

# 地震-移动荷载耦合作用下地铁车站动力性能研究

刘士龙<sup>1</sup>,高盟<sup>1</sup>,矫慧慧<sup>1</sup>,邢晨光<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590; 2. 中国铁路济南局集团有限公司,山东 济南 266000)

**摘要:**地下轨道交通是城市交通的生命线,由于我国地震频发以及列车进出站频率增加,地铁车站结构易受地震荷载和列车荷载共同影响,然而目前地铁车站结构抗震性能研究中未考虑地震-列车荷载耦合作用存在的现实问题。为保证地震和列车进出站同时发生时地铁车站结构的安全,建立土体-地铁车站-轨道相互作用的三维精细化计算模型,选取列车制动进站的荷载形式施加在轨道表面,并在模型底部输入三向地震波,对比分析地铁车站结构在地震作用和地震-列车耦合作用2种工况下的应力、位移和加速度的变化规律。研究表明:地震-列车耦合作用下,下层柱的柱底峰值应力最大,是车站结构最薄弱的位置,发生变形后首先达到最大屈服应力值并产生塑性破坏;在列车进站前期(0~5 s),板在地震-列车耦合作用下的加速度及位移幅值均大于地震作用下的加速度及位移幅值,列车进站后期,板在2种工况下的加速度及位移基本一致;在地震-列车耦合作用下,当地震加速度较小且列车速度较大时,两者振频接近产生共振,并导致对板的振动放大现象。

**关键词:**地震-列车耦合作用;地下车站结构;动力性能;共振放大现象

中图分类号:TU435

文献标识码:A

## Study on dynamic performance of metro station under seismic-moving load coupling

LIU Shilong<sup>1</sup>, GAO Meng<sup>1</sup>, JIAO Huihui<sup>1</sup>, XING Chenguang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. China Railway Jinan Group Co., Ltd., Jinan 266000, China)

**Abstract:** Underground rail transit is the lifeline of urban transportation. Due to the frequent occurrence of earthquakes and the increasing frequency of train entry and exit in China, the structure of subway stations is susceptible to both seismic and train loads. However, the current research on the seismic performance of subway station structures has not considered the practical problem of seismic and train load coupling. In order to ensure the safety of subway station structure when the seismic struck as the train was entering and leaving the station occur, a three-dimensional refined calculation model of soil, subway station and track interaction is established. The load form of train braking entering the station is selected to apply on the track surface, and the three-dimensional seismic wave is input at the bottom of the model. The variation law of stress, displacement and acceleration of subway station structure under the two working conditions of seismic action and seismic train coupling action is compared and analyzed. The results show that under the coupling effect of seismic and train, the peak stress at the bottom of the lower column is the highest, which is the weakest position of the station structure. After deformation occurs, the maximum yield stress value is first reached and plastic failure occurs. In the early stage of train arrival (0~5 s), the acceleration and displacement amplitudes of the board under seismic train coupling are greater than those under seismic action. In the later stage of train arrival, the acceleration and displacement of the board under both working

收稿日期:2023-05-06; 修回日期:2023-08-10

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME144)

作者简介:刘士龙(2000—),男,硕士研究生,主要从事岩土动力学方面研究。E-mail:liusl0725@163.com

通讯作者:高盟(1974—),男,教授,博士,主要从事岩土动力学及环境岩土工程研究。E-mail:gmxzy@sdust.edu.cn

conditions are basically the same. Under the coupling effect of seismic and train, when the seismic acceleration is small and the train speed is high, resonance occurs when the vibration frequencies of the two are close, leading to the amplification of the vibration of the plate.

**Key words:** seismic-train coupling; underground station structure; dynamic performance; resonance amplification

## 0 引言

我国是个地震频发的国家,很多城市处在地震活跃带上,随着地铁建设的蓬勃发展,列车发车频率日益提高,使得列车在进出站时遭遇地震的概率增加,因此有必要研究地震作用下列车进出站时的安全问题,为我国城市轨道交通的抗震建设服务。

目前,关于地铁车站结构的振动响应研究大多集中在地铁车站结构在单独的列车荷载作用或单独的地震荷载作用下的响应规律,但对地震-列车耦合作用下的地铁车站结构响应规律鲜有研究。对于列车作用下列车车站结构的动力研究,国内外学者分别采用现场监测和数值模拟等方法。MITROSHIN 等<sup>[1]</sup>通过在隧道中布置监测点,揭示了地铁列车振动在土体中的传播规律,发现当列车从隧道进入地铁车站时存在放大振动的来源,使振动对地面建筑影响较大。王凯等<sup>[2]</sup>采用 ANSYS 对换乘节点处进行侧重研究,获得中板处最不利荷载的位置和大小。苏志刚<sup>[3]</sup>通过 ABAQUS 对列车荷载作用下拱形无柱地铁车站的振动特性进行探究,分析了列车对车站的中板、顶板以及拉杆板产生的影响。在地铁车站结构的抗震研究方面,主要采用现场试验和数值模拟的方法进行分析。CHEN 等<sup>[4]</sup>通过大型振动台试验对黄土场地中框架式地铁车站结构的破坏机理进行阐释,发现在地震峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)较大时,中板和中柱产生的应变大于其他结构。许成顺等<sup>[5]</sup>通过离心机振动台试验,对比了4个板、柱的变形能力,提出中柱是地铁车站抗震的关键结构,并且总结容易破坏的结构。WANG 等<sup>[6]</sup>通过开展振动台试验,采取不同的地震荷载对地铁车站周围土体-地面相邻建筑物系统的振动响应进行分析,揭示了地下结构的存在对地面相邻建筑物的地震响应的影响。张亚辉等<sup>[7]</sup>研究了不同地震波下地铁车站结构的振动响应,通过 ANSYS 对比地震作用下自由场地和含地铁车站结构的土层反应特性,总结了在不同地震作用下地铁车站结构和临近场地土反应谱的关系成S形曲线。汪凡茗等<sup>[8]</sup>采用 ABAQUS 对4种地震幅值下地铁车站结构和土体的地震反应进行对比,发现地铁车站的柱顶和柱底最容易先破坏,地震动位移对地铁车站结构变形影响较大。上述文献大多是列车荷载作用下地铁车站系统动力响应的研究,亦或是地震荷载单独作用下地铁车站结构振动规律的分析,然而,对于地震-列车耦合作用下地铁车站结构的动力响应规律研究有限。

目前,已有地震-列车耦合作用下结构响应的研究,大多是地震-列车耦合作用下路基和轨道结构的研究。GAO 等<sup>[9]</sup>建立轨道-路基-地基相互作用体系的三维模型,将不同速度下移动荷载和地震-列车耦合荷载作用下路基和钢轨的振动特性进行对比,提出地震作用下列车的脱轨的临界速度非常小。XIE 等<sup>[10]</sup>建立地震-列车耦合作用下的2.5维模型,研究了地震-列车耦合作用引起的地面振动特性,发现地震-列车耦合作用下地面振动受列车速度和土体刚度的影响较大。王滢等<sup>[11]</sup>采用轨道系统-弹塑性路基-地基三维有限元模型,分析了不同列车速度下高速铁路弹塑性路基和轨道的地震响应,并且推测出列车脱轨速度。石传志等<sup>[12]</sup>建立轨道结构-路基-地基三维数值计算模型,研究了地震荷载和列车移动荷载共同作用下路基在不同列车速度及轴重条件下的应力、位移和加速度的振动特征。曹礼聪等<sup>[13]</sup>开展大型振动台试验,探究了路基上的列车在不同特性及幅值地震波作用下的脱轨特性。

因此,在上述已有的研究基础上,本文针对地震-列车耦合作用下地铁车站结构的动力响应特性问题,建立轨道系统-地铁车站结构-土体相互作用的三维精细化模型,对地震作用下列车减速进站时,地铁车站结构的应力、位移及加速度的响应规律开展研究,以为地下结构的抗震设计提供参考。

## 1 模型建立

### 1.1 车站几何模型

以青岛地铁车站为例,依据我国的 GB 50157—2013《地铁设计规范》<sup>[14]</sup>,采用 ABAQUS 软件建立两层三

跨的地铁车站模型,车站顶板覆土深度为3 m,主体水平横向宽度为21.8 m,高度为14.8 m,中柱采用0.8 m×1 m的矩形截面柱,纵轴向上中柱间距8 m,柱高6.2 m,顶板厚0.8 m,中板厚0.4 m,底板厚0.8 m,地铁车站剖面图如图1所示。

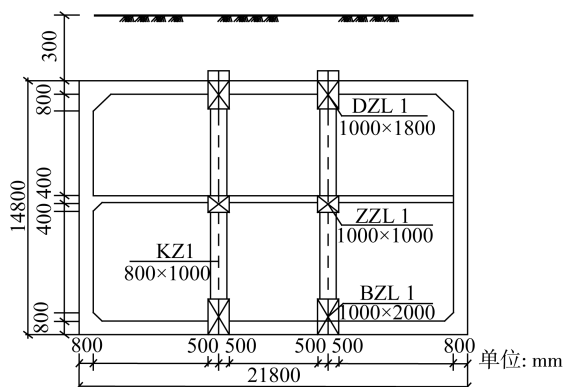


图1 地铁站剖面图

Fig. 1 Section of subway station

## 1.2 材料参数

地铁车站结构的墙、板、梁、柱均采用C40混凝土,其密度为 $2500 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $32500 \text{ MPa}$ ,混凝土轴心抗压强度为 $19.1 \text{ N/mm}^2$ ,泊松比为0.2,主体结构采用混凝土动力损伤塑性模型对混凝土材料的力学特性进行模拟,混凝土塑性损伤参数见表1;土体的力学特性采用摩尔库伦模型进行模拟,土层简化为6层,土体基本参数见表2。在有限元动力分析过程中,采取自动平衡法进行地应力平衡,并采取瑞利阻尼,分别计算各结构的瑞利阻尼系数,阻尼矩阵形式如式(1)、式(2)所示:

$$C_x = \alpha_x M_x + \beta_x K_x \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 \frac{\omega_j \omega_i}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \begin{bmatrix} \omega_i & -\omega_j \\ -1/\omega_i & 1/\omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_j \\ \xi_i \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $x$ 为模型中土体、车站、隧道等不同结构; $\alpha_x$ 、 $\beta_x$ 为阻尼系数; $C_x$ 为第 $x$ 种材料的阻尼矩阵; $M_x$ 为质量矩阵; $K_x$ 为刚度矩阵; $\omega_i$ 和 $\omega_j$ 为计算体系的第 $i$ 阶和第 $j$ 阶频率, $\xi_i$ 和 $\xi_j$ 为对应的第 $i$ 阶和第 $j$ 阶频率的阻尼比。

钢轨采用 $60 \text{ kg/m}$ 的工字型截面型钢,轨道间距为 $1.435 \text{ m}$ ,扣件支点间距为 $0.65 \text{ m}$ 。模型中轨道系统通过线性弹簧和黏性阻尼连接,弹簧的等效横、纵向刚度均取 $37.5 \text{ kN/m}$ ,横、纵向阻尼系数均取 $30.0 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,等效竖向(垂向)刚度和阻尼系数分别取 $25.0$ 、 $37.5 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表1 车站结构混凝土损伤塑性参数值

Table 1 Damage plastic parameter values of station structural concrete

模型参数	参数值	模型参数	参数值
弹性模量/MPa	32500	初始屈服压力/MPa	13.70
泊松比	0.2	初始屈服拉力/MPa	2.77
密度/( $\text{kg/m}^3$ )	2450	偏心率	0.10
极限压应力/MPa	29.8	剪胀角/( $^\circ$ )	36.31

表2 土体基本参数

Table 2 Basic parameters of soil

土层名称	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	密度/( $\text{kg/m}^3$ )	摩擦角/( $^\circ$ )	黏聚力/kPa
素填土	3	15	0.30	2020	18	12.0
粗砂	4	42	0.30	2010	20	19.0
粉质黏土	4	25	0.31	1960	12	25.0
粉质黏土(含有有机质)	5	21	0.33	1960	14	21.5
粗粒砂	9	61	0.31	2030	35	33.0
基岩	35	61000	0.21	2250	43	200.0

### 1.3 数值模型

建立土体-地铁车站-轨道相互作用的三维精细化计算模型如图 2 所示,模型尺寸为 200 m×100 m×60 m。车站中柱结构的单元划分为 0.5 m×0.5 m×0.5 m,梁和板的单元划分为 0.5 m×0.5 m×1 m,土体单元根据式(3)<sup>[15]</sup>计算确定为 1 m×1 m×1 m,轨道网格尺寸参考薛富春等<sup>[16]</sup>的研究成果定为 0.05 m,单元类型均为 C3D8R。

$$h_{\max} = \left( \frac{1}{6} \sim \frac{1}{8} \right) \frac{v_s}{f_{\max}} \quad (3)$$

式中: $h_{\max}$ 为土单元网格的最大尺寸; $v_s$ 为土层的剪切波速,取 200 m/s; $f_{\max}$ 为输入地震动的最大振动频率,取 30 Hz。经计算,土体单元最大尺寸为 0.83~1.1 m,符合计算精度要求。

土体与地铁车站结构之间的相互作用采用接触面进行模拟,法向接触采用硬接触,切向作用满足 Coulomb 摩擦定律;模型边界设置黏弹性人工边界<sup>[17]</sup>,并在各个边界的节点上分别设置三向的弹簧-阻尼元件,以解决二次响应问题。

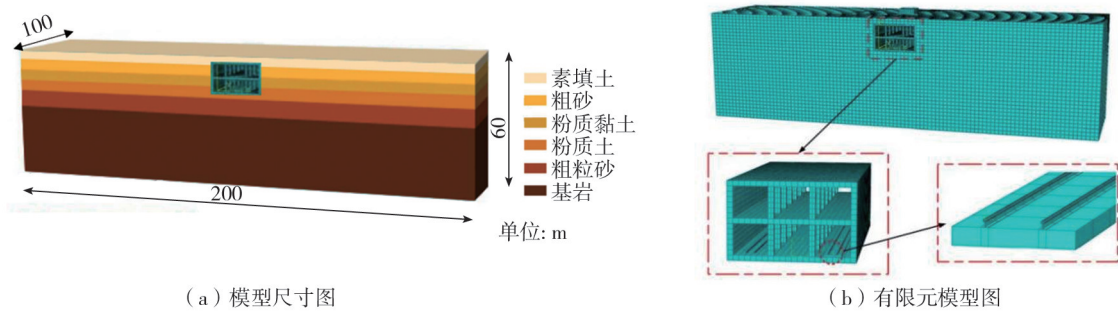


图 2 有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the finite element model

### 1.4 地震荷载

分析地铁车站结构的地震响应,将地震波动转化为边界节点的等效荷载;输入地震波采用绵竹清平台站所记录的汶川地震波,抗震设防烈度为 7 度,根据 GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》<sup>[18]</sup>对地震波幅值进行三向等比例调整<sup>[19-20]</sup>,输入峰值加速度为 0.1 g,其加速度时程曲线如图 3 所示。在结构抗震分析计算时,采用与夏栋舟等<sup>[21]</sup>相同的方法,在模型底部施加三向地震波加速度<sup>[18]</sup>。

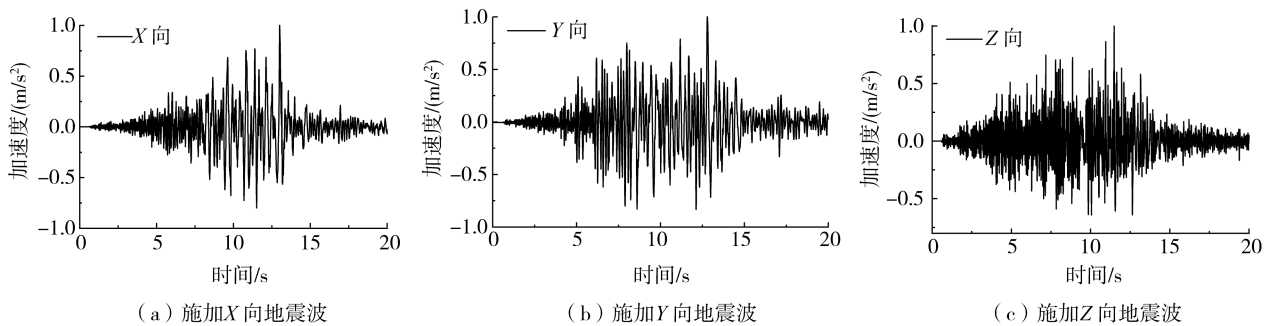


图 3 汶川地震加速度时程曲线

Fig. 3 Time history curves of Wenchuan earthquake acceleration

### 1.5 列车移动荷载

通过编制 DLOAD 子程序,对 ABAQUS 软件进行二次开发。模型建立不考虑车轨的不平顺性,以移动荷载的运行方向(即 y 轴)为正向,荷载的移动坐标根据列车的运行速度  $v$  和时间  $t$  进行定义,即  $y = y_0 + vt$ ,其中  $v = v_0 + at$ , $y_0$ 是车轮荷载的初始坐标值, $v_0$ 为列车初始速度,取 60 m/s, $a$ 为列车加速度,取 1 m/s<sup>2</sup>。在软件中将列车车轴轴重荷载设置为施加在钢轨表面上的移动表面载荷,将列车产生的连续轴重荷载采用式(4)、式(5)<sup>[22]</sup>表示:

$$P_M = \sum_{n=1}^M f_n(x - ct) \quad (4)$$

$$f_n(x-ct) = P_{n1}\delta(x-ct + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0) + P_{n1}\delta(x-ct + a_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0) + P_{n2}\delta(x-ct + a_n + b_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0) + P_{n2}\delta(x-ct + a_n + b_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0) \quad (5)$$

式中:  $P_M$  为列车产生的连续轴重荷载;  $c$  为车速;  $M$  为车厢节数;  $P_{n1}$  和  $P_{n2}$  分别为车厢前后轮的轴重力;  $L_s$  为车厢长度;  $L_0$  为第 1 节车厢前某测量参考点的始距;  $a_n$ 、 $b_n$  为车轴间距;  $\delta(\cdot)$  为冲击荷的 Dirac 函数。

地铁列车移动荷载模拟参数为 B 型动车, 车辆长度为 19 m, 地板宽度为 2.8 m, 车辆最大高度 3.8 m, 每节列车转向架之间的距离为 11.14 m, 地铁移动荷载轴重取 14 t。列车荷载分布如图 4 所示。

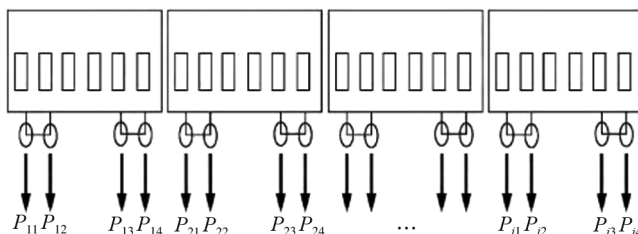


图 4 列车轴重荷载分布图

Fig. 4 Distribution diagram of train axle load

## 2 模型验证

由于无法对实际地震发生时车站内的振动响应进行直接测量验证, 因此对列车进站这一工况进行模拟研究。在模型中输入与文献[23]相同的土体、列车以及地铁车站结构的数据, 取相同位置的 1~3 测点进行模拟计算。并根据深圳市地铁 9 号线沿线某地铁车站站台层进行现场实测的数据, 对比验证地下车站一层地面在移动荷载作用下的振动响应, 以此确保模型的正确性。

图 5 为测点 1、测点 2、测点 3 的模拟计算竖向振动速度时程曲线, 与文献[23]中的地铁车站站台层监测数据的  $z$  方向竖向振动速度时程曲线图对比可知, 3 个测点模拟计算和文献实测的竖向振动速度时程曲线变化趋势大致相同, 其中, 测点 1 计算结果的峰值加速度大约出现在 1.2 s, 值约为  $2.86 \times 10^{-3}$  m/s, 文献中实测结果的峰值加速度大约出现在 1.3 s, 值对应为  $2.79 \times 10^{-3}$  m/s; 测点 2 计算结果的峰值加速度大约出现在 3.5 s, 值约为  $0.97 \times 10^{-3}$  m/s, 文献中实测结果的峰值加速度大约出现在 3.6 s, 值对应为  $1 \times 10^{-3}$  m/s; 测点 3 计算结果的峰值加速度大约出现在 4.7 s, 值约为  $-3.62 \times 10^{-3}$  m/s, 文献中实测结果的峰值加速度大约出现在 4.8 s, 值对应为  $-3.71 \times 10^{-3}$  m/s。模拟计算和文献实测的测点峰值速度基本一致, 误差在 5% 以内, 在列车荷载作用下模型的正确性得以验证。由此可见, 当地震荷载和列车荷载正确施加的情况下, 模型的正确性也可保证。

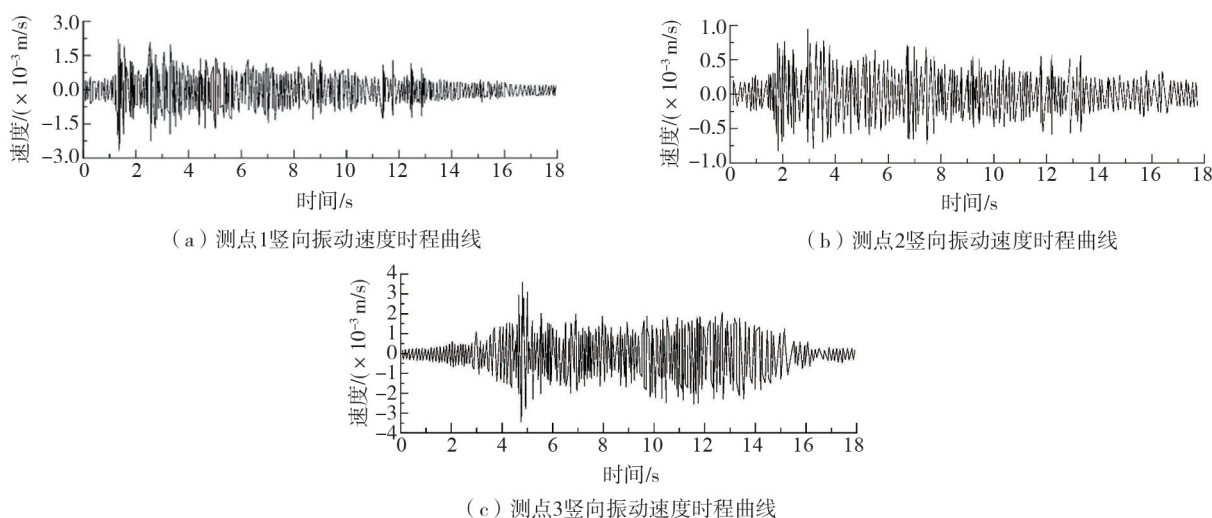


图 5 测点 1、测点 2、测点 3 模拟结果

Fig. 5 Monitoring point 1, 2 and 3 simulation results

### 3 列车移动荷载作用下地铁车站的地震响应分析

#### 3.1 应力响应分析

图 6 是地震作用发生初始时刻和地震-列车耦合作用的初始瞬间下车站主体的 X 方向正应力云图。由图可知,柱子在地震作用下和地震-列车耦合作用下的应力值差别较小,而底板、侧墙以及侧墙和底板的连接处应力值差别较大,说明列车减速进站对于柱子的影响较小,柱子主要承受地震产生的影响,而对于底板和侧墙的影响较大。同时也说明在地震和列车耦合作用下,列车荷载产生的影响不容忽视。

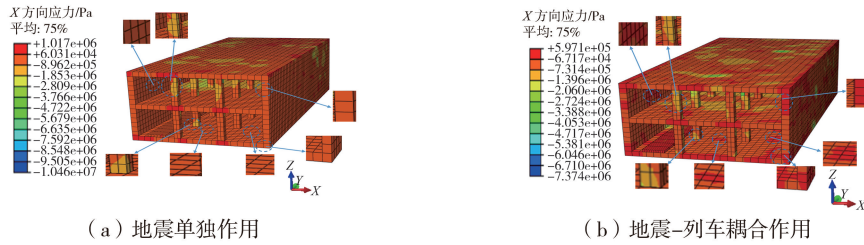


图 6 2 种工况下车站结构 X 方向正应力云图

Fig. 6 Stress cloud diagram of station structure under two working conditions

图 7 为地震作用发生初始时刻和地震-列车耦合作用的初始瞬间下侧墙和底板各测点的应力变化曲线。由图可知,2 种工况下的底板和侧墙的应力相差较大,其中底板与侧墙的连接处的应力值相差最大,说明初始时刻列车减速进站对于底板和侧墙的影响较大,而这种影响随着与列车距离增大而减小。

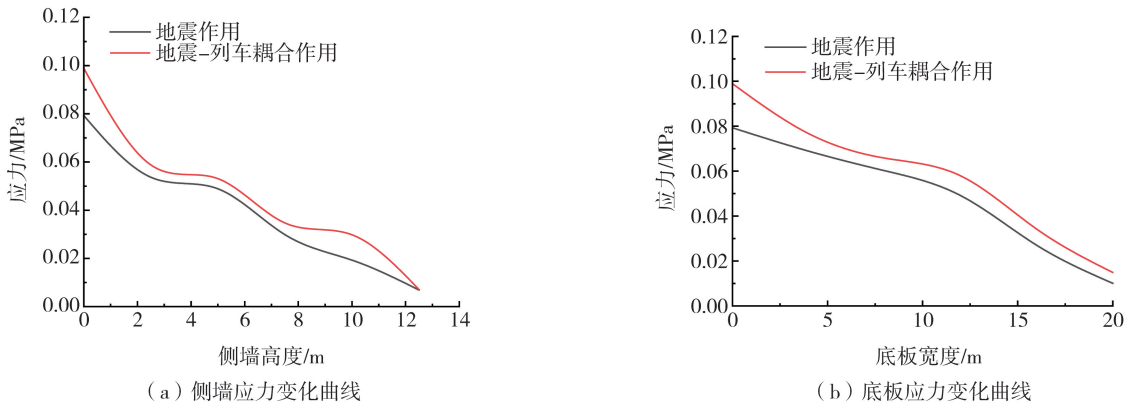


图 7 2 种工况下侧墙和底板应力变化曲线

Fig. 7 Stress change curves of side wall and bottom plate under two working conditions

为分析柱子在 2 种工况下的受力特性,分别选取地铁车站结构中上、下层柱作为研究对象,由于篇幅原因,仅对上层 1 号柱和下层 4 号柱进行研究,在地震作用最大时刻(即 12.5 s) 1 号和 4 号柱子在 2 种工况下的剪应力变化如图 8 所示,其水平方向剪应力随着柱子不同高度的变化趋势如图 9 所示。由图 8 和图 9 可知,柱子的应力变化趋势基本一致,除峰值应力相差较大外,相同时刻的应力值基本相差不大,说明柱子受到地震作用的影响较大。

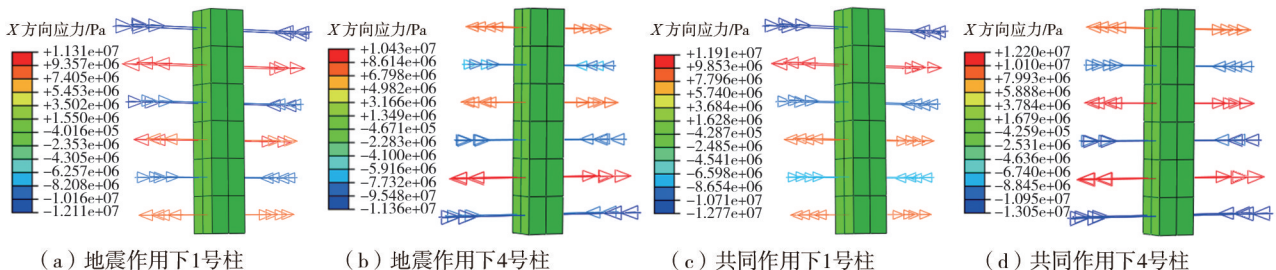


图 8 柱的剪应力分布曲线

Fig. 8 Shear stress distribution curves of columns

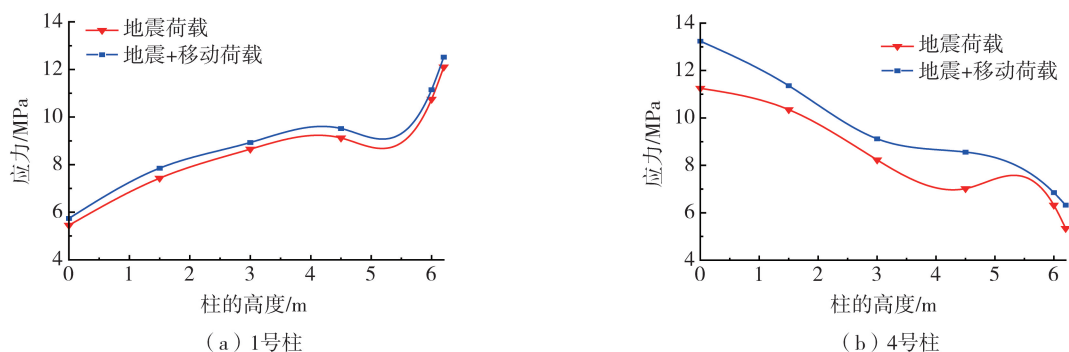


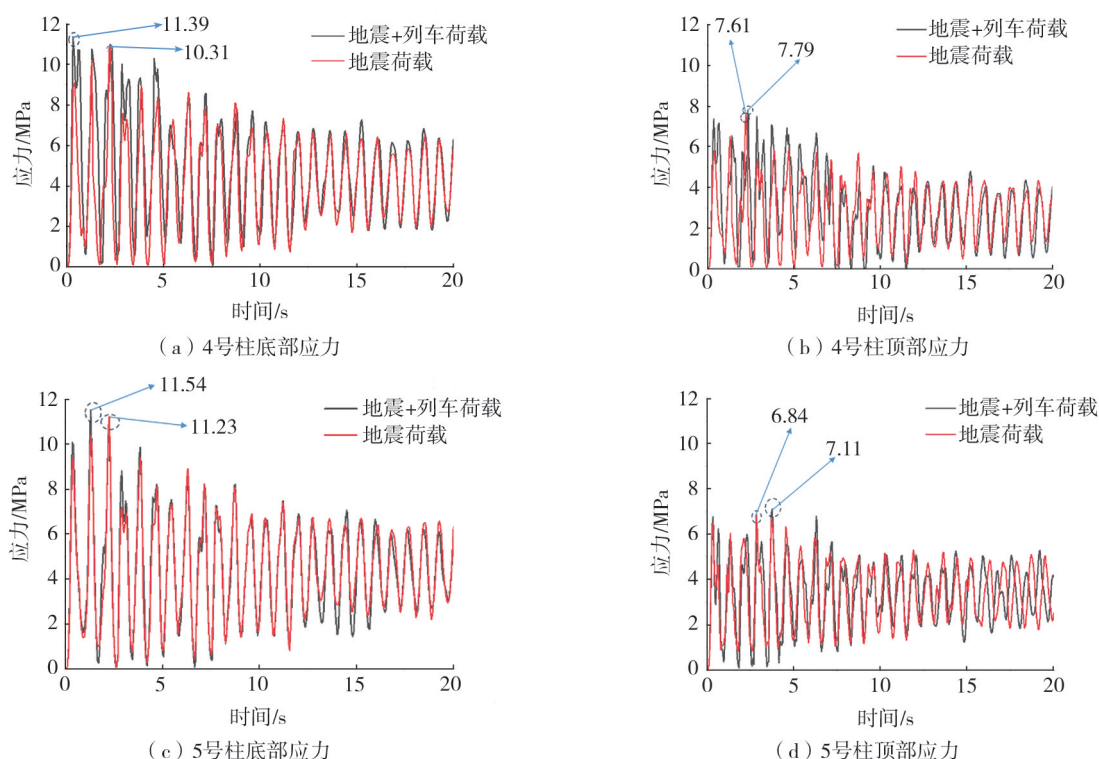
图9 柱剪应力随柱高变化曲线

Fig. 9 Variation of shear stress with height of column

由图9可知,在地震-列车耦合作用下,柱子的受力有所不同,较单独地震荷载剪应力峰值有所提高。其中,上层1号柱在地震-列车耦合作用下的最大剪应力为12.77 MPa,与单独地震作用下的最大剪应力相比增大了1.46 MPa。而下层4号柱在耦合作用下的最大剪应力为13.05 MPa,比地震作用下的最大剪应力增大了1.69 MPa,说明在列车荷载作用下车站结构产生的内力较大,不能被忽略。

取下层靠近列车运行一侧的4号柱、5号柱,以及离列车较远的6号柱的应力进行分析,其中柱顶和柱底的应力变化曲线如图10所示。由4~6号柱子的底部和顶部的应力变化曲线可知,列车荷载对柱子的影响较小,主要影响来自于地震荷载,2种工况下柱子两端应力曲线的峰值大小和走向变化基本一致。在0~5 s内,与地震作用相比,在地震-列车耦合作用下4~6号柱的柱底应力幅值分别增加2.4%、3.9%、12.4%,柱顶的应力幅值分别增大5.4%、2.9%、5.3%,其中5号柱的变化最小,在5 s后,3个柱子在2种工况下应力曲线的变化基本一致。这是由于0~5 s内受列车减速的影响,使柱子两端的应力产生变化,5 s后随着列车速度进一步减小,车站结构主要受地震荷载的影响。

1~6号柱的柱顶和柱底在2种工况下的应力峰值如表3所示。由表可知,与地震作用相比,地震-列车耦合作用的工况下,上层柱受到的影响比下层柱要小的多,并且下层柱的柱顶受耦合作用的影响比柱底也小。下层柱柱底应力峰值分别相差0.58、0.32、0.60 MPa,柱顶应力峰值分别相差0.18、0.27、0.90 MPa。对比发现,在列车和地震耦合作用下,下层柱的柱底应力峰值最大,说明双层三跨地下车站结构中,下层柱底部是受力最薄弱位置,发生变形后首先达到最大屈服应力值,发生塑性破坏增大车站整体结构损坏的危险。



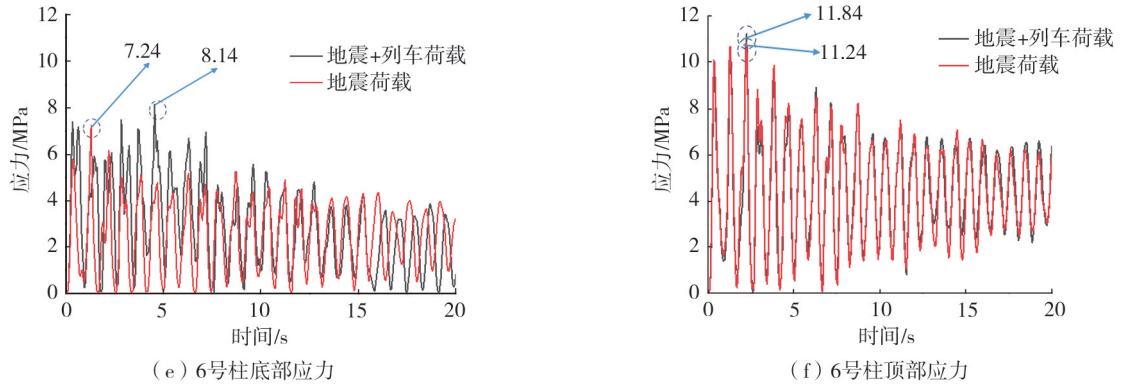


图 10 下层柱应力变化曲线

Fig. 10 Variation of stress curves of lower column

表 3 柱应力峰值对比

Table 3 Comparison of peak values of column stress

MPa				
编号	地震柱顶	耦合作用柱顶	地震柱底	耦合作用柱底
1	10.57	10.63	7.50	7.63
2	9.96	9.96	6.96	6.99
3	10.80	11.10	7.03	7.05
4	7.61	7.79	10.81	11.39
5	6.84	7.11	11.23	11.54
6	7.24	8.14	11.24	11.84

### 3.2 位移响应分析

为研究列车和地震耦合作用对地铁车站结构的位移影响,对顶底板上 2 个测点的相对水平位移值进行分析,计算结果如图 11 所示。由图 11(a)可知,0~5 s 内,2 种工况下板的相对位移幅值差距较大,其中,地震-列车耦合作用下顶底板相对位移在 2.3 s 时刻突增至 0.008 m。参考文献[12]分析发现,此时地震波加速度较小而列车速度较大,两者的振频接近引发共振,从而产生对底板的振动放大现象,使得顶底板相对位移增大。5 s 后随着地震波逐渐增强和列车逐渐减速,车站结构逐渐受到地震荷载主导影响,2 种工况下板的相对位移差距较小。由图 11(b)可知,0~5 s 内,在地震-列车耦合作用下板的相对位移与地震作用下板的相对位移基本一致。5 s 后,在地震-列车耦合作用下,结构中线上顶板在 14.7 s 时相对位移峰值达 0.049 m,地震单独作用下,在 14.8 s 时相对位移峰值达 0.048 m,说明地震荷载在其中起主导作用。对比两图可知,与结构中线上测点相比,靠近列车一侧顶底板的水平相对位移较小,但其受地震-列车耦合作用的影响较为显著。

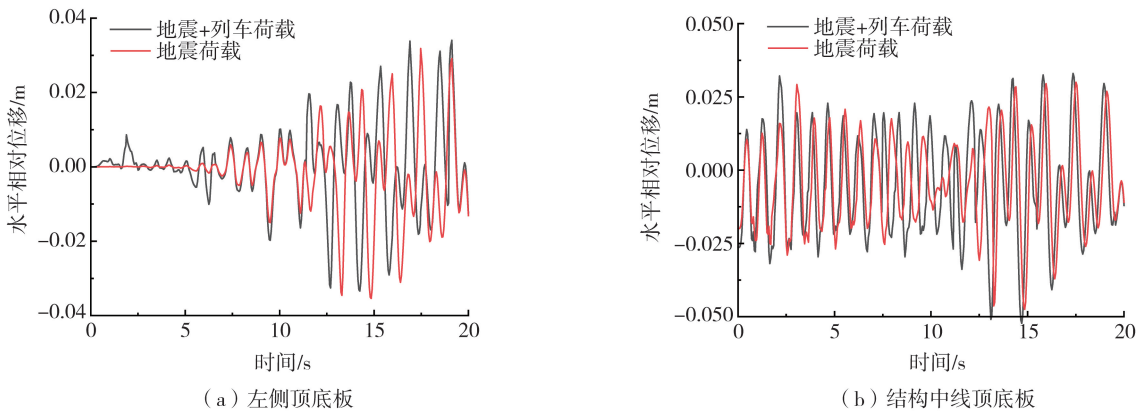


图 11 测点水平相对位移曲线

Fig. 11 Relative horizontal displacement curves of monitoring points

### 3.3 加速度响应分析

为了进一步分析地铁车站结构在地震-列车耦合作用下的响应特性,对底板、中板及顶板在 2 种工况下的加速度进行分析,各板在地震-列车耦合作用以及地震荷载单独作用下的水平方向加速度时程曲线如图 12 所示。

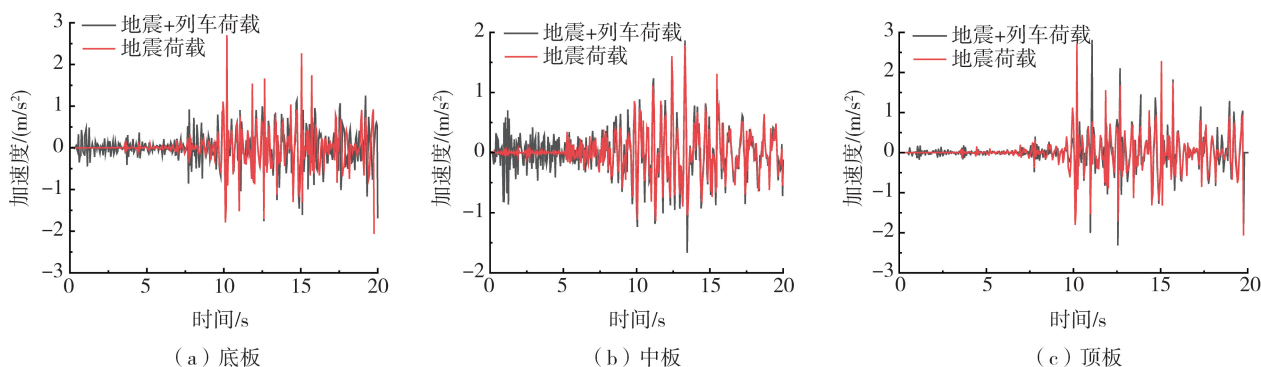


图 12 各板地震动的水平方向加速度时程曲线

Fig. 12 Horizontal acceleration time history curves of ground motion of each plate

由图 12(a)可知,在 0~5 s 内,底板的加速度幅值在 2 种工况下有较大差距,底板受地震-列车耦合作用影响显著,加速度较单一地震荷载的工况明显增大,5 s 内加速度峰值达到  $0.67 \text{ m/s}^2$ 。5 s 后,随着地震波逐渐增强以及列车逐渐减速,底板加速度逐渐受地震荷载主导的影响,耦合作用下在 10.2 s 出现加速度峰值为  $1.87 \text{ m/s}^2$ ,仅地震作用下在 13.3 s 出现相对位移峰值为  $1.83 \text{ m/s}^2$ 。由图 12(b)可知,中板在 2 种工况下加速度时程差距较小,中板加速度幅值较单一地震荷载工况发生小幅度的提高,5 s 内加速度峰值达到  $0.41 \text{ m/s}^2$ 。5 s 后,中板在耦合作用下,在 10.2 s 出现加速度峰值为  $2.32 \text{ m/s}^2$ ,仅地震作用下,在 10.2 s 出现相对位移峰值为  $2.30 \text{ m/s}^2$ 。5 s 后,中板完全受地震荷载主导,其峰值加速度以及对应时间与地震荷载工况基本相同。由图 12(c)可知,顶板在 2 种工况下的振动加速度基本一致,其完全受到地震荷载的作用,列车荷载的作用可以忽略不计。

## 4 结论

本文建立了轨道系统-地铁车站结构-土体相互作用的三维精细化模型,对地铁车站结构构件在地震作用和地震-列车耦合作用 2 种工况下的应力、位移以及加速度变化曲线进行了分析。主要结论如下:

1) 地震-列车耦合作用对底板和侧墙的影响较为显著,对柱的影响很小,与地震作用相比,在地震-列车耦合作用下下层 4 号、5 号、6 号 3 个柱的柱底峰值应力分别增加 2.4%、3.9%、12.4%,柱顶的峰值应力分别增大 5.4%、2.9%、5.3%,柱子的受力主要来自地震作用。此外,在列车和地震耦合作用下,下层柱的柱底峰值应力最大,是双层三跨地铁车站结构中受力最薄弱位置。

2) 靠近列车一侧顶底板受地震-列车耦合作用的影响较为显著,在进站前期(0~5 s)位移差距较大,这是由于刚进站时列车速度较大,列车振频和地震振频接近引发共振,使得顶底板相对位移增大,随着列车减速和地震增强,地震作用占主导地位,2 种工况下顶底板的位移变化基本一致。在列车进站整个过程中,结构中轴线处的顶底板受列车荷载影响较小,主要受地震荷载作用。

3) 进站前期(0~5 s),底板受列车和地震耦合作用的影响显著,其加速度幅值较单一地震荷载工况明显提高,中板加速度幅值也较单一地震荷载工况发生小幅度的提高。在 5 s 后,底板和中板加速度逐渐受地震荷载主导的影响,其峰值加速度以及对应时间与地震荷载工况基本相同。对于顶板,在列车进站整个过程中,其完全受地震荷载的作用,列车荷载的作用可以忽略不计。

4) 与地震作用相比,地震-列车耦合作用下车站结构的应力、位移和加速度峰值相差不大,但剪应力峰值相差较大,说明列车运行使车站结构产生了较大的内力,在地铁车站抗震设计中,列车荷载的影响不可忽略。

## 参考文献:

- [1] MITROSHIN V A, MONDRUS V L. Analysis of the impact of shallow subway train traffic on urban development[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1015(1): 012019.
- [2] 王凯, 张成平, 王梦恕. 移动列车荷载作用下地铁换乘节点中板内力分析[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(4): 22-27.  
WANG Kai, ZHANG Chengping, WANG Mengshu. Internal force analysis of medial plate in interchange joint of metro station under moving train load[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4): 22-27. (in Chinese)
- [3] 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(增刊 1): 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. (in Chinese)
- [4] CHEN S, ZHUANG H Y, QUAN D Z, et al. Shaking table test on the seismic response of large-scale subway station in a loess site: A case study [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 123: 173-184.
- [5] 许成顺, 张梓鸿, 李洋, 等. 板柱变形能力对地铁车站结构地震破坏反应影响研究 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(4): 26-35.  
XU Chengshun, ZHANG Zihong, LI Yang, et al. Influences of deformation capacity of structure roof and middle columns on earthquake damage responses of subway station structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(4): 26-35. (in Chinese)
- [6] WANG G B, YUAN M Z, MIAO Y, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 76: 145-159.
- [7] 张亚辉, 宋玉香, 郭唯伟, 等. 地铁车站对临近场地地震反应谱影响分析 [J]. *防灾减灾学报*, 2017, 33(3): 43-48.  
ZHANG Yahui, SONG Yuxiang, GUO Weiwei, et al. Influence analysis of the subway station to the site based on the earthquake response spectrum effect [J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, 2017, 33(3): 43-48. (in Chinese)
- [8] 汪凡茗, 陈颖辉, 王文举. 地震动特性对地铁车站结构影响分析 [J]. *冶金与材料*, 2020, 40(4): 127-129.  
WANG Fanning, CHEN Yinghui, WANG Wenju. Analysis of the influence of ground motion characteristics on subway station structure [J]. *Metallurgy and Materials*, 2020, 40(4): 127-129. (in Chinese)
- [9] GAO M, XU X, HE R, et al. Vibration of subgrade and evaluation of derailment coefficient of train under combined earthquake- moving train load [J]. *Soils and Foundations*, 2021, 61(2): 386-400.
- [10] XIE W, GAO G Y, SONG J, et al. Ground vibration analysis under combined seismic and high-speed train loads [J]. *Underground Space*, 2022, 7(3): 363-379.
- [11] 王滢, 张粮, 高盟, 等. 高速铁路弹塑性路基及轨道的地震反应特性研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(5): 225-237.  
WANG Ying, ZHANG Liang, GAO Meng, et al. Research on seismic response characteristics of high-speed railway elastoplastic subgrade and track [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(5): 225-237. (in Chinese)
- [12] 石传志, 徐晓, 高盟, 等. 地震荷载和列车荷载共同作用下弹性均质路基的动力响应 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(1): 61-70.  
SHI Chuanzhi, XU Xiao, GAO Meng, et al. Dynamic response of elastic homogenous subgrade under the interaction of seismic load and railway moving load [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 39(1): 61-70. (in Chinese)
- [13] 曹礼聪, 杨长卫, 张建经, 等. 地震作用下路基上列车脱轨响应的振动台试验研究 [J]. *铁道学报*, 2022, 44(4): 112-118.  
CAO Licong, YANG Changwei, ZHANG Jianjing, et al. Shaking table test on derailment features of train on subgrade under earthquake [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(4): 112-118. (in Chinese)
- [14] GB 50157—2013 地铁设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
GB 50157—2013 Code for design of metro [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [15] 廖振鹏. 工程波动理论导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
LIAO Zhenpeng. Introduction to engineering wave theory [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [16] 薛富春, 张建民. 移动荷载作用下高速铁路轨道-路基-地基耦合系统振动加速度的空间分布特征 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(12): 2179-2187.  
XUE Fuchun, ZHANG Jianmin. Spatial distribution of vibration accelerations in coupled rail-embankment-foundation system on high-speed railway under moving loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(12): 2179-2187. (in Chinese)
- [17] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件 [J]. *力学学报*, 2006, 38(1): 49-56.  
DU Xiuli, ZHAO Mi, WANG Jinting. A stress artificial boundary in fea for near-field wave problem [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(1): 49-56. (in Chinese)
- [18] GB 50111—2006 铁路工程抗震设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.  
GB 50111—2006 Code for seismic design of railway engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2006. (in Chinese)
- [19] 李小军, 王晓辉, 李亮, 等. 振动台试验三维层状剪切模型箱的设计及性能测试 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(5): 1524-1532.  
LI Xiaojun, WANG Xiaohui, LI Liang, et al. Design and performance test of 3D laminar shear container for shaking table [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1524-1532. (in Chinese)
- [20] 陈国兴, 卢艺静, 王彦臻, 等. 海底盾构隧道-竖井连接部位三维非线性地震反应特性 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(8): 1382-1390.  
CHEN Guoxing, LU Yijing, WANG Yanzhen, et al. 3D nonlinear seismic response characteristics for the junction of undersea shield tunnel-shaft [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(8): 1382-1390. (in Chinese)
- [21] 夏栋舟, 何益斌, 刘建华. 刚性桩复合地基-上部结构动力相互作用体系抗震性能及影响因素分析 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3505-3511.  
XIA Dongzhou, HE Yibin, LIU Jianhua. Analysis of aseismic capability and influential factors for rigid pile composite foundation-superstructure dynamic interaction system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3505-3511. (in Chinese)
- [22] 边学成, 陈云敏. 列车荷载作用下轨道和地基的动响应分析 [J]. *力学学报*, 2005, 37(4): 477-484.  
BIAN Xuecheng, CHEN Yunmin. Dynamic analyses of track and ground coupled system with high-speed train loads [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, 37(4): 477-484. (in Chinese)
- [23] 盛星星. 地铁列车运行对沿线环境的振动影响实测与数值模拟的研究 [D]. 广州: 广州大学, 2018.  
SHENG Xingxing. Research on actual measurement and numerical simulation of the influence of subway train running on environment near the subway rout [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)