

长板-短桩工法处理高速公路软土地基的数值分析

叶观宝, 廖星樾, 高彦斌, 徐超

(1. 同济大学岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092)

摘要: 长板-短桩工法综合了排水固结法和水泥土搅拌桩法在加固软土地基工程中的优点, 适用于处理高速公路深厚软土地基。以江苏省淮安-盐城高速公路盐城试验段为原型和依据, 利用 Plaxis 软件, 针对长板-短桩工法、排水固结法和水泥土搅拌桩法三种工况下的路堤和地基性状进行了二维有限元计算分析。从数值分析的角度研究了长板-短桩复合地基的加固机理和特性, 进一步认识了总沉降、分层沉降、侧向位移、潜在滑动面及超孔隙水压力等指标的特征, 得到了一些有益的结论。

关键词: 长板-短桩; 高速公路; 深厚软基; 数值分析

中图分类号: TU437

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)02-0232-05

作者简介: 叶观宝(1964-), 男, 安徽歙县人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理与托换技术研究。E-mail: yeguanbao@vip.citiz.net。

Numerical analysis of improved deep soft foundation for highways by use of D-M method

YE Guan-bao, LIAO Xing-yue, GAO Yan-bin, XU Chao

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. United Research Centre of Environment and Sustainable Development, Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: Newly developed D-M method was a combination of vertical drain consolidation and cement mixing, and it had been proved to be suitable for the improvement of deep soft soil under highway embankment. According to the Yancheng test section of Huai'an-Yancheng Highway project, three kinds of construction conditions including D-M method, PVD consolidation and cement mixing, were simulated by 2D finite element software Plaxis. The simulated results were contrasted and analyzed to cognize the mechanism and behavior of embankment and soft soil improved by D-M method. The characteristics of total settlement, settlement of different layers, lateral displacement, potential slip surface and dissipation of excess pore pressure were also presented.

Key words: D-M method; highway; deep soft foundation; numerical analysis

0 引言

在高速公路软土地基处理方法中, 应用比较普遍的是排水固结法和水泥土搅拌桩法。然而, 对于深厚软土地基的处理, 如果单独上述两种方法之一时, 一般难以取得令人满意的效果。为此, 文献[1, 2]提出了采用长的塑料排水板与短的水泥土搅拌桩联合处理的方法(简称长板-短桩工法), 用以加固高速公路深厚软土地基。研究人员通过试验段设计、测试、现场原型监测和分析对长板-短桩工法处理机理进行探索, 认为该工法发挥了预压排水固结法和水泥土搅拌桩法两者的优点: 短桩增加了浅部地基土的承载力, 竖向排水体加快了深部土体的排水固结, 适用于填方路堤下软土层厚度大于 10 m 的深厚淤泥、淤泥质土及冲填土等饱和黏性土的地基处理, 其处理深度由长

板处理深度决定, 受到塑料排水板施工机械能力控制。

在研究长板-短桩工法处理机理和效果时, 仅依靠现场监测资料是不够的, 需要结合数值分析方法, 才能全面地认识地基和路堤的性状。本文以盐城试验段联合处理 B 段为原型和依据^[1], 利用岩土工程有限元软件 Plaxis 研究了长板-短桩工法处理软土地基的特性, 得到了一些有益的结论。

1 试验段概况

试验段位于古泻湖相平原, 沉积了深度较大的软弱土层, 主要为强度低、透水性差的淤泥质黏土、粉

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50678130)

收稿日期: 2007-03-22

质黏土等。试验段路堤设计顶面宽度为 28.0 m，底面宽度为 44.0 m，填土高度为 5.4 m，分 18 层填筑（每层压实厚度为 0.3 m）。填土历时曲线如图 1 所示，简化为四级加载。采用长板 - 短桩工法进行地基处理，桩与板均按梅花形布置，间距均为 1.6 m。其中排水板截面尺寸为 100 mm×4 mm，板长为 17.0 m，通水量 q_w 为 100 m³/a；搅拌桩桩径为 0.5 m，桩长为 8.0 m。

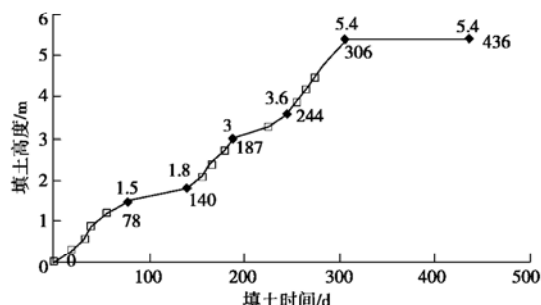


图 1 填土历时曲线图
Fig. 1 The soil filled during embankment construction

2 有限元模型

高速公路路堤是条形荷载，填土在公路轴向上延伸很远，可以使用平面应变模型进行平面二维有限元计算。试验段的水泥土搅拌桩和塑料排水板按等间距梅花形布置，进行平面二维计算时，都需要进行合理的简化和等效。

2.1 材料模型

地基土和路堤填土均采用 Mohr-Coulomb 模型，为理想塑性本构模型，该模型的计算参数可以从土样的基本试验里得到。地基土层资料及土工参数如表 1 所示，表中参数均是取自试验段勘察报告。

2.2 水泥土搅拌桩的简化

水泥土搅拌桩采用线弹性模型，符合广义 Hook 定律。对于梅花形布置的水泥土搅拌桩，可通过降低其弹性模量将其简化成沿纵向排列的板桩。简化后的板桩厚度等于水泥土搅拌桩的直径，板桩长等于原桩长，即是说使用板桩材料置换了水泥土搅拌桩及部分地基土。置换时可按面积置换率进行折减^[3-4]，也可

按桩间距进行折减^[5]，本文选择了前者。假定进行材料置换前后的轴向刚度相等，则可以按式 (1) 计算得到板桩的等效弹性模量 E_e ，见表 1。

$$E_e = \frac{2E_p s + E_s (\sqrt{3}dl - 2s)}{\sqrt{3}dl} \quad , \quad (1)$$

式中， E_p 为水泥土搅拌桩的弹性模量， E_s 为桩长范围内各土层弹性模量的加权平均值， s 为桩截面积， d 为桩径， l 为桩中心距。

2.3 塑料排水板的简化

Chai 指出，从宏观意义上看，在土层中打入塑料排水板的处理效果在于提高了土层的竖向渗透系数。因此，模拟塑料排水板加固土层时，可以采用一个等效的竖向渗透系数来代替原土层的竖向渗透系数^[6]。该简化方法可以完成塑料排水板三维问题向二维问题的简化，其简化过程中参数少，物理意义明确，能有效地满足工程计算的需要^[6-7]。等效竖向渗透系数 k_{ve} 可按式 (2)、(3) 计算，所得各层土的 k_{ve} 见表 1。

$$\mu = \ln\left(\frac{n}{s_s}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} + \pi \frac{2l^2 k_h}{3q_w} \quad , \quad (2)$$

$$k_{ve} = \left(1 + \frac{2.5h^2}{\mu D_e^2} \frac{k_h}{k_v}\right) k_v \quad , \quad (3)$$

式中， $n = D_e/d_w$ ， $s_s = d_s/d_w$ ， h 为各层地基土的排水路径， D_e 为有效排水直径， d_w 为等效砂径直径， d_s 为涂抹区直径。

计算时考虑了涂抹效应对径向渗流的影响，没有考虑非阻效应的影响。根据已有文献资料^[8]，涂抹区直径可按 $d_s = 3d_m$ 估算， d_m 为插板机芯轴直径，这里取 $d_s = 0.3$ m；非涂抹区渗透系数与涂抹区渗透系数之比 k_h/k_s 取 5.0。

2.4 计算模型

综合考虑试验段路堤的几何形状，中心对称性，地基土层分布及填土历时，建立如图 2 所示的有限元模型图。几何模型考虑路堤中心线右半部分：宽度 50m，深度 26 m，包括了 6 层地基土。路堤填土分为四层，与填土历时曲线相对应。路堤底面以下 0~8 m

表 1 材料参数表

Table 1 Model parameter for material									
材料	厚度 /m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模 量/MPa	泊松 比 ν	黏聚 力/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	渗透系数		等效竖向渗透 系数 $k_{ve}/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
							$k_h/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$k_v/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	
①黏土	2.0	18.4	2.8	0.32	16	14.0	6.82×10^{-4}	5.04×10^{-4}	8.38×10^{-4}
②淤泥质粉质黏土	4.8	18.0	1.8	0.35	12	13.6	1.09×10^{-4}	8.38×10^{-5}	3.92×10^{-4}
③粉质砂土	2.7	18.5	3.0	0.30	13	14.8	1.00×10^{-2}	7.70×10^{-3}	1.28×10^{-2}
④淤泥质粉质黏土	5.0	17.8	1.8	0.35	13	10.9	1.94×10^{-4}	1.02×10^{-4}	6.82×10^{-4}
⑤粉质黏土	3.9	18.6	2.0	0.33	12	13.8	7.96×10^{-4}	6.12×10^{-4}	1.21×10^{-3}
⑥粉质砂土	—	19.6	3.2	0.30	5	27.0	1.30×10^{-2}	1.00×10^{-2}	—
路堤填土	5.4	20.0	12.0	0.27	10	35.0	—	—	—
水泥土搅拌桩	8.0	21.0	105.0 ⁽¹⁾	0.20	—	—	—	—	—

注：水泥土搅拌桩的弹性模量为等效后的弹性模量。

范围内设置了水泥土搅拌桩, 0~17 m 是塑料排水板处理区, 该范围内土层的渗透系数采用等效渗透系数, 计为工况 I。现场打设的水泥土搅拌桩的面积置换率为 9.0%, 而等效后的板桩面积置换率达到了 31.2%, 如果计算中取水泥土的真实渗透系数(水泥土的渗透系数远小于土层渗透系数)作为桩的渗透系数, 必然对地基土的固结产生重大的影响。因此, 本文在计算时假定水泥土搅拌桩的渗透系数与相应土层的等效渗透系数相等。

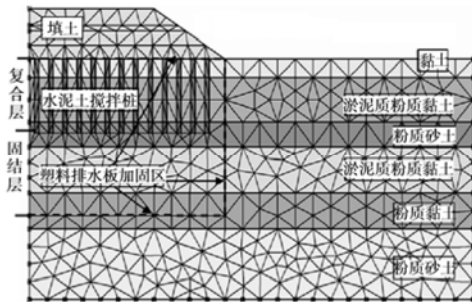


图2 几何模型及网格划分
Fig. 2 Finite-element mesh

数值计算类型为 Plaxis 内嵌的固结计算, 其采用的理论是比较完善的 Biot 固结理论, 适合本次计算的要求和条件。计算时间为 606 d, 即为填土期 306 d 加上固结 300 d。

为了分别认识塑料排水板和水泥土搅拌桩在长板-短桩工法里的作用, 本文还进行了以下两种假设工况的对比计算: ①仅设置 17 m 塑料排水板, 计为排水固结法, 工况 II; ②仅设置 8 m 水泥土搅拌桩, 计为水泥土搅拌桩法, 工况 III。计算结果与工况 I 进行比较, 揭示了长板-短桩的特点: 塑料排水板和水泥土搅拌桩在深厚软土地基加固工程中共同发挥作用。

3 计算结果分析

3.1 位移计算结果的对比

选取地基表面靠近路堤中心线的一点, 因为这一点是地基中沉降最大的一点, 所以可以用其沉降量代表地基土的总沉降量。计算的地基总沉降量随时间的变化关系见图 3 所示, 现场监测得到的结果也在图中给出。从图 3 可以看出, 与实测值相比, 计算值的沉降发展速率稍大, 该现象尤其在第 200 天~第 260 天这一填土速率较慢时间段比较明显。现有文献中也有学者提及到该现象, 即地基排水速率计算值要比实测值稍大一些^[6]。从整体上看, 计算值与实测值是吻合的, 证明了有限元计算简化方法和计算参数是合理的, 可进一步用于研究长板-短桩复合地基的性状。

图 3 同时给出了工况 II、III 的沉降曲线, 图 4 和图 5 为分层沉降曲线, 分别绘制了 0~8 m 复合层和 8~17 m 固结层的沉降时间关系曲线。

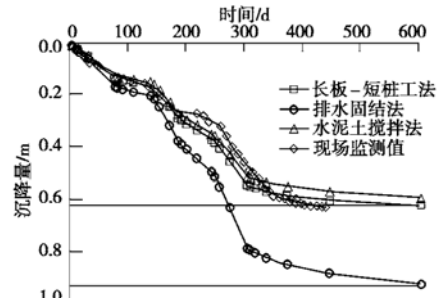


图3 地基总沉降曲线图

Fig. 3 Total settlement curves of foundation

工况 II 比工况 I 的总沉降量大, 最大沉降差值为 0.36 m, 表明了水泥土搅拌桩在控制总沉降量中发挥了重要作用。由图 4 和图 5, 可知设置水泥土搅拌桩主要减少了 0~8 m 复合层的沉降量。对于 8~17 m 固结层, 工况 I 比工况 II 的沉降量稍大, 但 300 d 以后两条沉降曲线基本一致。图 5 中给出的工况 I 的沉降量为桩底沉降和桩间土沉降的平均值, 这因为本文的计算结果中, 桩底和桩间土的沉降量不一致, 桩底沉降量比桩间土沉降量稍大, 这一现象与现场检测资料分析结果及已有研究资料的规律是一致的^[1-2,4]。

工况 III 比工况 I 沉降量减小了 0.04 m 左右, 这是因为塑料排水板加快了排水固结, 使得工况 I 的沉降量发展迅速并 420 d 左右趋于稳定; 而工况 III 则固结较慢, 工后沉降大, 其最终沉降量在理论上是与工况 I 相等的。参考图 4 和图 5, 可知工况 I 和工况 III 的沉降差值主要发生在 8~17 m 固结层。可以预见, 如果该区域的厚度增大, 那么塑料排水板的作用也会更明显, 计算得到的第 606 天的沉降差也会更大。

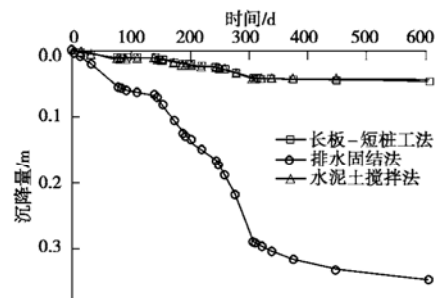


图4 0~8 m 复合层地基土沉降曲线图

Fig. 4 Settlement curves of composite layer (0~8 m)

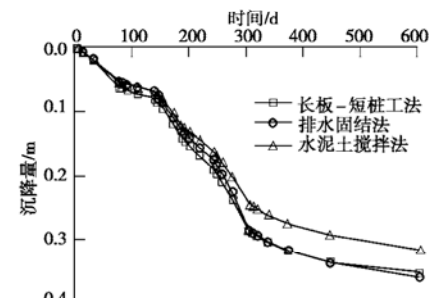


图5 8~17 m 固结层地基土沉降曲线图

Fig. 5 Settlement curves of consolidation layer (8~17 m)

图 6 为第 606 天时路面不均匀沉降曲线, 沉降量

在路堤中心线附近最大, 并向外逐渐减小。其中, 工况 I 差异沉降 0.165 m, 工况 II 差异沉降 0.292 m, 表明水泥土搅拌桩可以有效地减少路面不均匀沉降, 减小幅度为 43.5%, 效果明显。水泥土搅拌桩还有控制地基土侧向位移的重要作用, 如图 7 所示。由于搅拌桩提高了复合层地基土的刚度, 使得侧向位移减小, 具体表现在 3 个方面: ①地表侧向位移大幅减小, 由 0.086 m 减小为 0.022 m; ②剖面线上最大侧向位移减小, 由 0.201 m 减小为 0.159 m; ③发生最大侧向位移的深度增加, 由 9.5 m 增加到 11.8 m。减小地基土的侧向位移是地基稳定安全系数提高的表现。

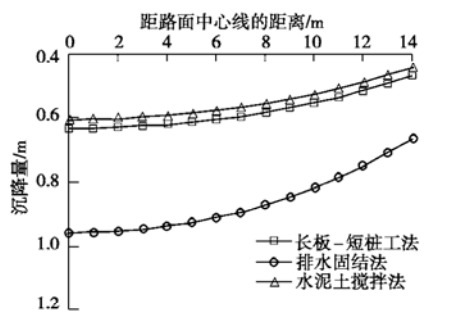


图 6 路面不均匀沉降曲线图
Fig. 6 Differential settlement curves of pavement

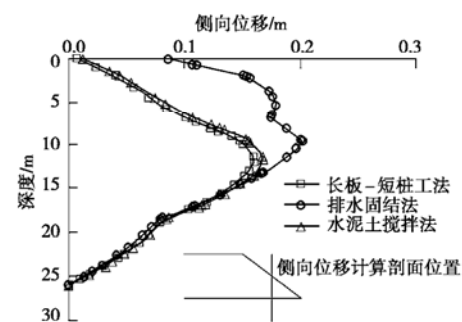


图 7 侧向位移曲线图
Fig. 7 Lateral displacement profiles

利用 Plaxis 内嵌的折减强度参数法做进一步的研究, 可以定性分析了长板 - 短桩工法处理软土路基的破坏模式。图 8 和图 9 所示为进行折减强度参数计算后得到的位移增量等值线图, 其中位移增量值的大小没有具体意义, 等值线的形态则代表了该计算模型有可能发生的破坏模式。图 8 为长板 - 短桩复合地基位移增量等值线图, 存在两个明显的潜在滑动面或滑动带, 除路堤边坡可能发生滑动破坏以外, 固结层软土地基也可能发生滑动破坏; 图 9 为天然软土地基位移增量等直线图, 滑动带位于浅层地基土。与天然软土地基相比较, 长板 - 短桩复合地基中的圆弧滑动带下切比较深, 可以认为基本绕过了上部 8 m 的水泥土搅拌桩加固区, 属于固结层地基局部破坏而非地基土

整体破坏, 这对于路堤和地基的稳定性是有利的。

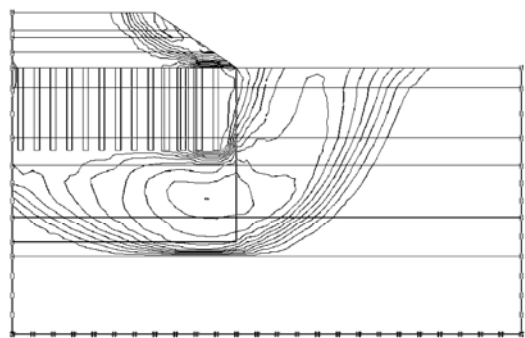


图 8 长板 - 短桩复合地基位移增量等值线图
Fig. 8 Total increment contours of D-M composite foundation

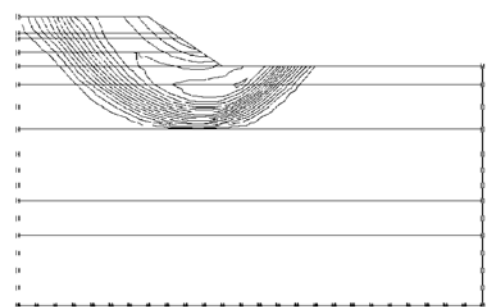


图 9 天然地基位移增量等值线图
Fig. 9 Total increment contours of natural foundation

3.2 超孔隙水压力的对比

超孔隙水压力的消散可以反应软土地基的固结情况, 为此, 有必要研究超孔隙水压力随时间的变化趋势。在路堤中心线附近取各土层中心点为超孔压计算点, 则得到 5 层地基土的超孔隙水压力与时间的关系曲线, 如图 10 所示。第 1 层土的超孔隙水压力最小, 第 4 层土的超孔隙水压力最大, 最高达到 33.4 kPa, 填土结束后开始迅速消散, 到第 606 天时减小到一个较小值 (<6 kPa)。超孔隙水压力消散速率在 420 d 以前很大, 而 420 d 以后就比较缓慢。

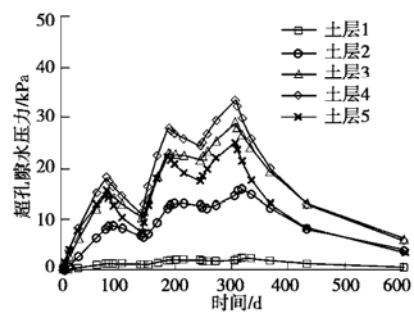


图 10 长板 - 短桩复合地基超孔隙水压力曲线图
Fig. 10 Excess pore pressure of D-M composite foundation
考虑到第 4 层淤泥质粉质黏土的超孔隙水压力最

大,图 11 对三种工况下该层土的超孔隙水压力曲线进行了比较。从图 11 可以看出,在任意时间段,第 4 层土超孔隙水压力大小顺序均为:工况 I < 工况 II < 工况 III。长板-短桩复合地基超孔隙水压力最小,其主要原因为:①与工况 II 相比,水泥土搅拌桩提高了浅层地基的刚度,固结速度加快;②与工况 III 相比,塑料排水板提高了地基土竖向渗透系数,固结速度大大加快。在荷载及地基土压缩性相同的情况下,最终沉降量是一定的,而固结速度加快则有利于沉降发展,可以到达减小工后沉降的目的,这一点已在 3.1 节中进行了分析;同时也有利于超孔隙水压力及时消散,使上部荷载转化为地基土的有效应力,以提高土体强度,进而提高地基稳定性。

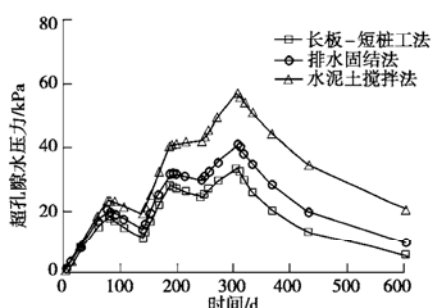


图 11 第四层土的超孔隙水压力曲线图

Fig. 11 Excess pore pressure of 4th layer of subsoil

4 结 语

对长板-短桩复合地基性状进行二维有限元分析,得到以下几点结论。

(1)长板-短桩工法可用于处理高速公路深厚软土地基。该工法结合了排水固结法和水泥土搅拌桩法的特点,具有固结速率快,总沉降量小,路面差异沉降小,控制工后沉降,侧向位移小,稳定性好等诸多优点,值得工程上推广应用。

(2)长板-短桩工法中,塑料排水板的作用在于控制超孔隙水压力的发展,加快固结层地基土排水固结,及时提高土体强度,进而提高地基的稳定安全系数。在二维数值计算中,塑料排水板可以采用等效竖向渗透系数来实现。

(3)水泥土搅拌桩的作用在于控制总沉降量,减小不均匀沉降和侧向位移。由于短桩的存在,地基土浅部侧向位移明显减小,潜在滑动面下移,提高了路堤的稳定性。在二维数值计算中,水泥土搅拌桩同样需要进行合理的等效和简化。

参考文献:

[1] 徐超,叶观宝. 基于现场检测的软土地基联合处理机理研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 918 - 921. (XU Chao,

YE Guan-bao. Research on mechanism of combined improvement of soft soils based on field monitoring[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 918 - 921. (in Chinese))

- [2] 徐超,姜竹生. 路堤荷载下长板-短桩工法复合地基[J]. 同济大学学报, 2006, 34(12): 1597 - 1601. (XU Chao, JIANG Zhu-sheng. Cement mixing pile composite foundation combined with prefabricated vertical drain preloading under embankment[J]. Journal of Tongji University, 2006, 34(12): 1597 - 1601. (in Chinese))
- [3] 陈福全,杨敏. 地面堆载作用下邻近桩基性状的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1286 - 1290. (CHEN Fu-quan, YANG Min. Numerical analysis of piles influenced by lateral soil movement due to surcharge loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1286 - 1290. (in Chinese))
- [4] 李涛,洪宝宁. 考虑过渡区影响的粉喷桩复合地基承载特性的有限元数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 289 - 292. (LI Tao, HONG Bao-ning. Finite element analysis of bearing capacity of DJM composite foundation considering the influence of transition between piles and soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(3): 289 - 292. (in Chinese))
- [5] 邓永锋,洪振舜,刘松玉. 搅拌桩复合地基平面模拟的简化方法探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 209 - 212. (DENG Yong-feng, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu. A planar simplified method for three-dimension cement-soil mixing piles composite foundation with FEM numerical analysis[J]. Rock and Soil Mechan, 2005, 26(S): 209 - 212. (in Chinese))
- [6] CHAI Jin-chun, SHEN Shui-long. Simple method of modeling PVD-improved subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 965 - 972.
- [7] 叶观宝,李志斌,徐超. 塑料排水板处理软弱地基的平面应变简化方法探讨[J]. 结构工程师, 2006, 22(1): 51 - 55. (YE Guan-bao, LI Zhi-bin, XU Chao. Discussion on plane-strain modeling methods in soft foundation treated by PVDs[J]. Structural Engineers, 2006, 22(1): 51 - 55. (in Chinese))
- [8] CHAI J C, MIURA N. Investigation of factors affecting vertical drain behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 216 - 226.