

# 西安地铁工程中的地裂缝地质问题

李忠生<sup>1</sup>, 宋彦辉<sup>1</sup>, 高虎艳<sup>2</sup>, 杨智国<sup>3</sup>, 程 耀<sup>1</sup>, 丛 璐<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710016;  
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**针对西安市主城区外围地铁线路多处于地裂缝研究空白区的实际问题,采用人工地震勘探与钻探方法研究查找地裂缝,为地铁线路穿越地裂缝的设防提供基础资料,其中人工地震勘探方法主要是从地下数百米深度范围内对地裂缝异常进行定性判断,划定异常区;钻探方法则通过分析近地表数十米深度内地层的连续性来定量判断是否存在地裂缝。研究结果表明:在西安东郊浐河、灞河一级阶地,可将厚度较大、连续性较好的中更新统砂卵石层作为判断是否存在地裂缝的标志层,该层埋藏深度一般为30~60 m,地层错断8~10 m,钻探深度一般70~80 m可满足要求;对于西安西南郊皂河、沣河一级阶地,地层结构复杂,沉积韵律差,缺少具有一定厚度且连续分布的标志层;采用大吨位震源车的人工地震勘探技术与勘探异常部位钻探验证相结合的方法,可有效识别地裂缝异常。

**关键词:**土木工程;西安地裂缝;西安地铁;地裂缝场地;长安地裂缝;临潼—长安断裂带;标志层  
**中图分类号:**P642 **文献标志码:**A

## Geological study on ground fissures in Xi'an metro engineering

LI Zhong-sheng<sup>1</sup>, SONG Yan-hui<sup>1</sup>, GAO Hu-yan<sup>2</sup>, YANG Zhi-guo<sup>3</sup>, CHENG Yao<sup>1</sup>, CONG Lu<sup>1</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geometrics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
2. Xi'an Metro Co Ltd, Xi'an 710016, Shaanxi, China; 3. China Railway First Survey &  
Design Institute Group Co Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Ground fissures distribution near Xi'an metro lines is unknown outside the main urban areas. In order to provide basic data for metro line passing through ground fissures, drilling and seismic exploration methods were employed to study and find out the ground fissures. Seismic exploration method can give qualitative judgment of ground fissure anomalies in the range of hundreds of meters under ground, and delimit anomalous area. While drilling method may quantitatively determine the existence of ground fissures through the analysis of stratum continuity in the range of tens of meters under surface. The results show that in the east suburb, first terrace area of Chanhe River and Bahe River, an uninterrupted thick Middle Pleistocene gravel stratum, buried at the depth of 30-60 m, with faulted stratum 8-10 m, can be referred to symbolic layer. The depth of borehole set at 70-80 m can meet the requirements for locating ground fissures. In the southwest, suburb first terrace area of Zaohe River and Fenghe River, however, because strata have structure complexity and poor sedimentary rhythm, and is lack of a thick and continuous symbolic layer. In order to overcome the problem, seismic exploration with large tonnage vibrator vehicle technology should be adopted. For the seismic explorative anomaly, some boreholes should be arranged to identify

ground fissure effectively. 1 tab, 7 figs, 15 refs.

**Key words:** civil engineering; Xi'an ground fissure; Xi'an metro; ground fissure site; Chang'an ground fissure; Lintong-Chang'an fault zone; symbolic layer

0 引言

在西安地铁建设中,3 个特殊技术难题之一的西安地裂缝直接影响地铁的线位走向、敷设方式及施工工法等,需在地铁建设前期得到解决。西安地裂缝是一种特殊的地质灾害,所到之处,建筑物毁坏、管线断裂、道路破损,给西安城市建设、工农业生产和人民群众带来极大的危害,已造成的直接经济损失逾 50 亿元。众多学者对这些地裂缝的分布特征、成因机理、活动规律等诸多方面进行了深入分析和探讨,取得了一系列的科研成果<sup>[1-9]</sup>。现已查明西安地裂缝的主要特征有:①总体走向北东,近似平行于西安临潼—长安断裂,平面呈不等间距近似平行形态排列,且连续性好,最大延伸长度可达数十千米;②具有构造断裂特征,且断裂两侧地层断距随深度增加而加大;③活动方式为蠕动,活动速率与西安地区过量抽汲地下深部承压水有很强的相关性。

自 2006 年西安地铁开始建设以来,本课题组先后承担完成了《西安市快速轨道交通建设规划》(2006~2018)一号线至六号线等地铁轨道交通的西安地裂缝研究工作,完成了大量的钻探及物探工作,取得了丰富的第一手资料,工作区域不仅覆盖了已知西安地裂缝区域,而且更大量的工作是在主城区外围地裂缝研究空白区。为此,本文在这些工作成果的基础上,对西安地铁工程中的地裂缝地质状态及存在问题进行阐述与分析。

1 西安地铁工程与西安地裂缝

自 1959 年西安发现首条地裂缝以来,目前已确认的西安地裂缝至少有 14 条,这些地裂缝以相互近似平行的方式,呈西南—东北向展布,像一张大网罩在西安城区(图 1)。地裂缝灾害使得西安城区土地利用受到极大限制,各种新建的建构筑物均须按有关规定进行避让。

按西安新一轮地铁建设规划,至 2018 年,除目前通车运营的一号线、二号线外,还将建成一号线西延段、三号线、四号线、五号线和六号线等,基本形成主城区地下交通网络,如图 1 所示。西安地铁线路由于属长距离的线状工程,无法像单体建筑物那样避开地裂缝,所以只能采取各种必要的技术设防措

施进行穿越。根据已掌握的相关资料,西安各条地铁线路穿越地裂缝次数如表 1 所示。

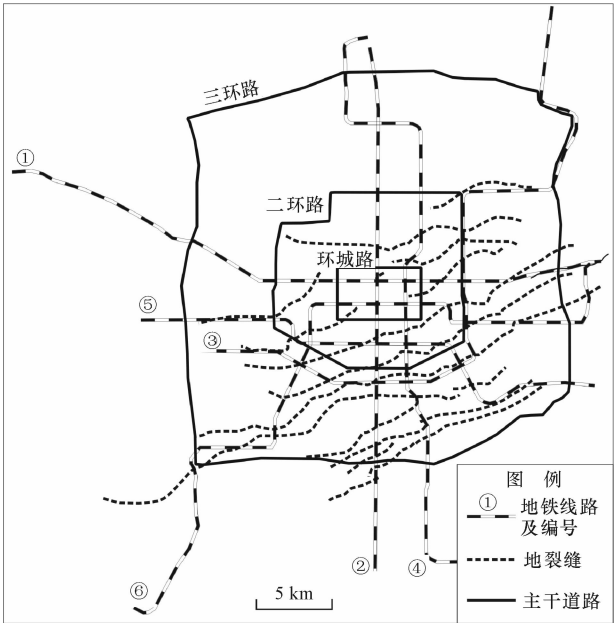


图 1 西安市城市轨道交通规划及西安地裂缝位置  
Fig. 1 Xi'an city rail transportation planning and Xi'an ground fissures

表 1 西安地铁穿越地裂缝次数

Tab. 1 Times of Xi'an metro passing through ground fissures

地铁线路	线路总体走向	穿越次数/次
一号线	东西向	8
二号线	南北向	15
三号线	南西—北东向	15
四号线	南北向	13
五号线	北西—南东向	9
六号线	南西—北东向	24

在地铁线路穿越地裂缝时,地裂缝的位置,特别是处于隐伏状态的地裂缝位置,是地铁穿越地裂缝段设计施工的必要参数,这也是本课题组要解决的主要问题。

2 地铁建设的西安地裂缝地质问题

西安地裂缝是一个狭义的概念,文献[10]将其限定为“临潼—长安断裂带  $F_N$  西北侧(上盘)一组北东走向的隐伏地裂缝出现活动,在地表形成的破裂,习惯上把在地表出露的地裂缝和未在地表出露的地裂缝统称为地裂缝或西安地裂缝”。由此可见,西安地

裂缝不仅包括在地表出露的“显性”破裂,也包括未活动到地表呈“隐伏”状态的地下断裂。显然,已出现或曾经出现过地表破裂地裂缝的准确位置和走向,可通过地面工程地质调查、资料收集及少量的挖探等工作得到确定。然而,对于隐伏地裂缝,由于地表没有变形破坏迹象,也没有对建(构)筑物等造成明显损坏,其位置和走向的确定就成为地裂缝研究的重点和难点。为方便不同情况下的地裂缝勘察研究,将地裂缝场地划分为3种类型<sup>[10]</sup>:一类场地是指地裂缝已造成地表明显破裂且其与错断上更新统或中更新统的隐伏地裂缝位置相对应;二类场地是指地表无破裂迹象但场地内埋藏有上更新统或中更新统红褐色古土壤;三类场地是指不符合一、二类勘探场地的所有其他场地。在上述3种类型场地中,一类场地可通过宏观地面调查确定地裂缝;二类场地主要通过工程地质钻探查明古土壤错断来确定地裂缝的位置和走向,这些方法相对简单、可靠,是目前研究中采用的主要手段。对于三类场地,由于缺少标志层,且不同地貌区域地层结构不同,故地裂缝的识别和确定目前仍处于探索研究阶段。

## 2.1 西安主城区及周围一、二类地裂缝场地

该区域是西安地铁规划网的线路分布密集区,也是西安地裂缝出现最早、研究最多的区域,地裂缝研究程度高,大多数地裂缝已具有大量的勘探、测量与研究资料,收集已有资料即可满足工可阶段资料需求。对于该区域内一些研究程度较低的隐伏地裂缝,一般在收集有关资料的基础上,采用工程地质钻探手段查明古土壤标志层的错断,可比较容易确定地裂缝的位置和走向。图2为地铁线路上处于隐伏状态的 $f_7$ 地裂缝钻探剖面图,地裂缝两侧古土壤层(图中②)在3.6 m距离内被错断了2.53 m。

## 2.2 浐河、灞河一级阶地三类地裂缝场地

西安地铁一号线、三号线、五号线、六号线经过浐河或灞河一级阶地,该区域由于未曾出现过类似于主城区的大规模地表破裂,也不存在古土壤标志层,属三类地裂缝场地。其地层结构自上而下分别为第四系全新统黄土状土、砂类土及卵石,上、中更新统冲洪积粉质黏土、卵石等。地层结构相对稳定,尤其是中更新统地层中常具有厚度较大、连续性较好的卵石层,埋藏深度一般为30~60 m,可作为判断地砂层是否产生错动的标志层。图3为浐河左岸一级阶地上的 $f_8$ 地裂缝钻探剖面图,从图3可知,深度为50~60 m的中更新统卵石层(图中②)分布稳定,其底部被地裂缝错断7.97 m,东盘相对下降。

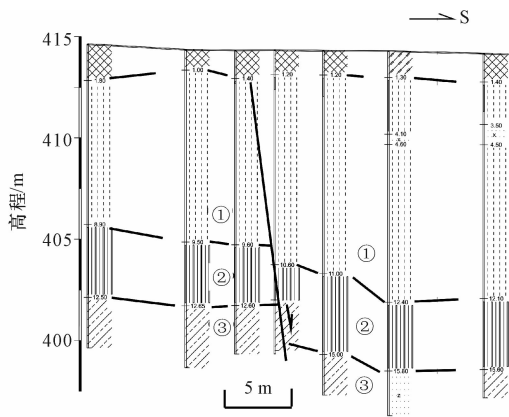


图2 二类地裂缝场地钻探剖面

Fig. 2 Drilling profile on second type of Xi'an ground fissure site

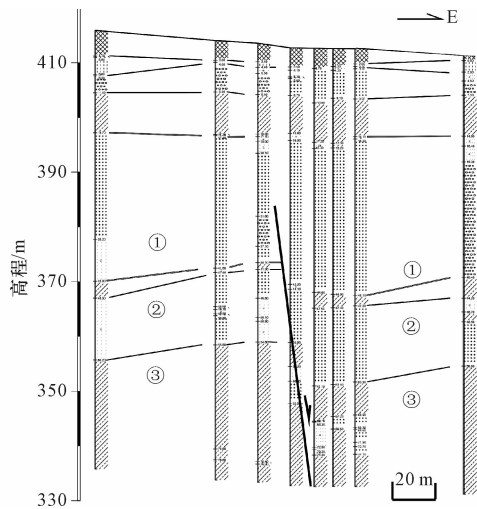


图3 浐河一级阶地三类地裂缝场地钻探剖面

Fig. 3 Drilling profile on third type site in first terrace of Chanhe river

灞河一级阶地具有与浐河一级阶地类似的地层结构,深度为40~60 m的中更新统地层中也有厚度较大、连续性较好的卵石层,该层可作为判断地裂缝的标志层。下页图4为灞河左岸一级阶地上的地裂缝地层剖面,从图4可以看出,深度为40~50 m的上更新统卵石层(图中②)分布稳定连续,其底部被错断8.6 m,南东盘相对下降。

上述2个剖面为浐河、灞河一级阶地的典型地裂缝剖面,在该区域的地铁工程地裂缝研究中,还进行了多达十几条剖面的研究。结果均表明,该区域尽管属地裂缝三类场地,但地裂缝的识别和位置的确定仍可通过工程地质钻探手段得到解决,钻探深度一般为70~80 m即可满足地裂缝的识别要求。

## 2.3 皂河、沣河一级阶地

皂河、沣河一级阶地位于西安城区西南郊方向,地层结构自上而下包括第四系全新统冲洪积黄土状

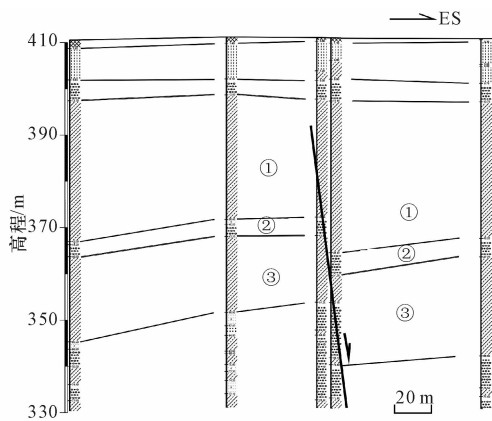


图4 灞河一级阶地三类地裂缝场地钻探剖面

Fig. 4 Drilling profile on third type site in

first terrace of Bahe river

土夹砂类土,第四系上更新统冲洪积粉质黏土夹砂类土,中更新统冲积、湖积粉质黏土及砂类土等;地层结构复杂,沉积韵律差,尤其是砂类土常以透镜体或薄夹层的形式存在。该区域因缺少具有一定厚度且连续分布的标志层,目前是西安地裂缝判别最困难的区域。

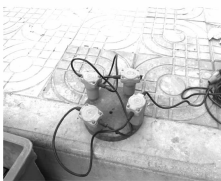
为了有效应对这种复杂的地层结构,在西安地铁工程地裂缝研究中,本课题组采用了人工地震勘探与工程地质钻探相结合的思路,取得了良好效果。人工地震勘探采用大吨位、抗干扰能力强的震源车(18 t, M-18S/612C),配以多道数采地震仪(DMT-SUMMIT 仪器,240 道接收),如图 5 所示。图 6(a)为单炮记录图,图中反射波同相轴清晰、连续、丰富,有效勘探深度大于 1 km;图 6(b)为经过处理后得到的反射时间剖面图,图中异常明显。



(a) 大吨位震源车



(b) 数字采集站



(c) 检波器

图5 人工地震勘探现场工作照片

Fig. 5 Photos of seismic exploration

人工地震勘探目标层的深度一般定为 500~800 m,在其反射剖面上根据各反射波组特征从深

部定性判断线路上是否具有地层的不连续现象,并分析其是否与西安地裂缝的特征相符合,进而在疑似西安地裂缝的部位布置工程地质钻探,以确定或排除地裂缝的存在。

在西安地铁工程地裂缝研究中的西太路地震反射时间剖面图中,发现多处反射同相轴自下而上被错断现象,其中一些呈南降南倾的正断层特征(如图 6(b))所示,与西安地裂缝特性吻合。经后期工程地质钻探验证,不仅证实了这些隐伏地裂缝的存在,而且人工地震异常位置与钻探确定地裂缝位置吻合良好。图 7 为图 6(b)中地震异常点的地质钻探剖面图。

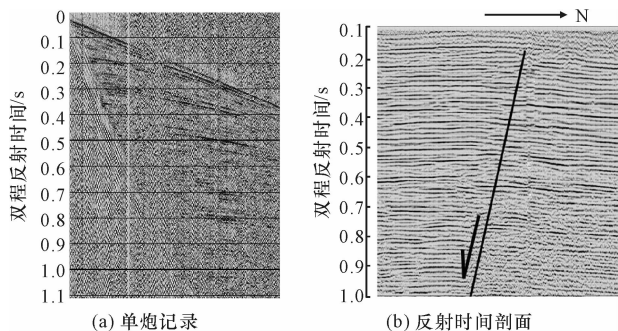


图6 人工地震勘探单炮记录及反射时间剖面

Fig. 6 Seismic exploration recorder and reflection time section

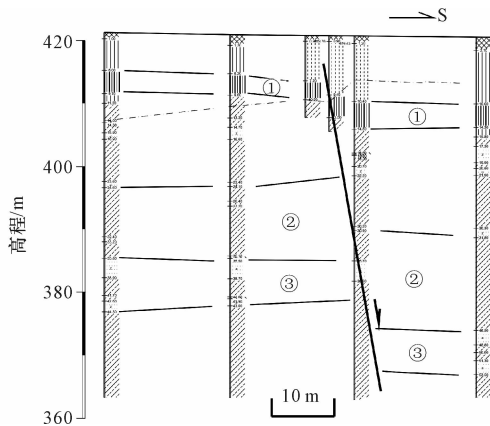


图7 与人工地震勘探异常相对应的钻探剖面

Fig. 7 Drilling profile corresponding to seismic explorative anomaly

上述研究表明,在该区域确定地裂缝时,单纯依靠地质钻探可能会给地裂缝的判断带来困难,若先进行有效的人工地震勘探,将人工地震勘探与钻探结合,可有效地使这一问题得到解决。

### 3 有关地裂缝的其他地质问题

#### 3.1 长安地裂缝

前述地裂缝均是狭义的西安地裂缝,即特指发

育在临潼—长安断裂带  $F_N$  上盘(西北侧)的一组显性或隐伏破裂,目前规划的西安地铁网不仅覆盖了整个人口密集的主城区,并且已扩展至外围区县,其覆盖范围远大于已知的西安地裂缝分布(图1)。如地铁二号线、四号线,自北向南穿越了临潼—长安断裂带,除遇到狭义的西安地裂缝,还在临潼—长安断裂带内部发现类似西安地裂缝的破裂构造。由于其行政区域属西安市长安区,故一般命名为长安地裂缝以示与西安地裂缝的区别。初步研究表明,长安地裂缝具有与西安地裂缝相同的特征,倾向与临潼—长安断裂相反(倾向南东),且具有生长断层的特征<sup>[11-12]</sup>。不同的是,长安地裂缝至今尚未造成地表变形和破坏。但这些断裂是否会在未来抽取地下水的触发下产生活动,并进而形成类似于西安地裂缝的地质灾害,目前尚无相关的研究结果。从安全角度出发,作为百年工程的西安地铁在穿越长安地裂缝时,可暂将其按西安地裂缝对待进行必要设防。

### 3.2 主城区外围地裂缝异常与已有地裂缝的关系

根据本课题组目前的研究结果<sup>[13-14]</sup>,在地铁六号线西南段、以及灞河以东的一些区域发现了一些新的隐伏地裂缝,这些地裂缝虽然处在临潼—长安断裂带  $F_N$  上盘范围内,但远离以前那些分布连续、出露明显的主城区西安地裂缝  $f_1 \sim f_{14}$ ,难以与其建立确切的对应关系,或许是一些新的地裂缝,或许是已有地裂缝向两端的延伸,或两者兼有。这些新发现的地裂缝目前均处于隐伏状态,其成因及活动趋势是否会对今后地铁的正常运营产生影响?这些疑问的解答还有待进一步研究和后续发现。

### 3.3 地裂缝场地划分问题

现行规范把西安地裂缝场地划分为3种类型(如前述),每种场地类型都有明确的定义<sup>[10]</sup>。在地铁工程地裂缝研究中发现,对有些地裂缝而言,这种场地类型的划分尚存在一些疑问。如地铁五号线东端  $f_{13}$  地裂缝,场地内存在上更新统残积古土壤标志层,属地裂缝二类场地<sup>[15]</sup>。但  $f_{13}$  地裂缝晚更新世以来活动较弱,上更新统残积古土壤标志层未被错断或错断不明显。这样就只能利用中更新统古土壤层的错断来判定地裂缝的存在与否,但对于西安地区二级阶地而言,其地层结构自上而下为上更新统风积黄土-残积古土壤、冲积粉质黏土和砂类土、中更新统冲积物等,并不存在中更新统黄土-古土壤系列地层。即这种情况下场地内缺乏定义地裂缝所用的标志层,若仍将场地类型作为二类场地显然有些不合适,若按三类场地对待则更合理些。

在灞河东岸的洪积台地区(如田王、洪庆镇),尽管该区存在作为标志层的古土壤地层,但浅层地层结构复杂,风积、洪积地层沉积较乱,受成生环境影响,古土壤层不够稳定,且多夹杂洪积物质,有时难以判断古土壤层的原生性或次生性。因此该类场地不应简单地作为二类场地考虑,必要时可按三类场地对待。

## 4 结 语

(1)在主城区的一、二类场地,可通过地质钻探查明古土壤地层错断,比较容易确定西安地裂缝的位置和走向。

(2)在西安东郊浐河、灞河一级阶地,厚度较大、连续性较好的更新统卵石层,埋藏深度一般为30~60 m,可作为判断地层是否存在地裂缝的标志层,该标志层错断约8~10 m,钻探深度一般70~80 m即可满足地裂缝的识别要求。

(3)在西安西南郊的皂河、沔河一级阶地,地层结构复杂,沉积韵律差,缺少具有一定厚度且连续分布的标志层,是目前西安地裂缝判别最困难的区域;采用大吨位震源车的人工地震勘探技术与异常部位钻探相结合的方法,效果良好。

(4)进一步加强对三类场地地裂缝识别问题的研究,尤其是皂河、沔河一级阶地应作为研究重点区。对一些特殊的二类场地地裂缝,如浐河阶地  $f_{13}$  地裂缝和灞河东岸洪积台地区的地裂缝,还应进一步加强研究分析,必要时可考虑按三类地裂缝场地对待。

### 参考文献:

### References:

- [1] 门玉明,石玉玲. 西安地裂缝研究中的若干重要科学问题[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2): 172-176.  
MEN Yu-ming, SHI Yu-ling. Some important scientific questions in the research on Xi'an ground fissures[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(2): 172-176. (in Chinese)
- [2] 门玉明,张结红,刘洪佳,等. 西安地铁隧道穿越地裂缝带的计算模型探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 95-100.  
MEN Yu-ming, ZHANG Jie-hong, LIU Hong-jia, et al. Discussion on the computing model for xi'an metro tunnel passing through the ground fissure zone[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33

- (1):95-100. (in Chinese)
- [3] 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4):433-440.  
PENG Jian-bing, FAN Wen, LI Xi-an, et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the Fen-Wei basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4):433-440. (in Chinese)
- [4] 彭建兵, 陈立伟, 黄强兵, 等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6):1826-1834.  
PENG Jian-bing, CHEN Li-wei, HUANG Qiang-bing, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground-fissure expansion mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6):1826-1834. (in Chinese)
- [5] 李新生, 王朋朋, 李亚圣, 等. 西安地铁穿越地裂缝的抽水试验研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(4):378-385.  
LI Xin-sheng, WANG Peng-peng, LI Ya-sheng, et al. Study on pumping test for xi'an metro crossing ground fracture[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(4):378-385. (in Chinese)
- [6] 胡志平, 赵振荣, 朱启东, 等. 西安某地裂缝两侧黄土物理力学性质试验[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1):85-88.  
HU Zhi-ping, ZHAO Zhen-rong, ZHU Qi-dong, et al. Experimental study on physical mechanic property of loess near ground fissure in Xi'an[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(1):85-88. (in Chinese)
- [7] Wang H N, Huang Z H, Li L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1):55-61.
- [8] 石玉玲, 门玉明, 刘洋, 等. 西安市地裂缝对城市立交的破坏机理及防治措施[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1):89-93.  
SHI Yu-ling, MEN Yu-ming, LIU Yang, et al. Design and construction of a partially piled raft foundation[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(1):89-93. (in Chinese)
- [9] 李忠生, 李新生, 高虎艳, 等. 西安地铁1号线沿线地裂缝性质研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(4):75-79.  
LI Zhong-sheng, LI Xin-sheng, GAO Hu-yan, et al. Ground fissure research along Xi'an metro No. 1[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(4):75-79. (in Chinese)
- [10] DBJ 61-6—2006, 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程[S].  
DBJ 61-6—2006, Specification for site investigation and engineering design on Xi'an ground fractures[S]. (in Chinese)
- [11] 宋彦辉, 李忠生, 李新生, 等. 临潼—长安断裂带内地裂缝特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2):50-54.  
SONG Yan-hui, LI Zhong-sheng, LI Xin-sheng, et al. Characteristics of ground fissures located at Lintong-Chang'an fault zone[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2):50-54. (in Chinese)
- [12] 李忠生, 高虎艳, 宋彦辉, 等. 西安地铁四号线沿线长安地裂缝研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8):98-104.  
LI Zhong-sheng, GAO Hu-yan, SONG Yan-hui, et al. Investigation and research on Chang'an ground fissure along the fourth metro line of Xi'an city[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8):98-104. (in Chinese)
- [13] 西安长安大学工程设计研究院有限公司. 西安市地铁六号线工可阶段沿线地裂缝勘察报告[R]. 西安: 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 2013.  
Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co Ltd. Investigation report on ground fissures along Xi'an metro No. 6 at the feasibility study stage[R]. Xi'an: Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co Ltd, 2013. (in Chinese)
- [14] 西安长安大学工程设计研究院有限公司. 西安市域快速轨道交通临潼线工可阶段沿线地裂缝勘察报告[R]. 西安: 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 2013.  
Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co Ltd. investigation report on ground fissures along Xi'an city rapid rail transit Lintong line at the feasibility study stage[R]. Xi'an: Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co Ltd, 2013. (in Chinese)
- [15] 西安长安大学工程设计研究院有限公司. 西安市地铁五号线改线段 $f_{13}$ 地裂缝补充勘察报告[R]. 西安: 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 2013.  
Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co Ltd. Supplementary investigation report on  $f_{13}$  ground fissures along Xi'an metro No. 5[R]. Xi'an: Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co Ltd, 2013. (in Chinese)

