

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.127



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



杂填土斜坡场地强夯振动传播规律与 影响参数分析

朱建民^{1a}, 董宝志², 于永堂^{1b,3}, 郑建国^{1b,4}, 文宇坤²

(1. 西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 交叉创新研究院, 西安 710055; 2. 山西金宝岛基础工程有限公司, 太原 030031; 3. 中联西北工程设计研究院有限公司, 西安 710077; 4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 西安 710021)

摘要: 强夯法是一种加固效果显著、经济高效、节能环保的地基处理方法,但其施工产生的强烈振动可能对周围建筑物造成不可逆的损害。因此,需要结合具体场地条件准确评估强夯振动的影响。以杂填土斜坡和平坦场地的强夯施工振动为研究对象,对比分析4000、12 000、25 000 kN·m能级下,振源距、夯击能和夯沉量对振动速度的影响规律。在此基础上,构建以上3种因素为输入值、振动速度为输出值的BP神经网络模型,并结合Sobol敏感性分析法评估各因素对振动速度的影响强度。结果表明:斜坡场地中振动速度在坡肩~坡底范围内呈负指数关系,坡肩存在“能量集中”效应,其振动速度大于相同振源距的平坦场地。杂填土斜坡中各能级下的振动速度多介于4~25 mm/s之间,与夯击能呈负指数关系。随着夯沉量增加,振动速度增长先快后慢,最终趋于稳定;在累计夯沉量-夯沉量曲线的“下凹”型折点后,振动速度增长或增长率增大,在“上凸”型折点后,振动速度减小或增长率衰减。夯沉量对振动速度的影响最显著,其敏感性指数是振源距的1.55倍、夯击能的5.93倍。减少夯沉量对减轻振动的效果最明显,振源距次之,夯击能最小。

关键词: 强夯; 振动速度; 杂填土; 斜坡; BP神经网络; 敏感性分析

中图分类号: TU751 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Analysis of vibration propagation and influencing parameters in dynamic compaction of miscellaneous fill slope

ZHU Jianmin^{1a}, DONG Baozhi², YU Yongtang^{1b,3}, ZHENG Jianguo^{1b,4}, WEN Yukun²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Institute for Interdisciplinary and Innovate Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. Shanxi Jinbaodao Foundation Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030031, P. R. China; 3. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, P. R. China; 4. China JiKan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710021, P. R. China)

Abstract: Dynamic compaction (DC) is a highly effective, cost-efficient, and environmentally friendly ground improvement technique. However, the intense vibrations it generates can irreversibly damage nearby structures,

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(42277151、42307277); 陕西省秦创原“科学家+工程师”团队建设项目(2022KXJ-086)

作者简介: 朱建民(1995-), 男, 博士生, 主要从事岩土工程监测与检测技术研究, E-mail: zjm1995triumph@163.com。

Received: 2024-10-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42277151, 42307277); Shaanxi Province Qin Chuangyuan ‘Scientist+Engineer’ Team Construction Project (No. 2022KXJ-086)

Author brief: ZHU Jianmin (1995-), PhD candidate, main research interest: geotechnical engineering monitoring and detection technology, E-mail: zjm1995triumph@163.com.

making it essential to evaluate DC-induced vibrations based on site-specific conditions. This study examines the impact of DC on miscellaneous fill slopes and flat sites, analyzing the effects of vibration source distance, tamping energy, and settlement on vibration velocity at energy levels of 4 000 kN·m, 12 000 kN·m, and 25 000 kN·m. A BP neural network model was developed using these factors as inputs and vibration velocity as the output. Sobol sensitivity analysis was applied to quantify the contribution of each factor. Results indicate that on slopes, vibration velocity follows a negative exponential relationship from the shoulder to the toe, with the slope shoulder experiencing an "energy concentration" effect, leading to higher velocities than flat sites at the same vibration source distance. Vibration velocities on slopes range from 4 to 25 mm/s and exhibit a negative exponential relationship with tamping energy. As settlement increases, vibration velocity initially rises rapidly, then stabilizes. After the "concave" inflection point in the cumulative settlement-settlement curve, velocity or its growth rate increases; beyond the "convex" inflection point, velocity decreases or its growth rate slows. Settlement has the greatest influence on vibration velocity, with a sensitivity index 1.55 times higher than vibration source distance and 5.93 times higher than tamping energy. Reducing settlement is the most effective strategy for vibration mitigation, followed by increasing vibration source distance, while tamping energy has the least effect. These findings provide valuable guidance for managing high-energy DC-induced vibrations in similar slope conditions.

Keywords: dynamic compaction; vibration velocity; miscellaneous fill; slope; BP neural network; sensitivity analysis

强夯法是一种经济高效、节能环保的地基处理方法,能提高地基强度,降低压缩性,消除湿陷性,改善其抵抗振(震)动液化的能力等,还能提高地基土的均匀性,减少工后沉降与差异沉降^[1-2]。强夯施工过程往往伴随着强烈的振动波,振动波的频率介于 3~25 Hz,属于低频振动,与建筑物的固有振动频率一致,极易产生“共振”效应^[3],会对周围建筑物、施工人员和居民产生不利影响,在一定程度上限制其应用^[4]。因此,当强夯施工场地与建(构)筑物距离较近时,需要准确评估强夯振动的影响,确定建(构)筑物的安全距离,并提出隔振、减振、防振动措施,保证建筑安全。

在平坦场地中的强夯振动研究方面,学者们通过对 15 000 kN·m 内强夯法处理砂^[5]、粉土^[6]、黄土^[7-8]、砂土^[9]、碎石土^[10]、安山岩^[11]的现场振动测试中发现,振动速度与振源距之间呈幂函数或指数函数关系。曹利等^[12]通过模型试验发现,夯击次数对振动加速度的影响有限,夯击能对振动速度影响较大,重锤低落可减缓振动加速度衰减率。在斜坡场地强夯振动研究方面,Wu 等^[13]从理论上验证了黄土高边坡场地高程对强夯振动速度的放大效应,提出了黄土高边坡强夯施工的允许安全距离。姚占勇等^[14]采用模型试验和数值模拟的方法研究了粉土路基中最佳落距和锤径的确定方法,指出振动加速度在坡脚处的衰减率大于平坦场地,为拓宽道路地基振动控制标准的确定提供了依据。龚成明等^[15]通过模型试验得出了黄土路堑边坡中夯击次数对振

动加速度的影响有限,边坡边缘对振动加速度存在放大效应,坡率越大,加速度峰值越大,指导了类似工程的设计和施工。Vlček 等^[16]在砾石土基场场地中研究了 130~240 kN·m 下土体强度、振源距、地形对振动速度的影响规律,发现强夯施工导致土体超出原有的抗剪强度时,振动速度的增长率减小,在振源距为 40~50 m 时振动速度降至 5 mm/s 以下,地势增大会导致加速度时程曲线的振幅增大。曲兆军等^[17]采用现场试验和数值模拟相结合的方法研究了 2 000 kN·m 下土石混合填筑边坡的振动特性,发现强夯振动影响与坡度成正比,振动加速度随振源距增大迅速衰减。综上所述,目前关于强夯振动的研究多集中在均质土体的平坦场地,关于斜坡场地的研究以低能级、模型试验、数值模拟为主,关于超高能级非均质土体斜坡场地强夯振动实测数据研究较少,且强夯振动受多种因素交互作用,仅研究单一因素难以指导强夯施工参数设计。

在杂填土平坦场地和斜坡场地中研究 25 000、12 000、4 000 kN·m 能级下振源距、夯击能、夯沉量 3 种因素对振动速度的影响规律,采用 BP 神经网络模型对上述 3 种因素与振动速度的关系进行回归,并利用 Sobol 敏感性分析法确定了 3 种因素对强夯振动速度影响强弱的排序。

1 强夯振动测试

1.1 试验场地概况

试验场地位于山西省阳泉市郊区,地理坐标为

113°34′35.0″E、37°58′39.9″N,为某电厂 500 MW·h ~ 1000 MW·h 电化学储能电站的场平工程,场地总体平坦,场地南侧存在 EN-WS 走向的边坡,为斜坡场地强夯振动规律研究提供了天然条件。根据勘探揭露的地层自上而下为杂填土(Q_4^{ml})、砂质页岩(C),勘探深度范围内无地下水。杂填土在场地内广泛分布,厚度 10~25 m,杂色,以泥岩、石灰岩、页

岩、砂岩为主,黏性土及煤灰充填,稍湿,形状大小不一,稍密,均匀性、稳定性差,厚薄不一。砂质页岩呈灰黑色-灰绿色,岩芯多碎块状、少数短柱状,层状构造,局部夹薄层泥岩,较破碎,钻探未穿透,岩土体的基本物理力学性质指标见表 1,试验场地的地层剖面示意图见图 1。

表 1 岩土体的基本物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical properties of rock and soil index

岩土体	天然重度平均值 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	天然密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	动力触探击数平均值 $N_{63.5}$	单轴抗压强度平均值/MPa	RQD	质量等级	变形模量平均值 E_0/MPa	承载力特征值平均值 f_a/kPa
杂填土	18.5	1.89	7.4	0.07				
砂质页岩		2.41		13.42	20 ~ 30	Ⅳ	50	600

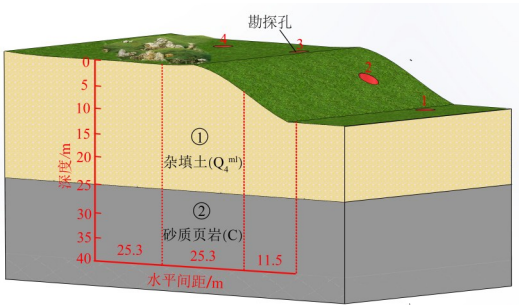


图 1 地层剖面示意图
Fig. 1 Stratigraphic profile

1.2 试验设备

强夯振动测试设备如图 2 所示,主要包括强夯机、三向振动速度传感器、测振仪和电脑。三向振动速度传感器型号为 TCS-D3,可测频率范围为 1~500 Hz,灵敏度为 26~28 V/(m/s),非线性精度为 0.2%,使用环境温度为一 40~70 ℃;环境温度 21 ℃,相对湿度 51% 时,40 Hz 下三向振动速度传感器速度频率响应曲线如图 3 所示。由图 3 可知,在可测频率范围内,测量值与真实值折线基本重合,最大绝对误差绝对值约为 0.31 mm/s,最大相对误差为 3.46%,满足非线性度小于 5% 的要求^[18]。测振仪型号为 TC-4850-3,读数精度 0.1 mm/s,量程 ±35 mm/s,可实时查看和下载数据。在开展强夯振动试验时,由强夯机自由落锤产生振源,将三向

振动速度传感器固定在地面测点位置,由数据线连接至测振仪采集振动信号,试验结束后采用电脑导出试验数据。



图 2 强夯振动测试设备
Fig.2 Dynamic compaction vibration test equipment

1.3 试验方案

强夯振动试验分别在平坦场地和斜坡场地上进行,共设置 25 000、12 000、4 000 kN·m 三种能级,强夯振动试验参数见表 2,夯点和测点位置分布如图 4 所示。在平坦场地和斜坡场地上各布置 3 条测线,相邻测线距离为 8 m,每条测线设 1 个能级、4 个测点,测点的振源距分别为 20、30、38.5、50.6 m。

表 2 强夯振动试验参数
Table 2 Dynamic compaction vibration test parameters

场地类型	夯击能/(kN·m)	夯点编号	测点编号	锤高/m	锤径/m	锤重/t	落距/m
斜坡场地	25 000	e_p	e_p -(1~4)	3.9		138	18.5
	12 000	a_p	a_p -(1~4)	1.9	2.4	67	18.2
	4000	c_p	c_p -(1~4)	0.7		25	16.3
平坦场地	25 000	e_d	e_d -(1~4)	3.9		138	18.5
	12 000	a_d	a_d -(1~4)	1.9	2.4	67	18.2
	4000	c_d	c_d -(1~4)	0.7		25	16.3

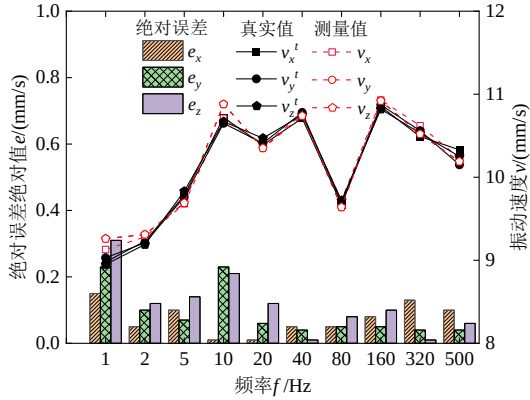


图3 速度频率响应曲线

Fig.3 Frequency response curves for velocity

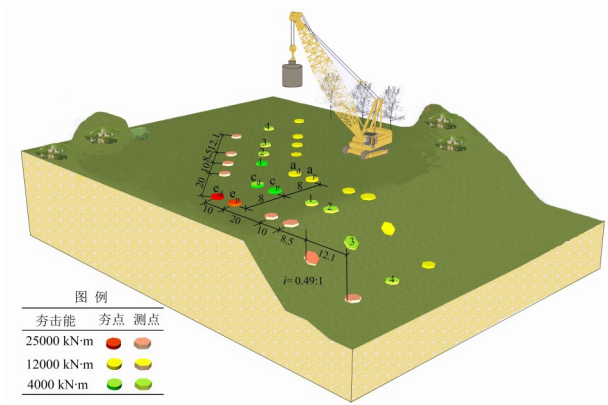


图4 夯点和测点位置分布图

Fig. 4 Distribution of tamping points and measuring points

2 强夯振动测试结果及分析

2.1 振源距对振动速度的影响规律

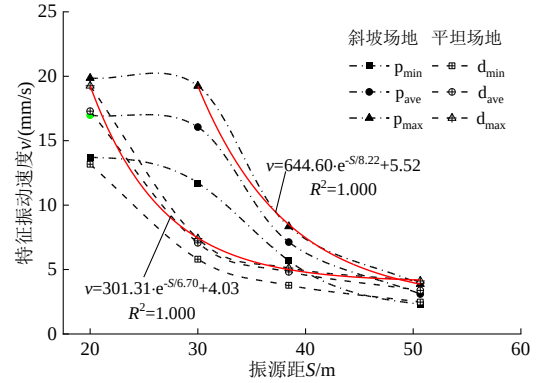
与地震引起的震动不同,强夯振动持续时间短、频度高,相比于位移或加速度,振动速度更容易导致结构损伤^[19],因此,通常以振动速度作为强夯振动潜在破坏的指标。研究表明^[20],导致结构损伤的振动速度应为最大单向或三向向量矢量和。选取单次夯击下三向最大振动速度(简称:振动速度)或特征振动速度(多次夯击下三向最大、最小和平均振动速度)作为统计分析对象。平坦场地与斜坡场地的特征振动速度与振源距关系曲线如图5,由图5可知,在平坦场地中,特征振动速度 v 与振源距 S 之间符合式(1)的指数函数关系。

$$v = a \cdot e^{\frac{-S}{b}} + v_0 \quad (1)$$

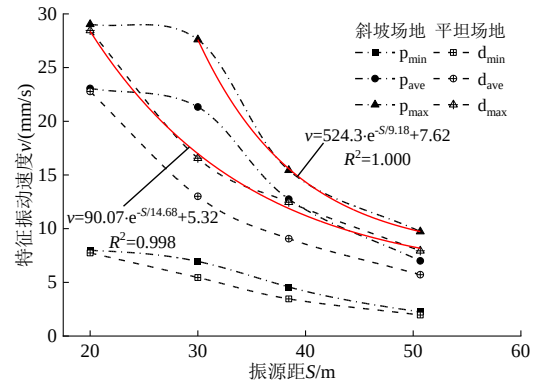
式中: a 为系数,是大于零的实数; e 为自然常数,2.718; b 为指数系数; v_0 为常数。

振动速度随振源距的变化过程分为3个阶段:

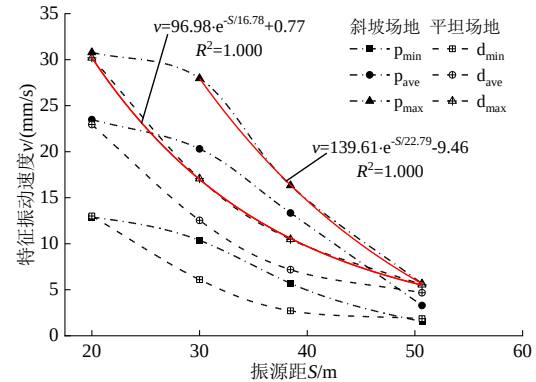
1)第Ⅰ阶段:骤减段(20~30 m),如图6所示,强夯振动致使夯坑周围土体隆起、裂缝,孔壁土体裂缝和剥落,削弱了强夯振动能量的传播。夯点附近高频波占主导,容易被土体吸收散射且衰减较



(a) 4 000 kN·m



(b) 12 000 kN·m



(c) 25 000 kN·m

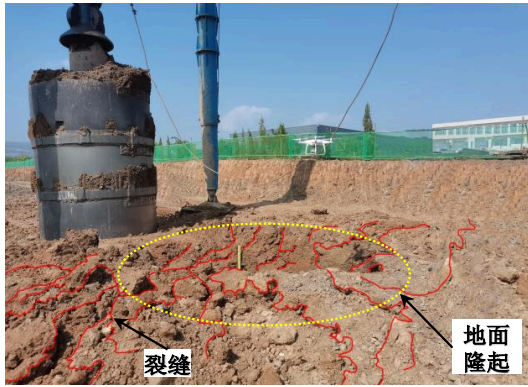
图5 特征振动速度与振源距关系曲线

Fig.5 Comparison of vibration velocity between slope and flat site

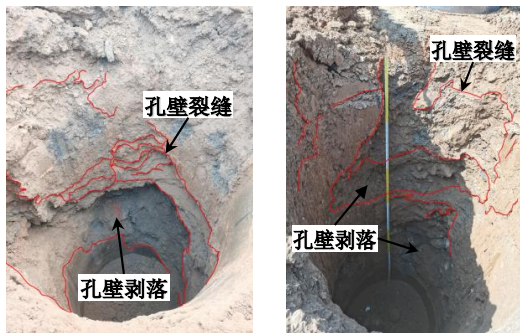
快^[21],再加上波的叠加干涉使振动速度迅速衰减或抵消^[22],所以20~30 m范围内衰减较大。

2)第Ⅱ阶段:缓减段(30~38.5 m),随着振源距增大,强夯振动对测点附近土体的扰动可忽略。经过第Ⅰ阶段的“滤波”作用^[23],高频波减少,低频波逐渐占据主导作用,而土体对低频波吸收弱,且波的叠加干涉作用减弱,“多路径效应”被平均化,导致波的振幅逐渐趋于平缓^[24],衰减速度也随之减缓,所以30~38.5 m范围内振动速度衰减趋于平缓。

3)第Ⅲ阶段:趋稳段(38.5~50.6 m),随着振源距的进一步增加,波的能量在更大的分布空间内,能量密度降低,能量损失比例减少^[25]。同时,经前两阶段土体的“滤波”作用,低频波占据了主导作用,但土体对低频波的吸收和散射能力减弱。所以38.5~50.6 m范围内振动速度衰减趋于平稳。



(a)



(b)

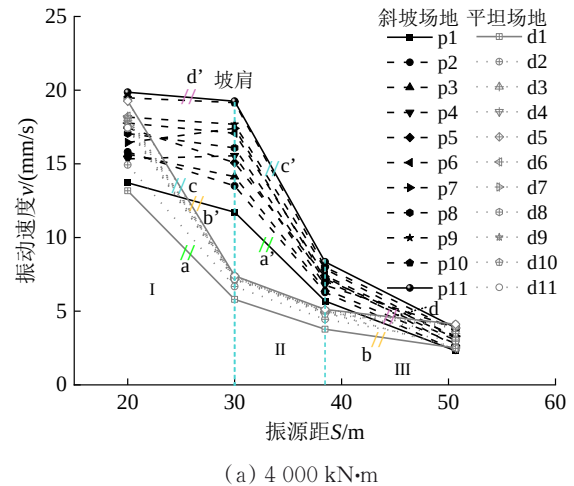
(c)

图6 夯坑周围土体破坏

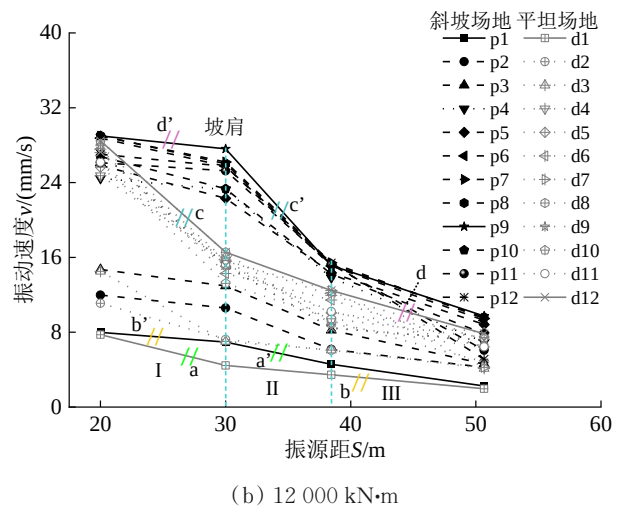
Fig. 6 Soil damage around the compaction pit

由图5可知,斜坡场地的振动速度与振源距之间仅在坡肩~坡底($S=30\sim50.6$ m)范围内符合指数函数关系,振动速度随振源距的增加可分为缓变段(20~30 m)、骤减段(30~38.5 m)、缓减段(38.5~50.6 m)3个阶段。为了更加直观的表述平坦场地与斜坡场地振动速度的衰减特征,绘制4 000、12 000、25 000 kN·m能级多次夯击下振动速度与振源距折线图如图7所示,用字母标记平坦场地与斜坡的特征振动速度折线段。由图7可知,平坦场地与斜坡场地中相似阶段折线倾斜度相似,说明平坦场地和斜坡场地中相似阶段振动速度与振源距有类似的变化规律。

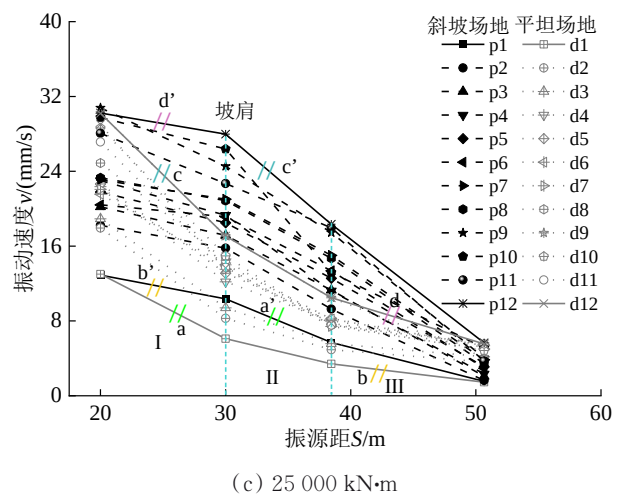
求图7中带标记折线段的斜率,获得振动速度衰减率,如表3所示。由表3可知,振源距为20~30 m时,斜坡场地中振动速度衰减率一般比平坦场地小,后者是前者的2.7~19.4倍。结合地形分析,坡肩($S=30$ m)处于平坦场地和斜坡场地的交界处,



(a) 4 000 kN·m



(b) 12 000 kN·m



(c) 25 000 kN·m

图7 振动速度与振源距折线图

Fig. 7 Line graph of vibration velocity and vibration source distance

振动波到达此处时会产生折射和反射等叠加效应^[13],能量在此处集中,宏观上表现为坡肩振动速度大于相同振源距下的平坦场地,在相同振源距下,振动速度衰减率表现为不同的特征。

表3 振动速率衰减率

Table 3 Vibration rate decay rate

夯击能/ (kN·m)	折线段	振动速度衰减率 k			差值 Δ	相对差 值 $ \Delta k /k$
		20~ 30.0 m	30~ 38.5 m	38.5~ 50.6 m		
4000	a-a'	-0.74	-0.71		-0.03	0.04
	b-b'	-0.20		-0.11	-0.09	0.88
	c-c'	-1.19	-1.28		0.10	0.08
	d-d'	-0.06		-0.08	0.02	0.27
12 000	a-a'	-0.33	-0.28		-0.05	0.18
	b-b'	-0.10		-0.12	0.02	0.17
	c-c'	-1.19	-1.47		0.28	0.19
	d-d'	-0.14		-0.38	0.24	0.64
25 000	a-a'	-0.69	-0.55		-0.14	0.26
	b-b'	-0.25		-0.16	-0.09	0.57
	c-c'	-1.31	-1.13		-0.18	0.16
	d-d'	-0.23		-0.41	0.18	0.45*

2.2 夯击能对振动速度的影响规律

斜坡场地中不同夯击能的振动速度分布如图8所示,图中阴影面积表示数据分布的密度,面积越大,数据量越大。由图8可知,夯击能为4 000、12 000、25 000 kN·m时,振动速度均值分别为10.82、16.03、15.10 mm/s,标准差分别为6.07、8.42、8.69。根据平均值 ± 1 倍标准差可知,4 000、12 000、25 000 kN·m能级的振动速度统计数据中占比68%分别为4.75~16.89 mm/s、7.61~24.46 mm/s、6.41~23.80 mm/s。整体分析,平均振动速度随夯击能增加先增后减,不同能级下的振动速度主要集中在4~25 mm/s。4 000 kN·m能级振动速度的标准差在3个能级中最小,数据集集中度最高,振动速度的稳定性相对较高。

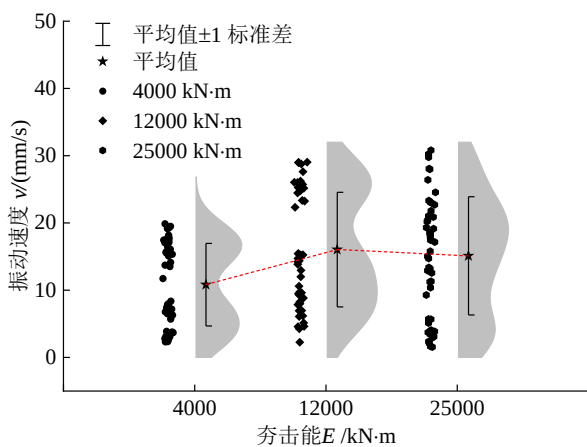


图8 振动速度分布

Fig. 8 Vibration velocity distribution

为定量研究振动速度与夯击能的关系,选取不同夯击能下最大、平均、最小振动速度等特征振动速度,得到特征振动速度与夯击能的关系曲线如图

9所示。

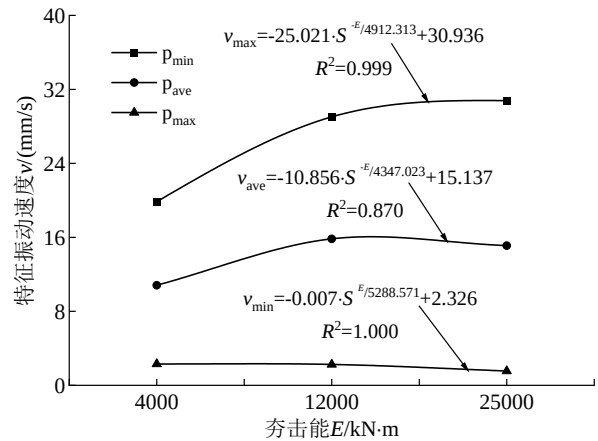


图9 振动速度与夯击能关系

Fig. 9 Relationship between vibration velocity and compaction energy

由图9可知,最大和平均振动速度随夯击能增加先快速增大,至曲线渐近线(分别为 $v_0=30.94$ mm/s和15.14 mm/s)后趋于平稳,而最小振动速度随夯击能增加无显著变化甚至略有下降,总体上两者符合式(2)所示的指数函数关系。

$$v = a \cdot e^{\frac{-E}{b}} + v_0 \quad (2)$$

式中: a 为系数,小于零的实数; e 为自然常数,2.718; b 为指数系数; v_0 为常数,大于零。

上述分析结果表明,夯击能对振动速度的影响有限。较高夯击能虽增加冲击能量,但较高的夯击能往往意味较大的夯锤侧面积,较大侧面积导致冲击能量的分布面增大,影响了振动传播效率,这解释了随着夯击能的增加,最大和平均振动速度先快速增大后趋于平稳、最小振动速度不增反降的现象。

2.3 夯沉量对振动速度的影响规律

斜坡场地中振动速度与夯沉量关系见图10。由图10可知,随着夯沉量增加,振动速度整体上先快速增长,再缓慢增长,最后趋于稳定,过程中有小波动。结合单击夯沉量分析,单击夯沉量曲线出现“折点”时,振动速度曲线也会出现“折点”,且振动速度曲线的折点可分为“a”“b”两种。

a型:单击夯沉量与累计夯沉量曲线在该点“下凹”。该型折点出现后,累计夯沉量与振动速度曲线增大或增长率变大。夯沉量与土体密度密切相关^[1],曲线出现“下凹”,说明此时土体密实度短暂达到“极值点”,夯坑底部形成“硬壳体”,其吸收冲击能量有限^[26],部分能量穿过硬壳体向更深的土层中传播。下一次夯击时,单击夯沉量增大,表明夯锤突破“硬壳体”,此时更多能量传至地表,使地表所

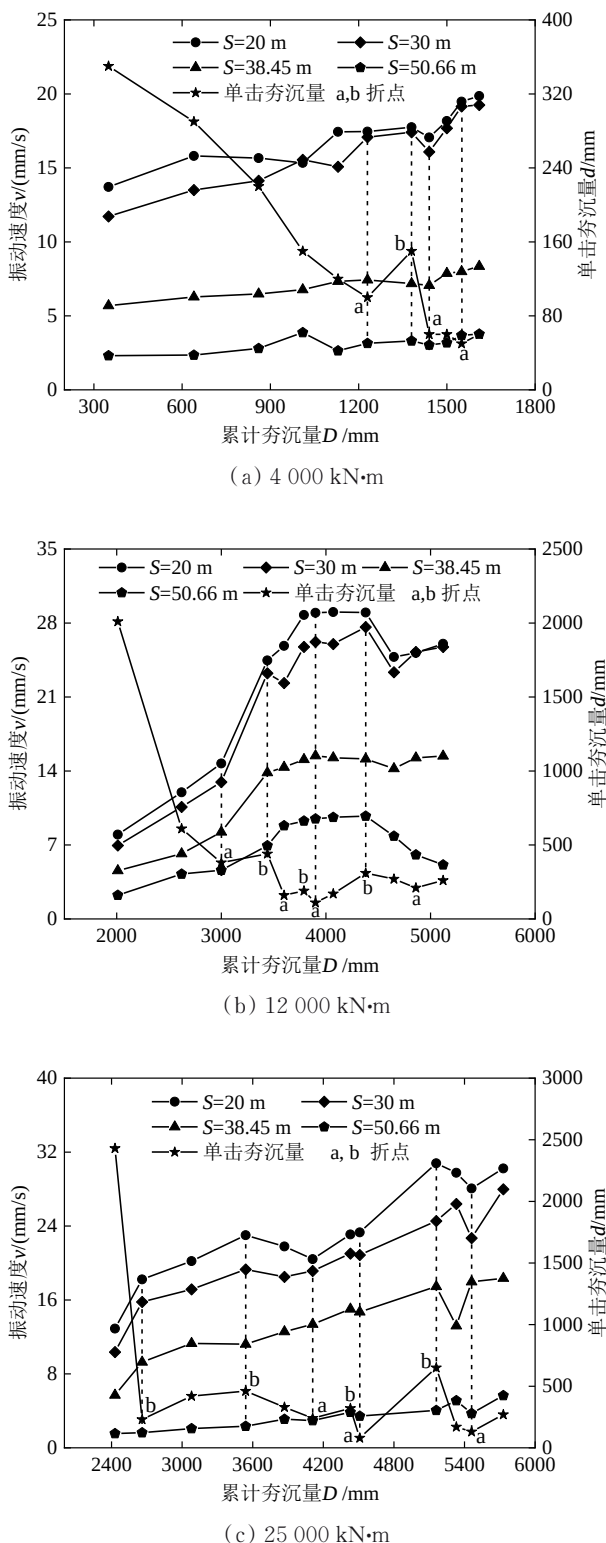


图 10 振动速度与夯沉量关系

Fig. 10 Relationship between vibration velocity and settlement

测振动速度增长或增长率增大。

b 型: 单击夯沉量与累计夯沉量曲线在该点处“上凸”。单击夯沉量曲线出现 b 型折点后, 累计夯沉量与振动速度曲线会呈现减小或增长率衰减的趋势。b 型折点往往出现在 a 型折点之后, 显示的是

夯锤突破“旧硬壳体”~形成“新硬壳体”的过程, 此时大部分振动能量传向更深的土层中, 地表所测振动速度出现减小或增长率衰减的现象。

3 强夯振动影响因素的敏感性分析

上述研究仅分析了振源距、夯击能、夯沉量等单一因素对振动速度的影响规律, 难以分辨各种因素对振动影响的强弱顺序, 且难以衡量各个因素之间相互作用对振动的影响, 无法系统指导强夯减振设计与施工。为量化各因素对强夯振动影响的强弱, 拟采用 Sobol 敏感性分析法对强夯振动数据进行分析, 但该方法一般需要模型函数关系, 而实际工程中振动速度与振源距、夯击能、夯沉量之间的函数 $f(x)$ 难以获得。BP 神经网络 (Back Propagation Neural Network) 是通用的函数逼近器, 理论上能逼近任何复杂非线性函数^[27]。BP 神经网络的结构参数为: 隐藏层数为 1 层, 学习率为 0.01, 经试验法分析, 最优隐藏节点数设为 7 个, 最大迭代次数设为 10 000 次, 实际迭代次数为 28 次。BP 神经网络和 Sobol 敏感性分析法结合的技术路线见图 11。

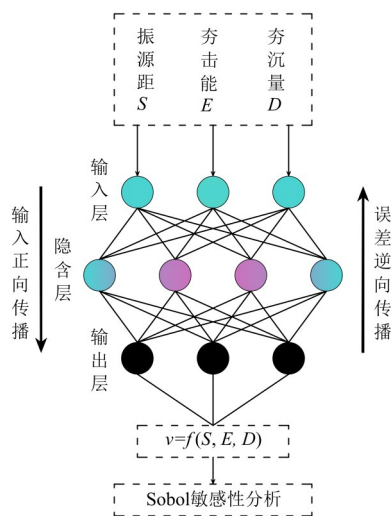


图 11 BP 神经网络建模与 Sobol 敏感性分析

Fig. 11 BP neural network modeling and Sobol sensitivity analysis

Sobol 敏感性分析是俄罗斯科学家 Sobol 提出的一种全局敏感性分析方法^[28], 基于方差分解原理, 通过分解模型输出总方差确定输入变量及其交互作用的贡献, 其敏感性指标有主效应和全效应指数。主效应指数衡量单个输入参数对输出参数的影响程度, 指数越大影响越大; 全效应指数表示输入参数对输出参数的单独影响及与其他参数交互作用的影响^[29]。

假设模型的函数关系为 $y=f(x)$, 其中 $x=[x_1, x_2$

$\cdots x_n]^T$ 为 n 维度独立随机变量, $0 \leq x \leq 1$, y 表示 1 维输出, 将模型 $y=f(x)$ 分解成 n 个以 2 为底的递增项之和

$$f(x) = f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} f_{i,j}(x_i, x_j) + \cdots + f_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

式中: f_0 为 $f(x)$ 数学期望, 是常数项; $f_i(x_i)$ 为 x_i 的 1 阶子函数; $f_{i,j}(x_i, x_j)$ 为与 x_i 和 x_j 有关的 2 阶子函数; $f_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为与所有输入变量有关的 n 阶子函数。

当全部子函数满足式(3)条件时, 式(4)分解唯一。

$$\int_0^1 f_{i_1, \dots, i_k}(x_{i_1}, \dots, x_{i_k}) dx_{i_k} = 0 \quad 1 \leq k \leq s \quad (4)$$

式(4)表示任何非 0 阶子函数的期望始终为 0。结合式(3)和式(4)可知, 各个子函数相互之间具有正交性, 可以通过多重积分求得

$$f_0 = E(y) = \int_0^1 f(x) dx \quad (5)$$

$$f_i = E(y/x_i) - f_0 = \int_0^1 f(x) \prod_{z \neq i} dx_z - f_0 \quad (6)$$

$$f_{i,j} = E(y/x_i, x_j) - f_i - f_j - f_0 = \int_0^1 f(x) \prod_{z \neq i,j} dx_z - f_i - f_j - f_0 \quad (7)$$

则函数 $f(x)$ 的总方差为

$$D[f(x)] = \int_0^1 f^2(x) dx - f_0^2 \quad (8)$$

每一项方差可以通过式(9)计算得出。

$$D_{i_1, \dots, i_z} = \int_0^1 f_{i_1, \dots, i_z}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_z}) dx_{i_1} \cdots dx_{i_z} \quad (9)$$

式中: $1 \leq i_1 < \dots < i_z \leq n$, $z = 1, 2, \dots, n$ 。

通过方差比值即可求得 Sobol 全局灵敏度指标

$$S_{i_1, i_2, \dots, i_z} = \frac{D_{i_1, i_2, \dots, i_z}}{D[f(x)]} \quad (10)$$

当 $z=i$ 时, 计算结果为参数 x_i 的主效应指数, 表示参数 x_i 对输出 $f(x)$ 的主要影响。

在强夯振动影响因素分析中, 设: $x_1=S$ =振源距; $x_2=E$ =夯击能; $x_3=D$ =夯沉量。

$$x = [x_1, x_2, x_3] = [S, E, D] \quad (11)$$

$x = [x_1, x_2, x_3]$ 为模型的输入参数集, 每一个参数进行归一化处理后, 可以将每一个参数看作在 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机变量, 且经过分析可知, 振源距、夯击能、夯沉量三个参数之间两两互相独立, 模型输出(振动速度)是关于输入参数集的函数, 可表示为 $v=f(x)$, 方差为 $D(x)$ 。

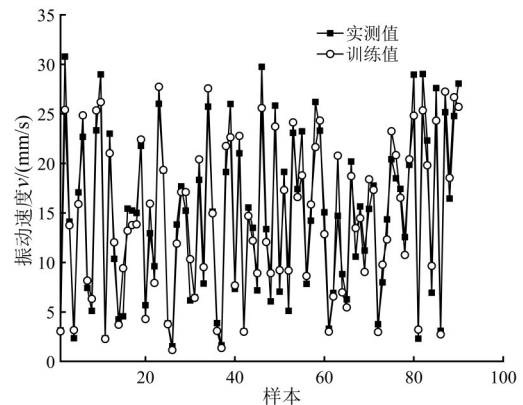
强夯振动数据共 140 组, 涵盖不同振源距、夯击能和夯沉量对应的振动速度数据。为避免原始数

据排序影响建模准确度, 采用 Fisher-Yates 随机洗牌算法对数据随机排序, 再用 Matlab 编程处理 BP 神经网络模型, 将 140 组数据划分为“训练组(X)”和“预测组(Y)”。不同数据量分组的仿真情况见表 4。由表 4 可知, “ $X/Y=90/50$ ”时, BP 模型的训练组和预测组数据的决定系数 R^2 分别为 0.928 和 0.905, 且 MAE 和 MBE 均相对较小, 所以选用该组作为模型训练输入数据, 模型训练和预测效果分别见图 12(a)、(b)。

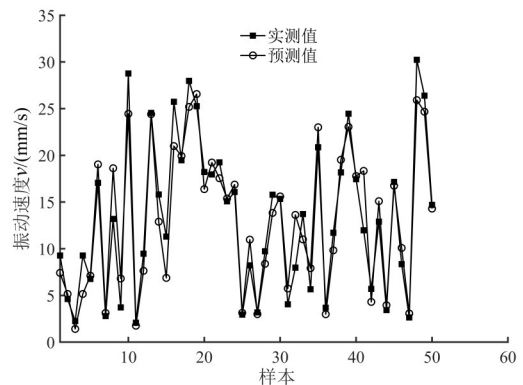
表 4 训练组与预测组比值对模型精度的影响

Table 4 Effect of the ratio of training group to prediction group on model accuracy

X/Y	R^2		MAE		MBE	
	X	Y	X	Y	X	Y
60:80	0.907	0.170	1.772	4.643	0.901	3.485
70:70	0.925	0.839	1.575	2.600	0.104	0.350
80:60	0.896	0.861	1.921	2.474	0.278	0.500
90:50	0.928	0.905	1.797	1.877	-0.024	-0.131
100:40	0.933	0.904	1.724	1.790	-0.044	-0.390
110:30	0.937	0.827	1.641	1.944	-0.001	0.684



(a) 实测值与训练值



(b) 实测值与预测值

图 12 $X/Y=90/50$ 时的 BP 模型训练和预测

Fig. 12 BP model training and prediction when $X/Y=90/50$

振源距 S 、夯击能 E 、夯沉量 D 对振动速度 v 的 Sobol 灵敏度指标直方图如图 13 所示。由图 13 可

知,振动速度受振源距 S 、夯击能 E 、夯沉量 D 影响的敏感性程度排序为

$$D > S > E \quad (12)$$

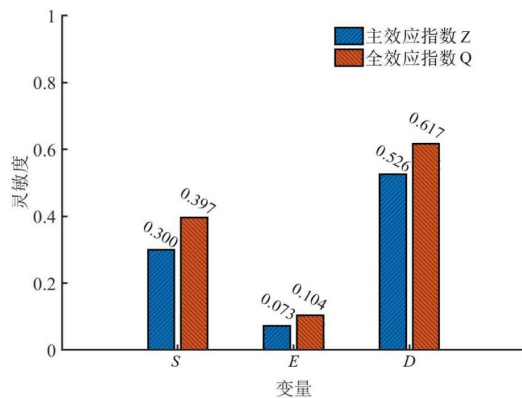


图 13 敏感性指标

Fig. 13 Sensitivity index

由图 13 可知,夯沉量 D 对振动速度 v 的主效应指数 Z 是振源距 S 的 1.75 倍、夯击能 E 的 7.21 倍,全效应敏感性指数 Q 是振源距的 1.55 倍、夯击能的 5.93 倍。具体来说, D 在主、全效应敏感性分析中指数最高,直接贡献和与其他变量的交互作用都很显著; S 次之; E 敏感性最低,对振动速度影响有限。

上述研究表明,夯沉量是影响振动速度的主要因素,对其优化或控制可显著减弱强夯振动;振源距影响次之,设计或施工中需重视;夯击能影响较小,可作为次要关注因素。

4 结论

在杂填土平坦场地和斜坡场地中研究了 25 000、12 000、4 000 kN·m 下振源距、夯击能、夯沉量 3 种因素对振动速度的影响规律,采用 Sobol 敏感性分析法确定了 3 种因素对强夯振动速度影响强弱的排序,得到以下结论:

1) 平坦场地中振动速度与振源距之间符合 $v = A \cdot e^{-S/b} + v_0$ 的负指数函数关系,而斜坡中仅在坡肩~坡底范围内符合负指数函数关系;在斜坡和平坦场地中,振动速度随夯源距变化均呈类似的 3 阶段衰减规律,平坦场地为骤减、缓减、趋稳,斜坡为缓变、骤减、缓减;坡肩存在“能量集中”效应,其振动速度大于相同振源距的平坦场地。

2) 斜坡场地中振源距为 20~50.6 m 时强夯振动速度大多分布在 4~25 mm/s 之间;随着夯击能的增加,最大和平均振动速度先快速上升,后趋于平稳,而最小振动速度保持稳定或略有下降;振动速度与夯击能之间符合 $v = A \cdot e^{-E/b} + v_0$ 的负指数函数关系,较高的夯击能虽能增加冲击能量,但其对振动速度的影响有限。

3) 随着夯沉量的增加,振动速度增长先快后慢,最终趋于稳定;在累计夯沉量-夯沉量曲线的“下凹”型折点后,振动速度增长或增长率增大,反映了土体密实度达到阶段性极值并形成短暂的“硬壳体”;在“上凸”型折点后,振动速度减小或增长率衰减,反映了夯锤突破“硬壳体”并形成新“硬壳体”的过程。

4) 夯沉量对振动速度的主效应指数是振源距的 1.75 倍、夯击能的 7.21 倍,全效应敏感性指数是振源距的 1.55 倍、夯击能的 5.93 倍;控制夯沉量对减轻强夯振动的影响最为显著,振源距次之,夯击能最小。

参考文献

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.
LIU H L, ZHAO M H. Review of ground improvement technical and its application in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115. (in Chinese)
- [2] 董炳寅, 水伟厚, 秦劭杰. 中国强夯 40 年之技术创新[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1-16.
DONG B Y, SHUI W H, QIN S J. Technological innovation of dynamic compaction in China for forty years [J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 1-16. (in Chinese)
- [3] HWANG J H, TU T Y. Ground vibration due to dynamic compaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 337-346.
- [4] 赵家琛, 吕江, 赵晖, 等. 高能级强夯处理抛填路基的有效加固深度[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 27-33.
ZHAO J C, LV J, ZHAO H, et al. Effective reinforcement depth of high energy dynamic compaction for filled subgrade [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 27-33. (in Chinese)
- [5] FATHI AFSHAR N, HAMIDI A, TAVAKOLI MEHRJARDI G. Impact of diffraction on screening of dynamic compaction waves with barriers [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9(6): 184.
- [6] ROLLINS K M, JORGENSEN S J, ROSS T E. Optimum moisture content for dynamic compaction of collapsible soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(8): 699-708.
- [7] 闫东霄, 邓小龙. 路基强夯振动衰减规律及对临近构筑物影响分析[J]. 公路, 2022, 67(6): 70-74.
YAN D X, DENG X L. Vibration attenuation law of subgrade dynamic compaction and its influence on adjacent structures [J]. Highway, 2022, 67(6): 70-74. (in Chinese)

- [8] 詹金林, 水伟厚. 强夯法施工的环境振动监测研究 [C]//第十届中国科协年会论文集, 2009: 506-514.
ZHAN J L, SHUI W H. Monitoring the environment vibration in dynamic compaction construction [C]// The 11th Annual Conference of Chinese Association for Science and Technology, 2009: 506-514. (in Chinese)
- [9] 刘超, 梁海安, 程新俊, 等. 城市软土地基组合锤法强夯施工振动效应研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(2): 381-390.
LIU C, LIANG H A, CHENG X J, et al. Study on vibration effect of combined heavy tamping on soft soil foundation in city [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(2): 381-390. (in Chinese)
- [10] WU S F, WEI Y Q, ZHANG Y Q, et al. Dynamic compaction of a thick soil-stone fill: Dynamic response and strengthening mechanisms [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129: 105944.
- [11] WU J W, MA L J, SHI J, et al. Investigation of ground vibration of full-stone foundation under dynamic compaction [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 2631797.
- [12] 曹利, 卞海丁, 张哲, 等. 高能级强夯黄土地基振动衰减规律模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6581-6590.
CAO L, BIAN H D, ZHANG Z, et al. Model test study on vibration attenuation law of high energy dynamic compaction loess foundation [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6581-6590. (in Chinese)
- [13] WU B Q, NI W K, SHI B L, et al. Study on elevation effect of vibration velocity by dynamic compaction on loess high slope based on dimensional analysis method [J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(6): 04024107.
- [14] 姚占勇, 金壮, 张恺, 等. 公路拓宽地基强夯振动传播规律研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 208-213.
YAO Z Y, JIN Z, ZHANG K, et al. Research on road widening subgrade compaction vibration propagation law [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(8): 208-213. (in Chinese)
- [15] 龚成明, 程谦恭, 刘争平. 强夯激励下黄土边坡动力响应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2001-2006.
GONG C M, CHENG Q G, LIU Z P. Model test study of dynamic responses of loess slope by dynamic compaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2001-2006. (in Chinese)
- [16] VLČEK J, GAGO F, MIHÁLIK J, et al. Investigation of dynamic effect of rapid impact compaction [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 21364.
- [17] 曲兆军, 高永涛, 欧阳振华. 强夯作用下土石混合体填筑边坡变形与振动特性[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 52-55, 110.
QU Z J, GAO Y T, OUYANG Z H. Displacement and vibration characteristics of soil-rock mixture filling-up slope under dynamic compaction [J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2011, 32(2): 52-55, 110. (in Chinese)
- [18] British Standards Institution. Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer: ISO 16063-22: 2005 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
- [19] COLAÇO A, ALVES COSTA P, MONT'ALVERNE PARENTE C, et al. Ground-borne noise and vibrations in buildings induced by pile driving: An integrated approach [J]. Applied Acoustics, 2021, 179: 108059.
- [20] HALADIN I, BOGUT M, LAKUŠIĆ S. Analysis of tram traffic-induced vibration influence on earthquake damaged buildings [J]. Buildings, 2021, 11(12): 590.
- [21] 刘远, 孙进忠, 赵体, 等. 强夯地基处理效果的多道瞬态瑞雷波检测[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2910-2916.
LIU Y, SUN J Z, ZHAO T, et al. Quantitative evaluation of dynamic consolidation effect of foundation based on multi-channel transient Rayleigh wave method [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6): 2910-2916. (in Chinese)
- [22] YANG H, DUAN H F, ZHU J B, et al. Water effects on elastic S-wave propagation and attenuation across single clay-rich rock fractures: insights from ultrasonic measurements [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(4): 2645-2659.
- [23] TOYGAR O, ULGEN D. A full-scale field study on mitigation of environmental ground vibrations by using open trenches [J]. Building and Environment, 2021, 203: 108070.
- [24] CHEN W W, WEI S J, WANG W T. Subslab ultra low velocity anomaly uncovered by and facilitating the largest deep earthquake [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2754.
- [25] HALL J R Jr, RICHART F E Jr. Dissipation of elastic wave energy in granular soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(6): 27-56.
- [26] 刘文俊, 李岳, 蔡靖, 等. 基于强夯应力波传播模型的夯击参数研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(Sup 1): 427-435.
LIU W J, LI Y, CAI J, et al. Study on tamping parameters based on dynamic compaction stress wave propagation model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(Sup 1): 427-435. (in Chinese)
- [27] 朱建民, 于永堂, 郑建国, 等. 基于 GA-BP 神经网络的黄土高填方工后沉降预测[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(Sup 1): 382-386, 418.

ZHU J M, YU Y T, ZHENG J G, et al. Prediction of post-construction settlement of loess high fill based on GA-BP neural network [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Sup 1): 382-386, 418. (in Chinese)

[28] Sobol I M. On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models [J]. Matematicheskoe modelirovanie, 1990, 2(1): 112-118.

[29] ZOUHRI W, HOMRI L, DANTAN J Y. Handling the impact of feature uncertainties on SVM: A robust approach based on sobol sensitivity analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 189: 115691.

(编辑 XXX)