强度。为验证粉煤灰作用量化分析的准确性, 将系列 FOII 各试样的不同龄期的试验结果同由式 (4-9) 计算得到的理论结果进行对比, 分别如图 4-8 所示。可以看出, 由强度计算公式得到的计算强度与实际误差在 10% 左右, 认为计算值是准确的。因此, 基于固化土强度及水土灰比模型的粉煤灰作用的量化分析结果是可信的。

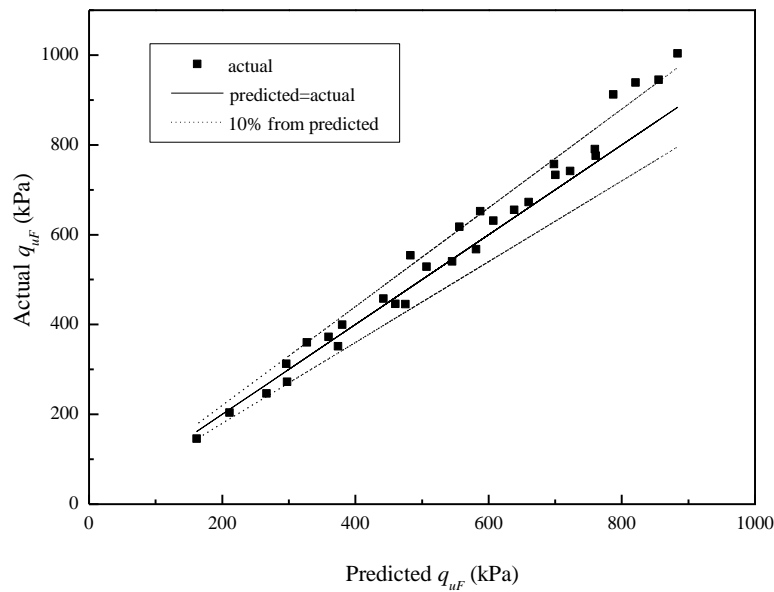


图 4-8 系列 FOII 固化土试样各龄期强度计算值与实测值的对比

Fig. 4-8 Comparison of predicted and actual values of compressive strength of stabilized specimens Series FOII

4.4 粉煤灰对固化土体基本物性指标的影响

4.4.1 试验结果

土的基本物化性质是固化土强度的决定因素之一。粉煤灰的掺入可对固化土在一定龄期的含水率、容重及土颗粒相对密度产生一定的影响。因此, 同样需考察粉煤



灰对固化土基本物性指标的影响，并建立高效固化剂混掺粉煤灰固化土的强度初步计算模型。参考第3章对固化土体基本物性指标表征的研究，结合本章4.3小节开展的粉煤灰作用的量化分析，采用当量高效固化剂总量 (C_{CF}) 作为基础指标之一，考察固化土基本物性指标与当量固化剂总量之间的关系，建立高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度初步计算模型。

参考表4-2的试验设计，同时为准确考察含水率对固化土基本物性指标的影响，本小节设计两组不同基准含水率的试验配方，并根据试验结果分析固化土试样各龄期的容重、含水率、相对密度与初始含水率和当量固化剂总量之间的关系，考察粉煤灰对固化土体基本物性指标的影响，最终建立固化剂混掺粉煤灰固化土强度初步计算模型。试验配比如表4-6所示。

表4-6 建立综合强度计算模型的试验配比

Table 4-6 Mixture compositions for establishing the integrated strength prediction models

Series	w^* (%)	CSCN content (%)	FA content (%)
FI70	70	8,12,16	0, 4, 8, 12, 16
FI90	90	8,12,16	0, 4, 8, 12, 16
FOII-1	70	9.5, 9, 8.5, 8, 7, 6	0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4
FOII-2	70	14.25, 13.5, 12.75, 12, 10.5, 9	0.75, 1.5, 2.25, 3, 4.5, 6

注： w^* ，基准含水率，为剔除固化剂浆体中水分后的剩余水量与干土的质量比 (%)

测试表4-6中各配方不同养护龄期的无侧限抗压强度，结果如表4-7所示。如表4-7所示，不同含水率的固化土抗压强度随养护龄期的增长均呈现递增趋势；对同一系列固化土试样，低掺量固化剂固化土长期强度与较高掺量固化剂固化土的早中期强度几乎相当；当高效固化剂及粉煤灰掺量相同时，同龄期的低含水率固化土抗压强度远高于同龄期的高含水率试样抗压强度；随粉煤灰掺量的增加，固化土各龄期强度有不同幅度的提高。这说明，高效固化剂及粉煤灰掺量、养护龄期及含水率为影响固化土抗压强度的主要因素。

表4-7 FI70与FI90各配方不同龄期的抗压强度

Table 4-7 The compressive strength of stabilized specimens FI70 and FI90 at different curing ages

Series	CSCN (%)	FA (%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
				7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
FI70	8	0	74	86.3	164.5	221.4	253.5	266.3
	8	4	76	113.3	216.7	275.5	312.7	343.3
	8	8	78	139.7	256.6	335.2	389.5	423.2
	12	0	76	203.1	416.9	532.7	595.6	635.2
	12	4	78	268.5	475.7	601.2	735.3	832.5



续表 4-7

Series	CSCN(%)	FA (%)	w_c (%)	Compressive strength(kPa)				
				7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
FI70	12	8	80	326.7	598.3	746.5	865.3	939.2
	12	12	82	353.5	649.3	829.5	845.5	1080.3
	16	0	78	489.2	739.4	917.6	1067.5	1132.8
	16	4	80	546.7	911.3	1163.3	1326.7	1486.5
	16	8	82	585.9	975.6	1335.6	1535.3	1735.3
	16	12	84	636.3	1120.5	1438.9	1667.7	1910.3
FI90	8	0	94	53.5	98.7	120.3	136.6	149.2
	8	4	96	61.2	121.7	153.6	171.2	189.6
	8	8	98	73.4	149.3	188.4	226.5	281.3
	12	0	96	140.8	251.1	302.0	347.3	365.8
	12	4	98	149.4	281.4	361.3	401.5	451.7
	12	8	100	172.3	335.1	430	496.1	556.2
	12	12	102	201.5	391.2	594.9	696.8	734.4
	16	0	98	276.3	502.9	594.9	696.8	743.4
	16	4	100	278.3	515.6	652.4	732.1	807.6
	16	8	102	320.5	589.2	740.9	847.2	957.8
	16	12	104	359.8	576.7	838.4	982.9	1149.6

4.4.2 基本指标的标准化分析

根据本章 4.2 小节对粉煤灰作用的量化分析结果,可知不同龄期高效固化剂混掺粉煤灰固化土的当量高效固化剂总量有所变化。因此,应首先对当量高效固化剂总量 (C_{CF}) 进行标准化分析,即标准化粉煤灰的 P&D 系数。由式 (4-8) 可知,固化剂掺量对粉煤灰作用的影响系数 (k_{CS}) 随养护龄期先减小后增加,粉煤灰在一定龄期时的固有 P&D 系数 (k_f) 随养护龄期不断增加,但随养护龄期增加, k_f 的增加幅度减小。对此,本文认为 k_{CS} 与养护龄期具有二次函数的相关关系; k_f 与养护龄期的关系可由双曲线模型表示。基于此假设,对式 (4-8) 中的 P&D 系数 (k_{CS} 和 k_f) 同养护龄期之间的关系进行曲线拟合,拟合得到的曲线如图 4-9 所示。由拟合曲线可得火山灰系数与养护龄期的关系式:

$$k_{CS}=1.69 \times 10^{-6} \cdot (t-67.4)^2+0.00216, R^2=0.652 \quad (4-10a)$$

$$k_f=\frac{t}{2.77t+21.79}, R^2=0.965 \quad (4-10b)$$



由式 (4-10) 可以看出, k_f 的拟合关系式具有较高的相关系数, 而 k_{CS} 的拟合关系式相关系数较低。同时, 亦可发现, k_{CS} 的数值比 k_f 的数值小至少一个数量级, 由图 4-9 可以看出, 与拟合值相差较大的实际值大多在 0.002~0.004 的范围内, 即便有高效固化剂掺量作为系数, $k_{CS} \cdot C_{CS}$ 对 P&D 系数的影响依然较小。因此, 可以认为分析 P&D 系数与养护龄期关系的相关假设基本成立。将式 (4-10) 代入式 (4-4) 可得当量固化剂总量与高效固化剂及粉煤灰掺量和养护龄期的关系式:

$$C_{CF} = C_{CS} + \left\{ [1.69 \times 10^{-6} \cdot (t - 67.4)^2 + 0.00216] \cdot C_{CS} + \frac{t}{2.77t + 21.79} \right\} \cdot C_F \quad (4-11)$$

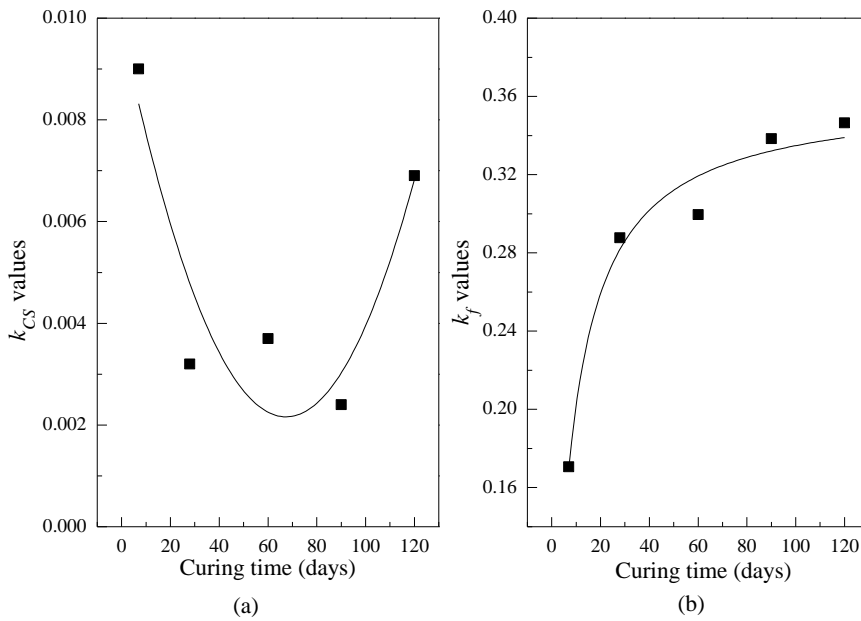


图 4-9 P&D 系数的拟合曲线

Fig. 4-9 The values and fitted curves for P&D factors k_{CS} and k_f

由式 (4-11) 可计算得到系列 FI70 与系列 FI90 各配方的不同掺量固化剂的当量水泥总量值, 并结合表 4-7 的抗压强度测试结果绘制强度-当量固化剂总量曲线, 如图 4-10 (以系列 FI70 为例) 所示。可以看出, 随当量固化剂总量的增加, 固化土抗压强度不断增加, 且当量固化剂总量较大时, 强度的增加幅度亦较大; 当固化土基准含水率发生变化时, 强度随当量水泥总量的变化趋势并未发生明显变化, 依然呈现出类似的变化规律, 这说明初始含水率的大幅变化并未影响固化剂混掺粉煤灰对软土的增强作用, 仅对增强作用的强弱有所影响, 即可认为, 含水率与固化剂掺量对固化土强度的影响是相对独立的。

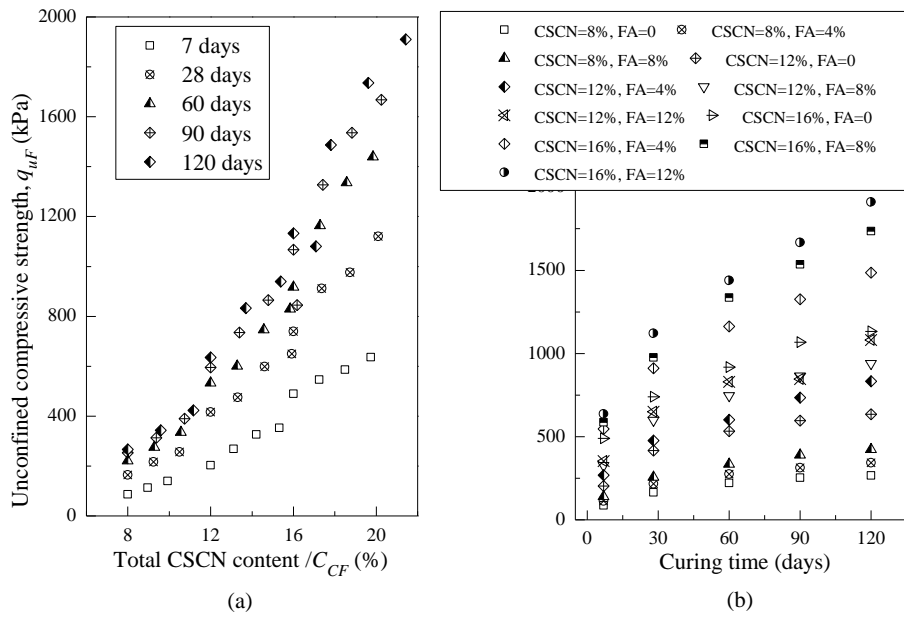


图 4-10 系列 FI70 的固化土抗压强度随当量固化剂总量及养护龄期的变化关系
 Fig. 4-10 The relationship of compressive strength of stabilized specimens Series FI70 with total CSCN content and curing time

由图 4-10 (b) 可以看出, 随养护龄期不断增加, 固化土抗压强度不断增长, 但其增长幅度降低, 28d 强度几乎可达 120d 强度的 60% 左右, 基准含水率的大幅增加并未明显改变这一规律, 这表明初始含水率与养护龄期对固化土强度的影响亦是相对独立的。上述现象与水泥固化土及高效固化剂固化土的分析结果相一致, 因此, 最终的固化土强度计算模型可表示为同时考虑初始含水率、当量固化剂总量及养护龄期的函数。

基于以上分析, 可知当量固化剂总量、养护龄期及初始含水率对高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度的影响是两两独立的, 参考第 3 章的分析结果, 上述三个基础指标可用来开展某一龄期高效固化剂混掺粉煤灰固化土的容重、颗粒比重及含水率的标准化分析。

参考第 3 章对固化土容重的分析方法, 定义容重比 (γ_{tF}/γ_0), 即固化土试样一定龄期的容重与未掺高效固化剂与粉煤灰时土水混合物初始容重的比值。容重比可反映某一龄期、某一当量固化剂总量下容重的变化, 消除了含水率对容重的影响, 便于对容重的标准化分析。理论上, 应将高效固化剂与粉煤灰对固化土容重的影响作用区别开来, 但若将粉煤灰掺量作为参数引入标准化分析式, 便增加了容重的计算复杂度。因此, 参考第 3 章的标准化分析结果, 同样考察固化土容重比与养护龄期对数的关系, 二者关系如图 4-11 所示。可以看出, 容重比与养护龄期的对数有较好线性关



系。图 4-12 给出了容重比与当量固化剂总量的关系，可以看出，二者基本呈线性变化。因此，固化土试样的容重比可由养护龄期对数及当量固化剂总量得出，采用多元线性拟合对三者关系进行拟合，拟合曲线如图 4-12 所示，关系式为：

$$\gamma_{tF} = \gamma_0 \cdot (0.00324C_{CF} + 0.003381gt + 0.99) , R^2 = 0.993 \quad (4-12)$$

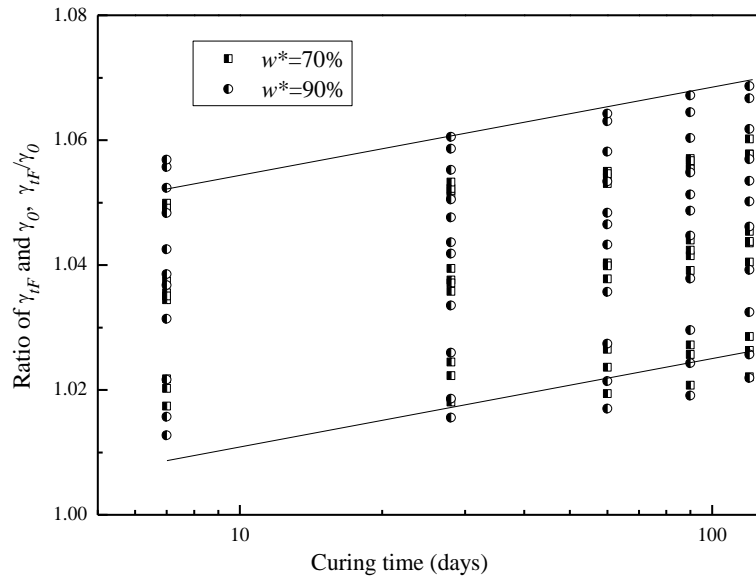


图 4-11 固化土试样容重比与养护龄期对数的关系

Fig. 4-11 The relationship of the ratio of γ_t' and γ_0 with the logarithm of curing time

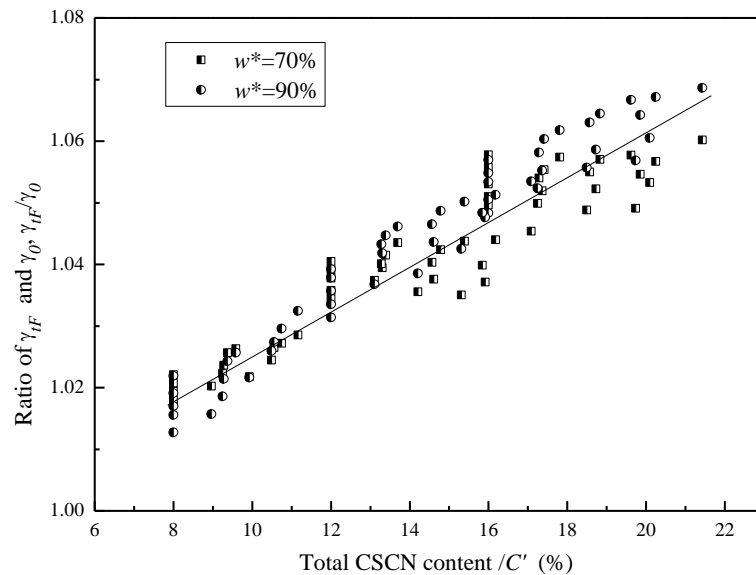


图 4-12 固化土试样容重比与当量固化剂总量的关系

Fig. 4-12 The relationship of the ratio of γ_t' and γ_0 with the total CSCN content



参照固化土容重的标准化分析，固化土一定龄期含水率的标准化同样需消除基准含水率（或初始含水率）的影响。定义含水率比（ w_{tF}/w_c ），即固化土试样一定龄期实际含水率与初始含水率的比值。含水率比可反映某一龄期、某一固化剂掺量下的含水率的相对改变，同时将初始含水率作为指标之一，有利于高效固化剂混掺粉煤灰固化土含水率的标准化分析。

依据第 3 章的研究结果，可知固化剂掺量对固化土含水率的影响作用强于养护龄期对固化土含水率的影响。同时，随着养护龄期超过 120d，固化土孔隙流体 pH 值的降低及游离钙相数量的减少导致粉煤灰等活性矿物的火山灰反应进一步减弱，从而使固化土含水率的降低速度进一步降低。因此，对含水率与当量固化剂总量和养护龄期关系需要采用不同函数关系进行分析。

考察含水率比与养护龄期对数的关系，二者变化关系如图 4-13 所示。可以看出，含水率比与养护龄期对数大致呈线性关系。考察含水率比与当量水泥总量之间的关系，二者变化关系如图 4-14 所示。可知，含水率比随当量固化剂总量基本呈线性降低的趋势。因此，固化土试样的含水率比可由养护龄期对数及当量固化剂总量得出，采用多元线性拟合对三者关系进行拟合，拟合曲线如图 4-14 所示，拟合曲线具有较高的相关系数，拟合关系式为：

$$w_{tF} = w_c \cdot (-0.0148C_{CF} - 0.0079 \lg t + 0.99) , R^2 = 0.995 \quad (4-13)$$

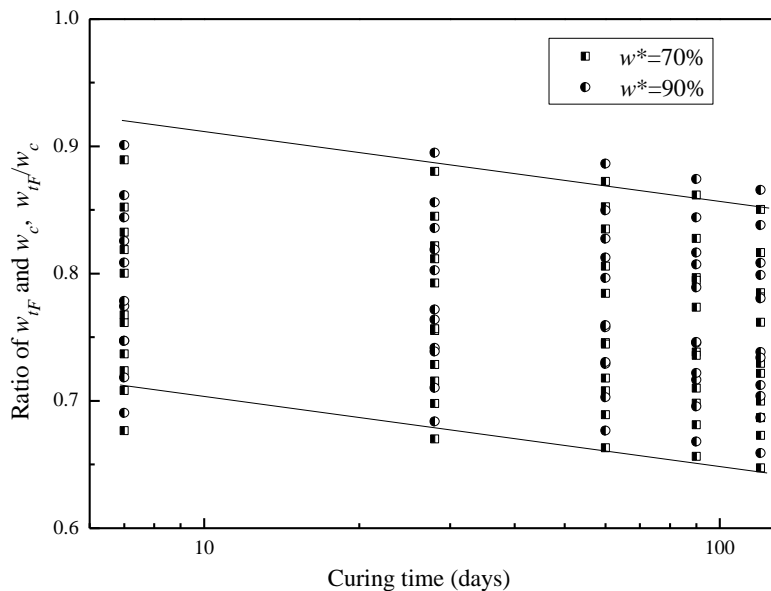


图 4-13 固化土试样含水率比与养护龄期对数的关系

Fig. 4-13 The relationship of the ratio of w_{tF} and w_c with the logarithm of curing time

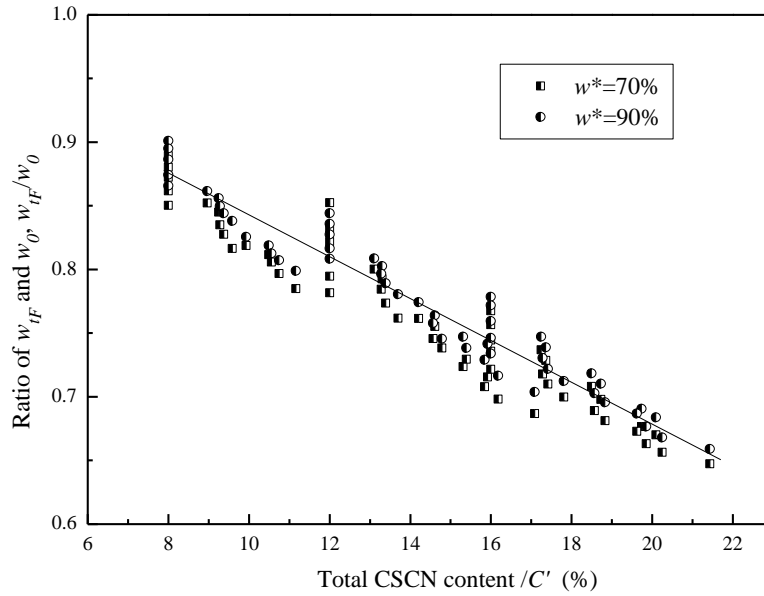


图 4-14 固化土试样含水率比与当量固化剂总量的关系

Fig. 4-14 The relationship of the ratio of w_t' and w_c with the total CSCN content

基于第 3 章研究可知，固化土固相颗粒比重仅受当量固化剂总量的影响，将固化土一定龄期的比重与未处理土比重的比值作为参数，同样会发现二者比值随龄期及当量水泥掺量的分布依然较分散。定义相对固化剂掺量 $(1-C_{CF}/100)$ ，并引入固化剂混掺粉煤灰固化土粒比重与未处理土粒比重的比值 (G_{stF}/G_{s0}) ，考察比重比与相对固化剂掺量之间的关系，并对二者关系进行拟合，拟合曲线如图 4-15 所示。由拟合曲线得到固化土一定龄期相对密度与当量固化剂总量的关系式：

$$G_{stF} = G_{s0} \cdot \left(1 - \frac{C_{CF}}{100}\right)^{0.1456}, \quad R^2 = 0.989 \quad (4-14)$$

基于对基本物性指标的标准化分析，综合式 (4-12)、式 (4-13)、式 (4-14) 及第 3 章式 (3-17) 可得由固化土初始物性指标以及养护龄期计算高效固化剂混掺粉煤灰固化土一定龄期孔隙比 (e_{tF}) 的公式：

$$e_{tF} = \left(G_{s0} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_0} \cdot \frac{w_c}{100}\right) \cdot \frac{\left(\frac{100}{w_c} - 0.0148C_{CF} - 0.00791gt + 0.99\right) \cdot \left(1 - \frac{C_{CF}}{100}\right)^{0.1456}}{0.00324C_{CF} + 0.003381gt + 0.99} - 1 \quad (4-15)$$

由于 γ_0 亦为初始含水率的函数，将第 3 章式 (3-25) 代入上式可得最终的孔隙比计算公式：

$$e_{tF} = \left(G_{s0} \cdot \frac{\gamma_w}{18.47 - 0.0473 \cdot w_c} \cdot \frac{w_c}{100}\right) \cdot \frac{\left(\frac{100}{w_c} - 0.0148C_{CF} - 0.00791gt + 0.99\right) \cdot \left(1 - \frac{C_{CF}}{100}\right)^{0.1456}}{0.00324C_{CF} + 0.003381gt + 0.99} - 1 \quad (4-16)$$

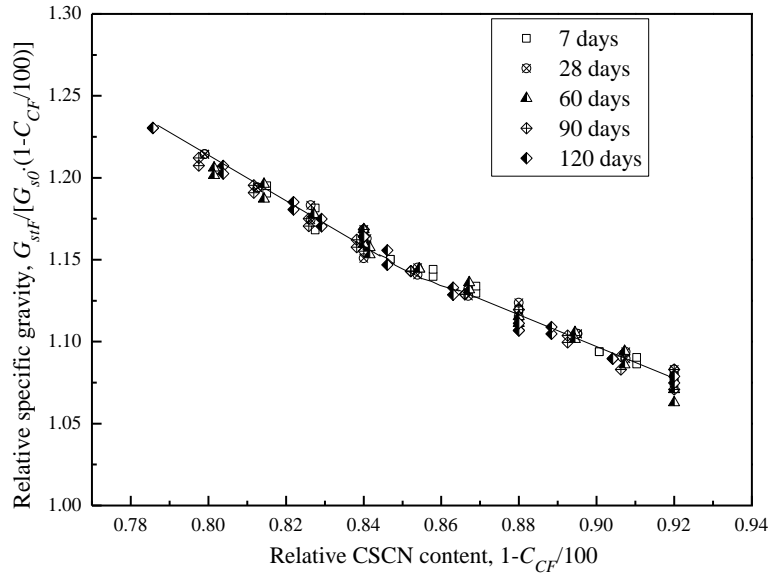


图 4-15 FI70 与 FI90 固化土试样一定龄期的相对比重比与相对水泥含量的关系

Fig. 4-15 The relationship and fitted curve of the relative specific gravity stabilized specimens Series FI70 and FI90 at different curing ages with relative cement content

4.4.3 固化剂混掺粉煤灰固化土强度初步计算模型

第 3 章研究可知固化土强度与孔隙率或孔隙比同固化剂掺量存在可能的指数关系。参考高效固化剂固化土强度初步计算模型，本小节为简化最终计算结果，仅分析固化剂混掺粉煤灰固化土无侧限抗压强度与孔隙比的关系。建立高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度与孔隙比同当量固化剂总量的指数模型：

$$q_u = K_{CF} \cdot \left(\frac{e_{tF}}{C_{CF}}\right)^{J_{CF}} \quad (4-17)$$

$$q_u = K_{LF} \cdot e^{J_{LF}[e_{tF}/C_{CF}]} \quad (4-18)$$

基于式 (4-17)，考察系列 FI70 与 FI90 固化土强度与 e_{tF}/C_{CF} 的变化关系，对二者关系进行拟合，曲线如图 4-16 所示。得固化土强度 (q_{uF}) 与 e_{tF}/C 的关系式：

$$q_{uF(7days)} = 45946 \cdot \left(\frac{e_{tF}}{C_{CF}}\right)^{-2}, R^2 = 0.976 \quad (4-19a)$$

$$q_{uF(28days)} = 75696 \cdot \left(\frac{e_{tF}}{C_{CF}}\right)^{-2}, R^2 = 0.974 \quad (4-19b)$$

$$q_{uF(60days)} = 97047 \cdot \left(\frac{e_{tF}}{C_{CF}}\right)^{-2}, R^2 = 0.987 \quad (4-19c)$$

$$q_{uF(90days)} = 105029 \cdot \left(\frac{e_{tF}}{C_{CF}}\right)^{-2}, R^2 = 0.980 \quad (4-19d)$$

$$q_{uF(120days)} = 108070 \cdot \left(\frac{e_{tF}}{C_{CF}}\right)^{-2}, R^2 = 0.980 \quad (4-19e)$$

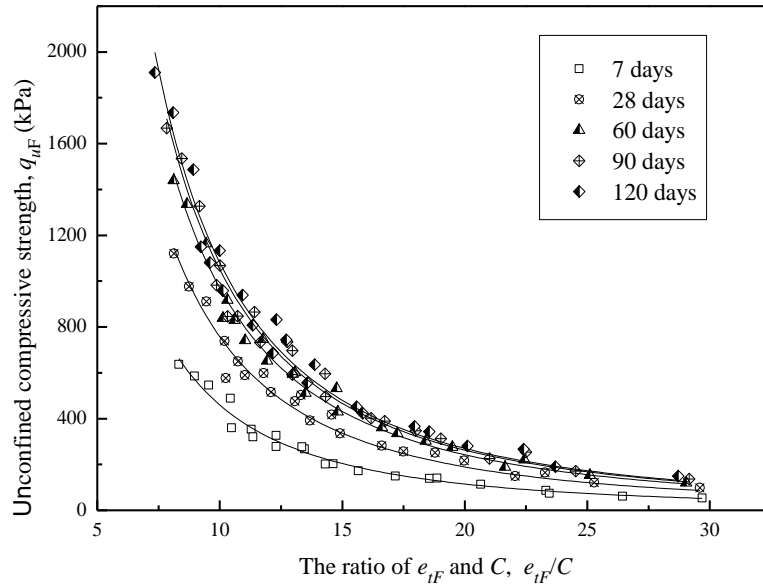


图 4-16 系列 FI70 与 FI90 固化土强度随孔隙比与当量固化剂总量比值的幂函数关系
 Fig. 4-16 The relationship of compressive strength of stabilized specimens Series FI70 and FI90 at different curing times with e_{iF}/C_{CF}

由式 (4-19) 可以看出, 各式均有较高的相关系数, K_{CF} 的值随龄期增加, 而 J_{CF} 的值保持不变。因此, K_{CF} 的值是决定固化土强度的主控参数, 采用双曲线模型拟合 K_{CF} 随养护龄期的关系, 拟合曲线如图 4-17 所示, 二者关系式为:

$$K_{CF} = \frac{t}{8.47 \times 10^{-6} \cdot t + 1.08 \times 10^{-4}}, R^2 = 0.975 \quad (4-20)$$

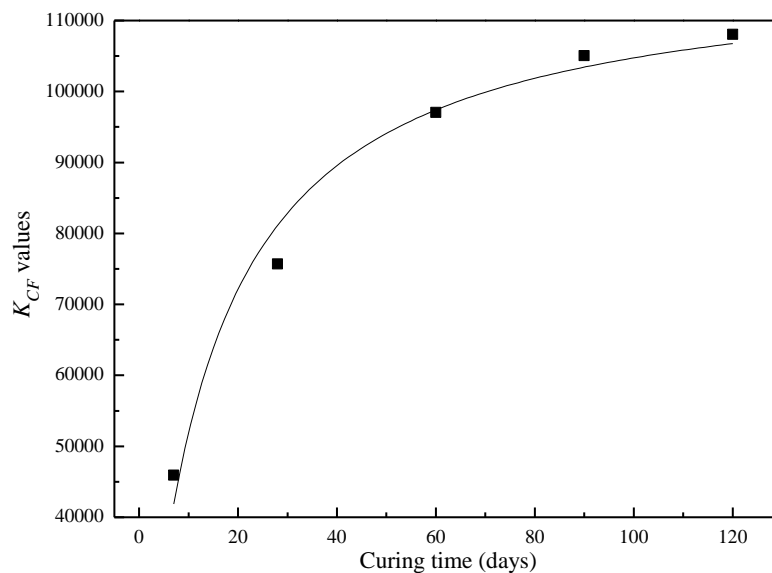


图 4-17 K_{CF} 的值与养护龄期的变化关系
 Fig. 4-17 The relationship of the K_{CF} values with curing time



将式 (4-11) 与式 (4-20) 代入式 (4-19), 可得基于式 (4-17) 的高效固化剂混掺粉煤灰固化土的强度计算模型:

$$q_{uF} = \frac{t}{8.47 \times 10^{-6} \cdot t + 1.08 \times 10^{-4}} \cdot \left(\frac{e_{tF}}{C_{CS} + [1.69 \times 10^{-6} \cdot (t - 67.4)^2 + 0.00216] \cdot C_{CS} \cdot C_F + \frac{t}{2.77t + 21.79} \cdot C_F} \right)^{-2} \quad (4-21)$$

将式 (4-16) 代入式 (4-21) 中, 可得基于式 (4-17) 的强度计算模型的最终形式。由式 (4-21) 可知高效固化剂混掺粉煤灰固化土某龄期抗压强度为未处理土粒比重、固化土初始含水率、养护龄期、固化剂各组分掺量的函数。即, 理论上讲, 对任一初始含水率、高效固化剂及粉煤灰掺量的固化土, 各龄期计算强度均可由式 (4-21) 获得。为验证计算模型的准确性, 测试了表 4-6 中的系列 FOII 固化土试样的各龄期强度, 将测试结果同由式 (4-21) 得到的计算结果对比, 对比结果如图 4-18 所示。可以看出, 固化土试样绝大多数实测值的波动范围在计算值的 ±10% 以内。

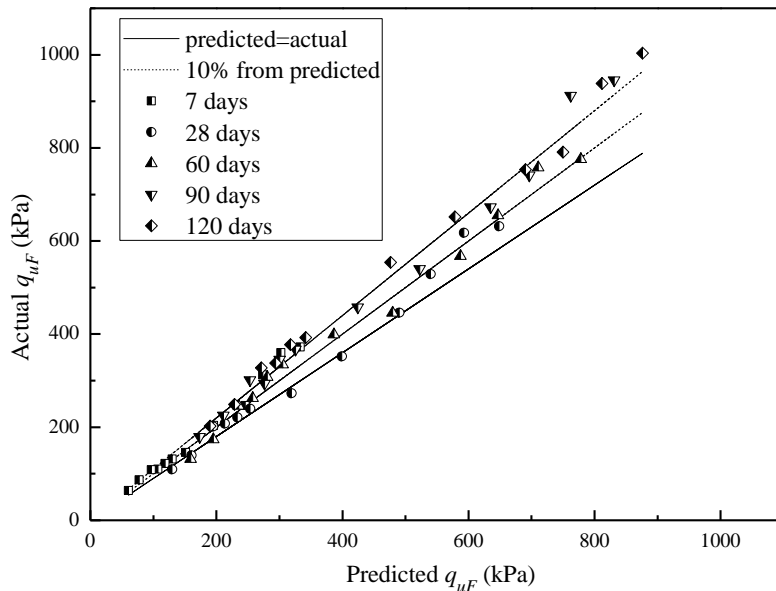


图 4-18 系列 FOII 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (4-21) 计算值的对比
Fig. 4-18 Comparison of predicted strength calculated from (4-21) and experimental results of stabilized specimens Series FOII

基于式 (4-18), 考察固化土强度与 e_{tF}/C_{CF} 的变化关系, 并对二者关系进行拟合, 拟合曲线如图 4-19 所示。可得到高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度与 e_{tF}/C_{CF} 的自然指数关系式:

$$q_{uF(7\text{days})} = 2580 \cdot e^{-0.17(e_{tF}/C_{CF})}, R^2 = 0.961 \quad (4-22a)$$

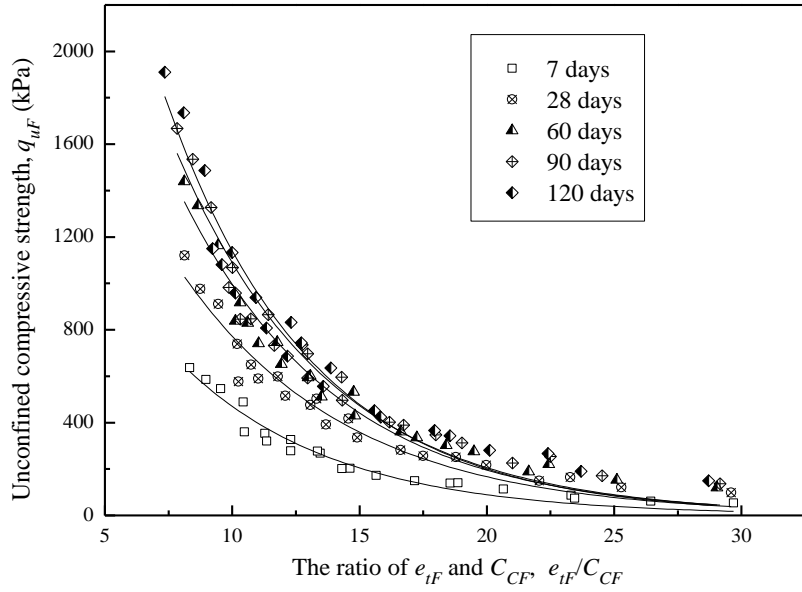


图 4-19 系列 FI70 与 FI90 固化土强度随孔隙比与当量固化剂总量比值的幂函数关系
 Fig. 4-19 The relationship of compressive strength of stabilized specimens Series FI70 and FI90 at different curing times with e_{tF}/C_{CF}

$$q_{uF(28days)} = 4265 \cdot e^{-0.17(e_{tF}/C_{CF})}, R^2 = 0.961 \quad (4-22b)$$

$$q_{uF(60days)} = 5472 \cdot e^{-0.17(e_{tF}/C_{CF})}, R^2 = 0.965 \quad (4-22c)$$

$$q_{uF(90days)} = 5966 \cdot e^{-0.17(e_{tF}/C_{CF})}, R^2 = 0.958 \quad (4-22d)$$

$$q_{uF(120days)} = 6248 \cdot e^{-0.17(e_{tF}/C_{CF})}, R^2 = 0.959 \quad (4-22e)$$

由式 (4-22) 可以看出, 各拟合关系式均有较高的相关系数, K_{LF} 的值随龄期增加, 而 J_{CF} 的值保持不变。因此, K_{LF} 的值是决定固化土强度的关键参数, 采用双曲线模型拟合 K_{CF} 随养护龄期的关系, 拟合曲线如图 4-20 所示, 拟合关系式为:

$$K_{LF} = \frac{t}{1.47 \times 10^{-4} \cdot t + 0.002}, R^2 = 0.971 \quad (4-23)$$

将式 (4-11) 与式 (4-24) 代入式 (4-23), 可得基于式 (4-18) 的高效固化剂混掺粉煤灰固化土的强度计算模型:

$$q_{uF} = \frac{t}{1.47 \times 10^{-4} \cdot t + 0.002} \cdot e^{-0.17 \times \{e_{tF} \{C_{CS} + [1.69 \times 10^{-6} \cdot (t-67.4)^2 + 0.00216] \cdot C_{CS} \cdot C_F + \frac{t}{2.77t+21.79} \cdot C_F\}} \quad (4-24)$$

将式 (4-16) 代入式 (4-24) 中, 可得基于式 (4-18) 的强度基础计算模型的最终形式。

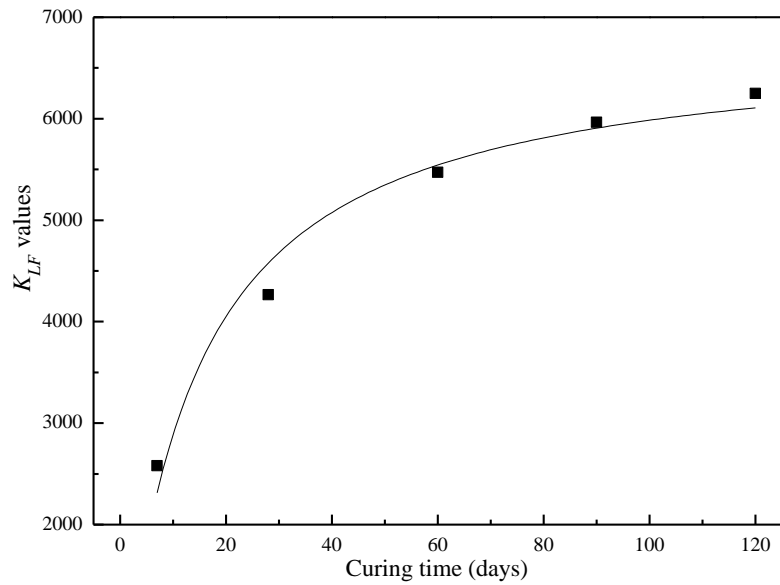


图 4-20 K_{LF} 的值与养护龄期的变化关系

Fig. 4-20 The relationship of the K_{LF} values with curing time

为验证强度计算模型式 (4-24) 的准确性, 将表 4-6 中的系列 FOII 固化土试样各龄期强度的测试结果同由式 (4-24) 得到的计算结果对比, 对比结果如图 4-21 所示。可以看出, 仅有少数的实测值在计算值的 10% 波动范围以内, 大多数实测值均大于计算值的 1.1 倍; 固化土强度越低, 实测值与计算值误差越大。

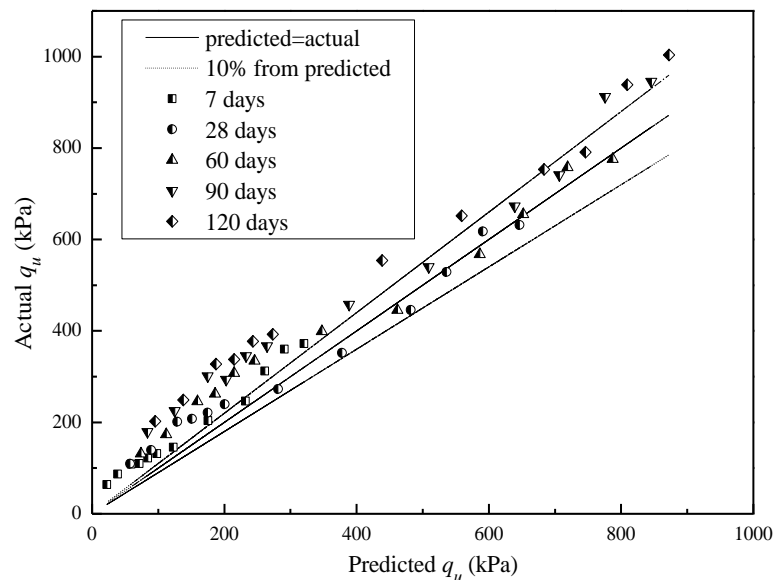


图 4-21 系列 FI70 与 FI90 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (4-24) 计算值的对比
Fig. 4-21 Comparison of predicted strength calculated from (4-24) and experimental results of stabilized specimens Series FI70 and FI90



由以上分析可知,对高效固化剂混掺粉煤灰固化土,基于自然指数函数的强度计算模型准确度低于基于幂函数的强度计算模型,这与第3章的强度计算模型的建立结果并不完全相符。究其主要原因,则是由于粉煤灰的掺入改变了固化土中后期的火山灰反应及固相颗粒基本物性指标的变化规律。这一结论为工程中的固化土强度预测提供了理论参考,即,对水泥或水泥基无机固化剂固化土与水泥或水泥基无机固化剂混掺粉煤灰或工业废渣固化土,应对粉煤灰或工业废渣对固化土固相颗粒基本物性指标进行预估,而后选择一种适用的计算模型,不能一概而论。总而言之,将固化土固相颗粒的基本物性指标引入固化土强度计算模型是提高强度预测精度的有效途径。

4.5 本章小结

为提高软土的密实度,同时提高高效固化剂固化土的工程性能及经济适用性,将低品质粉煤灰引入软土固化材料体系,测试了不同掺量粉煤灰对不同掺量高效固化剂固化土抗压强度的影响,考察了高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度随龄期的发展规律;基于火山灰及分散填充效应的基本认识,探讨了粉煤灰对固化土微观结构及物相组成的变化,提出当量固化剂总量理论、粉煤灰的P&D效应及P&D系数,并以此为基础,对粉煤灰在固化土中的作用效应进行了量化分析;测试了固化土的基本物性指标,考察其与当量固化剂总量(C_{CF})与养护龄期的关系,建立高效固化剂混掺粉煤灰固化土的强度基础计算模型。通过本章研究,得到以下结论:

(1) 一定量粉煤灰可显著提高高效固化剂固化土的抗压强度,且粉煤灰存在最佳掺量,主要原因为过量粉煤灰易在固化土中产生聚集,形成低强度松散聚集区域;对不同的固化剂掺量,粉煤灰最佳掺量不同,可能原因是固化剂掺量较大时有更多的水化产物生成,促进粉煤灰的分散填充作用。需要注意的是,过量粉煤灰明显降低了固化土早期强度,但随养护龄期的增长,粉煤灰的负面影响减弱。

(2) X射线衍射分析(XRD)、热重分析(TGA)及扫描电镜分析(SEM)结果确认了粉煤灰的火山灰及分散填充(P&D)效应,即粉煤灰微珠不仅可发生化学反应生成胶凝水化产物并将水化产物-土颗粒形成的大团簇分散为小团簇,还可填充在固化土孔隙中起到一定的骨架支撑作用,证实了粉煤灰具有最佳作用时的掺量与固化剂用量有关。基于高效固化剂固化土的水土灰比模型,量化分析粉煤灰在固化土中的作用效应,认为不同养护龄期的粉煤灰P&D系数(k_F)的值可表示为高效固化剂掺量的函数。即,对粉煤灰与不同掺量高效固化剂固化土,P&D系数及当量固化剂总量(C_{CF})均可通过计算获得。



(3) 固化土物性指标测试结果表明, 高效固化剂混掺粉煤灰固化土的试样容重 (γ_{tF}) 虽随高效固化剂掺量增加而明显增加, 但粉煤灰的掺入降低了试样容重, 因此, 容重随当量固化剂总量仅呈小幅增加。固化土试样的含水率 (w_{tF}) 随当量固化剂总量及养护龄期的增长而显著降低。类似于纯固化剂固化土的分析结果, 当量固化剂总量亦为影响固化剂混掺粉煤灰固化土固相颗粒相对密度 (G_{stF}) 的唯一因素。分别定义容重比 (γ_{tF}/γ_0)、含水率比 (w_{tF}/w_c) 及相对当量固化剂掺量 ($1-C_{CF}/100$), 对固化土基本物性指标进行标准化分析。

(4) k_F 随养护龄期的变化可由二次函数及双曲线模型表征, 从而可得不同龄期的 C_{CF} 。为简化计算, 建立高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度与基准指标 (e_{tF}/C_{CF}) 的指数模型。采用双曲线函数分析指数模型主控指标 (K_C 和 K_L) 与养护龄期的关系, 得到主控指标与龄期的函数关系式。基于自然指数函数的强度计算模型准确度低于基于幂函数的强度计算模型, 这说明粉煤灰的掺入改变了固化土中后期的火山灰反应强度及固相颗粒基本物性指标的变化规律。这一结论为工程中的固化土强度计算提供了理论参考, 有助于现场岩土工程师根据实际的土体性质及固化材料的掺量和类型选择一种适用的计算模型, 便于施工及成本控制。



第 5 章 固化饱和有机质软土的强度特性与计算模型研究

5.1 引言

如前所述,腐殖酸(humic acid, 胡敏酸)与富里酸(fulvic acid)为土体有机质的主要成分。一些学者对比研究了腐殖酸与富里酸对水泥固化土力学性能的影响作用大小,并提出相对应的作用机理。具有多价酸根的腐殖酸含有大量吸附有低价阳离子(H^+ 、 Na^+)的官能团,可与高价金属离子发生离子交换反应生成难溶或不溶于水的盐类。而富里酸分子量较小,一般以水溶性形式存在,含有的官能团亦少于腐殖酸,故离子交换作用弱于腐殖酸。但富里酸络合高价金属离子形成的胶体物质具有很强的吸附能力,可吸附在矿物颗粒表面形成吸附薄膜层,影响了水泥水化作用。此外,富里酸可使已成型的水化铝酸钙、水化硫铝酸钙等矿物解体,阻碍了水泥固化土稳定骨架结构的形成。

目前,关于二者对固化土性能的影响大小尚无准确定论。本文认为,富里酸形成的络合物不仅可以吸附在水泥颗粒或水化产物表面,亦可吸附在土颗粒表面。事实上,水泥在固化土中的质量占比仅为 10%~20%左右,可以推测富里酸络合物大部分吸附在土颗粒表面。而腐殖酸的离子交换及中和反应直接影响到固化土土体孔隙流体的 pH 值及 Ca^{2+} 的浓度,进而导致水泥水化产物的减少及火山灰反应的减弱。因此,本文基于腐殖酸对固化土强度影响作用较明显的理论,研究腐殖酸对固化剂或固化剂混掺粉煤灰固化土抗压强度的影响。

定性或半定量评价腐殖酸在水泥固化土中的影响作用是当前研究有机质土的主要手段,表现为:测试原状土的有机质含量,将不同有机质含量的原状土按一定比例混合制备拟定有机质含量的有机质土,定性考察有机质对固化土力学性能的影响^[190,197];将原状土在 70~105℃下(可使土中有机质分解失去活性)烘干后碾碎,掺入一定量的腐殖酸加水拌合制得人工有机质土,半定量分析腐殖酸对固化土力学性能的影响作用^[112,113,195]。而对土体有机质或腐殖酸影响固化土力学性能的定量化研究并不多见。

为对腐殖质的影响作用进行定量化研究,本文采用掺加高纯度腐殖酸的方式制备人工有机质土(材料性质与制备方法见本文 2.3 小节),测试腐殖酸对固化土抗压强度的降低作用,考察各龄期的腐殖酸对固化土抗压强度的作用权重,探讨高效固化剂及粉煤灰掺量对腐殖酸作用的影响。本章的技术路线图如图 5-1 所示。

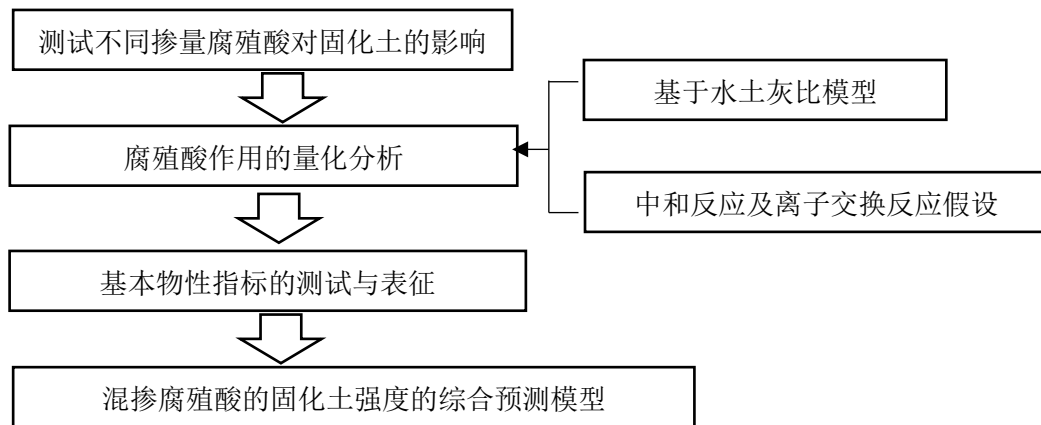


图 5-1 第 5 章研究技术路线图

Fig. 5-1 Schematic of research procedure for Chapter 5

5.2 高效固化剂固化有机质土的强度特性

5.2.1 试验方案及结果

随有机质（或腐殖酸）含量的增加，固化土的强度是不断降低的，而当有机质含量超过某一临界值时，固化土强度继续降低的趋势减缓。为准确研究腐殖酸对高效固化剂固化土抗压强度的影响，横向的腐殖酸(humic acid powder, HAP)掺量为 2.5~20%，纵向的高效固化剂（CSCN）掺量分别为 8%，12% 及 16%，各试验配方如表 5-1 所示。

表 5-1 试验配方表

Table 5-1 Mixture compositions

Series	CSCN content (%)	HAP content (%)
HI-1	8	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20
HI-2	12	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20
HI-3	16	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20
HOII-1	10	5, 10, 15, 20
HOII-2	15	5, 10, 15, 20

表 5-1 中各配方的基准含水率（即，未掺加固化材料浆体及除去腐殖酸的水土比）均为 70%。系列 HI 用以研究不同粉煤灰掺量对高效固化剂固化土抗压强度的影响，系列 HOII 作为对比系列试样，用以判断粉煤灰作用量化分析的准确性。

为了准确对比相同腐殖酸掺量对固化土试样强度发展的影响，定义强度保留系数，即一定掺量腐殖酸固化土某龄期的无侧限抗压强度与无腐殖酸固化土的同龄期



强度的比值。强度保留系数的关系式为：

$$RC_n = q_{uHn} / q_u \quad (5-1)$$

上式中， RC_n 为强度保留系数， n 为固化土试样养护龄期， q_{uHn} 为一定掺量腐殖酸固化土试样某龄期的抗压强度， q_u 为不掺腐殖酸的固化土某龄期的强度。

图 5-2~图 5-4 给出了系列 HI 固化土试样的抗压强度与强度保留系数随腐殖酸掺量的变化关系。由图 5-2 (a) 可以看出，随腐殖酸掺量由 0 增加到 15%，固化土的抗压强度快速降低，掺 15% 腐殖酸的固化土试样各龄期的强度仅有不掺腐殖酸固化土同龄期强度的 1/5 左右；当腐殖酸掺量大于 15% 时，固化土强度降低趋势不显著，趋近于一固定值。

掺一定量腐殖酸的固化土试样强度亦随龄期有不同幅度增长，但当腐殖酸掺量较大时，中后期强度增长幅度十分有限；掺入 10%、15% 及 20% 腐殖酸的系列 HI-1 固化土试样的 90d 抗压强度分别为 73.5 kPa、34.5kPa 及 28.7 kPa；掺 20% 腐殖酸的系列 HI-1 固化土试样的 120d 抗压强度为 29.7 kPa，仅比 90d 强度高出 1 kPa，可见，高掺量腐殖酸的固化土中后期强度基本不增长。

由图 5-2 (b) 可以看出，与强度随腐殖酸掺量变化规律类似的是，强度保留系数随腐殖酸掺量的增加不断降低，腐殖酸掺量大于 15% 时，强度保留系数保持基本不变；值得注意的是，腐殖酸掺量相同时，随养护龄期的增加，强度保留系数明显降低，掺 10% 腐殖酸的系列 HI-1 固化土试样的 7d、28d 及 90d 强度保留系数分别为 0.45、0.34 与 0.29，这表明腐殖酸对固化土中后期强度影响作用大于对前期强度的影响，主要原因为腐殖酸的离子交换及中和反应消耗了固化土孔隙流体中的 OH^- ，影响了固化土中后期的火山灰反应。

由图 5.3 及图 5-4 可以看出，当高效固化剂掺量增大时，固化土试样抗压强度及强度保留系数随腐殖酸掺量亦呈现类似的变化规律。即，随固化土中腐殖酸含量的增加，固化土试样的抗压强度及强度保留系数均出现不同程度的降低。同时可知，随高效固化剂掺量的增加，同腐殖酸掺量的固化土强度保留系数有所提高，掺 10% 腐殖酸的系列 HI-1 固化土试样的 7d、28d 及 90d 强度保留系数分别为 0.62、0.49 与 0.46。这表明，相同量腐殖酸对低掺量高效固化剂固化土各龄期抗压强度的影响更显著，主要原因为高掺量高效固化剂固化土孔隙流体中有更多的 OH^- ，在与腐殖酸发生中和反应后，还可发生较强的火山灰反应。

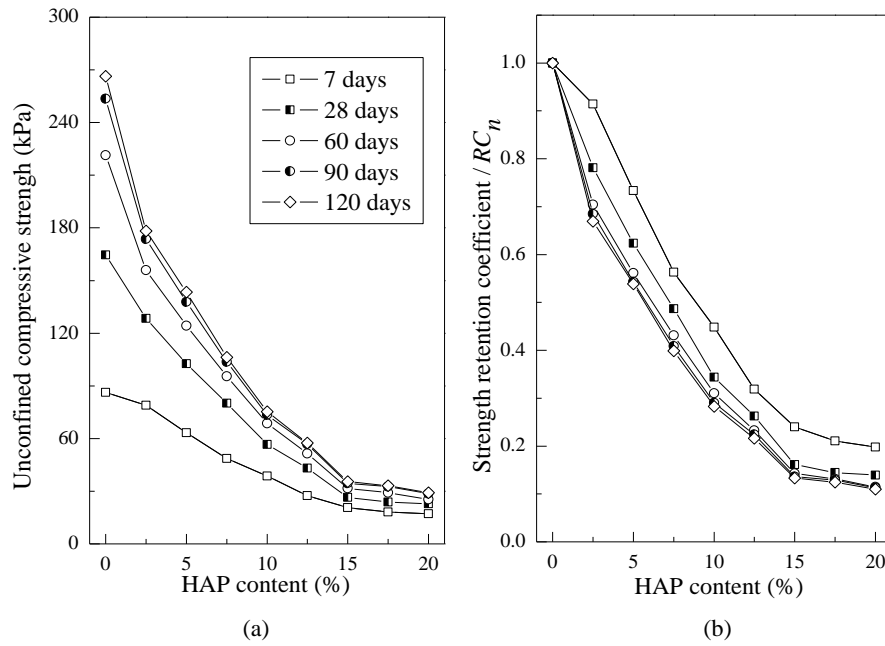


图 5-2 系列 HI-1 固化土试样抗压强度及强度保留系数随腐殖酸掺量的变化

Fig. 5-2 The relationship of compressive strength and RC_n to HAP content for specimens Series HI-1

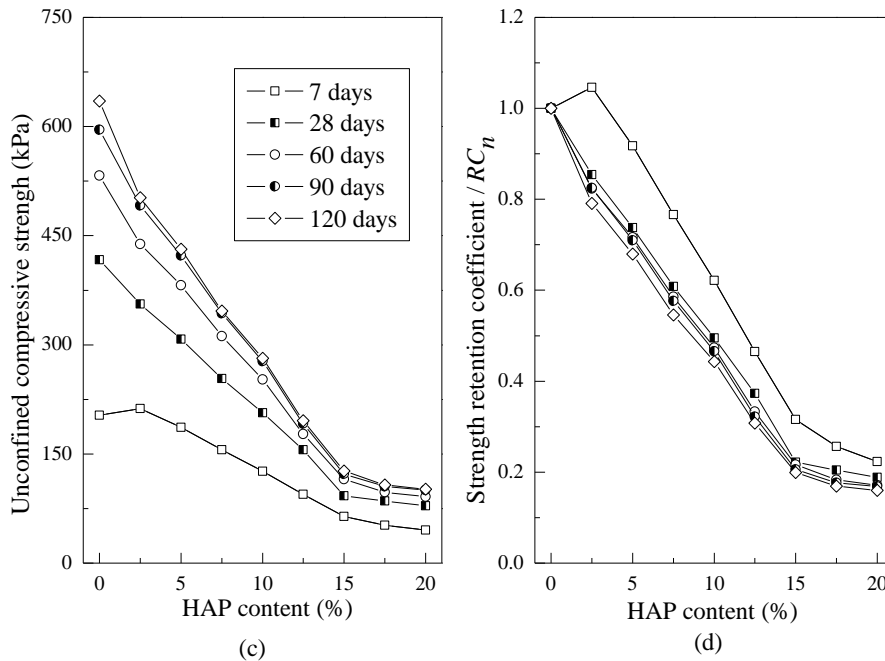


图 5-3 系列 HI-2 固化土试样抗压强度及强度保留系数随腐殖酸掺量的变化

Fig. 5-3 The relationship of compressive strength and RC_n to HAP content for specimens Series HI-2

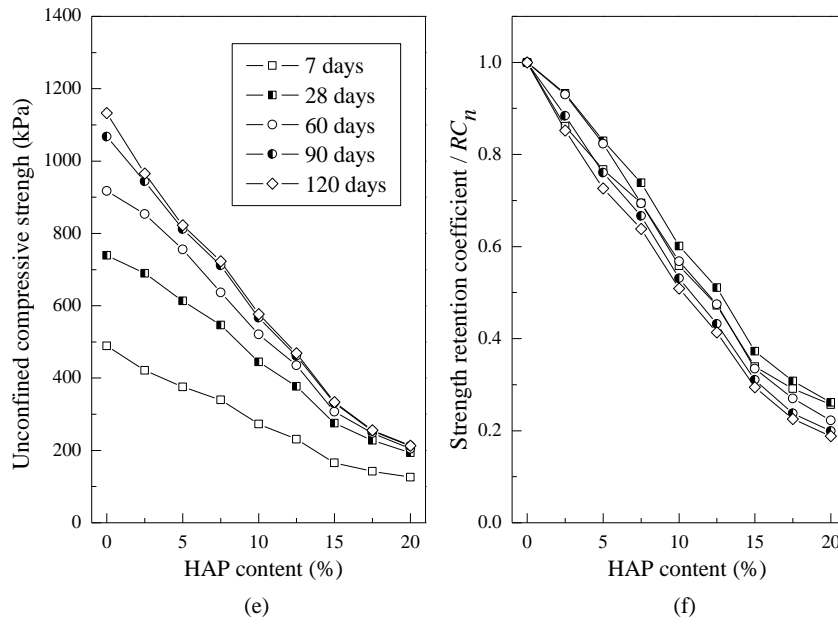


图 5-4 系列 HI-3 固化土试样抗压强度及强度保留系数随腐殖酸掺量的变化

Fig. 5-4 The relationship of compressive strength and R_{Cn} to HAP content for specimens Series HI-3

5.2.2 强度随龄期的变化关系

对上一小节的试验结果运用双曲线模型开展抗压强度随养护龄期变化规律的分析，以 HI-1 为例，强度随龄期的拟合曲线如图 5-5 所示。可以看出，固化有机质土早期强度增长迅速，随着养护龄期的增加，固化土中长期强度增长速率降低，当养护龄期为无限长时，固化有机质土强度趋近于稳定。

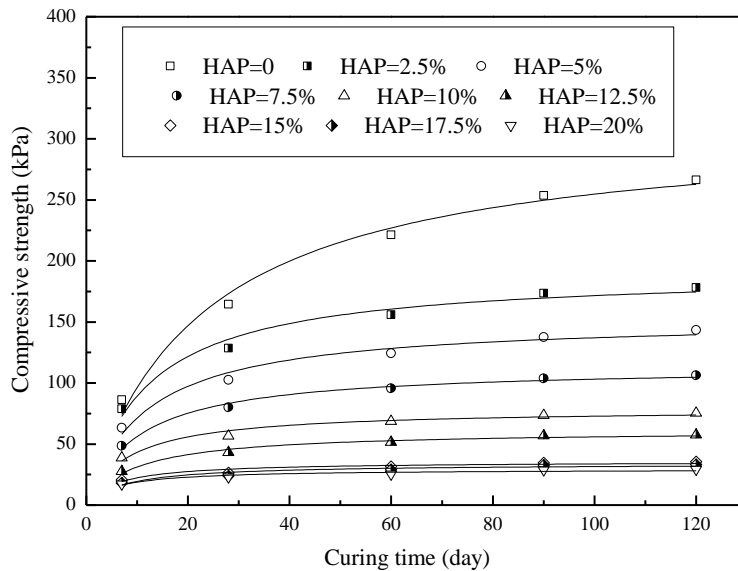


图 5-5 系列 HI-1 固化土试样强度随龄期的变化

Fig. 5-5 The relationship of compressive strength of specimens HI-1 with curing time



由各系列拟合曲线得到的 m_H 和 c_H 的值如表 5-2 所示。可以看出, 采用双曲线模型拟合固化土强度随龄期的发展规律具有较高的准确性, 其相关系数均大于 0.9; 在分析范围内, 随抗压强度的降低, m_H 和 c_H 的数值均呈增加趋势; m_H 和 c_H 的数值与高效固化剂及腐殖酸掺量有关, 与前文研究结果相似, 随高效固化剂掺量的增加, m_H 和 c_H 的数值有所降低; 当高效固化剂掺量相同时, 随腐殖酸掺量的增加, m_H 和 c_H 的数值均有所增加。

表 5-2 系列 HI 各固化土试样的双曲线模型的参数及相关系数值

Table 5-2 The values of coefficients of correlation and parameters for the fitted hyperbolic models

Series	HAP content (%)	m_H	c_H	R^2
Series HI-1	2.5	0.00523	0.0596	0.971
	5	0.00655	0.0746	0.969
	7.5	0.0088	0.0899	0.986
	10	0.01269	0.1045	0.958
	12.5	0.01634	0.1568	0.972
	15	0.02801	0.1680	0.871
	17.5	0.02954	0.2181	0.864
	20	0.03403	0.1935	0.896
Series HI-2	2.5	0.00183	0.0232	0.975
	5	0.00213	0.0260	0.975
	7.5	0.00266	0.0298	0.976
	10	0.00329	0.0365	0.978
	12.5	0.00482	0.0422	0.993
	15	0.00756	0.0653	0.945
	17.5	0.00878	0.0764	0.992
	20	0.00912	0.0951	0.992
Series HI-3	2.5	0.00096	0.0114	0.973
	5	0.00112	0.0119	0.983
	7.5	0.0013	0.0127	0.973
	10	0.00163	0.0153	0.987
	12.5	0.002	0.0168	0.997
	15	0.00281	0.0228	0.995
	17.5	0.00368	0.0225	0.995
	20	0.00446	0.0238	0.992

参考第 4 章对高效固化剂混掺粉煤灰固化土的研究, 将高效固化剂整体看作一种材料。本文认为高效固化剂固化有机质土强度随龄期的双曲线模型的两参数 (m_H 和 c_H) 与高效固化剂和腐殖酸掺量之间存在多元线性或指数关系。对表 5-2 中的分



析结果进行多元线性拟合及多元指数拟合, 分别得到 m_H 和 c_H 同高效固化剂掺量(C_{CS}) 和腐殖酸掺量 (C_{HAP}) 的关系式。两参数的线性拟合关系式为:

$$m_H=0.021-1.74\times 10^{-3}\cdot C_{CS}+7.52\times 10^{-4}\cdot C_{HAP}, R^2=0.672 \quad (5-2a)$$

$$c_H=0.1869-0.0137\cdot C_{CS}+0.0041\cdot C_{HAP}, R^2=0.789 \quad (5-2b)$$

两参数与固化剂和腐殖酸掺量的指数关系式为:

$$m_H=0.0522\times 0.741^{C_{CS}}\times 1.107^{C_{HAP}}, R^2=0.969 \quad (5-3a)$$

$$c_H=0.4325\times 0.781^{C_{CS}}\times 1.068^{C_{HAP}}, R^2=0.962 \quad (5-3b)$$

为进一步确认式 (5-3) 的准确性, 计算得到表 5-1 中系列 HOII 各试样的 m_H 和 c_H 的指数计算值, 进而得到各龄期的计算强度, 并同实测强度 q_u 进行了对比, 如图 5-6 所示。可以看出, 固化土强度较低 (系列 HOII-1) 时, 实测强度大多在预测强度波动的 10% 左右, 而当固化土强度较高 (系列 HOII-2) 时, 实测强度仅有少数点在预测强度波动的 10% 以内, 但大多在强度波动的 20-30% 以内。这说明, 采用双曲线模型、高效固化剂掺量及腐殖酸含量预测高效固化剂固化有机质土强度具有一定的准确度。

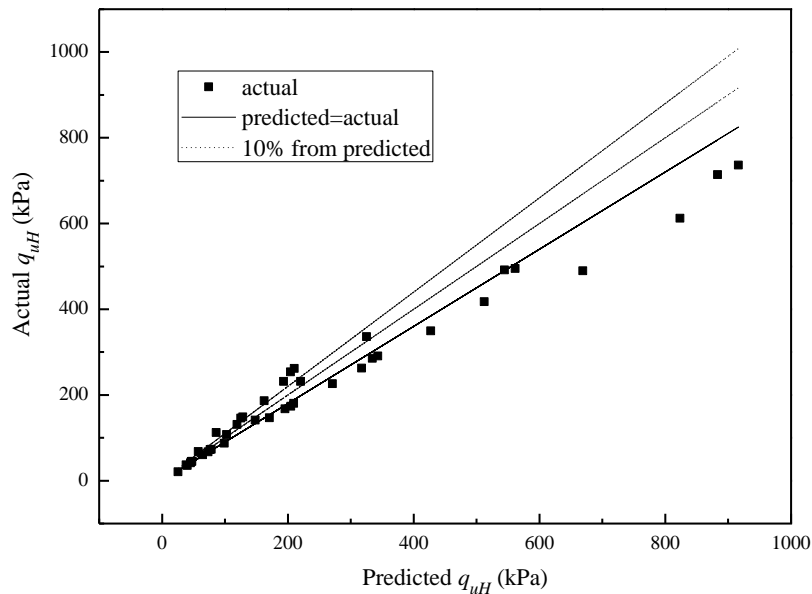


图 5-6 系列 HOII-1 固化土试样各龄期测试强度与计算强度的对比

Fig. 5-6 Comparison of predicted and actual values of compressive strength for Series HOII-1 at different curing times



5.3 高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土的强度特性

5.3.1 试验方案及结果

由前文分析可知,粉煤灰在固化土中具有一定程度的火山灰及分散填充效应。而大孔隙率为有机质软土的特征之一,已有众多学者将粉煤灰引入有机质土的固化处理,并开展了大量室内及现场试验研究。作为本文固化材料的最终形式,高效固化剂混掺粉煤灰固化土软土的效果已在前文阐述。因此,为更好的了解高效固化剂及粉煤灰在有机质土或淤泥土中的固化效果及作用机理,研究腐殖酸对高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度的影响是十分有必要的。

参考上一节的研究方法及试验结果,对不同的高效固化剂掺量,当腐殖酸掺量大于 15%时,固化土强度的降低幅度减小。这表明,高含量腐殖酸对固化土的作用机理与中低含量腐殖酸的作用机理并不完全相同。为更准确的分析腐殖酸对高效固化剂混掺粉煤灰固化土强度的影响,本小节设计的试验方案如表 5-3 所示。即固化剂掺量分别为 8%, 12%及 16%,粉煤灰掺量分别为 4%, 8%及 12%,腐殖酸掺量分别为 5%, 10%及 15%。

表 5-3 试验配方表

Table 5-3 Mixture compositions

Series	CSCN content (%)	FA content (%)	HAP content (%)
HFI-1	8	0, 4, 8, 12	0, 5, 10, 15
HFI-2	12	0, 4, 8, 12	0, 5, 10, 15
HFI-3	16	0, 4, 8, 12	0, 5, 10, 15
HFOII	10	5, 10	5, 10, 15

表 5-4~表 5-6 给出了系列 HFI 固化土试样各龄期的测试强度。由表 5-4 可以看出,当高效固化剂掺量与腐殖酸含量均相同时,随粉煤灰掺量的增加,固化土各龄期强度均有不同程度的增加;当腐殖酸含量为 15%时,8%固化剂与 12%粉煤灰固化土各龄期强度几乎为 8%固化剂固化土各龄期强度的一倍,这表明,粉煤灰对固化有机质土强度具有较强的改善作用。

表 5-4 系列 HFI-1 固化土试样的试验结果

Table 5-4 Experimental results of stabilized specimens Series HFI-1

FA content (%)	HAP content (%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
			7d	28 d	60 d	90 d	120 d
0	0	74	86.3	164.5	221.4	253.5	266.3
	5	70.5	63.3	102.6	124.3	137.7	143.5



续表 5-4

FA content (%)	HAP content (%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
			7d	28 d	60 d	90 d	120 d
0	10	67.3	38.7	56.6	68.7	73.5	75.3
	15	64.3	20.7	26.5	31.6	34.5	35.5
	0	76	113.3	216.7	275.5	312.7	343.3
4	5	72.4	89.2	143.2	169.1	181.4	189.3
	10	69.1	57.6	82.5	96.5	103.2	108.2
	15	66.1	31.8	44.6	53.2	56.4	58.2
8	0	78	139.7	256.5	335.2	389.5	423.2
	5	74.3	107.8	177.2	207.8	237.6	247.5
	10	70.9	67.5	108.7	124.1	138.2	146.9
12	15	67.8	35.7	59.5	69.2	78.5	83.6
	0	80	125.5	239.6	328.6	376.4	416.5
	5	76.2	101.5	167.7	207.2	233.4	249.9
	10	72.7	64.3	103.2	128.1	143.0	145.7
	15	69.6	38.1	62.3	72.3	81.8	87.5

表 5-5 系列 HFI-2 固化土土试样的试验结果

Table 5-5 Experimental results of stabilized specimens Series HFI-2

FA content (%)	HAP content (%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
			7d	28 d	60 d	90 d	120 d
0	0	76	203.1	416.9	532.7	595.6	635.2
	5	72.4	186.4	307.6	381.7	422.5	431.5
	10	69.1	126.3	206.5	252.5	277.4	281.6
	15	66.1	64.2	92.5	115.3	122.5	126.5
4	0	78	268.5	475.7	601.2	735.3	832.5
	5	74.3	204.7	347.3	426.9	507.4	561.3
	10	70.9	142.3	245.4	285.6	330.9	374.6
8	15	67.8	79.6	117.9	138.3	147.1	166.5
	0	80	326.7	598.3	746.5	856.3	939.2
	5	76.2	254.6	445.7	538.3	601.7	652.7
12	10	72.7	176.9	323.1	358.3	395.0	432.1
	15	69.6	98.6	155.5	171.7	186.2	197.4
	0	82	353.5	649.3	829.5	954.5	1080.3
	5	78.1	281.7	493.5	605.5	671.3	761.6
	10	74.5	201.5	335.1	414.8	449.1	507.7
	15	71.3	117.4	167.5	191.1	205.2	232.3



表 5-6 系列 HFI-3 固化土土试样的试验结果
Table 5-6 Experimental results of stabilized specimens Series HFI-3

FA content (%)	HAP content (%)	w_c (%)	Compressive strength (kPa)				
			7d	28 d	60 d	90 d	120 d
0	0	78	489.2	739.4	917.6	1067.5	1132.8
	5	74.3	375.3	613.1	755.3	811.5	822.5
	10	70.9	273.2	444.5	521.2	566.5	576.6
	15	67.8	165.9	275.3	307.1	331.4	343.7
4	0	80	546.7	911.3	1163.3	1326.7	1486.5
	5	76.2	520.9	692.6	884.1	975.2	1082.3
	10	72.7	306.2	496.7	633.9	716.4	772.6
	15	69.6	185.7	330.7	373.9	417.9	460.8
8	0	82	585.9	975.6	1335.6	1535.3	1735.3
	5	78.1	459.9	751.2	1028.4	1166.8	1295.4
	10	74.5	336.8	541.5	687.3	805.7	892.5
	15	71.3	205.1	356.8	407.4	465.3	516.6
12	0	84	636.3	1120.5	1438.9	1667.7	1910.3
	5	80	505.9	874.1	1122.4	1284.1	1451.8
	10	76.4	372.3	633.8	789.6	933.9	1021.6
	15	73	225.9	401.9	476.5	530.3	602.5

由表 5-5 可以看出, 系列 HFI-2 固化土试样各龄期强度呈现与系列 HFI-1 固化土试样强度的发展规律相类似, 即, 粉煤灰的掺入对固化土强度有较明显的改善作用; 同样地, 当腐殖酸含量为 15% 时, 仅用 12% 高效固化剂固化土的 7d、60d 及 120d 强度分别为 64.2 kPa、115.3 kPa 及 126.5 kPa, 而 12% 高效固化剂与 12% 粉煤灰固化土的同龄期强度分别为 117.4kPa、191.1kPa 及 232.3kPa, 几乎为未掺粉煤灰固化土强度的一倍。

由表 5-6 可以看出, 系列 HFI-3 固化土试样各龄期强度呈现与系列 HFI-1 与 HFI-2 固化土试样强度的发展规律相类似, 即, 粉煤灰的掺入对固化土强度有较明显的改善作用; 同样地, 当腐殖酸含量为 15% 时, 仅用 16% 高效固化剂固化土的 7d、60d 及 120d 强度分别为 165.9kPa、307.1kPa 及 343.7kPa, 而 16% 高效固化剂与 12% 粉煤灰固化土的同龄期强度分别为 225.9kPa、476.5kPa 及 602.5kPa。



5.3.2 强度随龄期的变化关系

类似于前文对固化土强度随龄期发展变化规律的研究，考察固化剂混掺粉煤灰固化土含腐殖酸软土强度随养护龄期的变化有助于建立固化剂与粉煤灰固化有机质土强度综合计算模型。同样采用双曲线模型分析固化土强度随龄期的变化规律，图 5-7 给出了系列 HFI-1 粉煤灰掺量为 8% 的固化土试样强度随龄期变化的拟合曲线。可以看出，与前文的研究结果类似，双曲线模型基本符合高效固化剂混掺粉煤灰固化土有机质土抗压强度随养护龄期的变化规律。即，固化有机质土的早期强度有较明显的增长，随养护龄期的增长，强度增长率降低，当养护龄期为无限长时，固化有机质土强度趋于稳定。

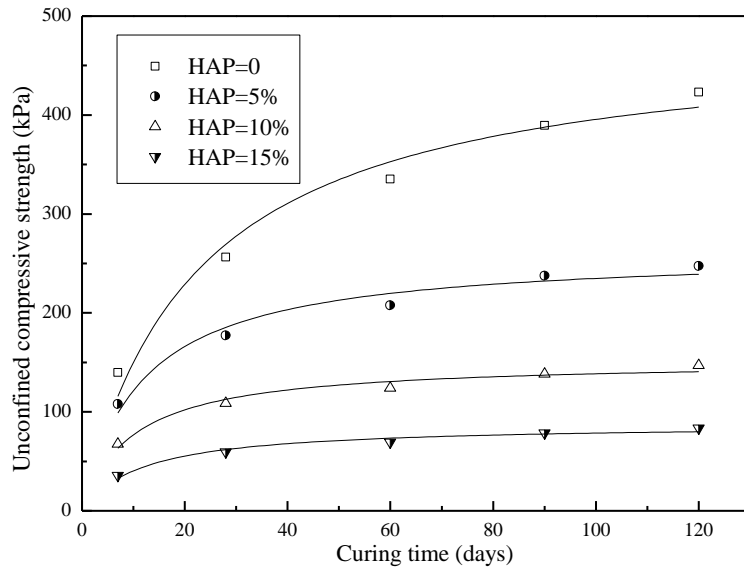


图 5-7 系列 HFI-1 粉煤灰掺量为 8% 的固化土试样强度随龄期的变化

Fig. 5-7 The relationship of compressive strength of specimens HFI-1 with 8% FA to curing time

由拟合曲线得到的 m_{FH} 和 c_{FH} 的值如表 5-7 所示。可以看出，采用双曲线模型拟合固化土强度随龄期的发展规律具有较高的准确性，其相关系数基本均大于 0.9；在分析范围内，随抗压强度的降低， m_{FH} 和 c_{FH} 的数值均呈增加趋势。

参考前文研究，认为高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土强度随龄期的双曲线模型的两参数 (m_{FH} 和 c_{FH}) 与高效固化剂和腐殖酸掺量之间存在多元线性或指数关系。对表 5-7 中的分析结果进行多元线性拟合及多元指数拟合，分别得到 m_{FH} 和 c_{FH} 同高效固化剂掺量 (C_{CS})、粉煤灰掺量 (C_F) 和腐殖酸掺量 (C_{HAP}) 的关系式。两参数的线性拟合关系式为：

$$m_{FH} = 0.0127 - 8.74 \times 10^{-4} \cdot C_{CS} + 2.51 \times 10^{-4} \cdot C_F + 7.52 \times 10^{-4} \cdot C_{HAP}, R^2 = 0.601 \quad (5-4a)$$



$$c_{FH} = 0.1459 - 0.0097 \cdot C_{CS} + 0.00133 \cdot C_F + 0.00292 \cdot C_{HAP}, R^2 = 0.789 \quad (5-4b)$$

两参数与固化剂、粉煤灰和腐殖酸掺量的指数关系式为：

$$m_{FH} = 0.0322 \times 0.758^{C_{CS}} \times 0.922^{C_F} \times 1.142^{C_{HAP}} R^2 = 0.977 \quad (5-5a)$$

$$c_{FH} = 0.3067 \times 0.799^{C_{CS}} \times 0.972^{C_F} \times 1.074^{C_{HAP}} R^2 = 0.931 \quad (5-5b)$$

表 5-7 系列 HFI 各固化土试样的双曲线模型的参数及相关系数值

Table 5-7 The values of coefficients of correlation and parameters for the fitted hyperbolic models

Series	HAP content (%)	m_{FH}	c_{FH}	R^2	Series	m_{FH}	c_{FH}	R^2
HFI-1 FA=0 %	0	0.00321	0.0718	0.983	HFI-1 FA=4%	0.00259	0.0526	0.976
	5	0.00655	0.0746	0.969		0.00502	0.0474	0.983
	10	0.01269	0.1045	0.958		0.00905	0.0654	0.952
	15	0.02801	0.168	0.871		0.01668	0.1166	0.949
HFI-1 FA=8 %	0	0.00207	0.0460	0.967	HFI-1 FA=12%	0.00203	0.0545	0.974
	5	0.00382	0.0441	0.959		0.00374	0.0521	0.956
	10	0.00658	0.0645	0.960		0.00635	0.0755	0.965
	15	0.01139	0.1337	0.957		0.01097	0.1236	0.952
HFI-2 FA=0 %	0	0.00137	0.0275	0.994	HFI-2 FA=4%	0.00105	0.0271	0.924
	5	0.00213	0.026	0.975		0.00164	0.0303	0.925
	10	0.00329	0.0365	0.978		0.00256	0.0386	0.920
	15	0.00756	0.0653	0.945		0.00604	0.0534	0.907
HFI-2 FA=8 %	0	0.00096	0.0182	0.965	HFI-2 FA=12%	0.00083	0.0183	0.953
	5	0.00143	0.0203	0.968		0.00124	0.0198	0.948
	10	0.00222	0.0252	0.969		0.00188	0.0262	0.944
	15	0.0051	0.0366	0.935		0.0044	0.0335	0.881
HFI-3 FA=0 %	0	0.00084	0.011	0.909	HFI-3 FA=4%	0.00062	0.0113	0.933
	5	0.00112	0.0119	0.983		0.00086	0.0134	0.945
	10	0.00163	0.0153	0.987		0.0012	0.0185	0.945
	15	0.00281	0.0228	0.953		0.00208	0.0255	0.958
HFI-3 FA=8 %	0	0.00051	0.0123	0.934	HFI-3 FA=12%	0.00047	0.0106	0.935
	5	0.00069	0.0148	0.937		0.00063	0.0127	0.940
	10	0.00104	0.0188	0.915		0.0009	0.0166	0.935
	15	0.00186	0.0245	0.940		0.00158	0.0235	0.946

由式 (5-4) 及式 (5-5) 可以看出，线性拟合式的相关系数远低于指数拟合式。综合前文研究，仅对比基于式 (5-5) 的系列 HFOII 固化土试样的强度预测值与实测



值，如图 5-8 所示。可以看出，系列 HFOII 的实测强度多在预测强度波动的 10% 左右，仅有少数实测值在预测值波动的 20% 左右。这说明，双曲线模型亦适用于高效固化剂混掺粉煤灰固化土有机质土强度的简单计算。

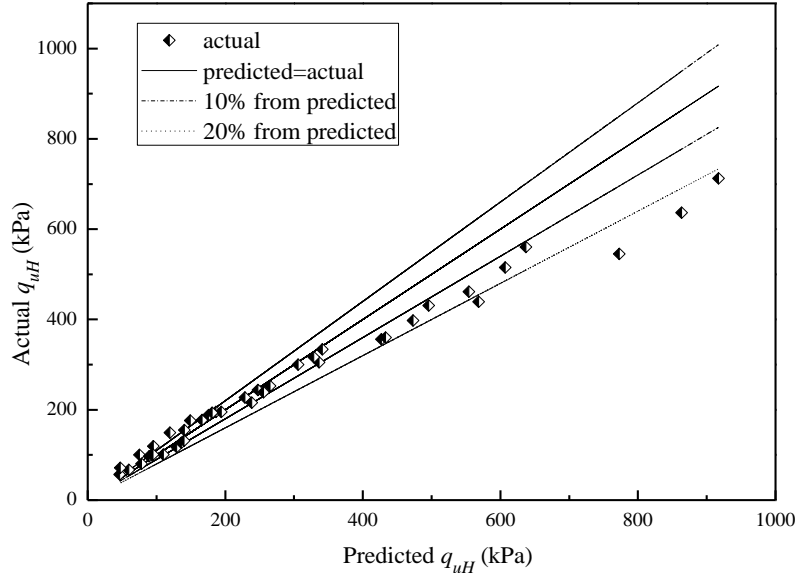


图 5-8 系列 HFOII 固化土试样各龄期测试强度与计算强度的对比

Fig. 5-8 Comparison of predicted and actual values of compressive strength for Series HFOII at different curing times

5.3.3 量化分析

如前文所述，腐殖酸在水泥基固化土中可以发生离子交换反应与中和反应。本质上，腐殖酸对固化土强度的影响作用大小主要取决于离子交换反应和中和反应的强弱。因此，将腐殖酸的作用效应定义为反活性效应（deactivation effect）。参考前文研究方法及其结果，将体系中的粉煤灰看作另掺一定量的固化剂，同时将腐殖酸看作在此体系下的对固化剂的消耗，重新定义粉煤灰的活性系数 (k_{fh}) 及腐殖酸的反活性系数 (OCl_{fh})，即，高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土的理论上的固化剂掺量 (C_{fh}) 可表示为：

$$C_{fh} = C_{CS} + C_{eH} = C_{CS} + k_{fh} \cdot C_F + OCl_{fh} \cdot C_{HAP} \quad (5-6)$$

上式中， C_{fh} 为高效固化土混掺粉煤灰固化土有机质土体系的理论固化剂总掺量， C_{CS} 为实际的高效固化剂掺量， C_{eH} 为粉煤灰与腐殖酸的当量固化剂量， k_{fh} 为粉煤灰的活性系数， C_F 为粉煤灰的实际掺量， OCl_{fh} 为腐殖酸的反活性系数， C_{HAP} 为腐殖酸的实际含量。

本小节对粉煤灰与腐殖酸影响作用的量化分析均基于前文的水土灰比模型，粉



煤灰与腐殖酸的当量固化剂量的数值均可由水土灰比模型换算而来，计算关系式为：

$$C_{eH} = k_{fh} \cdot C_F + OCI_{fh} \cdot C_{HAP} = \frac{w_{cH}}{\left(\frac{A_{FH}}{q_{uH}}\right)^{B_{FH}}} - C_{CS} \quad (5-7)$$

上式中， q_{uH} 为固化有机质土的无侧限抗压强度， w_{cH} 为体系中总含水量同有机质土质量（干土与腐殖酸的质量和）的比值， A_{FH} 、 B_{FH} 均为常数，可由式（4-7）获得。

根据已测得的系列 HFI 固化有机质土试样各龄期的抗压强度，可通过式（5-7）计算得到粉煤灰和腐殖酸的当量固化剂量的数值，由多元线性拟合可以分别得到粉煤灰与腐殖酸在高效固化土混掺粉煤灰固化土有机质土体系中的活性系数（ k_{fh} ）及反活性系数（ OCI_{fh} ）。拟合得到的 k_{fh} 与 OCI_{fh} 的数值如图 5-9 所示。可以看出，随养护龄期增加，粉煤灰活性系数有所增大，但当养护龄期由 90d 增加到 120d 时，活性系数突然增大。

基于理论分析及前文研究可知，粉煤灰活性系数随龄期呈双曲线趋势变化，即当养护龄期越大时，活性系数的增长率越小，直至趋于稳定。显然，粉煤灰在高效固化土混掺粉煤灰固化土有机质土体系中的活性系数不能准确地用双曲线模型进行描述。腐殖酸的反活性系数为负值（见图 5-9），且其绝对值随养护龄期的增加而有所增大；类似于粉煤灰的活性系数，当养护龄期由 90d 增加到 120d 时，反活性系数绝对值亦有增大的趋势。前文对腐殖酸反活性系数的研究亦采用双曲线模型，而反活性系数随养护龄期的变化更加复杂，因此，双曲线模型难以准确描述反活性系数随养护龄期的变化规律。

考虑到有腐殖酸的反活性系数与粉煤灰的活性系数具有相反的作用，在对两指标量化分析时，并不需要完全拘束于两者单独的实际发展趋势，而仅考虑二者之和的变化规律即可。对此，本文提出一个全新的活性系数随养护龄期变化的拟合模型：

$$k_{fh} / OCI_{fh} = \frac{t}{a \cdot t^2 + b \cdot t + c} \quad (5-8)$$

上式中， k_{fh} 为粉煤灰的活性系数， OCI_{fh} 为腐殖酸的反活性系数， t 为养护龄期， a 、 b 、 c 为通过数据回归分析得到的常数值。

基于式（5-8），对 k_{fh} 与 OCI_{fh} 随养护龄期的变化关系进行了拟合，拟合曲线如图 5-9 所示。由拟合曲线可得 k_{fh} 与 OCI_{fh} 的计算公式：

$$k_{fh} = \frac{t}{-0.0093 \cdot t^2 + 4.175 \cdot t + 0.764}, \quad R^2 = 0.920 \quad (5-9a)$$

$$OCI_{fh} = \frac{t}{0.0017 \cdot t^2 - 2.443 \cdot t - 1.179}, \quad R^2 = 0.968 \quad (5-9b)$$

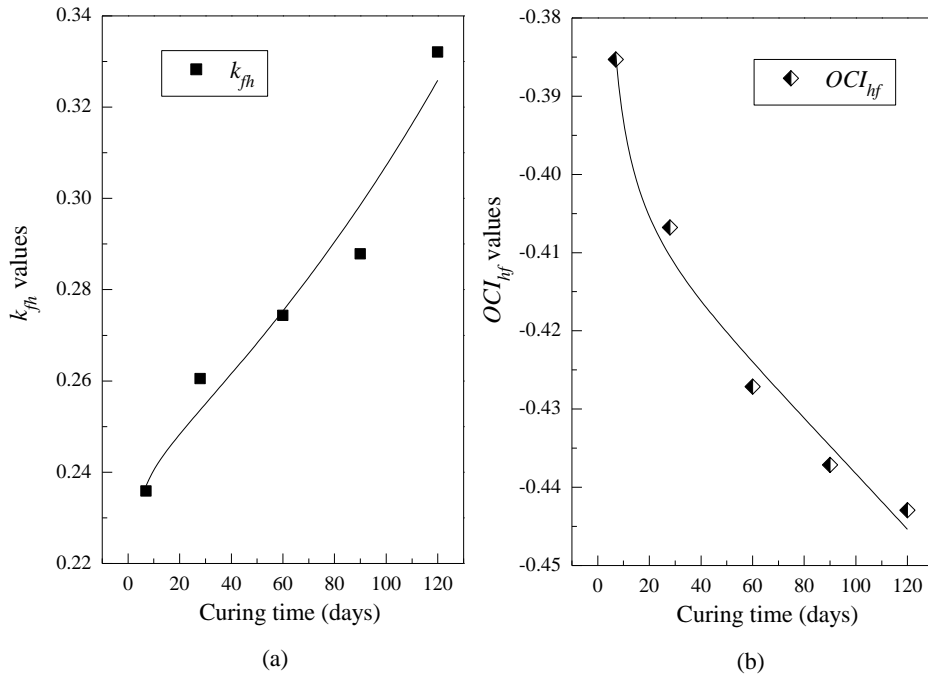


图 5-9 粉煤灰活性系数和腐殖酸反活性系数随养护龄期的变化关系

Fig. 5-9 The relationship and fitted curve of k_{fh} and OCI_{fh} values to curing time

将式 (5-9) 代入式 (5-6) 可得当量固化剂总量的计算式:

$$C_{fh} = C_{CS} + \frac{t}{-0.0093 \cdot t^2 + 4.175 \cdot t + 0.764} \cdot C_F + \frac{t}{0.0017 \cdot t^2 - 2.443 \cdot t - 1.179} \cdot C_{HAP} \quad (5-10)$$

将式 (5-10) 与水土比模型公式结合, 可得基于粉煤灰和腐殖酸量化分析的高效固化土混掺粉煤灰固化土有机质土各龄期强度的计算公式:

$$q_{uHp} = A_{FH} / \left[\left(\frac{w_{cH}}{C_{CS} + \frac{t}{-0.0093 \cdot t^2 + 4.175 \cdot t + 0.764} \cdot C_F + \frac{t}{0.0017 \cdot t^2 - 2.443 \cdot t - 1.179} \cdot C_{HAP}} \right)^{B_{FH}} \right] \quad (5-11)$$

上式中, q_{uHp} 为由计算强度, A_{FH} 与 B_{FH} 可分别由式 (4-7) 得来。

对任一高效固化剂掺量、粉煤灰掺量、腐殖酸含量及含水率的固化有机质土, 各龄期抗压强度均可由式 (5-11) 计算获得。借助系列 HFOII (配方如表 5-3 所示) 固化土试样, 对比了各龄期无侧限抗压强度的试验实测结果与计算结果的差值, 如图 5-10 所示。可以看出, 大多数实测值均在计算强度 10% 偏差的范围内。这说明, 上述对粉煤灰及腐殖酸的量化分析具有较高的准确度。与前文的由双曲线模型得到的计算强度相比, 经腐殖酸量化分析得到的强度计算值与实际值更接近, 这也说明关于腐殖酸对固化土力学性能影响的量化分析可以提高固化有机质土强度综合计算模型的精确性。

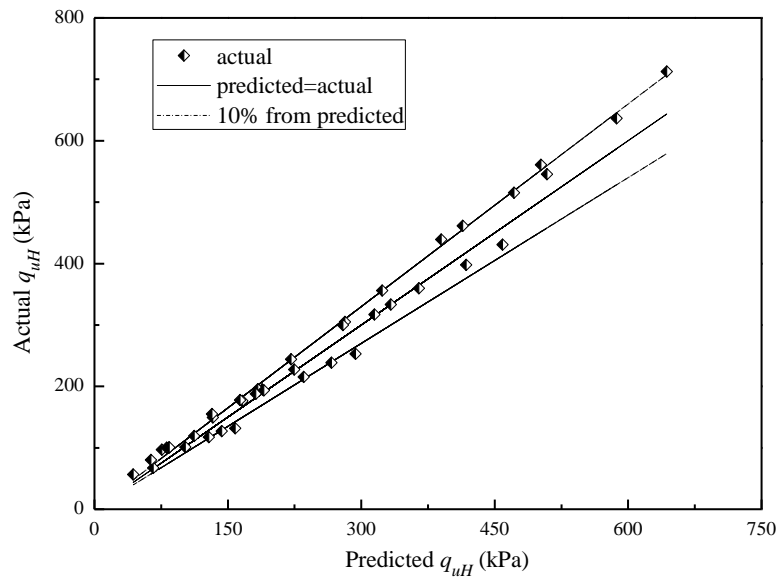


图 5-10 系列 HFOII 试样强度的实测值与由式 (5-11) 得到计算值的对比

Fig. 5-10 Comparison of predicted values from equation (5-11) and actual values of compressive strength for specimens Series HFOII

5.4 基于土体基本物性指标的固化有机质土强度综合计算模型

5.4.1 试验方案及结果

对软土-腐殖酸-高效固化剂-粉煤灰体系，腐殖酸、水化产物可与土颗粒结合，对体系的孔隙比及土颗粒自身物性产生影响。参考第 3 章和第 4 章对固化土强度综合计算模型的研究，结合本章前两小节开展的对固化剂、粉煤灰及腐殖酸作用的定量分析，采用当量固化剂总量 (C_{fh}) 或有效固化剂掺量 (C_{ec} , $C_{ec}=C_{CS}+k_{fh}\cdot C_F$) 作为基础指标，考察固化有机质土基本物性指标与当量固化剂总量之间的函数关系。

参照表 5-3 的试验配方设计，同时为准确考察含水率对固化土基本物性指标的影响，本小节设计两组不同基准含水率的试验配方，并测试各固化土不同龄期的容重、含水率及相对密度等基本物性指标，并探讨物性指标同当量固化剂总量之间的关系。试验配方如表 5-8 所示，系列 HFVII 试样用来验证强度综合计算模型的精确度。

表 5-8 试验配方表

Table 5-8 Mixture compositions

Series	w^* (%)	CSCN content (%)	FA content (%)	HAP content (%)
HFVI70	70	8, 16	4, 8	5, 10, 15
HFVI90	90	8, 16	4, 8	5, 10, 15
HFVII70	70	10	5, 10	5, 10, 15
HFVII90	90	12	5, 10	5, 10, 15



测试 HFVI 各试样不同龄期的无侧限抗压强度，结果如表 5-9 所示。可以看出，不同含水率的固化土抗压强度随养护龄期的增长均呈现递增趋势；当高效固化剂及粉煤灰掺量相同时，同龄期的低含水率固化土抗压强度远高于同龄期的高含水率抗压强度；随粉煤灰掺量的增加，固化土各龄期强度有不同幅度的提高；随腐殖酸含量增加，固化土各龄期强度大幅降低。这说明，高效固化剂及粉煤灰掺量、养护龄期及含水率为影响固化土抗压强度的主要因素。

表 5-9 HFVI70 与 HFVI 90 系列各配方不同龄期的抗压强度

Table 5-9 The compressive strength of specimens Series HFVI70and HFVI90 at different curing ages

Series	CSCN content (%)	FA content (%)	HAP content (%)	w_{cH} (%)	Compressive strength (kPa)				
					7 d	28 d	60 d	90 d	120 d
HFVI70	8	4	5	72.38	89.2	143.2	169.1	181.4	189.3
	8	4	10	69.09	57.6	82.5	96.5	103.2	108.2
	8	4	15	66.09	31.8	44.6	53.2	56.5	58.2
	8	8	5	74.29	107.8	177.2	207.8	237.6	247.5
	8	8	10	70.91	67.5	108.7	124.1	138.2	146.9
	8	8	15	67.83	35.7	59.5	69.2	78.5	83.6
	16	4	5	76.19	420.9	692.6	884.1	975.2	1082.3
	16	4	10	72.73	306.2	496.7	633.9	716.4	772.6
	16	4	15	69.57	185.7	330.7	373.9	417.9	460.8
	16	8	5	78.10	459.9	751.2	1028.4	1166.8	1295.4
	16	8	10	74.55	336.8	541.5	687.3	805.7	892.5
	16	8	15	71.30	205.1	356.8	407.4	465.3	516.6
HFVI90	8	4	5	91.43	43.5	70.3	85.6	94.5	99.7
	8	4	10	87.27	22.6	37.5	45.7	50.6	54.4
	8	4	15	83.48	10.1	16.2	19.3	23.7	25.9
	8	8	5	93.33	53.9	93.7	112.8	133.2	145.9
	8	8	10	89.09	32.7	49.2	62.8	73.4	80.6
	8	8	15	85.22	14.3	19.6	25.7	28.6	31.3
	16	4	5	95.24	221.3	391.9	493.8	549.2	575.8
	16	4	10	90.91	175.9	296.8	364.5	408.7	425.2
	16	4	15	86.96	115.5	209.1	237.5	255.6	270.4
	16	8	5	97.14	253.6	447.6	563.5	641.8	692
	16	8	10	92.73	195.3	347	412.7	461.7	506.8
	16	8	15	88.70	129.6	201.8	263.9	305.6	327.1



5.4.2 基本指标的标准化分析

基于前文研究可知，对固化土基本物性指标的标准化表征是建立固化土强度综合计算模型的有效方法。参数的标准化，即，采用土及固化土试样的初始参数描述固化土试样经过一定养护龄期后的物性指标。可见，参数的标准化分析决定了最终的强度综合计算模型的准确性及实用性。因此，标准化分析过程中需遵循以下原则：①参数的拟合关系式应有较高的相关系数；②参数的计算应简便，不宜繁琐；③拟合关系式应尽可能与实际情况相符。

由式（5-10）可计算得到系列 HFVI70 与系列 HFVI90 各配方的当量固化剂量（ C_{fh} ）的值，并结合表 5-9 的抗压强度测试结果绘制强度-当量固化剂总量曲线，如图 5-11 与图 5-12 所示。由图 5-11 可以看出，随当量固化剂总量的增加，固化土抗压强度不断增加，且当当量固化剂总量较大时，强度的增加幅度亦较大。如图 5-12（a）所示，当固化土基准含水率发生变化时，强度随当量水泥总量的变化趋势并未发生明显变化，依然呈现出类似与图 5-11（a）的变化规律。由图 5-11（b）与图 5-12（b）可以看出，随养护龄期的不断增加，固化土抗压强度不断增长，但其增长幅度降低，基准含水率的大幅增加并未明显改变这一规律。上述现象说明，初始含水率、当量固化剂总量即养护龄期对抗压强度的影响是相互独立的。因此，最终的固化土强度综合计算模型可为同时考虑初始含水率、当量固化剂总量及养护龄期的函数。

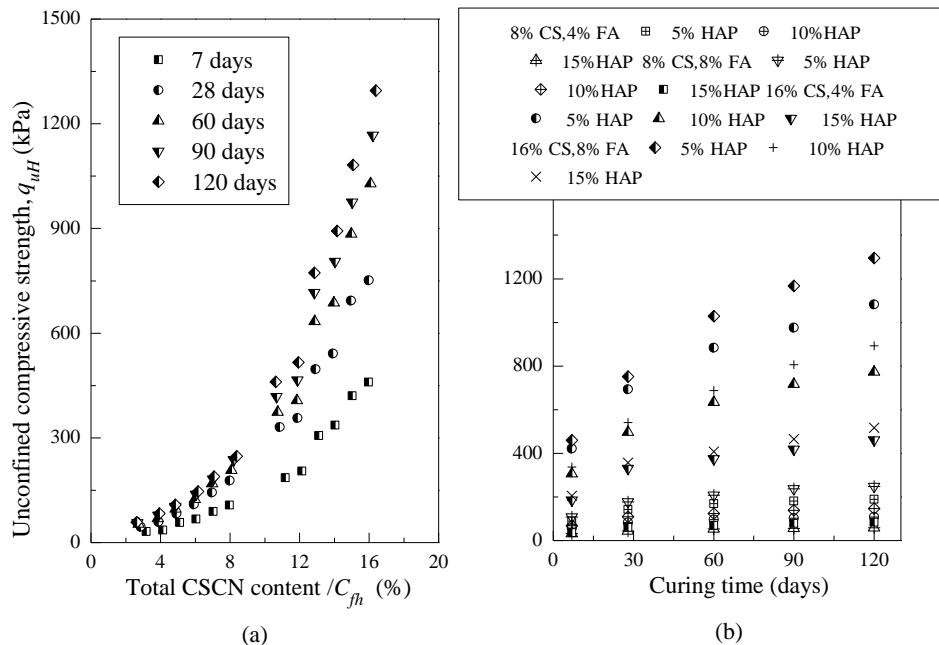


图 5-11 系列 FHVI70 的固化土抗压强度随当量水泥总量及养护龄期的变化关系

Fig. 5-11 The relationship of compressive strength of specimens Series FHVI70 to C_{fh} and curing time

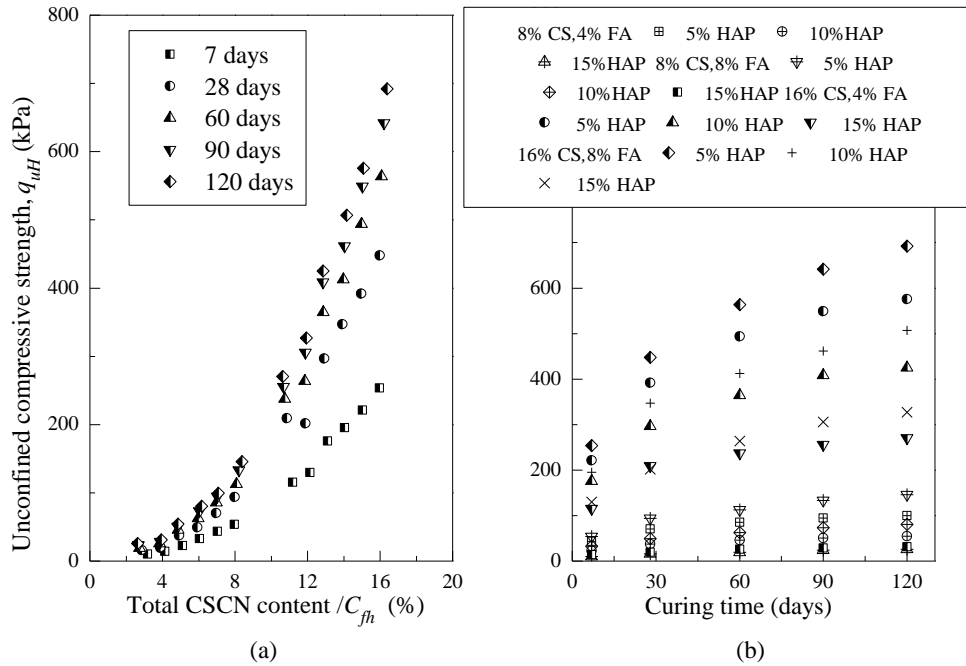


图 5-12 系列 FHVI90 的固化土抗压强度随当量水泥总量及养护龄期的变化关系

Fig. 5-12 The relationship of compressive strength of specimens Series FHVI90 to C_{fh} and curing time

基于上述分析，当量固化剂掺量、养护龄期及初始含水率对固化有机质土强度的影响是相互独立的，因此，以上三个初始指标可用来标准化固化有机质土特定龄期的容重、含水率及颗粒比重。

为标准化分析固化有机质土的容重，需消除基准含水率的影响，定义固化有机质土容重比 (γ_{tH}/γ_{0H})，即固化有机质土试样一定龄期的容重与未掺固化材料时的软土-腐殖酸-水混合物初始容重的比值。容重比可反映某龄期、某固化材料掺量及腐殖酸含量下容重的变化，消除基准含水率的影响，便于容重的标准化分析。

分析固化有机质土容重比与有效固化剂掺量 (C_{ec})、腐殖酸含量 (C_{HAP}) 及养护龄期的变化关系，分别如图 5-13~图 5-15 所示。由图 5-13 可以看出，有效固化剂掺量对容重比有较大影响，容重比数值随且 C_{ec} 的增加而增大，且二者基本呈线性关系；由图 5-14 可以看出，腐殖酸含量对容重比的影响作用较小，从总体趋势判断，随腐殖酸含量增加，容重比呈现小幅降低的趋势；由图 5-15 可知，随养护龄期的增长，固化有机质土容重比有一定程度的增加。因此，容重比可由 C_{ec} 、 C_{HAP} 与养护龄期表示，采用多元线性拟合对四者关系进行拟合，拟合曲线如图 5-14 所示，曲线具有较高的相关系数，拟合关系式为：

$$\gamma_{tH} = \gamma_{0H} (0.00367C_{ec} - 1.60 \times 10^{-4} \cdot C_{HAP} + 1.94 \times 10^{-5} \cdot t + 0.99), R^2 = 0.999 \quad (5-12)$$

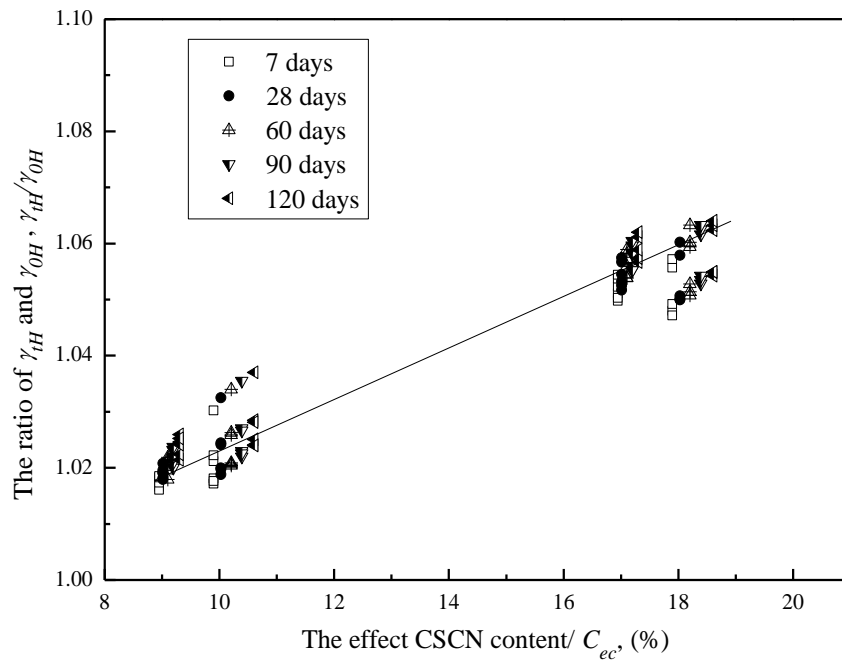


图 5-13 固化有机质土试样容重比与有效固化剂掺量的关系

Fig. 5-13 The relationship of the ratio of γ_{tH} and γ_{0H} to C_{ec}

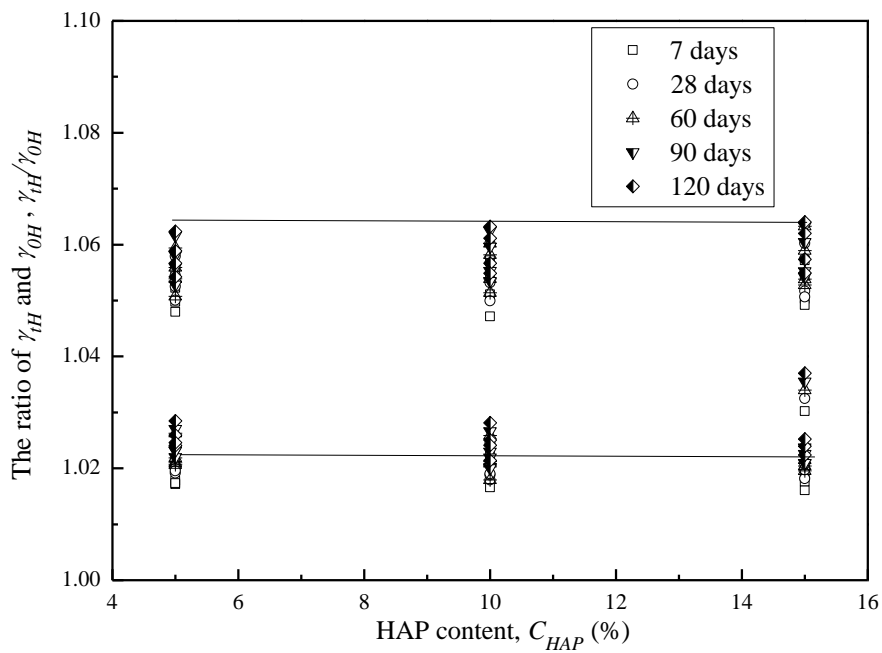


图 5-14 固化有机质土试样容重比与腐殖酸含量的关系

Fig. 5-14 The relationship of the ratio of γ_{tH} and γ_{0H} to C_{HAP}

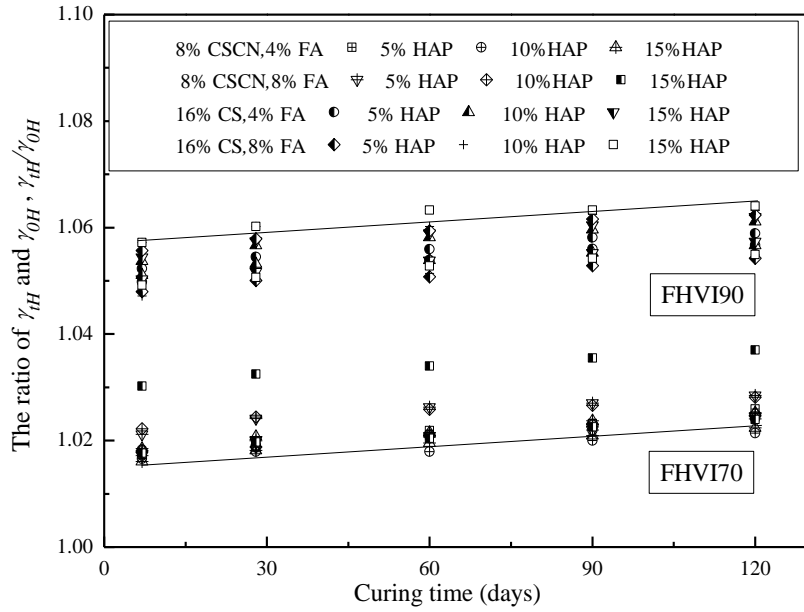


图 5-15 固化有机质土试样容重比与养护龄期的关系

Fig. 5-15 The relationship of the ratio of γ_{tH} and γ_{0H} to curing time

初始含水率 (w_{cH}) 与腐殖酸含量 (C_{HAP}) 决定了 γ_{0H} 的数值, γ_{0H} 与 w_{cH} 、 γ_{0H} 与 C_{HAP} 的关系分别如图 5-16 所示, 三者拟合关系式为:

$$\gamma_{0H} = 18.53 - 0.0483 \cdot w_{cH} - 0.0719 \cdot C_{HAP}, \quad R^2 = 0.992 \quad (5-13)$$

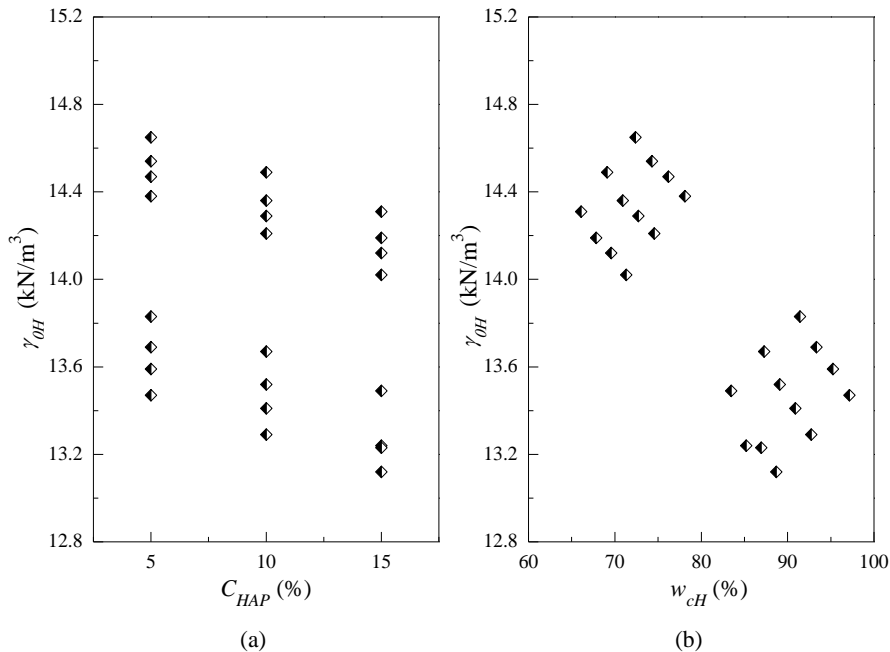


图 5-16 初始容重与腐殖酸含量和含水率之间的变化关系

Fig. 5-16 The relationship of γ_{0H} to C_{HAP} and w_{cH}



由于基准含水率是影响固化有机质土各龄期含水率的主要因素，在标准化分析固化有机质土试样含水率时，需消除基准含水率或初始含水率的影响。基于此，定义固化有机质土含水率比 (w_{IH}/w_{cH})，即固化有机质土一定龄期的含水率与初始含水率的比值。含水率比消除了初始含水率的影响，并未引入新的参数，可用于固化有机质土含水率的标准化分析。基于第 3 章和第 4 章的研究结果可知，影响含水率比的主要因素为固化剂掺量或当量固化剂用量以及养护龄期。因此，需考察含水率比与有效固化剂掺量 (C_{ec})、腐殖酸含量 (C_{HAP}) 及养护龄期的变化关系。

图 5-17~图 5-19 分别给出了固化有机质土含水率比与有效固化剂掺量 (C_{ec})、腐殖酸含量 (C_{HAP}) 及养护龄期的变化关系。由图 5-17 可以看出，随有效固化剂掺量的增加， w_{IH}/w_{cH} 的值基本呈线性降低，与前文的研究结果相符。而随腐殖酸含量的增加， w_{IH}/w_{cH} 的值有较明显的增加 (图 5-18)，其主要原因与腐殖酸含量的增加影响了固化剂水化反应和黏土活性矿物火山灰反应，导致化学结合水数量大幅降低。由图 5-19 可以看出，随养护龄期的增长， w_{IH}/w_{cH} 的值呈小幅降低。对此，采用多元线性拟合分析固化有机质土含水率比与有效固化剂掺量 (C_{ec})、腐殖酸含量 (C_{HAP}) 及养护龄期的函数关系，拟合曲线如图 5-17 所示。拟合曲线具有较高的相关系数，拟合关系式为：

$$w_{IH}=w_{cH}(0.99-0.0153C_{ec}+0.00246\cdot C_{HAP}-1.77\times 10^{-4}\cdot t), R^2=0.998 \quad (5-14)$$

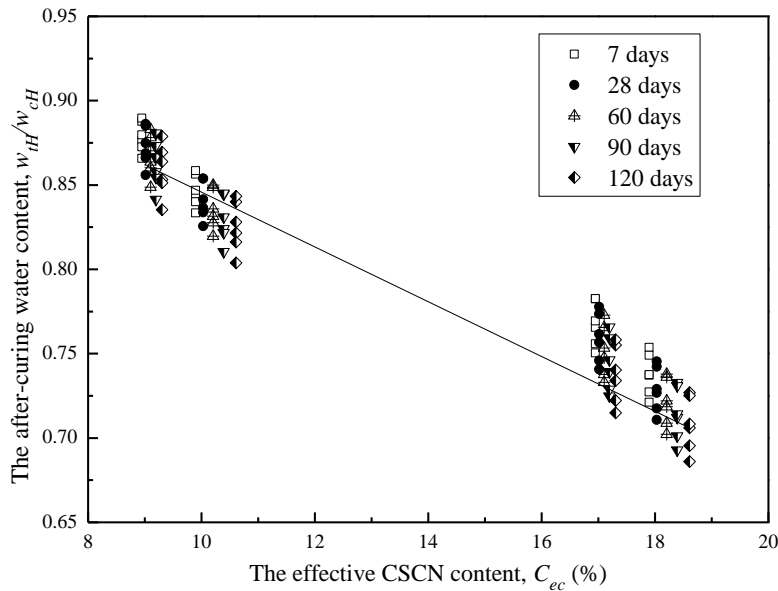


图 5-17 含水率比与有效固化剂掺量的关系

Fig. 5-17 The relationship of w_{IH}/w_{cH} to C_{ec}

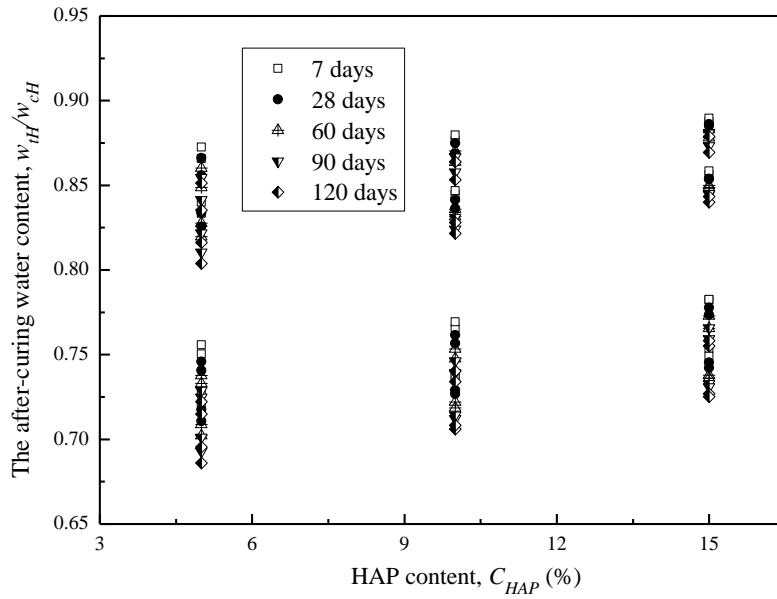


图 5-18 含水率比与腐殖酸含量的关系
 Fig. 5-18 The relationship of w_{iH}/w_{cH} to C_{HAP}

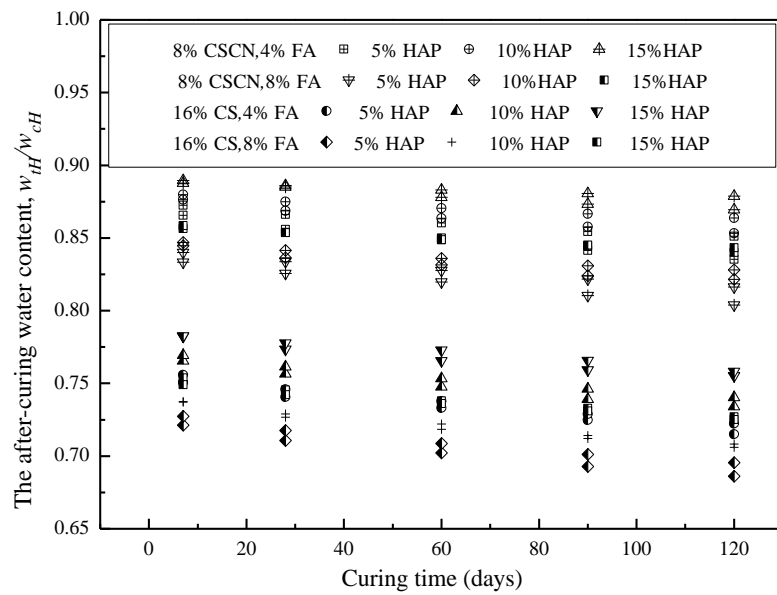


图 5-19 含水率比与养护龄期的关系
 Fig. 5-19 The relationship of w_{iH}/w_{cH} to curing time

前文研究可知，固化土土颗粒相对密度主要与固化剂掺量或当量固化剂总量有关。对固化有机质土，腐殖酸等有机质可吸附在土颗粒或胶凝水化产物表面，进而影响土颗粒相对密度。即，固化有机质土固相颗粒相对密度 (G_{stH}) 主要受有效固化剂



掺量及腐殖酸含量的影响，若采用类似于容重及含水率标准化分析的方法，将固化有机质土一定龄期的比重与未处理土比重 (G_{s0}) 的比值作为参数，会发现二者比值随养护龄期、腐殖酸含量及有效固化剂掺量的分布依然十分分散，难以探究内在规律。

参考第 3 章、第 4 章对固化土固相颗粒相对密度的分析，定义相对固化剂及腐殖酸掺量 ($1-C_{ec}/100-C_{HAP}/100$)，同时引入固化有机质土固相颗粒相对密度与未处理土颗粒相对密度的比值 (G_{stH}/G_{s0})，考察比重比与相对固化剂及腐殖酸掺量之间的关系，并对二者关系进行拟合，拟合曲线如图 5-20 所示。由拟合曲线得到固化有机质土一定龄期的固相颗粒相对密度与有效固化剂掺量、腐殖酸含量的关系式，计算关系式为：

$$G_{stH} = G_{s0} \cdot \left(1 - \frac{C_{ec}}{100} - \frac{C_{HAP}}{100}\right)^{0.1259}, \quad R^2 = 0.992 \quad (5-15)$$

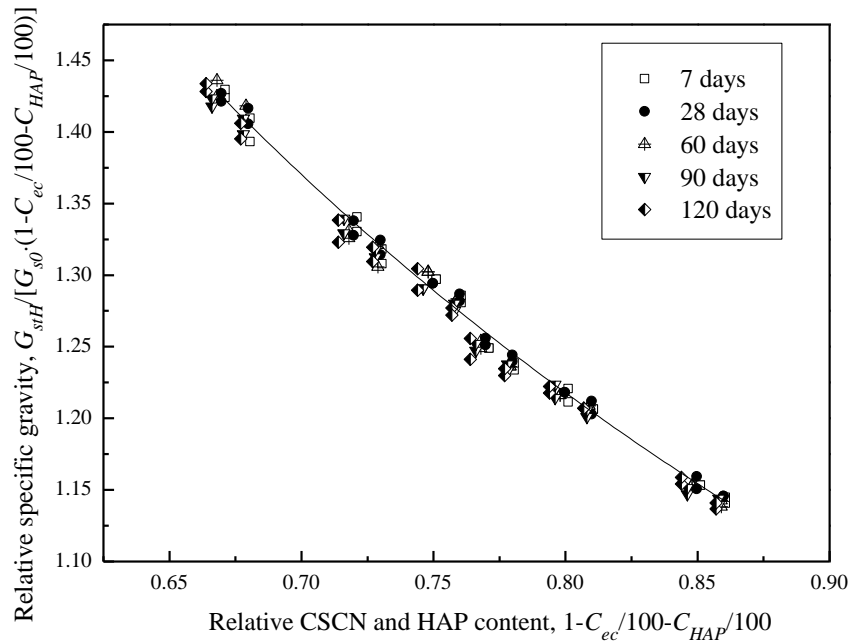


图 5-20 相对比重比与相对固化剂及腐殖酸掺量的关系

Fig. 5-20 The relationship of $G_{stH}/[G_{s0} \cdot (1 - C_{ec}/100 - C_{HAP}/100)]$ to $1 - C_{ec}/100 - C_{HAP}/100$

基于对固化有机质土基本物性指标的标准化分析，综合式 (5-12) ~ 式 (5-15) 及第 3 章式 (3-17) 可得由固化有机质土初始基本物性指标以及养护龄期计算高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土在一定养护龄期的孔隙比 (e_t'') 的计算公式：

$$e_{tH} = (G_{s0} \cdot \frac{\gamma_w}{18.53 - 0.0483 \cdot w_{cH} - 0.0719 \cdot C_{HAP}} \cdot \frac{w_{cH}}{100}) \cdot \frac{(\frac{100}{w_{cH}} - 0.99 - 0.00153 C_{ec} + 0.00256 C_{HAP} - 1.77 \times 10^{-4} \cdot t) \cdot (1 - \frac{C_{ec}}{100} - \frac{C_{HAP}}{100})^{0.1259}}{0.00367 C_{ec} - 1.60 \times 10^{-4} \cdot C_{HAP} + 1.94 \times 10^{-5} \cdot t + 0.99} - 1 \quad (5-16)$$



5.4.3 固化有机质土综合计算模型的建立

本节的研究结果发现, 高效固化剂掺量、粉煤灰掺量及腐殖酸含量均对固化土强度有较大的影响。因此, 为建立固化剂混掺粉煤灰固化有机质土抗压强度的综合计算模型, 需将当量固化剂总量 (C_{fh}) 作为参数之一, 并考察固化有机质土强度与孔隙比同当量固化剂总量比值 (e_{tH}/C_{fh}) 的关系。定义高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土抗压强度与 e_{tH}/C_{fh} 的指数模型:

$$q_{uH} = K_{sh} \cdot \left(\frac{e_{tH}}{C_{fh}}\right)^{Jsh} \quad (5-17)$$

系列 FHVI70 与 FHVI90 各试样的当量固化剂总量 C_{fh} 可由式 (5-10) 计算而来, 各试样强度如表 5-8 所示, 孔隙比 e_{tH} 由式 (3-17) 计算获得。

考察 FHVI 各试样不同龄期的抗压强度随 e_{tH}/C_{fh} 的变化关系, 对二者关系进行拟合, 拟合曲线如图 5-21 所示。

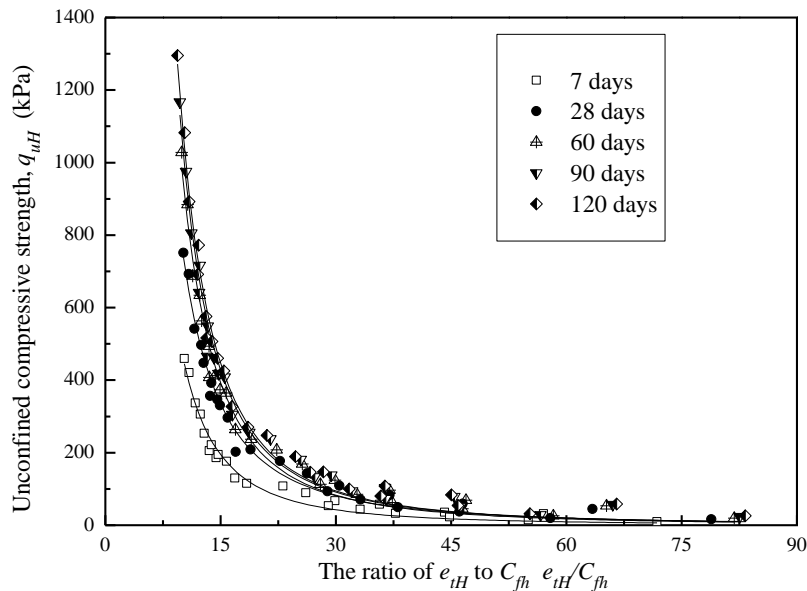


图 5-21 系列 FHVI70 与 FHVI90 固化土强度随孔隙比与当量固化剂总量比值的函数关系
Fig. 5-21 The relationship of compressive strength of stabilized specimens Series FHVI70 and FHVI90 at different curing times with e_{tH}/C_{fh}

由图 5-21 所示的拟合曲线可得高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土强度 (q_{uH}) 与 e_{tH}/C_{fh} 的关系式:

$$q_{uH(7days)} = 75184 \cdot \left(\frac{e_{tH}}{C_{fh}}\right)^{-2.2}, R^2 = 0.977 \quad (5-18a)$$

$$q_{uH(28days)} = 125165 \cdot \left(\frac{e_{tH}}{C_{fh}}\right)^{-2.2}, R^2 = 0.984 \quad (5-18b)$$



$$q_{uH(60days)} = 153434 \cdot \left(\frac{e_{tH}}{C_{fh}}\right)^{-2.2}, R^2 = 0.984 \quad (5-18c)$$

$$q_{uH(90days)} = 166752 \cdot \left(\frac{e_{tH}}{C_{fh}}\right)^{-2}, R^2 = 0.987 \quad (5-18d)$$

$$q_{uH(120days)} = 174732 \cdot \left(\frac{e_{tH}}{C_{fh}}\right)^{-2}, R^2 = 0.990 \quad (5-18e)$$

由式 (5-18) 可以看出, 各拟合关系式均有较高的相关系数, K_{sh} 的值随龄期增加, 而 J_{sh} 的值保持不变。因此, K_{sh} 是决定固化有机质土强度的关键参数, 根据本章前两小节对固化有机质土强度随养护龄期变化的分析结果, 采用双曲线模型拟合 K_{sh} 随养护龄期的关系, 拟合曲线如图 5-22 所示, 由拟合曲线得到的二者关系为:

$$K_{sh} = \frac{t}{5.34 \times 10^{-6} \cdot t + 6.31 \times 10^{-5}}, R^2 = 0.979 \quad (5-19)$$

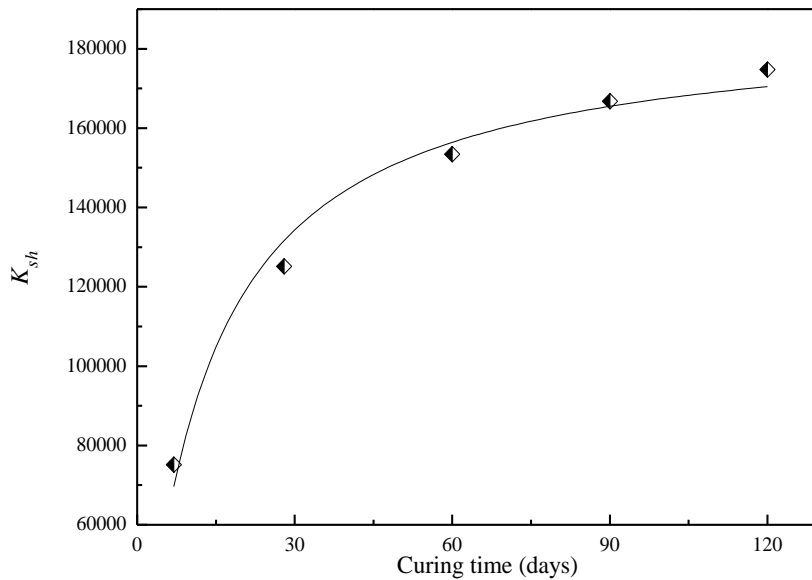


图 5-22 K_{sh} 的值与养护龄期的变化关系

Fig. 5-22 The relationship of the K_{sh} values with curing time

将式 (5-10)、式 (5-16)、式 (5-18) 及式 (5-19) 分别代入式 (5-17) 可得最终的高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土的综合强度计算模型:

$$q_{uH} = \frac{t}{5.34 \times 10^{-6} \cdot t + 6.31 \times 10^{-5}} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \beta - 1}{C_{CS} + \frac{t}{-0.0093 \cdot t^2 + 4.175 \cdot t + 0.764} \cdot C_F + \frac{t}{0.0017 \cdot t^2 - 2.443 \cdot t - 1.179} \cdot C_{HAP}} \right)^{-2.2} \quad (5-20)$$

上式中, C_{ec} 为有效固化剂掺量, α 、 β 分别为自定义参数。

$$C_{ec} = C_{CS} + \frac{t}{-0.0093 \cdot t^2 + 4.175 \cdot t + 0.764} \cdot C_F \quad (5-21)$$

$$\alpha = \left(G_{s0} \cdot \frac{\gamma_w}{18.53 - 0.0483 \cdot w_{cH} - 0.0719 \cdot C_{HAP}} \cdot \frac{w_{cH}}{100} \right) \quad (5-22)$$



$$\beta = \frac{\left(\frac{100}{w_{cH}} - 0.99 - 0.00153C_{ec} + 0.00256 \cdot C_{HAP} - 1.77 \times 10^{-4} \cdot t\right) \cdot \left(1 - \frac{C_{ec}}{100} \cdot \frac{C_{HAP}}{100}\right)^{0.1259}}{0.00367C_{ec} - 1.60 \times 10^{-4} \cdot C_{HAP} + 1.94 \times 10^{-5} \cdot t + 0.99} \quad (5-23)$$

式 (5-20) 为高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土抗压强度综合计算模型的最终形式，包含的参数有高效固化剂实际掺量 (C_{CS})、粉煤灰实际掺量 (C_F)、腐殖酸含量 (C_{HAP})、养护龄期 (t)、初始含水率 (w_{cH})、未处理土初始比重 (G_{s0}) 以及水重度 (γ_w)。即，对任一固化土配方，各龄期强度均可由式 (5-20) 计算获得。

为验证强度综合计算模型式 (5-20) 的准确性，测试了表 5-8 中 HFVII 系列各配方固化土试样不同龄期的抗压强度，将测试结果与式 (5-20) 得到的计算结果对比，如图 5-23 所示。可以看出，系列 HFVII70 试样的实测值仅有 40% 左右的点在计算值的 10% 以内，而大多在计算值的 20% 以内； $C_F=5\%$ 、 $C_{HAP}=15\%$ 时，二者的误差较大。同时，可以看出，系列 HFVII90 试样的实测值几乎均在计算值的 10% 以内。

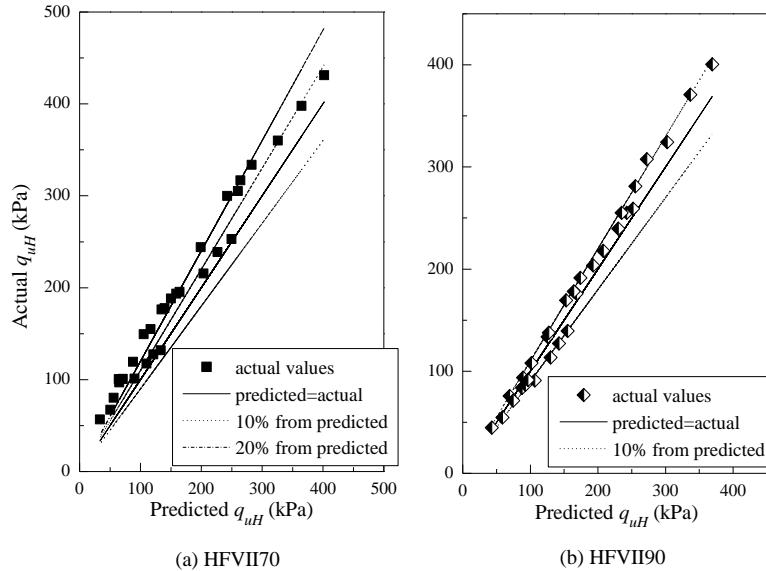


图 5-23 系列 HFVII 固化土试样的各龄期强度实测值与式 (5-20) 计算值的对比

Fig. 5-23 Comparison of predicted q_{uH} from (5-20) and experimental q_{uH} of specimens Series HFVII70

5.5 本章小结

为定量研究有机质含量对固化土性能的影响，使用经烘干磨碎的上海饱和软土并掺入腐殖酸按一定基准含水率混合制备人工再造有机质土，分别测试了高效固化剂固化有机质土与高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土各龄期的抗压强度，提出腐殖酸在固化土中的反活性效应及反活性系数 OCI_{fh} ，以此为基础，定量分析腐殖酸对固化土强度的影响作用，考察反活性系数与高效固化剂掺量、粉煤灰掺量及腐殖酸含量的关系；基于腐殖酸的量化分析结果，定义当量水泥总量 (C_{fh}) 与有效固化剂掺



量 (C_{ec}), 依据固化有机质土体各龄期基本物性指标的测试结果, 考察物性指标与当量固化剂掺量、腐殖酸含量与养护龄期的关系, 建立高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土抗压强度综合计算模型。通过以上研究, 得到以下结论:

(1) 对高效固化剂固化有机质土, 腐殖酸含量由 0 增加到 15% 时, 固化土强度出现比较明显的降低趋势, 当腐殖酸含量大于 15% 时, 固化土强度降低幅度减小。由自定义的强度保留系数可知, 腐殖酸对固化土中后期强度的影响大于前期, 主要原因为腐殖酸为酸性物质, 可以发生离子交换和中和反应, 降低了固化土孔隙流体中的 Ca^{2+} 浓度和 pH 值, 影响了水泥水化反应及土中活性矿物的火山灰反应, 进而使固化土强度大幅降低。

(2) 双曲线模型同样适用于表征固化有机质土抗压强度随养护龄期的关系, 拟合式具有较高的相关系数, 式中 m_H 和 C_H 值的大小由高效固化剂掺量及腐殖酸含量表示。基于水土灰比模型得到不同龄期的 k_{fh} 与 OCl_{fh} 的数值, 对二者数值进行量化分析并开展准确度验证, 认为基于 k_{fh} 与 OCl_{fh} 的粉煤灰及腐殖酸的量化分析具有较高的准确性。

(3) 当量固化剂总量 (C_{fh}) 或有效固化剂掺量 (C_{ec}) 的区别是 C_{ec} 未考虑腐殖酸的反活性作用。根据固化有机质土各龄期基本物性指标的测试结果, 得到各指标与 C_{ec} 及腐殖酸含量 (C_{HAP}) 的关系。容重 (γ_{tH}) 随 C_{ec} 与养护龄期的增长而增加, 随 C_{HAP} 的增加而明显降低, 含水率 (w_{tH}) 亦呈现类似规律。而试样的比重 (G_{stH}) 仅受 C_{ec} 与 C_{HAP} 的影响, 与养护龄期、初始含水率并无明显相关关系。

(4) 定义容重比 (γ_{tH}/γ_{0H})、含水率比 (w_{tH}/w_{cH}) 与相对固化剂及腐殖酸掺量 ($1-C_{ec}/100-C_{HAP}/100$), 得到了固化有机质土基本物性指标的标准化公式, 从而获得固化土强度与 e_{tH}/C_{fh} 的函数关系, 进而可得高效固化剂混掺粉煤灰固化有机质土的强度综合计算模型。对综合计算模型开展精度验证, 对比试样的各龄期计算强度与各试样实测强度的误差在 10-20% 以内。



第6章 沿海滩涂淤泥的固化处理

6.1 引言

在前文的试验材料准备部分介绍了试验用土的准备过程：将扰动上海软黏土烘干，并对烘干土进行磨碎，过 2mm 筛。此做法的突出优点为：将烘干土作为一种建筑材料，可按既定配方（含水率、腐殖酸含量）精确地制备固化土试样，有利于后续工作的定量分析。这一研究方法在国内外的固化土研究中多有使用^[77,79,195,220,221]。但此方法也有其显著的缺点，主要表现为：破坏了原状土的孔隙结构，使原状土粒径分布发生变化，改变了原状土的结构强度，用于原状土固化处理容易导致试验结果与工程应用效果出现较大的偏差。

当前，我国常用的水泥搅拌桩施工工艺中与固化剂浆体相关的主要有以下步骤，分别是：正循环钻进至设计深度→打开高压注浆泵→反循环提钻并喷水泥浆→至工作基准面以下 0.5m→重复搅拌下钻并喷水泥浆至设计深度。即，在钻杆钻进、喷浆的整个循环工艺过程中，固化剂浆体（水泥浆）要保证不初凝、不离析、均匀性好。通过前文研究得到了一种水泥基高效固化剂及基于土体基本物性指标的固化有机质土强度综合计算模型，室内试验也验证了固化剂的高效性及强度计算模型的准确性。在室内试验的基础上，开展现场试验，使用自制高效固化剂制备搅拌桩，并同常规水泥土搅拌桩进行强度对比。

现场试验经验表明：自制固化剂包含水玻璃、氢氧化钠、氯化钙等促凝组分，需对各组分多管分次注浆，复杂的注浆搅拌工艺会直接导致工程成本一定程度的提高；若不采用多管分次注浆的施工工艺，采用混合添加的方式可能会导致工程事故或达不到预期的性能。再者，前文是基于模拟孔隙结构遭到破坏的土体（如吹填土、疏浚泥等）开展的室内试验研究，所得高效固化剂更适用于结构破坏的土体。

水泥搅拌桩及注浆工艺常见于我国的路、桥及基坑施工，而高效固化剂虽具高效但综合经济效益并不显著，因此需开展经济、实用的土固化剂的研究。鉴于我国磷石膏的生产量巨大且利用率低，考虑将磷石膏等工业废渣引入土固化剂，不仅具有一定的经济效益，同时还极大的有利于环境保护。本文在考察高效固化剂固化处理滩涂淤泥强度特性及强度综合计算模型适用性的基础上，使用磷石膏、粉煤灰两种工业废渣混配生石灰、水泥等胶凝材料，采用单因素分析、正交试验方法制备水泥-废渣基无机土固化剂，并简要探讨了滩涂淤泥的固化作用机理。



6.2 高效固化剂固化处理滩涂淤泥及强度计算模型的对比应用

通过前文研究得到了一种水泥基高效固化剂及基于土体物性指标的固化土强度综合计算模型，本小节目的是检验水泥基高效固化剂及强度计算模型在滩涂淤泥中的适用性。

6.2.1 高效固化剂固化处理滩涂淤泥

试验用滩涂淤泥的物理化学性质如表 2-1 所示的福建连江滩涂淤泥，其含水率约为 70%，淤泥不具有流动性。实际上，滩涂淤泥具有一定的流动性，试验用淤泥其主要是由于淤泥在挖取过程中失去了较大量的水分。因此，为使室内试验数据更接近实际，需对不同含水率的疏浚淤泥进行固化处理研究。

图 6-1 为不同掺量的高效固化剂固化处理含水率分别为 70%、110% 及 150% 淤泥的早期（1d，3d，7d）与中期（28d，60d）的抗压强度。由图中可以看出固化淤泥抗压强度随高效固化剂掺量及龄期的发展规律类似，具有以下特点：在测试龄期内，固化淤泥的抗压强度随养护龄期的增长而不断增加；对各含水率的淤泥，随高效固化剂掺量的增加，其各龄期抗压强度均有大幅提高；固化淤泥的早期强度有较大的提高，7d 强度均为 1d 强度的一倍以上，随养护龄期的增加，固化土强度增长速率降低，28d 强度为 7d 强度的一倍左右，60d 强度仅比 7d 强度提高了 20-30%。高效固化剂掺量为 8%、淤泥含水率为 150% 时，固化淤泥试样的 28d 强度为 43.5kPa，同等固化剂掺量、淤泥含水率为 110% 与 70% 的试样的 28d 强度分别为 76.7 kPa 与 165.3 kPa；而高效固化剂掺量为 16%、淤泥含水率为 150% 时，固化淤泥试样的 28d 强度也仅为 127.5 kPa，这说明，土体含水率是决定固化淤泥强度的主要因素之一，这也与前文的研究结论相符。对各含水率的固化淤泥试样，高效固化剂掺量由 12% 增加到 16% 时对固化淤泥试样各龄期强度的改善作用优于其掺量由 8% 增加到 12% 的作用；高效固化剂掺量为 8%、淤泥含水率为 70% 时，固化淤泥试样的 7d 与 60d 强度分别为 79.6 kPa 与 203.1 kPa，固化剂掺量为 12% 时，固化试样的同龄期强度为 146.1 kPa 与 341.6 kPa，仅比固化剂掺量 8% 的强度高出 83.5% 与 68.2%；而当固化剂掺量为 16%、淤泥含水率为 70% 时，固化淤泥试样的 7d 与 60d 强度分别为 275.5 kPa 与 647.3 kPa，比固化剂掺量 8% 的强度高出 246.1% 与 218.7%，这一现象可能与固化剂掺量对固化淤泥 pH 值的改善作用有关。

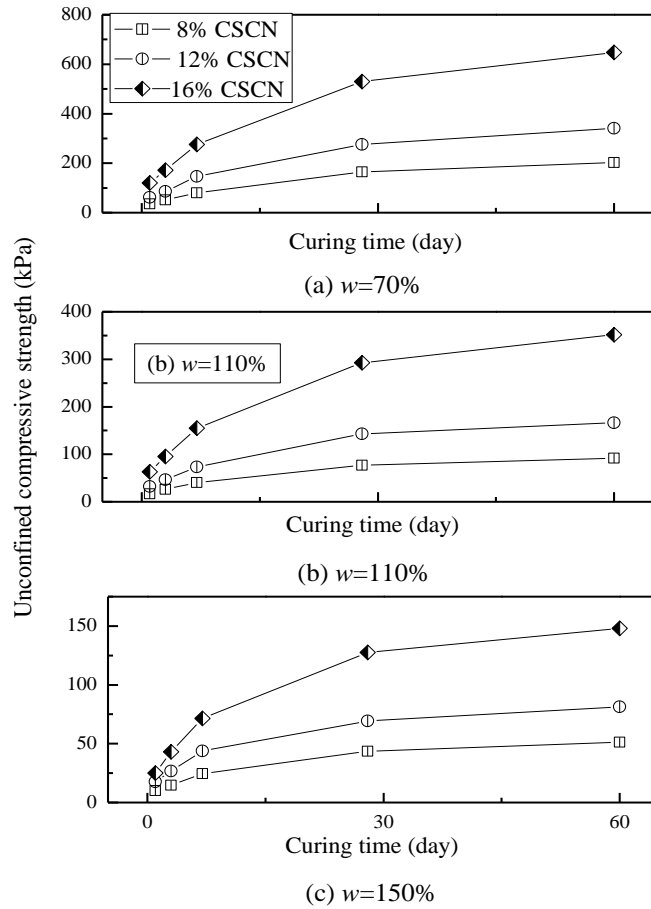


图 6-1 不同掺量高效固化剂固化处理淤泥土的抗压强度

Fig. 6-1 The compressive strength of different contents of CSCN stabilized silt at different curing ages

前文的研究结果可知，同等掺量下，高效固化剂固化处理上海软黏土的作用远远优于纯水泥的固化作用。为对比高效固化剂与纯水泥对滩涂淤泥的作用效果，以 110% 含水率的淤泥为基础材料，测试了同等水泥掺量下的固化淤泥在 1d、7d、28d 及 60d 的无侧限抗压强度，并与高效固化剂固化淤泥同龄期的强度进行对比，如图 6-2 至 6-5 所示。由图 6-2 可以看出，高效固化剂固化淤泥具有较高的 1d 强度，当水泥掺量为 8% 时，固化淤泥强度较低，而同掺量高效固化剂固化淤泥具有一定的强度；高效固化剂掺量为 12% 时，其 1d 强度比 20% 水泥固化淤泥的强度高出 15% 左右，而当高效固化剂掺量为 16% 时，其 1d 强度比 24% 水泥固化淤泥的强度高出近 50%。当养护龄期为 7d 时(图 6-3)，尽管同掺量的高效固化剂作用效果优于纯水泥的作用，但 12% 高效固化剂固化淤泥强度仅为 20% 水泥固化土强度的 70% 左右，24% 水泥固化淤泥的作用与 16% 高效固化剂的作用相当，在图 6-4 及图 6-5 中亦可看到如此现象。通过估算，可以认为，16% 高效固化剂固化处理滩涂淤泥的作用效果相当于约 24-25% 水



泥。与第 2 章关于高效固化剂固化处理上海软黏土的结果相比，可以看出，高效固化剂更适用于固化处理上海软黏土。由于不同类型的土具有不同的矿物组成、孔隙结构及孔隙流体 pH 值，导致同一种土固化剂发挥的功用有所差异。总之，高效固化剂 CSCN 均可有效固化处理上海软黏土及连江滩涂淤泥。

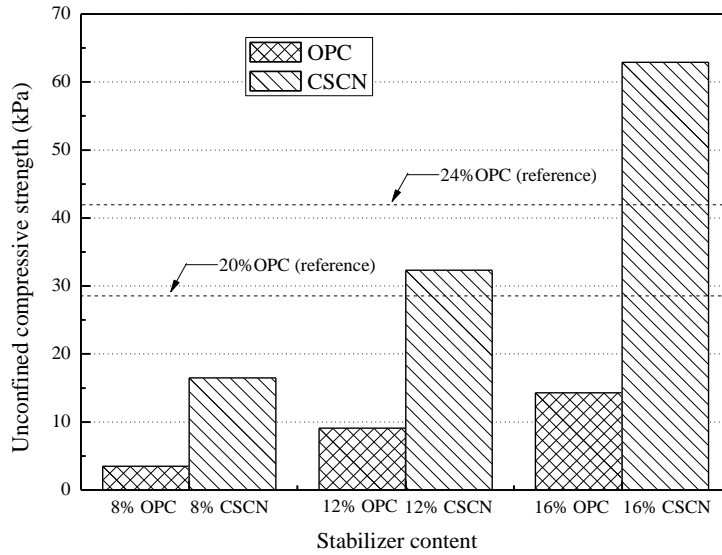


图 6-2 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 1 d 强度对比

Fig. 6-2 Strength development in OPC stabilized samples and CSCN stabilized samples at different binder contents for 1 days of curing

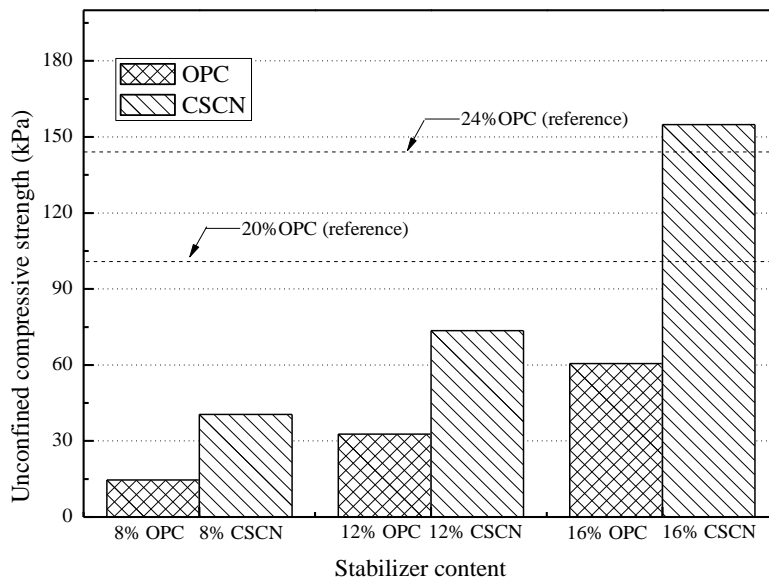


图 6-3 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 7 d 强度对比

Fig. 6-3 Strength development in OPC stabilized samples and CSCN stabilized samples at different binder contents for 7 days of curing

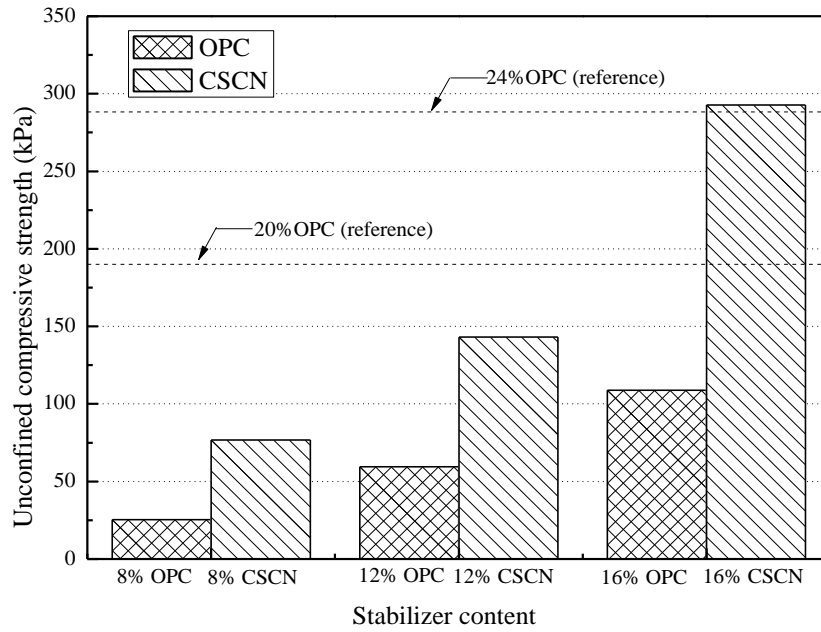


图 6-4 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 28 d 强度对比
Fig. 6-4 Strength development in OPC stabilized samples and CSCN stabilized samples at different binder contents for 28 days of curing

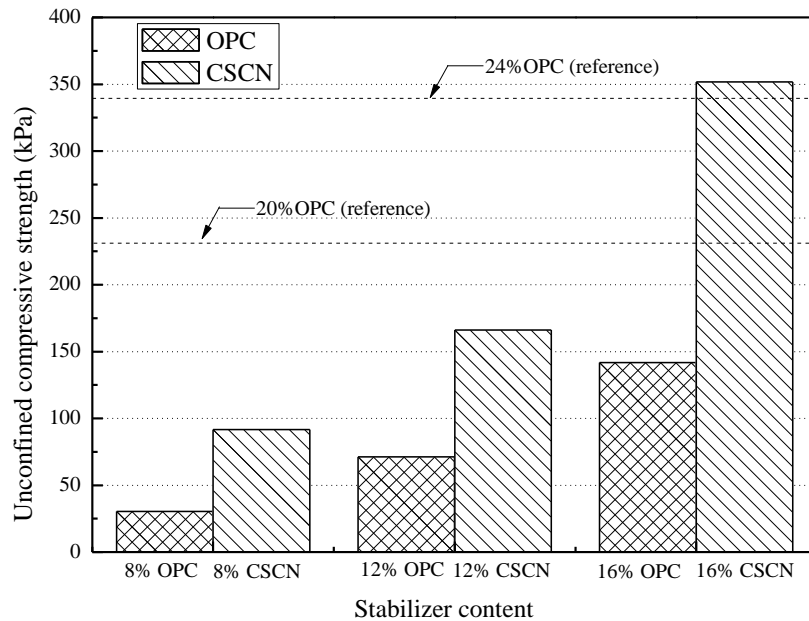


图 6-5 不同掺量高效固化剂及硅酸盐水泥固化淤泥的 60 d 强度对比
Fig. 6-5 Strength development in OPC stabilized samples and CSCN stabilized samples at different binder contents for 60 days of curing



6.2.2 高效固化剂混掺粉煤灰固化处理滩涂淤泥

本小节仅对含水率为 110% 的滩涂淤泥进行研究，高效固化剂掺量为 8%、12% 及 16%，粉煤灰掺量分别为 4%、8% 及 12%。

图 6-6 给出了不同掺量的高效固化剂混掺不同掺量粉煤灰固化滩涂淤泥各龄期的无侧限抗压强度。由图 6-6 (a) 可以看出，粉煤灰的引入可一定程度的提高固化淤泥各龄期的抗压强度，随粉煤灰掺量由 0 增加到 8% 时，固化淤泥各龄期强度均有所增加；当粉煤灰掺量为 4% 时，固化淤泥 7d 与 28d 强度仅比不掺粉煤灰的固化淤泥同龄期强度高出 15% 左右，而当粉煤灰掺量为 8% 时，固化淤泥 7d 与 28d 强度比不掺粉煤灰的固化淤泥分别高出 61.0% 与 59.4%。由图 6-6 (b) 可以看出，掺加 4% 粉煤灰即可使强度有较显著的增长，12% 高效固化剂与 4% 粉煤灰固化淤泥的 28d 强度比 12% 高效固化剂固化淤泥同龄期强度高出 24.7%。由图 6-6 (c) 可以发现与图 6-8 相类似的现象，即，低掺量粉煤灰对固化淤泥强度的改善作用有限。

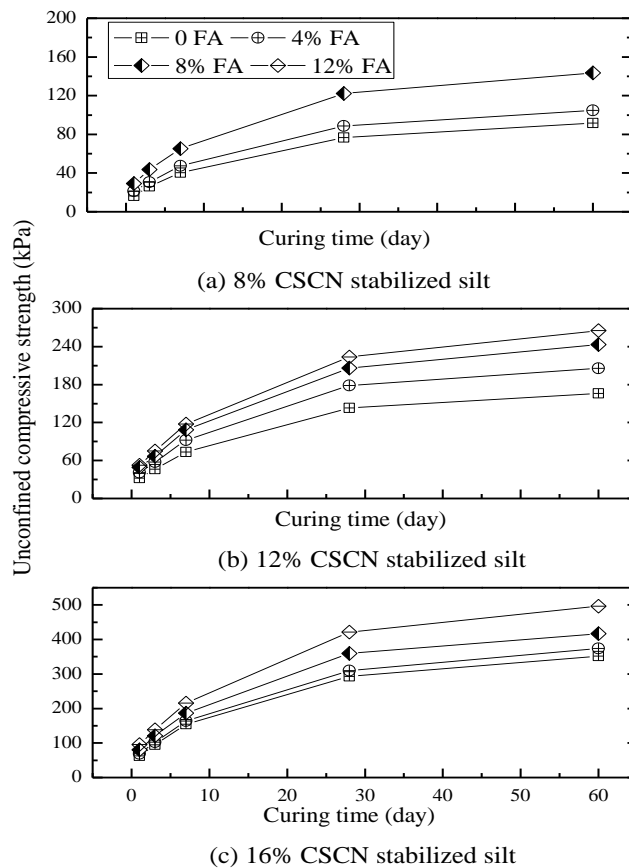


图 6-6 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的各龄期强度

Fig. 6-6 The compressive strength of CSCN stabilized silt admixed with different contents of FA at different curing ages



欲验证前文基于上海软黏土试验结果建立的综合强度计算模型对不同类型土固化处理后强度预测的适用性,应测试滩涂淤泥的有机质含量。钱宝等^[222]对比研究了土体有机质不同测试方法的准确度、精密度,结果发现,TOC 分析仪法是推荐使用的方法,测试结果精度最高,但要求具有高精度的大型仪器;其次为 550℃ 烧失量法,此方法测得的结果相对误差较小,而且要求试验条件不高,操作简单方便;水合热重铬酸钾氧化-比色法测定的结果偏低,而 950℃ 烧失量法测得的结果较实际较大,两种测试方法的相对误差均较大,不能准确反映土体有机质的实际情况。在缺少高精度 TOC 分析仪并采用 550℃ 烧失量作为测试方法的情况下,相关研究者基于 TOC 分析仪测试结果小于 550℃ 烧失量结果的发现,分析了二者关系,认为二者 TOC 分析结果约为 550℃ 烧失量结果的 0.82 倍。

考虑到实验室条件,本文采用 550℃ 烧失量分别测试上海软黏土及连江滩涂淤泥的有机质含量。实验测得的上海软黏土及连江滩涂淤泥的 550℃ 烧失量分别为 2.24% 与 5.67%,若以 TOC 分析仪测试结果为准的有机质含量,则上海软黏土与连江滩涂淤泥的有机质含量分别为 1.84% 与 4.65%。前文对固化处理上海软黏土的研究未将土体自身有机质考虑在内,因此,在利用式 (5-20) 计算高效固化剂混掺粉煤灰固化处理滩涂淤泥的各龄期强度时,将滩涂淤泥与上海软黏土实际有机质含量的差值 (2.81%) 作为计算预测强度的理论有机质含量。计算预测强度需要用到的指标如表 2-1 所示,由于含水率的变化,不同含水率的容重仍用式 (5-13) 进行计算。计算固化剂掺量分别为 8%、12% 及 16%、粉煤灰掺量分别为 4%、8% 及 12% 的固化淤泥 (基准含水率为 110%) 的各龄期强度,并与实验室实测强度进行对比,分别如图 6-7 至图 6-9 所示。由图 6-7 可知,当高效固化剂掺量为 8% 时,实测强度大多比预测强度高出 100%-120%;随着高效固化剂掺量增加到 12% 时 (图 6-8),实测强度比预测强度大 20%-40% 左右,具有了一定的准确性;而当高效固化剂掺量增加到 16% 时 (图 6-9),实测强度与预测强度相差均小于 20%,具有了较高的准确性。

滩涂淤泥孔隙流体 pH 值较高可能是造成这一现象的主要原因。由于淤泥取自沿海,其孔隙流体为海水,尽管有机质含量较高,但其孔隙流体 pH 值未受显著影响。而上海软黏土的碱性稍弱,当高效固化剂掺量较低时,一部分的 OH⁻ 和 Ca²⁺ 要与土颗粒的 H⁺、Na⁺ 等发生中和与离子交换反应,进而导致基于上海软黏土的固化土强度计算模型对固化淤泥的强度预测值偏低。因此,对本研究的固化土强度计算模型在不同类型土中的应用需要酸碱度系数 (k_p) 对式 (5-25) 进行修正,得到:

$$q_u = k_p \cdot K \cdot \left(\frac{e_t}{C}\right)^J \quad (6-1)$$

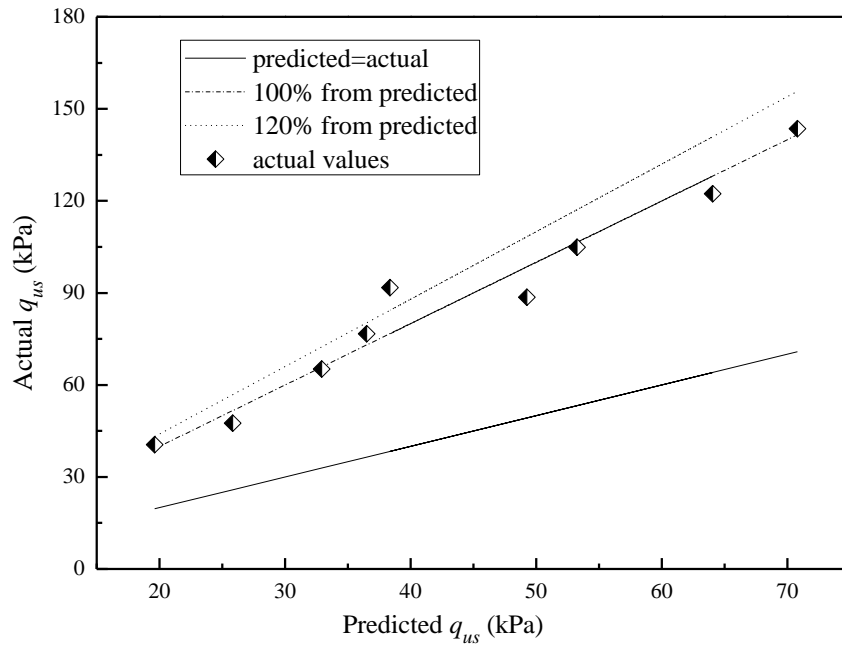


图 6-7 8% 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的实测强度与预测强度的对比

Fig. 6-7 The comparison of predicted and laboratory strength of 8% CSCN stabilized silt with fly ash

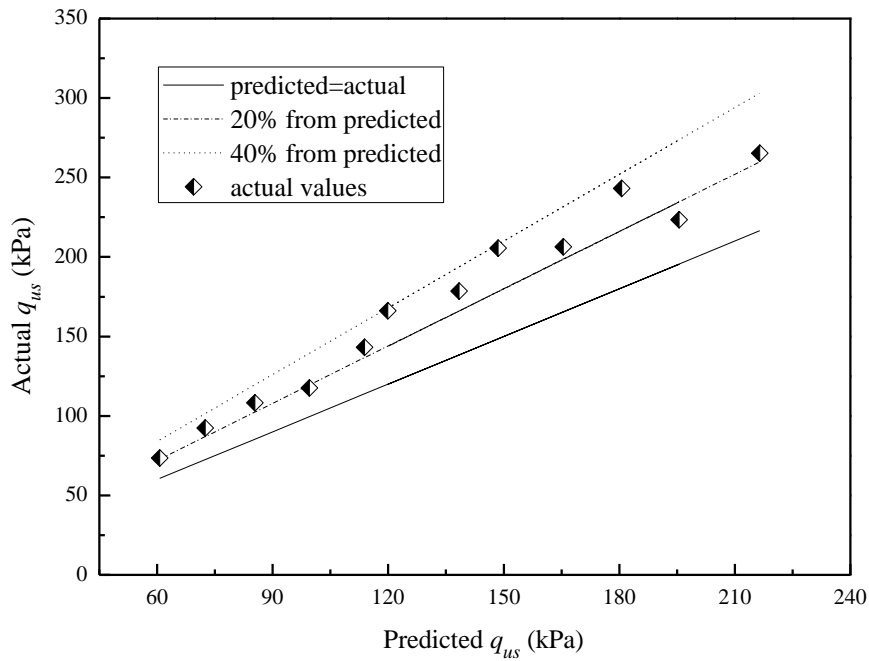


图 6-8 12% 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的实测强度与预测强度的对比

Fig. 6-8 The comparison of predicted and laboratory strength of 12% CSCN stabilized silt with fly ash

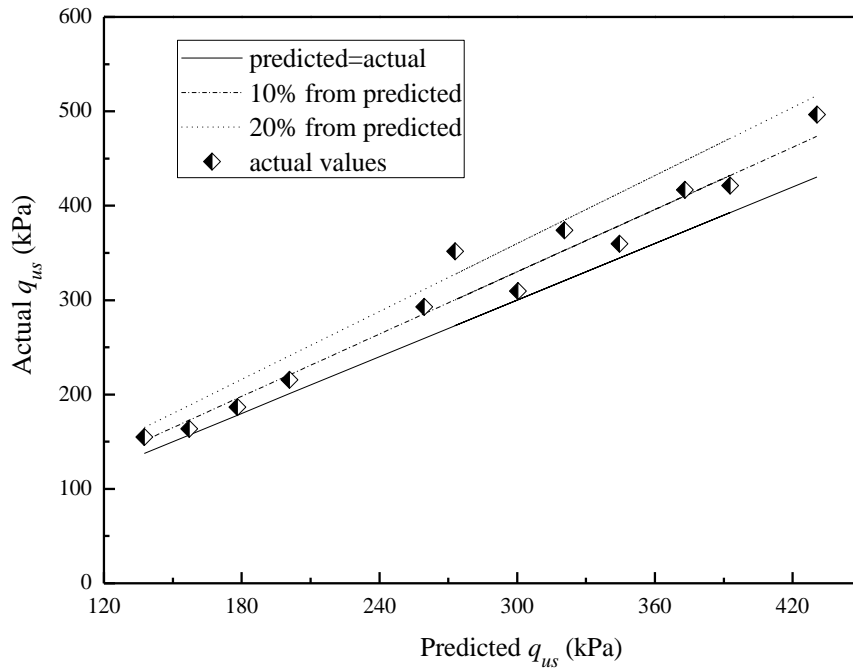


图 6-9 16% 高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的实测强度与预测强度的对比

Fig. 6-9 The comparison of predicted and laboratory strength of 16% CSCN stabilized silt with fly ash

6.3 水泥-废渣基无机土固化剂的制备

本小节开展以磷石膏、粉煤灰两种工业废渣混配生石灰、水泥等胶凝材料制备水泥-废渣基无机土固化剂的研究。试验用土为含水量为 110% 的连江滩涂淤泥。试验方法为：手工去除淤泥中的破碎贝壳、碎石等杂质后，称量设计用量的淤泥置入搅拌器低速搅拌 1 min，以土质量计算称量设计用量的固化材料，将固化材料按 0.5 的水固比制备成浆体，将固化材料浆体加入淤泥中继续搅拌至少 5 min，最终得到均匀的淤泥-固化材料拌合物；将拌合物分三层倒入 PVC 模具中，倒入每层试样后，将模具放上混凝土振动台振动 40-60 s，随后将模具置入标准养护箱中养护。养护箱温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $98 \pm 2\%$ 。养护 3d 后，脱模，将脱模后的试样继续放入养护箱中继续养护，至特定龄期后，取出进行无侧限抗压强度试验。每组取 3 个试样进行平行试验，其平均值即为试样的无侧限抗压强度。

6.3.1 固化材料单一因素试验分析

如前所述，水泥固化土各龄期强度随水泥掺量的增加而增加，即固化土性能与水泥掺量正相关。为分析磷石膏、粉煤灰及生石灰的作用及确定大致掺量范围，需开展单一因素分析试验。本节试验的基准配比如表 6-1 所示。即单一因素分析试验的水泥



掺量是固定不变的，为 12%。本节试验的详细配比如表 6-2 所示。可以看出，粉煤灰的掺量为 0-16%，磷石膏掺量为 0-12%，生石灰掺量为 0-6%。

表 6-1 单一因素分析试验基准配比

Table 6-1 The mix proportions for single-parameter analysis experiments

Items	Silt	Stabilizer slurry	
	Water content	OPC content	Water stabilizer ratio
Values	110%	12%	0.5

表 6-2 单一因素分析试验详细配比

Table 6-2 The detailed proportions for single-parameter analysis experiments

Series	No.	Silt	OPC	Fly ash	Phosphogypsum	Quick lime
CPI	1	1	0.12	0	0.03	0.015
	2	1	0.12	0.04	0.03	0.015
	3	1	0.12	0.08	0.03	0.015
	4	1	0.12	0.12	0.03	0.015
	5	1	0.12	0.12	0.16	0.03
CPII	6	1	0.12	0.04	0	0.015
	7	1	0.12	0.04	0.06	0.015
	8	1	0.12	0.04	0.09	0.015
	9	1	0.12	0.04	0.12	0.015
CPIII	10	1	0.12	0.04	0.03	0
	11	1	0.12	0.04	0.03	0.03
	12	1	0.12	0.04	0.03	0.045
	13	1	0.12	0.04	0.03	0.06

测试系列 CPI 各试样的 7d、28d 及 60d 无侧限抗压强度，考察不同掺量粉煤灰对固化淤泥各龄期强度的影响，如图 6-10 所示。可以看出，随粉煤灰掺量由 0 增加到 16%，固化淤泥各龄期无侧限抗压强度均呈现小幅增加，粉煤灰掺量为 16% 的固化淤泥强度比不掺粉煤灰的固化淤泥试样强度高出 40% 左右；掺 4% 粉煤灰的固化土试样 28d 与 60d 强度分别为 140.8kPa 与 189.5kPa，分别比不掺粉煤灰固化淤泥试样的同龄期强度高 13.7% 与 10%；值得注意的是，当粉煤灰掺量在 12% 以内时，粉煤灰对固化淤泥各龄期强度的改善作用更为显著。根据之前的研究结果，认为粉煤灰在固化土中起到一定的活性、填充及分散作用。活性效应指，粉煤灰中的活性硅、铝矿



物可在碱性环境中得以激发发生化学反应生成胶凝水化产物，增强土颗粒间的胶结作用，进而提高强度。填充效应指，粉煤灰中的微米级的圆形玻璃体可以填充在固化土孔隙中，使固化土结构更加密实，从而提高固化土强度。分散效应指，粉煤灰的玻璃体将固化土大团簇分为一些较小的团簇，增大了胶结水化产物与土颗粒的接触面积，提高了固化土强度。但粉煤灰前中期的活性效应较弱，进而导致粉煤灰掺量较大时对固化土前中期强度的提高幅度也较有限。粉煤灰掺量适中时，粉煤灰在固化淤泥的固相颗粒孔隙间起到一定的填充效应，同时，粉煤灰还可将水化产物与土颗粒胶结形成的大团簇分散成数量更多的大小不一的小团簇，具有一定的分散作用，但当粉煤灰掺量继续增大而水化产物数量未有继续增加时，粉煤灰作用的分散作用不能继续增强，表现为粉煤灰掺量小于 12% 时对固化淤泥强度改善较显著。

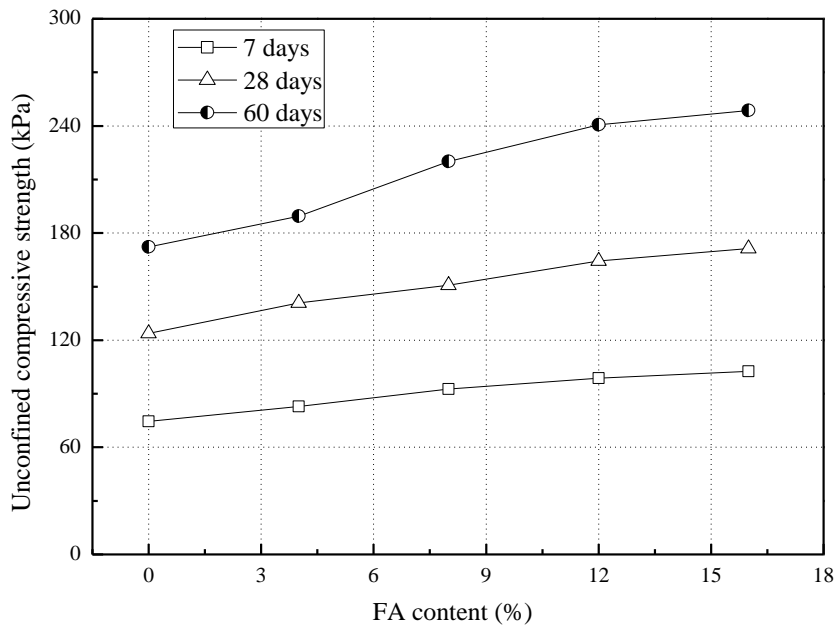


图 6-10 不同掺量粉煤灰对固化淤泥强度的影响

Fig. 6-10 The influence of different contents of fly ash on the compressive strength of stabilized silt

测试系列 C_{PII} 各试样的 7d、28d 及 60d 无侧限抗压强度，考察不同掺量磷石膏对固化淤泥各龄期强度的影响，如图 6-11 所示。可以看出，随磷石膏掺量的增加，固化淤泥各龄期强度均有显著增加，且在试验的磷石膏掺量范围内，固化淤泥强度随磷石膏掺量的增长速率并未发生显著变化；当磷石膏掺量为 12% 时，固化土试样的 7d、28d 与 60d 强度分别比不掺磷石膏的固化土试样同龄期强度高出 56.8%、53.2% 和 61.2%；掺入 3% 的磷石膏使固化土各龄期强度亦提高了 10-15% 左右。

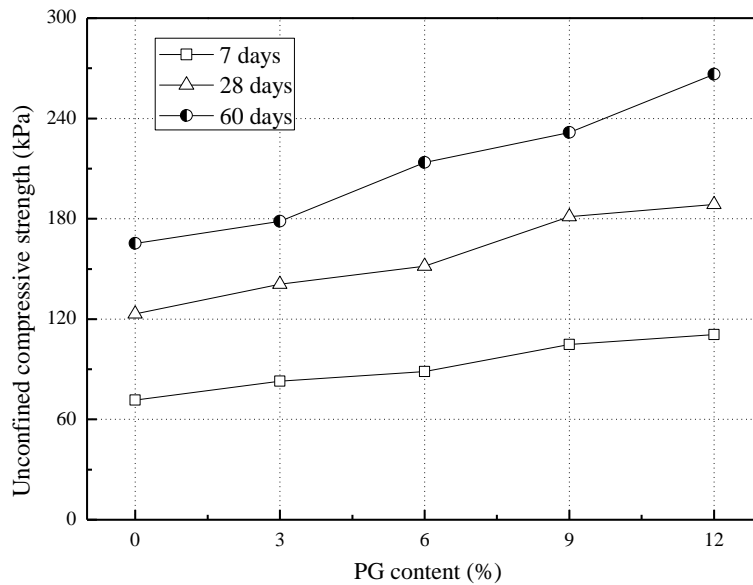


图 6-11 不同掺量磷石膏对固化淤泥强度的影响

Fig. 6-11 The influence of different contents of phosphogypsum on the compressive strength of stabilized silt

对比粉煤灰的作用可知，掺量较低时，磷石膏与粉煤灰作用效果相当；但当磷石膏掺量较高时，磷石膏的作用效果优于粉煤灰。对磷石膏的作用机理进行浅析：磷石膏和水泥同时使用时，磷石膏会与水泥水化产物中的水化硫铝酸钙生成高硫型水化硫铝酸钙（钙矾石）。钙矾石是一种六角形断面的针状晶体，在形成的过程中产生体积膨胀，固相体积增大 120% 左右。钙矾石本身及其膨胀作用产生的针状晶体可填充部分孔隙，有效降低固化土的孔隙数量，增加固化土密实度，提高其强度。但若磷石膏掺入过多时（超出本研究的试验范围），钙矾石的化学反应及膨胀作用会破坏已有胶凝水化产物，导致固化土强度降低。可以预见的是，钙矾石的最佳掺量随固化土含水率的变化亦有所不同（含水率极大地影响了固化土的孔隙率）。

测试系列 CPIII 各试样的 7d、28d 及 60d 无侧限抗压强度，考察不同掺量生石灰对固化淤泥各龄期强度的影响，如图 6-12 所示。可以看出，随生石灰掺量的增加，固化淤泥早中期强度（7d 与 28d）呈现先增加后降低的趋势，生石灰在此条件下（水泥掺量为 12%，粉煤灰掺量 4%，磷石膏掺量 3%，早中期养护）存在最佳掺量，最佳掺量范围在 3%-4.5% 之间；随养护龄期增长至 60d 时，过量生石灰（>4.5%）对固化淤泥强度的降低作用并不显著。此外，少量的生石灰即可大幅提高固化淤泥的各龄期强度，掺加 1.5% 与 3% 生石灰的固化淤泥各龄期比不掺生石灰的固化淤泥各龄期试样分别高出 20%-30% 及 40%-55%。

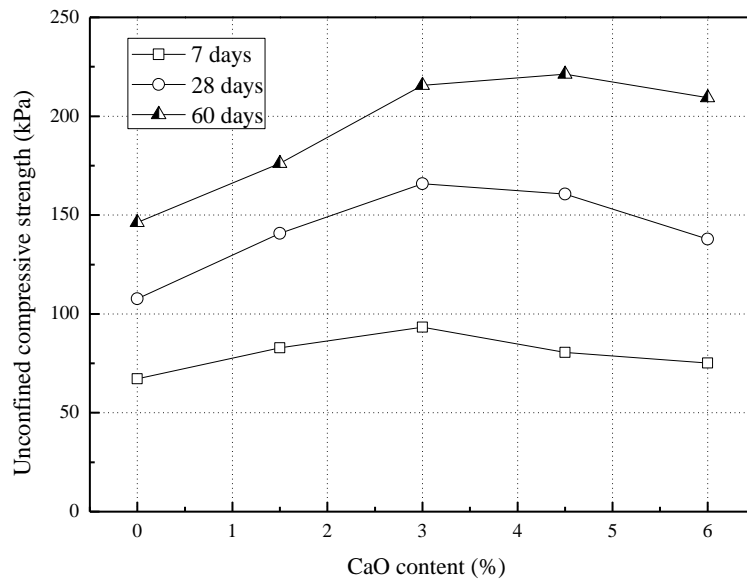


图 6-12 不同掺量生石灰对固化淤泥强度的影响

Fig. 6-12 The influence of different contents of quicklime on the compressive strength of stabilized silt

根据前文的研究成果,认为生石灰在固化土中的作用机理主要有:水化反应,即生石灰与水反应生成熟石灰,由于生石灰反应活性较大,生石灰的水化反应较迅速,在制备固化剂浆体过程中既已发生,因此,这一过程对固化淤泥强度的直接影响较小;参与水泥水化反应,适量的生石灰电离出一定量的 Ca^{2+} 促使反应(2-6)向右进行,生成更多的水化硅酸钙凝胶,进而提高固化淤泥强度;火山灰反应,生石灰提高固化淤泥碱性的同时增加了钙相含量,增强了火山灰反应,进而提高强度。当生石灰过量时,固化土孔隙流体中的 Ca^{2+} 与 OH^- 离子浓度过高,抑制了反应(2-5)的进行,导致早期胶凝水化产物生成量降低。

单一因素试验研究表明,一定掺量的磷石膏、生石灰及粉煤灰均可显著提高固化淤泥各龄期的无侧限抗压强度,但需注意的是,水泥、磷石膏、粉煤灰及生石灰等固化材料之间是相互影响的,即具有一定的交互作用。因此,为考察各固化材料影响固化淤泥性能的显著性,需进一步开展带交互作用的正交试验。

6.3.2 正交试验

由单因素分析试验可知,在水泥掺量(10%-12%)与固化材料总量固定(30%以内)的前提下,难以确定粉煤灰及磷石膏的最佳使用量。因此,需分析各固化材料的显著性,进而确定固化材料的较优配比。正交试验设计时,需考虑磷石膏与生石灰、粉煤灰与生石灰的交互作用,同时引入误差列。基于单因素分析试验结果,变化各材料的掺量,可得正交试验方案的因素水平表,如表 6-3 所示。



表 6-3 正交试验方案的因素水平表
Table 6-3 Contents of orthogonal factors and levels

Levels	Parameter, Content (%)		
	Quick lime [A]	Phosphogypsum [B]	Fly ash [C]
1	1.5	3	4
2	3	6	8
3	4.5	9	12
4	6	12	16

由于需考虑不同因素的交互作用，并引入误差列，未有常见的正交试验设计表格可以参考，故而采用正交试验设计软件设计出相对应的正交试验表格，如表 6-4 所示。对比前 16 组和后 16 组可以发现，前 16 组和后 16 组的因素 A、因素 B 与因素 C 的设计相同，即，虽然正交试验表有 32 组试验，仅开展前 16 组试验即可。在结果分析时，对前 16 组试验的结果进行重复分析。

表 6-4 正交试验设计表
Table 6-4 Orthogonal test design table

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	[C]	[B]×[C]	Error
OP1	A1	B1	1	C1	1	1
OP2	A1	B2	2	C2	2	2
OP3	A1	B3	3	C3	3	3
OP4	A1	B4	4	C4	4	4
OP5	A2	B1	1	C2	2	3
OP6	A2	B2	2	C1	1	4
OP7	A2	B3	3	C4	4	1
OP8	A2	B4	4	C3	3	2
OP9	A3	B1	2	C3	4	1
OP10	A3	B2	1	C4	3	2
OP11	A3	B3	4	C1	2	3
OP12	A3	B4	3	C2	1	4
OP13	A4	B1	2	C4	3	3
OP14	A4	B2	1	C3	4	4
OP15	A4	B4	3	C1	2	2
OP16	A4	B4	3	C1	2	2
OP17	A1	B1	4	C1	4	2
OP18	A1	B2	3	C2	3	1
OP19	A1	B3	2	C3	2	4
OP20	A1	B4	1	C4	1	3



续表 6-4

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	[C]	[B]×[C]	Error
OP21	A2	B1	4	C2	3	4
OP22	A2	B2	3	C1	4	3
OP23	A2	B3	2	C4	1	2
OP24	A2	B4	1	C3	2	1
OP25	A3	B1	3	C3	1	2
OP26	A3	B2	4	C4	2	1
OP27	A3	B3	1	C1	3	4
OP28	A3	B4	2	C2	4	3
OP29	A4	B1	3	C4	2	4
OP30	A4	B2	4	C3	1	3
OP31	A4	B3	1	C2	4	2
OP32	A4	B4	2	C1	3	1

对表 6-4 中的试验配方进行试验，得到固化淤泥试样的 7d 和 28d 无侧限抗压强度，结果分别如表 6-5、6-6 所示。

表 6-5 正交试验 7d 结果

Table 6-5 Experimental program of orthogonal analysis for 7 days of curing

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	[C]	[B]×[C]	Error	7d-strength
OP1	A1	B1	1	C1	1	1	82.8
OP2	A1	B2	2	C2	2	2	125.3
OP3	A1	B3	3	C3	3	3	162.5
OP4	A1	B4	4	C4	4	4	231.7
OP5	A2	B1	1	C2	2	3	105.8
OP6	A2	B2	2	C1	1	4	72.1
OP7	A2	B3	3	C4	4	1	88.2
OP8	A2	B4	4	C3	3	2	95.9
OP9	A3	B1	2	C3	4	1	145.6
OP10	A3	B2	1	C4	3	2	162.3
OP11	A3	B3	4	C1	2	3	89.4
OP12	A3	B4	3	C2	1	4	73.5
OP13	A4	B1	2	C4	3	3	91.1
OP14	A4	B2	1	C3	4	4	107.2
OP15	A4	B4	3	C1	2	2	63.4
OP16	A4	B4	3	C1	2	2	49.7
OP17	A1	B1	4	C1	4	2	82.8
OP18	A1	B2	3	C2	3	1	125.3



续表 6-5

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	[C]	[B]×[C]	Error	7d-strength
OP19	A1	B3	2	C3	2	4	162.5
OP20	A1	B4	1	C4	1	3	231.7
OP21	A2	B1	4	C2	3	4	105.8
OP22	A2	B2	3	C1	4	3	72.1
OP23	A2	B3	2	C4	1	2	88.2
OP24	A2	B4	1	C3	2	1	95.9
OP25	A3	B1	3	C3	1	2	145.6
OP26	A3	B2	4	C4	2	1	162.3
OP27	A3	B3	1	C1	3	4	89.4
OP28	A3	B4	2	C2	4	3	73.5
OP29	A4	B1	3	C4	2	4	91.1
OP30	A4	B2	4	C3	1	3	107.2
OP31	A4	B3	1	C2	4	2	63.4
OP32	A4	B4	2	C1	3	1	49.7
<i>K</i> 1	1024.6	850.6	938.5	760	864.5	813.2	
<i>K</i> 2	724	933.8	808	736	882	813.2	
<i>K</i> 3	941.6	807	808	1022.4	882	933.3	
<i>K</i> 4	622.8	901.6	938.5	1146.6	864.5	933.3	
\bar{K}_1	150.6	106.3	117.3	95	108.1	101.7	
\bar{K}_2	90.5	116.7	101	92	110.3	101.7	
\bar{K}_3	117.7	100.9	101	127.8	110.3	116.7	
\bar{K}_4	77.85	112.7	117.3	143.3	108.1	116.7	

表 6-6 正交试验 28d 结果

Table 6-6 Experimental program of orthogonal analysis for 28 days of curing

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	[C]	[B]×[C]	Error	28d-strength
OP1	A1	B1	1	C1	1	1	142.3
OP2	A1	B2	2	C2	2	2	222.3
OP3	A1	B3	3	C3	3	3	295.1
OP4	A1	B4	4	C4	4	4	377.9
OP5	A2	B1	1	C2	2	3	175.1
OP6	A2	B2	2	C1	1	4	131.5
OP7	A2	B3	3	C4	4	1	165.8
OP8	A2	B4	4	C3	3	2	172.3
OP9	A3	B1	2	C3	4	1	234.4
OP10	A3	B2	1	C4	3	2	262.9
OP11	A3	B3	4	C1	2	3	167.8
OP12	A3	B4	3	C2	1	4	114.3



续表 6-6

No.	[A]	[B]	[A]×[B]	[C]	[B]×[C]	Error	28d-strength
OP13	A4	B1	2	C4	3	3	142.9
OP14	A4	B2	1	C3	4	4	173.5
OP15	A4	B4	3	C1	2	2	125.7
OP16	A4	B4	3	C1	2	2	91.5
OP17	A1	B1	4	C1	4	2	142.3
OP18	A1	B2	3	C2	3	1	222.3
OP19	A1	B3	2	C3	2	4	295.1
OP20	A1	B4	1	C4	1	3	377.9
OP21	A2	B1	4	C2	3	4	175.1
OP22	A2	B2	3	C1	4	3	131.5
OP23	A2	B3	2	C4	1	2	165.8
OP24	A2	B4	1	C3	2	1	172.3
OP25	A3	B1	3	C3	1	2	234.4
OP26	A3	B2	4	C4	2	1	262.9
OP27	A3	B3	1	C1	3	4	167.8
OP28	A3	B4	2	C2	4	3	114.3
OP29	A4	B1	3	C4	2	4	142.9
OP30	A4	B2	4	C3	1	3	173.5
OP31	A4	B3	1	C2	4	2	125.7
OP32	A4	B4	2	C1	3	1	91.5
<i>K1</i>	2075.2	1382.2	1593.9	1066.2	1465.4	1417.2	
<i>K2</i>	1282.2	1580.4	1397.8	1267.6	1526.3	1417.2	
<i>K3</i>	1558.8	1508.8	1397.8	1750.6	1526.3	1574.5	
<i>K4</i>	1067.2	1512	1593.9	1899	1465.4	1574.5	
$\bar{K}1$	259.4	172.8	199.2	133.3	183.2	177.2	
$\bar{K}2$	160.3	197.6	174.7	158.5	190.8	177.2	
$\bar{K}3$	194.9	188.6	174.7	218.8	190.8	196.8	
$\bar{K}4$	133.4	189	199.2	237.4	183.2	196.8	

表 6-5、6-6 分别给出了各水平相对应的四次强度之和 $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 及 $K4$ 和平均强度 $\bar{K}1$ 、 $\bar{K}2$ 、 $\bar{K}3$ 及 $\bar{K}4$ ，其计算方法如下所示：

对表 6-5 的第一列（生石灰掺量）的 $K1$ 和 $\bar{K}1$ 值，

$K1=82.8+125.3+162.5+231.7+82.8+125.3+162.5+231.7=1024.6$ （第 OP1、OP2、OP3、OA4、OP17、OP18、OP19 与 OP20 号试样的 7d 强度之和）

$K2=105.8+72.1+88.2+95.9+105.8+72.1+88.2+95.9=724$ （第 OP5、OP6、OA7、OA8、OP21、OP22、OP23 与 OP24 号试样的 7d 强度之和）



$K_3=145.6+162.3+89.4+73.5+145.6+162.3+89.4+73.5=941.6$ (第 OP9、OP10、OA11、OA12、OP25、OP26、OP27 与 OP28 号试样的 7d 强度之和)

$K_4=91.1+107.2+63.4+49.7+91.1+107.2+63.4+49.7=622.8$ (第 OP13、OP14、OA15、OA16、OP29、OP30、OP31 与 OP32 号试样的 7d 强度之和)

其余各列(包括交互作用列和误差列)的 K_i 与 \bar{K}_i 值计算方法与第 1 列的计算方法相同。固化淤泥 28d 抗压强度的 K_i 与 \bar{K}_i 值的计算方法亦如此, 计算结果如表 6-6 所示。

对正交试验结果进行进一步的方差分析, 方差分析结果如表 6-7 及 6-8 所示。其中, S_S 为偏差平方和, df 为自由度, M_S 为方差, F 为构造统计量。

表 6-7 7d 正交试验结果的方差分析表

Table 6-7 ANOVA (analysis of variance) table of 7-day strength

Source	S_S	df	M_S	F	F_C	Significance
A	24933.2	3	8311.1	73.75	$F_{0.005}(3,16)=6.30$	**
B	1171.5	3	390.5	3.47	$F_{0.01}(3,16)=5.29$	*
A*B	2128.8	3	709.6	6.30	$F_{0.05}(3,16)=3.24$	**
C	16078.6	3	5359.5	47.56	$F_{0.1}(3,16)=2.46$	**
A*C	38.3	3	12.8	0.11		
Error	1803.0	16	112.7			
Total	46153.4	31				

注: 符号**代表非常显著, *代表显著

表 6-8 28d 正交试验结果的方差分析表

Table 6-8 ANOVA (analysis of variance) table of 28-day strength

Source	S_S	df	M_S	F	F_C	Significance
A	71124.5	3	23708.2	122.65	$F_{0.005}(3,16)=6.30$	**
B	2561.7	3	853.9	4.42	$F_{0.01}(3,16)=5.29$	*
A*B	4806.9	3	1602.3	8.29	$F_{0.05}(3,16)=3.24$	**
C	58015.6	3	19338.5	100.04	$F_{0.1}(3,16)=2.46$	**
A*C	463.6	3	154.5	0.80		
Error	3092.9	16	193.3			
Total	140065.2	31				

注: 符号**代表非常显著, *代表显著

由表 6-7 与表 6-8 的分析结果可以得出以下结论:

(1) 生石灰掺量、粉煤灰掺量及生石灰与磷石膏的交互作用对固化淤泥 7d 及 28d 无侧限抗压强度的影响均是十分显著的, 磷石膏掺量的对抗压强度的影响是显著的, 与上述因素相比, 生石灰与粉煤灰的交互作用对固化淤泥强度的影响较小, 甚至



可以忽略不计；

(2) 各因素在 7d 和 28d 的主次作用一致，主次顺序为：A（生石灰掺量）→C（粉煤灰掺量）→A*B（生石灰与磷石膏的交互作用）→B（磷石膏掺量）→误差→A*C（生石灰与粉煤灰的交互作用）；

(3) 对比表 6-7 与表 6-8 的分析结果可知，生石灰、粉煤灰对固化淤泥 28d 强度的影响作用强于对 7d 强度的影响作用，而磷石膏及交互作用的影响作用随龄期的变化并不显著，这表明，生石灰与粉煤灰对固化淤泥强度的影响作用随养护龄期的增加而增大。

在实际的软土及淤泥固化处理工程（水泥土搅拌桩）中，若固化材料掺量过大，易造成资源浪费、固化剂利用率低等问题，因此，固化材料的总掺量应不超过 25% 为宜。综合正交试验及单因素分析试验研究可以得出各固化材料较优的掺量范围，即，10%~12% 水泥，1.5%~2% 生石灰，4%~6% 磷石膏以及 4%~8% 粉煤灰。

6.4 本章小结

在对腐殖酸作用量化分析及固化有机质土强度综合计算模型建立的基础上，对高效固化剂及高效固化剂混掺粉煤灰固化连江滩涂淤泥各龄期的无侧限抗压强度进行了理论计算，并利用试验结果探讨了计算结果的准确性，进而考察固化有机质土强度综合计算模型在不同类型土中的适用性；以普通硅酸盐水泥、生石灰、磷石膏及粉煤灰为基础材料制备水泥-废渣基无机土固化剂，通过单一因素试验分析了各固化材料对固化淤泥各龄期强度的影响并确定各固化材料的大致掺量范围，随后借助正交试验以 7d 和 28d 强度为指标考察了各固化材料的显著性。通过以上研究，得到以下结论：

(1) 高效固化剂固化处理连江滩涂淤泥亦具有良好的效果，高效固化剂固化淤泥的各龄期强度均大大高于同等用量的水泥固化淤泥同龄期的强度。12% 高效固化剂固化淤泥强度仅为 20% 水泥固化土强度的 70% 左右，24% 水泥固化淤泥的作用与 16% 高效固化剂的作用相当。通过估算，可以认为，16% 高效固化剂固化处理滩涂淤泥的作用效果相当于约 24-25% 水泥。与第二章关于高效固化剂固化处理上海软黏土的结果相比，可以看出，高效固化剂用于上海软黏土具有更好的固化处理作用。由于不同的土具有不同的矿物组成、孔隙结构及孔隙流体 pH 值，导致同一种土固化剂发挥的功用有所差异。

(2) 粉煤灰可使高效固化剂固化淤泥的各龄期强度均出现不同幅度的增长，掺



入 4%~8% 粉煤灰时, 高效固化剂固化淤泥各龄期强度的增幅约为 20%~50%。对于粉煤灰作用于高效固化剂固化上海饱和软土的效果, 可以看出, 粉煤灰对固化淤泥的增强效果更为显著, 究其原因, 可能是因为淤泥含水率高、孔隙率更大, 更有利于粉煤灰发挥填充、分散作用。在测试连江淤泥基本物性指标的基础上, 利用前文得到的基于土体基本物性指标的固化有机质土强度综合计算模型, 估算得到高效固化剂混掺粉煤灰固化淤泥的各龄期计算强度, 同实验室实测强度对比后发现, 当高效固化剂掺量较低时, 计算值与实测值具有较大的误差, 随着高效固化剂掺量的增加 (由 8% 到 16%), 二者误差可缩小至 20% 以内。产生这一现象的主要原因可以解释为, 连江淤泥的 pH 值较高, 而上海软黏土的碱性稍弱, 当高效固化剂掺量较低时, 一部分的 OH^- 和 Ca^{2+} 要与土颗粒的 H^+ 、 Na^+ 等发生中和与离子交换反应, 进而导致基于上海软黏土的固化土强度计算模型对固化淤泥的强度预测值偏低。

(3) 在试验的掺量范围内, 水泥-废渣固化淤泥强度随粉煤灰掺量增加而出现不同程度的增加, 磷石膏亦呈现类似的作用规律, 但生石灰存在某最佳掺量范围。粉煤灰的作用表现为活性效应、填充效应及分散效应, 磷石膏在水泥-生石灰-粉煤灰体系中能生成一定数量的钙矾石, 钙矾石晶体较大并在孔隙中生长, 可有效起到填充固化淤泥孔隙的作用。生石灰掺量较低或适中时, 其溶解后生成的 Ca^{2+} 可以促进水化反应生成更多的水化硅酸钙凝胶, 进而提高固化淤泥强度; 而当生石灰掺量过量时, 孔隙流体中过高的 Ca^{2+} 与 OH^- 离子浓度, 一定程度上抑制了水化硅酸钙凝胶的生成, 导致固化淤泥强度有所降低。

(4) 正交试验表明, 生石灰与磷石膏存在显著的交互作用, 各因素的主次作用由强到弱依次为: 生石灰掺量, 粉煤灰掺量, 生石灰与磷石膏的交互作用, 磷石膏掺量。生石灰、粉煤灰对固化淤泥 28d 强度的影响作用强于对 7d 强度的影响作用, 而磷石膏及交互作用的影响作用随龄期的变化并不显著, 这表明, 生石灰与粉煤灰对固化淤泥强度的影响作用随养护龄期的增加而增大。综合正交试验及单因素分析试验研究可以得出各固化材料较优的掺量范围, 即, 10%~12% 水泥, 1.5%~2% 生石灰, 4%~6% 磷石膏以及 4%~8% 粉煤灰。



第7章 结论与建议

7.1 主要结论

本文以上海饱和软土与福建滩涂淤泥为研究对象,对上海饱和软黏土,通过单因素分析和正交试验研制了水泥基高效固化剂,同纯水泥固化土进行了对比,并借助物相分析和微观结构测试探究了固化剂的作用机理;将外加剂看作火山灰材料并分别定义其火山灰系数,以固化土无侧限抗压强度为指标量化分析了外加剂对固化土的作用;深入考察了粉煤灰在固化土中的作用机理,测试了高效固化剂混掺粉煤灰固化土的各龄期强度,进而对粉煤灰作用进行了量化分析;使用高纯度腐殖酸模拟土体有机质制备人工再造有机质土,依据固化有机质土强度测试结果量化分析土体有机质(腐殖酸)对固化土的影响;考察了固化土体物性指标随养护龄期、固化剂掺量与有机质含量之间的关系,最终建立了基于土物性指标的固化土强度综合计算模型。测试了高效固化剂固化处理滩涂淤泥的强度,考察了强度综合计算模型在固化淤泥中的应用。得到以下主要结论:

(1) 对上海饱和软黏土的固化处理,硅酸钠作为助剂使用,其他外加剂可作为激发剂。试验表明,氯化钙与氢氧化钠按质量比 1:1 复合使用作为激发剂对固化土强度具有协同改善作用。水泥掺量固定为 10%,硅酸钠及复合激发剂的掺量分别为 2% 和 4% 时,固化土具有最高强度。将三者按 5:1:2 制备得到的混合材料作为高效固化剂(CSCN)的基准配比,以 60d 强度为评价指标,10%、12% 及 16% CSCN 分别相当于 15%、20% 与 30% 水泥。

(2) 土体中的高岭石、伊利石及部分活性二氧化硅在碱激发环境下发生火山灰反应生成胶凝水化产物(C-S-H 或 C-A-H)。CSCN 与水泥用量相同时,CSCN 固化土生成更多水化硅酸钙凝胶(C-S-H),且为蜂窝状结构,而水泥固化土的 C-S-H 为针状结构,表明 C-S-H 的数量和形态对固化土强度均有较大影响;CSCN 固化土孔隙流体具有更高 pH 值,更有利于促进土中活性矿物的火山灰反应。

(3) 分别定义助剂和复合激发剂的火山灰系数 k_1 、 k_2 ,基于水泥固化土强度的水土灰比模型与正交试验结果,采用多元拟合得到 k_1 、 k_2 的值。发现外加剂火山灰系数随养护龄期变化, k_1 随龄期呈减小趋势, k_2 随龄期有小幅增大,二者与龄期关系可由幂函数式表示。外加剂作用的量化分析有助于指导工程中水泥与外加剂类固化剂的设计,如欲获得与 20% 水泥固化土相当的 60d 强度,仅需 10% 水泥、1.5% 助剂和 1.5% 复合激发剂或 8% 水泥、1.1% 助剂和 3% 复合激发剂(助剂和复合激发剂在



最佳掺量范围内, 即助剂/水泥和复合激发剂/水泥分别小于 $1/5$ 和 $2/5$), 外加剂用量可根据工程实际情况灵活计算。

(4) 粉煤灰在固化土中具有多重作用, 即火山灰作用、填充作用以及分散作用(综合为 P&D 作用)。粉煤灰微米级以下颗粒在早中期发生火山灰作用生成胶凝水化产物, 较大颗粒可有效填充在土体大孔隙中。部分颗粒将胶凝水化产物胶结土颗粒形成的大团簇分散为小团簇, 扩大了水化产物的作用范围, 促使形成更多骨架结构。可见, 固化土中胶凝水化产物越多, 粉煤灰 P&D 作用越显著, 此即为粉煤灰最优用量与固化剂掺量相关的原因。

(5) 定义粉煤灰的 P&D 系数 (k_F), 借助 CSCN 固化土强度的水土灰比模型, 得到各龄期 k_F 值, 进而计算得到考虑粉煤灰作用的当量固化剂总量 (C_{CF})。早中期 k_F 有较大增长, 随龄期增加, k_F 增长速率降低, 龄期无限大时, 固化剂水化反应近完全, 粉煤灰 P&D 作用完全发挥, k_F 亦近一常数。因此, k_F 与龄期的关系可由双曲线函数进行表示。

(6) 土体有机质(腐殖酸)含量由 0 增加到 15% 时, CSCN 固化土强度大幅降低, 其作用相当于对固化剂的消耗。粉煤灰的掺入并未改变这一趋势, 但粉煤灰最佳掺量发生变化, 说明 CSCN、粉煤灰与腐殖酸三者作用相互影响。故定义并计算粉煤灰在固化有机质土中的活性系数 (k_{fh}) 与腐殖酸反活性系数 (OCI_{fh}), 进而可获得 CSCN 混掺粉煤灰固化有机质土的有效固化剂掺量 (C_{ec})。

(7) 土体基本物性指标在软土固化土处理前后发生变化, 表现为: 容重 (γ_{tH}) 随 C_{ec} 增加与龄期增长而增大, 随腐殖酸含量 (C_{HAP}) 增加而明显降低, 含水率 (w_{tH}) 亦呈现类似规律; 土粒比重 (G_{stH}) 与龄期无关, 仅受 C_{ec} 与 C_{HAP} 的影响, G_{stH} 随 C_{ec} 与 C_{HAP} 的增加而小幅降低, 究其原因与土颗粒活性矿物的溶解、水化以及对大分子有机质的吸附作用有关。

(8) 基于未处理土体物性指标标准化分析得到固化土体各龄期物性指标, 进而建立基于土体基本物性指标的固化有机质土强度综合计算模型。对不同系列固化有机质土, 计算强度与实测强度误差在 10% 左右。CSCN 用于固化处理滩涂淤泥亦有良好效果, 16% 的 CSCN 与 24% 水泥固化淤泥的作用相当。强度综合计算模型用于计算 CSCN 混掺粉煤灰固化淤泥强度时, CSCN 用量较低时实测强度高于计算强度一倍以上, 但随着 CSCN 用量的增加(由 8% 到 16%), 二者误差可缩小至 20% 以内。究其原因为滩涂淤泥孔隙流体 pH 值较高, 故需在强度计算模型中考虑未处理土体 pH 值的修正系数。

(9) 以水泥、磷石膏、粉煤灰及生石灰为原材料研究水泥-废渣基固化剂。磷石



膏用于高含水率的淤泥固化处理具有优势：生成一定数量的钙矾石，钙矾石晶体较大并在孔隙中生长，具有填充固化淤泥孔隙的作用。正交试验表明，生石灰与磷石膏存在显著的交互作用，各因素的主次作用由强到弱依次为：生石灰掺量，粉煤灰掺量，生石灰与磷石膏的交互作用，磷石膏掺量。水泥-废渣基固化剂各材料的较优掺量范围为 10%-12% 水泥、1.5%-2% 生石灰、4%-6% 磷石膏以及 4%-8% 粉煤灰。

7.2 主要创新点

本研究主要有以下创新点：

(1) 以普通硅酸盐水泥、助剂和激发剂为基础材料，研究得到一种高效水泥基软土固化剂；

(2) 提出外加剂的火山灰（活性）系数，以强度指标量化分析外加剂在高效固化剂中的作用效果；

(3) 全面考察粉煤灰作用机理，提出粉煤灰的分散与填充系数（P&D 系数），可由此分析粉煤灰对固化土强度的作用权重；

(4) 量化分析土体有机质（腐殖酸）对固化土强度的影响，并建立基于土基本物理性质指标的固化有机质土强度综合估算模型。

7.3 进一步研究的建议

土体自身的物理化学性质极为复杂，对软土的固化处理及固化土强度计算模型的建立需要广泛且深入的研究。总体上讲，本研究虽取得了一些成果，却还不够成熟，未来将从以下几方面继续研究：

(1) 外加剂在固化土的作用不仅决定于活性效应，还与其在固化土孔隙流体中渗流作用亦密切相关。今后可以对外加剂在固化土中的渗流作用进行研究。

(2) 本研究仅对上海饱和软土和连江滩涂淤泥进行了研究，样本数量较少。最终结果虽被证明具有适用性，今后仍需增加样本数量，考察其普适性。

(3) 土体自身性质复杂，本研究仅考虑了与土体孔隙率相关的指标，并未考虑土体细观（矿物组成、矿物结构）、土体孔隙流体 pH 及黏粒含量等因素的影响，今后研究可以从此方面着手。

(4) 土中有机质组成复杂，本研究采用腐殖酸作为土体有机质，虽能准确定量分析，仍具有一定的局限性。可在最大程度还原有机质土这一方向做工作。

(5) 本研究以固化土的抗压强度为主要评价指标，其他性能（如弹性模量、渗透性等）涉及较少，今后可从这一方面进行完善。



参考文献

- [1] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1987, 156-163.
- [2] 简文彬, 吴振祥, 刘慧明, 陈志波, 张敏霞. 闽东南沿海地区软土静力触探参数相关分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 733-738.
- [3] 朱金颖, 陈龙珠, 葛炜. 层状地基中桩静载试验数据的拟合分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 34-39.
- [4] Van Impe W F. Soil improvement techniques and their evolution[M]. Wokingham, Berkshire United Kingdom, 1989, 15-21.
- [5] Chu J, Yan S W, Yang H. Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station[J]. Geotechnique, 2000, 50(6): 625-632.
- [6] Mitchell J K, Hooper D R, Campenella R G. Permeability of compacted clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1965, 91(4): 41-66.
- [7] Daniel D E. In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(9): 1205-1226.
- [8] 龚晓南. 21 世纪岩土工程发展展望 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 238-242.
- [9] Sherwood P. Soil stabilization with cement and lime[M]. Nine Mile Ride Wokingham, Berkshire RG40 3GA United Kingdom 1993, 53-56.
- [10] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2006, 34(2): 141-146.
- [11] 张天红, 周易平, 叶阳升, 祝和权. 水泥土的强度及影响因素初探[J]. 中国铁道科学, 2004, 24(6): 53-56.
- [12] 叶观宝, 叶书麟. 水泥土搅拌桩加固软基的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1995, 23(3): 270-275.
- [13] 李海生. 双向双轴水泥搅拌桩加固软土地基施工技术[J]. 铁道建筑, 2010 (2): 65-66.
- [14] 马时冬. 水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 48-51.
- [15] 陈水龙, 巨建勋. 深层水泥搅拌桩在基坑支护中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(3): 74-76.
- [16] 唐云, 王桃源. 深层水泥搅拌桩在港工软基边坡加固中的应用[J]. 中国港湾建设, 2009 (6): 20-24.
- [17] 刘顺妮, 林宗寿, 陈云波. 高含水量黏土固化剂的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 75-78.
- [18] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 申春妮, 徐尔昌. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1545-1548.
- [19] 周明凯. 高性能水泥基土壤固化剂材料的设计, 制备与机理研究[D]. 武汉: 武汉工业大学博士学位论文. 1999.
- [20] 董邑宁, 徐日庆, 龚晓南. 固化剂 ZDYT-1 加固土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 472-475.
- [21] 储诚富, 邵俐, 刘松玉, 洪振舜. 有机质含量对水泥土强度影响的室内定量研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1613-1616.
- [22] 刘宝臣, 唐黔, 李懿, 李翠娟. 外加剂对桂林含有机质水泥红黏土力学性质影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 554-559.
- [23] 邓晓轩, 纪宪坤, 田均兵, 杨欣华, 王明远. 矿渣在尾砂胶结充填中的应用与研究进展[J]. 材料导



- 报, 2016, 30(5): 95-100.
- [24] Shen W G, Zhou M K, Ma W, Hu J Q, Cai Z. Investigation on the application of steel slag-fly ashphosphogypsum solidified material as road base material[J]. *Journal of hazardous materials*, 2009, 164(1): 99-104.
- [25] 孙家瑛, 沈建生. 新型固化剂 GSC 固化软土的力学性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013 (1): 20-25.
- [26] Wild S, Kinuthia J M, Jones G I, Higgins D D. Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag (GGBS)[J]. *Engineering geology*, 1999, 51(4): 257-277.
- [27] Li L, Benson C H, Edil T B, Hatipoglu B. Sustainable construction case history: Fly ash stabilization of recycled asphalt pavement material[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, 26(2): 177-187.
- [28] Dermatas D, Meng X. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils[J]. *Engineering Geology*, 2003, 70(3): 377-394.
- [29] Chen L, Lin D F. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(1): 321-327.
- [30] Kazemian S, Prasad A, Huat B B K, Bazaz J B, Mohammed T A, Aziz F A. Effect of aggressive pH media on peat treated by cement and sodium silicate grout[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18(3): 840-847.
- [31] Kazemian S, Prasad A, Huat B B K, Bazaz J B, Abdul Aziz F N, Mohammad Ali T A.. Influence of cement-sodium silicate grout admixed with calcium chloride and kaolinite on sapric peat[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011, 17(3): 309-318.
- [32] Mehra S R, Chadda L R, Kapur R N. Role of detrimental salts in soil stabilization with and without cement. 1. The effect of sodium sulphate[J]. *Indian Concrete Journal*, 1900, 33(7).
- [33] Rajasekaran G. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(8): 1133-1159.
- [34] Paria S, Yuet P K. Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: a literature review[J]. *Environmental Reviews*, 2006, 14(4): 217-255.
- [35] Puppala A J, Pokala S P, Intharasombat N, Williammee R. Effects of organic matter on physical, strength, and volume change properties of compost amended expansive clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(11): 1449-1461.
- [36] Degirmenci N, Okucu A, Turabi A. Application of phosphogypsum in soil stabilization[J]. *Building and environment*, 2007, 42(9): 3393-3398.
- [37] Degirmenci N. The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(6): 1220-1224.
- [38] Wang G, Wang Y H, Gao Z L. Use of steel slag as a granular material: volume expansion prediction and usability criteria[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184(1): 555-560.
- [39] Shen W, Zhou M, Zhao Q. Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(7): 1480-1485.
- [40] Miller G A, Azad S. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust[J]. *Construction and building materials*, 2000, 14(2): 89-97.



- [41] Peethamparan S, Olek J, Lovell J. Influence of chemical and physical characteristics of cement kiln dusts (CKDs) on their hydration behavior and potential suitability for soil stabilization[J]. *Cement and concrete research*, 2008, 38(6): 803-815.
- [42] Peethamparan S, Olek J, Diamond S. Mechanism of stabilization of Na-montmorillonite clay with cement kiln dust[J]. *Cement and Concrete research*, 2009, 39(7): 580-589.
- [43] Sreekrishnavilasam A, Rahardja S, Kmetz R, Santagata M. Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(2): 318-327.
- [44] Moon D H, Grubb D G, Reilly T L. Stabilization/solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust[J]. *Journal of hazardous materials*, 2009, 168(2): 944-951.
- [45] Moon D H, Wazne M, Yoon I H, Grubb D G. Assessment of cement kiln dust (CKD) for stabilization/solidification (S/S) of arsenic contaminated soils[J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 159(2): 512-518.
- [46] Lin D F, Lin K L, Hung M J, Luo H L. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil[J]. *Journal of hazardous materials*, 2007, 145(1): 58-64.
- [47] Chen L, Lin D F. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(1): 321-327.
- [48] Reynolds K, Kruger R, Rethman N. The manufacture and evaluation of an artificial soil (SLASH) prepared from fly ash and sewage sludge[C]. *International ash utilization symposium*, 1999: 378-385.
- [49] 郭婷婷, 张伯平, 田志高, 吕东海. 黄土二灰土工程特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(5): 719-721.
- [50] 杜学玲, 李向红, 杨俊彪. 三灰土路面底基层混合料配合比优化[J]. *路基工程*, 2009 (2): 38-39.
- [51] Koliass S, Kasselouri-Rigopoulou V, Karahalios A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(2): 301-313.
- [52] Sezer A, İnan G, Yılmaz H R, Ramyar K. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay[J]. *Building and environment*, 2006, 41(2): 150-155.
- [53] Cokca E. Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001.
- [54] Phani Kumar B R, Sharma R S. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(7): 764-767.
- [55] Kaniraj S R, Havanagi V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(5): 673-677.
- [56] Lo S R, Wardani S P R. Strength and dilatancy of a silt stabilized by a cement and fly ash mixture[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 77-89.
- [57] Sobhan K, Mashnad M. Tensile strength and toughness of soil-cement-fly-ash composite reinforced with recycled high-density polyethylene strips[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(2): 177-184.
- [58] Show K Y, Tay J H, Goh A T C. Reuse of incinerator fly ash in soft soil stabilization[J]. *Journal of materials in civil engineering*, 2003, 15(4): 335-343.
- [59] Prabakar J, Dendorkar N, Morchhale R K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils[J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(4): 263-267.



- [60] Edil T B, Acosta H A, Benson C H. Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(2): 283-294.
- [61] Horpibulsuk S, Phetchuay C, Chinkulkijniwat A, Cholaphatsorn A. Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash[J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(4): 477-486.
- [62] Consoli N C, Prietto P D M, Ulbrich L A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(12): 1211-1214.
- [63] Tang C S, Shi B, Gao W, Chen F J, Cai Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25(3): 194-202.
- [64] Kaniraj S R, Havanagi V G. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(7): 574-584.
- [65] Das A, Jayashree C, Viswanadham B V S. Effect of randomly distributed geofibers on the piping behaviour of embankments constructed with fly ash as a fill material[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(5): 341-349.
- [66] Park S S. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(2): 162-166.
- [67] 刘和超. 一种土壤固化剂[P]. 中国专利: 103695005A, 2014-04-02.
- [68] 周振民. 土壤固化剂及土壤固化方法[P]. 中国专利: 103013526A, 2013-04-03.
- [69] 钱春香, 刘松玉. 土壤固化剂[P]. 中国专利: 1730836, 2006-02-08.
- [70] 李迎春, 钱春香, 刘松玉, 朱志铎. 粉土固化稳定机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2): 268-271.
- [71] 樊恒辉, 高建恩, 娄宗科, 何武全, 吴普特, 孙胜利. 一种水泥基土壤固化剂及其制备与应用[P]. 中国专利: 101597496B, 2011-05-11.
- [72] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 娄宗科. 水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J]. *岩土力学*, 2010, 31(12): 3741-3745.
- [73] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 娄宗科. 基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 1996-2000.
- [74] 高建恩, 孙胜利. 一种绿色土壤固化剂[P]. 中国专利: 101481238B, 2010-12-08.
- [75] 戴文亭, 陈瑶, 陈星. BS-100 型土壤固化剂在季冻区的路用性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(8): 2257-2261.
- [76] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2007.
- [77] 李雪刚. 杭州海相软土的固化及其理论研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2013.
- [78] Paya J, Monzo J, Borrachero M V, Peris E, Gonzalez-Lopez E. Mechanical treatments of fly ashes. Part III: Studies on strength development of ground fly ashes (GFA)-Cement mortars[J]. *Cement and concrete research*, 1997, 27(9): 1365-1377.
- [79] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddeepong A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(4): 1521-1531.
- [80] Kaniraj S R, Gayathri V. Factors influencing the strength of cement fly ash base courses[J]. *Journal of transportation engineering*, 2003, 129(5): 538-548.
- [81] Consoli N C, Prietto P D M, Carraro J A H, Heineck K S. Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(9): 774-782.
- [82] Ma C, Chen L Z, Chen B. Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based



- stabilizer[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 71: 354-362.
- [83] Liao Y, Jiang C. The mechanical properties of coastal soil treated with cement[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Material Science Edition*, 2013, 28(6): 1155-1160.
- [84] Kaniraj S R, Gayathri V. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21(3): 123-149.
- [85] Tastan E O, Edil T B, Benson C H, Aydilek A H. Stabilization of organic soils with fly ash[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(9): 819-833.
- [86] Uddin K, Balasubramaniam A S, Bergado D T. Engineering behavior of cement-treated Bangkok soft clay[J]. *Geotechnical Engineering*, 1996, 28(1).
- [87] Schulze J. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(6): 909-915.
- [88] Jongpradist P, Jumlongrach N, Youwai S, Chucheeprakul S. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 22(1): 49-58.
- [89] Schulze J. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(6): 909-915.
- [90] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(4): 439-444.
- [91] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj T S. Clay-water/cement ratio identity for cement admixed soft clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(2): 187-192.
- [92] Horpibulsuk S, Katkan W, Sirilerdwattana W, Rachan R. Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: Laboratory and field study[J]. *Soils and Foundations*, 2006, 46(3): 351-366.
- [93] Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay[J]. *Soils and Foundations*, 2009, 49(1): 85-98.
- [94] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddeepong A, Chinkulkijniwat A. Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations[J]. *Soils and Foundations*, 2011, 51(2): 239-251.
- [95] Horpibulsuk S, Suddeepong A, Chinkulkijniwat A, Liu M D. Strength and compressibility of lightweight cemented clays[J]. *Applied Clay Science*, 2012, 69: 11-21.
- [96] Horpibulsuk S, Phojan W, Suddeepong A, Chinkulkijniwat A, Liu M D. Strength development in blended cement admixed saline clay[J]. *Applied Clay Science*, 2012, 55: 44-52.
- [97] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddeepong A, Liu M D, Du Y J. Compressibility of lightweight cemented clays[J]. *Engineering Geology*, 2013, 159: 59-66.
- [98] Lorenzo G A, Bergado D T. Fundamental parameters of cement-admixed clay-new approach[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(10): 1042-1050.
- [99] Lorenzo G A, Bergado D T. Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(2): 161-174.
- [100] Consoli N C, Cruz R C, Floss M F. Variables controlling strength of artificially cemented sand: Influence of curing time[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 23(5): 692-696.
- [101] Consoli N C, Rosa A D, Saldanha R B. Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime



- mixtures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 23(4): 432-440.
- [102] Consoli N C, de Moraes R R, Festugato L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 25(10): 1568-1573.
- [103] Veloso Marques S F, Consoli N C, Almeida e Sousa J. Testing Cement Improved Residual Soil Layers[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 26(3): 544-550.
- [104] Consoli N C, Bassani M A A, Festugato L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28(4): 344-351.
- [105] Consoli N C, Da Silva Lopes L, Foppa D. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils[J]. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 2009, 162(2): 111-118.
- [106] Consoli N C, Foppa D, Festugato L, Heineck K S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2): 197-205.
- [107] Consoli N C, da Silva Lopes Jr L, Heineck K S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils[J]. *Journal of materials in Civil Engineering*, 2009, 21(5): 210-216.
- [108] Liu S Y, Zhang D W, Liu Z B, Deng Y F. Assessment of unconfined compressive strength of cement stabilized marine clay[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2008, 26(1): 19-35.
- [109] Kamruzzaman A H, Chew S H, Lee F H. Structuration and destructuration behavior of cement-treated Singapore marine clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(4): 573-589.
- [110] Yin J H, Fang Z. Physical modelling of consolidation behaviour of a composite foundation consisting of a cement-mixed soil column and untreated soft marine clay[J]. *Geotechnique*, 2006, 56(1): 63.
- [111] Nontananandh S, Boonyong S, Yoobanpot T, Chantawarangul K. Strength development of soft marine clay stabilized with cement and fly ash[J]. *Faculty of Engineering*, 2004, 38(4): 539-552.
- [112] Onitsuka K, Modmoltin C, Kouno M, Negami T. The effect of humic acid on lime Stabilized Ariake Clay[C]. *The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers*, 2002.
- [113] Yunus N Z M, Wanatowski D, Stace L R. Effect of humic acid on physical and engineering properties of lime-treated organic clay[J]. *Engineering and Technology*, 2011, 59(201): 1.
- [114] Bobet A, Hwang J, Johnston C T, Santagata M. One-dimensional consolidation behavior of cement-treated organic soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(7): 1100-1115.
- [115] Oliveira P J V, Correia A A S, Garcia M R. Effect of organic matter content and curing conditions on the creep behavior of an artificially stabilized soil[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 24(7): 868-875.
- [116] 丁建文, 刘铁平, 曹玉鹏, 杨瑞敏, 王刚. 高含水率疏浚淤泥固化土的抗压试验与强度预测[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(zk2): 55-60.
- [117] 陈达, 庄宁, 廖迎娣, 黄辉. 水泥土力学特性随龄期发展规律试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2012 (1): 26-29.
- [118] 王志强, 柴寿喜, 仲晓梅, 郭英, 王晓燕, 魏丽. 多元逐步回归分析应用于固化土强度与微结构参数相关性评价[J]. *岩土力学*, 2007, 8(28): 1650-1654.
- [119] 王立峰, 翟惠云. 纳米硅水泥土抗压强度的正交试验和多元线性回归分析 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S1): 452-457.



- [120] 徐日庆, 畅帅, 俞元洪, 陆建阳. 基于响应面法的杭州海相软土固化强度模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014 (11): 1941-1946.
- [121] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 3446-3453.
- [122] 宋南京, 陈新中, 赵洪义. 土壤固化剂的研究进展和应用[J]. 中国建材科技, 2009 (1): 55-61.
- [123] Chang A C, Lund L J, Page A L, Warneke J E. Physical properties of fly ash-amended soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1977, 6(3): 267-270.
- [124] Edil T B, Sandstrom L K, Berthouex P M. Interaction of inorganic leachate with compacted pozzolanic fly ash[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(9): 1410-1430.
- [125] Ferreira C, Ribeiro A, Ottosen L. Possible applications for municipal solid waste fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 96(2): 201-216.
- [126] Singh T S, Pant K K. Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using portland cement, fly ash and polymeric materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 131(1): 29-36.
- [127] Kumar A, Walia B S, Bajaj A. Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007.
- [128] Nalbantoğlu Z. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 377-381.
- [129] Prashanth J P, Sivapullaiah P V, Sridharan A. Pozzolanic fly ash as a hydraulic barrier in land fills[J]. Engineering Geology, 2001, 60(1): 245-252.
- [130] Cheriaf M, Rocha J C, Pera J. Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(9): 1387-1391.
- [131] Indraratna B. Utilization of lime, slag and fly ash for improvement of a colluvial soil in New South Wales, Australia[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1996, 14(3): 169-191.
- [132] Malhotra V M, Mehta P K. High-performance, high-volume fly ash concrete[J]. Concrete International, 2002, 24(7): 30-34.
- [133] Siddique R. Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(3): 487-493.
- [134] Chaichana R, Choowaew S, Chaisongkram W, Chantaranonthai P, Hodkinson T R, Suwanchaikasem P, Xia Q H. Ecological importance and biological resource conservation of Boraphet marsh, Thailand[J]. Science Asia, 2013, 39(2): 105-110.
- [135] Arulrajah A, Kua T A, Phetchuay C, Horpibulsuk S, Mahghoolpilehrood F, Disfani M M. Spent Coffee Grounds-Fly Ash Geopolymer Used as an Embankment Structural Fill Material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015: 04015197.
- [136] Horpibulsuk S, Raksachon Y. Fly ash as a dispersing material in cement stabilization[J]. Proceedings of the Geoshanghai 2010 International Conference, 2010, 137.
- [137] Vichan S, Rachan R, Horpibulsuk S. Strength and microstructure development in Bangkok clay stabilized with calcium carbide residue and biomass ash[J]. Science Asia, 2013, 39: 186-193.
- [138] 简文彬, 吴铭炳. 水泥-水玻璃加固软土研究[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(2): 30-32.
- [139] 资建民, 聂桂平. 增强型湿塑性水泥土加固软土地基研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 858-862.



- [140] 王国才, 吴旻炯. 滩涂淤泥固化土力学特性试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(4): 468-472.
- [141] 邓晓轩, 黄新, 宁建国. 外掺剂对水泥固化土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1628-1633.
- [142] 蒲凡, 詹树林, 赖俊英. NaOH 对固化海涂淤泥强度和变形特性的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2011 (5): 9-12.
- [143] 杨爱武, 周金, 孔令伟. 天津滨海新区吹填软土固化试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2442-2448..
- [144] 畅帅, 徐日庆, 李雪刚, 廖斌, 王兴陈. 基于响应面法的淤泥质土固化配方优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1).
- [145] 燕仲戩, 童小东, 周妙妙. 掺萘系高效减水剂水泥土室内试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 50: 5.
- [146] 王淑波. 水泥土添加剂的室内试验研究[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2007.
- [147] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 62-68.
- [148] 黄新, 周国钧. 再谈水泥加固硬化机理-兼答谭罗荣先生[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 130-132.
- [149] Taylor H F W. Cement chemistry[M]. London: Thomas Telford, 1997.
- [150] 钱觉时. 建筑材料学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007.
- [151] Prusinski J, Bhattacharja S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999 (1652): 215-227.
- [152] Shackelford C D, Daniel D E. Diffusion in saturated soil. I: Background[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991.
- [153] Shackelford C D, Daniel D E. Diffusion in saturated soil. II: Results for compacted clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(3): 485-506.
- [154] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(4): 665-676.
- [155] Wild S, Kinuthia J M, Jones G I, Higgins D D. Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils[J]. Engineering Geology, 1998, 51(1): 37-53.
- [156] Puppala A J, Intharasombat N, Vempati R K. Experimental studies on ettringite-induced heaving in soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005.
- [157] Mohamed A M O. The role of clay minerals in marly soils on its stability[J]. Engineering geology, 2000, 57(3): 193-203.
- [158] 肖林, 王春义, 郭议生. 建筑材料水泥石[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [159] Stevenson F J, Goh K M. Infrared spectra of humic acids and related substances[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1971, 35(5): 471-483.
- [160] Pandey A K, Pandey S D, Misra V. Stability constants of metal-humic acid complexes and its role in environmental detoxification[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2000, 47(2): 195-200.
- [161] Chiou C T, Malcolm R L, Brinton T I, Kile D E. Water solubility enhancement of some organic pollutants and pesticides by dissolved humic and fulvic acids[J]. Environmental Science & Technology, 1986, 20(5): 502-508.
- [162] Senesi N. Binding mechanisms of pesticides to soil humic substances[J]. Science of the total



- Environment, 1992, 123: 63-76.
- [163] Chiou C T, Kile D E, Rutherford D W, Sheng G Y, Boyd S A. Sorption of selected organic compounds from water to a peat soil and its humic-acid and humin fractions: Potential sources of the sorption nonlinearity[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(7): 1254-1258.
- [164] Kipton H, Powell J, Town R M. Solubility and fractionation of humic acid; effect of pH and ionic medium[J]. Analytica Chimica Acta, 1992, 267(1): 47-54.
- [165] Schnitzer M, Neyroud J A. Further investigations on the chemistry of fungal "humic acids"[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975, 7(6): 365-371.
- [166] Traina S J, Novak J, Smeck N E. An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids[J]. Journal of environmental quality, 1990, 19(1): 151-153.
- [167] Busch W H, Keller G H. The physical properties of Peru-Chile continental margin sediments--The influence of coastal upwelling on sediment properties[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(3).
- [168] Jeong S W. Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows[J]. Geosciences Journal, 2010, 14(4): 359-369.
- [169] 李生林, 秦素娟, 韩爱民. 软土中的蛋白质总量及其工程意义[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 56-63.
- [170] 刘增永. 有机质土加固试验研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2005.
- [171] Kujala K, Mäkikyrö M, Lehto O. Effect of humus on the binding reaction in stabilized soils[J]. Grouting and Deep Mixing, Yonkura, Terashi and Shibazaki (eds). Balkema, Rotterdam, 1996: 415-420.
- [172] Miura N, Taesiri Y, Koga Y, Nishida K. Practical of improvement of Ariake clay by mixing admixtures[C]. Proceeding of the international symposium on shallow sea and low land/Saga. 1988: 159-168.
- [173] Gotoh M. Study on soil properties affecting the strength of cement treated soils[J]. Proc. of Grouting and Deep Mixing, 1996: 399-404.
- [174] Onitsuka K, Modmoltin C, Kouno M, Negami T. Effect of organic matter on lime and cement stabilized Ariake clays[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2003 (729): 1-13.
- [175] Huat B B K, Maail S, Mohamed T A. Effect of chemical admixtures on the engineering properties of tropical peat soils[J]. American Journal of Applied Sciences, 2005, 2(7): 1113-1120.
- [176] Chen D H, Si Z, Saribudak M. Roadway heaving caused by high organic matter[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, 23(2): 100-108.
- [177] Zhu W, Chiu C F, Zhang C L, Zeng K L. Effect of humic acid on the behaviour of solidified dredged material[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(9): 1093-1099.
- [178] Clare K E, Sherwood P T. Further studies on the effect of organic matter on the setting of soil-cement mixtures[J]. Journal of Applied Chemistry, 1956, 6(8): 317-324.
- [179] Koslanant S, Onitsuka K, Negami T. Influence of salt additive in lime stabilization on organic clay[J]. Geotechnical Engineering, 2006, 37(2): 95.
- [180] Saride S, Puppala A J, Chikyala S R. Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays[J]. Applied Clay Science, 2013, 85: 39-45.
- [181] Chen H, Wang Q. The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65(4): 445-448.



- [182] Sakr M A, Shahin M A, Metwally Y M. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(1): 105-113.
- [183] Li X, Xu R, Rong X. Assessment of strength development in cement-admixed artificial organic soil with GX07[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19: 2999-3005.
- [184] James R, Kamruzzaman A H M, Haque A, Wilkinson A. Behaviour of lime-slag-treated clay[J]. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 2008, 161(4): 207-216.
- [185] Åhnberg H, Johansson S E, Pihl H, Carlsson T. Stabilising effects of different binders in some Swedish soils[J]. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 2003, 7(1): 9-23.
- [186] Tremblay H, Duchesne J, Locat J, Carlsson T. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(3): 535-546.
- [187] 林琼. 水泥系搅拌桩复合地基试验研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 1989.
- [188] 焦志斌, 盛华兴, 马建国, 卫振煜. 深层搅拌法加固应天河套闸软基工程[J]. *水运工程*, 2004 (8): 70-72.
- [189] 焦志斌, 刘汉龙, 蔡正银. 淤泥质酸性土水泥土强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2008 (S1): 57-60.
- [190] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(8): 1327-1330.
- [191] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 范昭平. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(10): 1561-1565.
- [192] 刘叔灼, 巴凌真, 杨医博, 梁松. 有机质含量对水泥土强度影响的试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(7): 40-43.
- [193] 邵玉芳, 龚晓南, 徐日庆, 刘增永. 腐殖酸对水泥土强度的影响[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(4): 354-357.
- [194] 陈慧娥, 王清. 有机质对水泥加固软土效果的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(z2): 5816-5821.
- [195] 邵玉芳. 含腐殖酸软土的加固研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2006.
- [196] 吕岩, 佴磊, 徐燕, 刘飞, 张敏. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(4): 655.
- [197] 范昭平. 有机质对淤泥固化的影响机理及对策研究[D]. 南京: 河海大学硕士学位论文, 2004.
- [198] 邵俐, 刘松玉, 杜广印, 顾明芬. 水泥粉煤灰加固有机质土的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(3): 408-414.
- [199] Uddin K. Strength and deformation behaviour of cement treated Bangkok clay[Ph. D. Thesis][D]. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1994.
- [200] Zhang R J, Santoso A M, Tan T S, Phoon K K. Strength of high water-content marine clay stabilized by low amount of cement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013.
- [201] 黄新, 宁建国, 许晟, 兰明章. 固化土孔隙液 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度对强度的影响[J]. *工业建筑*, 2006, 36(7): 19-24.
- [202] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(1): 62-68.
- [203] 宁建国, 黄新, 许晟. 土样 pH 值对固化土抗压强度增长的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 98-102.
- [204] Thyagaraj T, Rao S M, Suresh P S, Salini U. Laboratory studies on stabilization of an expansive soil by



- lime precipitation technique[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(8): 1067-1075.
- [205] Brykov A S, Danilov V V, Korneev V I, Larichkov A V. Effect of hydrated sodium silicates on cement paste hardening[J]. *Russian journal of applied chemistry*, 2002, 75(10): 1577-1579.
- [206] 杨爱武, 杜东菊, 赵瑞斌, 柳艳华, 刘举. 水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1823-1827.
- [207] Papadakis V G, Tsimas S. Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(10): 1525-1532.
- [208] Papadakis V G, Antiohos S, Tsimas S. Supplementary cementing materials in concrete: Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(10): 1533-1538.
- [209] ASTM C. 595. American Society for Testing and materials[J]. *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*.
- [210] Consoli N C, Rotta G V, Prietto P D M. Yielding-compressibility-strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress[J]. *Geotechnique-London*, 2006, 56(1): 69-73.
- [211] Toé Casagrande M D, Coop M R, Consoli N C. Behavior of a fiber-reinforced bentonite at large shear displacements[J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2006, 132(11): 1505-1508.
- [212] Dalla Rosa F, Consoli N C, Baudet B A. An experimental investigation of the behaviour of artificially cemented soil cured under stress[J]. *Géotechnique*, 2008, 58(8): 675-679.
- [213] Huang H S, Yan T N, Lan K. Laboratory experiment of the anticorrosion of cement stabilized soft soil in deep mixing pile[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(7): 85-88.
- [214] Malhotra V M. Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM class F) fly ash[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1990, 12(4): 271-277.
- [215] Naik T R, Singh S S, Hossain M M. Permeability of concrete containing large amounts of fly ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(5): 913-922.
- [216] Feldman R F, Carette G G, Malhotra V M. Studies on mechanics of development of physical and mechanical properties of high-volume fly ash-cement pastes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1990, 12(4): 245-251.
- [217] 黄士元, 李志华, 程吉平. 粉煤灰- $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-H}_2\text{O}$ 系统中的反应动力学[J]. *硅酸盐学报*, 1986, 14(1): 191-197.
- [218] 黄士元, 许丽萍. 粉煤灰水泥浆体的组成, 结构与力学性能[J]. *上海建材学院学报*, 1989, 2(3): 201-209.
- [219] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [220] 王文军. 纳米矿粉水泥土固化机理及损伤特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2004.
- [221] 吴志春. 有机质对水泥土力学性能影响的试验研究[D]. 南京: 东南大学硕士学位论文, 2010.
- [222] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 34-38.



致谢

求学二十余载，遇到了很多真诚帮助过我的老师、同学、师兄弟及朋友，在这里，向他们致以我最诚挚的谢意！

博士的四年光阴占据了人最黄金十年的近一半，得三生之幸，遇恩师陈龙珠教授。陈老师为人师表，坚持以学为乐、学以致用治学理念，感染并教育着我们每一位学生。陈老师和蔼可亲、平易近人，他的言行常给我们以如沐春风、家庭的般的温暖。在陈老师的悉心指导下，我逐渐养成了科研的思维和能力，同时学会了科学论文、科研报告等的写作。从博士课题的立意到如今成文，历经理论调研、试验方案设计、试验结果评估、论文撰写、修改到最终定稿，每一步都倾注了陈老师无数心血。如若我博士期间有所成长，大半都要归功于陈老师的培养。

蒙一世之荣，得第二导师陈兵研究员指导课题研究。陈老师具有很高的学术水平和敏锐的学术洞察力，与陈老师接触后，发现他更是一个专注于学问、科研的学者：坚持心中的学术理想，坚守自己的教学岗位，每一次实验都亲力亲为，每一组数据都反复核对。陈老师高效、认真、执着、勤奋的做事方式，乐观、积极、豁达、真诚的生活态度一直是我学习的榜样。

感谢寇新建教授、沈水龙教授、杨峻教授、杜守继研究员在论文开题阶段给予的宝贵建议。感谢叶冠林教授、张璐璐教授在论文预答辩时提出的宝贵建议，使论文质量有了进一步提高。感谢课题组邢爱国研究员、马宏旺副教授及宋春雨老师对论文研究工作给予的帮助和支持。感谢同济大学蒋正武教授、冯世进教授、北京工业大学李悦教授、中南大学龙广成教授对论文的试验研究部分提出的宝贵意见。

感谢已毕业的许海勇师兄、张敬一师兄，感谢同样是大博士的秦朝辉师兄，时常与我交流博士学习、科研的经验与心得。感谢赖华辉博士对我生活和科研的帮助。感谢已毕业的同门师弟童俊辉、范诗建、张冬冬在试验过程中给予的协助和建议。

感谢同门孙春晖、胡华洁、孙磊、徐姗姗、陈秋雨、陈嘉康、丁肇伟、陆宣、石亚文、方圆等师弟师妹们给予的关心和帮助。感谢至亲至爱的家人，是他们的支持和帮助让我在前行的道路上充满了力量。“鸦有反哺之义，羊知跪乳之恩。”感恩父母含辛茹苦将我养育成人。感谢姥姥、姥爷对我一直以来的疼爱。感谢我的妻子高义女士，她的坚强、睿智是我学习的榜样。

马聪

2016年11月于交大土木环境楼



个人简历攻读博士学位期间的相关学术成果

个人简历

马聪，男，山东菏泽人，1989年2月生。

2006年6月毕业于山东省菏泽市第一中学；

2010年7月毕业于中国石油大学（华东）石油工程专业，获工学学士学位；

2013年7月毕业于中国石油大学（华东）油气井工程专业，获工学硕士学位；

2013年9月进入上海交通大学土木工程系，攻读土木工程专业博士学位。

所获荣誉

2015.07-2016.07，获上海交通大学船建学院优博培育基金资助；

2015.12，获2014-2015年度研究生国家奖学金；

2016.12，获2015-2016年度研究生国家奖学金；

2016.12，获评为2016上海交通大学大学生年度人物。

攻读博士学位期间的学术成果

1. SCI 期刊论文

- [1] **Ma C**, Chen L Z, Chen B. Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer[J]. Construction and Building Materials,2014, 71: 354-362. (WOS:000345475300039)
- [2] **Ma C**, Qin Z H, Zhuang Y C, Chen L Z, Chen B. Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay[J].Soils and Foundations, 2015, 55(5): 1222-1232. (WOS:000363433500025)
- [3] **Ma C**, Chen L Z, Chen B. Experimental study of effect of fly ash on self-compacting rammed earth construction stabilized with cement-based composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2016: 04016022. (WOS:000378865900006)
- [4] **Ma C**, Chen B, Chen L Z. Variables controlling strength development of self-compacting earth-based construction [J].Construction and Building Materials,2016, 123: 336-345. (WOS:000383813000038)
- [5] **Ma C**, Chen B, Chen L Z. Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based composites [J].



Construction and Building Materials,2016, 123: 414-423. (WOS:000383813000046)

- [6] **Ma C**, Chen L Z,Chen B. Experimental feasibility research on a high-efficiency cement-based clay stabilizer [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, Online in June, 2017. (SCI)

2. 中文期刊论文

- [1] **马聪**, 杜骁, 陈兵. 自密实生土基改性材料的强度发展规律研究[J]. 新型建筑材料, 2016, (1): 10-13.
- [2] **马聪**, 陈龙珠, 庄迎春, 陈兵. 高性能固化剂掺粉煤灰加固软黏土的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报增刊 (第十二届全国土力学及岩土工程学术大会特刊), 2015, 35(11): 17-21.

3. 会议论文

- [1] **马聪**, 陈兵. 纤维改性固化土的应用研究[C]. 第十五届全国纤维混凝土学术会议论文集, 2014.
- [2] **Ma C**, Chen L Z, Chen B. Experimental study on soft clay stabilized with cement-based stabilizer[C]. Proceeding to 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2(60): 2043-2046.

参与的主要科研项目

- [1] 国家自然科学基金面上项目: 旋喷搅拌水泥土加劲桩受力机理及其应用研究, 2014-2017, 编号 51379122。
- [2] 国家自然科学基金面上项目: 基于生土材料空调型泡沫混凝土设计原理与传热调湿机理研究, 2014-2017, 编号 51378309。
- [3] 中国铁路总公司科技研究开发计划项目: 高速铁路无砟轨道维修技术的深化研究—用于板式无砟轨道损伤快速修复磷酸镁水泥开发与施工关键技术研究, 2014-2016, 编号 2013G008-F。



13006340

上海交通大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 马聪

日期：2017年6月29日



13006340

上海交通大学 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ，在年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名: 马聪

指导教师签名: 陈纪东

日期: 2017年6月29日

日期: 2017年6月29日



13006340

上海交通大学博士学位论文答辩决议书



0130109008

姓名	马聪	学号	0130109008	所在学科	土木工程
指导教师	陈龙珠	答辩日期	2017-06-20	答辩地点	木兰楼A1006
论文题目	饱和软土高效固化剂及固化土强度特性研究				

投票表决结果: 5/5/5 (同意票数/实到委员数/应到委员数) 答辩结论: 通过 未通过

评语和决议:

马聪同学的博士学位论文在综述国内外软弱土加固技术现状的基础上,采用室内试验研究了改善高含水量和富含有机质的饱和软土化学加固效果的新方法。为提高饱和粘土与淤泥土的pH值、改善固化土早期强度和中期火山灰效应,由试验选定了一种水泥与外加剂复合的无机高效固化剂配比,考察了固化剂各组成材料和粉煤灰掺量以及腐殖酸含量对固化剂与粉煤灰作用机理和固化土强度预测数学模型进行了研究。论文主要研究成果具有创新性,达到了工学博士学位论文的水平,对改善饱和软土的化学加固效果,具有重要的实用参考价值。

论文结构层次清晰,论证严谨,写作规范,表明马聪同学具有扎实的基础理论和宽广的专业知识,具备了独立从事科学研究的能力。答辩过程中,表述清楚,回答问题正确。经论文答辩委员会五位委员无记名投票,全票同意通过论文答辩,并建议授予工学博士学位。

2017年6月20日

答辩委员会成员签名	职务	姓名	职称	单位	签名
	主席	张孟喜	教授	上海大学	张孟喜
	委员	梁发云	教授	同济大学	梁发云
	委员	沈水龙	教授	上海交通大学	沈水龙
	委员	张璐璐	教授	上海交通大学	张璐璐
	委员	邢爱国	研究员	上海交通大学	邢爱国
	秘书	宋春雨 (07320)	讲师	上海交通大学	宋春雨