桩承式路堤中土拱效应产生机理研究

庄 妍[1, 2]，崔晓艳[1, 2]，刘汉龙[1, 2]
（1. 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）

摘 要：土拱效应的形成条件和荷载传递机理是刚性桩复合地基桩－土协调共同作用的关键性技术问题。基于ABAQUS三维有限元数值软件，研究路堤填土性质、路堤高度、桩间距等因素对土拱效应的形成和荷载传递特性的影响规律，分析路堤以及软土中应力和应变发展规律。研究结果表明：路堤高度 h 与桩间距 s 比值对土拱效应产生具有重要影响，当 $h/s \le 0.5$ 时，没有土拱效应产生；当 $0.5 \le h/s \le 1.5$ 时，土拱效应没有完全产生；当 $1.5 \le h/s$ 时，产生完整的土拱效应；桩承式路堤中最大拱效应发挥作用时，桩间土所受竖向极限应力与路堤填土自重比值 $\sigma_{s,ult}/\gamma h$ 约在0.2～0.4之间；土拱效应作用下，路堤填料中土体发生破坏的部位与桩间距和土体性质有关。

关键词：桩承式路堤；土拱效应；数值模拟；荷载传递机理
中图分类号：TU470 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2013)S1－0118－06

作者简介：庄 妍(1982－)，女，博士，副教授，主要从事软基处理方面的教学与科研工作。E-mail: Joanna_zhuang@163.com。

3D FE analysis of arching in a piled embankment

ZHUANG Yan[1, 2], CUI Xiao-yan[1, 2], LIU Han-long[1, 2]
(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210000, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University; Nanjing 210000, China)

Abstract: There is no a generally accepted approach for the design of piled embankments. A series of three-dimensional finite element analyses are presented to examine the performance of piled embankments. The analyses show that when $h/s \le 0.5$, there is virtually no effect of arching, when $0.5 \le h/s \le 1.5$, there is an increasing evidence of arching, and when $1.5 \le h/s$, full arching is observed. The ultimate stress on the subsoil ($\sigma_{s,ult}$) at the point of maximum arching normalized by γh ranges 20% to 40 %.

Key words: piled embankment; soil arching effect; numerical simulation; load transfer mechanism

0 引 言

桩和桩周软土在上部路堤荷载作用下产生的不均匀沉降将会使软土层上方的路堤填土沉降量大于桩上方填土层的沉降量。在路堤填土层中产生的不均匀沉降将会促使剪应变或者剪切面的产生，因此来自于路堤以及上部荷载的竖向应力会重新分布，使得传递到桩顶的竖向应力增加，而传递到软土的竖向应力会等量减少，这种由于不均匀沉降而引起的应力重分布的现象被定义为“土拱效应”。

近年来，国内外学者针对土拱效应进行了大量的研究，提出了不同的土拱模型和计算方法：1943年，Terzaghi通过著名的Trapdoor试验[1]证实了土力学领域土拱效应的存在，并在对土拱应力分布进行描述的基础上，得出了土拱效应的存在条件。1987年，Guido等[2]提出土拱的形状为正四棱锥，棱锥侧面与底面的夹角假设为45°，土工格栅仅承担该四棱锥部分的荷载，其余荷载由桩来承担。1988年，Hewlett等[3]提出了基于试验的理论模型，土拱的形状被描述成是半圆形的具有均匀厚度的拱，研究发现土拱的临界破坏点只可能出现在土拱拱顶和拱角处，并据此求解出了桩土应力比。英国规范BS8006[4]采用了Marston的管道土压力理论[5]来计算桩帽、桩间土土压力。2003年，刘吉福[6]最早研究得到土拱效应中荷载分担比的表达式。陈仁朋等[7]综合考虑路堤填土中的土拱效应，根据Marston的计算理论，建立了考虑桩－土－路堤变形和应力协调的平衡方程。Ellis等[8-9]通过开展离心机试验对桩承式路堤进行研究，研究分析了软土表面的应力分布和路堤表面的不均匀沉降，结果表明路堤的

基金项目：国家自然科学基金高铁联合基金项目（U1134207）；国家自然科学基金青年项目（51108155）；江苏省“333”计划资助项目（BRA2011146）；中国博士后科学基金面上资助项目（2012M511670）
收稿日期：2013－03－01

高度和桩帽间的距离比值是衡量土拱效应产生的关键参数。余闯等[10]结合模型试验结果，建立了三维有限元数值模型,对桩承式路堤中土体竖向应力分布规律进行了分析，结果反映出了土体竖向应力随深度的分布规律、土拱作用机理以及土拱的作用范围。费康等[11]对桩承式路堤中的土拱效应进行了三维模型试验研究，分析了应力折减系数大小和填土中的竖向应力分布特点。上述理论只考虑了软土的沉降，而没有考虑软土的承载力对土拱效应的影响。Iglesia 等[12]通过离心机试验，分析研究了软土的承载力对土拱效应的影响。

从现有的研究中，很难找到一种设计方法可以准确地描述出路堤填土中的土拱效应模型，对于它的形成条件和荷载传递特性也没有形成一种系统化的研究。因此，进一步开展对桩承式路堤中土拱效应的研究有着重要的科学研究价值。

本文针对不同桩间距和路堤几何参数以及材料参数工况，进行三维数值模型分析，研究其土拱效应的形成条件和荷载传递特性。

1　数值模型的建立与分析验证

1.1　模型的建立与参数选择

本文应用有限元分析软件 ABAQUS，取一根桩及其周围加固土体作为典型单元，建立三维有限元分析模型。模型布局如图 1 所示，本文的分析对象是路堤填料中的土拱效应，路堤填料采用莫尔－库仑模型，土体模型具体参数按表 1 选取。考虑到模型的对称性，取 1/4 实体进行分析。具体几何模型及其网格划分如图 2 所示。路堤填料采用 20 节点 2 次实体单元。模型四周约束水平方向位移，底部 1/4 桩帽约束竖直方向位移，桩间土区域采用竖向均布荷载模拟软土承载力作用。模型的底面 1/4 为桩帽（面积为 $a^2/4$），其余为软土（面积为（s^2-a^2）/4）

表 1　数值模型中所采用的材料参数

Table 1 Parameters of materials

饱和重度 /(kN·m^{-3})	土压力系数 K_0	E /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	φ /(°)	ψ /(°)
17.0	0.5	25.0	0.33	0.0	30	0

1.2　模型的验证

Potts 等[13]采用 Imperial College Finite Element Program 建立有限元分析模型，得出路堤填料竖向应力随填料深度的变化曲线（图 3 中 P & Z 分析结果）。本文利用 ABAQUS 建立的限元模型进行分析，得出路堤填料竖向应力随填料深度的变化曲线（图 3 中本文分析结果），其中 P & Z 分析结果所对应的路堤高度为 4.0 m，路堤下存在直径为 2.0 m 的孔洞；本文分析结果所对应的路堤高度为 3.5 m，桩间距为 2.0 m，且路堤下桩间土对其具有支撑作用。从图 3 可以看出，在一定高度时，路堤填料竖向应力随着路堤高度的减小而逐渐增加，且路堤填料中的竖向应力分布特点满足自重应力，表明填料没有受到土拱效应的影响；当路堤填料高度减小到一定值时，路堤填料中的竖向应力逐渐减小，表明在土拱效应的作用下应力发生重分布。由于 Potts & Zdravkovic 建立的模型中孔洞对其上部填料没有支撑作用，故在填料高度为零时，填料间竖向应力减小到零；而本文所建立的模型中，路堤下软土对其上部填料具有支撑作用，因而在填料高度减小为零时，填料间的竖向应力不会减小到零。由于两

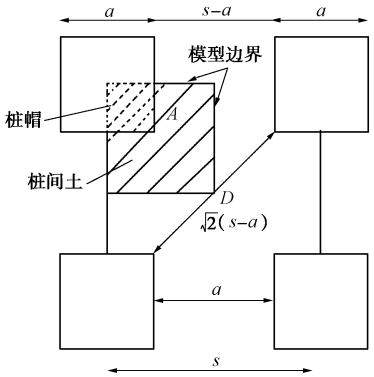


图 1　模型平面布置图

Fig. 1 Layout of piles

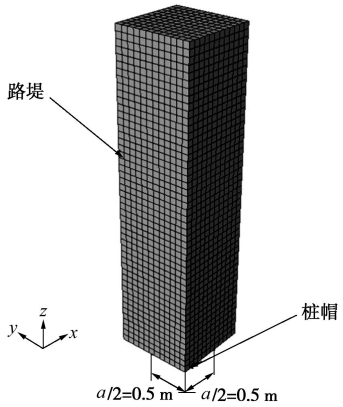


图 2　数值模型及网格划分

Fig. 2 Typical numerical model and finite element

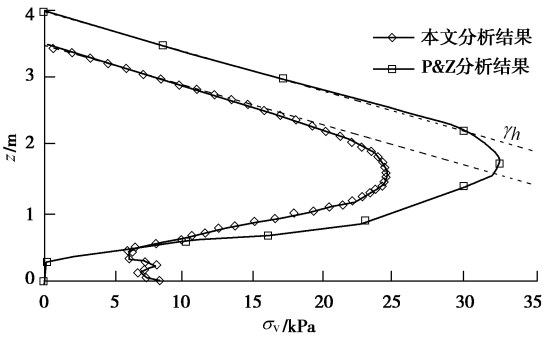


图 3　路堤填料竖向应力随填土深度的变化曲线

Fig. 3 Variation of vertical stress on embankment with depth

种情况的路堤填料高度不同，因此两条分析线呈现平行关系，而不是重合。通过图 3 中所描述的路堤填料竖向应力与路堤填土高度的变化关系，可以说明本模型是正确合理的。

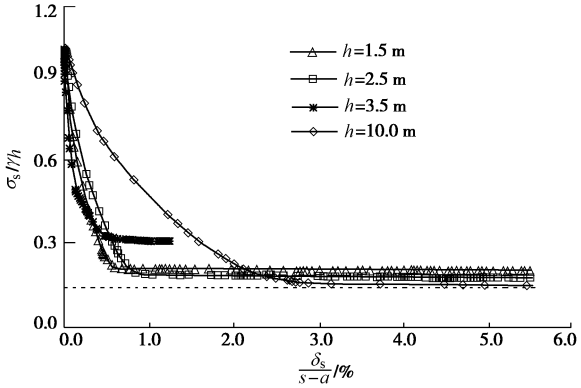
1.3 数值模拟工况

本文建立了 3 组不同桩间距下不同路堤高度的对比分析模型，桩帽宽度为 1.0 m，桩间距分别为 2.0，2.5，3.5 m；路堤高度介于 1.0～10.0 m 之间。

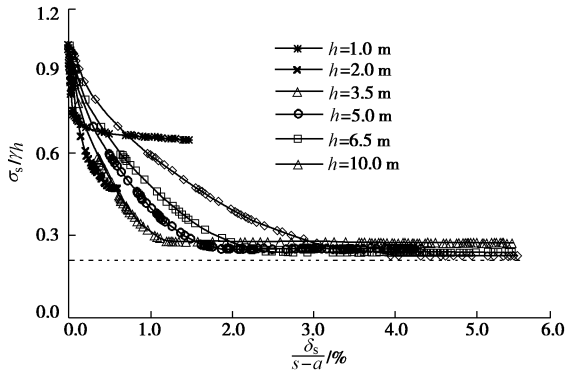
2 模拟结果与影响因素分析

2.1 桩间土作用力

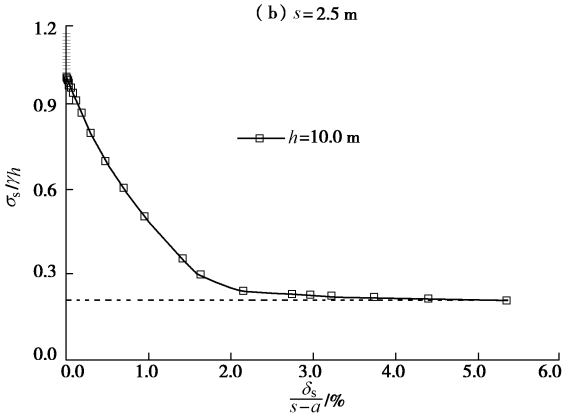
在三维数值模拟下所得桩间土的荷载分担比变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知，在桩间距相同时，路堤高度越大，产生最大土拱效应时桩间土的沉降量越大；当路堤高度相同时，桩间距越大，产生最大土拱效应时桩间土的沉降量也越大。由于桩土沉降差促使土拱效应的产生，使得作用于桩间土上的路堤荷载减小而作用桩梁上的路堤荷载增加，即路堤中发生了荷载转移的现象。当有越多的相对荷载从桩间土转移到桩梁上时，土拱效应发挥的程度越大，桩间土上土压力(σ_s)与路堤自重(γh)的比值就越小。当桩间距不变时，路堤高度越高，桩间土上土压力与路堤自重的比值越小，即越多的路堤自重由桩来承担，桩间土承担的相对路堤荷载($\sigma_s/\gamma h$)减少，说明在相同桩间距时，路堤高度越大，土拱效应发挥越充分。比较分析图 4 中（a）、（b）不难发现，当路堤高度相同时，桩间距越小，桩间土上路堤荷载与路堤自重的比值($\sigma_s/\gamma h$)越小，即越多的路堤荷载由桩来承担，而桩间土承担的路堤荷载越少，说明在相同路堤高度时，桩间距越小，土拱效应发挥得越充分。比较分析图 4（b）、（c）不难发现，φ 值越大，产生最大土拱效应时桩间土的沉降量越小，说明土拱效应与土体性质有关。从图 4（a）、（b）、（c）可以看出，桩承式路堤中最大拱效应发挥作用时，桩间土所受竖向应力极限值与路堤填土自重的比值$\sigma_{s,ult}/\gamma h$ 约为 0.2～0.4。



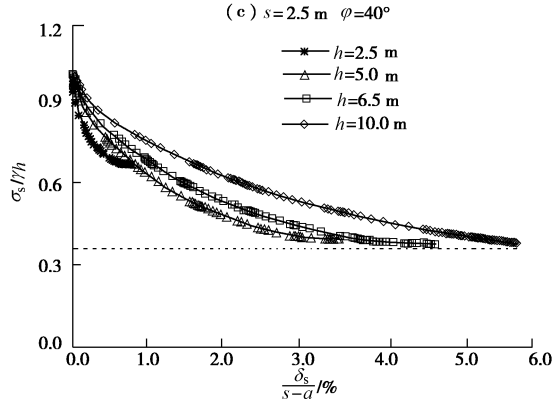
（a）s=2 m



（b）s=2.5 m



（c）s=2.5 m φ=40°



（d）s=3.5 m

图 4 桩间土的荷载分担比变化曲线

Fig. 4 Ground reaction curves of embankment heights at different heights

2.2 桩帽对角线中心点(D)点土压力系数

图 5 给出了不同桩间距下土压力系数 K 值随 z/s (z 为从路堤底部到坐标点的距离)的变化曲线，图中 K_0 为静止土压力系数，K_0 = 0.5；K_p 为被动土压力压力系数，$K_p=(1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$。从图中可以看出，当 $z/s>1.5$ 时，$K=K_0$，土中的应力分布不受土拱效应影响，即土拱效应只存在于 $z/s<1.5$ 的范围内。当 $z/s<1.5$ 时，$K>K_0$，表明土拱效应开始产生，也即土拱效应的上限为 $z/s=1.5$；当路堤的高度与桩间距比值 $h/s>1.5$，$z/s<1.5$ 时，$K>K_0$；当 $z\approx0.7(s-a)$ 时，$K=K_p$，表明土体达到塑性破坏状态。路堤填土的塑性破坏区域存在于内拱半径下部，土拱效应存在于路堤高度 $z/s<1.5$ 的范围内。当 $h/s<1.5$ 时，最大土压力系数趋于存在于路堤表面处。如图所示，曲线开始呈现出“S”形，随后 K 值随着路堤填土高度

的减小而减小。结果表明，土拱效应没有产生。比较分析图 5（a）、（b）表明，在 h 相同时，随着 s 的增加，曲线有向左移动的趋势，表明破坏点逐渐从土拱顶部转移到桩帽上方。比较分析图 5 中（b）、（c）、（d）不难发现，在 h 相同时，曲线随着 φ 的增大逐渐向左平移，表明破坏点逐渐从土拱顶部转移到桩帽上方；曲线随着 ψ 的增大逐渐向右平移，可以看出破坏逐渐从桩帽转移到桩间土上。表明路堤中发生破坏的部位与土的性质有关。三维模型中土拱的几何参数详见图 6。

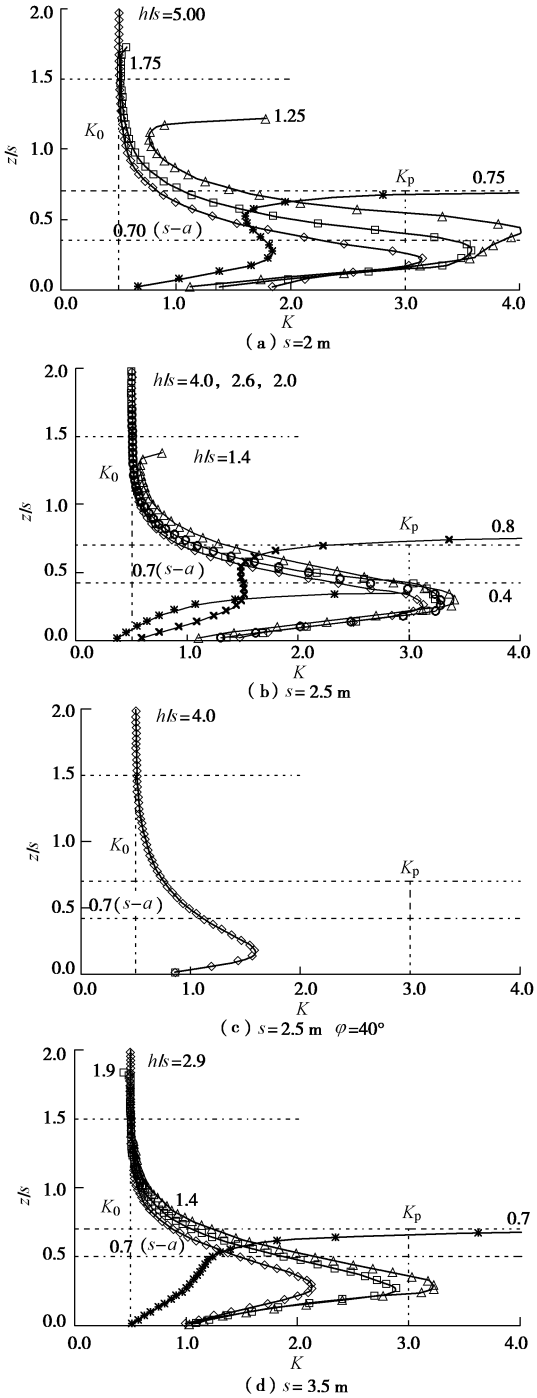


图 5 D 点 K 值随 z/s 的变化曲线

Fig. 5 Variation of earth pressure coefficient (K) at central point of basic unit (D, see Fig. 1)

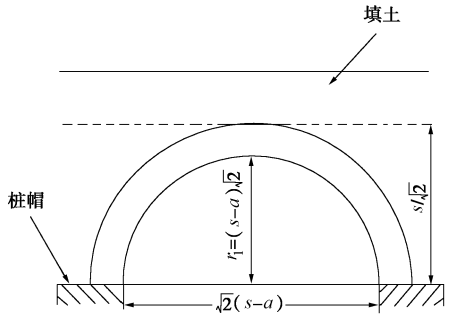


图 6 三维模型中土拱示意图和几何参数

Fig. 6 Geometry of arching in 3D model

2.3　桩间软土的极限应力

图 7 给出了模型中桩间土所受竖向应力极限值于路堤填土自重 $\sigma_{s,ult}/\gamma h$ 随 h/s 的变化曲线。从图 7 中可以看出，在相同桩间距条件下，当 $h/s > 1.5$ 时，桩间土上所承担的路堤荷载随着路堤填土高度的增加保持稳定；当 $h/s < 1.5$ 时，桩间土所承担的路堤荷载随着路堤填土高度的减小而迅速增加，表明当桩间距不变时，路堤高度越高，桩间土上所承担的路堤荷载与路堤填土自重的比值越小，即越多的荷载由桩来承担，表明在桩间距不变时，路堤高度越大，土拱效应发挥得越充分。而当 h/s 相同时，桩间土所承担路堤荷载随着桩间距的增加而增加，表明当路堤高度相同时，桩间距越小，桩间土所承担的路堤荷载与路堤自重的比值越小，即越多的路堤荷载由桩来承担，说明桩间距越小，土拱效应发挥得越充分。桩承式路堤中最大拱效应发挥作用时，桩间土所受竖向极限应力与路堤填土自重比值 $\sigma_{s,ult}/\gamma h$ 约为 0.2～0.4。

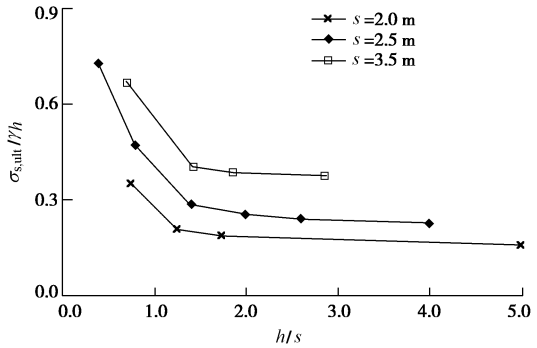


图 7 $\sigma_{s,ult}/\gamma h$ 随 h/s 的变化曲线

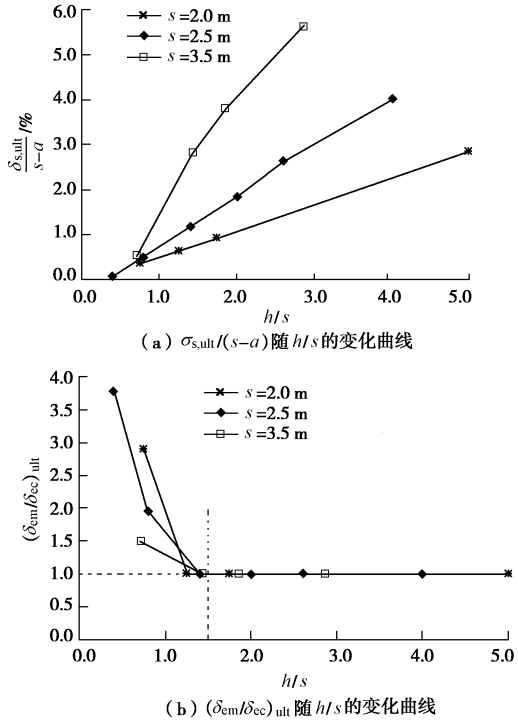
Fig. 7 Variation of normalized stress on subsoil under ultimate conditions (σ_s) with h/s

2.4　软土以及路堤表面的沉降量

图 8（a）给出了桩帽对角线中心点 D 点（如图 1 所示）对应的桩间土沉降量 $\delta_{s,ult}/(s-a)$ 随 h/s 的变化曲线，从图中可以看出，在桩间距相同的条件下，桩间

土沉降随着路堤填土高度的增加而增加；在路堤高度相同的条件下，桩间土的沉降量随着桩间距的增加而增加。

图 8（b）给出了 D 点对应的路堤表面与桩帽中心沉降量的比值$(\delta_{em}/\delta_{ec})_{ult}$随 h/s 的变化曲线。从图 8（b）中可以看出当 $h/s > 1.5$ 时，$(\delta_{em}/\delta_{ec})_{ult} = 1$，说明路堤表面无差异沉降；随着 h/s 减小，差异沉降逐渐变大，尤其是当 $h/s < 1.4$ 时，差异沉降更加明显。由此可得，当 $h/s > 1.5$ 时桩承式路堤中产生了土拱效应。



（a）$\sigma_{s,ult}/(s-a)$随 h/s 的变化曲线

（b）$(\delta_{em}/\delta_{ec})_{ult}$随 h/s 的变化曲线

图 8 桩间软土与路堤沉降

Fig. 8 Settlement results of subsoil and surface of embankment

3 结 论

本文总结了桩承式路堤土拱效应的研究现状，通过有限元数值模拟，对各种工况下的桩承式路堤中的土拱效应进行了分析研究，得出以下 5 点主要结论。

（1）土拱效应受路堤高度、桩间距、土体性质等多个因素的影响。

（2）路堤高度与桩间距之比越大，桩间土所承担的路堤荷载与路堤填土自重的比值越小，即越多的荷载由桩来承担，土拱效应发挥得越充分。

（3）土拱效应作用下，路堤填料中土体发生破坏的部位与桩间距和土体性质有关，桩间距越大，土体间内摩擦角越大，破坏发生在桩帽处的可能性越大。

（4）路堤高度 h 与桩间距 s 的比值对土拱效应的产生具有重要影响，当 $h/s \le 0.5$ 时，没有土拱效应发生；当 $0.5 \le h/s \le 1.5$ 时，土拱效应没有完全产生；当 $1.5 \le h/s$ 时，产生完整的土拱效应。

（5）桩承式路堤中最大拱效应发挥作用时，桩间土所受竖向应力极限值与路堤填土自重比值$\sigma_{s,ult}/\gamma h$约在 0.2～0.4 之间。

参考文献：

[1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: JohnWiley and Son, 1943: 66－75.

[2] GUIDO V A, KNEUPPEL J D, SWEENEY M A. Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs[C]// Proceeding. Geosynthetics’87 Conference. New Orleans, 1987: 216－225.

[3] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, **21**(3): 12－18.

[4] British Standard BS 8006. Code of practice for strengthened reinforced soils and other fills[S]. London: British Standard Institution, 1995.

[5] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[R]. Ames Iowa: Iowa Engineering Experiment Station Bulletin, Iowa State College, 1913.

[6] 刘吉福. 路堤下复合地基桩、土应力比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(4): 674－677. (LIU Ji-fu. Analysis on pile-soil stress ratio for composite ground under embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(4): 674－677. (in Chinese))

[7] 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): 358－4367. (CHEN Ren-peng, JIA Ning, CHEN Yun-min. Mechanism and settlement analysis of pile-supported and geogrid-reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(23): 358－4367. (in Chinese))

[8] ELLIS E A. ASLAM R. Arching in piled embankments: Comparison of centrifuge tests and predictive methods – Part 1 of 2[J]. Ground Engineering, 2009(6): 34－38.

[9] ELLIS E A, ASLAM R. Arching in piled embankments: comparison of centrifuge tests and predictive methods – Part 2 of 2[J]. Ground Engineering, 2009(7): 28－31.

[10] 余 闯, 刘松玉, 杜广印, 等. 桩承式路堤土拱效应的三维数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, **39**(1): 58－62. (YU Chuang, LIU Song-yu, DU Guang-yin, et al.

Three dimensional simulations on soil arching of piled embankment[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition) 2009, **39**(1): 58－62. (in Chinese))

[11] 费　康, 王军军, 陈　毅. 桩承式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, CHAEN Yi. Experimental and numerical studies of soil arching in piled embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 1975－1983. (in Chinese))

[12] IGLESIA G R, EINSTEIN H H, WHITMAN R V. Determination of vertical loading on underground structures based on an arching evolution concept[M]// FERNANDEZ C, BAUER R A, ed. Geo-Engineering for Underground Facilities. Reston: Geo-Insitute of the American Society of Civil Engineers (ASCE), 1999: 495－506 .

[13] POTTS V J, ZDRAVKOVIC L. Finite element analysis of arching behaviour in soils[C]// The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). Goa, India, 2008: 3642－3649.

（本文责编　孙振远）