

隧道预制新支护系统横向抗震响应与时程分析

童景盛, 张伟强, 赵国锐, 黎大玮

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为提升隧道在地震作用下的安全性与稳定性, 破解传统隧道支护系统抗变形能力弱、抗震性能不足的难题, 针对隧道预制装配式新支护系统, 展开抗震响应研究与数值模拟分析。首先, 系统梳理由波纹加筋复合支护结构、泡沫防水混凝土填充层和“蜂巢”状预制拱形支护构件组成的新型支护体系, 明确其结构特点与抗震工作原理; 然后, 依托振动台试验获取力学参数, 采用 Midas GTS NX, 建立 V 级围岩隧道三维数值模型, 设置黏弹性边界, 输入 EI-Centro 波, 开展动力时程分析, 观测不同结构部位的动态响应规律; 最后, 分析横向地震作用下应力位移的分布特征与结构薄弱环节。明确了该新支护体系的抗震力学特性与关键控制部位, 为隧道抗震设计、方案优化及安全指标制定提供重要参考。

关键词: 预制新支护系统; 抗震响应; 数值模拟; 动力时程分析

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0194-08

Transverse Seismic Response and Time History Analysis of New Precast Support System for Tunnels

TONG Jingsheng, ZHANG Weiqiang, ZHAO Guorui, LI Dawei

(CSECE Northwest Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to improve the safety and stability of tunnels under earthquake action, and address the pain points of weak deformation resistance and insufficient seismic performance of traditional tunnel support systems, the seismic response research and numerical simulation analysis are conducted on a new prefabricated tunnel support system. Firstly, the new support system composed of corrugated reinforced composite support structure, foam waterproof concrete filling layer and “honeycomb” prefabricated arched support components is systematically sorted out to clarify its structural characteristics and seismic working principle. Then, relying on shaking table tests to obtain mechanical parameters, a three-dimensional numerical model of a grade V surrounding rock tunnel is established using Midas GTS NX, the viscoelastic boundaries are set and EI-Centro waves are input to carry out the dynamic time-history analysis, and the dynamic response law of different structural parts is observed. Finally, the distribution characteristics of stress displacement and the structural weak links under transverse earthquake action are analyzed. The seismic mechanical properties and key control parts of the new support system are clarified, which provides important reference for seismic design, scheme optimization and safety indicator formulation of the tunnels.

Keywords: new prefabricated support system; seismic response; numerical simulation; dynamic time history analysis

0 引言

作为交通基础设施的重要组成部分,隧道的抗震性能一直是工程领域关注的焦点。影响隧道抗震性能的因素有许多,包括地震参数、围岩性质、隧道支护结构、隧道埋深及现场施工质量等^[1]。传统隧道支护系统存在抗变形能力差、整体抗震性能偏弱等问题。目前隧道抗震研究主要聚焦结构的地震响

应特性及抗震优化措施等方向^[2]。

针对隧道抗震、减震技术及支护材料应用,国内外学者已开展大量研究。国外学者多聚焦高性能泡沫混凝土的作用机理与外加剂改性研究。例如, Durack 等^[3]证实泡沫混凝土的强度与其内部的孔隙率存在密切关系。Kearsley 等^[4]提出,粉煤灰掺入量对混凝土内部的孔隙结构具有显著的调控作用。Kunhanadan 等^[5]发现,当抗震填充材料为砂子时,混凝土强度更高;当填充材料为粉煤灰时,混凝土的流动性更高,密实度也得到提升。

国内研究近年来在隧道抗震领域也取得了显著

收稿日期: 2026-04-16

基金项目: 甘肃省科技厅重点研发项目基金(24YFGA057)

作者简介: 童景盛(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, (公司副总工程师), 从事道桥隧研究与设计咨询工作。

进展。陈斌等^[6-8]对纤维泡沫混凝土在隧道抗震过程中的力学指标开展研究,发现随着纤维掺量的增加,纤维泡沫混凝土支护构件的强度呈现先增大、后减小的变化规律;谷文琦等^[9-12]基于纤维混凝土材料试验,分析在地震作用下,采用纤维混凝土套拱加固与未采用加固措施的隧道结构响应差异;吴悦等^[13-19]通过扩展有限元法,揭示了强震作用下隧道管片的动力响应特征、开裂演变过程,以及内在破坏机理;周浩等^[20-22]结合工程实例,采用数值分析方法,模拟分析隧道结构在地震工况下的控制部位和变形特征。

尽管国内外在隧道抗震研究方面已取得一定成果,但传统支护结构的抗震局限性仍然存在^[23-25]。为解决这一难题,本文提出一种隧道预制新型支护构件,采用“波纹加筋复合材料+泡沫防水混凝土填充”的组合系统,替代传统“普通喷射混凝土初期支护结合减震层”的抗震措施。

该支护抗震组合系统,可与围岩相互作用,共同承担地震荷载,从而减轻地震对隧道主体结构破坏。相较于传统支护结构,该系统能够显著减少震后工程修复的工作量,提升隧道在强震作用下的整体安全性,为解决传统支护结构的抗震局限性提供了一种新思路与新方法。这种新型支护抗震组合系统,有望在未来的隧道工程中得到广泛应用,为地震作用下隧道的安全运行提供保障。

1 新支护系统的结构特点与工作原理

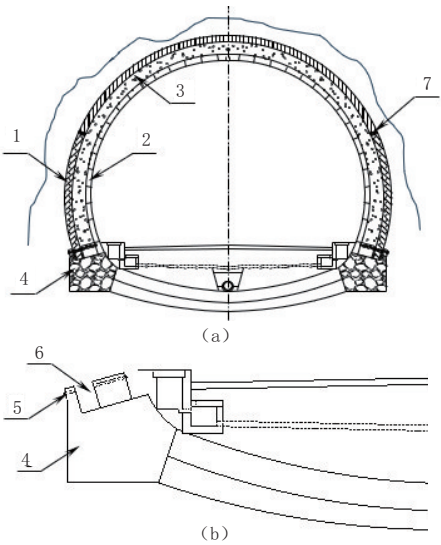
1.1 新支护系统的结构特点

新支护抗震组合系统由外向内可分为3层结构:最外层是由波纹加筋复合新型材料制成的隧道衬砌支护结构,中间层采用泡沫防水混凝土填充,里层是由预制拱形支护构件拼装而成的“蜂巢”状支护结构。整个支护系统可通过与隧道围岩的相互作用,共同承担地震荷载^[26-28]。

该组合系统的预制构件,可根据隧道断面形状与工程需求,灵活调整拼装方案。构件之间采用高强度螺栓结合榫卯的方式连接,可保障构件的连接强度与结构整体的稳定性。同时,新支护系统额外配置了橡胶垫、弹簧等特殊减震装置,可有效吸收、耗散地震能量。新支护系统的整体结构如图 1 所示。

1.2 工作原理

新支护抗震组合系统依靠填充的泡沫混凝土、



注:1—波纹加筋支护结构;2—拱形预制支护构件;
3—填充微膨胀泡沫防水混凝土;4—仰拱;
5—锚固螺孔;6—凹槽;7—接缝。

图 1 新支护抗震组合系统图

自带的橡胶垫与弹簧,可有效吸收和耗散地震能量,降低支护结构本身的振动响应,实现对隧道主体结构的安全防护。同时,该组合系统本身具备高强度抗变形能力与优良的整体抗震工作性能,可有效分散和传递地震作用,缓解围岩区域的应力集中现象,从结构受力层面提升隧道的抗震性能。

2 试验加载方案

为探究新支护系统在地震作用下的响应特征,本文开展离心机振动台试验(见图 2),针对纵向与竖向双向地震动同步加载的工况条件,对比分析隧道模型围岩的加速度、相对位移、应力应变演化规律,以及支护系统的内力分布特征。具体试验设计分 2 个阶段进行。

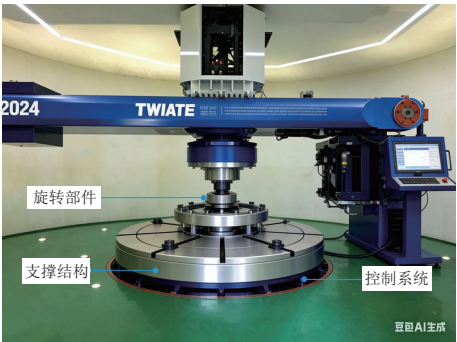


图 2 离心机振动台设备

第一阶段开展地基自由场试验:一方面,验证模型地基的边界效应,排除边界干扰对试验结果的影响;另一方面,获取地基的地震响应特性,得到不同深度处地基加速度与土体应力应变的对应关系,为

后续隧道模型试验提供可靠的基础参照。

第二阶段在自由场试验的基础上,在地基土层对应深度埋入整体式隧道模型,分别开展单向地震加载与双向地震加载对比试验,系统分析2种加载条件下隧道的地震响应差异。

本次试验采用土工离心机振动台,支持水平、垂直双向激振,可充分满足测试要求。振动台的主要性能参数如下。

最大有效负载:800 kg。

最大加速度:水平40g;垂直20g。

最大速度:0.5 m/s。

最大位移:5 mm。

最长振动持续时间:3 s。

频率范围:水平振动20~200 Hz;垂直振动20~250 Hz。

该振动台可输出正弦波、随机波、地震波等多种激振波形,能够在原型应力条件下,于模型底部输出可控激振波,配合各类监测设备,可准确获取振动作用下岩土结构的动力变形与稳定特性(见图3)。

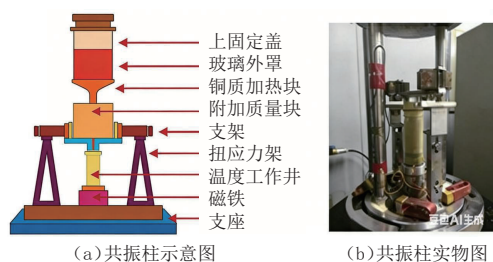


图3 共振柱试验示意图

3 计算模型

3.1 几何模型

本文采用MIDAS GTS有限元分析软件,建立由预制新支护构件组成的隧道支护系统三维有限元模型(见图4)。本文采用的围岩等级为V级,依据隧道实际尺寸,结合新支护系统的结构特征,建立三维几何模型。模型建构纳入了隧道围岩、新支护系统,以及隧道周边一定范围内的土体,同时充分考虑了各部分之间的相互作用。

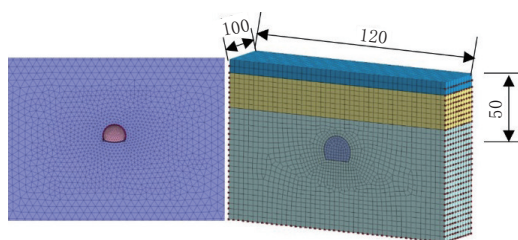


图4 三维数值几何模型图(单位:m)

3.2 边界条件和荷载施加

各边界设置规则如下。

底部边界:水平向施加地震波;竖向向约束。

侧向边界:采用黏弹性边界。

顶部边界:水平与竖直方向均自由。

接触面与荷载设置规则如下:不考虑土体与结构接触面的接触特性,采用节点耦合方式处理;地震荷载采用时程分析法施加。

3.3 监测点布置与计算过程

研究沿隧道纵向布置代表性监测点,分别设置在隧道拱顶、拱肩和拱腰处。具体监测点布置如图5所示。

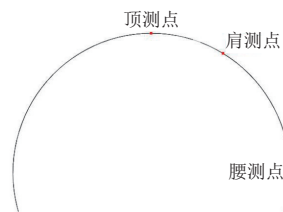


图5 监测点布置示意图

本文采用非线性动力分析流程:首先还原初始地应力场;然后开展隧道施工开挖模拟,得到动力分析前的初始应力状态;最后设置动力计算边界条件,施加地震荷载,完成动力运算。

3.4 地震波选取

本文采用动力时程分析法进行计算,所选用输入地震动的峰值加速度约为400 cm/s²,地震动持续时间根据工程实践的通用选取原则取40 s,地震波选用EI-Centro波。地震动作用下不同部位的加速度时程曲线如图6所示。

曲线峰值可以直观地反映V级围岩隧道在中强地震动作用下的响应水平。加速度时程曲线的时间范围为0~45 s,有效振动持续时间约为30 s,在30 s之后振幅快速衰减至接近零。该持续时间覆盖了地震动的上升段、峰值段和衰减段,满足动力时程分析对充分捕捉结构自由振动衰减特征的要求,也能够完整反映隧道“围岩—支护”体系动力响应的全过程。

3.4.1 不同部位的加速度时程特点

(1) 隧道拱肩

该处的峰值加速度约为400 cm/s²,是动力响应最为剧烈的部位,表明拱肩处为隧道地震动应力集中区,对地震波能量的放大效应最为突出。振动时段与拱腰处高度重合(10~20 s),峰值时刻与拱腰处几乎一致,体现了侧部围岩在地震作用下的协同变形特征。振幅在20 s之后逐步衰减,在30 s之后基

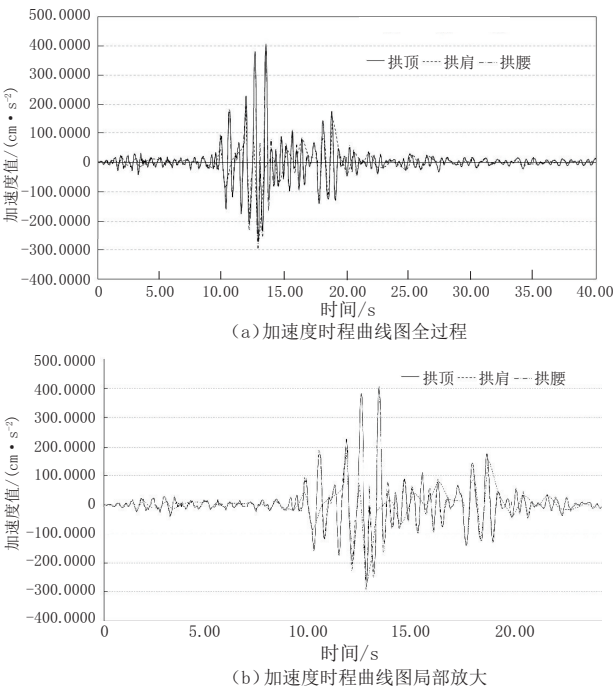


图6 不同监测点加速度时程曲线图

本收敛至零,说明拱肩处的动力响应在震动结束后能够较快进入稳定状态。

(2)隧道拱腰

该处峰值加速度约为 380 cm/s^2 ,略低于拱肩处。动力响应强度与拱肩处接近,是侧部围岩动力响应的另一关键区域。振荡频率、峰值时刻与拱肩处几乎同步,说明拱腰处与拱肩处在震动作用下的变形协调,共同承担侧部围岩的动力荷载。振幅在 20 s 之后逐步衰减,在 30 s 之后趋于稳定,与拱肩处的动力响应衰减规律一致。

(3)隧道拱顶

该处峰值加速度约为 370 cm/s^2 ,略低于拱肩和拱腰处,整体幅值更平缓,无明显尖峰突变。振荡频率与侧部一致,但幅值波动更小,说明拱顶处的“围岩—支护”体系在震动的作用下受力更均匀,动力稳定性优于侧部。振幅在 25 s 之后已基本衰减至零,相较于拱肩和拱腰处更早进入稳定状态,体现了拱顶结构的良好动力性能。

3.4.2 动力响应分布规律

从加速度峰值来看,不同部位的动力响应强度规律为拱肩>拱腰>拱顶,侧部是隧道震动响应的核心区域,拱顶的动力响应更为平缓。

从振动协同性来看,3个部位的振动时段、振动频率高度同步,说明在震动作用下隧道整体呈现协同振动的特征,侧部是能量放大与应力集中的关键部位。

基于以上动力响应特征,本文总结对应的抗震

设计优化方向与结论如下:在抗震设计中,需重点加强拱肩与拱腰处的支护刚度与强度,可设置减震构造,以削弱动力响应;拱顶处的动力响应虽较为平缓,但仍需关注整体动力稳定性,避免长期振动引发结构疲劳损伤;本次研究选取的地震波与震动持续时间可有效反映V级围岩隧道的动力响应特征,能够为后续隧道抗震优化设计提供可靠依据。

4 结果分析

4.1 隧道不同部位横向位移时程特点与规律

4.1.1 横向位移时程特点

图7为隧道不同部位横向位移时程曲线图,核心特点体现在监测部位差异、不同时间阶段的动力响应规律及变形特征3个维度。隧道拱肩与拱腰处位移曲线几乎重合,动力响应特征高度一致,两者均是3个监测部位中变形最剧烈的区域。

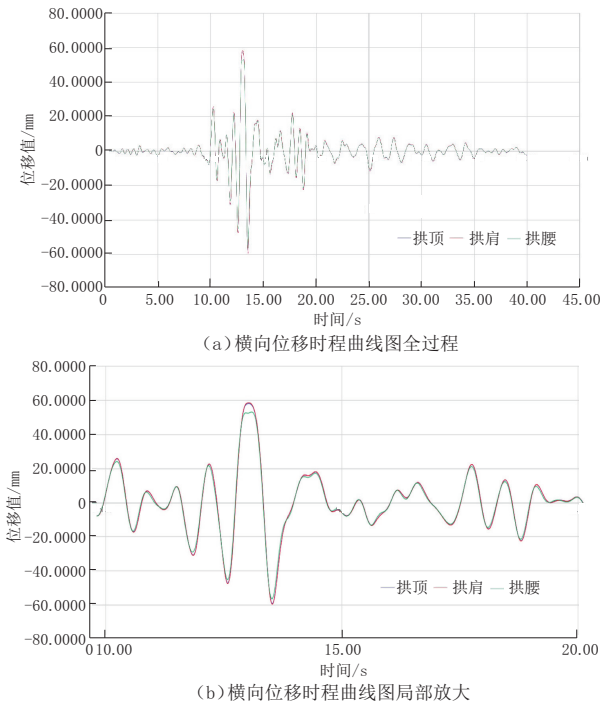


图7 不同监测点横向位移时程曲线图

(1)隧道拱肩与拱腰

拱肩与拱腰处横向位移时程曲线在 $10\sim 20\text{ s}$ 时出现剧烈振荡,峰值位移约为 $+58\text{ mm}$,谷值约为 -60 mm ,是本次3个监测部位中位移变化最剧烈的区域。两者的振动曲线几乎重合,说明拱肩与拱腰处的横向变形响应高度一致。

从约 10 s 开始,振动出现明显波动;到约 25 s 后,振动逐渐衰减,整体呈现振荡周期短、幅值变化大的特点;在 25 s 之后,位移波动幅度快速减小,位移值逐渐趋近于零,说明后期变形逐步趋于稳定。

(2) 隧道拱顶

该处全程位移基本保持在 ± 5 mm以内,位移曲线几乎贴近零轴线,是3个监测部位中变形最为稳定的区域。该处仅有微小的随机波动,未出现拱肩和拱腰处的大幅尖峰与深谷。从振动初始到结束,位移始终接近基准值,横向变形响应极微弱。

4.1.2 横向位移时程规律

不同部位围岩对横向扰动的敏感程度存在显著差异。隧道拱肩与拱腰处对开挖或扰动的横向响应较为敏感,位移振荡剧烈、幅值较大,且两者变形趋势高度一致;拱顶处最不敏感,位移基本保持稳定,几乎不受扰动影响。

从不同时间段围岩的变形过程看,在10 s之前,3个部位的位移均接近零,处于初始稳定状态;在10~25 s时,受扰动影响,拱肩和拱腰处出现剧烈振荡,且振荡峰值、谷值同步出现,拱顶处仍保持微小波动;在25 s之后,扰动影响逐渐消散,3个部位的位移均快速收敛至零,变形趋于稳定。

从变形特征来看,横向位移存在正负交替振荡的特征,说明围岩在扰动下存在往复变形。拱肩与拱腰处的正、负位移极值,均显著大于拱顶处,直接体现了2个部位横向变形的剧烈程度。

拱肩与拱腰是隧道横向变形的薄弱位置,施工和监测过程中需重点关注,有针对性地加强横向支护与位移监控。拱顶处的变形稳定,可作为相对安全的参考基准位置;拱肩与拱腰处变形高度同步,说明两者在受力与变形机制上存在强关联性,支护设计需要对两者进行协同考虑。

4.2 隧道不同部位最大主应力时程特点分析

最大主应力反映了围岩主要的承压状态,是判断围岩整体承载能力的核心指标(见图8)。

4.2.1 最大主应力时程特点

(1) 隧道拱腰

隧道拱腰处最大应力时程曲线在10~15 s时出现剧烈振荡,压应力峰值约为 $+4\ 500\text{ kN/m}^2$,为本次3个监测部位中应力最高处。受到开挖扰动的影响,围岩应力快速集中,压应力突增特征显著,对外部荷载的敏感性高。波动在15 s之后快速衰减,在20 s之后趋于平稳,但残余波动幅度仍大于拱顶处,应力重分布持续时间更长。

(2) 隧道拱肩

隧道拱肩处最大应力时程曲线在10~20 s时出现明显波动,压应力峰值约为 $+3\ 500\text{ kN/m}^2$,应力低

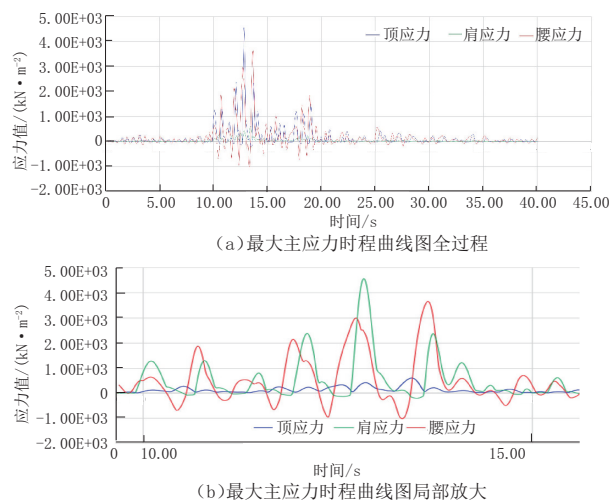


图8 不同部位最大主应力时程曲线图

于拱腰处、高于拱顶处,峰值出现时间与拱腰处一致,说明两者受力情况关联紧密,扰动后应力的传递路径同步。波动在20 s之后减弱,在25 s之后趋近稳定,应力恢复速度快于拱腰处。

(3) 隧道拱顶

隧道拱顶处全程应力维持在 $\pm 200\text{ kN/m}^2$ 以内,最大应力时程曲线贴近零轴线,无剧烈应力峰值。拱顶处围岩受力均衡,几乎不承受集中压应力,是整个断面应力状态最安全的部位。自监测起,该处最大应力时程曲线全程无明显突变,始终保持低幅度稳定波动。

4.2.2 最大主应力时程规律

(1) 不同部位的应力敏感性与应力集中程度差异

隧道拱腰处对开挖扰动的应力响应最为敏感,最大主应力峰值最高,是压应力集中的核心;拱肩处次之,最大主应力峰值略低于拱腰处;拱顶处对扰动最不敏感,应力始终平稳,受压作用最弱。

(2) 不同开挖阶段的应力演化特征

在10 s之前,3个部位的应力均接近零,处于初始应力平衡状态;在10~20 s时,受开挖扰动的影响,拱腰和拱肩处出现剧烈压应力集中现象,拱顶处应力仅有微小波动;在20 s之后,扰动逐渐消散,拱腰处应力率先衰减,拱肩处随后收敛,3个部位的应力均趋近于零,围岩恢复稳定平衡状态。

(3) 围岩应力分布特征与承载机制

最大主应力以压应力为主,无明显拉应力风险。拱腰和拱肩处的压应力极值远大于拱顶处,说明扰动下围岩主要通过挤压变形来适应荷载变化,拱腰处是主要承压区。

拱腰处为压应力集中的核心,易发生挤压破坏

或塑性变形,需重点加强监控;拱腰和拱肩处的应力峰值同步出现,说明两者的应力传递与变形机制高度关联,支护需整体设计;拱顶处应力平稳、受压程度小,可作为应力监测的基准。

4.3 隧道不同部位最小主应力时程特点分析

最小主应力反映围岩侧向约束与受拉状态,是判断局部稳定性的关键指标(见图9)。

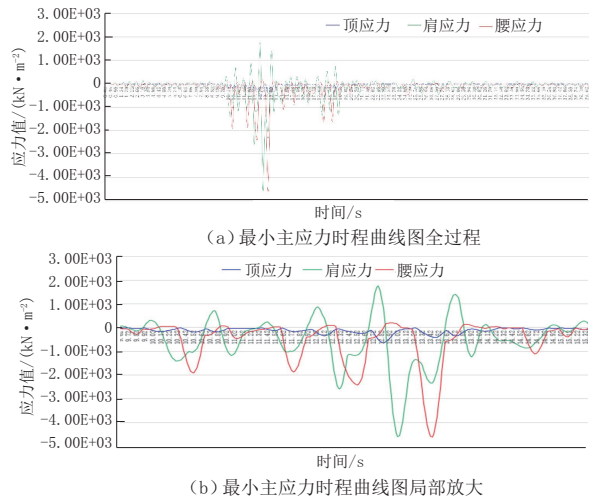


图9 不同部位最小主应力时程曲线图

隧道不同部位最小主应力时程曲线整体呈现“初始稳定—剧烈压应力振荡—衰减收敛”的动力响应过程。应力以负向压应力振荡为主,揭示了隧道结构受动力扰动的力学响应规律。

从时间维度看,在0~10 s时,3个部位的主应力接近零,结构受力平衡;在10~20 s时,3个部位主应力进入振荡阶段,拱肩和拱腰处应力急剧变化,压应力集中特征显著,最小主应力谷值分别约为 $-4\,800\text{ kN/m}^2$ 和 $-2\,000\text{ kN/m}^2$,拱顶处应力始终维持在 $\pm 500\text{ kN/m}^2$ 以内,响应极弱;在20 s之后,应力快速衰减,逐步趋近于零,应力重分布后,结构恢复稳定。

从空间维度看,拱肩和拱腰处应力响应协同剧烈,是压应力集中的敏感部位,两者受力变形的关联性强;拱顶处响应极弱、稳定性好,可作为应力评价的基准。

隧道不同部位的动态敏感性和应力集中程度存在明显差异,拱肩和拱腰处是压应力集中薄弱区,为支护设计与监控的重点区域,拱顶处应力平稳,是相对安全的基准区域。

4.4 结构内力分析

本文选取横向地震作用下TX、TY方向具有代表性的加速度云图开展对比分析(见图10)。结果显示,V级围岩在高加速度作用下,“围岩—支护”结构

体系更容易发生变形并出现破坏,需要有针对性地加强支护与减震设计。

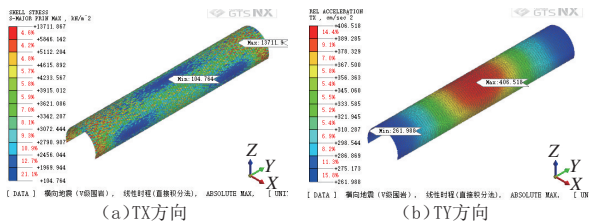


图10 横向地震作用下加速度云图

4.4.1 横向加速度响应特点

本文采用MIDAS GTS NX线性时程直接积分法,计算得到横向地震作用下隧道X向的相对加速度云图,明确隧道结构加速度响应的分布规律。

(1)加速度分布特点

隧道纵向加速度呈梯度变化,从 261.99 cm/s^2 逐步上升至 406.52 cm/s^2 ,直观地展现了地震波的传播放大效应。极大值集中在隧道左下端,惯性效应与地震响应最为剧烈;极小值位于右下端,响应较弱。该分布特征可能与模型边界、地震波输入位置有关。本文中V级围岩隧道加速度为 $262\sim 407\text{ cm/s}^2$,可见,这类隧道在横向地震作用下的动力响应强烈。

(2)力学行为与工程意义

在横向地震作用下,隧道以横向振动为主,X向加速度直接反映了惯性力水平:加速度越大,惯性力越大,结构内力与变形响应越剧烈。加速度沿纵向呈梯度分布,说明地震波在隧道内经历了传播放大过程,具有显著的端部效应。

根据加速度分布特征,本文将隧道区域划分为高加速度区和低加速度区,两者的工程风险差异明显:高加速度区由于动力响应剧烈,易发生衬砌开裂、变形集中、接头破坏、“围岩—支护”结构脱开等震害;低加速度区整体相对安全,但需重点关注其与高加速度区的衔接过渡段,避免刚度突变引发应力集中,进而诱发附加震害。

4.4.2 横向地震作用下的相对位移特点

本文选取横向地震作用下TX、TY方向具有代表性的相对位移云图开展对比分析,明确隧道在横向地震作用下的弯曲变形特征与动力响应分布规律,

可为隧道抗震设计提供直接参考依据(见图11)。

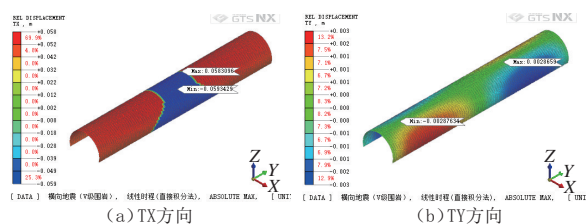


图11 横向地震作用下位移云图

(1)位移分布特征

隧道沿纵向呈现一端正向位移最大(绿色和黄色区)、另一端负向位移最大(蓝色和青色区)的梯度分布特征,位移幅值沿隧道纵向呈梯度分布。

正向最大位移与负向最大位移的绝对值几乎相等(2.87~2.88 mm),体现了地震作用下结构往复振动的对称响应特征。整体位移幅值为 ± 2.88 mm量级,属于毫米级微小变形,说明在当前地震工况下,隧道结构变形处于可控范围,未发生超限位移。

(2)力学行为与工程意义

在横向地震作用下,隧道结构以横向往复振动为主,位移两端极值对称分布。隧道两端极值区是横向变形最为剧烈的部位,更容易产生衬砌弯曲应力集中、接头剪切变形与开裂、“围岩—支护”结构界面相对滑移等病害。

4.4.3 横向地震作用下支护系统的轴力特点

本文采用线性时程直接积分法进行计算,提取横向地震作用下衬砌X向轴力的最大绝对值,绘制得到相应的云图。动力时程分析能够直观地揭示衬砌在地震作用下的瞬时最不利受力状态,可为隧道抗震设计提供关键依据(见图12)。

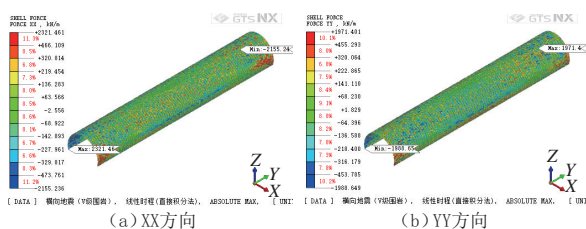


图12 横向地震作用下支护系统轴力云图

(1)力学分布特点分析

受力特征:最大拉轴力约为2 300 kN/m,最大压轴力约为2 150 kN/m,两者数值接近。在横向地震作用下,衬砌截面受力在拉、压间剧烈交替,同时承受显著的拉、压应力,动力响应十分明显。

极值位置:最大拉轴力出现在隧道端部(局部开口)位置,最大压轴力出现在隧道另一端,应力集中主要是由边界效应、几何不连续或荷载传递路径突

变引起。

纵向分布:衬砌内力从端部向中部快速衰减,当地震波沿隧道纵向传播时,衬砌动力响应强度逐渐降低,隧道端部为抗震薄弱环节。

(2)工程建议

隧道端部、几何突变位置为轴力极值集中区,需重点加强配筋,或采用衬砌刚度过渡设计优化结构受力。不同围岩段的衬砌需兼顾拉、压性能,可通过增设钢筋、设置变形缝或减震层来释放应力,改善受力状态。设计阶段需校核最大轴力下衬砌的强度与稳定性,避免拉裂或压溃破坏,同时需重点关注轴力与弯矩的组合效应。

4.4.4 横向地震作用下支护系统的最大主应力

图13清晰揭示了隧道在横向地震作用下的抗拉力学特征,动力时程云图揭示了瞬时最不利受拉状态,为隧道抗震设计中抗拉薄弱部位的识别提供了关键依据。

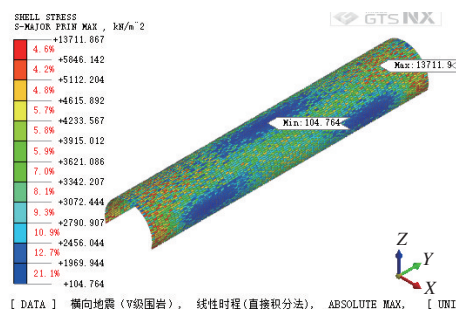


图13 横向地震作用下支护系统最大主应力云图

(1)力学分布特点分析

在横向地震动作作用下,衬砌全截面最大主应力均为正值,说明结构整体以受拉为主,这一特性与研究区围岩变形大、约束弱的工程条件直接相关。

应力幅值相差约130倍,最大拉应力达到13.71 MPa,最小仅为0.105 MPa,应力分布极不均匀,局部存在严重应力集中现象。在空间上,最大拉应力集中于隧道洞口(端部)处,是结构抗震最薄弱部位;隧道中部远离洞口区域,应力水平更低。这符合动力边界效应:洞口作为自由端,地震波的反射散射会加剧拉应力集中;中部围岩约束更强,应力可充分释放,应力水平更低。

(2)工程建议

针对隧道洞口(端部)拉应力集中,易引发衬砌开裂、剥落甚至出现整体破坏的问题,本文建议可从构造与刚度2个方面进行优化:一是通过增加配筋率、配置钢纤维混凝土、设置减震缓冲构造,强化结构的抗拉能力;二是在洞口段与中段间设置刚度过

渡段,避免刚度突变加剧应力集中。

衬砌材料需满足高强、高韧的要求,必要时可采用预应力衬砌或纤维增强混凝土,提升整体抗裂性能。抗震验算需以最大主拉应力为控制指标,并校核抗裂安全系数,保障结构在地震瞬时峰值荷载作用下不发生脆性破坏。

5 结 语

本文以隧道预制新支护系统为对象,结合试验、模拟与理论分析,探究新支护系统在横向地震作用下的抗震规律与力学性能,验证其抗震优势,明确隧道地震响应的关键特征与薄弱部位,为隧道抗震设计提供科学依据。

(1)相较于传统喷射混凝土支护,新支护体系中的多层级支护结构,通过多构件的协同作用,在抗变形与拉压承载性能上优势突出,可大幅提升中强地震下隧道结构的稳定性。

(2)横向地震响应存在空间差异,拱肩和拱腰处为抗震薄弱区,设计需强化该部位的支护刚度与减震构造,设置刚度过渡段,以削弱端部的边界效应。

(3)掺加纤维的泡沫混凝土预制构件,配合恰当的工法,可兼顾安全性与经济性。

(4)可通过增加配筋率、设置变形缝的方式,缓解隧道端部应力集中现象,避免发生结构破坏。

新支护系统突破了传统支护体系的抗震局限,契合行业发展方向,有望在高烈度地震区推广应用,后续可完善参数体系,构建智能监测预警体系,提升防灾水平。

参考文献:

- [1] JTG 2232—2019 公路隧道抗震设计规范[S].
- [2] 郑刚,程雪松,周海祚,等.岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J].土木工程学报,2022,55(7):1-38.
- [3] Durack J M, Li W Q. The properties of foamed air cured fly ash based concrete formasonry production[C]//Proceedings of 5th Australasian Masonry Conference, 1998.
- [4] Kearsley E P, Wainwright P J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete[J]. Cem Concr Res, 2001, 31: 105.
- [5] Kunhanandan N, Ramamurthy K. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology[J]. Cem Concr Compos, 2006, 28: 752.
- [6] 陈斌,王一帆,郭礼昱,等.纤维泡沫混凝土在隧道抗震过程中的应用[J].建筑设备与建筑材料,2022,43(3):256-260.

- [7] 张伟,郑大轩,王礼华.城市地下隧道玄武岩纤维增强泡沫混凝土的性能试验研究[J].当代化工,2021,50(8):1826-1830.
- [8] 詹炳根,李建勋,林涛.混杂纤维对泡沫混凝土收缩开裂的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(3):400-405.
- [9] 谷文琦,耿萍,陈昌健,等.基于纤维混凝土材料试验的套拱加固隧道地震响应模拟[J].铁道建筑,2024,64(1):90-94.
- [10] 欧楚萍,隋玉武,王冠通,等.孔隙特征对泡沫混凝土基本性能的影响研究[J].山东建筑大学学报,2020,35(1):71-75.
- [11] 张淑坤,李永靖,孙琦.水致弱化影响下粉煤灰泡沫混凝土充填体性能试验研究[J].硅酸盐通报,2021,35(6):1851-1855.
- [12] 黄海健,宫能平,穆朝民,等.泡沫混凝土动态力学性能及本构关系[J].建筑材料学报,2020,23(2):465-472.
- [13] 吴悦,黄杰,宋乐阳,等.地震作用下盾构隧道管片动力响应与开裂行为研究[J].建筑结构,2022,52(1):2906-2911.
- [14] 朱汉华,周小涵,王葵,等.隧道围岩与支护结构变形协调控制机理及工程应用[J].地下空间与工程学报,2023,19(1):79-86;94.
- [15] 陈建勋,陈丽俊,罗彦斌,等.大跨度绿泥石片岩隧道大变形机理与控制方法[J].交通运输工程学报,2021,21(2):93-106.
- [16] 于维刚,宋常胜,孙智海,等.深埋长大软岩隧道施工围岩稳定关键技术研究[J].现代隧道技术,2023(增刊1):220-227.
- [17] 赵伟,黄瑞,曾彬,等.公路隧道衬砌裂缝稳定性的多因素影响分析[J].地下空间与工程学报,2021(增刊1):425-431.
- [18] 孔超,张俊儒,王海彦,等.深埋软岩大变形隧道支护变形特征及承载机理研究[J].中国铁道科学,2021,42(6):103-110.
- [19] 苏凯,张妍珺,伍鹤皋,等.隧洞开挖过程中围岩安全系数演化特征与支护时机选择方法研究[J].岩石力学与工程学报,2019(增刊1):379-390.
- [20] 周浩,倪文龙.隧道结构抗震时程分析[J].城市道桥与防洪,2023(11):42-244.
- [21] 刘中宪,李楠,黄磊.含滑移界面复合式衬砌隧道地震响应边界元模拟[J].地下空间与工程学报,2021,16(2):615-628.
- [22] 陈卫忠,宋万鹏,赵武胜.地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J].岩石力学与工程学报,2017,36(2):310-325.
- [23] 童景盛,王胜利,韩秀丽,等.地下空间施工拼装用预制支护构件:CN205260054U[P].2016-05-25.
- [24] 童景盛,陈双庆,李菊红,等.一种大跨度地下空间深基坑支护系统与施工方法:CN110878555B[P].2024-08-02.
- [25] Tong J S. General formulas for calculating surrounding rock pressure of tunnels and underground spaces[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(4): 1348-1356.
- [26] Tong J S. Research on application of multi-factor surrounding rock pressure calculation theory in engineering[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 1-12.
- [27] Tong J S, Zhang H M, Zhang W Q. Application and numerical simulation of key technologies for deep foundation pit support[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Civil Engineering, 2023: 427-438.
- [28] Yuan S, Wang C B, Huang M L, et al. Research on seismic response of tunnel lining structure under complex geological conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 145: 105581.