

温度应力对环形地连墙围护结构受力变形的影响分析

胡琦¹, 凌道盛², 程泽海³, 陈峥⁴

(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 310027;

3. 浙江科技学院建筑工程学院, 浙江 杭州 310023; 4. 华东电力设计院, 上海 200063)

摘要: 温度场对深基坑围护结构受力变形的影响不仅是温度场与应力场的热耦合问题, 同时也是水、土、围护结构共同作用问题。通过对日本东京新丰洲变电所深基坑工程实测结果的反分析, 确定了温度场对环形深基坑围护结构受力变形影响的分析方法, 获得了温度场变化引起的围护结构受力变形模式, 并将研究成果应用于上海世博变深基坑围护结构受力变形分析。分析结果表明: 基坑开挖后, 围护结构的内侧面暴露在大气中, 受大气温度变化的影响, 地连墙内外侧存在温度差, 且不同位置、不同施工阶段, 地连墙的温度场不同; 开挖面以上的地连墙没有坑内土体的约束作用, 其环向应力的大小主要取决于坑外水、土压力的作用, 温度下降时, 地连墙向坑内收缩变形; 开挖面以下及开挖面附近的墙体, 墙体收缩变形受到坑内土体的约束, 温度下降时, 地连墙的环向应力减小。

关键词: 温度应力; 环形深基坑; 地下连续墙

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)11-2139-05

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。

Effects of temperature stress on diaphragm wall of circular deep foundation pit

HU Qi¹, LING Dao-sheng², CHENG Ze-hai³, CHEN Zheng⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Key Laboratory of Soft

Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. School of Civil

Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 4. East China Electric Power

Design Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: The effects of temperature on retaining structure of deep foundation pits are related with the thermal-mechanical coupling problem of temperature and stress fields and the interaction of water, soils and retaining structures. Through the back analysis of the measured data of Shin-Toyosu substation deep foundation pit in Tokyo, an analysis method for the effects of temperature fields on retaining structures of circular deep foundation pit is determined, and the changing patterns of temperature fields in the retaining structures are acquired. The research results are applied to the analysis of Shanghai 2010 Expo underground substation. The results show that the inner surface of the retaining structures is exposed to the atmosphere, and that temperature difference occurs between the inner and the outside of the wall due to change of atmospheric temperature. The temperature fields vary in different positions and construction stages. There is no constraint effect of soils in the pit, so the hoop stress of diaphragm wall above the excavation face mainly depends on the water-earth pressure outside the pit, and if temperature decreases, the volume of diaphragm wall will shrink. The diaphragm wall under or near the excavation face is restricted by the soils in the pit, so the hoop stress of the diaphragm wall will decrease when the temperature decreases.

Key words: temperature stress; circular deep foundation pit; diaphragm wall

0 引言

深基坑开挖施工期间, 围护结构与支护体系暴露在大气中, 会受到环境温度变化的影响。环境温度变化包括大气温度随季节和昼夜的变化、地下土层与大气的温差以及支护结构施工时产生的水化热。当围护结构与支护体系温度随环境温度变化时, 受热胀冷缩

的作用和边界条件的约束, 结构内部会产生附加内力。郑刚等^[1]提出了一种考虑水平支撑温度效应的支护结构计算方法。杨更社等^[2]通过有限元数值模拟, 研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108417); 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)

收稿日期: 2013-02-05

了非均匀温度分布对冻土墙围护结构的影响。陆培毅等^[3]通过有限元数值模拟,研究了水平支撑温度场对基坑工作性状的影响。吴明等^[4]、艾智勇等^[5]分别提出了考虑多道水平支撑温度应力的简化分析方法。陈玉香^[6]通过有限元数值模拟,分析了环境温度对某深基坑地连墙围护结构内力与变形的影响。

上述研究多是计算支撑温度变化对支撑轴力的影响,很少研究环境温度对围护结构的影响。对于排桩围护结构,每根桩相互独立,围护桩所受的约束作用很小,温度变化对围护桩内力影响很小。地连墙墙体之间,尤其是环形地连墙,墙体之间侧向相互约束,其受力变形特性受环向抗压刚度的影响很大^[7]。

本文通过有限元数值模拟,对日本东京新丰洲变电所超深基坑地连墙围护结构的温度场和应力场进行热力耦合分析,并与地连墙的温度、受力、变形等实测资料进行对比分析,研究了环境温度对环形深基坑围护结构受力变形的影响,为上海 500 kV 世博变等类似环形深基坑围护结构的受力变形分析提供指导。

1 工程背景

日本东京新丰洲变电所深基坑工程进行了大量、系统的监测工作,对混凝土材料、水土压力、基坑变形、环境温度、围护结构受力和变形等各项内容均作了非常充分的监测。为水、土、围护结构的相互作用分析奠定了基础,也为研究温度变化对环形深基坑围护结构受力变形的影响提供了全面、充分的资料,避免了不同因素之间的相互影响。

表 1 场地土层参数

Table 1 Soil parameters

土层名称	土层厚度/m	水平基床系数/(10 ³ kN·m ⁻³)
砂与淤泥互层	12.0	3
砂层	10.0	10
淤泥层	5.0	4
砂层	23.5	15
砂砾层	11.5	20
砂与淤泥互层	8.0	12

基坑工程开挖深度 29.2 m, 整个基坑为规则的环形基坑, 基坑内径 144 m、采用变厚度地下连续墙作挡土和防水结构, 地表到地下 44 m 深度范围内的墙厚 2.4 m、地下 44~70 m 深度范围内的墙体厚度 1.2 m, 总深度为 70 m, 嵌入不透水层内 2 m。地下结构外墙(内衬墙)采用逆作法施工, 墙厚 2 m, 分 6 次施工。整个基坑不设水平支撑, 完全依靠 2.4 m 厚地连墙和 2 m 厚内衬墙的环向抗压效应为围护结构提供水平支撑作用。地下连续墙混凝土设计抗压强度和弹性模量分别为 31.4 MPa 和 26 GPa, 实测抗压强度和弹性模量分别为 45 MPa 和 32 GPa; 地下结构外墙混

凝土设计抗压强度和弹性模量分别为 23.5 MPa 和 23 GPa, 实测抗压强度和弹性模量分别为 31 MPa 和 28 GPa。场地地质条件如表 1 所示, 场地土以砂土为主, 夹有黏土层。

2 数值分析

基坑开挖分 7 个阶段进行, 每次开挖结束后、第二次开挖之前, 砌筑地下结构外墙, 基坑开挖剖面如图 1 所示。有限元数值分析模型如图 2 所示: 分析模型为轴对称分析模型, 墙体单元为轴对称问题的实体 Plane 单元; 分析方法为弹性地基法; 坑外实测侧压力系数 $K \approx 0.6$; 坑内被动区土弹簧的水平基床系数如表 1 所示。地连墙为线弹性材料, 混凝土强度和弹性模量按上述实测结果, 混凝土热膨胀系数不随温度变化, 对于升温区间 0~30℃, 取热膨胀系数 $\alpha_c = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[8, 10], 取硅质骨料混凝土导热系数 $\lambda_c = 2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[9-10]。

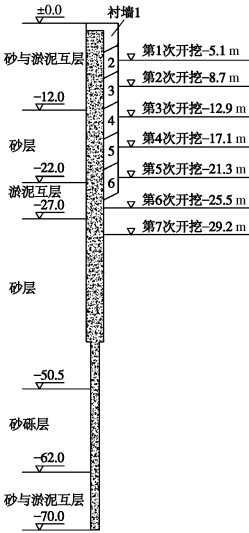


图 1 基坑开挖剖面

Fig. 1 Section of excavation of foundation pit

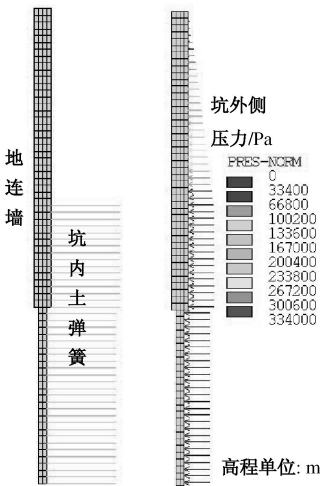


图 2 有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model

基坑开挖施工时间从 1994 年 11 月开始至 1996 年 2 月结束。地连墙内外侧的温度随时间变化规律实测结果如图 3 所示, 从实测结果中可以看出: 首先大气温度随着季节的改变呈正弦规律起伏, 冬季最低温度约 0℃, 夏季最高温度约 30℃; 地表下 4.4 m 处的地连墙在第一次开挖后即暴露在大 气中, 其温度变化规律与大气温度变化规律相同, 也呈正弦规律起伏, 地连墙内侧温度的变化范围为 10℃~28℃, 受内衬墙浇筑混凝土水化热的影响, 有短暂的突变, 地连墙外侧温度的变化幅度要小于内侧, 变化范围为 15℃~25℃, 且受水化热的影响也较小; 地表下 33 m 处地连墙一直被土层覆盖, 内外侧的温度均随着覆土厚度的减少而线形下降。

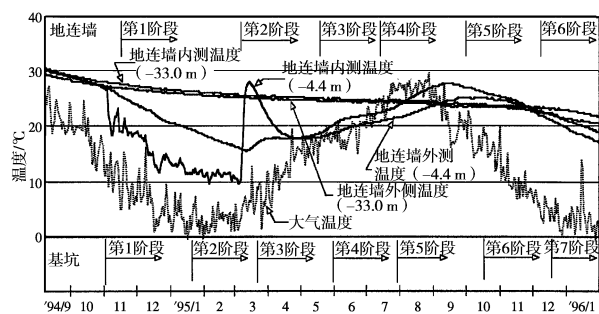


图 3 地连墙温度随时间变化规律^[11]

Fig. 3 Temperature variation of retaining wall^[11]

开挖至坑底, 地连墙受力变形分析结果如图 4~6 所示。从地连墙变形分析结果中可以看出: 受温度下降的影响, 地连墙墙身砼材料收缩, 开挖面以上的墙体向坑内收缩变形, 开挖面以下的地连墙受坑内土体的约束作用, 收缩变形较小。

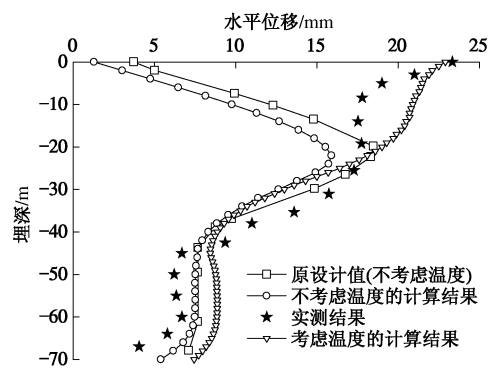


图 4 地连墙侧向变形分析结果与实测结果

Fig. 4 Results of lateral deformation of retaining wall

从地连墙环向应力分析结果中可以看出: 对于开挖面以上的墙体, 没有坑内土体的约束作用, 环向应力的大小主要取决于坑外水土压力的作用, 因此温度下降墙体收缩变形, 环向应力变化较小; 开挖面以下

及开挖面附近的墙体, 墙体收缩变形受坑内土体的约束作用, 因此温度下降引起收缩应力, 环向应力降低。

从地连墙弯矩分析结果中可以看出: 开挖面以上的地连墙弯矩受温度下降的影响较大, 墙体向坑内弯曲收缩, 且地连墙内侧的温度要低于外侧温度, 因此开挖面以上的地连墙产生负弯矩。

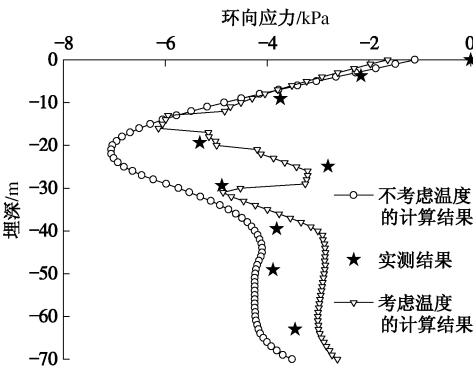


图 5 地连墙环向应力分析结果与实测结果

Fig. 5 Results of hoop stress of retaining wall

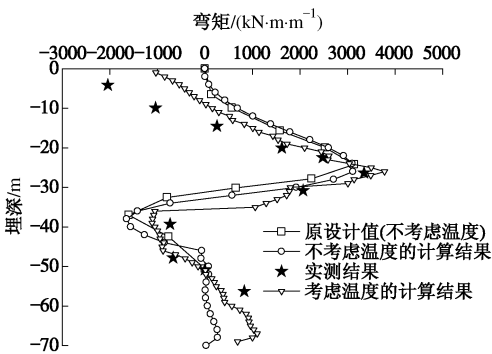


图 6 地连墙弯矩分析结果与实测结果

Fig. 6 Results of bending moment of retaining wall

3 工程应用

上海世博 500 kV 大型地下变电站工程位于上海市静安区, 为全地下 4 层筒型结构, 基坑开挖深度为 33.7 m, 开挖直径为 130 m, 场地土质为上海地区典型的粉质黏土和砂质粉土。围护结构采用 1.2 m 厚地下连续墙, 地下连续墙内侧设置 0.8 m 厚内衬墙。砼强度等级 C30, 抗压强度和弹性模量分别为 30 MPa 和 30 GPa。基坑剖面与土质参数如图 7、表 2 所示。

有限元数值分析模型如图 8 所示: 分析模型为轴对称分析模型, 楼板支撑与地下连续墙采用轴对称实体 4 节点 Plane 单元; 分析方法为弹性地基法, 坑内被动区土体采用线弹性弹簧单元, 坑外水土压力分布模式采用水土分算, 土压力为 Rankine 主动土压力, 水压力分布按静水压力。



图 7 上海世博变基坑工程剖面图

Fig. 7 Section of foundation pit

表 2 各土层力学参数

Table 2 Soil parameters

土层 编号	土层名称	层厚 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	强度指标		水平基床 系数
				c /kPa	φ /(°)	
①	填土	1.6	18.0	0.0	22.0	3
②	粉质黏土	1.5	18.8	15.7	15.8	5
③	淤泥质粉质黏土	6.6	17.8	7.4	14.7	5
④	淤泥质黏土	7.1	17.2	7.2	17.2	3
⑤-1	黏土	3.2	18.2	12.3	12.3	7
⑤-2	粉质黏土	6.6	18.5	6.8	13.9	9
⑥	粉质黏土	3.9	19.6	30.7	13.5	15
⑦-1	砂质粉土	5.7	19.1	7.9	29.8	35
⑦-2	粉砂	9.5	19.3	3.6	31.7	50
⑧-1	粉质黏土	13.6	18.4	13.9	23.2	40

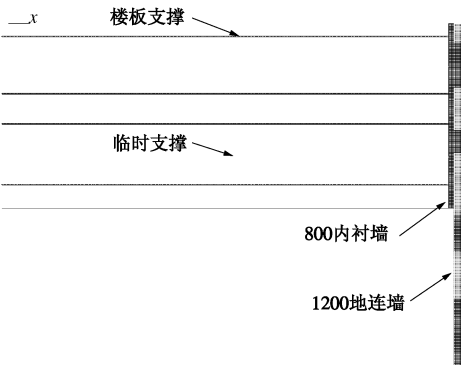


图 8 有限元分析模型

Fig. 8 Finite element analysis model for foundation pit

根据上海世博变基坑工程的施工进度与大气温度的变化规律，开挖面以上地连墙内外侧的温度变化规律模型如图 9 所示，地连墙的初始温度为地下土层平均温度+20°。开挖至坑底，地连墙侧向变形与环向应力实测结果和分析结果如图 10，11 所示：地连墙最大水平位移实测结果为 25~50 mm，不考虑温度影响的最大水平位移分析结果 28 mm，考虑温度影响的最大水平分析结果 37 mm；实测最大地连墙环向压应力

为 6~10 MPa，不考虑温度影响的最大环向应力分析结果 12.7 MPa，考虑温度影响的最大水平分析结果 11.6 MPa。可以看出，考虑温度影响的地连墙水平位移分析结果更接近于实测结果的平均值；考虑温度影响的地连墙最大环向应力分析结果也更接近于实测结果，但墙体最大环向应力实测结果要小于分析结果，这是由于环向应力测点离散分布、测点较少，可能未测出最大值。与东京新丰洲地下变深基坑工程不同的是，上海世博变深基坑有内支撑体系，因此在温度场的作用下，开挖面以上的地连墙不能自由变形。

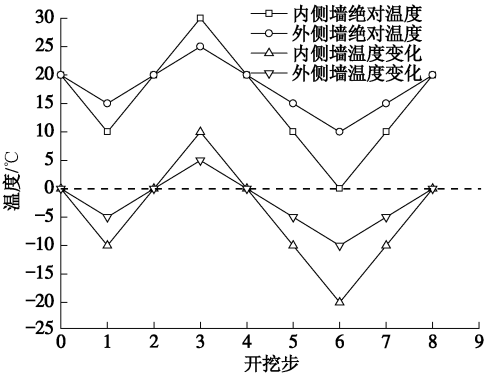


图 9 地连墙内外侧温度变化规律

Fig. 9 Temperature variation of retaining wall

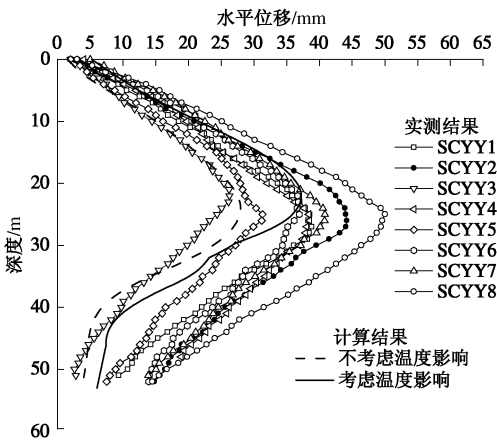


图 10 地连墙侧向变形分析结果与实测结果

Fig. 10 Results of lateral deformation of retaining wall

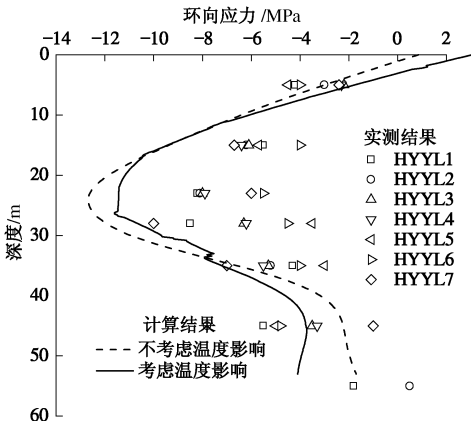


图 11 地连墙环向应力分析结果与实测结果

Fig. 11 Results of hoop stress of retaining wall

4 结 论

通过对日本东京新丰洲变电所深基坑工程实测资料的反分析, 揭示了温度场对环形深基坑地连墙围护结构受力变形影响的规律, 得到以下 5 点结论。

(1) 温度场对环形深基坑地连墙围护结构受力变形的影响不仅受到温度变化的影响, 还与水、土、围护结构的共同作用有关。

(2) 受温度下降的影响, 地连墙墙身砼材料收缩, 开挖面以上的墙体向坑内收缩变形, 开挖面以下的地连墙受坑内土体的约束作用, 收缩变形较小。

(3) 对于开挖面以上的墙体, 没有坑内土体的约束作用, 环向应力的主要取决于坑外水土压力的作用, 因此温度下降墙体收缩变形, 环向应力变化较小; 开挖面以下及开挖面附近的墙体, 墙体收缩变形受坑内土体的约束作用, 因此温度下降引起收缩应力, 环向应力降低。

(4) 受温度下降的影响, 开挖面以上的地连墙墙体向内弯曲收缩, 且地连墙内侧的温度要低于外侧温度, 因此开挖面以上的地连墙产生负弯矩。

(5) 上海世博变超深基坑围护结构受力变形分析结果表明, 考虑温度影响的地连墙位移和环向应力分析结果更接近于实测结果。与东京新丰洲地下变深基坑不同的是, 上海世博变深基坑有内支撑体系, 在温度场的作用下, 开挖面以上的墙体不能自由变形。

参考文献:

- [1] 郑 刚, 顾晓鲁. 考虑支撑—围护桩—土相互作用的基坑支护水平支撑温度应力的简化分析法[J]. 土木工程学报, 2002, 35(3): 87 - 89. (ZHENG Gang, GU Xiao-lu. Simple method for calculating temperature stress in horizontal strut of foundation pit considering strut-pile-soil interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(3): 87 - 89. (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 nonhomogeneous temperature distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 316 - 320. (in Chinese))
- [3] 陆培毅, 韩丽君, 于 勇. 基坑支护支撑温度应力的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1290 - 1294. (LU Pei-yi, HAN Li-jun, YU Yong. Finite element analysis of temperature stress in strut of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1290 - 1294. (in Chinese))
- [4] 吴 明, 孙鸣宇, 夏唐代, 等. 多层支撑深基坑中考虑支撑—围护桩—土相互作用的水平支撑温度应力简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 91 - 94. (WU Ming, SUN Ming-yu, XIA Tang-dai, et al. Simplified method of calculating temperature stress in multi-layer struts for deep excavations considering strut-pile-soil interactions[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(1): 91 - 94. (in Chinese))
- [5] 艾智勇, 苏 辉. 深基坑多层水平支撑温度应力的简化计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 199 - 203. (AI Zhi-yong, SU Hui. A simplified method of calculating thermal stress for multi-layered horizontal struts in deep excavations[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(2): 199 - 203. (in Chinese))
- [6] 陈玉香. 环境温度对某深基坑围护结构内力与变形影响分析[J]. 昆明学院学报, 2010, 32(3): 100 - 103. (CHEN Yu-xiang. Analysis on the influence of ambient temperature to enclosure structure internal force and deformation in a deep foundation excavation[J]. Journal of Kunming University, 2010, 32(3): 100 - 103. (in Chinese))
- [7] 罗耀武, 凌道盛, 陈云敏, 等. 环形超深基坑围护结构受力变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 617 - 622. (LUO Yao-wu, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Mechanical and deformation characteristics of enclosure structure for annular extra-deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 617 - 622. (in Chinese))
- [8] 姚 武, 郑 欣. 配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 77 - 87. (YAO Wu, ZHENG Xin. Effect of mix proportion on coefficient of thermal expansion of concrete[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, 35(1): 77 - 87. (in Chinese))
- [9] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (ZHU Bo-fang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [10] 唐世斌, 唐春安, 梁正召, 等. 混凝土热传导与热应力的细观特性及热开裂过程研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 11 - 19. (TANG Shi-bin, TANG Chun-an, LIANG Zheng-zhao, et al. Study of thermal conduction and thermal stress of concrete at mesoscopic level and its thermal cracking processes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 11 - 19. (in Chinese))
- [11] KUMAGAI T, ARIIZUMI K, KASHIWAGI A. Behaviour and analysis of large-scale cylindrical earth retaining structure[J]. Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 1999, 39(3): 13 - 26.