

· 地基与基础 ·



双排桩结构在滩海软基中的受力特性研究

龙丽吉^{1,2}, 高鑫林³

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
2. 重庆西南水运科学研究所, 国家内河航道整治工程技术中心, 重庆 400016;
3. 中交二航局第二工程有限公司, 重庆 400074)

摘要: 研究了双排桩在滩海陆岸平台中的应用。根据弹性抗力杆件有限元法, 采用数值计算软件 ANSYS, 分析了双排桩结构在不同的工况下的受力特性及双排桩的刚度、入土深度对结构内力和变形的影响。研究表明, 双排桩在滩海软土地基上有很好的适用性, 双排桩入土深度对结构的整体稳定性有很大的影响。桩身刚度的提高在一定程度上可以减少双排桩的水平位移, 但桩基直径增加到临界极限后, 双排桩出现近似刚体的运动, 这种情况对软土地基受力状态是不利的。

关键词: 双排桩; 滩海软基; 弹性杆件; 有限元; 优化设计

中图分类号: TU 473. 1 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)11-0140-08

Mechanical characteristics of double-pile structure in foreshore soft foundation

LONG Li-ji^{1,2}, GAO Xin-lin³

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,
Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing 400016, China;
3. The 2nd Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract: The application of double-pile in foreshore soft foundation is studied. Based on the elastic link finite element theory, the finite element software ANSYS is used to simulate the mechanical characteristics of double-pile under different conditions, and the influence on the displacements and internal forces of the double-pile stiffness and penetration depth. Results show that the double-pile is pretty well applied to the foreshore soft foundation. The penetration has great impact on the stability of structure. The increasing of the stiffness can reduce the horizontal displacement to some extent, but when the pile diameter reaches a certain critical threshold, double-pile appears rigid body motion which is not fit for the bearing capacity of soft foundation.

Keywords: double-pile; foreshore soft foundation; elastic link; finite element; optimization design

随着滩海石油开发项目的建设, 滩海石油开采逐渐向海中推进, 对于离岸较远的区域, 常常采用修筑人工岛 + 近海道路的模式来进行海上油气开发。然而我国大多数海域地质情况复杂, 多为深厚软土地基。传统的重力式结构对地基要求高, 很难适应滩海油气开发。双排桩是一种新型的人工岛支护结构, 由两排平行的预制钢筋混凝土桩及桩顶横

梁组成, 桩间用挡板挡土。双排桩 + 横梁 + 挡板组成空间箱体回填砂后形成围护结构, 前方可停靠船(图 1)。这种结构利用两排桩对土压力的有效分担, 使支护结构的入土深度和桩身内力分布更为合理, 使回填后形成的人工岛的变形得到很好的控制, 同时也能适应滩海地区的软土地基, 能够更好地适应于水深较大、基础较差的滩海油气开发^[1-2]。

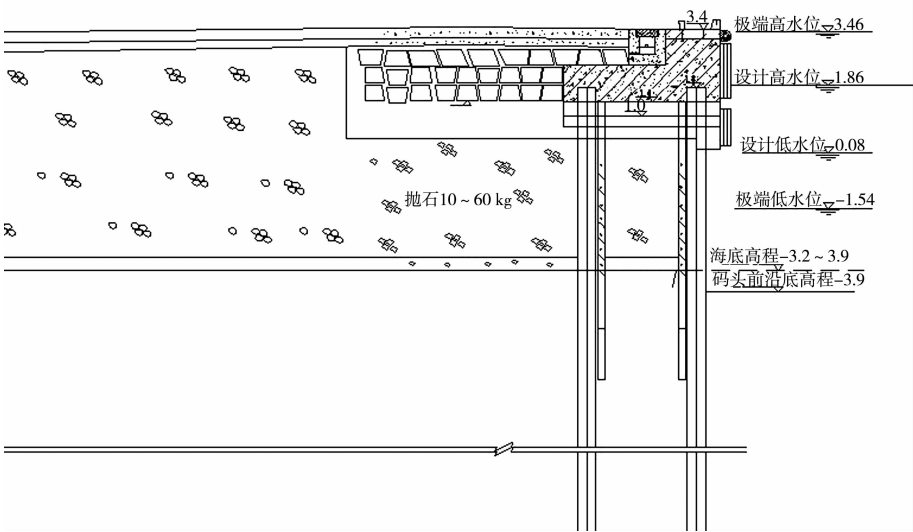


图 1 双排桩人工岛断面 (单位: m)

本研究以胜利陆岸油田为依托, 拟建人工岛地貌主要为海、陆相交替沉积的滨海水下三角洲, 地势整体缓慢向海中倾斜。人工岛泥面下至 -9 m 左右地层组成以淤泥质软土为主, 间夹薄层粉土。淤泥质软土压缩性高、强度低、排水性能差, 属欠固结土, 易引起岛体过大沉降, 影响整体稳定性。采用重力式结构要进行大面积的地基处理, 工程造价高, 施工质量难以保证, 由于墙后回填加载会导致墙两侧产生不均匀沉降, 发生倾覆失稳, 因此双排桩结构进入视野。然而, 对海洋软基上双排桩结构的研究还较少, 并不完整, 因此需要对其在海洋环境条件下、软地质条件下的受力特性进行研究。本文通过双排桩滩海陆岸平台与船舶停靠点共建结构的应用研究, 探讨了弹性抗力杆件有限元法在双排桩中的应用, 并分析了双排桩结构在不同的工况下的受力特性, 最后分析了双排桩的刚度、入土深度的变化对结构内力和变形的影响。

1 双排桩结构研究现状

双排桩计算方法有 3 种: 常规设计方法、弹性抗力法、有限元方法。

常规设计方法是选择一定的入土深度在满足整体稳定、抗隆起和抗渗要求的前提下用经典土力学理论计算主动土压力和被动土压力, 然后把

双排桩视为刚性墙验算其抗倾覆、抗滑移稳定性, 安全系数沿用设计规范中对普通支挡结构的规定^[3-4]。

弹性抗力法是由于桩位移有控制要求, 内侧不可能达到完全的被动状态, 实际上仍处在弹性抗力阶段, 因此引用承受水平荷载桩的横向抗力概念, 将外侧主动土压力作为施加在墙体上的水平荷载, 用弹性地基梁的方法计算双排桩的变形与内力。土对桩基的水平支撑用弹性抗力系数来模拟^[5-6]。

有限元法提供了一种更为合理的设计计算方法, 它可以从整体上分析支护结构以及桩土相互作用。通过分析可以得到桩的应力与位移, 而且可以适用于复杂的土质条件、荷载条件、约束条件^[7-9]。

2 弹性抗力杆件有限元法计算原理^[10-11]

双排桩弹性抗力有限元法是假想桩基在泥面以下桩侧全部受到一定规律的弹簧约束, 不需要假定有一个嵌固点。土对桩身的侧向弹力可分为多种假定, 本文采用 m 法。

1) 结构离散化。

根据结构受力特性把结构理想化为梁单元, 把地基作用理想化为弹簧单元 (图 2)。

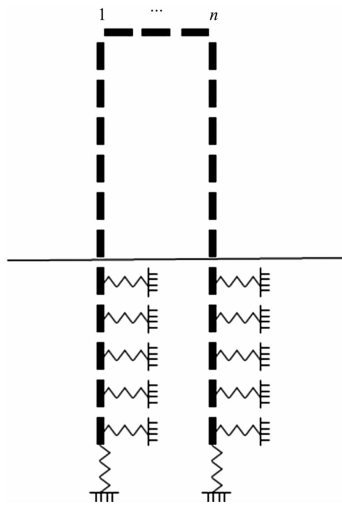


图2 离散模型

2) 等截面梁单元刚度矩阵推导见文献 [13]。

$$\mathbf{K}_e = E \begin{bmatrix} A/L & 0 & 0 & -A/L & 0 & 0 \\ & 12I_z/L^3 & 6I_z/L^2 & 0 & -12I_z/L^3 & 6I_z/L^2 \\ & & 4I_z/L & 0 & -6I_z/L^2 & 2I_z/L \\ & & & A/L & 0 & 0 \\ & & & & \text{对称} & \\ & & & & & 12I_z/L^3 & -6I_z/L^2 \\ & & & & & & 4I_z/L \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： E 为梁的弹性模量； L 为梁单元长度； A 为梁单元横截面积； I_z 为梁的惯性矩。

3) 桩身刚度矩阵。

桩身分泥面以上部分和泥面以下部分。

本文桩身上端与横向联系梁固结，则桩身泥面以上部分单元刚度矩阵为：

$$\mathbf{K}_p = E_p \begin{bmatrix} A_p/L_p & 0 & 0 & -A_p/L_p & 0 & 0 \\ & 12I_p/L_p^3 & 6I_p/L_p^2 & 0 & -12I_p/L_p^3 & 6I_p/L_p^2 \\ & & 4I_p/L_p & 0 & -6I_p/L_p^2 & 2I_p/L_p \\ & & & A_p/L_p & 0 & 0 \\ & & & & \text{对称} & \\ & & & & & 12I_p/L_p^3 & -6I_p/L_p^2 \\ & & & & & & 4I_p/L_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： E_p 为桩的弹性模量； L_p 为泥面以上桩单元的受弯长度； A_p 为桩单元横截面积； I_p 为桩的惯性矩。

泥面以下部分单元刚度矩阵包括两部分：桩本身的刚度矩阵和附加的弹性约束矩阵。

①泥面以下桩身刚度矩阵。

$$\mathbf{K}_d = E_d \begin{bmatrix} A_d/L_d & 0 & 0 & -A_d/L_d & 0 & 0 \\ & 12I_d/L_d^3 & 6I_d/L_d^2 & 0 & -12I_d/L_d^3 & 6I_d/L_d^2 \\ & & 4I_d/L_d & 0 & -6I_d/L_d^2 & 2I_d/L_d \\ & & & A_d/L_d & 0 & 0 \\ & & & & \text{对称} & \\ & & & & & 12I_d/L_d^3 & -6I_d/L_d^2 \\ & & & & & & 4I_d/L_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： E_d 为泥面以下桩的弹性模量； L_d 为桩单元的受弯长度； A_d 为桩单元横截面积； I_d 为桩的惯性矩。

②下端桩弹性约束的附加刚度矩阵。

若地基对桩的约束采用 m 法假定时的附加刚度矩阵推导见文献 [11]。

$$\mathbf{K}_m = mB_0 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{3l^2}{35} + \frac{13lc}{35} & \frac{l^3}{60} + \frac{11l^2c}{210} & 0 & \frac{9l^2}{140} + \frac{9lc}{70} & -\frac{l^3}{70} - \frac{13l^2c}{420} \\ & & \frac{l^4}{280} + \frac{l^3c}{105} & 0 & \frac{l^3}{60} + \frac{13l^2c}{420} & -\frac{l^4}{280} - \frac{l^3c}{140} \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \frac{2l^2}{7} + \frac{13lc}{35} & -\frac{l^3}{28} - \frac{11l^2c}{210} \\ & & & & & \frac{l^4}{168} + \frac{l^3c}{105} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： m 为横向地基系数与深度 x 的比例系数； B_0 为桩身的计算宽度； l 为计算单元的长度； c 为单元上节点的深度。

③考虑桩土相互作用的综合刚度为：

$$\mathbf{K}_{int} = \mathbf{K}_p + \mathbf{K}_m \quad (5)$$

式中： $\mathbf{K}_p$ 为桩身刚度； $\mathbf{K}_m$ 为弹簧附加刚度。

4) 总刚度矩阵形成。

对桩基的上、下单元刚度矩阵，经过局部坐标系的叠加后，还需要经过坐标转换得到整体坐标系的单元刚度矩阵。

$$\mathbf{K}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{ij} \\ \mathbf{K}_{ji} & \mathbf{K}_{jj} \end{bmatrix} \quad (6)$$

5) 等代节点荷载。

主要的等代节点荷载有：梁上集中力、梁上均布力、梁上梯形分布力，具体推导过程见文献 [13]。

6) 内力计算。

根据静力平衡条件, 作用在结构节点的外荷载与单元的内荷载相平衡, 单元内荷载由未知结点位移和单元刚度矩阵求得。

$$K \times U = F$$
 (7)

式中: U 为位移矩阵; F 为荷载矩阵。

3 双排桩有限元法计算模型及参数

3.1 有限元模型

本次研究的计算模型采用前排桩在开挖面以上作用静止土压力、后排桩在开挖面以上作用朗肯土压力, 前、后排桩土抗力作用在开挖面以下。计算模型见图 3。

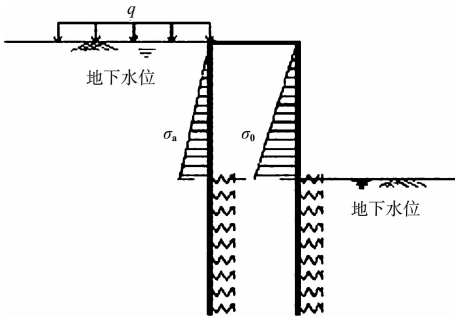


图 3 计算模型

初步确定桩基入土深度 16 m, 尺寸为 1 m × 1 m, 排桩纵向间距为 4 m, 横向桩基中心线间距为 3 m, 上端为现浇联系梁, 与桩基顶端固结。模型中双排桩结构采用二维梁单元——beam4 单元; 桩土相互作用采用二维弹簧单元——combin14 单元, 弹簧一端与梁单元连接、一端固结。

3.2 材料参数

根据地质勘探和土样的试验得到的土体参数见表 1。

表 1 土体材料参数

土层	弹模/MPa	密度/(t·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa
1	5.5	1.96	23	8
2	7.0	1.97	24	8
3	4.0	2.03	13	13
4	9.0	1.99	24	7

桩端以上的入土段桩侧所承受的土压力, 采用 Winkler 假定, 即土对桩的侧向抗力 P_x 等于桩的计算宽度 b 、地基系数 K_x 和侧向位移 x 三者之间的乘积。则作用于桩侧任一点 z 处的弹性抗力为:

$$P_x = K_x b x$$
 (8)

表 2 桩的计算宽度

桩径(或桩宽)/m	矩形桩	圆型桩
$b \leq 1$	$b_0 = 1.5b + 0.5$	$b_0 = 0.9(1.5b + 0.5)$
$b > 1$	$b_0 = b + 1$	$b_0 = 0.9(b + 0.5)$

地基水平向基床系数 K_x 取沿深度线性增加的“ m ”法分布^[12], 即:

$$K_h = m z$$
 (9)

式中: z 为计算点深度; m 为地基水平抗力比例系数。

对于双排桩, 用等效刚度法简化为单位宽度的连续墙, 则等效连续墙的厚度 h 为:

$$h = 0.838d \sqrt{d/b_k}$$
 (10)

式中: d 为排桩的单桩直径; b_k 为同一排桩的相邻桩中心间距。

m 为地基比例系数, 可由试验或按照规范中的经验公式计算求解。当桩入土深度范围内有多层土时, m 的计算公式^[12] 如下:

$$m = \frac{m_1 h_1^2 + m_2 (2h_1 + h_2) h_2}{h^2 m}$$
 (11)

计算“ m ”值的经验公式^[12] 为:

$$m_i = \frac{1}{\Delta} (0.2 \varphi_{ik}^2 - \varphi_{ik} + c_{ik})$$
 (12)

式中: m_i 为第 i 层土的水平抗力系数的比例系数; φ_{ik} 为第 i 层土的不固结排水剪内摩擦标准值; c_{ik} 为第 i 层土的不固结排水剪粘聚力标准值; Δ 为基底处位移量 (mm), 按地区经验取值, 无经验时可取 10。

3.3 分析工况

本文分析了 4 种常见工况作用下, 双排桩共建结构的位移及内力特征, 4 种工况分别为: 工况 1, 1.2 自重力 + 1.2 土压力 + 1.5 系缆力 + 0.7 × (1.5 × 波浪压力); 工况 2, 1.2 自重力 + 1.2 土压力 + 1.5 撞击力 + 0.7 × (1.5 × 波浪压力); 工况 3, 1.2 自重力 + 1.2 土压力 + 1.5 系缆力 + 0.7 × (1.5 × 波浪吸力); 工况 4, 1.2 自重力 + 1.2 土压力 + 1.5 撞击力 + 0.7 × (1.5 × 波浪吸力)。

4 双排桩有限元法计算结果分析

通过线性弹簧计算了桩土相互作用条件下, 双排桩共建结构在不同工况下的位移变形以及结

构内力。从表 3 给出的结果可以看出,在本案例中,结构的变形及内力最大值出现在船舶系缆力主导可变荷载+波浪力非主导可变荷载工况下,墩顶最大变形为 16.2 mm。4 种工况下结构的轴力变化不大,而工况组合对弯矩值和剪力值影响较大。可见由于海洋结构的荷载复杂,在海洋结构计算时,应当充分考虑对所有可能出现的荷载的组合工况进行验算,避免工况的遗漏导致结果的偏差。

表 3 双排桩不同工况计算结果

工况	前桩 轴力/MN	后桩 轴力/MN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m)	位移/ mm
1	-8.75	-5.57	768	2 730	139
2	-7.81	-6.96	349	894	45
3	-6.12	-5.62	886	3 200	162
4	-7.99	-6.20	467	1 360	68

5 双排桩优化分析

由前面分析可得,双排桩结构在系缆力、波吸力及机械荷载组合作用下较为危险,因此以此工况为控制工况对双排桩码头进行优化。本节针对双排桩共建结构中对双排桩具有较大影响力的一些因素进行分析讨论,优化方向主要考虑桩身刚度、桩基入土深度对结构内力及变形的影响。

5.1 入土深度的影响

双排桩的基本结构尺寸为:桩径为 1 m×1 m,桩基横向间距为 3 m。分析基本工况为:1.2 自重+1.2 土压力+1.5 系缆力+0.7×(1.5×波浪吸力)。计算不同桩基入土深度对结构的位移、弯矩和剪力的影响。计算结果见图 4~6。

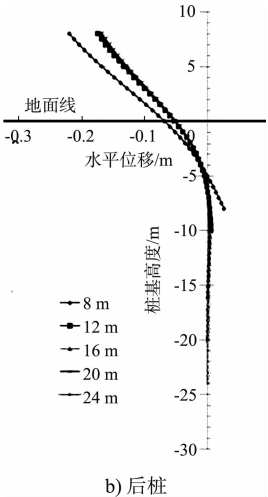


图 4 不同入土深度下前、后桩水平位移对比

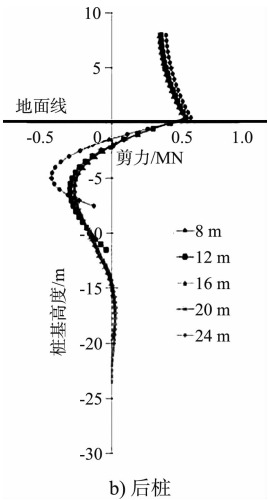
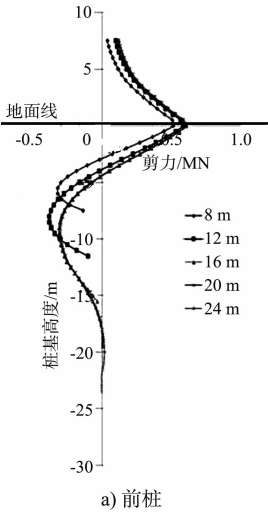
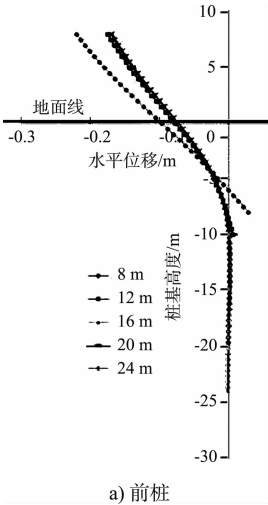


图 5 不同入土深度下前、后桩剪力对比

由图 4 可见:当桩基入土深度为 8 m 时,桩顶最大位移为 20 cm,桩底最大位移为 4 cm,可见此时桩基的入土深度并不够,桩基出现“踢脚”



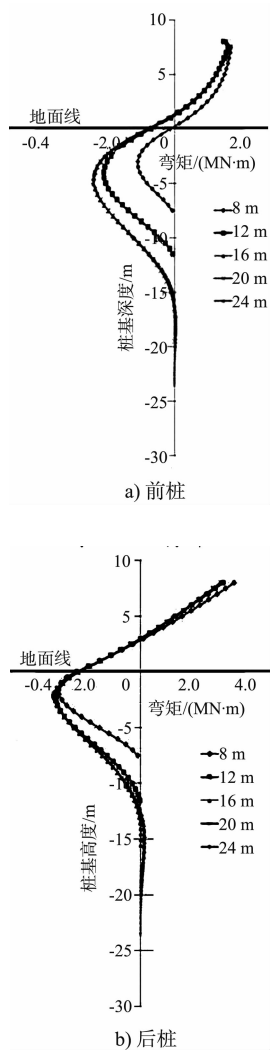


图 6 不同入土深度下前、后桩弯矩对比

失稳。而当桩基入土深度大于 10 m 后, 双排桩前后桩基的水平位移不再随桩基入土深度的增加而增加。可见桩基入土深度有一个临界值, 超过这个临界值后, 增加入土深度对结构承载力和变形控制没有积极作用, 反而使造价增加。

由图 5 可见: 前桩剪力最大值出现在土体分界面, 最大值为 5.15 MN。后桩剪力最大值出现在土体分界面, 最大值为 9.34 MN。后桩的剪力比前桩大 80%, 可见后桩的剪力远大于前桩的剪力。

由图 6 可见: 当入土深度超过嵌固深度后, 弯矩的分布和大小不会再随着桩基入土深度的增加而变化了。

综上所述, 对影响工程造价的桩基入土深度的选择应首先满足桩基嵌固深度的要求。通过上述对比计算可见, 当入土深度超过某一深度后,

即使桩基入土深度增加也不会影响结构的位移、弯矩和剪力分布, 则该深度为嵌固深度。

5.2 结构刚度的影响

桩体的刚度对双排桩的变形和受力存在一定的影响, 考虑通过改变桩体的几何参数来改变桩身刚度从而达到改善桩体变形和受力性能。按照基本算例, 改变前后桩的直径, 分别取 0.8、1.0、1.2、1.4 m 共 4 种桩基。计算结果见图 7~9。

由图 7 可见: 当桩径为 0.8 m 时, 其桩身的位移最大, 桩顶位移接近 30 cm。直径为 1 m 时, 桩顶位移为 20 cm, 而当直径增加到 1.2 m 时, 桩顶位移为 15 cm, 随着桩身截面直径加大, 桩身刚度增加, 桩身水平位移减少。并且不难看出只有当直径很小时, 直径的变化才会对桩身位移影响很大, 而当桩身直径达到一定值后, 再增加直径则对位移的影响很小。

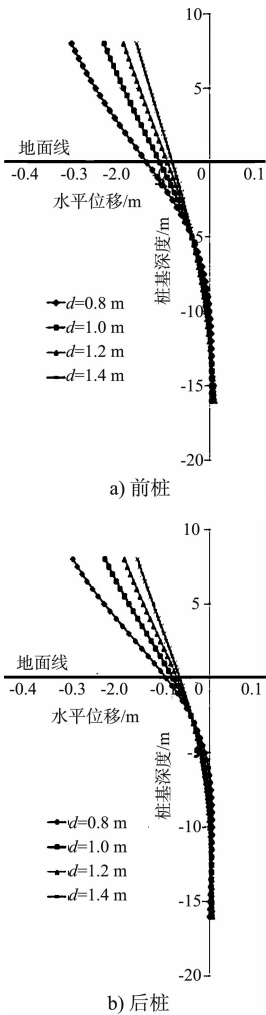


图 7 不同桩径前、后桩水平位移对比

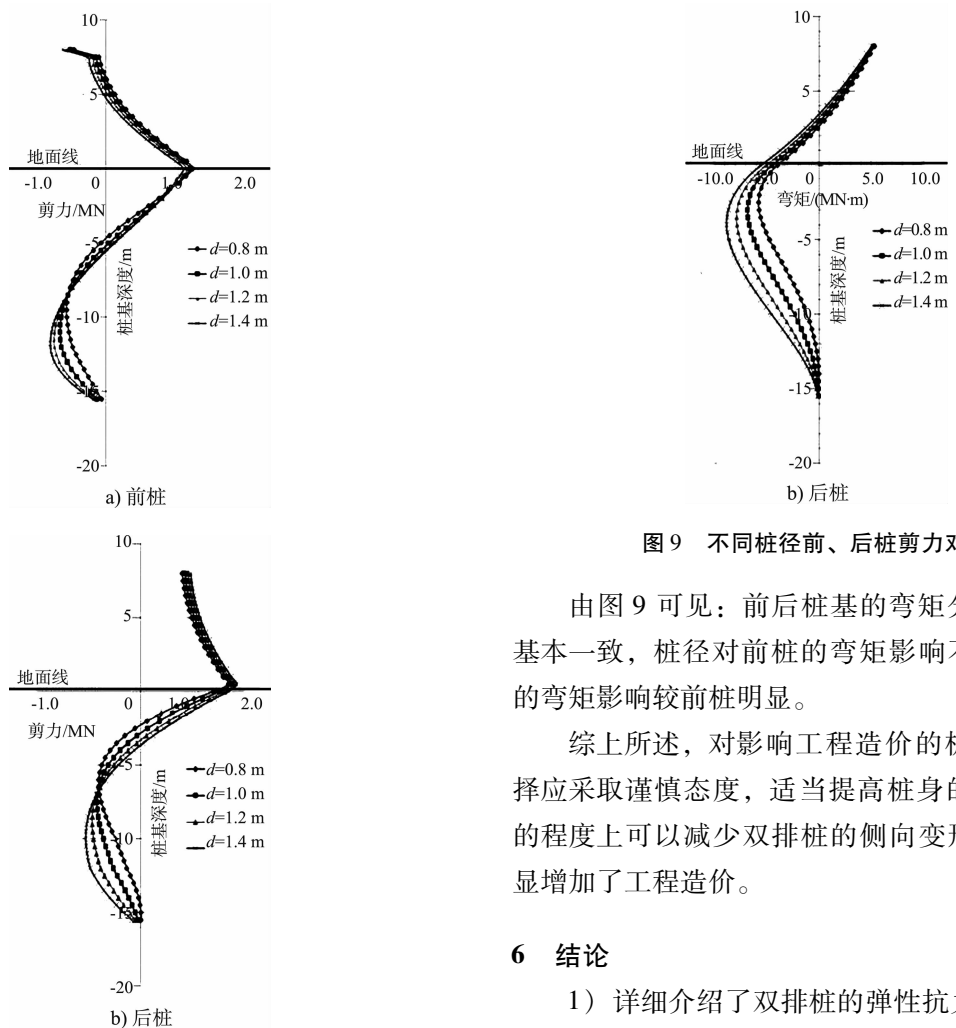


图 8 不同桩径前、后桩剪力对比

由图 8 可见：桩径的变化对剪力最大值影响不大。土层上部的桩基剪力大小和分布一致，不受桩径大小的影响。土层中的桩基剪力前桩分布曲线基本一致，但随着桩径的增大，极大值点下移。

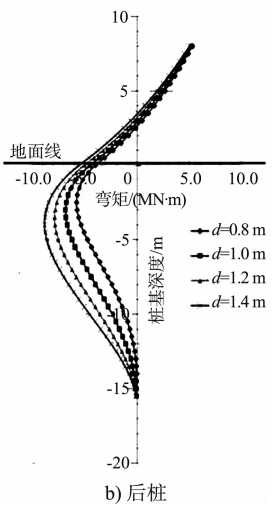
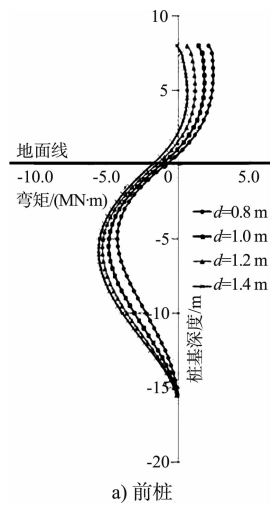


图 9 不同桩径前、后桩弯矩对比

由图 9 可见：前后桩基的弯矩分布曲线趋势基本一致，桩径对前桩的弯矩影响不大、对后桩的弯矩影响较前桩明显。

综上所述，对影响工程造价的桩身刚度的选择应采取谨慎态度，适当提高桩身的直径在一定的程度上可以减少双排桩的侧向变形，但同时明显增加了工程造价。

6 结论

- 1) 详细介绍了双排桩的弹性抗力杆件有限元法计算原理，给出了计算参数的取值方法及计算模型的简化原理，能给工程应用提供很好的借鉴。
- 2) 双排桩滩海陆岸平台与船舶停靠点共建结构的结构内力与结构的工况有很大关系，因此在滩海基础上的双排桩人工岛兼靠船结构的受力组合复杂，计算分析时，基本荷载组合应当全面。
- 3) 通过对双排桩入土深度的优化计算可以得到：双排桩的入土深度应当满足嵌固深度，但当入土深度超过嵌固深度后对结构承载力和变形控制没有积极作用，反而使造价增加。
- 4) 通过对双排桩刚度的优化计算可以得到：双排桩位移随刚度的增加而减少，但是减少的幅度变小；双排桩的刚度对结构的剪力影响不大，弯矩随着刚度的增加而增加。因此对桩身刚度的选择应采取谨慎态度，适当提高桩身的直径在一定程度上可以减少双排桩的侧向变形，但随着桩基的直径增加到一定极限后，双排将出现近似刚体的运动，这种情况对软土地基的受力状态是不利的。

参考文献：

[1] 林鹏,王艳丰,范志雄,等.双排桩支护结构在软土基坑工程中的应用分析[J].岩土工程学报,2010(S2):331-334.

[2] 汪彪,徐光耀,施木俊.双排桩桩间土加固作业在长江一级阶地深基坑工程中的应用分析[J].岩土工程学报,2014(S2):236-240.

[3] 应宏伟,初振环,李冰河,等.双排桩支护结构的计算方法研究及工程应用[J].岩土力学,2007,27(2):15-16

[4] 熊伟芬.深基坑双排桩支护结构计算模式与数值模拟研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.

[5] 顾问天,赵有明,刘国楠.反力弹簧法解双排桩结构内力[J].中国铁道科学,2007,28(6):12-18.

[6] 张克意,渝济涛.双排桩支护在某综合交通枢纽工程应用探讨[J].铁道工程学报,2010(10):95-99.

[7] Qian Tonghui, Ding Hongxing, Cheng Zhoubing. Numerical simulation on framed anti-sliding piles [J]. Advanced Materials Research ,2012,393:209-212.

[8] Mohammad R A K, Jiro Takemura, Hiroki Fukushima, et al. Behavior of double sheet pile wall cofferdam on sand observer In centeifuge tests [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2001(4):1-16.

[9] 朱庆科.深基坑双排板桩支护结构体系若干问题分析和研究[D].广州:华南理工大学,2013.

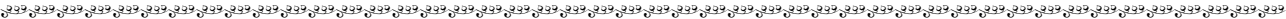
[10] 第三航务工程勘察设计院.码头新型结构[M].北京:人民交通出版社,1999.

[11] 张宪亮,宁贵霞,韩丽丽.基于“m”法的横向受力桩综合刚度有限元分析[J].兰州交通大学学报,2010(1):129-132.

[12] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].

[13] 曾攀.有限元分析基础教程[M].北京:清华大学出版社,2012.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

港珠澳大桥海底隧道已建成 2/3

11月5日，港珠澳大桥海底隧道第22节沉管安装成功。至此，项目已建成海底隧道总长达3 825 m，完成了2/3的沉管浮运安装施工。

10月中旬，“巨爵”台风在西太平洋生成并持续发展，因台风动向不明，项目部从控制工程风险出发，决定放弃10月下旬安装窗口，待机安装。台风过后，第22节沉管安装准备工作再次启动。经过风险排查后，项目部多次开展沉放演练，继续推进碎石基床整平作业，同时综合采取多种防淤减淤措施，减少已铺碎石基床回淤影响。由于第22节沉管安装区域仍处于强回淤段，据现场泥沙监测数据和多波束扫测数据显示：施工海域水体含沙量明显偏大，加之前两个船位静置时间较长，回淤量显著增加。为保证工期和沉管安装质量，项目总经理部决定首次采用整平船对第22节沉管第一、二船位基床进行清淤。11月1日，现场决策组成员住船指挥，已完成清淤技改的“津平1”整平船历经三天三夜连续施工，在确保基床形状完整的前提下高效完成清淤作业。第22节沉管安装各项准备工作全面就绪。

11月4日19时30分，第22节沉管开始绞移出坞，10艘大马力拖轮托带着沉管沿着浮运航路三驶向安装水域。11月5日上午11时灌水下沉，并快速通过表层强流速区。经多轮沉放、监测、调整，沉管平稳着床，并先后完成拉合施工和水力压接，于19时与已安装沉管精准对接。经贯通测量，沉管轴线、高程、纵坡满足设计标准，第22节沉管安装取得圆满成功。

(摘编自《中国交通建设网》)