

DOI: 10.11779/CJGE201711013

桩承式路堤“土拱结构”形成演化规律离散元分析

付海平, 郑俊杰*, 赖汉江

(华中科技大学岩土与地下工程研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: “土拱结构”作为桩承式路堤中的主要荷载传递媒介, 对路堤荷载传递和路堤填料位移有显著影响。基于室内模型试验, 采用颗粒流软件 PFC^{2D} 建立桩承式路堤离散元 (DEM) 数值分析模型, 基于应力主方向、接触力链及路堤填料沉降分布规律对路堤中“土拱结构”形态及其演化规律进行深入分析。研究表明: 路堤中“土拱结构”随桩土相对位移的增加而逐渐发展并最终趋于稳定, 最终的“土拱结构”形态呈 0.8 倍桩净间距高的抛物线形; 路堤填筑高度对“土拱结构”形态、演化规律以及荷载传递效率有显著影响; 路堤填料粗糙度、桩净间距及桩梁宽度对路堤荷载传递效率有显著影响, 但对“土拱结构”最终形态几乎无影响。

关键词: 桩承式路堤; “土拱结构”; 室内模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)11-2050-08

作者简介: 付海平(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理理论研究。E-mail: fuhaiping@hust.edu.cn。

Discrete element analysis of the development and evolution of “soil arching” within a piled embankment

FU Hai-ping, ZHENG Jun-jie, LAI Han-jiang

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: “Soil arching”, as the major medium of load transfer for a piled embankment, has significant influences on the behaviors of load transfer and of embankment fill displacements. Based on the laboratory model tests, a series of numerical models by discrete element method (DEM) are established with the particle flow code PFC^{2D} to investigate the features and evolution of “soil arching” by analyzing the distribution of principal stress direction, contact force chains and embankment fill settlements. The numerical results indicate that the “soil arching” develops gradually with the increase of pile-soil relative displacement and maintains a relatively stable state finally. Meanwhile the relatively stable “soil arching” is roughly parabola-shaped with a height of 0.8 times the clear spacing of cap beam. Additionally, the embankment height has significant influences on the features and evolution of “soil arching”, as well as the load-transfer efficacy. However, the roughness of embankment fill, the clear spacing of cap beam and the width of cap beam have significant influences on the load-transfer efficacy, but not on the “soil arching” features.

Key words: piled embankment; soil arching; laboratory model test; numerical simulation

0 引言

高速公路及铁路建设中, 不可避免地要穿越一些不良地基(如淤泥质土、膨胀土及可液化土等), 在这些不良地基上修建路堤时常常面临地基承载力不足, 路堤沉降和水平位移过大, 整体或局部失稳等问题。与传统上常用的软基处理方法如超挖换填、堆载预压、选用轻质填料以及设置竖向增强体等相比, 桩承式路堤因其经济性好, 且在一定程度上能够解决地基承载力不足, 路堤不均匀沉降过大等问题, 已在国内外高速公路及铁路工程中得到了广泛应用^[1-2]。

桩承式路堤中因桩-土刚度差异, 在路堤荷载作用下会发生桩土差异沉降, 进而导致路堤填料发生相对

滑动形成剪切面, 该剪切面上的剪应力将桩间土上方部分荷载传递至桩体, 从而使桩间土承担的荷载减小, 桩体承担的荷载增大, 这种荷载传递机理即为土拱效应。为便于叙述, 本文将土拱效应这一抽象概念采用“土拱结构”进行描述。

目前, 国内外学者提出了多种“土拱结构”理论或模型。Marston 理论^[3]根据桩土相对位移平衡方程计算桩-土承担的荷载, 但并未给出“土拱结构”具体形

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278216); 中国博士后科学基金项目(2016M600595)

收稿日期: 2016-08-18

*通讯作者(E-mail: zhengjj@hust.edu.cn)

态。Terzaghi 模型^[4]认为路堤中“土拱结构”为竖直剪切面,并根据土体竖向力平衡微分方程计算桩-土承担的荷载。H&R 模型^[5]认为“土拱结构”呈半球壳形,其可拆分为一个球形土拱和 4 个平面土拱,并以拱顶或拱脚土体单元的极限平衡方程求解桩-土荷载分担比。Zaeske 模型^[6]认为“土拱结构”形态由多个不同圆心的拱组成,并根据桩间土上部土体和桩帽上土体的几何条件及静力平衡条件求解桩-土荷载分担比。楔形体模型^[7]则假定“土拱结构”呈楔形体形,且楔形体内的填土荷载由桩间土承担,其余荷载均由桩体承担。俞缙等^[8]建立了路堤-网-桩-土相互协调工作的荷载传递模型,该土拱模型考虑了桩土相互作用、土拱效应和张拉膜效应三者耦合作用对桩土应力比及桩土差异沉降的影响。当塑性点出现在桩顶时,陈福全等^[9]认为“土拱结构”是以对角桩的桩心连线为直径的半球环,并基于该假定改进了 H&R 土拱模型。综合分析可知,现有的“土拱结构”形态基本上均基于假设提出,真实土拱形态并未得到试验验证。

与此同时,现行相关规范对于土拱效应的计算均基于不同的“土拱结构”理论或模型。英国标准 BS8006^[10-11]中第一种土拱效应计算方法基于 Marston 土拱理论^[4],而 BS8006^[11]中第二种土拱效应计算方法基于 H&R 土拱模型^[5];德国建议 EBGEO^[12]采用 Zaeske 土拱模型^[6];法国标准^[13]和日本设计手册^[14]则采用楔形体土拱模型^[7]。大量研究结果表明,不同的“土拱结构”理论或模型的计算结果差异较大。然而,土拱效应作为桩承式路堤中的主要荷载传递机理,其计算结果的准确性将直接影响路堤设计的合理性。

本文基于室内模型试验,采用颗粒流软件 PFC^{2D}建立桩承式路堤离散元 (DEM) 数值分析模型,基于接触力、应力主方向及路堤填料沉降分布规律对“土拱结构”形态及演化规律进行研究,并分析了路堤高度、桩净间距等对“土拱结构”的影响。

1 数值建模及参数选取

1.1 室内模型试验概述

如图 1 所示,二维模型试验装置由基座、有机玻璃板和可竖向移动的活动钢板组构成。有机玻璃板与基座构成的砂箱尺寸为 1200 mm×300 mm×800 mm (长×宽×高)。活动钢板组由钢条、活动钢板、升降机和位移计组成,钢条可通过螺栓固定在装置基座上以模拟桩梁或固定在活动钢板上通过升降机控制进行竖向移动以模拟桩土相对位移。试验过程中,通过土压力盒记录土压力变化,并通过数码相机记录各阶段路堤填料照片,后期通过 Matlab 软件处理获取填料位移分布规律。

路堤采用粒径范围为 1.4~2.0 mm 的长江江砂分层填筑,每层厚度为 25 mm,密实度控制为 85%,重度为 16.88 kN/m³。路堤最大填筑高度 $H=600$ mm,桩间距 $s=375$ mm,桩梁宽度 $a=75$ mm,桩净间距 $s-a=300$ mm。

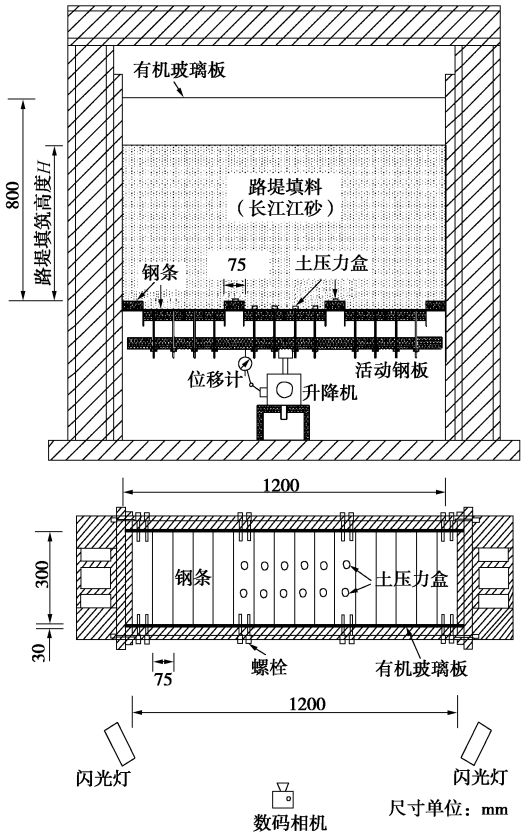


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Layout of test setup

1.2 模型建立及参数选取

基于模型试验装置的对称性,建立如图 2 所示的桩承式路堤 DEM 数值分析模型,底部的活动墙用来模拟桩土相对位移。路堤填料采用两个 Disk 颗粒构成的 Clump 单元模拟,如图 3 所示, η 为 Clump 单元中两圆颗粒圆心间距离 r 与颗粒粒径 R 之比,用于表征颗粒表面粗糙程度,本文将其定义为粗糙度。路堤采用压实法进行分层填筑^[15],每层填筑 25 mm (与模型试验一致)。

国内外学者通常采用参数反演试算来确定 PFC^{2D}中颗粒的细观参数 (如法/切向刚度、摩擦系数等),即不断地调整颗粒细观参数,使得 DEM 模型与模型试验表现出相同的宏观响应。最终确定的细观参数见表 1。

表 1 颗粒流模型细观参数

Table 1 Micro-mechanical parameters for particle flow model				
参数	密度 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	法向刚度 $/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	切向刚度 $/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	粗糙度 η
路堤填料	1058	2.5×10^6	2.5×10^6	0.05
桩、模型箱	—	5.0×10^8	5.0×10^8	—

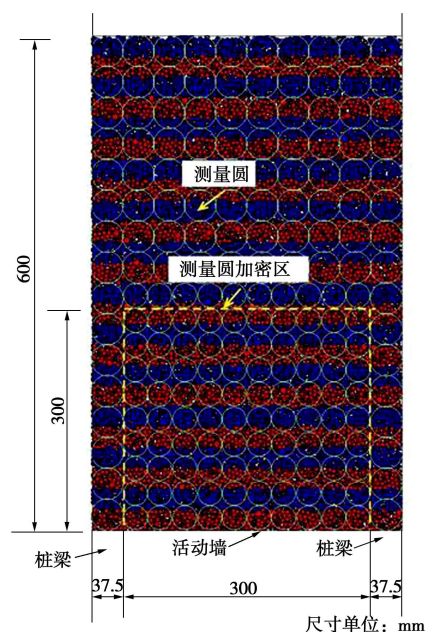


图 2 桩承式路堤 DEM 模型
Fig. 2 DEM model for piled embankment

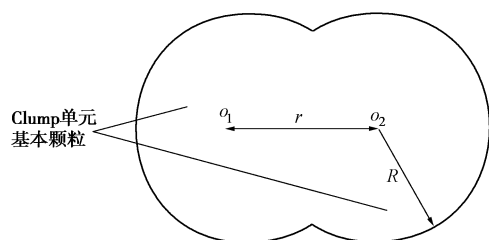


图 3 Clump 单元示意图
Fig. 3 Diagram of Clump element

1.3 DEM 模型验证

图 4 为 DEM 模型计算的路堤荷载传递效率与试验数据对比。从图中可看出, DEM 与模型试验结果变化规律基本一致, 荷载传递效率均随桩土相对位移 Δs 的增加而逐渐增大, 并在 Δs 约为 3 mm 时达到各自峰值, 之后趋于稳定。与此同时, DEM 模拟的路堤荷载传递效率峰值 (73.41%) 与试验数据 (69.18%) 基本相同, 两者差异仅约为 4.23%。

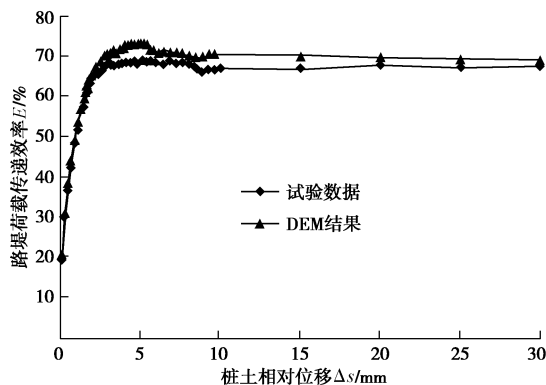


图 4 路堤荷载传递效率 DEM 结果与试验数据对比
Fig. 4 Comparison of load-transfer efficacy between DEM results and experimental data

DEM 模型中, 利用 PFC^{2D} 中 Fish 语言获取路堤填料最大竖向位移值 Δs , 将其划分为 16 等分, 并以不同的颜色标记, 从而绘制出路堤填料沉降分布等值线图。如图 5 所示为桩土相对位移 $\Delta s=30.0$ mm 时, DEM 模拟的路堤填料沉降分布规律与试验结果对比。从图中可看出, DEM 模拟的路堤填料沉降分布规律与模型试验结果基本一致。

综上分析, DEM 结果与试验数据较为吻合, 能够实现桩承式路堤的模拟。

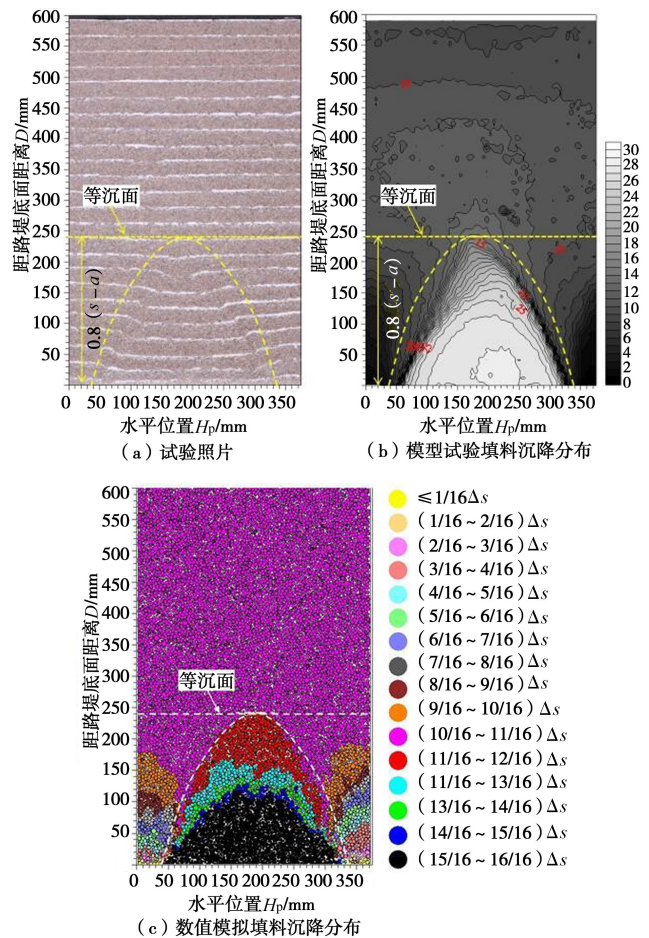


图 5 路堤填料沉降分布 DEM 与试验结果对比 ($\Delta s=30.0$ mm)
Fig. 5 Comparison of embankment fill settlement between DEM results and experimental data ($\Delta s=30.0$ mm)

2 “土拱结构” 形态分析

土拱效应是桩承式路堤中因桩土相对位移引起的一种应力重分布现象。DEM 模型中, 路堤荷载通过颗粒间的接触力链传递, 而颗粒相对滑动势必会引起应力主方向的偏转, 故可基于接触力及应力主方向分布规律对路堤中“土拱结构”进行分析。

随着桩土相对位移 Δs 的增加, 路堤荷载传递效率逐渐增大, 同时“土拱结构”也随之发展。由图 4 可知, 路堤荷载传递效率在 Δs 达到 3 mm 后趋于稳定, 由此可推测“土拱结构”在桩土相对位移为 3 mm 时

基本形成, 此后保持相对稳定状态。图 6 (a) 和 6 (b) 分别为“土拱结构”基本形成后的路堤中应力主方向及接触力链分布规律。其中, 应力主方向根据路堤中布置的测量圆 (如图 2 所示) 计算获得^[15]。

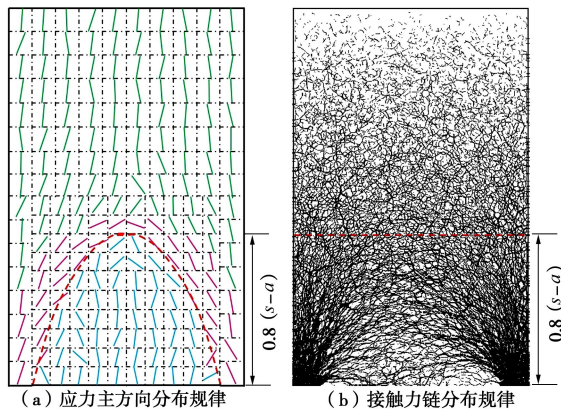


图 6 接触力链及应力主方向分布规律 ($\Delta s=30.0$ mm)

Fig. 6 Distribution of contact force chains and principal stress direction ($\Delta s=30.0$ mm)

如图 6 (a) 所示, 随着距路堤底面距离 D 的增加, 桩梁上方应力主方向逐渐向桩间偏转, 在 D 约为 $0.8(s-a)$ 高度处合拢, 形成虚拟“土拱结构”, 其形态呈抛物线形。高度为 $0.8(s-a)$ 的“抛物线”附近应力主方向偏转程度最大, 基本上与“土拱结构”轮廓线平行; “土拱结构”下方路堤中部应力主方向偏转程度较小, “土拱结构”上方应力主方向偏转程度随着 D 的增大而逐渐减小。在路堤荷载作用下“土拱结构”内侧土体相对滑动量较大, 在沉降变形过程中接触力会发生较大偏转, 从而接触力链在距路堤底面较低的位置开始合拢, 但是在距路堤底面距离 $D=0.8(s-a)$ 高度以上, 接触力分布较为均匀, 如图 6 (b) 所示, 基于上述分析可推测, 路堤中发展完成时的“土拱结构”可采用高度约为 $0.8(s-a)$ 的“抛物线”描述。

另外, 从图 5 中可看出, 路堤填料沉降在桩梁及其斜上方区域内随着与路堤底面距离 D 的增加而增大, 而在桩间土上方则随着 D 的增加而逐渐减小。与此同时, 在距路堤底面 $0.8(s-a)$ 高度以上, 桩梁与桩间土上方路堤填料间的差异沉降几乎可以忽略, 而该高度以下, 桩梁与桩间土上方差异沉降则十分显著, 即该工况下等沉面高度为 $0.8(s-a)$ 。土拱效应是因路堤填料相对滑动而引起的一种应力重分布现象, 从图 5 中可清楚地看到桩间土上方由较大沉降的路堤填料组成的边界呈“抛物线”形, 这进一步证实了该工况下“土拱结构”发展完成后的形态可用高度约为 $0.8(s-a)$ 的“抛物线”描述。

3 “土拱结构”形成-演化规律分析

由第 2 节分析可知, 基于接触力链、应力主方向

及路堤填料沉降分布规律对“土拱结构”形态的分析结果一致。因此可基于路堤填料沉降分布规律随桩土相对位移增加的演化规律对“土拱结构”的形成-演化进行分析。

图 7 为路堤填料沉降随桩土相对位移增加的演化规律。对比图 7 (a) ~ 7 (i) 发现, 较大的差异沉降主要在“土拱结构”下方, 而“土拱结构”上方几乎实现等沉。另外, 在较小的桩土相对位移 ($\Delta s=0.5$ mm) 下, 路堤中的“土拱结构”呈“三角形”, 类似于金字塔形或楔形体“土拱结构”; Δs 达到 1.0 mm 时, 路堤中能形成抛物线形“土拱结构”, 但其高度较低, 约为 $0.4(s-a)$; 随着 Δs 的增加, “土拱结构”高度逐渐增大, 直到 $\Delta s=3.0$ mm 时, “土拱结构”高度达到最大值, 约为 $0.8(s-a)$; 之后, 随着 Δs 的继续增加, 结合图 5 (c) 发现“土拱结构”形态没有明显差异, 均呈高度为 $0.8(s-a)$ 的抛物线形, 即“土拱结构”在 $\Delta s=3.0$ mm 时发展完成。综上所述, 路堤中“土拱结构”演化规律可概述为: 三角形“土拱结构” → 抛物线形“土拱结构” → “土拱结构”高度逐渐增大, 直到达到最大值 → “土拱结构”形态基本保持不变。

基于上述分析可知, 发生桩土相对位移时土拱效应随即产生, 但在桩土相对位移较小的条件下, 路堤中仅能形成三角形“土拱结构”, 其高度较低, 荷载传递能力小, 土拱效应较弱, 相应的路堤荷载传递效率较小。随着桩土相对位移的增加, 抛物线形“土拱结构”高度逐渐增大, 其传递荷载的能力也逐渐增大, 桩间土上更多荷载被传递至桩梁, 即土拱效应越显著, 从而荷载传递效率随桩土相对位移的增加而增大, 如图 4 所示。当 Δs 达到 3.0 mm 后, 路堤中形成了稳定的“土拱结构”, 其形态基本保持不变, 相应地其传递荷载的能力也基本保持不变, 从而荷载传递效率保持相对稳定。

4 “土拱结构”影响因素分析

4.1 路堤高度对“土拱结构”的影响

图 8 为不同路堤填筑高度工况下路堤荷载传递效率变化规律。当路堤填筑高度较低时, 荷载传递效率较小, 且峰值与稳定值之间差异较大。但是, 当填筑高度 $H \geq 450$ mm 时, 各工况下路堤荷载传递效率差异较小, 稳定后在 $68\% \sim 73\%$ 之间。从图中还可看出, 路堤高度越大, 荷载传递效率达到峰值所需的桩土相对位移也越大, 即路堤高度的增大将延缓“土拱结构”的发展过程。

图 9 为不同路堤填筑高度工况下 $\Delta s=10.0$ mm 时路堤填料沉降分布规律。当 $H=150$ mm ($0.5(s-a)$) 时, 路堤中的“土拱结构”为贯穿至路堤顶面的倾斜

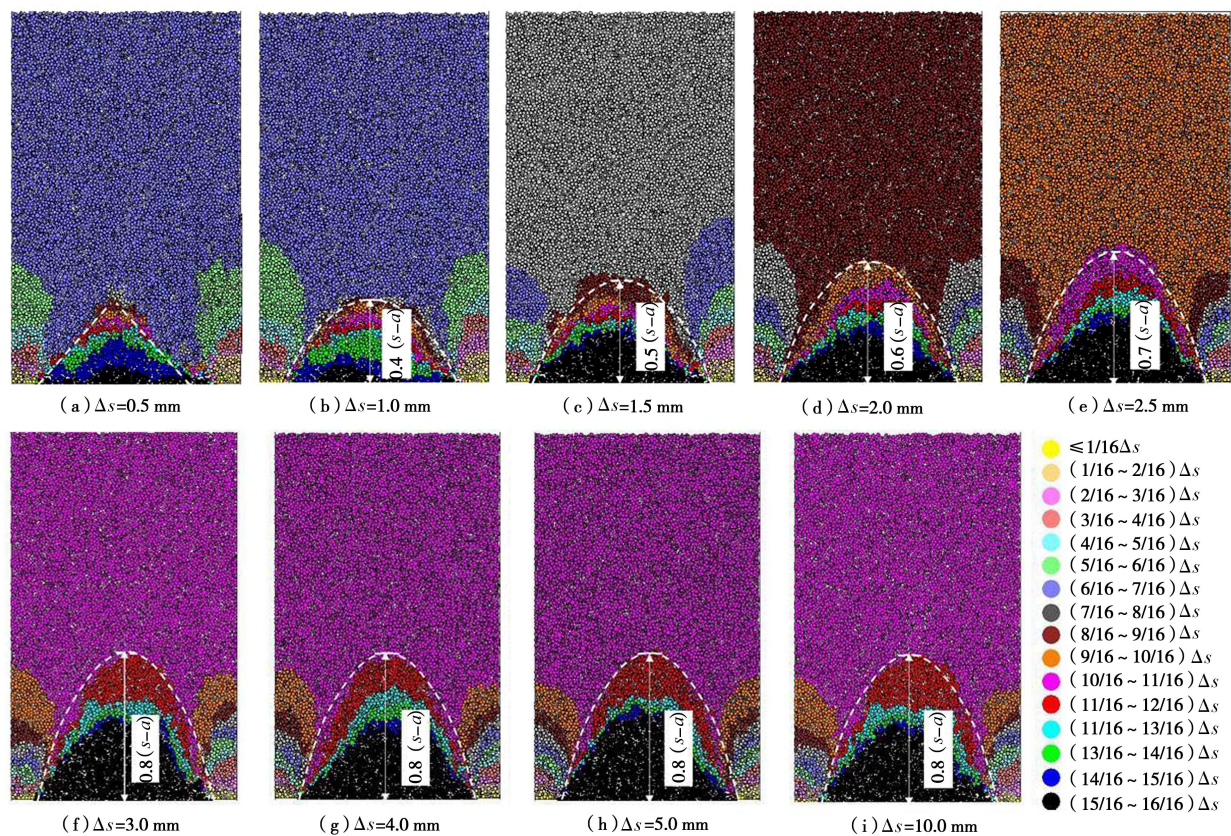


图 7 桩土相对位移不同时路堤填料沉降分布规律

Fig.7 Distribution of embankment fill settlement under different pile-soil relative displacement

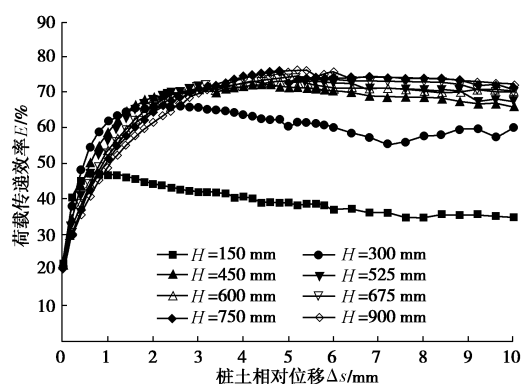


图 8 路堤高度对荷载传递效率的影响

Fig. 8 Influence of embankment height on load-transfer efficacy
剪切面，由此可推测路堤通过该“倾斜剪切面”将桩间土上方部分荷载传递至桩体，荷载传递效率达到峰值后“土拱结构”受桩土相对位移影响较大，从而使得荷载传递效率峰值与稳定值差异较大； $H=300\text{ mm}$ ($1.0(s-a)$) 时，路堤中形成顶部不闭合的抛物线形“土拱结构”，荷载传递效率峰值与稳定值之间的差异仍较为显著； H 达到 450 mm ($1.5(s-a)$) 时，路堤中能形成完整的抛物线形“土拱结构”，从而使荷载传递效率峰值与稳定值差异较小。同时，对比图 9 与图 5 (c) 发现， H 等于 $450, 525, 600\text{ mm}$ 时，路堤中“土拱结构”高度分别约为 $1.2(s-a)$ ， $1.0(s-a)$ ， $0.8(s-a)$ ，表现出“土拱结构”高度随着路堤填筑高

度增加而逐渐减小的变化规律。在本文研究的路堤高度范围内，只有当路堤填筑高度大于 600 mm ($2.0(s-a)$) 时，路堤中“土拱结构”高度差异较小，均约为 $0.8(s-a)$ 。

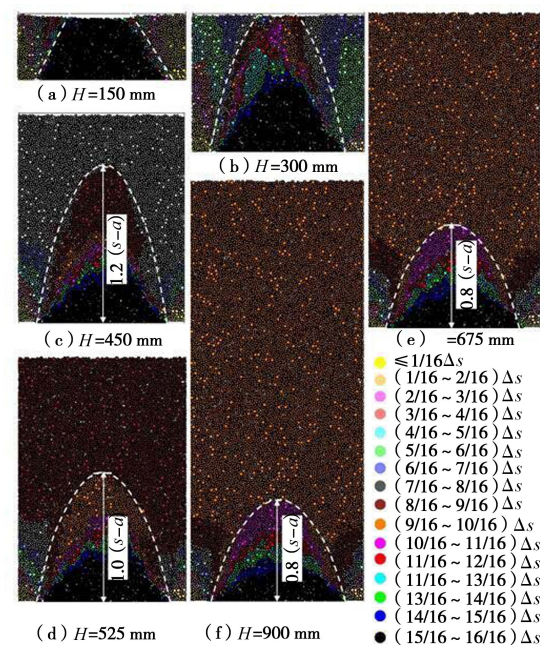


图 9 填筑高度不同时路堤填料沉降分布规律 ($\Delta s=10.0\text{ mm}$)
Fig. 9 Distribution of embankment fill settlement under different embankment height ($\Delta s=10.0\text{ mm}$)

英国标准 BS8006^[10-11]认为路堤高度在 $0.7(s-a) \sim 1.4(s-a)$ 范围内时, 路堤中的土拱为部分土拱 (partial arching), 路堤高度大于 $1.4(s-a)$ 时, 路堤中能形成完全土拱 (full arching)。因此, 结合本文研究成果及英国标准建议, 可将不同高度的路堤划分为 3 类: ① $H < 0.7(s-a)$, 路堤中的“土拱结构”呈倾斜剪切面; ② $0.7(s-a) \leq H < 1.4(s-a)$, 路堤中形成顶部不闭合的部分“土拱结构”; ③ $H \geq 1.4(s-a)$, 路堤中能形成抛物线形完全“土拱结构”。

4.2 桩净间距对“土拱结构”的影响

图 10 为不同桩净间距工况下路堤荷载传递效率变化规律。由图可见, 桩净间距越小, 荷载传递效率越大, 即土拱效应越显著; 此外, 桩净间距越小, 荷载传递效率达到峰值所需的桩土相对位移越小, 即“土拱结构”越易发展完成。分析其原因可能是: 桩净间距越小, 相同的桩土相对位移对路堤填料的影响越大, 从而越易诱发土拱效应。

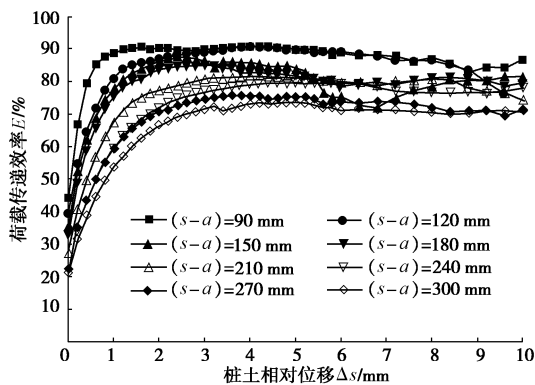


图 10 桩净间距对荷载传递效率的影响

Fig. 10 Influence of clear spacing of cap beam on load-transfer efficacy

图 11 为不同桩净间距工况下 $\Delta s=10.0\text{ mm}$ 时路堤填料沉降分布规律。各工况下, “土拱结构”最终形态几乎没有差异, 其高度约为 $0.8(s-a)$, 形态类似于抛物线。也就是说, 桩净间距对“土拱结构”最终形态

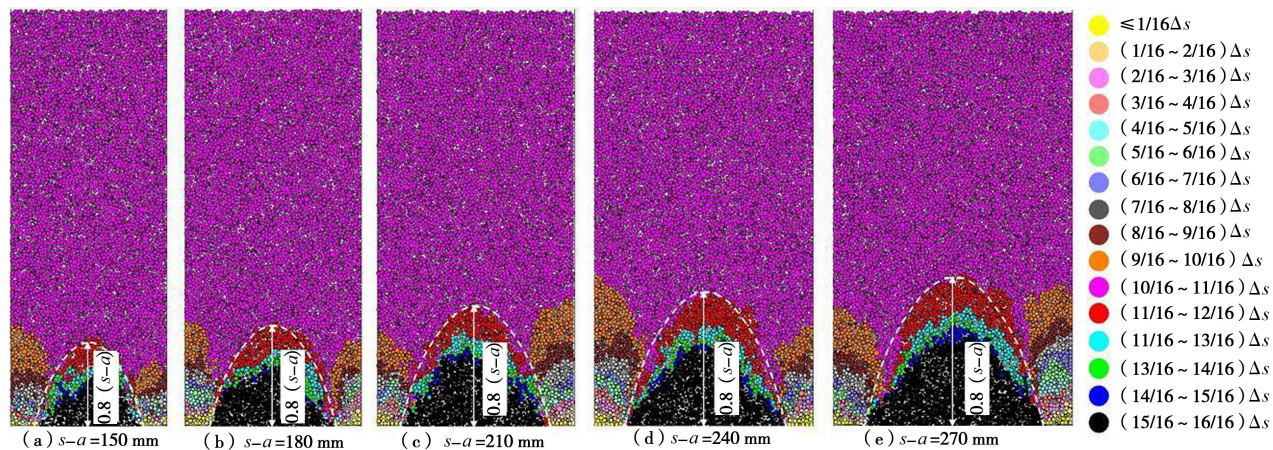


图 11 桩净间距不同时填料沉降分布规律 ($\Delta s=10.0\text{ mm}$)

Fig. 11 Distribution of embankment fill settlement under different clear spacing of cap beam ($\Delta s=10.0\text{ mm}$)

基本没有影响。

4.3 桩梁宽度对“土拱结构”的影响

图 12 为不同桩梁宽度工况下路堤荷载传递效率变化规律。从图中可看出, 桩梁宽度越大, 荷载传递效率越大, 分析其原因: 桩梁宽度增大, 桩体上方路堤填料荷载占单桩范围路堤荷载比例增大, 即直接由桩梁承担的荷载显著增加, 因此路堤荷载传递效率增大。此外, 桩梁宽度越大, 荷载传递效率达到峰值所需桩土相对位移越小, 即桩梁宽度越大, “土拱结构”越易发展完成。

图 13 为不同桩梁宽度工况下 $\Delta s=10.0\text{ mm}$ 时路堤填料沉降分布规律。从图中可看出, 各工况下“土拱结构”最终形态差异较小, 均可用高度为 $0.8(s-a)$ 的抛物线描述, 即桩梁宽度对“土拱结构”最终形态几乎没有影响。

4.4 路堤填料粗糙度对“土拱结构”的影响

图 14 为不同粗糙度工况下路堤荷载传递效率变化规律。整体上, 路堤荷载传递效率随桩土相对位移的增加而增大, 达到峰值后保持相对稳定, 并且荷载传递效率基本上均在 $\Delta s=3.0\text{ mm}$ 左右达到峰值, 即“土拱结构”均在 Δs 约为 3.0 mm 时发展完成。同时, 相同的桩土相对位移条件下, 粗糙度越大, 荷载传递效率也越大。

图 15 为不同粗糙度工况下 $\Delta s=10.0\text{ mm}$ 时路堤填料沉降分布规律。从图中可看出, 各工况下“土拱结构”最终形态没有明显差异, 均呈抛物线形, 且高度约为 $0.8(s-a)$, 也就是说粗糙度对“土拱结构”最终形态几乎没有影响。分析其原因: 土拱效应本质上是由于路堤填料间相对滑动面上剪应力引起的一种荷载传递机制理, 粗糙度越大, 剪切面上剪应力越大, 剪应力将更多的荷载传递到桩体上, 从而路堤荷载传递效率越大, 但是土拱效应的影响范围几乎不受剪应力大小的影响, 故“土拱结构”最终形态基本不受填料粗糙度大小影响。

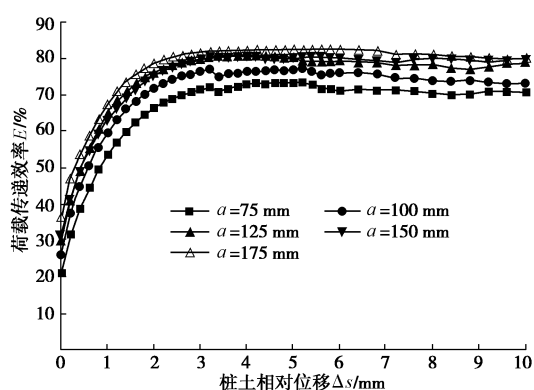


图 12 桩梁宽度对荷载传递效率的影响

Fig. 12 Influence of cap beam width on load-transfer efficacy

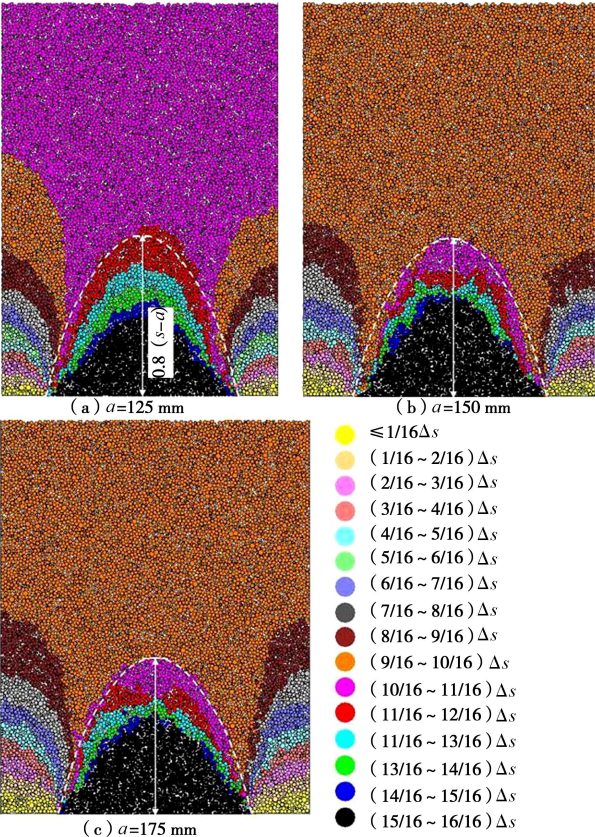


图 13 桩梁宽度不同时填料沉降分布规律 ($\Delta s=10.0$ mm)

Fig. 13 Distribution of embankment fill settlement under different width of cap beam ($\Delta s=10.0$ mm)

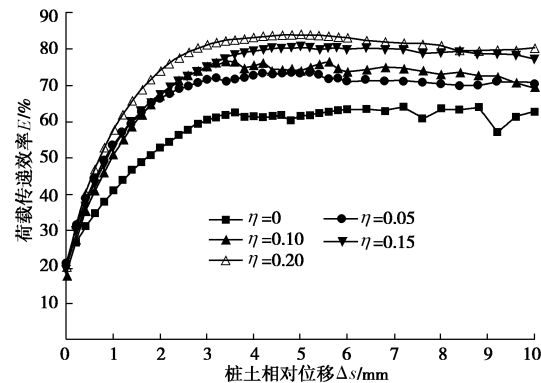


图 14 粗糙度对荷载传递效率的影响

Fig. 14 Influence of fill roughness on load-transfer efficacy

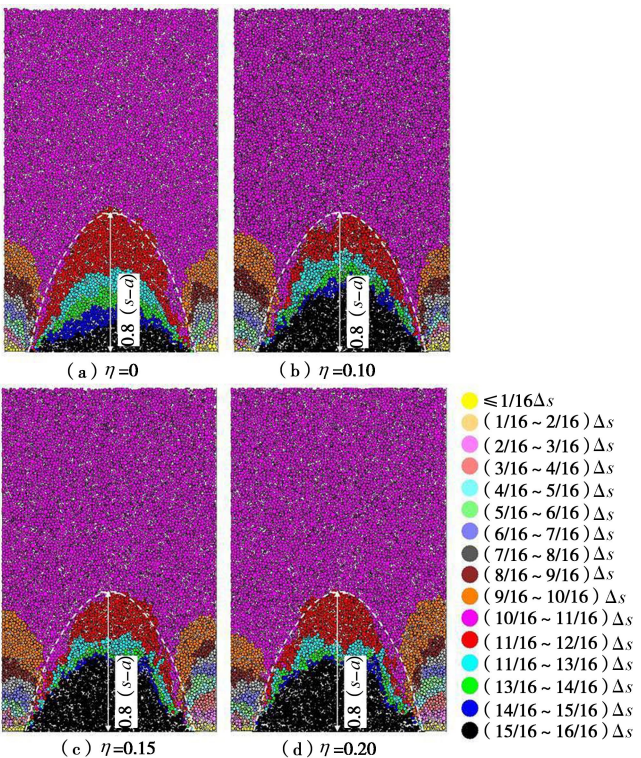


图 15 粗糙度不同时路堤填料沉降分布规律 ($\Delta s=10.0$ mm)

Fig. 15 Distribution of embankment fill settlement under different fill roughness ($\Delta s=10.0$ mm)

5 结 论

本文基于室内模型试验进行了一系列数值建模分析,较系统地研究了“土拱结构”形态及其演化规律,得到以下两点结论。

(1)“土拱结构”随桩土相对位移增加而逐渐发展。完全“土拱结构”的演化过程可概述为: Δs 较小时,路堤中形成三角形“土拱结构”,随着 Δs 增大,逐渐过渡到抛物线形“土拱结构”,之后抛物线形“土拱结构”高度随 Δs 增加而逐渐增大,达到最大值后“土拱结构”形态基本保持不变。

(2)路堤填筑高度不仅对路堤荷载传递效率有显著影响,而且影响“土拱结构”形态及其演化规律。随着路堤填筑高度的增大,路堤中土拱由倾斜的剪切面过渡到顶部不闭合的部分“土拱结构”,再到能形成完整的抛物线形“土拱结构”,但其高度随路堤填筑高度的增大而逐渐减小,当 $H \geq 2.0(s-a)$ 时,路堤中发展完成后的“土拱结构”高度差异较小,均约为 $0.8(s-a)$ 。填料粗糙度、桩净间距及桩梁宽度对荷载传递效率的影响显著,但对“土拱结构”最终形态的影响则几乎可以忽略。

参考文献:

[1] BRIANCON L, SIMON B. Performance of pile-supported embankment over soft soil: full-scale experiment[J]. Journal

- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(4): 551 - 561.
- [2] 郑俊杰, 曹文昭, 董同新, 等. 中低压缩性土地区桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1549 - 1555. (ZHENG Jun-jie, CAO Wen-zhao, DONG Tong-xin, et al. Experimental investigation of geogrid-reinforced and pile-supported embankment on soils with medium-low compressibility[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1549 - 1555. (in Chinese))
- [3] 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]. Bulletin: IA Engineering Experimental Station, Iowa State College, Ames IA, 1913, 31.
- [4] TERZAGHI K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Massachusetts, 1936: 307 - 311.
- [5] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankment[J]. Ground Engineering, 1988, **21**(3): 12 - 18.
- [6] ZAESKE D, KEMPFERT H G. Calculation and behavior of unreinforced and reinforced bearing layer over point- or line-shaped bearing elements[J]. Bauingenieur, 2002, **77**(2): 80 - 86.
- [7] CARLSSON B O. Reinforced soil, principals for calculation[M]. Sueitzzrland: Terratema A B, 1987.
- [8] 俞 缙, 周亦涛, 鲍 胜, 等. 柔性桩承式加筋路堤桩土应力比分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 705 - 713. (YU Jin, ZHOU Yi-tao, BAO Sheng, et al. Pile-soil stress ratio of deformable pile-supported and geosynthetics-reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 705 - 713. (in Chinese))
- [9] 陈福全, 李阿池. 桩承式加筋路堤的改进设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1804 - 1808. (CHEN Fu-quan, LI A-chi. Improved design method of geosynthetic reinforced pile supported embankments on soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1804 - 1808. (in Chinese))
- [10] BS8006—1995 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. London: British Standards Institution, 1995.
- [11] BS8006—2010 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. London: British Standards Institution, 2010.
- [12] EBGeo—2010 Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements[S]. Berlin: German Geotechnical Society, 2010. (in German)
- [13] IREX—2012 Recommendations for the design. Construction and control of rigid inclusion ground improvements[S]. Paris, ASIRI, 2012.
- [14] Manual on design and execution of reinforced soil method with use of geotextiles[S]. Tokyo: Public Work Research Center, 2000.
- [15] LAI Hai-jiang, ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, et al. DEM analysis of soil-arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported embankments[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **61**: 13 - 23.