

氯盐对水泥固化土应力应变特性影响分析*

范礼彬 章定文 邓永锋 刘松玉

(东南大学交通学院 南京 210096)

摘要 以人工制备的方法配制了不同氯盐含量的土样,并掺入不同含量的普通硅酸盐水泥对其进行固化处理。采用无侧限抗压强度试验对氯盐含量对水泥固化土的应力应变特性影响规律进行分析。试验结果表明:随着氯盐含量的增加,水泥固化土的无侧限抗压强度和变形模量降低,破坏应变随之增大,应力-应变关系曲线由脆性破坏向塑性破坏转化;增加水泥用量可以减缓氯盐对水泥固化土的不良影响;但水泥固化土变形模量与无侧限抗压强度的比值与氯盐含盐量大小无明显关系。

关键词 氯盐 水泥固化 应力应变特性 无侧限抗压强度 变形模量

中图分类号:TU443 **文献标识码**:A

EXPERIMENTAL STUDY OF STRESS-STRAIN CHARACTERISTICS OF CEMENT TREATED CHLORATE SALT RICH CLAYS

FAN Libin ZHANG Dingwen DENG Yongfeng LIU Songyu

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract This paper investigates the effect of chlorate salt on the stress-strain characteristics of cement stabilized soils. The clay with various sodium chloride salt concentrations is prepared artificially and stabilized by ordinary portland cement with different contents. A series of unconfined compressive strength tests of cement stabilized clay specimens after various curing periods are carried out in laboratory. The test results show that the chloride salt has adverse effects to the cement stabilized clay. The unconfined compression strength and deformation modulus of the cement treated clays decrease as the chloride salt content increases. The failure strain of cement treated clays increases as the chloride salt content increases. The stress-strain curves of cement stabilized clay change from brittle failure to ductile failure as the chloride salt content increases. However, the ratio of deformation modulus to the unconfined compressive strength of cement clay is independent to the chloride salt content.

Key words Chloride salt, Clay, Cement stabilization, Stress-Strain characteristics, Unconfined compression strength, Deformation modulus

* 收稿日期:2011-09-14;收到修改稿日期:2011-12-24.

基金项目:江苏省自然科学基金项目(SBK2011618)和江苏省公路局资助项目.

第一作者简介:范礼彬,主要从事地基处理方面的研究. Email: fanlibin880511@163.com

1 引言

为适应江苏省沿海大开发战略实施后日益增加的交通量需求,江苏省交通厅投资在沿海建设一条高等级公路。该公路临近黄海,根据沿线工程地质勘察资料表明,路线经过区域普遍分布高含水率的含氯盐软土和盐渍土。盐渍土是指土中易溶盐含量大于 0.3%,并具有溶陷性、盐胀性和腐蚀性的土^[1]。滨海盐渍土以细颗粒的黏土和粉质黏土为主,孔隙细小。受土的含水率变化的影响,当盐分结晶时,一部分盐颗粒填充于孔隙中,另一部分则充当土的骨架颗粒。土中的盐分以晶体、溶液或两者皆有的形式存在,使盐渍土成为一种带电的体系,当盐离子进入带电的多孔介质后,和土颗粒发生系列化学反应使得土的结构发生变化^[2],导致盐渍土的物理力学性质也发生相应的变化。

水泥固化是工程上处理高含水量软土的有效方法之一。常用的化学固化剂有石灰、电石灰、粉煤灰和水泥等。国内外仅少数学者对氯盐对水泥固化高含水量软土加固效果影响程度和机理进行了研究。储诚富等^[3]研究了含盐量对固化非有机质土无侧限抗压强度的影响规律,并分析了不同类型的盐对水泥土强度的影响差异。王沛等^[4]采用室内试验与现场测试的方法对固化滨海盐渍土路用性能进行了分析,指出石灰、粉煤灰和水泥等无机固化材料均适宜固化滨海盐渍土,掺入少量的高分子材料 SH 固土剂可提高固化土的强度和水稳性。Broms 等^[5]指出,当对含盐量较高的软土采用水泥加固时,由于水泥存在絮凝作用,使得水泥加固土的强度较无盐分时大大降低。Chew 等^[6]用扫描电镜等测试方法研究了水泥固化海相黏土的结构,并分析了固化土的物理力学性质指标和无侧限抗压强度等特性。柴寿喜等^[7]通过含盐量对石灰固化滨海盐渍土力学强度试验研究,指出随着含盐量增加固化土强度降低。戴蕾等^[8]对强硫酸盐盐渍土固化效果进行了研究。包龙生等^[9]对氯盐在水泥海排灰结合料中的固化机理进行了探讨。邢皓枫等^[10]对可溶盐离子对高含盐水泥固化土强度影响的机理进行了分析。马冬梅等^[11]通过扫描电子显微镜及 X-射线衍射试验等试验方法,进行了可溶盐对水泥土强度影响的微观分析。

本文将通过室内无侧限抗压强度试验就含盐量、水泥掺入量和龄期等对水泥固化含氯盐连云港

海相软土的应力-应变曲线、破坏应变和变形模量等的影响规律进行了研究。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

试验采用的不同含盐量的盐渍土是在室内人工制备而成。试验材料包括连云港滨海相盐渍土、普通硅酸盐水泥(标号 32.5 号)和化学分析纯氯化钠。试验土样取于连云港灌云县埭子口大桥桥头段,取样深度为地表下 2.5~3.5m。由该土样的基本物理参数(表 1)和土样孔隙水的化学成分(表 2)可知,该试验用土为高液限黏土,含盐量(即干土中盐分质量与干土质量比值)为 4.91%,且以氯盐为主要盐分。

表 1 土样物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil

含水率/(%)	孔隙比	液限/(%)	塑限/(%)	塑性指数
65.4	1.681	60.6	27.8	32.8
比重	黏粒含量/(%)	粉粒含量/(%)	砂粒含量/(%)	密度/ g·cm ⁻³
2.72	43.65	53.49	2.76	1.679

表 2 土样孔隙水化学成分

Table 2 Chemical composition of pore water in soil

离子种类	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
含量/mg·L ⁻¹	450	14000	570	2100	25530	3510

2.2 试验方法

根据土样含盐量测试结果,本次试验中设计含盐量分别为 2.5%、5.0%、7.5% 和 10.0%,文中分别用 S2.5、S5.0、S7.5、S10.0 表示。水泥掺入量(掺入水泥的质量与干土重量比值)分别取 10%、15%、20%,文中用 C10、C15、C20 表示。

土样制备过程如下:将现场取回土样风干后粉碎、过 2mm 筛。然后采用蒸馏水洗盐的方法移除原土中盐分。在洗盐过程中,将风干碾碎的土样放入塑料桶中,按 1:5 的土水质量比浸水搅拌均匀,待溶液静置澄清后用吸管将水排出,重复进行 5 次,使得土中盐分逐步移除。洗盐 5 次后土体孔隙水含盐量低于 0.1%。根据设计含盐量,向洗盐后土样中掺入不同质量的化学分析纯氯化钠,得到不同含盐量的盐渍土。

为了消除含水量对试验结果的影响,本次试验

中固化前土样含水量统一采用 $w = 70\%$ (接近 1.2 倍液限), 采用小型搅拌机将人工配置的土样和水泥充分搅拌 10min, 得到了搅拌均匀的水泥-水-土-盐混合物。

水泥土试样采用机械搅拌, 人工振捣制成, 试样模尺寸为内径 $\Phi 50\text{mm}$ 高度 100mm 的 PVC 聚乙烯管材。试样制成后放入温度为 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 相对湿度为 98% 以上的标准养护室中进行养护, 养护到 (7d、14d 和 28d) 龄期后进行无侧限抗压强度试验。将每组 3 个平行试样测试值的算术平均值作为该组试验的强度代表值。若存在试样的测值与平均值之差超过平均值 15% 时, 则应剔除, 取余下试样测值的平均值作为无侧限抗压强度值。若其中某一组试样不足 2 个, 则该组试样所测得的试验结果无效, 应重做直至满足要求^[12]。无侧限抗压强度试验轴向应变速率为 $1\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (ASTM D2166-06)。

3 试验结果与分析

3.1 应力-应变曲线

3.1.1 含盐量的影响

从水泥固化盐渍土 28d 龄期时无侧限抗压强度试验应力-应变曲线 (图 1) 中可以看出, 含盐量对水泥固化土的应力-应变曲线影响显著。其他条件相同时, 随着含盐量的增加, 水泥固化土对应的应力峰值减小, 即随着含盐量的增加, 水泥固化土的无侧限抗压强度降低; 同时, 其对应的破坏应变也有增大的趋势。

另外从图 1 中可以看出, 水泥固化土的应力-应变关系曲线呈现塑性破坏和脆性破坏两种形态。当水泥掺入量为 10% 时 (图 1a), 应力峰值点附近的曲线较为平缓状, 水泥土呈现塑性破坏特征。随着水泥掺入量的增加, 使得水泥与土颗粒之间的物理化学反应不断增强, 生成的水泥水化产物增加, 水化产物与土颗粒之间的连结不断增强, 故应力-应变曲线逐渐变陡, 且应力峰值点左右的曲线形态逐渐变为尖峰状 (图 1c)。

水泥固化土的应力-应变曲线与含盐量的大小密切相关, 其他条件相同时, 随着含盐量的增加, 水泥固化土对应的峰值将减小, 破坏应变增加 (图 1c)。

3.1.2 龄期的影响

图 2 是水泥掺入量为 20% 时, 不同龄期的水泥

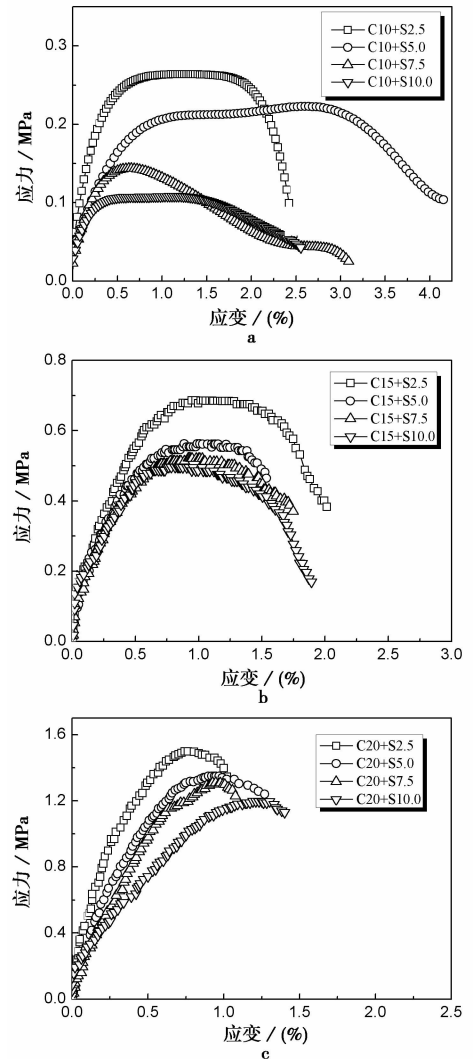


图 1 不同含盐量时水泥固化土应力-应变曲线 (28d 龄期)

Fig. 1 Stress-strain curves of cement treated salt rich soil (28 days curing period)

a. 10% 水泥掺入量; b. 15% 水泥掺入量; c. 20% 水泥掺入量

固化土应力-应变曲线。随着龄期的增长, 水泥固化盐渍土的应力-应变曲线也在变化, 破坏应变呈现逐渐减小的趋势, 破坏模式由塑性破坏转变为脆性破坏。这种变化趋势在含盐量较低时尤为显著。

3.2 无侧限抗压强度

图 3 为养护龄期为 28d 时含盐量对水泥固化土强度的影响。由图 3 可知, 对于相同水泥掺入量的固化土, 随着含盐量的增加, 无侧限抗压强度逐渐减小。例如, 当水泥掺入量为 20% 时, 含盐量由 2.5% 增加到 10%, 固化土的无侧限抗压强度降低了近 25%。含盐量对于不同水泥掺入量固化土的影响程度也不同, 水泥掺入量越高, 无侧限抗压强度降低的

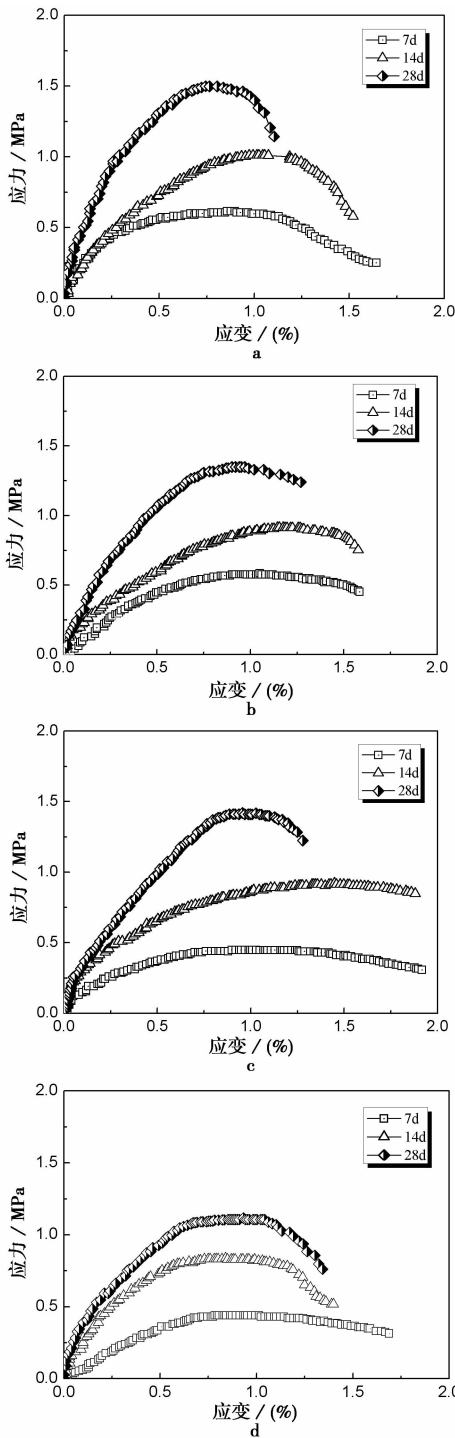


图2 不同龄期时水泥固化盐渍土的应力-应变曲线(C20)

Fig. 2 Stress-strain curves of cement treated salt rich soil after various days curing period(C20) (a)

a. C20+S2.5; b. C20+S5.0; c. C20+S7.5; d. C20+S10.0

相对程度越小。也就是说增加水泥含量可以减少氯盐对水泥固化效果的不良影响。

3.3 破坏应变

破坏应变是应力-应变曲线上与极限抗压强度

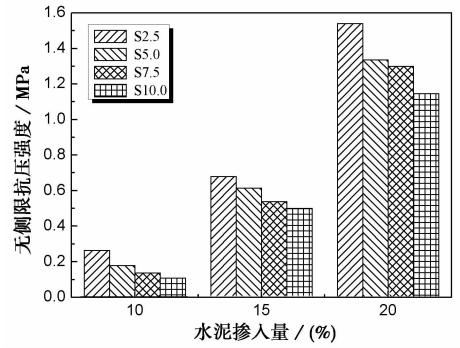


图3 含盐量对无侧限抗压强度的影响(28d 龄期)

Fig. 3 Effect of salt content on unconfined compression strength(28 days)

对应的应变值,它是评价土体变形特征的一个重要指标。当破坏应变大时,表明材料的韧性增大,而破坏应变小时,材料呈现出一定的脆性特征。

图4是水泥固化土的破坏应变随龄期的变化规律。在同种水泥掺入量下,不同含盐量固化土破坏应变与无侧限抗压强度的关系较离散。随着龄期的增加,破坏应变逐渐减小;随着水泥掺入量的增加,破坏应变也逐渐减小;不同含盐量、不同龄期和水泥掺入量的水泥固化土的破坏应变主要分布在0.5%~2.5%之间。总体而言,随着无侧限抗压强度的增加,破坏应变逐渐减小。

3.4 变形模量

由于水泥石混合材料变形为非线性变形,弹性模量不是一个常数,通常用 E_{50} 变形模量(当竖向应力值达到50%无侧限抗压强度时,水泥石应力与应变的比值)来表征材料的变形特征^[13]。

3.4.1 含盐量对变形模量的影响

由28d龄期时不同含盐量水泥固化土 E_{50} 的变化规律(图5)可知,含盐量对水泥固化土 E_{50} 的影响与对无侧限抗压强度的影响规律相似。对于同一水泥掺入量的固化土,随着含盐量的增加, E_{50} 逐渐减小。例如,对水泥掺入量20%的固化土,含盐量由2.5%增加到10%时, E_{50} 降低了近30%。含盐量对于不同水泥掺入量固化土的影响程度也不同,水泥掺入量越高,尽管 E_{50} 变化绝对值越大,但其降低相对幅度越小。

3.4.2 变形模量与无侧限抗压强度的关系

图6是28d龄期时水泥固化土 E_{50} 与无侧限抗压强度的关系。

由图6可知, E_{50} 与无侧限抗压强度存在较好的

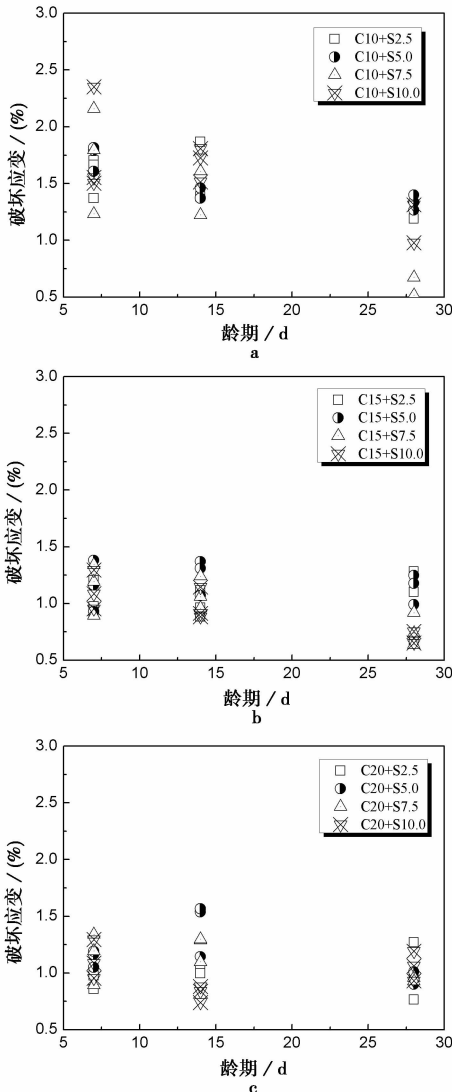


图4 破坏应变与龄期的关系

Fig. 4 Relationships between failure strain and curing period
a. 10%水泥掺入量; b. 15%水泥掺入量; c. 20%水泥掺入量

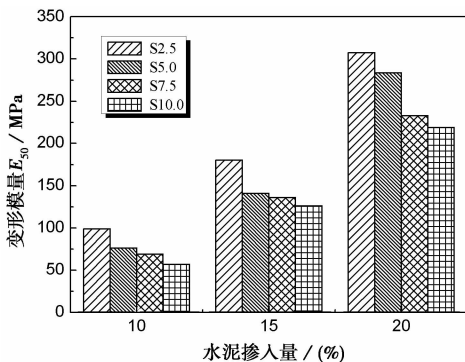


图5 含盐量对变形模量影响

Fig. 5 Effect of salt content on deformation modulus

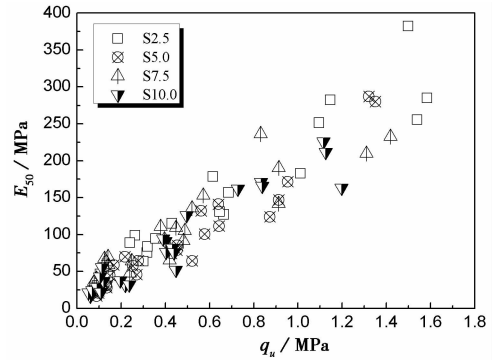


图6 水泥固化土变形模量与无侧限抗压强度的关系

Fig. 6 Relationships between E_{50} and q_u
of cement treated saline soil

拟合参数值 b 取值见表3; R^2 为相关系数。从表3可以看出,拟合参数 b 随含盐量的增加而减小。对于不同含盐量,水泥固化土变形模量与无侧限抗压强度比值范围在 190 ~ 215 之间,该值与文献 [14] 归纳的取值范围较为接近。

表3 式(1)拟合参数

Table 3 Fitting parameters of Eq. (1)

含盐量	b	R^2
S2.5	213.3	0.96
S5.0	192.0	0.97
S7.5	191.7	0.94
S10.0	187.8	0.96

4 结论

(1) 其他条件相同时,随着含盐量的增加,水泥固化土的无侧限抗压强度降低,破坏应变增加;增加水泥用量可以减弱氯盐对水泥固化土的不良影响。

(2) 本次试验中水泥固化土的破坏应变分布在 0.5% ~ 2.5% 之间。随着无侧限抗压强度增加,破坏应变降低;含盐量与破坏应变的关系不如破坏应变与无侧限抗压强度的关系明显。

(3) 不同含盐量不同水泥掺入量水泥固化土 E_{50} 与无侧限抗压强度存在较好的线性关系,其比值范围主要在 190 ~ 215 之间,且该值随含盐量的增加而减小。

参 考 文 献

线性关系,可由式(1)进行拟合:

$$E_{50} = bq_u \quad (1)$$

[1] 中华人民共和国建设部. GB. 50021-2001, 岩土工程勘察规范

- (2009年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- Ministry of Construction of People's Republic of China. G B. 50021-2001, Code for Investigation of Geotechnical Engineering(2009) Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] 侍倩,李翠华.酸碱对黏土物理性质影响的试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2001,34(5):84~87.
- Shi Qian, Li Cuihua. Laboratory study on effects of acid and alkali upon physical properties of clay. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(5): 84~87.
- [3] 储诚富,刘松玉,邓永峰,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 Chengfu, Liu Songyu, Deng Yongfeng, et al. The threshold of salt contents on strength of cement mixed clays: A finding of laboratory tests. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(1): 139~143.
- [4] 王沛,柴寿喜.固化滨海盐渍土路用性能的室内试验与现场测试[J].工程地质学报,2011,19(3):440~446.
- Wang Pei, Chai Shouxi. Laboratory and in-situ tests on solidified saline soils for highway fillings. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(3): 440~446.
- [5] Broms BB. Stabilization of Soft clay with lime and Cement Columns in Southeast Asia, Applied Research Project RP10/83. Singapore: Nanyang Technical Institute, 1986.
- [6] Chew SH, Kamruzzaman AHM, Lee FH. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 130(7): 696~706.
- [7] 柴寿喜,杨宝珠,王晓燕,等.含盐量对石灰固化滨海盐渍土力学强度影响试验研究[J].岩土力学,2008,29(7):1760~1777.
- Chai Shouxi, Yang Baozhu, Wang Xiaoyan, et al. Experimental research on effect of salt content on strength of solidified saline soil in inshore with lime. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1760~1777.
- [8] 戴蕾,黄新.强硫酸盐盐渍土固化研究[J].铁道建筑,2010,(5):99~101.
- Dai Lei, Huang Xin. Research on solidified strong sulphate saline soil. Railway Engineering, 2010, (5): 99~101.
- [9] 包龙生,宋晓纯,于玲,等.氯盐在水泥海排灰结合料中的固化机理[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(1):36~40.
- Bao Longsheng, Song Xiaochun, Yu Ling, et al. Study on bonding mechanism of chloride in the cement sea-fly-ash binder. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2010, 26(1): 36~40.
- [10] 邢皓枫,徐超,叶观宝,等.可溶盐离子对高含盐水泥土强度影响的机理分析[J].中国公路学报,2008,21(6):26~30.
- Xing Haofeng, Xu Chao, Ye Guanbao, et al. Mechanism analysis of influence of soluble salt ions on strength of salt rich cement soil. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 26~30.
- [11] 马冬梅.可溶盐对水泥土强度影响的微观分析[J].公路交通科技,2008,25(4):16~21.
- Ma Dongmei. Microstructural analysis of influence of soluble ions on strength of cemented soil. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(4): 16~21.
- [12] 储诚富.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- Chu Chengfu. On the Soil-cement Mixing Method Adaption in Special Regional Soft Ground Improvement. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [13] 王军星.粉喷桩复合地基受力变形及沉降计算方法研究[D].西安:西安理工大学,2009.
- Wang Junxing. Study on the Loading Deformation and Settlement Calculation Method of Composite Foundation with Djm Piles. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [14] 刘松玉,钱国超,章定义.粉喷桩复合地基理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- Liu Songyu, Qian Guochao, Zhang Dingwen. The Principle and Application of Dry Jet Mixing Composite Foundation. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.