

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.13

隧道洞口浅埋偏压段两种围岩注浆措施的抗震效果分析

崔光耀¹, 宋博涵¹, 肖 剑², 王道远^{3,4}

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 中冶交通建设集团有限公司, 北京 100011;
3. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 4. 河北交通职业技术学院土木工程系, 河北 石家庄 050091)

摘要: 为进一步提高隧道洞口浅埋偏压段的震时安全性, 依托某铁路隧道洞口段工程, 利用有限差分数值计算软件对两种围岩注浆抗震措施的抗震效果进行了研究, 对比分析了围岩采用接触注浆与间隔注浆两种抗震措施对隧道衬砌结构位移以及内力的影响。研究表明: 围岩采用接触注浆抗震措施后, 二衬结构横向及纵向位移分别减小了 86.7%、38.1%, 轴力及弯矩平均减小了 45.12%、64.20%, 最小安全系数平均提高了 61.36%; 围岩采用间隔注浆抗震措施后, 二衬结构横向及纵向位移分别减小了 49.3%、23.8%, 轴力及弯矩平均减小了 39.42%、44.90%, 最小安全系数平均提高了 43.11%; 围岩采用接触注浆抗震措施的抗震效果优于间隔注浆抗震措施。研究成果可为隧道洞口段抗震技术的发展提供参考。

关键词: 隧道工程; 洞口浅埋偏压段; 接触注浆; 间隔注浆; 抗震效果

中图分类号: U452.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)05-0098-07

Anti-seismic effect analysis of two kinds of surrounding rock grouting measures in the shallow and eccentric pressure section of tunnel portal

CUI Guangyao¹, SONG Bohan¹, XIAO Jian², WANG Daoyuan^{3,4}

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. MCC Communication Construction Group Co., Ltd, Beijing 100011, China; 3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 4. Department of Civil Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang, Hebei 050091, China)

Abstract: In order to further improve the safety of the shallow overburden and eccentric pressure section of the tunnel portal during earthquake, based on a railway tunnel portal section project, the seismic effect of two kinds of surrounding rock grouting anti-seismic measures were studied by using the finite difference numerical calculation software, and the influence of two kinds of anti-seismic measures of contact grouting and interval grouting on the displacement and internal force of the tunnel lining structure is compared and analyzed. After the contact grouting is adopted in the surrounding rock, the results show that the lateral and longitudinal displacements of the secondary lining structure are reduced by 86.7% and 38.1% respectively, the axial force

收稿日期: 2020-02-02; 修订日期: 2020-03-19

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

通讯作者: 宋博涵(1997-), 男, 天津静海人, 硕士研究生, 主要从事隧道与地下工程研究。E-mail: sbh19970110@163.com

and bending moment are reduced by 45.12% and 64.20% on average, and the minimum safety factor is increased by 61.36% on average; after interval grouting, the lateral and longitudinal displacements of the secondary lining structure are reduced by 49.3% and 23.8% respectively, the axial force and bending moment are reduced by 39.42% and 44.90% on average, and the minimum safety factor is increased by 43.11% on average. The anti-seismic effect of contact grouting is better than that of interval grouting. The research results can provide reference for the development of anti-seismic technology of tunnel portal section.

Keywords: tunnel portal; shallow buried partial pressure section of portal; contact grouting; interval grouting; anti-seismic effect

0 引言

随着我国西南地区经济建设的发展,交通基础设施建设也进行的如火如荼。但受西南地区地形、地质条件的约束,时常会出现隧道洞口段埋深较浅且为偏压的情况。由于我国西南地区多处于高烈度地震区,且隧道洞口段抗震能力较差^[1-3],有必要对具有浅埋偏压特点的隧道洞口段采取有效的抗震措施。

目前,对于隧道洞口段的抗震技术,国内外有关专家学者进行了部分研究,崔光耀等^[4-5]通过对汶川地震的灾后特点分析,认为隧道洞口段的震害主要是由软硬围岩交界面产生的强制位移以及地震惯性力造成的,并指出采用注浆加固的措施进行防治;吴旭阳等^[6]通过对宋家庄隧道洞口段的研究,同样提出采用注浆加固的措施能够减弱隧道洞口段的地震动力响应,起到抗、减震的效果。对于具有浅埋偏压特点的隧道,国内部分专家学者也对其进行的研究,吴志刚等^[7]对浅埋偏压隧道的力学特性进行了研究,认为浅埋偏压隧道的围岩垂直压力是由洞顶以上土体的重量减去土体两侧的摩擦力得出的;张治国等^[8]围绕浅埋偏压隧道的围岩压力进行分析,证明黏聚力对偏压隧道围岩解析有较大影响;张福聚等^[9]通过对浅埋偏压隧道地震力响应数值分析及研究,指出随着偏压坡度的增加,隧道衬砌对地震作用力的响应变大,安全系数降低;张斌伟等^[10]通过对偏压山岭隧道开展的研究,指出隧道衬砌的抗震性能并不随衬砌厚度的增加而提高,衬砌厚度存在一个合理的限度,超过这个限度,增大衬砌厚度就不能提高抗震效果。综上所述,关于隧道洞口段抗震技术以及浅埋偏压隧道抗震相关理论已有较深入地研究,但对于震区隧道洞口浅埋偏压段的抗震措施研究相对偏少。本文依托某铁路隧道洞口段,对震区隧道洞口浅埋偏压段围岩采取接触注浆及间隔注浆两种抗震措施的抗震效果进行研究。研究成果可为类似工程的抗震设防设计提供参考。

1 某铁路隧道洞口段概况

1.1 地质条件

该铁路隧道地处青、藏、滇印尼巨型“歹”字型构造西支中段与三江构造带中南段及南岭纬度向构造带西延部分的复合部位。拟建隧道区范围内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)、喜山期黑云母花岗岩(γ_{s2}),均为V级围岩,隧道洞口段偏压倾角 45° 。

1.2 衬砌结构设计

该铁路隧道采用复合式衬砌,曲墙带仰拱结构型式。初支采用C20素混凝土,厚度为25 cm;二次衬砌采用钢筋混凝土结构,厚度为45 cm。

2 研究情况

2.1 计算模型

依托该铁路隧道洞口段为研究背景,建立计算模型,隧道洞口段长度20 m,洞宽13.5 m,隧道洞口至右侧边界30 m,至左侧边界40 m,埋深至上斜边界垂直距离12.8 m,隧道洞口段偏压倾角 45° ,隧道底部基岩厚15 m。计算模型的边界条件为:四周以及下边界全约束,上边界无约束。计算模型如图1所示。

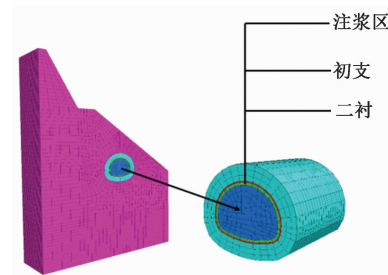


图1 计算模型

Fig.1 Computational model

2.2 计算参数

根据实际地勘资料,模型的计算参数见表1所示。

表 1 计算模型参数

Table 1 Calculate model parameters

参数	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa
V级围岩	20	2.0	0.4	25	0.2
II级围岩	25	20	0.2	50	1.5
初支	22	28	0.2	—	—
二衬	25	28	0.2	—	—
注浆区	23	7	0.35	—	—

2.3 计算工况

三种计算工况如图 2 所示。工况 1 为无注浆措施;工况 2 为接触注浆;工况 3 为间隔注浆。计算工况注浆参数,见表 2 所示。

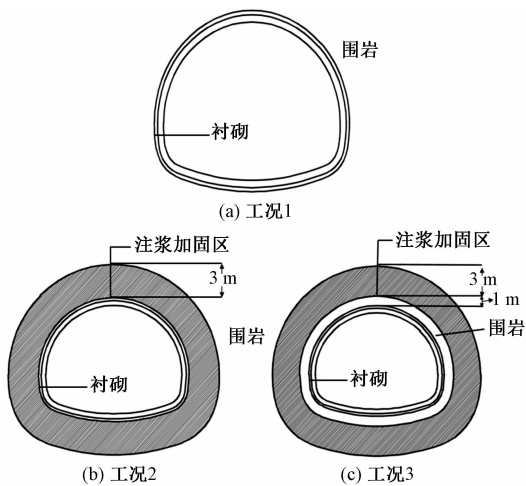


图 2 计算工况图

Fig. 2 Calculation condition

表 2 计算工况表

Table 2 Calculation condition

工况	注浆厚度/m	注浆间隔/m
1	0	0
2	3	0
3	3	1

2.4 动力参数

采用自由场边界条件对模型进行模拟计算分析,局部阻尼作为计算参数,局部阻尼系数为 0.157 1。采用常规动力加载方式,将地震波(汶川地震卧龙测站所测的加速度波,按 7 度地震烈度标准化,持续时间为 15 s)^[11]按 X、Y、Z 三个方向,同时从计算模型的底部向上部结构传递。利用滤波软件进行滤波和基线校正,经过处理的地震波加速度时程曲线如图 3 所示(以 Z 向为例)。

2.5 测点布置

各工况的监测点的位置位于隧道洞口段中部,提取二衬结构的拱顶、左拱肩、左边墙、左拱脚、右拱肩、

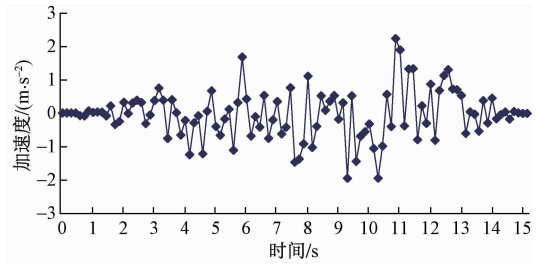


图 3 Z 方向加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time history curve in Z direction

右边墙、右拱脚、仰拱等 8 个测点,对其 8 个测点进行检测,测点布置如图 4 所示。

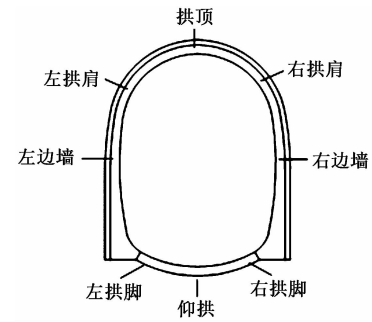


图 4 测点布置

Fig. 4 Layout of measuring points

3 抗震效果分析

3.1 结构位移分析

分别提取隧道洞口段结构各工况的位移云图,如图 5~图 7 所示。提取二衬结构的位移最大值,见表 3 所示。

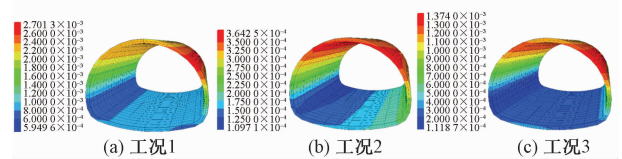


图 5 二衬结构横向位移云图

Fig. 5 Cloud chart of lateral displacement of secondary lining structure

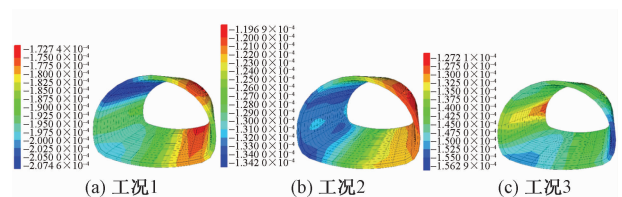


图 6 二衬结构纵向位移云图

Fig. 6 Cloud chart of longitudinal displacement of secondary lining structure

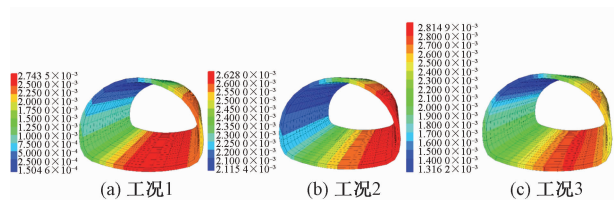


图 7 二衬结构竖向位移云图

Fig. 7 Cloud chart of vertical displacement of secondary lining structure

表 3 横向、纵向及竖向最大位移值

Table 3 Maximum horizontal, vertical and vertical displacement

工况	横向最大位移/mm	纵向最大位移/mm	竖向最大位移/mm
1	2.70	0.21	2.74
2	0.36	0.13	2.63
3	1.37	0.16	2.81

根据表 3 数据,计算各工况的抗震效果(以工况 1 为对比),计算结果见表 4。

表 4 横向、纵向及竖向位移抗震效果

Table 4 Anti-seismic effect of horizontal, vertical and vertical displacement

工况	横向位移抗震效果/%	纵向位移抗震效果/%	竖向位移抗震效果/%
1	—	—	—
2	86.7	38.1	4.01
3	49.3	23.8	-2.55

由图 5 ~ 图 7 及表 3 ~ 表 4 可知,围岩采用接触注浆抗震措施后,二衬结构三个方向的最大位移值均有下降,横向位移下降 2.34 mm,抗震效果提高了 86.7%;纵向位移下降 0.08 mm,抗震效果提高了 38.1%;竖向位移下降 0.11 mm,抗震效果提高了 4.01%。采用间隔注浆抗震措施后,横向位移下降 1.33 mm,抗震效果提高了 49.3%;纵向位移下降 0.05 mm,抗震效果提高了 23.8%;竖向位移有小幅增加,但数值上相差甚小,考虑在其误差范围内,抗震效果降低了 2.55%。综上所述,采用接触注浆以及间隔注浆的抗震措施后,各向位移得到控制,对比位移控制的抗震效果,围岩采用接触注浆抗震措施的抗震效果优于间隔注浆抗震措施。

3.2 内力分析

提取各监测点结构内外侧单元应变纪录(hist)时程曲线(图 8,以工况 1 拱顶处测点为例),根据材料力学由公式(1)、(2)计算各测点的轴力及弯矩时程曲线。根据规范^[12],由公式(3)、(4)计算各监测点的安

全系数时程曲线。工况 1 拱顶测点处内力时程曲线如图 9 所示。

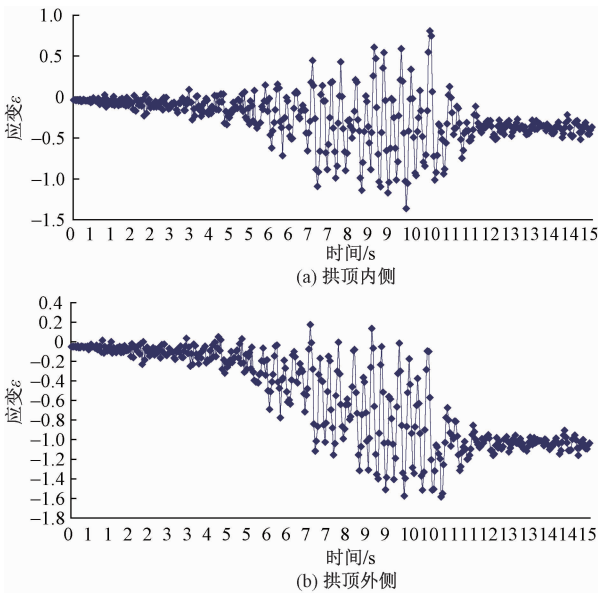


图 8 拱顶测点 X 向内外侧应变记录时程曲线

Fig. 8 Time history curve of X-direction internal and external strain recording at measuring point of arch crown

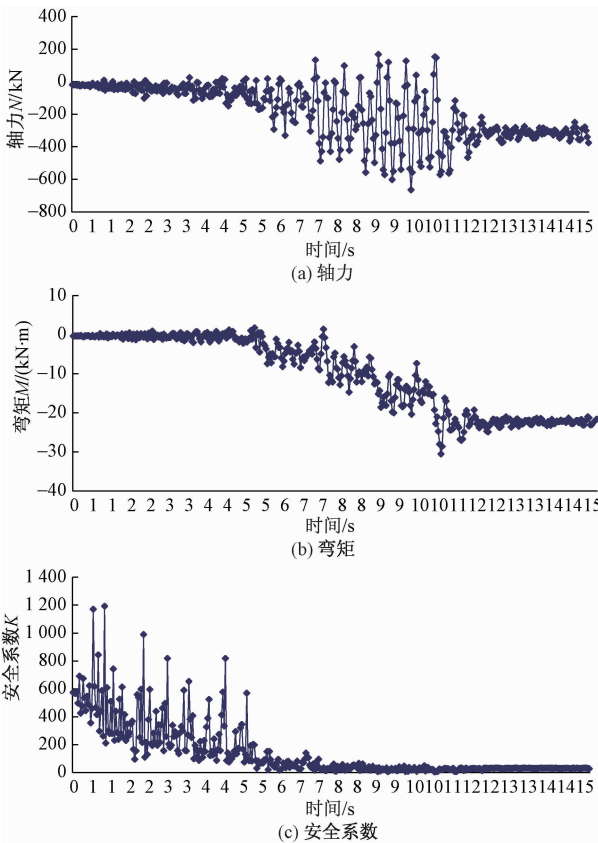


图 9 拱顶处内力时程曲线

Fig. 9 Time history curve of internal force at vault

二衬结构的轴力、弯矩值:

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

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

式中: N ——轴力;

M ——弯矩;

b ——截面宽度,取 1 m;

h ——截面厚度,取 45 cm;

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

E ——弹性模量。

二衬结构安全系数:

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

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

式中: K ——安全系数;

N ——轴力;

φ ——构件纵向弯曲系数;

α ——轴向力偏心影响系数;

R_a ——混凝土抗压极限强度;

b ——截面宽度,取 1 m;

h ——截面厚度,取 45 cm;

R_1 ——混凝土抗拉极限强度。

3.2.1 轴力、弯矩分析

根据各工况各监测点的轴力及弯矩时程曲线,提取各测点轴力及弯矩绝对值的最大值(图 10)。并计算围岩注浆工况各监测点的抗震效果(以工况 1 为对比),见表 5~表 6。

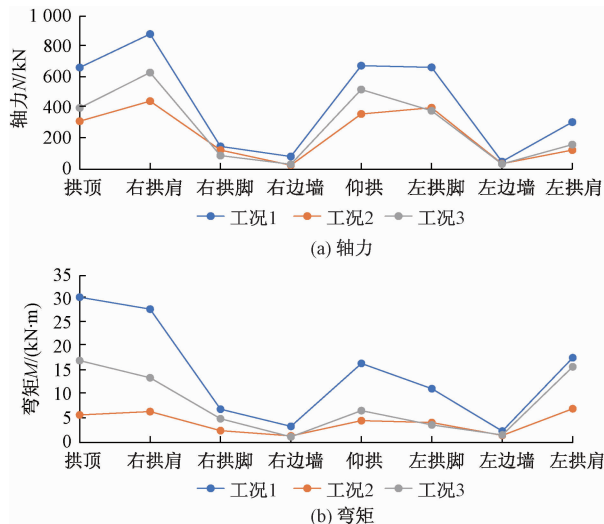


图 10 各工况下各监测点内力对比

Fig.10 Comparison of internal forces of monitoring points under different working conditions

表 5 二衬各监测点结构轴力及抗震效果

Table 5 Axial force and aseismic effect of each monitoring point of the second lining

测点位置	工况 1	工况 2	抗震效果/%	工况 3	抗震效果/%
拱顶	665	314	52.78	401	39.70
右拱肩	884	445	49.66	632	28.51
右拱脚	149	125	16.11	89	40.27
右边墙	83	26	68.67	32	61.45
仰拱	677	361	46.68	521	23.04
左拱脚	666	402	39.64	382	42.64
左边墙	50	36	28.00	34	32.00
左拱肩	308	125	59.42	161	47.73

表 6 二衬各监测点结构弯矩及抗震效果

Table 6 Bending moment and aseismic effect of each monitoring point of the second lining

测点位置	工况 1	工况 2	抗震效果/%	工况 3	抗震效果/%
拱顶	30.5	5.8	80.98	17.2	43.61
右拱肩	28	6.5	76.79	13.6	51.43
右拱脚	7	2.5	64.29	5	28.57
右边墙	3.4	1.4	58.82	1.2	64.71
仰拱	16.6	4.6	72.29	6.7	59.64
左拱脚	11.3	4.2	62.83	3.7	67.26
左边墙	2.4	1.5	37.50	1.6	33.33
左拱肩	17.8	7.1	60.11	15.9	10.67

由图 10 及表 5~表 6 可知,围岩采用接触注浆及间隔注浆的抗震措施后,二衬结构的最大轴力和弯矩均小于无措施下的轴力和弯矩,其抗震效果可观,均达到了较好的抗震效果。从总体来看围岩采用接触注浆措施后,结构的轴力和弯矩普遍小于采用间隔注浆措施后的轴力和弯矩。对比两工况的抗震效果,从二衬结构的轴力来看,采用接触注浆措施后的平均抗震效果提高了 45.12%,采用间隔注浆措施后的平均抗震效果提高了 39.42%;从二衬结构的弯矩来看,采用接触注浆措施后的平均抗震效果提高了 64.20%,采用间隔注浆措施后的平均抗震效果提高了 44.90%。综上所述,围岩采用接触注浆以及间隔注浆措施后,二衬结构的轴力和弯矩均减小,且采用接触注浆抗震措施的抗震效果优于间隔注浆抗震措施。

3.2.2 安全系数分析

根据各工况各监测点安全系数时程曲线,提取各测点安全系数最小值(图 11)。并计算围岩注浆工况各监测点的抗震效果(以工况 1 为对比)(表 7)。

由图 11 及表 7 可知,围岩采用接触注浆以及间隔注浆的抗震措施后,安全系数均有明显的提高,两者达到了抗震的效果。从整体来看,围岩采用接触注浆措施后的二衬结构安全系数普遍大于采用间隔注浆措施后的安全系数。对比两工况的抗震效果,采用接触注

浆措施后的平均抗震效果提高了 61.36% ;采用间隔注浆措施后的平均抗震效果提高了 43.11%。综上可知,围岩采用接触注浆抗震措施的抗震效果优于间隔注浆抗震措施。

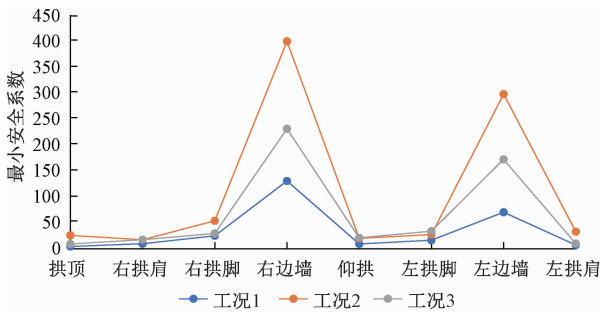


图 11 各监测点最小安全系数
Fig. 11 Minimum safety factor of each monitoring point

表 7 二衬各监测点安全系数及抗震效果
Table 7 Safety factor and aseismic effect of each monitoring point of secondary lining

测点位置	工况 1	工况 2	抗震效果/%	工况 3	抗震效果/%
拱顶	4.79	26.31	81.80	9.67	50.46
右拱肩	10.19	17.81	42.79	17.96	43.29
右拱脚	25.40	54.40	53.31	29.95	15.20
右边墙	131.4	401.01	67.23	232.14	43.39
仰拱	9.71	20.44	52.50	21.60	55.05
左拱脚	16.90	27.96	39.57	34.32	50.77
左边墙	71.02	299.07	76.25	172.99	58.95
左拱肩	7.56	7.1	60.11	15.9	10.67

4 结论

(1)由震时结构位移变化可知,围岩采用接触注浆及间隔注浆抗震措施后,可有效减小二衬结构的横向、纵向及竖向位移。根据横向位移变化分析,其抗震效果分别提高了 86.7%、49.3%,根据纵向位移变化分析,其抗震效果分别提高了 38.1%、23.8%,根据竖向位移变化分析,围岩采用接触注浆后其抗震效果提高了 4.01%、围岩采用间隔注浆后其抗震效果降低了 2.55%。

(2)由震时内力变化可知,围岩采用接触注浆以及间隔注浆等抗震措施后可减小二衬结构的轴力和弯矩。其中采用接触注浆措施后,平均抗震效果分别提高了 45.12%、64.20%;采用间隔注浆措施后。平均抗震效果分别提高了 39.42%、44.90%。

(3)由结构安全系数分析可知,围岩采用接触注浆及间隔注浆抗震措施后,可有效提高结构的安全系

数。采用接触注浆抗震措施后,平均抗震效果提高了 61.36%,采用间隔注浆抗震措施后,平均抗震效果提高了 43.11%。

(4)综上可知,对于具有偏压浅埋特点的隧道洞口,采取围岩注浆抗震措施后,抗震性能均有所提高。根据结构位移、结构内力及安全系数等指标的综合分析,围岩采用接触注浆抗震措施的抗震效果优于间隔注浆抗震措施。

参考文献:

[1] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6):742 - 750. [LI T B. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6):742 - 750. (in Chinese)]

[2] 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 Z J, CHEN T L, CUI G Y, 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)]

[3] 许劲松. 强震作用下山岭隧道洞口段典型震害的机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [XU J S. Study on failure mechanism of typical seismic damage at mountain tunnel portal section under strong earthquake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)]

[4] 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 G Y, WANG M N, LIN G J, 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)]

[5] 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 G Y, WANG M N, YU L, 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. (in Chinese)]
- [6] 吴旭阳,梁庆国. 宋家山隧道洞口段注浆加固围岩的抗震分析[J]. 铁道建筑, 2015 (2): 73 - 75. [WU X Y, LIANG Q G. Seismic analysis on surrounding rock reinforced by grouting in portal section of Song Jiashan tunnel [J]. Railway Engineering, 2015 (2): 73 - 75. (in Chinese)]
- [7] 吴志刚,李定越. 论浅埋偏压隧道围岩垂直压力的分布规律[J]. 工程建设与设计, 2019 (18): 82 - 83. [WU Z G, LI D Y. Discussion on the distribution law of vertical pressure of surrounding rock of shallow buried biased tunnel [J]. Construction & Design for Engineering, 2019 (18): 82 - 83. (in Chinese)]
- [8] 张治国,姜蕴娟,刘明,等. 考虑黏聚力及地震力的浅埋偏压隧道围岩压力[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47 (4): 780 - 790. [ZHANG Z G, JIANG Y J, LIU M, et al. Rock pressure of shallow unsymmetrical-loading tunnels considering the cohesion and earthquake action [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47 (4): 780 - 790. (in Chinese)]
- [9] 张福聚. 公路浅埋偏压隧道地震力响应数值分析及研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015. [ZHANG F J. Numerical analysis and research on seismic response of shallow road tunnel under unsymmetrical pressure [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)]
- [10] 张斌伟,刘万锋. 强震区浅埋偏压山岭隧道抗震数值分析[J]. 陇东学院学报, 2014, 25 (3): 39 - 45. [ZHANG B W, LIU W F. Numerical analysis of the anti-seism of shallow and bias tunnel in strong earthquake regions [J]. Journal of Longdong University, 2014, 25 (3): 39 - 45. (in Chinese)]
- [11] 崔光耀,左奎现,王明年,等. 强震区高岩温隧道阻热抗震技术研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34 (9): 83 - 87. [CUI G Y, ZUO K X, WANG M N, et al. Research on the heat resistant and anti-seismic technology of high rock temperature tunnel in meizoseismal area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34 (9): 83 - 87. (in Chinese)]
- [12] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2005 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. [Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design on tunnel of railway: TB 10003—2005 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese)]