

# 地铁隧道穿越地裂缝带的结构抗裂预留位移量

黄强兵<sup>1,2</sup>, 彭建兵<sup>1,2</sup>, 王启耀<sup>3</sup>, 高虎艳<sup>4</sup>

(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. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 4. 西安市地下铁道有限公司, 陕西 西安 721000)

**摘要:** 西安地铁穿越多条活动地裂缝带, 地裂缝未来活动对地铁隧道结构造成严重威胁。论述西安地裂缝成因、活动方式和剖面特征, 对未来地裂缝活动趋势和地铁设计使用期内地裂缝最大垂直位移量进行分析和预测。通过浅埋暗挖马蹄形地铁隧道穿越地裂缝带的三维有限元数值模拟, 得出当地裂缝垂直位移量达到 20 cm 时隧道出现开裂破坏, 隧道结构抗裂设计时需分段设缝和扩大断面以适应地裂缝的大变形。基于数值模拟结果, 建立地裂缝作用下地铁隧道与地裂缝正交和斜交条件下分段隧道三维运动位移模式, 确定正交和斜交条件下结构抗裂的垂直位移、横向位移和轴向位移预留量。其结果可为西安地铁隧道穿越地裂缝带的结构设计提供参考。

**关键词:** 隧道工程; 地裂缝; 西安地铁; 隧道衬砌性状; 结构抗裂; 预留位移量

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 2669 - 07

## RESERVED DISPLACEMENTS FOR ANTI-CRACK DESIGN OF METRO TUNNEL PASSING THROUGH ACTIVE GROUND FISSURE ZONES

HUANG Qiangbing<sup>1,2</sup>, PENG Jianbing<sup>1,2</sup>, WANG Qiyao<sup>3</sup>, GAO Huyan<sup>4</sup>

(1. Department of Geological Engineering, 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. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China; 4. Xi'an Underground Railway Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 721000, China)

**Abstract:** Xi'an metro under construction pass through many ground fissure active zones, the future large deformations of active ground fissure zones make a serious threat on Xi'an metro tunnel. The genesis, moving mode and profile characteristics of active ground fissures in Xi'an are analyzed, the active tendency and maximum vertical displacements of active ground fissures in the design life time of metro tunnel are estimated. The behaviors of metro tunnel passing through active ground fissure are studied with three-dimensional FEM, the results show that tunnel lining appears cracks when the vertical displacement of ground fissure increases to 20 cm, structural measures such as setting up seams in tunnel segmentation, adding flexible joints between segmented tunnel and enlarging tunnel lining cross-section should be adopted in structural design of metro tunnel passing through active ground fissure zones. Based on the deformation characteristics of active ground fissures and numerical simulation results, the three-dimensional moving model of metro tunnel which is perpendicular and oblique to active ground fissure zones, is respectively established, the reserved value of vertical, transverse and axial displacements for metro tunnel in design are calculated. The conclusions can be presented as the reference for lining structure design

收稿日期: 2009 - 01 - 23; 修回日期: 2009 - 06 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40534021); 国土资源大调查项目(1212010914013); 西安市地下铁道有限公司科技项目(D2 - YJ - 022008199)

作者简介: 黄强兵(1972 - ), 男, 博士, 1997年毕业于长安大学水文地质与工程地质专业, 现任副教授, 主要从事地质工程、岩土及地下工程等方面的教学与研究工作。E-mail: dedgx24@chd.edu.cn

of tunnel passing through the ground fissure active zones.

**Key words:** tunnelling engineering; active ground fissure; Xi'an metro; tunnel lining behaviors; anti-crack design; reserved displacements

## 1 引言

西安地铁是西安市“十一五”规划的重点工程,它的建设将会给西安市的交通带来质的改变,大大缓解目前西安市交通十分拥挤现象。然而在建的地铁2号线从北往南穿越11条地裂缝,将建的地铁1号线从西到东穿越5条地裂缝,而这些地裂缝有的工程致灾状况十分严重。地裂缝的活动对西安地铁建设留下了重大的安全隐患。多年来,人们对西安地裂缝进行了大量的基础研究,但这些研究主要集中在地裂缝的宏观成因机制、空间分布规律、活动特征和地裂缝灾害及其防治对策探讨等方面<sup>[1~7]</sup>,地裂缝对地下工程尤其是地铁隧道的危害及防治几乎是空白。随着西安地铁建设的进行,地铁建设中的一些地裂缝问题引起人们的高度关注,并取得了一些重要成果<sup>[8~11]</sup>。由于地裂缝的复杂性,西安地铁隧道穿越地裂缝带的设防问题还有待深入研究。

根据以往调查结果,横跨地裂缝的地面建筑物和地下工程如管道、涵洞和厂房等,不管其类型和结构形式如何,几乎无一免遭地裂缝蠕动变形的强烈破坏<sup>[1~5]</sup>。隧道能否抵抗地裂缝的变形是地铁建设的关键,如若不能,那么就需确定能使地铁隧道衬砌产生开裂破坏的垂直位移量以及一旦开裂应采取的结构措施,而且地铁2号线走向与地裂缝基本正交,地铁1号线走向与地裂缝斜交,在正交和斜交条件下地铁隧道穿越地裂缝带的抗裂设计预留位移量等问题要求对穿越地裂缝带的地铁隧道结构必须进行安全可靠的抗裂设计,而其中由于地裂缝活动引起隧道结构产生的三维位移量(即垂直向、横向和轴向位移分量)则是地铁隧道穿越地裂缝带结构抗裂设防极其重要的参数之一。

## 2 西安地裂缝基本特征及其最大垂直位移量

### 2.1 西安地裂缝的活动特征

西安地裂缝是形成年代较为久远的存在近地表的构造破裂,过量开采地下水导致其出露地表而形

成的地表裂缝<sup>[7]</sup>,其活动与正断层相似即上盘相对于下盘下滑。在剖面上,地裂缝倾角一般在 $70^\circ$ 以上。地裂缝的活动往往在地层中形成一个影响带,该带由主变形区和微变形区组成,且其宽度随着地层埋深的增加而减小(见图1,其中 $h$ 为地裂缝的垂直位移量)。

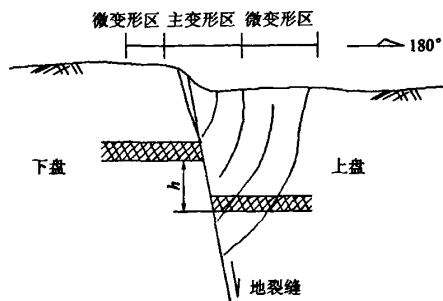


图1 活动地裂缝地层剖面示意图

Fig.1 Stratum profile sketch of active ground fissure

此外,西安地裂缝在地表还具有明显的三维变形特征即垂直位移、水平位移和水平扭动变形,三者之比约为 $1:0.31:0.03$ ,地裂缝的地表水准监测曲线也证明了这一点(见图2)。但地裂缝在地铁隧道埋深位置附近(10 m左右)其活动仅表现两侧地层的错位,水平张开度几乎为0,因此对地铁隧道影响而言,可只考虑地裂缝的垂直位移作用。

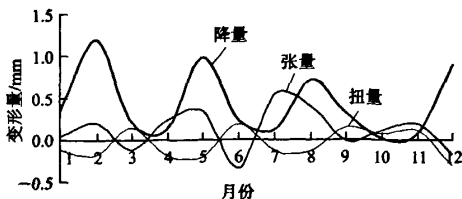


图2  $f_8$ 地裂缝在西影路的地表三维变形曲线

Fig.2 Three-dimensional ground deformation curves of ground fissure  $f_8$  in Xiying road

### 2.2 地裂缝的最大垂直位移量

西安地裂缝强烈活动于上世纪八、九十年代,在1990~1996年期间大量抽取地下水导致地裂缝超常活动,活动速率达 $10\sim40\text{ mm/a}$ ,而1996年后,

随着西安市采取黑河供水、禁采地下承压水措施的实施,地裂缝活动速率大大减小,尤其是近几年来活动速率一般为 1~10 mm/a。以活动最强烈的  $f_6$  地裂缝为例,西安地裂缝发展大致可分为如下 5 个阶段: A 为发生阶段, B 为加速发展阶段, C 为成熟阶段, D 为减速阶段和 E 为稳定阶段,如图 3 所示。由图 3 可知,目前西安地裂缝基本处于 E(稳定)阶段,未来活动只有可能保持目前的活动速率或者会进一步降低,重新快速活动的可能性极小。

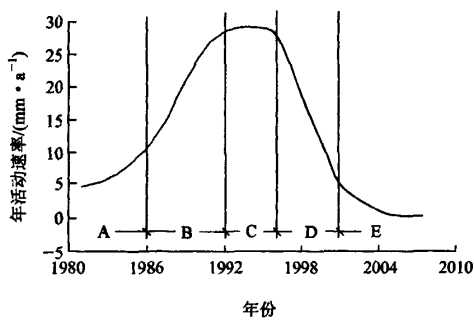


图 3 西安地裂缝发展阶段划分  
Fig.3 Active stages of Xi'an ground fissures.

针对地裂缝上述活动趋势,以地裂缝现今(2001~2005 年)的年平均活动速率为依据,结合各条地裂缝最大历史活动位移量,采用综合统计分析法得出与西安地铁相交的各条地裂缝在地铁设计使用期内的最大垂直位移量见表 1。考虑到地裂缝活动的不确定性,相关研究成果建议地铁隧道穿越每条地裂缝地段垂直位移量均按 500 mm 进行抗裂设防<sup>[6, 11]</sup>。

3 地裂缝作用下地铁隧道性状分析

为了研究地裂缝作用下地铁隧道的性状以及地裂缝多大位移量能使地铁隧道衬砌开裂破坏,本文采用大型有限元程序 MSC.Marc 对地铁隧道穿越活动地裂缝带进行了数值模拟分析。

3.1 建模思路及模型尺寸

地裂缝活动环境下隧道受力和结构变形模式是一个复杂的三维问题。因此,建模时采用三维有限元模型。以在建的地铁 2 号线浅埋暗挖隧道穿越地裂缝带为对象,来研究地裂缝作用下地铁隧道受力变形与破坏规律。考虑到西安地裂缝在地层中几乎近直立,有限元模型中地裂缝倾角统一取为 80°。模型长 72 m,马蹄形隧道断面宽和高分别为 6.4 和 6.63 m,埋深约 10 m,模型横向宽度和地层厚度分别取为 40 和 30 m。

3.2 边界条件

模型两端和左右两侧分别为 X 方向和 Y 方向约束,底部为 Z 方向约束。由于地裂缝的活动方式是上盘下降而下盘稳定,模型中在上盘底部设置一钢板,通过钢板向下运动来控制地裂缝上盘下降过程和位移量,上盘下降位移量分别按 10, 20, 30, 40 和 50 cm 这 5 种情况考虑。

3.3 材料取值

浅埋暗挖地铁隧道的初期支护主要采用锚杆和喷射混凝土来支护围岩,锚杆直径取为  $\phi 25$  mm,长度取为 2.5 m、间距为 1 m(见图 4(b))。初期支护喷射混凝土强度等级为 C20,厚度为 250 mm;二次衬砌为 C30 混凝土,厚度为 400 mm,按弹塑性材料考虑,参数取值见表 2。土体假设为理想弹塑性材料,采用 D-P 屈服条件和相关联流动准则。D-P 参数为

$$\sigma_y = \frac{9c \cos \varphi}{\sqrt{9 + 3\sin^2 \varphi}} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3\sin^2 \varphi}} \tag{2}$$

在上下盘之间即地裂缝破裂面、土体与衬砌和衬砌之间均设置接触面,采用库仑摩擦模型,地裂缝破裂面摩擦因数取 0.3,土体与隧道衬砌间摩擦因数取 0.7。锚杆采用 Rebar 膜单元,可随着实体单元的受力而同步变形。

3.4 计算结果分析

图 5 给出了隧道衬砌纵向应力云图。由图 5 可

表 1 地铁设计使用期内(100 a)各交汇处地裂缝最大垂直位移量

Table 1 Maximum predicted vertical displacements of each ground fissure in metro life time of 100 years												mm	
地裂缝编号	$A_{max}$												
	$f_2$	$f_3$	$f_{\text{朝阳门外}}$	$f_4$	$f_5$	$f_6(f_6')$	$f_7$	$f_8$	$f_9(f_9')$	$f_{10}$	$f_{11}$	$f_{12}$	备注
地铁 2 号线	180	180	-	-	400	450/200	400	400	150	200	400	400	未给数据的与地铁线路不相交,多个数据为多个交汇点
地铁 1 号线	-	250/100	100	100	400	150/400/150	-	-	-	-	-	-	

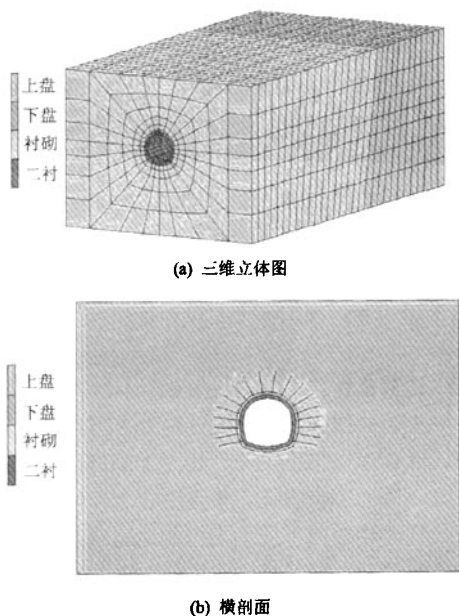


图 4 有限元计算模型  
Fig.4 General view of finite element model

表 2 模型材料计算参数

参数	容重 $\gamma$ $/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 $E/MPa$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/MPa$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
土体	19	9	0.34	0.03	20
C20混凝土	25	$2.55 \times 10^4$	0.18	2.10	45
C30混凝土	25	$3 \times 10^4$	0.18	3.00	56
锚杆	28	$2 \times 10^5$	0.20		

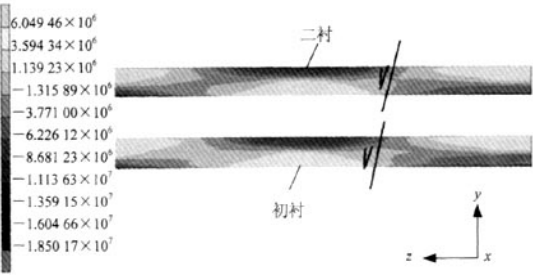


图 5 隧道衬砌纵向应力云图(单位: Pa)  
Fig.5 Spectrum of longitudinal stress of tunnel lining(unit: Pa)

知,在地裂缝作用下隧道衬砌纵向应力总体呈现出现在地裂缝带的上盘顶部受压、底部受拉而下盘顶部受拉、底部受压的反对称变化趋势,其中地裂缝上盘底部衬砌拉压较明显。

图 6 给出了隧道纵向中轴线二次衬砌底部和顶

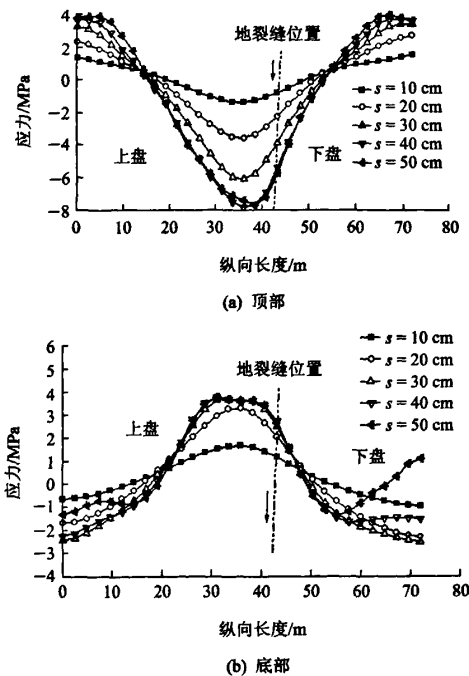


图 6 二衬底部纵向应力变化曲线  
Fig.6 Stress variations of secondary lining with displacement of ground fissure

部在地裂缝活动垂直位移量分别为 10, 20, 30, 40 和 50 cm 时的纵向应力变化曲线。随着地裂缝垂直位移量(s)的增加,隧道衬砌顶部受压和底部受拉越明显,顶部纵向应力变化曲线呈 V 型,地裂缝附近的上盘位置其值最大,向两侧受压程度逐步减小甚至出现受拉现象;而二衬底部纵向应力变化正好与顶部相反,呈现八型变化,位于上盘的地裂缝附近受拉程度最大,向两侧逐步减小直至两端出现受压现象。隧道衬砌的拉、压应力区基本位于上盘距裂缝带 3~15 m 处。

图 7 给出了二衬顶、底部最大应力随地裂缝垂直位移(错)量的变化曲线。由图 7 可知,衬砌顶部压应力和底部拉应力均随地裂缝位移(错)量的增大而增大,当位移(错)量达到 20 cm 时,底部拉应力 $\sigma_t = 3.3$  MPa 超出了衬砌抗拉强度,位于上盘的隧道底部衬砌最先出现开裂破坏;但当位错量大于 30 cm 时,底部最大拉应力增长缓慢,最终趋于一极限值,这与材料的屈服有关。

以上分析说明,地裂缝活动对地铁隧道的危害主要表现在:当上盘土体发生沉降时,隧道衬砌由于受到上盘土体拖拽及自重而发生变形,引起衬砌

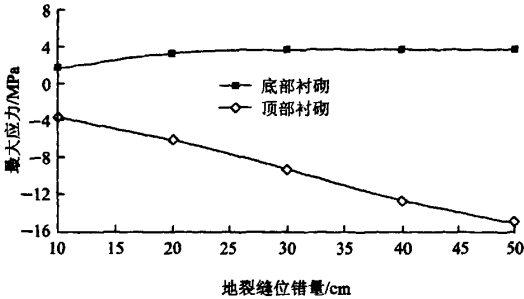


图 7 二衬最大应力变化曲线

Fig.7 Variations of the maximum stress of secondary lining with displacement of ground fissure

底部和顶部产生较大的拉应力和压应力, 从而导致衬砌材料的屈服和隧道的破坏。同时, 大型模型试验研究结果也表明当地裂缝活动量达到 25 cm 时浅埋暗挖隧道衬砌出现开裂破坏<sup>[8, 11]</sup>(见图 8), 这进一步证明地铁隧道无法抵抗地裂缝在地铁设计使用期内 500 mm 的垂直位移量。因此, 穿越地裂缝带的地铁隧道必须采取分段设缝加柔性接头以适应地裂缝大变形的特殊结构措施<sup>[10, 11]</sup>。

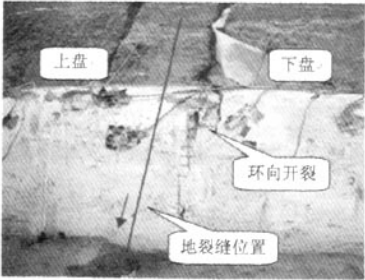


图 8 地裂缝作用下隧道衬砌的破坏示意图

Fig.8 Failure of metro tunnel lining under the action of active ground fissure

#### 4 地铁隧道穿越地裂缝带结构抗裂预留位移量

根据有限元数值计算及模型试验结果<sup>[8~11]</sup>, 地铁隧道穿越地裂缝带时必须采取分段设变形缝加柔性接头进行处理(见图 9)。地裂缝作用下分段隧道三维位错变形如图 10 所示, 图 10 中  $ab$  为垂直位移量,  $ab'$  为轴向位移量,  $ac$ (即  $\Delta x$ ) 为横向位移量。在地铁设计使用期内地裂缝垂直位移设计值为 500 mm, 这反映到隧道结构上, 分段隧道将产生明显三向位移, 引起其内部净空减小, 严重影响列车行车安全。因

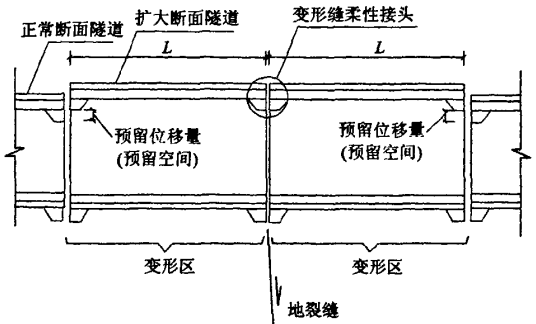


图 9 分段设变形缝隧道结构示意图

Fig.9 Structure diagram of segmented tunnel with flexible and movement joints

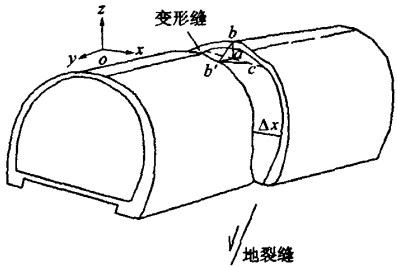


图 10 分段隧道三维位错变形示意图

Fig.10 3D dislocation of segmented tunnel under the action of ground fissure

此, 隧道穿越地裂缝带的结构抗裂设计需扩大衬砌结构断面, 断面扩大的尺寸就是分段隧道结构设计预留位移量(包括结构垂直向和横向的预留量或内净空)(见图 10)。

##### 4.1 正交条件下的抗裂设计预留位移量

当分段式隧道正交穿越地裂缝带时, 考虑到结构的安全性, 一般将变形缝设于地裂缝位置(见图 9)。隧道与地裂缝相交空间运动位移展布如图 11 所示, 图中  $\overline{AD}$  为地裂缝走向,  $\overline{MN}$  和  $\overline{EF}$  为隧道轴线方向,  $\overline{MN}$  与地裂缝正交于  $a$  点, 隧道变形缝设在  $a$  点, 地裂缝倾角为  $\beta$ , 按  $80^\circ$  考虑。当地裂缝垂直位移量为  $H$  时, 由于隧道在  $a$  点分段设缝, 其设计垂直位移预留量即地裂缝的最大垂直位移  $H$ ; 而隧道轴向拉伸位移量为  $oa'$ , 通过空间投影几何关系可得

$$oa' = H / \tan \beta \quad (3)$$

在建的西安地铁 2 号线为 SN 走向, 而西安地裂缝的走向基本为 NE80°左右, 二者近似正交。按照上面分析及式(3)即可得到未来 100 a 内西安地铁

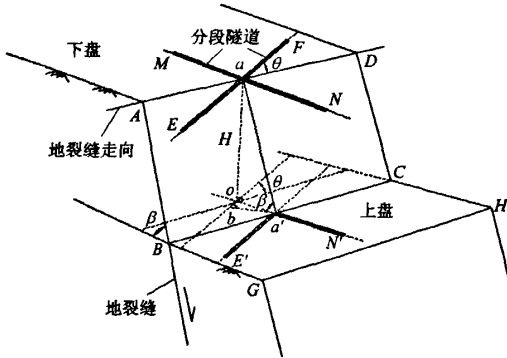


图 11 分段式隧道与地裂缝相交运动位移模式图

Fig.11 Movement model of segmented tunnel intersecting ground fissure

2 号线穿越地裂缝带的隧道结构抗裂设计位移预留量如表 3 所示。由表 3 可知,隧道抗裂设计垂直位移预留量即是地裂缝最大垂直位移量,最大可达 450 mm,分段式隧道断面高度方向应扩大的尺寸或预留净空可根据表 3 中垂直位移量进行确定,而轴向位移预留量最大为 80 mm,如果垂直位移量按设计建议值 500 mm 设防,则隧道轴向位移将达到 89 mm,这将对地铁轨道和接头产生拉伸作用。

表 3 地铁 2 号线与各地裂缝带交汇处隧道结构抗裂设计预留位移量

Table 3 Maximum reserved displacements of metro line 2 passing through each active ground fissure

地裂缝名称	垂直位移/mm	轴向位移/mm
$f_2$	180	32
$f_3$	180	32
$f_5$	400	71
$f_6(f'_6)$	450/200	80/35
$f_7$	400	71
$f_8$	400	71
$f_9(f'_9)$	150/150	27/27
$f_{10}$	200	35
$f_{11}$	400	71
$f_{12}$	400	71

注:表中有 2 个数字的为隧道上下行线路夹角不同,下同。

#### 4.2 斜交条件下的抗裂设计预留位移量

分段式隧道与地裂缝相交运动位移模式图如图 11 所示,分段隧道线路走向  $\overline{EF}$  与地裂缝斜交于  $a$  点,其他代号同前。当地裂缝垂直位移量为  $H$  时,由于隧道在  $a$  点分段设缝,其设计垂直位移预留量即是地裂缝最大垂直位移  $H$ ,隧道轴向拉伸位移量

为  $ob$ ,由于斜交导致地铁隧道的横向位移为  $a'b$ ,通过空间投影几何关系可得隧道水平(横向)位移量  $a'b$  和轴向拉伸位移量  $ob$  分别为

$$a'b = oa' \sin(90^\circ - \theta) = \frac{H}{\tan \beta} \cos \theta \quad (4)$$

$$ob = oa' \cos(90^\circ - \theta) = \frac{H}{\tan \beta} \sin \theta \quad (5)$$

将建的地铁 1 号线为东西走向,与地裂缝带斜交(夹角为  $25^\circ \sim 50^\circ$ )。当各条地裂缝与地铁 1 号线斜交的夹角  $\theta$ 、地裂缝倾角  $\beta$  以及地裂缝最大垂直位移量  $H$  已知时,通过式(4)、(5)可得未来 100 a 内地地铁 1 号线与各条地裂缝交汇处地铁隧道结构抗裂设计的最大水平位移和轴向位移预留量如表 4 所示。由表可知,地铁隧道与地裂缝斜交时,地裂缝活动对地铁隧道在空间上产生三向位移运动即垂直向、横向和轴向位移作用,使隧道结构受力更为复杂。尤其是其中的横向位移,最大可达 97 mm,这对地铁轨道影响很大,设计时需采取可调的道床和轨道等有效措施进行处理。在与地裂缝带斜交条件下分段式地铁隧道断面扩大或预留净空需要同时考虑横向和垂直向即高度方向的抗裂位移预留量。

表 4 地铁 1 号线与各地裂缝带交汇处隧道结构抗裂设计预留位移量

Table 1 Maximum reserved displacements of metro line 1 passing through each active ground fissure

地裂缝名称	交汇点位置	地铁线路与地裂缝的交角/(°)	垂直位移/mm	横向位移/mm	轴向位移/mm
$f_3$	大庆路	52	500	55	70
$f_3$	莲湖路	31	150	23	14
$f_{\text{朝阳门外}}$	朝阳门外	25/27	150	24	11
$f_4$	长乐西路	45	150	19	19
$f_5$	长乐东路	24/26	600	97/95	43/47
	长乐东路	39/36	300	41/43	33/31
$f_6$	纺北路	53/40	600	64/81	85/68
	堡子村南				
	纺北路	51/38	300	33/42	41/33
	新寺村				

## 5 结 论

(1) 论述了西安地裂缝的成因、活动方式和剖面活动特征,从西安地裂缝发生、发展的阶段性规律分析了西安地裂缝的未来活动趋势,对地铁设计使用期内地铁隧道与各地裂缝交汇点处地裂缝的最

大可能垂直位移量进行了预测。

(2) 有限元数值模拟表明, 地裂缝作用下隧道衬砌纵向应力总体呈现出上盘顶部受压、底部受拉而下盘顶部受拉、底部受压的反对称变化趋势, 且随地裂缝位错量的增大而增大。当地裂缝垂直位移量达到 20 cm 时隧道出现开裂破坏, 说明地裂缝作用下地铁隧道的变形破坏无法避免, 隧道抗裂设计时必须分段设缝和扩大断面以适应地裂缝的大变形。

(3) 建立了地裂缝活动环境下地铁隧道与地裂缝正交和斜交条件下隧道的三维运动位移模式, 求得了地铁设计使用期内正交和斜交条件下隧道抗裂设计的垂直位移, 横向位移和轴向位移预留量, 穿越地裂缝带的分段式隧道结构断面扩大尺寸即可根据所求预留位移量确定, 其结果可为西安地铁穿越地裂缝带的隧道结构设计提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 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))
- [2] 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 Jingming. Theory of ground fissures hazards and application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [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 Yongshan. Research on Xi'an ground fissures and active faults in Weihe basin [M]. Beijing: Seismic Press, 1992.(in Chinese))
- [4] 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 Jianbing. Active faults and geological hazards in Weihe basin[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992.(in Chinese))
- [5] 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制与对策的探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2002, (2): 1 - 6.(MAO Yingsheng, LIU Liying, WANG Dexin, et al. Approach to mechanism and countermeasure of municipal structures destroyed by ground cracking in Xi'an city[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2002, (2): 1 - 6.(in Chinese))
- [6] 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 Qiangbing, PENG Jianbing, 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))
- [7] 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): 1 826 - 1 834.(PENG Jianbing, CHEN Liwei, HUANG Qiangbing, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground fissure expansion mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1 826 - 1 834.(in Chinese))
- [8] 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): 1 917 - 1 923. (FAN Wen, DENG Longsheng, PENG Jianbing, et al. Study of the physical model experiment of metro tunnel crossing ground fissure belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 917 - 1 923.(in Chinese))
- [9] 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): 2 324 - 2 331.(HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Model test study of effect of ground fissure on open-cut metro tunnel with integral lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 324 - 2 331.(in Chinese))
- [10] 黄强兵, 彭建兵, 樊红卫, 等. 西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 781 - 788.(HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Hongwei, et al. Metro tunnel hazards induced by active ground fissures in Xi'an and relevant control measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 781 - 788.(in Chinese))
- [11] 彭建兵, 黄强兵. 西安地裂缝对地铁工程的危害及防治措施研究[R]. 西安: 长安大学, 2008.(PENG Jianbing, HUANG Qiangbin. Research on hazard of Xi'an active ground fissures on metro engineering and relevant countermeasures[R]. Xi'an: Chang'an University, 2007.(in Chinese))