

复合土钉墙支护基坑颗粒流数值模拟研究

周 健^{1,2}, 李 飞^{1,2}, 张 姣³, 崔积弘⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海城市管理职业技术学院 土木工程与交通学院, 上海 200432; 4. 上海港湾软地基处理工程有限公司, 上海 200092)

摘要: 利用基于离散元理论的颗粒流软件 PFC^{3d} 建立基坑开挖土钉支护的三维颗粒流模型, 通过分析有复合土钉墙支护基坑和无复合土钉墙支护基坑数值模型的位移场和应力场, 研究复合土钉支护基坑开挖过程的规律和土钉支护的机理. 有复合土钉墙支护基坑和无复合土钉支护基坑在变形程度和变形模式等方面存在较大差异. 复合土钉墙支护基坑挡墙变形较小, 出现“两头小、中间大”的流鼓型变形模式, 坑底隆起量和墙后土体沉降量相对于无土钉墙支护基坑均较小. 利用土拱效应来分析复合土钉支护机理, 认为土钉支护作用的关键是土拱效应, 而不仅仅是土钉和土体之间相互拉拔作用. 细观机理研究和颗粒流数值模拟为复合土钉墙支护基坑的机理研究提供新的思路和方法.

关键词: 复合土钉; 颗粒流模拟; 细观机理; 土拱效应

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Study of PFC Numerical Simulation of Soil Nailing Wall Support Excavation

ZHOU Jian^{1,2}, LI Fei^{1,2}, ZHANG Jiao³, CUI Jihong⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200432, China; 4. Shanghai Harbor Soft Soil Treatment Engineering Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: A three-dimension soil nails support excavation particle simulation model is established by the software of PFC^{3d} which is based on discrete element method (DEM). The contrast of deformation and stress during excavation between PFC^{3d} numerical model with and without soil nailing is analyzed in order to investigate laws of excavation with soil nailing and mesoscopic mechanism of soil nailing. Great

difference exists in deformation mode and level between excavation with and without soil nailing because the effect of soil nailing. The deformation of wall, foundation pit and settlement of excavation with soil nailing is smaller than that without soil nailing. Especially the deformation mode of wall with soil nailing which appears a special mode with small deformation on the top and at the bottom of wall and big deformation in the middle of wall. Finally, the mesoscopic mechanism of soil nailing is analyzed. The pullout contact between soil and nailing is not only factor for the excavation support; the soil arching is the most important factor for the soil nailing wall support excavation. The mesoscopic mechanism and PFC simulation study is expected to be a new approach for soil nailing wall support excavation research.

Key words: soil nailing; particle flow code simulation; mesoscopic mechanism; soil arching

随着地下空间的大规模利用, 地下建筑工程进入蓬勃发展的阶段, 由此产生了大量的深基坑工程. 土钉支护技术^[1]作为一种主动受力支护结构出现于 20 世纪 70 年代, 该技术的发展可视为是加筋土、土层锚杆和新奥法技术的有机结合.

对土钉支护机理的研究, 目前主要集中在具体加筋形式和不同土质条件下工程力学性质的宏观现象. Schlosser^[2]进行了大型土钉支护模型试验, 并对 6 个现场工程进行了详细量测, 研究了土钉在支护过程中的受力状态. Palmeira 和 Milligan^[3]研究了土钉轴向刚度对接触面力学机理的影响, 并指出土钉周围土体的破坏是一个渐进破坏过程. 在常体积的密砂剪切试验中, 当土钉被拉拔出来, 由于密砂的剪胀效应, 作用在土钉上的法向应力将会增加.

收稿日期: 2010-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(50879059)

第一作者: 周 健(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为软土地基处理技术、土体细观力学模拟.

E-mail: tjutj@vip.163.com

通讯作者: 李 飞(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为土体宏观机理. E-mail: lifei1982127@hotmail.com

Milligan^[4]根据室内试验对在接触面及土钉拉拔过程中土颗粒运动状态进行研究. Lok-Man Chu 和 Jian-Hua Yin^[5]通过拉拔试验研究提出当土钉被拔出时,土钉末端存在拱效应. Bishop^[6]和 Bolton^[7]针对土钉拉拔试验结果中强度破坏包络线的非线性,指出钉土接触面上的土体剪胀及颗粒的破碎是造成上述现象的主要原因. Bao C G^[8]通过试验指出在中密砂中的击入钉,由于剪胀作用产生的正压力约为自重压力的 3 倍.

目前大部分研究工作还是局限于连续介质力学的理论和方法,大多是从宏观角度对土体的力学特性进行研究和数值模拟,在三维条件下大都采用有限元法^[9-10]来分析计算. 周健等^[11]跳出宏观连续介质力学框架,利用一系列方法对土钉拉拔接触界面进行了细观试验及数值模拟,研究钉土界面孔隙率和颗粒运动等细观参数变化规律,从细观角度研究了土钉与土体相互作用机理.

本文通过颗粒流数值模拟^[12],对复合土钉支护基坑开挖过程进行研究,分析复合土钉墙支护基坑和无复合土钉墙支护基坑数值模型的位移场和应力场,分析土拱效应在土钉支护机理中的重要作用,为复合土钉墙支护基坑的机理研究提供新的思路和方法.

1 颗粒流数值模型

1.1 复合土钉墙支护基坑颗粒流数值模型

土钉支护结构是三维几何体,应直接应用三维模型来分析. 考虑到颗粒数量对计算时间的影响,模型尺寸存在一定缩小比例,数值模型尺寸 0.80 m×0.30 m×1.00 m(长×宽×高). 水泥土支护结构为半柔半刚性挡板,采用 220 个半径为 2 mm 的颗粒组成,颗粒间采用平行连接(the parallel bond),可以承受一定的剪切力和法向力,允许有一定的变形.

土体模型(参照福建平潭标准砂):①在模型箱内随机生成 42 256 个颗粒,初始孔隙度为 0.60;②采用扩大颗粒半径方法直到满足颗粒孔隙比为 0.35,在重力加速度设为零的情况下平衡;③施加重力作用,重新设定摩擦系数,让颗粒体在重力作用下重新平衡生成试样,平衡后的土体高度为 1.05 m;④删除模型箱内高度大于 0.80 m 范围内的颗粒共 34 757个.

土钉及挡墙模型:①删除基坑 $X = (0.60 \pm 0.003)\text{m}$,且 Z 大于 0.15 m 范围内的颗粒,在删掉

颗粒位置 $X = 0.60\text{ m}$ 处规则生成具有平行连接的颗粒;②重新在指定重力加速度下平衡生成基坑颗粒流模型,至模型达到平衡状态;③删掉挡墙右侧第一层开挖面以上空间颗粒,同时删掉土钉位置处颗粒,然后应用 Ball 命令生成土钉颗粒,应用 CLUMP 和 CLUSTER 命令将土钉颗粒连成一体;④将土钉与面层的两个颗粒应用 CLUMP 命令连接成一个整体;⑤继续开挖步骤,并在重力的作用下发生变形直到达到破坏状态.

图 1 为桩体及砂粒的颗粒流模型. 图 2 分别给出了土钉及挡墙颗粒流模型. 模型构成参数如表 1 所示.

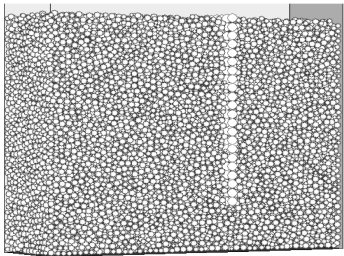


图 1 挡墙及砂粒的颗粒流模型

Fig.1 PFC model of walls and sands

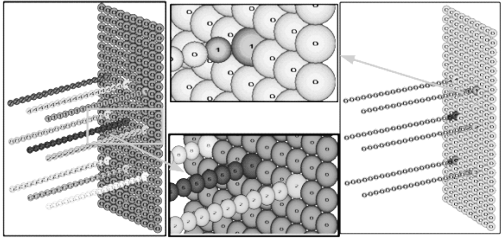


图 2 土钉与面板的连接

Fig.2 Connect of nails and panels

表 1 土体、土钉和挡墙数值模型参数

Tab.1 Parameters of numerical samples of soils,nails and walls

分类	参数	数值
颗粒	颗粒半径/mm	0.50~0.75
	密度/(kg·m ⁻³)	2 630
	法向刚度/(N·m ⁻¹)	1.0×10 ⁶
	切向刚度/(N·m ⁻¹)	1.0×10 ⁶
挡墙	摩擦系数	0.45
	法向刚度/(N·m ⁻¹)	1.0×10 ⁹
	切向刚度/(N·m ⁻¹)	1.0×10 ⁹
平行连接	颗粒半径/mm	2.00
	法向应力强度/(N·m ⁻³)	1.0×10 ⁵⁰
	切向应力强度/(N·m ⁻³)	1.0×10 ⁵⁰
	法向刚度/(N·m ⁻¹)	1.0×10 ⁷ ~1.0×10 ¹¹
	切向刚度/(N·m ⁻¹)	1.0×10 ⁷ ~1.0×10 ¹¹

复合土钉支护分 3 次开挖:第一次开挖深度为 0.25 m,开挖至 0.60 m 高度处;第二次开挖深度为 0.20 m,开挖至 0.40 m 高度处;第三次开挖深度为 0.15 m,开挖至 0.25 m 处,见图 3.土钉在深度方向设置 3 排,宽度方向设置 2 排,第一排土钉长度为 0.35 m,第二、三排土钉长度为 0.30 m.测量圈布置见图 4.

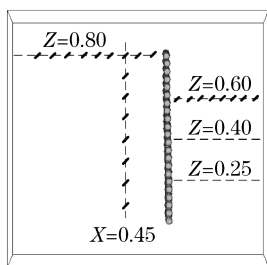


图 3 数值模型开挖过程
Fig.3 Excavation of model

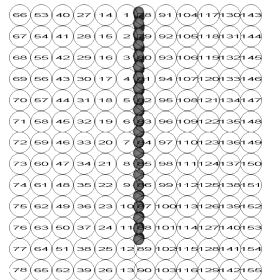


图 4 测量圈布置
Fig.4 Measurement zone arrangement

1.2 无复合土钉支护基坑开挖颗粒流模型

无复合土钉支护基坑数值模型在模型尺寸、开挖步骤和颗粒参数等方面与复合土钉支护基坑均保持一致,区别在于不设置土钉.

2 模拟结果及分析

2.1 复合土钉墙支护基坑

2.1.1 复合土钉墙支护基坑位移场

图 5 为复合土钉支护基坑开挖过程中土钉所在剖切面上的颗粒位移变化规律.土钉支护以后,每步开挖只对当前开挖高度内的土体产生较大位移,位移随开挖深度增加而增大,对以前各步开挖高度区的土体产生位移较小,累积各开挖步的结果,坑壁底部由单次开挖引起的位移可能超过顶部由各次开挖累积的位移而呈现下部鼓出的“流鼓型”变形曲线形状,土钉支护体系对其上部土体发挥抑制位移的作用随开挖过程逐渐发挥.

随着开挖的进行,X 方向位移范围更广,位移值更大.而 Z 向位移随着开挖的进行,外侧土体滑移面逐渐向外扩展,这与实际工程中基坑外侧土体中出现多个裂缝的现象一致^[13].土钉嵌入土中并与围护结构连成一体,加强了基坑外土体强度,整个支护体系的整体性提高.

图 6 为各步开挖中围护挡墙变形的变化,由于土钉将桩体与砂土牢牢的连到一起,桩体不再出现

象无土钉支护时整体前移的变形,而是出现“两头小、中间大”的大肚状变形模式,并且随着开挖的进行“凸出”点的位置逐渐向下移动,同时由于下部土体受到挤压,支护体有整体水平移动的趋势.

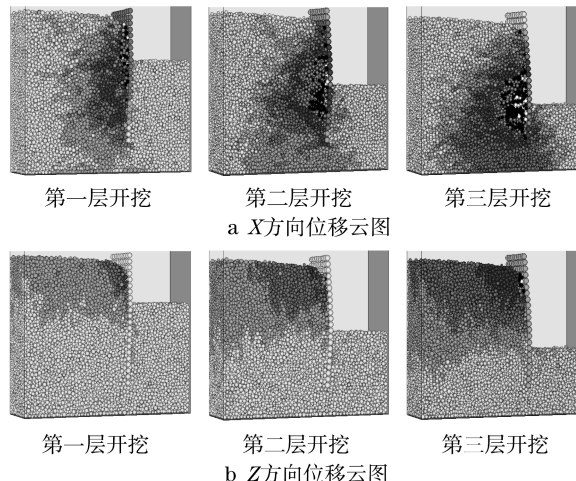


图 5 基坑开挖过程中颗粒位移的变化规律
Fig.5 Changes' law of particle displacement during excavation

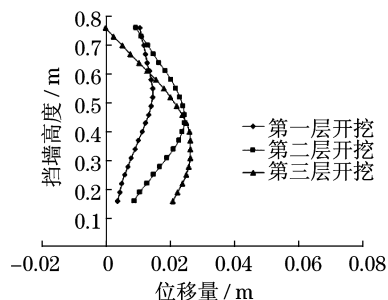


图 6 基坑开挖挡墙变形示意图
Fig.6 Retaining wall body deformation

基坑开挖过程位移矢量图如图 7 所示.从图中可以看出,基坑外土体整体性提高,土体破坏滑移面呈螺旋线状且经过桩端.土钉随着开挖的进行向外被拔出,土钉所在位置处的挡墙也有向外凸出的趋势.对比 3 排土钉的位移可以发现,第一排土钉主要以垂直位移为主,而第三排土钉则以水平位移为主.

基坑坑底隆起量如图 8 所示.在前两步开挖时,基坑隆起高度为基坑中部大,两边小,表现为卸载回弹.随着进一步的开挖,基坑壁附近的土体突然上涌,隆起的高度迅速增大,超过了基坑中部.基坑开挖过程,支护结构承受荷载增大,钉土之间的摩擦力随相对位移的增大而增大,当其大于土体抗剪强度峰值后,大部分钉土界面首先进入塑性状态,甚至在局部土体出现剪切面和拉裂缝.由于土钉有较高的

抗拉、抗剪强度,在土体进入塑性状态后,应力逐渐向土钉转移,当土体开裂时,土钉的应力分担作用更突出.因此在第三层开挖后,基坑周边产生了较大的塑性变形,坑外土体孔隙率变大,土体位移矢量图(图7)显示,坑外土颗粒向挡墙和坑内运动,坑内土颗粒受到挡墙挤压产生较大塑性变形和剪胀.土钉支护结构的骨架作用,仍可维持基坑的整体稳定性.坑内外靠近挡墙附近颗粒共同作用使得坑壁附近坑内土体隆起量增大,甚至超过基坑中部.

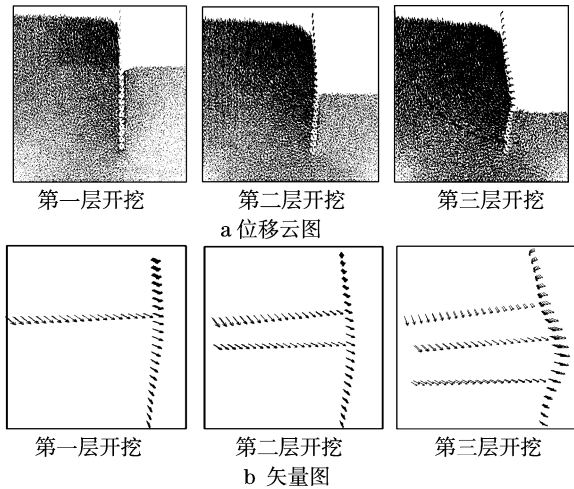


图7 基坑开挖过程土体、挡墙和土钉位移矢量图

Fig.7 Displacement vector of soil, wall and nails

基坑外土体沉降量如图9所示.在前两步开挖过程中,基坑外侧土体沉降曲线近似呈“抛物线”型分布,最大沉降点逐渐后移;随着开挖深度的增加,基坑周围的地表沉降量不断增大,沉降曲线的分布形态发生变化,基本可分为两段,在开挖面附近,沉降曲线呈“三角形”分布,在稍远处,沉降曲线呈“抛物线”型分布,最大沉降点出现在开挖面后.

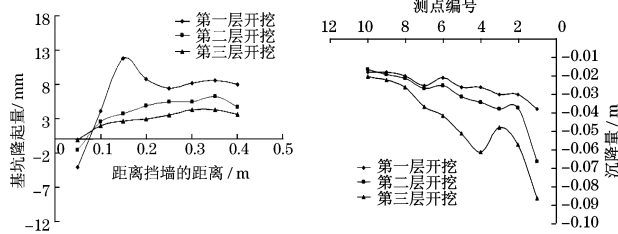


图8 基坑坑底隆起曲线

Fig.8 Curve of foundation pit

图9 基坑外土体沉降曲线

Fig.9 Curve of soil settlement

2.1.2 复合土钉墙支护基坑应力场

复合土钉墙支护基坑三级开挖挡墙两侧土压力和第三级开挖后土体接触力如图10和图11所示.

颗粒间接触力在基坑开挖后重新分布,尤其是靠近土钉和挡墙的颗粒,在土钉处有明显的应力集中,而且基坑内侧的应力梯度远大于基坑外土体的应力梯度.

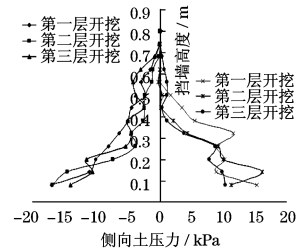


图10 挡墙两侧土压力
Fig.10 Earth pressure of wall

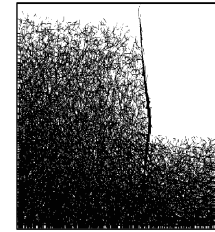


图11 土体接触力示意图
Fig.11 Contact force of soil

2.2 无复合土钉墙支护基坑

2.2.1 无复合土钉墙支护基坑位移场

无复合土钉支护基坑颗粒位移云图如图12所示,位移矢量图如图13所示. X 方向,基坑内部土体的卸载使得挡板受到的弯矩不断增大,挡板下部的颗粒受到很大的挤压,颗粒的 X 向位移逐渐变大. Z 方向,位移则由开始的整体下降逐渐向挡板收缩,基坑外侧土体的破坏滑移面与复合土钉支护基坑不同,为过开挖面的弧线面.基坑外侧顶部颗粒因挡墙前移产生的空隙而发生较大的位移,越靠近挡墙, X 方向和 Z 方向位移越大.

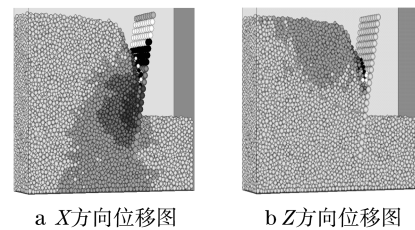


图12 第三层开挖后颗粒位移规律

Fig.12 Change law of particle displacement after excavation

无复合土钉支护基坑挡墙水平位移如图14所示.挡板的变形模式为上层较大,下层较小,挡板有前倾的趋势,与复合土钉支护基坑挡墙的“中间大,两端小”的模型完全不同.由于土体有向基坑方向滑动的趋势,所以在每个开挖步基坑底部处的面板水平位移不为零,且随着开挖深度的增加而增加.

无复合土钉支护基坑坑底隆起量和外侧土体沉降量如图15和图16所示,基坑内侧土体的隆起量逐渐增大,最大隆起量不是发生在开挖面,而是距开

挖面一定距离处,靠近挡板部分的土体有向下沉降的现象.对于基坑外侧土体,基坑开挖使得其发生一定的卸载,有向基坑内移动的趋势,挡板发生一定的侧向移动,使得后面土体发生下降,并随开挖步的增加,位移量逐渐增加.

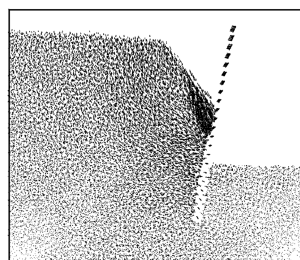


图13 基坑开挖过程土体、挡墙位移矢量图

Fig.13 Displacement vector of soil and wall

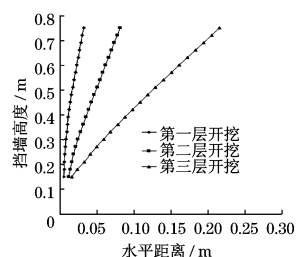


图14 基坑开挖挡墙变形示意图

Fig.14 Retaining wall body deformation

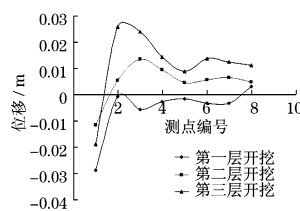


图15 基坑坑底隆起曲线
Fig.15 Curve of foundation pit

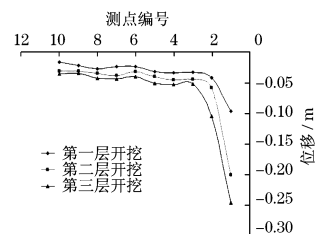


图16 基坑外土体沉降曲线
Fig.16 Curve of settlement

2.2.2 无复合土钉支护基坑应力场

无复合土钉支护基坑第三级开挖后接触力和挡墙两侧土压力如图17和图18所示.基坑开挖后,基坑内土体的接触力重新分布,而外侧靠近挡墙处土体的接触力变化较大,其他位置处的接触力则变化不明显.挡板上部受到基坑外侧土体的挤压,基坑内侧土体的土压力逐渐增大,而后挡板在板后土体压力的作用下位移量逐渐增大,使得基坑外侧挡板底部

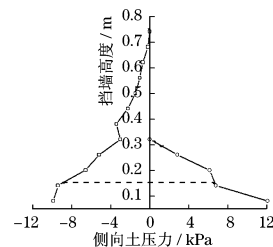


图17 挡墙两侧土压力曲线
Fig.17 Earth pressure of wall

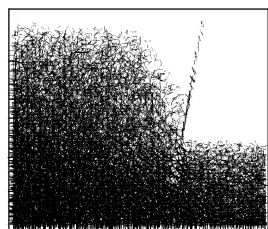


图18 土体接触力示意图
Fig.18 Contact force of soil

部的土体受到挤压,而内侧土压力又有一定的减小,即开挖过程中基坑内应力分布发生了改变.

3 复合土钉支护细观机理

本文认为,土拱效应是土钉支护的主要机理.

土拱效应是由于土颗粒之间的粘结力和摩擦阻力以及土的不均匀位移,使土颗粒间产生互相压密作用所致.太沙基提出了产生土拱效应的两个条件^[14]:①相邻土体单元产生相对位移,相对位移使得土体抗剪强度得到发挥;②支撑土拱的拱脚承担转移应力,并传递给稳定土体.

刚性挡墙转动使得墙后土体处于极限平衡状态时,主应力发生旋转形成土拱效应^[15],土钉的存在使得土体土拱效应得到一定程度增强才是复合土钉支护基坑支护机理最主要的作用.

如图19所示,当土体条件较好,土钉间距较小等条件下,土拱效应明显,土体卸载产生的侧向压力 σ_H 能被土钉之间的土拱挡住,分给两侧土钉,使得土钉之间的土体在产生相对移动时,被土钉摩擦阻力平衡,从而土钉与土体之间不产生塌落.当土质条件较差,土钉间距较大等条件下,土拱效应不明显,土钉之间的土体不能完全形成土拱,侧向压力 σ_H 不能完全由土钉的界面摩擦阻力抵消,侧向压力未抵消的部分将推动土体,使得土体向左滑落,推动挡墙变形.

上层土钉区域,侧向压力 σ_H 较小,土拱效应足以抵消侧向压力,使得挡板变形较小;下层土钉区域,随着侧向压力 σ_H 增大,土拱效应发挥程度对侧向压力抵消作用减小,使得挡板变形增大;底部土钉区域,侧向压力 σ_H 增大,但竖向压力 σ_V 增大提高了土体密度,一定程度上加强了该区域内的土拱效应,更有效抵消了侧向压力,使得挡板变形减小.土拱效应的发挥程度随着深度先增大,再减小的变化规律,使得复合土钉墙支护挡板形成“两头小、中间大”的流鼓型变形模式.

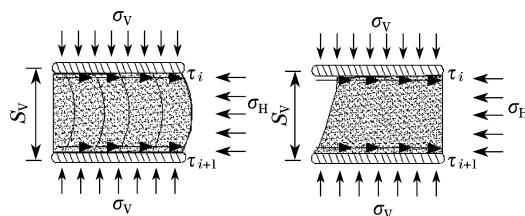


图19 土拱作用示意图

Fig.19 Diagram of soil arching

4 结 论

本文利用颗粒流数值模拟方式建立了复合土钉墙支护基坑和无复合土钉墙支护基坑数值模型. 分析了有、无土钉支护作用下基坑的位移场、应力场, 得出以下3点结论:

(1) 复合土钉墙支护基坑. 从位移场上看, 挡墙出现“两头小、中间大”的流鼓型变形模式, 随着开挖的进行, “凸出”点的位置逐渐向下移动. 初始开挖时, 沉降曲线近似呈“抛物线”型分布, 而随着开挖的进行, 沉降曲线基本可分为两段, 在开挖面附近, 沉降曲线呈“三角形”分布, 在稍远处, 沉降曲线呈“抛物线”型分布, 最大沉降点出现在开挖面后. 基坑开挖后土体应力重新分布, 在土钉处有明显的应力集中, 而且基坑内侧的应力梯度远大于基坑外土体的应力梯度.

(2) 无土钉支护条件下基坑. 从位移场上看, X 向位移表现为挡墙下部基坑外侧土体的位移较大, 而 Z 向位移则是挡墙顶部基坑外侧土体的位移较大. 从挡墙的位移模式来看, 上部位移大, 下部位移小, 挡墙有前倾的趋势. 随着开挖的进行, 基坑内侧土体发生一定的隆起, 并逐渐增大, 最大隆起值出现在距离支护面一定距离的位置. 基坑外侧土体随桩体的前倾出现一定的沉降.

(3) 复合土钉支护机理. 利用土拱效应原理对复合土钉支护机理进行分析. 土钉结构与土体之间相互作用增强了土拱效应, 随着土钉布置、开挖和土体参数等因素不同, 土拱效应随着开挖深度的不同全部或部分有效地抵消了由于开挖产生的侧向土压力, 抑制了土体的相对位移, 改变了整个基坑结构的变形模式和程度.

参考文献:

- [1] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1943.
- [2] Schlosser F. French research program CLOUTERRE on soil nailing[J]. Geotechnical Special Publication, 1992, 2(30): 60.
- [3] Palmeira E M, Milligan G W E. Scale and other factor influencing the results of grids buried in sand [J]. Geotechnique, 1989, 39(3): 511.
- [4] Milligan G W E. Soil deformations behind retaining walls[C]// Proc of 3rd Int Conf of Ground Movements and Structures. Cardiff: [s. n.], 1984: 707 - 721.
- [5] CHU Lokman, YIN Jianhua. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 11: 1097.
- [6] Bishop A W. The strength of soils as engineering materials[J]. Geotechnique, 1966, 16: 89.
- [7] Bolton M D. The strength and dilatancy of sands [J]. Geotechnique, 1986, 36: 65.
- [8] Bao C G. Study on the interaction between of geosynthetics and soil in China [C] // Proceedings of Third Asian Regional Conference on Geosynthetics. Seou: [s. n.], 2004: 104.
- [9] 高翔. 基坑复合土钉支护安全系数及工作性能的有限元分析[D]. 北京: 清华大学土木工程学院, 2004.
GAO Xiang. Analysis of composite soil nailing safety factor and working behaviors by FEM [D]. Beijing: Tsinghua University. Civil Engineering College, 2004.
- [10] 陈世龙. 土钉支护三维有限元分析[D]. 兰州: 兰州理工大学土木工程学院, 2006.
CHEN Shilong. The research on soil nailed construction by three-dimensional finite element modeling (FEM) [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology. Civil Engineering College, 2006.
- [11] 周健, 郭建军, 崔积宏, 等. 土钉拉拔接触面的细观模型试验研究与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1936.
ZHOU Jian, GUO Jianjun, CUI Jihong, et al. Meso-model testing and numerical simulation of nail-soil contacts during pull-out [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1936.
- [12] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47.
- [13] 陈利洲. 土钉墙的两条滑裂面成因分析[J]. 工业建筑, 2005, 35: 503.
CHEN Lizhou. Analysis of cause of two sliding surfaces on soil-nailed wall[J]. Industrial Construction, 2005, 35: 503.
- [14] Terzaghi. 理论土力学[M]. 徐志英, 译. 北京: 地质出版社, 1960.
Terzaghi. Theoretical soil mechanics[M]. Transtated by XU Zhiying. Beijing: Geological Publishing House, 1960.
- [15] 彭述权, 周健, 樊玲, 等. 考虑土拱效应刚性挡墙土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2071.
PENG Shuquan, ZHOU Jian, FAN Ling, et al. Research on earth pressure of rigid retaining wall considering soil arching[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2071.