

深基坑开挖土体扰动及其对邻近地铁隧道的影响分析

胡 琦¹, 许四法¹, 陈仁朋², 冉 龙³

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 杭州地铁集团, 浙江 杭州 3100031)

摘要: 通过杭州地区典型软黏土及其扰动土的室内单元体试验, 研究了扰动对软黏土工程特性的影响。试验结果表明, 软黏土的工程特性与土的结构性和应力状态有关, 受施工扰动的影响, 土的结构屈服应力被破坏, 导致土的压缩性增大、强度降低。深基坑开挖会对坑内软弱土地基产生扰动, 扰动后地基土的强度降低、变形性增大, 会加剧基坑开挖施工对周边环境的影响。通过有限元数值模拟, 研究了软黏土地基中深基坑开挖土体扰动对地铁隧道受力变形的影响, 并提出了相应的加固处理措施建议。分析结果表明: 当基底土受到扰动, 围护结构与邻近的地铁隧道结构受力变形均会呈现出加速发展的趋势, 直至发生破坏。

关键词: 深基坑; 隧道; 软土; 扰动

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0537-05

作者简介: 胡 琦(1978-), 男, 江西南城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事软黏土力学、基坑工程等方面的研究与教学工作。E-mail: huqi@zju.edu.cn。

Influence of soil disturbance on metro tunnel in soft clay due to excavation of deep foundation pit

HU Qi¹, XU Si-fa¹, CHEN Ren-peng², RAN Long³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang university, Hangzhou 310058, China; 3. Hangzhou Metro Group, Co., Ltd., Hangzhou 310003, China)

Abstract: According to the laboratory unit tests on typical soft clay and disturbed soils, the influence of disturbance on the soft clay is analyzed. The results show that the engineering properties of the soft clay are related to its structure and stress state. Due to the disturbance of construction, the yield stress of the soil structure is destroyed, resulting in an increase of its compressibility and a decrease of its strength. Deep excavation will result in disturbance of soft soil foundation, reduce the strength of foundation soils and increase the deformation and exacerbate the impact of construction on the surrounding environment. According to the finite element simulation, the influence of soft clay disturbance on the force-deformation of surrounding metro tunnel is analyzed, and some suggestions for reinforcement measures are proposed. When the base soils are disturbed, the force-deformation of building envelope and nearby metro tunnel structure will be accelerated until failure occurs.

Key words: deep foundation pit; tunnel; soft clay; disturbance

0 引言

软黏土力学性质差, 变形大、强度低、灵敏度高, 在软黏土地基中进行深基坑施工会对周边环境产生较大影响。地铁隧道结构作为一种柔性结构, 受环境的影响非常明显, 周边环境的变形会直接在隧道结构上体现出来, 造成隧道结构变形与不均匀变形, 影响地铁交通系统正常使用。上海地区是我国修建地铁较早的城市之一, 其地基土以淤泥质土为主, 针对软黏土地基中深基坑开挖对地铁隧道的影响展开了大量的研究工作, 同时提出了一些相应的技术处理措施^[1-6]。

杭州地区分布有大量的淤泥和淤泥质土, 正开始兴建大量的地铁工程。杭州地区城西、城北以及萧山的湘湖地区分布着大量的淤泥与淤泥质土, 在该土层中进行深基坑施工具有很高的风险性, 对周边环境影响也较大。软黏土往往具有一定的结构性, 受基坑开挖卸荷以及施工扰动的影响, 会导致软黏土的强度降

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108417, 51225804, U1234204);
浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室开放基金项目
(2011P01); 浙江省重大科技专项重点项目(2011C13043)

收稿日期: 2013-07-17

低、变形增大,进而对基坑周围环境造成更大的影响。Saye^[7]通过对地基沉降观测资料分析认为,地基沉降与土体的扰动程度成正比,排水板间距1.0 m的处理区比间距1.6 m处理区多沉降40%。王立忠等^[8]对温州软弱地基扰动后的沉降情况分析表明,排水板施工引起地基沉降较不扰动情况增大25%。根据陈颖平等^[9],王国欣等^[10]的研究成果,以萧山软黏土为代表的杭州海积软土具有显著的结构性。胡琦^[11]通过十字板与静力触探试验,研究了杭州地铁湘湖站基底土的扰动情况,研究结果表明,受开挖卸荷以及基坑坍塌的扰动影响,基底土的强度损失了40%~80%。

本文通过杭州地区典型软黏土的室内单元体试验,研究扰动对软黏土工程特性的影响;通过有限元数值模拟,研究软黏土地基中深基坑开挖土体扰动对地铁隧道受力变形的影响,并提出相应的处理措施。

1 扰动对软黏土工程特性的影响

通过原状土、扰动土以及重塑土的固结试验与直剪试验,研究土体扰动对软黏土工程特性的影响。试验土样取自杭州地铁湘湖车站,取样深度11 m,为全新世早期和中期的海相淤泥软土。本次取土参考《原状土取样技术标准(JGJ 89—92)》,采用固定活塞薄壁取土器取土。土样物理指标如表1所示。

表1 土样物性指标

Table 1 Physical indices of soil samples

土颗粒重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	土样含水率 /%	饱和重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	初始孔隙比 e_0
27.4	66.19	16.25	1.794

原状样按标准试验方法制作,保留土的应力状态和结构性;重塑样先将原状土烘干,然后碾碎过筛、称重、测出风干含水率后加水,按要求含水率计算所需加水量(水为无氧蒸馏水),养护3 d,理论上完全破坏土颗粒间原有的相互作用;扰动样的制作通过人工挤压模拟基坑开挖变形扰动,使土样产生大的塑性变形,土颗粒间的部分相互作用被破坏,扰动程度根据土体变形的大小来控制。

本次试验加载速率采用1:0.125,以减少加载速率对土体压缩特性的影响。直剪试验方法为快剪,剪切速率0.8 mm/min,测试土体的不固结不排水强度。

固结试验与直剪试验结果如图1,2所示。从试验结果中可以看出:受扰动影响,土体压缩性增大、强度降低;为保证试样成型,重塑样在制样过程中不可避免地会受到一定的压密作用,因此存在一点屈服应力与抗剪强度,与理论上的完全重塑土有所区别。

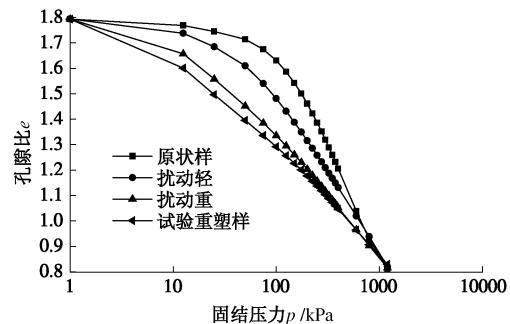


图1 固结试验压缩曲线

Fig. 1 Compression curves of consolidation tests

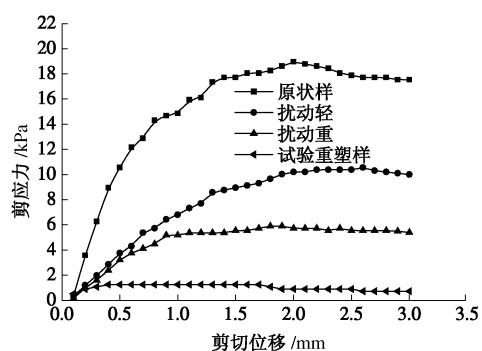


图2 剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 2 Shear stress-displacement curves

结构屈服应力的确定采用《土工试验方法标准》推荐的Casagrande图解法。土样结构屈服应力与不固结不排水剪峰值强度试验结果如表2所示,可以看出:原状样的结构屈服应力最大,扰动会降低土体屈服应力。以屈服应力定义的扰动度 SD_{P_c} 和按抗剪强度的扰动度 SD_{S_u} 如式(1)所示,分析结果如表2所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} SD_{P_c} = \frac{P_c - P_c^*}{P_c} \times 100\%, \\ SD_{S_u} = \frac{S_u - S_u^*}{S_u} \times 100\%. \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 SD_{P_c} 为按屈服应力定义的扰动度; P_c 为原状土的屈服应力; P_c^* 为扰动土的屈服应力; SD_{S_u} 为按抗剪强度定义的扰动度; S_u 为扰动前十字板剪切峰值强度; S_u^* 为扰动后十字板剪切峰值强度。

表2 土样强度试验结果

Table 2 Results of strength tests

土样	原状	扰动轻	扰动重	试验重塑样
屈服应力 P_c /kPa	121	58	22	6
扰动度 SD_{P_c} %	0	52.1	81.8	95.0
抗剪强度 S_u /kPa	19	11	6	1
扰动度 SD_{S_u} %	0	44.5	68.9	93.4

Nagaraj 等^[12]通过对大量实验数据统计分析, 认为现场实测不排水强度与结构屈服应力之间基本呈线性关系。本文室内试验得到的不排水剪强度与屈服应力之间的关系 $P_c = 6.29S_u - 5.17$ 。因此, 按强度定义的扰动度可以反映屈服应力受扰动程度。根据土体压缩曲线与屈服应力的关系, 土体压缩特性取决于屈服应力。因此, 扰动对土体的影响可统一由按强度定义的扰动度来表示。

2 深基坑开挖对地铁隧道的影响

2.1 地下结构参数

根据杭州地区此类项目的特点, 取基坑开挖深度 15 m, 开挖宽度 50 m, 基坑设 3 道水平支撑, 支撑竖向间距 5 m, 支撑抗压刚度取 800×800 钢筋混凝土结构的抗压刚度 $40 \text{ MN/m}^2/\text{m}$; 围护结构取 800 厚地连墙, 墙体嵌固深度 20 m。隧道结构按杭州地铁隧道结构取外径 6.2 m、壁厚 350 mm, 拼接处按铰接考虑, 隧道中心埋深 12 m, 隧道中心距离地连墙外边 10 m。

2.2 土体模型及参数

深基坑开挖地基土的应力路径复杂, 坑内土体以竖向卸荷为主, 坑外土体以侧向卸荷为主。大量研究表明, 应力路径与应力水平对地基土的变形特性有显著影响, 这种影响可以简化为下式^[13]:

$$E_0 = \lambda \cdot \gamma' \cdot z \quad (2)$$

式中 E_0 为变形模量 (MPa); λ 为应力路径影响系数; γ' 为土体有效重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); z 为深度 (m)。

根据杭州地区软黏土的应力路径试验结果^[13], 坑外土体侧向卸荷应力路径影响系数为 60, 坑内土体竖向卸荷应力路径影响系数为 250。

总应力不排水分析, 土体强度参数取不排水强度。根据杭州地铁湘湖站基坑工程原状土的现场十字板试验结果, 如图 3 所示, $S_u = 10 + 1.6d$ kPa。其中 d 为从地表算起的土体埋深, 土体饱和重度取 $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$ 。

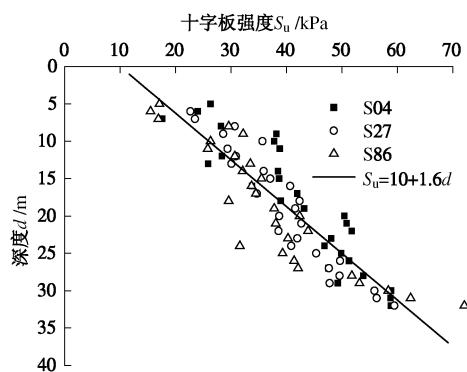


图 3 杭州地铁湘湖站原状土的十字板强度

Fig. 3 Vane shear strength of undisturbed soils

2.3 分析模型

分析模型选取典型的平面应变问题, 分析方法为不排水分析。分析软件为有限元软件 Plaxis, 桩与支撑采用线弹性模型, 土与桩土界面采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型, 桩土界面采用 Goodman 单元, 桩土界面折减系数 0.7。分析模型如图 4 所示, 根据杭州地铁湘湖站基坑坍塌土体扰动现场实测结果^[11], 开挖卸荷施工以及墙体变形挤压等扰动, 主要对坑内土体产生影响, 因此本次分析主要考虑坑底土体扰动, 坑外以及墙底以下土层不考虑扰动。扰动后的土体不排水抗剪强度 $S_u^* = SD \cdot S_u$, 计算工况如表 3 所示。



图 4 分析模型

Fig. 4 Analysis model

表 3 计算工况

Table 3 Calculation conditions

工况	挖深 /m	支撑	扰动度 SD/%
1	0.0	施工第一道	
2	5.0	施工第二道	
3	10.0	施工第三道	无
4	15.0	三道支撑	
5			20
6			40
7	15.0	三道支撑	60
8			80

2.4 分析结果

各个工况对应的地连墙侧向变形分析结果如图 5 所示, 隧道结构的受力变形分析结果如表 4 所示。

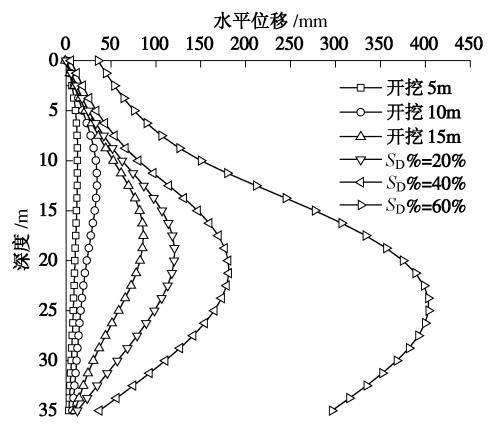


图 5 地连墙侧向变形

Fig. 5 Lateral deformation of diaphragm walls

从分析结果中可以看出: 随着开挖深度增大, 围护结构的受力变形逐步增加, 基坑处于安全状态; 隧道的平面内弯矩受开挖的影响逐渐增大, 但还处于设

计允许范围；当基底土受到扰动，围护结构的受力变形和隧道结构的受力变形都会急剧增加，并呈现出不收敛的趋势；基底土的扰动度为 40% 时，墙体变形和弯矩都会超过正常使用的极限状态；当基底土的扰动度超过 40% 时，墙体折断、坑底踢脚破坏，墙体折断位置会发生在正负弯矩最大处(地表下 10 m 与 20 m)，与杭州地铁湘湖站基坑坍塌后的观测结果基本一致。

表 4 围护结构与隧道受力变形分析结果

Table 4 Force-deformation results

工况	墙体最大位移/mm	墙体	最大支撑	隧道	隧道环向	隧道平面内
		最大弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	轴力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	位移 /mm	压力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
2	13	432		9	620	27
3	34	1004		21	630	59
4	86	1796	1074	41	650	94
5	121	2136	1370	50	670	98
6	181	2752	1804	65	700	125
7	404	4719	2939	92	780	158
8	破坏			112	840	174

2.5 工程措施

要减小基底土受扰动程度及其对隧道结构的影响，需要从产生影响的内因着手：基底土的扰动与变形是相互促进的，基底土受扰动后变形增大，变形增大后基底土受的扰动又会继续增加，形成恶性循环，围护结构的受力变形会呈现出加速发展的趋势，直至发生破坏。因此最为有效的措施就是对坑内土体加固，增强坑内土体的强度，避免扰动破坏土的结构性。坑底土体加固分析模型如图 7、8 所示，其中：图 7 仅对坑边土体进行加固，加固深度 5 m，加固宽度 4 m，置换率 50%；图 8 对基坑中部采用抽条加固的方法，加固深度 5 m，抽条区的置换率为 20%。

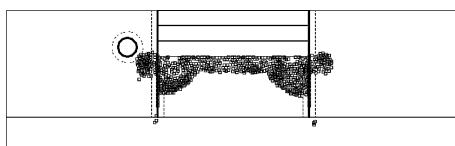


图 6 不加固开挖至坑底的塑性区

Fig. 6 Plastic zone without strengthening

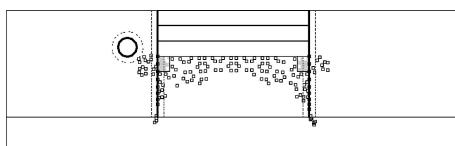


图 7 坑边土体加固开挖至坑底塑性区

Fig. 7 Plastic zone with strengthened soils

坑底加固水泥土的计算参数按复合地基模式确

定：水泥土割线模量 $E_{50}=140q_u=140 \text{ MPa}$ ，抗剪强度 $\tau=q_u/2=500 \text{ kPa}$ ， q_u 为无侧限抗压强度，28 天强度取 1 MPa；坑边水泥土置换率 50%，复合地基变形模量 $E_0=70 \text{ MPa}$ ，抗剪强度 $\tau=250 \text{ kPa}$ ；抽条区置换率 20%，复合地基变形模量 $E_0=28 \text{ MPa}$ ，抗剪强度 $\tau=100 \text{ kPa}$ 。

开挖至坑底，未进行坑底加固的基底塑性区分析结果如图 6 所示，采用坑边加固基底塑性区分析结果如图 7 所示，采用抽条加固基底塑性区分析结果如图 8 所示。从分析结果可以看出：坑底加固能有效地减少坑内土体塑性区，减少基底土受扰动程度和范围，尤其是采用了抽条加固的方法。



图 8 抽条加固开挖至坑底塑性区

Fig. 8 Plastic zone with sprout strengthened soils

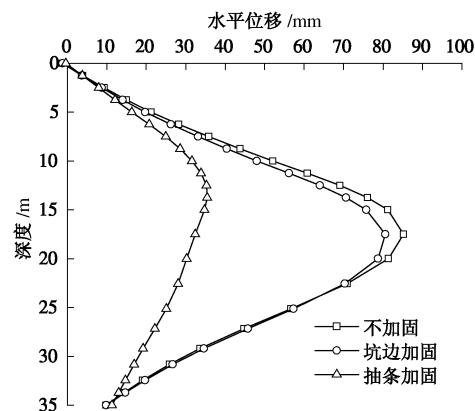


图 9 坑底加固对地连墙侧向变形的影响

Fig. 9 Influence of strengthened soils on lateral deformation

坑内土体加固对地连墙侧向变形的影响如图 9 所示。可以看出：如果仅对坑边土体进行加固，基坑变形的变化很小；抽条加固在坑底形成了一道强有力的支撑带，能大幅减小围护结构和隧道的变形，即使抽条加固的置换率较小，也能起到较为明显的效果。

3 结 论

通过软土地基深基坑开挖土体扰动及其对邻近地铁隧道的影响分析，得到以下结论：

(1) 软黏土的工程特性与土的结构性、应力状态等因素有关，受开挖卸荷以及施工扰动的影响，土的结构屈服应力减小，导致强度降低、压缩性增大。

(2) 土体不排水剪强度与结构屈服应力之间具有很好的线性关系，扰动对结构性土工程特性的影响可统一由按强度定义的扰动度来表示。

(3) 基底土所受到的扰动与基底土的变形是相互促进的, 基底土受扰动后变形量增大, 变形增大后基底土的扰动程度又会继续增加, 围护结构与邻近的地铁隧道结构受力变形均会呈现出加速发展的趋势, 直至发生破坏。

(4) 对坑内土体进行加固, 能有效地增强坑内土体强度, 减小基底土所受的扰动, 起到对周边环境的保护作用。

参考文献:

- [1] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J]. 同济大学学报, 2001(5): 531 - 535. (JI Mao-jie, LIU Guo-bin. Prediction method of displacement due to excavation[J]. Journal of Tongji University, 2001(5): 531 - 535. (in Chinese))
- [2] 孔祥鹏, 刘国彬, 廖少明. 明珠线二期上海体育馆地铁车站穿越施工对地铁一号线车站的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 821 - 825. (KONG Xiang-peng, LIU Guo-bin, LIAO Shao-ming. Influence of construction of Shanghai Stadium transverse station of Pearl Line phase II on station of Metro Line No.1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 821 - 825. (in Chinese))
- [3] 陈 郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005(1): 91 - 94. (CHEN Yu, LI Yong-sheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(1): 91 - 94. (in Chinese))
- [4] 戚科骏, 王旭东, 蒋 刚, 等. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 21(增刊 2): 5485 - 5488. (QI Ke-jun, WANG Xu-dong, JIANG Gang, et al. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 21(S2): 5485 - 5488. (in Chinese))
- [5] 高广运, 高 盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453 - 459. (GAO Guang-yun, GAO Meng, YANG Cheng-bin, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 453 - 459. (in Chinese))
- [6] 张玉成, 杨光华, 姚 捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 109 - 115. (ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, YAO Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 109 - 115. (in Chinese))
- [7] SAYE STEVEN R. Assessment of soil disturbance by the installation of displacement sand drains and prefabricated vertical drains[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2003(119): 325 - 362.
- [8] 王立忠, 李玲玲. 结构性土体的施工扰动及其对沉降的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 697 - 704. (WANG Li-zhong, LI Ling-ling. Field disturbance of structured clay and its effect on settlements of soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 697 - 704. (in Chinese))
- [9] 陈颖平, 黄 博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1065 - 1071. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1065 - 1071. (in Chinese))
- [10] 王国欣, 肖树芳, 黄宏伟. 杭州海积软土应力一应变特征与结构强度损伤规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1555 - 1560. (WANG Guo-xin, XIAO Shu-fang, HUANG Hong-wei. Study on stress-strain characteristics and dam age rule of structural strength for marine soft soil in Hangzhou[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1555 - 1560. (in Chinese))
- [11] 胡 琦. 扰动对软土地基深埋地下结构长期竖向变形的影响研究[R]. 杭州: 浙江大学, 2010. (HU Qi. Study on the influence of soft soil disturbance on the long-term vertical deformation of deep underground structure[R]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [12] NAGARAJ T S, MURTHY B R S, VATSALA A, et al. Analysis of compressibility of sensitive soils[J]. J Geotech Engng, ASCE, 1990, 116(1): 105 - 118.
- [13] 胡 琦. 超深基坑水、土与围护结构相互作用及设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (HU Qi. Study on design method and water-soil-retaining structure interaction of ultra-deep foundation pit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))