

鲁得文, 梁庆国, 熊玉莲. 山岭隧道洞口段围岩注浆厚度对抗震效果的影响分析[J]. 华南地震, 2021, 41(1): 132–136. [LU Dewen, LIANG Qingguo, XIONG Yulian. Analysis of the Influence of Grouting Thickness of Surrounding Rock at the Entrance of Mountain Tunnel on Anti-Seismic Effect[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 132–136]

# 山岭隧道洞口段围岩注浆厚度对抗震效果的影响分析

鲁得文<sup>1</sup>, 梁庆国<sup>2</sup>, 熊玉莲<sup>2,3</sup>

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 兰州交通大学, 土木工程学院 兰州 730070;  
3. 中国能源建设集团陕西省电力设计院有限公司, 西安 710075)

**摘要:** 以山岭隧道洞口段为研究对象, 通过有限元数值模拟验证在不同注浆加固厚度下的加固效果, 结果表明: 注浆加固措施对拱顶沉降和最大加速度有一定的影响, 随着注浆加固厚度的增大, 隧道各个部位的拱顶沉降和最大加速度逐渐减小, 最大位移降幅发生在拱顶, 最小发生在仰拱; 隧道左侧最大主应力整体大于右侧, 最大值部位为左拱脚处, 这与整个隧道洞口左侧处于浅埋偏压有关; 注浆加固围岩能够减小隧道的应力, 入射 10%超越概率地震波时, 除个别监测点外其余部位都有不同程度的降低, 左隧道拱顶处降低幅度最大, 右隧道为右拱腰处。入射 2%超越概率地震波时, 双侧隧道各部位都有一定程度的降低, 左隧道降低幅度平均值约为 15.5%, 右隧道约为 11.3%; 虽然注浆加固措施对山岭隧道洞口段有一定的作用, 但降低幅度有限, 对于强震区应采用联合加固措施, 以保证隧道的稳定性。

**关键词:** 山岭隧道; 洞口段; 注浆加固; 数值模拟

**中图分类号:** U43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2021) 01-00132-05

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2021.01.18

## Analysis of the Influence of Grouting Thickness of Surrounding Rock at the Entrance of Mountain Tunnel on Anti-Seismic Effect

LU Dewen<sup>1</sup>, LIANG Qingguo<sup>2</sup>, XIONG Yulian<sup>2,3</sup>

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. China Energy Engineering Group Shaanxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Taking the entrance section of mountain tunnel as the research object, the reinforcement effect under different grouting reinforcement thickness is verified by finite element numerical simulation. The test results indicated: grouting reinforcement measures have a certain impact on the peak vault settlement and maximum acceleration. With the increase of grouting reinforcement thickness, the vault settlement and maximum acceleration of each part of the tunnel gradually decrease, the maximum displacement reduction occurs in the

**收稿日期:** 2020-05-10

**基金项目:** 杨凌职业技术学院自然科学基金项目(ZK20-32; A2018023)

**作者简介:** 鲁得文(1985-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事工程管理和边坡及岩土工程方面的教学与研究工作。

**E-mail:** ludewen2010@126.com

arch crown, and the minimum occurs in the inverted arch. The peak value of the main stress on the left side of the tunnel is larger than that on the right side, and the maximum value is at the left arch foot, which is related to the shallow buried bias pressure on the left side of the tunnel entrance. Grouting reinforcement of surrounding rock can reduce the stress of the tunnel. When the incidence rate of 10% exceeds the probability of seismic wave, all the other parts have different degrees of reduction except some monitoring points. The reduction range is the largest at the left tunnel vault and the right tunnel is at the right arch waist. When the incident seismic wave of 2% exceeds the probability, each part of the tunnel on both sides has a certain reduction, the average reduction amplitude of the left tunnel is about 15.5%, and that of the right tunnel is about 11.3%. Although grouting reinforcement measures have a certain effect on the entrance section of mountain tunnel, the reduction range is limited. For the strong earthquake area, the joint reinforcement measures should be adopted to ensure the stability of the tunnel.

**Keywords:** Mountain tunnel; The entrance section; Grouting reinforcement; Numerical simulation

中国是一个多山国家,山地面积占全国总面积的 1/3,许多交通基础设施的建设都要穿越山岭地区,如宝兰客运专线、兰渝铁路,成兰铁路、武罐高速公路等。山区地震断裂带十分发育,地震活动频率高、强度大<sup>[1]</sup>。山岭隧道一般埋深较深,许多学者认为本身抗震能力较强,但随着地震的频繁发生,尤其是汶川大地震后,许多山岭隧道遭到严重破坏,通过震害调查发现隧道破坏主要集中在隧道洞口段<sup>[2-4]</sup>。

近年来,关于隧道洞口段抗震已做了大量的研究,发表了许多关于强震作用下隧道洞口段抗震及减震的研究论文<sup>[5-8]</sup>,具有代表性的有崔光耀<sup>[9-11]</sup>等以白云顶隧道进口段为依托,通过大型振动台模型试验研究了隧道的地震动峰值加速度、结构内力等,结果表明,采取刚柔相济抗减震措施在抵抗地震震动、消减强制位移方面作用显著,减震效果明显。高峰<sup>[12]</sup>等通过有限元法研究了山岭隧道洞口段的两种减震措施,研究发现在软弱围岩中减震层和加固层的设置能够使隧道的衬砌位移、应力减小,起到保护隧道衬砌的作用。耿萍<sup>[13]</sup>等采

用数值模拟方法研究了隧道洞口段衬砌的合理设防长度,结构表明 3 倍隧道跨度为合理的抗震设防长度。本文在现有研究的基础上以山岭隧道洞口段为研究对象,通过有限元数值模拟验证在不同注浆加固厚度下的减震效果,研究结果可以进一步丰富隧道洞口段的抗震措施,对类似工程有一定的借鉴作用。

## 1 数值模型参数选取

本文采用 MIDAS-GTS 有限元软件,初衬采用实体单元模拟,弹塑性本构,二次衬砌采用板单元模拟,计算模型的范围为: $x$  方向 80 m、 $y$  方向 90 m、 $z$  方向 120 m,左、右隧道出口段相距 40 m,计算模型如图 1 所示。根据隧道所处地区环境以及相似文献和规范要求<sup>[14-17]</sup>,确定出围岩和衬砌的力学参数,如表 1 所示。地震动输入采用超越概率为 10%与 2%的人工地震波,入射方向为水平向( $x$  向)。注浆加固范围分别选取 1.5 m、3 m 及 4.5 m,隧道监测特征点分布如图 2 所示。

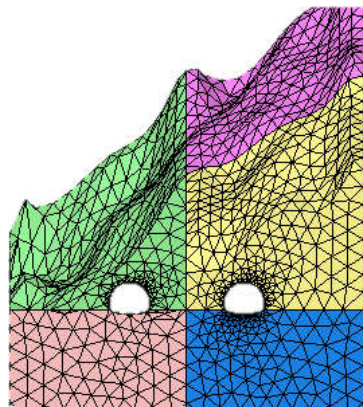


图1 计算模型图

Fig.1 Computational model diagram

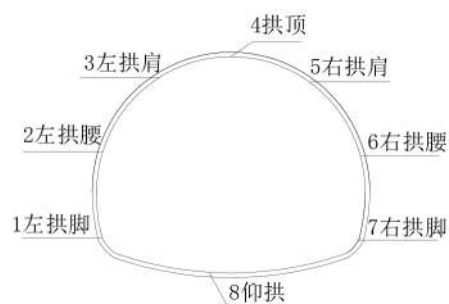


图2 隧道监测点分布

Fig.2 Distribution of tunnel monitoring points

表 1 计算物理力学参数

Table 1 Calculation of physical and mechanical parameters

材料类型	容重 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力 $c/\text{MPa}$	剪切模量 $G/\text{MPa}$
围岩	18.5	1 500	0.40	24	0.18	536
加固区围岩	20	2 000	0.35	27	0.2	741
初衬混凝土	22	23 000	0.20	55	4.0	9 583
二衬混凝土	23	29 500	0.20	60	5.0	12 292

2 不同注浆加固厚度的抗震性能比较

2.1 最大位移对比分析

由于左侧隧道呈现浅埋偏压的特征，故只选取左侧隧道为研究对象。图 3 为不同超越概率地震波、不同注浆加固厚度下的拱顶沉降最大位移的变化曲线。可以看出，不同超越概率地震波下隧道拱顶处的位移最大，10%超越概率地震波最大值为 0.897 cm，2%为 1.789 cm。注浆加固对最大位移有一定的影响，随着注浆加固范围的增大，隧道各个部位的最大位移逐渐减小。注浆加固范围为 1.5 m 时，最大位移降幅 10%超越概率地震波为 1.25%~3.47%，2%为 2.47%~3.68%，注浆加固范围为 3 m 时，最大位移降幅 10%超越概率地震波为 2.88%~4.88%，2%为 3.81%~5.01%，注浆加

固范围为 4.5 m 时，最大位移降幅 10%超越概率地震波为 5.47%~7.01%，2%为 6.17%~7.27%，注浆加固措施对 2%超越概率地震波效果更好。最大位移降幅发生在拱顶部位，最小发生在仰拱位置。

2.2 最大加速度对比分析

图 4 为左侧隧道不同超越概率地震波下的最大加速度变化曲线。可以看出，其变化规律与最大位移的变化规律基本一致，注浆加固对最大加速度有一定影响，但影响有限，随着注浆加固厚度的增大，各个部位的最大加速度逐渐减小，10%超越概率地震波降幅最大值发生在左拱脚，约为 8.9%，2%超越概率地震波降幅最大值发生在拱顶，约为 11%左右。

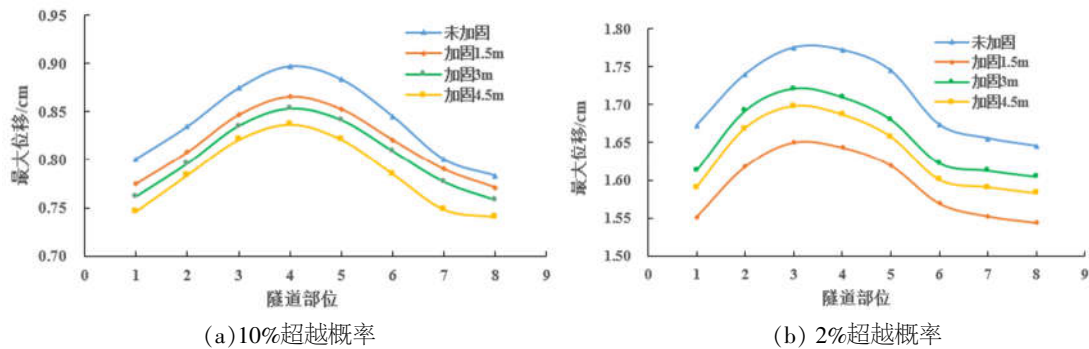


图 3 入射不同超越概率地震波隧道的最大位移变化曲线

Fig.3 The maximum displacement curve of the tunnel with incident seismic wave with different transpiration probabilities

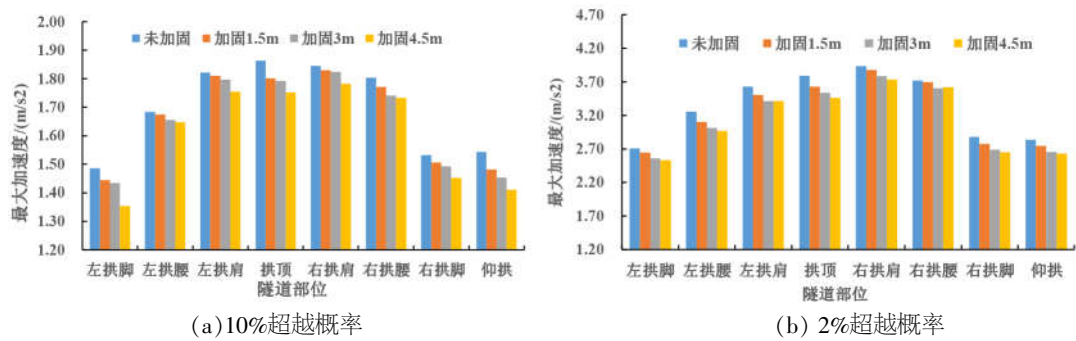


图 4 入射不同超越概率地震波隧道的最大加速度变化规律

Fig.4 The maximum acceleration variation law of the tunnel with incident seismic wave with different transpiration probabilities

### 2.3 最大主应力对比分析

图5、图6为不同注浆加固厚度下双侧隧道各控制点的最大主应力变化规律,表2、表3为不同注浆加固厚度下的加固效果。可以看出,除个别监测点外,注浆加固围岩能够减小隧道的应力。2%超越概率地震波的最大主应力大于10%超越概率地震波,大约为2倍左右。隧道左侧最大主应力整体大于右侧,最大值部位为左拱脚处,最小值为仰拱处,这主要是由于整个隧道洞口左侧处于浅埋偏压,在地震作用下更容易发生破坏,尤其是拱脚处,受地震的影响最大。

入射10%超越概率地震波时,对于左隧道,注浆加固围岩除左拱脚最大主应力增大了5.7%以外,其余部位都有不同程度的降低,其中拱顶处降低幅度最大,达到33.7%,右拱脚降低幅度最小,只有2.5%,对于右隧道,除右拱肩和拱顶处最大主应力有所增大,分别为2.1%、9.5%,其余部位都发生了降低,但相对于左隧道降低幅度较

小,最大值只有11.4%。

入射2%超越概率地震波时,双侧隧道各部位最大主应力都有一定程度的降低,整体降低幅度比10%超越概率地震波要大,说明注浆加固效果在2%超越概率地震波时更好,左侧隧道降低幅度最大的部位为右拱肩和右拱腰,约为22.3%,平均值约为15.5%,右侧隧道降低幅度最大的部位为左拱腰,约为19.9%,平均值约为11.3%。

### 3 结论与讨论

通过有限元数值模拟验证注浆加固围岩对山岭隧道洞口段的加固效果,得出的主要结论有:

(1)注浆加固范围为1.5 m、3 m、4.5 m时,注浆加固对拱顶沉降最大位移和最大加速度有一定的影响,随着注浆加固厚度的增大,隧道各个部位的最大位移和最大加速度逐渐减小,最大位移降幅发生在拱顶,最小发生在仰拱。最大加速度10%超越概率地震波降幅最大值发生在左拱脚,2%超越概率地震波发生在拱顶。

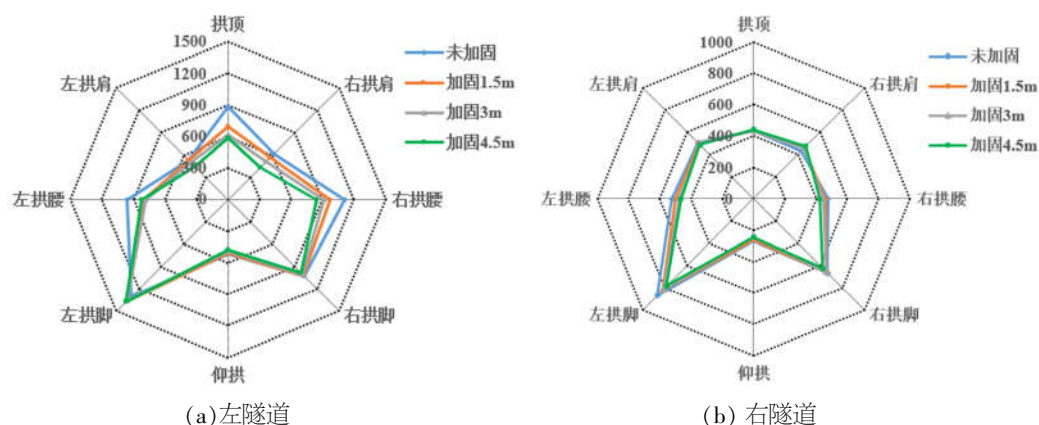


图5 入射10%超越概率地震波最大主应力变化规律(单位:kPa)

Fig.5 Variation law of the maximum principal stress of the incident 10% exceedance probability seismic wave(unit:kPa)

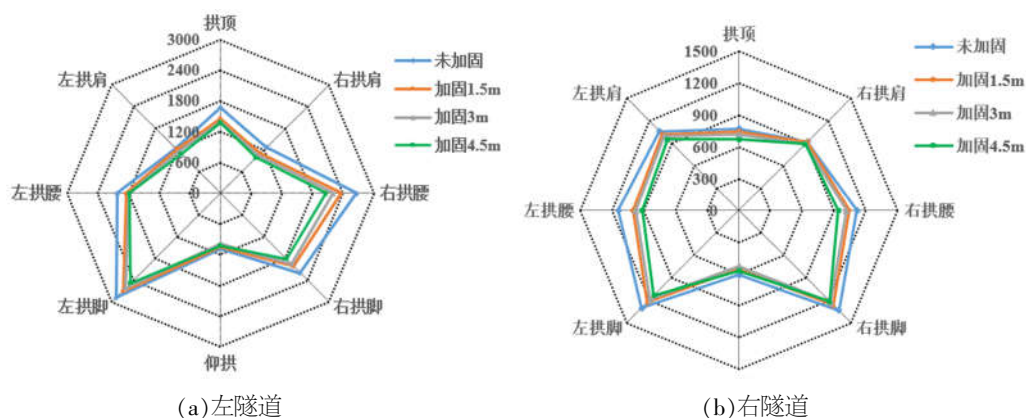


图6 入射2%超越概率地震波最大主应力变化规律(单位:kPa)

Fig.6 Variation law of the maximum principal stress of the incident 2% exceedance probability seismic wave (unit:kPa)

表 2 入射 10 %超越概率地震波最大主应力加固效果

Table 2 Reinforcement effect of the maximum principal stress of the incident 10% exceedance probability seismic wave

隧道位置	工况	加固效果/%							
		拱顶	右拱肩	右拱腰	右拱脚	仰拱	左拱脚	左拱腰	左拱肩
左隧道	加固 1.5m	-21.0	-8.4	-12.0	-1.1	-1.6	5.6	-15.9	-0.3
	加固 3m	-30.5	-17.3	-17.5	-2.5	-5.6	4.1	-18.0	-6.3
	加固 4.5m	-33.7	-29.3	-24.2	-4.4	-7.0	5.7	-13.8	-16.9
右隧道	加固 1.5m	0.2%	5.9%	-2.8%	-1.2%	-1.9%	-5.3%	-4.3%	-1.2%
	加固 3m	0.9%	5.9%	-6.2%	-1.8%	-8.4%	-6.4%	-8.3%	-2.2%
	加固 4.5m	2.1%	9.5%	-11.4%	-6.4%	-8.7%	-9.6%	-10.8%	-3.7%

表 3 入射 2%超越概率地震波最大主应力加固效果

Table 3 Reinforcement effect of the maximum principal stress of the incident 2% exceedance probability seismic wave

隧道位置	工况	加固效果/%							
		拱顶	右拱肩	右拱腰	右拱脚	仰拱	左拱脚	左拱腰	左拱肩
左隧道	加固 1.5m	-13.0%	-12.2%	-11.3%	-8.0%	-3.2%	5.9%	8.8%	2.4%
	加固 3m	-16.6%	-17.0%	-16.7%	-10.8%	-8.9%	8.8%	11.8%	7.3%
	加固 4.5m	-17.5%	-22.3%	-22.3%	-17.3%	-5.7%	13.7%	12.5%	13.0%
右隧道	加固 1.5m	-3.2%	-0.1%	-6.7%	-5.5%	-9.4%	-5.7%	-12.3%	-3.5%
	加固 3m	-6.5%	-2.9%	-8.9%	-8.0%	-13.6%	-8.6%	-14.6%	-5.9%
	加固 4.5m	-13.2%	-3.6%	-15.7%	-9.2%	-6.5%	-12.6%	-19.9%	-9.8%

(2)2%超越概率地震波的最大主应力大于 10%超越概率地震波, 大约为 2 倍左右, 隧道左侧最大主应力整体大于右侧, 最大值部位为左拱脚处, 最小值为仰拱处, 这与整个隧道洞口左侧处于浅埋偏压有关。

(3)注浆加固围岩能够减小隧道的应力, 入射 10%超越概率地震波时, 左隧道除左拱脚外其余部位都有不同程度的降低, 其中拱顶处降低幅度最大, 右隧道除右拱肩和拱顶处其余部位都发生了降低, 但相对于左隧道降低幅度很小。入射 2%超越概率地震波时, 双侧隧道各部位最大主应力都有一定程度的降低, 整体降低幅度比 10%超越概率地震波要大, 左侧隧道降低幅度平均值约为 15.5%, 右侧隧道约为 11.3%。

(4)注浆加固措施对山岭隧道洞口段有一定的作用, 但降低幅度有限, 对于强震区尤其是软弱围岩段应采用联合加固措施, 如可以设置减震层或者设置一定长度的抗震设防区, 保证隧道洞口段的抗震稳定性。

参考文献:

[1] 陆松林. 地震次生地质灾害浅析[J].城市与减灾, 2019 (01):34-38.

[2] 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(S1):3131-3136.

[3] 甘目飞. 隧道工程在汶川地震中的震害调查及病害浅析[J]. 铁道工程学报,2008,12(增):228-233.

[4] 潘昌实. 隧道地震灾害综述[J]. 隧道及地下工程, 1990, 11 (1):1-9.

[5] 李乔,赵世春. 汶川大地震工程震害分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.

[6] 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.

[7] 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[D]. 兰州: 兰州交通大学,2013.

[8] 王正松,王峥峥,高波. 双连拱隧道洞口段减震措施研究[J]. 公路,2014,59(06):302-305.

[9] 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 (06):1084-1091.

[10] 崔光耀,纪磊,王明年,等. 高烈度地震区隧道洞口段刚柔相济抗震模型试验研究[J].振动与冲击,2019,38 (05):92-97+115.

[11] 崔光耀,纪磊,荆鸿飞. 高烈度艰险山区跨断层隧道减震层减震技术研究[J]. 地震工程学报,2019,41(02):286-291.

[12] 高峰,石玉成,严松宏,等. 隧道的两种减震措施研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(02):222-229.

[13] 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(06):942-948+954.

[14] 中华人民共和国国家标准. GB50111-2006 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

[15] 石波. 震区隧道洞口段注浆措施的减震效果数值模拟分析[J]. 中国勘察设计,2013(11):76-79.

[16] 刘博清,赵杰,王桂萱,兰雯俊. 强震作用下软岩隧道洞口段动力响应规律分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17 (06):151-157.

[17] 皇民,赵玉如,苑俊杰,秦长坤,雷啸天. 浅埋双洞错距山岭隧道洞口段地震响应试验研究[J]. 公路交通科技, 2020,37(03):96-104+113.