

软土层未打穿的桩承式路堤现场实测研究

徐正中^{1,2}, 陈仁朋^{1,2}, 陈云敏^{1,2}

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 以申苏浙皖高速公路为工程背景, 对软土层未打穿的桩承式路堤进行现场实测研究。共选取2个管桩断面作为试验观测断面, 在填筑时及填筑完成后对桩托板和桩间土上的土压力、路基沉降及下卧层沉降进行监测, 并与软土层打穿时的实测结果作比较。研究表明: 桩间距越大, 桩体荷载分担比越小; 软土层未打穿时荷载分担比为61.4%~75.5%, 比打穿时小一些; 软土层打穿与未打穿时的土拱高度都为桩托板净间距的1.0~1.4倍; 软土层未打穿时桩土不均匀沉降比打穿时大; 路堤填筑完成后的沉降约占总沉降的30.0%; 下卧层沉降约占路堤总沉降的60.0%。将现场试验结果与4种理论方法的计算结果进行比较, 评价各种方法的适用性。

关键词: 土力学; 桩承式路堤; 工程实例; 设计方法; 荷载分担比; 沉降

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)11 - 2336 - 06

STUDY OF IN-SITU DATA OF PILE-SUPPORTED EMBANKMENT WITH PILE PARTIALLY PENETRATED IN SOFT SOILS

XU Zhengzhong^{1,2}, CHEN Renpeng^{1,2}, CHEN Yunmin^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Taking Shen-Su-Zhe-Wan(SJZA) highway as engineering background, in-situ study of pile-supported embankment with pile partially penetrated in soft soils is carried out. Soil pressure acting on the pile splint and soil surfaces, settlements of embankment and subjacent bed are monitored in two tubular pile sections during and after land filling. The results are compared with those in-situ data when pile penetrates soft soils. It can be found that the load share ratio decreases as the pile spacing increases. The measured load-bearing ratios are 61.4% - 75.5% when pile partially penetrates soft soils, which are smaller than those measured when pile is penetrated in soft soils. Both soil arching heights are 1.0 - 1.4 times as large as the clear pile spacing. The measured differential settlements when pile is partially penetrated in soft soils are larger than those measured when pile penetrates soft soils. The settlements of embankment after land filling make up about 30.0% in total settlement. The settlements of subjacent bed make up about 60.0% in total settlement. Applicability of each method is evaluated by comparing in-situ test results and computing results of four theoretical methods.

Key words: soil mechanics; pile-supported embankment; case study; design method; load share ratio; settlement

收稿日期: 2009 - 01 - 14; **修回日期:** 2009 - 08 - 31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878193)

作者简介: 徐正中(1980 -), 男, 2009年于浙江大学岩土工程专业获博士学位, 主要从事地基处理及桩基础工程方面的研究工作。E-mail: supbaobao@163.com

1 引言

与传统的软弱地基处理方法相比, 桩承式路堤具有工期短、无须预压和二次开挖、能有效控制地基沉降和侧向变形等优点, 为软基上需快速施工或对沉降要求较严格的高速公路和铁路工程提供了经济有效的解决办法。桩承式路堤受力性状很复杂, 推导求解非常困难, 所以只有少数学者^[1~5]采用解析方法对其进行研究。随着计算机的发展, 数值方法则越多越地被广大学者所接受^[6~11], 但是它只能凭经验来选取桩土界面剪切系数, 无法很好地模拟桩土界面剪切特性。W. J. Hewlett 等^[1, 12~14]用模型试验对桩承式路堤进行了研究。模型试验是研究桩承式路堤比较有效的手段, 具有较强的实际指导意义, 但由于存在比尺效应, 也不能完全反映实际情况。相对而言, 现场试验能更真实全面地反映问题, 但目前关于桩承式路堤的工程实例研究不多^[15, 16]。随着我国高速公路和高速铁路的大规模建设, 该技术得到了越来越广泛的应用。英国、北欧和德国等少数国家有简化的设计手册^[17~19], 但是我国还没有相关规范。为了更好地了解桩承式加筋路堤的实际工作情况, 本文以申苏浙皖高速公路为工程背景, 对软土层未打穿的桩承式路堤进行了现场实测, 着重讨论了桩托板及桩间土上的土压力、桩体荷载分担比、沉降等工程设计中关注的问题, 并与软土层打穿的实测结果作了比较。最后, 将现场试验结果与 4 种理论方法的计算结果进行了比较, 评价了各种方法的适用性。

2 申苏浙皖高速公路试验段概况

申苏浙皖高速公路连接了江苏、浙江、安徽和上海 3 省 1 市, 在浙江段总长约 89 km。选取 K25+100(记为 D1 断面)和 K25+135(记为 D2 断面)进行现场测试。根据岩土工程勘察报告, 现场试验段表层为软塑粉质黏土; 上部为淤泥和湖沼积淤泥质粉质黏土, 为本路段的主要软土层; 中部为硬塑状黏土; 中下部为亚砂土; 下部为黏土。地下水位约在地表下 1.2 m。该试验段土层物理力学指标如表 1 所示。其中, γ 为容重, w 为含水量, e_0 为孔隙比, I_p 为塑性指数, k_h 为水平向渗透系数, k_v 为

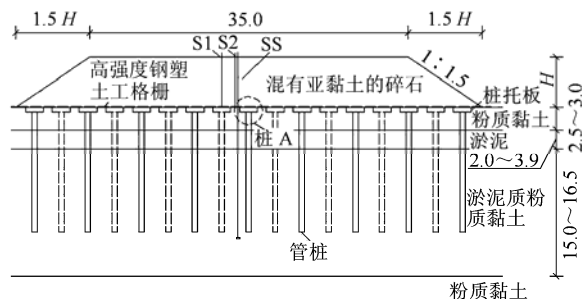
表 1 申苏浙皖高速公路试验段土层物理力学指标

Table 1 Soil physical mechanics index of test section in SJZA highway

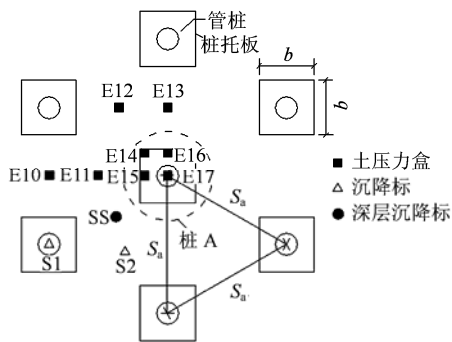
土层名称	h/m	$\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$w /\%$	e_0	I_p	$k_h / (10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_v / (10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	E_{s1-2} / MPa	c' / kPa	$\phi' / (^\circ)$
粉质黏土	2.5~3.0	19.1	27.2	0.806	11.5	7.50	5.80	5.30	0	24
淤泥	2.0~3.9	17.3	59.9	1.687	19.9	0.91	0.35	1.47	0	20
淤泥质粉质黏土	15.0~16.5	17.1	47.0	1.318	15.9	0.20	0.11	2.07	0	22
亚黏土	12.0~13.2	18.9	27.8	0.778	15.0	6.35	4.72	6.91	0	25

竖向渗透系数, E_{s1-2} 为压缩模量, c' 为有效黏聚力, ϕ' 为有效内摩擦角。

路堤顶面宽度为 35.0 m, 坡倾 1:1.5。路堤填料主要由混有亚黏土的碎石组成, 内摩擦角为 35°, 平均容重为 22 kN/m³。图 1 给出了试验段(D1 和 D2 断面)桩位布置及仪器埋设的剖面图和平面图。所有管桩都采用三角形布置, 桩径分别为 0.3(D1 段面)和 0.4 m(D2 段面), 壁厚均为 5.0 cm, 桩间距分别为 2.0(D1 段面)和 2.5 m(D2 段面), 桩长均为 14.0 m,



(a) 剖面图(单位: m)



(b) 平面图

图 1 申苏浙皖高速公路桩位布置及仪器埋设图

Fig.1 Piles layout and instruments arrangement in SJZA highway

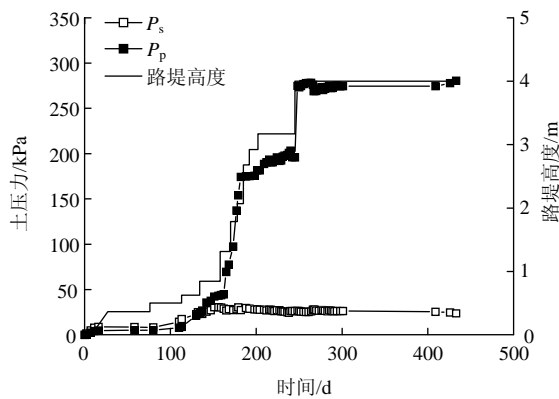
桩端未打穿淤泥层。管桩托板为正方形，宽度分别为 0.9(D1 段面)和 1.0 m(D2 段面)，采用 C30 混凝土现浇。在桩托板顶面铺设了一层高强度钢塑土工格栅，其最大延伸率为 6%，抗拉强度为 120 kN/m。

试验段监测的内容有桩托板及桩间土上的土压力、地基表面沉降和桩端下卧层沉降。在路堤中心埋设了土压力盒以测量桩土各自分担的上部荷载。地基表面设置了沉降标以监测桩土沉降。此外，还在路堤中心线附近桩端深度处理设了深层沉降标以测量桩端土沉降。

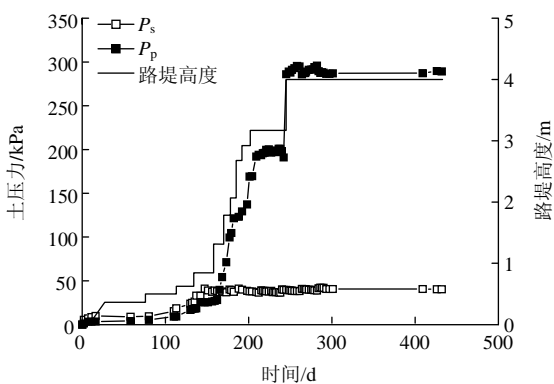
3 现场测试结果

3.1 桩托板及桩间土表面上的土压力

图 2(a), (b)分别给出了申苏浙皖高速公路 D1, D2 两个断面在填筑开始后桩托板和桩间土表面的土压力实测结果。图 2 中 P_p 为桩托板上测得的土压力, P_s 为桩间土上测得的土压力。结果显示, 在路堤填筑到 1.0 m 过程中, 桩托板和桩间土上的土压



(a) D1 断面



(b) D2 断面

图 2 申苏浙皖高速公路监测断面在填筑开始后土压力实测结果

Fig.2 In-situ results of soil pressure after land filling beginning in monitoring section in SJZA highway

力随着路堤的填高而增大。此后路堤填筑的速度增快, 桩托板上的土压力增加地也很快; 而桩间土上的土压力在达到了峰值后, 慢慢减小直到稳定。当路堤填筑完成后(填到 4.0 m), 桩托板上测得的土压力分别为 280(D1 断面)和 289 kPa(D2 断面), 远大于桩间土上的土压力。在现场试验结束时, 测得的桩体荷载分担比(桩承担的荷载占路堤总荷载的比例)分别为 75.5%(D1 断面)和 61.4%(D2 断面)。

徐正中等^[16]给出了台缙高速公路管桩打穿软土条件下现场实测结果。为了方便比较, 记该工程 K18+223, K18+253, K18+283 测试断面分别为 D3, D4, D5 断面。该工程管桩采用正方形布置, 桩外径为 0.40 m, 壁厚为 0.05 m, 桩间距分别为 2.5(D3 断面), 3.0(D4 断面)和 2.0 m(D5 断面)。桩长为 20.0 m, 桩端打穿淤泥质黏土层, 位于持力较好的圆砾层上。桩托板为正方形, 边长分别为 1.3(D3 断面), 1.6(D4 断面)和 1.0 m(D5 断面)。实测的荷载分担比分别为 82.6%(D3 断面), 71.2%(D4 断面)和 87.6%(D5 断面)。可以看到, 不管在软土层是否打穿, 桩间距越大, 桩体荷载分担比越小; 而软土层打穿时的荷载分担比比未打穿时要大一些。

3.2 土压力与路堤高度的关系

图 3 给出了申苏浙皖高速公路 D1, D2 两个断面的土压力与路堤填筑高度的关系。在路堤填筑过程中, 桩托板上的土压力一直随着路堤填高的增大而增加, 而桩间土上的土压力却不是以相同的速率增大。可以看出, 路堤存在一临界高度(记为 H_c), 当路堤填筑高度大于该临界高度 H_c 后, 桩托板上的土压力急剧增加, 而桩间土上的土压力变化较小。

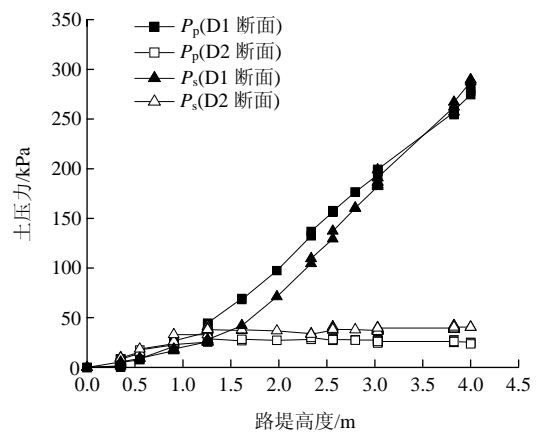


图 3 申苏浙皖高速公路 D1 和 D2 断面的土压力与路堤填筑高度的关系

Fig.3 Relationship between soil pressure and embankment height in sections D1 and D2 in SJZA highway

可以认为该临界高度对应于路堤完整土拱形成的所需要的最小高度。W. J. Hewlett 和 M. F. Randolph^[1]指出, 当路堤填土厚度小于相邻桩的净间距时, 土拱无法形成。北欧手册^[18]指出路堤高度至少需大于 1.2 倍桩托板净间距。图 3 中临界高度 H_c 分别为 1.2~1.5(D1 断面)和 1.5~1.9 m(D2 断面), 相应的桩托板净间距分别为 1.1(D1 断面)和 1.5 m(D2 断面)。

重新整理台绍高速公路试验段中的土压力数据^[16], 并绘制土压力 - 路堤填筑高度关系图(见图 3)。台绍高速公路土压力的测试结果与申苏浙皖测试结果规律类似, 对应的各断面临界高度分别为 1.3~1.5(D3 断面), 1.5~1.8(D4 断面)和 1.0~1.3 m(D5 断面), 对应的桩托板净间距分别为 1.2(D3 断面); 1.4(D4 断面)和 1.0 m(D5 断面)。比较发现, 软土层打穿与未打穿时的土拱高度都约为桩托板净间距的 1.0~1.4 倍。

3.3 桩托板、桩间土表面及桩端下卧层沉降

图 4(a), (b)分别给出了申苏皖浙高速公路 D1, D2 断面实测沉降。图 4 中 S_p 为桩托板沉降, S_s 为桩间土表面的沉降, S_d 为桩端平面处桩间土的沉降。在监测结束时, 各断面测得的桩托板顶面和桩间土表面的沉降分别为 236 和 265(D1 断面), 295 和 345 mm(D2 断面), 沉降已趋于稳定, 地基土体完成了大部分固结。沉降受桩间距影响较大, 桩间距越大, 沉降也越大。从填筑完成到监测结束期间产生的桩土沉降分别为 87 和 98(D1 断面), 93 和 115 mm(D2 断面)。该阶段沉降占路堤总沉降值的 35% 左右。由于桩体未打穿软土层, 路堤填筑结束后地基沉降稳定历时较长。由于软弱下卧层的存在使得下卧层沉降相对较大, 监测结束时桩端平面处桩

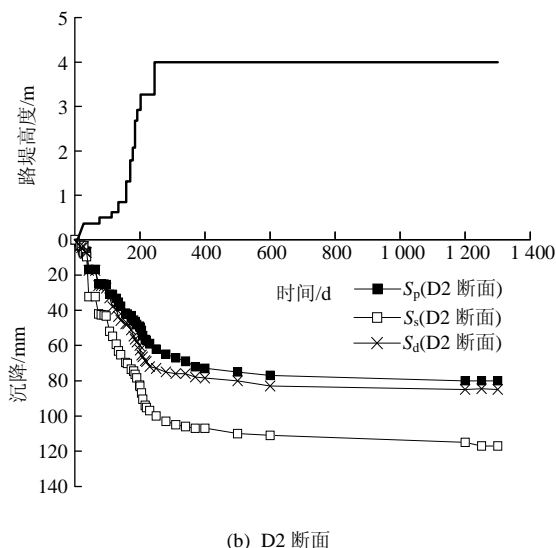
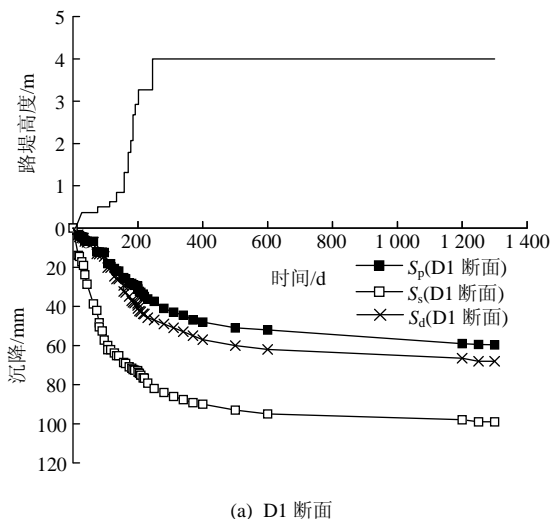


图 4 申苏浙皖高速公路监测断面实测沉降
Fig.4 In-situ settlements in monitoring section in SJZA highway

间土的沉降分别为 166(D1 断面)和 205 mm(D2 断面), 由软弱下卧层的压缩所产生的沉降占路堤总沉降值的 60% 左右。因此控制桩长可以有效控制路堤沉降。

在台绍高速公路试验段中, 监测结束时 3 个断面测得的桩托板顶面和桩间土表面的沉降^[16]分别为 85 和 97(D3 断面), 116 和 134(D4 断面), 59 和 74 mm(D5 断面)。定义桩土不均匀沉降为桩托板高度处桩托板沉降与地基土体沉降的差值。申苏浙皖高速公路中, D1, D2 断面测得的最大桩土不均匀沉降分别为 29 和 50 mm, 并且大部分发生在路堤填筑过程中; 台绍高速公路实测最大桩土不均匀沉降为 12~18 mm^[16], 其随时间的发展规律与申苏浙皖高速公路类似。可以看出, 软土层打穿时的桩土不均匀沉降比未打穿时要小。

4 理论计算方法与实测结果比较

土拱形成于路堤填筑过程中, 而桩体荷载分担比能直观地反映土拱效应。目前, 桩承式路堤设计中可以参考的方法主要有 R. P. Chen 等^[4]提出的解析方法、英国规范^[17]、北欧手册^[18]及德国规程^[19]等。其中, R. P. Chen 等^[4]提出的解析方法针对于一维路堤荷载情况, 建立了考虑桩托板、桩、地基土和路堤填料之间的相互作用的理论模型, 首次将路

堤土拱效应的发挥与桩土压缩沉降有机地联系起来，通过计算能够获得桩托板和桩间土土压力、沉降、路堤土拱高度等设计关心的参数；英国规范^[17]使用 Marston 公式来估算桩顶的竖向土压力，但是未能考虑路堤填料压缩性对竖向压力的影响；北欧手册^[18]采用顶角为 30°的土楔模型来计算土拱，假定在任何路堤高度条件下，作用在桩间土上的荷载都等于楔形体的土重，即路堤填料大于土拱高度后桩间土压力保持不变；德国规程^[19]以 W. J. Hewlett 和 M. F. Randolph 的研究成果为基础，假设土拱为桩支撑起的半球拱进行计算。R. P. Chen 等^[4]提出的解析方法是这 4 种方法中唯一能够计算路堤、桩和地基沉降的方法。

图 5 给出了桩体荷载分担比实测值与 4 种方法的计算值之间的比较。结果显示，各种方法计算得到的桩体荷载分担比相差很大，其中，英国规范^[17]给出的计算结果与实测值偏离较大，尤其当桩体荷载分担比较低时，英国规范方法会明显偏低；德国规程^[19]的计算结果普遍偏大很多；北欧手册^[18]给出的方法略微偏大；R. P. Chen 等^[4]的解析方法得到的荷载分担比则与实测结果较为接近，但是 R. P. Chen 等^[4]需要较为复杂的计算。申苏浙皖高速公路和台缙高速公路共 5 个断面实测的桩托板沉降和桩间土沉降，及台缙高速公路 3 个断面下卧层沉降与 R. P. Chen 等^[4]提出的解析方法的比较(见表 2)。从表 2 中看出，桩顶沉降最大误差达到了 50%，但是桩间土沉降与下卧层沉降与实测结果吻合较好。

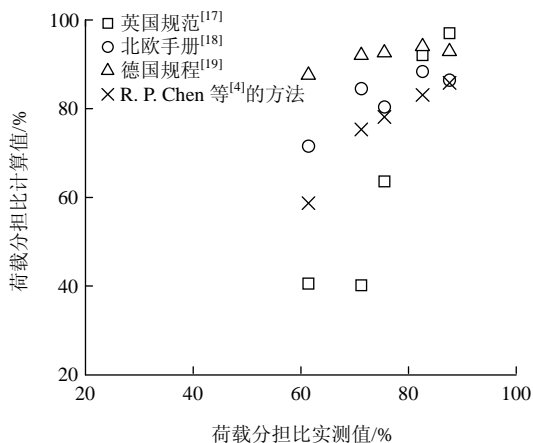


图 5 桩体荷载分担比实测值与 4 种方法计算值的比较

Fig.5 Comparison between measured and calculated values of load-bearing ratio

表 2 沉降实测值和计算值的比较

Table 2 Comparison of settlements between measured and computed values

试验断面	现场实测/mm			R. P. Chen 等 ^[4] 的方法/mm		
	S _p	S _s	S _d	S _p	S _s	S _d
D1	59	99	68	76	82	73
D2	80	117	85	121	127	97
D3	57	62		35	45	
D4	72	82		77	88	
D5	36	43		21	32	

5 结 论

本文比较分析了软土层未打穿及打穿高速公路实测托板和桩间土上的土压力、路基沉降及下卧层沉降数据，分析了打穿条件对土压力分布、桩体荷载分担比和沉降的影响，并将实测结果与 4 种方法进行了比较，评价了各种方法的适用性。通过研究得到如下结论：

(1) 土拱效应使桩间土上荷载往桩上转移，桩承担了大部分路堤荷载。桩间距越大，桩体荷载分担比越小。软土层未打穿时桩体荷载分担比为 61.4%~75.5%，比打穿时要小一些。

(2) 路堤高度大于土拱高度，路堤才能形成完整土拱，软土层打穿与未打穿时的土拱高度为桩托板净间距的 1.0~1.4 倍。

(3) 桩间距越大，实测的沉降越大。软土层未打穿时的桩土不均匀沉降比打穿时大，并且大部分桩土不均匀沉降发生在路堤填筑过程中。软土未打穿时，路堤填筑完成后的沉降占总沉降的 30%左右，下卧层沉降占路堤总沉降的 60%左右。可以通过调整桩长控制下卧层沉降，从而达到控制路堤总沉降的目的。

(4) 与现场实测桩体荷载分担比相比，英国规范^[17]偏差较大，德国规程^[19]偏高，北欧手册^[18]略偏大，R. P. Chen 等^[4]提出的解析方法计算的桩体荷载分担比、桩土沉降及下卧层沉降则与实测结果较为接近。

参考文献(References):

[1] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J].

- Ground Engineering, 1998, 21(3): 12 - 18.
- [2] 陈云敏, 贾 宁, 陈仁朋. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 1 - 7.(CHEN Yunmin, JIA Ning, CHEN Renpeng. Soil arching analysis of pile-supported embankments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 1 - 7.(in Chinese))
- [3] 陈福全, 李阿池, 吕艳平. 桩承式路堤中土拱效应的改进 Hewlett 算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 278 - 1 283.(CHEN Fuquan, LI Achi, LU Yanping. An improved solution of Hewlett's method for soil arching effect in piled embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1 278 - 1 283.(in Chinese))
- [4] CHEN R P, CHEN Y M, HAN J, et al. A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soils under one-dimensional compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(5): 611 - 623.
- [5] YU C, LIU S Y, JI T Y. Study of the performance of the reinforced piled embankment[J]. Advances in Earth Structures: Research to Practice, ASCE, 2006, 26(2): 247 - 254.
- [6] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(1): 44 - 53.
- [7] PHAM H, SULEIMAN M T, WHITE A M, et al. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced rammed aggregate pier-supported embankments[R]. Ames: Iowa State University, 2003.
- [8] 陈仁朋, 贾 宁, 陈云敏. 桩承式加筋路堤受力机制及沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 358 - 4 367.(CHEN Renpeng, JIA Ning, CHEN Yunmin. Mechanism and settlement analysis of pile-supported and geogrid-reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 358 - 4 367.(in Chinese))
- [9] 陈仁朋, 徐正中, 陈云敏. 桩承式加筋路堤关键问题研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 1 - 6.(CHEN Renpeng, XU Zhengzhong, CHEN Yunmin. Key problems of pile-supported and geosynthetic-reinforced embankment[J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 1 - 6.(in Chinese))
- [10] 贺 冲, 楼晓明, 熊巨华. 桩承式路堤土拱效应有限元研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1 466 - 1 470.(HE Chong, LOU Xiaoming, XIONG Juhua. Study of soil arching in piled embankment with FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1 466 - 1 470.(in Chinese)))
- [11] 芮 瑞, 夏元友. 桩 - 网复合地基与桩承式路堤的对比数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 769 - 772.(RUI Rui, XIA Yuanyou. Numerical simulation and comparison of pile-net composite foundation with pile-supported embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 769 - 772.(in Chinese))
- [12] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1994, 120(11): 1 917 - 1 938.
- [13] CHEW S H, PHOON H L, LOKE K H, et al. Geotextile reinforced piled embankment for highway bridges[C]// Proceeding of the 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering. Beijing: [s. n.], 2004: 438 - 443.
- [14] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式加筋路堤土拱效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 436 - 441.(CAO Weiping, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Experimental investigation on soil arching in piled reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 436 - 441.(in Chinese)).
- [15] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(12): 1 483 - 1 493.
- [16] 徐正中, 陈仁朋, 陈云敏. 托板桩处理路堤技术现场试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(9): 12 - 17.(XU Zhengzhong, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Field test on technique of cap-pile supported embankment[J]. Chinese Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(9): 12 - 17.(in Chinese))
- [17] British Standard Institute. British standard 8006 strengthened/reinforced soils and other fills[S]. London: British Standard Institute, 1995: 162.
- [18] Nordic Geotechnical Society. Nordic handbook-reinforced soils and fills[S]. Stockholm: Nordic Geotechnical Society, 2002.
- [19] Deutsche Gesellschaft fur Geotechnik E V. Entwurf der empfehlung "bewehrte erdkorper auf punkf-order linienfomigen tragglindern" [S]. Berlin: Ernst and Sohn, 2004.