

DOI: 10.11779/CJGE2014S2056

基于海量数据的深基坑本体变形特征研究

喻 军^{1, 3}, 龚晓南², 李元海³

(1. 浙江工业大学建筑工程学院,浙江 杭州 310014; 2. 浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310096; 3. 中国矿业大学建筑工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要: 由于影响深基坑变形因素较多,在不同的场地施工条件下其可控因素不同,很难准确预测基坑变形量的大小,不能为基坑监测提供准确可靠的预警值,有必要针对某特定区域和支护结构进行深基坑变形的预测分析。针对杭州地区的基坑监测数据,通过大量数据的统计分析,得到基坑支护结构与地面沉降和坑底隆起的关系,以及变形特征和变形值大小;然后根据基坑的重要性和周围建筑物重要程度进行分级,确定基坑变形的控制值,作为基坑监测的预警值,以确保基坑施工安全。通过监测数据分析发现针对杭州地区有较好的适应性。

关键词: 海量数据; 统计分析; 深基坑; 变形; 监测; 预警值

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0319-06

作者简介: 喻 军(1978-),男,博士后,讲师,主要从事隧道及地下工程教学科研工作, E-mail: yujunsunny@163.com。

Deformation characteristics of deep excavations based on mass data

YU Jun^{1, 3}, GONG Xiao-nan², LI Yuan-hai³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310096, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Deformation prediction of deep excavations is difficult, and pre-warning value is not accurate and reliable because there are many factors to affect their deformation and different controlling factors in different places. It is essential to predict and analyze deformation of deep excavations according to special area and supporting structure. Statistical analysis is conducted to analyze the mass data of monitoring in Hangzhou City to gain the relationship between deformation of supporting structures and surface settlement and bottom upheaval as well as the deformation characteristics and values. Then, the degree of excavations is classified according to its importance and the degree of building importance. Finally, the controlling value of excavation deformation is put forward as the pre-warning value so as to ensure the construction safety of excavation. The conclusion is adaptable to predict the deformation of excavations in Hangzhou.

Key words: mass data; statistics and analysis; deep excavation; deformation; monitoring; pre-warning value

0 引言

随着城市建设的发展,高层建筑基坑和地铁基坑越来越多,朝着深大方向发展,并且周围出现许多敏感性建筑物、地下管线等,使得基坑变形控制成为关注的焦点之一^[1]。过去的基于平衡理论强度控制设计是静止的、单一的,不再适用于目前的基于过程的、演化的、状态的施工控制要求;越来越多的深基坑工程出现在密集的建筑群中间,周边分布各种建筑物以及各种复杂的地下管网和电缆等。因此,越来越多的深基坑工程设计受到环境因素的制约,在很多场合主要是以变形作为控制条件,特别是在软土地区,基坑支护结构更应实施变形控制以使相邻环境处于安全和正常营运状态。变形控制设计是首先应是变形预测分析,对支护结构在使用条件下的变形规律及趋势作预

测分析^[2-4];其次是动态设计,即将设计置于时间和空间的动态过程中,随施工过程中的采集与反馈,对原设计作必要的调整;设计还应考虑开挖影响区域内的其它有关物体,如邻近的管线、建(构)筑物等;以及基坑施工结束后的周围影响程度评价,如后期沉降,地下水评估。

1 杭州地区地质特征

在杭州地区的软土,其工程地质和水文地质条件较差,土体具有高水位、高承压水、高含水率、高灵

基金项目:国家自然科学基金项目(51174197);国家重点基础研究发展计划973项目(2014CB046905);浙江省科技厅项目(2012C21074);浙江省教育厅项目(Y201432360);中国博士后科学基金项目(2014M560464)
收稿日期:2014-07-28

敏度、高压缩性、低密度、低渗透性和流塑等特点，更增加了基坑工程的难度^[5-8]；基坑开挖深度加大，支护结构体系设计的复杂性和难度增加，地基变形的敏感性增大^[9-10]。

2 杭州深基坑监测统计分析

随着基坑深度的加大，灌注桩和地下连续墙成为软土地区的主要围护形式，表 1 列出了杭州软土地区 16 个深基坑工程的基本实测数据，全部为顺作法，深度从几米基坑到接近 30 m 的超深基坑。

计算基坑变形的方法——基于大量监测数据统计分析法。根据大量基坑工程的统计资料确定杭州地区变形控制指标，由这些大量已成功实施的基坑工程的统计资料来确定基坑的变形控制指标不失为一种有效的方法。首先定义基坑的环境保护等级，然后根据统计资料来确定变形控制指标。很显然，基坑的变形控制指标与基坑环境保护等级密切相关，环境保护等级越高变形控制也越严格。

基坑工程环境保护等级的划分需要考虑的要素是环境保护对象的重要性程度和环境保护对象与基坑之间的距离^[11-12]。环境保护对象的重要性程度主要考虑两类：一类是重要性程度非常高，如历代优秀建筑、有精密仪器与设备的厂房、其它采用天然地基或短桩

基础的重要建筑物、轨道交通设施、隧道、防汛墙、原水管、自来水总管、煤气总管、共同沟等重要建(构)筑物或设施，其损坏往往会对社会生活产生巨大的影响和经济损失；另一类是重要性程度较高，如较重要的自来水管、煤气管、污水管等市政管线、采用天然地基或短桩基础的建筑物等，其损坏往往会对人们的生活产生一定程度的影响和经济损失。

环境保护对象的变形量和它与基坑之间的距离以及坑外地表沉降的性状密切相关。根据大量基坑统计资料得到的软土基坑地表沉降包络线表明，在(0~0.75)H(H 为基坑开挖深度)的范围内，地表沉降最大，在(0.75~2.0)H 的范围内地表沉降逐渐衰减。地表沉降曲线表明，最大地表沉降发生于墙后 0.5H 处；在(0~1.0)H 的范围内，地表沉降较大；在(1.0~2.0)H 的范围内地表沉降逐渐减小；而在(2.0~4.0)H 的范围内地表沉降由较小值衰减到可忽略的程度，如图 1。综合上述有关研究，将 1.0H、2.0H 和 4.0H 作为划分基坑环境保护等级时建(构)筑物所处位置的分界点。

地表沉降基本介于 0.4~2.0 倍的围护结构最大侧移之间，平均地表最大沉降为 0.8 倍的围护结构最大侧移。取平均地表最大沉降为 0.8 倍的围护结构最大侧移，则对应于环境保护等级为一、二和三级基坑的

表 1 杭州深基坑工程实例一览表

Table 1 List of deep excavation cases in Hangzhou City

序号	名称	挖深/m	围护结构形式	桩径或墙厚/mm	嵌入深度/m	支撑间距/m	最大侧移/mm	最大侧移深度/m
1	浙江建工综合楼	9.80	钻孔灌注桩	800	—	3.265	35.00	12.00
2	杭州钢铁公司业务楼	10.80	钻孔灌注桩	800	21.0	4.150	25.00	7.00
3	浙江大酒店	11.22	钻孔灌注桩	800	15.2	4.375	35.00	7.20
4	杭州第二电信长途枢纽大楼	13.90	钻孔灌注桩	1000	25.0	3.900	22.90	12.00
5	杭州武林村综合楼	6.80	沉管灌注桩	426	18.5	4.500	54.20	8.50
6	杭州金城工商联大楼	6.20	钻孔灌注桩	800	21.0	3.030	40.00	7.50
7	杭州金山大厦	10.2	钻孔灌注桩	800	20.7	6.200	39.33	6.65
8	杭州电力调度大厦	11.30	钻孔灌注桩	800	18.0	4.500	17.00	13.00
9	浙江证券交易大楼	13.93	地下连续墙	650	20.5	4.490	9.00	—
10	浙江日报新闻大楼	8.40	地下连续墙	650	16.0	5.230	11.00	—
11	浙江省国际金融大厦	14.25	地下连续墙	800	29.3	4.250	73.97	10.00
12	杭州中信银行大厦	29	地下连续墙	800	28.0	5.300	50.00	27.00
13	杭州金融大厦	35	地下连续墙	1000	35.0	4.500	40.00	31.00
14	杭州国际大厦	25	地下连续墙	800	26.0	5.400	30.00	20.00
15	杭州天成广场	19.5	地下连续墙	800	20.0	5.500	34.00	18.50
16	杭州黄龙饭店二期	19.4	地下连续墙	800	19.0	5.300	30.62	15.00

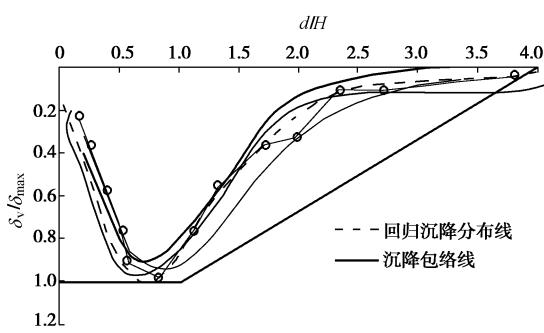


图 1 杭州地区的墙后地表沉降统计分析

Fig. 1 Statistic analysis of surface settlement behind diaphragm wall in Hangzhou

墙后地表最大沉降设计值分别为 $0.144\%H$ 、 $0.24\%H$ 和 $0.56\%H$ 。适当调整后取环境保护等级为一、二和三级基坑的墙后地表沉降设计控制指标分别为 $0.15\%H$ 、 $0.25\%H$ 和 $0.55\%H$, 见图 2。

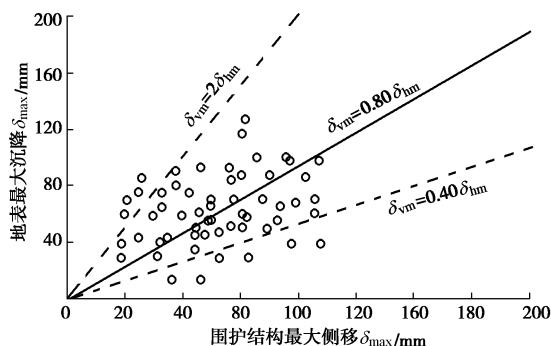


图 2 围护结构最大侧移与地表沉降的关系

Fig. 2 Relationship between side displacement of supporting structure and surface settlement

围护结构侧向变形分析: 围护体的最大侧向变形及位置与土质情况、围护体刚度、支撑系统刚度、基坑开挖深度等因素有关, 围护墙体厚度的选取和支撑的布置是关键。抗隆起稳定也是控制和估算墙体变形和地面沉降的关键因素。

无黏性砂土中侧墙的最大水平位移数值通常较小, 一般发生在坑深的中部附近, 且不超过 $0.5\%H$ 。在饱和软黏土和很软的土中进行基坑开挖, 产生的地层的位移要比砂土或硬黏土中大许多, 其延伸的范围也广。经统计杭州地区基坑围护结构(地下连续墙)的侧向位移见表 2。

此外, 围护结构的侧向位移还受如下因素的影响: 围护结构的刚度与位移的关系; 围护结构的刚度与开挖深度的关系; 基坑开挖深度与最大侧移及其位置的关系; 抗隆起稳定安全系数与最大侧移的关系; 支点与围护结构侧移量的关系; 围护结构入土深度与侧移量的关系; 开挖宽度对侧移的影响; 土性参数 c 、 φ 对

侧移的影响。下面分析他们之间的关系, 见图 3~8。

表 2 软土中地下连续墙的位移量

Table 2 Displacement of diaphragm wall in soft soils

基坑名称	相对刚度 $(kPa \cdot m^{-1})$	$\gamma H/S_a$	最大侧移与 坑深比值/%
浙江证券交易 大楼	1470	4.4	0.2
浙江日报新闻 大楼	4300	7.0	0.1
浙江省国际金 融大厦	1420	6.6	0.5
杭州中信银行 大厦	3020	7.6	1.5
杭州金融大厦	6370	6.6	2.1
杭州国际大厦	3460	5.6	1.5

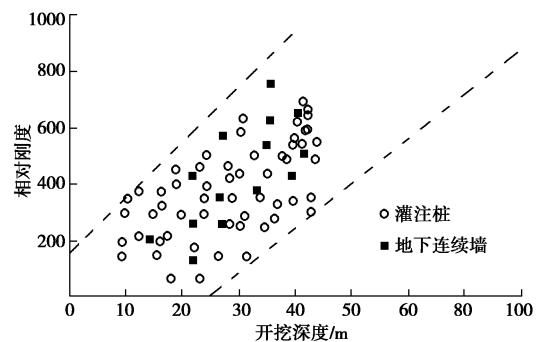


图 3 支撑的相对刚度与开挖深度的关系

Fig. 3 Relationship between relative stiffness of support structure and excavation depth

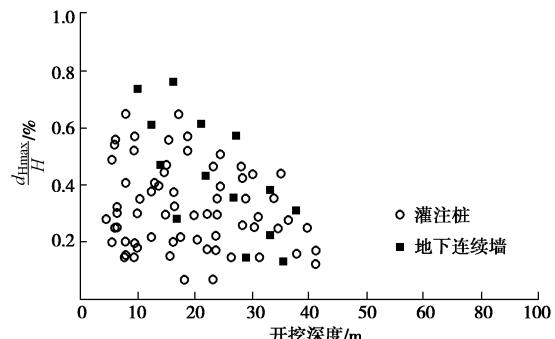


图 4 最大相对侧移与开挖深度的关系

Fig. 4 Relationship between relative displacement of support structure and excavation depth

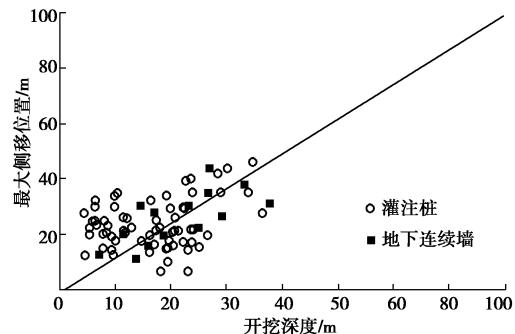


图 5 最大侧移位置与开挖深度的关系

Fig. 5 Relationship between location with maximum displacement of support structure and excavation depth

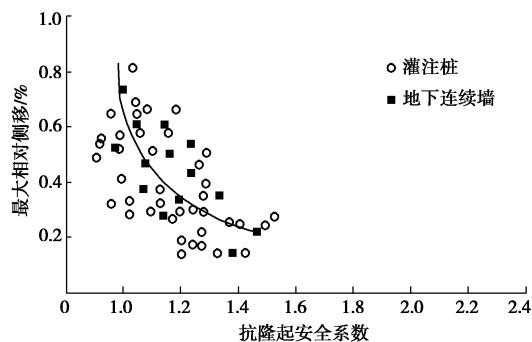


图 6 最大相对侧移与抗隆起安全系数的关系

Fig. 6 Relationship between maximum relative displacement of support structure and safety factor of anti-upheaval

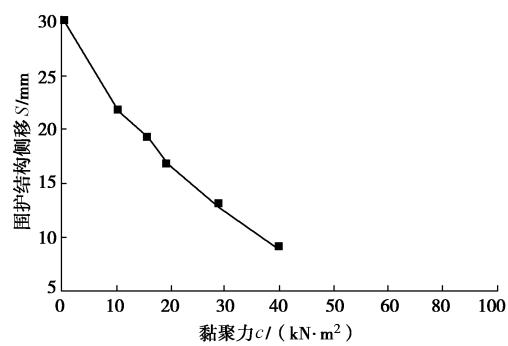


图 7 黏聚力与围护结构侧向变形的关系

Fig. 7 Relationship between maximum relative deformation of support structure and cohesive force

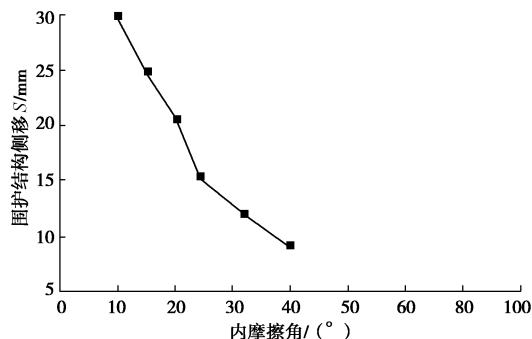


图 8 摩擦角与围护结构侧向变形的关系

Fig. 8 Relationship between maximum relative deformation of support structure and friction angle

坑底隆起变形分析：对于软土深基坑，坑底隆起变形是基坑变形失稳中占有重要位置，它不仅可影响到周边土体及支护结构的稳定性，甚至可能因过大的变形而使基础施工底板的破坏，坑底隆起产生的原因除了坑底土体因卸荷产生回弹外，更重要的是因周边土体的积压涌入基坑内部而产生塑性变形。它与土体的力学参数 c 、 φ ，开挖宽度及开挖深度有关。比如统计杭州地区基坑隆起与开挖宽度、深度的关系，见图 9、10。

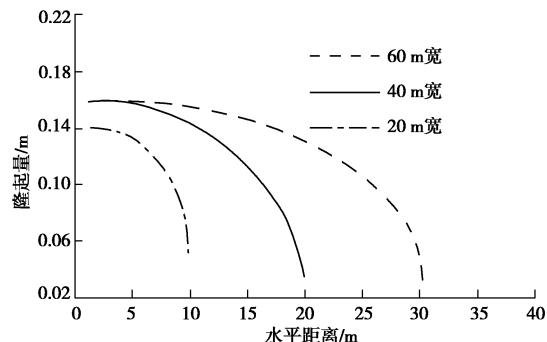


图 9 开挖宽度对隆起变形的影响

Fig. 9 Effect of excavation width on upheaving deformation

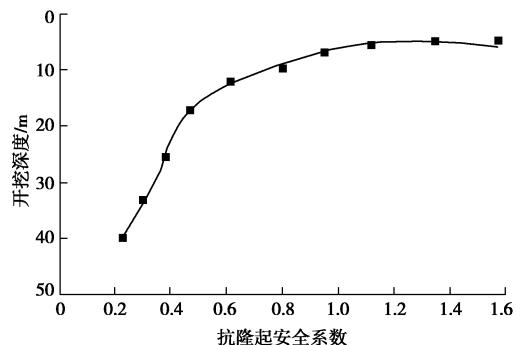


图 10 开挖深度对隆起的影响

Fig. 10 Effect of excavation depth on upheaving deformation

坑后地面沉降分析：坑后地面沉降是衡量基坑开挖对邻近建筑物影响的重要指标。基坑开挖的过程是基坑开挖面卸荷的过程，由于卸荷而引起坑底土体产生以向上为主的位移，同时也引起围护墙在两侧压力差的作用下而产生水平向位移，因此而产生的墙外侧土体的位移，基坑开挖引起周围地层移动的主要原因是坑底的土体隆起和围护墙的位移。它与支护结构的系统特征有关，如①墙体的刚度、支撑水平与垂直向的间距，②墙体厚度及插入深度，③支撑预应力的大小和施加的及时程度以及④安装支撑的施工方法和质量，也与基坑开挖的分段、土坡坡度及开挖程序，基坑内土体性能的改善，开挖施工周期和基坑暴露时间的影响，水的影响，地面超载和振动荷载，围护墙接缝的漏水及水土流失、涌砂等有关。

经统计分析坑后地面沉降的主要特征如下：①对于柔性板桩墙，插入深度较浅，插入比 $D/H < 0.5$ (D 插入深度, H 开挖深度)，最大地表沉陷量要比最大墙体位移量大；②对于地下连续墙，插入较深的 ($D/H > 0.5$) 柱列式灌注桩墙等，墙体水平位移约为墙后地表沉降的 1.4 倍；③地面沉陷影响范围为基坑开挖深度 1.0~3.0 倍。坑后地面沉降与基坑的距离有关，也与设计的抗隆起安全系数有关。见图 11、12。常常因此可在基坑内外进行地基加固以提高土的强度和刚

性, 从而控制坑后地面沉降。

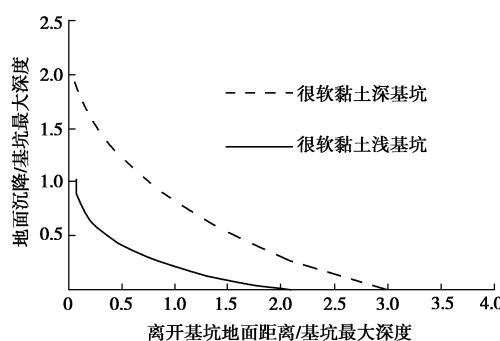


图 11 预估地面沉降的曲线 (Peck 公式)

Fig. 11 Curve to predict surface settlement (Peck formula)

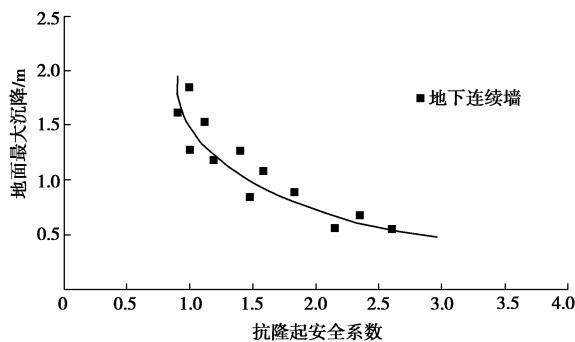


图 12 地面最大沉降与抗隆起安全系数的关系

Fig. 12 Relationship between maximum surface settlement and safety factor of anti-upheaval

深基坑变形控制标准分析: 由于环境条件的复杂性和保护要求多样性, 基坑工程中须按具体环境条件与保护对象的容许变形值来确定基坑支护结构的变形控制等级, 不同安全等级的基坑工程对围护结构变形的控制标准不同, 不同规范的规定也有差别。支护结构的变形控制指标一般包括: ①支护结构主体水平位移及水平位移速率; ②支护结构主体的倾斜; ③支撑构件位移量及位移速率; ④基坑隆起量与隆起速率; ⑤地表下沉量及下沉速率; ⑥邻近建筑的沉降、倾斜等。常以①、⑤、⑥项作为重点控制指标。

随着深度的加大, 围护体的侧移随深度成非线性增长, 这导致了即使基坑处于正常工作状态, 其发生的相对侧移仍将超过现行规范的控制标准。另外在多数情况下, 对房屋或管线构成危害的是不均匀沉降和地表水平应变等。在较深基坑工程中, 一般为施加预应力的多道锚杆式支护结构, 最大位移一般发生在下部, 围护体顶部的位移往往很小, 所以对深度较大的基坑应该也允许有较大的总沉降和水平位移。参考上海、深圳、武汉等地区的基坑变形控制标准, 结合杭州的监测数据和安全状况, 提出杭州地区深基坑变形控制值, 见表 3。

表 3 杭州深基坑设计规程 (DBJ 08—61—97)

Table 3 Design code of deep excavations in Hangzhou (DBJ 08—61—97)

安全等级	墙顶位移 /mm		墙体最大位移 /mm		地面最大沉降 /mm	
	监测值	设计值	监测值	设计值	监测值	设计值
一	30	50	50	80	30	50
二	50	80	60	100	50	80
三	80	110	70	90	80	110

3 结论

(1)采用数据统计的方法对基坑变形范围进行了归纳总结, 分析了其相互影响因素, 并提出了深基坑变形控制标准确定的方法。

(2)确定基坑周围环境对附加变形的承受能力, 同时需预估基坑开挖对周边环境的影响程度, 是一种严格的方法, 适合于确定特定基坑工程的变形控制指标, 由于其复杂性往往难度较大。

(3)提出了基坑环境保护等级的概念, 并根据基坑环境的重要性程度及其与基坑的距离将基坑的环境保护等级分为三级, 在此基础上根据杭州地区大量基坑工程的统计资料, 确定了各环境保护等级基坑的围护结构最大侧移及坑外地表最大沉降的设计控制指标。这种方法简单实用, 大体上能保证基坑周围环境的安全, 具有广泛的适用性, 可作为基坑变形控制设计的参考。

参考文献:

- [1] 张鸿儒, 侯学渊, 夏明耀. 深开挖对周围设施的影响预测[J]. 北方交通大学学报, 1996, 20(2): 205—209. (ZHANG Hong-ru, HOU Xue-yuan, XIA Ming-yao. Prediction of the effects on nearby buildings from deep excavation[J]. Journal of North Transportation University, 1996, 20(2): 205—209. (in Chinese))
- [2] 李庆来. 人工神经网络与概率方法在深基开挖信息施工中的应用[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 96—100. (LI Qing-lai. Application of ann and probability method to information technology for construction of deep excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 96—100. (in Chinese))
- [3] 熊孝波, 孙钧. 润扬大桥北锚碇基坑工程施工变形智能预测与控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1966—1970. (XIONG Xiao-bo, SUN Jun. Prediction and control of pit deformation during construction in north anchor Runyang Bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 1966—1970. (in Chinese))

- [4] 丁洲祥, 龚晓南, 俞建霖. 基坑降水引起的地面沉降规律及参数敏感性分析[J]. 地基处理, 2014, 25(2): 3 - 8. (DING Zhou-xiang, GONG Xiao-nan, YU Jian-lin. Analysis of surface settlement and parameters sensitivity for excavation dewatering[J]. Ground Improvement, 2014, 25(2): 3 - 8. (in Chinese))
- [5] 刘兴旺. 软土地区深基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 456 - 460. (LIU Xing-wang. Study on deformation behavior for deep excavations in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 456 - 460. (in Chinese))
- [6] 谢康和. 成层土中基坑开挖降水引起的地表沉降分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(10): 239 - 242. (XIE Kang-he. Analysis of surface settlement for excavation dewatering in stratification[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edit), 2002, 36(10): 239 - 242. (in Chinese))
- [7] 唐翠萍. 基坑开挖中地下水抽取对周围环境的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 634 - 637. (TANG Cui-ping. Effect analysis on around environment for dewatering during excavation[J]. Chinese Journal of Under Space and Engineering, 2005, 1(4): 634 - 637. (in Chinese))
- [8] 张莲花, 孔德坊. 沉降变形控制的基坑降水最优化方法及应用 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1172 - 1174. (ZHANG Lian-hua, KONG De-fang. Optimization method and application of pit dewatering for controlling settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1172 - 1174. (in Chinese))
- [9] 张永进. 考虑土体性质影响的基坑地面沉降变形计算[J]. 建筑结构, 2000, 30(11): 32 - 33. (ZHANG Yong-jin. Calculation of settlement and deformation of the surface around foundation pits considering soil properties[J]. Building Structure, 2000, 30(11): 32 - 33. (in Chinese))
- [10] 应宏伟, 谢康和. 土的应力历史对软黏土地基深基坑性状的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 34(4): 360 - 365. (YING Hong-wei, XIE Kang-he. Effect on the behavior of deep excavations in soft clay considering stress history of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 34(4): 360 - 365. (in Chinese))
- [11] 欧章煜, 谢百钧. 深开挖邻产保护之探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 509 - 517. (OU Zhang-yu, XIE Bai-li. Study on near building protection for deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S0): 509 - 517. (in Chinese))
- [12] 欧章煜. 深开挖工程分析设计理论与实务[M]. 台北: 科技图书股份有限公司, 2004. (OU Zhang-yu. Theory and practice of deep excavation engineering[M]. Taipei: scientific and technical books of LTD, 2004. (in Chinese))

(本文责编 明经平)