

# 水泥土力学特性随龄期发展规律试验研究

陈 达<sup>1</sup>, 庄 宁<sup>1</sup>, 廖迎娣<sup>1</sup>, 黄 辉<sup>2</sup>

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 水泥土搅拌法是加固软土地基的常用方法, 水泥土强度随龄期的发展规律直接影响水泥土的加固设计、施工进度安排和控制. 基于我国东南沿海淤泥土特点, 通过室内配比试验和力学加载试验, 获得了5种以常用水泥为固化剂的水泥土试样90 d龄期内的应力应变曲线. 在此基础上研究了不同固化剂和龄期对水泥土力学特性的影响, 建立了水泥土抗压强度与龄期间的关系式, 能根据水泥土3 d强度较准确地预测水泥土的后期强度, 对于提高施工质量控制水平有重要意义.

**关键词:** 水泥土; 强度; 龄期; 淤泥

**中图分类号:** TU411.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2012)01-0026-04

水泥土搅拌法是以水泥作为固化剂, 在地基深处就地在地基土体与固化剂充分搅拌, 形成具有足够强度和稳定性的水泥土, 从而达到加固软土地基的目的. 水泥土的强度和力学特性直接关系到地基加固的效果, 且影响因素众多<sup>[1-15]</sup>, 包括水泥品种、强度等级、掺入比和龄期等, 其中, 龄期直接关系到地基加固设计和工程进度安排. 本文基于我国东南沿海淤泥土特点, 通过对不同水泥品种混拌的水泥土的室内配比试验和力学分析, 研究水泥土强度与龄期的关系, 为类似土质的水泥土搅拌法设计提供依据.

## 1 试验方案

试验用土取自厦门某沿海区域, 根据《软土地基深层搅拌加固法技术规程》(YBJ 225-91)规定, 土样取出后立即切成 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 的小块, 用厚聚氯乙烯塑料袋封装运送至实验室, 放置于阴凉干燥处的木箱内存放, 确保试验用土的各项主要物理、力学性质与现场土一致. 经检测土体呈弱碱性, 土体中孔隙水对水泥土具有弱腐蚀性, 土中水的质量分数(以下称含水率)为34.6%, 天然重度为 $14.4 \text{ kN/m}^3$ , 原状及重塑土的无侧限抗压强度分别为16.2和4.7 kPa, 灵敏度为3.45.

选用抗硫酸盐水泥(P. MSR 32.5)、膨胀水泥(AEC 32.5)、矿渣硅酸盐水泥(P. S 32.5)和普通硅酸盐水泥(P. O 42.5和P. O 52.5)作为固化剂, 试块尺寸为 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ , 水灰比0.8:1, 水泥掺入比为0.20. 掺入各种水泥分别制成水泥土试块5组, 每组3个, 各组龄期分别为3, 7, 14, 28和90 d.

试验土和水泥浆经充分搅拌后, 采用分层压实的方法填充到试模中, 将试块表面刮平后盖上塑料布放置于阴凉处. 试块制作2 d后拆模, 放入养护室(恒温 $20^\circ\text{C}$ , 湿度 $\geq 95\%$ )养护到规定龄期. 水泥土无侧限抗压强度试验采用电子万能试验机进行, 采用应变控制方式加载, 加载速度在应力上升段和下降段分别为0.3和0.5 mm/min.

**收稿日期:** 2011-05-20

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51009061); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(200801057, 200901062); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009B10114, 2010B02414, 2010B03214); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(海岸带资源开发与安全)

**作者简介:** 陈 达(1978-), 男, 福建福清人, 副教授, 博士, 主要从事港工结构方面研究.

通信作者: 廖迎娣(E-mail: liaoyd770410@163.com)

## 2 试验结果及分析

图 1 为各种水泥土不同龄期时的应力应变关系曲线.

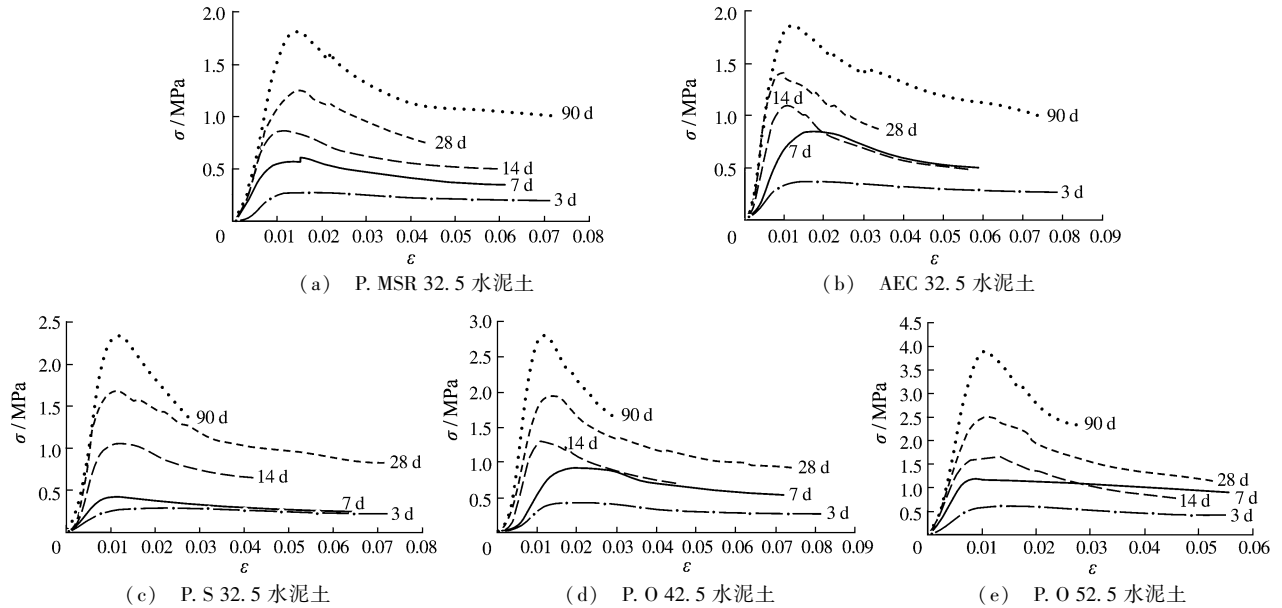


图 1 5 种水泥土不同龄期的应力应变关系曲线

Fig. 1 Strain-stress curves for the cement-soil samples at different ages

分析图 1 可以得出如下结论: (1) 尽管水泥土采用的固化剂水泥种类不同, 但龄期对水泥土强度发展的影响规律大致相同, 水泥土试样均表现出较强的塑性特征, 其中, P. MSR 32.5 水泥土塑性变形较其他几种固化剂更为明显. (2) 应力应变曲线大致可以分为 4 个阶段: ①试块压实阶段, 随着试块表面被加载, 应力应变曲线的斜率也逐渐增大; ②线性阶段, 应变增长较慢, 应力应变曲线基本呈线性关系; ③塑性变形阶段, 试块变形增长加快, 并逐渐达到强度极限; ④软化阶段, 变形发展较快, 试块承载能力逐渐降低至强度极限的 50% ~ 70%; ⑤残余强度阶段, 试块表面开始破碎开裂, 承载能力下降缓慢, 变形发展很快, 直至试块完全破坏. (3) 随着龄期的增加, 第 2 阶段(线性阶段)越来越明显, 且斜率也越来越大, 水泥土的刚度模量和抗压强度逐渐增大, 但是超过 28 d 后刚度模量已无明显变化, 而抗压强度在 28 ~ 90 d 之间仍有明显增长, 表明两者发展不同步, 所对应的物理、化学过程及机理并不完全一致; 第 3 阶段越来越不明显, 且斜率也越来越大, 水泥土试块的轴向应力在达到强度极限时的塑性变形明显变小, 水泥土脆性增大; 第 4 阶段变得越来越陡, 水泥土脆性增大, 残余强度相对于抗压强度的比值越来越小.

表 1 列出了 5 种水泥土各种龄期的无侧限抗压强度值. 综合 5 种水泥土强度随龄期的发展情况可知, 掺入比为 0.20 时, 龄期对水泥土抗压强度的影响关系大体为:  $q_{u,90} : q_{u,28} : q_{u,14} : q_{u,7} : q_{u,3} = 1 : 0.65 : 0.45 : 0.30 : 0.15$ , 其中  $q_{u,T}$  表示龄期为  $T$  的水泥土抗压强度.

表 1 水泥土无侧限抗压强度

Tab. 1 Unconfined compressive strength of the cement-soil

水泥种类	水泥土无侧限抗压强度 / MPa				
	3 d	7 d	14 d	28 d	90 d
P. MSR 32.5	0.26	0.62	0.93	1.20	1.91
AEC 32.5	0.33	0.79	1.12	1.42	2.08
P. S 32.5	0.27	0.42	1.07	1.68	2.37
P. O 42.5	0.48	0.83	1.19	1.75	2.80
P. O 52.5	0.59	1.18	1.65	2.49	3.89

若以 90 d 水泥土无侧限抗压强度为标准值,则水泥土 3 d 强度可达到标准值的 15% 左右,即日均强度增长约为标准值的 5%; 7 d 强度可达到标准值的 30% 左右,即 3~7 d 日均强度增长约为标准值的 4%; 14 d 强度可达到标准值的 45% 左右,即 7~14 d 日均强度增长约为标准值的 2%; 28 d 强度可达到标准值的 65% 左右,水泥土已经具备相当强度,14~28 d 日均强度增长约为标准值的 1.5%; 28~90 d,水泥土强度仍有较大幅度增长,但是日均强度增长约为标准值的 0.55%。

### 3 抗压强度与龄期的关系

基于水泥土的水化过程和强度发展机理,通过对大量试验数据的回归分析,提出了适用于我国东南沿海淤泥土层的水泥土无侧限抗压强度与龄期关系表达式:

$$\frac{q_{u1}}{q_{u2}} = \frac{1.3 \ln T_1 - 1}{1.3 \ln T_2 - 1} \quad (1)$$

式中: $q_{u1}$ 为龄期  $T_1$  的水泥土抗压强度, $q_{u2}$ 为龄期  $T_2$  的水泥土抗压强度. 上式成立的条件是掺入比相同、龄期  $T$  为 3~90 d.

P. MSR 32.5, AEC 32.5, P. S 32.5, P. O 42.5 和 P. O 52.5 水泥土的抗压强度试验数据与式(1)(以龄期 90 d 的试验数据作为  $q_{u2}$ ) 计算结果的比较见图 2. 可见,式(1)较准确地预测了 5 种水泥土的抗压强度,具有较强的通用性和适应性. 值得注意的是,式(1)适用的龄期范围为 3~90 d,对水泥土后期强度的预测可以从 3 d 开始,但是水化反应初期的水泥土强度离散性较大,因此在实际工程中建议使用 7 d 强度作为预测参数.

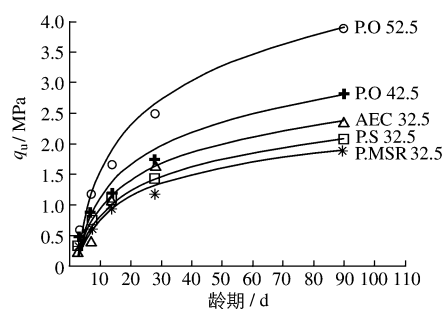


图 2 水泥土强度试验数据与计算值比较  
Fig. 2 Comparison between the simulation and test data for cement-soil samples

### 4 结 语

(1) 对于我国东南沿海淤泥质土层,尽管采用的固化剂水泥种类不同,但龄期对水泥土强度发展的影响规律大致相同.

(2) 28 d 龄期前,水泥土强度快速增长,28 d 强度可达到标准值的 65% 左右,水泥土已具备相当强度;龄期 28~90 d,水泥土强度仍有较大增长,但是增长速度明显变缓,工程应用中将 90 d 强度作为水泥土强度标准值符合水泥土强度发展规律.

(3) 提出的水泥土抗压强度-龄期关系式较准确地预测了 5 种水泥土的抗压强度,具有较强的通用性和适应性,在工程实践中可以 3 d 强度为依据预测水泥土后期强度,能够大大提高施工质量控制水平.

### 参 考 文 献:

- [1] 李治平. 水泥搅拌土(软土)的室内强度试验研究[J]. 岩土工程界, 2004, 7(2): 74-76. (LI Zhi-ping. Laboratory strength test of soil-cement(soft soil)[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, 7(2): 74-76. (in Chinese))
- [2] 张家柱, 程钊, 余金煌. 水泥土性能的试验研究[J]. 岩土工程技术, 1999(3): 38-40. (ZHANG Jia-zhu, CHEN Zhao, YU Jin-huang. Experimental study on properties of cement soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999(3): 38-40. (in Chinese))
- [3] 校务权. 深层搅拌法加固软弱土层的室内实验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004(3): 490-494. (JIAO Wu-quan. Laboratory test for treatment of the poor soil using deep mixing method[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2004(3): 490-494. (in Chinese))
- [4] 李建, 张松洪, 刘宝举. 水泥土力学性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2001(8): 31-33. (LI Jian, ZHANG Song-hong, LIU

- Bao-ju. Experimental study on mechanical behavior of cemented soil [J]. *Railway Engineering*, 2001 (8): 31-33. (in Chinese))
- [5] 黄严. 水泥加固土性能及其影响因素研究[J]. *福建建筑*, 2007(1): 32-34. (HUANG Yan. On the performance of cement-soil and its affecting factors[J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2007(1): 32-34. (in Chinese))
- [6] 周丽萍, 申向东. 水泥土力学性能的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2009, 28(2): 359-365. (ZHOU Li-ping, SHEN Xiang-dong. Study on mechanical behaviors of soil cement[J]. *Bulletin of the Chinese Ceram Society*, 2009, 28(2): 359-365. (in Chinese))
- [7] 饶彩琴, 黄汉盛. 深圳软土水泥土抗压强度的影响因素研究[J]. *华中科技大学学报: 城市科学版*, 2009, 26(2): 99-102. (RAO Cai-qin, HUANG Han-sheng. Factors affecting the compression strength of Shenzhen cement-stabilized soft soil[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Urban Science Edition)*, 2009, 26(2): 99-102. (in Chinese))
- [8] 严红霞, 孙磊, 钱玉林. 水泥土拉、压强度影响因素综述[J]. *岩土工程界*, 2008, 12(2): 20-23. (YAN Hong-xia, SUN Lei, QIAN Yu-lin. Influence factors of strength soil cement's tension and compression geotechnical engineering world[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2008, 12(2): 20-23. (in Chinese))
- [9] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. *Foundation treatment manual*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [10] 欧阳克连, 宁宝宽. 水泥土强度影响因素的研究[J]. *中外公路*, 2009, 29(4): 189-191. (OUYANG Ke-lian, NING Bao-kuan. The influence factors of cement-mixed clays strength[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2009, 29(4): 189-191. (in Chinese))
- [11] 徐至钧, 曹名葆. 泥土搅拌法处理地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. (XU Zhi-jun, CAO Ming-bao. *The cement soil mixing method in foundation treatment*[M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 周承刚, 高俊良. 水泥土强度的影响因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2001, 29(1): 45-48. (ZHOU Cheng-gang, GAO Jun-liang. Control factors of grouting soil[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(1): 45-48. (in Chinese))
- [13] 储诚富, 刘松玉, 邓永锋, 等. 含盐量对水泥土强度影响的室内试验研究[J]. *工程地质学报*, 2007, 15(1): 139-143. (CHU Cheng-fu, LIU Song-yu, DENG Yong-feng, et al. The threshold of salt contents on strength of cement-mixed clays: a finding of laboratory tests[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(1): 139-143. (in Chinese))
- [14] 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*, 2005, 5(26): 57-60. (JIAO Zhi-bing, LIU Han-long, CAI Zheng-ying. Experimental study on cement-soil strength in mucky-acid soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 5(26): 57-60. (in Chinese))
- [15] 邵光辉, 羊文明. 含盐与酸碱条件下水泥土的强度特性[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(6): 73-76. (SHAO Guang-hui, YANG Wen-ming. Strength characteristic of cement soil in saliferous and acidic-alkalescent environment [J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences)*, 2007, 31(6): 73-76. (in Chinese))

## Experimental study on mechanical properties of cement-soil with age

CHEN Da<sup>1</sup>, ZHUANG Ning<sup>1</sup>, LIAO Ying-di<sup>1</sup>, HUANG Hui<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Coastal Disaster and Defense, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** Cement-soil mixing method is commonly used in strengthening soft soil foundation. The increase of cement-soil strength with age has a direct influence on the cement-soil reinforcement design, construction schedule arrangement and control, etc. Based on the characteristics of the silt soil of China's southeast coast, the mechanical properties of cement-soil are studied using five common cements and their strain-stress curves at the age of 90 days are obtained through the lab mixing proportion tests and loading tests. The tests results show that the mechanical properties of cement-soil change with age and kinds of cement. The compressive strength-age formula of the cement-soil is achieved, which can be used to predict cement-soil strength according to 3 days' strength accurately. It is helpful to improve the construction quality control.

**Key words:** cement-soil; strength; age; silt soil