

# 既有双洞扩挖隧道抗震性能分析

吴晨<sup>1,2</sup>, 臧万军<sup>1,2</sup>

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 以某隧道扩挖工程为背景, 建立三维有限元模型并进行动力时程分析, 探讨扩挖隧道衬砌结构在地震荷载作用下的位移和内力变化规律, 同时与扩挖前对应规律进行对比分析, 研究扩挖隧道对相邻隧道结构抗震性能的影响, 为扩挖隧道的抗震性能设计提供参考。

**关键词:** 扩挖隧道; 地震响应; 位移变化; 内力变化; 时程分析法

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)01-0043-07

## Seismic performance analysis of existing double-hole tunnel expanded

WU Chen<sup>1,2</sup>, ZANG Wanjun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Based on a tunnel expansion project, a three-dimensional finite element model was established and dynamic time-history analysis was carried out. The variation patterns of the displacement and the internal force of the lining structure of the enlarged tunnel under earthquake load were discussed and compared with the corresponding patterns before enlargement. The influence of enlarged tunnels on the seismic performance of adjacent tunnels was studied, thus providing reference for the seismic performance design of expanded tunnels.

**Keywords:** tunnel expansion; seismic response; displacement variation; internal force variation; time history analysis

近年来地震灾害在中国频频发生, 地震灾害的预防治理一直都是人们讨论的热门话题, 随着城市地下空间的大量开发, 地下结构的抗震问题引起了国内外专家学者的高度重视<sup>[1-3]</sup>。刘晶波等<sup>[4]</sup>详细研究了反应位移法在地下结构中尤其是在地铁车站结构抗震分析中的应用, 利用土-结构相互作用法并结合子结构法, 进一步论证反应位移法在地下结构抗震分析中的可靠性; 沈昆等<sup>[5]</sup>分析介绍了山岭隧道地震破坏形式和震害机理, 同时详细介绍了地震系数法、反应位移法和动力时程分析法的计算原理和特点以及各自的适

用性, 提出了适合高烈度地震区山岭隧道的减震措施; 郭正伟等<sup>[6]</sup>利用有限元软件对实际盾构隧道工程进行动力时程分析, 研究了非线性时程分析法在盾构隧道抗震性能分析中的可靠性。

福建省地处亚欧板块与太平洋板块交界处附近, 其内山脉纵横交错。近年来福建省内交通运输量增长迅速, 早期修建的山岭隧道已无法满足交通量增长的需求, 对既有隧道扩挖可以有效地解决这一问题<sup>[7]</sup>。本文以时程分析法为基础, 利用 MIDAS/GTS NX 有限元软件, 结合实际工程情况, 研究扩挖隧道衬砌结构在地震作用下的位移

收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2016J01205); 福州市科技局项目(2017-G-63)

第一作者简介: 吴晨(1995-), 男, 福建南平人, 硕士研究生, 研究方向: 隧道工程。

通信作者: 臧万军(1975-), 男, 吉林农安人, 教授, 博士, 研究方向: 隧道抗震减震、隧道施工、地下工程风险评估。

与应力,对比分析扩挖与未扩挖隧道的抗震性能,为实际工程的抗震设计提供参考。

## 1 工程背景

隧道地处福州市区下院至上坂之间,场地地形波状起伏,隧道所处场地最高点标高约为 160 m,最低点标高约为 15 m,地貌单元属剥蚀残丘地貌。隧道沿线山体植被较发育,自然斜坡稳定,未见有滑坡、泥石流等不良地质作用。隧道为整体式衬砌结构,由两座机动车隧道组成,分南北两洞,其之间呈分离式布置,每个洞内均有两车道,北洞长 740.2 m,南洞长 740 m,隧道扩挖剖面见图 1。

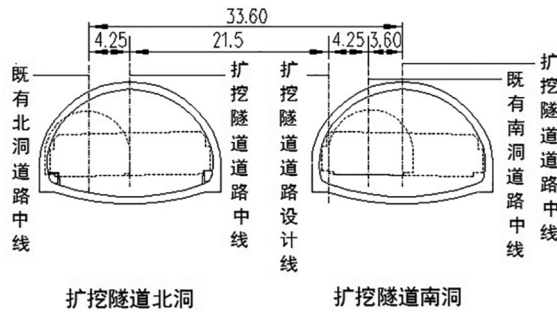


图 1 隧道扩挖剖面图(单位:m)

Fig.1 Sectional drawing of tunnel expansion(unit: m)

以实际隧道扩挖工程为背景,把原单洞 2 车道分别拓宽为单洞 3 车道+1 个非机动车道+1 个人行道,由此,断面由双向 4 车道扩宽为双向 6 车道+2 个非机动车道+2 个人行道。拓宽隧道北洞桩号: NK8+068.8~NK8+809,拓宽隧道南洞桩号: SK8+073~SK8+813,北洞长 740.2 m,南洞长 740 m。对洞中既有的车行横洞及人行横洞利用原车行横洞及人行横洞进行单侧原位扩挖改造,扩挖方法采用单侧拓宽上台阶弧形分步开挖。

## 2 时程分析法的基本原理

时程分析法是一种利用逐步积分求解的方式,对结构体系的动力方程进行求解的方法。在对扩挖隧道进行抗震分析时,主要是对扩挖隧道衬砌结构的动力方程进行求解,并最终利用扩挖隧道衬砌结构的弹性或非弹性性能,得到隧道结构从静止到开始震动,直至震动结束状态整个过程的地震响应<sup>[8]</sup>。

时程分析法在分析时,综合考虑不同的场地

条件和地震环境对结构的影响,以及地震波振幅、持时和频谱等因素的影响,因此可以精准地求得在地震波作用下,隧道结构中每个质点在不同时刻的位移、速度以及加速度,同时还可以求得每个构件的内力以及应变情况<sup>[9-10]</sup>。时程分析法中所利用的多自由体系地震反应方程如下<sup>[11]</sup>:

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = p(t) \quad (1)$$

其中  $[M]$  代表质量矩阵;  $[C]$  代表阻尼矩阵;  $[K]$  代表刚度矩阵;  $\ddot{u}(t)$  代表节点的相对加速度;  $\dot{u}(t)$  代表节点的相对速度;  $u(t)$  代表节点的相对位移;  $p(t)$  代表动力荷载。

本文采用动力时程分析法,对扩挖隧道结构各质点的地震反应方程进行分析求解,得到扩挖隧道结构在地震荷载作用下的位移及应力应变变化,研究既有隧道扩挖后抗震性能的改变规律,以及扩挖隧道对相邻隧道抗震性能的影响,为扩挖隧道的抗震性能研究提供参考。

## 3 三维有限元模型

### 3.1 有限元简介

MIDAS /GTS 是一款针对岩土工程领域研发的通用有限元分析软件,它既支持线性或非线性的静力分析、线性或非线性的动态分析、边坡稳定分析、施工阶段分析等分析类型,同时可以进行渗流-应力耦合、应力-边坡耦合、非线性动力分析-边坡耦合等多种耦合分析。MIDAS /GTS 中抗震分析模拟流程如下:

1) 确定材料参数及定义部件属性; 2) 建立几何模型; 3) 划分网格; 4) 定义分析模型的边界条件及添加荷载; 5) 定义分析工况,抗震分析中主要建立特征值分析与时程分析; 6) 提取结果。

### 3.2 模型的建立

利用有限元软件 MIDAS /GTS 对某隧道实际扩挖工程进行数值分析,整体模型高度取 80 m,横向距离取 150 m,纵向深度取隧道进口段 40 m; 围岩的屈服准则采用德鲁克-普拉格( Drucker-Prager/D-P) 准则; 围岩及隧道工程初支、二衬采用平面应变单元,锚杆、初支和二衬为弹性材料,围岩为弹塑性材料。

相关的岩层及隧道结构的支护参数参考地勘资料,如表 1、表 2 所示。扩挖隧道南北洞口跨度均为 17.87 m,洞口高度 11.68 m,模型埋深为北洞 12.13 m,南洞 11.51 m。南北洞道路中线间距

30.0 m, 扩挖后隧道道路中线间距 29.3 m。

表 1 岩层参数

Tab.1 Rock formation parameters

岩层代号	1	2
名称	砂土状强风化花岗岩	微风化花岗岩
类型	D-P 准则	D-P 准则
泊松比 $\mu$	0.40	0.19
内摩擦角/ $^{\circ}$	30.00	54.84
粘聚力/kPa	30	6 630
弹性模量/MPa	16.7	44.1
重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	21	26

表 2 支护参数

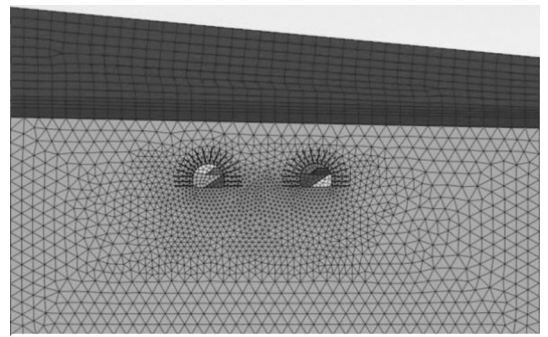
Tab.2 Support parameters

材料号	名称	弹性模量 /MPa	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma$ /( $kg \cdot m^{-3}$ )
1	锚杆	210.0	0.3	78.5
2	扩挖隧道 初支 C25	28.0	0.2	23.8
3	扩挖隧道 二衬 C30	31.5	0.2	24.0
4	既有隧道 初支 C20	25.5	0.2	23.5
5	既有隧道 二衬 C25	28.0	0.2	23.8

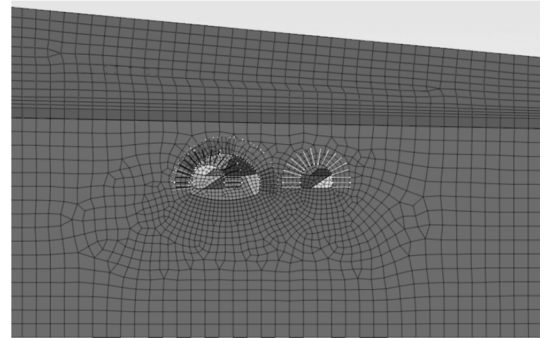
土体实际上是一个半无限体,但是在有限元分析中只能选取部分土体建立模型,因此为了考虑边界对地震波传播的影响,需要合理设置边界条件。本模型四侧采用自由场边界条件,底部设为固定的约束状态,上表面则依照实际情况设成自由变形边界。自由场边界条件是利用阻尼器将自由场边界模型网格与所建立的模型网格节点一一对应连结,并通过阻尼器将自由场网格中的不平衡力传递到模型网格上,建立的模型如图 2 所示。

### 3.3 非线性时程法参数设置

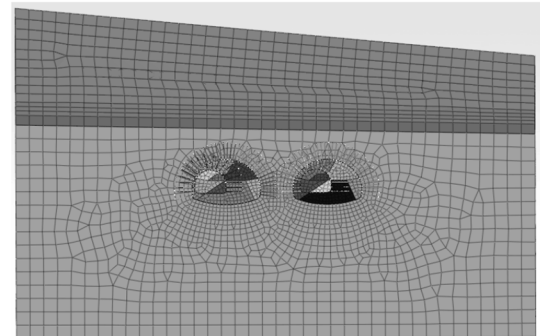
从已有的地震资料来看,隧道结构在地震波



(a) 未扩挖模型



(b) 单洞扩挖模型



(c) 双洞扩挖模型

图 2 三维有限元模型图

Fig.2 Three-dimensional finite element model

作用下水平方向的振幅远大于纵向和竖向,因此本文主要研究水平方向上传播的地震波对扩挖隧道造成的地震动力作用<sup>[12-15]</sup>。在模型的水平方向上施加地震动荷载,其作用方式是地震波的加速度转化为应力并作用在土体上。选取的地震波为福建地区 50 a 基准期的地震波。根据测试成果及场地地质条件分析,依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010),实际隧道进口场地类别主要以 II 类为主,洞身场地类别主要以 II 类为主,特征周期值为 0.40 s,阻尼比取值 0.05。地震波时程曲线如图 3 所示。

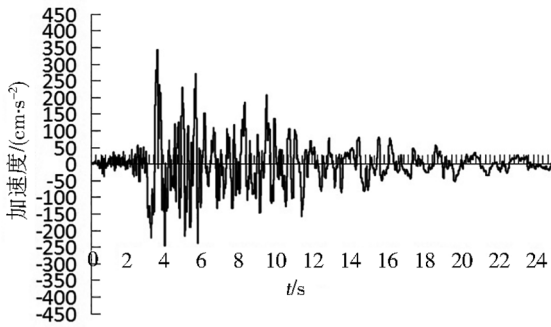


图 3 地震波时程曲线图

Fig.3 Seismic wave time history curve

### 4 计算结果分析

#### 4.1 扩挖隧道位移与内力结果分析

扩挖隧道衬砌结构水平方向位移峰值沿纵向变化如图 4 所示。对比图 4(a) 与 4(b) 可知,扩挖隧道南北洞衬砌结构水平方向位移峰值变化基本相同。

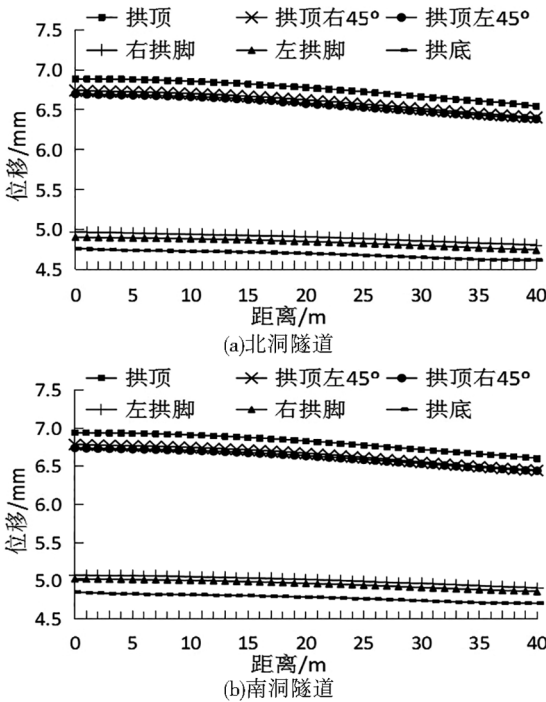


图 4 扩挖隧道水平方向位移峰值沿纵向变化曲线

Fig.4 Longitudinal variation curve of horizontal displacement peak of the expanded tunnel

(1) 从图 4 可以看出,随着扩挖隧道埋深的增加,衬砌结构水平方向位移峰值有减小的趋势。扩挖隧道南洞水平方向位移峰值比北洞大 0.1

mm 左右,主要是因为北洞的整体埋深比南洞埋深大。并且,因为扩挖隧道模型左侧埋深大于右侧,扩挖隧道南北洞左拱顶 45° 位置及左拱脚的水平方向位移峰值均大于右拱顶 45° 位置及右拱脚 0.1~0.2 mm。

(2) 图 5 是扩挖隧道衬砌结构弯矩峰值沿隧道纵向变化曲线图。从图 5 可以看出,扩挖隧道弯矩峰值沿洞身方向逐渐增大,并且在拱脚处达到最大值,拱脚处弯矩峰值约为拱顶及拱底位置的 3 倍左右。随着纵向深度和埋深的增加,扩挖隧道衬砌结构的弯矩峰值也有增加的趋势。受相邻扩挖隧道的影响,靠近相邻扩挖隧道一侧的衬砌结构弯矩峰值会略有增大,但增大幅度不明显,弯矩峰值增加范围在 10~20 kN·m。

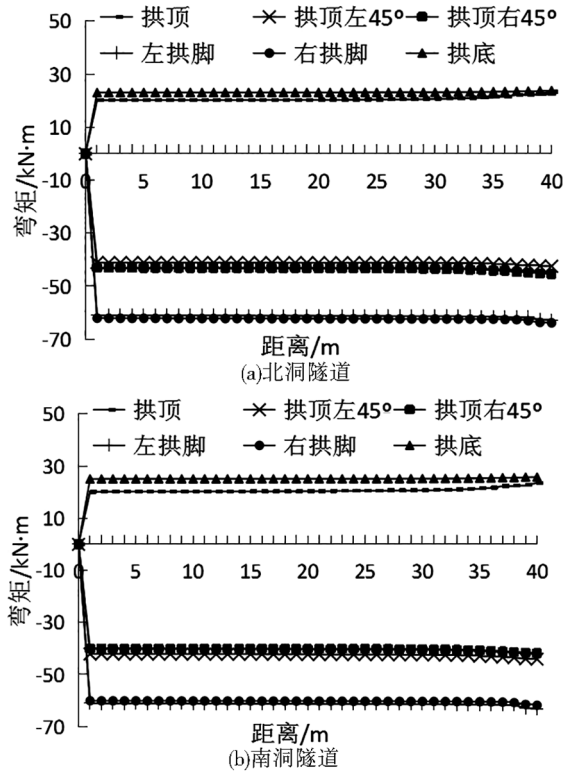


图 5 扩挖隧道弯矩峰值沿纵向变化曲线

Fig.5 Longitudinal variation curve of bending moment peak of the expanded tunnel

(3) 图 6、图 7 是扩挖隧道衬砌结构轴力及剪力峰值沿隧道纵向变化曲线图。扩挖隧道衬砌结构轴力及剪力峰值变化趋势基本与弯矩峰值变化趋势一致,沿纵向扩挖隧道衬砌结构的轴力及剪力峰值都有增大的趋势,并且受相邻扩挖隧道的影

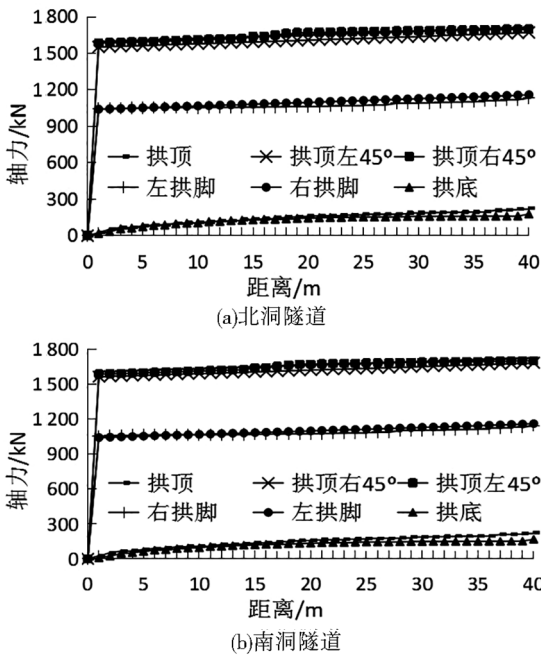


图 6 扩挖隧道轴力峰值沿纵向变化曲线

Fig.6 Longitudinal variation curve of axial force peak of the expanded tunnel

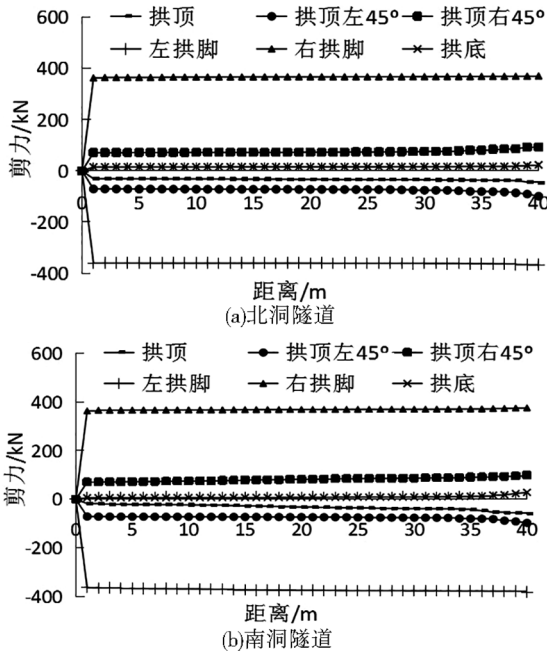


图 7 扩挖隧道剪力峰值沿纵向变化曲线

Fig.7 Longitudinal variation curve of shear force peak of the expanded tunnel

会略有增大。扩挖隧道衬砌结构的轴力峰值在拱顶 45°位置达到最大,剪力峰值在扩挖隧道拱脚位置达到最大,扩挖隧道衬砌结构弯矩、轴力及剪力的变化趋势都较为平缓。

(4)由图 8 可知,隧道结构的最大应力分布在隧道拱顶 45°处及拱脚位置,且由于受到相邻隧道的影响,靠近相邻隧道一侧的应力略大于另一侧,单洞扩挖时扩挖隧道结构内的应力大于双洞扩挖,并且在隧道拱顶 45°及拱脚位置,衬砌结构内力随时间而呈“一正一负”的变化。这说明在地震波作用下,扩挖新隧道会分担一部分土中应力,降低已扩挖隧道内部的应力;扩挖隧道衬砌结构的拱顶 45°及拱脚位置可能受到拉压的循环作用,这对混凝土结构不利,应注意此处钢筋的布置,并注意拱顶 45°及拱脚位置的受力,适当采取加强措施。

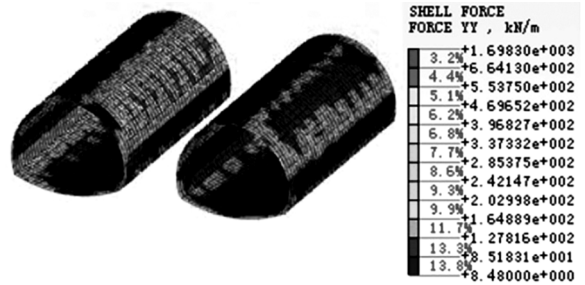


图 8 扩挖隧道衬砌结构轴力峰值图

Fig.8 Peak axial force diagram of the lining structure in the expanded tunnel

### 4.2 扩挖与未扩挖隧道对比分析

将未扩挖隧道、隧道单洞扩挖和隧道双洞扩挖 3 种情况对比分析,以隧道拱顶、拱顶 45°、拱脚以及拱底作为关键点并计算其水平方向位移。在研究扩挖对隧道结构抗震性能的影响时,3 个模型中隧道结构的水平方向位移峰值都出现在拱顶处,特取南洞拱顶位置进行位移对比分析,拱顶 45°、拱脚以及拱底位置进行轴力、剪力和弯矩对比分析。

(1)从图 9 可以看出,受北洞隧道扩挖的影响,南洞隧道拱顶的水平方向位移略有增加,增加值在 0.2~0.4 mm 内。南洞隧道在扩挖后,围岩土体受到二次扰动,隧道结构的覆盖层厚度减少 3.02 m,隧道截面积增大,导致了隧道拱顶的水平方向位移增加。

(2)从图 10 可以看出,隧道上部结构的水平方向位移峰值大于隧道下部结构 2 mm 左右,并且上部各关键点之间相差不大,因此抗震分析中隧道上部结构是关键部位,应注意加强隧道上部结构;扩挖隧道的拱脚及拱底的水平方向位移比

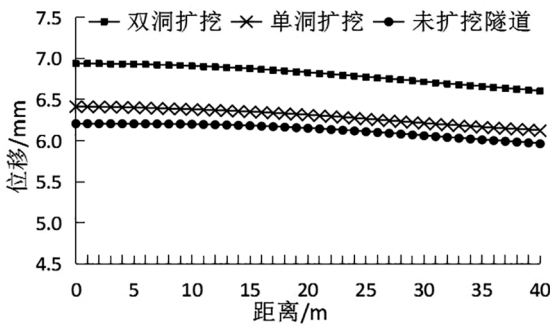


图9 南洞隧道拱顶水平方向位移峰值沿纵向变化曲线对比图

Fig.9 Contrast diagram of peak displacement curve along the longitudinal direction of arch roof of the south tunnel

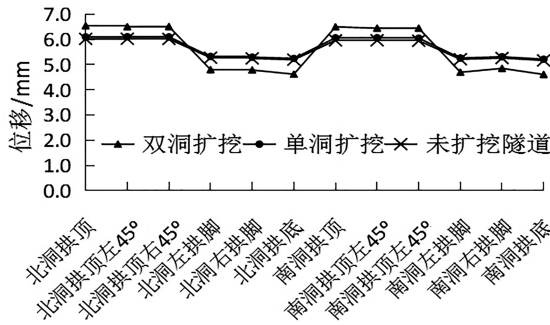


图 10 隧道各关键点水平方向位移峰值对比图

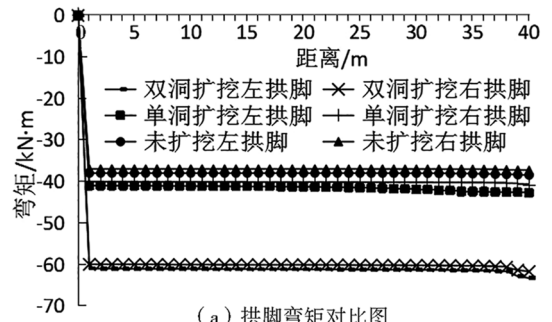
Fig.10 Comparison of horizontal displacement peaks of key points of tunnels

未扩挖时少 0.5~0.6 mm,说明隧道在扩挖后隧道下部结构的抗震性能会略有增强;单洞扩挖时,未扩挖隧道受扩挖隧道的影响,隧道上部结构水平方向位移增加,因此应注意加固相邻未扩挖隧道拱顶。

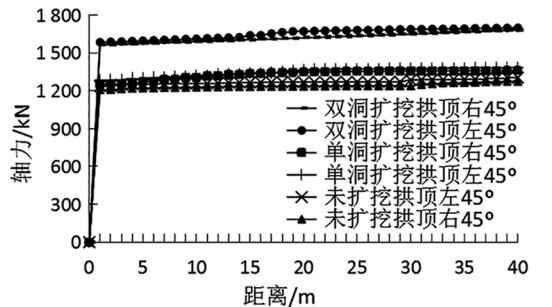
(3)从图 11 可以看出,受相邻北洞扩挖隧道影响,未扩挖南洞隧道的轴力、剪力及弯矩峰值会略有增大,但影响较小。南洞隧道在靠近相邻隧道一侧的轴力、剪力及弯矩峰值也略有增大,因此要对靠近相邻隧道一侧衬砌结构进行适当的加强。南洞隧道扩挖前后轴力、剪力及弯矩峰值变化趋势基本相同,沿着隧道纵向有增大的趋势。南洞隧道扩挖后,拱脚位置的弯矩和剪力以及拱顶 45°位置的轴力峰值急剧增大,应注意对拱脚及拱顶 45°抗震薄弱位置采取适当的加强措施。

### 5 结论

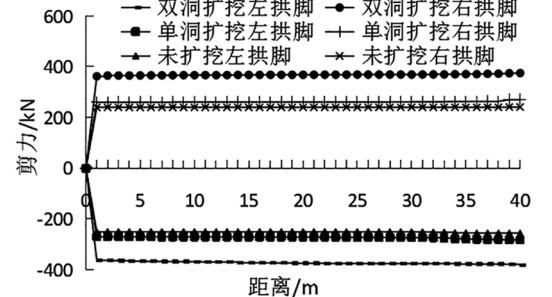
采用 MIDAS /GTS 有限元软件对实际隧道扩挖工程进行分析,得到在地震波作用下扩挖隧道



(a) 拱脚弯矩对比图



(b) 拱顶 45° 轴力对比图



(c) 拱脚剪力对比图

图 11 南洞隧道轴力、剪力及弯矩峰值沿纵向变化曲线对比图  
Fig.11 Comparison of longitudinal curve of axial force, shear force and bending moment of the south tunnel

与未扩挖隧道从静止到震动结束每个时刻的地震响应,得出以下结论:

1)扩挖隧道水平方向位移峰值随埋深的增加有递减的趋势,而内力峰值会略有增大。扩挖隧道水平方向位移峰值受埋深影响较大,建议加强扩挖隧道埋深较小段的抗震设防。

2)扩挖隧道在地震波作用下,越靠近地面的部分水平方向位峰值移越大,并在拱顶处达到最大值。扩挖隧道上部结构的水平方向位移峰值大于未扩挖时,但在拱底及拱脚位置会小于未扩挖时,因此在扩挖隧道抗震设计中要着重考虑隧道上部结构的加强措施。

3)扩挖隧道会增加相邻隧道的水平方向位移峰值,并且对未扩挖隧道的影晌大于对已扩挖

隧道的影响。因此在隧道进行单洞扩挖时,应注意对相邻未扩挖隧道采取适当的支护措施。

4)在 seismic wave 作用下,扩挖隧道结构拱顶 $45^\circ$

处及拱脚位置内力出现拉压循环作用,是扩挖隧道抗震分析时的内力最不利位置,要适当的增加此处衬砌结构的配筋并进行验算。

## 参考文献:

- [1] 王小林,孟敏强,李冀伟,等. 隧道抗震设计中反应位移法与时程分析法的对比分析[J]. 铁道建筑, 2015(7): 35-38.
- [2] 耿萍,张景,何川,等. 隧道横断面反应位移法基本原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3478-3485.
- [3] 卢致强,曹平,李冀伟,等. 地震作用下地铁隧道与邻近建筑相互影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(4): 48-52.
- [4] 刘晶波,王文晖,张小波,等. 地下结构横断面地震反应分析的反应位移法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 163-167.
- [5] 沈昆,张理,贾毅. 山岭隧道抗震设计与减震措施研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(9): 204-207.
- [6] 郭正伟,沈捷. 基于非线性时程分析法的地铁盾构隧道抗震性能研究[J]. 铁道勘察, 2016, 42(2): 28-32.
- [7] 施有志,车爱兰,周先齐,等. 双洞八车道大断面隧道地震动力响应数值分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(4): 510-518.
- [8] 来庆杰. 时程分析的应用[J]. 建筑技术研究, 2013, 191(1): 60-63.
- [9] 刘晶波,王东洋,谭辉,等. 隧道纵向地震反应分析的整体式反应位移法[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 17-26.
- [10] 王立新. 地铁盾构隧道与矿山法隧道接口段抗震计算研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 97-103.
- [11] 邱军领,姚顺意,赖金星,等. 沉管隧道三维地震响应动力时程分析[J]. 公路, 2019(2): 256-261.
- [12] 蒋树屏,方林,林志. 不同埋置深度的山岭隧道地震响应分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 211-216, 225.
- [13] 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.
- [14] 陶连金,李书龙,侯森,等. 山岭隧道洞口段地震响应振动台模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(4): 7-16.
- [15] 高文立,吕涛,杨明松. 高烈度地震区山岭隧道设置减震层的地震动力响应及减震效果分析[J]. 工程与建设, 2018, 32(3): 371-376, 403.

(特约编辑:黄家瑜)