

土钉支护结构设计深度的确定

屠毓敏¹, 阮长青²

(1. 浙江大学土木工程学系, 浙江 杭州 310058; 2. 温州城市中心区建设指挥部, 浙江 温州 325003)

摘要: 针对基坑支护结构设计深度的这一基坑设计中争议较大的问题, 以土钉支护结构为研究对象, 运用有限元强度折减方法, 研究了基坑工程中最为基础梁、桩基承台局部超深开挖的设计深度问题。研究表明: 强度折减的有限元方法完全能应用于边坡及土钉支护结构的极限设计中; 为真正做到土钉支护结构设计的合理、安全、可靠, 应根据不同的局部超深开挖的深度、尺寸及距离分别考虑; 可不考虑基础梁的局部超深开挖, 或 1~3 桩承台可考虑 1/2 的超深深度, 或多桩承台应计算至超深开挖深度的基底。

关键词: 基坑; 土钉墙; 有限元强度折减法; 整体稳定性; 设计深度

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)05-0805-05

作者简介: 屠毓敏(1965-), 男, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: tu-ym@sohu.com。

Determination of design depth of soil-nailing protection structures

TU Yu-min¹, RUAN Chang-qing²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Headquarters of Wenzhou Urban Center Area Construction, Wenzhou 325003, China)

Abstract: The design depth problem of excavation protection structures is one of controversial issues in the design of foundation pits. Taking the soil-nailing structure for the study, the strength reduction FEM is employed to solve this problem. The design depth of local ultra-deep excavation such as base beams and pile caps in the excavation is studied. Research shows that: the strength reduction FEM can be applied to the limit design of slopes and soil-nailing structures; different local ultra-deep excavation depths, sizes and distances are respectively treated in order that the soil nailing structures are truly designed reasonably, safely and reliably. In the design, the base beam ultra-deep excavation can not be considered, 1/2 of the ultra-deep excavation depth can be considered for the caps with 1~3 piles, and the ultra-deep excavation depth should be considered for the caps with many piles.

Key words: foundation pit; soil-nailing wall; strength reduction FEM; whole stability; design depth

0 引言

土钉支护是一种以充分利用土体的自支承能力为出发点, 通过在边坡中按一定的间距和长度设置土钉, 利用土钉与岩土体的黏接作用, 并辅以钢筋网喷射混凝土面层, 使土钉与土体协同工作并形成有机的整体, 形成一种复合式挡土结构体系, 弥补了土体抗拉、抗剪强度低的弱点, 同时改变了基坑(或土坡)的变形和破坏性状, 以提高岩土体的整体刚度和稳定性, 确保基坑(或边坡)稳定的工程措施。

土钉墙具有造价低廉、施工便捷、施工速度快、施工现场文明、支护质量高、能适用于多种地质条件等优点, 已在基坑支护和边坡加固中得到工程界的青睐, 并已在软弱地基基坑支护中得到广泛应用。

建筑基坑根据建筑物的不同建筑功能、结构布置及受力特点, 往往需设置诸如基础梁、承台、排水沟

及集水井、电梯井等结构(或构造), 有时电梯井距基坑开挖边线也较近, 而承台往往尺寸差异较大, 大部分基坑都存在局部超深开挖的问题, 目前工程界对如何准确合理地确定其设计深度仍分歧较大, 有人主张设计深度计算至基础梁及承台基底, 有人主张计算至 1/2 基础梁, 而笔者在设计中通常不考虑基础梁及单桩承台的局部超深开挖效应, 仅考虑多桩承台的局部开挖效应。鉴于目前国内基坑支护结构设计软件中未能考虑这方面的因素, 而设计规范中也未提出明确的规定, 设计人员只能凭自己的工程经验进行选取, 设计具有一定的盲目性。为此本文基于强度折减的有限元方法, 考虑基坑设计中的局部超深开挖效应, 研究土

收稿日期: 2008-10-22

修改稿返回日期: 2010-01-06

钉基坑支护结构的设计深度问题，确定带有局部超深开挖情况的设计深度，提高对局部超深开挖效应的认识，以供工程设计人员参考。

1 研究方法

土钉墙基坑支护结构设计时，其整体稳定性往往作为设计的控制条件，且不少土钉墙的工程事故均与其整体稳定性不足有关。根据文献[1]的要求，土钉墙的整体稳定性应按边坡稳定分析的简单（瑞典）条分法进行计算，同时应考虑土钉的锚固力作用，其计算式为：

$$\sum_{i=1}^n c_{ik} L_i s + s \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \cos q_i \tan j_{ik} + \sum_{j=1}^m T_{nj} [\cos(a_j + q_j) + \frac{1}{2} \sin(a_j + q_j) \tan j_{ik}] - s g_k g_0 \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \sin q_i \geq 0 \quad (1)$$

式中 g_k 、 g_0 分别为整体滑动分项系数和基抗侧壁重要性系数， c_{ik} 、 j_{ik} 为地基土强度指标的标准值， L_i 为土条滑弧面长度， w_i 为土条重量， q_0 为地面均布超载， T_{nj} 为土钉极限抗拔力， s 为土钉的水平间距， a_j 为土钉与水平面的夹角， q_j 为滑动面某处切线与水平面之间的夹角。

式（1）中的 $g_k g_0$ 即为通常所说的安全系数，令 $g_k g_0 = F$ ，式（1）可转化为：

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_{ik}}{F} L_i s + s \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \cos q_i \frac{\tan j_{ik}}{F} + \sum_{j=1}^m T_{nj} [\cos(a_j + q_j) + \frac{1}{2} \sin(a_j + q_j) \frac{\tan j_{ik}}{F}] - s \sum_{i=1}^n (w_i + q_0 b_i) \sin q_i \geq 0 \quad (2)$$

将岩土体的抗剪强度指标 c_{ik} 和 $\tan j_{ik}$ 用一个折减系数 F 进行折减，然后用折减后的虚拟抗剪强度指标 c_F ($c_F = c_{ik}/F$) 和 j_F ($j_F = \arctan(\tan(j_{ik}/F))$) 取代原来的抗剪强度指标 c_{ik} 和 j_{ik} ，并在有限元分析中使用。这就是强度折减有限元法的基本原理^[2-3]。

在弹塑性有限元数值分析中，折减系数的初始值取得足够小，以保证开始时是一个近乎弹性的问题，然后不断增加其值，折减后的抗剪强度指标逐步减小，反复对土钉墙进行分析，首先部分岩土体单元开始屈服，应力在单元之间重新分配，局部失稳逐渐发展，直到某个临界状态，在虚拟的折减抗剪强度下整个土钉支护结构发生失稳。那么在发生整体失稳之前的那个折减系数值，即实际抗剪强度指标与发生虚拟破坏时折减强度指标的比值，就是这个土钉支护结构的稳定安全系数。这里定义的抗剪强度折减系数，与极限

平衡分析中的稳定安全系数在本质上是一致的。

采用强度折减有限元法分析土钉墙基坑支护结构稳定性的一个关键问题就是如何根据有限元计算结果来判别土钉墙基坑支护结构是否处于滑动破坏状态。根据对边坡失稳破坏判据^[3-5]的研究，土钉墙基坑支护结构的破坏判据可按如下方法执行：①数值收敛判据：根据有限元解的收敛性确定失稳状态，即在给定的非线性迭代次数及限值条件下，最大位移或不平衡力的残差值不能满足所要求的收敛条件，则认为土钉墙基坑支护结构在所给定的强度折减系数下失稳破坏；②位移判据：根据计算域内某一部位的位移与折减系数之间关系曲线的变化特征确定失稳状态，如当折减系数增大到某一特定值时，某一部位位移突然迅速增大，则认为土钉墙基坑支护结构发生失稳；③塑性区判据：通过域内广义剪应变等某些物理量的变化和分布来判断，如当域内的塑性区（或某一幅值的广义剪应变）连通时，则判断边坡发生破坏。

如果土钉支护结构失去稳定，将产生很大的位移，滑体由稳定静止状态变为运动状态，其位移和塑性应变不再是一个定值，而是处于无限塑性流动状态，这就是土钉墙基坑支护结构破坏的特征^[4]。

2 土钉支护结构有限元强度折减分析

某一开挖基坑，开挖深度为 5.0 m，位于淤泥质黏土地层中，其场地土的物理力学性指标列于表 1，土钉支护结构剖面及地层分布如图 1 所示，土钉墙坡面坡度为 1：0.5，由上下 4 道土钉组成，长度分别为 9.0、12.0、12.0、9.0 m，采用钢管击入土钉，设计地面超载为 15 kPa。

表 1 土层的物理力学性指标

Table 1 Physical and mechanical properties of field soils				
土层名称	含水率 w/%	重度 g/(kN·m ⁻³)	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
黏土	32	18.0	15	12
淤泥质黏土	43	17.0	12	8

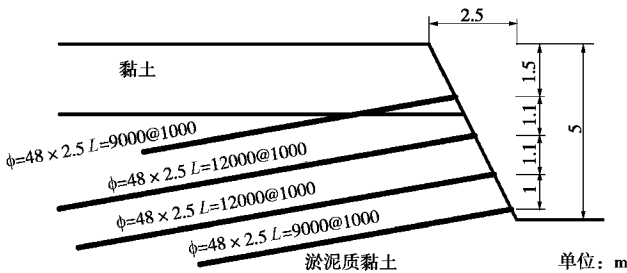


图 1 计算剖面

Fig. 1 Calculation section of soil-nailing wall

对图1的开挖边坡及土钉支护结构进行强度折减

的有限元分析,分析时地基土作为Mohr-Coulomb弹塑性材料,面层及土钉作为线弹性材料,用杆单元来模拟土钉,板单元模拟面层,土钉与地基土之间采用Goodman节理单元来模拟,其有限元计算网格如图2所示,有限元计算参数列于表2。

表 2 有限元计算参数

Table 2 Parameters for FEM calculation		
材料	弹性模量/kPa	泊松比
黏土	6000	0.40
淤泥质黏土	4000	0.45
混凝土	2×10^7	0.20

根据文献[1]的要求,求得图1开挖边坡的整体稳定性安全系数为0.823,而采用强度折减的有限元方法可得其开挖边坡的强度折减系数为0.838,其偏差仅为1.82%。

同样由计算可得,土钉支护结构的强度折减系数为1.312,若不考虑钢筋混凝土面层时,其强度折减系数降至1.238,而根据“规程”^[1]的方法求得图1土钉墙的整体稳定性安全系数为1.192,与强度折减的有限元方法相比,其偏差也仅为3.86%,从另一方面可以看出,在土钉支护结构中,面层的作用是不可忽视的,只有考虑土钉-面层-地基土的相互作用,才能真正体现土钉墙支护岩土体的效能。

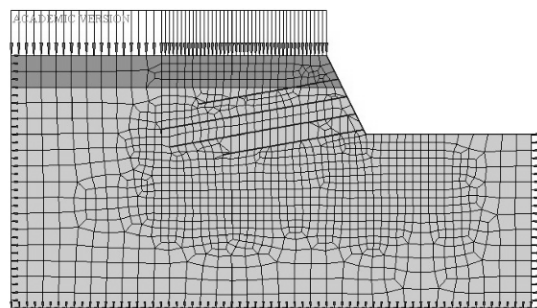


图 2 有限元计算网格

Fig. 2 Finite element mesh

众所周知,在用瑞典条分法(“规程”推荐方法)进行边坡极限分析时,由于没有考虑土条之间的相互作用力,与其他条分法相比,其值偏小,与强度折减的有限元方法相比同样有所偏小,但其偏差较小,由此可得,用强度折减的有限元方法进行土质边坡的极限分析是完全合适的,完全能满足工程设计需要。同样对于土钉墙而言,由于土钉的存在,加大了土条条间的相互作用,则用“规程”方法所得的安全系数的偏小量会增大,从强度折减的有限元方法也可证实这点,当考虑土钉墙面层作用时,其强度折减系数明显增大。从有限元强度折减法分析土钉支护结构的整体稳定性来看,强度折减的有限元分析土钉支护结构的

整体稳定性是完全可行的。

图3为开挖边坡及土钉墙支护结构的最大剪应变等值线云图。由图可知:边坡及土钉墙达到极限状态时,剪切破坏带均明晰可见,而且剪切破坏带具有较宽的范围;开挖边坡的塑性破坏区比土钉墙要小得多,土钉墙的剪切破坏面位于土钉端部外,逸出点远离坡脚,其实不少土钉墙工程事故都证实了这点,当土钉支护结构产生较大位移时,地表的裂缝往往位于土钉端部的外侧,同时基底一定范围内产生大面积隆起。

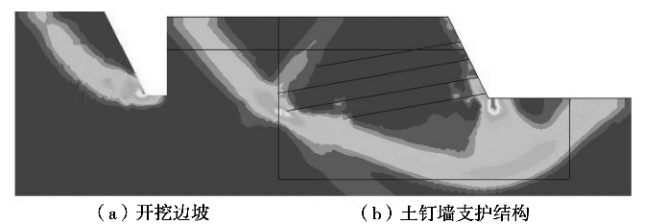


图 3 最大剪应变等值线云图

Fig. 3 Contour cloud of maximum shear strain

3 土钉支护结构设计深度的算例分析

在建筑基坑工程中,常存在局部超深开挖问题^[6-7],地下室的外墙一般均存在基础梁及承台,而承台有单桩承台、两桩承台及多桩承台。基础梁一般超深开挖0.5 m,单桩及两桩承台一般超深开挖1.0 m左右,而多桩承台一般超深开挖不超过1.50 m。由于超深开挖对土钉支护结构的整体稳定性产生一定的影响,如何正确选取土钉支护结构的设计深度,直接关系到土钉墙的稳定性的,同时也直接影响工程造价,既不能单纯将设计深度计算至各超深开挖基底,也不能不考虑局部超深开挖的影响,而应根据超深开挖的深度、尺寸及距离统筹考虑。

3.1 基本假定

为更好地研究土钉支护结构的设计深度问题,特作如下几点假定:

- (1) 开挖基坑(边坡)位于软弱土地层中,其地层分布、土质指标及计算参数见第2节表2。
- (2) 土钉支护结构以图1为依据,当局部超深开挖时,其土钉的布置型式保持不变。
- (3) 用强度折减的有限元方法来研究土钉支护结构的局部超深开挖,当具有相同的强度折减系数时,则此时的计算深度即为设计深度。
- (4) 局部超深取为0.5, 1.0, 1.5 m,以模拟工程中的基础梁、单(两)桩承台及多桩承台,局部超深开挖尺寸及距离如图4所示。由于工程中的基础梁一般为0.4 m,考虑到施工因素,图4中的b值最小取为1.0 m。

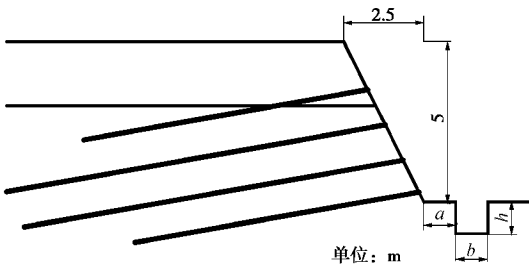


图 4 计算剖面

Fig. 4 Section of soil-nailing wall

3.2 不同计算深度时的强度折减系数

土钉支护结构及土钉布置型式保持不变, 仅改变基坑的开挖深度, 即基坑的开挖深度由原来的5.0 m增大至5.25, 5.50, 5.75, 6.0, 6.25 m, 分别进行强度折减的有限元分析, 则其相应的强度折减系数依次为1.263, 1.213, 1.138, 1.113, 1.063。

3.3 超深开挖 0.5 m

研究 $h=0.5$ m时的情况, 改变 a 、 b 时的强度折减系数的变化列于表3。

表 3 强度折减系数 ($h=0.5$ m)

Table 3 Strength reduction coefficients ($h = 0.5$ m)

a/m	$b=1.0$	$b=1.5$	$b=2.0$	$b=2.5$	$b=3.0$
	m	m	m	m	m
0.0	1.263	1.263	1.238	1.238	1.238
0.5	1.288	1.263	1.263	1.263	1.263
1.0	1.288	1.288	1.288	1.263	1.263
1.5	1.288	1.288	1.288	1.263	1.263

由计算可得, 强度折减系数与局部超深的距离和尺寸存在一定的关系, 就工程中的基础梁而言, 基础梁开挖边线距基坑开挖边线一般大于0.5 m, 基础梁开挖尺寸一般小于1.0 m, 由此可见, 土钉支护结构的设计深度可不考虑基础梁的局部超深开挖的影响。

3.4 超深开挖 1.0 m

研究 $h=1.0$ m时的情况, 改变 a 、 b 时的强度折减系数, 列于表4。

表 4 强度折减系数 ($h=1.0$ m)

Table 4 Strength reduction coefficients ($h = 1.0$ m)

a/m	$b=1.0$	$b=1.5$	$b=2.0$	$b=2.5$	$b=3.0$
	m	m	m	m	m
0.0	1.188	1.188	1.163	1.163	1.138
0.5	1.238	1.213	1.188	1.163	1.163
1.0	1.238	1.213	1.188	1.188	1.163
1.5	1.238	1.213	1.188	1.188	1.163
2.0	1.238	1.213	1.213	1.188	1.163
2.5	1.238	1.238	1.213	1.188	1.188

就工程中的1~3桩承台而言, 开挖边线距基坑开

挖边线一般为0.5 m左右, 其开挖宽度一般为1.5 m左右, 为此, 土钉支护结构的设计深度可按1/2局部超深开挖深度考虑, 对于距基坑边线超过2.5 m的1~3桩承台的超深开挖, 可按1/3超深开挖深度考虑。对超深开挖1.0 m的4桩承台而言, 其设计深度可按3/4局部超深开挖深度计算。

3.5 超深开挖 1.5 m

研究 $h=1.5$ m时的情况, 改变 a 、 b 时的强度折减系数, 列于表5。

表 5 强度折减系数 ($h=1.5$ m)

Table 5 Strength reduction coefficients ($h = 1.5$ m)

a/m	$b=1.0$	$b=1.5$	$b=2.0$	$b=2.5$	$b=3.0$
	m	m	m	m	m
0.0	1.063	1.063	1.038	1.038	1.013
0.5	1.138	1.088	1.088	1.063	1.063
1.0	1.138	1.113	1.088	1.088	1.063
1.5	1.163	1.138	1.113	1.113	1.088
2.0	1.188	1.138	1.138	1.113	1.113
2.5	1.188	1.163	1.138	1.113	1.113

就工程中的多桩承台而言, 开挖边线距基坑开挖边线较近, 其开挖尺寸一般为3.0 m×3.0 m, 土钉支护结构的设计深度应计算至局部超深开挖深度的基底, 对于距基坑边线超过2.0 m的多桩承台的超深开挖, 可按4/5超深开挖深度考虑。

4 结 论

通过对局部超深开挖的土钉支护结构的有限元极限分析, 可以得出如下结论:

用强度折减的有限元方法来分析边坡及土钉支护结构的整体稳定性, 与传统的极限平衡分析方法在本质上是一致的, 两者的偏差很小, 因此, 强度折减的有限元方法完全能满足工程设计的需要。

在土钉支护结构中, 土钉 - 面层 - 土体三者之间的相互作用, 使土钉墙真正发挥其支护边坡的效能, 而传统的极限平衡分析法很难解决这一问题, 用强度折减的有限元方法无疑是解决这一问题的最有效的方法。

对于软弱地基基坑中的局部超深问题, 应根据超深的深度、尺寸及位置进行分别对待: 对于超深深度不超过0.5 m的基础梁, 可不考虑其局部超深开挖, 当超深深度在0.5~1.0 m时, 可按超深深度的1/3考虑; 对于1~3桩承台的超深开挖, 当超深深度小于1.0 m时, 可按1/2超深深度计算, 当超深深度在1.0~1.5 m时, 可按2/3超深深度计算; 对于大于4桩的承台超深开挖, 当超深深度小于1.0 m时, 可按3/4超深深度计

算, 当超深深度在1.0~1.5 m时, 可按4/5超深深度计算。

参考文献:

- [1] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2005(3): 1 - 6. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, SONG Ya-kun. Advance of study on the strength reduction finite element method[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2005(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381 - 3388. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381 - 3388. (in Chinese))
- [4] 黄秋枫, 胡海浪. 基于强度折减有限元法的边坡失稳判据研究[J]. 灾害与防治工程, 2007(2): 38 - 43. (HUANG Qiu-feng HU Hai-lang. Study on slope failure criteria based on strength reduction FEM[J]. Disaster and Control Engineering, 2007(2): 38 - 43. (in Chinese))
- [5] 吕庆, 孙红月, 尚岳全. 强度折减有限元法中边坡失稳判据的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008(1): 83 - 87. (LÜ Qing, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan. Slope failure criteria of shear strength reduction finite element method[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2008(1): 83 - 87. (in Chinese))
- [6] 吴志敏, 屠毓敏. 土钉基坑支护的空间效应研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2178 - 2182. (WU Zhi-min, TU Yu-min. Space effect of soil-nailing excavation protection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2178 - 2182. (in Chinese))
- [7] 屠毓敏, 阮长青, 赵向前, 等. 温州大剧院深基坑支护技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 59 - 62. (TU Yu-min, RUAN Chang-qing, ZHAO Xiang-qian, et al. Protecting technique for deep excavation of Wenzhou Grand Theater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 59 - 62. (in Chinese))

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于1979年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续5版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大16开, 双栏排版, 160页, 每月中旬出版, 每期定价25元, 全年300元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)