

张宇,王洛媛,安韶,等.基岩正断层错动浅埋隧道铰接式衬砌损伤响应与减灾效果[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(5):578-589.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20220042
ZHANG Yu, WANG Luoyuan, AN Shao, et al. Damage response and disaster reduction effect of articulated lining in shallow buried tunnels subject to bedrock normal fault displacement[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 578-589. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20220042

基岩正断层错动浅埋隧道铰接式衬砌损伤响应与减灾效果

张宇¹, 王洛媛¹, 安韶², 陶连金³, 赵旭³

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 102627;
2. 海军研究院, 北京 100071; 3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 针对土质浅埋隧道下伏基岩断层错动威胁结构运营安全的问题, 基于已有试验, 建立基岩正断层错动下浅埋隧道的数值模型, 结合混凝土损伤塑性模型(CDP)研究铰接式节段隧道结构的损伤响应规律、耗能机理和减灾效果, 探讨铰接设计柔性接头的纵向位置、连接方式、连接长度、弹性模量以及节段衬砌长度对减灾效果的影响。研究表明: 铰接设计的柔性接头可通过变形耗能显著降低断层错动对衬砌的损伤; 断层错动位置与柔性接头重合时减灾效果最佳, 与节段衬砌中点重合时减灾效果较弱; 增大接头长度、减小弹性模量或减小节段衬砌长度可进一步提升减灾效果。研究结论为浅埋隧道铰接抗断设计提供理论依据。

关键词: 正断层; 浅埋隧道; 铰接设计; 柔性接头; 减灾效果; 损伤响应

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0578-12

Damage response and disaster reduction effect of articulated lining in shallow buried tunnels subject to bedrock normal fault displacement

ZHANG Yu¹, WANG Luoyuan¹, AN Shao², TAO Lianjin³, ZHAO Xu³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102627, China; 2. Naval Research Academy, Beijing 100071, China; 3. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on existing experiment, a numerical model of shallow buried tunnels under the influence of bedrock normal fault displacement is established to address the threat to structural operation safety caused by underlying bedrock fault displacement in soil shallow buried tunnels. Combined with the Concrete Damage Plasticity (CDP) model, the damage response law, energy dissipation mechanism, and disaster reduction effect of articulated segmented tunnel structure were investigated. The influence of longitudinal position, connection type, connection length, elastic modulus of articulated design flexible joints and segmented lining length on disaster reduction effect was explored. The results demonstrate that the flexible joints in articulated design can significantly reduce lining damage through deformation energy dissipation; the best disaster reduction effect is achieved when the fault displacement position coincides with the flexible joint, while the effect is weaker when it coincides with the midpoint of the lining segment; increasing the joint length, reducing the elastic modulus, or shortening the segmented lining length can further enhance the disaster reduction effect. The research conclusion can provide theoretical basis for anti-fault articulated designs in shallow-buried tunnel.

Keywords: normal fault; shallow tunnel; articulated design; flexible joint; disaster reduction effect; damage response

收稿日期: 2025-02-06 修回日期: 2025-04-01 接受日期: 2025-04-13 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(42402283); 北京市教委科研项目(KM202410016016)

作者简介: 张宇(1993-), 男, 山西太原人, 博士, 副教授, 主要从事地下工程施工方面的研究。E-mail: zhangyu93@bucea.edu.cn

0 引言

城市轨道交通是公共基础设施的重要组成部分,对经济发展和社会稳定具有深远的战略意义^[1]。国内诸多城市位于高烈度地震区,部分城市如北京、太原、乌鲁木齐等还存在多条活动断裂带,地下工程施工面临严峻的挑战^[2-3]。虽然各国出台的相关法律法规均规定,设计地上和地下构筑物时应避免穿越活动断裂带,但由于隧道具有明显的线性特征,设计和施工过程中不得不穿越活动断裂带及其影响区域。研究穿越活动断裂带的浅埋地下结构的力学响应特性并提出相应的抗断设计方法,对防止结构整体倒塌、保障生命安全具有重要的现实意义。

为保障隧道的安全运营,对于穿越活动断裂带的隧道结构需制定合理的设防策略。目前,学者对抗断减灾设计法开展了大量的研究。SHAHIDI等^[4]针对穿越活动断裂带的伊朗输水隧道,采用铰接设计法,在节段衬砌间填充塑性混凝土柔性材料,以适应断层错动引起的变形,并通过数值模拟确定了节段衬砌长度和柔性连接宽度。JALALI^[5]以穿越 Pourkan-Verdij 断层的伊朗 Karaj 输水隧洞为研究对象,将断层影响范围内的混凝土衬砌划分为 1.3 m 长的独立节段,并对节段间的接缝进行密封处理。胶州湾第二海底隧道^[6]和滇中引水^[7]等工程均采用柔性接头的抗断设计法。蒋树屏等^[8]阐述了穿越活动断层隧道结构的超挖和铰接抗错断设计的工作原理,并总结了相应的抗断设计方法。刘学增等^[9-10]通过模型试验研究设置柔性接头的跨断层隧道的变形特性,验证了柔性接头在减灾方面的有效性。孙飞等^[11]通过开展地铁隧道分段式衬砌结构穿越倾角为 60° 正断层的大型剪切错动模型试验,研究正断层黏滑错动下隧道结构的响应规律。王明年等^[12]、崔光耀等^[13-14]通过断层黏滑错动模型试验,研究减震缝与减震层的减震效果。孙凤伯等^[15]通过理论推导得出隧道最大设缝间距并通过实验进行验证。CUI 等^[16]通过模型试验研究设置减震层的抗断方法,研究表明当减震层分别设置在围岩与初衬之间、初衬与二次衬砌之间时,抗断效果最佳。杜修力等^[17]通过自主设计的试验装置研究走滑断层运动下采用铰接设计的隧道力学响应规律及破坏模式,发现铰接设计可显著降低隧道结构的力学响应,减灾效果显著。

目前,抗断设计主要采用超挖、铰接及减震层设计法,其中,铰接法在穿越活动断裂带以及

地质不稳定区域的隧道施工中应用最为广泛,其工作原理^[8]如下:将整体隧道分隔成若干相对独立的节段衬砌,在连接处填充刚度较小的柔性材料(例如纤维混凝土、橡胶止水带和塑性混凝土等),通过柔性接缝处的变形来消纳断层错动引起的剪切位错变形,从而降低隧道结构的拉伸、压缩、剪切以及弯曲损伤,保障隧道结构灾后主体功能完整,降低修复成本。本文基于已有离心模型试验,构建浅埋隧道穿越正断层的三维数值模型,通过模型试验来验证数值模型的可靠性,结合混凝土损伤塑性模型(CDP),探究采用铰接式抗断措施的隧道的损伤响应规律、耗能机理和减灾效果,并对铰接式抗断措施的关键设计参数进行敏感性分析,以期为跨基岩正断层错动下浅埋隧道抗断设计提供参考。

1 有限元模型的建立与验证

1.1 模型建立

断层运动对隧道的影响主要分为两种类型:①断层运动由基岩处传播至地表,引起显著的土层破裂变形,严重威胁位于断层破裂路径附近的隧道;②隧道直接穿越位于基岩处的断层破碎带,断层滑动面处的巨大位移导致隧道结构严重损毁。针对第①类情况,CAI等^[18]通过离心机试验分析了正断层错动作用下砂土地层隧道结构的力学响应特性,发现隧道沿竖向产生压缩变形,沿水平向产生拉伸变形,推测隧道拱腰处混凝土易开裂。在断层作用下,隧道结构还会伴随剪切、压缩、弯曲以及扭曲破坏^[19]。文献[18]的离心机试验装置及断层纵剖面示意图1。该试验通过液压加载装置实现断层错动,断层倾角为 70°,断层走向与隧道轴向垂直。ANASTASOPOULOS 等^[20]研究表明,采用有限元方法进行断层错动分析所得结果更符合模型试验结果。因此,本文采用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,模型参数与 CAI 等^[18]离心机试验参数一致,见表 1。土-隧道三维有限元模型见图 2。

表 1 数值模型物理力学参数
Tab.1 physical and mechanical parameters of numerical model

材料	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	剪胀角 /(°)
砂土	1 533	0.036	0.20	0	31	10
衬砌	2 500	70.000	0.35			

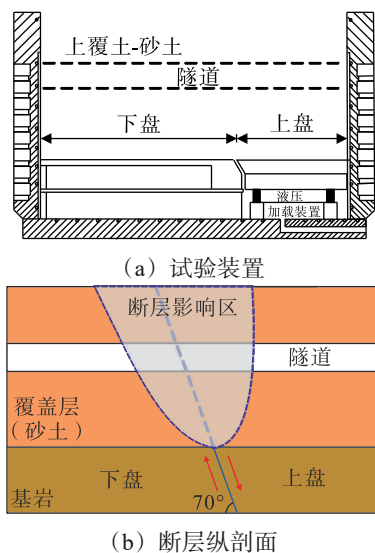


图1 离心机试验装置及断层纵剖面示意
Fig.1 schematic of centrifugal testing device and fault longitudinal section

土-隧道三维有限元模型尺寸为 57.5 m (长) × 17.5 m (宽) × 25.0 m (高), 隧道外径为 5.0 m, 厚度为 0.36 m, 埋深为 7.5 m, 上下盘纵向长度之

比为 1 : 2。砂土采用理想弹塑性模型并服从 Mohr-Coulomb 破坏准则, 衬砌采用线弹性模型。砂土与隧道之间采用面面接触, 法向采用硬接触, 切向采用罚函数摩擦接触, 摩擦系数为 0.24^[21]。

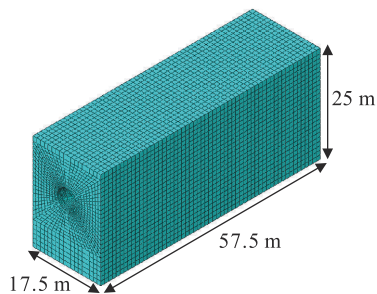
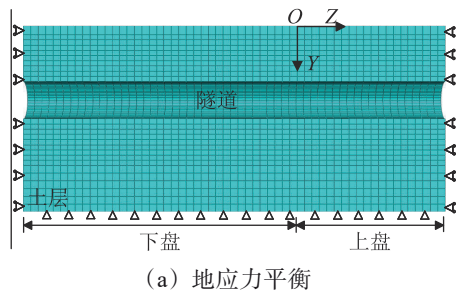


图2 土-隧道三维有限元模型

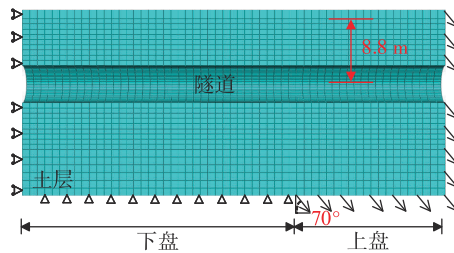
Fig.2 three dimensional finite element model of soil-tunnel

1.2 边界条件与模型验证

边界条件设置见图 3。在设置地应力平衡时, 模型侧边界施加法向约束, 底部施加固定约束, 顶部为自由边界。在施加断层位移^[20]时, 释放上盘底部及侧向边界的法向约束, 并在相应位置施加位移载荷来模拟断层错动。



(a) 地应力平衡



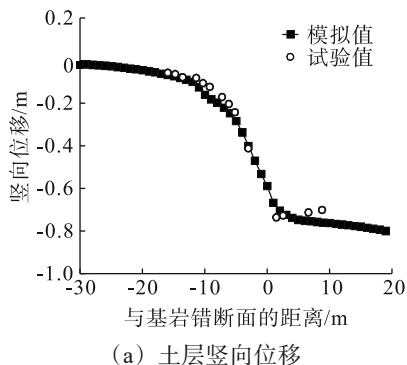
(b) 施加断层位移

图3 模型边界条件

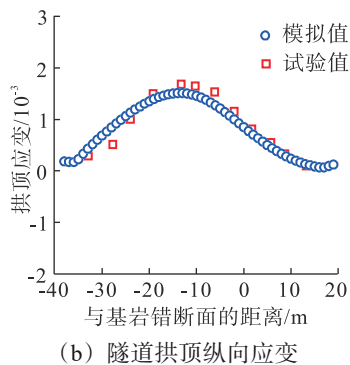
Fig.3 boundary conditions of model

对上盘施加竖向位移 0.8 m, 相应的水平位移为 0.291 m。距隧道轴心 8.8 m 处土层的竖向位移及拱顶纵向应变见图 4, 其中, 试验值取自文献[18]。

由图 4 可以看出, 土层竖向位移和隧道拱顶纵向应变与模型试验结果均较为吻合, 验证了数值模型的可靠性。



(a) 土层竖向位移



(b) 隧道拱顶纵向应变

图4 土层竖向位移及隧道拱顶纵向应变

Fig.4 vertical displacement of soil and longitudinal strain of tunnel arch crown

混凝土塑性损伤参数见表 2。由于客观条件限制, 模型试验无法全面反映隧道的纵向响应。孙飞等^[11]研究表明, 在正断层错动作用下, 上盘内隧道拱顶纵向压缩, 而下盘内隧道拱顶纵向拉伸。为了充分反映隧道的力学响应特性, 根据文献[22], 最终确定数值模型尺寸为 120 m (长) ×30 m

(宽) ×25 m (高)。鉴于弹性模型无法考虑正断层错动大变形条件下混凝土结构在塑性阶段的刚度退化情况, 且无法量化隧道结构的破坏程度, 本文采用混凝土损伤塑性模型来模拟正断层错动作用下隧道的损伤破坏。混凝土等级为 C30, 密度为 2 500 kg/m³, 弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.2。

表 2 混凝土损伤塑性参数
Tab.2 damage plasticity parameters of concrete

压缩应力/MPa	非弹性应变/10 ⁻³	压缩损伤因子	拉伸应力/MPa	开裂应变/10 ⁻³	拉伸损伤因子
5.82	0	0	1.26	0	0
20.10	0.801 8	0.357 7	2.01	0.028 2	0.225 6
17.91	1.603 0	0.519 4	1.18	0.160 8	0.546 2
14.41	2.519 6	0.646 0	0.81	0.272 9	0.724 6
11.66	3.411 2	0.731 5	0.63	0.378 9	0.815 0
10.11	4.063 0	0.777 3	0.53	0.482 4	0.866 1
8.21	5.126 4	0.831 3	0.46	0.584 8	0.897 9
6.65	6.378 2	0.873 5	0.40	0.686 6	0.919 2
5.29	8.023 7	0.908 7	0.36	0.787 9	0.934 1
4.58	9.247 4	0.926 0	0.33	0.888 9	0.945 1
4.29	9.857 1	0.932 9	0.31	0.989 7	0.953 4

2 铰接设计耗能机理及减灾效果

2.1 节段衬砌与柔性连接长度确定

SHAHIDI 等^[4]研究表明隧道最大节段衬砌长度应小于等于正、负弯矩最大值之间的距离。隧道纵向弯矩与拱顶竖向位移见图 5。图 5 (b) 中红色箭头所指位置处基岩发生错动。由图 5 可知, 隧道

拱顶竖向位移与土层竖向位移一致, 弯矩沿纵向呈反对称分布, 在错动面两侧 33 m 范围内变化剧烈, 之后逐渐减小并趋于稳定。假设正、负弯矩最大值对应的两点之间距离为 L_M , 节段衬砌长度为 L_j , 柔性接头长度为 L_R , 根据文献[4], 可得 $L_j \leq L_M=33\text{ m}$ 。

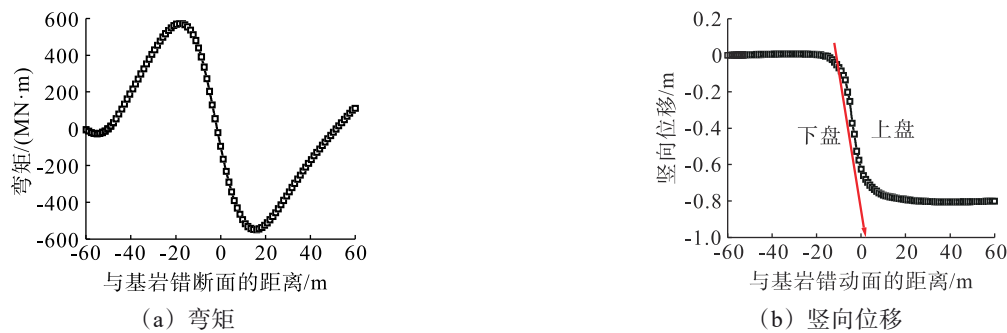


图 5 隧道纵向弯矩与拱顶竖向位移

Fig.5 longitudinal bending moment and vertical displacement of arch crown

铰接式节段隧道变形示意图 6。断层错动竖向位移、节段衬砌长度及柔性接头长度满足

$$L_R = \frac{\Delta u}{\varphi_u L_j}, \tag{1}$$

式中: Δu 为断层错动竖向位移, m; φ_u 为衬砌发生弯曲的极限弯曲曲率; L_R 为柔性接头长度, m。

参考李鹏^[23]的研究结果, φ_u 取 0.015。考虑目前混凝土衬砌台车的长度一般为 6~12 m, 假设数

值模型中节段衬砌长度 L_j 与断层错动竖向位移 Δu 分别为 12 m 和 0.2 m, 计算可得柔性接头长度为 1 m。柔性接头内径、外径及壁厚尺寸与隧道衬砌横断面保持一致。

为确定隧道纵向设防总长度, 将纵向转角定义为沿隧道纵向每延米竖向位移的变化量, 转角示意图 7。其中, 点 A、点 B 为隧道初始位置; 点 A'、点 B' 为断层错动作用下隧道发生变形后的

位置。隧道纵向转角为

$$\theta = \frac{u_2 - u_1}{L_{AB}}, \quad (2)$$

式中, u_2 、 u_1 、 L_{AB} 分别为 BB' 、 AA' 、 AB 两点之间的距离。

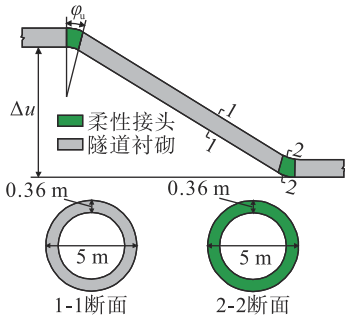


图 6 铰接式节段隧道变形示意

Fig.6 deformation schematic of articulated tunnel

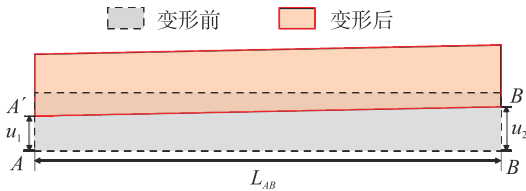


图 7 转角示意

Fig.7 schematic of deflection angle

根据图 5 (b), 得到隧道转角纵向分布曲线, 见图 8。断层错动穿过柔性接头中点工况见图 9。

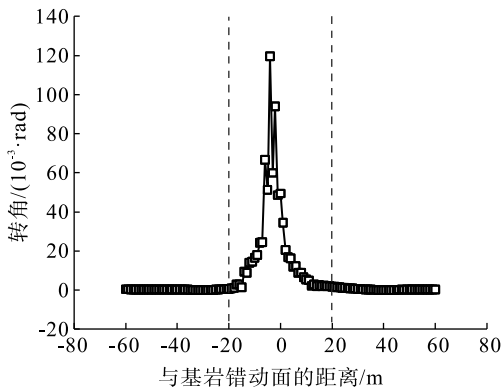


图 8 隧道转角纵向分布

Fig.8 longitudinal distribution of tunnel rotation angle

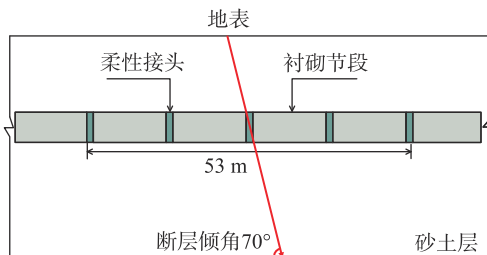


图 9 断层错动穿过柔性接头中点工况

Fig.9 case of fault displacement passing through the midpoint of flexible joint

由图 8 可知, 隧道变形主要集中在纵向坐标为 $-20 \sim 20$ m 内。由于断层错动时衬砌纵向转角最大值位于纵坐标为 -5 m 处, 应在此处设置柔性接头。考虑到断层错动的影响范围, 在纵向坐标为 $-31 \sim 22$ m 内布设节段式衬砌, 铰接设计总长度为 53 m。

2.2 柔性接头参数

柔性连接材料应具有较高的抗拉强度与韧性, 从而保证在应变较大的情况下不发生脆性破坏, 继续保持一定的强度与防水性。在数值模型中, 考虑到柔性连接材料韧性较好, 因此采用弹性模型^[24]进行模拟。柔性接头与节段衬砌之间采用绑定连接方式。柔性连接材料参数如下: 容重为 $1.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$; 弹性模量为 7.8 MPa ; 泊松比为 0.47 。

2.3 铰接设计耗能机理分析

断层错动本质上是能量释放过程, 模型结构内部各种能量相互转换, 总能量守恒。分别设置整体式隧道和铰接式节段隧道两种数值模拟工况, 施加正断层竖向位移 0.200 m, 水平向位移 0.073 m。在相同比移下, 作用在整体式隧道和铰接式节段隧道的能量是相等的。通过比较整体式、铰接式节段隧道结构的损伤耗能, 可间接得到柔性接头吸收的能量, 从而明确铰接式设计法的减灾机理。

整体式与铰接式节段隧道结构损伤耗能对比见图 10。由图 10 可知, 随着正断层竖向位移的增大, 整体式与铰接式节段隧道结构的损伤耗能可分为 3 个发展阶段, 即无损伤耗能阶段、缓慢损伤耗能阶段和快速损伤耗能阶段。对于整体式隧道, 当正断层竖向位移为 $0 \sim 0.010$ m 时, 衬砌结构处于无损伤耗能阶段, 保持弹性工作状态; 当正断层竖向位移为 $0.010 \sim 0.030$ m 时, 衬砌结构处于缓慢损伤耗能阶段, 开始发生损伤破坏; 当正断层竖向位移超过 0.030 m 后, 衬砌结构进入快速损伤耗能阶段, 损伤速率开始加快。当正断层竖向位移达到 0.200 m 时, 衬砌结构损伤耗能达到 $39\ 903.1 \text{ J}$ 。对于铰接式节段隧道, 当正断层竖向位移为 $0 \sim 0.043$ m 时, 衬砌结构处于无损伤耗能阶段; 当正断层竖向位移为 $0.043 \sim 0.120$ m 时, 衬砌结构进入缓慢损伤耗能阶段, 柔性接头通过自身变形吸收了断层错动作用在衬砌结构上的能量; 当正断层竖向位移超过 0.120 m 后, 衬砌结构损伤耗能急剧增加; 当正断层竖向位移达到 0.200 m 时, 衬砌结构损伤耗能达到最大值, 为 $17\ 040.4 \text{ J}$ 。

通过对比不同正断层竖向位移下整体式、铰接式节段隧道结构的损伤耗能可以看出, 当正断层竖向位移一定时, 铰接式节段隧道结构的损伤

耗能远小于整体式隧道,这是由于柔性接头可通过自身变形吸收断层错动作用在衬砌结构上的能量,表明通过设置合理的柔性接头,可有效削弱断层错动对隧道结构造成的损伤。

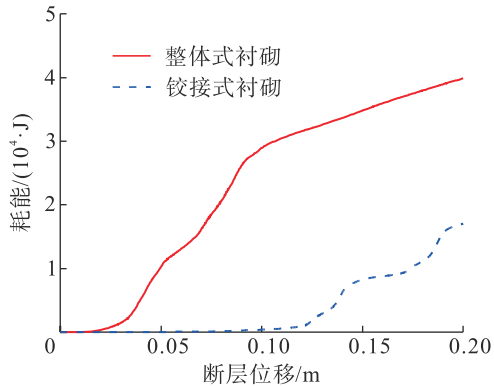


图10 整体式与铰接式节段隧道结构损伤耗能对比

Fig.10 comparison of damage energy dissipation between integral and articulated segmented tunnel structure

2.4 铰接设计减灾效果分析

整体式与铰接式节段隧道结构损伤云图对比见图11。由图11(a)可知,隧道等效塑性应变沿下盘拱顶向上盘拱底分布,与正断层错动轨迹一致。整体式隧道等效塑性应变的最大值为 5.277×10^{-3} ,出现在纵坐标为-5 m的拱腰处。设置铰接接

头后,衬砌结构等效塑性应变最大值为 8.826×10^{-4} ,减小了83.27%。铰接式节段隧道塑性应变损伤范围显著缩小,且主要集中在铰接接头附近。

当C30混凝土达到极限抗拉强度(2.01 MPa)或极限抗压强度(20.1 MPa)时,对应的拉伸、压缩损伤因子分别为0.225 6与0.357 7(见表2)。可认为拉伸损伤因子大于等于0.225 6的单元为拉伸损伤单元,即拉伸损伤体积,压缩损伤因子大于等于0.357 7的单元为压缩损伤单元,即压缩损伤体积。整体式隧道拉伸损伤体积为146.47 m^3 ,压缩损伤体积为13.50 m^3 ,拉伸破坏范围大于压缩破坏范围。由图11(b)和图11(c)可知,虽然铰接式节段隧道与整体式隧道结构的最大拉伸损伤因子均为0.953 4,但与整体式隧道相比,铰接式节段隧道拉伸损伤体积为61.78 m^3 ,减小了57.74%;最大压缩损伤因子为0.471 8,减小了46.31%,拉伸损伤体积为0.32 m^3 ,减小了97.6%。由图11(d)可知,剪应变沿隧道轴线两侧对称分布,最大剪应变出现在拱腰或拱脚处。整体式隧道剪应变的最大值为 1.29×10^{-2} ,铰接式节段隧道剪应变的最大值为 6.815×10^{-4} ,减小了94.72%。由此可见,设置柔性接头有利于衬砌结构更好地适应断层错动变形,可有效削弱断层错动对结构的破坏。

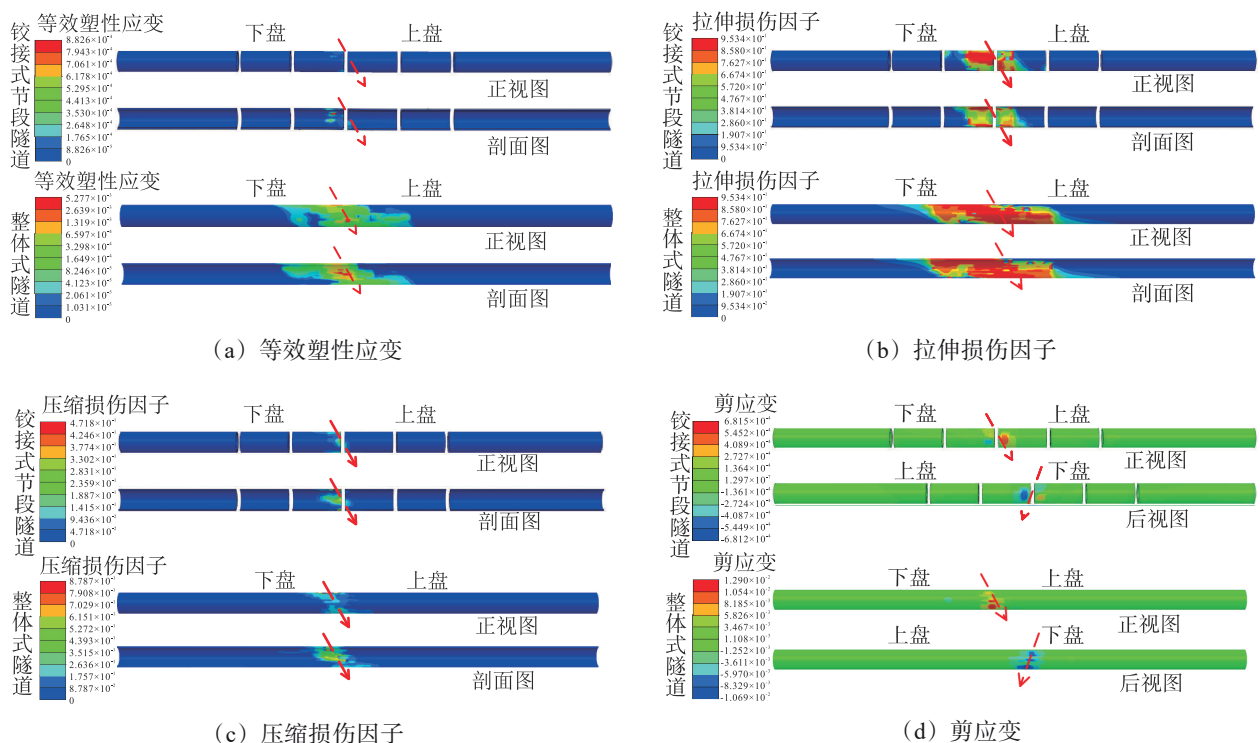


图11 整体式与铰接式节段隧道结构损伤云图对比

Fig.11 comparison of damage cloud maps between integral and articulated segmented tunnel structure

3 铰接设计减灾效果影响因素分析

3.1 柔性接头纵向位置

考虑到断层错动面与柔性接头纵向位置的关系可能对隧道破坏程度产生影响,将断层错动面设置在节段衬砌中点处,见图 12。施加正断层竖向位移 0.200 m,水平向位移 0.073 m,断层错动穿过节段衬砌中点工况见图 13。

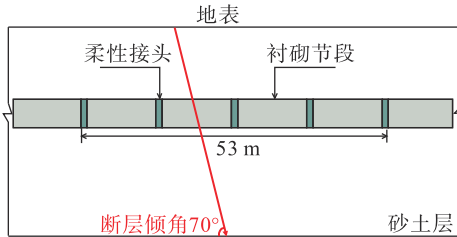


图 12 断层错动穿过节段衬砌中点工况

Fig.12 case of fault displacement passing through the midpoint of the segmented lining

令工况 1 为断层错动面通过柔性接头,工况 2 为断层错动面通过节段衬砌中点,工况 3 为整体式隧道。不同工况下损伤指标对比见图 14。由图 13

和图 14 可知,与工况 3 相比,工况 2 衬砌结构等效塑性应变最大值为 3.512×10^{-3} ,减小了 33.45%;剪应变最大值为 1.251×10^{-2} ,减小了 3.02%;最大拉伸损伤因子为 0.953 4,与工况 3 相同;拉伸损伤体积为 54.83 m^3 ,减小了 62.57%;最大压缩损伤因子为 0.804 2,减小了 8.27%;压缩损伤体积为 3.01 m^3 ,减小了 76.93%。与工况 1 相比,工况 2 衬砌结构等效塑性应变最大值增大了 297.92%;剪应变最大值增大了 1 735.66%;最大拉伸损伤因子相等,拉伸损伤体积减小了 12.68%;最大压缩损伤因子增大了 70.45%,压缩损伤体积增大了 840.62%。通过以上分析可知,与断层错动面通过柔性接头相比,当断层错动面通过节段衬砌中点时,隧道损伤程度较高。产生这种现象的原因是当柔性接头设置在断层错动最不利位置(工况 1)时,能最大限度地消耗断层错动产生的能量,显著减小隧道的剪应变。断层错动面通过节段衬砌中点时,与整体式隧道相比,剪应变略有减小。为最大程度地降低断层错动作用下隧道的破坏程度,应在断层错动位置设置柔性接头。

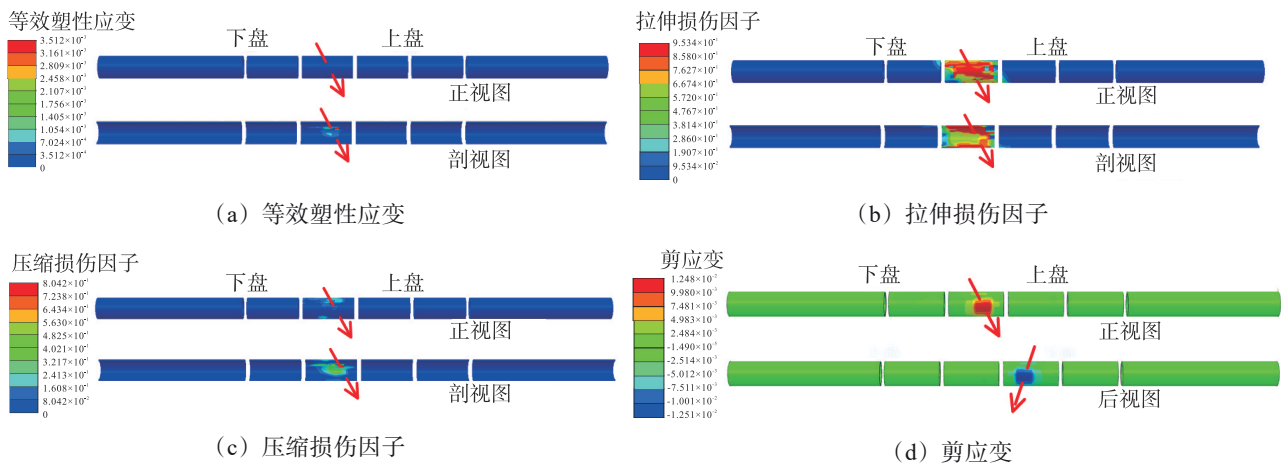


图 13 断层滑动面通过节段衬砌中点的结构损伤云图

Fig.13 structural damage cloud map of fault sliding surface passing through the midpoint of segmented lining

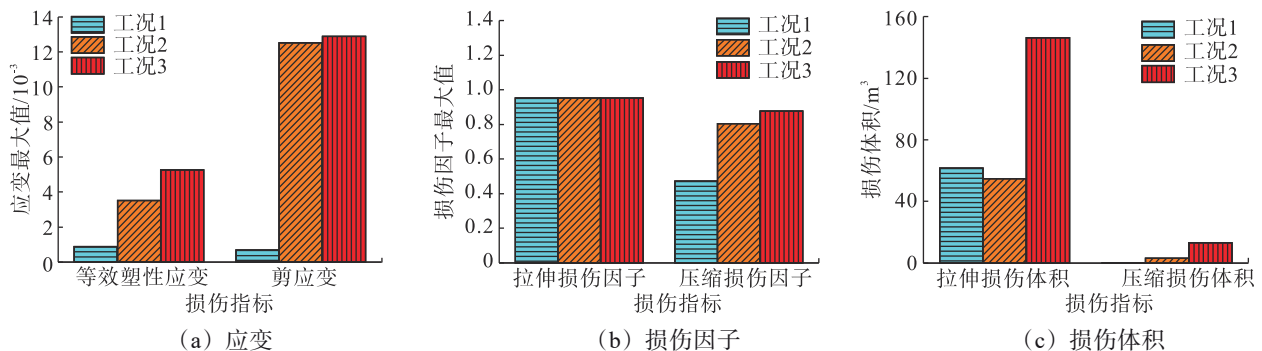


图 14 不同工况下损伤指标对比

Fig.14 comparison of damage indicators under different cases

3.2 柔性接头连接方式

考虑到实际断层错动过程中,柔性接头与节段衬砌可能发生相对位移,部分学者将柔性接头与节段衬砌的连接方式设为摩擦接触^[25]。本文将柔性接头与节段衬砌之间设置为摩擦接触,摩擦系

数取0.2,其他参数保持不变。为防止模型出现不收敛问题,减小施加的正断层竖向位移,取0.14 m,相应的水平位移为0.051 m,断层错动位置通过柔性接头。不同连接方式下隧道的塑性损伤云图见图15,损伤指标对比见图16。

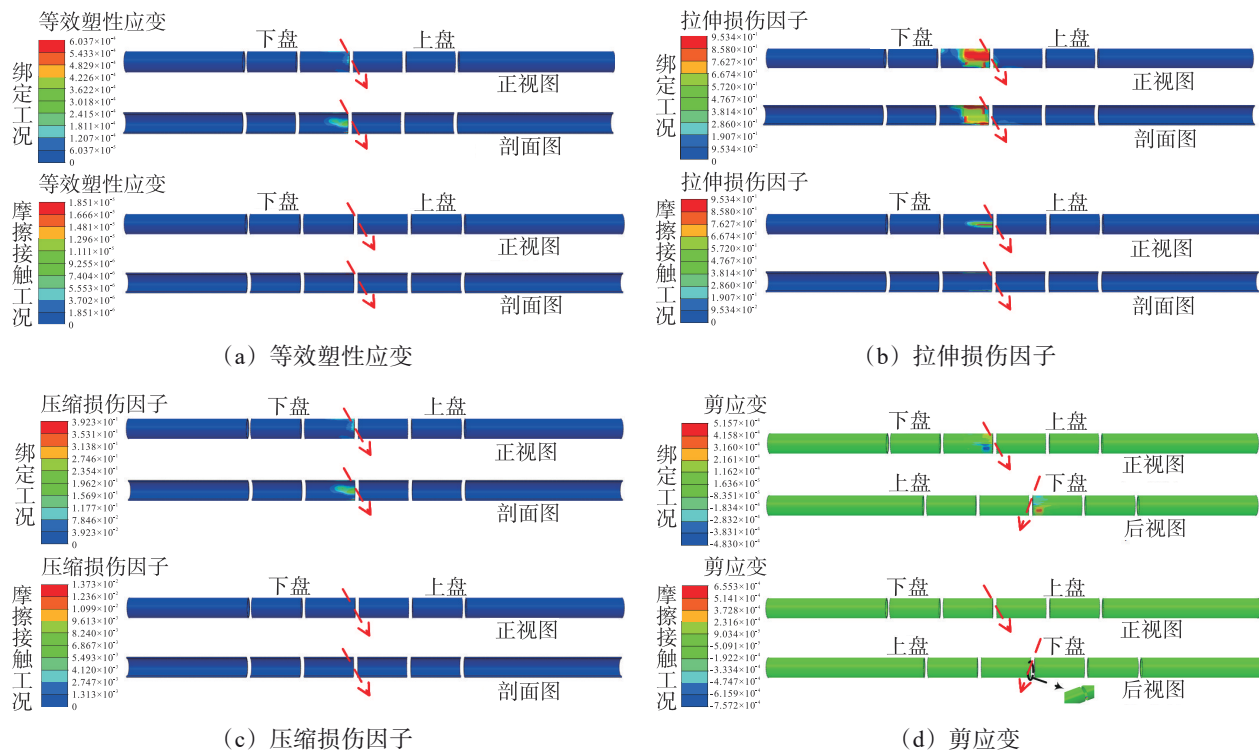


图15 不同连接方式下隧道结构损伤云图对比

Fig.15 comparison of damage cloud maps of tunnel structure under different connection methods

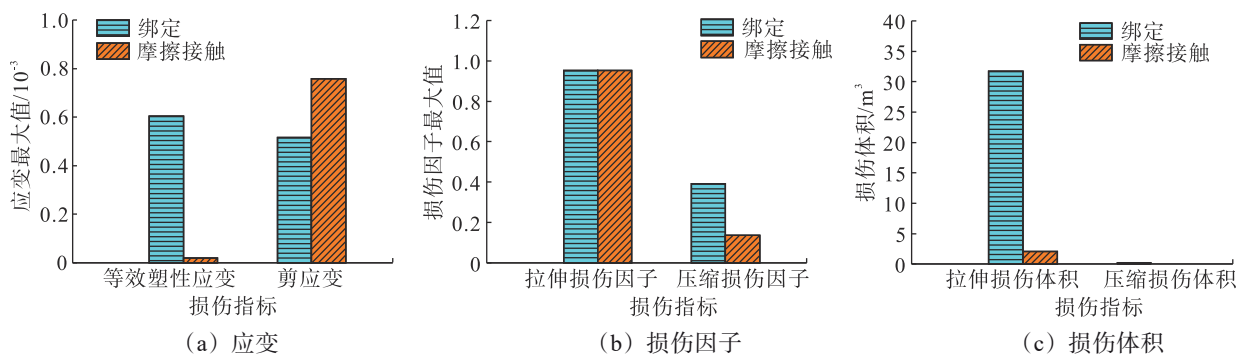


图16 不同连接方式下损伤指标对比

Fig.16 comparison of damage indicators under different connection method

由图15和图16可知,绑定与摩擦接触两种连接方式下等效塑性应变的最大值分别为 6.037×10^{-4} 和 1.851×10^{-5} ;剪应变的最大值分别为 5.157×10^{-4} 和 7.572×10^{-4} ;最大拉伸损伤因子均为0.953 4,拉伸损伤体积分别为 31.7 m^3 和 2.09 m^3 ;最大压缩损伤因子分别为0.392 3和0.137 3;压缩损伤体积分别为 0.049 m^3 和0。对比可知,节段衬砌之间设置为摩擦接触时,隧道衬砌结构所受损伤更小。这是

由于摩擦接触连接方式下允许柔性接头与节段衬砌发生相对滑动,柔性接头可吸收较多的地层变形。

绑定与摩擦接触两种连接方式的特点如下:绑定连接方式下,衬砌结构受损严重,模型容易收敛;摩擦接触连接方式下,衬砌结构受损较轻,模型不易收敛。通过以上分析可知,在工程设计中,若摩擦接触工况下模型不收敛,可考虑采用

绑定连接的方式进行模拟计算,这样既符合包络设计原则,也利于模型收敛。

3.3 柔性接头弹性模量

取柔性接头弹性模量 E_j 为 78 MPa、780 MPa,

施加正断层竖向位移 0.200 m,水平向位移 0.073 m,错动位置通过柔性接头,不同柔性接头弹性模量下各损伤指标云图见图 17,损伤指标对比见图 18。

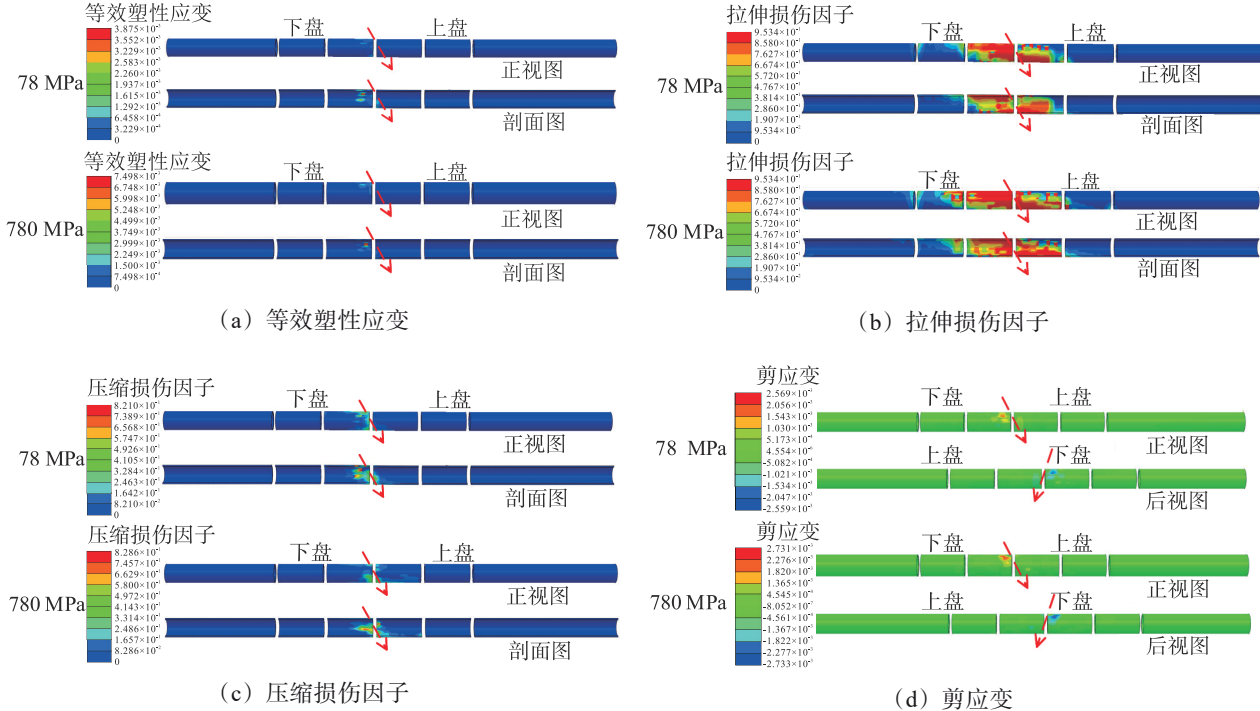


图 17 不同柔性接头弹性模量下隧道结构损伤云图对比

Fig.17 comparison of damage cloud maps of tunnel structure under different elastic moduli of flexible joints

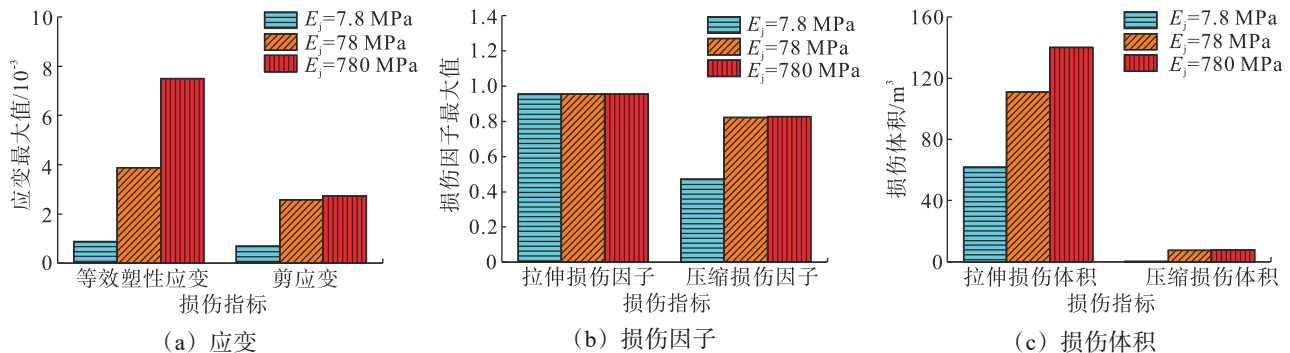


图 18 不同柔性接头弹性模量下损伤指标对比

Fig.18 comparison of damage indicators under different elastic moduli of flexible joints

由图 17 和图 18 可知,与 E_j 为 7.8 MPa 的工况相比, E_j 为 78 MPa、780 MPa 工况下,等效塑性应变最大值分别为 3.875×10^{-3} 和 7.498×10^{-3} ,分别增大了 339.04% 和 749.53%;剪应变最大值分别为 2.569×10^{-3} 和 2.733×10^{-3} ,分别增大了 276.96% 和 301.03%;最大拉伸损伤因子均为 0.953 4;拉伸损伤体积分别为 110.88 m^3 和 140.14 m^3 ,分别增大了 79.49% 与 126.83%;最大压缩损伤因子分别为 0.821 0 和 0.828 6,分别增大了 74.01% 与 75.63%;压缩损伤体积分别为 7.62 m^3 和 7.94 m^3 ,分别增大了 2 281.25% 和

2 381.25%。通过对比可知,随着柔性接头弹性模量的增大,柔性接头吸收的断层错动变形减少,隧道损伤破坏程度较高,损伤体积增大。

3.4 节段衬砌长度

取节段衬砌长度为 4 m、8 m,施加正断层竖向位移 0.200 m,水平向位移 0.073 m,断层错动位置通过柔性接头。不同节段衬砌长度下隧道塑性损伤云图见图 19,损伤指标对比见图 20。由图 19 和图 20 可知,与节段衬砌长度为 12 m 工况相比,

节段衬砌长度为8 m、4 m工况下,等效塑性应变最大值分别为 7.600×10^{-4} 和 6.178×10^{-4} ,分别减小了13.89%和30.00%;剪应变最大值分别为 7.457×10^{-4} 和 9.041×10^{-4} ,分别增大了20.56%和46.34%;最大拉伸损伤因子均为0.953 4;拉伸损伤体积分别为 49.83 m^3 与 22.99 m^3 ,分别减小了19.34%和

62.79%;最大压缩损伤因子分别为0.436 9和0.396 3,分别减小了7.39%和16.00%;压缩损伤体积分别为 0.22 m^3 和 0.12 m^3 ,分别减小了31.25%和62.50%。通过对比可知,随着节段衬砌长度的减小,隧道损伤破坏程度减弱,损伤体积减小。在实际工程中,应尽量选择短型柔性节段衬砌。

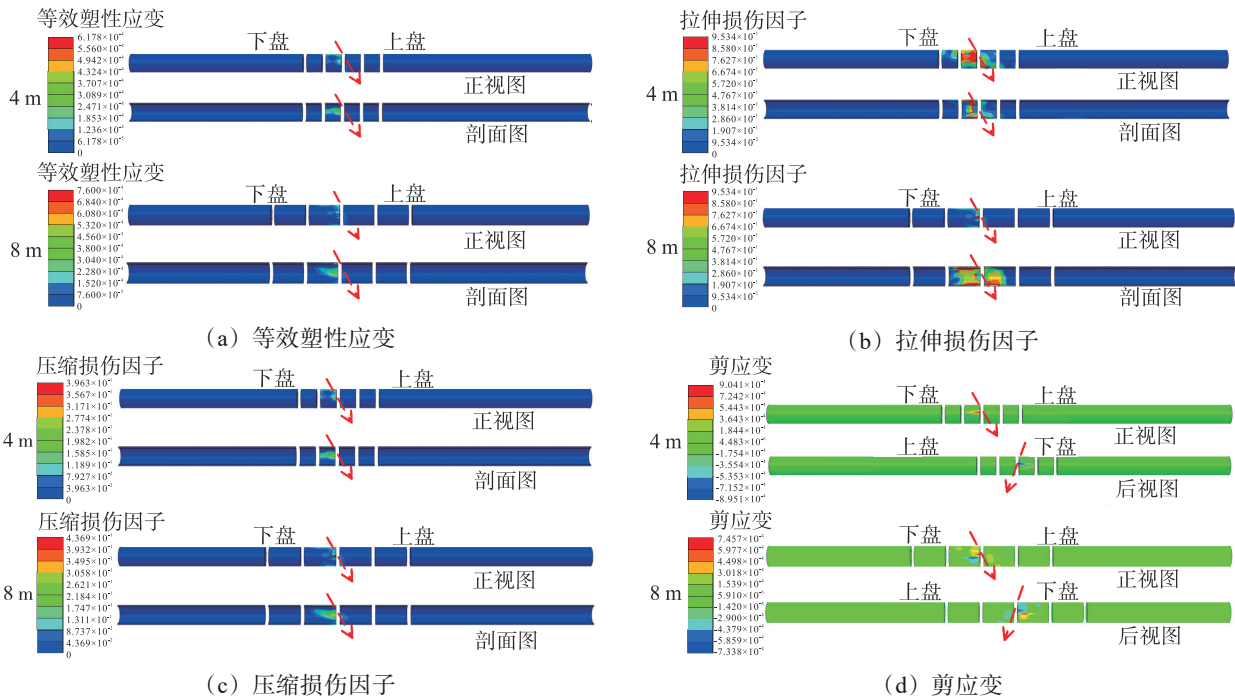


图19 不同节段衬砌长度下隧道结构损伤云图对比

Fig.19 comparison of damage cloud maps of tunnel structure under different segmented lining lengths

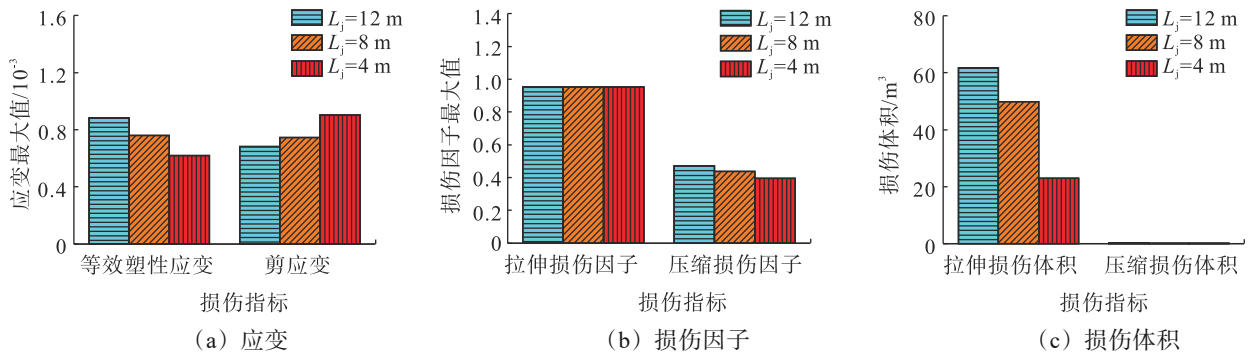


图20 不同节段衬砌长度下损伤指标对比

Fig.20 comparison of damage indicators under different segmented lining lengths

3.5 柔性接头长度

取柔性接头长度 L_R 为0.5 m、1.5 m,施加正断层竖向位移0.200 m,水平向位移0.073 m。不同柔性接头长度下隧道塑性损伤云图见图21,损伤指标及损伤体积对比见图22。

由图21和图22可知,与 L_R 为0.5 m工况相比, L_R 为1 m与1.5 m工况下等效塑性应变最大值分别为 8.826×10^{-4} 和 1.697×10^{-4} ,分别减小了71.07%和94.44%;剪应变最大值分别为 6.185×10^{-4}

和 7.660×10^{-4} ,分别减小了78.04%和73.02%;3种工况下最大拉伸损伤因子均为0.953 4;拉伸损伤体积分别为 61.78 m^3 和 5.81 m^3 ,分别减小了16.39%和92.14%;最大压缩损伤因子分别为0.471 8和0.125 9,分别减小了39.28%和83.80%;压缩损伤体积分别为 0.32 m^3 和0,分别减小了90.44%和100%。通过对比可知,随着柔性接头长度的增大,隧道损伤破坏程度有所减弱,损伤体积减小。

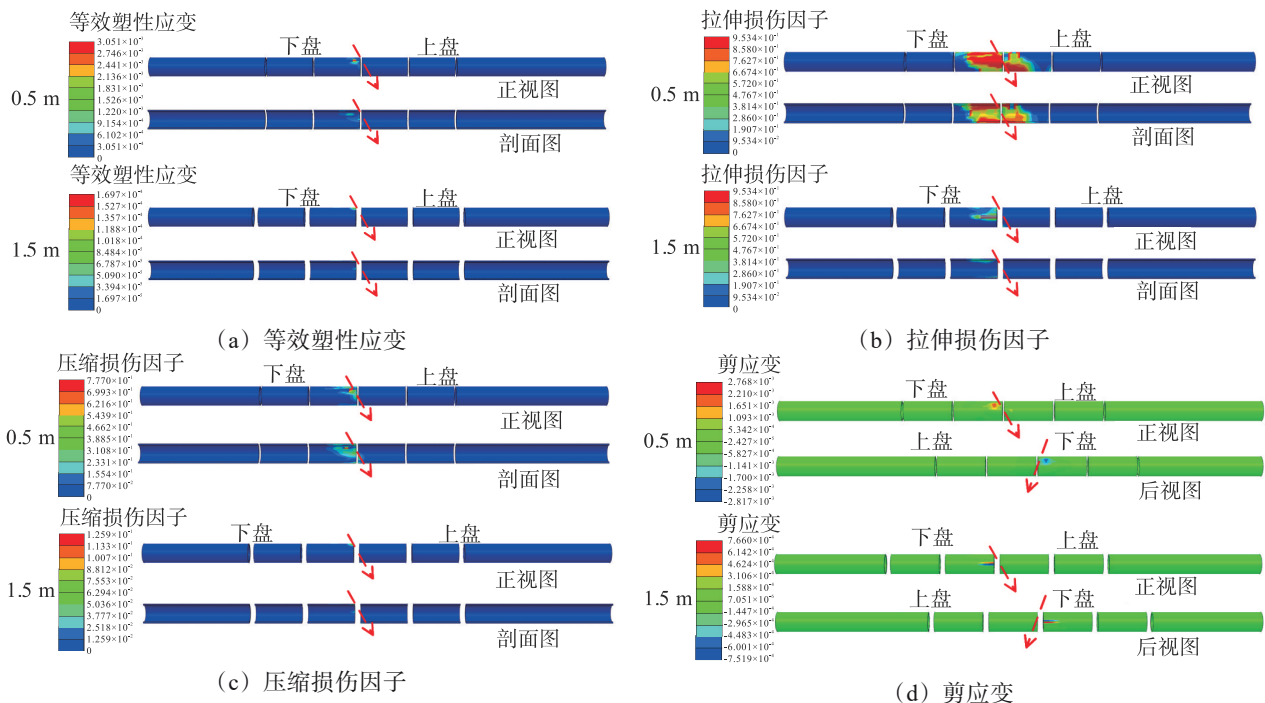


图 21 不同柔性接头长度下隧道结构损伤云图对比

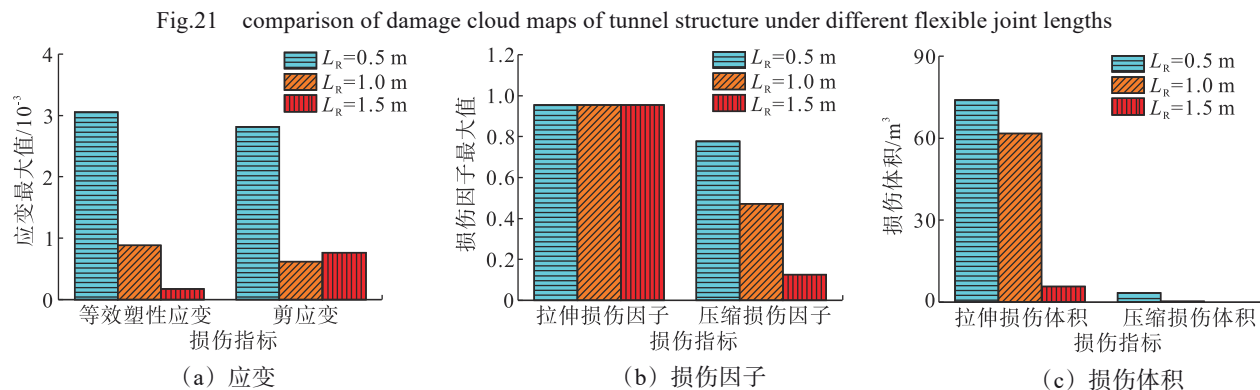


图 22 不同柔性接头长度下损伤指标对比

Fig.22 comparison of damage indicators under different flexible joint lengths

4 结论

(1) 采用铰接设计方法设置的柔性接头通过自身变形可有效吸收断层错动能量,降低衬砌结构的损伤耗能,削弱断层错动对结构的破坏。当柔性接头与断层错动位置重合时,柔性接头可最大程度地吸收断层错动能量,减灾效果最优。

(2) 发生断层错动时,柔性接头与节段衬砌之间采用绑定连接比采用摩擦连接的衬砌结构损伤程度更严重。虽然柔性接头与节段衬砌之间采用摩擦接触更符合实际情况,但考虑到工程设计中的包络原则以及摩擦接触易导致模型计算不收敛等问题,在数值模拟时,柔性接头与节段衬砌之间可采用绑定连接方式来初步判断结构的破坏情况。

(3) 柔性接头弹性模量、节段衬砌长度、柔性接头长度对铰接设计方法的减灾效果影响较大。

柔性接头弹性模量越小、节段衬砌越短、柔性接头越长,越有利于柔性接头自身变形,从而更多地吸收断层错动产生的能量,降低衬砌结构的损伤耗能和破坏程度。

参考文献(References):

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设, 2017,37(2):123-134.
HONG Kairong. Development and prospects of tunnels and underground works in China in recent two years[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 123-134.
- [2] 陈爽,白根铭,肖畅,等.断层构造对高地应力隧道初始地应力场影响分析[J].中国安全科学学报, 2023, 33(2): 146-151.
CHEN Shuang, BAI Genming, XIAO Chang, et al. Analysis of influence of fault structure on initial ground stress field of high ground stress tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 146-151.
- [3] 赵海峰,卞德宝,张建,等.岩溶地区不同溶洞位置对隧道的安全性

- 影响特征分析[J].西安科技大学学报,2024,44(6):1107-1117.
- ZHAO Haifeng, BIAN Debao, ZHANG Jian, et al. Analysis of the impact characteristics of different cave positions on the safety of tunnels in karst regions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(6): 1107-1117.
- [4] 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.
- [5] JALALI M. Tunnel rehabilitation in fault zone using sequential joints method-case study: Karaj water conveyance tunnel[J]. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 2018, 52(1): 87-94.
- [6] 武哲书, 孙文昊, 肖明清, 等. 胶州湾第二海底隧道穿越活动断层抗错断结构方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(5): 826-836.
- WU Zhesu, SUN Wenhao, XIAO Mingqing, et al. Antidislocation structure design of Jiaozhou Bay second subsea tunnel crossing an active fault[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(5): 826-836.
- [7] 司建强, 王涛, 向天兵, 等. 滇中引水工程凤凰山隧洞过活动断裂带结构适应性研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 105-110.
- SI Jianqiang, WANG Tao, XIANG Tianbing, et al. Structural adaptability of Fenghuangshan tunnel of central Yunnan water diversion project to active fault zone[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(12): 105-110.
- [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, 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.
- [9] 刘学增, 林亮伦. 75°倾角逆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, 2011, 30(12): 2523-2530.
- LIU Xuezheng, LIN Lianglun. Research on model experiment of effect of thrust fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2523-2530.
- [10] 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): 2083-2090.
- LIU Xuezheng, LIU Jindong, LI Xuefeng, 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): 2083-2090.
- [11] 孙飞, 张志强, 易志伟. 正断层黏滑错动对地铁隧道结构影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3037-3044, 3053.
- SUN Fei, ZHANG Zhiqiang, YI Zhiwei. Model experimental study of the influence of normal fault with stick-slip dislocation on subway tunnel structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3037-3044, 3053.
- [12] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道减震模型的建立及其减震效果模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1884-1890.
- WANG Mingnian, CUI Guangyao. Establishment of tunnel damping model and research on damping effect with model test in highly seismic area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1884-1890.
- [13] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 断裂黏滑隧道减震缝减震技术模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1603-1609.
- CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Model test study of shock absorption joint damping technology of crossing stick-slip fracture tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1603-1609.
- [14] 崔光耀, 伍修刚, 王明年, 等. 高烈度地震区黏滑断层隧道减震层减震模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2125-2131.
- CUI Guangyao, WU Xiugang, WANG Mingnian, et al. Model tests on damping of shock absorption layer of stick-slip fracture tunnel in highly seismic areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2125-2131.
- [15] 孙凤伯, 赵伯明, 杨清源, 等. 穿越活动断层隧道组合抗震缝定量设置的计算公式及试验验证[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 61-70.
- SUN Fengbo, ZHAO Boming, YANG Qingyuan, et al. Calculation formula and test verification for quantitative setting of combined seismic joint for tunnel through active fault[J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 61-70.
- [16] CUI G Y, WANG X L. Model test study on the antibreaking technology of reducing dislocation layer for subway interval tunnel of the stick-slip fracture[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 4328103.
- [17] 杜修力, 汪振, 赵密, 等. 穿越走滑断层的山岭隧道抗错断铰接设计试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(5): 97-106.
- DU Xiuli, WANG Zhen, ZHAO Mi, et al. Experimental study on articulated design of mountain tunnel crossing strike-slip fault zones[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(5): 97-106.
- [18] CAI Q P, PENG J M, NG C W W, et al. Centrifuge and numerical modelling of tunnel intersected by normal fault rupture in sand[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111: 137-146.
- [19] 安韶. 穿越活动断裂带城市浅埋隧道结构破坏机理与设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021: 85-90.
- [20] ANASTASOPOULOS I, CALLERIO A, BRANSBY M F, et al. Numerical analyses of fault-foundation interaction[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6: 645-675.
- [21] 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: 110-132.
- [22] 陶连金, 张乃嘉, 安韶. 正断层错动圆形隧道结构影响因素及损伤分析研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(11): 127-134.
- TAO Lianjin, ZHANG Naijia, AN Shao. Study on influence factor law and damage analysis of circular tunnel structure under the effect of normal fault dislocation[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(11): 127-134.
- [23] 李鹏. 活动断层区公路隧道抗错断结构设计的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009: 80-81.
- [24] 孙飞, 张志强, 秦昌. 正断层错动下乌鲁木齐地铁1号线隧道结构受迫影响研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(2): 54-63.
- SUN Fei, ZHANG Zhiqiang, QIN Chang. Research on influence upon tunnel structure of metro line 1 in Urumqi forced by normal fault dislocation[J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 54-63.
- [25] YAN G M, SHEN Y S, GAO B, et al. Damage evolution of tunnel lining with steel reinforced rubber joints under normal faulting: an experimental and numerical investigation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103223.