

吹填路基高压差动力降水击密过程影响因素分析

洪 渊¹, 沈兴承², 虞修华², 欧阳金芳², 朱佳棋²

¹浙江交通投资集团有限公司高速公路管理部, 浙江 杭州

²浙江交工国际工程有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年4月13日; 录用日期: 2024年5月3日; 发布日期: 2024年5月13日

摘 要

本文建立了单点夯击 + 高压差动力降水处理吹填路基的数值分析模型, 设置了不同地下降水面和夯击能, 分析了夯后夯沉量和孔压效应。研究表明: 在夯击能相同时, 采用重锤轻击比轻锤重击得到的夯击位移量要大, 超孔隙水压数值要低; 在单点夯击作用时, 在一定的降水深度下, 降低上部土体水位, 可有效减缓土体塑性体积变化量。研究结果对高压差动力降水击密法在现场施工中的应用具有指导意义。

关键词

高压差动力降水击密法, 夯击能, 降水深度, 吹填地基, 因素分析

Analysis of Influencing Factors on Compaction Process of High-Pressure Differential Dynamic Precipitation for Hydraulic Fill Subgrade

Yuan Hong¹, Xingcheng Shen², Xiuhua Yu², Jinfang Ouyang², Jiaqi Zhu²

¹Department of Highway Management, Zhejiang Communications Investment Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Zhejiang Jiaogong International Engineering Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 13th, 2024; accepted: May 3rd, 2024; published: May 13th, 2024

Abstract

This paper establishes a numerical analysis model for hydraulic fill subgrade using single-point

文章引用: 洪渊, 沈兴承, 虞修华, 欧阳金芳, 朱佳棋. 吹填路基高压差动力降水击密过程影响因素分析[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 585-594. DOI: 10.12677/hjce.2024.135063

compaction combined with high-pressure differential dynamic precipitation. Different underground water levels and compaction energies are considered to analyze post-compaction settlement and pore pressure effects. The research findings indicate that, with the same compaction energy, greater compaction displacement and lower excess pore pressure values are achieved using a heavy hammer for light compaction compared to a light hammer for heavy compaction. During single-point compaction, at a certain depth of water table lowering, reducing the water level in the upper soil can effectively mitigate the volume change of the soil's plasticity. The results of this study provide guidance for the practical application of the high-pressure differential dynamic precipitation compaction method in field construction.

Keywords

High-Pressure Differential Dynamic Precipitation Compaction Method, Compaction Energy, Water Table Depth, Hydraulic Fill Subgrade, Factor Analysis

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

高压差动力降水击密法本质是真空降水与动力固结技术的联合使用,将高压差动力降水与单点夯击联合使用,进而通过降低土壤含水量和集中强力夯击来优化地基土壤的物理性质。通过这种综合处理,可以增加地基的承载能力和稳定性,确保建筑物或结构在地基上的安全和可靠。国内外许多学者通过现场试验、数值模拟等方法证实其可行性[1] [2] [3]。朱志铎等进行了强夯联合降水法的现场试验,结果表明,在单点夯作用下,随着夯击击数的增加,地基的累计夯沉量增加,而单击夯沉量减小[4]。安晓明结合具体工程实例,探究了真空堆载联合预压施工的加固效果[5]。沙玲等采用 Abaqus 有限元软件进行了数值模拟与分析,对真空-堆载预压法处理软弱地基的加固机理和处理效果进行了探究[6]。梁发云等对吹填土地基进行了原位测试,进而探究了其真空预压加固效果[7]。

因此,本文采用数值模拟的方法研究了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孔隙水压力变化规律和地基的变形发展规律等,并对施工参数进行了敏感性分析。

2. 工程概述

本工程位于杭州湾吹填陆域,面临着深厚软基处理难、费用高、工后沉降难以控制,而且路基填料缺乏的问题。因此,本文以绍兴产业集聚区新东线公路工程吹填路基为依托,开展高压差动力降水击密法处理吹填路基的研究。在分析高压差动力降水击密法基本原理的基础上,以依托工程的水文地质条件和吹填路基设计方案为依据,采用大型数值分析软件建立分析模型,研究高压差动力降水击密法的作用机理,分析吹填路基、地基结构、施工工艺等对处理效果的影响。

2.1. 作用机理

滨海地区吹填路基高压差动力降水固结施工工法所涉及的路基结构为土工管袋(或土工布)围堰+吹填土,基本原理是:先在路基设计的轮廓位置构筑土工管袋(或土工布)围堰,采用泵送方式将粉砂性土体冲填到围堰,沉淀并排除上清水后,在吹填土层设置排水井点进行真空降水,然后对路基施加数次能级为 $1000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ~ $3000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 的强夯,使土体的孔隙水在真空负压和动力冲击所形成的超静孔隙压力耦合

作用迅速排水，土体固结，强度提高。

2.2. 施工步骤

测量定位后清除地表杂物后，在路基底部外轮廓线处构筑围堰，再将由挖泥船运送过来的高含水率粉砂土通过泥浆泵吹填到围堰内；待吹填土沉淀后挖沟排除上吹填土层顶面的清水；再在吹填土层内插设PVC降水管并进行真空降水，待路基内水位降低到一定深度后进行强夯作业，强夯一般包括3~4遍点夯和一遍满夯，满夯后即可进行一步工序的施工。

2.3. 现场试验

为获取夯击联合降水加固滨海吹填土的施工过程中土体参数的变化规律，以及评价该加固方法的效果，在依托工程的吹填土加固施工过程中进行现场监测与原位试验。现场监测指标包括：孔隙比、孔隙水压力以及振动加速度；原位试验包括静力触探试验与静载荷试验。基于现场试验结果比对验证仿真模拟的准确性，进而探究施工条件的影响规律。

图1为现场试验土体振动加速度峰值随夯检距变化曲线，由图1可知，不同强夯遍数下土体的振动加速度峰值变化趋势一致：土体振动加速度峰值随夯检距的增加而减小，且衰减率也随夯检距的增加而降低，呈“先急后缓”的下降趋势。

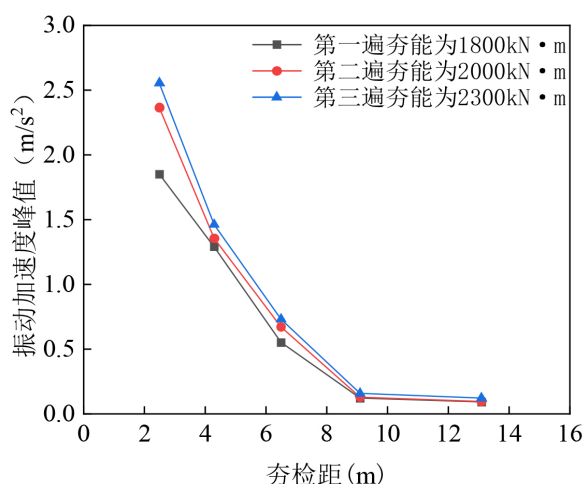


Figure 1. Variation curve of peak value of vibration acceleration of soil with tamping distance in field test
图1. 现场试验土体振动加速度峰值随夯检距变化曲线

3. 单点夯击模型建立

3.1. 单点夯击有限差分网格

网格尺寸越小计算精度越高，但同时也意味着需要投入更多的计算成本(即计算机内存和计算时间)，故综合考虑计算成本和计算精度之间的平衡，计算模型网格划分时仅考虑在夯锤作用面下方及周边一定范围内的单元网格细化，其他单元网格将以一定的几何比率逐渐递增。另外，该计算模型需要进行动力计算，网格划分时为避免计算误差过大，还需要考虑到动荷载的频率特征。Lysmer 和 Waas 的研究表明，要想精确描述模型中波的传播，网格尺寸必须要小于输入波形最高频率对应的波长 λ 的 $1/8 \sim 1/10$ [8]。参考已有经验，土体中计算得到的应力波波速 v 大约为 116 m/s ，强夯振动主频 f 一般为 $6 \sim 20 \text{ Hz}$ [9]，则计算波长为 $5.8 \text{ m} \sim 19.3 \text{ m}$ ，故选定网格单元的最大尺寸应小于 $0.58 \text{ m} \sim 1.93 \text{ m}$ 。

由于单点夯击加固处理区域可看作为半无限空间区域，故计算模型选择方形区域进行模拟(图 2)。吹填路基高度最高为 4.8 m，故取厚度为 10 m，长宽均取 20 m，夯锤半径为 1 m。单点夯击计算模型单元网格通过 Midas/GTS 软件进行划分并导入 FLAC3D 中。厚度方向，上部 4 m 范围内单元尺寸为 0.2 m，下部 6 m 范围内单元尺寸为 0.3 m；水平面内，夯锤下单元尺寸最小值 0.2 m，外围最大值为 0.5 m，所建立的单点强夯计算模型共计 118,240 个单元，125,665 个节点。

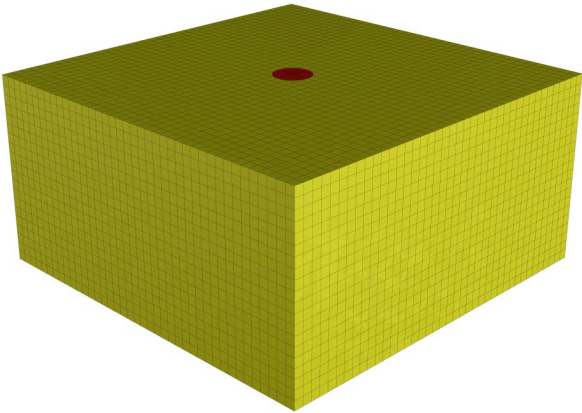


Figure 2. Single-point tamping reinforcement processing model
图 2. 单点夯击加固处理模型

3.2. 本构模型及参数选择

根据前人经验，本构模型可以选择硬化土模型或修正剑桥模型，本文采用摩尔库伦模型进行分析。根据滨海地区土层相关试验资料，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

本文考虑强夯的工程特性。在每次夯击后，将土体塑性应变值大于 5%的区域视作土体的加固区，数值模拟时将此区域在空间上等效成以夯锤底面为上表面的四棱台。考虑每一次夯击引起的塑性变形，确定前次夯击后土体塑性区开展的形状，调整塑性区的土性参数，而对于塑性区以外土体的参数保持不变，以此作为下次夯击分析的基础，重复上述步骤来实现对强夯整个过程的模拟。随着夯击次数的增加，塑性区不断扩大，土体的整体性质也不断提高。

3.3. 模型验证

为确保后续模拟的准确性，设置夯击能为 1800 kN·m 按照现场试验条件进行夯击模拟，得到不同夯检距处的振动加速度曲线，如图 3 所示。由图 3 可知，在夯击作用下，不同夯检距处的土体振动加速度峰值出现存在时间差，夯检距越大，振动加速度峰值出现越晚，且随着夯检距的增大，振动加速度峰值逐渐减小。对比现场试验结果可得，数值模拟所得到的振动加速度峰值随夯距的变化规律一致，模拟数据相较于实测数据偏小，由于数值模拟情况较为理想，没有考虑到实际现场试验的复杂因素，数据略有偏差，但两者误差范围均低于 20%，可以确保数值模拟具有一定的准确性。

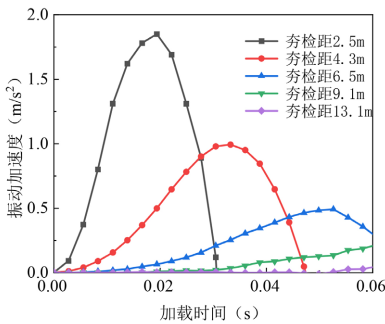


Figure 3. Variation curve of soil vibration acceleration with loading time at different tamping distance
图 3. 不同夯检距处土体振动加速度随加载时间变化曲线

4. 强夯影响因素分析

4.1. 夯击能对夯击效果的影响

软土地基强夯易采用低能级、少击数、多遍数、先轻后重的原则进行施工，低能级标准为 500 kN·m~4000 kN·m，为了解不同夯击能对软土地基夯击效果的影响规律，采用单点夯击模型，模拟不同夯锤重量和落距组成的几组夯击能工况(见表 2)。

Table 2. Calculation working conditions of compaction energy
表 2. 夯击能计算工况

工况组合	夯击能	锤重与落距
1	1000 kN·m	40 t × 10 m、20 t × 5 m
2	1500 kN·m	10 t × 15 m、20 t × 7.5 m
3	2000 kN·m	10 t × 20 m、20 t × 10 m
4	2500 kN·m	10 t × 25 m、20 t × 12.5 m
5	3000 kN·m	10 t × 30 m、20 t × 15 m

4.1.1. 对夯沉量的影响

整理以上 5 组夯击能工况的模拟结果，将首次夯击后的夯沉量与夯击能对应关系绘制于图 4。由图 4 可知，整体而言，两种不同质量(10 t、20 t)的夯锤作用下，夯沉位移量均随着夯击能的增大而增大，但夯沉位移量的增速逐渐放缓，20 t 落锤的夯沉位移与夯击能关系曲线更能清楚地揭示该点，这也跟土体在较大夯击后能够产生的极限塑性体积应变有关，该塑性体积应变不能无限制的发生。

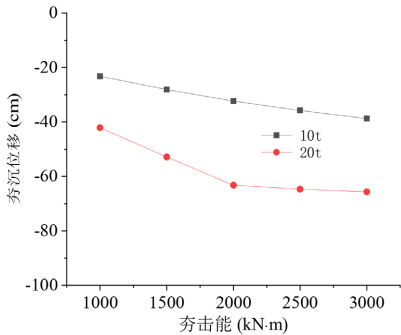


Figure 4. Influence of compaction energy on tamping and sinking displacement
图 4. 夯击能对夯沉位移的影响

不同夯锤质量但相同夯击能下, 20 t 夯锤得到的夯沉位移曲线均大于 10 t 夯锤的, 这说明夯击能相同时, 采用较重夯锤、较小落距(即重锤轻击)比用较轻夯锤、较大落距得到的夯击位移量要大。

4.1.2. 对孔隙水压的影响

由于距离夯坑中心水平距离越近, 得到的超孔隙水压也越大, 故以下分析结果将针对夯坑中心处不同土层深度的超孔隙水压进行。整理分析以上 5 组夯击能工况下, 其一击后土体中孔隙水压力的瞬间响应情况, 绘制于图 5。

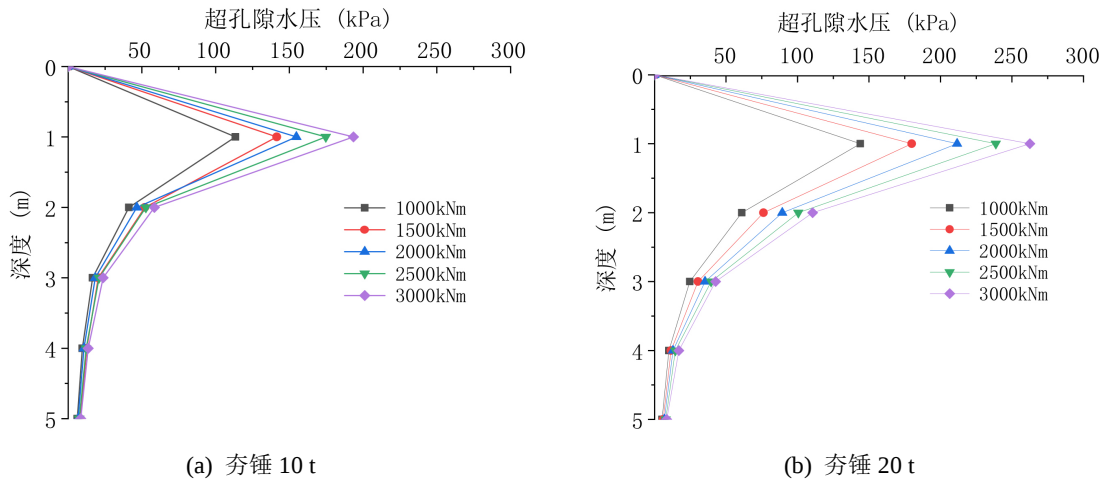


Figure 5. Variation of soil superporous water pressure with depth at different compaction energies
图 5. 不同夯击能下土体超孔隙水压沿深度的变化

由图 5 可知, 采用夯锤质量相同时, 土体中产生的超孔隙水压数值大小与夯击能成正比, 但不同夯击能对孔隙水压在土体中影响的范围基本无影响, 沿深度也呈现先增大后减小的趋势, 大约在土体表面下 1 m 左右达到超孔隙水压最大值, 在土体下 5 m 左右处产生的超孔隙水压基本为零。而在不同夯锤质量, 但夯击能相同时(夯锤质量大但落距小), 夯锤质量大落距小时夯击产生的超孔隙水压数值均比小质量大落距时要低, 比如对于 2000 kN·m 的夯击能, 质量为 10 t 的夯锤夯击时产生的最大超孔隙水压为 211.62 kPa, 而质量为 20 t 的夯锤夯击时最大超孔隙水压降为 154.9 kPa。各级相同夯击能时, 10 t 夯锤产生的最大超孔隙水压均大于 20 t 夯锤的(见图 6)。

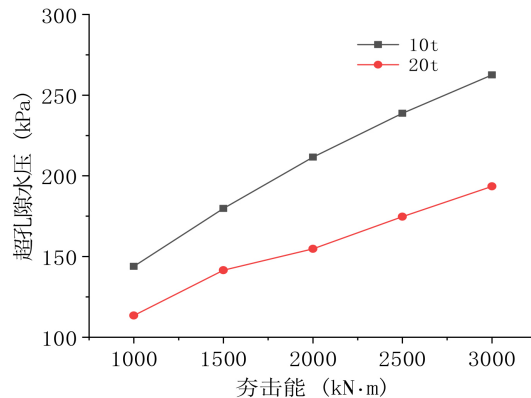


Figure 6. Influence of compaction energy on superporous water pressure
图 6. 夯击能对超孔隙水压的影响

4.2. 降水深度对夯击效果的影响

根据强夯前降水深度的不同, 分析探讨夯后土体的首次单击夯沉量和土体中超孔隙水压力的瞬态分布, 对比分析夯前降水深度对夯击效果的影响, 进而确定夯前降水的合理深度。夯前降水没有考虑降水过程、降水方式及降水对土体孔隙水压力的非均匀分布影响, 仅考虑降水后土体中达到的最终水平水位。模拟中通过控制地下水位面, 模拟水位在地表下 1 m、2 m、3 m 和 4 m。

4.2.1. 对夯沉量的影响

分别模拟计算夯前降水的四种工况, 由模拟结果可知, 夯前是否降水, 夯击形成的竖向位移场、夯坑周边土体隆起特征基本吻合, 仅是夯前降水后得到的量值稍大些。图 7 和图 8 给出了夯前降水深度分别为 1 m 和 4 m 时首次单夯后的竖向位移云图。

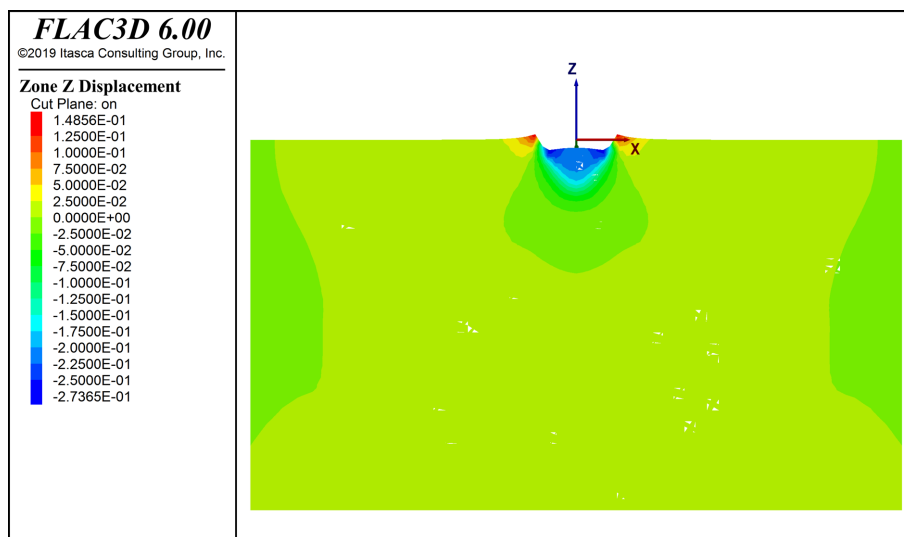


Figure 7. Vertical displacement cloud map of the first single tamp at 1 m precipitation depth
图 7. 降水深度 1 m 时首次单夯竖向位移云图

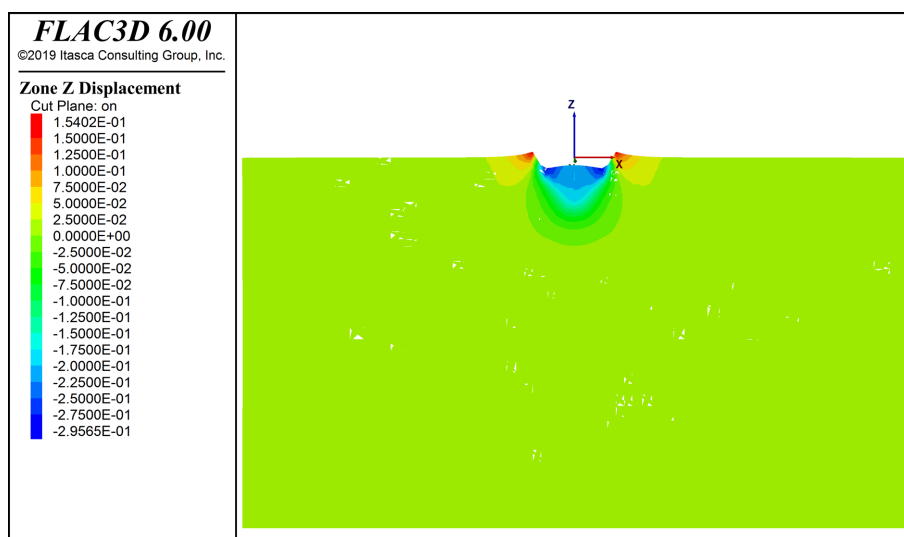


Figure 8. Vertical displacement cloud map of the first single tamp at 4 m precipitation depth
图 8. 降水深度 4 m 时首次单夯竖向位移云图

根据夯前降水 4 种工况的模拟结果，将首次夯击后的夯沉量与夯前降水深度对应关系绘制于图 9。

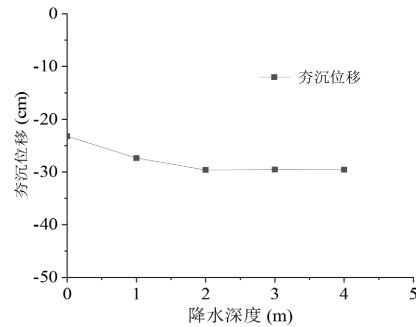


Figure 9. Influence of compaction energy on tamping displacement
图 9. 夯击能对夯沉位移的影响

由图 9 可知，整体而言，首次单击荷载下土体产生的竖向位移，在降水深度降为 2 m 前，呈正相关，夯前降水越深，单夯沉降量越大。土体无降水时，单夯竖向位移为 23.19 cm，降水深度 2 m 时，单夯产生的竖向位移增加至 29.62 cm。然而，随着降水深度的继续增加，单击产生的竖向位移基本维持在 29.55 cm 上下波动。夯击作用下，土体产生直接较大塑性体积变形的范围有限，将土体上部范围内(比如地表 2 m)水位降低，可有效减少土体因强夯导致的超静孔隙水压的反向作用，即减缓土体塑性体积变化量。但过大的降水深度，由于单夯作用范围有限，总体上也不能增加夯沉位移。这可能是夯沉量随降水深度变化曲线的内在原因。

4.2.2. 对超孔隙水压的影响

整理夯前降水的四种工况，发现随着降水深度的增加，由于地下水位距夯锤底面的距离逐渐增加，夯击对土体中孔隙水压的影响逐渐变弱，甚至消失。图 10 和图 11 给出了夯前降水深度分别为 1 m 和 4 m 时首次单夯后的孔隙水压云图，从图中可以看出，降水深度增加，土体中孔隙水压为零的区域(蓝色部分)也逐渐扩大，底部土体中孔隙水压数值向深部逐渐增大。降水深度为 1 m 时，强夯导致土体中孔隙水压增加，夯坑底部云图颜色(浅蓝)上移明显。降水深度为 4 m 时，由于夯锤底面距离土体水位面较远，强夯作用下导致的孔隙水压升高(云图浅蓝色上扬)不明显。

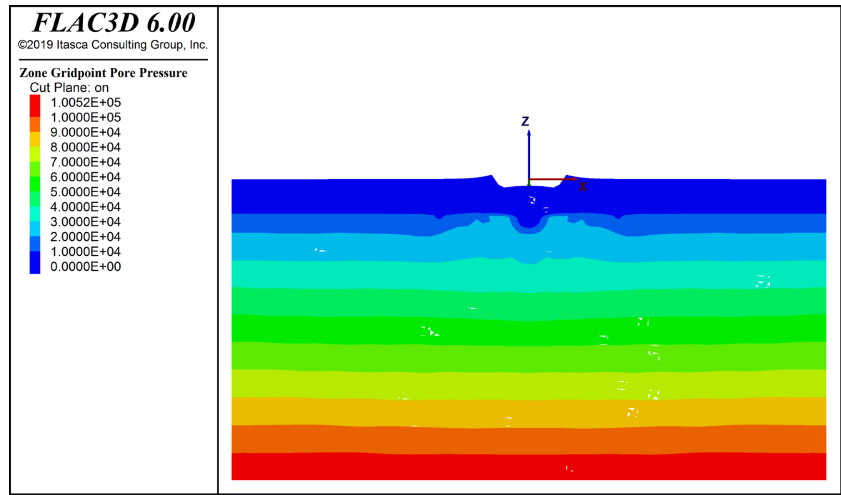


Figure 10. Pore water pressure cloud map of the first single tamp at 1 m precipitation depth
图 10. 降水深度 1 m 时首次单夯孔隙水压云图

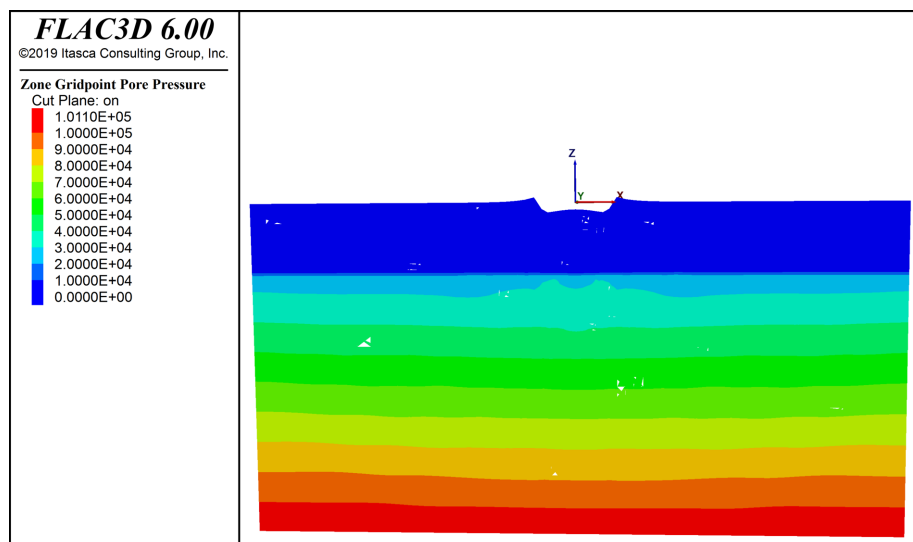


Figure 11. Pore water pressure cloud map of the first single tamp at 4 m precipitation depth
图 11. 降水深度 4 m 时首次单夯孔隙水压云图

针对不同降水深度共 5 种工况(包括不降水工况),将强夯导致的土体超孔隙水压沿深度方向的变化关系提取出来,并绘制于图 12 中,其中图 12(a)为强夯作用下夯点中心线下不同深度的超孔隙水压值,图 12(b)为距离夯点中心水平距离 1 m 处沿深度的超孔隙水压值。

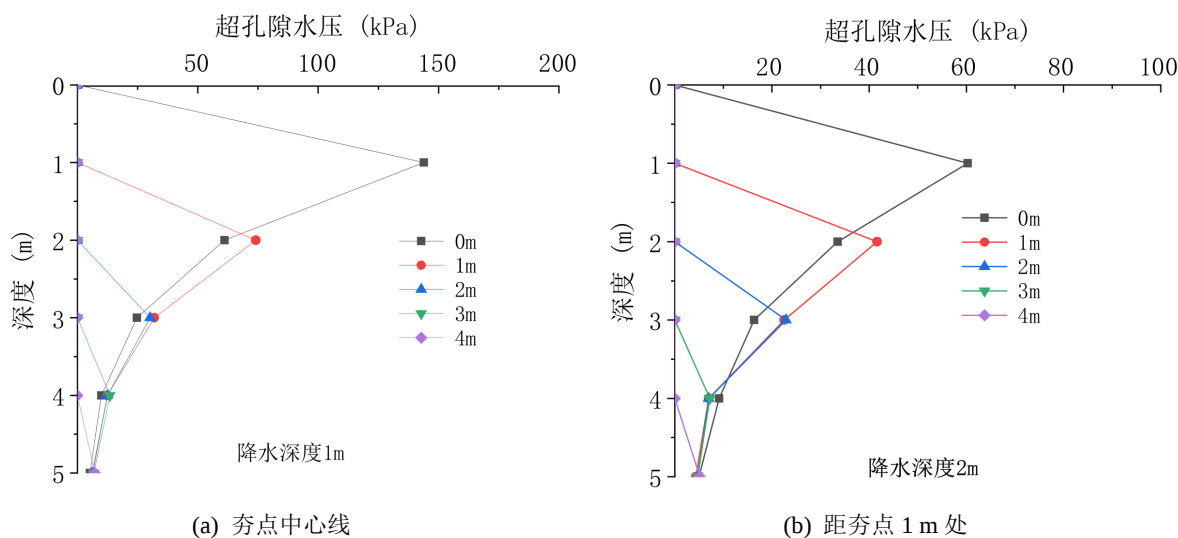


Figure 12. Relationship between soil superporous water pressure and precipitation depth under single tamping loads
图 12. 单夯荷载下土体超孔隙水压力与降水深度的关系

从图 12 中可以看出,随着降水水位的增加,强夯导致的超孔隙水压峰值逐渐减小,产生超孔压峰值的位置也逐渐下移。这表明降水作用下,强夯后孔隙水压力影响范围逐渐减小,且影响程度也减弱。相较于不进行地面降水时,降水 1 m、2 m、3 m、4 m 时,强夯产生的超孔压峰值减少程度分别为不降水时(夯点中心线)的 51.5%、22.1%、8.6%和 4.5%。

从图 12 中还可以看出,当降水至地表下 3 m 时,监测到超孔隙水压峰值已很小(不足无降水时的 10%),可忽略不计。这个深度可以作为高压差动力降水击密法夯前的降水标准。

5. 结论

本文建立了单点夯击 + 高压差动力降水处理吹填路基的数值分析模型, 设置了不同地下水面和夯击能, 分析了夯后夯沉量和孔压效应, 得出如下结论:

- 1) 在夯击能相同时, 采用较重夯锤、较小落距(即重锤轻击)比用较轻夯锤、较大落距得到的夯击位移量要大, 超孔隙水压数值要低。
- 2) 在单点夯击作用下, 土体产生直接较大塑性体积变形的范围有限, 将土体上部范围内(比如地表 2 m)水位降低, 可有效减少土体因强夯导致的超静孔隙水压的反向作用, 即减缓土体塑性体积变化量。但过大的降水深度, 由于单夯作用范围有限, 总体上也不能增加夯沉位移。

基金项目

浙江建设科技项目(2022K069)。

参考文献

- [1] 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): 124-127.
- [2] 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): 248-251.
- [3] Chang, T.T., Lou, X.M., Xu, S.L., et al. (2010) Innovative Soft Soil Stabilization Using Simultaneous High-Vacuum Dewatering and Dynamic Compaction. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, **2186**, 138-146. <https://doi.org/10.3141/2186-15>
- [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]//第十四届全国地基处理学术讨论会论文集. 南昌: 中国土木工程学会, 2016: 142-150.
- [5] 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(中旬刊), 2020(11): 77-78.
- [6] 沙玲, 刘鸿, 王国才. 真空-堆载联合预压法处理吹填土地基的大变形有限元分析[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(2): 140-146.
- [7] 梁发云, 秦承瑞, 汪中卫, 等. 沿海吹填土地基真空预压加固效果现场监测分析[J]. 结构工程师, 2017, 33(6): 155-161.
- [8] Lysmer, J. and Waas, G. (1972) Shear Waves in Plane Infinite Structures. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **98**, 85-105. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001583>
- [9] 蔡袁强, 陈超, 徐长节. 强夯加固回填土地基的三维数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1108-1112.