

DOI: 10.11779/CJGE20230103

有压引水隧洞多层柔性叠合衬砌对断层蠕滑错动的适应性研究

徐文韬¹, 徐红超², 石长征¹, 伍鹤皋^{*1}, 张超², 李端正¹

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 长距离输水隧洞工程建设很难避免穿越活动断层的问题, 有压隧洞采用何种衬砌结构型式穿越活动断层迄今为止研究还不够深入。针对目前隧洞过活断层常用抗断措施存在的问题, 结合有压引水隧洞自身的特点, 提出了一种适合有压引水隧洞穿越活动断层的多层柔性叠合衬砌结构型式。依托某工程的实践情况, 采用有限元数值分析方法论证了多层柔性叠合衬砌结构的可行性和合理性; 同时分析了垫层厚度、垫层弹模对隧洞结构内力响应和抗断性能的影响。计算结果表明: 垫层厚度越大, 伸缩节总变形量越大, 对于隧洞衬砌适应断层错动越有利; 但当垫层厚度过大时, 将对衬砌的受力产生不利影响, 因此建议根据工程设防的断层错动量选择合适厚度的垫层, 不必采用过厚的垫层。垫层弹模的变化对钢管应力的影响较为显著, 综合考虑钢衬应力、混凝土损伤以及对断层错动的适应性能, 建议选取 3~5 MPa 的垫层弹模最为合适。研究结果可为有压输水隧洞应对断层蠕滑变形时的结构设计提供参考。

关键词: 有压隧洞; 衬砌结构; 断层错动; 柔性接头; 垫层; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)05-0998-10

作者简介: 徐文韬(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事地下工程与压力管道方面的研究工作。Email: xwt_whu@whu.edu.cn。

Adaptation of multi-layer flexible stacked linings of pressure water transmission tunnels subjected to fault creep

XU Wentao¹, XU Hongchao², SHI Changzheng¹, WU Hegao¹, ZHANG Chao², LI Duanzheng¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Central Yunnan Provincial Water Diversion Project Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: Crossing active faults is a difficult problem to avoid when building long-distance water transmission tunnels, and the structural form of pressure tunnels crossing active faults has not been thoroughly studied. In this study, a multi-layer flexible stacked lining suitable for pressure water transmission tunnels crossing active faults is proposed aiming at addressing the problems of the common anti-fracture measures for the tunnels crossing active faults as well as their characteristics. Based on the actual situation of a project, the finite unit method is used to analyze the stress and deformation of the structures under the condition of using different tunnel lining structures in the project. According to the calculated results, the reasonableness of the multi-layer flexible stacked lining structures is confirmed. The numerical simulation is used to assess the impact of cushion thickness and elastic modulus on the internal force response and fracture resistance of the tunnel structures. The findings demonstrate that the thicker the cushion thickness the larger the total deformation of the expansion joints. It is more favorable for the tunnel lining to adapt to fault dislocation. However, when the cushion thickness increases further, there is a certain adverse effect on the force of the lining, so it is recommended to choose the appropriate thickness of the cushion layer according to the amount of fault dislocation. It is not necessary to use a too-thick cushion layer. The change of elastic modulus of cushion has a significant effect on the stress of steel pipes. Considering the stress of steel lining, the damage of concrete and the adaptability to fault dislocation, it is recommended that the elastic modulus of the cushion be selected as 3 to 5 MPa. The research results can provide some references for the design of pressure water transmission tunnels crossing fault zones.

Key words: pressure tunnel; lining structure; fault creep;

flexible joint; cushion; numerical simulation

基金项目: 云南省重大科研专项计划项目(202102AF080001)

收稿日期: 2023-02-10

*通信作者 (E-mail: wbf1988@vip.sina.com)

0 引 言

中国水资源空间分布与社会经济发展不协调的问题较为突出,为了解决这个问题,近年来设计兴建了不少跨流域引调水工程,例如引黄济青、南水北调、滇中引水、引汉济渭等。对于这些引调水工程,特别是从水资源相对丰富的青藏高原、云贵高原取水的滇中引水、南水北调等长距离引调水工程,由于受到地形和地质条件的制约,常常需要修建大量长距离输水隧洞^[1-2]。中国西部地区地质构造复杂,地震活动强烈,长距离输水隧洞工程建设很难避免穿越活动断层的问题。

目前隧洞穿越活断层主要采用“设置柔性连接”、“采用复合衬砌的隔离消能设计”、“断面超挖法”以及“洞内明管跨越”这 4 种方法。近些年,学者们针对穿越活断层输水隧洞错断破坏机理及抗错断措施开展了广泛研究。Russo 等^[3]、周光新等^[4]依托土耳其 Bolu 隧洞和云南香炉山隧洞,采用数值模拟和小尺度物理模型试验等方法,深入地研究了断层错动影响下跨活断层铰接隧洞的破坏型式及机制。崔光耀等^[5]通过模型试验在混凝土衬砌中掺入钢纤维、玄武岩纤维和聚丙烯纤维,从主应力、纵向应变、结构安全系数等角度对比了 3 种隧道纤维混凝土的抗错断性能。蒋树屏等^[6]对超挖设计进行了讨论及分析,认为扩大断面尺寸是即使突发黏滑错动,在隧洞开裂后仍能保证输水线路满足运行要求的措施。任兴普等^[7]介绍了赛珠水电站引水隧洞采用“洞内明管”跨越活断层的工程布置,该工程布置满足了断层变形和变位需要,至今仍运行良好。隧洞钢筋混凝土衬砌穿越活动断层的抗错断设计归纳起来主要有两种思路:①通过改变地下结构本身性能,使结构随地层发生变形,从而减小结构反应,例如柔性连接法和复合衬砌法;②预留断层可能错动量,保证断层错动发生后结构的功能性,例如断面超挖法和洞内明管跨越。

目前隧洞工程通常采用钢筋混凝土衬砌,在过断层洞段,由于围岩条件差,钢筋混凝土衬砌容易产生裂缝,从而发生漏水,因此对于有压隧洞,通常采用钢板衬砌。钢板衬砌具有较高的强度和密封性,能够很好的保证正常运行情况下有压隧洞的运行安全。然而常规钢板衬砌的抗剪性和抗压性较差,当活动断层穿过埋于岩土体中的钢管时,将引起钢管“S”形弯曲变形,尤其是逆断层的挤压效应,容易使钢板衬砌受压产生屈曲破坏。因此,钢板衬砌要用于跨活断层的有压隧洞仍需要进行改进,但相关研究鲜有涉及。

为此,针对目前工程中常用的隧洞过断层抗错断措施存在的问题,结合有压隧洞自身的特点,提出一种适合有压隧洞穿越活动断层的多层柔性叠合衬砌,该结构包括混凝土外保护层、柔性连接段、软垫层、钢管内衬和直埋波纹管伸缩节。依托某工程实践,建立不同隧洞衬砌结构的有限元模型,计算了钢衬和混凝土的应力以及波纹管伸缩节的变形,验证多层柔性叠合衬砌结构的合理性,为有压输水隧洞应对断层蠕滑变形时的结构设计提供参考。

1 工程概况及计算模型

1.1 基本资料

某水电站位于巴基斯坦东北部地区,工程开发任务主要为引水发电,引水隧洞直径 5 m,长度约为 17.4 km,设计内压 1.5 MPa。坝址位于该断裂带上盘,距断裂带最近处约 730 m,从坝址到断裂带区域均铺设钢板内衬,同时再向下游延伸相同距离,钢板内衬铺设距离大约 1.4 km。与引水隧洞相交的活动断裂带为逆断裂带 F5,如图 1 所示。

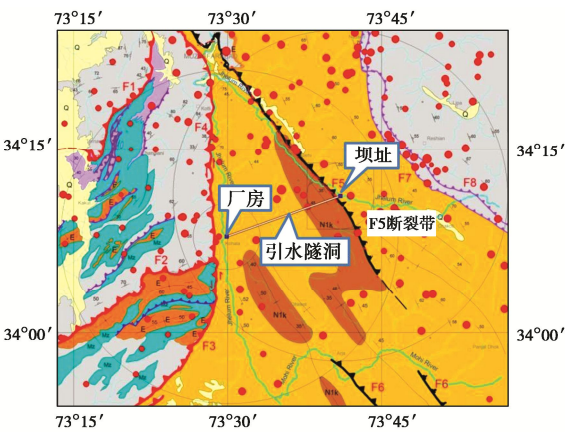


图 1 近场区主要断裂带延伸示意图
Fig. 1 Schematic diagram of extension of main fracture zone

F5 断裂带穿过引水隧洞的上游段,总体倾角约为 55°~60°,坝基处的围岩受 F5 逆冲断裂的影响,整体相对破碎。基于 Q 系统分类法,断裂带与隧洞相交段的围岩类别主要以 Q5 类为主,其次为 Q6 类,各类围岩材料参数见表 1。

表 1 围岩材料参数表
Table 1 Material parameters of surrounding rock

名称	围岩类别	
	Q6	Q5
天然重度/(g·cm ⁻³)	2.15~2.19	2.43~2.45
内摩擦角/(°)	22~30	34~41
泊松比	0.34~0.38	0.31~0.34
岩体变形模量/GPa	0.3~1.1	2~4
黏聚力/MPa	0.14~0.26	0.41~0.82

钢管内衬采用 Q355 钢材,具体参数见表 2。柔性

连接段由高性能泡沫混凝土或纤维塑性混凝土制成，弹模设定为衬砌节段混凝土弹模的 1/200^[8]，其他参数不变，垫层和混凝土的材料参数详见表 3。

表 2 Q355 钢材材料参数表

Table 2 Material parameters of Q355 steel			
钢号	壁厚/mm	允许应力/MPa	屈服强度/MPa
Q355	24	210	345

表 3 垫层和混凝土材料参数表

Table 3 Material parameters of cushion and concrete				
材料	重度 /(10 ⁻⁵ N·mm ⁻³)	泊松 比	弹性模 量/MPa	轴心抗压/抗 拉强度设计 值/MPa
C20 混凝土	2.4	0.20	2.55×10 ⁴	9.6/1.1
柔性连接段	2.4	0.20	128	—
垫层	0.5	0.16	3	—

1.2 计算模型

为了更好地表示常规钢板衬砌结构和多层柔性叠合衬砌结构之间的区别，绘制了两种隧洞衬砌结构的示意图，见图 2。

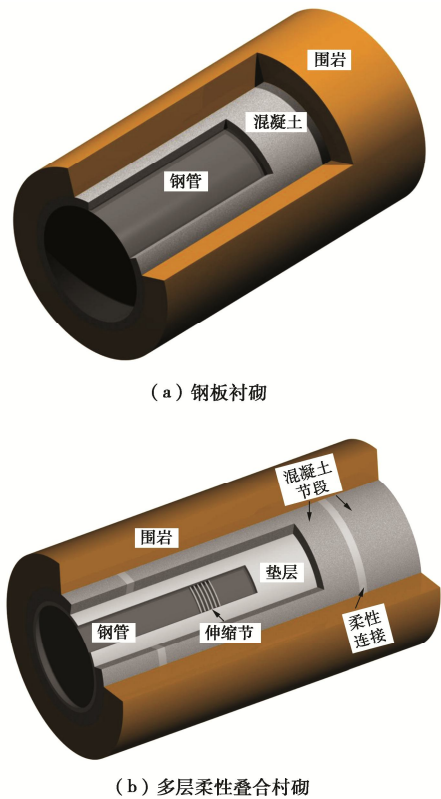


图 2 两种隧洞衬砌结构示意图

根据上述工程资料，建立采用不同衬砌型式的引水隧洞数值模型，其中管壁厚度为 24 mm，钢管半径 2.5 m，回填混凝土厚 0.5 m。多层柔性叠合衬砌中的混凝土节段长度为 8 m，柔性连接段长度为 0.5 m，钢管节段长度为 10 m，伸缩节长度为 1.5 m，垫层

厚度为 0.1 m。柔性连接段和伸缩节在工程设防距离中均匀分布。为了避免边界条件对有限元计算结果的影响^[9]，选择模型的横断面尺寸为 80 m×80 m；模型的纵向（沿管轴向）长度 300 m，断裂带纵向长度为 50 m，断层倾角确定为 60°，有限元整体模型如图 3 所示。

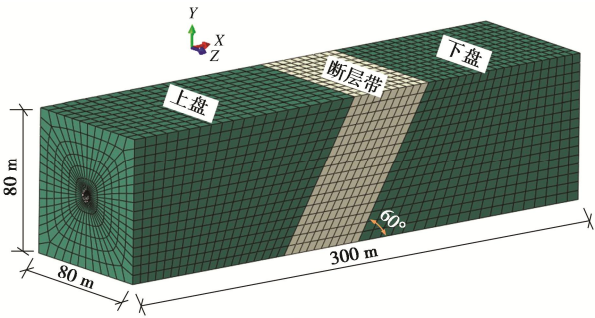
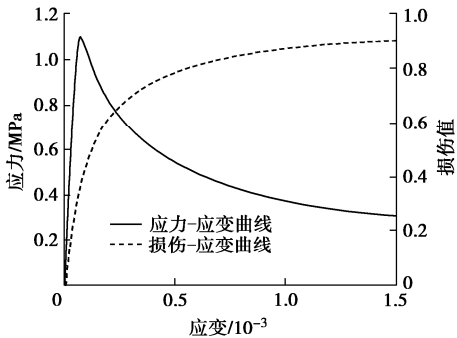


图 3 有限元整体模型图

Fig. 3 Overall finite element model

模型中钢管采用四节点 S4 壳单元模拟，衬砌混凝土、断裂破碎带和围岩采用八节点 C3D8 实体等参单元模拟；柔性连接和垫层两者均用 C3D8 单元模拟，采用线弹性本构。伸缩节轴向刚度为 1274 N/mm，横向刚度为 1481 N/mm，采用 B31 梁单元模拟，截面类型为圆环型，梁单元的各向刚度按伸缩节的计算刚度设置^[10]。

模型考虑材料的非线性，其中混凝土采用塑性损伤本构^[11]，相关的参数曲线见图 4，钢管采用多线性随动强化本构，围岩、断层带采用莫尔-库仑本构。由于各材料之间力学性质的差异，层与层之间可能产生相对分离、滑移等现象，因此在回填混凝土与围岩、钢管与混凝土、钢管与垫层等之间设置接触面来模拟各部分之间的相互作用。通过相应的现场测定及工程经验，取围岩与混凝土间的摩擦系数为 0.86，垫层与混凝土间的摩擦系数为 0.63，钢管与混凝土间的摩擦系数为 0.5，钢管与垫层间的摩擦系数为 0.3^[8, 12]，本文计算中，衬砌仅考虑服役期正常使用状态，忽略围岩压力的影响。



(a) 拉伸本构及塑性损伤曲线

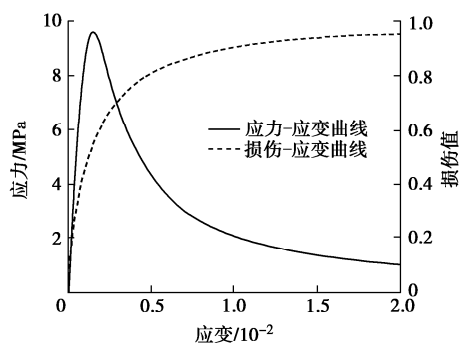


图4 混凝土材料本构参数

Fig. 4 Parameters of constitutive model

刘学增等^[13]设计了相似比为1:50的室内模型试验,模拟了60°倾角正断层错动下,与之正交的隧道结构的受力变形破坏过程。参照上述室内试验,建立了相应的有限元模型。提取错动位移为10 mm时数值模型和物理模型#1~#6断面竖向应力的数值,采用无量纲分析法^[14]进行分析,将模型的计算结果与室内试验中的应力变化进行对比,二者在量值大小上虽有一定偏差,但是总体的变化趋势基本一致,说明有限单元法具有较高的可信度,计算中的接触算法及其他参数设置较为合理,后续的计算结果及规律性分析具有一定的参考意义。

1.3 边界条件

在数值模拟逆断层错动中,通常采用强制位移施加方式,约束下盘底部节点,模型前后及右侧边界施加法向约束,使上盘沿断层倾角方向发生错动位移。本文计算中考虑工程百年设防要求,在上盘沿y轴正向错动0.3 m, x轴正向错动0.173 m,即蠕滑合位移0.346 m。断层带内的错动位移模式缺少实测资料的验证,目前常采用的位移模式主要有上凸型、直线型、下凹型和S型等^[15],本文采用的是直线型,如图5所示。

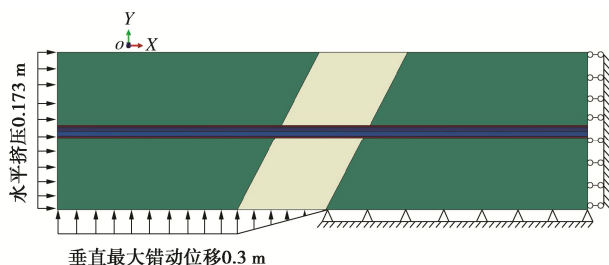


图5 边界条件示意图

Fig. 5 Boundary conditions

2 常规钢板衬砌结构对蠕滑错动的适应性研究

本节主要研究常规钢板衬砌在断层错动作用下的

结构变形情况,采用的衬砌型式如图2(a)所示,包括钢管和回填混凝土。

断层带蠕滑错动过程中,衬砌会随着围岩同步发生错动,钢管的位移如图6所示,可以看出钢管的变形主要集中在断层带附近。随着断层位移的增加,管道的位移和翘曲程度也在不断增大。

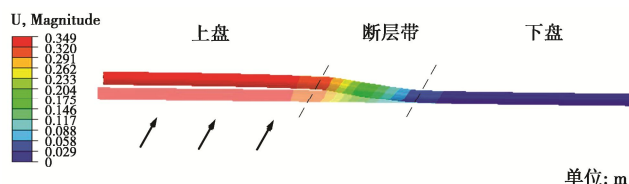
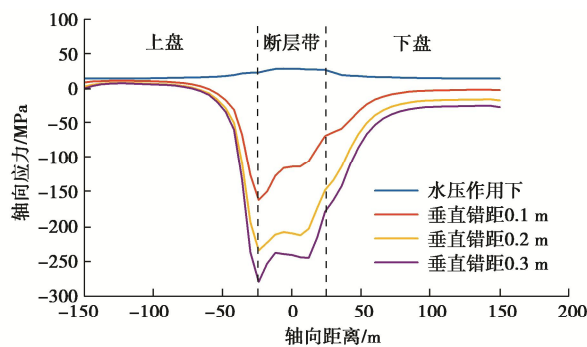


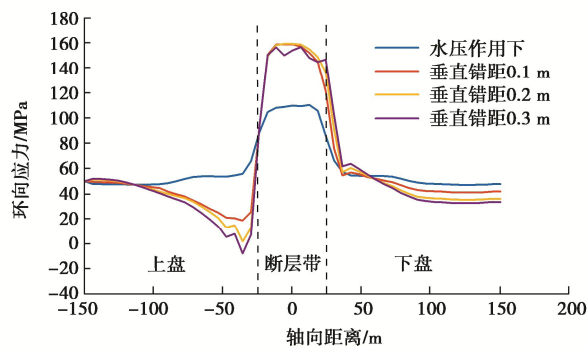
图6 断层错动情况下钢管合位移图

Fig. 6 Resultant displacements of pipes under fault condition

当活动盘施加错动位移时,隧洞底部受到围岩强烈作用,钢管底部也呈现出更明显的应力集中,以隧洞的轴向距离为横坐标,以管底的轴向应力和环向应力为纵坐标,绘制不同断层错动量下钢管的应力变化曲线如图7所示。



(a) 轴向应力



(b) 环向应力

图7 不同断层错动量下钢管的应力变化曲线

Fig. 7 Curves of stress of steel pipes under different fault displacement dislocations

由曲线可以看出,隧洞正常运行过程中,钢管受水压和水重的影响环向应力较大,且由于断层带变形模量较小,中间管段轻微下沉导致位于断层带之间的钢管应力略大于左右两侧,而轴向应力主要是由内压作用下环向应力的泊松效应产生,大部分区域的数值在20 MPa以下。断层垂直错距为0.1 m时,钢管的轴

向应力和环向应力数值在围岩与断层带交界处附近产生较大的突变, 轴向应力数值的变化幅度大于环向应力。随着断层错动量继续增加, 钢管受到持续的挤压, 轴向压缩应力持续增大直至接近屈服, 而环向应力总体变化不太明显。

不同断层错动量下, Mises 等效应力的最大值都出现在固定盘与断层带的交界处, Mises 应力分布云图见图 8。

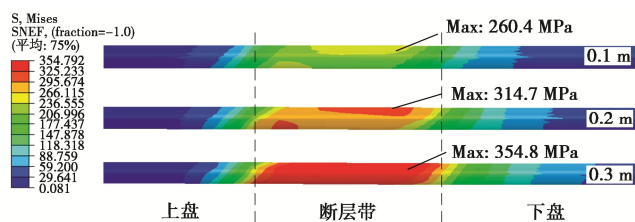


图 8 不同断层错动量下钢管 Mises 应力分布云图

Fig. 8 Distribution of stress of steel pipes under different fault displacement dislocations

当断层垂直错距为 0.3 m 时, 断层带内的钢管受压 Mises 等效应力均超过 345 MPa, 大范围进入塑性阶段。Mises 等效应力与轴向应力、环向应力一致, 80% 应力急剧变化范围集中在断层带及两侧 30 m (6 倍管径) 的范围内, 应力影响范围受错动量的影响较小, 而应力最大值随着错动量的增加而增加。

除了钢管大范围变形以外, 回填混凝土也产生了较大的拉压损伤, 以压缩损伤为例, 图 9 绘制了回填混凝土遭受断层错动后的压缩损伤云图, 由图 9 可知, 混凝土在断层带内发生整体压缩损伤, 位于断层下盘区域的混凝土相较于位于上盘区域的混凝土结构受错动影响的破坏范围更大、损伤程度更严重。

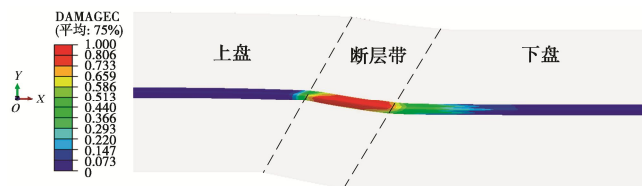


图 9 混凝土压缩损伤图

Fig. 9 Compressive damages of concrete

因此, 仅以钢管+回填混凝土作为有压隧洞的衬砌结构不足以应对断层带的蠕滑变形, 需再采取其他抗断措施来达到工程长期安全稳定运行的目的。

3 多层柔性叠合衬砌对蠕滑错动的适应性研究

根据上述计算结果, 为了减少钢管的轴向压缩变形, 降低混凝土的损伤程度, 引入一种适用于有压引水隧洞的衬砌组合结构, 如图 2 (b) 所示, 该衬砌组合结构包括钢管内衬、波纹管伸缩节、软垫层、混

土节段和节段间的柔性连接。由图 7 结果分析可知, 断层带的影响范围大致为断层带两侧各 30 m, 因此计算中工程设防距离取为 110 m。

根据计算结果绘制了钢管的合位移图, 如图 10 所示, 钢管的变形都出现在工程设防距离内, 设防距离的选取较为合理。钢管添加了伸缩节以后, 整体柔性更强, 在钢管自重、内水压力、水重及蠕滑变形共同作用下, 合位移最大为 353 mm, 略大于钢板衬砌的合位移。

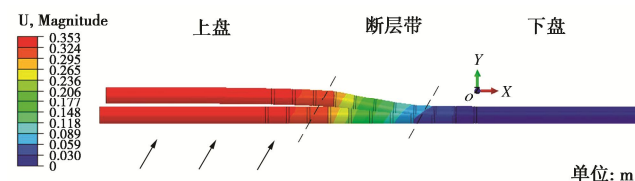


图 10 断层错动情况下钢管合位移图

Fig. 10 Resultant displacements of pipes under fault conditions

另外以断层带中心位置为 X 轴 0 点, 整理了管道断面中心位移沿管轴线的分布曲线 $DX-z$ 、 $DY-z$ 、 $DZ-z$, 如图 11 所示, 断层错动下 X 向和 Y 向位移有较程度的变化, 位移值沿着 Z 向从左到右总体趋势为逐渐递减; 在下盘钢管一端位移最小, 而在断层上盘钢管端 X 向和 Y 向位移达到最大值, X 向约等于该断层的水平错动位移 300 mm; Y 向平衡了重力作用产生的负位移后也与垂直错动 170 mm 大致相同。单从伸缩节的角度来看, 伸缩节两侧 Y 向的变形随着断层的错动大致呈现线性变化趋势; 在 X 向即轴向, 伸缩节两端钢管的变形量差异相对更为明显, 伸缩节变形相对更大。

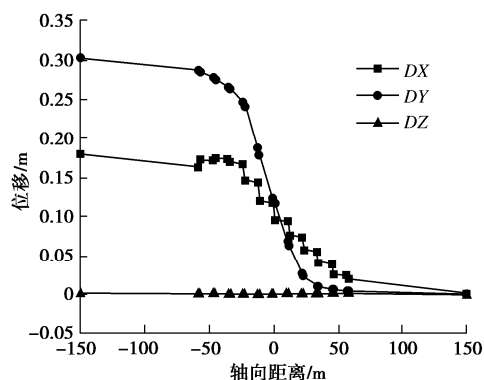


图 11 管道断面中心位移沿管轴线的分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of central displacement of pipeline sections along pipe axis

根据计算结果, 提取了断层错动 0.3 m 情况下垫层变形图, 从图 12 可以看出, 垫层变形的数值在 $-3.06 \sim 0.12$ mm, 最大压缩量达到了 3.06 mm。垫层的压缩变形主要发生在断层带钢管腰部位置, 其他部位垫层的变形集中在 1.5 mm 以下。在本节的计算模型中, 钢管外

包裹的垫层采用连续垫层,在混凝土分节处,由于管节的错动,会引起垫层顶部和底部局部张拉。

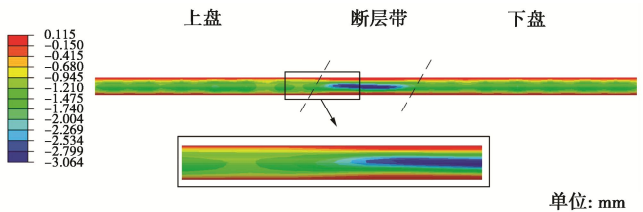


图 12 垫层径向变形

Fig. 12 Radial deformations of cushion

为厘清每种衬砌结构在隧洞正常运行和遭到断层错动破坏过程中所起的作用,隧洞除了采用常规钢板衬砌(方案 1)和多层柔性叠合衬砌(方案 5)以外,还在钢板衬砌(钢管+混凝土)的基础上,分别通过添加伸缩节、添加软垫层和添加柔性连接段的方式,增设 3 种衬砌型式作为比较,详见表 4。

表 4 不同衬砌型式内容表

Table 4 Content of different lining types

方案	结构型式
1	钢管、混凝土
2	钢管节段、混凝土、伸缩节
3	钢管、混凝土、软垫层
4	钢管、混凝土节段、柔性连接
5	钢管节段、伸缩节、软垫层、混凝土节段、柔性连接

不同衬砌型式钢管沿轴向和环向的应力变化曲线如图 13 所示。

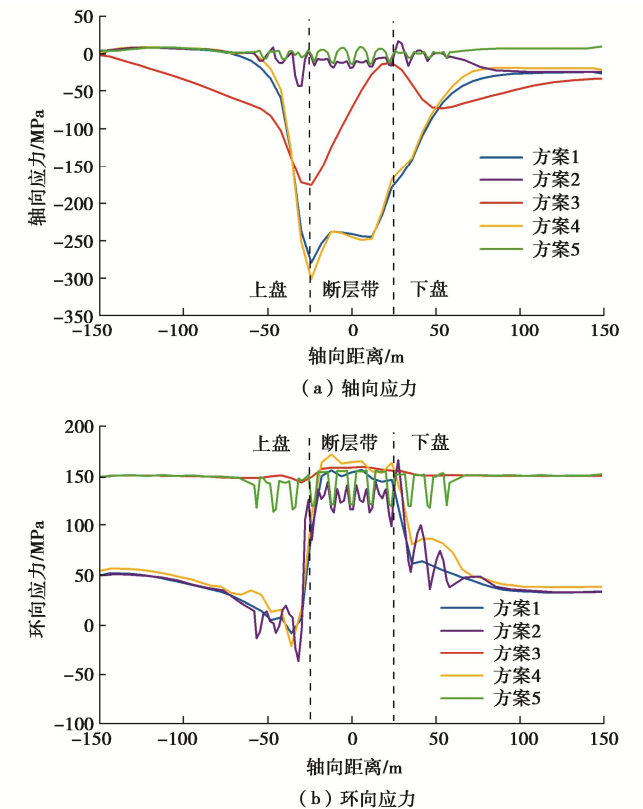


图 13 不同衬砌型式钢管的应力变化曲线

Fig. 13 Curves of stress of steel pipes with different lining types

由图 13 可知:钢管与混凝土之间添加一层软垫层后,混凝土对水压的承载比有所降低,钢管整体受力更加均匀。断层影响范围外的钢管各项应力增大明显;断层影响范围内的轴向应力峰值有所减低,而环向应力峰值变化不太明显,其中断层影响范围内钢管轴向应力峰值从-280.8 MPa 减少至-175.8 MPa,减少幅度为 37.4%。

混凝土添加柔性连接段以后,混凝土整体更具柔性,节段间更容易发生变形从而加大钢管应力集中的程度,因此设置柔性连接段并不能有效地减少钢管的各项应力,反而可能不利于钢管的受力。

钢管添加伸缩节以后,受力有明显改善,与常规钢板衬砌方案相比钢管的轴向应力峰值从-280.8 MPa 减少至-43.3 MPa,减少幅度为 84.6%。

为了量化混凝土的受损程度,提取隧洞在正常运行(water)和断层垂直错距 0.3 m (fault) 两种情况下混凝土的压缩和拉伸损伤单元体积,计算混凝土压缩和拉伸总损伤比;根据单元损伤的程度按照“0.1~0.4”,“0.4~0.6”及“0.6 以上”划分为低、中、高 3 种等级,计算每种等级所占的体积比;接着以方案 1 的压缩和拉伸总损伤比为基准,计算出不同衬砌型式混凝土的压缩和拉伸相对损伤比,计算结果如图 14 所示。

通过横向对比图 14 (a) 可知,钢衬添加伸缩节和垫层结构无法降低混凝土的压损伤,且钢管添加伸缩节后,损伤程度 0.6 以上的高损伤单元占比更多,这是由于钢管添加伸缩节后,使得伸缩节位置对应的一部分混凝土内部失去水压的径向支撑作用,混凝土损伤压碎更容易产生也更集中。对于采用柔性连接的混凝土分节方案和组合方案,混凝土的压损伤有很明显的降低,损伤程度基本处于低水平。

通过横向对比图 14 (b) 可知,钢衬添加伸缩节和柔性连接结构对降低混凝土拉损伤无法起到效果,且柔性连接将混凝土节段间的分缝宽度增大以后,混凝土单位体积所受到的拉应力增大,在内压和断层错动作用下,混凝土节段更容易产生径向贯穿拉裂纹。常规钢板衬砌方案中钢管和混凝土处于联合承载状态,由加垫层方案和组合方案的拉伸相对损伤比可以知道,垫层吸收了正常运行情况下钢管充水向外膨胀的部分位移量,一定程度上减少了水压的向外传递,对降低混凝土拉损伤效果显著。

通过纵向对比图 14 (a)、(b) 可知,断层错动过程中,回填混凝土随着围岩产生强烈的变形,在这一阶段里混凝土既受到剪切挤压作用,又受到拉伸作用,受力条件较为复杂,很难通过添加单一的结构措施来

适应断层蠕滑错动。正常运行情况下,各方案的混凝土压缩相对损伤比较小,均在 10% 以下,压损伤主要发生在断层错动过程中。拉损伤则相反,主要发生在钢管充水正常运行过程中。

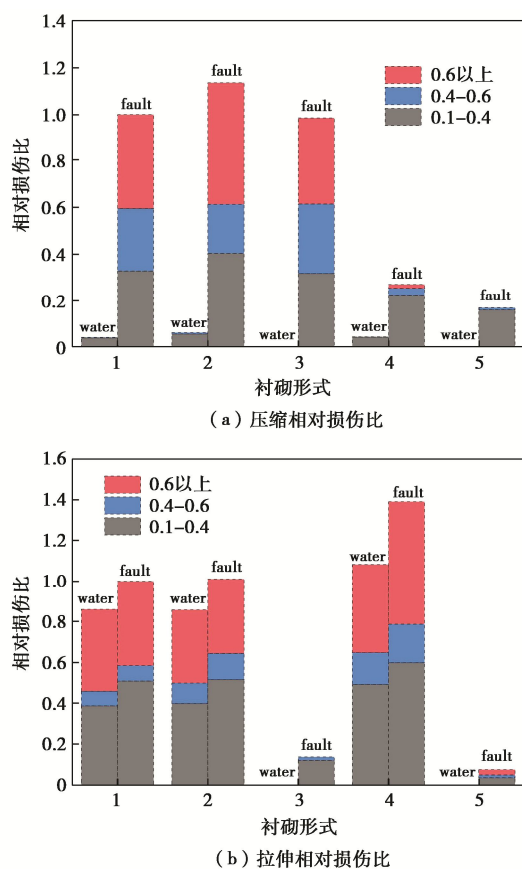


图 14 不同衬砌型式混凝土的相对损伤比

Fig. 14 Relative damage ratios of concrete for different lining types

由上述分析可知,波纹管伸缩节主要用来吸收管轴向的拉压变形与横向剪切作用,对减低钢管应力有很好的效果;软垫层在降低混凝土承载水压比例的同时还吸收了混凝土节段的部分错动变形,使结构受力更加均匀;柔性连接增大了混凝土节段间的分缝宽度和变形空间,断层错动时破坏能够集中在柔性连接部位,从而避免混凝土发生整体挤压破坏。多层柔性叠合衬砌结构结合了各结构措施的优点又一定程度上克服了各结构措施相应的缺陷,在降低钢管应力及减少混凝土压缩和拉伸损伤上都有比较出色的表现。

4 垫层参数影响分析

多层柔性叠合衬砌结构中,垫层是关键的一环,本节对垫层厚度、垫层弹模对隧洞结构响应和抗断性能的影响展开分析。

4.1 垫层厚度的影响

为了研究不同垫层厚度条件下衬砌结构的应力与

变形,假定垫层厚度分别为 10, 40, 70, 100 cm。保持衬砌组合方案数值模型的其他参数不变,垫层厚度增大以后,吸收了一部分混凝土的变形错动,减弱了混凝土变形错动对钢管的影响,同时减少了钢管内水压力的外传,提高钢管整体 Mises 应力大小。不同垫层厚度影响下钢管的 Mises 应力如图 15 所示,垫层厚度从 10 cm 增大到 40 cm 时,钢管 Mises 应力迅速提高,随着垫层厚度继续增大,钢管 Mises 应力的增量逐渐降低,变化不太明显。

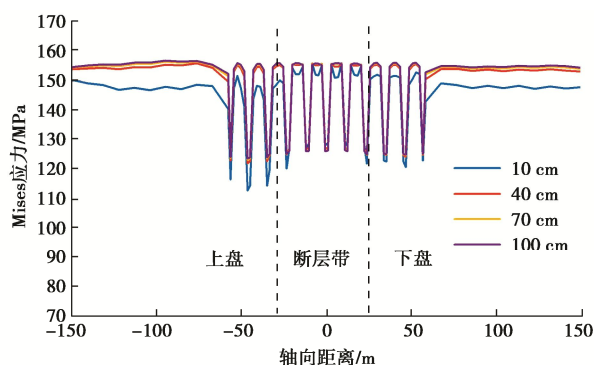


图 15 不同垫层厚度钢管的 Mises 应力变化曲线

Fig. 15 Curves of Mises stress for steel pipes with different cushion thicknesses

以活动盘侧第一个伸缩节 SSJ1 为例,绘制伸缩节变形量随垫层厚度的变化关系图,见图 16。由图 16 可知,变形量最大的伸缩节为断层范围内靠近中部的 SSJ5 和 SSJ6,变形量最小的伸缩节为位于活动盘的 SSJ2 和 SSJ3。当垫层厚度为 40 cm 时,单个伸缩节的最大变形量为 26.32 mm。

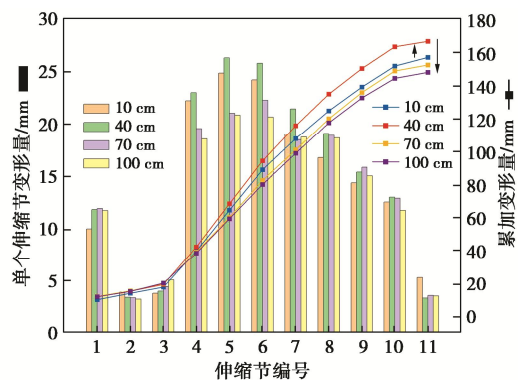


图 16 伸缩节变形量随垫层厚度的变化关系

Fig. 16 Relationship between deformation of expansion joint and cushion thickness

按常规理解,垫层厚度越厚,给伸缩节变位提供了更大的空间,伸缩节越容易发生变形进而导致总的变形量越大;通过研究对比发现:随着垫层厚度的增大,伸缩节的总变形量先增大后减小;为了解释这种现象,提取各管节首尾断面顶底的轴向位移差,见图 17,该数值可以体现钢管的偏转程度。

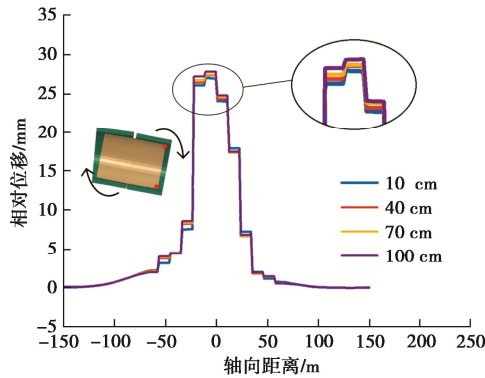


图 17 管节首尾断面顶底轴向位移差曲线

Fig. 17 Curves of top-bottom axial displacement difference for head and tail sections of pipe sections

由图 17 可知,越靠近断层带中部,管节的偏转程度越明显。伸缩节与钢管形成一个变形体系,随着垫层厚度变厚,钢管可转动量也随之变大,一部分错动位移通过钢管的转动吸收,因此伸缩节的吸收量反而减小了。

混凝土的压缩和拉伸损伤云图如图 18 所示。由于断层迹线穿过#4 混凝土节段,所以不同垫层厚度下混凝土压损伤最严重的部位均为#4 混凝土节段底部。随着垫层厚度从 0.1 m 增大到 1 m,混凝土的压损伤范围逐渐增大,且多集中在活动盘与断层带交界处,损伤深度变化不大;#4 混凝土节段压损伤程度下降, #1

—#3 混凝土节段压损伤程度上升,垫层厚度增大让混凝土的压损伤出现“均匀化”现象。混凝土拉损伤主要出现在断层带内混凝土管腰部位。垫层厚度为 0.1 m 时, #5—#6 混凝土节段顶部出现贯穿拉裂纹,随着垫层厚度增大混凝土的损伤深度及损伤程度逐渐减小,但总体变化不明显。

从衬砌结构抗断设计的角度来看,采用更厚的垫层厚度有利于减小伸缩节的变形量,减少混凝土损伤程度,但是会提高钢管的 Mises 应力,增大混凝土损伤范围,同时增加施工难度,因此垫层的最适宜厚度需根据具体计算来确定。

4.2 垫层弹模的影响

垫层弹性模量选择参照目前已建工程垫层材料常见范围,分别为 1, 3, 7, 10 MPa; 垫层厚度为 0.1 m, 保持衬砌组合方案数值模型的其他参数不变,不同垫层弹模影响下,钢管沿轴向的 Mises 应力变化曲线如图 19 所示。

从图 19 中可以看出,垫层采用不同弹模时,钢管 Mises 应力分布规律相同,但随着垫层弹模的增大,钢管 Mises 应力数值相应减小,减小幅度最大可达 26.3%,垫层弹模的大小对钢管内水压力外传的影响较为显著。

为了分析垫层弹模大小对伸缩节及混凝土变形的影响,以伸缩节的变形为例进行分析,绘制了伸缩节

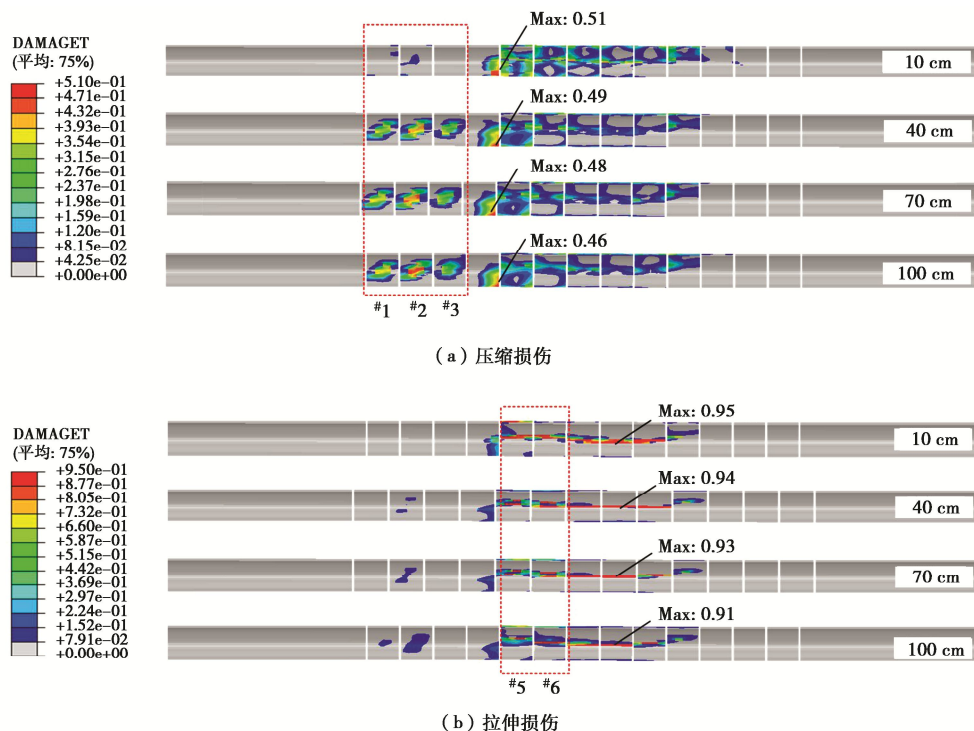


图 18 不同垫层厚度混凝土的损伤云图

Fig. 18 Damages of concrete with different cushion thicknesses

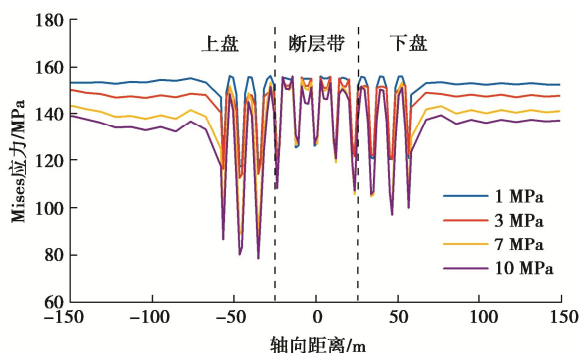


图 19 不同垫层弹模钢管的 Mises 应力变化曲线

Fig. 19 Curves of Mises stress of steel pipes with different cushion elastic moduli

变形量随垫层弹模的变化关系图, 见图 20。由图 20 可知, 随着垫层弹模的增大, 伸缩节最大变形量不断增大, 当垫层弹模为 1, 10 MPa 时, 单个伸缩节的最大变形量分别为 23.3, 28.12 mm, 增大幅度为 20.69%。而左右两端的伸缩节变形量随着垫层弹模的增大呈现出一定的减小趋势, 使得最后累加变形量大小大致相同。

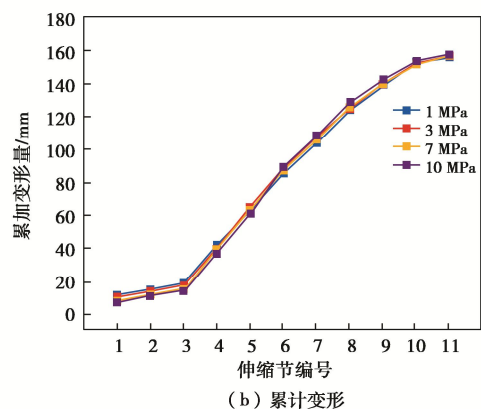
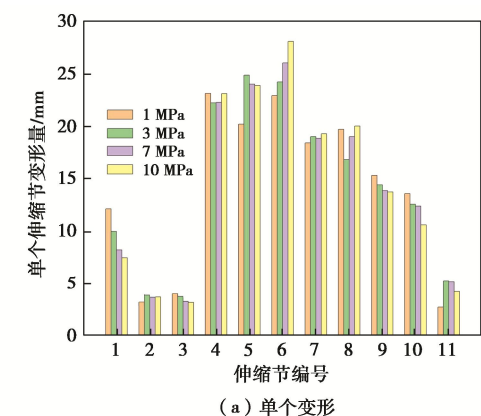


图 20 伸缩节变形量随垫层弹模的变化关系

Fig. 20 Variation of deformation of expansion joint with change in elastic modulus of cushion

当垫层弹模从 1 MPa 增大到 10 MPa 时, 回填混凝土拉伸损伤和压缩损伤数值上均呈现增大趋势, 损

伤的范围略微减小, 变化不太明显。

虽然垫层弹性模量较大时对减小钢管应力有利, 但垫层弹模越大, 其吸收变形的能力越弱, 对断层错动的适应性越差, 因此工程选择时应综合考虑材料的性能及经济性, 在可选择的弹模范围内, 本文建议选取 3~5 MPa 的垫层弹模最为合适。

5 结 论

通过数值模拟分析了设置垫层、伸缩节和柔性连接等工程措施对过断层隧洞结构内力响应和抗断性能的影响, 得到 3 点主要结论。

(1) 经过研究论证了多层柔性叠合衬砌的可行性和合理性, 为有压输水隧洞过活动断层结构设计提供了一种新的方法。

(2) 当垫层厚度为 10~40 cm 时, 垫层厚度越厚, 伸缩节越容易发生变形, 有利于发挥伸缩节适应错动变形的作用; 与此同时较厚的垫层还可以使各节钢管通过管节转动的形式, 更好地适应断层的错动变形。然而, 随着垫层厚度的进一步增加, 钢管 Mises 应力的增幅将达到 9.2%, 并且会增加隧洞开挖直径。因此, 建议根据工程设防断层错动量选择合适厚度的垫层, 厚度以不超过 40 cm 为宜。

(3) 垫层弹性模量从 1 MPa 增大到 10 MPa 时, 钢管应力降幅最大可达 26.3%, 说明垫层弹模的增大有利于降低钢衬应力, 但不利于减小混凝土损伤以及对断层错动的适应性能, 因此, 综合考虑各方面的因素后, 建议选取 3~5 MPa 的垫层弹模最为合适。

参考文献:

- [1] 杨启贵, 张传健, 颜天佑, 等. 长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1188-1210. (YANG Qigui, ZHANG Chuanjian, YAN Tianyou, et al. Integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1188-1210. (in Chinese))
- [2] 何川, 李林, 张景, 等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 427-434. (HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 427-434. (in Chinese))
- [3] RUSSO M, GERMANI G, AMBERG W. Design and construction of large tunnel through active faults: a recent

- application[C]// Proceedings of the International Conference of Tunnelling & Underground Space Use. Istanbul, Turkey, 2002.
- [4] 周光新, 盛 谦, 崔 臻, 等. 走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞破坏机制模型试验[J]. 岩土力学, 2022, **43**(1): 37-50. (ZHOU Guangxin, SHENG Qian, CUI Zhen, et al. Model test of failure mechanism of tunnel with flexible joint crossing active fault under strike-slip fault dislocation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(1): 37-50. (in Chinese))
- [5] 崔光耀, 王李斌, 王明年, 等. 隧道纤维混凝土衬砌抗错断性能模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, **38**(13): 50-56, 80. (CUI Guangyao, WANG Libin, WANG Mingnian, et al. Model tests for anti-breaking performance of a fiber reinforced concrete tunnel lining[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, **38**(13): 50-56, 80. (in Chinese))
- [6] 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, 1041. (JIANG Shuping, LI Peng, LIN Zhi. Design strategies of breaking resistance of tunnels crossing active faults zone[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, **27**(6): 1034-1036, 1041. (in Chinese))
- [7] 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(下半月), 2015, **15**(2): 167-168, 200. (REN Xingpu, LI Xiaobin, LI Weigong. Design of diversion tunnel crossing active fault in Ximahe second-stage Saizhu hydropower station[J]. China Water Transport, 2015, **15**(2): 167-168, 200. (in Chinese))
- [8] 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**(增刊 1): 3411-3421. (ZHAO Kun, CHEN Weizhong, ZHAO Wusheng, 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): 3411-3421. (in Chinese))
- [9] 苏 凯, 常智慧, 崔金鹏, 等. 深埋隧洞开挖数值模拟分析的纵向模型范围研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 2): 706-714. (SU Kai, CHANG Zhihui, CUI Jinpeng, et al. Study of model longitudinal range in numerical simulation of deep tunnel excavations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 706-714. (in Chinese))
- [10] 石长征, 石雅竹, 伍鹤皋, 等. 长距离埋地钢管中波纹管伸缩节的作用研究[J]. 特种结构, 2021, **38**(5): 64-68. (SHI Changzheng, SHI Yazhu, WU Hegao, et al. Function of bellows expansion joint in long-distance buried steel pipe[J]. Special Structures, 2021, **38**(5): 64-68. (in Chinese))
- [11] 史鑫宇, 姚 燕, 王 玲, 等. 基于单轴拉压模拟的CDP模型参数影响[J]. 建筑结构, 2021, **51**(增刊 2): 999-1007. (SHI Xinyu, YAO Yan, WANG Ling, et al. The influence of CDP model parameters based on the numerical simulation of uniaxial loading test[J]. Building Structure, 2021, **51**(S2): 999-1007. (in Chinese))
- [12] 程展林, 左永振, 姜景山, 等. 粗粒料试验中界面摩擦阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 331-334. (CHENG Zhanlin, ZUO Yongzhen, JIANG Jingshan, et al. Experimental research on interface friction in granular materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 331-334. (in Chinese))
- [13] 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 Xuezheng, WANG Xulin, LIN Lianglun. 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))
- [14] 马亚丽娜, 崔 臻, 盛 谦, 等. 正断层错动对围岩-衬砌体系响应影响的离散-连续耦合模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 2088-2097. (MA Yalina, CUI Zhen, SHENG Qian, et al. Influences of normal fault dislocation on response of surrounding rock and lining system based on discrete-continuous coupling simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 2088-2097. (in Chinese))
- [15] 周光新, 崔 臻, 盛 谦, 等. 活动断裂错动位移模式对隧洞变形与内力的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, **41**(6): 1323-1330, 1349. (ZHOU Guangxin, CUI Zhen, SHENG Qian, et al. Study on the deformation and internal force of the tunnel under the displacement pattern of the active fault zone[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, **41**(6): 1323-1330, 1349. (in Chinese))