

震动荷载条件下软岩隧道仰坡变形规律与钢纤维混凝土优化支护研究

刘军军

(中铁十八局集团第三工程有限公司, 河北 涿州 072750)

摘要: 为明确高仰坡软岩隧道洞口段围岩震动响应机制, 为软岩隧道抗震设防提供设计基础, 本文以某软岩隧道为研究对象, 首先分析地震荷载作用效应的有限元求解方法, 采用 FLAC3D 数值模拟软件建立了软岩隧道模型, 选用典型汶川波对模型进行震动加载, 并分析了隧道在震动荷载作用下的位移变化规律。同时, 提出软岩隧道高强韧性抗震支护设想, 开展钢纤维混凝土支护材料研发实验, 最后采用该材料对隧道进行抗震支护计算分析。计算结果表明: 通过在浆体内掺入钢纤维, 二衬的各项力学性能得到优化, 隧道拱顶最大变形量减少 47.1%, 进一步提高了支护结构的安全储备。

关键词: 隧道工程; 围岩震动响应机制; 位移变化; 隧道支护; 数值模拟

中图分类号: U455

文献标识码: A

Research on the Deformation Law of Soft Rock Tunnel Slope under Vibration Load Conditions and Optimization Support of Steel Fiber Reinforced Concrete

LIU Junjun

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou 072750, Hebei, China)

Abstract: To clarify the vibration response mechanism of the surrounding rock at the entrance of a high-slope soft rock tunnel and provide a design basis for the seismic fortification of soft rock tunnels, this study takes a soft rock tunnel as the research object. First, the finite element solution method for the effect of seismic loads is analyzed. A soft rock tunnel model is established using FLAC3D numerical simulation software, and the model is subjected to vibration loading with typical Wenchuan waves. Then, the displacement variation law of the tunnel under vibration loads is analyzed. Meanwhile, the idea of high-strength and toughness seismic support for soft rock tunnels is proposed, and research and development experiments on steel fiber reinforced concrete support materials are conducted. Finally, this material is used for the seismic support calculation and analysis of the tunnel. The calculation results show that by adding steel fibers into the slurry, the mechanical properties of the secondary lining are optimized, the maximum deformation of the tunnel arch crown is reduced by 47.1%, and the safety reserve of the support structure is further improved.

Key words: tunnel engineering; mechanism of rock mass vibration response; displacement variation; tunnel support; numerical simulation

随着我国西部大开发进程持续推进, 西部地区基础设施建设发展迅猛, 隧道工程建设的增长

态势尤为突出。受西部地区多山的特殊地形条件影响, 隧道结构也成为区域线路规划中较为适宜

收稿日期: 2024-10-07

作者简介: 刘军军, 助理工程师, 本科, 研究方向为市政工程及地下铁路隧道

的设计形式。西部地区地处构造地质活动较为剧烈的板块区域,地震多发频发,给当地隧道工程建设带来诸多棘手难题与严峻挑战。因此,隧道抗震支护设计已成为我国震区隧道工程建设中的重点与难点。

国内外众多学者对隧道在震动荷载作用下的力学响应机制、防治理论与技术进行了大量的研究,取得了较为丰硕的成果。贾世济等^[1]通过建立数值模型对隧道震动响应进行分析,并采用注浆技术防治隧道震动灾害,研究表明,注浆厚度对降低围岩位移、位移加速度以及应力相应峰值等均具显著效果;崔光耀等^[2-3]采用大型振动台模型试验对隧道衬砌结构在振动荷载作用下的力学响应机制进行了研究,提出“结构加强+铰接”的隧道抗震支护结构。朱合华等^[4-5]对穿越断层等特殊地址区域的隧道抗震技术进行了研究,提出了“震前预留、震中稳定、震后恢复”的隧道震动灾害防治体系。TAO J G 等^[6]研发出了一种“恒阻大变形锚索”(NPR),并将其应用于实际隧道抗震技术中。李亚东等^[7-8]以沉管隧道为研究对象,采用数值模拟方法,探究了P波入射条件下,采用不同介质填充基槽时的隧道纵向力学响应规律,研究结果表明,采用砂土替代黏土填充沉管隧道基槽时,隧道抗震性能大幅提升。Zhang J H 等^[9-10]以盾构隧道为研究对象,采用拟动力法对隧道掌子面稳定性进行了分析,最终明确了盾构隧道掌子面在震动荷载作用下的最佳支护范围。耿萍等^[11]等采用动力分析与振动台模型试验相结合的分析手段,对穿越断层破碎带及振动荷载双重不利条件下的隧道支护进行研究,明确了穿越断层隧道的合理抗震支护长度为3.5倍隧道跨度。殷允腾等^[12]针对隧道结构在土

体与岩体界面处的破坏机理及防治措施进行了研究,结果表明,当隧道结构与围岩之间的密度、刚度越相近,土-岩界面处隧道破坏程度就越小。

综上所述,现有研究大多集中于分析穿越断层隧道或常规隧道在震动荷载下的力学机理,且大多集中于隧道的洞身段,而对于洞口段尤其是急倾斜洞口段围岩的震动响应机制鲜有研究。因此,本文以西部某软岩高仰坡隧道为工程背景,开展了软岩隧道急倾斜洞口段围岩震动力学响应机制与治理技术研究,讨论了震动荷载条件下隧道围岩在不同方向上的变形状况,设计高强度钢纤维混凝土应用于隧道抗震支护,通过数值模拟计算确定了合适的钢纤维混凝土喷射厚度,期望此次研究成果能够为后续类似隧道工程的抗震治理设计提供参考。

1 隧道工程概况

1.1 隧道地质状况

本文所研究的隧道为云南省境内的某在建隧道,该隧道地处高烈度地震带生态脆弱区。隧道全长1.7 km,最大埋深150 m;洞口坐落于斜坡地带,山体坡度达60°。洞口仰坡高,坡体上部常出现岩石垮塌及小滑坡等现象,稳定性差。勘察资料显示,隧道围岩为V级,泊松比为0.35,黏聚力为25.2 kPa,密度为2.61 g/cm³,单轴抗压强度为26.5 MPa。为模拟隧道的大角度仰坡,本文依托FLAC3D数值模拟软件建立长度200 m的梯形隧道模型;模型上覆岩层厚130 m,顶面岩层宽120 m,以此还原60°的隧道洞口仰坡。隧道断面尺寸及进洞口段急倾斜仰坡整体示意图如图1所示,混凝土衬砌破坏状况如图2所示。

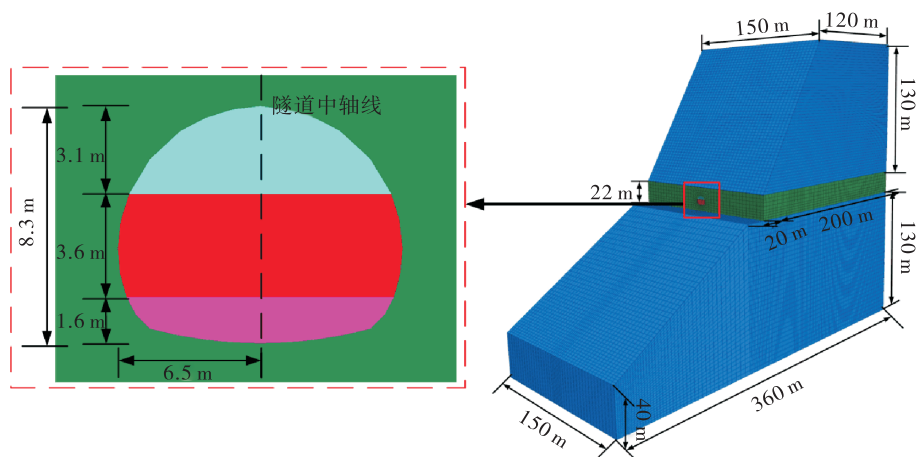
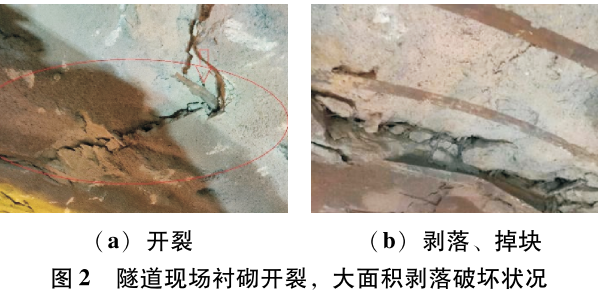


图1 隧道断面尺寸与整体示意图



1.2 隧道洞口段初始抗震支护方案

隧道初始支护采取超前支护+复合式支护结构形式。洞口段支护结构为超前大管棚+小导管预支护，洞口段支护结构类型及布置如表1所示。洞身段为锚喷复合支护，具体为长3.5 m、间距60 cm的Φ25 钢筋锚杆、C25 混凝土喷29 作为初期加固措施；浇筑厚60 cm的C30 钢筋混凝土为二次支护结构。支护结构示意图见图3，支护结构力学性能见表2、表3。

表1 洞口段支护结构类型及布置				
支护形式	类型	节长/m	间距/cm	安装范围/(°)
管棚	Φ108×6 无缝钢管	6.0	40	140
导管	Φ140×8 无缝钢管	4.5	40	170
锚杆	Φ25 钢筋锚杆	3.0	60	170

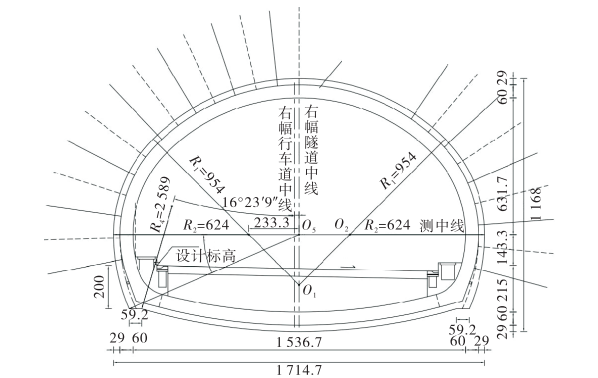
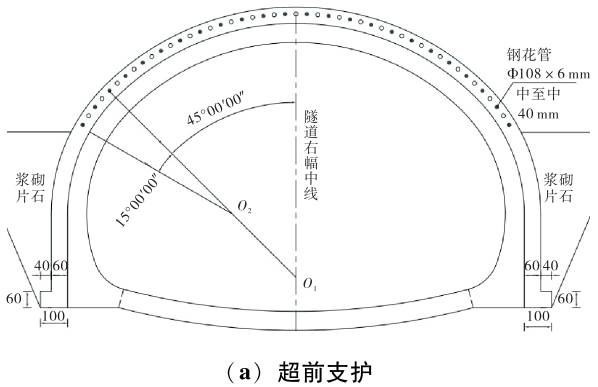


图3 支护结构示意图

表2 锚杆支护参数				
弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	屈服强度 σ/MPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	钻孔直径 D/mm
200	0.23	400	7 800	50

表3 管棚与混凝土支护参数					
种类	E/GPa	μ	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
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

1.3 隧道围岩动力参数测定

为探明隧道围岩（强风化板岩）在动荷载条件下的力学性质，为后续数值模拟计算分析奠定数据基础，本文现场采集围岩岩样并开展室内实验，测定阻尼比、阻尼系数、弹性模量等关键力学参数。试验采用GDS 动三轴仪，加载方式选用轴向振动，以正弦波形式施加动荷载；轴向荷载振动幅值区间选取为2~12 kN，振动频率为3 Hz，振动循环次数为30 次。共选取4 个实验岩样，样品及实验设备如图4 所示，获得岩石动力参数实验结果如表4 所示。

表4 各岩石试样的动力参数实验结果			
试样号	阻尼比 $\lambda/\%$	阻尼系数 $C/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	动弹性模量/MPa
B1	3.25	0.90	130.5
B2	2.61	2.04	108.8
B3	2.72	1.68	121.5
B4	2.64	0.80	110.5

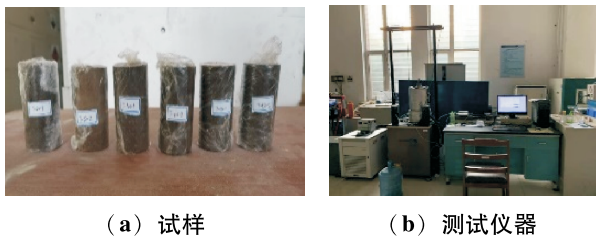


图4 实验岩样与实验设备

2 隧道洞口段动力响应机制研究

2.1 地震荷载的确定

地震波是影响隧道在动荷载作用下破坏程度的主要外在因素。本文研究的隧道工程位于云南境内，毗邻四川。为进一步提升数值计算结果的真实性与合理性，同时校核极端动荷载作用下隧道的整体稳定性与安全储备，本文选取典型汶川地震波作为动力输入。截取该地震波能量集中的

波段,以位移加载形式在FLAC3D软件中开展动力计算,所选汶川波的加速度时程曲线如图5所示。

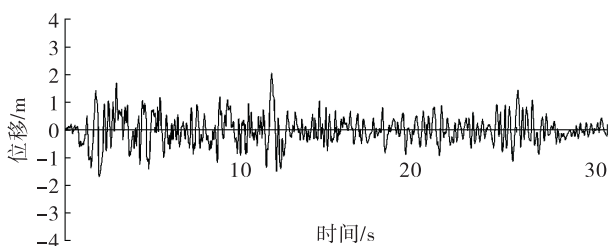
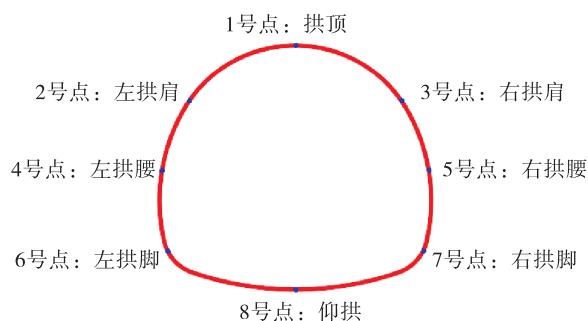


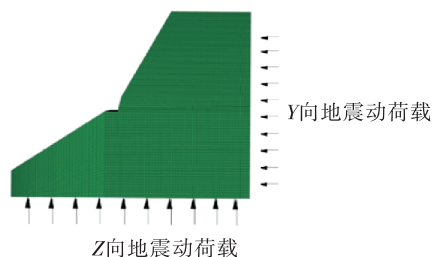
图5 汶川波位移时程曲线

2.2 模型的地震荷载加载方式

在模型中模拟输入地震波,对比模型在有支护和无支护作用时隧道的动力响应,并分析隧道对不同方向震动波的敏感程度。根据隧道现场实际状况采用FLAC3D数值模拟软件建模,模型断面及整体尺寸如图1所示;将室内实验测得的动力参数赋予模型,开展隧道模型动力响应分析,隧道模型位移监测点布置及汶川波震动荷载输入方向如图6所示,输入方向分为X向、Y向、Z向三种类型,其中X向是指隧道横断面方向,即垂直于图6(b)的平面方向;Y向指隧道轴向方向;Z向指隧道竖直方向。



(a) 位移监测点



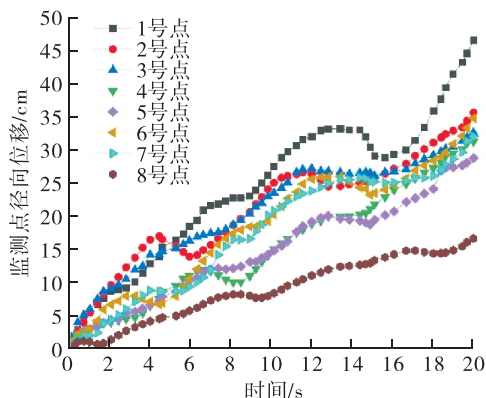
(b) 动荷载输入方向

图6 隧道动力响应监测点布置及震动荷载输入位置

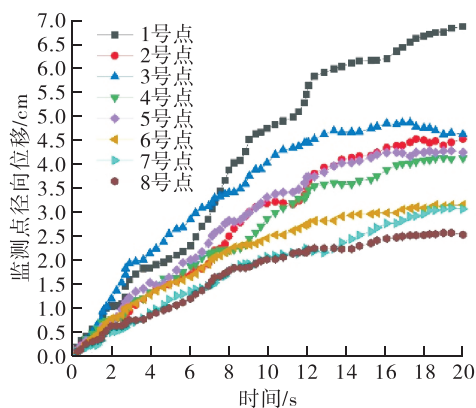
2.3 X向作用下的隧道动力响应

在模型底部输入横向(X)汶川波,动荷载加载时间为20 s,对比分析有无支护结构(普通

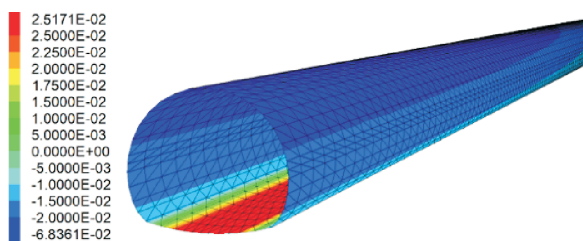
混凝土支护)两种情况下隧道监测点径向位移,数值模拟结果见图7。



(a) 隧道无支护动力响应曲线



(b) 隧道有支护动力响应曲线



(c) 围岩变形量云图

图7 汶川波X向动力响应

由计算结果可知,当隧道无支护结构时,在20 s的X方向(水平且垂直于隧道轴线)动荷载加载过程中,监测点变形总体为逐步增大趋势,其中拱顶变形最为明显。加载结束后拱顶1号点径向变形量为46.5 cm;2、3号点变形量接近,约为33 cm;4、5号点变形量约为30 cm;6、7号点变形量约为32 cm;8号点仰拱处变形量约为17 cm。

当隧道采用前文所述复合支护方案时,监测点变形仍为总体逐步增大趋势,但相对于无支护状态,变形量明显减小,各监测点中仍是拱顶位置处变形最大。加载结束后拱顶1号监测点径向

变形量为 6.8 cm；2、3 号点变形量接近，约为 4.5 cm；4、5 号点变形量约为 4 cm；6、7 号点变形量约为 3 cm；8 号点仰拱处变形量约为 2.5 cm。

2.4 Y 向作用下的隧道动力响应

在模型底部输入纵向（Y）汶川波，动荷载加载时间同样为 20 s，对比分析有无支护结构两种情况下隧道监测点径向位移，结果见图 8。

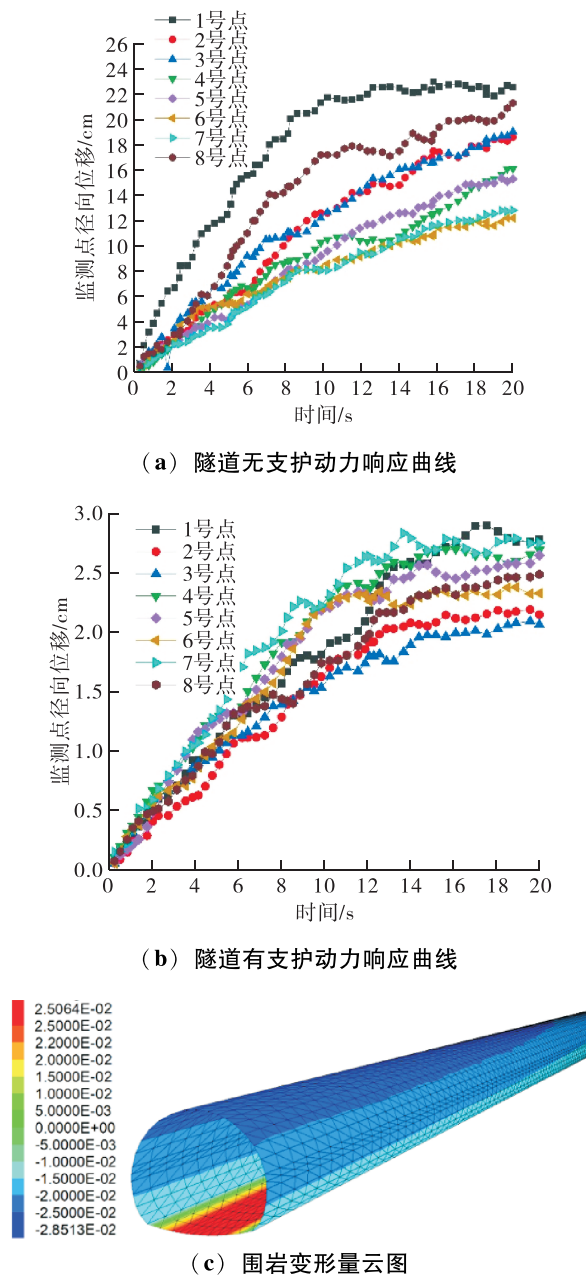


图 8 汶川波 Y 向动力响应

由计算结果可知，当隧道无支护结构时，在 20 s 的 Y 方向（平行于隧道轴线）动荷载加载过程中，监测点变形总体为逐步增大趋势，其中拱顶及仰拱变形最为明显。加载结束后拱顶 1 号点径向变形量为 22.5 cm，8 号点仰拱处变形量约为 21.2 cm；

2、3 号点变形量接近，约为 19 cm；4、5 号点变形量约为 15 cm；6、7 号点变形量约为 12 cm。

当隧道采用前文所述复合支护方案时，监测点变形仍为总体逐步增大趋势，但相对于无支护状态变形量明显减小，各监测点中仍是拱顶及仰拱位置处变形最大。拱顶 1 号监测点加载结束后径向变形量为 2.8 cm，8 号点仰拱处变形量约为 2.5 cm；2、3 号点变形量约为 2 cm；4、5 号点变形量约为 2.5 cm；6、7 号点变形量约为 2.5 cm。

2.5 Z 向作用下的隧道动力响应

在模型底部输入竖向（Z）汶川波，动荷载加载时间同样为 20 s，对比分析有无支护结构两种情况下隧道监测点径向位移，结果见图 9。

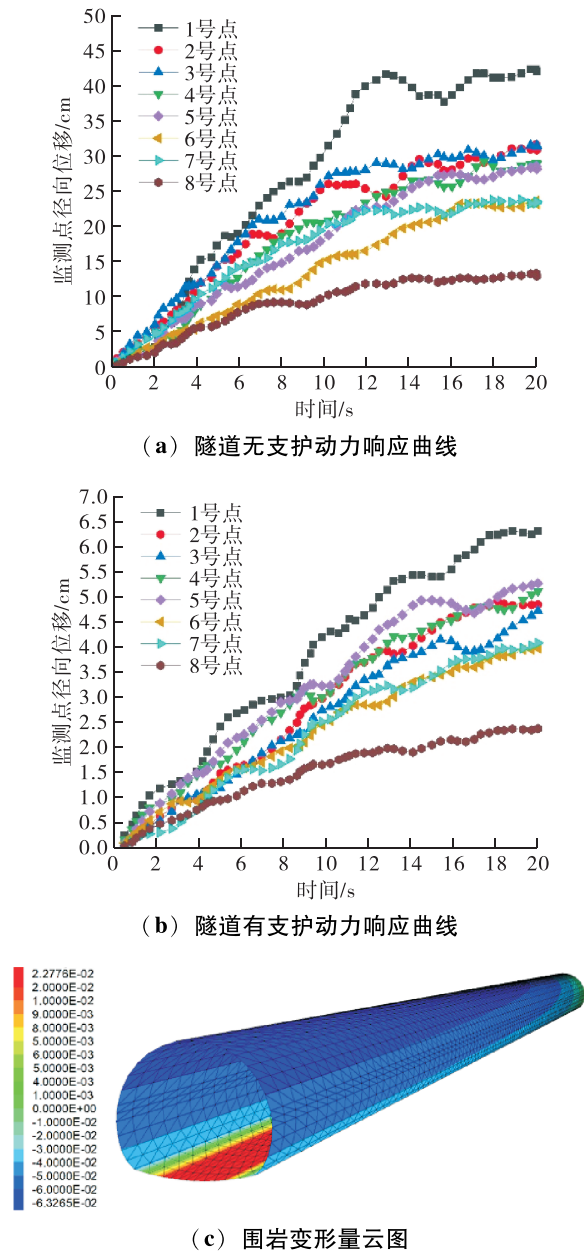


图 9 汶川波 Z 向动力响应

由计算结果可知,当隧道无支护结构时,在20 s的Z方向(垂直于水平面)动荷载加载过程中,监测点变形总体呈逐步增大趋势,其中拱顶变形最为明显。加载结束后拱顶1号点径向变形量为42.4 cm;2、3号点变形量接近,约为31.5 cm;4、5号点变形量约为28.5 cm;6、7号点变形量约为23 cm;8号点仰拱变形量约为18 cm。

当隧道采用前文所述复合支护方案时,监测点变形仍总体呈现逐步增大趋势,但相对于无支护状态变形量明显减小,各监测点中仍是拱顶位置处的变形最大。拱顶1号监测点加载结束后径向变形量为6.3 cm;2、3号点变形量接近,约为5 cm;4、5号点变形量约为5 cm;6、7号点变形量约为4 cm;8号点仰拱处变形量约为2.3 cm。

3 隧道二衬高强增韧改性研究

3.1 震动荷载下隧道支护结构优化思路

上文分析了地震波在单方向输入时支护结构的动力响应。而在实际工程中地震波往往是X、Y、Z三方向共同输入,该种工况下结构将产生更大变形,面临断裂破坏的风险。为进一步提高支护结构的安全储备,本文对混凝土结构进行优化,具体方案为:在混凝土内掺钢纤维,利用钢纤维突出的抗拉屈服强度以及混凝土与钢纤维粘结界面的高强摩擦力,改善混凝土抗拉性能。最后在Z方向输入影响最大的汶川波,对优化后的支护结构进行动力响应分析。

3.2 钢纤维改性混凝土优化方案

3.2.1 试验原料

水泥采用P·O 42.5 硅酸盐水泥;粗骨料为碎石,细骨料为河砂;钢纤维选用多锚固点钢纤维和剪切型钢纤维,材料参数如表5、表6所示。

表5 粗骨料基本性能试验指标

种类	粒径/细 度模数	压碎指 标/%	含泥量 /%	表观密度 /(g/cm ³)	堆积密度 /(g/cm ³)	空隙率 /%
碎石	20 mm	5.1	7.5	2 700	1 459	42
河砂	2.78	—	—	2 610	1 655	36.6

表6 钢纤维参数

型号	半径/mm	长度/mm	抗拉强度/MPa
多锚固点型	0.275	30	700~1 100
剪切型	0.4	32	400~650

3.2.2 试验设备及方法

实验设备主要包括:TAW2000 岩石三轴试验机、软岩流变仪、养护箱、烘干箱等。本实验

设计的立方体试件尺寸为70 mm×70 mm×70 mm,共计63个,每组实验各3个,根据实验结果,分析混凝土等级(C30、C40、C50)。钢纤维质量分数(1%、1.3%、1.6%)及类型对混凝土力学性质的改善效果。实验设计组见表7。其中,C30~C40不同混凝土强度等级分别采用X₁~X₃进行表征,同理,钢纤维掺入率表征为Y₁~Y₃,不同钢纤维表征为Z₁~Z₂。

表7 正交试验试件参数

强度X	掺量Y	Z ₁ 组合	试件编号	Z ₂ 组合	试件编号
X ₁	Y ₁	X ₁ Y ₁ Z ₁	CF30-B1.0	X ₁ Y ₁ Z ₂	CF30-D1.0
	Y ₂	X ₁ Y ₂ Z ₁	CF30-B1.3	X ₁ Y ₂ Z ₂	CF30-D1.3
	Y ₃	X ₁ Y ₃ Z ₁	CF30-B1.6	X ₁ Y ₃ Z ₂	CF30-D1.6
X ₂	Y ₁	X ₂ Y ₁ Z ₁	CF40-B1.0	X ₂ Y ₁ Z ₂	CF40-D1.0
	Y ₂	X ₂ Y ₂ Z ₁	CF40-B1.3	X ₂ Y ₂ Z ₂	CF40-D1.3
	Y ₃	X ₂ Y ₃ Z ₁	CF40-B1.6	X ₂ Y ₃ Z ₂	CF40-D1.6
X ₃	Y ₁	X ₃ Y ₁ Z ₁	CF50-B1.0	X ₃ Y ₁ Z ₂	CF50-D1.0
	Y ₂	X ₃ Y ₂ Z ₁	CF50-B1.3	X ₃ Y ₂ Z ₂	CF50-D1.3
	Y ₃	X ₃ Y ₃ Z ₁	CF50-B1.6	X ₃ Y ₃ Z ₂	CF50-D1.6

3.3 钢纤维混凝土性能测试

利用TAW2000 电液伺服刚性压力机开展混凝土抗压、劈裂抗拉、抗折和轴心抗压性能测试。实验结果如表8所示。

表8 二次衬砌浆体力学参数

试件号	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	抗折强度 /MPa	轴心抗压强度 /MPa
C30-0	36.35	2.87	5.47	30.82
CF30-B1.0	39.17	2.95	5.81	31.65
CF30-B1.3	40.91	3.65	5.99	31.87
CF30-B1.6	44.65	3.68	6.02	32.64
CF30-D1.0	41.58	3.55	5.83	31.95
CF30-D1.3	44.36	3.58	5.88	32.61
CF30-D1.6	46.13	3.67	6.12	32.95
C40-0	44.66	3.54	5.95	32.83
CF40-B1.0	48.51	4.05	6.23	33.66
CF40-B1.3	50.33	4.43	6.26	34.29
CF40-B1.6	52.75	4.51	6.32	34.55
CF40-D1.0	49.5	4.10	6.18	34.37
CF40-D1.3	51.92	4.38	6.23	34.56
CF40-D1.6	53.4	4.61	6.35	34.60
C50-0	56.02	4.73	6.38	35.44
CF50-B1.0	58.1	4.92	6.44	35.69
CF50-B1.3	59	4.99	6.41	35.87
CF50-B1.6	58.4	4.85	6.39	35.62
CF50-D1.0	58.26	4.83	6.35	35.71
CF50-D1.3	61.31	5.21	6.58	36.22
CF50-D1.6	63.21	5.28	6.60	36.20

由表8可知,立方体抗压强度与纤维掺量呈正相关变化趋势,两种钢纤维类型均能提高混凝土的各项力学性能,但多锚固点型钢纤维提升效果更为明显。本文结合力学性能与经济效益,选用多锚固点型钢纤维掺量1.3%的C30混凝土作为衬砌优化材料。具体支护优化参数如下:初期支护采用掺1.3%多锚固点型钢纤维的C30喷射混凝土,喷射厚度为30 cm;二次衬砌喷射厚度为70 cm,超前支护、锚杆支护等其余结构参数均与原支护方案保持一致。

3.4 改性支护结构动力时程响应分析

本文在Z方向输入最具代表性的汶川波作为加载波形,对性能优化后的支护结构进行动力响应分析,性能优化后的二次衬砌厚度为70 cm,结果如图10所示。

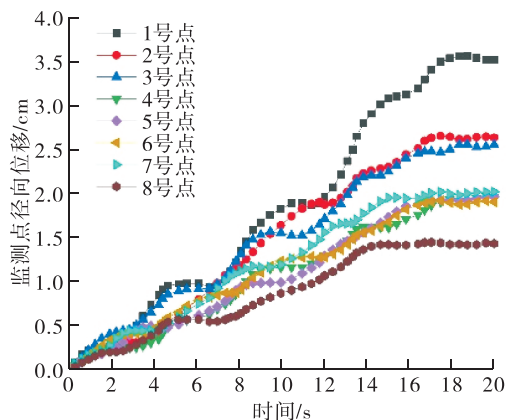
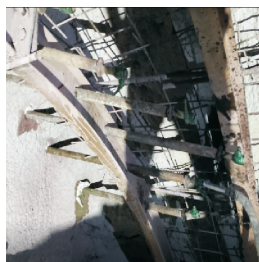


图10 支护优化后的监测曲线

衬砌性能优化后相对于优化之前更能控制围岩变形,在Z方向汶川波的影响下,优化前拱顶1号点加载结束后径向变形量为6.8 cm;2、3号点变形量接近,约为5 cm;4、5号点变形量约为5.5 cm;6、7号点变形量约为4 cm;8号点仰拱处变形量约为3.0 cm。优化后拱顶1号点加载结束后径向变形量为3.6 cm;2、3号点变形量接近,约为2.6 cm;4、5号点变形量约为2 cm;6、7号点变形量约为2 cm;8号点仰拱处变形量约为1.5 cm。

对变形量最大处的拱顶而言,在初始支护条件下以及优化支护条件下,拱顶最大变形量由6.8 cm缩减到3.6 cm,即二次支护结构性能优化后拱顶最大变形量减少47.1%,进一步提高了支护结构的安全储备。现场超前支护、锚杆+钢纤维混凝土二衬支护结构设置如图11所示。



(a) 超前支护



(b) 锚杆+钢纤维混凝土支护

图11 钢纤维优化支护结构现场布置

优化支护结构施作后对二衬混凝土径向变形进行监测,监测时间为30天,实际监测结果:钢纤维混凝土在施作后未产生开裂、剥落等状况,围岩变形逐渐收敛并趋于稳定,隧道稳定性得到良好改善。

4 结论

本文对隧道的破坏特征及破坏机理进行了分析,确定了地震荷载作用下隧道洞口的破坏形式。利用有限元软件FLAC3D对隧道动力响应进行分析,通过分析计算结果可知:

(1) 在汶川波震动作用下,隧道拱顶变形最大,衬砌拱顶最大变形量为6.8 cm;计算结果表明,地震波会对隧道顶部产生较大扰动,在支护结构施作时应加强拱顶支护。

(2) 同一种波形以不同方向输入时,隧道会产生不同的响应。计算结果表明,X方向和Z方向的振动会对隧道产生较大的扰动,在Y方向的振动对隧道扰动较小。

(3) 钢纤维能提高混凝土的各项力学性能,且钢纤维混凝土立方体抗压强度与纤维掺量呈正相关,多锚固点型钢纤维提升效果更为明显。采用掺量为1.3%的多锚固点型钢纤维C30混凝土作为衬砌具有优异的力学性能 and 经济效益。

(4) 通过在浆体内掺入钢纤维,二衬各项力学性能得到优化,拱顶最大变形量减少47.1%,进一步提高了支护结构的安全储备。

参考文献:

- [1] 贾世济,高帅,秦浩朕. 强震区洞口段隧道全环间隔注浆抗震效果研究[J]. 河北地质大学学报,2024,47(4): 56-63.
- [2] 崔光耀,麻建飞,王明年,等. 隧道软岩洞口段结构加强抗震措施振动台模型试验研究[J]. 土木工程学报,2020,53(S2):315-320.
- [3] 马险峰,刘正好,吴迪,等. 基于振动台试验的粉质黏土隧道抗震计算方法修正[J]. 岩土工程学报,2022,44

- (S2):1-5.
- [4]朱合华,禹海涛,韩富强,等. 穿越活动断层隧道抗震韧性设计理念与关键问题[J]. 中国公路学报,2023,36(11):193-204.
- [5]潘小虎,孙永震,陈荣. 隧道穿越活动断层震害机理及抗震措施研究[J]. 建筑施工,2023,45(6):1161-1164,1168.
- [6]TAO Z G, FENG Y X, ZHAO Y, et al. Shaking table test on anti-seismic characteristics of NPR anchor cable support system for tunnel crossing faults[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(4):939-949.
- [7]李亚东,周金雯,单毅,等. P波入射下考虑基槽回填材料的沉管隧道抗震分析[J]. 岩土工程学报,2023,45(6):1190-1199.
- [8]何应道,王稼祥,李沛松,等. 考虑行波效应的盾构隧道纵向抗震分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(S1):42-49.
- [9]ZHANG J H, XU P, SUN W C, et al. Seismic reliability analysis of shield tunnel faces under multiple failure modes by pseudo-dynamic method and response surface method[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(5):1553-1564.
- [10]JIA H, ZHANG B. Reliability analysis for seismic stability of tunnel faces in soft rock masses based on a 3D stochastic collapse model[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7):1706-1718.
- [11]耿萍,何悦,何川,等. 穿越断层破碎带隧道合理抗震设防长度研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):358-365.
- [12]殷允腾,李廷春. 土岩软硬结合部隧道结构的震害机理分析及抗震研究[J]. 现代隧道技术,2013,50(4):84-91.

~~~~~  
(上接第19页)

#### 参考文献:

- [1]李得伟,吕佳晰,黄悦,等. 旅客“门到门”城际出行路径规划研究综述[J]. 铁道运输与经济,2025,47(1):1-12,52.
- [2]余柳,刘莹. 北京市小学生通学交通特征分析及校车开行建议[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(5):193-199.
- [3]NEWTON R, THOMAS W. Design of school bus routes by computer[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 1969,3(1):75-85.
- [4]ELLEGOOD W, RILEY J, BERG M. The many costs of operating school buses in America[J]. Research in Transportation Economics,2024,103:101401.
- [5]FENG R, ZHANG J, WU Y, et al. School accessibility evaluation under mixed-load school bus routing problem strategies[J]. Transport Policy,2023,131:75-86.
- [6]BANERJEE D, SMILOWITZ K. Incorporating equity into the school bus scheduling problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019,131:228-46.
- [7]FARZADNIA F, LYSGAARD J. Solving the service-oriented single-route school bus routing problem: Exact and heuristic solutions[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics,2021,10:100054.
- [8]QIAN L, MELACHRINOUDIS E. An integrated neural combinatorial Tabu Search for optimizing school bus scheduling with bell time[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2024,164:104662.
- [9]GUO X, SAMARANAYAKE S. Shareability network based decomposition approach for solving large-scale single school routing problems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2022,140:103691.
- [10]李开雷,白翰,燕翔,等. 基于运营和出行成本的校车路径问题研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2023,15(3):293-303.
- [11]LÓPEZ SANTANA E R, ROMERO CARVAJAL J D J. A hybrid column generation and clustering approach to the school bus routing problem with time windows[J]. Ingeniería,2015,20(1):101-17.
- [12]SHAFABI A, WANG Z, HAGHANI A. SpeedRoute: Fast, efficient solutions for school bus routing problems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018,117:473-93.
- [13]ELLEGOOD W, CAMPBELL J, NORTH J. Continuous approximation models for mixed load school bus routing[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015,77:182-98.
- [14]丁兆辉,朱晓宁,康柳江. 大型居住区模块化公交线路与时刻表协同优化[J]. 清华大学学报(自然科学版),2026,66(3):627-637.
- [15]易虹雨. 基于GPS数据的公交车辆站点停靠与站间行驶时间预测研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.
- [16]宫月红,张少君,王明雨,等. 基于遗传-粒子群优化算法的USV路径规划方法[J]. 山东交通学院学报, 2022,30(1):29-34.
- [17]蔡皓,谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版),2010,46(3):319-326.