

文章编号: 1674—8247(2021)04—0016—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.004

## 强震区隧道洞口段刚柔并济抗震技术研究

蒋梦新 邱枫博 刘久明 崔光耀

(北方工业大学,北京 100144)

**摘 要:**为进一步提高强震区隧道洞口段衬砌结构的安全性,本文以樊家寨隧道芒市进口段为依托,利用有限元软件 ABAQUS 对强震区隧道洞口段采用“SFRC 二衬 + 减震层”的刚柔并济抗震技术进行研究。结果表明:与仅采用素混凝土作为二衬结构材料相比,采用刚柔并济抗震技术后,二衬结构最大主应力极值减小了 20.96%,最小主应力极值减小了 12.42%,剪应力极值减小了 11.82%,合位移极值减小了 44.25%,最小安全系数提高范围 38.15%~192.86%。研究结果可为强震区隧道洞口段的工程设计提供参考。

**关键词:**隧道工程;强震区;洞口段;刚柔并济;抗震技术

**中图分类号:**U452.2<sup>+</sup>8 **文献标志码:**A

## Study on Rigid and Flexible Anti-seismic Technology for Tunnel Portal Sections in Meizoseismic Areas

JIANG Mengxin QIU Fengbo LIU Jiuming CUI Guangyao

(North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** In order to further improve the safety of the lining structure at the tunnel portal in meizoseismic areas, this paper studies the rigid and flexible anti-seismic technology of "secondary lining of SFRC + shock-absorbing layer" for tunnel portals in meizoseismic areas with finite element software ABAQUS based on a case study of the portal section of Fanjiazhai Tunnel in Mangshi. The results show that compared with the practice of using only plain concrete as the secondary lining, the extreme values of maximum principal stress, the minimum principal stress, the shear stress, and the resultant displacement of the secondary lining structure are reduced by 20.96%, 12.42%, 11.82%, and 44.25% respectively, and the minimum safety coefficient rises by 38.15% to 192.86% after using the rigid and flexible anti-seismic technology. The results can provide a reference for the engineering design of tunnel portal sections in meizoseismic areas.

**Key words:** tunnel engineering; meizoseismic area; portal section; rigid and flexible; anti-seismic technology

随着我国隧道建设的快速发展,隧道修建时所面临的埋深大、纵深长、地质条件复杂、修建难度大的情况随之增多<sup>[1]</sup>。在 5.12 汶川大地震中,与隧道其它部分相比,隧道洞口段,特别是浅埋洞口段,结构破坏更为严重<sup>[2]</sup>。因此,有必要对强震区隧道洞口段的抗震

技术进行研究。

目前,国内外隧道抗震、减震措施研究主要有:通过对两种工况“围岩-初支-减震层-二衬”、“围岩-减震层-初支-二衬”的减震效果进行对比分析,发现“围岩-初支-减震层-二衬”的隧道结构在

收稿日期:2021-04-06

作者简介:蒋梦新(1997-),男,在读研究生。

基金项目:国家自然科学基金项目(52178378);北京市大学生科学研究与创业行动计划项目(21XN216/006)

引文格式:蒋梦新,邱枫博,刘久明,等.强震区隧道洞口段刚柔并济抗震技术研究[J].高速铁路技术,2021,12(4):16-20.

JIANG Mengxin, QIU Fengbo, LIU Jiuming, et al. Study on Rigid and Flexible Anti-seismic Technology for Tunnel Portal Sections in Meizoseismic Areas[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4):16-20.

新奥法施工方面更具优势<sup>[3]</sup>;通过建立试验模型,分析隧道减震层的减震机理与减震机制,发现隧道设置减震层可有效降低裂缝数量与尺寸<sup>[4]</sup>;通过现场调查,结合室内试验与理论推导,对隧道减震层的减震原理进行分析<sup>[5]</sup>;通过室内模型试验和数值模拟,进行钢纤维混凝土衬砌模型承载能力和受力特性研究,发现隧道结构采用单层钢纤维混凝土二次衬砌后,隧道各项受力特性均有所改善<sup>[6-7]</sup>;以实际工程为背景,利用数值分析软件,对高烈度地震区隧道结构的抗震、减震综合措施进行研究,发现针对不同实际工程对抗震、减震措施进行不同组合时,隧道工程可以更加经济、安全<sup>[8-10]</sup>。综上可知,目前研究多集中于分别对隧道设置减震层、围岩注浆与采用钢纤维混凝土作为衬砌材料时的抗震、减震效果进行研究,对于强震区隧道洞口段同时采用抗震、减震措施的研究较少。

本文以樊家寨隧道芒市进口段为研究背景,利用 ABAQUS 进行工程模拟,与无措施(素混凝土二衬)隧道模型计算工况对比,对隧道洞口段使用“围岩-初支-减震层-钢纤维混凝土二衬”结构时的刚柔并济抗震技术进行研究。研究结果可为强震区隧道洞口段采用抗震、减震综合措施的类似工程提供参考。

1 研究概况

1.1 工程地质概况

由地质勘探资料可知,隧址区所经过的梁河、盈江、户撒、陇川盆地为“歹”字型构造所控制,并由大盈江断裂、殿广~平山断裂、瓦得龙断裂沉陷而成,堆积了第四系地层,基底为元古代黑云母花岗岩,周边为构造剥蚀中山区。根据地质调查,隧址区未见有泥石流、滑坡、崩塌等不良地质作用发育,场地较稳定,不易富集形成稳定的地下水位,不存在土壤污染,适宜进行隧道建设。

1.2 计算模型

以樊家寨隧道芒市进口段为依托,利用 ABAQUS 软件建立有限元计算模型。模型围岩遵从摩尔-库伦强度准则,由上至下依次为粉质粘土、V 级、IV 级、III 级、II 级围岩,模型横向长约 39 m,纵向长约 10 m,竖向长约 80.05 m,底部为 20 m 厚 II 级基岩。模型初支厚度为 25 mm,减震层厚度为 10 mm,二次衬砌厚度为 50 mm。计算模型如图 1 所示。

1.3 模型参数

计算模型以 C25 喷射混凝土作为初支材料、泡沫橡胶板作为减震层材料、CF25 钢纤维混凝土(钢纤维

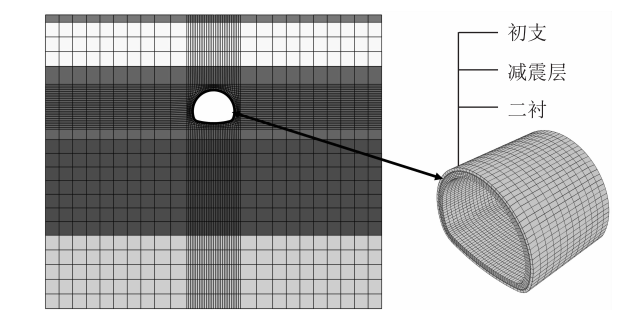


图 1 计算模型图

掺量为 42 kg/m<sup>3</sup>,以下简称 SFRC)与 C25 素混凝土作为二衬结构材料。模型材料参数如表 1 所示。

表 1 模型材料参数表

| 参数        | 重度<br>/(kN/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量<br>/GPa | 泊松比   | 内摩擦角<br>/(°) | 剪胀角<br>/(°) | 粘聚力<br>/MPa |
|-----------|-----------------------------|--------------|-------|--------------|-------------|-------------|
| 粉质粘土      | 19.5                        | 0.17         | 0.365 | 21.0         | 6           | 0.044       |
| V 级围岩     | 20.0                        | 2.0          | 0.40  | 25.0         | 7           | 0.20        |
| IV 级围岩    | 22.0                        | 5.0          | 0.30  | 35.0         | 10          | 0.50        |
| III 级围岩   | 24.0                        | 15.0         | 0.30  | 45.0         | 12          | 1.00        |
| II 级围岩    | 25.0                        | 20.0         | 0.20  | 50.0         | 13          | 1.50        |
| C25 喷射混凝土 | 22.0                        | 25.0         | 0.20  | -            | -           | -           |
| CF25 SFRC | 25.0                        | 38.0         | 0.20  | -            | -           | -           |
| C25 素混凝土  | 25.0                        | 28.0         | 0.20  | -            | -           | -           |
| 减震层       | 10.0                        | 0.3          | 0.3   | -            | -           | -           |

1.4 计算工况

为进行强震区隧道洞口段刚柔并济抗震技术研究,选取“C25 素混凝土二衬”(工况 I)与“CF25 钢纤维混凝土二衬+初支与二衬之间设置 10 cm 厚减震层”(工况 II)计算工况,从隧道模型计算结果中提取位移、应力等相关数据,对采取刚柔并济抗震技术后的抗震效果进行分析。

1.5 监测点布置

为方便对不同工况下衬砌结构安全性进行评价分析,在隧道衬砌结构纵向计算深度中间部位取一监测面,监测面上各监测点布置如图 2 所示。

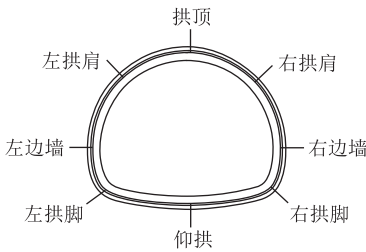


图 2 监测点布置图

1.6 动力荷载

计算模型动力荷载采用汶川(卧龙测站)8 度地震

波,经过滤波软件矫正后的加速度时程曲线(以Z向为例),如图3所示。

2 计算结果及分析

2.1 结构应力分析

提取工况Ⅰ、工况Ⅱ二衬结构最大、最小主应力及剪应力云图,如图4~图6所示。

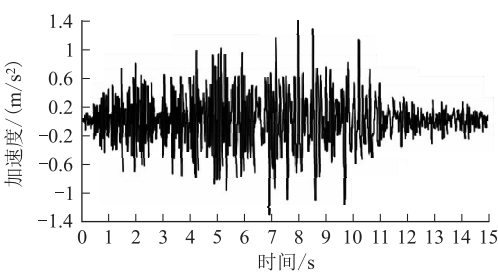


图3 Z向加速度图

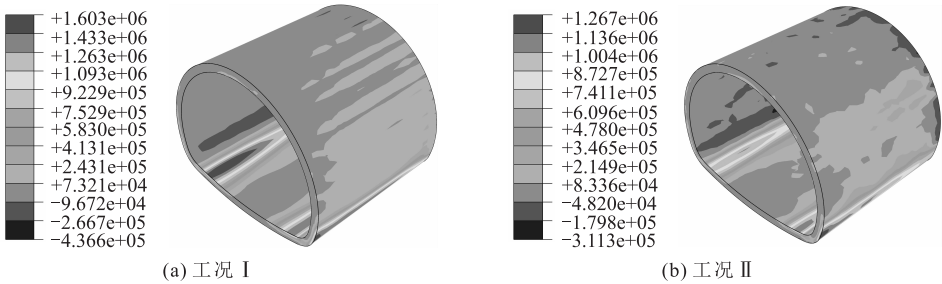


图4 最大主应力云图

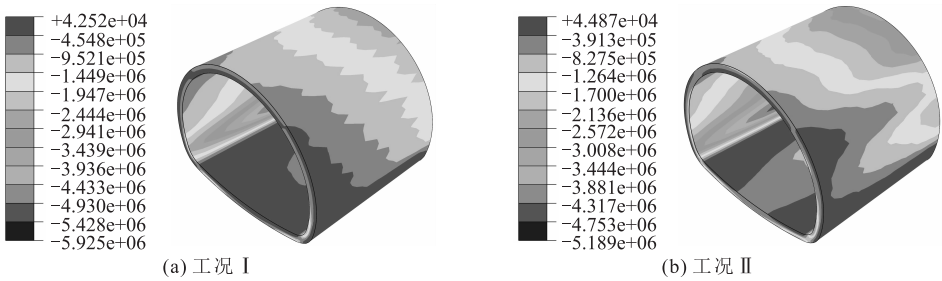


图5 最小主应力云图

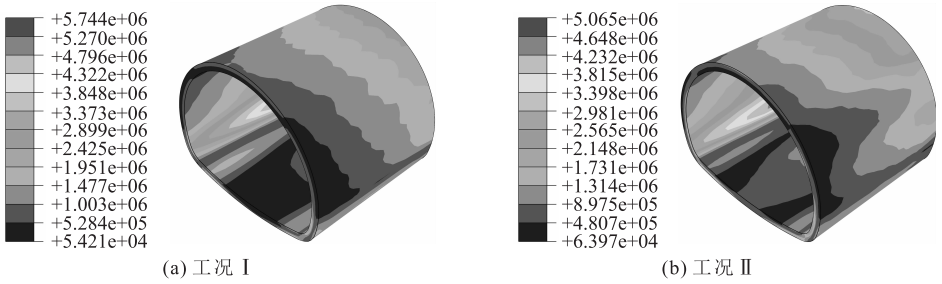


图6 剪应力云图

由图4~图6可知,工况Ⅰ(素混凝土二衬)衬砌结构最大、最小主应力极值与剪应力极值均出现在左拱脚附近;工况Ⅱ(SFRC二衬+10 cm厚减震层)最大、最小主应力极值出现在右拱脚附近,剪应力极值出现在左拱脚附近。

从图4~图6中提取工况Ⅰ、工况Ⅱ二衬结构最大、最小主应力极值与剪应力极值,与工况Ⅰ对比,分析工况Ⅱ的抗震效果,结果如表2所示。

| 表2 应力极值及抗震效果表 |           |        |           |        |         |        |
|---------------|-----------|--------|-----------|--------|---------|--------|
| 工况            | 最大主应力/MPa |        | 最小主应力/MPa |        | 剪应力/MPa |        |
|               | 应力极值      | 抗震效果/% | 应力极值      | 抗震效果/% | 应力极值    | 抗震效果/% |
| Ⅰ             | 1.603     | —      | −5.925    | —      | 5.744   | —      |
| Ⅱ             | 1.267     | 20.96  | −5.189    | 12.42  | 5.065   | 11.82  |

由表2可知,与无措施(工况Ⅰ)相比,采取措施后(SFRC二衬+10 cm厚减震层),二衬结构最大、最

小主应力极值与剪应力极值有明显降低。其中,最大主应力极值由 1.603 MPa 降低到 1.267 MPa,抗震效果为 20.96%;二衬结构最小主应力极值由 -5.925 MPa降低到 -5.189 MPa,抗震效果为 12.42%;二衬结构剪应力极值由 5.744 MPa 降低到 5.065 MPa,抗震效果

为 11.82%。

2.2 结构位移分析

提取工况 I、工况 II 二衬结构 X,Y,Z 共 3 个方向位移的合位移云图,如图 7 所示。

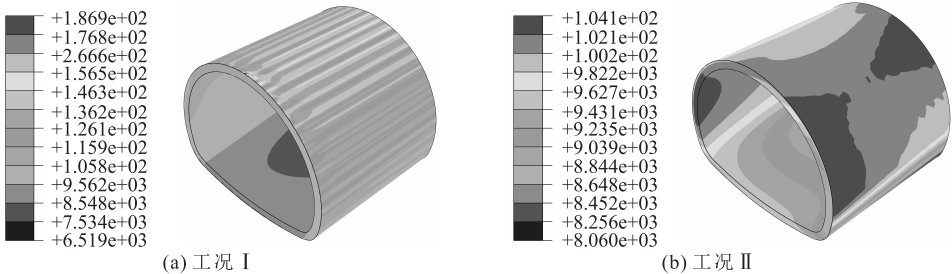


图7 合位移云图

从图 7 中提取二衬结构合位移最大值,分析工况 II 相对于工况 I 的抗震效果,合位移最大值及抗震效果如表 3 所示。

| 表 3 合位移及抗震效果表 |        |        |
|---------------|--------|--------|
| 工况            | 合位移/mm | 抗震效果/% |
| I             | 18.69  | -      |
| II            | 10.42  | 44.25  |

由表 3 可知,与工况 I 相比,采取措施(SFRC 二衬 + 10 cm 厚减震层)后,二衬结构合位移最大值大幅度减少,由 18.69 mm 减少至 10.42 mm,抗震效果为 44.25%。

2.3 结构安全性评价

为分析二衬结构安全性,从隧道洞口段模型计算结果中提取出相关数据,得出各监测点最小安全系数,如图 8 所示。与工况 I (素混凝土二衬)为对比,由式(1)分析工况 II (SFRC 二衬 + 10 cm 厚减震层)的抗震效果,分析结果如表 4 所示。

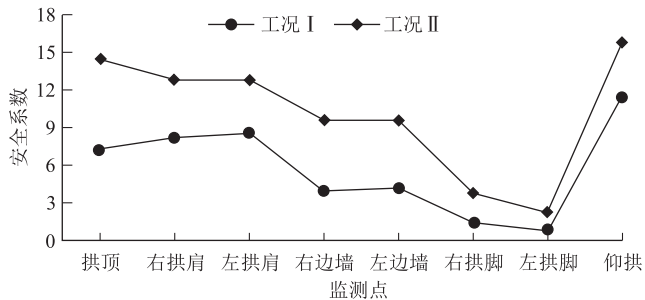


图8 监测点最小安全系数图

二衬结构安全系数抗震效果:

$$\rho_k = \frac{K_1 - K_0}{K_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: $\rho_k$ ——安全系数抗震效果;

$K_1$ ——监测点最小安全系数(工况 II);

$K_0$ ——监测点最小安全系数(工况 I)。

| 表 4 安全系数及抗震效果表 |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|
| 监测点            | 工况 I   | 工况 II  | 抗震效果/% |
| 拱顶             | 7.260  | 14.464 | 99.23  |
| 右拱肩            | 8.165  | 12.802 | 56.79  |
| 左拱肩            | 8.597  | 12.759 | 48.41  |
| 右边墙            | 3.897  | 9.564  | 145.42 |
| 左边墙            | 4.155  | 9.557  | 130.01 |
| 右拱脚            | 1.403  | 3.708  | 164.30 |
| 左拱脚            | 0.756  | 2.214  | 192.86 |
| 仰拱             | 11.458 | 15.829 | 38.15  |

由表 4 可知,二衬结构各监测点最小安全系数数最小值出现在左拱脚处,远远低于隧道结构安全性要求。无措施(工况 I)时,二衬结构监测面各监测点最小安全系数最小值为 0.756,采取措施(工况 II)后,二衬结构监测面各监测点最小安全系数最小值为 2.214,抗震效果为 192.86%。

3 结论

本文以樊家寨隧道芒市进口段为依托工程,利用 ABAQUS 软件建立模型分析,开展强震区隧道洞口段刚柔并济抗震技术研究,得出主要结论如下:

- (1)二衬结构应力方面,与“素混凝土二衬”相比,采取“SFRC 二衬 + 10 cm 厚减震层”的刚柔并济抗震措施后,二衬结构的最大、最小主应力与剪应力极值均有不同程度的降低,其中,最大主应力极值减少 0.336 MPa,抗震效果为 20.96%,最小主应力极值减少 0.736 MPa,抗震效果为 12.42%,剪应力极值减少 0.679 MPa,抗震效果为 11.82%。
- (2)二衬结构位移方面,与“素混凝土二衬”相比,

采取“SFRC 二衬 + 10 cm 厚减震层”的刚柔并济抗震措施后,二衬结构合位移最大值有明显减小,减小 8.27 mm,抗震效果为 44.25%。

(3)二衬结构安全性方面,与“素混凝土二衬”相比,采取“SFRC 二衬 + 10 cm 厚减震层”的刚柔并济抗震措施后,二衬结构监测面各监测点最小安全系数均有明显的增加。其中,监测面各监测点最小安全系数最小值由 0.756 增加至 2.214,抗震效果为 192.86%。

## 参考文献:

- [1] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123-134.
- HONG Kairong. Development and Prospects of Tunnels and Underground Works in China in Recent Two Years[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 123-134.
- [2] 王维嘉. 公路隧道洞口段震害机理及抗减震措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- WANG Weijia. Study on the Damage Mechanism of Tunnel Portal Section and the Anti-Damping Measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [3] 徐华, 李天斌. 隧道不同减震层的地震动力响应与减震效果分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S1): 201-208.
- XU Hua, LI Tianbin. Seismic Dynamic Response and Damping Effect Analysis of Different Buffer Layers on Tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S1): 201-208.
- [4] 王帅帅, 高波, 隋传毅, 等. 减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1086-1092.
- WANG Shuaishuai, GAO Bo, SUI Chuanyi, et al. Mechanism of Shock Absorption Layer and Shaking Table Tests on Shaking Absorption Technology of Tunnel across Fault[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1086-1092.
- [5] 王明年, 崔光耀. 高烈度地震区隧道设置减震层的减震原理研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 126-131.

WANG Mingnian, CUI Guangyao. Study of the Mechanism of Shock Absorption Layer in the Supporting System of Tunnels in Highly Seismic Areas[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 126-131.

- [6] 周平, 王志杰, 雷飞亚, 等. 考虑层间效应的钢纤维混凝土隧道单层衬砌受力特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 116-128.
- ZHOU Ping, WANG Zhijie, LEI Feiya, et al. Experimental Study on Mechanical Behavior of Single-Layer Lining of Steel Fiber Reinforced Concrete Tunnel Considering Interlayer Effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 116-128.
- [7] 崔光耀, 王道远, 倪嵩陟, 等. 软弱围岩隧道钢纤维混凝土衬砌承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1807-1813.
- CUI Guangyao, WANG Daoyuan, NI Songzhi, et al. Model Tests on Bearing Characteristics of Steel Fiber-Reinforced Concrete Lining of Weak Surrounding Rock Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1807-1813.
- [8] 王秋懿, 杨奎, 毛金龙, 等. 九度地震区公路隧道二次衬砌结构抗震综合措施研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 42-49.
- WANG Qiuyi, YANG Kui, MAO Jinlong, et al. Study on the Comprehensive Aseismic Measures for the Secondary Lining Structure of Highway Tunnels in Nine-Degree Seismic Region[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 42-49.
- [9] 朱正国, 余剑涛, 隋传毅, 等. 高烈度活断层地区隧道结构抗震的综合措施[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6): 55-62.
- ZHU Zhengguo, YU Jiantao, SUI Chuanyi, et al. Comprehensive Seismic Measures for Tunnel Structure in the Area of High Intensity Active Fault[J]. China Railway Science, 2014, 35(6): 55-62.
- [10] 崔光耀, 王雪来, 左奎现, 等. 强震区高岩温隧道刚柔并济综合减灾技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 98-103.
- CUI Guangyao, WANG Xuelai, ZUO Kuixian, et al. Study on Rigid and Flexible Compound Disaster Reduction Technology for the Tunnel with High Rock Temperature in Meizoseismal Area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 98-103.