

潮汐区淤泥质地层CFG单桩施工力学特征研究

时贞祥¹, 郭世波¹, 张 玮¹, 刘子超¹, 罗浩天², 武 科²

¹中国电建市政建设集团有限公司, 天津

²山东大学土建与水利学院, 山东 济南

收稿日期: 2021年9月14日; 录用日期: 2021年9月28日; 发布日期: 2021年10月13日

摘 要

潮汐区淤泥质地层具有含水率大、抗剪强度低、孔隙比大、压缩性高等工程特征, 采用CFG桩作为基础型式进行路基建设, 在潮汐动水压力作用下CFG桩体完整性和承载能力会受到影响甚至改变。为探究潮汐区淤泥质地层CFG桩施工力学机理与动水压影响效应, 依托福鼎市滨海大道二期道路工程, 基于大型有限元程序ABAQUS, 建立潮汐区淤泥质地层CFG单桩三维施工力学计算模型, 通过考虑振动沉管法CFG桩施工的拔管速度和潮汐孔压作用, 研究CFG单桩施工过程中的竖向与水平变形特征, 探究潮汐作用对CFG桩整体质量的影响规律。主要研究成果: 1) 振动沉管法CFG桩施工的拔管速度对于CFG桩整体成桩质量有显著影响; 2) 淤泥质地层在潮汐动水压力作用下易侵入CFG桩体内, 造成断桩等病害。

关键词

CFG桩, 淤泥质地层, 施工力学, 数值计算, 渗流

Study on Mechanical Characteristics of CFG Single Pile Construction in Muddy Soil in Tidal Area

Zhenxiang Shi¹, Shibo Guo¹, Wei Zhang¹, Zichao Liu¹, Haotian Luo², Ke Wu²

¹China Power Construction Municipal Construction Group Co., Ltd., Tianjin

²School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan Shandong

Received: Sep. 14th, 2021; accepted: Sep. 28th, 2021; published: Oct. 13th, 2021

文章引用: 时贞祥, 郭世波, 张玮, 刘子超, 罗浩天, 武科. 潮汐区淤泥质地层 CFG 单桩施工力学特征研究[J]. 土木工程, 2021, 10(10): 977-984. DOI: 10.12677/hjce.2021.1010108

Abstract

The muddy stratum in tidal area has the engineering characteristics of high water content, low shear strength, large void ratio and high compressibility. The integrity and bearing capacity of CFG pile will be affected or even changed when CFG pile is used as the foundation for Subgrade Construction under tidal hydrodynamic pressure. In order to explore the mechanical mechanism and dynamic water pressure effect of CFG pile construction in tidal area, based on the second phase road project of Binhai Avenue in Fuding City and large finite element program ABAQUS, a three-dimensional construction mechanical calculation model of CFG single pile in tidal area is established. By considering the pipe pulling speed and tidal pore pressure effect of CFG pile construction with vibration sinking method, the construction process of CFG single pile is studied. Based on the characteristics of vertical and horizontal deformation, the influence of tide on the overall quality of CFG pile is explored. The main research results are as follows: 1) The speed of pulling out the pipe has a significant impact on the overall quality of CFG pile; 2) The muddy stratum is easy to invade into the CFG pile body under the tidal hydrodynamic pressure, resulting in pile breaking and other diseases.

Keywords

CFG Pile, Muddy Stratum, Construction Mechanics, Numerical Calculation, Seepage

Copyright © 2021 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

相对一般的软土而言,潮汐区淤泥质地层具有含水率大、抗剪强度低、孔隙比大、压缩性高等工程特征[1] [2]。为提升基础稳定性,土木工程建设中软土地基处理大量采用桩体较强的 CFG 桩进行加固。然而,采用 CFG 桩处理受潮汐动水压力作用的内海滩涂软土时,会对周边软土有挤压、扰动破坏作用,同时潮汐作用导致内海滩涂软土内的孔隙水压力处于动态变化,这些都会大大降低了 CFG 桩的完整性和承载能力,增大了 CFG 桩施工难度,无形中扩大了建设成本,延误了施工进度;若进行路基填筑时,CFG 桩又可能会出现剪切、倾斜和弯曲的破坏现象,并且呈现多米诺骨牌的效应,使路基快速产生外挤、下沉和开裂变形的破坏,导致基础无法满足使用要求[3]。围绕海相软土地层 CFG 桩施工力学机理,许多学者已开展了大量的研究工作。如,张志平等[4]采用 Midas/GTS 建立了 CFG 桩地基有限元模型,分析了 CFG 桩的沉降控制效果和参数的影响。贾亮等[5]对公路加固段进行工后沉降现场监测,将 CFG 桩桩顶和抛石顶面沉降进行对比,研究了 CFG 桩不同埋深的沉降变化情况。薛飞招[6]对动荷载作用下桩端炭质泥岩的工程特性和动力性质展开相关研究,分析了桂林西站路基沉降原因,提出了处理措施。孙宏宾等[7]通过单孔和群孔效应数值模拟,并加以工程实测分析,初步得到了群孔效应引发周边土体变形机理。然而,在潮汐区淤泥质地层 CFG 桩施工力学机理与动水压影响效应方面缺少系统的研究与阐述。为此,本文依托福鼎市滨海大道二期道路工程,基于大型有限元程序 ABAQUS,建立潮汐区淤泥质地层 CFG 单桩三维施工力学计算模型,通过考虑振动沉管法 CFG 桩施工的拔管速度和潮汐孔压作用,研究 CFG 单桩施工过程中的竖向与水平变形特征,探究潮汐作用对 CFG 桩整体质量的影响规律。

2. 工程概况

福鼎市滨海大道二期道路工程设计起于站前大道与滨海大道一期平交路口, 途径外墩、后兰、戏台、王孙、江美、长楼、岐头, 终点设置在点头镇海堤, 线路全长 4.865 km。本工程按城市主干路标准建设, 其中普通路段路宽 40 m, 海堤路段路宽 48 m, 福鼎市滨海大道二期路段全程设计时速为 50 km/h, 双向四车道。主线 K0+710~K1+820 CFG 桩软基处理总桩长 320,470 米, 总桩数 25,385 个, 桩径为 50 cm, 按四边形布置。

工程建设地段属典型海相冲淤积地貌, 广泛分布有软土层(淤泥), 地形变化小, 地势较平缓。土层压缩性高, 承载力低, 稳定性差。海域潮流属正规半日潮(每日两次涨退潮), 落潮速大于涨潮速。历年最高潮水位为 4.25 m, 历年最低潮水位为-3.42 m, 历年平均高潮位 3.86 m, 历年平均低潮位为-1.61 m, 历年平均潮差为 4.17 m, 平均海平面 0.53 m。根据现有区域地勘资料显示, CFG 桩处理区域地层由上到下分别为淤泥层、粉质粘土层、泥质角砾碎石层。其中, 重点研究区域淤泥层抗剪强度(固结快剪)内聚力为 7.3 kPa、内摩擦角为 14.2°; 淤泥层平均含水量达到 63.09%, 淤泥层土体天然孔隙比 1.76, 液限 51%。相对一般的软土而言, 海域滩涂软黏土的含水率更大, 抗剪强度很低, 土体孔隙比大, 压缩性高, 受施工扰动后会发很大的沉降变形。

振动沉管法 CFG 桩施工是通过振捣将桩管插入淤泥层, 到达指定位置后进行混凝土灌浆, 当混凝土灌注到预估量后, 在上拔桩管的同时注入混凝土。因此, 基于大型数值计算程序 ABAQUS, 建立 CFG 单桩施工力学计算模型, 同时赋予渗流场环境变量, 通过建立桩管-CFG 桩-淤泥土层之间的相互作用来模拟 CFG 桩施工过程中受渗流作用下的影响, 其中土体宽度 $D = 25$ m, 深度 $H = 25$ m, 桩径 $d = 0.5$ m, 埋深 $h = 10$ m, 桩体划分为 80 个单元, 土体划分为 10,000 个单元, 均采用四节点平面应变四边形单元, 双线性位移, 双线性孔压, 如图 1 所示。

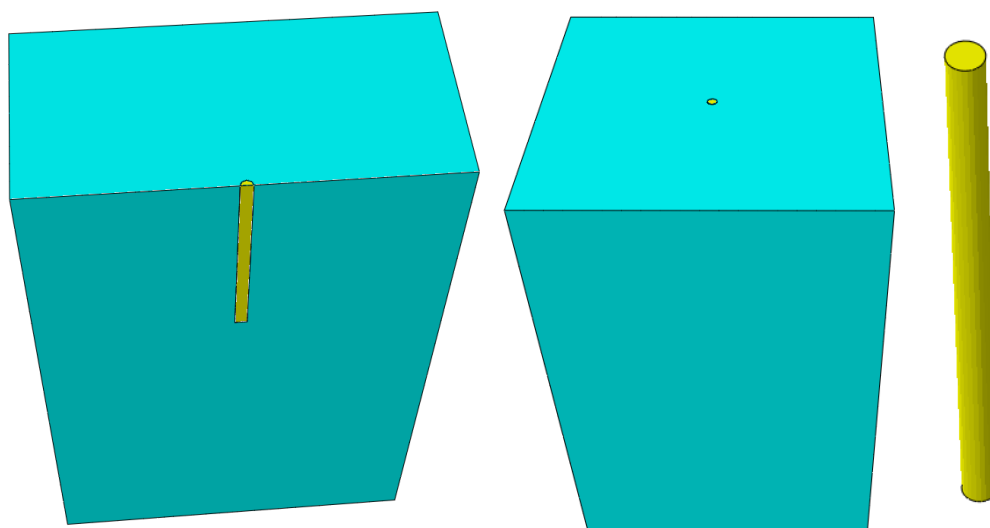


Figure 1. Schematic diagram of the three-dimensional model CFG pile-silt layer orientation
图 1. 三维模型 CFG 桩 - 淤泥层方位示意图

3. 参数设置

为建立有效的数值模拟, 需要对模型赋予基本物理力学参数, 本文采用现场测得的淤泥土层参数与常规 CFG 桩。桩体采用随温度变化的弹性本构模型以模拟桩管灌注 CFG 桩的属性变化, 淤泥层土采用

摩尔 - 库伦弹塑性本构模型，力学参数如表 1 所示。

Table 1. Numerical simulation mechanical parameters table

表 1. 数值模拟力学参数表

力学参数名称	数值
淤泥层密度 ρ	1750 kg/m ³
桩管密度 ρ	1750 kg/m ³
CFG 桩密度 ρ	2500 kg/m ³
桩管杨氏模量 E/泊松比 ν	2.1×10^{11} Pa/0.125
CFG 桩杨氏模量 E/泊松比 ν	1×10^9 Pa/0.2
淤泥层杨氏模量 E/泊松比 ν	3×10^6 Pa/0.15
淤泥层抗剪强度内聚力 c/摩擦角	7300 Pa/14.2°
桩管渗透系数 k/孔隙比 e	1×10^{-6} /0.3
CFG 桩渗透系数 k/孔隙比 e	1×10^{-5} /0.8
淤泥层渗透系数 k/孔隙比 e	1×10^{-4} /1.76

4. 分析方法

CFG 桩施工过程中，提拔桩管的施工速度直接影响 CFG 桩成桩率与承载性能，通过调整开挖土层与桩管更替 CFG 桩的比例来模拟施工中的沉管拔管速度，土层与更替 CFG 桩的比例越多，代表施工时速度越快，土体回弹、渗流变化等现象改变次数越少。如图 2 所示，模拟采用两段式、四段式和八段式施工，将桩体分为 2、4、8 段分段加载，通过开挖土体后将桩管分段打入淤泥层中，当桩管打入至规定位置后，通过将指定部位的截面属性根据场变量变化，将桩管从下往上分段替换为 CFG 桩模拟桩管上拔浇灌混凝土的施工步骤，即实现施工速度模拟，如图 2 所示。与此同时，根据工程实例中历史水位变化情况，选择具有代表性的水位，对模型两侧边界定义孔隙水压力值模拟淤泥层周围水位线情况，通过数值计算影响 CFG 桩施工过程，并了解施工过程中渗流变化情况，为 CFG 桩成桩分析做出理论指导。

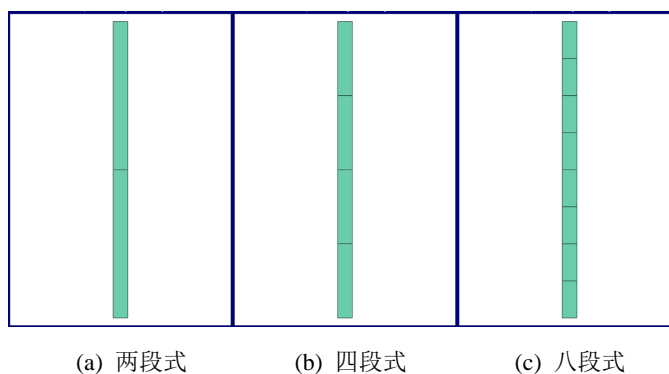


Figure 2. Schematic diagram of pipe pile-CFG pile segment construction

图 2. 管桩-CFG 桩分段施工示意图

5. 计算结果分析

5.1. CFG 单桩施工过程分析

图 3 给出了 CFG 单桩沉管振动下沉过程中淤泥层 - 桩管位移分布图, 其中 U 代表位移, 单位为 m。由图可知: 振动沉管法 CFG 单桩施工过程中, 四段式与八段式施工方法中土体最大位移相较于两段式施工方法最大位移增加 84.67%与 98.35%, 沉管振动下沉速度越快, 短时间内对周边淤泥层土体最大位移影响越小, 但容易产生局部应力集中与区域位移变化较大等情况, 对后续应力释放与 CFG 桩施工有影响, 四段式与八段式施工方法最大位移差距较小, 八段式施工方法的最大位移只多出 7.4%, 随着沉管速度的变慢, 最大位移的增加速率也逐渐下降。

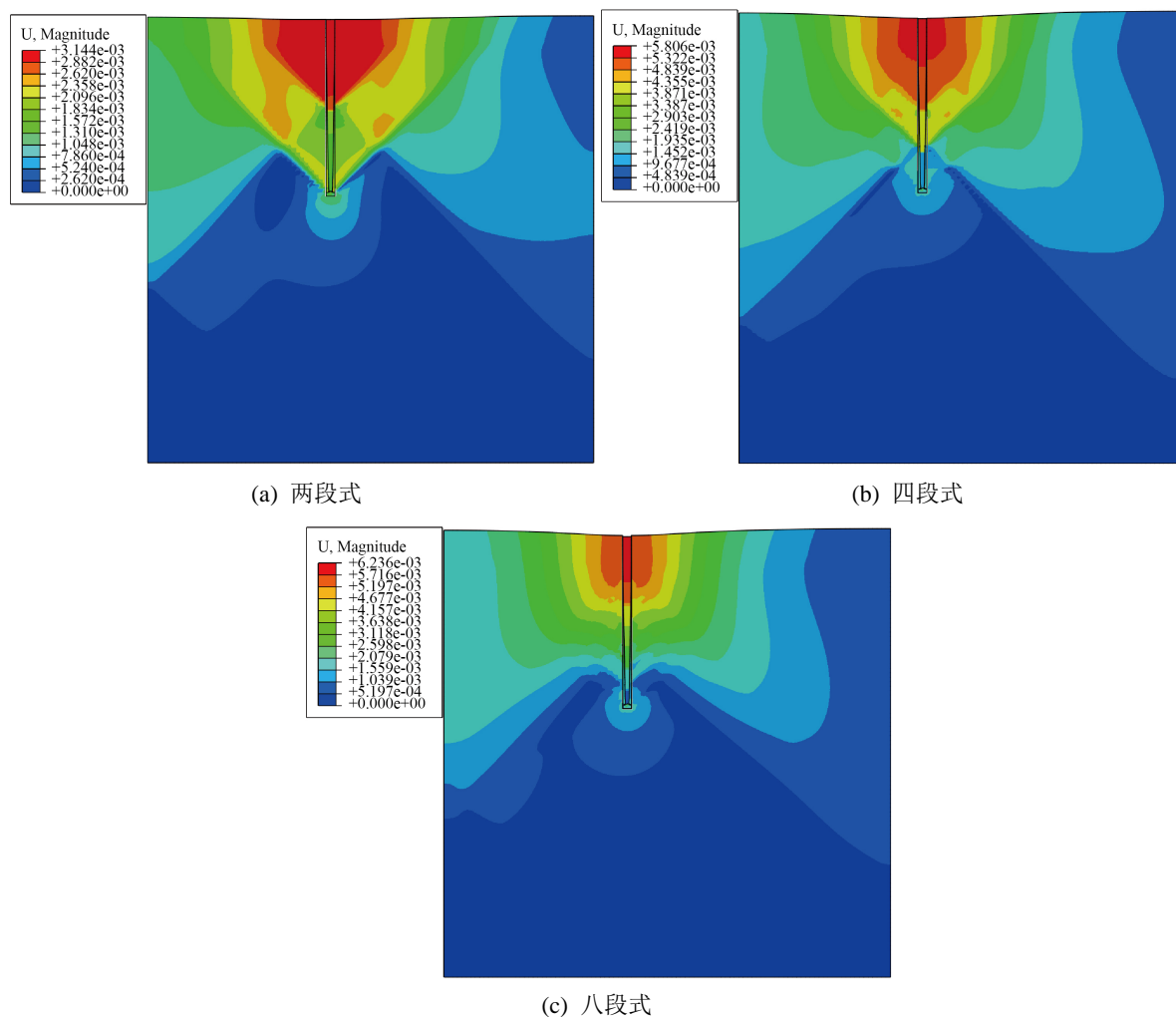


Figure 3. Pile pipe construction silt layer-pile pipe displacement distribution map

图 3. 桩管施工淤泥层 - 桩管位移分布图

图 4 给出了 CFG 单桩沉管上拔过程中淤泥层 - 桩管位移分布图。在上拔过程中通过场变量改变指定部分的截面属性, 由图可知: 在灌注混凝土施工 CFG 桩时, 四段式与八段式上拔过程中土体最大位移较两段式提高 53.33%与 80.92%, 沉管上拔速度越慢对周边淤泥层土体最大位移影响越小, 影响范围大; 因此, 在 CFG 桩间施工时需要平衡施工速度与桩间距的认识。

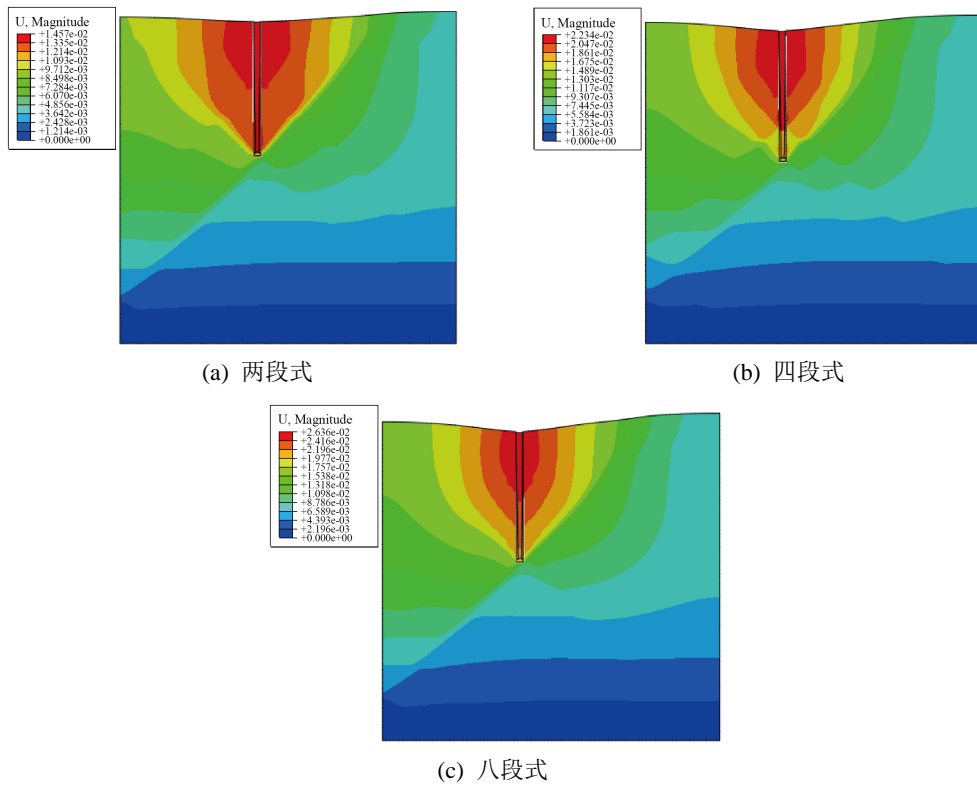


Figure 4. CFG construction silt layer-CFG pile displacement distribution diagram

图 4. CFG 施工淤泥层-CFG 桩位移分布图

5.2. CFG 单桩周边土体侧向变形分析

图 5 给出了 CFG 单桩施工完成后周边土体的侧向位移情况，其中远水侧为距离高水位线环境较远的一侧，近水侧为距离高水位线环境较近的一侧，位移的方向为指向高水位线环境的方向。由图可知：淤泥层土体两侧在施工后底部有向桩边挤压的趋势，而上部均有远离高水位线环境的趋势；同时，施工时的沉拔管速度也对位移有一定影响，施工速度越快桩边土水平位移越小。

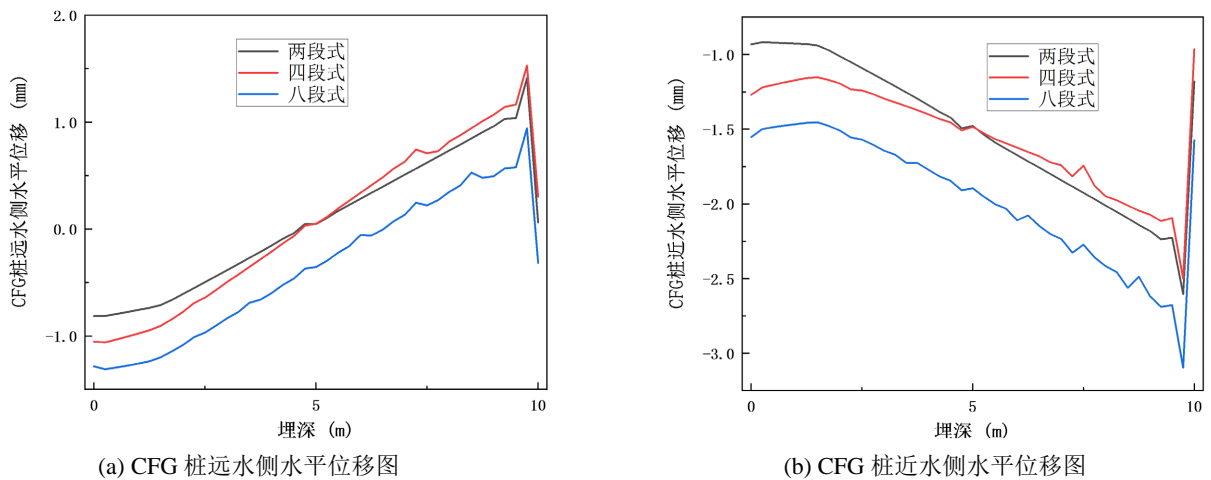


Figure 5. Lateral displacement of soil around CFG single pile

图 5. CFG 单桩周边土体侧向位移图

5.3. 淤泥层 CFG 桩施工渗流情况

图 6 给出了 CFG 单桩施工过程中淤泥土层渗流情况的变化图，其中 POR 为孔压，孔压为 0 为浸润面。由图可知：在施工过程中，管桩的渗透系数较低从而大大阻挡了淤泥土层中渗流现象，但是 CFG 桩材料的渗透系数较高，淤泥土层的渗流现象恢复部分，从阻挡到恢复，代表 CFG 桩不仅承受施工情况下的渗流压力，还有部分恢复时的渗流压力，导致 CFG 桩在成桩过程中较为困难。

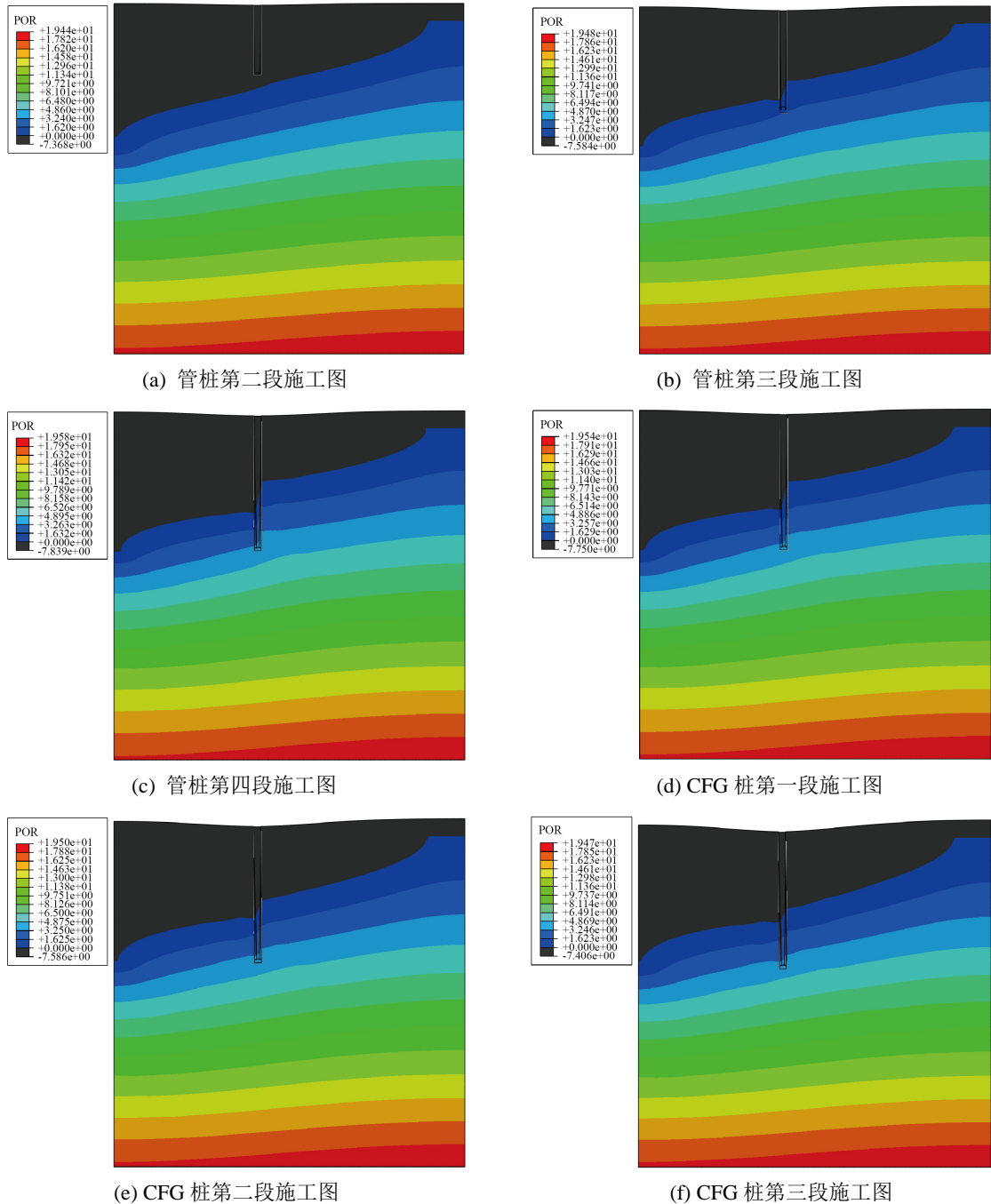


Figure 6. Seepage diagram of CFG pile construction process

图 6. CFG 桩施工过程渗流图

6. 主要结论

为探究潮汐区淤泥质地层 CFG 桩施工力学机理与动水压影响效应,依托福鼎市滨海大道二期道路工程,基于大型有限元程序 ABAQUS,建立潮汐区淤泥质地层 CFG 单桩三维施工力学计算模型,通过考虑振动沉管法 CFG 桩施工的拔管速度和潮汐孔压作用,研究了 CFG 单桩施工过程中的竖向与水平变形特征,探究了潮汐作用对 CFG 桩整体质量的影响规律。主要研究成果:

- 1) CFG 桩施工采用振动沉管法时,其桩管灌注混凝土时上拔速度对于 CFG 桩的整体成桩质量上有显著影响,随着上拔速度的降低,影响逐渐降低;
- 2) 淤泥质地层在潮汐动水压力作用下易侵入 CFG 桩体内,造成断桩等病害。

参考文献

- [1] 言丽平. 潮差区土质海岸无堤堰路基填筑新工艺[J]. 北方交通, 2010(9): 28-30.
- [2] 陈昌杰, 陈吉森. 潮汐环境堆填速率对桩土作用性状影响研究[J]. 河南科技, 2015, 572(9): 88-92.
- [3] 刘志勇. 软土路基中 CFG 桩复合地基的应用研究[J]. 道路工程, 2019(11): 84-87.
- [4] 张志平, 高景军, 刘强, 张子贤, 娄平. 湛江大道大范围软土地基 CFG 桩施工模拟及参数影响研究[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(1): 1-6.
- [5] 贾亮, 朱彦鹏, 贺世开, 陈琰娇. CFG 桩和抛石挤淤加固软土地基的试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 216(9): 1-5.
- [6] 薛飞招. 动荷载作用下 CFG 桩桩端炭质泥岩的变形破坏特征试验研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [7] 孙宏宾, 郑刚, 程雪松, 王凡俊. 软土地区 CFG 桩群孔效应引发周边土体变形机理研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(1): 39-54.