文章编号:1674-2974(2024)05-0076-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024049

正断层错动下地铁盾构隧道变形破坏模型试验研究

李瀚源[1,2],李兴高[1,2†],王杰[1,2],杨益[1,2],刘浩[3]
[1. 城市地下工程教育部重点实验室(北京交通大学),北京 100044;
2. 北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;
3. 济南轨道交通集团有限公司,山东 济南 250101]

摘 要:为揭示跨隐伏断层地铁盾构隧道结构变形破坏特征,采用自主设计的模拟隐伏断层错动加载试验装置,开展1∶25几何比例的跨断层盾构隧道模型试验,分析正断层错动下盾构隧道的力学响应规律及变形破坏特征.试验结果表明:在2 cm正断层错动影响下,隧道纵向差异变形呈现非线性增大趋势,环缝接头张开变形主要位于断层下盘隧道拱顶及断层上盘隧道拱底,且环缝峰值张开量已超过盾构隧道接缝防水限值;断层延长线与隧道交界处管片直径收敛变形较为严重,该处管片呈现拱腰外侧受拉、拱顶及拱底外侧受压的受力状态;管片与地层之间接触压力受断层错动的影响较大,存在围岩挤压区与围岩松散区,但接触压力峰值相对较小;盾构隧道的主要变形破坏特征为环缝接头拉裂破损、管片纵向开裂及环缝接头变形,管片发生斜向剪切破坏及局部压溃破坏的概率较低.基于盾构隧道环纵向变形破坏特征,建议将管片环缝变形及接头混凝土拉裂破损作为界定跨断层盾构隧道结构破坏的主要控制指标.基于隧道的变形破坏模式,提出了跨断层盾构隧道结构设计及应对措施的建议.

关键词:断层错动;盾构隧道;模型试验;力学响应;变形破坏特征
中图分类号:U451 **文献标志码**:A

Model Test Study on Deformation and Failure of Metro Shield Tunnel under Normal Faulting

LI Hanyuan[1,2],LI Xinggao[1,2†],WANG Jie[1,2],YANG Yi[1,2],LIU Hao[3]
[1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education(Beijing Jiaotong University), Beijing 100044,China;
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044,China;
3. Jinan Rail Transit Group Co. Ltd. , Jinan 250101,China]

Abstract: To reveal the deformation and failure characteristics of the metro shield tunnel overpassing buried fault, a self-designed loading test device for faulting simulation was used to carry out a 1∶25 geometric scale cross-fault shield tunnel model test. The mechanical response law and deformation failure characteristics of the shield tunnel under normal faulting were analyzed. The test results show that under 2 cm normal faulting, the longitudinal differential deformation of the tunnel shows a nonlinear increasing trend. The opening of the circumferential joint is

* **收稿日期**:2023-02-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978040),National Natural Science Foundation of China (51978040);住建部科技计划项目(2021-K-025),Science and Technology Foundation of Ministry of Housing and Urban-rural Development of China (2021-K-025)
作者简介:李瀚源(1994—),男,河南平顶山人,北京交通大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: lixg@bjtu.edu.cn

mainly located at the vault of the footwall tunnel. The arch bottom of the hanging wall tunnel and the peak opening of the circumferential joints have exceeded the waterproof limit of the joints. The diameter convergence deformation of the segment lining at the junction of the fault extension line and the tunnel occurs severely. The stress state of the outer side of the arch waist of the tunnel lining is tensioned, while the outer side of the vault and the arch waist are compressed. The contact pressure between the tunnel and the stratum is greatly affected by the faulting, and there are surrounding rock compression and loosening zones. However, the peak value of contact pressure is relatively limited. Tensile fracture of the circumferential joint, longitudinal cracking of the segment, and joint deformation are the main deformation and failure characteristics of the shield tunnel. The probability of oblique shear failure and local crushing failure is low. Based on the longitudinal deformation and failure characteristics of shield tunnels, the joints deformation and the tensile fracture of the circumferential joint should be taken as the main control indexes to define the structural failure of cross-fault shield tunnels. Based on the deformation and failure characteristics of segmental lining, suggestions on structural design and countermeasures of cross-fault shield tunnel are proposed.

Key words: faulting; shield tunnel; model test; mechanical response; deformation and failure characteristics

在我国广泛分布着活动断层.活动断层既是强震的主要危险源,也是引发地表变形及地下结构严重破坏的重大工程风险源.相关研究表明[1],在我国338个地级城市规划建设区中,约有53%的建设区不同程度受活动断裂的影响.对于跨断层隧道而言,断层错动作用极易引起隧道结构开裂、渗漏水等灾害,严重影响隧道的运营安全[2].随着我国近年来“一带一路”、南水北调等重大建设工程的推进,以及城市地下空间的深入开发,跨断层隧道工程变得越来越普遍.鉴于断层错动严重威胁着盾构隧道的安全,开展跨断层盾构隧道结构力学响应研究显得尤为重要.

在现有研究中,众多学者基于模型试验方法,分析断层错动下隧道结构变形破坏特征.刘学增等[3]通过开展75°逆断层错动对公路隧道影响的模型试验,研究了跨断层隧道衬砌结构的变形破坏过程与特征.杜修力等[4]基于模型试验研究,探讨了铰接式分段隧道的抗错断性能.Cai等[5]基于离心试验研究,得出了正断层错动对城市地铁隧道的影响.闫高明等[6]采用振动台模型试验研究了断层错动与震动综合加载作用下隧道结构的动力响应特征,指出黏滑错动是造成隧道震害的主控因素.

在精细化数值模拟方面,郭翔宇等[7]基于扩展有限元理论建立跨断层隧道精细化力学模型,分析了逆断层黏滑错动下山岭隧道衬砌损伤及开裂破坏模式.Zhong等[8]基于混凝土塑性损伤理论,研究了走滑断层错动对输水隧洞结构损伤演化机制.安韶等[9]依托乌鲁木齐地铁隧道穿越西山活动断层工程,分析了上跨活动断层暗挖地铁隧道的力学响应规律.

在理论解析方面,李瀚源等[10]提出了跨断层隧道弹性地基模型,以强迫位移模拟断层错动作用.陶连金等[11]将断层错动引起的地层变形以附加荷载方式施加在结构上,采用两阶段计算方法建立了跨断层地下管线纵向力学响应分析方法.

目前,跨断层隧道力学响应研究多以山岭隧道连续式结构或分段设置柔性接头的结构形式为主,对于城市地铁盾构隧道,由于其隧道结构形式、隧道周围地层条件与山岭隧道存在显著区别,故断层错动下城市浅埋盾构隧道的结构变形破坏特征存在诸多不确定性.然而在现有研究中,针对上跨隐伏断层盾构隧道力学响应及变形破坏特征的成果较为匮乏,隐伏断层错动下盾构隧道结构破坏形式及薄弱环节尚需深入研究.

有鉴于此,以济南地铁4号线区间盾构隧道上跨千佛山断裂带工程为背景,采用自主设计的断层错动模拟试验装置,开展几何比例为1∶25的跨断层盾构隧道室内模型试验,研究隐伏断层错动下盾构隧道结构变形特征及损伤破坏规律.研究成果可为地铁盾构隧道上跨隐伏断层的结构设计及灾害防护

提供借鉴与参考.

1 模型试验设计

1.1 依托工程概况

在建济南地铁4号线省体育中心站-泉城公园站区间隧道穿越千佛山断裂带,区间隧道采用盾构法施工,断层运动属性为正断层,断层面倾角为70°~80°,断层基岩上覆土层主要包括素填土、碎石、胶结砾石及全风化闪长岩.区间隧道临近泉城公园,周边场地岩溶强发育,存在高承压性岩溶水,对区间盾构隧道的防水性能要求较高.

区间盾构隧道以上跨形式通过千佛山断裂带,隧道顶覆土厚度约为10 m,该区间隧道穿越地层主要为碎石和全风化闪长岩,岩体风化呈砂土状,岩体完整程度为极破碎.盾构隧道管片外径为6.4 m,内径为5.8 m,管片环宽1.5 m,厚度为0.3 m,设计采用C50混凝土,管片环缝之间设置16根6.8级螺栓,管片环与环之间采用通缝拼装方式.区间盾构隧道上跨隐伏断层的地质纵断面如图1所示.

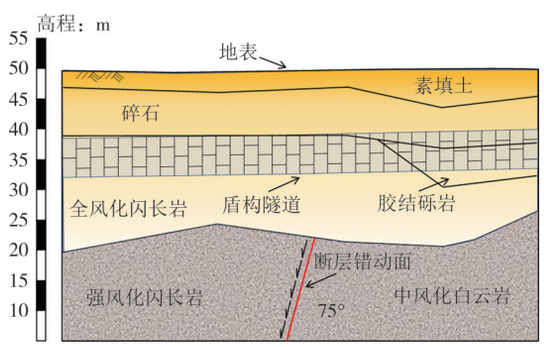


图1 盾构隧道上跨隐伏断层的地质纵断面

Fig. 1 The geological profile of shield tunnel overpassing buried fault

1.2 断层加载试验装置及工作原理

断层错动加载试验装置如图2所示.该装置由模型箱本体、断层错动加载装置、支撑系统组成,箱体内部长×宽×高尺寸为2 m×1 m×1.3 m,模型箱底板分为上盘(活动盘)及下盘(固定盘).通过底部2台液压油缸加载装置实现断层上盘的升降,可近似模拟隐伏断层错动作用.

1.3 模型试验相似材料

根据模型试验箱尺寸及模型材料特性,以长度相似比 C_L=1∶25、重度相似比 C_p=1∶1作为基础相似比,其他相似比设计根据基础相似比,并基于量纲分析理论推导得出,其中弹性模量相似比 C_E=1∶25,泊松比相似比 C_μ=1∶1,应变相似比 C_ε=1∶1,应力相似比 C_σ=1∶25,土压力相似比 C_P=1∶25,管片配筋量相似比 C_{As}=1∶625,环缝接头抗拉刚度相似比 C_{Kt}=1∶625.

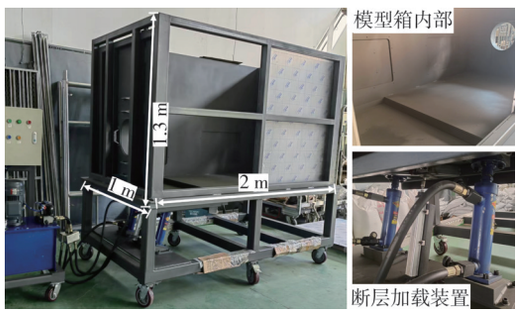


图2 断层错动加载试验装置

Fig. 2 Fault dislocation loading test device

1.3.1 模型管片制作

试验以石膏模拟盾构隧道,具体制作方法为:将水、石膏及硅藻土按照一定配比浇筑试块,通过单轴抗压强度试验测定石膏强度,最终确定为水∶普通石膏∶硅藻土的质量比=1∶1∶0.1.石膏管片与实际隧道管片的物理力学参数如表1所示.

表1 隧道管片的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of tunnel segments

参数类别	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
原型	34.5	0.25	32.4
模型	1.46	0.24	1.33

石膏管片外径为26 cm,厚度为1.4 cm,环宽6 cm,分别对应原型隧道外径6.5 m、管片厚度0.35 m及环宽1.5 m.在石膏管片内放入直径0.8 mm的细铁丝网,铁丝网间距为1 cm,近似模拟管片钢筋.管片环向接头采用内外侧开槽的方式近似模拟[12],开槽深度根据管片环的横向抗弯刚度有效率确定,本研究取5 mm.

1.3.2 环缝接头模拟及管片拼装

以往学者[13-14]采用在环缝面打孔并插入钢棒的方式近似模拟盾构隧道环缝连接螺栓,然而上述方法难以直接获取环缝接头的受力及变形数据.参考已有研究成果[15-16],采用在管片环外侧安装接头片材的方式近似模拟环缝接头,并在接头片材上粘贴应变片用于监测环缝接头变形.模型管片环缝接头材料的选取应以满足接头抗拉刚度等效为原则,可

根据式(1)计算确定：

$$\frac{\left(nE_{\mathrm{t}}A_{\mathrm{t}}\right)_{\mathrm{p}}}{L_{\mathrm{p}}}=\frac{\left(n'E'_{\mathrm{t}}A'_{\mathrm{t}}\right)_{\mathrm{m}}}{L'_{\mathrm{m}}}=C_{K_{\mathrm{t}}} \tag{1}$$

式中：n 和 n' 分别为原型及模型隧道接头螺栓数量；E_{t} 和 E'_{t} 分别为原型及模型隧道螺栓弹性模量；A_{t} 和 A'_{t} 分别为原型及模型隧道螺栓截面积；L_{p} 和 L'_{m} 分别为原型及模型隧道螺栓有效长度.

石膏管片环缝共设置 8 个纵向接头板，若选用钢材作为接头片材，则片材厚度应为 0.12 mm，实际选材比较困难.根据调研，HDPE(高密度聚乙烯)片材的弹性模量较小，通过材料的室内拉伸试验测得 HDPE 片材的弹性模量约为 850 MPa.试验最终选用的厚度 1.5 mm、长度 20 mm、宽度 15 mm 的 HDPE 接头模型板可满足接头刚度等效要求.模型隧道接头片材与实际隧道环缝接头的抗拉刚度如表 2 所示.

表 2　环缝接头抗拉刚度

Tab.2　Tensile stiffness parameters of circumferential joint

参数类别	材料类型	弹性模量/GPa	接头尺寸	抗拉刚度/(kN·m^{-1})
原型	钢材	206	M27 螺栓	4 717.86
设计	钢材	206	厚 0.12 mm	7.549
模型	HDPE	0.85	厚 1.5 mm	7.549

模型隧道制作流程如图 3 所示.在拼装石膏管片时，首先在管片环缝接头位置打孔，然后用螺丝将接头板固定并进行逐环管片拼装.需要说明的是，模型管片采用通缝拼装，相比于错缝拼装形式，通缝拼装管片的整体性及横向刚度偏小，断层错动下隧道结构变形量偏大[17].

1.3.3　模型土制备

参考已有研究成果[18]，以石英砂、重晶石粉作为骨料，以热熔凡士林作为胶结材料，按照一定配比混合成地层相似材料.根据地勘报告测定的围岩物理力学参数，以土体重度、变形模量、黏聚力等指标作为控制因素，通过开展不同配比混合材料的岩土三轴试验，拟定地层相似材料配比.试验模型土制备流程如图 4 所示，原型及模型地层的参数如表 3 所示.试验模型土材料的质量配比为重晶石粉：10 ~ 20 目石英砂：20 ~ 40 目石英砂：凡士林=9∶2.5∶2.5∶0.6.

1.4　监测方案

试验监测项目主要包括隧道竖向位移、管片直径收敛变形、环缝接头变形、管片横向应变以及地层

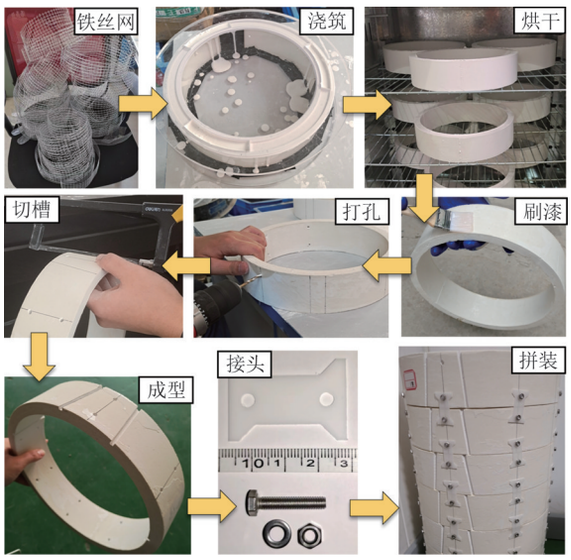


图 3　模型隧道管片制作及拼装

Fig. 3　Fabrication and assembly of model tunnel segments



图 4　模型土制备流程

Fig. 4　Preparation process of model soil

表 3　原型及模型材料物理力学参数

Tab.3　Physico-mechanical parameters of prototype and model materials

参数类别	弹性模量/MPa	重度/(kN·m^{-3})	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
原型	50	20.2	35.0	50
模型	2.68	18.9	33.2	2.2

接触压力等.在石膏管片内部安装位移传感器监测隧道竖向位移及管片竖向收敛变形.在管片拱顶、拱底及拱腰外侧粘贴应变片监测管片环横向受力.在隧道拱顶及拱底埋设微型土压力盒，监测隧道与地层之间接触压力.通过粘贴在接头板上的应变片测量环缝接头纵向应变，并根据接头应变反算接头张开量.具体的试验监测断面布置及监测仪器如图 5、图 6 所示.

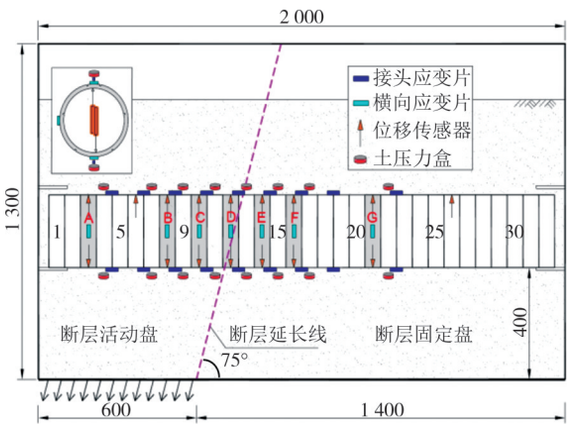


图5 模型试验监测断面及测点分布(单位:mm)

Fig. 5 Monitoring section and measuring point distribution of model test(unit:mm)

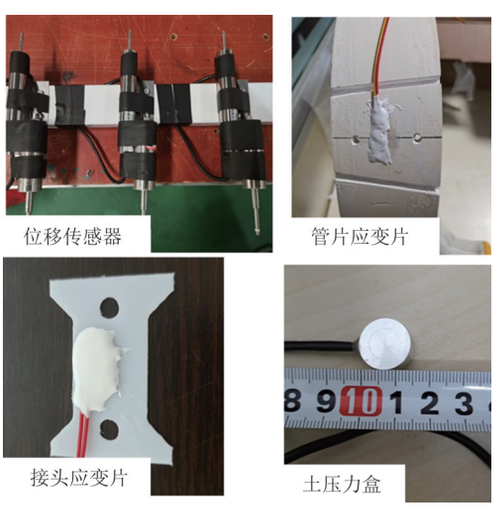


图6 试验监测仪器

Fig. 6 Instruments for test monitoring

1.5 试验实施

本试验包含6个关键实施步骤,具体为:

1)模型管片制作及拼装.浇筑模型管片结构,养护完成后进行切槽与打孔,然后进行逐环拼装.

2)模型土的制备及分层夯实.将模型土分层填入模型箱中,每层装填10 cm并分层压实.

3)传感器粘贴及放置模型隧道.在模型隧道上粘贴应变片与土压力盒,将隧道放入模型箱内.并继续分层填入模型土,当达到预定高度后,停止填料,静置24 h以上.

4)传感器安装及调试.在管片内部安装位移传感器,调试传感器数据.

5)开始试验并记录数据.为了保证试验满足准静态加载要求,试验过程中控制液压油缸加载速率为0.5 mm/min[4],每加载1 mm进行一次数据采集.当加载至预定断层错动量时,试验结束.

6)试验结果观察.开挖部分土体,观察模型管片的变形破坏特征.

需要说明的是,模型试验断层倾角为75°,模型断层最大错动量为2 cm,对应实际50 cm的错动量.试验主要操作流程如图7所示.

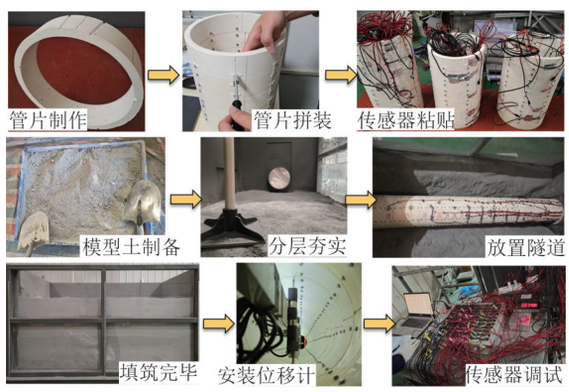


图7 模型试验主要实施流程

Fig. 7 Main implementation process of model test

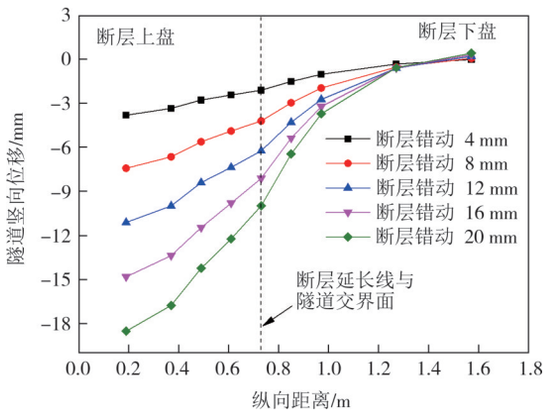
2 试验结果分析

2.1 隧道管片环纵向变形分析

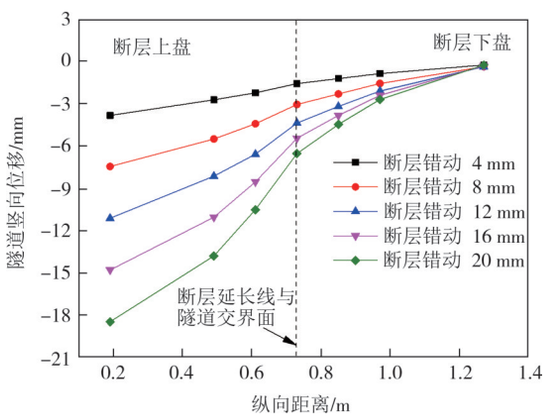
图8为不同断层错动量盾构隧道拱顶竖向位移沿轴向分布曲线.可以看出,断层错动导致盾构隧道沿轴向出现不均匀变形,断层上盘区域内的管片结构随断层错动量的增大出现明显竖向沉降,断层下盘隧道受断层错动的影响较弱.将相邻监测断面隧道拱顶竖向位移差值定义为隧道纵向差异变形Δ_y,换算得到不同断层错动下的原型隧道最大纵向差异变形分别为0.49 cm/m、1.03 cm/m、1.62 cm/m、2.28 cm/m、2.99 cm/m,可以看出,隧道纵向差异变形随断层错动量显著增大,当断层错动量由4 mm增大至8 mm时,Δ_y的增量为0.54 cm/m;而当断层错动量由16 mm增大至20 mm时,Δ_y的增量为0.71 cm/m.由此可知,随着断层错动量持续增大,隧道纵向差异变形呈现非线性增加趋势,对隧道纵向变形更为不利.

此外,管片拱顶和拱底的垂向位移变化均小于基岩错动位移,说明断层基岩与隧道之间的土层对隧道具有一定保护作用,在一定程度上降低了断层错动对隧道结构的不利影响.

图9为隧道径向收敛变形与断层错动量关系.可以看出,随着断层错动位移的增大,地层与衬砌结



(a)拱顶竖向位移



(b)拱底竖向位移

图 8　盾构隧道竖向位移沿轴向分布曲线

Fig. 8　Displacement distribution curve of shield tunnel along the axial direction

构之间的挤压作用增强,导致衬砌结构出现径向收敛变形,其中靠近断层延长线的管片径向收敛变形最大,最大收敛值达到了 2.39 mm,换算为实际原型后的收敛变形为 5.98 cm,为净空高度的 0.93%,该处管片横向收敛变形较大,此时已远超过《地铁设计规范》(GB 50157—2013)规定的 4‰ ~ 6‰ 的管片直径变形率,在实际工程中可考虑增设保护措施.远离断层延长线的管片结构竖向收敛变形较小,其中位于断层活动盘的管片竖向收敛变形最小.

2.2　管片环缝接头变形分析

图 10(a)为隧道拱顶环缝接头变形分布.可以看出,盾构隧道拱顶环缝接头张开变形主要位于断层下盘,该区域管片拱顶沿纵向呈张拉变形状态,环缝峰值变形位置位于断层延长线右侧,断层错动对拱顶环缝接头的影响范围在 0 ~ 3.2 D(D 为管片外径,26 cm).图 10(b)为拱底环缝接头变形分布.由图可知,盾构隧道拱底环缝接头张开变形主要位于断层上盘,断层错动对拱顶环缝接头的影响范围在 0 ~ 3.4D.在断层错动量达到 2 cm 时,拱顶及拱底接头峰值张开量分别为 0.35 mm 和 0.22 mm,相当于实际接头张开量 9 mm 和 5.5 mm,此时接头张开量已超过盾构隧道接缝防水限值,隧道面临严重的渗漏水灾害.

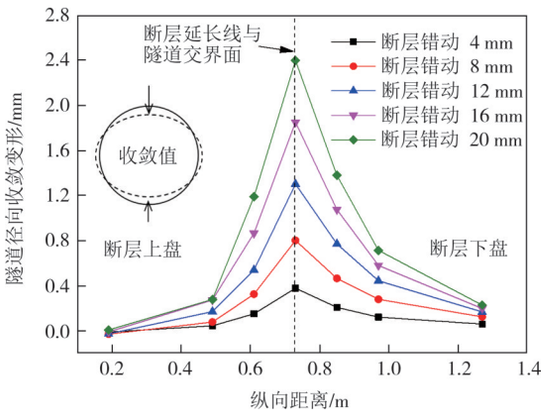
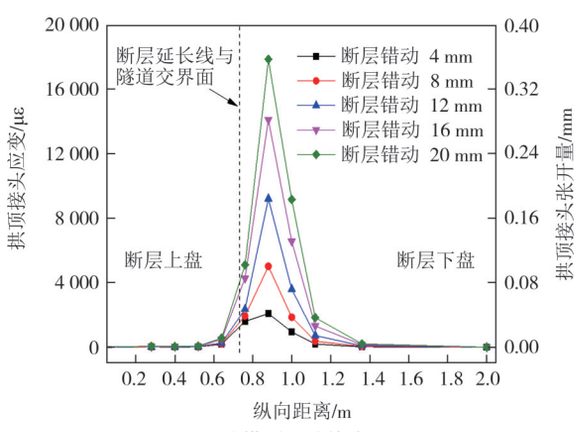


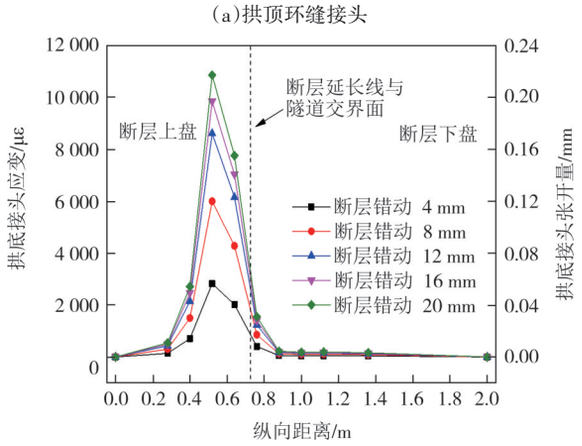
图 9　盾构隧道直径收敛变形与断层错动量关系

Fig. 9　Relationship between diameter convergence deformation of shield tunnel and fault dislocation

此外,随着断层错动量增大,盾构隧道环缝接头的变形增量逐渐减小,这主要是由于此时的环缝接



(a)拱顶环缝接头



(b)拱底环缝接头

图 10　管片环缝接头板沿轴向变形分布曲线

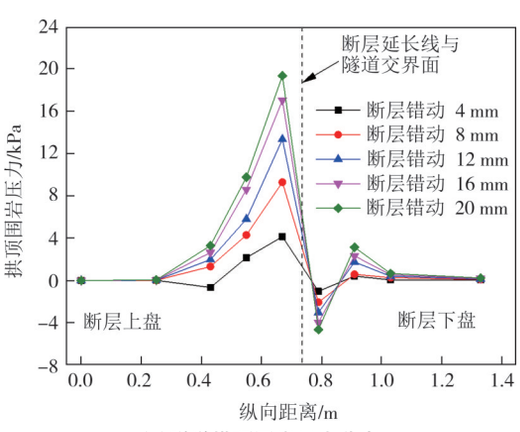
Fig.10　Deformation distribution curve of segment joint plate along the axial direction

头石膏已产生局部破坏,从而导致接头 HDPE 片材的拉应变增量减小.

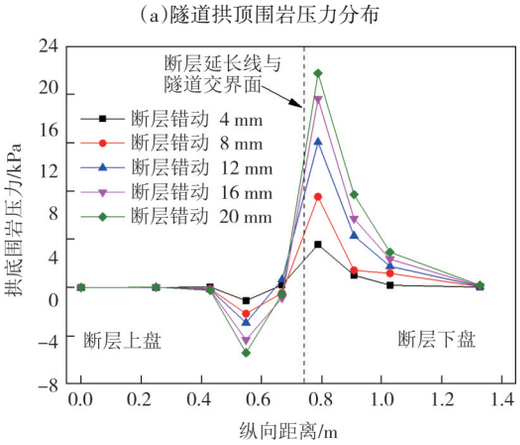
2.3 管片-围岩接触压力分布规律分析

图 11(a)为管片拱顶地层压力沿隧道轴向分布曲线,图中假定隧道管片的初始地层压力值为 0 kPa.可以看出,断层延长线附近管片与地层接触压力随断层错动而发生明显波动,其中断层下盘管片-围岩接触压力随断层错动量呈减小趋势,而断层上盘管片-围岩接触压力随断层错动量呈显著增大趋势.整体受影响范围在 0 ~ 0.78 m(0 ~ 3D)之间,对应实际工况的 0 ~ 19.5 m 之间.

图 11(b)为管片拱底围岩压力沿隧道轴向分布曲线.与管片拱顶地层压力变化规律相似,位于断层下盘隧道拱底围岩压力随断层错动量呈增大趋势,该区域隧道与围岩之间产生挤压变形,而位于断层上盘隧道拱底地层压力随断层错动量呈减小趋势,表明区域存在围岩松散区.隧道与地层之间接触压力影响范围在 0 ~ 0.9 m(0 ~ 3.46D)之间,对应实际工况 0 ~ 22.5 m 之间.



(a)隧道拱顶围岩压力分布



(b)隧道拱底围岩压力分布

图 11 隧道-围岩接触压力沿轴向分布曲线

Fig.11 Distribution curve of tunnel-surrounding rock contact pressure along the axial direction

根据以上分析可知,在正断层错动下,断层延长线与隧道交界处附近隧道拱顶及拱底围岩压力存在围岩挤压区与围岩松散区,其中拱底围岩压力受断层的影响更大.随着断层错动量增大,断层上盘隧道拱底所受地层挤压作用持续减小.此外,试验最终得到的峰值围岩压力为 22.2 kPa,对应实际工况的 0.56 MPa,表明此时隧道结构与地层之间并未发生严重挤压现象,主要原因是断层强迫位移在向地表传播过程中影响范围逐渐变大,影响程度逐渐减小,同时隧道周围土质地层对结构的变形限制作用较小.因此,对于跨活动断层城市浅埋盾构隧道,隧道受到地层挤压作用的影响相对有限.

2.4 管片结构环向应变响应分析

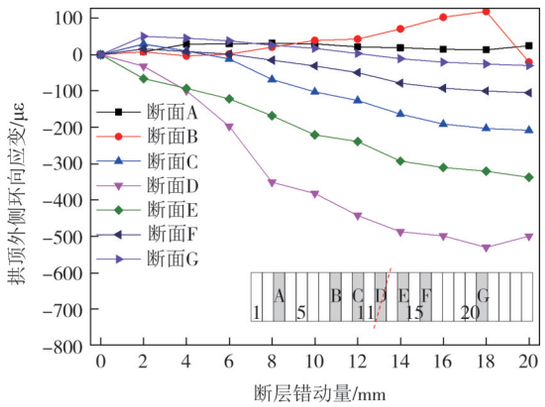
图 12 为各监测断面管片环向应变与断层错动量关系曲线.由图可知,随着断层错动量增大,靠近断层延长线的管片环向应变随断层错动的增大而显著增加,而远离断层延长线的管片环向应变相对较小.根据试验监测结果,将监测断面 C、D 及 E 定义为主要影响区,纵向长度为 5 l_s(l_s为管片环宽,6 cm),对应实际工程中为 7.5 m,其余断面定义为次要影响区.

在主要影响区内,管片拱顶及拱底外侧应变值为负,表明该处结构外侧受压、内侧受拉;拱腰外侧应变值为正,表明该处结构外侧受拉、内侧受压.在断层错动 2 cm 时,断面 D 管片的最大拉压应变分别为 736 με 和 926 με,此时管片环向应变较大,存在纵向开裂的风险.在次要影响区内,最终加载步的管片环向最大拉压应变分别为 178 με 和 147 με,远小于相似材料石膏的极限压应变,说明上述部位管片横向受力较小,管片发生横向压溃的风险较低.

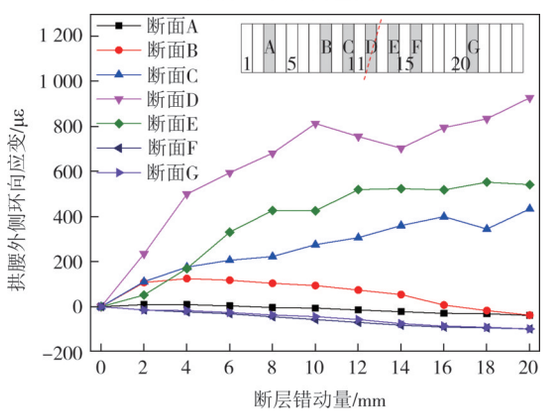
2.5 模型隧道变形破坏特征分析

试验加载结束后,将土层挖开得到已产生明显变形的模型隧道,如图 13 所示.可以看出,在断层错动 2 cm 时,位于断层上盘的隧道结构随断层错动作用而产生竖向沉降变形,而位于断层下盘的隧道结构受断层错动影响较弱.此外,试验中模型隧道拱底位置未发生明显的脱空现象,推测主要原因是盾构隧道具有一定柔性,同时试验的断层位错动相对较小.

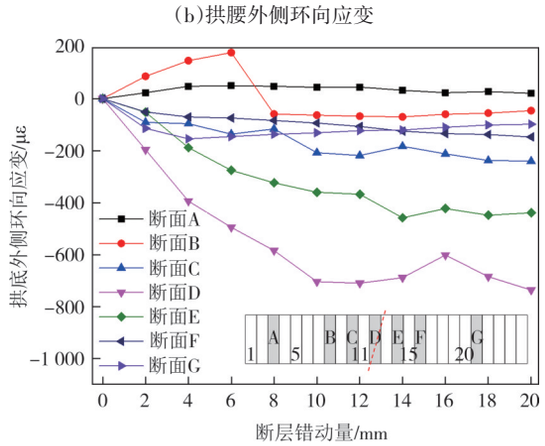
观察模型隧道局部变形,发现在断层延长线附近的隧道拱顶、拱底均产生了环缝张开及错台变形,如图 14 所示,其中拱顶环缝变形主要分布在#10~



(a)拱顶外侧环向应变



(b)拱腰外侧环向应变



(c)拱底外侧环向应变

图 12　隧道管片环向应变与断层错动量关系

Fig.12　Relationship between circumferential strain of tunnel segment and fault dislocation

#15 环缝处,拱底错台变形主要分布在#5~#9 环缝处.部分接头处的石膏管片发生拉裂破损现象.然而隧道沿纵向并未产生环缝接头拉断现象,同时管片结构无局部压溃破坏.试验结果表明由于盾构隧道具备柔性结构特征,可在一定程度上避免结构发生局部严重破坏.另外,虽然此时环缝接头尚未被拉断,但过大的接头变形将会影响盾构隧道的整体防水性能,威胁隧道的运营安全.

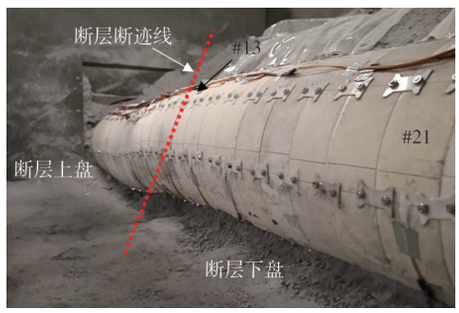


图 13　盾构隧道纵向变形

Fig. 13　Longitudinal deformation of shield tunnel

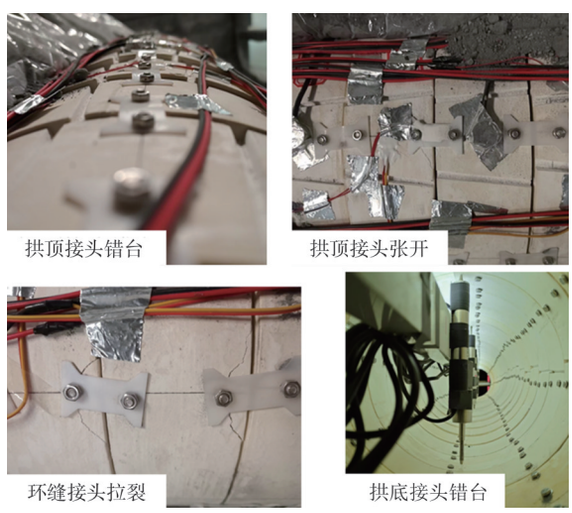


图 14　隧道管片环缝接头变形特征

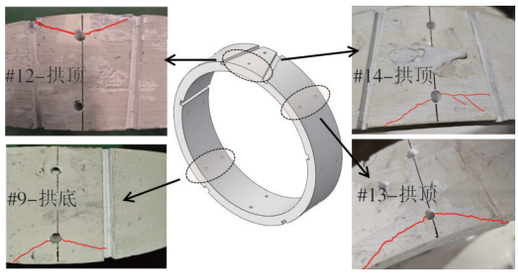
Fig. 14　Deformation characteristics of tunnel segment joint

图 15 为试验结束后,不同位置管片结构的损伤破坏实物图,其中断层顶部延长线与隧道拱底交界面位于管片#11 ~ #12.可以看出,在断层下盘位置,隧道环缝接头产生了较为严重的拉裂破损现象,破损范围主要集中在#12 ~ #14 环管片拱顶接头处.在断层上盘位置,#9 环管片拱底接头产生明显的拉裂破坏.环缝接头受拉破坏特征表现为出现环缝螺栓孔向环缝面斜向拉裂缝,且在#12、#13 环缝接头拉裂缝已贯穿至环缝端面.#11 ~ #13 环管片拱腰外侧及拱底内侧产生单条纵向裂缝,这表明该处管片横向受力较大,此时管片变形呈现“横鸭蛋形”,管片拱顶及拱底内侧受拉、拱腰外侧受拉.

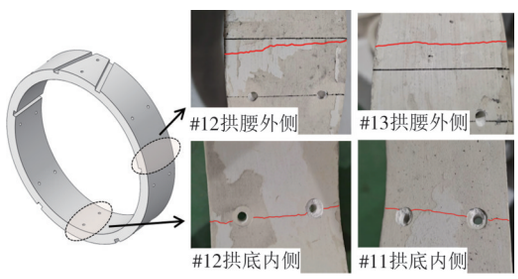
3　讨 论

3.1　隧道变形破坏规律

根据第 2 节试验结果可知,断层错动下盾构隧道的主要破坏特征包括环缝接头石膏拉裂破损及管



(a)管片环缝接头拉裂破损



(b)管片结构纵向裂缝

图 15 隧道管片及接头损伤破坏形式

Fig. 15 Damage failure forms of tunnel segments and circumferential joints

片纵向裂缝,同时环缝接头易产生较大的张开及错台变形.由于管片环缝接头刚度远小于管片本体刚度,且断层强制位移作用在向地表传播的过程中削弱了其对隧道的剪切作用,故盾构管片发生斜向剪切破坏的风险较低,上述隧道的变形破坏特征与跨断层矿山法隧道的结构斜向剪切破坏模式存在显著差异[7,9].

此外,试验中环缝接头位置的石膏模型并未产生局部压溃及掉块现象,推断跨正断层城市浅埋盾构隧道发生管片压溃破坏的风险相对较低,盾构隧道整体以环缝接头张拉破坏为主,上述现象与 Kiani 等[19]离心试验结果较为吻合,进一步验证了本试验结果的合理性.

根据模型试验得到的盾构隧道变形破坏特征,沿隧道轴向可以将盾构隧道划分为拱底受拉区、拱顶受拉区及环向受力区,如图 16 所示.其中,在拱顶及拱底受拉区内,管片环缝接头容易产生大变形,管片局部容易发生拉裂破损,从而降低盾构隧道的防水性能.而在环向受力区内,管片环的直径收敛变形较为严重,管片拱腰外侧及拱底内侧容易产生纵向裂缝.

3.2 隧道变形破坏控制指标

在盾构隧道横向变形性能研究方面,董正方

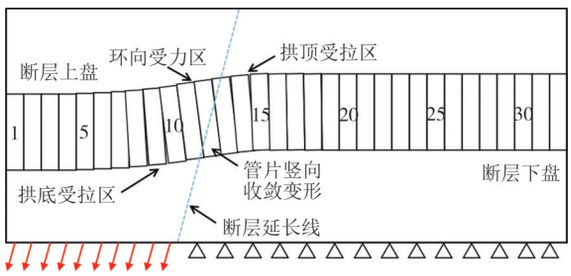


图 16 正断层错动下模型隧道变形破坏素描图

Fig. 16 The sketch of deformation and failure of model tunnel under normal faulting

等[20]基于模型管片的静力加载试验结果,提出管片弹塑性分界点、临界失稳点直径变形率限值分别为 0.42‰和 15.22‰.施成华等[21]通过开展基于混凝土塑性损伤的管片极限承载力数值计算,得出隧道管片极限承载力对应的直径收敛变形率为 13.4‰.王如路等[22]指出超载作用下软土盾构隧道管片达到混凝土强度标准值的直径变形率为 13.5‰,并认为当管片收敛变形接近 10 cm 时应进行及时加固.在本试验中,管片最大直径收敛变形率为 9.3‰,从管片收敛变形分析,此时管片尚未达到临界失稳点.

从管片破坏形态分析,本试验管片纵向裂缝主要分布在拱底内侧及拱腰外侧,仅为单条纵向裂缝,裂缝发展程度较浅,根据王士民等[13]试验结果,管片达到临界失稳破坏状态时,管片产生多条纵向贯穿裂缝,拱腰产生压溃破坏区域.因此,断层错动加载后,模型管片尚未发生失稳压溃破坏,管片仍具备一定的横向承载力.

在盾构隧道纵向承载力研究方面,Wang 等[23]基于管片接头拉拔试验结果,指出在管片接头受拉过程中,接头混凝土首先发生受拉破坏,即接头混凝土拉裂破损的速度远大于螺栓受拉屈服的速度.此外,相关理论[24]及模型试验[25]研究表明,当环缝螺栓发生屈服后,隧道纵向承载力显著降低,环缝极易产生张拉大变形.环缝接头变形及接头混凝土受拉裂缝将成为渗漏水通道,进一步削弱盾构隧道的防水性能.

在本试验中,当断层位错动量达到 2 cm 时(对应原型 50 cm 断层错动量),换算为原型的隧道环缝峰值张开量为 9 mm,已经远超出管片接缝防水限制指标,接头混凝土发生严重拉裂破损,严重影响隧道的

运营安全.此外,由于接头相似材料尚无法满足接头塑性变形阶段的相似等效理论,故试验得到的管片环缝变形量偏小.

综上所述,本文建议将管片环缝接头变形及接头混凝土拉裂破损作为界定跨断层盾构隧道结构破坏的主要控制指标.

3.3 对盾构隧道结构设计的建议

目前,国内外的隧道设计规范规定隧道以避让活动断层为主,且均未明确提出跨断层隧道结构设计方法及应对措施.结合本试验研究成果,在盾构隧道结构设计方面提出如下建议:

1)本试验盾构隧道受断层错动的影响范围约为4D(D为隧道外径),在#9~#14环管片环缝接头处发生明显拉裂破损,而在实际工程中,盾构隧道的变形破坏范围受断层运动属性、断层错动量、断层与隧道垂直距离等因素的影响.因此,在进行盾构隧道结构设计时,应结合具体工程,重点加强断层附近盾构隧道环缝接头承载力与变形验算.

在应对措施方面,可将该范围内的管片替换为钢纤维混凝土管片或钢管片,或对螺栓手孔位置的衬砌结构进行局部补强[26],同时将纵向螺栓替换为柔性连接件[27],避免螺栓被拉断后导致隧道结构失稳破坏.此外,环缝接头应增设适应接缝大变形的止水带,防止发生严重的渗漏水现象.

2)由于在断层错动下,盾构隧道横向承载力远大于纵向承载力,管片并未发生横向失稳破坏,因此可以按照高于本地区抗震设防烈度一度的抗震设防烈度进行管片结构横向承载力验算,并适当提高管片钢筋数量与等级.当盾构管片横向变形不满足设计要求时,可采用钢板加固措施进行结构补强.

4 结 论

通过开展隐伏正断层错动对地铁盾构隧道影响的模型试验,揭示了盾构隧道上跨隐伏断层的结构变形与损伤破坏特征,明确了盾构隧道的薄弱环节,主要结论如下:

1)在正断层错动下,隧道纵向差异变形呈现非线性增加趋势,环缝接头变形主要位于断层下盘隧道拱顶及断层上盘隧道拱底,换算为原型的环缝峰值张开量为9 mm,远超过地铁盾构隧道接缝防水限值.

2)隧道与地层之间接触压力主要位于断层延长线与隧道交界面附近,且存在围压松散区与围岩挤压变形区,试验最终得到的峰值围岩压力为22.2 kPa,对应实际工况的0.56 MPa,表明地层对隧道的挤压作用相对有限.

3)管片环向受力整体呈现“横鸭蛋形”,位于断层延长线附近的管片环向应变较大,断层延长线与隧道交界处(#12~#15环)管片结构径向收敛变形较为严重,该处管片易发生纵向开裂.

4)盾构隧道的主要破坏特征包括环缝接头石膏拉裂破损及管片纵向裂缝,同时管片环缝变形量较大,盾构隧道发生斜向剪切破坏及局部压溃破坏的概率较低.结合盾构隧道横纵向承载力特性,建议将管片环缝接头变形及接头混凝土拉裂破损作为界定跨断层盾构隧道结构破坏的主要控制指标.

5)在进行盾构隧道结构设计时应重点加强环缝接头承载力与变形验算,为了提高盾构隧道抗错断性能,建议将断层错动影响区内的管片替换为钢纤维混凝土管片或钢管片,或补强纵向螺栓手孔位置的衬砌结构,并设置适应接缝大变形及防水性能可靠的柔性连接件.

参考文献

[1] 周春景,吴中海.“中国及毗邻海区活动断裂图(1:5000000)”编图新思路及最新研究成果[C]//第四届中国地球科学联合学术年会论文集.北京:中国地球物理学会, 2017:920-922.
ZHOU C J, WU Z H. New map of China and its adjacent sea area activity map (1:5000000) and the latest research results [C]// Proceedings of the 4th China Earth Science Joint Academic Annual Meeting. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2017: 920-922. (in Chinese)

[2] KIANI M, GHALANDARZADEH A, AKHLAGHI T, et al. Experimental evaluation of vulnerability for urban segmental tunnels subjected to normal surface faulting [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 89: 28-37.

[3] 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 X Z, LIN L L. Research on model experiment of effect on 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. (in Chinese)

[4] 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 X L, WANG Z, ZHAO M, 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. (in Chinese)

[5] CAI Q P, PENG J M, NG C, et al. Centrifuge and numerical modelling of tunnel intersected by normal fault rupture in sand[J]. Computers and Geotechnics,2019,111:137-146.

[6] 闫高明,申玉生,高波,等. 穿越断层隧道钢筋橡胶接头振动台试验研究[J]. 振动与冲击,2021,40(13):129-135,153.
YAN G M, SHEN Y S, GAO B, et al. Experimental study of stick-slip fault crossing segmental tunnels with joints[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 129-135, 153. (in Chinese)

[7] 郭翔宇,耿萍,丁梯,等. 逆断层黏滑作用下隧道力学行为研究[J]. 振动与冲击,2021,40(17):249-258.
GUO X Y, GENG P, DING T, et al. Mechanical behavior of tunnel under stick-slip action of reverse fault [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(17):249-258. (in Chinese)

[8] ZHONG Z L, WANG Z, ZHAO M. Structural damage assessment of mountain tunnels in fault fracture zone subjected to multiple strike-slip fault movement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,104:103527.

[9] 安韶,陶连金,边金,等. 逆断层错动作用下地铁隧道结构损伤分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(7):147-156.
AN S, TAO L J, BIAN J, et al. Damage analysis on subway tunnel structure under effect of reverse fault dislocation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(7): 147-156. (in Chinese)

[10] 李瀚源,李兴高,刘杨,等. 跨活动断层盾构隧道纵向受力及变形特征[J]. 浙江大学学报(工学版),2023,57(2):340-352.
LI H Y, LI X G, LIU Y, et al. Longitudinal stress and deformation characteristics of shield tunnel crossing active fault [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(2):340-352.(in Chinese)

[11] 陶连金, 王志岗, 石城, 等. 基于Pasternak地基模型的断层错动下管线结构纵向响应的解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1577-1586.
TAO L J, WANG Z G, SHI C, et al. Analytical solution for longitudinal response of pipeline structure under fault dislocation based on Pasternak foundation model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(9):1577-1586. (in Chinese)

[12] 徐国文,王士民,代光辉,等. 基于内外分区割槽方式的盾构隧道接头环向模拟方法研究[J]. 铁道学报,2016,38(4):90-97.
XU G W, WANG S M, DAI G H, et al. Research on ring simulation method of shield tunnel based on internal and external slotting[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(4): 90-97. (in Chinese)

[13] 王士民, 申兴柱, 彭博, 等. 侧压力系数对盾构隧道管片衬砌受力及破坏形态的影响研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 102-109.
WANG S M, SHEN X Z, PENG B, et al. Analysis of effect of lateral strata pressure coefficient on mechanical characteristics and failure modes of segment lining of shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2019,41(7):102-109. (in Chinese)

[14] 刘川昆, 何川, 王士民, 等. 裂缝长度对盾构隧道管片结构破坏模式模型试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019, 50(6):1447-1456.
LIU C K, HE C, WANG S M, et al. Model test study on failure mode of segment structure of shield tunnel with crack length [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019,50(6):1447-1456. (in Chinese)

[15] 黄宏伟,徐凌,严佳梁,等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(1): 11-18.
HUANG H W, XU L, YAN J L, et al. Study on transverse effective rigidity ratio of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(1):11-18. (in Chinese)

[16] 申兴柱. 盾构隧道双层衬砌结构力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2018:15-16.
SHEN X Z. Research on the mechanism properties of the double-layer lining structure for shield tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2018:15-16. (in Chinese)

[17] 苟玉轩,黄强兵,王立新,等. 地裂缝环境下盾构隧道结构性状及适应性研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(6):117-125.
GOU Y X, HUANG Q B, WANG L X, et al. Study on structural behaviors and adaptability of shield tunnel in the ground fissure environment [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(6): 117-125. (in Chinese)

[18] 张成平,张旭,李贺,等. 浅埋隧道施工扰动下含空洞地层破坏演化规律试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(2):263-270.
ZHANG C P, ZHANG X, LI H, et al. Model tests on failure laws of ground with voids induced by shallow tunnelling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 263-270. (in Chinese)

[19] 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.

[20] 董正方,张继康,蔡宝占,等. 地震作用下盾构隧道变形性能试验研究[J]. 世界地震工程,2019,35(4): 125-132.
DONG Z F, ZHANG J K, CAI B Z, et al. Experimental study on deformation performance of shield tunnel under seismic action [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(4): 125-132. (in Chinese)

[21] 施成华, 王祖贤, 刘建文, 等. 基于混凝土损伤模型的盾构隧道极限承载力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4310-4325.
SHI C H, WANG Z X, LIU J W, et al. Study on ultimate bearing capacity of shield tunnel based on damage model of concrete [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53 (11):4310-4325. (in Chinese)

[22] 王如路,张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(6):1092-1101.
WANG R L, ZHANG D M. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(6):1092- 1101. (in Chinese)

[23] WANG Q, GENG P, GUO X Y, et al. Experimental study on the tensile performance of circumferential joint in shield tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 112: 103937.

[24] CHEN H Z, CHEN R P, WU H N, et al. General solutions for the longitudinal deformation of shield tunnels with multiple discontinuities in strata [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021, 107:103652.

[25] 刘四进,封坤,何川,等. 大断面盾构隧道管片接头抗弯力学模型研究[J]. 工程力学,2015,32(12):215-224.
LIU S J, FENG K, HE C, et al. Study on the bending mechanical model of segmental joint in shield tunnel with large cross-section [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (12): 215-224. (in Chinese)

[26] 苟玉轩, 黄强兵, 杨晓强, 等. 大角度斜交地裂缝带盾构隧道变形破坏机制的模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(10): 117-130.
GOU Y X, HUANG Q B, YANG X Q, et al. Model test on deformation and failure mechanism of shield tunnel intersecting ground fissure with large angle [J]. China Civil Engineering Journal, 2022,55(10):117-130. (in Chinese)

[27] LUNARDI P, CASSANI G, CANZONERI A, et al. Passage of a precast segmental lining tunnel through an active fault-special segments and details-Thessaloniki metro [C]//Proceedings of the World Tunnel Congress 2017-Surface Challenges-Underground Solutions. Bergen, Norway: JSCE, 2017: 37-44.