

考虑断层带影响的公路隧道数值模拟研究

Numerical Simulation Study on Highway Tunnels Incorporating the Influence of Fault Zones

邱波¹, 叶挺¹, 闫希东¹, 张晓乐², 王立峰³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 宁波 315101; 2. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 杭州 310014; 3. 浙江科技大学 土木与建筑工程学院, 杭州 310023)

摘要: 为保障隧道穿越断层破碎带施工安全, 依托江西某高速隧道工程, 采用 PLAXIS 建立二维数值模型, 分析断层破碎带对隧道衬砌位移的影响, 并与现场监测数据对比验证模型合理性。重点研究了断层宽度 (B)、倾角 (β) 及覆高比 (H/D) 对衬砌位移和应力的影响规律。结果表明: 随断层宽度增大, 拱顶最大沉降与拱底最大隆起值均增大, 最大值位于断层中心区域, 且拱底在断层外侧呈现轻微沉降; 隧道边界与断层边界重合时, 横向位移分布显著密集化。随断层倾角增大, 拱顶最大沉降量呈先增后减趋势, 峰值出现在倾角 60° 时 (非拱顶位置); 当倾角为 90° 时, 衬砌变形均匀, 轮廓线呈“U 型”分布。覆高比对衬砌变形亦有显著影响。研究成果可为穿越断层破碎带隧道的断层参数选取提供依据。

关键词: 公路隧道; 断层破碎带; 监控量测; 数值模拟

中图分类号: U459.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0121-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.022

QIU Bo¹, YE Ting¹, YAN Xidong¹, ZHANG Xiaole², WANG Lifeng³

(1. Construction Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315101, China; 2. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. School of Civil Engineering and Architectural, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: To ensure construction safety when tunneling through fault fracture zones, this study established a two-dimensional numerical model using PLAXIS based on a highway tunnel project in Jiangxi, China. The model analyzed the influence of the fault fracture zone on tunnel lining displacement, with its rationality validated against field monitoring data. The study focused on the impact of fault width (B), dip angle (β), and cover-depth ratio (H/D) on lining displacement and stress. Results indicate: As fault width increases, the maximum crown settlement and maximum invert heave also increase, with their peak values tending to occur near the fault center; slight settlement is observed in the invert outside the fault zone. Transverse displacement distribution becomes significantly denser when tunnel boundaries align with fault boundaries. With increasing dip angle, maximum crown settlement initially increases then decreases, peaking at a dip angle of 60° (not at the crown); at 90° dip angle, lining deformation is uniform, exhibiting a "U-shaped" distribution. The cover-depth ratio also significantly influences

基金项目: 浙江省重点研究计划 (2021C01131)。

作者简介: 邱波 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程。

通信作者: 王立峰 (1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2024-10-18

道桥技术

lining deformation. The findings provide references for selecting fault parameters in tunnels crossing fault fracture zones.

Key words: highway tunnel; fault fracture zone; monitoring and measurement; numerical simulation

0 引言

随着我国经济快速增长,山区隧道建设规模不断扩大。然而,在断层构造多发区,断层破碎带易积聚地下水,导致隧道施工中频发塌方、大变形、突泥突水等灾害,严重威胁施工安全与进度。有效解决这些地质难题是当前亟待攻克的关键^[1-2]。

肖时辉等^[3]通过室内试验、数值模拟及现场监测,研究岩样力学与渗透特性、围岩参数及工程特性对隧道变形的影响,发现破碎带岩样力学性质受水-岩作用影响大;杨超等^[4]研究深大富水断层隧道防突,指出施工扰动改变应力/渗流场诱发剪切失稳,确定了临界防突安全厚度,且埋深影响更显著;章玉伟等^[5]研究发现断层厚度和倾角对隧道围岩稳定性影响显著,注浆加固圈厚度为2 m时对断层段隧道施工过程的稳定性提升效果最佳;刘智等^[6]依托深圳某隧道工程,深入分析了超大直径泥水平衡盾构穿越断层破碎带的工程特点及难点,并引入了大格栅+双破碎机排渣系统等技术手段,以提高泥浆处理效率;付艳斌等^[7]分析了断层破碎带形成机理与施工关键问题,强调综合地质预报与新技术可提升安全与效率;殷帅峰等^[8]基于理论计算确定了窄煤柱合理留设宽度,分析了沿空煤巷穿越断层时的围岩应力与塑性破坏特征,提出的联合支护技术有效控制了变形;黄解放等^[9]以东天山隧道穿越F2断层软岩大变形为例,确定了初期支护变形控制标准与预警方法;韩超等^[10]针对双护盾TBM穿越断层卡机问题(深圳地铁8号线),通过数值分析与地质统计学,确定了预处理加固范围与最佳掘进参数,成功规避风险;王东剑^[11]针对穿越断层灾害问题,利用FLAC 3D模拟超前小导管参数影响,发现外插角与导管长度是关键,提出了优化方案;韩瑀萱等^[12]研究了绵九高速五里坡隧道穿越不同断层,发现断层倾角、厚度对围岩稳定性影响显著;钟祖良等^[13]基于Janssen理论推导出富水断层防突岩盘厚度修正公式,模型试验验证了其适用性,揭示了多因素影响规律;刘晓龙等^[14]依托清泉隧道,通过数值

模拟与现场分析,揭示了偏压洞口段围岩在断层影响下的变形机理,并提出锚索-抗滑桩组合控制措施,验证其可有效稳定围岩;王达等^[15]研究长距离深埋盾构隧洞穿越不良地质段,发现断层破碎带模量变化对衬砌纵向变形影响大,接缝变形与螺栓应力随模量减小而增加,可供类似工程设计参考。

现有研究对隧道穿越断层破碎带提供了指导,但尚未深入分析断层及埋深比对支护结构与围岩压力的影响。因此,在探明其变形机理,通过PLAXIS建立二维模型,采用控制变量法,研究断层破碎带厚度、倾角及覆高比对围岩稳定性的影响,为类似工程提供参考。

1 工程概况

江西省某隧道起止桩号为Z1K896+360.5~Z1K896+993,全长632.5 m,隧道整体设计宽度为18 m,高度12 m,分离式隧道。

根据超前地质预报情况,ZK896+520~ZK896+570段范围内围岩节理裂隙局部发育显著;岩体局部破碎,结合程度差,稳定性差。围岩设计为V级,初步判定为V₂级硐室存在板岩与砂岩互层,ZK896+525~ZK896+535局部夹硅质板岩,岩体裂隙较发育;ZK896+537~ZK896+546段硐室穿越F21断层,岩性主要为砂岩、板岩夹灰岩互层,上盘岩体受构造影响,岩体极破碎,中薄层状结构围岩呈碎裂状结构,质地软硬不均,遇水易散;ZK896+560~ZK896+650段硐室上部存在小型岩溶,为灰岩透镜体,局部岩溶化溶蚀强烈;ZK896+700~ZK896+740段硐室处于I4破碎带,隧道围岩为中风化板岩与砂岩互层,岩块较软,岩体破碎,中薄层状结构,围岩呈裂隙块状结构。

2 模型建立及验证

2.1 模型建立

采用PLAXIS 2D建立二维有限元隧道模型。整个地层宽度为100 m,高度为100 m,其中断层区长度取9 m,高度取100 m;隧道为半圆形隧道,宽

18 m，高 12 m。选用弹塑性 Mohr – Coulomb 作为本构模型，并用板单元模拟隧道支护结构。隧道有限元模型如图 1 所示，岩体参数见表 1。

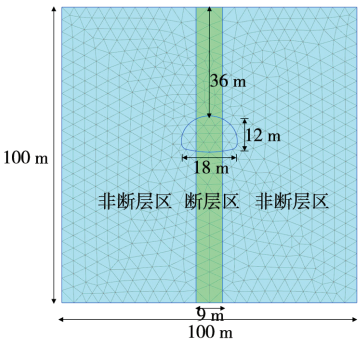


图 1 PLAXIS 有限元模型图
Fig. 1 PLAXIS finite element model

表 1 岩石参数表
Table 1 Rock parameters table

岩体类型	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 $c/(\text{kPa})$
断层破碎带	20	110	0.30	28	35
砂岩	22	300	0.28	36	150

2.2 监控量测

在拱顶、拱腰、拱脚边墙位置围岩内钻一个直径 50 mm，深 1 800 mm 的孔，钻孔完成后将监控设备放置进去，并在下方封口，封口采用 200 mm × 200 mm × 2 mm 的铁片并在中间以及 4 个边角位置各开一个直径 30、8 mm 的孔，中间位置开孔为预留灌浆孔，四个边角位置为预留安装打膨胀螺丝固定孔，中间预留位置灌浆需要使用中空灌浆锚杆设备灌浆，灌浆为快硬型砂浆，灌浆完成后使用木塞将灌浆口堵住。安装完毕后需要现场采集一次数据，查看设备是否完好并记录。监测断面布置如图 2 所示。

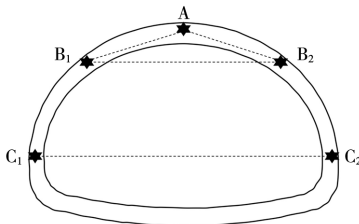


图 2 监控断面布置图
Fig. 2 Monitoring section layout

2.3 对比验证

为验证所建模型的准确性，选取了典型断层带地层隧道截面的实测数据，并与有限元分析结果进行比较。结果如图 3 所示，计算结果与实际监测结果

基本一致，从而证明了有限元模型是合理、准确的，可以反应实际的隧道工程状况。

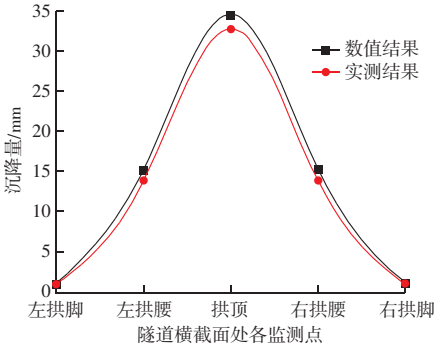


图 3 隧道横断面各监测布置点位移沉降图
Fig. 3 Displacement and settlement diagram of each monitoring arrangement point in tunnel cross section

3 断层形态参数分析

在实际工程项目中，为确保隧道的稳定与安全，选址时通常会避免断层破碎带。然而，当绕行断层会显著增加线路成本时，选择合适的角度穿越断层破碎带成为必要策略。隧道的破坏模式与断层的形态参数密切相关，这些参数包括断层的宽度、倾角、倾向以及断层本身的属性。为了深入探究隧道与断层之间的最佳夹角以及断层倾角等因素，采用 PLAXIS 软件建立了详细的数值模型，旨在研究隧道在不同工况下穿越断层的力学机制及损伤演化过程，进而揭示公路隧道施工中衬砌结构的应力应变规律。

3.1 断层宽度对隧道的影

3.1.1 隧道位移分析

断层宽度的变化对隧道稳定性具有显著影响。特别是当断层宽度较大时，隧道在断层剪切面附近可能遭受严重的剪切变形。为了深入探究这一影响，在保持断层倾角恒定的条件下，逐步调整断层的宽度，从最初的 6 m 逐渐增大至 30 m。通过数值分析模型，更精确地模拟和分析不同断层宽度下隧道的稳定性表现，为实际工程建设提供科学依据。

不同断层宽度下隧道变形图如图 4 所示。其中，负值代表沉降，正值代表隆起。当断层的宽度为 6、12、18、24、30 m 时，拱顶的最大沉降值分别为 33.11、36.31、39.41、46.85、51.75 mm。拱底的最大隆起值分别为 68.67、88.18、96.13、102.62、106.29 mm。隧道中心线附近是沉降现象最为显著的

道桥技术

区域，无论是拱底还是拱顶，其沉降量都呈现增大的趋势，特别是在断层中间位置，沉降量达到最大。而在断层区域外的隧道拱底有轻微的沉降现象，这种沉降可能源于多种因素，如岩体的自稳能力不足、岩体风化严重或基底软弱导致的承载力不足等，这些因素都可能对隧道的稳定性产生重要影响。此外，随着断层宽度的增加，无论是拱顶的沉降还是拱底的隆起都呈现出增大的趋势，但它们的变化规律大致相同，这为分析和预测隧道的稳定性提供了重要依据。

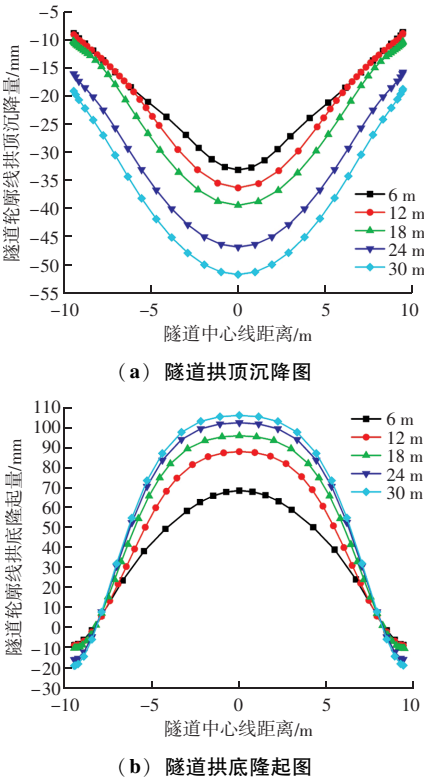


图4 不同断层宽度下变形图
Fig. 4 Tunnel deformation diagram under varying fault widths

由图5可知，横向位移分布形式在拱顶处近似为0，其次逐渐增大，拱脚达到最大值，最后逐渐减小至拱底处。另一方面，当隧道边界与断层边界线重合时，横向位移分布呈高度集中特征，体现为位移峰值显著增大，影响范围扩展及位移曲线梯度急剧升高，因此需要在设计和施工过程中避开边界线重合部位。

图6中隧道衬砌的横向最大位移随着断层宽度的增大分别为18.89、22.41、21.16、31.15、34.09 mm，最大增幅发生在18 m向24 m增加时。

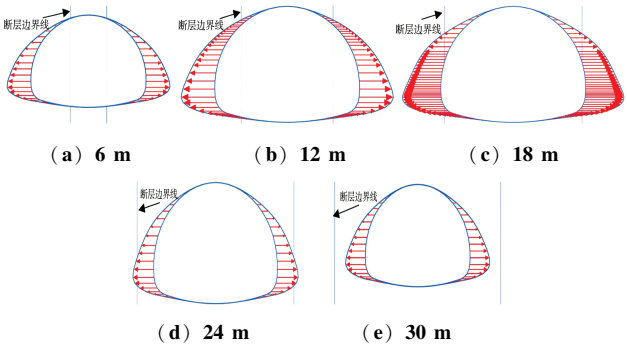


图5 不同断层宽度下隧道衬砌横向位移变形分布
Fig. 5 Lateral displacement and deformation distribution of tunnel lining under different fault widths

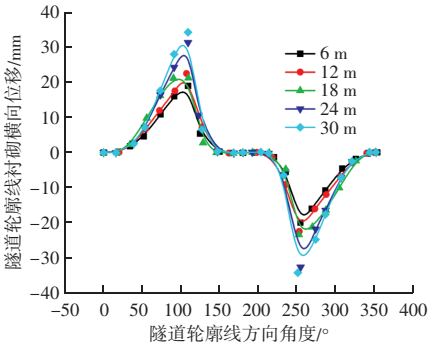


图6 不同断层宽度下隧道衬砌横向位移图
Fig. 6 Lateral displacement diagram of tunnel lining under different fault widths

3.1.2 隧道竖向应力分析

由图7可知，随着距离的增大，围岩应力先增大后减小最后达到稳定状态；其中在断层边界处发生应力突变。

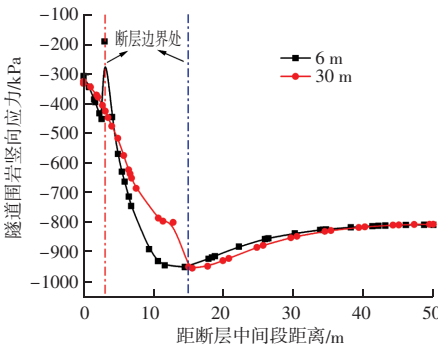


图7 不同宽度下隧道围岩竖向应力变化曲线
Fig. 7 Change curve of vertical stress in tunnel surrounding rock with different widths

3.2 断层倾角对隧道的影响

3.2.1 隧道位移分析

在隧道实际施工过程中，断层与隧道的空间位置关系极为复杂多变，同时断层的倾角、破碎带厚

度等参数存在差异。这些不确定因素将对隧道衬砌的稳定性产生重要影响。当隧道穿越断层破碎带时，断层的倾角直接决定了其稳定性，因为断层面与衬砌的交界位置会随着倾角的变化而发生变动。倾角的变化可能导致衬砌结构遭受剪切损伤，从而威胁到隧道的安全与稳定。考虑到断层倾角对隧道衬砌的影响至关重要，深入探讨了不同断层倾角（30°、45°、60°、75°、90°）下，隧道穿越断层破碎带时衬砌的位移规律。通过数值模型（如图 8 所示）的精细分析，更准确地理解衬砌与断层倾角之间的相互作用，为隧道施工和稳定性评估提供有力的理论依据。

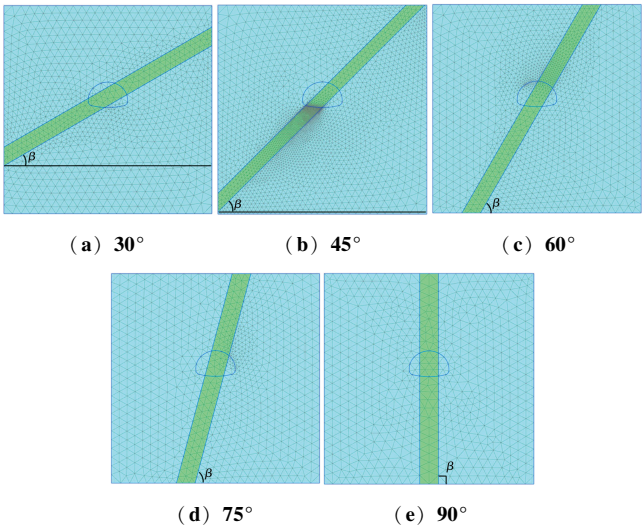


图 8 不同倾角的断层破碎带模型

Fig. 8 Fault fracture zone models with different dip angles

由图 9 可知，断层倾角为 60° 的衬砌拱顶的沉降最大，且最大值未出现在拱顶处。通过对不同断层倾角下（30°、45°、60°、75°、90°）隧道衬砌拱顶沉降量的详细分析，可以发现，随着断层倾角的增加，衬砌拱顶的最大沉降值呈现出先上升后下降的趋势。表现在，当断层倾角从 30° 增加至 60° 时，拱顶沉降最大值从 36.02 mm 增大到 38.22 mm；而当倾角继续增大至 90° 时，沉降最大值则减小至 34.62 mm。

由图 10 可知，当断层倾角为 30°、45°、60°、75° 和 90° 时，隧道衬砌拱底最大隆起量为 52.71、64.53、78.39、84.74、78.86 mm，随着断层倾角的增大，衬砌拱底最大隆起值的变化趋势为先增大后

减小，其最大隆起值相对于隧道中心线有所偏移。同时，距离隧道中心线最远处拱底有轻微的沉降现象。

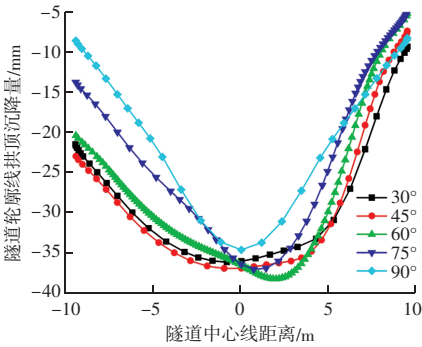


图 9 不同断层倾角下隧道拱顶沉降图

Fig. 9 Settlement of tunnel vault under different fault inclination angles

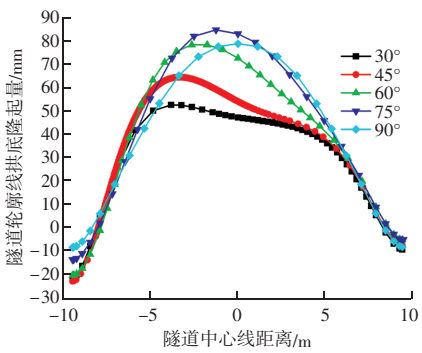
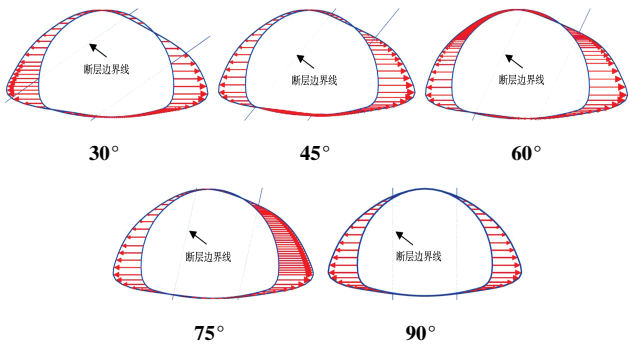


图 10 不同断层倾角下隧道拱底隆起图

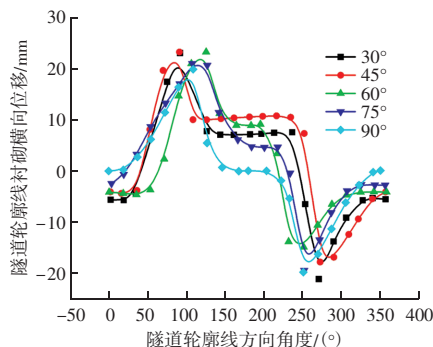
Fig. 10 Uplift of tunnel arch bottom under different fault dip angles

由图 11 (a) 可知，横向位移分布并不对称，右侧处横向位移出现反弯点；且随着倾斜角度的增大，反弯点逐渐向拱顶靠近。在倾角 75° 时，隧道右侧横向分布最密集。由图 11 (b) 可知，隧道衬砌的横向最大位移随着断层倾角的增大分别为 23.11、23.27、23.31、21.03、19.89 mm，相差基本不大；但最大值所对应的轮廓线角度亦有差距。



(a) 隧道衬砌横向位移变形分布

道桥技术



(b) 隧道衬砌横向位移图

图 11 不同断层倾角下隧道衬砌横向位移变形分布图

Fig. 11 Distribution map of lateral displacement deformation of tunnel lining under different tunnel dip angles

3.2.2 隧道竖向应力分析

由图 12 可知, 断层倾角 90° 所对应的围岩应力突变范围要比 30° 的大。因为断层活动性的增强、地应力分布的不均匀性、破坏范围的扩大以及断层面稳定性的降低等多种因素共同作用的结果。导致了围岩应力状态的剧烈变化和应力突变范围的扩大。

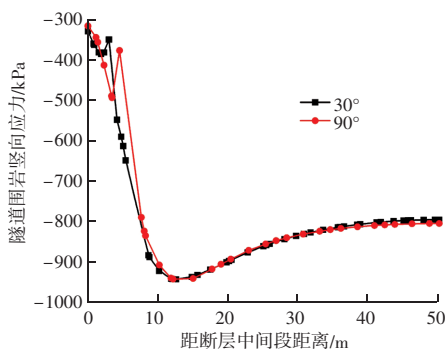


图 12 不同倾角下隧道围岩竖向应力变化曲线

Fig. 12 Change curve of vertical stress of tunnel surrounding rock under different inclination angles

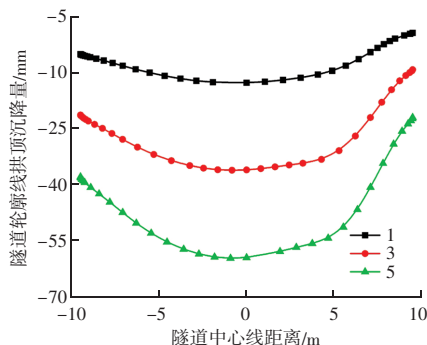
3.3 覆高比对隧道的影响

3.3.1 隧道位移分析

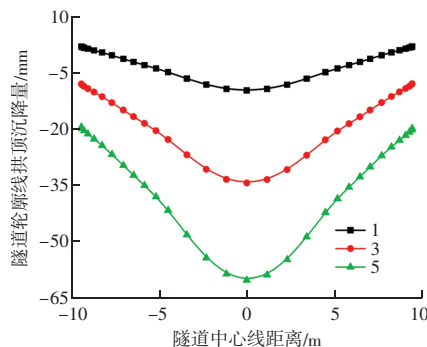
在隧道的整体设计中, 覆高比是一个至关重要的参数 (即覆土厚度与隧道高度的比值), 直接关联着隧道的刚度与整体稳定性。因此必须寻求一个最优的覆高比, 实现隧道结构安全与经济性的双重优化。选取断层宽度为 9 m 及倾角为 30° 、 90° 时覆高比 H/D 分别为 1、3、5 时, 隧道穿越断层破碎带时衬砌的位移变化及围岩竖向应力变化情况。

由图 13 可知, 拱顶附近处隧道沉降值最大, 且覆高比越大, 拱顶沉降最大值也逐渐变大。另一方面, 断层倾角为 90° 时, 隧道轮廓线整体变形情况非

常均匀, 呈现“U 型”分布。最大值出现在拱顶, 最小值出现在拱脚附近。



(a) 30°

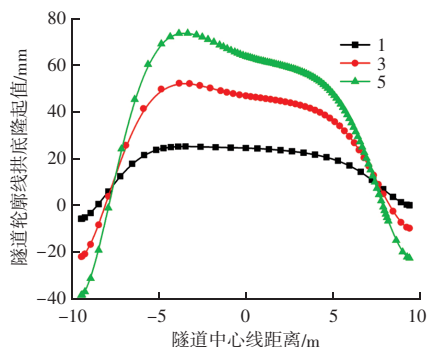


(b) 90°

图 13 不同覆高比下隧道拱顶沉降图

Fig. 13 Settlement of tunnel arch under different overlay ratio

由图 14 可知, 当断层倾角为 90° 衬砌拱底的最大隆起值发生在覆高比为 5 时, 其最大隆起量为 115.53 mm, 最小为 38.89 mm, 拱底隆起减小幅度为 66.34%。衬砌均在两端发生沉降。另一方面, 断层倾角为 30° 时, 隧道最大隆起值不在拱顶, 发生在离中心线向左偏移的位置, 且随着覆高比的增大, 最大值点逐渐向中心线偏移; 而在倾角为 90° 时, 最大隆起值始终在拱底处。而断层倾角为 90° 时, 由于断层表现为垂直方向上的断裂, 隧道拱底直接面对



(a) 30°

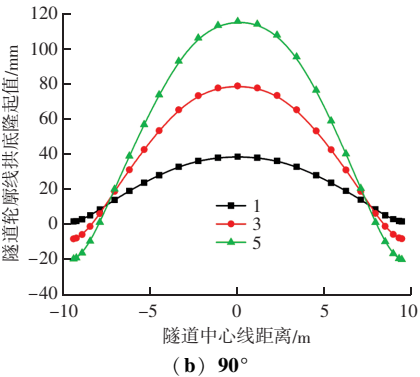
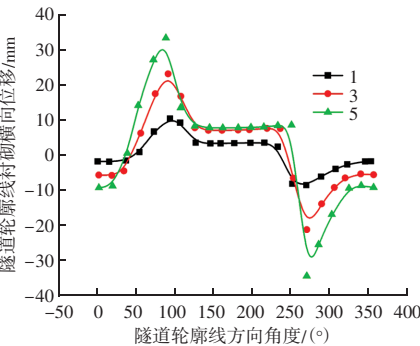


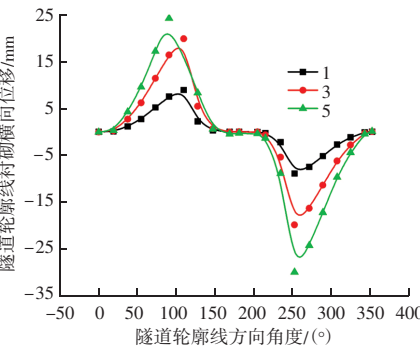
图 14 不同覆高比下隧道拱底隆起图
Fig. 14 Uplift of tunnel arch bottom under different cover height ratio

断层的影响，因此最大隆起值通常出现在隧道拱底处。

由图 15 可知，断层倾角为 30°时，最大横向位移在覆高比为 5 且隧道轮廓线角度 72°左右，即拱肩位置处为 27.2 mm。断层倾角为 90°时，最大横向位移在覆高比为 5 且隧道轮廓线角度 90°左右，大小为 24.23 mm。两者都在 180°左右范围内横向位移变化平缓，且呈对称分布。



(a) 30°

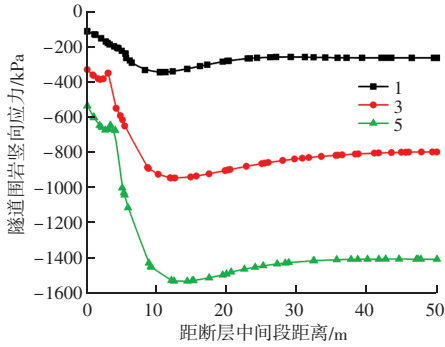


(b) 90°

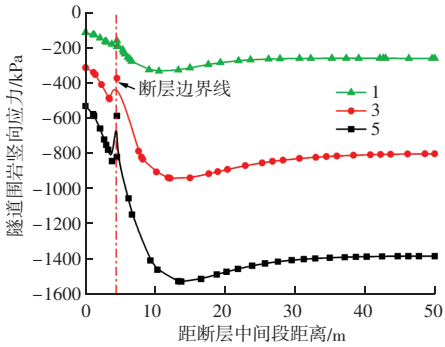
图 15 不同覆高比下隧道衬砌横向位移图
Fig. 15 Lateral displacement diagram of tunnel lining under different cover height ratio

3.3.2 隧道竖向应力分析

由图 16 可知，随着覆高比的增大，断层边界线处围岩竖向应力会发生突变，断层倾角 90°时比 30°的突变更大，但整体变化趋势基本一致，最终都达到了稳定围岩状态。



(a) 30°



(b) 90°

图 16 不同覆高比下隧道围岩竖向应力变化曲线
Fig. 16 Change curve of vertical stress of tunnel surrounding rock under different overlay ratio

4 结论

以江西省某高速公路隧道工程为背景，通过 PLAXIS 数值模拟软件，建立了详细的二维数值模型，研究了断层破碎带宽度、倾角及覆高比对山岭隧道安全稳定性的影响。通过对不同工况下隧道的位移及竖向应力进行分析，得到以下结论：

(1) 在隧道开挖掘进过程中，断层破碎带对隧道围岩的变形具有显著影响。特别是在断层破碎带段，该区域成为变形控制的关键所在。在穿越断层破碎带时，隧道围岩的拱顶沉降量和拱底隆起量均达到最大值，这进一步凸显了断层破碎带对隧道稳定性的挑战。

(2) 随着断层宽度的增加，拱顶的最大沉降值

道桥技术

和拱底最大隆起值也逐渐增大,且最大值位置出现在断层中间处,同时,隧道拱底在断层区域外时有轻微的沉降现象。

(3) 当断层倾角逐渐增大时,衬砌拱顶的最大沉降值呈现出一种先上升后下降的趋势。值得注意的是,最大沉降值并非出现在拱顶的正中位置,而是在断层倾角达到 60° 时,衬砌拱顶的沉降量达到了最大。这一发现对于深入了解断层倾角对隧道稳定性的影响至关重要,有助于更精确地评估隧道施工的安全性和稳定性。

(4) 断层倾角为 30° 时,最大横向位移在覆高比为 5 且隧道轮廓线角度 72° 左右;断层倾角为 90° 时,最大横向位移在覆高比为 5 且隧道轮廓线角度 90° 左右;两者都在 180° 左右范围内横向位移变化平缓,且呈对称分布。

参 考 文 献

- [1] 廖伯富,黄明,路遥,等. 非均质断层破碎带盾构开挖面极限支护力上限解 [J]. 工程地质学报, 2023, 31 (6): 2008 - 2019.
- [2] 王亚奇. 超大断面隧道临近溶洞围岩突水失稳破坏特征分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 25 - 30, 140.
- [3] 肖时辉,曹雄,李伟鹏,等. 断层破碎带围岩工程特性及隧道施工影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21 (3): 1038 - 1049.
- [4] 杨超,邹永木,李磊,等. 深大断层破碎带隧道突水突泥机理研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (3): 173 - 179.
- [5] 章玉伟,徐泽鑫,谢远,等. 断层破碎带隧道围岩敏感性及其沉降控制分析 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (8): 3493 - 3501.
- [6] 刘智,钟长平. 超大直径泥水平衡盾构断层破碎带掘进关键技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (1): 225 - 232.
- [7] 付艳斌,王福道,陈湘生,等. 破碎带地层盾构隧道建造关键问题 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67 (1): 25 - 33.
- [8] 殷帅峰,李娅琪,李昊,等. 沿空煤巷过断层破碎带围岩控制技术研究 [J]. 矿业安全与环保, 2022, 49 (5): 102 - 108.
- [9] 黄解放,黄明利,谭忠盛. 东天山隧道穿越断层破碎带初期支护变形阶段控制标准研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (增刊 1): 155 - 165.
- [10] 韩超,张柯. 双护盾隧道掘进机穿越地铁区间断层破碎带卡机机理及防卡机技术 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (6): 153 - 158.
- [11] 王东剑. 隧道穿越断层带围岩超前小导管预加固措施参数研究 [J]. 公路, 2022, 67 (6): 395 - 400.
- [12] 韩瑀萱,江腾飞,谭碧舸,等. 隧道穿越不同形态断层破碎带围岩稳定性分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40 (5): 162 - 173.
- [13] 钟祖良,申卓,李亚朋,等. 富水断层破碎带隧道防突岩盘厚度计算与模型试验验证 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (8): 1883 - 1892.
- [14] 刘晓龙,孙闯,王慧,等. 含断层偏压隧道围岩变形机理及支护方案优化 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36 (1): 108 - 118.
- [15] 王达,石文广,王志云,等. 穿越不良地质段的长距离深埋输水隧洞纵向变形数值分析 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (2): 90 - 96.