

地铁运行对国家大型地震工程模拟研究设施的 振动影响分析

巴振宁^{1,2,3}, 符瞻远^{1,3}, 韩庆华^{1,2,3}, 梁建文^{1,2,3}, 刘又恺³

(1. 天津大学中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350;

2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 天津地铁 6 号线紧邻天津大学北洋园校区, 列车运行可能会对学校重要建(构)筑物产生不利振动影响。本文以距该线路较近的天津大学国家大型地震工程模拟研究设施为研究对象, 对沿线场地以及设施建(构)筑物进行现场振动测试, 研究了振动沿场地的衰减规律和设施建(构)筑物内振动控制点的振动水平; 建立了隧道-场地-设施建(构)筑物整体有限元模型, 开展了有/无河道(实际存在河道)情况下, 场地以及设施建(构)筑物振动仿真模拟分析, 着重探讨了河道对场地和设施建(构)筑物的隔振情况。研究表明, 由于天津软土地及河道的影响, 场地竖向加速度衰减显著, 0~80 m 衰减达 97.33%; 设施的大体积混凝土基础及其底部桩基设计有利于基础自身的振动控制; 河道使得场地和设施大型振动台基础的加速度振幅分别降低 40.87% 和 27.97%, 场地频谱在 0~20 Hz 和 40~70 Hz 区间出现明显的“双峰”现象。

关键词: 地铁列车; 现场振动测试; 有限元分析; 振动影响

中图分类号: U231; U260.11⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)11-1884-14

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.11.009

引言

地铁作为一种安全快捷的出行方式, 具备能耗低、污染少等优点, 在解决城市交通问题方面具有重要的地位和作用。地铁常穿越商业中心、居住区或文教区, 由于振动引起的工程结构安全隐患^[1-4]、振动敏感设备无法正常使用^[5-8]和人体舒适度降低^[9-12]等问题十分突出, 因而开展地铁运行引起的场地振动衰减和建(构)筑物振动响应分析具有十分重要的意义。

目前, 国内外学者通常采用经验法、数值法和现场测试法对地铁运行下场地及建(构)筑物的振动影响开展研究。其中, 经验法基于振动衰减的基本理论和测试数据, 提出简化的振动衰减预测公式^[13-15], 如 HUNT^[16]结合铁路车辆和轨道现有模型, 提出了一种能够预测从铁路到邻近场地再到建筑物的振动方法, 可用于定性或半定量计算分析, 但无法全面考虑影响轨道交通振动的诸多因素^[17]。数值法具有较好便捷性, 适用于多工况参数分析^[18-23], 如 GUPTA 等^[24]提出了一种利用耦合周期有限元-边界元模型

来预测地铁对场地的振动影响, 但数值法实施时需尽可能保证模型结构、基本假设和输入参数与实际接近^[25]。现场测试法结果最为准确^[26-30], 可作为校核和评判预测结果的标尺, 如冯青松等^[31]基于广州某车辆段实测, 分析了列车运行引起试车线、咽喉区、检修线区域的振动特性差异和衰减规律; DEGRANDE 等^[32]基于伦敦某地铁线路现场实测, 研究了地铁对公园邻近场地的振动影响; 李明航等^[33]对北京某地铁线路的同一区间内 2 个断面进行现场原位测试, 从时域、频域多角度出发, 分析了振动源强的离散特征以及不同频段的控制因素, 但测试法实施时也容易受到各种客观条件的制约和限制。

国家大型地震工程模拟研究设施距天津地铁 6 号线最近距离仅 80 m。此外, 考虑天津滨海场地的软土特性, 地铁振动对国家大型地震工程模拟设施振动的影响是一项十分值得开展的研究。本文采用现场测试结合数值模拟的方法开展了振动影响研究。首先, 选取设施中的大型振动台基础、水下振动台基础和仿真中心为研究对象, 设计现场振动测试方案并使用 CMG-5TCDE 强震仪进行了现场振动测试, 分析了地铁运行引起场地的振动衰减规律及

收稿日期: 2022-11-01; **修订日期:** 2022-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178495); 天津市科技计划项目(24ZYJJJC00100); 天津市研究生科研创新项目(2021YJSB145)。

其对设施建(构)筑物的振动影响;然后采用有限元分析软件 ABAQUS 建立了有/无河道情况的隧道-场地-设施建(构)筑物整体有限元模型,将振动测试结果与数值模拟结果对比,验证了模型的精度并进一步分析了河道的隔振效率。研究可为开展地铁运行对天津大学内具有振动控制要求的建(构)筑物的振动影响评估和减隔振方案分析提供参考。

1 场地及设施建(构)筑物振动测试

1.1 测试对象及测试场地

“十三五”国家重大科技基础设施“国家大型地震工程模拟研究设施”位于天津大学北洋园校区西南侧,设施规划用地面积约 66000 m²,包括实验中心和仿真中心,分别如图 1(a)和(b)所示。其中,实验中心内包括大型地震模拟振动台(台面尺寸为 20 m×16 m,最大载重为 1350 t,满载水平最大加速度为 1.5g,满载竖向最大加速度为 2.0g)、水下可移动双子台振动台台阵(台面尺寸为 6 m×6 m,最大载重为 150 t,满载水平最大加速度为 1.5g,满载竖向最大加速度为 2.0g)和高水平造波造流试验水池及配套设施等。仿真中心则配备试验测试分析设备,可为设施科学研究提供高性能计算、数值计算、仿真分析、智能可视化分析、大数据分析 & 开放共享等功

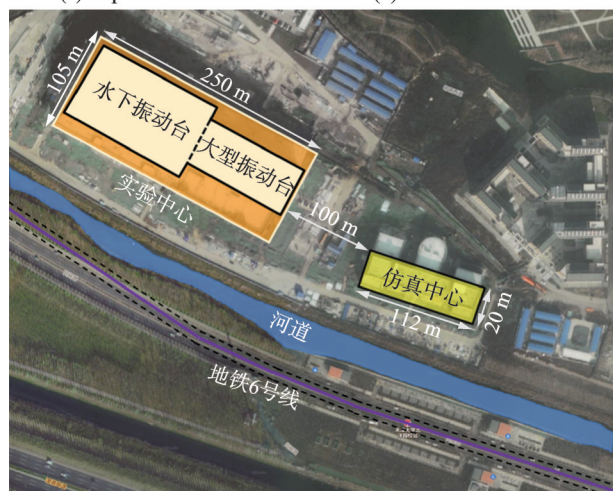
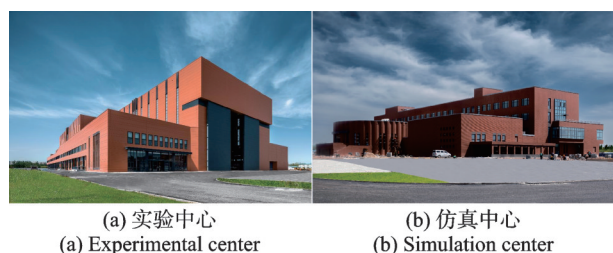


图 1 测试对象与测试场地情况

Fig. 1 Test object and test site

能。大型振动台基础和水下基础均为振动台核心大体积混凝土与周边钢筋混凝土框架结构,底部均采用桩基础设计;仿真中心为钢框架结构,底部采用桩基础设计。

设施位于天津地铁 6 号线二期北部。其中,实验中心的大型振动台基础和水下振动台基础均与地铁线路平行,分别距地铁中心线 100 和 80 m 左右;仿真中心与地铁线路呈 5° 夹角,距线路 90 m 左右。鉴于设施距地铁振动源较近且地铁运行可能会对其造成不利振动影响,选取大型振动台基础、水下振动台基础和仿真中心为测试对象。现场布置如图 1(c) 所示。

1.2 测试仪器

测试仪器选用英国 Guralp Systems 公司生产的 CMG-5TCDE 一体化强震仪(内部的加速度计包含三个独立的用于测量垂直、南北、东西方向的三个传感器,最高采样频率可达 1000 Hz),该仪器配置 Scream 软件与数据分析处理软件 ART3,可完成从测试到数据后处理的一体化操作。振动测试仪器与配套设备如图 2 所示。



图 2 振动测试仪器与配套设备

Fig. 2 Vibration testing instrument and supporting equipment

依据文献[31]中的研究,地铁运行产生的振动主要集中在 30~80 Hz。由于数据在进行离散化时会产生频率混叠现象,依据奈奎斯特采样定理(当采样频率大于信号中最高频率的 2 倍时,采样得到的数字信号就能够较为完整地保留信号的原始信息),将此次测试的采样频率定为 200 Hz。

1.3 测点布置

为了研究地铁振动沿场地的衰减规律及振动对设施建(构)筑物的影响,振动测点分别布置在沿线场地、设施实验中心内的水下振动台基础和大型振动台基础、设施仿真中心内。场地测点的测振次数

按照《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071—88)^[34]规定,每个测点连续测量20次,取算术平均值(下文相同)。设施地震模拟振动台基础的测振次数参考《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—

2013)^[35]规定,每个测点连续测量5次。设施仿真中心的测振次数参考《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2018)^[36]规定,每个测点连续测量5次。测点整体布置如图3所示。

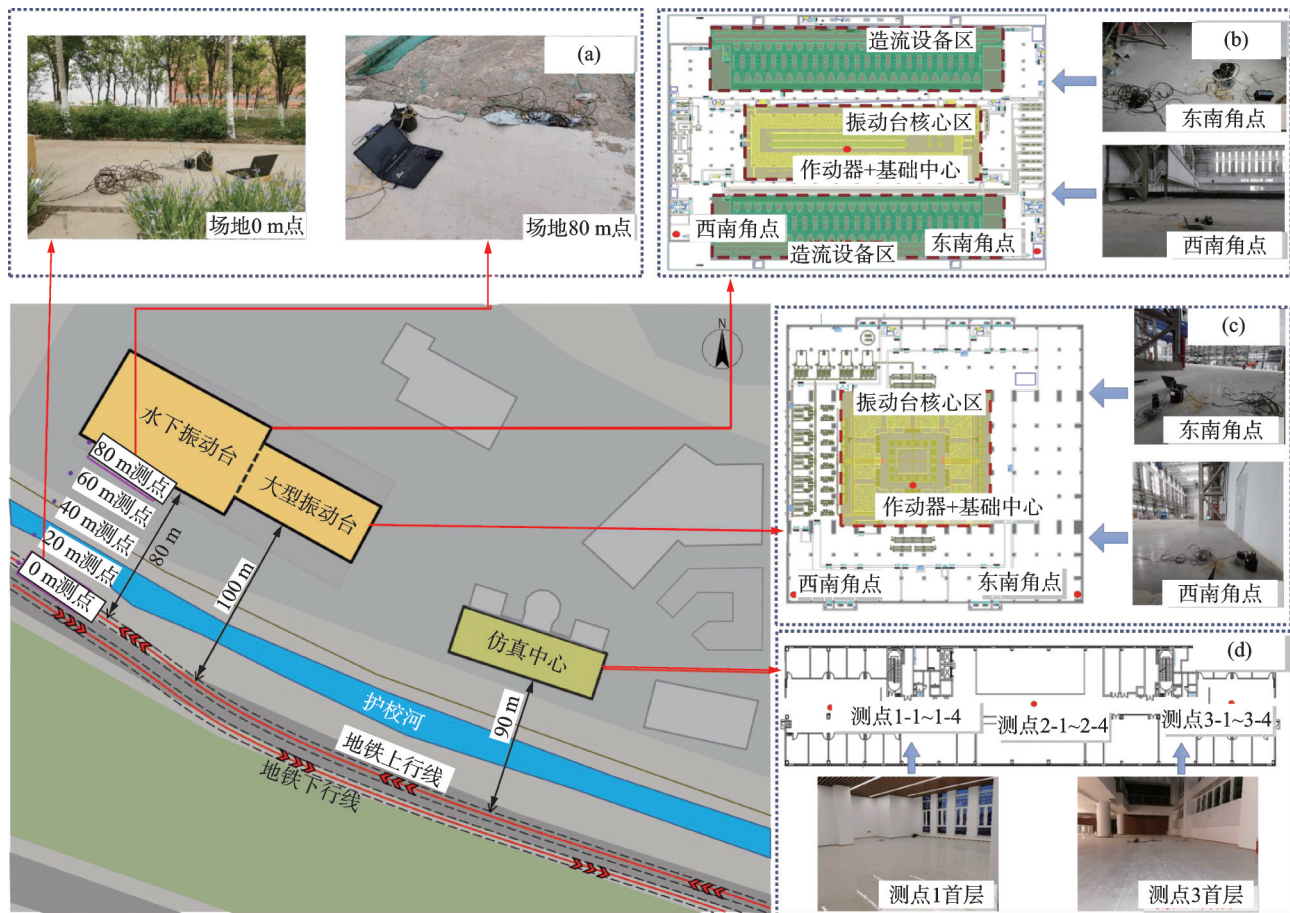


图3 研究区域的振动测点布置示意图

Fig. 3 Schematic layout of vibration measurement points in the study area

1.3.1 场地测点布置

地铁6号线距水下振动台基础最近距离仅80 m,为尽可能分析场地振动衰减规律,场地测点布置如图3(a)所示:沿地铁-水下振动台基础线路上每隔20 m布置一个测点,共5个测点,并标记为0 m测点、20 m测点、40 m测点、60 m测点和80 m测点,其中0 m测点代表地铁线路正上方,80 m测点接近水下振动台基础,可作为振动由场地传至设施建(构)筑物前的状态参考,测量竖向加速度。

1.3.2 设施大型振动台和水下振动台基础测点布置

参考《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)^[35]对振动试验台振动控制点的相关规定,选取基础中心和作动器底座附近(基础中心和作动器位置近似视为同一测点)、靠近地铁线路一侧的两个角点(东南角点、西南角点)作为振动测试点,如图3(b)和(c)所示,测量水平向和竖向加速度。

1.3.3 设施仿真中心测点布置

同样地,参考《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)^[35]对建筑结构振动评价位置的相关规定,选取仿真中心建筑物室内地面中央作为振动测试点,测量竖向加速度。其中仿真中心共4个建筑层,每层楼空间结构布置基本相同,测点布置于每层的相同位置处,如图3(d)所示,测量竖向加速度。

2 场地振动衰减及设施建(构)筑物振动响应分析

2.1 场地振动衰减分析

图4给出了场地竖向加速度实测结果。由于场地土为软土且20~40 m处存在河道,场地竖向振动衰减迅速,距线路正上方20,40和80 m处的加速度衰减率分别达到了67.25%,91.39%和97.33%。此外,场地各个测点的背景振动相近且幅值均小于80 m

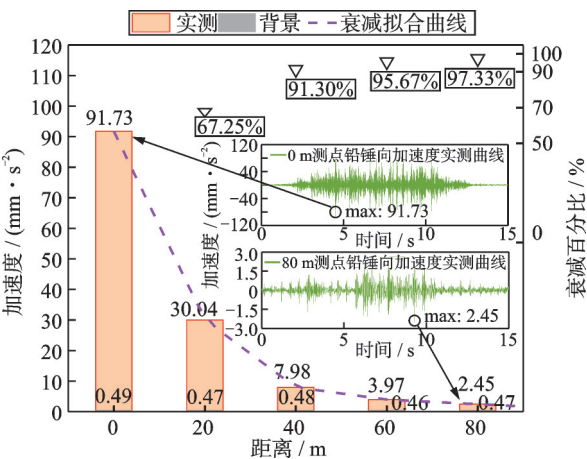


图4 场地竖向加速度实测结果

Fig. 4 Site vertical acceleration measurement results

测点实测结果的20%,场地的背景振动对测试结果影响较小,地铁可认为是天津大学北洋园校区在建设设施周边的主要环境振动源。

场地0,40和80 m位置振动加速度频谱如图5所示。对比可知,随着距离的增加,场地振动主频段呈现由高频向低频迁移、由集中到分散的情况。如0 m近场位置振动主频段集中分布在50~70 Hz内,80 m测点处的振动主频段分布在0~40 Hz内。值得注意的是,40 m测点处的振动主频出现在40~70 Hz区间,但振动波在0~20 Hz频段存在放大效应导致频谱图像出现了明显的“双峰”现象,推测出现上述现象的原因是受河道局部地形产生波的反射叠加效应^[37]。

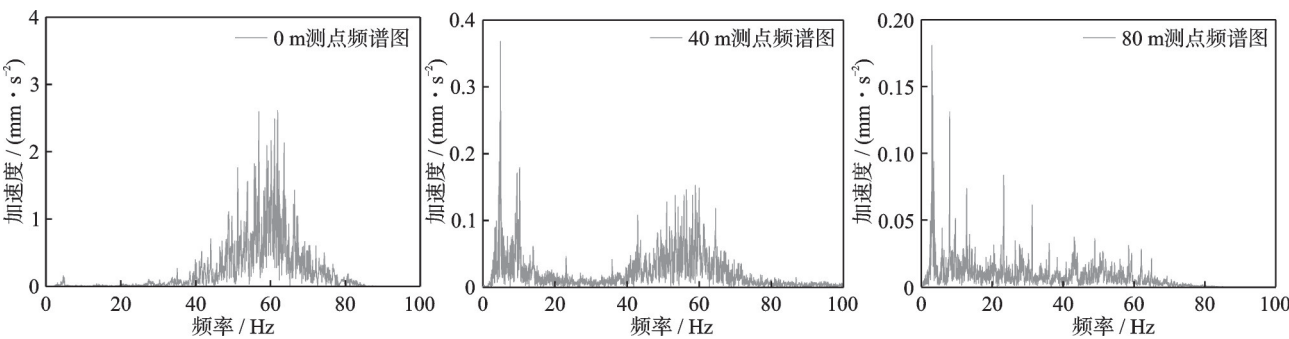


图5 场地不同位置振动加速度频谱图

Fig. 5 Vibration acceleration spectrum at different locations of the site

2.2 振动台基础振动响应分析

表1给出了大型振动台基础、水下振动台基础测点的加速度、速度、位移实测振动峰值(采用积分的方式将加速度测量结果转化为速度和位移)。分析可知,大型振动台基础和水下振动台基础最大振动加速度、速度和位移均出现在西南角点位置且振

动方向均为竖向,地铁6号线运行对天津大学地震模拟振动台的正常使用影响较小。此外,水下振动台基础西南角点及其紧邻80 m处场地地表点的振动加速度分别为1.93和2.45 mm/s²,振动由场地传至结构内部后峰值加速度下降21.2%,表明目前基础设计采用的大体积混凝土及其底部桩基等设计有利于基础自身振动的控制。

表1 振动台基础实测振动峰值

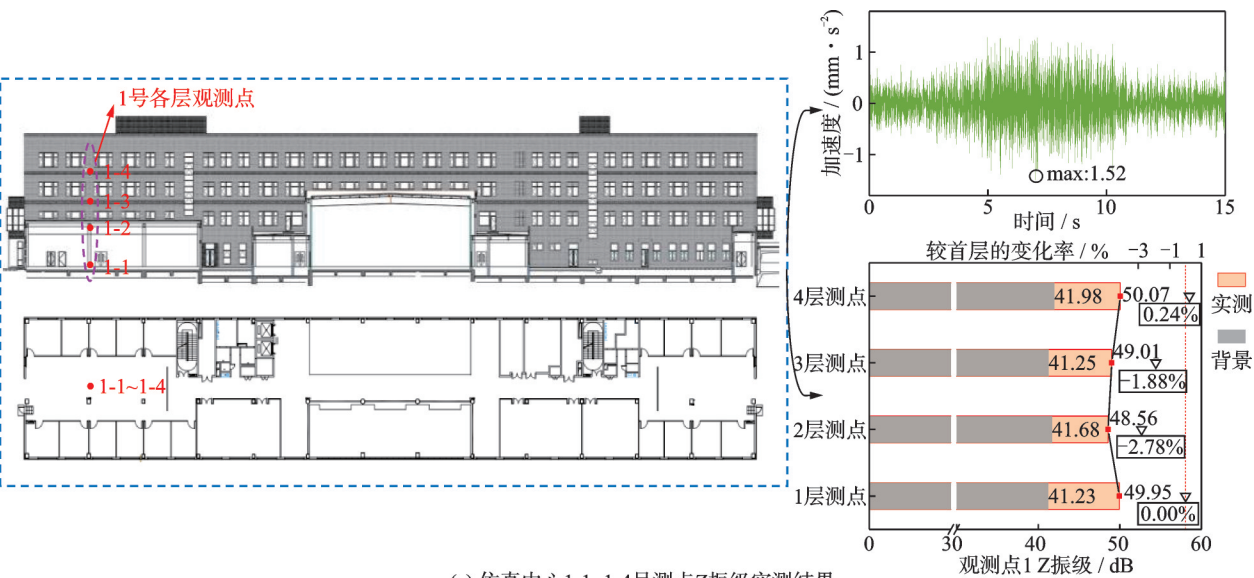
Tab. 1 Shaking table foundation measured vibration peak

基础	测点	加速度峰值/(mm·s ⁻²)			速度峰值/(mm·s ⁻¹)			位移峰值/mm		
		x向	y向	z向	x向	y向	z向	x向	y向	z向
大型振动台	东南角点	0.3171	0.2810	0.8811	0.0357	0.0328	0.0954	0.0035	0.0022	0.0054
	西南角点	0.3019	0.2841	1.0588	0.0469	0.0381	0.0987	0.0034	0.0028	0.0063
	作动器+基础中心	0.1952	0.1765	0.3895	0.0241	0.0237	0.0812	0.0024	0.0019	0.0039
水下振动台	东南角点	0.4013	0.8021	1.7831	0.0522	0.0422	0.1525	0.0042	0.0030	0.0093
	西南角点	0.3891	0.7326	1.9312	0.0574	0.0667	0.2587	0.0042	0.0054	0.0141
	作动器+基础中心	0.2052	0.4211	0.4859	0.0305	0.0395	0.0859	0.0028	0.0025	0.0049

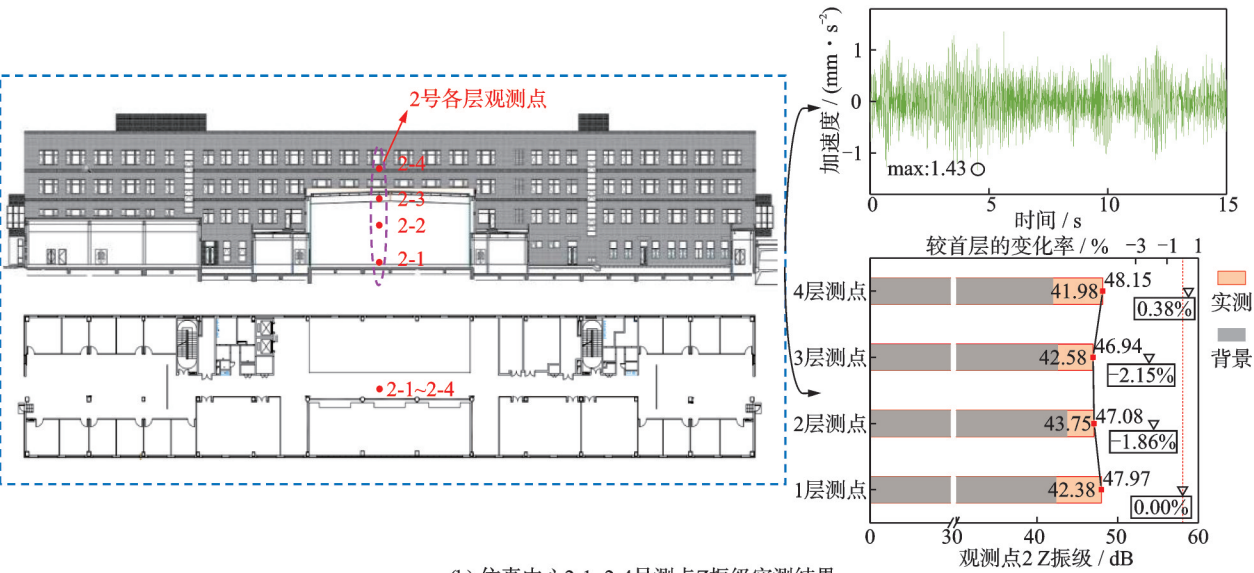
2.3 仿真中心振动响应分析

图6给出了仿真中心测点的Z振级(概念及计算公式参考文献[17])实测结果。对比各层测点的振动响应可知,由于地铁6号线和仿真中心建筑长

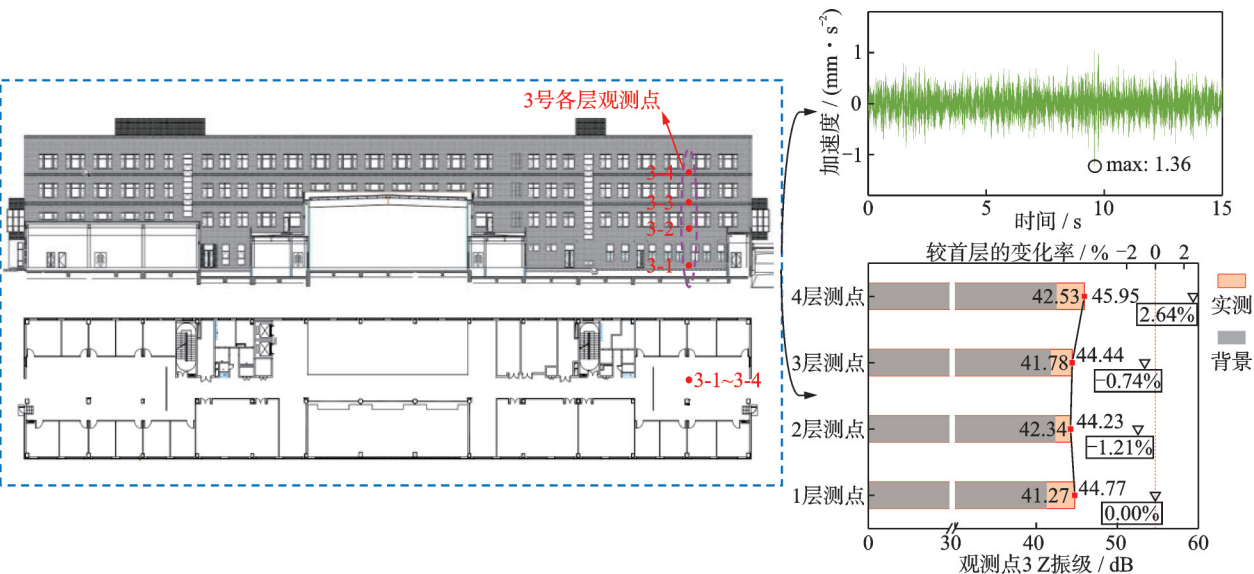
轴方向存在5°左右的夹角(1-1~1-4号测点距线路最近,3-1~3-4号测点距线路最远),同层不同测点的Z振级相差约4~5 dB。随着楼层增加,仿真中心的Z振级出现先减小后增大的趋势。出现这种现象的原因为振动波在楼层间的传递主要是通过框架柱



(a) 仿真中心1-1~1-4号测点Z振级实测结果
(a) Z-vibration level measurement results at observation point 1-1~1-4 of the simulation center



(b) 仿真中心2-1~2-4号测点Z振级实测结果
(b) Z-vibration level measurement results at observation point 2-1~2-4 of the simulation center



(c) 仿真中心3-1~3-4号测点Z振级实测结果
(c) Z-vibration level measurement results at observation point 3-1~3-4 of the simulation center

图 6 仿真中心测点的 Z 振级实测结果

Fig. 6 Simulation center Z-vibration level measurement results of measurement points

和墙体向上传播,受到不同入射波和反射波叠加的影响,楼板的振动并非随着楼层的增加呈现单调性的增加或减小。并且仿真中心只有4个结构层,向上传递的振动波尚未经结构阻尼充分耗散,因此Z振级最大处出现在顶层,如果楼层继续增加,Z振级或将再次出现减小的趋势。此外,由于仿真中心底部桩基础增大了整体的质量和刚度,不易被激振,各楼层间的Z振级变化幅度最大仅为1.72 dB,相似工况下的低层框架结构振动影响测试可仅选取振动响应较大的首层和顶层处位置开展。

3 精细化数值模拟与河道隔振效率分析

3.1 精细化有限元模型的建立

3.1.1 几何模型及网格划分

为了分析河道对场地及设施建(构)筑物的隔振效率,本文利用大型通用有限元软件ABAQUS,建立有/无河道两种工况下的有限元对比分析模型。

设施实验中心的大型振动台基础和水下振动台基础平面尺寸分别为 $105\text{ m} \times 95\text{ m}$ 和 $145\text{ m} \times 122\text{ m}$ 。基底大部埋深为 15.2 m ，底部均采用混凝土桩基础。设施仿真中心层高 3.1 m ，共 4 层，底部同样采用混凝土桩基础。简化后设施建(构)筑物构件的几何参数如表 2 所示。模型中大体积混凝土基础采用 C3D8 实体单元分层分构件精细化模拟，梁、柱和桩均采用 B31 梁单元，楼板采用 S4 壳单元，根据文献[38]的研究确定网格尺寸为 1 m 。

表2 设施建(构)筑物构件几何参数

Tab.2 Geometric parameters of building (structure) components

名称	梁/mm	板/mm	柱/mm	桩/mm
仿真中心	H650×250× 14×18	120	600×450×25	600
大型振动 台基础	1000×600	500~750	1200×1200	700
水下振动 台基础	1000×600	400~750	1000×1000	700

隧道外径 $d_1=6.6$ m, 内径 $d_2=6$ m, 圆形衬砌厚 0.3 m, 埋置深度 $d=13.2$ m, 运行车速约为 60 km/h。仰拱回填混凝土的厚度 $h=1.5$ m, 轮轨间距 $L=1.475$ m, 隧道间距为 7 m。此外, 轨枕为 2500 mm×220 mm×160 mm 的长方体, 轨道为 T60 型, 简化为图 7 所示工字型截面建模, 单位长度质量为 $m=60.64$ kg。模型中隧道衬砌以及隧道仰拱回填混凝土

土模型采用 C3D8 实体单元,钢轨采用 B31 梁单元,

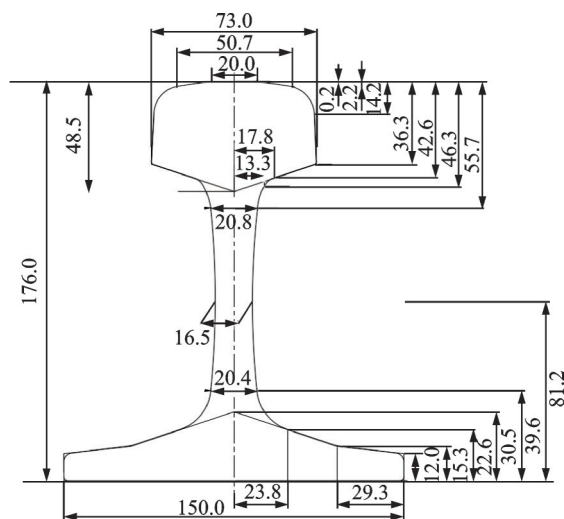


图7 T60型钢轨截面参数及有限元建模参数示意图(单位: mm)

Fig. 7 Schematic diagram of T60 rail section parameters and finite element modeling parameters(Unit: mm)

网格尺寸为 0.22 m。

场地模型尺寸设为 $70\text{ m} \times 60\text{ m} \times 360\text{ m}$ (垂向深度 $\times$ 轴向长度 $\times$ 水平宽度), 采用 C3D8 实体单元, 综合考虑材料剪切波速、地铁振动频率及其计算效率的影响, 确定场地的网格尺寸为 $0.22 \sim 4\text{ m}$ 。整体及各部分有限元模型示意图如图 8 所示。

3.1.2 材料参数

设施中的大型振动台基础、水下振动台基础采用 C30 混凝土,仿真中心主体结构采用 Q355。材料阻尼比均取为 0.05,实际计算时采用瑞利阻尼并根据文献[39]方法确定,相关材料参数如表 3 所示。

隧道内仰拱回填混凝土采用C30混凝土,衬砌和轨枕采用C50混凝土(考虑到本文采用的整体建模方法会增大隧道结构整体强度,计算时将隧道衬砌与仰拱回填混凝土的混凝土弹性模量乘以折减系数 $0.75^{[40]}$),各部件材料参数如表4所示。

依照《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2016)^[41]第4.1.4条规定中对基岩剪切波速的要求,结合地勘数据确定场地覆盖层厚度为70 m。为便于建模计算,将剪切波速相似的土层合并划归为9层,阻尼比近似统一为0.01,同样采用文献[38]方法确定实际计算的瑞利阻尼系数为 $\alpha=0.124$, $\beta=3.15\times 10^{-5}$,其他参数如表5所示。

3.1.3 接触条件

设施建(构)筑物均采用桩基础,在场地土层中通过内置区域约束设置接触。为了较好还原力在各个实体之间的传递过程,振动台基础和土体之间,以及土体和隧道之间采用面面接触,法向采取硬接触,

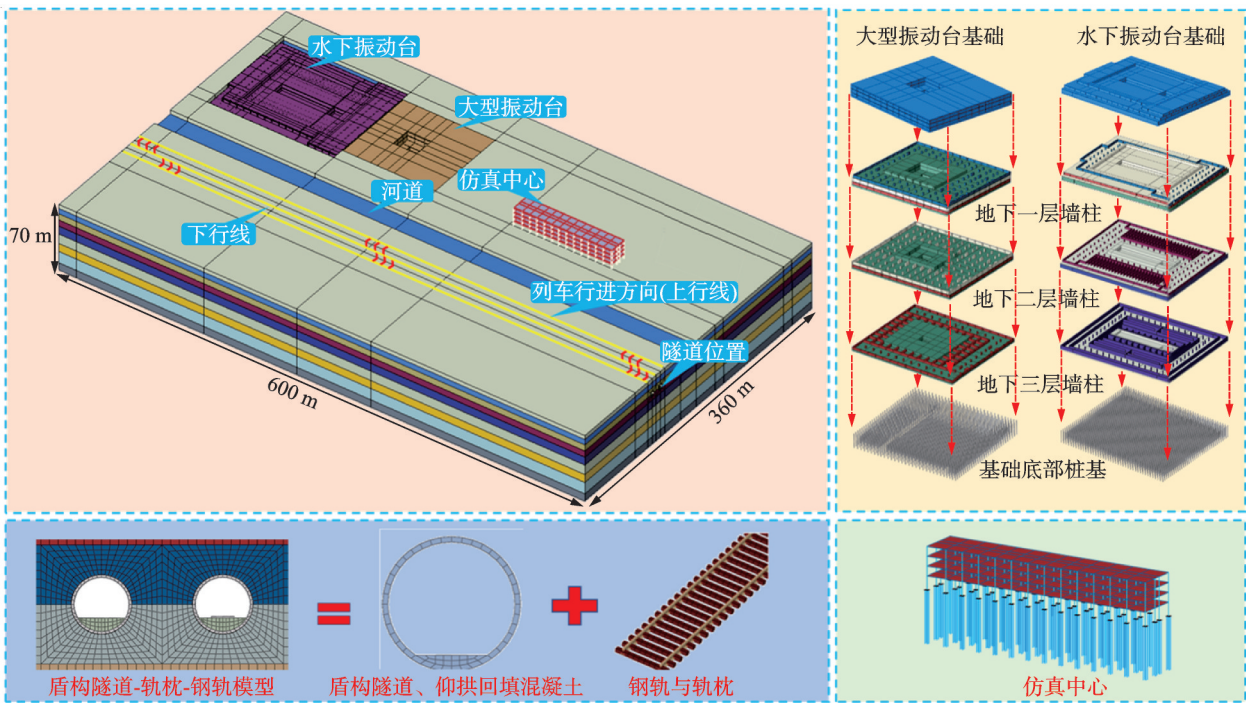


图8 场地-隧道-设施建(构)筑物整体及部分有限元模型示意图

Fig. 8 Integral and partial finite element model of site-tunnel-facility building

表 3 材料参数

Tab. 3 Material parameters

设施建(构)筑物 名称	弹性模 量/MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松 比	瑞利阻尼系数 α	β
仿真中心(钢)	2.35×10^5	7850	0.3	0.6232	0.0029
仿真中心(混凝土)	3.00×10^4	2360	0.2	0.6232	0.0029
大型振动台基础	3.00×10^4	2360	0.2	1.3818	0.0014
水下振动台基础	3.00×10^4	2360	0.2	0.6368	0.0032

表 4 衬砌、仰拱回填混凝土、轨枕及钢轨材料参数

Tab. 4 Lining, backfill concrete for inverted arch, rail sleeper and track material parameters

名称	材料类别	弹性模量/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松 比
衬砌	C50	5.00×10^4	2500	0.2
仰拱回填混凝土	C30	3.00×10^4	2360	0.2
轨枕	C30	3.00×10^4	2360	0.2
钢轨	T60 钢轨	235.00×10^4	7350	0.2

表 5 土层动力学参数

Tab. 5 Soil dynamics parameters

序号	土类	厚度/m	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
1	黏土	4.3	130	1900	0.35
2	粉质黏土	5.6	150	1890	0.30
3	粉质黏土	6.6	190	1960	0.30
4	粉砂	6.6	230	2000	0.33
5	粉土	8.4	280	2010	0.25
6	粉砂	10.0	300	2015	0.33
7	粉质黏土	8.5	320	2100	0.31
8	黏土	12.0	350	2035	0.30
9	粉质黏土	8.0	400	2140	0.33

切向根据材料间摩擦系数定义罚函数接触,仰拱回填混凝土和轨枕以及轨枕和钢轨之间采用绑定约束。

此外,由于钢筋混凝土建筑结构在地铁振动中的变形可以忽略不计,结构在受力变形过程中梁柱节点处的夹角保持不变,本文研究的目标建筑均可假定为刚性节点,因此本文将仿真中心的梁柱板桩等各构件合并成一个部件,并在 ABAQUS 的 Property 模块中使用 Stringer 功能以实现梁柱结构的连接。大型振动台基础和水下振动台基础均采用整体现浇施工工艺,因此分层建立的构件模型之间采用绑定约束。

3.1.4 边界条件

为避免有限元模拟时,列车引发的振动波传至场地模型边缘时产生反射波对场地内部区域造成影响,本文采用三维黏弹性边界来减小截断边界的影响,实现方法为分别沿三个坐标轴方向,在边界节点处设置三个坐标方向的弹簧和阻尼单元。以边界上某节点 b 为例,弹簧刚度和阻尼可以表示为^[42]:

$$\begin{cases} K_{bn} = \alpha_n \frac{G}{R} \cdot A_b \\ K_{bt} = \alpha_t \frac{G}{R} \cdot A_b \\ C_{bn} = \rho c_p \cdot A_b \\ C_{bt} = \rho c_s \cdot A_b \end{cases} \quad (1)$$

式中 K_{bn} 和 K_{bt} 分别为黏弹性边界法向和切向的弹簧刚度; C_{bn} 和 C_{bt} 分别为黏弹性边界法向和切向的阻尼系数; G 为介质的剪切模量; A_b 为边界节点的影

响面积,即图9虚线所包围的部分; ρ 为介质质量密度; c_p 和 c_s 分别为介质的P波和S波波速; α_n 和 α_t 分别为法向和切向弹簧的修正系数,本文采用文献[43]的推荐值 $\alpha_n = 1.33$, $\alpha_t = 0.67$; R 为散射波源到人工边界节点的距离,计算时取模型的长、宽和高的一半的平方和开方。

具体实施时,采用文献[44]研究成果,通过对ABAQUS软件进行二次开发,运用Python编程输入每层土参数(密度、剪切波速和压缩波速等)并计算每层土的弹簧刚度、阻尼以及单元影响面积,批量化自动设置各土层的弹簧和阻尼参数,施加后的整体模型以及三维黏弹性边界示意图如图9所示。

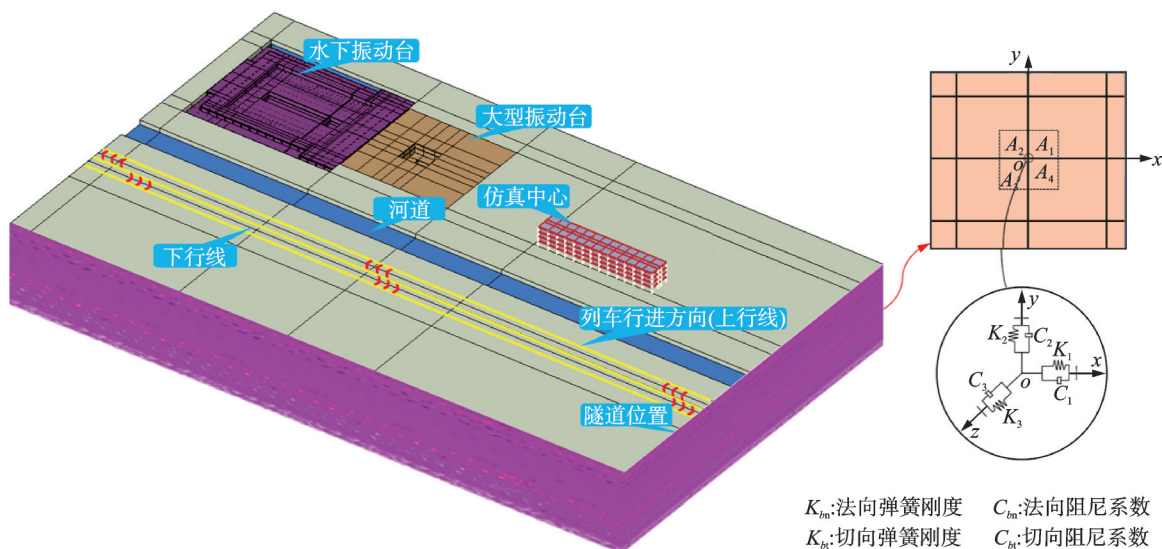


图9 黏弹性边界及弹簧-阻尼器示意图

Fig. 9 Schematic diagram of viscoelastic boundary and spring-damper

3.1.5 荷载施加

天津地铁6号线采用地铁A型车,6辆编组。A型车厢车身质量为44000 kg,转向架质量为2418 kg,轮对质量为1150 kg,其他相关参数如图10所示。

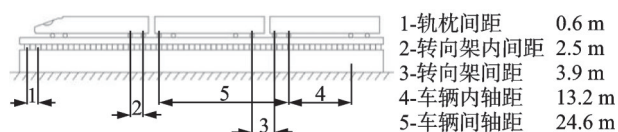


图10 地铁A型车示意图

Fig. 10 Diagram of the type A subway train

地铁列车轮载的模拟方法采用激振力函数法^[43],此方法综合考虑了地铁列车振动性质、轨道不平顺、车速以及荷载工况等影响因素,具体公式为:

$$P(t) = F + a_1 \sin(\omega_1 t) + a_2 \sin(\omega_2 t) + a_3 \sin(\omega_3 t) \quad (2)$$

式中 $P(t)$ 为列车振动荷载; F 为车轮静载; $a_1 \sim a_3$ 为考虑列车轨道不平顺所产生的荷载, $\omega_1 \sim \omega_3$ 为所对应的圆频率。

$$a_i = M_0 q_i \omega_i^2 \quad (3)$$

$$\omega_i = 2\pi v_i / L_i \quad (4)$$

式中 M_0 为列车的簧下质量; L_i 为列车平稳性参数; q_i 为作用到线路上的动力附加荷载和波形磨耗;

v_i 表示列车速度。

根据天津地铁线路的实际轨道状况,分别取三种典型不平顺波长和相应矢高: $L_1 = 10$ m, $q_1 = 5$ mm; $L_2 = 2$ m, $q_2 = 0.4$ mm; $L_3 = 0.4$ m, $q_3 = 0.08$ mm。结合上述参数取值和公式(2)即可得到各个列车时速下的地铁振动荷载时程曲线。本文模拟的列车运行工况时速为60 km/h,计算得到相应时程曲线如图11所示。为了模拟列车荷载的移动,利用ABAQUS自带的DLOAD子程序实现列车荷载的施加。通过编写子程序语句输入荷载的时程关系以及荷载作用位置随时间的变化关系,以此实现移动轮载的施加。

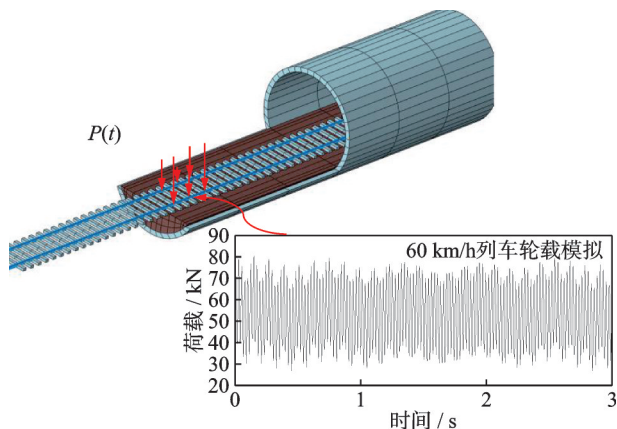


图11 列车振动荷载时程曲线

Fig. 11 Subway vibration load time-history curve

3.2 振动响应对比分析

3.2.1 场地振动响应对比分析

场地振动对比分析点位的选取如图 3 所示(下文基础和仿真中心的对比分析点位均与测试点位相同),0~80 m 共 5 个分析点的振动实测结果与有限元计算模拟结果(包括场地模型挖出河道和未挖出河道两种模拟工况)汇总如图 12 所示,图 13 和 14 分别给出了场地振动衰减曲线和加速度频谱。

对比图 12~14 中实测与含河道工况的数值模拟结果可知,场地各个分析点的振动加速度误差最大为 16.8%,Z 振级误差最大为 4.26%,加速度频谱也基本保持一致,为无河道工况数值模拟结果以及后续对比分析提供了一定的精度保证。由图 13 的衰减曲线可以明显看出 0 和 20 m 分析点的实测结果略大

于模拟结果,40~80 m 分析点的实测结果反而小于模拟结果。误差原因主要是实际测试中下行线列车引起场地振动的时段会和上行线列车的振动时段部分重合,双向列车运行的共同作用导致近场范围的振动偏大,而实际河道填充水且地形存在一定起伏,使得实测结果的隔振效率优于数值模拟结果。

对比图 12 和 13 中有/无河道工况的数值模拟结果可知,场地振动响应在 20 m 河道位置处开始出现明显分支,40 m 位置处有/无河道情况下的加速度分别为 11.77 和 6.96 mm/s²,紧邻河道位置场地的振幅降低 40.87%。对比图 14 中频谱结果可知,0 和 80 m 处场地振动频谱的峰值和主振频率基本吻合。有河道情况场地加速度频谱主频段在 0~20 Hz 和 40~70 Hz,较无河道情况存在明显的“双峰”现象,这也验证了本文 2.1 节的相关结论。

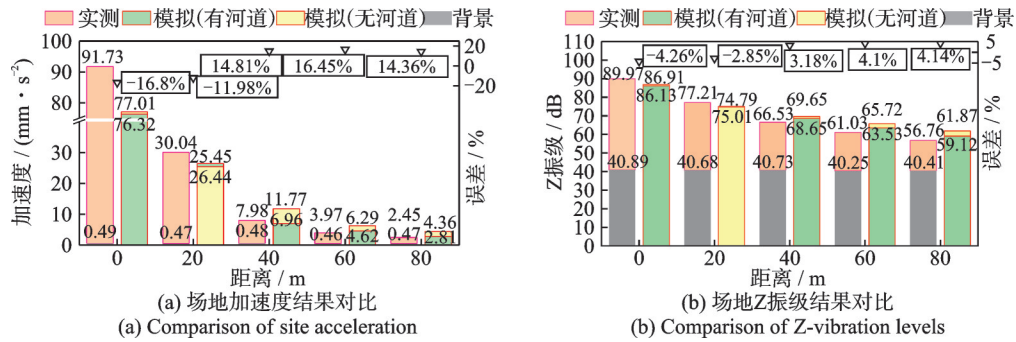


图 12 场地加速度和 Z 振级的实测结果与模拟结果对比

Fig. 12 Comparison of measured and simulated results of site acceleration and Z-vibration levels

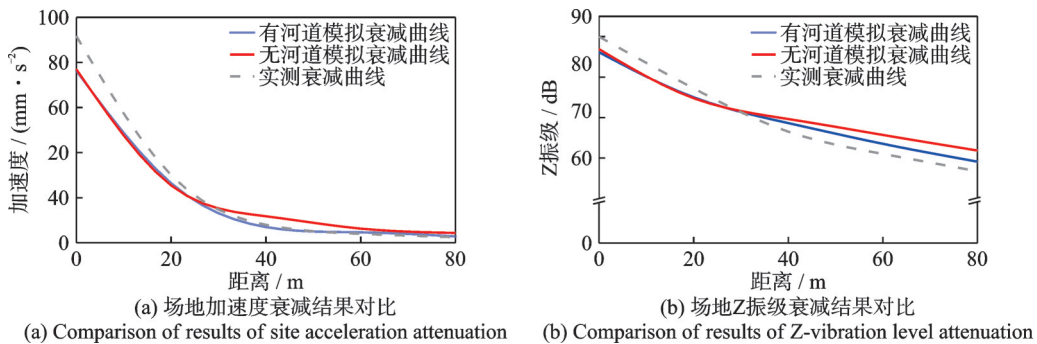


图 13 场地加速度和 Z 振级衰减模拟结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation results of site acceleration and Z-vibration level attenuation

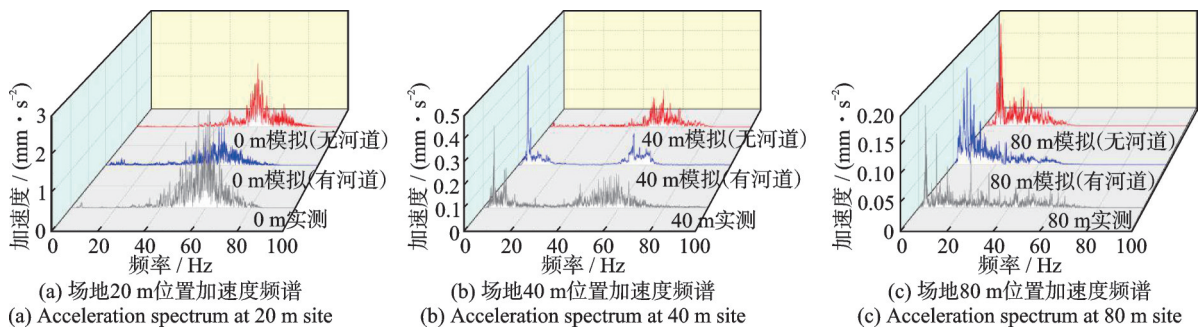


图 14 场地振动响应频谱结果对比

Fig. 14 Comparison of site vibration response spectrum results

3.2.2 振动台基础振动响应对比分析

大型振动台和 underwater 振动台基础各个分析点的实测结果与有限元模拟结果(包括场地模型挖出河道和未挖出河道两种模拟工况)如图 15 和 16 所示。

由图 15 和 16 可知,大型振动台基础和 underwater 振动台基础的加速度、速度、位移响应最大值方向均出现在竖向,加速度振幅分别降低 27.97% 和 15.25%。由此可知,除 2.2 节所述大体积混凝土基础及其底部桩基设计外,河道的存在同样有利于基础的振动

控制。

3.2.3 仿真中心振动响应对比分析

仿真中心各个分析点的振动实测结果与有限元计算模拟结果(包括场地模型挖出河道和未挖出河道两种模拟工况)汇总如图 17 所示。对比实测与含河道工况的数值模拟结果可知,无河道情况下仿真中心各层 Z 振级较有河道情况增大约 1~4 dB,最大值为 54.66 dB。此外,随着楼层增加,仿真中心的 Z 振级出现先减小后增大的现象,原因同 2.3 节所述。

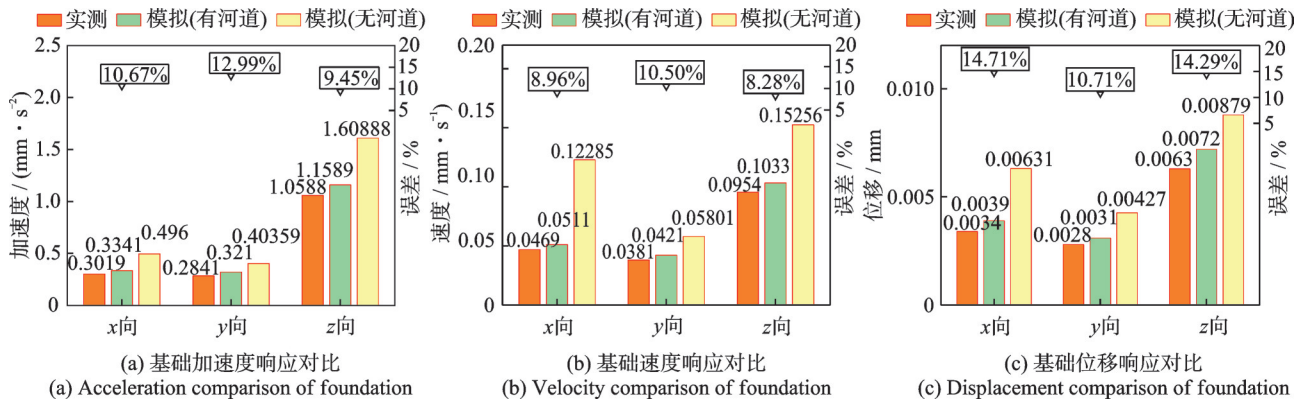


图 15 大型振动台基础振动响应对比

Fig. 15 Vibration response comparison of large shaking table foundation

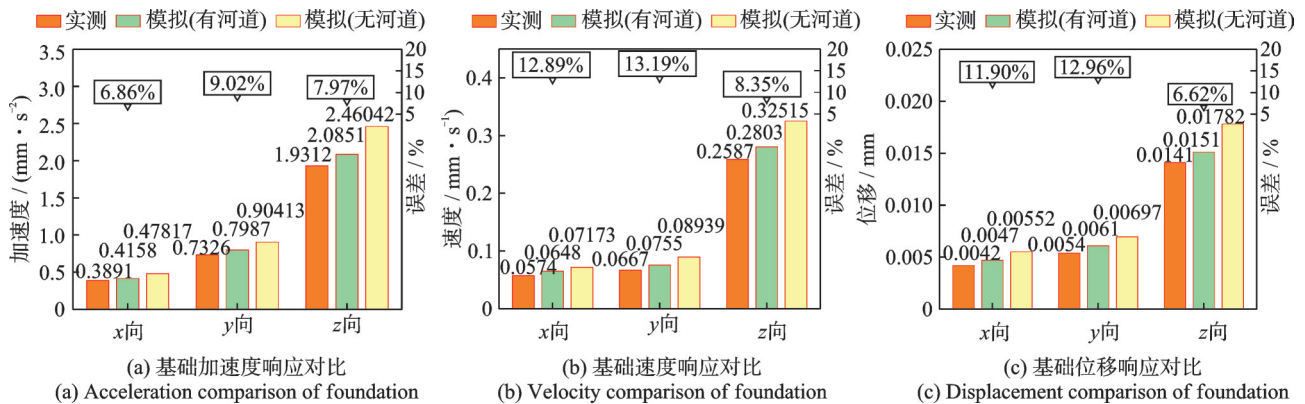


图 16 水下振动台基础振动响应对比

Fig. 16 Vibration response comparison of underwater shaking table foundation

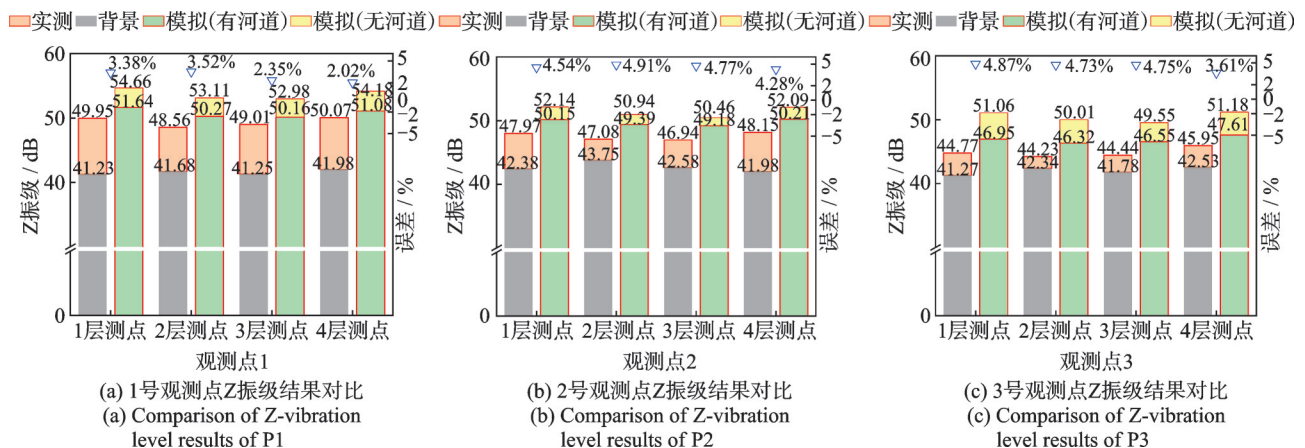


图 17 仿真中心观测点 1~3 的 Z 振级结果对比

Fig. 17 Comparison of Z-vibration level results of simulation center observation points 1 to 3

4 结 论

针对天津地铁6号线可能会对临近天津大学北洋园校区国家大型地震工程模拟研究设施建(构)筑物产生不利振动影响,本文采用现场测试和数值模拟相结合的方法,首先对沿线场地及设施建(构)筑物进行现场振动测试,分析了振动沿场地的衰减规律和设施建(构)筑物内振动控制点的振动水平,并论证了各建(构)筑物的振动响应均满足规范要求,确保了振动台的正常使用和仿真中心的人员舒适度能得到满足;然后采用大型有限元软件ABAQUS开展了有/无河道情况下的隧道-场地-设施建(构)筑物全过程地铁振动有限元数值仿真模拟,着重探讨了河道对沿线场地及设施建(构)筑物的隔振效率,得到了如下结论:

(1)由于场地土为软土且20~40 m处存在河道的影响,场地振动衰减迅速,40和80 m位置处的竖向振动加速度衰减率分别达到了91.39%和97.33%。

(2)由于基础大体积混凝土及其底部桩基等设计有利于基础自身的振动控制,水下振动台基础西南角点的加速度幅值由邻近地表点的2.45降至1.93 mm/s²。

(3)仿真中心为含桩基础的框架结构,受到不同入射波和反射波叠加的影响,测试Z振级随楼层升高呈现先减小后增大的趋势。此外,底部桩基础增大了整体的质量和刚度,使得各楼层间的Z振级变化最大仅为1.72 dB,相似工况下的低层框架结构振动影响测试可仅选取振动响应较大的首层和顶层处位置开展。

(4)对比有/无河道的场地及设施建(构)筑物振动响应,场地振动在20 m河道位置开始出现明显分支,场地和设施大型振动台基础的加速度振幅分别降低40.87%和27.97%。

参考文献:

- [1] VLADIMIR Smirnov, ILYA Tsukernikov. To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic[J]. Procedia Engineering, 2017, 176: 371-380.
- [2] 高广运, 耿建龙, 毕俊伟, 等. 地铁环境振动对建筑场地影响实测分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1116-1121.
GAO Guangyun, GENG Jianlong, BI Junwei, et al. Effect of subway induced environmental vibration on building site through in-situ measurement[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1116-1121.
- [3] 高广运, 穆曾焱, 耿建龙, 等. 地铁环境振动对拟建住宅办公楼影响实测分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(5): 180-186.
GAO Guangyun, MU Zengliao, GENG Jianlong, et al. Investigation of the effects of subway induced environmental vibration on proposed residential and office buildings through in-situ measurement[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(5): 180-186.
- [4] 凌育洪, 皇甫婵媛, 吴景壮, 等. 振动激励下地铁沿线建筑物振动测试与数值分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 33-40.
LING Yuhong, HUANGFU Chanyuan, WU Jingzhuang, et al. Test and numerical analysis of subway-induced vibration of metro-line nearby buildings[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(2): 33-40.
- [5] WOLF S. Potential low frequency ground vibration (< 6.3 Hz) impacts from underground LRT operations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(3): 651-661.
- [6] 王帅昊, 熊学祥. 某地铁荷载激励诱发邻近医技楼建筑结构微振动响应分析[J]. 绿色环保建材, 2020(6): 194-195.
- [7] 倪景峰, 李莉. 长春地铁7号线列车运行对沿线某精密仪器场区的振动预测[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(4): 108-112.
NI JingFeng, LI Li. Prediction of vibration of precision instruments on the site of Changchun metro line 7[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(4): 108-112.
- [8] 耿万里, 刘敦宇, 蔡永恩, 等. 预测北京地铁16号线振动对北京大学精密仪器的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(6): 19-25.
GENG Wanli, LIU Dunyu, CAI Yongen, et al. Prediction of the influence of the proposed Beijing metro line 16 on a precise instrument of Peking University[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(6): 19-25.
- [9] KOWALSKA K. Influence of location of measurement point on evaluation of human perception of vibration[J]. Journal of Measurements in Engineering, 2019, 7(3): 147-154.
- [10] 陈兆玮, 徐鸿, 尹镪, 等. 地铁运行引发邻近建筑群低频微振动及传递规律研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1623-1632.
CHEN Zhaowei, XU Hong, YIN Qiang, et al. Low-frequency microvibration and its transfer law of nearby building group caused by running metro train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(6): 1623-1632.
- [11] 冯青松, 廖春明, 张凌, 等. 地铁振动对人体暴露于全

- 身振动的舒适度影响评价[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(6): 237-243.
- FENG Q S, LIAO C M, ZHANG L, et al. Evaluation of subway vibration influence on human exposure comfort of whole-body vibration[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(6): 237-243.
- [12] 杜林林, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 城市轨道交通环境振动评价指标计算与分析[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(5): 40-45.
- DU Linlin, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Computation and analysis of evaluation indicators of environmental vibration induced by urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(5): 40-45.
- [13] VERHAS H P. Prediction of the propagation of train-induced ground vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3): 371-376.
- [14] 崔正翔, 嵇正毓. 地铁隧道振动对地面环境影响预测的探讨[J]. 噪声与振动控制, 1996(1): 9-14.
- [15] 徐忠根, 任珉, 杨泽群, 等. 广州市地铁一号线振动传播对环境影响的测定与分析[J]. 环境技术, 2002(4): 12-14.
- XU Zhonggen, REN Min, YANG Zequn, et al. Environment vibration measurement and analysis of first line Guangzhou Subway[J]. Environmental Technology, 2002(4): 12-14.
- [16] HUNT H E M. Modelling of rail vehicles and track for calculation of ground-vibration transmission into buildings[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 185-194.
- [17] 刘维宁, 马蒙. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [18] AVCIO, BHARGAVA A, NIKITAS N, et al. Vibration annoyance assessment of train induced excitations from tunnels embedded in rock[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134528.
- [19] 韩俊艳, 万宁潭, 赵密, 等. 地铁振动荷载作用下场地动力响应及振动衰减规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 191-199.
- HAN Junyan, WAN Ningtan, ZHAO Mi, et al. Research on site dynamic response and vibration attenuation under the vibration loading of subway[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 191-199.
- [20] 刘一文, 巴振宁, 高愈辉, 等. 天津 Z2 线地铁运营对沿线地面振动的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 193-196.
- LIU Yiwen, BA Zhenning, GAO yuhui, et al. Influences of metro operation on ground vibration along Tianjin Z2 line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup1): 193-196.
- [21] 朱志辉, 刘禹兵, 王力东, 等. 基于 2.5 维有限元法和虚拟激励法的地铁交通场地随机振动分析[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 29-39.
- ZHU Zhihui, LIU Yubing, WANG Lidong, et al. Analysis of ground random vibration induced by subway transit based on 2.5-dimensional finite element and pseudo excitation methods[J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 29-39.
- [22] 黄强, 万灵, 刘干斌, 等. 软土隧道地铁振动效应现场实测与数值分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 435-441.
- HUANG Qiang, WAN Ling, LIU Ganbing, et al. Field measurement and numerical analysis of train-induced vibration effect on metro tunnel in soft ground[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 435-441.
- [23] 张辰辰, 钱振东, 张晓春. 高架地铁列车环境振动传播规律的数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(4): 863-867.
- ZHANG Chenchen, QIAN Zhendong, ZHANG Xiaochun. Numerical simulation of environmental induced by viaduct rail transit[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(4): 863-867.
- [24] GUPTA S, DEGRANDE G, LOMBAERT G. Experimental validation of a numerical model for subway induced vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 321(3-5): 786-812.
- [25] 马蒙, 刘维宁, 刘卫丰. 列车引起环境振动预测方法与不确定性研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 1-16.
- MA Meng, LIU Weining, LIU Weifeng. Research progresses of prediction method and uncertainty of train-induced environmental vibration[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 1-16.
- [26] SADEGHI J, ESMAEILI M H, AKBARI M. Reliability of FTA general vibration assessment model in prediction of subway induced ground borne vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 300-311.
- [27] 孙烨. 基于随机参数响应面模型的地铁振动环境影响预测的准确度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- SUN Ye. Study on prediction accuracy by the response surface model with random parameters for train-induced vibration and its environmental influence[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [28] 孙晓静, 袁扬, 马蒙, 等. 地铁列车运行引起远场低频振动响应预测研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 198-202.
- SUN Xiaojing, YUAN Yang, MA Meng, et al. Prediction of metro train-induced low frequency vibration responses in far field[J]. Vibration and shock, 2017, 36(4): 198-202.

- [29] HUANG Q, LI P, ZHANG D M, et al. Field measurement and numerical simulation of train-induced vibration from a metro tunnel in soft deposits[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 6688749.
- [30] 刘维宁, 马蒙, 刘卫丰, 等. 我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J]. *中国科学:技术科学*, 2016, 46(6): 547-559.
- LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2016, 46(6): 547-559.
- [31] 冯青松, 王子玉, 刘全民, 等. 地铁车辆段不同区域振动特性对比分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(14): 179-185.
- FENG Qingsong, WANG Ziyu, LIU Quanmin, et al. Comparative analysis of environmental vibration characteristics in different regions of a metro depot[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(14): 179-185.
- [32] DEGRANDE G, SCHEVENELS M, CHATTERJEE P, et al. Vibrations due to a test train at variable speeds in a deep bored tunnel embedded in London clay[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3-5): 626-644.
- [33] 李明航, 马蒙, 刘维宁, 等. 地铁列车振动源强离散机理测试分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(4): 738-744.
- LI Minghang, MA Meng, LIU Weining, et al. Analysis mechanism of vibration source dispersion induced by metro trains through in-situ test[J]. *Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2020, 40(4): 738-744.
- [34] 国家环境保护局. 城市区域环境振动测量方法: GB 10071—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- National Environmental Protection Agency. Measurement method of environmental vibration of urban area: GB 10071—88[S]. Beijing: China Standards Press, 1988.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Standard for allowable vibration of building engineering: GB 50868—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准: GB/T 50355—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Standard for limits and measurement methods of vibration in the room of residential building: GB/T 50355—2018[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2018.
- [37] 李钧睿. 某大厦异常振动成因分析及控制方案设计[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- LI Junrui. Cause analysis and control scheme of abnormal vibration in a high-rise building[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [38] YANG Y B, KUO S R, HUNG H H. Frequency-independent infinite element for analysing semi-infinite problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, 39(20): 3553-3569.
- [39] 吴宗臻. 地铁列车振动环境影响的传递函数预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- WU Zongzhen. Transfer function prediction methods for environmental influence of metro train-induced vibrations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [40] 巴振宁, 高愈辉, 梁建文, 等. 天津软土地区地铁运营沿线地面振动响应实测与建模分析[J]. *噪声与振动控制*, 2021, 41(1): 160-167.
- BA Zhenning, GAO Yuhui, LIANG Jianwen, et al. Field test and finite element modeling of ground surface vibration caused by metro line operation[J]. *Noise and Vibration Control*, 2021, 41(1): 160-167.
- [41] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2016[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [42] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. *工程力学*, 2007, 24(12): 31-37.
- GU Yin, LIU Jingbo, DU Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(12): 31-37.
- [43] 张玉娥, 白宝鸿. 地铁列车振动对隧道结构激振荷载的模拟[J]. *振动与冲击*, 2000, 19(3): 68-70.
- [44] 梁建文, 梁佳利, 张季, 等. 深厚软土地中三维凹陷地形非线性地震响应分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(7): 1196-1205.
- LIANG Jianwen, LIANG Jiali, ZHANG Ji, et al. Non-linear seismic response of 3D canyon in deep soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(7): 1196-1205.

Analysis of the vibration effects of metro operation on the national facility for earthquake engineering simulation

BA Zhen-ning^{1,2,3}, FU Zhan-yuan^{1,3}, HAN Qing-hua^{1,2,3}, LIANG Jian-wen^{1,2,3}, LIU You-kai³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Tianjin Metro Line 6 is adjacent to Beiyangyuan Campus of Tianjin University, and the train operation may cause adverse vibration effects on important infrastructures of the campus. In this paper, the National Facility for Earthquake Engineering Simulation of Tianjin University, which is close to the line, is taken as the research object. Firstly, the site vibration test is carried out on the sites distributed along the line and the adjacent constructions, through which the vibration attenuation law along the site and the vibration level of the control points in the constructions are studied. Furthermore, a whole process finite element model of tunneling-site-facility constructions is established, and the vibration simulation analysis of site and facility constructions is carried out considering whether the protected river exists or not (actually there is a protected river). The vibration isolation efficiency of the protected river is emphatically discussed. The research shows that the vibration impact of the operation of Tianjin Metro Line 6 on the large-scale earthquake engineering simulation research facilities of Tianjin University meets the limit requirements of the code. Affected by Tianjin soft soil and the protected river, the vertical acceleration attenuation of the site is significant, and the attenuation rate reaches 97.33% from 0m to 80 m. The design of the mass concrete foundation of the facility and its bottom pile foundation is helpful to the vibration control of the foundation itself. Due to the presence of protected river, the amplitude of the site and the large shaking table foundations was reduced by 40.87% and 27.97%, and the frequency spectrum of the site showed obvious “double peak” phenomenon in 0~20 Hz and 40~80 Hz bands.

Key words: metro train; field measurement of vibration; finite element analysis; vibration influence

作者简介: 巴振宁(1980—),男,博士,教授。E-mail: bazhenning_001@163.com。