

# 分段式地铁隧道穿越地裂缝带的模型试验研究

范文<sup>1, 2, 3</sup>, 熊炜<sup>1</sup>, 彭建兵<sup>1, 2</sup>, 马杰<sup>1</sup>, 黄强兵<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054; 2. 西部地质资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以西安某段地裂缝为原型, 通过几何比 1:25 的模型试验, 研究了地裂缝活动对分段式衬砌结构受力变形的影响效应。由试验结果得出: 由于分段式衬砌每一段均可以满足一定量的独立变形, 且对附近的衬砌段影响较小, 所以较能适应地裂缝环境。当地裂缝活动时, 衬砌顶部 10 cm 处土压力在上盘靠近裂缝两段及下盘靠近裂缝一段均减小; 衬砌底部 5 cm 处土压力在上盘靠近裂缝段减小, 在下盘靠近裂缝段增大; 其余段影响较小。上盘靠近裂缝两段衬砌顶部和底部均受纵向压力; 下盘靠近裂缝段衬砌顶部受拉, 底部受压; 其余段影响较小。上盘靠近裂缝段衬砌两侧面受压, 下盘影响较小。衬砌的破坏模式主要为侧壁受环向挤压破坏, 多发生在上盘尤其是靠近裂缝的结构段; 土体内次生裂缝不发育, 仅出现在上盘顶部预设裂缝附近以及下盘土体内部, 土体受张拉剪切作用, 形成张剪裂缝。

**关键词:** 隧道工程; 分段式衬砌; 模型试验; 地裂缝

**中图分类号:** U45      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2010)01-0138-06

**作者简介:** 范文(1967-), 男, 内蒙古人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: fanwen@chd.edu.cn。

## Model tests on segmental subway tunnel crossing ground fissure belt

FAN Wen<sup>1, 2, 3</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, PENG Jian-bing<sup>1, 2</sup>, MA Jie<sup>1</sup>, HUANG Qiang-bing<sup>1, 2, 3</sup>

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

**Abstract:** By use of a 1:25 model to simulate one section of the ground fissure in Xi'an, the effect of ground fissure activities on segmental lining is studied. The results indicate that each segment of lining can satisfy the quantitative unattached deformation and there is very small effect between each segment lining, so it can adapt to the ground fissure surroundings. When a fissure moves, the earth pressure at the lining top at the depth of 10 cm of two segments in the hanging wall and one segment in the footwall near the fissure decreases. The earth pressure at the lining bottom at the depth of 5 cm of one segment in the hanging wall near the fissure decreases, but that in the footwall increases. The top and bottom of two segment linings near the fissure in the hanging wall are longitudinally pressed. The top of one segmental lining in the footwall is pulled, but its bottom is pressed. Both sides of the lining near the fissure in the hanging wall are pressed, and the effect is smaller in the footwall. The main failure mode for the linings is that sidewall suffers hoop extrusion, which often occurs in the hanging wall, especially near the fissure. The secondary fissures in the soil do not develop, and they only appear on the top of the hanging wall near the fissure and inside the soil of the footwall. The soil is pulled and sheared to form the fissure.

**Key words:** tunnelling engineering; sectional lining; model test; ground fissure

## 0 前 言

随着西安城市规模的快速发展, 交通问题日益突出, 地铁建设迫在眉睫, 如何防治地裂缝灾害成为西安地铁修建的关键问题。

对于地裂缝环境下地铁隧道的修建, 国内外尚属首次, 资料匮乏, 缺少实验验证。现阶段研究人员虽然对其进行了分析研究<sup>[1-9]</sup>, 针对不同类型地裂缝提出不同的防治手段, 其中对于活动性较强烈的地裂缝普

遍认为采用分段式结构措施, 但理论基础与实验验证不足。

本文就此现状采用模型试验对地裂缝环境下分段式衬砌及其周围土体的受力变形和破坏模式进行分析

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40972181); 教育部重点项目(109146); 西部交通建设科技项目(200631800006)

**收稿日期:** 2008-09-01

研究, 为同类研究及西安地铁穿越地裂缝的工程方案提供参考。

# 1 试验概况

## 1.1 试验原型

西安市已查明的地裂缝带共有 14 条, 总体走向都是在 NE80° 左右, 倾角集中在 70° ~ 86°, 而此次建设的地铁二号线为南北走向, 穿越了其中 11 条地裂缝<sup>[1-2, 4, 8, 10]</sup>。

其中小寨地裂缝 (f<sub>7</sub>) 是西安地裂缝中贯通性最好、活动性最强、地表出露最清楚以及总长度最长的地裂缝之一。其总长度约 20 km, 深度最大达三百余米, 走向 NE75°, 倾角 84°, 地表单缝宽度 1.5~8.0 cm, 累计最大垂直位移可达 50~60 cm<sup>[2]</sup>, 将南北走向的地铁 2 号线与其近似看成正交。故此次试验选取地铁二号线隧道穿越小寨地裂缝作为研究对象, 根据实际情况, 进行相似模型试验研究, 以此来分析地铁隧道结构在地裂缝环境下的变形、受力情况, 并研究地裂缝环境下的围岩压力分布、衬砌破坏特征以及次生裂缝的扩展规律。

## 1.2 相似材料

试验以几何相似比 1 : 25 及重度相似比 1 : 1 为基础相似比, 根据相似理论<sup>[11]</sup>推得泊松比、应变、土体黏聚力和摩擦角的相似比为 1 : 1, 衬砌强度、应力、弹性模量的相似比为 1 : 25。由此确定马蹄形隧道衬砌外尺寸为宽 256 mm、高 265.2 mm、衬砌厚 26 mm。衬砌模型采用石膏粉 : 水 : 缓凝剂以 3 : 3 : 1 进行配制。

衬砌内配设钢丝网模拟衬砌的配筋, 衬砌的配筋率参考等强度原则近似确定,

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

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

## 1.3 结构特征模拟

隧道衬砌与裂缝正交, 通过对整体式衬砌模型试验<sup>[4]</sup>及有限元模拟结果分析, 为了避开衬砌最大受力点, 使衬砌符合受力规律, 拟将裂缝处设置分段接头, 近地裂缝段为 10 m, 次近段为 15 m, 故根据相似比本次试验衬砌共分 5 段, 其中 60 cm 长 2 段, 40 cm 长 2 段, 45 cm 长 1 段 (最北边一段由于模型箱限制, 仅设置为 45 cm), 其排列顺序如图 1 所示。根据地铁 2 号线在此段的平均埋置深度在 15~20 m, 确定试验

模型衬砌埋深 78.5 cm。

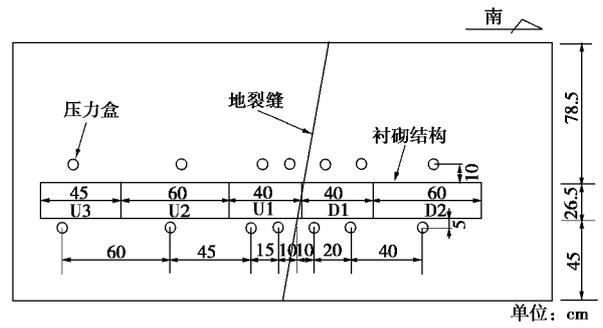


图 1 隧道及压力盒布设图

Fig. 1 Layout of tunnel and pressure boxes

## 1.4 试验装置及量测系统

以 3.0 m × 1.5 m × 2.0 m (长 × 宽 × 高) 的模型箱作为实验载体, 模型箱北边底板用千斤顶及千分表进行升降控制, 地裂缝用塑料薄膜预置。试验时, 北边底板按给定速率下降模拟地裂缝上盘运动, 根据小寨地裂缝未来 100 a 内可能到达的最大垂直位错量为 600 mm<sup>[10, 12]</sup>, 并考虑到试验的可操作性, 设计每次下降 1 cm, 代表实际 25 cm。

通过在衬砌顶、底围岩中埋设土压力盒 (图 1) 并在衬砌结构上粘贴应变片 (图 2), 用来量测上盘底板下降时衬砌顶底土压力的变化及衬砌结构的受力变形。



图 2 应变片粘贴位置图

Fig. 2 Layout of foil gauges

# 2 试验结果分析

## 2.1 地裂缝对土压力分布的影响

由于各种因素的影响, 拱顶初始纵向土压力在 0.01 MPa 附近分布, 为了较好地观察到地裂缝活动对围岩压力的影响, 将土压力均初始化为 0.01 MPa, 衬砌顶部的纵向土压力如图 3 所示。

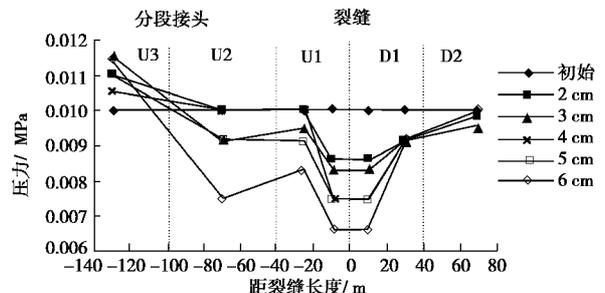


图 3 距隧道衬砌顶部 10 cm 处土压力纵向变化曲线

Fig. 3 Variation of longitudinal earth pressure on 10 cm top of tunnel lining

从图3看到衬砌顶部10 cm处土压力的变化数量级在 $10^{-3}$  MPa, 说明地裂缝对分段模型顶部土压力影响不显著。从曲线分析, 上盘顶部土压力减小, 且靠近裂缝处的土压力最小, 远离裂缝减小幅度降低, 并且随错距增加土压力值减小越多, 主要是由于上盘相对下降, 而裂缝处两盘之间的摩擦力阻止上盘相对运动, 形成张拉的趋势, 从而使衬砌顶部土压力减小; 上盘靠近模型箱一端的U3段土压力增大, 主要是因为上盘下降时越远离裂缝土体沉降幅度越大, 由于模型箱的限制产生挤压, 属于边界条件的影响。下盘D1段顶部靠近裂缝位置土压力减小, 且减小值随错距增大而增加, 主要是由于上盘下降, 对下盘靠近裂缝的土体及衬砌有向下拖拽的作用, 土体受拉, 使其顶部的土压力减小; 远离裂缝的D2段顶部土压力基本无变化。

将底部土压力初始化为0.05 MPa, 从图4看到衬砌底部5 cm处土压力的变化数量级在 $10^{-2}$  MPa。从曲线看到, 土压力变化集中在裂缝附近的两段衬砌, U1段底部土压力减小, 当错距小于3 cm时土压力略减小, 错距大于3 cm时土压力减小值突然增大, 且不再随错距的增加而增加; D1段底部土压力增大, 且错距大于3 cm时土压力突然增大, 推测衬砌发生破坏。试验后通过开挖发现衬砌西侧壁有较严重的破坏, 是造成U1段土压力的急剧减小及D1段土压力的急剧增大的主要原因。

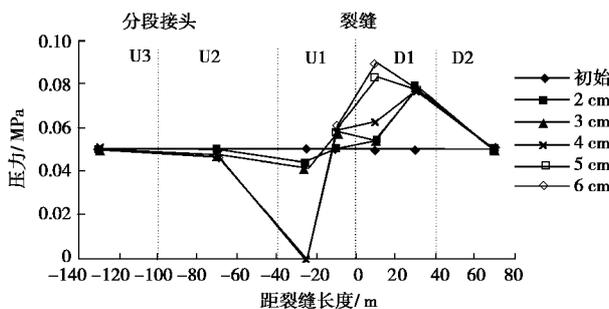


图4 距隧道衬砌底部5 cm处土压力纵向变化曲线

Fig. 4 Variation of longitudinal earth pressure at 5 cm bottom of tunnel lining

## 2.2 地裂缝对衬砌结构的影响

### (1) 衬砌顶、底的受力变形

试验中, 对模型上盘底板施加不同的竖向位移来研究裂缝活动对隧道衬砌变形的影响效应, 图5, 6给出了上盘底板位移为1~5 cm时隧道衬砌顶部、底部的纵向应变变化曲线, 由图可见, 当没有施加位移(位移0 cm)时, 衬砌顶部、底部的纵向应变值都很小, 基本为零。

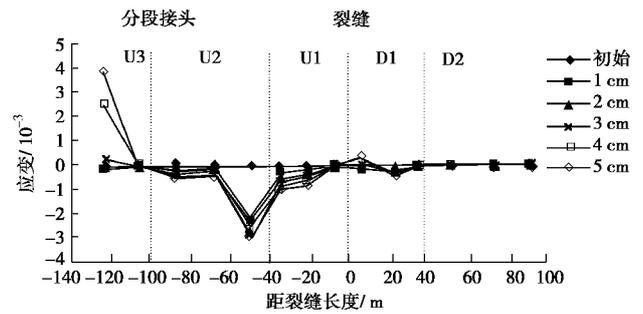


图5 隧道衬砌顶部纵向应变变化曲线

Fig. 5 Variation of longitudinal strains along lining top of tunnel

图5为衬砌顶部纵向应变曲线, 从图中可以看到衬砌在围岩压力的影响下, 上盘U1, U2衬砌顶部纵向受压, 且随错距增加略增大, U2段靠近裂缝处压应力变化达到最大, 靠模型箱的U3段应力变化主要是由于边界条件影响。下盘靠近裂缝的D1段衬砌顶部受拉, 且随着错距增加数值上略有变化, D2段衬砌受到的地裂缝活动影响微弱。

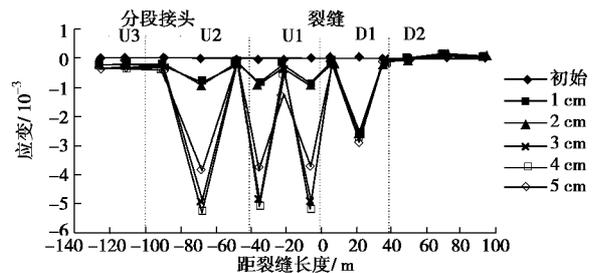


图6 隧道衬砌底部纵向应变变化曲线

Fig. 6 Variation of longitudinal strains along lining bottom of tunnel

图6为衬砌底部纵向应变曲线, 上盘U1, U2段衬砌受地裂缝活动的影响较严重, 整体受到挤压作用。且与顶部受力相比底部受到的挤压作用大, 远离裂缝的U3段受力变形较小。从图上看到错距小于3 cm时随错距增大压力缓慢增加, 当错距为3 cm时压应变突然增加, 结合衬砌底部土压力, 认为衬砌发生破坏, 而错距为5 cm时应变反而有减小趋势, 是由于上盘底部靠近裂缝的土体被拉裂塌落造成。下盘D1段受压, 且基本不随错距增加而变化, D2段不受影响。

### (2) 衬砌外侧壁的受力变形

图7为衬砌模型西侧面不同角度纵向排列应变片的应变曲线, 从图中可以反映模型受力模式, 位于下盘土体中的衬砌侧壁变形微小; 位于上盘土体中的衬砌侧壁在3个方向均处于受压变形, 且在与纵向方向成 $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 时变形作用较明显, 说明侧面主要受与纵向成 $45^\circ \sim 90^\circ$ 的剪应力。当错距3 cm时, 衬砌西侧壁破坏,  $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 的应变突然增大。



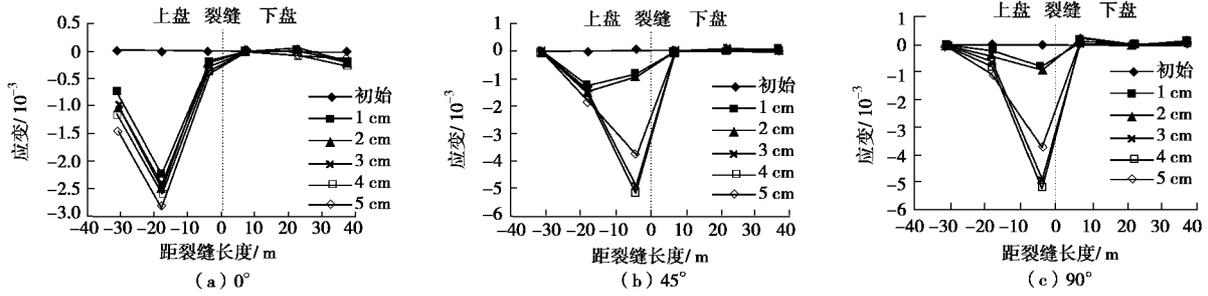


图 7 隧道衬砌西侧面应变变化曲线

Fig. 7 Variation of strains at west side of lining

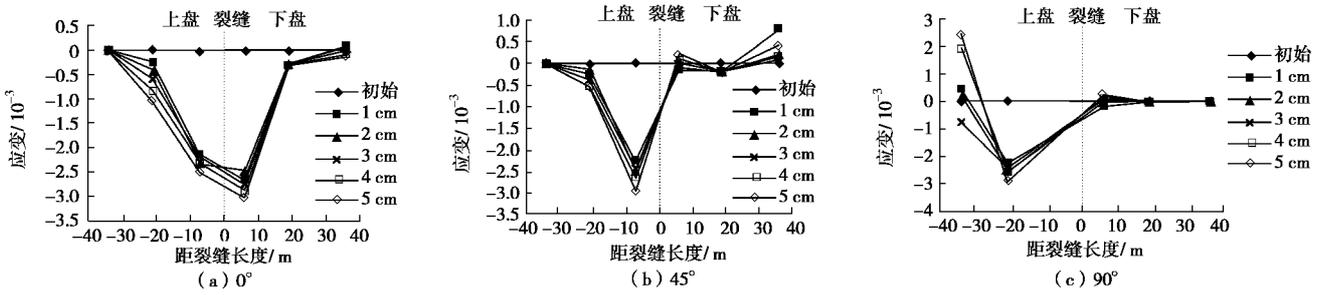


图 8 隧道衬砌东侧面应变变化曲线

Fig. 8 Variation of strains at east side of lining

图 8 为模型结构东侧面不同角度纵向排列应变片的应变曲线, 由图可见, 位于裂缝下盘的衬砌侧壁除 0° 方向临裂缝处受压外, 其他两个方向变形微小; 上盘 3 个方向均以受压为主, 压应变随错距变化差值不大, 且均小于西侧面 45°, 90° 的变形。

### 2.3 裂缝发展规律及衬砌变形破坏模式

本次试验上盘土体基本保持完整, 仅在其远离裂缝处的两侧各产生一条微小次生裂缝, 沉降时裂缝扩展主要体现在预设裂缝的扩展, 最大扩展距离达到 15.48 cm, 如图 9 所示。

生裂缝 f3, 发育不强烈; 在上盘底部形成一条受拉破裂带 f2, 这主要是在模型上盘底部施加竖向位移时, 下盘土体对上盘土体产生阻碍较大, 导致沉降不连续, 从而形成受拉破裂带, 产生脱空现象。在下盘可见 4 条与预设裂缝方向基本一致的微裂缝带, 主要是由于上盘对下盘土体有一定摩擦作用使其内部产生微小剪切裂缝。从图上还能看到, 在裂缝影响下, 顶部土体均向北有一个缓倾角度, 且上盘顶部倾角略大, 说明上盘土体越远离裂缝其沉降量越接近底板预设下降量, 而下盘是在上盘拖拽下产生的沉降。

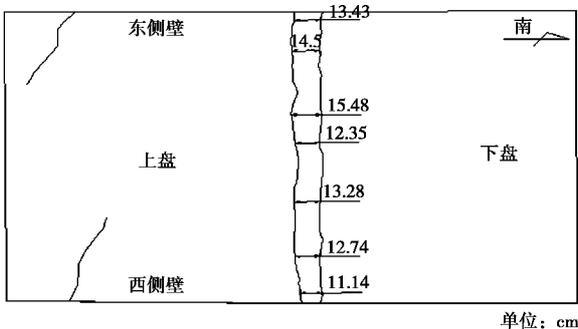


图 9 模型顶部裂缝扩展素描图

Fig. 9 Expansion of fissures in the top of model

地裂缝活动时, 上盘土体在重力作用下逐渐沉降, 而上、下盘之间的摩擦力有阻碍上盘相对下降的作用。如图 10 所示, 为西侧面开挖 25 cm 时的剖面素描图, 在上盘距裂缝较远处产生略向预设裂缝 f1 延伸的次

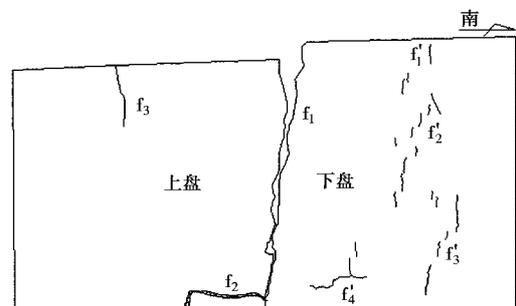


图 10 距衬砌西侧面 25 cm 纵剖面素描图

Fig. 10 Vertical section with a distance of 25 cm to west side of lining

图 11 为沿模型中心的纵剖面素描图, 预设裂缝 f1 在模型分段接口处垮塌严重, 此处仅见上盘底部受拉破裂带 f2, 以及下盘底部两条微裂缝, 未发现其他

次生裂缝。

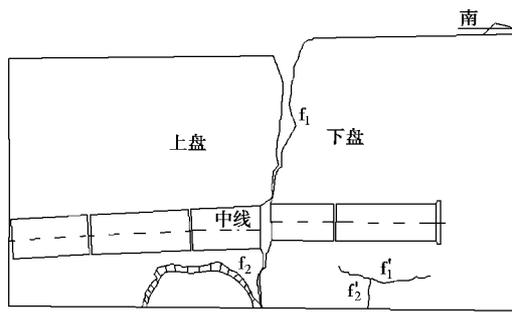
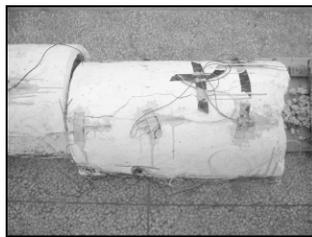


图 11 模型中心纵剖面素描图

Fig. 11 Vertical section in the center of model

通过开挖可以看到，所有衬砌模型的分段结构均受到挤压作用而出现裂缝，且西侧裂缝较多，尤其是靠近地裂缝的U1段衬砌西侧面受到强烈的挤压作用，产生严重的破坏（图 12），其余分段结构仅产生少量裂隙（图 13），这与前边的应力应变分析结果一致。导致衬砌西侧破坏的原因主要是下盘对上盘运动的阻碍造成上盘底部土体非均匀拉裂，产生不连续沉降，使衬砌两侧受力不等。



(a) 东侧面



(b) 西侧面

图 12 上盘靠裂缝段东侧面及西侧面照片

Fig. 12 Photos of east and west sides of hanging wall near the fissure

	北	上盘	裂缝位置	下盘	南
东侧	4 cm	基本完好	20 cm	11 cm	基本完好
顶面	25 cm	46 cm	17 cm 12 cm		20 cm
西侧	30 cm	基本完好	最宽18 cm	裂缝	12 cm

图 13 衬砌破坏素描图

Fig. 13 Failure of linings

本次模型试验只模拟了静力条件下地裂缝错动对衬砌结构的影响，但在地铁隧道实际运营过程中，列

车行驶时的动荷载对衬砌结构也会产生一定影响。动荷载使受拉的上盘土体被压实，同时由于分段衬砌的整体性较差，可能造成上盘靠近裂缝各段衬砌的不均匀沉降，影响列车通行。

### 3 结 论

(1) 隧道衬砌顶部土压力变化较小，总趋势为随错距增加而减小；而底部靠近裂缝两段土压力变化较大，变化趋势为随错距增加上盘减小，下盘增大。

(2) 整个衬砌结构模型均以受压变形为主，尤以上盘靠近裂缝段较为明显，并且随着地裂缝垂向错距增加，衬砌变形量有所增加。

(3) 衬砌结构的破坏模式主要表现为两侧壁受环向挤压产生破坏。位于上盘的衬砌模型由于底部出现不连续沉降等原因使衬砌两侧壁受力变形不均匀，靠近裂缝一段西侧壁破坏严重，其余分段仅出现少量裂隙；位于下盘的衬砌模型变形破坏不明显，仅产生少量裂隙。

(4) 当上盘沉降完成时，预设裂缝被拉开，土体上盘顶部出现两条未在土体中发育贯通的张拉裂缝，下盘土体内部产生与预设裂缝方向一致的微小剪切裂缝。

(5) 整个土体出现不等量沉降，尤其是上盘，表现出南高北低的不均匀沉降。

综上所述，通过分段式衬砌的模型试验说明分段式衬砌较能适应地裂缝的活动。

### 参考文献:

- [1] 长安大学. 西安市快速轨道交通二号线沿线地裂缝勘察[R]. 西安: 长安大学, 2007. (Chang'an University. Ground fissures reconnaissance along No. 2 Subway in Xi'an[R]. Xi'an: Changan Unnerving, 2007. (in Chinese))
- [2] 长安大学. 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, 2007. (Chang'an University. Research on structure technique of No. 2 Subway tunnel crossing the ground fissure belt of Xi'an[R]. Xi'an: Changan University, 2007. (in Chinese))
- [3] 陕西省地质矿产局. 西安地裂缝勘查研究综合报告[R]. 西安: 陕西省地质矿产局, 1990. (Shaanxi Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development. The general research report of Xi'an ground fissures exploration[R]. Xi'an: Shaanxi Provincial Bureau of Geo-Exploration and Mineral Development, 1990. (in Chinese))
- [4] 范文, 邓龙胜, 彭建兵, 等. 地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型实验研究[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. Research on physical model experiment of metro tunnel crossing ground fissure belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1917 - 1923. (in Chinese))
- [5] 李新生, 王静, 等. 西安地铁二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 Xin-sheng, WANG Jing, et al. Ground fissures along Xi'an subway line 2: characteristics, harms and measures[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(4): 463 - 468. (in Chinese))
- [6] 刘晓文, 王璐, 王进峰. 西安地铁区间隧道通过地裂缝带的施工方案[J]. 山西建筑, 2007, **33**(32): 316 - 318. (LIU Xiao-wen, WANG Lu, WANG Jin-feng. Investigation on construction scheme of the interzone tunnel which crosses the earth fissure in Xi'an metro[J]. Shanxi Architecture, 2007, **33**(32): 316 - 318. (in Chinese))
- [7] 丁先立, 季同月. 西安地铁地裂缝处理[J]. 山西建筑, 2007, **33**(13): 336. (DING Xian-li, JI Tong-yue. Process of cracks in Xi'an subway[J]. Shanxi Architecture, 2007, **33**(13): 336. (in Chinese))
- [8] 杨育僧, 杨骏. 西安地铁区间隧道通过地裂缝带的方案探讨[J]. 都市轨道交通, 2006, **19**(3): 67 - 69. (YANG Yu-seng, YANG Jun. A scheme for the transit tunnels of Xi'an metro to pass through ground crack[J]. City Quick Railway Transportation, 2006, **19**(3): 67 - 69. (in Chinese))
- [9] 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.
- [10] 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))
- [11] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998. (YUAN Wen-zhong. Similarity theory and statics model tests[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998. (in Chinese))
- [12] 李永善, 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 Yong-shan, et al. Research on ground fissures in Xi'an region and active faults in Weihei basin[M]. Beijing: Earthquake Press, 1992. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 彩色广告 封2 北京金土木软件技术有限公司  
封3 北京理正软件设计研究院有限公司  
封4 国网电力科学研究院南京南瑞集团公司  
前插1 武汉中科智创岩土技术有限公司  
前插2 金源土木工程仪器厂  
后插1 广州市中海达测绘仪器有限公司  
后插2 中仿科技