

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.001



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



强夯砂土地基振动衰减规律及减振沟参数的影响

程旭日¹, 童晨曦², 王小桃³, 冯雨顺³, 张升²

(1. 元翔福州国际空港有限公司, 福州 350209; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075;
3. 福建兆翔机场建设有限公司, 福州 361000)

摘要: 强夯是地基处理中广泛采用的方法,但其产生的振动可能会对周围既有建筑物造成损害,因此,需根据特定场地情况和振动衰减规律来确定安全距离和采取减振措施。以福州长乐国际机场强夯地基处理为背景,通过强夯试验获取现场数据,并进行离散元程序模拟。模拟结果表明,在强夯能级相同时,夯锤质量越小,地表振速越大;夯锤越重,强夯影响范围越广,振动衰减越缓慢;该场地强夯引发的地表振动速度随距离呈双曲线函数型衰减。基于此,提出强夯引发的地表振速衰减模型,拟合结果表明,该模型能准确预测场区的地表振动变化规律。设置减振沟后的模拟结果表明,相较于未设置减振沟的情况,减振沟前的土体振动速度会增加;减振沟后的土体振动会减小。结合相关规范发现,设置减振沟后该场区安全距离可大幅减小。

关键词: 强夯;减振沟;砂土地基;振动衰减模型;离散元法

中图分类号: TU441.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)01-0063-08

Vibration attenuation characteristic of dynamic compaction and effect of damping ditch parameters in a sandy foundation

CHENG Xuri¹, TONG Chenxi², WANG Xiaotao³, FENG Yushun³, ZHANG Sheng²

(1. Fujian Yuanxiang Airport Construction Limited Company, Fuzhou 350209, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China; 3. Fujian Zhaoxiang Airport Construction Limited Company, Fuzhou 361000, P. R. China)

Abstract: Dynamic compaction is a widely employed foundation treatment method, but the surface vibrations it incurs can potentially lead to damage in nearby constructions. Therefore, it is crucial to determine appropriate safety distances and implement effective vibration absorption methods based on specific site conditions and vibration attenuation laws. Drawing from the dynamic compaction process at Fuzhou Changle International Airport, we conducted on-site tests to acquire essential data and subsequently performed simulations using the discrete element method. Our findings revealed that, under identical energy levels, lighter hammers result in higher soil velocities. Moreover, heavier hammers exhibit a broader influence and lead to a slower attenuation process. Simulation results demonstrated that the attenuation process can be accurately modeled using hyperbolic functions, a conclusion substantiated by the results of our field experiments. Damping ditch

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 湖湘高层次人才聚集工程创新团队(2019RS1008)

作者简介: 程旭日(1968-),男,高级工程师,主要从事机场建设研究, E-mail: 540518860@qq.com。

童晨曦(通信作者),男,副教授,博士生导师, E-mail: cxtong@csu.edu.cn。

Received: 2023-08-28

Foundation item: Huxiang High-Level Talent Gathering Engineering Innovation Team Project (No. 2019RS1008)

Author brief: CHENG Xuri (1968-), senior engineer, main research interest: construction of airport, E-mail: 540518860@qq.com.

TONG Chenxi (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: cxtong@csu.edu.cn.

calculations indicated that the vibration velocities of soil increase before the ditch and decrease behind it. Based on relevant standards, the installation of a damping ditch in this area allows for a substantial reduction in the required safety distance.

Keywords: dynamic compaction; damping ditch; sandy foundation; vibration attenuation model; discrete element method

强夯法具有施工简便、经济高效的特点,目前已被广泛运用于地基处理与加固、山区机场以及山区公路修建等需要大量填方的工程中^[1-3]。

由于强夯法的应用十分广泛,众多学者对其展开了研究。廖燕宏等^[4]通过试验发现,强夯法能提高花岗岩残积土的承载力,但对软化现象改善不明显。李富春等^[5]通过模型试验发现,细粒与黏粒含量的增加会减弱强夯效果。李希等^[6]利用离散元方法模拟了强夯过程,提出夯沉比的修正计算方法,并讨论了强夯作用下土体塑性区的形状以及最佳夯击次数与有效加固深度。张健等^[7]通过现场试验与数值仿真研究发现,强夯引发的动应力峰值随深度呈指数衰减。袁鸿鹄等^[8]通过现场强夯试验发现,总夯沉量与夯击次数呈对数函数关系。Li等^[9]通过室外试验系统研究了强夯能级、锤重、落距以及夯锤大小对强夯效果的影响。Jia等^[10]提出了一种离散元与有限元耦合的计算方法,并将其应用于强夯计算,通过对比试验数据证明了该方法的适用性。赵家琛等^[11]采用FLAC3D探究了在高能级强夯处理方法下抛填路基的有效加固深度。

上述研究主要关注强夯的工程效果,而没有讨论其引发的土体振动。但强夯诱发的地表振动可能造成周围既有建筑物损坏,在实际工程中不能忽视。对此,部分学者对强夯引发的土体振动展开了研究。林伟斌等^[12]通过现场试验研究了减振沟对降低强夯引发的地表振动的作用,发现减振沟可以减小60%的地表振动。吴燕开等^[13]利用有限元计算软件模拟了基坑中的强夯过程,讨论了强夯距离与次数对基底沉降与侧壁位移的影响。陈超等^[14]利用大变形几何非线性有限元方法研究了强夯中振动加速度峰值与速度峰值的衰减特征,发现振动加速度与速度随距离呈指数形式衰减,且近场振动对夯击能较敏感。谭捍华等^[15]发现,强夯引发的地表振动速度随距离成幂函数形式衰减,并分析了衰减指数与振动频率的关系。但这一关系式在强夯位置处发散,且表达式中也没有反映强夯能级以及夯锤质量等影响强夯效果的参数。刘超等^[16]基于现场试验数据发现,用自然指数函数描述强夯引发的振动加速度衰减规律,其模型预测结果与实测值吻合较好。但在对振动危害进行评价与控制时,相关规

范^[17]主要关注振动速度与频率,没有涉及振动加速度,且给出的模型中也不含强夯施工参数。

设置减振沟是强夯法减振的一种常用的方法,已有许多学者对此开展了研究。淳庆等^[18]利用有限元软件和现场试验研究了减振沟在降低强夯振动效应上的影响因素,但未提出设置减振沟后的安全距离。罗辉才等^[19]通过分析地基强夯施工中的振动实测资料,研究了强夯振动对周围建筑物的影响,并用振动速度在不同位置的变化对减振沟的减振效果进行分析和评价,但没有对比减振沟的各项参数对减振效果的影响。李玉歧等^[20]基于二维离散元法理论和已有的砂土地基强夯离心机试验,建立强夯的地基处理模型,研究隔振沟深度和位置对地基表面隆起的影响,结果表明,隔振沟能有效减小地基表面的隆起变形,但其位置和深度对地表的隆起变形影响较小,该研究主要针对隔振沟对强夯引起的土体变形和应力的影响,并未对其减振效果做具体分析。

笔者以福州长乐机场强夯地基处理为背景,利用离散元方法模拟强夯过程,提出强夯引发地表振动的速度衰减模型,利用现场试验数据进行验证,结果表明,该模型能较好地预测该场区强夯地表振动衰减规律。最后,对比分析了减振沟不同埋设深度与距夯点距离对振动速度衰减的影响。

1 工程概况与现场试验结果

1.1 工程概况与地质条件

福州长乐国际机场位于福州市东南,距市中心47.5 km,机场围界范围内占地面积为7.09 km²。福州长乐国际机场为海岸低丘、平原地貌,东部和南部临海,沿东海岸发育一系列呈北东走向的残丘,平原地势开阔,沙丘、沙垅发育。场区总体呈东西高、中部低。拟建场地上覆第四系人工堆积填土(砂)、砂层、淤积层、砂层、黏土层等,下伏花岗岩。砂土广泛分布于工程场区,部分砂土呈欠压密状态,分布深度在10~15 m范围内,处理困难。在填方、道面和飞机荷载作用下,此地基土容易发生沉降和不均匀沉降,严重时导致道面损坏,影响运行安全,因此有必要对场地进行地基处理。

1.2 强夯施工内容与测点布置

为减小机房地基沉降,采取强夯法对地基进行处理。为保证良好的地基施工,正式施工前,选取 2 个试验区开展现场试验,为强夯地基处理提供合适的施工参数。试验中采用的夯锤锤重为 17.61 t,选用 3 000、4 000 kN·m 两个强夯能级进行试验。在单点强夯试验过程中,采用爆破振动仪对强夯时地表振动速度进行监测,每个测点夯击 1 次。每个强夯能级单点夯,试验布置 1 条监测剖面,每条监测剖面上布置 6 个地表测点,每夯击 1 次进行 1 组监测。强夯测点布置见图 1。

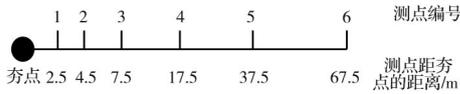


图 1 强夯测点布置

Fig. 1 Distribution of testing points

1.3 强夯试验结果

现场强夯试验实测最大速度与加速度分别见图 2、图 3。由图 2、图 3 可知,随着强夯能级的增加,最大振速及加速度也相应增加,但振动速度与加速度随距离迅速衰减,在距离夯点较远处能级的影响不显著。在强夯试验中,各测点的振动频率均小于 10 Hz。

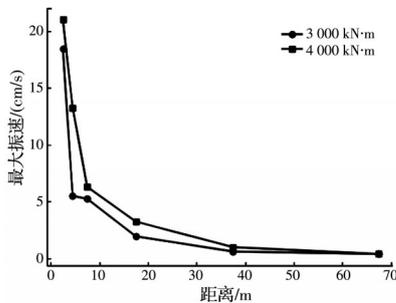


图 2 实测地表最大振动速度

Fig. 2 Maximum measured surface vibration velocity

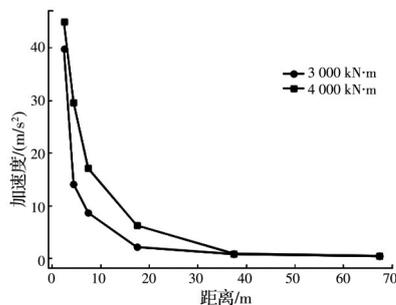


图 3 实测地表最大振动加速度

Fig. 3 Maximum measured surface vibration acceleration

2 强夯施工离散元模拟

2.1 颗粒接触模型与接触参数

由于现场试验数据较少,用数值模拟方法获取

地表振动衰减模型。采用南京大学自主研发的岩土体高性能离散元计算软件——矩阵离散元 MatDEM。在 MatDEM 中,假定颗粒之间靠弹簧相互接触并产生力的作用。颗粒间的法向力和法向变形按式(1)计算^[21]。

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n, X_n < X_b \\ K_n X_n, X_n \leq 0 \\ 0, X_n > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_n 为颗粒间的法向力; X_n 为法向位移; X_b 为断裂位移; K_n 为法向刚度。

颗粒间的切向力与切向变形按式(2)计算^[22]。

$$F_s = K_s X_s \quad (2)$$

式中: F_s 为颗粒间的切向力; X_s 为切向位移; K_s 为切向刚度。

在切向上的破坏准则采用莫尔-库伦准则,如式(3)所示。

$$F_{s\max} = F_{s0} - \mu_p F_n \quad (3)$$

式中: $F_{s\max}$ 为颗粒间的最大剪切力; F_{s0} 为颗粒间的抗剪力; μ_p 为颗粒间的摩擦系数。在莫尔-库伦准则中,单元间的最大抗剪力与初始抗剪力有关。 F_{s0} 为没有施加法向压力时单元间能承受的最大剪切力。当切向力超过最大剪切力时,切向连接断裂,此时颗粒间只存在滑动摩擦力 $-\mu_p F_n$ 。当堆积结构确定且胶结完整时,模型的力学性质主要受单元的接触模型及其参数控制。在 MatDEM 中,颗粒接触模型中的力学参数由模拟材料的宏观力学参数确定。Liu 等^[23-24]在紧密规则堆积条件下得到了离散元模型宏微观力学参数转换公式,见式(4)~式(9)。

$$K_n = \frac{\sqrt{2} E d}{4(1-2\nu)} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{\sqrt{2}(1-5\nu) E d}{4(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$X_b = \frac{(3K_n + K_s) T_u d^2}{6\sqrt{2} K_n (K_n + K_s)} \quad (6)$$

$$F_{s0} = \frac{1 - \sqrt{2} \mu_p}{6} C_u d^2 \quad (7)$$

$$\mu_p = \frac{\sqrt{2} I - 2\sqrt{2}}{2I + 2} \quad (8)$$

$$I = \left[(1 + \mu_i^2)^{1/2} + \mu_i \right]^2 \quad (9)$$

式中: K_n 为法向刚度; K_s 为切向刚度; X_b 为断裂位移; F_{s0} 为颗粒间的抗剪力; μ_p 为颗粒间的摩擦系数; E 为回弹模量; ν 为泊松比; T_u 为抗拉强度; C_u 为抗压强度; μ_i 为内摩擦系数; d 为颗粒直径。

MatDEM 提供了训练材料的模块,使用时只需提供 5 个材料宏观力学参数以及建模的颗粒尺寸,

相应模块就能生成试样并测试其力学参数,利用式(4)~式(9)对细观力学参数进行修正迭代,最终得到需要的参数。福州长乐机场场区地层上部15 m范围内主要分布的是中细砂,根据相关规范,通过开展承载板法试验、静三轴试验、直剪试验等室内土工试验可以得到中细砂的回弹模量、泊松比、抗拉、抗压强度和内摩擦系数5个宏观力学参数,见表1。根据表1中的参数,利用MatDEM的相应模块可以计算颗粒间的力学参数。

表1 土体材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil

回弹模量/MPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦系数	密度/(kg/m ³)
33.21	0.38	8.01	0.80	0.40	1 489.80

2.2 模型的建立与计算工况

已有研究表明^[25],强夯的影响深度在15~20 m,故模型深度应当位于这一范围内。为了研究强夯引发的地表振动衰减规律,模型水平方向的尺寸应足够长。综合考虑离散元的计算效率以及研究的需要,构建一个120 m×20 m的二维离散元模型,用于模拟地层,颗粒平均粒径为0.5 m。边界条件设置为固定边界条件,认为在20 m深度处振动已完全衰减。在模型中生成一个宽1 m、高1 m的方形,用于模拟夯锤,夯锤位于横坐标X=60 m、纵坐标Z=20 m处。模型示意图见图4。数值试验中选用8.81、17.61、35.24 t三个不同锤重及3 000、4 000、5 000 kN·m三个不同强夯能级,一共进行9个工况的数值模拟试验,试验编号见表2。数值模拟中通过改变夯锤的密度赋予夯锤不同的质量,通过赋予夯锤不同的初速度模拟不同能级的强夯,夯锤的初始速度按式(10)计算。

$$v_h = \sqrt{2W/m} \quad (10)$$

式中: v_h 为夯锤初始速度; W 为强夯能级,kN·m; m 为夯锤质量,t。

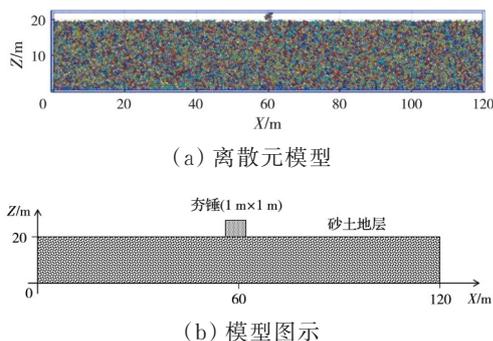


图4 离散元模型示意图

Fig. 4 Discrete element model diagram

表2 数值模拟工况

Table 2 Conditions of numerical simulation

编号	锤重/t	能级/(kN·m)
E1	8.81	3 000
E2	8.81	4 000
E3	8.81	5 000
E4	17.61	3 000
E5	17.61	4 000
E6	17.61	5 000
E7	35.24	3 000
E8	35.24	4 000
E9	35.24	5 000

2.3 模拟结果

将E1、E3与E7、E9的最大速率云图绘制于图5中。由图5可知,在宽度上,强夯产生的影响集中于距强夯位置约10 m的范围内;在深度上,强夯的影响集中在距强夯位置10 m左右的范围内。对于同一个能级,夯锤较轻时土体产生的最大速度较大,但夯锤较重时夯击的影响范围更大。

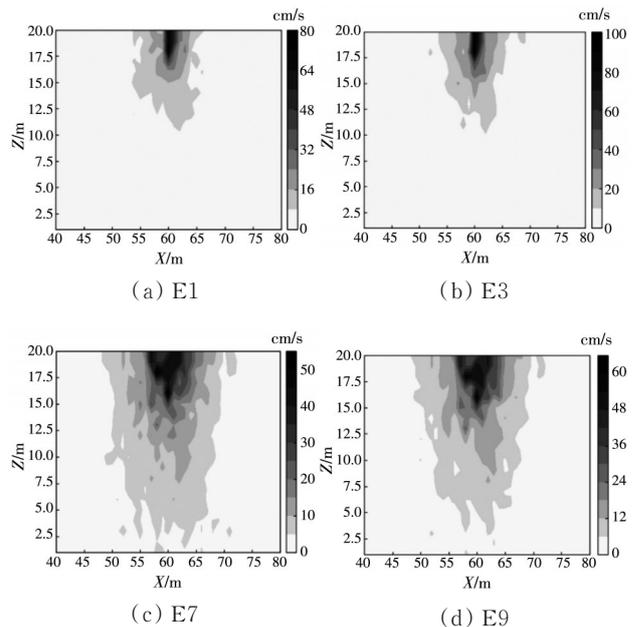


图5 最大速度云图

Fig. 5 Maximum velocity distribution

对E5进行了5次强夯计算,计算结果见图6。由图6可知,由于夯击次数的增加,土体渐趋密实,强夯引发的地表最大振速逐渐减小,但不同夯击次数的影响主要集中在夯点附近。

3 强夯振动衰减规律

3.1 强夯振动衰减模型

通过分析模拟获得的强夯引发的地表振动最

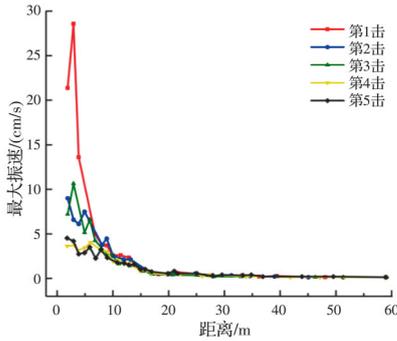


图 6 不同夯击次数时地表最大振速

Fig. 6 Maximum surface vibration velocities at different tamping times

大速度,用式(11)拟合模拟得到的地表最大振动速度随距离衰减规律。根据数值模拟数据得到的拟合参数见表 3。

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2W}{m}} \cdot \frac{100}{(k_1 m + k_2)r + k_3} \quad (11)$$

式中: v_{\max} 为地表振动最大速度,cm/s; r 为地表至夯锤的距离,m; k_1 、 k_2 、 k_3 为拟合参数。

表 3 拟合参数计算结果

Table 3 Values of fitting parameters

编号	k_1	k_2	k_3
E1	-1.05	57.94	36.57
E2	-1.04	55.76	36.03
E3	-1.05	58.68	35.85
E4	-1.72	58.80	35.12
E5	-1.27	54.98	35.65
E6	-1.18	55.66	35.70
E7	-1.43	62.26	29.46
E8	-1.33	59.95	32.85
E9	-1.25	58.33	35.57
平均值	-1.26	58.04	34.75

由表 3 可知,各拟合参数的变化范围较小,可以将 3 个拟合参数取为定值,最终得到强夯引起的地表最大振动速度衰减模型如式(12)所示。数值试验 E4 的拟合结果见图 7。其余拟合结果与此相似,不再列出。

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2W}{m}} \cdot \frac{100}{(-1.26m + 58.04)r + 34.75} \quad (12)$$

3.2 模型验证与场地安全距离

福州长乐国际机场在地基处理前进行了单点强夯试验,试验中采用 3 000、4 000 kN·m 两个强夯能级以及 17.61 t 的夯锤。模型计算得到的地表最大振动速度与现场试验监测结果的对比见图 8。由图 8 可知,提出的模型能够较好地预测福州长乐机场场区强夯施工引发的地表振动速度最大值,为相关施工确定安全区以及优化强夯施工参数提供

依据。

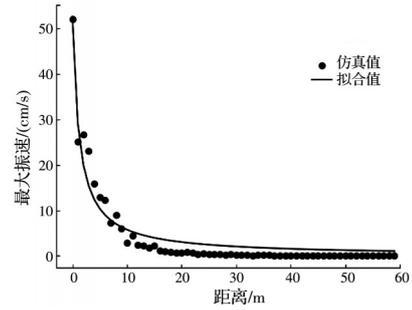


图 7 数值试验 E4 拟合结果

Fig. 7 Fitting results of numerical test E4

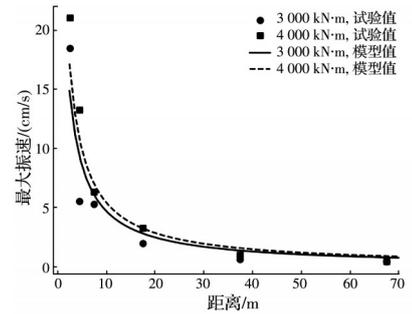


图 8 模型预测结果

Fig. 8 Predicton results of the attenuation model

根据相关规范^[17],对于一般民用建筑,当质点振动频率小于 10 Hz 时,允许峰值振速为 1.5~2.0 cm/s;当振动频率介于 10~50 Hz 时,允许峰值振速为 2.0~2.5 cm/s;当振动频率大于 50 Hz 时,允许峰值振速为 2.5~3.0 cm/s。相关研究^[26]显示,强夯引发的振动频率在 5~30 Hz 之间。结合模型计算结果可知,在考虑了一定安全余量时,对于一般的民用建筑,可取安全距离为 20 m,大于这一距离时可不采取振动防护措施。李俊如等^[27]研究了砂土中强夯振动的衰减规律,土质与福州长乐国际机场类似,按其结果计算,可得到在 20 m 处最大振动速度为 0.17 cm/s,满足规范要求。对比王斯海等^[28]对不同土层结构下强夯振动衰减规律的研究,取其中振动速度最大的模型结果计算可知,在 20 m 处最大振动速度为 1.96 cm/s,也在规范容许范围内。

3.3 减振沟参数分析

就实际场地而言,在安全距离内可能存在既有建筑,此时需要采取相应措施,减小地表振动,以避免对既有建筑的损害。减振沟是工程中常用的一种减振措施,现根据数值模拟模型对减振沟的减振效果进行计算分析。取减振沟的宽度为 2 m,夯锤质量为 17.61 t,能级为 4 000 kN·m,计算不同深度与距夯点距离的 4 种工况,见表 4 与图 9。在模拟中将减振沟范围内的颗粒设置为固定单元。

模拟工况 E10~E13 的地表最大振速与 E5 的结

表 4 减振沟计算工况

Table 4 Calculation conditions of damping ditch

编号	深度/m	距夯点距离/m
E10	2	5
E11	4	5
E12	2	10
E13	4	10

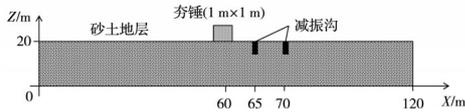


图 9 减振沟位置示意图

Fig. 9 Location diagram of damping ditch

果对比见图 10。由计算结果可知,在减振沟前的区域,地表最大振速会增加,这是由于减振沟的存在阻隔了能量向四周传播。综合计算结果可知,如果采用减振沟减小强夯产生的地表振动,则建议在距离强夯位置 5 m 处设置宽 2 m、深 4 m 的减振沟,此时安全距离可减小至 10 m。

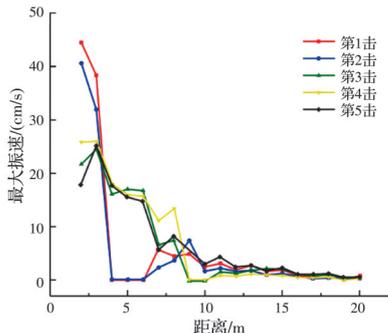


图 10 减振沟计算结果对比

Fig. 10 Comparison of damping ditch calculation results

4 结论

结合福州长乐国际机场强夯地基处理现场试验,通过离散元软件 MatDEM 对不同锤重与强夯能级的工况进行数值试验。基于数值试验结果,提出强夯引发的地表振动最大速度衰减模型,现场试验监测结果显示,该模型较好地反映了福州长乐国际机场场区强夯引发的地表振动衰减规律。

1) 在宽度方面,强夯产生的影响主要集中于距离强夯位置约 10 m 的范围内。在深度方面,强夯的影响主要集中在距离强夯位置 10 m 的范围内。相同强夯能级下,当夯锤质量较小时,地面振速较大;当夯锤质量较大时,强夯影响范围更大。

2) 强夯引发的地表振动随距离呈双曲线形式衰减;其振动速度与夯锤的下落速度成正比;夯锤质量越大,振动衰减越缓慢。

3) 根据模型计算结果和相关规范,认为在未采

取相应减振措施的情况下,福州长乐国际机场场区强夯的安全距离为 20 m;当采用减振沟时,建议在距离夯锤 5 m 处设置宽 2 m、深 4 m 的减振沟,此时的安全距离为 10 m。

参考文献

- [1] 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 Y H, WANG W D, FENG S J, 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. (in Chinese)
- [2] 占鑫杰,李文炜,杨守华,等.强夯法加固堰塞坝料的室内模型试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(5):953-963.
ZHAN X J, LI W W, YANG S H, et al. Model tests on landslide dam materials improved by dynamic compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 953-963. (in Chinese)
- [3] 吴其泰.排水板强夯置换复合工艺处理软基试验研究[J].施工技术,2021,50(11):149-152.
WU Q T. Experimental study on soft soil foundation reinforcement by composite process of drainage board and dynamic compaction replacement [J]. Construction Technology, 2021, 50(11): 149-152. (in Chinese)
- [4] 廖燕宏,王冉,夏玉云,等.安哥拉花岗岩残积土强夯法地基处理试验研究[J].施工技术(中英文),2023,52(7):149-154.
LIAO Y H, WANG R, XIA Y Y, et al. Experimental study on foundation treatment of Angola granite residual soil by dynamic compaction method [J]. Construction Technology, 2023, 52(7): 149-154. (in Chinese)
- [5] 李富春,张璟泓,周红星,等.粉粒及黏粒含量对强夯加固粉细砂土层效果的影响[J].人民长江,2022,53(8):186-191.
LI F C, ZHANG J H, ZHOU H X, et al. Study on influence of silt particle and clay particle on dynamic compaction effect of silty fine sand [J]. Yangtze River, 2022, 53(8): 186-191. (in Chinese)
- [6] 李希,张勋,马新岩,等.土石混合填料强夯过程三维离散元模拟[J].北京交通大学学报,2020,44(3):88-92,108.
LI X, ZHANG X, MA X Y, et al. Three-dimensional simulation of dynamic compaction for earth-rock fill by discrete element method [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 88-92, 108. (in Chinese)
- [7] 张健,刘俊.填石路堤强夯加固施工参数及路基动应力

- 响应规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 95-101.
- ZHANG J, LIU J. Dynamic stress response law and construction parameters study of rockfill embankment under dynamic compaction [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 95-101. (in Chinese)
- [8] 袁鸿鹄, 王魏东, 张琦伟, 等. 房渣土地基强夯加固施工力学效应分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(增刊 2): 224-230.
- YUAN H H, WANG W D, ZHANG Q W, et al. Mechanical analyze of dynamic compaction on muck foundation [J]. Yellow River, 2021, 43(Sup 2): 224-230.
- [9] LI P X, SUN J Y, GE X S, et al. Parameters of dynamic compaction based on model test [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 168: 107853.
- [10] JIA M C, LIU B, XUE J F, et al. Coupled three-dimensional discrete element-finite difference simulation of dynamic compaction [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(3): 731-747.
- [11] 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)
- [12] 林伟斌, 周雷靖. 回填砂土地基上强夯振动影响及处理效果研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(增刊 1): 174-177.
- LIN W B, ZHOU L J. Study on vibration influence and treatment effect of dynamic compaction on backfill sand foundation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(Sup 1): 174-177. (in Chinese)
- [13] 吴燕开, 胡晓士, 石玉斌, 等. 基坑底强夯离侧壁距离对其稳定性影响[J]. 施工技术, 2017, 46(19): 63-67.
- WU Y K, HU X S, SHI Y B, et al. Different distance influence on slope stability of the dynamic compaction foundation excavation at the bottom [J]. Construction Technology, 2017, 46(19): 63-67. (in Chinese)
- [14] 陈超, 徐长节, 蔡袁强. 强夯加固回填土地基振动特性的三维数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 119-122.
- CHEN C, XU C J, CAI Y Q. Three-dimensional numerical simulation on vibration characteristic of back-filled soil caused by dynamic compaction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(12): 119-122. (in Chinese)
- [15] 谭捍华, 孙进忠, 祁生文. 强夯振动衰减规律的研究[J]. 工程勘察, 2001, 29(5): 11-14.
- TAN H H, SUN J Z, QI S W. Study on the attenuation law of dynamic compaction vibration [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2001, 29(5): 11-14. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 爆破安全规程: GB 6722—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Safety regulations for blasting: GB 6722—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [18] 淳庆, 潘建伍. 减振沟在强夯施工时的减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 115-120.
- CHUN Q, PAN J W. Vibration-isolating effect of vibration-isolating slot in the process of dynamic compaction construction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 115-120. (in Chinese)
- [19] 罗辉才, 王喜迁. 强夯振动测试及隔振沟减振效果实例分析[J]. 云南地质, 2011, 30(4): 471-475.
- LUO H C, WANG X Q. The testing of intense ramming and an analysis of shake-proof effect of shake-prevent groove example [J]. Yunnan Geology, 2011, 30(4): 471-475. (in Chinese)
- [20] 李玉岐, 杨赋安, 张文杰. 离散单元法分析隔振沟引起的强夯变形和应力变化[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2021, 27(6): 1085-1093.
- LI Y Q, YANG F A, ZHANG W J. Effect of an isolation trench on deformation and stress induced by dynamic compaction based on the discrete element method [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2021, 27(6): 1085-1093. (in Chinese)
- [21] MORA P, PLACE D. A lattice solid model for the nonlinear dynamics of earthquakes [J]. International Journal of Modern Physics C, 1993, 4(6): 1059-1074.
- [22] PLACE D, MORA P. The lattice solid model to simulate the physics of rocks and earthquakes: Incorporation of friction [J]. Journal of Computational Physics, 1999, 150(2): 332-372.
- [23] LIU C, POLLARD D D, SHI B. Analytical solutions and numerical tests of elastic and failure behaviors of close-packed lattice for brittle rocks and crystals [J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2013, 118(1): 71-82.
- [24] LIU C, XU Q, SHI B, et al. Mechanical properties and energy conversion of 3D close-packed lattice model for

- brittle rocks [J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 103: 12-20.
- [25] 孔令伟, 袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(2): 86-92.
- KONG L W, YUAN J X. Study on boundary contact stress and settlement characteristics of dynamic compaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(2): 86-92. (in Chinese)
- [26] HWANG J H, TU T Y. Ground vibration due to dynamic compaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(5): 337-346.
- [27] 李俊如, 高建光, 邵蔚, 等. 砂土中的强夯振动对周边环境的影响研究 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(增刊 1): 198-200.
- LI J R, GAO J G, SHAO W, et al. Study on the influence of dynamic compaction vibration in sand on surrounding environment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(Sup 1): 198-200. (in Chinese)
- [28] 王斯海, 陈海军, 王世坚. 不同土层结构场地强夯振动效应研究 [J]. *施工技术*, 2016, 45(增刊 1): 15-19.
- WANG S H, CHEN H J, WANG S J. Study on vibration effect of dynamic compaction in different soil structure sites [J]. *Construction Technology*, 2016, 45 (Sup 1): 15-19. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)