



地铁荷载对防空洞旧址结构安全性能的影响

周勇¹, 吴统凡¹, 周政冕¹, 杨文钰^{2,3}, 张瑾璇², 杨阳², 刘汉龙²

(1. 重庆红岩革命历史博物馆 山地革命文物保护实验室, 重庆 400043; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 武汉 430071)

摘要:城市化进程中,地铁长期循环振动易致历史构筑物累积破坏,对兼具战时掩体功能与年代性损伤的历史防空洞威胁尤甚。现有地铁振动与历史结构相互作用的研究多将地下结构简化为规则无损材料,数值模拟常用局部简化模型,难以精准复现历史防空洞“地下空间约束+年代性结构损伤”的复杂受力环境,也无法充分反映其不规则形态、材料性能退化特征及振动荷载在“地铁-土体-防空洞”系统中的完整传递路径。以《新华日报》总馆旧址防空洞为对象,采用 PLAXIS 3D 构建全系统耦合模型,分析其振动变形规律并量化累积变形。结果表明:地铁振动对防空洞的影响呈“距离衰减-频率筛选”双重特性,防空洞区域振动以 1.98~8.67 Hz 低频为主,洞顶主频率 8.67 Hz;防空洞动力响应空间差异由“距离-形态-介质”共同决定,北侧(距轨道最近)竖向加速度峰值 1.05 m/s²、最大主应力 531 kPa,弧形拱顶的“振动聚焦效应”使顶部残余塑性变形达 2.0 mm(黏滞性累积损伤主导);地铁循环荷载下防空洞沉降呈“初期快、后期稳”的特征,经“改进 Monismith 公式+分层总和法”计算,50 a 长期沉降 30.5 mm,满足《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)中历史构筑物沉降限值(≤50 mm)要求。

关键词:地铁振动;防空洞旧址;结构安全性能;动力响应;累积损伤

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

Impact of metro loads on the structural safety performance of the former air-raid shelter

ZHOU Yong¹, WU Tongfan¹, ZHOU Zhengmian¹, YANG Wenyu^{2,3},
ZHANG Jinxuan², YANG Yang², LIU Hanlong²

(1. Laboratory of Mountainous Revolutionary Cultural Relics Protection, Chongqing Hongyan Revolutionary History Museum, Chongqing 400043, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

收稿日期: 2025-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(52478326); 国家资助博士后研究人员计划(GZC20242129); 岩土力学与工程安全全国重点实验室开放基金(SKLGGES-024015)

作者简介: 周勇(1985-), 男, 副研究馆员, 主要从事不可移动文物保护研究, E-mail: ierwei-zhou@163.com。

杨阳(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn。

Received: 2025-09-11

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52478326), the Postdoctoral Fellowship Program of CPSF under Grant Number (No. GZC20242129); Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Chinese Academy of Sciences (No. SKLGGES-024015)

Author brief: ZHOU Yong (1985-), associate research librarian, main research interest: protection of immovable cultural relics, E-mail: ierwei-zhou@163.com.

YANG Yang (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn.

Abstract: In the process of urbanization, long-term cyclic vibrations from subways tend to cause cumulative damage to historical structures, with a particularly greater threat to historical air-raid shelters that have both wartime bunker functions and age-related damage. Existing studies on the interaction between subway vibrations and historical structures mostly simplify underground structures as regular undamaged materials and use local simplified models in numerical simulations, which fail to accurately reproduce the complex stress environment of historical air-raid shelters characterized by underground space constraints + age-related structural damage and cannot fully reflect their irregular shapes, material performance degradation, or the complete transmission path of vibration loads in the subway-soil-air-raid shelter system. Taking the air-raid shelter at the former site of Xinhua Daily Headquarters as the research object, this study used PLAXIS 3D to establish a full-system coupling model, analyzing the vibration deformation law and quantifying the cumulative deformation. The results show that: subway vibrations have the dual characteristics of distance attenuation-frequency filtering on the air-raid shelter; the vibration in the shelter area is dominated by low frequencies of 1.98~8.67 Hz, and the main frequency of 8.67 Hz; the spatial difference in the dynamic response of the shelter is determined by distance-shape-medium; the peak vertical acceleration and maximum principal stress on the north side (closest to the track) are 1.05 m/s^2 and 531 kPa respectively, and the vibration focusing effect of the arc vault leads to a residual plastic deformation of 2.0 mm at the top; the settlement of the shelter under cyclic subway loads shows the characteristic of fast initial stage and stable later stage; calculated by the improved Monismith formula + layered summation method, the 50-year long-term settlement is 30.5 mm, which meets the settlement limit ($\leq 50 \text{ mm}$) for historical structures specified in the *Code for Monitoring Measurement of Urban Rail Transit Engineering* (GB 50911—2013).

Keywords: metro vibration; former air-raid shelter; structural safety performance; dynamic response; vibration-induced cumulative damage

《新华日报》总馆旧址位于重庆市渝中区虎头岩下,1939年8月13日正式启用。防空洞又名机印房,位于旧址西侧,是为躲避日机轰炸,开凿放置印刷机的地方,是兼具战时掩体功能与历史年代属性的地下结构。随着城市交通网络拓展,其周边已建成多条地铁线路^[1]。地铁运行产生的持续振动荷载,可能对防空洞结构造成累积性损伤,威胁其长期稳定性。近年来,该防空洞内部工程病害日趋显著,进口段局部12处砂浆层剥落、10处渗水点,洞身段顶板及侧面砂浆层全部剥落、岩石裸露,地面有少量落石,结构完整性受损,亟须开展系统性修缮与加固。对于这类具有历史属性的岩体洞穴结构,保护修复工作不仅需评估防空洞表层损伤状况及围岩结构稳定性^[2],更需考虑周边地铁振动等环境因素的叠加影响,预防潜在安全隐患^[3]。因此,通过量化分析地铁动荷载对防空洞结构的力学作用机制,明确结构动力响应规律与变形风险边界,能为该防空洞结构安全性能评估及后续长期监测提供关键技术支撑,具有重要工程实践意义。

针对地铁振动对周边结构影响的研究,主要采用现场测试、理论分析与数值模拟3种方法^[4-6]。其中,数值模拟依托有限元软件构建动力学模型,对岩土介质的动力特性进行分析^[7-8]。该方法具备较

强的适应性,能在不同地质条件与结构形式下,较好地反映土体及结构在复杂边界条件下的响应特征,具有计算效率高、成本相对低的优势,适用于多种工况下的预测研究^[9-10]。此外,数值模拟结果与试验或现场监测数据结合使用,能进一步提升分析结论的可靠性^[11-13]。

目前,已有多项研究采用有限元分析方法探究地铁荷载对历史构筑物安全的影响。王宇等^[14]基于MIDAS/GTS NX,模拟了北京地铁13号线新建区间下穿高粱古桥段时,古桥在交通荷载作用下的振动响应。马蒙等^[15]采用MIDAS/GTS对西安地铁现有2号线与拟建6号线在联合运行状态下,对钟楼产生的振动影响进行了预测分析。杨娜等^[16]实测了北京4号线附近的六檩抬梁式木结构振动响应,分析了木结构振动特性并提出了减振建议。陈娟等^[17]以重建木构钟楼和拟建济南地铁6号线为背景,通过建立隧道-土层-台基-钟楼耦合模型,分析了重建钟楼木结构不同位置处动力特性。

目前针对隧道与历史防空洞相互作用的问题,一般简化为近接施工问题^[18]。尽管对于浅表层交通荷载对地下结构的影响问题已有较多研究成果^[19-20],但现有研究多将地下结构简化为规则无损材料^[21],而历史防空洞是具有退化结构承载力的不

规则(分布及尺寸均不规则)地下工程,受空间位置、形状尺寸以及结构材料的影响,其在振动荷载作用下动应力分布具有较大的随机性,采用现有的理论、试验方法较难精准估算地铁荷载对其长短期的影响,亟待利用现场监测手段与三维数值模拟技术,探究动荷载在地铁-土体-防空洞空间的传递规律及防空洞在长期动力影响下的响应。

以《新华日报》总馆旧址防空洞为典型研究载体,通过 PLAXIS 3D 构建“地铁-土体-防空洞”全系统耦合动力学模型,完整还原地铁动荷载从振源经土体传递至防空洞的全过程路径,精准复现历史防空洞“地下空间约束+年代性结构损伤”的复杂受力环境;结合现场实测与数值模拟,通过在地铁线路不同距离处布置监测点,采集振动信号并分析其时域、频域特征,明确地铁振动在防空洞区域的特性,揭示振动对防空洞的长期作用机制;针对历史防空洞结构不规则、材料性能退化的特点,重点分析防空洞不同区域的动力响应差异,量化竖向加速度峰值、主应力幅值及残余塑性变形等关键指标,识别风险区域;采用“改进 Monismith 公式+分层总和法”,结合重庆 9 号线运营参数计算防空洞 50 a 长期沉降,并针对性提出加固与监测方案。

1 工程概况

1.1 场地简介

《新华日报》总馆旧址位于重庆市渝中区化龙桥街道虎头岩村 86 号,占地面积约 7 930 m²,现存 5 栋建筑、防空洞和托儿所遗址、篮球场遗址。防空洞原有两个出入口,其中主入口临时用条石砌筑封闭,基于高精度站式三维激光扫描仪获取的点云数据,防空洞周长约 57 m,洞内面积约 97 m²、洞内净高 1.4~3 m。

防空洞断面形态不规则,入口断面宽度约 2.8 m,沿洞内延伸方向断面宽度逐渐增大至 9.7 m。根据雷达图像,其拱顶、地面、边墙背后 2 m 范围内无大的空洞。防空洞围岩主要由泥岩构成,且节理裂隙较为发育。区域地质情况复杂,主要地层包括第四系全新统素填土、残坡积层以及侏罗系中统沙溪庙组的砂岩和泥岩。素填土主要为杂色素填土,松散至稍密,分布于砌石挡墙背后。残坡积层为灰色、黄褐色粉质黏土,分布于原始地形区域,厚度变化大。砂岩呈青灰、灰白色,中至细粒结构,岩质较硬。泥岩为紫红色、暗紫色,岩质也较硬,洞口及洞身主要为泥岩。由于该防空洞闲置多年,洞内弃土(淤土)较厚,厚度在 65~80 cm 之间,弃土以灰褐色黏性土为主。

1.2 测点布置

用 L2_WD 加速度传感器采集振动信号,每个点位的采样频率是 250 Hz,采集时间是 15~20 min,保证了在采集周期内,有地铁驶过至少一个来回,完整采集地铁经过的振动信号。根据地形测绘图,防空洞洞口与 9 号线地铁轨道最近的水平距离为 37.45 m,地铁轨道与防空洞的最小水平距离约 27.68 m,地铁轨道与防空洞的最小垂直距离为 2.23 m。

鉴于《新华日报》总馆旧址防空洞距离地铁轨道较近,为分析地铁振动对防空洞的影响,采集了 5 个点位的振动信号,分别是:地铁线路桥墩底部 0 m 处采集点位(K0)、与地铁线路距离 10 m 处采集点位(K10)、防空洞顶部与地铁线路直线距离大约 20 m 处的洞顶采集点位(K20)、防空洞洞口采集点位(K30)、防空洞洞内采集点位(K40)。各点位与地铁线路的相对位置示意图如图 1 所示。

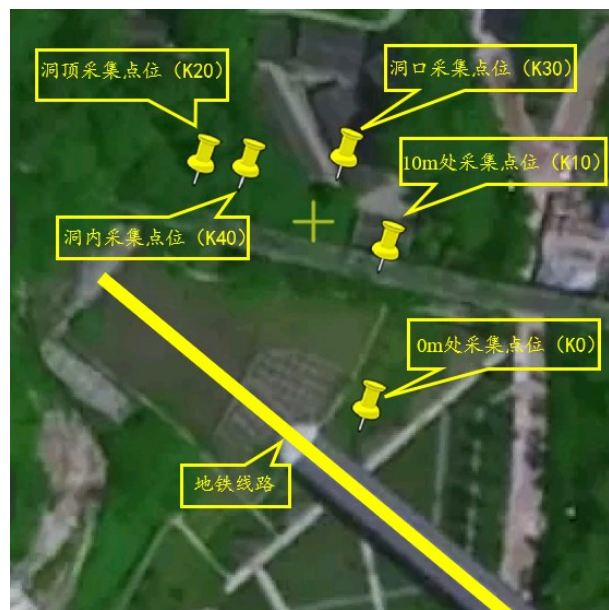


图 1 各采集点位相对位置

Fig.1 Relative positions of each collection point

1.3 实测结果分析

图 2 所示为 5 个监测点在“地铁驶过”与“无地铁”工况下的竖向加速度差异,直观反映了地铁振动的传播特征与环境背景的叠加效应。

近源点(K0、K10)在“地铁驶过”工况下,振动信号呈现显著的周期性脉冲特征,脉冲间隔稳定(约 0.45~0.5 s),与列车轮对通过频率(2.0~2.2 Hz)一致,直接对应轮轨接触的周期性激励作用;而“无地铁”工况下,信号幅值极低,以环境噪声为主。远源点(K20、K30、K40)中,“地铁驶过”工况的振动信号周期性随距离增加逐渐模糊,K20(洞顶)信号仍可见弱周期性,K30(洞口)和 K40(洞内)则因地层

阻尼耗散与环境噪声叠加,周期性特征基本消失, 至防空洞区域。
但幅值仍高于“无地铁”工况,表明振动能量已传递

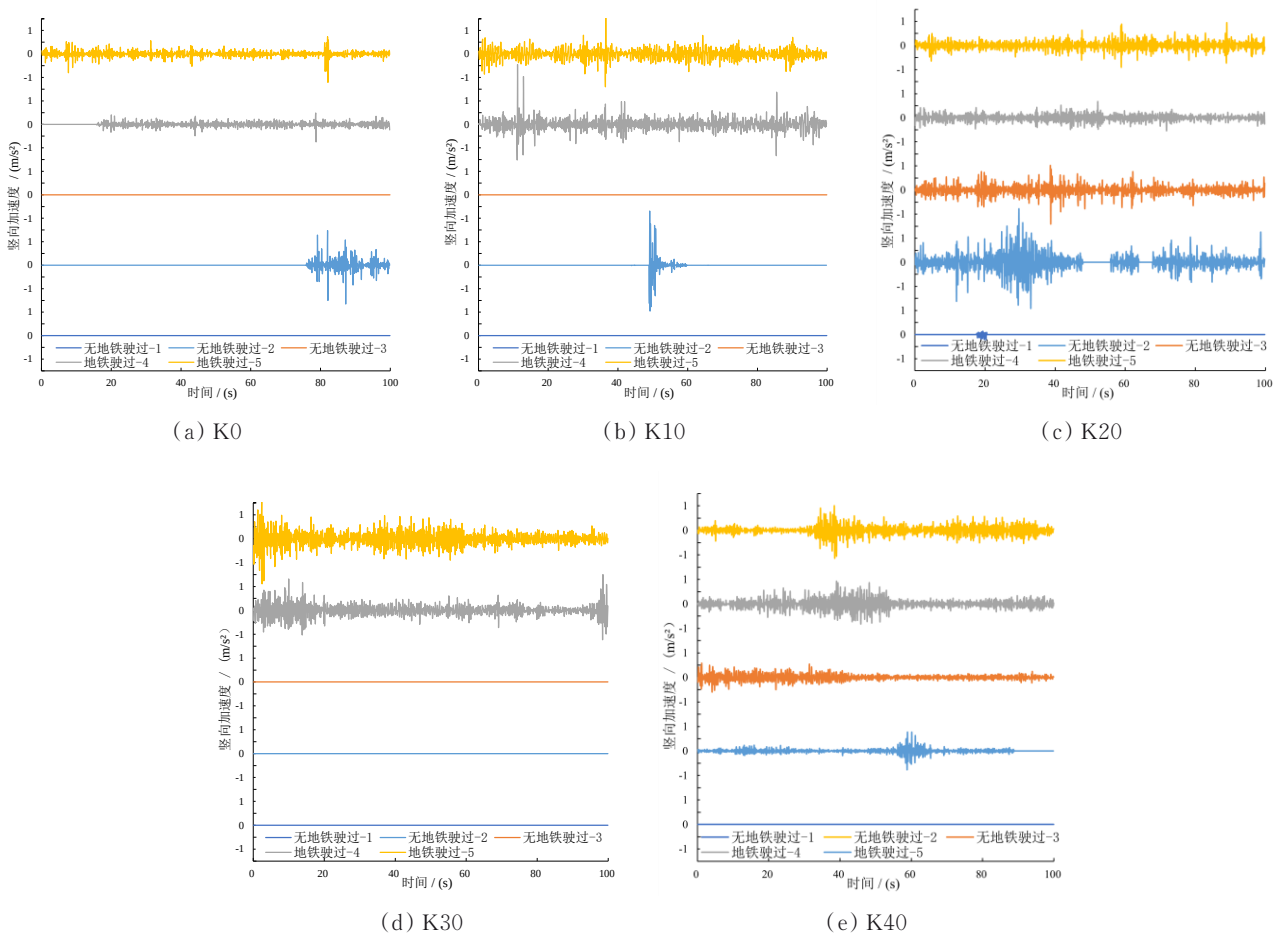


图2 振动信号

Fig.2 Vibration signal

图3所示竖向加速度时程曲线进一步揭示了地铁振动在时域上的传播演化规律,反映了振动波与地层介质的耦合作用及空间衰减特性。近源点(K0、K10)的时程曲线呈现规则的周期性脉动形态:K0点波形峰值密集且间隔均匀,峰值出现时间与列车轮对通过时刻对应,无显著畸变,表明振源信号在近场传递过程中保持稳定;K10点波形周期与K0点一致,反映振动波在10 m范围内的传播延迟及地层初步阻尼耗散效应。

远源点的时程曲线随距离增加呈现明显畸变:K20(洞顶)波形出现谐波叠加,主振动周期延长,峰值较K10点降低,包络线呈指数衰减趋势,与泥岩层对高频成分的过滤作用相关;K30(洞口)波形在主峰值后约0.8 s出现二次振动峰值,推测为洞口素填土与泥岩界面的波反射所致,形成局部振动放大;K40(洞内)波形呈现多频率成分叠加的复杂形态,周期性特征基本消失,与洞内积土的黏滞阻尼及围岩节理的散射效应有关,体现振动能量在洞内

的强效耗散。

图4所示的频谱分析揭示了地铁振动信号的频率构成及能量分布规律,为理解振动对防空洞的作用机制提供了关键依据。K0点频谱呈现宽频特征,能量分布范围为0~60 Hz,其中17.43 Hz处出现显著峰值,反映了振源的主要激励特性;同时34.86 Hz(二倍频)、52.29 Hz(三倍频)等谐波成分的存在,表明轨道存在轻微不平顺激励。

随传播距离增加,频谱能量呈现向低频集中的显著趋势。K10点频谱能量收缩至0~30 Hz,高频成分(>30 Hz)基本消失,主频率降至8.70 Hz;K20点能量进一步集中于0~20 Hz,8.67 Hz处形成单一主导峰值;K30点与K40点能量主要分布在0~20 Hz范围,其中K40点主频率低至1.98 Hz。这种频率筛选现象与岩土介质的动力学特性密切相关——高频振动在传播过程中因阻尼作用衰减更快,而低频成分更易穿透地层到达防空洞区域。

值得注意的是,K20点与K30点的主频率

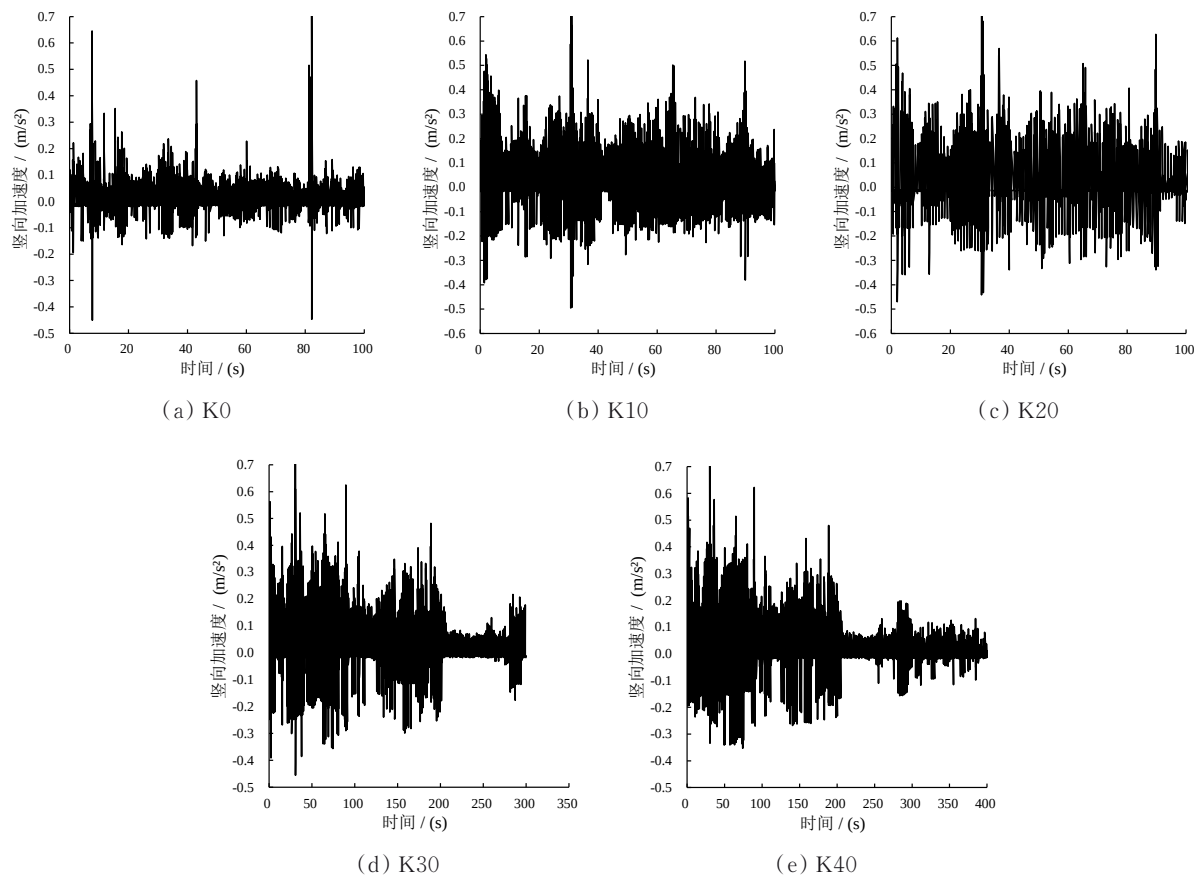


图 3 竖向加速度时程曲线

Fig.3 Vertical acceleration time-history curves

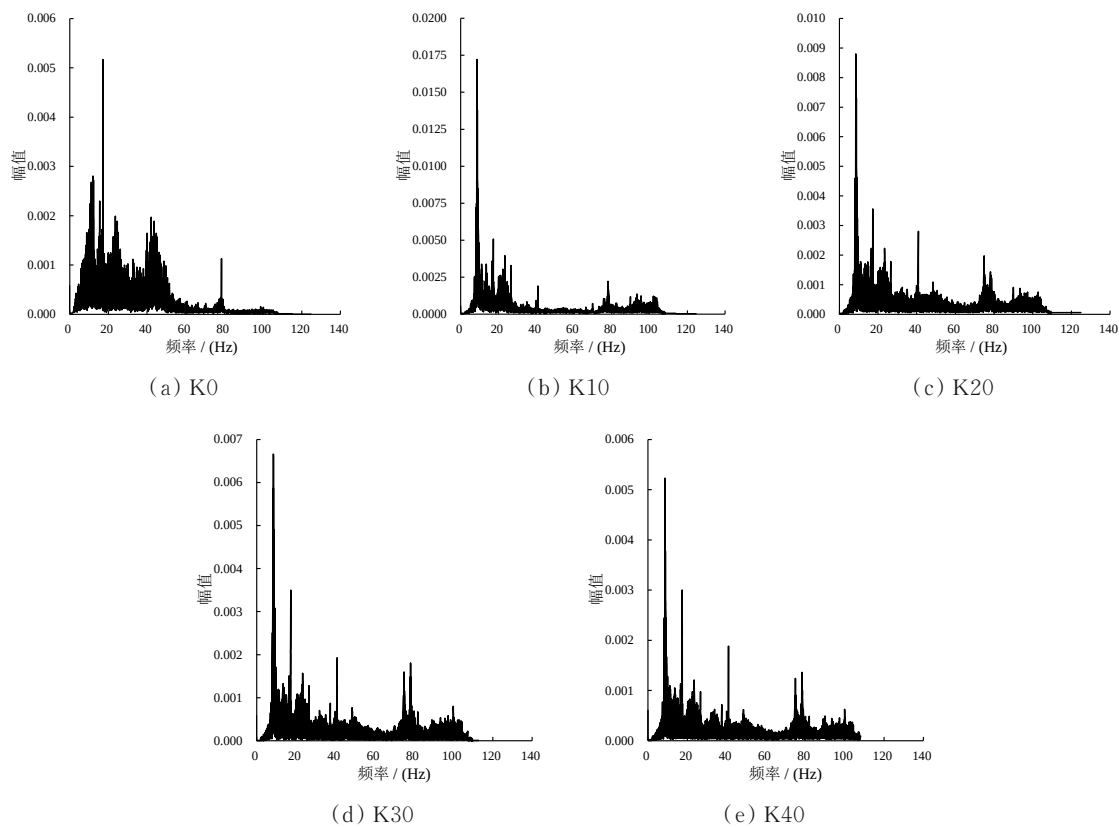


图 4 地铁驶过时频谱图

Fig.4 Spectrum diagram when the metro passes by

(8.67~8.88 Hz)与泥岩类结构的固有频率(通常为7~10 Hz)接近,存在潜在共振风险。通过能量占比分析可知,该频率成分的能量占比超过70%,若长期作用可能导致防空洞结构振动响应放大。K30点在70~90 Hz范围内出现微弱峰值(能量占比<5%),结合雷达探测数据推测,该高频成分源于洞口处素填土与泥岩界面的反射共振,虽能量占比低,但对洞口表层岩体可能产生局部激励作用。

频谱特征与防空洞保护具有直接关联性。到达洞内的振动以低频(<20 Hz)为主,此类频率成分对岩体的作用表现为低幅、长期的疲劳效应,易加速节理裂隙的扩展;而近源点的高频成分(>30 Hz)虽在传播过程中大幅衰减,但仍需关注其对洞口及浅表层围岩的微损伤累积作用。频谱分析结果为后续制定针对性保护措施提供了重要依据,如针对8~10 Hz频段设置振动监测阈值,对洞口区域采取减振处理等。

地铁振动对《新华日报》总馆旧址防空洞的影响呈现距离衰减与频率筛选的双重特性。近场以高频振动的脉冲作用为主,远场则以低频振动的长期效应为核心,两者共同构成对文物安全的潜在威胁。

2 地铁-土体-防空洞数值模型

2.1 地铁列车荷载施加

为探究地铁荷载对防空洞结构的影响,采用能反映其周期性的激励力函数来表达动荷载。包括车轮静载和3个对应不同振动频率的正弦函数叠加的动荷载^[22]。分别用来模拟车体自重、附加动载、列车轨道的随机不平顺以及列车速度的影响,根据潘昌实等的研究^[23],激振力模拟函数表达式确定为

$$F(t)=P_0+P_1\sin\omega_1t+P_2\sin\omega_2t+P_3\sin\omega_3t \quad (1)$$

$$P_i=M_0\alpha_i\omega_i^2 \quad (2)$$

$$\omega_i=2\pi v/L_i \quad (3)$$

式中: P_0 为单个车轮静荷载; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为低频(0.5~5 Hz)、中频(30~60 Hz)、高频(200~400 Hz)范围荷载振动峰值; M_0 为弹簧下质量; ω 为不平顺振动波长的圆频率; t 为振动波长的作用时间; α 为矢高; L 为列车不平顺振动波长。

在车辆轴重、轨道不平顺、车辆行驶速度、列车振动荷载的周期性等影响因素中,轨道不平顺是列车振动荷载的主要影响因素。对于控制条件分别为行车平稳性、动力附加荷载、波形磨耗的轨道不平顺管理值见表1^[23]。

重庆9号线采用6节编组,最高时速100 km/h,

表1 轨道不平顺管理值^[23]

Table 1 Management value of track irregularity^[23]

控制条件	波长/m	正矢/mm
行车平顺性	50.00	16.000
	20.00	9.000
	10.00	5.000
作用到线路上的动力附加荷载	5.00	2.500
	2.00	0.600
	1.00	0.300
波形磨耗	0.50	0.100
	0.05	0.005

$P_0=75\text{ kN}$, $M_0=750\text{ kg}$,参考相关研究^[24],波长和矢高分别取: $L_1=10\text{ m}$, $\alpha_1=5\text{ mm}$; $L_2=2\text{ m}$, $\alpha_2=0.6\text{ mm}$; $L_3=0.5\text{ m}$, $\alpha_3=0.1\text{ mm}$ 。荷载函数表达式为

$$F(t)=75+1.14\sin 17.45t+3.43\sin 87.28t+9.13\sin 349.08t \quad (4)$$

荷载施加于地铁轨道梁顶部,作用对象为轨道结构,再通过轨道传递至周边土体。前7s列车的荷载作用力如图5所示。

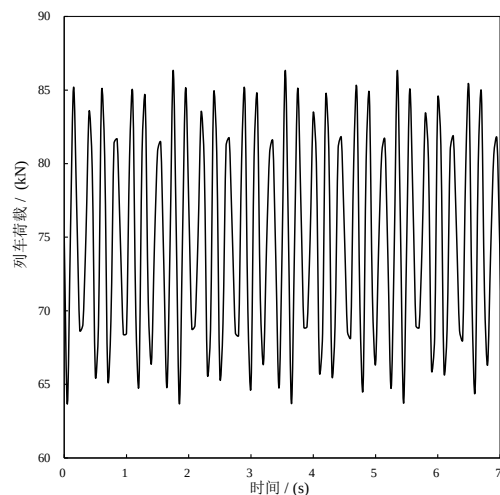


图5 列车振动荷载时程曲线

Fig.5 Time-history curve of train vibration load

该激振力函数包含低频(0.5~5 Hz)、中频(30~60 Hz)及高频(200~400 Hz)分量,与现场监测K0点频谱呈现的宽频特征(0~60 Hz)及17.43 Hz主峰值(对应列车轮对通过频率)、34.86 Hz(二倍频)、52.29 Hz(三倍频)等谐波成分高度匹配,准确反映了轮轨接触激励及轨道不平顺引发的多频振动特性。可用于后续数值模拟中振动荷载的输入。

2.2 三维有限元模型

2.2.1 土层分布

通过工程地质测绘及钻探揭示,场地内地层有第四系全新统素填土及残坡积层、侏罗系中统沙溪庙组的砂岩、泥岩。地层岩性由新至老分述如下:

1)第四系全新统土层

素填土:杂色,松散~稍密,稍湿,主要由砂岩碎块石、粉质黏土及少许泥岩碎石组成,骨架颗粒含量 35%~75%,粒径 5~650 mm,厚度 0.50~18.30 m。

粉质黏土:灰色、黄褐色,可塑状,干强度及韧性差~中等,切面稍有光泽,无摇晃反应,砂粒含量较重,为第四系残坡积成因,分布于原始地形区域。揭露厚度 0.70~8.60 m。

2)侏罗系中统沙溪庙组

砂岩:青灰色、灰白色,局部灰白色,中~细粒结构,中厚层状构造,主要含石英、长石云母,少许云母等,钙、泥质胶结,岩质较硬。勘察钻孔揭露单层厚度为 0.8~24.9 m,未揭穿,为场地主要地层,与泥岩显不等厚互层产出。

泥岩:紫红色、暗紫色,泥质结构,中厚层状构造,主矿物成分为黏土物,岩质较硬。钻孔揭露单层厚度为 0.80~25.1 m,为场地主要地层。

考虑地铁作用下土体产生的塑性累积变形,土体采用莫尔-库伦弹塑性本构模型,该模型可较好反映素填土的弹塑性变形特征与泥岩的剪切破坏特性,且参数获取简便、计算效率高,适用于本工程地铁循环荷载下的土体动力响应分析。根据工程地质勘察报告、土工试验及区域地质资料,合理归并性质相似的土层,最终划分为 2 个地层,简化后各层土体物理力学参数见表 2。

表 2 土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil		
土层	本构模型	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
素填土	MC 模型	19.2
泥岩	MC 模型	26
黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	弹性模量 E/MPa
12	7	8
597	40.5	100

2.2.2 结构布置

防空洞一侧对应的轨道依托桥梁架设,另一侧延伸的轨道逐渐接入地下隧道。桥体结构(桥面板、桥墩、承台及桩基)采用 C30 混凝土,桥面板宽 6 m、高 0.5 m,桥墩高 5 m、间距 30 m、截面尺寸为 1.8 m $\times$ 2.4 m,承台高 1.5 m、截面尺寸为 9 m $\times$ 6 m,桩基直径 1.2 m、长 26 m。轨道梁高 1.5 m、宽 0.85 m,道床采用 C35 混凝土,管片厚 0.5 m,采用 C50 混凝土。结构参数如表 3 所示,结构布置如图 6 所示。

2.3 边界条件及网格划分

为了模拟地铁驶入和驶出的完整过程,同时兼顾模拟精度和计算效率,建立的土体模型尺寸为

表 3 结构参数

Table 3 Structural parameters		
结构类型	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa
桥体结构	25	32.5
轨道梁		210
道床	25	31.5
管片	26	33.5

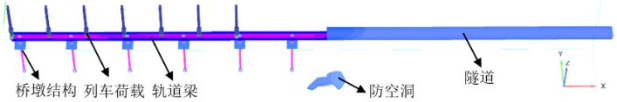


图 6 结构布置图

Fig.6 Structural layout drawing

320 m $\times$ 100 m $\times$ 100 m($x \times y \times z$),其中 x 向为地铁列车运行方向。模型土体边界条件设置为四周水平约束,底部竖向约束,顶部无约束。该设置旨在模拟土体的实际受力状态,减少振动波在模型边界处的反射干扰,确保计算结果准确性。动力计算时模型外围采用黏性边界条件,顶部则设置为自由边界,采用瑞利阻尼,瑞利阻尼比取 0.03。

进行网格划分时要兼顾准确描述各结构单元几何形状和变形梯度的准确性。通过四面体单元模拟网格,其可以适应并模拟复杂的几何模型,结构单元自动加密,根据输出的网格质量图,使用网格细化工具对模型进行网格优化后,最终共生成 16 271 个单元,26 285 个节点,网格划分情况如图 7 所示。

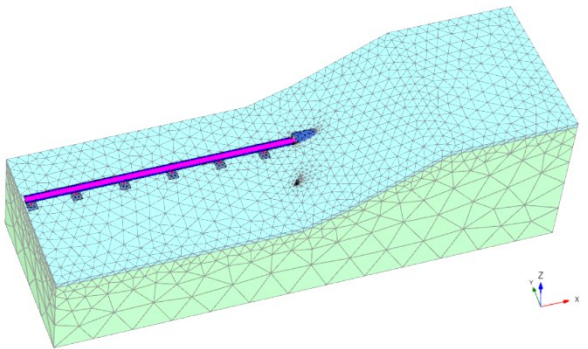


图 7 网格划分情况

Fig.7 Mesh division

2.4 模型验证

图 8 对比了现场实测与数值模拟的竖向加速度时程曲线,各监测点(K0、K10、K20、K30)的模拟曲线与实测曲线在振动形态及时域演化趋势上高度吻合。近源点(K0、K10)均呈现显著的周期性脉冲特征,远源点(K20、K30)曲线均表现为主峰值后随时间缓慢衰减的尾迹特征,反映地层黏弹性阻尼对振动能量的耗散效应,模拟与实测的衰减趋势一致。

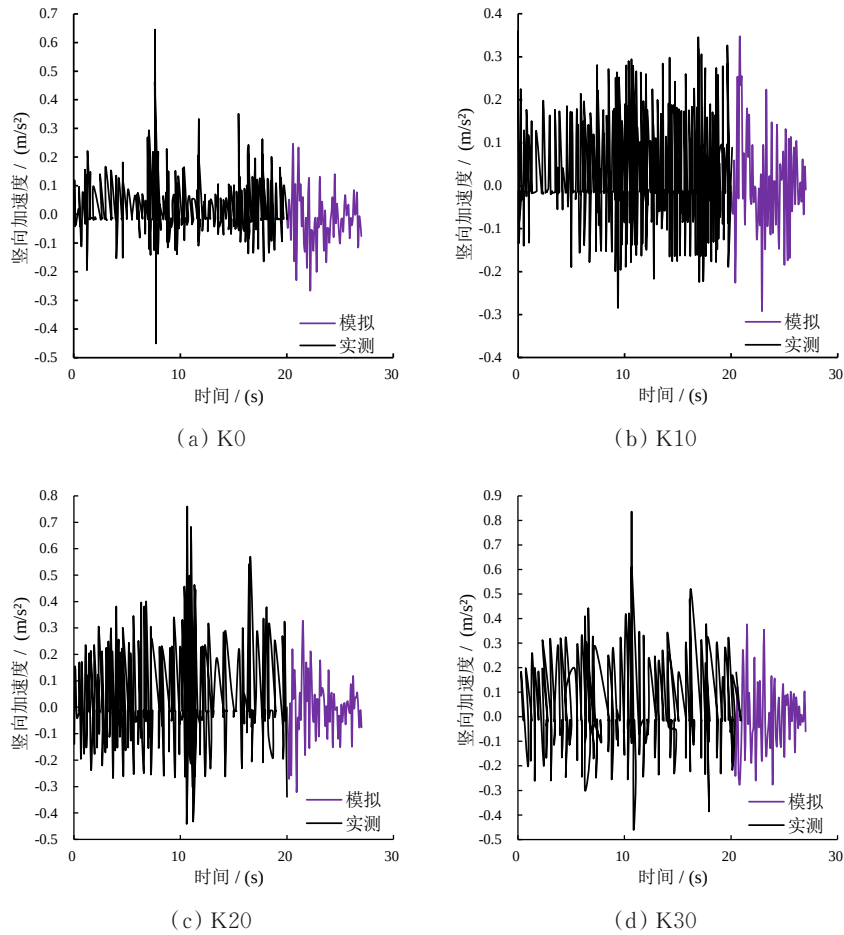


图8 竖向加速度时程曲线

Fig.8 Vertical acceleration time-history curves

3 数值模拟结果分析

以东向为 x 轴正向(见图9),详细分析防空洞的东、南、北、西侧以及顶部、底部的加速度响应、位移响应以及主应力响应。

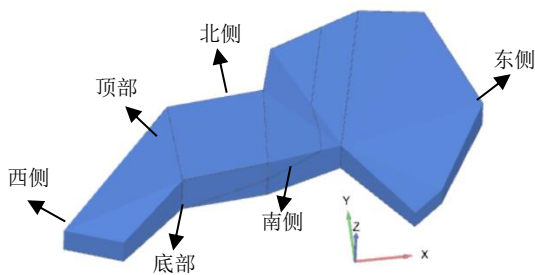


图9 方位示意图

Fig.9 Schematic diagram of orientation

3.1 加速度响应

图10绘制了地铁驶过防空洞时,各面竖向加速度时程曲线。西侧(1.02 m/s^2)、北侧(1.05 m/s^2)及顶部(0.98 m/s^2)竖向加速度峰值显著高于其他区域,这与距地铁轨道水平距离直接相关。东侧在地铁通过后1.8 s出现主峰值,随后呈现衰减尾迹,反

映泥岩黏弹性阻尼特性对振动能量的耗散过程。顶部与底部的加速度响应呈现“拱顶放大效应”,这是由于弧形拱顶对振动波的聚焦作用,底部因65~80 cm积土的阻尼作用(阻尼比0.05),高频成分($> 30 \text{ Hz}$)衰减率达90%,导致响应幅值降低。

3.2 位移响应

图11所示为竖向位移时程曲线,各面竖向位移均随地铁荷载作用呈“脉冲式增长-缓慢衰减”的动态过程,位移峰值出现时间普遍滞后于加速度峰值1.0~1.5 s,反映结构变形对动力荷载的滞后效应。拱顶对振动波具有汇聚作用,导致顶部振动能量集中,这种“振动聚焦效应”使顶面残余塑性变形最大,约2.0 mm,其余各面约0.05~0.15 mm,顶面残余塑性变形约为其余各面的13~40倍。表明地铁振动已引发岩体的不可逆损伤,这种累积效应与泥岩的黏滞性特性直接相关。

3.3 主应力响应

图12、图13分别为最大主应力及最小主应力时程曲线,各面主应力时程均呈现与地铁荷载同步的周期性波动特征,峰值出现时间滞后对应面加速度峰值1.5~2.0 s,反映应力从振动激励到结构响应

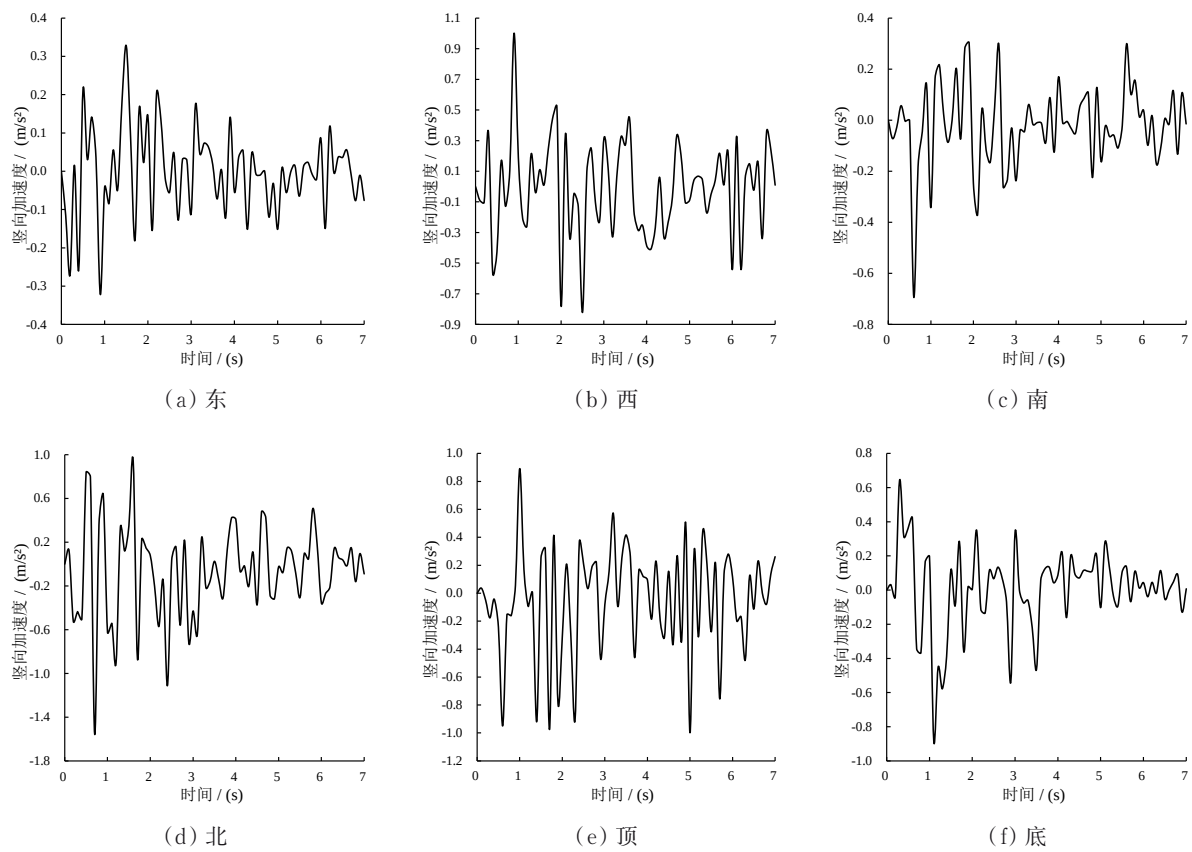


图 10 竖向加速度时程曲线

Fig.10 Vertical acceleration time-history curve

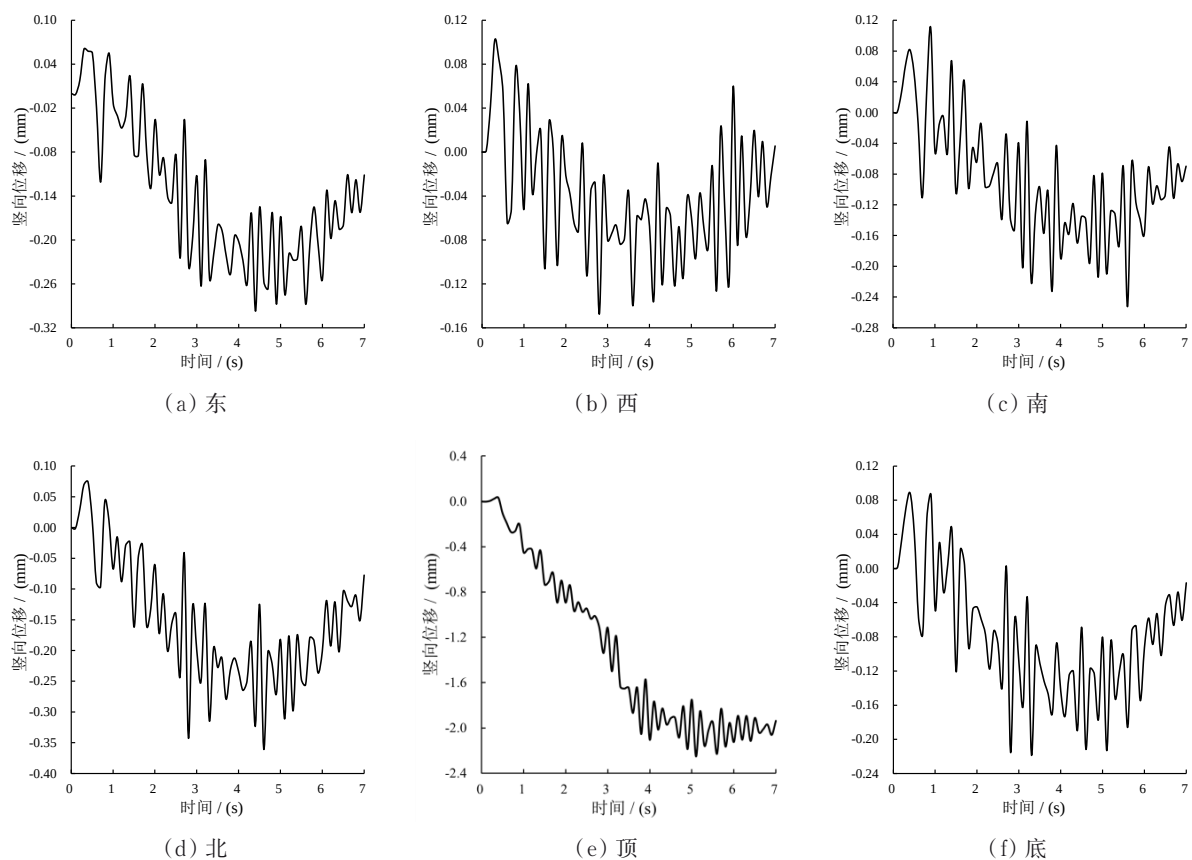


图 11 竖向位移时程曲线

Fig.11 Vertical displacement time-history curve

的传递延迟效应。主应力幅值空间分布呈“近轨点高、远轨点低”的规律:东侧最大主应力达 363 kPa,最小主应力达 342 kPa,西侧最大主应力和最小主应

力分别约 386、378 kPa,南侧分别为 444、434 kPa,北侧分别约 531、396 kPa,这种分布规律与各面距地铁轨道的水平距离及岩体节理发育程度直接相关。

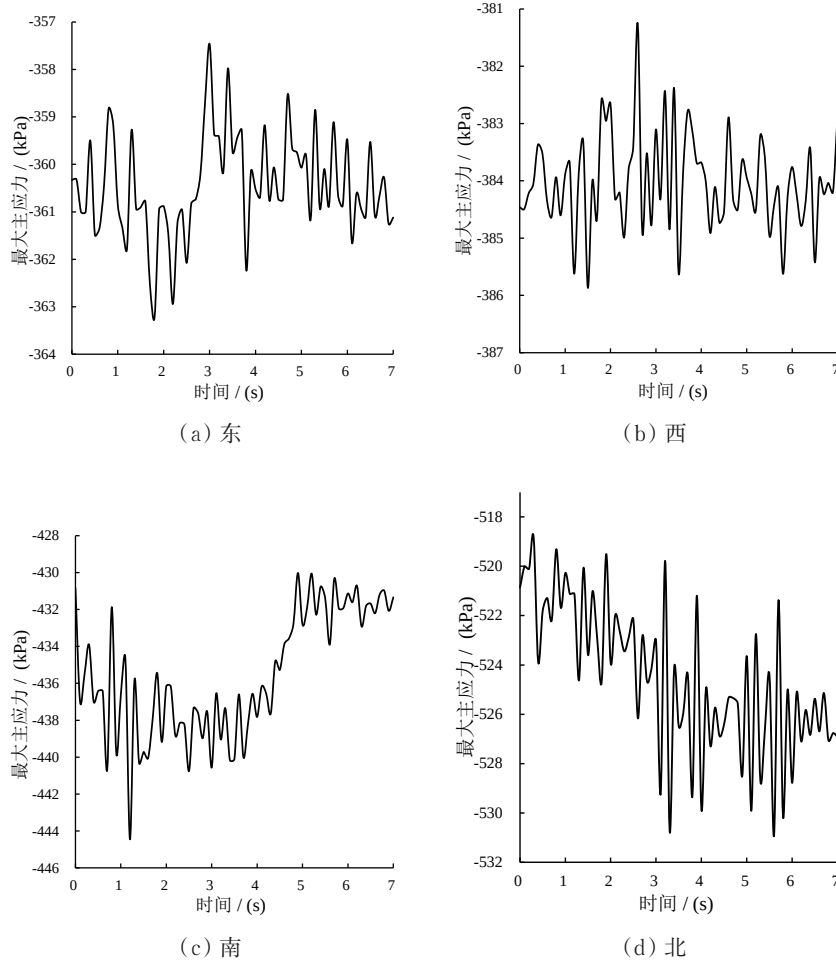


图 12 最大主应力时程曲线

Fig.12 Maximum principal stress time-history curve

3.4 长期沉降分析

在地铁列车长期循环荷载作用下,防空洞周边土体(素填土、泥岩)会产生累积塑性变形,进而引发长期沉降,可能加剧防空洞围岩节理扩展、岩层剥落等病害。基于现场监测数据与数值模拟结果,采用“Monismith 累积塑性应变公式+分层总和法”,计算防空洞区域长期沉降,并结合相关规范验证安全性,为文物保护提供依据。

目前,在地下工程及轨道交通领域,Monismith 累积塑性应变公式是预测循环荷载下土体累积变形应用最广泛的经验公式之一^[25-26],见式(5)^[27]。

$$\epsilon^p = AN^b \quad (5)$$

式中: ϵ^p 为地基土的累积塑性应变;A为第1次加载后土体的循环应变;N为循环次数;b为地基土特性参数。

由于式(5)的参数A较难确定,Li等^[28]对公式进行了改进,见式(6)及式(7)。

$$A = \alpha \left(\frac{q_d}{q_f} \right)^m \quad (6)$$

$$q_d = \sqrt{3j_2} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{xd} - \sigma_{yd}) + (\sigma_{xd} - \sigma_{zd}) + (\sigma_{zd} - \sigma_{yd}) + 6(\tau_{xyd}^2)]} \quad (7)$$

式中: q_f 为土体的静强度; q_d 为循环荷载作用下的动偏应力; α 、 m 分别为试验参数。

各土层长期沉降由累积塑性应变与层厚乘积计算,总沉降为各土层沉降之和,见式(8)。

$$S_d = \sum_i^n \epsilon_i^p h_i \quad (8)$$

式中: ϵ_i^p 为第*i*层土累积塑性应变; h_i 为第*i*层土厚度; n 为计算土层数。

通过提取数值模拟中防空洞周边土体主应力幅值,代入公式计算得到 $q_d=32.6$ kPa,基于土体的黏聚力及内摩擦角计算得到素填土的静强度 $q_f=$

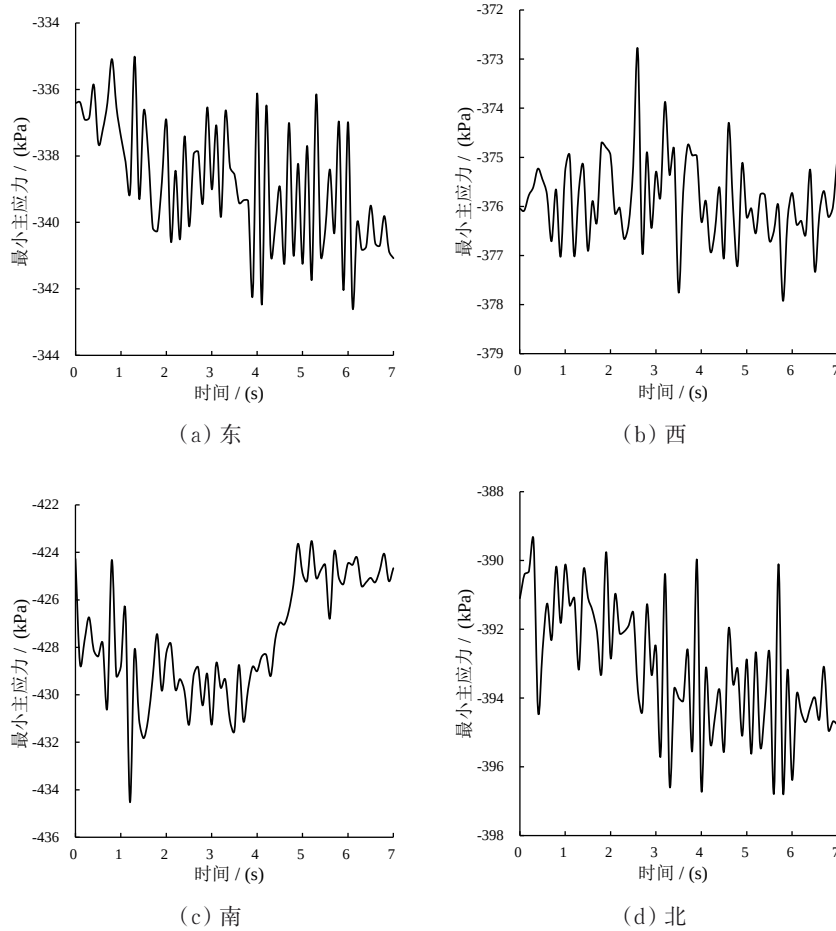


图 13 最小主应力时程曲线

Fig.13 Minimum principal stress time-history curve

45 kPa, 泥岩静强度 $q_{f2}=680$ kPa。重庆 9 号线日均运营 18 h, 列车通过频次 5 min/列, 日均 216 列, 每列 6 节编组 (每节 8 轴), 50 a 总循环次数 $N=216 \times 8 \times 6 \times 365 \times 50 \approx 2 \times 10^8$, 可得土体长期沉降曲线, 如图 14 所示。从图 14 可以看出, 在运营初期, 地铁循环荷载引起的列车沉降增速较大, 第 1 年沉降约 21.5 mm, 第 10 年约 28 mm, 随后沉降趋于稳定, 最终沉降约 30.5 mm。依据《城市轨道交通工程监测

技术规范》(GB 50911—2013)^[29], 长期沉降限值为 50 mm, 计算值 30.5 mm 小于限值, 满足结构安全保护要求。

4 结论

以《新华日报》总馆旧址防空洞为对象, 采用 PLAXIS 3D 有限元软件, 构建了“地铁-土体-防空洞”全系统耦合模型, 分析了防空洞在持续振动荷载作用下的变形演化规律, 量化了其在地铁循环荷载下的累积变形风险, 结论如下:

1) 地铁振动对防空洞的影响呈“距离衰减-频率筛选”双重特性。振动信号随传播距离衰减, 防空洞区域高频成分 (>30 Hz) 衰减率达 90%, 以 1.98~8.67 Hz 低频振动为主, 其中洞顶处为 8.67 Hz。

2) 历史不规则地下结构的动力响应空间差异由“距离-形态-介质”共同决定。距地铁轨道越近的区域 (如北侧水平距离 27.68 m), 竖向加速度峰值 (1.05 m/s^2) 和主应力幅值 (最大主应力 531 kPa) 越高; 弧形拱顶等特殊形态会产生“振动聚焦效应”, 导致顶部加速度峰值 (0.98 m/s^2) 和残余塑性变形

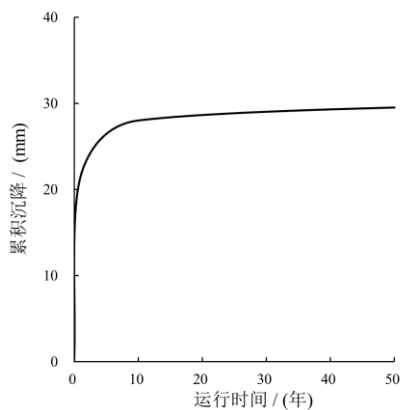


图 14 土体长期沉降曲线

Fig.14 The long term settlement of soils

(2.0 mm)显著高于其他区域;而洞内积土、围岩节理等介质特性则会通过黏滞阻尼或能量散射,进一步加剧响应差异,这一规律可为同类不规则历史地下结构的风险区域识别提供依据。

3)地铁循环荷载下历史地下结构的长期沉降需结合“短期变形趋势+规范限值”综合判定。此类结构沉降呈现“初期快、后期稳”特征,前1年沉降21.5 mm,占50 a总沉降(30.5 mm)的70.5%,前10 a沉降28 mm,占91.8%,最终沉降满足规范限值(≤ 50 mm)。基于此可建立“分阶段管控”策略:运营初期(1 a内)加密监测频次,重点关注沉降速率;后期(10 a后)可适当降低频次,同时针对高风险区域采用注浆加固、减振垫层等措施。

参考文献

- [1] 乔宏. 轨道交通导向下的城市空间集约利用研究:以重庆市渝中区为例[D]. 重庆:西南大学, 2013.
- QIAO H. Analysis of urban space intensive use under the guidance of rail transit [D]. Chongqing: Southwest University, 2013. (in Chinese)
- [2] 孟志刚. 圆觉石窟顶板变形机理及控制对策研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2021.
- MENG Z G. Research on the deformation mechanism and control countermeasures of Yuanjuedong Grottoes Roof [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2021. (in Chinese)
- [3] 袁宗浩, 蔡袁强, 袁万, 等. 地铁列车荷载作用下饱和土中圆形衬砌隧道和轨道系统动力响应分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1003-1014.
- YUAN Z H, CAI Y Q, YUAN W, et al. Dynamic response of circular railway tunnel and track system in saturated soil under moving train loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1003-1014. (in Chinese)
- [4] CHEN Y M, FENG Q S, LIU Q J. Experimental study on the train-induced vibration characteristics in the over-track buildings of metro depots [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113523.
- [5] JIANG X, FENG Q S, LIANG W S, et al. Analysis of vertical vibration transmission in over-track buildings above metro depot based on energy functional variational principle [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 106: 112657.
- [6] ZOU C, ZHAO Y, LUO W J, et al. Dynamic coupling mechanisms and hybrid mitigation of vibration transmission in metro depot climbing lines [J]. Construction and Building Materials, 2025, 492: 142873.
- [7] 邹超, 冯青松, 何卫. 列车运行引起地铁车辆段与上盖建筑环境振动研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 27-46.
- ZOU C, FENG Q S, HE W. Research review on environmental vibrations in metro depot and over-track buildings induced by train operation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 27-46. (in Chinese)
- [8] MA L X, ZHU H J, LIU Y Q, et al. Numerical modelling of ground-borne vibration from a metro tunnel embedded in saturated soil strata using a 2.5D fully-coupled formulation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2026, 200: 109752.
- [9] 刘维宁, 夏禾, 郭文军. 地铁列车振动的环境响应[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊1): 586-593.
- LIU W N, XIA H, GUO W J. Study of vibration effects of underground trains on surrounding environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Sup 1): 586-593. (in Chinese)
- [10] 潘昌实, 谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. 土木工程学报, 1990, 23(2): 21-28.
- PAN C S, XIE Z G. Measurement and analysis of vibrations caused by passing trains in subway running tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23(2): 21-28. (in Chinese)
- [11] 杨林德, 王国波, 郑永来, 等. 地铁车站结构振动台试验及地震响应的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1538-1545.
- YANG L D, WANG G B, ZHENG Y L, et al. Shaking table test on metro station structure and 3D numerical simulation of seismic response [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1538-1545. (in Chinese)
- [12] 陈国兴, 左熹, 庄海洋, 等. 地铁车站结构大型振动台试验与数值模拟的比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 157-164.
- CHEN G X, ZUO X, ZHUANG H Y, et al. A comparison between large-size shaking table test results and numerical simulation of a subway station structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2008, 28(1): 157-164. (in Chinese)
- [13] 路德春, 高泽军, 孔凡超, 等. 地铁列车运行诱发地面邻近建筑振动的数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 113-124.
- LU D C, GAO Z J, KONG F C, et al. Numerical study on vibration of ground building adjacent to metro induced by operation of subway train [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 113-124. (in Chinese)
- [14] 王宇, 马蒙, 李万博. 地铁列车振动对高梁古桥影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(2): 197-203.
- WANG Y, MA M, LI W B. Analysis of the effect of metro train induced vibration on Gaoliang ancient bridge

- [J]. Noise and Vibration Control, 2025, 45(2): 197-203. (in Chinese)
- [15] 马蒙, 刘维宁, 邓国华, 等. 基于校准法的地铁振动对西安钟楼影响研究[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 206-212.
- MA M, LIU W N, DENG G H, et al. Study of subway vibration impact on Xi'an bell tower by calibration method [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 206-212. (in Chinese)
- [16] 杨娜, 杨菁熊. 环境振动下传统木结构的动力响应现场实测[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 75-82.
- YANG N, YANG J X. In-situ measurements of dynamic responses of traditional timber buildings under ambient vibration [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 75-82. (in Chinese)
- [17] 陈娟, 李元庆, 耿建龙, 等. 地铁荷载下台基与重建钟楼的振动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(3): 236-242.
- CHEN J, LI Y Q, GENG J L, et al. Dynamic response of reconstructed bell tower and pedestal foundation induced by subway loading [J]. Noise and Vibration Control, 2025, 45(3): 236-242. (in Chinese)
- [18] 杨克文. 城市隧道穿越人防空洞关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- YANG K W. Research on the key construction technology of urban tunnel close to dugout [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [19] 姚志雄, 吉磊, 刘耀星, 等. 交通荷载对浅埋群洞隧道的动力影响分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 107-117.
- YAO Z X, JI L, LIU Y X, et al. Analysis of the dynamic effect of traffic load on shallow multi-tube tunnel structure [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 107-117. (in Chinese)
- [20] 姚志雄, 刘耀星, 张忠星, 等. 上覆地表车载作用下群洞隧道动力响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1363-1373.
- YAO Z X, LIU Y X, ZHANG Z X, et al. Dynamic response of group tunnel under overlaying surface vehicle load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(4): 1363-1373. (in Chinese)
- [21] 黎泳钦, 仇文岗, 袁运涛, 等. 扩底式斜支撑受压承载性能试验与数值研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(7): 199-208.
- LI Y Q, ZHANG W G, YUAN Y T, et al. Static load test and numerical investigation on compressive bearing capacity of belled tilted strut [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(7): 199-208. (in Chinese)
- [22] 胡焱, 李明帅, 郭飞, 等. 地铁行车荷载作用下地层和重叠隧道变形数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增刊2): 258-263.
- HU Y, LI M S, GUO F, et al. Numerical simulation of deformation of strata and stacked tunnels under traffic loads of subway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(Sup 2): 258-263.
- [23] 潘昌实, G.N.Pande. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报, 1984, 17(4): 19-28, 18.
- PAN C S, PANDE G N. Preliminary deterministic finite element study on a tunnel driven in loess subjected to train loading [J]. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(4): 19-28, 18. (in Chinese)
- [24] JENKINS H H, STEPHENSON J E, CLAYTON G A, et al. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces [J]. Railway Engineering Journal, 1974, 3(1): 2-16.
- [25] XIA F, XIA T D, WANG Z H. Dynamic response and settlement cause analysis of roadbed-soft clay foundation system under traffic vibration loads [J]. Applied Sciences, 2025, 15(4): 2163.
- [26] YANG A W, WANG B B, ZHU Y. Deformation characteristics of soft dredger fill under continuous dynamic loading [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2025, 43(11): 2257-2269.
- [27] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soil due to repeated loading [J]. Journal of the transportation research board, 1975, 537: 1-17.
- [28] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006-1013.
- [29] 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

(编辑 XXX)