

# 塑料排水板联合超载预压处理超大面积深厚软基的数值分析

张甲峰<sup>1, 2, 3</sup>, 钱建固<sup>1</sup>, 张合青<sup>2</sup>, 韩黎明<sup>4</sup>, 曹杰<sup>4</sup>, 李军世<sup>3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中国民航机场建设集团公司, 北京 100101; 3. 上海民航新时代机场设计研究院有限公司, 上海 200335; 4. 中国民航机场建设集团公司机场工程科研基地, 北京 100101)

**摘要:** 以浦东国际机场软土地基为研究对象, 利用二维有限元软件 Plaxis, 根据土体特性相应采用软土蠕变模型或 Mohr-Coulomb 模型, 针对打设塑料排水板、分层填筑、堆载预压和卸载的实际工况, 模拟打设塑料排水板和超载预压的分步实施过程, 从数值分析的角度研究了塑料排水板和超载预压处理软土地基的特性, 并与实测结果对比分析。结果表明, 塑料排水板联合超载预压处理深厚软土地基的沉降分析中考虑软土蠕变是必要的。

**关键词:** 深厚软基; 蠕变; 超载预压; 塑料排水板; 数值模拟

中图分类号: TU472.33

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2013)S2 - 0892 - 05

**作者简介:** 张甲峰(1982 - ), 男, 河南濮阳人, 博士研究生, 工程师, 从事岩土工程方面的设计和科研工作。E-mail: jiafeng6060@163.com。

## Numerical analysis of oversized deep soft foundation improved by plastic drainage plates combined with surcharge preloading

ZHANG Jia-feng<sup>1, 2, 3</sup>, QIAN Jian-gu<sup>1</sup>, ZHANG He-qing<sup>2</sup>, HAN Li-ming<sup>4</sup>, CAO Jie<sup>4</sup>, LI Jun-shi<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Airport Construction Corporation of CAAC, Beijing 100101, China; 3. Shanghai CAAC New Era Airport Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 4.

The Engineering Research Base of China Airport Construction Corporation of CAAC, Beijing 100101, China)

**Abstract:** A series of two-dimensional numerical analyses are carried out to investigate the behaviors of soft soil foundation at Shanghai Pudong International Airport by means of the finite element software Plaxis. Both the soft soil model and the Mohr-Coulomb model are used to simulate the staged construction process involving installation of plastic drainage plates, layered filling and surcharge preloading and unloading. The numerical and field monitoring results are compared to investigate the behaviors of soft soil foundation improved by plastic drainage plates together with surcharge loading method. It is shown that it is necessary to take the creep of soft soils into consideration for predicting settlements of thick soft soil layers improved by using this method.

**Key words:** deep soft foundation; creep; surcharge preloading; plastic drainage plate; numerical simulation

## 0 引言

软土主要分布在我国沿海一带, 具有分布广, 埋深厚的特性, 上海地区软土分布尤为普遍。浦东国际机场位于上海市东南部, 濒临东海, 新建的第四跑道为新近围涂筑塘形成的滩地, 地基土为河口、滨海、浅海、沼泽、溺谷相沉积层, 土层主要为淤泥质粉质黏土、粉性土、淤泥质黏土、黏土等软弱土层, 具有高含水率、高液限、高压缩性、孔隙率大、灵敏度高、欠固结、力学强度低的特点。不仅如此, 地基处理面积和深度也很大, 机场跑道相关区域软土处理面积达  $200 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 软土埋深多为 10~35 m, 古河道区域可达 60 m, 层厚多为 20~25 m, 古河道区域可达 35 m。

该类地质条件在沿海区域较为普遍, 极具有代表性。在此类软土地基上修建机场工程, 将面临大变形问题, 特别是对于机场跑道工程而言, 不仅要求严格控制工后沉降, 而且对工后不均匀沉降要求极为严格。

需要强调的是在 2005 年对第四跑道区域进行了吹砂补土堆载预压, 至 2010 年已有 5 年时间, 监测资料显示沉降已趋于稳定。由于总图调整, 新建第四跑道有  $20 \times 10^4 \text{ m}^2$  区域位于堆载范围外, 该区域将产生

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51238009, 41272291); 民航局科技项目 (MHRD201055); 上海市科学技术委员会科研计划项目课题 (10231000900)

收稿日期: 2013 - 07 - 19

较大沉降和差异沉降,特别是堆载区与未堆载区交界处的差异沉降问题,未堆载区如何在短时间完成固结沉降值得探讨。

在软土地基处理方法中,应用比较普遍的是超载预压排水固结法。张电吉<sup>[1]</sup>经过试验研究认为,延长预压时间或增大超载值可以减小软土地基的次固结变形。朱向荣等<sup>[2]</sup>通过实测数据分析了堆载预压加固软土地基的效果,从应力-应变的角度研究了软土地基固结特性。竖向排水体加速深部土体的排水固结,适用于软土层厚度大于 10 m 的深厚淤泥、淤泥质土等饱和软黏土的地基处理,处理深度由排水体施工深度决定。然而,对于深厚软土地基的处理,如果单独采用上述两种方法之一时,一般难以取得令人满意的效果。为此,可结合两者优点,采用超载预压与插塑料排水板相结合来处理深厚软土地基。郭庆海等<sup>[3]</sup>通过现场试验研究,认为塑料排水板超载预压法处理软基具有较好的效果。由于本工程工期较短,且机场跑道工程对工后沉降及差异沉降要求较高,采用插塑料排水板和超载预压能否在短时间内完成软土地基的沉降固结,满足工后沉降及差异沉降的要求,值得探讨和研究。

以浦东国际机场第四跑道未堆载区为研究对象,利用大型有限元软件 Plaxis,依据实际工况模拟塑料排水板联合超载预压的分步实施过程,分析地基变形,研究了塑料排水板联合超载预压处理软土地基的特性,得到了一些有益的结论。

研究成果可为机场、高速公路、港口、码头等工程的深厚软土地基及填海工程地基设计与施工提供借鉴和指导。

## 1 工程概况

本工程位于第四跑道北端,采用打设塑料排水板

和超载预压进行地基处理,堆载设计顶面宽度为 297.5 m,预压填高 6.7 m,超载预压填高 3.4 m,填筑时间为 30 d,设计预压时间 270 d,填土历时曲线如图 1 所示。塑料排水板按等边三角形布置,排水板长 27 m,穿透第④淤泥质黏土层(约为 20 m),并深入第⑤层,间距 1.3 m,其中排水板截面尺寸为 100 mm×4.5 mm,通水量为 40 cm<sup>3</sup>/s。

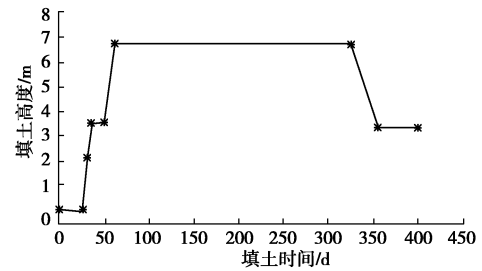


图 1 填土历时曲线图

Fig. 1 Variation of filling of embankment construction with time

## 2 有限元模型

堆载沿跑道轴向延伸,属于条形荷载,可以使用平面应变模型进行二维有限元计算。塑料排水板按等边三角形布置,在进行平面二维计算时,需按置换率进行等效处理。

### 2.1 材料模型

堆载填土为粉细砂,堆载填土和粉性土采用 Mohr-Coulomb 模型,为理想弹塑性本构模型;黏性土采用剑桥蠕变模型,该模型可考虑软土的蠕变和应力松弛效应,并且可以解释超固结效应,常用于地基和路基等的沉降计算问题,模型有三个基本刚度参数:修正的膨胀指标  $\lambda^*$ 、修正的压缩指标  $k^*$  和修正的蠕变指标  $\mu^*$ 。塑料排水板采用软件自带的排水线进行等效。地基土层资料及土工参数如表 1 所示,有限元分析计算参数见表 2,表 1,2 中的参数取自勘察报告。

表 1 各土层土特性参数

Table 1 Parameters of soils

土层	厚度 /m	重度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	渗透系数	
							$k_h/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$k_v/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
① <sub>02</sub> 淤泥质粉质黏土夹黏质粉土	1.3	17.8	—	—	14	22.5	$4.37\times 10^{-4}$	$3.35\times 10^{-4}$
② <sub>2</sub> 黏质粉土夹淤泥质粉质黏土	1.4	18.0	—	—	10	26.5	$1.40\times 10^{-2}$	$3.00\times 10^{-3}$
② <sub>3</sub> 砂质粉土	3.4	18.6	10.40	0.2	5	31.0	$1.76\times 10^{-1}$	$1.68\times 10^{-1}$
③ <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土	1.7	17.5	—	—	13	19.0	$2.48\times 10^{-3}$	$1.31\times 10^{-3}$
③ <sub>2</sub> 砂质粉土	2.7	18.4	10.00	0.2	4	31.5	$5.52\times 10^{-1}$	$3.13\times 10^{-1}$
④ 淤泥质黏土	10.3	16.5	—	—	14	11.0	$3.68\times 10^{-4}$	$1.40\times 10^{-4}$
⑤ <sub>1-1</sub> 黏土	9.9	17.7	—	—	17	150	$1.05\times 10^{-4}$	$8.26\times 10^{-5}$
⑤ <sub>4</sub> 粉质黏土	5.3	19.6	—	—	43	18.0	$8.18\times 10^{-4}$	$6.41\times 10^{-4}$
⑦ <sub>1</sub> 砂质粉土	1.6	18.6	12.54	0.2	2	32.0	$6.55\times 10^{-1}$	$3.69\times 10^{-1}$
⑦ <sub>2</sub> 砂质粉土	5.4	19.0	14.88	0.2	0.1	33.5	$8.09\times 10^{-1}$	$4.53\times 10^{-1}$

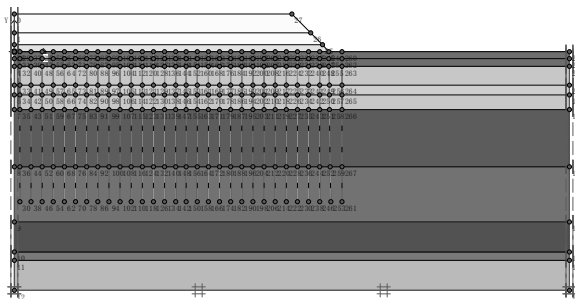
表 2 黏土模型参数

Table 2 Model parameters of clays

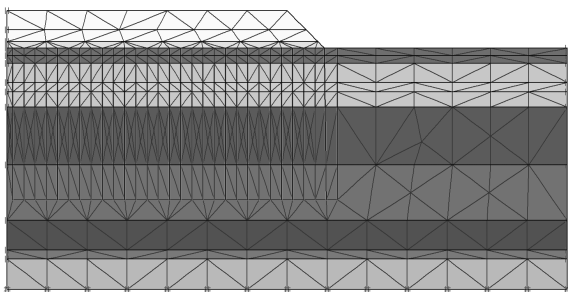
土体	$\lambda^*$	$k^*$	$\mu^*$
① <sub>02</sub> 淤泥质粉质黏土 夹黏质粉土	0.029	$3.89 \times 10^{-3}$	$1.46 \times 10^{-3}$
② <sub>2</sub> 黏质粉土夹淤泥质 粉质黏土	0.026	$3.49 \times 10^{-3}$	$1.31 \times 10^{-3}$
③ <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土	0.045	$5.94 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-3}$
④ 淤泥质黏土	0.062	$8.22 \times 10^{-3}$	$3.08 \times 10^{-3}$
⑤ <sub>1-1</sub> 黏土	0.054	$7.17 \times 10^{-3}$	$2.69 \times 10^{-3}$
⑤ <sub>4</sub> 粉质黏土	0.037	$4.92 \times 10^{-3}$	$1.85 \times 10^{-3}$

## 2.2 计算模型

根据堆载工程段的几何形状、对称性、地基土层分布及填筑情况,建立如图 2 所示的有限元模型。基于对称性和尺寸效应,本文几何模型仅考虑跑道堆载区右半部分,尺寸选取如下:堆载体宽度 50 m,地基土体宽度 100 m,深度 43 m,填土采用粉细砂,地基土层见表 1 所示。模型位移边界采用标准固定边界,即模型底部施加完全固定约束,两侧竖直的边界施加水平向约束,竖向自由。地基上部为砂垫层,下部为砂层,均为排水边界,塑料排水板采用排水线进行等效。



(a) 几何模型



(b) 网格划分图

图 2 几何模型及网格划分图

Fig. 2 Geometrical model and finite element mesh

## 3 计算结果分析

### 3.1 数值计算结果

选取原地基表面靠近堆载中心线的一点,理论上讲,该点为地基中沉降最大点,该点可作为地基沉降控制点。图 3 为原地基总沉降量计算值与实测值随时间变化的对比关系曲线,从图 3 可以看出,在打设塑料排水板期间(0~25 d),原地面产生沉降,但沉降值较小,在堆载施工后沉降迅速增加,这说明仅插塑料排水板虽可促进固结沉降,但其沉降速率依然较为缓慢,超载预压与塑料排水板联合使用具有较好的效果。

在堆载施工期间(0~60 d),施工期沉降量计算值与实测值基本相符,局部存在偏差,这是由于实际监测中未能及时记录填土堆载数据,导致模拟施工进度与实际施工进度不同所致。

在堆载放置期间,与实测值相比,计算值稍微偏大,这一现象在第 60~175 d 尤为明显。文献[4, 5]中也有提及该现象,原因在于:随着沉降的发生,地基土压密,渗透系数随着土层压密有所减小,而在有限元计算中采用排水线进行等效,未考虑这一变化。

总体来看,计算值与实测值基本吻合,证明了采用 Plaxis 有限元计算简化方法、排水板等效及参数选取是合理的,可用于进一步分析超载预压地基的相关性状。

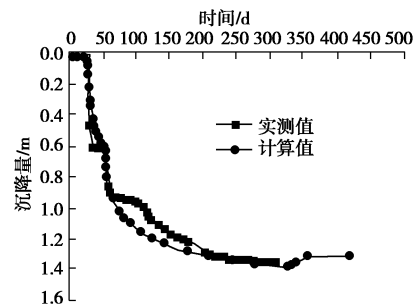


图 3 原地面总沉降曲线

Fig. 3 Total settlement curves of foundation

### 3.2 分层沉降变形规律

图 4 为堆载中心线处的实测分层沉降随时间和荷载的变化曲线,从图 4 可知,在堆载填筑期间,随着填土荷载的增大,各土层的沉降迅速增加。0~22 m 深度范围内土层沉降占总沉降的百分比较大,22 m 以下土层沉降较小,这意味着塑料排水板影响范围在 22 m 以内,超过该数值后增加塑料排水板长度对加速沉降效果不明显。

由于地基土层较多,为便于分析研究,本文根据工程处理原则,针对塑料排水板穿透区和未穿透区展开研究。图 5 为塑料排水板穿透区沉降和未穿透区沉降的实测值与数值模拟结果随时间的变化曲线,从图 5 可知,计算值与实测值变化规律相似,数值分析结

果与实测值较为接近。

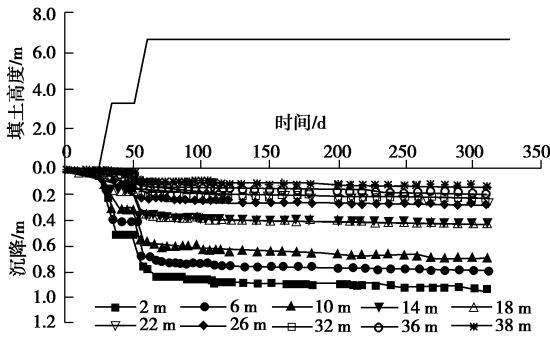


图 4 多级荷载下荷载 - 沉降 - 时间关系

Fig. 4 Relationship among load, settlement and time

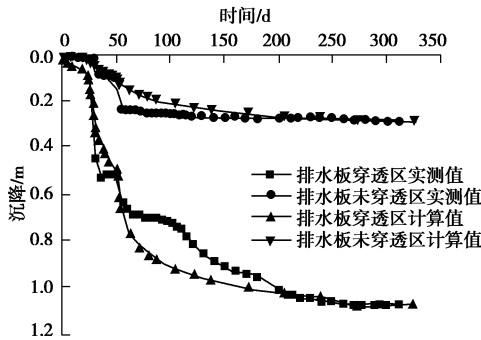


图 5 处理区和未处理区分层沉降曲线图

Fig. 5 Curves of layered settlement

从图 5 可知, 在堆载填筑期间, 不论塑料排水板穿透区还是未穿透区, 其沉降值均迅速增加。而在进入预压期后, 在前期塑料排水板穿透区域沉降速率虽有所减缓, 但沉降速率值依然较大, 这表明在浅层产生了超固结现象, 在预压后期沉降速率减小, 沉降趋于平稳; 塑料排水板未穿透区域沉降增加缓慢, 沉降趋于平稳。

因此, 对于工后沉降要求严格的机场工程, 可通过排水超载预压法提前完成沉降固结, 减小工后沉降值。

### 3.3 不均匀沉降

图 6 为堆载 270 d 时横剖面上原地面沉降与堆载高度曲线图, 图 7 为横剖面的沉降位移云图, 从图 6~7 可以看出, 原地面沉降不均匀, 随堆载高度而变化。距堆载体坡顶线 20 m 范围内, 沉降量变化幅度较大, 不均匀沉降也较大, 由此可见堆载存在一定的边界效应, 为使地基沉降均匀, 满足工程需要, 在设计时, 堆载范围应扩大, 范围扩大值为堆载效应边界限值, 本文以 20 m 为宜。

值得一提的是, 最大沉降并未发生在堆载中心线处, 而是发生在靠近堆载坡顶边线一定距离处, 这一现象可由 3.4 节的深层水平位移来解释, 如图 9 所示, 在堆载边界区域下深层土体产生较大水平位移, 最大值达 0.32 m, 这进一步加大了该区域竖向位移。

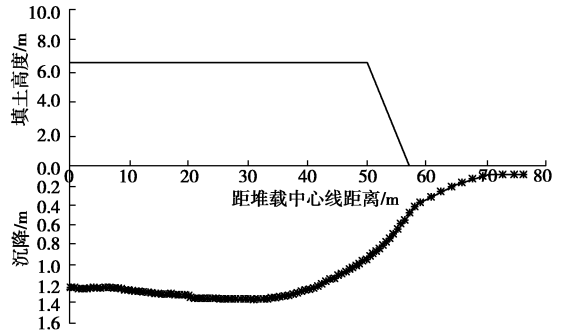


图 6 堆载不均匀沉降曲线图

Fig. 6 Differential settlement curves by preloading

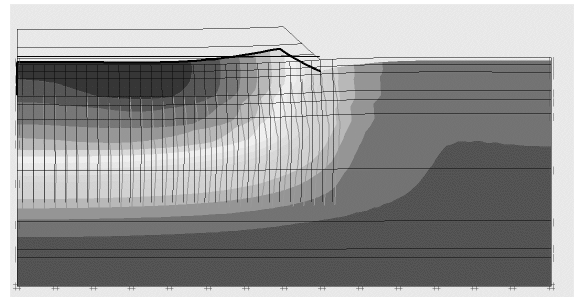


图 7 地基土沉降云图

Fig. 7 Total settlements of foundation

### 3.4 深层水平位移

图 8 为堆载体坡脚下土体深层水平位移随深度及时间的变化过程曲线, 随着时间增加水平位移由小变大, 由负值变为正值, 水平位移方向发生变化, 这一现象是由于打设塑料排水板后, 土体产生沉降收缩, 水平位移朝有排水板一侧移动, 在填土施工开始后, 由于竖向荷载增大, 产生挤压, 水平位移朝着堆载体外发生, 与原移动方向相反。在塑料排水板插入后的各个阶段, 水平位移随深度先增大后减小, 直至为零, 近似呈正态分布; 随着堆载荷载、堆载时间的增加, 深层水平位移相应增大, 在卸载至设计标高后, 水平位移仍在增加, 但增加幅度较小。从图 8, 9 可以看出, 对于深厚软土地基, 水平位移影响深度为地表下 30 m 以内, 最大位移发生在地表下 14 m 处, 且产生最大水平位移的位置不随堆载高度、堆载时间而变化。

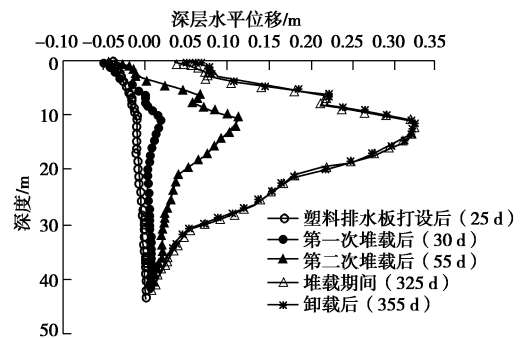


图 8 深层水平位移变化过程

Fig. 8 Lateral displacement of deep soils

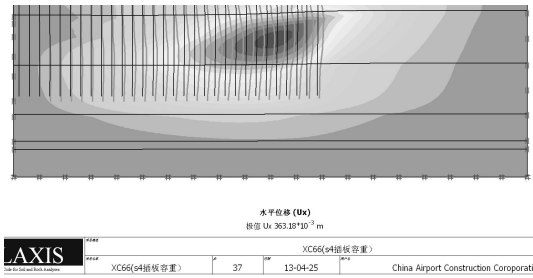


图9 水平位移云图

Fig. 9 Lateral displacements

## 4 结 论

对采用超载预压与塑料排水板结合处理深厚软土地基进行二维有限元分析, 得到以下结论:

(1) 采用 Plaxis 软件的软土蠕变模型进行有限元计算, 计算所得沉降与实测值较为吻合, 表明在沿海软土地基上进行超载预压设计考虑软土蠕变的必要性。

(2) 采用塑料排水板结合超载预压处理机场深厚软土地基, 使得沉降大部分发生在填筑和超载预压期, 且卸载后再施工道面结构层时沉降速率较小, 在设计要求范围内, 达到了超载预压的目的。

(3) 在打设塑料排水板后至堆载前期间, 软土地基产生沉降但沉降值较小; 堆载后, 沉降显著增大, 说明超载预压与塑料排水板联合使用具有较好的效果。

(4) 塑料排水板的作用在于缩短水平向排水通道, 提高土层的竖向渗透系数, 加速地基土排水固结。在二维数值计算中, 塑料排水板可以采用等效排水线来实现。

(5) 在软土地基中, 塑料排水板影响范围在 22 m 深度内, 超过该数值后增加塑料排水板长度对加速沉降贡献值较小。

(6) 堆载存在一定的边界效应, 为使地基沉降均

匀, 堆载范围应大于加固区范围。

## 参考文献:

- [1] 张电吉. 淤泥质黏土的超载预压实验研究[J]. 武汉化工学院院报, 1999, 21(4): 39 - 42. (ZHANG Dian-ji. Experiment research of surcharge pre-compression on mud[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 1999, 21(4): 39 - 42. (in Chinese))
- [2] 朱向荣, 李 振. 舟山国家石油储备基地堆载预压加固效果分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 881 - 886. (ZHU Xiang-rong, LI Zhen. Analysis of consolidation effects of Zhoushan national oil reserve base improved by preloading combined with plastic drains[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 881 - 886. (in Chinese))
- [3] 郭庆海, 周顺华, 王炳龙, 等. 塑料排水板超载预压处理高速公路软基的试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 340 - 344. (GUO Qing-hai, ZHOU Shun-hua, WANG Bing-long, et al. Soft ground treated with plastic drainage belt combined with surcharge preloading on express way[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(3): 340 - 344. (in Chinese))
- [4] 叶观宝, 廖星樾, 高彦斌, 等. 长板-短桩工法处理高速公路软土地基的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 232 - 236. (YE Guan-bao, LIAO Xing-yue, GAO Yan-bin, et al. Numerical analysis of improved deep soft foundation for highways by use of D-M method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 232 - 236. (in Chinese))
- [5] CHAI Jin-chun, SHEN Shui-long. Simple method of modeling PVD-improved subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2001, 127(11): 965 - 972.

(本文责编 明经平)