

强夯法处理机场地基振动衰减规律及 邻近建筑安全评估

沈军¹, 刘勤峰¹, 胡天文¹, 王顺苇^{2*}, 木林隆², 钱建固²

(1. 杭州萧山国际机场有限公司, 浙江 杭州 311207; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了探讨机场地基在强夯荷载下的动力特性, 以萧山机场地基加固项目为依托, 进行了现场振动监测试验。通过强夯点周围的振动速度监测数据, 分析了强夯荷载下地基振动速度衰减规律, 分别给出了 800 kN·m、1 200 kN·m 和 1 800 kN·m 夯击能级作用下地基竖向振动速度随距离的衰减公式。基于该公式确定了地基强夯处理安全范围, 并结合监测结果评估了强夯区周边建筑的安全性。研究表明: 在强夯作用下, 地基振动速度峰值随距离呈指数衰减, 且在同一位置的竖向振动速度大于水平振动速度, 因此在实际工程中应重点关注竖向振动速度峰值; 强夯点周围的建筑物基础和顶层振动速度峰值均满足相关规范要求。

关键词: 强夯法; 振动速度; 振动监测; 安全范围; 邻近建筑; 衰减规律

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0463-06

Vibration attenuation patterns of airport foundation with dynamic compaction treatment and safety assessment of adjacent buildings

SHEN Jun¹, LIU Qinfeng¹, HU Tianwen¹, WANG Shunwei^{2*}, MU Linlong², QIAN Jiangu²

(1. Hangzhou Xiaoshan International Airport Co., Ltd., Hangzhou 311207, Zhejiang, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the dynamic characteristics of airport foundation under dynamic compaction loads, with the backdrop of the Xiaoshan Airport foundation reinforcement project, field vibration monitoring experiments were conducted. Based on the monitoring data of vibration velocity around the dynamic compaction points, the attenuation law of ground vibration velocity under dynamic compaction loading was analyzed. The attenuation formulas for vertical ground vibration velocity with distance were provided for compaction energy levels of 800 kN·m, 1 200 kN·m, and 1 800 kN·m, respectively. Using this formula, the safe range for ground treatment through dynamic compaction was determined, and the safety of surrounding buildings near the dynamic compaction area was evaluated in conjunction with the monitoring results. The study shows that under dynamic compaction, the peak ground vibration velocity decays exponentially with distance, and the vertical vibration velocity is greater than the horizontal vibration velocity at the same location. Therefore, in practical engineering applications, attention should be primarily focused on the peak vertical vibration velocity. The peak vibration velocities of the foundations and top floors of the surrounding buildings near the dynamic compaction points comply with relevant code requirements.

Key words: dynamic compaction; vibration velocity; vibration monitoring; safety range; adjacent buildings; attenuation pattern

收稿日期: 2023-07-15

作者简介: 沈军 (1970—), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 主要从事工程建设管理工作。E-mail: 283063154@qq.com。

*通信作者: 王顺苇 (1991—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事地基处理方面的研究工作。E-mail: shunweiwang@tongji.edu.cn。

0 引言

强夯法是一种常用的地基处理方法，通过在地表上反复使用大型夯锤对地基施加冲击以提高地基的承载能力和稳定性。然而，强夯法产生的振动波会沿着地层进行传播，引发结构振动，导致建筑物振动速度增加，从而对结构稳定性产生不利的影响^[1]。随着国家经济的快速发展，基础设施建设项目如道路、桥梁、铁路、机场等规模日益扩大，工程振动问题在这些大型基础设施施工中变得尤为重要，需要更精确的振动分析与控制，以确保结构的安全性和稳定性，减小对周围环境和居民的影响。

强夯法施工振动对周边环境的影响规律是工程振动领域的研究重点之一。国内外的研究学者对此进行了广泛的研究。梁永辉等^[2]通过强夯法对新疆乌鲁木齐机场高填方地基进行了处理，现场试验结果显示其效果显著；潘周展^[3]的现场试验表明强夯法不仅可以有效提高地基强度，还能消除设计深度内的砂土液化问题；邱玉航^[4]通过有限元软件建立数值模型，研究了强夯作用下地基的应力和位移的变化规律。然而，这些研究并没有深入分析强夯振动规律。刘超等^[5]通过南昌某地基的原位试验，分析了锤击次数对地基水平和竖向加速度的影响规律；闫东霄和邓小龙^[6]采用强夯法处理公路地基，通过实测振动数据建立了3 000 kN·m能级夯击下振动速度的衰减公式；时伟等^[7]通过现场试验分析了强夯振动在不同距离和楼层上的衰减规律，并确定了8 000 kN·m能级强夯施工的安全施工距离；丁文湘等^[8]通过数值模拟分析了夯锤半径和夯击

能组合条件下，竖向振动速度和加速度随距离的衰减规律，并分析了隔振孔的隔振效果；曹利等^[9]通过室内试验研究了夯击次数、含水量、落距等参数对黄土地基振动加速度的影响。虽然上述研究取得了一定的成果，但是强夯法引发的振动受到夯重、夯击能量、夯击频率、土体类型、地下水含量等多种因素的影响，现有的研究成果仍滞后于工程实践的需求。此外，上述研究的夯击能级均在2 000 kN·m以上，针对2 000 kN·m以下能级在机场地基处理中的应用研究较少。

本文依托萧山机场地基加固项目，对现场实测数据进行分析，得到了2 000 kN·m以下能级强夯条件下竖向振动速度峰值衰减规律，为相似工程的安全评估提供参考。

1 工程概况与试验方案

1.1 工程概况

杭州萧山国际机场L滑行道工程位于二期工程航站楼东侧、跑道滑行道南侧。施工场区内沟浜塘众多，大小不一，形状各异，底部分布有厚度不等的淤泥，浅层土的地基反应模量和强度均比较低。场区地基主要由浅层砂质粉土构成，强度低且物理性质和均匀性较差，并伴有轻微至中等程度的地震液化问题，场区浅层残留有大量建筑垃圾和原有房屋基础，主要由碎石、块石和混凝土块组成，与周边地基土形成较大差异，加剧浅层地基的不均匀性。为了提高地基的强度并降低其压缩性，主要采用强夯法进行地基处理，不同区域地基处理方案如图1所示。

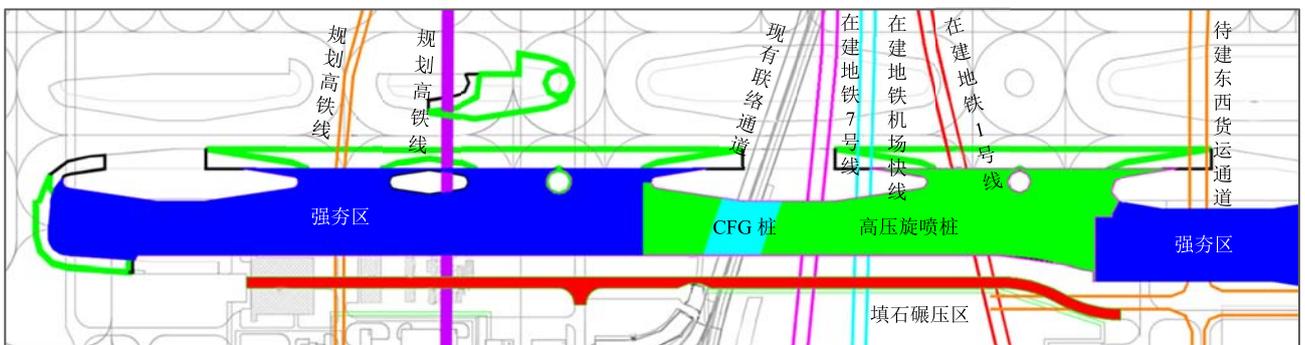


图1 不同区域地基处理方案

Fig. 1 Foundation treatment plans for different areas

1.2 试验方案

采用强夯法进行地基处理时，会对地层和周边建筑的安全性产生影响，因此在施工前需要进行现

场试验。在本次试验中，选取离AOC（机场运行中心）大楼和机坪管理楼较近的一点作为强夯点，该点分别距离AOC大楼和机坪管理楼172.72 m和

85.65 m, 分别采用 800 kN·m、1 200 kN·m 和 1 800 kN·m 能级在强夯点夯击, 为得到地面水平振速和竖向振速随距离的衰减规律, 分别在距离强夯点 11 m、33 m、55 m、77 m 和 99 m 处设置监测点, 为确保周边建筑的安全, 还在 AOC 大楼塔顶和机坪管理楼楼顶设置监测点, 测量楼顶振速。强夯点及监测点布置情况如图 2 所示。

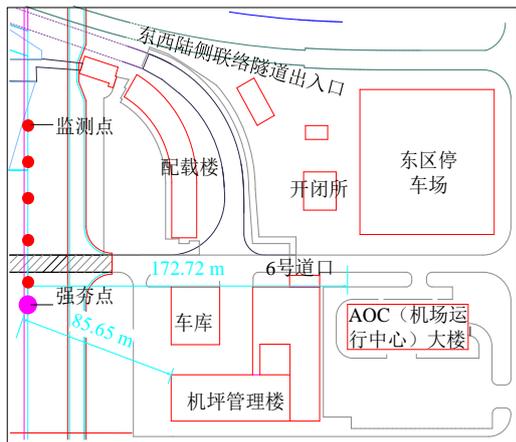


图 2 强夯点及监测点布置情况

Fig. 2 Layout of dynamic compaction points and monitoring points

2 结果分析

2.1 强夯水平振动速度衰减规律

图 3 为在 800 kN·m 夯击能级作用下, 距夯击中心 20 m 处获取到的水平振动速度时程曲线, 由图 3 可知, 在该点的水平振动速度峰值为 0.84 cm/s, 发生在夯击后 903 ms, 水平振动速度谷值为 -0.60 cm/s, 发生在夯击后 952 ms。

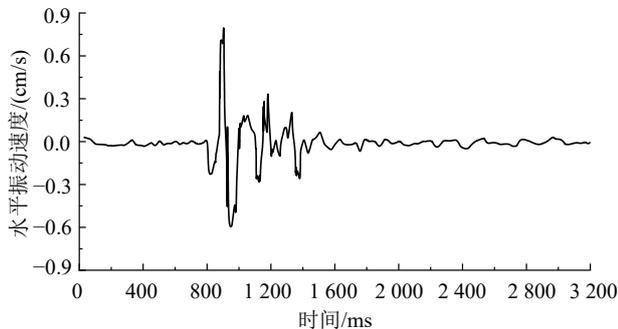


图 3 距夯击中心 20 m 处水平振动速度时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of horizontal vibration velocity at 20 m away from the tamping center

图 4 为夯击能级为 800 kN·m、1 200 kN·m 和 1 800 kN·m 时水平最大振动速度随距离的变化曲线, 由图 4 可知, 水平最大振速随着夯击能级的提

高而增大, 随着与强夯点中心距离的增加逐渐减小, 当测点与强夯点的距离达到 100 m 时, 3 种夯击能级对应的最大水平振速分别为 0.09 cm/s、0.11 cm/s、0.14 cm/s。

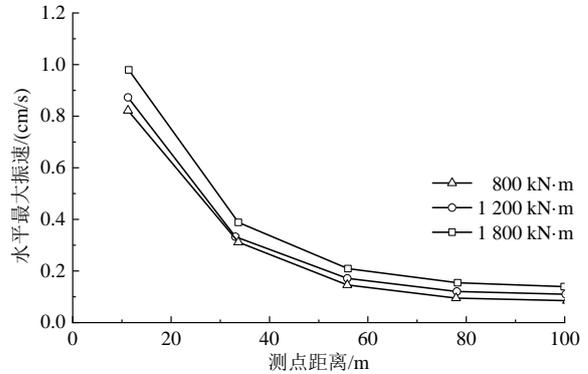


图 4 水平最大振动速度随距离的变化曲线

Fig. 4 Relationship curves of maximum horizontal vibration velocity versus distance

2.2 强夯竖向振动速度衰减规律

图 5 为在 800 kN·m 夯击能级作用下, 距夯击中心 20 m 处获取到的竖向振动速度时程曲线, 由图 5 可知, 该点的竖向振动速度谷值为 -1.30 cm/s, 发生在夯击后 1 937 ms, 竖向振动速度峰值为 0.85 cm/s, 发生在夯击后 2 012 ms。实际上由于纵波在土体中的传播速度大于横波^[10], 因此该点应先发生竖向振动再发生水平振动, 而本文却出现了相反的结果, 造成该现象的主要原因可能是采用了不同的拾振器分别测量竖向和水平振动速度, 在测量过程中出现了误差。

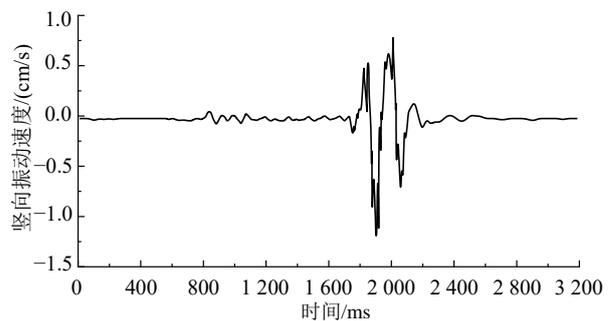


图 5 距夯击中心 20 m 处竖向振动速度时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of vertical vibration velocity at 20 m away from the tamping center

图 6 为夯击能级分别为 800 kN·m、1 200 kN·m 和 1 800 kN·m 时竖向最大振动速度随距离的变化曲线。由图 6 可知, 竖向最大振动速度与水平最大振动速度的衰减规律相似, 随着夯击能级的提高而增大, 随着测点距离的增加而减小, 当测点与强夯点的距离

达到 100 m 时, 3 种夯击能级对应的最大竖向振速分别为 0.14 cm/s、0.19 cm/s、0.23 cm/s。为了方便与水平振动速度对比, 表 1 列出不同夯击能级和距离下, 同一位置的水平 and 竖向振动速度峰值情况, 由表 1 可知, 相同位置的竖向振动速度要大于水平振动速度。

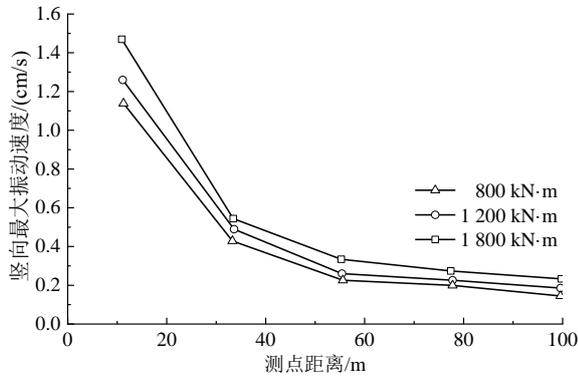


图 6 竖向最大振动速度随距离的变化曲线

Fig. 6 Relationship curves of maximum vertical vibration velocity versus distance

表 1 同一位置不同夯击能下振动速度峰值对比

Table 1 Comparison of peak vibration velocity at the same location under different tamping energies

距离/m	振动方向	夯击能		
		800 kN·m	1 200 kN·m	1 800 kN·m
11	水平	0.82	0.87	0.98
	竖向	1.13	1.26	1.47
33	水平	0.31	0.33	0.39
	竖向	0.42	0.49	0.54
55	水平	0.15	0.17	0.21
	竖向	0.23	0.26	0.33
77	水平	0.10	0.12	0.15
	竖向	0.20	0.23	0.27
99	水平	0.09	0.11	0.13
	竖向	0.14	0.19	0.23

注: 振动速度单位为 cm/s。

2.3 强夯振动基础安全范围分析

由 2.2 节可知, 相同位置下竖向振动速度要大于水平振动速度, 《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)^[11] 给出了基础的容许振动速度峰值, 但未对振动速度衰减规律给出建议, 为了保证周边建筑的安全, 对竖向振动速度随距离的衰减曲线进行拟合, 得到安全范围。

采用式 (1) 对竖向最大振动速度进行拟合:

$$v = a + be^{-kx} \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 k 为拟合参数, 可根据实测数据确定。

对 800 kN·m、1 200 kN·m 和 1 800 kN·m 夯击能级下的最大竖向振动速度实测数据进行拟合, 得到参数 a 、 b 、 k 的取值, 如表 2 所示, 拟合相关系数分别为 0.998 7、0.999 4 和 0.999 5, 说明取得了较好的拟合效果。竖向振动速度峰值衰减曲线拟合结果如图 7 所示, 由图 7 可知, 竖向振动速度峰值随着与测点距离的增加呈指数型衰减。

经现场测量, 3 种夯击能级的频率均小于 10 Hz, 根据标准^[11], 当振动频率小于 10 Hz 时, 工业建筑和公共建筑的基础容许振动峰值为 1.2 cm/s, 居住建筑的基础容许振动峰值为 0.5 cm/s。通过拟合公式分别确定了满足公共/公用建筑、民用建筑保护要求的强夯施工安全范围, 如表 2 所示, 当最大夯击能级为 1 800 kN·m 时, 安全范围分别为 15.27 m 和 37.04 m, 图 2 中的建筑物均在该范围之外, 说明强夯法加固地基可以满足建筑物的基础保护要求。

表 2 衰减函数参数及安全范围预测

Table 2 Attenuation function parameters and safety range predictions

拟合参数/ 建筑类型	800 kN·m	1 200 kN·m	1 800 kN·m
	a	0.16	0.18
b	1.89	2.01	2.40
k	0.058	0.060	0.060
相关系数	0.998 7	0.999 4	0.999 5
公共/公用建筑 安全距离/m	10.30	11.31	15.27
居住建筑 安全距离/m	29.58	30.62	37.04

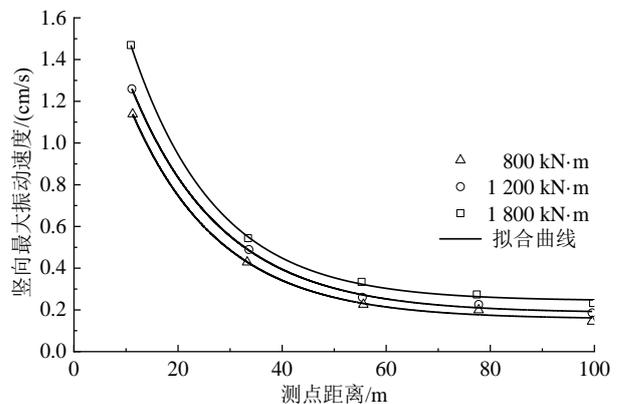


图 7 竖向振动速度峰值衰减曲线拟合结果

Fig. 7 Fitted results of peak vertical vibration velocity attenuation curves

2.4 顶层楼面监测数据分析

标准^[11]不仅给出了基础处的容许振动速度峰值,还给出了顶层楼面的容许振动速度峰值,两者需均在规范要求范围内。图8和图9分别为机坪管理楼楼顶和AOC大楼塔顶振动速度时程曲线,由图8~9可知,机坪管理楼楼顶的振速峰值和谷值分别为0.10 cm/s和-0.14 cm/s, AOC大楼塔顶的振动速度峰值和谷值分别为0.047 cm/s和-0.037 cm/s。标准^[11]建议工业建筑和公共建筑的顶层楼面容许振动速度峰值为2.4 cm/s,而居住建筑的楼顶容许振动速度峰值为1.2 cm/s,监测结果均满足规范要求。

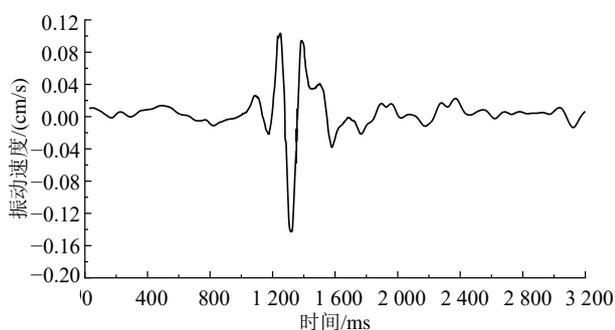


图8 机坪管理楼楼顶振动速度时程曲线

Fig. 8 Time-history curve of vibration velocity of apron management roof

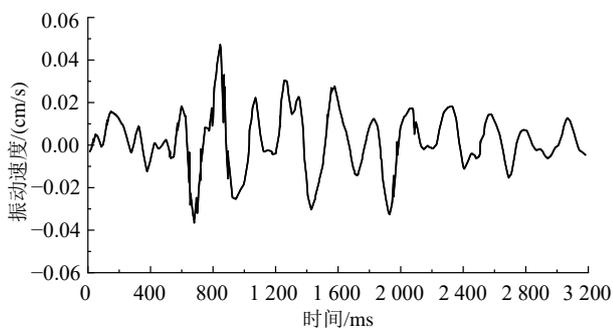


图9 AOC大楼塔顶振动速度时程曲线

Fig. 9 Time-history curve of vibration velocity at the tower top of the AOC building

3 结论

本文以萧山机场L滑道地基加固工程为依托,通过对强夯振动监测数据进行分析,得到以下结论:

(1)随着与强夯点距离的增加,振动速度呈指数型衰减,且竖向振动速度大于水平振动速度;通过现场实测数据,提出了竖向振动速度随距离的衰减规律拟合表达式。

(2)通过对振动速度监测数据进行拟合,分别得到了不同夯击能级下的最大竖向振动速度随夯点距离的衰减曲线,并对强夯施工的基础影响范围进行了预测,结果表明强夯点周围的基础容许振动峰值均满足要求。

(3)对顶层楼面的监测数据进行了分析,结果表明机坪管理楼和AOC大楼塔顶最大振速远小于标准^[11]的规定值。

参考文献

- [1] 周洋,阿拉塔,郭迅,等.强夯振动衰减规律及其对建筑安全性的影响[J].震灾防御技术,2018,13(4):860-868.
ZHOU Yang, A Lata, GUO Xun, et al. Investigation on vibration attenuation laws with dynamic compaction vibration and the effect on building safety[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(4): 860-868.
- [2] 梁永辉,王卫东,冯世进,等.高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(6):1027-1035.
LIANG Yonghui, WANG Weidong, FENG Shijin, et al. Field study on treatment of collapsible silt for high-fill airport project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1027-1035.
- [3] 潘周展.强夯法消除砂土地基液化的应用研究[J].福建建筑,2022(3):88-93.
PAN Zhouzhan. Application of dynamic compaction method to eliminate liquefaction of sandy soil foundation[J]. Fujian Architecture & Construction, 2022(3): 88-93.
- [4] 邱玉航.强夯荷载作用下填土地基的动力特征分析[J].水利科技与经济,2021,27(10):28-34.
QIU Yuhang. Analysis of dynamic characteristics of backfill foundation under dynamic compaction load[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2021, 27(10): 28-34.
- [5] 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 Chao, LIANG Haian, CHENG Xinjun, 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.
- [6] 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 Dongxiao, DENG Xiaolong. Analysis of vibration attenuation law of subgrade dynamic compaction and its influence on adjacent structures[J]. *Highway*, 2022, 67(6): 70-74.
- [7] 时伟, 邵琪琳, 董炳寅, 等. 深厚粉细砂场地 8 000 kN·m 能级强夯振动衰减规律研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(3): 309-314.
SHI Wei, SHAO Qilin, DONG Bingyin, et al. Research on vibration decay law of 8 000 kN·m energy level dynamic compaction in deep silty sand site[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 51(3): 309-314.
- [8] 丁文湘, 丁海滨, 徐长节, 等. 强夯加固地基土振动传播特性及隔振孔隔振分析[J]. *噪声与振动控制*, 2017, 37(4): 121-125.
DING Wenxiang, DING Haibin, XU Changjie, et al. Analysis of vibration propagation characteristics and effect of vibration isolation holes in soil foundation reinforced by dynamic consolidation[J]. *Noise and Vibration Control*, 2017, 37(4): 121-125.
- [9] 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 Li, BIAN Haiding, ZHANG Zhe, 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.
- [10] 刘洋. 土动力学基本原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
LIU Yang. *Fundamentals of Soil Dynamics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Standard for Allowable Vibration of Building Engineering: GB 50868—2013*[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

【简 讯】

岩土工程西湖论坛（2024）：交通岩土工程新进展（三号通知）

近年来,我国交通工程快速发展,许多岩土工程新理论、新技术和新材料在我国交通工程建设中得到应用和发展,同时也有诸多技术难题尚待解决。为了加强技术交流,促进交通岩土工程领域技术的进一步发展和提高,更好地为我国交通工程建设服务,由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会指导,《地基处理》杂志社和浙江大学建筑工程学院等单位,联合组织召开岩土工程西湖论坛(2024):交通岩土工程新进展。

会议旨在为道路、铁道、隧道、桥梁、机场、水运港口及特殊土地区交通岩土工程等领域新进展提供交流平台,从新理论、新方法、新材料、新工艺及新装备等多方面展开研讨,促进交通岩土工程的信息、智能化、绿色环保及可持续创新发展,

满足交通工程快速高质量发展需求。

本次会议前,将围绕该主题组织有关专家学者编写岩土工程西湖论坛系列丛书第8册《交通岩土工程新进展》,并由中国建筑工业出版社出版。

热忱欢迎各位同行积极参与!

会议时间: 2024年10月18—20日(18日报到)

会议地点: 杭州花家山庄

会议主题: 交通岩土工程新进展

联系方式: 宋秀英

(0571-88208775, xysong2020@163.com)

www.geo-forum.cn