

# 相邻深基坑的连续墙受力数值分析与现场测试

陈江, 阳军生, 张学民, 欧雪峰

(中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘 要:** 以深圳地铁车公庙枢纽 11 号线车站基坑与换乘大厅基坑的地下连续墙为例, 分析连续墙在开挖过程中的受力规律. 在地下连续墙内埋置了混凝土应变计, 对两基坑施工全过程的受力情况进行了现场测试, 并对连续墙的安全性进行了评价. 结合有限元软件 ABAQUS 进行分析, 结果显示, 共用连续墙受紧邻基坑开挖的影响明显, 内力变化较大, 而非共用连续墙受紧邻基坑开挖的影响较小, 可以忽略. 测试结果为深圳地区地铁车站工程建设提供参考.

**关 键 词:** 现场测试; 数值分析; 共用地下连续墙; 轴力; 深基坑

**中图分类号:** TU 28      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)08-1189-06

## Numerical Analysis and Field Measurement of Force on Diaphragm Walls in Adjacent Deep Excavations

CHEN Jiang, YANG Jun-sheng, ZHANG Xue-min, OU Xue-feng

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China. Corresponding author: CHEN Jiang, E-mail: 981750161@qq.com)

**Abstract:** This paper focused on the study of shared diaphragm walls in the foundation pits of Chegongmiao station of Shenzhen subway line 11. During the study, typical tested section was selected, and concrete strain meters were embedded so as to carry out internal force test for diaphragm walls. Stability of the station structure was evaluated. The ABAQUS software was used to analyze it, and shared diaphragm walls were affected greatly by construction of adjacent excavation, and internal forces varied significantly, while other diaphragm walls were affected slightly by construction of adjacent excavation, and the effect could be ignored. In the end, it provides a reference for the construction of subway station in Shenzhen area.

**Key words:** field measurement; numerical analysis; shared diaphragm wall; axial force; deep excavation

单一基坑开挖时地下连续墙的受力和变形方面的研究成果已有不少, 但是对于两个基坑相继开挖时共用地下连续墙的受力变化分析较少, 研究共用地下连续墙的受力规律对共用连续墙设计和施工, 显得十分必要.

Arai 等<sup>[1]</sup>通过数值计算方法得知不同开挖工序和连续墙的厚度对连续墙受力有明显的影响. Pujades 等<sup>[2]</sup>分析了富水地层明挖法施工过程中基坑降水对连续墙的变形受力影响. Tan 等<sup>[3]</sup>

通过现场实测研究, 得出在基坑开挖过程中应主要分析连续墙的弯矩变化, 轴力的影响可以忽略. 陈江等<sup>[4-7]</sup>分析了连续墙和结构板在基坑开挖中的受力变化规律, 并且对连续墙的安全性进行了评价. Zhang 等<sup>[8]</sup>认为基坑开挖过程中连续墙的最大允许变形控制在开挖深度的 0.5% 是不科学的, 提出了基于可靠度的评价连续墙安全性的方法.

以上研究仅针对单一基坑开挖时连续墙的受力和变形方面的研究, 对于两个基坑共用连续墙

的研究成果鲜见报道. 本文依托深圳车公庙地铁枢纽站的施工, 选取典型监测断面, 在共用连续墙和非共用连续墙埋置混凝土应变计, 在整个基坑开挖过程中, 采集测试数据, 对比分析共用连续墙和非共用连续墙的受力特征, 并计算其安全系数, 分析其安全性.

1 工程概况及内力测试方案

施工现场概况如图 1、图 2 所示. 车公庙交通枢纽主要包括 11 号线车站、换乘大厅、7&9 号线车站和物业基坑, 其中 11 号线车站位于深圳市深南大道下方, 呈现东西走向布置, 南侧紧邻换乘大厅和丰盛町地下商业街, 北侧紧邻既有 1 号线车站, 东侧紧邻 7&9 号线车站. 11 号线车站基坑长 414.28 m, 宽 26.8 m, 基坑开挖深度约 18 m. 换乘大厅基坑长约 151.3 m, 基坑开挖与 11 号线车站基坑一样, 深度约 18 m, 宽 38.5 m. 换乘大厅和 11 号线车站均采用 800 mm 连续墙的埋深约为 23 m, 连续墙的保护层厚度为 70 mm, 采用 C35 混

土浇筑, 单位长度的截面配筋面积为  $5\,630\text{ mm}^2$ . 地层从上到下主要依次为粉质黏土层、砾质黏土层和全风化花岗岩层, 基坑开挖采用盖挖逆作法施工<sup>[9]</sup>.

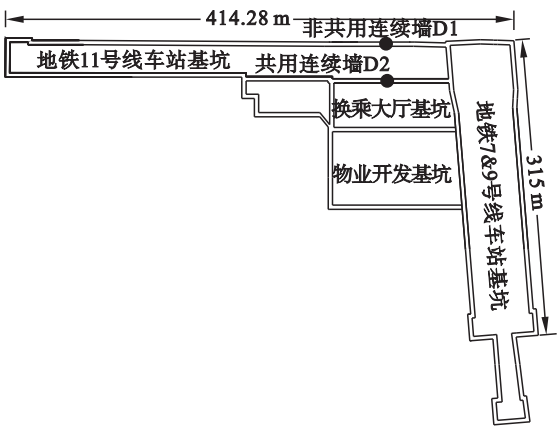


图 1 测试平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement plane

根据现场施工情况和施工进度, 在非共用连续墙 D1 和共用连续墙 D2 的钢筋笼埋置混凝土应变计, 通过导线并用一段测斜管保护, 引导到冠梁上, 在两幅连续墙上分别埋置了 7 对应变计, 如图 2 所示. 现场施工主要顺序如图 3 所示.

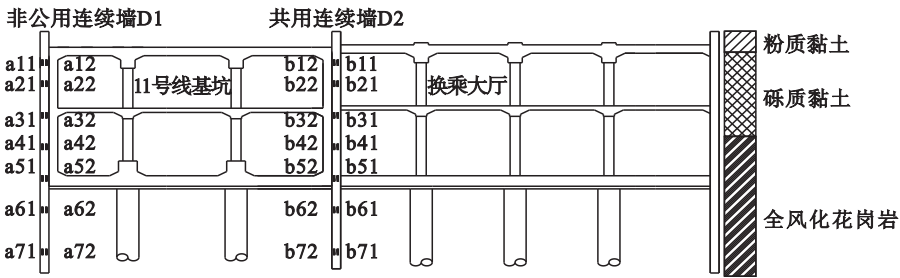


图 2 监测断面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement section

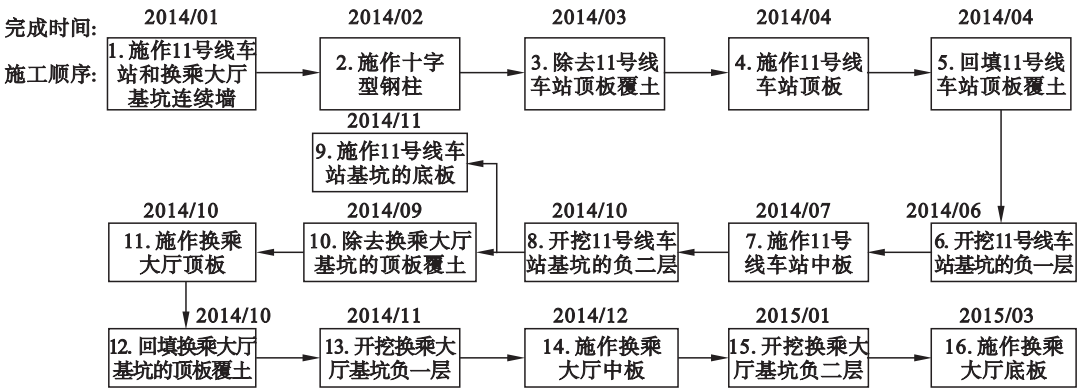


图 3 施工步骤

Fig. 3 Construction steps

2 内力测试结果分析

2.1 非地下连续墙内力测试

为了研究连续墙的受力变化规律, 在非共用

地下连续墙 D1 埋置 7 对智能混凝土应变计, 并于 2013 年 12 月 25 日开始采集数据, 分析地下连续墙 D1 应变随时间变化的规律. 连续墙 D1 冠梁施工完成后, 进行连续墙应变测试, 整理数据如图 4 所示, 从 2 月 24 日开始, 即工序 1 顶板覆土进

行开挖。被测连续墙 D1 的最大拉应变值为  $147 \times 10^{-6}$ , 最大压应变值为  $-157 \times 10^{-6}$ ; 随着基坑开挖深度的增加, 绝大多数混凝土应变计测得的应变数据均变化非常明显, 而且在被监测连续墙附近施工时, 连续墙的应变数据变化较大, 远离被监测连续墙附近施工时, 连续墙的应变数据变化较小。负二层开挖时连续墙受到的影响要比负一层大。a11 和 a12 测点应变值变化较大, a11 和 a12 测点埋深较浅, 测点受土体开挖和地面活荷载的影响较大。

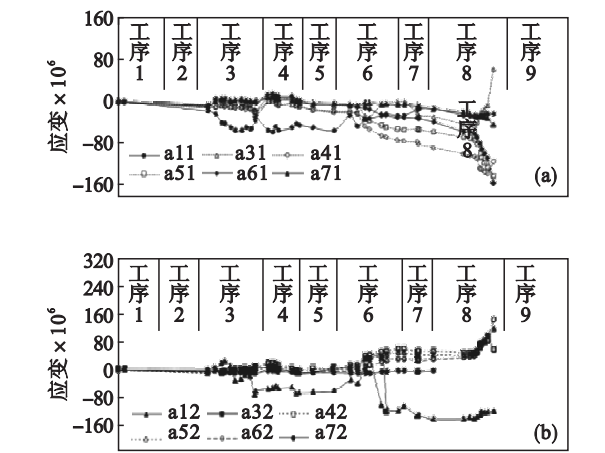


图 4 地下连续墙 D1 应变随时间变化曲线  
Fig. 4 Strain versus time for diaphragm wall D1  
(a)—外侧; (b)—内侧。

根据应变测试数据, 结合连续墙的厚度和配筋等情况, 计算的非共用连续墙 D1 的内力, 如图 5 所示, 从图 5a 看出, 埋深小于 15 m 范围内的地下连续墙的轴力变化较大, 埋深大于 15 m 的部分轴力变化小。工序 8 完成后轴力值达到最大值  $-1\,570\text{ kN}$ , 从工序 3 “顶板覆土开挖” 完成到工序 4 “施作 11 号线车站底板” 完成, 地下连续墙埋深 4 m 处测点轴力  $-218\text{ kN}$  变为  $-1\,143\text{ kN}$ , 轴力变化最为明显, 比原来增加了 424.31%。从总体上来说, 工序 8 “11 号线车站负二层土体开挖” 对地下连续墙轴力的影响最大。

从图 5b 看出, 在工序 8 “11 号线车站负二层土体开挖” 之前, 埋深小于 10 m 范围内的地下连续墙的弯矩变化较大, 而埋深大于 10 m 范围内的地下连续墙的弯矩变化较小。从图 5b 看出, 在工序 6 “11 号线车站负一层土体开挖” 之前, 开挖对连续墙扰动较小, 所以连续墙的弯矩变化较小, 工序 8 “11 号线车站负二层土体开挖” 之后, 最大弯矩值出现在工序 6 “11 号线车站负一层土体开挖” 埋深 12 m 处, 最大值为  $-245\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 地下连续墙埋深 22 m 处测点的弯矩值变化很小。开挖深

度越深, 弯矩变化越大, 工序 8 对地下连续墙的扰动最大。

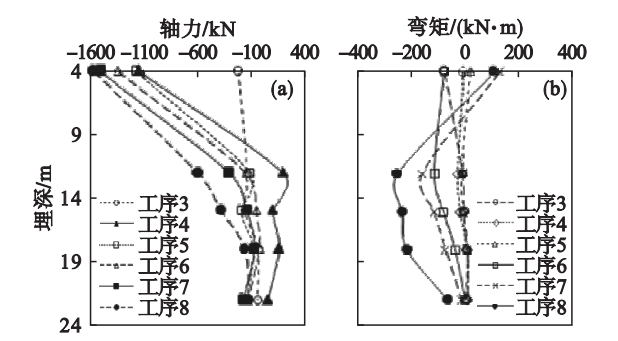


图 5 地下连续墙 D1 内力变化曲线  
Fig. 5 Inner-force curves of diaphragm wall D1  
(a)—轴力; (b)—弯矩。

## 2.2 共用地下连续墙内力测试

与非共用连续墙 D1 测试过程相似, 共用连续墙 D2 冠梁完成后, 为了提高对比性, 两幅连续墙在同一时间段采集数据。从图 6 可以看出: 两幅连续墙应变随时间变化规律具有一致性, 但是还有部分差异。共用连续墙 D2 测点最大应变值为  $183 \times 10^{-6}$ , 而非共用连续墙 D1 最大应变值为  $147 \times 10^{-6}$ ; 连续墙内力受 11 号线车站基坑负二层的土体开挖比负一层的影响要大, 埋深 15 m 处测点 b51 和 b52 应变值变化较大。

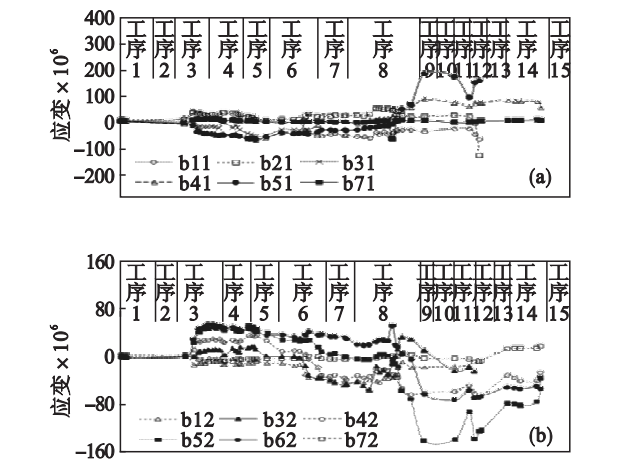


图 6 共用连续墙 D2 应变随时间变化曲线  
Fig. 6 Strain versus time for shared diaphragm wall D2  
(a)—外侧; (b)—内侧。

根据应变测试数据, 结合连续墙的厚度和配筋等情况, 计算得到共用连续墙 D2 的内力变化曲线, 如图 7 所示。从图 7a 看出, 埋深较浅的连续墙部分, 轴力变化较大; 埋深较深的连续墙部分, 轴力变化较小。工序 8 施工完成后连续墙的最大轴力值为  $-967\text{ kN}$ , 连续墙 D2 的最大轴力值比北侧连续墙 D1 最大轴力值小。

由于施工现场破除部分连续墙, 连续墙 D2

的负一层部分已破除,部分测点被破坏.从图 7b 看出,工序 8 完成后,共用连续墙的最大弯矩值为  $-172.66\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,位于测点 b31 和 b32 所在的截面.换乘大厅开挖前后,连续墙的弯矩变化以 b71 和 b72 为例,工序 8 完成后截面的弯矩值为  $-2.29\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;工序 15 完成后截面的弯矩值为  $-17.15\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,两者之差为  $14.86\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,弯矩变化大于 6 倍,虽然元器件损坏较多,但是也能说明共用连续墙受紧邻的换乘大厅基坑开挖影响较大.

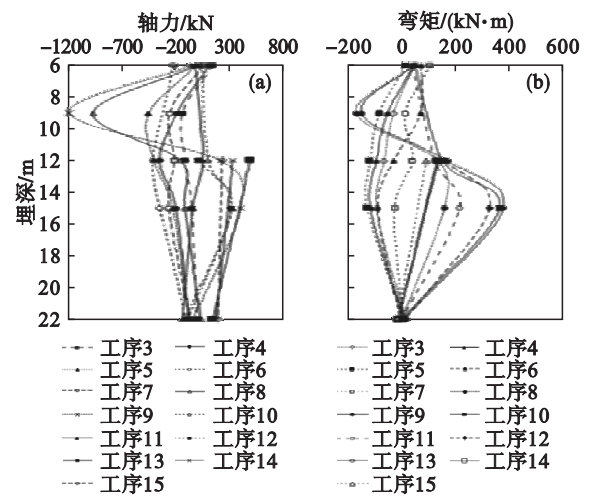


图 7 共用连续墙 D2 实测内力的变化曲线  
Fig. 7 Inner-force curves of diaphragm wall D2  
(a)—轴力;(b)—弯矩.

从图 7 中提取工序 8 和工序 15 这两种工序完成后的轴力和弯矩图进行研究,如图 8 所示,可以清楚地得到共用连续墙受紧邻基坑开挖的影响

较大,因此应重点进行内力和位移的监测,图中具体分析见文献[5].

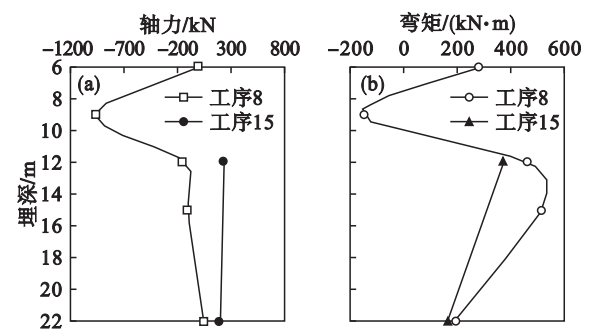


图 8 两种工序下的连续墙 D2 内力变化曲线  
Fig. 8 Inner-force curves of diaphragm wall D2 in two steps  
(a)—轴力;(b)—弯矩.

### 3 数值计算分析

#### 3.1 数值计算参数选取

根据《车公庙详勘报告》<sup>[9]</sup>,选取土层及基坑结构力学参数如表 1 所示.采用 ABAQUS 有限元分析软件建立基坑群开挖模型,模型大小为  $420\text{ m}\times 80\text{ m}$ (见图 9),模型共 4 385 个单元,土体采用实体单元模拟,地下连续墙采用实体模拟.土体采用 Mohr – Coulomb 本构模型进行研究.基坑土体开挖和连续墙施作采用 Model Change, Remove 和 Add 生死单元.围护墙和土体之间均采用 Tie 方式接触.抗拔桩与土体采用 Tie 方式接触,轴力和弯矩采用 Free Body Cut 输出弯矩值和轴力值<sup>[10]</sup>.

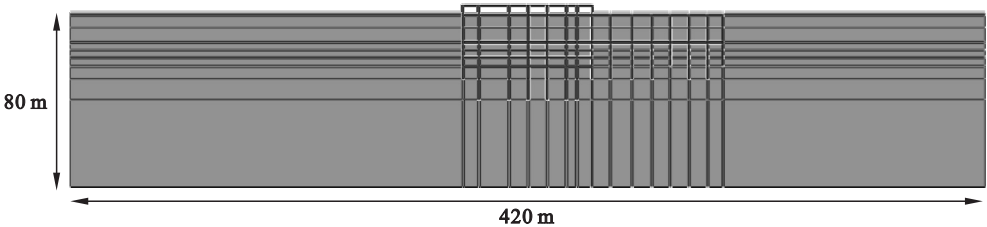


图 9 有限元计算模型  
Fig. 9 Finite element model

表 1 土层及基坑结构力学参数表  
Table 1 Soil and excavation structure mechanical parameters

项目	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	孔隙比
钢筋混凝土	2 400	30	0.2	—	—	—	—
素填土	1 790	0.015	0.28	22	24.2	1.3e-5	1.05
粉质黏土	1 860	0.020	0.30	20	20	2.8e-6	0.72
砾质黏土	1 800	0.020	0.35	52.40	31.61	1.5e-5	0.78
全风化花岗岩	2 200	0.200	0.25	49.93	28.74	1.4e-4	0.59
强风化花岗岩	1 890	0.300	0.31	25.70	25.40	8.3e-4	0.55



3.2 数值计算结果分析

换乘大厅基坑开挖后,地下连续墙 D1 的轴力和弯矩受到影响较小,而地下连续墙 D2 的轴力和弯矩变化非常明显,见图 10 所示,所以认为换乘大厅基坑开挖对地下连续墙 D2 的弯矩影响比地下连续墙 D1 大,施工和设计过程中主要考虑换乘大厅基坑开挖对地下连续墙 D2 内力变化的影响,可以忽略换乘大厅基坑开挖对地下连续墙 D1 内力变化的影响。

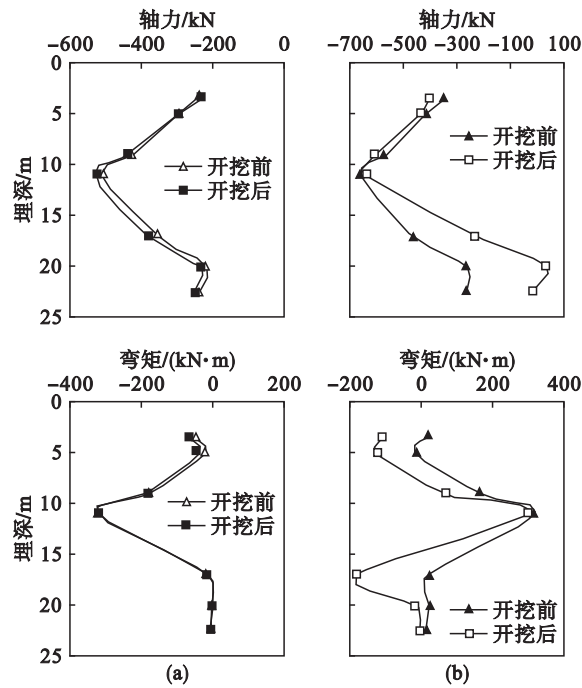


图 10 开挖前后地下连续墙内力变化曲线  
Fig. 10 Inner-forces of diaphragm walls in two steps

(a)—地下连续墙 D1; (b)—地下连续墙 D2.

4 连续墙的安全性分析

根据现场监测计算得到的连续墙内力值,并结合连续墙的截面配筋和规范<sup>[11]</sup>,最后得到连续墙 D1 和 D2 的安全系数(见图 11)。

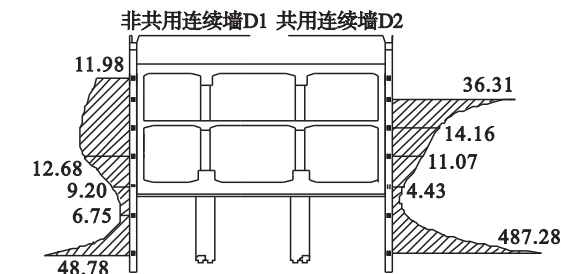


图 11 地下连续墙 D1 和 D2 的安全系数  
Fig. 11 Safety factors of diaphragm walls D1 and D2

连续墙 D2 的最小安全系数为 4.43,D1 的最小安全系数为 6.75,而技术规程<sup>[12]</sup>规定结构安全系数最小值不应小于 2.2,两幅被测连续墙 D1 和 D2 的安全系数均大于规范规定的最小值<sup>[12]</sup>,所以连续墙 D1 和 D2 均处于安全状态。

5 结 论

1) 根据测试数据计算得到被测的连续墙 D1 和 D2 的安全系数均大于规范规定的最小值,所以共用连续墙 D2 和非共用连续墙 D1 是稳定安全的。

2) 现场内力测试及计算得到:共用连续墙受到紧邻基坑的扰动较大,应注意重点监测;而非共用连续墙受紧邻基坑开挖的影响较小,内力没有明显变化.在连续墙的设计过程中,共用连续墙和非共用连续墙宜分开考虑和设计。

3) 本文进行的共用连续墙和非共用连续墙在基坑开挖施工过程中受力的对比分析,可供类似工程参考。

4) 由于埋置在地下连续墙的混凝土应变计已经部分损坏,无法得到部分测点的轴力和弯矩,而数值计算手段可以弥补现场实测的不足;但是数值计算方法未全部考虑施工现场复杂因素,数值计算结果数据小于实测数据.另外二维数值分析未考虑空间效应,为了得到更好的数值模拟结果,以后需要进行三维数值分析。

参考文献:

[ 1 ] Arai Y, Kusakabe O, Murata O, 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 ( 5 ) : 791 - 807.

[ 2 ] Pujades E, Carrera J, Vázquez-Suñé E, et al. Hydraulic characterization of diaphragm walls for cut and cover tunneling [ J ]. *Engineering Geology*, 2012, 125: 1 - 10.

[ 3 ] Tan Y, Wang D L. Structural behaviors of large underground earth-retaining systems in Shanghai. I: unpropped circular diaphragm wall [ J ]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29 ( 2 ) : 5801 - 5814.

[ 4 ] 陈江, 阳军生, 陈思明, 等. 紧邻立交桥的连续墙受力分析和安全性评价 [ J ]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38 ( 3 ) : 12 - 17.

( Chen Jiang, Yang Jun-sheng, Chen Si-ming, et al. Force analysis and security assessment of diaphragm walls adjacent overpasses [ J ]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38 ( 3 ) : 12 - 17. )

- [5] 陈江,阳军生,张学民,等. 共用连续墙结构的现场测试与安全性评价[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(7): 108–112.  
(Chen Jiang, Yang Jun-sheng, Zhang Xue-min, et al. Field measurement and safety evaluation of shared diaphragm wall structure [J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(7):108–112.)
- [6] Chen J, Yang J, Zhang X, et al. Field measurement of stresses of floor slabs in excavations[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2017, 35(1):1–15.
- [7] Chen J, Yang J, Zhang X, et al. Field measurements and design optimization of diaphragm walls [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2016, 40(1):1–10.
- [8] Zhang W G, Goh A T, Zhang Y M. Probabilistic assessment of service ability limit state of diaphragm walls for braced excavation in clays [J]. *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2015, 1(3):0000827.
- [9] 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, 2014.  
(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., 2014.)
- [10] ABAQUS standard user's manual (version 6.13) [R]. [S. l.]: HKS Inc., 2013.
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. 混凝土结构设计规范: GB50010—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.)
- [12] 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.)

(上接第 1176 页)

4) 从试验结果分析来看, 纳米材料并不是掺量越高效果越好, 而是有个最佳掺量. 当 Nano-SiO<sub>2</sub> 的掺量在 0.5% 或 Nano-CaCO<sub>3</sub> 掺量为 2.0% 时, 试件的干缩率相对较小, 此时为最佳掺量.

## 参考文献:

- [1] Rao G A. Long-term drying shrinkage of mortar-influence of silica fume and size of fine aggregate [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(2):171–175.
- [2] 张茂花. 纳米路面混凝土的全寿命性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
(Zhang Mao-hua. Full life performance of nanopavement concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.)
- [3] Persson B. Eight-year exploration of shrinkage in high-performance concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(8):1229–1237.
- [4] 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
(Ordinary concrete mix design procedures: JGJ55—2011 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.)
- [5] Gardner N J, Zhao J W. Creep and shrinkage revisited [J]. *ACI Materials Journal*, 1993, 90(3):236–246.
- [6] Whiting D A, Detwiler R J, Lagergren E. Cracking tendency and drying shrinkage of silic fume concrete for bridge deck application [J]. *ACI Materials Journal*, 2000, 97(1):71–77.
- [7] Mazloom M. Estimating long-term creep and shrinkage of high-strength concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(3):316–326.
- [8] Nassif H, Suksawang N, Mohammed M. Effect of curing methods on early age and drying shrinkage of high-performance concrete [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003, 18:48–58.
- [9] 王宏光. 路用纳米混凝土的干缩与碳化性能[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.  
(Wang Hong-guang. Road shrinkage and carbonation properties of nanoconcrete [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.)
- [10] Bai Y, Darcy F, Basheer P A M. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(9):691–697.