

逆断层错动作用下地铁隧道结构损伤分析

安韶^{1†}, 陶连金¹, 边金², 韩学川¹, 吴晓娟¹

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 广东海洋大学 海洋工程学院, 广东 湛江 524008)

摘要:以乌鲁木齐地铁隧道穿越西山活动逆断层工程为例, 建立三维弹塑性有限元模型. 首先模拟分析了逆断层错动作用下隧道二次衬砌塑性应变发展过程, 拉压损伤因子、剪切应变的横向及纵向分布规律, 计算了混凝土的裂缝宽度; 其次研究了不同错动位移、隧道底部距围岩交界面不同垂直距离及不同破碎带宽度的结构损伤规律, 最后进行了设置柔性接头的减灾效果研究. 结果表明: 二次衬砌结构破坏首先出现在拱顶; 然后是拱底, 最后在拱腰处累积. 破裂面附近拱腰处发生拉压剪的共同破坏; 远离破裂面上盘拱顶, 破碎带拱底处发生受拉破坏; 远离破裂面上盘拱底, 破碎带拱顶处发生受压破坏. 基于混凝土裂缝得到隧道拉裂破坏的严重与轻微受损区分别为 10 m 和 30 m. 错动位移越大, 结构受损越严重; 隧道底部距围岩交界面垂直距离越大, 土层越厚, 耗散能量越多, 结构受损越轻; 破碎带宽度越大, 隧道破坏越严重, 当破碎带宽度达到 26 m 时, 破碎带宽度对隧道的影响基本保持稳定. 设置柔性接头可以显著降低结构的损伤, 基本满足在设防错动位移下的设计要求.

关键词:逆断层; 地铁隧道; 损伤分析; 影响因素; 柔性接头

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Damage Analysis on Subway Tunnel Structure under Effect of Reverse Fault Dislocation

AN Shao^{1†}, TAO Lianjin¹, BIAN Jin², HAN Xuechuan¹, WU Xiaowa¹

(1. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524008, China)

Abstract: Damage Analysis on Subway Tunnel Structure under Effect of Reverse Fault Dislocation. AN Shao¹, TAO Lianjin¹, BIAN Jin², HAN Xuechuan¹, WU Xiaowa¹ (1. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Guang Dong Ocean University, Zhanjiang 524008, China) Abstract: Taking the subway tunnel in Urumqi crossing Xishan reverse active fault as an example, a three-dimensional elastic-plastic finite element model of soil-tunnel structure was established to simulate and analyze plastic strain development process of secondary lining, transverse and longitudinal distribution of tensile damage factor, compressive damage factor and shear strain, calculate the crack width of concrete under the action of reverse fault dislocation. Then the damage law of the tunnel structure with different dislocation displacements, different vertical distances from tunnel bottom to the interface of surrounding rocks and different widths of fault zone was studied.

* 收稿日期: 2019-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41877218, 41572276), National Natural Science Foundation of China(41877218, 41572276); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805403), National Key R&D Program of China(2017YFC0805403)

作者简介:安韶(1991—), 男, 北京工业大学博士

† 通讯联系人, E-mail: as56913@163.com

ied. Finally, the disaster reduction effect of the flexible joint was studied. Results show that the damage of secondary lining first appeared in the vault, then the bottom, and finally accumulated at the waist. The shear, tensile and compressive damage all appear at the tunnel waist of the rupture surface. When the tunnel structure is away from rupture surface, the tensile damage appears at the tunnel vault of hanging wall and invert of fault zone, the compressive damage appears at the tunnel invert of hanging wall and vault of fault zone. The severe and slightly tensile-crack damaged length are 10 m and 30 m respectively based on the crack width of concrete. The larger the fault displacement is, the more serious the structural damage is. The larger the vertical distances from tunnel bottom to the interface of surrounding rocks, the thicker the soil is, resulting in that more energy is dissipated and the structural damage is lighter. The damage to tunnel increases with the increase of width of fault zone, but when the width increases to 26 m, the influence of width of fault zone on tunnel damage becomes stable. Setting flexible joints can significantly reduce structural damage and substantially meet the design requirements for fault displacement.

Key words: reverse fault; subway tunnel; damage analysis; influence factor; flexible joint

目前,我国很多城市正在进行大规模的地铁建设.但如北京、乌鲁木齐、天津及太原等城市位于高烈度区且存在多条活动断裂带,由于地铁工程走向往往取决于城市交通功能的需求,避让原则^[1]常常无法实现.穿越活动断裂带的隧道在断层错动作用下会发生严重破坏,如 5.12 汶川地震白云顶隧道距映秀端洞口 60 m 处二衬错台近 40 cm,隧道破坏长 20 m,局部发生垮塌,路面破损、开裂起拱^[2].因此研究断层错动作用对城市地铁隧道结构的影响,是保障隧道工程安全的关键性课题之一.

跨断层隧道结构的影响研究方法包括震后调查、数值模拟及模型试验法,其中震后调查受诸多条件限制,难以大规模开展,因此主要采用后两种方法.在模型试验方面,Kontogianni 等^[3]通过模型试验研究了在不同断层倾角的逆断层、走滑断层作用下隧道衬砌管片环向接头部位应力应变规律. Lin 等^[4]通过提升底板试验模拟了逆冲断层作用下砂土中盾构隧道变形破坏特点.陈俊岭等^[5]通过振动台试验研究了近断层滑冲效应下风力发电塔动力响应,结果表明近断层地震滑冲效应脉冲使得结构响应明显增大.刘学增等^[6]通过模型试验研究了断层倾角为 75° 的逆断层错动下公路隧道衬砌的反应规律,给出了受拉受压区间以及最大拉压应变发生的位置.黄强兵等^[7]通过地裂缝活动模型试验,研究了西安地铁 2 号线隧道正交穿越地裂缝带的设防参数.胡辉^[8]进行了相似模型试验,研究了跨断层隧道变形缝设置的有效性.孙风伯等^[9]等推导了隧道最大节段长度并通过实验得以验证.王明年,崔光耀等^[10]展开了断裂黏

滑错动作用下模型试验并研究了减震缝与减震层的减震效果,为实际隧道工程的建设提供了参考和依据.在数值模拟方面,Mohammad 等^[11]通过数值模拟研究了逆断层错动作用下距错动处不同位置的隧道附近土层剪切带出现的位置及传播路线.王琼^[12]采用有限元方法研究了断层错动对长大山岭隧道的非线性反应,得到了应力屈服破坏顺序、屈服范围和产生高应力区的位置.张维庆^[13]采用数值模拟研究了穿越断层隧道在断层错动和地震力分别作用下的震害机理.赵颖等^[14]采用数值模拟研究了走滑断层位错作用下城市地铁隧道衬砌结构的损伤发展,重点分析了结构损伤的开始部位、发展过程以及最终的损伤程度,并建立了能够估计结构损伤范围及破坏最严重位置的统计关系式. Shahidi 等^[15]针对伊朗 Koohrang-III 输水隧道跨活动断裂的情况,提出断层带部分衬砌采用铰接设计方法,并计算确定了适宜的衬砌节段长度和柔性连接宽度.赵坤等^[16]采用有限元法通过正交试验研究了衬砌节段长度、柔性连接宽度、柔性连接材料强度 3 种因素对衬砌结构内力的影响.刘国庆等^[17]对跨断层水工隧洞建立三维有限元模型,考虑动接触后在地震作用下围岩出现了明显的错动位移,断层破碎带的存在造成了衬砌位移和应力的增加.

以上研究成果对于穿越活动断层的隧道工程均具有一定的指导意义,但仍然存在一些不足.目前的研究对象主要集中在深埋山岭隧道,对城市浅埋地铁隧道研究较少,且受条件所限,现有模型试验尺寸都比较小,缺乏对隧道纵向尺度方向的考虑;数值模

拟试验结构大多采用弹性本构, 结构塑性损伤分析方面研究较少.

本文以乌鲁木齐地铁 2 号线隧道穿越西山断裂带工程为依托, 考虑活动断层错动作用下土层与隧道结构的相互作用, 采用 ABAQUS 建立三维有限元弹塑性模型, 研究了隧道二次衬砌塑性应变发展过程、拉压损伤因子及剪切应变的分布, 给出了隧道拉裂严重受损、轻微受损及无受损的区间范围, 分析了不同错动位移、隧道底部距围岩交界面不同垂直距离时隧道及不同断层破碎带宽度的损伤破坏规律, 进行了设置柔性接头的减灾效果研究, 以期为实际工程提供参考.

1 工程背景

乌鲁木齐轨道交通 2 号线马料地站-平川路区间, 由西外环的马料地站起, 沿马料地街向西, 再向北转到平川路北园春市场平川路站, 中间段穿越西山断层, 全长约 873.1 m. 拟建区间底板埋深 17.6~26.5 m, 标高 831~842.6 m, 地质剖面简图见图 1. 西山断层形成于中更新世中晚期, 最新活动时间为晚更新世晚期, 属晚更新世活动断层, 走向 N45°-75°E, 倾向 N, 倾角 44°~83°, 具逆冲性质. 穿越断层段前后 200 m 范围内隧道区间拟采用矿山法施工, 其余地段拟采用盾构法施工. 根据乌鲁木齐轨道交通 2 号线详勘报告, 考虑未来 100 年有突发事件的可能性, 建议设防垂直位错 $h_v = 0.165$ m.

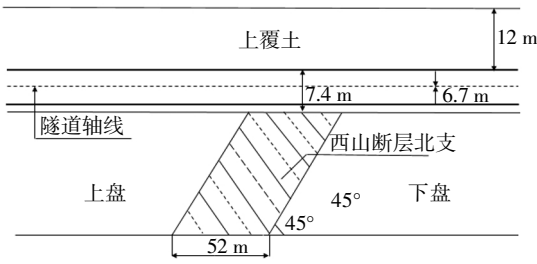


图 1 地质剖面简图
Fig.1 Sketch of geological profile

2 模型建立及参数选取

取断层破碎带前后各 100 m 范围内建立计算模型, 模型长×宽×高为 252 m × 68 m × 60 m, 隧道埋深为 12 m, 断层倾角为 45°, 隧道直径为 6.7 m, 模型网格划分见图 2, 隧道结构采用复合式衬砌, 纵向划分 126 份网格, 网格纵向间距为 2 m. 土体假设为理想弹塑性材料, 采用摩尔库伦屈服准则, 各土层参数见

表 1, 衬砌结构采用 ABAQUS 中的塑性损伤模型, 依据标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[18] 的规定, 定义衬砌混凝土弹塑性应力应变关系, 初期支护与二次衬砌结构参数见表 2. 初期支护厚 0.35 m, 混凝土强度等级为 C45; 二次衬砌厚 0.25 m, 混凝土强度等级为 C50. 考虑隧道与土体之间的摩擦, 其接触面设置罚摩擦, 摩擦系数取为 0.4^[19]. 模拟分析分为三步: 初始地应力平衡-隧道开挖-施加断层位移, 在前两个步骤中, 模型底部及侧边界施加法向约束, 上部边界为自由边界, 在最后一个步骤中, 由于逆断层错动为上盘相对下盘作向上运动, 因此为实现逆断层错动过程, 释放上盘底部及侧边界法向约束, 并在相应的位置上施加位移荷载以模拟断层错动, 位移加载边界条件见图 3.

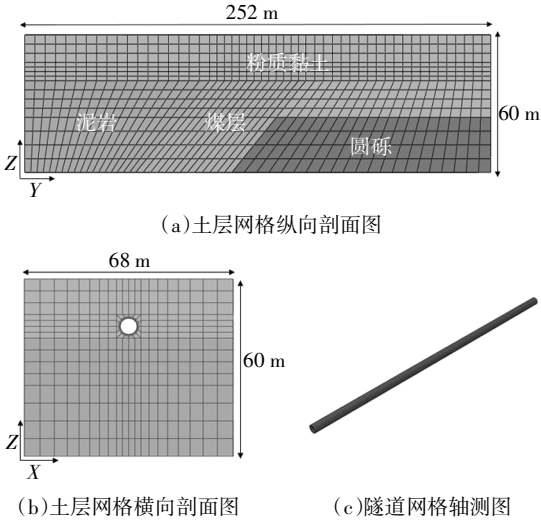


图 2 土层-隧道模型网格
Fig.2 Meshing of soil-tunnel model

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers					
名称	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
粉质黏土	2 010	13.6	0.33	18	21
泥岩	2 470	2 500	0.25	27	90
煤层	1 800	2 000	0.17	18	30
圆砾	2 100	47	0.25	40.8	4

表 2 结构物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of tunnel structure					
名称	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	压缩屈服 应力/MPa	拉伸屈服 应力/MPa
初期支护	2 500	33 500	0.2	29.6	2.51
二次衬砌	2 500	34 500	0.2	32.4	2.64

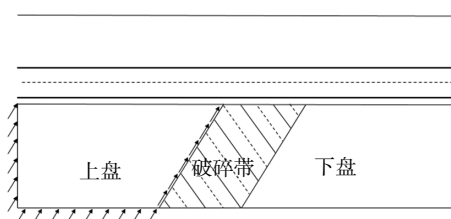


图3 断层错动加载边界
Fig.3 Boundary of fault dislocation

3 结构破坏分析

3.1 位移分析

施加断层错动位移 16.5 cm, 图 4 为二次衬砌竖向位移沿隧道纵向距离的分布曲线。图 4 中, 以模型上盘边界处为 0 点, 往右侧指向下盘方向为正, 破碎带两侧边界分别在纵向坐标 100 m 和 152 m 处, 断层错动发生在纵向坐标 100 m 处, 纵坐标的竖向位移, 以竖直向上为正, 向下为负。由图 4 可知, 断层错动发生后, 隧道衬砌沿着纵向发生了“S”状弯曲, 上盘受竖向位移的作用, 二次衬砌产生向上的位移 16.5 cm, 随着纵向距离的增加, 二次衬砌竖向位移逐渐减小。

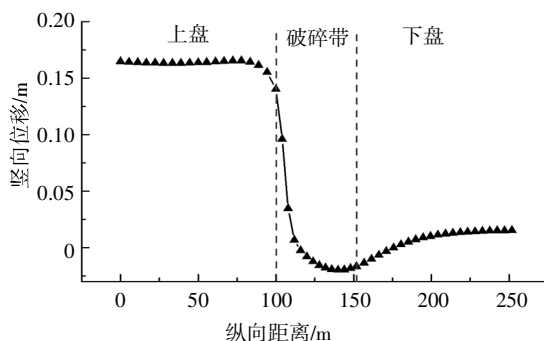


图4 二次衬砌竖向位移纵向分布曲线
Fig.4 Longitudinal distribution curve of vertical displacement of secondary lining

3.2 塑性应变发展过程

图 5 为断层错动位移过程中二次衬砌的塑性应变发展过程。由图 5 可知, 当断层位移不大于 3 cm 时, 二次衬砌未发生塑性应变, 代表结构材料尚未屈服。当断层位移逐渐增大时, 最大塑性应变首先出现在上盘拱顶, 然后出现在上盘拱底, 最后出现在破碎带内拱腰处并在此逐渐累积。产生这种现象的可能原因是由于隧道埋置在上覆土层内, 隧道底部最早与土体共同运动, 隧道顶部受到覆土压力与底部位移的共同作用, 最早产生塑性应变。当隧道顶部与上覆土层之间的作用逐渐达到稳定时, 隧道底部开始与土体产生相互作用, 塑性应变在隧道底部逐渐增

大, 隧道横截面逐渐变为椭圆面, 随着断层位移的进一步增大, 椭圆面拱腰处产生应力集中, 塑性应变在拱腰处逐渐累积直至破坏。

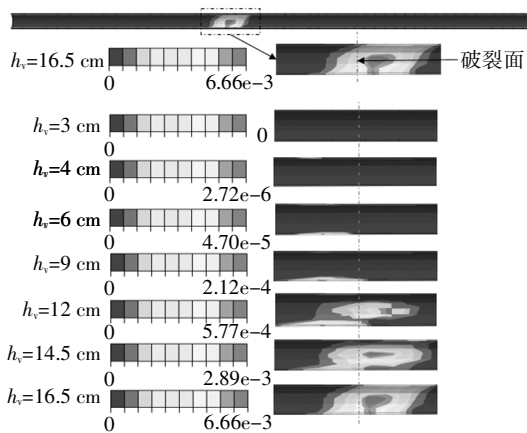


图5 塑性应变发展过程
Fig.5 Development process of plastic strain

3.3 拉压损伤因子分布

图 6 为二次衬砌纵向受压受拉损伤因子分布云图, 图 7 和图 8 为二次衬砌拱顶、拱腰及拱底的受压受拉纵向分布曲线图。由图 7 和图 8 可知, 最大受压受拉损伤因子出现在破碎带拱腰处, 上盘内拱顶处受拉, 拱底处受压, 在受损最为严重的拱腰处指向下盘方向的破碎带内拱顶处受压, 拱底处受拉。由以上分析可知, 二次衬砌拱腰处拉压破坏最为严重, 拉压损伤因子沿纵向均呈“S”型分布, 与衬砌变形一致。

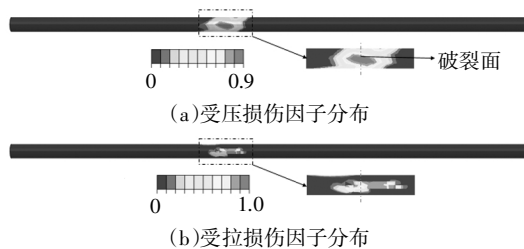


图6 受压受拉损伤因子分布云图
Fig.6 Distribution cloud of compressive and tensile damage factor

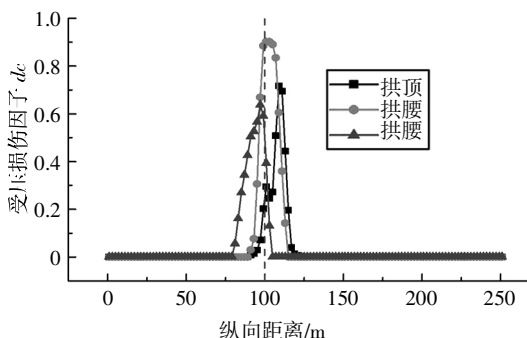


图7 隧道拱顶、拱腰及拱底受压损伤因子纵向分布曲线
Fig.7 Longitudinal distribution curve of compressive damage factor of tunnel vault, waist and invert

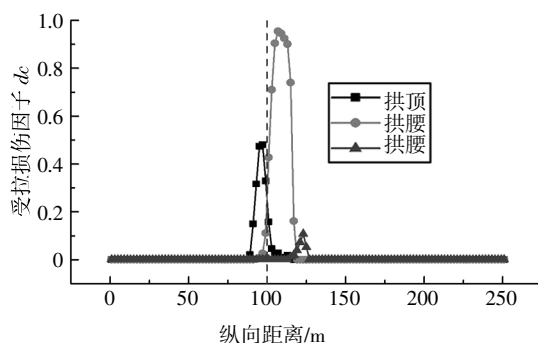


图8 隧道拱顶、拱腰及拱底受拉损伤因子纵向分布曲线

Fig.8 Longitudinal distribution curve of tensile damage factor of tunnel vault, waist and invert

3.4 剪应变

图9为二次衬砌剪应变分布云图.由图9可知,最大剪应变发生在拱腰处.图10为拱腰处剪应变(绝对值)纵向分布曲线图,拱腰处最大剪应变发生在纵向坐标105m处,最大值为0.0193.混凝土抗剪强度和抗压强度之比约为0.095~0.121^[20],依据Zia的建议,混凝土的剪切模量为其弹性模量的40%^[21].由此可求得C50混凝土允许的极限剪切应变 ε_s :

$$\varepsilon_s = \frac{\tau}{G} = \frac{0.121 \cdot \sigma_{cu}}{0.4E_0} = 2.595e-4 \quad (1)$$

拱腰处剪应变为 $1.93e-2$,远大于极限剪切应变,表示混凝土极可能发生了严重的剪切破坏.

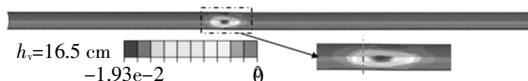


图9 二次衬砌剪应变分布云图

Fig.9 Distribution cloud of shear strain of secondary lining

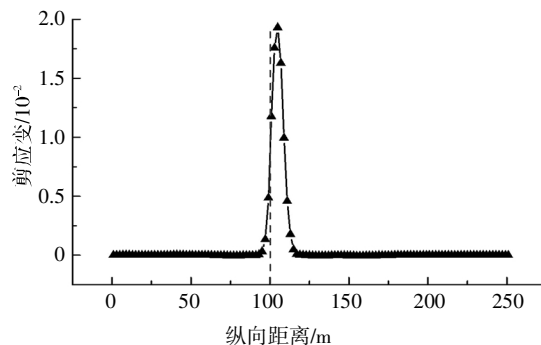


图10 拱腰处剪应变纵向分布曲线

Fig.10 Longitudinal distribution curve of shear strain of tunnel waist

3.5 结构拉裂受损区间划分

由3.3和3.4节隧道的受拉、受压与剪切破坏分析可知在断层破裂面附近,二次衬砌受到拉压和剪

切的共同作用,距破裂面较远范围内,上盘隧道拱顶处、破碎带内拱底处主要承受拉力,上盘拱底处、破碎带内拱顶处主要承受压力.二次衬砌破坏形式的纵向分布示意图见图11.

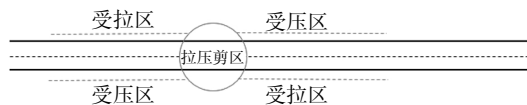


图11 二次衬砌破坏形式纵向分布示意图

Fig.11 Schematic diagram of the damage form along the tunnel axis of secondary lining

为进一步区别隧道的拉裂严重受损区、轻微受损区与无受损区,本文以受拉损伤因子计算得到混凝土的裂缝宽度进行划分. Chen 等人^[22]提出了一种通过拉伸损伤因子 d_t 合理计算混凝土裂缝的计算公式:

$$d_t = \frac{w_t}{[w_t + (\sigma_t h_c)/E_0]} \quad (2)$$

式中: h_c 为特征值长度,对于八节点积分单元而言等于单元边长^[23]; σ_t 为拉应力; E_0 为初始弹性模量.

由公式(2)得到当混凝土裂缝宽度为0.2mm时,受拉损伤因子为0.838.依据《水工混凝土结构设计规范》^[24],表3给出了混凝土裂缝宽度和受拉损伤因子定义的二次衬砌(C50)受损程度区间划分依据.

表3 二次衬砌受损程度划分

Tab.3 Classification of damage degree of secondary lining

分类	受损程度	裂缝宽度/mm	拉伸损伤因子
I	无破坏	$w_t = 0$	$d_t = 0$
II	轻微破坏	$0.2 > w_t > 0$	$0.838 > d_t > 0$
III	严重破坏	$w_t \geq 0.2$	$d_t \geq 0.838$

结合图8隧道二次衬砌拱顶、拱腰及拱底的受拉损伤因子纵向分布曲线,得到二次衬砌沿纵向拉裂受损区间分布见图12.

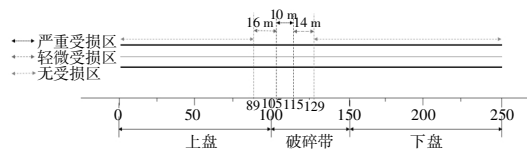


图12 二次衬砌拉裂受损区间纵向分布

Fig.12 Longitudinal distribution of tensile-crack damaged interval of secondary lining

由图12可知,二次衬砌拉裂严重受损区集中在

破碎带内, 发生在纵向区间 105 m 至 115 m 共 10 m 范围内, 轻微受损区发生在严重受损区两侧, 沿破碎带指向上盘方向为 16 m, 指向下盘方向为 14 m, 总长为 30 m.

4 影响因素分析

考虑到错动危险的不确定性、施工时隧道埋深位置的选取以及断层破碎带宽度的不同, 本文重点分析了不同断层竖向错动位移 h_v 、隧道底部距围岩交界面不同垂直距离 b 及不同断层破碎带宽度的二次衬砌结构的破坏损伤规律, 依此建立模拟工况见表 4.

表 4 不同影响因素模拟工况

Tab.4 Simulated working conditions with different influencing factors

工况设置	h_v/cm	l/cm	b/cm
工况 1	10	0.7	52
工况 2	16.5	0.7	52
工况 3	20	0.7	52
工况 4	10	2.7	52
工况 5	10	4.7	52
工况 6	16.5	0.7	2
工况 7	16.5	0.7	26

4.1 不同断层错动量影响分析

表 5 为不同错动位移下的最大塑性应变, 图 13 为拱腰处剪应变纵向分布曲线图, 最大塑性应变及最大剪应变均出现在拱腰处. 由图表可知, 当错动位移逐渐增大时, 塑性应变和剪应变均增大.

表 5 不同错动位移下的塑性应变

Tab.5 Plastic strain under different dislocation displacements

h_v/cm	10	16.5	20
PEEQ	0.001 44	0.006 66	0.021 7

当错动位移分别为 10 cm、16.5 cm 和 20 cm 时, 受压和受拉损伤因子最大值均出现在破碎带内拱腰处, 图 14 和图 15 为隧道沿纵向各个横截面上最大受压和受拉损伤因子的纵向分布曲线图, 由图可知, 当错动位移逐渐增大时, 隧道拉压损伤因子越大, 代表二次衬砌受拉受压破坏越严重.

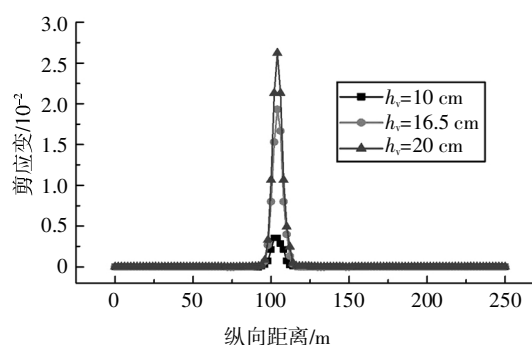


图 13 不同错动位移下的拱腰处剪应变

Fig.13 Shear strain of tunnel waist under different dislocation displacements

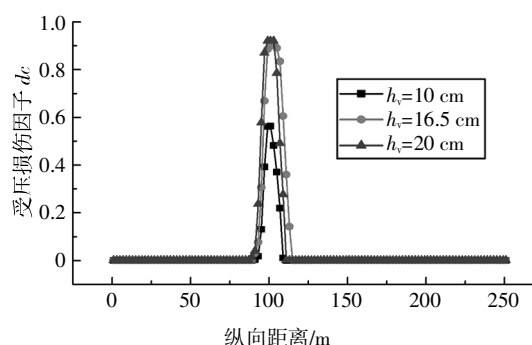


图 14 最大受压损伤因子纵向分布曲线

Fig.14 Longitudinal distribution curve of maximum compressive damage factor

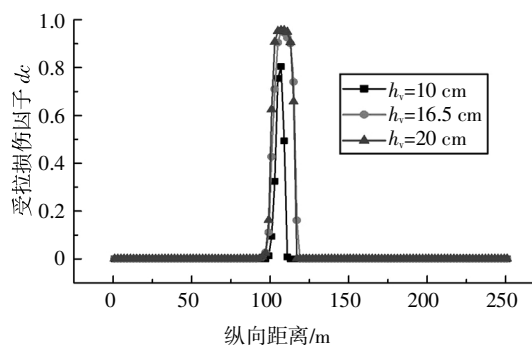


图 15 最大受拉损伤因子纵向分布曲线

Fig.15 Longitudinal distribution curve of maximum tensile damage factor

4.2 隧道底部距围岩交界面不同垂直距离影响分析

表 6 为隧道底部距围岩交界面不同垂直距离的最大塑性应变, 图 16 为拱腰处剪应变纵向分布曲线图, 最大塑性应变及最大剪应变均出现在拱腰处. 由图表可知, 当垂直距离逐渐增大时, 塑性应变和剪应变均减小, 当垂直距离等于 4.7 m 时, 塑性应变为 0, 剪应变接近于 0.

表 6 不同隧道底部距围岩交界面垂直距离的塑性应变

Tab.6 Plastic strain under different vertical distances from tunnel bottom to the interface of surrounding rocks

l / m	4.7	2.7	0.7
PEEQ	0	$8.69\text{e-}5$	0.001 44

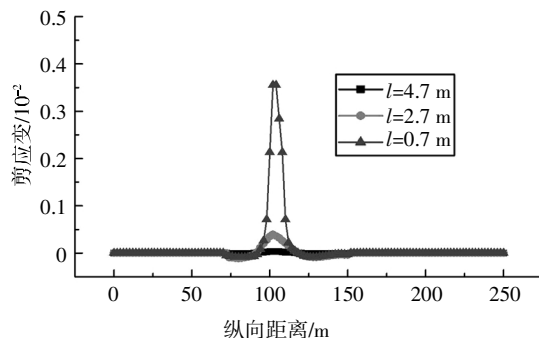


图 16 不同隧道底部距围岩交界面垂直距离的拱腰处剪应变

Fig.16 Shear strain of tunnel waist under different vertical distances from tunnel bottom to the interface of surrounding rocks

图 17 和图 18 为隧道底部距围岩交界面不同垂直距离的隧道横截面最大受压和受拉损伤因子的纵向分布曲线。由图可知,当隧道底部距围岩交界面的垂直距离为 0.7 m 时,受压和受拉损伤因子最大,且最大值出现在破碎带内拱腰处;当隧道底部距围岩交界面的垂直距离为 2.7 m 时,受压损伤因子最大值出现在上盘拱底处,受拉损伤因子出现在隧道上盘拱顶处;当隧道底部距围岩交界面的垂直距离为 4.7 m 时,受压受拉损伤因子最小均为 0。结合以上剪应变和塑性应变的分析可知,当隧道底部距围岩交界面的垂直距离逐渐增加时,隧道遭受的破坏越严重,当隧道底部距围岩交界面的垂直距离为 4.7 m 时,隧道未发生破坏,这主要是因为距离越大,土层越厚,在错动位移传播过程中耗散掉了大部分能量。

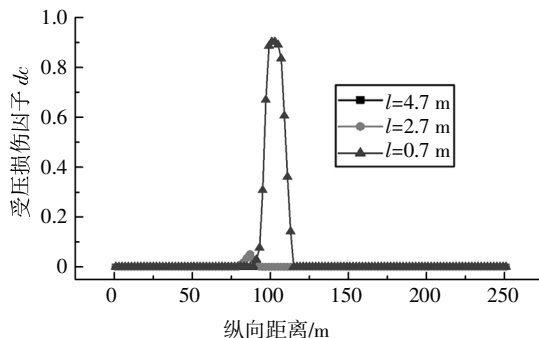


图 17 最大受压损伤因子纵向分布曲线

Fig.17 Longitudinal distribution curve of maximum compressive damage factor

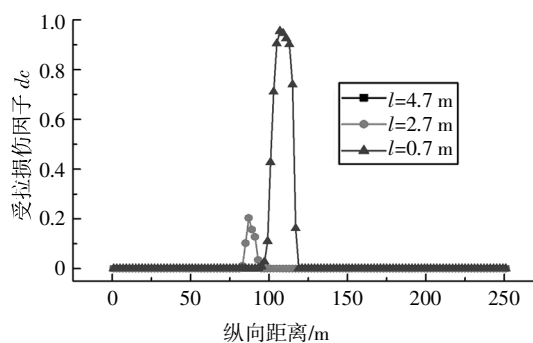


图 18 最大受拉损伤因子纵向分布曲线

Fig.18 Longitudinal distribution curve of maximum tensile damage factor

4.3 不同断层破碎带宽度影响分析

表 7 为不同破碎带宽度下的最大塑性应变,图 19 为拱腰处剪应变纵向分布曲线,破碎带宽度为 2 m 时,最大塑性应变出现在拱底处,破碎带宽度为 26 m 和 52 m 时,最大塑性应变出现在拱腰处。不同破碎带宽度最大剪应变均出现在拱腰处,分别为 $3.804\ 02\text{e-}4$ 、0.014 25 及 0.015 31。由图表可知,当破碎带宽度由 2 m 变为 26 m 时,最大塑性应变增加了 4 952.04%,最大剪应变增加了 3 646.05%;当破碎带宽度由 26 m 变为 52 m 时,最大塑性应变增加了 5.55%,最大剪应变增加了 7.44%。

表 7 不同破碎带宽度的塑性应变

Tab.7 Plastic strain under different widths of fracture zone

b / m	2	26	52
PEEQ	$1.249\text{e-}4$	0.006 31	0.006 66

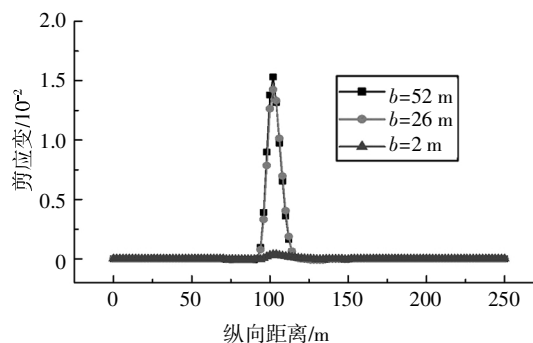


图 19 不同破碎带宽度的拱腰处剪应变

Fig.19 Shear strain of tunnel waist under widths of fracture zone

图 20 和图 21 为隧道沿纵向各个横截面上最大受压和受拉损伤因子的纵向分布曲线图。当破碎带宽度分别为 2 m、26 m 和 52 m 时,最大受压损伤因子分别为 0.159 43、0.866 27 及 0.901 48,最大受拉损

伤因子分别为 0.902 12、0.933 2 及 0.954 3。由图可知,当破碎带宽度由 2 m 变为 26 m 时,最大受压损伤因子增加了 443.35%,最大受拉损伤因子增加了 3.45%;当破碎带宽度由 26 m 变为 52 m 时,最大受压损伤因子增加了 4.06%,最大受拉损伤因子增加了 2.26%。结合以上分析可知,当断层破碎带宽度由 2 m 变为 26 m 时,隧道衬砌破坏显著增加,当破碎带宽度由 26 m 变为 52 m 时,衬砌破坏会出现很小程度的增加,基本保持稳定。产生这种现象的原因依据是泥岩与煤层为 V 级围岩,粉质黏土与圆砾为 VI 级围岩,断层错动位置发生在泥岩与煤层接触面处,当破碎带(煤层)宽度较小时,下盘内的粉质黏土发挥主要作用,其围岩性质较软,有利于隧道的变形,衬砌破坏较轻。随着破碎带宽度的逐渐增加,破碎带围岩对隧道的影响越来越大,二次衬砌破坏逐渐增加,当破碎带宽度达到 26 m 时,破碎带围岩对隧道的影响基本保持稳定。

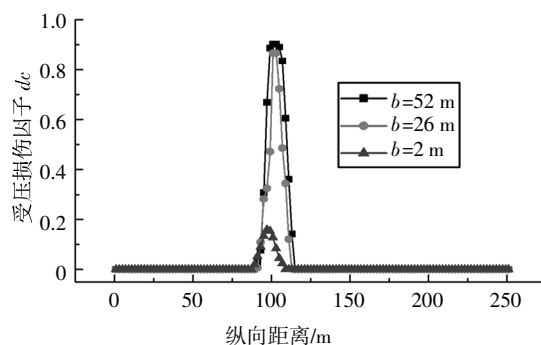


图 20 最大受压损伤因子纵向分布曲线

Fig.20 Longitudinal distribution curve of maximum compressive damage factor

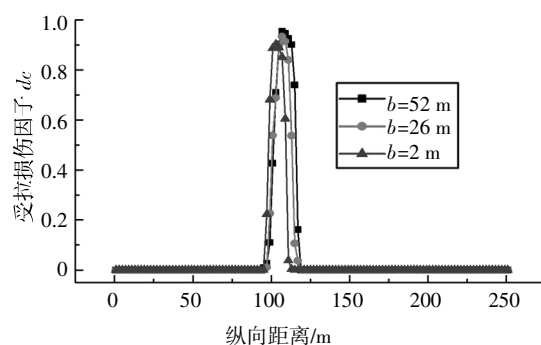


图 21 最大受拉损伤因子纵向分布曲线

Fig.21 Longitudinal distribution curve of maximum tensile damage factor

5 柔性接头减灾效果研究

断层错动会对地下结构造成严重的破坏,因此

研究有效的抗断设计方法十分必要且具实际意义。目前常用的抗断减灾设计方法主要包括超挖设计、柔性接头、设置减震层及注浆加固 4 种,该工程采用设置柔性接头的方法。为确定衬砌节段长度,在设防错动位移作用下二次衬砌的弯矩纵向分布见图 22,如图所示,在错动面两侧 32 m 处隧道二次衬砌形成反弯点,依据 Shahidi^[15]等人的研究,衬砌节段长度最大不应大于 32 m,考虑到混凝土台车的宽度一般为 6~12 m,同时考虑到防水要求,衬砌节段长度不宜设置太短,因此节段衬砌长度最终确定为 12 m,设置范围分布在断层破碎带及其附近共 96 m,柔性接头长度 0.15 m,按不利工况考虑,假定断层错动的位置发生在节段衬砌中点处,模拟中柔性接头被简化为理想弹性材料,密度为 1 000 kg/m³,弹性模量为 7.8 MPa,泊松比 0.47,柔性接头设置示意图见图 23。

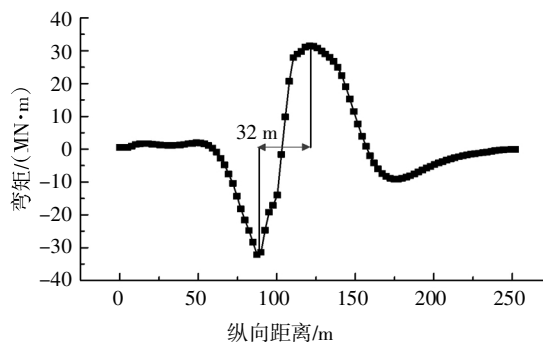


图 22 弯矩纵向分布曲线

Fig.22 Variations of computed bending moment along longitudinal direction

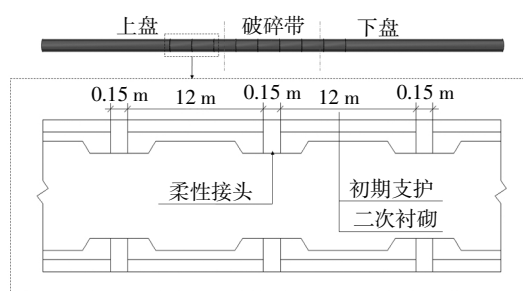


图 23 柔性接头设置示意图

Fig.23 Sketch diagram of flexible joints

施加断层错动位移 16.5 cm,二次衬砌的塑性应变、拉压损伤因子及剪应变云图见图 24。对比第 3 节相应的分析可知,二次衬砌塑性应变降低了 97.8%,最大受压损伤因子降低了 90.7%,最大受拉损伤因子降低了 88.8%,最大剪应变降低了 98.5%。值得注意的是,设置柔性接头以后,二次衬砌发生破坏的位置主要集中在跨断层错动面附近的柔性接头处,因

此应对此处的结构进行重点加固.综合以上分析可知,设置柔性接头可以显著降低断层错动变形对结构的损害,但由于柔性接头弹性模量低,较为“柔软”,因此成为了抗断薄弱部位,结构损伤最大的位置也往往出现在柔性接头附近.以上分析体现出了跨断层地下结构的“以适应地层变形为主,局部结构加固为辅”的设计理念.

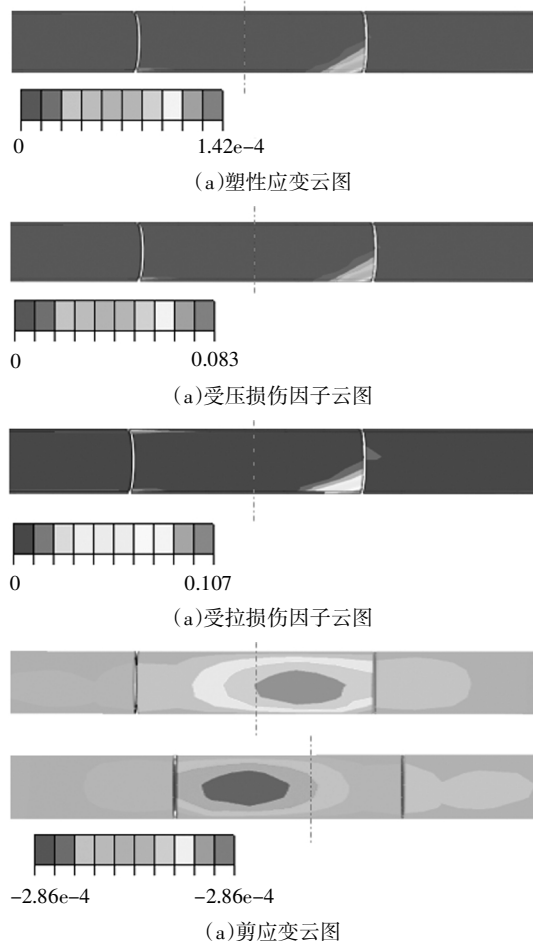


图24 应变及损伤因子云图

Fig.24 Cloud maps of strain and damage factor

6 结 论

1) 逆断层错动作用下, 错动位移不大于 3 cm 时, 二次衬砌塑性应变为 0, 结构未发生破坏. 当错动位移进一步加大时, 塑性应变首先出现在拱顶, 然后是拱底, 最后在拱腰处累积. 当错动位移达到 16.5 cm 时, 错动面及其附近的拱腰处产生拉压剪的共同破坏, 远离破裂面上盘内拱顶处受拉, 拱底处受压, 在受损最为严重的拱腰处指向下盘方向的破碎带内拱顶处受压, 拱底处受拉.

2) 基于拉伸损伤因子计算得到了二次衬砌的混

凝土裂缝宽度, 并依此为依据将隧道二次衬砌受损区间划分为拉裂严重受损区、轻微受损区与无受损区. 其中, 拉裂严重受损区集中在破碎带内, 发生在纵向区间 105 m 至 115 m 处, 总长共 10 m; 轻微受损区出现在严重受损区两侧, 沿破碎带指向上盘为 16 m, 指向下盘为 14 m, 总长为 30 m.

3) 断层错动位移越大, 结构受损越严重. 隧道底部距围岩交界面垂直距离越大, 土层越厚, 错动位移传播过程中消耗能量越多, 结构受损越轻. 断层破碎带宽度越大, 隧道破坏越严重, 当破碎带宽度达到一定值时, 破碎带对隧道的影响基本保持稳定.

4) 节段衬砌之间设置柔性接头可以显著降低错动位移对结构的危害. 但由于柔性接头较为柔软, 是抗断薄弱部位, 设置柔性接头以后受损最为严重的区域往往出现在变形缝及其附近, 因此应对该处结构进行重点加固.

参考文献

- [1] GB 20909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 56—57.
- [2] GB 50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2014: 56—57. (In Chinese)
- [3] 孙凤伯. 穿越活动断裂山岭隧道抗位错机理与方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2018: 27—29.
- [4] SUN F B. Failure mechanism and method of anti-dislocation of mountain tunnel through active fault [D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2018: 27—29. (In Chinese)
- [5] KONTOGIANNI V A, STIROS S C. Earthquakes and seismic faulting: effects on tunnels [J]. Turkish Journal of Earth Sciences, 2003, 12(1): 153—156.
- [6] LIN M L, CHUNG C F, JENG F S, *et al.* The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels [J]. Engineering Geology, 2007, 92 (3/4): 110—132.
- [7] 陈俊岭, 阳荣昌, 马人乐. 近断层地震滑冲效应下风力发电塔动力响应和振动控制试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(8): 28—33.
- [8] CHEN J L, YANG R C, MA R L. Experimental study of the seismic response and vibration control of wind turbine tower considering near-fault ground motion with fling step [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(8): 28—33. (In Chinese)
- [9] 刘学增, 林亮伦. 75°倾角逆断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2523—2530.
- [10] LIU X Z, LIN L L. Research on model experiment of effect of thrust fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel [J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (12): 2523—2530. (In Chinese)
- [7] 黄强兵, 彭建兵, 邓亚虹, 等. 西安地铁 2 号线隧道穿越地裂缝带的设防参数[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2882—2888.
HUANG Q B, PENG J B, DENG Y H, *et al.* Design parameters of Xi'an Metro Line 2 Tunnel passing through active ground fissure zones [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2882—2888. (In Chinese)
- [8] 胡辉. 穿越活动断层的隧道减震结构研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2013: 68—78.
HU H. Study on aseismic structure for tunnel passing through active fault [D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2013: 68—78. (In Chinese)
- [9] 孙凤伯, 赵伯明, 杨清源, 等. 穿越活动断层隧道组合抗震缝定量设置的计算公式及试验验证 [J]. 中国铁道科学, 2018, 39 (2): 61—70.
SUN F B, ZHAO B M, YANG Q Y, *et al.* Calculation formula and test verification for quantitative setting of combined seismic joint for tunnel through active fault [J]. China Railway Science, 2018, 39 (2): 61—70. (In Chinese)
- [10] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道减震模型的建立及其减震效果模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1885—1890.
WANG M N, CUI G Y. Establishment of tunnel damping model and research on damping effect with model test in highly seismic area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1885—1890. (In Chinese)
- [11] MOHAMMAD H B, ALI N, RONAK M, *et al.* Evaluation of underground tunnel response to reverse fault rupture using numerical approach [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 83: 1—17.
- [12] 王琼. 跨断层隧道地震反应分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011: 43—70.
WANG Q. Seismic response analysis of crossing-fault tunnel [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011: 43—70. (In Chinese)
- [13] 张维庆. 穿越断层隧道震害机理以及抗减震技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2012: 61—71.
ZHANG W Q. Study on the seismic damage mechanism of tunnels through fault and the anti-seismic and damping measures [D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2012: 61—71. (In Chinese)
- [14] 赵颖, 郭恩栋, 刘智, 等. 走滑断层位错作用下城市地铁隧道损伤分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 467—473.
ZHAO Y, GUO E D, LIU Z, *et al.* Damage analysis of urban metro tunnel under strike-slip fault [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 467—473. (In Chinese)
- [15] SHAHIDI A R, VAFAEIAN M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20 (3): 213—221.
- [16] 赵坤, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 逆断层错动作用下隧道衬砌铰接设计参数研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3412—3421.
ZHAO K, CHEN W Z, ZHAO W S, *et al.* Study on parameters of articulated design of tunnel lining under reverse fault dislocation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (S1): 3412—3421. (In Chinese)
- [17] 刘国庆, 肖明, 杨阳, 等. 跨断层水工隧洞地震响应数值模拟分析方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 141—148.
LIU G Q, XIAO M, YANG Y, *et al.* Numerical simulation and analysis method of seismic response for hydraulic tunnel across fault [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45 (11): 141—148. (In Chinese)
- [18] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 19—20.
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 19—20. (In Chinese)
- [19] HUO H. Seismic design and analysis of rectangular underground structures [D]. West Lafayette: School of Civil Engineering, Purdue University, 2005: 23—28.
- [20] 施士昇. 混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量[J]. 土木工程学报, 1994, 32(2): 47—51.
SHI S S. Shear strength, modulus of rigidity and Young's modulus of concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1994, 32(2): 47—51. (In Chinese)
- [21] PAUL Z. Torsional strength of prestressed concrete member [J]. ACI Journal, 1961, 32(10): 1337—1359.
- [22] CHEN G M, TENG J G, ASCE M, *et al.* Finite-element modeling of intermediate crack debonding in FRP-Plated RC beams [J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(3): 339—353.
- [23] ROTS J G. Computational modeling of concrete fracture [D]. Netherlands: School of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1988: 49—50.
- [24] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 20—21.
SL 191—2008 Design code for hydraulic concrete structures [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008: 20—21. (In Chinese)