

文章编号: 1674—8247(2019)03—0025—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.03.006

高烈度地震区跨断层隧道围岩注浆抗震效果研究

王李斌¹ 崔光耀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跨断层隧道的抗震性能,文章依托七达里隧道断层段,利用有限差分数值计算软件对采用不同注浆措施的抗震作用效果进行研究。研究结果表明:(1)跨断层隧道采用全环接触注浆和全环间隔注浆抗震措施,对二衬拱顶竖向位移和边墙收敛的控制效果较为显著;(2)全环间隔注浆在控制隧道结构主应力方面优于全环接触注浆;(3)全环接触注浆最小安全系数抗震效果达8.16%以上,全环间隔注浆最小安全系数抗震效果达18.97%以上;(4)跨断层隧道采用全环间隔注浆抗震措施的作用效果优于全环接触注浆抗震措施。研究成果可为高烈度地震区跨断层隧道的抗震设防设计提供参考。

关键词:高烈度地震区;跨断层隧道;围岩注浆;抗震措施

中图分类号:U452.2⁺8 文献标志码:A

Study on Anti-seismic Effect of Surrounding Rock Grouting of Fault-crossing Tunnels in Highly Seismic Area

WANG Libin¹ CUI Guangyao¹ 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 seismic behavior of fault-crossing tunnels in highly seismic area, by using the finite difference numerical calculation software, based on the research background of Qidali tunnel, the effect of the anti-seismic measures with different grouting is studied. The results show that the control effect on vertical displacement and boundary wall convergence of secondary lining vault is significant when the aseismatic methods of the whole chain contact grouting and the whole chain interval grouting in fault-crossing tunnels are used. The whole chain interval grouting is better than the whole chain contact grouting in controlling the main stress of tunnel structure. The anti-seismic effect of minimum safety coefficient of the whole chain contact grouting is more than 8.16%; The anti-seismic effect of minimum safety coefficient of the whole chain interval grouting is more than 18.97%; The effect of adopting the anti-seismic measures of the whole chain interval grouting than the whole chain contact grouting in fault-crossing tunnels. The research results can provide reference for anti-seismic and fortification design of fault-crossing tunnels in highly seismic area.

Key words: highly seismic area; fault-crossing tunnels; surrounding rock grouting; anti-seismic measures

随着西部交通基础设施建设持续、深入的进行,穿越断层交通隧道大量涌现,西部山区又处于高烈度地

收稿日期:2018-06-05

作者简介:王李斌(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(1816008);四川省应用基础研究计划项目(2015JY0166)

引文格式:王李斌,崔光耀,荆鸿飞. 高烈度地震区跨断层隧道围岩注浆抗震效果研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(3):25-29.

WANG Libin, CUI Guangyao, JING Hongfei. Study on Anti-seismic Effect of Surrounding Rock Grouting of Fault-crossing Tunnels in Highly Seismic Area[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 25-29.

震区^[1-2]。因此,如何保证强震区跨断层隧道的震时安全性和稳定性是当前亟待解决的关键技术问题之一。

目前,国内外专家学者对强震区跨断层隧道的抗震技术进行了部分研究,主要有:不同注浆材料及注浆参数优化的研究^[3-4];隧道围岩注浆加固效应模拟方法及注浆理论的研究^[5-7];强震区山岭隧道围岩全间隔注浆预加固方案的研究^[8-10]。综上可知,关于隧道注浆技术的研究已有很多,但对于高烈度地震区跨断层隧道围岩注浆方面的研究较少。因此,本文依托丽香铁路七达里隧道七达里断层段,利用有限差分数值计算软件,对不同注浆方式的抗震效果进行研究,研究成果可为类似跨断层隧道的抗震设防设计提供参考。

1 七达里断层段概况

1.1 断层地质条件

七达里断层位于丽江至香格里拉铁路段的中部,其走向 N64°W,倾向 NE,倾角约 65°,两盘均为 T₂b 灰岩、白云质灰岩,Ⅳ级围岩;破碎带宽约 100 m,为灰岩质断层角砾,密实-半胶结状,Ⅴ级围岩;断层与线路交于 DK 27+170 附近,大角度相交,交角为 77°,对隧道影响较大,如图 1 所示。该区域地震动峰值加速度为 0.2 g,抗震设防烈度为Ⅷ度。

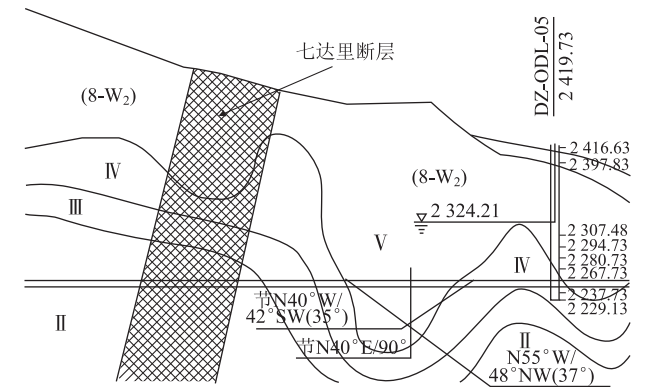


图1 七达里断层分布示意图

1.2 衬砌结构设计

跨断层隧道支护结构采用复合式衬砌,初支厚度为 25 cm,二衬结构厚度为 45 cm。初支喷射 C25 耐腐蚀混凝土,二衬结构采用 C25 钢筋混凝土。

2 研究情况

2.1 计算模型

以七达里隧道七达里断层段为背景建立计算模

型,本结构模型为弹塑性模型,屈服准则采用摩尔-库伦准则。隧道纵向开挖深度为 100 m,埋深 50 m,隧道底部基岩厚 20 m。隧道左右两侧宽度均取 5~8 倍洞径,约 50 m,断层倾角 65°,破碎带宽度为 10 m。计算模型的边界条件为下边界与四周边界全约束,上边界无约束。计算模型如图 2 所示。

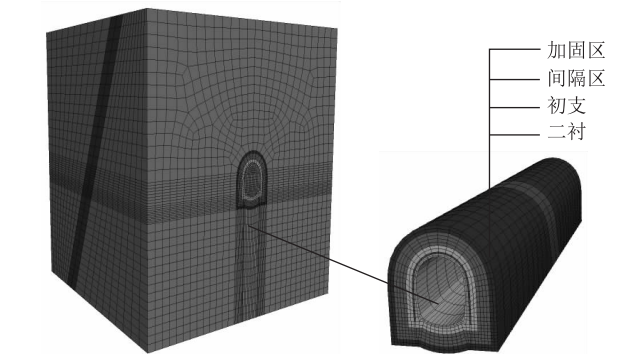


图2 计算模型图

2.2 计算参数

依据实际地勘资料,模型的计算参数如表 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 /(°)	粘聚力 /MPa
上下盘Ⅳ级围岩	22	5.0	0.3	35	0.5
破碎带Ⅴ级围岩	20	2.0	0.4	25	0.2
基岩Ⅱ级围岩	25	20	0.2	50	1.5
初支	22	23	0.2	-	-
二衬	25	29	0.2	-	-
加固区	23	7	0.35	-	-

2.3 计算工况

以常用注浆厚度 3 m 为例进行研究,计算工况如表 2 所示。

表2 计算工况

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

本模型选用四周自由场边界条件进行模拟计算,选用局部阻尼为计算参数,局部阻尼系数为 0.157 1。依据实际情况,采用常规动力加载方式,将 3 个方向(x,y,z)的地震波同时从模型的底部向上部结构传递。地震波选取汶川地震卧龙测站所测的加速度波,按 9 度地震烈度标准化,持续时间为 15 s。通过滤波软件进行滤波和基线校正,处理的地震波加速度时程曲线如图 3 所示(以 y 向为例)。

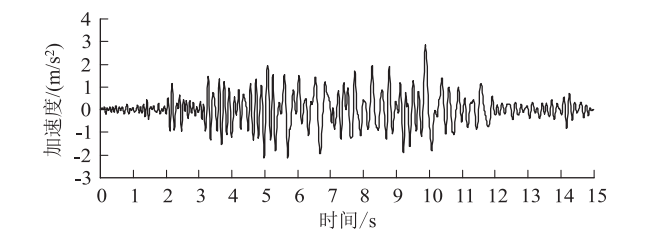


图 3 地震波加速度时程曲线图

2.5 测点布置

沿隧道纵向每隔 10 m 设置一个检测断面,分别提取各监测断面二衬结构的拱顶、右拱肩、右边墙、右拱脚、左拱肩、左边墙、左拱脚、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 4 所示。

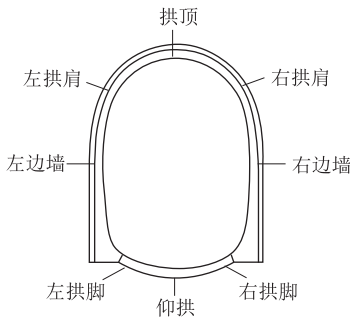


图 4 测点布置图

3 抗震效果分析

以间隔注浆、接触注浆工况与不注浆工况各项性能的提升比例作为其抗震效果的分析指标,得出最佳的抗震措施。

3.1 结构位移

提取各工况隧道跨断层破碎带的位移云图,如图 5、图 6 所示。提取二衬拱顶的位移最大值,并计算工况 2、工况 3 的抗震效果(以工况 1 为对比),如表 3 所示。

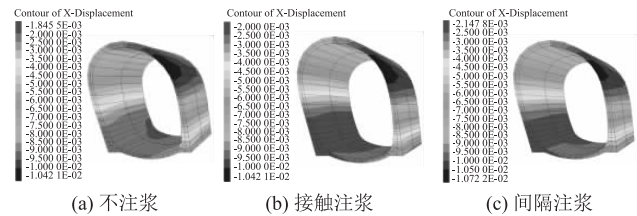


图 5 二衬结构 x 向位移云图

表 3 二衬结构的最大位移及控制效果

项目	不注浆 /mm	接触注浆 /mm	抗震效果 /%	间隔注浆 /mm	抗震效果 /%
竖向位移	11.73	10.83	7.67	10.97	6.48
横向位移	10.42	10.38	0.40	10.72	-2.88

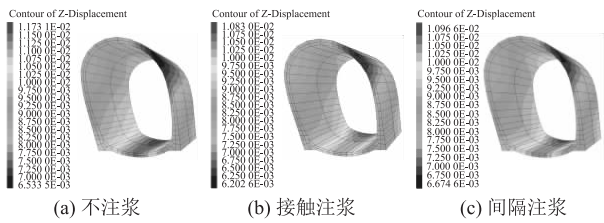


图 6 二衬结构 z 向位移云图

由图 5、图 6 及表 3 可知,采用全环接触注浆后,隧道二衬拱顶的竖向位移、横向位移的抗震效果分别为 7.67% 和 0.4%;采用全环间隔注浆后,隧道二衬拱顶的竖向位移、横向位移的抗震效果分别为 6.48% 和 -2.88%。全环接触注浆抗震措施在控制结构位移方面优于全环间隔注浆抗震措施。

3.2 边墙收敛

提取的各断面(S5、S6 断面位于断层破碎带)的二衬结构边墙收敛值,如图 7 所示,并提取不同工况的边墙最大收敛值(如表 4 所示),分析其抗震效果。

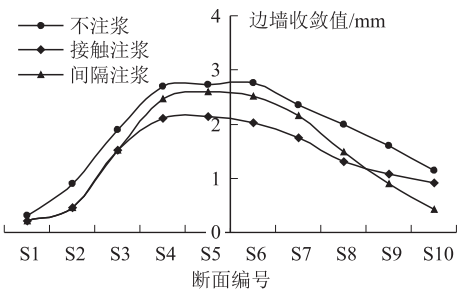


图 7 边墙收敛图

表 4 边墙最大收敛值

工况	最大收敛值/mm	抗震效果/%
不注浆	2.76	-
接触注浆	2.14	22.46
间隔注浆	2.59	6.16

由图 7 及表 4 可知,采用全环接触注浆后,隧道二衬的边墙最大收敛值为 2.14,抗震效果为 22.46%;采用全环间隔注浆后,隧道二衬的边墙最大收敛值为 2.59,抗震效果为 6.16%。全环接触注浆抗震措施在控制边墙收敛方面优于全环间隔注浆抗震措施。

3.3 主应力

提取各工况 S5 断面处(S5 断面位于断层破碎带)二衬结构仰拱的最大主应力与最小主应力的时程曲线,如图 8、图 9 所示。提取其最大主应力与最小主应力的极值,并计算其抗震效果(以工况 1 为对比),如表 5 所示。

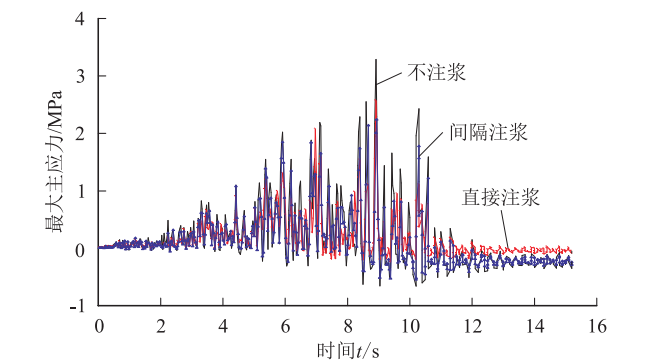


图8 最大主应力时程曲线图

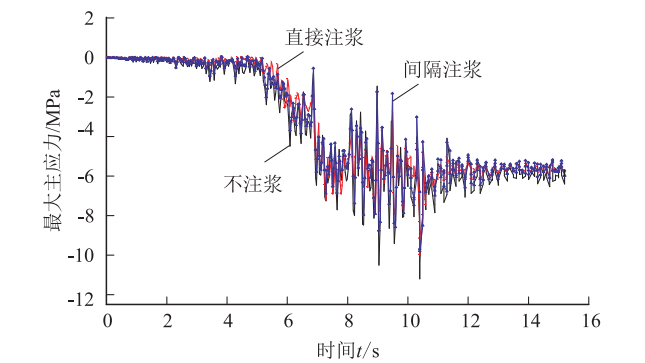


图9 最小主应力时程曲线图

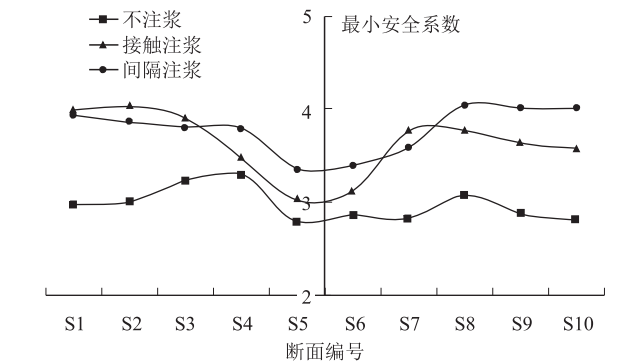


图10 最小安全系数图

表6 各工况最小安全系数及抗震效果

断面编号	不注浆	接触注浆	抗震效果 (相对工况1) /%	间隔 注浆	抗震效果 (相对工况1) /%
S1	2.974	3.982	33.89(↑)	3.925	31.98(↑)
S2	2.998	4.03	34.42(↑)	3.865	28.92(↑)
S3	3.222	3.902	21.10(↑)	3.799	17.91(↑)
S4	3.291	3.476	5.62(↑)	3.797	15.38(↑)
S5	2.793	3.021	8.16(↑)	3.347	19.84(↑)
S6	2.862	3.126	9.22(↑)	3.405	18.97(↑)
S7	2.823	3.77	33.55(↑)	3.589	27.13(↑)
S8	3.082	3.769	22.29(↑)	4.045	31.25(↑)
S9	2.876	3.632	26.29(↑)	4.011	39.46(↑)
S10	2.805	3.579	27.59(↑)	4.011	42.99(↑)

表5 主应力极值及抗震效果

工况	最大主应力 /MPa	抗震效果 /%	最小主应力 /MPa	抗震效果 /%
不注浆	2.98	—	-11.2	—
接触注浆	2.57	13.76	-10	10.71
间隔注浆	2.24	24.83	-9.79	12.59

由图7、图8及表5可知,采用全环接触注浆后,断层处二衬结构仰拱的最大主应力与最小主应力的抗震效果分别为13.76%、10.71%;采用全环间隔注浆后,最大主应力与最小主应力的抗震效果分别为24.83%、12.59%。全环间隔注浆在控制最大、最小主应力方面优于全环接触注浆。

3.4 结构内力

提取的各断面(S5、S6断面位于断层破碎带)各监测点的数据,计算得到3种工况下各断面二衬结构的最小安全系数,如图10所示。

各工况的最小安全系数均出现在断层破碎带,提取各工况二衬结构的最小安全系数,并计算其抗震效果(以工况1为对比),如表6所示。

由图10及表6可知,采用全环接触注浆后,隧道结构最小安全系数为3.021,抗震效果达8.16%以上;采用全环间隔注浆后,隧道结构最小安全系数为3.347,

抗震效果达18.97%以上。全环间隔注浆抗震措施在控制结构内力方面优于全环接触注浆抗震措施。

4 结论

(1)由结构位移分析可知,全环接触注浆二衬拱顶竖向位移、横向位移的抗震效果分别为7.67%和0.4%;全环间隔注浆竖向位移、横向位移的抗震效果分别为6.48%和-2.88%。全环接触注浆对二衬拱顶的位移控制较好。

(2)由边墙收敛分析可知,全环接触注浆最大收敛值为2.14,抗震效果为22.46%;全环间隔注浆最大收敛值为2.59,抗震效果为6.16%。全环接触注浆在控制边墙收敛值方面优于全环间隔注浆。

(3)由主应力分析可知,全环接触注浆最大主应力与最小主应力抗震效果分别为13.76%、10.71%;全环间隔注浆最大主应力与最小主应力抗震效果分别为24.83%、12.59%。全环间隔注浆对最大、最小主应力的控制效果显著。

(4)由结构内力分析可知,全环接触注浆最小安全系数抗震效果达8.16%以上;全环间隔注浆最小安全系数抗震效果达18.97%以上。全环间隔注浆最小安全系数抗震效果优于全环接触注浆。

(5)由结构位移、边墙收敛、主应力及结构内力综合分析可知,跨断层隧道采用全环间隔注浆抗震措施的作用效果优于全环接触注浆。

参考文献:

[1] 朱正国,余剑涛,隋传毅,等.高烈度活断层地区隧道结构抗震的综合措施[J].中国铁道科学,2014,35(6):55-62.
ZHU Zhengguo, YU Jiantao, SUI Chuanyi, et al. Comprehensive Seismic Measures for Tunnel Structure in the Area of High Intensity Active Fault [J]. China Railway Science, 2014, 35 (6) : 55 - 62.

[2] 何川,李林,张景,等.隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J].岩土工程学报,2014,36(3):427-434.
HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic Damage Mechanism of Tunnels through Fault Zones [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3) : 427 - 434.

[3] 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.

[4] 李立新,邹金锋.破碎岩体隧道注浆参数确定方法[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(8):3432-3440.
LI Lixin, ZOU Jinfeng. Design Method of Grouting Parameters for Broken Rock Tunnel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8) : 3432 - 3440.

[5] 高峰,谭绪凯.隧道围岩注浆加固效应模拟方法研究[J].铁道工程学报,2014,31(11):82-86.
GAO Feng, TAN Xunkai. Research on the Numerical Simulation Method of Grouting in Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(11) : 82 - 86.

[6] 朱红,杜嘉鸿.隧道围岩注浆的理论分析及工程应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(3):497-500.
ZHU Hong, DU Jiahong. Theory Analysis and Engineering Application of Tunnel Surrounding Rock Grouting [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science) , 2012, 28 (3) : 497 - 500.

[7] 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 Xuyang, LIANG Qingguo. Seismic Analysis on Surrounding Rock Reinforced by Grouting in Portal Section of Songjiashan Tunnel[J]. Railway Engineering, 2015(2) : 73 - 75.

[8] 申玉生,高波,胡邦,等.强震区山岭隧道围岩全环间隔注浆加固的方案研究[J].土木工程学报,2011,44(S1):186-191.
SHEN Yusheng, GAO Bo, HU Bang, et al. Study on the Interval Grouting Pre-reinforcement Scheme of Mountain Tunnel Surrounding Rock in High-intensity Earthquake Zone [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S1) : 186 - 191.

[9] 高峰,胡蓉,谭绪凯.隧道注浆加固模型试验研究[J].重庆大学学报(自然科学版),2014,33(4):44-46.
GAO Feng, HU Rong, TAN Xukai. Model Test of Tunnel Grouting Reinforcement [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 2014, 33(4) : 44 - 46.

[10] 王安华,贺斗,郭廷喜,等.注浆加固围岩对公路隧道的减震作用研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2009,37(S1):17-21.
WANG Anhua, HE Dou, GUO Tingxi, et al. Study on Shock Absorption of Grouting Reinforcement Surrounding Rock on Highway Tunnel [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 37(S1) : 17 - 21.

(编辑:车晓娟 苏玲梅)

(上接第 9 页)

[3] 李建明,朱康.高压电气设备试验方法[M].北京:中国电力出版社,2013.
LI Jianming, ZHU Kang. Test Method For High-voltage Electrical Equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

[4] 周鹤良.电气工程师手册[M].北京:中国电力出版社,2008.
ZHOU Heliang. Handbook for Electrical Engineers [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[5] 杨成刚.一起 35kV 变压器故障分析处理[J].科技创业家,2013,4(10):85.
YANG Chenggang. Analysis of A 35kV Transformer Fault [J]. Technological Pioneers, 2013, 4(10) : 85.

[6] 徐艳聪.35kV/6kV 变压器常见故障分析及处理对策[J].机电信

息,2014,14(36):84-85.
XU Yancong. Analysis and Treatment of Common Failure of 35kV/6kV Transformer [J]. Mechanical and Electronical Information, 2014, 14(36) : 84 - 85.

[7] 牟雪梅,马静洁.变压器油色谱分析及故障判断[J].科技创新与应用,2016,6(31):186.
MU Xuemei, MA Jingjie. Oil Chromatography Analysis and Fault Diagnosis of Transformer[J]. Technology Innovation and Application, 2016, 6(31) : 186.

[8] GB/T 7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
GB/T 7252-2001 Guide to the Ananysis and the Daignosis of Gases Dissolved in Transformer Oil[S].

(编辑:车晓娟 张红英)