

软土地基真空预压加固对周围环境的变形影响分析

梁志荣, 李忠诚, 翁鑫荣

(现代设计集团上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘要: 基于上海迪斯尼工程场地形成过程中的真空预压试验, 对真空预压而引起的沉降变形、分层沉降、孔隙水压力等试验结果进行了系统分析。在此基础上, 对真空预压对引起的场地外侧沉降变形和侧向变形进行了分析。对分析结果表明: 在上海等软土地区, 进行真空预压对大面积地基进行处理, 可以取得良好效果, 试验结果满足工程要求。

关键词: 真空预压; 软土地基; 地基处理

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0744-05

作者简介: 梁志荣(1966-), 男, 浙江上虞人, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计及相关科研工作。E-mail: llq009@vip.sina.com。

Influence of vacuum preloading of soft soil foundation on deformation of surrounding environment

LIANG Zhi-rong, LI Zhong-cheng, WENG Xin-rong

(Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: The vacuum preloading tests on engineering site formation of Shanghai Disneyland park are systematically introduced. The test results of surface settlement, layered sedimentation and pore water pressure are summarized and analyzed. On such a basis, the influences on the surrounding environment of settlement deformation and lateral displacement in the vacuum preloading tests are obtained. The results show that in the soft-land area, the vacuum preloading can achieve good effect in large-area foundation treatment, and the engineering requirements are meted.

Key words: vacuum preloading; soft soil foundation; foundation treatment

0 引言

上海迪士尼是继日本东京和香港之后, 亚洲第3个迪士尼乐园。乐园预计需历时5 a建成, 项目投资达245亿元人民币。上海迪士尼场地形成工程位于浦东新区川沙黄楼镇, 总用地面积约7 km², 需要处理的地基面积2.2 km²。

上海迪斯尼场地形成项目主要由乐园游乐区、乐园后勤区、酒店区、零售餐饮娱乐、停车场等组成。场地属上海地区典型的软黏土, 土层情况见下表所示。拟建场地浅层普遍分布有第②层褐黄色黏性土, 上海地区俗称“硬壳层”, 该层土呈可塑—软塑状, 自上而下逐渐变软, 是一般荷载较轻建筑物良好的天然地基持力层, 其下第③层灰色淤泥质粉质黏土和第④层灰色淤泥质黏土, 具有流塑、高压缩性, 为天然地基基础的主要压缩层。场地土层剖面如图1所示。

1 真空预压试验及监测方案

1.1 真空预压试验

钻孔深度	50.0 m	孔口标高	3.19 m	稳定水位埋深	0.50 m	
土层 层号	土层 名称	层底 深度 /m	层底 标高 /m	厚度 /m	柱状图 1:100	土层描述
①	素填土	0.80	2.39	0.80		含植物根茎等 $w=32.5\%, e=0.929, E_s=3.86 \text{ MPa}$ $c=19 \text{ kPa}, \varphi=13^\circ, r=18.4 \text{ kN/m}^3$
②	褐黄—灰黄色 粉质黏土	1.60	1.59	0.80		$w=38.0\%, e=1.061, E_s=3.06 \text{ MPa}$ $c=12 \text{ kPa}, \varphi=13^\circ, r=17.9 \text{ kN/m}^3$
③ ₁	灰色淤泥质 粉质黏土	6.50	-3.31	4.90		$w=41.1\%, e=1.163, E_s=2.68 \text{ MPa}$ $c=12 \text{ kPa}, \varphi=10.5^\circ, r=17.5 \text{ kN/m}^3$
③ ₂	灰色淤泥质 黏土	10.50	-7.53	4.00		$w=24.0\%, e=0.702, E_s=7.38 \text{ MPa}$ $c=39 \text{ kPa}, \varphi=21^\circ, r=19.5 \text{ kN/m}^3$
④ ₁	暗绿—草黄色 粉质黏土	17.50	-14.31	7.00		$w=25.2\%, e=0.733, E_s=7.54 \text{ MPa}$ $c=37 \text{ kPa}, \varphi=19^\circ, r=19.3 \text{ kN/m}^3$
④ ₂	灰黄色粉质 黏土	31.0	-27.81	13.50		$w=33.7\%, e=0.960, E_s=4.96 \text{ MPa}$ $c=25 \text{ kPa}, \varphi=15.5^\circ, r=18.3 \text{ kN/m}^3$
⑤ ₃	灰色黏土	42.0	-38.81	11.00		$w=25.9\%, e=0.752, E_s=7.23 \text{ MPa}$ $c=46 \text{ kPa}, \varphi=19^\circ, r=19.2 \text{ kN/m}^3$
⑥	灰绿色 粉质黏土	47.10	-43.91	5.10		$w=24.0\%, e=0.718, E_s=7.44 \text{ MPa}$ $c=49 \text{ kPa}, \varphi=21^\circ, r=19.1 \text{ kN/m}^3$
⑨ ₁	灰绿—草黄色 残积土				未钻穿	

图1 土层剖面图

Fig. 1 Soil layers

对于乐园游乐区和乐园后勤区, 采用真空预压处理(见图 1)。真空预压针对不同的处理区域和处理要求, 采用不同的真空度^[1-3], 维持至沉降达到稳定。乐园游乐区排水板间距 1.0 m, 真空度 90 kPa。乐园后勤区排水板间距 1.5 m, 真空度 55 kPa。

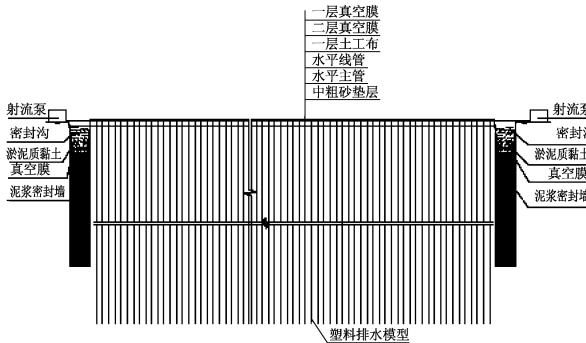


图 2 真空预压剖面图

Fig. 2 Profile of vacuum preloading

1.2 试验内容

上海迪斯尼场地形成项目地基处理的监测任务主要包括地表沉降、分层沉降以及孔隙水压力, 临近场地和管线的变形。图 3 为分层沉降及孔隙水压力埋设图。

(1) 地表沉降

地表沉降监测采用 30 cm×30 cm×5 cm 的混凝土板, 中间埋设一个沉降杆, 铺膜后将沉降板安放在密封膜上, 为了保证沉降板的稳定性, 沉降板采用沙袋压实固定。

(2) 分层沉降

分层沉降通过在不同深度位置埋设分层沉降管实现。分层沉降埋管管理设如图 3 所示。

(3) 孔隙水压力

孔隙水压力的监测采用埋设孔压计的方式实现^[4-5]。为了保证测试数据的有效性, 孔压计不能埋设过密, 每组孔压计分 3~4 孔布设, 每个孔内设置不超过 3 只孔压计。为保证测试元件的存活率, 孔压计在放入孔内后, 立即测试数据, 一旦发现孔压计损坏后立即取出并更换。孔压计采用成熟且能够适合长期工作的负压专用振弦式渗压计。

(4) 真空预压外围沉降及侧向变形监测

在加固区外围设置了沉降监测点和侧向位移观测点^[6]。沉降测点距离密封墙的距离分别为 1, 6, 16, 20, 34 m。每个测点分别测试 4 个不同深度的沉降, 不同深度分别代表为地表、管线顶、管线底、10 m 处。

侧向位移采用在垂直密封墙布设 2 排测斜孔, 监测点距离密封墙的距离分别为 34, 20, 16, 6, 1 m。采用钻孔法埋设, 埋设深度 20 m。具体埋设图如图 3

所示。

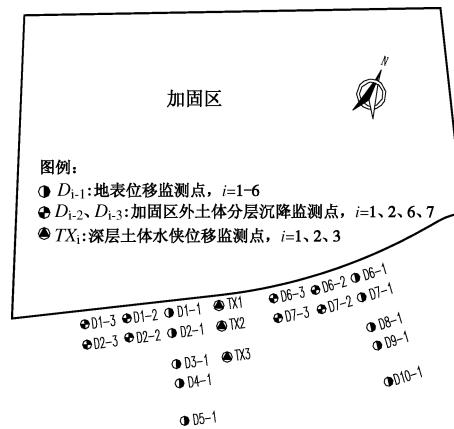


图 3 加固区外围监测点布置图

Fig. 3 Layout of monitoring points outside reinforced area

2 真空预压变形分析

2.1 深层沉降分析

真空预压施工自 2011 年 04 月 30 日正式开始, 截止 2011 年 06 月 21 日共计施工 51 d。至 5 月 30 日, 该场地最大沉降量为 565 mm, 最小沉降量为 366 mm, 平均沉降量为 474 mm, 沉降观测值达到该区块的目标沉降值, 满足设计要求。至 6 月 10 日实际停泵, 该场地最大沉降量为 589 mm, 最小沉降量为 386 mm, 平均沉降量为 500 mm。地表沉降历时曲线、地表沉降速率曲线见图 4, 5 所示。

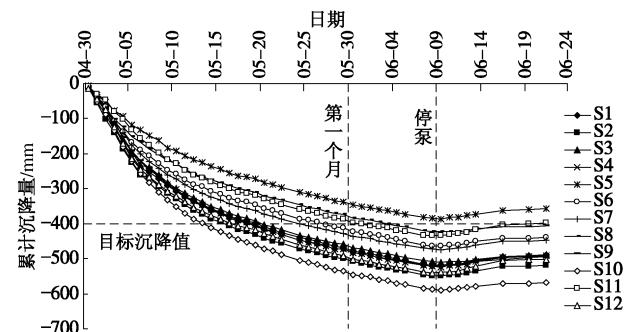


图 4 地表累计沉降历时曲线

Fig. 4 Settlement-time curves of surface settlement

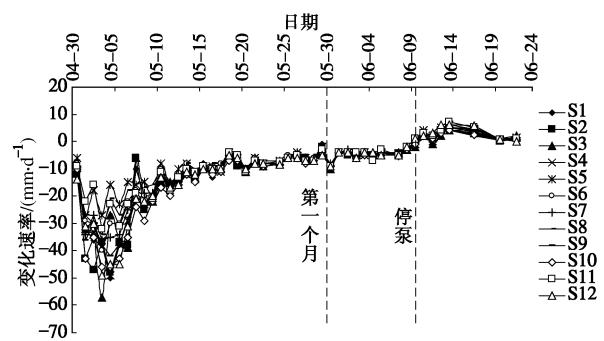


图 5 地表沉降速率历时曲线

Fig. 5 Settlement velocity curves of surface settlement

从沉降观测资料和沉降曲线可知,整个场地的固结沉降与真空加压关系密切,加压前期真空度增大沉降速率明显增大。真空调度稳定后,地表沉降变化速率逐渐放缓。本场地在真空预压施工到达一个月时就完成了90%的沉降量,真空预压的效果非常明显。

2.2 分层沉降分析

由图6、7可见,分层沉降最上面的磁环反映土体的变化规律与地表沉降基本相似,随着真空调度逐渐的上升,分层沉降逐渐发展。不同深度的分层沉降曲线形态基本相似,但斜率不同。从不同孔位的分层沉降曲线上可以发现浅层分层沉降较大,真空预压在10 m深度范围内影响较大,10 m以下则影响较小,24 m影响已经很小,这也反映了在真空预压施工中,由于排水板的深度、真空调度的传递效果和底部土层等多方面的因素,使得最底部的土体沉降很小。

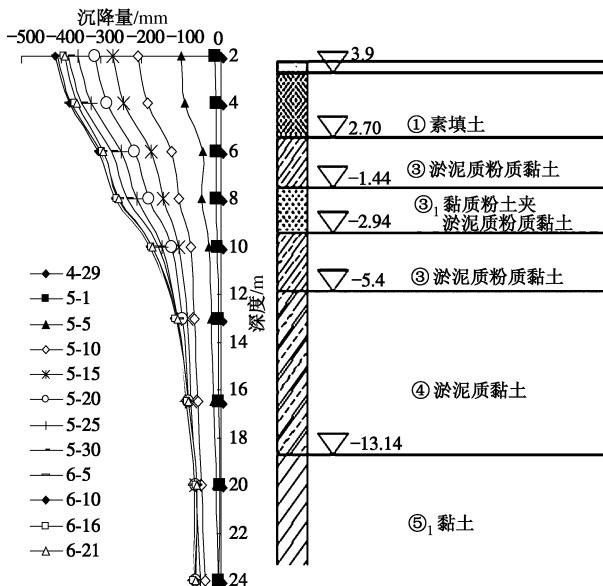


图6 分层沉降沿深度变化曲线

Fig. 6 Variation of layered settlements with depth

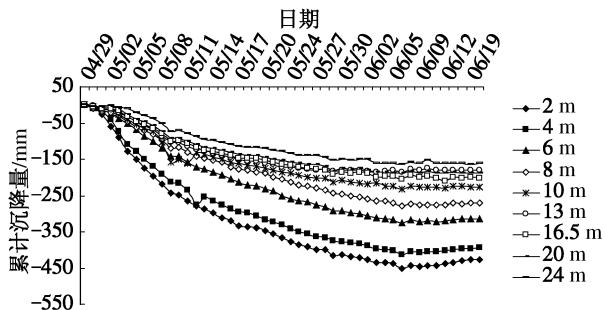


图7 分层沉降变化历时曲线

Fig. 7 Variation of layered settlements with depth

2.3 孔压消散分析

真空预压施工开始后,各孔负压增加明显,随着时间的推移,负孔压增加速度逐渐降低,一般在5 d后明显降低并趋向稳定,并且4 m以上土体负孔隙水

压力基本与真空压力接近,说明该范围内真空调度较好,真空调度效果明显。另外,由图可见孔压与真空调度的关系比较密切,随着深度的增加,负压绝对值逐渐减小,即真空调度随着深度增加逐渐降低。当深度超过12.5 m时孔压变化量明显降低,在20 m以下孔压基本无变化。说明加压影响随深度增加逐渐减少,这与分层沉降呈现的规律相一致。

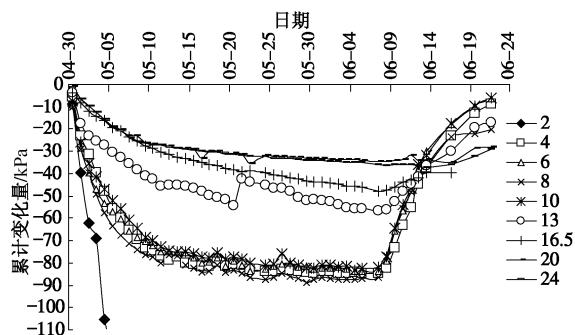


图8 孔压变化历时曲线

Fig. 8 Variation of pore pressures with time

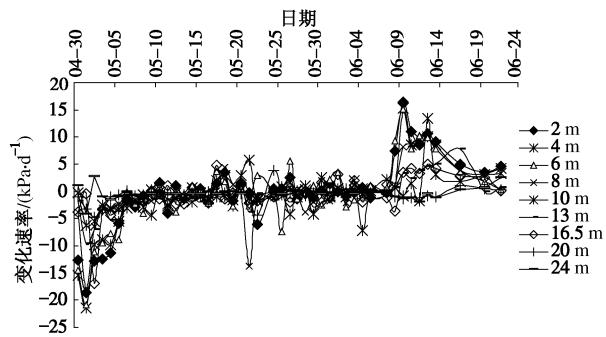


图9 孔压变化速率曲线

Fig. 9 Variation rates of pore pressure

3 真空预压对周围环境的影响分析

3.1 加固区外地表沉降分析

在试验加固区外共布设2个地表沉降断面,垂直密封墙布设2排监沉降断面,每个断面5个测点,测点距离密封墙的距离分别为1, 6, 16, 20, 34 m, 编号为D1-D10, 其中D1-D5编号为断面一, D6-D10编号为断面二。场地从4月28日开始测试初值,6月7日停止抽真空,停泵前共测试38次(测试结果见表1)。

表1 加固区外地表沉降汇总表

Table 1 Surface settlements outside reinforced area

距密封墙S/m	1	6	16	20	34
编号	D1-1	D2-1	D3-1	D4-1	D5-1
沉降/mm	-266	-13	-8	-3	2
距密封墙S/m	1	6	16	20	34
编号	D6-1	D7-1	D8-1	D9-1	D10-1
沉降/mm	-273	-48	-5	-3	-1

通过图10, 11可以发现,从剖面图来看,真空预压对周边土体的影响主要集中在16 m以内, 真空预

压对距密封墙 16 m 以外土体的影响均在 10 mm 以内; 随着抽真空时间增长, 距离加固区近的土体沉降不断增加, 但是加固区外的土体沉降逐渐趋于稳定。

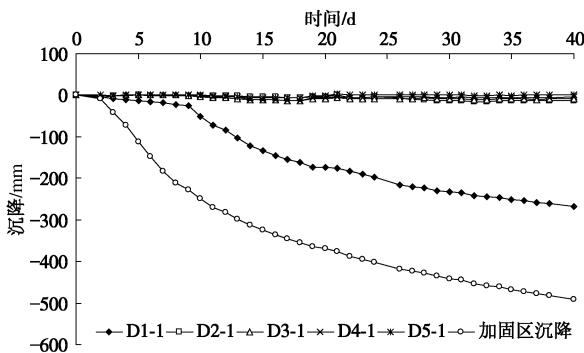


图 10 加固区外断面一地表沉降曲线

Fig. 10 Curves of surface settlement outside reinforced area for section 1

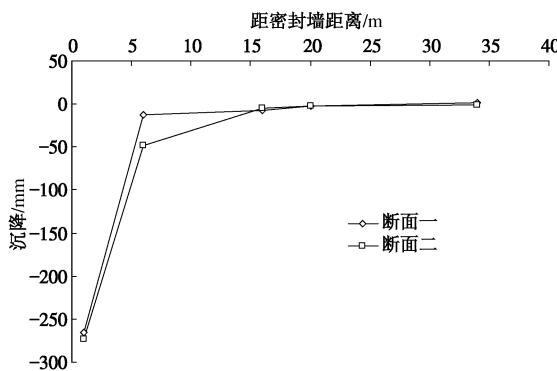


图 11 加固区外地表沉降剖面图

Fig. 11 Profile of surface settlement outside reinforced area

3.2 加固区外深层土体沉降分析

在试验加固区外共布设 2 个地表沉降断面, 其中距离密封墙分别为 1, 6 m。表 2 分别为不同位置处沉降汇总表。

表 2 邻近加固区外沉降汇总表

Table 2 Settlements outside reinforced area

距密封墙距离 S/m	1		6	
编号	D1-2	D1-3	D2-2	D2-3
沉降/mm	-42	-34	-10	-8
距密封墙距离 S/m	1		6	
编号	D6-2	D6-3	D7-2	D7-3
沉降/mm	-75	-66	-31	-19

从表 2 可以看出: ①距离密封墙 1 m 处沉降较大, 最大值达到 75 mm; ②场地中间对外围影响大, 场地边角影响小; 场地中间沉降最大值达到 75 mm, 但是场地边上沉降最大值仅 42 m; ③D6-2 沉降最大值为 75 mm, D7-2 沉降最大值为 31 mm, 可以看出距离加固越近沉降越大, 距离加固区越远沉降越小; ④度越

大沉降越小, 说明真空预压的影响随着深度衰减。

由图 12 可以发现: ①真空预压对邻近场地位置土体的影响较大, 最大值达到 75 mm; ②随着抽真空时间增长, 加固区内土体沉降不断增加, 加固区外 6 m 范围内的土体沉降随之增加。

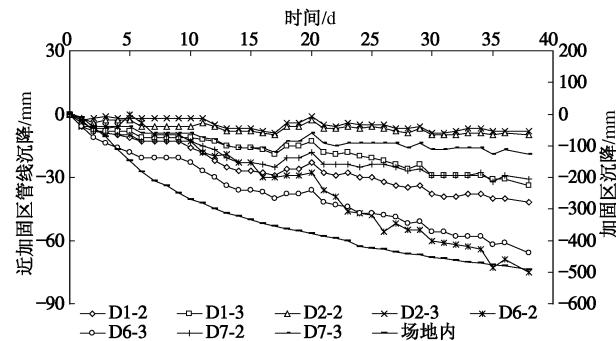


图 12 分层沉降沿深度变化曲线

Fig. 12 Variation of layered settlements with depth

3.3 加固区外土体深层水平位移分析

在试验加固区外共布设 2 个土体深层水平位移断面, 距离密封墙分别为 1, 6 m。场地 4 月 28 日开始测试初值, 6 月 7 日停止抽真空。

为了分析真空预压对周围土体深层水平位移的影响, 图 13 给出水平位移随深度变化的曲线。

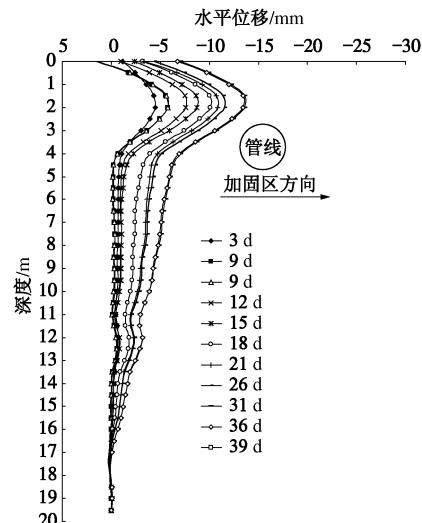


图 13 水平位移与深度关系曲线

Fig. 13 Relationship between horizontal displacement and depth

从图 13 可以看出, 真空预压对邻近加固区附近土体的影响较大, 水平位移最大值达到 15 mm; 随着抽真空时间增长, 加固区内土体水平位移不断增加, 加固区外的土体水平位移也随之增加。

真空预压对外侧土体水平位移的影响, 从深部到浅部是逐渐增加的。从图 13 中可以看出其主要影响区为 5 m 以上范围, 对此区域可能存在的地下管线影响

较大, 设计施工时应注意对管线的保护。随着抽真空时间增长, 加固区内土体沉降不断增加, 抽真空 15 d 后, 加固区内土体继续沉降, 但是主要管线处土体水平位移基本维持不变。

4 结语

综上所述, 本工程真空预压效果比较明显, 在较短的时间内达到了设计要求的目标沉降值, 其中沉降主要发生在第 1 个月。整个预压期间虽有 3 次停电的影响, 但由于停电时间较短, 真空压力的减小量值不大, 因此对总的沉降未有较大的影响, 仅使停电后第 2 天的沉降量有所减小, 并未发生土体反弹的现象。

真空预压对周边土体的影响主要集中在 16 m 以内, 真空预压对距密封墙 16 m 以外土体的影响均在 10 mm 以内。真空预压对 16 m 范围的以外的土体的水平位移方面的影响, 从深处到浅部是逐渐增加的, 且除了个别测斜孔浅部受外界干扰外基本呈线性增加。

通过真空预压试验可以看出在上海等软土地区, 采用真空预压对大面积地基进行处理, 可以取得良好效果, 试验结果满足工程要求。

参考文献:

- [1] 刘汉龙, 李豪, 彭劫, 等. 真空—堆载联合预压加固软基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 145 - 149. (LIU Han-long, LI Hao, PENG Jie, et al. Laboratory test on vacuum preloading combined with surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 145 - 149. (in Chinese))
- [2] 许海岩, 谢非, 王占东. 真空堆载预扭法软基处理与插板深度的关系[J]. 地下空间与土力学, 2011, 7(增刊 1): 1529 - 1532. (XU Haiyan, XIE Fei, WANG Zhan-dong. Relation between soft soil treatment by vacuum stack-load preloading method and depth of plastic drainage board[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S1): 1529 - 1532. (in Chinese))
- [3] 温晓贵, 朱建才, 龚晓南. 真空堆载联合预压加固软基机理的试验研究[J]. 土工基础, 2010, 24(3): 71 - 74. (WEN Xiao-gui, ZHU Jian-cai, GONG Xiao-nan. Experimental study on mechanism of reinforcing soft foundation of bridge head by vacuum combined with surcharge preloading[J]. Industrial Architecture, 2010, 24(3): 71 - 74. (in Chinese))
- [4] 谢非, 肖策, 王占东. 塑料排水板堆载预扭法在软基处理中的应用[J]. 地下空间与土力学, 2011, 7(增刊 1): 1542 - 1548. (XIE Fei, XIAO Ce, WANG Zhan-dong. Application of plastic dewatering board of preloading method in soft subgrade treatment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S1): 1542 - 1548. (in Chinese))
- [5] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Foundation treatment manual[M]. 3 rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 于海成, 席宁中, 李业龙. 真空联合堆载预压处理大面积软土地基变形规律及分析[J]. 建筑科学, 2009, 25(3): 145 - 149. (YU Hai-cheng, XI Ning-zhong, LI Ye-long. Analysis on deformation law of super soft foundation under vacuum combined surcharge preloading[J]. Building Science, 2009, 25(3): 145 - 149. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)