

桩承式路堤承载特性的颗粒流模拟

许朝阳^{1,2}, 周 健¹, 完绍金²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 210009; 2. 扬州大学 岩土工程研究所, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 现有的土拱效应计算方法中, 由于采用的计算模型不同, 计算结果差异很大。文中克服传统连续介质力学模型的宏观连续性假设, 采用二维颗粒流程序(PFC)建立基于模型试验的细观数值分析模型, 对桩承式路堤中土体接触力、应力分布、主应力方向、竖向位移进行分析, 并比较计算和实测结果, 研究土拱效应的荷载传递机制。同时, 对不同桩帽、桩间距、填土高度、颗粒大小、摩擦角的情况进行 PFC 方法的参数敏感性分析。研究结果表明, 桩承式路堤桩顶处局部范围可按弹性核考虑; 土拱的分布型式受桩帽型式、桩净距、格栅的影响; 实际土拱作用的影响范围主要集中在路堤底面以上约 1 倍桩净距的区域; 土拱内部的竖向应力和水平应力均随深度非线性改变, 桩土应力比随着荷载水平、土体内摩擦角、颗粒大小的增大而增加。

关 键 词: 桩承式路堤; 土拱效应; PFC 颗粒流分析; 桩土应力比

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Simulation of bearing characteristics of pile-supported embankments by particle flow code

XU Zhao-yang^{1,2}, ZHOU Jian¹, WAN Shao-jin²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Shanghai 210009, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Several methods are available for account the soil arching effect in the pile-supported embankment; but these present methods produce dramatically different results partially due to the different analysis models. To avoid the macro continuity hypothesis of traditional continuum mechanics model, a two-dimensional numerical model using particle flow code(PFC) has been established to simulate soil arching effect of pile-supported embankment. One part of the numerical analysis deals with load transfer mechanisms by investigating the contact stress, stress distribution and vertical displacement. Also the simulated results have been compared with model test results. The other part of numerical analysis consists to a parametrical study investigating the influence of the size of the pile cap, pile spacing, the fill height, particle size and the friction angle of embankment. It is shown that: (1) The local soil on the top of pile can be regarded as elastic nucleus. Soil arch forms were affected by forms of the pile cap, clear spacing of pile cap and geogrid. (2) The soil arching area is located around one time pile cap clear spacing over the bottom of embankment. (3) The vertical stress and lateral stress in the inner arching vary with depth nonlinearly and pile-soil stress ratio increases with the load level, the friction angle and particle size of soil.

Key words: pile-supported embankments; soil arching effect; particle flow code(PFC); pile-soil stress ratio

1 引 言

桩承式路堤是近年来国内外出现的一种新型地基处理技术, 根据其是否采用土工合成材料可以分为传统桩承式路堤和加筋桩承式路堤。从目前的研究进展来看, 实用分析主要集中在对土拱效应^[1-6]、水平加筋体的拉膜效应^[7-8]、桩土相互作

用^[9-10]等的分析研究上, 数值模拟分析^[11-18]基本沿用连续体的建模和分析思路, 两种方法对于路堤土、桩以及加筋体之间荷载传递特性的细观机制均难以深入。离散单元法可以考虑土颗粒填料的散体特性, 克服传统连续介质力学模型的宏观连续性假设, 从微细观角度研究桩承式路堤的工作机制, 目前对桩承式加筋堤的离散元研究还较少, 分析中还

没有建立路堤土、加筋体、桩、桩间土整体分析模型,对土拱效应的耦合和内在机制的研究也不够深入。本文结合模型试验,建立基于模型试验的桩承路堤的细观分析模型,研究土拱效应的宏细观发展机制。

2 颗粒流方法分析

2.1 几何模型的建立

在室内模型试验的基础上,利用颗粒流程序对桩承土袋拱加筋路堤的工作性状进行了数值模拟。桩承(加筋)路堤数值试样的尺寸参照模型试验的尺寸,应用二维颗粒流程序(PFC^{2D})进行计算分析。为了再现桩承加筋路堤填筑过程中工作性状,数值分析的步骤与室内模型试验完全一致。模型槽、桩体单元和桩帽单元采用墙体模拟,土颗粒采用圆盘颗粒,根据软土和路堤土体特性赋予其合适的表征参数;格栅单元和刚性路面采用平行粘结圆颗粒来生成。

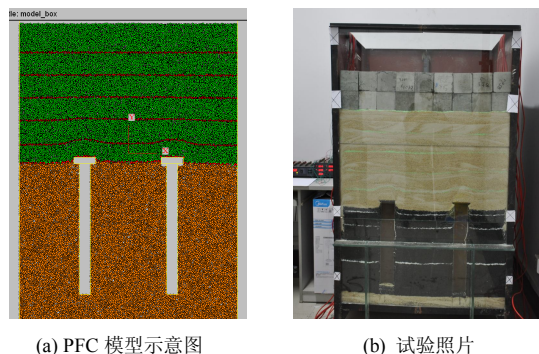


图1 模型图
Fig.1 Test model diagram

依据试验步骤,分别生成模型箱、地基土、桩、土工格栅、砂土路堤和刚性路面,建立起一个能够模拟实际桩承路堤在受力条件下的颗粒流数值仿真模型,图1为桩帽宽取10 cm,桩距为40 cm时的模型图,其中图1(a)为数值模型示意图,坐标原点在桩间中心处(余同);图1(b)为实际拍摄的试验图

片,与现场试验观测的土体位移变形规律相似。

2.2 模型参数和计算方案

由于实际土体细观结构的客观复杂性和目前研究水平的局限性,人们通常还无法由室内细观试验准确地得到土体颗粒之间的接触本构关系及其力学参数,也没有形成一套完善的细观力学理论来建立土体宏观响应与细观组构之间的定量关系。而PFC^{2D}自带的围压伺服控制系统所提供的双轴数值试验环境,可用于室内平面应变试验或室内双轴试验的模拟。通过室内三轴试验与PFC三轴试验应力-应变关系的多次模拟逼近,得到模型的具体参数见表1,调整刚度和摩擦系数后得到的 φ 分别等于21°、29°两种摩擦角,如图2所示($\varphi=21^\circ$ 图类同)。

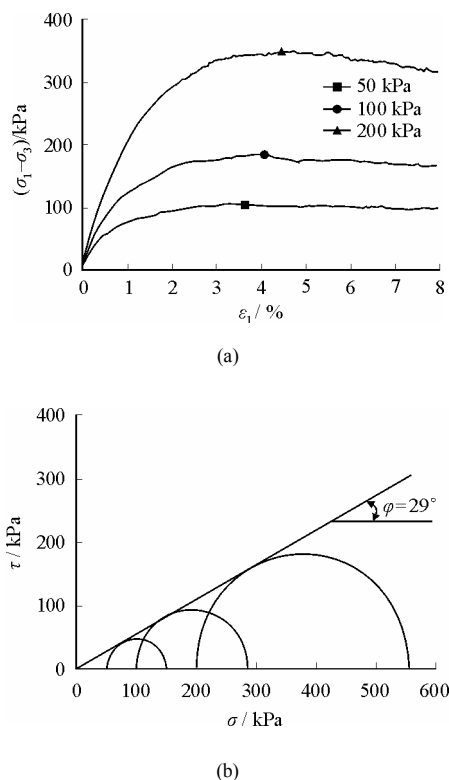


图2 PFC三轴试验模拟结果
Fig.2 Results of triaxial test by PFC simulation

表1 数值试样参数表
Table 1 Sample parameters table of numerical analysis

工况	数量 /个	粒径 /mm	孔隙率	密度 /(kg/m ³)	法向刚度 /(N/m)	切向刚度 /N/m	法向连接刚度 /(N/m ³)	切向连接刚度 /(N/m ³)	摩擦系数
桩间土	16 630	2.0~5.0	0.20	2 630	5×10^5	5×10^5			0.5
格栅	50	10		2 630	1×10^8	1×10^8	2×10^{13}	2×10^{13}	0.5
路堤	2 621(每层)	1.0~3.0	0.18	2 780	1×10^6	1×10^6			0.5
刚性路面	100	10	0.16	3 000	1×10^9	1×10^9	1×10^{20}	1×10^{20}	1.0

计算桩长 0.7 m, 桩直径 D 为 5 cm (下同), 桩间距 s 分别取 0.4、0.5、0.6 m, 桩帽宽 a 分别取 10、20 cm 对应每一个桩间距。填土高度 H 分别取 0.5、0.6、0.7、0.7 m, 分别考虑了桩顶无格栅和有格栅, 不同格栅刚度、不同摩擦角、不同颗粒大小等 60 余种计算工况。

3 桩承路堤数值模拟结果与分析

3.1 路堤填土荷载传递特征

图 3 为路堤填料中颗粒的接触力分布。接触力的分布实质是土中荷载传递特征的体现, 图 3(a) 为未设加筋格栅的情况, 此时填土中颗粒的接触力在桩顶处明显增大, 接触力总体分布与水平方向近似呈 $45^\circ + \varphi/2$ 向上发展, 在桩间发生交叉, 即形成了“虚拟土拱”^[17]; 图 3(b) 为设置柔性加筋体时填料中颗粒的接触力分布, 此时桩顶接触力仍较为集中, 但相比图 1(a) 有所减小; 图 3(c) 为设置刚性加筋体时土中接触力的分布, 填料中颗粒接触力分布较均匀, 基本与颗粒的重力场分布相似, 接触力随深度的增加而增大, 在桩顶区域达到最大。

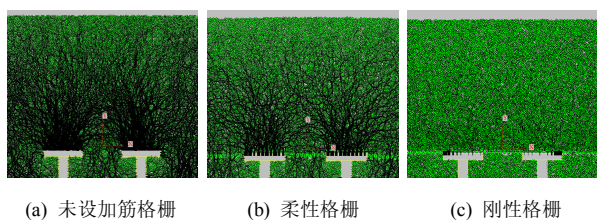


图 3 路堤颗粒间的接触力分布

Fig.3 Distribution of contact force between particles of embankment

3.2 主应力图

使用程序自带的测量圈命令, 测量圈大小为 0.02 m, 由测量圈内颗粒的正应力 σ_x 、 σ_y 及切应力 τ_{xy} , 可以得到主应力值(大主应力 σ_1 , 小主应力 σ_3) 及其主方向组成, 表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,3} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \alpha_0 &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right), \quad \left(\alpha_0 \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据主应力大小和方向绘制主应力图, 线条长度表示主应力的相对大小, 箭头方向表示主应力的方向(指向中心代表压应力)。为形象地表示主应力的偏转程度, 当大主应力相对初始方向(即竖直方向)的逆时针偏转角度绝对值大于 10° 时, 用蓝色

标记该网格中的主应力值大小; 当大主应力相对初始方向(即竖直方向)的顺时针偏转角度绝对值大于 10° 时, 用红色标记该网格中的主应力值大小。

图 4(a)~(c) 桩距不同时为桩帽宽度 $a=4D$ (D 为桩的直径) 对应的土中主应力状态的分布。

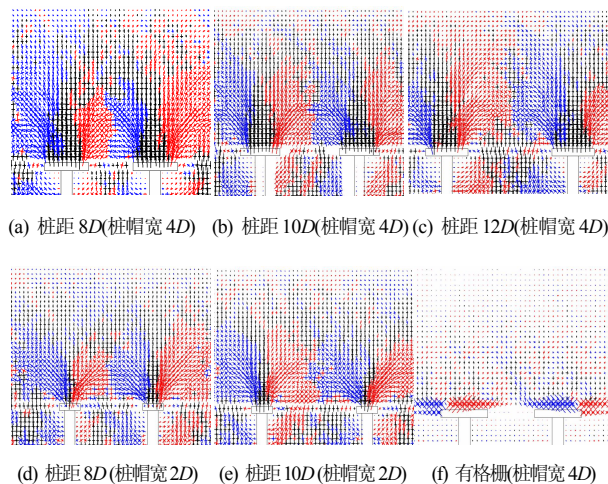


图 4 主应力偏转图

Fig.4 Deflection of principal stress

由图 4 可见, 路堤的应力状态相对初始状态均发生了较大的变化, 由于桩帽间土的应力松弛, 大主应力朝向桩间方向明显偏转, 形成土拱。土拱的发生范围主要从桩帽边缘附近开始向上并向桩间发生, 随着桩帽间距的增大, 土中主应力偏转的角度随之增加, 土体中发生应力偏转的范围也明显增大, 但第一道完整拱形的顶端高度都限制在 20~25 cm 处, 约等于桩帽 a 的宽度。当桩帽间距 $(s-a) = (4 \sim 6)D$ 时, 主应力偏转形成一系列曲率不同的拱圈, 说明土中存在若干虚拟拱, 这与 Zaeske 等^[4]提出的土拱为多个壳单元为拱组成的系统类似, 不同的是图中拱圈并不是完整的半圆。当 $(s-a)$ 增大到 $8D$ 时, 下方的主应力偏转变得无序, 此时完整土拱的形状类似于 Hewlett 和 Randolph 方法提出的半圆形或楔形拱。图 4(d)、4(e) 为桩帽宽度 $a=2D$ 时土中应力的变化。其规律与上类似, 土拱的拱顶高度均在 20~25 cm, 但应力偏转范围较前面有所减小, 从图中可以看出, 桩顶上方局部范围内土体的主应力方向保持不变。图 4(f) 为设置刚性加筋体路堤的主应力分布图, 应力偏转主要发生在加筋体中, 填料中应力较小, 且应力发生偏转的范围相对较小。

由上分析, 土拱的形状与桩帽大小及桩距有关, 土拱效应实质是主应力方向偏转的结果。

3.3 土压力的分布特点

在路堤填筑过程中, 对应不同的桩距和桩帽大

小, 土压力的变化规律均表现相似的变化规律。图 5(a)以桩距 $s = 40 \text{ cm}$, 桩帽 $a = 20 \text{ cm}$ ($s - a = 20 \text{ cm}$) 为例, 给出了无加筋路堤中竖向土压力的变化规律。比较图 5(a)与图 5(b)可见, PFC 的计算结果与实测的土拱范围拟合较好, 桩帽顶部的竖向土压力随深度的增加而显著增加, 进一步证实了土拱效应的存在, 并且土拱范围主要分布在 30 cm , 即为 $(1.0 \sim 1.1)s$ (s 为桩距) 范围内, 这与文献[2-3]提出的结果相似。

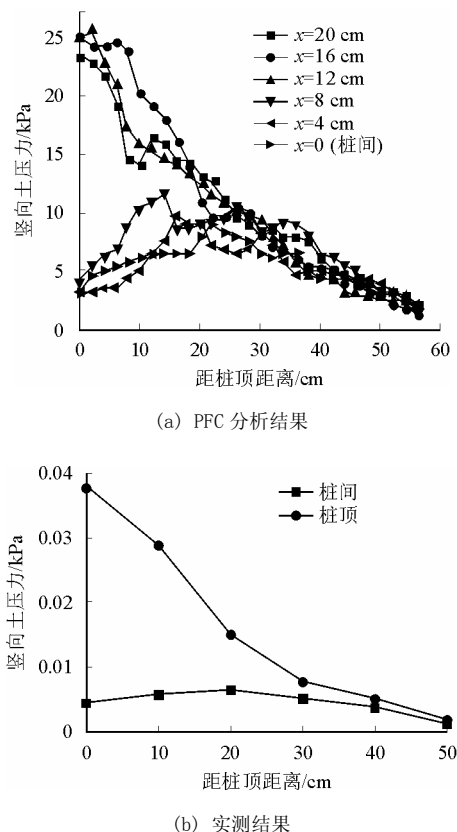


图 5 竖向土压力分布
Fig.5 Distribution of vertical earth pressure

图 6 为图 5 与同算例侧向土压力的变化规律 ($s - a = 20 \text{ cm}$)。由图 6(a)中 PFC 分析结果可以看出, 在距桩顶 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 处, 桩间侧压力较大, 在桩顶 10 cm 范围, 桩顶侧压力增幅明显。由图 6(b)实测结果可见, 在距桩顶 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 范围, 桩顶处侧向应力增大, 而桩间则变化不大。两个图进一步说明土拱在拱脚处产生较大的水平推力, 拱脚的范围大概距桩顶 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 。

综上所述可知, 桩顶上方局部范围土体处于三向受压状态。比较图 5 和图 6 中桩顶处的最大竖向应力/最大侧向应力值, 实测值为 2.5 , 计算值为 1.8 , 按 $\varphi = 29^\circ$ 计算, 土体处于弹性状态, 所以文献[18]将桩顶按弹性核考虑是可行的。但是, 土拱

破坏模式按太沙基破坏模式考虑时, 桩间土拱的形状与实际不甚相同。桩间实测的竖向应力/侧向应力比值为 0.89 , 计算值为 0.48 , 相差较大, 仍能看出桩间主应力方向发生了偏转。

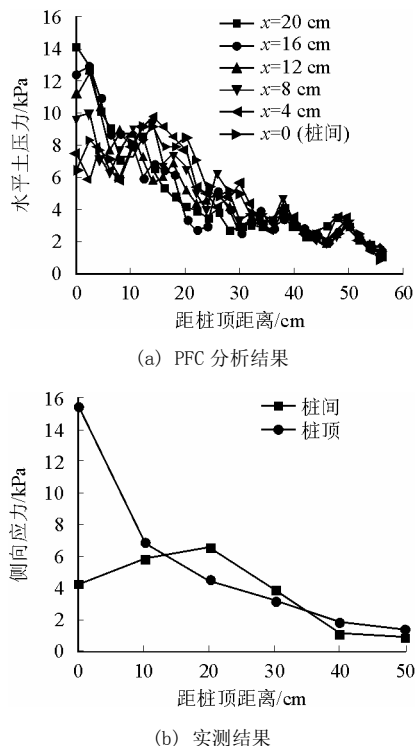


图 6 水平土压力分布
Fig.6 Distribution of lateral earth pressure

3.4 竖向位移分布

填土达到一定高度时会出现完整的土拱效应, 继续加载时, 对应的沉降特性同样体现出土拱效应的实质。

通过 PFC 中 FISH 语言, 自动实现“等值线图”实时绘制程序。该方法首先搜索出颗粒中最大的位移值, 将最大位移值划分为 8 等份, 将 8 等份的位移值用 8 种不同颗粒的颜色进行表示, 这样位移的分布情况可以通过不同颗粒的颜色来获知。图 7 为土层顶面加载 100 kPa 时竖向位移的增量等值线图, 其中图 7(e)为各颜色与位移量大小的关系对应图。比较各图 7(a)~7(d)可以看出, 桩帽顶部局部范围变形受到限制, 桩顶和桩间的填土中出现了明显的差异沉降, 差异沉降随着桩间净距 ($s - a$) 的增大而增大, 当 ($s - a$) 相同时, 差异沉降的大小基本相似, 仅在桩帽边缘附近滑动区域存在差异, 形成了某一滑动面, 滑动面的分布主要与桩帽的形式和桩距大小有关。对于大桩帽, 滑动面为一曲面, 类似于 Zaeake 等^[4]的多拱破坏模式, 而小桩帽则倾向为竖直面, 类似 Terzaghi^[1]提出的竖直破坏面。由图

7(a)~7(d) PFC 分析结果可以看出, 等沉面的高度集中在桩顶以上第三至第四层填土中, 这与曹卫平^[5]的试验结果 $1.4(s-a) \sim 1.5(s-a)$ 较一致, 而与 Terzaghi^[1]建议的等沉面的高度取 $2.5(s-a)$ 差距较大。

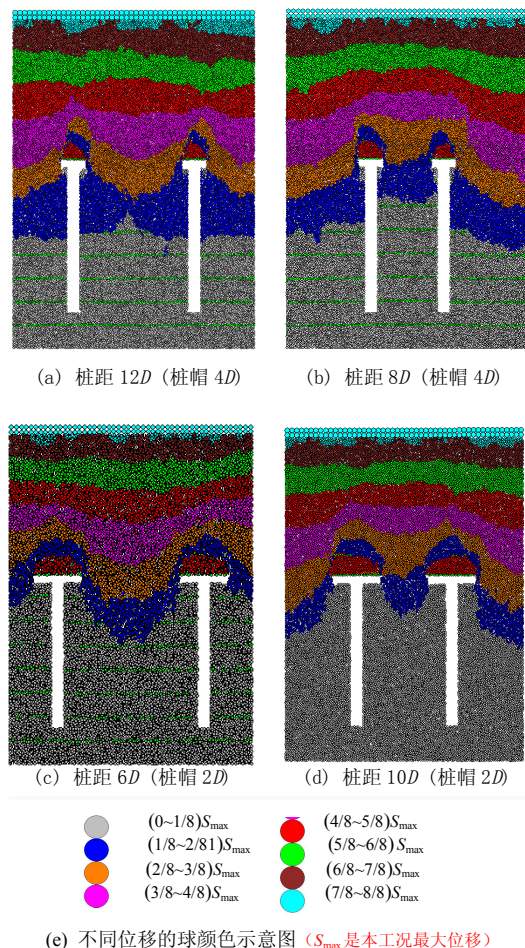


图 7 竖向位移等值线图

Fig.7 Contours of vertical displacement

4 讨论

土拱效应只是一个概念, 表示路堤中不同区域填料之间通过相互作用的剪应力而发生荷载转移的现象。土拱效应的参数有多个, 如桩土应力比、荷载分担比, 应力折减系数等。桩土应力比 n 值越大, 代表土拱效应越明显:

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} \quad (1)$$

式中: n 为桩土应力比; σ_p 为桩帽上的平均应力; σ_s 为桩间土体平均应力。

桩帽不同时, 采用应力折减系数 S_r 可以更为客观地反映土拱效应的大小, S_r 值越小, 表示土拱效应越明显。

$$S_r = \sigma_s / \gamma H \quad (2)$$

式中: S_r 为应力折减系数; σ_s 为桩间平均土体应力; γH 为土体自重应力。

采用 PFC 对不同桩帽、桩间净距 $(s-a)$ 和填土内摩擦角 φ 的情况进行了分析。为便于与试验结果的比较, 本文 σ_s 采用桩间中心的土体应力代入计算, 讨论土拱效应的影响因素。

4.1 桩帽大小对土拱效应的影响

分别取桩帽大小 $a=20$ 、15、10 cm 和无桩帽四种情况为例, 研究桩帽大小对土拱效应的影响。由图 8 可见, 应力折减系数随桩净距 $(s-a)$ 的增大而增大, 但增大的幅度与桩帽大小相关。桩净距越小, 应力折减系数越小, 土拱效应越明显; 桩净距相同时, 无桩帽时的应力折减系数最大, 因为此时桩土间沉降差相对较小, 土拱效应较弱, 所以使用较大的桩帽比使用较小的桩间距要经济, 但当桩净距等于 10 cm 和 60 cm 时, 4 种情况的应力折减系数趋于定值, 说明桩净距过大 $(s-a) \geq 12D$, 和过小 $(s-a) \leq 2D$ 时, 土拱效应的发挥受到限制, 桩帽的影响已不明显。

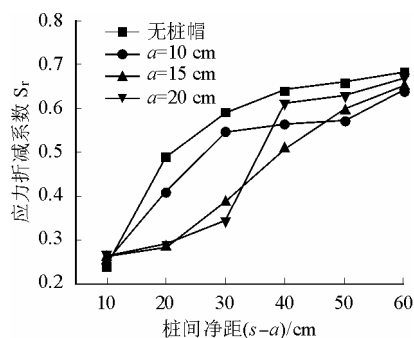


图 8 桩帽大小对应力折减系数的影响

Fig.8 Influence of pile-cap size on stress reduction ratio

4.2 不同桩帽间距 s 对土拱效应的影响

图 9 以桩帽宽 $a=10$ cm 为例, 给出了不同桩帽间距 $(s-a)$ 对应的竖向和水平向应力的桩土应力比

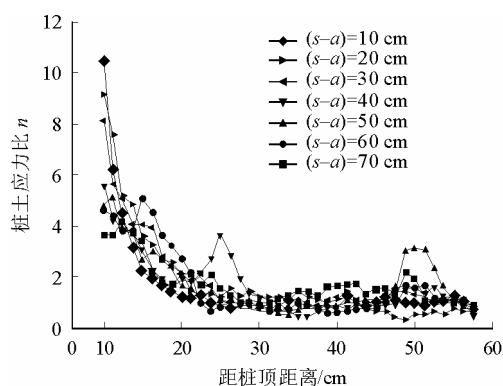


图 9 桩帽间距对桩土应力比的影响

Fig.9 Influence of pile-cap spacing on pile-soil stress ratio

变化规律。由图可见,对于竖向应力,在距桩顶 0~10 cm 深度范围内,桩土应力比 n 变化显著, n 随着 $(s-a)$ 的增大而减小;在距桩顶大于 a 的填土中, n 总体变化不大,说明土拱效应的影响主要集中在 0~ a 区域内。对于水平应力,桩土应力比波动较大,但在距桩顶 0~ a 区域范围内的填土, n 值仍有所增加,但随 $(s-a)$ 的变化, n 值的变化幅度不大,在 2.2~3.5 之间变化。

4.3 填土高度对土拱效应的影响

图 10 为桩帽宽 $a=20$ cm,桩距 $s=40$ cm 时不同填料高度下桩土应力比 n 的分布规律。从图中可以看出,当填土总高度过小,小于 $0.5(s-a)$ 时,土拱表现不明显,一旦填土总高等于 $(s-a)$,即有明显的土拱效应产生;当填土高度大于 $1.5(s-a)$ 时,桩土应力比变化规律较为相似,桩土应力比均在距桩顶 $(s-a)$ 附近发生明显转折。在距桩顶距离大于 $(s-a)$ 的填土中,桩土应力比 n 趋于一致,而距桩顶距离小于 $(s-a)$ 的填土中,桩土应力比变化明显,距桩顶越近桩土应力比 n 越大,并且填土总高越高, n 的数值越大。PFC 分析结果说明,土拱效应主要表现在桩顶至 $(s-a)$ 范围内,且填土总高越高, n 的数值越大,但当填土高度小于 $(s-a)$ 时,土拱效应不稳定,所以 $H_{\min} \geq (s-a)$ 。其他的研究结果认为,形成土拱的路堤最小高度 $H_{\min} \geq 0.7s$ [19],文献[9]推荐 $H_{\min} \geq s$,文献[20]则提出 $H_{\min} \geq 1.4(s-a)$ 。

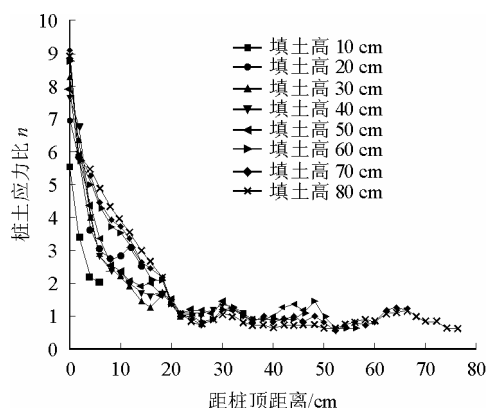


图 10 填土高度对桩土应力比的影响

Fig.10 Influence of embankment height on pile-soil stress ratio

4.4 填土性质的影响

以桩帽宽 $a=10$ cm、 $(s-a)=20$ cm 为例,对 φ 分别等于 21° 、 29° 、 33° 三种内摩擦角的填土进行分析,得到竖向桩土应力比分布曲线如图 11 所示。由 PFC 分析结果可见,桩土应力比随着 φ 值增大而增大,这与文献[18]试验结论一致。

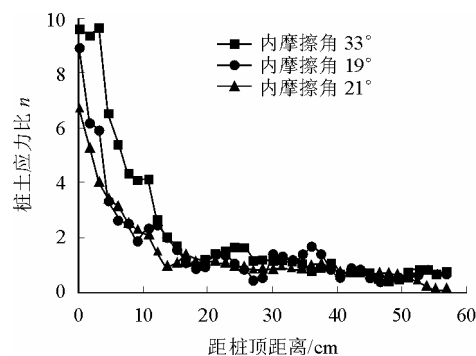


图 11 填土内摩擦角对桩土应力比的影响

Fig.11 Influence of internal friction angle on pile-soil stress ratio

图 12 为 PFC 算得的不同颗粒大小竖向桩土应力比变化曲线。由图可见,当颗粒粒径不同时,桩土应力比在桩顶 0~10 cm (即 $(s-a)/2$) 范围变化明显;颗粒越大,颗粒的阻塞效应越明显,桩顶的桩土应力比也愈大。文献[22]通过现场试验证明,粒径大的垫层材料形成的土拱稳定性要强于粒径较小的垫层材料所形成的土拱结构,所以在桩顶处可优先选用粒径较大的粗粒土填料。

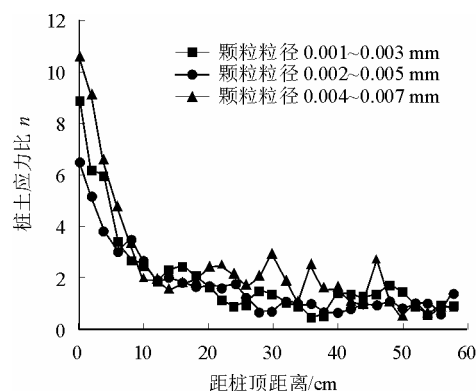


图 12 颗粒大小对桩土应力比的影响

Fig.12 Influence of soil particle size on pile-soil stress ratio

5 结 论

(1) 土拱效应的形成是土颗粒接触力改变的结果,接触应力越大,土拱效应越明显;土拱效应也是主应力方向发生偏转的结果,虚拟拱体的形状和范围与桩帽大小、桩帽净间距、加筋体关系密切。

(2) 桩帽顶部局部范围土体的主应力方向保持不变,变形也受到限制,可以看成三向受压的“弹性核”。

(3) 对于桩承式(无筋)路堤,桩间土沉降量大于桩体沉降量,两桩之间土体产生被动拱,呈下凹状;不同桩帽对应的拱脚形状不同,等沉面高度约为 $1.4(s-a) \sim 1.5(s-a)$ 。

(4) 桩承式路堤土拱效应的发挥程度不仅与桩帽大小、桩帽净间距、路堤填料高度及路堤土的内摩擦角、颗粒大小等因素有关, 而且还取决于加筋体的相对刚度等因素。桩帽越大、净间距越小、填土高度越高、填土性质越好、颗粒越大, 土拱效应越明显。当桩净距过小或过大时, 桩帽的影响不明显; 当填土高度大于 $(s-a)$ 时土中便可形成稳定的土拱。

参考文献

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Son, 1943.
- [2] HEWLETT J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. **Ground Engineering**, 1988, 21(3): 12—18.
- [3] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994.
- [4] ZAESKE D, KEMPFERT H G. Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über punktförmigen Traggliedern[J]. **Bauingenieur**, 2002, 77: 80—86.
- [5] 曹卫平. 桩承式路堤土拱效应及基于性能的设计方法研究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [6] 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.
- [7] JONES C J F P, LAWSON C R, AYRES D J. Geotextile reinforced piled embankments[C]//Proc. 4th Int. Conf. on Geotextiles: Geomembranes and Related Products. Rotterdam: Balkema, 1990: 155—160.
- [8] GUIDO V A, KNEUPPEL J D, SWEENEY M A. Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs[C]//Proceedings of Geosynthetics '87 Conference. New Orleans: [s.n.], 1987: 216—225.
- [9] HAN J, AKINS K. Use of geogrid-reinforced and pile-supported earth structures[C]//Proceedings of International Deep Foundation Congress. Orlando, USA: [s.n.], 2002: 688—679.
- [10] KEMPFERT H G, STADEL M, ZESKE D. Design of geosynthetic-reinforced bearing layers over piles[J]. **Bautechnik**, 1997, 74(12): 818—825.
- [11] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2002, 128(1): 44—53.
- [12] KEMPTON G, RUNSELL D, PIERPOINT N D, et al. Two and three-dimensional numerical analysis of the performance of piled embankments[C]//Sixth International Conference on Geosynthetics. GA, USA: [s.n.], 1998: 767—772.
- [13] SA C T, PALMEIRA E M, DELLABIANCA L M A, et al. Numerical analysis of reinforced embankments on soft soils[M]. Swets and Zeitlinger: Landmarks in Earth Reinforcement, 2001: 265—270.
- [14] 贾宁, 陈仁朋, 陈云敏. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(6): 755—760.
JIA Ning, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hang-Yong expressway[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 755—760.
- [15] ORIANNE J, DANIEL D, RICHARD K. Two-dimensional physical and numerical modeling of a pile-supported earth platform over soft soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2007, 133(3): 295—305.
- [16] 陈仁朋, 徐正中, 陈云敏. 桩承式加筋路堤关键问题研究[J]. **中国公路学报**, 2007, 20(2): 7—12.
CHEN Ren-peng, XU Zheng-zhong, CHEN Yun-min. Research on key problems of pile-supported reinforced embankment[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2007, 20(2): 7—12.
- [17] 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**, 2009, 39(1): 58—62.
YU Chuang, LIU Song-yu, DU Guang-yin, et al. Three dimensional simulations on soil arching of piled embankments[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2009, 39(1): 58—62.
- [18] 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.
- [19] BSI. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. London: British Standard Institution, 1995.
- [20] COLLIN J G. Column supported embankment design considerations[C]//Proceedings of the 52nd Annual Geotechnical Engineering Conference. Minnesota: [s.n.], 2004: 51—78.
- [21] 夏元友, 芮瑞. 刚性桩加固软土路基竖向土拱效应的试验分析[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(3): 22—26.
XIA Yuan-you, RUI Rui. Experimental analysis of vertical soil arching effect of embankment reinforced by rigid piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 22—26.
- [22] 贾致荣, 谭炜. 桩承路堤土拱效应现场试验与分析[J]. **工程勘察**, 2008, 36(6): 9—12.
JIA Zhi-rong, TAN Wei. Experimental analysis of soil arching effect of pile-supported embankment[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2008, 36(6): 9—12.