

基于 PFC2D 的基坑排桩支护机理探讨

张婧¹, 王俊杰^{1,2*}, 武立清², 周泳峰²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 重庆交通大学 河海学院)

摘要:研究土拱效应有助于进一步揭示基坑排桩支护的机理。采用离散元 PFC2D 软件, 分析基坑排桩支护时土体内部力学变化, 重点探讨土拱发展各阶段的力学特性, 同时对桩间距、颗粒黏结强度和颗粒摩擦系数等对支挡效应的影响进行探讨。结果表明:在支护过程中, 土拱所能承载的荷载呈现先增大后减小最后趋于稳定的变化历程;土拱效应呈现“发育—形成—破坏(残余)”的变化过程, 土拱的形状大致呈马鞍形;颗粒间的黏结力和摩擦系数与排桩支挡效果呈正相关;桩间距与排桩支挡效果呈负相关。

关键词:离散元; 排桩; 基坑; 土拱效应; 支挡效果

排桩支护是基坑围护工程中一种快速、有效、方便的支护措施。排桩以离散的修筑方式实现了连续的支挡, 在以离散满足连续的过程中, 土拱效应起到了较为明显的作用。关于土拱效应, 最早由太沙基通过活动门试验发现, 此后众多学者纷纷投入到土拱效应的研究中, 并应用到工程领域中。比如, 赵明华、杨雪强、曹卫平和赵波等通过理论分析、数值模拟和物理试验等方式对边坡中的土拱效应进行研究和分析, 韩同春、费康、Lai Hanjiang 等对路堤中的土拱效应进行研究等。然而, 关于土拱效应在基坑排桩支护中的分析和应用, 仅有古海东、陈秋南、刘斌等进行了探讨和分析, 对于完全揭示排桩支护机理还远远不够。

鉴于此, 为了研究排桩支护基坑的机理, 该文采用离散元理论, 建立基于离散元的数值模型, 从细观土颗粒的角度研究在排桩支护下, 基坑桩间土拱的发展过程、其所能承载荷载的变化、桩后土体主应力变化以及不同因素(如桩间距、土颗粒间黏结强度和摩擦系数等)对土拱效应与排桩极限承载力的影响。

1 计算模型及参数

1.1 计算模型

排桩支护的边界条件与传统的抗滑桩支护边坡的

边界条件有较为明显的差别, 排桩支护基坑的桩前没有约束, 是临空面。为了可以对排桩支护基坑所产生的土拱效应进行合理分析, 采用吕涛、李明明等建模思路来选取研究对象。选取桩直径 $D=1\text{ m}$, 初始桩间距 $L=3\text{ m}$ ($S=L/D=3$), 模型长度 $M=6\text{ m}$ 。

采用基于离散元的 PFC2D 软件, 计算模型见图 1。土颗粒采用圆形球体模拟, 通过赋予球体不同的接触性质模拟不同土质。模型边界采用光滑的 Wall (墙) 单元, 相对于土体位移桩身的位移可以忽略, 故假定桩身为刚体。采用不同摩擦系数模拟桩土的相互作用程度。模型前端设置为自由端(不设置约束)来模拟临空面。

由于桩间距对基坑支护效果的影响较为显著, 对不同桩间距下的基坑支护效果展开分析。

1.2 模型参数

从细观角度对排桩支护的土拱效应进行研究需要确定细观参数, 目前宏观参数和细观参数进行联系的主要方法是参数标定法。参数标定法是通过室内双轴试验与 PFC 双轴试验进行宏观参数的对应分析。图 2 为颗粒流双轴模型, 采用平行黏结模型, 模型尺寸为 $1.4\text{ m}\times 2.8\text{ m}$, 颗粒半径为 $2\sim 3\text{ cm}$, 采用均匀分布, 共生成 2 343 个颗粒。

双轴标定试验分别在围压为 1、1.5 和 2 MPa 共 3

收稿日期: 2020-09-14(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: U1865103); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(编号: cstc2019jscx—gksbX0072)

作者简介: 张婧, 女, 硕士研究生, E-mail: 244207394@qq.com

* 通信作者: 王俊杰, 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: wangjunjie@cqjtu.edu.cn

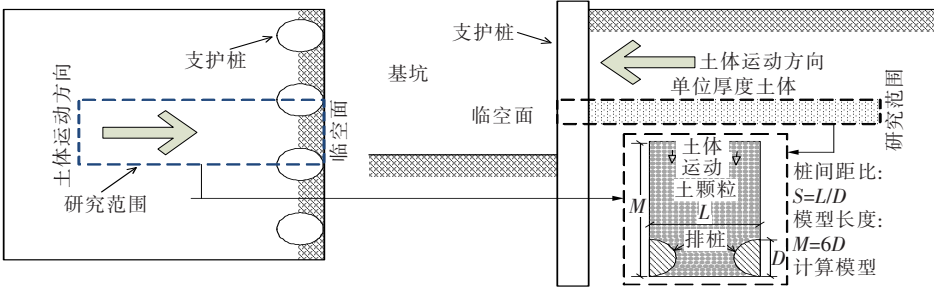


图 1 计算模型选取

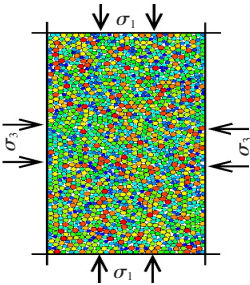


图 2 颗粒双轴模型

种情况下进行。图 3 为不同双轴模拟条件下得到的摩尔应力圆。该文所用细观参数相对应的宏观参数见表 1。

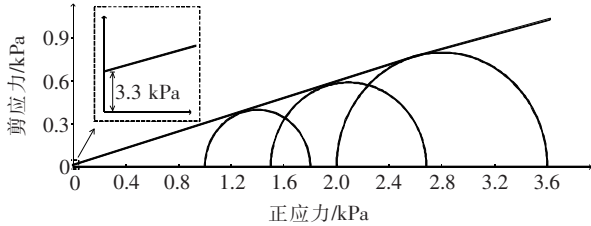


图 3 摩尔圆

表 1 宏观观参数对照表

项目	最大 粒径/ m	最小 粒径/ m	法向接 触刚度/ (N · m)	切向接 触刚度/ (N · m)	法向黏 结强度/ (N · m)	切向黏 结强度/ (N · m)	空隙 率/ %	颗粒摩 擦系数	密度/ (kg · m ⁻³)
细观参 数类型	0.03	0.02	8 × 10 ⁷	5 × 10 ⁷	1 × 10 ³	1 × 10 ³	16	0.5	2 500
项目	弹性模量/MPa		泊松比		密度/(kg · m ⁻³)		黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)
宏观参数类型	100		0.21		2 100		3.3		18

2 计算结果

2.1 土拱的发展过程

采用加载墙(图 1)的缓慢变位来模拟土体的蠕变,以此来观察排桩支护基坑形成的土拱效应及其他性质。加载墙的变位速度为 1 mm/s,程序求解 200 s 时间内桩间及桩后土体的力学性能变化。图 4 为不同变位条件的土颗粒间接触力链分布图。图 5 为不同变位条件下加载墙所承受的荷载值。由于整个模型只有排桩给土颗粒提供支护,故加载墙所承受的荷载等于排桩支挡荷载。

图 4(a)为加载墙变形 5 s 时模型的力链图(加载墙变位 5 mm),此时还没有明显的土拱效应,加载墙所承受的荷载也较小(图 5)。随着加载墙变位的持续

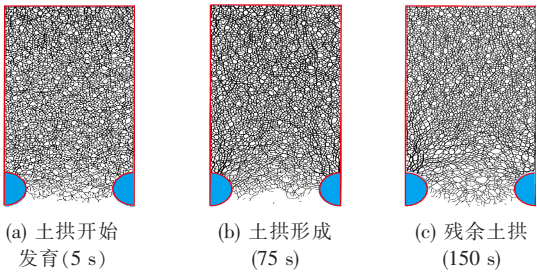


图 4 土拱发展过程图

增大,土拱开始发育并快速发展,加载墙所承受的荷载也快速增加。图 4(b)为加载墙变位 75 s(75 mm)时的力链图,可以发现此时桩后有“拱状”的力链密实分布区,加载墙所承受的荷载也达到最大(图 5),说明此时桩后土拱已完全形成。随着土颗粒的持续蠕变,桩后的土拱开始遭到破坏,加载墙所承受的荷载变小;由于颗粒间的接触参数,最后土拱效应并没有完全破坏,

而是会形成一定的残余土拱,见图4(c),加载墙所承受的荷载也趋于稳定(图5)。

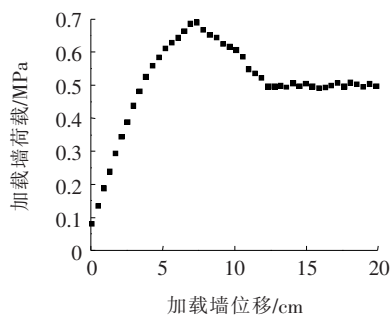


图5 加载墙的荷载变化图

2.2 土体主应力的方向变化

土拱的发展过程实际是土体应力的重新分布过程。研究表明:土拱效应是土体中主应力的轨迹线,对桩后土体主应力的偏转进行监测,可以实现对土拱效应的形态及演变规律研究。土体中主应力方向 θ 的数学表达式为:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \right) \quad (1)$$

式中: σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 τ_{xy} 分别为水平应力、竖向应力、切向应力,在PFC2D中可通过Measure测量获取。

根据Measure的布置,把桩后重点观测区域划分成168个小块体,非重点区域划分成30个大块体,监测每个方块内的相关力学数据并代入式(1),可以绘制出不同变位条件下支护桩后土体的主应力方向分布图。图6为加载墙变形75mm时桩后土体的主应力方向分布图。

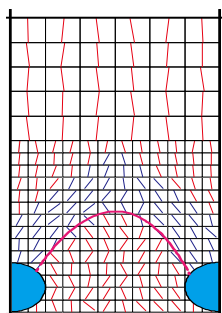


图6 支护桩后土体主应力变化图

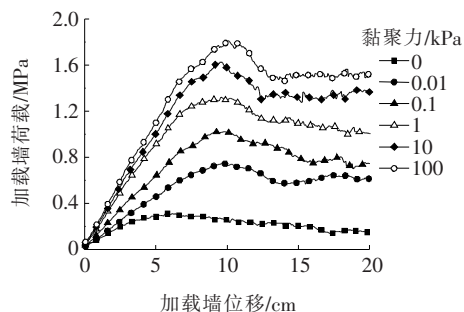
由图6可知:自排桩桩背开始主应力逐渐向中间偏移,并最终贯通,形成主应力拱,并呈现马鞍形,同时当远离桩背一定距离后,土体的主应力方向则与颗粒运动方向大体一致。

2.3 影响因素分析

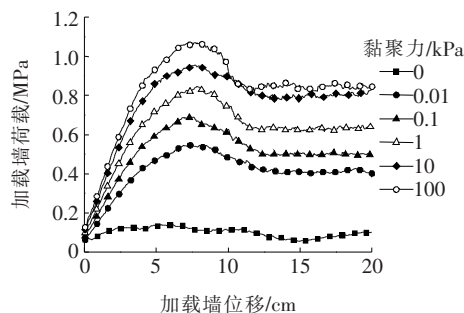
为了对排桩支护基坑的相关影响因素有较为直接

的认识,选取较为常用的影响因素:桩间距、土颗粒的黏结强度和土颗粒的摩擦系数等参数进行分析。

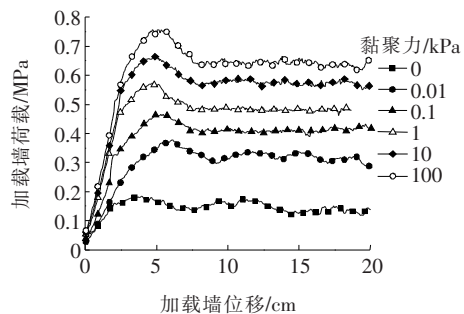
图7为不同桩间距、不同黏聚力条件下的加载墙荷载随加载墙位移变化图。



(a) 桩间距比 $S=2$



(b) 桩间距比 $S=3$



(c) 桩间距比 $S=4.0$

图7 不同桩间距与黏聚力下加载墙荷载变化图

由图7可知:在加载墙模拟蠕变的过程中,加载墙的荷载均呈现先增大后降低,然后趋于稳定的变化趋势,这与前文分析的土拱效应的“发育—形成—破坏(残余)”过程相符。

加载墙所承受的极限荷载尚受黏聚力(颗粒黏结强度)(图8)、桩间距(图9)和摩擦系数(图10)等因素的影响。

由图8可知:随着黏聚力的增大,加载墙的极限承载力不断增大,即排桩的支挡效果正在逐渐提高,并逐渐成线性增加;其中,当桩间距为 $2d$ (d 为桩直径)时,

随着黏聚力的增大,加载墙极限承载力的增加幅度最大,其支挡效果提高得也更为明显;当桩间距大于 $2d$ 时,加载墙极限承载力随黏聚力增大的幅度基本一致,即排桩的支挡效果提高率大致相等。

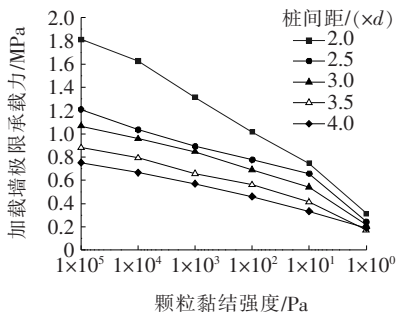


图 8 不同黏聚力下加载墙极限荷载变化图

由图 9 可知:随着桩间距的增大,抗滑桩的加载墙极限承载力逐渐下降,即支挡效果逐渐降低,同时,黏聚力越大,桩间距对排桩的支挡效应影响越明显。

由图 10 可知:随着土颗粒摩擦系数的增大,加载墙极限承载力逐渐增大,排桩支护的效果逐渐增强,说明增大摩擦系数可以增强排桩间土体的土拱效应。

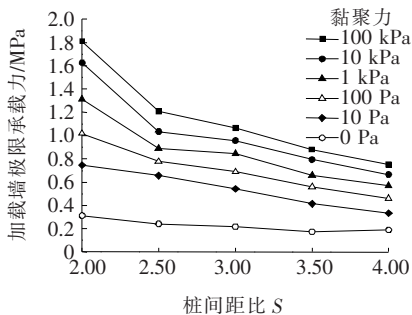


图 9 不同桩间距下加载墙极限荷载变化图

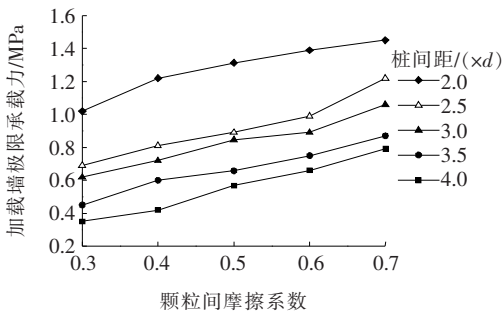


图 10 不同摩擦系数下加载墙极限荷载变化图

3 结论

(1) 随着土体向基坑内部方向的蠕变,土拱经历

了“发育—形成—破坏(残余)”的变化趋势,与之相对应的加载墙所承受的荷载呈现“升高—极值—降低并趋于平缓”的变化趋势。

(2) 排桩支护基坑所形成土拱呈现马鞍形,并只在桩后一定区域内产生主应力的偏转。

(3) 土颗粒黏结强度和土颗粒摩擦系数与排桩的支护效果呈正相关,桩间距与排桩的支护效果呈负相关。

参考文献:

- [1] 王俊杰,杨恒.双排桩—承台—挡墙组合结构设计计算方法[J].地下空间与工程学报,2017(2).
- [2] 贾海莉,王成华,李江宏.关于土拱效应的几个问题[J].西南交通大学学报,2003(4).
- [3] 刘平,杜晓方.地面超载对双排桩基坑稳定性影响的有限元分析[J].中外公路,2018(6).
- [4] 宋虎,周虎,喻青儒.地铁车站开挖对桥梁托换桩基变形的影响研究[J].中外公路,2018(1).
- [5] 赵明华,廖彬彬,刘思思.基于拱效应的边坡抗滑桩桩间距计算[J].岩土力学,2010(4).
- [6] 杨雪强,吉小明,张新涛.抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J].中国公路学报,2014(1).
- [7] 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(3).
- [8] 赵波,王羽.基于土拱效应双排桩不同布置方式对支挡性能的影响[J].中外公路,2016(2).
- [9] 赵波,王运生,李贞,等.双排抗滑桩土拱效应影响因素的数值分析[J].中外公路,2017(2).
- [10] 韩同春,邱子义,豆红强.基于颗粒离散元的抗滑桩土拱效应分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016(8).
- [11] 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(5).
- [12] Han-Jiang Lai, Jun-Jie Zheng, Jun Zhang, et al. DEM Analysis of “Soil” — Arching within Geogrid — Reinforced and Unreinforced Pile-Supported Embankments [J]. Computers & Geotechnics, 2014, 61:13—23.
- [13] 古海东,杨敏.考虑土拱效应的疏排桩支护基坑内力和变形分析[J].岩土力学,2014(12).
- [14] 陈秋南,周亚军,马晓朋,等.基于双剪强度理论土拱效应的基坑支护桩间距分析[J].水文地质工程地质,2012(4).
- [15] 刘斌,杨敏,杨志银,等.疏排桩—土钉墙组合基坑支护结构设计与实践[J].土木工程学报,2010(10).
- [16] 赵明华,胡增,张玲,等.考虑土拱效应的高路堤桩土复合地基受力分析[J].中南大学学报(自然科学版),2013(5).