

文章编号: 1674—8247(2020)05—0046—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.009

# 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

麻建飞<sup>1</sup> 郭艳军<sup>2</sup> 崔光耀<sup>1</sup>

(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:**为提高西部艰险山区隧道软硬围岩交接段的抗震性能,本文依托某铁路隧道软硬围岩交接段,利用有限差分软件对隧道软硬围岩交接段纤维混凝土衬砌的地震响应规律进行了研究,结果表明:(1)在同纤维体积掺量的条件下,隧道软硬围岩交接段衬砌采用钢纤维混凝土的横向位移、竖向位移的抗震效果分别为2.50%~5.00%和0.32%~0.55%,边墙收敛抗震效果为1.74%~6.57%,最小安全系数抗震效果为5.84%~41.30%;(2)隧道软硬围岩交接段衬砌采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土的横、竖向位移的抗震效果分别为0.32%~0.55%和0.14%~0.94%,边墙收敛抗震效果为0.44%~70.04%,最小安全系数抗震效果为12.68%~45.81%。(3)同纤维体积掺量条件下,隧道软硬围岩交接段衬砌采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土的抗震效果优于钢纤维混凝土衬砌的抗震效果。研究成果可为高烈度艰险山区隧道的抗震设防设计提供参考。

**关键词:**隧道工程;强震区;软硬围岩交接段;纤维混凝土;抗震性能

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

## Seismic Performance of Fiber Concrete Lining at Soft and Hard Surrounding Rock Junction of Tunnel in Highly Seismic Area

MA Jianfei<sup>1</sup> GUO Yanjun<sup>2</sup> CUI Guangyao<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** In order to improve the seismic performance of tunnels at soft and hard surrounding rock junctions in western dangerous mountainous areas, based on a railway tunnel at the soft and hard surrounding rock junction, the seismic response rules of fiber concrete lining at the soft and hard surrounding rock junction of the tunnel are researched by using the finite difference software. The results show that: (1) Under the condition of the same fiber volume content, the seismic effect in lateral displacement and vertical displacement of steel fiber reinforced concrete lining at the soft and hard surrounding rock junction of the tunnel is 2.50%~5.00% and 0.32%~0.55% respectively, the side wall convergence seismic effect is 1.74%~6.57%, and the minimum safety factor seismic effect is 5.84%~41.30%. (2) The seismic effect in lateral displacement and vertical displacement of steel-basalt hybrid fiber concrete lining at the soft

收稿日期:2020-01-03

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)

引文格式: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.

and hard surrounding rock junction of the tunnel is 0.32% ~ 0.55% and 0.14% ~ 0.94% respectively, the side wall convergence seismic effect is 0.44% ~ 70.04%, and the minimum safety factor seismic effect is 12.68% ~ 45.81%.

(3) Under the condition of the same fiber volume content, the seismic effect of steel-basalt hybrid fiber concrete lining at the soft and hard surrounding rock junction of the tunnel is better than that of steel fiber concrete lining. The research results can provide a reference for the seismic fortification design of tunnels in high-intensity dangerous mountainous areas.

**Key words:** tunnel construction; highly seismic area; soft and hard surrounding rock junction; fiber concrete; seismic performance

高烈度地震作用下,隧道结构软硬围岩交接段容易发生衬砌掉块、渗水、剪切错位、开裂、仰拱隆起和洞口边坡滑塌等震害<sup>[1]</sup>,严重影响隧道的正常使用和设计寿命。因此,对高烈度地震区隧道软硬围岩交接段的抗震性能进行研究是非常必要的。

高烈度地震区隧道软硬围岩交接段常用的抗震措施包括围岩加强和结构加强。纤维混凝土作为一种水泥基复合材料,其韧性、抗裂、抗剪等力学性能相比素混凝土都有明显提高,将纤维混凝土应用到隧道工程中,可提高衬砌结构的承载性能和抗震性能,且简单易行。因此,本文采用纤维混凝土衬砌来实现结构加强的目的,进而提高隧道软硬围岩交接段的抗震性能<sup>[2]</sup>。

目前,学术界对隧道中纤维混凝土的研究主要集中在纤维混凝土结构的力学性能、承载性能、抗爆、抗渗及抗震性能<sup>[3-6]</sup>,复杂地质条件下隧道纤维混凝土的使用<sup>[7-8]</sup>,隧道中纤维混凝土的施工方法和纤维混凝土在地铁盾构管片上的应用技术等方面<sup>[9]</sup>。对于软硬围岩交接段隧道的研究主要集中于震害机理、地震响应及破坏机制、围岩注浆和减震层减震效果等方面<sup>[10-11]</sup>。但对于高烈度地震区隧道纤维混凝土抗震性能的研究较少,对强震作用下软硬围岩交接段隧道纤维混凝土抗震性能的研究更是鲜有报道。因此,本文以某铁路隧道软硬围岩交接段为研究背景,通过有限差分软件FLAC3D建立数学模型,分析高烈度地震作用下隧道软硬围岩交接段衬砌材料采用钢纤维混凝土和钢-玄武岩混杂纤维混凝土时结构的地震响应规律,并得到纤维混凝土衬砌在高烈度地震区隧道软硬围岩交接段的抗震性能。研究成果可为高烈度地震区隧道抗震设防提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 地质条件

某铁路隧道隧址区主要地层为第四系残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ )、下古生界高黎贡山群层( $Pz_1gl$ )和喜山期黑

云母花岗岩( $\gamma_5^2$ )。软硬围岩交接面倾角约 $65^\circ$ ,上盘主要以喜山期( $r_5^2$ )中风化黑云母花岗岩为主,矿物成分部分蚀变,颗粒间结合较差,风化裂隙较发育,岩体以砾状及碎块状结构为主。下盘主要是古生界高黎贡山群中风化变粒岩石,属较坚硬岩,块状构造。

### 1.2 衬砌结构设计

隧道为三心圆马蹄形断面,跨度11.00 m,高度8.55 m,复合式衬砌,二次衬砌厚0.45 m,采用C25模筑混凝土,初期支护厚0.25 m,采用C20喷射混凝土。

## 2 研究情况

### 2.1 数值模型的建立

本文以某铁路隧道软硬围岩交接段为研究对象,采用有限差分软件FLAC3D建立弹塑性模型,屈服准则采用Mohr-Coulomb屈服准则。隧道埋深50 m,纵向开挖深度100 m,隧道左右两侧山体宽度各取4~5倍洞宽(约为50 m)。模型的软硬围岩交接面与水平面成 $65^\circ$ 夹角,上盘为软弱围岩(V级),下盘为坚硬围岩(Ⅲ级)。模型底部设置10 m厚的基岩,用来模拟的地震波传输过程中地下的刚性地基。

### 2.2 计算工况分组

计算模型中,纤维混凝土材料选用同纤维体积掺量CF25钢纤维混凝土和CF25钢-玄武岩混杂纤维混凝土,工况2中钢纤维掺量为 $42 \text{ kg/m}^3$ ,工况3中钢纤维和钢-玄武岩混杂纤维掺量分别为 $30 \text{ kg/m}^3$ 和 $3.3 \text{ kg/m}^3$ ,对照组采用素混凝土,计算工况如表1所示。

表1 计算工况表

工况	二次衬砌材料
1	素混凝土
2	CF25钢纤维混凝土
3	CF25钢-玄武岩混杂纤维混凝土

### 2.3 物理参数

模型中用到的围岩物理参数由地勘资料得到,纤维混凝土物理参数由实验数据得到,如表2所示。

表2 模型物理参数表

参数	重度 /(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa
Ⅲ级围岩	24.0	10.0	0.25	45.0	1.0
V级围岩	20.0	2	0.4	25.0	0.2
CF25 钢纤维混凝土	25.0	38	0.2	-	-
CF25 钢-玄武岩 混杂纤维混凝土	24.5	29	0.2	-	-
C20 喷射混凝土	24.5	23	0.2	-	-
C25 混凝土	24.5	28	0.2	-	-
基岩	25.0	20	0.2	50.0	0.5

2.4 动力参数

由于计算模型单元数量较多,因此在动力计算中,系统阻尼选用 FLAC3D 内置的局部阻尼,这样可大幅缩短动力计算的时长,阻尼系数取 0.157 1。计算采用汶川地震时卧龙站测得的 15 s 加速度波,用 Seismo-Signal 软件对其进行滤波处理。为消除 FLAC3D 在计算完成后的残余速度和位移,再将地震波进行基线矫正,计算时,3 个方向的地震波通过刚性地基(基岩)同时向上传播。地震波加速度时程曲线如图 1 所示(以 X 方向为例),频谱曲线如图 2 所示。

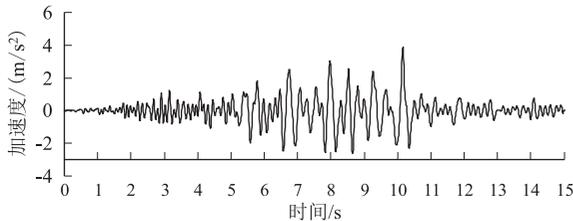


图1 地震波加速度时程曲线图

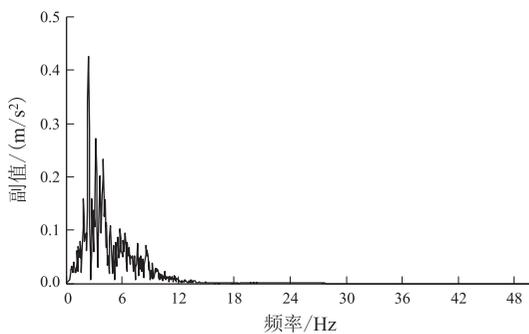


图2 地震波频谱曲线图

2.5 监测面及测点布置

计算模型共设置 7 个监测面,在隧道纵向中心处设置监测断面 S4,与软硬围岩交接面夹角为 25°。软岩侧设置监测面 S1、S2 和 S3,硬岩侧设置监测面 S5、S6 和 S7。相邻监测面间距离为 10 m,监测面布置图如图 3 所示。每个监测面上设置 8 个监测点,其分布如图 4 所示。

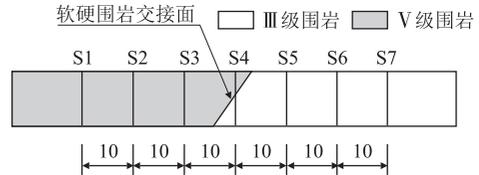


图3 监测断面布置图(m)

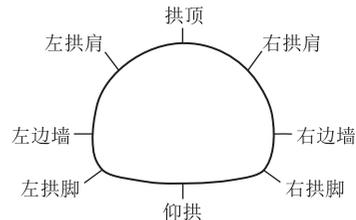


图4 测点布置图

3 纤维混凝土抗震效果分析

3.1 结构位移分析

3 种工况下,提取监测面 S3、S4、S5 处的结构最大位移,如表 3 所示。

表3 结构最大位移表(mm)

位移	监测面	素混凝土	钢纤维混凝土	钢-玄武岩 混杂纤维混凝土
竖向位移	S3	11.205	11.161	11.155
	S4	10.786	10.65	10.681
	S5	7.595	7.476	7.584
横向位移	S3	4.472	4.334	4.455
	S4	3.061	2.984	3.051
	S5	1.312	1.247	1.305

由表 3 可知,强震作用后,隧道软硬围岩交接段软岩侧监测面 S3 二衬结构发生较大拱顶沉降,3 种工况下沉降最大值分别为 11.205 mm、11.161 mm 和 11.155 mm;强震作用后,软岩侧隧道边墙处发生较大横向位移,3 种工况下位移最大值分别为 4.472 mm、4.334 mm 和 4.455 mm。在 3 种工况下,隧道软硬围岩交接段衬砌结构的竖向位移和横向位移均沿隧道纵向由软岩段至硬岩段逐渐减小。

按式(1)计算隧道软硬围岩交接段纤维混凝土衬砌在位移方面的抗震效果,结果如表 4 所示。

$$\rho_d = \frac{D_p - D_f}{D_p} \quad (1)$$

式中: $\rho_d$ ——由位移计算得到的纤维混凝土的抗震效果;

$D_f$ ——纤维混凝土衬砌横(竖)向位移;

$D_p$ ——素混凝土衬砌横(竖)向位移。

表 4 二衬结构横、竖向位移抗震效果表

位移	监测面	钢纤维混凝土 /%	钢-玄武岩混杂纤维混凝土 /%
竖向位移	S3	0.39	0.45
	S4	1.26	0.97
	S5	1.56	0.14
横向位移	S3	3.09	0.39
	S4	2.50	0.32
	S5	5.00	0.55

由表 4 可以看出,隧道软硬围岩交接段在经历强震作用后,相比于工况 1(素混凝土衬砌),工况 2 和工况 3 使用纤维混凝土对拱顶沉降和二衬结构的水平位移均有抑制作用。

由隧道衬砌的横向位移和竖向位移,计算得到钢纤维混凝土衬砌(工况 2)在隧道软硬围岩交接段的抗震效果分别为 2.50% ~ 5.00% 和 0.32% ~ 0.55%,钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌(工况 3)在隧道软硬围岩交接段的抗震效果分别为 0.32% ~ 0.55% 和 0.14% ~ 0.94%。在结构位移方面,隧道软硬围岩交接段结构采用钢纤维混凝土衬砌的抗震效果优于采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌的抗震效果。

3.2 水平边墙分析

强震作用后,提取 3 种工况隧道软硬围岩交接段二衬结构 S1 ~ S7 监测面的水平(边墙)收敛值,并按式(2)计算由衬砌水平收敛值得到的隧道软硬围岩交接段纤维混凝土衬砌的抗震效果,结果如表 5 所示。

$$\rho_c = \frac{c_p - c_f}{c_p} \quad (2)$$

式中: $\rho_c$ ——由衬砌水平收敛计算得到的纤维混凝土的抗震效果;

$c_f$ ——纤维混凝土衬砌各监测面的水平收敛值;

$c_p$ ——素混凝土衬砌各监测面的水平收敛值。

表 5 水平(边墙)收敛值表

监测面	素混凝土 /mm	钢纤维混凝土 /mm	抗震效果 /%	钢-玄武岩混杂纤维混凝土 /mm	抗震效果 /%
S1	6.88	6.63	3.63	6.53	5.09
S2	5.30	5.20	1.74	5.14	2.97
S3	5.24	4.90	6.57	3.71	29.23
S4	3.52	3.42	2.85	3.50	0.44
S5	1.89	1.79	5.54	0.73	61.18
S6	2.31	2.24	3.17	0.79	65.64
S7	2.19	2.14	1.99	0.66	70.04

由表 5 可知,强震作用下,工况 2 和工况 3 中,隧道软硬围岩交接段采用纤维混凝土衬砌时,各断面的边墙收敛值相较于工况 1(素混凝土衬砌)均有所减小。

由边墙收敛计算得到钢纤维混凝土衬砌(工况 2)

在隧道软硬围岩交接段的抗震效果为 1.74% ~ 6.57%,钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌(工况 3)在隧道软硬围岩交接段的抗震效果为 0.44% ~ 70.04%。钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌在隧道软硬围岩交接段硬岩侧的抗震效果优于其在软岩侧的抗震效果。

3.3 结构内力分析

由模型中隧道二衬结构的内力数据,采用式(3)、式(4)计算结构在工况 1 ~ 3 下监测面 S1 ~ S7 上各测点不同步的安全系数<sup>[12]</sup>,取监测面上 8 个测点不同步的安全系数的最小值来反映结构在该监测面处的安全程度,计算结果如图 5 所示。

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

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

式中: $b$ ——二次衬砌的截面宽度,取 1 m;

$h$ ——二次衬砌的截面厚度;

$R_a$ ——混凝土抗压极限强度;

$R_t$ ——混凝土抗拉极限强度;

$K$ ——安全系数;

$\varphi$ ——衬砌纵向弯曲系数;

$\alpha$ ——轴向力偏心影响系数。

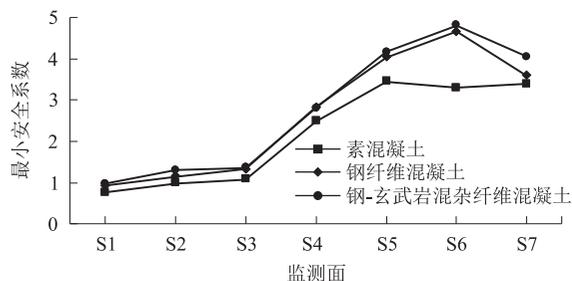


图 5 最小安全系数图

由图 5 可知,强震作用下隧道软硬围岩交接段各监测面的最小安全系数沿隧道纵向由软岩段至硬岩段逐渐增大,越靠近坚硬围岩,结构越安全。

采用式(5)计算由结构最小安全系数得到的隧道软硬围岩交接段各监测面纤维混凝土衬砌的抗震效果,结果如表 6 所示。

$$\rho_i = \frac{I_p - I_f}{I_p} \quad (5)$$

式中: $\rho_i$ ——由结构最小安全系数计算得到的纤维混凝土的抗震效果;

$I_f$ ——纤维混凝土衬砌最小安全系数;

$I_p$ ——素混凝土衬砌最小安全系数。

表6 最小安全系数抗震效果表

监测面	素混凝土/mm	钢纤维混凝土/mm	抗震效果/%	钢-玄武岩混杂纤维混凝土/mm	抗震效果/%
S1	0.755	0.931	23.31	0.968	28.21
S2	0.981	1.148	17.02	1.297	32.21
S3	1.082	1.323	22.27	1.362	25.88
S4	2.492	2.823	13.28	2.808	12.68
S5	3.457	4.033	16.66	4.166	20.51
S6	3.303	4.667	41.30	4.816	45.81
S7	3.392	3.59	5.84	4.046	19.28

由表6可知,在强震作用下,衬砌材料采用纤维混凝土可使隧道软硬围岩交接段的最小安全系数有不同程度的提高,使隧道结构在强震作用下相对安全。工况2中钢纤维混凝土衬砌在隧道软硬围岩交接段中的抗震效果为5.84%~41.30%,工况3中钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌在隧道软硬围岩交接段中的抗震效果为12.68%~45.81%。在监测面S1~S7上,钢-玄武岩混杂纤维混凝土衬砌在隧道结构软硬围岩交接段的抗震效果均优于钢纤维混凝土衬砌在隧道结构软硬围岩交接段的抗震效果。

## 4 结论

本文依托某铁路隧道,利用有限差分软件对隧道软硬围岩交接段纤维混凝土衬砌的地震响应规律进行了研究,主要结论如下:

(1) 软硬围岩交接段隧道衬砌采用钢纤维混凝土后,横向位移、竖向位移的抗震效果分别为2.50%~5.00%和0.32%~0.55%,边墙收敛抗震效果为1.74%~6.57%,最小安全系数抗震效果为5.84%~41.30%。

(2) 软硬围岩交接段隧道衬砌采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土后,横、竖向位移的抗震效果分别为0.32%~0.55%和0.14%~0.94%,边墙收敛抗震效果为0.44%~70.04%,安全系数抗震效果为12.68%~45.81%。

(3) 综合位移、内力等指标的抗震效果,同纤维体积分量条件下,软硬围岩交接段隧道衬砌采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土的抗震效果优于钢纤维混凝土衬砌,推荐该铁路隧道软硬围岩交接段采用钢-玄武岩混杂纤维混凝土进行抗震设防设计。

## 参考文献:

- [1] 于媛媛. 山岭隧道衬砌结构震害机理研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.  
YU Yuanyuan. Seismic Damage Mechanism of Secondary Lining of Mountain Tunnel[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2013.
- [2] 崔光耀, 孙凌云, 左奎现, 等. 纤维混凝土隧道衬砌力学性能研

究综述[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 1-7.

- CUI Guangyao, SUN Lingyun, ZUO Kuixian, et al. Review of Researches on Mechanical Behaviors of Tunnel Fiber Reinforced Concrete Lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(3): 1-7.
- [3] 倪高陟. 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.
- [4] 崔光耀, 左奎现, 朱长安, 等. 隧道纤维混凝土二衬承载机理及受力计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 122-128.  
CUI Guangyao, ZUO Kuixian, ZHU Chang'an, et al. Study on Bearing Mechanism and Stress Calculation Method of Tunnel Secondary Lining of Fiber Reinforced Concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 122-128.
- [5] 刘伟. 地下隧道钢纤维混凝土衬砌抗爆性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.  
LIU Wei. Study on Anti-explosion Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Lining in Underground Tunnel[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [6] 朱虹. 基于断裂力学的纤维混凝土隧道衬砌渗透机理研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.  
ZHU Hong. Study on Permeability Mechanism of Fiber Reinforced Concrete Tunnel Based on Fracture Mechanics[D]. Huainan, China: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [7] 王道远, 崔光耀, 许海亮, 等. 跨断层隧道纤维混凝土衬砌抗错断技术研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12): 71-75.  
WANG Daoyuan, CUI Guangyao, XU Hailiang, et al. Research on the Technology of Resisting Dislocation of Fiber Reinforced Concrete Lining on Cross-fault Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 71-75.
- [8] 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 Meizoseismal Area[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 14-19.
- [9] 雷锐锋. 掺玄武岩纤维混凝土隧道喷射施工技术研究[J]. 四川建材, 2020, 46(4): 84-85.  
LEI Ruifeng. Study on Shotcrete Construction Technology of Basalt Fiber Concrete Tunnel[J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(4): 84-85.
- [10] 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]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2018, 50(6): 84-90.
- [11] 赵洪督. 强震区穿越软硬围岩浅埋隧道抗减震技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
Zhao Hongdu. Study on Anti-seismic Technology of Shallow Tunnel Structure Crossing Soft and Hard Surrounding Rock in Meizoseismal Areas[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [12] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].  
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnel[S].