

文章编号: 1674—8247(2021)01—0012—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.003

隧道软硬围岩交接面倾角对震时结构安全的影响

麻建飞¹ 郭艳军² 余君宇¹ 葛婧¹ 崔光耀¹

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610041)

摘要:本文研究了交接面倾角对于隧道软硬围岩交接带结构震时安全性的影响,建立了跨越不同交接面倾角隧道的三维模型,对比分析跨越不同交接面倾角的隧道边墙收敛、最大主应力、最大剪应力及内力的变化规律,提出了“减震层+结构加强”的抗减震措施,对提高强震区隧道软硬围岩交接带的震时结构安全性有着重要的意义。

关键词:隧道工程; 软硬围岩交接带; 倾角; 地震响应; 结构安全

中图分类号:U452.2⁺8 文献标志码:A

Influence of Dip Angle of Interface between Soft and Hard Surrounding Rock of Tunnel on Structural Safety During Earthquake

MA Jianfei¹ GUO Yanjun² YU Junyu¹ GE Jing¹ CUI Guangyao¹

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper studies the influence of dip angle of the interface between the soft and hard surrounding rock structure of tunnel on the seismic safety, establishes a three-dimensional model of the tunnel crossing different interface dip angles, analyzes the variation laws of side wall convergence, maximum principal stress, maximum shear stress, and internal force of tunnel crossing different interface dip angles by comparison, and proposes the anti-seismic measures of "damping layer + structural strengthening", which is of great significance to improve the seismic safety of the interface between the soft and hard surrounding rock in a tunnel in the strong earthquake area.

Key words: tunnel engineering; the interface between soft and hard surrounding rock; dip angle; seismic response; structural safety

在我国西部地区大量的铁路隧道需穿越软硬围岩交接带,汶川地震的震害资料显示隧道软硬围岩交接带在强震中遭受了严重的震害,严重影响隧道的正常使用和灾后重建工作。因此,如何提高强震区隧道软硬围岩交接带的震时结构安全性是保证隧道安全

运行的重要因素。

国内对于隧道软硬交接带的研究主要有:依托仁阁隧道等实际工程对隧道软硬围岩交接带施工技术的研究^[1-2];利用汶川地震的震害资料对隧道洞口软硬围岩交接带的破坏机理的研究^[3-4];采用数值模拟和

收稿日期:2020-08-19

作者简介:麻建飞(1997-),男,硕士。

基金项目:国家自然科学基金项目(51408008);北京市青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201704013);北京市属高校基本科研业务费项目(110052971921/061);北京高等学校高水平人才交叉培养实培计划大学生科研训练计划深化项目(21XN217/016)

引文格式:麻建飞,郭艳军,崔光耀.隧道软硬围岩交接面倾角对震时结构安全的影响[J].高速铁路技术,2021,12(1):12-16.

MA Jianfei, GUO Yanjun, CUI Guangyao. Influence of Dip Angle of Interface between Soft and Hard Surrounding Rock of Tunnel on Structural Safety During Earthquake[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1):12-16.

大型振动台试验对隧道洞口软硬围岩交接带的地震响应的研究^[5-6];采用模型试验对隧道软硬围岩交接带中设置减震缝、减震层的减震效果的研究^[7-8];利用数值模拟对隧道软硬围岩交接带采用围岩注浆等抗震措施的抗震效果的研究^[9-10];利用数值模拟研究浅埋隧道跨越不同倾角的软硬围岩交接面的地震响应^[11]等。以上对于隧道软硬围岩交接带的研究主要集中在施工技术、震害机理、地震动力响应和抗减震措施等方面,对软硬围岩交接面岩倾角的讨论也仅在浅埋隧道中稍有提及,对强震区山区隧道中软硬围岩交接面倾角与震时结构安全性关系的研究较少。

本文利用有限差分软件 FLAC3D 建立三维数值模型,对比分析强震作用下隧道跨越不同倾角软硬围岩交接面时结构的变形、主应力、剪应力及内力的变化规律,研究山区隧道在跨越不同倾角的软硬围岩交接面时结构震时安全性的差异问题。研究成果对提高强震区隧道软硬围岩交接带的震时结构安全性有着重要的意义。

1 研究情况

1.1 支护结构概况

选取三心圆马蹄形断面隧道为计算模型,高 11 m,跨度为 8.55 m,复合式衬砌结构,初期支护采用 C25 喷射混凝土,厚 0.25 m,二衬采用 C30 模筑混凝土,厚 0.45 m。

1.2 计算工况

选取 4 种软硬围岩交接面倾角进行分析,计算工况如表 1 所示。

表 1 计算工况表

工况	软硬围岩交接面倾角/(°)
1	30
2	45
3	60
4	75

1.3 数值模型的建立

利用有限差分软件 FLAC3D 模拟跨越不同倾角软硬围岩交接面隧道在地震荷载作用下的动力响应,数值模型的尺寸为 100 m × 120 m × 90 m。隧道埋深 50 m,纵向开挖深度 120 m,隧道左右两侧取大于 5 倍隧道跨度(约 45 m)。围岩上盘为 V 级围岩(软弱围岩),下盘为 III 级围岩(坚硬围岩),软硬围岩交接面与隧道纵向正交。支护结构和围岩采用实体单元模拟,支护结构的本构模型采用弹性模型,围岩遵从

Mohr-Coulomb 屈服准则。模型从最底部往上 10 m 范围内设置基岩层,模拟地震波在传输过程中的刚性地基。计算模型如图 1 所示。

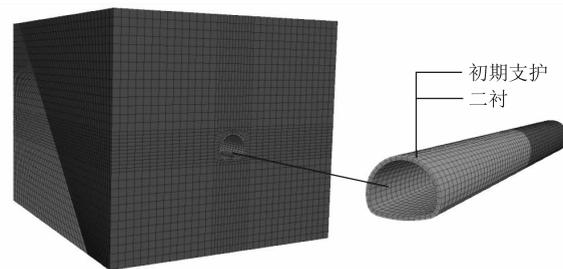


图 1 计算模型(以 45° 倾角为例)

1.4 物理参数

计算模型中材料的物理参数如表 2 所示。

表 2 模型的物理参数表

参数	重度 / (kN/m)	弹性模量 / GPa	泊松比	内摩擦角 / (°)	粘聚力 / MPa
III 级围岩	24.0	15.0	0.3	45.0	1.0
V 级围岩	20.0	2.0	0.4	25.0	0.2
基岩	25.0	20.0	0.2	50.0	1.5
初支	22.0	25.0	0.2	-	-
二衬	25.0	28.0	0.2	-	-

1.5 动力计算

选取 2008 年汶川地震中卧龙站记录的三方向加速度波作为模型输入的地震波,加载时间为 14.98 s。为减少干扰波的影响,借助 SeismoSignal 软件对地震波进行数字滤波处理。为消除动力计算后产生的残余位移,使用基线矫正软件对地震波进行基线矫正,矫正处理后地震波加速度时程曲线如图 2 所示。计算时地震加速度波通过模型底部基岩向上传播,模型底部采用静态边界,四周采用自由场边界。

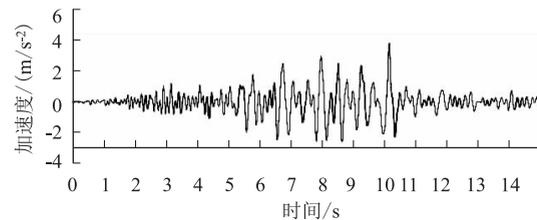


图 2 加速度时程曲线图(以 X 向为例)

1.6 监测面及测点布置

模型共设置 9 个监测面,监测面布置如图 3 所示。相邻监测面间距 10 m,监测面 S1 ~ S9 模型横截面中软岩范围逐渐减小,硬岩范围逐渐增加。每个监测面共设置 8 个测点,测点布置如图 4 所示。

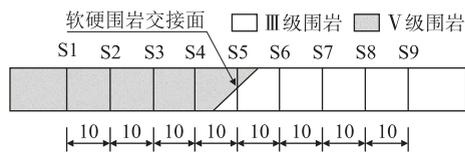


图3 监测面布置图(m)

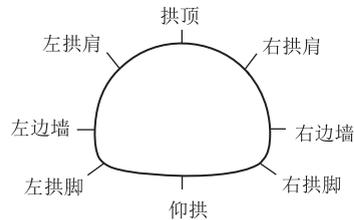


图4 测点布置图

2 计算结果分析

2.1 边墙收敛

震后各工况隧道结构的边墙收敛量,如图5所示。

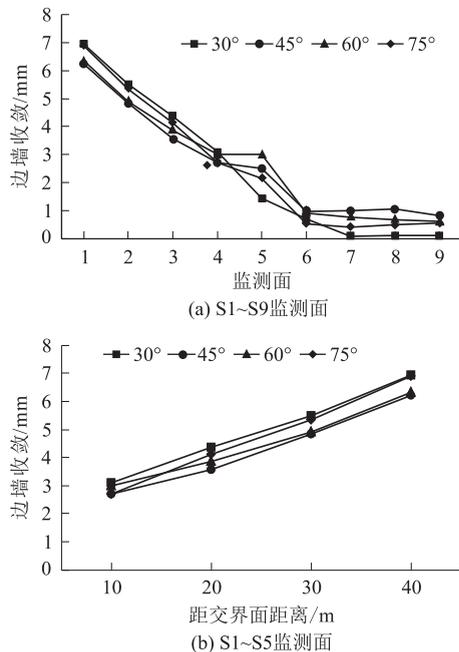


图5 边墙收敛量图

由图5(a)可知,隧道软岩侧结构(监测面S1~S4)的边墙收敛量均远大于硬岩侧结构(监测面S6~S9)的边墙收敛量,监测面S1~S9结构边墙收敛量逐渐减小。由图5(b)可知,软岩侧结构边墙收敛量与结构距交界面的距离成正比,随着结构距交界面距离的增大,结构边墙收敛量逐渐增大。

软岩侧隧道结构交接面倾角为 30° 时各监测面的边墙收敛量最大,为 $3.08 \sim 6.94 \text{ mm}$;倾角为 45° 时软岩侧各监测面的边墙收敛最小,为 $2.71 \sim 6.23 \text{ mm}$ 。

交接面倾角为 60° 和 75° 时软岩侧各监测面的边墙收敛量介于交接面倾角为 30° 和 45° 的工况之间,分别为 $3.00 \sim 6.34 \text{ mm}$ 和 $2.72 \sim 6.89 \text{ mm}$ 。交接面倾角为 45° 时,软岩侧结构的边墙收敛相较于倾角为 30° 、 75° 和 60° 的工况平均减小 13.20% 、 8.21% 和 5.06% 。

硬岩侧隧道结构在交接面倾角为 45° 时各监测面二衬的边墙收敛量最大,为 $0.82 \sim 1.06 \text{ mm}$,倾角为 30° 时硬岩侧各监测面二衬的边墙收敛量最小,为 $0.09 \sim 0.69 \text{ mm}$ 。交接面倾角为 60° 和 75° 时结构的边墙收敛量介于倾角为 45° 和 30° 的工况之间,分别为 $0.60 \sim 0.92 \text{ mm}$ 和 $0.41 \sim 0.54 \text{ mm}$ 。交接面倾角为 30° 时,硬岩侧隧道二衬的边墙收敛量相较于倾角为 45° 、 60° 和 75° 的工况平均减小 75.21% 、 71.19% 和 52.96% 。

2.2 最大主应力

震后隧道二衬的最大主应力云图,如图6所示。

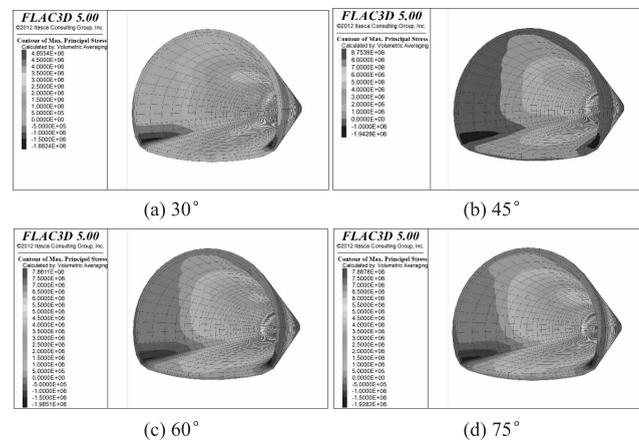


图6 最大主应力图

由图6可知,4种工况下隧道结构的最大主应力峰值均在软硬围岩交接面拱顶处,极小值均在软岩侧洞口左、右拱脚处。软硬围岩交接面倾角为 30° 时,二衬的最大主应力峰值相较于倾角为 45° 、 60° 和 75° 的工况分别减小 45.08% 、 38.17% 和 38.40% 。

2.3 最大剪应力

震后隧道二衬的最大剪应力云图,如图7所示。

由图7可知,4种工况下二衬的最大剪应力峰值均在软硬围岩交接面左、右拱肩处,极小值在隧道两侧洞口仰拱处。软硬围岩交接面倾角为 30° 时,二衬的最大剪应力峰值相较于倾角为 45° 、 60° 和 75° 的工况分别减小 26.13% 、 25.74% 和 19.05% 。

2.4 结构内力

由式(1)、式(2)^[11-12]计算各测点的安全系数时程曲线,如图8所示。取同一监测面上不同测点所有

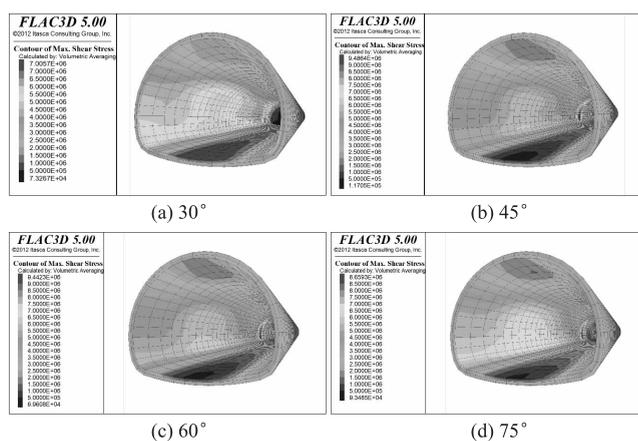


图7 最大剪应力图

时步的结构安全系数的最小值进行分析,如图9所示。

$$KN \leq \varphi \alpha R_a bh \quad (1)$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_l bh}{6e_0/h - 1} \quad (2)$$

式中: b ——二衬的截面宽度(m);

h ——二衬的截面厚度(m);

R_a ——混凝土抗压极限强度(MPa);

R_l ——混凝土抗拉极限强度(N);

K ——安全系数;

φ ——衬砌纵向弯曲系数;

α ——轴向力偏心影响系数;

e_0 ——截面偏心距(m)。

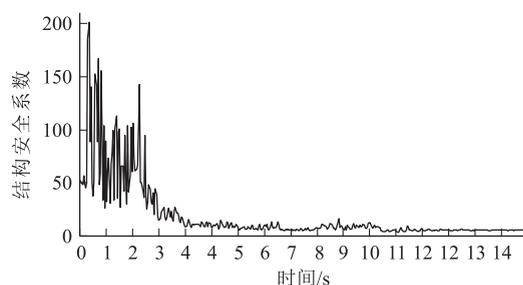


图8 安全系数时程曲线图(工况4监测面S5拱顶测点)

由图9(a)可知,4种工况下,监测面S1~S9的结构最小安全系数逐渐增大。鉴于隧道硬岩侧结构的最小安全系数均已大于TB 10003-2016《铁路隧道设计规范》中的安全系数的允许值2.4,故本文对软岩侧隧道结构的最小安全系数进行重点分析。

由图9(b)可知,交接面倾角为30°时,结构各监测面的最小安全系数最小,为0.804~1.795,震时结构安全性最低。交接面倾角为60°时,各监测面的最小安全系数为1.055~1.923,震时结构安全性最高。交接面倾角为45°和75°时,各监测面最小安全系数介

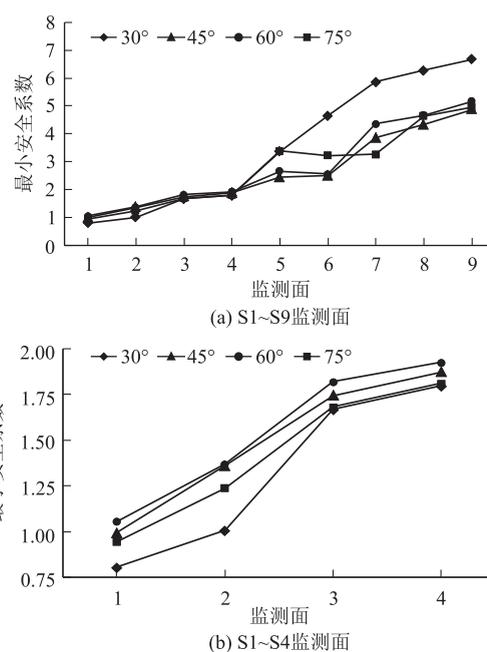


图9 结构最小安全系数图

于交接面倾角为30°和60°的工况的值之间,分别为0.993~1.871和0.945~1.809。软硬围岩倾角为60°时,结构的最小安全系数相比于倾角为30°、45°和75°的工况平均增大20.90%、3.51%和9.18%。

3 结论

本文通过建立跨越不同交接面倾角隧道的有限元模型,对比分析跨越不同交接面倾角的隧道边墙的收敛、最大主应力、最大剪应力及内力的变化规律,得出以下主要结论:

(1)软岩侧隧道的边墙收敛量在软硬围岩交接面倾角为45°时最小,隧道二衬结构的最大主应力峰值和最大剪应力峰值在交接面倾角为30°时最小。隧道二衬的最小安全系数在交接面倾角为60°时最大。

(2)综合结构变形、应力和内力分析结果可知,跨越不同软硬围岩交接面倾角隧道的震时结构安全性,由高至低为:倾角60°>倾角45°>倾角75°>倾角30°。

(3)隧道软硬围岩交接带软岩侧结构震时安全性均低于硬岩侧,软岩侧应为隧道抗震设防的重点段落。交界面倾角为30°时结构安全性最低,建议采取“减震层+结构加强”的抗减震措施进行隧道的抗震设防。

参考文献:

- [1] 熊燕辉. 仁阁隧道软硬岩石交汇地段塌方成因及其处理[J]. 土工基础,2013,27(3):38-40.

- XIONG Yanhui. Mitigation of collapse in the Soft and Hard Rock Transition Zone in Range Tunnel [J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(3):38-40.
- [2] 冉铭哲. 软硬交界地层重载铁路隧道施工关键技术研究[D]. 西南交通大学, 2015.
- RAN Mingzhe. The Key Construction Technology Study on the Heavy-load Railway Tunnel in Soft-hard Layer Stratum [D]. Southwest Jiaotong University, 2015.
- [3] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 汶川地震公路隧道洞口结构震害分析及震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6):1084-1091.
- CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Seismic Damage and Mechanism of Portal Structure of Highway Tunnels in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6):1084-1091.
- [4] 徐华, 李天斌, 王栋, 等. 山岭隧道地震动力响应规律的三维振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9):1762-1771.
- XU Hua, LI Tianbin, WANG Dong, et al. Study of Seismic Response of Mountain Tunnels with 3D Shaking Table Model Test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 32(9):1762-1771.
- [5] 申玉生, 邹成路, 靳宗振, 等. 穿越软硬交界面隧道结构动力响应特性研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3):95-102.
- SHEN Yusheng, ZOU Chenglu, Jin Zongzhen, et al. A Study of the Dynamic Response Characteristics of a Tunnel Structure Through an Interface of Soft and Hard Rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3):95-102.
- [6] 崔光耀, 孟令瀚, 张军徽, 等. 隧道洞口软硬围岩交接段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6):84-90.
- CUI Guangyao, MENG Linghan, ZHANG Junhui, et al. Study on Large-scale Shaking Table Model Test for Seismic Response of Soft and Hard Surrounding Rock Interface Section of Tunnel Portal Part [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(6):84-90.
- [7] 范凯祥, 申玉生, 高波, 等. 穿越软硬围岩隧道设置减震层振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9):109-120.
- FAN Kaixiang, SHEN Yusheng, GAO Bo, et al. Shaking Table Test on Damping Layer Applied in Tunnel Crossing Soft and Hard Surrounding Rock [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9):109-120.
- [8] 王道远, 袁金秀, 朱永全, 等. 高烈度区软硬岩交界段隧道震害机制及减震缝减震技术模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2):4113-4121.
- WANG Daoyuan, YUAN Jinxiu, ZHU Yongquan, et al. Mechanism of Seismic Damage and Mode Test on Absorption Joint Damping Technology of Tunnel Across Junction of Soft and Hard Rock in Highly Seismic Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2):4113-4121.
- [9] 王泽军, 陈铁林, 崔光耀, 等. 强震区隧道洞口软硬岩交接段围岩注浆抗震措施效果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4):96-102.
- WANG Zejun, CHEN Tielin, CUI Guangyao, et al. Aseismic Effect of Grouting Measures for Tunnel Portal Structure at Interface between Soft and Hard Rock in High-intensity Earthquake Zone [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4):96-102.
- [10] 申玉生, 唐浪洲, 周鹏发, 等. 强震区穿越软硬交界面铁路隧道结构抗震技术研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(10):123-129.
- SHEN Yusheng, TANG Langzhou, ZHOU Pengfa, et al. Study on Seismic Technology of Railway Tunnels Crossing Soft and Hard Interface in Strong Earthquake Area [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(10):123-129.
- [11] 麻建飞, 郭艳军, 崔光耀. 强震区隧道软硬围岩交接段纤维混凝土衬砌抗震性能研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5):46-50.
- MA Jianfei, GUO Yanjun, CUI Guangyao. Seismic Performance of Fiber Concrete Lining at Soft and Hard Surrounding Rock Junction of Tunnel in Highly Seismic Area[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):46-50.
- [12] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
- TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels[S].