土木工程學輯要
Compendium of Civil Engineering
ISSN Print: 3079-5605
ISSN Online: 3079-5613
https://doi.org/10.63313/CE.2004

不同能级强夯作用下风积粉细砂应力波传播与密实响应预测分析

罗凯淇

兰州交通大学土木工程学院，甘肃省 兰州市

发布日期：2026年10月26日

摘　要

为分析高能级强夯在风积粉细砂中的应力波传播、衰减及其与累积密实效果的联系，构建6000、8000和10000 kN•m三个试验区的12击动土压力预测数据，并建立文献约束的轴对称显式动力代理模型。采用峰值动应力、到时、冲量、相关系数、均方根误差、平均绝对百分比误差和Nash-Sutcliffe效率系数评价现场预测与数值结果的一致性，同时比较夯前与第12击后干密度剖面。结果表明：三能级轴线1 m处第12击峰值分别为900、1111和1285 kPa，最大监测深度处分别衰减至331、393和435 kPa；代理模型与现场预测的空间趋势具有较高一致性，R^2为0.989～0.996，但未经幅值校准时吻合率仅为73.3%～74.3%，采用单尺度系数后提高至93.5%～95.5%；干密度提升率峰值分别位于5.5、6.5和8.5 m，峰值为13.41%、14.67%和15.83%。瞬时峰值应力沿深度单调衰减，而密实增量在中深部达到峰值，说明干密度响应不能由单次峰值应力单独解释，更可能受累计有效冲量、塑性耗散能、初始密度及围压共同控制。本文结果为现场监测布置和Abaqus参数校准提供方法框架，但所用数据为预测数据，工程结论仍需实测压力时程和真实ODB结果验证。

关键词

风积粉细砂；强夯；动土压力；应力波； Abaqus；干密度；模型验证

Prediction of stress-wave propagation and densification response of aeolian silty fine sand under dynamic compaction at different energy levels

Kaiqi Luo

College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730000 Gansu, China

Abstract

文章引用: 罗凯淇. (2026). 不同能级强夯作用下风积粉细砂应力波传播与密实响应预测分析. 土木工程学辑要, 1(2), 51 – 59. ISSN Print: 3079-5605, ISSN Online: 3079-5613.
DOI: 10.63313/CE.2004

A prediction-based framework was developed to investigate stress-wave propagation, attenuation and densification of aeolian silty fine sand under 6,000, 8,000 and 10,000 kN·m dynamic compaction. Twelve-blow earth-pressure histories were compared with a literature-constrained axisymmetric explicit-dynamic surrogate. The axial peak stresses at 1 m depth were 900, 1,111 and 1,285 kPa. Spatial trends agreed closely (R^2=0.989–0.996), although the uncalibrated amplitude agreement was only 73.3%–74.3%; a single amplitude factor increased it to 93.5%–95.5%. Peak dry-density improvement occurred at 5.5, 6.5 and 8.5 m, rather than at the shallow stress maximum. Thus, peak stress controls the affected zone, whereas cumulative impulse, plastic dissipation, confinement and initial density are required to explain permanent densification. All numerical series used here are predictions and require validation using measured histories and Abaqus ODB outputs.

Keywords

Aeolian Silty Fine Sand; Dynamic Compaction; Earth Pressure; Stress Wave; Abaqus; Dry Density

Copyright © 2026 by author(s) and Erytis Publishing Limited.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

引言

强夯通过夯锤自由落体向地基输入短历时、高幅值冲击能量，在土体内形成以压缩波为主并伴随剪切波和表面波的复杂波场。对于颗粒细、结构松散且浅层非均匀的风积粉细砂，冲击波传播既决定单击的有效影响范围，也控制多击作用下孔隙压缩、颗粒重排和密实区形成。工程设计通常依据单击夯击能和经验系数估算有效加固深度，但相同能量可由不同锤重和落距组合实现，其动量、接触时间及能量传递效率并不相同，单一能级指标难以完整描述深部响应。

已有现场研究表明，强夯能级提高可扩大粉细砂地基的影响深度。周宝江等[1]在新近吹填粉细砂场地开展 2000 和 4000 kN·m 现场试验，分别获得约 6 m 和 9 m 的处理影响深度，并指出孔隙水压力和标准贯入击数随深度呈显著差异。Gu 和 Lee[2]通过大变形有限元分析发现，干砂中的应力波前由近地表近似平面逐渐发展为沿轴线拉长的形态，且锤重和落距组合会改变深部传播。Pan 和 Selby[3]以及后续显式动力研究[4-6]进一步说明，接触过程、本构模型、阻尼和边界设置是数值结果能否重现现场波形的关键。

然而，现场压力峰值与最终干密度之间并非必然线性对应。浅层土体距离冲击源最近，瞬时应力通常最大，但自由面卸载、夯坑隆起和较低围压可能限制永久体积压缩；中深部虽然峰值应力较低，却可能因围压提高和多击塑性功累积形成干密度峰值。因此，需要把现场时程、数值模拟和夯前—夯后密度剖面置于同一证据链中。

本文基于 6000、8000 和 10000 kN·m 三个试验区的 12 击预测数据，构建现场动土压力—Abaqus 代理模拟—干密度响应的一体化分析框架。研究重点包括：1）识别不同能级下峰值、到时和空间衰减规律；2）建立多指标吻合率评价方法；3）分析瞬时应力与累积密实的关系。本文数据均为试验方案阶段的预测值，研究结论用于形成可验证假设和论文分析流程，不替代现场实测。

1. 试验方案与数据

1.1. 三能级试验区

三个试验区分别采用 6000、8000 和 10000 kN·m 单击夯击能，每个夯点连续夯击 12 次。动土压力盒以夯点中心线为基准，按深度 z 和径向距离 r 编号。6000 kN·m 区最大监测深度为 6 m，共 15 个测点；8000 kN·m 区最大深度为 7 m，共 16 个测点；10000 kN·m 区最大深度为 8 m，共 17 个测点。各深度的径向布点由浅至深逐级减少，以兼顾近场扩散和深部轴向传播。

表 1. 三能级预测试验方案

能级/(kN·m)	测点数	最大深度/m	第 12 击 1 m 峰值/kPa	最深点峰值/kPa
6000	15	6	900	331
8000	16	7	1111	393
10000	17	8	1285	435

1.2. 动土压力时程模型

每个测点生成 0～120 ms、间隔 2 ms 的单击压力时程。空间峰值采用能级相关的指数衰减形式，多击效应采用趋于稳定的指数增长函数，传播时延由测点至夯点的距离和波速确定。单击波形使用具有传播延迟的单峰脉冲，以保证冲击前压力为零、峰值后逐渐衰减。

$$P_{12}(E,z,r)=P_0(E)\exp[-\alpha z(z-1)-\alpha r\, r] \quad (1)$$

$$F_n=0.72+0.28(1-e^{-0.65n})/(1-e^{-7.8}) \quad (2)$$

$$p(t)=P_{12}F_n\cdot x\cdot\exp(1-x),\quad x=(t-t_a)/\tau \quad (3)$$

式中，P□为轴线 1 m 处第 12 击峰值，αz 和 αr 分别为竖向与径向衰减系数，n 为夯击次数，t□为到时，τ 为脉冲尺度。模型设置 αr>αz，用于反映水平方向的扩散衰减强于轴向传播。

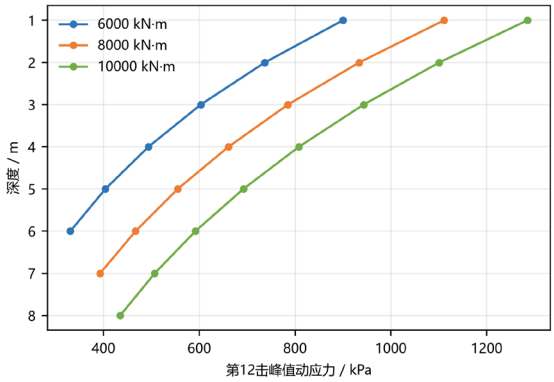


图 1. 第 12 击轴线峰值动应力随深度变化

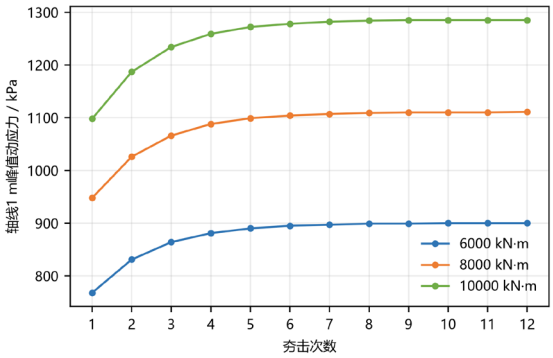


图 2. 轴线 1 m 处峰值动应力随夯击次数变化

1.3. 干密度预测剖面

原状干密度按 0.5 m 间隔设置。0～6 m 浅层叠加两组周期扰动以表征风积沉积的不均匀性；6 m 以下减小随机起伏并设置缓慢增密趋势。第 12 击后的干密度增量由峰值区高斯项和随深度衰减的背景项组成，使 6000、8000 和 10000 kN·m 工况的提升率峰值分别落在 5～6、6～7 和 8～9 m，并在峰值区以下 1～2 m 后逐渐接近原状土。

$$\eta\rho=(\rho d,12-\rho d,0)/\rho d,0\times100\% \qquad (4)$$

2. 数值模拟与对比方法

2.1. Abaqus 显式动力分析框架

采用轴对称半域描述单点夯击，计算域径向 8 m、深度 13 m。夯锤视为解析刚体，土体宜采用能够描述压力相关屈服与压密硬化的 Drucker-Prager/Cap 模型，近夯点区域加密网格，侧边和底部采用无反射边界或黏性边界。模型需要输出平均有效应力、竖向应力、塑性体积应变、接触力、动能、内能和塑性耗散能，并通过网格敏感性和能量平衡检验数值稳定性。

本研究现阶段使用文献约束的代理应力场代替真实 ODB 输出。代理场采用椭圆传播距离、能级相关波速、指数衰减、几何扩散和轻微阻抗增强项。6000、8000 和 10000 kN·m 的波速分别取 225、235 和 245 m/s，阻抗增强中心分别位于 5.5、6.5 和 8.5 m。该处理用于形成待验证的空间分布，不代表已完成 Abaqus 反演。

2.2. 吻合率评价指标

现场数据与模拟数据应按能级、击次、深度、径向距离和时间一一配对。为同时评价趋势、幅值和预测效率，采用决定系数 R^2、均方根误差 RMSE、归一化均方根误差 NRMSE、平均绝对百分比误差 MAPE 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 NSE。工程表达中的峰值吻合率 A 定义为 100%-MAPE，但不单独作为验证依据。

$$\mathrm{RMSE}=\{n^{-1}\Sigma(\sigma sim,i-\sigma field,i)^2\}^{1/2} \qquad (5)$$

$$\mathrm{MAPE}=100\%n^{-1}\Sigma|(\sigma sim,i-\sigma field,i)/\sigma field,i| \qquad (6)$$

$$A=100\%-\mathrm{MAPE} \qquad (7)$$

$$\mathrm{NSE}=1-\Sigma(\sigma sim,i-\sigma field,i)^2/\Sigma(\sigma field,i-\bar{\sigma}field)^2 \qquad (8)$$

为识别整体幅值偏差，在不改变空间分布的条件下计算单尺度系数 $k=\Sigma(\sigma field\sigma sim)/\Sigma\sigma sim^2$。正式验证时，k 只能由校准组确定，随后锁定参数并用于独立测点或保留能级；若在全部数据上拟合 k，则所得

指标只能称为拟合优度，不能称为外部验证精度。

2.3. 应力—干密度关系

分别计算轴线同深度处第 12 击峰值动应力与干密度增量、提升率的 Pearson 相关系数。由于密实是 12 次冲击的累积结果，还应在现场实测后进一步比较累计冲量、阈值以上有效冲量及 Abaqus 塑性耗散能。

$$I_{eff}=\Sigma_n\int \max[p_n(t)-p_{th},0]dt \qquad (9)$$

3. 结果

3.1. 动土压力传播与多击演化

第 12 击轴线峰值随深度近似指数衰减。6000 kN·m 工况由 1 m 处 900 kPa 降至 6 m 处 331 kPa；8000 kN·m 由 1111 kPa 降至 7 m 处 393 kPa；10000 kN·m 由 1285 kPa 降至 8 m 处 435 kPa。相同深度下，能级越高，峰值越大且深部保留的应力幅值越高，说明提高能级可扩大有效传播范围。

多击增长主要集中在前 3～5 击。三个能级在第 1 击时的轴线 1 m 峰值分别约为 768、948 和 1098 kPa，第 5 击增至 890、1099 和 1272 kPa，此后曲线逐渐趋稳。该趋势意味着若实测结果一致，可利用前 5 击判断主要密实阶段，并结合夯沉量确定后续击数的边际收益。

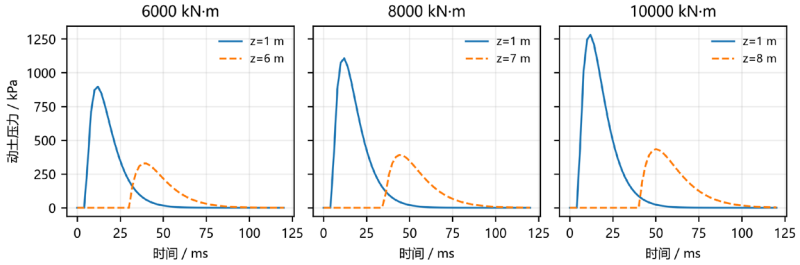


图 3. 三能级轴线浅层与最深测点第 12 击压力时程

时程曲线显示，深部测点的响应具有明显延迟，峰值降低且脉宽增加。10000 kN·m 工况的深部脉冲幅值和持续时间均高于较低能级，符合高能级应力波传播更深、衰减更缓的设定。正式现场分析应在相同滤波和时间零点下比较到时、半峰宽和冲量。

3.2. 应力波空间传播与消散

10～15 ms 时高应力区主要位于夯点下方，波前同时向深部和径向扩展；30 ms 时主波峰已进入中深部，轴向传播距离明显大于径向高幅区；50 ms 时 6000 和 8000 kN·m 工况全域基本低于 100 kPa，10000 kN·m 仅在深部保留低幅移动波峰。该演化与干砂强夯数值研究中由近地表平面波前向轴向拉长波前转变的规律一致[2-3]。

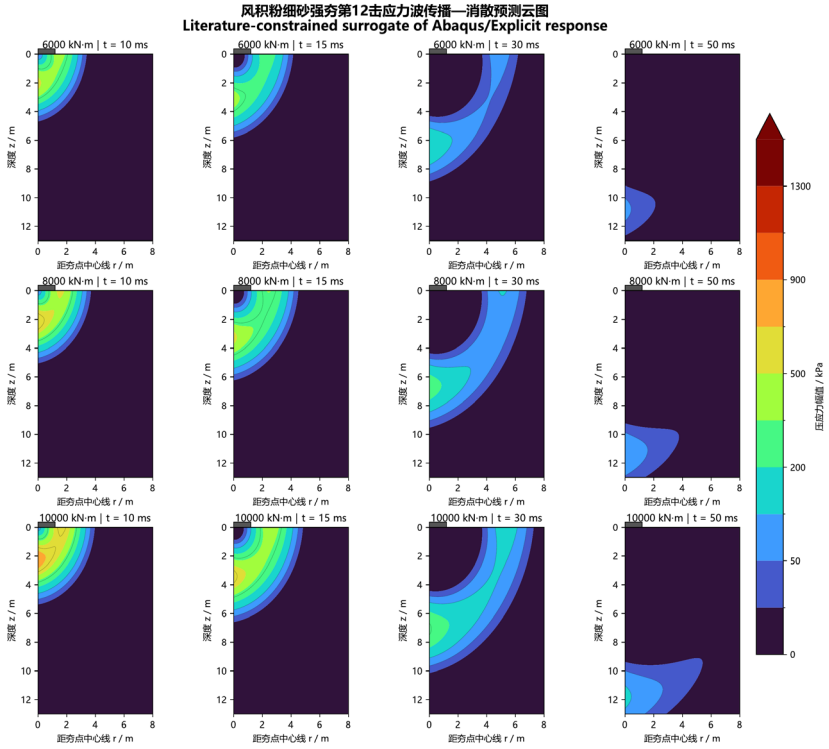


图 4. 6000、8000 和 10000 kN·m 第 12 击应力波传播—消散预测云图（统一色标）

注：该图为文献约束代理结果，并非 Abaqus ODB 直接导出；正式投稿时应以完成材料参数、接触、阻尼、边界和能量平衡校核后的真实模拟结果替换。

3.3. 现场预测与数值结果吻合率

表 2. 代理模拟与现场预测峰值的统计对比

能级	R^2	原始 RMSE	原始 A/%	k	校准 A/%	校准 NSE
6000	0.996	118.1	73.3	1.321	95.5	0.987
8000	0.993	146.8	74.2	1.300	94.6	0.974
10000	0.989	172.9	74.3	1.290	93.5	0.954

三能级的 R^2均大于 0.988，说明代理模拟能够重现测点间的相对空间衰减趋势。然而，原始 RMSE 为 118.1～172.9 kPa，原始吻合率仅 73.3%～74.3%，且 NSE 随能级提高由 0.597 降至 0.463，表明模型存在稳定的整体低估。采用单尺度系数后，吻合率提高至 93.5%～95.5%，NSE 达到 0.954～0.987。

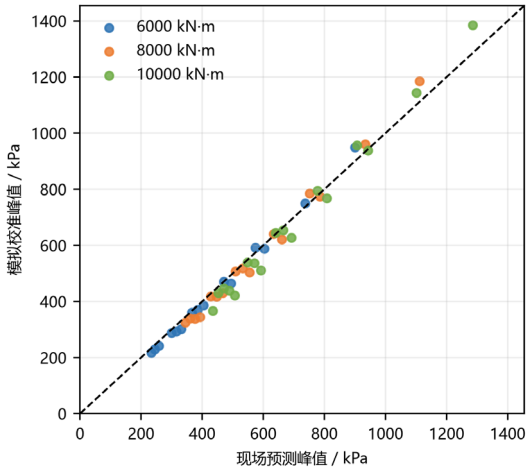


图 5. 单尺度校准后模拟峰值与现场预测峰值对比

高 R^2与较低的原始吻合率同时出现，说明相关性不能替代幅值验证。单尺度校准改善了整体偏差，但 10000 kN·m 工况的校准后误差仍略高，可能与高能级下接触面积扩大、非线性硬化和深层阻抗差异有关。由于现场基准和代理模拟均来自预测模型，本节只能证明分析流程具有内部一致性，不能证明 Abaqus 模型已通过现场验证。

3.4. 干密度剖面及提升率

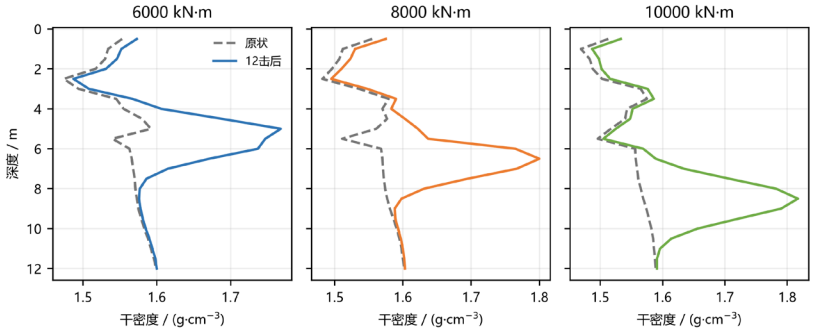


图 6. 三能级夯前与第 12 击后干密度剖面

原状土在 6 m 以上呈现明显起伏，6 m 以下波动减弱并随深度缓慢增密。第 12 击后，三个试验区均形成中深部密实峰值。6000 kN·m 工况的夯后干密度最大值为 1.768 g/cm³，位于 5.0 m；提升率峰值为 13.41%，位于 5.5 m。8000 kN·m 工况的夯后干密度和提升率峰值均位于 6.5 m，分别为 1.800 g/cm³和 14.67%。10000 kN·m 工况的峰值均位于 8.5 m，分别为 1.817 g/cm³和 15.83%。

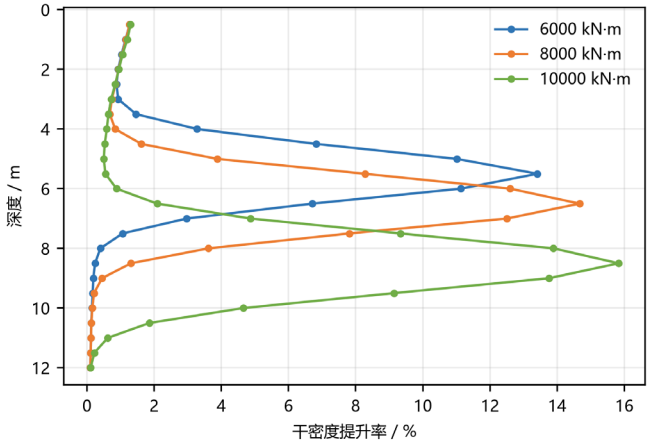


图 7. 三能级干密度提升率随深度变化

表 3. 三能级干密度峰值特征

能级/(kN·m)	夯后峰值/(g·cm^{-3})	峰值深度/m	最大提升率/%	提升率深度/m
6000	1.768	5.0	13.41	5.5
8000	1.800	6.5	14.67	6.5
10000	1.817	8.5	15.83	8.5

4. 讨论

4.1. 能级对传播深度的控制

三个工况中，浅层峰值、深部峰值和影响深度均随能级提高而增加。这一趋势与参考现场试验中 2000 kN·m 对应约 6 m、4000 kN·m 对应约 9 m 影响深度的结果方向一致[1]，也与数值研究中能量和动量共同控制深部传播的认识相符[2]。但本文不能据此建立能级与有效加固深度的普适比例关系，因为风积砂与吹填砂的含水状态、细粒含量、初始密度及夯锤组合不同。

4.2. 峰值应力与干密度并非简单正相关

轴线峰值动应力在 1 m 处最大并随深度下降，而干密度提升率在 5.5、6.5 和 8.5 m 达到峰值。按共同深度直接计算，6000、8000 和 10000 kN·m 工况中峰值应力与提升率的相关系数分别为-0.828、-0.778 和-0.583。负相关并不意味着应力波抑制密实，而是说明“单点瞬时峰值”不是描述多击永久变形的充分变量。

浅层具有较高峰值应力，但自由面卸载明显，颗粒可向夯坑周边侧向迁移或隆起；中深部围压提高，剪胀受到限制，循环压缩更易转化为不可恢复的体积应变；超过主要波及深度后，能量因几何扩散和材料阻尼而不足，干密度逐渐回归原状。因此，密实峰值位于浅层应力峰值以下是具有物理合理性的。

4.3. 建议采用累计能量变量解释密实

正式试验应将每一击的峰值、冲量、半峰宽和频谱能量累积，并从 Abaqus 提取塑性耗散能 Wp 与塑性体积应变。若 ηρ 与累计有效冲量或 Wp 的相关性显著高于与单击峰值的相关性，即可支持“峰值控制

波及范围、累计塑性功控制密实程度”的机制解释。统计模型还应纳入原状干密度、含水率和深度，以避免把初始非均匀性误判为能级效应。

4.4. 模型验证边界

现有吻合率是两个预测模型之间的内部比较。正式验证应将 6000 和 8000 kN·m 部分测点用于材料参数和阻尼校准，把未参与校准的径向测点、后 6 击或 10000 kN·m 工况作为独立验证集。模型只有在峰值、到时、冲量和波形相关系数同时达到预设标准，且残差不随深度和半径呈系统变化时，才能用于解释场地应力波传播。

5. 结论

1）预测数据表明，6000、8000 和 10000 kN·m 工况轴线 1 m 处第 12 击峰值分别为 900、1111 和 1285 kPa，最深监测点仍保持 331、393 和 435 kPa；能级提高增强了深部传播能力。

2）代理模拟能够较好再现空间衰减趋势，三能级 R^2为 0.989～0.996，但未经幅值校准时吻合率仅 73.3%～74.3%。单尺度校准后吻合率达到 93.5%～95.5%，说明模型存在可识别的系统幅值偏差。

3）干密度提升率峰值随能级提高由 5.5 m 下移至 6.5 和 8.5 m，最大提升率由 13.41%提高至 14.67%和 15.83%；峰值区以下 1～2 m 后，加固增量逐渐衰减。

4）瞬时峰值应力沿深度递减，而干密度增量在中深部达到峰值，二者不存在简单正线性关系。应以累计有效冲量、塑性耗散能、围压和初始密度共同解释多击密实。

5）本文建立了现场时程—Abaqus 响应—干密度效果的统一评价流程。所有数值均为预测结果，最终工程结论需由现场压力盒实测、分层干密度试验和真实 Abaqus/Explicit 计算共同验证。

参考文献

[1] 周宝江, 邵旭. 不同能级强夯法处理新近吹填粉细砂地基现场试验[J]. 水运工程, 2024(9): 238-244. DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20240903.013.

[2] GU Q, LEE F H. Ground response to dynamic compaction of dry sand[J]. Géotechnique, 2002, 52(7): 481-493. DOI:10.1680/geot.52.7.481.38747.

[3] PAN J L, SELBY A R. Simulation of dynamic compaction of loose granular soils[J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33: 631-640. DOI:10.1016/S0965-9978(02)00056-8.

[4] MAYNE P W, JONES J S. Impact stresses during dynamic compaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(10): 1342-1346. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:10(1342).

[5] LIU W J, LI Y, CAI J, et al. Selection of tamping parameters based on propagation model of dynamic compaction-induced stress wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 427-435. DOI:10.16285/j.rsm.2022.1463.

[6] ZHANG, WANG, HAN. Model test study on the effect of dynamic compaction under low water content[J]. PLOS ONE, 2021, 16:e0253981. DOI:10.1371/journal.pone.0253981.

[7] 何长明, 邹金锋, 李亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 628-632.

[8] 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.

[9] 张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 等. 基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 117-125.

[10] 陈宗坤. 强夯及降水强夯法在某码头地基处理中的应用研究[J]. 中国水运, 2017(3): 67-68.