

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.002



紧邻立交桥的连续墙受力分析和安全性评价

陈江¹, 阳军生¹, 陈思明², 张学民¹, 欧雪峰¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中铁建设投资集团有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要:以深圳地铁车公庙交通枢纽 7 & 9 号线车站深基坑工程为研究背景, 选取典型的监测断面, 埋置混凝土应变计, 进行地下连续墙的内力测试, 分析了连续墙在深基坑开挖过程中的内力变化规律, 并对连续墙的安全性进行了评价, 得到以下结论: 随着基坑开挖深度的增加, 地下连续墙的内力变化越发明显, 基坑负二层和负三层开挖对连续墙的内力变化影响较大, 应重点关注和监测; 根据现场测试数据得到两侧地下连续墙的内力变化并非完全一致, 主要受到紧邻基坑开挖和周边建筑物的影响; 最后计算得到地下连续墙处于安全状态。

关键词:地下连续墙; 现场测试; 弯矩; 安全系数

中图分类号: TU28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0012-06

Force analysis and security assessment of diaphragm walls adjacent overpasses

Chen Jiang¹, Yang Junsheng¹, Chen Siming², Zhang Xuemin¹, Ou Xuefeng¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China;

2. Construction & Investment Group Co. Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong, P. R. China)

Abstract: A typical measurement-section was selected, and concrete strain meters were embedded to make measurement for diaphragm walls on the construction of Station of Metro Line 7&9 of Chegongmiao Station of Shenzhen Metro. The internal force change of diaphragm walls was discussed, and the reliability of diaphragm walls was evaluated. Results showed that with the increasing of the excavation depth of foundation pits, the variation of stresses of diaphragm walls was observable. According to the strain data from field measurement, safety factors of diaphragm walls were calculated, which turned out to meet national code. Meanwhile, it can be concluded that diaphragm walls were in the safe status. In the end, the variation relationship of their internal force, which would provide some references for the design and construction of similar projects in the future, was obtained.

Keywords: diaphragm wall; field measurement; bending moments; safety factor

随着中国城市地铁的大规模建设, 施工中常遇到一些问题, 尤其是地铁车站深基坑施工的安全

性, 受到了工程建设者和专家的广泛关注。为了确保深基坑施工过程的安全, 对地下连续墙在施工过

收稿日期: 2016-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51378505、50808178); 中国中铁股份有限公司科技开发计划(2012-19)

作者简介: 陈江(1985-), 男, 博士生, 主要从事地下工程研究, (E-mail) chenjianggood@163.com.

Received: 2016-03-03

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51378505, 50808178); Technology Development Program of China Railway Group Limited (No. 2012-19)

Author brief: Chen Jiang(1985-), PhD candidate, main research interest: underground project, (E-mail) chenjianggood@163.com.

程中的受力变化规律进行研究十分必要。由于缺少对地下连续墙内力的现场测试,对地下连续墙在施工过程中的受力变化规律进行研究就比较困难,因此,对连续墙进行内力测试是直接和有效的手段。

对地下连续墙的研究,许多学者通过室内试验和现场水平位移监测来进行。Emilios 等^[1]研究了地下连续墙的成槽和浇筑过程中对周边建筑物的影响,但对连续墙的内力没有研究;Anthony 等^[2]、Wyjadlowski 等^[3]对地下连续墙在基坑开挖过程中的稳定性进行了研究;在地下连续墙内力的现场测试方面,石钰锋等^[4]通过对连续墙进行水平位移的实测,得到了偏压基坑地下连续墙的水平位移变化规律,并对基坑围护结构的稳定性进行了评价;王树英等^[5]通过埋置混凝土应变计得到结构底板的内力变化规律;Yasushi 等^[6]、Paolo 等^[7]、Chu 等^[8]、Nicoleta 等^[9]通过室内试验和数值分析对地下连续墙的优化设计;Luis 等^[10-11]通过数值分析研究了双层地下连续墙受力变化规律;Tan 等^[12]对上海大型基坑开挖对连续墙和结构板的水平位移和竖向位移以及周边建筑物的沉降进行了研究,为上海地区地下连续墙设计和施工提出了一些建议。

大多数学者的研究都通过数值模拟的方法来分析基坑开挖过程中地下连续墙的内力和位移的变化,对基坑开挖过程中地下连续墙的现场内力测试方面研究较少。本文以深圳地铁车公庙交通枢纽7 & 9 号线地铁车站基坑为研究背景,选择典型的监测断面,埋置混凝土应变计,进行了地下连续墙内力测试,获得了地下连续墙的轴力和弯矩变化规律。

1 工程概况

车公庙枢纽站为既有地铁1号线与新建7 & 9、11号线综合换乘枢纽站,位于深圳市福田区深南大道与香蜜湖路交叉处西南角。7 & 9 号线车站基坑紧邻香蜜湖立交桥和换乘大厅基坑以及物业开发基坑,车站整体为地下3层三柱四跨结构,车站全长315 m,监测断面所在的盖挖逆作段基坑长246.54 m,基坑宽41.2 m,深约25.3~26.4 m;7 & 9 号线车公庙站基坑均采用1 m厚地下连续墙作为围护结构^[13](如图1、图2所示)。

地层情况主要为粉质粘土,砾质粘土,全风化花岗岩,强风化花岗岩(如图3所示)。



图1 施工现场

Fig. 1 Construction site

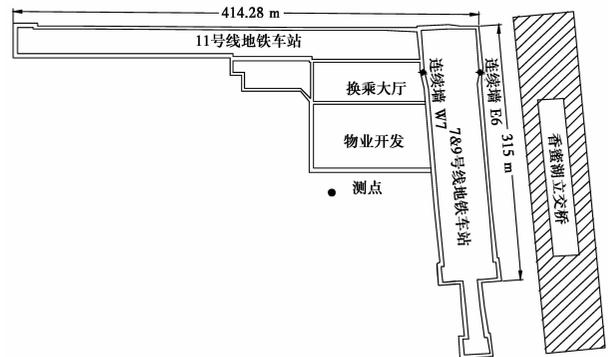


图2 内力测试平面示意图

Fig. 2 Measurement plan

7 & 9 号线地铁车站基坑的现场施工工序及对应的完成时间见表1。

表1 施工工序

Table 1 Construction process

施工过程	完成时间
工序1:施作车站基坑连续墙	2014-01
工序2:施作十字型钢柱	2014-02
工序3:除去车站顶板覆土	2014-03
工序4:施作车站顶板	2014-04
工序5:回填车站顶板覆土	2014-04
工序6:开挖车站基坑的负1层	2014-06
工序7:施作车站第1层中板	2014-07
工序8:开挖车站基坑的负2层	2014-08
工序9:施作车站第2层中板	2014-09
工序10:开挖车站基坑的负3层	2014-10
工序11:施作车站的底板	2014-11

2 地下连续墙内力测试方案

根据车公庙站换乘枢纽总平面图并结合施工现场情况,准备在地下连续墙E6和W7各埋设7对智能混凝土应变计;共计28个智能混凝土应变计(如图3、图4所示)。在连续墙不同深度不同位置的主

筋上埋置混凝土应变计,固定在连续墙不同深度位置内外侧竖向主筋上,通过导线统一引到冠梁上部。

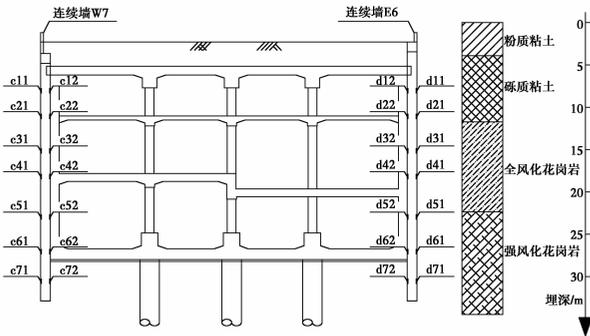


图 3 地下连续墙 E6 和 W7 测点位置示意图

Fig. 3 Gauging points of diaphragm wall E6 and W7

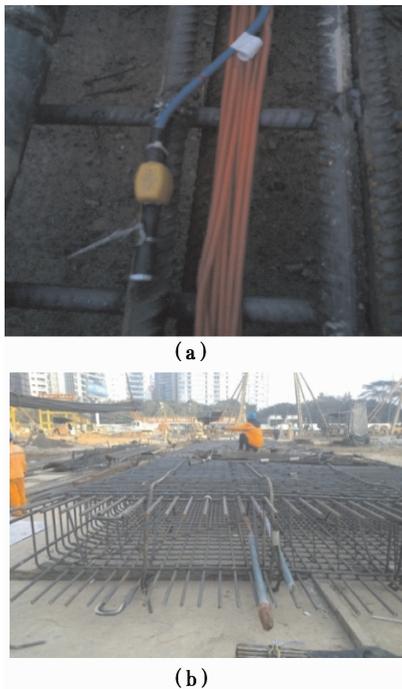


图 4 现场埋置元件图

Fig. 4 Installation site

3 连续墙内力测试的结果分析

3.1 地下连续墙 E6 的内力测试结果分析

2014 年 1 月 17 日,地下连续墙 E6 冠梁施工完成后,开始采集应变数据,从图 5 和图 6 可以看出: 1) 从顶板覆土开始开挖(2 月 27 日),地下连续墙的应变值发生明显变化,从地下连续墙 E6 测点最大的拉应变为 $813 \mu\epsilon$,地下连续墙 N21 测点最大压应变为 $-392 \mu\epsilon$; 2) 由于地下连续墙 E6 的许多混凝土应变计已经损坏,所以图 6 和图 7 的应变曲线未呈现明显的对称性; 3) 随着基坑的开挖深度增加,大

多数测点的应变值变化明显; 工序 8 和工序 9 施工时,混凝土应变计的测试数据变化幅度最大; 4) 每道工序在埋置混凝土测试元件附近施工时,测点应变值变化较大,各条曲线表现为波动明显,在远离埋置混凝土测试元件施工时,测点应变值变化很小,各条曲线表现为平滑; 5) d51、d52 和 d32 测点应变值变化较大,主要由于这几个测点的混凝土应变计埋深较浅,受开挖的扰动的影响较大。施工完成后,混凝土应变计的测试数据变化很小,最后趋于稳定。

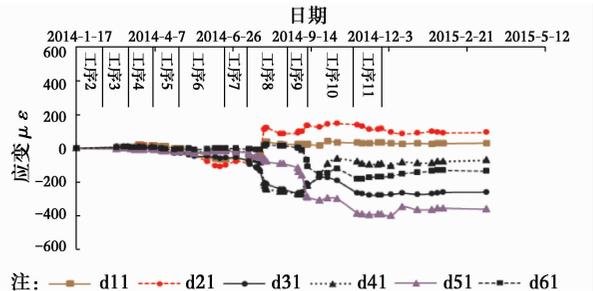


图 5 地下连续墙 E6 应变随时间变化曲线(外侧)

Fig. 5 Development of strain versus time for diaphragm wall E6

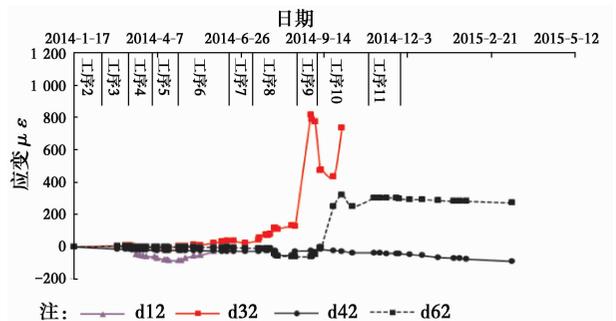


图 6 地下连续墙 E6 应变随时间变化曲线(内侧)

Fig. 6 Development of strain versus time for diaphragm wall E6

根据混凝土应变计测得应变值,计算地下连续墙 E6 的轴力和弯矩,如图 7 和图 8 所示。从图 7 看出,在工序 8(开挖车站基坑的负 2 层)之前,地下连续墙的轴力变化较小,但是,从工序 7(施作车站第 1 层中板)开始,连续墙轴力变化逐渐增大,工序 10(开挖车站基坑的负 3 层)完成后轴力值最大达到 -7585 kN ,而从工序 8 到工序 10,地下连续墙埋深 15.5 m 处,测点轴力从 -1395 kN 变为 7585 kN ,因此,工序 8 到工序 10,对地下连续墙轴力的影响较大。

从图 8 看出,在工序 8 之前,各工序之间地下连续墙的弯矩变化不大,但是,随着开挖深度的增加,弯矩变化越来越大,工序 9(施作车站第 2 层中板)

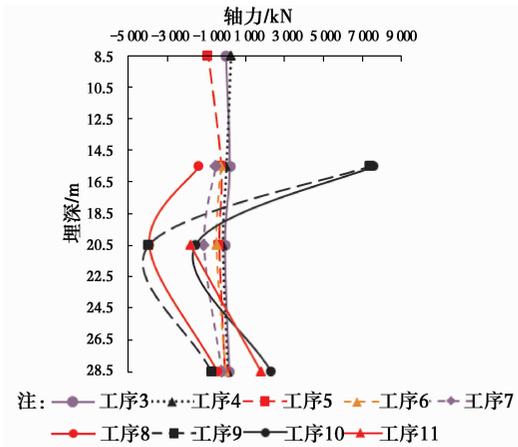


图 7 连续墙 E6 轴力的变化曲线
Fig. 7 Axial forces of diaphragm wall E 6

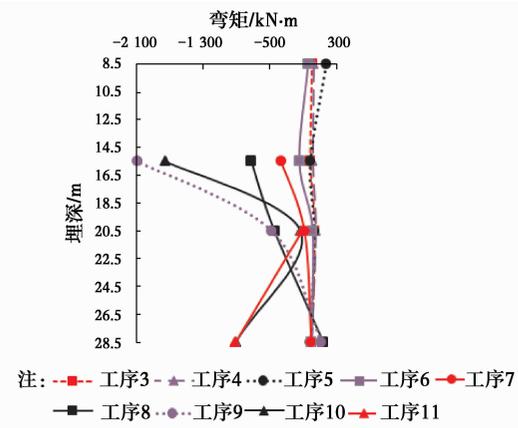


图 8 连续墙 E6 弯矩的变化曲线
Fig. 8 Bending moments of diaphragm wall E 6

之后,最大弯矩值出现在埋深 15.5 m 处,最大值为 -2 099 kN·m。从图 8 看出,工序 9 和工序 10 的弯矩曲线变化最大,说明工序 8 到工序 10,对地下连续墙的弯矩影响较大,弯矩计算结果与轴力计算结果规律相类似。因为施工现场情况复杂,一些混凝土应变计遭到了破坏,所以轴力和弯矩曲线变短。

3.2 地下连续墙 W7 的内力测试结果分析

2014 年 1 月 20 日,地下连续墙 W7 开始采集应变数据,从图 9 和图 10 可以看出:

1)从顶板覆土开始开挖(2 月 20 日),地下连续墙的应变值发生明显变化,地下连续墙 W7 测点最大拉应变为 896 $\mu\epsilon$,最大压应变为 -436 $\mu\epsilon$;2)随着基坑的开挖深度增加,大多数测点的应变值呈增长趋势,工序 8 和工序 9 施工时,混凝土应变计的测试数据变化幅度最大;3)每个工序在埋置混凝土测试元件附近施工时,测点应变值变化较大,各条曲线表现为波动明显,在远离埋置混凝土测试元件施工时,

测点应变值变化很小,各条曲线表现为平滑;4) c41、c51、c52 和 c61 测点应变值变化较大,受开挖的扰动的影响较大;5) c71 和 c72 测点埋深最深,在基坑开挖面以下,所以测点应变值受基坑开挖的影响较小。施工完成后,混凝土应变计的测试数据变化很小,最后趋于稳定。E6 和 W7 两幅地下连续墙的测试数据变化规律整体相似。

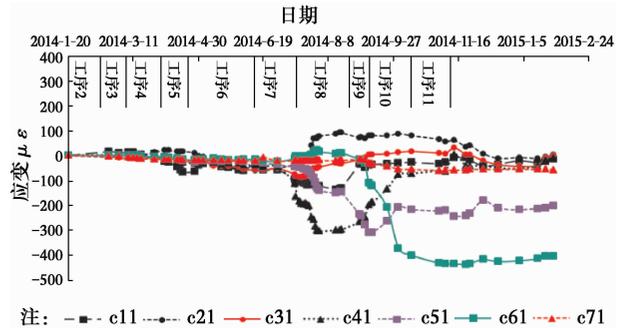


图 9 地下连续墙 W7 应变随时间变化曲线(外侧)
Fig. 9 Development of strain versus time for diaphragm wall W7

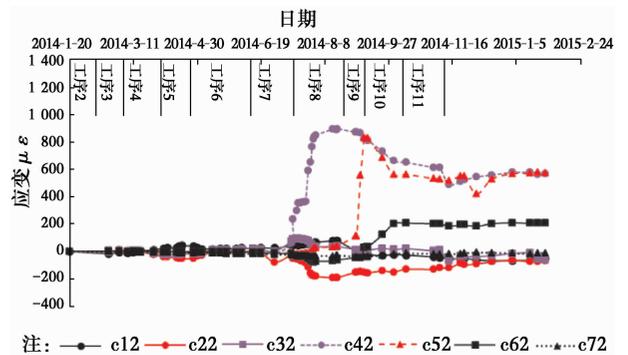


图 10 地下连续墙 W7 应变随时间变化曲线(内侧)
Fig. 10 Development of strain versus time for diaphragm wall W7

根据混凝土应变计测得应变数值,计算地下连续墙 W7 的轴力和弯矩,如图 11 和图 12 所示。从图 11 看出,在工序 7 之前,地下连续墙的轴力变化较小,工序 9 后轴力最大,达到 8 439 kN。从工序 8 到工序 10,地下连续墙埋深 15.5 m 处,测点轴力从 -230 kN 变为 8 439 kN,说明工序 8 到工序 10 对地下连续墙轴力的影响较大。西侧连续墙 W7 总体变化规律与东侧连续墙 E6 相似。

从图 12 看出,在工序 7 之前,各工序之间地下连续墙的弯矩变化不大,但是,随着开挖深度的增加,弯矩变化越来越大,工序 8 之后,最大弯矩值出现在工序 8,最大值为 -2 318 kN·m。从工序 8 完成到工序 10,地下连续墙 W7 埋深 15.5 m 处,弯矩

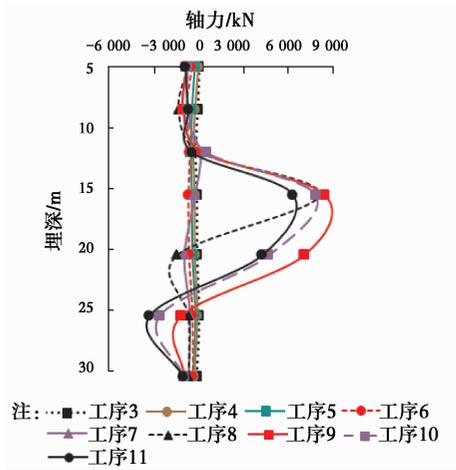


图 11 连续墙 W7 轴力的变化曲线

Fig. 11 Axial forces of diaphragm wall W7

值从 $-359 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 变为 $-2\,209 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。由于地下连续墙 W7 是 7 & 9 号线车站基坑和换乘大厅基坑的共用连续墙,受换乘大厅的基坑开挖的影响较大。从图 12 看出,工序 8 到工序 10 的弯矩曲线变化较大,说明工序 8 到工序 10 对地下连续墙的扰动较大。地下连续墙 W7 弯矩计算结果与轴力计算结果的规律相类似。

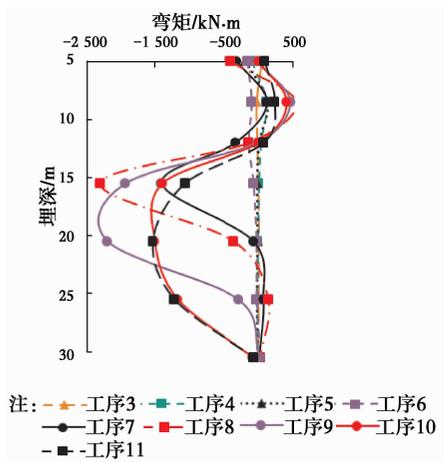


图 12 连续墙 W7 弯矩的变化曲线

Fig. 12 Bending moments of diaphragm wall W7

4 地下连续墙 E6 和 W7 的安全性评价

为了分析基坑开挖对地下连续墙安全性的影响,根据《混凝土结构设计规范》^[14]和截面配筋,计算得到地下连续墙 E6、W7 的抗弯承载力,并结合实测内力计算数据,计算得到测试断面连续墙的安全系数。如图 13 所示,地下连续墙的最小安全系数出现在连续墙 E6,最小安全系数为 2.6,地下连续墙 E6 主要受到邻近香蜜湖立交桥的高路堤的挤压影

响,受到轴力和弯矩要比另一侧地下连续墙 W7 的轴力和弯矩大。满足规范《建筑基坑支护技术规程》^[15]的最小安全系数 2.2 的要求,说明地下连续墙 E6 和 W7 处于安全状态,地下连续墙是稳定安全的。

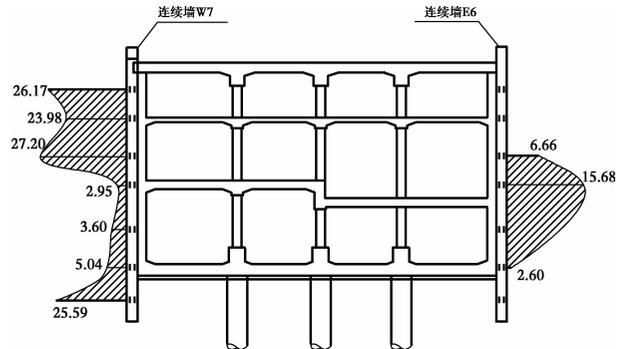


图 13 地下连续墙 E6 和 W7 的安全系数分布图

Fig. 13 The safety factors of diaphragm walls E6 and W7

5 结论

以深圳地铁车公庙交通枢纽 7 & 9 号线车站深基坑工程为背景,选取典型的监测断面,埋置混凝土应变计,进行深基坑的地下连续墙内力测试,得到以下结论:

1)随着基坑开挖深度的增加,地下连续墙的内力变化越发明显,表现为 7 & 9 号线车站基坑负 3 层土体开挖的轴力和弯矩值大于负 2 层土体开挖的轴力和弯矩值,负 2 层土体开挖的轴力和弯矩值明显大于负 1 层土体开挖的轴力和弯矩值。工序 8 到工序 10 对地下连续墙的内力变化影响较大,应重点关注和监测。

2)由于受到紧邻基坑开挖和周边建筑物的影响,7 & 9 号线车站深基坑两侧的地下连续墙 E6 和 W7 的轴力和弯矩变化曲线并非完全一致。

3)根据实测应变数据,计算得到连续墙的安全系数,地下连续墙 W7 的最小安全系数为 2.95,地下连续墙 E6 的最小安全系数为 2.6,说明地下连续墙处于安全状态,地下连续墙 E6 和 W7 是稳定安全的,但是地下连续墙 E6 最小安全系数较小,主要受到邻近香蜜湖立交桥的高路堤的挤压影响,所以,连续墙设计时应考虑周边环境的影响。

参考文献:

- [1] EMILIOS M C, MELLO C P, GEORGIOS K K. Effects from diaphragm wall installation to surrounding soil and

- adjacent buildings [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 53: 106-121.
- [2] GOH-ANTHONY T C, XUAN F, ZHANG W G. Reliability assessment of diaphragm wall deflections in soft clays [J]. *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty*, 2013, 487-496.
- [3] WYJADLOWSKI M, PULA W, BAUER J. Reliability of diaphragm wall in serviceability limit states [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, 288:1-9.
- [4] 石钰锋, 阳军生, 白伟, 等. 紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(4):826-833.
SHI Y F, YANG J S, BAI W, et al. Analysis of field measurement for deformation and internal force of unsymmetrical loaded foundation pit's enclosure structure close to railway [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 30(4): 826-833. (in Chinese)
- [5] 王树英, 阳军生, 唐鹏, 等. 八车道明挖湖底隧道结构受力现场测试与安全性评价[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(11):120-127.
WANG S Y, YANG J S, TANG P, et al. Field measurement of stresses and safety evaluation of eight-lane framed lake tunnel with the cut-and-cover method [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(11): 120-127. (in Chinese)
- [6] YASUSHI A, OSAMU K, OSAMU M, et al. A numerical study on ground displacement and stress during and after the installation of deep circular diaphragm walls and soil excavation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35: 791-807.
- [7] PAOLO F, FRANCESCO C. Seismic performance-based design of flexible earth-retaining diaphragm walls [J]. *Engineering Structures*, 2014, 78: 57-68.
- [8] CHU E H, SC D, HU S. Design optimization of underground metro station diaphragm walls using numerical modeling [C]//*Geo-Congress 2014 Technical Papers*, ASCE, 2014: 439-470.
- [9] NICOLETA M I, FARCAS V S, POP M. Design optimization of diaphragm walls [J]. *Procedia Technology*, 2015, 19: 357-362.
- [10] LUIS S C, ANTONIO A, ALEJANDRO J. Bi-layer diaphragm walls: Experimental and numerical structural analysis [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 154-164.
- [11] LUIS S C, ALEJANDRO J, ANTONIO A. Bi-layer diaphragm walls: Parametric study of construction processes [J]. *Engineering Structures*, 2014, 59: 608-618.
- [12] TAN Y, WEI B. Observed behaviors of a long and deep excavation constructed by cut-and-cover technique in Shanghai soft clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138: 69-88.
- [13] 中铁二院工程集团有限责任公司. 深圳地铁车公庙综合交通枢纽工程施工图设计[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2012.
China Railway Eryuan Survey and Design Group Co., Ltd. Design blueprint of Chegongmiao comprehensive transportation hub project of Shenzhen metro [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Survey and Design Group Co., Ltd., 2012. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)