

吹填路基高压差动力降水单点夯击击密过程数值模拟分析

朱佳棋, 程传胜, 马洪

浙江交工国际工程有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年3月26日; 录用日期: 2024年4月16日; 发布日期: 2024年4月26日

摘要

高压差动力降水击密法是一种结合真空降水与动力固结技术的新型快速动力排水固结法。本文采用FLAC3D6.0进行数值模拟分析, 对单点夯击下高压差动力降水击密法处理吹填路基的沉降特性及夯击效果进行研究, 进而揭示高压差动力降水击密法的加固机理。研究表明: 根据孔隙压力影响范围判断强夯有效加固深度具有一定可行性; 随着夯击次数的增加, 最大竖向动应力峰值增大, 超孔隙水压峰值逐渐降低, 夯沉最终位移逐渐增大, 但增大幅度逐渐减小。研究结果对现场施工效果具有参考价值。

关键词

高压差动力降水击密法, 单点夯击, 吹填地基, 数值模拟

Numerical Simulation and Analysis of Single-Point Tamping Compaction Process of High-Pressure Differential Dynamic Precipitation for Hydraulic Fill Subgrade

Jiaqi Zhu, Chuansheng Chen, Hong Ma

Zhejiang Jiaogong International Engineering Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Mar. 26th, 2024; accepted: Apr. 16th, 2024; published: Apr. 26th, 2024

Abstract

The high-pressure differential dynamic precipitation compaction method is a novel and rapid dy-

dynamic consolidation technique that combines vacuum water drainage with dynamic consolidation technology. In this study, numerical simulation analysis was conducted using FLAC3D 6.0 to investigate the settlement characteristics and compaction effects of the high-pressure differential dynamic precipitation compaction method with single-point compaction for hydraulic fill subgrade. This research aims to uncover the reinforcement mechanism of the high-pressure differential power water injection compaction method. The results indicate that determining the effective reinforcement depth through the range of pore pressure influence is feasible. As the number of compaction cycles increases, the maximum vertical dynamic stress peak increases, the peak excess pore pressure gradually decreases, and the final settlement displacement gradually increases, but the rate of increase diminishes. These research findings offer valuable insights for practical construction outcomes.

Keywords

High-Pressure Differential Dynamic Precipitation Compaction Method, Single-Point Compaction, Hydraulic Fill Subgrade, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于具有较高饱和度的软弱土体, 常规强夯法对其加固效果不明显, 且容易出现“丢锤”现象, 甚至产生“橡皮土”现象, 其主要原因在于其土体内部的水没有及时排出。将高压差动力降水联合强夯可以较好地解决这一问题: 夯前通过高压差动力降水, 使地下水位降低; 地下水位以上土体在冲击荷载作用下压缩变形较大, 水位以下土体的超静孔隙水压力得以减小; 夯后持续的真空排水作用, 加快了超静孔压的消散和土体固结。众多学者对其进行了实际应用与数值分析研究, 结果表明高压差动力降水击密法具有良好的技术经济性和适用性[1] [2] [3] [4]。王俊伟结合具体施工总结了真空动力固结法的施工要点[5]。苏亮等探究了降雨强夯法在吹填砂土地基中的加固效果[1]。张力通过数值模拟研究吹填土地基的沉降特性[6]。然而实际工程由于待处理场地的土体性质、水位条件和使用要求的不同, 具体的施工参数、工艺要求、控制指标和加固效果也会存在较大差异, 而现有研究还没有形成一个系统性的指导文件, 使得该技术的推广应用受到一定限制[7]。

因此本文以依托工程为依据, 采用 FLAC3D6.0 有限差分软件建立单点夯击下吹填路基高压差动力降水击密法处理数值分析模型, 研究高压差动力降水击密法的动力影响范围进而揭示高压差动力降水击密过程中地基和路基加固效果。

2. 单点夯击模型建立

以依托工程的地质条件为依据, 建立吹填路基高压差动力降水击密法处理地基的数值分析模型, 采用动力分析方法开展降水条件下强夯分析, 研究不同降水条件下和不同强夯能量条件下, 高压差动力降水击密法的动力影响范围、孔隙水压力变化规律和地基的变形发展规律等, 讨论参数之间的相互影响, 揭示高压差动力降水击密过程中地基和路基承载力增加的规律。

2.1. 模型验证

为验证数值模拟的准确性, 现场试验时在每次动力击密夯击施工过程中, 对地表进行振动加速度的

实时监测, 选取每一遍强夯过程中土体振动加速度时程曲线的峰值进行分析。同时建立有限差分计算模型, 施加强夯冲击荷载, 模拟强夯过程, 得到不同夯检距处的振动加速度曲线, 与施工现场第一次夯击土体的振动加速度峰值进行对比, 结果如图 1 所示。

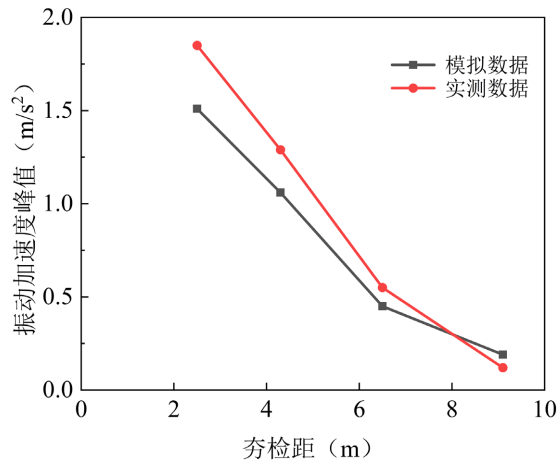


Figure 1. Variation curve of peak value of soil vibration acceleration with tamping distance
图 1. 土体振动加速度峰值随夯检距变化曲线

由图 1 可知, 在夯检距 2.5 m、4.3 m、6.5 m 三个测点模拟计算结果与现场监测结果差异均低于 20%, 且土体振动加速度峰值整体沿水平距离方向的分布规律相似, 振动加速度峰值随着水平距离的增加逐渐减小。因此, 所建立的计算模型较为合理, 可用于后续的单点夯击模拟分析。

2.2. 有限差分网格

通过 Midas/GTS 软件划分网格后导入 FLAC3D 中建立的单点强夯计算模型(图 2), 模型共 118,240 个单元, 125,665 个节点。

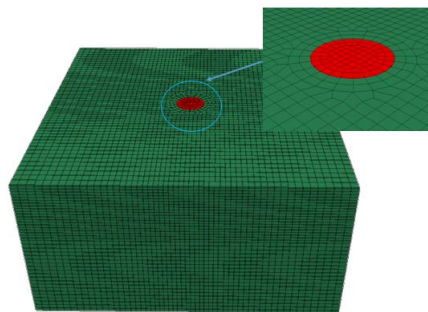


Figure 2. Schematic of finite-difference grid for single-point tamping
图 2. 单点夯击有限差分网格示意图

2.3. 边界条件和初始条件

对吹填路基高压差动力降水击密法模拟大致分为两大阶段, 即夯前真空降水阶段和强夯阶段, 涉及 FLAC3D 中静力、动力、渗流三个模块及其之间的耦合分析。

2.3.1. 静力计算边界

吹填路基吹填完成后需静置一段时间, 待路基中水体自然渗流直至路基顶面达到无水状态, 满足井

点降水管施工的条件。此阶段进行静力分析, 计算模型侧面约束水平位移, 模型底面约束水平位移和竖向位移, 模型顶面设置为自由面(FLAC3D中约束位移边界通过设置相应边界的节点速度为零来实现)。模型中渗流边界设置为孔隙水压力自模型顶面沿深度线性增长, 顶面孔隙水压保持为零。初始分析得到土体竖向应力与孔隙水压力分布云图见图3和图4。

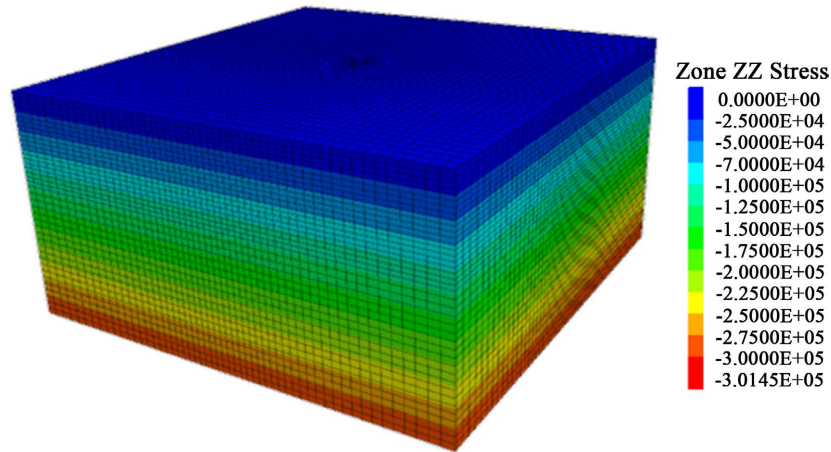


Figure 3. Vertical stress distribution cloud map of soil
图3. 土体竖向应力分布云图

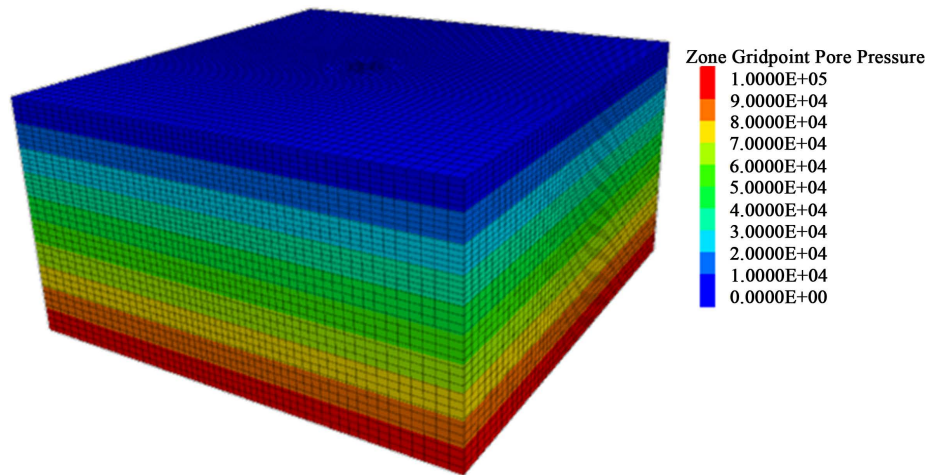


Figure 4. Cloud diagram of soil pore water pressure distribution
图4. 土体孔隙水压力分布云图

2.3.2. 夯前真空降水阶段

吹填路基土体处于接近饱和状态, 通过在地基内部设置竖向排水通道(PVD), 并通过真空泵等设备对地基土体施加负压进而抽出土体内的水、气等, 加快土体固结。该过程属于典型的流固耦合过程, 单纯进行真空预压或联合堆载时, 施加真空荷载一般为2~4个月。但短期内施加真空荷载, 主要目的在于降低地下水位, 并在强夯过程中, 将强夯产生的超孔隙水压(“正压”), 与抽真空形成的“负压”, 人为制造压差, 进行主动排水。进行真空降水时的渗透边界条件为真空管范围内节点设置为负的孔隙水压力。

2.3.3. 强夯阶段

动力分析时, 为减小振动波在边界处的反射从而影响计算精度, 需要选择合适的动力边界条件。

FLAC3D 中常用的两种人工边界为静态边界和自由场边界。本次模拟时模型四周设置为自由场边界，模型底部设置为静态边界(吸收边界)，如图 5。

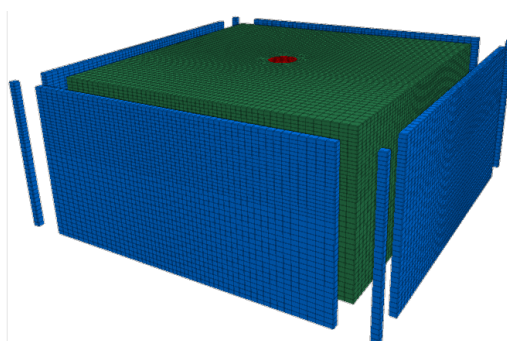


Figure 5. Model dynamic boundary conditions
图 5. 模型动力边界条件

2.3.4. 夯击荷载的模拟

夯锤与土作用的边界接触应力是动力固结数值模拟分析的主要边界条件，也是衡量夯后土体应力历史和应力路径的直接判据，冲击力的大小直接影响到夯后加固的效果，特别是夯击能向深层的传播比例及影响深度。结合一些学者的模拟结果，尽管冲击荷载作用期间表面接触动应力会表现一定的波动和起伏，但从整体变化趋势来看，可以以脉冲荷载代替，即大致可分为加荷和卸荷两个阶段。

以脉冲荷载的形式施加强夯冲击荷载，方法简单，其关键在于应力时程的选取，即最大接触动应力以及加卸荷时间的确定。而且，FLAC3D 允许输入应力(压力)时程曲线作为动力荷载，且可以应用 FISH 函数表达比较规则的动力荷载。因此，在本次模拟中，作者假设接触应力均匀分布，且在时域上采用最简单的正弦波变化规律。

2.4. 本构模型及参数选择

本构模型选择摩尔库伦模型，土体的计算参数取值如表 1 所示。

Table 1. Calculated parameters of the soil
表 1. 土体计算参数

重度(kg/m ³)	动弹模 E(MPa)	泊松比	粘聚力	内摩擦角
1800	13	0.32	10	5

3. 单点夯击数值模拟结果及分析

根据该工程典型工点土层相关试验资料，土体模型的计算参数选取如表 1 所示。首先采用单点夯击计算模型分析强夯的影响范围及影响因素、井点降水的影响范围及其对强夯处治效果的影响，为建立多点强夯计算模型和分析提供便利。本模拟结果主要展示该模拟方法的可行性。夯锤为短圆柱体，锤重为 10 吨，落距为 10 m，夯锤半径为 1 m。

3.1. 竖向应力场分布

图 6 和图 7 分别给出了夯击 1 次时和夯击 4 次时的竖向应力云图。由模拟结果可知，夯锤与土体接触时，产生较大冲击力使得土体发生塑性变形，表现为与夯锤直径相当的夯坑，并随着夯击次数的增加

使得深部土体得到加固。

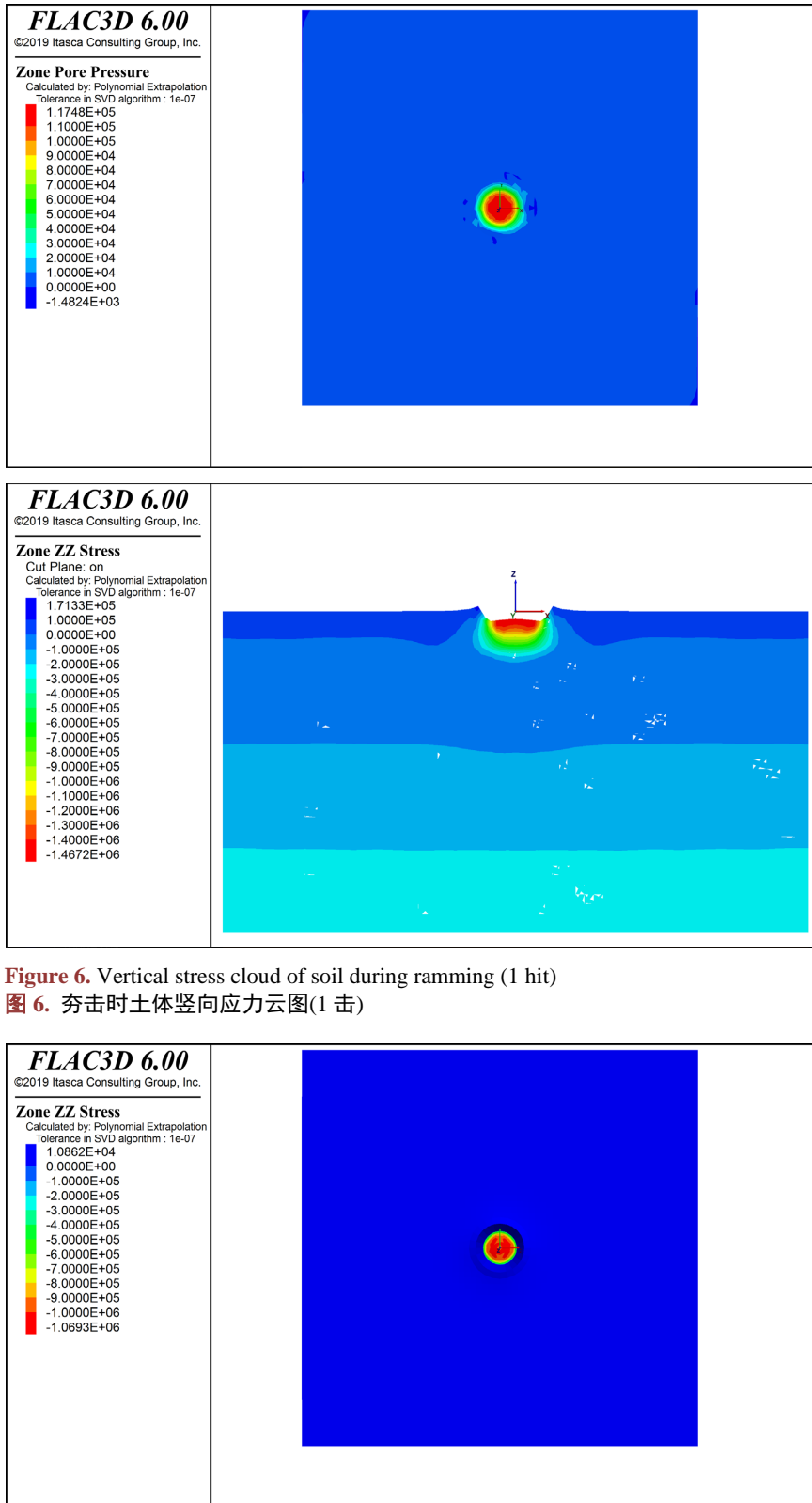


Figure 6. Vertical stress cloud of soil during ramming (1 hit)
图 6. 夯击时土体竖向应力云图(1 击)

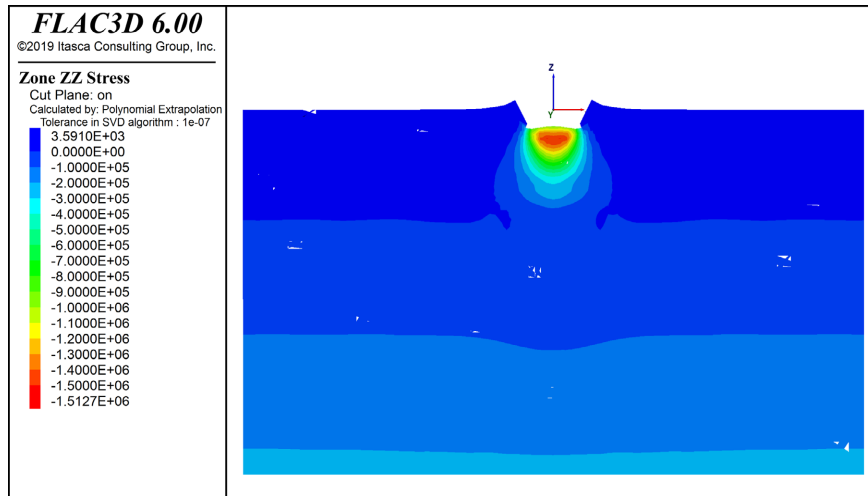


Figure 7. Vertical stress cloud of soil during ramming (4 hit)
图 7. 夯击时土体竖向应力云图(4 击)

为了解夯击产生的应力波在土体深度方向的影响范围,提取夯锤中心处的土体(深度分别为 0 m、1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m)在各次夯击作用下竖向总应力的时程曲线,见图 8。

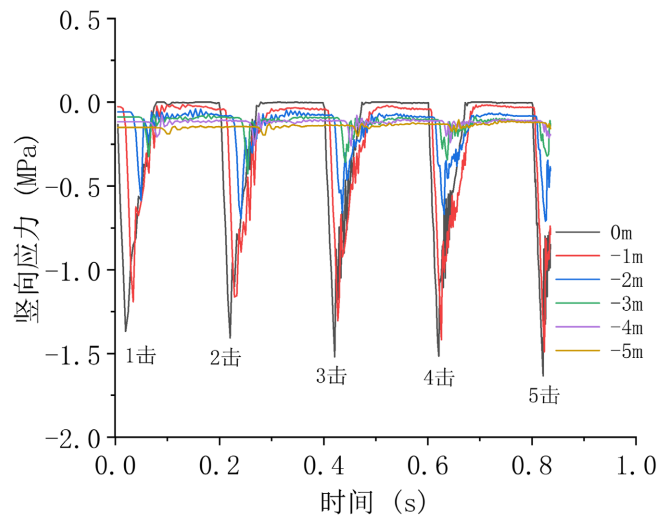


Figure 8. Time course curves of vertical dynamic stresses in soil at different depths at the center of the rammer
图 8. 夯锤中心处不同深度土体竖向动应力时程曲

从图 8 中可以看出,对于单次强夯冲击荷载,土中均会形成脉冲应力波,当其传播过后,土中仍有应力传播,但是应力幅值已大幅度减小。此外,随着夯击次数的增加,最大竖向动应力增大,且只存在一个明显的峰值。如夯击面上(0 m 处)竖向动应力峰值由第 1 击的 1.37 MPa 提高到第 6 击的 1.63 MPa。

此外,强夯应力波随深度方向呈减小趋势(见图 9),以第 4 击为例,应力峰值在深度 1 m 时,相对于强夯面上竖向应力峰值减少为 93.5%,到深度为 3 m 时,减少为 22.60%,至深度 5 m 时,减少为 11.5%。

3.2. 夯击后超孔隙水压力分布

由于夯击作用时间短,可以认为夯击过程中地基是不排水的,夯击时土中超孔隙水压力随深度、水平距离的分布,以第 1 击和第 4 击为例,分别见图 10 和图 11。其中第 1 击产生的超孔隙水压与原有

土体中静水压力相比较明显，随后进行的夯击对比程度逐渐降低，图 11 中夯坑底部仅出现了孔隙水压力云图有少许改变，而夯坑表面均为零静水压力云图显示。

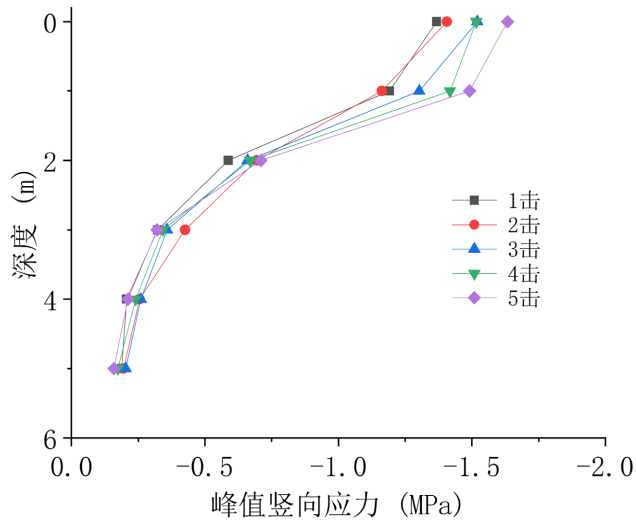


Figure 9. Curve of peak vertical dynamic stress with depth in soil at center of rammer
图 9. 夯锤中心处土体竖向动应力峰值随深度变化曲线

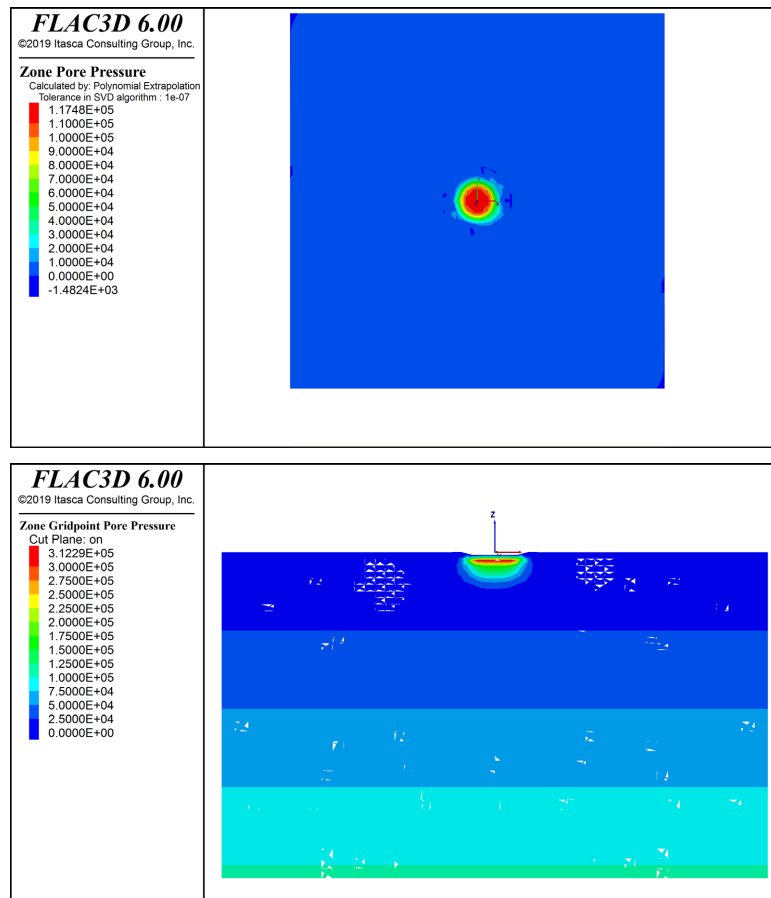


Figure 10. Cloud diagram of pore water pressure distribution during ramming (1 hit)
图 10. 夯击时孔隙水压力分布云图(1 击)

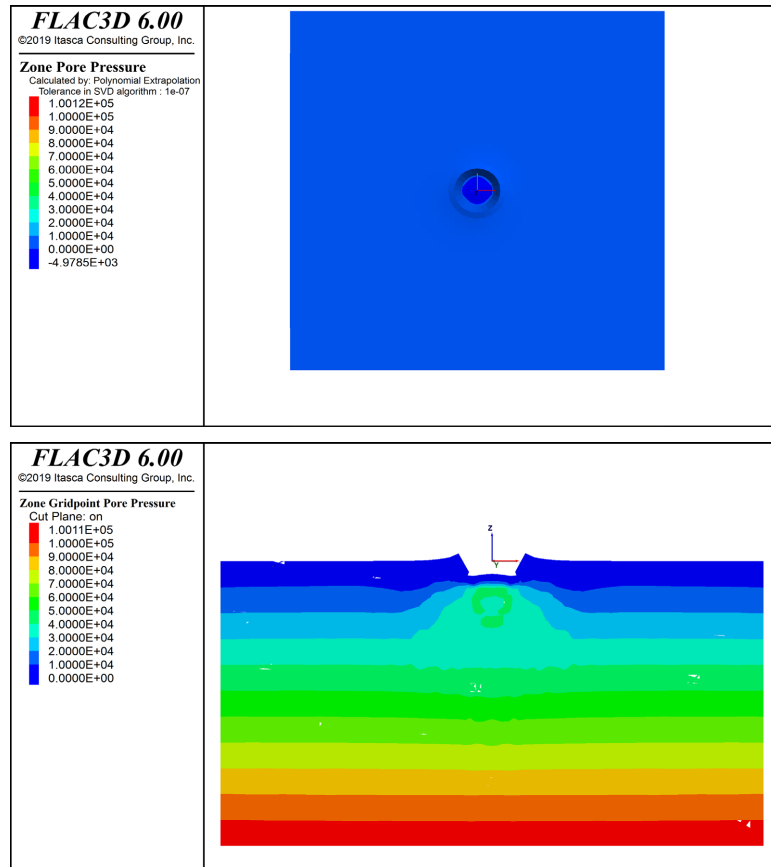


Figure 11. Cloud diagram of pore water pressure distribution during ramming (4 hit)
图 11. 夯击时孔隙水压力分布云图(4 击)

为探究夯击引起的超孔隙水压力沿深度和水平方向的变化规律，距离夯点中心 0 m、1 m、2 m 和 3 m 位置，深度 0 m、1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 处，布置监测点，时时记录各监测点处的孔隙水压力。图 12 为水平距离为 1 m 时的各深度位置在夯击时的孔隙水压时程曲线，距夯点其他水平距离时孔隙水压时程曲线类似。

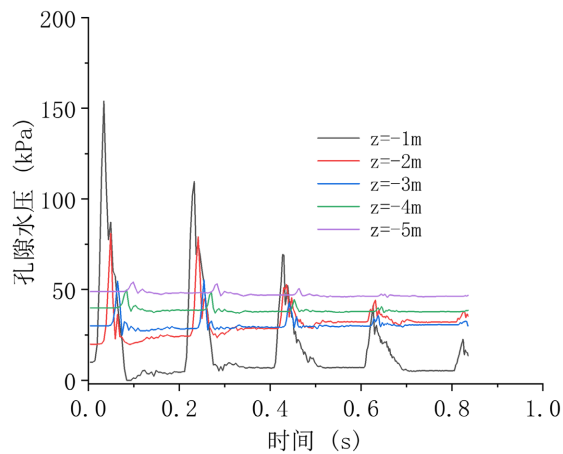


Figure 12. Time course curve of pore water pressure during ramming (1 m from the center of the ramming pit)
图 12. 夯击时孔隙水压力时程曲线(距夯坑中心 1 m)

由图 12 可知，强夯引起的超孔隙水压力在夯击时出现峰值，然后沿深度逐渐减小，并随夯击次数的增加，强夯引起的超孔隙水压峰值逐渐降低。图 13 给出了强夯时孔隙水压力沿深度的变化曲线。

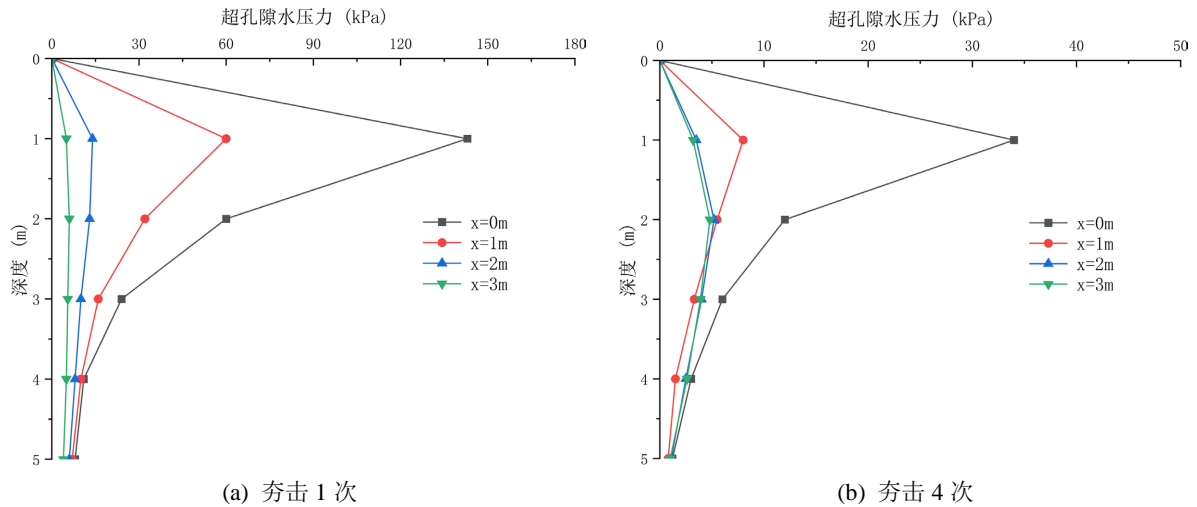
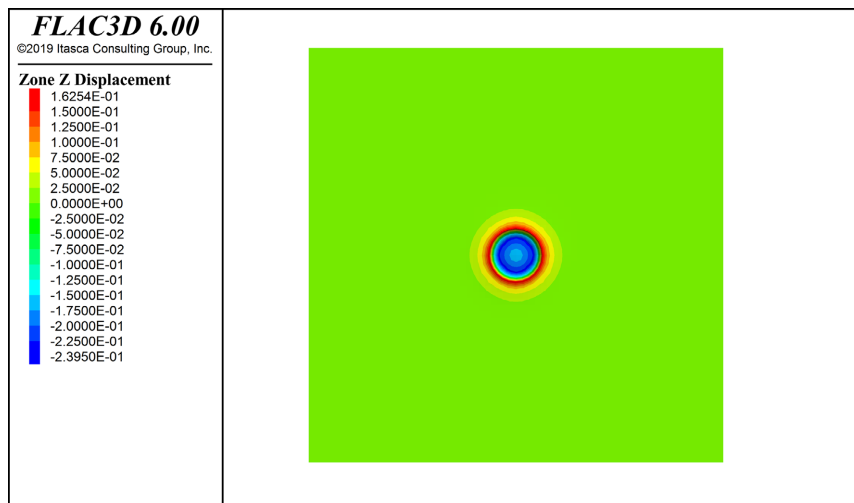


Figure 13. Variation curve of pore water pressure along depth during ramming
图 13. 夯击时孔隙水压力沿深度变化曲线

根据图 13 超孔隙水压力沿深度分布曲线可知，在一定深度范围内，土体孔隙水压力呈现球状分布，先增大后减小。超孔隙水压峰值在大约深度 1.3 m 时达到最大值，其中本次模拟值，夯击 1 次时为 143.9 kPa，夯击 4 次时为 34.2 kPa。超出地表下 5 米范围时，土体在夯击后产生的超孔隙水压力基本为 0。对比夯击 1 次和夯击 4 次产生的超孔隙水压力可知，连续夯击后，由于夯坑的产生及土体的密实，后续新产生的超孔隙水压将逐渐降低。另外，强夯对土体孔隙水压力的影响范围有限，在水平方向距夯点中心 3 m 外，夯击产生的超孔隙水压相比夯点中心线下显著降低，如在夯击 1 次时，峰值孔隙水压在夯点中心线下为 143.9 kPa，而在距夯点水平距离 3 m 时仅有 5.5 kPa。

3.3. 位移场结果分析

图 14 和图 15 分别给出了单点在 1 次夯击和 4 次夯击后的竖向位移云图。由模拟结果可知，在夯击作用下夯锤下土体产生竖向位移，夯坑周边土体出现隆起，该结果与现场观测到的较吻合。



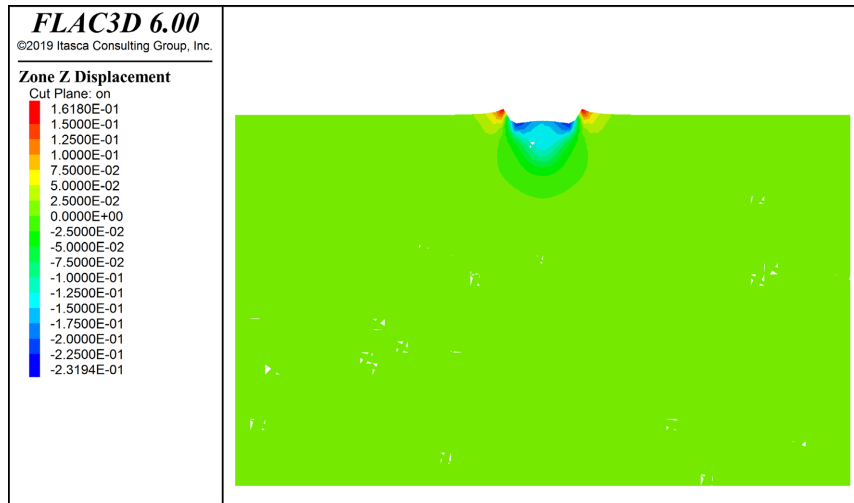


Figure 14. Vertical displacement cloud of soil after tamping (1 hit)
图 14. 夯后土体竖向位移云图(1 击)

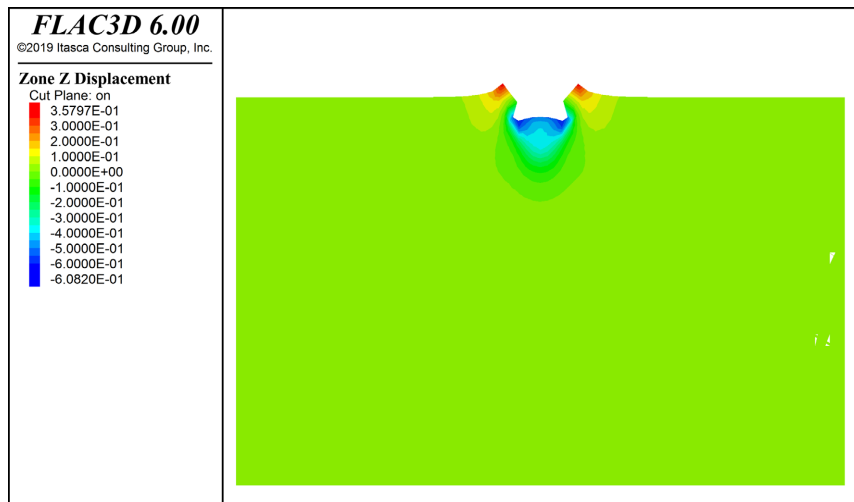
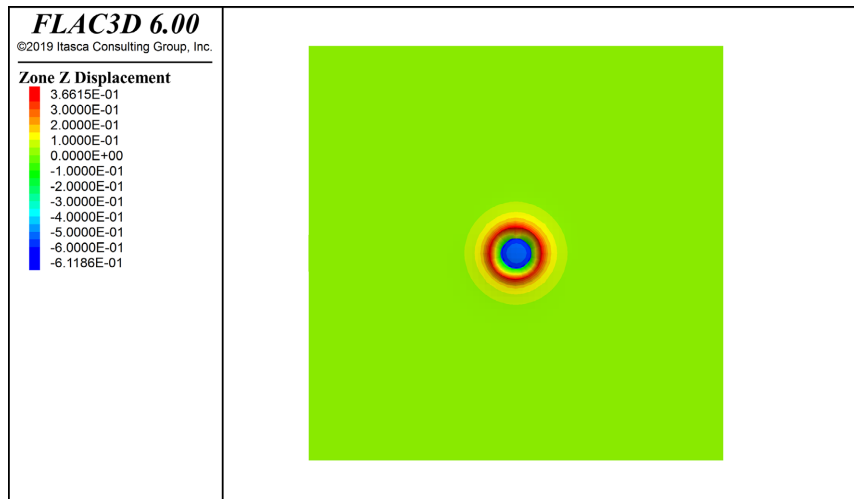


Figure 15. Vertical displacement cloud of soil after tamping (4 hit)
图 15. 夯后土体竖向位移云图(4 击)

以单点夯击4次为例，自夯点中心向外延伸，分别提取不同深度(0 m、1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m)处的土体竖向位移绘制于图 16 中。夯坑下方处夯击沉降量随深度增加而减小，且速率较快。在3 m深度处，夯击沉降量仅为 1~2 cm，变化较小。此外，模型模拟了夯坑外侧土体的隆起，表层土体隆起较为明显。因此，为保证浅层不发生过大隆起，夯击能级的控制至关重要。

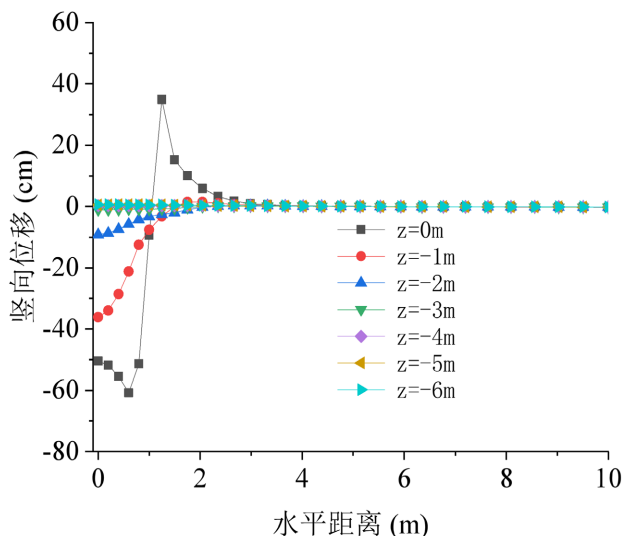


Figure 16. Vertical displacement of soil at different depths after ramming (4 hit)
 图 16. 夯后不同深度处土体竖向位移(4 击)

对比图 14 和图 15 可知，随着夯击次数的增加，夯点处竖向位移逐渐加大。提取不同夯击次数时，自夯点中心向外延伸各节点的土体竖向位移绘制于图 17，同时将夯点处最大位移随着夯击次数的变化绘制于图 18。由上图可明显看出，夯沉最终位移随着夯击次数增加而逐渐增大，但增大幅度逐渐减小。如第一次夯击产生的最大竖向沉降为 23.19 cm，第 5 击时最大沉降为 67.38 cm；依次夯击时，后续沉降值依次减小，分别为 15.19 cm、11.14 cm、10.7 cm 和 6.56 cm。

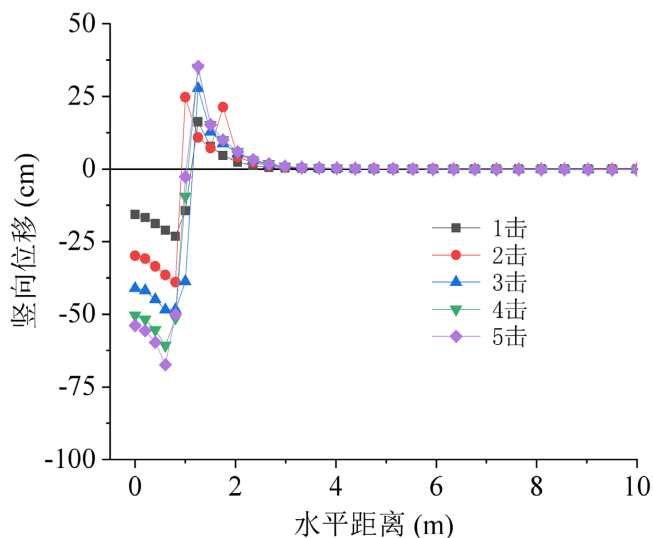


Figure 17. Vertical displacement of soil surface for different number of ramming strokes
 图 17. 不同夯击次数时土表面竖向位移

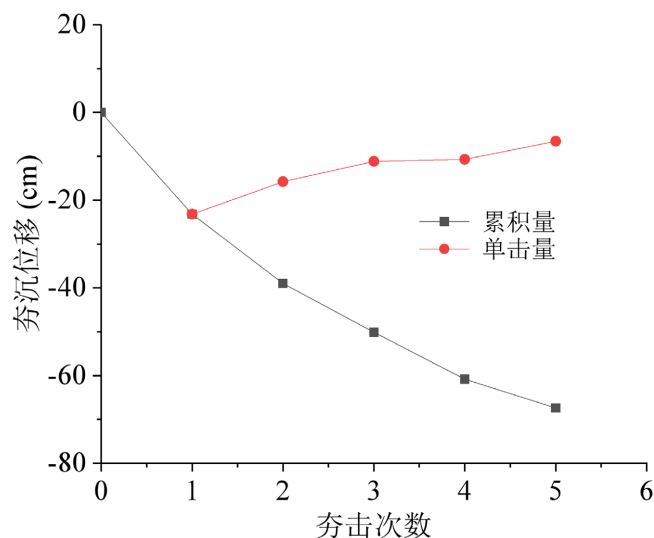


Figure 18. Effect of number of ramming strokes on tamping displacements
图 18. 夯击次数对夯沉位移的影响

4. 结论

本文以依托工程地质条件为依据,建立了单点夯击 + 高压差动力降水处理吹填路基的数值分析模型,探讨了单点夯击下高压差动力降水击密法的加固机理,结论如下:

(1) 本工程采用单点夯击 + 高压差动力降水击密技术,有效加固深度在 5 m 左右,通过降水可使间隔时间减少,进而提高有效加固深度。

(2) 单点夯击时,在同能级的夯击作用下,土体孔隙水压力的影响深度为 5 m 左右,与有效加固深度近似相等,可见根据孔隙压力影响范围判断强夯有效加固深度具有一定可行性。

(3) 单点夯击时,随着夯击次数的增加,最大竖向动应力峰值增大,超孔隙水压峰值逐渐降低,夯沉最终位移逐渐增大,但增大幅度逐渐减小。

基金项目

浙江建设科技项目(2022K069)。

参考文献

- [1] 苏亮, 时伟, 水伟厚, 等. 降水强夯法处理饱和吹填砂土地基现场试验研究[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(6): 5.
- [2] 安晓明. 真空堆载联合预压法在公路软基处理中的应用[J]. 交通世界, 2020(32): 77-78.
- [3] 赵明星, 张永敏, 韩国鹏, 等. 降水联合强夯法在处理吹填土地基中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(2): 4.
- [4] 朱志铎, 张孝彬. 强夯联合降水法处理吹填土地基现场试验研究[C]//中国土木工程学会. 第十四届全国地基处理学术讨论会 论文集. 2016: 142-150.
- [5] 王俊伟. 真空动力固结法在加固海域吹填土路基中的应用[J]. 价值工程, 2017, 36(9): 4.
- [6] 张力, 王琛, 梁发云, 等. 真空-堆载联合预压吹填土路基沉降特性数值模拟[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(6): 36-42.
- [7] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93-110.