

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.01.011

盾构施工绕穿钟楼方案的优化研究

周远强, 朱才辉, 李 宁

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 西安地铁二号线的修建会不可避免地穿越国家级重点保护文物——西安钟楼。本文以该工程为背景,采取有限元数值分析方法,建立三维有限元模型,模拟了七种不同盾构绕穿钟楼的施工方案。在有加固桩和无加固桩两种工况下,得到了钟楼台基及其周围地表土的沉降规律和钟楼台基应力变化规律。对比分析了钟楼加固前后不同施工方案对钟楼的影响程度,优化了设计施工方案。

关键词: 地铁隧道; 盾构法; 钟楼; 有限元; 方案优化

中图分类号: TV732.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)01-0060-06

Study of the optimization scheme of shield construction passing around the Bell Tower

ZHOU Yuanqiang, ZHU Caihui, LI Ning

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Xi'an metro line two construction inevitably passes through the national key cultural relic—the Bell Tower. Based on the engineering background, the finite element numerical analysis method is adopted to establish the three-dimensional finite element model. Under two conditions of reinforced piles and non reinforced piles, the seven different shield construction schemes underneath passing through the Bell Tower are simulated respectively, according to which the Bell Tower platform and the surrounding surface soil settlement rules and the Bell Tower platform stress variation rules are obtained. Different effects of the seven construction schemes on the Bell Tower are compared and analyzed, with the design and construction scheme optimized.

Key words: Subway tunnel; shield method; Bell Tower; finite element; scheme optimization

近年来,随着地铁在国内大中城市的陆续兴建,城市交通系统得到不断完善,但对历史遗迹众多的文化古城而言,如何处理好地铁施工与文物保护的关系成为我们面临的新问题。对此,国内外已有众多专家学者做了相关研究。雷永生^[1]主要研究了西安地铁二号线的沉降规律;张承容等^[2]研究了不同地铁开挖形成的沉降槽对钟楼的影响;马蒙等^[3]研究了地铁运营震动对钟楼的影响。这些研究主要集中在地铁施工的地表沉降规律^[4-6]、地铁施工方法^[7-8]、地铁修建对周围建筑的影响^[9-11]等方面,而就地铁隧道盾构施工制定不同开挖方案并优化,分析其对古建筑物的影响的研究还很少见。

本文以西安地铁二号线绕穿钟楼工程为例,采用数值分析方法模拟了多种不同盾构施工方案,从钟楼关键监测点的应力和沉降值来分析施工方案对钟楼的影响程度,并对施工方法进行优化,在保证国家重点保护文物安全与稳定的基础上,尽可能节省人力、物力、财力。

1 工程概况

钟楼位于西大街、广济街口东侧的迎祥观内,是典型的明代重檐三滴水四角攒尖木结构建筑,钟楼从地面至金顶通高 36.0 m,面积 1 377.8 m²。其基座为正方形,高 8.6 m,宽 35.5 m,表面由青砖砌成,四面正中各有高 6.0 m、宽 6.0 m 的券形门洞,

收稿日期: 2016-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308456);陕西省科技计划资助项目(2015JM5175);陕西省博士后基金资助项目;陕西省黄土力学与工程重点实验室科研计划资助项目(16JS073)

作者简介: 周远强,男,硕士生,研究方向为岩土工程。E-mail:1392882517@qq.com

通讯作者: 朱才辉,男,副教授,博士,研究方向为黄土力学与工程、隧道工程。E-mail:zhucahui@xaut.edu.cn

与四条大街相互贯穿,并分别与明城墙东、南、西、北四门相接。

西安地铁二号线全长 26.71 km,南北方向穿越西安市的主城区,所以会不可避免地穿过国家级重点保护文物—西安钟楼。为了保护文物古迹,地铁区间隧道从钟楼两侧绕行,左右线距钟楼

台基 15~17m,隧道顶面埋深约 12.8 m,隧道底部埋深约 18 m。地下水稳定水位埋深为 12.7~13.0 m,属潜水层,稳定水位标高约为 395.0 m。施工过程中采用大口井降水^[12]。西安钟楼与地铁二号线的空间关系如图 1 所示。

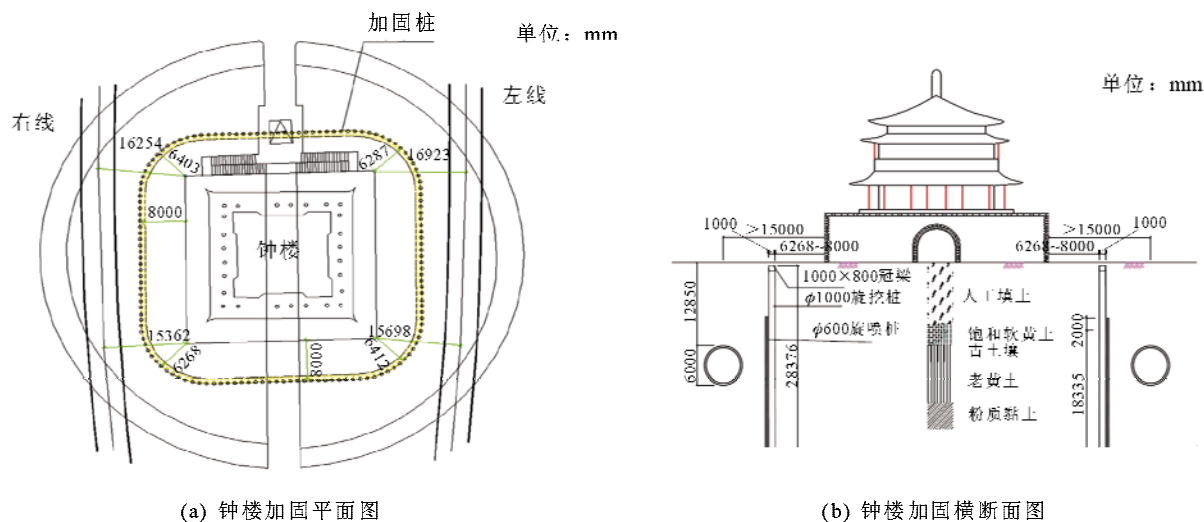


图 1 钟楼加固措施示意图
Fig. 1 Reinforced protection of the Bell Tower

2 研究方案及基本假设

研究方案:在钟楼无加固桩保护和钟楼有加固桩保护两种工况下,分别进行七种不同施工方案的数值模拟分析,得到钟楼关键监测点的应力和沉降值。七种不同盾构开挖方案如表 1 所示。

表 1 研究方案及内容
Tab.1 Research programs

方案编号	方案内容
方案一	地铁隧道左右线同时开挖
方案二	右线比左线超前开挖一倍隧洞直径
方案三	右线比左线超前开挖二倍隧洞直径
方案四	右线比左线超前开挖三倍隧洞直径
方案五	右线比左线超前开挖四倍隧洞直径
方案六	右线比左线超前开挖五倍隧洞直径
方案七	右线隧道先开挖左线隧道后开挖 (实际开挖方案)

对所要建立的模型进行简化,并引入假设:①土体的应力-应变关系符合摩尔库伦模型(M-C模型),土体不考虑固结和蠕变作用,其本身的变形与时间无关;②盾构面的推进是分段连续的;③衬砌与土体之间的间隙用等代层^[18]模拟,并假设等代层应力-

应变关系符合 M-C 模型。④将加固桩简化成地下连续墙;⑤省略钟楼上部木结构,用荷载代替上部结构;⑥新土壤和古土壤合为一个地层。

3 数值模拟及结果分析

3.1 物理力学参数与有限元模型

水泥砂浆抗拉强度为 0.2~0.4 MPa,抗压强度为 10~18 MPa^[10]。地层及其他材料的物理力学参数按照地质勘察资料^[18]选取,具体取值如表 2 所示。三维有限元模型尺寸大小为 135 m×229.5 m×100 m,加固桩与周围土层的接触面用模拟软件 ANSYS 中的接触单元 CONTA174 模拟,如图 2 所示。

3.2 钟楼无加固桩保护工况的数值模拟及分析

由南向北盾构施工,模拟盾构趋近、盾构到达、盾构通过和盾构远离四个阶段。盾构隧道直径 $D=6$ m,为模拟方便,左右线开挖采用 6 m 的开挖进尺。有限元模拟实现步骤为:第一步,开挖盾构隧道土体,用空模型来模拟;第二步,激活相应位置的混凝土管片单元;第三步,钝化第二步激活的管片单元,激活相应位置等代层单元。每个方案有 40 个施工步。

表 2 钟楼地层及其他材料的力学参数表
Tab. 2 Physic mechanical parameters of soil layers and other materials

材料名称	弹性模量 E_0 / (MPa)	泊松比 μ	天然容重 γ / (kN/m ³)	抗剪强度		平均厚度 / m
				c / (kPa)	ϕ / (°)	
钟楼基座青砖	520	0.20	19.0	1500	27	8.66
人工填土	5	0.28	18.2	16	8	9.59
新黄土和古土壤	6	0.30	19.4	17	10	6.75
老黄土	8	0.27	20.0	28	12	6.25
粉质粘土	10	0.27	20.3	22	12	68.75
钟楼地基	5	0.28	18.2	16	8	9.59
加固桩和周围土体	32500	0.20	24.0	—	—	28.40
衬砌	34500	0.20	24.0	—	—	0.30
等代层	5	0.30	19.4	17	10	0.10
桩土界面	—	—	—	12	10	—

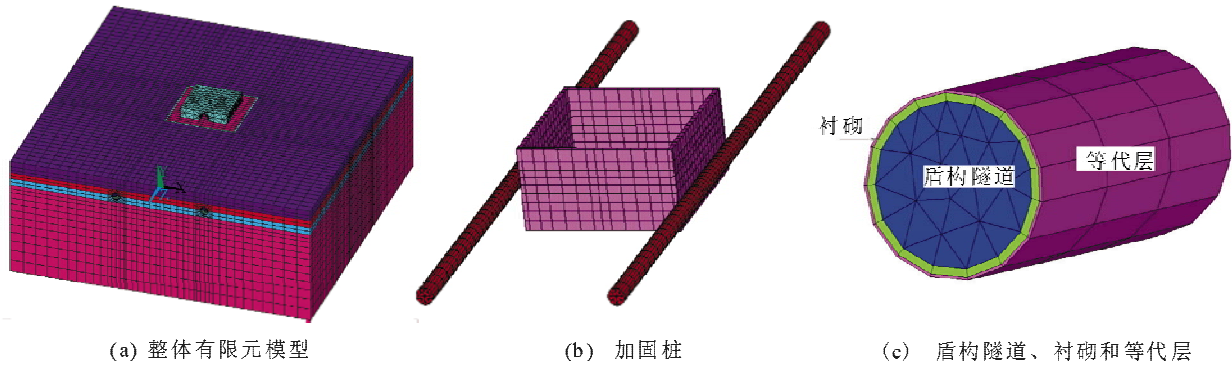


图 2 三维有限元单元模型图

Fig. 2 Three dimensional finite element model

3.2.1 钟楼监测点沉降结果分析

沉降监测点布置在钟楼基座南墙地表(1-1 剖面)处,如图 3 所示。每种开挖方案在施工期间的最大沉降值如图 4 所示。

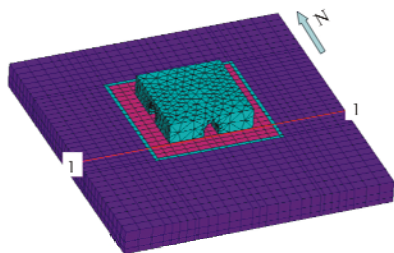


图 3 剖面位置示意图

Fig. 3 The location of sections

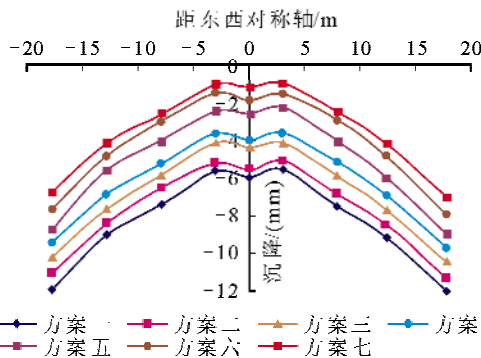


图 4 钟楼南墙基座(1-1 剖面)不同盾构方案下沉降曲线
Fig. 4 Settlement curves of the south wall of the Bell Tower (1-1 section) under different shield schemes

由图 4 可知,在每种方案下,钟楼中轴线左右两侧的沉降基本上都是对称分布的。最大沉降值是 -11.95 mm,两盾构隧道掌子面前后间距越大,则沉降越小。

3.2.2 钟楼监测点应力分析

钟楼南墙监测点布置如图 5 所示。在每种开挖方案下,钟楼台基南墙上各监测点的应力状态如表 3 所示。

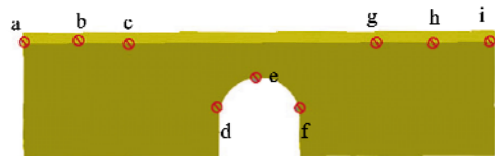


图 5 钟楼南墙立面监测点布置图

Fig. 5 The monitoring points of south wall of the Bell Tower

由表 3 可知,随着左右线隧道掌子面间距的增大,钟楼台基关键部位的拉应力减小。方案一引起的钟楼拉应力值最大,最大拉应力是 0.394 MPa;而方案七引起的拉应力值最小,最大拉应力是 0.220 MPa。

表 3 加固前钟楼基座关键部位监测点在不同施工方案下的应力值

Tab. 3 The values of the key position monitoring points stress of the Bell Tower by different shield methods before reinforced

监测点	监测点应力值/(MPa)						
	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七
a	0.320	0.232	0.122	0.120	0.120	0.097	0.087
b	0.371	0.257	0.244	0.241	0.153	0.147	0.145
c	0.267	0.204	0.171	0.153	0.130	0.118	0.094
d	0.251	0.163	0.103	0.077	0.077	0.053	0.037
e	0.357	0.324	0.247	0.243	0.234	0.231	0.220
f	0.394	0.303	0.243	0.203	0.202	0.193	0.177
g	0.279	0.188	0.135	0.128	0.126	0.078	0.062
h	0.205	0.168	0.108	0.058	0.045	0.042	0.041
i	0.336	0.192	0.132	0.102	0.097	0.082	0.066

3.3 钟楼有加固桩保护工况的数值模拟及分析

隔离排桩设置在盾构隧道和钟楼基础之间,在钟楼基座外围 8 m 左右^[14-15],大桩与小桩相间布置,直径 1m 的桩应为钢筋混凝土灌注桩,桩间距 1.3 m,直径 0.6 m 的桩应为作为止水帷幕的旋喷桩。桩顶加冠梁,尺寸为 1 m×0.8 m(宽×高)。桩尖进入地层下部粉质黏土 2 m,所有的灌注桩被连为整体,通过桩间施工旋喷封闭,跳桩施工,如图 1 所示。

3.3.1 加固后钟楼监测点沉降分析

各施工方案下,钟楼南墙基础的实测沉降曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,不同方案下的数值模拟结果与实测结果均存在一定的差异,实测结果相比数值分析得到的钟楼基座沉降略显平缓。方案七(实际施工方案)模拟的钟楼基座沉降没有超过 4 mm,与实测沉降曲线^[16]的最大沉降 3.10 mm 相差 1 mm 左右,最大局部倾斜为 0.000 2,达到了沉降变形控制标准(最大沉降量不超过 5 mm,局部倾斜不超

过 0.000 5)的要求^[9],模拟结果较好。

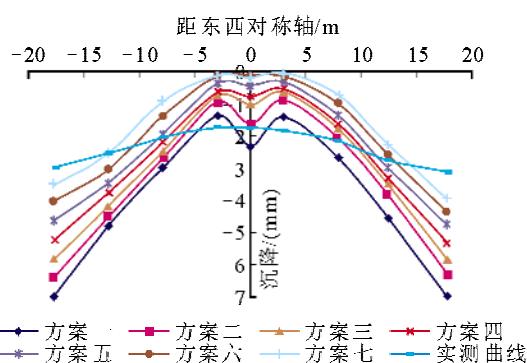


图 6 不同施工方案下钟楼基座基础的实测沉降曲线
Fig. 6 The settlement curves of different construction schemes for the base of the Bell Tower

3.3.2 加固后钟楼监测点应力分析

在每种开挖方案下,钟楼台基南墙上各监测点的最大应力状态及安全性态如表 4 所示。

由表 4 可知,钟楼加固后,监测点应力从方案一至方案七仍呈递减趋势。最大拉应力是 0.187 MPa,小于砂浆极限抗拉强度 0.2 MPa。

表 4 加固后钟楼基座关键部位监测点在不同施工方案下的应力值

Tab. 4 The values of the key position monitoring points stress of the Bell Tower by different shield methods after reinforced

监测点	监测点应力值/(MPa)						
	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七
a	0.112	0.109	0.105	0.104	0.103	0.102	0.102
b	0.142	0.105	0.105	0.057	0.054	0.053	0.052
c	0.069	0.071	0.038	0.035	0.031	0.029	0.027
d	0.090	0.090	0.089	0.087	0.087	0.086	0.086
e	0.187	0.161	0.149	0.136	0.078	0.061	0.060
f	0.130	0.116	0.115	0.112	0.108	0.093	0.091
g	0.051	0.049	0.049	0.048	0.045	0.042	0.041
h	0.027	0.028	0.016	0.014	0.014	0.011	0.008
i	0.143	0.136	0.138	0.101	0.092	0.090	0.085

3.4 钟楼加固前后对比分析

将每种开挖方案下的最大沉降值绘制成沉降曲线,如图 7 所示。将每种开挖方案下的最大拉应力绘制成拉应力曲线,如图 8 所示。

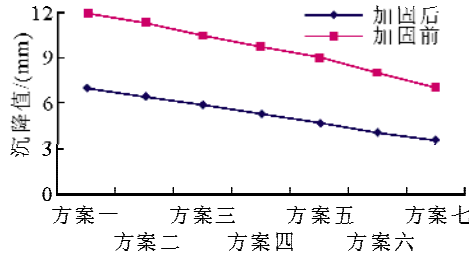


图 7 最大沉降点在不同开挖方案下的沉降曲线

Fig. 7 Settlement curves of the max settlement point by different excavation methods

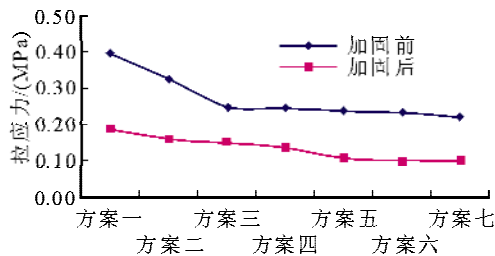


图 8 最大拉应力点在不同开挖方案下的拉应力曲线

Fig. 8 Tensile stress curves of the max settlement point by different excavation methods

对比钟楼加固前后最大监测点的应力和沉降值。由图 7、图 8 可知,加固桩对钟楼的加固效果显著,而且加固效果随左右线隧道掌子面间距的增加而更加明显。图 7 中,七种不同开挖方案下,加固桩使钟楼监测点沉降减少均在 40% 以上,其中方案七使钟楼不均匀沉降减少 49.81%。图 8 中,七种不同开挖方案下,加固桩使钟楼监测点最大拉应力减少均在 39% 以上,其中方案五使钟楼最大拉应力减少 55.84%。

3.5 讨论

随着左右线掌子面间距的增大,钟楼监测点的最大沉降和最大拉应力都在减小。加固后的工况中,方案五、方案六、方案七的沉降均减小 5 mm;方案五中,钟楼最大拉应力减小到 0.108 MPa,方案六和方案七的最大拉应力都是 0.102 MPa。因此,当左右隧道掌子面前后间距超过五倍洞径后,钟楼监测点的最大拉应力随间距增加而减小缓慢,甚至不明显。

在加固工况下,方案五中,钟楼基座最大沉降是 4.64 mm,钟楼最大倾斜是 0.000 22,均未超过国家文物局和文物保护司的要求;最大拉应力是 0.108 MPa,未超过砂浆的极限抗拉强度。

4 结论

本文以西安地铁二号线绕穿钟楼工程为依托,在钟楼无加固桩保护和有加固桩保护两种工况下,分别做了七种不同盾构施工方案绕穿钟楼数值试验,并对钟楼盾构施工方案进行了优化,得出以下几点结论:

1) 数值模拟分析结果表明,随着左右线隧道掌子面前后间距增大,隧道开挖对钟楼的影响逐渐减小。掌子面离钟楼越近,盾构隧道对钟楼的影响越大;当隧道施工恰好经过钟楼南墙时,不均匀沉降最大;

2) 右线比左线超前开挖四倍隧洞直径的盾构方案是本文根据模拟开挖结果分析得到的最佳盾构施工方案。在此方案中,加固后钟楼的最大沉降是 4.64 mm,钟楼的最大倾斜是 0.000 22,钟楼的最大拉应力是 0.108 MPa;

3) 西安地铁二号线绕穿钟楼区间段的实际施工方案是最为安全且对周围环境影响最小的方案,该施工方案略显保守。本文通过数值分析认为:方案五(右线比左线超前开挖四倍隧洞直径)在保证钟楼的安全和对周围环境影响很小的基础上,大大缩短了盾构隧道工期,提高了施工效率。因此,在类似的地铁下穿古建筑工程中,建议考虑本文提出的施工方案。

参考文献:

- [1] 雷永生. 西安地铁二号线下穿城墙及钟楼保护措施研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 223-236.
LEI Yongsheng. Research on protective measures of City Wall and Bell Tower due to underneath crossing Xi'an Metro Line No. 2 [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 223-236.
- [2] 张承客, 李宁. 西安地铁二号线建设对钟楼古建筑影响[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(3): 266-272.
ZHANG Chengke, LI Ning. Influence of Xi'an subway line No. 2 construction on Bell Tower ancient architecture [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(3): 266-272.
- [3] 马蒙, 刘维宁, 丁德云. 地铁列车引起的振动对西安钟楼的影响[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(4): 88-92.
MA Meng, LIU Weining, DING Deyun. Influence of metro train induced vibration on Xi'an Bell Tower [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(4): 88-92.
- [4] 张顶立, 黄俊. 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1703-1707.
ZHANG Dingli, HUANG Jun. Analysis and prediction of vault crown settlement in metro tunneling at shallow depth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1703-1707.
- [5] 朱才辉, 李宁, 柳厚祥, 等. 盾构施工工艺诱发地表沉降规律浅析 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 158-164.
ZHU Caihui, LI Ning, LIU Houxiang, et al. Analysis of ground settlement induced by workmanship of shield tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 158-164.
- [6] 唐益群, 宋永辉, 周念清, 等. 土压平衡盾构在砂性土中施工问题的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 53-56.
TANG Yiqun, SONG Yonghui, ZHOU Nianqing, et al. Experimental research on troubles of EPB shield construction in sandy soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 53-56.
- [7] 周小文, 吴宏伟. 用于估计多隧道开挖地面沉降的解析解 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1703-1710.
ZHOU Xiaowen, WU Hongwei. Analytical solution for estimating surface settlements induced by multiple tunnel excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1703-1710.
- [8] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 755-760.
ZHANG Haibo, YIN Zongze, ZHU Jungao. 3D finite simulation on deformation of soil mass during shield tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 755-760.
- [9] 李宁, 顾强康, 朱才辉, 等. 西安地铁二号线下穿古城墙段地表沉降控制标准研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3751-3763.
LI Ning, GU Qiangkang, ZHU Caihui, et al. Research on ground sedimentation criterion of Xi'an line-2 subway under circumvallation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3751-3763.
- [10] 朱才辉, 李宁. 西安地铁施工诱发地表沉降及对城墙的影响 [J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 538-544.
ZHU Caihui, LI Ning. Ground settlement caused by subway construction in Xi'an and its influence on the city wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 538-544.
- [11] 要创. 西安地铁隧道下穿城墙段盾构施工引起的地表沉降研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
YAO Chuang. Xi'an city wall section of subway tunnel beneath the shield ground settlement due to construction [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [12] 王俊. 西安地铁钟楼站降水方案选择与实施 [J]. 山西建筑, 2011, 37(10): 56-58.
WANG Jun. Dewatering scheme selection and implementation at Xi'an subway Zhonglou station [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(10): 56-58.
- [13] 朱才辉. 西安黄土层地铁盾构施工引起地层变形规律研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
ZHU Caihui. Research on ground settlements induced by subway shield tunnel construction in Xi'an loess strata [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [14] 中铁第一勘察设计院集团公司. 西安市城市快速轨道交通二号线工程区间隧道施工方法专题研究报告 [R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2006.
- [15] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 西安市地铁二号线绕穿钟楼、城墙南门及北门区段文物保护设计方案专题研究报告 [R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2008.
- [16] 张引合. 西安地铁隧道盾构施工诱发的地表沉降规律及其控制技术 [D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
ZHANG Yinhe. Study on the laws of surface subsidence induced by shield construction and control technology of Xi'an subway tunnel [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.

(责任编辑 周 蓓)