

桩间距和桩帽宽度影响土拱效应的现场试验

陈 洋¹, 李国维², 杨 涛¹, 马鹏真¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

摘要: 为了研究桩间距和桩帽宽度对桩承式加筋路堤土拱效应的影响,在广清高速公路拓宽工程庆丰收费站进行了现场试验,实测了路堤荷载下不同桩间距和桩帽宽度下桩帽及桩间土表面的竖向土压力,据此获得土拱高度与桩帽净距的关系.试验结果表明,桩间土表面竖向应力近似均匀分布.当桩帽净距数值超过1.0 m以后,土拱高度随桩帽净距的增加而减小.桩帽-土应力比随路堤荷载的增加而增大,随桩帽宽度和桩间距的增加而减小.桩帽荷载分担比随路堤荷载和桩帽宽度的增加而增大,随桩间距的增加而减小.桩间土荷载分担比随路堤荷载和桩帽宽度的增加而减小,随桩间距的增加而增大.

关键词: 桩承式加筋路堤; 土拱效应; PHC 桩; 桩帽-土应力比; 荷载分担比

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

Field Tests on the Effects of the Spacing of Piles and Width of Pile Caps on the Soil Arching

CHEN Yang¹, LI Guowei², YANG Tao¹, MA Pengzhen¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of the center-to-center spacing of piles and the width of pile caps on the soil arching in a piled embankment with reinforcements, field tests were performed at the Qing Feng toll station constructed on a geogrid-reinforced and PHC pile-supported embankment in the Guangzhou-Qingyuan highway extension project. The contact pressures acting on the pile caps and the surrounding soil were measured in the conditions of different widths of pile caps and spacings of piles, and the relation between the height of soil arch and the clear spacing of pile caps was obtained. The test results show that the vertical stress in the surrounding soil is distributed uniformly. The height of soil arch decreases with the increasing of the clear spacing of pile caps when the spacing is larger than 1.0 m. The pile cap-soil stress ratio increases with the increasing of the embankment load, while decreases with the increasing of the width of pile caps and the spacing

收稿日期: 2016-12-16

基金项目: 广东省交通运输厅科技项目(201102021); 上海理工大学国家级项目培育计划(16HJJPY-MS03)

第一作者: 陈 洋(1991-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 地基处理与桩基础. E-mail: cyext@qq.com

通信作者: 杨 涛(1962-), 男, 教授. 研究方向: 软土地基加固技术与复合地基理论. E-mail: shyangtao@163.com

of piles. The load sharing ratio carried by the pile caps increases with the increasing of the embankment load and the width of pile caps, while decreases with the increasing of the spacing of piles. The load sharing ratio carried by the surrounding soil decreases with the increasing of the embankment load and the width of pile caps, while increases with the increasing of the spacing of piles.

Keywords: *piled embankment with reinforcements; soil arching effect; PHC pile; pile cap-soil stress ratio; load sharing ratio*

工程实践表明,软土地区公路和铁路建设中采用桩承式加筋路堤技术,施工速度快,路堤沉降、不均匀沉降和侧向变形小且稳定性好.因此,桩承式加筋路堤在国内外公路和铁路建设中都得到了广泛的应用.

根据路堤中是否加筋,桩承式路堤分为无筋和加筋桩承式路堤这两种类型.桩承式加筋路堤由路堤填料(包括砂石垫层)、水平加筋体、带帽刚性桩、地基土4部分组成,4部分彼此相互作用,承载机理非常复杂.国内外学者通过室内缩尺模型试验研究了桩承式路堤的承载特性^[1-10],包括土拱形态、土拱效应以及它们各自的演化过程、加筋拉膜效应及其机理以及各因素的影响.由于现场试验可以考虑实际工程的地质和路堤荷载条件,克服了模型试验中模型尺寸效应的影响,所以,桩承式路堤现场试验越来越受到重视.Liu等^[11]和Chen等^[12]分别对上海和浙江省软土地区上的无筋和加筋桩承式路堤进行了现场试验.Wachman等^[13]和Briançon等^[14]分别在美国和法国进行了软土地基上桩承式加筋路堤现场试验.郑俊杰等^[15]针对中低压缩性土地基上的宁—安城际铁路桩承式加筋路堤进行了现场试验.在这些现场试验中,通过桩帽和桩间土顶面竖向压力、土工格栅应变、地基土孔隙水压力、桩帽顶和桩间土沉降以及地基土侧向位移等项目的观测,验证了土拱效应和加筋拉膜效应,评价了桩承式无筋和加筋路堤地基土固结特性及控制路堤沉降的效果.

带帽PHC(预应力高强混凝土)桩桩承式加筋路堤在我国的应用越来越多.由于PHC桩混凝土强度等级很高(大于C60),这就为采用疏桩加固方案创造了条件.迄今为止,通过现场试验研究桩间距和桩帽宽度对桩承式加筋路堤承载特性影响的成果不多.广清高速公路扩建工程庆丰收费站采用了大面积PHC桩桩承式加筋路堤技术,本文通过现场试验,分析、比较了不同桩间距和桩帽宽度条件下桩承式加筋路堤中土拱高度与土拱效应特性,期为工

程设计提供参考.

1 现场试验

1.1 工程概况

广东省广州—清远高速公路改扩建工程起点为庆丰收费站K2+890,终点位于横荷立交K60+450,路线全长57.56 km,正常加宽方式为双侧拓宽,每侧拓宽8.25 m,扩建后为8车道,路基宽度41 m,设计车速100 km/h.

工程先行试验段位于庆丰段至朝阳段之间.为了研究不同桩间距和桩帽宽度下桩承式加筋路堤的土拱效应,选择横向处理宽度达47.1~65.4 m,可容纳12出货车的庆丰收费站左幅(K4+450—K4+550)路堤作为本次现场试验场地,该试验段拓宽路堤采用悬臂式挡土墙代替路堤放坡.试验段地基土自上而下分布如下:a.素填土,厚度约0.8~1.2 m,灰褐~褐黄色,软塑~可塑状;b.淤泥,厚度约7.2~9.2 m,灰黑~深灰色,流塑~软塑状,含粉细砂,为主要软弱土层;c.淤泥质粉质粘土,厚度1.5~3.6 m,灰~深灰色,软塑状;d.粗砂,3.5~5.7 m,稍密~中密状;e.全风化~强风化砂岩.主要土层的天然含水量 ω 、孔隙比 e 、压缩模量 E_s 、凝聚力 c 和内摩擦角 φ 等物理力学性质参数如表1所示.

表1 试验段土层物理力学性质参数

Tab.1 Physico-mechanical parameters of subsoil

土层	$\omega/\%$	e	E_s/MPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
素填土	23.8	0.72	3.4	17.3	23.1
淤泥	65.4	1.86	2.2	7.0	14.0
淤泥质粉	45.9	1.34	3.5	16.0	7.4
质粘土	45.9	1.34	3.5	16.0	7.4

试验段路堤填土高度约3.82~4.06 m.软基采用带帽PHC管桩+碎石垫层+钢塑土工格栅加固.PHC桩型号为PHC-A300(70),外径0.3 m,壁厚

0.07 m. 方形桩帽厚度 0.4 m. 桩顶铺设厚 0.4 m 的碎石垫层. 垫层中部和顶面各铺设一层土工格栅, 格栅极限抗拉强度为 80 kN/m. 设计桩长 9~13 m, 桩端穿透淤泥和淤泥质粉质粘土进入粗砂层. 图 1 为试验段地基加固现场图.

1.2 试验方案

为了研究预应力 PHC 桩桩间距和桩帽尺寸的变化对桩帽-土荷载分担与传递特性的影响, 分别在 K4+460—K4+510 和 K4+510—K4+560 断面之间设计了桩间距 $s=3.0$ m 和 $s=2.5$ m、桩帽宽度 $a=1.2$ m 和 $a=1.5$ m 共 4 种工况下的现场试验, 如表 2 所示, 表中给出了相应工况下的桩帽净距.



图 1 试验段地基加固现场

Fig.1 Test field with ground improved

表 2 试验工况

Tab.2 Test conditions

位置	工况	a/m	s/m	$(s-a)/m$
K4+510—K4+560	A1	1.2	2.5	1.3
	A2	1.5	2.5	1.0
K4+460—K4+510	B1	1.2	3.0	1.8
	B2	1.5	3.0	1.5

试验采用常州金土木工程仪器有限公司生产的 JTM-V2000A 型振弦式二次感应土压力计测量桩帽和桩间土表面土压力, 土压力计量程 0.6 MPa. 现场埋设采用砂垫层法: 在桩帽顶面和桩间土表面铺设 5 cm 左右的细砂并夯实, 使桩帽顶面与桩间土表面在同一高程, 然后在桩顶、二桩中间和四桩中心桩间土处放置土压力计, 再铺设 10~15 cm 厚的细砂并夯实, 最后将土压力计的导线通过 PVC 管引出基底范围以便后期测量, 如图 2 所示. 图 3 给出了试验场中 2-8[#] 和 3-12[#] 这 2 根 PHC 桩单桩静荷载试验获得的荷载-沉降曲线, 可见 $P-S$ 曲线呈陡降型, 2 根 PHC 桩单桩极限承载力分别超过 240 kN 和 300 kN. P 为荷载, S 为沉降.

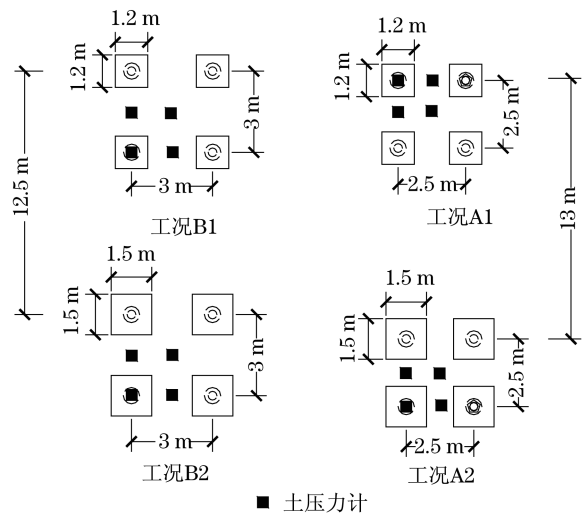


图 2 土压力计布置图

Fig.2 Arrangement of earth pressure cells

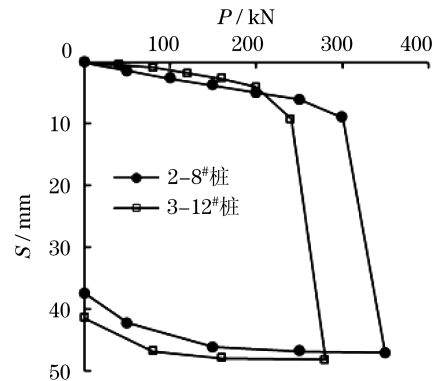


图 3 单桩静荷载试验曲线

Fig.3 Static loading test curves

2 试验结果及分析

图 4 给出了试验点路堤填筑厚度时程线, B1 和 B2, A1 和 A2 工况试验点分别位于 K4+500 和 K4+530 断面附近, 路堤填土重度为 19.12 kN/m^3 . t 为时间. 图 4 表明, 试验结束时 K4+500 和 K4+530 断面的填筑高度分别为 3.04 m 和 3.88 m. 由于试验段地处大面积填土的庆丰收费站, 受力变形类似桩承式加筋路堤, 与主线上标准拓宽路堤不同.

图 5 为试验获得的 4 个工况下桩帽与桩间土表面土压力随填土荷载的变化曲线, 填土荷载是根据土的重度和填土厚度计算的近似值. 从图 5 可以看出, 4 个工况下四桩中心桩间土土压力测值与二桩中心桩间土土压力测值非常接近, 说明桩间土表面竖向应力接近均匀分布. 随着路堤填筑高度的增加,

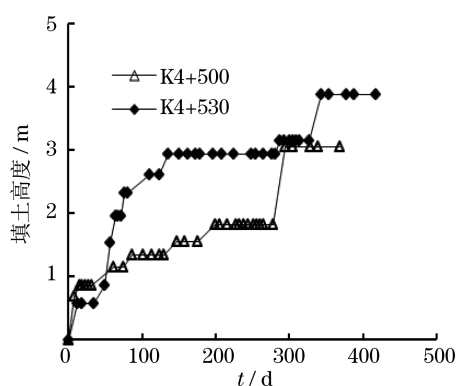


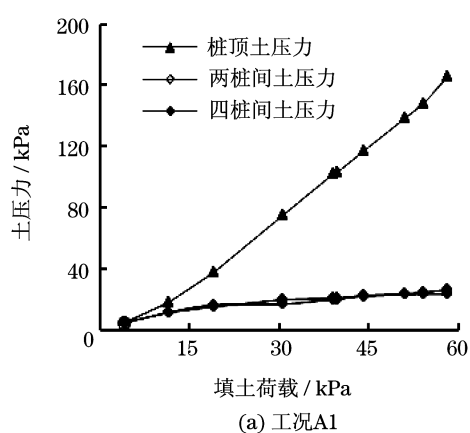
图4 填土厚度时程线

Fig.4 Embankment height with time at two sections

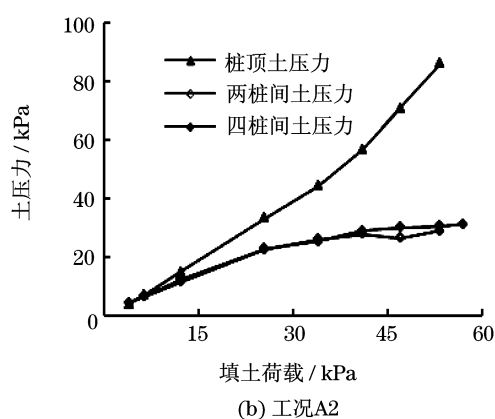
填土荷载逐渐增大,桩帽与桩间土表面土压力逐渐增大.路堤荷载小于13 kPa时,桩帽与桩间土上的竖向应力数值相差较小,说明土拱效应并不明显.路堤荷载超过13 kPa以后,桩帽上的土压力随路堤荷载的增加迅速增大,而桩间土表面的土压力则增长较为缓慢.当A1,A2和B1,B2工况试验段的路堤荷载分别超过50 kPa和45 kPa以后,各工况桩间土表面土压力数值趋于稳定,说明此时土拱效应已完全发挥.路堤填筑到桩间土上土压力不再变化时,路堤中可形成完整的土拱.图6(见下页)给出了土拱高度 h 随桩帽净距 $s-a$ 的变化曲线.图6表明,当桩帽净距超过1.0 m以后,土拱高度随桩帽净距的增加而减小,桩帽净距从1.0 m增加到1.8 m,土拱高度从2.82 m减小到2.33 m,减小了约17.3%.

图7(见下页)给出了桩间距分别取 $s=2.5$ m和 $s=3.0$ m情况下桩帽宽度对桩帽-土应力比的影响.从图7中可以发现,桩帽-土应力比随路堤荷载的增加而增大,在桩间距一定的条件下,桩帽宽度为1.2 m时,桩帽-土应力比较之桩帽宽度为1.5 m时的要大,说明桩帽-土应力比随桩帽宽度的增加而减小.图8(见下页)给出桩帽宽度分别取 $a=1.0$ m和 $a=1.5$ m情况下桩间距对桩帽-土应力比的影响.图8表明,在桩帽宽度一定的条件下,桩间距为2.5 m时,桩帽-土应力比较之桩间距为3.0 m时的要大,说明桩间距越大,桩帽-土应力比数值越小.路堤填筑结束时,工况A1和A2的桩帽-土应力比分别为10.1和6.6,工况B1和B2的桩帽-土应力比分别为6.7和5.1.

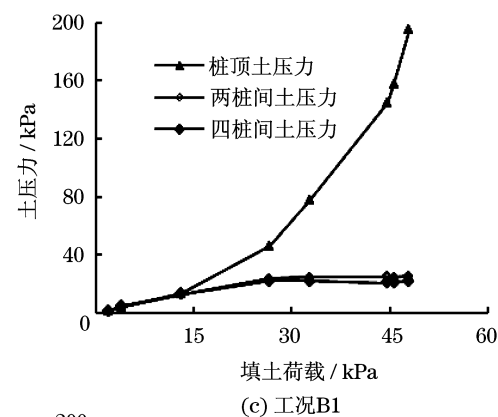
桩帽和桩间土分担路堤荷载的比例可由桩帽荷载分担比和桩间土荷载分担比来表示.图9(见下页)给出了桩间距 $s=2.5$ m时不同桩帽宽度下的桩帽和桩间土各自的荷载分担比随路堤荷载的变化曲线.



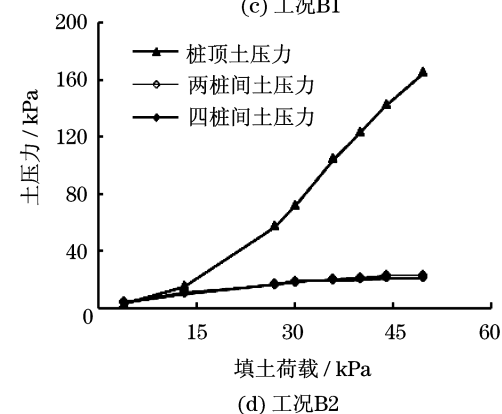
(a) 工况A1



(b) 工况A2



(c) 工况B1



(d) 工况B2

图5 桩帽与桩间土上土压力的变化曲线

Fig.5 Variation of the earth pressure on pile caps and soils with embankment load

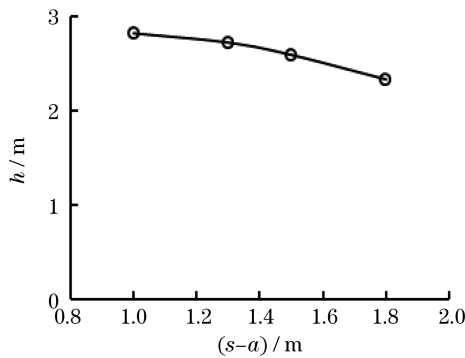


图6 土拱高度随桩帽净距变化的曲线
Fig.6 Variation of h with $(s-a)$

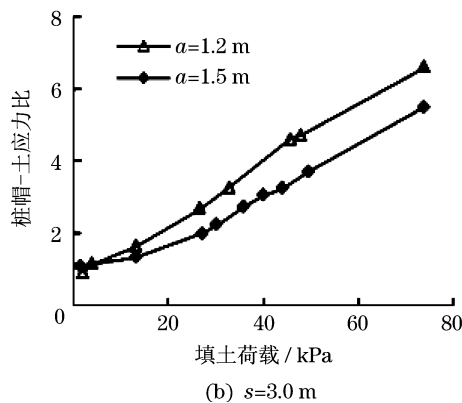
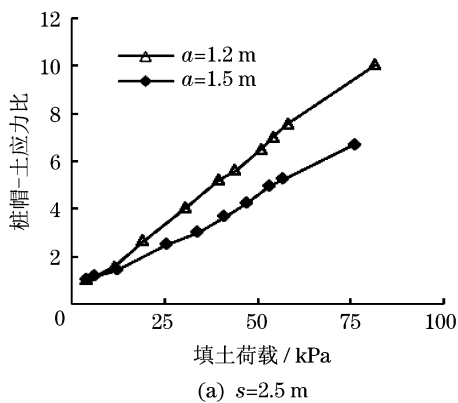


图7 桩帽宽度对桩帽-土应力比的影响

Fig.7 Effect of the width of pile caps on the pile cap-soil stress ratio

图9表明,桩帽荷载分担比随路堤荷载的增加而增大,桩间土荷载分担比随路堤荷载的增加而减小.保持桩的间距不变,桩帽荷载分担比随桩帽宽度的增加而增大,桩间土荷载分担比随桩帽宽度的增加而减小.路堤填筑结束时,桩帽宽度 $a=1.2$ m和 $a=1.5$ m两种情况下桩帽荷载分担比约为75%和79%,桩间土荷载分担比约为25%和21%.

图10给出了桩帽宽度 $a=1.2$ m时不同桩间

距下桩帽和桩间土荷载分担比随路堤荷载变化的曲线.从图10可见,桩帽荷载分担比随桩间距的增加而减小,桩间土荷载分担比随桩间距的增加而增大.桩间距从2.5 m增加到3.0 m,路堤填筑结束时桩帽荷载分担比从75%降低到59%,而桩间土荷载分担比从25%增加到41%.

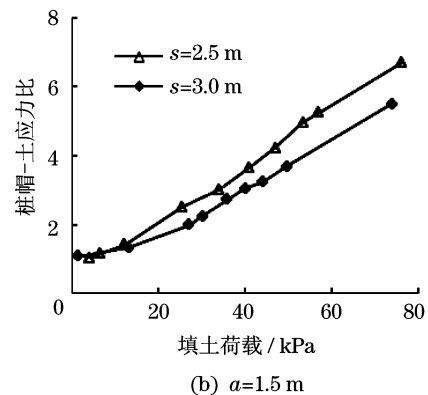
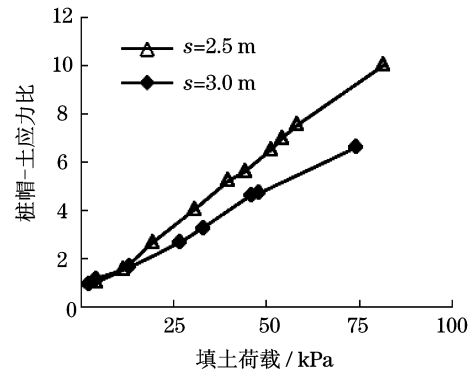


图8 桩间距对桩帽-土应力比影响

Fig.8 Effect of the pile spacing on the pile cap-soil stress ratio

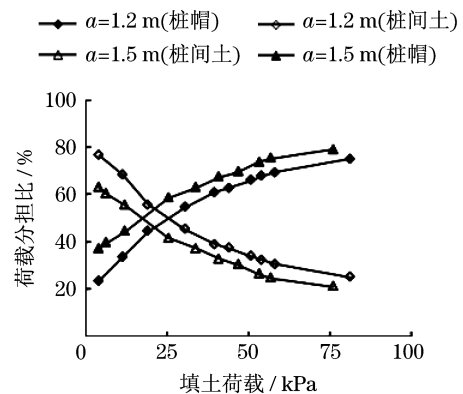


图9 桩帽宽度对桩帽和桩间土荷载分担比的影响
Fig.9 Effect of the width of pile caps on the load sharing ratio between the pile caps and the surrounding soil

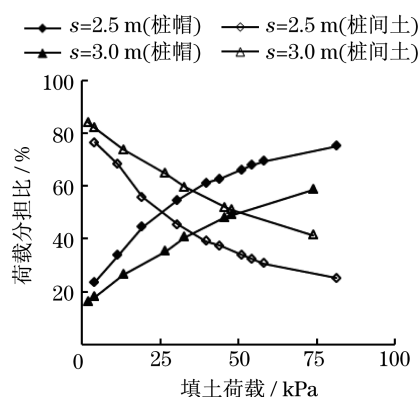


图 10 桩间距对桩帽和桩间土荷载分担比的影响

Fig.10 Effect of the pile spacing on the load sharing ratio between the pile caps and the surrounding soil

3 结 论

a. 四桩中心桩间土表面土压力测值与二桩中心桩间土表面土压力测值近乎相等,据此可以认为,桩承式加筋路堤中桩间土表面竖向应力接近均匀分布。

b. 桩帽净距大于 1.0 m 以后,土拱高度随桩帽净距的增加而减小。桩帽净距从 1.0 m 增加到 1.8 m,土拱高度从 2.82 m 减小到 2.33 m。

c. 桩帽-土应力比随路堤荷载的增加而增大,随桩帽宽度和桩间距的增加而减小。

d. 桩帽荷载分担比随路堤荷载和桩帽宽度的增加而增大,随桩间距的增加而减小。桩间土荷载分担比则相反,其随路堤荷载和桩帽宽度的增加而减小,随桩间距的增加而增大。

参考文献:

- [1] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12-18.
- [2] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(11): 1917-1938.
- [3] HONG W P, LEE J H, LEE K W. Load transfer by soil

arching in pile-supported embankments[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(5): 833-843.

- [4] ELLIS E A, ASLAM R. Arching in piled embankments: comparison of centrifuge tests and predictive methods-part 1 of 2[J]. Ground Engineering, 2009, 42(6): 34-38.
- [5] VAN EEKELLEN S J M, BEZUIJEN A, LODDER H J, et al. Model experiments on piled embankments. Part I [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32(1): 69-81.
- [6] 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.
- [7] 蔡德钧,闫宏业,叶阳升,等. 桩网支承路基结构中土拱效应及网垫受力的模型试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(11): 85-92.
- [8] 曹卫平,胡伟伟. 桩承式加筋路堤三维土拱效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 351-358.
- [9] 芮瑞,黄成,夏元友,等. 砂填料桩承式路堤土拱效应模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2082-2089.
- [10] 费康,陈毅,王军军. 加筋形式对桩承式路堤工作性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2312-2317.
- [11] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1483-1493.
- [12] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M, et al. Field tests on pile-supported embankments over soft ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6): 777-785.
- [13] WACHMAN G S, BIOLZI L, LABUZ J F, et al. Structural behavior of a pile-supported embankment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1): 26-34.
- [14] BRIANÇON L, SIMON B. Performance of pile-supported embankment over soft soil: full-scale experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(4): 551-561.
- [15] 郑俊杰,曹文昭,董同新,等. 中低压缩性土地区桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1549-1555.

(编辑:石 瑛)