

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202003039

走滑断层作用下跨断层隧洞错断模型试验研究*

王天强^{1,2}, 崔臻², 盛谦², 宁宝宽¹, 马亚丽娜², 周光新²

(1. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 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)

摘要: 隧洞抗错断研究中, 正、逆断层研究较多, 走滑断层研究较少。针对走滑断层引起的隧洞变形破坏、应变分布规律以及上覆围岩的破裂形态等关键问题, 以滇中引水输水隧洞为依托工程, 制作了隧洞模型开展走滑断层作用下断层隧洞的抗错断模型试验研究, 得到隧洞在走滑断层断层错动作用下的结构响应规律。结果表明: ①隧道衬砌结构在走滑断层作用下的破坏形式是弯曲张拉破坏以及直接剪切组合破坏, 其中剪切破坏是主要破坏形式; ②隧道衬砌结构沿纵向以受拉为主, 主要集中在活动盘距离错断面 $-0.5D \sim 2.0D$ (D 为隧洞直径) 范围内的隧洞衬砌顶部以及两侧拱腰沿纵向位置处, 而受压区主要在活动盘距离错动面 $-0.5D \sim 0.5D$ 内与活动盘移动方向一致的一侧拱腰; 环向应变的影响主要集中在断层错动面附近; ③活动盘受断层错动影响范围和剧烈程度均小于固定盘, 故断层错动作用下的固定盘是隧洞抗错断控制重点。

关键词: 隧洞; 走滑断层; 模型试验; 应变分布; 变形特性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0597-09

Model Experimental Study of the Influence of Strike-slip Fault with Dislocation on Tunnel

WANG Tianqiang^{1,2}, CUI Zhen², SHENG Qian², NING Baokuan¹, MA Yalina²,
ZHOU Guangxin²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Most studies in the literature have focused on the effect of normal and reverse fault on the tunnel lining structural response, and only a few had investigated the performance of tunnel linings subject to strike-slip faults. Focusing on this problem, a model test of tunnel lining performance under strike-slip fault movements was conducted based on the Central Yunnan water conveyance tunnel. The results suggest that the tunnel lining structural failures were mainly due to the combination of bending tension and direct shear, in which the shear failure plays the main role. The tensile deformation was distributed along the tunnel alignment, focusing on the tunnel crown and springlines in the

* 收稿日期:2020-03-18;修回日期:2020-08-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401803)、国家自然科学基金资助项目(51779253,41672319)、长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016388/KY)、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金课题(SKLG-DUEK1912)资助

作者简介: 王天强(1995—),男,硕士研究生。主要从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail:1091035861@qq.com

range of $-0.5D$ (D is the tunnel diameter) to $2.0D$ away from the strike-slip fault zone. The compressive deformation mainly distributed on the tunnel springlines in the range of $-0.5D$ and $0.5D$, and kept in line with the movement direction. The influence of circumferential strain was mainly concentrated near the fault zone. Moreover, the tunnel lining deformation in the stationary block was apparently greater than that in the moving wall under strike-slip fault movements. Therefore, more attention should be paid to the structural response of tunnel linings buried in the stationary block.

Keywords: tunnel; strike-slip fault; model test; strain distribution; deformation characteristics

引言

构造地震是由于地壳板块间的断层相对运动而产生,而地壳板块间的断层按照错动方式分为正断层、逆断层和走滑断层,按照运动形式分为粘滑和蠕滑两种^[1]。我国的西部地区存在较多的活动断裂带,这一现状导致在西部隧道建设过程中不可避免要穿越活动断层,使得隧道抗错断问题成为研究西部隧道不可回避的重要研究内容。

国内外学者就此问题开展了一系列的研究工作,M.L.Ling等^[2]通过模拟逆断层作用下穿越活断层盾构隧道的缩尺模型试验,研究得到盾构隧道在逆断层作用下的变形破坏特点。M.Kiani等^[3]通过模型试验方法探究正断层作用下,隧洞埋深与断层倾角对节段隧洞结构的影响。马亚丽娜等^[4]通过建立二维数值模型研究穿越活动断层隧洞的内力响应,认为弱岩体以及较大的断层与隧洞交角有利于提高隧洞的抗错断性能^[4]。陈宇龙等^[5]通过土工离心机比较正断层与逆断层引发上覆土体破坏的试验,结果表明:逆断层的影响范围比正断层的影响范围更广^[5]。刘学增等^[6-7]获得了逆断层黏滑错动下不同倾角的公路隧道的响应规律以及影响范围;孙飞等^[8]借助1:25大比例尺实验装置开展了正断层黏滑错动作用下隧道结构的受迫变形规律分析试验,结果表明上盘比下盘破坏范围更大。毛金龙等^[9]通过模型试验得到逆断层黏滑错动下穿越活动断层山岭隧道的变形特性及破坏机制;信春雷等^[10-11]开展了基于走滑断层的振动台模型试验研究,并结合围岩-隧道体系的地震加速度响应特性、应变规律以及破坏形态验证了套管式可变形的抗减震措施的有效性。

从国内外研究现状来看,目前针对穿越正断层、逆断层隧洞的结构影响关系的研究较为深入,另外对于跨走滑断层隧洞,国内外学者多采用数值

模拟的研究方法,缺少通过试验手段获得隧洞穿越走滑断层对结构的影响,这就导致了研究结果的不准确性。据统计,1900年至2015年我国大陆伴有地表破裂的断层地震共29次,其中具有走滑断层性质的地震占52%^[12];数据表明我国地震活动以走滑型为主,研究走滑断层作用下跨隧洞错断响应特性具有重要科学与现实意义。

基于国内外学者针对跨正断层、逆断层隧洞的模型试验研究基础,并结合已有走滑断层深埋地下管道数值模拟研究工作,本文主要运用模型试验方法研究走滑断层作用下跨断层隧洞衬砌裂纹扩展情况、衬砌纵向应变、环向应变分布规律以及上覆围岩的开裂情况,依据试验分析结果对原型隧洞提出相应的控制范围,该研究对解决穿越具备走滑断层性质的断层隧洞,尤其是我国西部重大跨断层隧洞的稳定性问题具有重要的参考意义。

1 试验设计

1.1 试验装置

本次研究使用的装置为自主设计的可通过调节模型箱错动速度模拟走滑断层的试验模型箱。箱体设计尺寸为 $72\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 40\text{ cm}$,试验装置加载系统通过千斤顶作用于活动盘箱体外侧实现,同时考虑依托工程百年位移设防量设计出箱体的极限错动位移为 10 cm ,试验装置如图1所示。

1.2 相似材料

本次缩尺模型试验采用几何相似比 $C_L=1:100$,以容重相似比 $C_V=1:100$ 为基础相似比推导出各个相关的力学参数的相似比。根据相似理论原理列出 π 项式,计算后得到 $C_H=1:100$ 、 $C_E=1:100$ 、 $C_r=1:100$ 、 $C_\sigma=1:100$ 及 $C_\epsilon=1:100$ 。其中 C_H 、 C_E 、 C_r 、 C_σ 、 C_ϵ 分别为隧洞埋深、弹性模量、半径、应力及应变相似比。

衬砌相似材料主要用石膏来模拟,围岩相似材

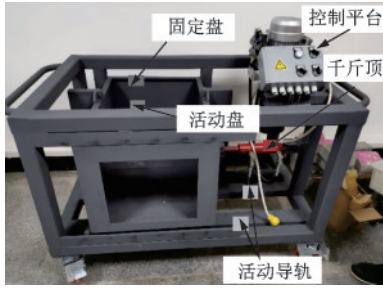


图1 试验装置
Fig.1 Test setup

料主要用细沙来模拟。

经过反复试验及力学性能的测试,最终确定衬砌相似材料的配合比为石膏:水:重晶石粉:硅藻土:纤维=1:1.2:0.6:0.25:0.004,完整隧道衬砌模型尺寸为600 mm,宽100 mm,高100 mm,厚10 mm,根据得到的配合比浇筑隧洞模型如图2(a)所示,相应截面尺寸如图2(b)所示。 R_1 、 R_2 分别表示衬砌的内外半径。围岩相似材料的配合比为细沙:重晶石粉:水玻璃:水=1:0.5:0.1:0.1。

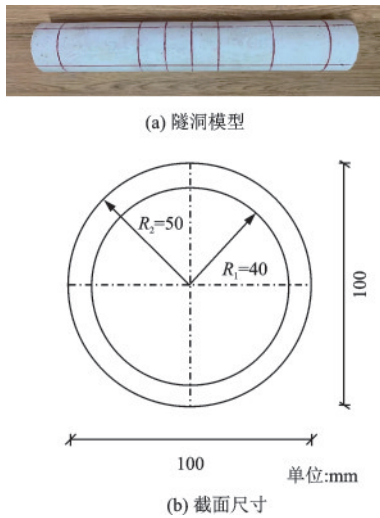


图2 隧道模型与截面尺寸

Fig.2 Photograph of the model tunnel and its sectional dimension

本次试验主要借助围岩自重应力场模拟实际工程的初始应力,为进一步接近实际工程中围岩的初始地应力场,首先利用相似原理得到相对应的围岩力学性能指标,并采用环刀检验对应力学性能指标的密实度,当标准环刀试样总质量达到160 g时认为与模拟实际工程的初始地应力场较为接近。

经力学测试,衬砌各物理力学参数的原型值和模型值见表1。

围岩各物理力学参数的原型值和模型值见表2。

表1 衬砌材料原型值与模型值
Table 1 Prototypical and model values of lining

类别	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压强度/ MPa
原型值	24	30	0.2	14.30
模型值	1.0	0.28	0.28	0.70

表2 围岩材料原型值与模型值
Table 2 Prototypical and model values of surrounding rock

类别	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压强度/ MPa
原型值	25.5	11	0.28	80
模型值	19.2	0.10	0.25	4

1.3 测试方案

本次试验的测量系统主要由箱体位移、衬砌纵向应变及环向应变、衬砌开裂过程监测及上覆围岩的破裂情况四部分组成。箱体位移按照设定的加载速率进行加载并监测,加载示意如图3所示。试验间歇期间使用工业内窥镜记录衬砌内部裂纹扩展情况并使用相机记录上覆围岩的破裂情况。应变采集采用DS-50A型号的动态应变箱,并且考虑设备温度对应变的影响,通过外接隧洞相似材料试样进行温度补偿,保证所测结果的可靠性。

参考针对走滑断层对深埋地下管道影响的数值模拟研究结果^[13]、隧道模型尺寸以及实验条件,同时尽可能通过有限监测部位反映出衬砌变形的整体变化趋势,本次模型试验根据模型尺寸合理设置7个关键应变监测断面,其中,#3、#4、#5、#6断面间距较为紧密。该7个断面的洞顶及洞底均布置纵向应变片,以监测隧洞的纵向应变,另外考虑到靠近断层错动缝的隧洞受力相对复杂,所以在#3、#4、#5、#6断面的左拱腰和右拱腰粘贴应变花。

为方便后期数据的处理,将每个应变测点进行编号,约定隧道顶部#1~#7的应变测点为TL-1~TL-7,隧道底部#1~#7的应变测点为FL-1~FL-7,沿进洞方向的左右拱腰处的应变测点分别记为L、R,对应#3~#6的测点分别为L-3~L-6、R-3~R-6,试验量测断面及测点布置如图3所示。

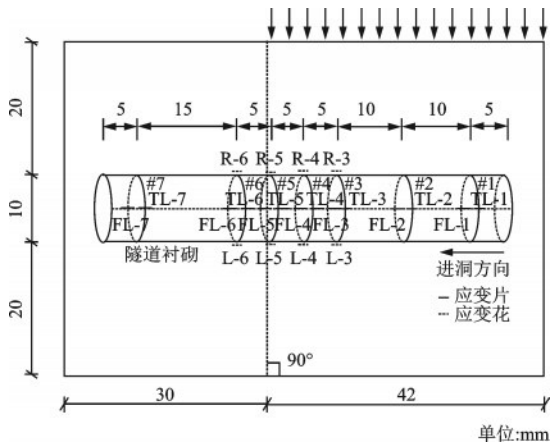


图3 加载示意及应变片布设

Fig.3 Loading diagram and layout of strain gauges

1.4 试验步骤

(1)按照配合比浇筑隧洞模型,凝结后,将模具拆除,经养护后为方便监测进行标记,并在应变测点处粘贴应变片。

(2)围岩相似材料填充模型箱,每填充5 cm厚夯实一次,按照相似关系检验其压实度;满足要求后,再填充第二层,循环往复,直至围岩相似材料填至模型箱15 cm高处。

(3)填砂高度达到15 cm时,把隧洞模型摆放好,并将端子引出的传输线连接至动态应变采集仪,继续填充围岩相似材料,直至将模型箱被夯实填满,达到要求。

(4)开展试验。

(5)试验结束后,将隧洞上部围岩填充材料取出,观察和记录隧洞模型的裂缝发展和破坏情况。

2 结果分析

监测系统所得到的结果包括模型箱错动量、上覆围岩的破坏过程、衬砌裂缝的开裂情况以及衬砌应变的分布规律。

2.1 模型箱错动位移

试验主要通过控制箱体位移来模拟断层的错动,以原型隧洞发生错动的平均水平位错速率为2.2~3.5 mm/a作为参考,得到原型隧洞百年位错量最大值为3.5 m,此时对应模型试验错动量为35 mm。试验中采用的加载方式为千斤顶位移累计加载恒速加载进行模拟试验,错动速度为0.01 mm/s,

且每次加载的位移步长为2 mm。试验在达到设计错动量值后继续开展,以观察破坏后效应,直至破坏现象不再进一步发展时停止,实际试验中在错动50 mm后停止。

2.2 上覆围岩破裂情况

围岩破裂及剪切带扩展过程如图4所示。从图中可以看出,围岩裂纹从错动位移12 mm时开始出现,并由两端逐渐向中间靠拢,两端扩展速度基本一致。随着模型箱活动盘位错量的增大,裂缝继续扩展,错动位移达到36 mm时,上覆围岩在断层缝上方形成较为明显的贯通趋势,并逐渐扩展至贯通。

此外,通过量测围岩网格线位错值,可以得到当最终错动位移为50 mm时,上覆围岩最大水平相对位错量为20 mm,且位于两侧裂缝扩展至中间的贯通处。

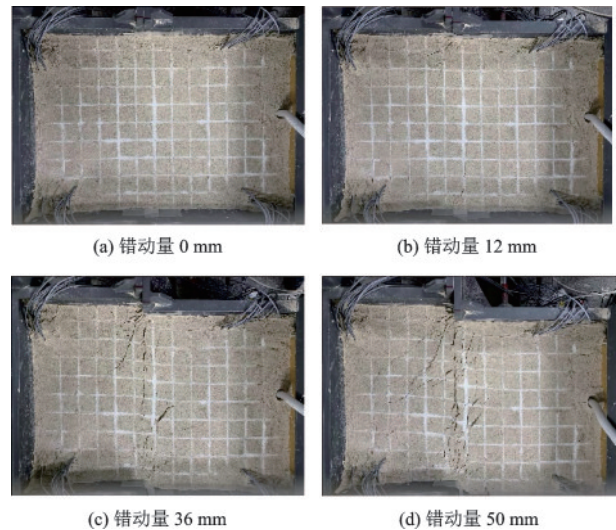


图4 围岩主要破坏过程

Fig.4 Failure processes of surrounding rocks

2.3 衬砌开裂情况

衬砌开裂过程主要借助工业内窥镜进行监测,通过前端摄像头捕捉裂纹扩展细节并进行追踪,主要破坏过程如图5所示。

错动量达到28 mm前未看到衬砌表面有明显的裂纹产生,但是从围岩破坏的主要过程来看,当位错量达到12 mm时上覆围岩已有裂纹产生,即衬砌开裂发生在上覆围岩破裂之后,说明衬砌发生开裂之前围岩已经处于被压缩的状态。

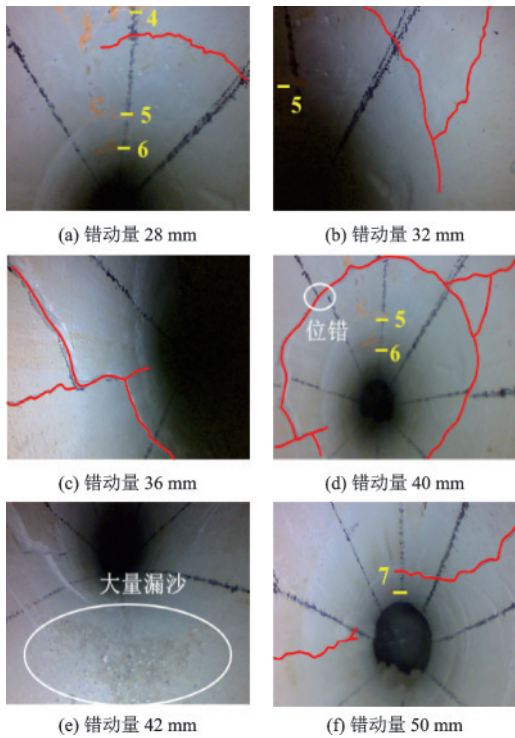


图5 衬砌主要破坏过程

Fig.5 Failure processes of the tunnel lining

错动量达到 28 mm 时,在#4 和#5 截面之间出现细小环向裂缝,并且其扩展至右边墙处向#3 截面方向引发出一条斜向裂缝。继续错动至 32 mm, #4 与#5 之间的环向裂缝发展至左边墙,并在仰拱附近引出一条纵向裂缝,分别沿隧洞轴向向两侧发展。当错动量达到 36 mm 时, #4 与#5 之间的环向裂缝随着断层错动量的增大而逐渐变宽,并且环向裂缝有继续向洞底延伸的趋势;由环向裂缝引发的在断层错动量为 32 mm 产生的纵向裂缝继续向#5 延伸,并且已经延伸至#5 与#6 之间。

继续错动至 40 mm, #4 与#5 截面之间的环向裂缝接近贯通,并且可以从标记的纵向墨线中明显看出位错现象;从隧洞放置位置来看, #4 与#5 之间直接正交穿越断层错动面,受剪切作用最大,属于剪切裂缝。错动至 42 mm 时, #4、#5 之间的环向裂缝在洞顶大量漏沙,导致洞底大量沙体散落。

继续加载至错动量为 50 mm 时,位于#4、#5 断面位置处的主环向裂缝继续扩展,致使隧洞衬砌已经发生严重破坏。位于#6、#7 截面之间右侧拱腰的纵向裂缝发展为斜向裂缝,且延伸过洞顶,而左侧拱腰的纵向裂缝分叉,其中一支发展为斜向裂缝的趋势。通过裂纹的扩展状况,并通过绘制最终得到完整的隧道衬砌开裂结果,如图 6 所示。

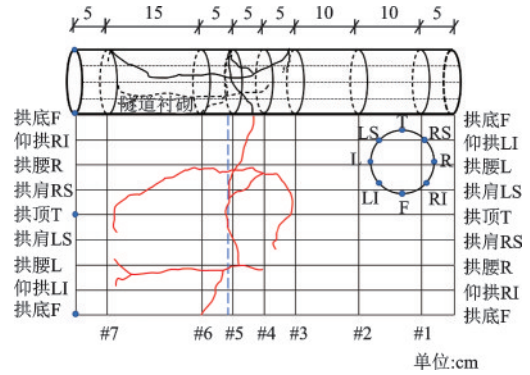


图6 衬砌裂缝展开

Fig.6 Crack patterns obtained at the end of the loading

从裂缝展开图中综合来看裂缝分布及发展情况: #4 与#5 截面之间有明显环向剪切缝,并且引发#3、#4 截面之间的纵向裂缝以及#6、#7 截面之间的纵向裂缝。其中#6 与#7 截面之间右边墙纵向裂缝逐渐发展为斜向裂缝并延伸至洞顶。而#3、#4 截面之间的纵向裂缝逐渐发展为斜裂缝并从右边墙延伸至左边墙,具有发展成为环向裂缝的趋势。

2.4 衬砌应变分布规律

图 7 给出了隧道顶部与隧道底部各截面纵向应变与错动位移之间的关系。从隧道各截面顶部的纵向应变随错动位移的关系可以得到:

#1 与#6 截面洞顶纵向应变均表现为压应变,其他截面的洞顶纵向应变均表现为不同程度的受拉状态。随着试验进一步的进行,可以看到#1 截面洞顶测点的纵向应变变化较为稳定,错动位移达到 28 mm 时纵向应变开始表现出较为明显的受压状态,并最终达到极大压应变值 $-374 \mu\epsilon$,最终稳定在 $-294 \mu\epsilon$ 。#6 截面的纵向压应变较#1 截面变化范围相当但不稳定,错动位移达到 12 mm 时达到最大压应变值 $-354 \mu\epsilon$,随后应变值开始减小,且当错动量达到 28 mm 时压应变值减为 $0 \mu\epsilon$,错动量达到 46 mm 时达到极大压应变值 $-184 \mu\epsilon$,最终稳定在 $-173 \mu\epsilon$ 。

#2、#7 截面的纵向应变随着错动位移的增加表现出不断增加的趋势,从 2F 测点及 7F 测点来看#2 截面的纵向应变较#7 截面更大,#2、#7 截面的纵向应变最终稳定在 $557 \mu\epsilon$ 、 $348 \mu\epsilon$ 。

#3 截面各测点的纵向应变同样均表现为拉应变,且总体上表现为先增加后减小;当错动位移 24 mm 时纵向应变达到最大值 $217 \mu\epsilon$,此后随着错动位移的不断纵向应变最终稳定至 $149 \mu\epsilon$ 。

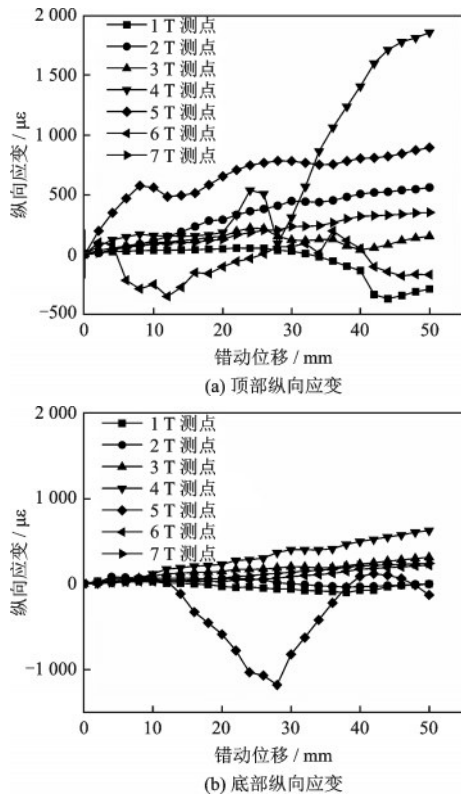


图7 隧道顶部-底部纵向应变-错动位移关系曲线

Fig.7 Typical monitoring results of the longitudinal strains in the model tunnel lining

#4 截面洞顶测点的纵向应变变化最为剧烈但仍表现出拉应变,错动位移在 0~20 mm 期间纵向应变表现为持续稳定状态,并且错动位移在 25~30 mm 期间纵向应变出现极大值与极小值,而后随着错动位移的逐渐增加,#4 截面洞顶测点的纵向应变持续增长,最终达到最大值 1 855 $\mu\epsilon$ 。#5 截面洞顶纵向应变的变化幅度较大,在试验初期应变增加最快,当错动量达到 28 mm 时达到极大拉应变值 781 $\mu\epsilon$,最终稳定在 891 $\mu\epsilon$ 。

从隧道各截面底部的纵向应变随错动位移的关系可以得到:#2、#3、#4、#6、#7 截面隧洞纵向应变的变化规律较为一致,均表现出整体受拉应力,随着错动位移的增加,纵向应变缓慢增加,各截面最大拉应变分别为 80、311、625、216 及 239 $\mu\epsilon$,其中 #4 各点应变最大;#1 应变受断层影响程度较小,当错动位移达到 20 mm 时应变值开始表现出受压的趋势,并最终稳定至 -3 $\mu\epsilon$;#5 截面的纵向应变波动最大,错动位移达到 12 mm 时纵向压应变开始逐渐增大,错动位移继续增大到 28 mm 时压应变达到最大,且最大压应变为 -1 184 $\mu\epsilon$,最终达到 -129 $\mu\epsilon$ 。

图 8 给出了 #3~#6 截面环向应变与错动位移

之间的关系。

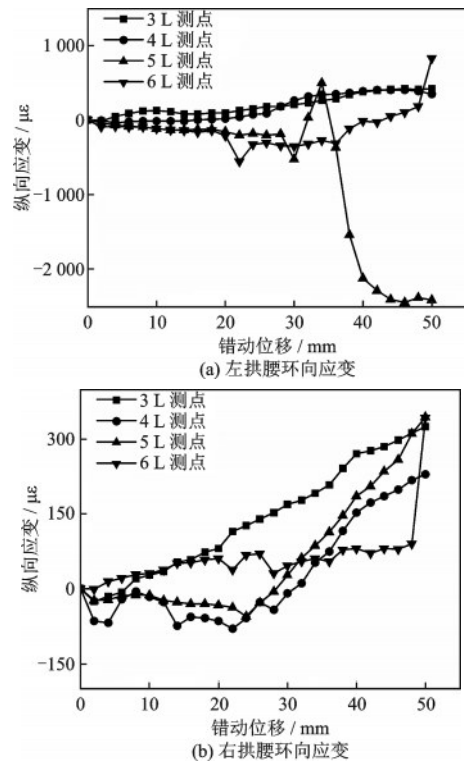


图8 隧道左、右拱腰环向应变-错动位移关系曲线

Fig.8 Typical monitoring results of the circumferential strains in the model tunnel lining

从隧道左拱腰环向应变与错动位移的关系曲线可以得到:#3、#4 截面的环向应变均表现为拉应变,其中#3 截面的环向拉应变随着错动位移的增大缓慢增加,且环向应变最终稳定在 413 $\mu\epsilon$;#2 截面的环向应变变化趋势与#1 截面环向应变变化趋势较为接近,#2 截面的环向应变最终稳定在 347 $\mu\epsilon$ 。#5 截面的左拱腰环向应变变化最为剧烈,当错动位移在 0~30 mm 期间该测点一直处于受压状态,继续加载又转为受拉,且错动位移达到 34 mm 时达到最大拉应变,最大拉应变为 495 $\mu\epsilon$,继续加载应变再次转变,由最大拉应变变为错动量为 50 mm 的最大压应变,且最大压应变为 -2 414 $\mu\epsilon$ 。#6 截面左拱腰环向应变总体表现为压应变,且随着错动位移的增加,压应变逐渐增加,当错动位移达到 20 mm 时,压应变达到最大值为 -562 $\mu\epsilon$,继续加载后,压应变转变为拉应变,最终达到 821 $\mu\epsilon$ 。

从右拱腰环向应变与错动位移关系曲线可以得到:#3、#6 的环向应变均表现为拉应变,其中#3 截面的环向拉应变随着错动位移的增大缓慢增加,且环向应变最终达到 325 $\mu\epsilon$;#6 截面的环向应变变化趋势与

#1截面环向应变变化总体趋势较为接近,但当错动位移达到50 mm时,#6截面的环向应变达到突增为342 $\mu\epsilon$ 。#4、#5截面的隧洞环向应变变化趋势较为接近且在错动位移达到30 mm之前表现出受压状态,过后开始转为受拉状态。且最终环向应变分别为339 $\mu\epsilon$ 、344 $\mu\epsilon$ 。

各截面动态纵向应变与错动位移之间的关系,如图9所示。从#3、#4、#6截面隧洞底部的动态应变的变化程度较#5截面弱,且粗糙程度较洞顶更加平滑,这是由于隧洞底部埋深较大,围岩压力较为稳定,使得“应变调整”现象弱化。

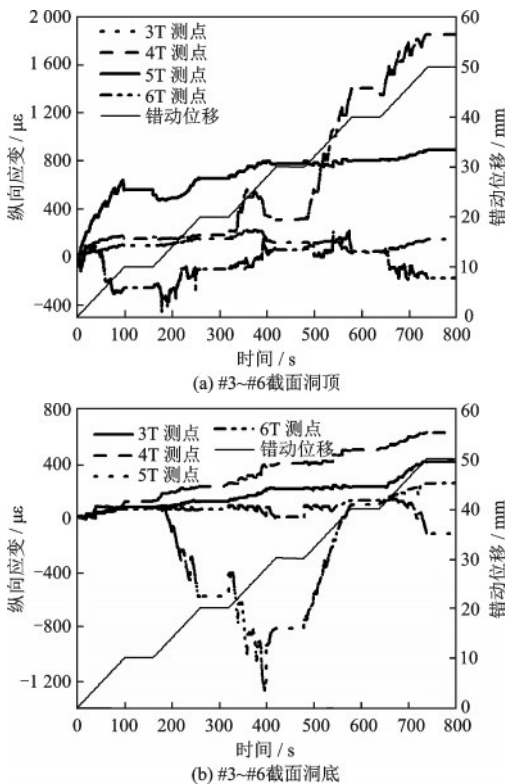


图9 #3~#6截面隧洞顶部、底部动态纵向应变分布规律
Fig.9 Longitudinal strains of the section No. 3 to NO. 6 at the crown and bottom of tunnel

3 讨论

从上覆围岩的破裂情况来看,地裂缝主要沿断层错动面形成,该面为岩体薄弱面;错动位移达到12 mm之前,围岩未出现裂纹,但此时断层附近截面的纵向应变分布增长趋势较为明显,说明在此期间围岩逐渐被压缩,故当错动量超过隧洞洞径1/10时,围岩表面开始出现肉眼可见的地裂缝,衬砌开

始受到较大的影响。从内窥镜拍摄的衬砌裂缝发展过程得知:当错动量超过隧洞洞径1/4时,衬砌裂缝逐渐形成,围岩-衬砌体系完整性遭到破坏。

从隧洞顶部纵向应变随错动位移的关系图得知#5截面洞顶纵向应变增长速率最快,错动位移达到12 mm时,#4~#5截面洞顶的纵向应变均有减小的趋势,此时发现上覆围岩开始破裂,并向模型箱内侧逐渐发育,这是因为前期错动位移使围岩积累的应变能突然释放并引发上覆围岩破裂,致使处于错断面附近的衬砌应变开始降低。

随着试验的进行,围岩逐渐被压缩,衬砌应变开始增长,错断位移达到28 mm时,洞顶纵向应变达到极大值781 $\mu\epsilon$,同时#4截面洞顶纵向应变急剧上升,此时观察到衬砌在#4~#5截面间开始出现环向裂纹。

原型隧洞衬砌混凝土选用普通混凝土,模型试验中衬砌截面开始有裂缝出现时错动量为28 mm,对应原型隧洞衬砌在错动位移为2.8 m时受拉开裂,此时对应原型隧洞衬砌的纵向应变为 7.81×10^{-4} ,说明原型隧洞在2 m的设计错断量下不会发生整体坍塌破坏。

从隧洞底部纵向应变随错动位移的关系以及与右拱腰环向应变随错动位移的关系可以得到#5截面洞底及有左拱腰呈受压状态,应力变化较为显著,错动位移达到40 mm时#5截面裂缝贯通,左拱腰处达到对应原型隧洞的峰值应变,认为#5截面左拱腰受压破坏;然而此时洞底对应的应变远小于混凝土轴心受压时的峰值应变,说明隧洞的主要破坏方式不是简单受压破坏,根据右拱腰环向应变随错断位移的关系以及隧洞最终变形形态,如图10所示,综合分析得到隧洞的破坏形式主要为弯曲张拉以及剪切组合破坏。

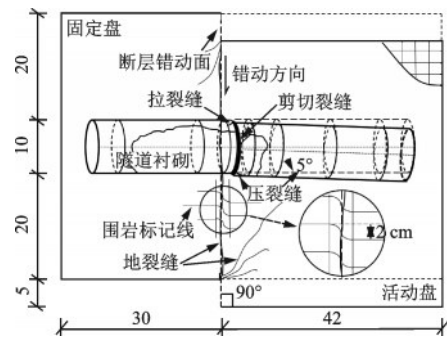


图10 衬砌及围岩最终变形

Fig.10 Failure patterns of the tunnel lining and surrounding rocks after testing

4 结 论

通过走滑断层作用下的模型试验研究结果分析,得到以下结论:

(1)在右旋走滑断层错动作用下跨断层隧洞上覆围岩经过了围岩压缩、开裂、扩展、贯通四个主要过程;当错动量达到 $0.5D$ 时,上覆围岩表面的最大破坏位移约为 $0.2D$,表明在错动过程中出现了一定量的地层压缩。

(2)固定盘受断裂错动范围和剧烈程度均远大于活动盘,故断裂错动下的固定盘是隧洞抗错断的控制重点。

(3)隧洞衬砌结构在右旋走滑断层错动作用下的破坏形式是弯曲张拉破坏以及直接剪切组合破坏,其中剪切破坏是主要破坏形式,在固定盘距离断层面 $0.5D$ 处至活动盘距离断层面 $2D$ 范围内的洞顶位置该为防止衬砌受拉破坏的主要控制区域。

(4)从衬砌两侧拱腰的破坏程度来看,与活动侧移动方向一致的一侧拱腰的破坏程度较另一侧小,但单从衬砌两侧拱腰的环向应变变化范围来看,与活动盘移动方向一致的一侧拱腰的环向应变变化范围反而较另一侧大,说明环向应变并不是直接影响左右拱腰破坏的关键力学指标,同时防止与活动侧移动方向一致的一侧拱腰距离断层错动面 $\pm 0.5D$ 范围内发生受压破坏。

参考文献:

- [1] 王威,任青文. 活动断裂对深埋隧洞影响的研究概述[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(1):175-180.
Wang W, Ren Q W. General introduction to the effect of active fault on deep tunnel[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 175-180. (in Chinese)
- [2] Ling 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(3-4): 110-132.
- [3] 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.
- [4] 马亚丽娜,盛谦,崔臻,等. 基于弹性地基梁理论的跨活断层隧洞纵向变形及内力响应特性研究[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(4):715-722.
Ma Y L N, Sheng Q, Cui Z, et al. Study on the longitudinal deformation and mechanical response characteristics of a tunnel crossing active fault based on elastic foundation theory [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 715-722. (in Chinese)
- [5] 陈宇龙,黄栋. 正断层与逆断层错动引起的上覆黏土变形特性离心试验[J]. 岩土力学,2017,38(增1):189-194.
Chen Y L, Huang D. Centrifuge test of deformation characteristics of overburden clay subjected to normal and reverse fault rupture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup 1): 189-194. (in Chinese)
- [6] 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 X Z, Wang X L, Lin L L. Model experimental study on influence of normal fault with 60° dip angle stick-slip dislocation on mountain tunnel[J]. Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 121-128. (in Chinese)
- [7] Liu X Z, Li X F, Sang Y L, 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.
- [8] 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.
Sun F, Zhang Z Q, Yi Z W. 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. (in Chinese)
- [9] 毛金龙,张锐,吴行. 隧道过断层受力机理相似模型试验研究[J]. 现代交通技术,2019,16(3):31-34.
Mao J L, Zhang R, Wu H. Similarity model test study on force mechanism of tunnel crossing faults[J]. Modern Transportation Technology, 2019, 16(3): 31-34. (in Chinese)
- [10] 信春雷,高波,周佳媚,等. 跨断层隧道抗减震措施性能振动台试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(8):1414-1422.
Xin C L, Gao B, Zhou J M, et al. Shaking table tests on performances of anti-seismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1414-1422. (in Chinese)
- [11] 信春雷,高波,王英学,等. 跨断层隧道可变形抗减震措施振动台试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(4):1041-1049.

Xin C L, Gao B, Wang Y X, et al. Shaking table tests on deformable aseismic and damping measures for fault-crossing tunnel structure[J]. Rock and soil mechanics, 2015,36(4):1041-1049. (in Chinese)

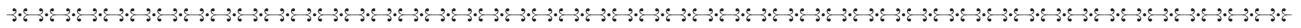
[12] 陈红旗,魏云杰. 断裂构造工程效应综述[J]. 土工工程技术,2003,5:249-252.

Chen H Q, Wei Y J. The formulation of fault engineer-

ing effect in whole[J]. Geotechnical Engineering Technique,2003,5:249-252. (in Chinese)

[13] Uckan E, Akbas B, Shen J, et al. A simplified analysis model for determining the seismic response of buried steel pipes at strike-slip fault crossings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2015,75:55-65.

(本文责编:周小潭)



“城市综合防灾与抗灾韧性”专题征稿函

建设“韧性城市”是我国新时代可持续发展阶段的一项重要目标和紧要任务,其要旨在于提高现代城市治理水平,加强特大城市中的风险防控,通过工程技术手段和合理调配资源,保障城市功能安全高效可持续运行,实现灾后快速恢复。

当前形势下,地震、强风、洪涝、海啸等自然灾害及引发的工程/地质灾害,火灾、爆炸、污染物及病毒扩散等人为因素导致的事故灾害,以及与这些灾害相偶联的环境生态和公共安全等问题日渐严峻。如何有效提升城市综合防灾能力和韧性性能,需要围绕核心科学问题、技术难点和战略规划等开展全方位的深入探索和系统研究。

在此背景下,《防灾减灾工程学报》拟开展“城市综合防灾与抗灾韧性”专题征稿,欢迎各位专家学者不吝赐稿。

一、征稿范围:

1. 基于抗灾韧性评估的城市综合防灾规划与设计理论
2. 地震、强风、洪涝及地灾作用下城市灾害模拟与抗灾韧性评估
3. 基于多灾耦合的重大工程抗灾韧性设计方法与评估模型
4. 城市生命线工程网络抗灾韧性评价指标和评估方法
5. 新建和既有工程结构及基础设施安全运维与抗灾性能提升
6. 面向特殊功能的场所多灾响应与能力恢复综合策略
7. 重要建(构)筑物抗、减、隔震新理论/方法/技术
8. 地上、地下结构(群)动力相互作用与灾害演化
9. 灾害衍生的室内、外病毒/污染物空间运移、扩散及防控

二、征稿时间

2022年4月20日—2022年12月15日

三、论文格式

同《防灾减灾工程学报》正刊文章,具体要求详见本刊《写稿样式》。

四、投稿网址

<http://fzjzgcxb.ijournals.cn/fzjzgcxb/home>,投稿时请选择栏目“城市综合防灾与抗灾韧性”。

《防灾减灾工程学报》编辑部