

深基坑土钉支护的有限元数值模拟及稳定性分析

赵 杰¹, 邵龙潭²

(1. 大连理工大学土木水利学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学工程力学系, 大连 116024)

摘 要: 在平面应变条件下, 对土钉支护的基坑进行了有限元数值模拟, 在此基础上采用有限元稳定分析方法评价基坑的稳定性。研究了土钉拉力及基坑变形的变化规律, 土钉长度及布置方式变化对基坑变形和稳定性的影响。结果表明, 当土钉足够长时, 基坑的潜在滑动面与最大拉力作用点连线位置通常是一致的。

关 键 词: 土钉; 有限元; 变形; 稳定性; 安全系数

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

Numerical simulation and stability analysis of soil nailing support for deep foundation pit by FEM

ZHAO Jie¹, SHAO Long-tan²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Chian)

Abstract: Under the condition of plane strain, a 2D elastoplastic FEM is used to analyze the behavior of a soil nailing support for deep foundation pit; and stability method based on slip surface FE stress is applied to evaluate the stability of the soil-nailed wall. The variations of tensile force of soil nails and deformation of foundation pit are studied. The influence of different lengths and layouts of soil nails on stability and deformation of foundation pit is also analyzed. The result indicates that the potential slip surface of foundation pit is consistent with the position of maximal tensile force when the soil nails are long enough.

Key words: soil nailing; finite element analysis; deformation; stability; factor of safety

1 引 言

土钉支护(Soil Nailing)是一种用于深基坑开挖支护或边坡加固的新的挡土技术, 它属于主动支护的技术方法, 先以一定倾角成孔, 然后将钢筋置入孔内, 在孔内注浆形成土钉体, 随后在坡面披挂钢筋网, 并与土钉连接, 最后在坡面上喷射混凝土。土钉支护具有经济、可靠且施工快速简便等优点, 在我国得到了迅速的推广和应用^[1]。

迄今为止的土钉支护设计的分析方法^[2], 国外主要有法国法、德国法、Bridle 法、Davis 法、Juran 法等; 国内主要有王步云法、冶建院法、清华法等。这些方法在高层建筑深基坑土钉支护中得到了广泛应用, 但是它们都属于极限平衡方法, 包含有不同定义的安全系数、滑裂面形式、土压力及土钉抗拔

力的不同假设和简化, 不能考虑土钉的变形与破坏, 设计者无法评价基坑的变形对临近建筑物的影响程度, 也不能客观评判土钉加固后土体的破坏情况, 设计的方案或偏于保守, 造成很大浪费; 或偏于危险, 造成基坑失稳。在具体应用时多少都有些局限性。

有限元法作为一种强有力的数值计算方法, 考虑了土体的应力应变关系, 不仅能计算土钉支护中土钉内力, 模拟开挖过程等, 而且可以考虑土体的非均匀性和各向异性的复杂形态。本文采用 Z_Soil 土工分析专业有限元软件, 在数值模拟基坑土钉支护的基础上, 分析土钉内力变化及基坑变形规律, 并在得到基坑开挖支护后应力场的基础上采用有限元稳定分析方法评价其稳定性; 此外还研究了土钉长度及布置方式变化对基坑变形和稳定的影响。

2 土钉支护的有限元数值分析

2.1 土体的本构模型

岩土工程通常采用的土体弹塑性本构模型有 Drucker-Prager 模型和 Mohr-Coulomb 模型, 都考虑了静水压力对屈服强度的影响, 但 D-P 模型与 M-C 模型相比, 具有参数易于确定, 模型屈服面光滑和易计算等优点。故本文在进行基坑开挖弹塑性计算时采用 D-P 模型。其屈服函数 F 表达式为

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式中: I_1 为应力张量第 1 不变量; J_2 为应力偏量第 2 不变量; α , k 为与岩土材料强度参数 c , ϕ 有关的常数, 通过变换 α , k 的表达式就可以在有限元中实现不同的屈服准则。平面应变条件下, 采用非关联流动法则($\phi = 0$), 将上式与 Mohr-Coulomb 公式对比, 可得:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sin \phi}{3} \\ k &= c \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

该准则与 M-C 准则精确匹配, 实质上它仍属广义 Mises 准则。

2.2 计算模型的建立

将支护体系简化为二维平面应变问题处理, 对地层土体采用四边形等参元离散, 土钉的作用简化为仅承受拉力的弹性杆单元, 土层开挖后喷射的混凝土面层简化为线弹性单元。为模拟土钉与土的相互作用, 引入界面单元的概念, 用一个弹塑性模型描述界面的性质。

当界面单元为弹性时, 剪应力为

$$|\tau| < \sigma_n \tan \phi_i + c_i \quad (3)$$

当界面单元为塑性时, 剪应力为

$$|\tau| = \sigma_n \tan \phi_i + c_i \quad (4)$$

式中: ϕ_i 和 c_i 分别为界面单元的摩擦角和凝聚力; σ_n 为作用在界面单元上的正应力; τ 为剪应力。

2.3 开挖与支护施工的模拟

土工结构的内力和变形往往和其建造过程密切相关^[3], 用有限元法模拟开挖和建造过程时, 较简便的作法是针对施工过程中的最大区域来划分有限元网格。必要时关闭某些单元以形成体系的初始状态, 之后再通过单元的关闭和启动来模拟开挖与建造的过程。当单元的关、启状态有变化时, 程序重新生成体系的刚度矩阵, 并计算相应的施工荷载, 求解体系内力和变形的改变量, 从而实现模拟开挖与建造的计算。

每步土钉支护施工的模拟过程为开挖一定深度的一层土体, 设置一排土钉, 构筑喷混凝土面层。当挖去一层土体后, 计算被挖去的土体单元的等效结点力, 并反向施加于开挖面上, 使开挖面成为 0 应力面。

3 基坑的稳定性分析

传统的基坑稳定性分析方法采用极限平衡方法, 这些分析方法在求安全系数时通常需要假定滑裂面形状为折线、单圆弧、双圆弧、对数螺旋线等, 而未考虑土体的应力应变关系, 也不能考虑土体与支挡结构(土钉与水泥土搅拌桩)的共同作用及其变形协调。

有限元法作为一种强有力的数值计算方法, 是近年来研究分析基坑土体结构稳定性的新趋势。应用有限元法评价基坑的稳定性方法主要有两类: 基于滑面上应力分析的有限元方法和强度折减有限元法。滑面应力分析法直接从极限平衡方法演化而来, 在国内外均有较多应用; 强度折减法是一种比较有争议的计算土坡稳定性的方法, 最近几年发展较快, 它的优点在于安全系数可以直接得出, 不需要事先假设滑动面的形式和位置, 但大都局限于纯土坡的应用, 较少考虑边坡中的锚桩、土钉和土工织物等结构体的作用。

本文采用基于滑面上应力分析的有限元方法, 对于平面应变问题, 取土体的抗剪强度为 Mohr-Coulomb 强度准则, 那么潜在滑动面上任一点土体的抗剪强度为^[4]

$$\tau_f = \sigma_n \tan \phi + c \quad (5)$$

式中: σ_n 为法向应力; ϕ 和 c 分别是土体的内摩擦角和黏聚力。沿滑动面的稳定安全系数 F_s 定义为土体抗剪强度与实际剪应力的比值:

$$F_s = \frac{\int_l (\sigma_n \tan \phi + c) dl}{\int_l \tau dl} \quad (6)$$

本文在采用有限元方法数值模拟基坑土钉开挖支护并获得基坑土体应力场的基础上, 采用广义数学规划法中的模式搜索法搜索最危险滑动面及相应的安全系数, 具体步骤如下:

(1) 采用 Z_Soil 软件模拟基坑土钉开挖支护过程, 计算每一时段内土体的应力分布, 输出各单元高斯点的应力值;

(2) 根据高斯点的应力推出单元节点应力, 单元节点应力经平滑处理后插值求得单元内部点的应力, 这样得到连续的土体应力场;

(3)在给定的搜索范围内,给定多条初始滑动面,采用 Hooke-Jeeves 模式搜索法进行搜索,取其中最小的安全系数及其对应的滑动面作为问题的解。

4 实例分析

4.1 工程概况

某一建筑基坑开挖深度为 8 m,其计算区域的几何尺寸和有限元计算模型如图 1 所示,边坡土体为均质土,其物理力学参数见表 1。开挖过程中采用 5 层土钉对该基坑进行支护,5 层土钉长度均为 6 m,土钉横向间距 1.0 m,纵向间距为 1.5 m,第 1 层土钉距离地表为 1.0 m,喷射混凝土面层的厚度为 0.2 m。

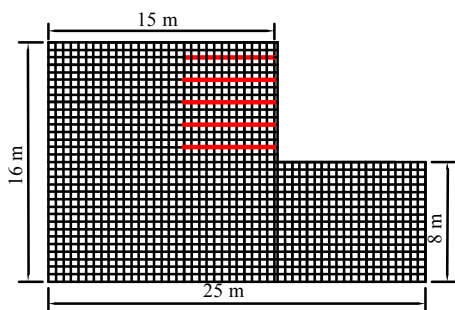


图 1 有限元计算模型

Fig.1 FEM model

表 1 土钉支护计算参数表

Table 1 The material parameters of the soil nailing

类型	γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	c / kPa	φ / $(^\circ)$	k	n	E / GPa	ν	f_y / MPa
土体	20	20	35	200	0.5		0.3	
土钉	25					30	0.2	310
面层	25					20	0.2	

注:土钉、面层采用的为等效弹性模量;土体的弹性模量根据公式

$$E = k p_s \left(\frac{\sigma_{3\max}}{p_s} \right)^n \text{ 确定。}$$

4.2 开挖过程中土钉内力与基坑变形分析

(1) 土钉拉力分布

图 2 为基坑开挖后不同位置处土钉拉力的分布情况,图 3 为基坑不同开挖阶段土钉最大拉力的分布情况。由图可知,不同层的土钉拉力沿钉深全长分布不均匀,随着开挖深度的增加,各排土钉的最大拉力都在增大。第 2, 3, 和 4 排土钉的拉力最大值要高于顶层和底层土钉的最大拉力,第 4 排土钉拉力最大,且土钉的最大拉力位置随着土钉埋深逐渐向土钉端部移动,最底层土钉的最大拉力位置已经很接近土钉端部,这与文献[5~9]的结论比较吻合。

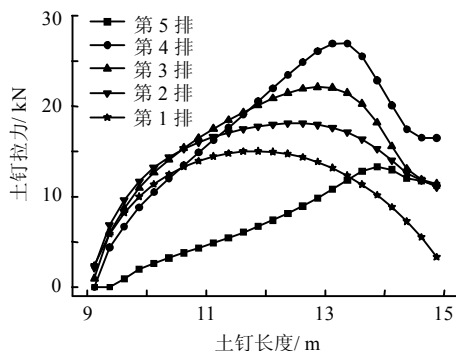


图 2 开挖后各排土钉拉力分布

Fig.2 Pull force distribution within each soil nailing after excavation

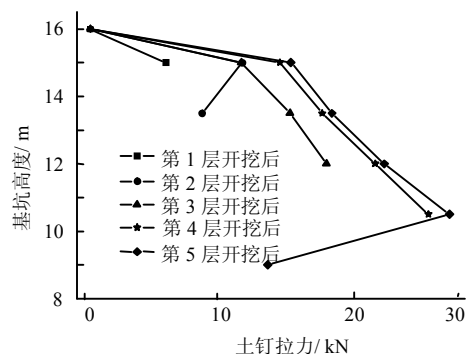


图 3 不同开挖阶段各排土钉最大拉力分布

Fig.3 Maximum pull force of each soil nailing in different excavation stage

(2) 基坑位移

图 4 为基坑分步开挖时侧壁水平位移变形曲线,可见随着开挖深度的增加,基坑位移发展变化很快,最大变形发生在基坑坡顶附近,约 2 cm。

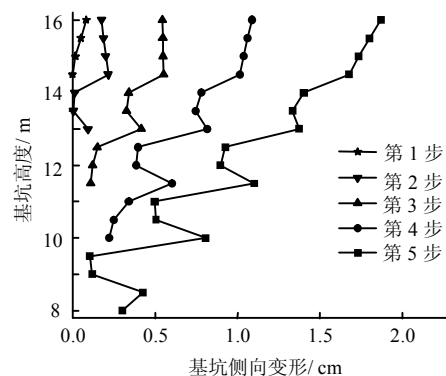


图 4 基坑侧向变形

Fig.4 Horizontal displacement of the foundation pit

4.3 土钉长度变化对基坑变形及稳定的影响

对不同土钉长度(1~10 m)的设计方案进行计算(基坑开挖及土钉布置均如图 1,土钉等长),图 5 给出的是不同土钉长度下基坑地表沉降,可以看出,地表沉降的最大值发生在坡顶附近,随着土钉长度

的增加,地表沉降逐渐减小。图6给出的是不同土钉长度下基坑底部隆起曲线,可以看出距离基坑侧壁越远,隆起值越大,但是土钉长度的改变几乎对坑底隆起的大小不起作用。

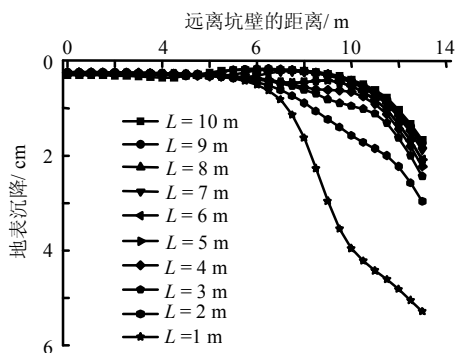


图5 基坑地表沉降

Fig.5 Ground settlement of the foundation pit

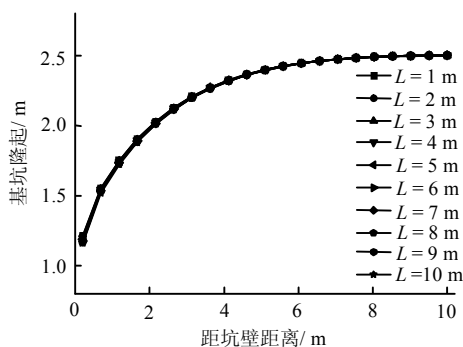


图6 基坑坑底隆起

Fig.6 Basal heave of the foundation pit

图7给出的是不同土钉长度下基坑最大水平位移和稳定安全系数,可以看出随土钉长度的增加,基坑最大水平位移不断减小,安全系数逐渐增大。在土钉较短时,从图中可以看出基坑的安全系数很小,此时从图5中也可以看出基坑变形急剧变大。为了控制基坑变形和提高稳定性,可以适当增加土钉长度,但是基坑的变形和安全系数与土钉长度并不是线性关系,土钉长度过长,控制变形的效果不明显,安全系数也不再变化,易造成浪费。

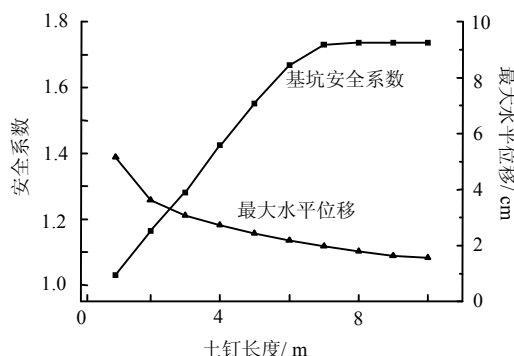


图7 土钉长度变化对变形和稳定的影响

Fig.7 Influence of the length of soil nailing on the distortion and stability of the foundation pit

此外,研究了某一排土钉长度变化对基坑稳定性的影响(其它各排土钉长度保持为6m)。从图8中可知,位于基坑中下部的土钉长度变化对稳定性影响较大,其中第4排土钉长度的减小对基坑稳定性影响最大,底排(第5排)土钉长度的减小对基坑稳定影响最小。这一点不难理解,因为从图2和3可知第4排土钉拉力最大,可以说第4排土钉对基坑的稳定性贡献最大。计算结果还表明,位于基坑中上部的土钉,土钉长度初始减小对稳定影响较大,曲线开始下降较快,后期变慢;而位于中下部的土钉后期减小对稳定影响较大,曲线初始比较平缓,后期下降较快。这一现象的主要原因是同基坑潜在滑动面的位置有关。

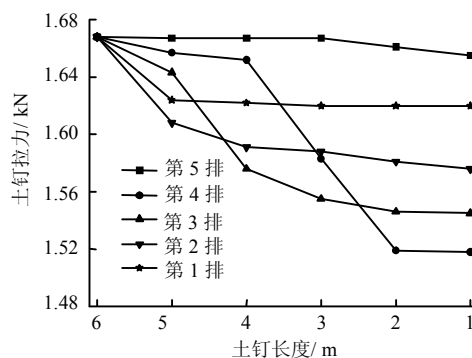


图8 某一排土钉长度变化对稳定的影响

Fig.8 Influence of the variety of length of each soil nailing on the stability

4.4 基坑潜在滑动面与土钉最大拉力作用位置

由图2可知,各排土钉的最大拉力位置随基坑开挖深度的增加逐渐由土钉的中部向端部移动。本文比较了基坑潜在滑动面同土钉最大拉力作用位置的关系,图9是土钉长6m,7m,8m和10m时基坑潜在滑动面位置与土钉最大拉力作用点连线的比较,可以看出在 $L=6\text{m}$ 时,由于土钉长度相对较短,不足以完全“锚固”住基坑土体,使得滑动面在第1排土钉之外;当土钉增长至 $L=7\text{m}\sim 10\text{m}$ 时,土钉可以“锚固”住基坑土体的滑动,此时潜在滑动面位置前移,与最大拉力作用点连线是一致的。

4.5 土钉长度布置方式对基坑变形及稳定的影响

现设4种不同土钉长度的设计方案,各排土钉的长度见表2,每种方案土钉的长度总和是相同的。对上述不同方案进行计算,得到开挖完成后水平位移沿深度的分布如图10所示。由图10可知,土钉的布置方案对基坑变形有较大影响,基坑上部土钉长的设计方案对控制基坑上部水平位移较为有利,是较好的设计方案,这与文献[8]的结论是一致的。

在相同计算条件下对不同设计方案进行了稳定

性分析,得到上述4种方案的稳定安全系数依次为1.67, 1.64, 1.67和1.55。可以看出,前3种设计方案得到的安全系数相差不大,但土钉上短下长的设计方案安全系数最小,同时坡顶位移较大,从本文的分析看,底排土钉的增长对稳定和变形控制的贡献很小,所以土钉上短下长是不可取的设计方案。文献[8]曾用极限平衡方法对不同土钉布置方式的稳定性进行研究,得出上短下长的设计方案安全系数最大,与有限元变形分析结论不一致,并分析了出现这种差异的原因,指出极限平衡分析方法中由于安全系数计算的方法使得下部土钉的作用被过分夸大,而且没有合理考虑土钉的破坏形式。从本文的分析看,有限元分析得到的变形和稳定性结果基本上是一致的。

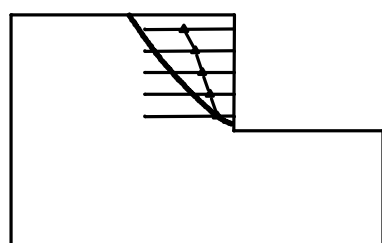
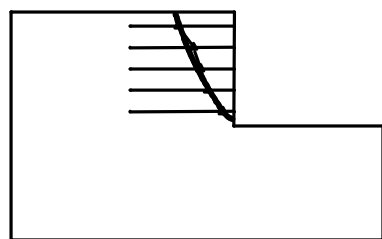
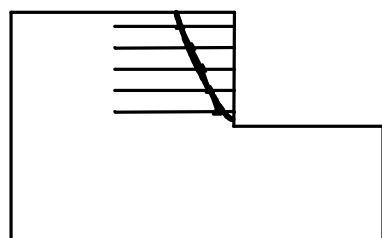
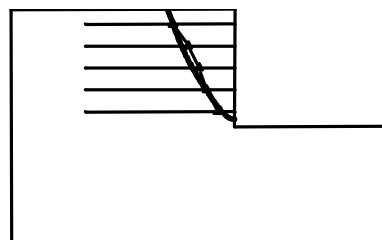
(a) $L = 6\text{ m}$ (b) $L = 7\text{ m}$ (c) $L = 8\text{ m}$ (d) $L = 10\text{ m}$

图9 基坑潜在滑动面与土钉最大拉力位置
Fig.9 The slip surface of the foundation pit and the location of maximum soil nailing pull force

表2 不同设计方案的土钉长度布置方式

Table 2 Arrangement of soil nailing in different design projects

土钉	土钉长度/m			
	方案1 (等长)	方案2 (中部长)	方案3 (上长下短)	方案4 (上短下长)
第1排	6.0	4.0	8.0	4.0
第2排	6.0	6.5	7.0	5.0
第3排	6.0	9.0	6.0	6.0
第4排	6.0	6.5	5.0	7.0
第5排	6.0	4.0	4.0	8.0

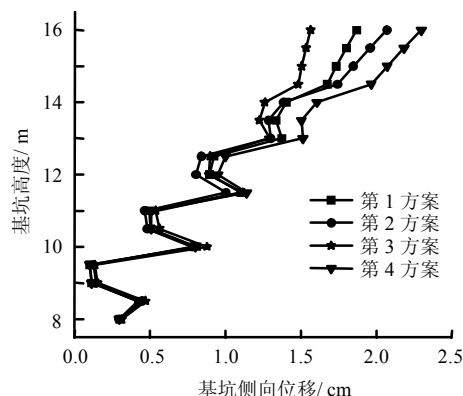


图10 不同设计方案比较

Fig.10 Comparisons among the different design projects

5 结 语

本文采用Z_Soil土工有限元软件对土钉支护的基坑进行了数值模拟,并在此基础上采用有限元稳定分析方法评价基坑的稳定性,得到以下结论:

(1) 不同层的土钉拉力沿土钉全长分布不均匀,随着开挖深度的增加,各排土钉的最大拉力都在增大。基坑开挖支护后,位于基坑中下部土钉的拉力最大值要高于顶层和底层土钉的最大拉力,土钉的最大拉力位置随着土钉埋深逐渐向土钉端部移动。

(2) 随着土钉长度的增加,基坑地表沉降和坡顶水平位移逐渐减小,但土钉长度的增加对控制坑底隆起几乎不起作用。

(3) 随着土钉长度的增加,基坑稳定安全系数逐渐增大,当土钉长度增加到一定长度时,安全系数趋于稳定,不再变化;位于基坑中下部土钉长度的减小对基坑稳定性影响最大,底排土钉长度的减小对基坑稳定影响最小。

(4) 土钉足够长时,基坑的潜在滑动面与最大拉力作用点连线位置通常是一致的。

(5) 土钉的布置方式对基坑变形和稳定有较大影响,其中基坑上部土钉短下部土钉长的设计方案变形最大,安全系数最小,是不可取的设计方案。

参考文献

- [1] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 连镇营, 韩国城, 吕凯歌. 土钉支护弹塑性数值分析及稳定性探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 85—89.
LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, LU Kai-ge. Elastoplastic numerical analysis and stability study of soil-nailed wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 85—89.
- [3] 宋二祥, 陈肇元. 土钉支护及其有限元分析[J]. 工程勘察, 1996, (2): 1—5.
- [4] 邵龙潭, 唐洪祥, 韩国城. 有限元边坡稳定分析方法及其应用[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 81—87.
SHAO Long-tan, TANG Hong-xiang, HAN Guo-cheng. Finite element method for slope stability analysis with its applications[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2001, 18(1): 81—87.
- [5] 秦四清, 王建党. 土钉支护机理与优化设计[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [6] 张明聚, 宋二祥. 土钉支护变形性能的有限元分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 59—63.
ZHANG Ming-ju, SONG Er-xiang. Analysis of deflection behavior of soil nailing by FEM[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(6): 59—63.
- [7] 杨林德, 李象范, 钟正雄. 复合型土钉墙的非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (3): 149—152.
YANG Lin-de, LI Xiang-fan, ZHONG Zheng-xiong. The nonlinear analysis of FEM on composite soil-nailed retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(3): 149—152.
- [8] 陈进杰, 贾金青, 张明聚. 土钉支护工作性能参数分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 618—622.
CHEN Jin-jie, JIA Jin-qing, ZHANG Ming-ju. Parametric studies on behaviors of soil nailing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 618—622.
- [9] 武亚军, 栾茂田, 杨敏. 深基坑土钉支护的弹塑性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1549—1554.
WU Ya-jun, LUAN Mao-tian, YANG Min. Elasto-plastic Numerical Simulation of Soil Nailing Support of Deep Foundation Pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1 549—1 554.
- [10] Z_SOIL.PC. 2003. User manual[R]. Zace Services Ltd. Report 1985-2003. Lausanne: Switzerland, 2003.

上接第 982 页

bearing capacity[J]. **Industrial Construction**, 2004, 34(8): 33—35.

- [6] 唐世栋, 李阳. 饱和土地基中桩周土固结模式的分析及其级数解[J]. 勘察科学技术, 2005, (3): 3—6

TANG Shi-dong, LI Yang. Analysis on consolidation mode in saturated clayed soil foundation around pile and its solution by progression[J]. **Exploration Science and Technology**, 2005, (3): 3—6

- [7] 赵维炳, 施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.

- [8] 王伟, 宰金珉, 王旭东. 考虑时间效应的预制桩单桩极限承载力解析解[J]. 南京工业大学学报, 2003, 25(5): 13—16.

WANG Wei, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong. Analytical solution for time-dependent ultimate bearing capacity of single driving pile[J]. **Journal of Nanjing University of Technology**, 2003, 25(5): 13—16.

- [9] MYINT T[美]. 数学物理方程[M]. 杨年钧, 姜广良, 允全德译. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1985.