

DOI: 10.11779/CJGE201404018

桩承式路堤中土拱形态与成拱过程中土拱效应研究

杨 涛¹, 王刚刚¹, 闫业强¹, 李国维²

(1. 上海理工大学土木工程系, 上海 200093; 2. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 建立了平面应变条件下模拟土拱形成过程的弹塑性有限元模型。研究了桩承式路堤中的土拱形态, 分析了影响土拱高度的主要因素和土拱形成过程中桩帽与桩帽间地基土之间的荷载分担特性。研究表明: 平面应变条件下土拱的形态为半椭圆, 填土内摩擦角和凝聚力的变化对土拱高度的影响较小。土拱高度随桩帽净距的增加先增大后逐渐减小, 随路堤高度的增加先线性增加后稳定不变。完整土拱形成时土拱效应发挥程度最大, 桩帽间地基土承担的路堤荷载不再向桩帽上转移。

关键词: 桩承式路堤; 土拱形态; 差异沉降; 平面应变; 有限元

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)04-0731-05

作者简介: 杨 涛(1962-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 主要从事地基处理与复合地基理论研究。E-mail: shyangtao@163.com。

Shape of soil arching and development of its effect in a piled embankment

YANG Tao¹, WANG Gang-gang¹, YAN Ye-qiang¹, LI Guo-wei²

(1. Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Research Institute of Road and Railway Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A two-dimensional elastic-plastic finite element model which can simulate the process of development of soil arching in a piled embankment is established. The shape of soil arching in a piled embankment is simulated. Then, parameter study on height of soil arching is made. Finally, the behavior of embankment load transferring from the surrounding soils to the pile caps is investigated. The results indicate that the shape of soil arching in a piled embankment is semi-elliptic under the condition of plane strain. The influence of the values of internal friction angle and cohesion of embankment fill on the height of soil arching is smaller. The height of soil arching increases firstly with the increase of net spacing between pile caps, and then decreases gradually. Furthermore, it increases linearly firstly with the increase of the height of embankment, and then remains the same for a higher embankment. The load shared by the subsoil remains unchanged after the entire soil arching appears.

Key words: piled embankment; shape of soil arching; differential settlement; plane strain; FEM

0 引言

桩承式路堤中的“土拱效应”, 是指软土地基经(带帽)刚性桩加固后, 由于路堤荷载作用下桩(帽)与桩间土间产生差异沉降, 导致桩(帽)顶平面以上一定高度范围内路堤填料应力重分布, 荷载从桩(帽)间土向桩(帽)上转移, 桩(帽)间土上荷载减小的现象。土拱效应影响了桩(帽)与桩间土之间的荷载分担, 所以桩承式路堤的设计必须考虑土拱效应。

要分析土拱效应, 必须首先确定土拱的形态以及拱高等几何特征参数。Terzaghi^[1]基于Trapdoor试验提出了平面土拱模型, Marston等^[2]建立了竖向滑体土拱模型。这两种土拱模型中仅给出破坏面位置, 并没有土拱形态。Handy^[3]首次描绘出拱形为近似于悬链

线的主应力流线。Carlsson^[4]提出了楔形土拱形态模型。Russell等^[5]提出了金字塔形土拱形态模型。Hewlett等^[6]和Low等^[7]等针对空间与平面问题提出了半球形和半圆形土拱形态模型。Zeaske等^[8]认为在Hewlett土拱下方还存在着一系列圆心和半径不同的土拱, 据此提出了多拱形态模型。目前的土拱效应设计与计算理论都是基于上述假定的土拱形态建立的, 如英国规范^[9]采用滑体土拱模型, 德国早期规范采用半球形土拱模型, 新规范EBGEO则采用了多拱模型, 北欧Nordic手册^[10]则采用楔形土拱模型。中国学者对基于上述土拱形态建立的土拱计算理论的进行了改进^[11-14]。由于假

定的土拱形态不同,造成各计算方法之间的计算结果仍有较大差异,因此,关于土拱形态问题的研究已开始引起学者的关注。芮瑞等^[15]认为平面土拱形态是一段圆弧而非半圆形。王亮亮等^[16]建立的平面土拱形态为双曲余弦曲线。刘俊飞等^[17]通过分析桩承式路堤主应力迹线,认为土拱形态为双曲线。强小俊等^[18]认为土拱形态为椭球,给出了土拱高度的计算公式。

综上所述,目前国内外学者对土拱形态的研究还不深入。鉴于目前室内外试验技术很难量测到土拱形态,采用有限元数值模拟方法,研究平面应变条件下的土拱形态和成拱过程中的土拱效应,并对影响土拱高度的主要因素进行探讨。

1 土拱分析有限元模型

1.1 几何模型与边界条件

设在大面积填筑的桩承式路堤中,路堤高度为 h ,刚性桩方形桩帽边长为 a ,桩的间距为 s 。由于路堤中的土拱是由桩帽与桩帽间地基土之间的差异沉降引起的,桩帽间地基土对路堤的支撑作用可以通过控制路堤底部的边界条件来实现,因此,土拱有限元模拟分析的几何模型中可以只考虑路堤本身。进行土拱形态与效应的二维平面应变有限元分析时,利用对称性,取桩帽的中心线到桩间土中心线范围的路堤进行分析,几何模型见图1所示。模型左边界为桩帽的中心线,右边界为桩间土的中心线,故左、右侧边界水平向约束,竖向自由。模型顶部为路堤顶面,水平向和竖向都自由。模型底部边界分成两部分,桩帽中心线附近 $a/2$ 范围填土受到桩帽的支撑,水平向和竖向都约束,剩余部分受到桩帽间地基土的支撑,水平向和竖向都自由。

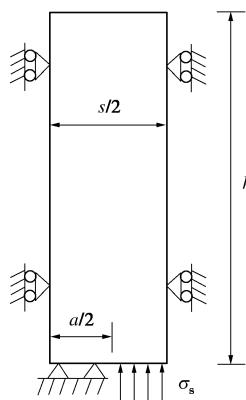


图 1 有限元分析模型

Fig. 1 FEM model

1.2 材料本构模型及参数

采用大型有限元软件ABAQUS进行土拱有限元数值模拟分析。路堤填土采用四边形四结点CPE4R单

元进行离散,桩帽顶部、桩帽边缘处网格局部加密,共剖分1540个单元。无黏性路堤填土采用莫尔-库仑模型,模型参数取自文献[19],见表1所示。

表 1 路堤填土材料参数

Table 1 Material parameters of embankment fill

重度 γ /(kN·m ⁻³)	侧压力 系数 k	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	凝聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /°
17	0.5	25	0.2	1.0	30

1.3 土拱形态模拟方法

采用Zhuang等^[19]的方法模拟土拱形成过程。首先对图1所示模型在自重荷载下进行有限元分析,然后进行应力平衡,保留自重应力状态但变形归零,此时路堤底部地基土的支撑应力 σ_s 等于该处自重应力 $\sigma_s = \gamma h$, γ 为填土重度。然后人为地逐渐降低 σ_s 从而引起路堤底部产生沉降,它即为桩帽与桩帽间地基土之间的差异沉降,其最大值 δ_s 发生在桩间土中心线处。随着 σ_s 的逐渐降低, δ_s 逐渐增大,当 σ_s 降低到稳定不再变化,引起有限元计算不收敛时出现完全土拱。此时,绘出路堤某截面的竖向应力沿其高度分布曲线,它与自重应力分布曲线的偏离点一定在土拱轴线上。

2 土拱形态曲线

取路堤高度 $h=5$ m, 桩的间距 $s=2.5$ m, 桩帽边长 $a=1$ m。图2给出了归一化的路堤底部竖向应力随桩帽与桩帽间地基土之间最大差异沉降变化曲线。图2表明,形成完整土拱时 $\sigma_{s\min}=15$ kPa, 此时 $\delta_s=1.1$ cm。可见,只需要很小的差异沉降即可形成完整土拱。

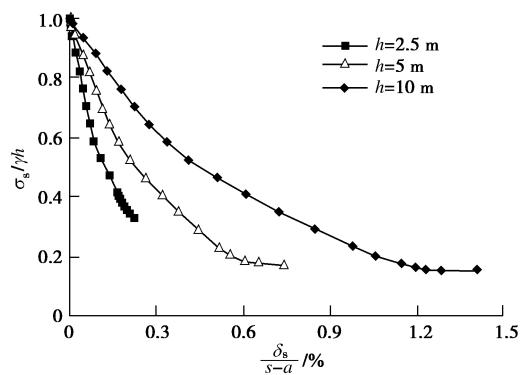


图 2 $\sigma_s/\gamma h - \delta_s/(s-a)$ 关系曲线

Fig. 2 Relation between $\sigma_s/\gamma h$ and $\delta_s/(s-a)$

为获得土拱形态,在图1模型的地基土顶面以上路堤中选择13个断面,其中第1个断面距桩帽右侧边缘2.5 cm,最后一个断面位于桩间土中心线处,即图1模型的右侧边界。绘出形成完整土拱时各断面竖向应力分布曲线,连接它们和其自重应力分布曲线偏离点即可获得路堤中的土拱形态曲线。图3给出模型右侧边界

面上竖向应力分布曲线与其自重应力分布线的比较, R_1 表示截面距桩帽中心线的距离, 可知该截面上拱轴线距桩间地基土表面4.1 m。

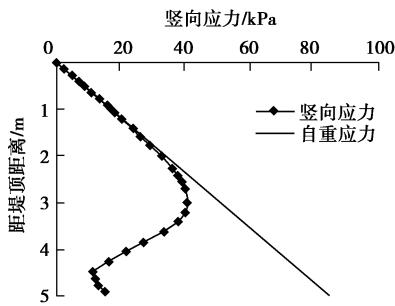


图3 $R_1=1.25$ m 处截面竖向应力分布曲线

Fig. 3 Distribution curve of vertical stress at $R_1=1.25$ m vertical plane in piled embankment

图4给出由13个断面计算获得的桩承式路堤中土拱形态曲线。从图4中可以发现, 拱冠位于桩间土中心线处截面上。采用不同的曲线拟合法对土拱形态曲线进行拟合, 发现椭圆曲线最为适宜, 拟合的土拱形态曲线方程为

$$\frac{(x-1.25)^2}{0.831^2} + \frac{y^2}{4.15^2} = 1 \quad (R^2=0.993) \quad (1)$$

式(1)中的 x 和 y 分别表示拱轴线上某点距桩帽中心线和地基土表面的距离。式(1)表明, 土拱长半轴长度与土拱高度非常接近, 短半轴长度为0.831 m, 拱脚落在距桩帽边缘约8.1 cm桩帽上。

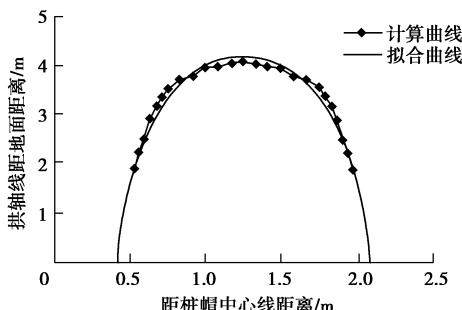


图4 土拱形态曲线

Fig. 4 Shape of soil arching in piled embankment

3 土拱高度影响因素分析

3.1 桩帽净距的影响

图5给出路堤高度 $h=10$ m、桩间距 $s=2.5$ m时土拱高度 H_0 随桩帽间净距($s-a$)的变化曲线。图5表明, 桩承式路堤中的土拱高度与桩帽间净距($s-a$)有关。从图5中可以发现, 桩帽净距小于1.1 m时, 土拱高度随桩帽净距的增加而逐渐增大, 桩帽净距超过1.1 m后土拱高度随桩帽净距的增加而逐渐减小。

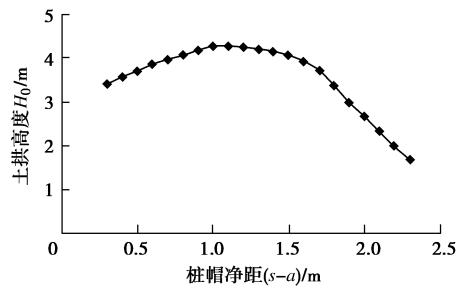


图5 土拱高度 H_0 随桩帽净距($s-a$)变化曲线

Fig. 5 Variation of H_0 with ($s-a$)

3.2 路堤高度的影响

设桩间距 $s=2.5$ m, 桩帽宽度 $a=1$ m。图2给出路堤高度 h 分别为2.5, 5, 10 m时归一化的路堤底部竖向应力随桩帽与桩帽间地基土之间最大差异沉降变化曲线, 图6给出土拱高度 H_0 随路堤高度 h 的变化曲线。从图2和图6中可以发现, 土拱高度以及形成完整土拱时所需要的桩帽与桩帽间地基土间的差异沉降与路堤高度有关。路堤高度过低, 如 $h=2.5$ m, σ_s 未达到稳定, 说明没有形成完整土拱。路堤越高, 形成完整土拱时所需要的桩帽与桩帽间地基土间的差异沉降越大。路堤高度小于5 m时, 土拱高度随路堤高度的增加近乎线性增大, 但路堤高度超过5 m后, 土拱高度随路堤高度的增加不再变化。

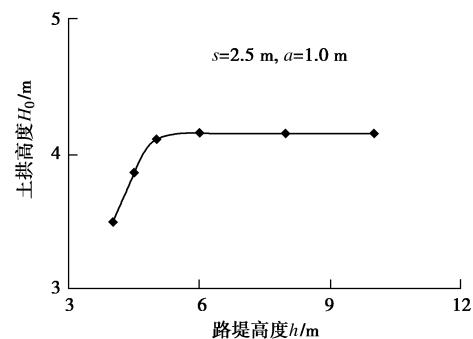


图6 土拱高度 H_0 随路堤高度 h 变化曲线

Fig. 6 Variation of H_0 with h

3.3 填土强度指标的影响

图7给出路堤高度 $h=10$ m, 桩间距 $s=2.5$ m, 桩帽宽度 $a=1$ m时土拱高度 H_0 随路堤填土内摩擦角 φ 的变化曲线。图7表明桩承式路堤中土拱高度随路堤填料内摩擦角的增加而逐渐减小, 但减的小幅度不大, 内摩擦角从 15° 增加到 45° , 土拱高度仅下降约3.6%。

前述土拱高度影响因素的分析针对的是无黏性土路堤。保持路堤填土的内摩擦角 $\varphi=30^\circ$ 不变, 图8给出路堤高度 $h=10$ m、桩间距 $s=2.5$ m、桩帽宽度 $a=1$ m时土拱高度 H_0 随路堤填土凝聚力 c 的变化曲线。从图8可以看出, 桩承式路堤中土拱高度随路堤填料凝聚力的增加而逐渐减小, 但减小幅度较小, 凝聚力从1

kPa 增加到 100 kPa, 土拱高度下降了约 4.4%。

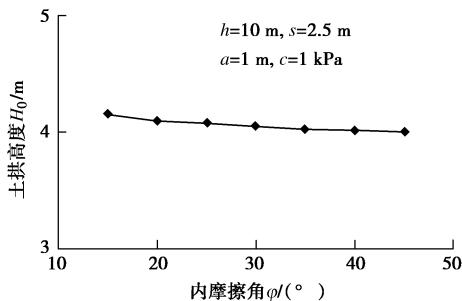


图 7 土拱高度 H_0 随内摩擦角 φ 变化曲线

Fig. 7 Variation of H_0 with φ

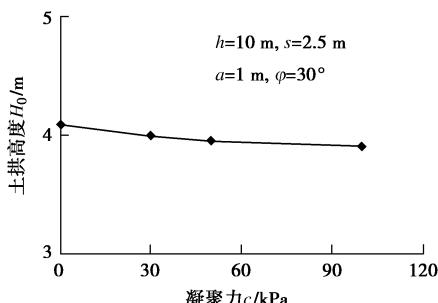


图 8 土拱高度 H_0 随凝聚力 c 变化曲线

Fig. 8 Variation of H_0 with c

4 土拱形成过程中的土拱效应

对于高度 $h=5$ m, 桩间距 $s=2.5$ m, 桩帽宽度 $a=1$ m 的无黏性土桩承式路堤, 图 9, 10 分别给出土拱形成过程中桩帽中心和桩间土表面处竖向应力增量 $\Delta\sigma_p$ 和 $\Delta\sigma_s$ 随桩帽与桩间土之间差异沉降变化曲线, 正值表示竖向应力增加, 负值表示竖向应力减小。从这两幅图中可见, 随着桩帽与桩帽间地基土之间差异沉降的逐渐增加, 即土拱逐渐形成的过程中, 桩帽间地基土承担的路堤荷载逐渐减小, 而桩帽顶面的竖向应力逐渐增大, 说明桩帽间地基土承担的路堤荷载向桩帽顶面转移。从图中还可以发现, 完整土拱形成时 $\Delta\sigma_p - \delta_s$ 和 $\Delta\sigma_s - \delta_s$ 曲线都趋于稳定, 表明桩帽间地基土向桩帽的荷载转移趋于停止, 完整土拱形成时土拱效应的发挥达到最大。

可以利用费康等^[20]提出的土拱效应发挥曲线表示土拱形成过程中拱效应的逐渐发挥过程, 如图 11 所示。土拱效应发挥系数 D_{sa} 和归一化的桩帽与桩间土间的差异沉降 ξ 按下式计算:

$$D_{sa} = \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta\sigma_{sf}}, \quad (2)$$

$$\xi = \frac{G\delta_s a}{\gamma h(s-a)^2}, \quad (3)$$

在式(2)、(3)中, G 为路堤填土的剪切模量, $\Delta\sigma_{sf} = \gamma h - \sigma_{smin}$, σ_{smin} 为完整土拱形成时桩帽间地基土表面的竖向应力。图 11 清楚地表明, 土拱效应随土

拱形成过程是逐渐发挥的。桩帽与桩帽间地基土之间没有差异沉降时 $D_{sa}=0$, 无土拱效应。随着桩帽与桩帽间地基土间差异沉降的增加, D_{sa} 数值逐渐增大, 土拱效应随之增大。在完整土拱接近形成时, 曲线开始变得平缓, 形成完整土拱时 $D_{sa}=1$, 此时土拱效应全部发挥。

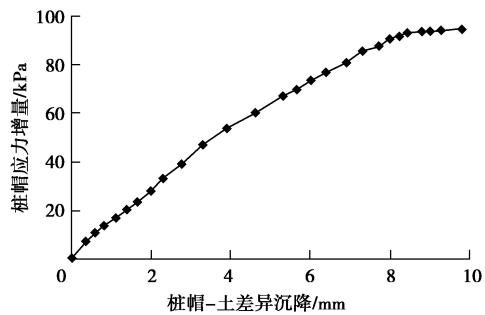


图 9 $\Delta\sigma_p$ 随差异沉降 δ_s 变化曲线

Fig. 9 Variation of $\Delta\sigma_p$ with δ_s

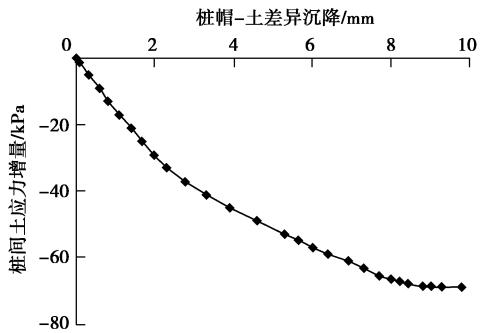


图 10 $\Delta\sigma_s$ 随差异沉降 δ_s 变化曲线

Fig. 10 Variation of $\Delta\sigma_s$ with δ_s

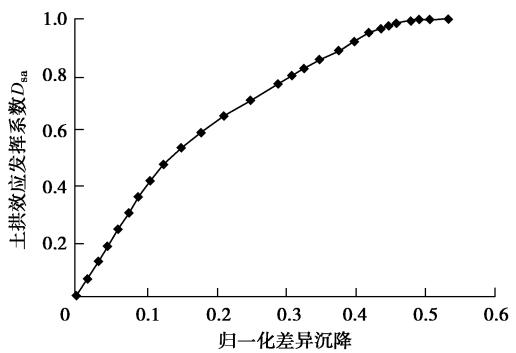


图 11 土拱效应发挥曲线

Fig. 11 Mobilized curve of soil arching effect

5 结 论

(1) 平面应变条件下桩承式路堤中的土拱形态为长半轴约等于土拱高度的半个椭圆。

(2) 土拱高度为土拱的重要几何参数, 也是桩承式路堤设计的关键参数之一。数值分析表明, 它受填土材料的强度指标 c 和 φ 影响不大。

(3) 土拱高度受路堤高度、桩帽净距影响较大。路堤高度过低无法形成完整土拱。土拱高度随路堤高

度的增加先线性增加然后保持不变, 它随桩帽净距的增加先增加然后逐渐减小。

(4) 土拱效应随着土拱的形成而逐渐发挥。完整土拱形成时土拱效应发挥程度最大, 桩帽间地基土承担的路堤荷载不再向桩帽上转移。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [2] JONES C J, LAWSON C R, AYRES D J. Geotextile reinforced piled embankment[C]// Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Netherlands: Balkema, 1990: 155 – 159.
- [3] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 – 318.
- [4] CARLSSON B. Reinforced soil, principles for calculation[M]. Sweden: Terratema AB, Linköping, 1987.
- [5] RUSSELL D, PIERPOINT N. An assessment of design methods for piled embankments[J]. Ground Engineering, 1997, **30**(11): 39 – 44.
- [6] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, **21**(3): 12 – 18.
- [7] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(11): 1917 – 1938.
- [8] ZAESKE D, KEMPFERT H G. Berechnung und wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen tragschichten auf punktund linienförmigen traggliedern[J]. Bauingenieur, 2002, **77**(S0): 80 – 86. (ZAESKE D, KEMPFERT H G. Calculation and mechanism of unreinforced and reinforced base layers on point and line-shaped support members[J]. Civil Engineer, 2002, **77**(S0): 80 – 86. (in German))
- [9] British Standard 8006. Code of practice for strengthened /reinforced soils and other fills[S]. London: British Standard Institution, 1995.
- [10] Nordic Geotechnical Society. Nordic handbook-reinforced soils and fills[S]. Stockholm: Nordic Geotechnical Society, 2002.
- [11] 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 – 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))
- [12] 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]. 岩石力学与工学报, 2007, **26**(6): 1278 – 1283. (CHEN Fu-quan, LI A-chi, LU Yan-ping. An improved solution of Hewlett's method for soil arching effect on piled embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1278 – 1283. (in Chinese))
- [13] 强小俊, 赵有明, 胡荣华. 桩网结构支承路堤土拱效应改进算法[J]. 中国铁道科学, 2009, **30**(4): 7 – 12. (QIANG Xiao-jun, ZHAO You-ming, HU Rong-hua. Improved algorithm for the soil arching effect of pile- net supported embankment[J]. China Railway Science, 2009, **30**(4): 7 – 12. (in Chinese))
- [14] 余 闯, 刘松玉, 杜广印. 桩承式路堤土拱效应的改进 Terzaghi 方法[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(4): 74 – 76. (YU Chuang, LIU Song-yu, DU Guang-yin. A modified Terzaghi's method on soil arching in piled embankments[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, **37**(4): 74 – 76. (in Chinese))
- [15] 芮 瑞, 夏元友. 桩承式路堤荷载传递计算方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, **31**(13): 73 – 77. (RUI Rui , XIA Yuan-you. Research on load transfer mechanism and calculation method of embankment supported by piles[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, **31**(13): 73 – 77. (in Chinese))
- [16] 王亮亮, 杨果林. 桩承式路堤拱效应分析[J]. 湖南工业大学学报, 2010, **24**(5): 67 – 70. (WANG Liang-liang, YANG Guo-lin. Subgrade soil arching effect on pile reinforced foundation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, **24**(5): 67 – 70. (in Chinese))
- [17] 刘俊飞, 赵国堂, 马建林. 桩网复合地基桩顶土拱形态分析 [J]. 铁道学报, 2011, **33**(6): 81 – 87. (LIU Jun-fei, ZHAO Guo-tang, MA Jian-lin. Analysis on conformation of soil arch on the pile head of composite pile–net foundations[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, **33**(6): 81 – 87. (in Chinese))
- [18] 强小俊, 赵有明, 张长生. 桩承地基土拱高度计算方法的研究及分析[J]. 铁道建筑, 2012(5): 90 – 94. (QIANG Xiao-jun, ZHAO You-ming, ZHANG Chang-sheng. Study and analysis of calculation method of arching height for pile foundation[J]. Railway Engineering, 2012(5): 90 – 94. (in Chinese))
- [19] ZHUANG Y, ELLIS E A, YU H S. Plane strain FE analysis of arching in a piled embankment[J]. Ground Improvement, 2010(14): 207 – 215.
- [20] 费 康, 陈 毅, 王军军. 桩承式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))