doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.05.011

大型 TOD 地下综合体地铁振动响应规律研究

王　臣[1,2]，江志伟[1,2]，夏瑞萌[2]，吴成刚[1,2]，娄海成[2]
（1. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程研究中心，北京 100037；
2. 北京城建设计发展集团股份有限公司，北京 100037）

摘　要：在以公共交通为导向的城市发展(transit-oriented development，TOD)背景下，城市地下综合体常与地铁结构合建，但隧道内运行列车也会导致地下综合体结构产生振动响应，对建筑的使用功能造成不利影响。针对此问题，本文以长春“银河一英里”地下综合体工程为背景，采用三维非线性有限元分析方法，结合车辆-轨道耦合动力学子模型，对大型地下综合体结构进行地铁列车荷载作用下的振动响应时程分析；并在现场进行实测，结果验证了数值模拟方法的有效性，获得典型区域的层间和横断面方向振动响应规律。研究结果表明：列车振动直接沿墙、柱自底向上传播，在各楼板处沿水平方向扩散并衰减，各楼层距轨道中心线水平向距离最小的柱及其附近区域，通常也是该楼层振动响应最大的区域；但对于远离振源的区域，则更应该关注板的振动响应。研究成果可以为地下空间开发与设计提供参考。

关键词：城市轨道交通；地下综合体结构；地铁环境振动；地铁-地下综合体合建结构；地下结构振动舒适度
中图分类号：U231，TU93　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)05-0083-10

Subway-Induced Vibration Response Characteristics of a Large TOD Underground Complex

WANG Chen[1,2], JIANG Zhiwei[1,2], XIA Ruimeng[2], WU Chenggang[1,2], LOU Haicheng[2]
(1. National Engineering Research Center of Green & Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, Beijing 100037; 2. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: With the background of transit-oriented development (TOD), urban underground complex structure is often joint constructed with a subway tunnel. However, the running trains in tunnel can also induce vibration responses of the underground complex, which may have negative effect on the functional use of the structure. To address this issue, a three-dimensional nonlinear soil-structure finite element model of the “Galaxy One Mile” underground complex in Changchun was developed and coupled with a vehicle-track dynamic sub-model to perform time-history analyses under subway train loading. Time history analyses on the vibration of the large underground complex were conducted, under the subway train load. After the effectiveness of the modelling method was verified through the in-situ measurement results, the interlayer and transversal vibration responses of the underground complex were acquired. Results show that train-induced vibrations propagate upward along walls and columns and then spread and attenuate horizontally through each floor slab, the columns and adjacent zones with the smallest horizontal distance to the track centerline exhibit the largest vibration responses on each floor; whereas in regions far from the

收稿日期：2025-07-09　修回日期：2025-07-25
第一作者：王臣，男，硕士，正高级工程师，主要从事轨道交通工程研究与设计工作，wangchen1@bjucd.com
基金项目：国家重点研发计划课题(2024YFB3713002)
引用格式：王臣，江志伟，夏瑞萌，等. 大型 TOD 地下综合体地铁振动响应规律研究[J]. 都市快轨交通，2025，38(5)：83-92.
WANG Chen, JIANG Zhiwei, XIA Ruimeng, et al. Subway-induced vibration response characteristics of a large TOD underground complex[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(5): 83-92.

vibration source, slab responses become more critical. The findings provide a reference for the development and design of underground space.

Keywords: urban rail transit; underground complex structure; subway-induced environmental vibration; jointly constructed subway-underground complex structure; vibration serviceability of underground structures

为了提高城市土地利用率，并更好地为地下商业引流，大型地下综合体常与地铁合建，但地铁列车也会给地下空间结构带来较强的振动响应，对地下空间的开发利用带来负面影响。

现有的地铁环境振动分析大多针对地面建筑，包括住宅、上盖开发[1-2]和商业办公楼[3]等。但地下综合体结构受土体约束，振动特性与地面建筑存在明显差异，因此针对地面建筑得到的规律并不适用于地下结构，有必要对地下结构的地铁振动响应开展针对性分析。许振刚等[4-5]分别针对上跨地铁车站地下空间和拱形地铁车站结构，开展了地铁振动响应分析，但侧重点在于结构的安全性，未对结构的振动响应规律和减振措施开展分析。牛晓宇等[6-7]对密贴下穿既有线车站的换乘通道结构和交叠式换乘车站结构开展了振动响应研究，针对多因素对参数进行分析，获得了结构的响应规律。但地铁换乘通道和地铁车站结构的断面尺寸较小，建筑布局也与大型地下综合体结构明显不同，得到的响应规律很难直接在大型地下空间的设计中应用。Xu 等[8]采用列车-轨道-隧道模型对盾构隧道结构的振动响应开展分析，认为模型中隧道结构构造细节对结构振动响应具有较大影响。樊堃[9]研究了黄土地区地铁环境振动对邻近地下空间的影响，发现地下二层楼板(底板)与地下一层楼板的振动响应存在差异，这是由于结构地下二层楼板与土体接触，楼板本身自振特性被抑制，主要受周围土体自振特性影响；而地下一层楼板不与土体接触，振动响应主要与楼板的自振特性有关。

与地铁车站等地下结构不同，长春“银河一英里”大型地下综合体结构复杂，存在横纵交叉的梁、板、柱及楼板孔洞；此外，综合体结构与地铁隧道结构合建，成为整体，且隧道位于综合体结构正下方，地铁运营产生的振动可直接影响地下综合体结构的使用，这与已有研究中振动经土体、桩基等复杂路径传播至结构的情况不同。基于此，本文对“银河一英里”大型地下综合体结构开展了地铁振动响应规律分析。首先建立土-地下结构三维有限元数值模型，并基于车辆-轨道耦合动力学子模型得到的扣件力时程，获取了结构的振动响应；在采用实测加速度响应验证了数值分析方法的合理性后，分别对结构的层间和横断面方向的竖向振动响应规律进行了分析，结果可为地下空间开发与设计提供参考。

1 有限元数值模型

1.1 工程概况

以公共交通为导向的城市发展(transit-oriented development，TOD)大型综合体“银河一英里”位于长春市南关区，为地下 3 层(局部 4 层)轨道交通与商业综合体，无地上建筑。本文选取了部分区域开展结构在地铁列车荷载作用下的振动响应分析，平面图如图 1 所示。图 1 中左侧部分为地下三层结构，宽度为 40.2 m，典型横断面结构见图 2(a)；右侧部分为地下四层结构，宽度为 73 m，典型横断面结构见图 2(b)。

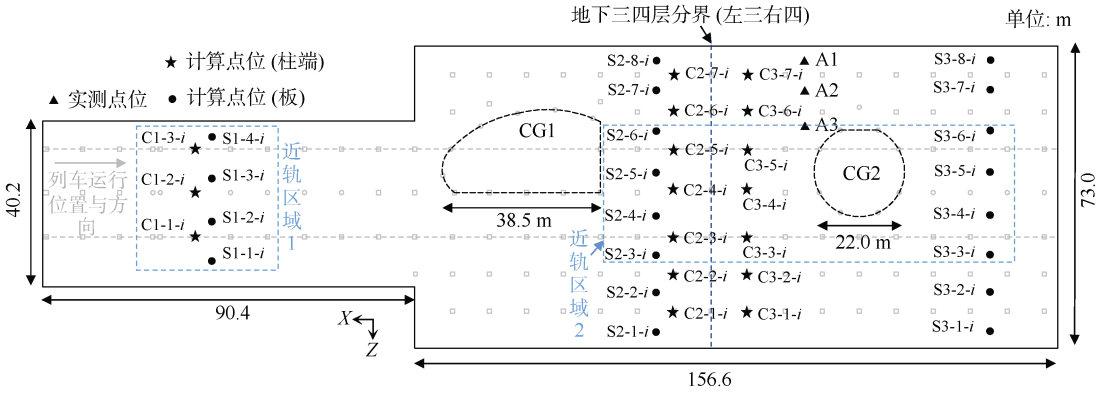


图 1 地下综合体结构平面及数据点位示意

Figure 1 Plan view of the underground complex and data point positions

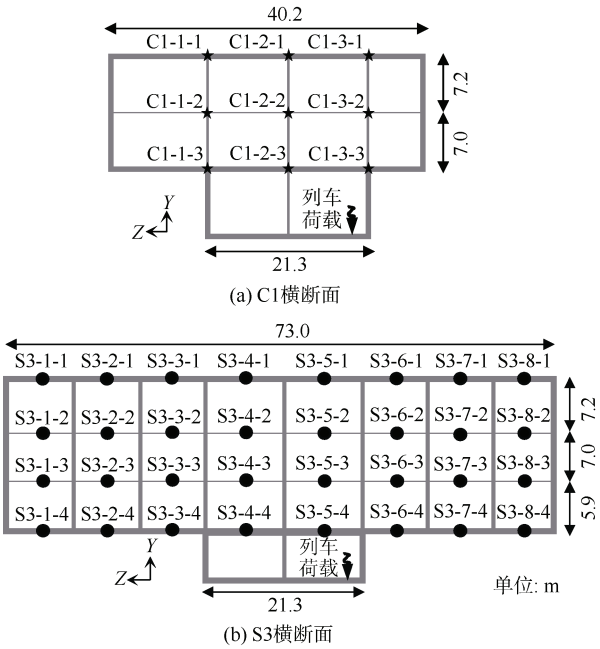


图 2　地下综合体结构剖面

Figure 2　Cross-sections of the underground complex

结构底部合建有矩形双线地铁隧道，坡度为 28‰。因景观需要，将顶板和地下一层底板作开洞处理，见图 1 中的 CG1 和 CG2 区域。

图 1 和图 2 中还标注有多个数据提取点，以断面形式排布，即 C*n*-*j*-*i* 和 S*n*-*j*-*i*，其中 C 和 S 分别代表柱端和楼板中心(单跨)，*n* 为断面编号，*n*=1，2，3；*j* 为断面内的测点编号，当测点位于平面宽度为 40.2 m 区域内时，*j*=1，2，3，当测点位于平面宽度为 73 m 的断面内时，*j*=1，2，…，8；*i* 为楼板编号，当测点位于地下三层区域时，*i*=1，2，3，当测点位于地下四层区域时，*i*=1，2，3，4。因设置的测点数量较多，为便于在后续分析中分类引用，在图 1 中还标注了“近轨区域 1”“近轨区域 2”，这两个区域以外的测点属于“远轨区域”。

1.2　结构模型

依据设计图纸建立结构的有限元模型，如图 3 所示，其中柱、板、梁和抗拔桩分别采用实体(C3D8R)、板(S4R)、梁(B31)和实体(C3D8R)单元模拟，各构件绑定连接，抗拔桩则嵌入土体中，不考虑二者的相对滑移；结构外廓则与土体绑定，认为二者共同运动。

因地铁振动产生的变形较小，土和结构应变较小，故采用弹性模型模拟土和结构的行为。其中结构的部分材料参数见表 1，其他结构材料参数与柱的一致。结构顶板厚 0.45 m，与土接触的楼板厚 1.2 m，其他楼板厚度为 0.3 m；侧墙厚 1.0 m；柱横截面尺寸为 1.4 m×1.2 m (*X*×*Z* 方向)。

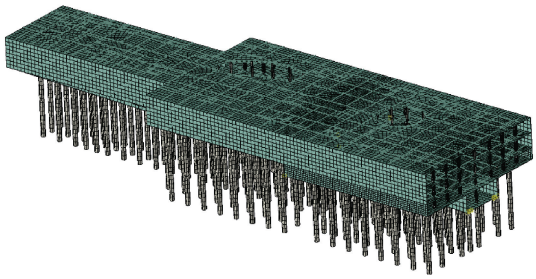


图 3　大型地下综合体结构的有限元模型

Figure 3　Finite element model of the underground complex structure

表 1　结构材料参数

Table 1　Material properties of the structure

结构	弹性模量×10^{10}/Pa	密度/(kg/m^3)	泊松比	阻尼比/%
柱、桩	3.45	2400	0.2	5
梁、板、墙	3.55	2400	0.2	5

1.3　场地模型

为减小边界振动反射作用的影响，将结构侧壁至土体侧向边界的水平向距离定义为 3 倍结构的宽度(*Z* 向)，场地底部边界设定在基岩面，其沿轨道纵向的长度与结长度(*X* 向)一致，场地尺寸为 518.0 m×247.0 m×88.5 m，场地-结构有限元模型如图 4 所示。

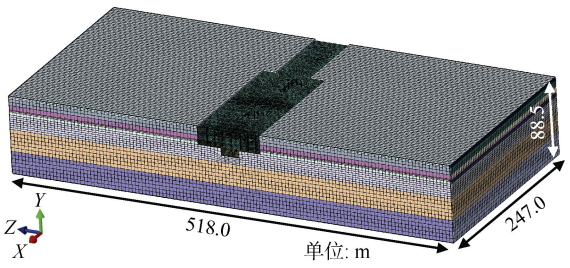


图 4　场地-结构有限元模型

Figure 4　Finite element model of the site-structure

场地共含有 8 个土层，各土层重度、厚度、动弹性模量见表 2。因由列车振动产生的土体竖向变形很小，处于弹性范围，一般不产生材料阻尼，因此按经验为土层设置了黏滞阻尼，阻尼比参考文献[10-11]，统一取为 5%。

1.4　列车振动荷载

采用两次分析获取结构的振动响应，其中第 1 次分析首先开展车辆-轨道耦合动力学计算，获取扣件力

时程，并将其作为荷载输入至 ABAQUS 土-地下结构模型中的对应节点位置处，然后开展第 2 次计算。

表 2　场地土层材料参数

Table 2　Material parameters of the soil layers

编号	土层类别	重度/(kN/m³)	厚度/m	动弹模/MPa	动泊松比	阻尼比/%
1	素填土	17.5	3.1	172.7	0.341	5
2	粉质黏土	19.7	7.4	342.7	0.343	5
3	全风化砂岩	20.5	4.3	1090.0	0.310	5
4	强风化砂岩	20.9	2.3	969.6	0.297	5
5	强风化泥岩	21.2	1.21	679.4	0.299	5
6	中风化泥岩	21.8	19.69	1657.7	0.328	5
7	中风化砂岩	22.6	25.1	1760.8	0.323	5
8	中风化泥岩	21.8	25.4	1657.7	0.328	5

车辆-轨道耦合动力学分析[12-13]采用自编计算程序完成，分析过程中将列车简化为多体力学模型，轨道结构、土-地下结构则简化为梁、弹簧和阻尼器，如图 5 所示。车辆-轨道耦合系统的动力学方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{\mathrm{m}} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{M}_{\mathrm{f}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\delta}}_{\mathrm{m}} \\ \ddot{\boldsymbol{\delta}}_{\mathrm{f}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{C}_{\mathrm{f}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\boldsymbol{\delta}}_{\mathrm{m}} \\ \dot{\boldsymbol{\delta}}_{\mathrm{f}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{\mathrm{m}} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{K}_{\mathrm{f}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\delta}_{\mathrm{m}} \\ \boldsymbol{\delta}_{\mathrm{f}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{P}_{\mathrm{m}} \\ \boldsymbol{P}_{\mathrm{f}} \end{Bmatrix} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为质量、阻尼和刚度矩阵；$\boldsymbol{P}$ 为荷载矩阵；$\boldsymbol{\delta}$ 为位移矩阵；下标 m 和 f 分别代表车辆系统和轨道-地基有限元系统。

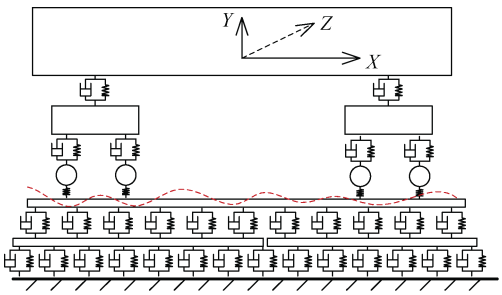


图 5　车辆-轨道耦合动力学计算模型示意

Figure 5　Schematic of vehicle track coupling dynamic calculation model

在动力学模型中，列车为 B 型车 6 辆编组，车速为 80 km/h，车体质量为 35 t，转向架质量为 2.7 t，轮对质量为 1.44 t，一系和二系悬挂垂向刚度分别为每簧 0.8 kN/mm 和 467 kN/mm，一系和二系悬挂垂向阻尼分别为 2.96 N·s/m 和 39 N·s/m，车体点头转动惯量为 1297 t·m²，转向架和轮对点头转动惯量分别为 612 kg·m² 和 104 kg·m²；钢轨为 T60 型，密度为 60 kg/m；扣件为 DTVI2 型，刚度为 45 kN/mm，阻尼为 40 kN·s/m。道床采用 C35 混凝土，地基弹簧刚度参考表 2 取值。

采用轨道实测竖向不平顺样本作为列车多体系统的荷载激励，如图 6 所示，并依据 Hertz 接触理论将其转化为轮轨荷载作用至钢轨上。经计算可得到多个扣件力时程，其中典型时程如图 7 所示。

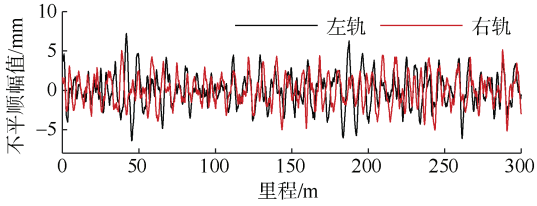


图 6　轨道实测不平顺样本

Figure 6　Measured vertical rail irregularity sample

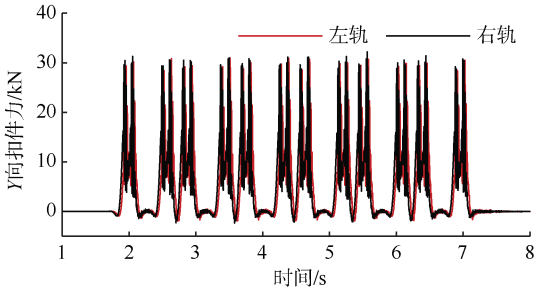


图 7　典型扣件力时程

Figure 7　Typical fastener load time histories

1.5　阻尼设置

Rayleigh 阻尼是目前动力分析中最常用的阻尼矩阵构造方法，但 Rayleigh 阻尼与体系的自振频率相关，阻尼比在不同频率范围内的值不同，易导致不同区域结构的动力衰减情况产生差异[14]；此外，Rayleigh 阻尼通常还会降低显式动力分析的稳定增量步，增大计算成本。鉴于此，本文采用 ABAQUS 软件中的限带阻尼(band-limited damping)来进行计算分析，其可在指定的有限频带范围内提供大小相对稳定的阻尼比。

为更好地对比 Rayleigh 阻尼和限带阻尼的差异，采用了 1 个 1 m³ 的实体单元(C3D8R)进行有阻尼自由振动分析，2 种阻尼的 2 个频率参数均分别为 1 Hz 和 200 Hz，阻尼比 ξ 均为 5%。通过改变单元材料刚度的方式获取其在不同自振频率下的位移时程，并采用对数衰减率法计算实际输出的阻尼比，阻尼比随自振频率的变化曲线见图 8。

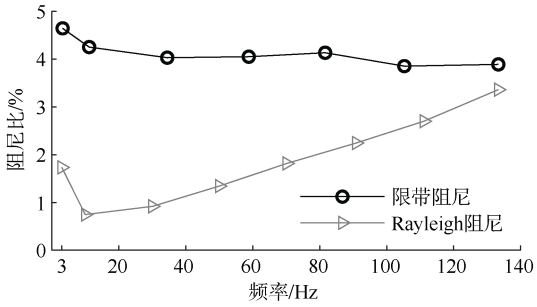


图 8　限带阻尼和 Rayleigh 阻尼对比

Figure 8　Comparison between band-limited damping and Rayleigh damping

由图 8 可知：不同频率范围内，通过限带阻尼输出的阻尼比稳定在 4%～4.7%，虽然略小于输入阻尼比，但总体可满足计算要求；通过 Rayleigh 阻尼输出的阻尼比随自振频率变化显著，与目标阻尼比差异较大，总体呈先减小后增大趋势，这也与文献[14]中的规律类似。

1.6　黏弹性人工边界

为模拟半无限空间条件，抑制振动在场地边界处的反射，在场地的外侧设置了黏弹性人工边界，并采用黏弹性边界单元的形式实现，目前此类边界条件已在相关研究和工程实践中广泛应用[15-16]。一致黏弹性边界单元的等效弹性模量 $\tilde{E}$ 和与等效 Rayleigh 阻尼系数 $\tilde{\beta}$ 可表示为

$$\tilde{E}=\alpha_{\mathrm{N}}h\frac{G}{R}\cdot\frac{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{(1-\tilde{\nu})} \tag{2}$$

$$\tilde{\beta}=\frac{\rho R}{3G}\left(2\frac{c_{\mathrm{s}}}{\alpha_{\mathrm{T}}}+\frac{c_{\mathrm{p}}}{\alpha_{\mathrm{N}}}\right) \tag{3}$$

式中，c_{s} 和 c_{p} 分别为土层的剪切波速和压缩波速，G 和 ρ 分别为土层的剪切模量和密度；$\tilde{\nu}$ 为等效黏弹性边界的泊松比；R 为波源至人工边界点的距离；h 为黏弹性边界厚度，本文取 1 m；α_{N} 和 α_{T} 分别为黏弹性边界参数，分别取 1.33 和 0.67。关于一致黏弹性边界单元的详细介绍见文献[15-16]。

2　数值模拟方法的合理性验证

通过将数值和实测加速度结果对比的方式来验证数值模拟方法的合理性。实测加速度传感器点位布置如图 9 所示，由加速度传感器获取测点 A1、A2 和 A3 处的加速度时程。测点在结构中的位置见图 1。

提取数值模型中 A1、A2 和 A3 处的加速度计算结果，将其与实测结果进行对比，如图 10～12 所示。

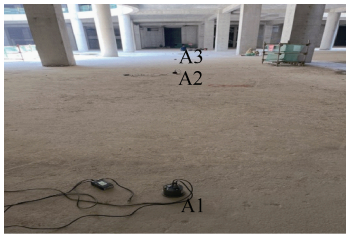
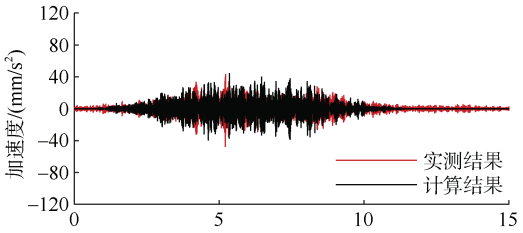
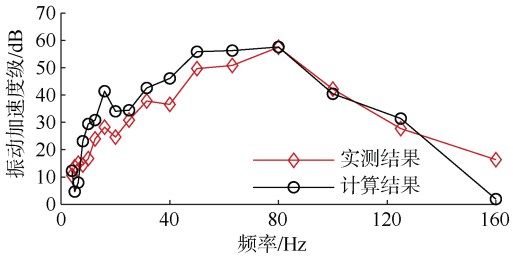


图 9　现场实测照片

Figure 9　Field test setup



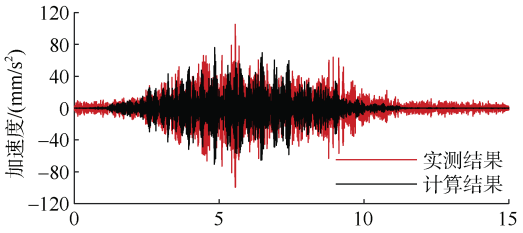
(a) 加速度时程



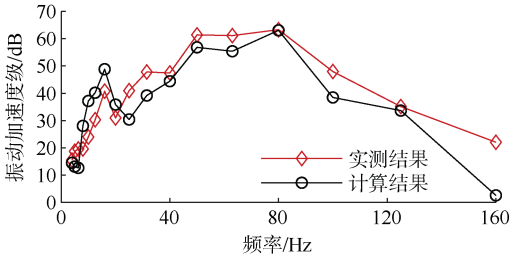
(b) 振动加速度级

图 10　测点 A1 数值和实测结果对比

Figure 10　Comparison of the field test and the computational results at point A1



(a) 加速度时程



(b) 振动加速度级

图 11　测点 A2 数值和实测结果对比

Figure 11　Comparison of the field test and the computational results at point A2

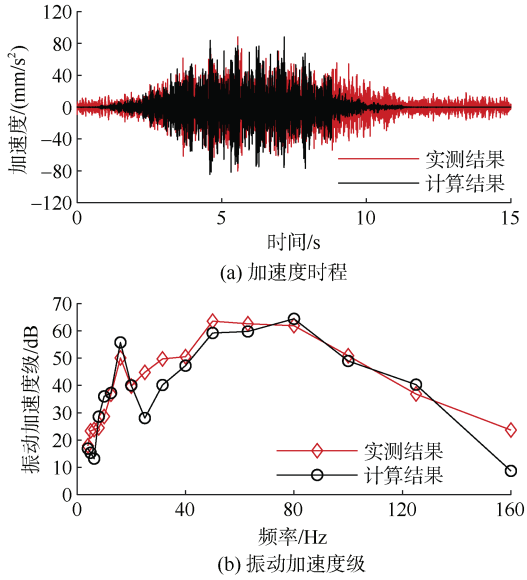


图 12　测点 A3 数值和实测结果对比

Figure 12　Comparison of the field test and the computational results at point A3

由图 10～12 可知，无论加速度时程还是对应的振动加速度级，数值与实测结果的吻合程度均较好，这表明数值模拟方法合理，数值结果可近似反映结构真实的振动响应，能够用于开展后续的振动规律分析。

3　综合体结构层间竖向振动响应规律

提取各测点加速度时程，将其转化为 Z 振级，本文采用最大计权 Z 振级(Z_{max})进行结构层间振动响应规律分析。

3.1　柱端

地下三层区域的柱端 Z_{max} 如图 13 所示。由图 13 可知：①在 2 个断面内，C1-3、C2-5 处测点的 Z_{max} 均最大，根据图 1，Z_{max} 最大位置处于轨道两侧，而非轨行区中间位置正上方；且此部分区域的 Z_{max} 超过了现行规范 75 dB 的要求[17]，人体会有较强振感，不宜直接作为商业开发目的使用。

②距离轨行区一跨以外区域的 Z_{max} 则迅速衰减，满足现行规范的要求，可见在远离轨行区区域的空间具有较好的商业开发前景。

③同时观察各楼层间的振动衰减情况可知，振动在地下二层处最大，在地下一层处得到了一定的衰减，但顶板处的加速度衰减并不明显，甚至在部分区域出现了一定的放大情况，这可能是因为顶板上部缺少土体约束，导致此部分的竖向刚度较小。

地下四层区域柱端的振动响应如图 14 所示。由图 14 可知，地下四层区域的振动响应情况与地下三层

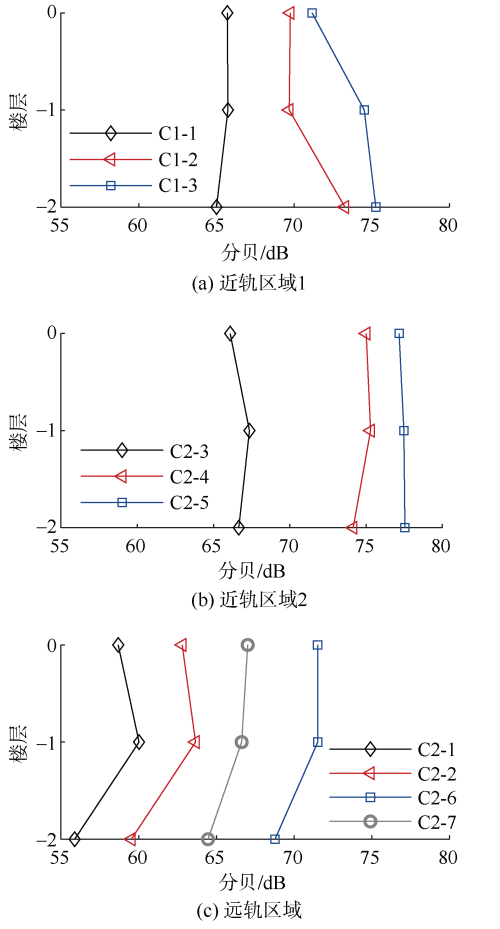


图 13　地下三层区域柱端 Z 振级大小分析

Figure 13　Maximum Z vibration level at column ends in the three-layer region

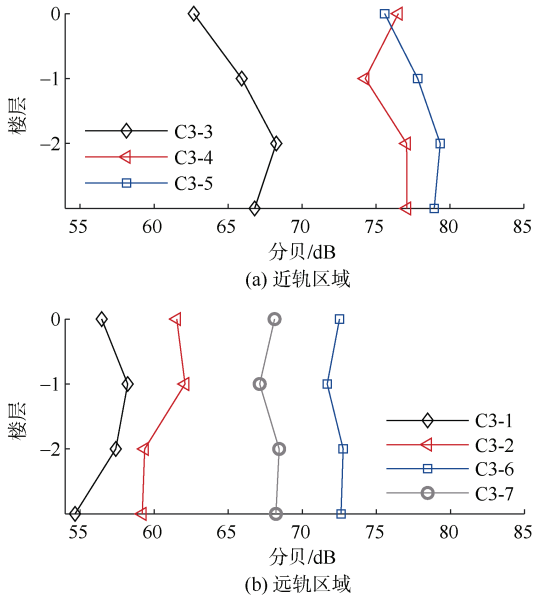


图 14　地下四层区域柱端 Z 振级大小分析

Figure 14　Maximum Z vibration level at column ends in the four-layer region

类似，但振动响应明显更大，尤其是在 C3-4、C3-5 位置处，超过了规范限值要求。这表明此地下综合体结构四层区域的振动响应普遍大于三层区域的振动响应。原因是下穿行车隧道为倾斜布置，四层区域位置处的地下三层实际为行车隧道和地下二层间的夹层，观察图 1 和图 2 可知，地下四层区域各测点与轨道结构的竖向距离更短，也即振动的传播路径较短，因此柱端竖向振动的大小也与其与振源的竖向距离有关。

3.2 地下三层区域楼板

三层区域楼板的振动响应如图 15 所示。对比楼板和柱端的振动响应可知，楼板的振动并未放大，这与地面建筑的规律不同，可见振动主要通过柱体向上传播，至每楼层后，再向水平方向扩散。振动在楼板顶层得到一定程度的放大，甚至在远轨区域，振动响应大于底层区域。这主要是因为地下二层的远轨区域已经远离轨行区，直接与土体接触，厚度也增大到 1.2 m，土体的约束和较大的刚度抑制了其振动；而地下一层和顶板区域则无土体约束，也无刚度增大区域，因此，当振动经柱向上传播时，在对应的楼层沿水平方向进一步传播，而由此产生的结构振动响应，大于受土体约束和刚度较大的地下二层楼板抑制的振动响应。

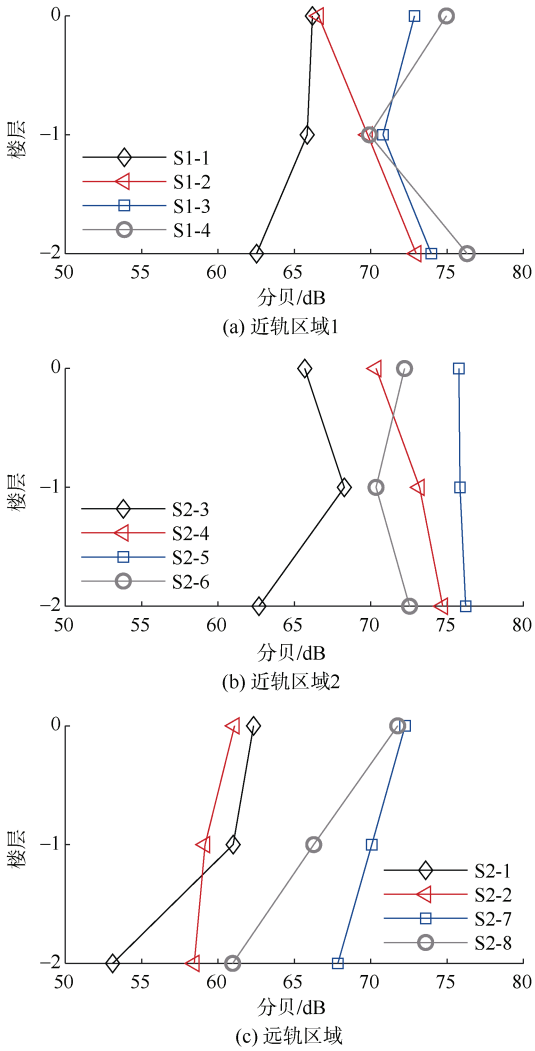


图 15　地下三层区域板 Z 振级大小分析

Figure 15　Maximum Z vibration level at slabs in the three-layer region

3.3 地下四层区域楼板

地下四层区域板的竖向 Z 振级如图 16 所示。因楼板的竖向距离与振源更近，与柱端响应的规律类似，地下四层区域楼板的响应略大于三层区域楼板的响应，但与地下三层区域不同的是，地下四层区域振动响应的规律性较差，沿竖向或增大或减小，在顶板处的放大效应也更明显。这可能是因为采光区域 CG1 和 CG2 的存在，导致楼板开洞，柱的分布也与其他区域存在差异，进而使得结构局部的动力特性发生变化所致。

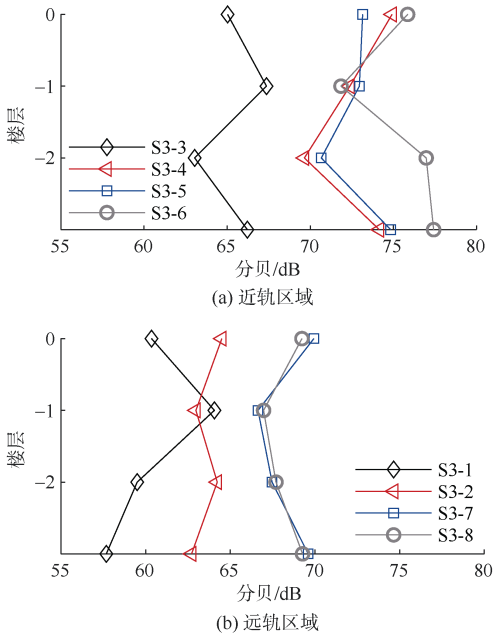


图 16　地下四层区域板竖向 Z 振级大小分析

Figure 16　Maximum vertical Z vibration level at slabs in the four-layer region

4 综合体结构横断面方向振动响应规律

结合柱端和板端 Z 振级计算结果，对综合体结构横断面方向的振动响应规律进行分析，并指出振动响应最大的区域。

4.1 柱端

沿横断面方向，柱端的 Z_{max} 规律较强，从–Z 至+Z

呈先增大后减小趋势，在 3 个断面位置处，各楼层均是 C1-3-*i* 和 C*n*-5-*i* 点处的响应最大，如图 17 所示，但在远离轨道中心线位置处迅速衰减。由图 17 可知，C1-3-*i* 和 C*n*-5-*i* 同时也为距离振源水平向距离最短的点，也即在水平方向上，各楼层距轨道中心线水平向距离最小的柱及其附近区域，一般也是该楼层振动响应最大的区域，这在设计时应予以重视。

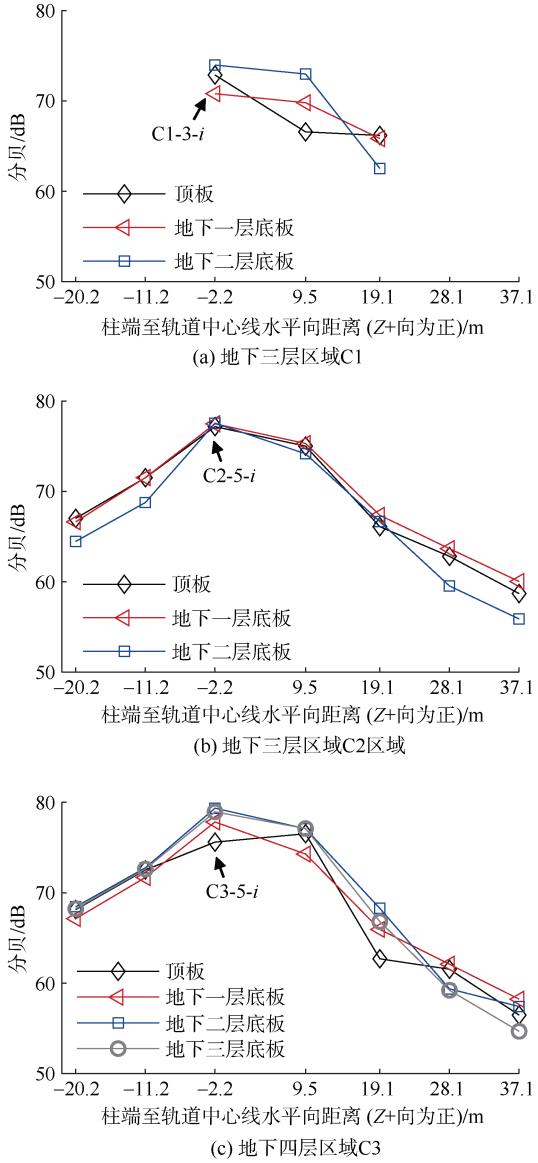


图 17　横断面方向柱端 *Z* 振级对比

Figure 17　Comparison of maximum *Z* vibration levels at column ends across cross-sections

目前 C1-3-*i* 和 C*n*-5-*i*(*n*=2，3)区域的 *Z* 振级较大，可能超过了现行规范标准的限值[17](实际中需要结合现场实测结果综合判断)，因本次计算为单侧加载，而实际中地铁为往返双线运营，又因 C1-1-*i* 或 C*n*-3-*i* (*n*=2，3)至振源的距离与 C1-3-*i* 或 C*n*-5-*i*(*n*=2，3)至振源的距离相近，易知 C1-1-*i* 和 C*n*-3-*i*(*n*=2，3)处的振动响应也将超过规范标准限值。

4.2　楼板

楼板的振动响应规律较为复杂，在各点处存在一定的起伏，但总体上仍然在轨行区正上方区域的振动响应最大，如图 18 所示。这主要因为，在此区域内楼板主要受迫于柱的振动而产生振动，而此处柱的响应较大，各板中心的振动响应仍然主要受周围柱体振动响应的控制。远离轨道中心线点位的振动则随其至轨道中心线距离的增大而减小，这与柱端振动规律类似。

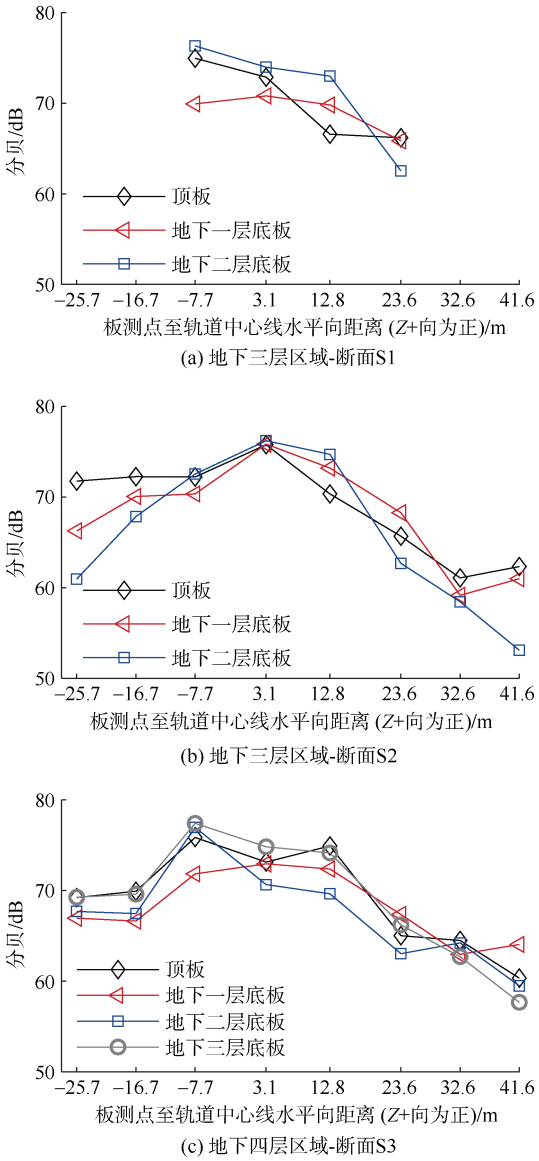


图 18　横断面方向板中心 *Z* 振级对比

Figure 18　Comparison of maximum Z vibration levels at slab centers across cross-sections

综上可总结出列车振动的传播规律，如图 19 所示，列车振动经由隧道壁和柱直接向上传播，距离列车最近的墙、柱及其附近区域产生了最强烈的振动响应；当振动传播至楼板位置处时，进一步沿水平方向传播，并随着其与振源水平向距离的增大而减小。

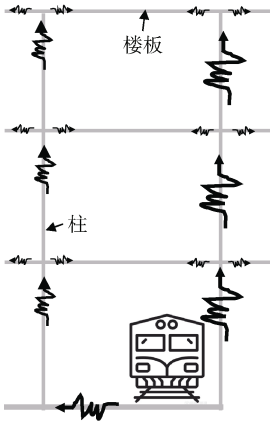


图 19　振动传播路径示意

Figure 19　Schematic of the vibration propagation path

根据图 19，板和柱均在振动的传播路径上，但对比柱端和板端的 Z_{max} 可知，在轨行区附近，柱端响应大于板中心振动响应；而在其他区域，柱端振动的衰减程度大于板中心衰减程度，板中心的振动更大。这主要是因为，在列车运行区域内，振动荷载直接沿隧道壁和柱向上传播，若以楼板为隔离体，可将柱近似视为板的激励源，其作用至楼板的加速度频谱成分主要在 50 Hz 以上，如图 10～12 所示；而楼板本身的自振频率通常较小，多在几赫兹或十几赫兹，这与荷载激励的频率相差较远，振动荷载难以放大板的响应。这可从板的自由振动响应得到佐证，对板中心点 S1-2-2 施加初始位移，得到的自由振动响应如图 20 所示。由图 20 可知：1 s 内楼板产生了约 10 次循环往复位移，粗略估计楼板的 1 阶自由振动频率为 10 Hz；对于远离振源的柱，则不可视为激励源，虽然其也受激励而产生振动响应，但其竖向刚度较大，且受外部约束，振动被抑制，导致柱的振动响应一般小于板中心的响应。

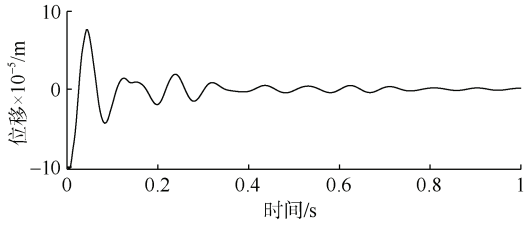


图 20　楼板中心点位(S1-2-2)在初始位移情况下的自由振动

Figure 20　Free vibration response of slab center point (S1-2-2) under initial displacement

综上，在与地铁隧道合建的地下综合体结构中，对于轨行区正上方及其附近区域，应重点关注隧道壁及柱周围区域的振动响应；对于其他区域，更应该关注板中心的振动响应。

5　结论

本文采用车辆-轨道耦合动力学方法和有限元法建立了大型地下综合体结构的地铁振动分析模型，在采用现场实测结果验证数值模拟方法后，开展了地下综合体的振动响应分析，获得了结构的振动响应规律，得出结论如下：

1) 以“银河一英里”地下综合体项目为依托，采用现场地铁振动实测结果验证了数值模拟方法，实测与数值模拟结果吻合度较好，表明所采用的数值模拟方法合理，可近似反映结构真实的振动响应，也可在其他类似的数值计算中应用。

2) 地下综合体结构中，临近地铁楼板的振动响应最大，在其与顶板之间各层楼板的振动响应大小呈现一定的随机性，可能增大或衰减，但在顶板处一般不衰减。

3) 地下综合体结构中，由地铁产生的竖向振动直接沿墙、柱自底向上传播，在各楼层柱端处沿水平方向扩散，并逐步衰减。因此，各楼层距轨道中心线水平向距离最小的柱及其附近区域，一般也是该楼层振动响应最大的区域。因此，对于轨行区正上方及其附近区域，应重点关注隧道壁及柱周围区域的振动响应；但对于远离振源的区域，因墙和柱的竖向刚度更大，振动受抑制，则更应该关注板中心的振动响应。

参考文献

[1] 张东风，莫修栋，邵壮，等. 基于振源控制的上盖开发车辆段轨道无缝化关键技术研究[J]. 都市快轨交通，2024，37(4)：60-64.
ZHANG Dongfeng, MO Xiudong, SHAO Zhuang, et al. Key technologies for seamless track development in depots based on upper cover vibration source control[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 60-64.

[2] 赵密，鹿成麟，曹胜涛，等. 大底盘多塔地铁车辆段车

致环境振动分析[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(6): 273-285.
ZHAO Mi, LU Chenglin, CAO Shengtao, et al. Train-induced environmental vibration analysis of large-chassis and multi-tower metro depots[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2024, 24(6): 273-285.

[3] 佘才高, 张伯林, 刘铁旭, 等. 南京地铁 1 号线珠江路站振动及二次结构噪声整治研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(4): 113-118.
SHE Caigao, ZHANG Bolin, LIU Tiexu, et al. Vibration and secondary structure noise control of Zhujiang Road Station of Nanjing metro line 1[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(4): 113-118.

[4] 许振刚, 范小周. 上跨地铁隧道的大跨度底板设计分析[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(1): 41-43.
XU Zhengang, FAN Xiaozhou. Design analysis of large-span floor across the subway tunnel[J]. Guangdong architecture civil engineering, 2018, 25(1): 41-43.

[5] 苏志刚. 列车动荷载作用下地铁拱形无柱车站结构的动力响应与优化[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1070-1078.
SU Zhigang. Dynamic response of arch-shaped subway station with no-pillar and its structural optimization due to train dynamic load[J]. Building structure, 2022, 52(S1): 1070-1078.

[6] 牛晓宇. 密贴正交下穿既有地铁车站的换乘通道车致振动响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
NIU Xiaoyu. Study on vehicle-induced vibration response of transfer passage closely and perpendicularly undercrossing the existing metro station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[7] 刘淑怡. 地铁交叠式换乘车站环境振动的实测与仿真分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2024.
LIU Shuyi. Measuremrnt and simulation analysis of environment vibration in metro overlapping transfer stations[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2024.

[8] XU L, ZHAI W M. Vehicle–track–tunnel dynamic interaction: a finite/infinite element modelling method[J]. Railway engineering science, 2021, 29(2): 109-126.

[9] 樊堃. 黄土地区地铁环境振动对邻近地下空间的影响及减振措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2024.
FAN Kun. Study on the influence of subway environmental vibrations on adjacent underground space and vibration reduction measures in loess site[D]. Xi'an: Chang'an University, 2024.

[10] YANG J J, ZHU S Y, ZHAI W M, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel[J]. Science of the total environment, 2019, 668: 485-499.

[11] HE P P, CUI Z D. Dynamic response of a thawing soil around the tunnel under the vibration load of subway[J]. Environmental earth sciences, 2015, 73(5): 2473-2482.

[12] ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics: theory and applications[M]. Singapore: Science Press and Springer, 2020.

[13] WANG S, XIN T, WANG P S, et al. Assessment and mitigation of railway-induced environmental vibrations over underground comprehensive transportation hub[J]. Structure and infrastructure engineering, 2024, 20(6): 883-894.

[14] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学(第 2 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.

[15] 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.

[16] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2006, 28(9): 1070-1075.

[17] 国家环境保护局, 城市区域环境振动标准: GB 10070-88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. Standard of environmental vibration in urban area: GB 10070—88[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.

（编辑：傅依萱）