

复合土钉支护基坑的力学研究

王 涛 熊传祥

(福州大学 环境与资源学院, 福建福州 350001)

【摘要】 为讨论复合土钉墙支护基坑在实际工程中的受力机理, 借助基于离散元法的颗粒流软件 PFC^{2D}, 引入颗粒流理论和开发颗粒流细观数值模拟技术, 从细观角度对复合土钉支护的力学机理进行研究。通过离散元方法建立复合土钉颗粒流模型, 并与纯土钉支护和纯搅拌桩支护的受力进行对比, 发现复合土钉支护时土钉轴力的分布形式和大小与纯土钉支护有很大不同, 且桩墙所受的弯矩和剪力分布也异于纯搅拌桩支护。研究表明利用离散元法进行力学分析, 能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; 基坑; 离散元法; 力学研究

【中图分类号】 TU 471.3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2012.06.007

Mechanics Studies on Composite Soil Nailing for Supporting Foundation Pit

Wang Tao Xiong Chuanxiang

(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350001, Fujian, China)

【Abstract】 In order to discuss the mechanical mechanism of composite soil nailing wall supporting foundation pit in practical projects, it was based on discrete element method of PFC^{2D}, and the introduction of particle flow theory and development of particle flow in mesoscopic numerical simulation technology, to conduct the mechanics studies about its mechanism from mesoscopic aspect for composite soil nailing supporting. The particle flow code model for composite soil nailing supporting was established by discrete element method, which compared with nailing supporting only and cement-soil pile supporting only, there were much difference about axial force and its distribution between composite soil nailing supporting and nailing supporting only. What's more, the distribution of bending moment and shear stress is different from cement-soil pile supporting only. So, the results show it offers a new approach and method for mechanism study of composite soil nailing wall supporting foundation pit by using discrete element method.

【Key words】 composite soil nailing; foundation pit; discrete element method (DEM); mechanics studies

0 引言

复合土钉支护技术在我国到了较大的发展, 与传统支护形式相比, 它在满足工程需求的前提下, 能够节省工程造价并缩短工期。其中水泥土搅拌桩复合土钉支护使用较为广泛, 它能够将主动支护和被动支护很好地联合应用, 柔性支护与刚性支护相结合, 扩大了其应用范围。但其受力是个十分复杂的过程, 为提供其理论依据, 研究其受力机理显得尤为重要。

国外对土钉的理论研究较早, 如: Stocker 等^[1] (1979) 仅考虑土钉的抗拉作用, 假定滑动面为双曲线形并通过土坡坡脚, 进行力的极限平衡总体稳定分析。C. Plamelle 等^[2] (1981) 采用有限元方法模

拟计算了土钉的最大内力和土钉支护的变形。Bridle^[3] (1989) 提出了 Bride 方法, 通过假定滑动面为对数螺旋线形并通过坡脚, 并用条分法分析滑动土体的平衡, 给出了计算各土钉剪力的经验公式。Jurán 等^[4] (1991) 提出了机动法或运动法, 这种方法通过引入了土钉的最大内力局部稳定验算的内容, 认为土钉失稳往往是上层土钉被拔出, 然后向下逐步发展为整体失稳。P. Unterreiner 等^[5] (1997) 运用 Mohr-Coulomb 屈服准则和非关联流动法则, 建立有限元分析模型, 并对比分析了模拟计算结果和现场实测结果。目前对复合土钉支护的研究多利用连续介质力学理论和方法, 用有限元法在宏观角度对其力学机理进行研究。虽然有限元方法有很多优

点,但其求出的结果在很大程度上依赖于本构方程的选择,但土的本构理论并不十分完善,且其主要适用于小变形的连续介质问题,对基坑的大变形和非线性问题求解具有一定的局限性。

颗粒流法作为一种新颖的数值计算方法,其无需假定材料本构关系,无需满足变形协调条件,直接从细观上定义颗粒之间的接触关系,交替应用力-位移定律和牛顿运动定律^[6],更新接触部分的接触力,其计算是土颗粒求得稳定状态的自然调整过程,本文利用 PFC^{2D} 的优势,对复合土钉支护基坑开挖过程进行细观研究,为以后的工程实践提供一些有价值的参考,也为更深入、量化的理论研究提供一定的基础。

1 模型的细观参数

利用 PFC^{2D} 软件对实际情况的模拟所得到的结

果可以很好的与实际相吻合,但这是在细观参数与宏观参数相一致的前提下,所以模型的细观参数的合理选择显得尤其重要。

1.1 土体的细观参数

对于离散元理论,模型输入的是土体的细观参数,但目前试验手段无法直接获得材料的细观参数,要得到能正确反应宏观参数相对应的细观参数,首要的任务就是建立细观参数与宏观参数之间的关系。利用 PFC^{2D} 模型建立数值三轴试验模型,通过取相同的围压,并调整模型的各个力学性质参数,对数值模拟生成的应力-应变关系曲线与室内试验结果进行拟合,使模型的颗粒集合体反映出与真实情形下相同的土工颗粒,此时获得的细观参数可以认为是与实际试样相适应的细观参数。为建模分析方便,模型选用单一性质的软粘土,其细观参数见表 1。

表 1 基坑土体的细观参数

土质	孔隙率	颗粒初始摩擦系数	颗粒密度 / (kg · m ⁻³)	法向刚度 / (N · m ⁻¹)	切向刚度 / (N · m ⁻¹)	法向粘结力 / N	切向粘结力 / N	粒径放大系数
软粘土	0.18	0.15	2 650	2.0 × 10 ⁷	2.0 × 10 ⁷	1.4 × 10 ⁴	1.0 × 10 ⁴	2

1.2 桩和土钉的细观参数

为了实现水泥土搅拌桩和土钉在颗粒流模型的功能,使其能够传递剪力和弯矩,选用 PFC^{2D} 平行粘结模型,平行粘结可以想象为一组有恒定法向刚度与切向刚度的弹簧均匀分布于接触平面内,这些弹簧作用的本构关系类似与点接触弹簧模拟颗粒刚度的本构特性。接触的相对运动在平行连接处产生力和力矩,作用于相互连接的颗粒上,且与连接材料的最大法向、切向应力有关。平行粘结颗粒间的接触关系见图 1。

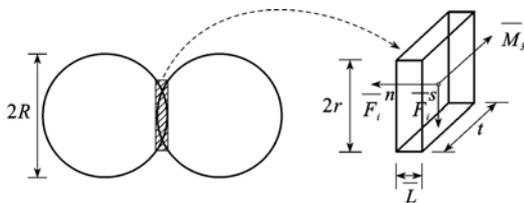


图 1 平行粘结模型示意图

其中:

$$\Delta \bar{F}_i^n = (-\bar{k}^n A \Delta U^n) n_i \quad (1)$$

$$\Delta \bar{F}_i^s = -\bar{k}^s A \Delta U^s \quad (2)$$

$$\Delta \bar{M}_3 = -\bar{k}^n I \Delta \theta_3 \quad (3)$$

式中, $\Delta \bar{F}_i^n$ 、 $\Delta \bar{F}_i^s$ 表示接触力的法向增量和切向增量。 \bar{k}^n 、 \bar{k}^s 为平行粘结弹性材料的法向和切向刚度; ΔU^n 、 ΔU^s 法向和切向位移增量;A 为颗粒间接触面

积, $A = 2 \cdot r \cdot t$, r 为接触约束单元半径, t 为厚度且为 1; $\Delta \bar{M}_3$ 平行粘结弹性材料的弯矩增量; I 粘结的截面惯性矩; $\Delta \theta_3$ 转角增量。

通过试验,可获得搅拌桩和土钉的宏观参数(见表 2 和表 3),由罗勇^[7]对桩墙、支撑等围护结构的宏观参数与 PFC^{2D} 平行粘结模型细观参数之间的转换关系可知,根据公式(4)~式(6)可以获得颗粒流数值模型的细观参数。

表 2 桩的宏观物理参数

桩长 / m	桩半径 / m	颗粒密度 / (kg · m ⁻³)	杨氏模量 / Pa	切向模量 / Pa
12	0.3	2 500	2.8 × 10 ¹⁰	1.9 × 10 ¹⁰

表 3 土钉的宏观物理参数

钉长 / m	土钉半径 / m	颗粒密度 / (kg · m ⁻³)	杨氏模量 / Pa	切向模量 / Pa
6/8	0.1	2 650	2 × 10 ¹¹	7.7 × 10 ¹⁰

$$k_n = E/\bar{L} \quad (4)$$

$$k_s = G/\bar{L} \quad (5)$$

$$b_n = b_s = 2nAE/L \quad (6)$$

其中: k_n 、 k_s 为平行粘结法向刚度、切向刚度; b_n 、 b_s 为平行粘结法向接触强度、切向接触强度; L 为桩的长度; \bar{L} 为两颗粒间平行连接的长度; n 为平行连接的个数; E 为杨氏模量; G 为剪切模量。根据土钉距

离,计算获得相应每延米水泥土搅拌桩和土钉的颗粒流数值模型细观参数,具体见表4和表5。

表4 桩的细观参数

桩长 /m	桩半径 /m	颗粒密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	平行粘结法向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	平行粘结切向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	法向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	接触约束单元半径 /m
12	0.3	3 300	4.67×10^{10}	3.17×10^{10}	4.96×10^{10}	4.96×10^{10}	0.28

表5 土钉的细观参数

钉长 /m	土钉半径 /m	颗粒密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	平行粘结法向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	平行粘结切向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	法向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	接触约束单元半径 /m
6/8	0.1	3 500	1.0×10^{12}	3.85×10^{11}	$3.48/3.51 \times 10^{11}$	$3.48/3.51 \times 10^{11}$	0.09

2 建立计算模型

在建模过程中,如果按实际土颗粒尺寸进行模拟,得到的颗粒数量太多,一般计算机速度和容量还无法满足计算要求。由于本论文主要是研究复合土钉支护的力学机理,而不是具体量的大小,因此在模拟过程中对颗粒的尺寸进行了放大,土颗粒尺寸的选用与前面三轴试验所选用的颗粒大小一致,使其符合地基土的物理力学性质。

2.1 基坑模型的选取

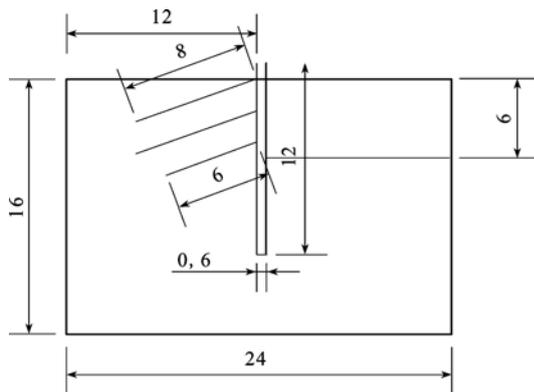


图2 基坑模型示意图(单位:m)

参考福州某实际工程,选取计算模型尺寸为 $24 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ (宽 \times 深),基坑开挖深度为 6 m ,分三级开挖,每开挖一级施加一根土钉,第一、二排土钉长度为 8 m ,第三级土钉长度为 6 m ,土钉与水平夹角为 20° ,土钉水平间距为 1.5 m ,垂直间距为 2 m ,水泥搅拌桩桩长为 12 m ,半径为 0.3 m ,具体尺寸见图2。

2.2 建立颗粒流模型

建模时,模型首先生成4道墙,围成一个尺寸为 $24 \text{ m} \times 16.5 \text{ m}$ 的区域作为地基土体,墙的法向和切向刚度均为 $2.0 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。然后在该区域内随机生成颗粒,粒径范围为 $0.07 \sim 0.08 \text{ m}$,共生成18 375个颗粒,控制孔隙率为0.18,形成压实的颗粒集合,地基土采用接触粘结计算模型,先进行8 000时步的运算,使土体在自重和颗粒间的摩擦下达到稳定状态,此时颗粒的平均不平衡力与平均接触力的比值为0.006%,平均不平衡力已收敛,地基土体处于初始稳定状态。此时,模型基本符合天然状态下地基土的特征,并施加粘结材料的性质。三种支护方案见图3。

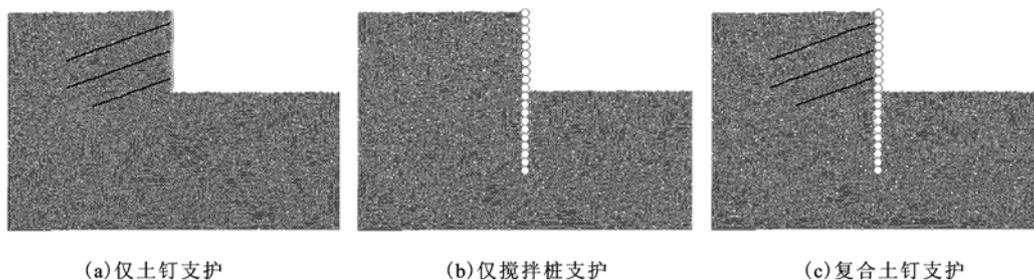


图3 不同支护形式的颗粒流模型

2.2.1 纯土钉支护模型

本模型采用分层开挖,每次土方开挖 2 m ,分3层开挖。利用FISH语言删除土钉位置的土颗粒,并生成土钉,土钉采用平行粘结计算模型,其细观参数见表5,并设置土钉与土体的粘结力为 300 kPa ,每一步开挖运

行6 000时步,使其充分变形。在每一级开挖后,在开挖面生成一层颗粒,记录开挖所产生的变形。

2.2.2 纯搅拌桩支护模型

本模型在指定位置先删除桩身所在位置的土颗粒,然后利用PFC^{2D}内置的FISH语言生成桩体,桩

采用平行粘结计算模型,这样桩体可以承受弯矩和剪力,其细观参数见表4。然后将模型进行4 000时步的运算,使桩和土之间密实,并达到稳定平衡状态。接着分层进行开挖,每层运行6 000时步,并记录此时桩体的各项参数。

2.2.3 复合土钉支护模型

本模型为上述两种模型的综合,首先在指定位置生成桩体,并运行使桩土稳定;然后每开挖一层,施加一排土钉,并使土钉与桩体连接成一体,两者共同受力,每一层运行6 000时步,其中搅拌桩与土钉的参数与上述两模型相同。

3 模拟结果分析

为了更好地研究不同支护方案的力学机理,通过FISH编程,能够获得基坑开挖后土钉的轴力分布情况、搅拌桩弯矩和剪力分布情况以及基坑侧壁的变形情况。(其中土钉0 m处位于基坑内侧壁方向)

3.1 纯土钉支护轴力分析

纯土钉支护时,其所受轴力分布曲线见图4,其轴力沿着土钉轴向总体呈中间大两边小的“枣核状”,其轴力最大值出现在土钉长度的中部附近。不同部位的土钉所受轴力大小是不同的,第一排土钉的轴力最小,约为第二、三排轴力的一半。但第二、三排土钉轴力大小相差不大,只是分布形式略有差别,第二排土钉轴力最大值主要分布在中部,而第三

排土钉最大值主要分布在中上部。

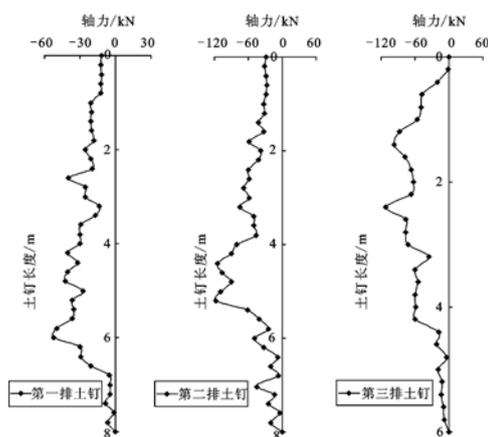


图4 纯土钉支护时土钉轴力图

3.2 复合土钉支护轴力分析

通过复合土钉支护计算模型,可得土钉的轴力呈“指数曲线”分布,最大值出现在桩墙联结点附近,且其轴力沿着土钉轴向逐渐减小(见图5)。这与上面所述单纯土钉支护时的轴力大小和分布曲线完全不同,与纯土钉支护相比,第一排土钉轴力最大值相差不大,第二排纯土钉支护时轴力最大值比复合土钉支护时略大,而第三排土钉复合土钉轴力最大值约为纯土钉支护2倍,且复合土钉轴力随着其埋置深度的加大有明显的增大的过程。这主要是因为复合土钉支护时,土钉与桩连接在一起受力变形,使其轴力分布形式改变。

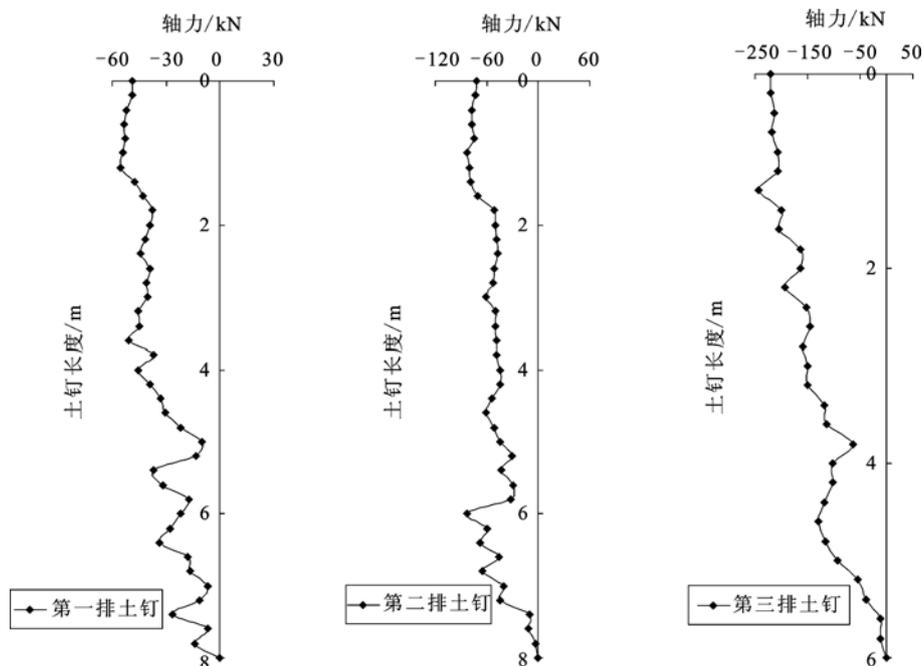


图5 复合土钉支护时土钉轴力图

3.3 纯搅拌桩支护弯矩和剪力分析

纯搅拌桩支护时,桩墙所受剪力和弯矩见图6。

从桩墙的剪力分布可以看出,剪力在桩身范围由三段抛物线组成,最上面一段剪力较小,而下面两段剪

力较大,由此可知纯搅拌桩支护时,剪力较大处主要集中在基坑底面以下部位;弯矩呈“S型”分布,上下段受弯部位不同,且基坑底面以下弯矩最大值略大于基坑底面以上的最大值。

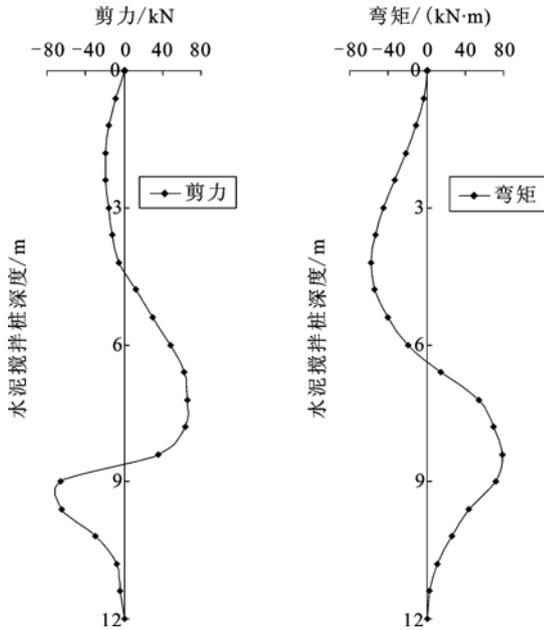


图6 纯搅拌桩支护时桩墙剪力和弯矩图

3.4 复合土钉支护弯矩和剪力分析

复合土钉支护时,由于受土钉的影响,桩墙所受的弯矩和剪力分布形式和大小与单纯搅拌桩支护时有很大的不同(见图7)。此时,桩墙由于受土钉的拉力影响,使剪力沿桩长分布复杂,每一排土钉与桩墙接触处剪力都有较大改变,约在5 m深度处剪力最大,该位置正好为第三排土钉与桩的连接处,且此排土钉所受轴力也最大。与图6相比,在桩墙所受的剪力的最大值比纯搅拌桩支护时大;但弯矩的最大值在比纯搅拌桩支护时小。

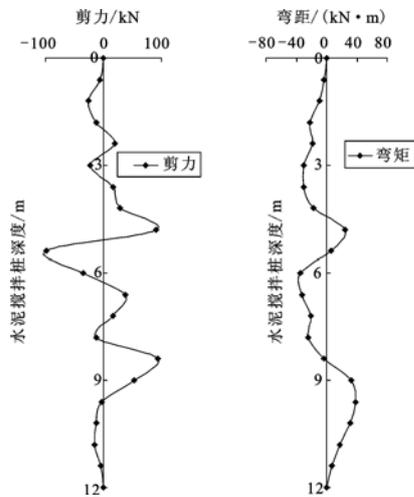


图7 复合土钉支护时桩墙剪力和弯矩图

3.5 桩墙与侧壁水平位移分析

通过监测桩体和侧壁颗粒的坐标变化,可以获得基坑开挖过程侧壁的水平位移(见图8)。纯土钉支护时基坑的侧壁变形量最大,曲线呈“倒S型”,侧壁中下部的位移量最大;而纯搅拌桩支护时变形量次之,曲线呈“近直线型”,越往上位移量越大,桩顶部的位移最大;而复合土钉支护时变形量最小,曲线呈“凸肚型”,位移中间大两边小,在侧壁中部位移最大。

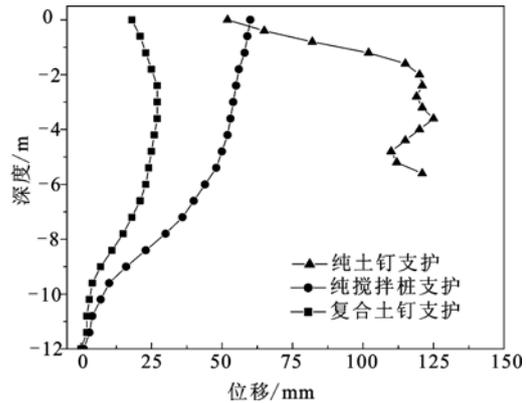


图8 桩墙与侧壁水平位移示意图

由此可知,在纯土钉计算时,混凝土面层限制坡面开挖卸荷而膨胀变形的能力有限,故其对变形有更严格限制的情况下难以奏效。单纯搅拌桩计算时,由于桩体要承受较大的弯矩和剪力,必须在弯矩和剪力最大处进行强度的验算。复合土钉计算时,变形能较好地满足要求,但土钉所受的轴力、桩体所受的剪力都较大,因此需对土钉抗拉强度和桩体剪力最大处强度进行验算。

4 结论

本文利用基于离散元法的颗粒流软件 PFC^{2D}建立了不同支护形式的基坑数值模型,通过各支护方案对比研究,得到以下四点结论:

- 1) 复合土钉支护结构的土钉轴力大于纯土钉支护,且轴力分布形式不同,复合土钉支护轴力呈“指数曲线”分布,且最大值出现在桩墙联结点附近,而纯土钉支护轴力呈“枣核状”分布,中间大两头小。
- 2) 由于搅拌桩具有一定的强度和刚度,除了隔水的作用外,本身也能够承担土体的荷载,起到支护坑壁的作用,与复合土钉支护相比,其水平位移、弯矩较大,但剪力略小。
- 3) 复合土钉支护时搅拌桩与土钉协同在一起支护基坑,公共维持基坑稳定性,并能够较理想地控制基坑变形。

4)复合土钉支护时水平位移最小,曲线呈“凸肚型”;仅搅拌桩支护时水平位移居中,曲线呈“近直线型”;仅土钉支护时水平位移最大,曲线呈“倒S型”。

参 考 文 献

- [1] Stocker M F, et al. Soil Nailing[J]. On Soil Reinforcement, Paris, 1979; 556-570.
- [2] G. Gassler, G. Gudehus. Soil Nailing-Some Aspects of New Technique [J]. Proceedings of 10th ICSMF, 1981, 5.
- [3] Bridle, R J. Soil Nailing Analysis and Design[J]. Ground Engineering, Sep. 1989.
- [4] Juran I, Elias, V. Ground Anchors and Soil Nails in

Retaining Structures. Foundation Engineering Handbook, Chapter 26 [M], Van Nostrand Reinhold Pub, 1991.

- [5] P. Unterreiner, B. Benhamida, F. Schlosser. Finite element modeling of the construction of a full-scale experimental soil-nailed wall [J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 1997, 1(1): 1-8.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. . PFC^{2D} user's manual[M]. Minneapolis; Itasca Consulting Group, Inc. , 2004.
- [7] 罗 勇,龚晓南,吴瑞潜. 桩墙结构的颗粒流数值模拟研究[J]. 科技通报, 2007, 23(6): 853-857.

收稿日期: 2012-09-12

(上接第 299 页)

3)综合对比分析本文极限端阻力标准值的取值范围与桩基规范中极限端阻力标准值的取值范围得出,较破碎中等风化极软岩的工程性质与强风化软质岩的工程性质相似;较破碎中等风化软岩的工程性质好于强风化硬质岩的工程性质但不如密实状态卵(碎)石的工程性质;较破碎中等风化较软岩的工程性质与密实状态卵(碎)石的工程性质相似;较破碎中等风化较硬岩的工程性质好于密实状态卵(碎)石的工程性质。同时分析了本文较破碎中等风化岩体 q_{pk} 取值范围的合理性。

参 考 文 献

- [1] 孔垂烛. 桩基规范中嵌岩桩竖向承载力计算方法[J]. 平顶山工学院学报, 2005, 14(6): 12-15.
- [2] 陈如连. 对桩基规范中 q_{pk} 的探讨[J]. 岩土工程学

报, 2011, 33(5): 831-832.

- [3] 李家奇,赵晓豹,李晓昭,等. 不同地区砂土中桩端承载力计算方法比较[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 1007-1012, 1043.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 94—2008. 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 重庆市建设委员会. DBJ 50—047—2006. 建筑地基基础设计规范[S]. 重庆: 重庆市建设技术发展中心, 2006.
- [6] 重庆市建设委员会. DBJ 50—043—2005. 工程地质勘察规范[S]. 重庆: 重庆市建设技术发展中心, 2005.

收稿日期: 2012-08-22