

45°倾角正断层粘滑错动对隧道影响试验分析

刘学增¹, 王煦霖², 林亮伦³

(1. 同济大学 土木信息技术教育部工程研究中心, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 重庆市建筑科学研究院, 重庆 400015)

摘要: 通过 1:50 室内模型试验, 模拟了 45°倾角正断层粘滑错动下, 与之正交的隧道结构的受力变形破坏过程, 并布置传感器监测了隧道顶部和底部的围岩压力、隧道轴向的应变和隧道环向的应变。结果表明, 围岩压力在剪切带附近发生显著变化, 上盘和剪切带范围内拱顶压力显著增大, 下盘拱顶压力次之, 上盘和剪切带隧道底部压力减小, 下盘底部压力显著增大, 隧道与下部围岩可能局部脱空以适应断层的剪切位移; 上盘和剪切带范围内隧道纵向弯矩为正, 下盘范围内为负, 隧道偏心受压; 以原型混凝土压坏来判定衬砌破坏, 初步确定原型结构破坏所容许的最大断层位移 $D=0.7$ m, 理论上该值略偏大; 隧道衬砌破坏区域长度, 在剪切带和下盘范围分别为 1.7 和 2.8 倍隧道宽度。

关键词: 隧道; 正断层; 粘滑错动; 模型试验

中图分类号: U45

文献标志码: A

Modeling Experiment on Effect of Normal Fault with 45° Dip Angle Stick-slip Dislocation on Tunnel

LIU Xuezheng¹, WANG Xulin², LIN Lianglun³

(1. Civil Engineering Information Technology Research Center of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Chongqing Construction Science Research Institute, Chongqing 400015, China)

Abstract: The force-deformation mechanism and failure process under the effects of stick-slip dislocation of the normal fault with 45° obliquity was studied by a 1 : 50 model experiment. And the strata pressure of the tunnel vault and bottom, axial strain and hoop strain were monitored. Results show that the strata pressure on the vault in the hanging wall and the shear zone increases significantly, followed by the pressure on the vault in the foot wall. The pressure on the tunnel bottom in the hanging wall and the shear zone

decreases, while it greatly increases in the foot wall. The tunnel is separated from the wall rock so as to accommodate the shear displacement of the fault. The longitudinal bending moment in the hanging wall and the shear zone is positive and negative in the foot wall zone. By judging the lining failure from the cement prototype under compression, the maximum allowable fault displacement of the prototype is $D=0.7$ m. Theoretically, the value is overestimated. Tunnel lining fracture length is 1.7 and 2.8 times the width of the tunnel in the shear zone and foot wall respectively.

Key words: tunnel; normal fault; stick-slip dislocation; modeling experiment

断层错动不仅可以引起地震灾害, 而且带来的地层永久性变形会因断层两侧的差异运动对地上及地下工程造成很大影响。公路工程中遇到断裂构造问题, 现行规范都基于避让原则加以规定^[1], 但随着我国国民经济的快速发展, 国土资源开发密度、强度和深度的不断增加, 许多隧道在建设过程中不可避免地会遇到活动断裂。因此活动断层作用下山岭隧道的变形破坏特征如何, 其影响范围为多少, 隧道所能承受的最大断层位移有多大等, 这一系列问题成为活动断层区隧道工程的关键所在。

国内外很多学者针对地震引起的地层永久变形, 通过理论解析方法、数值模拟方法以及室内模型试验方法, 研究了地下构造物的受力变形机理。

在埋地管线方面, Newmark^[2]假设走滑断层下的浅埋钢管道发生反对称变形, 以一个柔性挠索常曲率曲线来描述管道位移, 并认为管道与断层交点为最大轴力的临界点。Kennedy 等^[3]扩展了 Newmark 的研究, 采用均匀被动土压力、大位移、单一曲率弯曲曲线模型, 进行大直径浅埋管线分析。冯

收稿日期: 2012-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(51278377); 交通运输部科技项目(2011318775.680); 上海市优秀技术带头人计划(12XD1424100)

第一作者: 刘学增(1971—), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为岩土工程监测、检测与信息化施工技术。

E-mail: xuezhengL@263.net

启民、郭恩栋等^[4]首次对钢管道做了静力及动力振动台模拟实验,并采用梁式模型分析计算了跨断层管道的变形和强度.刘学增等^[5]结合土耳其地震断层引起的土体的相对运动,应用梁-壳模型分析了断层运动对地下供水管道的影响.张志超等^[6-7]进行跨断层地下管线振动台模型试验,将钢管埋设在一个盛装砂土、可以模拟走滑断层错动作用的模型箱中,研究地下管线在承受断层错动时应变分布规律和管周动土压力变化规律,并考察地下管线与断层的夹角以及管内水体的影响.

在断层错动对隧道结构的影响方面,Burridge等^[8]将离心机试验结果用于对土体-隧道相互作用一维有限元模型参数的确定,通过理论计算对试验模型进行校核,充分再现有限长隧道离心试验的弯矩,经过校正后的模型可用来计算无限长原型隧道在0.61和1.12 m断层位移下的垂直位移、纵向弯矩和剪力.Johansson等^[9]利用试验和数值模拟的手段,根据断层位移和失效应变来确定结构设计准则.现场调查和数值模拟结果表明设计中应考虑地下结构周围的水平压力.黄强兵等^[10]以具有正断层性质的西安地裂缝为背景,采用沉降试验平台模拟上盘整体下降,下盘保持不动的试验装置来研究地裂缝对地铁隧道衬砌结构的影响机制.刘学增等^[11]通过室内模型试验,研究了逆断层错动下公路隧道的受力变形和破坏形式.

由于断裂活动的复杂性,目前尚缺少充分的现场观测资料,特别是断裂特性的勘测,如断裂物化特征、断裂分级分段、断裂破裂扩展等^[1],对断裂活动影响隧道结构的模拟还有待进一步研究.

本文设计了室内砂箱模型试验,模拟45°倾角正断层粘滑错动下,与之正交的隧道结构的受力变形破坏特征.并监测隧道顶部和底部的地层压力、隧道轴向的应变和隧道环向的应变,以期了解地层-结构相互作用特征,断层错动引起的结构变形和内力的变化规律,为穿越断裂带的隧道结构设计提供一定的技术参考.

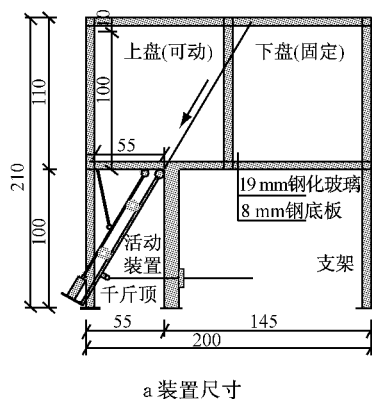
1 试验设计

断层基岩错动产生的剪切位移,可以穿过覆盖层到达地表,场地的这种剪切通常被限制到活动断层周围一个狭窄的范围^[12].针对45°倾角正断层粘滑错动,本文设计了砂箱模型试验,通过箱底施加强制位移,模拟断层的错动,并监测隧道在断层影响下

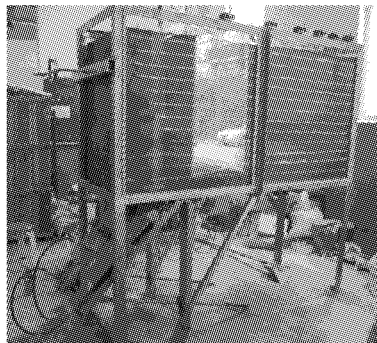
的受力和变形.试验中,用上下活动的模型箱底板来模拟断层基岩,砂土模拟覆盖层,模型隧道埋置于基岩上方一定距离处,基岩错动产生的断裂在覆盖层中向上传播,来模拟场地受到断层错动的影响,随着上盘一侧模型箱底板的下降,砂土中形成了明显的断裂,断裂在覆盖层中空间位置的分布与实际较接近.值得一提的是,由于砂箱尺寸的限制,隧道模型为有限长,与实际中可认为是无限长的整体式隧道有一定的差别.

1.1 试验装置

试验采用同济大学自行开发的试验箱^[13],如图1所示,装置由支撑系统、加载系统和量测系统组成,箱体在加载装置之上,其长宽高分别为2.0,0.8,1.1 m.根据正断层运动特点,将试验箱底板分为上盘(沉降盘)和下盘(固定盘),保持下盘不动,千斤顶升降以实现上盘的沉降.上盘底部与加载系统之间设置了活动轴承,可以在30°~90°间自由调节断层的倾角,本次试验断层倾角设置为45°.



a 装置尺寸



b 装置照片

图1 试验装置(单位:cm)

Fig.1 Experiment equipment(units:cm)

1.2 相似比例与相似材料

根据试验条件,取几何相似比 $C_L=50$,容重相似比 $C_\gamma=1$ 为基础相似比,按相似定律列出 π 项式,推导得应力相似比 $C_\sigma=C_L \cdot C_\gamma=50$.由于衬砌模型

材料的限制,弹性模量相似比实际为 $C_E = 25$,那么在弹性范围内应变相似比 $C_\epsilon = C_\sigma / C_E = 2$ 。

根据《公路隧道设计规范》^[14]中的标准双车道单心圆衬砌断面尺寸,确定模型截面尺寸为:宽 25 cm,高 20 cm,为方便制作,厚度略增大至 1.5 cm,隧道长取 170 cm。

原型钢筋混凝土衬砌采用内置钢丝网的石膏材料模拟。混凝土强度等级 C25,弹性模量为 28 GPa,钢筋级别 HRB335。石膏配合比石膏:水:缓凝剂 = 1.2:1:0.003,抗压强度 2.7 MPa,弹性模量 1.13 GPa,那么弹模相似比即如前所述, $C_E = 28/1.13 = 25$ 。

钢筋的配筋率按照等强度原则简化考虑,即:

$$\frac{A_{ps} f_{py}}{A_{pc} f_{pc}} = \frac{A_{ms} f_{my}}{A_{mc} f_{mc}} \quad (1)$$

式中: A_{ps} 、 f_{py} 分别为原型钢筋的截面积和强度; A_{pc} 、 f_{pc} 分别为原型混凝土的截面积和强度; A_{ms} 、 f_{my} 分别为模型钢筋的截面积和强度; A_{mc} 、 f_{mc} 分别为模型石膏的截面积和强度。最终采用 $\phi 0.8$ 纵向钢筋和 $\phi 0.5$ 环向钢筋,并统一钢筋间距为 10 mm。

围岩按均匀介质考虑,原型为强风化的 V 级围岩,属破碎或极破碎的松散覆盖层,重度 $\gamma = 17 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, $c = 0.1 \text{ MPa}$,内摩擦角 $\varphi = 27^\circ$;模型材料采用筛净的干燥黄砂模拟,重度 $\gamma = 14.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,粘聚力 $c = 0$,内摩擦角 $\varphi = 28^\circ$ 。模型隧道埋深 50 cm,模型箱底板与隧道底部之间黄砂厚度为 40 cm,如图 2a 所示。

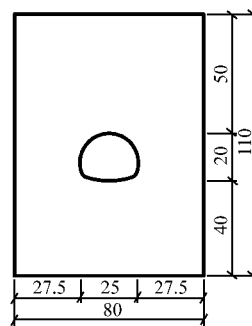
1.3 量测系统

监测内容主要有隧道轴向应变、隧道环向应变以及隧道与地层的接触压力。沿隧道轴线布设 1# ~ 7#,共 7 个监测断面,在各断面的隧道顶部和底部布置 JTM-Y2000 微型电阻式土压力盒;在隧道表面顶部和底部处粘贴纵向应变片;在每个断面粘贴环向应变片,顶部、底部、左拱腰、右拱腰各有一测点。应变片和土压力盒的布置如图 2b 所示,7# 断面没有土压力盒及环向应变片。

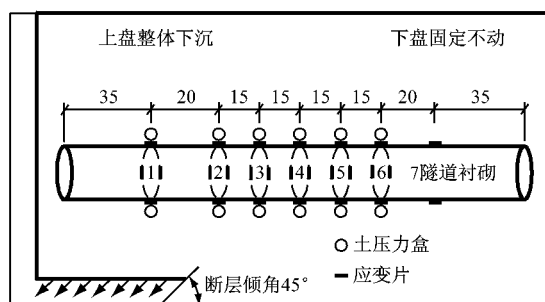
1.4 试验实施

试验过程可分为模型埋置和仪器安装、断裂传播、隧道衬砌测试三个部分。

(1) 在模具内浇筑石膏衬砌模型,达到强度后粘贴应变片,通过加载装置将活动盘(断层上盘)提升至 100 mm 高度处后固定,然后在模型箱内填充干燥黄砂,埋置隧道模型和传感器,测试仪器,待稳定后记录初读数。



a 隧道位置示意图(横断面)



b 监测点布置

图 2 模型隧道及监测点布置图(单位:cm)

Fig.2 Arrangement of tunnel and transducers(units:cm)

(2) 开始试验,上盘底部千斤顶收缩,上盘整体下沉,在覆盖层中形成了明显的断裂,并向上传播至砂土表面,断层得以模拟。本试验考虑的正断层粘滑错动,主要是通过较快的加载速率来模拟的,兼顾数据采集的可操作性,取上盘的垂直位移速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(3) 加载过程中,自动采集应变片和土压力盒数据,以断层垂直向位移为控制量,测试不同位移时隧道的受力变形。加载结束后,开挖并观察隧道模型的最终破坏形态,了解裂缝的分布规律。

2 试验分析

随着上盘的逐级下降,基岩覆盖层形成倒三角形的剪切带,其几何形态^[15]如图 3 所示。剪切带左右两侧断裂面的夹角即扩散角为 44° ,剪切带中心线倾角约为 78° ,与隧道模型的轴线交点在 2# 监测断面左侧 11 cm 处,剪切带与隧道相交的范围长 41.5 cm,上下盘可以此为分界;1 号断裂与隧道轴线交点在 1# 监测断面左侧 13.5 cm 处,2 号断裂与隧道轴线交点在 2# 监测断面右侧 8 cm 处。断层引起地层发生不均匀沉降,隧道经历错动位移作用,这将导致围岩压力、隧道轴向应变、隧道环向应变等的变化,以下详述。

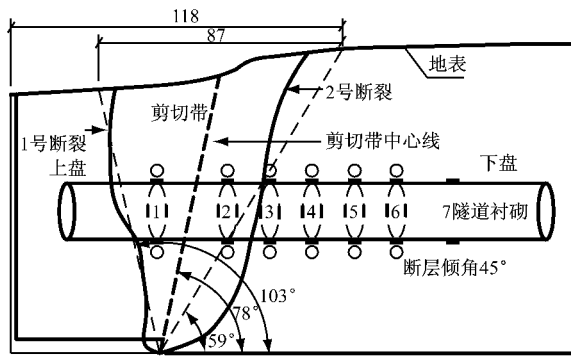


图3 剪切带几何特征(单位:mm)

Fig.3 Geometrical features of the shear zone(units:mm)

2.1 纵向应变

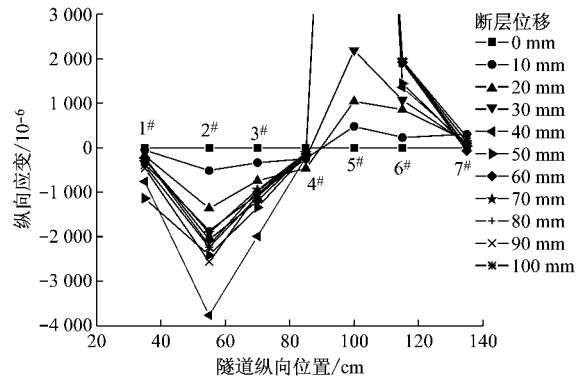
图4a为不同断层垂直位移时模型衬砌顶部纵向应变分布曲线,上盘和剪切带内隧道顶部出现压应变,下盘内隧道顶部出现拉应变。断层垂直错距较小时,应变逐步增加;断层垂直错距超过30 mm后,5#断面拱顶应变片拉坏;错距达40 mm时,各监测点应变不再增加,其后逐步降低。拱顶最大拉、压应变分布在剪切带和断层下盘范围内,位于5#和2#断面,分别为 2.187×10^{-6} 和 -3.763×10^{-6} 。4#断面顶部应变始终保持在较小的范围内。

图4b为不同断层垂直位移模型衬砌底部纵向应变分布曲线,上盘和剪切带内隧道底部为拉应变,下盘内隧道底部为压应变。同样,当断层垂直错距超过30 mm后,2#断面底部应变片拉坏;断层错距达70 mm时,应变不再增加,其后,各点应变逐步降低。最大拉、压应变出现在2#和4#,分别为 1.512×10^{-6} 和 -3.707×10^{-6} 。3#断面底部应变始终保持在较小的范围内。

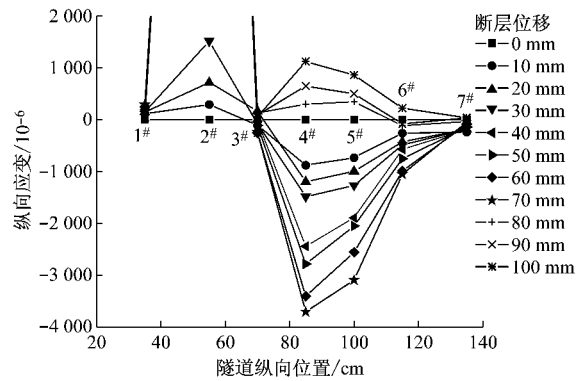
由图4可知,上盘和剪切带范围内隧道截面受正弯矩作用,下盘范围内隧道截面受负弯矩作用,2#~5#截面表现出明显的偏心受压特征。从衬砌拱顶和底部的纵向最大应变出现的位置来看,隧道在剪切带以及下盘范围受错动的影响较大,而上盘范围隧道纵向应变较小。

根据应变相似比,石膏模型压应变达 -1.000×10^{-6} ,原型衬砌混凝土压应变为 -2.000×10^{-6} ,此时混凝土受压破坏。图4b中,模型断层垂直错距达到 $D_{\max}^z = 14$ mm,4#底部石膏应变首先达到 -1.000×10^{-6} ,可认为原型已发生纵向受压破坏, D_{\max}^z 表示由纵向应变极限值决定的隧道破坏断层垂直错距。实际中钢筋混凝土截面在受压侧破坏前,受拉侧钢筋

多已屈服,即钢筋受力达到极限略早于混凝土,从而 D_{\max}^z 取14 mm可能略偏大,为其上限。由于模型几何相似比的限制,难以测得衬砌钢丝的应变,且衬砌断面表现为偏心受压,故上面分析以石膏压应变为准。



a 隧道拱顶



b 隧道底部

图4 不同断层垂直位移模型衬砌纵向应变

Fig.4 Curves of longitudinal strain with different vertical fault displacements

2.2 环向应变

1#~6#断面布置了环向应变片,顶部、底部、左侧、右侧各有一测点,图5为模型衬砌环向应变随断层垂直位移的变化曲线。断层垂直错距较小时,环向应变逐步增加,其后趋于稳定,其分界在10~30 mm间不等。1#~3#断面受断层影响较大,断面大多发生受拉破坏。5#~6#断面距断层剪切带较远,应变很小。

模型断层垂直错距达到 $D_{\max}^h = 39$ mm,2#底部石膏应变首先达到 -1.000×10^{-6} ,可认为原型已发生环向受压破坏, D_{\max}^h 表示由环向应变极限值决定的隧道破坏断层垂直错距。

2.3 围岩压力

断裂在基岩覆盖层中的传播、断层的错动位移以及隧道与围岩的相互作用,都将导致围岩压力的变化。图6a为不同断层垂直错距下模型隧道顶部围

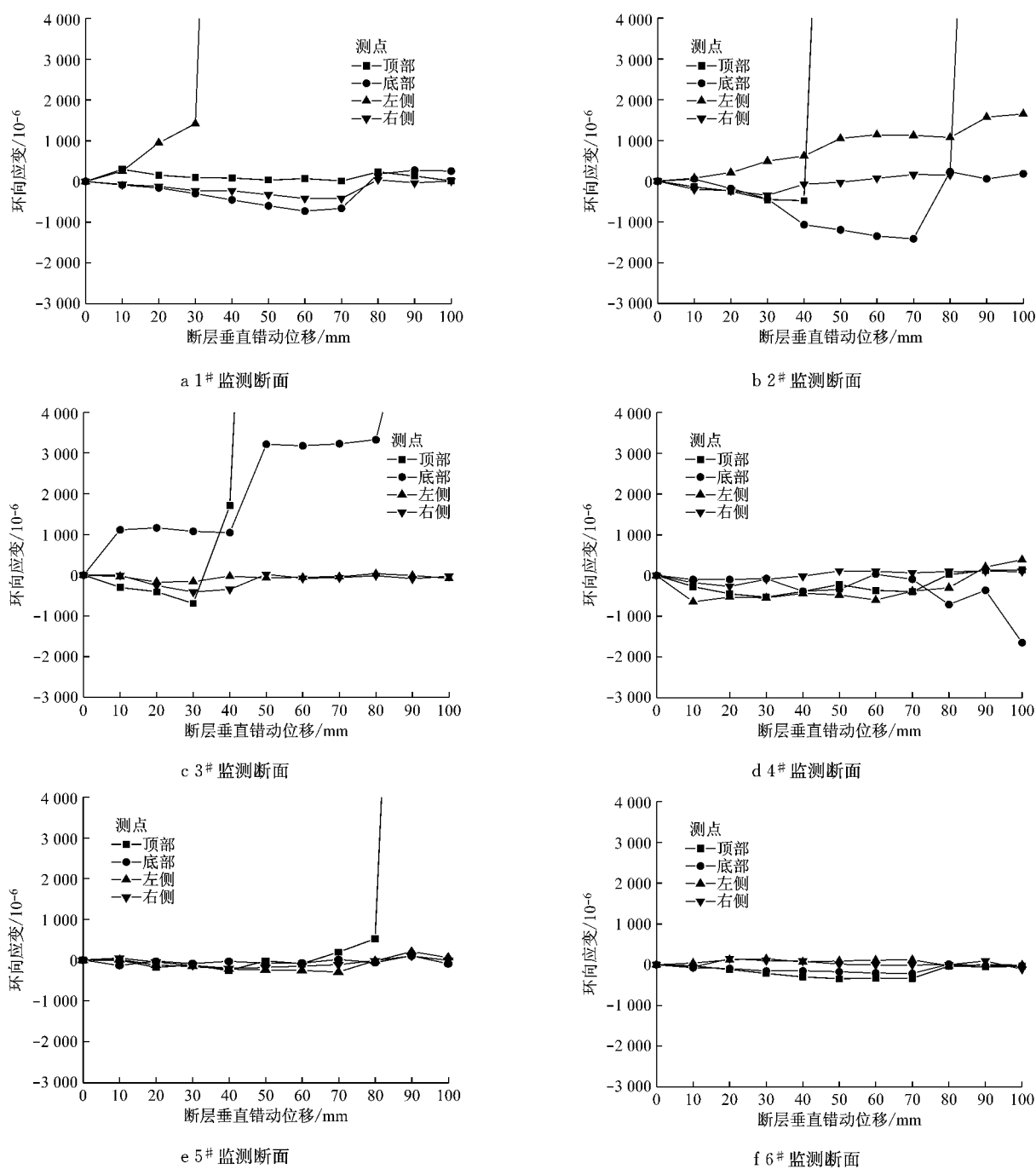


图 5 模型衬砌环向应变随断层垂直位移变化曲线
 Fig.5 Hoop strain versus vertical fault displacements

岩压力分布情况,断层错距 10 mm 时压力接近最大值,以后随上盘下降,有所波动,错距大于 60 mm 后,压力逐渐减小.在上盘和剪切带范围内拱顶围岩接触压力大,下盘范围内较小,最大值出现在断裂带内 2# 拱顶.

图 6b 为隧道底部围岩压力分布情况,断层错距达 10 mm 时压力达最大值,以后随上盘下降,不断减小.总体特征表现为:上盘和剪切带范围内压力很小,甚至低于初始围岩压力,下盘范围内大幅增加,

最大值出现在 4# 底部.上盘范围内隧道底部压力减小,说明隧道与地基脱开,隧道在断层附近应存在一脱空段,以适应错动位移,这同时也导致了隧道纵向受力不均匀,理论上,脱空段长度与地层性质、隧道刚度、断层错距和围岩压力有关.试验中,断层错距约为 5 mm 时,2# 处隧道底部与围岩脱开,错距超过 10 mm 后 1# 和 2# 底部均脱开,上盘范围内隧道长度较短,未能得到脱空段长度的变化规律,这与实际无限长的隧道存在一定的差异.

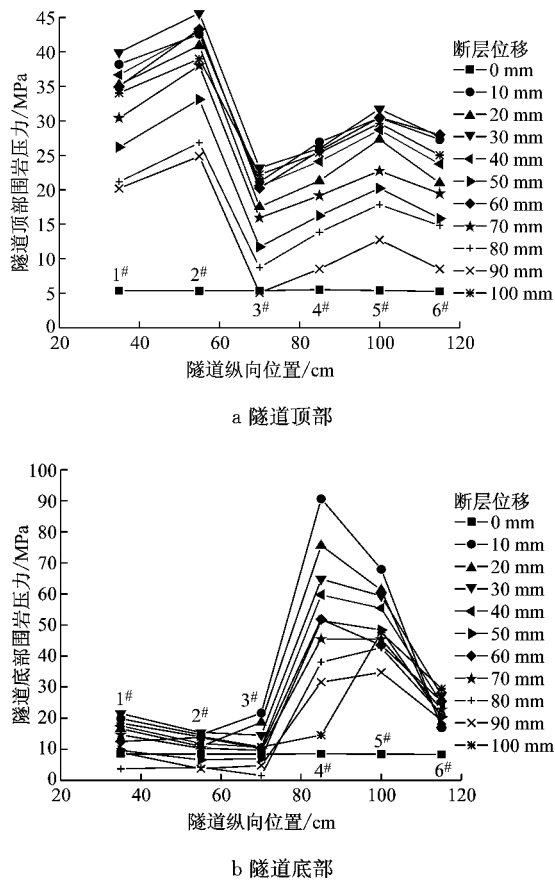


图6 模型隧道地层压力分布

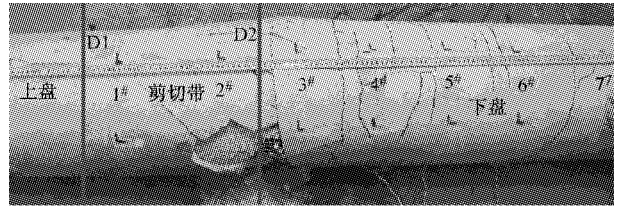
Fig. 6 Curves of formation pressure with different vertical fault displacements

2.4 破坏形态

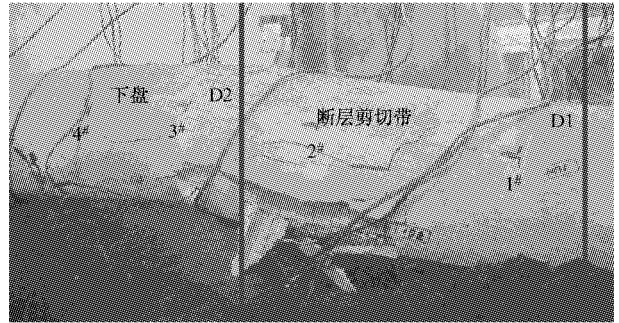
图7为隧道最终的破坏图片,直线D1与D2分别表示1、2号断裂(见图3)与隧道中心位置的交线,之间为剪切带与隧道相交部分,由于照片拍摄角度不同,图7a上盘在图左侧,下盘在右侧,图7b相反。

根据监测应变的变化,推测衬砌破坏的大致过程。当断层垂直错距达到30 mm时,2#底部和5#顶部应变片受拉过载,衬砌出现环向拉裂缝,裂缝导致了附近测点应力释放或者转移;同时,1#左侧也受拉破坏,出现裂缝。当断层垂直错距达到40 mm时,2#、3#拱顶环向应变片进入受拉过载状态,2#拱顶纵向压应变达最大并开始减小,附近发生破坏。

衬砌破坏集中在剪切带和下盘范围内,上盘隧道较完好。剪切带出现一条斜裂缝与数条纵向裂缝,下盘范围为环向裂缝,且大多未贯通。隧道发生破坏区域的长度,在D2左侧等于1.7倍的隧道宽度,D2右侧等于2.8倍的隧道宽度,即在剪切带和下盘范围分别等于1.7和2.8倍的隧道宽度,上盘内隧道受影响很小。



a 隧道顶部



b 隧道侧面

图7 隧道最终破坏图

Fig. 7 Final failure of the tunnel

2.5 小结

正断层断裂在基岩覆盖层中传播,与之正交的隧道结构需经历较大的错动位移,由于地层的永久变形和地层-结构的相互作用,围岩压力在剪切带附近发生显著变化,隧道与下部围岩可能局部脱空以适应断层的剪切位移,此时,隧道的纵向受力模式可以简化为一个局部脱空的弹性地基梁。通过限定石膏模型受压应变 $-1\,000 \times 10^{-6}$ 为原型混凝土压坏分界点,可以初步确定结构破坏所容许的最大断层位移。理论上,该容许断层位移与断层性质、隧道围岩的刚度相对大小、围岩压力、断裂传播的地层永久变形有关,这些复杂的关系导致了试验所模拟的条件对容许的最大断层位移具有重要意义,故将试验条件总结如下。

断层为45°倾角正断层,隧道埋深0.5 m(对应原型25 m),隧道底距离基岩0.4 m(对应原型20 m),剪切带与隧道相交范围(见图3)的长度为41.5 cm(对应原型20.75 m)。隧道与围岩的刚度相对大小可用弹性地基梁法的特征系数 α 来表征,表达式为 $\alpha = \sqrt[4]{Kb/4EI}$ 。试验用黄砂按新填筑砂土^[16]取基床系数 $K = 2\,500 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,宽度 $b = 0.25 \text{ m}$,刚度 $EI = 87 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,则 $\alpha = 1.16$ 。

如前所述,由纵向应变极限值决定的隧道破坏断层垂直错距 $D_{\max}^c = 14 \text{ mm}$,由环向应变极限值决定的隧道破坏断层垂直错距 $D_{\max}^h = 39 \text{ mm}$,取两者小值,则 $D_{\max} = 14 \text{ mm}$,对应原型,隧道破坏所容许的最大断层错距为 $D = 0.7 \text{ m}$,理论上,该值为其上限。

3 结论

本文通过 1:50 室内模型试验,开展了 45°倾角正断层粘滑错动影响下隧道的受力变形机制研究,通过分析试验数据,得出以下结论。

(1) 正断层断裂在基岩覆盖层中传播,与之正交的隧道结构需经历较大的错动位移,由于地层的永久变形和地层-结构的相互作用,围岩压力在剪切带附近发生变化。上盘和剪切带范围内拱顶压力增大显著,下盘拱顶次之;上盘和剪切带范围内隧道底部压力减小,局部与地层脱开,下盘底部压力增大显著。

(2) 纵向应变在断层剪切带以及下盘范围较大,上盘范围内较小;上盘和剪切带范围内隧道截面受正弯矩作用,下盘范围内隧道截面受负弯矩作用,隧道表现出较明显的偏心受压特征。

(3) 通过限定石膏模型受压应变 $-1\ 000\times 10^{-6}$ 为原型混凝土压坏分界点,初步确定原型结构破坏所容许的最大断层位移 $D=0.7\text{ m}$ 。

(4) 隧道存在脱空段,以适应较大的错动位移。实际中的无限长隧道,其纵向受力模式可以简化为一个局部脱空的弹性地基梁。

(5) 隧道衬砌破坏区域长度,在剪切带内和下盘范围分别等于 1.7 和 2.8 倍的隧道宽度,上盘内隧道受影响很小。

参考文献:

- [1] 陈红旗,魏云杰.断裂构造工程效应综述[J].岩土工程技术,2003(5):249.
CHEN Hongqi, WEI Yunjie. The formulation of fault engineering effect in whole[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(5): 249.
- [2] Newmark N M, Hall W J. Pipeline design to resist large fault displacement[C]// Proceedings of US National Conference on Earthquake Engineering. Ann Arbor: University of Michigan, 1975: 416-425.
- [3] Kennedy R P, Chow A W, Williamson R A. Fault movement effects on buried oil pipeline[J]. Journal of Transport Engineering, ASCE, 1977, 103: 617.
- [4] 冯启民,郭恩栋,宋银美,等.跨断层埋地管道抗震实验[J].地震工程与工程振动,2000,20(1):56.
FENG Qimin, GUO Endong, SONG Yinmei, et al. Aseismic test of buried pipe crossing fault[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(1): 56.
- [5] Liu Xuzeng, Hamada M. Experiment, numerical simulation on earthquake fault rupture propagation through soil and its effects on pipeline[R]. Tokyo: Waseda University, 2002.
- [6] 张志超,王进廷,徐艳杰.跨断层地下管线振动台模型试验研究(I)——试验方案设计[J].土木工程学报,2011,44(11):93.
ZHANG Zhichao, WANG Jinting, XU Yanjie. Shaking table test for cross-fault buried pipelines(I)—model design[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 93.
- [7] 张志超,王进廷,徐艳杰.跨断层地下管线振动台模型试验研究 II:试验成果分析[J].土木工程学报,2011,44(12):116.
ZHANG Zhichao, WANG Jinting, XU Yanjie. Shaking table test for cross-fault buried pipelines II: test results[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12): 116.
- [8] Burridge P B, Scott R F, Hall J F. Centrifuge study of faulting effects on tunnel[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(7): 949.
- [9] Johansson J, Konagai K. Fault induced permanent ground deformations; experimental verification of wet and dry soil, numerical findings relation to field observations of tunnel damage and implications for design[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(10): 938.
- [10] 黄强兵,彭建兵,门玉明,等.地裂缝对地铁明挖整体式衬砌隧道影响机制的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(11):2324.
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Model test study on effect of ground fissure on open-cut metro tunnel with integral lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2324.
- [11] 刘学增,林亮伦,桑运龙.逆断层粘滑错动对公路隧道的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(7):1008.
LIU Xuezheng, LIN Lianglun, SANG Yunlong. Effect of thrust fault stick-slip rupture on road tunnel[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(7): 1008.
- [12] Rowe R. 地震带的隧道开挖[J].雷谦荣译.地下空间,1994,14(2):138.
Rowe R. Tunnel excavation in seismic zone[J]. Translated by LEI Qianrong. Underground Space, 1994, 14(2): 138.
- [13] 林亮伦.正断层粘滑错动对山岭隧道影响的试验研究[D].上海:同济大学,2012.
LIN Lianglun. Experimental study on the effect of stick-slip dislocation of normal fault to mountain tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [14] 中华人民共和国行业标准.JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
Professional Standard of the People's Republic of China. JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China People's Communications Press, 2004.
- [15] 刘学增,王煦霖,林亮伦.正断层破坏在砂土中传播规律试验模拟[J].工程地质学报,2012,20(5):700.
LIU Xuezheng, WANG Xulin, LIN Lianglun. Modeling test of normal fault rupture propagation in sandy soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 700.
- [16] 中国船舶工业总公司第九设计研究院.弹性地基梁及矩形板计算[M].北京:国防工业出版社,1983:288-289.
Ninth Design and Research Institute of CSSC. Calculations of elastic foundation beams and rectangular plates[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983: 288-289.