

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2286

高速列车振动荷载作用下马蹄形断面隧道动力响应特性分析

杨文波, 邹 涛, 涂玖林, 谷笑旭, 刘雨辰, 晏启祥, 何 川

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 为了研究马蹄形隧道在高速列车振动荷载作用下的动力响应特性, 采用模型试验与数值模拟相结合的方法, 以时域、频域分析为基础, 采用频率响应函数和峰值振动加速度作为评价指标, 分析了列车时速分别为 300 km/h 和 350 km/h 的单个振动荷载作用下的隧道结构动力响应规律。通过 FLAC^{3D} 计算软件建立三维数值模型, 研究了高速列车移动荷载作用下隧道结构的动力响应特性。研究表明: 在列车振动全频域扫频荷载作用下, 隧道结构内部的动力响应不是沿隧道环向逐渐衰减, 而是仰拱到拱脚处的响应出现一定的衰减, 但拱腰到拱顶处却呈现出增大趋势; 在 40~200 Hz 频率范围内, 圆形断面隧道结构的动力响应小于马蹄形断面隧道结构的动力响应, 平均差值约为 3.8 dB, 表明隧道的断面形状对其结构的动力响应影响较大, 在设计时应予以考虑; 在列车移动荷载作用下, 各监测点的加速度响应表现出明显的周期效应, 列车经过时动力响应显著增大; 移动荷载作用下隧道结构的峰值振动加速度较单个振动荷载作用下均有不同程度的增加, 因此在研究列车振动荷载诱发的动力响应特性时应考虑列车的移动效应。

关 键 词: 马蹄形隧道; 高速列车; 振动荷载; 模型试验; FLAC^{3D}; 动力响应

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 09-3635-10

Analysis of dynamic response of horseshoe cross-section tunnel under vibrating load induced by high-speed train

YANG Wen-bo, ZOU Tao, TU Jiu-lin, GU Xiao-xu, LIU Yu-chen, YAN Qi-xiang, HE Chuan

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In this paper, both physical tests and numerical simulation were conducted to study the dynamic response characteristics of the tunnels with horseshoe cross-section under high-speed train loads. Based on time domain and frequency domain analysis, the frequency response function (FRF) and peak particle acceleration (PPA) are used as evaluation indicators. Under the train vibration loads, the dynamic response of tunnels is analyzed at the speeds of 300 km/h and 350 km/h in the physical tests, respectively. The numerical model is developed by FLAC^{3D} to study the dynamic response of the tunnel under moving loads of high-speed train. Results show that the dynamic response of the tunnel is not attenuated in the circumferential direction as the distance from the vibration source increases. The tunnel response shows a clear attenuation from the inverted arch to the arch. However, there is an increasing trend from the arch to the vault. The test results also show that dynamic response of the horseshoe cross-section tunnel is greater than dynamic response of the circular tunnel, and the average difference is about 3.8 dB in frequency range of 40–200 Hz. It indicates that the tunnel cross-section greatly affects the dynamic response of the tunnel, which should be considered in design. Furthermore, the PPA of the tunnel is the largest at the inverted arch under single-point excitation load. The peak acceleration is the smallest at the tunnel dome. The PPA of the tunnel at monitoring points shows obvious periodic effect under moving train loads of high-speed train. The PPA reaches the highest value when the train travels at the monitoring section. The PPA of the tunnel under moving train loads shows a clear amplification compared with tunnel response under the single-point excitation load. Therefore, it is important to consider the effect of moving trains when studying the tunnel dynamic behaviour under train induced vibration loads.

Keywords: horseshoe cross-section tunnel; high-speed train; vibration load; physical test; FLAC^{3D}; dynamic response

收稿日期: 2018-12-19

基金项目: 国家重点研发计划资助 (No.2016YFC0802201); 国家自然科学基金资助项目 (No.51678499)。

This work was supported by the National Key R & D Program of China(2016YFC0802201) and the National Natural Science Foundation of China(51678499).

第一作者简介: 杨文波, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和研究工作。E-mail: yangwenbo1179@hotmail.com

1 引言

由于轨道的不平顺,高速铁路列车通过隧道时引起的列车振动荷载会诱发隧道结构产生动力响应,且在长期振动荷载作用下隧道衬砌结构可能产生开裂、混凝土块剥落等问题,并使原有的损伤和破坏对结构产生更不利的影响^[1]。因此,研究高速列车振动荷载作用下马蹄形断面隧道结构的动力响应特性及传播规律具有重大意义,以期对隧道结构在高速列车振动荷载作用下的安全性评估及结构减振方法的设计提供理论依据。

目前,国内外学者针对列车振动荷载作用下隧道结构的动力响应这一领域开展了大量的研究。杨文波等^[2]采用频率响应函数和峰值加速度分析了盾构隧道衬砌结构不同位置处的动力响应特性及其衰减规律。莫海鸿等^[3]利用三维动力有限差分法对营运期间的盾构隧道管片环的动力响应进行了深入研究。袁宗浩等^[4]采用解析法建立数值模型,分析了饱和土渗透系数对地铁列车振动荷载作用下隧道和轨道动力响应的影响。Yang 等^[5]通过考虑管片接头阻尼影响,研究了 3 种盾构衬砌模型:均质圆环、通缝拼装、错缝拼装模型隧道结构的动力响应特性。在此基础上,Yang 等^[6]进一步采用错缝拼装和均质圆环隧道模型进行试验,对比分析了两种不同衬砌结构在重复列车振动荷载作用下的动力响应规律。Deng 等^[7]通过建立弹塑性三维动态模型,讨论了是否考虑管片接头对衬砌结构及软土地层动力响应的影响。Huang 等^[8]通过土-水全耦合动力有限法研究了在饱和黏土中列车振动荷载诱导盾构隧道的沉降问题。

以上研究都是针对圆形断面隧道的分析,主要研究隧道在低速列车振动荷载作用下的动力响应。为了探讨高速列车振动荷载作用下马蹄形隧道结构的动力响应特性,王祥秋等^[9]通过数值模拟的方法,研究了在铁路列车荷载作用下直墙拱、曲墙拱和圆形拱 3 种截面形状的隧道衬砌的动力响应以及内力变化规律,并与现场实测的数据进行了对比。晏启祥等^[10]通过建立空间交叉隧道三维模型,利用加速度峰值与交叉口的最大主应力研究了列车振动荷载的时空变化对隧道的动力响应影响。李亮等^[11]通过弹塑性有限元法分析了在高速列车振动荷载作用下不同车速、断面形式和阻尼比系数对大断面隧道结构的振动响应影响规律,并与小断面隧道的响应进行了对比分析。陈行等^[12]研究了地铁与高铁在不同行驶方式下近距离平行隧道衬砌

结构的动力响应规律。田甜等^[13]以京沪高速铁路为背景,采用 ABAQUS 有限元软件研究了衬砌拱顶在不同深度的空洞情况下列车振动荷载及围岩荷载对隧道结构的动力响应特性。黄希等^[14]通过数值模拟对时速 350 km/h 下的高速列车振动荷载作用下交叉隧道不同位置处的动力响应规律与损伤特性进行了分析,得出了拱底处损伤最大的结论。而上述研究,基本都是通过数值计算的方法进行分析,并未结合模型试验来进行验证。同时也主要是研究单点振动荷载作用下的动力响应,未考虑列车荷载的移动效应。

因此,本文结合数值计算与模型试验,研究了马蹄形断面隧道在频域、时域下不同位置处的动力响应规律,并进一步考虑列车的移动效应,建立三维数值计算模型,对移动列车荷载作用下隧道结构的动力响应进行了计算,分析了时域下的峰值振动加速度响应特性。研究成果旨在为马蹄形断面隧道结构设计方法的动力分析提供参考。

2 单点振动荷载作用下的动力响应

结合室内模型试验与数值模拟来探究马蹄形隧道在高速列车单点振动荷载作用下的动力响应问题,在扫频激振荷载下研究了 0~200 Hz 频率范围内隧道结构不同位置处的动力响应特性。同时,通过提取时域内的峰值振动加速度对隧道结构不同位置处的动力响应进行了分析。

2.1 模型试验

2.1.1 模型相似关系

列车产生的振动对隧道结构的影响一般被认为是小应变问题,通常认为隧道的响应是线弹性的^[15-17]。因此,建立的物理模型采用弹性相似准则。本次试验最终确定模型基础相似比如下:几何比尺为 1/20、质量密度比尺为 1/1 以及弹性模量比尺为 1/30,并由此计算得出其他物理量的相似比如表 1 所示。

2.1.2 模型材料

本次试验采用了将一定配比的相似材料(石英砂、粉煤灰、河砂、机油等)进行混合、制备模型土的方法对隧道周围土体进行模拟^[2,5-6,18]。为满足相似关系的均质软土地层,确定材料的合理配比,开展了不同配比下模型土物理力学参数的室内测试。最终确定采用质量比为 54:27:12:7 的石英砂、粉煤灰、河砂和机油的混合材料作为本次试验的模型土体,土体的具体参数如表 2 所示。

表 1 模型试验物理量相似关系

Table 1 Similarity ralationship of physical parameters

物理量	符号	相似比关系式	相似比
长度	l	C_l	1/20
密度	ρ	C_ρ	1/1
弹性模量	E	C_E	1/30
力	F	$C_F = C_l^3 C_\rho$	1/8 000
应变	ε	$C_\varepsilon = C_l C_\rho C_E^{-1}$	1/0.667
应力	σ	$C_\sigma = C_E C_\varepsilon$	1/20
加速度	a	$C_a = a_m / a_p$	1/1
速度	v	$C_v = C_E^{0.5} C_\rho^{-0.5}$	1/5.477
位移	u	$C_u = C_l C_\varepsilon$	1/13.333
时间	t	$C_t = C_l C_\rho^{0.5} C_E^{-0.5}$	1/3.651
频率	ω	$C_\omega = C_l^{-1}$	1/0.274

注：C_l、C_ρ、C_E、C_F、C_ε、C_σ、C_a、C_v、C_u、C_t、C_ω分别为长度、密度、弹性模量、力、应变、应力、加速度、速度、位移、时间、频率相似比。

表 2 土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil

类型	弹性模量 /MPa	剪切模量 /MPa	泊松比μ
原型	60	23.08	0.3
模型	2	0.77	0.3

在试验模型准备过程中,首先按照模型土配比,使用搅拌机将各种材料均匀搅拌、制备;之后采用分层填土的方法,将整个模型的土体分为多层。每一层制备时,先将模型土松散摊铺(厚度约为 10 cm),用工字钢进行初次整体夯实,再用软锤敲击木板对模型土进行最终压密,并通过控制夯击和敲击次数来保证压实度。

为了让隧道模型的力学性能符合试验的模型相似准则,试验将石膏:硅藻土:水以 1.0:0.4:1.8(质量比)比例混合模拟隧道结构模型,隧道结构材料的物理力学参数如表 3 所示。隧道断面的设计尺寸及模型如图 1 所示。

表 3 隧道结构材料物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of tunnel materials

类型	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比μ
原型	34.5	13.30	0.3
模型	1.1	0.44	0.3

2.1.3 试验装置及测试系统

本次试验采用了自制的矩形钢制模型箱,其主

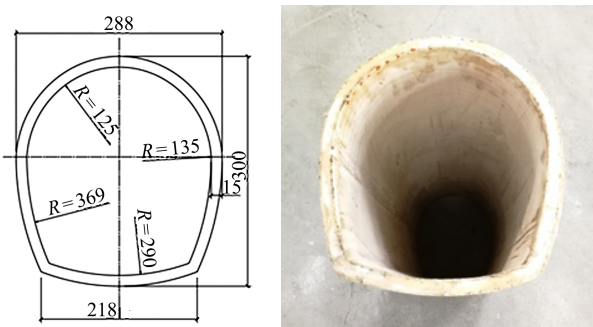


图 1 马蹄形隧道断面的设计尺寸及模型(单位: mm)

Fig.1 Design dimensions and model of horseshoe cross-section tunnel (unit: mm)

体是由 6 mm 厚的 Q235 的钢板焊接而成的顶部开口(用作围岩填充操作)的立方体结构,并在钢板四周焊接了不锈钢肋板,增加模型箱的整体刚度。同时,箱体内部通过防水喷膜处理,以满足防水要求。模型箱内部有效尺寸长、宽、高分别为 150、90、135 cm,如图 2 所示。为减弱振动荷载诱发的压缩波和剪切波在模型边界上的反射效应,在模型箱的内部布置了一层厚 3 cm 的吸振材料 Duxseal,该材料可有效吸收振动能量,减小反射效应对动力响应的影响,提高试验精度^[19-20]。

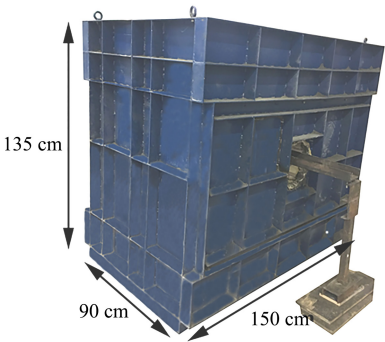


图 2 模型箱

Fig.2 Geomechanical model frames

模型试验中施加的振动信号由电脑控制,电脑产生的模拟信号通过信号发生器 JM-1230 转变为电信号,再经过功率放大器 JM5801 将信号放大后传至安装在隧道模型底部中心的激振器 JM-20,激振器根据控制信号在隧道底部施加振动荷载,并在激振器与隧道结构底部之间安装动态力传感器 JM0710-001,用于采集实际施加的振动荷载大小。在隧道底部与顶部共布置了 5 个加速度传感器 JM0213,以研究加速度响应沿隧道纵向的传播特性;在隧道断面 1 和断面 2 分别布置 6 个加速度传感器,以研究隧道断面不同位置处的加速度响应特

性。室内模型试验加载装置如图 3 所示, 加速度传感器布置如图 4 所示。

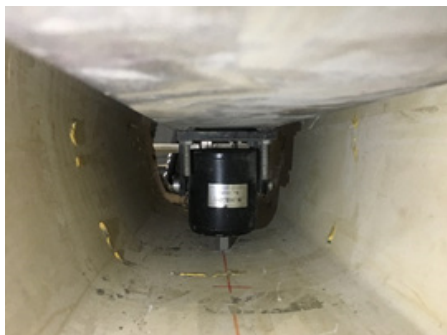


图 3 模型试验加载装置

Fig.3 Loading device of physical model test

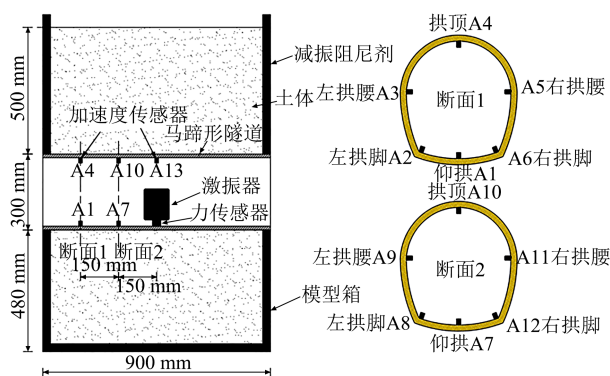


图 4 加速度传感器监测点布置图

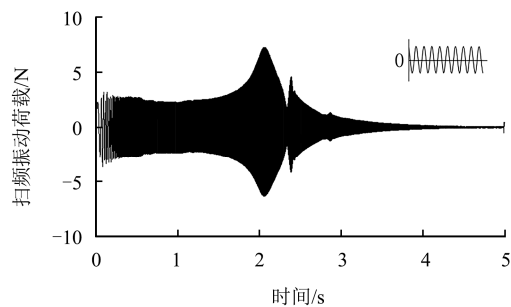
Fig.4 Layout of acceleration sensors

2.1.4 试验方案

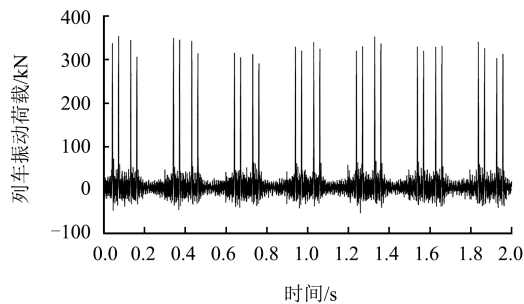
模型试验分别施加了两种振动荷载: 正弦波扫频振动荷载和高速列车单点振动荷载。采用包含列车振动荷载全频域区段 (0~200 Hz) 的正弦波扫频振动荷载, 扫频周期为 5 s 的典型激振力曲线如图 5(a)所示。根据已有研究成果^[21-23], 通过建立车辆-轨道耦合模型并考虑轨道不平顺的影响, 在试验中施加了时速分别为 300、350 km/h 的高速列车振动荷载 (见图 5(b)、5(c))。

2.2 数值模拟

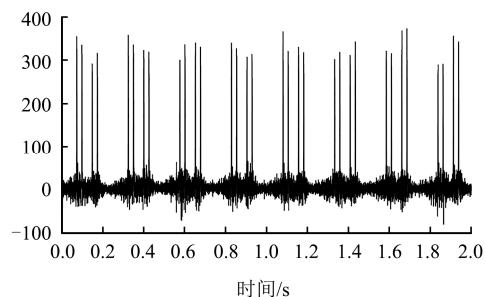
数值模拟是岩土工程中研究岩土体动力响应特性的常用工具^[24-26]。为进一步研究高速列车振动荷载作用下马蹄形断面隧道动力响应特性, 本文采用有限差分计算软件 FLAC^{3D} 进行三维数值模拟。数值模型尺寸与模型试验原型一致, 长、宽、高分别为 30.0、18.0、25.6 m, 土体和隧道结构的物理力学参数也与模型试验原型一致, 并对与模型试验相同测点位置处的加速度进行监测。由于列车振动荷载引起的隧道变形一般较小^[27-28], 因此数值计算模型采用了弹性本构模型。同时, 为保证数值分析的



(a) 扫频正弦荷载曲线



(b) 时速为 300 km/h 下的列车振动荷载曲线



(c) 时速为 350 km/h 下的列车振动荷载曲线

图 5 列车振动荷载曲线

Fig.5 Vibration loading curves of train

准确性, 模型网格单元尺寸小于输入波频率所对应波长的 $1/10 \sim 1/8$ ^[29], 建立的数值计算模型如图 6 所示。动力分析中边界条件选用静态边界条件, 可有效吸收模型边界上的体波, 保证数值计算的精度与数值模拟的可靠性^[30]。

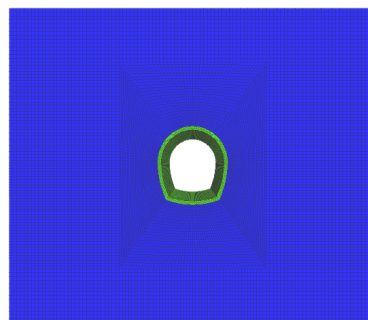


图 6 数值计算模型

Fig.6 Meshes of numerical simulation

在进行动力分析时, 阻尼的正确选取是确保数值模拟可靠性的关键。在本文中, 使用瑞利阻尼, 阻尼矩阵计算式为

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为质量矩阵和刚度矩阵; α 和 β 分别为质量阻尼系数和刚度阻尼系数。

在使用瑞利阻尼时需设置中间频率 f 和阻尼比 ζ , 中间频率取施加于隧道底部的正弦振动荷载频率, 阻尼比可根据多次试算确定, 本文中隧道管片和土体的阻尼比分别取为 0.10 和 0.06。

数值模拟中施加的荷载为频率介于 0~200 Hz 之间的振幅为 1 N 的简谐振动波, 荷载施加于隧道结构底部中心处, 与模型试验一致。通过不断改变施加荷载的频率, 计算单点振动荷载作用下隧道结构在不同频率下的竖向加速度响应。

2.3 动力响应曲线及其相关性分析

为了研究在不同频率振动荷载作用下隧道结构的动力响应特性, 本文采用频率响应函数 FRF 将扫频振动荷载作用下的时域结果转换成频域结果进行分析, 同时利用相关系数对结果的可靠性进行评测。

频率响应函数 FRF 的定义为经过傅里叶变换后的加速度响应 $R(\omega)$ 与振动荷载 $F(\omega)$ 的比值, 计算式可表示为

$$\text{FRF}(\omega) = \frac{R(\omega)}{F(\omega)} \quad (2)$$

为降低噪音对数据的影响, 提高计算结果的可靠性, 本文采用随机振动理论, 将加速度计和动态力传感器测得的信号视为随机振动信号, 通过计算激振力与加速度的自功率谱密度函数以及它们之间的互谱密度函数, 得到频率响应函数估算式:

$$\text{FRF}(\omega) = \frac{S_{\text{FA}}(\omega)}{S_{\text{FF}}(\omega)} \quad (3)$$

式中: $S_{\text{FA}}(\omega)$ 为加速度的互功率谱密度函数; $S_{\text{FF}}(\omega)$ 为激振力的自功率谱密度函数。

根据随机振动分析理论, 引入相关系数 $\gamma^2(\omega)$ 来检验频率响应函数 FRF 的可靠性, 其计算式为

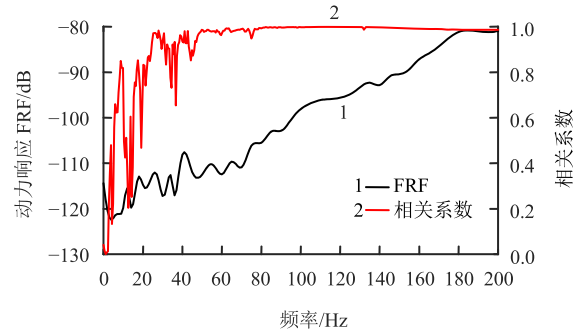
$$\gamma^2(\omega) = \frac{S_{\text{FA}}(\omega)S_{\text{AF}}(\omega)}{S_{\text{FF}}(\omega)S_{\text{AA}}(\omega)} \quad (4)$$

式中: $S_{\text{AF}}(\omega)$ 为激振力的互功率谱密度函数; $S_{\text{AA}}(\omega)$ 为加速度的自功率谱密度函数。

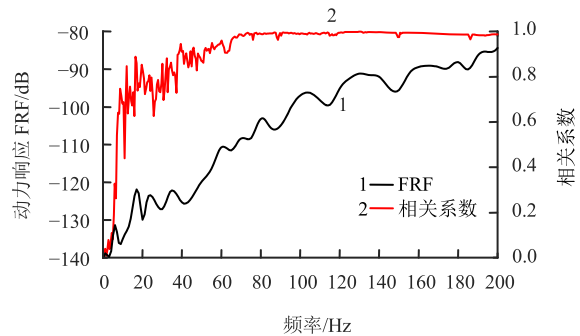
相关系数表示测得的加速度响应与所施加荷载的相关程度, 介于 0~1 之间。相关系数数值越大,

加速度响应与激振荷载的相关性越高。

通过上述方法计算得到的隧道结构内部测点 A7 及 A13 的频率响应函数曲线 (FRF) 及相关系数曲线如图 7 所示。



(a) 测点 A7



(b) 测点 A13

图 7 测点 7 与测点 13 的动力响应曲线
Fig.7 Dynamic response at points A7 and A13

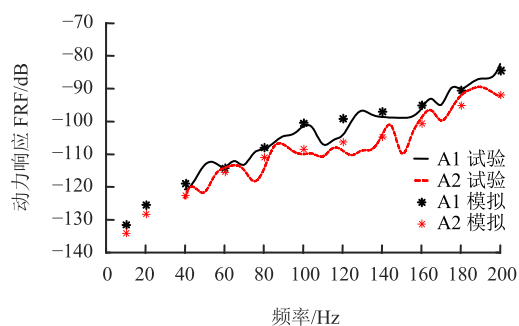
从图 7 可以看出, 当激振荷载频率为 0~40 Hz 时, 相关系数较低, 波动较大, 这主要是由于试验室环境噪音的干扰造成; 当激振荷载频率为 40~80 Hz 时, 相关系数波动较小, 基本约为 0.95; 当激振荷载频率为 80~200 Hz 时, 对应的相关系数几乎为 1, 说明此频率范围内的 FRF 曲线相关性较好, 试验结果可靠。

2.4 计算结果分析

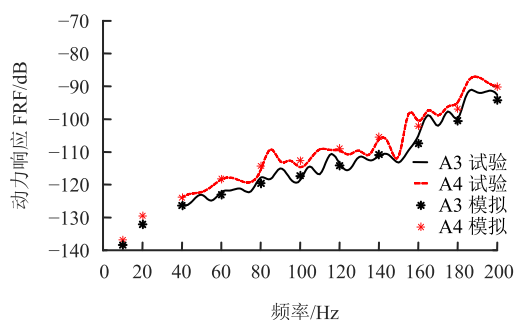
2.4.1 隧道结构频域下动力响应研究

为了分析马蹄形隧道结构在扫频振动荷载作用下不同位置处 (包括仰拱、拱脚、拱腰及拱顶) 的动力响应特性, 本文研究了两个隧道断面的动力响应。绘制的频率响应函数曲线如图 8~10 所示, 可以得出:

(1) 在 40~200 Hz 频率范围内, 模型试验与数值计算所得的结果平均差值在 1.2 dB 左右, 吻合度较高, 试验结果可靠。整体而言, 隧道结构的动力响应随着激振频率的增加而增大。



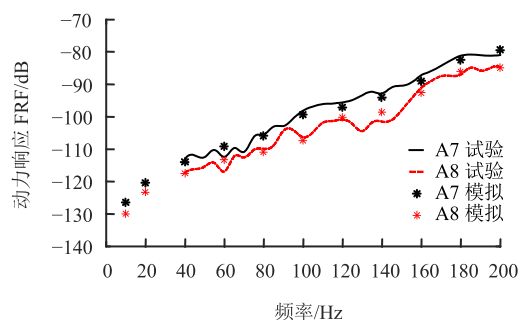
(a) 测点 A1、A2



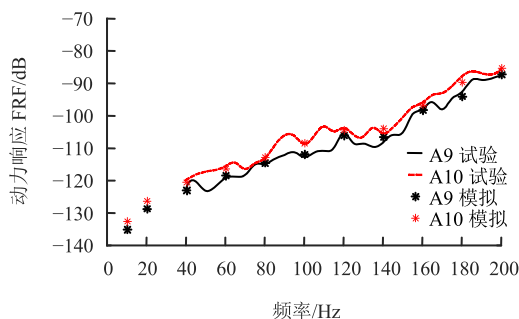
(b) 测点 A3、A4

图 8 断面 1 测点的动力响应曲线

Fig.8 Dynamic response at section 1



(a) 测点 A7、A8



(b) 测点 A9、A10

图 9 断面 2 测点的动力响应曲线

Fig.9 Dynamic response at section 2

(2) 由图 8、9 可知,对于隧道环向各测点的动力响应,仰拱大于拱脚,拱腰则小于拱顶。不同断

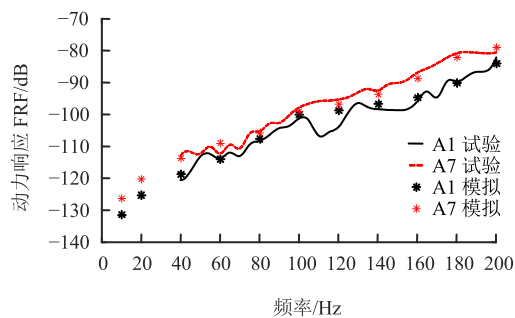


图 10 隧道纵向动力响应曲线

Fig.10 Dynamic response along longitudinal direction in tunnel

面的动力响应规律基本一致,仅在数值上有一定的差异。对离振源较近断面 2 的频率响应函数(图 9)进行分析,仰拱处(A7)的动力响应明显大于拱脚处(A8)的动力响应,最大差值可达 10.1 dB,平均差值在 5.2 dB 左右。在拱腰处(A9)的动力响应明显小于拱顶处(A10)的动力响应,最大差值可达 7.4 dB,平均差值在 3.3 dB 左右。由于马蹄形断面隧道各监测点位置的曲率不同,在列车振动全频域扫频荷载作用下,隧道结构环向的动力响应并非随着距激振点距离的增加而逐渐衰减。隧道结构的动力响应从仰拱到拱脚首先出现一定的衰减,但从拱腰到拱顶,结构的动力响应却呈现出明显的增大趋势。

(3) 分析断面 1 与断面 2 仰拱处的动力响应(图 10 测点 A1、A7)可知,由于材料阻尼的存在,加速度响应沿隧道纵向出现了衰减趋势,最大衰减幅值可达 10.9 dB,平均差值为 5.6 dB 左右。通过与文献[2]圆形断面隧道结构的动力响应相比,模型试验的测点位置基本一致,在 40~200 Hz 频率范围内,马蹄形断面隧道结构的动力响应大于圆形断面隧道结构,平均差值约为 3.8 dB。因此,隧道的断面形状对其结构的动力响应有较为明显的影响。

2.4.2 隧道结构时域下动力响应研究

考虑到高速列车单点振动荷载对隧道不同位置处的动力响应大小不一,从而通过激振器在隧道结构底部中央施加了列车时速 300、350 km/h 的振动荷载。同时在隧道断面 1 和断面 2 分别布置了 6 个加速度传感器进行监测分析。如图 11 所示,绘制了不同断面典型测点处的峰值振动加速度。分析可知:

(1) 隧道内不同监测位置处的峰值振动加速度随着列车时速的增加相应增大,如断面 2 所示,350 km/h 时速下仰拱(A7)处的峰值加速度是 300 km/h 的 1.18 倍,且隧道结构对称位置处的峰值加速度基本一致,说明列车振动荷载诱发的动力响

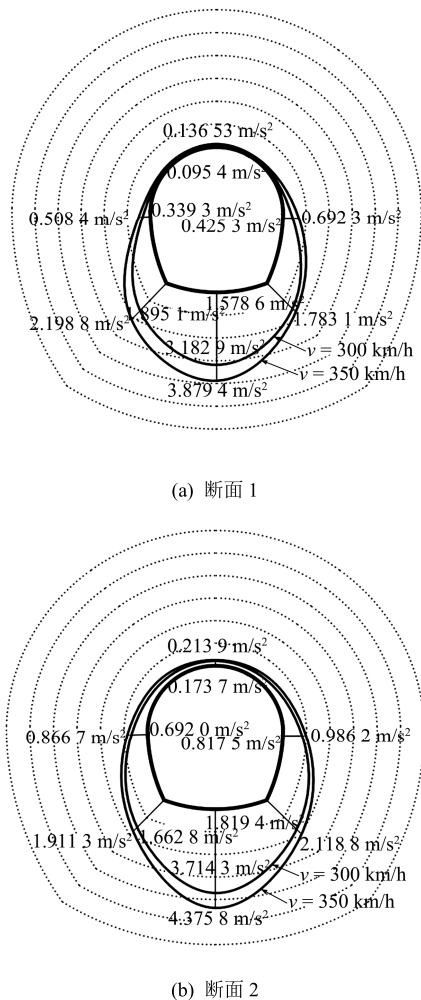


图 11 不同时速下隧道结构测点的峰值振动加速度

Fig.11 PPA of monitoring points in tunnel under different speeds

应具有对称性。

(2) 隧道断面的峰值振动加速度仰拱处最大, 拱顶处最小。如断面 2 处在时速为 300 km/h 的列车振动荷载作用下, 仰拱(A7)处的峰值加速度是拱脚(A8)处的 2.04 倍, 是拱腰处(A9)的 4.54 倍, 是拱顶(A10)处的 21.41 倍。因此, 振动荷载对马蹄形隧道结构仰拱处的动力响应影响最大, 在列车运营中应对其重点监测。

(3) 断面 1 处监测点的峰值加速度均小于断面 2 相应位置处的峰值加速度, 在列车时速为 300 km/h 振动荷载作用下, 仰拱处的峰值振动加速度衰减了约 14%。由于隧道结构材料阻尼的存在, 加速度响应沿隧道纵向逐渐衰减。

3 隧道时域下动力响应研究

前文结合模型试验与数值模拟, 研究了单点振动荷载作用下马蹄形隧道结构的动力响应特性及传

播规律。数值模拟与模型试验的动力响应基本一致, 证明了数值模拟与模型试验数据吻合度较高, 结果可靠。然而, 铁路列车运营时, 轮轨位置随列车的移动而不断发生变化, 因此列车振动荷载是移动的, 并非单点振动荷载。鉴于此, 在上述研究成果的基础上, 考虑列车的移动效应, 通过数值模拟来研究马蹄形隧道在不同时速的高速列车振动荷载作用下的动力响应特性。

3.1 计算模型的建立

当列车经过时, 各个轨道扣件上测得的列车振动荷载除存在一个时间差外, 荷载时程曲线及频谱特性基本一致。该时间差是由观测点与列车的距离不同所致。对于钢轨上连续的一排扣件, 当列车以匀速通过时, 作用于相邻扣件上的列车振动荷载曲线除存在时间差外近似一致。因此, 若在各扣件位置处施加对应的荷载时程曲线, 即可模拟出列车振动荷载的移动效应。

数值模型网格尺寸与 2.2 节一致。以列车至隧道进口开始, 车尾至隧道出口结束, 即模拟一辆列车驶过隧道的全过程。高速列车采用 6 辆编组, 长度为 150 m, 对于列车时速分别为 300、350 km/h 的振动荷载, 计算时长分别为 3.8、3.3 s。为了深入研究高速列车移动荷载作用下隧道结构典型位置处的动力响应规律, 并与单点振动荷载作用下的动力响应进行对比分析, 因此监测点的布置也与 2.1.4 节一致。

3.2 计算结果分析

为了分析隧道结构不同位置处的加速度响应特性, 以 300 km/h 的移动荷载作用下的隧道结构的动力响应为例, 隧道断面 2 仰拱、拱脚、拱腰及拱顶的加速度时程曲线如图 12 所示。

由图 12 可知, 隧道结构的竖向加速度响应以仰拱(A7)处响应最为强烈, 可达 4.53 m/s^2 , 拱顶(A10)处的加速度响应最弱, 最大为 0.28 m/s^2 。各监测点处的加速度响应整体上随时间增加先增强后减弱, 以列车行驶至监测断面时响应最大。隧道结构动力响应随着振动荷载的移动而表现出明显的周期效应, 当列车经过某一断面时, 该断面各处测点的动力响应出现明显的峰值, 但列车行驶在隧道内部时, 每一个断面的峰值振动加速度基本一致, 只是到达峰值的时间略有差异。为了便于对加速度响应结果进行分析, 提取不同时速下隧道断面 2 处各测点的峰值振动加速度如图 13 所示。

对比分析单点振动荷载作用下相同监测点的峰

值振动加速度（见图 10）可知，移动荷载作用下的加速度峰值均大于单点振动荷载作用下的加速度峰值。以断面 2 各监测点的竖向加速度响应为例，仰拱（A7）处在列车时速分别为 300、350 km/h 移动荷载作用下的加速度峰值比单点振动荷载下分别增加了约 22% 和 23%，右拱脚（A12）处相应增加了

56% 和 58%，拱顶（A10）处相应增大了 107% 和 110%，表明考虑列车振动荷载的移动效应会使得隧道结构的动力响应增大，可能与多个激振点在某监测点的动力响应叠加效应有关。因此，在研究列车振动荷载作用下的动力响应时应考虑列车的移动效应。

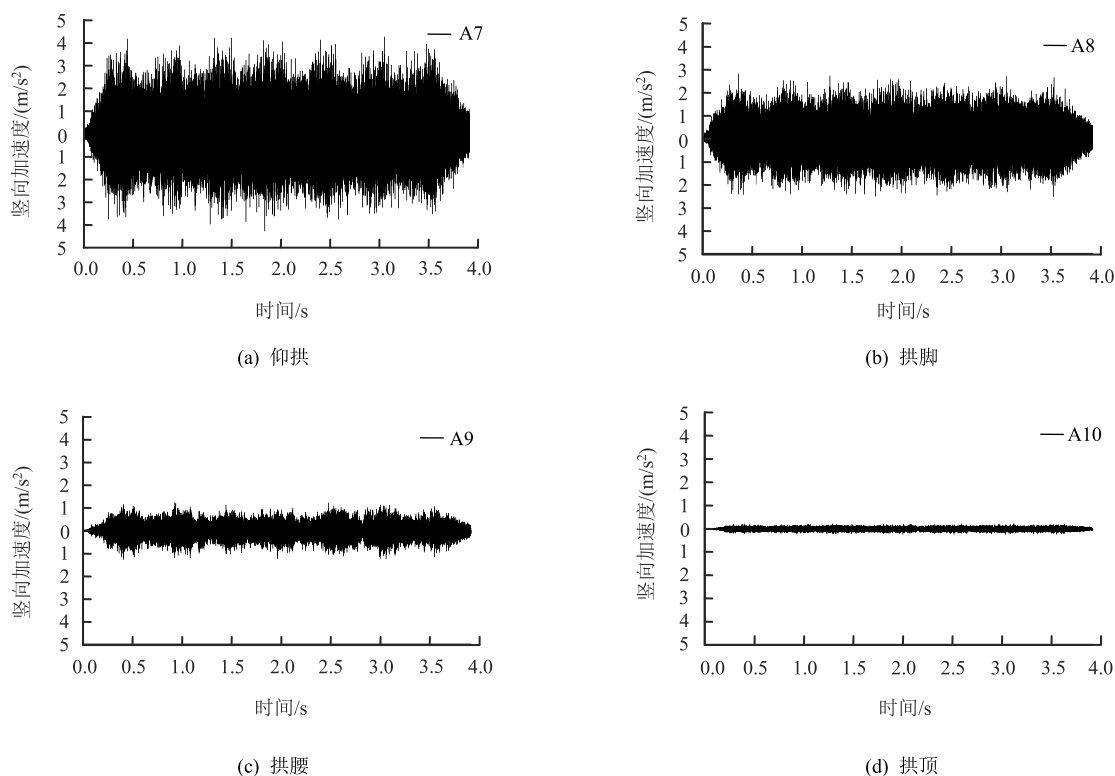


图 12 隧道结构内测点的加速度时程曲线

Fig.12 Curves of acceleration in time domain in tunnel

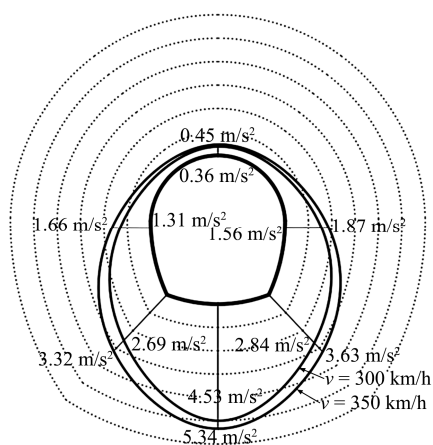


图 13 不同时速下隧道结构测点的峰值振动加速度

Fig.13 PPA of monitoring points in tunnel under different speeds

4 结 论

采用模型试验和数值计算相结合的方法，以频

率响应函数和峰值振动加速度作为评价指标，分析了单点激振荷载作用下马蹄形断面隧道在频域、时域下不同位置处的动力响应规律。在此基础上，进一步考虑列车振动荷载的移动效应，建立了三维仿真数值计算模型，研究了高速列车振动荷载作用下马蹄形断面隧道的动力响应特性，得到主要结论如下：

(1) 由于马蹄形断面隧道各监测点位置的曲率不同，在列车振动全频域扫频荷载作用下沿隧道环向的动力响应表现出非单一的衰减规律。马蹄形隧道结构的动力响应从仰拱到拱脚首先出现一定的衰减，但拱腰到拱顶的动力响应却呈现出增大趋势。

(2) 通过与圆形断面隧道结构动力响应对比发现，马蹄形断面会对结构的动力响应有明显的放大效应。在 40~200 Hz 频率范围内，马蹄形断面隧道结构的动力响应大于圆形隧道结构，平均差值在 3.8 dB 左右。表明隧道的断面形状对其结构的动力

响应有较大影响,在设计时应予以考虑。

(3) 在高速列车移动荷载作用下,各监测点处的加速度响应随着振动荷载的移动而表现出明显的周期效应。当列车经过某一断面时,该断面各处测点的动力响应出现明显的峰值。其中马蹄形隧道结构的仰拱处动力响应最大,因此在高速列车运营期间应对其重点监测。

(4) 由于存在多个激振点对某监测点动力响应的叠加效应,移动荷载作用下隧道结构的峰值振动加速度较单点振动荷载作用下均有不同程度的增加。各监测点增加的幅度为20%~110%,其中拱顶处增加的幅度最大。因此,在研究列车振动荷载诱发的动力响应时应考虑列车的移动效应。

参考文献

- [1] YI H, QI T, QIAN W, et al. Influence of long-term dynamic load induced by high-speed trains on the accumulative deformation of shallow buried tunnel linings[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019, 84: 166—176
- [2] 杨文波, 陈子全, 徐朝阳, 等. 盾构隧道与周围土体在列车振动荷载作用下的动力响应特性[J]. **岩土力学**, 2018, 39(2): 537—545.
YANG Wen-bo, CHEN Zi-quan, XU Zhao-yang, et al. Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil due to train induced vibration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 537—545.
- [3] 莫海鸿, 邓飞皇, 王军辉. 运营期地铁盾构隧道动力响应分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(2): 3508—3512.
MO Hai-hong, DENG Fei-huang, WANG Jun-hui. Analysis of dynamic responses of shield tunnel during metro operation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 3508—3512.
- [4] 袁宗浩, 蔡袁强, 袁万, 等. 地铁列车荷载作用下饱和土中圆形衬砌隧道和轨道系统动力响应分析[J]. **岩土力学**, 2017, 38(4): 1003—1014.
YUAN Zong-hao, CAI Yuan-qiang, YUAN Wan, et al. Dynamic response of circular railway tunnel and track system in saturated soil under moving train loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 1003—1014.
- [5] YANG W, CUI G, XU Z, et al. An experimental study of ground-borne vibration from shield tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 71: 244—252.
- [6] YANG W, LI L, SHANG Y, et al. An experimental study of the dynamic response of shield tunnels under long-term train loads[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 79: 67—75.
- [7] DENG F H, MO H H, ZENG Q J, et al. Analysis of the dynamic response of a shield tunnel in soft soil under a metro-train vibrating load[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2006, 16(4): 509—513.
- [8] HUANG Q, HUANG H W, YE B, et al. Dynamic response and long-term settlement of a metro tunnel in saturated clay due to moving train load[J]. **Soils and Foundations**, 2017, 57(6): 1059—1075.
- [9] 王祥秋, 杨林德, 周治国. 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构动力响应特性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(7): 1337—1342.
WANG Xiang-qiu, YANG Lin-de, ZHOU Zhi-guo. Dynamic response analysis of lining structure for tunnel under vibration loads of train[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1337—1342.
- [10] 晏启祥, 陈诚, 黄希, 等. 盾构隧道与横通道交叉结构的列车振动响应特性分析[J]. **土木工程学报**, 2015, 48(增刊1): 228—235.
YAN Qi-xiang, CHEN Cheng, HUANG Xi, et al. Analysis on vibration response characteristics of cross structure between shield tunnels and cross passage induced by the train[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(Suppl.1): 228—235.
- [11] 李亮, 张丙强, 杨小礼. 高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(23): 4259—4265.
LI Liang, ZHANG Bing-qiang, YANG Xiao-li. Analysis of dynamic response of large cross-section tunnel under vibrating load induced by high speed train[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4259—4265.
- [12] 陈行, 晏启祥, 刘阳, 等. 高速铁路和地铁近距离平行隧道动力响应分析[J]. **铁道建筑**, 2017(2): 48—52.
CHEN Hang, YAN Qi-xiang, LIU Yang, et al. Analysis on dynamic response of parallel tunnels with small distance apart of high speed railway and metro[J]. **Railway Engineering**, 2017(2): 48—52.

- [13] 田甜, 李泰澧, 黎国清, 等. 高铁隧道衬砌拱顶空洞对列车荷载响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊 2): 669—677.
- TIAN Tian, LI Tai-feng, LI Guo-qing, et al. Investigation of dynamic response model of high speed railway tunnel lining structure with vault cavity[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2016, 12(Suppl.2): 669—677.
- [14] 黄希, 晏启祥, 陈诚, 等. 列车振动荷载作用下交叉盾构隧道动力响应与损伤分析[J]. 铁道建筑, 2016(8): 60—64.
- HUANG Xi, YAN Qi-xiang, CHEN Cheng, et al. Dynamic response and damage analysis of spatial intersecting shield tunnels under vibration load of train[J]. **Railway Engineering**, 2016(8): 60—64.
- [15] BEHNAM M, MOHAMMAD V. Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 47(1): 114—122.
- [16] GUPTA S, HUSSEIN M F M, DEGRANDE G, et al. A comparison of two numerical models for the prediction of vibrations from underground railway traffic[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2007, 27(7): 608—624.
- [17] YANG W B, HUSSEIN M F M, MARSHALL A M. Centrifuge and numerical modeling of ground-borne vibration from surface sources[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2013, 44: 78—89.
- [18] 何川, 封坤, 杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2260—2269.
- HE Chuan, FENG Kun, YANG Xiong. Model test on segmental lining of Nanjing Yangtze River tunnel with super-large cross-section[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 2260—2269.
- [19] YANG W B, HUSSEIN M F M, MARSHALL A M. Centrifuge and numerical modeling of ground-borne vibration from an underground tunnel[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2013, 51: 23—34.
- [20] PAK R Y S, GUZINA B B. Dynamic characterization of vertically loaded foundations on granular soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 121(3): 274—286.
- [21] ZHAI W, WANG K, CAI C. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics[J]. **Vehicle System Dynamics**, 2009, 47(11): 1349—1376.
- [22] 韦凯, 翟婉明, 肖军华. 软土地铁盾构隧道垂向随机振动分析模型[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 117—123.
- WEI Kai, ZHAI Wan-ming, XIAO Jun-hua. Vertical random vibration model for subway shield tunnel in soft soil[J]. **Engineering Mechanics**, 2014, 31(6): 117—123.
- [23] WEI K, WANG P, YANG F, et al. The effect of the frequency-dependent stiffness of rail pad on the environment vibrations induced by subway train running in tunnel[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, 2016, 230(3): 171—178.
- [24] YAN Q X, XU Y J, ZHANG W L, et al. Numerical analysis of the cracking and failure behaviors of segmental lining structure of an underwater shield tunnel subjected to a derailed high-speed train impact[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 72: 41—54.
- [25] PENG X, YU P, ZHANG Y, et al. Applying modified discontinuous deformation analysis to assess the dynamic response of sites containing discontinuities[J]. **Engineering Geology**, 2018, 246(11): 349—360.
- [26] ZHANG Y, CHEN G, ZHENG L, et al. Effects of near-fault seismic loadings on run-out of large-scale landslide: a case study[J]. **Engineering Geology**, 2013, 166(8): 216—236.
- [27] International Organization for Standardization. BS ISO 14837—1: 2005 Mechanical vibration-ground-borne noise and vibration arising from rail systems[S]. Geneva: ISO Copyright Office, 2005.
- [28] ISHIHARA K. Soil behaviour in earthquake geotechnics[D]. Oxford: Oxford University, 1996.
- [29] 王涛. FLAC^{3D}数值模拟方法及工程应用——深入剖析 FLAC^{3D} 5.0[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 302.
- WANG Tao. Numerical simulation method and engineering application of FLAC^{3D}—in-depth analysis of FLAC^{3D} 5.0 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 302.
- [30] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC^{3D} (Version 5.0) User's Manual[M]. [S. l.]: Itasca Consulting Group, Inc., 2004.