

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2018.04.016

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*

马亚丽娜^{1,2}, 盛 谦^{1,2}, 崔 臻^{1,2}, 程昊民^{1,2}

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于温克尔地基梁理论, 建立穿越活动断裂带的隧洞纵向二维数值模型, 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。结果表明: 在错断作用下, 较弱的断层带岩体质量、较大的断层与隧洞交角、较宽的活断层宽度、较大的隧洞衬砌厚度等条件有利于保证隧洞的抗错断性能; 当在隧洞衬砌节段之间采用较弱的铰接段来改善隧洞抗错断性能时, 较小的铰接段的长度与材料强度均有利于隧洞抗错断性能。该结论可以为穿越活断层隧洞的抗错断设计提供一定参考。

关键词: 隧洞工程; 活动断裂带; 铰接段; 地基弹簧; 内力响应

中图分类号: TV554 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2018)04-0715-08

Study on the Longitudinal Deformation and Mechanical Response Characteristics of a Tunnel Crossing Active Fault Based on Elastic Foundation Theory

MA Yalina^{1,2}, SHENG Qian^{1,2}, CUI Zhen^{1,2}, CHENG Haomin^{1,2}

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

Abstract: The aim of this paper is to study the characteristics of longitudinal deformation and mechanical response of a tunnel under active fault dislocation. A 2-D longitudinal numerical model of the tunnel is established based on the Winkler's elastic foundation theory. Using this model, the mechanical response of the tunnel liner under various fault conditions is investigated. The results show that the tunnel would have better anti-dislocation performance with weaker rock mass of fault, larger angle between fault and tunnel axes, wider fault width, and thicker tunnel lining. Under the condition that flexible hinge joints on the tunnel lining were applied to improve the anti-dislocation performance of the tunnel, the anti-dislocation performance would be enhanced with a smaller length and a lower material strength of the hinge joint. The conclusions may provide some reference for the anti-dislocation design of tunnels crossing active faults.

Keywords: tunnel engineering; active fault zone; hinge joint; foundation spring; mechanical response

* 收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-06-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057905)、国家重点研发计划(2016YFC0401803)、国家自然科学基金项目(51409263, 51779253, 41672319)资助

作者简介: 马亚丽娜(1993-), 女, 博士研究生。主要从事岩土工程静动力稳定性评价研究。Email: mayalina@126.com

引言

活动断裂是一个与构造地质学、地震学及地球动力学等一系列理论问题相关的重要地质现象,与大型工程的场区烈度划分、基础稳定设计及地震预报等诸多实际问题紧密相关^[1]。从技术和经济角度出发,隧洞的选线会尽量避免从重大不良地质带穿越,以保证建设和运营期间的安全。但是我国地形条件、地层岩性复杂,断裂构造广泛发育,当隧洞不可避免地穿越活动断层时,破碎的围岩、间歇的黏滑和持续的蠕滑都会对隧洞工程的建设及运营带来严重的威胁。

对隧洞进行数值模拟试验,探索隧洞在活动断裂带错动作用下的内力响应及纵向变形特征,并以此作为对工程结构设计的参考,成为实践中越来越重视的方法^[2]。因此,对穿越活动断裂带隧洞在断层错动作用下的纵向变形和衬砌内力响应特性研究,有重要的科学与工程意义。

前人开展了大量研究工作,Z. Z. Wang 等^[3]通过在隧洞衬砌上采用柔性接头,发现当隧洞扭曲成S形时未发生破裂,为位于活动断裂带隧洞的设计和施工提供了参考。刘学增等^[4]开展了关于隧洞有无变形缝对跨断层隧洞抗错断影响的模拟与试验研究,证明变形缝的设置可有效提高隧洞衬砌结构抗剪能力。古柏森等^[5]基于链式衬砌的抗错断设计理念,探讨了不同链式衬砌节段长度下,隧洞结构围岩压力和塑性应变的变化规律。张煜^[6]建立围岩-断层破碎带-隧洞的蠕滑错动三维有限元分析模型,揭示了穿越断层破碎带隧洞设置柔性连接,能够有效减少错断时产生的裂缝。蒋树屏等^[7-8]针对穿越活动断层区隧洞结构,探讨了超挖设计和铰接设计两种抗断设计方法,并对断层错动时隧洞轴线变形特征进行了理论分析,初步提出隧洞衬砌节段长度及节段间连接剪切刚度的计算方法。

弹性地基梁理论将地基结构从几何、物理等角度进行简化,在地下管道的抗错断研究领域有较多应用,多用于解决施工中基础地基承载力问题。高丙丽^[9]基于温克尔弹性地基梁模型,推导出隧洞暗挖施工引起地下管线变形的计算公式。龚晓南等^[10]基于温克尔弹性地基梁理论,建立地面超载对埋深管道影响的分析计算模型。韩银杉等^[11]用弹性梁模拟断层作用下的埋深管道大变形段以及变形较小的远端管段,研究断层作用下管道的应变响应。

但纵观前人研究成果,鲜见将弹性地基梁理论应用于研究穿越活动断裂隧洞工程中。关于设置铰接段这一抗断设计方法的研究成果,缺少活动断裂各参数改变和铰接段各参数不同的情况下的多因素对隧洞衬砌纵向变形及内力特性影响的规律总结。基于弹性梁理论,考虑柔性连接在穿越活断层的隧洞工程结构中的应用,探索隧洞因错动产生的力学响应规律,此领域目前为空白。

实际工程中,隧洞在纵向上长度较大,可在数值模拟中把隧洞简化,等效为长度无限大的梁。本文根据依托工程相应的工程地质条件,并基于温克尔地基梁理论,建立穿越活动断裂带隧洞的二维数值模型,运用数值模拟计算,开展对隧洞因断裂带错动产生力学响应规律的研究,分析了断层走向、宽度,衬砌强度、厚度,以及设置铰接段等多个因素对隧洞衬砌纵向变形及内力特性的影响,并提出抗错断结构优化措施的理论依据。

1 计算原理

1.1 基于弹性地基梁理论隧洞错断变形内力分析

温克尔地基梁理论是岩土力学与基础工程领域中一种常用的计算方法,其基本假定为:把地基模拟为刚性支座上一系列独立弹簧,地基表面任一点的沉降与该点单位面积上所受的力成正比。

本文引入这一理论,用以模拟活动断裂错动作用下,隧洞的纵向变形与内力特性。在温克尔地基梁理论的框架下,对隧洞受断裂带错动作用时的计算做出如下假定:

- (1)隧洞在断层作用下的变形是平面内的二维变形,并将隧洞简化为实截面的梁;
- (2)错动作用下隧洞与围岩的相互作用以隧洞两侧的弹性地基弹簧的形式体现;
- (3)忽略自重应力及构造应力等初始应力;
- (4)忽略断层滑动的时动力效应。

根据以上假定,本项目采用如图1所示的计算模型。其中,在两侧围岩错动的条件下,地基弹簧与岩土体会发生相互作用,代表隧洞结构的梁单元微元体内部会产生相应的轴力、剪力、弯矩等内力响应。

1.2 基本计算模型

根据弹性地基梁理论,将隧洞简化为二维平面

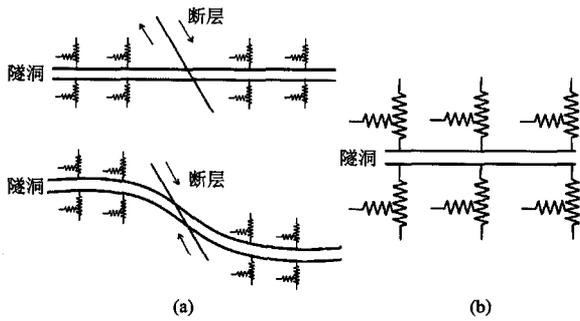


图1 隧洞的形变及梁单元微元体结构

Fig. 1 Longitudinal deformation profile of tunnel and beam element of tunnel liner

上的一条梁,隧洞围岩的相互作用采用地基梁两侧弹性接触单元进行模拟,断层沿主断带发生剪切,建立隧洞基本计算模型如图2所示。

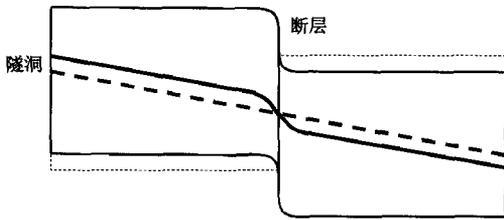


图2 隧洞纵断面示意

Fig. 2 Sketch map of tunnel longitudinal section

2 工程背景与分析模型的建立

将上述弹性地基梁理论方法和跨活动断裂隧洞的铰接段的设置,引入到香炉山隧洞的抗错断适应性分析中。

2.1 工程简介

本文以滇中引水工程香炉山隧洞为例。该线路从石鼓冲江河向南,主要以隧洞型式穿越崇山峻岭,其中冲江河至松桂镇段称“香炉山隧洞”。香炉山隧洞段跨越金沙江与澜沧江分水岭,地质条件复杂,岩溶较为发育,沿线发育多条大断(裂)层,其中龙蟠一乔后、丽江—剑川及鹤庆—洱源断裂为全新世区域活动断裂。香炉山隧洞长 55 km,在过活动断裂带的开挖直径为 11.3 m,主要地层围岩为 V 类围岩,初步考虑全断面采用 10 cm 厚的 C25 混凝土进行初喷,利用厚度为 60 cm 的 C30 钢筋混凝土进行二次支护。

隧洞沿线经过的 3 条断裂中,龙蟠一乔后断裂

宽度最大,为正左旋走滑断层。断裂带产状约 $N10^{\circ}E, NW \angle 80^{\circ}$ 。该断裂至少自早古生代开始活动,表现出长期以来多期活动的复合性质,历史上发生多次 5 级以上地震,其中发生两次 $6\frac{1}{4}$ 级地震,是滇西北地区重要孕震构造之一。该断裂全新世以来的左旋走滑速率为 $1.0 \sim 3.3 \text{ mm/a}$ (均值为 2.2 mm/a),平均垂直位移速率为 0.31 mm/a 。未来百年最大地表位错量设防参数,即水平方向和垂直方向位错范围分别为 $1.9、0.33 \text{ m}$ 。

2.2 建立模型

以规模最大、对隧洞威胁最为强烈的 F10-1 龙蟠一乔后断裂为例进行分析,如图 3 所示。F10-1 断裂带宽 132 m,断层与隧洞轴线交角为 70° 。根据初步地质成果,基本计算模型,断层采用的杨氏模量为 200 MPa ,泊松比为 0.3 ;岩体采用的杨氏模量为 400 MPa ,泊松比为 0.35 。

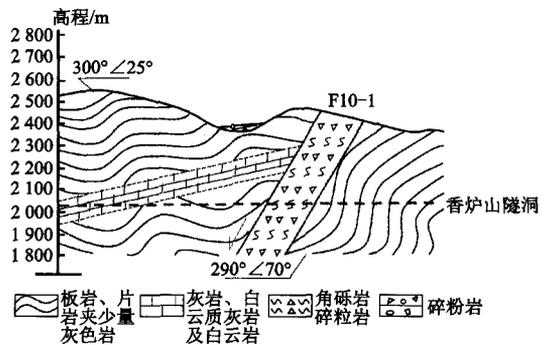


图3 F10-1 龙蟠一乔后断裂带地质地层
Fig. 3 Geological map of F10-1 fault zone

2.3 模型截取范围

如图 4 所示,左边灰色三角形代表边界条件的固定约束,右边箭头代表下盘上升,中部斜线代表断层,中间粗横线代表隧洞结构。对上述模型进行计算,得到的隧洞结构内力变化趋势如该图中灰色粗

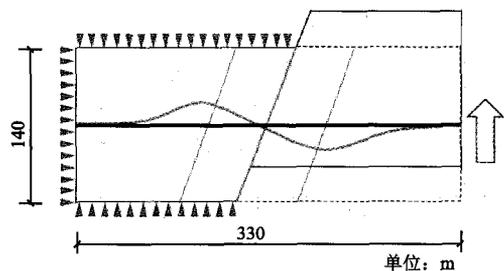


图4 隧洞纵向变形及支护结构弯矩

Fig. 4 Longitudinal deformation of tunnel and bending moment of supporting structure

实线所示,可以看到在邻近数值模型边界,衬砌纵向弯矩已趋近于0,同时隧洞衬砌的轴力、剪力也有相同的分布趋势,表明当前采用的剪切错动加载方式与模型范围是合理的,可应用于后续研究。

3 参数分析

下文将基于以上原理方法和计算模型,开展各种因素影响下,断层错断对隧洞衬砌内力影响的参数分析,以期获取各种输入条件对断层错动条件下隧洞衬砌内力分布的影响,获得一些对隧洞设计具有指导意义的定性结果。

3.1 断层带岩体质量等级的影响

其他条件不变,通过改变断层带岩体材料的弹性模量控制岩体质量等级,探究断层带岩体质量等级的影响。按照中值 200 MPa,取断层带岩体材料的弹性模量分别为 100、200、300 MPa 开展计算分析,隧洞支护结构剪力、弯矩、形变位移分别如图5~图7所示。

由图5可以看出,隧洞衬砌剪力随岩体材料刚度的增大而增大,并且最大值出现在靠近断层的位置。从图6和图7可以得到,在断层裂缝处,衬砌形变量急剧增加,弯矩在断裂裂缝处为0。同时,岩体材料刚度不同,隧洞沿轴线方向的变形不同。对于刚度较大的岩体材料,隧洞轴线变形曲线更为平缓;断裂带岩体材料刚度较小时,轴线变形曲线更为陡峭,错动变形可能更集中于断裂带中部区域。

综上所述,随着断层带岩体弹性模量增加,岩体材料刚度增大,错动条件下衬砌内力峰值和支护结构内力等参数明显增大,表明在相同的错动条件下,

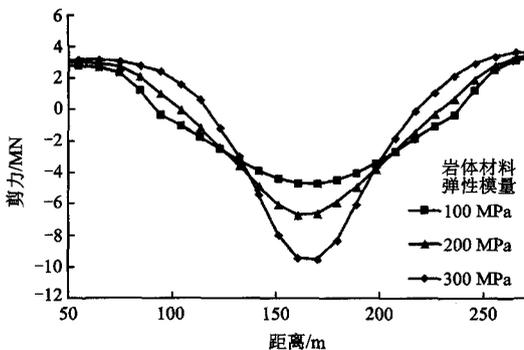


图5 不同岩石质量等级下隧洞衬砌剪力
Fig. 5 Shear force curve of tunnel liner with different quality grades of rock mass

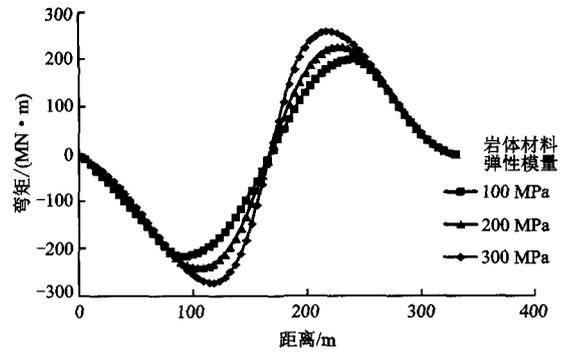


图6 不同岩石质量等级下隧洞衬砌弯矩
Fig. 6 Bending moment curve of tunnel liner with different quality grades of rock mass

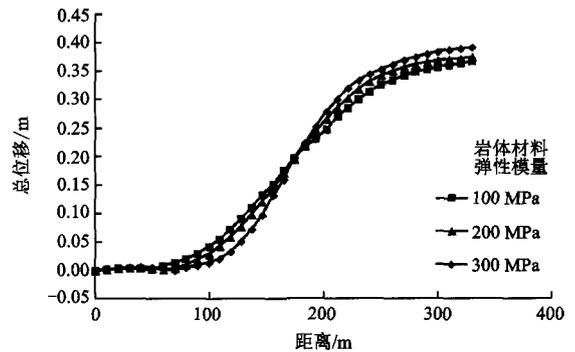


图7 不同岩石质量等级下隧洞衬砌形变位移
Fig. 7 Total displacement curve of tunnel liner with different quality grades of rock mass

更高等级的断裂带岩体质量会对隧洞衬砌受力状况带来更不利的影响。

3.2 断层与隧洞轴线交角的影响

F10-1断层与香炉山隧洞轴线交角约为 70° 。以此为参考,改变计算模型中模拟断层与隧洞轴线的交角,研究支护结构内力变化特性,讨论断层与隧洞轴线交角对隧洞衬砌内力分布的影响。断层与隧洞轴线的交角分别取 70° 、 80° 、 90° ,分析其内力响应规律,隧洞支护结构剪力、弯矩分别如图8、图9所示。

从图8中可以看出,衬砌剪力随断层与隧洞轴线交角的增加而减小,剪力最大值出现在靠近断层带错动面处。从图9中可见,断层破碎带处弯矩为0,在距离断层破碎带同一距离的条件下,弯矩量值随交角的增大而减小。同时,在不同的交角条件下,隧洞沿轴线方向的纵向变形不同。交角较大时(以图中交角 90° 曲线为例),隧洞轴线变形曲线更为

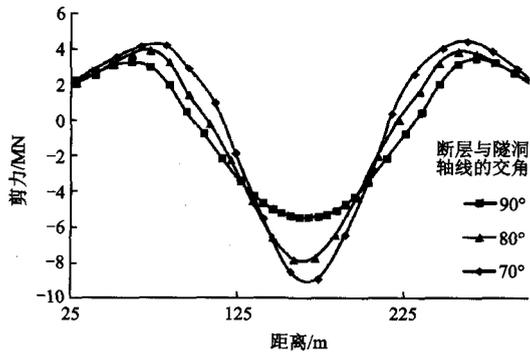


图 8 不同断层与隧洞轴线交角下隧洞衬砌剪力
Fig. 8 Shear force curve of tunnel liner with different intersection angle between fault and tunnel axis

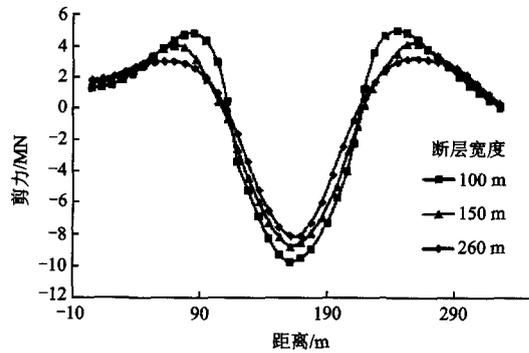


图 10 不同断层宽度下隧洞衬砌剪力
Fig. 10 Shear force curve of tunnel liner with different fault widths

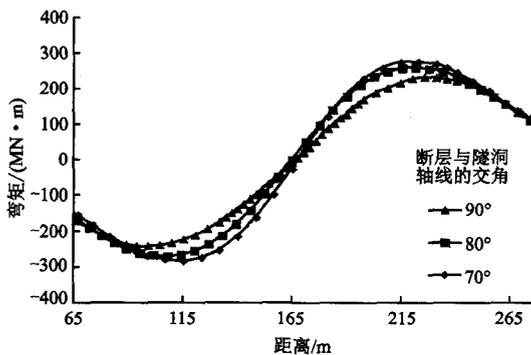


图 9 不同断层与隧洞轴线交角下隧洞衬砌弯矩
Fig. 9 Bending moment curve of tunnel liner with different intersection angle between fault and tunnel axis

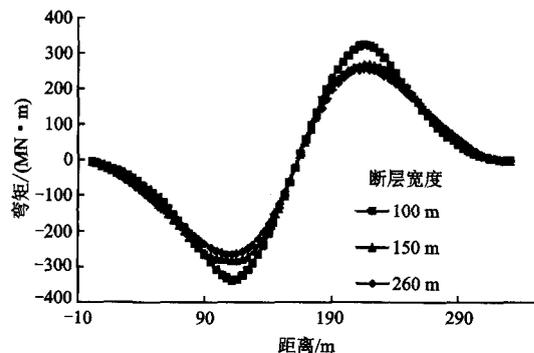


图 11 不同断层宽度下隧洞衬砌弯矩
Fig. 11 Bending moment curve of tunnel liner with different fault widths

“平缓”；交角较小时(以图中交角 70° 曲线为例)，轴线变形曲线更为“陡峭”，错动变形可能更集中于断裂带中部区域。

综上所述，当断层走向相交角度增大，支护结构剪力和弯矩峰值减小，表明较大的断层与隧洞轴线的交角有利于提高隧洞的抗错断能力。

3.3 断层宽度的影响

模型中活动断层宽度分别取 100、150、260 m，计算其结构内力变化特性。隧洞支护结构剪力、弯矩如图 10、图 11 所示。

从图 10 中可看出，隧洞衬砌剪力最大值出现在活动断裂带中部的断层破碎带处，而从图 11 中可得断层破碎带处弯矩为 0。表明在相同的错动条件下，断层宽度越大，衬砌的内力峰值越小。较大的活断层宽度有益于保证隧洞的抗错断性能。

3.4 衬砌厚度的影响

通过改变二维数值计算中代表隧洞的地基梁的

截面积及对应的惯性矩来表达衬砌厚度的变化，从而研究衬砌厚度对错动下衬砌内力的影响。在实际工程中，隧洞内径大小受到建筑界限的限制，不能随意降低，但用数值模拟的方法分析衬砌厚度影响时，保持隧洞开挖外半径不变，通过在一定范围内适度降低内径大小来实现厚度变化。衬砌截面外圆半径为 5.65 m，衬砌厚度分别取为 70、80、90 cm，所得剪力与弯矩分别如图 12、图 13 所示。

由图 12 和图 13 可见，隧洞截面内圆半径越大，即衬砌厚度越小，衬砌剪力与弯矩峰值越小，并且剪力最大值以及弯矩为 0 的位置都出现在断裂带中部。在未展示的隧洞支护结构轴力图与变形位移图中得到同样规律。所以在施工中选用较大的衬砌厚度，有利于提高隧洞结构的抗错断能力。

3.5 铰接段长度的影响

铰接段是一种常用的隧洞抗剪断适应性结构。在国内外学者对隧洞穿越活动断层的研究中，其对

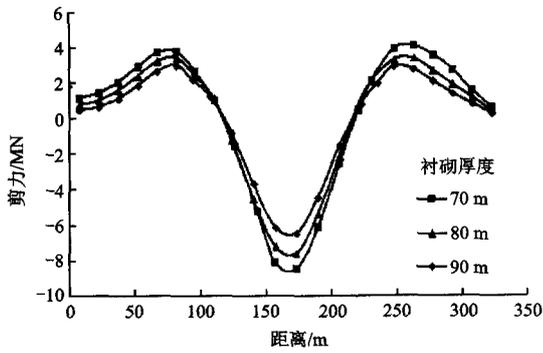


图 12 不同衬砌厚度下隧洞衬砌剪力

Fig. 12 Shear force curve of tunnel liner with different lining thicknesses

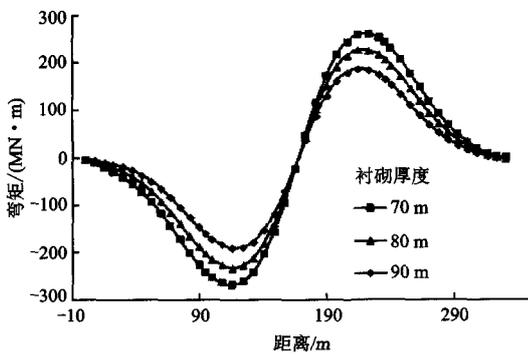


图 13 不同衬砌厚度下隧洞衬砌弯矩

Fig. 13 Bending moment curve of tunnel liner with different lining thicknesses

象多是未设置变形缝的隧洞,对铰接式衬砌考虑相对较少,且对其作用机理的理解尚不够深入^[12]。铰接段是在衬砌结构上设置的强度较低的柔性间隔,各刚性节段间采用较小的柔性连接,使断层带及其两侧一定范围内的节段保持相对独立,其在物理力学特性上表现为低强度、高塑性。在断层错动过程中,柔性连接先于隧洞节段发生破坏,吸收断层错动变形,使工程结构的局部破坏,而不会导致结构的整体性破坏。J. L. Jethwa 等^[13]利用柔性衬砌这一概念对喜马拉雅地区 Chhibro-Khodri 隧洞错断活动提出安全性评价。A. R. Shahidi 等^[14]将适用于活断层的柔性衬砌设计方法用于对伊朗 Koohrang III 隧洞的研究,证明柔性铰接段的设计可以提高隧洞在活动断裂下的抗剪能力。

在地基梁模型上取一定长度 ΔL 和间隔 ΔT 的柔性节段,分析铰接段基本计算条件下对支护结构内力特性的影响。铰接段示意如图 14 所示。

在计算模型中通过改变铰接段长度来研究对支

护结构内力变化特性的影响,长度分别取为 0.1、0.5、1.0 m 开展数值计算,隧洞支护结构剪力如图 15、图 16 所示。

由图 15、图 16 可以看出,在铰接段间隔和强度相同的情况下,衬砌剪力与弯矩峰值大小随铰接段长度的增大而减小,并且剪力最大以及弯矩为 0 处都位于靠近断层裂缝处。从同组曲线对比中得出:采用较小的铰接段长度有助于提高隧洞的抗剪能力。

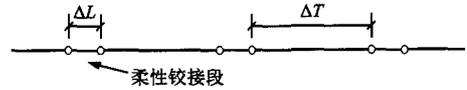


图 14 铰接段示意

Fig. 14 Schematic of hinge joints

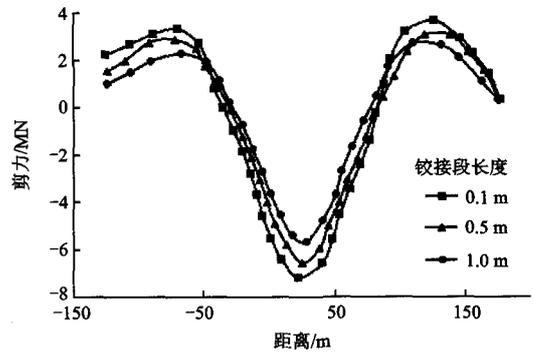


图 15 不同铰接段长度下隧洞衬砌剪力

Fig. 15 Shear force curve of tunnel liner with different lengths of hinge joint

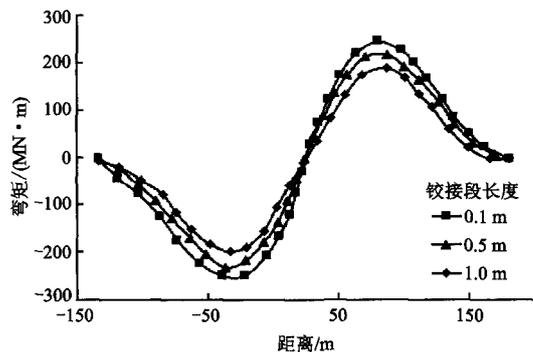


图 16 不同铰接段长度下隧洞衬砌弯矩

Fig. 16 Bending moment curve of tunnel liner with different lengths of hinge joint

3.6 铰接段混凝土强度的影响

通过改变计算模型中铰接段强度大小,研究对支护结构内力变化特性的影响。铰接段长度和间隔

相同时,铰接段混凝土强度分别取为 5、10、20 GPa 开展计算,隧洞支护结构剪力、弯矩如图 17、图 18 所示。

从图 17 中可得,铰接段强度越大,衬砌内力峰值越大,并且剪力最大处位于靠近断层破碎带附近。从图 18 中可以看出,断层中部破碎带处衬砌弯矩为 0,并且弯矩量值随着铰接段强度的增大而增大。因此,隧洞设计中采用较小的铰接段强度,可使得隧洞在剪切条件下承受的内力量值更小,有利于提高隧洞承载力大小。

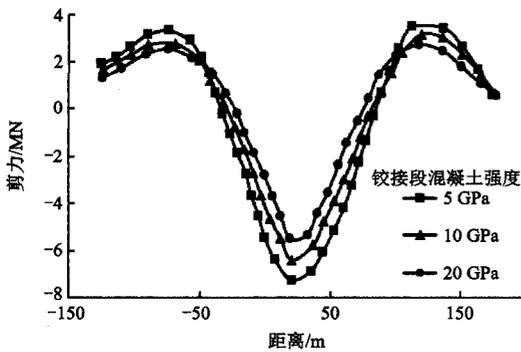


图 17 不同铰接段混凝土强度下隧洞衬砌剪力

Fig. 17 Shear force curve of tunnel liner with different concrete strengths of hinge joint

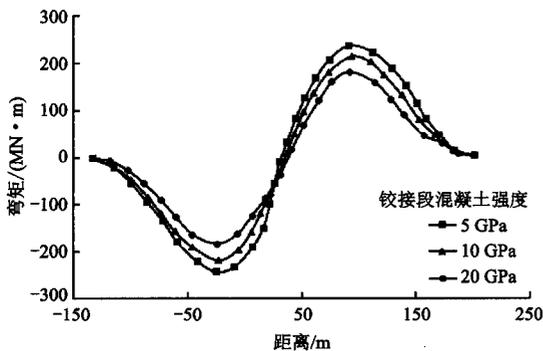


图 18 不同铰接段混凝土强度下隧洞衬砌弯矩

Fig. 18 Bending moment curve of tunnel liner with different concrete strengths of hinge joint

4 结 论

本文基于温克尔地基梁理论,研究穿越活动断层隧洞的抗错断问题。通过将隧洞简化为二维平面上的梁,并假定错动作用下隧洞与围岩的相互作用以隧洞两侧的弹性地基弹簧的形式进行体现。经过参数研究,本文讨论了在断层带错动条件下,断层错

动带岩体质量、交角、衬砌厚度等多个关键参数对隧洞衬砌产生的力学响应特性的影响,得出如下结论:

(1)断层带错动作用下,断层带岩体质量、断层与隧洞轴线的交角、隧洞衬砌厚度等关键参数均会对衬砌内力量值分布情况产生显著的影响。

(2)较弱的断层带岩体质量、较大的断层与隧洞的交角、较大的活断层宽度、较厚的隧洞衬砌条件均有益于保证隧洞的抗错断性能。

(3)本文试图在隧洞衬砌节段之间采用较弱的铰接段来改善隧洞抗错断性能。初步研究发现,较小的铰接段长度及较小的铰接段材料强度均会引起衬砌较小的内力响应及变形,即采用较小的铰接段长度、较小的铰接段材料强度均有利于对隧洞抗错断的性能。

本文研究结果可为跨活动断裂隧洞的抗错断设计提供一定参考,因篇幅所限,当前仅对隧洞衬砌考虑了弹性本构模型,后续将采用非线性地基弹簧进行研究,以揭示更多关于隧洞抗错断问题的机理。

参考文献:

- [1] Corigliano M, Scandella L, Lai C G, et al. Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions: a case study in Southern Italy[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(4): 975-995.
- [2] 张 宇. 隧道三维变形规律研究及其在乌鞘岭隧道工程中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. Zhang Y. Study on 3D deformation rule of tunnel and the application of the rule to Wushaoling tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [3] Wang Zh Zh, Gao B, Shen Y S, et al. Study on the flexible lining of the tunnel in the active faulted zone [C]//ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK 2009. Hong Kong: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009: 173-178.
- [4] 刘学增, 郭 彪, 李雪峰. 变形缝对跨断层隧道抗错断影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 2): 3 837-3 843. Liu X Z, Guo B, Li X F. Model test study on the influence of deformation joints on fault resistance of cross fault tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 2): 3 837-3 843. (in Chinese)
- [5] 谷柏森, 吴建勋, 宋 磊. 链式衬砌节段长度对隧道

- 抗错断效果的影响研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015,32(3): 66-70.
- Gu B S, Wu J X, Song L. Study on the influence of the length of the chain lining section on the tunnel fault resistance [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2015, 32(3): 66-70. (in Chinese)
- [6] 张煜. 断层蠕滑错动作用下隧道衬砌损伤开裂研究及柔性连接抗错断措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- Zhang Y. Study on the tunnel lining damage and fracture under the action of fault slip and the measures of flexible connection [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [7] 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): 1 034-1 036.
- Jiang Sh P, Li P, Lin Zh. Design strategies of breaking resistance across the active fault zone of the tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, 27(6): 1 034-1 036. (in Chinese)
- [8] 林志, 蒋树屏, 李鹏. 穿越活动断层隧道抗断铰接设计[C]//全国公路隧道学术会议论文集. 兰州: 中国公路学会, 2009: 211-216.
- Lin Zh, Jiang Sh P, Li P. Design of flexible plastic joints for crossing active fault tunnel[C]// National Highway Tunnel Conference. Lanzhou: China Highway & Transportation Society, 2009: 211-216. (in Chinese)
- [9] 高丙丽. 地铁隧道暗挖施工引起刚性接口管线变形的理论分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017,37(2): 1-6.
- Gao B L. Theory analysis of rigid connection pipeline deformation affected by tunneling construction of metro tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(2): 1-6. (in Chinese)
- [10] 龚晓南, 孙中菊, 俞建霖. 地面超载引起邻近埋地管道的位移分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 305-310.
- Gong X N, Sun Zh J, Yu J L. Displacement analysis of adjacent buried pipeline caused by ground overload [J]. Rock Soil Mechanics, 2015, 36(2): 305-310. (in Chinese)
- [11] 韩银杉, 张宏. 走滑断层作用下管道应变解析计算方法的适用性[J]. 油气储运, 2016, 35(12): 1 329-1 336.
- Han Y Sh, Zhang H. Applicability of analytical calculation methods on the pipeline strain under the effect of strike-slip fault[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2016, 35(12): 1 329-1 336. (in Chinese)
- [12] 刘学增, 刘金栋, 李学锋, 等. 逆断层铰接式隧道衬砌的抗错断效果试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2 083-2 090.
- Liu X Z, Liu J D, Li X F, et al. Experimental research on effect of anti-dislocation of highway tunnel lining with hinge joints in thrust fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2 083-2 090. (in Chinese)
- [13] Jethwa J L, Singh B, Mithal R S. Influence of geology on tunnelling conditions and deformational behaviour of supports in faulted zones — A case history of the Chhibro-Khodri tunnel in India [J]. Engineering Geology, 1980, 16(3): 291-319.
- [14] Shahidi A R, Vafaeian M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining (for Koohrang-III tunnel) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 213-221.