

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.008

缓倾泥页岩互层隧道开挖的围岩松动圈形态研究

杨平庆¹, 邵蔚², 王长柏¹, 周志³, 陈云超¹

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 河南省南阳市水利建筑勘测设计院, 河南 南阳 473068;
3. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 依托四川某公路隧道开挖工程, 针对缓倾泥页岩地层及其隧道围岩松动圈形态的特殊性, 采用有限元分析软件对不同岩体应力条件下的围岩松动特性进行了数值模拟, 并与现场测试结果进行了对比分析。研究发现: 隧道围岩呈现“钉齿状”的不均匀损伤形态, 且垂直于缓倾层理对称分布, 隧洞边墙以页岩损伤为主、泥岩损伤不明显, 而上顶板和下底板的泥岩损伤范围则比页岩大; 在地应力侧压力系数大于 1.0 时, 围岩的松动范围随着侧压力系数增大而逐渐增大, 但边墙泥岩层的损伤深度变化不明显。当岩体地应力侧压力系数为 1.75 时, 数值模拟计算结果与现场声波测试结果具有较好的吻合性。

关键词: 公路隧道; 松动圈; 数值模拟; 侧压力系数

中图分类号: U456.3+1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)05-0048-04

Surrounding Rock Loose Ring Shape in Interbedded Tunnel of Gently Inclined Mudstone and Shale

YANG Pingqing¹, SHAO Wei², WANG Changbo¹, ZHOU Zhi³, CHEN Yunchao¹

(1. School of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. Nanyang Hydraulic Investigation and Design Institute, Nanyang, He'nan 473068, China;

3. Jiangsu Transportation Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: Based on a highway tunnel in Sichuan, the finite element analysis software was adopted to simulate the loosening characteristics of surrounding rock under different rock mass stress conditions for the particularity of the mud shale slow-dipping stratum and its surrounding rock loose ring shape, and compared with the results of in-situ testing. It was found that the tunnel surrounding rock presents the no uniform damage form of “Rake”, and perpendicular to the symmetric distribution of the gently tilting bedding. The side wall of the tunnel is dominated by shale damage, and the mudstone damage is not obvious. The damage range of the mud at the upper part and bottom is larger than that of the shale, and when the side pressure coefficient is greater than 1.0, the loosening range of the surrounding rock increases gradually with the increasing of the stress coefficient pressure, however the degree of mud damage change is not obvious. When the earth pressure lateral pressure coefficient of rock mass is 1.75, the numerical simulation results are in good agreement with the field acoustic test results.

Keywords: highway tunnel; loose ring; numerical simulation; lateral pressure coefficient

随着我国经济的快速发展, 铁路和高速公路的隧洞工程建设进入了高速发展期。建设过程中不可避免地出现大量隧道^[1], 隧道的建设开挖, 打破了原有的应力平衡状态, 当围岩重分布应力超过其承载力极限时, 岩体产生破坏甚至发生开裂、岩爆以及坍塌

现象^[2-3]。

围岩松动圈是在应力重分布的过程中, 围岩裂隙从隧道开挖面逐步向深处扩展, 以重新达到应力平衡状态时形成的破裂区域^[4]。围岩松动圈的形态与开挖方式、支护设计等密切相关, 目前对围岩松动

收稿日期: 2018-05-17

修稿日期: 2018-06-15

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目 (2016121032)

作者简介: 杨平庆 (1993—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为爆破振动信号监测分析, 地应力测量及围岩稳定性评价。

E-mail: 1010858861@qq.com

通讯作者: 邵蔚 (1970—), 女, 江苏扬州人, 高级工程师, 主要从事水利工程设计及咨询工作。E-mail: 346608907@qq.com

圈的研究主要针对匀质围岩,对于各向异性的非匀质围岩的研究比较少。例如,池田和彦^[5]首次利用声测法对围岩松动区现场测试,并提出围岩松动的厚度与隧道参数及岩体波速的关系式。L. Z. Wojno^[6]根据围岩破碎程度以及墙体位移对围岩进行分类,定义为正常和严重两种状态,并对松动下的围岩提出支护建议。长春煤炭科研所于 1977 年研制出适用于矿山条件下的超声波围岩裂隙探测仪,使声波探测围岩松动圈进入快速发展时期。周黎明等^[7]通过对隧道围岩松动区声波法测试,发现断面上部比断面下部的松动区厚度大,且松动区岩体静弹性模量值较完整性岩体明显降低。樊克恭等^[8]利用数值模拟分析了软弱围岩巷道的塑性区,指出弱结构部位松动圈厚度较大,非弱结构部位松动圈厚度较小,软弱围岩巷道的松动圈形态特征与塑性发育区特征基本一致。近年来,随着工程实践经验的累计和丰富,部分学者提出了新的认知理论和分析方法,如王睿等^[9]基于 Hoek – Brown 强度准则,提出理想状态下围岩松动圈厚度的计算公式,其结果对公路隧道围岩隧道松动范围的估算中具有一定的准确性和适用性。

由于地层结构的复杂性,大多数隧道开挖地层隧道开挖面临的是不同岩性组合的地层结构,单一均质地层结构在实际中并不多见。因此,研究组合岩层结构条件下隧道围岩松动圈形态特点对实际工程具有重要的现实意义^[10-11]。本文结合缓倾泥页岩互层地层中的某隧道,针对其开挖过程中出现的变形破坏问题,采用有限元分析软件对不同岩体应力条件下的围岩松动特性进行了数值模拟,并与现场测试结果进行了对比分析,确定了隧道围岩的松动形态特征和深度范围,并针对非均质地层特点提出了相应的支护建议,为后续的隧道设计及围岩加固提供了参考,有效地保证了隧道的安全顺利施工。

1 现场工程背景

该隧道位于四川省凉山彝族自治州境内,地层岩性主要为侏罗系中统益门组(J_{2y})泥岩,弱风化带,属Ⅳ级软石,紫红、深紫色,中厚层状长石石英砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩,节理裂隙发育;三叠系上统白果湾组(T_{3b})砂岩、泥岩、粉砂岩夹炭质页岩及煤,灰色,中厚层状细、中粒岩屑,石英砂岩、粉砂岩、深灰色炭质水云母黏土岩、页岩,底部夹部分煤层、弱风化带,属Ⅳ级软石。岩层层理倾向为N20°E左右,倾角在13°~25°SE左右,整体为缓倾岩

层。

当隧道施工至中一薄层页岩及泥岩区段时,现场陆续发现进口平导出现底板隆起开裂,拱顶变形下沉,拱部左侧初期支护混凝土开裂掉块,右侧边墙初期支护大面积崩落。根据现场统计,平导初支开裂主要分布在左侧拱腰部位,隆起最大值接近 30 cm,裂缝纵向延伸,宽度达到 9.0 cm,混凝土剥落掉块严重。采取临时措施,用 C25 混凝土补喷、封闭平整后,底部隆起及下沉变形仍然呈逐渐发展趋势。

针对该隧道缓倾中薄层泥岩和页岩段支护破坏情况,根据开挖段的地层特征和岩体参数,利用有限元分析软件建立模型进行仿真分析,并与现场测试结果对比,综合分析确定围岩的松动破坏特征和破坏机制,及时评估地下洞室围岩稳定状态,指导施工,反馈设计,及时调整支护参数,保障洞室整体稳定^[12-14]。

2 数值模拟计算及分析

2.1 数值模拟的参数和建模

为了模拟出该工程围岩松动圈的形态,使用 RS2 有限元分析软件建模,模型大小为 85 m×84 m,隧道截面宽度为 12 m,高度 10 m,弧形边界。模型共划分为 9 012 个网格,节点数为 4 667 个,四周刚性铰接,围岩定义为泥页岩薄层相互嵌插,倾角水平逆时针 13°,网格划分后的模型如图 1 所示,其中浅色薄层为泥岩层,深色薄层为页岩层,模型计算参数参照樊克恭等^[8],如表 1 所示。

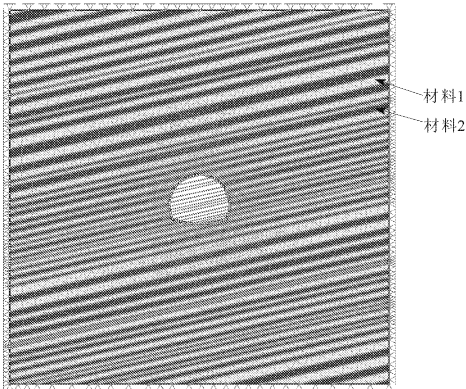


图 1 计算模型与网格划分

表 1 围岩主要力学参数

岩石名称	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
泥岩	1200	0.32	2.0	30
页岩	3000	0.25	4.1	36

2.2 计算结果及分析

根据现场地质资料,隧道埋深为 310 m,上覆岩层密度 2.65 g/cm^3 。为准确地反映数值模拟下围岩松动圈的形态,在硐室周围选取 8 个应力位移监测点,其中 1#—7# 点对应于现场的声波测试孔 K1—K7 点,8# 点为上顶板中心位置。

为更清楚地展示泥页岩互层的计算模型,对岩体地应力侧压力系数 $\lambda = 2.0$ 时的计算结果图进行放大,并标记地层信息(①表示泥岩、②表示页岩),如图 2 所示。

为了分析围岩应力侧压力系数对围岩损伤的影响,分别取侧压力系数值为 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50、1.75 和 2.00 代入模型中计算,得到每个侧压力系数下的围岩松动形态^[15]。

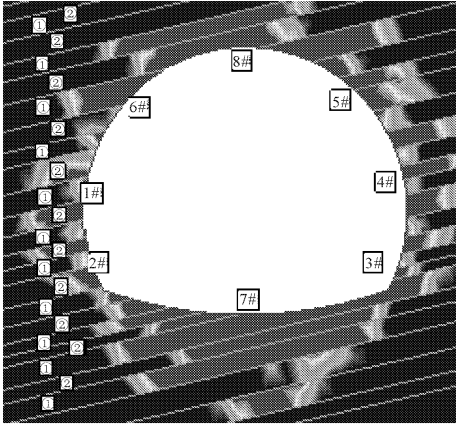


图 2 隧道截面测点分布图

研究表明:隧道断面不同部位岩层的松动形态与范围呈现如下规律:在上顶板与下底板处主要是泥岩层的破坏,泥岩损伤分布范围较页岩层大;而在侧边墙处,页岩松动范围比泥岩松动范围大,整体呈现“钉齿状”。

以此同时,隧道围岩松动圈沿垂直于缓倾层理方向对称分布,当侧压力系数较小时,损伤范围主要集中在两侧墙,上顶板和下底板损伤范围较小;当侧压力系数较大时,上顶板和下底板损伤区域迅速增大,而侧墙损伤范围增加不明显。

选取隧道断面 8 个监测点的损伤深度平均值作为平均松动深度,与侧压力系数的变化关系如图 3 所示。随着侧压力系数增加,松动圈平均深度先基本保持不变,当侧压力系数大于 1.0 后,平均损伤深度随侧压力系数的增加呈线性增长趋势。

除此之外,随着地应力侧压力系数增加,隧道横截面不同部位、不同岩性的围岩松动深度变化特征不同。分别选取隧道顶板中心、底板中心、侧边墙泥

岩层、侧边墙页岩层监测点,其松动圈深度随侧压力系数变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出:边墙泥岩层损伤深度基本不随侧压力系数变化而变化,平均值为 0.17 m;边墙页岩层则处于折线平缓上升的状态,整体增长幅度不大;而上顶板在 $0.5 \leq \lambda \leq 1.0$ 时,基本处于无损伤状态,而后随着侧压力系数的增长,上顶板损伤范围迅速增大;下底板损伤范围在 $\lambda = 0.75$ 有所下降之外,随着侧压力系数增长,其损伤范围增长速度越来越快。

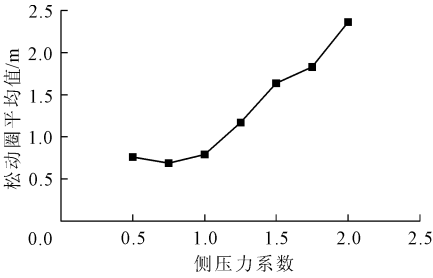


图 3 侧压力系数与松动圈范围的关系曲线

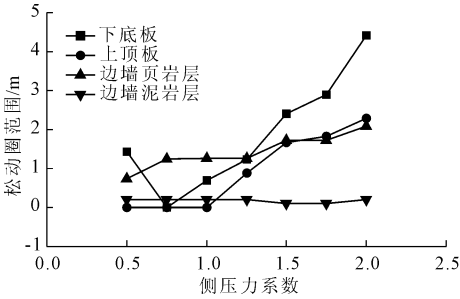


图 4 不同部位松动圈范围随侧压力系数的变化

3 模拟值和实际值对比分析

3.1 现场测试与测试结果

为了全方位测量隧道围岩损伤厚度,在隧道底板和两侧共布置 7 个钻孔作为单孔声波测试孔,编号为 K1—K7,其中 K1—K4 孔深为 5.0 m, K5—K7 孔深为 10 m,孔径均为 50 mm,声波测试孔布置情况如图 5 所示。

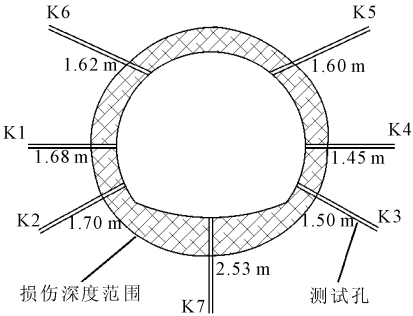


图 5 声波测试孔布置与围岩损伤范围图

K1—K7 测试孔的波速 - 深度变化曲线如图 6 所示。各测试孔的岩体声波波速在孔口附近较低,并逐渐增加直至一定深度后趋于稳定,将此变化过程的拐点深度视为损伤深度^[16]。例如,对于测试孔 K1,孔口附近声波波速为 2 122 m/s,随深度增加波速急剧增大,深度达 1.68 m 时波速达到 3 879 m/s,此后只有小幅度变化,K1 附近岩体损伤范围为 1.68 m。同理,可以得到 K2—K7 测试孔岩体损伤深度分别为 1.70 m、1.50 m、1.45 m、1.60 m、1.62 m、2.53 m。

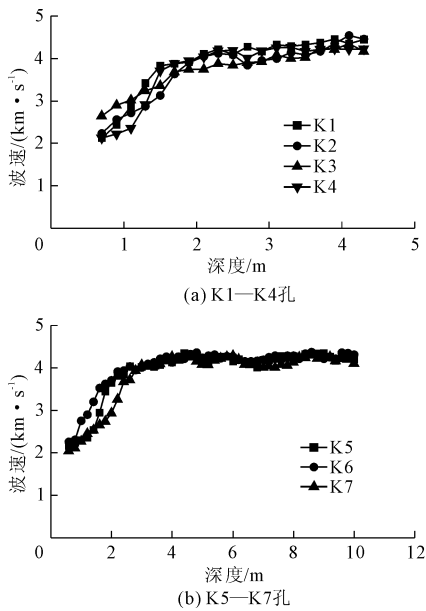


图 6 实测围岩波速随孔深的变化

根据各声波孔测试结果和孔位布置,可勾画出该隧道横截面处的围岩平均损伤范围,如图 5 所示。声波法测试结果表明:硐室顶板、左右两侧岩体损伤深度范围基本一致,平均扰动深度为 1.60 m 左右。整体扰动深度并不是沿着隧道截面均匀延伸,而是呈现侧壁薄板底厚的格局,其中下板底中心岩体扰动深度达到最大值 2.53 m。

3.2 模拟值和实际值对比分析

根据现场地应力测试资料,岩体地应力侧压力系数约为 1.75。为进行对比分析,选取数值计算中 $\lambda = 1.75$ 时,隧道围岩各个监测点的松动范围深度,并与声波测试结果进行对比,如图 7 所示。

从图 7 可看出,K1—K7 监测点的损伤范围模拟值和声波测试值基本接近,实测值略小于模拟值,二者的吻合度较高。现场声波测试缺乏上顶板测试结果,利用模拟计算结果推测,在侧压力系数 $\lambda = 1.75$ 时,上顶板的松动圈范围深度为 1.80 m,与侧墙的松动范围均值接近。平均松动圈范围在两侧壁向下

沿着截面外壁均匀向深处发展,下底板中心处的平均松动深度最大。

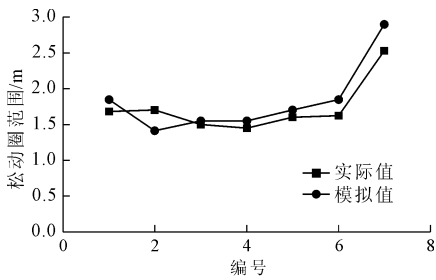


图 7 松动圈范围模拟值与实测值的比较

4 结 论

结合缓倾、泥页岩互层隧道开挖工程,针对其开挖过程中出现的变形破坏问题,采用有限元分析软件对不同岩体应力条件下的围岩松动特性进行了数值模拟,并与现场测试结果进行了对比分析,主要得到如下结论:

- (1) 隧道围岩松动在上顶板与下底板处主要是泥岩层的破坏,泥岩损伤分布范围较页岩层大;而在侧边墙处,页岩松动范围比泥岩松动范围大,整体呈现不均匀的“钉齿状”。
- (2) 隧道围岩松动圈沿垂直于缓倾层理方向对称分布,而非与隧道断面中心对称;当侧压力系数较小时,损伤范围主要集中在两侧墙,上顶板和下底板损伤范围较小;当侧压力系数较大时,上顶板和下底板损伤区域迅速增大,而侧墙损伤范围增加不明显。
- (3) 随着侧压力系数增加,松动圈平均深度先基本保持不变,当侧压力系数大于 1.0 后,平均损伤深度随侧压力系数的增加呈线性增长趋势。
- (4) 隧道不同部位、不同岩性的围岩松动深度随地应力侧压力系数的变化特征不同。边墙泥岩层损伤深度基本不随侧压力系数变化而变化,平均值为 0.17 m;边墙页岩层则处于折线平缓上升的状态,整体增长幅度不大;而上顶板在 $0.5 \leq \lambda \leq 1.0$ 时,基本处于无损伤状态,而后随着侧压力系数的增长,上顶板损伤范围迅速增大;下底板损伤范围在 $\lambda = 0.75$ 有所下降之外,随着侧压力系数增长,其损伤范围增长速度越来越快。
- (5) 通过与声波测试结果的对比,发现数值计算的围岩损伤范围平均值与声波测试值基本吻合。但声波测试结果为围岩损伤范围的平均值,无法反映隧道围岩不同部位的“钉齿状”损伤形态和非对称分布特征。

(6) 建议实施有针对性的支护设计,尤其注意加强隧道顶部左侧和底部右侧的加固支护措施,可有效防止发生初期支护混凝土开裂掉块、右侧底板开裂破坏情况,为后续的隧道设计及围岩加固提供了参考,有效地保证了隧道的安全顺利施工。

参考文献:

- [1] 马林,关伟,张军.考虑结构性影响的黄土隧道围岩力学响应分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(5):114-118.
- [2] 张旭.软弱围岩隧道侧压力系数反演分析及变形特性研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013.
- [3] 陶云平.软弱围岩隧道变形破坏机制及处治措施研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(1):69-72.
- [4] 杨建明,孙西能,石晨晨,等.深部巷道围岩松动圈厚度测试及演化规律研究[J].云南冶金,2017,46(2):18-23.
- [5] 史兴国.巷道围岩松动圈理论的发展[J].河北煤炭,1995,4(1):1-5.
- [6] 周希圣,宋宏伟.国外围岩松动圈支护理论研究概况[J].建井技术,1994(Z1):67-71.
- [7] 周黎明,肖国强,尹健民.巴昆水电站发电洞开挖松动区岩体弹性模量测试与研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):3971-3975.
- [8] 樊克恭,蒋金泉.岩性弱结构巷道围岩的塑性区与松动圈形态[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):5275-5280.
- [9] 王睿,袁崇洋,张进增,等.基于 Hoek - Brown 强度准则的隧道围岩松动圈分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):58-63.
- [10] 陈庆发,周科平,胡建华,等.缓倾薄层弱结构松动圈声波测试时测孔布置的理论依据与验证[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(5):1406-1410.
- [11] 陈庆发,张世雄,王官宝,等.倾斜薄层岩体巷道围岩松动圈测试研究[J].矿山压力与顶板管理,2005(2):61-65.
- [12] 伍文峰.溪洛渡水电站超大型地下厂房围岩监测资料分析和稳定性评价[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):112-116,124.
- [13] 邹红英,肖明.地下洞室开挖松动圈评估方法研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):513-519.
- [14] 张建海,胡著秀,杨永涛,等.地下厂房围岩松动圈声波拟合及监测反馈分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6),1191-1197.
- [15] 杨栋,李海波,夏祥,等.高地应力下隧道围岩动力损伤分析[J].岩土力学,2013,34(2):311-317.
- [16] 吴涛,戴俊,杜美利,等.基于声波发测试技术的巷道围岩松动圈测定[J].煤炭安全,2015,46(1):169-172.