

应用 H-S 模型进行巨型深基坑的开挖优化分析

杜佐龙^{1, 2}, 王士峰³, 刘祥勇⁴, 郭锋效⁵

(1. 中国建筑第八工程局有限公司技术中心 上海 200120; 2. 同济大学土木工程博士后流动站, 上海 200092; 3. 中国建筑第八工程局有限公司土木公司
路桥分公司, 上海 200120; 4. 无锡市轨道交通发展有限公司, 江苏 无锡 214131; 5. 中国建筑第八工程局有限公司天津公司, 天津 310450)

摘 要: 天津滨海新区于家堡金融起步区一期工程, 基坑面积约为 11 万 m², 普遍开挖深度约为 13~14m, 只使用了一道钢筋混凝土支撑, 这对整个基坑支护体系的稳定性控制提出了很高的要求, 在开挖前就需要对基坑在开挖过程中的变形性状进行预测, 判定其对周边环境的影响。本文使用基于 Hardening-Soil 模型的有限元方法, 对比不同开挖步时基坑开挖对周边环境的影响, 分析证实了优化方案的可行性, 得到的结论可供类似工程参考。

关键词: 单支撑巨型深基坑; Hardening-soil 本构模型; 有限元法; 开挖优化

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0248-06

作者简介: 杜佐龙 (1979-), 男, 湖北仙桃人, 博士后, 从事地下深基础工程的研究。E-mail: dzdragon_ac@126.com。

Optimization of earthwork for a super-large deep excavation based on hardening-soil constitutive model

DU Zuo-long^{1, 2}, WANG Shi-feng³, LIU Xiang-yong⁴, GUO Feng-xiao⁵

(1. Technology Center, China Construction Eighth Engineering Division, Shanghai 200120, China; 2. The Postdoctoral Research Station of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Road & Bridge Branch Division, China Construction Eighth Engineering Division, Shanghai 200120, China; 4. Wuxi Rail Transit Development Co., Ltd. Wuxi 214131, China; 5. Tianjin Branch Division, China Construction Eighth Engineering Division, Tianjin 310450, China)

Abstract: The first planning excavation of Yujiapu Financial Zone in Binhai New District of Tianjin has an area of about 110000 m², and the depth of the excavation is commonly 13~14 m. In this excavation, only one level of concrete internal bracing is applied, so it has high requirements for the control of stability. The prediction of deformation is necessary to determine the impact of the surrounding environment during the process of excavation. Based on the hardening-soil constitutive model and the finite element method, the influence of different steps of excavation on the environment is analyzed. The conclusions show the validity of this optimization and have certain reference value for the relevant excavation projects.

Key words: super-large deep excavation with single internal bracing; hardening-soil constitutive model; finite element method; excavation optimization.

0 引 言

在城市基坑工程日益发展的今天, 量化分析基坑开挖引起的周边地表变形是岩土工程的热点和难点, 其理论方法可以划分为三类: ①经验分析法, ②时空效应估算法, ③数值分析法。

经验分析法以 Peck^[1]公式为代表, 在收集了旧金山、西雅图、芝加哥、圣路易斯及奥斯陆等地关于基坑开挖的实测数据基础上, 得到了基坑变形与土的性质以及开挖深度有关的地表沉降曲线的估算公式; 后续的研究主要是依据工程实践对 Peck 公式进行修正和完善, 对不同地区土的性质给出不同的修正经验系数项; 刘建航等^[2]从国内软土地区, 特别是上海地区近十年来在深基坑的施工实践和试验研究的成果中,

提出了基坑开挖的时空效应: 即在深基坑开挖及支撑过程中, 分步开挖的空间几何尺寸和支护结构开挖部分的无支撑暴露时间与基坑变形有一定的相关性; 以此为理论基础, 《上海基坑工程技术规范》^[3]根据基坑周边不同环境保护条件给出了一个粗略的围护结构最大变形设计控制标准,

方法①和方法②的优点是简单易行, 地区公式的使用已有多年的历史, 符合当地实际情况。缺点是难以反映深基坑开挖过程中各种因素的影响, 尤其是无法考虑基坑开挖与周边环境的相互作用的影响, 且地

基金项目: 中建股份科技研发课题 (CSCEC-2009-Z-13); 天津市科委立项课题 (2011-7)

收稿日期: 2012-08-24

域性较强, 难于推广应用。

数值分析方法^[4-6]近年来得到了广泛的应用, 其优势在于可以方便地对各种因素进行量化分析, 考虑土体-围护结构和周边环境的共同作用, 但是由于土体变形行为的复杂性, 数值分析方法的计算结果并不一定都理想, 有时甚至得不到较为合理的结果。

从目前实际应用来看, 描述土体应力-应变关系的 Hardening-Soil 本构模型 (简称 H-S 模型)^[7]是应用于基坑开挖的较为成功的模型, 本文重点介绍了采用 H-S 模型的有限元法在深基坑土方开挖优化分析中的应用, 探讨了不同开挖步设置和基坑坑内预降水对基坑周边土体位移场的影响程度, 并总结相应的变化规律, 使用围护结构变形、坑后土体变形和坑底隆起变形的三条曲线对比的方式对土方优化开挖方案进行评价, 并与实测结果进行了对比分析, 确保了优化方案的安全性。

1 Hardening-Soil 本构模型

H-S 模型为等向硬化屈服模型, 其基本思想是将三轴试验得到的土体“剪应力-轴向应变”曲线用双曲线方程表示, 可以模拟应力增量随应变逐渐减小的硬化现象, 另外充分考虑土体的剪胀性和中性加载, 特别适合于描述基坑开挖等土体的卸载行为, 屈服面如图 1 所示。

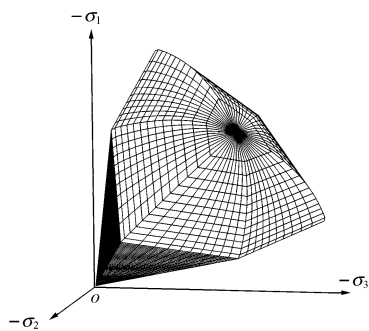


图 1 Hardening-Soil 模型在 π 平面上的屈服面

Fig. 1 Yield surface of H-S model in π plane

关于 H-S 模型的进一步更详尽的讨论见文献^[7~9], H-S 模型的参数共有 10 个, 其中土体强度参数有四个: 内摩擦角 φ 和黏聚力 c , 膨胀角 ψ , 用来描述极限状态的破坏比 R_f ; 描述土体的刚度参数有 3 个: 考割线刚度 E_{50}^{ref} 、参考压缩模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 和参考卸载/再加载弹性模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。上述参数均可以通过常规三轴剪切和侧限固结试验获得。

2 工程概况及相应的分析方法

2.1 工程概况及特点

于家堡金融区起步区一期基坑工程坐落于天津市

滨海新区, 基坑占地面积约 11 万 m^2 , 普遍开挖深度 13~14 m, 基坑支护方案采用钻孔灌注桩 (桩径 1.1 m) + 钢筋混凝土内支撑的支护方式, 基坑整体仅设置一道水平混凝土支撑 (矩形截面 1.5 m \times 1 m), 本工程为一狭长矩形, 基坑平、剖面布置如图 2 所示。

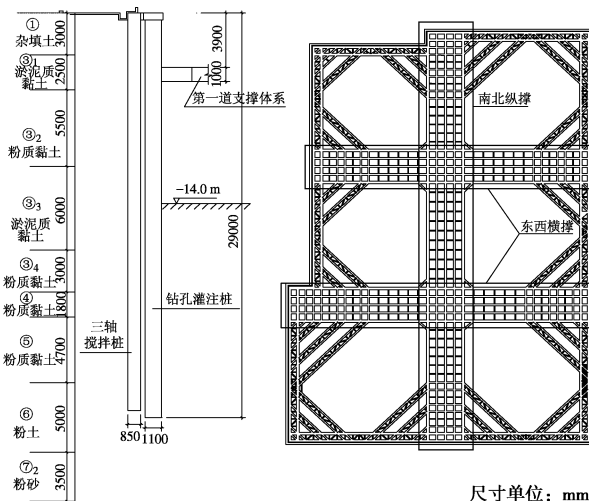


图 2 基坑剖面、平面示意

Fig. 2 Plane and cross section of excavation

2.2 分析方法与模型

采用岩土工程专业有限元分析软件进行基坑开挖过程的有限元数值模拟, 因为本基坑形状狭长, 接近平面应变状态, 利用对称性, 取基坑宽度的一半进行分析, 断面处于平面应变状态, 使用 15 节点高精度三角形平面应变单元模拟土体; 单元划分和边界条件如图 3 所示, 计算区域竖向取为 $6H$, 而水平方向取为 $30H$, H 为土方开挖深度, 底部边界约束水平和竖向位移, 左侧约束水平位移, 右侧为对称边界。土层物理力学指标如表 1 所示。

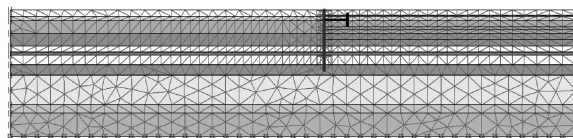


图 3 有限元网格划分

Fig. 3 FEM mesh of model

2.3 分析过程

基坑开挖涉及到支护结构施工、土方开挖、支撑体系施工等复杂过程, 具体的实现步骤如下:

(1) 建立整个地基土体和支护结构的模型后, 利用生死单元功能“杀死”所有的支护结构单元, 并施加重力荷载, 模拟基坑开挖前的土体初始应力场分布, 保留初始地应力场而初始位移场接近于零的状态即是基坑土方开挖计算的起点。

(2) 根据实际的施工顺序, “激活”围护桩单元,

表 1 土层的物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层编号	平均层厚/m	重度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	参考压缩 模量 E_s/MPa	参考割线 刚度 $E_{50}=E_s/\text{MPa}$	参考卸载 - 再加载 模量 $E_{ur}=3E_{50}/\text{MPa}$
①杂填土	3.0	18.0	10.0	5.0	2.0	2.0	6.0
③1 淤泥质土	2.5	17.7	6.0	6.7	2.1	2.1	6.3
③2 黏性土	5.5	18.8	18.6	12.1	5.7	5.7	17.1
③3 淤泥质土	6.0	17.9	6.7	10.5	3.0	3.0	9.0
③4 黏性土	3.0	19.2	18.3	12.2	4.0	4.0	12.0
④黏性土	1.8	19.7	15.8	17.2	5.4	5.4	16.2
⑤黏性土	4.7	20.1	18.1	18.8	6.2	6.2	18.6
⑥粉土	5.0	20.3	29.0	12.0	13.2	13.2	39.6
⑦2 粉砂	13.8	20.3	31.0	9.4	16.7	16.7	50.1

支护结构设定为弹性介质，参数按混凝土材料确定，弹性模量 E 取为 30 GPa，泊松比 μ 取为 0.17，使用 2 节点梁单元模拟，在围护桩与周围土体之间设置接触面单元来模拟桩 - 土的相互作用。

(3) 通过“生死单元”功能模拟基坑工程支护结构、各层土体的分层开挖以及混凝土支撑的施工过程，坑边超载统一考虑为 20 kPa。

3 H-S 模型在基坑工程中的应用

3.1 土方开挖方案的优化分析

在基坑工程实践中，常需要对不同的开挖方案进行比选，采用前述的分析方法，通过变形曲线对比的方式，可方便地进行方案比选。

(1) 原设计方案为：以第 1 道混凝土支撑位置分界，分成 2 个阶段、5 个施工步进行土方开挖，第 1 阶段分为 2 个施工步，土方开挖总深度为 4.9 m+0.1 m（还要考虑 0.1 m 超挖），单步开挖深度约为 2.5 m，完成后插入第一道混凝土支撑施工；待混凝土支撑施工完成并达到设计强度后，进行支撑下方的第 2 阶段土方开挖，总深度约为 9.0 m，分成 3 个施工步，每步开挖约为 3 m。

(2) 优化方案同样分成两个阶段、但希望将五个施工步缩减为 3 个：第 1 阶段即第 1 施工步，单步开挖深度 5.0 m，将支撑下方的土方开挖的第 2 阶段分成两个施工步，每步开挖约为 4.5 m，即增大每一步的开挖深度，减少施工步，以节约工期。

土方开挖的施工部署如图 4 所示，图 5 是分别使用不同的土方开挖方案得到的在不同开挖深度下的围护结构变形图，图 6 和图 7 分别是这两种不同方案下的最终坑底隆起曲线和坑后土体沉降曲线，具体的量值对比如表 2 所示，综合这些分析，可以得到如下的结论。

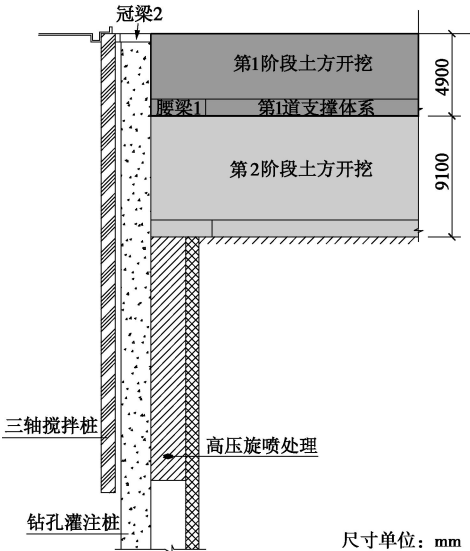


图 4 土方开挖阶段划分

Fig. 4 Different steps for earthwork

(1) 支撑施工前围护结构最大侧向变形位于围护桩顶部，沿深度方向逐渐递减；水平支撑设置后，由于支撑的水平约束，支撑所在的位置成为反弯点，最大侧向变形点逐渐下移，开挖至基底后，最大侧向位移量位于接近坑底处，侧移曲线呈“肚子形”分布；2 种方案的最终侧向位移变形相差不大。

(2) 位于基坑底部的③3 层淤泥质土对土方开挖的影响最大，土方开挖越接近此层土，则围护桩的侧向变形量越大。因此在优化方案中必须重视基坑降水和采取被动区留土护坡的措施，控制变形速率，以避免周边环境的破坏。

(3) 两种方案的坑底土体的隆起和坑后的土体沉降量的差别较大，如表 3 所示，单步开挖深度越大，意味着单步卸载量越大，则基坑隆起量和坑后的沉降量越大，因此在开挖至基底后，必须采取压载等措施，同时加强信息化施工监控，保证施工安全。

表 2 基坑变形的原方案和优化方案对比

Table 2 Comparison of deformation by different methods on earth work

项目	开挖步	原方案		优化方案	
		变形形式/位置	最大值/ mm	变形形式/位置	最大值/ mm
支护结构变形	开挖至 5 m 处	桩顶处	104.07	桩顶处	108.41
	开挖至基底	接近坑底, 向坑内凸起	105.75	接近坑底, 向坑内凸起	110.51
坑底隆起量	开挖至基底	隆起变形	90.36	隆起变形	126.90
坑后地表沉降量	开挖至基底	坑后(0.5~0.7) H 范围内	27.89	坑后(0.5~0.7)H 范围内	38.99

综上可知优化方案对整个围护体系的稳定影响不大,但在增大单步开挖深度、减少工期的同时也带来了较大的坑底隆起量和坑后土体沉降,但通过采取相应的应对措施,可以将周边环境的变形控制在允许范围内,故优化方案经判断,是合理可行的。

效地改善土体强度,其刚度参数由于固结压力的增长而显著提高。

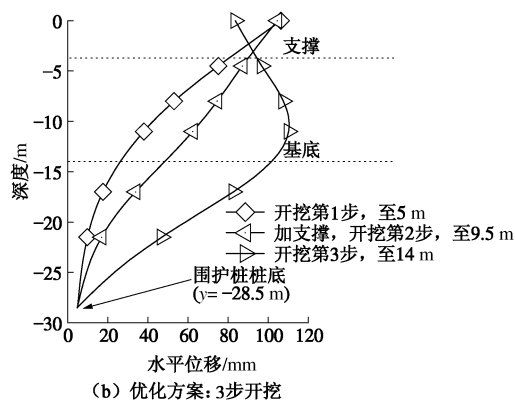
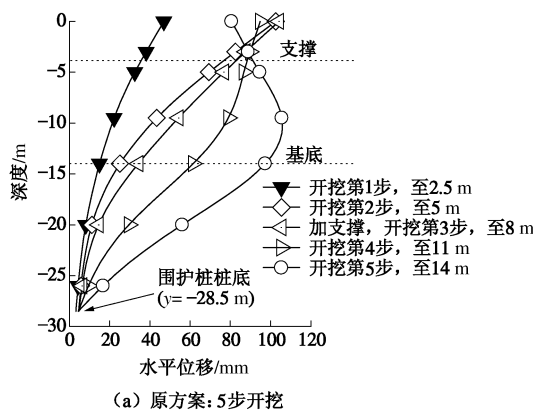


图 5 基坑围护结构变形对比

Fig. 5 Comparison of deformation of retaining structure for excavation

3.2 应用非均质模式分析基坑预降水的加固作用

在确定了土方开挖方案后,面临的问题是如何量化分析基坑降水对坑内土体的加固作用。针对此问题,吴林高等^[10]的室内试验研究主要得出了以下 2 点结论:①降水后的排水固结可以使土体孔隙水压力减小,有效应力增加;②室内试验的结果表明:降水可以有

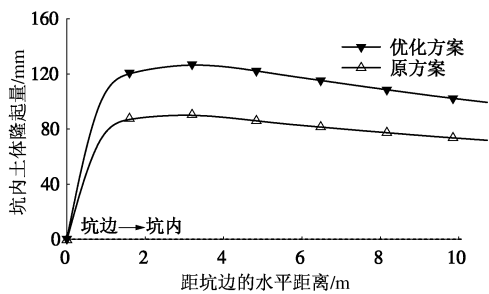


图 6 坑内土体隆起量对比

Fig. 6 Comparison of uplifting value of soil at bottom of excavation

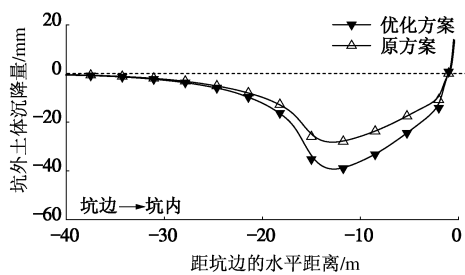


图 7 坑后地表土体沉降对比

Fig. 7 Comparison of settlement of soil beside excavation

但参考文献[10]的研究中的试验非常复杂,而且并未给出土体有效应力增量的具体计算方式,针对此问题,此处借鉴 Gibson 土^[11]的思路,将土体刚度参数随深度变化的非均质模式引入预降水对基坑内土体的加固分析中,即认为由于坑内的预降水加固,使得基坑内的深层土体的刚度增大,如图 8 所示,沿土体深度方向,土体的参考压缩模量 E_s 呈线性变化,修正后的变化函数如下式所示: $E_s = E_{s0} + \lambda y$, λ 为刚度参数随深度线性变化的斜率, λ 的变化范围一般为 $0.0 \sim 3.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$,同样使用 Gibson 土的模式, λ 值使用降水后的现场十字板剪切试验得到的斜率值(如条件不具备,也可使用地勘报告中的十字板剪切试验得到的斜率值),取值如表 3 所示。

表 3 降水加固范围内的参数修正

Table 3 Modified soil parameters affected by dewatering

土层编号	参考压缩模量 E_s/MPa	非均质系数 $\lambda/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
①杂填土	2.0	1.5
③1 淤泥质土	2.1	1.5
③2 黏性土	5.7	1.5
③3 淤泥质土	3.0	1.5

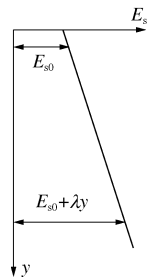


图 8 刚度参数随深度变化的非均质模式

Fig. 8 Variation pattern of E_s with depth

如图 9 所示, 考虑降水加固作用后, 周边环境的变形量约降低了 35%, 降水的加固效果体现在坑底土

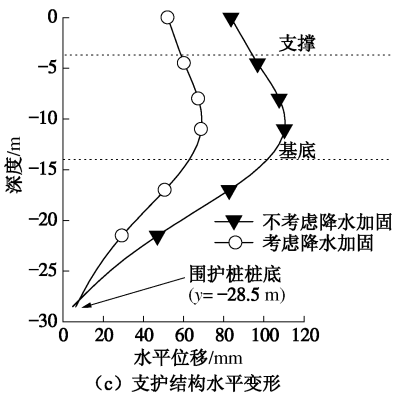
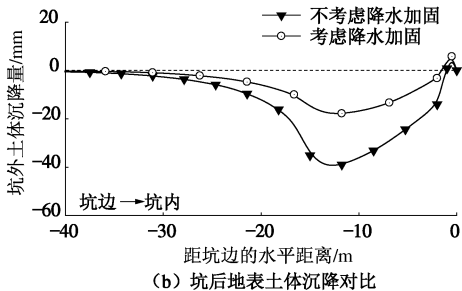
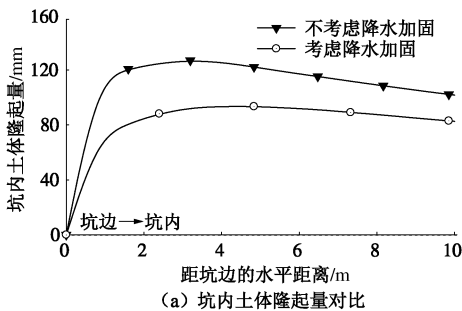


图 9 基坑周边变形对比

Fig. 9 Comparison of value of deformation for excavation

体隆起量、坑后的土体沉降、以及围护结构的水平变形均有明显改善, 相应的曲线变化更加平缓, 对比结果表明: 非均质模式的引入, 与“降水效果好的基坑, 相应的周边环境变形更小”的客观工程规律一致, 初步证明用非均质模式分析基坑预降水的加固作用是合理的。

进一步的证明源于有限元预测值与实测值的对比, 如表 4 和图 10 所示, 显然考虑基坑的降水加固作用得到的结果更为合理: 以“坑后地表土体沉降曲线、坑底土体的隆起曲线和围护结构的侧移变形曲线这三条曲线的预测值与实测值的相吻合程度”为衡量标准的话, 显然, 将土体刚度系数的非均质特性引入 Hardening-Soil 模型中来模拟基坑在预降水条件下的土方开挖过程是比较理想的, 满足预测精度要求, 可以更加准确地反映了基坑周边土体的变形趋势和坑后最大沉降值可能出现的位置, 从而可以有针对性的采取预防措施。

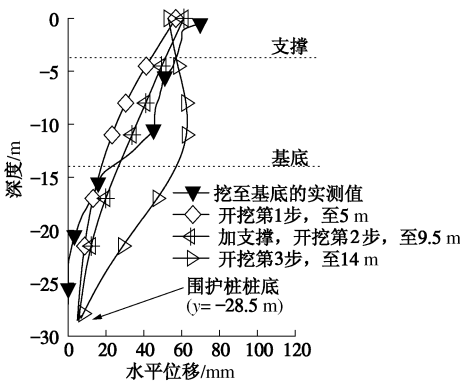


图 10 围护结构变形的预测值与实测值对比

Fig. 10 Comparison of deformation of retaining structure for excavation between monitoring and prediction by FEM

表 4 基坑变形的预测值与实测值的对比

Table 4 Comparison of deformation for excavation between monitoring and prediction by FEM

项目 /形式	有限元计算值		实测值	
	位置	最大值/mm	位置	数值/mm
坑底隆起量	基坑中心	83.7	竖托桩处 实测	35~88
坑后地表沉降量	坑后约 0.5H 处	11.6	坑后(0.5~ 0.7)H 范围	8~12
支护结构变形	支护结 构底部	62.5	支护结构 顶部	81.6

4 结 语

基于 H-S 模型的方法较为准确地预测了土体沉降和隆起变形, 可以广泛应用于基坑工程的土方开挖方案优化, 本文相关土体位移场的分布符合基坑变形的一般规律, 得出的结论可供类似工程参考。

因为对基坑工程的围护结构的刚度难于估算, 故

对围护结构本身的变形的预测精度不高, 需对此问题进行进一步的研究, 形成较系统的分析方法, 从而提高预测基坑开挖对周边环境影响的分析精度。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [M]. the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City. 1969: 225 - 290.
- [2] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [3] DG/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海, 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai, 2010. (in Chinese))
- [4] 刘继国, 曾亚武. FLAC^{3D} 在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用 [J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 505 - 508. (LIU Ji-guo, ZENG Ya-wu. Application of FLAC^{3D} to simulation of foundation excavation and support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 505 - 508. (in Chinese))
- [5] 王 清, 郭惟嘉, 刘正兴. 修正剑桥模型在基坑开挖分析中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(4): 565 - 569. (WANG Qing, GUO Wei-jia, LIU Zheng-xing. Application of modified Cambridge model in foundation excavation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University 2001, 35(4): 565 - 569. (in Chinese))
- [6] 陆新征, 宋二祥, 吉 林, 等. 某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 488 - 491. (LU Xin-zheng, SONG Er-xiang, JI Lin, et al. 3-D Dimensional FEA for the interaction between supporting structure of excavation and soil in a very deep pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 488 - 491. (in Chinese))
- [7] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. Beyond 2000 in computational geotechnics, chapter formulation and verification of the hardening-soil model[M]. Balkema: Potterdam, 1991.
- [8] VERMEER P A, NEHER H P. A soft soil model that accounts for creep (Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years of PLAXIS International) [M]. Balkema: Rotterdam, 1999.
- [9] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University Stuttgart, 2007.
- [10] 刘陕南, 吴林高. 工程降水引起的前期固结压力增长对软土工程性质影响的试验研究[J]. 工程勘察, 1997(4): 9 - 12. (LIU Shan-nan, WU Lin-gao. Experimental study on the soil property affected by the increase of preconsolidation pressure induced by dewatering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1997(4): 9 - 12. (in Chinese))
- [11] GIBSON R E. Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space[J]. Géotechnique, 1967, 17: 58 - 64.

(本文责编 孙振远)