

西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究

黄强兵^{1,2}, 彭建兵^{1,2}, 樊红卫³, 杨沛敏⁴, 门玉明²

(1. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 721000; 4. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要: 西安地裂缝是一种独特的城市地质灾害, 其活动对地铁建设造成严重威胁, 西安地铁建设的关键是如何解决地铁隧道穿越地裂缝带的问题。以西安地铁穿越地裂缝带为研究对象, 在地裂缝基本特征分析和未来活动趋势预测的基础上, 分析了地裂缝活动对地铁隧道的危害模式, 从结构、防水、地基基础与变形监测等方面提出了如下防治措施: 结构上应采用扩大断面、预留净空、分段设缝加柔性接头和局部衬砌加强等措施; 防水方面宜采用可卸式管片拼装双层结构法和波纹板强化橡胶复合材料制成的防裂止水带处理; 地基基础处理方面采用地基注浆加固法和弹性囊变形恢复法处理; 建立隧道衬砌和轨道的变形监测预警方案; 地铁线路走向应尽量与地裂缝正交或大角度相交, 避免小角度相交; 严格禁止在地铁沿线一定范围内开采地下水。研究成果可为西安地铁隧道穿越地裂缝带的施工、结构和防水设计以及隧道病害监测与防治提供重要参考。

关键词: 隧道工程; 西安地铁; 地裂缝; 隧道病害; 防治措施

中图分类号: TU475; U452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)05-0781-08

作者简介: 黄强兵(1972-), 男, 湖南安化人, 副教授, 博士研究生, 主要从事地质工程、岩土及地下工程方面的研究。E-mail: dcdgx24@chd.edu.cn。

Metro tunnel hazards induced by active ground fissures in Xi'an and relevant control measures

HUANG Qiang-bing^{1,2}, PENG Jian-bing^{1,2}, FAN Hong-wei³, YANG Pei-min⁴, MEN Yu-ming²

(1. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Laboratory of Western Mineral Resources and

Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Underground Railway Co., Ltd.,

Xi'an 721000, China; 4. China Railway First Survey & Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The ground fissures in Xi'an are one of the particular urban geological hazards and have a serious threat on Xi'an metro construction, so it is the key for Xi'an metro construction to solve the problem of active ground fissures. On the background of Xi'an metro transversing the active ground fissure zones, the metro tunnel hazards induced by active ground fissures are analyzed based on the characteristics of ground fissures and their moving trend. The control measures are put forward from the following aspects: structural measures such as the enlarged cross-section, local reinforced lining, segmented tunnel lining and flexible joints; waterproof measures including the detachable segment method and a new flexible anti-cracking sealing strip made of fortified corrugated plate rubber complex material; foundation injected reinforcement and method of foundation deformation recovery of elastic sack; establishment of warning programs of the deformation of tunnel lining and metro track; design of the strike of metro line perpendicular with ground fissure zones or intersecting with large angle; and prohibition of groundwater withdrawal within a certain scope along the metro. The conclusions can be presented as the reference for the structural and waterproof design of metro tunnel going through the active ground fissure zones.

Key words: tunnelling engineering; Xi'an metro; active ground fissure; tunnel hazard; control measure

0 引 言

西安市位于陕西省关中盆地的中部, 由于自然和人为等因素的影响, 产生了严重的地裂缝灾害。自1976年唐山大地震和1977年西安北郊草滩两次有感地震之后, 加之20世纪80年代的过量抽取地下承压

水, 西安城区至今已先后出现了地裂缝14条, 其活动

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40534021); 国土资源大调查项目(1212010641403); 长安大学科学基金项目(06Q08)

收稿日期: 2008-07-14

时间之长、规模之大和危害之重,在国内外尚属罕见。这些地裂缝所经之处,使地表建筑物开裂甚至坍塌、桥梁受损开裂和道路变形,错断地下洞室和管道,致使闻名古迹西安大雁塔向西北倾斜 1 m 多^[1]。目前地裂缝仍在活动中,并出现新的地裂缝带,这不仅严重地制约着城市建设用地的有效利用和城市建设规划发展,且为西安市“十一五”规划的重点建设工程——西安地铁的建设留下了重大的灾害隐患。

长期以来,人们对西安地裂缝的研究主要集中在其成因机制、空间分布规律和活动特征等方面^[1-8],在地裂缝对地下工程的影响、相互作用机理以及防治对策方面的研究成果相对较少。在以往地裂缝灾害防治方面,对于拟建的地表建(构)筑物,主要采用空间避让、时间避让的方法来避开或减轻地裂缝对建(构)筑物的影响^[1, 4, 8],规范^[9]也明确规定:各类场地和建筑物对地裂缝要采用避让措施,并规定了避让距离;对于已建的跨地裂缝地表建(构)筑物,可以采取隔离法、地基注浆加固法、局部浸水法和断裂置换法等方法进行处理^[4];对于地下管道,一般采用管道浅埋、砌沟填砂以及柔性接头如波纹膨胀节等办法^[1, 4, 10]来防止地裂缝活动带来的管道剪切破坏。

地铁工程是一种线性工程,无法避让地裂缝。在建的西安地铁 2 号线从北往南穿越西安 14 条地裂缝中的 11 条,将建的地铁 1 号线穿越 4 条,这些地裂缝现有的工程致灾状况十分严重,如果不采取有效措施进行防治,将会对西安地铁建设及建成后的地铁安全运行带来无法估量的危害和损失。随着西安地铁建设的进行,地裂缝问题的研究越来越引起国内工程界和学术界的关注。范文等^[11]结合西安地铁 2 号线对马蹄形隧道穿越地裂缝带进行了物理模型试验,初步得出了地裂缝环境下隧道的破坏模式;黄强兵等^[12]以西安地铁 2 号线为背景,通过大比例尺明挖隧道结构模型试验,开展了地裂缝对地铁隧道影响机制的研究,认为地裂缝作用下隧道变形破坏模式为拉张破坏,得出了一些很有价值的结论;邓亚虹等^[13]对地裂缝活动环境下的盾构隧道衬砌性状进行了研究,分析了地裂缝作用下隧道衬砌结构的应力和变形情况。这些成果为后续的深入研究奠定了一定基础。

目前地铁隧道穿越活动地裂缝带的防治措施领域的研究是一个空白,西安地铁穿越地裂缝带的问题可以说是世界地铁建设史上的重大难点问题^[14]。规范^[9]明确指出地下铁道穿越地裂缝是一个全新的工程难题。因此,研究地裂缝活动对地铁工程的危害以及如何有效地防治因地裂缝活动而引起的地铁隧道病害问题,具有十分重要的现实意义。

本文在西安轨道交通二号线穿越地裂缝带的结构措施专题研究^[14]的基础上,对地裂缝引发的地铁隧道病害进行了深入分析,从多个角度较系统地提出了地铁隧道穿越活动地裂缝带的防治措施。

1 地裂缝基本特征及活动趋势

1.1 地裂缝的基本特征

西安地裂缝是在过量开采地下水、产生不均匀地面沉降的条件下,临潼—长安断裂带西北侧一组北东向的隐伏地裂缝出现活动,在地表形成的破裂^[9]。地貌上西安地裂缝分布于黄土梁洼之间,均位于黄土梁的南侧,呈带状分布,走向为 $NE70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。在剖面上西安地裂缝的形态一般为上宽下窄的楔形,向下逐渐变窄变少,最深达 300 余米。地裂缝主体倾向南,倾角一般在 70° 以上(见图 1)。地裂缝带基本具有统一的三维空间运动变形特征,即南倾南降的垂直位移、水平引张和水平扭动,其中以垂直位移量为最大,南北拉张量次之,而水平错动量则很小,三者之比为 $1:0.31:0.03$ ^[4]。监测数据表明地裂缝水平扭动量很小,它是由于地层差异沉降引起的,属于地裂缝地表效应的范畴。此外,根据槽探揭露的西安地裂缝在 10 m 以下拉张位移量很小,裂缝几乎是闭合的,因此工程上一般只考虑地裂缝的垂直位移量^[14]。

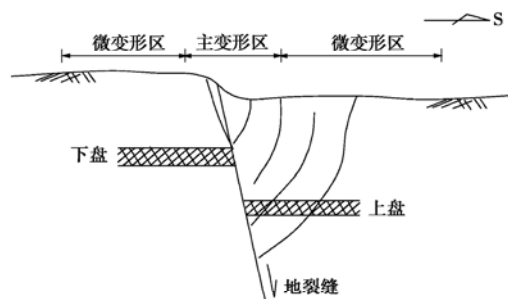


图 1 地裂缝活动剖面示意图

Fig. 1 Profile of motion of ground fissures in Xi'an

1.2 地裂缝活动趋势

由于西安市供水由地下水改为地表水(黑河水源供水),且在地铁修成后,将禁止在地铁沿线周围开采地下水,所以未来 100 a 西安地裂缝出现如 1990~1996 年间的快速活动的可能性极小。此外,西安地裂缝位于临潼—长安断裂上盘,其构造基础——隐伏地裂缝的扩展是伴随临潼—长安断裂正断层活动而出现的,但从多年来的定点形变资料来看,它与地裂缝活动无明显关系。因此,未来 100 a 西安地裂缝活动不会因构造运动而增强。但考虑到地裂缝活动的复杂性、不确定性以及地铁工程的安全性,西安地铁穿越地裂缝带的变形量一律按 500 mm 进行设防^[14-15]。

2 地裂缝对地铁隧道的危害

西安地裂缝活动产生的垂直位移具有时间单向累计特征, 是造成其两侧地层破坏的主要运动形式。通过对以往西安地裂缝造成地面建筑物、市政构筑物如道路、桥梁和地下管道等破坏特征分析, 结合有限元和离散元数值计算结果以及笔者室内完成的大型地裂缝与地铁隧道结构模型试验成果^[12-14], 认为地裂缝对地铁隧道的致灾机理是地裂缝上盘下降导致位于上盘的地铁隧道底部脱空, 在上覆土层重量和隧道两侧土体向下的摩擦阻力共同作用下, 隧道衬砌结构产生的开裂破坏。西安地铁穿越地裂缝带时如果不采取特殊有效的防治措施, 将很有可能出现以下地铁隧道病害。

2.1 隧道衬砌变形破坏

根据地裂缝活动特征, 将地裂缝活动引起地铁隧道变形破坏大致可分为如下两种模式:

(1) 拉张-挤压破坏。当地裂缝活动速率较低时, 它对地铁隧道的影响可等效于隧道长期在上覆土层重量和其两侧土体向下的摩擦阻力共同作用下的疲劳破坏。当地裂缝垂直位错超过某一定值时, 位于地裂缝上盘的隧道底部出现脱空, 衬砌顶部将产生拉应力, 底部产生压应力。当拉、压应力超出了隧道衬砌的抗拉和抗压强度后, 位于下盘的隧道衬砌顶部在距离裂缝一定距离处出现开裂, 隧道产生拉张-挤压破坏。随着地裂缝垂直位错量的进一步增大, 隧道衬砌顶部裂缝向两侧扩展而使衬砌产生环向开裂, 见图2(a)。

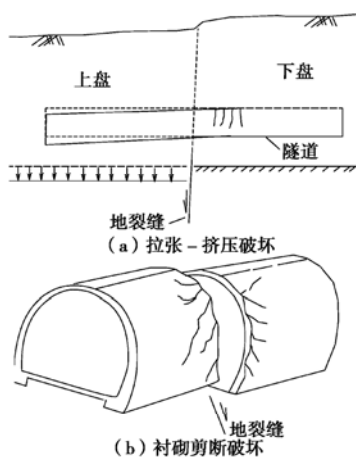


图2 隧道衬砌破坏模式

Fig. 2 Damage patterns of tunnel lining

(2) 直接剪断破坏。当地裂缝在过量抽取地下承压水或大地震等作用下, 其活动量突然增大, 隧道上覆土层的重力和两侧土体向下运动产生的侧壁摩擦阻力在衬砌内部产生较大的剪力, 使隧道产生直接剪断破坏, 如图2(b)所示。以往地裂缝强烈活动导致地下管道被错断和地裂缝穿过南绕城对地下洞室的剪断

破坏也证明了这一点(见图3)。从地裂缝监测及其活动趋势来看, 地裂缝未来强烈活动的可能性很小, 故这种破坏模式一般较少发生。



图3 地裂缝活动引起地下砖衬洞室剪断破坏

Fig. 3 Abri lining disasters caused by motion of ground fissures

2.2 防水失效

据地裂缝勘察资料, 西安地铁与地裂缝交汇处地下水位埋深8~19 m, 而地铁隧道埋深大部分为10~15 m, 基本处于地下水位线以下或附近, 加之地裂缝地段原生地层破坏, 地下水连通性好, 是较好的渗流通道, 地表水亦可沿地裂缝带下渗。在地铁设计使用年限(100 a)内, 地裂缝的最大垂直位移按500 mm设防^[14-15], 若不采取有效的防治措施, 隧道衬砌结构变形破坏是不可避免的。一旦衬砌开裂, 极有可能发生严重的隧道水害——隧道涌水现象。

2.3 轨道变形

地裂缝活动将使隧道衬砌产生变形, 隧道净空减小, 建筑界限入侵, 衬砌将其变形逐步传递至隧道内部的轨道, 从而导致跨地裂缝处的轨道产生变形。此外, 地表水可沿地裂缝带下渗, 在其向下的流动过程中会冲刷地裂缝侧壁, 使地裂缝宽度变大, 随着水流的冲刷作用的进一步增强, 可导致地铁隧道底部土层被掏空, 衬砌基础下沉, 亦可引起整体轨道下沉变形。考虑到地铁轨道的上下允许变形量不能超过几个毫米, 所以这将严重影响列车的正常运行。

3 地铁隧道穿越地裂缝的防治措施

根据数值计算和大型模型试验结果^[12-14], 当地裂缝活动量达到200 mm时, 地铁隧道衬砌结构就出现开裂破坏, 因此地铁隧道衬砌结构必须设变形缝以适应地裂缝的大变形, 而且单从结构上设变形缝, 也无法保证地铁隧道穿越地裂缝时防水满足要求。因此, 防治措施应当是多方面的, 包括结构、防水、地基基础处理和变形监测及预警等方面, 其中结构和防水措施尤为重要。

3.1 结构措施

众所周知, 人类工程结构在自然界的构造运动面

前是不堪一击的，任何想以增强工程结构的坚固性或
对地裂缝进行人工处理方法都是不现实的。因此，穿
越地裂缝带的地铁隧道应当采取“防”与“放”相结
合，以结构适应变形为主，先结构后防水的指导原则。
“防”就是扩大断面和局部衬砌加强，“放”就是分段
设缝加柔性接头。

(1) 扩大断面和局部衬砌加强

考虑到未来 100 a 地裂缝地段隧道设计预留量为
500 mm，为防止隧道建筑限界入侵，保证隧道净空和
行车安全，隧道穿越地裂缝变形区必须局部扩大断面
预留净空，同时采用双层衬砌或复合式衬砌局部（主
要为接头部位）加强以确保结构强度（见图 4）。国外
就有类似的成功实例可以借鉴，如美国加利福尼亚州
的 Los Angeles 地铁隧道穿越 Hollywood 活断层时就采
用了扩大断面的结构处理措施，隧道衬砌断面由 6.0 m
扩大到了 8.5 m，成功地穿越了活断层^[16]。

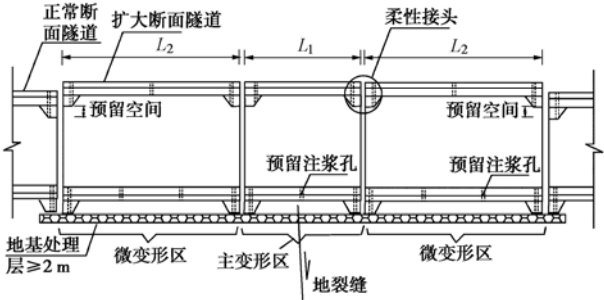


图 4 地裂缝变形区地铁隧道分段示意图
Fig. 4 Longitudinal schematic diagram of tunnel segments

(2) 分段设缝加柔性接头

为使隧道结构适应地裂缝两侧土体的差异大变
形，区间隧道穿越地裂缝应采取分段设变形缝，每段
隧道结构采用柔性接头连接。与整体式隧道相比，分
段隧道的柔性接头消除了因地裂缝活动在衬砌结构内
部产生的弯矩和剪应力，可以适应地裂缝变形，尽管
给隧道衬砌防水带来较大困难，但能确保衬砌结构安
全，因结构安全比结构防水补漏相对重要得多。当衬
砌管段对缝设（即变形缝正对地裂缝位置）时，衬砌
结构受力较小，管段接头变形较大，防水较为困难；
当衬砌管段跨（跨）缝设时，管段接头变形较对缝设
小很多，衬砌则受一部分弯矩和剪力作用，但对结构
影响不大。考虑到在地裂缝活动的主变形区地铁隧道
结构内力变化梯度最大，参照国外相关研究^[17]，笔者
建议隧道衬砌管段跨（跨）缝设（见图 4），在地裂缝
主变形区衬砌管段长度为 L1，微变形区衬砌管段长
度为 L2。隧道分段结构和接头构造如图 4 和 5 所示。

(3) “管中管”结构

“管中管”结构^[14]是以基坑支护时的连续墙作为

外管，外管承担地裂缝的作用，在地裂缝处设置变形
缝，在外管的基础上，用简支结构支撑内管，由于内
外管结构隔开，消除了因地裂缝活动引起地层垂直和
水平运动与隧道衬砌摩擦而产生的剪应力和张应力，
避免了地裂缝影响，外管对内管起保护作用，故内管
结构不会有大的变形，只需注意外管结构接头的防水
问题。“管中管”结构不失为一种较好的防治地裂缝隧
道病害的结构措施之一，但该结构工程量太大，造价
高，且施工场地要求高，故受到限制，须慎重采用。

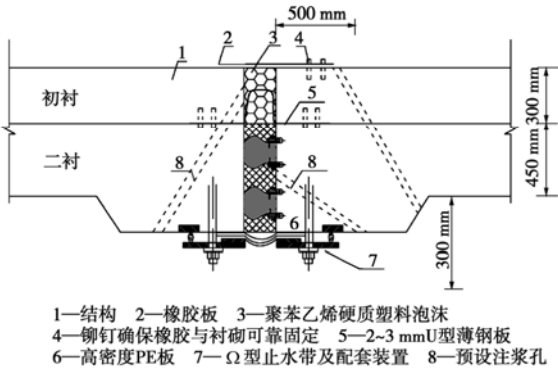


图 5 柔性接头（变形缝）构造详图
Fig. 5 Structural diagram of flexible joint

(4) 柔性外围护适应变形结构—托换结构^[18]

隧道柔性外围护是一种托换结构，它是通过改变
隧道外围环境，而不是隧道本身来适应地裂缝引起的
地层变形，从外到内包括由 BQXF（一种波纹板强化
橡胶复合防水材料的简称）卷材和聚氨酯泡沫（填料）
组成的柔性外围护抗裂防渗变形层和由中、粗砂组成
的变形调整层，其结构如图 6 所示。该结构类似“管
中管”结构，它的作用机理是当地裂缝引起地层发生
沉降变形时，柔性外围护层将其变形传递给变形调整
层，变形调整层调整本身变形，消化吸收柔性围护层
传递来的变形，而使隧道结构不受地裂缝的影响，但
该结构的可靠性仍有待进一步验证。

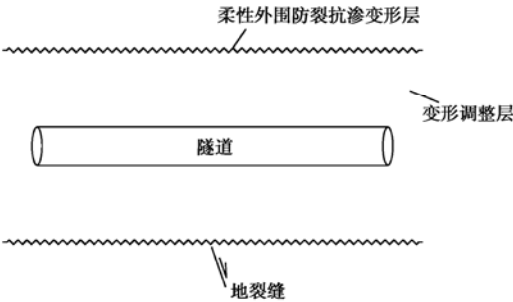


图 6 柔性外围护适应变形构造示意图
Fig. 6 Sketch of flexible exterior-protected construction

此外，彭建兵课题组还提出了简支梁型隧道结构
模型^[14]、陕西大地地震工程勘察中心提出了弹簧连接

的隧道分段结构模型^[18]和樊红卫提出了隧道底部蛇形弹簧穿越地裂缝方法^[19]以及杨育才提出了悬臂滑动隧道结构方案^[20]等结构措施或方案, 这些结构措施或方案尽管存在一些不足之处, 甚至可能是一种设想, 但均是对西安地铁穿越地裂缝问题的有益探索。

3.2 防水措施

西安地铁防水有其特殊性: 其一, 西安地铁穿越数条地裂缝带, 地裂缝的活动不可避免地会使隧道衬砌结构变形开裂, 这给隧道衬砌结构防水带来很大压力, 若隧道结构采用分段设缝, 结构安全了, 但地铁设计使用期(100 a)内地裂缝错位量按 500 mm^[14-15]设防, 隧道防水能否满足要求存在很大问题; 其二, 地裂缝活动地段地层被错断, 地下水连通性好, 地表水亦可沿地裂缝带下渗, 黄土的大孔隙性和地裂缝带的强导水性使得地铁隧道通过地裂缝带的防水压力大, 地铁2号线试验段施工在 f_3 地裂缝地段出现了突水和涌水现象就进一步证明了这一点; 其三, 地铁隧道在大部分地段均处于地下水位附近或以下, 尽管水压不大, 但一旦地下水和地表水入渗, 防水失控, 却不能采用抽排水的办法进行处理, 因为抽排水会加剧地裂缝的活动, 从而导致结构变形增大, 造成不可挽回的损失。因此, 如何在地裂缝大变形和地下水贯通以及地表水下渗的不利情况下满足地铁工程防水要求, 成为西安地铁隧道穿越地裂缝带的一大难题^[14]。考虑到地裂缝活动量较大, 跨地裂缝地段的隧道结构设计必须考虑到今后的维修问题。根据上海、深圳、广州和南京等地铁防水情况来看, 隧道混凝土结构自防水显得尤为重要^[21-22]。因此, 建议西安地铁隧道穿越地裂缝地段的防水在采取“以防为主, 刚柔结合, 多道设防, 可拆可修, 综合治理”原则的基础上, 强调结构自防水和变形缝防水。

(1) 混凝土衬砌结构自防水

西安地铁隧道穿越地裂缝地段以采用浅埋暗挖法施工的马蹄形隧道为主, 防水应从设计、选材、施工工艺和防水层等方面采取如下措施: ①设计方面, 结构分段、局部截面扩大, 结构管段本身不再设施工缝, 加强结构纵向分布钢筋, 其总配筋率不得低于 0.5%。②合理选择原材料。优先采用添加有膨胀剂的补偿收缩防水混凝土, 增加混凝土的抗裂防渗性能。此外, 可采用钢纤维混凝土和近年来发展的聚丙烯纤维混凝土的材料, 以提高材料韧性, 但价格均比较昂贵。③加强施工工艺。防水混凝土应分层连续浇注, 采用高频机械振捣密实, 加强养护, 防水混凝土保温养护持续时间不得少于 15 d。同时加强开挖断面轮廓的控制, 保证喷混凝土与围岩、二次衬砌与初期支护之间的密贴, 做好初期支护背后的注浆工作。④防水层材料采

用膨润土防水板, 缓冲层和保护层采用 400 g/m² 的土工布。

(2) 变形缝防水

西安地铁隧道穿越地裂缝地段结构上采用分段设变形缝来处理, 但一般地铁隧道变形缝所采用的中置式橡胶止水带、自粘性改性沥青防水卷材以及密封胶均无法满足地裂缝地段地铁防水要求。因此, 变形缝的防水就成了西安地铁穿越地裂缝地段结构防水成败之关键。

a) GINA 止水带法。借鉴目前地下工程变形缝防水方面比较成熟的穿越江河湖海的沉管隧道防水技术。GINA 止水带防水构造如图 7 所示。图中 1 为可伸缩的橡胶板, 主要为了阻挡土体进入裂缝; 3 为膨润土充填材料, 构成防水的第一道防线; 9 为两道 GINA 止水带, 固定在二衬上构成第二道防线, 是防水措施中最主要的防线; 8 为 Ω 型橡胶止水带, 是第三道防线。另外, 还设置了多个可以多次重复注浆的注浆孔, 以便紧急情况时的堵漏、维修处理。为了减小 GINA 止水带与结构之间的剪切力, 在结构上预埋特制的光滑高密度 PE 板。该方法能应对不同方向变形和防水, 但处理变形量较小, 可以通过多结构管段串联来提高其适用变形能力, 而从尽可能少发生渗漏来说, 管段越少越好, 因此该方法存在局限性。

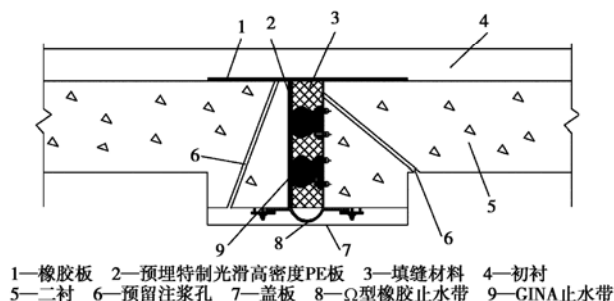


图 7 GINA 止水带防水构造图

Fig. 7 Structural diagram of GINA waterproof strip

b) 可卸式管片拼装双层结构法^[14]是双层衬砌结构和扩大断面的综合, 可以解决防水失效补修问题。在跨地裂缝地段将隧道断面局部扩大, 在复合衬砌基础上再局部增加一层由管片拼装而成的内衬, 防水措施主要安装在这一可拆卸的衬砌上, 原有复合衬砌主要起支撑土体和初始阶段的防水作用。防水失效补修时, 先将内部衬砌拆下, 然后更换防水材料, 最后再将管片重新拼装成整体。因为管片本身不会破坏, 因此维修相当方便和经济。其构造如图 8 所示。这种方法较好地体现了“以防为主, 刚柔结合, 多道设防, 可拆可修, 综合治理”的原则。

c) 波纹强化橡胶复合材料(缩写“BQXF”)防

裂止水带法^[18]是在钢板橡胶复合止水带的基础上经过改进而提出来的。BQXF 可按需要选取不同厚度、不同波纹的钢板、PVC 板等为夹芯，外裹聚合物材料三元乙丙橡胶、氯丁橡胶、天然橡胶等经模压硫化形成。笔者对其进行了局部改进，外侧增加了铆钉固定的钢板，支撑土压力和水压力作用，对 BQXF 防裂止水带起到保护作用，其构造如图 9 所示。据初步的试验研究^[18]，BQXF 防裂止水带本身能适用较大变形，也可以结构分段串联处理以增加适用变形能力。

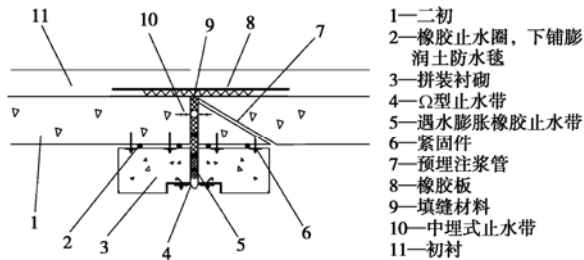


图 8 可卸式管片结构变形缝防水构造图

Fig. 8 Structural diagram of detachable segment waterproofing

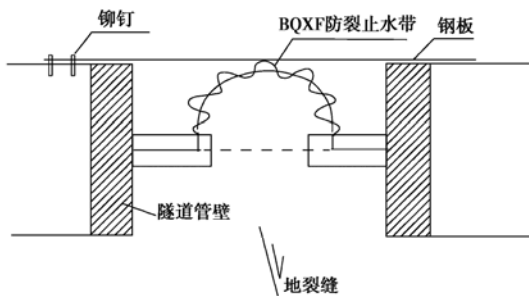


图 9 BQXF 防裂止水带示意图

Fig. 9 Sketch of BQXF anti-cracking sealing strip

3.3 地基与基础处理措施

(1) 地基加固法

随着地裂缝活动量不断增大，位于地裂缝上盘的隧道在一定范围内将出现底部脱空现象，此时，隧道在上覆地层自重和两侧地层的向下的摩擦剪应力的双重作用下，结构将出现变形破坏。为了减弱地裂缝活动引起的地铁隧道变形破坏，结构应预留注浆孔（见图 4，5），适时进行必要的注浆处理。隧道修建时也应先对地裂缝影响区地基进行注浆加固处理，强化地基整体刚度。该方法可缓解或抑制地铁隧道衬砌结构变形的进一步发展。

(2) 弹性囊变形恢复法

基于弹性变形可恢复的原理，笔者提出了弹性囊变形恢复法，该方法原理类似于汽车轮胎（可称为轮胎思路）。如图 10 所示，考虑到地铁隧道衬砌结构在地裂缝变形区分段设缝后，因地裂缝活动量不断增大，结构管段底部会出现部分脱空现象。将隧道管段底部

可能脱空部位地基整平夯实后预铺设一个弹性囊（弹性囊可设计为多层以增强其安全可靠），弹性囊需由耐久性好的高强度弹性材料制成，弹性囊壁设一细管（类似于汽车打气孔或管）穿过结构壁引到隧道内部控制室，当隧道底部出现脱空时，可在隧道内部控制室预设的细管向弹性囊充气或水，通过弹性膨胀抬高或控制下沉变形的隧道管段，从而起到适应地裂缝变形的作用。此外，西安地铁埋深一般为 10~15 m，土压力不大，加上隧道本身重量荷载和交通荷载等，总荷载也不过 200~300 kPa，只要保证了弹性囊的耐久性，弹性囊完全可以满足压力要求。

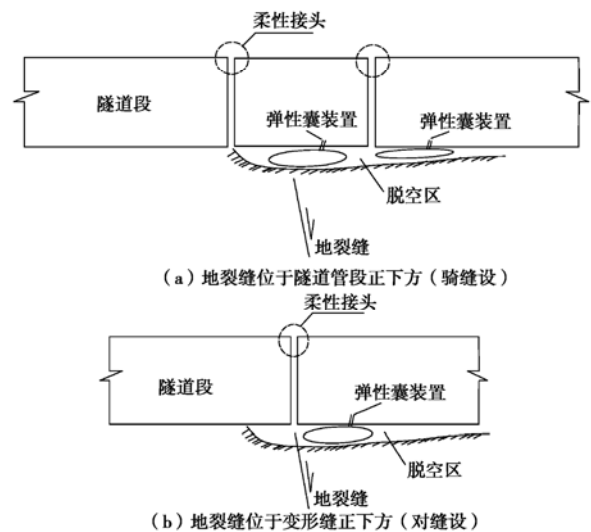


图 10 弹性囊变形恢复法示意图

Fig. 10 Sketch of elastic sack deformation recovery method

3.4 变形监测及预警措施

地裂缝活动引起的地层变形是一个长期而缓慢的过程，建立专门针对跨地裂缝地段地铁隧道的变形监测和预警系统，可以全面掌握地裂缝活动及其引起的隧道变形，有利于适时采取或调整必要的预防措施，确保修建后地铁的安全运营。

(1) 隧道衬砌变形预警措施

在跨地裂缝上、下盘主变形区，将扁钢板作成抱箍固定在隧道衬砌外围或直接浇在衬砌内，其上焊接一钢筋做的测杆使其穿越地层延伸至地表，在地表做好醒目标记作为测点（上、下盘的地铁隧道衬砌各布设一个），对测点进行长期地表高精度水准测量，根据测点沉降变形的大小，进行实时准确快速的直接式预警。同时，在地裂缝主变形区隧道底部与土层接触面上沿纵向埋设压力传感器，根据接触压力的变化判断隧道底部是否脱空，从而进行间接式预警。

(2) 轨道变形预警处理方案

在跨地裂缝地段将轨道分段，每段两端下设混凝土支墩，固定在整体式道床上，使轨道与道床分离，

在两端混凝土支墩处的轨道与道床之间布设高精度伸长计测量轨道与道床之间的相对变形或位移,根据伸长计测量值的大小(即轨道变形量)进行预警。处理方案:在每段轨道与混凝土支墩间采用可调支座,通过调整支座控制地裂缝地段轨道的变形,同时在地裂缝段道床上预留注浆孔,当地裂缝活动量超过了可调装置的可调位移量时进行紧急注浆处理,或者采用整体式道床中的纵向浮置板道床和简支梁结构的组合。

3.5 其他措施

在地铁穿越地裂缝附近适当调整线路走向尽量使地铁隧道与地裂缝正交或大角度相交,避免小角度相交。因为地铁隧道与地裂缝正交或大角度相交时,穿越地裂缝变形区长度较小,结构受力基本受剪切作用,而小角度相交时,隧道穿越地裂缝变形区长度较大,且受力较复杂,不利于结构适应地裂缝的变形,增加结构防水的难度。建议西安市政府出台相应措施严格禁止在地铁二号线沿线一定范围内开采地下水,从而从根本上有效抑制地裂缝的活动,减少人为因素对地铁工程的影响。

此外,还应针对跨活动强烈的地裂缝地段预留应急检修室,对地铁进行局部维修或抢修。

4 结 论

(1)地裂缝对地铁隧道的致灾机理是地裂缝上盘下降导致位于上盘的地铁隧道底部脱空,在上覆土层重量和隧道两侧土体向下的摩擦阻力共同作用下,隧道衬砌结构产生的变形破坏。地裂缝活动可引起隧道衬砌变形破坏、防水失效和轨道变形等地铁病害。

(2)地铁隧道穿越地裂缝带的防治措施总的指导原则为:“防”与“放”相结合,以结构适应变形为主,先结构后防水。在此基础上提出了以扩大断面(预留净空)、分段设缝、柔性接头和局部衬砌加强的结构措施,结合可卸式管片拼装双层结构综合使用。其中“管中管”结构和柔性外围护结构作为备选方案,宜慎重采用。

(3)穿越地裂缝的地铁隧道防水必须强调结构自防水和变形缝防水,建议采取“以防为主,刚柔结合,多道设防,可拆可修,综合治理”的原则,可采用可卸式管片拼装双层结构法和BQXF防裂止水带法处理,而GINA止水带法因其处理变形量小,适用性有限。

(4)地基基础方面宜采用地基加固和弹性囊变形恢复法进行处理。为了全面掌握地裂缝活动及其可能引起地铁隧道变形破坏,提出了隧道衬砌和轨道的变形监测预警方案,可适时采取或调整必要的预防措施。

(5)地铁线路走向应尽量与地裂缝正交或大角度相交,避免小角度相交。严格禁止在地铁沿线一定范围内开采地下水。针对跨活动强烈的地裂缝地段应预留应急检修室,应对地铁局部维修或抢修。

本文所提上述措施和方法中,有些措施和方法如弹性囊变形恢复法进行地基处理仍需要进一步验证,工程中应根据具体情况采取不同的方案,或者几种措施和方法联合使用,成果可为西安地铁隧道穿越地裂缝的结构与防水设计、施工和隧道变形监测以及病害防治等方面提供重要参考。

参考文献:

- [1] 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 ground fissures in the region of Xi'an[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] 李永善. 西安地裂缝及渭河盆地活断层研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992. (LI Yong-shan. Research on ground fissures in xi'an region and active faults in Weihe basin[M]. Beijing: Seismic Press, 1992. (in Chinese))
- [4] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论分析与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000. (WANG Jing-ming. Theory of ground fissures hazards and its application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [5] 彭建兵. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992. (PENG Jian-bing. Active faults and geological hazards in Weihe basin[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992. (in Chinese))
- [6] 武 强, 陈佩佩. 地裂缝灾害研究现状与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 22 - 27. (WU Qiang, CHEN Pei-pei. Research on state of art and prospect of earth fissures[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 22 - 27. (in Chinese))
- [7] 王庆良, 刘玉海, 陈志新, 等. 抽水引起的含水层水平应变—地裂缝活动新机理[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1): 46 - 50. (WANG Qing-liang, LIU Yu-hai, CHEN Zhi-xin, et al. Horizontal strain of aquifer induced by ground water pumping—a new mechanism for ground fissure movement[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(1): 46 - 50. (in Chinese))
- [8] 师亚琴. 跨西安地裂缝建设一般建筑物的可能性探讨[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 76 - 81. (SHI Ya-qin. Discussion on

- possibility to construct ordinary buildings across ground fissures in Xi'an[J]. Journal of Catastrophology, 2001, **16**(2): 76 - 81. (in Chinese))
- [9] DBJ61—6—2006, J10821—2006 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程[S]. 2006. (DBJ61—6—2006, J10821—2006 Specification for site investigation and engineering design on Xi'an ground fractures[S]. 2006. (in Chinese))
- [10] 毛应生, 柳丽英, 王德信, 等. 西安市地裂对市政构筑物的破坏机理与对策的探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2002(2): 1 - 6. (MAO Ying-sheng, LIU Li-ying, WANG De-xin, et al. Approach to mechanism and countermeasure of municipal structures destroyed by ground cracking in Xi'an City[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2002(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [11] 范文, 邓龙胜, 彭建兵, 等. 地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1917 - 1923. (FAN Wen, DENG Long-sheng, PENG Jian-bing, et al. Study on the physical model experiment of subway tunnel crossing the ground fissure belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1917 - 1923. (in Chinese))
- [12] 黄强兵, 彭建兵, 门玉明, 等. 地裂缝对地铁明挖整体式衬砌隧道影响机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2324 - 2331. (HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, MEN Yu-ming, et al. Model test study on effect of ground fissure on open-cut metro tunnel with integral lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2324 - 2331. (in Chinese))
- [13] 邓亚虹, 彭建兵, 范文, 等. 地裂缝活动环境下盾构隧道双层衬砌性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增 2): 3861 - 3867. (DENG Ya-hong, PENG Jian-bing, FAN Wen, et al. Analysis of double-layer liner's behaviors of shield tunnel under the environment of moving ground-fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2) 3861 - 3867. (in Chinese))
- [14] 彭建兵, 范文, 黄强兵. 西安市城市快速轨道交通二号线穿过地裂缝带的结构措施专题研究[R]. 西安: 长安大学, 铁道第一勘察设计院, 2006. (PENG Jian-bing, FAN Wen, HUANG Qiang-bing. Special research on structural measurements of Xi'an urban express track traffic No.2 going through ground fissures[R]. Xi'an: Chang'an University, China Railway First Survey and Design Institute, 2006. (in Chinese))
- [15] 黄强兵, 彭建兵, 范文, 等. 西安地铁二号线沿线地裂缝未来位错量估算及工程分级[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(4): 469 - 474. (HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, FAN Wen, et al. Estimation of the maximum displacement of ground fissures along Xi'an Metro Line 2 and its engineering classification[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(4): 469 - 474. (in Chinese))
- [16] STIRBYS Anthony F, RADWANSKI Z Richard, et al. Los Angeles metro rail project-geologic and geotechnical design and construction constraints[J]. Engineering Geology, 1999, **51**: 203 - 224.
- [17] SHAHIDI A R, VAFAEIAN M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in active faulted zone and designing the flexible lining (for Koohrang-III tunnel)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, **20**: 213 - 221.
- [18] 陕西大地地震工程勘察中心. 西安地裂缝与轨道交通#2线防裂防渗研究[R]. 西安: 陕西大地地震工程勘察中心, 2006. (Shaan Xi Geodetic Seismic Survey Center. Research on crack-control and antiseep measures of Xi'an Metro Line 2 going through the ground fissures[R]. Xi'an: Shaanxi Geodetic Seismic Survey Center 2006. (in Chinese))
- [19] 樊红卫. 西安地铁一号线通过地裂缝对策研究[C]//中国交通运输协会城市轨道交通专业委员会首届中青年专家论文集, 北京: 2002: 105 - 109. (FAN Hong-wei. Study on the countermeasure for the Xi'an Metro Line 1 to transverse ground fissure[C]// The First Young Experts' Proceedings of Urban Track Transportation Professional Committee of China Transport Association, Beijing, 2002: 105 - 109. (in Chinese))
- [20] 杨育僧. 西安地铁二号线区间隧道通过地裂缝带方案探讨[J]. 都市快轨交通, 2006, **19**(3): 67 - 69. (YANG Yu-seng. A scheme for the transit tunnels of Xi'an Metro Line 2 to pass through ground fissures[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2006, **19**(3): 67 - 69. (in Chinese)).
- [21] 张雪松, 邓景纹, 董云德. 上海地铁车站结构防水措施评述[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(5): 107 - 110. (ZHANG Xue-song, DENG Jing-wen, DONG Yun-de. The evaluation of water-proofing work for Shanghai Metro stations[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(5): 107 - 110. (in Chinese))
- [22] 高树东. 深圳地铁一期工程混凝土结构自防水措施研究[J]. 现代隧道技术, 2002, **39**(1): 24 - 28. (GAO Shu-dong. Study on self-waterproofing for concrete structure of phase I project, Shenzhen Metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, **39**(1): 24 - 28. (in Chinese))