

DOI: 10.11779/CJGE2017S1033

# 真空预压联合搅拌桩在有轨电车软基加固中的应用

庄 妍<sup>1,3</sup>, 王晓东<sup>2</sup>, 程 军<sup>4</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;  
3. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098; 4. 南京河西新城新型有轨电车建设有限公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:** 有轨电车以其绿色环保的运营方式正在引领中国交通行业向可持续方向发展。针对南京河西地区软土地基的结构特点和工程特性, 提出了真空预压联合搅拌桩软基加固方法, 结合施工期表层沉降、分层沉降、水平位移和孔压及运营期累计沉降监测结果, 分析了该软基处理方法的加固效果。研究结果表明: 在抽真空过程中, 孔隙水压力随着深度的增加而逐渐减小; 水平位移和分层沉降变化率均逐渐减小; 表层总沉降量在抽真空 2 个月后趋于稳定, 表明软土层接近完成固结; 施工期的表层累计沉降量为 440 mm; 运营后半年累计沉降为 4.2 mm, 预测运营 10 a 后累计沉降约为 9.8 mm, 远低于设计警戒值。说明真空预压联合搅拌桩的方法可以有效加固有轨电车软土地基。

**关键词:** 真空预压联合搅拌桩; 现场监测; 软土地基; 有轨电车

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0166-05

作者简介: 庄 妍(1982- ), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事软土地基加固方面的研究。E-mail: Joanna\_zhuang@163.com。

## Application of vacuum preloading combining mixing pile method in treatment of tram foundation

ZHUANG Yan<sup>1,3</sup>, WANG Xiao-dong<sup>2</sup>, CHENG Jun<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Province's Geotechnical Research Center, Nanjing 210098, China; 4. Nanjing Hexi New Town New Type Tramcar Construction Co. Ltd., Nanjing 210019)

**Abstract:** Due to the green and environmental protection operation mode, the tram is leading the transportation industry into sustainable development in China. According to the structural characteristics and engineering properties of soft soil foundation in Nanjing, a vacuum preloading combining mixing pile foundation treatment method is proposed. Based on the monitoring results of surface settlement, layered settlement, horizontal displacement and pore pressure in construction period and cumulative settlement in operation period, the improvement effect of the proposed method as analyzed. It is shown that the pore water pressure gradually decreases with the increase of the depth. The horizontal displacement and layered settlement all decrease gradually during the process of vacuum. The total surface settlement remains unchanged after vacuum preloading of the soft soil foundation for 2 months, which means that the consolidation of soft soil is approximately completed. The total settlement at the surface of the subsoil is approximately 440 mm. The cumulative settlement after construction is 4.2 mm in half a year and approximately 9.8 mm in 10 years by the predicted method, which satisfies the requirements of the settlement control. It is concluded that the method of vacuum preloading combining mixing pile can significantly improve the tram soft soil foundation.

**Keyword:** vacuum preloading combining mixing pile; field measurement; soft soil ground; tram

## 0 引言

现代有轨电车以崭新的形象、舒适便捷的服务、美观的外表和绿色环保的运营迅速在发达国家推广开来。中国有轨电车大部分都修建在长江三角洲、珠江三角洲和沿海经济发达城市的软土地基上, 软土地基具有孔隙比和含水率大、压缩性高、透水性弱、抗剪强度低、灵敏度高且埋藏深厚等特点<sup>[1]</sup>。

真空预压是指在需要加固的软土地基上布置排水板、砂垫层和密封膜, 通过抽真空使膜内外形成压力差, 由于砂垫层和竖向排水板与地基土界面存在这一

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478166); “青蓝工程”资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016B20614, 2015B17814, 2015B25914); “111”计划项目(B13024); 国家自然科学基金重点项目(51420105013)  
收稿日期: 2016-11-28

压力差, 土中的孔隙水向排水板不断渗流, 使孔隙水压力不断降低, 有效应力不断提高, 从而使土体逐渐固结<sup>[2]</sup>。王炳龙<sup>[3]</sup>通过路基原位试验, 分析了塑料排水板处理软土、堆载预压对地基工后沉降的影响; Indraratna 等<sup>[4]</sup>介绍了一种竖向真空预压法和超载预压法结合使用的软土地基处理方法。该方法已经在国外许多工程中得到了应用, 取得了很好地工程和经济效果。但真空预压法存在施工期较长, 地基土固结速度慢等缺点<sup>[5]</sup>。

水泥搅拌桩以其施工方法简便、适应性强、投资少、工期短而被大量应用于软土地基加固。水泥搅拌桩复合地基处理技术使用水泥浆或水泥粉等固化剂, 按用途选取适当的配合比, 与土体均匀搅拌成桩, 使水泥与土起物理化学作用, 复合形成整体的、坚硬的、水稳性的生成物, 从而提高软土地基的承载力, 改善其变形性能。Liu<sup>[6]</sup>等运用在压实的颗粒填充层或土工加筋层下埋设水泥土深搅拌桩的方法来减少桩间土层的不均匀沉降。但水泥搅拌桩仍存在很多问题, 如单独使用时不能保证处理效果, 加固深度偏浅等<sup>[7]</sup>。

将真空预压和搅拌桩两种方法结合使用, 可以很好地弥补各自的不足。丁光文<sup>[8]</sup>对甬台温铁路某路段搅拌桩联合塑料排水板复合地基现场监测结果表明, 该地基处理方法可以加快地基沉降完成速度, 减小工后沉降。

本文主要介绍了南京河西有轨电车某特殊路段工程的工程概况、加固方案及真空预压联合搅拌桩的施工工艺, 并通过施工期和运营期现场监测结果分析了本方法的软基处理效果, 检验了运营后地基是否满足设计的沉降要求。

## 1 工程概况

本工程位于南京河西江东南路, 有轨电车全长 7.76 km, 共设置 13 个车站和 1 个地下车辆段, 列车采用 100% 低地板现代有轨电车。试验段选取 DK3+300 - DK7+900 范围内某特殊路段工程。根据土性指标, 试验区软土层可大致分为以下几层: ① 杂填土, 厚 0.5 m, 为多次填积形成; ② 素填土, 厚 0.5 m, 可塑, 局

部硬塑, 主要由黏性土组成, 极限承载力 80 kPa; ③ 粉质黏土, 厚 0.5 m, 土质不均匀, 稍有光泽, 极限承载力 90 kPa; ④ 淤泥质粉质黏土, 厚 18.5 m, 稍有光泽, 中等灵敏度, 极限承载力 65 kPa; ⑤ 淤泥质粉质黏土夹粉砂, 厚 2.5 m, 强度低, 韧性低, 极限承载力 85 kPa。各土层及物理力学参数如表 1 所示。

## 2 加固方案

特殊路段地基加固方案主要为真空预压联合搅拌桩处理。由于有轨电车对沉降的要求高于传统铁路<sup>[9-10]</sup>, 并且还需要避免有轨电车荷载对河桥的不利影响, 因而在河桥特殊路段地区采用真空预压联合搅拌桩地基处理方法。其中搅拌桩采用水泥搅拌桩, 桩径 0.5 m, 桩身无侧限抗压强度 1.2 MPa (龄期 90 d), 桩间距 1.2 m, 按梅花型布置, 桩顶设厚 0.6 m 砂垫层; 塑料排水板因其排水效果好、质量可靠、便于施工和成本低等优点已经在真空预压中得到广泛采用。本工程塑料排水板宽 0.1 m, 厚 4.5 mm, 间距设置为 1.5 m, 正方形布置, 具体布置方法如图 1, 2 所示。

## 3 施工工艺

真空预压联合搅拌桩方法的主要施工工艺分为搅拌桩下桩和抽真空预压两大部分, 其中塑料排水板与搅拌桩的布置方法和塑料膜的密封效果都将影响预压后地基的强度, 具体施工流程如下:

搅拌桩施工流程为: ① 平整场地, 清除桩位处障碍; ② 测量放线, 根据平面设计图定出各个桩位; ③ 搅拌机具就位, 调整钻机, 检验各部位安全; ④ 搅拌机预搅下沉, 同时后台拌制水泥浆; ⑤ 待搅拌头转速正常后, 使钻杆边下沉边搅拌, 下沉到指定位置后, 开启灰浆泵, 边喷浆搅拌边提升钻杆, 提升按预先设计速度进行以确保浆液与土体拌合均匀; ⑥ 钻头提升到桩顶以上 0.5 m 后, 重复搅拌下沉和喷浆搅拌提杆过程; ⑦ 清洗搅拌器具, 转移下一桩施工。

真空预压施工期为 2 个月, 真空膜压达到 80 kPa, 具体施工流程如图 3。

表 1 各土层参数表

Table 1 Parameters for soil properties

土层名称	含水率 w/%	相对密度 $G_s$	重度 $\gamma$ (kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比 $e_0$	饱和度 $S_r$	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_p$ /%	塑性指数 $I_p$
杂填土	19.3	2.73	18.9	0.85	97.0	33.8	19.1	14.7
素填土	25.1	2.72	19.1	0.82	95.0	33.4	18.1	15.4
粉质黏土	33.5	2.73	18.5	1.16	98.0	36.4	21.7	14.7
淤泥质粉质黏土	41.3	2.72	17.5	1.16	97.0	35.8	22.4	13.4
淤泥质粉质黏土夹粉砂	37.0	2.71	17.8	1.07	96.0	33.6	23.0	10.6

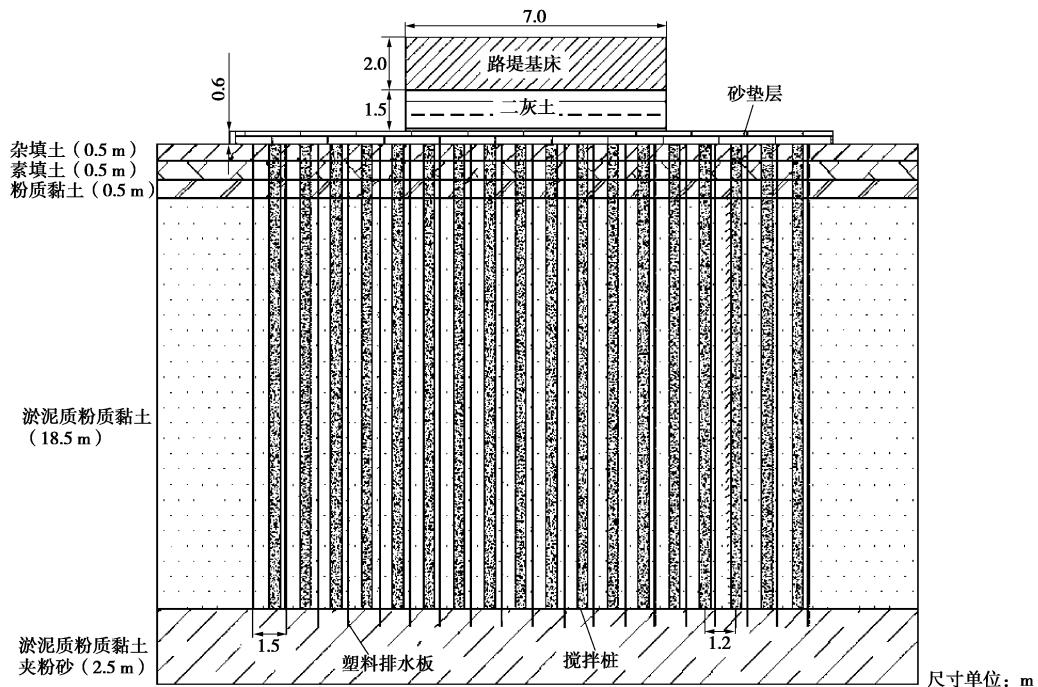


图 1 真空预压联合搅拌桩断面图

Fig. 1 Section of vacuum preloading combining mixing pile foundation

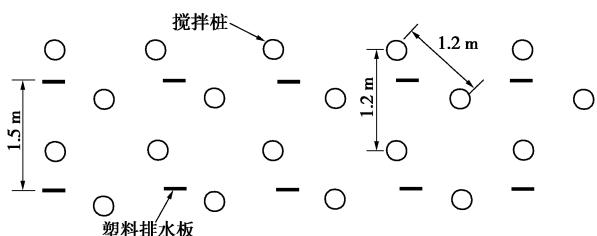


图 2 搅拌桩-塑料排水板平面布置图

Fig. 2 Layout of mixing pile and plastic drainage plate

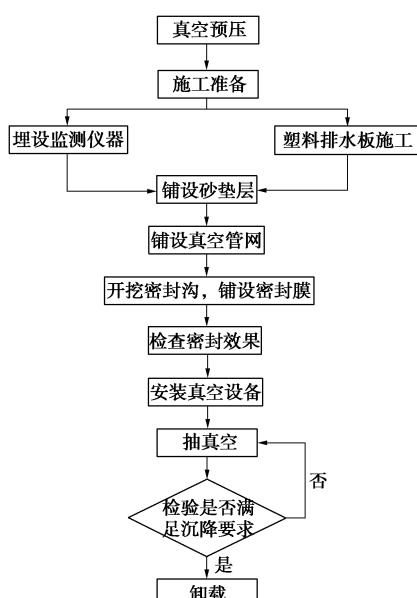


图 3 真空预压施工工艺

Fig. 3 Construction technology for method of vacuum preloading

#### 4 监测结果分析

本监测段位于江东南路 DK3+300 - DK7 +900 范围内, 监测分施工期和运营期两部分。施工期监测时间为 2013 年 8 月 7 日至 2013 年 10 月 13 日, 共 68 d, 主要进行表层沉降、分层沉降、水平位移和孔压监测, 运营期监测从 2015 年 6 月 14 日开始, 主要进行工后累计沉降监测, 每月监测一次。其中, 表层沉降通过在监测点 K3+850 左、中、右 3 个位置布设沉降板进行监测, 左右测点与中心测点等距, 均为 3.5 m; 分层沉降使用分层沉降仪进行监测, 在测试断面中心位置沿深度方向每隔 2 m 埋设分层沉降磁环, 共埋设 9 个, 每周监测一次; 水平位移由布置在道路两侧的测斜管监测得到, 孔压由孔压计进行监测, 孔压计分别埋设在 3, 6, 9, 12, 15 m 深度处; 工后累计沉降通过监测筏板-钢管结构中钢管的沉降量得到, 本工程结合现有规定和专家组评议意见, 确定工后最大沉降值不能超过 100 mm。

##### 4.1 施工期表层沉降分析

图 4 描述的是表层沉降随时间的变化关系。从图中可以看出真空预压前期表层沉降速率较大, 维持在 15 mm/d 左右, 沉降效果明显。中后期表层沉降速率明显减小, 大约 4 mm/d。抽真空 2 个月后, 表层总沉降量趋于稳定, 表明软土基本完成固结。3 个测点表层总沉降量分别为 370, 395, 440 mm。

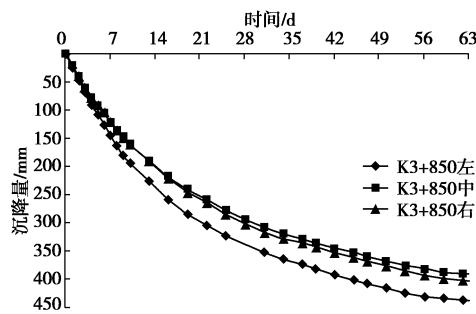


图 4 表层沉降 - 时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between time and surface settlement

#### 4.2 施工期分层沉降分析

分层沉降随深度的变化情况如图 5 所示。从图中可以看出, 预压前期沉降速度较快, 中后期沉降速度逐渐变缓, 土体固结趋于稳定; 由于塑料排水板和搅拌桩作用范围的影响, 表层以下 11 m 深度范围内沉降较大, 11 m 以下的土体沉降量较小; 最大沉降发生于地表, 约为 420 mm。

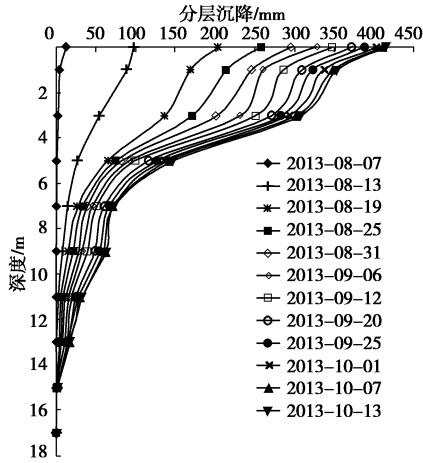


图 5 分层沉降 - 深度关系曲线

Fig. 5 Distribution of layered settlements of soft soil foundation at different depths

#### 4.3 施工期水平位移分析

图 6 为土体水平位移随深度变化曲线。由图看出, 地表下 18 m 范围内的土体均产生远离路中心侧的变形。预压前期水平位移发展速度较快, 两个月后基本保持稳定。水平位移主要发生在地表下 13 m 范围内, 13 m 到 18 m 水平位移较小且发展缓慢, 说明真空预压主要影响地表以下 13 m 深度范围内土体的水平位移。本工程最大水平位移发生在地表, 约为 38 mm。

#### 4.4 施工期孔压分析

孔隙水压力的消散可以反映土体在预压荷载作用下的固结情况。根据有效应力原理, 在总应力不变的情况下, 消散的孔隙水压力转化为有效应力, 从而提高了地基承载力。通过孔隙水压力计监测得到孔压随深度的变化曲线, 如图 7 所示。从图中可以发现, 随着

抽真空的进行, 孔隙水压力随着深度的增加而逐渐减小, 至抽真空结束时孔压减小了约 10~70 kPa; 孔压的消散主要发生在预压开始前半个月, 半个月之后孔压基本保持稳定, 地基土趋于完成固结。

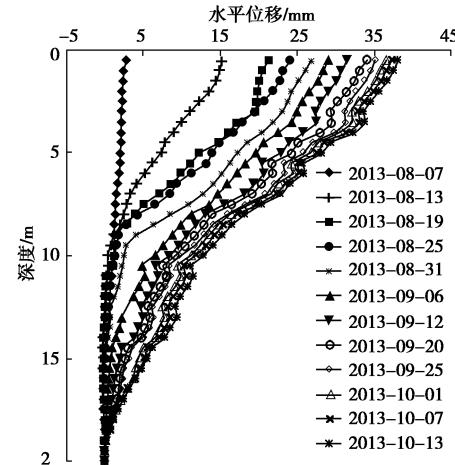


图 6 水平位移 - 深度关系曲线

Fig. 6 Distribution of horizontal displacements of soft soil foundation at different depths

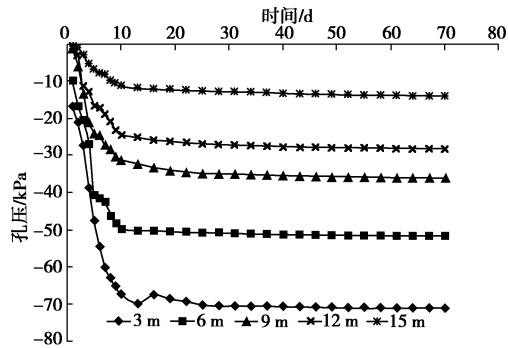


图 7 不同深度处孔压 - 深度关系曲线

Fig. 7 Distribution of pore pressures of soft soil foundation at different depths

#### 4.5 工后累计沉降分析

图 8 描述的是运营期累计沉降与时间之间的关系, 并根据工后沉降现场监测结果, 对工后沉降进行曲线拟合 (如图 8 所示), 预测曲线的表达式为  $u=11.0-15.4/[1+(t/3.5)^{0.7}]$  (其中  $u$  为工后沉降, 单位为 mm;  $t$  为运营时间, 单位为月)。预测曲线的结果与现场监测的结果误差为 4.1%~14.6%, 从图中可以看出, 运营半年后累计沉降为 4.2 mm, 运营 10 a 后的预测累计沉降约为 9.8 mm, 远低于设计对于特殊路段工后沉降的要求 (100 mm), 只达到设计警戒线的 9.8%, 且仅达到施工期表面沉降最大值的 2.2%, 说明真空预压联合搅拌桩的方法能够很好地对软土地基进行加固, 确保有轨电车顺利运行。

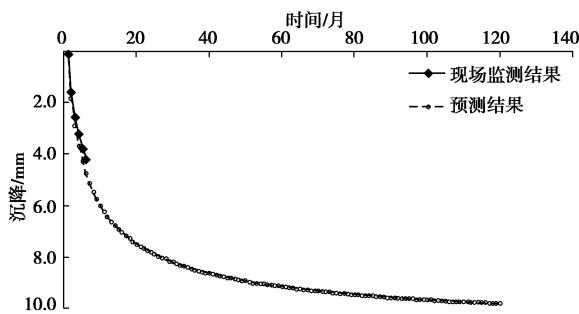


图8 工后累计沉降-时间关系曲线

Fig. 8 Relationship between time and accumulated settlement after construction

## 5 结 论

本工程通过对有轨电车某特殊路段工程的工程概况、加固方案和真空预压联合搅拌桩施工工艺的介绍, 以及通过对施工期表层沉降、分层沉降、水平位移、孔压和运营期累计沉降现场监测数据进行分析, 得到以下4点结论。

(1) 真空预压前期表层沉降速率较大, 维持在15 mm/d左右, 沉降效果明显。中后期表层沉降速率明显减小, 大约为4 mm/d。抽真空2个月后, 表层总沉降量趋于稳定, 表明软土基本完成固结。各测点总沉降量均满足设计要求, 加固效果明显。

(2) 自路基表面以下13 m, 水平位移较大且发展速度较快; 路基表面以下13~18 m水平位移较小且发展缓慢, 说明了真空预压对土体水平位移的影响主要集中在地表以下13 m范围内, 水平位移最大值发生在地表, 约为38 mm。

(3) 有轨电车运营半年后累计沉降4.2 mm, 预测运营10 a后累计沉降约为9.8 mm, 满足设计要求且远低于施工期表面最大沉降, 说明真空预压联合搅拌桩地基处理方法可以很好地控制工后沉降的发生。

(4) 目前国内尚无有轨电车软土地基沉降相关设计规范, 本工程工后沉降设计标准综合考虑了现有规定和专家组评议意见。因此, 本文的研究成果可以为我国有轨电车软土地基沉降问题的处理提供参考, 为未来有轨电车软土地基沉降相关规范的制定提供指导。

## 参考文献:

- [1] 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))
- [2] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 45~56. (GAO Zhi-yi. Analysis of the mechanism of vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 45~56. (in Chinese))

- [3] 王炳龙, 周顺华, 杨龙才. 高速铁路软土路基工后沉降试验研究[J]. 同济大学学报, 2003, 31(10). (WANG Bing-long, ZHOU Shun-hua, YANG Long-cai. Experimental study on soft soil settlement of high-speed railway subgrade after construction[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10). (in Chinese))
- [4] INDRARATNA B. Recent advances in the application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilization[J]. Australian Geomechanics Journal, 2010, 45(1): 1~44.
- [5] 孙田磊, 林涌潮, 杨福麟. 真空预压超软弱土下卧透水层新密封方法探讨[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(5): 74~77. (SUN Tian-lei, LIN Yong-chao, YANG Fu-lin. Discussion of new sealing method of deep water-permeable stratum under super soft ground in vacuum pre-loading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 74~77. (in Chinese))
- [6] LIU S Y, DU Y J, YI Y L, et al. Field investigations on performance of t-shaped deep mixed soil cement column-supported embankments over soft ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(6): 718~727.
- [7] 刘松玉, 易耀林, 朱志铎. 双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2273~2280. (LIU Song-yu, YI Yao-lin, ZHU Zhi-duo. Comparison test on field bidirectional mixing column for soft ground improving in expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2273~2280. (in Chinese))
- [8] 丁光文. 搅拌桩联合塑料排水板地基加固现场试验研究[J]. 铁道工程学报, 2011(9): 23~30. (DING Guang-wen. In-situ experimental study on behavior of foundation reinforcement of cement deep mixing pile with plastic drainage board[J]. Journal of Rail Engineering Society, 2011(9): 23~30. (in Chinese))
- [9] GB 50157—2013. 地铁设计规范[S]. 2013. (GB 50157—2013. Code for metro design[S]. 2013. (in Chinese))
- [10] 城市有轨电车工程设计规范(征求意见稿)[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部. (Code for design of city tram engineering[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Construction. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)