

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0765

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

周光新^{1,2}, 盛 谦^{1,2}, 崔 臻^{1,2}, 王天强³, 马亚丽娜⁴, 付兴伟⁵

(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;
3. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 4. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056;
5. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

摘 要: 以滇中引水香炉山隧洞为背景工程, 通过小尺度物理模型试验, 对断层错动模拟过程中的隧洞上覆围岩破裂形态、衬砌破坏形态和裂纹发展、应变分布特征等关键响应特征开展试验分析, 深入地研究了走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞的破坏形式及破坏机制。在铰接隧洞抗错断设计参数作用机制方面, 详细研究了衬砌节段长度、衬砌厚度、隧洞直径、隧洞轴线与断层带夹角、隧洞断面形式, 衬砌材料力学特性等因素对铰接设计隧洞抗断性能的影响。研究表明: (1) 当跨活断层隧洞不采用铰接设计时, 在断层错动作用下隧洞破坏模式为剪切和弯曲组合破坏, 衬砌破坏程度严重, 存在剥离脱落现象。隧洞截面呈现椭圆化变形, 整体坍塌趋势明显; 在当前试验中, 无铰接隧洞破坏范围达 $4W_f$ (W_f 为断层带的宽度)。(2) 当跨活断层隧洞采用铰接设计时, 在断层错动作用下隧洞整体变形呈现 S 形, 衬砌结构破坏形式为节段间的转动和错台, 衬砌节段相对完整, 破坏程度较轻; 当前试验中, 铰接隧洞破坏范围为 $2.14W_f$, 相较于无铰接隧洞减少 48%, 表明铰接设计可改变活断层错断作用下隧洞的变形破坏模式, 并减小隧洞结构的损伤范围。(3) 铰接设计条件下, 隧洞衬砌结构应变峰值主要分布在断层带内, 隧洞易发生屈服破坏; 与无铰接隧洞相比, 铰接隧洞左右边墙纵向最大拉应变减少了 56%, 纵向最大压应变减少了 68%, 进一步表明铰接设计可以有效提高隧洞的抗错断性能。(4) 在铰接隧洞抗错断设计参数作用机制方面, 研究表明增加衬砌厚度、增加衬砌混凝土强度等级、减小节段长度、减小隧洞直径均可提高铰接隧洞的抗错断性能, 隧洞穿越断层带的最佳角度为正交, 圆形断面相较于三心圆断面可提升铰接隧洞的抗断能力。综上所述, 研究成果可以为跨活断裂隧洞工程抗错断措施提供必要的理论参考和技术支持。

关 键 词: 隧洞工程; 走滑断层; 模型试验; 破坏形式; 铰接设计

中图分类号: U 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 01-0037-14

Model test of failure mechanism of tunnel with flexible joint crossing active fault under strike-slip fault dislocation

ZHOU Guang-xin^{1,2}, SHENG Qian^{1,2}, CUI Zhen^{1,2}, WANG Tian-qiang³, MA Ya-li-na⁴, FU Xing-wei⁵

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 4. CCCC Second Highway Consultant Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China; 5. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the fault crossing situation of Xianglushan tunnel of water diversion project, we conducted systematic monitoring and analysis of key mechanical characteristics of tunnel such as surrounding rock rupture pattern, lining damage pattern and crack development, strain distribution characteristics during faults dislocation simulation through indoor physical model tests, and thoroughly studied the damage form and failure mechanism of tunnel with flexible joint crossing active faults under strike-slip fault dislocation. In terms of the mechanism of the design parameters of the flexible joint tunnel to resist faulting, the effects of factors such as liner section length, liner thickness, tunnel diameter, angle between tunnel axis and fault zone, tunnel section form, and

收稿日期: 2021-05-23

修回日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51779253, No. 52079133); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金课题 (No. SKLGDUEK1912); 长江科学院开放研究基金资助项目 (No. CKWV2019746/KY); 暨南大学“重大工程灾害与控制”教育部重点实验室开放基金课题 (No. 20200904002)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51779253, 52079133), the Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology (SKLGDUEK1912), CRSRI Open Research Program (CKWV2019746/KY) and the MOE Key Laboratory of Major Disaster Forecast and Control in Engineering, Jinan University (20200904002).

第一作者简介: 周光新, 男, 1995 年生, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面研究工作。E-mail: zhouguangxin95@163.com

通讯作者: 崔臻, 男, 1986 年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程抗震安全方面的研究。E-mail: zcui@whrsm.ac.cn

mechanical properties of liner materials on the fracture resistance of the flexible joint tunnels were studied in detail. The results of the study show: 1) When the tunnel crossing the active fault is not articulated, the damage pattern presents a combination of shear and bending damage under the fault dislocation, and the lining damage is severe with a phenomenon of peeling off. The tunnel section shows elliptical deformation, and the overall collapse trend is obvious. The damage range of non-articulated tunnel reaches $4W_f$ (W_f is the width of the fault zone) in this scenario. 2) When the articulated design is adopted in the tunnel crossing the active fault, the deformation of the tunnel shows S-shape under the fault misalignment. The damage of the lining structure is in the form of inter-segment rotation and misalignment, while the lining segments are relatively intact and less damaged. The damage range of the flexible joint tunnel in this scenario is $2.14W_f$, which is 48% less than that of the non-flexible joint tunnel, indicating that the articulated design can change the deformation and damage of the tunnel under the active fault dislocation and reduce the damage range of the tunnel structure. 3) Under the condition of articulated design, the maximum strain of the tunnel lining structure is mainly distributed in the fault zone, and the tunnel is prone to yield failure. Compared with the non-flexible joint tunnel, the maximum longitudinal tensile strain and compressive strain in the left and right side walls of the flexible joint tunnel are reduced by 56% and 68% respectively, which further indicates that the articulated design can effectively improve the tunnel's resistance to fault dislocation. 4) In terms of the mechanism of the design parameters of the articulated tunnel, this paper concludes that the resistance performance of articulated tunnel can be enhanced by increasing the tunnel lining thickness, increasing the concrete strength level of the lining, reducing the length of the section and reducing the diameter of the tunnel. The optimal angle of the tunnel through the fault zone is orthogonal, and the circular section can improve the resistance of the flexible joint tunnel compared with the three-centered circular section. In summary, the research results can provide necessary theoretical reference and technical supports for the anti-faulting measures of cross-active fracture tunnel projects.

Keywords: tunnel engineering; strike slip fault; model test; failure pattern; articulated design

1 引言

近年来,国家对西南地区交通设施的投资力度不断加大,高速公路、高速铁路等建设均掀起新的高潮。在此过程中修建了大量的隧道工程,尤其是西南山区,修建了大量公路隧道、铁路隧道、引水隧洞等。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。正在建设中的川藏铁路^[1]穿越十余条深大断裂带及大型缝合带,该范围内活动断层密集发育、构造运动活跃,由于板块构造活动强烈,断层每年的蠕滑累计效应对铁路工程施工和运营安全有较大的影响。1999年台湾发生里氏7.6级的大地震,Wang等^[2]调查发现,穿越活断层的隧洞相对薄弱区段均遭受了一定程度的破坏。在国外,如1906年美国旧金山8.3级地震,穿越圣安德烈斯断层的莱特铁路隧道遭受严重破坏,隧道的最大错断量达1.5 m^[3]。目前国内外的隧洞设计规范针对活动断层均以避让处理为主,缺少关于隧洞穿越活断裂的工程设计和应对措施的明确建议。因此,针对活断层错动影响下隧洞结构的破坏形式和破坏机制的研究是十分必要的。

国内外学者针对断层错动作用下隧洞(道)结构的力学响应特征和破坏机制的研究做了大量工作。刘国钊等^[4]采用Pasternak双参数弹性地基梁,建立了满足变形和内力连续的隧道纵向力学解析模

型并进行了求解。熊炜等^[5]通过有限元方法计算,归纳出衬砌的拉张-挤压型、直接剪断型、张拉-挤压-剪断结合的3种破坏模式。马亚丽娜等^[6]基于三维离散-连续耦合方法,研究在断裂错动作用下衬砌的内力响应及围岩破裂的细观特征。汪振等^[7]运用断裂力学中的黏性界面模型结合有限元方法,探讨了正断层断层错动量和倾角对隧道响应的影响规律。赵颖等^[8]通过在数值计算模型中嵌入合理的损伤塑性本构模型,利用损伤指标研究了走滑断层下衬砌结构的破坏形式,建立了能够估计结构损伤范围及破坏最严重位置的统计关系式。刘学增等^[9-12]通过室内模型试验,研究了断层倾角分别为45°、60°、75°时,正、逆断层作用下隧道结构的受力、变形、损伤特征。Kiani等^[13]对正断层作用下的浅埋盾构隧道进行了一系列离心模型试验,研究了断层倾角以及隧道上覆土层厚度对隧道破坏特征及损伤范围的影响。

根据国内外穿越活动断层隧道工程设计经验,隧道工程抗断防护设计可以归纳为“超挖设计”、“铰接设计”及“隔离效能设计”三大类^[14]。从已建工程来看,目前最为常用的应对措施为铰接设计,即在各刚性隧道节段间采用刚度相对较小的柔性连接。蒋树屏等^[15]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。赵坤等^[16]运用数值计算初步确定“铰接设计”中节段长度及节段间柔性连接的宽度,并采用极差分析得到“铰接设计”的最优水

平组合。Shahidi 等^[17]在 Koohrang-III 输水隧洞穿越 Zarab 活断层时,采用了减小衬砌各节段间连接刚度的方法,柔性连接处采用塑性混凝土。闫高明等^[18-19]采用数值模拟和模型试验研究了正断层作用下铰接隧道衬砌的响应和损伤模式。刘学增等^[20-22]开展跨断层铰接隧道物理模型试验,研究了铰接隧洞结构的破坏特征和破坏机制。孙飞等^[23]开展地铁隧道分段式衬砌穿越倾角 60° 正断层的大型剪切错动模型试验,对隧道结构变形、应变分布特征、围岩压力关键力学特征进行了监测分析,获得了正断层黏滑错动下的分段隧道结构响应规律。王道远等^[24]通过断裂黏滑错动下隧道大型模型试验,得到铰接设计理念下“减错层+交错设缝”组合措施,可有效保障依托隧道黏滑错动后衬砌结构的安全。孙风伯等^[25]推导出基于活动断层倾角、宽度和错动量等参数的隧道组合抗震缝设置数量的计算公式,并通过室内模型试验结果验证了该计算公式的正确性和有效性。

尽管前人针对断层错动影响下隧洞(道)结构的力学响应及对应措施开展了大量的研究,但在物理模型试验方面,针对走滑断层错动作用下隧洞结构的破坏形式和破坏机制的模型试验研究还不充分,尤其是在铰接设计隧洞方面,还要进一步通过物理模型试验研究铰接隧洞衬砌节段长度、衬砌厚度、隧洞直径、断面形式等因素对“铰接设计”隧洞的抗断性能的影响。

本研究以滇中引水香炉山隧洞为背景工程,研发了考虑走滑断层的隧洞抗错断模型试验装置,以小尺度物理模型试验为主要研究手段,对断层错动模拟过程中的隧洞上覆围岩破裂形态、衬砌破坏形态和裂纹发展、应变分布特征等关键响应特征开展试验分析,深入地研究了走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞的破坏形式及破坏机制。在铰接隧洞抗错断设计参数作用机制方面,详细研究了衬砌节段长度、衬砌厚度、隧洞直径、隧洞轴线与断层带夹角、隧洞断面形式、衬砌材料力学特性等因素对铰接设计隧洞抗断性能的影响。

2 试验方案设计

2.1 背景工程

本研究以滇中引水香炉山隧洞为背景工程。香炉山隧洞位于青藏地震区的鲜水河—滇东地震带内,隧洞全长约为 63 km。沿线地质条件复杂,发育多条大断(裂)层,香炉山引水隧洞穿越的龙蟠—乔后(F10)断裂带与线路大多呈中等角度及大角度

相交。隧洞断面是直径为 10 m 的圆形断面。初期支护采用 C20 喷射混凝土,厚度为 20 cm,二次衬砌采用强度等级为 C30 的混凝土,厚度为 50 cm。断层带宽度达 200 m,全新世活动断裂 100 a 位移设防水平向量值最大可达 1.9 m,使得香炉山隧洞面临着严重的错断威胁。

2.2 试验装置

试验采用自行研究设计的走滑断层模型试验剪切装置,详见图 1。试验装置模型箱为长方体,箱体设计尺寸为 $72\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 40\text{ cm}$,模型箱按照是否移动,分为主动侧与固定侧。主动侧模型箱长约 42 cm,固定侧模型箱长度为 30 cm。模型箱主动侧底部设置滑轨,固定侧底部固定,走向推力加载系统作用于主动侧箱体上;主动侧与固定侧之间留有容纳错动的极小的缝隙,通过隧洞模型摆放角度不同模拟断层和隧洞的交角变化,极限角度考虑为 35° 。通过模型箱主动侧水平向推力加载装置,实现水平方向的恒位移剪切。

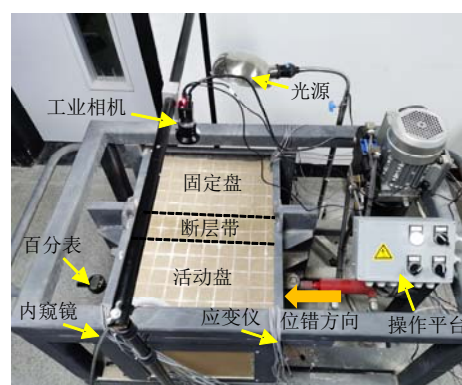


图1 试验装置

Fig.1 Test apparatus

2.3 相似材料

因本研究拟对隧洞抗错断铰接设计开展全面研究,拟开展试验工况较多,采用了较小的相似比开展试验,即物理模型试验采取几何相似比 $C_L=100$ 。由于隧洞模型尺寸较小以及浇筑衬砌模型材料的限制,很难采用人工质量的方法考虑重力效应,因此密度相似比 $C_\rho=2.4$,弹性模量相似比 $C_E=100$ 。根据相似原理列出 π 项式,推导各相关物理力学参数的相似比分别为:长度相似比 $C_H=100$,应力相似比 $C_\sigma=240$,弹性范围内应变相似比 $C_\epsilon=2.4$,模型相似比见表 1。

因模型试验隧洞原型的自然地质条件比较复杂,本研究主要考虑铰接设计及其影响因素对跨断层破坏机制的研究,因此断层带宽度设置为 10 cm。

表 1 模型相似关系和相似比
Table 1 Similarity relations and similarity ratio for shaking table tests

长度相似比	密度相似比	弹性模量相似比	应变相似比	应力相似比
C_H	C_ρ	C_E	C_ϵ	C_σ
100	2.4	100	2.4	240

原型断层破碎带围岩等级为 V 级, 上下盘围岩等级为 III 级。隧洞断面为圆形, 隧洞衬砌采用 C30 混凝土。经配比试验, 围岩相似材料质量配比为河砂: 重晶石粉: 水玻璃: 水 = 1.0: 0.6: 0.1: 0.1。断层破碎带用黄砂模拟: 重度 $\gamma = 13.8 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 0.44 \text{ MPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 17^\circ$ 。衬砌相似材料质量配合比为石膏: 水: 重晶石粉: 硅藻土 = 1.00: 1.20: 0.60: 0.25, 为提高材料延性, 添加 3%~4% 的聚丙烯纤维材料。围岩和衬砌相似材料见图 2、3, 围岩和衬砌物理力学参数见表 2、3。



图 2 衬砌相似材料
Fig.2 Lining similar materials



图 3 围岩相似材料
Fig.3 Surrounding rock similar materials

表 2 衬砌材料原型值与模型值
Table 2 Prototypical and model values of lining

类别	重度 $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $/\text{GPa}$	泊松比	抗压强度 $/\text{MPa}$
原型值	24	30.00	0.20	14.30
模型值	10	0.28	0.28	0.70

表 3 围岩材料原型值与模型值
Table 3 Prototypical and model values of surrounding rock mass

类别	重度 $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $/\text{GPa}$	泊松比	黏聚力 $/\text{MPa}$	内摩擦角 $/(^{\circ})$
原型值	25.5	11.00	0.28	0.550	33.02
模型值	19.2	0.10	0.25	0.005	54.14

2.4 试验工况

本研究模型试验工况具体参数值见表 4。其中, 无铰接隧洞模型长为 60 cm, 铰接隧洞衬砌节段长

度为 10 cm。隧洞外直径为 10 cm, 厚度为 1 cm, 衬砌模型见图 4。

表 4 试验工况参数值
Table 4 Parameters of test working conditions

工况 编号	断层倾角 $/(^{\circ})$	断层宽度 $/\text{cm}$	错动量 $/\text{cm}$	铰接设计节 段长度/cm
1	90	10	5	无变形缝
2	90	10	8	10



图 4 两种工况下的衬砌模型
Fig.4 Lining models under two working conditions

模型试验中隧洞铰接结构的设计是试验的难点之一。现有的铰接隧洞模型试验中, 刘学增等^[22]采用节段间主筋搭接和低强度石膏浆覆盖相结合的接头设计方案, 该方案不能有效地模拟隧洞在断层作用下的链式运动, 即模拟通过节段间的转动或错台消纳断层的错动。闫高明等^[18]采用在节段间钢丝搭接和橡胶柔性材料相结合的接头设计方案, 该方案可以较好地模拟断层中隧洞接头的运动方式, 且制作简便。本研究采用闫高明等^[18]的铰接接头方式, 铰接接头宽度为 2 cm, 柔性橡胶带宽为 5 cm。本试验中的接头结构模型见图 5。

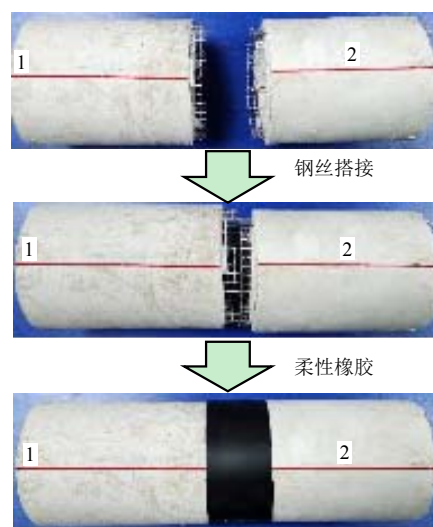


图 5 模型试验铰接设计结构
Fig.5 Structure of the joints in model test

2.5 监测内容

试验监测设备见图 6, 具体内容包括: ①通过

工业相机记录围岩破裂及剪切带的扩展；②利用内窥镜记录隧洞内部变形破坏特征以及裂缝的发展过程；③通过应变仪记录隧洞纵向及环向应变响应。

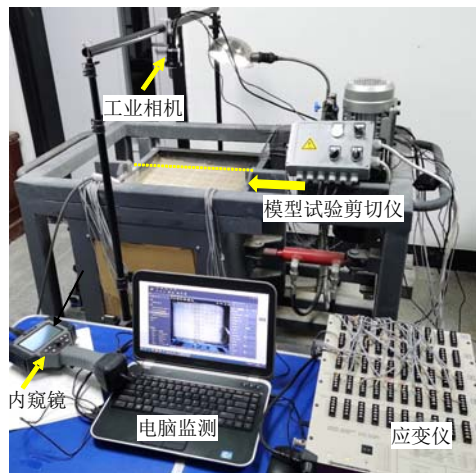


图 6 模型试验监测设备
Fig.6 Model test monitoring equipment

上覆围岩破裂情况监测：利用定制镂空模具，通过石英砂在围岩表面划分网格线，其中边长为 5 cm，缝隙为 2 mm。通过围岩上部的工业相机记录围岩位错及剪切带的扩展状态。

隧洞结构内部破坏特征：用直尺和黑色标记笔在隧洞节段以及隧洞顶部关键断面做标记，通过 PVC 管将内窥镜线沿隧洞轴向进入衬砌内部，断层错动达到目标位移后，记录隧洞变形破坏特征以及裂缝发展过程。内窥镜监测效果见图 7。



图 7 通过工业内窥镜对隧洞内部形态的监测
Fig.7 Observation of tunnel internal shape through industrial endoscope

参考走滑断层对深埋隧洞影响的数值模拟结果^[8]、隧洞模型尺寸以及试验条件^[26]，在衬砌模型上合理布置应变监测断面和测点，应变监测包括衬

砌纵向应变和环向应变衬砌。

无铰接隧洞和铰接隧洞两种工况应变测点布置如图 8、9 所示。其中 LZ、RZ、TZ、FZ 分别表示隧洞监测断面左边墙、右边墙、洞顶、洞底的纵向应变，LH、RH、TH、FH 分别表示隧洞监测断面左边墙、右边墙、洞顶、洞底的环向应变。

工况 1：在隧洞上共设置 7 个监测断面，监测断面编号为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]。其中，在 1[#]~7[#]断面左右边墙粘贴纵向应变片，在 2[#]、3[#]、4[#]、5[#]断面分别粘贴纵向应变片和环向应变片。

工况 2：在隧洞节段上设置 6 个监测断面，监测断面编号为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]。其中，每个断面左右边墙粘贴纵向应变片，在断层带内断面粘贴纵向应变片和环向应变片。

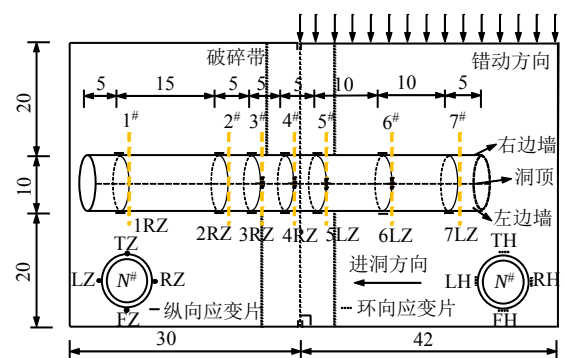


图 8 工况 1 应变片布设 (单位: cm)

Fig.8 Strain gauges arrangement of case 1 (unit: cm)

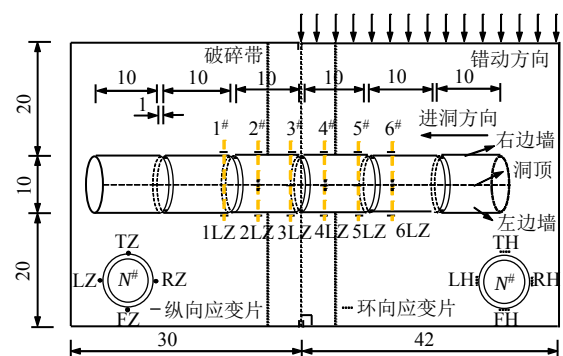


图 9 工况 2 应变片布设 (单位: cm)

Fig.9 Strain gauges arrangement of case 2 (unit: cm)

2.6 试验步骤

走滑断层作用下跨断层铰接隧洞破坏机制的模型试验按照以下试验步骤实施^[10]：

(1) 衬砌模型在养护、拼装完成后，在隧洞模型表面粘贴应变片，其中应变片覆盖水溶胶做防水处理。同时，在隧洞节段内和顶部关键断面用直尺和红色标记笔做标记。

(2) 向试验箱里充填围岩相似材料, 错动缝两侧各 5 cm 范围内填充断层破碎带相似材料, 每填充 5 cm 厚的材料, 利用夯锤进行夯实、整平表面, 并用环刀检验压实度。在相似材料达到压实度要求后, 对压实的表面进行打毛, 继续填充下一层材料, 直至预定高度。

(3) 填砂高度达到 20 cm 时, 把隧洞模型放入试验箱中间位置, 并连接静态应变采集仪。继续填充围岩相似材料, 直至隧洞埋深达为 20 cm。在砂土表面用石英砂划分网格线, 通过工业相机记录围岩位错情况及剪切带的扩展状态; 通过固定在模型箱横梁上的电子千分表, 监测模型箱位移量。

(4) 试验过程中, 加载速率控制在 0.125 mm/s。以上盘的错动位移为控制对象, 2 mm 为一级, 每加载一级对上述监测内容进行一次记录。当错断位移达到预定错动量时, 试验结束。

(5) 试验结束后, 取出衬砌模型, 并对隧洞模型破坏状态和裂纹发展进行记录。

3 铰接设计对隧洞抗错断影响

3.1 上覆围岩破裂形态及扩展情况

无铰接隧洞和铰接隧洞两种工况下的围岩破裂及剪切带扩展过程如图 10、11 所示, 从图 10 中可以发现: 无铰接设计工况 1 的围岩首先在模型箱错动缝处产生一条贯穿剪切裂纹, 且随着错动量的增大, 围岩裂纹在断层带内逐渐扩展。当错动量达到 30 mm 时, 围岩表面在断层带与两盘交界处出现了几条张开裂纹。断层带错动影响范围基本在断层带内。

从图 11 中可以发现: 铰接设计工况 2 的围岩, 错动量为 20 mm 时, 围岩表面在断层带内产生两条剪切裂纹, 剪切带裂纹尚未贯通; 错动量为 30 mm 时, 围岩表面断层带内剪切裂纹贯通, 同时在断层带内贯通剪切裂纹周边出现了 3 条细小的斜裂纹; 错动量为 50 mm 时, 最终围岩裂纹在断层带内进一步可扩展, 最终贯穿形成剪切带, 在主要剪切裂纹周边共发育了 6 条斜裂纹。

对比两种工况下的围岩破裂情况发现, 铰接隧洞剪切带裂纹数量相较于无铰接隧洞多, 且裂纹深度更深。试验结果分析表明: 走滑断层下, 铰接设计隧洞可以通过衬砌节段间的错动和转动, 即通过连接段刚度较低材料的变形消纳活断层的错动。铰接设计通过柔性连接段降低了隧洞的整体刚度, 增加了活动断层区域内隧洞的整体柔度。因此, 铰接缝隧洞与地层的整体抗剪刚度比无铰接设计隧洞

与地层的整体抗剪刚度小, 导致工况 2 上覆围岩张开缝条数和发展深度比工况 1 更深。

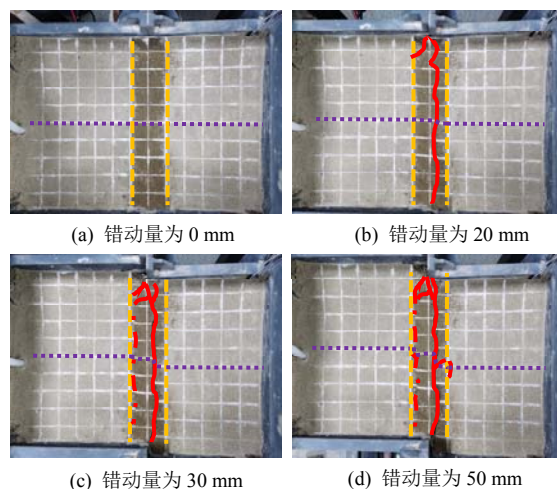


图 10 无铰接隧洞围岩破裂发展情况
Fig.10 Fracture development of surrounding rock of non-flexible joint tunnel

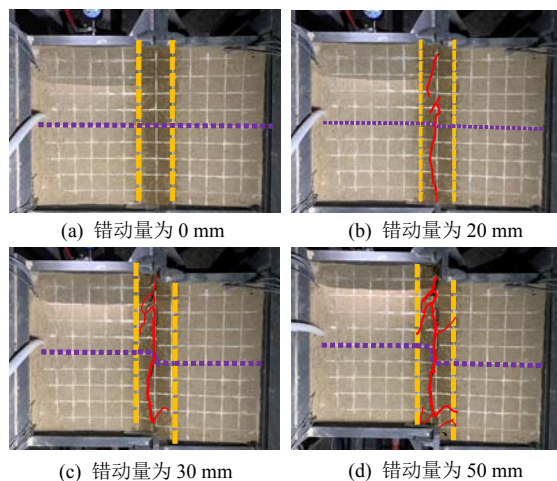


图 11 铰接隧洞围岩破裂发展情况
Fig.11 Fracture development of surrounding rock of flexible joint tunnel

3.2 隧洞结构内部破坏特征

图 12 和图 13 给出了无铰接隧洞和铰接隧洞的隧洞内部破裂形态和裂纹发育情况。图中用如 C-3-2 的形式表示裂纹的扩展和分类, 例如 C-3-1 和 C-3-2 表示 C-3 裂纹的两条分支。

对于工况 1 无铰接隧洞, 当活动盘位移加载为 14 mm 时, 衬砌内部首先出现一条由活动盘一侧出发并沿隧洞纵向扩展的裂纹, 裂缝 1 沿纵向扩展至监测断面 3#和 4#之间后开始扩展为环向裂纹, 并在断层错动面附近贯通。另外, 沿隧洞左侧拱脚处扩展一条斜裂缝至左拱腰处。继续加载至 30 mm, 裂缝 3 的第 2 条分支继续扩展, 同时又扩展出两条斜

向下的裂缝。加载至 36 mm 时, 4#断面处裂缝 3 发展为环向拉裂缝, 4#断面发生椭圆化变形。错动量达到 50 mm 时, 4#断面处左侧拱腰的裂缝继续增大, 且衍生出更多的裂缝, 右边墙衬砌由于承受围岩压力较大, 致使位于该侧的衬砌截面变形较为严重, 局部出现隆起处且出现多处拉裂缝, 但由于分布钢筋的套箍作用未观察到衬砌有较大裂缝, 也未观察到围岩相似材料落入隧洞中。

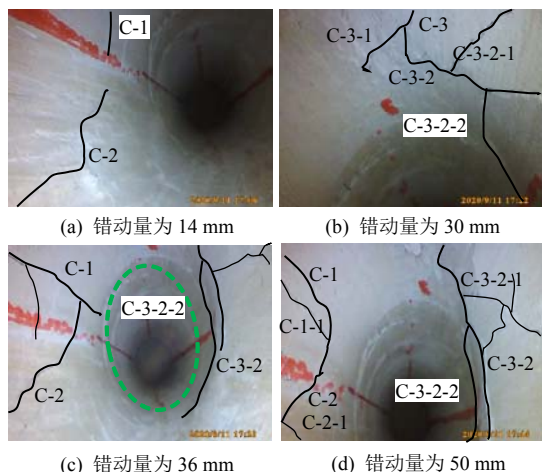


图 12 无铰接隧洞衬砌内部变形和破裂
Fig.12 Deformation and rupture of the non-flexible joint tunnel

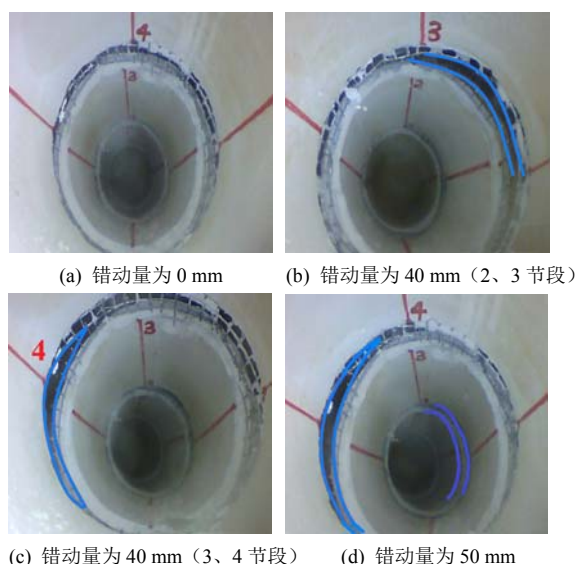


图 13 铰接隧洞衬砌内部变形和破裂
Fig.13 Deformation and rupture of the flexible joint tunnel

对于工况 2 铰接隧洞, 隧洞模型在错断作用下的变形破坏特征以及衬砌裂缝的发展过程如下: 试验错动量为 40 mm 时, 节段 2 和 3 右侧拱肩处变形缝受到断层的扭转作用, 铰接设计接头钢丝受拉, 节段之间开始出现转动。同时节段 3 和 4 左侧拱腰

处变形缝受到断层的扭转作用, 铰接设计接头钢丝受拉, 节段之间开始出现转动。当错动量达到 50 mm 时, 两处变形缝衬砌节段转动进一步增加, 钢丝网张开角度增加, 其中衬砌节段 4 和 5 之间的相对转动最大, 变形缝破坏最严重。隧洞在错断作用下节段间发生较大的错动, 通过内窥镜监测发现, 隧洞衬砌节段未发现裂纹, 裂纹发育不明显。

试验结果表明: 在走滑断层错动下, 有铰接隧洞和无铰接隧洞的衬砌内部变形破坏特征不同之处主要体现在衬砌破坏模式不同。在断层带剪切作用下, 无铰接隧洞衬砌破坏严重, 在断层带范围内的衬砌出现大量的纵向和环向裂缝, 因为围岩的挤压作用, 截面出现椭圆化变形, 整体坍塌趋势明显。在断层带剪切作用下, 铰接隧洞破坏主要集中在断层带附近的节段间的变形缝的拉压破坏, 以及衬砌节段之间的转动, 未发现明显的裂纹。

3.3 隧洞整体变形和裂纹分布

无铰接隧洞和铰接隧洞两种工况下隧洞整体变形破坏特征如图 14 所示。

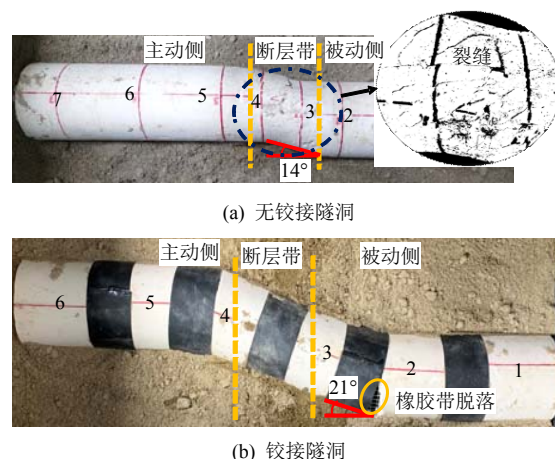


图 14 隧洞衬砌外部形态
Fig.14 Failure mode of the tunnel

对于工况 1 无铰接隧洞, 隧洞最终剪切破坏主要集中在断层带附近。位于断层破碎带范围内的隧洞发生的变形较为严重。在断层区域内的 3#~4#截面间出现两处反弯点位置, 分别位于衬砌的左右两侧拱腰处; 衬砌右边墙反弯点处的偏转角为 14°。

对于工况 2 铰接隧洞, 在断层带错动作用下, 隧洞最终破坏表现为衬砌节段间的转动, 断层带范围内变形缝压剪破坏, 节段截面的椭圆化形变, 隧洞整体呈现 S 形。节段 2 与 3 之间偏转角度达到 21°, 柔性橡胶带与衬砌节段脱落。

两种工况下隧洞衬砌裂纹分布如图 15、16 所示。对于工况 1 无铰接隧洞, 衬砌裂纹主要集中在断层

破碎带附近的衬砌结构 3[#]~4[#]断面间。裂缝主要包括纵向裂缝、环向裂缝、斜裂缝,在洞顶断层区域内存在数条剪切斜裂缝及沿隧洞纵向的拉裂缝,其中左边墙处发育的裂缝最大。观察隧洞结构破坏范围可知:主动侧隧洞结构破坏范围为 $3.5W_f$ (W_f 为断层带的宽度),固定侧隧洞结构破坏范围为 $0.5W_f$,主动侧隧洞破坏范围明显大于固定侧,为 7 倍。

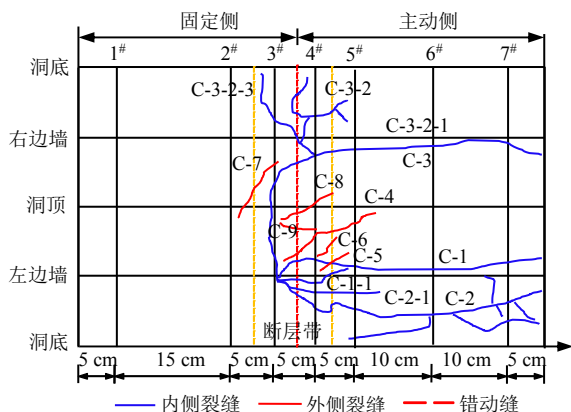


图 15 无铰接隧洞衬砌结构裂缝分布图

Fig.15 Lining cracks in the non-flexible joint tunnel structure

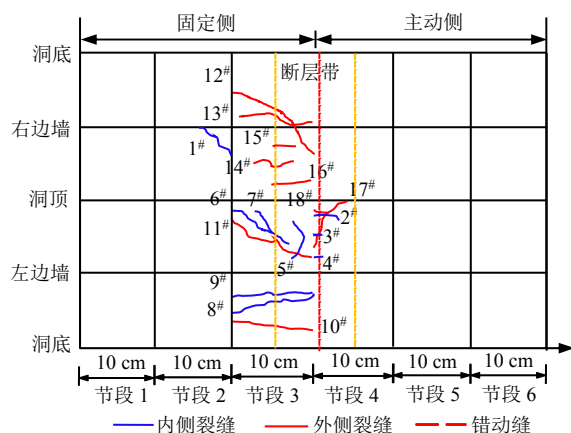


图 16 铰接隧洞衬砌结构裂缝分布图

Fig.16 Lining cracks in the flexible joint tunnel

对于工况 2 铰接隧洞,裂缝出现在主要分布于断层带范围衬砌 2、3、4 号节段上。从开裂形态看,以纵向裂缝为主,主要发生在左边墙与洞底之间的内外侧、右边墙外侧。3 号节段位于断层带内,受剪力作用最为严重,结构破坏最为严重。观察隧洞结构破坏范围可知:固定侧铰接隧洞结构破坏范围为 $1.6W_f$,主动侧铰接隧洞结构破坏范围为 $0.5W_f$,固定侧铰接隧洞破坏范围大于主动盘,为 3 倍。

试验结果表明:无铰接隧洞最终破坏模式为剪切和弯曲组合破坏,隧洞损伤主要集中在断层破碎带范围内衬砌结构。无铰接隧洞最终破坏范围为

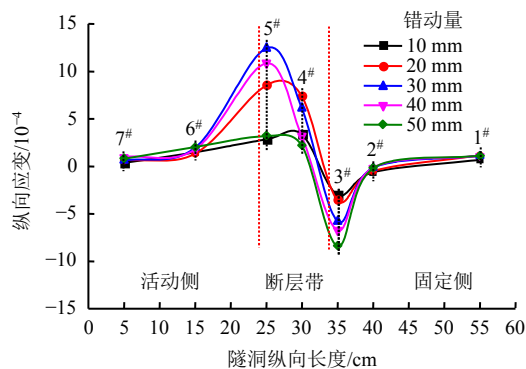
$4W_f$ 。铰接隧洞损伤主要集中在断层带附近衬砌节段间的转动,变形缝剪压破坏,节段衬砌损伤不明显。铰接隧洞最终破坏范围为 $2.1W_f$,损伤范围减少 48%。

3.4 隧洞纵向应变分布规律

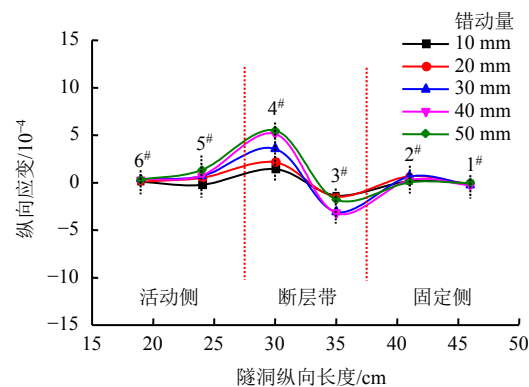
走滑断层错动作用下,两种工况下隧洞左边墙纵向应变的变化如图 17 所示,其中正值为拉应变,负值为压应变。

对于工况 1 无铰接隧洞,由图 17(a)可知:2[#]、3[#]断面为压应变,1[#]、4[#]、5[#]、6[#]及 7[#]断面处的纵向应变为拉应变。走滑断层对 1[#]、2[#]、6[#]及 7[#]断面的应变影响较小;随断层错动量值增大,3[#]断面的压应变持续增长。隧洞衬砌结构最大拉应变位于 5[#]断面处,为 12.44×10^{-4} ,最大压应变位于 3[#]断面处,为 -8.41×10^{-4} ,都位于断层带范围内。

对于工况 2 铰接隧洞,由图 17(b)可知:1[#]、4[#]、5[#]、6[#]断面为拉应变。走滑断层错动对 1[#]、6[#]、5[#]断面的应变的影响较小。随断层错动量值增大,5[#]断面的拉应变持续增长。隧洞衬砌左边墙纵向最大拉应变位于 4[#]断面处,为 5.44×10^{-4} ,最大压应变位于 3[#]断面处,为 -3.29×10^{-4} ,都位于断层带范围内。



(a) 工况 1 无铰接隧洞



(b) 工况 2 铰接隧洞

图 17 不同错动量下隧洞左边墙纵向应变
Fig.17 Longitudinal strain of tunnel left wall under different displacements

无铰接隧洞和铰接隧洞两种工况下隧洞右边墙纵向应变的变化如图 18 所示, 其中正值为拉应变, 负值为压应变。

对于工况 1 无铰接隧洞, 由图 18(a)可知: 1[#]、2[#]、3[#]断面为拉应变, 4[#]、5[#]、6[#]及 7[#]断面变为压应变。走滑断层对 1[#]、2[#]、6[#]断面的应变影响较小, 1[#]、2[#]、6[#]断面的纵向应变变化量相对较小; 随断层错动量值变增大, 5[#]、7[#]断面的压应变持续增长; 隧洞衬砌结构右边墙纵向最大拉应变位于 3[#]截面, 最大值为 7.72×10^{-4} 值, 最大压应变位于 4[#]截面, 为 -14.27×10^{-4} , 都位于断层带范围内。

对于工况 2 铰接隧洞, 由图 18(b)可知: 1[#]、2[#]、3[#]、6[#]断面的纵向应变为拉应变。走滑断层错动对 1[#]、6[#]断面的应变的影响较小。随着断层错动量增大, 2[#]和 3[#]断面的拉应变逐渐增加; 隧洞衬砌右边墙纵向最大拉应变位于 3[#]断面处, 为 3.98×10^{-4} , 最大压应变位于 5[#]断面处, 为 -4.74×10^{-4} , 都位于断层带范围内。

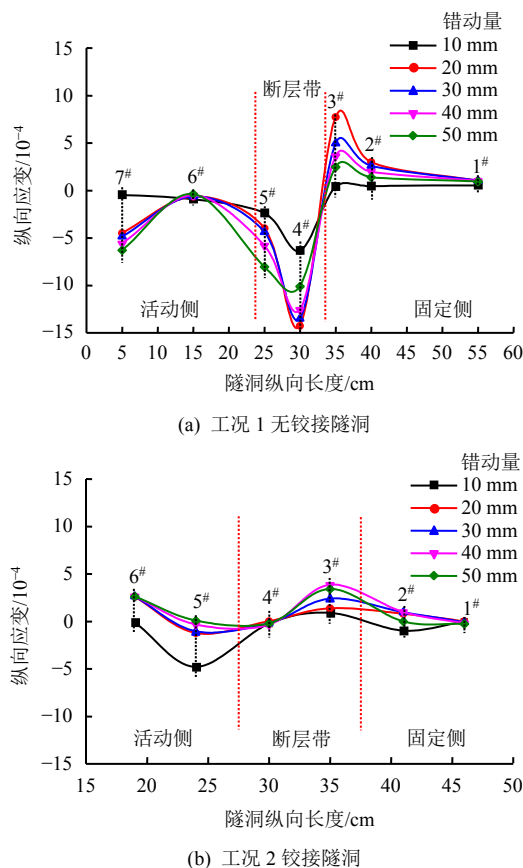


图 18 不同错动量下隧洞右边墙纵向应变
Fig.18 Longitudinal strains of tunnel right wall under different displacements

试验结果表明: 在走滑断层的错动作用下, 隧洞远离断层带衬砌应变很小, 几乎不受断层带影响;

断层带附近衬砌应变较大, 易发生屈服破坏。相较于工况 1 无铰接隧洞, 工况 2 铰接隧洞左右边墙纵向最大拉应变减少了 56%, 纵向最大压应变减少了 68%。

根据以上试验结果的分析可以得到, 在走滑断层错断作用下, 相较于无铰接隧洞, 铰接隧洞损伤主要集中在断层带附近衬砌节段间的转动, 节段衬砌损伤不明显。铰接隧洞衬砌结构纵向受力情况较无铰接隧洞有所改善, 铰接设计可以提高隧洞的抗错断性能。

4 不同铰接设计因素对隧洞抗错断影响

前文通过无铰接隧洞和铰接隧洞的物理模型试验, 得到铰接设计是提高隧洞抗错断能力的有效措施。然而, 在铰接隧洞抗错断设计参数作用机制方面, 诸如衬砌节段长度、厚度, 隧洞直径, 隧洞衬砌材料力学特性, 隧洞断面的形式, 隧洞轴线与断层带夹角等, 对走滑断层错动下铰接设计隧洞的破坏机制的影响还有待进一步的讨论, 下面将继续通过物理模型试验这一手段, 对这一问题做进一步的研究。试验分组情况见表 5, 试验工况的衬砌参数设计见表 6。

表 5 铰接设计因素试验分组

Table 5 Groups of the articulated design factors test

工况编号	试验内容
2	对比工况
3	衬砌节段厚度为 2 cm
4	衬砌节段长度为 15 cm
5	隧洞直径为 15 cm
6	隧洞与断层错动面夹角为 60°
7	衬砌节段弹性模量为 72 MPa
8	隧洞衬砌断面为三心圆断面

表 6 铰接设计因素试验工况参数

Table 6 Conditions parameters of the articulated design factors test

工况编号	节段长度 /cm	衬砌厚度 /cm	隧洞直径 /cm	弹性模量 /MPa	隧洞与错动面夹角 /($^\circ$)	衬砌断面形式
2	10	1	10	280	90	圆形
3	10	2	10	280	90	圆形
4	15	1	10	280	90	圆形
5	10	1	15	280	90	圆形
6	15	1	10	280	60	圆形
7	15	1	10	72	90	圆形
8	15	1	10	280	90	三心圆

4.1 铰接隧洞上覆围岩破裂形态

走滑断层错动作用下, 工况 2~8 铰接隧洞上覆

围岩破裂形态见图 19。

由图可知,走滑断层错动作用下,工况 2~8 铰接隧洞上覆围岩发育裂缝主要分布在断层带及其附近范围内,裂缝主要包括纵向剪切贯通裂缝、横向裂缝、斜裂缝。上覆围岩的主要裂缝为剪切作用下的贯通裂缝。由于铰接隧洞与围岩整体受到剪切作用,剪切贯通裂缝位于往断层带内,次级裂纹为往断层带两侧发育的横向裂缝和斜裂缝。主动侧围岩产生裂缝要多于固定侧裂缝。其中工况 8 围岩破裂形态最严重,裂缝最大宽度达 2 cm。

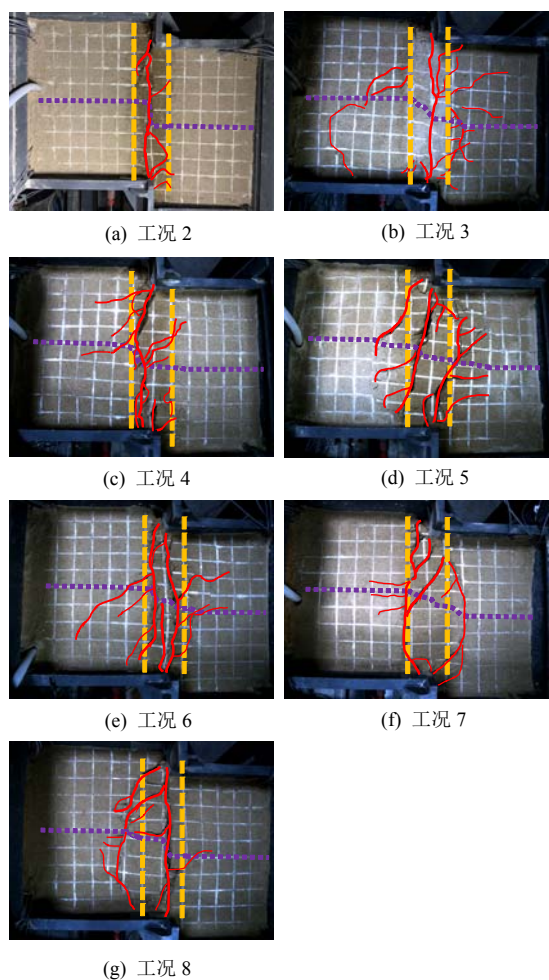


图 19 不同工况下铰接隧洞上覆围岩破裂形态
Fig.19 Fracture development of surrounding rock of flexible joint tunnel under different working conditions

图 20 给出了走滑断层错动作用下不同工况的铰接隧洞上覆围岩影响范围。由图可知:工况 3~8 的围岩影响范围较工况 2 均有显著增加;工况 6 增加最大,增加了 $3.5W_f$;工况 7 增加最小,增加了 $1.5W_f$ 。

试验结果表明:铰接隧洞上覆围岩发育裂缝主要分布在断层带及其附近范围内。在优化铰接隧洞

抗错断方面,改变铰接设计影响因素,隧洞上覆围岩影响范围均有显著增加。

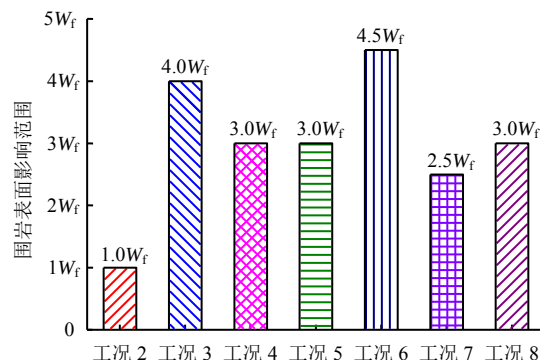


图 20 不同工况下铰接隧洞上覆围岩影响范围
Fig.20 Influence ranges of surrounding rock of flexible joint tunnel under different working conditions

4.2 铰接隧洞结构变形破坏特征

图 21 为走滑断层错动作用下,工况 2~7 铰接隧洞衬砌结构内部破裂形态。

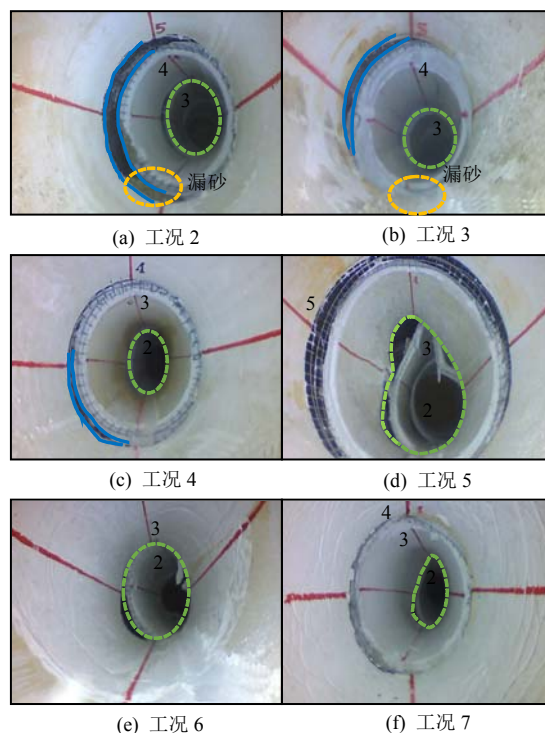


图 21 不同铰接因素隧洞结构内部破坏形态
Fig.21 Failure modes of the segments of tunnel under different working conditions

由图 21 可知,在走滑断层作用下,各种工况下的铰接隧洞结构损伤衬砌节段间的大角度转动、衬砌节段端部的剪压破坏以及变形缝的破坏。其中,工况 2 铰接隧洞衬砌节段间发生大角度转动,左边墙变形缝钢丝受拉张开,导致衬砌漏砂。工况 3 铰

接隧洞衬砌节段间发生转动,左上拱肩处变形缝钢丝受拉张开,导致衬砌露砂。工况4隧洞衬砌节段未发生明显的转动和错台,左下边墙变形缝受拉破坏同时在走滑断层错断作用下,由于围岩的挤压以及断层带两侧的差异位移^[7],导致工况2~7铰接隧洞断层带内衬砌节段都在一定程度上发生了变形,从试验结果中可以观察到垂直方向上隧洞直径的增加和水平方向上隧洞直径的减少,其中工况2、4、6隧洞截面均压缩为椭圆形,工况5、7隧洞截面发生类似“梨形”的不规则变形。

根据走滑断层作用下隧洞截面形变后近似椭圆,以铰接隧洞截面水平直径为短轴,竖直直径为长轴,计算椭圆截面的离心率。由此定义隧洞椭圆截面形变率 β 来评价隧洞横断面变形来表征结构损伤,即

$$\beta = \frac{\sqrt{(d_v^2 - d_h^2)}}{d_v} \quad (1)$$

式中: d_v 为隧洞椭圆截面长轴长度; d_h 为隧洞椭圆截面短轴长度。

图22为走滑断层错动后工况2~7铰接隧洞截面形变率。由图可知,相对于工况2,工况3隧洞截面形变率为0,即未发生形变。工况7隧洞截面形变率最高,节段严重变形,形变率增加了24%。隧洞抗错断能力降低。工况4、5、6铰接隧洞形变率都有一定程度的增加,衬砌节段产生了变形。

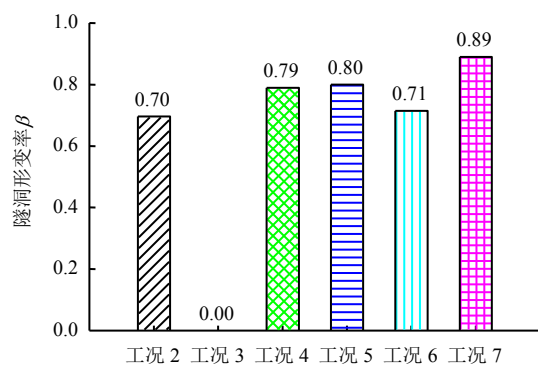


图22 隧洞截面形变率

Fig.22 Deformation rate of tunnel section

图23给出了不同工况下铰接隧洞的最终破坏形态。由图可知,在走滑断层作用下,工况2、3、4、6、7铰接隧洞衬砌节段间都发生了明显的转动,铰接隧洞整体变形呈现S形。其中工况2铰接隧洞节段2和节段3之间铰接设计柔性橡胶带脱落。工况5和工况8铰接隧洞断层带内节段发生了明显的

压剪破坏,由此证明衬砌的三心圆断面形式对于铰接隧洞的抗错断是不利的。

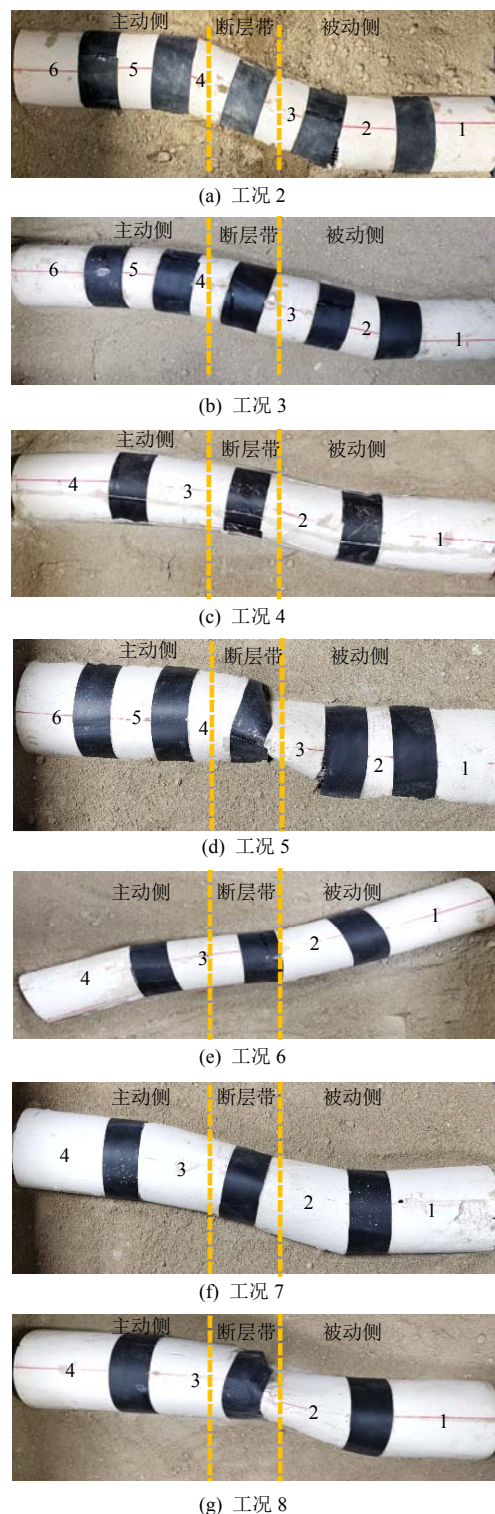


图23 隧洞衬砌最终破坏形态

Fig.23 The failure modes of lining

4.3 铰接隧洞纵向应变分布规律

走滑断层作用下,不同工况铰接隧洞边墙纵向应力峰值如图24所示。由图可知,走滑断层错动作

用下,相较于工况 2 对照组,其他工况铰接隧洞边墙最大拉应变显著增加,最大压应变影响较小。其中,工况 8 铰接隧洞最大拉应变增幅最大,增加了 4.5 倍。工况 6 铰接隧洞最大拉应变增幅最小,增加了 81%。工况 4、5、7 铰接隧洞最大拉应变分别增加了 2.4 倍、1.7 倍和 1.8 倍。

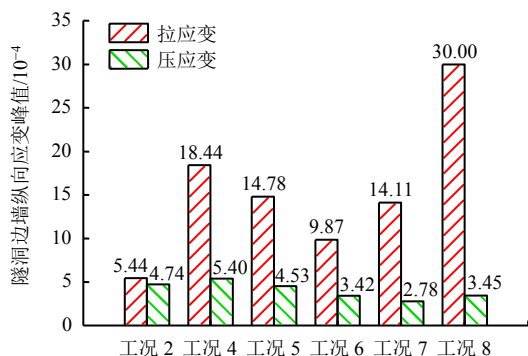


图 24 隧洞衬砌边墙纵向应力峰值
Fig.24 Maximum longitudinal stress of tunnel lining side wall

试验结果表明,在走滑断层作用下铰接隧洞整体变形呈现 S 形,衬砌结构主要的破坏形式为节段间的转动和错台,少数情况下衬砌节端发生压剪破坏。在优化铰接隧洞抗错断方面,增加衬砌厚度、增加衬砌混凝土强度等级、减小节段长度、减小隧洞直径可以有效提高铰接隧洞的抗错断性能;隧洞穿越断层带的最佳角度为正交;圆形断面相较于三心圆断面,能有效地增加铰接隧洞的抗断能力。

5 结 论

本研究以滇中引水香炉山隧洞为背景工程,以小尺度物理模型试验为主要研究手段,深入地研究了走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞的破坏形式及破坏机制。在铰接隧洞抗错断设计参数作用机制方面,详细研究了衬砌节段长度、衬砌厚度、隧洞直径、隧洞轴线与断层带夹角、隧洞断面形式、衬砌材料力学特性等因素对铰接设计隧洞抗断性能的影响。获得以下结论:

(1) 无铰接隧洞破坏模式为剪切和弯曲组合破坏,断层带内衬砌出现大量的纵向和环向裂缝,衬砌破坏程度严重,衬砌存在剥离脱落现象。由于围岩的挤压作用,隧洞截面呈现椭圆化变形,整体坍塌趋势明显。衬砌裂缝主要包括纵向裂缝、环向裂缝、斜裂缝,其中左边墙处发育的裂缝最多。在当前试验中,无铰接隧洞损伤破坏范围为 $4.0W_f$ 。

(2) 铰接隧洞整体变形呈现 S 形,衬砌结构破坏形式为节段间的转动和错台。通过连接段刚度较低材料的变形,铰接设计隧洞可以通过衬砌节段间的转动消纳活断层的错动,以减轻隧洞结构损伤程度。铰接隧洞以纵向裂缝为主,主要发生在左边墙与洞底之间的内外侧、右边墙外侧。铰接隧洞最终破坏范围为 $2.14W_f$,相较于无铰接减少 48%,表明铰接设计可改变活断层错断作用下隧洞的变形破坏模式,并减小隧洞结构的损伤范围。

(3) 在走滑断层的错动作用下,铰接隧洞远离断层带处衬砌应变很小,几乎不受断层带影响;断层带附近衬砌应变较大,易发生屈服破坏。活动侧内铰接隧洞右边墙以受压状态为主,而左边墙呈现受拉趋势,固定侧内的隧洞左边墙受拉而右边墙受压。与无铰接隧洞相比,铰接隧洞左右边墙纵向最大拉应变减少了 56%,纵向最大压应变减少了 68%,进一步表明铰接设计可以有效提高隧洞的抗错断性能。

(4) 在铰接隧洞抗错断设计参数作用机制方面,研究认为增加衬砌厚度、增加衬砌混凝土强度等级、减小节段长度、减小隧洞直径均可提高铰接隧洞的抗错断性能;隧洞穿越断层带的最佳角度为正交;圆形断面相较于三心圆断面,能增加铰接隧洞的抗断能力。

(5) 相比本文的试验条件,跨活断层隧洞的赋存环境更加复杂,如断层两侧岩性不一致、断层带本身具有倾角、断层带宽度达到 200 m 等等。为了优化铰接隧洞抗错断方面,考虑铰接设计因素对隧洞抗错断的影响,本研究尚未考虑到断层两侧岩性变化、断层倾角不同、大宽度的断层带、柔性连接宽度、柔性连接材料力学特性等其他因素对铰接隧洞的破坏形式和破坏机制的影响。另外,尚未通过数值模拟对模型试验进行验证,在后续的研究中可以进一步开展研究。

参 考 文 献

- [1] 彭建兵,崔鹏,庄建琦.川藏铁路对工程地质提出的挑战[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):2377-2389.
PENG Jian-bing, CUI Peng, ZHUANG Jian-qi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [2] WANG W L, WANG T T, SU J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space

- Technology**, 2001, 16(3): 133-150.
- [3] KONTOGIANNI V A, STIROS S C. Earthquakes and seismic faulting: effects on tunnels[J]. **Turkish Journal of Earth Sciences**, 2003, 12(1): 153-156.
- [4] 刘国钊, 乔亚飞, 何满潮, 等. 活动性断裂带错动下的隧道纵向响应解析[J]. **岩土力学**, 2020, 41(3): 923-932.
- LIU Guo-zhao, QIAO Ya-fei, HE Man-chao, et al. An analytical solution of longitudinal response of tunnels under dislocation of active fault[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 923-932.
- [5] 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(增刊 1): 2845-2852.
- XIONG Wei, FAN Wen, PENG Jian-bing, 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(Suppl.1): 2845-2852.
- [6] 马亚丽娜, 盛谦, 崔臻, 等. 基于三维离散-连续耦合方法的跨活动断裂隧洞错断破坏机制研究[J]. **岩土工程学报**, 2018, 40(增刊 2): 240-245.
- MA Ya-li-na, SHENG Qian, CUI Zhen, et al. Disruption and destruction mechanism of cross-active fault tunnels based on 3D discrete-continuous coupling method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(Suppl. 2): 240-245.
- [7] 汪振, 钟紫蓝, 赵密, 等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究[J]. **岩土工程学报**, 2020, 42(10): 1876-1884.
- WANG Zhen, ZHONG Zi-lan, ZHAO Mi, et al. Simulation of normal fault rupture and its impact on mountain tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(10): 1876-1884.
- [8] 赵颖, 郭恩栋, 刘智, 等. 走滑断层位错作用下城市地铁隧道损伤分析[J]. **岩土力学**, 2014, 35(增刊 2): 467-473.
- ZHAO Ying, GUO En-dong, LIU Zhi, et al. Damage analysis of urban metro tunnel under strike-slip fault[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl. 2): 467-473.
- [9] 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 Xue-zeng, WANG Xu-lin, LIN Liang-lun. 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.
- [10] 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 Xue-zeng, LIN Liang-lun. 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.
- [11] 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 Xue-zeng, WANG Xu-lin, LIN Liang-lun. 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.
- [12] LIU X Z, LI X F, SANG Y, et al. Experimental study on normal fault rupture propagation in loose strata and its impact on mountain tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 49: 417-425.
- [13] KIANI M, AKHLAGHI T, GHALANDARZADEH A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 51: 108-119.
- [14] 丁秀丽, 张雨霆, 张传健, 等. 隧洞穿越活动断层应对措施及其适应性研究综述[J]. **隧道与地下工程灾害防治**, 2019, 1(1): 8-23.
- DING Xiu-li, ZHANG Yu-ting, ZHANG Chuan-jian, et al. Review on countermeasures and their adaptability evaluation to tunnels crossing active faults[J]. **Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering**, 2019, 1(1): 8-23.
- [15] 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 Shu-ping, 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.
- [16] 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 Wei-zhong, ZHAO Wu-sheng, 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(Suppl. 1): 3411-3421.
- [17] 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.
- [18] 闫高明, 申玉生, 高波, 等. 穿越黏滑断层分段接头隧道模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4450-4458.
- YAN Gao-ming, SHEN Yu-sheng, GAO Bo, et al. Experimental study of stick-slip fault crossing segmental tunnels with joints[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4450-4458.
- [19] 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.
- [20] 刘学增, 郭彪, 李学锋, 等. 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(增刊 2): 3837-3843.
- LIU Xue-zeng, GUO Biao, LI Xue-feng, et al. Model experiment study on effect of deformation joints on road tunnel resisting destruction by thrust fault stick-slip dislocation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl. 2): 3837-3843.
- [21] 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 Xue-zeng, LIU Jin-dong, LI Xue-feng, 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.
- [22] 刘学增, 林亮伦, 王煦霖, 等. 柔性连接隧道在正断层黏滑错动下的变形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3545-3551.
- LIU Xue-zeng, LIN Liang-lun, WANG Xu-lin, et al. Deformation characteristics of tunnel with flexible joints affected by normal fault stick-slip dislocation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Suppl. 2): 3545-3551.
- [23] 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): 3037-3053.
- SUN Fei, ZHANG Zhi-qiang, YI Zhi-wei. 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): 3037-3053.
- [24] 王道远, 崔光耀, 袁金秀, 等. 断裂黏滑错动下隧道减错措施作用效果模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1515-1521.
- WANG Dao-yuan, CUI Guang-yao, YUAN Jin-xiu, et al. Model tests on effect of dislocation reducing measures of stick-slip fault of tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(8): 1515-1521.
- [25] 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 Feng-bo, ZHAO Bo-ming, YANG Qing-yuan, 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.
- [26] 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 Guang-yao, WANG Ming-nian, 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.