

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2023.05.006

文章编号:1672-3767(2023)05-0048-10

地铁移动荷载作用下准饱和地基振动特性及隔振研究

王 滢^{1,2}, 姚 真^{1,2}, 宋永山^{1,2}, 赵礼治^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:根据 2.5 维有限元理论,将地基假设为准饱和地基,建立地铁列车-轨道-隧道衬砌-分层准饱和地基 2.5 维有限元模型,研究准饱和地基饱和度变化对地铁列车运行产生的地面振动响应的影响规律,并分析了准饱和地基饱和度对波阻板隔振性能的影响。结果表明:准饱和地基饱和度减小使地面振动加速度、水平 x 方向、竖向 z 方向位移幅值有一定程度减小;随着距离轨道中心距离增加,饱和度对地面振动响应的影响越明显;准饱和地基饱和度减小,波阻板对 x 方向隔振性能增强,对 z 方向隔振系数减弱;波阻板对地铁移动荷载产生的低频振动有较好隔振性能。

关键词:准饱和地基;饱和度;地面振动响应;波阻板;隔振性能

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

Study on vibration characteristics and vibration isolation of nearly saturated ground under moving load of subway

WANG Ying^{1,2}, YAO Zhen^{1,2}, SONG Yongshan^{1,2}, ZHAO Lizhi^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: According to the 2.5-dimensional finite element theory, the foundation was assumed to be a nearly saturated foundation and a 2.5-dimensional finite element model of subway train-track-tunnel lining-layered nearly saturated foundation was established. The influence of changes in saturation of the nearly saturated foundation on the ground vibration response generated by subway train operation was studied, and the influence of the saturation of the nearly saturated foundation on the vibration isolation performance of wave impedance block (WIB) were analyzed. The results show that the decrease of saturation of the nearly saturated foundation reduces the ground vibration acceleration and the displacement amplitudes in horizontal x direction and vertical z direction to a certain extent. With the increase of the distance from the track center, the influence of saturation on the ground vibration response becomes more obvious. When the saturation of the nearly saturated foundation decreases, the vibration isolation performance of WIB in x direction is enhanced whereas the vibration isolation coefficient of WIB in z direction is weakened. WIB has better vibration isolation performance for the low-frequency vibration caused by the moving load of the subway.

Key words: nearly saturated ground; saturation; ground vibration response; WIB; vibration isolation performance

城市地铁的快速发展,缓解了交通压力,方便了人们的生活,但列车运行诱发的地基振动危害也愈加严重^[1],导致临近线路噪音污染、精密试验仪器无法正常工作、临近建筑物开裂等问题。因此研究列车运行诱

收稿日期:2022-04-14

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51808324)

作者简介:王 滢(1979—),女,山东临沂人,副教授,博士,主要从事土动力学及岩土工程方面的教学和研究。

E-mail:hopeywwgy@hotmail.com

发的振动特性及其振动危害控制显得十分必要。Gao 等^[2]在 Biot 饱和多孔介质波动理论基础推导饱和地基动力控制方程,建立了高铁移动荷载作用下饱和地基 2.5 维有限元模型。张昀青等^[3]建立三维力学模型,把地基土视为弹性介质,分析了轨道参数对隧道地面点动力响应的影响。Sheng 等^[4]建立准静态地铁移动荷载作用下地铁隧道-弹性地基 2.5 维有限元模型,分析列车产生的地面振动频率衰减特性,指出建立地铁列车模型应考虑地基特性、轨道参数、结构参数等因素。王涛等^[5]基于实测数据建立弹性地基-隧道-地铁 2.5 维有限元分析模型,分析了粉细砂地层对地铁列车荷载的动力响应。Lu 等^[6]建立饱和介质 2.5 维有限元模型,对地铁移动荷载作用下隧道及地面动力响应进行分析。Gupta^[7]对影响地铁隧道振动特性的影响因素进行了较为详细的分析,发现地基材料阻尼及剪切模量对振动传播有重要影响,对比分析了饱和、弹性地基对地铁荷载振动特性的影响,发现隧道结构、隧道埋深等对地铁运行产生的地面振动也有一定影响。梁建文等^[8]采用间接边界元法对层状饱和地基地铁振动问题进行研究,通过自有场波与散射场波结合得到总场波动力响应,分析了透水边界条件、饱和状态、孔隙率等对振动传播的影响。

对地铁列车运行引起的振动的隔振研究也主要基于饱和地基和弹性地基。高广运等^[9-10]建立有限元分析模型,分析了饱和地基中,高速与低速列车空沟、隔振墙、波阻板等不同隔振措施的隔振效果,表明波阻板隔振效果最好。高盟等^[11]提出一种带孔波阻板填充 Duxseal 的联合隔振方法,通过现场试验研究了不同参数变化对其隔振效果的影响。时刚等^[12]采用边界元法研究弹性地基中波阻板对入射 Rayleigh 波散射,并分析了不同因素对波阻板远场隔振效果的影响。周凤玺等^[13]提出一类新型的空沟-波阻板联合隔振屏障,并对其隔振性能进行了数值分析。

已有研究均将地基视为均质弹性地基或饱和地基,对准饱和地基的地面振动特性及隔振性能尚无研究,实际地基多为准饱和地基,已有研究结果与实际情况往往不相符。因此,为研究地铁移动荷载作用下准饱和地基的地面振动特性和隔振性能,基于准饱和地基控制方程,建立地铁列车-轨道-隧道衬砌-分层准饱和地基 2.5 维有限元模型,得到了地铁移动荷载作用下更符合实际工程情况的准饱和地基的地面振动响应特性,并且分析了在地铁移动荷载作用下,饱和度对准饱和地基中 WIB 隔振性能影响。

1 控制方程的推导

基于 Biot 方程^[14],获得准饱和介质中孔隙流体的控制方程和平衡方程:

$$-n\left(\frac{1}{K_w} + \frac{1-S_r}{p_a}\right)\dot{p} = \dot{W}_{i,j} + \dot{u}_{i,j}, \quad (1)$$

$$-p_i = \rho_f \ddot{u} + \frac{\rho_f}{n} W_i + \frac{\rho_f g}{k_d} \dot{W}_i. \quad (2)$$

式中: n 为孔隙度; S_r 为饱和度; K_w 为孔隙水体积模量; p_a 为绝对空隙压力; p 为孔压; ρ_f 为孔隙流体密度; u 、 w 分别为固体骨架和孔隙流体的位移矢量; W 表示固体骨架的体积应变和流体含量的增量, $W = n(u-w)$; k_d 为动力渗透系数; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

为求解这些控制方程,使用关于方程(3)时间的傅里叶变换形式:

$$W_i = F(\omega^2 \rho_f \tilde{u}_i - \tilde{p}_i). \quad (3)$$

式中: $F = (nk_d)/(i\omega\rho_f g_n - \omega^2 k_d \rho_f)$, ω 为循环频率,“ \sim ”表示频域中的变量。将式(3)代入式(1),得准饱和地基频域内控制方程:

$$-F \frac{p_a K_w}{p_a + K_w(1-S_r)} \tilde{p}_i + (\omega^2 \rho_f + 1) \frac{p_a K_w}{p_a + K_w(1-S_r)} \tilde{u}_{i,j} + n \tilde{p}_i = 0. \quad (4)$$

边界条件、轨道及荷载模型和 2.5 维有限元推导采用文献[2]方法。

2 地铁移动荷载作用下分层准饱和地基振动特性研究

2.1 模型建立

2.5 维有限元法又称波数有限元法,其基本思想是先将结构截面不均匀二维区域进行空间笛卡尔坐标

积分,然后再在有相同几何尺寸的方向进行波数域中的计算,最后将频域内求解的结果通过反变换得到三维空间中的解答^[15]。

建立地铁列车-轨道-隧道衬砌-分层准饱和地基 2.5 维有限元模型,如图 1 所示。模型长 80 m,深 30 m,网格被划分为 1 836 个单元、1 953 个节点,隧道及周围土体、轨道中心及上方土体进行加密。隧道埋深 8 m,隧道外径 6 m,内径 5.5 m。隧道衬砌混凝土厚度 0.25 m。轨道底板距隧道底拱 0.75 m,轨道中心距地面 11 m。准饱和地基分为两层,各土层参数及隧道衬砌参数见表 1。假定垂直轨道方向截面连续,且每个截面上土体及结构材料特性一致。

列车参数取上海地铁 A01 型列车参数,列车由 6 辆车组成,包括两动一拖。动车长 23.8 m,拖车长 22.8 m,列车总长 140 m,转向架中心距离 15.7 m,固定轴距 2.5 m。地铁列车每辆车设计总重 53 000 kg,轨道弯曲刚度 $E_1 = 13.254 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$, $m = 540 \text{ kg/m}$ 。地铁列车运行速度为 20 m/s,与列车实际运行速度相符。监测点分别为地面中心 A 点(0,0),B 点(10 m,0),C 点(20 m,0)。

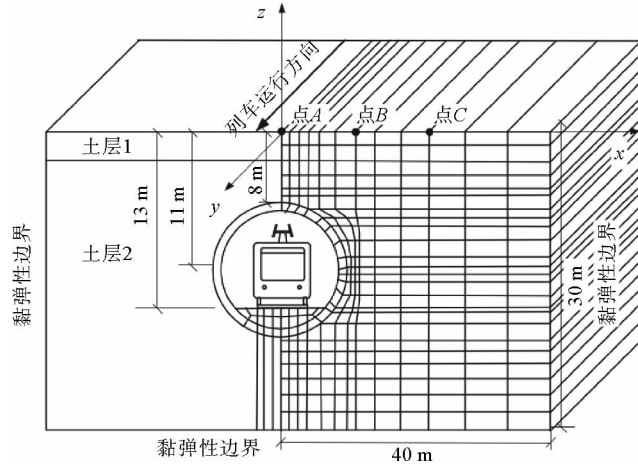


图 1 地铁列车-轨道-隧道衬砌-分层准饱和地基有限元模型
Fig. 1 Finite element model of subway train-track-tunnel lining-layered nearly saturated ground

表 1 准饱和地基及隧道衬砌参数

Table 1 Parameters of nearly saturated ground and tunnel lining

土层	厚度/m	土骨架密度 / (kg/m^3)	孔隙流体密度 / (kg/m^3)	剪切波速 / (m/s)	材料阻尼	泊松比	流体体积模量/Pa	动力渗透系数/ (m/s)	孔隙率	弹性模量 /MPa
混凝土	—	2 500	—	2 500	0.05	0.15	—	—	—	15 625
土层 1	2	1 850	1 000	100	0.05	0.40	2×10^9	1×10^{-7}	0.47	40
土层 2	28	1 910	1 000	160	0.03	0.35	2×10^9	1×10^{-4}	0.42	106

2.2 模型验证

采用文献[16-17]方法对地铁模型正确性进行验证。建立如图 2 所示半空间有限元模型,长 80 m,深 30 m,D 点位于地面中心点以下 4 m,坐标为(0,-4),O 点为地面中心点。将本模型退化为弹性模型,主要计算参数:剪切模量 $G = 1.154 \times 10^7 \text{ N}/\text{m}^2$,泊松比 $\nu = 0.3$,土体密度 $\rho = 1 900 \text{ kg}/\text{m}^3$,列车速度 $c = 40 \text{ m}/\text{s}$ 。按照互等定理,在监测点 D 接收到由 O 点施加荷载产生的振动响应与振源 O 与监测点 D 互换后,在 O 点监测到的振动响应一致。如图 3,在 O 点施加荷载后,在距离地面 4 m 深的 D 点产生的 x 方向振动位移(U_x)、 z 方向振动位移(U_z)与在 O 点振动位移(D 点施加荷载)完全一致。从而验证了地铁 2.5 维有限元模型的正确性。

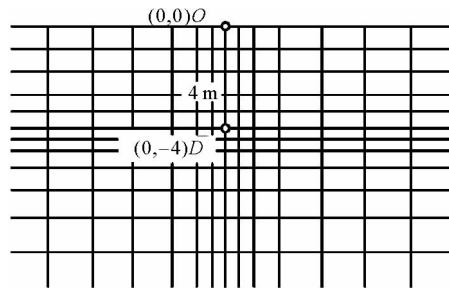


图 2 半空间有限元模型
Fig. 2 Half space finite element model

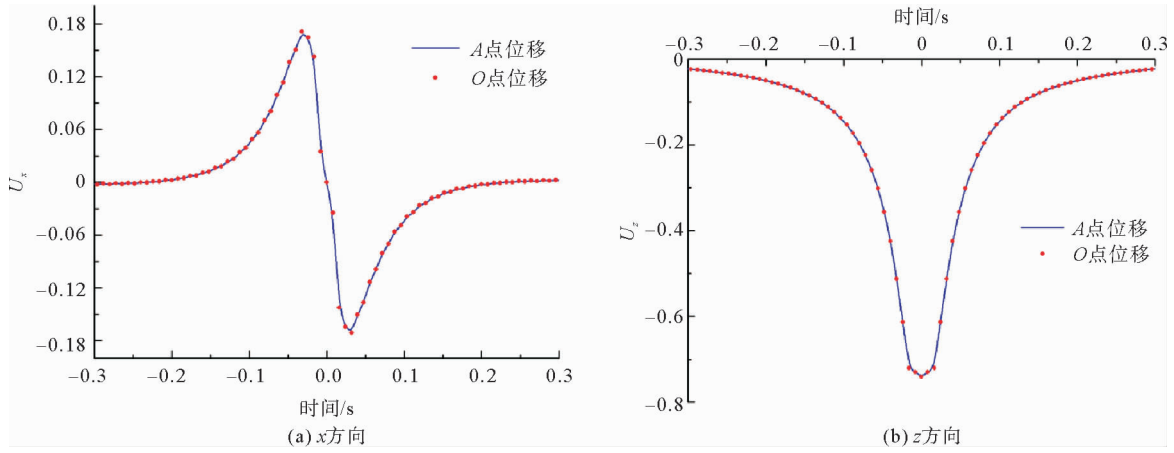


图 3 地铁有限元模型验证

Fig. 3 Verification of subway finite element model

2.3 地铁作用下准饱和地基振动特性分析

2.3.1 加速度时程曲线

图 4 为准饱和地基饱和度变化对地面振动加速度时程曲线的影响。由图 4 可知,在 A 点,饱和度 S_r 从 100% 降至 95% 时,振动加速度幅值呈现约 1% 的减小。B 点,准饱和地基饱和度为 95% 时地面振动加速度幅值约为饱和度为 100% 时振动加速度幅值的 0.97 倍 ($t=2.8$ s)。距离轨道中心 20 m 处,地基饱和度为 95% 时,地铁列车运行引起的地面振动加速度幅值约是地基饱和时的 0.71 倍 ($t=2.8$ s)。准饱和地基饱和度减小对地铁运行产生的地面振动加速度有一定减小作用,且随着与 A 点距离的增加,地基饱和度变化对地面振动加速度振幅影响越大。

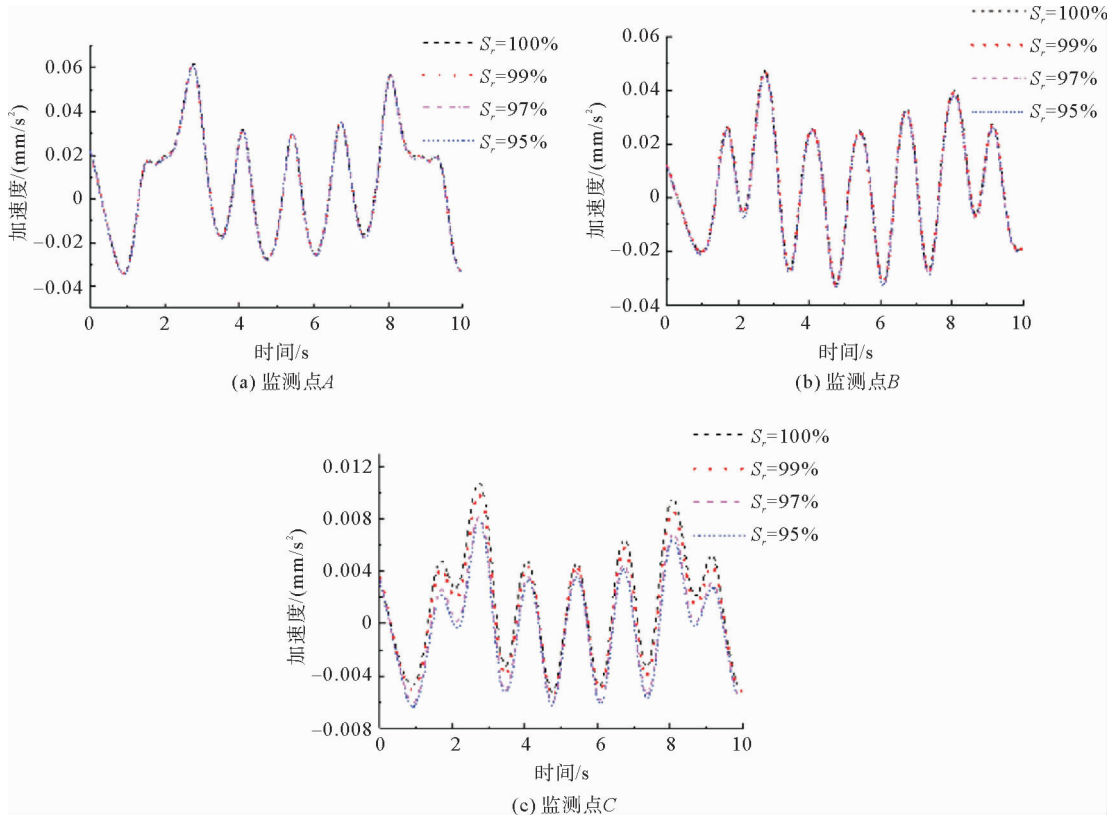


图 4 地基饱和度对振动加速度时程曲线的影响

Fig. 4 Influence of ground saturation on vibration acceleration time-history curves

2.3.2 频谱曲线

图 5 为监测点 A、B、C 的频谱曲线。对于地铁移动荷载作用下的地面振动,以低频为主且低频频率衰减缓慢。对比饱和地基与饱和度为 95%的准饱和地基,饱和度变化对地面不同距离振动频率主导频率大小、带宽无明显影响。

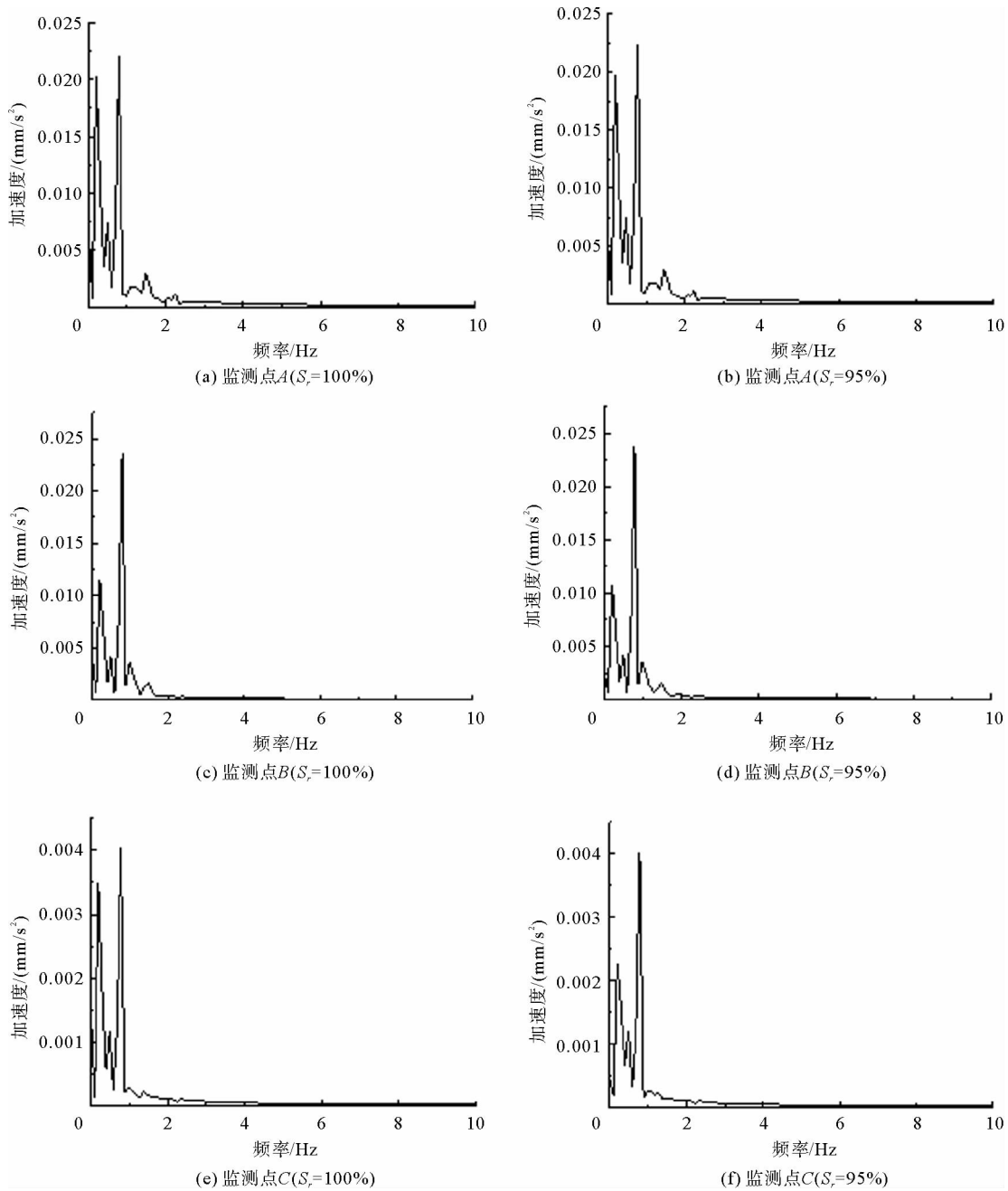


图 5 地基饱和度对振动频谱曲线影响

Fig. 5 Influence of ground saturation on vibration spectrum curves

2.3.3 x 方向位移时程曲线

图 6 为准饱和地基饱和度对地面不同距离 x 方向位移时程曲线的影响。对于地铁列车荷载引起的振动位移时程曲线呈现明显轮轨分布,列车刚驶入和驶离时,引起较大的水平方向位移。由图 6 可知,随着准饱和地基饱和度减小,地面 x 方向位移时程曲线位移幅值明显减小。在地面 A 点,经过饱和度为 95%的准

饱和地基传播后的水平方向位移约是饱和地基的 0.55 倍($t=1.6$ s),减小 54.5%。在 B 点处,监测到 x 方向位移在准饱和地基饱和度为 95% 时,位移幅值($t=1.6$ s)相较于饱和时减小约 53.3%。

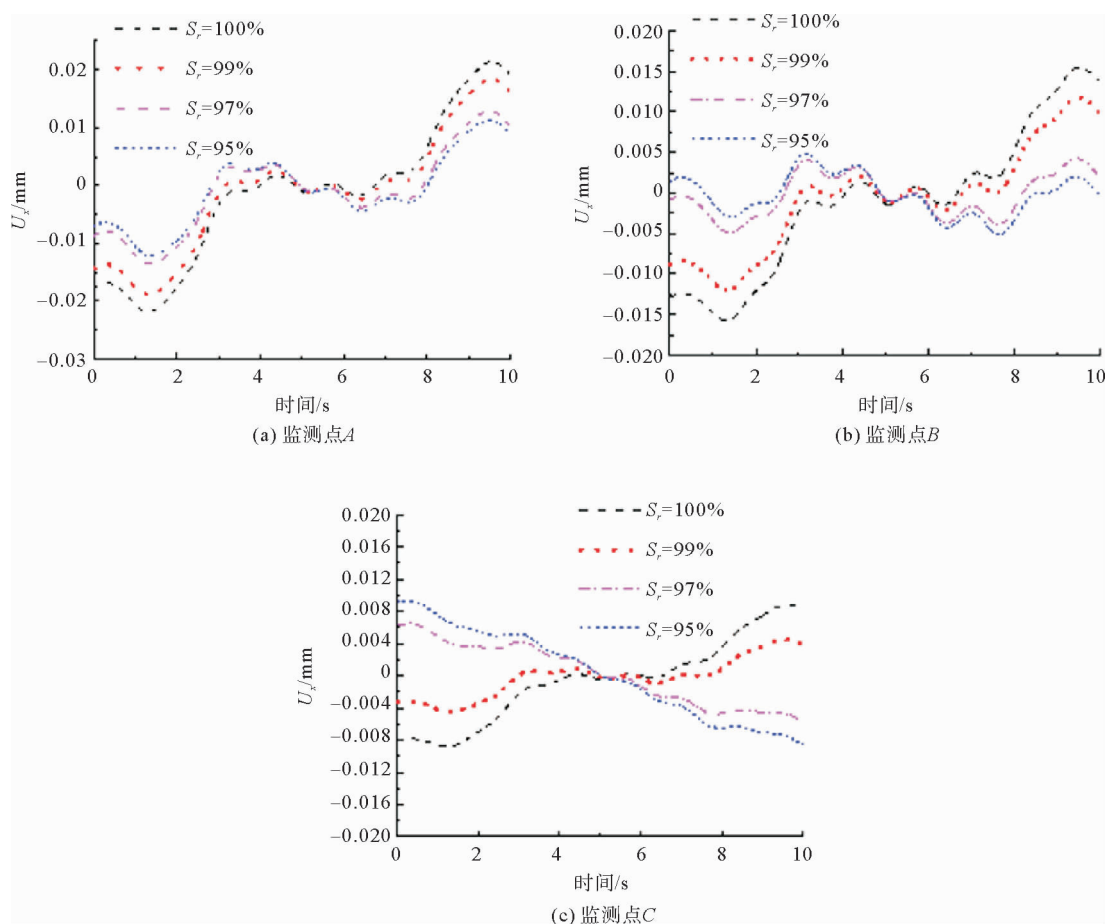


图 6 地基饱和度对 x 方向振动位移时程曲线影响

Fig. 6 Influence of ground saturation on the time-history curves of displacement in x -direction

2.3.4 z 方向位移时程曲线

图 7 为不同饱和度下产生的振动竖向位移时程曲线。由图 7 可知,随着准饱和地基饱和度减小,地面 z 方向位移明显减小,且随着与 A 点距离的增加,准饱和地基饱和度对地面振动 z 方向位移作用效果逐渐增强。地面 A 点处,准饱和地基饱和度为 95% 时,地面 z 方向位移幅值约是饱和度为 100% 地基的 0.899 倍,减小约 10% ($t=4$ s)。在 B 点处, z 方向振动位移经过饱和度为 100% 的地基传播后,位移幅值为 0.057 mm;在饱和度为 95% 的准饱和地基中,位移幅值($t=4$ s)为 0.04 mm,减小 0.3 倍。C 点处,准饱和地基饱和度的变化对地面 z 方向位移时程曲线影响剧烈, $t=4$ s 时,饱和度为 95% 时准饱和地基的地面 z 方向位移幅值约是饱和度为 100% 时的 0.25 倍。

3 准饱和地基中波阻板(WIB)隔振性能研究

3.1 地铁荷载作用下波阻板隔振计算模型

在地铁列车-轨道-隧道衬砌-分层准饱和地基模型的基础上,建立地铁列车-轨道-隧道衬砌-分层准饱和地基-波阻板隔振 2.5 维有限元模型,如图 8 所示。列车参数与地铁列车-轨道-隧道衬砌-分层准饱和地基模型所用的列车参数相同。地铁列车运行速度为 20 m/s。

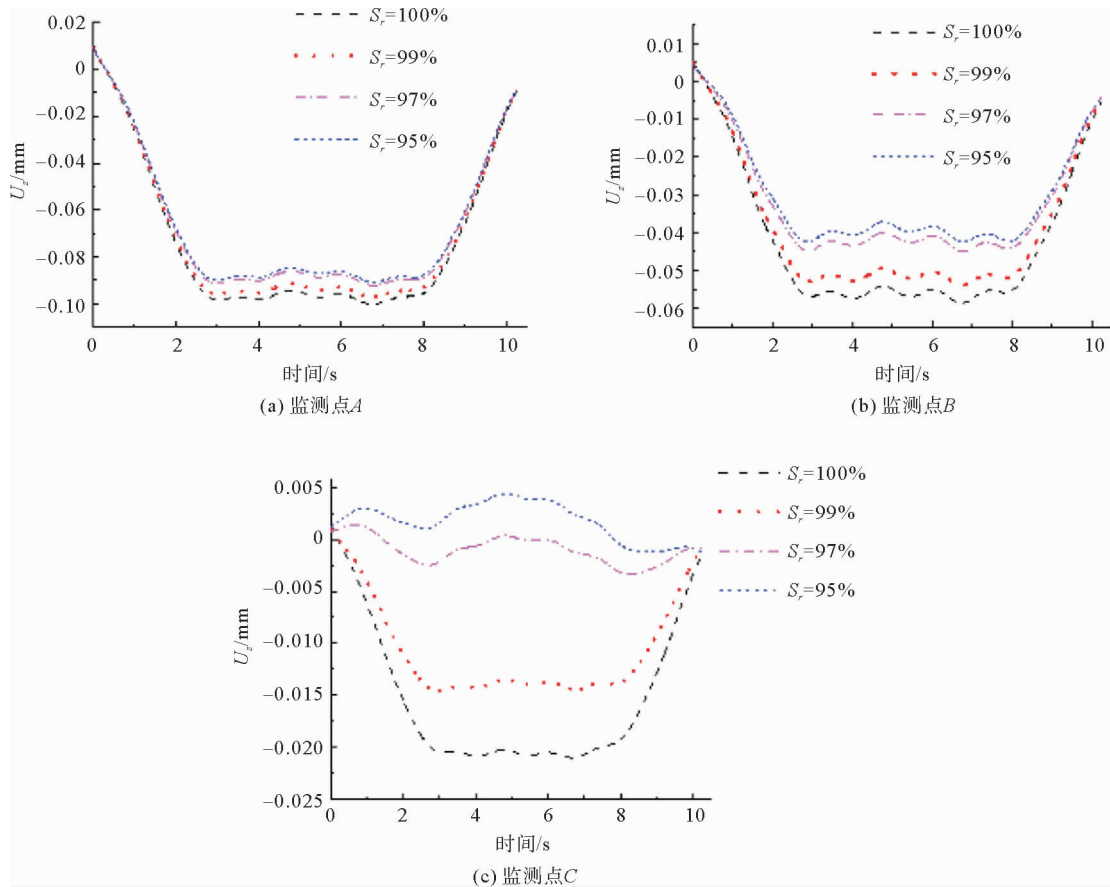


图 7 地基饱和度对 z 方向振动位移时程曲线影响

Fig. 7 Influence of ground saturation on the time-history curves of displacement in z-direction

为分析准饱和地基中饱和度变化对波阻板隔振性能的影响,在隧道上方土体中埋置波阻板。波阻板埋深 k 为 1 m,宽度 e 为 6 m,厚度 h 为 1 m,土骨架密度为 $2\ 500\ \text{kg/m}^3$,剪切波速为 $2\ 500\ \text{m/s}$,泊松比为 0.15,材料阻尼为 0.05,弹性模量 E 为 $33\ 000\ \text{MPa}$ 。土体、隧道衬砌参数等见表 1。

根据工程中对准饱和土(饱和度 $\geq 95\%$)的定义,分析饱和度为 95%、97%、99%、100%时准饱和地基中波阻板隔振性能。其中,饱和度为 100%时为饱和地基。

3.2 地铁荷载作用下地基饱和度对波阻板隔振性能的影响

3.2.1 地基饱和度对 x 、 z 方向位移振幅衰减系数的影响

采用隔振系数 A_x 、 A_z 对波阻板隔振性能进行评价。 A_x 是设置波阻板后与无波阻板时 x 方向位移的比值, A_z 是设置波阻板后与无波阻板时 z 方向位移的比值。图 9 为不同地基饱和度条件下地面不同距离处波阻板隔振系数 A_x 。由图 9 可知,波阻板对地面水平 x 方向位移有较好隔振效果,在隧道正上方地面,波阻板隔振性能最好,位移振幅衰减效果达 35%。随着测点距离增加,波阻板隔振性能逐渐减弱,10 m 后

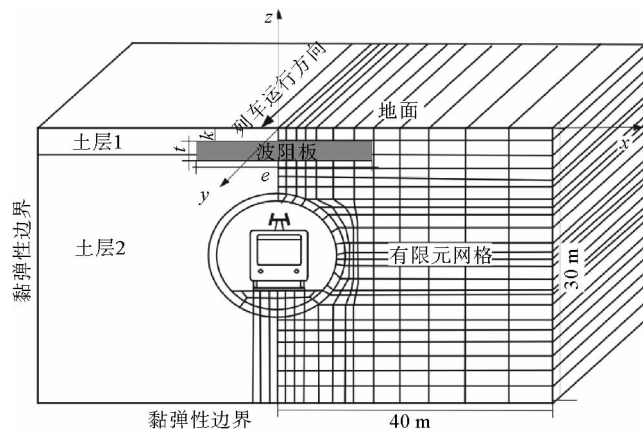


图 8 地铁-波阻板隔振 2.5 维有限元模型

Fig. 8 2.5-D finite element model of metro-WIB isolation

隔振性能稳定在 68%左右。随着地基饱和度降低,波阻板对水平 x 方向位移隔振性能明显增强, $x=0\sim 5$ m 处饱和度对波阻板隔振性能影响尤为明显。在 $x=4$ m 处,地基饱和度从 100%减小到 95%时,波阻板隔振系数 A_x 从 0.58 减小到 0.31,隔振性能增强了 53.4%。

图 10 为地铁移动荷载作用下准饱和地基中波阻板隔振系数 A_R 随地面距离的变化曲线。由图 10 可知,波阻板对地面 z 方向位移隔振性能较差。在饱和地基中,波阻板隔振系数 A_R 随距 A 点距离增大呈现先减小后增大的现象,在 $x=5$ m 处隔振系数值最小。此时的隔振系数 A_R 值为 0.965,隔振性能为 96.5%。在准饱和地基地面上,距离 A 点距离超过 15 m 后,波阻板表现出的隔振性能较差,隔振系数 A_R 值在 0.995 左右。而随着准饱和地基饱和度减小,波阻板 z 方向位移衰减效果随之减弱,饱和度越小,波阻板隔振性能越差。在地面 $x=5$ m 处,准饱和地基饱和度为 95%时波阻板对地面 z 方向位移隔振系数 A_R 为 0.978,是饱和度为 100%时隔振系数的 1.015 倍。

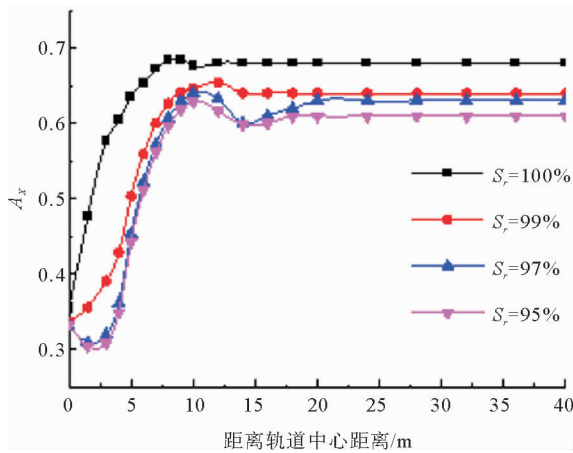


图 9 地基饱和度对波阻板隔振系数 A_x 影响
Fig. 9 Influence of the saturation on isolation coefficient A_x of WIB

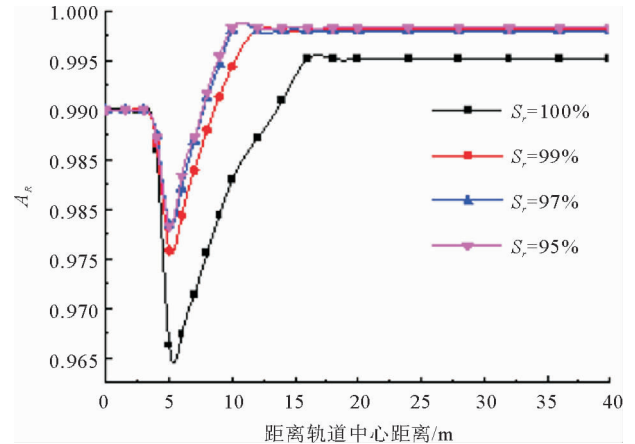


图 10 地基饱和度对波阻板隔振系数 A_R 影响
Fig. 10 Influence of the saturation on isolation coefficient A_R of WIB

3.2.2 准饱和地基波阻板隔振频带研究

图 11~13 分别为地面距离轨道中心 0、5、10 m 处,准饱和地基饱和度 S_r 分别为 95%和 100%时地面振动频谱曲线。由图 11 可知,未加波阻板时,地面振动存在两个主导频率,分别为 0.3 Hz 和 0.8 Hz,频带范围 0~3 Hz。加入波阻板后,地面振动频率明显减弱,0.8 Hz 的主频被衰减,隔振后地面 0 m 处振动频率减小到 0~1 Hz,波阻板对低频有较好隔振性能。但观察地面距离轨道中心 5 和 10 m 处的频谱曲线,波阻板

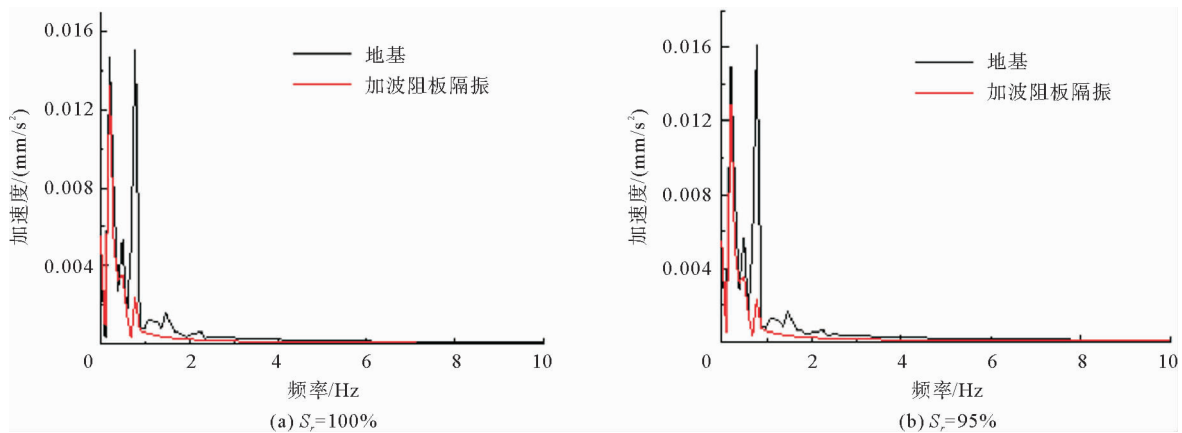


图 11 地面 $x=0$ m 处波阻板隔振后频谱曲线

Fig. 11 Frequency spectrum curve after the vibration isolation effect of WIB at $x=0$ m

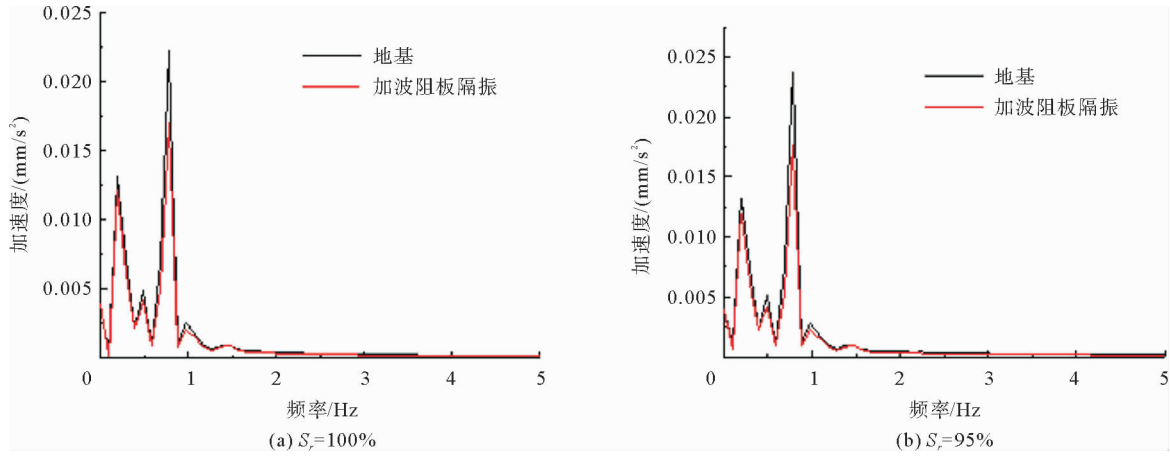


图 12 地面 $x=5\text{ m}$ 处波阻板隔振后频谱曲线

Fig. 12 Frequency spectrum curve after the vibration isolation effect of WIB at $x=5\text{ m}$

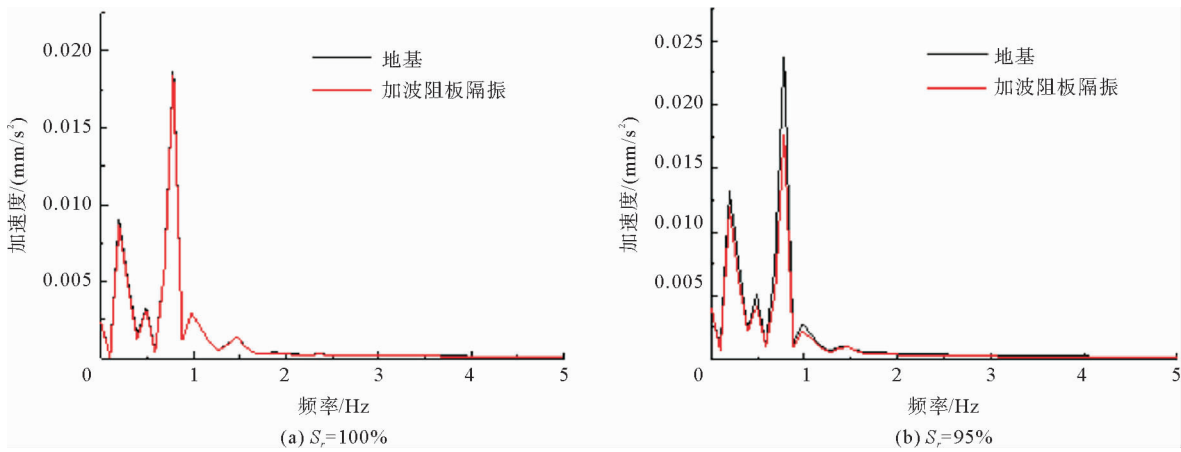


图 13 地面 $x=10\text{ m}$ 处波阻板隔振后频谱曲线

Fig. 13 Frequency spectrum curve after the vibration isolation effect of WIB at $x=10\text{ m}$

对地铁移动荷载产生的距离波阻板较远的 $0\sim 1\text{ Hz}$ 的地面振动频率隔振性能较差。

4 结论

- 1) 准饱和地基饱和度变化对地面不同距离处振动频率的主导频率大小、带宽无明显影响
- 2) 地铁移动荷载作用下,随着准饱和地基饱和度值的减小,地面振动加速度、水平 x 方向、竖向 z 方向位移幅值均有一定程度减小。随着距离轨道中心距离增加,饱和度影响越明显。
- 3) 准饱和地基饱和度变化对波阻板隔振系数影响明显。对地铁移动荷载产生的地面振动,波阻板隔振系数 A_x 随准饱和地基饱和度减小而减小, A_R 随饱和度减小而增大、隔振性能减弱。
- 4) 波阻板对地铁移动荷载产生的低频振动有较好隔振性能,但对距离轨道中心较远的地面 $0\sim 1\text{ Hz}$ 的频率隔振性能较差。

参考文献:

[1] 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 Chuazhi,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.
- [2] GAO G Y, CHEN Q S, HE J F, et al. Investigation of ground vibration due to trains moving on saturated multi-layered ground by 2.5D finite element method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 40: 87-98.
- [3] 张昫青, 刘维宁, 张玉斌, 等. 轨道结构参数对隧道地面点动力响应的分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 1009-1014.
- ZHANG Yunqing, LIU Weining, ZHANG Yu'e, et al. Analysis of effect of track structural parameters on dynamic responses of ground due to metro train[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 1009-1014.
- [4] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 293(3): 575-586.
- [5] 王涛, 施斌, 马龙祥, 等. 粉细砂地层对地铁列车荷载的动力响应及长期变形研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1378-1385.
- WANG Tao, SHI Bin, MA Longxiang, et al. Dynamic response and long-term cumulative deformation of silty sand stratum induced by metro train vibration loads[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1378-1385.
- [6] LU J F, DING J J, FAN Z, et al. Response of a circular tunnel embedded in saturated soil to a series of equidistant moving loads[J]. *Acta Mechanica*, 2017, 228: 3675-3693.
- [7] GUPTA S, STANUS Y, LOMBAERT G, et al. Influence of tunnel and soil parameters on vibrations from underground railways[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 327(1/2): 70-91.
- [8] 梁建文, 高亚南, 巴振宁, 等. 层状饱和地基中地铁列车振动荷载诱发地表振动研究[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(增2): 646-661.
- LIANG Jianwen, GAO Ya'nan, BA Zhenning, et al. Ground vibration of Layered Saturated soils induced by subway train vibration load[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(S2): 646-661.
- [9] 高广运, 陈功奇, 张博. 列车荷载下竖向非均匀地基波阻板主动隔振分析[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(22): 57-62.
- GAO Guangyun, CHEN Gongqi, ZHANG Bo. Active vibration isolation using WIB in non-uniform ground under train loadings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(22): 57-62.
- [10] 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[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 2191-2198.
- [11] 高盟, 张致松, 王崇革, 等. 竖向激振力下 WIB-Duxseal 联合隔振试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 537-546.
- GAO Meng, ZHANG Zhisong, WANG Chongge, et al. Field test on vibration isolation performance by WIB-Duxseal under vertical excitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 537-546.
- [12] 时刚, 李永辉. 弹性地基中波阻板对入射 Rayleigh 波的远场被动隔振研究[J]. *世界地震工程*, 2019, 35(2): 11-17.
- SHI Gang, LI Yonghui. Passive vibration isolation effectiveness of wave impedance block under incident Rayleigh wave in elastic foundation[J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(2): 11-17.
- [13] 周凤玺, 马强, 周志雄. 二维地基中空沟-波阻板联合隔振屏障分析[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 4087-4092.
- ZHOU Fengxi, MA Qiang, ZHOU Zhixiong. 2D analysis of vibration-isolation efficiency of an open trench-wave impedance block barrier[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 4087-4092.
- [14] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media[J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, 33: 1482-1498.
- [15] 高广运, 何俊锋, 杨成斌, 等. 2.5 维有限元分析饱和地基列车运行引起的地面振动[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(2): 234-241.
- GAO Guangyun, HE Junfeng, YANG Chengbin, et al. Ground vibration induced by trains moving on saturated ground using 2.5D FEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(2): 234-241.
- [16] HUNG H H, YANG Y B. Analysis of ground vibrations due to underground trains by 2.5D finite/infinite element approach[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2010, 9(3): 327-335.
- [17] YANG Y B, HUNG H H. A 2.5D finite/infinite element approach for modelling visco-elastic bodies subjected to moving loads[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001, 51(11): 1317-1336.