



# 高桩+板桩复合式结构的内力分析方法

邱文，卢生军，骆俊彬

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510230)

**摘要：**对高桩+板桩复合式结构进行内力分析，通过采用 SAP2000 和 PLAXIS 有限元分析软件建立不同的计算模型，得出每种模型下高桩和板桩结构的弯矩、轴力、剪力和位移等计算结果，并对结果及其产生差异的原因进行分析。结果表明：仅采用 SAP2000 的分析模型因高估了土体对板桩结构的支撑作用，其内力计算结果偏小；仅采用 PLAXIS2D 的分析模型因忽略了高桩结构的变形，其内力计算结果偏大；而采用这两种软件迭代计算的分析模型与 PLAXIS 3D 模型的计算结果接近，说明该计算模型的结果与实际情况较为吻合。

**关键词：**高桩+板桩；复合式结构；内力；SAP2000；PLAXIS

中图分类号：U 656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)04-0064-08

## Internal forces analysis methods of combinatorial structure of sheet piles and tubular piles

QIU Wen, LU Shengjun, LUO Junbin

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

**Abstract:** Regarding the calculation of combinatorial structure of sheet piles and tubular piles, different analysis methods are compared through finite element analysis software SAP2000 and PLAXIS, the bending moments, axial forces, shear forces and displacements are obtained, these results and the reasons for the differences are analyzed. The results show that the calculation model of SAP2000 will result in a smaller calculated internal force, because it overestimates the soil support to sheet piles. While the PLAXIS 2D will result in a bigger calculated internal force, because it ignores the deformation of tubular piles. The internal force calculation results obtained by using the iterative calculation model of the two software combined are close to the results produced by PLAXIS 3D, which shows that the results of the above method are consistent with the actual situation.

**Keywords:** sheet piles and tubular piles ; combinatorial structure; internal forces; SAP2000; PLAXIS

高桩结构主要通过底部桩基础将上部结构所承受的水平和竖向荷载传递到地基土中，对地基土的适应性较好，可用于黏性土、粉土、砂土、碎石土和风化岩石等可以沉桩的地基，当采用灌注桩或嵌岩桩时，也可用于不易沉桩的情况。

将高桩结构用作电厂、LNG(液化天然气)码头、海水淡化等项目的取排水口结构时，为满足取排水口结构的挡浪、拦砂和防止海水间热交换

等的功能需求，需在高桩结构的基础上增设板桩结构作为挡浪板，形成高桩+板桩的复合式结构<sup>[1]</sup>。此时，高桩结构被用作主受力结构将上部荷载传递到地基土深处，而板桩结构主要用作防浪、拦砂及阻隔取排水口间的海水热交换。

针对单一形式的高桩结构或板桩结构，已有成熟的方法进行结构内力分析。如高桩结构的内力通常采用结构有限元分析软件进行计算；桩-土

收稿日期：2022-07-14

作者简介：邱文（1990—），男，工程师，从事港航工程水工结构设计工作。

相互作用一般采用线性或非线性弹簧单元进行简化模拟; 板桩结构可简化为二维平面问题, 采用土工计算软件进行分析, 并直接对土体进行模拟。然而, 对于高桩+板桩复合式结构, 采用传统的计算方法存在以下问题:

1) 一般的结构有限元分析软件如 SAP2000 通常采用线性或非线性弹簧单元来简化模拟土体与结构的相互作用, 然而目前的简化方法均基于单桩与土体的相互作用, 而板桩结构的空间连续性与单桩有所不同。

2) 结构有限元软件可采用更为复杂的计算模型来模拟桩、板桩与土体的相互作用, 如采用实体单元将土体进行建模并设置合理的结构与土的相互作用关系, 但该方法涉及复杂的土力学知识及大量的输入参数, 很难掌握。

3) 土工计算软件如 PLAXIS 2D 虽操作简单又可准确模拟结构与土体的相互作用, 但仅局限于解决二维特征明显的平面问题, 如传统的板桩码头结构, 而复合式结构属于三维空间结构, 需采用三维软件如 PLAXIS 3D 进行模拟, 较复杂。

针对上述问题, 本文结合印度尼西亚某煤制甲醇项目的取水口结构设计, 通过 SAP2000 及 PLAXIS 等软件建立不同的分析模型, 对高桩+板桩复合式结构的内力进行计算, 并分析不同计算模型间内力结果的差异, 相关经验可为类似结构的内力分析提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 项目背景

该煤制甲醇项目位于印度尼西亚某化学工业园区, 设计产能为 190 万 t/a, 项目采用海水直流冷却系统, 设计流量为 46 m<sup>3</sup>/s。海水经取水口进入取水明渠, 通过重力流至取水前池、流道及泵房, 后经海水泵将冷却水输送至冷凝器进行热交换, 最后由排水明渠排出。项目执行中国标准, 取水口结构的设计使用年限为 50 a。

### 1.2 设计水位及波浪

根据水文分析结果, 高程系统采用当地理论最低潮位。项目所在海域的极端低水位为 -0.26 m; 设计低水位为 0.04 m; 设计高水位为 2.14 m; 极端高水位为 2.77 m。

通过波浪模拟分析得出本项目取排水口结构 50 a 重现期设计波浪参数见表 1。

表 1 取水口设计波浪参数

水位	波高 $H_{1\%}/m$	谱峰周期 $T_p/s$
极端高水位	3.67	13.5
设计高水位	3.67	13.5

### 1.3 工程地质

项目位于沿海滩涂地带, 地质较差, 取水口结构下方存在近 30 m 厚的软黏土, 该层土平均标贯击数为 3 击。根据地勘分析报告, 可划分 3 个土层, 分别为 SU<sub>1</sub>、SU<sub>2</sub> 和 SU<sub>3</sub>, 各土层特性及土体参数见表 2。

表 2 土层及土体参数

土层	土层名称	平均标贯击数/击	饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	不排水剪强度/kPa	弹性模量/MPa	泊松比
SU <sub>1</sub>	软黏土	1.0	16.8	$12+k_1z$	2.5	0.5
SU <sub>2</sub>	黏土	9.0	17.9	$32+k_2z$	13.5	0.5
SU <sub>3</sub>	硬黏土	21.0	18.0	$55+k_3z$	22.5	0.5

注:  $k_1=0.2$ 、 $k_2=1.3$ 、 $k_3=0.8$  为土体不排水剪强度与土层深度相关的系数, kPa/m;  $z$  为土中某一位置距离原泥面的深度, m。

### 1.4 设计地震

工程位于强震区, 根据项目地震灾害性评估报告, 工程区域设计重现期 475 a 的场地地震峰值加速度为 0.4g, 最大震级可达 7.9 级, 设计地震谱见图 1。

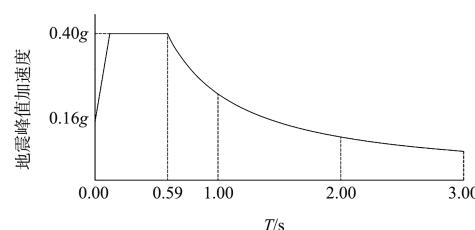


图 1 设计地震谱

### 1.5 取水口结构方案

项目需在深厚软土区、强震及强浪区条件下建设1座取水口，结构选型明显受以下建设条件制约：1) 取水口结构位于软土地基和强震区，如采用传统的斜坡堤结构，为满足沉降及地震作用下的边坡稳定性要求，需对结构下方及周边的深厚软土进行地基处理，工期长、费用高。2) 该软土地基适宜采用高桩结构，但其透空结构不满足取水口拦砂、挡浪和阻止海水热交换的要求。3) 板桩的非透空式结构可满足取水口的功能要求，但在波浪、水流等作用下自身无法保持稳定。

经技术论证和经济比选，最终采用高桩+板桩的复合结构形式，即采用高桩结构作为主受力结

构，将上部结构所受的波浪力、水流力及地震惯性力等通过桩基传递至深层地基土；采用板桩结构实现拦砂、挡浪和阻止海水热交换的功能需求。高桩+板桩复合式结构见图2。

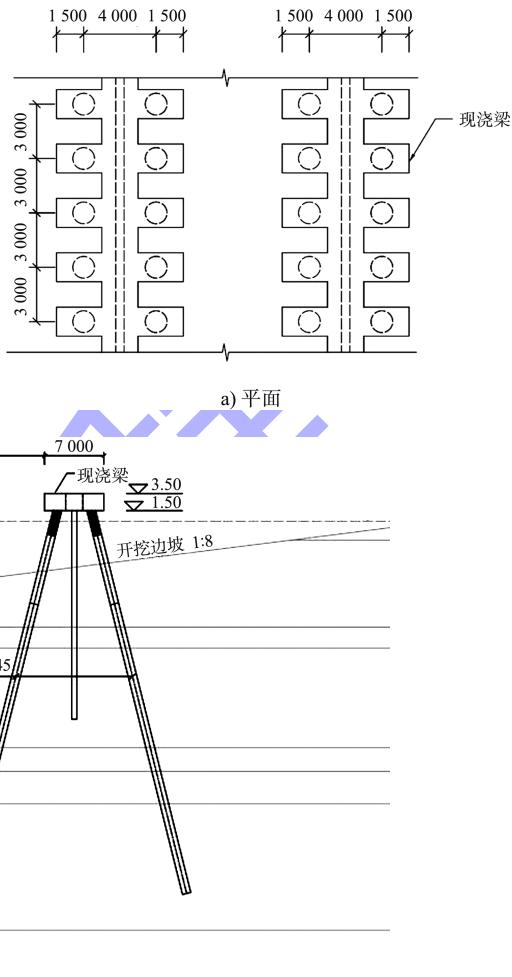


图2 取水口结构 (高程: m; 尺寸: mm)

## 2 结构内力分析

### 2.1 计算软件

传统板桩结构属于二维平面问题，常用的软件有 PLAXIS 2D、WALLAP 等二维土工计算软件。其中，PLAXIS 2D 软件因操作简单，又可较为准确地模拟板桩结构和土体之间的相互作用，因此被广泛应用于板桩、基坑支护等结构的内力分析，实践证明其对于具有二维特征的板桩结构的内力计算结果较为准确，三维空间结构的内力分析则需要借助 PLAXIS 3D 软件进行，但该软件操作困难。

高桩结构均具有三维空间结构特征，常用的有限元软件有 SAP2000、ANSYS 等。因不是专门的土工计算软件，在模拟结构与土的相互作用时，

对土体单元模拟比较困难，一般采用非线性弹簧单元来简化模拟。

该工程的取水口采用高桩+板桩的复合式结构，既具有三维空间结构特征，又涉及复杂的桩或板桩与土体的相互作用。因此，选择合适的计算软件和建立恰当的计算模型至关重要。为获得准确的内力结果，本项目采用 SAP2000、PLAXIS 2D/3D 等软件建立不同的模型对该复合式结构的内力进行分析。

### 2.2 桩-土相互作用模拟

桩土相互作用的常用分析方法包括  $m$  法、嵌固点法、 $p-y$  曲线法等<sup>[2]</sup>。其中  $m$  法是假定土体为线弹性体，是我国现行 JTS 167—2018《码头结构

设计规范》<sup>[3]</sup>和JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》<sup>[4]</sup>中均推荐的一种方法, 嵌固点法是建立在  $m$  法基础上的计算方法, 二者的计算理论接近。

在较大水平力作用下, 桩基周围的土体往往是非线性变形,  $p-y$  曲线法较好地反映土体的这种特性, 因此我国现行码头结构设计规范、美标 API<sup>[5]</sup>、欧标 Tomlinson<sup>[6]</sup>等规范均推荐该方法分析桩土的相互作用。然而  $p-y$  曲线法不适用于板桩结构, 因为板桩为连续式, 采用  $p-y$  不考虑群桩效应, 因此将高估土体对板桩的支撑作用。

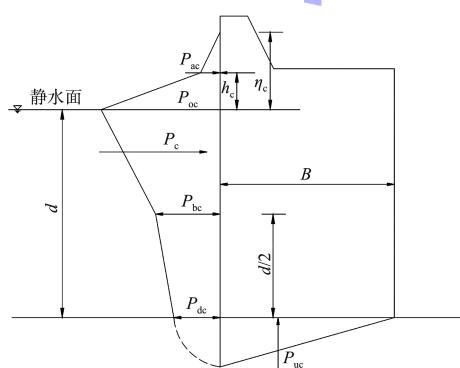
本文中 SAP2000 将采用  $p-y$  曲线法模拟土体对管桩的作用, 而 PLAXIS 2D/3D 中土体采用摩尔-库仑模型。

### 2.3 设计荷载

本项目结构所受外荷载主要为波浪力、水流力及地震荷载。由于水流较小, 计算时可忽略水流力, 为便于对比不同计算方法的计算结果, 计算时仅为正常使用工况而不考虑地震工况, 因此本设计荷载仅考虑结构自身重力和波浪力。

为简化计算, 假定波浪力全部作用于板桩, 不考虑波浪对桩基的作用以及作用于板桩的波浪力的折减。

波浪力按照 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》<sup>[7]</sup>第 10.1 节波浪对直墙式建筑物的作用的相关规定进行计算, 不考虑浮托力。波峰时波浪力对直墙建筑物的作用压力分布见图 3。



注:  $d$  为建筑物前水深(m);  $B$  为直墙底宽(m), 有趾时包括趾宽;  $\eta_c$  为波峰波面高度(m);  $h_c$  为波压力强度  $P_{ac}$  在静水面上的作用点位置(m);  $P_{ac}$  为与  $h_c$  对应的墙面波压力强度(kPa);  $P_{ec}$  为静水面上的波压力强度(kPa);  $P_{be}$  为与  $d/2$  水深对应的墙面波压力强度(kPa);  $P_{dc}$  为墙底处波压力强度(kPa);  $P_e$  为单位长度墙身上的水平总波浪力(kN/m);  $P_{ue}$  为单位长度墙底面上的波浪浮托力(kN/m)。

图 3 波压力分布

## 2.4 分析方法及模型

### 2.4.1 方法 1

方法 1 仅采用结构计算软件 SAP2000 对复合式结构内力进行三维建模计算, 模型断面见图 4。模型采用梁单元模拟钢管桩, 混凝土矩形梁单元模拟上部结构。

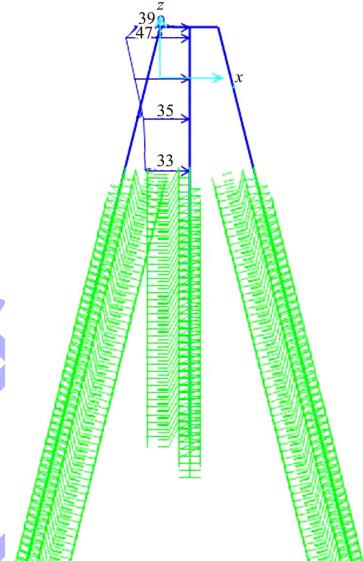


图 4 横断面 SAP2000 建模(单位: kN/m)

钢管桩及板桩结构与土体的相互作用采用  $p-y$  曲线法模拟, 因不适用于板桩, 所以在模型中将混凝土板桩近似模拟成间距 1 m、宽 1 m、厚 0.6 m 的矩形混凝土桩。

### 2.4.2 方法 2

方法 2 采用 SAP2000 和 PLAXIS 2D 软件分别建模联合求解, 即采用 PLAXIS 2D 模拟板桩结构部分, 采用 SAP2000 模拟高桩结构部分。在 PLAXIS 2D 中只建板桩模型, 板桩顶部与高桩的连接处采用固接约束, 计算模型见图 5。

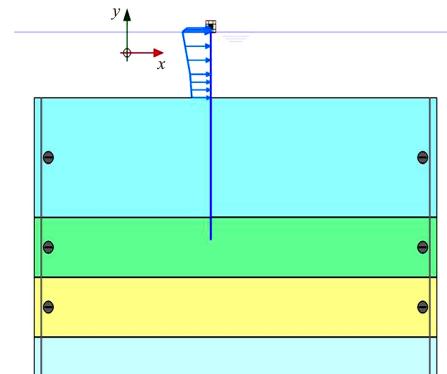


图 5 板桩顶部固接约束 PLAXIS 2D 建模

在 SAP2000 中只建高桩结构, 即桩基和上部纵横梁, 将 PLAXIS 2D 模型中计算得到的板桩顶部反力作为外荷载加入到模型中求解, 计算模型见图 6。

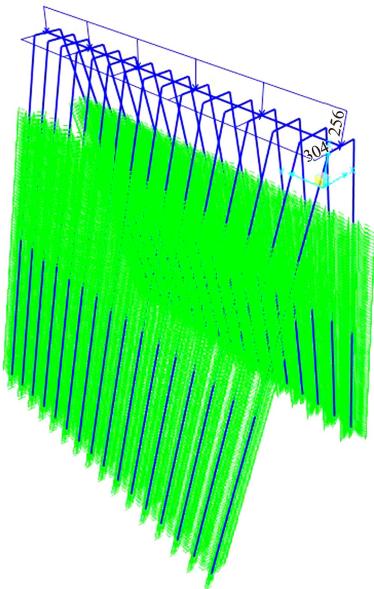


图 6 桩基和上部纵横梁三维视图 SAP2000 建模  
(单位: kN/m)

#### 2.4.3 方法 3

方法 3 采用 SAP2000 和 PLAXIS 2D 软件分别建模联合求解, 即采用 PLAXIS 2D 模拟板桩结构部分, 采用 SAP2000 模拟高桩结构部分。但是与方法 2 不同之处在于: 1) 在 SAP2000 的高桩模型中板桩顶部与高桩结构的连接点处施加线性增加的水平荷载, 通过计算得到每个水平荷载作用下的结构水平位移, 然后根据水平力与位移曲线确定该高桩结构的水平向刚度。2) PLAXIS 2D 板桩模型中, 在板桩顶部与高桩结构的连接处采用线性弹簧单元取代方法 2 的固接来模拟高桩对板桩结构的水平向约束, 线性弹簧刚度采用 SAP2000 模型计算确定的刚度, 计算模型见图 7。3) 在 PLAXIS 2D 模型中施加作用于板桩结构上的荷载, 求解得出板桩结构内力, 以及顶部弹簧约束反力。4) 将弹簧约束反力作为外荷载施加到 SAP2000 高

桩模型中, 求解得出高桩结构内力。

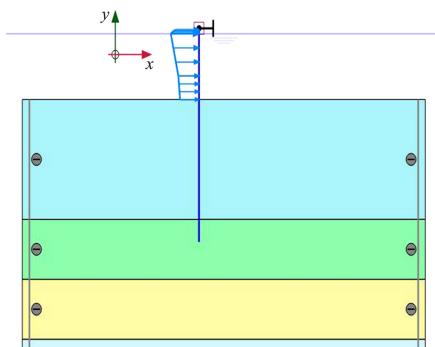


图 7 板桩顶部加水平向弹簧 PLAXIS 2D 建模

#### 2.4.4 方法 4

直接采用土工计算软件 PLAXIS 3D 对该高桩+板桩复合式结构进行模拟, 其中 1) 采用 Embedded 桩单元模拟管桩, 采用梁单元模拟横、纵梁, 采用板单元模拟板桩; 2) 土体采用摩尔-库仑本构模型; 3) 将波浪力作为面荷载作用在板单元上, 计算模型见图 8。

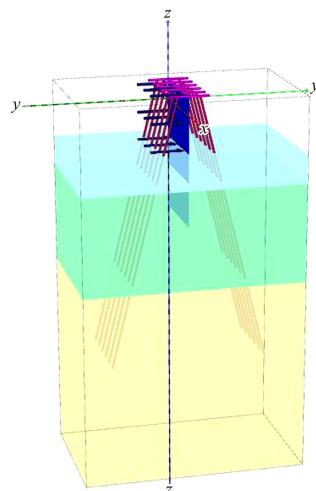


图 8 高桩+板桩复合式结构 PLAXIS 3D 建模

### 3 结构内力结果分析

通过方法 1 模型计算得到的管桩最大弯矩 1 665 kN·m, 板桩最大弯矩 616 kN·m/m, 结构的最大位移 60.0 mm, SAP2000 软件模拟结果见图 9、10。

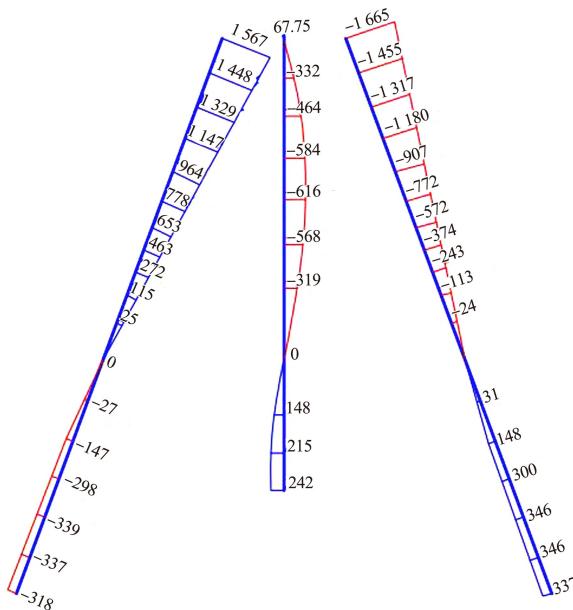


图 9 SAP2000 管桩和板桩弯矩 (单位: kN·m)

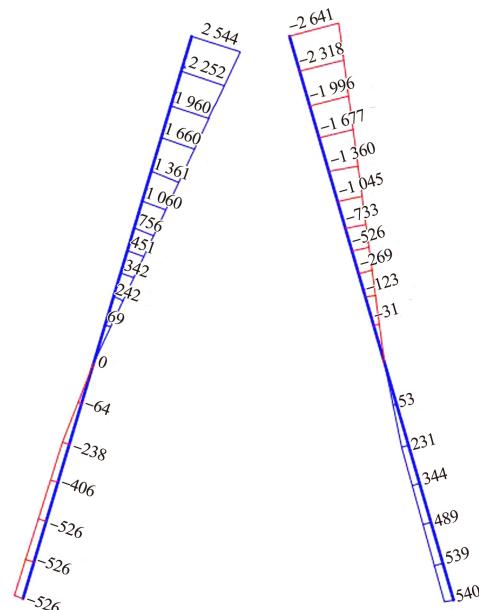


图 12 SAP2000 高桩弯矩 (单位: kN·m)

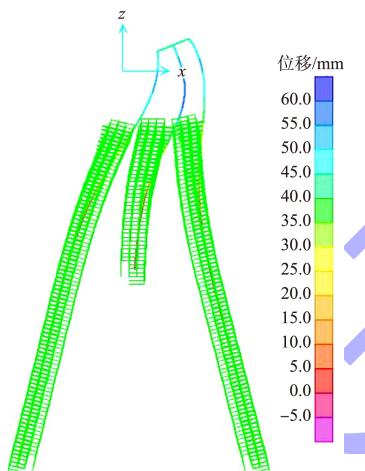


图 10 SAP2000 杆件位移

通过方法 2 模型计算得到板桩最大弯矩 871 kN·m/m, 管桩最大弯矩 2 641 kN·m, 结构的最大位移 84.5 mm, PLAXIS 2D 和 SAP2000 软件模拟结果见图 11~13。

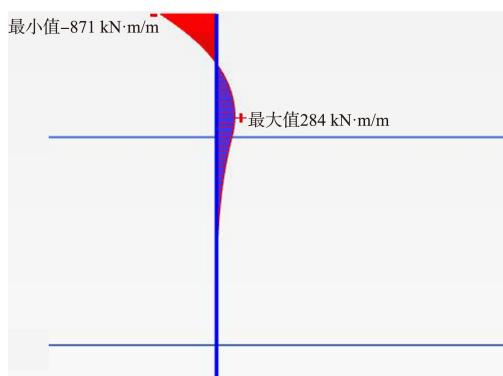


图 11 PLAXIS 2D 板桩弯矩

通过方法 3 模型计算得到板桩最大弯矩 439 kN·m/m, 管桩最大弯矩 1 998 kN·m, 结构的最大位移 65.0 mm, PLAXIS 2D 和 SAP2000 软件模拟结果见图 14~16。

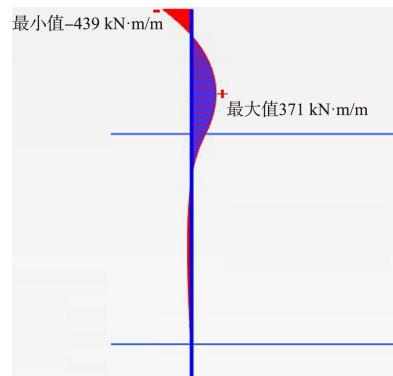


图 14 PLAXIS 2D 板桩弯矩

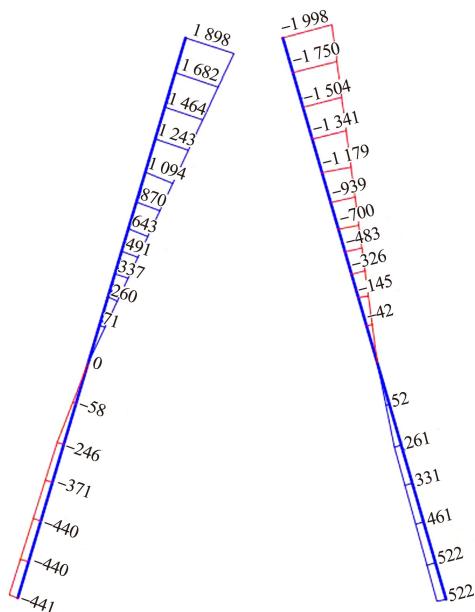


图 15 SAP2000 高桩弯矩 (单位: kN·m)

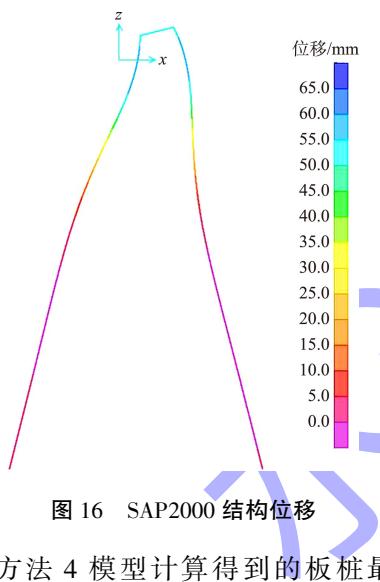


图 16 SAP2000 结构位移

通过方法 4 模型计算得到的板桩最大弯矩 482 kN·m/m, 管桩最大弯矩 1 959 kN·m, 结构的最大位移 68.0 mm, PLAXIS 3D 软件模拟结果见图 17~19。

4 种不同方法的计算模型得到的结构弯矩、轴力、剪力及位移计算结果见表 3。

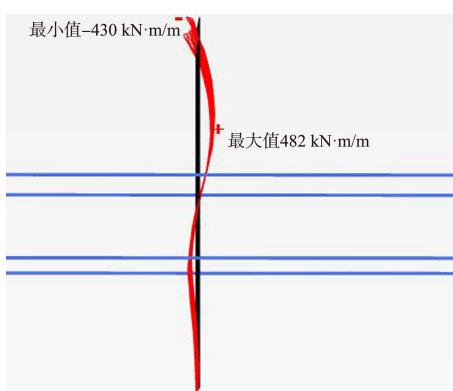


图 17 PLAXIS 3D 板桩弯矩

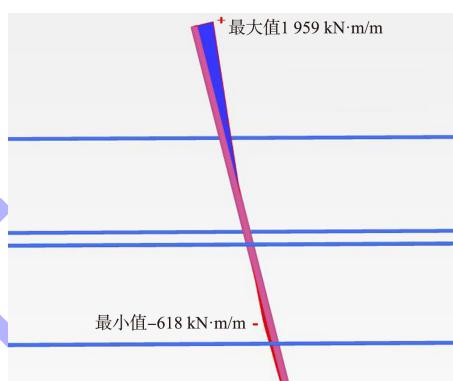


图 18 PLAXIS 3D 管桩弯矩

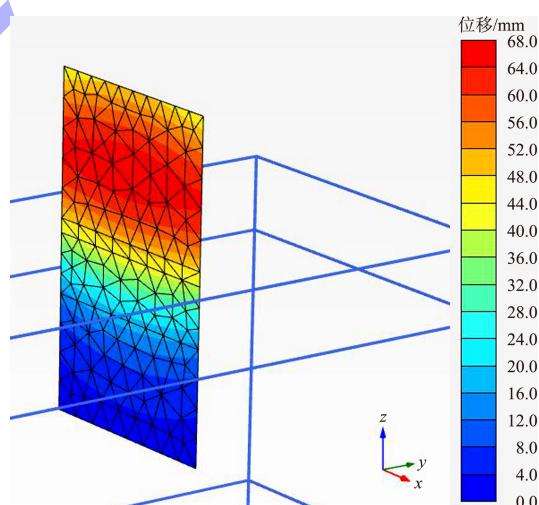


图 19 PLAXIS 3D 板桩位移

表 3 不同方法的计算结果对比

方法	钢管桩			板桩			水平位移/mm
	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m·m <sup>-1</sup> )	轴力/(kN·m <sup>-1</sup> )	剪力/(kN·m <sup>-1</sup> )	
方法 1	1 665(-15%)	1 412(5%)	148(-16%)	616(27%)	140(32%)	244(-3%)	60.0(-12%)
方法 2	2 641(35%)	1 692(26%)	238(34%)	871(80%)	256(141%)	304(21%)	84.5(24%)
方法 3	1 998(2%)	1 266(-6%)	180(2%)	439(-9%)	86(-15%)	256(2%)	65.0(-4%)
方法 4	1 959	1 344	177	483	101	251	68.0

注: 括号内数字为各方法与方法 4 计算结果的偏差值。

#### 4 计算结果分析

根据以上不同方法的计算结果可知:

1) 钢管桩内力: 方法 1 得到的高桩结构的桩基内力最小, 而方法 2 得到的最大, 方法 3 和 4 计算结果相当, 均介于方法 1 和 2 之间。

2) 板桩内力: 方法 2 计算得到的板桩结构内力最大, 方法 1 次之, 方法 3 和方法 4 计算结果相当, 且都小于方法 1 和方法 2。

3) 结构水平位移: 方法 2 计算得到的结构水平位移最大, 方法 1、3 和 4 计算结果相当且均小于方法 2。

方法 4 采用 PLAXIS 3D 计算软件, 其计算模型既考虑复合式结构的三维空间特性, 又比较准确地模拟了结构和土体的相互作用, 因此其计算结果跟实际情况较为吻合。而方法 3 计算结果无论是钢管桩内力、板桩内力及结构水平位移, 均与方法 4 相当, 说明采用方法 3 也可获得较为准确的内力结果。

方法 2 钢管桩内力、板桩内力及结构水平位移均最大, 主要是因为采用 PLAXIS 2D 模型模拟板桩结构时, 其板桩顶部采用固接约束忽略了高桩结构的变形, 导致板桩刚度比实际情况偏大, 得到比实际偏大的板桩内力和板桩顶约束反力。该约束反力又作为外部荷载施加到 SAP2000 的高桩模型中, 导致高桩结构的内力和位移比实际情况大。

方法 1 钢管桩结构内力比实际偏小, 板桩结构内力比实际偏大, 主要是因为采用  $p-y$  曲线法模拟土体与板桩结构的相互作用时, 未考虑群桩效应, 高估了土体对板桩的支撑作用。高估的板桩刚度导致结构内力比实际偏大, 过高的板桩刚度分担了较多的荷载, 因此导致高桩结构的内力比实际偏小。

综上, 采用方法 1 和 2 均未得到较为准确的内力计算结果, 而方法 3 的计算结果跟实际较为吻合, 在缺少 PLAXIS 3D 软件等手段的情况下,

可采用方法 3 的简化方法进行确定高桩+板桩复合结构的内力。

#### 5 结论

1) 采用 PLAXIS 3D 计算高桩+板桩复合式结构, 既考虑了该复合式结构的三维空间特性, 又较为准确地模拟了结构和土体的相互作用, 因此计算结果跟实际情况相吻合。

2) 采用 SAP2000 的分析模型, 其采用  $p-y$  曲线法模拟土体与板桩结构的相互作用, 未考虑群桩效应, 高估了土体对板桩的支撑作用, 从而导致板桩内力偏大, 管桩的内力偏小。

3) 采用 PLAXIS 2D 模拟板桩而 SAP2000 模拟高桩结构, 并将二者迭代计算, 得到与实际情况较为吻合的计算结果。但需注意的是, 板桩与上部结构连接时应考虑高桩结构的刚度, 否则将导致计算结果偏差较大。

#### 参考文献:

- [1] 彭志豪, 陈海燕, 周海芳. 一种带防浪板的桩基式防波堤结构[J]. 水运工程, 2016(3): 62-65.
- [2] 杨小龙, 刘庄. 国内外常用规范中的  $p-y$  曲线法对比[J]. 港湾建设, 2017(2): 17-21.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [4] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2008.
- [5] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms [S]. Washington: API Publishing Services, 2014.
- [6] TOMLINSON M J, WOODWARD J. Pile design and construction practice [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 赵娟)