

文章编号:1674-2974(2016)03-0135-07

基于土拱效应的桩承式路堤承载变形计算研究^{*}

赵明华[†], 吴家继, 何玮茜, 刘 猛

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要:从桩土差异沉降、土拱效应、荷载分配三者的关系出发,提出桩体向上刺入路堤的体积等于土拱区体积的压缩量的假设,通过对桩承式路堤进行力学分析,并结合其变形协调特性,推导出用差异沉降表示的桩土应力比以及拱高的计算公式.采用模型试验和数值模拟结果对该方法进行了验证,并分析了桩土面积置换率、填土高度、填土内摩擦角对桩土应力比以及拱高的影响.结果表明了该方法所求得结果与实测值较为接近,验证了其合理性.

关键词:差异沉降;土拱效应;桩承式路堤;桩土应力比;土拱高度

中图分类号:U416.1;TU 473.1

文献标识码:A

Researches on Bearing Mechanism and Deformation of Pile-supported Embankments Based on Soil Arch Effect

ZHAO Ming-hua[†], WU Jia-ji, HE Wei-xi, LIU Meng

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract:Based on the relationships of the differential settlement of piles and soil, soil arch effect and load distribution, an assumption that the volume of pile into the embankment is equal to the compression amount of the soil arch volume was firstly put forward. Combined with the mechanical analysis of pile-supported embankment and the deformation equilibrium of piles and soil, the formula between the pile-soil stress ratio and the soil arch height with differential settlement was derived. Finally, comparative model test and numerical analysis were performed to check the validity of this method. The proposed method was also used for a parametric study in order to investigate the effects of various parameters such as replacement ratio of pile and soil area, embankment height, and friction angle of the soil on the behavior of the pile-soil stress ratio and soil arch height. The result turned to be in good agreement with the measured values, which verifies the rationality of the proposed method.

Key words: differential settlement; soil arch effect; pile-supported embankment; pile-soil stress ratio; soil arch height

现阶段,中国高速公路、铁路建设迅猛发展,施工过程中经常会遇到大面积软土问题,而桩承式路堤作为一种有效适应于该类不良地基的构筑物形式

得到普遍应用^[1-3],同时也引起了学术界的广泛关注,他们对桩承式路堤的研究主要集中在对其土拱效应以及桩侧摩阻力分布情况的研究^[4].

^{*} 收稿日期:2015-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278187), National Natural Science Foundation of China(51278187)

作者简介:赵明华(1956-),男,湖南邵阳人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: mhzhaoohd@21cn.com

由于路堤土拱效应对桩承式路堤荷载分配及变形有很大影响,因此国内外学者针对土拱效应进行了大量的研究,提出了不同土拱模型及计算方法.关于土拱效应的研究由来已久, Terzaghi^[5]通过著名的 Trapdoor 试验验证了土拱效应的存在,并提出了平面土拱效应模型:假设填土中的破坏面为通过 Trapdoor 边缘的竖直面,作用在地基表面的荷载等于滑动体重力扣除边界上的摩阻力.英国规范 BS8006^[6]采用了 Marston 等^[7]的竖向滑体土拱模型理论来计算桩顶、桩间土土压力.然而这 2 种模型仅给出了破坏面位置,没有提出土拱形态,因此,不能准确地反映土拱效应对路堤承载变形的影响,这也是现代学者从“成拱形状与条件”角度分析桩承式路堤土拱效应的原因.

关于路堤“成拱形状与条件”,学者们做了大量假设, Handy^[8]分析了沟槽介质由于土拱效应而引起的应力重分布,将近似于悬链线的主应力流线作为拱轴形状. Carlsson^[9]和 Guido 等^[10]分别提出了楔形拱假设,其中 Carlsson 假设楔形体顶角为 30° ,而 Guido 等假设棱锥侧面与底面的夹角为 45° ,由此提出桩土荷载分担比的计算方法.“楔形假设”计算简便,但由于楔形假设与实际土拱形状有一定区别,从而会导致两者受力状态存在较大差异.因此,为充分模拟路堤的成拱形状, Hewlett & Randolph^[11]基于模型试验研究成果,提出了半球壳形土拱模型,并认为拱顶、拱脚的土体达到极限状态,建立了求解土拱效应的解析方法. Low 等^[12]利用试验验证了该方法,并将其退化到平面应变状态,简化了计算过程,但该方法计算出的桩体荷载分担比偏大,这是由于拱顶和拱脚的土单元体并不是在任何情况下都会达到极限状态,而是与路堤高度、材料性质、桩间距等因素有关. 陈云敏等^[13]改进了 Hewlett & Randolph 基于极限状态的空间土拱效应分析方法,通过引入系数 α 来判定土体是否进入塑性状态,从而对极限状态分析方法进行修正. 周龙翔等^[14]认为填土中土拱由拱脚支承在相邻两桩桩顶的主拱与搭接于主拱上的次拱组成,拱轴线均为悬链线. 刘俊飞等^[15]通过数值模拟提出桩顶土拱区域内的主应力迹线是一组自桩顶平面向上曲率逐渐增大的变曲率曲线,并据此得到了土拱的高度. 综上所述,近年来关于土拱的成拱形状也多集中于圆弧、悬链线等平滑曲线,但上述方法均未考虑桩土差异变形对土拱发挥程度的影响,而在桩承式路堤中,桩土变形刚度的差异往往对土拱发挥着较大影响,

曹卫平等^[16]参照 Low 的试验方法进行了二维模型槽试验,证明了这一结论. 针对这一状况,刘吉福^[17]利用等沉面概念,提出了“土柱模型”,从而得到了桩土应力比与差异沉降的关系,然而该模型脱离了土拱形状,没有考虑到布桩形式对桩土应力比的影响.

本文拟从桩土差异沉降、土拱效应、荷载分配三者的关系出发,基于路堤变形协调提出土拱区土体压缩变形等于桩顶刺入路堤的体积的假设,继而得到桩土应力比、土拱高度与桩土差异沉降的关系. 最后进行参数分析,并结合三者关系,获得土拱效应与桩承式路堤承载及其变形特性的内在联系,以期进一步完善桩承式路堤设计计算理论.

1 模型的建立与求解

1.1 基本假设

桩承式路堤是由路堤填土、桩以及桩间土 3 部分组成的复杂系统,为了使问题简化,结合前人成果,本文做出如下假定:

- 1) 路堤填土及桩间土为各项同性的均质材料,土体满足 Mohr-Coulomb 准则.
- 2) 土拱问题简化为平面应变问题,即仅考虑二维平面土拱效应^[12].
- 3) 根据文献^[18]研究成果,假定土拱拱轴线为合理拱轴线,桩间土应力均匀分布,土拱厚度均匀.
- 4) 土拱区以上路堤填土之间没有差异沉降,即路堤中能够形成完整的应力拱^[19],土拱与桩间土始终不脱离.

1.2 成拱形状

本文研究模型如图 1 所示,路堤高度为 H ,填土容重为 γ ,填土压缩模量为 E ,粘聚力为 c ,内摩擦角为 φ ,桩长为 h ,桩径为 d ,桩间距为 s . 假定土拱矢高为 f ,土拱区厚度为 t .

桩承式路堤模型竖向荷载静力平衡,可得

$$\gamma H = \sigma_s(1 - m) + \sigma_p m. \quad (1)$$

式中:面积置换率 $m = A_p/A_c$,本文取 $m = d/s$; σ_s, σ_p 分别为桩间土压力与桩顶土压力.

由式(1)可得桩土应力比为:

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} = \frac{\gamma H - \sigma_s(1 - m)}{m\sigma_s}. \quad (2)$$

以土拱轴线为研究对象,根据假定 3),建立如图 2 所示的坐标系,土拱宽度取单位宽度进行分析,则路堤作用在拱轴上的作用力为:

$$\omega = \int_{-s/2}^{s/2} Q dx. \quad (3)$$

其中,路堤荷载为:

$$Q = \gamma(H - f) + \gamma y. \quad (4)$$

土拱任意截面弯矩表达式为:

$$M = M_0 - F_H(f - y). \quad (5)$$

式中: M_0 为相同荷载下,等跨简支梁相应截面弯矩; F_H 为土拱拱脚所受水平力。

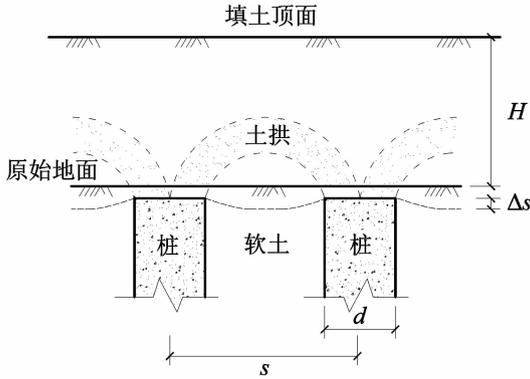


图 1 桩承式路堤计算模型
Fig. 1 Calculation model of the pile-supported embankment

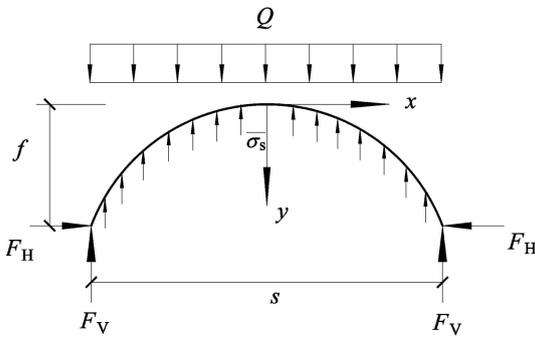


图 2 土拱合理拱轴线
Fig. 2 The reasonable arch axis of soil arch

由于填土中土拱的形成是桩体复合地基在填土荷载的作用下产生不均匀沉降,土体调动自身强度以抵抗荷载的结果.因此土体中自然形成土拱,其形状及结构必然是最合理的,即为合理拱轴线.合理拱轴线上剪力、弯矩处处为零,只有轴力^[18],即 $M=0$,

$$y = f - M_0 / F_H. \quad (6)$$

对其求两阶导,且已知 $\frac{d^2 M_0}{dx^2} = -(Q - \bar{\sigma}_s)$,作用在拱底的竖向应力为:

$$\bar{\sigma}_s = \sigma_s - \frac{1}{2} \gamma f. \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),化简可得二阶非齐次线性方程为:

$$y'' - \frac{\gamma}{F_H} y = \frac{\gamma H - \gamma f / 2 - \sigma_s}{F_H}. \quad (8)$$

通解为:

$$y = C_1 e^{\sqrt{\gamma/F_H} x} + C_2 e^{-\sqrt{\gamma/F_H} x} - \frac{\gamma H - \gamma f / 2 - \sigma_s}{\gamma}. \quad (9)$$

根据土拱区边界条件 $x=0, y=0, y'=0$,得 $C_1 = C_2 = [\gamma H - \gamma f / 2 - \sigma_s] / 2\gamma$.

因此,土拱曲线方程为:

$$y = (H - \frac{f}{2} - \frac{\sigma_s}{\gamma}) (\frac{1}{2} e^{\sqrt{\gamma/F_H} x} + \frac{1}{2} e^{-\sqrt{\gamma/F_H} x} - 1). \quad (11)$$

当 $x=s/2$ 时, $y=f$, 将其代入式(9),可得土拱矢高为:

$$f = (H - \frac{f}{2} - \frac{\sigma_s}{\gamma}) (\frac{1}{2} e^{\sqrt{\gamma/F_H} \frac{s}{2}} + \frac{1}{2} e^{-\sqrt{\gamma/F_H} \frac{s}{2}} - 1). \quad (12)$$

在竖向荷载的作用下,桩间土上方路堤土体与桩顶上方路堤土体之间产生相对位移,即产生滑动破坏,该剪切面也称破坏面,所以填土中的破坏面为通过桩边缘的竖直面,如图 3 所示,作用在地基表面的荷载等于滑动体重力扣除边界上的摩擦力:

$$\sigma_s(s - d) = \gamma H(s - d) - 2\tau t. \quad (13)$$

由 Mohr-Coulomb 准则,土体破坏面上任意一点的剪应力表达式为:

$$\tau = c + \sigma_x \tan \varphi. \quad (14)$$

其中,土拱在拱脚处水平应力 $\sigma_x = F_H / t$.

将式(12)代入式(11)可得:

$$\sigma_s(s - d) + 2t(c + \tan \varphi \frac{F_H}{t}) = \gamma H(s - d). \quad (15)$$

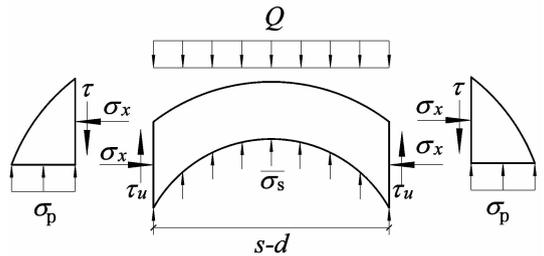


图 3 土拱单元平衡状态
Fig. 3 The balance of soil arch unit

根据假定 3),土拱厚度均匀为 t ,

$$y|_{x=s/2} - y|_{x=(s-b)/2} = t.$$

代入土拱方程,化简得到:

$$\frac{2(f - t)\gamma}{\gamma(H - f/2) - \sigma_s} = e^{\sqrt{\frac{\gamma}{F_H} \frac{s-b}{2}}} + e^{-\sqrt{\frac{\gamma}{F_H} \frac{s-b}{2}}} - 2. \quad (16)$$

1.3 模型求解

路堤填筑过程中,由于荷载增加,内部发生变形,即桩土产生差异沉降,如图1所示.同时,可将路堤作为研究对象,相当于桩顶向上刺入路堤^[20],从而在路堤中产生土拱效应以调节荷载,且土拱区土体发生压缩变形^[21],因此假定桩顶向上刺入路堤的体积等于加固区土拱体积压缩量.

其中,桩顶与桩间的沉降差,即为 Δs ,其值可由经验取得^[17],通常为加固区压缩量的25%~50%,桩体刚度大、桩间距大时取较大值.因此,桩顶向上刺入路堤的体积为:

$$V_{\text{刺入}} = \Delta s d. \quad (17)$$

下面对土拱区体积压缩量进行计算,取任意一段土拱微元体 dx 进行受力分析,如图4所示,微元体在水平方向上受附加应力为:

$$\sigma'_x = \sigma_x - K_0 \sigma_y. \quad (18)$$

式中: σ'_x 为附加应力值; K_0 为水平土压力系数,对于砂土和正常固结土,近似取 $K_0 = 1 - \sin\varphi$.

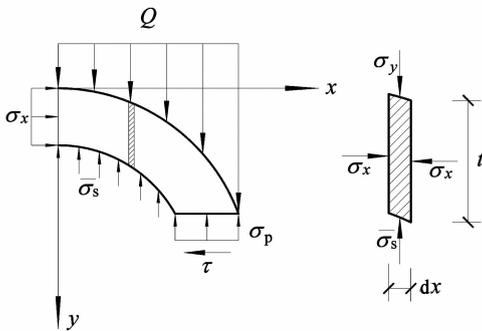


图4 土拱微元体受力示意图
Fig. 4 The stress diagram of soil arch

$$\sigma_y = \gamma(H - f) + \gamma y. \quad (19)$$

由于在土拱形成过程中,微元体竖直方向不受附加应力作用,因此土拱的体积压缩变形即为水平方向体积压缩量.由虎克定律,微元体应变为:

$$\epsilon_x = \sigma'_x / E = (\sigma_x - K_0 \sigma_y) / E. \quad (20)$$

所以,土拱体积压缩量为:

$$V_{\text{土拱}} = 2 \int_0^{s/2} \epsilon_x t dx. \quad (21)$$

将式(19)代入式(20),然后再代入(21),化简得:

$$V_{\text{土拱}} = \frac{F_H s}{E} - \frac{K_0 \gamma t}{E} (H - f) s - \frac{K_0 t}{E} (\gamma H - \gamma f / 2 - \sigma_s) \left(\sqrt{\frac{F_H}{\gamma}} e^{\sqrt{\gamma/F_H} \frac{s}{2}} - \sqrt{\frac{F_H}{\gamma}} e^{-\sqrt{\gamma/F_H} \frac{s}{2}} - s \right). \quad (22)$$

土拱区土体的压缩变形等于桩顶刺入路堤土体的体积,联立式(17)和式(22)得到:

$$\Delta s d = \frac{F_H s}{E} - \frac{K_0 \gamma t}{E} (H - f) s - \frac{K_0 t}{E} (\gamma H - \gamma f / 2 - \sigma_s) \left(\sqrt{\frac{F_H}{\gamma}} e^{\sqrt{\gamma/F_H} \frac{s}{2}} - \sqrt{\frac{F_H}{\gamma}} e^{-\sqrt{\gamma/F_H} \frac{s}{2}} - s \right). \quad (23)$$

联立方程(1),(12),(15),(16)和(23)得到方程组并求解:首先将式(15)分别代入式(11),(14)和(22),消去未知量 F_H ,然后把式(11)和(14)分别代入(22)消去未知量 t 和 f ,得到桩间土应力 σ_s 与桩土差异沉降关系:

$$\sigma_s = f(\Delta s). \quad (24)$$

将式(24)代入式(2),得到桩土应力比与桩土差异沉降关系:

$$n = f(\Delta s). \quad (25)$$

同理,将式(11),(14)分别代入(22)消去未知量 t 和 σ_s ,得到土拱矢高 f 与桩土差异沉降关系:

$$f = f(\Delta s). \quad (26)$$

2 算例验证

2.1 桩土应力比

芮瑞等^[22]通过模型试验箱装置进行砂填料的桩承式路堤土拱效应模型试验,试验中通过活动挡板下移量 Δs 来模拟桩土差异沉降,进而得到不同桩距比、填土高度情况下桩土应力比.其中,桩径为150 mm,路堤填料采用内摩擦角 31° ,颗粒比重2.67的干净河砂,重度为 16.67 kg/m^3 ,压缩模量为12 MPa,模型试验结果见表1.需要指出的是,随挡板下移量的增加,桩土应力比曲线首先进入峰值区域,后迅速衰减,最终达到稳定状态.因此表1中桩土应力比采用了曲线峰值段终点对应的数值,此时桩土应力比对应的挡板下移量即为桩土差异沉降.

通过计算,将本文方法得到的桩土应力比结果与芮瑞等模型试验^[22]、刘吉福等的路堤下复合地基桩土应力比计算方法^[17]、Terzaghi^[5]以及英国规范BS8006^[6]的土拱效应计算方法结果进行对比分析,结果如图5所示.

表 1 桩承式路堤模型试验表
Tab.1 The calculation parameters of the pile-supported embankment model

桩间距 s/mm	桩距比 d/s	填土高度 H/mm	下移量 $\Delta s/\text{mm}$	桩土应力比 n
225	1 : 1.5	150	1.0	4.5
		300	4.8	6.5
		600	7.2	9.5
300	1 : 2.0	150	0.4	3.2
		300	4.0	5.0
		600	4.4	7.9
375	1 : 2.5	150	0.6	2.5
		300	7.8	4.6
		600	5.2	7.0

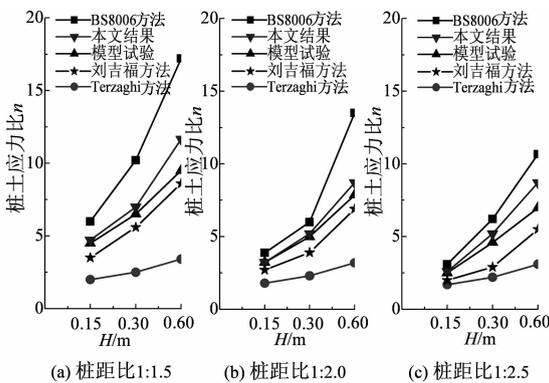


图 5 本文方法与其他方法结果对比
Fig.5 Results contrast of this calculation and other solution

通过各理论方法与芮瑞等模型试验结果对比,可以看出:本文方法以及刘吉福等的方法与试验结果较为吻合.另外,从图 5 中可以看出,桩土应力比与填土高度成正比,与桩距比成反比.其中,BS8006 规范由于公式过于简化,考虑因素少,计算出的桩土应力比偏大,只有在桩距比较大(桩距比 1 : 2.5)的情况下与实测吻合较好. Terzaghi 假设路堤填土中存在垂直剪切面与等沉面,适用于较大桩土相对位移和较大的桩距情况,因此计算结果偏小.

2.2 土拱高度

采用有限元软件 ABAQUS 进行土拱有限元数值模拟分析,路堤填料压缩模量为 20 MPa 的无粘性土,内摩擦角为 30°,重度为 20 kg/m³,模型参数取 $H=6\text{ m}$, $d=0.5\text{ m}$,分别改变桩间距 s (1.5 m, 2.0 m, 2.5 m),进行 3 组数值模拟,得到应力场如图 6 所示,由于对称分布,模型右边界为对称面,即路堤中心线.

选取路堤中心线不同深度各点(按照网格划分选取),其中第 1 点在路堤顶面,最后一点在桩间土

顶面,绘制出形成土拱时各点竖向应力分布曲线,如图 7 所示.

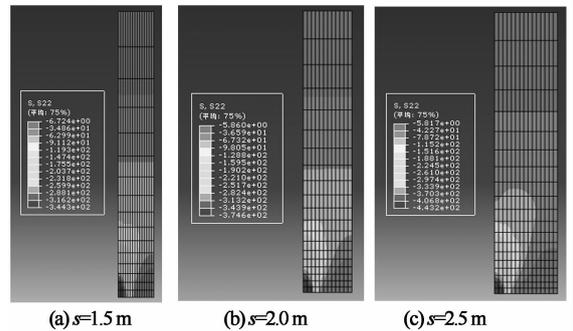


图 6 不同桩间距对应的应力场
Fig.6 Stress field under the variable pile spacing

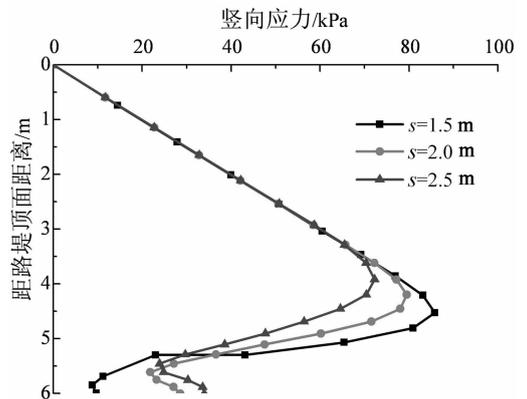


图 7 不同桩间距对应的竖向应力分布曲线
Fig.7 The vertical stress under variable pile spacing

从图 7 可以得到,在距离路堤顶面距离较近时,各点的竖向应力为一条直线,且斜率等于 20,即土体的重度.随着深度的增加,土拱效应开始发挥作用,将竖向应力传递至桩顶,因此桩间土上方竖向应力先最大值,然后逐渐减小,到达土拱区下方时,竖向应力缓慢增大,最终等于桩间土应力 σ_s . 本文将竖向应力极大值点到桩间土顶面的距离作为土拱高度 f . 并根据公式(26)计算同样得到土拱高度,并进行对比,如表 2 所示. 由此可知,本文计算所得土拱高度与数值模拟结果较为接近,且土拱高度随桩距的增加而增大.

表 2 数值模拟与计算结果
Tab.2 Results of numerical simulation and calculation

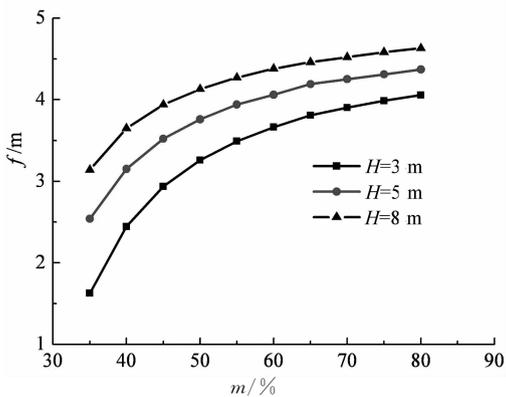
组号	桩距 s/m	f (数值模拟) /m	f (计算) /m	误差/%
1	1.5	1.47	1.27	-13.6
2	2.0	1.81	1.91	5.2
3	2.5	2.08	2.54	22.1

3 影响因素分析

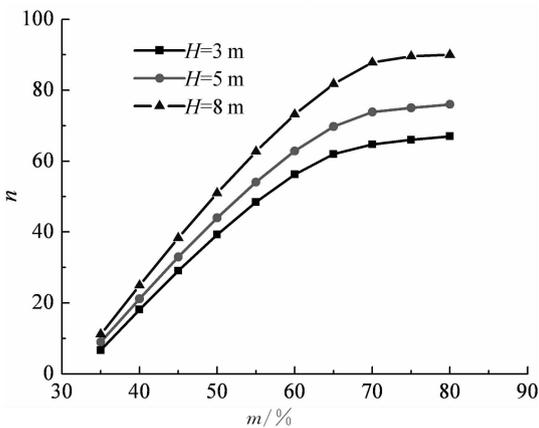
由桩土应力比(图5)和土拱高度(表2)的验证结果可以得到桩距比、填土高度对桩土应力比的影响,桩间距对土拱拱高的影响.另外,为充分研究桩土面积置换率、路堤填土抗剪强度指标对桩承式路堤土拱效应的影响,本文对参数 m, H, s, φ 进行分析.

3.1 m 及 H 对 n, f 的影响

由图8可知,拱高与桩体面积置换率、填土高度成正比.桩土应力比随桩体面积置换率的增大先增加然后趋于稳定,而填土高度对桩土应力比影响不大.这是由于填土大于一定高度后,土拱会将路堤荷载均匀地传递到桩与桩间土,因此桩土应力比达到一个稳定值.



(a) 对土拱高度 f 的影响



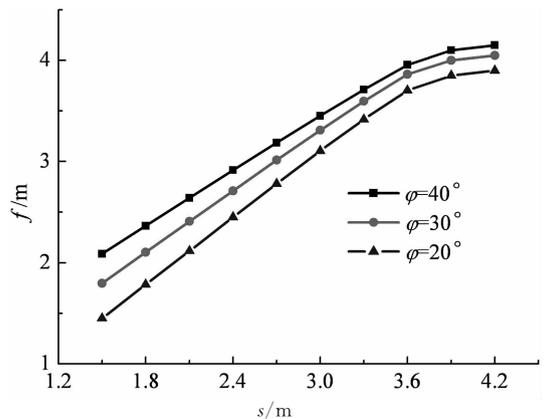
(b) 对桩土应力比 n 的影响

图8 面积置换率 m 及路堤高度 H 与 n, f 的关系
Fig.8 The relationship between n, f and m, H

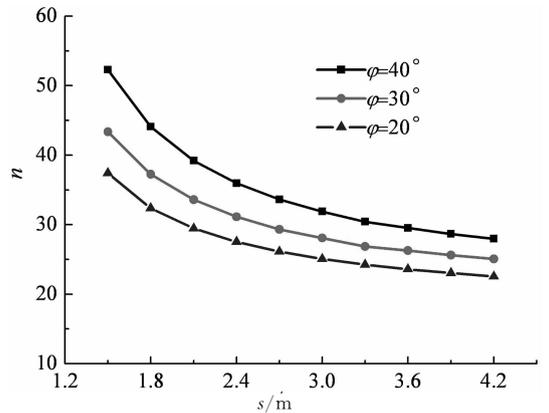
3.2 s, φ 对 n, f 的影响

由图9可知,随桩间距增加,土拱高度逐渐升高,桩间距 $s > 3.6$ m后,土拱高度趋于4.0 m,此时拱高与桩净距之比 $f/(s-d) = 1.33$ (英国规范BS8006中,土拱高度 $f = 1.4(s-d)$,与本文计算结

果相近),而填土内摩擦角对拱高影响较小.桩土应力比随桩间距增大先减小最终趋于稳定,与填土内摩擦角成正比.



(a) 对土拱高度 f 的影响



(b) 对桩土应力比 n 的影响

图9 桩间距 s 及填土内摩擦角 φ 与 n, f 关系
Fig.9 The relationship between n, f and s, φ

4 结束语

1) 提出桩体刺入路堤填土的体积等于土拱区体积的压缩变形的假设,从而建立土拱形状与桩土参量之间的关系;再根据土拱拱脚处极限平衡状态以及路堤竖向静力平衡,进而得到桩土应力比及其拱高与桩土差异沉降的关系.

2) 结合工程实例,探讨了影响土拱效应的主要因素,结果显示:桩土应力比与路堤高度成正比,与桩体面积置换率、填土内摩擦角成反比;土拱高度与路堤高度成正比,与桩净距成反比,而受填土材料的抗剪强度指标影响不大.

3) 为简化计算,本文假定土拱效应为平面应变状态,且没有考虑路堤加筋的情况,因此对于三维土拱效应以及筋材对桩承式路堤受力特性的影响有待进一步探讨.

参考文献

- [1] 余闯,刘松玉,杜广印. 桩承式加筋路堤理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,2010:9-18.
YU Chuang, LIU Song-yu, DU Guang-yin. Piled reinforced embankment theory and application [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2010:9-18. (In Chinese)
- [2] 徐超,汪益敏. 桩承式加筋路堤研究综述[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 19-26.
XU Chao, WANG Yi-min. Summary piled reinforced embankment research[J]. Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31 (3): 19-26. (In Chinese)
- [3] 赵明华,彭理,龙军. 刚性桩复合地基桩土应力比计算[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2014, 41(9): 66-71.
ZHAO Ming-hua, PENG Li, LONG Jun. Settlement method for the calculation of pile-soil stress ratio of rigid pile composite foundation[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(9): 66-71. (In Chinese)
- [4] 许朝阳,周锋,吕惠,等. 动荷载下桩承式路堤的承载特性及机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11):3231-3239.
XU Zhao-yang, ZHOU Feng, LV Hui, *et al.* Bearing behavior and mechanism of pile-supported embankment under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11):3231-3239. (In Chinese)
- [5] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943:66-75.
- [6] British Standard BS 8006 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. London: British Standard Institution, 1995.
- [7] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches: and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[M]. Ames: Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1913:28-39.
- [8] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302-318.
- [9] CARLSSON B. Reinforced soil, principles for calculation[M]. Linköping, Sweden Terratema AB, 1987:32-46.
- [10] GUIDO V A, KNEUPPEL J D, SWEENEY M A. Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs[C]//Proceedings Geosynthetics87 Conference. New Orleans, 1987: 216-225.
- [11] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12-18.
- [12] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(11): 1917-1938.
- [13] 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)
- [14] 周龙翔,王梦恕,张顶立,等. 复合地基土拱效应与桩土应力比研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 93-99.
ZHOU Long-xiang, WANG Meng-shu, ZHANG Ding-li, *et al.* Study of the soil arching effect and the pile-soil stress ratio of composite ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 93-99. (In Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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 Wei-ping, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Experimental investigation on soil arching in piled reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 436-441. (In Chinese)
- [17] 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)
- [18] 贾海莉,王成华,李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(4): 398-402.
JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Discussion on some issues in theory of soil arch[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(4): 398-402. (In Chinese)
- [19] 庄妍,崔晓艳,刘汉龙. 桩承式路堤中土拱效应产生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 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)
- [20] 张玲,赵明华. 散体材料桩复合地基承载力计算[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2007, 34(6): 10-14.
ZHANG Ling, ZHAO Ming-hua. Study on bearing capacity calculation method of discrete material pile composite foundation[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34 (6): 10-14. (In Chinese)
- [21] 许朝阳,周健,完绍金. 桩承式路堤承载特性的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 501-507.
XU Zhao-yang, ZHOU Jian, WAN Shao-jin. Simulation of bearing characteristics of pile-supported embankments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 501-507. (In Chinese)
- [22] 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.
RUI Rui, HUANG Cheng, XIA Yuan-you, *et al.* Model tests on soil arching effects of piled embankments with sand fills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2082-2089. (In Chinese)