

西安地铁隧道穿越地裂缝带的计算模型探讨

门玉明, 张结红, 刘洪佳, 韩冬冬, 王海英

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过对西安地铁隧道穿越地裂缝带的大型物理模型试验成果的分析, 提出在地裂缝活动时, 穿越地裂缝带的地铁隧道有以下两个方面的变化特征: 一是作用于隧道的荷载发生改变; 二是在隧道底部产生脱空现象。这种脱空现象无论在整体式隧道还是盾构隧道中都会出现。造成隧道在界面上与土体脱空的原因是隧道和周围地层的变形不协调。脱空区域的大小对地铁隧道的变形与内力计算会产生明显影响。在对隧道变形特征分析的基础上, 总结得出了西安地铁穿越地裂缝带隧道变形的 4 种计算模型: 对于整体式长隧道, 可以采用一端固定而另一端简支, 或一端固定而另一端定向支承的计算模型; 对于整体式短隧道, 可以采用外伸梁模型; 对于盾构隧道, 可以采用一端固定而另一端定向支承的计算模型。最后, 对脱空条件下隧道数值分析的建模问题进行了讨论。算例分析表明: 在数值计算中, 对于隧道与土体接触面的界面处理非常关键, 否则将造成计算结果的重大误差。

关键词: 地裂缝; 地铁隧道; 脱空; 变形特征; 计算模型

中图分类号: P642.26; TU354 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)01-0095-06

Discussion on the Computing Model for Xi'an Metro Tunnel Passing Through the Ground Fissure Zone

MEN Yu-ming, ZHANG Jie-hong, LIU Hong-jia, HAN Dong-dong, WANG Hai-ying

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract According to the analysis of the large physical model test on Xi'an Metro tunnel passing through the ground fissure zone, two deformation characteristics in the metro tunnel were found when ground fissures were active. Firstly, the change happened when the tunnel was in load; secondly, the gap appeared at the bottom of the tunnel. The gap appeared in monolithic and shield tunnels. The reason was that the deformations of the surrounding strata and tunnel were incongruous. The size of the gap had significant effect on metro tunnel deformation and internal force calculation. On the basis of the analysis of the tunnel deformation characteristics, four deformation calculating models of the tunnel passing through the ground fissure zone were summarized. For the long monolithic tunnel, to fix one end and simply support the other was a calculating model, another model was to fix one end and directly support the other; for the short monolithic tunnel, the simplified overhanging beam could be used; for the shield tunnel, to fix one end and directly support the other was the calculating model. Finally, the tunnel numerical models under the condition of the gap were discussed. The calculating examples showed that it was very crucial to process interface between the tunnel and the soil in the numerical calculation; otherwise, the calculation would cause the major error.

Key words: ground fissure; metro tunnel; gap; deformation characteristic; computing model

0 引言

由于自然和人为等因素的作用和影响, 自 20 世纪 50 年代末期以来, 西安市区先后出现了 14 条地裂缝, 这些地裂缝致使不少地面建筑物和地下设施

遭受破坏, 迄今为止已造成约 40 亿元的直接经济损失^[1-4]。尽管西安市政府已经采取了禁止开采地下水等措施, 使得地裂缝活动整体趋缓, 但在一些地段, 地裂缝仍在活动。地裂缝的存在对西安市城市建设用地的有效利用和城市规划及发展带来重大影响。

收稿日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40772183)

作者简介: 门玉明 (1957-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士研究生导师, 从事岩土工程及建筑安全工程研究。E-mail: dcmnym@chd.edu.cn

对地裂缝灾害的最有效防治措施是在工程规划时就避开地裂缝。在陕西省工程建设标准《西安地裂缝场地勘察与工程设计规程》中,规定了建筑物基础底面外缘至地裂缝带的最小避让距离^[5]。但是,在西安这样地裂缝密集发育的城市,要在工程建设中完全避开地裂缝是不可能的,尤其是一些线型构筑物(如地下管道、地铁隧道等)穿越地裂缝不可避免,而地裂缝的活动又受到多种因素的影响。限于当前人们对地裂缝的认识水平有限,尚无法准确确定地裂缝未来的活动时间及活动强度;因此,只有通过加强穿越地裂缝带的地铁隧道防灾设计及安全监测来保障运营安全。

西安地铁工程已进入正式实施阶段,在规划的6条线路中,二号线已进入铺轨调试阶段,一号线已经开工建设,三号线也已进入开工前的准备阶段。这6条线路都不同程度地穿越地裂缝,其中已经开工建设的一号线将穿越其中的4条地裂缝,二号线穿越11条地裂缝。因此,深入研究地铁隧道穿越地裂缝带的结构变形模式及计算方法,对于地铁隧道的安全设计具有重要意义。近年来,彭建兵等围绕西安地铁工程穿越地裂缝带的结构措施开展了较深入的研究^[6-11]。但是由于这一问题的复杂性,尚有许多问题需要进一步解决^[12]。如对穿越地裂缝带的地铁隧道的设计计算方法,还需要更深入的探讨。笔者将在总结穿越地裂缝带的地铁隧道大型物理模型试验成果的基础上,对地铁穿越地裂缝带的隧道结构计算模型进行探讨,为西安地铁在地裂缝这一特殊地质背景下的防灾设计提供科学依据。从西安地铁线路与地裂缝的相交关系来看,两者既有正交,也有斜交的,限于篇幅,本文重点对地铁隧道与地裂缝正交情况下变形模式及计算模型进行初步探讨。

1 地裂缝活动时穿越地裂缝带的地铁隧道变形特征分析

在正常情况下,如果没有地裂缝的作用,地铁隧道的计算模型为一典型的弹性地基梁,可以采用弹性地基梁理论计算其内力 and 变形。但在地裂缝活动情况下,作用于地裂缝带地铁隧道的荷载将发生显著变化,变形也与正常情况极不相同。长安大学地质工程与测绘学院近年来围绕西安地铁穿越地裂缝带的结构措施开展了大量的物理模型试验,这些试验既有大比例尺试验(1:5),也有小比例尺试验(1:20);既有钢筋混凝土材料的,也有石膏、有机玻璃的^[6,9]。通过试验发现,在地裂缝活动时,地铁隧道无论从荷

载还是变形方面都与无地裂缝时表现出较大差异,归结起来主要有两个明显变化:①作用于隧道的荷载发生了改变;②在隧道底面出现了脱空现象。

西安地铁隧道在地面下的埋置深度一般为10~15 m,如果按照地下结构的埋置深度分类,应属于浅埋隧道。此类隧道在不考虑地裂缝活动时,作用于隧道上的竖向压力就是计算截面以上全部土柱的重量,但在地裂缝活动时,由于围岩和隧道的相互作用,这一荷载并不等于静止荷载。图1、2分别为根据西安地铁二号线穿越地裂缝带的矩形隧道大型物理模型试验结果绘制的隧道底部、顶部的土压力变化图。该试验采用的模型尺寸与原型尺寸的几何相似比为1:5,隧道材料采用钢筋混凝土,围岩采用黄土,按照西安实际地层进行设计。由图1可见,在地裂缝活动初期,即上盘的沉降量未超过2 cm时,地裂缝两侧隧道顶部的土压力沿隧道纵向均匀分布,随地裂缝上盘土体沉降量的增加,顶部接触压力开始发生变化,总体表现为近地裂缝处上盘增大下盘减小的趋势,表明在地裂缝活动时,作用于隧道的竖向荷载发生了改变。产生这种现象的原因是上盘土体下降时,在隧道结构两侧的土体沿隧道侧壁产生了竖直向下的摩擦阻力,该摩擦阻力传递给结构顶部土体,使结构顶部压力增加;而下盘土体由于受反向摩擦阻力的作用,荷载减小。图2显示在地裂缝活动时,隧道底部的土体抗力也在变化。当地裂缝上盘的沉降量超过2 cm后,在下盘靠近地裂缝段的抗力变化剧烈,其最大值达到地裂缝活动前地层压力的3倍,而在其余区段,最大抗力低于地裂缝活动前的水平。

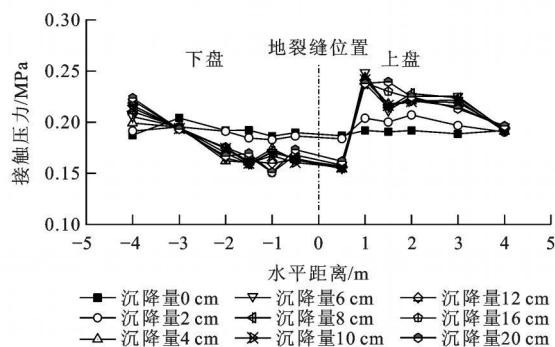


图1 隧道顶部接触压力变化

Fig 1 Variation of Contact Pressure at the Top of the Tunnel

在地裂缝活动时,位于地裂缝带隧道的另一变形特征是在上盘隧道的底面出现围岩和隧道的局部脱空现象,这一现象无论在何种截面的隧道中都会出现,无论是矩形、圆形或马蹄形隧道中都在所难

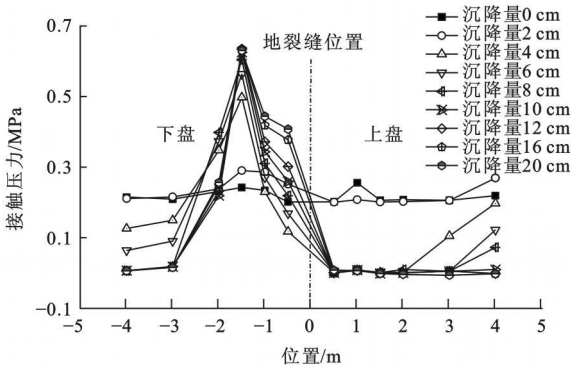


图 2 隧道底部接触压力变化

Fig. 2 Variation of Contact Pressure at the Bottom of the Tunnel

免。造成隧道在界面上与土体脱空的原因是隧道和周围地层的变形不协调。近年来, 长安大学彭建兵等围绕穿越地裂缝带地铁隧道的结构措施开展了多种工况的物理模型试验^[6-7]。试验表明, 不论模型尺寸大小、不论何种材料, 当地裂缝活动量达到一定的量值时, 无一例外地在隧道底部出现了脱空现象。图 3 是一矩形截面模型, 其试验模型和原型的几何相似比为 1 : 5, 材料采用钢筋混凝土, 在开挖后的剖面中可以清楚地看到脱空现象。图 4 是一盾构隧道试验模型, 几何相似比为 1 : 5, 管片材料为钢筋混凝土, 连接螺栓为钢材, 从剖面中也能看到脱空区域。图 5 为马蹄形隧道试验模型, 几何相似比为 1 : 20, 模型材料采用石膏加钢筋网片, 其底部的脱空也很明显。图 6 为圆形隧道模型, 几何相似比为 1 : 20, 材料为有机玻璃, 仍可从开挖的剖面处看到隧道底部脱空现象。因此, 在地裂缝活动情况下, 隧道底部脱空是一种普遍现象。正是这种脱空造成了地铁隧道受力模式的变化, 使其不能再按照普通的弹性地基梁理论进行分析计算。

隧道底部脱空区长度与地裂缝的活动强度、隧

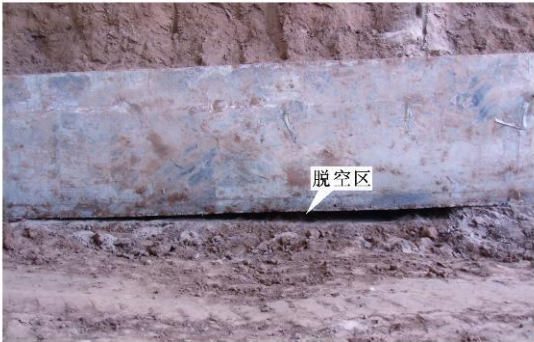


图 3 矩形截面隧道底部脱空现象

Fig. 3 Gap at the Bottom of the Rectangle Section Tunnel

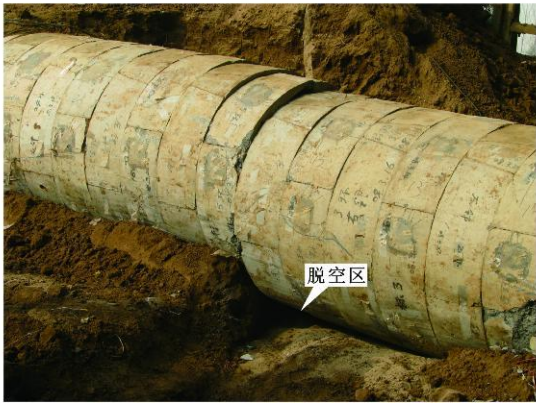


图 4 盾构隧道底部脱空现象

Fig. 4 Gap at the Bottom of the Shield Tunnel



图 5 马蹄形隧道底部脱空现象

Fig. 5 Gap at the Bottom of the Horseshoe Tunnel

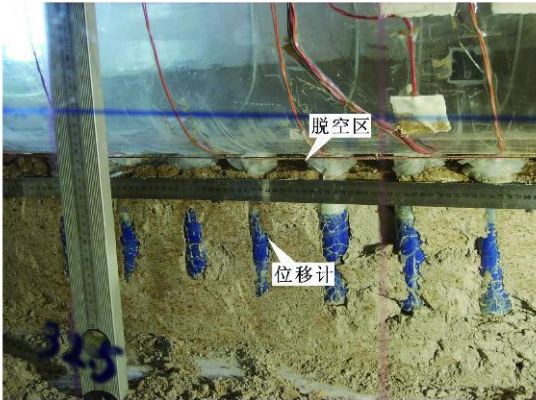


图 6 圆形隧道底部脱空现象

Fig. 6 Gap at the Bottom of the Circular Tunnel

道埋深、长度、土与隧道的刚度比等诸多因素有关, 对隧道变形模式起着控制作用, 同时又影响隧道的变形及内力计算。

地铁隧道中常用的衬砌结构有整体式和装配式, 两者的施工工艺不同, 在刚度上也有较大差别, 其中装配式结构主要用于盾构隧道; 整体式隧道因为采用的是模注工艺, 整体性强、抗弯刚度大。装配式隧道是将一个个钢筋混凝土管片用螺栓相连, 各

接缝之间的连接力就是螺栓的紧固力,其抗弯和抗剪刚度都低于整体式结构。在地裂缝活动时,两种隧道将呈现不同的变形特征。

对于整体式浅埋隧道,由于其抗弯和抗剪刚度大,在地裂缝活动时,位于下盘土体中隧道在近地裂缝处变形最大,距离地裂缝位置越近,隧道的变形越大,在距地裂缝稍远之外,隧道的变形趋近于零;而位于上盘土体中隧道由于受土体运动的牵连,出现整体沉降,对于分段式隧道(西安地铁隧道穿越地裂缝时采用这种结构形式),当隧道长度较短时(如位于上盘部分的长度小于隧道高度的2倍时),如果地裂缝竖向活动量超过隧道的竖向变形,上盘隧道底部将全部脱空,这时地铁隧道的变形类似于在下盘固定的外伸梁。而当隧道纵向长度较长时,隧道底部将产生部分脱空,其变形类似于下盘固定、上盘在远端支承的超静定梁。根据脱空区长度的不同,其远端可分别呈现固定支承或铰支承的变形特征。图7为长隧道的变形特征,其远端的支承形式类似于铰支座。

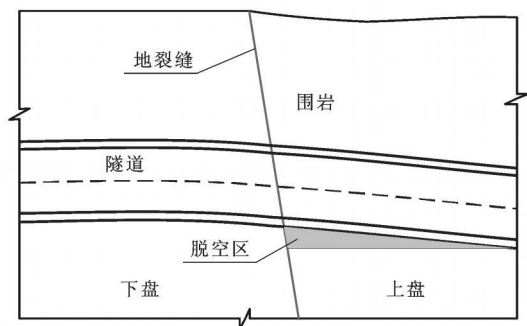


图7 整体式长隧道的变形特征

Fig. 7 Deformation Characteristics of the Monolithic Long Tunnel

对于盾构隧道来说,由于其纵向刚度很小,上盘隧道只在地裂缝附近产生脱空,离开地裂缝稍远处又与围岩相接触,隧道的整体变形特征如图8。由

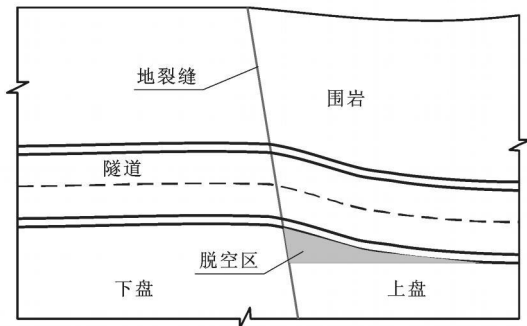


图8 盾构隧道的变形特征

Fig. 8 Deformation Characteristics of the Shield Tunnel

于脱空区较短,离开脱空区较远处,其约束类似于固定端约束。

根据以上分析就可以建立起地裂缝活动时穿越地裂缝带地铁隧道的计算模型。

2 地裂缝活动时穿越地裂缝带的地铁隧道计算模型

与地铁隧道的变形特征相适应,笔者建立了4种浅埋式地铁隧道在地裂缝活动时的计算模型(图9)。这4种计算模型适用于隧道顶面未形成裂缝时的内力计算,与此相对应的极限地裂缝位错量可依据钢筋混凝土理论计算得出,这里不再赘述。

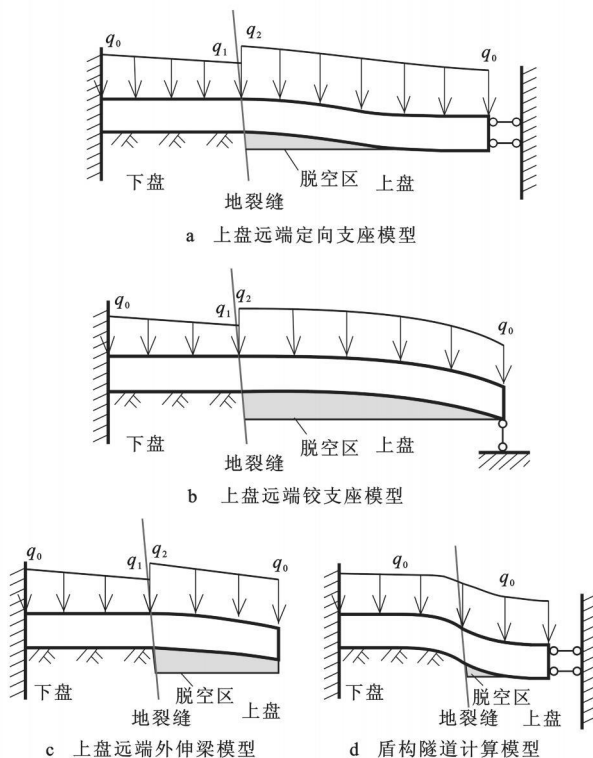


图9 穿越地裂缝带的隧道计算模型

Fig. 9 Computing Models for the Tunnel Passing Through the Ground Fissure Zone

2.1 作用于隧道上的荷载

在地裂缝活动时,穿越地裂缝带地铁隧道的计算模型的确定,首先应对作用于隧道上的荷载进行分析,建立合理的荷载模型。

综上所述可知,在地裂缝活动时,作用于隧道顶部的竖向荷载发生了改变,在近地裂缝处,呈现下盘减小、上盘增大的特点,而在距离地裂缝较远的隧道两端,荷载又恢复到无地裂缝状态时的荷载,为便于计算,可以将地裂缝两侧隧道上的地层压力简化为梯形荷载(图9),即在远端,荷载等于初始荷载 q_0 ,

在地裂缝位置,下盘隧道上的荷载减小为 q_1 ,上盘隧道上的荷载增大为 q_2 ,两组荷载之间按直线变化。 q_0 按照无地裂缝时地层静止压力进行计算, q_1 和 q_2 可通过试验确定,或近似按 $q_1 = 0.8q_0$ 、 $q_2 = 1.2q_0$ 计算。对于盾构隧道,由于变形区域较短,为简化计算,在初步设计时,也可以不考虑荷载变化,按照 q_0 进行计算。

2.2 隧道的计算模型

2.2.1 整体式长隧道计算模型

由整体式长隧道的变形特征可知,下盘隧道在近地裂缝处变形最大,距离地裂缝位置越近,隧道的变形越大,在距地裂缝稍远距离之外,隧道变形趋近于零。鉴于此,可以将远处地层对隧道的约束简化成固定端,对位于地裂缝上盘的隧道,其变形受地裂缝活动量的控制,可呈现出两种不同的模式:当地裂缝活动量较小时,隧道底部脱空范围较短,上盘隧道远端随土体一起发生沉降变形,土体对隧道的约束作用类似于定向支座的作用,这时对上盘远端隧道的作用可简化为定向支座(图9a);当地裂缝活动量较大时,隧道底部脱空范围变长,土体对隧道的约束作用类似于可随土体沉陷的铰支座,其计算简图可采用图9b的模型。

2.2.2 整体式短隧道计算模型

整体式短隧道在下盘的变形模式有两种:一种是当地裂缝活动时,隧道在地层内发生绕下盘某点的刚性转动,使下盘远端隧道顶部应力集中,严重时可引起地面鼓起,这种变形是地铁隧道设计中应避免的;另一种是下盘隧道有一定长度,其变形与长隧道的类似,即计算时可远端简化为固定端,而在上盘,当地裂缝活动量大于隧道的变形量时,隧道底部全部脱空,呈现外伸梁的变形特征,其计算简图可以采用图9c的模型。

2.2.3 盾构隧道计算模型

盾构隧道的纵向刚度很小,上盘隧道的脱空区较短,离开脱空区较远处,其下盘的约束类似于固定端约束,上盘可以简化为定向支座约束。其计算模型如图9d。

根据以上计算模型,结合弹性地基梁的计算理论,就可以建立地裂缝活动时穿越地裂缝带地铁隧道的计算公式。

需要特别指出的是,随着计算技术的快速发展和普及,有限元等数值模拟方法已成为结构分析中的一种重要手段,在结构计算与分析中得到了广泛应用。但是,数值模拟只有在正确确定计算模型的

基础上,才能得到合理的结果,否则盲目使用会给设计带来误导,尤其在地下工程这样复杂的项目上,更应该引起注意。这里以受均布荷载作用的梁为例,说明这种差别的大小(图10a)。设梁的长度为 $2L$,柔度系数 t 为5,按照弹性地基梁计算,可得其跨中最大弯矩 M_1 ^[13]为

$$M_1 = 0.080qL^2$$

式中: q 为作用于梁上的均布荷载集度; L 为梁的半长。

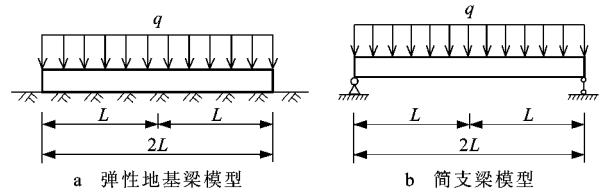


图10 两种计算模型比较

Fig. 10 Comparison of Two Calculating Models

如果隧道底面发生脱空,则计算模型可简化为两端简支梁(图10b),其跨中最大弯矩 M_2 ^[14]为

$$M_2 = \frac{1}{8}q(2L)^2 = 0.5qL^2$$

两者的比值为

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{0.5qL^2}{0.08qL^2} = 6.25$$

可以看出,后者的最大弯矩是前者的6.25倍,如果隧道为无限长梁,则不考虑脱空所产生的误差更大。这一例子表明,在数值计算中,对于隧道与土体接触面的界面处理非常关键,否则将造成计算结果的重大误差。

3 结语

(1)在地裂缝活动情况下,隧道底部脱空是一种普遍现象。隧道底部脱空区长度与地裂缝的活动强度、隧道埋深、长度、土与隧道的刚度比等诸多因素有关,对隧道的变形模式起着控制作用,同时反过来又影响隧道的变形及内力计算。

(2)在地裂缝活动时,由于围岩和隧道的相互作用,作用于地裂缝带隧道的荷载并不等于围岩的静止压力,总的趋势是上盘增大、下盘减小,在整体式隧道计算时可以简化为梯形荷载。

(3)穿越地裂缝带的隧道变形特征与隧道的分段长度、隧道的刚度等因素有关。整体式隧道由于其刚度较大,变形为缓变型,隧道底部脱空区较大;而盾构隧道由于纵向刚度小,在地裂缝带的变形为陡降型,其底部脱空区长度相对较小。

(4)根据试验及理论分析,浅埋隧道在地裂缝活动时的计算模型可以分为 4 类。对于整体式长隧道,可以采用一端固定而另一端简支,或一端固定而另一端定向支承的计算模型;对于整体式短隧道,可以采用外伸梁模型;对于盾构隧道,可以采用一端固定而另一端定向支承的计算模型。

(5)对于地裂缝活动时穿越地裂缝带地铁隧道的数值模拟必须在正确确定计算模型的基础上,才能得到合理的结果,否则盲目使用会给设计带来误导,尤其在地下工程这样复杂的项目上,更应该引起注意。

(6)由于地裂缝引起的结构失效是一个长期缓变的过程,西安地铁建设的历史还很短,目前尚未发现在已建地铁沿线有明显的地裂缝活动迹象,但加强对穿越地裂缝带隧道的变形及内力监测,制定合理的灾害预警措施及方案,对于保障西安地铁的安全施工与运营,仍然是非常必要的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990.

- [3] 王景明. 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.
- [4] 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.
- [5] DBJ 61-6—2006, 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程[S].
- [6] 彭建兵, 范 文, 黄强兵, 等. 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研究[R]. 西安: 长安大学, 2006.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 胡志平, 赵振荣, 朱启东, 等. 西安某地裂缝两侧黄土物理力学性质试验[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 85-88.
- [11] 邓亚虹, 彭建兵, 卢全中, 等. 地铁工程地质灾害危险性综合评估定量方法——以西安地铁一号线为例[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 291-294.
- [12] 门玉明, 石玉玲. 西安地裂缝研究中的若干重要科学问题[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2): 172-176.
- [13] 门玉明, 王启耀. 地下建筑结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [14] Timoshenko S P, Young D H. 结构理论[M]. 叶红玲, 杨庆生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(上接第 94 页)

参考文献:

- [1] 徐友宁, 何 芳, 陈社斌, 等. 矿山环境地质问题特点及类型划分[J]. 西北地质, 2003, 36(增): 19-25.
- [2] 寿嘉华. 走绿色矿业之路——西部大开发矿产资源发展战略思考[J]. 中国地质, 2000, 27(12): 2-3.
- [3] 徐友宁. 矿山地质环境调查研究现状及展望[J]. 地质通报, 2008, 27(8), 1235-1244.
- [4] 姜建军, 刘建伟. 中国矿山地质环境问题及其对策[J]. 西北地质, 2003, 36(增): 1-5.
- [5] 武 强, 刘伏昌, 李 铎. 矿山环境研究理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [6] 张进德, 张作辰, 刘建伟, 等. 我国矿山地质环境调查与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [7] 魏迎春, 徐友宁. 矿山地质环境量化评价模型研究[J]. 华南地质与矿产, 2004(4): 47-50.
- [8] 何 芳, 徐友宁, 袁汉春. 矿山环境地质问题综合评价客观权值确定方法探讨[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 337-343.
- [9] 汤中立, 李小虎, 焦建刚, 等. 矿山地质环境问题及防治对策[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 1-4.
- [10] 王俊桃, 谢 娟, 张益谦. 矿山废石淋溶对水环境的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4): 92-96.
- [11] 虎维岳, 周建军, 闫兰英. 废弃矿井水位回弹诱致环境与安全事故分析[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(4): 436-440.

- [12] 西安地质矿产研究所. 重点矿山地质环境问题专题调查综合研究报告[R]. 西安: 西安地质矿产研究所, 2007.
- [13] 西安地质矿产研究所. 陕西潼关金矿区地质环境问题专题调查报告[R]. 西安: 西安地质矿产研究所, 2009.
- [14] 西安地质矿产研究所. 陕西大柳塔煤矿区地质环境问题专题调查报告[R]. 西安: 西安地质矿产研究所, 2007.
- [15] 辽宁省地质矿产调查院. 辽宁阜新煤矿区地质环境问题专题调查报告[R]. 沈阳: 辽宁省地质矿产调查院, 2007.
- [16] 刘世建, 谢 洪, 韦方强, 等. 小秦岭金矿区人为泥石流[J]. 山地学报, 1996, 14(4): 259-263.
- [17] 徐友宁, 陈社斌, 何 芳, 等. 潼关金矿区矿渣型泥石流灾害及防治对策[J]. 山地学报, 2006, 24(6): 667-671.
- [18] GB 15618—1995, 土壤环境质量标准[S].
- [19] 徐友宁, 张江华, 陈社斌, 等. 小秦岭金矿区不同污染方式土壤剖面上重金属含量分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 200-206.
- [20] 徐友宁, 陈社斌, 陈华清. 生态环境脆弱区煤炭资源开发诱发环境地质问题——以陕西省神木县大柳塔煤矿区为例[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1344-1350.
- [21] 李智佩, 徐友宁, 郭 莉, 等. 陕北现代化煤炭开采区土地沙漠化影响及原因——以大柳塔—活鸡兔矿区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(4): 398-403.
- [22] 徐友宁, 陈社斌, 陈华清, 等. 大柳塔煤矿开发土壤重金属污染响应研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 47-50.