

深厚软岩填土不同能级强夯处理数值模拟研究

Numerical Simulation Study on Dynamic Compaction Treatment of Different Energy Levels in Deep Soft Rock Fill

胡瑾¹, 赵阳^{2,3}

(1. 中冶武勘工程技术有限公司, 武汉 430080; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所
岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 乌鲁木齐 830006)

摘要: 为揭示深厚软岩填土地基的强夯加固机理, 基于深厚软岩填土不同能级强夯试验, 建立夯锤-软岩填土地基三维模型, 引入非线性理论, 对低、中、高、超高等能级强夯进行数值模拟, 研究了深厚软岩填土强夯加固处理的变形与振动特性。结果表明: 各击次下加固土层的弹性模量与夯击次数呈幂函数分布规律; 振动速度和振动加速度在距夯击点较近处衰减得快, 在距夯击点较远处衰减得慢, 3 000、6 000 和 12 000、15 000 kN·m 相比, 后者强夯能级虽然增大很多, 但强夯对振动影响未见明显增强很多; 夯击能 3 000~15 000 kN·m, 有效加固深度在 6.0~11.6 m。研究成果可为深厚软岩填土地基的强夯加固提供分析计算的理论依据和技术指导。

关键词: 软岩填土; 强夯; 不同能级; 数值模拟; 振动特性

中图分类号: TU472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0041-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.008

HU Jin¹, ZHAO Yang^{2,3}

(1. WSGRI Engineering & Surveying Incorporation Limited, Wuhan 430080, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Xinjiang Transportation Planning Survey and Design
Institute Co., Ltd., Urumqi 830006, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of dynamic compaction reinforcement of deep soft rock fill foundation, based on the dynamic compaction test of different energy levels of deep soft rock fill, a three-dimensional model of hammer-soft rock fill foundation was established. The nonlinear theory was introduced to simulate the dynamic compaction of low, medium, high and ultra-high energy levels, and the deformation and vibration characteristics of deep soft rock fill were studied. The results show that the elastic modulus of the reinforced soil layer and the number of tamping times are in a power function distribution. The vibration velocity and vibration acceleration decay faster near the tamping point, and decay slower far away from the tamping point. Compared with 3 000, 6 000 and 12 000, 15 000 kN·m, although the dynamic energy level of the latter increases a lot, the influence of dynamic compaction on vibration is not significantly enhanced. The tamping energy ranges from 3 000 to 15 000 kN·m,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42077262)。

作者简介: 胡瑾(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 地基处理、边坡工程。

收稿日期: 2024-12-20

岩土力学

and the effective reinforcement depth is distributed between 6.0 and 11.6 m. The research results can provide theoretical basis and technical guidance for the analysis and calculation of dynamic compaction engineering of deep soft rock fill foundation.

Key words: soft rock fill; dynamic compaction; different energy levels; numerical simulation; vibration characteristics

0 引言

随着我国城市化进程的加速和土地需求的不断增加，“开山填洼”工程逐渐增多，软岩通常被用作回填材料，形成了深厚的软岩填土地基^[1-2]。这些深厚的软岩填土由于未经过严格的压实和处理，其承载力较低，容易产生不均匀沉降，影响地基稳定性，需采用强夯进行加固处理^[3]。

工程中主要通过现场试验确定具体的施工参数。刘杰等^[4]研究了重庆江北机场扩建项目中3 000 kN·m强夯试验段，分析了夯击能释放规律，证明强夯置换碎石墩能有效加固软土地基。陈晨等^[5]以某大型厂房为工程背景，探究了不同强夯能级对红层软岩碎石土的加固效果。刘强等^[6]采用模型试验与数值模拟相结合的方法探究了强夯置换在基坑支护中的作用，并研究了强夯置换后基坑开挖过程中的变形位移规律。贺立等^[7]以北海某铁路软土路基处理为工程背景，采用现场试验探究了强夯垫层法对软土路基的处理效果。秦堃^[8]针对深厚软土地基，提出采用闭合水泥土围护桩+真空联合堆载预压联合治理措施对地基进行加固，研究成果为深厚软土地基的处理提供借鉴。王连俊等^[9]以云南某高速公路为工程依托探究了强夯垫层法对河谷软土区地基的加固效果。徐剑佩等^[10]采用模型试验及数值模拟方法探究了强夯作用下边坡的加固机理。程旭日^[11]以沿海某机场吹填地基工程为背景，探究了强夯法在机场填海大面积道路地基处理过程中的适用性。王家磊等^[12]以北京大兴机场为工程背景，探究了低能级、小夯距、少击数对可液化砂质粉土地基的加固效果。王建平等^[13]采用数值模拟方法探究了强夯法对珊瑚礁地基的加固机理。闫东霄等^[14]以西北地区某工程为依托，探究了强夯法对湿陷性黄土路基加固效果及其对临近建筑物的影响。刘超等^[15]以南昌市某软土地基为工程依托，采用原位测试方法探究了组合锤法强夯振动对周边场地环境的影响。刘强等^[16]通过室内模型试验和数值模拟研究了强夯置换对软土

基坑的变形影响，发现置换率增大能提高坡体稳定性，墩土耦合模型提高了模拟准确性。

综上所述，学者们对强夯的夯实过程地基三维波动、土体本构关系的非线性、土体塑性与几何非线性变形、地基加固效果等问题进行了探究，但对不同强夯能级条件下土体的力学特性关注较少。基于此，开展了深厚软岩填土不同能级强夯试验，对低、中等、高、超高等不同能级强夯进行数值模拟，研究不同夯击能、不同夯击次数下，强夯加固过程中土体应力与变形情况、弹性模量的变化规律以及强夯施工引起的振动特性。

1 软岩填土不同能级强夯试验

场地位于福建省漳平市工业园区内，拟建设大型智能化钢铁工业基地，场地已完成场平回填工作，总体较为平整。填土堆积时间小于5年，随意堆填形成，未经任何处理，填土主要成分为泥质粉砂岩、砂岩及少量含碎石粉质黏土，碎块粒径为2~20 cm，碎块含量约占50%，填土厚度约50 m。分低、中、高、超高能级开展强夯试验。试验方案见表1，试验过程中对夯坑沉降、地面隆起、地面振动速度与加速度等进行监测，每个试验区面积50 m×50 m。

表1 试验区强夯方案

Table 1 Dynamic compaction plan for the experimental area

试验区	夯击能/(kN·m)	能级范围	强夯方案
I 区	3 000	低能级	两点一满
II 区	6 000	中能级	两点一满
III 区	8 000	高能级	三点一满
IV 区	12 000	超高能级	三点两满
V 区	15 000	超高能级	四点两满

2 软岩填土强夯数值模拟动力模型

2.1 夯锤与地基土接触模型

采取摩擦接触模型定义夯锤、土体之间的接触类型，采用无厚度的硬接触摩擦模型来反映夯锤与土的相互作用，如图1所示。模型包括夯锤与土之间的法向作用、切向作用两个方面，当达到剪应力最大值 τ_{\max} 时，正应力增大，剪应力保持不变。

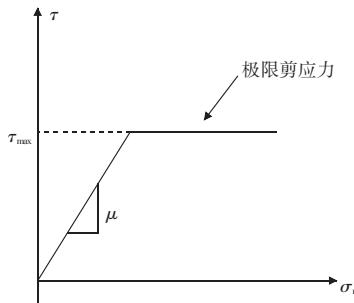


图1 摩擦接触单元模型

Fig. 1 Friction contact unit model

法向作用满足以下条件: 当接触面的分开距离为0时, 夯锤、土之间建立接触关系, 两者之间沿法向的所有力都将被传递; 当接触面的分开距离大于0时, 夯锤、土体之间接触关系解除, 两者之间的法向力为0。硬接触关系的接触面之间切向相互作用满足修正的库仑摩擦模型, 使用摩擦系数来表示接触面之间的摩擦特性:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu p \quad (1)$$

$$\tau_{\text{eq}} = \sqrt{t_1^2 + t_2^2} \quad (2)$$

式中: τ_{crit} 为临界剪应力; μ 为摩擦系数; p 为法向接触力; τ_{eq} 为临界滑动力; τ_i 为 i 方向的滑动力。其中 $\tau_{\text{crit}} = \max(\mu_p, \tau_{\text{max}})$, 最大剪应力值 τ_{max} 取夯锤与土体之间的剪应力最大值。若 $\tau_{\text{eq}} < \tau_{\text{crit}}$, 接触面为粘结状态; 若 $\tau_{\text{eq}} = \tau_{\text{crit}}$, 接触面为滑动状态。

2.2 强夯冲击荷载和计算工况

强夯冲击过程中的接触应力接近于三角形分布, 作用时间为 t_N , 如图2所示, 冲击过程历时很短, 通常约为0.1 s。

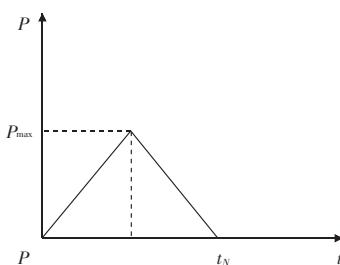


图2 冲击荷载示意图

Fig. 2 Diagram of impact load

根据已有的研究结论可知, 施加在夯锤底部的接触力和作用时间是:

$$P_{\text{max}} = \frac{\mu \sqrt{mS}}{\pi r^2} \quad (3)$$

$$t_N = P \sqrt{\frac{m}{S}} \quad (4)$$

$$\mu = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

$$S = \frac{2 \gamma E}{1 - v^2} \quad (6)$$

$$h = \frac{E_k}{mg} \quad (7)$$

式中: P_{max} 为夯锤底部的最大接触应力; m 为夯锤质量; r 为夯锤半径; u 为夯锤靠近地表时的速度; S 为弹性常数; t_N 统一取 0.1 s; h 为夯锤落距; E 为土体的弹性模量; v 为土体的泊松比; E_k 为强夯能级。

针对5个试验区的情况, I区~V区各夯击能对应的锤重分别为30、30、55.1、69.5、75 t, 计算得到各夯击能下对应的夯锤底部的最大接触应力 P_{max} , 见表2。

表2 计算荷载信息
Table 2 Calculation of load information

试验区	夯击能/(kN·m)	锤重/t	落距/m	P_{max}/Pa
I区	3 000	30	10	4 135 475.1
II区	6 000	30	20	5 848 444.9
III区	8 000	55.1	14.5	6 753 202.5
IV区	12 000	69.5	17.3	8 270 950.1
V区	15 000	75	20	9 263 490.1

2.3 软岩填土阻尼计算

利用瑞利阻尼来定义软岩填土材料的阻尼作用。瑞利阻尼的定义为:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (8)$$

式中: M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; α 和 β 为阻尼系数, 其中:

$$\begin{cases} \alpha = 4\pi f_1 f_2 \zeta / (f_1 + f_2) \\ \beta = \zeta / \pi / (f_1 + f_2) \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_1 和 f_2 为前两阶模态的固有频率, ζ 为阻尼比。通过模态分析后, 按上式计算得到阻尼系数 $\alpha = 0.272$, $\beta = 0.01$ 。

2.4 有限元模型与参数

夯锤-软岩填土地基整体计算模型如图3所示, 以土体的弹性模量为基本场变量, 建立弹性模量与夯击次数的相关性, 实现动力计算中土体参数的动态变化。夯锤采用钢锤, 软岩填土及夯锤材料参数见表3。

岩土力学

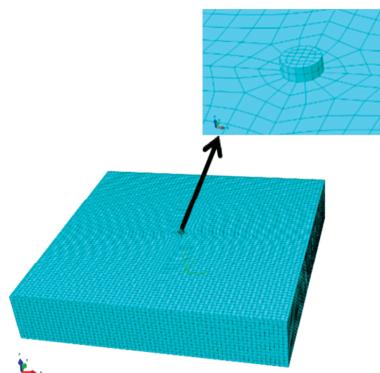


图 3 夯锤-软岩填土地基整体计算模型

Fig. 3 Integrated calculation model of rammer soft rock fill foundation

表 3 模型材料计算参数

Table 3 Model material calculation parameters

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	初始弹性 模量/MPa	泊松比	摩擦角/ (°)	剪胀角/ (°)	黏聚力/ kPa
软岩填土	2 000	24	0.30	22	10	15
夯锤	7 800	2×10^5	0.16			

3 结果与分析

3.1 加固土弹性模量反演

随着每一次夯击，填土的弹性模量将增加，根据试验区强夯试验的实测沉降数据，对每次夯击后加固土层的弹性模量进行反算，通过率定，得到与

实际情况相符的计算参数。从图 4 可以看出，根据率定，数值模拟得到的夯坑累计沉降量与现场实测结果较吻合，表明该方法能较好地模拟深厚软岩填土在强夯加固处理下的变形情况。

各击次下反算的加固土弹性模量分布如图 5 所示。通过拟合分析，得到各击次下加固土层的弹性模量的呈幂函数分布规律，拟合公式为：

$$E' = EN^a \quad (10)$$

式中： E' 为夯击 N 次后软岩填土的弹性模量； E 为处理前软岩填土的弹性模量； N 为强夯击次数， a 为拟合参数，拟合值介于 0.481 9 ~ 0.534 3 之间，可为强夯加固深厚软岩填土地基的参数确定与选取提供重要的参考。

3.2 坚向位移

不同夯击能下的变化规律具有相似性，以夯击能为 6 000 kN·m 的工况为例进行说明。图 6 为不同夯击次数对应的夯锤中心点下的土体沉降与深度的变化曲线。可以看出，沉降最大的地方位于夯锤下的土体表面，且由于深度的提高土体沉降量迅速减少，强夯处理效果随深度增加而降低，在不同夯击次数下出现较大沉降的深度集中在 7 m 以内，表明

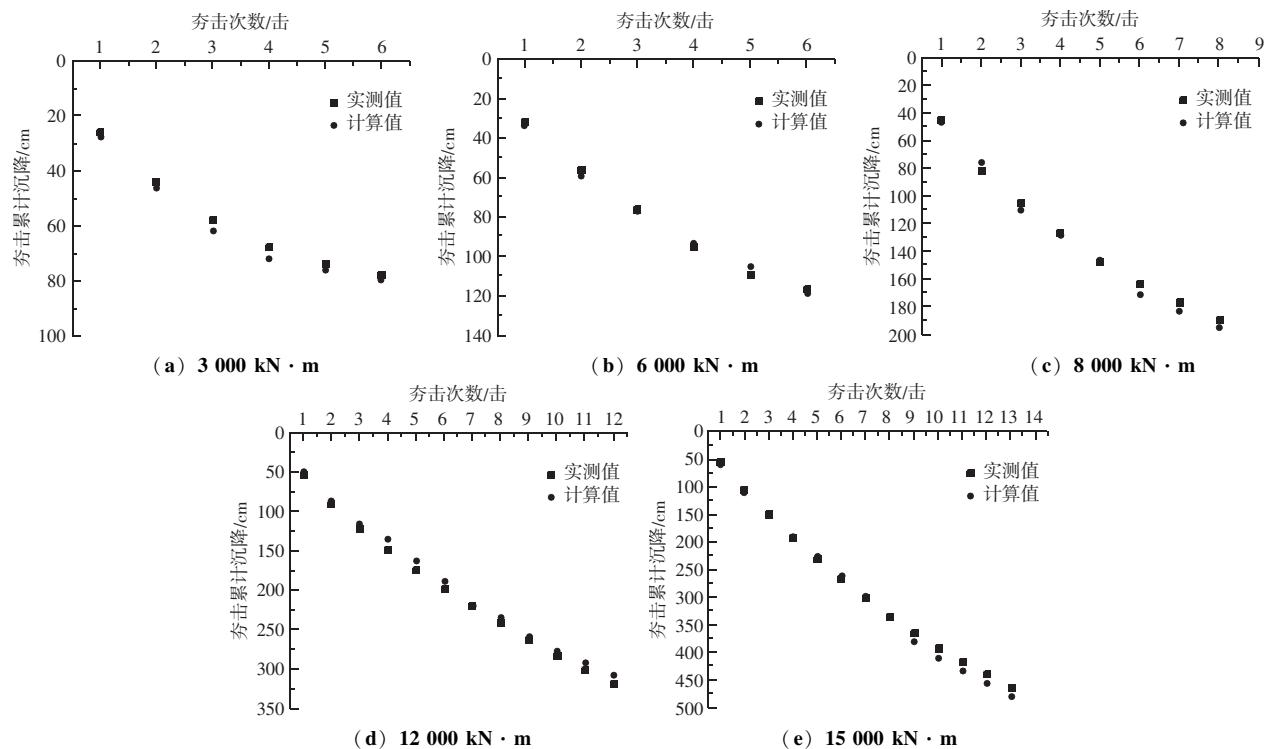


图 4 不同夯击能下夯坑累计沉降计算值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between calculated and measured cumulative settlement values of compacted pits under different compaction energies

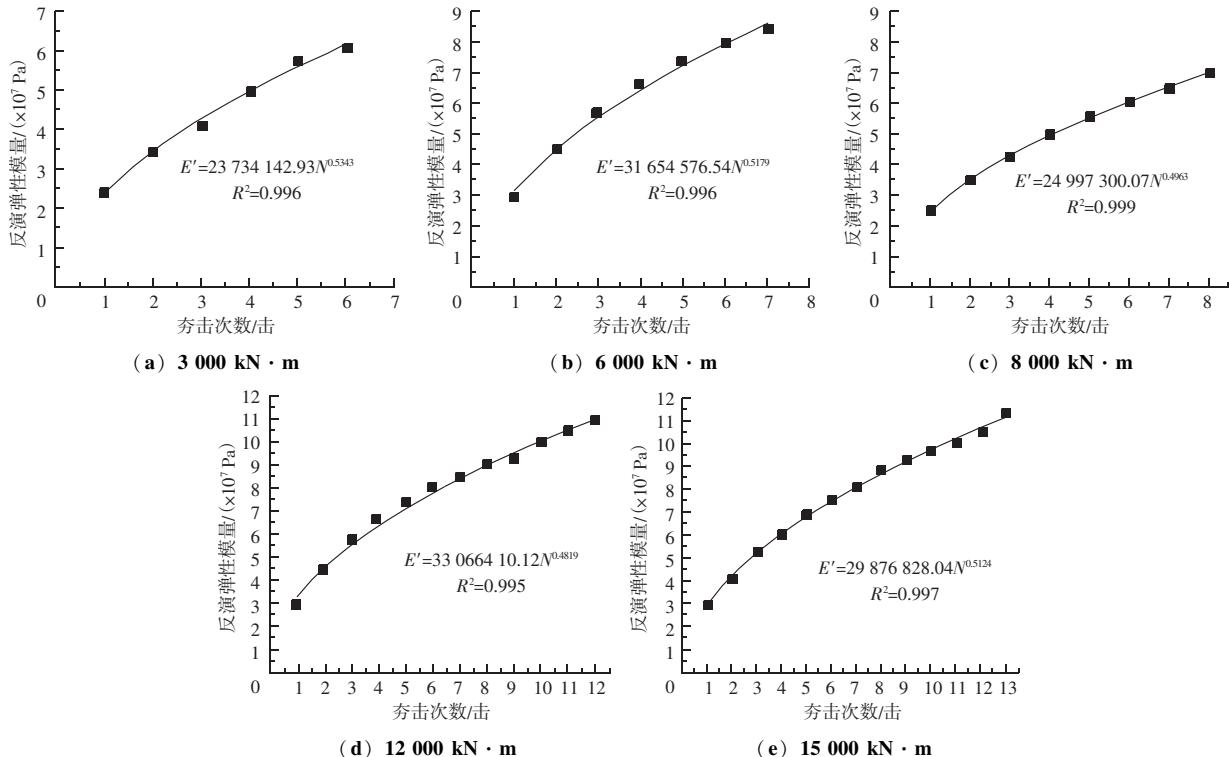


图5 不同夯击能下加固土弹性模量与夯击次数关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between elastic modulus of reinforced soil and compaction frequency under different compaction energies

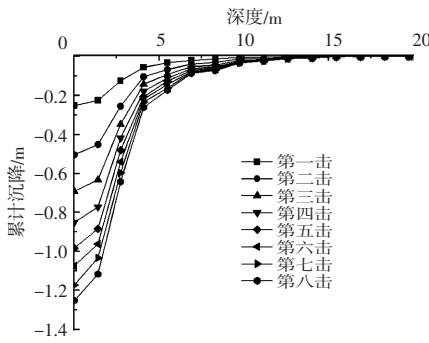


图6 夯锤下土体沉降与深度的变化曲线

Fig. 6 Curve of soil settlement and depth variation under ramming hammer

6 000 kN · m 能级的强夯有效加固深度约为 7 m，其中 7 m 处的沉降约为地表处沉降的 8%。同时，夯击一定次数后，出现沉降变化的深度范围由于夯击次数的增加并无明显的改变，表明过于增加夯击次数无法显著增加强夯的有效加固深度。

图7为不同击次下不同位置地表累积竖向变形分布。可以看出，在强夯作用下，夯坑下的土体发生明显沉降，夯坑两侧土体受下部挤压，有少许隆起。随着夯击次数的增加，夯坑深度逐渐增加，地表隆起量也逐渐增大。靠近夯锤的地表隆起显著，远离

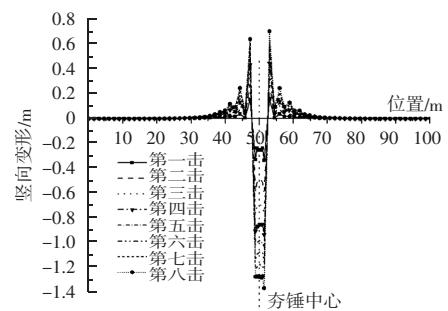


图7 不同击次下不同位置地表累积竖向变形分布图

Fig. 7 Distribution map of cumulative vertical deformation of the ground surface at different locations under different hits

夯锤各点隆起不明显，靠近夯锤的隆起量变化幅度比远离夯锤的大，地面隆起变形的影响区距夯锤中心约 10.0 m 范围。

3.3 振动特性

图8为夯击能为 6 000 kN · m 时，强夯后不同时刻速度、加速度响应分布情况。以第一次夯击为例，在夯击完成后，随着水平距离的增加，振动速度在夯锤近处迅速衰减，主要原因是夯锤近处体波起主导作用，随水平距离的增加迅速衰减；夯锤远处面波起主导作用，随水平距离的增加衰减较慢。一般民用建筑物、工业和商业建筑物安全允许振动速度

岩土力学

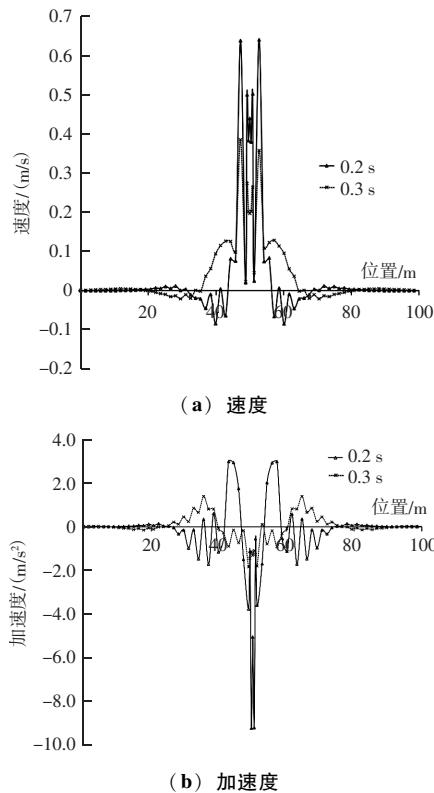


图 8 0.2、0.3 s 时不同位置速度、加速度响应情况

Fig. 8 Velocity and acceleration response at different positions at 0.2 and 0.3 s

为 1.5~5 cm/s，采用 5 cm/s 作为振动速度安全允许限值，根据振动速度随水平距离的衰减曲线，夯击能 6 000 kN·m 强夯施工的安全距离约为 30~35 m。

随着水平距离的增加，振动加速度的幅值急剧减小。夯锤近处振动加速度对夯击较为敏感，但是对于夯锤远处，振动的影响不是很大。加速度在距夯击点较近处衰减得快些，在距夯击点较远处衰减得慢些。采用 0.1g 作为加速度容许振动限值，根据振动加速度随水平距离的衰减曲线，夯击能 6 000 kN·m 强夯施工的安全距离约为 25~30 m。

3.4 不同能级强夯对比分析

3.4.1 竖向位移

不同夯击能下竖向位移有类似的分布规律，即不同能级的累计夯沉量的变化规律相似，都是累计夯沉量前几次夯击快速增长，渐渐趋于稳定，靠近夯锤的变形变化幅度比远离夯锤的大。图 9 为不同夯击能对应的第六击时累积竖向变形变化规律。可见，不同能级下累积变形在水平方向和深度方向的变化规律也很相似，不同之处在于，夯击能越大，各击

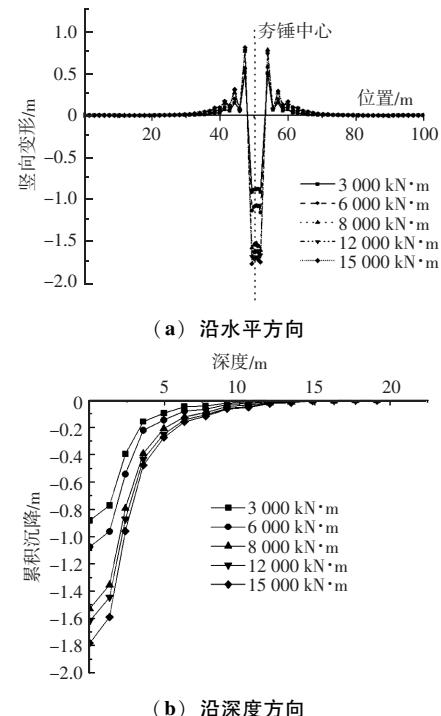


图 9 不同夯击能下累积竖向变形变化规律（第六击）

Fig. 9 Cumulative vertical deformation variation law under different compaction energies (sixth strike)

下的累积变形就越大。

夯击能越大引起的地表隆起范围和沉降影响深度范围也越大，但总体而言，强夯能的增加对地表隆起范围的影响极其有限。而强夯引起的沉降影响深度越大，加固深度就越大，3 000、6 000、8 000、12 000、15 000 kN·m 能级下有效加固深度的计算值分别为 6.0、6.8、9.0、10.7、11.6 m。

3.4.2 振动特性

图 10 为不同夯击能下振动特性影响。夯击能对振动特性的影响，不能简单地通过夯击能的大小来判断，即便是同一夯击能，还涉及轻锤高落距和重锤低落距的问题。在夯击能相同的情况下，对于轻锤高落距和重锤低落距的组合形式，重锤低落距所产生的地面振动速度和加速度的峰值要大。因此，相同的强夯能级在保证夯击效果的前提下，选用轻锤高落距的组合形式，可以在一定程度上减小强夯的振动影响。而对于不同夯击能而言，如果锤重相同，显然夯击能越大，产生的振动影响越大；相比于 12 000 和 15 000 kN·m 这两个能级，后者强夯能级虽然增大很多，但强夯对振动影响相比前两个能级也未见明显增强很多。

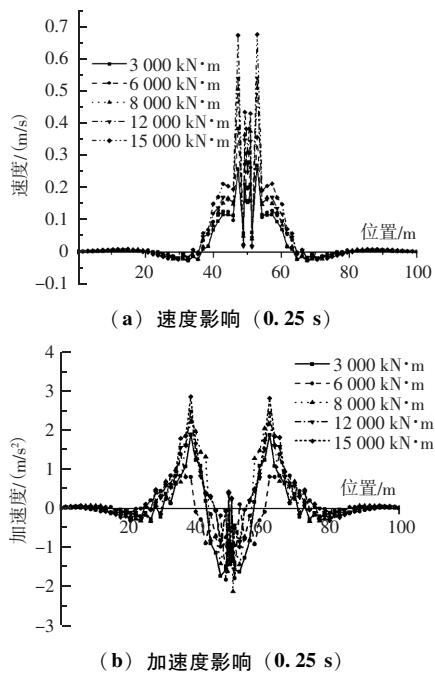


图 10 不同夯击能下振动特性影响

Fig. 10 The influence of vibration characteristics under different compaction energies

4 结论

为探究不同强夯能级条件下土体的力学特性, 进行了不同能级强夯试验, 并通过数值模拟分析了在不同夯击能级和次数下, 土体在加固过程中的应力变化、变形特性、弹性模量的变化规律以及强夯施工所引起的振动特性, 得出以下主要结论:

(1) 据现场实测数据, 通过强夯过程模拟, 对每次夯击后加固土层的弹性模量进行反算, 并将反算的弹性模量进行拟合, 得到各击次下加固土层的弹性模量与夯击次数呈幂函数分布规律。

(2) 在强夯作用下, 振动速度和振动加速度的传播特性和衰减规律相同, 在距夯击点较近处衰减得快些, 在距夯击点较远处衰减得慢些。夯击能越大, 产生的振动影响越大, 3 000、6 000 $kN \cdot m$ 和 12 000、15 000 $kN \cdot m$ 相比, 后者强夯能级虽然增大很多, 但强夯对振动影响相比前两个能级未见明显增强很多。

(3) 夯击能越大引起的地表隆起范围和沉降影响深度范围也越大, 但总体而言, 强夯能的增加对地表隆起范围的影响极其有限, 不同夯击能加固后的填土模量差别不大, 但是加固深度有着一定的影响。当夯击能从 3 000~15 000 $kN \cdot m$ 时, 有效加固深度分布在 6.0~11.6 m。

参 考 文 献

- [1] 陈晨, 冯爱国, 王春艳, 等. 某厂区红层软岩碎石填方高能级强夯现场试验研究 [J]. 工程勘察, 2023, 51 (5): 22~28.
- [2] 张巧慧, 姜小磊. 软土地区双基坑开挖变形分析及其对既有地铁车站结构的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (6): 51~57.
- [3] 冉逸涵, 肖世国, 廖家前, 等. 土-石混合填土强夯动应力的简化与修正算法 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (4): 1121~1128.
- [4] 刘杰, 刘松, 张海阔, 等. 强夯置换碎石墩在机场场道软基的应用研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊2): 2332~2337.
- [5] 陈晨, 冯爱国, 王春艳, 等. 某厂区红层软岩碎石填方高能级强夯现场试验研究 [J]. 工程勘察, 2023, 51 (5): 22~28.
- [6] 刘强, 高立群, 赵民, 等. 强夯置换对软土基坑边坡开挖稳定性的影响研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (3): 226~233.
- [7] 贺立, 廖小明. 强夯垫层法在海港软土路基处理中的应用 [J]. 水运工程, 2023, (4): 185~190.
- [8] 秦堃. 深厚软土地基联合加固技术模型试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 35~39.
- [9] 王连俊, 杨天琪, 帅宇轩, 等. 强夯垫层法对河谷区软土地基加固效果研究 [J]. 公路, 2022, 67 (1): 46~52.
- [10] 徐剑佩, 谭勇锋, 陶耀东, 等. 强夯作用下边坡动力响应模型试验和数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (33): 14314~14321.
- [11] 程旭日. 强夯法加固机场道基的现场试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21 (5): 55~62.
- [12] 王家磊, 张合青, 余虔, 等. 强夯法加固可液化砂质粉土地基试验研究 [J]. 矿业科学学报, 2024, 9 (3): 361~369.
- [13] 王建平, 安韶, 方斌. 基于离散元的强夯法加固珊瑚礁砂地基机理分析 [J]. 工业建筑, 2024, 54 (10): 199~204.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘强, 高立群, 赵民, 等. 强夯置换对软土基坑边坡开挖稳定性的影响研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (3): 226~233.