

# 不同倾角逆断层错动对隧道结构影响理论分析

焦鹏飞<sup>1,2</sup> 来弘鹏<sup>3</sup>

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东济南 250061; 2. 山东省交通运输厅公路局, 山东济南 250002;  
3. 长安大学公路学院桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西西安 710064)

**摘要:** 结合某隧道工程项目, 采用 FLAC3D 有限差分软件, 建立相应的数值模型, 分析由于地震引发的逆断层错动作用对正交穿越断层隧道的影响, 并揭示其影响机理。结果表明断层错动对主动盘内隧道的影响范围远大于被动盘, 断层两侧隧道衬砌竖向相对位移随着错距量的增加而发生线性增长, 且断层对衬砌影响范围不受错距大小的影响。在断层上盘与下盘之间挤压力的作用下, 衬砌边墙处最容易发生拉裂破坏和剪切破坏, 为最不利位置, 拱顶次之, 仰拱所受影响最小。在逆断层倾角一定的情况下, 随着错动距离的增大, 衬砌不同部位受到的最大主应力、最小主应力、剪应力均整体呈增大趋势。对依托工程隧道的安全性和可靠性进行评价, 同时对类似特殊修建条件下隧道的设计和施工具有一定的指导作用。

**关键词:** 隧道工程; 逆断层; 衬砌结构; 影响分析

**中图分类号:** U451<sup>+</sup>.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)02-0106-12

## Theoretical analysis on the influence of different dip angle reverse faults' dislocation on tunnel structure

Jiao Pengfei<sup>1,2</sup> Lai Hongpeng<sup>3</sup>

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan 250061, China;  
2. Shandong Provincial Transportation Department Road Bureau, Ji'nan 250002, China;  
3. Key Laboratory of Highway College Bridge and Tunnel Shanxi, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** For a tunnel project, the finite difference software FLAC3D is used to establish the numerical model, so that the influence of earthquake induced dislocation of reverse faults on the fault-crossing tunnel can be analyzed, and the influence mechanism can be disclosed. It is found that the effect of fault dislocation on the tunnel in active plate is much larger than that of the passive plate, the vertical relative displacement increases linearly with the dislocation spacing, and the impact of the fault on the lining is not affected by the dislocation spacing. Due to the squeezing action between the upper plate and the lower plate of reverse fault, the most adverse position, which is most susceptible to tensile rupture and shear failure is the side wall of lining, next is the vault, and the last is the inverted arch. The maximum principal stress, the minimum principal stress and the shear stress in different positions of the lining increase with the increase of dislocation spacing. The safety and reliability of the present tunnel are assessed in this study, which can be referred by the design and construction of similar tunnel projects.

**Keywords:** tunnel engineering; reverse fault; lining structure; impact analysis

**E-mail:** jiaopf@sina.com

## 引 言

活动断层有蠕动和错动两种运动形式。活断层的蠕动位移量一般较小, 对工程结构物一般不会造成直接和即时的破坏。活断层的错动往往能引发地震, 且产生地层永久性的位移, 这种作用影响很大,

基金项目: 国家自然科学基金(51378071)、陕西省科学技术研究发展计划(科技新星计划 2014KJXX-53)和陕西省科技统筹创新工程重点实验室(2014SZS19-Z01)

作者简介: 焦鹏飞, 博士研究生, 工程师

收稿日期: 2018-07-14

一般会使附近的工程结构和设施产生不可修复性破坏。因此,研究断层错动对隧道结构受力与变形的影响具有重要意义。

国内外学者针对断层错动对隧道结构的影响研究方面做了大量的研究。Linetal<sup>[1]</sup>通过砂箱模型试验和数值模拟对逆冲断层对隧道的影响进行了研究,认为逆冲断层对隧道的影响与断层的倾角和地层(土体)刚度密切相关,位于逆冲断层上盘的隧道部分相比下盘部分容易变形破坏。赵伯明等<sup>[2]</sup>基于断裂几何学和震源的运动学特征,以广州地区活动断裂为研究背景,通过在断层左右盘施加一定的速度荷载,模拟了断层错动达到 0.28m 时对隧道的影 响,得出隧道结构在断层错动影响下的位移和应力的变化规律。邵润萌<sup>[3]</sup>结合成兰线铁路项目,建立围岩-断层-隧道体系的有限元模型,计算断层错动作用对于穿越断层隧道的影 响。刘学增等<sup>[4]</sup>结合大量地震断层案例,通过模型试验研究了不同倾角逆断层黏滑错动下,隧道应力分布规律和整个破坏过程。刘恺<sup>[5]</sup>从断层错动及隧道地震动力响应的基本原理出发,运用数值模拟方法,对跨越断层隧道的错动及地震动力响应规律进行了较为系统的对比分析,并根据研究成果提出了针对断层错动破坏的隧道抗错设计方案。许丁矛<sup>[6]</sup>开展活断层对隧道工程的危害性研究和隧道结构的地震响应与破坏机理研究,根据隧道和穿越断层的条件提出了针对断层错动破坏的隧道抗错动设计方法,运用数值模拟计算,对跨越断层区间隧道抗错动设计方案进行了较系统的验证对比分析。何川<sup>[7]</sup>及其团队采用资料调研、模型试验及数值模拟等方法研究了地震作用下跨断层隧道的动力响应特性,对围岩的振动、变形特性及衬砌受力等结果进行了分析,同时探讨了跨断层隧道的破坏机理。李学锋等<sup>[8]</sup>以活动断裂带工程为背景,建立有限元模型,分析了断层错动下不同节段长度隧道围岩压力分布情况、二次衬砌最大轴向应力变化情况以及隧道塑性应变发展规律。本文依托川藏公路 102 隧道工程,通过建立数值模型,在考虑逆断层错动速率的前提下,分析在逆断层错动作用下隧道衬砌结构的受力变形情况,总结衬砌的破坏形式。

## 1 工程概况

依托工程隧道起止桩号为 K0+724~K2+455,全长 1731m,位于大滑坡段,为山岭岩土隧道,设计为单洞双向两车道二级公路标准,速度为

40km/h。隧道进口端方位约为 180°,出口为 253°~272°,为曲线隧道。属高中山构造剥蚀地貌,冰积高阶地。隧道进口断层破碎偏压较严重,围岩构成较复杂,出口段为 V 级花岗片麻岩断层破碎带。根据区域勘测资料,隧道洞身围岩基岩主要为前震旦系冈底斯岩群(AnZgd)片麻岩(通麦片麻岩),以 IV、V 级为主,岩层产状为 50°~70°∠50°~80°。隧址区 F2 断层位于洞身 K1+462~K1+812 段,产状 310°∠64°,宽度达 350m。

## 2 模型建立及参数选取

### 2.1 模型的几何尺寸

针对活动断裂的地质特征,考虑到断层错动对隧道附近围岩影响的有效范围,结合研究的侧重点将研究范围局限于断层上的某个区域,同时设置接触面模拟断层滑动面,通过设置此面的物理力学属性来实现对于断层滑动面的考虑。综合考虑,模型沿隧道轴向总长度为 120m,其中 F2 断层破碎带宽为 10m,模型横断面的尺寸为 80m×80m。计算模型具体几何尺寸见图 1 和图 2(以 75°逆断层为例)。

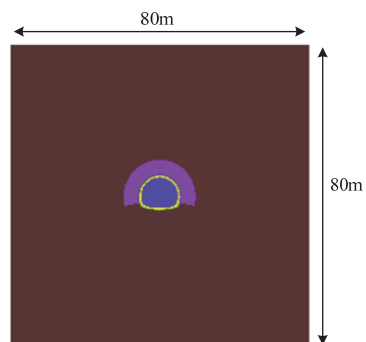


图 1 75°逆断层计算模型正视图

Fig.1 Cross section for calculation model of inverse fault of 75°

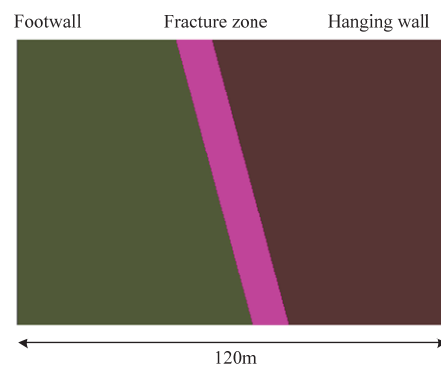


图 2 75°逆断层计算模型侧视图

Fig.2 Longitudinal section for calculation model of inverse fault of 75°

隧道与断层的空间关系：隧道与断层走向交角 90°，即正交穿越断层，隧道与断层的空间关系如图 3 所示（以倾角 75°断层为例）。

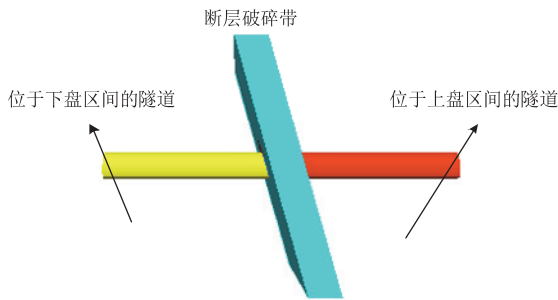


图 3 断层与隧道的相对位置关系

Fig.3 Relative positions between the fault and the tunnel

### 2.2 计算参数

围岩力学参数参考所依托隧道工程勘测资料，并结合规范要求，给出围岩和断层的物理力学参数及衬砌混凝土参数见表 1。

### 3 计算结果及分析

按照断层倾角的不同构建了 3 个三维隧道计算模型，分别计算了下列工况：断层的倾角分别为 45°、64°、75°情况下，不同倾角断层错动对正交穿越断层隧道的结构受力与变形的影响。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and Mechanical Parameters of Materials

名称	体积模量(MPa)	剪切模量(MPa)	密度(kg/m³)	黏聚力(MPa)	内摩擦角(°)
围岩	4167	1705	2300	0.5	45
断层	2000	428	2000	0.16	40
锚固区	5000	2040	2250	0.72	43
初支	12778	9583	2200	—	—
二衬	15556	11667	2500	—	—

### 3.1 45°逆断层错动对隧道结构影响的结果分析

#### 3.1.1 位移分析

图 4 为 45°逆断层沿 45°错动面错动 20cm 时衬砌的竖向位移云图，图 5 为 45°逆断层错动不同错距时衬砌拱顶处的竖向相对位移量曲线。

从此图可以看出，位于主动盘（上盘）内的隧道区间在较大范围内发生了位移，说明断层错动对主动盘（上盘）内隧道的影响范围较大；而被动盘（下盘）内的隧道区间发生位移的区段很小，距断层一定距离以外基本没发生竖向位移。从位移变化的幅度看，剧烈的变化在滑动面附近小范围内发生，在此之外的区域，位移的变化很微弱。

上盘衬砌的竖向相对位移随着错距量的增加呈线性增加，且最大竖向位移量与错距的垂向分量

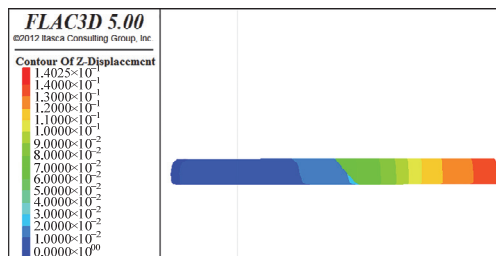


图 4 断层沿错动面错距 20cm 时衬砌的竖向位移云图  
Fig.4 Vertical displacement contour of the lining when the dislocation spacing of the fault is 20cm

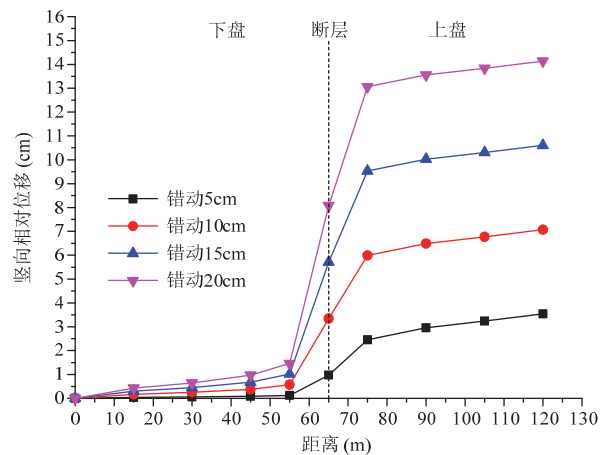


图 5 断层不同错距时衬砌的竖向位移曲线

Fig.5 Vertical displacement curve of the lining for different dislocation spacings of the fault

一致，沿 45°错动面错动 20cm 时竖向相对位移达到了 14cm。断层对衬砌影响范围不受错距大小的影响。  
3.1.2 隧道二次衬砌最大主应力分析

断层不同错动距离下，隧道二衬不同部位最大主应力沿隧道纵向的分布如图 6~图 9 所示。

从图中可以看出，随着断层错动距离不断增加，二衬拱顶、拱腰、拱脚、仰拱处的最大主应力整体呈增加趋势，最大主应力都是压应力，且衬砌

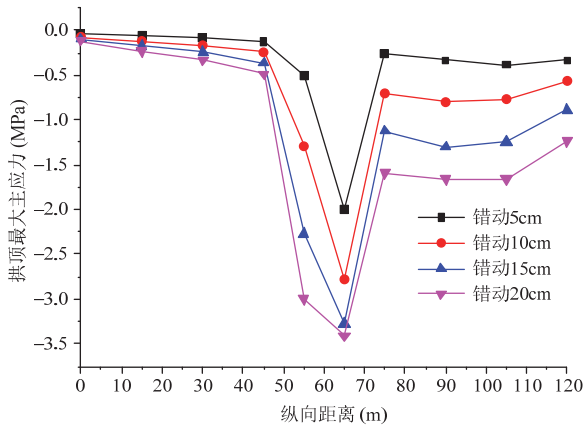


图 6 拱顶最大主应力变化

Fig.6 Variation of the maximum principal stress of the vault

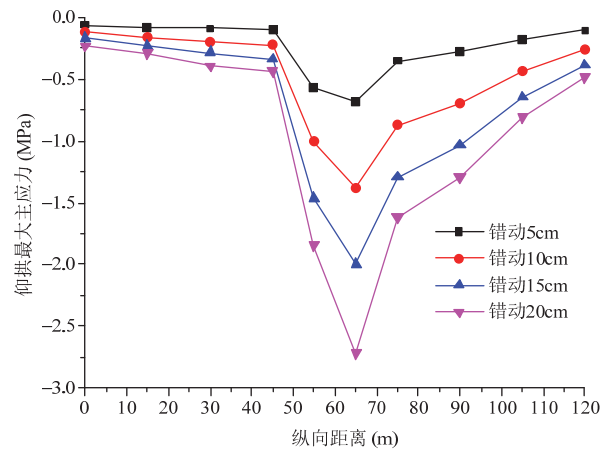


图 9 仰拱最大主应力变化

Fig.9 Variation of the maximum principal stress of the inverted arch

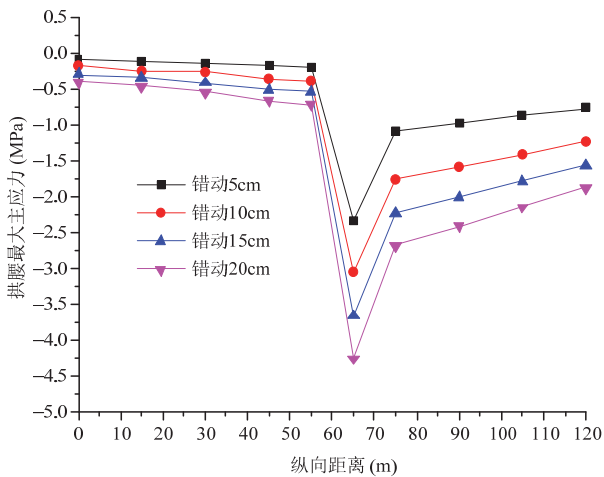


图 7 拱腰最大主应力变化

Fig.7 Variation of the maximum principal stress of the haunch

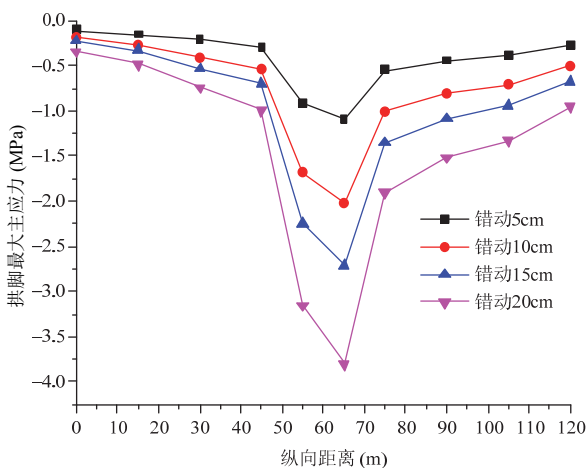


图 8 拱脚最大主应力变化

Fig.8 Variation of the maximum principal stress of arch springing

各部位最大主应力在上盘与断层破碎带交界处达到最大,拱顶压应力最大值为 3.4MPa,仰拱压应力最大达到 2.7MPa。随着错动距离的增加,上盘断层附近的二衬拱腰和拱脚压应力增加迅速,成为主要的应力集中区。其中拱腰处最大压应力达到 4.25MPa,拱脚处最大达到 3.8MPa。仰拱处受到的压应力最小,拱腰和拱脚处受到的压应力较大。因此,对于逆断层而言,隧道边墙处为最不利位置,仰拱受到的影响最小。在倾角为 45°断层错动 0~20cm 的范围内,衬砌中的最大压应力未达到 C25 混凝土的抗压强度,衬砌未产生压裂破坏。

### 3.1.3 隧道二次衬砌最小主应力分析

图 10~图 13 为不同错距下,隧道二次衬砌拱顶等部位最小主应力沿隧道纵向的分布变化图,其中正值为拉应力,负值为压应力。

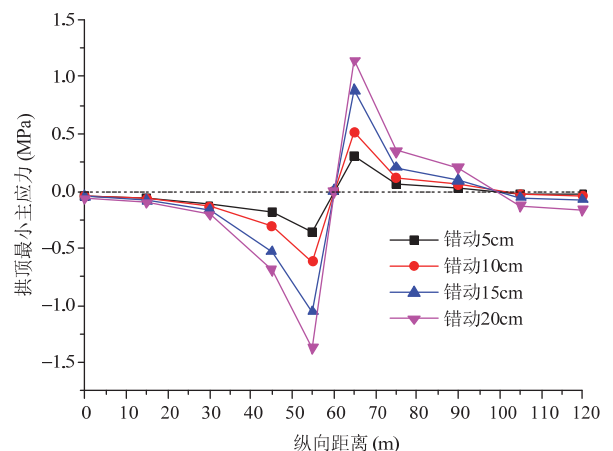


图 10 拱顶最小主应力变化

Fig.10 Variation of the minimum principal stress of the vault

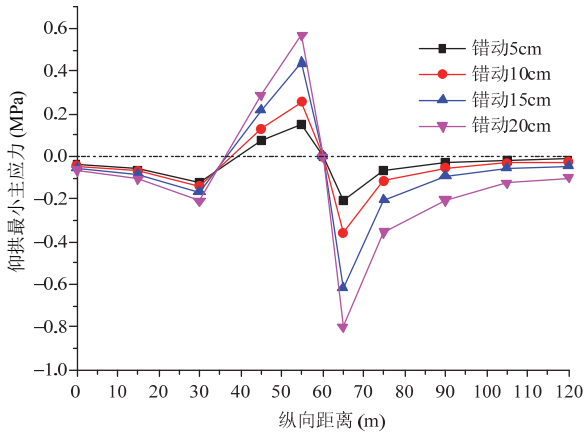


图 11 仰拱最小主应力变化

Fig.11 Variation of the minimum principal stress of the inverted arch

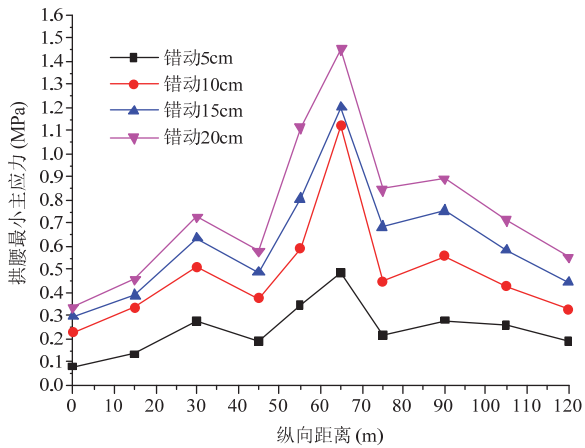


图 12 拱腰最小主应力变化

Fig.12 Variation of the minimum principal stress of the haunch

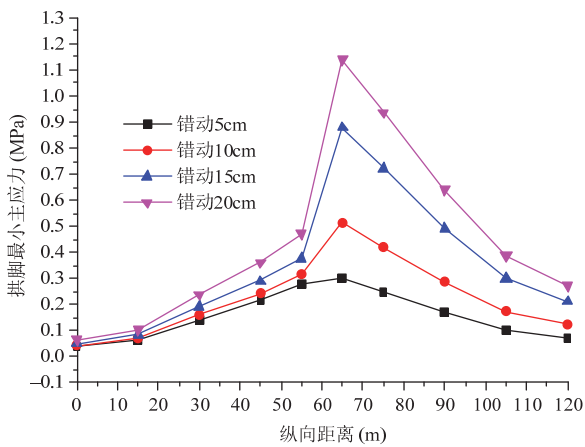


图 13 拱脚最小主应力变化

Fig.13 Variation of the minimum principal stress of the arch springing

在上盘与断层破碎带交界处，衬砌拱顶受拉，

拉应力最大达 1.11MPa。仰拱的受力与拱顶相反，在下盘与断层破碎带交界处受拉，拉应力最大达到 0.56MPa。拱脚和拱腰受到的拉应力在上盘与断层破碎带交界处最大，分别达到了 1.14MPa 和 1.45MPa。由此可见，逆断层错动形成的挤压作用对仰拱的受力是有利的，错动对拱脚和拱腰的影响较大，因此隧道衬砌边墙处为最不利位置。在倾角为 45°断层错动 0~20cm 的范围内，衬砌受到的最大拉应力未达到 C25 混凝土的抗拉强度，衬砌未产生拉裂破坏。

### 3.1.4 隧道二次衬砌剪应力分析

图 14 为断层沿错动面错动 15cm 时隧道二次衬砌剪应力云图。

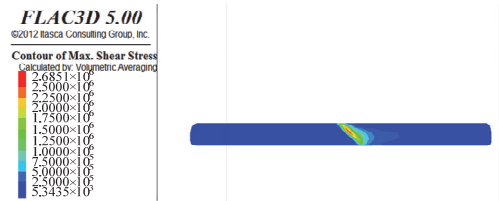


图 14 沿错动面错动 15cm 二衬剪应力云图

Fig.14 Shear stress contour of the secondary lining for dislocation of 15cm

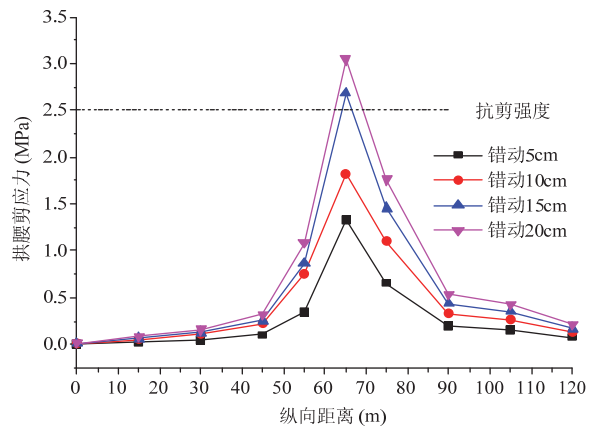


图 15 不同错距下二衬拱腰剪应力

Fig.15 Shear stress curves of haunch of the secondary lining under different dislocation spacings

从图中可以看出，剪应力最大值出现在靠近断层裂缝，衬砌边墙位置，由于衬砌结构完全对称，剪应力的分布也对称，故取下图中可见的一侧作为研究对象。图 15 为不同错距下二衬拱腰剪应力变化图，从图中可以看出剪应力随着断层错距量的增加逐渐增大，当断层错动达到 15cm 时，剪应力最大值达到 2.68MPa，达到 C25 混凝土的抗剪强度，衬砌发生剪切破坏。



综合以上分析，在倾角为 45°的逆断层沿错动面错动 0~20cm 的范围内，隧道二次衬砌的压应力和拉应力均未达到 C25 混凝土强度标准值，即未发生衬砌拉裂或压裂破坏；当错距达到 15cm 时，剪应力超过混凝土抗剪强度，衬砌边墙处发生剪切破坏。

### 3.2 64°逆断层错动对隧道结构影响的结果分析

#### 3.2.1 位移分析

图 16 为 64°逆断层沿 64°错动面错动 20cm 时衬砌的竖向位移云图，图 17 为 64°逆断层错动不同错距时衬砌拱顶处的竖向位移量。

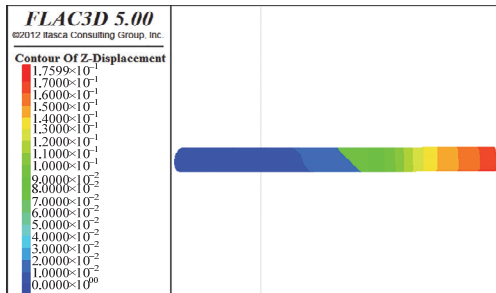


图 16 断层沿错动面错距 20cm 时衬砌的竖向位移云图  
Fig.16 Vertical displacement contour of the lining for dislocation of 20cm

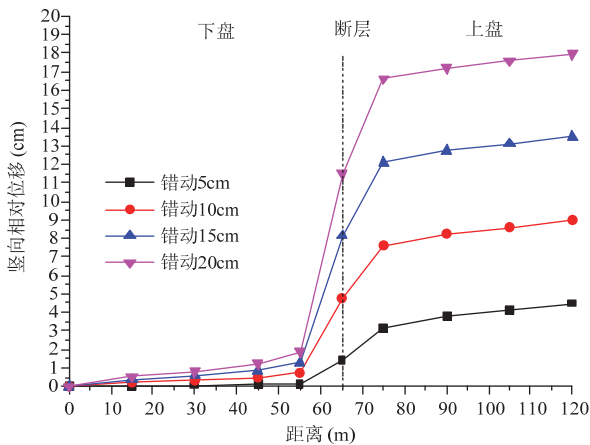


图 17 断层不同错距时衬砌的竖向位移曲线  
Fig.17 Vertical displacement curves of the lining for different dislocation spacings of the fault.

从图中可以看出，位于主动盘（上盘）内的隧道区间在较大范围内发生了位移，反映出断层错动对主动盘（上盘）内隧道的的影响范围较大；而被动盘（下盘）内的隧道区间发生位移的区段很小，距断层一定距离以外基本没发生位移。从位移变化的幅度看，剧烈的变化在滑动面附近小范围内发生，在此之外的区域，位移的变化很微弱。

上盘衬砌的竖向相对位移随着错距量的增加

呈线性增加，且最大竖向位移量与错距的垂向分量一致，沿错动面错动 20cm 时竖向相对位移达到了 17cm。断层对衬砌影响范围不受错距大小的影响。

#### 3.2.2 隧道二次衬砌最大主应力分析

断层不同错动距离下，隧道二衬不同部位最大主应力沿隧道轴向的分布如图 18~图 21 所示。

从图中可以看出，随着断层错动距离不断增加，二衬拱顶、拱腰、拱脚、仰拱处的最大主应力整体呈增加趋势，最大主应力都是压应力，且衬砌各部位最大主应力在上盘与断层破碎带交界处达到最大，拱顶压应力最大值为 3.02MPa，仰拱压应力最大达到 2.398MPa。随着错动距离的增加，上盘断层附近的二衬拱腰和拱脚压应力增加迅速，成为主要的应力集中区。其中拱腰处最大压应力达到 6.55MPa，拱脚处最大达到 6.12MPa。仰拱处受到

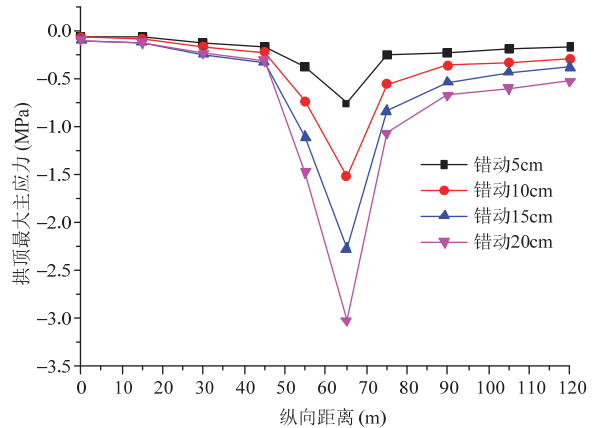


图 18 拱顶最大主应力变化  
Fig.18 Variation of the maximum principal stress of the vault

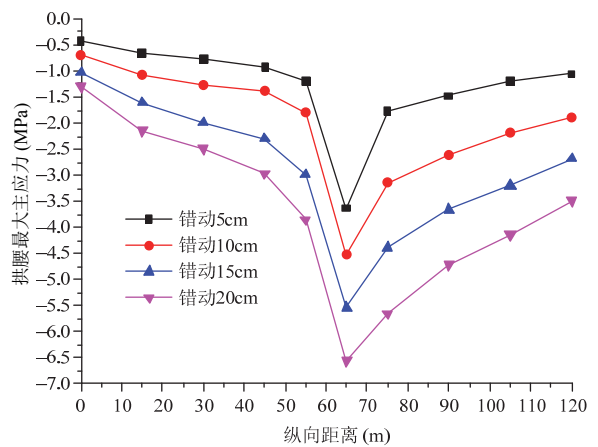


图 19 拱腰最大主应力变化  
Fig.19 Variation of the maximum principal stress of the haunch

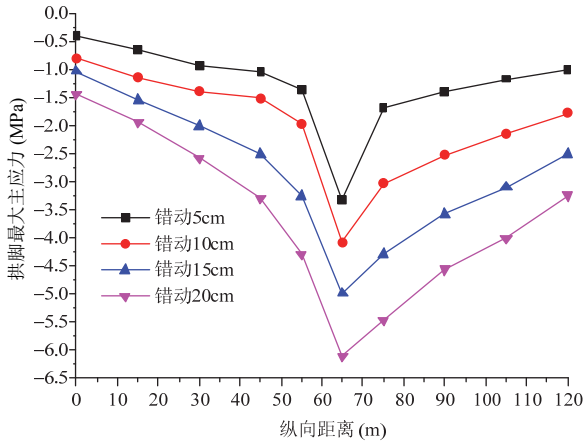


图 20 拱脚最大主应力变化

Fig.20 Variation of the maximum principal stress of the arch springing

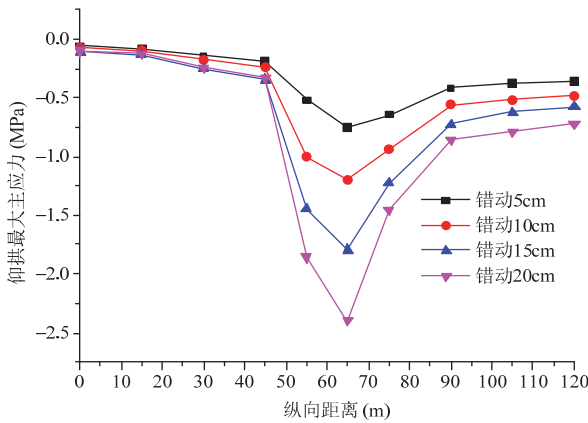


图 21 仰拱最大主应力变化

Fig.21 Variation of the maximum principal stress of the inverted arch

的压应力最小，拱顶次之，拱腰和拱脚处受到的压应力较大，因此，对于逆断层而言，隧道边墙处为最不利位置，仰拱受到的影响最小。在倾角为 64° 断层错动 20cm 的范围内，衬砌受到的最大压应力未达到 C25 混凝土的抗压强度，衬砌未产生压裂破坏。

### 3.2.3 隧道二次衬砌最小主应力分析

图 22 ~ 图 25 为不同错距下，隧道二次衬砌拱顶等部位沿隧道纵向的分布变化图，其中正值为拉应力，负值为压应力。

在上盘与断层破碎带交界处，衬砌拱顶受拉，拉应力最大达 1.45MPa。仰拱的受力与拱顶相反，在下盘与断层破碎带交界处受拉，拉应力最大达到 0.725MPa。拱脚和拱腰受到的拉应力在上盘与断层破碎带交界处最大，分别达到了 1.46MPa 和 1.79MPa，拱腰处受拉破坏。由此可见，逆断层错

动形成的挤压作用对仰拱的受力是有利的，错动对拱脚和拱腰的影响较大，因此隧道衬砌边墙处为最

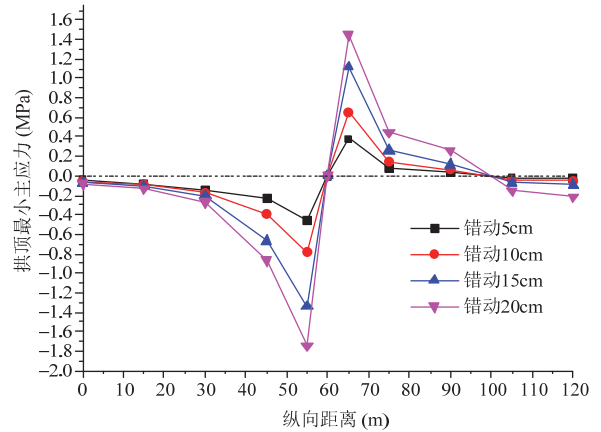


图 22 拱顶最小主应力变化

Fig.22 Variation of the minimum principal stress of the vault

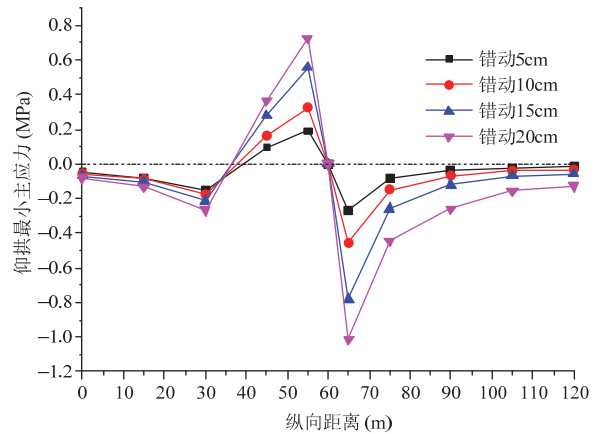


图 23 仰拱最小主应力变化

Fig.23 Variation of the minimum principal stress of the inverted arch

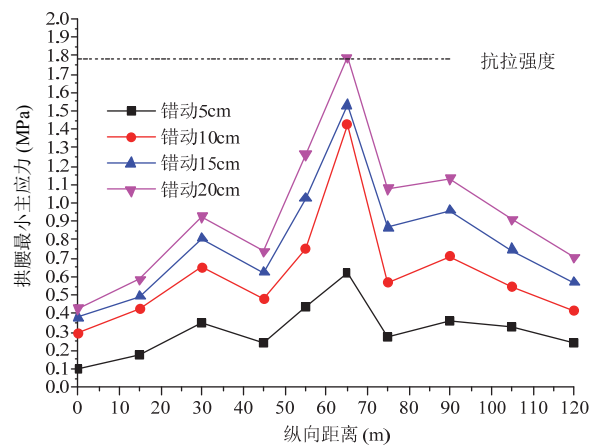


图 24 拱腰最小主应力变化

Fig.24 Variation of the minimum principal stress of the haunch

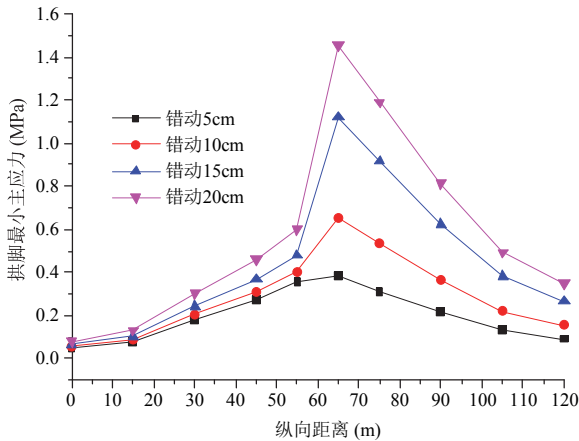


图 25 拱脚最小主应力变化

Fig.25 Variation of the minimum principal stress of the arch springing

不利位置。倾角为 64°断层错动 20cm 时，衬砌拱腰处受到的最大拉应力达到了 C25 混凝土的抗拉强度，拱腰处产生了拉裂破坏。

### 3.2.4 隧道二次衬砌剪应力分析

图 26 为断层沿错动面错动 10cm 时，隧道二次衬砌剪应力云图。



图 26 错动 10cm 二衬剪应力云图

Fig.26 Shear stress contour of the secondary lining for dislocation of 15cm

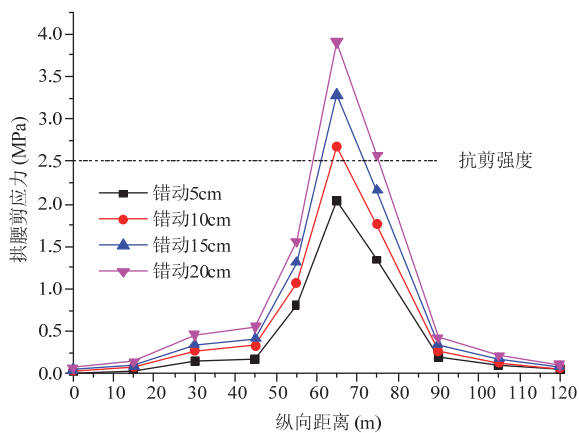


图 27 不同错距二衬拱腰剪应力变化

Fig.27 Variation of shear stress of haunch of the secondary lining under different dislocation spacings

从图中可以看出，剪应力最大值出现在靠近断层裂缝，衬砌边墙位置，由于衬砌结构完全对称，剪应力的分布也对称，故取下图中可见的一侧作为研究对象。图 27 为不同错距下二衬拱腰剪应力变化图，从图中可以看出剪应力随着断层错距量的增加逐渐增大，当断层错动达到 10cm 时，剪应力最大值达到 2.67MPa，达到 C25 混凝土的抗剪强度，衬砌剪切破坏。

综合以上分析，在倾角为 64°的逆断层沿错动面错动 20cm 的范围内，隧道二次衬砌的压应力未达到 C25 混凝土强度标准值，即未发生衬砌压裂破坏；错动 20cm 时，拱腰处受到的拉应力超过了混凝土的抗拉强度，即拱腰处拉裂破坏；当错距达到 10cm 时，剪应力超过混凝土抗剪强度，衬砌边墙处发生剪切破坏。

### 3.3 75°逆断层错动对隧道结构影响的结果分析

#### 3.3.1 位移分析

图 28 为 75°逆断层沿 75°错动面错动 20cm 时衬砌的竖向位移云图，图 29 为 75°逆断层错动不同错距时衬砌拱顶处竖向相对位移量。

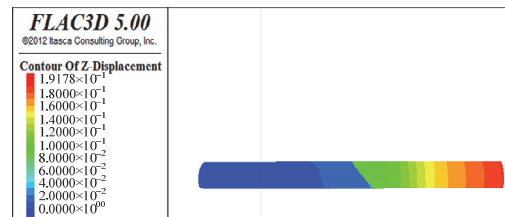


图 28 断层沿错动面错距 20cm 时衬砌的竖向位移云图

Fig.28 Vertical displacement contour of the lining for dislocation of 20cm

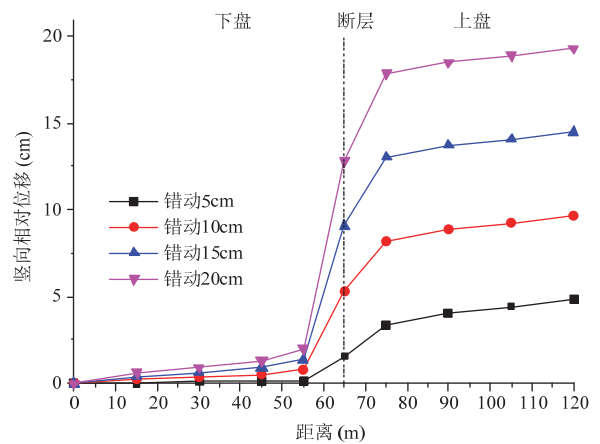


图 29 断层不同错距时衬砌的竖向相对位移曲线

Fig.29 Vertical displacement curves of the lining for different dislocation spacings of the fault



从图中可以看出，位于主动盘（上盘）内的隧道区间在较大范围内发生了位移，反映出断层错动对主动盘（上）内隧道的影 响范围较大；而被动盘（下盘）内的隧道区间发生位移的区段很小，距断层一定距离以外基本没发生位移。从位移变化的幅度看，剧烈的变化在滑动面附近小范围内发生，在此之外的区域，位移的变化很微弱。

上盘衬砌的竖向相对位移随着错距量的增加呈线性增加，且最大竖向位移量与错距的垂向分量一致，沿错动面错动 20cm 时竖向相对位移达到了 19cm。断层对衬砌影响范围不受错距大小的影响。

### 3.3.2 隧道二次衬砌最大主应力分析

断层不同错动距离下，隧道二衬不同部位最大主应力沿隧道纵向的分布如图 30~图 33 所示。

从图中可以看出，随着断层错动距离不断增加，二衬拱顶、拱腰、拱脚、仰拱处的最大主应力

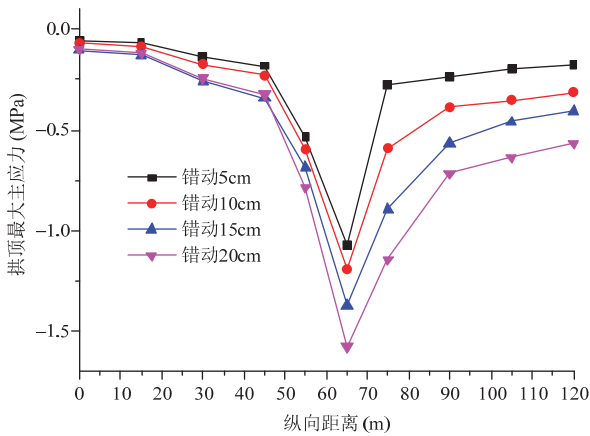


图 30 拱顶最大主应力变化

Fig.30 Variation of the maximum principal stress of the vault

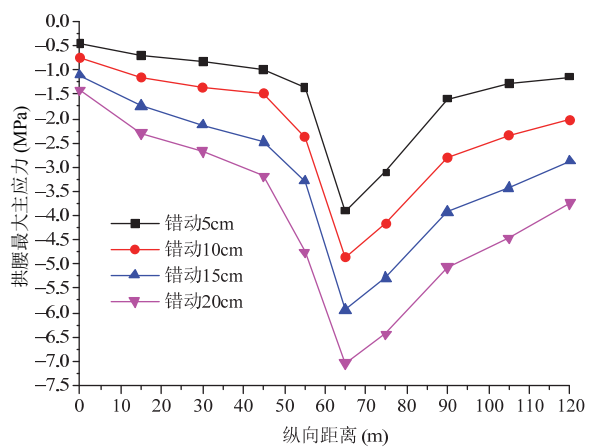


图 31 拱腰最大主应力变化

Fig.31 Variation of the maximum principal stress of the haunch

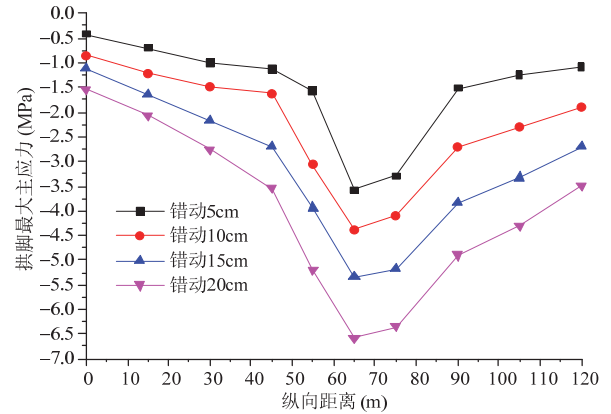


图 32 拱脚最大主应力变化

Fig.32 Variation of the maximum principal stress of the arch springing

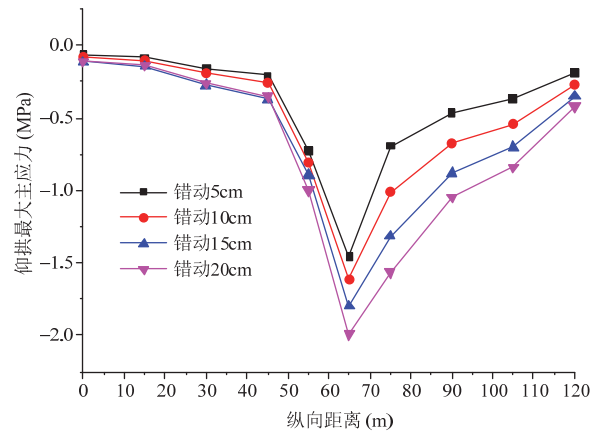


图 33 仰拱最大主应力变化

Fig.33 Variation of the maximum principal stress of the inverted arch

整体呈增加趋势，最大主应力都是压应力，且衬砌各部位最大主应力在上盘与断层破碎带交界处达到最大，拱顶压应力最大值为 1.57MPa，仰拱压应力最大达到 1.99MPa。随着错动距离的增加，上盘断层附近的二衬拱腰和拱脚压应力增加迅速，成为主要的应力集中区。其中拱腰处最大压应力达到 7.04MPa，拱脚处最大达到 6.57MPa。仰拱和拱顶处受到的压应力较小，拱腰和拱脚处受到的压应力较大，因此，对于逆断层而言，隧道边墙处为最不利位置。在倾角为 75°断层错动 20cm 的范围内，衬砌受到的最大压应力未达到 C25 混凝土的抗压强度，衬砌未产生压裂破坏。

### 3.3.3 隧道二次衬砌最小主应力分析

图 34~图 37 为不同错距下，隧道二次衬砌拱顶等部位沿隧道轴向的分布变化图，其中正值为拉应力，负值为压应力。

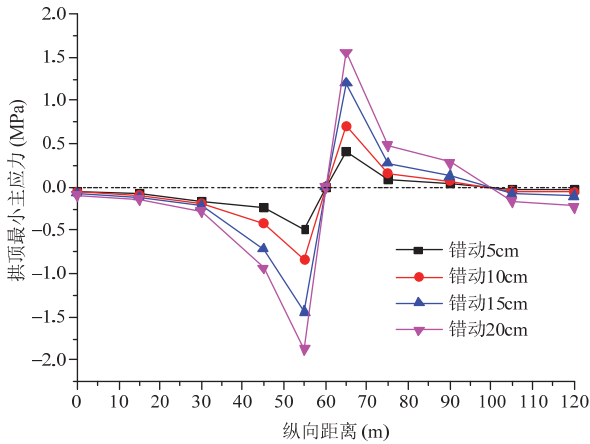


图 34 拱顶最小主应力变化

Fig.34 Variation of the minimum principal stress of the vault

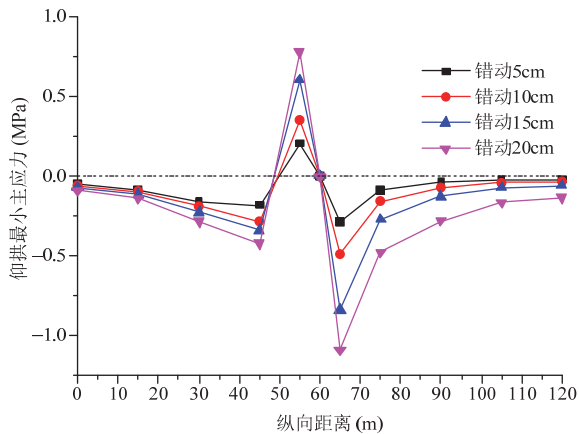


图 35 仰拱最小主应力变化

Fig.35 Variation of the minimum principal stress of the inverted arch

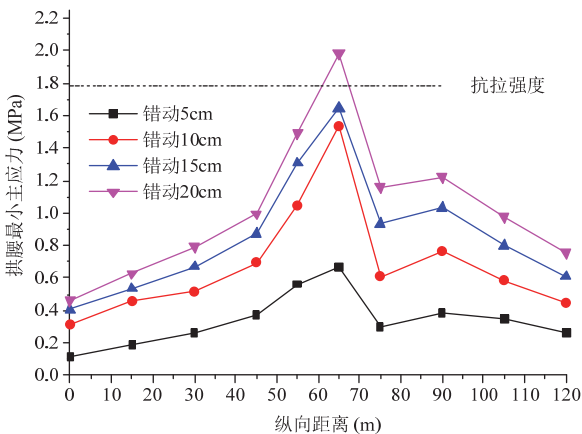


图 36 拱腰最小主应力变化

Fig.36 Variation of the minimum principal stress of the haunch

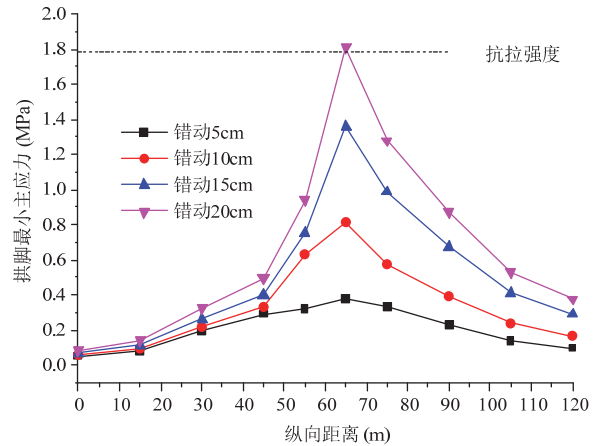


图 37 拱脚最小主应力变化

Fig.37 Variation of the minimum principal stress of the arch springing

在上盘与断层破碎带交界处，衬砌拱顶受拉，拉应力最大达 1.56MPa。仰拱的受力与拱顶相反，在下盘与断层破碎带交界处受拉，拉应力最大达到 0.78MPa。拱脚和拱腰受到的拉应力在上盘与断层破碎带交界处最大，分别达到了 1.81MPa 和 1.98MPa。由此可见，逆断层错动形成的挤压作用对仰拱和拱顶的受力是有利的，错动对拱脚和拱腰的影响较大，因此隧道衬砌边墙处为最不利位置。倾角为 75°断层错动 20cm 时，衬砌拱脚和拱腰处受到的最大拉应力达到 C25 混凝土的抗拉强度，衬砌产生了拉裂破坏。

### 3.3.4 隧道二次衬砌剪应力分析

图 38 为断层沿错动面错动 10cm，隧道二次衬砌剪应力云图。

从图中可以看出，剪应力最大值出现在靠近断层裂缝，衬砌边墙位置，由于衬砌结构完全对称，剪应力的分布也对称，故取下图中可见的一侧作为研究对象。图 39 为不同错距下二衬拱腰剪应力变化图，从图中可以看出剪应力随着断层错距量的增加

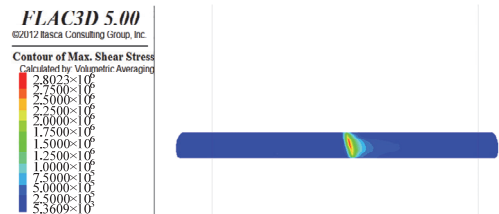


图 38 错动 10cm 二衬剪应力云图

Fig.38 Shear stress contour of the secondary lining for dislocation of 10cm

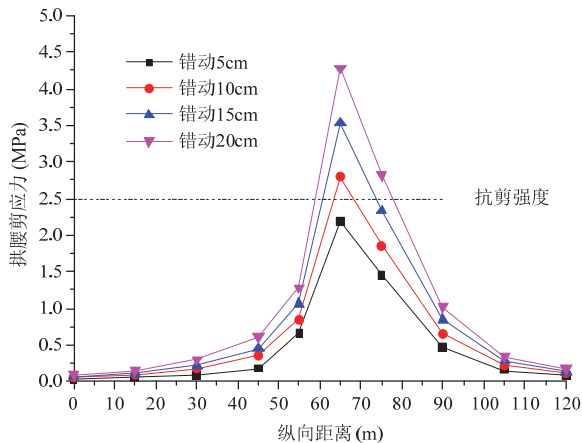


图 39 不同错距二衬拱腰剪应力云图

Fig.39 Shear stress curves of haunch of the secondary lining under different dislocation spacings

逐渐增大,当断层错动达到 10cm 时,剪应力最大值达到 2.80MPa,达到 C25 混凝土的抗剪强度,衬砌发生剪切破坏。

综合以上分析,在倾角为 75°的逆断层沿错动面错动 20cm 的范围内,隧道二次衬砌的压应力未达到 C25 混凝土强度标准值,即未发生衬砌压裂破坏;错动 20cm 时,拱脚和拱腰处受到的拉应力超过了混凝土的抗拉强度,产生了拉裂破坏;当错距达到 10cm 时,剪应力超过混凝土抗剪强度,衬砌边墙处发生剪切破坏。

## 4 结语

(1) 断层错动对主动盘(上盘)内隧道的影响范围较大;而被动盘(下盘)内的隧道区间发生位移的区段很小。上盘衬砌的竖向相对位移随着错距量的增加呈线性增加,且最大竖向位移量与错距的垂向分量一致,且断层对衬砌影响范围不受错距大小的影响。

(2) 随着断层错动距离不断增加,二衬拱顶、拱腰、拱脚、仰拱处的最大主应力均为压力且整体呈增加趋势,在上盘与断层破碎带交界处达到最大,其中仰拱处受到的压应力最小,拱顶次之,拱腰和拱脚处受到的压应力较大。因此,对于逆断层而言,隧道边墙处为最不利位置,仰拱受到的影响最小。衬砌受到的最大压应力未达到 C25 混凝土的抗压强度,衬砌未产生压裂破坏。

(3) 在上盘与断层破碎带交界处,衬砌拱顶受拉,仰拱的受力与拱顶相反,在下盘与断层破碎

带交界处受拉,拱脚和拱腰受到的拉应力在上盘与断层破碎带交界处最大。由此可见,逆断层错动形成的挤压作用对仰拱的受力是有利的,错动对拱脚和拱腰的影响较大,因此隧道衬砌边墙处为最不利位置。在倾角为 60°、75°断层错动 20cm 的时,衬砌受到的最大拉应力达到 C25 混凝土的抗拉强度,产生拉裂破坏。

(4) 随着断层错动距离不断增加,剪应力逐渐增大,剪应力最大值出现在靠近断层裂缝,剪应力在衬砌边墙位置对称分布,当断层错动距离较大时,达到 C25 混凝土的抗剪强度,衬砌发生剪切破坏。

(5) 通过对比不同角度断层错动时隧道二衬不同部位最大主应力大小的变化,发现当断层倾角变大后,隧道拱顶与仰拱的最大主应力随断层倾角的增大而减小,而隧道拱腰与拱脚处的最大主应力随着断层倾角的增大而增大,说明在不同断层倾角的条件下,隧道二衬中的应力分布会发生相应的变化,在设计中应予以灵活考虑。

## 参 考 文 献

- [1] 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
- [2] 赵伯明, 刘洋. 断层错动对隧道的影响分析[J]. 华南地震, 2009, 29(1): 33-41(Zhao Boming, Liu yang. Analysis on effects of fault slip on tunnel[J]. South China Journal of Seismology, 2009, 29(1): 33-41(in Chinese))
- [3] 邵润萌. 断层错动作用下隧道工程损伤及岩土失效扩展机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011 (Shao Runmeng. Study on the mechanism of tunnel damage and geotechnical failure propagation due to fault rupture [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011 (in Chinese))
- [4] 刘学增, 林亮伦, 桑运龙. 逆断层黏滑错动对公路隧道的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(7): 1008-1014 (Liu Xuezheng, Lin Lianglun, Sang Yunlong. Effect of thrust fault stick-slip rupture on road tunnel[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2012, 40(7): 1008-1014(in Chinese))
- [5] 刘恺. 成兰线跨断层隧道的错动破坏机理研究及地震 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011(Liu Kai. Study on the failure mechanism under fault movement and seismic dynamic response of the chenglan across-fault tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011 (in Chinese))
- [6] 许丁予. 高铁隧道工程穿越汉川地震断裂带抗错动机理与设计参数研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015 (Xu Dingyu. Anti-breaking mechanism and design parameters research on high-speed railway tunnel

- engineering through the Wenchuan seismic fracture zone [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015 (in Chinese))
- [7] 李林, 何川, 耿萍, 等. 浅埋偏压洞口段隧道地震响应振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2540-2548 (Li Lin, He Chuan, Geng Ping, et al. Study of shaking table model test for seismic response of portal section of shallow unsymmetrical loading tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2540-2548 (in Chinese))
- [8] 李学锋, 代志萍, 谷雪影, 等. 活断层错动位移下变形缝间距对隧道内力的影响[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 237-242 (Li Xuefeng, Dai Zhiping, Gu Xueying, et al. Influence of deformation joint spacing on internal force of tunnel under active fault movement[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 237-242 (in Chinese))

焦鹏飞 (1978—), 男, 博士研究生, 工程师。主要从事公路建设和养护管理研究。

来弘鹏 (1979—), 男, 博士, 教授。主要从事隧道工程方面的研究。

(上接第 105 页)

- prediction equations for  $T > 1s$  and their influence on seismic hazard assessment[C]//Proceedings of the University of Tokyo Symposium on Long-period Ground Motion and Urban Disaster Mitigation. Tokyo. Japan, 2010
- [16] CEN European Committee for Standardization. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance-Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings [S]. Bruxelles: European Committee for Standardization, 2004
- [17] NZS 1170.5: 2004 Structural design actions Part 5: Earthquake actions [S]. New Zealand: Standards New Zealand, 2004
- [18] Boore M B, Atkinson G M. Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s [J]. Earthquake Spectra, 2008, 34(1): 99-138
- [19] Cubrinovski M, Bradley B A, Wotherspoon L, et al. Geotechnical aspects of the 22 February 2011 Christchurch Earthquake [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011, 44(4): 205-226

陈龙伟 (1983—), 男, 博士, 副研究员。主要从事土动力学、岩土地震工程方面的研究。

陈玉祥 (1994—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土地震工程方面的研究。

袁晓铭 (1963—), 男, 博士, 研究员。主要从事土动力学、岩土工程抗震方面的研究。