

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-14

# 强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析

崔光耀<sup>1</sup>, 李鹏宇<sup>1</sup>, 王庆建<sup>2</sup>

- (1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144;
2. 中铁隧道集团四处有限公司, 广西南宁 530000)

**摘要:**为进一步提高地震时软弱围岩铁路隧道安全性及稳定性,以玉磨铁路新平隧道工程为依托,利用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件,对强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施效果进行研究,对比分析了无加固措施、措施一(桩-拱结构)及措施二(桩-筏-拱结构)二衬的结构位移及内力,研究表明:措施一和措施二的竖向位移分别减小了1.35%、1.09%;措施一的边墙收敛几无变化(增大了0.44%);由于桩-筏-拱结构的整体稳定性较好,措施二的边墙收敛减小了30.49%;距离洞口最近的两个危险截面1和2处,措施一的最小安全系数提高了1.43%、6.71%,措施二的最小安全系数提高了145.91%、143.72%;综合位移及内力分析,措施二的抗震效果优于措施一,建议新平隧道洞口段采用桩-筏-拱结构进行抗震加固。

**关键词:**隧道工程;软弱围岩;洞口段;桩-拱结构;桩-筏-拱结构;地震稳定性

**中图分类号:** P694      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-8035(2021)04-0106-07

## Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

CUI Guangyao<sup>1</sup>, LI Pengyu<sup>1</sup>, WANG Qingjian<sup>2</sup>

- (1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. China Railway Tunnel Group No.4 Co. Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China)

**Abstract:** In order to further improve the safety and stability of railway tunnels with weak surrounding rocks during earthquake, the Xinping tunnel at Yumo Railway was taken as an example and, to study the effect of pile-raft seismic measures at the tunnel opening in soft surrounding rocks during strong earthquake using FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation software. The structural displacement and internal force of the two linings without reinforcement were compared, the research results show that the vertical displacement of the pile-arch structure reduced 1.35% and that of the pile-raft-arch structure reduced 1.09%; the side wall convergence of the pile-arch structure has little change (increase 0.44%); due to the better overall stability of the pile-raft-arch structure, the side wall convergence of it is reduced by 30.49%; At the two dangerous sections closest to the entrance of the tunnel, the minimum safety factor of the pile-arch structure has been increased by 1.43% and 6.71%, and the minimum safety factor of the pile-raft-arch structure has been increased by 145.91% and 143.72%; The anti-seismic effect of the pile-raft-arch structure is better than that of the pile-arch structure. It is recommended that the pile-raft-arch structure should better be adopted for seismic reinforcement at the opening section of Xinping tunnel.

**Keywords:** tunnel engineering; weak surrounding rock; cave section; pile-arch structure; pile-raft-arch structure; seismic stability

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-07-31

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)

第一作者: 崔光耀(1983-),男,山东莒南人,博士,副教授,主要从事隧道与地下工程的教学与研究。E-mail: cyao456@163.com

## 0 引言

在我国西部铁路建设的持续进程当中,围岩条件较差的隧道工程不断出现<sup>[1-3]</sup>,并且西部地区往往处于地震频发区,因此,为保证地震频发区软弱围岩隧道的震时稳定性和安全性,极需对受震害影响较大的软弱围岩隧道洞口段采用有效的抗震设防措施。

当前,国内外相关专家学者对强震区软弱围岩隧道洞口段的抗减震技术条件进行了一些研究,其中包括利用振动台模型试验对隧道洞口段地震动力特性进行研究<sup>[4-5]</sup>;利用数值模拟软件对采用围岩注浆加固的强震区隧道洞口段抗震效果进行分析<sup>[6]</sup>;利用振动台模型试验对隧道洞口段设置减震层的减震效果进行分析<sup>[7]</sup>;利用积分有限元法和数值模拟研究隧道洞口段的合理抗震设防长度<sup>[8]</sup>;依托实际工程对高烈度地震区隧道洞口段进行了刚柔并济抗减震措施模型试验研究<sup>[9]</sup>;依托实际工程背景对强震区隧道洞口段的综合抗减震技术进行研究<sup>[10-13]</sup>;综上所述,以上研究仅针对围岩注浆、减震层、减震缝等抗减震技术。对于强震区软弱围岩隧道洞口段桩-拱结构与桩-筏-拱结构抗震措施鲜有报道。本文以玉磨铁路新平隧道工程作为依托,利用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件,对强震区软弱围岩隧道洞口段桩-筏抗震措施效果进行研究。

## 1 工程概况

### 1.1 地质条件

新平隧道是玉磨铁路的重点工程,位于石屏一建水断裂和扬武-青龙厂大断裂间,地面高程为1 150~1 782 m,相对高差约为632 m,隧道起讫里程D1K46+290~D1K60+780,全长14 835 m最大埋深约为578 m。隧道地质条件复杂,管段内基本以软岩为主,不可预见风险多,灾害性地质类型多。不良地质包括断层破碎带、褶皱、瓦斯、岩溶、浅埋、软岩大变形等。不良地质段落几乎涵盖了整座隧道,隧道洞口段为V级围岩。

### 1.2 隧道结构

此段隧道结构采用复合式衬砌,初期支护喷射C25混凝土,厚度为25 cm;二次衬砌采用C25模筑钢筋混凝土,厚度为50 cm。隧道断面为马蹄形,高度为11.7 m,跨度为14.2 m。

## 2 计算情况

### 2.1 计算模型

依托新平隧道洞口 D1K58+950~D1K59+000 建立计算模型(图1),此段V级围岩与IV级围岩相交接。

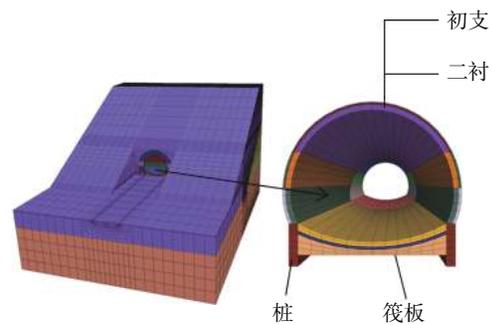


图1 计算模型

Fig.1 Calculation model

计算模型模拟地层的范围为横向两端取3~5倍洞径,约47 m,总宽度为110 m;隧道上方高度以实际覆土厚度为准,最小埋深为3 m,最大埋深35 m;隧道底部30 m(取3~5倍洞高),总高为93 m。计算模型的边界条件为上边界无约束,底部与四周边界全约束。

### 2.2 计算工况

模拟分析拱结构、桩-拱结构及桩-筏-拱结构三种计算工况(表1),加固措施如图2所示。

表1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

工况类型	加固措施
无措施	无加固措施
措施一	桩-拱结构
措施二	桩-筏-拱结构

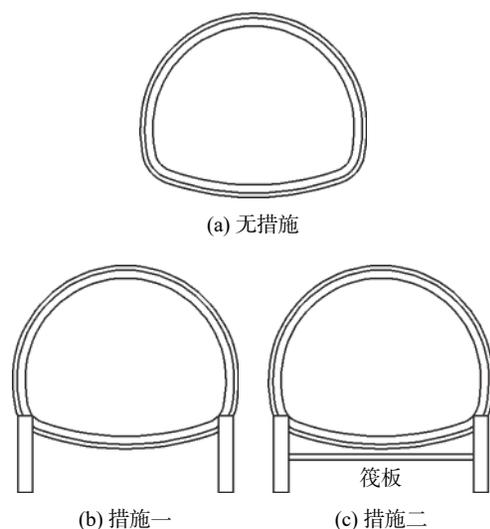


图2 加固措施

Fig.2 Reinforcement measures

### 2.3 计算参数

计算模型的计算参数如表2所示。

表 2 材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the materials

材料属性	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
V级围岩	19	0.4	2.0	24	0.2
IV级围岩	21	0.3	5.0	36	0.5
II级围岩	25	0.2	20	51	1.5
初支	23	0.2	20	—	—
二衬	24	0.2	27	—	—
加固圈	23	0.35	7	—	—
桩	25	0.2	28	—	—
筏板	25	0.2	28	—	—

### 2.4 动力参数

选用自由场边界条件进行模拟,该模型阻尼采用局部阻尼进行计算,阻尼系数经模态分析计算为 0.157 1。以常规动力加载方式,从模型的底部同时将 XYZ 三个方向的地震波向上部结构传递。

地震波选取汶川地震卧龙测站加速度波,按 9 度地震烈度标准化,持续时间为 15 s。滤波和基线校正后的加速度时程曲线如图 3 所示。

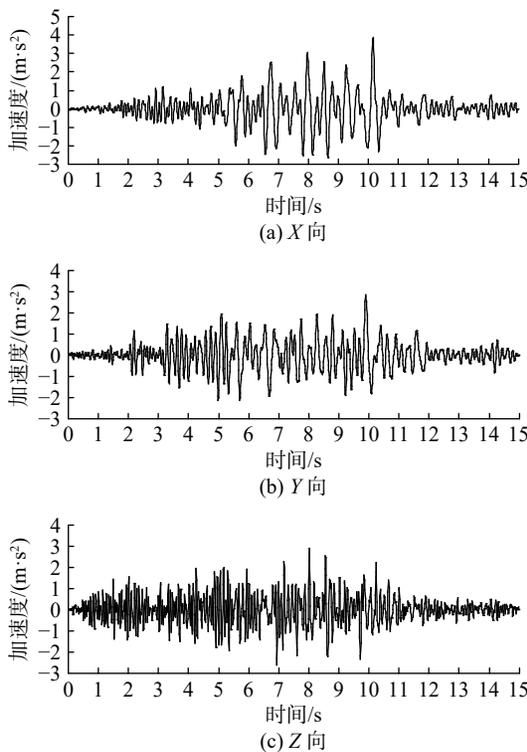


图 3 加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time history curve

### 2.5 测点布置

为了解震时隧道的动态信息,据以判断隧道结构的稳定状态及加固方案的合理性,在隧道进口处 0, 5, 10,

15 m 设置四个监测断面,断面测点布置如图 4 所示。并取二衬结构的拱顶、拱肩、边墙、拱脚以及仰拱等 8 个测点进行监测,采集各测点位置的应力信息,测点布置如图 5 所示。

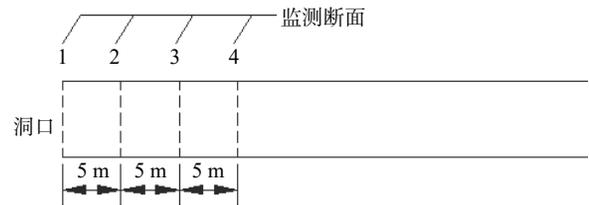


图 4 断面布置

Fig. 4 Arrangement of section

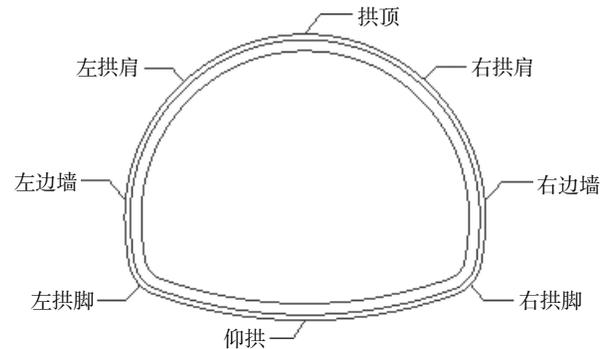


图 5 测点布置

Fig. 5 Arrangement of measuring points

### 3 洞口段地震稳定性评价及加固范围

提取各监测点数值计算数据,由公式(1)~(4)计算无措施的二衬结构安全系数并提取各监测断面的二衬最小安全系数<sup>[9]</sup>(图 6)。

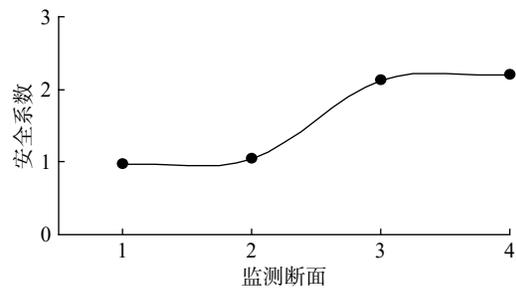


图 6 二衬结构断面最小安全系数图

Fig. 6 The minimum safety factor diagram of the second lining structure section

二衬结构的轴力、弯矩值:

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

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

二衬结构安全系数:

$$KN \leq \varphi \alpha R_s bh \quad (3)$$

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

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

$b$ ——截面宽度, 取 1 m;

$M$ ——弯矩/(N·m);

$N$ ——轴力/N;

$E$ ——弹性模量/MPa;

$h$ ——截面厚度/m;

$\alpha$ ——轴向力偏心影响系数;

$\varphi$ ——构件纵向弯曲系数;

$R_t$ ——混凝土抗拉极限强度/MPa;

$R_s$ ——混凝土抗压极限强度/MPa;

$K$ ——安全系数。

文献 [14] 规定隧道结构抗震最小安全系数需大于 2.4, 为保证洞口段的安全性和稳定性将隧道洞口段 0~25 m 处施作加固措施, 措施布置范围如图 7 所示。

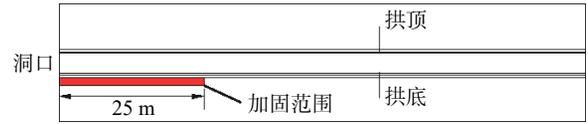


图 7 加固措施范围

Fig. 7 Scope of reinforcement measures

#### 4 桩-拱和桩-筏抗震措施作用效果

##### 4.1 结构位移分析

提取三种工况的隧道及围岩位移云图, 竖向位移云图由图 8, 水平位移云图由图 9 所示。提取二衬各项位移最大值, 并由式 (5) 计算措施一和措施二的抗震效果 (表 3)。

最大位移抗震作用效果:

$$\rho_D = \frac{D_{\text{前}} - D_{\text{后}}}{D_{\text{前}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $D_{\text{后}}$ ——采取加固措施后最大位移;

$D_{\text{前}}$ ——无措施时最大位移;

$\rho_D$ ——最大位移抗震作用效果。

由表 3 可知, 由于地震波对桩产生了较大的横向位移, 加固措施对二衬横向最大位移没有抗震效果; 因为

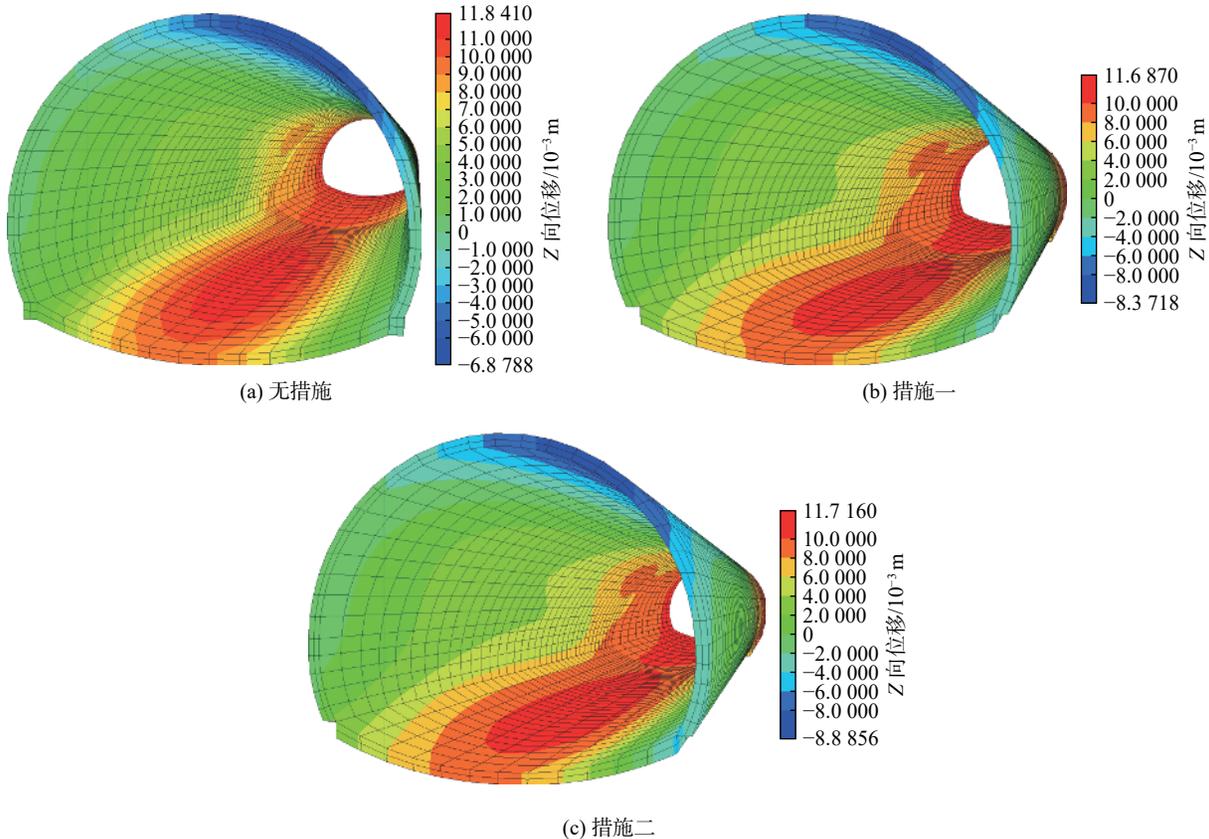


图 8 二衬结构竖向位移云图

Fig. 8 Cloud map of vertical displacement of second lining structure

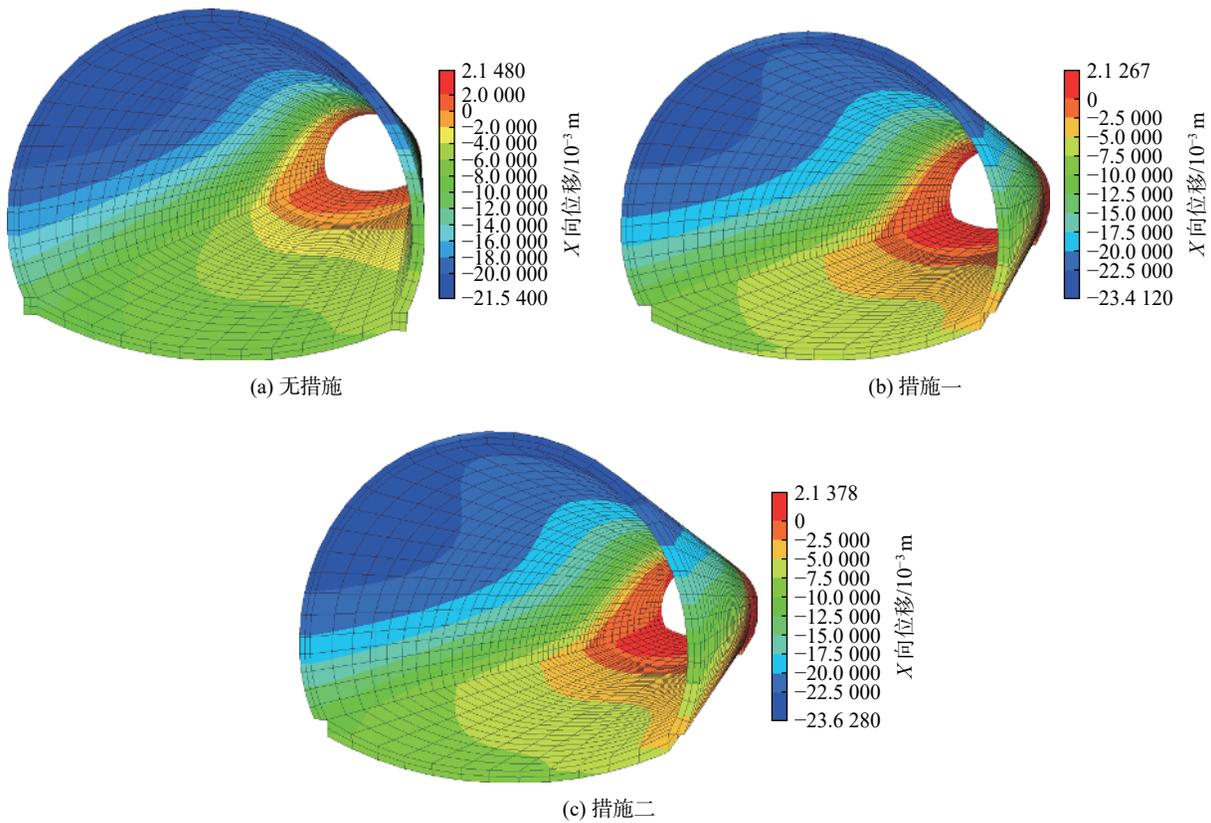


图 9 二衬结构横向位移云图

Fig. 9 Cloud map of lateral displacement of second lining structure

表 3 二衬结构的最大位移及控制效果

Table 3 Maximum displacement and control effect of second liner structure

位移	无措施/mm	措施一/mm	抗震效果/%	措施二/mm	抗震效果/%
竖向	11.84	11.68	1.35	11.71	1.09
横向	21.54	23.41	-8.69	23.62	-9.66

桩能较好的承担竖向荷载其中措施一的二衬竖向最大位移由 11.84 mm 降至 11.68 mm, 措施二的二衬竖向最大位移由 11.84 mm 降至 11.71 mm。措施一和措施二的抗震效果分别为为 1.35% 和 1.09%

#### 4.2 边墙收敛分析

将三种工况下隧道不同监测断面的边墙收敛值绘制于图 10。提取其中最大值并计算采用加固措施后(措施一、二)的抗震效果(表 4)。

由表 4 可知, 无措施的边墙收敛最大值为 49.66 mm; 采用措施一的隧道结构的边墙收敛值为 49.88 mm, 略微增加, 施设桩结构对边墙收敛没有抗震效果, 会加大水平方向的地震波对二衬结构的影响; 采用措施二后, 二衬结构的边墙收敛值明显降低, 措施二的收敛值为 34.52 mm, 抗震效果为 30.49%, 筏板在水平方向上对隧道结构具有较好的约束作用, 减小了水平方向的地震

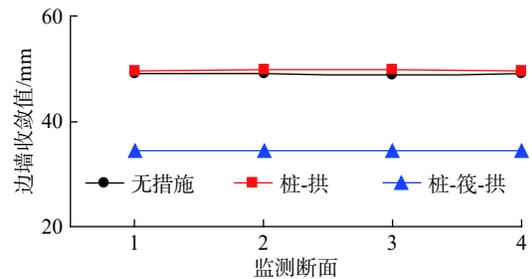


图 10 边墙收敛值

Fig. 10 Side wall convergence value

表 4 最大边墙收敛及抗震效果

Table 4 Maximum side convergence value and anti-seismic effect

工况	边墙收敛最大值/mm	抗震效果/%
无措施	49.66	—
措施一	49.88	-0.44
措施二	34.52	30.49

波对二衬结构的影响。从控制结构边墙收敛方面看, 措施二的抗震效果略优于措施一。

#### 4.3 内力分析

将三种工况下各监测断面各监测点的计算量测数据提取出后依据式 (1)~(4) 计算二衬结构的各项内力

值(轴力、弯矩及安全系数<sup>[11]</sup>),提取各监测断面的二衬最小安全系数及对应轴力、弯矩,由图11所示,并计算措施一和措施二的抗震效果(以无措施为对比)(表5)。

表5 监测断面最小安全系数及抗震效果

Table 5 Monitoring section minimum safety factor and anti-seismic effect

监测断面	无措施	措施一	抗震效果/%	措施二	抗震效果/%
1	0.978	0.992	1.43 (↑)	2.405	145.91 (↑)
2	1.043	1.113	6.71 (↑)	2.542	143.72 (↑)
3	2.116	2.921	38.04 (↑)	2.637	24.62 (↑)
4	2.194	4.64	111.49 (↑)	5.165	135.41 (↑)

由图11及表5可知,措施一和措施二的二衬的各断面最小安全系数均大于无措施,在危险截面断面1和断面2处,措施二的最小安全系数明显大于其余两种工况。断面1处的安全系数提高了145.91%,断面2处的安全系数提高了143.72%。措施二的抗震效果优于措施一。

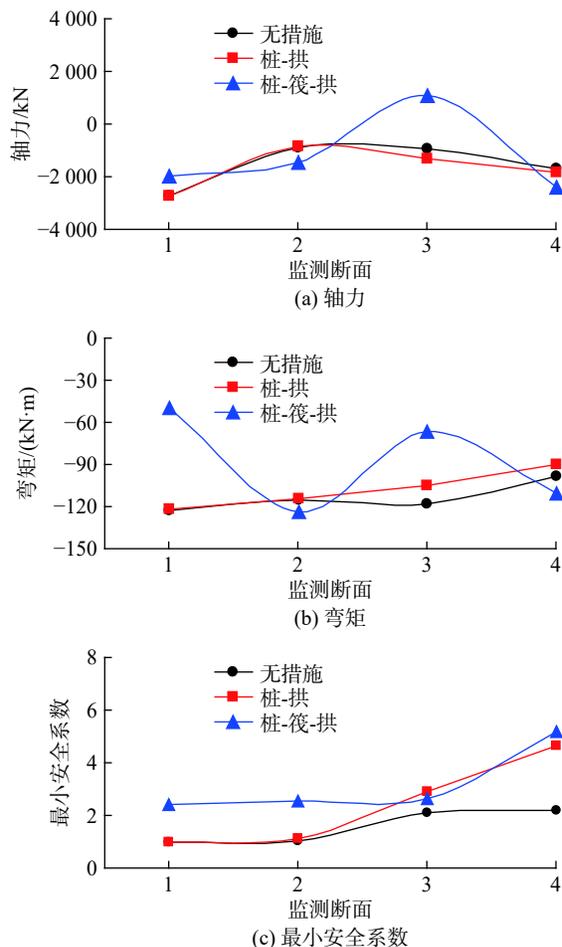


图11 各监测断面内力

Fig. 11 Internal force at each monitoring section

## 5 结论

(1)由竖向位移分析可知,采用桩-拱结构与桩-筏-拱板结构,会增大隧道结构的水平位移,减小隧道的竖向位移。其中水平位移分别增大了8.69%、9.66%,竖向位移分别减小1.35%、1.09%。

(2)由边墙收敛变化可知,桩-拱结构边墙收敛几无变化(增大了0.44%);桩-筏-拱结构能够有效减小边墙收敛,抗震效果为30.49%。

(3)分析危险截面1、2处结构最小安全系数后发现,利用桩-拱结构与桩-筏-拱结构能够增大结构安全系数。桩-拱结构的抗震效果较差,仅分别提高了1.43%和6.71%;桩-筏-拱结构的抗震效果显著,分别提高了145.91%和143.72%。

(4)综合位移及内力分析,在新平隧道洞口段中,桩-筏-拱结构较桩-拱结构的抗震效果更好,为保证隧道洞口段的安全性和稳定性,建议隧道洞口段采用桩-筏-拱结构进行抗震加固。

## 参考文献 (References) :

- [1] 何乐平,罗舒月,胡启军,等.基于理想点-可拓云模型的隧道围岩稳定性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):126-134. [HE Leping, LUO Shuyue, HU Qijun, et al. Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 126-134. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 崔光耀,宋博涵,肖剑,等.隧道洞口浅埋偏压段两种围岩注浆措施的抗震效果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(5):98-104. [CUI Guangyao, SONG Bohan, XIAO Jian, et al. Anti-seismic effect analysis of two kinds of surrounding rock grouting measures in the shallow and eccentric pressure section of tunnel portal [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 98-104. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 皇民,苑俊杰,赵玉如,等.高烈度区双洞隧道洞口段地震响应分析与振动台模型试验[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(1):113-119. [HUANG Min, YUAN Junjie, ZHAO Yuru, et al. Seismic response analysis and shaking table test realization of double tunnel entrance in high intensity zone [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 113-119. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 申玉生,高波,王英学.强震区山岭隧道洞口段结构动力特性分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3131-3136. [SHEN Yusheng, GAO Bo, WANG Yingxue. Structural dynamic properties analysis for portal part of

- mountain tunnel in strong earthquake area [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1): 3131 – 3136. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 5 ] WANG Z Z, JIANG Y J, ZHU C A. Seismic energy response and damage evolution of tunnel lining structures [ J ] . European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 23( 6 ): 758 – 770.
- [ 6 ] 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. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 7 ] 侯森, 陶连金, 李书龙, 等. 山岭隧道洞口段设置减震层的振动台模型试验研究 [ J ] . 世界地震工程, 2014, 30(3): 187 – 195. [ HOU Sen, TAO Lianjin, LI Shulong, et al. Shaking table test for dynamic response in portal section of mountain tunnel with shock absorption layer [ J ] . World Earthquake Engineering, 2014, 30(3): 187 – 195. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 8 ] 耿萍, 曹东杰, 唐金良, 等. 铁路隧道洞口合理抗震设防长度 [ J ] . 西南交通大学学报, 2012, 47(6): 942 – 948. [ GENG Ping, CAO Dongjie, TANG Jinliang, et al. Rational seismic protective length for portal of railway tunnel [ J ] . Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6): 942 – 948. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 9 ] 崔光耀, 王李斌, 王明年, 等. 强震区隧道软岩洞口段刚柔并济抗震措施模型试验研究 [ J ] . 振动工程学报, 2019, 32(1): 29 – 36. [ CUI Guangyao, WANG Libin, WANG Mingnian, et al. Model test study of rigid-flexible combined anti-seismic measures of soft rock tunnel portal part in meizoseismal area [ J ] . Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 29 – 36. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 10 ] 崔光耀, 麻建飞, 肖剑. 地震高烈度区隧道软硬围岩交接段减震层减震效果分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 113 – 120. [ CUI Guangyao, MA Jianfei, XIAO Jian. Effectiveness of damping control technology of shock-absorbing layer of soft and hard surrounding rock junctions of tunnels in high-intensity earthquake zone [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 113 – 120. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 11 ] 曹小平. 强震作用下山岭隧道洞口段地震响应分析及减震措施研究 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2160. [ CAO Xiaoping. Research on dynamic response at portal section of mountain tunnel under intense earthquake and shock absorption measure [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2160. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 12 ] 张乾翼, 赖国泉. 某高速公路隧道洞口错落体变形原因与治理措施分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 25 – 29. [ ZHANG Qianyi, LAI Guoquan. Analysis of deformation and controlling measures of a cut slope at a highway tunnel portal with faulted rock mass [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 25 – 29. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 13 ] 崔光耀, 王明年, 林国进, 等. 汶川地震公路隧道洞口段震害机理及抗震对策研究 [ J ] . 现代隧道技术, 2011, 48(6): 6 – 10. [ CUI Guangyao, WANG Mingnian, LIN Guojin, et al. Study of the earthquake damage mechanism and aseismatic countermeasure of a highway tunnel portal section in the Wenchuan seismic disaster area [ J ] . Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(6): 6 – 10. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 14 ] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017. [ National Railway Administration of the People's Republic of China, Code for design of railway tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. ( in Chinese ) ]