

文章编号:1671-8879(2015)04-0089-06

地震作用下大跨地下结构覆土地面动力响应

袁春燕¹, 卢俊龙²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要:为了给大跨地下结构地面上新建建筑的抗震设计提供依据,以某大跨地下拱壳结构工程为对象,采用通用有限元软件 ANSYS,建立大跨地下拱壳结构-上覆土体的数值计算模型,依据结构抗震设防目标及场地条件,输入三向地震波进行地震反应分析。在结构覆土地面沿纵向和横向分别选取代表性节点,提取沿纵向线及沿横向线分布各点的地震反应,分析地面点的位移与应力响应,并结合建筑结构动力特性进行分析。研究结果表明:所建立的地下结构-上覆土体的地震反应分析模型能够反映出结构上覆土地面的动力反应特性;在靠近大跨地下拱壳结构的地面投影中心附近,竖向动力响应较为显著,不宜增建对竖向位移响应较敏感的结构;在综合利用大跨地下拱壳结构上部地面空间时,对地面增建建筑进行抗震设计时,分析结果可为增建建筑抗震分析的地震输入与分析提供理论指导,并为增建建筑位置的选取及结构选型提供依据。

关键词:结构工程;地下结构;拱壳结构;动力响应;地震反应

中图分类号:TU311.3 **文献标志码:**A

Dynamical response of ground covered by soil above the large span underground structure

YUAN Chun-yan¹, LU Jun-long²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: To provide references for the seismic design of a new building on the ground over the large span underground structure, this paper chose a large span underground as the researching subject and established is a numerical model for the underground structure with overlaying soil by using the universal finite element software ANSYS. According to the site conditions and seismic fortification target, a seismic response analysis was conducted with three different directions seismic wave input. By selecting different representative nodes on the ground along the longitudinal and transverse directions over the air defense structure, their responses of displacement and stress were analyzed. The results show that the seismic response analysis model for the underground structure with the overlying soil can reflect the earth dynamic response. Near the projection center of large span underground arch shell structure, the vertical dynamic response is significant and thus structures should not be established when they are sensitive to the vertical displacement. When making comprehensive utilization of the upper floor space on the

收稿日期:2015-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51308455)

作者简介:袁春燕(1977-),女,甘肃金昌人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:yuanchunyan@chd.edu.cn。

large span underground arch shell structure, the effects of underground structure of the new buildings should be considered for the seismic design. The results can provide a theoretical guidance for additional seismic structure analysis and for their location selection and structure selection. 7 figs, 17 refs.

Key words: structural engineering; underground structure; arch shell structure; dynamic response; seismic response

0 引言

地下空间的开发利用是加速中国当前城市化进程的重要途径。同时为了满足城市化进程的飞速发展,部分地下结构工程的地面要求增建各类建筑物,对地面增建建筑进行抗震设计时,应合理确定地震动输入。受地下结构及上覆土的影响,增建建筑结构抗震分析时的地震输入是对其进行抗震设计重要依据之一。

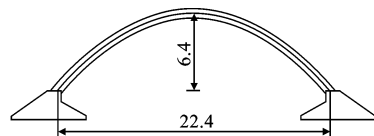
在地下洞室或地下人防工程及其地面建筑结构动力分析的相关研究中,文献[1-2]结合工程算例对人防结构隔震计算及设计的关键问题进行了探讨;文献[3]根据相似条件设计了场地土和单层多跨无梁楼盖人防结构模型,进行振动台模型试验,研究了无梁楼盖人防结构地震破坏机理;文献[4-6]推导了人防结构在地震作用下的运动方程及弹性地基梁的振动方程;文献[7-10]计算了连拱隧道偏压段及洞室群围岩的动力响应,并分析了地震荷载作用下埋深、洞室形状、地应力特征对地下岩体洞室位移特征的影响;文献[11-14]介绍了人防工程在地震作用下的动力反应特性和在地震中可能受到的危害。以上研究以地下结构为研究对象,给出地震作用下地下洞室的动力形式、位移特征及其可能的破坏形式。而采用有限元分析方法,针对地下大跨拱壳结构-上覆土地震反应分析的研究较少,考虑地下大跨结构地面上的空间利用,在利用地面时如何进行新建结构位置选择和结构选型,需要结合大跨拱壳结构-上覆土体的地震反应特性,开展更加细致的分析。

为了深入分析地震作用下大跨地下结构上覆土地面的动力响应,以某大跨地下拱壳结构工程覆土地面的地震响应为例,进一步分析地震作用下地下结构顶部地面的动力响应规律,为地下结构工程的改造设计提供参考。以该大跨拱壳结构工程为对象,输入三向地震波,计算人防-覆土体系的地震反应,通过对比覆土地面不同位置的位移及应力响应,为地下大跨拱壳结构地面增建建筑的抗震设计提供参考。

1 工程概况

某大跨地下拱壳结构工程位于西安市某公园内,为地下一层钢筋混凝土平战结合 5 级人防工程。工程建于 20 世纪 80 年代初期,1997 年曾因地质原因停止使用,2001 年进行过维修,使用至今^[15]。

如图 1 所示,该地下结构形式为落地拱,拱壳两支座间距 22.4 m,拱顶高(跨中矢高)6.4 m,两端为钢筋混凝土基础。



单位: m

图 1 地下拱壳结构几何尺寸

Fig. 1 Dimensions of ground supported arch structure

2 计算模型与参数

按落地拱壳尺寸,并考虑壳体上部回填土的影响,在拱跨度方向将地面土体向两边各延伸 12 m,厚度按该工程实际覆土厚度,拱顶覆土深度为 2.2 m,拱趾覆土深度为 8.6 m。

计算时将拱趾于最底端嵌固,拱体混凝土强度按检测结果取为 C20,其力学参数为:密度 $\rho = 25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,抗压强度 $f_c = 9.6 \text{ MPa}$,抗拉强度 $f_t = 1.1 \text{ MPa}$,弹性模量 $E_c = 2.55 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。上覆土为夯实回填土,计算时弹性模量依据压缩模量测试结果近似取值为 $E_s = 23 \text{ MPa}$ 。

若将地震作用作为外部激励输入地基边界,并对计算范围内土体进行离散,则其动力方程为^[9-10]

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \ddot{u} 、 \dot{u} 、 u 分别为加速度、速度、位移向量; P 为地震激励。

采用大型通用有限元软件计算平台 ANSYS 对落地拱壳建模,拱壳采用弹性 4 节点壳单元,上覆土体采用四面体实体单元,拱壳与土体在接触面上采用节点共用,固定覆土地面各方向的自由度,并保持

覆土侧面及顶面自由。覆土水平方向划分为 10 段,深度方向划分为 2 段,而后进行单元划分^[16-17]。计算模型如图 2 所示。

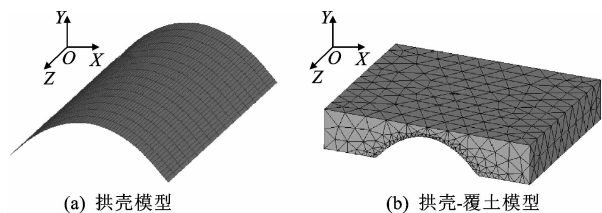


图 2 计算模型
Fig. 2 Calculation model

3 地震波输入

地震波的选取应全面考虑地震动三要素的特征,并反映地震动强度,一般采用直接输入地震反应方程的加速度曲线^[3-5]。研究表明,地下人防结构属地下工程且跨度较大,在地震作用下,竖向地震对其破坏较为显著^[11-13],因而在考虑水平地震作用的同时宜考虑竖向地震作用。为节省计算时间,在地震波输入时仅取强震阶段记录,该工程所在场地为Ⅲ类场地,采用“中国天津(1976)地震记录”,该地震波东西向峰值记录为 7.58 s,南北向为 7.64 s,竖向为 9.03 s。故采用 7~12 s 间的记录,时间间隔 0.01 s。加速度峰值调整方法为

$$\ddot{a}(t) = \frac{\ddot{a}'_{\max}}{\ddot{a}_{\max}} a(t) \quad (2)$$

式中: $\ddot{a}'(t)$ 、 \ddot{a}'_{\max} 分别为调整后的加速度曲线及峰值; $\ddot{a}(t)$ 、 \ddot{a}_{\max} 分别为原记录的加速度曲线及峰值。

按抗震设防烈度进行调幅处理后,在计算中输入。所输地震波东西向、南北向及竖向峰值应出现于 0.58、0.64、2.03 s。

4 计算结果分析

输入地震波进行计算后,分别于拱壳中心线横向及纵向按图 3 所示位置等距选取 6 个节点,分别按图 2 中 X 轴及 Z 轴正向进行编号,提取其位移及应力响应曲线进行分析。

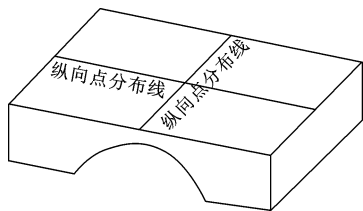


图 3 地面点分布位置
Fig. 3 Locations of nodes on the ground

4.1 沿横向线分布各点地震反应

4.1.1 位移

图 4 为沿横向(X 向)所取各点的位移响应曲线。由图 4(a)、(b)可以看出,横向点 3 在 X 向与 Z 向(沿纵向)的水平位移响应较为接近,而其他各点 X 向的响应略低于 Z 向响应,且与地下拱壳中心线距离越远,2 个方向的位移响应相差越大。

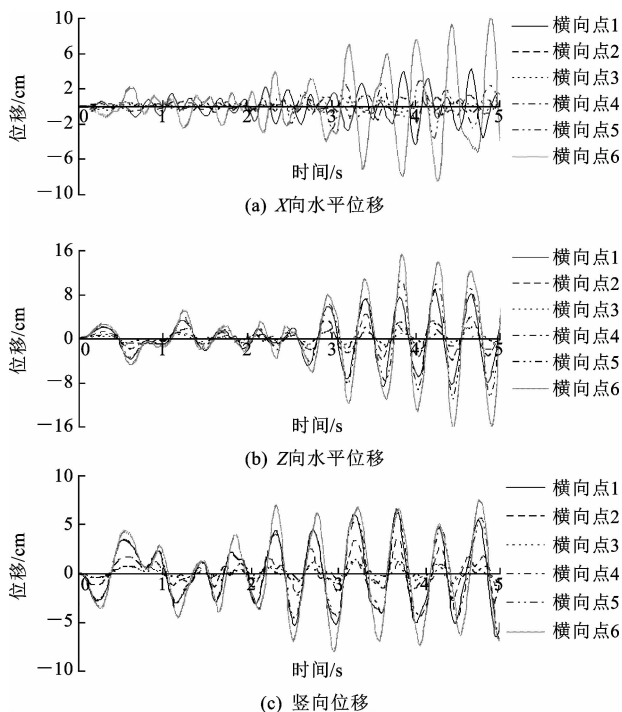


图 4 沿横向各点位移反应
Fig. 4 Displacement response of each point along the transverse direction

同时对比各点的水平位移响应值可以发现,横向点 1 与横向点 6 的位移响应较为接近,而横向点 3 的位移响应最小。

由图 4(c)对比各点的竖向位移响应可以发现,靠近拱壳中心线的响应值显著高于其他点,且其位移响应值与该点的水平位移响应较为接近。

4.1.2 应力

下页图 5 为沿横向各点的应力反应曲线。可以看出,横向点 3 在各向的应力响应值均显著大于其他各点,其中沿 X 向的水平响应与竖向的响应值较为接近。同时,其余各点离中心线越远,水平应力响应有一定的降低,而竖向应力响应则显著降低。

对比沿横向各点的位移与应力响应可以发现,靠近横向中心线附近的点在三向地震作用下的动力响应较为显著,对地震作用的放大效应明显,而靠近拱趾附近点的放大效应则显著降低。

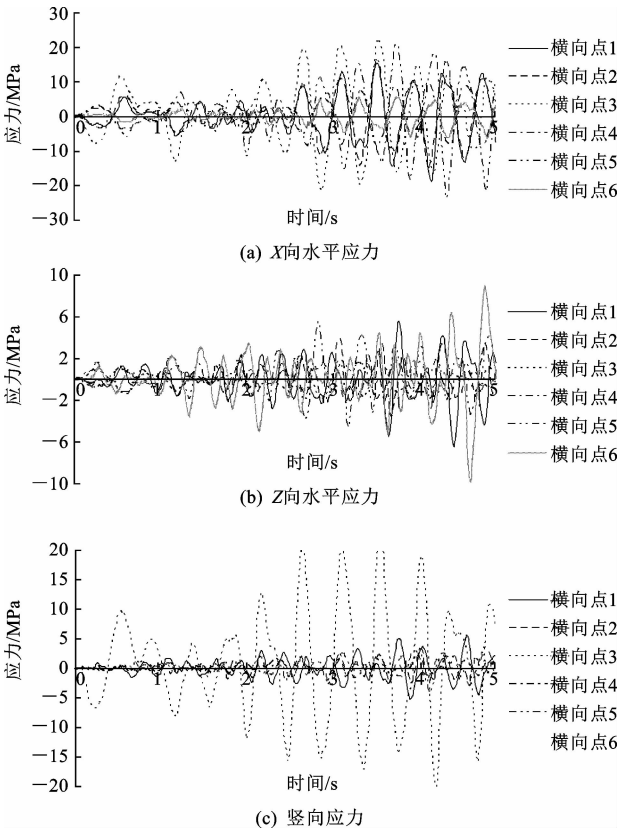


图5 沿横向各点应力反应

Fig. 5 Stress response of each point along the transverse direction

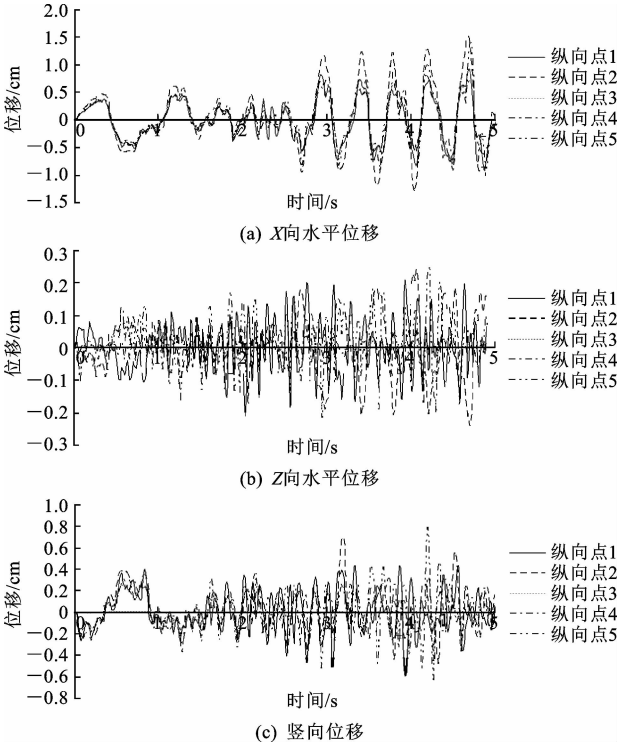


图6 沿纵向各点位移反应

Fig. 6 Displacement response of each point along the longitudinal direction

4.2 沿纵向线分布各点地震反应

4.2.1 位移

图6为沿纵向线分布各点的位移响应曲线。对比分析可以看出,各点在X向位移响应除中心点略高于其他点外,其余点的响应值均较为接近;与沿纵向线分布各点的Z向水平位移相比,响应值较高。同时,各点Z向位移响应的规律为仅在靠近中心点的响应略高于其他各点。

同时对比各点的竖向位移可见,沿纵向靠近中心点时响应显著降低。

4.2.2 应力

图7为各点的应力计算结果。对比分析可以发现,X向水平应力响应显著高于Y向的响应,沿纵向线分布各点中,点1与点5的应力响应较高,点3的应力响应较低。同时可见,各点竖向应力响应低于水平方向的响应。

4.3 地面动力响应分析

综合各位移与应力反应计算结果可以发现,在三向地震作用下,大跨地下拱壳结构覆土地面水平位移沿横向靠近地下拱壳中心线的地面投影时较

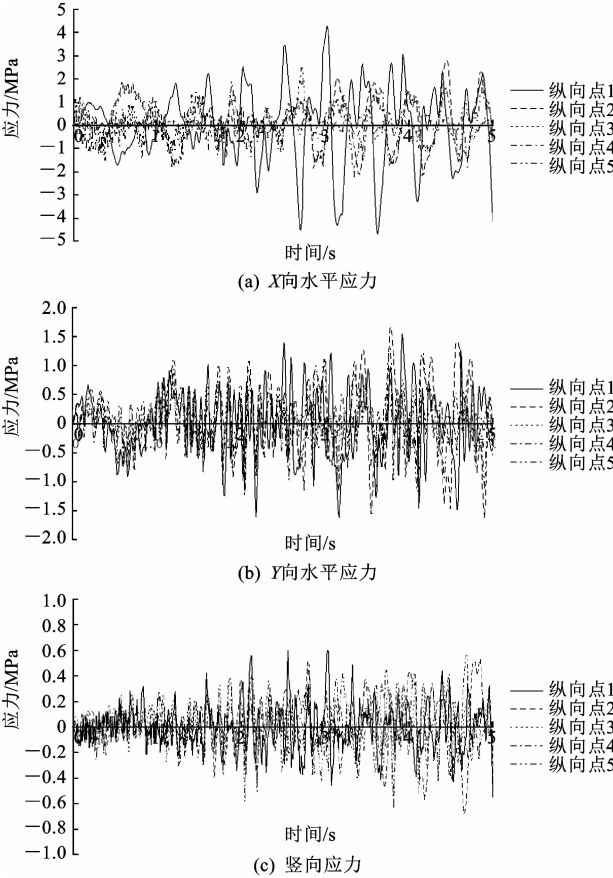


图7 沿纵向各点应力反应

Fig. 7 Stress response of each point along the longitudinal direction

低,而该位置的竖向位移响应较大;各向应力响应均在中心附近较大,随着与中心线距离的增大,水平应力显著降低,而竖向应力则略有降低。沿纵向水平位移在中心位置最大,竖向位移显著降低,且在中心附近应力响应低。

因此,在地震作用下,大跨地下拱壳结构及上覆土体对地震动输入有显著的影响,在靠近地下拱壳结构地面投影中心附近,其竖向位移响应明显。因此,在该区域不宜增建对竖向位移响应较敏感的结构。同时,在地下拱壳结构出入口附近的应力响应较高,在该部位宜对地面建筑的基础进行重点加强。

5 结 语

(1)在地震作用下,靠近拱顶中心位置处沿地下拱壳跨度方向的位移响应较小,而随着与拱顶中心距离的增大,位移响应则逐渐增大。而随着与中心距离的增大,应力响应则逐渐降低,且竖向应力响应降低最为显著。

(2)沿纵向分布中心点的水平位移响应略高于其他各点,而竖向位移在靠近中心点时显著降低,因而沿拱顶轴线方向不宜增建对水平位移敏感的柔性结构;沿纵向线分布距离中心线越远,应力响应增大,且各点竖向应力响应低于水平方向的响应,因而在该区域增建结构时可采用抗剪强度较高的材料。

(3)综合地面点的地震反应分析结果,在靠近大跨地下拱壳结构的地面投影中心附近,竖向动力响应较为显著,故不宜增建对竖向位移响应较敏感的结构。

(4)在综合利用大跨地下拱壳结构上部地面空间时,考虑地下结构及上覆土的结构动力特性,本文分析结果可为地面增建建筑结构抗震分析时的地震输入与分析提供理论参考,为增建结构位置选取和结构选型提供依据。但由于地下大跨拱壳结构的跨度及周边环境差别与复杂性,还需进一步对模型修正,给出更细致的结构动力反应分析结果。

参考文献:

References:

[1] 徐汉中,尹放林,杨文,等.关于人防工程隔震设计的探讨[J].地下空间与工程学报,2014,10(4):933-936.
XU Han-zhong, YIN Fang-lin, YANG Wen, et al. Discussion on design of shock isolation for civil air defence works [J]. Chinese Journal of Underground

Space and Engineering, 2014, 10(4): 933-936. (in Chinese)

- [2] Yiouta-Mitra P, Kouretzis G, Bouckovalas G, et al. Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures [J]. Dynamic Response and Soil Properties, 2007(10): 1-10.
- [3] 陈万祥,郭志昆,叶均华,等.无梁楼盖地震响应的试验研究与破坏机理分析[J].地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 530-537.
CHEN Wan-xiang, GUO Zhi-kun, YE Jun-hua, et al. Shaking table test and failure mechanism of seismic response for slab-column air defense system [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 530-537. (in Chinese)
- [4] 郑杰,戚承志,陈灿寿,等.隧道在纵向地震作用下的动力响应分析[J].解放军理工大学学报:自然科学版, 2014, 15(4): 347-352.
ZHENG Jie, QI Cheng-zhi, CHEN Can-shou, et al. Dynamic response of tunnel under longitudinal seismic action [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 15(4): 347-352. (in Chinese)
- [5] 徐英乾,戚承志,沙曼.纵向剪切地震波作用下非线性地基床系数对地下区间隧道动力响应的影响[J].世界地震工程, 2013, 29(3): 113-120.
XU Ying-qian, QI Cheng-zhi, Saman. Effect of nonlinear foundation bedding coefficient on dynamic response of underground tunnel structures under longitudinal seismic wave [J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 113-120. (in Chinese)
- [6] Chen R, Yao Y, Wang R, et al. Three-dimensional finite element analysis of underground structures' dynamic response in liquefiable soil [J]. Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering, 2014 (5): 572-578.
- [7] Wang M W, Iai S, Tobita T. Seismic performances of underground RC structures in liquefiable soils in nuclear plants [J]. Ground Modification and Seismic Mitigation, 2006(5): 387-394.
- [8] 李静.不同偏压状态下浅埋连拱隧道地震动力响应分析[J].湖南交通科技, 2013, 39(3): 147-151.
LI Jing. Seismic dynamic response analysis on shallow buried arch tunnel under different bias conditions [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2013, 39(3): 147-151. (in Chinese)
- [9] 王如宾,徐卫亚,石崇,等.高地震烈度区岩体地下洞室动力响应分析[J].岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 568-575.

- WANG Ru-bin, XU Wei-ya, SHI Chong, et al. Dynamic response analysis of rock underground caverns in highly seismic region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 568-575. (in Chinese)
- [10] 隋 斌, 朱维申, 李晓静. 地震荷载作用下大型地下洞室群的动态响应模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1877-1882.
- SUI Bin, ZHU Wei-shen, LI Xiao-jing. Simulation on dynamic response of large underground opening complex under seismic loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1877-1882. (in Chinese)
- [11] 于 翔, 赵跃堂, 郭志昆. 人防工程的抗地震问题[J]. 地下空间, 2001, 21(1): 28-32.
- YU Xiang, ZHAO Yue-tang, GUO Zhi-kun. Earthquake-resistant problems in civil defense engineering [J]. Underground Space, 2001, 21(1): 28-32. (in Chinese)
- [12] 李 季, 王国波, 孙 明, 等. 某人防工程地震响应分析与抗震性能评价[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 271-274.
- LI Ji, WANG Guo-bo, SUN Ming, et al. Seismic response analysis on a civil air defense engineering and evaluation on its earthquake resistant capability[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3): 271-274. (in Chinese)
- [13] 戴皓华. 人防地下结构抗震分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- DAI Hao-hua. Seismic analysis of civil air defense underground structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] 徐家云, 戴皓华. 地下结构的抗震分析[J]. 中国水运: 学术版, 2006, 6(10): 55-57.
- XU Jia-yun, DAI Hao-hua. Underground structure earthquake resistance analysis [J]. China Water Transport, 2006, 6(10): 55-57. (in Chinese)
- [15] 叶均如, 罗辉斌. 早期人防工程抗震加固技术探讨[J]. 中国人民防空, 2011(3): 73-74.
- YE Jun-ru, LUO Hui-bin. Strengthening of civil air defense engineering at early stage[J]. People's Air Defense of China, 2011(3): 73-74. (in Chinese)
- [16] Morris J P, Glenn L A, Heuzé F E, et al. Simulations of underground structures subjected to dynamic loading using the distinct element method[J]. Discrete Element Methods, 2002(8): 392-396.
- [17] Zhai E D, Davis C A, Yan L D, et al. Numerical simulations of geotechnical centrifuge modeling of seismic earth pressures on an underground restrained structure[J]. International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering, 2013(12): 369-376.
- (上接第 88 页)
- Chang'an University. Qinling Zhongnanshan tunnel operation ventilation study report [R]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese)
- [12] 西安长大公路工程检测中心. 茅荆坝隧道通风斜井壁面摩阻损失系数检测报告[R]. 西安: 西安长大公路工程检测中心, 2013.
- Xi'an Changda Highway Engineering Test Center. Test report of surface frictional resistant coefficient for Maojingba tunnel [R]. Xi'an: Xi'an Changda Highway Engineering Test Center, 2013. (in Chinese)
- [13] 陈建勋. 隧道工程试验检测技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- CHEN Jian-xun. Tunnel engineering test and inspection technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [14] 陈建勋. 公路隧道运营通风效果现场实测与分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(5): 51-54.
- CHEN Jian-xun. Analysis and field survey about operation ventilation effect of highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(5): 51-54. (in Chinese)
- [15] 王亚琼, 谢永利, 刘洪洲, 等. 海底隧道半横向通风孔物理模型试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 76-82.
- WANG Ya-qiong, XIE Yong-li, LIU Hong-zhou, et al. Physical model experiment on semi-transverse ventilation air inlet and outlet of subsea tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 76-82. (in Chinese)
- [16] JTJ 026.1—1999, 公路隧道通风照明设计规范[S]. JTJ 026.1—1999, Specifications for design of ventilation and lighting of highway tunnel[S]. (in Chinese)