

# 排桩冻结法中冻土壁对排桩作用力的分析

张菊连, 梁志荣

(上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

**摘要:**通过对润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基础实测桩体和土体测斜资料的分析,认为基坑采用冻结法作止水帷幕后,埋深一定深度以上坑外土体处于压密状态、这一深度以下土体处于松塌状态,提出这一埋深以上土压力应按被动土压力理论进行计算、下段土压力可按主动土压力理论进行计算的设计理念;同时认为作用在排桩上的力与冻结过程中产生的冻胀力、以及冻土壁后侧的土压力大小相等。这一工程中,与采用常规止水桩的排桩支护相比,排桩所受的力为被动状态下的土压力,实测值大于常规按主动土压力计算的37%~184%。上述设计理念和结论可为冻结法基坑围护设计提供一般理论参考。

**关键词:**冻胀力; 基坑; 围护设计; 主动土压力; 被动土压力

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0542-06

作者简介: 张菊连(1984-), 女, 江西丰城人, 博士, 工程师, 主要从事边坡及基坑工程等方面的设计和研究工作。

E-mail: happy\_julian@hotmail.com.

## Frost heaving force on row piles in freezing method

ZHANG Ju-lian, LIANG Zhi-rong

(Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd, Shanghai 200040, China)

**Abstract:** Based on the monitoring data of bored pile and soil slope of south anchor foundation of Runyang Yangtze River Suspension Bridge, the soil above certain depth is in compaction state, and the soil below it is in loose state. Thus it is proposed that the soil pressure on froze wall above this depth is the passive pressure and that below it is the active pressure, and the forces should be calculated by the theories of the passive and active earth pressures, respectively. Meantime, a conclusion is drawn that the force on the pile in row, the frost-heaving force caused by the frozen wall and the soil pressure on the frozen wall are the same in value. Compared with the piles in row with conventional sealing piles, the force on piles is earth pressure in passive state, and it is 37% to 184% greater than the active earth pressure calculated by the conventional theory. The above results provide a theoretical reference for the design of excavations by means of the freezing method.

**Key words:** frost-heaving force; excavation; support design; active earth pressure; passive earth pressure

## 0 引言

随着社会经济的发展,基坑逐步向大、深、复杂方向发展,对基坑围护结构工程技术及隔渗止水提出了新的要求,同时也产生了许多新技术和施工工艺<sup>[1]</sup>。冻结法是利用人工冻结技术对建筑物基坑周围的土层进行冻结,使之形成一连续、封闭的冻土帷幕墙,利用冻土的高强度和不透水性来围护坑壁的稳定和隔绝地下水与基坑内的联系,以保证施工安全<sup>[2]</sup>。人工冻结法具有隔水性能好、强度高、支护整体性好、土体可复原、不污染环境、冻结结构物的性状和扩展范围可控等优点<sup>[3]</sup>,因而在基坑中有较好的运用前景。然而,由于冻土技术还缺乏理论和技术的充分研究,施工工艺也不尽完善,冻土技术在基坑中的应用并不广泛。

润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基础是润扬长江公路大桥的一个关键子项目。基础平面尺寸约69 m×51 m,周边延长米约为240 m,基坑开挖29 m。悬索桥锚碇深基坑通常采用沉井法或地下连续墙法施工,但这两种工法在本基坑施工中都存在困难,如沉井法存在下沉困难及遇基岩容易偏斜等问题,地下连续墙存在嵌岩沉槽困难、厚砂层槽壁稳定性差等问题<sup>[4]</sup>。经过多方案的分析和比较,最后考虑采用φ1500大直径钻孔灌注桩排桩区+冻结法隔水,并结合七道钢筋混凝土支撑的围护形式。

在本工程的围护设计中存在的最大问题是冻土壁冻胀产生的冻胀力以及对围护结构内力和变形的影

响, 目前排桩冻结法为首次运用于深基坑中, 还缺少冻土墙形成过程中对围护桩产生的冻胀力的研究。为分析这一问题, 已采用了有限元模拟、室内冻胀试验、室内模型试验以及现场监测进行了研究。从研究结果来看前三者冻胀力与实测结果有较大的差距, 得出的结果也不能很好地指导工程人员进行基坑围护设计。因此, 本文从实测桩体、土体测斜以及土压力资料出发, 揭示了冻土壁后侧土压力成因类型; 并提出冻胀力与土压力、冻胀力与围护桩受力为两对作用力与反作用力, 为冻结技术在基坑围护中的应用提供一般理论参考。

## 1 实测土压力与规范计算土压力的比较分析

土体存在一个初始冻胀含水率, 当土体的含水率小于这一含水率时, 水的体积膨胀主要用于充填空隙, 土体宏观上不表现冻胀; 当含水率大于这一含水率时, 尤其是有外界水源补给时, 土体发生膨胀<sup>[1, 5]</sup>。影响土体冻胀强弱的主要因素有土的颗粒大小、矿物成分、含水率、补给来源、温度及外荷载等<sup>[4]</sup>。如果土体在冻结膨胀过程中受到支护的约束, 那么冻结土体将对支护产生一个作用力, 即为冻胀力。冻胀力的大小与土体的冻胀性及支护对冻胀的约束程度有关, 另外据文献[4]分析发现排桩所受冻胀力大小与冻土墙的厚度呈较强的正相关关系。因此, 影响冻胀力的主要因素为影响土体冻胀性的因素、约束条件以及冻土壁的厚度。影响冻胀力的因素较多, 如何合理确定冻胀力及应用于基坑设计中就显得尤为重要。

本次冻结管理深 40 m, 超过基坑开挖深度 11 m。为便于比较分析, 将本文涉及的润扬长江大桥南锚基础土层参数列于表 1。为探究冻土壁的冻胀力、壁后土压力以及作用在围护桩上力的大小和规律, 以实测土压力以及桩、土测斜资料<sup>[6]</sup>为基础, 并采用规范计算土压力与之进行比较分析。

南锚碇基础 2001 年 11 月 11 日开始冻土施工, 共分 6 个阶段进行监测, 监测时间从冻结前一直到垫层和底板浇筑完成。从监测资料中提取了桩体和土体测斜资料、水平土压力等资料。图 1~3 分别对应第 1 层、第 4 层、第 6 层土开挖过程中某天的土体侧向变形情况, 这一变形为侧壁变形和冻胀量的综合反映。可以看出, 3 个阶段的土体侧向变形在 23 m 处均发生变化, 其他 3 个阶段亦同(趋势相同, 未给出), 冻土壁后侧土体在垂直方向由压密状态变为松塌状态。

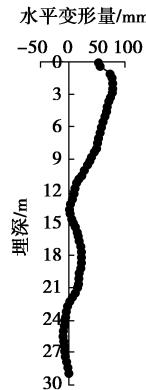


图 1 第 1 阶段开挖过程中土体测斜

Fig. 1 Lateral deformation of soils at first phase

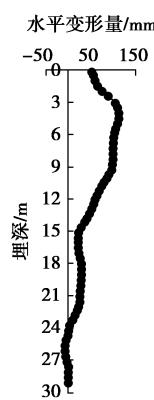


图 2 第 3 阶段开挖过程土体测斜

Fig. 2 Lateral deformation of soils at third phase

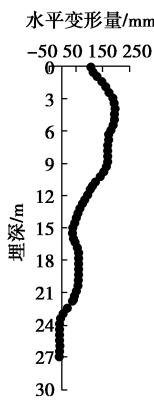


图 3 第 5 阶段开挖过程土体测斜

Fig. 3 Lateral deformation of soils at fifth phase

图 4~6 为第 4 层、第 6 层、第 7 层土开挖和支撑形成时土压力随深度变化曲线(其他阶段土压力趋势相同, 未给出), 可以看出, 冻土壁后侧土压力在 3~23 m 范围内逐渐增大, 在埋深 23 m 处达到最大, 后逐渐减小。综合图 1~6 曲线认为: 在冻土壁冻胀力的作用下, 埋深 0~23 m 内土体发生背离基坑方向的变形, 对冻土壁产生的土压力为被动状态土压力; 埋深 23~28 m 内的土体, 由于桩体向基坑内的变形超过冻

土壁产生的冻胀量, 土体发生向基坑方向的变形, 此时作用在冻土壁上的土压力为主动状态土压力。

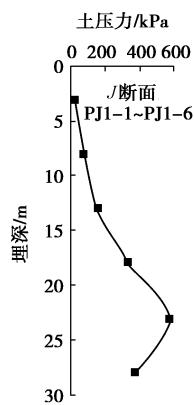


图 4 第 3 阶段实测土压力

Fig. 4 Measured soil pressure at third phase

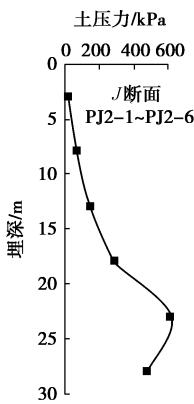


图 5 第 5 阶段实测土压力

Fig. 5 Measured soil pressure at fifth phase

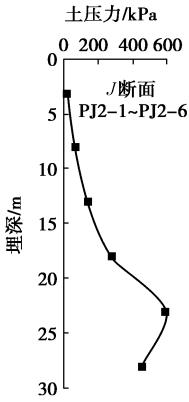


图 6 第 6 阶段实测土压力

Fig. 6 Measured soil pressure at sixth phase

为比较实测土压力和规范计算土压力大小, 考虑 20 kPa 的施工荷载, 按地下潜水水位埋深 0.5 m 考虑, 水位以下黏性土及粉土按水土合算, 砂土和风化岩按水土分算, 埋深 0~23 m 之间按被动土压力计算, 23~28 m 之间按主动土压力计算。

将从第 1 阶段土开挖到浇筑垫层、底板阶段的实测土压力与国家规范<sup>[7]</sup>和上海市工程建设规范<sup>[8]</sup>计算的土压力及其比值列于表 2, 并将实测值和规范计算值随埋深的变化绘于图 7 中。从图 7 中可以看出, 各阶段土压力变化不大, 在埋深 23 m 处土压力达到最大为 600 kPa 左右。23 m 以上实测土压力只有国家规范计算被动土压力的 20.7%~43.8%, 上海市规范的 15.8%~30.7%。23 m 以下实测土压力为规范计算主动土压力的 91.8%。究其原因为: 23 m 以上土体处于被动状态, 23 m 以下处于主动状态, 而主动土压力的极限状态较易达到, 被动土压力的极限状态一般很难达到<sup>[9]</sup>。

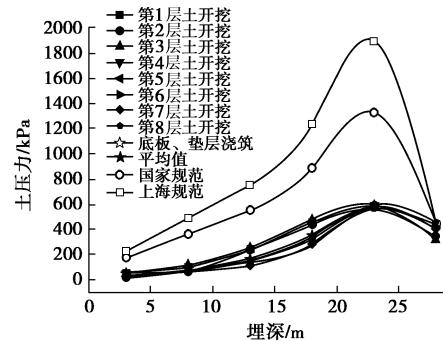


图 7 各工况阶段实测和理论计算土压力随埋深变化曲线

Fig. 7 Variation of measured and theoretical soil pressures with depth of each construction step

比较实测土体水平变形和规范给出的极限变形量, 将各阶段对应的水平变形量, 以及参考《欧洲岩土设计规范 Eurocode》和《加拿大基础工程手册》得出的土体被动和主动极限状态时的变形量绘于图 8 中, 数据详见表 3。从图 8 可以看出: 随着基坑的开挖, 被动变形逐渐增大, 但增加量相对被动极限变形量来说还很小, 因而各工况阶段土压力的变化并不是很大(图 7); 主动极限变形与实测变形基本相同,

表 1 土层参数特性表

Table 1 Soil parameters

编号	名称	土层厚度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	渗透系数/(10 <sup>-6</sup> cm·s <sup>-1</sup> )
1	亚黏土	1.8	18.6	18	25	1.90
2-1	淤泥质亚黏土	12.4	17.9	21	6.3	9.34
2-2	亚黏土与粉砂互层	8.2	18.5	25.4	8.8	
2-3	粉细砂	6.5	19.2	30	5	898

表 2 各工况下土压力实测平均值和规范计算值及其比值

Table 2 Average measured and calculated soil pressures under each construction step and their ratios

埋深/m	土层名称	实测平均压力/kPa	国家规范	上海规范	实测与国家 计算比值	实测与上海规 范计算比值
3	淤泥质亚黏土	36.53	176.74	230.99	20.7%	15.8%
8	淤泥质亚黏土	78.76	365.89	494.13	21.5%	15.9%
13	淤泥质亚黏土	175.60	555.03	757.27	31.6%	23.2%
18	亚黏土与粉砂互层	359.89	891.99	1239.69	40.3%	29.0%
23	粉细砂	583.22	1332.38	1898.67	43.8%	30.7%
28	粉细砂	410.78	447.30	447.30	91.8%	91.8%

表 3 实测最大水平变形量和规范给出的被动、主动极限变形量及其比值

Table 3 Measured maximum horizontal deformations and passive and active ultimate deformations and their ratios

埋深 /m	土层名称	平均变形 量/mm	《欧洲岩土设 计规范》/mm	《加拿大工程 手册》/mm	实测与《欧洲岩土设 计》比值	实测与《加拿大工程 手册》比值
3	淤泥质亚黏土	208.52	1450~4350	1160	4.8%~14.4%	18.0%
8	淤泥质亚黏土	190.76	1450~4350	1160	4.4%~13.2%	16.4%
13	淤泥质亚黏土	80.28	1450~4350	1160	1.8%~5.5%	6.9%
18	亚黏土与粉砂 互层	63.74	1450~2900	580	2.2%~4.4%	11.0%
23	粉细砂	2.466	1450~2900	580	0.1%~0.2%	0.4%
28	粉细砂	-7.18	29~58	29	-12.4%~-24.8%	-24.8%

因而实测主动土压力和规范计算结果较为接近(图7)。从实测变形量与极限变形量的比值、实测土压力与规范计算土压力的比值(图9)可以看出,相对变形量与相对土压力没有很强的相关性(对应的相关系数分别为0.54, 0.41, 0.66, 0.53),因此不能从土体相对水平变形量来推断土压力大小。

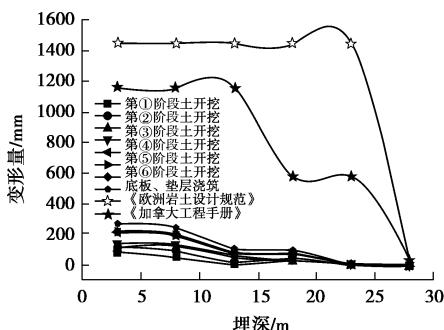


图8 各阶段土体水平变形量和极限变形量与埋深的关系曲线

Fig. 8 Variation of lateral and ultimate deformations with depth  
each phase

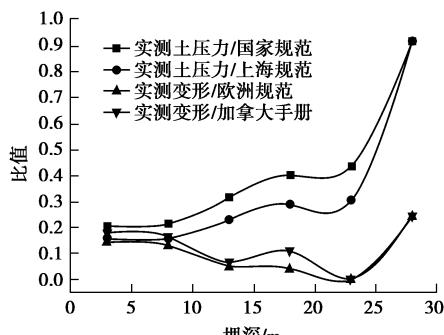


图9 各阶段土体水平变形量比值和土压力比值与埋深的关系曲线

Fig. 9 Variation of lateral deformation ratios and pressure ratios  
of soils with depth

通过上述分析得到以下一些结论:①冻土壁后侧所受的土压力,自然地面以下一定埋深内为被动状态的土压力,往下为主动状态的土压力,本基坑的分界线在埋深23 m处,其他基坑这一分界线的确定可通过土体测斜确定;②冻土壁后的土压力如按规范进行计算,被动土体部分的土压力计算结果偏大,主动部分接近。设计时,被动土体部分可采用规范计算结果进行50%的折减,主动部分不进行折减,但考虑场地地质条件的不确定性和各向异性以及施工条件的可变性和施工质量的难以保障性,土压力可按国家规范<sup>[7]</sup>计算后不再进行折减。

## 2 冻胀力对基坑围护设计影响的分析

土体冻结后,由于水的存在会产生膨胀,如果膨胀方向没有约束,冻胀力为零;如果受到约束限制其膨胀,则会产生一个对限制物体的力,这个力即为冻胀力。相同条件下,约束导致冻结体变形越小,则相应的冻胀力将越大。

基坑开挖前,冻土壁形成后开始发生冻胀,一侧受到围护灌注桩的限制,另一侧受到土体(A区,图10)的限制。由于冻胀力的存在,A区土体和围护灌注桩发生向两侧的变形。基坑开挖前,由于灌注桩刚度较大,以A区土体背离基坑的变形为主(图11),此时A区土体被压密,产生的土压力 $e$ 与冻土壁产生的冻胀力 $F_f$ 形成一对作用力与反作用力,大小相等方向相反;桩由于冻胀力的作用产生向基坑方向的变形,其施加给冻土壁的作用力 $F_p$ 与冻胀力 $F_f$ 也是一对作用力与反作用力,大小相等方向相反(图10)。根据力的传递关系, $F_p=F_f=e$ ,即作用在灌注桩上的力与冻

土壁后侧的土体施加给侧壁的压力是相等的, 否定了冻结技术中围护桩所受之力为冻胀力与后侧土体土压力之和这一结论。

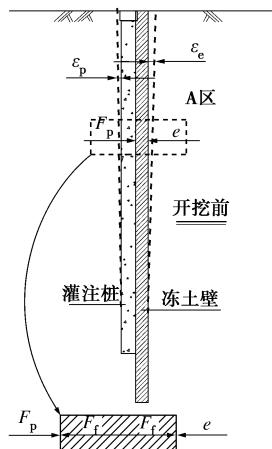


图 10 开挖前桩、土变形示意图

Fig. 10 Deformation of piles and soils before excavation

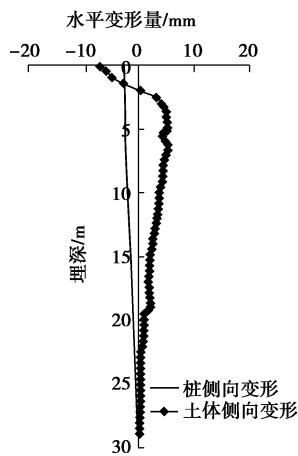


图 11 刚开始开挖冻胀示意图 (冻结一月, 第一皮土开挖过程中)

Fig. 11 Schematic diagram of frost heave at excavation point

在基坑开挖过程中, 桩体和土体的变形量都随之增大(图 12, 13), 桩体测斜和常规带支撑的板式支护变形趋势相同; 基坑外土体水平变形量背离基坑进一步增大。冻土壁的受力情况同冻结后基坑开挖前, 即  $F_p=F_f=e$ , 土压力在整个基坑开挖过程中变化不大(图 7)。

通过上述分析可知, 桩体受到的作用力与冻土壁后侧所受土压力大小相等, 但与采用传统止水桩的排桩围护结构所受土压力不同, 基坑外侧一定埋深以上土压力为被动状态土压力, 其实测值较一般设计中计算的主动土压力理论值大 37%~184% (图 14), 如仍按常规设计方法计算土压力, 其结果将相当不安全。

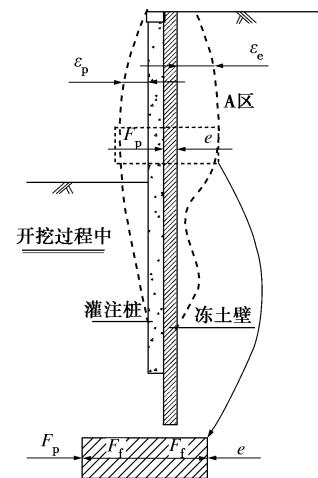


图 12 开挖过程中桩、土变形示意图

Fig. 12 Deformation of piles and soils after excavation

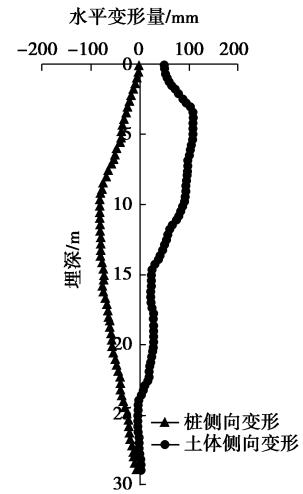


图 13 第 4 层开挖及第 4 道支撑完成时桩体测斜 (左) 和土体测斜 (右)

Fig. 13 Lateral deformation of piles (left) and soils (right) at fourth phase

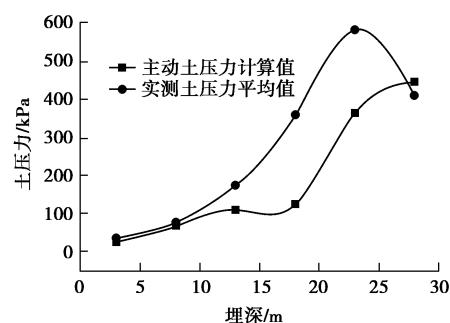


图 14 主动土压力理论值和实测平均土压力的比较

Fig. 14 Comparison between theoretical active soil pressure and average measured soil pressure

### 3 结语

以润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基础基坑土体、桩体测斜及土压力资料为基础, 探讨了冻土壁后侧土压力的成因类型, 以及坑外土压力与冻胀力的关系, 认为坑外土体地面以下某一埋深以下以内土体受到挤密, 应按被动土压力设计, 这一深度以下土体向坑内变形, 仍按主动土压力进行计算。冻土壁产生的冻胀力与坑外土压力为一对作用力与反作用力, 作用在围护桩上的力与冻土壁产生的冻胀力也是一对作用力与反作用力, 因此作用在围护桩上的力与坑外土压力大小相同。与采用常规止水桩的排桩支护相比, 冻结壁止水帷幕的冻胀作用将坑外土体由主动状态改变为被动状态, 土压力相应由主动状态土压力转变为被动状态的土压力。

### 参考文献:

- [1] 黄建华. 深基坑冻结止水帷幕冻胀变形模拟分析与试验测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2554 - 2560. (HUANG Jian-hua. Simulation analysis and experimental test on frost deformation of freezing waterproof curtain in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2554 - 2560. (in Chinese))
- [2] 杨更社, 张晶. 非均匀温度分布冻土墙围护深基坑开挖的有限元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 316 - 320. (YANG Geng-she, ZHANG Jing. Finite element numerical simulation of deep foundation pit excavation supported by frozen soil wall with non-homogeneous temperature distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 316 - 320. (in Chinese))
- [3] 金永军, 杨维好. 冻土直墙用于基坑支护的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2280 - 2285. (JIN Yong-jun, YANG Wei-hao. Application of linear frozen soil wall to support of foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2280 - 2285. (in Chinese))
- [4] 姚直书, 程桦. 锚碇深基坑排桩冻土墙围护结构的冻胀力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1521 - 1524. (YAO Zhi-shu, CHEN Hua. Study on frost-heaving force in retaining structure with Row-pile and frozen soil wall for deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1521 - 1524. (in Chinese))
- [5] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 108 - 151. (CUI BULATOVIC H A. frozen soil mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1985: 108 - 151. (in Chinese))
- [6] 裴捷. 润扬长江公路大桥悬索桥南锚碇深基坑排桩冻结工法研究 - 基坑施工监测[R]. 上海: 上海申元岩土工程有限公司, 2003. (PEI Jie. Study on row-pile of freezing method in runyang yangtze river suspension bridge south anchorage deep foundation-pit construction monitoring[R]. Shanghai: Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering, 2003. (in Chinese))
- [7] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 中国建筑科学研究院, 1999: 10 - 13. (JGJ 120—99 Construction Department of Shandong Province. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations JGJ 120-9 [S]. 1999: 10 - 13. (in Chinese))
- [8] J 11577—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海, 2010. (J 11577—2010 Shanghai Survey and Design Industry Association. Technical code for Excavation engineering[S]. Shanghai, 2010. (in Chinese))
- [9] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architectural Press, 2009. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)