

引文格式:黎盼,杨晓华,刘禹阳,等.穿越断层带隧道结构动态力学特性试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):153-162.

LI Pan, YANG Xiaohua, LIU Yuyang, et al. Experimental study on dynamic mechanical characteristics of tunnel structure passing through fault zone[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 153-162.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04057

穿越断层带隧道结构动态力学特性试验研究

黎盼^{1,2}, 杨晓华¹, 刘禹阳³, 王少飞⁴, 池维宏²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710064;
3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710064; 4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为了揭示隧道穿越断层期间结构力学响应特性,通过室内模型试验研究断层倾角为45°、60°、75°时采用台阶法进行开挖施工的围岩压力、围岩位移和衬砌应力变化情况。结果表明:断层倾角越大,围岩压力值越高,断层倾角为75°、60°时围岩压力分别为45°的1.169倍、1.089倍;拱部围岩压力影响范围达1.0倍洞径,拱腰、边墙处影响范围为0.5倍洞径;断层倾角越大,围岩径向位移值越高,断层倾角为75°、60°时径向位移达45°的1.112倍、1.057倍;拱部围岩位移影响范围达1.0倍洞径,拱腰、边墙处影响范围为0.5倍洞径;由于存在断层结构,隧道开挖后形成较大松散压力,衬砌结构呈“扁担式”受力状态,边墙位置衬砌应力最大,拱顶、拱腰处次之;断层倾角越大,衬砌应力值越高,第一施工循环拱顶位置衬砌应力在断层倾角75°、60°时分别为45°的1.176倍、1.079倍,拱腰处为1.187倍、1.089倍,边墙处为1.169倍、1.082倍;第二循环拱顶位置衬砌应力在断层倾角75°、60°时分别为45°的1.136倍、1.067倍,拱腰处为1.158倍、1.075倍,边墙处为1.156倍、1.077倍。

关键词:隧道工程;断层结构;模型试验;力学特性

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)02-0153-10

Experimental study on dynamic mechanical characteristics of tunnel structure passing through fault zone

LI Pan^{1,2}, YANG Xiaohua¹, LIU Yuyang³, WANG Shaofei⁴, CHI Weihong²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. The Engineering Design Academy of Chang'an University Co., Ltd., Xi'an, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. CCCC First Highway Construction Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reveal the structural mechanical response characteristics of the tunnel during passing through fault zone, indoor model tests were conducted to study the changes in surrounding rock pressure, surrounding rock displacement, and lining stress during excavation construction using the step method with fault dip angles of 45°, 60°, and 75°. The results show that the larger the dip angle of the fault, the higher the surrounding rock pressure value. When the dip angle of the fault is 75° and 60°, the surrounding rock pressure is 1.169 times and 1.089

收稿日期: 2023-04-21

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908051)

作者简介: 黎盼(1987-),男,工学博士研究生,工程师, E-mail: 502572573@qq.com。

通讯作者: 杨晓华(1961-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: xiaohuay@126.com。

times that of 45° , respectively. The influence range of surrounding rock pressure at the arch is 1.0 time of the tunnel diameter, and the influence range at the arch waist and side walls is 0.5 times of the tunnel diameter. The larger the dip angle of the fault, the higher the radial displacement value of the surrounding rock. When the fault dip angle is 75° and 60° , the radial displacement reaches 1.112 times and 1.057 times that of 45° . The displacement of the surrounding rock at the arch has an impact range of 1.0 time of the tunnel diameter, and the impact range at the arch waist and side walls is 0.5 times of the tunnel diameter. Due to the presence of fault structures, a large amount of loose pressure is formed after tunnel excavation, and the lining structure is in a “flat and flat” stress state. The lining stress is highest at the side wall position, followed by the arch crown and arch waist. The larger the dip angle of the fault, the higher the stress value of the lining. The stress of the lining at the arch crown position in the first construction cycle is 1.176 times and 1.079 times that of 45° when the fault dip angle is 75° and 60° , 1.187 times and 1.089 times at the arch waist, and 1.169 times and 1.082 times at the side wall. The stress of the lining at the arch crown position in the second cycle is 1.136 times and 1.067 times that of 45° when the fault dip angle is 75° and 60° , 1.158 times and 1.075 times at the arch waist, and 1.156 times and 1.077 times at the side wall.

Key words: tunnel engineering; fault structure; model test; mechanical characteristic

Author resumes: LI Pan(1987-), male, doctoral student, engineer, E-mail: 502572573@qq.com; YANG Xiaohua(1961-), male, PhD, professor, E-mail: xiaohuay@126.com.

0 引言

隧道穿越断层期间往往会造成围岩大变形及衬砌结构损伤。隧道穿越断层时围岩-支护结构力学响应机制与处治措施已成为国内外学者竞相研究的热点课题。针对穿越断层破碎带时隧道结构力学响应机制问题,部分学者采用数值计算、极限平衡理论、模型试验、离心试验方法探究了不同断层倾角、隧道直径、衬砌厚度、覆土厚度情况下隧道结构力学响应特性。分析了断层破碎带对基础结构、输水隧洞、管道结构的作用机制。探讨了正向、逆向、走滑断层、逆冲断层、倾向滑移断层对隧道结构的受力影响^[1-13]。关于隧道穿越断层结构时的处置技术研究,相关学者采用数值计算、现场测试、室内试验方法探究了长锚管注浆技术、地基改良及灌浆技术、柔性衬砌设计技术^[14-21]。部分学者构建了隧道穿越断层破碎带施工风险评估系统^[22-23]。文献[24]、[25]针对隧道穿越断层破碎带时的涌水情况进行了分析研究。

综上所述,目前穿越断层位置隧道结构力学响应机制及处治措施研究成果较多,但对于采用室内相似模型试验方法探究不同断层倾角及施工步影响下隧道结构力学响应特性研究尚不十分充分。为此,本文拟通过室内试验方法,采用上、下台阶开挖

方法,依次考虑隧道断层倾角为 45° 、 60° 、 75° 时不同施工工序下的隧道结构力学响应特性,希冀为相关隧道工程设计和施工提供借鉴与参考。

1 模型试验设计

1.1 相似比

根据试验目的及室内试验条件,将模型试验箱尺寸设计为 3.0 m(长度)×0.64 m(宽度)×2.0 m(高度),相似比取为 1:30。参考《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTJ 3370.1—2018),选择时速 100 km·h⁻¹ 单向双洞两车道隧道衬砌轮廓,见图 1。围岩按Ⅳ级进行设置,断层结构按Ⅴ级围岩考虑,参数见表 1、2。

1.2 围岩及衬砌材料

采用黏土、细砂、水、凡士林材料配制围岩相似材料。砂、土之比为 3:2 时,密度为 2.0 g·cm⁻³ 和含水率为 10.2% 时,弹性模量为 67.5 MPa,黏聚力为 0.2,内摩擦角为 27° ,满足试验要求。

采用石膏、水、重晶石粉构建衬砌相似材料,三者质量之比为 1:1.1:0.1 时,弹性模量均值为 834.46 MPa,满足试验要求。图 2 为围岩试样,图 3 为万能试验机,图 4、5 分别为测试围岩、衬砌试样。

1.3 断层

采用中粗粒砂、水、凡士林混合物模拟断层,砂

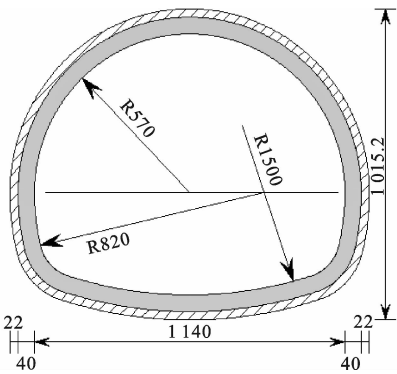


图 1 衬砌内轮廓示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of inner contour of lining (unit:m)

表 1 原型材料参数

Table 1 Material parameters of prototype

围岩	$\gamma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	c	$\varphi/(^{\circ})$	μ
Ⅳ级	2 000	67	0.2	27	0.35
Ⅴ级	1 800	33	0.1	30	0.40

注: γ 为围岩重; E 为弹性模量; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; μ 为泊松比。

表 2 模型材料参数

Table 2 Material parameters of model

围岩	$\gamma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	c	$\varphi/(^{\circ})$	μ
Ⅳ级	2 000~2 300	1.3~6.0	0.20~0.70	27~39	0.30~0.35
Ⅴ级	1 700~2 000	1.0~2.0	0.05~0.20	20~27	0.35~0.45



图 2 围岩试样

Fig.2 Surrounding rock sample

与土质量比为 1:1 时,密度为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,含水率为 7%,弹性模量 $E=33.6 \text{ MPa}$,黏聚力 $c=0.1$,内摩擦角为 30° ,满足试验要求;断层厚度取 15 cm,断层与隧道轴线交角分别设置为 45° 、 60° 、 75° ,隧道轴线与断层呈正交状态,断层布置见图 6。

1.4 量测系统

沿试验箱纵向设置 3 处监测断面,距箱体正面



图 3 万能试验机

Fig.3 Universal testing machine



图 4 围岩测试

Fig.4 Surrounding rock test

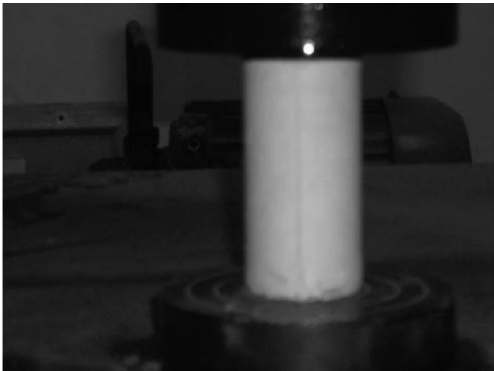


图 5 衬砌测试

Fig.5 Lining test

依次为 10、30、50 cm,见图 6。图 7 为模型试验箱内布设断层。每个监测断面布设 5 条测线 Line1~Line5,5 条测线分别位于拱顶、拱腰、边墙位置,见图 8。每条测线布设 3 处测点,1# 测点毗邻衬砌轮廓,2# 位于 $0.5B$ 位置($B=40 \text{ cm}$),3# 测点位于 $1B$ 位置,监测点处布设围岩压力盒、位移计。

图 9 为在试验箱内埋设测试元件。围岩、断层

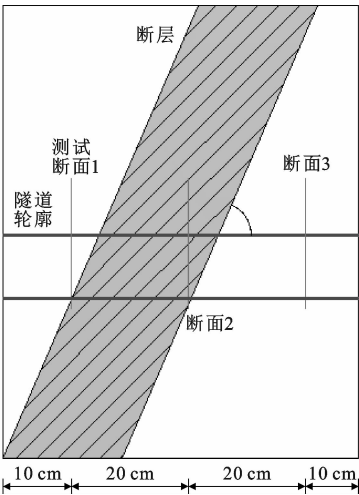


图 6 室内模型试验及监测断面布置

Fig. 6 Layout of indoor model test and monitoring section



图 7 布置断层结构

Fig. 7 Layout of fault structure

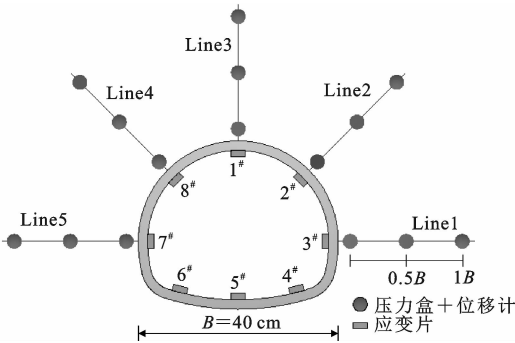


图 8 测试仪器安设示意图

Fig. 8 Installation diagram of test instrument



图 9 埋设测试元件

Fig. 9 Embedding test elements

相似材料配制完成后,在模型试验箱内进行分层填筑,填筑期间按图 6 埋设测试元件,图 10 为将测试元件埋设完毕。



图 10 测试仪器埋设完毕后的照片

Fig. 10 Photos after test instrument embedding

为获取衬砌结构力学响应情况,于衬砌结构内侧拱顶、左右拱腰、左右边墙、仰拱中心、仰拱两端位置依次布设应变片,每个特征位置布设横向、纵向两处应变片,见图 11、12。图 13 为静态应变仪。

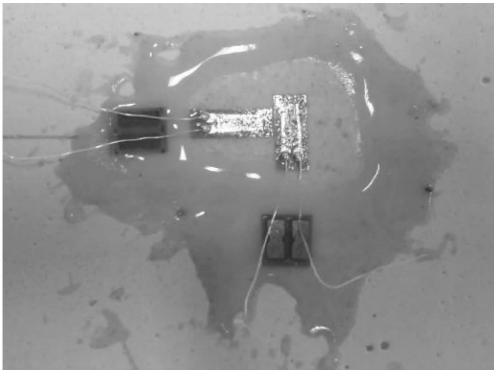


图 11 粘贴应变片

Fig. 11 Pasting strain gauge

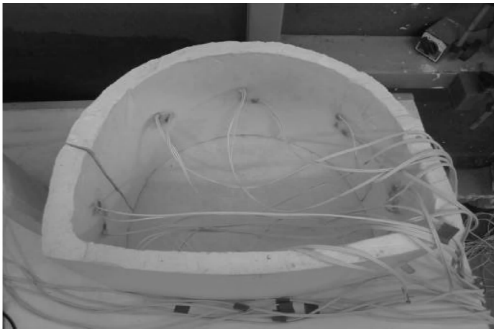


图 12 成型衬砌

Fig. 12 Forming lining

2 室内试验流程

图 14 为准备完毕的模型试验箱,围岩及断层材料此时已按要求装填完毕,测试仪器埋设已完成。

试验期间采用上、下台阶法进行开挖(图 15),每个开挖循环涉及 8 个工序:①第一循环上台阶围

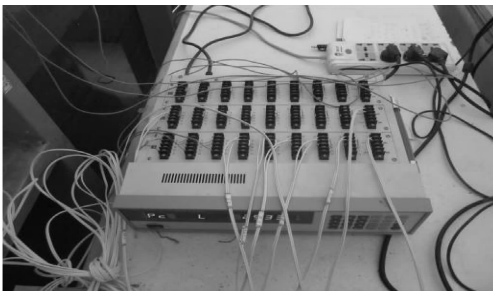


图 13 静态测试仪
Fig. 13 Static tester



图 14 准备完毕的模型试验箱
Fig. 14 Prepared model test chamber

岩开挖[图 15(a)];②第一循环上台阶衬砌施作并注浆,注浆浆液中石膏与水的质量之比为 1.4 : 1 (确保支护结构与围岩接触密实即可),采用水泥钉代替锁脚锚管[图 15(b)];③第二循环上台阶开挖[图 15(c)];④第二循环上台阶衬砌施作并注浆[图 15(d)];⑤第一循环下台阶开挖[图 15(e)];⑥第一循环下台阶施作并注浆[图 15(f)];⑦第二循环下台阶开挖[图 15(g)];⑧第二循环下台阶施作并注浆[图 15(h)]。每个工序进行一次初始读数,每个循环施工读数 9 次,每个工序完毕后停留 12 h。开挖长度:试验中采用台阶法进行开挖,开挖步长为每步 20 cm。衬砌模型尺寸:模型尺寸宽度为 42 cm,高度为 34 cm,厚度为 2 cm。

3 试验结果与分析

3.1 围岩压力

图 16 为断面 2-测线 1-1[#] 测点围岩压力变化曲线。可以看出,断层倾角越大,围岩压力值越高。对于各施工工序,断层倾角为 75°、60°时,围岩压力可达 45°时的 1.187 倍、1.099 倍。工序 4 为第二循环上台阶开挖施工,围岩此时形成较大松散压力,以致边墙位置产生较大围岩压力,第二循环上台阶支护结构施作完毕后,围岩压力得到改善。至第二循环下台阶施作完毕,该测点围岩压力得到充分抑制。

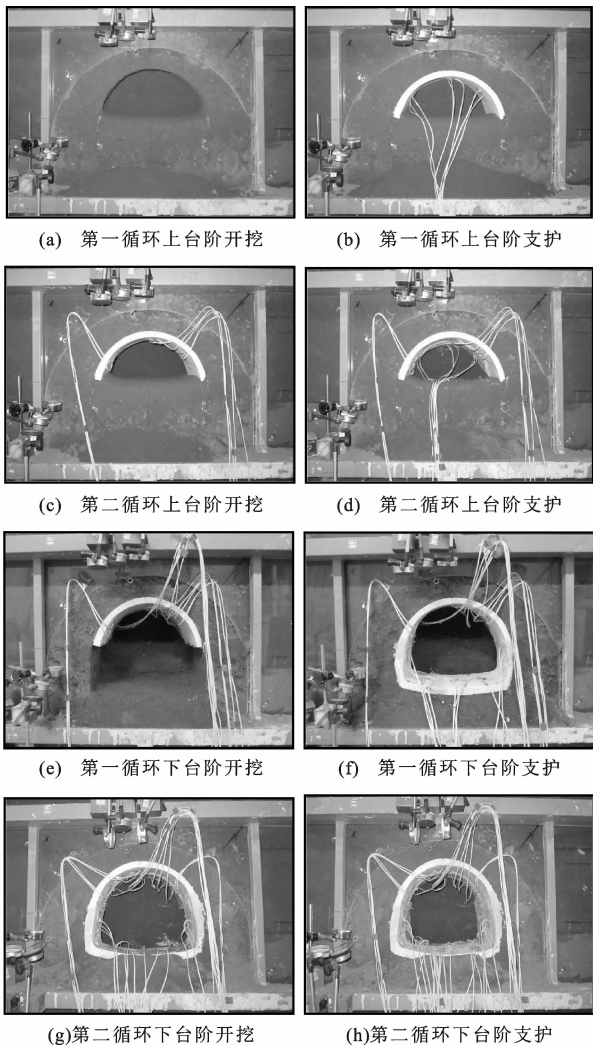


图 15 台阶法开挖施工工序
Fig. 15 Excavation construction process of step method

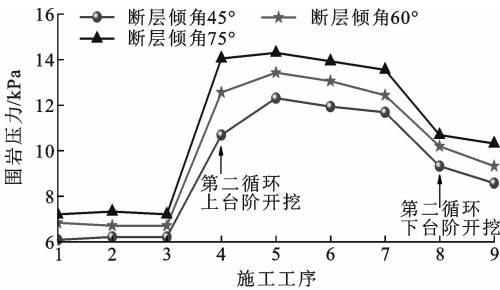


图 16 断面 2-测线 1-1[#] 测点围岩压力
Fig. 16 Surrounding rock pressure at section 2-measuring line 1-1[#] measuring point

图 17 为断面 2-测线 1-2[#] 测点围岩压力变化曲线。可见断层倾角越大,围岩压力值越高。断层倾角为 75°、60°时,围岩压力可达 45°时的 1.152 倍、1.079 倍。由于 2[#] 测点处于 0.5B 位置,围岩压力值整体小于 1[#] 测点,压力响应时间亦略有滞后。经统计,3[#] 测点围岩压力响应程度大幅降低,可见边

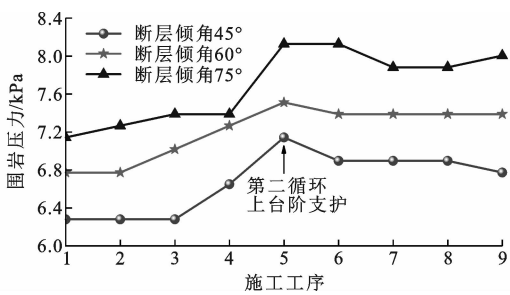


图 17 断面 2-测线 1-2[#] 测点围岩压力
Fig. 17 Pressure of surrounding rock at section
2-measuring line 1-2[#] measuring point

墙位置压力响应范围为 $0.5B$ 。

图 18 为断面 2-测线 2-1[#] 测点围岩压力变化曲线。可见断层倾角越大,围岩压力值越大。工序 4 为第二循环上台阶开挖施工,由于存在断层围岩结构,拱腰位置围岩压力陡增,75°倾角时增幅可达 165.71%。经统计,该测线 2[#]、3[#] 测点位置围岩压力逐步趋于平缓。

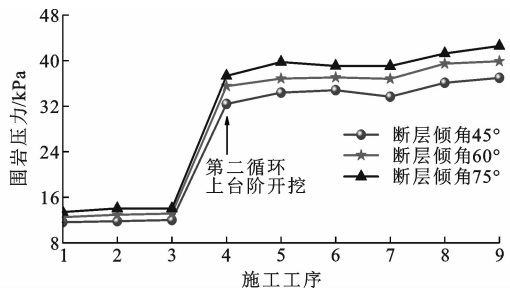


图 18 断面 2-测线 2-1[#] 测点围岩压力
Fig. 18 Pressure of surrounding rock at section
2-measuring line 2-1[#] measuring point

图 19 为断面 2-测线 3-1[#] 测点围岩压力变化曲线。由于存在围岩断层结构,至隧道第二循环上台阶开挖施工时,围岩结构形成坍落拱,该位置处围岩会产生较大松散应力,围岩压力形成陡降,75°时降幅可达 37.89%。直至上台阶支护结构施作完成,围岩压力得以改善。

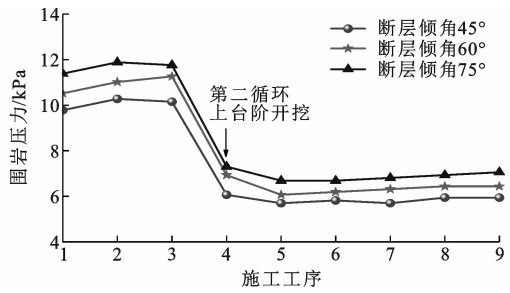


图 19 断面 2-测线 3-1[#] 测点围岩压力
Fig. 19 Pressure of surrounding rock at section
2-measuring line 3-1[#] measuring point

图 20 为断面 2-测线 3-2[#] 测点围岩压力变化曲线,该测点围岩压力基本与 1[#] 测点变化趋势保持一致。相较而言,该处围岩压力值稍小于 1[#] 测点。图 21 为 3[#] 测点围岩压力,此处围岩压力变化幅度基本与 1[#]、2[#] 测点保持一致,但变化幅度明显小于 1[#] 测点。可见由于存在断层结构,拱顶围岩压力响应范围可达 $1B$ 。

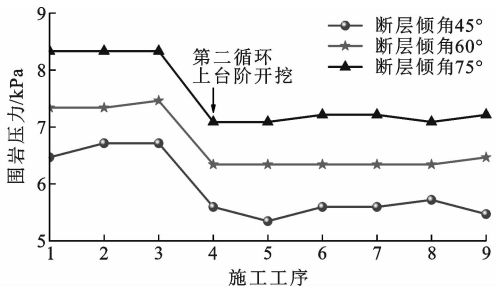


图 20 断面 2-测线 3-2[#] 测点围岩压力
Fig. 20 Pressure of surrounding rock at section
2-measuring line 3-2[#] measuring point

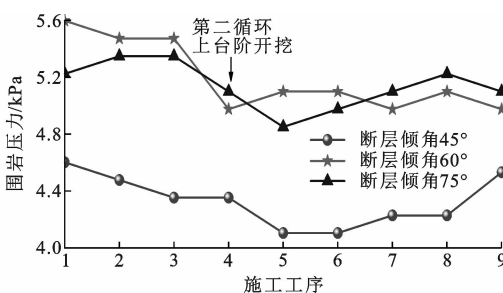


图 21 断面 2-测线 3-3[#] 测点围岩压力
Fig. 21 Pressure of surrounding rock at section
2-measuring line 3-3[#] measuring point

3.2 围岩位移

图 22 为断面 2-测线 4-1[#] 测点围岩位移变化曲线。可见断层倾角越大,围岩径向位移值越高。对于各工序位移,断层倾角为 75°、60°时的围岩位移值可达 45°时的 1.115 倍、1.058 倍。工序 4 为第二循环上台阶开挖施工,围岩此时产生较大松散变形,该测点位移产生陡增,75°倾角时增幅可达 12.82%。

图 23 为断面 2-测线 4-2[#] 测点围岩位移变化曲线。可见该测点位移整体与 1[#] 测点保持一致,而位移值与响应强度均有所降低。断层倾角为 75°、60°时位移值可达 45°的 1.107 倍、1.056 倍。经统计,3[#] 测点位移响应强度已基本较弱。由于存在断层结构,边墙位置位移响应范围为 $0.5B$ 。

图 24 为断面 2-测线 5-1[#] 测点围岩位移变化曲线。可见拱腰位置位移变化规律基本与边墙位置保持一致。断层倾角 75°、60°时,围岩位移可达 45°的

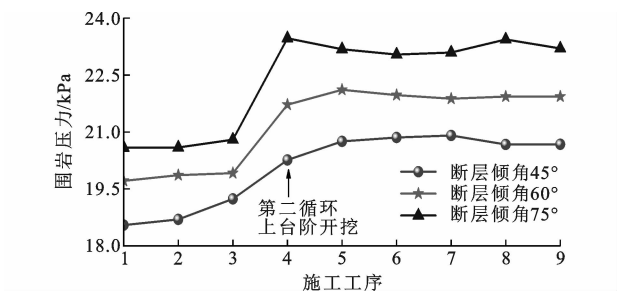


图 22 断面 2-测线 4-1[#] 测点围岩位移

Fig. 22 Displacement of surrounding rock at section 2-measuring line 4-1[#] measuring point

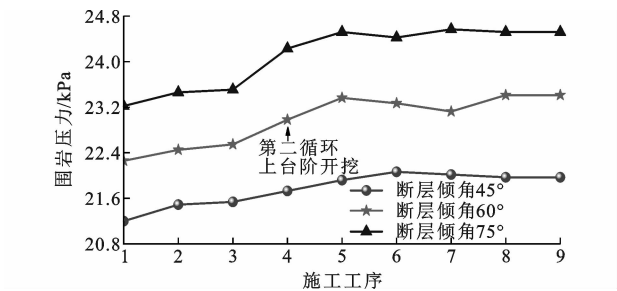


图 23 断面 2-测线 4-2[#] 测点围岩位移

Fig. 23 Surrounding rock displacement at section 2-measuring line 4-2[#] measuring point

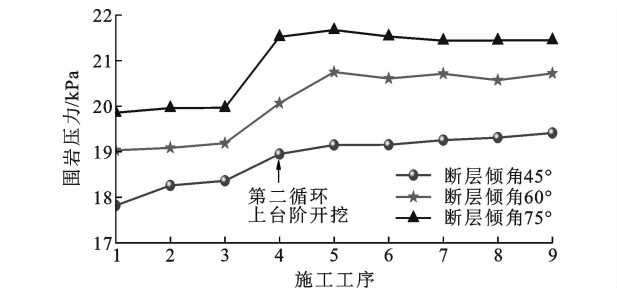


图 24 断面 2-测线 5-1[#] 测点围岩位移

Fig. 24 Surrounding rock displacement at section 2-measuring line 5-1[#] measuring point

1.113 倍、1.056 倍。由于存在断层结构,直至第二循环上台阶开挖施工时,围岩位移形成陡增趋势,75°工况时增幅为 7.81%。上台阶支护结构施作完毕后,围岩位移变化情况得到抑制。图 25 为 2[#] 测点围岩位移变化曲线,可见该处位移变化趋势与 1[#] 测点保持一致,变化幅度相对较弱,3[#] 测点响应强度基本可忽略。

3.3 衬砌应力

图 26 为 75°断层倾角时第一、二循环支护结构衬砌应力变化曲线。可见由于存在断层结构,隧道开挖施工后可形成较大松散压力,衬砌结构呈现“扁担式”受力状态,两侧边墙位置处衬砌应力最大,拱顶、拱腰位置次之。至第 7、9 施工工序,衬砌结构应

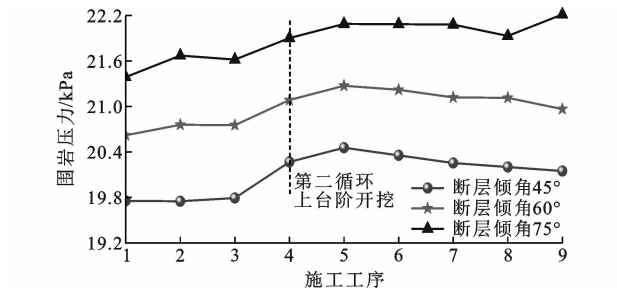


图 25 断面 2-测线 5-2[#] 测点围岩压力

Fig. 25 Surrounding rock pressure at section 2-measuring line 5-2[#] measuring point

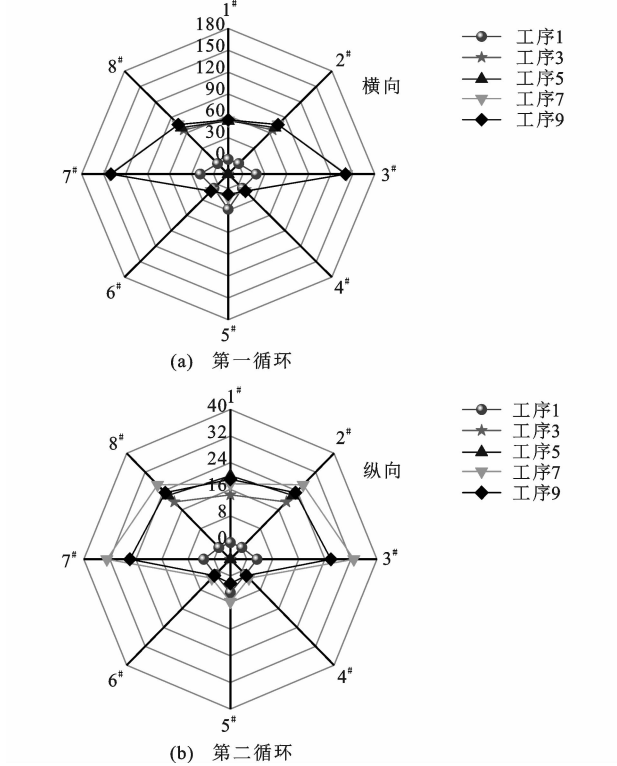


图 26 75°断层倾角时衬砌结构应力(单位:kPa)

Fig. 26 Lining structure stress when fault dip angle is 75° (unit:kPa)

力达到峰值并形成稳定状态。

图 27 为 45°断层倾角时第一、二循环支护结构衬砌应力变化曲线。可见衬砌结构各测点应力基本与 75°保持一致,至工序 9 时衬砌应力达到稳定状态。相较而言,45°断层倾角时衬砌应力水平整体较低。

经统计,60°断层倾角时衬砌结构各测点应力水平基本与 75°、45°保持一致。各循环施工完毕后,对于第一施工循环,断层倾角 75°、60°时衬砌拱顶应力为 45°的 1.176 倍、1.079 倍,拱腰位置为 1.187 倍、1.089 倍,边墙处为 1.169 倍、1.082 倍。对于第二循环衬砌应力,断层倾角 75°、60°时衬砌拱顶应力为

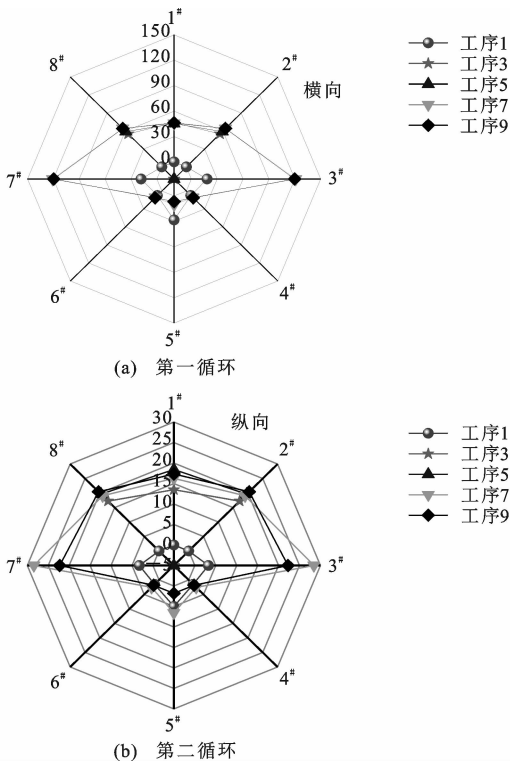


图 27 45°断层倾角时衬砌结构应力(单位:kPa)

Fig. 27 Lining structure stress when fault dip angle is 45°
(unit:kPa)

45°时的 1.136 倍、1.067 倍,拱腰处为 1.158 倍、1.075 倍,边墙位置处为 1.156 倍、1.077 倍。

4 结 语

(1)采用黏土、细砂、水、凡士林材料配制围岩相似材料,其中黏土和细砂质量比为 3 : 2。断层材料采用黏土、中粗砂、水、凡士林配制而成。按石膏、水、重晶石粉质量比 1 : 1.1 : 0.1 配制衬砌材料。注浆浆液中石膏与水质量比为 1.4 : 1,采用水泥钉模拟锁脚锚管。

(2)断层倾角越大,测点围岩压力值越高。断层倾角为 75°、60°时,围岩压力整体可达 45°时的 1.169 倍、1.089 倍。由于存在断层结构,隧道拱部围岩压力较为明显,影响范围达 1.0 倍洞径,拱腰、边墙位置影响范围为 0.5 倍洞径。

(3)对于围岩径向位移,呈现断层倾角越大,围岩径向位移越高的变化规律。断层倾角为 75°、60°时,径向位移整体可达 45°时的 1.112 倍、1.057 倍。由于存在断层结构扰动,拱顶位置影响范围较大,可达 1.0 倍洞径,拱腰与边墙位置处影响范围约为 0.5 倍洞径。

(4)由于存在断层结构,隧道开挖施工后可形成

较大松散压力,衬砌结构呈现“扁担式”受力状态,两侧边墙位置处衬砌应力最大,拱顶、拱腰位置次之。对于衬砌结构应力,呈现断层倾角越大,衬砌应力值越高的受力规律。

(5)对于第一施工循环的拱顶位置衬砌应力,断层倾角 75°、60°时应力为 45°的 1.176 倍、1.079 倍,拱腰位置为 1.187 倍、1.089 倍,边墙处为 1.169 倍、1.082 倍。对于第二循环,断层倾角 75°、60°时衬砌拱顶应力为 45°的 1.136 倍、1.067 倍,拱腰处为 1.158 倍、1.075 倍,边墙位置处为 1.156 倍、1.077 倍。

参考文献:

References:

[1] WANG Y C, JING H W, SU H J, et al. Effect of a fault fracture zone on the stability of tunnel-surrounding rock[J]. International Journal of Geomechanics, 2017,17(6): 04016135.

[2] 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.

[3] SABAGH M, GHALANDARZADEH A. Numerical modelings of continuous shallow tunnels subject to reverse faulting and its verification through a centrifuge [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 128: 103813.

[4] AZIZKANDI A S, GHAVAMI S, BAZIAR M H, et al. Assessment of damages in fault rupture-shallow foundation interaction due to the existence of underground structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 222-237.

[5] KIANI M, AKHLAGHI T, GHALANDARZADEH A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 51: 108-119.

[6] HUANG F, WU C Z, NI P P, et al. Experimental analysis of progressive failure behavior of rock tunnel with a fault zone using non-contact DIC technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104355.

[7] 王 林, 韩凯航, 郭彩霞, 等. 盾构隧道穿越断层破碎带开挖面稳定性研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(增 1): 93-98.

WANG Lin, HAN Kaihang, GUO Caixia, et al. The

- face stability of shield tunnel traversing the fault fracture zone[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1):93-98.
- [8] 张伟喜,孙飞,张志强.正断层下隧道结构受力特征及设防长度研究[J].路基工程,2017(4):57-63.
ZHANG Weixi, SUN Fei, ZHANG Zhiqiang. Study on mechanical characteristics and fortified length of tunnel structure under normal slip fault[J]. Subgrade Engineering, 2017(4):57-63.
- [9] 刘洋,赖孝辉,李永林,等.穿越断层破碎带隧道支护结构受力特性分析[J].路基工程,2021(3):235-240.
LIU Yang, LAI Xiaohui, LI Yonglin, et al. Analysis on the mechanical characteristics of tunnel supporting structure passing through fault fracture zone[J]. Subgrade Engineering, 2021(3):235-240.
- [10] 唐浪洲,于丽,王玉锁,等.走滑断层错动量大小对铁路隧道结构安全性影响的数值分析[J].现代隧道技术,2022,59(1):214-224.
TANG Langzhou, YU Li, WANG Yusu, et al. Numerical simulation on safety effects of railway tunnel structure under strike-slip fault dislocation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1):214-224.
- [11] 赵旭,程鼎甲,代志杰,等.断层错动形式对输水隧洞的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):96-106.
ZHAO Xu, CHENG Dingjia, DAI Zhijie, et al. Influence of fault dislocation on water conveyance tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(5):96-106.
- [12] 张向阳,任尚磊,许林峰.断层错动作用下隧道衬砌围岩破坏机理研究[J].地下空间与工程学报,2021, 17(1):290-299.
ZHANG Xiangyang, REN Shanglei, XU Linfeng. Study on coupled failure mechanism of tunnel structural surrounding rock under fault motion[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1):290-299.
- [13] 祁彬溪,王凡,陈捷翎.粘滑断层错动作用下穿越断层隧道结构响应数值模拟[J].建筑结构,2020, 50(增2):753-758.
QI Binxi, WANG Fan, CHEN Jieling. Numerical simulation on structural response of tunnel passing through fault under the action of stick slip fault dislocation[J]. Building Structure, 2020, 50(S2):753-758.
- [14] 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.
- [15] KANG Y S, LIU Q S, XI H L, et al. Improved compound support system for coal mine tunnels in densely faulted zones: a case study of China's Huainan coal field[J]. Engineering Geology, 2018, 240:10-20.
- [16] BAYATI M, KHADEMI HAMIDI J. A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63:162-170.
- [17] 唐晓杰,石磊,陈佳玮,等.大跨地铁隧道组合工法穿越断层时的围岩变形控制分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(2):227-239.
TANG Xiaojie, SHI Lei, CHEN Jiawei, et al. Analysis of surrounding rock deformation control of large-span metro tunnel crossing fault by combined tunneling method[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2):227-239.
- [18] 张秀良.胡家湾隧道断层破碎带挤压性围岩变形控制技术[J].铁道建筑技术,2021(5):131-134,161.
ZHANG Xiuliang. Deformation control technology of extruding surrounding rock in fault fracture zone of hujiawan tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2021(5):131-134,161.
- [19] 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 Xiangyu, GENG Ping, DING Ti, et al. Mechanical behavior of tunnel under stick-slip action of reverse fault[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(17):249-258.
- [20] 吕国鹏,周传波.隧道断层带注浆加固围岩体爆破动力损伤特征[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):2038-2047.
LYU Guopeng, ZHOU Chuanbo. Damage characteristics of grouted tunnel rock mass in fault zones induced by blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10):2038-2047.
- [21] 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(5):1304-1312.
LIU Xiaoyan, ZHANG Chuanqing, SHI Tiejong, et al. Experimental study of axis displacement mode of deep buried tunnel across active faults[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5):1304-1312.
- [22] 卢庆钊.基于AHP-Fuzzy的隧道穿富水断层破碎带突水涌泥评估[J].地下空间与工程学报,2021, 17(增1):439-448,462.

LU Qingzhao. Risk assessment of water and mud inrush in tunnel crossing water-rich fault fracture zone based on AHP-fuzzy[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17 (S1): 439-448,462.

[23] 杨奎,毛金龙,刘永恒. 隧道断层破碎带围岩大变形的模糊层次综合评价[J]. 现代交通技术, 2018, 15(6):40-43,55.

YANG Kui,MAO Jinlong,LIU Yongheng. Fuzzy hierarchy comprehensive evaluation for large deformation of surrounding rock in tunnel fault fracture zone [J]. Modern Transportation Technology, 2018, 15(6):40-43,55.

[24] 傅鹤林,李 鲇,成国文,等. 基于保角映射的断层影响区内隧道涌水量预测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(1):86-92.

FU Helin,LI Jie,CHENG Guowen,et al. Prediction of tunnel water inflow in fault affected area based on conformal mapping[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2021,49(1):86-92.

[25] GAO C L,ZHOU Z Q,YANG W M,et al. Model test and numerical simulation research of water leakage in operating tunnels passing through intersecting faults [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,94:103134.