

# 地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型试验研究

范文<sup>1,2,3</sup>, 邓龙胜<sup>1</sup>, 彭建兵<sup>1,2</sup>, 黄强兵<sup>1,2,3</sup>, 曹琰波<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿井资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;  
3. 长安大学 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 根据西安地裂缝的分布特征与活动方式, 结合西安地铁2号线的走向, 建立地质模型, 通过物理模型试验来研究地裂缝对地铁隧道的影响。由试验结果可知: 地裂缝环境下隧道结构的受力、变形模式相当于一悬臂式弹性地基梁, 处于拉、压的受力状态, 受拉变形区主要在固定盘距裂缝20~80 cm范围内的衬砌顶部, 受压区则主要分布在下降盘距裂缝20 cm至固定盘距裂缝80 cm范围内的衬砌底部; 地裂缝的活动增加了下降盘内隧道顶部的竖向围岩压力, 同时减小了该范围内衬砌底部的竖向围岩压力; 地裂缝环境下隧道衬砌的破坏模式以环向开裂为主, 次生裂缝的发展则受张剪区的控制, 主要形成阶梯形、“y”形的贯通裂缝。在试验分析的基础上, 提出地铁隧道穿越地裂缝带时的设防范围及设防位置。

**关键词:** 隧道工程; 地裂缝; 地铁隧道; 物理模型试验; 相似理论

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)09 - 1917 - 07

## RESEARCH ON PHYSICAL MODEL EXPERIMENT OF METRO TUNNEL CROSSING GROUND FISSURE BELT

FAN Wen<sup>1,2,3</sup>, DENG Longsheng<sup>1</sup>, PENG Jianbing<sup>1,2</sup>, HUANG Qiangbing<sup>1,2,3</sup>, CAO Yanbo<sup>1</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Land Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** According to the distribution and movement of Xi'an ground fissure, combining the trend of metro tunnel No.2 in Xi'an, a geological model has been built, and then the effects of the ground fissure on the metro tunnel have been studied. The experimental results show that the tunnel is in tension and compression states, and behaviors as a cantilever elastic foundation beam under the environment of ground fissure. The tensile parts mainly distribute in the range between 20 and 80 cm away from the fissure in fixed block, and the compressive parts distribute between 20 cm away from the fissure in declined block and 80 cm away from the fissure in fixed block. At the same time, the movement of the ground fissure greatly increases the vertical pressure of surrounding rock at the top of tunnel and reduces the vertical pressure of surrounding rock under the bottom of tunnel in the decline block. Under the environment of ground fissure, the failure mode is mainly circumferential crack; the secondary fissures are controlled by tension-shear areas, and step and y-shaped fissures are mainly induced. Based on the experimental results, the section and position where countermeasures should be taken are put forward when the metro tunnels cross the ground fissure region.

**Key words:** tunnelling engineering; ground fissure; subway tunnel; physical model experiment; similarity theory

**收稿日期:** 2008 - 03 - 23; **修回日期:** 2008 - 06 - 21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40534021); 西部交通建设科技项目(20063180006)

**作者简介:** 范文(1967 - ), 男, 1990年毕业于西安地质学院水文地质与工程地质专业, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。  
E-mail: fanwen@chd.edu.cn

## 1 引言

西安地铁是西安市“十一五”规划的重点工程,南北走向的地铁2号线是西安市轨道交通规划中的一条重要的南北干线,其穿越了西安13条地裂缝中的11条,而这些地裂缝有的工程致灾状况十分严重。在地裂缝地段进行轨道交通建设,尚无规范、规程可循,国内外也没有在此类场地建设的先例,地裂缝的活动对地铁工程的建设及建成后的安全运营存在较大威胁。因此,研究地铁隧道穿越地裂缝问题是西安地铁建设中的难题<sup>[1]</sup>。

长期以来,人们对地裂缝的研究主要集中在地裂缝的宏观成因机制、空间分布规律、活动规律等方面,而在地裂缝对结构及构筑物的影响和相互作用原理方面的研究成果则相对较少。部分研究人员<sup>[2~5]</sup>认为,当管线、巷道等通过活断层带时,由于活动量较小,此时可以采用加强地基和围岩处理的办法来保证结构的正常使用,而对于地裂缝带,由于活动速率非常大,则主要采用空间避让、时间避让的办法来避开地裂缝活动对建筑物的影响。《西安地裂缝场地勘察与工程设计规程》(DBJ61-6-2006)指出了各类场地和建筑物对地裂缝要采取避让的措施,并规定了对不同级别地裂缝的避让距离。但是,当建筑物像管道、地铁等生命线工程通过强烈活动的地裂缝时,因无法避让,故研究地裂缝对通过地裂缝结构的影响是非常必要的。

根据西安地铁2号线穿越小寨地裂缝带的实际情况,进行相似物理模型试验研究,来分析地铁隧道结构在地裂缝环境下的变形、受力情况,并研究地裂缝对围岩压力分布、衬砌破坏特征的影响效应以及地裂缝的扩展规律,为通过地裂缝带地铁结构的设计提供参考。

## 2 西安地裂缝成因及活动方式

地裂缝对西安城市的建设和发展造成了灾害性的影响,迄今为止,西安地裂缝造成的直接损失已超过数十亿元<sup>[6~14]</sup>。多年来,人们对西安地裂缝的成因、分布规律和活动方式等进行了大量的研究,已形成较系统的认识。

### 2.1 地裂缝成因

对于西安地裂缝的成因,先后出现了抽水成因<sup>[15、16]</sup>、构造成因<sup>[8、17]</sup>和复合成因<sup>[7、18、19]</sup>的观点。但近年来,越来越多的学者趋向于西安地裂缝的形成是以断裂构造的发育为基础,过量开采地下水为诱因的成因观点,认为西安地裂缝是土层中的剪切破碎带在近地表处的扩展延伸,但其真正原因却是由于过量抽取地下水,使弱透水层压缩而改变土层中的应力状态引起的<sup>[20]</sup>。

### 2.2 地裂缝分布特征及活动方式

西安地裂缝是在西安正断层组的基础上发育起来的,其由南而北在黄土梁和洼地之间呈有规律排列,均位于黄土梁的南侧,主体走向为 $NE70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。它们一般都由主裂缝及其下降一侧的次级裂缝组成地裂缝带,带宽 $3\sim 8\text{ m}$ ,局部可达 $20\sim 30\text{ m}$ 。各条地裂缝带间距为 $0.4\sim 2.1\text{ km}$ ,平均 $1.0\text{ km}$ 。在剖面上的形态一般为上宽下窄的楔形,向下逐渐变窄变少,主要呈阶梯状、“y”字形、追踪式3种剖面组合形式<sup>[7]</sup>。

西安地裂缝主体倾向南,倾角较陡,一般在 $70^{\circ}$ 以上,并做正断层式的活动,其上盘总是相对于下盘下滑,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,而水平错动量很小,三者之比为 $1.00:0.31:0.03$ <sup>[1、12]</sup>。由西影路地裂缝监测结果(见图1<sup>[1]</sup>)可见地裂缝明显的三维运动特征。

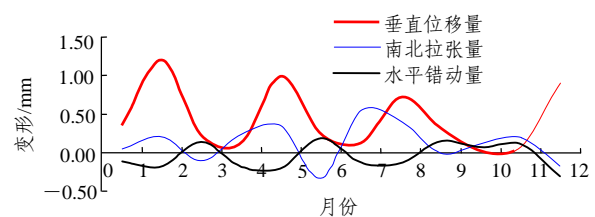


图1 西影路地裂缝三维变形曲线<sup>[1]</sup>

Fig.1 Three-dimensional deformation curves of ground fissure in Xiying Road<sup>[1]</sup>

对于本次模型试验的原型小寨地裂缝,其沿乐游源黄土梁南侧发育,西起西高新开发区,东至纺织城国棉六厂。勘察查明长度为 $20\text{ km}$ ,地表出露长度为 $14.5\text{ km}$ ,总体走向为 $NE75^{\circ}$ ,倾角近 $80^{\circ}$ ,活动强烈,现阶段活动速率为 $15.00\text{ mm/a}$ ,最大曾达 $56.93\text{ mm/a}$ ,在地铁2号线附近的地面破裂呈断续分布。

### 3 模型试验

#### 3.1 模型设计及参数选取

根据小寨地裂缝的实际情况, 走向为 NE75°, 其与 SN 向的地铁近似正交, 故在试验中按正交考虑, 地裂缝的倾角则设置为 80°, 并用塑料薄膜预置。根据西安地裂缝活动特征, 认为地裂缝影响区为上盘 0~20 m, 下盘 0~12 m, 考虑到对穿越地裂缝带的刚性结构的影响范围更大, 故做试验时取原型范围为上盘 40 m, 下盘 35 m, 结合地铁 2 号线在该段的平均埋深为 17.5 m, 并将本次模型试验的几何相似比确定为 1:25, 则模型尺寸选取为 3.000 m×1.500 m×1.465 m, 其中上盘长 160.0 cm, 下盘长 140.00 m, 衬砌埋深 70.0 cm。试验模型如图 2 所示。

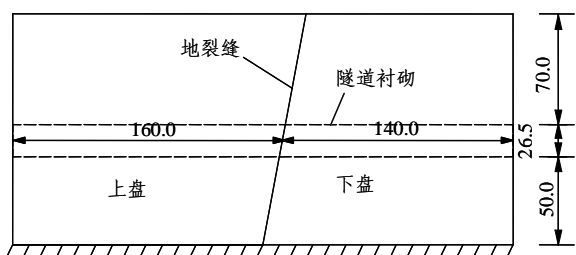


图 2 地裂缝试验模型(单位: cm)

Fig.2 Experimental model of ground fissure(unit: cm)

试验中, 衬砌的围岩按均匀土层考虑, 在填筑过程中沿模型箱四周内壁划分网格, 使每格填筑土体的体积相等来控制土体的均匀度。土体的材料参数取值如下: 土体容重  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ , 弹性模量  $E_s = 9 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.34$ , 黏聚力  $c = 0.03 \text{ MPa}$ , 内摩擦角  $\varphi = 28^\circ$ 。

由于本次模型试验的几何相似比为 1:25, 根据西安地铁 2 号线小寨段的衬砌断面实际尺寸, 确定模型马蹄型衬砌的尺寸: 宽 256.0 mm、高 265.2 mm、衬砌厚 26.0 mm。衬砌模型采用石膏浇注, 衬砌内配置钢丝网。根据试验前的多种配比测试, 试验中材料的配合比以石膏粉:水:缓凝剂为 3:3:1 进行配制, 其抗压强度为 3.8 MPa, 抗折强度为 2.05 MPa。衬砌的配筋率按等强度原则确定, 即

$$\frac{A_{ps} f_{py}}{A_{pc} f_{pc}} = \frac{A_{ms} f_{my}}{A_{mc} f_{mc}} \quad (1)$$

式中:  $A_{ps}$ ,  $f_{py}$  分别为原型构件的钢筋的面积和强度;  $A_{pc}$ ,  $f_{pc}$  分别为原型构件的混凝土的面积和强度;  $A_{ms}$ ,  $f_{my}$  分别为模型构件的钢筋的面积和强度;  $A_{mc}$ ,  $f_{mc}$  分别为模型构件的石膏的面积和强度。

以几何相似比 1:25、容重相似比 1:1 为基础相似比, 根据相似理论原理列出  $\pi$  项式, 可计算各物理量的相似比。本次模型试验中各相似比取值如下:  $C_{E_s} = 1/1$ ,  $C_\nu = 1/1$ ,  $C_\varphi = 1/1$ ,  $C_{\xi_s} = 1/1$ ,  $C_c = 1/1$ ,  $C_{\sigma_s} = 1/25$ ,  $C_L = 1/25$ ,  $C_H = 1/25$ ,  $C_P = 1/25$ ,  $C_E = 1/25$ ,  $C_{A_s} = 1/625$ ,  $C_{R_i} = 1/25$ ,  $C_{\sigma_T} = 1/25$ ,  $C_{\xi_T} = 1/1$ , 其中,  $\sigma_s$ ,  $\xi_s$  分别为土中应力及应变;  $L$  为模型长;  $H$  为隧道埋深;  $P$  为围岩压力;  $E$  为衬砌模量;  $A_s$  为配筋截面面积;  $R_i$  为衬砌各半径;  $\sigma_T$  为衬砌应力;  $\xi_T$  为衬砌应变。

#### 3.2 地裂缝活动模拟及边界控制

根据西安地裂缝的活动特点, 其主要是上盘相对于下盘下降, 以垂直位移为主, 则对地裂缝带的地表结构物或者浅层穿越地裂缝带的地铁等生命线工程, 地裂缝的影响主要表现为裂缝带不均匀沉降导致的结构变形、破坏。为研究这种具有正断层性质的地裂缝两侧土体活动引起隧道结构的变形破坏效应, 在本次模型试验中, 采用模型下盘底部不动, 上盘底部施加整体下降的位移边界条件来模拟地裂缝的活动, 如图 3 所示。试验中, 将 3 个千斤顶以正三角形位置放置在模型箱上盘底下, 通过控制千斤顶的升降进而控制模型上盘底部的竖直位移量来模拟地裂缝的活动量, 以研究模型底部竖向位移量为 1, 2, 3, 4, 5 cm 时, 地裂缝的影响效应, 并在上盘底部承台底面以下的模型箱侧壁划分均匀网格, 通过调节千斤顶来控制上盘的均匀沉降, 沉降速率控制为 1 cm/d。

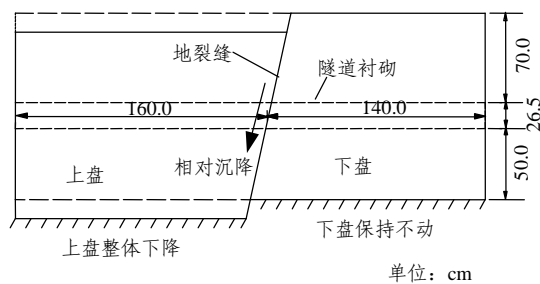


图 3 地裂缝活动边界条件

Fig.3 Boundary conditions of ground fissure movement

#### 3.3 监测点的布置

为研究地裂缝活动对隧道衬砌周围围岩压力及衬砌自身变形、受力的影响效应，试验中分别在距衬砌模型顶部 10 cm 及距底部 5 cm 处沿纵向布置一排 JXY - 2 型土压力盒，如图 4 所示。并在衬砌模型的顶部和底部各黏贴一排应变片，测量模型顶、底部的纵向变形；在两个侧面按照 0°，45°和 90° 倾角分别黏贴 7 组应变片，来测量衬砌侧面不同方向的变形，应变片的具体布置见图 5。试验中，压力盒数据用万用表测量，应变用 CML - 1L - 16 型综合应变测试仪进行测量，每小时记录一次读数。

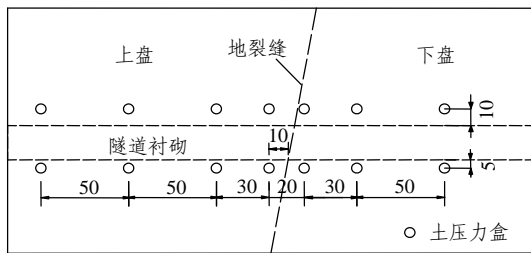


图 4 土压力盒布置图(单位: cm)

Fig.4 Location of earth pressure cell(unit: cm)

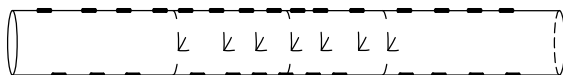


图 5 应变片黏贴位置图

Fig.5 Location of strain gauges

### 4 试验结果分析

#### 4.1 隧道衬砌变形受力分析

当模型上盘底部施加不同的竖向位移时，围岩将在自重作用下发生沿纵向不均匀的固结沉降，从而引起隧道衬砌的弯曲变形。图 6, 7 给出了模型底部位移为 0~5 cm 时隧道衬砌顶、底部的纵向应变曲线。由图可见，当没有施加位移(位移为 0 cm)时，衬砌顶、底部的纵向应变值都很小，基本为 0，结构没有发生弯曲变形。

由图 6 可见，当地裂缝开始活动以后，衬砌顶部在上盘范围内沿纵向基本处于受压状态，在下盘范围内基本处于受拉状态。在下盘距地裂缝 20~80 cm 的范围内拉应变值剧增，是主要的受拉区。当模型底部位移为 1~3 cm 时，拉应变值随着底部位移的增大而增大，而受拉区的范围基本没有扩展。当模型底部位移大于 3 cm 时，最大拉应变值反而变

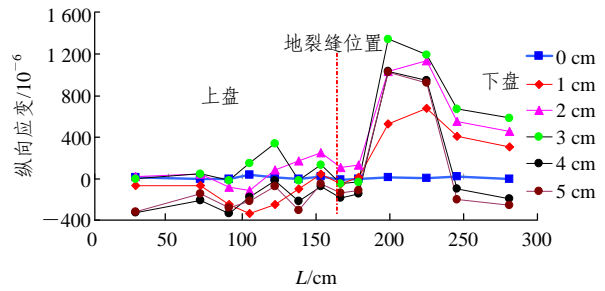


图 6 隧道衬砌顶部纵向应变曲线

Fig.6 Longitudinal strain curves at the top of tunnel lining

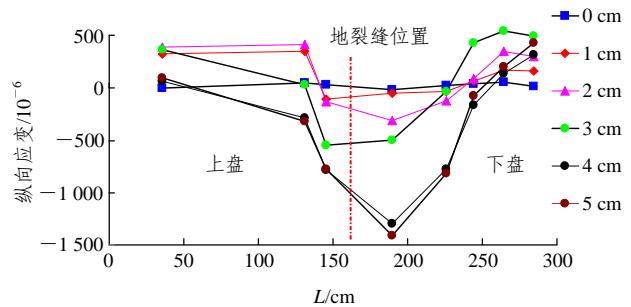


图 7 隧道衬砌底部纵向应变曲线

Fig.7 Longitudinal strain curves at the bottom of tunnel lining

小，说明结构的受拉区已经破坏，同时受拉区范围在向地裂缝方向收缩，在下盘远离地裂缝段变为受压状态，出现一反弯点。

由图 7 可见，地裂缝活动时，在地裂缝带衬砌结构底部沿纵向基本处于受压状态，受压区主要集中在上盘距地裂缝 20 cm 至下盘距地裂缝 80 cm 的范围内，两端远离地裂缝带则为受拉区。当模型底部位移为 1~3 cm 时，衬砌底部受压区压应变值随着模型底部位移的增大而增大，当模型底部位移大于 3 cm 时，位移的增加对最大压应变值没有明显的影响，此时受压区材料已基本屈服。同时，随着位移的增加，受压区有扩展的趋势。

通过上述分析可知，对于穿越地裂缝带的隧道衬砌结构，当地裂缝活动时，上盘范围内的衬砌将随周围土体一起下沉，而下盘围岩则阻止下盘范围内衬砌的下沉，所以在上、下盘交汇的裂缝带，衬砌结构将受到一定的弯矩和剪力作用。这些弯矩、剪力和围岩压力的共同作用，决定了衬砌的受力状态：在衬砌的顶部，基本是上盘范围内受压，下盘范围内受拉；在衬砌的底部，则是上、下盘靠近裂缝带受压，远离裂缝带受拉。此时，衬砌的受力模式相当于一根悬臂式弹性地基梁，下盘围岩对于衬

砌来说相当于锚固段。

### 4.2 地裂缝对围岩竖向压应力的影响分析

地裂缝活动情况下围岩内的应力分布与一般情况有明显的差异。当地裂缝上盘相对于下盘向下运动时, 跨地裂缝的隧道结构将阻止结构顶部一定范围内的土体向下活动, 而结构两侧下降的土体对结构顶部的土体将产生向下的拖拽作用, 这会极大地增大上盘内靠近裂缝带隧道结构顶部的竖向压应力。如图 8 所示, 在上盘距离地裂缝 10~40 cm 范围内, 衬砌顶部的竖向压应力越靠近裂缝带越大, 最大值出现在上盘裂缝带附近, 并且, 此范围内衬砌顶部的竖向压应力远比下盘和上盘此范围外的压应力大, 这是地裂缝活动影响的结果。此外, 随着模型底部位移量的增加, 竖向压应力略有减小。

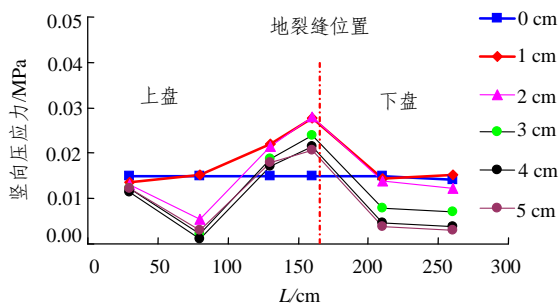


图 8 距隧道衬砌顶部 10 cm 处竖向压应力纵向变化曲线  
Fig.8 Longitudinal change curves of vertical pressure at the position 10 cm away from the top of tunnel lining

在隧道衬砌底部, 当地裂缝活动时, 下盘裂缝带的土体受到结构弯曲变形的挤压作用, 承受较大的竖向压应力, 远离地裂缝两侧的围岩中竖向压应力则有减小的趋势, 并且随着模型底部位移的增大而减小, 如图 9 所示。同时, 在上盘地裂缝附近, 隧道衬砌底部的竖向压应力略小于隧道衬砌顶部的

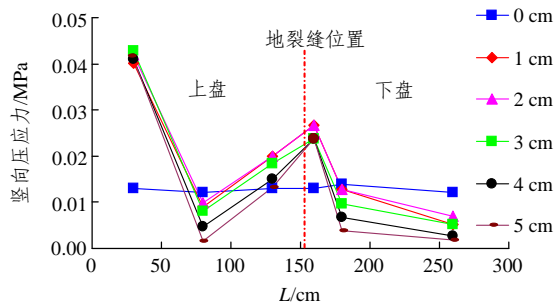


图 9 距隧道衬砌底部 5 cm 处竖向压应力纵向变化曲线  
Fig.9 Longitudinal change curves of vertical pressure at the position 5 cm away from the bottom of tunnel lining

竖向围岩压应力, 这种围岩竖向压应力底部小、顶部大的受力模式和没有地裂缝的情况具有极大的差异。

### 4.3 结构的破坏特征及裂缝发展规律

试验结束后, 对围岩进行了开挖、素描等, 以分析地裂缝环境下衬砌结构的破坏特征, 并研究围岩的变形规律及主、次裂缝的扩展规律。

由前面的分析可知, 地裂缝环境下的隧道结构相当于一受弯构件, 在地裂缝活动时, 衬砌顶部的受拉区首先产生屈服, 随着地裂缝活动量的增加, 屈服范围向下发展并导致结构的开裂破坏, 形成环向开裂的破坏模式, 如图 10 所示。



图 10 地裂缝环境下衬砌的破坏  
Fig.10 Failure of lining under the environment of ground fissure

地裂缝活动时, 上盘在土体重力的作用下固结沉降, 而上、下盘之间的摩擦力有阻碍上盘相对下降的作用, 故在上盘内预设裂缝附近形成剪切带。当地裂缝活动量逐渐增加时, 在地表形成张剪区, 产生次生裂缝, 并逐渐向下发展。图 11 所示为距隧道侧壁 35 cm 剖面素描图, 可见从地表向下发展的次生裂缝  $f_2$  与预设裂缝  $f_1$  近似平行, 呈阶梯状的剖

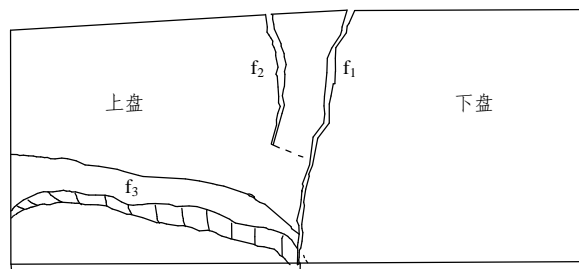


图 11 距隧道侧壁 35 cm 纵剖面素描图  
Fig.11 Sketch of longitudinal section 35 cm away from tunnel side wall



面特征,且裂缝宽度较大,为一张性裂缝。在上盘的底部,形成受拉破碎带  $f_3$ ,这主要是由于在模型上盘底部施加竖向位移时,模型箱四周对土体约束产生的摩擦力较大,导致固结沉降的不连续性,从而形成受拉破碎带。

图 12 为沿模型中心纵剖面素描图,可见从地面向下发展的次生裂缝  $f_2$ 、受拉破碎带  $f_3$  与预设裂缝  $f_1$  斜交,成典型的“y”形剖面特征,并且在主裂缝带的结构底部出现一定的脱空区。在上盘的底部产生受拉破碎带  $f_4$ ,这同样是由施加位移时,模型箱的约束导致底部土体固结沉降的不连续并脱空造成的。在下盘距预设裂缝 20~80 cm 的范围内,出现从结构顶部向上发展的 3 条微裂缝,这是因为该范围是衬砌结构的主要受拉区,由于土体与结构的摩擦较大,导致结构顶部小范围内的土体在地裂缝活动时受到水平张引力,导致土体的张拉开裂,这和前面衬砌结构的变形受力分析结果一致。

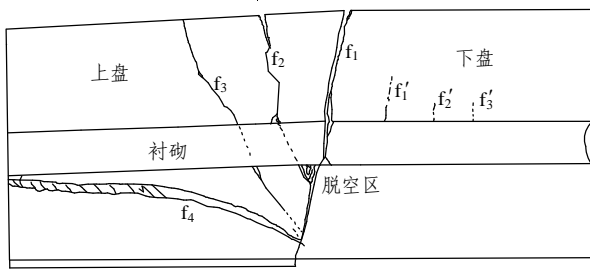


图 12 模型中心纵剖面素描图

Fig.12 Sketch of model central longitudinal section

## 5 结 论

通过试验结果及前面的分析可知:

(1) 对于通过地裂缝带的隧道结构,在地裂缝带附近顶部受拉,底部受压,其受力模式相当于一根悬臂式弹性地基梁,受拉变形区主要在固定盘距裂缝 20~80 cm 范围内的衬砌顶部,受压区主要在下盘距裂缝 20 cm 至固定盘距裂缝 80 cm 范围内的衬砌底部。

(2) 地裂缝的活动对穿越裂缝带衬砌结构的影响范围主要在地裂缝附近,尤其对下盘靠近裂缝带结构的影响最大。在该段,结构沿纵向所受的力较大,是进行结构设计时的重点设防地段,可采用增加衬砌顶部的纵向配筋和底部的混凝土厚度及强度

的措施。

(3) 地裂缝活动的程度对结构的受力状态有明显的影响。当地裂缝活动加剧时,结构拉、压区的应变增大,处于更不利的受力状态。

(4) 地裂缝的活动对结构围岩的应力状态有明显的影响,将增大上盘内衬砌顶部和下盘内衬砌底部靠近裂缝带的竖向围岩压应力,并且,在上盘地裂缝附近,结构顶部的围岩压应力略大于结构底部的围岩压力,这种结构围岩压应力底部小,顶部大的受力模式和一般情况结构围岩压力的分布情况有极大的差别。

(5) 地裂缝环境下衬砌结构的破坏模式主要以环向开裂为主,次生裂缝的发展主要受张剪区的控制,主要形成阶梯形、“y”形的贯通裂缝,并伴生一些张拉微裂缝或破碎带,并且在主裂缝带的结构底部会出现一定的脱空区。

## 参考文献(References):

- [1] 长安大学. 西安市城市快速轨道交通 2 号线穿过地裂缝带的结构措施专题研究[R]. 西安: 长安大学, 2007.(Chang'an University. Research on structure technique of subway tunnel No.2 cross through the ground fissure belt of Xi'an[R]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))
- [2] 伍法权, 王学潮, 国连杰, 等. 南水北调西线一期工程区断层活动性及其对工程的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 370 - 1 374.(WU Faquan, WANG Xuechao, GUO Lianjie, et al. Fault activity and its effect on the West Line of South-to-North Water Transfer Project of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 370 - 1 374.(in Chinese))
- [3] 黄生文, 司铁汉, 陈文胜, 等. 断层对大跨度隧道围岩应力影响的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 788 - 3 793. (HUANG Shengwen, SI Tiehan, CHEN Wensheng, et al. Finite element analyses of influence of fault on large-span tunnel surrounding rock stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 788 - 3 793.(in Chinese))
- [4] 张东升, 张吉雄, 徐金海. 预掘巷过断层及其矸石井下处理技术[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 178 - 182.(ZHANG Dongsheng, ZHANG Jixiong, XU Jinhai. Pre-driven roadway in fault and underground disposal of associated waste[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(2): 178 - 182.(in Chinese))

- [5] 师亚芹. 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 Yaqin. Discussion on possibility to construct ordinary buildings across ground fissures in Xi'an[J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(2): 76 - 81.(in Chinese))
- [6] 吴嘉毅, 廖燕鸿. 西安地裂缝的工程性质[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1990.(WU Jiayi, LIAO Yanhong. Engineering characters of Xi'an ground fissure[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [7] 王景明, 谢广林. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.(WANG Jingming, XIE Guanglin. Theory of ground fissures hazards and its application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [8] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990.(ZHANG Jiaming. Research on ground fissures in the region of Xi'an[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990.(in Chinese))
- [9] 李永善, 耿大玉, 林继华, 等. 西安地裂及渭河盆地活断层研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992.(LI Yongshan, GENG Dayu, LIN Jihua, et al. Research on ground fissures in Xi'an region and active faults in Weihe Basin[M]. Beijing: Earthquake Press, 1992.(in Chinese))
- [10] 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 457 - 466.(PENG Jianbing, MA Runyong, LU Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 457 - 466.(in Chinese))
- [11] 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 Jianbing, FAN Wen, LI Xi'an, et al. Some key issues in the formation of ground fissures in the Fenwei Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 433 - 440.(in Chinese))
- [12] 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 Peipei. Research on state of art and prospect of ground fissures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 22 - 27.(in Chinese))
- [13] 陈志新, 袁志辉, 彭建兵, 等. 渭河盆地地裂缝发育基本特征[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 441 - 447.(CHEN Zhixin, YUAN Zhihui, PENG Jianbing, et al. Basic characteristics about ground fractures' development of Weihe Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 441 - 447.(in Chinese))
- [14] 李新生, 王 静, 王万平, 等. 西安地铁 2 号线沿线地裂缝特征、危害及对策[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 463 - 468.(LI Xinsheng, WANG Jing, WANG Wanping, et al. Ground fissures along Xi'an subway No.2: characteristics, harms and measures[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 463 - 468.(in Chinese))
- [15] 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 Xuefa. Research on the asymmetry ground substance and the cause of ground fissure in Xi'an[J]. Earthquake, 1984, (6): 50 - 54.(in Chinese))
- [16] 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 Liuqiao, LI Shanyin. Possible mechanism of ground surface deformation caused by groundwater level changes[J]. Acta Seismologica Sinica, 1984, 6(2): 203 - 210.(in Chinese))
- [17] 赵其华, 王兰生. 构造重力扩展机制的地质力学模拟研究[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 21 - 27.(ZHAO Qihua, WANG Lansheng. Study on geomechanical simulation of tectonic gravity spreading mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(1): 21 - 27.(in Chinese))
- [18] 王景明, 常丕兴. 汾渭地裂缝与现代地震活动[J]. 地震学报, 1989, 11(1): 57 - 67.(WANG Jingming, CHANG Pixing. The Fenwei ground-fissure and modern seismic activity[J]. Acta Seismologica Sinica, 1989, 11(1): 57 - 67.(in Chinese))
- [19] 刘国昌. 西安的地裂缝[J]. 西安地质学院院报, 1986, (4): 9 - 22.(LIU Guochang. Ground fissure of Xi'an[J]. Journal of Xi'an Geology College, 1986, (4): 9 - 22.(in Chinese))
- [20] PENG J B, LI X A, SUN P. Ground fissure: the major geological and environmental problem in the development of Xi'an City, China[C]// STARRETT S K, HONG J H, LYON W G ed. Environmental Science and Technology(Vol.2). Houston, USA: American Science Press, 2006: 469 - 474.