

DOI: 10.11779/CJGE20230379

近河谷地铁车站振动台模型试验研究

禹海涛¹, 王治坤², 张中杰³, 宋毅²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

摘要: 近年来沿海沿江城市建设涌现出大量紧邻河谷地形修建的地铁车站, 由于河谷地形具有地震动放大效应, 会对近河谷结构抗震安全性构成威胁, 但目前关于河谷地形效应对近邻结构的影响机制尚不清晰。提出了近河谷地铁车站 1g 振动台模型试验方法, 分别设计了 3 组深宽比为 1/8, 1/4 和 1/3 的圆弧形河谷地形, 开展了不同地形、不同地震动输入条件下的近河谷地铁车站振动台模型试验研究, 并以平整场地条件(无地形效应)下的地铁车站振动台试验工况为参照, 对比分析了河谷地形效应对车站结构地震响应的影响规律。试验结果表明: 与平整场地车站结构响应相比, 在水平横向地震动作用下近河谷车站结构的动力响应较大, 尤其是近河谷车站顶板处的加速度放大效应高达 1.27 倍; 受河谷地形效应影响, 车站中柱弯矩显著增加, 而且邻近河谷侧的车站侧墙弯矩放大更为明显, 即与平整场地相比放大效应可达 2.3 倍, 同时该侧墙顶部的动土压力峰值也显著增强; 随着河谷地形深宽比的增加, 地形引起的局部地震动放大效应逐渐增加, 导致近河谷车站结构的地震响应更为显著。研究成果可为近河谷地形地铁车站结构的抗震设计和安全性评估提供科学依据。

关键词: 地铁车站; 地震响应; 振动台试验; 河谷地形效应

中图分类号: TU924 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)09-1800-09

作者简介: 禹海涛(1983—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地下工程抗震防灾减灾。E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn。

Shaking table tests on a near-valley subway station

YU Haitao¹, WANG Zhikun², ZHANG Zhongjie³, SONG Yi²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, Shanghai 200125, China)

Abstract: A large number of subway stations close to valley topography have been built in coastal and riverine cities in recent years, and the seismic safety of near-valley structures is threatened due to the seismic amplification effects of valley topography during earthquakes. However, the influence mechanism of valley topography on the adjacent structures has not been well understood. In this study, a 1g shaking table test model method for a near-valley subway station is proposed. Three sets of circular valley topography with depth-to-width ratios of 1/8, 1/4 and 1/3 are designed, the tests on a near-valley subway station under different topography and ground motion input conditions are performed, and a subway station test without valley site is used as a benchmark to investigate the seismic response of the valley topography on the adjacent structures. The results show that the dynamic response of the near-valley structures is greater under horizontal transverse motion compared to the response of the station structures without valley, particularly the acceleration amplification effects are up to 1.27 times at the structural top slab. The bending moment of the structural column increases due to the valley topography, and the amplification of the bending moment in the sidewall adjacent to the valley is more pronounced, i.e., up to 2.3 times compared to the tests without valley site. Additionally, the peak dynamic earth pressure at the top of the side wall is higher. The local seismic amplification effects of valley are more pronounced as the depth-to-width ratio of the valley topography increases, which leads to a greater seismic response of the near-valley station structures. The research results can provide a scientific basis for the seismic design and safety assessment of station structures around valley topography.

Key words: subway station; seismic response; shaking table test; valley topographic effect

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177134); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2023-05-04

0 引言

随着城市轨道交通建设的日益扩大, 目前沿海沿江城市涌现出越来越多紧邻河谷地形修建的地铁车站, 由于受地形效应影响, 会对邻近结构的抗震安全性构成威胁。如1985年墨西哥地震, 位于市中心沉积层内的地上和地下结构由于局部场地效应影响而遭到严重破坏^[1]; 1995年日本神户地震, 靠近山体和海域地形一侧的地下墙出现了大量裂缝^[2]。河谷作为一种典型的不规则地形, 其引起的局部场地地震动放大效应已被地震观测证实^[3], 因此, 对邻近河谷地形的地下结构抗震安全性应引起高度重视。

目前河谷地形场地效应已被国内外学者广泛关注^[4-5], 但主要围绕自由场地地震动特征, 且研究方法局限于解析解和数值模拟, 尚无针对近邻河谷地形的地下结构地震响应分析。物理试验如振动台模型试验作为一种客观认识自然规律的重要手段, 已广泛应用于地铁车站结构的地震响应研究^[6]。然而, 已有研究工作主要集中于车站结构形式的变化^[7]或地层条件的改变^[8], 但未涉及河谷地形效应及对邻近地铁车站影响研究, 尚缺少相应的物理试验方法和影响机制认识。

本文以某近河谷地形的地铁车站为背景, 提出了近河谷车站结构的1g振动台模型试验方法, 重点探究不同地震作用下河谷地形效应对近邻地铁车站的影响规律。为了体现研究工作的广泛性, 试验设计了3组不同深宽比(1/8, 1/4和1/3)的圆弧形河谷模型, 并以平整场地条件下(无地形效应)的车站结构模型试验作为参照, 通过试验数据对比分析, 探究河谷地形局部场地效应对近邻车站结构响应的作用机制。

1 试验设计

1.1 振动台系统及层状剪切模型箱

本试验依托于同济大学地震工程馆多功能振动台系统。该系统包含MTS多点振动台阵、SMA强震仪及DASP数据自动采集仪等。依据本试验的实际需求, 选用承重高达70t的主台进行振动台试验, 详细技术参数如表1所示。

表1 振动台系统主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of shaking table system

项目	技术参数
台面尺寸	4 m×6 m
额定承载能力	70 t
控制自由度	水平纵向、水平横向、水平转动
额定行程	水平横、纵向±500 mm
额定速度	水平横、纵向±1000 mm/s
额定加速度	水平横、纵向±1.5g
工作频率	0.1~50 Hz
额定倾覆力矩	400 t·m

考虑到本试验的场地范围需求, 选定外部尺寸为4.8 m(长)×4.1 m(宽)×1.7 m(高)的层状剪切箱, 如图1所示。箱体采用14层矩形钢管框架叠合而成, 层间由轴承或滚珠连接, 能够较好地模拟土层的自由剪切变形, 模型箱内壁粘贴一层5 mm厚的橡胶垫, 防止模型土从框架间隙流出, 并降低模型箱边界对试验场地的干扰。该模型箱的剪切运动效果及边界效应已由Zhang等^[9]在前期试验中得到验证。

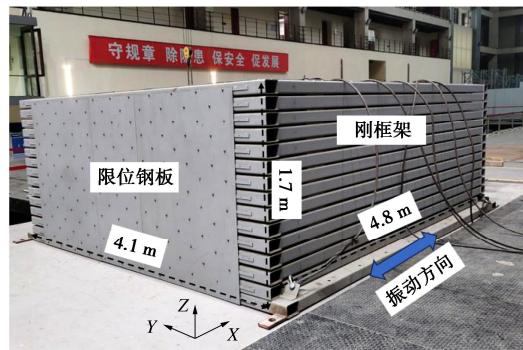


图1 层状剪切模型箱

Fig. 1 Layered shear model box

1.2 动力相似比设计

本试验相似设计理论主要依据Buckingham- π 定理建立动力相似关系, 依据Wood等^[10]的前期工作, 首先将长度、密度及模量作为动力相似问题中的3个关键参数, 即可对其它物理量的相似关系进行理论推导。综合考虑有效模拟范围和量纲关系, 试验拟定几何相似比 S_l 为1/35, 密度相似比 S_ρ 和剪切模量相似比 S_G 分别定为1/2和1/70。由于试验在1g常重力环境下进行, 因此加速度相似比与重力加速度保持一致设为1。其它物理量的相似关系详见表2。

表2 相似比设计

Table 2 Similarity ratios

物理量	相似关系	相似比
应变 ε	S_ε	1
应力 σ	$S_\sigma = S_E S_\varepsilon$	1/70
加速度 a	$S_a = S_E S_l^{-1} S_\rho^{-1}$	1
时间 t	$S_t = S_l S_\rho^{0.5} S_E^{-0.5}$	0.17
速度 v	$S_v = S_\rho^{-0.5} S_E^{0.5}$	0.17
频率 w	$S_w = S_l^{-1} S_\rho^{-0.5} S_E^{0.5}$	5.91
压力 P	$S_P = S_\rho S_a S_l$	1/70
质量 m	$S_m = S_\rho S_l^3$	1.17×10^{-5}

1.3 河谷场地制备

试验模型的制备应综合考虑河谷场地-地铁车站的影响范围和剪切箱边界效应影响。鉴于振动台承载能力及模型箱的尺寸限制, 将河谷地形设计为一侧分布, 另一侧为地下车站结构, 如图2所示。关于模型

箱边界设置的合理性验证详见文献[11]，结果表明模型箱边界效应影响可以忽略不计。此外，为了满足本试验模型相似比要求和土体动力剪切特性，通过一系列动三轴试验，最终选取锯末与无黏性砂土配比为1:2.5的混合材料配置振动台试验模型土^[11]，模型土密度为860 kg/m³(相对密度为90%)，剪切模量为2.84 MPa，模型土的动剪切模量比-剪应变曲线和阻尼比-剪应变曲线如图3所示。

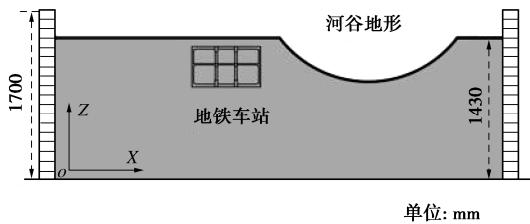


图2 近河谷地铁车站分布形式

Fig. 2 Distribution of near-valley subway station

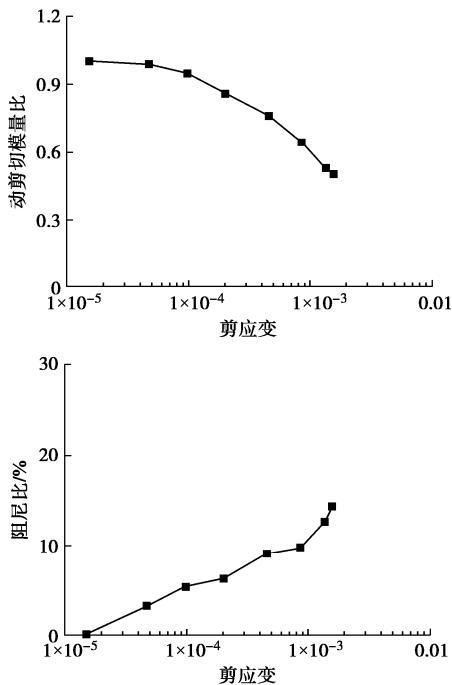


图3 模型土动力剪切特性曲线

Fig. 3 Dynamic shear characteristics of model soil

本试验共设置3种不同深宽比的河谷地形进行对比，并增加了平整场地（无地形效应）下的结构试验作为对照。依据试验条件限制，最终确定河谷尺寸并分别编号，如表3所示。此外，弧形河谷地形的制备过程需要在均质场地分层夯实中进行，如图4所示。首先，选择厚度为20 cm的泡沫板，通过表4中的不同河谷尺寸裁定成相应深宽比的弧形河谷形状；其次，将土体逐层放入模型箱中并逐层夯实，当模型土层填埋至河谷底部高度时，将20块泡沫板依次放置在河谷指定位置并固定，之后采用分层夯实的方式填至相应

标高后，通过泡沫板底部装置（图4(c)中蓝色PVC袋）将其撤下即可完成河谷地形的制作。

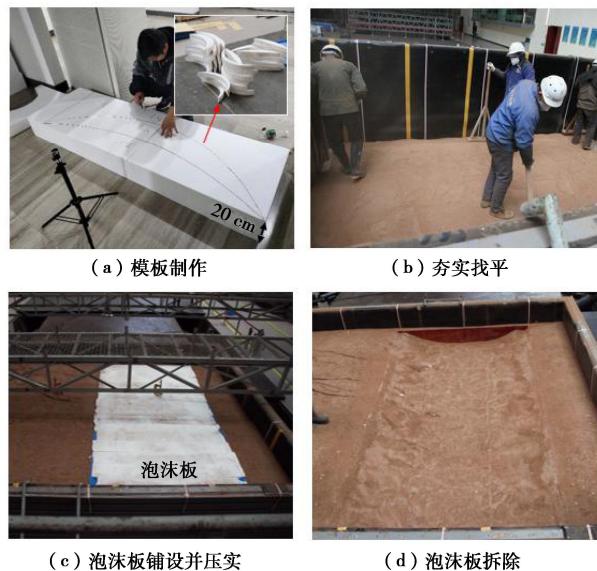


图4 河谷地形制作过程

Fig. 4 Production of valley topography

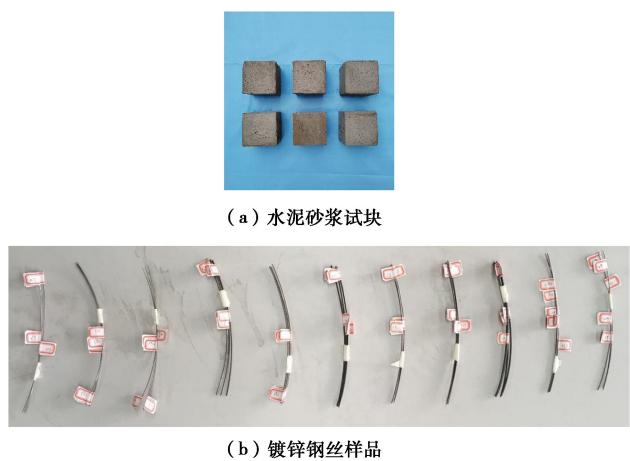
表3 试验河谷地形对比

Table 3 Comparison of test valley topography

河谷编号	河谷尺寸(深×宽)	宽深比	对应圆弧直径/m
V1	0.22 m×1.78 m	1:8	3.77
V2	0.44 m×1.78 m	1:4	2.22
V3	0.59 m×1.78 m	1:3	1.93

1.4 结构模型设计与制备

结构模型采用水泥砂浆进行浇筑，并根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[12]进行了相应的材料性能试验，如图5(a)所示。试验最终选定水泥、砂、石灰和水的配比为1:5:0.8:1.16的砂浆进行车站结构模型的制作，其弹性模量为8.6 GPa。模型结构配筋则采用镀锌钢丝模拟，通过对多种直径的镀锌钢丝样品进行的弹性试验，如图5(b)所示，最终选定直径1.2 mm的镀锌钢丝，其弹性模量为205 GPa。



(a) 水泥砂浆试块

(b) 镀锌钢丝样品

图5 材料性能试验

Fig. 5 Material performance tests

由于地下结构和地层系统难以同时满足相似比关系, 因此重点关注土-结构相对刚度比这一关键指标进行模型结构的设计, 即要求模型结构-地层刚度比与原型车站-地层相对刚度比保持一致。Wang^[13]提出用于计算矩形地下结构与周围地层的相对刚度比公式:

$$F = G_d \left(\frac{B^2 H}{EI_B} + \frac{BH^2}{EI_H} \right) / 24 \quad . \quad (1)$$

式中: G_d 为结构高度处的地层剪切刚度; B , H 分别为结构横截面宽度和高度; I_B , I_H 分别为结构顶、底板和结构侧墙惯性矩。

依据场地土和结构的材料参数, 计算得到模型结构-地层相对刚度比与原型结构-地层的相对刚度比的比值为 1.26:1。考虑到结构材料为水泥砂浆, 其误差在预期试验设计考虑之内, 这表明模型设计能够再现原型土-结构模型的地震响应特征。图 6 给出了地铁站模型的横截面尺寸和配筋图, 模型结构宽度为 685 mm, 高度为 407 mm, 纵向长度为 1300 mm, 包含 5 排双列立柱, 中柱横断面为 23 mm×37 mm, 纵向柱间距为 260 mm。此外, 模型结构的配筋率根据原型车站结构确定, 并以正截面抗弯能力等效控制。

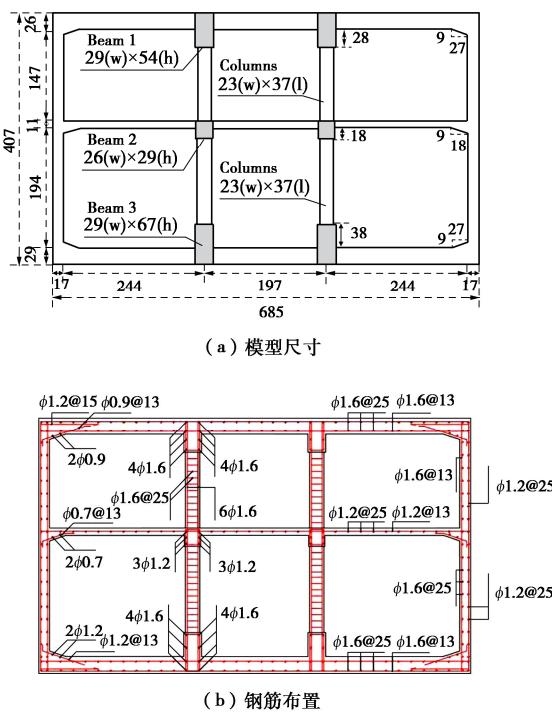


图 6 地铁站模型设计

Fig. 6 Structural design of model station

地铁车站模型的详细建造过程见图 6, 首先将梁柱的钢筋骨架系好, 并绑扎钢筋笼; 其次将其安装在临时模板中进行浇筑, 并固化 28 d 拆除模板即可。试验准备阶段首先将土体逐层放入模型箱中, 采用 2 m

×2 m 的钢板压实。待模型土层达到结构底部标高后, 将车站结构模型放置在指定位置, 然后继续放置土体在结构周围并以同样的方式进行压实, 以确保土体均匀分布。此外, 在场地土-结构模型制备过程中, 为防止模型土移入箱体, 结构两端采用 PVC 板封口, 以保证数据采集的准确性。

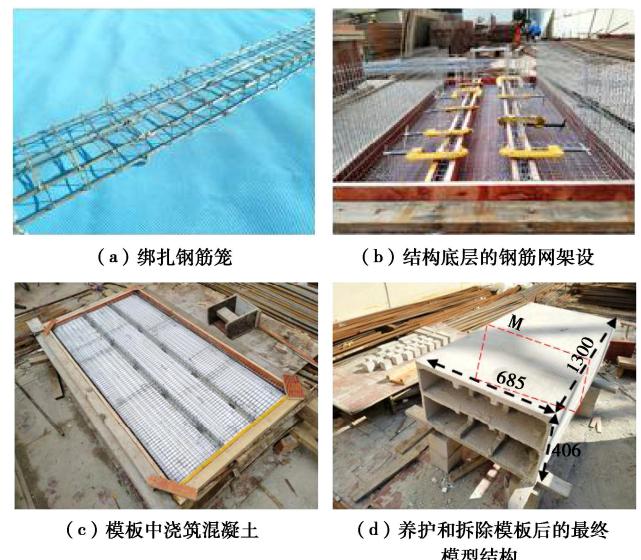
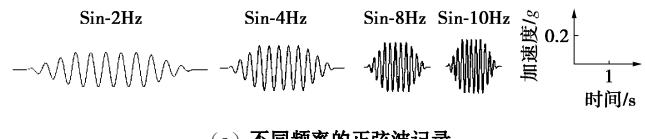


图 7 结构模型的施工过程

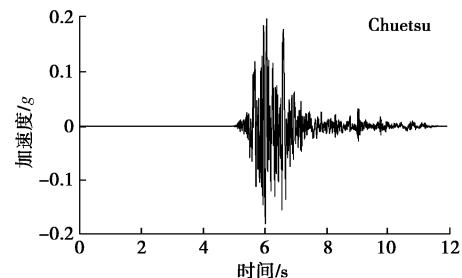
Fig. 7 Construction process of model structures

1.5 试验工况

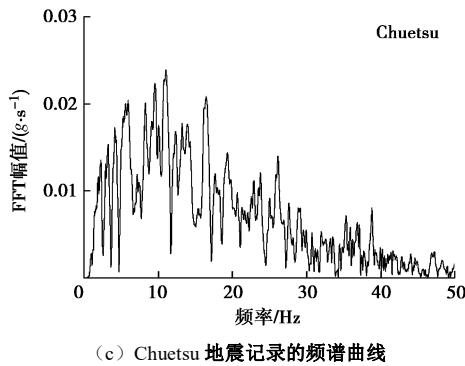
本试验选取频率分别为 2, 4, 8, 10 Hz 的 4 条正弦波, 以反映特定频率成分下的近河谷地铁车站的地震响应特性, 如图 8 (a) 所示。试验前采用 0.05g 白噪声扫频测定场地基频 ($f=14$ Hz), 选取中低频丰富且主频接近于场地基频的 Chuetsu 地震记录 (源自美国太平洋地震研究中心强震动数据库), 以反映结构的实际地震响应特征, 如图 8 (b), (c) 所示。详细的试验工况如表 4 所示。



(a) 不同频率的正弦波记录



(b) Chuetsu 地震记录的时程曲线



(c) Chuetsu 地震记录的频谱曲线

图 8 不同频率的正弦波记录及 Chuetsu 地震记录的时程和频谱曲线
Fig. 8 Time histories of acceleration of Sin waves with different frequencies and time histories and frequency spectra of Chuetsu seismic record

Fig. 8 Time histories of acceleration of Sin waves with different frequencies and time histories and frequency spectra of Chuetsu seismic record

表 4 试验加载工况

Table 4 Test conditions

工况	地震动类型	加速度峰值/g
1	白噪声(WN1)	0.05
2	Sin-2Hz	
3	Sin-4Hz	
4	Sin-8Hz	0.2
5	Sin-10Hz	
6	Chuetsu-Kashiwazaki-2007	
7	白噪声(WN2)	0.05

1.6 传感器布设

以 V2 河谷地形下的地铁车站试验工况为例, 图 9 给出了河谷场地-结构模型的传感器测点布置图, 监测截面位于模型结构的中间 (图 7(d) 中的 M 截面)。其中, 地层中设置 6 个加速度传感器, 以记录结构周围地层的加速度响应; 地铁车站各层楼板均布置 1 个加速度传感器, 以监测结构的加速度响应规律; 结构两侧墙分别布设 3 个土压力传感器, 以监测结构沿竖向的动土压力分布, 并采用 28 个应变片对称布置于模型结构的墙柱板等关键位置, 以监测车站结构关键部位的应变响应。

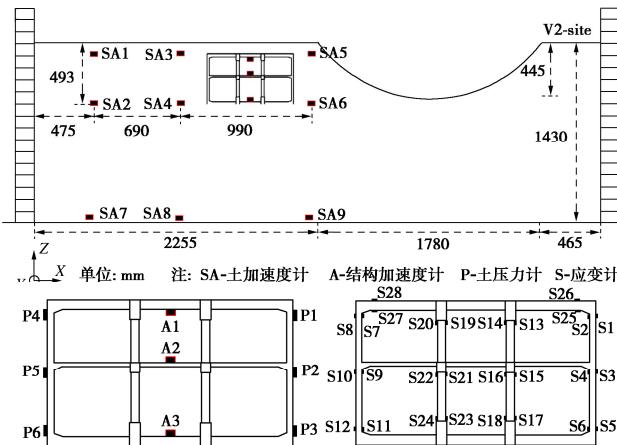


图 9 传感器布置示意图

Fig. 9 Layout of sensors

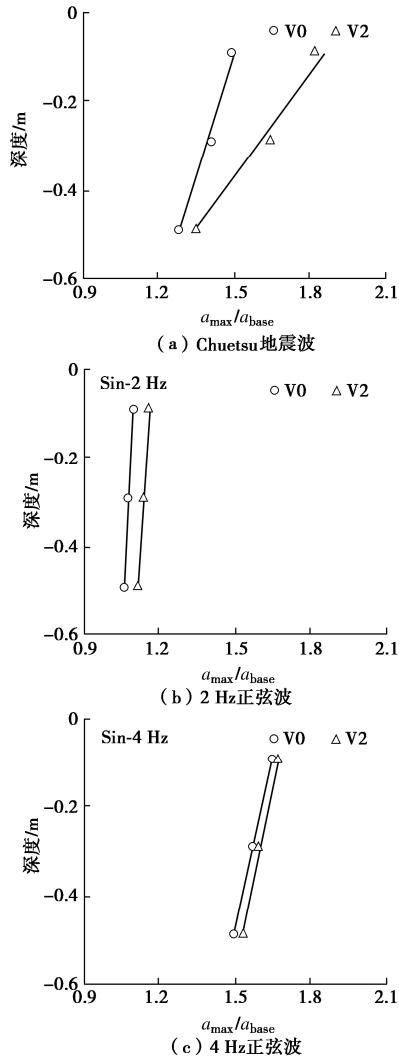
此外, 模型底部安装了 3 个加速度计 (SA7~SA9), 以验证振动台台面的输入激励。通过试验前振动测试, 对比输入激励和有效施加在振动台面激励的时域和频域特性, 结果表明两种激励在时域和频域上均相似, 振动台系统性能良好。

2 近河谷地铁车站地震响应特征

本节以 V2 河谷地形 (深宽比为 1:4) 条件下的地铁车站为研究对象, V0 平整场地 (无地形效应) 条件下的车站结构为参照, 探讨河谷地形效应对邻近地铁车站的地震响应影响规律。关于不同深宽比河谷地形效应对车站结构影响的对比分析详见第 3 节。

2.1 结构加速度响应特征

图 10 给出了 V2 河谷地形和 V0 平整场地下车站结构的峰值加速度放大因子, 定义峰值加速度放大因子为各测点的峰值加速度 a_{\max} 与振动台输入加速度 a_{base} 之比。图中实线表示结构 3 个监测点 (A1, A2, A3, 位置见图 9) 加速度放大因子的线性拟合, 斜率 $k = \Delta y / \Delta x$ 用以反映结构的侧向振动幅度, 其中 k 值越小表示结构的侧向振动变形越大。



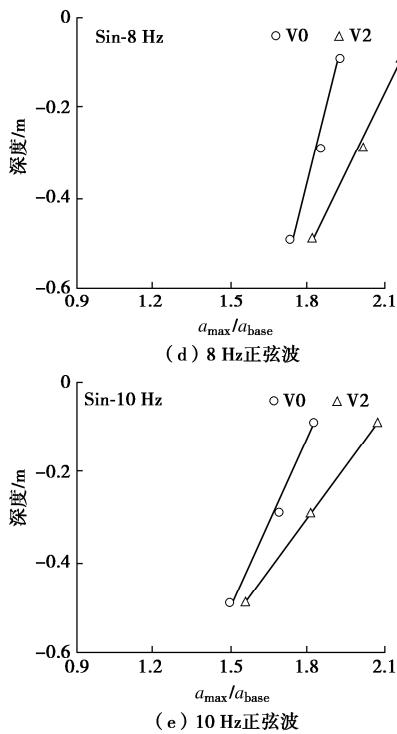


图 10 V0 场地和 V2 场地下结构的峰值加速度放大因子分布

Fig. 10 Distribution of peak acceleration amplification factor of structures for V0-site and V2-site

从图 10 中可以看出, 在 Chuetsu 地震记录工况下(表 4 中的工况 6), 近河谷车站的加速度放大因子从结构底板到顶板逐渐增加。与 V0 平整场地下的结构相比, 近河谷结构的 a_{\max}/a_{base} 显著放大, 且最大放大效应出现在结构顶板位置。这是由于河谷地形效应, 周围土体的加速度放大效应增强^[11], 土-结构相互作用的存在导致近邻结构的地震响应增加。此外, 相比于平整场地结构, 近河谷结构 a_{\max}/a_{base} 拟合线的斜率 k 较小, 表明结构的侧向振动变形也更为显著。

在不同频率正弦波输入下(表 4 中的工况 2~5), 结构的加速度响应与 Chuetsu 地震记录相似, 即相比于平整场地结构, 近河谷车站的加速度放大因子显著增加, 且在结构顶板位置达到最大值。此外, 在输入正弦波频率不高于场地基频(14 Hz)的情况下, 随着入射波频率的变化, 近河谷结构的加速度响应呈现出明显的差异性。相对而言, 低频入射时($f=2 \text{ Hz}, 4 \text{ Hz}$), 由于低频入射波作用下河谷场地效应较小^[5, 11], 两种地形下结构的峰值加速度放大因子沿竖向分布相似, 其线性拟合线均近似为一条竖直线($k \rightarrow \infty$)。随着正弦波入射频率的增加(8 Hz, 10 Hz), 与平整场地下的车站相比, 近河谷结构顶板处的加速度响应显著放大, 线性拟合线的斜率减小, 近河谷结构侧向振动变形也更加显著。

2.2 结构侧墙动土压力分布

图 11 给出了 V2 河谷地形和 V0 平整场地下结构

侧墙的峰值动土压力, 其中峰值动土压力为总压力(土压力传感器的记录)与静态土压力(土压力传感器原始值)的差值。需要说明的是, 本节以结构右侧墙动土压力为例(左侧墙相似), 并选取了 Chuetsu 记录和加速度响应更明显的 $f=8 \text{ Hz}$ 正弦波输入。从图 11 可以看出, 平整场地下结构侧墙顶部和底部的峰值动土压力较大, 侧墙中部相对较小。与 V0 场地下结构相比, 近河谷结构侧墙顶部的峰值动土压力显著增加, 而侧墙底部的动土压力减小。

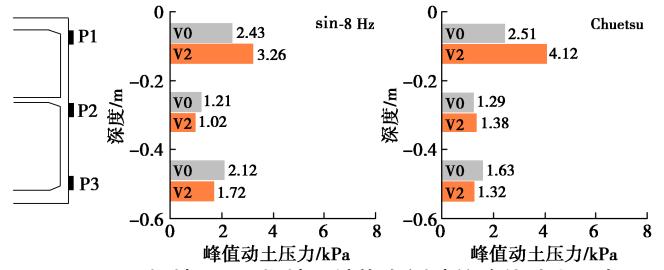


图 11 V0 场地和 V2 场地下结构右侧壁的峰值动土压力

Fig. 11 Peak dynamic earth pressures of structural right sidewalls for V0-site and V2-site

为了解释上述现象, 图 12 给出了平整场地下结构顶板和底板加速度(a_t)与相邻地层中土加速度(a_s)的时程记录对比。可以看出, 不同地震动输入下, 结构顶板的加速度小于相邻土的加速度($a_t < a_s$), 结构底板的加速度大于相邻土的加速度($a_t > a_s$)。根据 Mononobe-Okabe^[14]土压力计算简图(图 13)可知, 结构侧墙顶部为主动土压力(P_{AE})极限状态, 结构侧墙底部为被动土压力(P_{PE})极限状态。

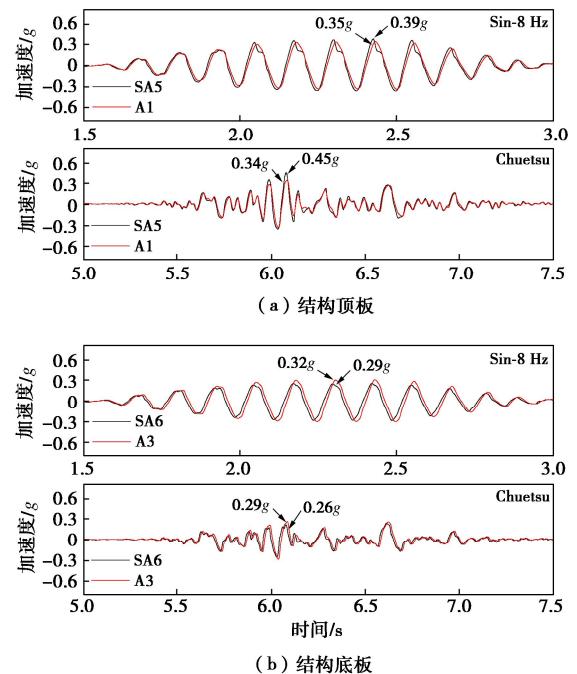


图 12 结构顶底板与相邻土的加速度时程记录

Fig. 12 Time histories of acceleration of top base slab of structures and adjacent soils

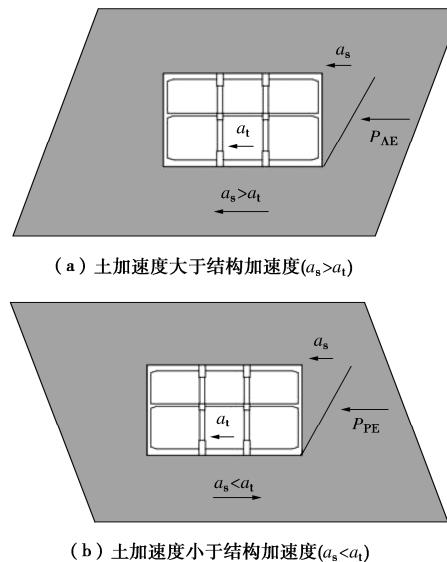


图 13 M-O 理论的主动和被动土压力示意图

Fig. 13 Schematic diagram of active and passive earth pressures of Mononobe-Okabe theory

基于上述研究可以看出,由于河谷地形效应的影响,地表加速度响应的显著放大^[5, 11],导致结构右侧壁顶部(靠近谷顶位置)的主动土压力显著增加;此外,由于侧墙顶部和底部的土压力极限状态相反,随着河谷效应引起周围土体的加速度(a_s)增加使其更接近于结构加速度(a_t),土-结构相互作用降低从而引起右侧壁底部的被动土压力减小。

2.3 结构应变分布及内力分析

图 14 给出了 V2 河谷地形和 V0 平整场地下地铁车站的峰值动应变响应,其中动应变为 Chuetsu 记录和 $f=8$ Hz 正弦波下的拉伸应变(不包括静态初始应变)。从图 14 中可以看出,在水平横向运动下,两种地形下的结构中心柱和侧墙的峰值应变均沿着结构中心线呈反对称分布,且明显大于顶板的峰值应变,说明地铁车站在结构横截面均表现为侧向剪切变形。然而,与平整场地下的结构相比,近河谷车站的结构构件(顶板、柱和侧墙)峰值动应变更大,且右侧墙顶部的应变放大效应更为显著。

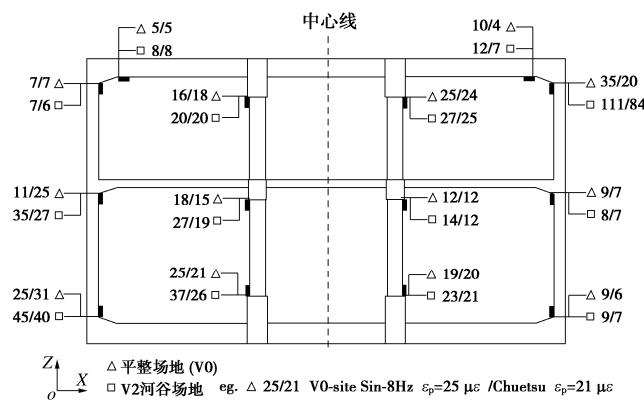


图 14 V0 场地和 V2 场地下结构的动应变分布

Fig. 14 Distribution of dynamic strain of structures for V0-site and V2-site

为了研究地震作用下结构的侧向剪切效应,图 15 给出了 Chuetsu 记录下结构中心柱和侧墙的截面最大弯矩。基于平截面假定,截面弯矩由构件两侧监测点的应变记录计算得到^[15]

$$M = 1/12 E(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)bl^2 \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为结构构件两侧的应变值; b 和 l 分别为结构构件的宽度和长度,其中侧墙的长度采用单位长度 $l=1$ m 计算,柱的高度为 $l=37$ mm。

从图 15 中可以看出,与平整场地下的结构相比,近河谷结构中心柱和侧墙的截面弯矩均增加。在平整场地(V0 工况)下,结构中心柱的弯矩显著高于侧墙,说明结构中心柱相比于侧墙更容易发生破坏。不同的是,近河谷结构最大的弯矩出现在右侧墙顶端(即靠近河谷地形的谷顶位置),且弯矩放大效应也最明显,即相比于 V0 场地下结构的相同位置放大了 2.3 倍。这是由于河谷效应存在,结构右侧墙顶部的动土压力显著增加(第 2.2 节),土-结构相互作用增强导致该位置的截面弯矩显著增大。上述结果表明,在近河谷地下结构的抗震设计中,不仅应关注中心柱,还应特别注意靠近河谷地形两侧的结构侧墙,这些位置在地震作用下可能更容易出现裂缝甚至破坏。

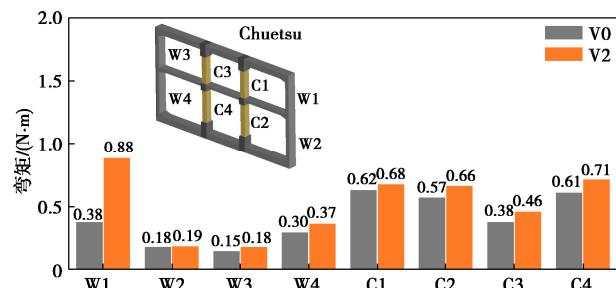


图 15 V0 场地和 V2 场地结构中心柱和侧墙的最大弯矩值

Fig. 15 Maximum bending moments of center columns and sidewall for V0-site and V2-site

3 河谷地形变化对地铁车站的影响

本节以 Chuetsu 实际地震记录输入条件(表 4 中的工况 6)为例,设计了 3 种不同深宽比的河谷地形(如表 3)进行对比分析,进一步探讨河谷地形变化对近邻地铁车站结构的影响特性。

图 16 给出了不同深宽比河谷影响下的结构和平整场地下结构的峰值加速度放大因子的比值(A/A_{V0})。从图 16 中可以看出,不同深宽比河谷地形下结构的 A/A_{V0} 均大于 1,说明近河谷结构的加速度响应均被放大。随着河谷深宽比的增加,结构顶板的加速度放大效应更显著,相比于平整场地结构最高可达 1.27 倍,而结构底板的加速度放大效应减弱。此外,随河谷深度增加结构沿竖向分布的线性拟合线斜率 k 逐渐减

小, 结构的侧向振动变形更为显著。这是由于随着河谷地形深宽比的增加, 引起的局部地震动放大效应变大^[11], 进一步导致近邻结构的地震响应增加。

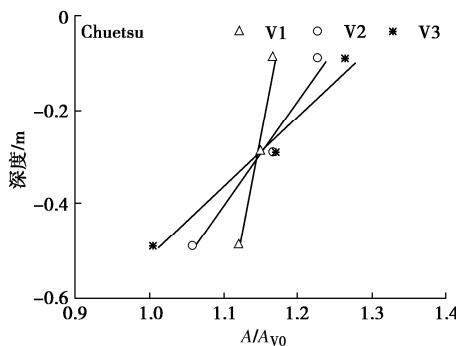


图 16 不同深宽比河谷近邻结构的峰值加速度放大因子比值

Fig. 16 Distribution of peak acceleration amplification factor ratio of the structure near the valley with different depth-to-width ratios

图 17 给出了不同深宽比河谷影响下近邻地铁车站侧墙的峰值动土压力比 (P/P_{V0}), 其中 P/P_{V0} 为近河谷结构侧墙的动土压力与平整场地工况下结构相同位置的动土压力比。从图 17 中可以看出, 随着河谷深宽比的增加, 结构侧墙顶部的动土压力比逐渐增大。这是由于河谷地形中地表的加速度随河谷深宽比的增加而显著放大^[4], 导致结构右侧壁顶部的主动土压力逐渐增加。由于结构侧墙底部为被动土压力极限状态, 该位置 P/P_{V0} 随着河谷深宽比的增加而逐渐减小。此外, 结构侧墙中部的 P/P_{V0} 趋近于 1, 说明不同深宽比河谷对结构侧墙中部的影响较小。

在 2.3 节研究的基础上, 图 18 给出了不同深宽比河谷条件下近邻结构 C2 中心柱 (车站底层的右柱) 的剪力时程曲线。剪力由中心柱两端弯矩计算得到:

$$F_s = \frac{M_2 - M_1}{H} \quad (3)$$

式中: M_1 和 M_2 分别为中心柱两端的截面弯矩; H 为中心柱的高度。

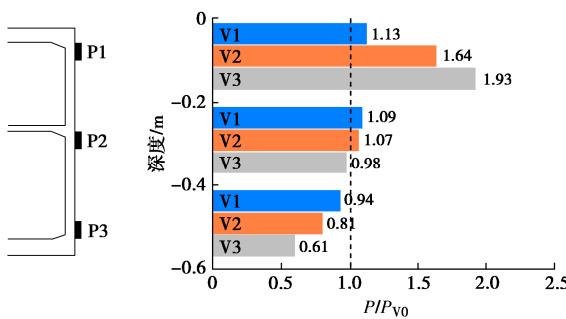


图 17 不同深宽比河谷近邻结构右侧壁的峰值动土压力比

Fig. 17 Ratios of peak dynamic earth pressure along right sidewall of station near valley with different depth-to-width ratios

从图 18 中可以看出, 在地震运动期间中心柱的剪

力时程出现多个峰值, 且深河谷影响下的结构中心柱剪力值均高于浅河谷影响下的结构, 如 V3 河谷近邻车站结构 C2 柱的最大剪力相比于 V1 和 V2 河谷近邻结构分别放大了 1.57 倍和 1.24 倍。结果进一步表明了河谷深宽比对近邻地铁站的地震响应有显著影响, 且当河谷的深宽比较大时, 近邻地铁站的侧向剪切效应也更为显著。

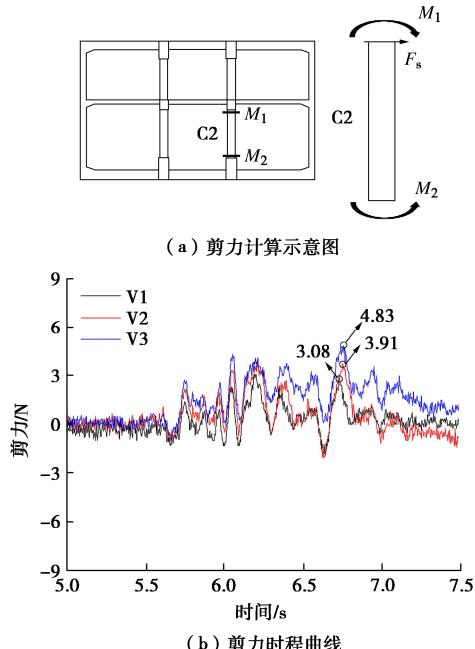


图 18 不同深宽比河谷近邻车站结构 C2 中心柱的剪力

Fig. 18 Shear forces of C2 column of station near valley with different depth-to-width ratios

4 结 论

本文建立了近河谷地铁车站的 1g 振动台模型试验方法, 通过对比平整场地条件下车站结构的地震响应, 研究了地震作用下河谷地形对邻近地铁车站的动力响应特性, 并探讨了不同河谷深宽比、不同地震动输入因素下近河谷地铁站地震响应的影响规律, 主要得出以下 4 点结论。

(1) 与平整场地车站结构响应相比, 近河谷车站结构的加速度响应显著放大, 尤其是车站顶板位置, 加速度放大效应可达 1.27 倍。随着河谷深宽比的增加, 地形引起的地震动放大效应逐渐增强, 土-结构相互作用的存在导致结构的加速度放大效应更为显著。

(2) 近河谷地铁车站侧墙的动土压力分布不均匀, 靠近河谷谷顶位置的侧墙顶部的动土压力明显大于侧墙中部和底部。侧墙顶部和底部的动土压力极限状态相反, 侧墙顶部的动土压力逐渐增大, 而侧墙底部的动土压力减小。

(3) 地铁车站墙柱的峰值应变以结构中心线呈

反对称分布，相比于平整场地工况，近河谷结构的峰值应变显著增加，结构横截面表现出强烈的侧向剪切效应。随着河谷深宽比的增加，结构的柱端剪力幅值逐渐增加，侧向剪切效应更加明显。

(4) 相比于平整场地结构工况，受河谷地形效应影响的结构中心柱弯矩显著增加，且靠近河谷位置的结构侧墙弯矩放大效应更明显，高达 2.3 倍。结果表明近河谷地铁站的抗震设计不仅需要关注结构中心柱，还应特别注意靠近河谷地形结构侧墙的抗震设防。

参考文献：

- [1] ANDERSON J G, BODIN P, BRUNE J N, et al. Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake[J]. *Science*, 1986, **233**(4768): 1043-1049.
- [2] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. *Soils and Foundations*, 1996, **36**: 283-300.
- [3] 李平, 刘红帅, 薄景山, 等. 汶川 Ms8.0 地震河谷地形对汉源县城高烈度异常的影响[J]. 地球物理学报, 2016, **59**(1): 174-184. (LI Ping, LIU Hongshuai, BO Jingshan, et al. Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Hanyuan town during the Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(1): 174-184. (in Chinese))
- [4] CAO H, LEE V W. Scattering and diffraction of plane P waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1990, **9**(3): 141-150.
- [5] 高玉峰, 代登辉, 张宁. 河谷地形地震放大效应研究进展与展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, **41**(4): 734-752. (GAO Yufeng, DAI Denghui, ZHANG Ning. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, **41**(4): 734-752. (in Chinese))
- [6] 庄海洋, 龙慧, 陈国兴, 等. 可液化地基中地铁车站周围场地地震反应分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 81-88. (ZHUANG Haiyang, LONG Hui, CHEN Guoxing, et al. Seismic responses of surrounding site of subway station in liquefiable foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(1): 81-88. (in Chinese))
- [7] WU W F, GE S, YUAN Y, et al. Seismic response of a cross interchange metro station in soft soil: physical and numerical modeling[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2021, **50**(9): 2294-2313.
- [8] CHEN G X, CHEN S, ZUO X, et al. Shaking-table tests and numerical simulations on a subway structure in soft soil[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, **76**: 13-28.
- [9] ZHANG S, YUAN Y, YANG Y, et al. Dynamic performance of soil-tunnel system under transverse sinusoidal excitations[J]. *Applied Sciences*, 2021, **11**(11): 5079.
- [10] WOOD D M, CREWE A, TAYLOR C. Shaking table testing of geotechnical models[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2002, **2**: 1-13.
- [11] 张中杰, 禹海涛, 宋毅, 等. 圆形河谷地形效应振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(5): 1102-1111. (ZHANG Zhongjie, YU Haitao, SONG Yi, et al. Shaking table test on the topographic effect of circular arc valley[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, **46**(5): 1102-1111. (in Chinese))
- [12] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (Standard for Test Method of Basic Properties of Construction Mortar: JGJ/T 70—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [13] WANG J N. Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach[J]. New York: Parsons Brinckerhoff, 1993.
- [14] MONONOBE H. Considerations into earthquake vibrations and vibration theories[J]. *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, 1924, **10**(5): 1063-1094.
- [15] 牌立芳. 高烈度地震区隧道下穿滑坡体系灾变演化机制与控制技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2022. (PAI Lifang. Research on Catastrophic Evolution Mechanism and Control Technology of Tunnel Underpass Landslide System in High Intensity Earthquake Area[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2022. (in Chinese))