

桩承式加筋路堤土拱效应现场试验

陈庚^{1,2}, 陈永辉^{1,2}, 徐锴³, 齐昌广^{1,2}, 蔡锐⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 4. 南通沿海开发集团 城镇建设有限公司, 江苏 南通 226006)

摘要:为研究桩承式加筋路堤填土中竖向应力分布和土拱效应临界高度的变化规律,依托塑料套管现浇混凝土桩(TC桩)承式路堤现场试验,在填筑预压期对桩帽、桩间土及不同填土高度处土压力进行全过程监测,分析了路堤填筑及预压过程中桩土间的荷载传递规律,同时结合土拱设计高度计算方法,研究填土中竖向应力分布和土拱效应临界高度的变化规律,对多种土拱形式的假定进行了现场试验验证分析,并基于试验结果,开展了路堤土拱形成的参数讨论。研究表明:填土高度约达到0.5倍桩间距时,桩帽上压力实测值大于该处路堤荷载,且桩土应力比大于1,表明路堤载荷开始从桩间土向桩体转移,路堤内土拱初步形成;填土高度约达到0.9倍桩间距后,后续填土对桩间土压力变化影响较小,说明路堤已形成完整稳定的土拱;观测到的土拱等沉面的高度为1.2~1.5 m,大于德国EBGEO规程计算值,小于英国BS 8006规范计算值;与滑动面为沿桩顶轮廓线向上的假定与应力扩散理论相比,路堤中竖向土压力分布趋势与圆形土拱假定计算结果相符,但试验所得土压力测量值仅为理论计算值的50%和30%。因桩承式加筋路堤中桩间土压力随其距桩的位置不同会有明显不同,故建议采用桩土应力比联合桩帽上土压力大小综合判定桩承式加筋路堤的土拱形成。

关键词:道路工程;桩承式加筋路堤;土拱效应;现场试验;等沉面高度;桩土应力比
中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A

Field test on soil arching in pile-supported reinforced embankment

CHEN Geng^{1,2}, CHEN Yong-hui^{1,2}, XU Kai³, QI Chang-guang^{1,2}, CAI Rui⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 4. Cities and Towns Construction Co. Ltd., Nantong Coastal Development Group, Nantong 226006, Jiangsu, China)

Abstract: In order to research the vertical stress distribution in filling and critical height of soil arch effect, the stress of pile cap, soil between piles and fill at different height were monitored and recorded, on the basis of field test on plastic tube cast-in-place concrete pile (TC pile)-

收稿日期:2016-01-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51178160);水利部公益性行业科研专项经费项目(201201015);浙江省交通运输厅科技计划项目(2014H13)

作者简介:陈庚(1987-),男,山东淄博人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:yushan007@126.com。

supported embankment, the load transfer during the periods of embankment filling and preloading was analyzed. Meanwhile, vertical stress distribution in filling and critical height of soil arch effect was studied, assumptions about the soil arch was compared with the test results. Based on the experimental results, parameters of embankment soil arch were also discussed. The results show that the pile-soil stress ratio is more than 1 and the measured values of earth pressures on pile cap is bigger than the embankment load when the filling height of embankment approaches to 0.5 times of pile spacing, which indicates that embankment load begins to transfer from soils to piles and soil arching is initially formed. When height of the embankment is close to 0.9 times of pile spacing, the corresponding earth pressures in soils change little, which reveals that the complete and stable soil arching has been produced, the change range of soil arching root be carried as the reason. The measured height of equal settlement plane is between the calculated values of EBGeo and BS 8006. The monitoring of earth pressures in embankment demonstrates that soil arching is in a shape of semicircular. However, the measured values of earth pressures on pile cap and cushion are 50% and 30% of the calculated results from semicircular soil arching theory. Pile-soil stress ratio with the value of earth pressure on pile is suggested to judge the formation of soil arch in pile-supported reinforced embankment. 2 tabs, 7 figs, 22 refs.

Key words: road engineering; pile-supported embankment; soil arching effect; field test; height of equal settlement plane; pile-soil stress ratio

0 引言

桩承式加筋路堤因其因施工速度快、造价低和沉降控制显著而在道路、市政、机场和堤坝等建设中得到广泛应用^[1-3]。在桩承式加筋路堤的填筑中,路堤荷载会在桩土间进行传递和调整,使桩体承担大部分路堤荷载,从而形成“土拱效应”,在路堤荷载的传递和调整过程中,路堤中差异沉降为 0 的平面为等沉面^[4-7]。土拱效应不仅使路堤荷载从桩间土向桩体上转移,而且还可有效减少桩土间的不均匀沉降^[8]。而土拱效应与等沉面高度和桩土荷载分担比等重要设计参数存在紧密联系,因此分析桩承式加筋路堤中土拱效应具有重要的科学研究和工程实用价值^[9]。

土拱效应首次由 Terzaghi 通过活动门试验发现,在最近几十年中,许多学者通过理论分析、试验和数值模拟等方法对土拱效应进行了研究^[4]。如 Chen 等求解了一维土拱平衡方程^[10]; Handy 研究了挡土墙中二维土拱造成的应力重分布,并基于最小主应力为悬垂线的假定,推导了单元土体的平衡方程^[11];随后 Harrop-Williams 对 Handy 的假定进行了讨论,并对土拱外形进行了修正,证明在二维情况下土拱外形可近似为圆环^[12];Low 等进行了二维桩承式加筋路堤模型试验,在砂土填筑的二维条件下可认为土拱形式为半圆环形^[13];Hewlett 等进行

了桩承式加筋路堤模型试验,提出用球形土拱来表征载荷在填料中的重分布^[14];Naughton 假定土拱剪切面为对数螺旋线并进行了等沉面高度的计算^[15];Raithel 等介绍了 Zaeske 采用室内试验进行土拱的穹顶处理,并采用深土压力计分析填料中的竖向应力分布,研究填料土拱穹顶的竖向应力分布规律^[16];费康等对等沉面高度、填料土拱效应作用下的竖向应力分布等进行分析,对桩间距、填土高度、填土材料等进行了敏感性分析,并通过现场试验和数值分析对大直径薄壁管桩为桩体的 GRPS 路堤系统进行研究,分析桩土应力比、应力折减系数及土工格栅拉力等变化^[5-6,17-19];Liu 等通过路堤填筑荷载下 Y 型沉管灌注桩加筋路堤的现场试验研究,分析了桩土应力比及荷载分担比在路堤填筑荷载下的变化趋势及规律^[20]。

综上所述,桩承式加筋路堤荷载的传递和调整是一个十分复杂的过程,而相比于模型试验、理论分析和数值模拟,现场试验更加直接和有效,但目前在土拱效应的现场试验中,多是通过桩土荷载分担比的变化进行土拱效应研究,而对于不同填土高度处路堤竖向应力分布的研究较少,也未有针对路堤内部荷载调整全过程及等沉面变化进行研究。鉴于此,本文依托塑料套管现浇混凝土桩(以下简称 TC 桩)承式加筋路堤的现场试验,开展路堤填土过程中荷载传递调整的全过程分析;并结合土拱设计高度

计算方法,研究填土中竖向应力分布和土拱效应临界高度的变化规律;还对多种土拱形式的假定进行了现场试验验证分析。

1 试验段路堤设计参数及地质参数

1.1 路堤设计参数

试验段为浙江省内某高速公路,设计路基宽度为 42 m,路堤填筑高度为 3.5 m,1∶1.5 角度放坡。地基处理形式为 TC 桩复合地基,其中 TC 桩直径 d 为 20 cm,桩长 10 m,桩帽为圆形,其直径 a 为 50 cm,桩帽高度为 20 cm,桩身及桩帽均采用 C25 混凝土浇注,打设桩间距 s 为 150 cm,是梅花形布

桩;加筋垫层厚度为 0.5 m,加筋材料位于与桩帽垂直距离 30 cm 处,为高强整体式钢丝格栅,格栅刚度为 9.0×10^4 kN/m。

1.2 土性参数

试验段地处申嘉湖平原,地形平坦,地质概况为:②-1 粉质粘土,灰黄色,可塑,表层含植物根茎;②'-2 粉质粘土,灰色,软塑,饱和;②-2 淤泥质粉质粘土,灰色,流塑,饱和,含腐殖质;③-1 粉质粘土,灰黄色,可塑,饱和;③-4 粉质粘土,灰色,软塑,饱和;④-2 粉质粘土,灰色,可塑,饱和,夹粉土;④-5 粉土,灰色,中密~密实,饱和。具体物理力学指标详见表 1。

表 1 试验段各地基土层的特性
Tab. 1 Properties of each soil layer in test section

土层编号	土层名称	土层厚度/ m	天然含水 率/%	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	空隙比 e	塑限 w_p	液限 w_L	压缩模量 E_s/MPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
②-1	粉质粘土	3.2	29.4	18.9	0.855	25.7	38.4	5.01	42.0	9.2
②'-2	粉质粘土	2.0	36.8	18.7	0.990	26.1	40.2	3.03	13.0	3.4
②-2	淤泥质粉质粘土	3.5	40.2	18.3	1.093	25.6	40.7	2.76		
③-1	粉质粘土	9.8	30.6	19.5	0.762	26.6	41.6	7.96	67.0	7.6
③-4	粉质粘土	4.4	34.5	18.6	0.951	23.7	37.5	4.79	50.0	16.7
④-2	粉质粘土	3.8	26.2	19.8	0.727	22.1	32.4	5.57	8.0	15.2
④-5	粉土	12.1	21.4	20.3	0.616	22.0	28.5	15.27	19.0	32.7

加筋垫层使用碎石填料,加筋垫层上部路堤填料使用普通宕渣,其填料内摩擦角 $\varphi=35^{\circ}$,不考虑路堤填料的粘聚力 c ;填料压缩模量取为 20 MPa,宕渣重度均记为 19×10^3 kN/m³。

1.3 试验段仪器埋设

本试验预先在现场路堤填筑过程中埋设土压力计以测试某一高度平面上的上覆压力,并与正常状况下的土压力对比,以研究路堤等沉面在路堤填筑与预压过程中的变化。根据部分国外加筋垫层桩支承路基的计算方法,结合现场填土计划,确定路堤中土压力计的埋设高度,具体埋设高度见表 2^[21-22]。其中,按北欧 Nordic 手册中的土拱高度,现场试验预埋设高度为 190 cm,但由于施工原因致使仪器损坏,故以下试验数据分析中不再涉及此高度。

现场试验所用土压力测试仪器为振弦式土压力计(型号:TXR-2020),量程分为 0.2、1.0 MPa 这 2 种,其中,桩帽范围及其对应的路堤填土 0.5 m 内采用量程为 1.0 MPa 的土压力计(T3、T4),其余位置采用量程为 0.2 MPa 的土压力计,测试仪器的电缆长度可根据具体埋设位置确定。测试仪器具体埋设过程:①埋设桩土界面土压力计 T1、T2 及 T3,在土压力计下铺设 1 层 5 cm 厚的细砂,且

在其上掩埋细砂以确保其受力均匀,同时在相邻桩帽上铺设相同厚度的细砂以保证相邻桩的受力环境与设置土压力计的桩相同;然后使用全站仪进行水平定位,并按设计高度埋设路堤中的土压力计 T4、T5、T6 和 T7,测试仪器具体埋设位置见下页图 1。仪器的检测频率为路堤填筑期 3 d 一次(每次填土前后必进行检测);路堤设计预压期 1 周 1 次;路堤沉降稳定后为 10 d 一次。

表 2 不同桩承式加筋路堤设计方法中等沉面高度
Tab. 2 Heights of equal settlement plane using different design methods of pile-supported embankment

部分国外规范	英国 BS 8006	北欧 Nordic 手册	日本细则	德国规程 EBGEO
计算公式	$1.4(s-a)$	$0.5(s-a)\tan(15^{\circ})$	$0.7(s-a)$	$s_{\max}/2$
等沉面 高度/cm	140	187	70	129
设计埋设 高度/cm	150	190	70	120

注:日本细则中土拱格栅垫层与填土层的应力扩散角分别为 45° 和 30° 。

2 试验结果分析

2.1 路堤沉降

试验段在 2011 年 7 月 12 日开始填筑,至 2011

2个与土拱效应相关的高度:土拱形成高度(0.5s)与完全土拱高度(即0.9s)。

通过对几组不同时间路堤中桩体对应范围内监测数据的分析,进一步讨论土拱效应形成变化过程。如图4所示,2条重力线分别表示填筑过程中不同填筑高度下的路堤填料 L 值,第32、50 d的填筑高度分表为2.65、3.50 m;分别选择第32、122、175、254及373 d的土压力数值研究填土预压全过程的填料载荷在不同高度处的应力分布。

在填筑中期(第32 d,填高2.65 m)时,在埋设高度大于1.2 m处土压力计(T_6 、 T_7)的测值与其高度对应的 L 值相符;而在第50 d路堤填筑至3.5 m后, T_6 的测值小于相应的 L 值,表明填土高度大于完全土拱高度后,其等沉面仍需经过一定时间才能调整至此高度。在第122 d时,路堤沉降趋于稳定且沉降速率稳定,此时 T_6 测值与相应的 L 值相符,表明路堤中土拱效应的形成过程与路堤沉降具有联系,且本试验表明等沉面的调整范围应在1.2~1.5 m之间,即EBGEO规程计算值与BS 8006规范计算值之间。

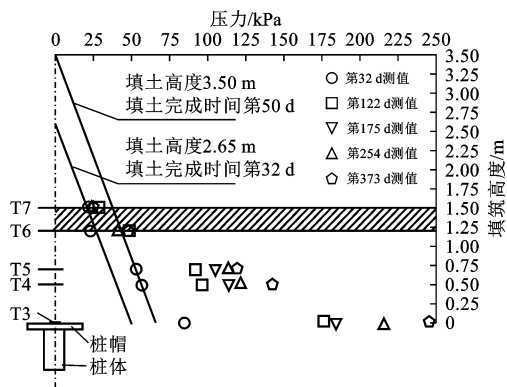


图4 监测期内桩顶上部竖向土压力与填筑荷载的对比

Fig. 4 Comparison between vertical earth pressures at different heights on top of pile and filling loads during monitoring period

2.3 带有碎石垫层的桩承式加筋路堤的土拱形式

对应不同土拱形式,路堤中桩体对应范围内的竖向应力分布也不同。本文通过实测路堤中桩体对应范围内的竖向应力分布,反推验证土拱合理结构形式。Terzaghi假设填土中的滑动面为沿桩顶轮廓线向上的竖直面,根据桩顶上微分土体竖向力的平衡及边界条件可以得到竖向应力 σ_v 的分布^[10]

$$\sigma_v = \frac{\gamma(s^2 - a^2)}{4aK \tan(\varphi)} [1 - \exp(\frac{-4aK \tan(\varphi)}{s^2 - a^2} z)] \quad (1)$$

$$\sigma_v = \frac{\gamma(s^2 - a^2)}{4aK \tan(\varphi)} \{1 - \exp[\frac{-4aK \tan(\varphi)}{s^2 - a^2} (z - H + h_c)]\} \quad (2)$$

式中: γ 为填土重度(kN/m^3); K 为破坏面上的土压力系数(建议取1.0); z 为填土自表面向下的距离(m)。

如图5所示, A 线为滑动面为竖向平面假定下的理论解连线,此时填土高度为3.5 m,其中 A_1 为等沉面高度假定为1.2 m的理论解, A_2 为等沉面高度假定为1.5 m的理论解;当采用应力扩散角理论进行路堤中应力重分布分析时,参照日本细则的建议值,碎石格栅垫层扩散角为 45° ,填土扩散角为 30° ,其桩帽上方应力分布计算值如 B 线,其中 B_1 为填土高度为2.65 m的理论解, B_2 为填土高度为3.5 m的理论解;针对滑动面为圆形土拱的假定,可认为桩帽范围内的等沉面土体承受其上部土体及相邻土拱等沉面上部土体的载荷,该圆拱形式假定情况下的计算值为 C 线,其中 C_1 为填土高度为2.65 m的理论解, C_2 为填土高度为3.5 m的理论解。

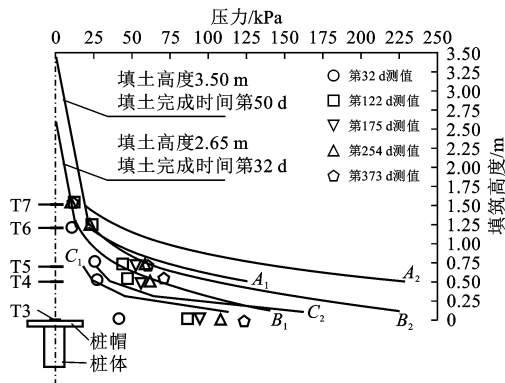


图5 不同土拱滑动面假定下路堤填土竖向土压力分布

Fig. 5 Distributions of vertical earth pressures calculated from different assumptions of sliding surface

如图5所示,采用竖向滑动面假定时(A 线),填土中桩帽范围上的理论值均大于实测值,且在碎石垫层中的理论计算值远大于实测值(A_1 线与 A_2 线在桩帽上的竖向应力值分别为821、1 469 kPa);采用应力扩散角理论(B 线)计算时,填土中桩帽范围上碎石垫层的理论计算值大于实测值,但碎石垫层上部的普通填土计算值小于实测值,需要说明的是,该方法的等沉面高度在本试验中应为0.7 m。尽管应力扩散法得出的等沉面高度较实测高度有很大差异,但其填土中的应力变化规律却与实测结果具有一定规律性:碎石垫层内竖向应力随深度的变化率大于上覆填土的竖向应力随深度的变化率。

采用滑动面为圆拱假定时(C 线),当填土高度

为 2.65 m 时,其计算值与实测值相差较大,这是因为在填土当天进行测试时路堤沉降速率较大,该填土高度的稳定土拱尚未形成,故其值近似于无土拱作用的竖向应力分布;当填土高度为 3.5 m 时,填土层的实测值随着时间的变化不断逼近计算值,但碎石垫层内的竖向应力计算值大于实测值,这可能是因为碎石垫层内含土工钢丝格栅,钢丝格栅随时间发生徐变使得原作用于桩间土的上部荷载进一步向桩体上转移,但这一过程需较长时间。

如图 6 所示,作为桩承式地基重要参数,其桩土应力比也随时间而不断增大,至第 373 d 其值为 11.6,且仍缓慢增长,说明尽管填土中的应力调整基本稳定,但桩体及其上碎石垫层内的荷载还在调整中。

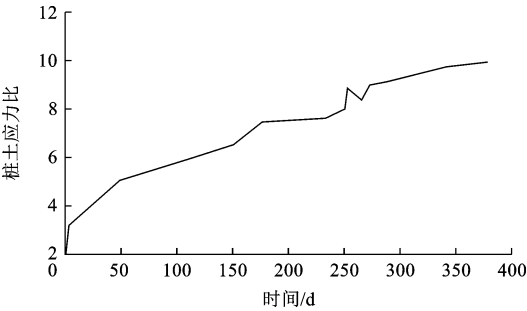


图 6 桩土应力比变化曲线
Fig.6 Curve of pile-soil stress ratio

2.4 路堤土拱形成的试验参数

桩承式加筋路堤的现场试验通常从桩土界面土压力值判断土拱现象的产生及其发展,一般认为当桩间土所受竖向应力小于其上覆填土重力荷载时,或桩土应力比大于 1 时,即认为产生土拱效应。

图 7 中的填筑高度由填土荷载线反应(填土重度为 19 kN/m³)可以看出,当填土高度为 0.5 m 时,桩土应力比为 1.13;当填土高度大于 1.0 m 时,桩间土的测值小于其上覆填土荷载;但通过路堤埋设的土压力计的分析得到,当填土高度大于 0.7 m 时,桩帽上的土压力计 T3 的测值大于其上覆填土荷载,此时竖向荷载已开始向桩帽范围内的土体转移。说明在桩承式加筋路堤系统中采用桩土界面的土压力测值来判断土拱高度会有一定的模糊性,原因是桩间土压力随其与桩的相对位置不同会有明显不同,且由桩间土压力得出的土拱效应作用时间较桩帽范围内的测试数据要迟缓。因此,应采用桩土应力比联合桩帽上测值来判断路堤中土拱效应的产生。

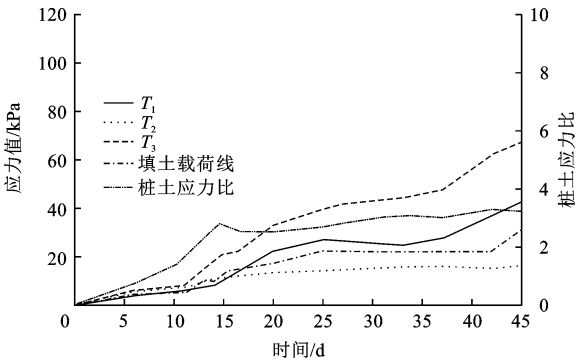


图 7 填土初期桩土界面土压力及桩土应力比变化
Fig.7 Curves of soil vertical pressure at pile-soil interface and pile-soil stress ratio at preliminary stage of embankment filling

3 结 语

(1)通过路堤填土全过程中的竖向土压力试验分析,得出桩承式加筋路堤在填筑及预压过程中其路堤内竖向土压力在调整时存在 2 个典型高度:0.5s 和 0.9s。当填土高度到达 0.5s 时,桩间土荷载通过土拱向桩体转移,出现土拱效应;随着路堤应力的调整和沉降发生,填土高度到达 0.9s 时,形成完全稳定土拱,等沉面趋于稳定。

(2)在填筑预压过程中,其等沉面的高度调整范围应在 1.2~1.5 m 之间,约在德国 EBGeo 规程计算值($s_{max}/2$)与英国 BS 8006 规范计算值($1.4s-a$)之间。

(3)通过实测路堤中桩体对应范围内的竖向应力分布,对比竖向滑动面、应力扩散角理论及半圆形拱滑动面的理论值,尽管在路堤沉降稳定后碎石垫层的顶底层土压力测量值分别为圆形土拱理论计算值的 50% 和 30%,但圆形拱滑动面的假定计算结果与实测结果具有较好的吻合趋势。

(4)桩承式加筋路堤中,由桩间土压力得出的土拱效应作用时间较桩帽范围内的测试数据要迟缓,且桩间土压力随其与桩的相对位置不同会有明显不同,因此,建议采用桩土应力比联合桩帽上测值综合判定桩承式加筋路堤的土拱形成,并做进一步试验研究。

参考文献:
References:

[1] 费 康,刘汉龙. 桩承式加筋路堤设计理论研究进展[J]. 水利水电科技进展,2008,28(4): 89-94.
FEI Kang, LIU Han-long. Advances in research on

- design theory of geosynthetic reinforced pile supported embankment[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2008, 28(4): 89-94. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 陈永辉, 齐昌广, 王新泉, 等. 塑料套管混凝土桩单桩承载特性研究[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(3): 51-58.
CHEN Yong-hui, Qi Chang-guang, WANG Xin-quan, et al. Research on bearing performance of plastic tube cast-in-place single-pile[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(3): 51-58. (in Chinese)
- [4] TERZAGHI K. *Theoretical soil mechanics*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943
- [5] 费 康, 王军军, 陈 毅. 桩承式加筋路堤土拱效应的试验和数值研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 1975-1983.
FEI Kang, WANG Jun-jun, CHEN Yi. Experimental and numerical studies of soil arching in piled embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 1975-1983. (in Chinese)
- [6] 庄 妍, 崔晓艳, 刘汉龙. 桩承式加筋路堤中土拱效应产生机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增1): 118-123.
ZHUANG Yan, CUI Xiao-yan, LIU Han-long. 3D FE analysis of arching in a piled embankment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(S1): 118-123. (in Chinese)
- [7] 徐立新. 桩承式加筋路堤的设计计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
XU Li-xin. Study on design and computation method of geosynthetic reinforced pile-supported embankments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [8] 陈云敏, 贾 宁, 陈仁朋. 桩承式加筋路堤土拱效应分析[J]. *中国公路学报*, 2004, 17(4): 1-6.
CHEN Yun-min, JIA Ning, CHEN Ren-peng. Soil arch analysis of pile-supported embankments [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2004, 17(4): 1-6. (in Chinese)
- [9] JTG/T D31-02—2013, 公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S].
JTG/T D31-02—2013, Technical guidelines for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] HANDY R L. The arch in soil arching [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 302-318.
- [12] HARROP-WILLIAMS K. The arch in soil arching [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(3): 415-419.
- [13] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(11): 1917-1938.
- [14] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. *Ground Engineering*, 1988, 21(3): 12-18.
- [15] NAUGHTON P J. The significance of critical height in the design of piled embankments [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2007(10): 1-10.
- [16] RAITHEL M, KIRCHNER A, KEMPFERT H G, et al. German recommendations for the reinforced embankments on pile-similar elements[C]//LI G X, CHEN Y M, TANG X W. *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetic*. Berlin: Springer, 2009: 697-702.
- [17] 费 康, 陈 毅, 王军军. 桩承式加筋路堤土拱效应发挥过程研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5): 1367-1374.
FEI Kang, CHEN Yi, WANG Jun-jun. Study of development of soil arching effect in piled embankment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1367-1374. (in Chinese)
- [18] ZHUANG Y. Numerical modelling of arching in piled embankments including the effects of reinforcement and subsoil[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2009.
- [19] 费 康, 刘汉龙. 桩承式加筋路堤的现场试验及数值分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(4): 1004-1012.
FEI Kang, LIU Han-long. Field test study and numerical analysis of a geogrid-reinforced and pile-supported embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 1004-1012. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 周 镜, 叶阳升, 蔡德钧. 国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析[J]. *中国铁道科学*, 2007, 28(2): 1-6.
ZHOU Jing, YE Yang-sheng, CAI De-gou. Analysis of calculation method for foreign geosynthetic reinforced pile supported embankments[J]. *China Railway Science*, 2007, 28(2): 1-6. (in Chinese)
- [22] JTG F10—2006, 公路路基施工技术规范[S].
JTG F10—2006, Technical specification for construction of highway subgrades[S]. (in Chinese)