

郑卢鑫, 胡兆兴, 张建俊, 等. 2024. 小净距隧道洞口抗震设防研究[J]. 地震研究, 47(2): 311-320, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0021.

Zheng L X, Hu Z X, Zhang J J, et al. 2024. Research on seismic fortification of the entrance of the tunnel with small interval [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(2): 311-320, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0021.

小净距隧道洞口抗震设防研究*

郑卢鑫¹, 胡兆兴¹, 张建俊², 孙 闯², 王 洋²

(1. 中铁九局集团有限公司大连分公司, 辽宁 大连 116000; 2. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为明确净距与岩体等级对隧道洞口段抗震设防长度的影响规律, 以云南玉溪宝山高陡边坡段小净距隧道为工程依托, 利用 FLAC3D 有限差分软件建立小净距隧道数值模型, 根据室内力学试验确定模型参数, 以校正后的汶川地震波作为震动荷载输入, 针对震动荷载作用下隧道洞口段围岩稳定性进行分析, 探明隧道围岩与支护结构在不同工况下的动力响应特征, 进一步确定合理的隧道抗震设防长度。研究表明: 同一净距条件下, 围岩等级越高, 衬砌结构位移及轴力、应力的响应值越小, 反之亦然; 宝山隧道最不利工况条件为 V 级围岩、0.5B 净距, 在震动荷载作用条件下, 隧道峰值位移最大值为 62.5 cm, 衬砌轴力最大值产生于左、右拱脚处, 洞口段峰值达 1 320 kN, 位移曲线下降率升高临界点最大值为 78 m (6.0B), 最终确定宝山隧道洞口合理设防长度为 78 m。

关键词: 小净距隧道; 高陡边坡; 隧道洞口; 震动荷载; 抗震设防长度; 数值模拟

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)02-0311-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0021

0 引言

小净距隧道是指双线隧道中左右隧道间隔岩体厚度小于规范建议值的隧道结构形式(浙江省交通设计院, 1991; 石洪超等, 2008)。小净距隧道在结构形式上具有一定的特殊性和新颖性, 被广泛用于特殊地段条件下公路、桥梁、隧道的衔接及总体线型优化(黄拔洲等, 2003; 刘艳青等, 2000; 孙明路等, 2009)。随着西部大开发进程的加快, 我国西部地区基础设施的建设数量与日俱增, 由于西部地区多高山的地形特点, 不可避免地出现高陡边坡型隧道, 导致隧道进出口段的施工与围岩稳定性控制技术难度大幅提高, 而当隧道处于地震易发区时, 其合理抗震设防就

更为重要。

关于隧道的抗震性问题, 已有众多学者展开了研究(崔光耀等, 2013, 2018; 何川等, 2014; 王明年, 崔光耀, 2011)。皇民等(2010)通过研究探明了隧道震害机制为隧道软硬围岩交界面处的软岩受到巨大的强制位移作用, 并指出地震惯性力是引发震害的首要因素; 还有学者通过大量隧道震动模拟实验对隧道地震动力响应规律进行研究并取得良好的成果(徐华等, 2013; 皇民等, 2020; 蒋树屏等, 2011; Jiang et al, 2018); 高峰等(2015)、蒋树屏等(2014)、许增会等(2004)则在此基础上考虑震动荷载作用下隧道埋深对隧道稳定性的影响并开展了一系列振动试验, 研究表明隧道埋深对震动荷载作用下隧道稳定性具有至关重要的影

* 收稿日期: 2023-09-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1503101)。

第一作者简介: 郑卢鑫(1992-), 工程师, 主要从事隧道建设相关研究工作. E-mail: 3082789045@qq.com.

响,且在不同类型的震动荷载作用下,隧道衬砌应力随埋深的变化规律基本相似;此外,Tao等(2015)、Asakura等(2007)、Huang和Zhao(2014)通过现场调查、振动台试验与仿真分析等手段针对隧道洞口段围岩震害机理展开研究并取得一定成果。

目前,对于震动荷载作用下隧道稳定性的研究主要集中于单线隧道,且大多集中于洞身段,而针对小净距隧道,尤其是高陡边坡隧道洞口段抗震设防的研究较少。洞口段抗震设防长度的确定是隧道工程设计中的关键环节,设防长度过小,则支护结构不足以维持隧道在震动荷载作用下的稳定性;设防长度过大,则会造成材料的浪费,增加工程成本。因此,开展强震区高陡岸坡小净距隧道洞口抗震设防措施研究具有重要意义。

本文以云南省玉溪市拟建宝山隧道为算例,采用动力有限元分析方法对宝山双线隧道围岩稳定性进行分析计算,选取典型的汶川地震波对隧道进行加载,使用FLAC3D数值模拟软件对小净距隧道在震动荷载作用下的力学响应进行模拟,研究隧道围岩与衬砌在各工况条件下所产生的位移、内力及应力响应,确定隧道在震动荷载作用下最适宜的设防长度,为隧道后期支护设计与优化提供指导依据。

1 工程背景

1.1 隧道概况

宝山隧道位于云南省玉溪市峨山县双江街道宝山村,为拟建分离式隧道,右线起止桩号K16+990~K18+630,长度1640m;左线起止桩号ZK17+035~ZK18+657,长度1622m。隧道处于高烈度地震带生态脆弱区且洞口位于斜坡地带,坡度约为60°,地形高陡。隧道进口段穿过山体的表层,隧道区洞口及洞身段基本为坡积土层,局部为风化岩,围岩以IV、V级为主,岩土体节理裂隙稍发育,地下水发育。隧道出口覆盖层主要为第四系残坡积角砾、碎石、粉质黏土,

均匀性差且厚度不均,岩土体力学性质较差,且洞顶表层土体多处存在裂缝,在天然状态下边坡现状整体存在失稳风险。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),该区域地震频繁且震级较大。依据地区经验及类似工程经验,综合判定隧道区工程场地类别为II类。

1.2 隧道破损状况

由于宝山隧道处于强震区,受地震作用影响,隧道洞口易出现落石灾害、洞门被砸坏、边仰坡滑塌、崩塌、洞门部分堵塞等现象。目前,隧道洞口段二衬局部出现网状开裂,衬砌开裂处发生渗水,严重处出现混凝土剥落,掉块,甚至衬砌垮塌等严重震害类型。隧道现场破损状况如图1所示。



(a) 混凝土开裂脱落

(b) 钢架弯折失效

图1 宝山隧道洞口段衬砌震害破损状况

Fig. 1 Seismic damage to the lining at the entrance of the Baoshan tunnel

1.3 隧道洞口边坡岩体动力学特性

宝山隧道岩体主要为强风化板岩。为了解岩体性质,为数值模拟提供参数,通过现场钻孔取样进行室内力学试验,设置两组实验,每组制备尺寸为50mm×100mm的标准圆柱试样各2个,采用英国GDS软岩流变仪及TAW2000电液伺服压力试验机等对试件进行室内试验,测定隧道围岩的相关物理与力学参数。对于试件动弹模量的测定,实验中采用DT-18岩石动弹模量测量仪进行实验,试件为100mm×100mm×100mm的棱柱体。以两组实验所得相应测定值的平均值作为本文中岩体的相关力学参数值。岩体动弹模量计算

公式如下：

$$E_{dt} = 9.65 \times 10^{-4} \frac{Gf^2 L^3 R}{bh^3} \quad (1)$$

式中： E_{dt} 为动弹模量； G 为试件质量； f 为试件的自振频率； L 、 b 、 h 分别表示试件的长、宽、高； R 为修正系数，取值1.5。测试结果见表1。

表1 岩体物理力学参数实验结果

Tab.1 Experimental results of the physical and mechanical parameters of rock

围岩级别	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	单轴抗压强度 σ_c/MPa	阻尼比 λ (%)	动弹模量 E_{dt}/MPa	阻尼系数 $C/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$
IV	0.44	37.6	32.4	4.82	35.3	3.25	155	1.68
V	0.35	25.2	27.0	2.61	26.5	2.93	130	1.52

2 数值模型及加载条件

2.1 隧道数值模型及尺寸

考虑隧道工程在数值计算时会产生一定的误差，结合弹性力学中圣维南原理，拟建隧道尺寸应适当放大。杨林德等（2003）和陈国兴等（2010）的研究表明：当计算模型尺寸大于 $5B$ (B 为隧道开挖宽度) 时，隧道模型的边界影响效应较小。为探明震动荷载作用下隧道边坡的稳定性，以确定合理的设防长度，确定隧道模型上部分呈梯形体状，上边界长 120 m，下边界长 200 m，高 130 m，洞口段形成约 60° 的边坡，隧道数值模型具体细部尺寸如图 2 所示。该隧道采用 Mohr - Coulomb 本构模型，Null 模型模拟隧道开挖。对于数值模型的边界条件确立，由于隧道最大埋深为 134 m，所以并不需要在围岩边界设

置等效荷载，选用围岩自重方式对隧道围岩进行加载，模型位移边界固定在水平方向及底部，与现场实际边界条件基本相符。围岩的力学参数值由室内试验测得。

以 FLAC3D 软件中的动力学分析模块为计算工具对宝山隧道模型进行动力响应分析。对隧道模型赋予室内实验所测得的动力参数，通过 zone face apply 命令在模型下边界处进行震动荷载的输入，实现震动荷载的加载。在进行隧道地震响应分析之前，先使用 FLAC3D 软件内置的 Dynamic Input Wizard 插件对输入的地震波进行基线校正，消除地震波的漂移现象而导致的计算结果失真，震动荷载校正后在模型底部边界输入，震动荷载加载时间为 20 s。在数值模型中模拟输入地震波，对比分析隧道模型在不同围岩等级与不同净距工况下的动力响应特征。隧道数值模型动力监测点布置及震动荷载输入方式如图 3 所示。

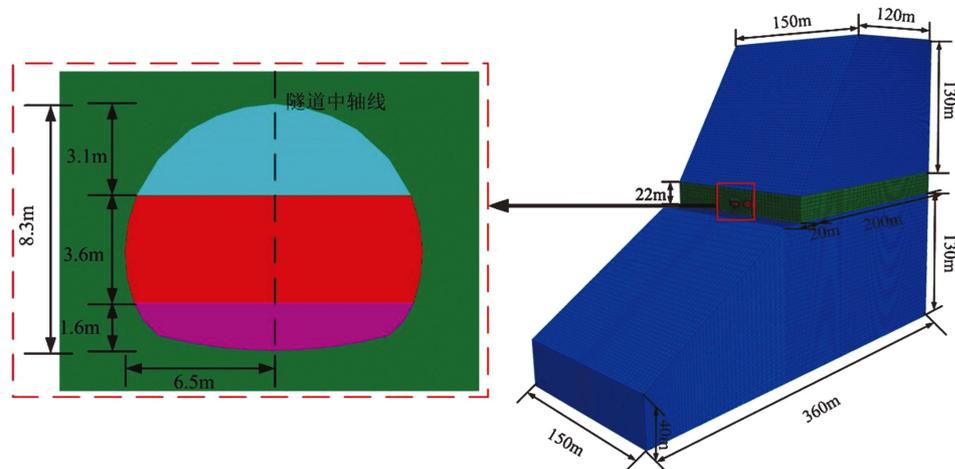


图2 宝山隧道模型尺寸

Fig.2 Size of the Baoshan Tunnel model

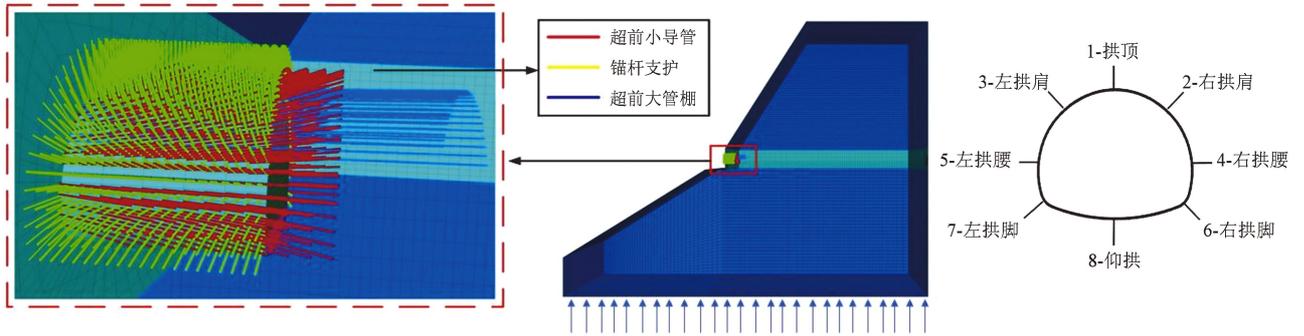


图3 隧道动力响应监测布置与震动荷载加载示意图

Fig. 3 Layout of the dynamic response monitoring of the Tunnel and seismic loading

2.2 隧道洞口段抗震支护方案

宝山隧道工程地质复杂、围岩强度弱，隧道开挖后围岩只能保持短暂的稳定，当隧道的初期支护未完全施作时，围岩变形将会超出其所允许的变形范围，产生一定程度的破坏。因此，针对宝山隧道的软弱围岩支护方案拟设计采取超前预支护辅助结构，将超前加固和复合式支护结合起来。洞口段支护结构为超前大管棚预支护结合超前小导管预支护的形式，支护结构参数见表2。隧道洞身段为复合式支护，将锚杆、湿喷砼（采用Φ25钢筋锚杆、锚杆长3.5 m、间距为60 cm，C25混凝土喷29 cm）的初期加固措施和浇筑混凝土

（C30钢筋混凝土厚60 cm）的二次支护结合在一起共同加固。支护结构布置如图4所示，其力学性能见表3、4。

表2 洞口段支护结构参数

Tab. 2 Parameters of supporting structures in the opening section

结构单元	材料	节长/ m	环距/ cm	设置范围/ (°)
管棚	Φ108mm×6 热轧无缝钢管	6.0	40	140
小导管	Φ140mm×8 热轧无缝钢管	4.5	40	170
锚杆	Φ25mm 钢筋锚杆	3.0	60	170

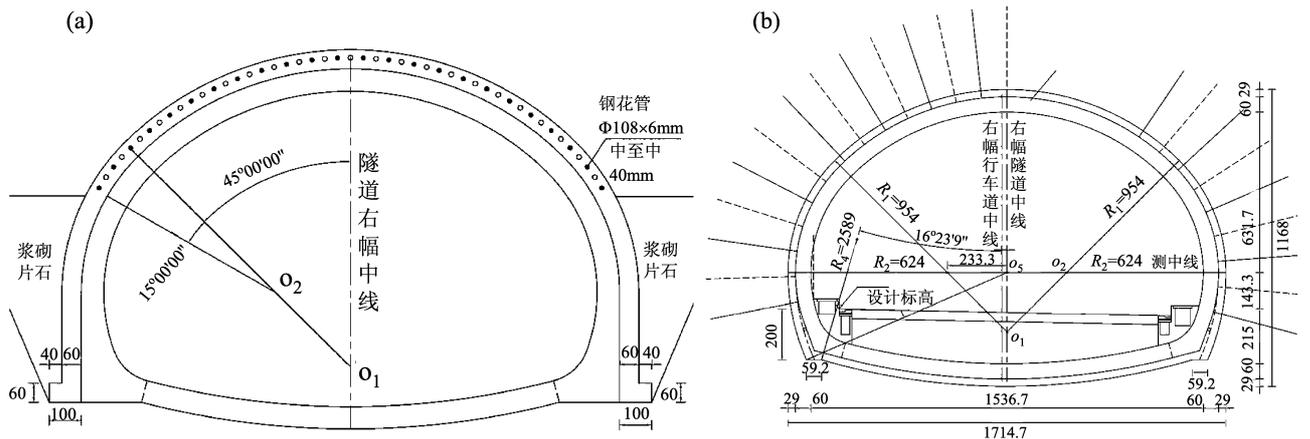


图4 隧道超前预支护 (a) 和二次支护 (b) 结构布置示意图 (单位: cm)

Fig. 4 Sketch of the layout of the Tunnel's pre-support (a) and secondary support (b) structure

表3 锚杆支护参数

Tab. 3 Bolt support parameters

支护材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	屈服强度 σ/MPa	密度 ρ/ (kg·m ⁻³)	钻孔直径 D/mm	浆体摩擦角/ (°)	浆体弹性模量/ GPa	浆体黏聚力/ MPa
锚杆	200	0.23	400	7 800	50	39	4.83	6.45

表4 管棚与混凝土支护参数

Tab. 4 Parameters of pipe shed and concrete support

种类	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 ρ / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
管棚	206	0.20	7 700	—	—
小导管	190	0.30	7 800	—	—
混凝土	0.13	0.35	1 910	25.2	27

2.3 地震波的选取

为在最大程度上确保计算结果的安全性,同时使得隧道支护结构保留足够的安全储备,本文选取汶川地震波对隧道进行加载,研究截取能量最为集中的波段以速度的方式在FLAC3D有限差分软件中输入。在进行隧道地震响应分析之前,采用FLAC3D软件内置的Dynamic Input Wizard插件对输入的地震波进行基线校正,以此来消除地震波漂移现象的发生而导致计算结果失真的影响。基线校正后汶川地震波的位移时程曲线如图5所示。

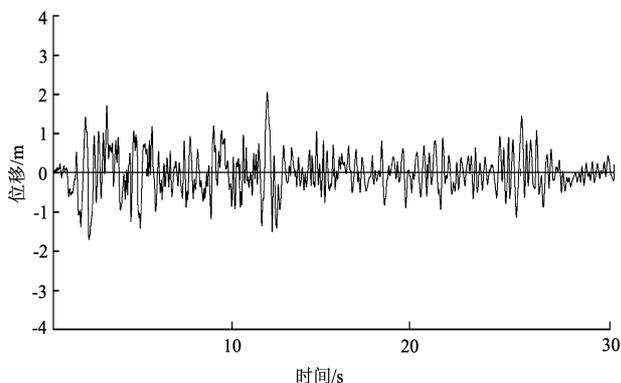


图5 汶川地震波位移时程曲线图

Fig. 5 Time-history curve of the displacement wave of the Wenchuan earthquake

2.4 计算方案

针对高陡边坡小净距隧道洞口段围岩与支护结构动力响应特征进行模拟研究。净距分别选取 $0.5B$ 、 $1.5B$ 两种相对位置,由于工程中岩体主要以IV、V级围岩为主,随着净距的扩大,左右双线隧道所处围岩级别存在一定差异,故数值模拟中围岩级分别选取IV、V级进行分析,工况信息见表5。

表5 数值模拟工况

Tab. 5 Numerical simulation conditions

计算工况	隧道净距/m	隧道模拟计算长度/m	围岩级别
1	$0.5B$	200	IV
2	$0.5B$	200	V
3	$1.5B$	200	V

注: B 为隧道开挖宽度,本文中 $B=13\text{ m}$ 。

3 隧道稳定性分析

3.1 隧道监测断面峰值位移变化规律

通过数值模拟计算得出各工况条件下的不同围岩监测断面峰值位移变化规律,如图6a所示。由图6a-1可知,当隧道洞口段穿越IV级围岩时,双洞净距为 $0.5B$ 时隧道监测断面各点的峰值位移随隧道进深的增加而呈现下降趋势,在下降的过程中围岩峰值位移呈现出一个较明显的临界点,该临界点以距洞口距离为 55 m ($4.2B$)为标志。临界点前段围岩峰值位移最高达 52.0 cm ,位移下降率仅为 0.073% ;临界点后段围岩径向峰值位移下降率增大,达到 0.6% ,此时围岩位移为 29 cm 并开始趋于缓和。对比分析图6a-1、a-2可以看出,同一净距条件下,V级围岩峰值位移大于IV级围岩,最大值为 62.5 cm ,较IV级围岩增大 20.2% ,位移峰值下降率增大位置距洞口 74.5 m ($5.7B$),较IV级围岩延后 19.5 m ,且临界值所出现的位置相对于推迟。

由工况1与工况2可知,隧道洞口段抗震设防长度很大程度上取决于围岩岩体性质,且与岩体等级呈负相关关系。同一净距条件下,围岩等级越高,岩体条件越好。隧道受震动荷载的扰动效应越弱,洞口段相应抗震设防长度要求也越低。在此基础上探明了对应围岩等级下的隧道洞口段抗震合理设防长度。为进一步探究除岩体性质外的隧道净距对隧道洞口段抗震性的影响规律,模拟计算中改变双线隧道的净距为 $1.5B$,采用围岩等级为V级,计算得出隧道在汶川波作用下径向位移峰值响应规律如图6a-3所示。

对比分析图6a-2与图6a-3可得:在同一围岩等级条件下,不同净距隧道各关键点的峰值位

移变化规律基本相似,只是数值不同。当隧道净距扩大到1.5B时,位移下降率升高临界点位于距洞口39 m (3.0B)处,临界点前段位移峰值最大

达到37.4 cm,发生在拱顶位置处,位移峰值下降率约为0.188%;临界点后位移峰值下降率为0.8%,围岩趋于稳定。

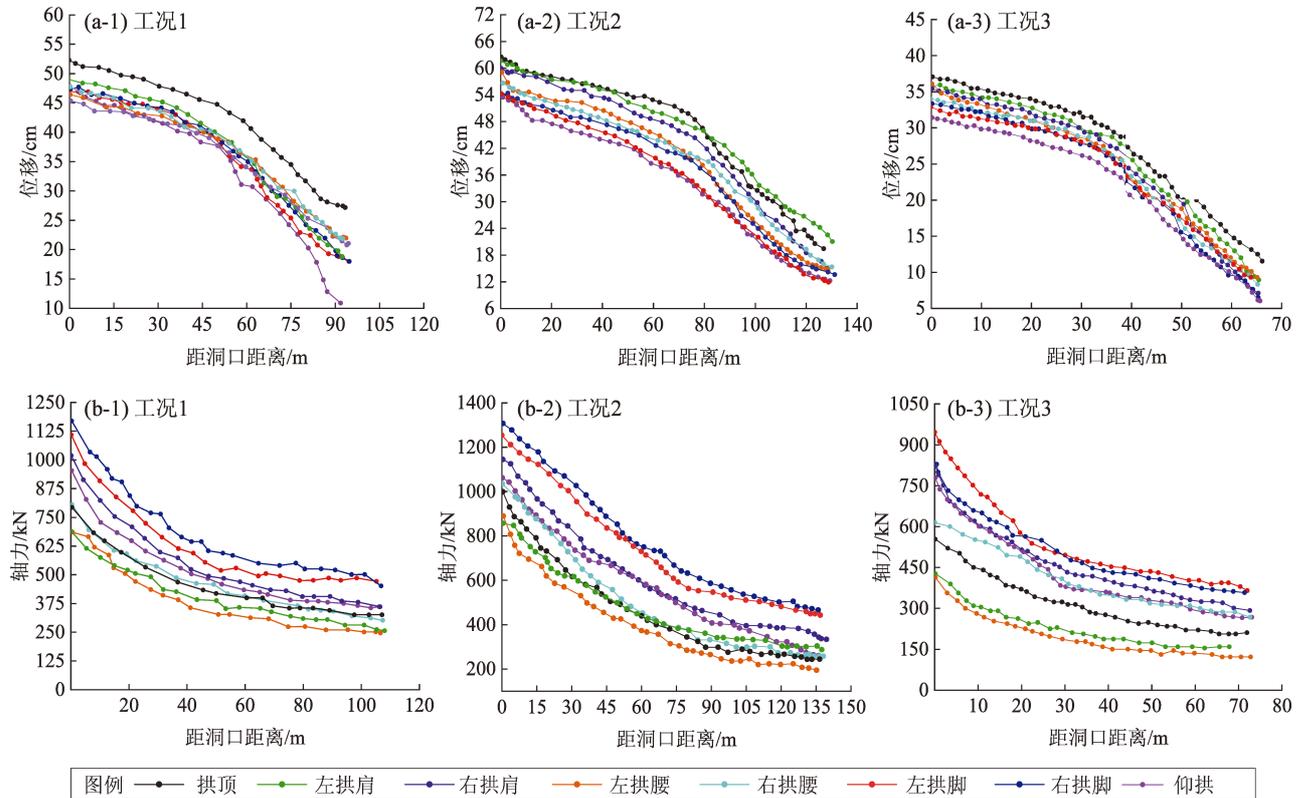


图6 隧道监测断面峰值位移变化规律 (a) 和衬砌结构轴力纵向响应规律 (b)

Fig. 6 Variation law of the peak displacement of the Tunnel's monitoring section (a) and the longitudinal response law of the lining axial force (b)

分析图7a结果可知:隧道在震动荷载影响的最不利工况下(工况2),衬砌结构位移的响应值突出区域主要分布于距洞口75 m (5.7B)内,在较安全工况下(工况1、3),衬砌结构位移的响应值突出区域主要分布于距洞口39 m (3.0B)与55 m (4.2B)以内。因此,建议取75 m (5.7B)作为隧道洞口合理设防长度。

3.2 各工况条件下衬砌结构轴力纵向响应规律

从隧道监测断面峰值位移沿隧道进深的变化规律确定出一个合理的隧道抗震设防范围,采用隧道衬砌结构轴力峰值响应对上述结果进行验证,隧道衬砌结构轴力纵向响应计算结果如图7b所示。

从图7b可以看出,沿隧道进深方向,不同工况下衬砌结构的动力响应逐渐减弱并趋于稳定。

对于工况1(图6b-1),衬砌结构最大轴力位于右拱脚处,为1172 kN。随着隧道进深的增加,隧道受震动荷载的作用效应逐渐减弱,在距洞口62 m (4.7B)处衬砌轴力开始趋于稳定,其值为623 kN,比洞口段衬砌结构轴力减少47.2%。对于工况2(图6b-2)衬砌结构轴力,其最大值位于左拱脚处,洞口段峰值达1320 kN,比IV级围岩时增大10%,轴力下降率减小的临界点出现在距洞口72.4 m (5.5B)位置,较IV级围岩条件下延后了12.4 m,此后轴力下降率逐渐减小并趋于稳定。对比分析工况2、3(图6b-2、b-3)可知,在水平纵向地震动作用下,当隧道净距增大后,隧道受震动荷载作用的扰动效应降低,隧道衬砌结构轴力下降率减小的临界点向洞口靠近,为距洞口39 m (3B),且整体数值约减小23%。

综合震动荷载作用下衬砌结构轴力峰值的计算结果可知：隧道在震动荷载影响的最不利工况下（工况2），衬砌结构轴力的响应值突出区域主要分布于距洞口72.4 m（5.5B）内，在较安全工况下（工况1、3），衬砌结构轴力的响应值突出区域主要分布于距洞口39 m（3B）与62 m（4.7B）以内。因此，基于衬砌安全使用的隧道洞口合理设防长度建议值应取为72.4 m（5.5B）。

3.3 衬砌剪力、弯矩及主应力纵向响应规律

由上述位移与轴力计算结果可知，不同隧道净距与围岩级别对隧道抗震性影响差异较大，工况2下隧道所需设防长度为上限。为精确确定不同因素相互影响下隧道抗震合理设防长度的具体值，针对工况1与工况3，对其震动荷载作用下衬砌的剪力、弯矩及主应力进行对比，确定最终隧道合理抗震设防长度下限值，计算结果如图7所示。

由图7可知：沿隧道进深方向，两种工况下，衬砌产生的剪力、弯矩及最大主应力的变化基本

一致。在工况1下，虽然岩体质量较好，但隧道净距较小，剪力趋于稳定的断面距洞口间距为65 m（5B）。而工况3相比于工况1，围岩级别降低，但隧道双线净距增大至1.5B，此时剪力趋于稳定的断面距洞口间距为39 m（3B），隧道受震动荷载作用的动力响应范围大大缩小。而针对衬砌所产生的弯矩与最大主应力，在工况1下，弯矩与主应力最大值分别为128 kN·m、1 100 kPa，而趋于稳定时分别为60 kN·m、575 kPa，趋于稳定的断面距洞口距离分别为6.0B、5.5B。工况3下，弯矩与主应力其最大值分别为92 kN·m、910 kPa，而趋于稳定时分别为47 kN·m、480 kPa，趋于稳定时断面距洞口间距分别为3.4B、3.8B。

由上述可知，在围岩等级与隧道净距这两个影响因素中，隧道净距对隧道抗震性的影响程度大于隧道围岩等级。为探究不同净距的影响效应，选取8组同一围岩等级、不同净距隧道进行震动模拟，模拟计算结果如图8所示。

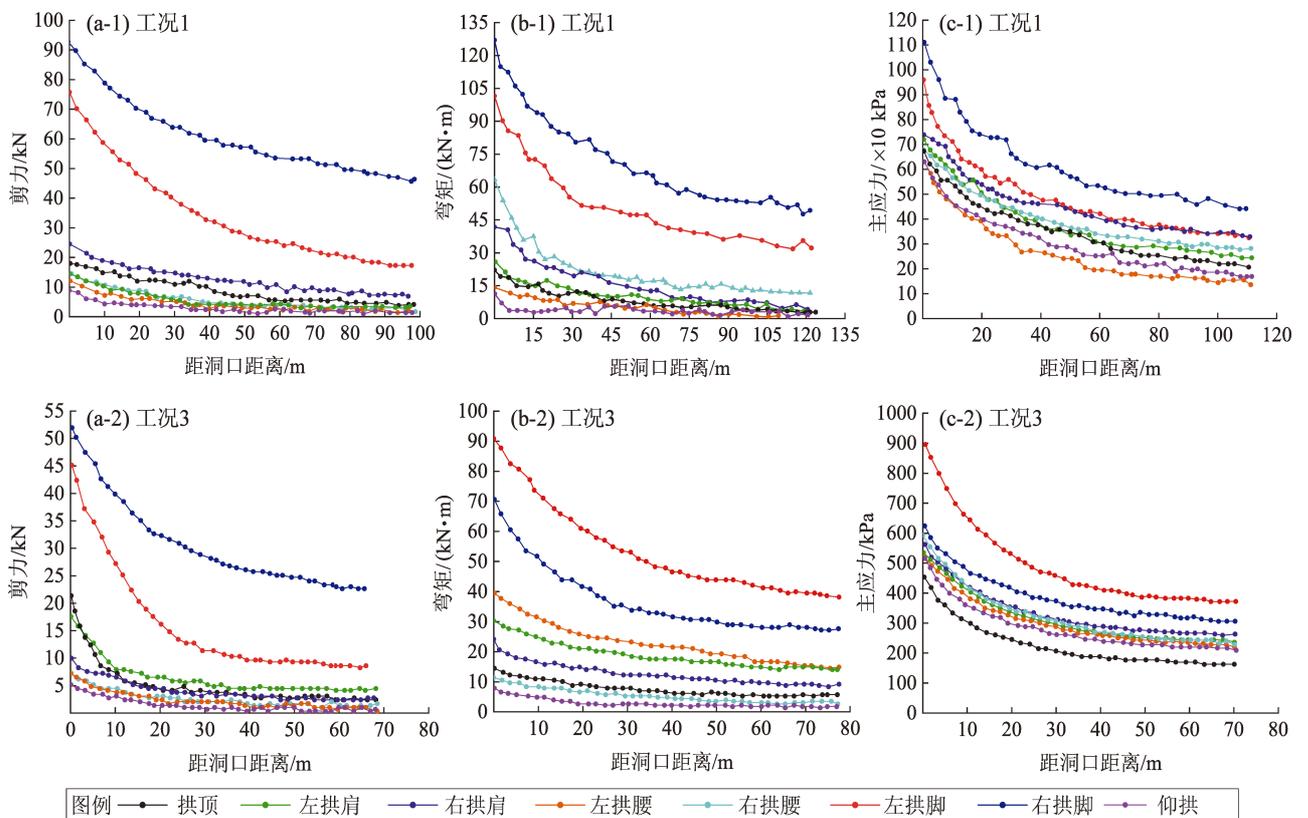


图7 断面监测点剪力 (a)、弯矩 (b) 和主应力 (c) 纵向变化规律
 Fig.7 Longitudinal variation law of shear force (a), bending moment (b) and principal stress (c) at cross-section monitoring points

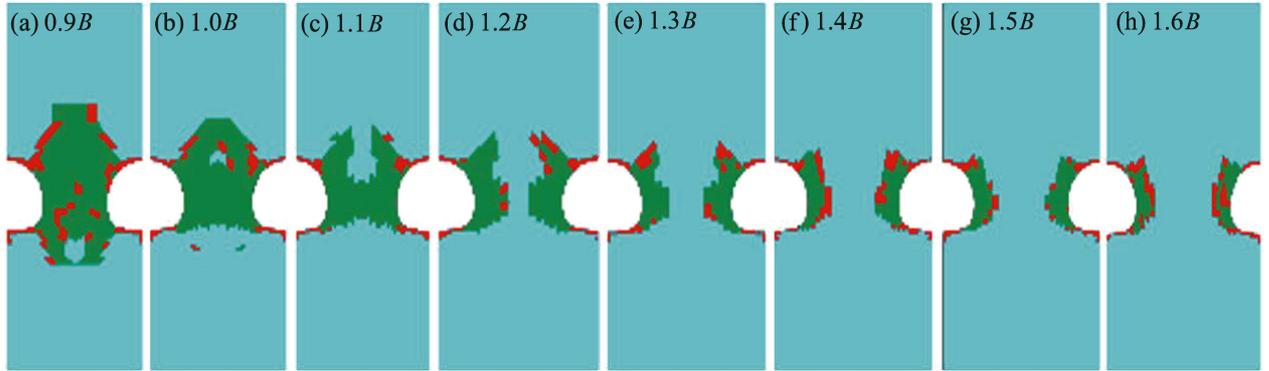


图8 不同净距隧道中夹岩柱的塑性区分布

Fig. 8 Distribution of the plastic zone of rock pillars in tunnels with different clear distances

从图8中可以看出,当隧道净距较小时,双线隧道围岩塑性区产生交会,使得隧道在震动荷载下的稳定性大大降低。随着隧道净距的扩大,双线隧道中夹岩柱厚度增大,左右双线隧道围岩塑性区交会部分逐渐减小,在 $1.2B$ 的时候不再产生交会,围岩发挥一定承载能力使得隧道抗震性能有所提升,隧道所需抗震设防长度相应缩短。

综上所述:在V级围岩条件下,可分别取 $6.0B$ 、 $3.5B$ 作为 $0.5B$ 与 $1.5B$ 小净距隧道的洞口抗震合理设防长度;IV级围岩条件下,取 $5.7B$ 作为 $0.5B$ 小净距隧道的洞口抗震合理设防长度。宝山隧道净距13m,隧道穿越围岩主要为IV、V级围岩。基于以上分析,为确保隧道在震动荷载作用下维持稳定且具有一定安全储备,宝山隧道在最不利条件下洞口段合理设防长度应取为 $6.0B$ (78m)。

4 结论

本文采用FLAC3D软件中的动力学分析模块结合室内实验所测得岩土动力参数对宝山双线隧道模型进行动力响应分析。通过采用FLAC3D软件数值模拟3种工况下隧道在地震荷载作用下的位移、内力以及应力的响应规律,探究围岩等级与隧道净距对隧道动力响应的影响规律,求得不同工况下隧道洞口段抗震合理设防长度,主要得出如下结论:

(1) 围岩等级与净距均对隧道的动力响应值有较大影响且呈负相关。同一净距条件下,围岩

等级越高,衬砌结构位移及内力、应力的响应值越小;同一围岩等级条件下,净距越大,衬砌结构位移及内力、应力的响应值也越小。

(2) 宝山隧道最不利工况条件为V级围岩, $0.5B$ 净距。在震动荷载作用条件下,隧道峰值位移最大值为62.5cm,衬砌结构轴力最大值产生于左、右拱脚处,洞口段峰值达1320kN,位移曲线下降率升高临界点最大值为78m($6.0B$),因此,宝山隧道隧道洞口合理设防长度建议值应取78m。

参考文献:

- 陈国兴,王志华,左熹,等.2010.振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J].岩土工程学报,32(1):89-97.
- Chen G X, Wang Z H, Zuo X, et al. 2010. Development of a stacked shearing soil box for shaking table test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 32(1): 89-97. (in Chinese)
- 崔光耀,王明年,于丽,等.2013.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,35(6):1084-1091.
- Cui G Y, Wang M N, Yu L, et al. 2013. Analysis of earthquake damage of highway tunnel opening in Wenchuan earthquake and research on damage mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 35(6): 1084-1091. (in Chinese)
- 崔光耀,伍修刚,王明年,等.2018.汶川地震区跨断层带公路隧道震害形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,29(2):108-114.
- Cui G Y, Wu X G, Wang M N, et al. 2018. Analysis on the formation mechanism of earthquake damage of highway tunnels across fault belts in Wenchuan earthquake area [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 29(2): 108-114. (in Chinese)
- 高峰,孙常新,谭绪凯,等.2015.不同埋深隧道的地震响应振动台试验研究[J].岩土力学,36(9):2517-2522.
- Gao F, Sun C X, Tan X K, et al. 2015. Shaking table test study on seismic response of tunnels with different buried depths [J]. Rock and Soil Mechanics, 36(9): 2517-2522. (in Chinese)

- 何川,李林,张景,等. 2014. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报,36(3):427-434.
- He C, Li L, Zhang J, et al. 2014. Study on earthquake damage mechanism of tunnel crossing fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 36(3):427-434. (in Chinese)
- 皇民,刘马群,王安华,等. 2010. 隧道地震破坏的主要形式及影响因素分析[J]. 交通科技与经济,12(1):60-62.
- Huang M, Liu M Q, Wang A H, et al. 2010. Analysis of the main forms and influencing factors of tunnel earthquake damage[J]. Transportation Science and Technology and Economics, 12(1):60-62. (in Chinese)
- 皇民,苑俊杰,赵玉如,等. 2020. 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,31(1):113-119.
- Huang M, Yuan J J, Zhao Y R, et al. 2020. Seismic response analysis and shaking table model test at the entrance of Shuangdong tunnel in high-intensity area[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 31(1):113-119. (in Chinese)
- 黄拔洲,陈少华,秦峰. 2003. 小净距隧道在京福高速公路上的实践[J]. 重庆大学学报:自然科学版,26(10):19-22.
- Huang B Z, Chen S H, Qin F. 2003. Development of parallel tunnels with super-small interval in Beijing - Fuzhou freeway engineering [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 26(10):19-22. (in Chinese)
- 蒋树屏,方林,林志. 2014. 不同埋置深度的山岭隧道地震响应分析[J]. 岩土力学,35(1):211-216.
- Jiang S P, Fang L, Lin Z. 2014. Seismic response analysis of mountain tunnels with different buried depths[J]. Rock and Soil Mechanics, 35(1):211-216. (in Chinese)
- 蒋树屏,文栋良,郑升宝. 2011. 嘎隆拉隧道洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,30(4):649-656.
- Jiang S P, Wen D L, Zheng S B. 2011. A large-scale shaking table model test study on the seismic response of the entrance of the Galongla Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(4):649-656. (in Chinese)
- 刘艳青,钟世航,卢汝媛,等. 2000. 小净距并行隧道力学状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,19(5):590-594.
- Liu Y Q, Zhong S H, Lu R S, et al. 2000. Experimental study on mechanical state of parallel tunnels with small clearance distance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 19(5):590-594. (in Chinese)
- 石洪超,丁宁,张继春. 2008. 爆破动力作用下小净距隧道围岩振动效应分析[J]. 爆破,25(1):74-78.
- Shi H C, Ding N, Zhang J C. 2008. Analysis of vibration effects on surrounding rock for small clear distance tunnel under the dynamic action of blasting[J]. Blasting, 25(1):74-78. (in Chinese)
- 孙明路,朱永全,何本国. 2009. 小净距地铁隧道围岩受力特性研究[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版),22(1):55-59.
- Sun M L, Zhu Y Q, He B G. 2009. Research on the mechanical characteristics of surrounding rock of small clear distance subway tunnel[J]. Journal of Shijiazhuang Railway University: Natural Science Edition, 22(1):55-59. (in Chinese)
- 王明年,崔光耀. 2011. 高烈度地震区隧道设置减震层的减震原理研究[J]. 土木工程学报,44(8):126-131.
- Wang M N, Cui G Y. 2011. Research on the shock absorption principle of the shock absorption layer in the tunnel in the high-intensity earthquake area[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 44(8):126-131. (in Chinese)
- 徐华,李天斌,王栋,等. 2013. 山岭隧道地震动力响应规律的三维振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,32(9):1762-1771.
- Xu H, Li T B, Wang D, et al. 2013. Three-dimensional shaking table model test research on seismic dynamic response law of mountain tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(9):1762-1771. (in Chinese)
- 许增会,宋宏伟,赵坚. 2004. 地震对隧道围岩稳定性影响的数值模拟分析[J]. 中国矿业大学学报,(1):44-47.
- Xu Z H, Song H W, Zhao J. 2004. Numerical simulation analysis of the impact of earthquakes on the stability of surrounding rock in tunnels [J]. Journal of China University of Mining and Technology, (1):44-47. (in Chinese)
- 杨林德,季倩倩,郑永来,等. 2003. 软土地铁车站结构的振动台模型试验[J]. 现代隧道技术,40(1):7-11.
- Yang L D, Ji Q Q, Zheng Y L, et al. 2003. Shaking table model test of soft soil subway station structure [J]. Modern Tunnel Technology, 40(1):7-11. (in Chinese)
- 浙江省交通设计院. 1991. 公路隧道设计规范[M]. 北京:人民交通出版社.
- Zhejiang Provincial Communications Design Institute. 1991. Design Specifications for Highway Tunnels[M]. People's Communications Press. (in Chinese)
- GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].
- GB 18306—2015, Seismic ground motion parameter zonation map of China[S].
- Asakura T, Kojima Y, Matsuoka S, et al. 2007. Damage to mountain tunnels by earthquake and deformation mechanism[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 659:819-824.
- Huang S K, Zhao J. 2014. Seismic analysis of the entrance section of a nuclear power intake tunnel[J]. Advanced Materials Research, 1065-1069:426-432.
- Jiang X L, Wang F F, Yang H, et al. 2018. Dynamic response of shallow-buried small spacing tunnel with asymmetrical pressure: Shaking table testing and numerical simulation[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 36(4):1-19.
- Tao S, Gao B, Xin C. 2015. Seismic damage analysis of tunnel front slope and shaking table tests on highway tunnel portal[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20(8):2167-2182.

Research on Seismic Fortification of the Entrance of the Tunnel with Small Interval

ZHENG Luxin¹, HU Zhaoxing¹, ZHANG Jianjun², SUN Chuang², WANG Yang²

(1. *China Railway 9th Bureau Group Co., Ltd., Dalian Branch, Dalian 116000, Liaoning, China*)

(2. *Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin 123000, Liaoning, China*)

Abstract

In order to find out the influence of the clearance distance and the rock mass grade on the seismic fortification length of a tunnel entrance section, based on the project of the small-interval Baoshan Tunnel in the high-and steep-slope section of the Yuxi-Chuxiong super highway, the numerical model of the small-interval tunnel is established by using FLAC3D finite difference software, and the model parameters are determined according to the indoor mechanical test. The corrected Wenchuan wave was inputted as the ground motion loading to analyze the stability of the surrounding rock of the Tunnel entrance section. The dynamic response characteristics of the surrounding rock and supporting structure of the Tunnel under different working conditions are discovered. Further, the Tunnel's reasonable length of seismic fortification is determined. The results show that for the same clearance distance, the higher the surrounding rock grade is, the smaller the response values of lining displacement, internal force, and stress will be, and vice versa. The most unfavorable working conditions for Baoshan Tunnel are Grade V surrounding rock and $0.5B$ net distance. By the action of the ground-motion loading, the Tunnel's peak displacement is 62.5 cm. The maximum lining axial force is generated at both the left and the right feet; the peak value of the entrance section reaches 1320 kN. At the critical point where the displacement and the peak curve decline, the maximum value is 78 m ($6.0B$). Finally, the reasonable fortification length of the Baoshan Tunnel's entrance is determined as 78 m.

Keywords: small clearance tunnel; high- and steep-slopes; tunnel entrance; earthquake load; seismic fortification length; numerical simulation