

DOI: 10.11779/CJGE2021S1032

地裂缝对隧道衬砌结构的作用和工程措施

邵 帅¹, 邵生俊^{1,2}, 余芳涛^{1,2}, 李军琪¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 西安地裂缝广泛分布于区域内黄土梁凹交接部位。地裂缝活动经历了发生发展、剧烈活动、缓慢变形及稳定阶段。在确定各地裂缝上、下盘相对沉降位移量的基础上, 提出了地裂缝隧道采用扩大断面和设置变形缝的结构措施, 分析了随着地裂缝上、下盘相对沉降变形的发展, 分缝衬砌结构既产生竖向错动位移, 又产生旋转的运动特征。为了可适应地裂缝活动, 满足地铁运行空间要求, 针对隧道内侧拱腰部位产生拉应力集中分布区域和分缝衬砌结构运动, 提出了沥青混凝土密封变形缝防止地下水渗漏的工程措施, 进行了沥青混凝土密封变形缝的模型试验验证。

关键词: 地裂缝; 沉降位移; 衬砌结构; 旋转运动; 结构措施

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0176-05

作者简介: 邵 帅(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事黄土力学与土动力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

Effect of ground fissures on lining structure of tunnels and engineering measures

SHAO Shuai¹, SHAO Sheng-jun^{1,2}, SHE Fang-tao^{1,2}, LI Jun-qi¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Under the influences of tectonic movement and groundwater change, the fissures in Xi'an area are widely distributed at the concave junction of loess beam. The monitoring results of ground fissure movement show that the ground fissure movement has experienced the stage of development, violent activity, slow deformation and stability. On the basis of determining the relative settlement displacement of the upper and lower discs of the fissure movement, the structural measures of the tunnel with ground fissures adopting the expansion section and setting the deformation joints are put forward. With the development of the relative settlement deformation of the upper and lower plates of ground fissures, the lining structure of joints produces vertical staggered displacement and rotational motion characteristics. In order to adapt to the displacement of ground fissures and to meet the requirements of subway operation space, the concentrated distribution area of tensile stress and the movement of lining structure of joints are produced in the inner arch waist of tunnel. The engineering measures of asphalt concrete sealing deformation joints to prevent groundwater leakage are put forward.

Key words: ground fissure; settlement displacement; lining structure; rotational motion; structural measure

0 引言

西安地裂缝是20世纪50年代后期发现的, 引起了人们的关注。1976年唐山地震后, 西安地裂缝显著活动引起建筑物不均匀沉降而破坏。地质、工程界的研究, 明确了西安地裂缝是地质构造运动而产生的认识^[1-2]。20世纪80年代以来, 进一步开展了西安地裂缝的原因、分布及活动规律的调查、监测研究, 初步确定了其成因受南侧临潼-长安大断裂控制^[2-5]。近年来, 西安地裂缝活动加剧不仅受到周围地区地震作用影响, 且与西安地区过量开采承压水产生相关。通过对西安地裂缝造成现有建(构)筑物破坏特征分析, 地裂缝致灾机理是地裂缝上盘下沉, 从而引起不均匀沉

降、拉裂和错动位移, 进而导致建筑物、地下洞室裂开和坍塌, 路基、管道错动和断裂。同时, 地表水沿地裂缝入渗和潜蚀, 引起黄土湿陷不均匀沉降变形, 对建(构)筑物造成二次破坏。西安地裂缝带来的危害性不仅体现在对于各类建(构)筑物生产建设的直接破坏, 还会对工程场地土的性质与工程稳定性产生严重影响。从而严重地限制了建筑场地的使用, 影响城市建设的合理布局^[6-7,9-10]。

对于这一特殊地质环境下的地铁隧道, 特别是横

穿地裂缝的隧道结构, 衬砌结构沿纵向将承受比正常情况下大得多的附加应力和变形。附加作用表现为: ①在地裂缝附近, 上盘地层错动下沉可能脱空衬砌结构仰拱基底, 或减小基底对衬砌结构的支撑作用, 导致隧道衬砌发生剪切破坏; ②地裂缝下盘对衬砌结构的约束作用, 导致地裂缝附近衬砌结构承受拉应力; ③上盘土体向下运动, 引起该侧隧道结构变形, 相当于弹性地基梁一端发生沉降的弯曲变形; ④衬砌结构受地裂缝两侧土体的相运动, 对隧道衬砌施加向下的作用力, 引起隧道结构出现拉裂变形^[6,8]。地裂缝隧道设计了衬砌结构位移的预留空间^[11]。由此可见, 未采取措施的地裂缝隧道可能引起衬砌结构强度破坏和防水失效, 不能保证正常运营。

为了揭示地裂缝隧道的力学特征和变形形态, 需要分析地裂缝的产状和运动特征, 以及地裂缝活动对衬砌结构的作用等。

1 西安地裂缝分布与运动特征

西安地裂缝包括有显露地裂缝与隐伏地裂缝, 是典型的黄土地区地质灾害现象。目前已发现 14 条地裂缝总延伸长度约 103 km, 分布在 150 km²的黄土梁洼地貌范围内, 单条地裂缝出露长度在 2~12 km 之间。其主要位于渭河断裂以南, 临潼—长安断裂以北, 向东西两侧(浐河至皂河)延伸。西安地裂缝由主裂缝、次生地裂缝和分枝地裂缝三部分组成, 总体走向近似平行于临潼—长安断裂; 总体倾向近似与临潼—长安断裂倾向相反, 倾角约 80°。西安地裂缝延伸长度可达数公里至十数公里, 空间上呈不等间距平行排列, 其分布范围内的地表由北向南呈逐渐升高的梁-洼地貌景观, 如图 1, 2 所示^[5]。

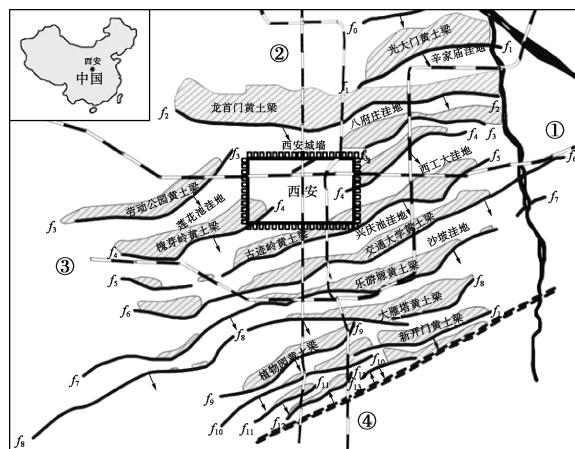


图 1 西安地裂缝分布平面图^[8]

Fig. 1 Distribution of ground fissures in Xi'an^[8]

地裂缝大都发育在“黄土梁”地貌的南侧陡坡上这一特定地貌构造部位。其垂直位移单向累积, 断距随深度的增大而增大。地裂缝发育剖面如图 3

所示。

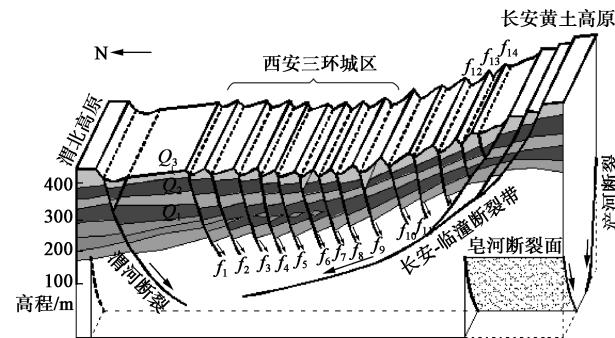
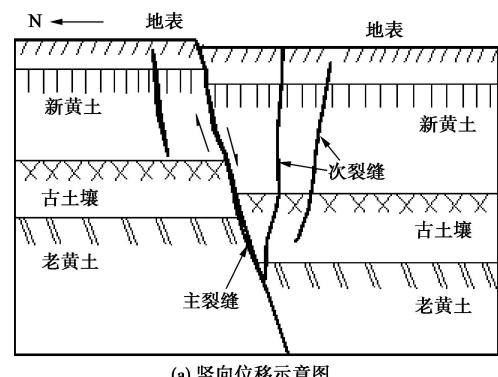
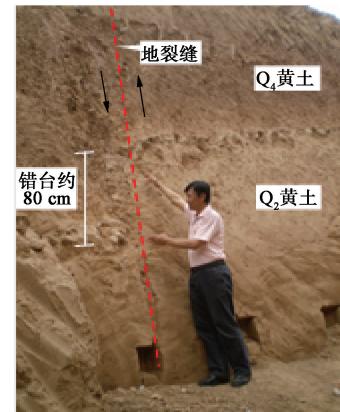


图 2 西安地裂缝南北走向地层剖面图

Fig. 2 Stratigraphic profile of north-south direction of ground fissures in Xi'an



(a) 坚向位移示意图



(b) 地质剖面地层不连续错位

图 3 西安地裂缝引起的地层错位示意图

Fig. 3 Stratum dislocation caused by ground fissures in Xi'an

2 西安地铁隧道穿越地裂缝的设计

2.1 地裂缝最大竖向预估位移量

西安地裂缝的发展经历了从发生阶段发展至剧烈活动到成熟阶段, 随后缓慢变形直至稳定这一过程。地裂缝的最大位移估算如表 1 所示。

2.2 地裂缝区间隧道结构设计

地铁隧道穿越地裂缝不可避免, 应遵从以下原则: 以结构措施适应变形为主前提下, 在地裂缝处理段需对结构进行分段预留必要的变形空间适应地裂缝的

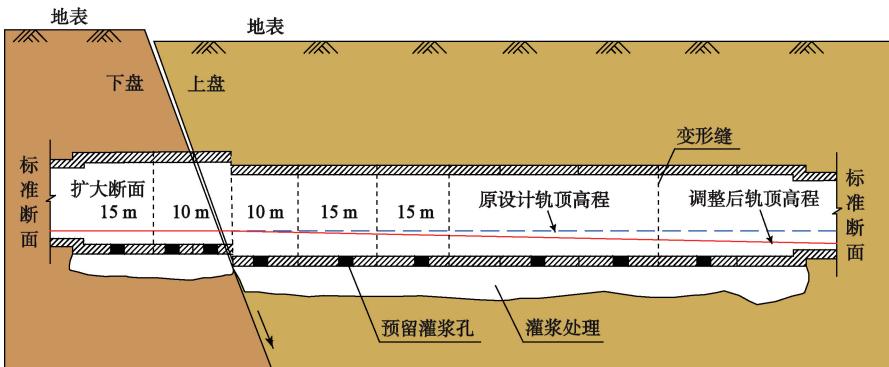


图4 变形缝设置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of setting of deformation joints

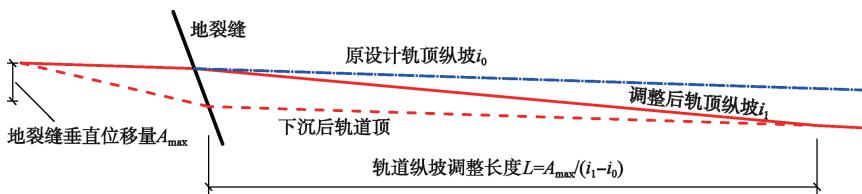


图5 地裂缝隧道纵坡调整示意图

Fig. 5 Schematic diagram of longitudinal slope adjustment of tunnel with ground fissures

表1 西安地裂缝最大垂直预估位移量^[8]

Table 1 Maximum predicted vertical displacements of ground fissures (mm)

| 地裂缝编号 | A(预估极限值) | $A \times 1.5$ (设计值) | 地裂缝编号 | A(预估极限值) | $A \times 1.5$ (设计值) |
|--------|----------|----------------------|--------|----------|----------------------|
| f2 | 200 | 300 | f8 | 100 | 150 |
| f3 | 150 | 225 | f10 | 150 | 225 |
| f5 | 300 | 450 | f11 | 300 | 450 |
| f6/f6' | 300(200) | 450(300) | f9/f9' | 300(250) | 450(375) |
| f7 | 300 | 450 | f12 | 100 | 150 |

变形;加强断面结构抵抗变形对结构的破坏;变形缝处在结构发生变形时应当能够保持防水的效果。地裂缝活动主变形区范围根据地裂缝活动引起附近地层的活动变形范围确定为:上盘0~6 m,下盘0~4 m;微变形区上盘6~20 m,下盘4~15 m。上盘变形影响范围大于下盘。隧道衬砌结构为了适应地裂缝活动的变形应在地裂缝处应设置变形缝^[6,8]。如4,5所示。

3 地裂缝隧道的数值分析

3.1 地裂缝隧道衬砌结构及地层条件的模型

西安地铁二号线地裂缝区段隧道一般采用马蹄形隧道断面,以正交穿越地裂缝的地铁2号线为分析对象,地裂缝区间隧道采用CRD开挖方法,最大断面净空宽为8.3 m,高为8.45 m;初衬为C25喷射混凝土,厚30 cm;二衬为C30模注钢筋混凝土,厚50 cm。衬砌结构沿纵向每10 m或15 m预设10 cm宽的变形缝,充填密封防渗材料封闭变形缝。以便衬砌结构适应地裂缝上下盘土体相对运动,避免衬砌结构附加拉

应力,防止基底出现脱空现象。并且在衬砌结构端部局部加厚以便适应可能出现的应力集中现象。

西安地铁地裂缝隧道通过FLAC-3D有限差分软件建立了计算模型。计算模型隧道埋深为10 m,横断面内水平向宽度为80 m,竖向高度为60 m,轴向长度为200 m。模拟地层埋深0~7.5 m为晚更新世风积黄土,埋深7.5~25.5 m为晚更新世粉质黏土及古土壤层,埋深25.5~30.5 m为中更新世黄土及古土壤层,以及埋深30.5 m以下为中更新世粉质黏土。地裂缝采用库仑摩擦接触面模拟;应力应变关系采用莫尔-库仑屈服条件的弹塑性模型描述;地层及二次衬砌结构采用实体单元模拟;初期衬砌结构采用壳单元模拟。

在地裂缝活动导致自由场地地面不均匀沉降如图6所示条件下,衬砌结构错动位移如图7,8和图9所示。衬砌结构变形缝最大挤压变形为3.6 cm,位于地裂缝处变形缝两侧衬砌拱底;最大张拉变形为5.7 cm,位于上盘内邻近地裂缝衬砌结构变形缝的拱底处。衬砌结构变形缝预留10 cm,满足最大挤压变形的要求。衬砌结构大、小主应力如图10,11所示。大主应力受

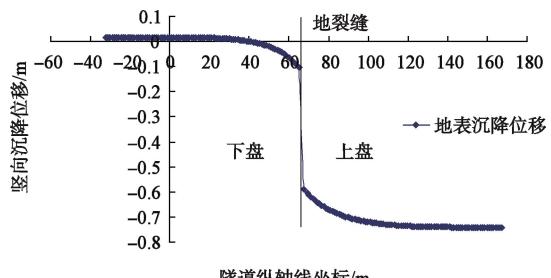


图6 地裂缝自由场地地表沉降

Fig. 6 Surface settlements of free site under acting ground fissures

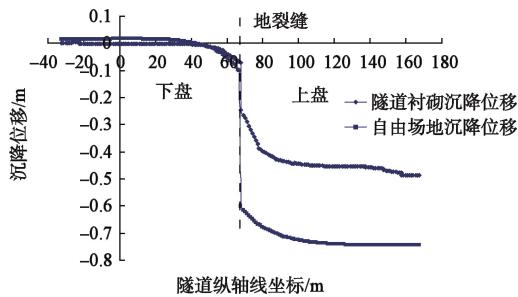


图 7 隧道衬砌拱顶纵轴线沉降分布曲线

Fig. 7 Distribution of settlement at arch of lining structure and on surface

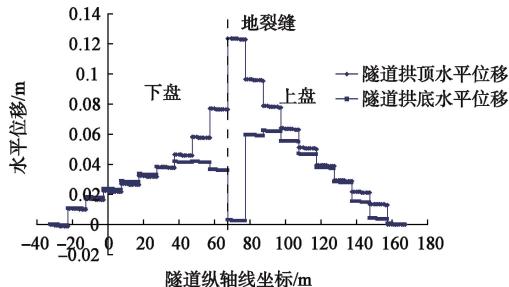


图 8 隧道衬砌结构顶、底水平位移分布曲线

Fig. 8 Distribution of horizontal displacement at vault and arch bottom of lining structure along axial direction of tunnel

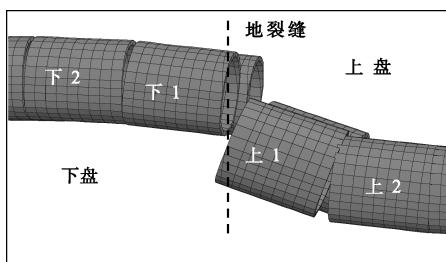


图 9 地裂缝附近隧道衬砌结构变位示意图

Fig. 9 Differential settlements of segmented lining near ground fissures

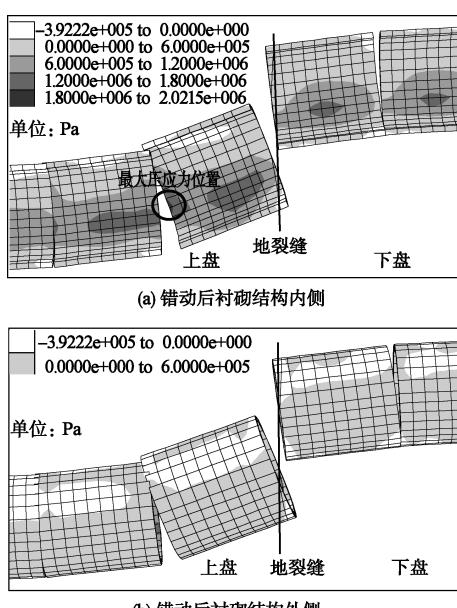
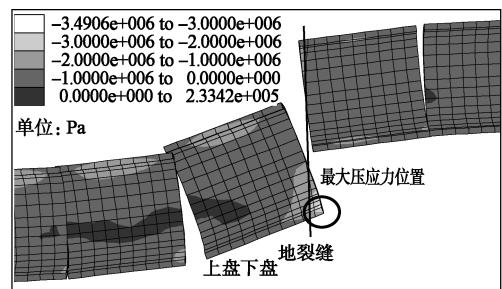
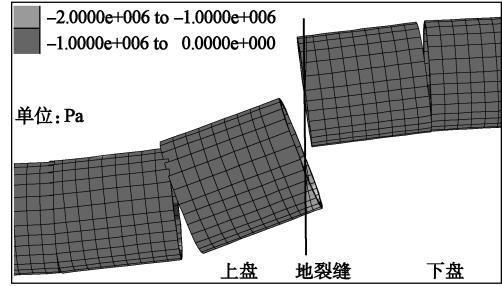


图 10 衬砌结构大主应力

Fig. 10 Major principal stresses of linings



(a) 错动后衬砌结构内侧



(b) 错动后衬砌结构外侧

图 11 衬砌结构小主应力

Fig. 11 Minor principal stresses of linings

拉的集中区域主要分布在衬砌结构内侧腰部, 最大值为 2.02 MPa; 小主应力受拉的区域也分布于此。地裂缝两侧衬砌结构内侧腰部受拉, 应进行加强处理。隧道衬砌结构采用 C30 混凝土, 其抗压强度为 30 MPa, 抗拉强度为 2.01 MPa, 添加钢纤维可满足受拉的强度要求。

4 地裂缝隧道结构与轨道工程措施

在地裂缝区间段隧道运行 100 a 后, 地裂缝会导致隧道下沉 500 mm。为保证隧道具有列车运行的空间, 在隧道截面扩构段, 二衬结构加大截面厚度及增加配筋, 提高纵向分布筋直径及间距的方法抵抗扭转、剪切对结构的影响。地裂缝隧道段的初期支护和内衬之间增设沥青混凝土复合衬砌, 在初期支护和二次衬砌之间形成夹层, 利用沥青混凝土特有的延展性、流变性, 密封衬砌结构变形缝。随着地裂缝活动, 沥青混凝土在围岩压力作用下沿侧向产生挤出变形, 从围岩压力大的部位向围岩压力小的部位流动, 使得围岩压力趋于均匀化。当地裂缝活动导致衬砌结构错动变形时, 沥青混凝土易产生流变剪切变形, 适应衬砌结构变形缝的变化, 可发挥其防渗能力。沥青混凝土变形缝构造与变形模型试验结果如图 12, 13 所示。

5 结 论

(1) 西安临潼—长安断裂带是地裂缝产生的构造活动, 过量开采承压水产生不均匀沉降是地裂缝发展的附加作用。准确预测地裂缝的位移量, 是地裂缝隧道结构设计的重要依据。

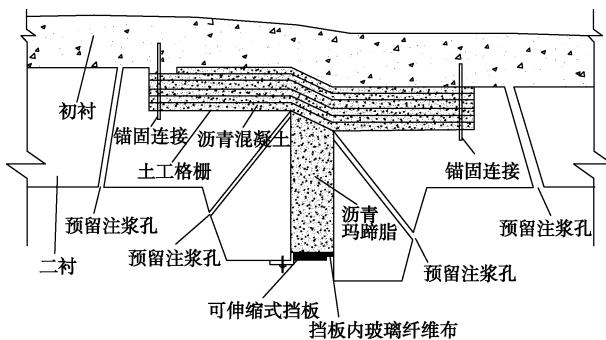


图 12 加筋沥青混凝土防渗变形缝结构

Fig. 12 Scheme of reinforced asphalt concrete and anti-seepage deformation joint structure



图 13 沥青混凝土变形模型试验

Fig. 13 Model tests on deformation of asphalt concrete

(2) 西安地铁二号线地裂缝影响段 65 m 设变形缝, 在地裂缝影响范围内, 主变形段通常占地裂缝 80% ~ 90% 的总垂直位移量, 是主要的设防区, 按 10 m 进行隧道分段。微变形段垂直位移量仅占 10% ~ 20% 的总位移量, 按 10 ~ 15 m 进行隧道分段。

(3) 地裂缝隧道结构应采取衬砌结构适应地裂缝变形的原则。在地裂缝处理段需对结构进行分段, 预留必要的变形空间作为变形缝以适应地裂缝的变形。加强变形缝断面的结构, 以便满足抵抗变形对结构破坏的要求。

(4) 衬砌结构内侧拱腰分布拉应力集中区, 需提高衬砌结构混凝土的抗拉强度。采取加筋沥青混凝土复合衬砌及沥青玛蹄脂填充变形缝处理, 可改善衬砌结构受力条件, 密封衬砌结构变形缝, 保持防水的效果。

参考文献:

[1] 陕西省建设厅. 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程 DBJ61—6—2006 [S]. 2005. (The Construction Department of Shaanxi Province. Specification for Site Investigation and Engineering Design on Xi'an Ground Fractures (DBJ61-6-2006) [S]. 2005. (in Chinese))

- [2] 张家明. 西安地裂缝研究 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1990. (Zhang Jia-ming. Research on Xi'an ground fractures [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990. (in Chinese))
- [3] 王六桥, 李善因. 地下水位变化引起地面形变的可能机制 [J]. 地震学报, 1984, 6(2): 203–210. (WANG Liu-qiao, LI Shan-yin. Possible mechanism of ground surface deformation caused by ground water level changes [J]. Acta Seismologica Sinica, 1984, 6(2): 203–210. (in Chinese))
- [4] 易学发. 西安市地面不均匀沉降及地裂缝成因的讨论 [J]. 地震, 1984 (6): 50–54. (YI Xue-fa. Research on the asymmetry ground substance and the cause of ground fissure in Xi'an [J]. Earthquake, 1984(6): 50–54. (in Chinese))
- [5] 彭建兵. 西安地裂缝灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. (PENG Jian-bing. Xi'an Ground Fissure Disaster [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2012. (in Chinese))
- [6] 长安大学. 西安市城市快速轨道交通二号线详细勘察阶段沿线地裂缝勘察报告 [R]. 西安: 长安大学, 2007. (Chang'an University. Survey Report on Ground Fractures Along Subway Tunnel No. 2 of Xi'an in the Detailed Investigation Stage [R]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))
- [7] 马广超. 西安地裂缝对地下排水管道的破坏及防治 [J]. 灾害学, 2005, 20 (3): 108–111. (MA Guang-chao. The Damages to Underground Drainage Pipelines Caused by Ground Fissures in Xi'an [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(3): 108–111. (in Chinese))
- [8] 铁道第一勘察设计研究院. 西安市城市快速轨道交通二号线地裂缝区间初步设计 [R]. 西安: 铁道第一勘察设计研究院, 2007. (Chinese First Railway Reconnaissance Design Institute. Preliminary Design of Subway Tunnel No. 2 Cross Through the Ground Fissure Belt of Xi'an [R]. Xi'an: Chinese First Railway Reconnaissance Design Institute, 2007. (in Chinese))
- [9] LEE C F, ZHANG J M, ZHANG Y X, Evolution and origin of the ground fissures in Xian, China [J]. Engineering Geology, 1996(43): 45–55.
- [10] LI You-li, YANG Jing-chun, HU Xiao-meng. Origin of ground fissures in the Shanxi Graben System, Northern China [J]. Engineering Geology, 2000(55): 267–275.
- [11] 黄强兵, 彭建兵, 王启耀, 等. 地铁隧道穿越地裂缝带的结构抗裂预留位移量 [J]. 2010, 29(增刊1): 2669–2675. (HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, WANG Qi-yao, et al. Reserved displacements for anti-crack design of metro tunnel passing through active ground fissure zones [J]. 2010, 29(S1): 2669–2675. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)