

文章编号: 1674—8247(2018)04—0014—06

强震区跨断层隧道纤维混凝土衬砌抗震性能研究

孟令瀚¹ 安栋¹ 荆鸿飞²

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘要:为进一步提高高烈度地震区穿断层隧道的震时安全稳定性,文章依托中义隧道万隆断层段,利用有限差分数值计算软件对纤维混凝土隧道衬砌的抗震性能进行研究,对比分析了素混凝土二衬、钢纤维混凝土(SFRC)二衬及钢-玄武岩混杂纤维混凝土(SBHFRC)二衬的结构位移及内力。研究表明:(1)SFRC二衬竖向及横向位移分别减小了1.67%、0.68%,SBHFRC二衬竖向及横向位移分别减小了0.97%、0.39%;(2)SFRC二衬与SBHFRC二衬边墙收敛分别减小6.54%、5.14%;(3)SFRC二衬最大、最小主应力分别减小了5.24%、2.86%,SBHFRC二衬最大及最小主应力分别减小了4.73%、1.02%;(4)SFRC二衬与SBHFRC二衬最小剪切应力分别减小2.93%、1.05%;(5)SFRC二衬结构最小安全系数提高高达32.99%以上,SBHFRC二衬结构最小安全系数提高高达36.08%以上;(6)SBHFRC二衬抗震性能优于SFRC二衬。研究成果可为强震区穿断层隧道抗震技术的发展提供参考。

关键词:强震区;跨断层隧道;纤维混凝土;抗震性能

中图分类号:U452.2⁺8 文献标志码:A

Study on Seismic Performance of Fiber Reinforced Concrete Lining of Fault-crossing Tunnels in Meizoseismic Area

MENG Linghan¹ AN Dong¹ JING Hongfei²

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

2. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group, Beijing 102600, China)

Abstract:In order to improve the safety and stability of fault-crossing tunnel in highly seismic areas, based on the Wanlong fault of Zhongyi tunnel, aseismic performance of fiber reinforced concrete tunnel lining is studied in this paper by using finite difference numerical calculation software. The tunnel secondary lining structural displacements and internal forces of plain concrete steel fiber reinforced concrete (SFRC) and steel-basalt hybrid fiber reinforced concrete (SBHFRC) are compared and analyzed. The results show that: (1) the vertical and lateral displacement of SFRC secondary lining are reduced by 1.67% and 0.68%, respectively, the vertical and lateral displacement of SBHFRC secondary lining are reduced by 0.97% and 0.39%, respectively. (2) The side wall convergence of SFRC secondary lining and SBHFRC secondary lining are reduced by 6.54% and 5.14%, respectively. (3) The maximum and minimum principal stress of SFRC secondary lining are reduced by 5.24% and 4.73%, respectively, the maximum and minimum principal stress of SBHFRC secondary lining are reduced by 2.86% and 1.02%, respectively. (4) The maximum shear stress of SFRC secondary lining and SBHFRC secondary lining are reduced by 6.54% and 5.14%, respectively. (5) The minimum factor of safety of the SFRC secondary lining is increased to more than 32.99%, the minimum factor of safety of the SBHFRC secondary lining is increased to more than 36.08%. (6) The aseismic performance of SBHFRC secondary lining is better than that of SFRC secondary lining. The research results can provide

收稿日期:2018-02-08

作者简介:孟令瀚(1995-),男,在读硕士研究生。

基金项目:国家自然科学基金(51408008,51478277);北京市青年拔尖人才培养计划(1759-004);四川省应用基础研究计划项目(2015JY0166)

引文格式:孟令瀚,安栋,荆鸿飞.强震区跨断层隧道纤维混凝土衬砌抗震性能研究[J].高速铁路技术,2018,9(4):14-19.

MENG Linghan, AN Dong, JING Hongfei. Study on Seismic Performance of Fiber Reinforced Concrete Lining of Fault-crossing Tunnels in Meizoseismic Area [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 14-19.

reference for anti-seismic fortification design of fault-crossing tunnel in meizoseismal area.

Key words: meizoseismal area; fault-crossing tunnels; fiber reinforced concrete; seismic performance

受区域影响及各种因素限制,隧道工程往往会不可避免地穿越高烈度地震区的断层破碎带。因此,穿越断层破碎带隧道的抗震设防问题受到广泛关注。纤维混凝土是一种在混凝土基体中掺入纤维组成的复合材料^[1]。纤维可有效提高混凝土衬砌的抗压、抗拉、抗剪等力学性能^[2],是隧道衬砌结构抗震设防的有利替代材料。

目前,国内外专家、学者对穿断层隧道的抗、减震技术进行了部分研究,主要有:采用模型试验及数值仿真对强震区隧道减震层减震模型及减震原理进行研究^[3-5];采用数值仿真对强震区断层隧道围岩注浆加固机制及注浆材料进行研究^[6-7];采用模型试验对纤维混凝土衬砌的承载能力进行研究^[8-10]。以上研究主要集中在隧道设施减震层的减震原理及参数敏感性、围岩注浆加固机制及注浆材料、纤维混凝土隧道衬砌静力承载能力等方面。

目前,对纤维混凝土隧道衬砌的抗震性能研究较少。本文依托丽香铁路中义隧道万隆断层段,利用有限差分数值计算软件对钢纤维混凝土(SFRC)与钢-玄武岩混杂纤维混凝土(SBFRC)隧道衬砌的抗震性能进行研究。

1 中义隧道万隆断层段概况

1.1 地质条件

万隆断层位于丽香铁路新尚至虎跳峡区间内,位于8度设防区,走向近S-N,倾向E-NEE,倾角65~75°。上盘为玄武岩(P_{β})、砂岩夹页岩(T_{11})等,下盘为砂岩(T_1)、偏离化玄武岩夹砂质板岩(T_{β}),均为IV级围岩。断层破碎带宽约30 m,主要由角砾岩组成,为V级围岩,胶结松散,胶结物为铁泥质和碎石土。

1.2 衬砌结构设计

万隆断层段隧道结构采用曲墙带仰拱型式,复合式衬砌。初支采用C25喷射混凝土,厚度25 cm,二次衬砌采用C30模筑混凝土,厚度45 cm。

2 研究情况

2.1 计算模型

以中义隧道跨万隆断层为研究背景建立计算模型,本构模型为弹塑性模型,屈服准则采用摩尔-库伦准则。隧道埋深40 m,纵向开挖深度150 m,隧道底部基岩厚20 m,左右两侧宽度均取5倍洞宽,约35 m,断

层倾角75°,破碎带宽度10 m。计算模型下边界与四周边界全约束,上边界无约束。计算模型如图1所示。

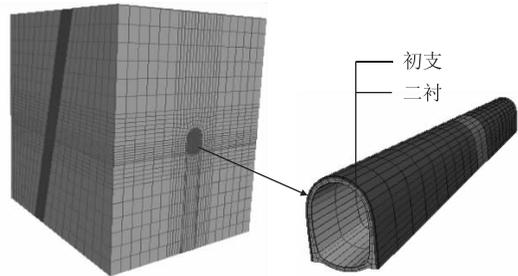


图1 计算模型

2.2 计算参数

以实际地勘资料及实验研究结果得到模型的计算参数^[2]如表1所示。

表1 计算模型参数

参数	重度 /(kN/m^3)	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /($^{\circ}$)	粘聚力 /MPa
上下盘IV级围岩	22.0	5.0	0.3	35	0.5
破碎带V级围岩	20.0	2.0	0.4	25	0.2
基岩II级围岩	25.0	20.0	0.2	50	1.5
C25混凝土	24.5	28.0	0.2	-	-
C30混凝土	25.0	30.0	0.2	-	-
SFRC	25.0	38.0	0.2	-	-
SBHFRCC	24.5	29.3	0.2	-	-

2.3 计算工况

计算工况如表2所示。

表2 计算工况

工况	计算内容
1	二衬采用C25素混凝土
2	二衬采用钢纤维混凝土(SFRC)
3	二衬采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土(SBHFRCC)

注:SFRC($\text{CF}25, 42 \text{ kg}/\text{m}^3$),SBHFRCC($\text{CF}25$,钢纤维 $30 \text{ kg}/\text{m}^3$ +玄武岩 $5 \text{ kg}/\text{m}^3$)。

2.4 动力参数

选用自由场边界条件进行模拟计算,计算阻尼选用局部阻尼,局部阻尼系数0.157 1。采用常规动力加载方式,将三个方向(x, y, z)的地震波同时通过模型底部向上部结构传递。地震波选取汶川地震加速度波(卧龙测站),按9度地震烈度标准化,持续时间为15 s。滤波及基线校正后,加速度时程曲线如图2所示。

2.5 测点布置

各工况沿隧道纵向分别设置10个监测断面,提取

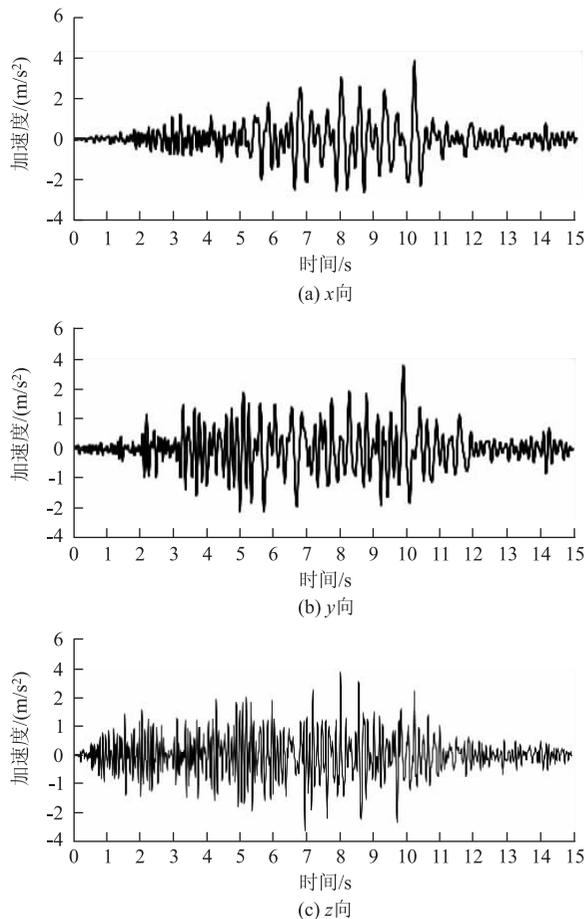


图 2 加速度时程曲线

各监测断面二衬结构的拱顶、左拱腰、左边墙、左拱脚、右拱腰、右边墙、右拱脚、仰拱等 8 个测点的位移、内力值等进行抗震效果分析,测点布置如图 3 所示。

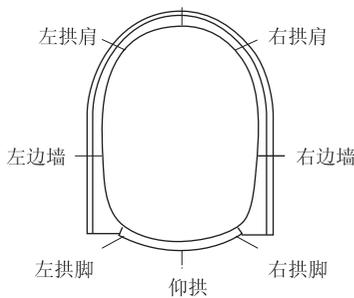


图 3 测点布置

3 抗震效果分析

3.1 结构位移分析

3.1.1 破碎带段位移分析

提取各工况断层破碎带段隧道结构的位移云图,如图 4~图 6 所示。提取二衬结构的位移最大值,并计算工况 2~工况 3 的抗震效果(与工况 1 对比),如表 3 所示。

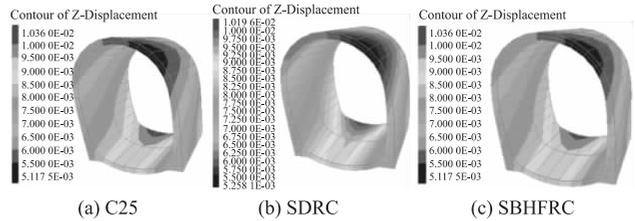


图 4 二衬结构竖向位移云图

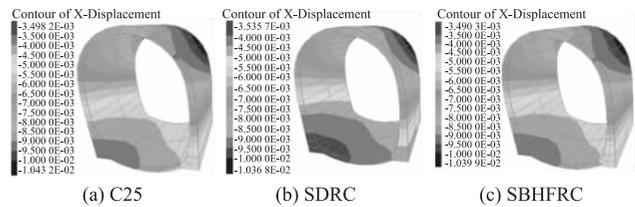


图 5 二衬结构横向位移云图

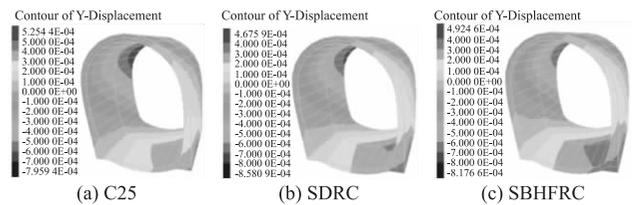


图 6 二衬结构纵向位移云图

表 3 二衬结构最大位移值及抗震效果

位移	素混凝土 /mm	SFRC /mm	抗震效果 /%	SBHFRC /mm	抗震效果 /%
竖向位移	10.36	10.19	1.64	10.26	0.97
横向位移	10.43	10.36	0.68	10.39	0.39
纵向位移	0.53	0.47	11.32	0.49	7.54

由表 3 可以看出,采用纤维混凝土衬砌后,二衬结构竖向及横向位移值均有所下降,其中 SFRC 较素混凝土的竖向位移减少 1.64%,横向位移减少 0.68%,纵向位移减少 11.32%;SBHFRC 较素混凝土的竖向位移减少 0.97%,横向位移减少 0.39%,纵向位移减少 7.54%。从控制结构位移方面看,SFRC 二衬的抗震效果略优于 SBHFRC 二衬。

3.1.2 边墙收敛分析

提取不同工况下隧道各监测断面的边墙收敛量,如图 7 所示。提取二衬结构的边墙收敛最大值,计算工况 2~工况 3 的抗震效果(与工况 1 对比),如表 4 所示。

表 4 最大边墙收敛及抗震效果

二衬类型	边墙收敛最大值/mm	抗震效果/%
素混凝土	2.14	-
SFRC	2.00	6.54
SBHFRC	2.03	5.14

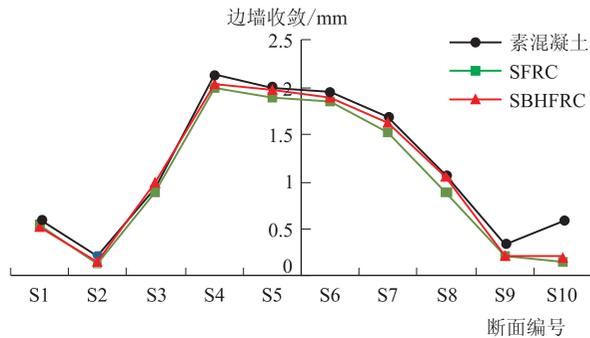


图 7 边墙收敛值

由表 4 可以看出,素混凝土二衬边墙收敛最大值为 2.14 mm,采用纤维混凝土衬砌后,二衬结构的边墙收敛值均有所下降,其中 SFRC 的收敛值为 2.00 mm,抗震效果为 6.54%,SBHFRC 的收敛值为 2.03 mm,抗震效果为 5.14%。从控制结构边墙收敛方面看,SFRC 二衬的抗震效果略优于 SBHFRC 二衬。

3.2 内力分析

3.2.1 主应力分析

提取各工况断层破碎带段隧道结构的主应力云图,如图 8~9 所示。根据二衬结构的主应力最大值,并计算工况 2~工况 3 的抗震效果(以工况 1 为对比),见表 5 所示。

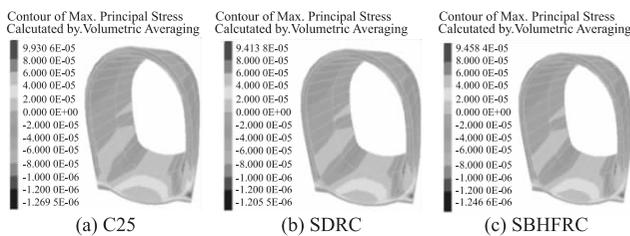


图 8 二衬结构最大主应力云图

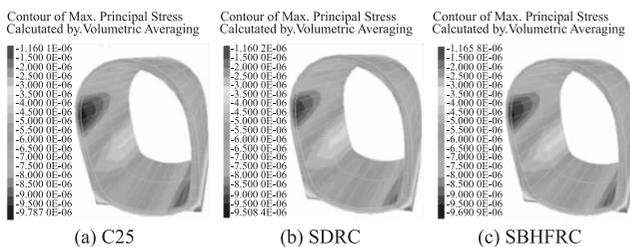


图 9 二衬结构最小主应力云图

表 5 主应力及抗震效果

二衬类型	最大主应力		最小主应力	
	最大值/MPa	减震效果/%	最大值/MPa	减震效果/%
素混凝土	0.99	-	-9.79	-
SFRC	0.94	5.24	-9.51	2.86
SBHFRC	0.95	4.73	-9.69	1.02

由表 5 可以看出,素混凝土二衬结构最大、最小主应力分别为 0.99 MPa、-9.79 MPa,采用纤维混凝土衬砌后,二衬结构最大主应力及最小主应力均有所下降,其中 SFRC 二衬最大、最小主应力分别为 0.94 MPa、-9.51 MPa,较素混凝土分别减少 5.24%、2.86%;SBHFRC 二衬最大、最小主应力分别为 0.95 MPa、-9.69 MPa,较素混凝土分别减少 4.73%、1.02%。从控制最大、最小主应力方面看,SFRC 二衬的抗震效果优于 SBHFRC 二衬。

3.2.2 剪切应力分析

提取各工况断层破碎带段隧道结构的剪切应力云图,如图 10 所示。提取二衬结构的剪切应力最大值,并计算工况 2~工况 3 的抗震效果(与工况 1 对比),如表 6 所示。

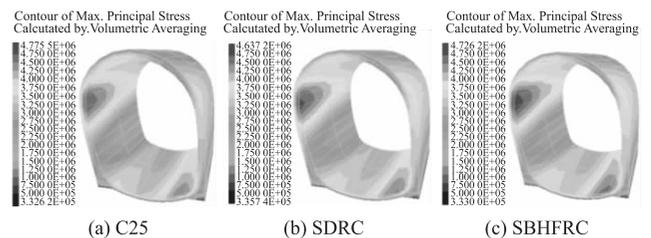


图 10 二衬结构最小主应力云图

表 6 最大剪切应力及抗震效果

二衬类型	最大剪切应力/MPa	抗震效果/%
素混凝土	4.78	-
SFRC	4.63	2.93
SBHFRC	4.73	1.05

由表 6 可以看出,素混凝土二衬最大剪切应力为 4.78 MPa,采用纤维混凝土衬砌后,二衬结构的剪切应力均有所下降,其中 SFRC 的最大剪切应力为 4.63 MPa,抗震效果为 2.93%,SBHFRC 的最大剪切应力为 4.73 MPa,抗震效果为 1.05%。从控制结构剪切应力方面看,SFRC 二衬的抗震效果优于 SBHFRC 二衬。

3.2.3 安全系数分析

提取各监测点计算量测数据,计算结构的轴力、弯矩及安全系数^[11],提取各工况各监测断面(其中 S5、S6 断面为破碎带段内断面)的二衬最小安全系数及对应轴力、弯矩(如图 11 所示),并计算其抗震效果(与工况 1 对比),如表 7 所示。

二衬结构的轴力、弯矩值:

$$N = \frac{1}{2}E(\varepsilon_{内} + \varepsilon_{外})bh \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{12}E(\varepsilon_{内} - \varepsilon_{外})bh^2 \quad (2)$$

二衬结构安全系数:

$$KN \leq \varphi \alpha R_a b h \quad (3)$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_1 b h}{6 e_0 / h - 1} \quad (4)$$

式中: N ——轴力;

M ——弯矩;

b ——截面宽度,取1 m;

h ——截面厚度;

E ——弹性模量;

$\varepsilon_{内}$ 、 $\varepsilon_{外}$ ——结构内外侧应变;

R_a ——混凝土抗压极限强度;

R_1 ——混凝土抗拉极限强度;

K ——安全系数;

φ ——构件纵向弯曲系数;

α ——轴向力偏心影响系数。

表7 破碎段内监测断面最小安全系数及抗震效果

断面编号	素混凝土	SFRC	抗震效果 / %	SBHFRC	抗震效果 / %
S1	2.8	4.94	76.43(↑)	4.41	57.50(↑)
S2	2.67	4.85	81.65(↑)	4.43	65.92(↑)
S3	2.73	5.00	83.15(↑)	4.44	62.64(↑)
S4	3.59	4.48	24.79(↑)	4.14	15.32(↑)
S5	2.13	3.06	43.66(↑)	3.42	60.56(↑)
S6	3.88	5.16	32.99(↑)	5.28	36.08(↑)
S7	4.17	4.53	8.63(↑)	4.54	8.87(↑)
S8	3.87	5.11	32.04(↑)	4.28	10.59(↑)
S9	3.58	5.06	41.34(↑)	4.46	24.58(↑)
S10	3.12	5.18	66.03(↑)	4.48	43.59(↑)

由图11及表7可以看出,SFRC及SBHFRC二衬的各断面最小安全系数均大于素混凝土二衬,且SBHFRC二衬的最小安全系数大于SFRC二衬的最小安全系数。在断层破碎段,采用SFRC二衬使结构安全系数提高达32.99%,采用SBHFRC二衬使结构安全系数提高达36.08%。SBHFRC二衬抗震效果优于SFRC二衬。

4 结论

(1)由震时结构位移变化可知,二衬结构采用SFRC与SBHFRC,可减小隧道跨断层破碎带段的竖向与横向位移,竖向位移分别减小1.67%、0.97%,横向位移分别减小0.68%、0.39%,纵向位移减小11.32%、7.54%。从控制结构位移方面看,SFRC二衬的抗震效果略优于SBHFRC二衬。

(2)由震时边墙收敛变化可知,采用纤维混凝土可减小边墙收敛,其中SFRC的抗震效果为6.54%,SBHFRC的抗震效果为5.14%。SFRC二衬的抗震效果略优于SBHFRC二衬。

(3)由主应力分析可知,二衬结构采用SFRC与SBHFRC,可减小隧道跨断层破碎带段的最大最小主应力,最大主应力分别减小5.24%、4.73%,最小主应力分别减小2.86%、1.02%。从控制结构位移方面看,SFRC二衬的抗震效果优于SBHFRC二衬。

(4)由剪切应力分析可知,采用纤维混凝土可减小最大剪切应力,其中SFRC的抗震效果为2.93%,SBHFRC的抗震效果为1.05%。从控制结构剪切力方面看,SFRC二衬的抗震效果优于SBHFRC二衬。

(5)由结构安全系数分析可知,采用纤维混凝土可有效增大结构安全系数,其中SFRC二衬抗震效果达32.99%以上,SBHFRC二衬抗震效果达36.08%以上。SBHFRC二衬抗震效果优于SFRC二衬。

参考文献:

[1] 杨宇林.纤维混凝土复合材料耐久性能研究综述[J].混凝土,

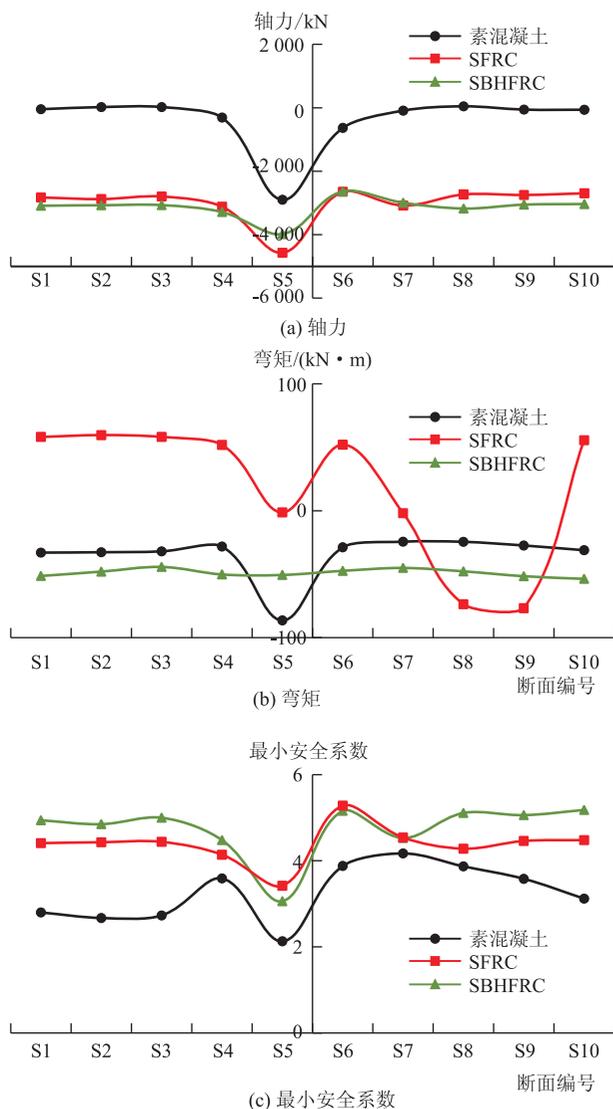


图11 各监测断面内力

- 2012,34(2):78-80.
- YANG Yulin. A Review of the Durability of Fiber Reinforced Concrete Composites [J]. Concrete, 2012,34(2):78-80.
- [2] 倪嵩陟. 钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌承载特性及抗震性能研究[D]. 北京:北方工业大学,2017.
- NI Songzhi. Study on Bearing Capacity and Seismic Performance of Steel-basalt Hybrid Fibers Reinforced Concrete [D]. Beijing: North China University of Technology, 2017.
- [3] 崔光耀,王明年,于丽,等. 穿越黏滑错动断层隧道减震层减震技术模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):1753-1758.
- CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Model Tests on Damping Shake Technology of Shock Absorption Layer of Tunnels Crossing Stick-slip Faults [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1753-1758.
- [4] 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.
- [5] 崔光耀,伍修刚,王明年,等. 高烈度地震区黏滑断层隧道减震层减震模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):2125-2131.
- CUI Guangyao, WU Xiugang, WANG Mingnian, et al. Model Tests on Damping of Shock Absorption Layer of Stick-slip Fracture Tunnel in Highly Seismic Areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2125-2131.
- [6] 张庆松,李鹏,张霄,等. 隧道断层泥注浆加固机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(5):924-934.
- ZHANG Qingsong, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Experimental Study on the Mechanism Model of Tunnel Gouge Grouting Reinforcement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 34(5):924-934.
- [7] 郭志超,丁庆军,田焜. 盾构隧道新型水玻璃注浆材料的研究[J]. 施工技术,2008,37(10):25-28.
- GUO Zhichao, DING Qingjun, TIAN Kun. Study on New Water Glass Grouting Material for Shield Tunnel [J]. Construction Technology, 2008,37(10):25-28.
- [8] 王再举,周祥瑞,姚直书. 钢纤维喷射混凝土衬砌结构模型试验及数值模拟研究[J]. 混凝土与水泥制品,2016,43(10):53-55.
- WANG Zaiju, ZHOU Xiangrui, YANG Zhishu. Model Test and Numerical Simulation Study of Steel Fiber Shotcrete Lining Structure [J]. China Concrete and Cement Products,2016,43(10):53-55.
- [9] 徐进,姚直书,李振宇,等. 喷射钢纤维混凝土衬砌结构模型试验[J]. 煤矿安全,2017,48(6):56-59.
- XU Jin, YAO Zhishu, LI Zhenyu, et al. Model Test on Lining Structure of Spray Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Safety in Coal Mines, 2017,48(6):56-59.
- [10] 胡磊,王志杰,何明磊,等. 隧道钢纤维混凝土单层衬砌模型试验及数值模拟[J]. 铁道建筑,2014,54(6):72-74.
- HU Lei, WANG Zhijie, HE Minglei, et al. Model Test and Numerical Simulation of Single Layer Lining of Steel Fiber Reinforced Concrete in Tunnel [J]. Railway Engineering, 2014,54(6):72-74.
- [11] TB 10003-2005 铁路隧道设计规范[S].
- TB 10003-2005 Code for Design of Railway Tunnel[S].
- (编辑:苏玲梅 白雪)

(上接第8页)

- [5] Q/CR 9127-2015 铁路路基极限状态法设计暂行规范[S].
- Q/CR 9127-2015 Tentative Specification for Railway Subgrade Limit State Method Design [S].
- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司,西南交通大学. 铁路路基支挡结构极限状态设计验证研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2016.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Southwest Jiaotong University. Research on the Limit State Design and Validation Research of Retaining Structures for Railway Subgrade [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2016.
- [7] 王占盛,罗一农,李安洪,等. 变量相关性对分项系数的影响分析[J]. 铁道工程学报,2017,34(2):37-42.
- WANG Zhansheng, LUO Yinong, LI Anhong, et al. The Effect Analysis of Correlation between Variables on the Partial Coefficient [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(2):37-42.
- [8] 王占盛,罗一农,魏永幸,等. 变量相关性对可靠指标的影响分析[J]. 铁道工程学报,2016,33(12):19-23.
- WANG Zhansheng, LUO Yinong, WEI Yongxing, et al. The Effect of Correlation between Variables on Reliability Index [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12):19-23.
- [9] TB 10025-2006 铁路路基支挡结构设计规范[S].
- TB 10025-2006 Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade[S].
- [10] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路路基典型结构极限状态法试设计分报告[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2017.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study Report on the Limit State Tentative Design of Typical Structures for Railway Subgrade [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2017.
- [11] 李毓林. 铁路工程设计技术手册-路基[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.
- LI Yulin. Railway Engineering Design Technical Manual-subgrade [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992.
- [12] 罗一农,王占盛,郭海强. 分项系数与目标可靠指标的关系及其应用[J]. 高速铁路技术,2018,9(1):6-9.
- LUO Yinong, WANG Zhansheng, GUO Haiqiang. Relationship between Partial Factor and Reliability Index and Its Application [J]. High Speed Railway Technology, 2018,9(1):6-9.
- (编辑:刘会娟 苏玲梅)