

隧道在地裂缝处的沥青混凝土 复合衬砌的力学响应分析

杨素新, 邵生俊, 余芳涛, 马林

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:针对隧道分缝衬砌结构为适应地裂缝错动造成位移变形而采用的流变性沥青混凝土复合衬砌置于初次衬砌和永久衬砌之间,改善隧道受力条件,以及沥青混凝土密封变形缝防止隧道渗漏的新型技术,应用有限差分数值方法,模拟隧道围岩土层结构及土材料的弹塑性、开挖支护施工过程、复合衬砌沥青混凝土的弹粘塑性、地裂缝两侧上、下盘土层相对错动位移变化,进行了地裂缝隧道永久衬砌结构分缝支护、初次衬砌和永久衬砌中间复合无缝沥青混凝土衬砌的力学响应特性分析。结果表明沥青混凝土复合衬砌能够抑制地裂缝错动位移条件下永久分缝衬砌段的水平位移和旋转位移,其流变变形调整和改善了永久分缝内衬的受力状态,减小了地裂缝附近衬砌结构的集中受拉受压作用。

关键词: 地裂缝; 隧道; 分缝衬砌结构; 沥青混凝土复合衬砌; 流变; 数值分析

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)03-0265-06

Dynamic Response Analysis on the Asphalt Concrete Composite Lining Structure in Tunnel near Ground Fissure

YANG Su-xin, SHAO Sheng-jun, SHE Fang-tao, MA Lin

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to avoid the destroy of segmented lining structure caused by displacement of ground fissures in the tunnel of Xi'an metro, a new technology which use the creeping asphalt concrete composite lining between the initial lining and the permanent lining is adopted at the position of ground fissures. In this paper, using the 3D finite difference numerical method, the structure of soil mass, the elastic-plastic deformation property of soils, the construction process of excavation and lining support, the visco-elastic-plastic property of the asphalt concrete lining and the relative displacement between both blocks of ground fissure are simulated. The mechanics behaviors of the tunnel at ground fissure area with and without the composite asphalt concrete lining structure are analyzed. The results shows that the horizontal displacement of segmented inner lining structure become smaller, the tension and compression action forced on the segmented lining are reduced, because the creep deformation of the asphalt concrete lining adjusts and improves the stress state of the lining structure.

Key words: Ground-fissure; Tunnel; Segmented lining structure; Asphalt concrete composite lining; Creep; Numerical analysis

0 引言

西安是我国遭遇地裂缝灾害最广泛、最严重的城市之一。根据《西安地裂缝场地勘察与工程设计规程》(DBJ61-6-2006),西安地裂缝被定义为在过量开采承压水,产生不均匀地面沉降条件下,临潼—长安断裂带西北侧(上盘)的一组 NE 走向隐伏地裂缝出现活动,在地表形成的破裂。地裂缝的走向大体为 NE~NEE,近似平行于长安—临潼断裂;呈南倾、南降运动,倾角 80° [1]。根据地裂缝活动的监测等分析,竖直向错动、水平拉张、水平扭动的位移比为 1:0.3:0.03;预测 100 年内隧道洞顶竖向错动位移设计值为 50 cm。

已建设的西安地铁二号线是轨道交通线网南北向骨干线,穿越了西安市目前已发现的 15 条地裂缝中 11 条主裂缝和 2 条次级裂缝。这些地裂缝的活动将改变地铁隧道的边界条件(包括应力边界条件、位移边界条件和渗流边界条件),其特殊影响使得隧道结构设计和防渗方案变得复杂,是西安地铁建设面临的前所未有的难题。

地裂缝活动对隧道等洞室稳定性的影响表现在:不均匀变形而引起构筑物的附加应力和附加变形;过大的变形导致衬砌结构破坏或沉降缝处位移过大导致防渗材料破坏而引起渗漏;不均匀沉降差引起洞室内部结构产生附加应力而可能遭到破坏,或者导致如地铁轨道不平顺而影响运行。为了降低地裂缝活动对地铁隧道运行的影响,许多学者根据已有资料提出了一些处理措施建议。林康利等[2]建议对活动微弱或近年来基本无活动迹象的地裂缝,通过填塞隧道地表裂缝,设置完善的地表排水系统,采用允许一定变形的钢筋混凝土管片或钢管片衬砌盾构隧道穿越地裂缝;对活动性强烈的单条或多条地裂缝,且破裂带宽度在 10 m 以内的地裂缝带,可通过简支梁结构直接跨越;对活动性较强或强烈的多条地裂缝,且破裂带宽度在 10 m 以上的地裂缝,可采用双层衬砌结构进行处理。邓亚虹等[3]建议地裂缝活动环境下盾构隧道采用双层衬砌结构支护技术,外侧衬砌结构抵抗地裂缝活动的附加作用。邵生俊等提出了一种可主动适应和调节不均匀变形的可伸缩式衬砌管片技术方案,以及地裂缝地层埋置分缝地基梁调整上下盘地层错动变形的处理措施,如洞底、洞侧埋置分段地基梁处理措施、洞底微型静压桩加固地基处理措施、明挖基坑地基处理措施、拱顶分段多层管棚加固处理措施等。目前西安地铁隧

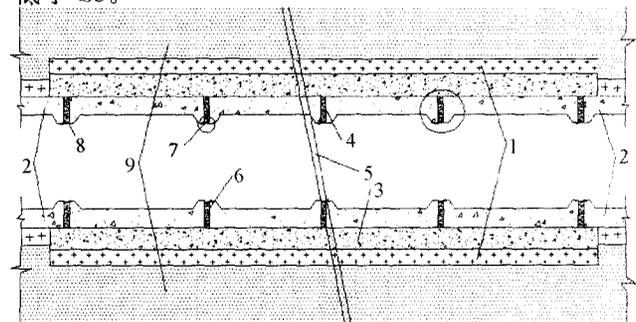
道建设已经实施了扩大隧道断面、分缝衬砌支护、衬砌结构端部加强、变形缝柔性密封连接、道床可调节、适应地裂缝活动的设计方案。已经开展了分缝衬砌结构模型试验研究[4-5]。

针对西安地铁 2 号线分缝衬砌结构支护技术方案,为了改善衬砌结构受力条件和防渗,结合沥青混凝土流变材料的特性,在传统初次衬砌结构和永久衬砌的基础上,邵生俊[6-7]提出了中间增设沥青混凝土层的支护技术。本文就地裂缝区间沥青混凝土复合衬砌结构隧道开展数值计算分析,探讨地裂缝活动位移条件下这种衬砌结构的力学响应,对于完善地裂缝区间隧道的设计具有工程实践意义。

1 地裂缝地层沥青混凝土复合衬砌结构支护技术

沥青混凝土是一种弹粘塑性材料,将其应用于地裂缝区间隧道作为初期支护和永久支护中间复合层,具体结构如图 1 所示。在地裂缝的影响区间内,按照从围岩土体到隧道依次设置初期衬砌、沥青混凝土复合衬砌、永久衬砌。初期衬砌和永久衬砌上沿隧道轴线每间隔 10~15 m 设置一变形缝。永久衬砌结构变形缝内填充沥青玛蹄脂,从而达到隧道整体防渗的目的。

沥青混凝土浇筑材料由改性沥青热溶后与砂、石拌合制成。沥青混凝土复合衬砌可以由现场浇筑或预制块砌筑建成。沥青混凝土复合衬砌的厚度根据地裂缝活动或地震作用强度以及预估计的不均匀变形确定,一般为 200~500 mm。钢筋混凝土永久衬砌采用 C30 防水钢筋混凝土结构,其抗渗等级不低于 S8。



1、初期支护; 2、钢筋混凝土衬砌; 3、沥青混凝土衬砌;
4、变形缝; 5、地裂缝; 6、沥青玛蹄脂

图 1 沥青混凝土复合衬砌结构
纵轴向剖面示意图

Fig. 1 Sketch of composite asphalt concrete lining structure on the section along the tunnel.

采用该支护技术能达到以下有益效果:

(1) 随着地裂缝错动位移发展,必然引起衬砌结构产生附加应力,从而作用于初期支护和内衬之间增设的沥青混凝土复合衬砌。由于沥青混凝土具有显著的流变性,围岩压力大的部位,沥青混凝土在围岩压力作用方向被压缩,沿侧向产生挤出变形,向围岩压力小的部位流动,使得围岩压力趋于均匀化。

(2) 沥青混凝土复合衬砌是永久衬砌结构外侧有效、耐久的防渗体,它与混凝土衬砌结构粘结封闭了衬砌结构变形缝及衬砌结构可能的渗漏通道。尽管地裂缝错动也必然引起变形缝两侧衬砌结构发生显著的相对位移,沥青混凝土复合衬砌被拉伸、剪切,甚至出现裂缝,但由于其具有抗裂性和裂缝自愈性,在适应地裂缝隧道不均匀沉降变形的条件下仍能够继续发挥其防渗能力。

(3) 沥青混凝土具有良好的抗侵蚀性能,沥青混凝土复合衬砌既能抵抗侵蚀物质作用,也能够保护衬砌结构混凝土及配筋。

(4) 沥青混凝土的热熔流动性、流变性、裂隙愈合性,有利于采取热加固措施进行后期维护,改善沥青混凝土复合衬砌的完整性,以及与混凝土衬砌结构的粘结。

2 数值计算模型及材料参数

2.1 数值计算模型

地裂缝双洞隧道计算模型采用 FLAC 3D 有限差分计算软件建立。隧道埋深取 10 m,横断面内水平向(x 方向)宽度为 80 m,竖向(z 方向)高度为 60 m,轴向长度为 200 m(即 y 方向模型的坐标在 $-32.5 \sim 167.5$ m 范围内),建成的计算模型如图 3 所示。模型中埋深 $0 \sim 7.5$ m 为 Q_3 黄土;埋深 $7.5 \sim 25.5$ m 为 Q_3 粉质粘土及古土壤层;埋深 $25.5 \sim 30.5$ m 为 Q_2 黄土及古土壤层;埋深在 30.5 m 以下为 Q_2 粉质粘土。模型采用库仑摩擦接触面模拟地裂缝,其倾角为 80° ,与隧道衬砌结构正交,如图 2 (a)、(b)所示。采用实体单元模拟地层、沥青混凝土复合衬砌结构及混凝土衬砌结构;采用壳单元模拟初期衬砌结构。隧道采用矿山法开挖,断面为马蹄形,其中初期支护为 C25 喷射混凝土,厚 30 cm;内衬结构为 C30 模注钢筋混凝土,厚 50 cm。初期支护和钢筋混凝土内衬间隔 10 m 设置一道变形缝,地裂缝附近隧道纵断面如图 2(b)、(c)所示。

2.2 计算参数选取

数值计算模型模拟地层如上节所述,土采用摩

尔-库伦为屈服准则的弹塑性模型,其具体参数如表 1。初期喷层支护采用衬砌结构单元模拟;混凝土内衬结构采用弹性体单元模拟;沥青混凝土复合衬砌采用流变体单元模拟。具体参数如表 2 所示。

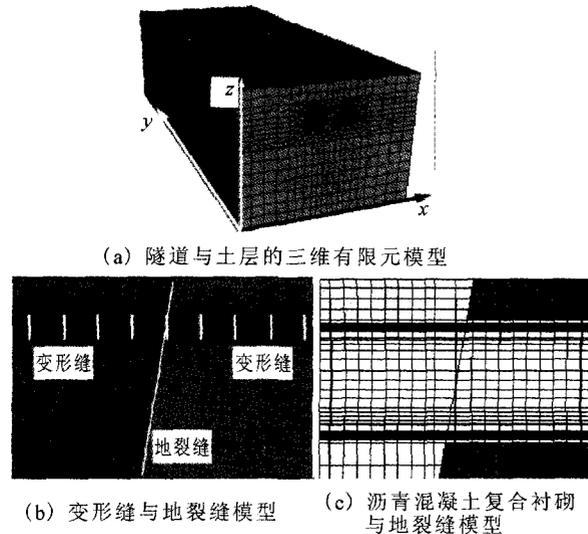


图 2 计算模型

Fig. 2 Models for calculation.

沥青混凝土二次衬砌采用 Cvisc 粘弹塑性流变模型如图 3 所示。该模型由 Burger 粘弹性模型与 Mohr-Coulomb 塑性模型串联建立,能够考虑材料的粘弹塑性偏应力偏应变特性与弹塑性体积变化特性。加载时,它既能反映弹性应变,又能反映延滞弹性和粘滞流动;卸载时,它既可以反映瞬时弹性恢复和弹性后效,又可以反映残余永久应变。此外,该模型还反映了应力松弛现象。当作用应力较小,未产生塑性变形时,Maxwell 体、Kelvin 体的应变之和组成了 Cvisc 模型的应变。在常应力作用下,根据线性粘弹性应变叠加原理,并通过 Laplace 变换和反演

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{E_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K t}{\eta_K}\right) \right] + \frac{\sigma_0 t}{\eta_M} \quad (1)$$

式中, ϵ 为总应变; t 为时间; E_M, E_K 分别为 Maxwell 体、Kelvin 体的弹性模量; η_M, η_K 分别为 Maxwell 体、Kelvin 体的粘滞系数。依据沥青混凝土的室内蠕变试验结果确定流变模型相关参数如表 2 所示。

模型地层中地裂缝采用接触面单元模拟,为了便于模拟地裂缝与衬砌结构及变形缝,接触面单元为三角形单元。通过试算地裂缝附近地表不均匀沉降分布形态,求得合理的接触面参数如表 3 所示。在地裂缝错动位移过程中,每一个时步 Δt 内,首先计算接触面节点和接触目标面之间的绝对侵入量和

切向相对速度,再利用接触面本构模型计算法向力和切向力的大小。 $t + \Delta t$ 时刻接触面的法向力和切向力为

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (2)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+(1/2)\Delta t)} A + \sigma_{si} A \quad (3)$$

式中, σ_n 为接触面初始化附加法向应力; σ_{si} 为接触面初始化附加切向应力; k_s 为接触面单元的切向刚度, k_n 为接触面单元的法向刚度; A 为接触面节点代表面积。接触面单元服从库仑剪切破坏准则和拉伸破坏准则。

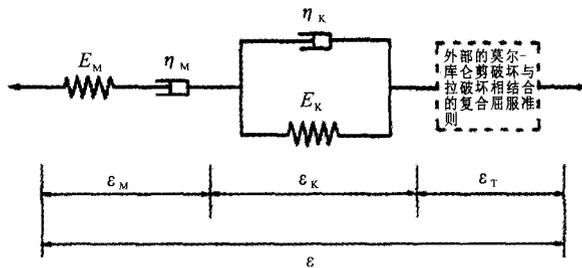


图3 FLAC3D中的Cvisc模型示意图

Fig. 3 Sketch of Cvisc model in FLAC3D.

表1 土材料参数表

| 岩土名称 | 密度/ [g · cm ⁻³] | 体积模 量/MPa | 剪切模 量/MPa | C/ kPa | φ/ ° |
|-------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|-----------|---------|
| Q ₃ 黄土 | 1.79 | 8.6 | 4.2 | 20 | 19 |
| Q ₃ 粉质粘土、古土壤 | 1.94 | 13.7 | 6.7 | 25 | 20 |
| Q ₃ 黄土 | 1.9 | 13.8 | 6.7 | 24.8 | 20 |
| Q ₂ 粉质粘土、古土壤 | 2.02 | 11.8 | 4.8 | 25 | 19 |

表2 衬砌混凝土参数表

| 衬砌名称 | 密度/[g · cm ⁻³] | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa |
|----------|----------------------------|----------|----------|
| 矿山一衬 C25 | 25 | 14.0 | 12.0 |
| 矿山二衬 C30 | 25 | 15.015 | 12.853 |

K=42 MPa,
 沥青混凝土 G_M=19 MPa, η_M=3.5e10 Pa · s,
 流变模型参数 G_K=11 MPa, η_K=4.6e9 Pa · s,
 C=0.6 MPa, φ=40°

表3 接触面参数表

| 体积模量/MPa | 剪切模量/MPa | C/kPa | φ/° |
|----------|----------|-------|-----|
| 150 | 1.5 | 8 | 10 |

2.3 地裂缝错动位移输入条件

当地裂缝错动时,引起上下盘土体产生相对沉降。这种不均匀沉降对地面或地下结构的影响较大。依据《西安地裂缝场地勘察与工程设计规程》,地裂缝不均匀沉降的最大影响范围是上盘约40 m,下盘约24 m。已有勘察表明^[1],地裂缝的拉张和扭动变形主要位于表层,埋深5~10 m以下的地裂缝是闭合的剪切面;深部地层只有竖向错动位移;埋深越大,竖向错动位移越大。根据上述地裂缝变形特

征,对于60 m厚的地裂缝地层计算模型,当上盘模型地层底面施加如图4所示的均布竖向错动位移时,地裂缝地表的竖向错动位移为50 cm,且不均匀分布范围也与实际比较一致,如图5所示。因此在地裂缝隧道数值计算分析时,将计算模型上盘地层底面施加均布的75 cm位移为输入条件。在考虑流变分析时,100年设计运行周期内每年错动位移平均为7.5 mm。

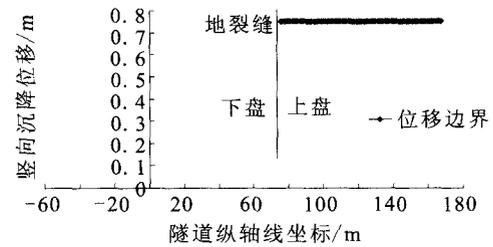


图4 上盘地层底面竖向沉降位移边界

Fig. 4 Vertical displacement boundary of ground fissure.

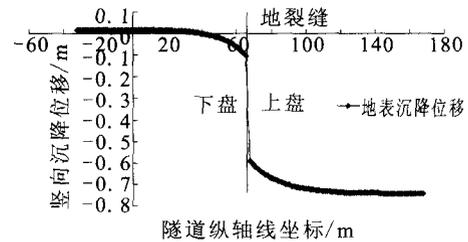


图5 地裂缝自由场地地表沉降

Fig. 5 Surface settlements of free site.

3 沥青混凝土复合衬砌结构的位移与应力变化

3.1 隧道衬砌结构沉降位移

当地裂缝隧道遭受地裂缝错动位移作用,一方面引起隧道围岩土体产生不均匀沉降,另一方面也引起隧道分缝衬砌结构产生相对错动和结构变形。以下分析了地裂缝上盘地层竖向错动位移条件下自由场地不均匀沉降,以及传统的初衬、二衬结构和沥青混凝土复合衬砌结构的位移变化。在设计错动位移条件下,隧道纵剖面内地面、拱顶和仰拱底的不均匀沉降分别如图6(a)、(b)所示。表明传统分缝衬砌结构地裂缝处的相对错动位移最小,其次是内衬分缝的沥青混凝土复合衬砌结构,无衬砌结构时最大。可见传统的衬砌结构即使预设变形缝,也能够有效抑制围岩土体的不均匀沉降。

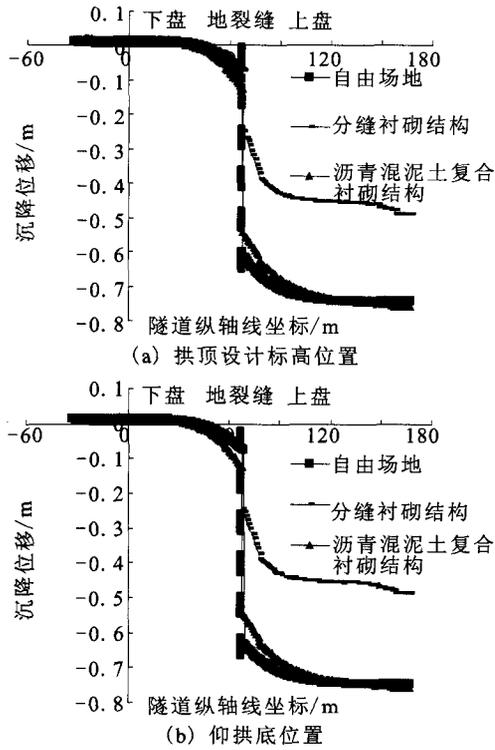


图 6 隧道纵剖面拱顶设计标高位置和仰拱底位置的沉降分布曲线

Fig. 6 Settlement distribution curves at the design level of arch top and the bottom arch of lining structure on vertical section.

图 7(a)、(b)表示地裂缝错动位移为 75 cm 时隧道衬砌结构沿隧道纵轴线的水平位移。下盘隧道衬砌结构拱顶变形缝处呈张拉变形,上盘拱顶变形缝处呈挤压变形;隧道衬砌结构拱底上、下盘变形缝处呈挤压变形,最大挤压变形位于衬砌结构拱底地裂缝处;最大张拉变形位于上盘第一节衬砌与第二节衬砌拱底变形缝处。沥青混凝土复合衬砌支护方案明显减小了这两处的张拉挤压变形。

3.2 隧道衬砌结构纵向应力

下面比较分析未施加和施加 50 cm 厚的沥青混凝土复合衬砌支护方案对隧道内部分段衬砌结构的应力和位移。为了去除边界效应,选取地裂缝附近的上下盘各四个单节衬砌结构来研究。

图 8 表示地裂缝错距为 75 cm 时未施加和施加 50 cm 厚的沥青混凝土复合衬砌支护方案的钢筋混凝土衬砌结构纵向应力。未施加沥青混凝土复合衬砌支护方案的隧道纵向受拉区域主要集中在每节衬砌结构拱腰附近区域,受压区域主要集中在上盘每节衬砌结构拱顶附近区域,如图 8(a)所示;施加沥青混凝土复合衬砌支护方案的隧道衬砌结构在外部

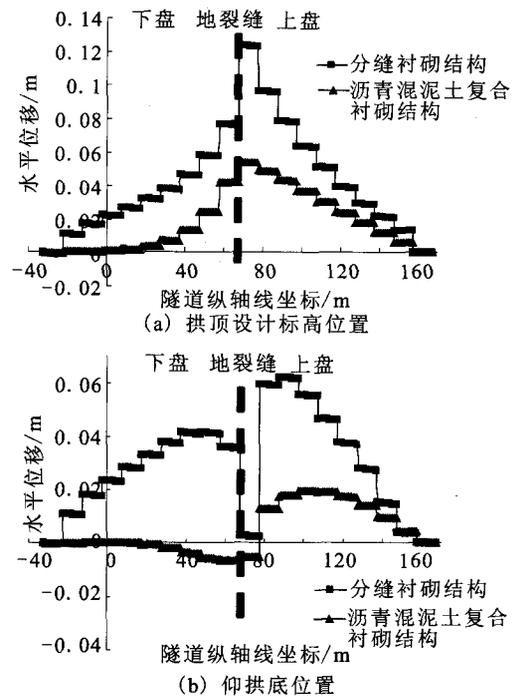
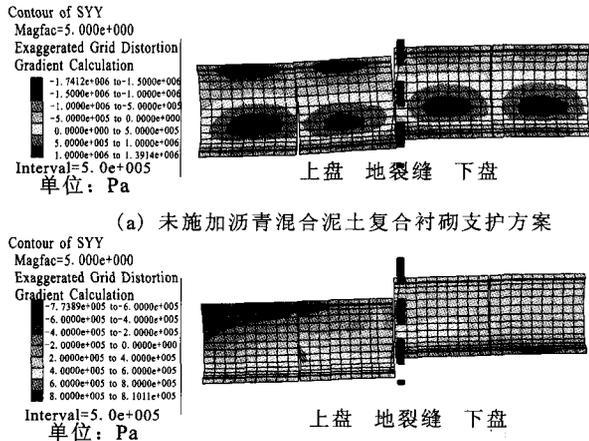


图 7 隧道纵剖面拱顶设计标高位置和仰拱底位置的水平位移分布曲线

Fig. 7 Horizontal displacement curves at the design level of arch top and the bottom arch of lining structure on vertical section.

沥青混凝土层流变作用下受力性状改变明显,在地裂缝附近形成了一条受拉带状区域,其两侧是受压区域,改变了每节衬砌结构单独承受地裂缝错动作用的受力模式,降低了受拉与受压的趋势,通过沥青混凝土协调各节衬砌结构适应变形(图 8(b))。



(a) 未施加沥青混合泥土复合衬砌支护方案

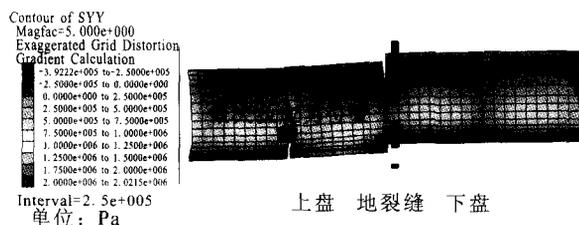
(b) 施加 50 cm 厚的沥青混合泥土复合衬砌支护方案

图 8 混凝土内衬砌纵向应力分布(竖向错动位移放大 5 倍)

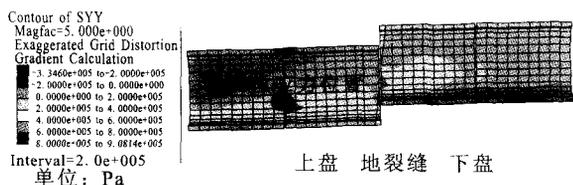
Fig. 8 Distribution of axial normal stress of segmented inner lining structure.

3.3 隧道衬砌结构的大主应力(拉应力)

图9比较未施加沥青混凝土复合衬砌支护方案和施加50 cm厚的沥青混凝土后的钢筋混凝土衬砌大主应力。未施加沥青混凝土复合衬砌支护方案的上盘底部和下盘顶部衬砌结构受拉严重,而施加的在地裂缝附近形成了一条受拉带。C30混凝土抗压强度为30 MPa,抗拉强度为2.01 MPa,相比较而言隧道衬砌受拉破坏可能性更大。地裂缝错动后,隧道衬砌结构最大拉应力位置均在上盘第一节衬砌结构远离地裂缝端拱腰处,施加沥青混凝土复合衬砌支护方案的最大拉应力为0.9 MPa,而未施加的最大拉应力为2.02 MPa,沥青混凝土复合衬砌改善衬砌结构的受拉区域和减小最大拉应力,确保了衬砌结构处于安全状态。



(a) 未施加沥青混合泥土复合衬砌支护方案



(b) 施加50 cm厚的沥青混合泥土复合衬砌支护方案

图9 混凝土内衬砌大主应力分布(竖向
错动位移放大5倍)

Fig. 9 Distribution of major principal stress of the tunnel.

3.4 沥青混凝土衬砌结构的纵向应力

沥青混凝土衬砌是连续整体结构,地裂缝错动之后与内衬共同承受附加应力,受拉区域与内衬的拉应力带一致,在变形缝与下盘每节衬砌结构中中部受拉尤为突出,主要由于调整内部衬砌结构的受力环境。包裹在分段衬砌结构外的沥青混凝土通过流变适应地裂缝活动产生的大变形,并能起良好的防渗效果(图10)。

4 结论

对沥青混凝土复合衬砌支护技术在地裂缝作用下的变形和受力性状进行了数值分析,对比了是否有沥青混凝土复合衬砌两种情况下隧道结构的力学性状,得出如下结论:沥青混凝土复合衬砌结构减小

了地裂缝附近衬砌结构变形缝的张拉、挤压变形。永久分缝衬砌结构外侧的沥青混凝土层流变变形也改善了地裂缝错动作用下永久分缝衬砌结构的受力性状,在地裂缝附近形成了一个条带状受拉区,其两侧为受压区。通过沥青混凝土调整内部衬砌结构的受力环境,减小了衬砌结构集中受拉受压区,显著减小了最大拉应力,有利于确保衬砌结构在地裂缝错动位移作用下的安全状态。在地裂缝错动位移条件下沥青混凝土衬砌仍是连续整体结构,与永久分缝结构共同承受附加应力,并且能够继续发挥防渗效果。

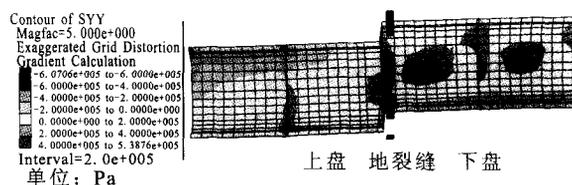


图10 沥青混凝土衬砌的纵向应力分布(竖向
错动位移放大5倍)

Fig. 10 Distribution of axial normal stress of composite asphalt concrete lining structure.

【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.
- [2] 林康利. 西安地铁二号线沿线地裂缝带的结构及防水措施[J]. 铁道勘察, 2007, 33(4): 64-66.
- [3] 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.
- [4] 熊田芳, 邵生俊, 王天明, 等. 西安地铁正交地裂缝隧道的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 179-186.
- [5] 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.
- [6] 邵生俊, 王超, 王帅, 等. 地裂缝地层隧道复合衬砌变形缝防渗结构及其构筑方法[P]. 中国: 200910304185.4, 2009-12-16.
- [7] 于清高, 邵生俊, 等. 西安地裂区灾害与岩土工程治理措施[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 45-51.