

Lateral Deformation Characteristics of a Subway Station Excavation in Deep Soft Clay in Shanghai

Chaoqun Wang^{1,2*}, Yanbin Gao^{3#}, Xiaoming Tang³

¹Shanghai Shentong Metro Co., LTD., Shanghai

²School of Emergency Management and Safety Engineering, China Mining University, Beijing

³School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: 302529202@qq.com, #yanbin_gao@tongji.edu.cn

Received: May 5th, 2019; accepted: May 20th, 2019; published: May 27th, 2019

Abstract

The characteristics, laws and mechanism of the lateral displacement of the underground continuous wall of a subway station of (excavation depth of 17.6 m) in a deep paleochannel area with a relatively large thickness of soft clay (up to 40 m) in Shanghai are introduced. The ratio of the maximum lateral displacement of the diaphragm wall to the excavation depth is 0.17% to 0.46%. Between the excavation and the excavation to 12 m, the displacement increased significantly, exceeding the alarm value (0.4%), showing signs of kicking. The ratio of the maximum lateral displacement to the excavation depth is much smaller than the empirical correlation based on the Terzaghi's safety factor of base heave. In addition, the comparison with the design results shows that the lateral displacement of the diaphragm wall given by the design is smaller, which may be related to the selection of the lateral bed coefficient of soft soil. The project case shows that the lateral deformation of the foundation pit of the metro station in the deep soft soil area is large, but the results from the design calculation and theoretical analysis are quite different. Therefore, the lateral direction of the foundation pit of the deep soft soil layer metro station should be emphasized to improve the reliability of design parameters' (such as lateral bed coefficients) calculations.

Keywords

Deep Paleochannel, Foundation Pit, Deformation

上海深厚软土层地铁车站基坑的侧向变形特征

王超群^{1,2*}, 高彦斌^{3#}, 汤小明³

¹上海申通地铁集团有限公司, 上海

*第一作者。

#通讯作者。

²中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京

³同济大学土木工程学院, 上海

Email: 302529202@qq.com, [#]yanbin_gao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019年5月5日; 录用日期: 2019年5月20日; 发布日期: 2019年5月27日

摘要

本文详细介绍和分析了上海软粘土厚度较大(四十多米)的深古河道地区某地铁车站(开挖深度17.6 m)基坑地下连续墙侧向位移的特征、规律以及机理。结果表明: 地下连续墙最大侧向位移与开挖深度的比值在0.17%至0.46%之间, 开挖至12 m以后位移明显加大, 超过报警值(0.4%), 出现“踢脚”的迹象; 最大侧向位移与开挖深度的比值要远小于国外基于太沙基坑底隆起安全系数的经验关系。另外, 与设计对比表明, 设计给出的连续墙的侧向位移偏小, 这可能与软土的侧向基床系数的选取有关。该工程案例表明深厚软土地区的地铁车站基坑的侧向变形较大, 而与设计计算和理论分析的结果差异较大, 因此应该重视对深厚软土层地铁车站基坑围护结构侧向变形的设计计算方法以及设计参数(如侧向基床系数)的研究, 以提高设计计算的可靠性。

关键词

深谷河道, 基坑, 侧向变形

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

上海属于较为典型的天然软土地基区, 软土主要为滨海沼泽相堆积类型[1] [2]。软土层厚且具有高含水量、高灵敏度(触变性)、大孔隙比、高压缩性、低强度、弱渗透性和明显的流变性等特征。在这种地质条件下, 深基坑施工过程中围护结构容易产生较大的变形, 引起基坑支护结构失稳或周边建(构)筑物开裂等工程事故[3] [4] [5] [6]。在第四纪时期, 长江口由于受古气候、古环境和地质构造的影响, 经历了6次海侵、海退, 在江、湖、海的交替作用下, 经历了沉积、冲刷或切割、再沉积的反复作用, 在不同时期沉积了不同的古河道地层[7] [8]。上海地区更新世末古河道地层具有软土埋深大、分布广、厚度大、成分复杂的特点, 对深基坑工程施工十分不利。

本文以位于深古河道深厚软土层中的某地铁车站基坑施工为例, 研究深厚软土层中地铁车站深基坑的侧向变形规律和机理, 对沿海地区同类地质条件下的地铁车站基坑工程的科学设计与施工具有重要的意义。

2. 某地铁车站基坑介绍

该车站场地属滨海平原地貌, 位于晚更新世时期沿海深切古河道内。场地 60.45 m 深度范围内分布的土层见图 1。场地埋深 4.39 m~21.04 m 内分布有由③层、④层、⑤₁₁层组成的软土, 含水率高(大于 40%)、强度低(不超过 27 kPa)。基坑坑底为埋深 21.83 m~41.7 m 的由⑤₁₂、⑤_{31a}、⑤_{31b}和⑤₄层组成的含水率较高、强度较低的古河道地层。埋深 43.3 m~45.7 m 范围内为渗透性较大、强度较高的⑦₁₂和⑦₂层土, 也是该场地的承压含水层。

基坑采用明挖顺作法施工。自南端头井向北端头井单向分层分段开挖，见图 1 所示，标准段开挖分五层，开挖深度依次为 5.9 m、9.1 m、12.1 m、15.1 m、17.64 m，用 S₁~S₅ 表示；端头井开挖分六层，开挖深度依次为 5.9 m、9.5 m、12 m、14.5 m、17 m、19.5 m，用 S₁~S₆ 表示。基坑开挖期间，采用真空深井泵降基坑内浅层潜水，对基坑内土层进行疏干加固，平均每 150 m²~200 m² 设置一口真空深井泵；开挖至坑底施工底板时，在井管位置每 200 m² 设置一个泄水孔并在顶板覆土和内部铺装层施工完成后封孔。

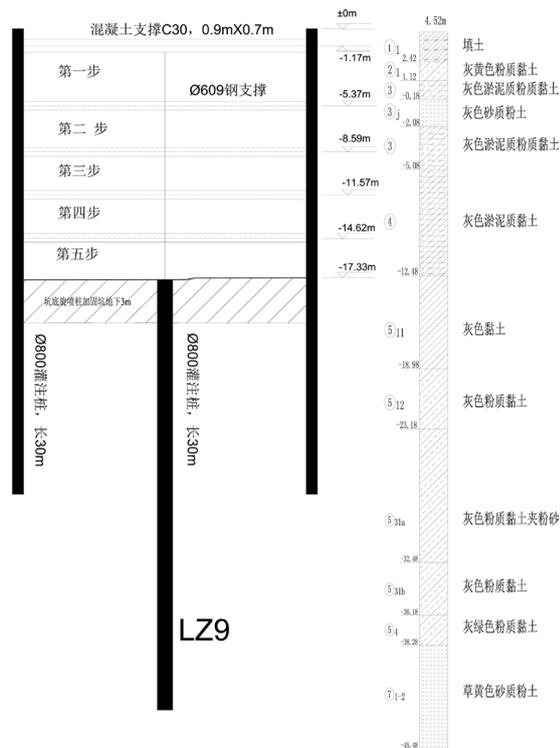


Figure 1. Layout of enclosure structure
图 1. 围护结构布置

基坑监测项目及监测点布置如图 2 所示。坑外布置 12 个地表沉降监测断面(编号 D1~D7, D9~D13)，每个断面布置 4 个地表监测点和 1 个地下水位监测点。地下连续墙侧向位移监测孔 28 个(编号 Q1~Q28)。立柱隆沉的监测点共 18 个(编号 LZ1~LZ18)，其中标准段监测点为 LZ2~LZ17，端头井监测点为 LZ1 和 LZ18。另外还有若干支撑轴力监测点。基坑围护主体结构基本参数见表 1。

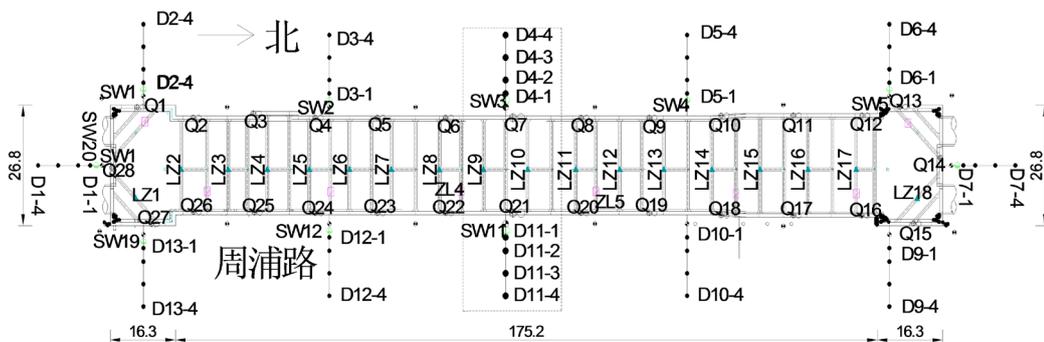


Figure 2. The main structure of the foundation pit in the station and the layout of monitoring points
图 2. 基坑主体结构及监测点布置

Table 1. Basic parameters of foundation pit
表 1. 基坑围护主体结构基本参数

基坑围护主体结构基本参数		
基坑总体几何参数	标准段	长 176.2 m, 宽 22 m, 挖深 17.64 m
	端头井	长 16.3 m, 宽 26.8 m, 北端头井挖深 19.09 m, 南端头井挖深 19.50 m
坑底加固	标准段	坑底 3 m 深度范围内采用旋喷桩抽条加固
	端头井	坑底 3 m 深度范围内采用裙边加抽条加固
地下连续墙	标准段	墙厚度为 800 mm, 标准段墙深 32.5 m, 入土比 0.84~0.87
	端头井	南端头井墙深 36.5 m, 北端头井墙深 35.5 m, 入土比 0.84~0.87
内支撑	标准段	5 道支撑: 第 1 道为钢筋混凝土支撑(C30 混凝土, 截面积 0.9 m * 0.7 m), 支撑水平间距大约为 6 m, 其余为 Φ609 钢支撑(Q235b 钢), 水平间距约为 3 m
	端头井	6 道支撑, 其中第 1 道为钢筋混凝土支撑, 第 5 道为 Φ800 钢支撑, 其余为 Φ609 钢支撑。钢支撑的预加轴力为 600 kN
立柱桩	钻孔灌注桩, 直径为 Φ800, 长 30 m, 水下混凝土 C30	

3. 连续墙侧向变形分析

图 3 给出了标准段(测斜孔 Q9)和端头井(测斜孔 Q28)在不同开挖步下地下连续墙侧向位移 δ_h 与深度 H 的关系。标准段地下连续墙在开挖至坑底时, 墙脚的侧向位移突然增加大 20 mm 左右, 最大侧向位移 δ_{hm} 增加到 60 mm 左右, 此时地下连续墙的安全系数处于最低值, 需注意围护结构的稳定性问题。图 4 给出了设计计算得到的连续墙侧向位移曲线, 可以看出设计给出的曲线的形态与实测结果比较一致。但是, 设计计算得到的标准段连续墙最大侧向位移 δ_{hm} 为 24.6 mm, 地下连续墙最大侧向位移实测值明显大于计算值, 表明计算参数或方法存在一定的问题。另外, 受空间效应和周边环境等因素的影响, 端头井的侧向位移较小, 最大侧向位移 δ_{hm} 在 40 mm 左右。

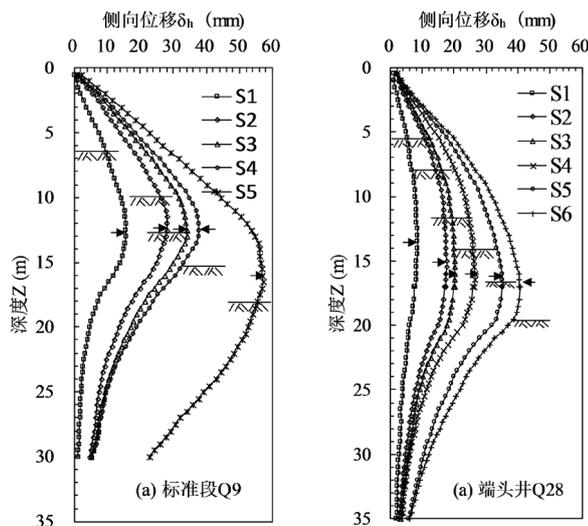


Figure 3. Measured lateral displacement of diaphragm wall
图 3. 连续墙侧向位移曲线

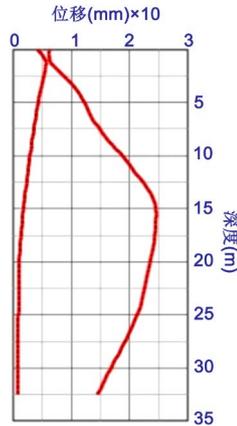


Figure 4. Calculate lateral displacement of standard section
 图 4. 设计计算得到的连续墙侧向位移曲线

图 5 给出了标准段地下连续墙最大侧向位移 δ_{hm} 与开挖深度 H 关系。最大侧向位移 δ_{hm} 随开挖深度的增加而增大。标准段最大侧向位移 δ_{hm} 在 $0.17\% H \sim 0.46\% H$ 。开挖步 S_4 和 S_5 下最大侧向位移的增加速率 ($\Delta\delta_{hm}/\Delta H$) 较 $S_1 \sim S_3$ 快；开挖至坑底时，最大侧向位移 δ_{hm} 值集中在 $40 \text{ mm} \sim 60 \text{ mm}$ 。图 6 给出了端头井地下连续墙最大侧向位移 δ_{hm} 与开挖深度 H 关系。南北端头井的最大侧向位移与开挖深度的关系分别为 $\delta_{hm} = 0.17\% H$ 和 $\delta_{hm} = 0.31\% H$ 。北端头井具有较大的侧向位移，可能与施工过程中的一些细节有关。

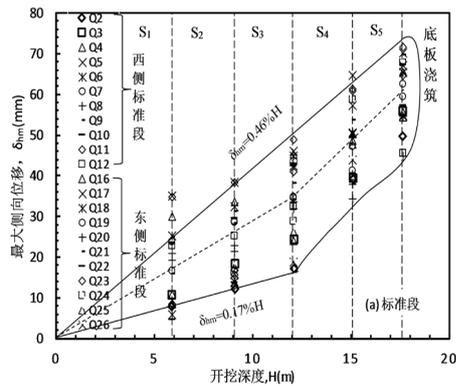


Figure 5. The relationship between δ_{hm} and H of standard section
 图 5. 标准段最大侧向位移 δ_{hm} 与 H 的关系

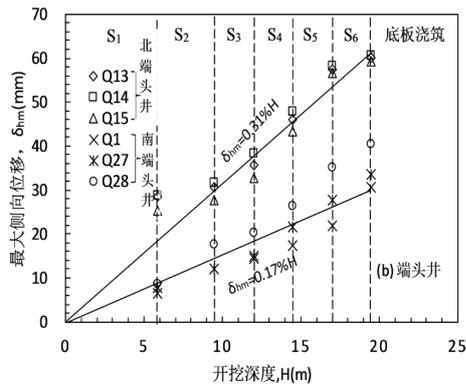


Figure 6. The relationship between δ_{hm} and H of end wells
 图 6. 端头井最大侧向位移 δ_{hm} 与 H 的关系

图 3 中除了给出侧向位移变形曲线外,还标出了开挖深度以及最大侧向位移的位置(用箭头表示)。根据这些信息,图 7 和图 8 分别给出了标准段和端头井各开挖步最大侧向位移位置 $H_{\delta hm}$ 与开挖深度 H 的关系。最大侧向位移的位置大致在 10 m~15 m 之间,随着开挖深度的增加,最大侧向位移对应的深度位置也随之增加。开挖深度小于 12.1 m ($S_1 \sim S_3$), $H_{\delta hm}$ 位置在开挖面之下,开挖深度大于 12.1 m (S_4 之后), $H_{\delta hm}$ 位置在开挖面之上。这与王建华等[9] [10]对上海软土地区深基坑最大侧向位移位置的研究结论一致。

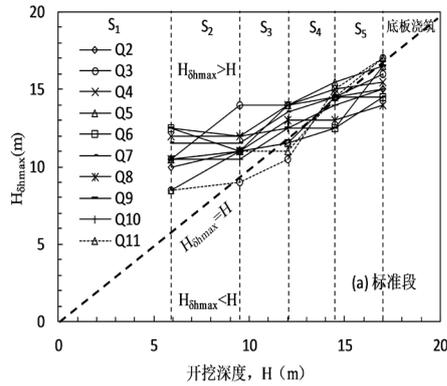


Figure 7. The relationship between $H_{\delta hm}$ and H of standard section
 图 7. 标准段最大侧向位移位置 $H_{\delta hm}$ 与 H 的关系

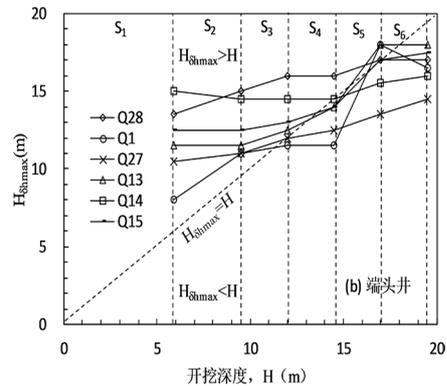


Figure 8. The relationship between $H_{\delta hm}$ and H of end wells
 图 8. 端头井最大侧向位移位置 $H_{\delta hm}$ 与 H 的关系

4. 连续墙侧向变形分析与太沙基坑底隆起安全系数的关系

研究表明,太沙基坑底抗隆起安全系数与围护结构的侧向变形有很好的相关性[11] [12] [13] [14] [15]。K. Terzaghi [11]把基坑抗隆起稳定安全系数 F_s 定义为:

$$F_s = \frac{N_c C_u}{\gamma H} \tag{1}$$

式中: C_u 为黏土的不排水抗剪强度, γ 为土体容重, N_c 为地基承载力系数。标准段的坑底隆起安全系数采用式 1 计算。在不考虑基坑坑底加固时, C_u 取图 1 中给出的天然土 $C_{u\pm}$ 的数值;考虑坑底加固时, C_u 取滑动面影响范围内坑底加固水泥土和天然土的等效十字板强度 $C_{u\text{等}}$,其中水泥土 C_u 取 200 kPa。标准段 F_s 的计算不考虑支护结构影响, $N_c = 5.7$;端头井基坑属于矩形,采用 Skempton [12]建议的可以考虑基坑几何形状的方法计算 F_s 。计算得到的各开挖步下标准段坑底隆起安全系数 F_s 见表 2 所示,端头井的 F_s 见表 2 和表 3 所示。可以看出,未考虑坑底加固时,随着开挖深度的增加,标准段的 F_s 由 1.75 减小至 0.63;

端头井的 F_s 由 2.11 减小至 0.83。考虑坑底加固时, 标准段和端头井 F_s 显著提高 0.3~0.7, 随开挖深度的变化规律与不考虑坑底加固的情况一致。在开挖深度超过 12 m 以后, 在两种条件下计算的 F_s 变化都不大。

Table 2. Standard section bottom uplift safety factor F_s

表 2. 标准段坑底隆起安全系数 F_s

$H(m)$		5.9	9.5	12.1	15.1	17.6
C_u (kPa)	$C_{u\pm}$	34	22	25	29	33
	$C_{u等}$	47	36	39	43	47
F_s	$C_{u\pm}$	1.75	0.75	0.64	0.66	0.64
	$C_{u等}$	2.45	1.24	1.00	0.97	0.90
$\delta h_m/H$ (%)		0.15	0.16	0.38	0.37	0.37

Table 3. End well bottom uplift safety factor F_s

表 3. 端头井坑底隆起安全系数 F_s

$H(m)$		5.9	9.5	12	14.5	17	19.5
C_u (kPa)	$C_{u\pm}$	34	22	25	29	32	35
	$C_{u等}$	41	34	37	40	43	46
F_s	$C_{u\pm}$	2.12	0.95	0.83	0.91	0.87	0.84
	$C_{u等}$	2.56	1.46	1.22	1.27	1.17	1.10
$\delta h_m/H$ (%)		0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.15

图 9 给出了地下连续墙最大侧向位移 δ_{hm} 与坑底抗隆起稳定系数 F_s 的关系, Mana 等[14]给出的预测曲线亦在图中绘出。本工程得到的数据点远小于 Mana 等给出预测值, 标准段开挖至坑底时, 计算得到的 F_s 约为 0.9, 而 δ_{hm}/H 仅约 0.4%。由拟合曲线 1 和 2 可知, 坑底加固对限制地下连续墙侧向位移和提高坑底抗隆起稳定系数均有一定作用。实测的 $\delta_{hm}/H-F_s$ 的关系与 Mana 的预测曲线总体差别较大, 故不能用该曲线预测连续墙的侧向变形。该差别可能是由于实际施工工艺(分层开挖、支撑预加应力和坑底加固方式等)、周围环境以及理论模型的不足有关。

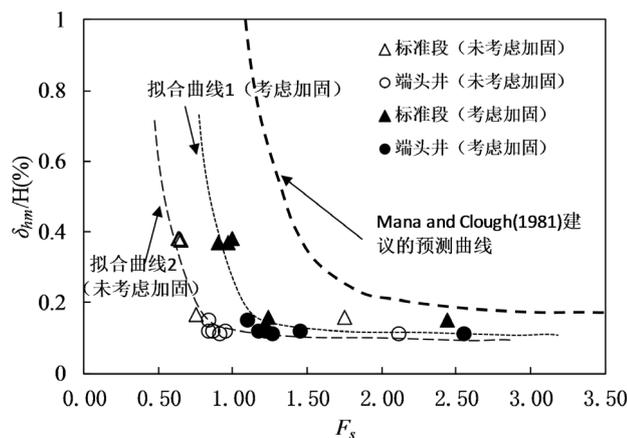


Figure 9. The relationship between the maximum lateral displacement of underground continuous wall and the stability coefficient F_s

图 9. 地下连续墙 δ_{hm} 与坑底抗隆起稳定系数 F_s 的关系

5. 结语

介绍了上海软粘土厚度较大的深古河道地区某地铁车站(开挖深度 17.6 m)基坑侧向位移的特征、规律以及机理。研究表明,地下连续墙最大侧向位移与开挖深度的比值 δ_{hm}/H 较大,最大值可接近 0.5%。开挖至 12 m 以后由于坑底稳定性的降低,侧向位移明显加大,出现“踢脚”的迹象,影响支护结构稳定性。另外发现最大侧向位移与开挖深度的比值要远小于国外基于坑底隆起安全系数的经验关系,但要明显大于设计计算值。侧向变形空间效应明显,端头井侧向变形显著小于标准段。建议重视对深厚软土的侧向基床系数取值的研究,以提高设计计算可靠性。能否采用太沙基坑底抗隆起稳定系数预测同类支护体系下的围护结构的侧向变形值得进一步研究。

参考文献

- [1] 黄绍铭,高大钊. 软土地基与地下工程(精) [M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 周学明, 袁良英, 蔡坚强, 等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海国土资源, 2005, 26(4): 6-9.
- [3] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] 卢俊义, 杨敏. 上海地区深基坑工程连续墙和墙后地表土体的变形特点[J]. 岩土工程学报, 2008(s1): 369-375.
- [5] 楼晓明, 杨晶, 李德宁, 等. 立柱桩在深基坑分步开挖过程中的上拔位移分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 193-198.
- [6] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659-1666.
- [7] 张丹, 王张华, 李卫康, 等. 现代长江口的形成及末次冰消期以来沉积环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010(2): 17-25.
- [8] 韦桃源, 陈中原, 魏子新, 等. 长江河口区第四纪沉积物中的地球化学元素分布特征及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 397-405.
- [9] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.
- [10] 王建华, 徐中华, 陈锦剑, 等. 上海软土地区深基坑连续墙的变形特性浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 485-489.
- [11] Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948) Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New York.
- [12] Skempton, A.W. (1951) The Bearing Capacity of Clays. *Proceedings of Building Research Congress*, London, 180-189.
- [13] Mana, A.I. and Clough, G.W. (1981) Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay. *Geotechnical Special Publication*, 107, 1840-1858.
- [14] Liuguo, B., Jiangrebecca, J., Ngcharles, W.W. and Hong, Y. (2011) Deformation Characteristics of a 38 m Deep Excavation in Soft Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 1817-1828. <https://doi.org/10.1139/t11-075>
- [15] Chang, M.F. (2000) Basal Stability Analysis of Braced Cuts in Clay. *Journal of Geotechnical & Geo-Environmental Engineering*, 126, 276-279. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:3\(276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:3(276))

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org