

DOI: XXX

逆断层错动下直墙式管道隧道结构响应及破坏模式试验研究

申玉生^{*1, 2}, 骆阳¹, 黄海峰¹, 刘君¹, 王浩麟¹, 杨春玲³, 铁明亮³

(1. 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;

2. 西南交通大学 国家陆地交通地质灾害防治工程研究中心, 四川 成都 610031;

3. 中国石油天然气管道工程有限公司 河北省管道隧道和跨越技术创新中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 依托穿越活动断层某直墙式管道隧道工程, 开展逆断层错动作用下隧道结构响应模型试验, 分析了衬砌竖向位移、应变及内力分布规律, 结合裂缝扩展形态探究了衬砌破坏机制。研究结果表明: 隧道拱顶竖向位移沿纵向呈 S 形分布, 断层错动量 50mm 工况下核心影响区为断层内部, 一般影响区为断层错动面沿上盘侧 0.9D~3.7D、下盘侧 0.9D~2.6D (D 为隧道宽度); 断层错动面附近衬砌发生拉伸破坏, 拉应变峰值主要出现在墙脚, 隧道衬砌仰拱、墙脚和拱脚损伤程度相较于其他部位更严重; 受断层走向与隧道轴线交角影响, 断层错动面附近隧道内力呈现非对称分布, 45° 对角线方向轴力和弯矩量值相对较大, 衬砌发生扭转、弯曲变形, 墙脚、仰拱和拱肩受力较为不利; 隧道衬砌仰拱、墙脚纵向开裂破坏, 断层错动面附近同时伴随隧道拱脚和边墙发生斜向剪切破坏。

关键词: 管道隧道; 直墙式断面; 结构响应; 破坏模式; 模型试验; 逆断层

中图分类号: O 319.56 文献标识码: A 文章编号: XXX

作者简介: 申玉生(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事强震作用隧道工程抗减震方面的研究工作。E-mail: sys1997@163.com。

Experimental study on structural response and failure mode of arched pipeline tunnel with straight walls under reverse fault

SHEN Yusheng *^{1, 2}, LUO Yang¹, HUANG Haifeng¹, LIU Jun¹, WANG Haokang¹, YANG Chunling³, TIE Mingliang³

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2.

National Engineering Research Center of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan

610031, China; 3. Hebei Provincial Pipe Tunnel and Crossing Technology Center, China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: Based on an arched pipeline tunnel with straight walls passing through an active fault, the model test was conducted under the action of a reverse fault. The vertical displacement, strain, and internal force distribution of the lining were analysed. Additionally, the failure mechanism of the lining was explored in combination with the crack propagation morphology. The research results indicate that: The vertical displacement of the tunnel arch is distributed in an S-shape along the longitudinal direction. While the fault displacement is 50mm, the core affected area is within the fault, and the general affected area is 0.9 D~3.7 D along the fault displacement surface on the hanging wall side and 0.9 D~2.6 D along the footwall side, where D is the tunnel width. The lining near the fault displacement surface experiences tensile failure, with the peak tensile strain mainly occurring at the foot of the wall. The damage to the inverted arch, foot of the wall, and arch foot of the tunnel lining is more severe compared to other areas. Due to the intersection angle between the fault direction and the tunnel axis, the internal forces of the tunnel near the fault displacement surface show an asymmetric distribution. The axial force and bending moment in the 45° diagonal direction are relatively large, and the lining undergoes torsional and bending deformation. The stress on the wall foot, inverted arch, and arch shoulder is relatively unfavorable. The arch and wall foot of tunnel lining are longitudinally cracked and damaged, and the area near the fault displacement surface is accompanied by oblique shear failure of the arch foot and side walls.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278414)

收稿日期: 2024-10-XX

*通信作者 (sys1997@163.com)

Key words: pipeline tunnel; arch section with straight walls; structural response; failure mode; model test; reverse fault

0 引言

石油和天然气长输管道是重要的生命线工程，管道失效将导致严重后果^[1]。随着能源需求增加，我国西部管道建设不可避免穿越活动断裂带，在地震作用下可能导致管道失效^[2]。将管道敷设在隧道内可降低失效风险，西气东输、中缅、中亚油气管道等广泛采用管道隧道方案。因此，穿越活动断层管道隧道结构响应研究对于保障管道安全运营具有重要意义。

2022 年青海门源发生 6.9 级地震，受冷龙岭活动断裂错动作用，大梁隧道结构发生严重破坏，混凝土压碎掉块、轨道板纵向开裂上拱^[3]。大量震害调研结果显示，活动断层错动是导致隧道结构震害严重的主要因素^[4]。

国内外学者对断层错动作用下隧道结构响应开展了研究。Qiao 等^[5]采用数值模拟方法研究发现在正断层位错作用下，隧道结构沿纵向呈倒 S 形分布。禹海涛等^[6]推导了穿越断层隧道结构分段柔性接头响应解析解，揭示了柔性接头布置方式和隧道-接头刚度比等因素对隧道内力的影响规律。Zhao 等^[7]考虑地层与隧道之间的法向和切向作用，建立了断层位错作用下隧道响应解析解。

模型试验被广泛用于揭示断层错动作用下隧道结构破坏规律。Wang 等^[8]通过模型试验研究了穿越正断层的马蹄形高铁隧道结构破坏模式，断层附近衬砌具有较高的剪切和弯曲应力，导致仰拱内侧纵向开裂。Zhang 等^[9]针对穿越逆断层的地铁隧道开展了模型试验，结果表明隧道衬砌发生拉伸弯曲破坏，开裂形式以纵向裂缝和斜裂缝为主，分别占裂缝总长度的 58.6% 和 34.3%。Zhang 等^[10]研究了穿越多破裂面走滑断层马蹄形隧道受力和变形规律，主破裂面附近衬砌具有相反的拉伸和压缩变形趋势，衬砌主要发生拉伸弯曲破坏。Guo 等^[11]依托圆形地铁隧道工程分析了地裂缝错动对隧道结构的影响，研究发现衬砌为扭剪受力模式，拱顶和仰拱螺栓附近管片开裂。Xu 等^[12]开展了穿越地裂缝矩形断面地下综合管廊试验，研究表明管廊发生弯曲变形，混凝土和钢筋未发生明显损伤。

综上所述，现有研究主要针对交通隧道和城市地下综合管廊，断面形式多为马蹄形、圆形或矩形，极少涉及管道隧道。根据油气管道敷设功能需求，管道隧道广泛采用直墙式断面，且需考虑隧道内回填材料和管道荷载。根据 Liu 等^[13]的研究，断层错动作用下断面形状对隧道衬砌损伤破坏影响较大，有必要开展穿越活动断裂带管道隧道结构破坏模式研究。

本文依托穿越逆断层某直墙式管道隧道工程，设

计了 1:20 隧道模型试验，研究在不同断层错动量作用下隧道结构位错及损伤特征。深入分析隧道衬砌竖向位移、应变及内力分布规律，揭示了衬砌破坏机制，为穿越活动断层管道隧道结构抗错设计提供参考。

1 工程概况

图 1 为穿越活动断层某管道隧道地质剖面图。上下盘（IV 级围岩）为中等风化灰岩，岩体较完整。断层区（V 级围岩）为强风化灰岩，节理裂隙密集发育，岩体极破碎，多呈散体碎块、碎裂结构。断裂走向 290°，断裂走向与隧道轴线交角约 51°。断层面倾角 60~70°。断裂性质为逆冲，为晚更新世活动断裂，未来 100 年可能造成的地表最大垂直位错量约 1.0m。

管道隧道采用钻爆法施工，横断面为直墙拱形，如图 2 所示。隧道高 5.99m、宽 7.03m。隧道支护体系由 0.24m 厚度的 C20 喷射混凝土和锚杆组成的初期支护以及 0.35m 厚度的 C35 钢筋混凝土二次衬砌构成。试验研究重点在于隧道运营过程中，断层错动作用下二次衬砌响应，暂未考虑初期支护的影响。隧道内回填粉质黏土，埋设两根外径 1219mm、壁厚 26.4mm 的 X80M 级钢管。

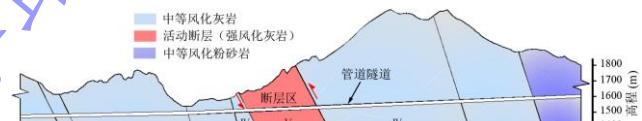


图 1 管道隧道地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of pipeline tunnel

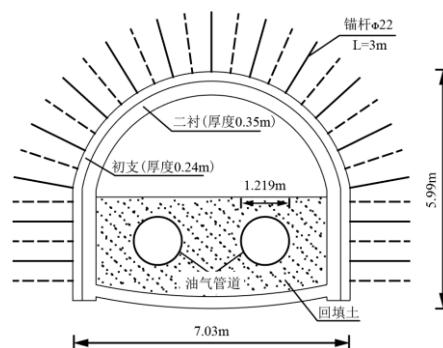


图 2 管道隧道结构横断面图

Fig. 2 Diagram of pipeline tunnel supporting system

2 模型试验设计

2.1 试验装置

本次试验采用自主设计的断层错动模型箱，箱体尺寸为 3.5m×2.5m×2.2m。模型箱由厚度为 1cm 的钢板和矩形钢管焊接而成。箱体分为断层上盘、断层带、断层下盘三部分，断层倾角及其走向与隧道交角均为 76°。断层区箱体由螺栓连接，试验前拧松螺栓释放约束，确保箱体可沿断层错动面滑动。在错动面相邻

两钢板之间铺设两块厚度为 1mm 的聚乙烯板, 并涂抹润滑油以减少摩擦阻力。断层位错模拟是通过千斤顶沿断层错动面方向对上盘施加位移, 如图 3 所示。

2.2 模型试验相似比及相似材料

考虑模型箱加载装置尺寸、承载力及材料性能等因素, 本次试验选取长度、密度和加速度作为基本物理量, 并允许管道和围岩、回填土、隧道衬砌采用部分不同的相似比^[14]。围岩、回填土、衬砌的相似比依次取 $C_l=1/20$ 、 $C_p=1/1.5$ 、 $C_a=1$, 管道的相似比依次取 $C_l=1/20$ 、 $C_p=1/5$ 、 $C_a=1$, 根据 Bockingham π 定理导出其他物理量相似关系见表 1 所示。

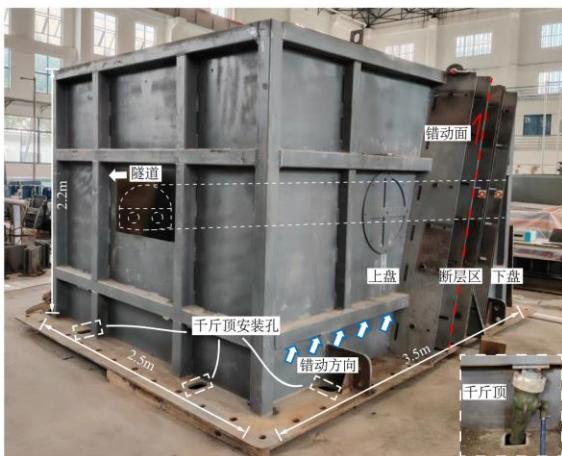


图 3 穿越断层隧道位错试验模型箱

Fig. 3 Test model box for dislocation in tunnel crossing faults

表 1 模型试验物理量相似关系一览表

Table 1 Table of similar relationships in physical quantities of model test

物理量	相似关系	相似比(模型/原型)		
		围岩、回填土	隧道衬砌	管道
长度	C_l	1/20	1/20	1/20
密度	C_p	1/1.5	1/1.5	1/5
加速度	C_a	1	1	1
弹性模量	$C_E=C_lC_pC_a$	1/30	1/30	1/100
泊松比	$C_\mu=1$	1	1	1
粘聚力	$C_c=C_lC_pC_a$	1/30	-	-
内摩擦角	$C_\varphi=1$	1	-	-
应力	$C_\sigma=C_lC_pC_a$	1/30	1/30	1/100
应变	$C_e=1$	1	1	1
力	$C_F=C_l^3C_pC_a$	1/12000	1/12000	1/40000
弯矩	$C_M=C_l^4C_pC_a$	1/240000	1/240000	1/800000

通过图 4 所示单轴压缩试验确定隧道衬砌相似材料质量比为石膏:石英砂:重晶石:硅藻土:水 = 1:0.2:0.6:0.4:1.4, 材料参数如表 2 所示。衬砌内配置直径 0.5mm、间距 25mm 的单层钢丝网模拟配筋, 配筋率按照等强度原则式 (1) 简化考虑^[15]。

$$\frac{A_s f_y}{A_c f'_c} = \frac{A'_s f'_y}{A'_c f'_c} \quad (1)$$

式中: A_s 和 A_y 分别为原型钢筋横截面积和屈服强度, A_c 和 A_c' 分别为原型 C35 混凝土横截面积和抗压强度, A'_s 和 f'_y 分别为模型钢丝横截面积和屈服强度, A'_c 和 f'_c 分别为模型石膏横截面积和抗压强度。

采用外径 60mm、壁厚 1.5mm 的 PVC 管模拟油气管道, 管道材料参数如表 3 所示。

通过三轴压缩试验 (图 5) 确定上下盘围岩相似材料质量比为河砂:粉煤灰:机油:重晶石:石英砂 = 18:31.2:8.5:25.3:17, 断层材料质量比为河砂:粉煤灰:机油 = 31:57:12, 隧道内回填土材料质量比为河砂:粉煤灰:机油:凡土林 = 20:71:8:1, 材料参数如表 4 所示。将河砂与锯末按照质量比 5:1 混合模拟断层错动面。



图 4 单轴压缩试验

Fig. 4 Uniaxial compression test



图 5 三轴压缩试验

Fig. 5 Triaxial compression test

表 2 衬砌材料参数及相似度

Table 2 Parameters and similarity of lining materials

类别	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	抗压强度(MPa)
原型值	2500	31.5	26
模型值	1667	1.05	0.87
试验值	1580	1.14	1.04
相似程度	满足	满足	接近

表 3 管道材料参数及相似度
Table 3 Parameters and similarity of pipeline materials

类别	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)
原型值	7850	210
模型值	1570	2.1
试验值	1380	2.7
相似程度	满足	接近

表 4 围岩材料参数及相似度
Table 4 Parameters and similarity of surrounding rock materials

类别	密度	弹性模	粘聚力	内摩擦
	(kg/m ³)	(GPa)	(kPa)	(°)
上下 盘(IV 级)	原型值	2200	3.7	450
	模型值	1467	0.12	15
	试验值	1520	0.11	11.7
	相似程度	满足	满足	接近
断层	原型值	1900	1.5	130
	模型值	1267	0.05	4.33
				24

(V 级)	试验值 相似程度	1310 满足	0.042 接近	4 满足	22 满足
回填 土	原型值 模型值 试验值 相似程度	1800 1200 1220 满足	0.038 0.0013 0.002 满足	10 0.33 0.36 满足	20 20 22 满足

2.3 监测方案

为获取隧道衬砌变形及受力特征, 布置如图 6 所示衬砌位移、应变监测断面及监测点。采用 LVDT 顶杆式位移计监测隧道拱顶竖向位移, 图 6(a)为位移监测点, 位移计固定于沿隧道纵向架设的矩形钢管, 位移计金属探针接触隧道拱顶, 当拱顶发生竖向位移时引起探针长度变化从而采集位移数据。通过电阻式应变片(标称电阻 120Ω)监测隧道衬砌应变, 图 6(b)为应变监测断面, 错动面附近的 3#~7#断面为主要监测断面, 其余为次要监测断面, 应变监测点布置如图 6(c)所示, 根据测点位置粘贴隧道衬砌环向和纵向应变片。

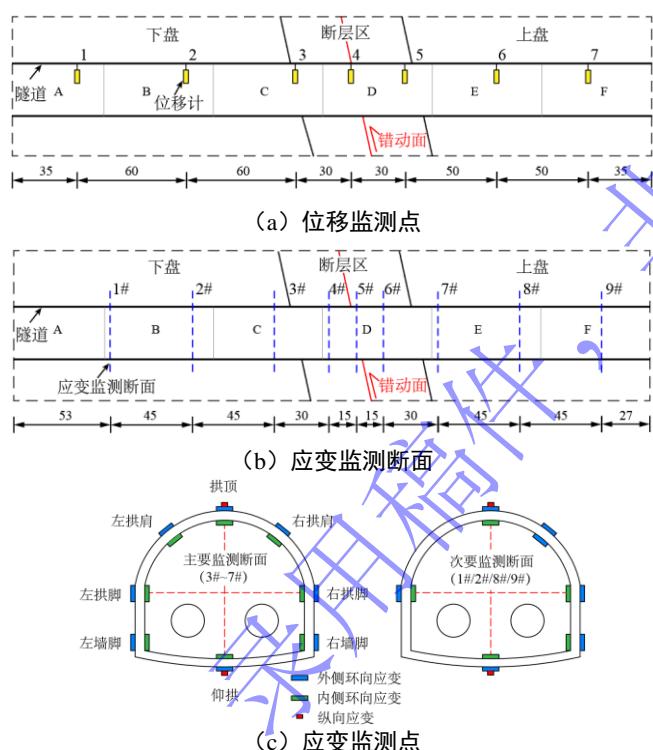


图 6 管道隧道监测断面及监测点布置图 (单位: cm)

Fig. 6 Monitoring section and measuring point layout of pipeline tunnel (unit: cm)

2.4 试验步骤

图 7 为模型试验主要步骤, 主要分为: ①浇筑衬砌, 养护完成后粘贴应变片, 搅拌围岩材料; ②分层填筑模型箱底部围岩材料至 0.96m 高度, 在衬砌端部钻孔, 通过钢钉和植筋胶刚性连接各段衬砌, 埋设隧道内填土和管道、安装位移计; ③填筑隧道上覆围岩

至设计标高, 静置 24h 确保围岩-隧道体系构造应力稳定; ④分 5 级加载断层错动量, 每级位移的竖向分量为 10mm, 加载速率为 0.5mm/min^[16], 每级错动量加载结束后停留 10min, 保证围岩位移及隧道衬砌受力稳定。隧道衬砌布置如图 8 所示, A~F 段之间刚性连接, 模拟整体式衬砌。



图 7 模型试验主要步骤

Fig. 7 Typical steps of model test

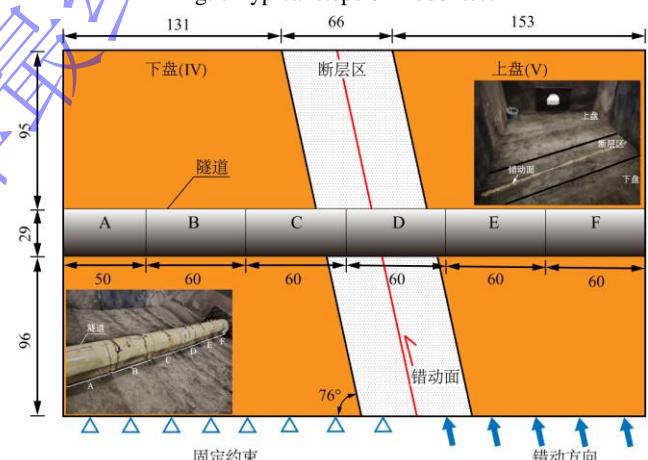


图 8 隧道衬砌布置示意图 (单位: cm)

Fig. 8 Schematic diagram of lining layout (unit: cm)

3 试验结果分析

3.1 隧道结构变形规律

试验在每级错动量加载结束后, 隧道拱顶最大竖向位移略小于断层错动量, 主要受模型土密实度影响, 吸收一部分变形, 然后再作用至衬砌。随着断层错动量增加, 模型土密实度增大, 拱顶最大位移量与断层错动量逐渐接近, 如图 9 所示。

在断层不同错动量工况下, 隧道拱顶竖向位移沿纵向呈 S 形分布, 且在断层错动面附近发生突变。拱顶竖向位移受断层错动作用的影响范围随错动量增加而增加。错动量 10mm 工况下, 拱顶竖向位移受断层影响区域主要为断层内部, 即断层错动面沿上下盘侧

各 $0.9D$, D 为隧道宽度。当错动量增加至 50mm , 拱顶竖向位移受断层影响区域为断层内部及向上下盘各延伸一定范围, 即断层错动面沿上盘侧 $3.7D$, 沿下盘侧 $2.6D$ 。其中, 核心区域为断层内部, 一般影响区为错动面沿上盘侧 $0.9D\sim 3.7D$ 、沿下盘侧 $0.9D\sim 2.6D$ 。随着断层错动量增加, 隧道衬砌由弹性向塑性状态转变, 当达到极限强度发生脆性开裂破坏, 衬砌裂缝由断层错动面附近向上下盘侧扩展, 拱顶竖向位移扰动范围进一步增加。建议管道隧道结构设计时根据断层预估错动量分区设防。

试验加载结束并清除上覆模型土, 隧道衬砌变形如图 10 所示。受逆断层错动影响, 上盘侧衬砌抬升, 衬砌轮廓线呈 S 形, 与拱顶竖向位移曲线规律一致, 拱顶最大竖向位移为 40mm (对应原型位移 800mm)。

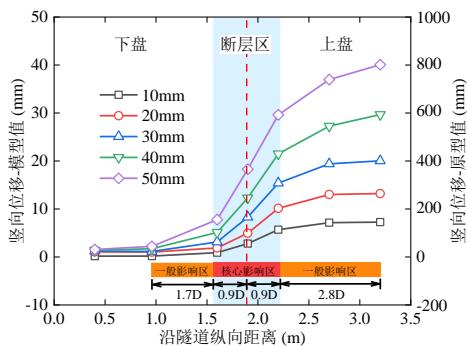


图 9 隧道拱顶竖向位移沿纵向分布曲线

Fig. 9 Vertical displacement distribution curves of arch crown along the longitudinal direction

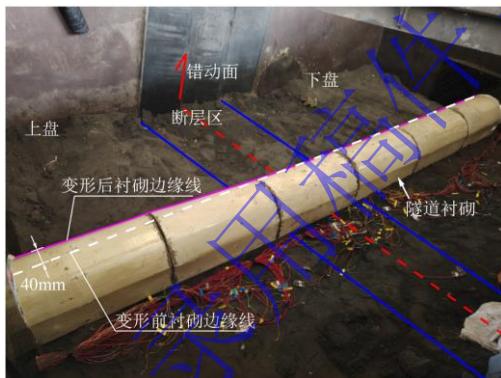


图 10 断层错动作用下隧道衬砌变形

Fig. 10 Tunnel lining deformation under fault dislocation

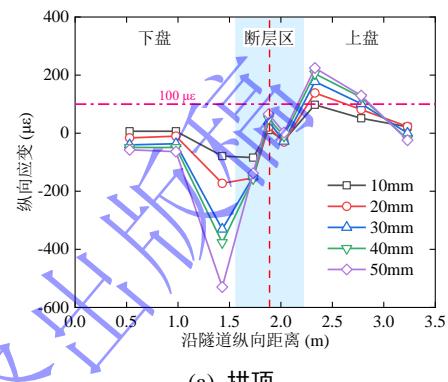
3.2 隧道结构应变分析

本次试验以混凝土受拉时应变为正值, 受压时应变为负值。由《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)可知 C35 混凝土受拉和受压破坏极限应变分别为 $100\mu\epsilon$ 和 $-1500\mu\epsilon$ 。

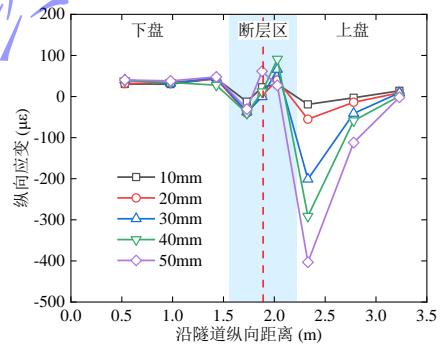
由图 11 隧道衬砌外侧纵向应变沿纵向分布曲线可知, 断层错动面附近, 隧道拱顶和仰拱纵向应变发生突变。上盘侧拱顶纵向应变为正值, 隧道结构处于

受拉状态。当断层错动量大于 10mm , 拱顶纵向应变超过受拉极限应变限值, 衬砌出现纵向受拉破坏。断层错动量 50mm , 拱顶出现最大拉应变 $225\mu\epsilon$ 。下盘侧拱顶纵向应变为负值, 加载工况下未出现受压破坏。仰拱纵向应变正负号分布规律与拱顶大致相反, 上盘侧受压、下盘侧受拉。

隧道衬砌关键断面 (3#、5#、7#) 环向应变分布曲线如图 12 所示。衬砌横断面内相同位置的内外侧环向应变正负符号大致相反, 即一侧受拉另一侧受压。



(a) 拱顶



(b) 仰拱

图 11 隧道衬砌外侧纵向应变沿纵向分布曲线

Fig. 11 Longitudinal strain distribution curve along the longitudinal direction on the outer side of lining

3#断面位于下盘侧, 受断层错动影响相对较小, 仅当错动量达到 50mm , 隧道拱顶外侧环向应变超过拉应变限值, 为 $125\mu\epsilon$ 。位于断层错动面的 5#断面, 隧道衬砌环向应变正负值发生突变, 且内外侧环向应变量值差异较为明显, 表明衬砌横断面承受弯曲作用, 隧道拱顶、拱脚和墙脚环向应变均出现不同程度的拉应变超限, 应变峰值位于左墙脚内侧, 为 $390\mu\epsilon$ 。7#断面位于上盘侧, 受上盘抬升作用, 隧道衬砌拉伸破坏较下盘侧严重, 仰拱、墙脚、拱脚、拱顶均出现拉应变超限, 拉应变峰值位于右墙脚内侧, 为 $465\mu\epsilon$ 。

隧道衬砌环向应变峰值统计如表 5 所示。逆断层错动作用下, 衬砌主要出现拉应变超限, 发生拉伸破坏, 压应变均在限值以内。受断层错动影响, 位于断层内和上盘侧的衬砌拉应变峰值明显大于下盘侧, 且

拉应变峰值均出现在隧道墙脚位置。逆断层错动作用下，隧道结构发生拉伸、扭转变形，直边墙的存在导致隧道边墙脚为近似 101° 的转角，较其他部位更容易发生拉应力集中，因此出现拉应变峰值。

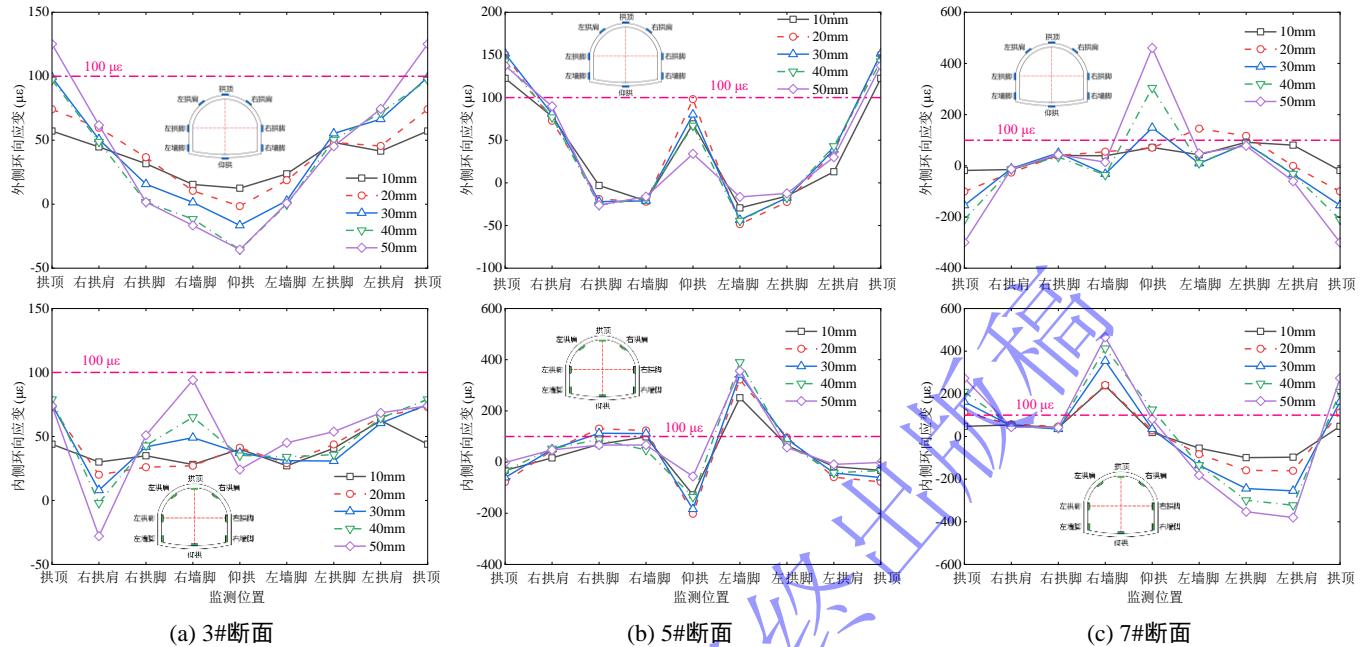


图 12 隧道衬砌关键断面环向应变分布曲线

Fig. 12 Distribution curve of circumferential strain on key sections of lining

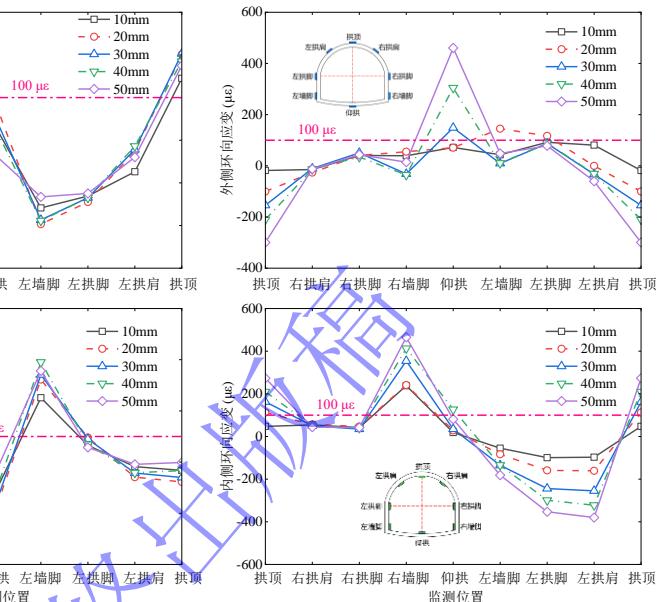
表 5 隧道衬砌环向应变峰值统计表

Table 5 Table of peak circumferential strain of lining

断面	衬砌拉应变		衬砌压应变	
	峰值 ($\mu\epsilon$)	位置	峰值 ($\mu\epsilon$)	位置
1#	94	内侧-拱顶	-60	内侧-仰拱
2#	106	外侧-仰拱	-130	内侧-右拱肩
3#	125	外侧-拱顶	-36	外侧-仰拱
4#	432	内侧-左墙脚	-465	内侧-仰拱
5#	390	内侧-左墙脚	-202	内侧-仰拱
6#	153	内侧-左墙脚	-350	内侧-左拱肩
7#	465	内侧-右墙脚	-380	内侧-左拱肩
8#	309	内侧-右墙脚	-445	外侧-仰拱
9#	347	内侧-右墙脚	-34	内侧-左拱脚

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)中 C35 混凝土拉伸损伤因子与拉应变关系(图 13)，绘制隧道衬砌断面测点拉伸损伤因子分布图，如图 14 所示。逆断层错动作用下，衬砌内外侧拉伸损伤较严重区域主要集中在 3#~7#断面，即错动面附近区域。衬砌内侧损伤程度和损伤范围整体大于外侧。隧道仰拱和左右墙脚损伤程度较其他部位更严重，最大损伤因子均达到 0.96，其次为拱脚，最大损伤因子为 0.93。仰拱损伤主要受逆断层错动挤压衬砌导致，且仰拱曲率较普通交通隧道小，受力更为不利。墙脚和拱脚部位由于衬砌直边墙在转角处近似呈折线，断层错动作

直墙拱形断面管道隧道墙脚为受力薄弱部位，建议在墙脚部位加强配筋，避免出现隧道结构整体失稳破坏，对隧道内埋设的油气管道安全运营造成影响。



用不容易出现应力集中，导致衬砌损伤。考虑到直墙式管道隧道断面特征，建议优化隧道断面形状，如采取带曲边墙的三心圆断面、减小隧道仰拱曲率半径等，改善管道隧道结构受力。

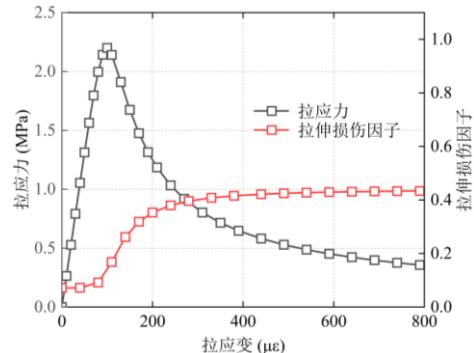


图 13 C35 混凝土拉伸损伤因子与拉应变关系曲线

Fig. 13 Relationship curve between tensile damage factor and tensile strain of C35 concrete

3.3 隧道结构内力分布

隧道结构内力分布规律可反映隧道结构受力模式，揭示衬砌变形和破坏机制。根据衬砌内外侧环向应变、弹性模量和截面尺寸，由式(2)~(3)计算得到衬砌轴力 N 和弯矩 M：

$$N = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)A = \frac{1}{12}Ebh(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)W = \frac{1}{12}Ebh^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3)$$

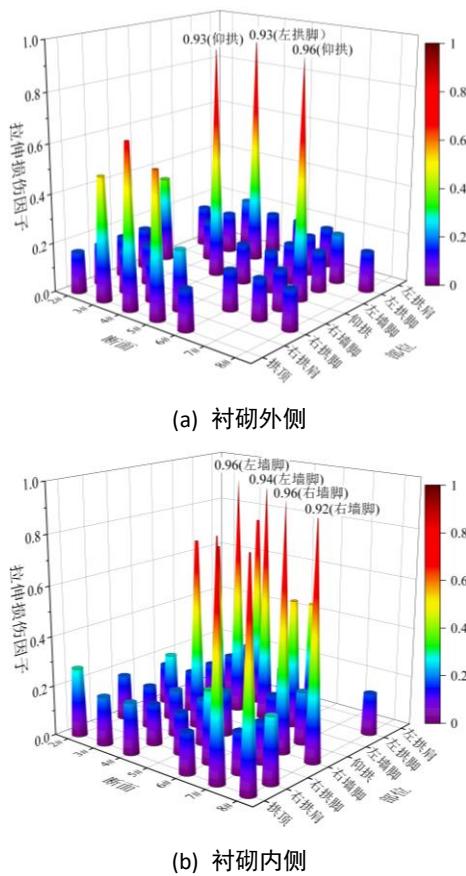


图 14 隧道衬砌关键断面拉伸损伤因子分布图

Fig. 14 Distribution of tensile damage factor on key sections of lining

式中: N 为衬砌截面轴力, 拉力为正值、压力为负值;

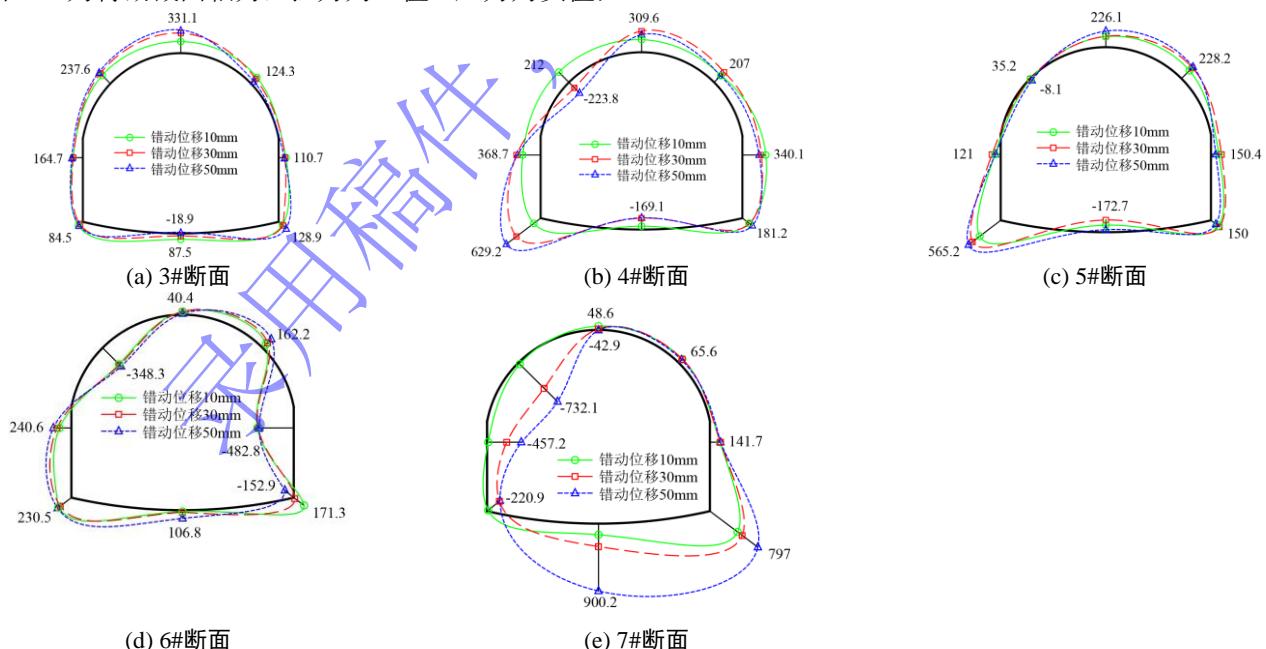


图 15 隧道衬砌关键断面轴力分布图 (单位: N)

Fig. 15 Axial force distribution of key sections of lining (unit: N)

图 16 为隧道结构 3#~7#监测断面弯矩分布。3#断面位于下盘侧, 隧道衬砌弯矩量值相对较小且整体呈对称分布, 最大弯矩位于右墙脚, 为 3.2N·m (对应

M 为衬砌截面弯矩, 使衬砌内侧受拉的弯矩为正值, 反之为负值; σ_1 和 σ_2 分别为衬砌内侧和外侧测点的应力; ε_1 和 ε_2 分别为衬砌内侧和外侧测点的应变; E 为衬砌的弹性模量, 1.14GPa; W 为衬砌截面抵抗矩; A 为截面的面积; b 为截面宽度, 取单位长度 1m; h 为衬砌厚度, 17.5mm)。

图 15 为断层典型错动量下 ($\delta=10, 30, 50\text{mm}$), 隧道结构 3#~7#监测断面轴力分布。3#断面位于下盘侧, 断面轴力关于隧道中心线大致呈对称分布, 最大值轴力值位于拱顶, 为 331.1N (对应原型值 3.97MN)。

由于隧道轴线与断层走向呈 76° 交角, 4#~7#监测断面轴力呈现非对称分布。位于断层区的 4#~5#监测断面衬砌轴力较 3#断面显著增加, 最大轴力均位于左墙脚, 分别为 629.2N 和 565.2N。6#断面轴力分布规律出现反转, 左墙脚轴力减小, 最大轴力值位于右拱脚, 为 -482.8N。7#监测断面位于上盘侧靠近断层位置, 受上盘和断层区刚度突变对围岩传递位移量差异的影响, 隧道结构轴力增加, 最大轴力位于仰拱, 为 900.2N (对应原型值 10.8MN), 为 3#断面最大轴力的 2.7 倍, 同时右墙脚也处于较大轴力水平, 为 797N。

断层错动过程中, 隧道衬砌发生抬升、扭转等复杂受力模式, 位于 45° 对角线方向轴力量值相对较大, 墙脚和仰拱均处于不利受力部位。

原型值 $0.77\text{MN}\cdot\text{m}$)。

位于断层区的 4#~6#断面和上盘侧靠近断层的 7#断面弯矩量值相较于 3#断面迅速增加。4#断面仰拱右

侧、左拱肩附近弯矩量值相对较大，最大弯矩量值位于仰拱，为 $-22.5\text{N}\cdot\text{m}$ （对应原型值 $-5.4\text{MN}\cdot\text{m}$ ），为3#断面最大弯矩的7倍。7#断面衬砌弯矩呈现相反规律，仰拱左侧、拱顶附近弯矩量值相对较大，最大弯矩量值位于拱顶，为 $16.7\text{N}\cdot\text{m}$ 。5#~6#断面衬砌弯矩分布规

律介于3#和7#断面之间。受隧道与断层交角影响，断层错动作用下4#~7#断面隧道衬砌呈现扭转、弯曲变形，呈非对称分布，衬砌沿 45° 对角线方向弯矩量值较大。

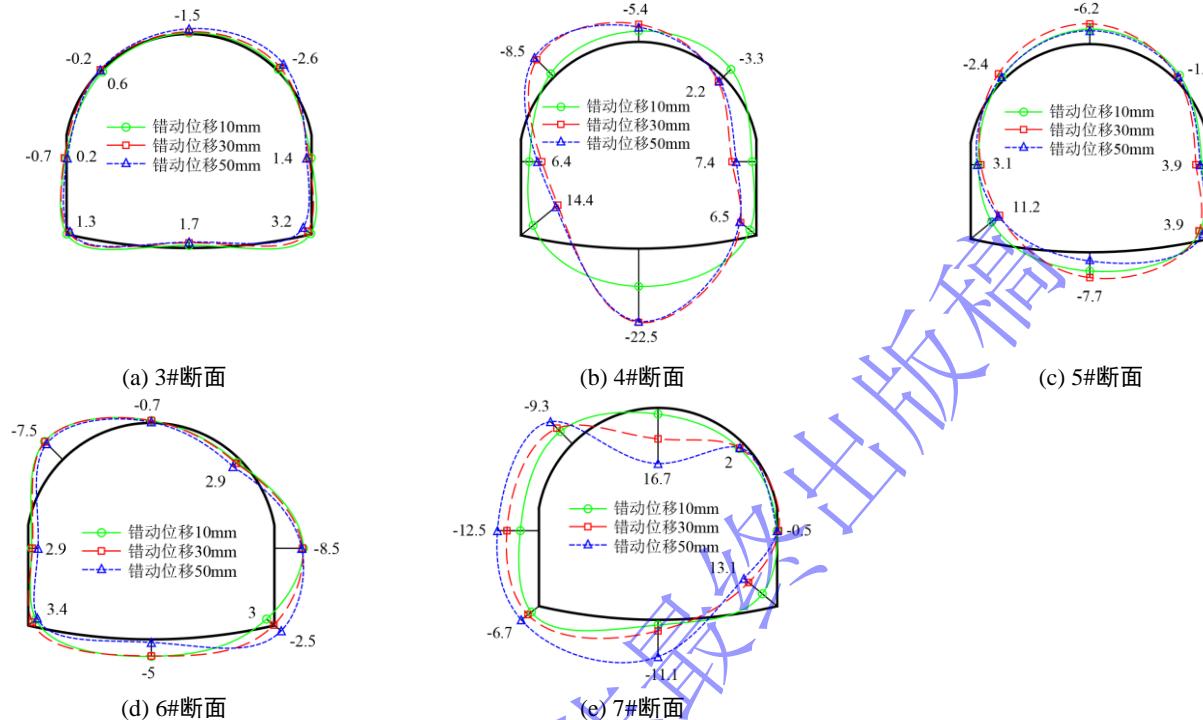


图 16 隧道衬砌关键断面弯矩分布图（单位：N·m）

Fig. 16 Bending moment distribution of key sections of lining (unit: N·m)

3.4 隧道结构破坏模式

图17为隧道衬砌裂缝展布图。各段衬砌裂缝长度排序依次为：E段（349cm）>D段（249cm）>C段（241cm）>F段（193cm）>B段（89cm）>A段（13cm）。位于断层及上盘侧的C~F段衬砌开裂破坏程度大于下盘侧A、B段衬砌。分别位于上下盘侧的F段、B段衬砌与断层错动面距离大致相等，而F段开裂较B段更严重。主要受活动上盘抬升作用所致。

隧道衬砌裂缝统计及典型破坏特征分别如表6和图18所示。隧道仰拱和墙脚相较于其他部位破坏严重，是抗错的受力薄弱部位。各段衬砌仰拱和墙脚裂缝长度之和的占比均达到60%以上，A和F段占比达到100%，且C~F段衬砌仰拱和墙脚部位相邻裂缝贯通。拱脚、拱肩、拱顶裂缝长度占比逐渐降低，衬砌各部位裂损程度依次为仰拱>墙脚>拱脚>拱肩>拱顶。

远离断层区的A、B和F段衬砌，受上下盘相对位移产生的拉伸、挤压受力作用，破坏特征主要为仰拱、墙脚纵向开裂。断层区附近的C~E段衬砌，受断层错动面剪切作用及断层走向与隧道轴线交角影响，隧道结构转变为拉伸、挤压、剪切、扭转等复杂受力

模式，衬砌以仰拱、墙脚纵向开裂破坏为主，同时拱脚和边墙出现斜向剪切裂缝。E段衬砌仰拱受上盘抬升挤压作用出现大范围“Y”形裂缝。

3.5 隧道结构抗错断接设计建议

鉴于直墙式管道隧道内力分布及破坏特征，建议设防区域内采用抗错断接设计，通过铰接接头转动、错动变形吸收地层强制位移，减轻隧道衬砌破坏程度，并使衬砌破坏集中在断层错动面局部范围，避免发生整体垮塌，同时便于维修。如图19所示为穿越活动断层管道隧道衬砌抗错断柔性接头模型，在两槽形钢板之间硫化连接橡胶，槽型钢板通过螺栓与管道隧道衬砌连接，通过橡胶大变形性能吸收断层错动位移。

4 结 论

本文依托某直墙式管道隧道工程，采用模型试验方法分析了逆断层错动作用下管道隧道衬砌位错及损伤特征，结合裂缝扩展形态探究了衬砌破坏机制。主要得出以下结论：

(1) 隧道拱顶竖向位移沿纵向呈S形分布，且在断层错动面附近发生突变。断层错动量10mm工况下，拱顶竖向位移受断层影响区域主要为断层内部，即错动面沿上下盘侧各 $0.9D$ (D 为隧道宽度)。当断

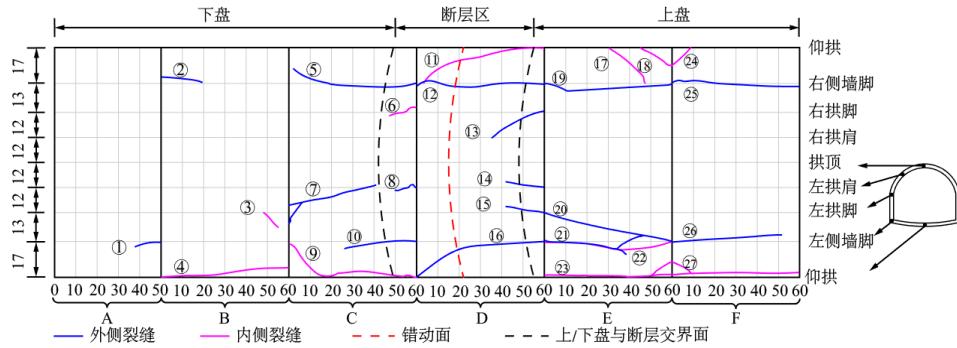


图 17 隧道衬砌裂缝展布图 (单位: cm)

Fig. 17 Layout of lining cracks (unit: cm)

表 6 隧道衬砌裂缝统计表

Table 6 Table of lining crack

衬砌段	部位	裂缝长度(cm)	裂缝占比	破坏特征
A	墙脚	13	100%	墙脚纵向开裂
	拱脚	10	11%	
B	墙脚	19	22%	墙脚和仰拱纵向开裂
	仰拱	60	67%	
C	拱肩	12	5%	拱脚斜向剪切破坏;
	拱脚	68	28%	拱肩、墙脚和仰拱纵
	墙脚	94	39%	向开裂
	仰拱	67	28%	
D	拱肩	18	7%	拱肩、拱脚和仰拱斜
	拱脚	46	19%	向剪切破坏; 墙脚纵
	墙脚	124	50%	向开裂
	仰拱	61	24%	
E	拱脚	75	22%	墙脚纵向开裂; 边墙
	墙脚	161	46%	斜向剪切破坏; 仰拱
	仰拱	113	32%	呈“Y”形开裂
F	墙脚	111	58%	仰拱、墙脚纵向开裂
	仰拱	82	42%	

层错动量增加至 50mm, 拱顶竖向位移受断层影响的核心区域为断层内部, 一般影响区为错动面沿上盘侧 0.9D~3.7D、沿下盘侧 0.9D~2.6D。管道隧道结构设计时应根据断层预估错动量进行分区设防。

(2) 断层错动面附近隧道衬砌断面应变超过拉应变限值, 发生拉伸破坏, 拉应变峰值主要出现在墙脚。隧道衬砌仰拱、墙脚和拱脚损伤程度相较于其他部位严重。仰拱损伤主要受断层错动挤压所致, 墙脚和拱脚损伤主要由于衬砌直边墙在转角处出现应力集中。

(3) 受断层错动影响, 位于断层内和上盘侧衬砌断面弯矩和轴力量值较下盘侧迅速增加。由于隧道轴线与断层走向成 76° 交角, 断层内和上盘侧隧道轴力和弯矩呈现非对称分布, 45° 对角线方向轴力和弯矩量值相对较大, 隧道衬砌发生扭转、弯曲变形, 墙脚

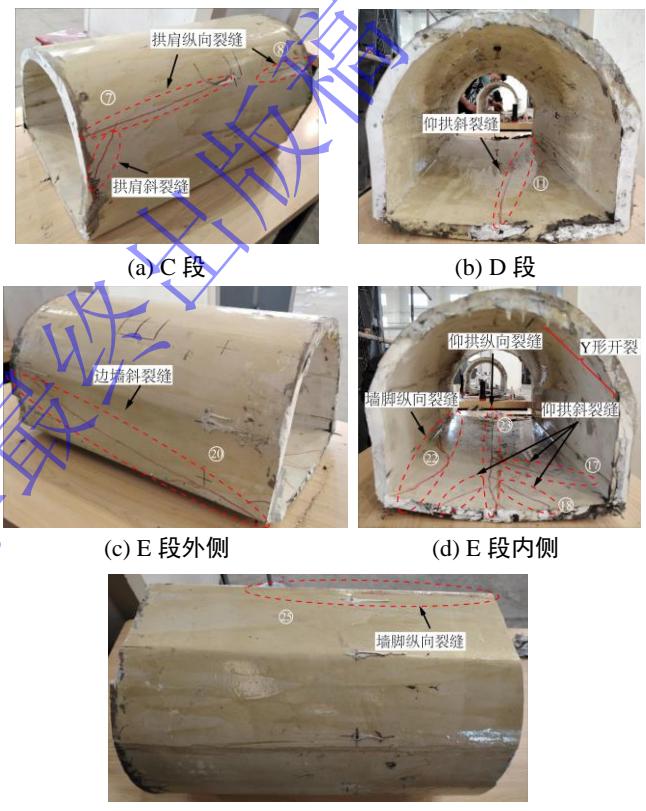


图 18 隧道衬砌典型破坏特征

Fig. 18 Typical failure characteristic diagram of lining



(a) 正视图 (b) 斜视图

图 19 管道隧道衬砌抗错断柔性接头模型

Fig. 19 Flexible joint model for pipeline tunnel

、仰拱和拱肩受力较为不利。

(4) 隧道衬砌仰拱、墙脚纵向开裂破坏, 各段衬砌仰拱和墙脚裂缝长度之和的占比达到 60% 以上, 裂损程度较其他部位更严重, 是抗错的受力薄弱位置。断层错动面附近受剪切作用, 同时伴随隧道拱脚和边墙发生斜向剪切破坏。

参考文献:

- [1] ROSTAMI H, OSOULI A, KUMAR S. Experimental modeling of far-field effects in buried pipelines subjected to reverse faulting [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, **164**: 107561.
- [2] MA C, CHENG X, XU T, et al. Research on local buckling failure range of X80 buried steel pipeline under oblique-reverse fault [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, **164**: 107592.
- [3] 张玉芳, 袁坤, 周文皎, 等. 门源地震对跨冷龙岭断层的大梁隧道结构变形特征和地表裂缝分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(05): 1055-69. (ZHANG Yufang, YUAN Kun, ZHOU Wenjiao, et al. Study on structural deformation characteristics and surface crack distribution of girder tunnel across Lenglongling fault caused by Menyuan earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(05): 1055-69. (In Chinese))
- [4] 朱合华, 禹海涛, 韩富强, 等. 穿越活动断层隧道抗震韧性设计理念与关键问题 [J]. 中国公路学报, 2023, **36**(11): 193-204. (ZHU Hehua, YU Haitao, HANFuqiang, et al. Seismic resilience design principles and key issues for tunnels crossing active faults [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, **36**(11): 193-204. (In Chinese))
- [5] QIAO Y, TANG J, LIU G, et al. Longitudinal mechanical response of tunnels under active normal faulting [J]. Underground Space, 2022, **7**(4): 662-79.
- [6] 禹海涛, 卫一博. 穿断层分段柔性接头隧道纵向地震响应解析解 [J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(05): 912-20. (YU Haitao, WEI Yibo. Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnels with segmental flexible joints crossing faults [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(05): 912-20. (In Chinese))
- [7] ZHAO M, XU L, HUANG J, et al. Analytical solutions of the tunnels under the fault creeping by elastic foundation beam model with considering tangential interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, **172**: 108047.
- [8] WANG T, GENG P, LI P, et al. Deformation and failure of overburden soil subjected to normal fault dislocation and its impact on tunnel [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, **142**: 106747.
- [9] ZHANG Z, ZHANG Y, WEI R, et al. The damage mode and forced response characteristics of articulated lining structure: A case study of metro tunnel under a reverse fault action [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, **140**: 105246.
- [10] ZHANG X, SHEN Y, QIU J, et al. Failure and deformation mode for soil and tunnel structure crossing multiple slip surfaces of strike-slip fault in model test [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, **179**: 108541.
- [11] GOU Y, HUANG Q, KANG X, et al. Experimental study on the mechanical response of metro shield tunnels obliquely crossing ground fissures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, **132**: 104849.
- [12] XU Q, BAI C, PENG J, et al. Model test of prefabricated underground utility tunnel crossing active ground fissures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, **140**: 105279.
- [13] LIU Y, YAO C, LUO W, et al. Deformations and damages of tunnels subjected to strike-slip faulting: Effects of tectonic stress and cross-sectional shape [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, **160**: 108159.
- [14] 杜修力, 韩俊艳, 李立云. 长输埋地管道振动台试验设计中相似关系的选取 [J]. 防灾减灾工程学报, 2013, **33**(03): 246-52. (DU Xiuli, HAN Junyan, LI Liyun. Selection of shaking table test similarity relations for long-distance buried pipeline [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2013, **33**(03): 246-52. (In Chinese))
- [15] 周光新, 盛谦, 张传健, 等. 穿越走滑断层铰接隧洞抗错断设计参数作用机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(05): 941-53. (ZHOU Guangxin, SHENG Qian, ZHANG Chuanjian, et al. Study on action mechanism of anti-dislocation design parameters of a tunnel with flexible joint crossing strike-slip faults [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2022, **41**(05): 941-53. (In Chinese))
- [16] 刘小岩, 张传庆, 史铁勇, 等. 跨活断层深埋隧道轴线错动位移模式试验研究 [J]. 岩土力学, 2021, **42**(05): 1304-12. (LIU Xiaoyan, ZHANG Chuanqing, SHI Tieyong, et al. Experimental study of axis displacement mode of deep buried tunnel across active faults [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(05): 1304-12. (In Chinese))