



管桩贯入分层土体的阻力影响特性及预测

俞峥巍, 孙正

(上海交通大学建设总承包有限公司, 上海 200136)

摘要: 插板机是排水板打设的主要设备。本文利用 CEL 数值方法研究插板机管桩贯入分层土体时, 贯入阻力随深度的变化曲线, 通过皮尔逊模型讨论管桩贯入阻力的影响参数, 并对贯入阻力的大小进行预测分析。研究表明: 管桩贯入吹填土层时, 贯入阻力随深度增加近似呈线性递增, 且不同参数对斜率的影响存在差异; 管桩贯入阻力曲线存在明显的转折点, 阻力极值在土层分界附近, 且参数变化对极值大小的影响不同; 当管桩从吹填土层贯入淤泥土层时, 贯入阻力急剧减小, 后续基本保持不变。吹填土摩擦角与贯入阻力极值的相关性最大, 相关系数为 0.88。最后, 利用分析模型对不同参数条件时的贯入阻力进行预测, 模型精度达 0.91。

关键词: 管桩; CEL 方法; 贯入阻力; 参数分析; 极值预测

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0188-07

Influence characteristics and prediction of resistance of pipe-pile penetrating layered soil

YU Zhengwei, SUN Zheng

(Shanghai Communications Construction Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: Board insert machine is the main equipment of drainage board. In this paper, CEL numerical method is used to study the penetration resistance curve with depth when the pipe-pile of board insert machine penetrating layered soil. The influence parameters of pipe-pile penetration resistance are discussed by using Pearson model, and the magnitude of the penetration resistance is predicted and analyzed. The results show that the penetration resistance increases linearly with the increase of depth when the pipe-pile penetrating dredged soil layer, and the influence of different parameters on the slope is different. There is an obvious turning point in the penetration resistance curve of pipe-pile, and the position of the extreme resistance value is near the soil layer boundary, and the influence of parameter change on the extreme value is different. When the pipe-pile penetrates into the silt soil layer from the dredged soil layer, the penetration resistance decreases sharply and then basically remains unchanged. The correlation between the friction angle and the extreme value of penetration resistance is the greatest, and the correlation coefficient is 0.88. Finally, the analysis model is used to predict the value of penetration resistance under different parameter conditions, and the accuracy of the model is 0.91.

Keywords: pipe-pile; CEL method; penetration resistance; parameter analysis; extreme value prediction

插板机是排水板打设的主要设备, 通过振动锤带动管桩及排水板插入至设计深度。管桩的贯入阻力是影响工艺流程和施工效率的主要指标, 许

多学者对贯入阻力开展过研究。王永洪等^[1]通过模型试验研究铝桩静压贯入黏土层的力学机制, 分析桩端形式对贯入力学机制的影响特征; 张海彭^[2]、

收稿日期: 2024-01-29

作者简介: 俞峥巍 (1974—), 男, 高级工程师, 从事海洋疏浚工程及港航工程研究工作。

通讯作者: 孙正 (1992—), 男, 工程师, 从事港航和水利工程研究工作。E-mail: 598456654@qq.com

寇海磊等^[3]、邹长春等^[4]、于洪川等^[5]利用模型试验研究管桩的贯入机理, 分析贯入阻力的影响因素; 王青^[6]通过室内模型试验和 CEL(耦合欧拉-拉格朗日)有限元方法研究多种因素下钢圆筒贯入阻力变化; 叶明鸽等^[7]采用有限元法模拟混凝土管桩贯入黏土层过程中贯入阻力的变化规律, 总结得到桩模贯入阻力与上层土体厚度、桩径和桩土摩擦系数之间的关系式; 吴曲楠等^[8]、郝友超^[9]采用 ALE(任意欧拉拉格朗日)方法和 CEL 方法研究刚性桩基贯入土体时的贯入阻力, 并对贯入阻力的影响因素开展参数分析。

工程中通常研究的桩径为 0.3~1.2 m, 对小直径管桩贯入土体的研究较少。本文拟采用 CEL 方法开展小直径管桩贯入土体时的阻力影响特性研究, 定量分析吹填土的厚度、弹性模量、摩擦角及管桩贯入速度对贯入阻力的影响, 并利用分析模型对贯入阻力极值进行预测。

1 CEL 数值模拟方法

CEL 方法将产生大变形的土体用欧拉网格划分, 土体材料可在欧拉网格之间自由流动。算子分裂是应用 CEL 方法求解过程的关键步骤, CEL 方法中的算子分裂仅针对欧拉域的求解过程。欧拉形式的守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \otimes u) = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (eu) = \sigma / D \quad (3)$$

式中: t 为时间, u 为物质点速度, ∇ 为梯度算子, ρ 为密度, σ 为柯西应力张量, b 为体力, e 为单位体积内的内能。

基于此可得到以上质量、动量与能量守恒方程具有如下相同的形式:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = Q \quad (4)$$

式中: Φ 为通量函数, Q 为源项, ψ 为任意一个

求解变量。

应用算子分裂方法可将式(4)分解为以下两式:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = Q \quad (5)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = 0 \quad (6)$$

式(5)、(6)分别为拉格朗日步与欧拉步。算子分裂方法原理见图 1, 在拉格朗日步中, 节点被临时固定在材料上, 且单元随材料变形而变形; 在欧拉步中, 材料变形时, 已发生变形的网格被移回初始的网格位置, 并在新旧网格之间进行变量映射, 实际是完成相邻单元之间的材料运输的一个过程。因此, CEL 法常用来研究土体大变形的

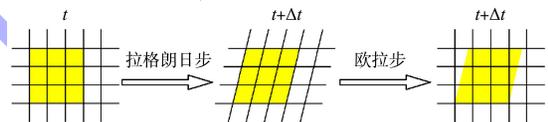


图 1 算子分裂方法原理

2 数值模拟方法验证

2.1 模型试验

选用文献[1]等开展的模型试验, 对本文的数值模拟方法进行验证, 图 2 为模型试验装置。模型箱内部净尺寸为 2.8 m×2.8 m×2.0 m(长×宽×高), 其中, 铝制模型桩桩长 1.0 m、外径 0.14 m、内径 0.08 m, 桩端封底。试验用土为粉质黏土, 土层介于流塑-软塑状态, 采用分层填筑压实法制备地基土。



a) 模型箱

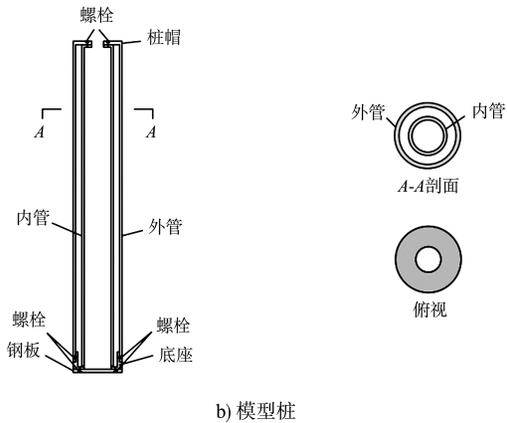


图2 模型试验装置

2.2 建立有限元模型

基于上述模型试验建立管桩贯入的 CEL 三维有限元模型(图3), 土体直径 3.0 m, 高 1.2 m, 土表以上 0.1 m 范围内设为空穴, 容纳贯入过程中隆起和回淤的土体。已有研究^[10]表明, 需将 CEL 模型中土体产生大变形的区域设为欧拉区, 因此, 将土体全设为欧拉区域, 采用欧拉六面体单元进行划分。基于已有方法^[11], 将桩体中心 1.0 m 范围内土单元的水平网格尺寸用细网格划分, 设为 0.05 m; 1.0 m 范围以外的水平网格尺寸设为 0.10 m。竖直方向网格尺寸取 0.1 m。

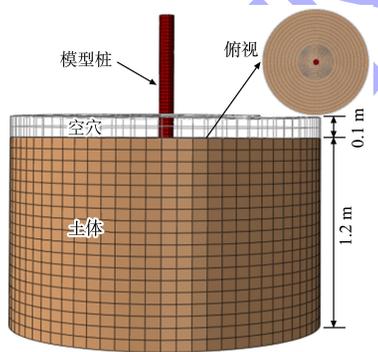


图3 三维有限元模型

计算模型中, 土体的应力-应变关系采用满足摩尔库仑定律的理想弹塑性模型, 土体密度 1.8 g/cm³、弹性模量 5 MPa、内摩擦角 8.6°、黏聚力 14.4 kPa、泊松比 0.4。桩径为 0.14 m、长 1.0 m, 位于模型中心, 从土表以 0.005 m/s 的速度贯入土体。采用广义胡克定律描述桩的应力-应变关系, 为提高模

型计算速度, 按式(7)确定等效实体桩的弹性模量 E_2 , 结果为 62.54 GPa, 泊松比取 0.3。

$$E_2 = E_1 \frac{I_1}{I_2} \quad (7)$$

式中: E_1 为铝的弹性模量, 取 70 GPa; I_1 为铝管桩截面惯性矩; I_2 为等效实体桩的截面惯性矩。

将土体和管桩设为通用接触, 法向可分离, 切向光滑。将欧拉区域边界的水平速度设为零, 且为欧拉吸收边界, 以消除有限边界对计算结果的影响, 将底部边界的竖向速度设为零。

2.3 验证结果

图4为数模计算得到的管桩贯入阻力曲线与试验测量数据的比较结果。

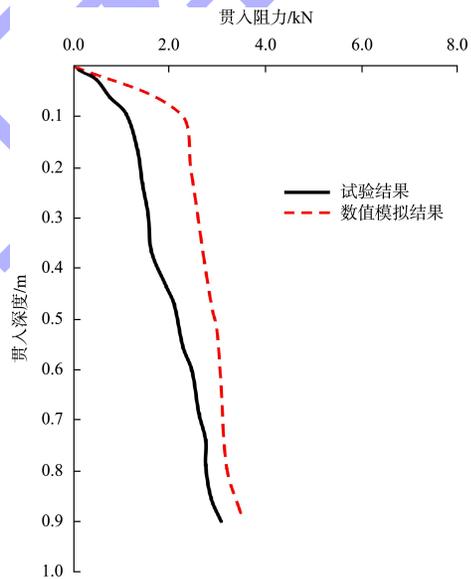


图4 模型试验与数值模拟比较结果

由图4可知, 数模结果与试验结果存在一定差异, 但阻力极值误差基本控制在 13% 以内, 且两者贯入阻力随贯入深度的变化关系曲线趋势基本一致, 表明 CEL 方法分析管桩贯入问题是可行的。

3 模型建立

吹填现场地基土层的分布特征基本为下层软弱淤泥层上覆吹填疏浚土, 上覆吹填土的厚度一般在 10 m 内, 当前吹填工程中常用的疏浚土主要包括疏浚淤泥、粉土及粉细砂等。不同的土层组

成对插板机插打施工的贯入阻力影响较大。为探究土层组成、土质特征及贯入速度的变化对管桩贯入阻力的影响特性, 结合工程实际土层分布及施工工艺, 表 1 为管桩贯入分层土体拟分析的计算工况。其中, 土层总深度为 12 m, 软弱淤泥层土体密度 1.8 g/cm^3 、弹性模量 1 MPa , 吹填土密度近似取 1.8 g/cm^3 。

表 1 计算工况

工况	吹填土/淤泥层厚度/m	弹性模量/MPa	摩擦角/(°)	贯入速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	3/9	5	10	0.5
2	5/7	5	10	0.5
3	8/4	5	10	0.5
4	5/7	7	10	0.5
5	5/7	10	10	0.5
6	5/7	5	20	0.5
7	5/7	5	30	0.5
8	5/7	5	10	0.3
9	5/7	5	10	1.0

根据表 1 的计算工况及现场常用的管桩尺寸, 建立 CEL 有限元模型, 与图 3 类似, 其中, 土体直径 3.0 m 、高 12.0 m , 土表以上 0.2 m 范围为空穴。桩径为 0.133 m , 长度 12 m , 底部为 0.5 m 插头, 见图 5。管桩位于模型中心位置, 从土表以一定速度贯入土体, 土单元的细网格划分与上述保持一致。



图 5 管桩插头结构模型

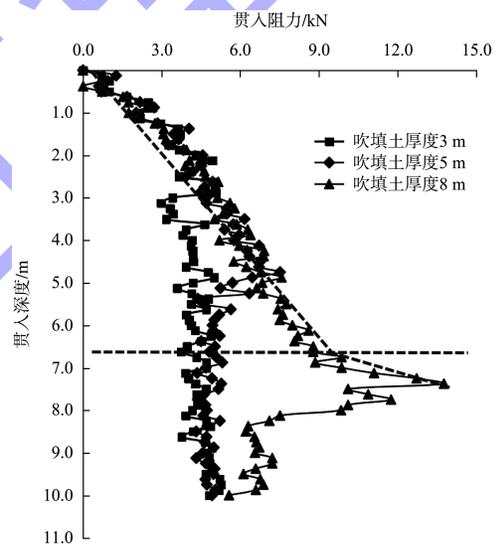
计算模型中, 土体的本构模型与上述相同, 吹填土密度取 1.8 g/cm^3 , 泊松比 0.3 ; 淤泥质土密度 1.8 g/cm^3 , 泊松比取 0.45 , 模拟管桩贯入过程的不排水状态。将管桩设为刚体, 采用广义胡克定律描述其应力-应变关系, 泊松比取 0.25 。管桩与吹填土接触的摩擦系数设为 $\tan\delta$ (δ 为砂土摩擦角), 管桩与淤泥质土设为光滑接触。

4 计算结果及参数分析

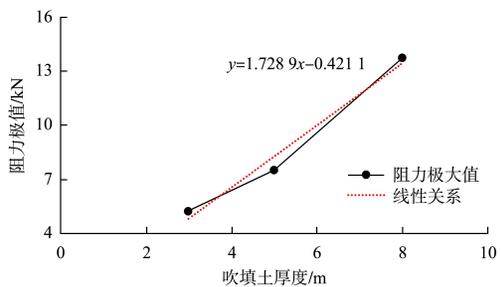
4.1 贯入阻力影响参数分析

4.1.1 吹填土厚度的影响

图 6 为吹填土厚度对贯入阻力的影响分析结果。由图 6a) 可知, 管桩在吹填土中贯入时, 贯入阻力随深度基本呈线性增加, $1.0\sim 7.0 \text{ m}$ 深度范围内斜率几乎保持不变, 超过 7.0 m 深度时, 斜率急剧增大; 当管桩穿过吹填土层进入淤泥层时, 由于淤泥土强度较低、易穿透, 故此时的贯入阻力突然降低, 且随着贯入深度增加基本保持不变。由图 6b) 可知, 随着吹填土厚度的增加, 贯入阻力的极值近似呈线性增加, 线性斜率约为 1.7 kN/m , 基本与吹填土厚度呈等比增加。



a) 不同厚度的贯入阻力曲线



b) 厚度对阻力极值的影响

图 6 吹填土厚度对贯入阻力的影响

4.1.2 吹填土模量的影响

图 7 为吹填土弹性模量对贯入阻力的影响分析结果。由图 7a) 可知, 贯入阻力随贯入深度的变化关系与图 6 相似, 管桩在吹填土中贯入时, 阻

力随贯入深度近似呈线性增加，且随着土层弹性模量的增加，阻力曲线的斜率和阻力极值不断变大；当管桩进入淤泥层时，贯入阻力突然降低，后续保持不变。由图 7b)可知，随着吹填土弹性模量的增加，贯入阻力极值也近似呈线性增加，线性斜率约为 0.2 kN/MPa，为弹性模量增加速率的 1/10。

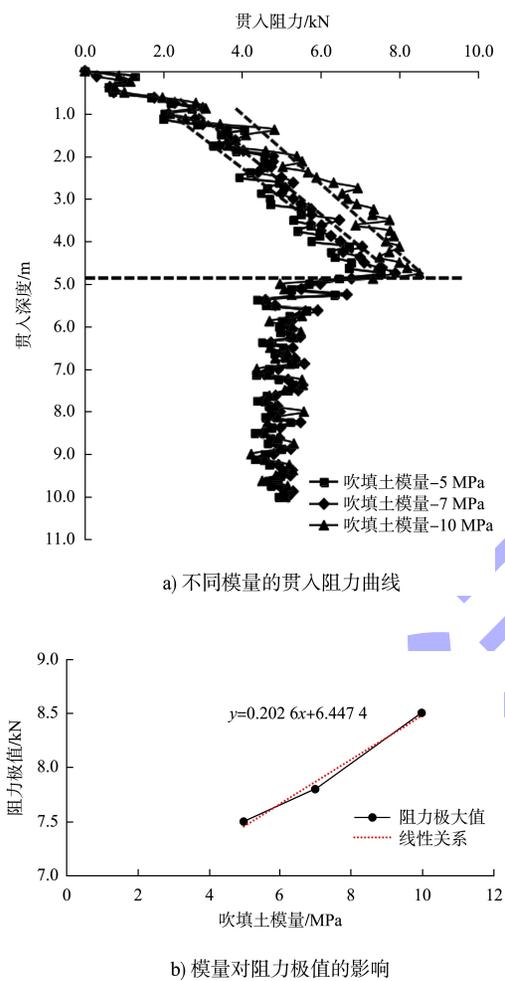


图 7 吹填土模量对贯入阻力曲线的影响

4.1.3 吹填土摩擦角的影响

图 8 为吹填土摩擦角对贯入阻力的影响分析结果。由图 8a)可知，贯入阻力随贯入深度的变化关系与上述结果略有不同，在 1.0 m 深度范围内，贯入阻力曲线的斜率较大，随着土层摩擦角的变大而增大；1.0 m 以下吹填土深度内，阻力曲线的斜率基本保持不变；管桩进入淤泥层时，贯入阻力突然降低，随后基本不再变化。由图 8b)可知，

随着吹填土摩擦角的增加，贯入阻力极值近似呈线性增加，线性斜率约为 0.74。

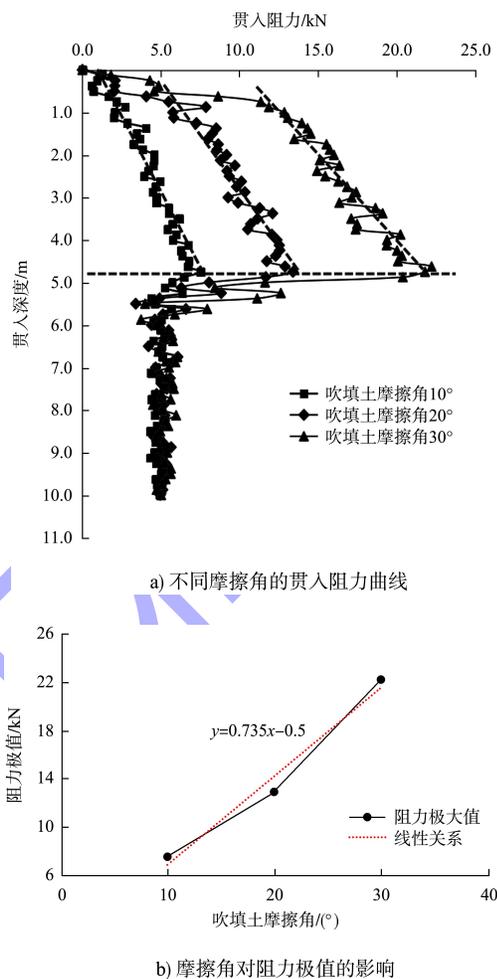
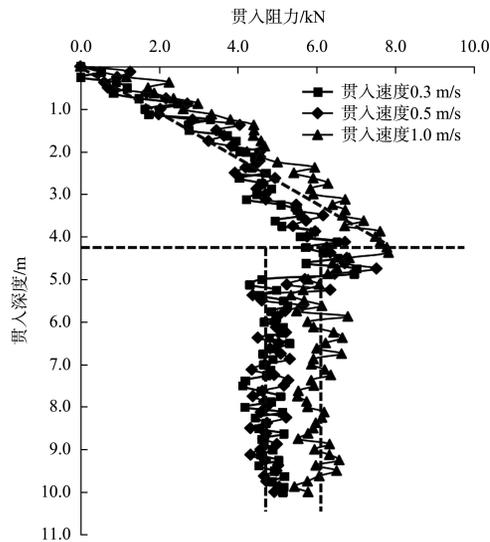


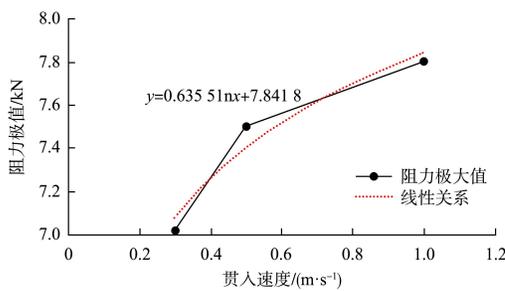
图 8 吹填土摩擦角对贯入阻力曲线的影响

4.1.4 管桩贯入速度的影响

图 9 为贯入速度对贯入阻力的影响分析结果。由图 9a)可知，随着贯入速度的增加，对吹填土深度范围内的贯入阻力曲线变化关系影响不大，淤泥层中的贯入阻力略有增加，这可能由于贯入速度较快时，进入淤泥层中的贯入阻力缓冲时间较短，吹填土中的阻力未完全消散。由图 9b)可知，随着管桩贯入速度的增加，贯入阻力极值近似呈对数增加，当贯入速度从 0.5 m/s 提升至 1.0 m/s，贯入阻力极值变化不明显，因此，插板施工过程中，可适当增加管桩的贯入速度，贯入阻力变化较小，进而有效提高插打施工效率。



a) 不同贯入速度的贯入阻力曲线



b) 贯入速度对阻力极值的影响

图 9 贯入速度对贯入阻力曲线的影响

4.2 参数相关性及阻力预测

4.2.1 皮尔逊相关性分析

通过皮尔逊模型讨论管桩贯入阻力影响参数的相关性分析, 图 10 为皮尔逊相关性分析结果, 图中的横纵坐标均为各影响参数自变量和阻力极值因变量, 分析结果的数值越大, 表示相关性越高。由图 10 可知, 吹填土的摩擦角与贯入阻力极值的相关性系数为 0.88, 相关性最大; 吹填土模量和管桩贯入速度与贯入阻力极值的相关性最小, 相关性系数不足 0.10。

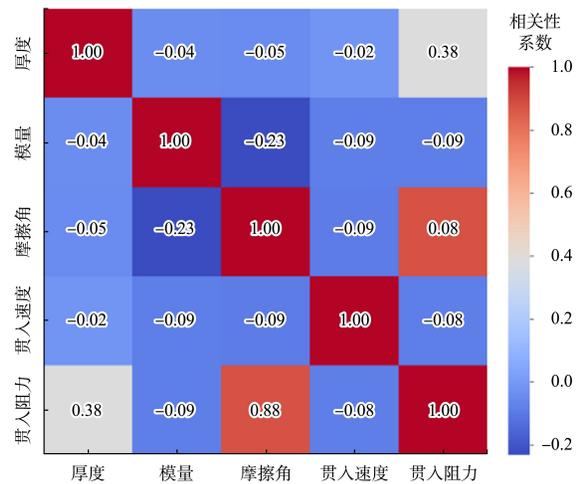


图 10 皮尔逊相关性分析

4.2.2 贯入阻力预测分析

XGBoost(分布式梯度增强库)能够将多个决策树弱学习器通过梯度提升方法集成在一起, 并通过正则化和二阶泰勒展开等数学原理进行优化, 通过不断迭代地添加树, 模型逐渐对数据有更精准的拟合。利用机器学习方法建立 XGBoost 模型, 对插板机管桩贯入分层土体的阻力影响特性进行分析, 基于 70% 的模拟数据建立贯入阻力与各影响参数的拟合关系, 并依托其余 30% 的各参数数据对贯入阻力的模拟结果进行预测比较。该方法得出不同参数对阻力影响的变化情况及预测结果, 图 11 为贯入阻力的预测结果。由图可知, 贯入阻力的预测结果与数值模拟的计算结果重合度较高, 模型的精度达到 0.91。

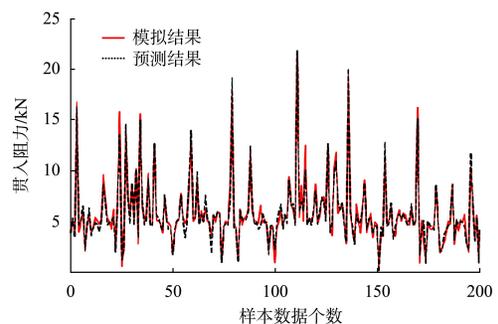


图 11 贯入阻力预测

5 结论

1) 吹填土层管桩施工插打时,随着贯入速度的增加,贯入阻力极值变化较小,可适当增加贯入速度以提高施工效率。

2) 采用皮尔逊模型分析管桩贯入阻力影响参数的相关性,相较于吹填土模量和管桩的贯入速度,吹填土摩擦角与贯入阻力极值的相关性最大,相关系数为 0.88。

3) 贯入阻力的预测结果与数值模拟的计算结果重合度较高,模型精度达到 0.91,该成果可为后续相关的管桩插打工程提供理论指导。

参考文献:

[1] 王永洪,张明义,刘俊伟,等.黏性土中静压沉桩贯入力学机制室内试验研究[J].工程科学与技术,2020,52(4):203-212.

[2] 张海彭.锤击管桩桩土相互作用研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.

[3] 寇海磊,李旺,杨丹良,等.基于不同贯入速率砂土地基中静压敞口混凝土管桩试验研究[J].建筑结构学报,

2020,41(7):140-145.

[4] 邹长春,何杰,刘孟鑫,等.楔形管桩沉桩挤土效应试验研究[J].湖南工业大学学报,2022,36(2):1-7.

[5] 于洪川,代楠,陈逸飞,等.开口与闭口管桩连续贯入机理的可视化模型试验研究[J].科学技术与工程,2023,23(15):6573-6580.

[6] 王青.砂土地基中插入式钢圆筒贯入特性及对邻近筒体影响研究[D].镇江:江苏科技大学,2023.

[7] 叶明鸽,董金梅.贯入双层土中的混凝土管桩桩模与土体作用研究[J].建筑结构学报,2018,39(S1):350-358.

[8] 吴曲楠,刘润,张海洋,等.筒型桩靴在饱和砂土中的贯入阻力研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1183-1190.

[9] 郝友超.砂土中静压桩沉桩阻力及挤土效应研究[D].郑州:河南工业大学,2019.

[10] THO K K, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Eulerian finite element simulation of spudcan-pile interaction[J]. Canadian geotechnical journal, 2013, 50(6): 595-608.

[11] 戴笑如,王建华,范怡飞.钻井船插桩 CEL 数值模拟中的若干问题分析[J].岩土力学,2018,39(6):2278-2286.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 127 页)

[4] 林芬芬,季岚,曹慧江,等.长江口北支河段碍航特性及治理思路[J].水运工程,2021(6):177-182,199.

[5] 周良平,周东泉,杜德军,等.长江北支进口段演变特征及治理[J].水运工程,2022(12):128-133,169.

[6] 黄家瑞,黄卫,闫军,等.长江口北支河道演变及航道开发利用初步分析[J].港工技术,2017,54(2):9-15.

[7] 长江委水文局长江口水文水资源勘测局.启东中远海运海洋工程有限公司防台防汛独立墩工程防洪评价报告[R].上海:长江口水文水资源勘测局,2023.

[8] 陈正兵,陈前海,侯卫国,等.新情势下长江口综合整治

的思考[J].人民长江,2022,53(S1):1-4,9.

[9] 胡高建.长江口北支河槽动力沉积变化过程研究[D].上海:华东师范大学,2021.

[10] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.海港锚地设计规范:JTS/T 177—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

[11] 连石水,王汝凯,许鸿贯.防台锚地的选址和设计[J].水运工程,2014(2):82-85.

[12] 唐树涛,黄惠明,王义刚,等.台风路径对长江口各汉道波高的影响[J].水运工程,2019(1):48-54,83.

(本文编辑 赵娟)