



深厚软土码头岸坡中不同桩土 耦合模型的对比研究*

吴乔¹, 范琰昀², 李家华¹

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210029)

摘要: 为厘清嵌入梁单元和实体单元建立的桩土耦合有限元模型的异同, 以北非某深厚软土地基上的高桩码头为例, 详细对比研究了两种模型的规模、计算效率、整体位移、桩体变形、负摩阻、内力等设计关键要素。研究表明: 嵌入梁单元桩的计算效率是实体单元桩的3.5倍; 在计算结果方面, 两者均能较好地模拟软土地基码头岸坡的整体变形、桩基受到的负摩阻、变形及竖向受力情况, 其中最大变形差异控制在5%以内; 然而由于嵌入梁单元通过在土体中设置弹性区简化模拟桩基水平受力特性, 难以考虑桩间土体“流动效应”, 导致其桩基弯矩极值达到实体单元桩的1.5倍。在码头岸坡桩土耦合分析中, 建议在方案初期通过嵌入梁单元进行快速评估和方案比选, 在方案实施阶段通过实体单元精细化分析, 以提升方案的经济性。

关键词: 深厚软土地基; 桩土耦合; 嵌入梁单元桩; 实体单元桩; 负摩阻

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0052-08

Comparative of different pile-soil coupling models of wharf bank slope in deep soft soil

WU Qiao¹, FAN Yanyun², LI Jiahua¹

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210029, China)

Abstract: To clarify the similarities and differences between the pile-soil coupling finite element models established by embedded beam element and solid element, this paper takes a high pile wharf on a deep soft soil foundation in North Africa as an example, and compares the model scale, computational efficiency, overall displacement, pile deformation, negative friction, internal force and other key design factors in detail. The results show that the calculation efficiency of embedded beam element pile is 3.5 times that of solid element pile. In terms of the calculation results, both of them can well simulate the overall deformation of the wharf bank slope of soft soil foundation, the negative friction, deformation and vertical force of pile foundation, with the maximum deformation difference is controlled within 5%. However, due to the fact that the embedded beam element simplifies the simulation of the horizontal stress characteristics of pile foundations by setting elastic zones in the soil, it is difficult to consider the “flow effect” of the soil between piles, resulting in the extreme bending moment of the pile foundation reaching 1.5 times that of the solid element pile. In the pile-soil coupling analysis of the wharf bank slope, it is suggested that the embedded beam could be used for rapid evaluation and scheme comparison in the initial design stage, and the solid unit should be used for detail analysis in the implementation stage to improve the economy of the design scheme.

Keywords: deep soft soil foundation; pile-soil coupling; embedded beam element pile; solid element pile; negative shaft friction

收稿日期: 2025-03-03

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 吴乔(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为港口工程结构设计。

在深厚软土地基中高桩码头是一种常用的结构形式, 其设计要点在于准确分析桩基结构与深厚软土的复杂相互作用^[1], 包括负摩阻、桩土流动、桩基变形等问题^[2], 这常常需要通过建立桩土有限元模型进行分析。在基于有限元 Plaxis 3D 的码头工程的分析与设计, 模拟桩土相互作用方法有实体单元法和嵌入梁单元法: 其中实体单元法通过精确建立桩的实体模型^[3], 并通过桩侧设置接触单元模拟桩土相互作用, 其单元数量较多, 计算量较大; 而嵌入梁单元(embedded beam)法^[4]则将桩简化为梁单元, 利用节点对节点的非线性耦合弹簧模型模拟土-桩相互作用, 显著减少理论计算量^[5]。

目前在软土地基边坡分析中两种桩土耦合模型均有使用, 并获得了有益研究, 例如郑辉等^[6]采用嵌入梁单元模拟斜坡式海堤工程对临近桥梁桩基位移的影响; 冯建国等^[7]采用嵌入梁单元分析欠固结地基中边坡与桩基相互作用, 模拟了桩基的变形及内力变化; 贝建忠等^[8]则采用实体单元建立水泥搅拌桩的地基加固模型, 并分析了复合地基综合强度指标的适用性。然而以上研究均基于同一类桩土耦合模型进行的分析, 在同一工程中对两类桩土耦合模型的异同还缺乏深入对比分析。

本文将以北非某码头为例, 通过对比两类桩土耦合模型在计算精度、效率和适用性方面的差异, 旨在为大荷载下深厚软土地基中的桩土相互作用数值模拟选择合适的建模方法提供参考。

1 桩基模拟方法

在 Plaxis 中, 实体单元模拟桩通常按照桩基实际尺寸建模, 桩体材料采用线弹性模型, 桩基与土之间设置界面单元模拟桩土相互作用, 使得桩土之间的共用节点分割为一个节点对, 见图 1, 在每一对节点中, 一个属于土体单元, 一个属于结构单元。在节点对之间, 用两个理想弹塑性弹簧模拟土-结构之间的相对滑动和相对裂隙^[9]。弹塑性弹簧的刚度参数取自对应的土体材料, 并采用界面强度折减系数 R_{inter} 进行修正。

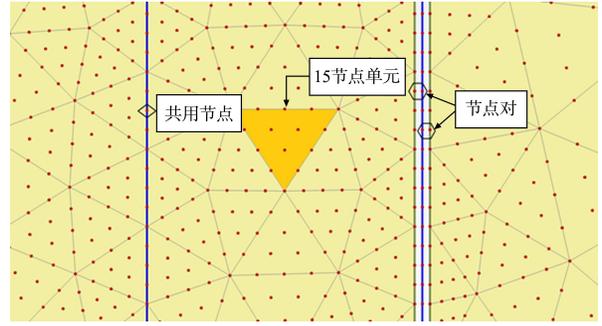


图 1 实体单元桩土界面模拟

Fig. 1 Simulation of solid element pile-soil interface

Plaxis 中嵌入式梁单元本质是由梁单元和专属界面单元组合而成, 梁单元模拟桩基变形、界面单元模拟桩土相互作用^[10]。其中界面单元由弹簧和滑块组成, 见图 2。弹簧用于模拟界面处的弹性变形(较小的位移差), 而滑块则用于模拟塑性滑动行为(较大的位移差), 弹簧的刚度与周围土体的剪切刚度相关, 塑性强度由用户定义或依据相邻土体的强度确定, 见式(1)、(2)。

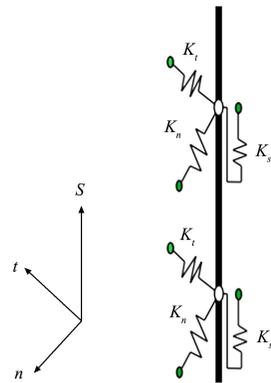


图 2 嵌入梁单元的本构关系

Fig. 2 Constitutive relationship of embedded beam element

$$\begin{bmatrix} \tau_s \\ \tau_n \\ \tau_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & K_n & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{p,s} - u_{s,s} \\ u_{p,n} - u_{s,n} \\ u_{p,t} - u_{s,t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$K_n = K_t = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} K_s \quad (2)$$

式中: τ_s 、 τ_n 、 τ_t 分别为桩侧 3 个方向的摩擦力; K_s 、 K_n 、 K_t 为对应的接触单元刚度, 其数值与桩周土体相关; $u_{p,s}$ 、 $u_{p,n}$ 、 $u_{p,t}$ 为桩基节点的位移; $u_{s,s}$ 、 $u_{s,n}$ 、 $u_{s,t}$ 为对应土体节点的位移; ν 为土体的泊松比。

以上嵌入梁单元在求解过程中会将梁周围等效半径内的土体材料转为线弹性材料，忽略土体的塑性变形，从而使得嵌入梁的行为表现更加类似实体结构，然而需要注意的是，该模型中的桩土相互作用点设置在桩基的中心点，而不是桩周，因此可能会产生部分计算偏差^[11]。

嵌入梁的桩端承载力则按式(3)计算：

$$F_{\text{foot}} = K_{\text{foot}}(u_{p,\text{foot}} - u_{s,\text{foot}}) \leq F_{\text{max}} \quad (3)$$

式中： F_{foot} 为桩端实际荷载； K_{foot} 为桩端弹簧的刚度系数； $u_{p,\text{foot}}$ 桩单元节点的位移； $u_{s,\text{foot}}$ 为对应土体节点的位移； F_{max} 为用户输入的桩端极限承载力。

2 模型分析

2.1 模型及参数

以北非某码头为例，该码头拟建于超过 20 m 的软土地基上，通过开挖软土换填开山石形成码头

岸坡，采用高桩梁板结构，每榀排架下采用 5 根直径 1.2 m，壁厚 20 mm 的钢管桩作为支撑，桩长 74.8 m，桩端打入持力层。

选取该码头的典型断面，见图 3，采用 Plaxis 3D 建立了该码头二榀排架的桩土耦合模型，其中土体采用相同的设置，即 4 个侧面约束其法向位移，底面约束 x 、 y 、 z 这 3 个方向的位移，土体材料统一采用硬化模型，参数见表 1。

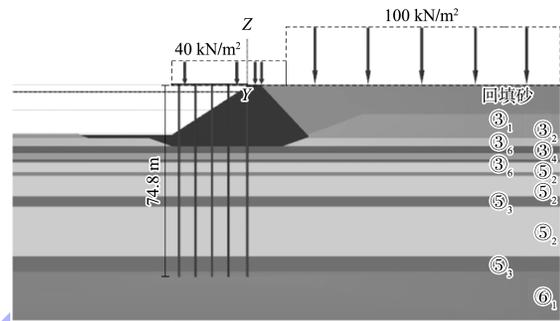


图 3 码头典型断面

Fig. 3 Typical cross-section of wharf

表 1 土层物理力学参数

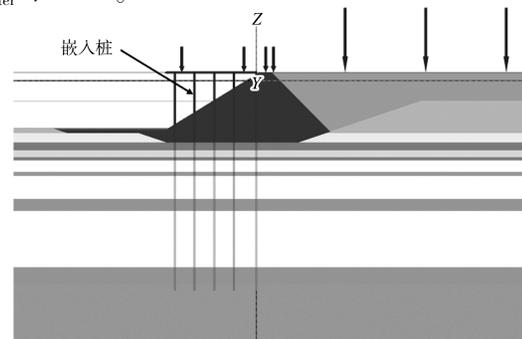
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E_{50,\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oad},\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur},\text{ref}}/\text{MPa}$	ν_{ur}	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
③ ₁	1.72	2.5	2.5	7.5	0.3	7.0	25.6
③ ₂	1.81	2.3	2.3	6.9	0.3	3.0	25.1
③ ₄	2.07	9.4	9.4	28.2	0.3	14.2	26.8
③ ₆	1.90	28.0	28.0	84.0	0.3	0.1	33.0
⑤ ₂	1.87	4.9	4.9	24.5	0.3	11.6	24.3
⑤ ₃	1.99	9.0	9.0	27.0	0.3	12.3	25.6
⑤ ₆	1.90	31.0	31.0	93.0	0.3	0.1	31.0
⑥ ₁	2.20	50.0	50.0	150.0	0.3	0.1	42.0

注： ρ 为土体密度； $E_{50,\text{ref}}$ 为参考应力下土体强度降至破坏强度的 50% 时的割线模量； $E_{\text{oad},\text{ref}}$ 为参考应力下主固结加载切线模量； $E_{\text{ur},\text{ref}}$ 为参考应力下土体卸载再加载模量； c' 为土体有效黏聚力； φ' 为土体有效内摩擦角。

模型中的桩基分别采用了嵌入梁单元和实体单元进行模拟，见图 4。嵌入梁单元截面为直径 1.2 m，壁厚 20 mm 的圆环，材料密度 7.85 g/cm^3 ，弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$ ；而实体单元桩为直径 1.2 m 的圆形实体，按照刚度、密度等效原则换算得到材料密度 1.6 g/cm^3 ，弹性模量 $E = 26.12 \text{ GPa}$ ，根据相关规范及设计经验，实体单元的桩土界面单元强度设定为相同深度土层材料强度的 $2/3$ ^[12]，即

R_{inter} 取 0.67。



a) 嵌入梁单元桩

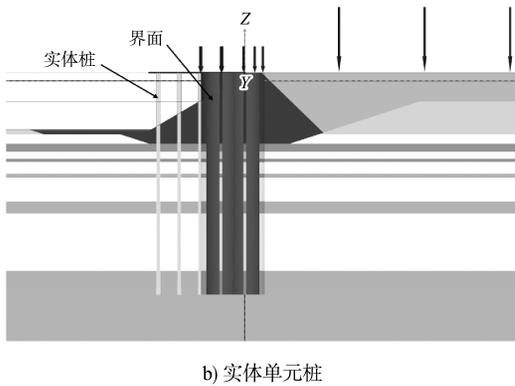


图 4 嵌入梁单元模型与实体单元模型对比

Fig. 4 Comparison between embedded beam element model and solid element model

2.2 施工步

桩土模型按照拟定的荷载步进行模拟, 见图 5, 即原始地层地应力平衡、基槽开挖、打设桩基、回填接岸结构等, 码头施工完成后按照使用荷载要求逐步增加荷载, 最后模拟固结 50 a 后的码头在长期使用状态下的结构变形及内力, 评估码头运行状态。



图 5 数值模拟荷载步

Fig. 5 Numerical simulation procedure

3 结果对比

2 个模型的单元数、计算情况及主要计算结果见表 2, 实体单元桩模型的单元数量约为嵌入梁单元桩模型数量的 5 倍, 计算时间约为 3.5 倍。

表 2 嵌入梁单元模型与实体单元模型计算结果

Tab. 2 Calculation result of embedded beam element model and solid element model

模型	单元数/ 万个	计算耗时/ min	码头前沿水平 变形/mm	码头后方水平 变形/mm	坡底水平 位移/mm	桩基弯矩极值/ (kN·m)	桩基轴力 极值/kN
嵌入梁单元模型	3.05	20	1.62	150.10	-120.34	-5 227	-15 691
实体单元模型	16.90	73	-11.30	130.10	-115.70	-3 468	-11 749

3.1 结构变形

在码头面板前沿、岸坡顶部、坡脚设置的监

测点位移随荷载步的变化见图 6, 结果显示两种模型得到的位移变化趋势一致, 数值接近。

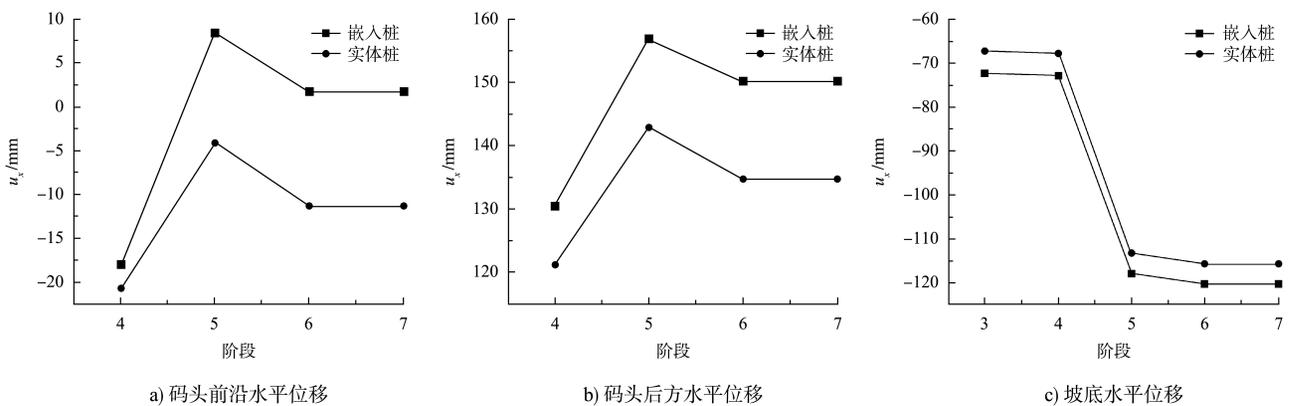


图 6 位移随时间的变化

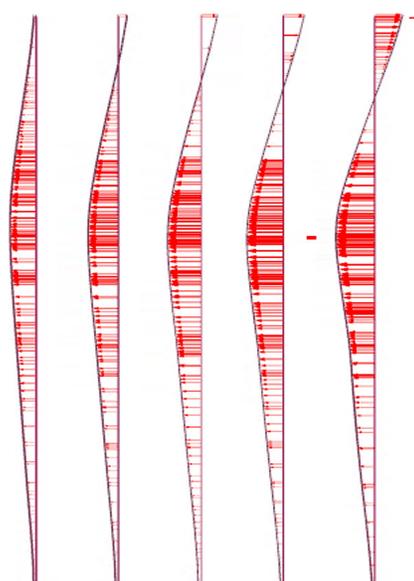
Fig. 6 Change of displacement with time

两种模型中桩基在固结 50 a 后的水平变形见图 7, 总体来看, 其变形特征一致, 呈 S 形, 且最

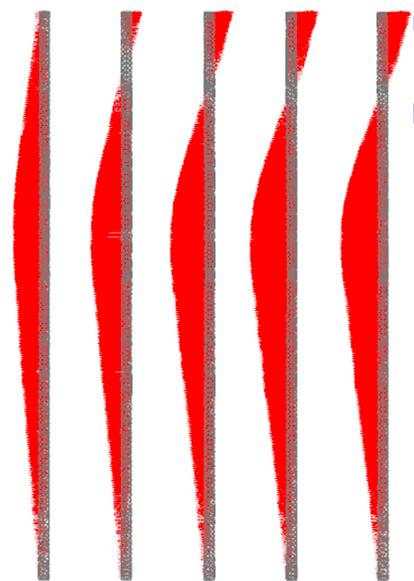
大水平变形均为 0.21 m, 仅在局部变形方面存在细微差别: 1) 码头后方存在长期沉降, 拉动桩基

和码头向陆侧偏斜，因此桩基顶部向陆侧变形，且从海侧向陆侧依次递增，陆侧桩受到更明显的“负摩阻”效应；2) 桩基中段位于软土地层中，在陆域后方大荷载作用下存在一个潜在的深层滑动区，码头桩基在土体滑动推力作用下表现出向海侧的水平变形；3) 随着土体强度增长，桩基嵌固效果增强，其水平变形沿桩基向下逐渐减小至 0。

桩端沉降依次递减，表明受到明显的负摩阻作用。从沉降幅度来看，嵌入梁单元桩最大沉降值为 0.108 m，而实体单元桩最大沉降值为 0.128 m，这一差异是由于嵌入梁单元桩采用了弹簧模型来简化桩基底部土体的承载情况，其弹性系数取决于桩端土体的剪切变形模量，是一个点接触；而实体模型则通过桩土界面的接触来模拟桩端承载力，是一个面接触。



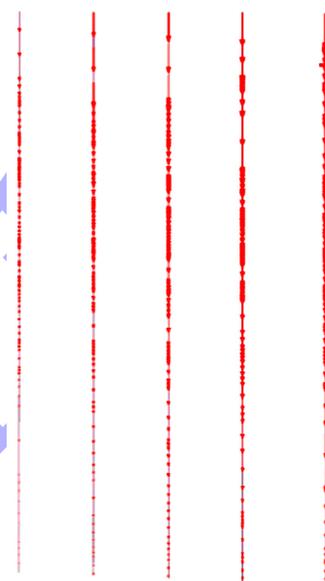
a) 嵌入梁单元桩，最大水平位移 $u_x=0.2098$ m



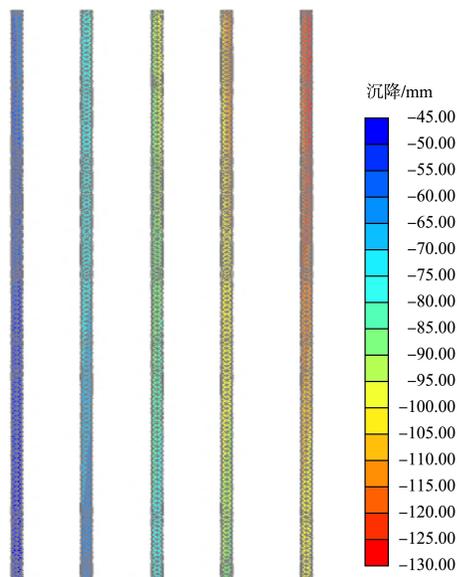
b) 实体梁单元桩，最大水平位移 $u_x=0.2056$ m

图 7 嵌入梁单元桩和实体单元桩的水平位移分布
Fig. 7 Horizontal displacement distribution of embedded beam element pile and solid element pile

桩基的竖向变形(沉降)见图 8，两种模型均表现出陆侧桩基沉降大于海侧桩基，并从桩顶向



a) 嵌入梁单元桩，最大沉降 $u_z=0.108$ m



b) 实体单元桩，最大沉降 $u_z=0.128$ m

图 8 嵌入梁单元桩和实体单元桩的沉降
Fig. 8 Settlement of embedded beam element pile and solid element pile

3.2 桩基侧摩阻及轴向受力

深厚软土地基中, 码头桩基, 尤其是陆侧桩基会受到严重的负摩阻问题。在嵌入梁单元模型中, 可直接读取嵌入梁单元的表面侧摩阻, 而实体单元桩模型则需要读取桩土界面单元上的剪应力分布情况, 并按深度积分才可得得到桩基周围的侧摩阻力, 在数据获取方面略显复杂。两种模型获取的最终桩侧摩阻结果见图 9, 两者的桩侧摩阻总体趋势相似, 数值相近, 表现出较好的一致性, 其中 5#桩最靠近陆侧的位置, 受负摩阻影响最为显著。

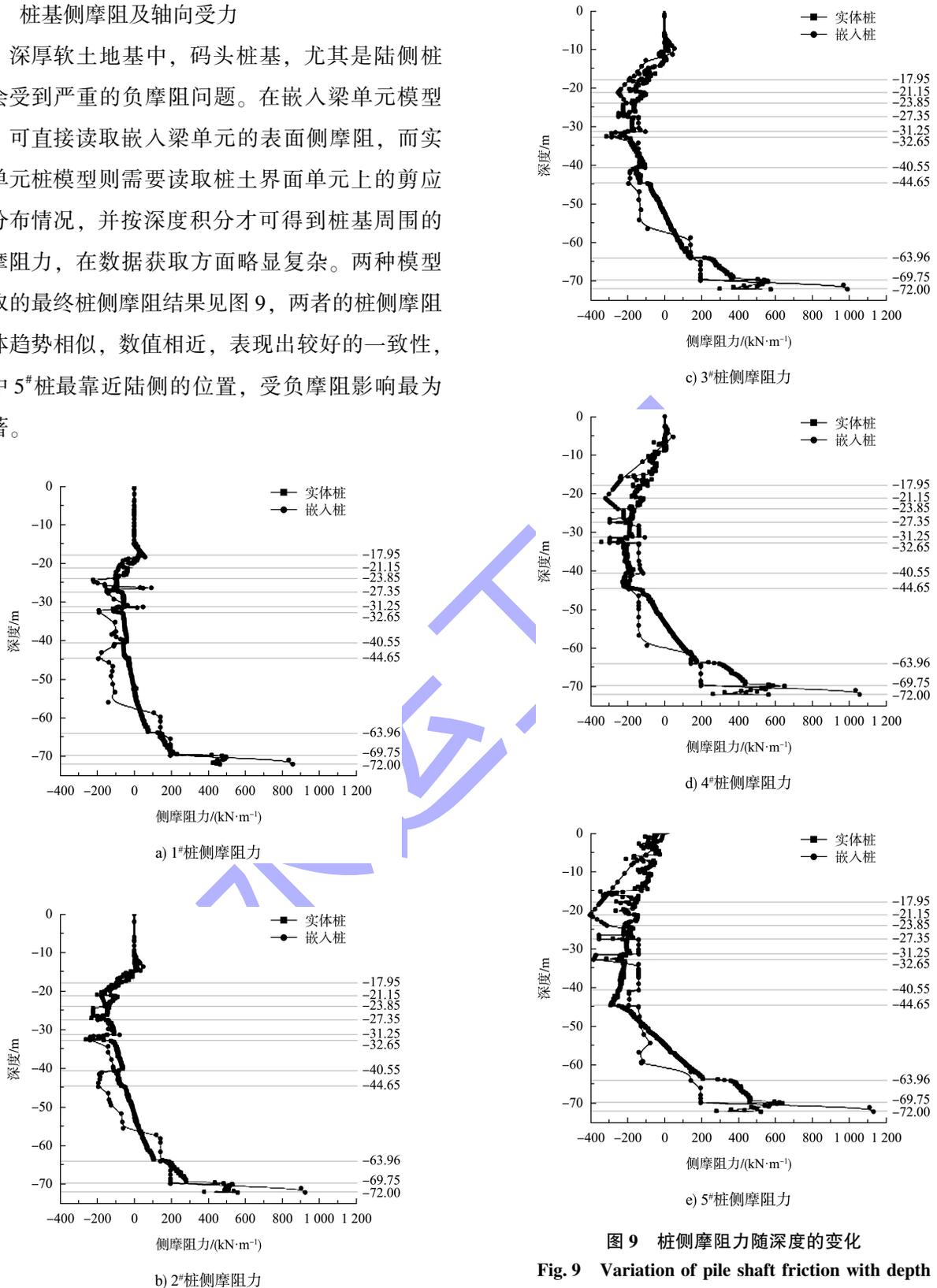


图 9 桩侧摩阻力随深度的变化
Fig. 9 Variation of pile shaft friction with depth

由于嵌入梁单元的桩侧摩阻极值是基于周围土体参数按经验公式提前计算后输入，并根据桩土节点位移差按式(1)计算得到，因此在土层交界面可看到明显突变。相比之下，实体单元桩在模拟中考虑了土层之间的相互作用，桩土界面在土层突变区域会存在应力重分布，而非剧烈波动，因此桩侧摩阻的分布更平滑。由于两种桩基桩端承载力的模拟方式差异，嵌固桩在底部的正摩阻力大于实体单元桩，中性点位置也略深；而实体单元桩靠近桩端区域，由于桩土位移趋近相同，可观察到一小段正模阻快速降低的现象。

上述负摩阻计算方面的差异也体现在桩基的轴力分布上，以5#桩基为例，见图10，嵌入梁单元桩通过耦合弹簧模拟土-桩相互作用，计算得到的桩基轴力略大，从设计角度偏于安全，适合设计初期快速评估桩基的安全性。而实体单元桩采用界面单元模拟土-桩接触，轴力分布均匀、曲线平滑，能反映摩擦滑移和接触状态变化，适合精细化设计，两者结合可为工程设计提供可靠依据。

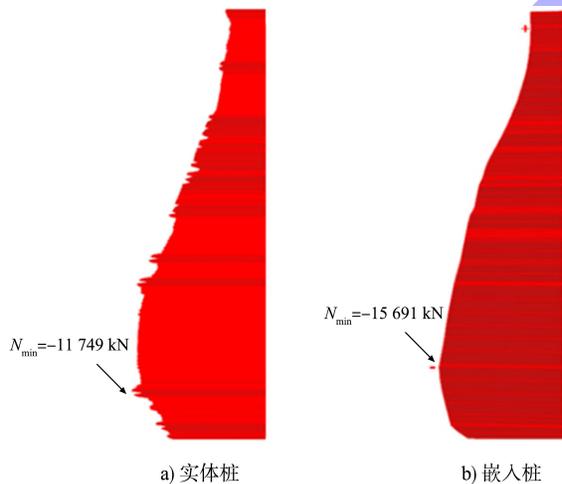
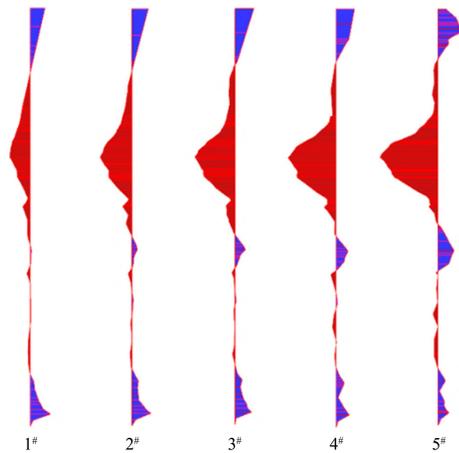


图 10 5#桩轴力对比

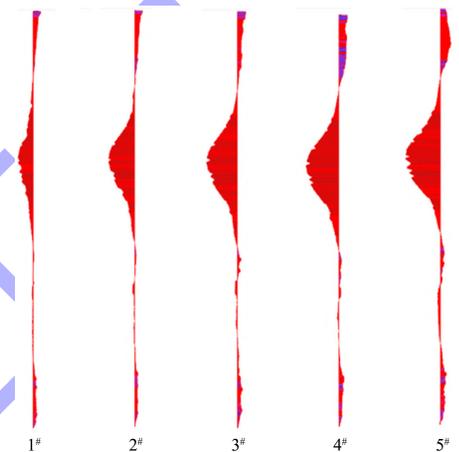
Fig. 10 Comparison of axial force of pile 5#

3.3 桩基横向受力

从海侧至陆侧1#~5#桩基弯矩分布见图11，从弯矩分布趋势来看，嵌入梁单元桩与实体单元桩均呈现从海侧到陆侧逐渐增大的规律，陆侧桩的弯矩值显著高于海侧桩基，因此需要对陆侧桩截面加强，以提高其抗弯承载能力。



a) 嵌入梁单元桩，最大弯矩M=5 227 kN·m



b) 实体单元桩，最大弯矩M=3 468 kN·m

图 11 桩基弯矩分布

Fig. 11 Bending moment distribution of pile foundation

各排桩基弯矩的峰值见表3，其中嵌入梁单元桩的弯矩峰值明显高于实体单元桩，以陆侧桩基最明显，可达实体单元桩的1.5倍。由于嵌入梁单元在模拟桩土相互作用时，计算桩土节点的位移差选取的不是实际桩周节点，而是桩基的中心点。在该计算模式下，会部分忽略大直径桩基结构之间的“桩土流动”，见图12，过大考虑了桩基受到土体横向推力的面积，增大了桩基的弯矩，对桩的抗弯设计带来一定影响。

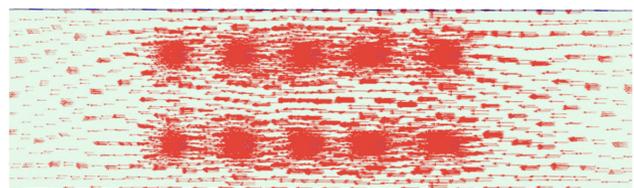


图 12 实体单元桩模型中的桩间土的“流动”

Fig. 12 Soil flow between piles in solid element pile model

表 3 桩基弯矩峰值

Tab. 3 Peak bending moment of pile foundation

桩基	嵌入梁单元桩 $M_{\min}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	实体单元桩 $M_{\min}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	比值/%
1 [#]	-1 861	-1 476	126
2 [#]	-2 845	-2 615	109
3 [#]	-3 609	-3 062	118
4 [#]	-4 318	-3 289	131
5 [#]	-5 227	-3 468	151

4 结论

1) 计算效率及适用性: 嵌入梁单元桩从模型规模及计算效率上均优于实体单元桩模型, 计算结果总体偏于安全, 可用于方案初期的快速评估; 实体单元桩模型计算获得的内力结果和变形更精确, 可用于后续方案精细化设计, 确保结构的可靠性。

2) 桩基竖向受力及变形特性: 嵌入梁单元桩和实体单元桩均能较好地模拟出桩侧正负摩阻的分布及中性点位置, 轴力分布等情况。嵌入梁单元桩桩侧摩阻极值需提前计算并输入, 而实体单元桩通过界面单元模拟桩土接触, 需要单独提取并按深度积分才能获得。

3) 桩基水平向受力及变形特性: 嵌入梁单元通过弹性区简化桩土相互作用, 高估了受到土体横向推力的桩体面积, 计算得到的弯矩峰值高于实体单元桩, 最大比值可达 1.5 倍, 不利于结构方案的精细化设计。

参考文献:

- [1] 武明, 王俐, 向晓辉. 软土地区高桩码头设计与研究[J]. 土工基础, 2009, 23(4): 26-29.
WU M, WANG L, XIANG X H. Design and research of high-piled wharf in soft soil area[J]. Soil engineering and foundation, 2009, 23(4): 26-29.
- [2] 廖雄华, 张克绪. 天津港高桩码头桩基—岸坡土体相互作用的数值分析[J]. 水利学报, 2002, 33(4): 81-87.
LIAO X H, ZHANG K X. Numerical analysis of pile-soil interaction in long-piled wharf of Tianjin Port[J]. Journal of hydraulic engineering, 2002, 33(4): 81-87.
- [3] 陈志平, 施浒立. 三维实体建模与有限元分析的关系[J]. 电子机械工程, 2002, 18(3): 12-16.
CHEN Z P, SHI H L. The relationship between 3D solid modeling and finite element analysis [J]. Electro-

- mechanical engineering, 2002, 18(3): 12-16.
- [4] AMANI A S, SUSILA E. Lateral pressure on piles in soft cohesive soil due to adjacent embankment filling: a comparative study of 2D and 3D finite element analyses[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2025, 1464(1): 012031.
- [5] SADEK M, SHAHROUR I. A three dimensional embedded beam element for reinforced geomaterials[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2004, 28(9): 931-946.
- [6] 郑辉, 李春阳. 某斜坡式海堤工程对临近桥梁桩基位移的影响[J]. 水运工程, 2018(4): 63-68.
ZHENG H, LI C Y. Effect on pile displacement of bridge near slope seawall project [J]. Port & waterway engineering, 2018(4): 63-68.
- [7] 冯建国, 宋方瀚, 李存兴. 欠固结地基边坡与桩基相互作用分析[J]. 水运工程, 2019(12): 164-168.
FENG J G, SONG F H, LI C X. Analysis of interaction between slope and pile foundation on underconsolidated soil [J]. Port & waterway engineering, 2019 (12): 164-168.
- [8] 贝建忠, 赵瑞东, 李伟仪, 等. 水泥搅拌桩复合地基综合强度指标方法在岸坡设计中的适用性分析[J]. 水运工程, 2022(5): 184-190.
BEI J Z, ZHAO R D, LI W Y, et al. Applicability of DCM composite foundation comprehensive strength method in revetment design [J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 184-190.
- [9] SKEJIC A. Interface formulation problem in geotechnical finite element software [J]. Electronic journal of geotechnical engineering, 2012, 17: 2035-2041.
- [10] SMULDERS C M, HOSSEINI S, BRINKGREVE R. Improved embedded beam with interaction surface[C]//Proceedings of the 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Reykjavík: [s. n.], 2019: 1-8.
- [11] TSCHUCHNIGG F, SCHWEIGER H F. The embedded pile concept-verification of an efficient tool for modelling complex deep foundations [J]. Computers and geotechnics, 2015, 63: 244-254.
- [12] SIDOROV V, ALMAKAEVA A. Soil and structure interaction investigation features[J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2020, 869(7): 072013.

(本文编辑 赵娟)