

郑西高铁地面振动实测分析及隔振沟效果研究

宋玉兰, 杨立中

Ground vibration test of the Zhengzhou-Xi'an high-speed railway and analyses of the vibration isolation trench effect

SONG Yulan and YANG Lizhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水泥改良黄土路基动力稳定性评价参数试验研究

An experimental study of the evaluation parameters of dynamic stability of the cement-improved loess subgrade

张沛云, 马学宁 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 141-141

郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway

黄海宁, 巨能攀, 黄健, 张成强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 164-172

花岗岩循环爆破振动衰减规律与损伤演化机理试验

An experiment of attenuation law of vibration and evolution mechanism of damage of granite under cyclic blasting

钟靖涛, 王志亮, 田诺成 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 101-101

川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan-Tibet Railway

张云辉, 李晓, 徐正宣, 常兴旺, 黄, 多吉 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 46-53

基于等速线模型的一维黄土动荷载响应分析

Dynamic load response analysis of 1-D loess based on the equal speed line model

王文丽, 王兰民 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 113-119

不同勘探方法在丰水期和枯水期岩溶塌陷探测效果分析研究

Studies on effect analysis of different exploration methods for karst collapse detection in the periods of rainy and dry seasons

金爱芳, 刘磊, 殷秀兰 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 171-178



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205041

宋玉兰, 杨立中. 郑西高铁地面振动实测分析及隔振沟效果研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 132-143.

SONG Yulan, YANG Lizhong. Ground vibration test of the Zhengzhou-Xi'an high-speed railway and analyses of the vibration isolation trench effect[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 132-143.

郑西高铁地面振动实测分析及隔振沟效果研究

宋玉兰, 杨立中

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 高铁列车动载会引起环境振动问题。为研究高速列车运行在高架段和路堤段引起的环境振动差异, 文章对郑西线高速铁路展开现场测试, 对比分析高架段和路堤段地面振动特征及其衰减规律。测试结果表明, 路基段的振动响应大于高架段, 高架段近场区衰减作用高于路堤段近场区域。振动传播过程中存在多次反弹增大现象, 路堤段地面振动反弹增大位置滞后于高架段。高架段和路堤段的二次反弹增大率均明显大于一次反弹增大率。Z 振级随距离的衰减符合对数衰减规律, 拟合得到黄土地区 Z 振级衰减公式, 最大偏差均出现在反弹增大区。引入无限元-黏弹性耦合边界条件, 建立路堤段三维轨道-土体-隔振沟数值模型分析高速铁路隔振沟对减隔振的影响。研究发现空沟对中高频 (30 ~ 60 Hz) 振动波的隔振效果较低频 (1 ~ 20 Hz) 振动波明显, 其具有低通滤波作用。空沟比填充沟隔振效果好, 但是考虑到沟壁的稳定性的, 可在空沟中填入软质材料。研究成果可为高速铁路的设计及其环境振动的评价和控制提供参考。

关键词: 高速铁路; 地面振动; 现场实测; 隔振效果; 频谱分析

中图分类号: U238

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0132-12

Ground vibration test of the Zhengzhou-Xi'an high-speed railway and analyses of the vibration isolation trench effect

SONG Yulan, YANG Lizhong

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The dynamic load of high-speed railway train can cause environmental vibration problems. In order to study the environmental vibration effect caused on the viaduct bridge section and embankment section by high-speed train, the field test of the Zhengzhou - Xi'an high-speed railway is carried out, and the ground vibration characteristics and attenuation law of viaduct bridge section and embankment section are compared and analyzed. The test results show that the vibration response of the embankment section is greater than that of the viaduct bridge section, and the attenuation effect in the near-field area of the viaduct bridge section is higher than that in the near-field area of the embankment section. There are multiple rebound increases in the process of vibration propagation, and the ground vibration rebound of the embankment section lags behind that of the viaduct bridge section. The increase rate of secondary rebound in the viaduct bridge section and embankment section is significantly greater than that of primary rebound. The attenuation of Z vibration level with the distance conforms

收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-05-24

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272322)

第一作者: 宋玉兰 (1990-), 女, 博士研究生, 主要从事高速铁路运行引起的环境振动研究。E-mail: haha.syl@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 杨立中 (1947-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事工程地质环境评价理论与方法研究。E-mail: lzyang@swjtu.edu.cn

to the law of logarithmic attenuation. The Z vibration level attenuation formula in the loess area is obtained by fitting, and the maximum deviation appears in the rebound increasing area. The infinite element-viscoelastic coupling boundary is introduced to establish a 3D track-soil-vibration isolation trench numerical model of the embankment section. The influence of vibration isolation trench on vibration reduction and isolation of high-speed railway is analyzed. The results show that the vibration isolation effect of empty trench on the medium and high frequency (30 - 60 Hz) vibration wave is more obvious than that of low frequency (1 - 20 Hz), and it has the function of low-pass filtering. The vibration isolation effect of empty trench is better than that of filled trench, but soft materials can be filled in the trench considering the stability of trench walls. The research results can provide references for the design of high-speed railway and the evaluation and control of environmental vibration.

Keywords: high-speed railway; ground vibration; in-site measurement; vibration isolation effect; spectrum analysis

随着我国高速铁路网加密及列车运行速度的大幅提升, 高铁列车动载引起的环境振动问题越来越普遍^[1-2]。近年来, 生活水平的提高使得人们对环境舒适度要求越来越高, 研究人员也逐渐关注列车振动对环境的影响, 并把振动列为七大环境公害之一^[3-4]。高铁列车运行引起的振动会影响沿线居民的正常生活和精密仪器的使用。因此, 研究高铁列车运行引起的振动沿时间和空间的衰减规律及减振措施具有重要的意义。

高速列车引起的地面振动问题十分复杂, 轮轨接触关系、轨道不平顺、土体材料属性、车辆-轨道-基础-土体动力特性及相互作用关系等均会对其产生影响。因此, 众多学者将现场测试视为重要的研究手段, 为理论分析、预测提供有效的实测数据验证^[5-7]。高广运等^[8]对秦沈铁路车致地面振动进行了实测分析。李小珍等^[9-10]发现近场测点的加速度时程呈现出明显的列车周期性加载现象。马骥骥等^[11]分析了宝兰客专路堤段不同类型车致地面振动在黄土中的衰减规律。何鉴辞等^[12]研究了某高速铁路高架线路直线与曲线段环境振动的差异。翟婉明等^[13]研究了软土地基上车致地面振动问题。董海山等^[14]通过测试数据的回归分析, 得到了高铁桥梁段车致地面振动衰减经验公式。从以上的环境振动研究可以看出, 现有的研究大多单独针对高铁路堤段和高架段进行振动理论及现场实测的分析, 缺少二者的对比分析。现有文献中只有毛昆明等^[15]对比了沪宁城际 CRH 动车组运行引起的高架段和路堤段的地面振动竖向速度, 得到了一些有重要参考价值的结论。因此有必要从环境振动的角度比较高架桥段与路堤段车致地面振动的差异性。

随着高铁振动问题的日益突出, 减振措施也相应

出现。最简单有效的方法就是在线路附近开挖一条平行于线路的沟槽以切断振动的传播路径或使振动发生散射和衍射, 从而降低沟后建(构)筑物的振动响应^[16]。由于空沟良好的隔振效果, 现有对隔振沟的研究主要集中在对振动衰减有影响的空沟位置、几何尺寸等方面, 对填充沟的研究较少。巴振宁等^[17]研究了层状饱和地基中空沟的隔振性能; 张立群等^[18]进行了空沟减隔振措施的室内模型试验; 曹志刚等^[19]运用饱和半空间模型研究隔振效果。黄土作为一种具有大孔隙和湿陷性的特殊土壤, 在世界范围内广泛分布^[20-21]。黄土的特殊性质使其对高速铁路振动传播的影响不同于其他土层。目前, 对黄土地区高速铁路隔振沟的研究还相对较少。

本文通过对郑西高铁高架段和路堤段的现场测试, 对比分析了高架段和路堤段地面振动特征及其传播的衰减规律。引入无限元-黏弹性边界条件, 建立考虑隔振沟的三维数值模型, 分析了高铁路堤段空沟及填充沟的减隔振效果差异, 以为高速铁路两侧环境振动的控制提供参考。

1 环境振动测试

郑州—西安高速铁路客运专线(简称郑西高铁)是我国“八纵八横”高速铁路网的重要组成部分, 沿线 80% 区段为黄土覆盖。测试场地选取在郑西高铁 K1042+200 附近路堤段和 K988+848 附近高架段。轨道结构均为 CRTS II 型双块式无砟轨道。轨枕为钢筋桁架连接的双块式轨枕。

测试场区自上而下地层岩性分别为: 第四系上更新统自重湿陷性黄土约 19 m, 上更新统非湿陷性黄土约 28 m, 中更新统砂层。地层岩性稳定。测试场区地下水为第四系孔隙潜水, 埋深约 30 m。

测区场地开阔,地势平缓,周围为大片农田,无建筑物,不受其他交通振动的影响,便于布设测点,测试条件较好,便于单独分析列车引起的地面振动效应,如图 1 所示。



图 1 测试场区
Fig. 1 Test site area

测试仪器采用中地装(重庆)地质仪器有限公司生产的三分量 EPS 便携式数字地震仪(图 2)。



图 2 EPS 便携式数字地震仪
Fig. 2 EPS portable digital seismograph

本次测试测点选取在区间直线段,测试区段前后 200 m 范围内钢轨需无明显波形磨耗,轨道无病害。在垂直线路方向上,每隔 15 m 布置一个测点,测线总长 180 m,仪器编号依次为 1~12,布置过程中保证传感器底部与地面紧密接触。测点布置见图 3。

郑西高铁运营的动车组为“和谐号”CRH2C 型高速动车组。测试列车的特征长度见图 4。典型车速下列车几何特征频率见表 1。

2 高架段与路堤段振动特性实测对比

现场通过记录列车通过测段的时间计算列车运行速度。试验较完整地采集到 150, 200, 240, 250, 300 km/h 等运行速度下高架段与路堤段不同测点的竖向振动加速度。数据处理前均进行了滤波,仅保留 85 Hz 以下的振动。本文主要以列车运行速度 240 km/h 为例进行分析。

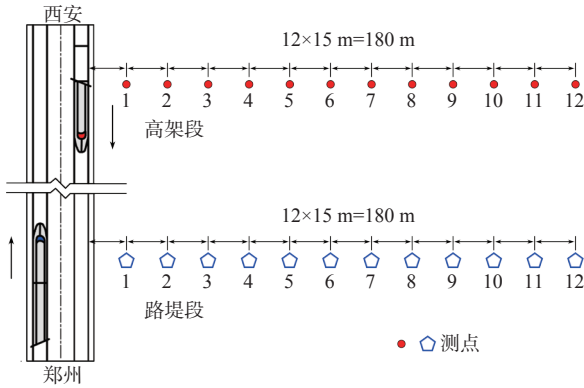


图 3 测点布置图
Fig. 3 Layout of the measuring points

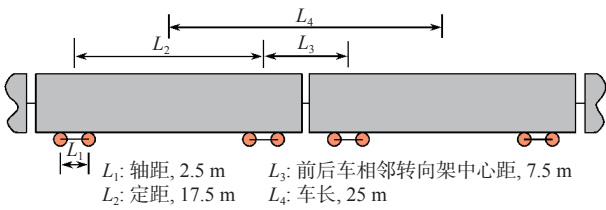


图 4 测试列车的特征长度
Fig. 4 Characteristic length of the train

表 1 典型车速下列车几何特征频率
Table 1 Geometrical characteristic frequencies of the train at typical speeds

列车运行速度 (km·h ⁻¹)	特征频率 /Hz			
	固定轴距 激励频率	车辆定距 激励频率	前后车相邻转向架 中心距激励频率	车长激励 频率
200	22.22	3.17	7.41	2.22
240	26.67	3.81	8.89	2.67
250	27.78	3.97	9.26	2.78
300	33.33	4.76	11.11	3.33
350	38.89	5.56	12.96	3.89

2.1 位移时程和衰减特征分析

地面竖向位移时程关系和峰值位移衰减情况见图 5 和图 6。从图 5 可以看出,越靠近轨道,地面振动越明显,且高架段和路堤段均未出现明显的轮对产生的周期性峰值,可能的原因是黄土的结构性和非均质性,在不同介质传播过程中振动产生了叠加效应。从图 6 可以看出,随着距离的增加,位移峰值逐渐衰减。

高架段和路堤段的振动衰减特性明显不同。整体上看,路基段的振动响应大于高架段。从紧临线路的测点 1 至距线路 30 m 的测点 2,高架段振动位移峰值由 0.26×10^{-4} m 迅速衰减至 0.16×10^{-4} m,衰减率达到 38.5%;路堤段振动位移峰值由 0.37×10^{-4} m 迅速衰减至 0.31×10^{-4} m,衰减率达到 16.2%,即高架段近场区域衰减作用高于路堤段近场区域。

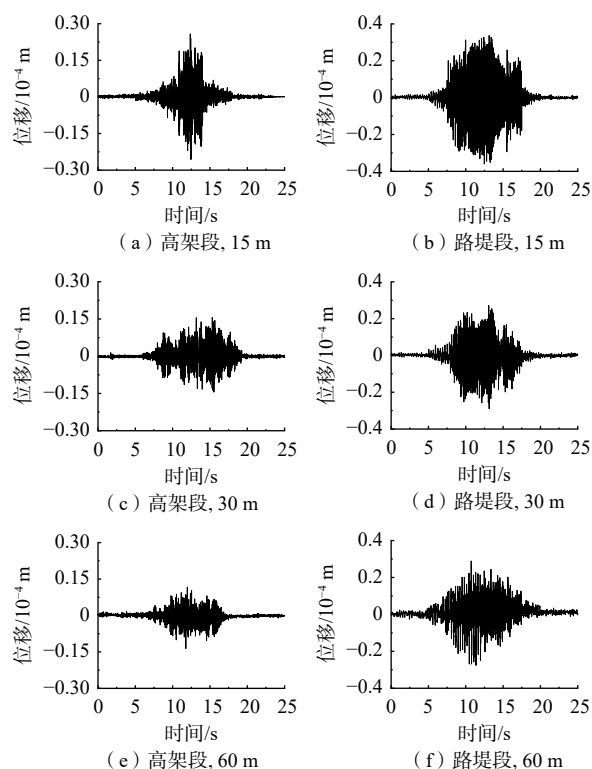


图5 位移时程曲线

Fig. 5 Displacement-time curves

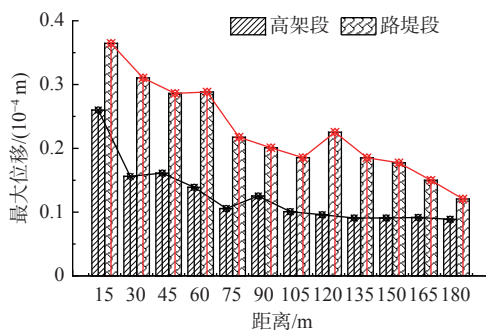


图6 位移峰值衰减曲线

Fig. 6 Displacement peak attenuation curves

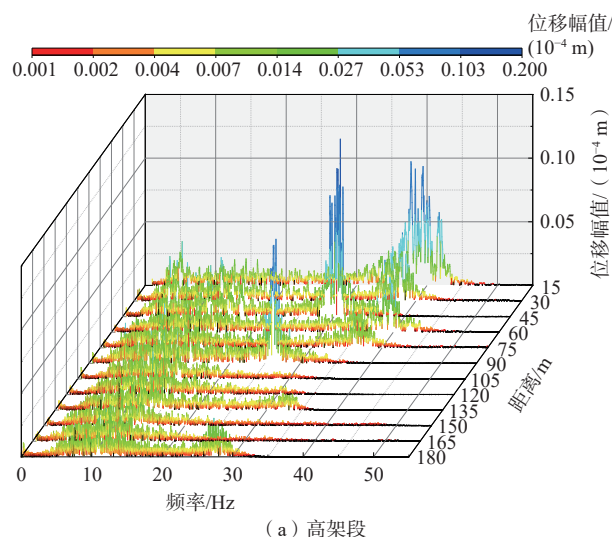
对于高架段,距线路 30 m 范围内为振动快速衰减区,当距离大于 30 m 位移衰减的速度明显降低,但是在 45, 90 m 处出现反弹增大现象;对于路堤段,距线路 75 m 范围内为振动快速衰减区,并且在 60, 120 m 处出现反弹增大现象。随着距离的增加,两者的位移峰值逐渐趋于一致。由于测线较长,本次测试发现了 2 次反弹增大现象。对于反弹增大现象,李小珍等^[10]研究认为是由于振动波在基岩与地表土层间多次反射所致,与多种原因有关。关于反弹增大原因尚待进一步研究。

路堤段地面振动反弹增大位置滞后于高架段。高架段在 45 m 处出现第一次反弹增大,相较于前一测

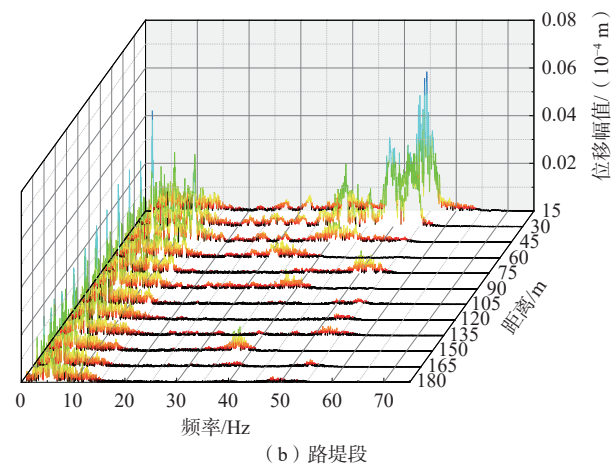
点的增大率(本文定义为一次反弹增大率)为 3.15%;在 90 m 处出现第二次反弹增大,相较于前一测点的增大率(本文定义为二次反弹增大率)为 18.70%。路堤段在 60 m 处出现第一次反弹增大,一次反弹增大率为 0.75%;在 120 m 处出现第二次反弹增大,二次反弹增大率为 21.48%。通过分析发现,高架段和路堤段的二次反弹增大率均明显大于一次反弹增大率。

2.2 地面振动频谱分析

通过傅立叶变换得到的地面各测点的频谱如图 7 所示。从频谱结果可以看出,地面振动波的频率主要分布在 60 Hz 以下。随着距离的增大,高频迅速衰减。远距离处频谱主要由低频控制,主要分布在 10 Hz 左右。



(a) 高架段



(b) 路堤段

图7 位移频谱曲线

Fig. 7 Displacement spectrum curves

列车运行时,列车特征频率会对轨道结构产生脉冲激励,使得频谱曲线上在列车特征频率附近出现峰值。当距线路较近时,固定轴距激励频率(f_1)、车辆定

距激励频率(f_2)、前后车相邻转向架中心距激励频率(f_3)和车长激励频率(f_4)均对地面振动产生重要的影响。随着距离的增加,车辆定距激励频率(f_2)和车长激励频率(f_4)对频率幅值的影响减弱,这主要受到土体固有频率的截止作用。当距离较远时,固定轴距激励频率(f_1)、前后车相邻转向架中心距激励频率(f_3)及其倍频对位移幅值起主要控制作用。

高架段和路堤段的频谱曲线呈现较大的差异性。相较于路堤段,高架段的地面振动频率分布范围较宽,频率分布也较连续。高架段的地面振动频率主要分布在 5~45 Hz,路堤段的地面振动频率主要分布在 0~20 Hz 和距离线路较近时的 40~60 Hz。高架段的高频部分主要分布在距线路 75 m 范围内,路堤段的高频部分主要分布在距线路 45 m 范围内,且高架段的峰值频率低于路堤段。

2.3 环境振动评价

20 世纪 80 年代颁布执行《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)^[22]。该标准中环境振动标准值见表 2。

表 2 城市各类区域 Z 振级标准值^[22]

Table 2 Standard values of Z vibration level in various urban areas^[22]

适用地带范围	昼间/dB	夜间/dB
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

为了与标准进行比较,需要将测试数据转化为加速度振级。加速度振级具体计算公式如下:

(1)采用不计权的方式,计算得到各测点的垂向振动加速度级(VAL):

$$VAL = 20 \lg(a_{\text{rms}}/a_0) \quad (1)$$

式中: a_{rms} ——振动加速度有效值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

a_0 ——基准加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),取 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

(2)按照 ISO 2631/1—1997 国际标准规定的全身铅垂向振动不同频率计权因子计算得到地面振动 Z 计权振动加速度级(VLz):

$$VLz = 20 \lg(a'_{\text{rms}}/a_0) \quad (2)$$

$$a'_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (3)$$

式中: a'_{rms} ——频率计权振动加速度的均方根值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

T ——振动测量的平均时间/s;

a_w ——经过频率计权的加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

计算结果表明各测点 Z 振级均小于 80 dB(图 8),满足规范中对于铁路干线两侧环境振动标准的规定。高架段 30 m 外满足工业集中区、混合区、商业中心区、居民、文教区的要求,60 m 外满足特殊住宅区的要求。路基段 60 m 外满足工业集中区、混合区、商业中心区、居民、文教区的要求,90 m 外满足特殊住宅区的要求。同时可以看出,高架段和桥梁段 Z 振级与位移峰值随距离衰减的规律基本一致。列车运行引起的 Z 振级沿测线方向整体呈现衰减趋势。路堤段环境振动高于高架段 1~7 dB。

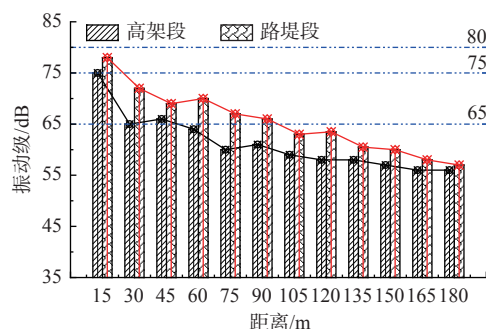


图 8 各测点 Z 计权振级衰减曲线

Fig. 8 Z-weighted vertical ground vibration levels attenuation curve of each measuring point.

目前我国对铁路环境振动的评价均参考 20 世纪 80 年代的标准,该标准基于我国当时的铁路状况制订,未将高速铁路考虑在内。现阶段我国还没有一个针对高速铁路的环境振动标准。截至 2021 年底,我国高铁运营里程突破 $4 \times 10^4 \text{ km}$ 。同时,人们对环境舒适度要求越来越高。显然,旧规范已不再适用于当前中国高速铁路的发展。因此,提出一个当前条件下高速铁路环境振动标准是十分必要的。

2.4 回归分析

对郑西高铁高架段和路堤段的现场实测值进行统计,采用回归方法拟合出地面振动(V_L)的级衰减公式,可以得到高架段和路堤段 Z 振级随距轨道中心线距离(r)的关系。国内外较多学者对铁路列车引起的环境振动进行了大量的研究,建立了很多地面振动预测模型。

(1)日本川崎公害研究所

$$V_L = 93.92 - 25 \lg r + 0.18v \quad (4)$$

(2)日本京都公害研究所

$$V_L = 85 - 9 \lg r \quad (5)$$

(3) 同济大学

$$V_L = 70 - (4.1/\lg 2.0) \times \lg(r/10) \quad (6)$$

可以看出振动级和距离的对数之间基本呈线性关系。

根据现有研究结果, 本文建立模型:

$$VLz = a + b \lg r \quad (7)$$

利用最小二乘法进行估计, 拟合的方程为:

$$\begin{cases} VLz_{\text{高架}} = 100.51 - 18.52 \lg r, R^2 = 0.952 \\ VLz_{\text{路堤}} = 92.24 - 16.32 \lg r, R^2 = 0.944 \end{cases} \quad (8)$$

式中: R ——相关系数。

将式(8)与式(4)~(6)预测结果进行比较, 见图9。 Z 振级随距离的衰减符合对数衰减规律, 除反弹增大区外, 拟合效果较好。拟合公式与实测值相比, 高架段最大偏差 8.15 dB, 路基段最大偏差 2.42 dB, 最大偏差均出现在反弹增大区, 可见这种预测方式本身具有的缺陷, 即无法表征振动传播过程中的反弹增大行为。式(4)~(6)均是针对高架铁路提出的环境振动公式, 相较于日本京都公害研究所提出的式(5), 式(4)和式(6)与本文高架段的测试结果较接近。

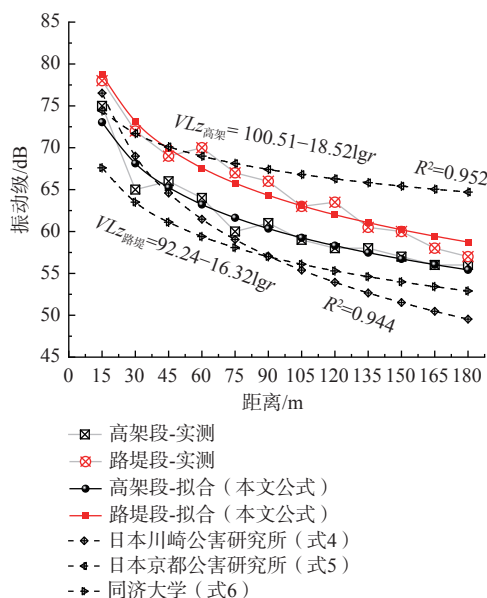


图9 地面振动预测结果与实测结果的对比

Fig. 9 Comparison of the ground vibration prediction and measured results

3 无限元-黏弹性耦合边界数值模型

3.1 模型基本设置

为研究空沟及沟内填充材料对减振效果的影响, 采用有限元软件 ABAQUS 进行模拟分析。数值模

拟时参考郑西高铁工程的实际情况建模, 模型沿轨道方向长度取 255 m, 与轨道中心线垂直的水平方向长度取 250 m, 土体厚度取 50 m。空沟位置距路堤坡脚 20 m, 沿线路方向长度为 20 m, 宽度为 1 m, 深度为 6 m。

无砟轨道结构形式复杂(图10), 考虑到本文研究重点是土体振动传播问题, 在建模时进行了一定程度的简化处理。钢轨横截面按照截面惯性矩等效的原则简化为矩形横截面(0.1 m×0.2 m), 轨距取 1.435 m。不考虑轨道板间纵向连接, 对其在纵向上进行整体建模, 简化为矩形横截面(2.4 m×0.2 m)。砂浆填充层的宽度设置与轨道板等宽, 厚度取 0.05 m。混凝土支撑层横截面尺寸为 3.0 m×0.3 m。不对扣件进行实体建模, 用弹簧模拟钢轨和轨道板之间的相互作用, 扣件纵向间距取 0.65 m。

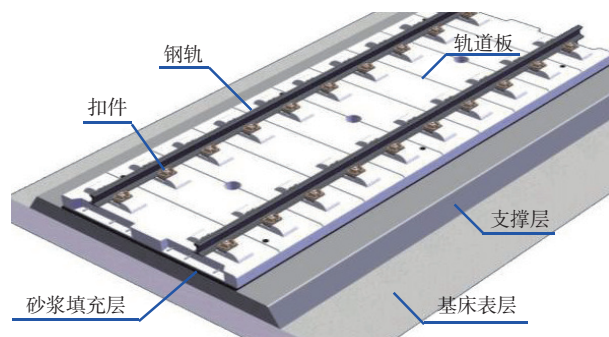


图10 无砟轨道结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the ballastless track structure

路堤断面尺寸参考《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)[23] 中无砟轨道单线路堤的标准横断面尺寸(图11)。基床表层厚 0.4 m, 基床底层厚 2.3 m, 基床表层顶部宽度 8.6 m, 基床以下路堤厚 3.6 m, 路堤边坡取 1:1.5。

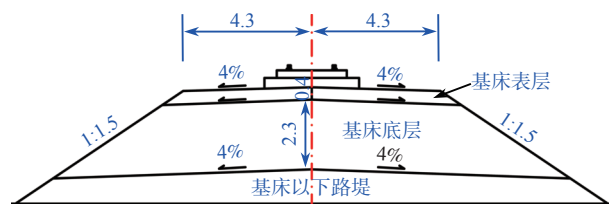


图11 无砟轨道单线路堤标准横断面图(单位:m)

Fig. 11 Schematic diagram of the standard cross-section of single-line embankment for ballastless track (unit: m)

边界条件为土层底部固定约束, 四面侧边界均为接地阻尼弹簧(黏弹性边界), 地表面为自由面。为提高计算效率, 轨道附近网格划分的较细, 逐渐向外过

度到较粗的网格。最终建立的轨道-土体数值模型见图 12。

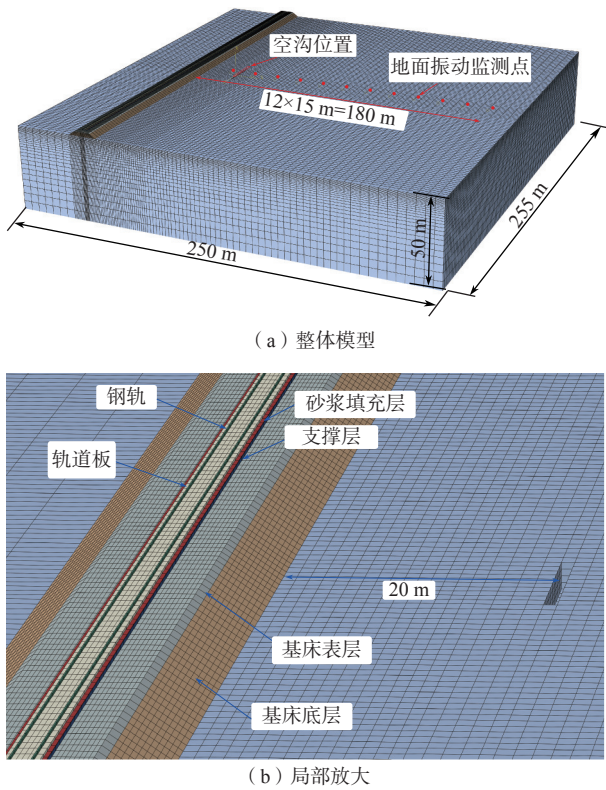


图 12 轨道-土体数值模型图
Fig. 12 Diagram showing the track structure-soil numerical model

3.2 材料参数及本构模型

钢轨、轨道板、支撑层均采用线弹性本构模型。路堤及周围土体采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型。模型基本材料参数见表 3。

表 3 基本材料参数
Table 3 Basic material parameters

类型	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
钢轨	7 800	210 000	0.3	/	/
轨道板	2 500	34 500	0.15	/	/
砂浆填充层	1 800	10.0	0.35	/	/
支撑层	2 400	32 500	0.17	/	/
基床表层	2 000	180	0.25	70	27
基床底层	1 950	110	0.25	50	23

黄土的剪切模量取 38.76 MPa, 等效波速取 250 m/s。考虑到振动波在土体中传播时会不断发生衰减, 本文采用瑞利阻尼定义土体阻尼, 阻尼系数 α 取 0.616, β 取 0.000 312^[24]。沟内填充材料选用常见工程材料, 分别取混凝土、橡胶、石膏、泡沫塑料等材料。填充材料参数见表 4。

表 4 填充材料参数

Table 4 Filling material parameters

类型	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	阻尼比
混凝土	2 500	28 000	0.20	0.05
橡胶	1 150	6.8	0.47	0.32
石膏	900	800	0.41	0.20
泡沫塑料	500	400	0.38	0.25

3.3 相互作用设置

钢轨与轨道板的接触力学行为, 法向为允许分离、不可穿透的硬接触形式。二者之间的扣件采用 3 个方向的 Axial 连接器模拟, 见图 13。纵向方向上每组扣件的纵向阻力取 30 kN/组, 临界位移为 2 mm。垂直方向上扣件刚度取 50 kN/mm, 阻尼系数取 60 (kN·s)/m, 扣件垂向力取 35 kN, 力学行为上为只能受拉不能受压的非线性行为。

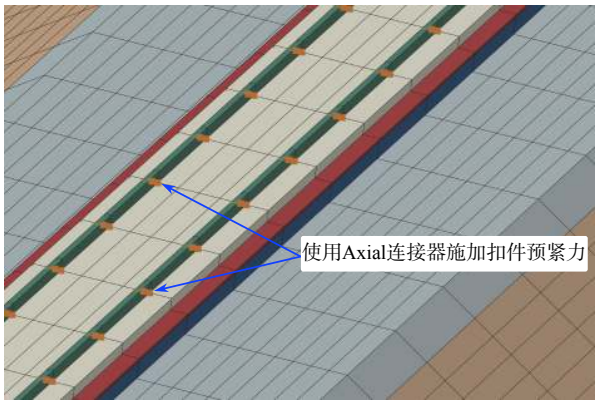


图 13 扣件预紧力
Fig. 13 Application of fastener preload

考虑到组成轨道结构的各层间以及轨道结构和地基土之间的滑动相对很小, 所以各部分之间采用绑定连接。

3.4 无限元-黏弹性边界条件

在涉及到无穷大介质的动力分析中, 若简单地采用人工截断边界, 则会导致应力波在边界界面上发生反射, 使得本该传向无穷远的能量反射回分析区域, 直接影响到分析结果的准确性。ABAQUS 无限元理论是通过在边界上引入阻尼力吸收能量。通过手动编辑 inp 文件修改关键字将模型底部的 C3D8R 单元改为 CIN3D8 单元, 即外层单元变换成无限元。

黏弹性边界由弹簧和阻尼器组成^[25]。

切向边界:

$$k_t = \alpha_t \frac{G}{R}, \quad c_t = \rho c_s \quad (9)$$

法向边界:

$$k_n = \alpha_n \frac{G}{R}, \quad c_n = \rho c_p \quad (10)$$

式中: k_t ——弹簧法向刚度/(Pa·m⁻¹);
 k_n ——弹簧切向刚度/(Pa·m⁻¹);
 R ——波源至人工边界点的距离/m;
 G ——剪切模量/Pa;
 α_t ——切向黏弹性人工边界参数;
 α_n ——法向黏弹性人工边界参数;
 ρ ——介质质量密度/(kg·m⁻³);
 c_s ——横波波速/(m·s⁻¹);
 c_p ——纵波波速/(m·s⁻¹)。

刘晶波等^[26]建议对于三维问题, α_t 的取值范围为 [0.5, 1.0], 推荐取值为 0.667; α_n 的取值范围为 [1.0, 2.0], 推荐取值为 1.333。本文按推荐的值进行取值计算, 模型中的边界设置见图 14。

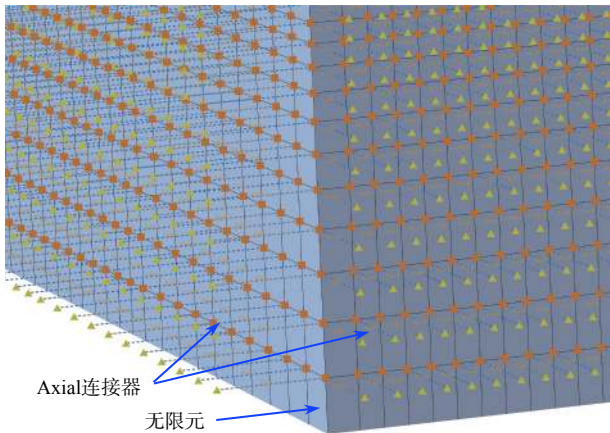


图 14 黏弹性和无限元边界
Fig. 14 Viscoelasticity and infinite element boundaries

3.5 激振力施加

竖向轮轨力主要是由各种不平顺等原因造成的, 其主要出现在低频(0.5 ~ 10.0 Hz)、中频(30.0 ~ 60.0 Hz)和 高频(100.0 ~ 400.0 Hz)3 个范围内。研究表明, 竖向轮轨力可以用能够反映其周期特点的激振力表达, 文献 [27] 和 [28] 均取得了较好的模拟效果。其表达式为:

$$P(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega_1 t) + P_2 \sin(\omega_2 t) + P_3 \sin(\omega_3 t) \quad (11)$$

$$P_i = M_0 a_i \omega_i^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

$$\omega_i = \frac{2\pi v}{L_i} \quad (13)$$

式中: P_0 ——车轮静载/kN;
 P_1 、 P_2 、 P_3 ——对应于表 5 中 I、II、III 控制条件下的某一典型振动荷载/kN;

M_0 ——簧下质量/kg;
 a_i ——对应于表 5 中 I、II、III 控制条件下的某一典型矢高/mm;
 L_i ——对应于表 5 中 I、II、III 控制条件下的某一典型波长/m;
 v ——列车运行速度/(m·s⁻¹)。
英国轨道几何不平顺管理值见表 5。

表 5 轨道几何不平顺管理值^[29]
Table 5 Management values under railway geometric-regular condition^[29]

控制条件	波长/m	正矢/mm
行车平稳性(I)	50	16
	20	9
	10	5
作用到线路上的动力附加荷载(II)	5	2.5
	2	0.6
	1	0.3
波形磨耗(III)	0.5	0.1
	0.05	0.005

对于高速铁路, 本文参数取值分别为: $P_0=80$ kN, $M_0=750$ kg, $L_1=10$ m, $a_1=3.5$ mm, $L_2=2$ m, $a_2=0.4$ mm, $L_3=0.5$ m, $a_3=0.06$ mm。列车时速为 240 km 时竖向轮轨激振力时程曲线见图 15。采用 VDLOAD 子程序将该激振力以指定的移动速度施加于钢轨上。

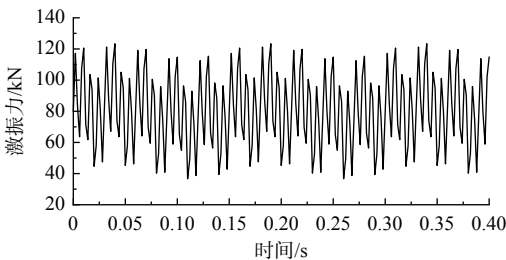


图 15 时速 240 km 时竖向轮轨激振力时程曲线
Fig. 15 Time-history curve of wheel-rail excitation force when $v = 240$ km/h

4 填充沟隔振效果分析

隔振沟前后#1 和#2 测点处不同填充材料下的频谱分布见图 16。隔振沟可有效的阻隔土体中振动波传播, 减弱土体的振动。隔振沟对 中高频(30 ~ 80 Hz) 振动波的隔振效果较低频(1 ~ 20 Hz) 振动波明显, 可见其低通滤波作用。其原因在于低频波长和隔振沟尺寸处于同量级, 当低频振动波到达隔振沟时, 不发生反射而只进行散射和衍射, 使得低频波绕过隔振沟, 起不到隔振效果。中高频波到达隔振沟时, 会遵

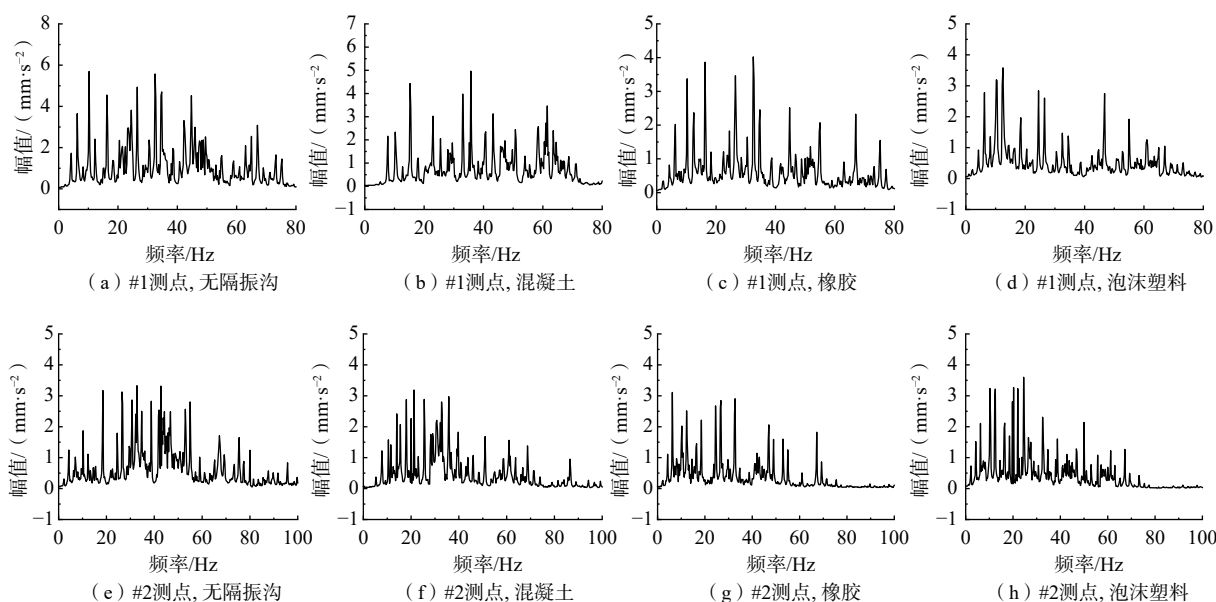


图 16 #1 和 #2 测点处不同填充材料下的频谱曲线

Fig. 16 Spectrum curves under different filling materials at measuring points #1 and #2

循波的反射原理,使其改变传播方向,起到了隔振的效果。不设隔振沟时,地面振动的中高频部分本身也会随着距离增大向线路两侧迅速衰减。因此实际工程中隔振沟不可设置在距线路较远的位置,否则起不到隔振的效果。建议在满足规范要求的条件下,尽可能的靠近线路,且最远不超过 30 m。

不同填充材料下 Z 振级衰减状况见图 17。线路设有隔振沟时,隔振沟后土体振动都呈现一定程度的衰减。无填充物的空隔振沟隔振效果最好,但是空沟受到长期列车振动影响后极易发生局部失稳而塌陷。因此在空隔振沟施工过程中要重点对沟壁进行处理。对于填充沟,数值模拟计算结果显示,各隔振材料的隔振效果由优至劣分别为:泡沫塑料>石膏>橡

胶>混凝土。因此对于实际工程,可以考虑在空沟中填入泡沫塑料等材料,在保证隔振效果的同时又可以增强沟壁的稳定性。

5 结论

本文对郑西线高架段和路堤段展开现场测试,对比分析了高架段和路堤段地面振动特征及其衰减规律。建立了路堤段三维轨道-土体-隔振沟数值模型,分析了隔振沟的减隔振作用。主要得出以下结论:

(1) 路基段的振动响应大于高架段,高架段近场区衰减作用高于路堤段近场区域。发现振动传播过程中存在 2 次反弹增大现象,路堤段地面振动反弹增大位置滞后于高架段。高架段和路堤段的二次反弹增大率均明显大于一次反弹增大率。

(2) Z 振级随距离的衰减符合对数衰减规律。拟合得到黄土地区高架段和路堤段的 Z 振级衰减公式,高架段最大偏差 8.15 dB,路基段最大偏差 2.42 dB,最大偏差均出现在反弹增大区。

(3) 使用无限元-黏弹性耦合边界可以得到较好的模拟结果。隔振沟对中高频(30~80 Hz)振动波的隔振效果较低频(1~20 Hz)振动波明显,其具有低通滤波作用。隔振沟不可设置在距线路较远的位置,建议尽可能的靠近线路,且最远不超过 30 m。

(4) 空沟比填充沟隔振效果好。考虑到沟壁的稳定性,可在空沟中填入软质材料以增强沟壁的稳定性,同时起到隔振效果。

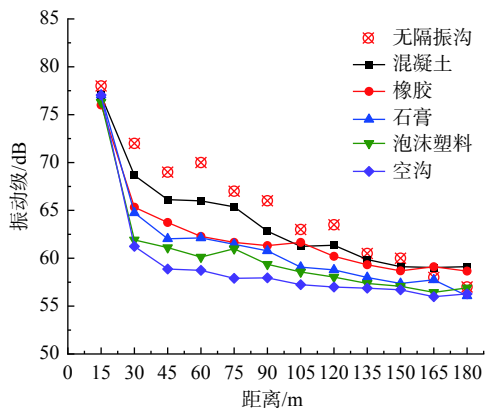


图 17 不同填充材料下 Z 振级衰减曲线

Fig. 17 Attenuation of Z vibration level with distance under different filling materials.

同时,目前我国对高速铁路环境振动的评价均参考 20 世纪 80 年代的标准,该标准基于我国当时的铁路状况制订,没有预先考虑高速铁路的情况。因此,亟待提出一个适用于当前条件的高速铁路环境振动标准。

参考文献 (References):

- [1] 高广运,何俊锋,李宁,等.饱和地基上列车运行引起的地面振动隔振分析[J].岩土力学,2011,32(7): 2191 – 2198. [GAO Guangyun, HE Junfeng, LI Ning, et al. Analysis of isolating ground vibration induced by trains running on saturated ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2191 – 2198. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 高广运,赵宏,张博,等.饱和分层地基上列车运行引起的地面振动分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(12): 1805 – 1811. [GAO Guangyun, ZHAO Hong, ZHANG Bo, et al. Analysis of ground vibration induced by trains on saturated layered ground[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(12): 1805 – 1811. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姚锦宝,夏禾,胡敬梁.空沟对列车运行产生的环境振动隔振效果研究[J].中国铁道科学,2018,39(2): 44 – 51. [YAO Jinbao, XIA He, HU Jingliang. Study on vibration isolation effect of open trench on environmental vibration induced by train operation[J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 44 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘晶磊,张雷刚,宋绪国,等.高速铁路空沟减隔振措施数值分析与模型试验[J].铁道标准设计,2017,61(3): 42 – 46. [LIU Jinglei, ZHANG Leigang, SONG Xuguo, et al. Numerical analysis and model test of vibration reduction by open trench on high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(3): 42 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 孟祥连,周福军.西宝高铁黄土地区路基振动效应空间分析研究[J].铁道工程学报,2017,34(8): 28 – 33. [MENG Xianglian, ZHOU Fujun. Spatial analysis and study of roadbed vibration effect on loess area for Xi'an-Baoji high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 28 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李小珍,陈桂媛,朱艳,等.高速铁路轨道-桥梁-土体系统的振动传递特性试验研究[J].振动与冲击,2019,38(17): 58 – 64. [LI Xiaozhen, CHEN Guiyuan, ZHU Yan, et al. Tests for vibration transmission characteristics of a high-speed railway track-bridge-soil system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 58 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 路德春,马一丁,王国盛.近接隧道列车运行时地表振动响应数值模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5): 1452 – 1462. [LU Dechun, MA Yiding, WANG Guosheng. Numerical Study on ground surface vibration response under train load in multi adjacent tunnels[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1452 – 1462. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 高广运,李志毅,冯世进,等.秦-沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J].岩土力学,2007,28(9): 1817 – 1822. [GAO Guangyun, LI Zhiyi, FENG Shijin, et al. Experimental results and numerical predictions of ground vibration induced by high-speed train running on Qin-Shen Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1817 – 1822. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李小珍,张志俊,冉汶民,等.桥上列车高速运行引起的地面振动试验研究[J].西南交通大学学报,2016,51(5): 815 – 823. [LI Xiaozhen, ZHANG Zhijun, RAN Wenmin, et al. Field test of ground vibration induced by high-speed train on elevated bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 815 – 823. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李小珍,刘全民,张迅,等.高架轨道交通附近自由地表振动试验研究[J].振动与冲击,2014,33(16): 56 – 61. [LI Xiaozhen, LIU Quanmin, ZHANG Xun, et al. Ground vibration induced by inter-city express train[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16): 56 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 马骥骅,李斌,王东,等.宝兰客专路堤段地面振动特性试验研究与数值分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(2): 294 – 301. [MA Kuikui, LI Bin, WANG Dong, et al. Experimental study and numerical analysis on ground vibration characteristics of subgrades section of Baoji-Lanzhou high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 294 – 301. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 何鉴辞,童湘雄,唐剑,等.某高速铁路高架线路直线与曲线段环境振动实测对比分析[J].铁道标准设计,2018,62(6): 40 – 44. [HE Jianci, TONG Xiangxiong, TANG Jian, et al. Contrastive analysis of environment

- vibration of elevated straight and curved lines of high-speed railway[J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(6): 40 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 翟婉明, 韩海燕. 高速列车运行于软土地基线路引起的地面振动研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42(10): 1148 – 1156. [ZHAI Wanming, HAN Haiyan. Research on ground vibration caused by high-speed train running on soft soil foundation line[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2012, 42(10): 1148 – 1156. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 董海山, 周青, 贺玉龙, 等. 高速铁路桥梁路段地面环境振动衰减特性研究[J]. *四川环境*, 2013, 32(6): 7 – 10. [DONG Haishan, ZHOU Qing, HE Yulong, et al. Study of ground environmental vibration attenuation characteristics at high-speed train bridge section[J]. *Sichuan Environment*, 2013, 32(6): 7 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 毛昆明, 陈国兴, 张杨, 等. 高架桥段与路堤段CRH动车组运行引起的地面振动对比测试[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(5): 19 – 23. [MAO Kunming, CHEN Guoxing, ZHANG Yang, et al. Comparative testing on ground surface vibration caused by CRH train running on viaduct and embankment[J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 33(5): 19 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 崔涛, 郝志明, 贾彬, 等. 移动荷载作用下隔振沟隔振性能数值模拟分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2015, 41(2): 183 – 187. [CUI Tao, HAO Zhiming, JIA Bin, et al. Numerical simulation analysis of the vibration isolation trench performance under moving load[J]. *Sichuan Building Science*, 2015, 41(2): 183 – 187. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 巴振宁, 梁建文, 王靖雅. 空沟对层状饱和地基中列车移动荷载的隔振性能研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 848 – 858. [BA Zhenning, LIANG Jianwen, WANG Jingya. Isolation effect of an open trench against train-induced vibrations in a saturated layered ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 848 – 858. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张立群, 侯恩品, 刘晶磊, 等. 空沟减隔振对路基本体影响效果的试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(4): 752 – 761. [ZHANG Liqun, HOU Enpin, LIU Jinglei, et al. Research on the test of the effect of vibration isolation measures of empty groove on the subgrade body[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(4): 752 – 761. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 曹志刚, 蔡袁强, 徐长节. 空沟对列车运行引起的地基振动隔振效果研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2373 – 2382. [CAO Zhigang, CAI Yuanqiang, XU Changjie. Screening efficiency of open trenches to train-induced ground vibration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2373 – 2382. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 康海伟, 李萍, 侯晓坤, 等. 原状黄土土水特征滞后性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 76 – 83. [KANG Haiwei, LI Ping, HOU Xiaokun, et al. A study of hysteresis of soil and water characteristics of intact loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 76 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 等. 冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 109 – 115. [LIU Leqing, ZHANG Wuyu, ZHANG Bingyin, et al. Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 109 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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, 1988. [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, 1988. (in Chinese)].
- [23] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015. [National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015. (in Chinese)]
- [24] 权登州, 王毅红, 井彦林, 等. 黄土区地铁车站动力分析中的无限元传输边界[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(4): 537 – 542. [QUAN Dengzhou, WANG Yihong, JING Yanlin, et al. Infinite-element transmitting boundary in dynamic analysis of subway station in loess area[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 47(4): 537 – 542. (in Chinese with English abstract)]

- [25] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 黏弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 37 – 42. [LIU Jingbo, DU Yixin, YAN Qiushi. The implementation of viscoelastic artificial boundary and the ground motion input in the general finite element software[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(4): 37 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 叶茂, 曹保兴, 郑志华, 等. 列车动荷载下某古遗址隔振沟的减振效果研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 682 – 688. [YE Mao, CAO Baoxing, ZHENG Zhihua, et al. Effect of vibration isolation trench on an ancient ruin subjected to train dynamic loads[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 682 – 688. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 皮音培, 叶茂, 金晶, 等. 列车诱发环境振动在某古遗址内的应力分布规律研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(2): 224 – 229. [PI Yinpei, YE Mao, JIN Jing, et al. Research on the stress distribution in an ancient ruin caused by train environmental vibration[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(2): 224 – 229. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 84 – 88. [LIANG Bo, CAI Ying. Dynamic analysis on subgrade of high speed railways in geometric irregular condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(2): 84 – 88. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳