

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907005

# 活动断裂错动位移模式对隧洞变形与内力的影响研究\*

周光新<sup>1,2</sup>, 崔臻<sup>1,2</sup>, 盛谦<sup>1,2</sup>, 吴海斌<sup>3</sup>, 付兴伟<sup>3</sup>

(1. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 在考虑多种断层错动位移模式的基础上, 建立穿越活动断裂带的隧洞数值模型, 进行跨活断裂隧洞断层错动的数值计算, 开展不同断层错动位移模式对隧洞衬砌的变形与内力的影响研究。选择断层带中隧洞结构变形的最可能的模式——固支梁支座垂直位移时梁的结构变形作为断层带错动位移模式, 即为“S”型错动位移模式。考虑“S”型与“直线型”两种位移模式对铰接设计隧洞结构变形与内力的影响。结果表明: 考虑断层带错动位移模式下, 错动作用时衬砌受影响的范围主要集中在断层破碎带附近, 衬砌内力峰值出现在断层带与上下盘交界处; 断层错动位移模式不同, 断层错动时衬砌变形以及所受内力的分布规律基本相同。但衬砌拱顶垂直位移曲线、衬砌所受内力在断层带刷变程度以及峰值大小相差较大; “S”型位移模式相对于“直线型”在对铰接衬砌的变形以及受力上有较大的差异。在进一步研究断层错动位移模式时, 可对跨断层隧洞的影响研究上考虑“S”型位移模式。

**关键词:** 隧洞; 活动断裂带; 断层错动位移模式; 衬砌变形; “S”型位移模式

**中图分类号:** U451   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1323-08

## Study on the Deformation and Internal Force of the Tunnel under the Displacement Pattern of the Active Fault Zone

ZHOU Guangxin<sup>1,2</sup>, CUI Zhen<sup>1,2</sup>, SHENG Qian<sup>1,2</sup>, WU Haibin<sup>3</sup>, FU Xingwei<sup>3</sup>

(1. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Based on the consideration of various fault dislocation displacement patterns, this paper first establishes a tunnel numerical model that drills through an active fault zone, then carries out numerical calculation on tunnel shear displacement caused by the active fault, and finally studies the influence of different fault dislocation displacement patterns on the deformation and internal force of tunnel lining. The most probable pattern for deformation of the tunnel structure in the fault zone, that is, the structural deformation of the fixed support beam due to the vertical displacement of the support, is selected as the dislocation displacement mode of the fault zone, namely the "S" type displacement pattern. The

\* 收稿日期: 2019-07-20; 修回日期: 2019-09-19

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(U21A20159, 52079133, 51991393)、长江科学院开放研究基金资助项目(CK-WV2019746/KY)、暨南大学“重大工程灾害与控制”教育部重点实验室(20200904002)资助

**作者简介:** 周光新(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土工程静动力稳定性评价研究。E-mail: 1152339437@qq.com

**通讯作者:** 盛谦(1962—), 男, 研究员。主要从事工程岩体力学性质与稳定性评价。E-mail: qsheng@whrsm.ac.cn

influence of "S" type and "linear" type displacement patterns on structural deformation and internal force of the articulated tunnel is considered. The calculation results show that: considering the dislocation displacement pattern of the fault zone, the affected area of the lining under dislocation action is mainly concentrated in the vicinity of the fault fracture zone. The peak lining internal force appears at the ends of the shear zone. The distribution rules of lining deformation and internal forces are basically the same regardless of the displacement patterns of fault dislocation. However, the vertical displacement curve of the lining arch and the variation and the peak value of the internal force of the lining in the fault zone vary greatly for different displacement patterns of fault dislocation. Compared with "linear" displacement pattern, "S" displacement pattern has great difference in deformation and stress of articulated lining. In order to further study the influence of fault dislocation displacement pattern on cross-fault tunnel, "S" displacement pattern can be considered.

**Keywords:** tunnel; active fault zone; fault displacement pattern; deformation and internal force response; S-type displacement pattern

## 引 言

对于新建的隧洞工程,特别是长大隧洞而言,往往不可避免地穿越位于西部地区的复杂不良地质区段,接近或跨越地震活动断裂带,受到严重的活断裂错动威胁。相关设计规范大都是要求避让、避免穿越断裂带。对跨活动断裂隧洞错断破坏机制开展研究,提出跨活动断裂隧洞抗错断措施,是保障重大生命线工程安全运营的前提。

目前,国内外学者针对断层错动对隧洞(道)结构的影响方面做了大量的研究工作。刘学增等<sup>[1-3]</sup>通过室内模型试验,模拟了45°、60°、75°倾角正断层黏滑错动下,与之正交的隧道结构的受力变形破坏过程,研究了正断层黏滑错动作用下跨断层隧道结构的受力、变形、损伤特征。M. Lin等<sup>[4]</sup>通过模型试验和数值模拟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。焦鹏飞等<sup>[5]</sup>利用有限差分软件FLAC3D研究不同倾角逆断层错动对隧道结构的影响,并揭示其影响机理。林克昌等<sup>[6]</sup>以走滑断层为例,对比分析了断层宽度逐渐增大的过程中,跨断层岩体隧道的错动反应特性。赵坤等<sup>[7]</sup>基于衬砌弯矩沿轴向的分布,初步确定“铰接设计”中节段长度及节段间柔性连接的宽度。通过正交试验和极差分析得到“铰接设计”的最优水平组合。蒋树屏等<sup>[8]</sup>提出了“铰接设计”中隧道节段长度

及节段间连接抗剪刚度的计算方法,并分析了连接剪切失效后隧道节段的运动特征。

针对跨活断裂隧洞在断层错动下的隧洞结构响应研究,对隧洞进行数值模拟计算,开展跨活断裂隧洞错动作用下的内力响应及纵向变形特征研究,并以此作为工程结构设计的参考,成为实践中越来越重视的方法。熊炜等<sup>[9]</sup>针对断层错动量、断层倾角、隧道埋深以及隧道与断层的交角4个主要因素分别进行组合计算,并由此归纳出衬砌的3种破坏类型:拉张-挤压型、直接剪断型、张拉-挤压-剪断结合。马亚丽娜等<sup>[10]</sup>基于温克尔地基梁理论,研究穿越活动断裂带隧洞在断裂带错动作用下的衬砌纵向变形及内力响应特征。任兴普等<sup>[11]</sup>在考虑直线型断层位移模式的基础上,通过数值模拟,研究了跨活断层水工隧洞断层错动作用下布置明钢管的变形和受力特征,验证了跨断层水工隧洞内明钢管的布置满足要求。

分析已有的断层带错动对隧洞结构影响方面的数值计算研究发现,大部分跨活断裂洞断层错动数值模型没有或者模糊给出断层带的边界设定。断裂破碎带的边界条件无法确定,因为断裂破碎带既不属于上盘,也不属于下盘,它是上盘和下盘的过渡区域,尤其当断裂破碎带很宽时,其边界条件更难确定<sup>[12]</sup>。断层的错动位移模式表征断层错动时断层带的位移变形。在跨活断裂隧道断层错动数值模型中断层带的错动位移模式的施加是值得考虑的。

本文在前人对跨活断裂隧洞(道)的数值计算及模型试验研究基础上,以香炉山隧洞穿越断层带

为研究背景,考虑上凸、直线、下凹三种断层位移模式,建立穿越活动断裂带的隧洞数值模型,进行跨活断裂隧道断层错动的数值计算,开展不同断层错动位移模式对隧道衬砌的变形与内力的影响研究。设定断层带中隧道结构变形的最可能的模式-两端固支梁支座垂直位移时梁的结构变形作为断层带错动位移模式,即为“S”型错动位移模式。考虑“S”型与“直线型”两种位移模式对铰接设计隧洞结构变形与内力的影响。

## 1 计算模型及参数

### 1.1 计算原型

本文计算原型参考香炉山引水隧洞穿越的龙蟠一乔后断裂带<sup>[13]</sup>,综合对比多个断层结构因素后,将本次计算的断层倾角确定为90°、断层宽度为40 m,考虑设防垂直向量值为0.2 m。

### 1.2 模型建立及参数

采用FLAC3D建立计算模型,模型隧洞净断面为半径5 m的圆断面,将隧洞的初支、二衬合并考虑为0.7 m混凝土衬砌。计算范围纵向为300 m,模型横断面的尺寸为130 m×110 m。模型满足莫尔-库伦屈服准则,具体几何尺寸如图1所示。围岩和断层的物理力学参数及衬砌混凝土参数见表1。

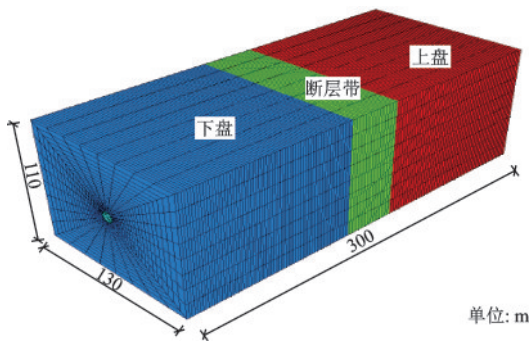


图1 计算模型

Fig.1 Schematic diagram of calculation model

表1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

材料名称	围岩等级	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
围岩	IV	2 250	6.0	0.28	0.8	36
破碎带	V	2 000	1.5	0.35	0.2	25
衬砌	-	2 500	30	0.2	-	-

### 1.3 边界条件

模拟正断层错动时,固定下盘外边界,上盘左右两侧约束法向位移,在上盘顶部边界施加沿错面向下的位移来模拟上盘和下盘的相对错动过程。考虑断层错动位移模式的施加,在断层带边界施加错动位移。断层带错动位移模式施加如图2所示。

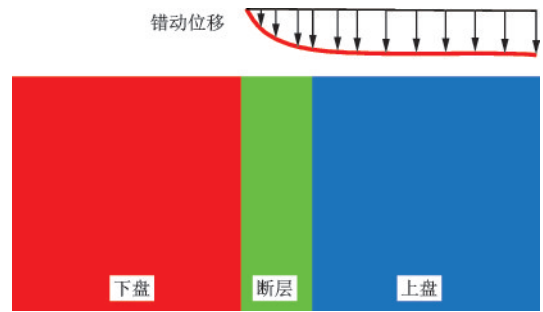


图2 位移模式施加示意

Fig.2 Schematic diagram of normal displacement application

### 1.4 计算方案

考虑断层带可能存在的变形模式,假设断层带上凸、下凹位移模式,并且假定其位移模式公式。计算模型正断层错动,分别按照上凸、直线、下凹断层错动位移模式3种工况,进行跨活断裂隧洞断层错动的数值计算,开展不同断层位移模式条件下隧洞衬砌的破坏规律研究。3种不同位移模式曲线如图3所示。3种位移模式公式如下:

$$\text{上凸型: } \omega = -(y + 0.5d)^{1.5} \times \frac{\omega_{\max}}{d^{1.5}} \quad (1)$$

$$\text{直线型: } \omega = -(y + 0.5d)^{0.5} \times \frac{\omega_{\max}}{d^{0.5}} \quad (2)$$

$$\text{下凹型: } \omega = -(y + 0.5d) \times \frac{\omega_{\max}}{d} \quad (3)$$

式中, $\omega$ 为断层错断位移; $y$ 为断层带内位置; $d$ 为断层带宽度; $\omega_{\max}$ 为断层最大错动量。

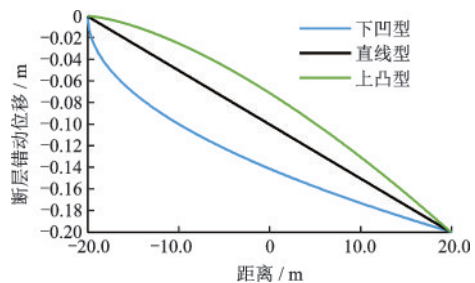


图3 不同位移模式曲线

Fig.3 Different displacement pattern curves

## 2 计算结果分析

### 2.1 衬砌变形分析

正断层错动时,上盘沿错动面滑动牵连影响断层破碎带及下盘围岩,错动面附近的下盘顶部也产生少量沉降,衬砌结构受到围岩约束影响,沿纵向发生“S”形弯曲,衬砌变形云图如图4所示。衬砌同时受到围岩环向的接触压力和纵向的摩阻力作用,在地层约束力作用下,出现了垂直方向的弯曲变形,同时轴向产生了拉伸。

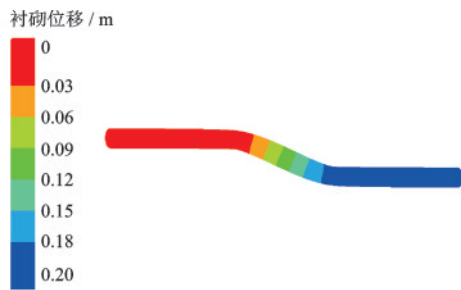


图4 衬砌变形云图

Fig.4 Contour of lining deformation

不同断层位移模式时衬砌拱顶位移沿轴向的分布曲线如图5所示,上盘中衬砌拱顶位移基本等于错动量0.2 m,下盘中衬砌拱顶位移很小,即该范围内上盘衬砌仅随上盘做自上往下的平动运动,而下盘衬砌保持固定状态。在断层破碎带及两侧较近范围内衬砌拱顶位移沿轴向的变化最为剧烈,说明正断层错动作用时衬砌受影响的范围主要集中在断层破碎带附近,约为断层破碎带两侧各30 m处。不同位移模式下的拱顶位移沿轴向的分布规律基本一致,仅在断层带内部有些许差别,断层位移模式不同,位移曲线变化剧烈程度不同。位移曲

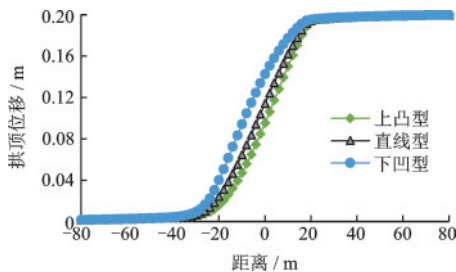


图5 不同位移模式下衬砌拱顶的垂直位移量曲线

Fig.5 The displacement distribution curves at lining crest under different fault displacement patterns

线变化剧烈程度依次是下凹型、直线型、上凸型。

### 2.2 衬砌沿轴向断面轴力分析

图6为20 cm错断量下直线型位移模式隧洞衬砌的纵向应力云图。由图可知,纵向应力集中分布在断层附近、衬砌的顶部及底部位置,故选取衬砌的拱顶及拱底作为纵向轴力的研究对象。

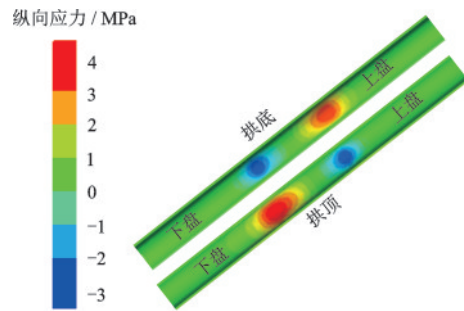


图6 衬砌顶部及底部纵向应力云图

Fig.6 Longitudinal stress contour at top and bottom of lining

不同断层位移模式时隧洞衬砌的拱顶、拱底纵向轴力沿轴向的分布曲线如图7所示。由图7可知,纵向轴力沿轴向的分布规律基本相同,在断层破碎带及两侧较近范围内衬砌纵向轴力沿轴向的变化最为剧烈,说明正断层错动作用时衬砌受影响的范围主要集中在断层破碎带附近,约为断层破碎

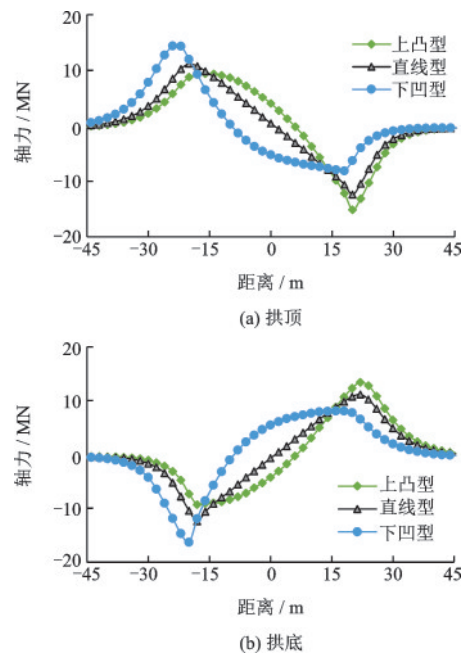


图7 不同断层位移模式下隧洞衬砌的纵向轴力曲线

Fig.7 Curves of longitudinal stresses of lining under different fault displacement patterns

带两侧各 30 m 处。峰值出现在断层带与上下盘交界处附近,向两侧逐渐减小。衬砌拱顶、拱底的受力方向相反,拱顶沿轴向是先受拉后受压,拱底沿轴向是先受压再受拉。衬砌拱顶、拱底在下盘与断层交界处纵向轴力拉压峰值下凹型最大,直线型次之,上凸型最小;衬砌拱顶、拱底在上盘与断层交界处纵向轴力拉压峰值上凸型最大,直线型次之,下凹型最小。断层带内部,断层位移模式不同,纵向轴力曲线变化剧烈程度不同。衬砌拱顶轴力曲线变化剧烈程度依次是上凸型、直线型、下凹型;衬砌拱底轴力曲线变化剧烈程度依次是下凹型、直线型、上凸型。

### 2.3 衬砌沿轴向断面弯矩分析

图 8 为不同断层位移模式下衬砌各断面弯矩沿轴向的分布曲线。以衬砌拱底受拉、拱顶受压为正。由图可知,断面弯矩沿轴向的分布规律基本相同,在断层破碎带及两侧较近范围内衬砌断面弯矩沿轴向的变化最为剧烈,说明正断层错动作用时衬砌受影响的范围主要集中在断层破碎带附近,约为断层破碎带两侧各 30 m 处。峰值出现在断层带与上下盘交界处附近,向两侧逐渐减小。衬砌断层带两侧所受弯矩作用相反。衬砌在下盘与断层交界处断面弯矩峰值下凹型最大,直线型次之,上凸型最小;衬砌在上盘与断层交界处断面弯矩峰值上凸型最大,直线型次之,下凹型最小。断层带内部,断层位移模式不同,弯矩曲线变化剧烈程度不同。衬砌断面弯矩曲线变化剧烈程度依次是上凸型、直线型、下凹型。

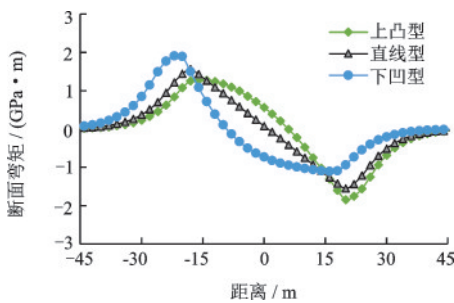


图 8 不同断层位移模式下衬砌各断面弯矩沿轴向的分布曲线

Fig.8 The bending moment distribution curves of lining under different fault displacement patterns

### 2.4 衬砌沿轴向断面剪力分析

图 9 为 20 cm 错断量下直线型位移模式下隧洞

衬砌的剪应力云图。由图可知,剪应力集中分布在断层附近、衬砌的拱腰位置,故选取衬砌的拱腰作为剪应力的研究对象。

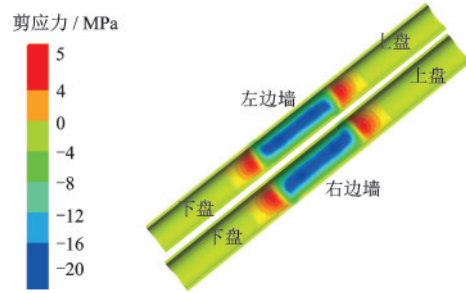


图 9 衬砌剪应力云图

Fig.9 Shear stress contour of lining

图 10 为不同断层位移模式下隧洞衬砌拱腰剪力沿轴向的分布曲线。由图可知,断层带范围内的衬砌受到沿错断方向的剪切作用,在断层破碎带及两侧较近范围内衬砌拱腰剪力沿轴向的变化最为剧烈,说明正断层错动作用时衬砌受影响的范围主要集中在断层破碎带附近,约为断层破碎带两侧各 30 m 处。峰值出现在断层带与上下盘交界处附近,向两侧逐渐减小。下凹型位移模式衬砌拱腰的剪力的峰值出现在断层与下盘交界处;直线型位移模式衬砌拱腰的剪力的峰值出现在断层带内近似不变;上凸型衬砌拱腰的剪力的峰值出现在断层与上盘交接处。衬砌拱腰剪力峰值下凹型最大,上凸型次之,直线型最小。断层带内部,断层位移模式不同,拱腰剪力变化剧烈程度不同。衬砌拱腰剪力曲线变化剧烈程度依次是下凹型、上凸型、直线型。

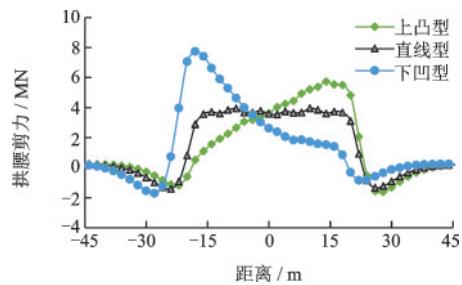


图 10 不同断层位移模式下衬砌拱腰剪力沿轴向的分布曲线  
Fig.10 Curves of shear stress on the side of lining under different fault displacement patterns

不同错动断层位移模式对隧道衬砌的变形和内力分布影响很大,断层破碎带及两侧较近范围内衬砌内力沿轴向的变化最为剧烈,峰值出现在断层带与上下盘交界处附近,向两侧逐渐减小。在跨活

断裂隧道断层错动数值模型中考虑断层带的错动位移模式是必要的。

### 3 “S”型断层错断位移模式对铰接设计隧道结构影响

关于断层位移模式的施加的研究还不充足,断层错动位移模式没有具体的位移表达公式。本文在前人研究成果的基础上,提出“S”型错动位移模式,同时考虑“S”型与“直线型”两种位移模式对铰接设计隧洞结构变形与内力的影响。

#### 3.1 “S”型断层错动位移模式

前文的计算结果表明在隧道错断数值计算中,考虑断层的错动位移模式是必要的。但较少有资料说明隧道错动时断层的位移模式。选择断层带中隧道结构变形的最可能的模式之一作为位移模式,例如两端固支的结构<sup>[14]</sup>。选择两端固支梁结构,支座垂直位移时梁的结构变形为隧道结构变形的最可能模式之一,因此断层的错动位移模式为该结构梁的挠曲线。该结构变形类似变形S,称其为“S”型错动位移模式。图11为“S”型断层带错断位移模式下断层错动示意图。

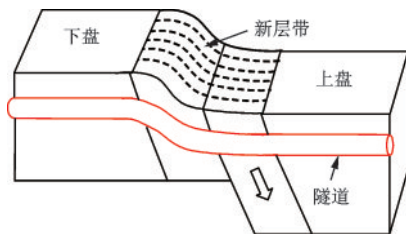


图11 “S”型断层带错断位移模式下断层错动  
Fig.11 Fault movement in S-type fault displacement pattern

图12为两端固支梁,一端发生一定大小的垂直位移时梁的结构变形示意图。两端固支梁,一端有一个垂直位移时梁的挠曲线方程为:

$$\omega = -\frac{2ax^3}{l^3} + \frac{3ax^2}{l^2} \quad (4)$$

式中, $a$ 为垂直位移; $l$ 为梁的长度; $x$ 为坐标系下梁上一点的位置。

因此,“S”型断层位移模式为:

$$\omega = -\frac{2at^3}{l^3} + \frac{3at}{2l} + \frac{a}{2} \quad (5)$$

式中, $t$ 为坐标系下断层带内一点的位置。

图13为“S”型和直线型错断位移模式曲线。

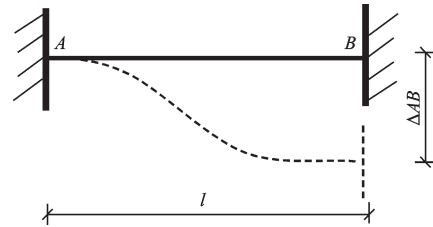


图12 两端固支梁,一端发生一定大小的垂直位移时梁的结构变形

Fig.12 Structural deformation of the ends fixed support beam due to a certain vertical displacement occurs at one end

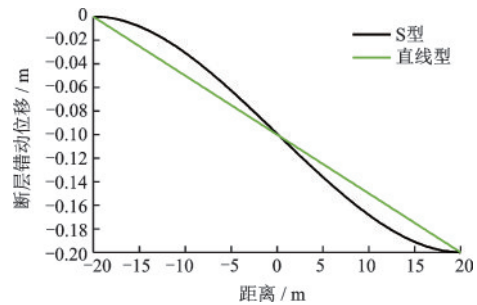


图13 “S”型和直线型位移模式曲线

Fig.13 Curves of S-type and linear displacement patterns

#### 3.2 计算结果分析

隧道铰接设计为变形缝宽度为1 m、弹性模量为0.03 GPa,衬砌节段长度为8 m。计算“S”型、“直线型”两种断层位移模式工况。图14考虑铰接设计后的计算模型。

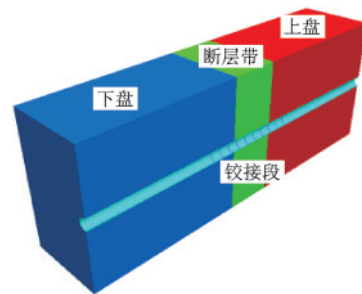


图14 考虑铰接设计计算模型

Fig.14 Schematic diagram of Consider the articulated design lining

不同断层位移模式时链式衬砌拱顶位移沿轴向的分布曲线如图15所示,由图可知,不同位移模式下的链式衬砌拱顶位移沿轴向的分布规律基本一致,在变形缝处,位移量产生明显跌落,仅在断层带内部有些许差别,可以看出断层位移模式不同,位移曲线变化剧烈程度不同。在断层带内部位移

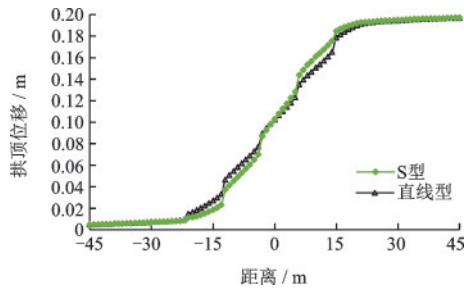


图15 不同位移模式下链式衬砌拱底的垂直位移量曲线  
Fig.15 The displacement distribution curves of the articulated design lining under different fault displacement patterns

曲线剧烈变化程度“S”型要大于直线型。

不同断层位移模式时链式衬砌的拱顶、拱底纵向轴力沿轴向的分布曲线如图16所示。由图可知,纵向轴力沿轴向的分布规律基本相同,断层带内的纵向轴力呈现锯齿状变化,在变形缝处,纵向轴力有明显的跌落。在断层破碎带及两侧较近30 m范围内衬砌纵向轴力沿轴向的变化最为剧烈,峰值出现在断层带与上下盘交界处附近,向两侧逐渐减小。两断层位移模式下衬砌拱顶、拱底的纵向拉力峰值基本相同,纵向压力峰值直线型比“S”型大。

图17为不同断层位移模式下链式衬砌各断面弯矩沿轴向的分布曲线。由图可知,断面弯矩沿轴向的分布规律基本相同,在变形缝处,断面弯矩有

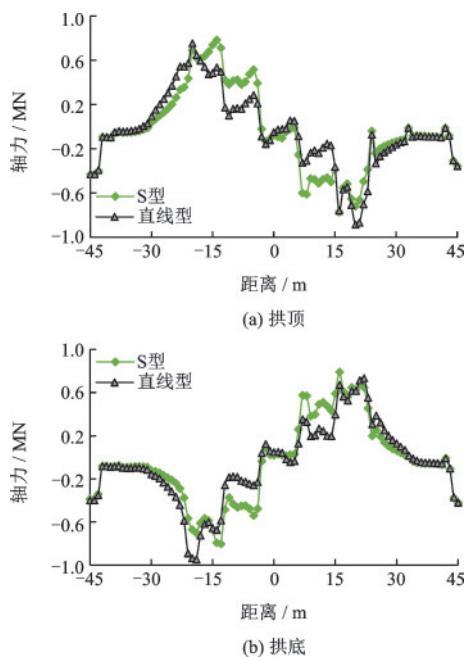


图16 不同断层位移模式下链式衬砌的纵向轴力曲线  
Fig.16 Curves of longitudinal stresses of articulated design lining under different fault displacement patterns

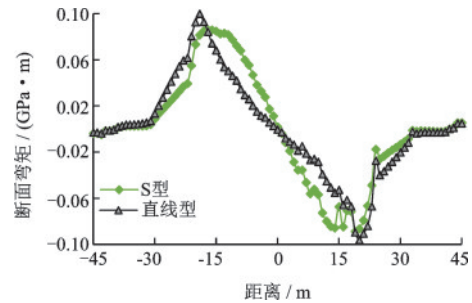


图17 不同断层位移模式下链式衬砌各断面弯矩沿轴向的分布曲线

Fig.17 The bending moment distribution curves of articulated design lining under different fault displacement patterns

明显的跌落。在断层破碎带及两侧较近30 m范围内衬砌断面弯矩沿轴向的变化最为剧烈,峰值出现在断层带与上下盘交界处附近,向两侧逐渐减小。衬砌断层带两侧所受弯矩作用相反。链式衬砌断面弯矩的峰值直线型比“S”型大。

图18为不同断层位移模式下链式衬砌拱腰剪力沿轴向的分布曲线。由图可知,衬砌拱腰剪力沿轴向的分布规律基本相同,在断层带内的横向剪力呈现锯齿状变化,在变形缝处,横向剪力有明显的跌落。断层带范围内的衬砌受到沿错断方向的剪切作用,在断层破碎带及两侧较近30 m范围内衬砌拱腰剪力沿轴向的变化最为剧烈。“S”型位移模式衬砌拱腰的剪力的峰值比直线型大。

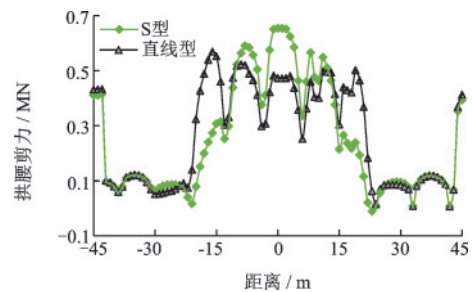


图18 不同断层位移模式下衬砌拱腰剪力沿轴向的分布曲线  
Fig.18 Curves of shear stress on the side of articulated design lining under different fault displacement patterns

## 4 结论

(1)考虑断层带错动位移模式下,错动作用时衬砌受影响的范围主要集中在断层破碎带附近,约为断层破碎带两侧各30 m处。衬砌内力峰值出现在断层带与上下盘交界处。

(2)断层错动位移模式不同,断层错动时衬砌变形以及所受内力的分布规律基本相同。但衬砌拱顶垂直位移曲线在断层带内的剧变程度相差较大,衬砌所受内力在断层带剧变程度以及峰值大小、分布相差较大。

(3)两端固支梁结构,支座垂直位移时梁的结构变形为隧道结构变形的最可能模式之一,因此断层的错动位移模式为该结构梁的挠曲线,即为“S”型错动位移模式。

(4)“S”型位移模式相对于“直线型”在对铰接衬砌的变形以及受力上有较大的差异。在进一步研究断层错动位移模式对跨断层隧洞的影响研究时,可以考虑“S”型位移模式。

### 参考文献:

[1] 刘学增,王煦霖,林亮伦. 45°倾角正断层粘滑错动对隧道影响试验分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 44-50.  
Liu X Z, Wang X L, Lin L L. Modeling experiment on effect of normal fault with 45° dip angle stick-slip dislocation on tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 44-50. (in Chinese)

[2] 刘学增,王煦霖,林亮伦. 60°倾角正断层黏滑错动对山岭隧道影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 121-128.  
Liu X Z, Wang X L, Lin L L. Model experimental study on influence of normal fault with 60° dip angle stick-slip dislocation on mountain tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 121-128. (in Chinese)

[3] 刘学增,王煦霖,林亮伦. 75°倾角正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, 2013, 32(8): 1714-1720.  
Liu X Z, Wang X L, Lin L L. Model experiment on effect of normal fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1714-1720. (in Chinese)

[4] Lin M, Chung C, Jeng F, 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.

[5] 焦鹏飞,来弘鹏. 不同倾角逆断层错动对隧道结构影响理论分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(2): 106-117.

Jiao P F, Lai H P. Theoretical analysis on the influence of different dip angle reverse faults' dislocation on tunnel structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(2): 106-117. (in Chinese)

[6] 林克昌,陈新民,左娟花,等. 断层宽度对跨断层隧道错动反应特性影响的数值模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 61-65.  
Lin K Ch, Chen X M, Zuo J H, et al. Numerical simulation of effects of fault width on characteristics of across-fault tunnel due to fault movement[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 35(3): 61-65. (in Chinese)

[7] 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(增1): 3411-3421.  
Zhao K, Chen W Zh, Zhao W Sh, 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(Sup 1): 3411-3421. (in Chinese)

[8] 蒋树屏,李鹏,林志. 穿越活动断层区隧道的抗断设计对策[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 1034-1036.  
Jiang Sh P, Li P, Lin Zh. Design strategies of breaking resistance of tunnels crossing active faults zone[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2008, 27(6): 1034-1036. (in Chinese)

[9] 熊炜,范文,彭建兵,等. 正断层活动对公路山岭隧道工程影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2845-2852.  
Xiong W, Fan W, Peng J B, et al. Numerical analysis of effect of normal fault activity on road mountain tunnel project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 2845-2852. (in Chinese)

[10] 马亚丽娜,盛谦,崔臻,等. 基于弹性地基梁理论的跨活断裂隧洞纵向变形及内力响应特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 715-722.  
Ma Y L N, Sheng Q, Cui Zh, et al. Study on the longitudinal deformation and mechanical response characteristics of a cross active fault tunnel based on elastic foundation theory[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 715-722. (in Chinese)

[11] 任兴普,李晓彬,李卫功. 洗马河二级赛珠水电站引水隧洞跨越活断层设计[J]. 中国水运, 2015, 15(2): 167-168, 200.

(本文责编:周小潭)

(下转第1349页)