

西安地铁 1 号线沿线地裂缝性质研究

李忠生¹, 李新生¹, 高虎艳², 张福忠³, 宋彦辉¹, 高铎文⁴, 朱宝山⁵

(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 710043; 4. 中国有色金属工业西安勘察
设计研究院, 陕西 西安 710054; 5. 西安中交公路岩土工程有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:结合西安地铁 1 号线建设, 对地铁 1 号线沿线相关地裂缝进行了细致研究。在资料收集、地面调查的基础上, 研究主要采用钻探手段, 揭示地裂缝两侧地层形态, 进而确定地裂缝位置及性质。研究表明: 地铁 1 号线由西向东先后穿越了西安地裂缝 f_3 、 f_4 、 f_5 , 其中与 f_3 相交 2 次; 除西安地裂缝外, 地铁 1 号线还穿越了朝阳门外地裂缝和跑马场—纺织城地裂缝, 与跑马场—纺织城地裂缝缠绕相交 3 次; 朝阳门外地裂缝以前未曾被发现, 钻探剖面显示其断距大, 具有西安地裂缝的性质; 跑马场—纺织城地裂缝为 1 条长度超过 4 km 的地裂缝, 浐河东西两岸均有出露, 活动方式与西安地裂缝相同, 应属西安地裂缝范畴。

关键词:地下工程; 西安地铁; 地裂缝; 裂缝性质

中图分类号: P642

文献标志码: A

Ground fissure research along Xi'an metro No. 1

LI Zhong-sheng¹, LI Xin-sheng¹, GAO Hu-yan², ZHANG Fu-zhong³,
SONG Yan-hui¹, GAO Duo-wen⁴, ZHU Bao-shan⁵

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Xi'an Metro Co Ltd, Xi'an 710016, Shaanxi, China; 3. China Railway First Survey and Design
Institute Group Ltd, Xi'an 710043, Shaanxi, China; 4. Xi'an Engineering Investigation and Design
Research Institute of China National Non-Ferrous industry, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
5. Xi'an China Highway Geotechnical Engineering Co Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: The ground fissures were studied in details along Xi'an metro No. 1. On the basis of previous research data collection and ground investigation, the research was implemented mainly by means of drilling exploration which could reveal strata situation of ground fissures of both sides and then the fissures' locations and characteristics were determined. The results show that the Xi'an ground f_3 , f_4 , f_5 cross the metro line, and f_3 crosses twice. In addition to the Xi'an ground fissures, two ground fissures, Chao-yang-men-wai and Pao-ma-chang—Fang-zhi-cheng also cross the metro line, and the latter intertwines the metro line and passes through it 3 times. The Chao-yang-men-wai ground fissure has not been discovered before. It has the same properties with those of Xi'an ground fissures and has great displacement of fault according to the drilling

收稿日期: 2012-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972215); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(SJ08D04);
西安市地下铁道有限责任公司资助项目(D1-KC-012008020)

作者简介: 李忠生(1964-), 男, 河北秦皇岛人, 副教授, 工学博士, E-mail: lizhsh@chd.edu.cn.

profiles. Pao-ma-chang—Fang-zhi-cheng ground fissure is over 4 km long. It outcrops two banks of Chanhe River, and has the same activity with Xi'an ground fissures, therefore should be listed in Xi'an ground fissures' category. 1 tab, 5 figs, 13 refs.

Key words: underground engineering; Xi'an metro; ground fissure; character of ground fissure

0 引言

西安地裂缝以其对地面设施巨大的破坏力而备受关注,地裂缝所到之处的建构筑物、道路桥梁、市政管线等都遭受了灾难性的破坏。作为线状工程的西安地铁 1 号线东西向贯穿古城,是西安市建设的第 2 条地铁线路,其 1 期工程西起西郊的后围寨,经三桥镇沿枣园路向东转入大庆路至玉祥门,进城墙后沿莲湖路、东西五路出朝阳门,后沿长乐路东行跨过浐河至终点纺织城。

根据已有的西安地裂缝资料显示,地铁 1 号线号线穿越了西安地裂缝 f_3 、 f_4 、 f_5 ,并可能穿越零星出露的长乐坡跑马场地裂缝、纺织城梁家街村地裂缝^[1]。除了这些地裂缝外,1 号线沿线还有没有其他地裂缝?浐河西岸的跑马场地裂缝与浐河东岸的梁家街村地裂缝是什么关系?这 2 条地裂缝不仅研究程度低,而且距离线路近,又与线路大致平行交织。这些悬而未解的问题对地铁 1 号线前期线路稳定有重大影响。为此,本文对地铁 1 号线沿线的地裂缝情况进行深入研究,查明了各条地裂缝的详细性质、活动特征及在线路上的位置。

1 西安地裂缝

自 20 世纪 70 年代在西安城区发现成规模的地裂缝灾害以来,目前已发现 14 条西安地裂缝。为了查清这种大规模的地裂缝活动机理,广大科研工作者对西安地裂缝进行了长达 30 多年的深入细致研究,到目前,有关西安地裂缝的研究仍在一些领域持续进行着,并取得了一系列成果,基本查清了西安地裂缝的成因和活动机理^[2-10]。在这些研究成果基础上,形成了针对西安地裂缝的地方性规程《西安地裂缝场地勘察与工程设计规程》(DBJ 61-6—2006)。在该规程中,“西安地裂缝”被定义为专用名词并赋予明确含义。

西安地裂缝表现出的主要特征有:①平面分布上,大多数地裂缝具有很好的连续性,每条裂缝的延伸长度达数千米至数十千米;地裂缝总体走向北东至北东东,基本平行于临潼—长安断裂带;各地裂缝间呈数百米至 1.5 km 左右的不等间距,近似平行排列;②构造活动性质上,地裂缝断面均倾向东南,

且东南盘下降,呈正断层现象,地裂缝两侧地层具有同生断裂特征,即地层断距随深度的增加而增大,活动方式为蠕动;③地表活动速率上,与抽汲地下深层承压水有很好的相关性,自 20 纪 90 年代,西安市先后引入石砭峪库水和黑河水,并封停地下抽水井后,地裂缝活动速率大幅度降低。

2 沿线地裂缝研究方案

为了查清沿线地裂缝情况,采用收集已有资料、踏勘调查地裂缝地表出露及地面变形情况、布置钻探剖面等手段,综合判定地裂缝性质。

对于研究程度高、相关资料丰富的 f_3 、 f_4 、 f_5 地裂缝,沿地铁 1 号线左右线路各布设一条钻探剖面,以准确确定地裂缝的位置、走向等参数。对于研究程度低的跑马场地裂缝和纺织城梁家街村地裂缝,在收集早期有关资料的基础上,进行现场细致踏勘,并走访附近老住户,然后在可疑之处布设钻探剖面,通过地层错断现象,最终判定地裂缝性质并给出其准确位置等参数。按此思路,在长乐坡村到纺织城的纺渭路之间长约 4 km 的线路附近布设了 15 条钻探剖面,如下页图 1 所示。

3 沿线各条地裂缝性质

根据上述研究思路确定的与地铁 1 号线相关的地裂缝共 7 处,下面逐一叙述^[11-13]。

(1) f_3 (劳动路口)地裂缝。 f_3 地裂缝在西二环以东走向 NE45°,在劳动路附近转为 NE30°,与地铁 1 号线在劳动北路路口附近相交,地表破裂迹象明显,附近的劳动路小学教学楼受地裂缝活动影响已成为危房。2 条跨 f_3 地裂缝的钻探剖面显示,晚更新世 Q_3 古土壤层错断,见下页表 1。

(2) f_3 (莲湖路)地裂缝。 f_3 地裂缝在城墙内活动较弱,仅在北大街附近发现有地表破裂现象,出露段总体走向为 NE50°左右,从青年路口附近斜穿北大街。微地貌上呈一台坡,可辨别出南盘下降迹象。裂缝出露长度约 20 m,宽度约 2~5 cm。该裂缝与地铁 1 号线在莲湖路和北大街十字西侧相交,相交处附近呈隐伏状态。该处 2 条跨 f_3 地裂缝的钻探剖面显示,晚更新世 Q_3 古土壤层错断,见下页表 1。

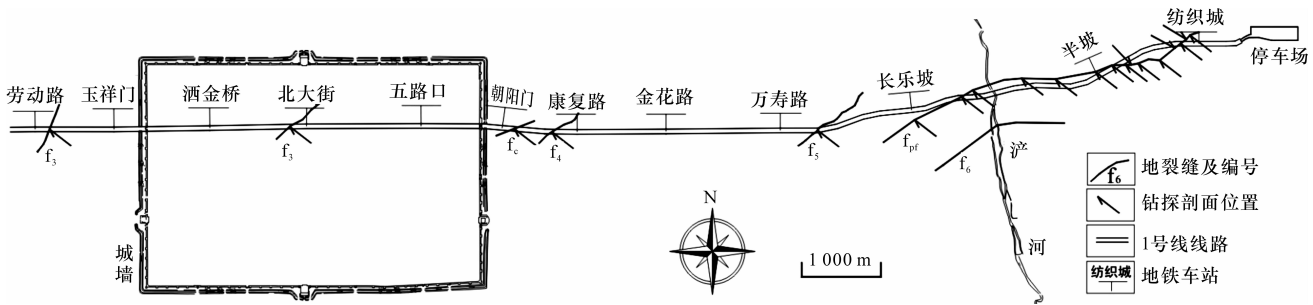


图 1 西安地铁 1 号线线路及地裂缝分布
Fig. 1 Xi'an ground fissures near Xi'an metro No. 1

表 1 地裂缝钻探剖面地层错断参数

Tab. 1 Parameters of strata crossing ground fissures on drilling profiles

地裂缝钻探剖面	地层	断距/m	两侧地层厚度差/m	跨缝孔间距/m	备注
f ₃ (劳动路口)	晚更新世 Q ₃ 古土壤	0.70~1.60	0~+1.80	2.7~6.5	
f ₃ (莲湖路)	晚更新世 Q ₃ 古土壤	1.00~2.09	+1.70~+2.00	2.9~3.1	
f _c (朝阳门外)	晚更新世 Q ₃ 古土壤	1.74~3.08	+1.01~+1.91	4.0~5.0	
f ₄ (康复路)	晚更新世 Q ₃ 古土壤	0.39~0.57	+0.30~+0.50	1.7~5.0	
f ₅ (幸福路口)	晚更新世 Q ₃ 古土壤	3.60~4.13	+1.30~+2.80	3.0~5.3	
f _{pf} (跑马场)	晚更新世 Q ₃ 地层	6.10~20.49	+5.70~+11.4	31.0~90.0	无古土壤标志层
f _{pf} (跑马场)	中更新世 Q ₂ 地层	19.8~28.49	+3.30~+8.00	39.0~90.0	无古土壤标志层
f _{pf} (纺织城)	晚更新世 Q ₃ 古土壤	1.57~5.31	+1.40~+3.98	8.6~18.8	
f _{pf} (纺织城)	中更新世 Q ₂ 古土壤	3.95~7.68	+0.80~+1.10	8.6~18.8	
f _{pf} (纺织城)	晚更新世 Q ₃ 地层	2.65~16.70	+1.70~+10.70	5.3~51.0	无古土壤标志层
f _{pf} (纺织城)	中更新世 Q ₂ 地层	7.68~22.00	+3.10~+6.70	5.3~51.0	无古土壤标志层

注:两侧地层厚度差以南侧地层厚度大于北侧地层为正(+),反之为负(-)。

(3)f₄(康复路)地裂缝。在地铁 1 号线附近,f₄地裂缝从中山门断续出现,向东经西京医院至杨森制药厂,总体走向 NE40°。该地裂缝在康复路西侧处与地铁 1 号线相交,该处活动性较弱,处于隐伏状态。2 条跨 f₄ 地裂缝的钻探剖面显示,晚更新世 Q₃ 古土壤层错断,但断距较小,见表 1。

(4)f₅(幸福路口)地裂缝。f₅ 在幸福路附近是西安地裂缝活动最强烈的地段,20 世纪 80 年代中后期,最大活动速率达 35 mm/年,至今仍在活动。十五街坊处地裂缝活动造成的地表错坎目前已超过 60 cm。该地裂缝与地铁 1 号线在长乐路八零九库门前处相交,长乐路上有明显的破裂痕迹,裂缝宽度 2~3 cm,总体走向 NE60°,南东盘相对北西盘明显下沉。该处 2 条跨 f₅ 地裂缝的钻探剖面显示,晚更新世古 Q₃ 土壤层错断,且断距大,见表 1。

(5)f_{pf}(跑马场)地裂缝。该地裂缝最早于 20 世纪 80 年代出露于长乐坡村附近的跑马场,但出露点东西两侧未见延伸出露点,其后该区域的地面建筑物等亦未见地裂缝活动迹象,该地裂缝未被列入西安地裂缝范畴;为表达方便,本文以 f_{pf} 表示该条地

裂缝。本次工作针对跑马场地裂缝,在长乐坡村到浐河之间布设了 3 条钻探剖面,因该区域为浐河阶地,没有二类标志层(古土壤层),钻孔深度设计为 60~80 m。剖面显示,晚更新世 Q₃ 地层和中更新世 Q₂ 地层均被错断(表 1),且 3 条剖面的 Q₂ 地层断距大于 Q₃ 地层断距,南盘下降,南盘地层厚度大于北盘地层,下页图 2 为跑马场地裂缝一钻探剖面图,图中,①、②、③为地层序号。

(6)f_{pf}(纺织城)地裂缝。该裂缝最早发现于 20 世纪 90 年代,在地面调查过程中发现浐河东岸梁家街村(因修建东三环早已拆迁)和堡子村的一些建筑物遭受地裂缝破坏,受损建筑物均呈南侧下降(下页图 3),地裂缝走向 NE70°,断续出露长度约 1 km。由于西安地裂缝早期研究主要集中在主城区,主城区发现的成规模的地裂缝无法与该地裂缝合并为一条,故称之为纺织城地裂缝,未列入西安地裂缝范畴。

针对纺织城地裂缝,本次研究工作布设了 12 条钻探剖面,不仅确定了梁家街村、堡子村地裂缝位置,还确定了其向东至纺渭路范围内的延伸状况。沿地铁 1 号线,浐河至纺渭路的地貌分别为浐河阶

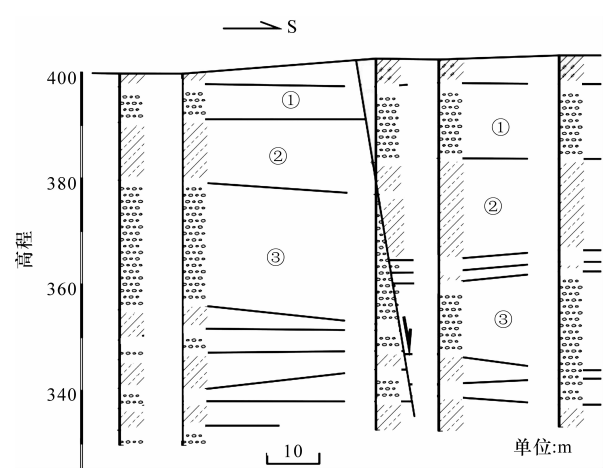


图 2 跑马场地裂缝钻探剖面

Fig. 2 Drilling profile crossing Pao-ma-chang ground fissure



图 3 堡子村遭受地裂缝破坏的建筑物(镜向:东)

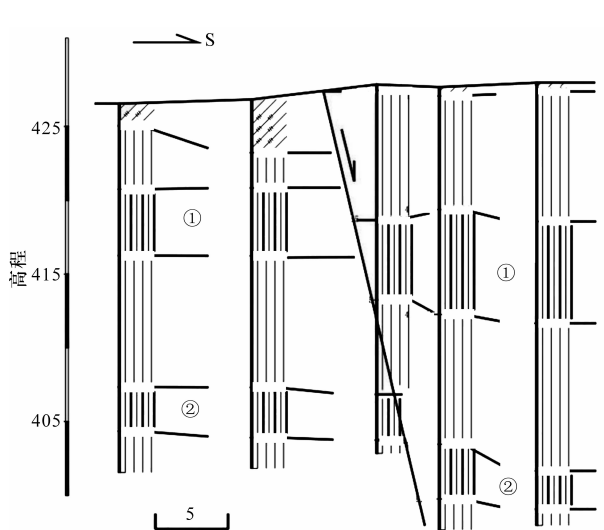
Fig. 3 Building damaged by ground fissure

(photo direction: east)

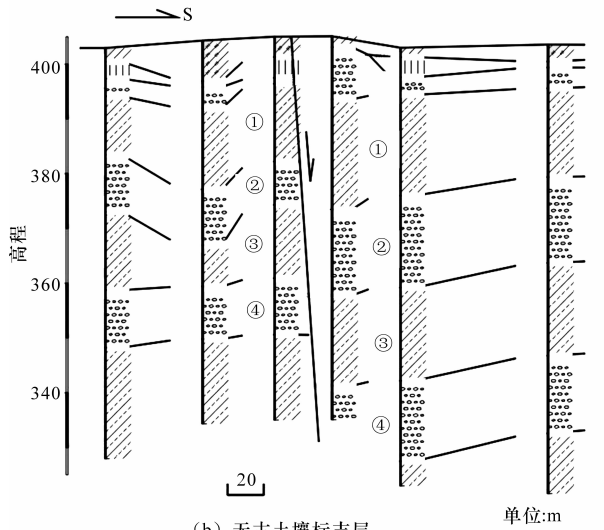
地、黄土梁、灞河阶地,在浐河阶地和灞河阶地中没有古土壤标志层,钻孔深度设计为 60~80 m,黄土梁中古土壤标志层清晰连续,可作标志层,钻孔深度为 20~30 m。

12 条钻探剖面显示,晚更新世 Q_3 地层和中更新世 Q_2 地层均被错断,且各剖面的 Q_2 地层断距均大于 Q_3 地层断距,南盘下降,南盘地层厚度大于北盘地层厚度,图 4 为纺织城地裂缝钻探剖面图。

(7) f_c (朝阳门外)地裂缝。在地铁 1 号线初步勘察阶段,发现朝阳门外长乐西路上的古土壤地层存在不连续现象,为此,在异常附近布设了 2 条地裂缝钻探剖面,两剖面显示古土壤底界分别错断 1.74 m(孔间距 4.0 m)和 3.08 m(孔间距 5.0 m),见下页图 5 和表 1。经分析认为,该处应该为一条隐伏地裂缝,由于以前未曾发现该地裂缝,暂称为朝阳门外地裂缝,为表达方便本文以 f_c 表示该条地裂缝。综合随后附近的其他场地勘察资料分析,该地裂缝目前查



(a) 古土壤作为标志层



(b) 无古土壤标志层

图 4 纺织城地裂缝钻探剖面

Fig. 4 Drilling profiles crossing Fang-zhi-cheng ground fissure 明的长度约 300 m,在长乐西路上走向为 $NE70^\circ$,地裂缝倾向 SSE,南盘下降,与西安地裂缝性质相同。

4 结果分析

从上面的研究结果可以看出, f_3 、 f_4 、 f_5 地裂缝情况比较简单清楚,地铁线路穿越地裂缝时可参考地铁 2 号线成功的应对措施。

跑马场地裂缝和纺织城地裂缝是同一条地裂缝在浐河两侧的分段显现,其总长度超过 4 km。资料收集、地面调查、钻探等综合分析,该地裂缝总体走向 $NE70^\circ$,地裂缝南倾,南盘下降,下部地层断距大于上部地层。该地裂缝在浐河西岸活动弱,一直处于隐伏状态,浐河东岸活动较强,梁家街村、堡子村民宅遭受破坏,纺北路路面破裂。从跑马场—纺织城地裂缝的特性及活动性来看,该地裂缝与西安地

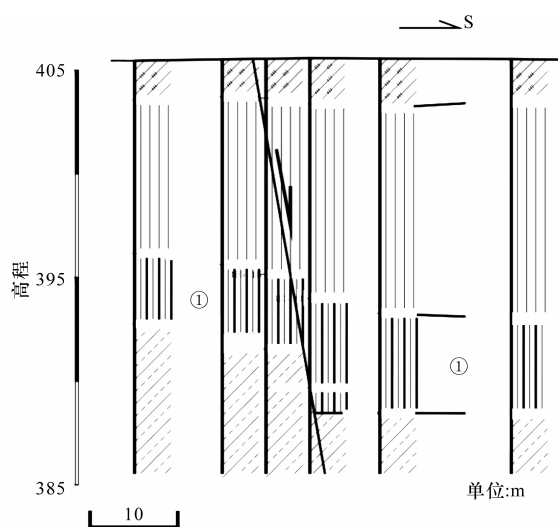


图5 朝阳门外地裂缝钻探剖面

Fig. 5 Drilling profile crossing Chao-yang-men-wai ground fissure
裂缝性质完全一致,其规模较大,应属西安地裂缝范畴。空间位置上,跑马场—纺织城地裂缝位于 f_5 、 f_6 中间。从目前已掌握的资料分析,跑马场—纺织城地裂缝与 f_6 地裂缝很可能是一条地裂缝的雁行式展布,若该推测成立,则原有的 f_6 在浐河东岸延伸一段后将逐渐尖灭,而跑马场—纺织城地裂缝继续向东延伸,据目前掌握的资料,该地裂缝向东已过纺渭路。

跑马场—纺织城地裂缝与地铁1号线缠绕在一起,3次与线路小角度相交,是对1号线影响最大的地裂缝,建议适当调整地铁原有线路,加大穿越地裂缝的角度。

朝阳门外地裂缝从20世纪70年代发现西安地裂缝以来未曾有过活动迹象,但不排除未来在某一特定地质环境触发下出现较强的地面差异沉降活动,因此,建议在地铁1号线建设中将其按西安地裂缝对待进行设防。

5 结 语

(1)西安地铁1号线与西安地裂缝 f_3 在劳动路口和莲湖路2次交汇,与 f_4 在康复路西侧交汇,与 f_5 在幸福路口东侧交汇。

(2)早期发现的跑马场地裂缝和纺织城地裂缝是同一条连续的地裂缝,性质与西安地裂缝相同,目前查明长度超过4 km,应属西安地裂缝范畴。该地裂缝3次与地铁1号线路小角度相交,不利于地铁隧道的稳定,建议适当调整地铁原有线路,加大穿越地裂缝的角度,并建议按西安地裂缝标准进行设防。

(3)朝阳门外地裂缝目前处于隐伏状态,地表未见活动迹象,但不排除未来某特定地质条件触发其

出现较强的地面活动,因此,建议按西安地裂缝标准设防。

参考文献:

References:

- [1] 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)
- [2] 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)
- [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] 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)
- [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)