

桩、土、刚性承台相互作用下桩基内力计算新方法^{*}

刘祚秋^{1,2}, 温少荣^{1,2}, 周翠英^{1,2}, 富明慧¹

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275;
2. 中山大学地下工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275)

摘 要: 针对港口工程中广泛使用的桩基础在波浪力及荷载作用下与高桩刚性承台和土共同工作的问题, 提出较为有效、合理的计算方法。首先以杆系有限元方法为基础, 将承台模拟成一根竖直刚性梁, 将桩基模拟成线弹性梁, 以承台与桩基相连的节点作为主节点, 桩基与承台相连的节点为从节点, 推导出了刚性承台和桩基的单元刚度方程; 其次, 桩基与土的相互作用按弹性桩的线性地基反力假设法中的 m 法计算, 推导出了桩土相互作用下桩基单元刚度方程; 最后, 将波浪力等效成相应桩基单元上的节点荷载, 并编写相应的有限元程序 (FEPPRC)。算例表明: 所提出的在波浪力及其他荷载共同作用下考虑桩土相互作用的刚性承台桩基内力计算新方法是可靠的。

关键词: 刚性承台; 桩基内力; 桩、土相互作用; 波浪力; 有限元

中图分类号: TU31 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 04-0033-05

在港口工程和桥梁工程设计中, 刚性承台—桩基础被广泛应用^[1,2]。桩基设计是整个结构设计的重要组成部分, 其中, 合理、准确的承台桩基内力计算显得越来越重要。

目前, 承台桩基内力计算的有限元方法中, 普遍用梁模拟桩基。对承台的模拟方法主要有三种^[3]: ①用薄板模拟承台; ②将承台简化为实体元; ③将承台简化成若干个板带, 用梁单元代替。桩基的梁单元节点具有 6 个自由度, 而薄板单元不具有绕承台法向转角方向的自由度, 实体元仅具有 3 个自由度, 所以薄板单元和实体元都不能与桩基的梁单元直接协调, 存在自由度的耦合问题。对于采用横梁单元来模拟承台, 虽然不存在桩基梁单元的节点耦合的问题。但是, 空间承台中, 每根桩头节点都需要 4 根横梁单元来相连。这带来了承台梁单元划分的困难。

考虑桩、土、承台的相互作用, 本文将刚性承台模拟成一根竖直刚性梁, 将桩基划分为线弹性梁单元, 每个单元节点都具有 6 个自由度, 则承台与桩基不存在自由度耦合问题。用 m 法描述桩、土的相互作用, 采用海港水文规范^[4]的规定来确定波浪力和桩基的相互作用。从而推导出了高桩刚性承台桩基内力计算公式, 通过 FORTRAN 语言编写了有限元程序, 并结合某港口工程中的高桩靠船墩桩

基内力计算和某水域中高桩承台的桩基内力计算, 表明了此方法的简便和准确性。

1 原理及假设

实际的高桩刚性承台的变形非常小, 通常可以忽略不计, 所以可以将刚性承台假设成一根位于承台中心位置的竖直的刚性梁, 其抗拉和抗弯刚度应为无穷大。事实上, 承台的刚性都是相对桩基而言的, 本文主要采用桩的弹性刚度这一因素来保证承台的刚性, 且为避免整个结构方程组出现病态而导致解不稳定, 取承台刚性梁的抗拉和抗弯刚度为所有桩中最大的抗拉和抗弯刚度的 10^4 倍。

波浪对桩基作用假设前提: ①桩与波浪不发生如绕射、反射等相互作用; ②桩在该波反复作用下不发生破坏性的共振。波浪力的作用点都等效到相应的梁单元节点上。

本文采用有限元法分析刚性承台桩基组成的空间结构时, 只考虑承台与桩刚接的情况, 将承台与桩基相连的节点作为主节点, 桩基与承台相连的节点为从节点, 各单元通过节点互相连接; 在单元分析时采用单元坐标系, 而在结构整体分析集成整体刚度矩阵时, 则采用统一的整体坐标系; 最后求解包含单元节点位移的线性方程组, 由节点位移通过单元刚度矩阵求出单元内力。

* 收稿日期: 2004-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59809008, 19902022), 广东省自然科学基金重点资助项目 (03188), 广东省自然科学基金资助项目 (031552), 广东省科技攻关十五重大专项资助项目 (2001B30903)

作者简介: 刘祚秋 (1965 年生), 男, 讲师, 在职博士研究生; 通讯联系人: 周翠英; E-mail: eeszy@zsu.edu.cn

2 刚性承台和桩基的单元刚度方程

2.1 承台刚度方程

设一整体坐标系 $oxyz$, 该坐标系符合右手螺旋法则, y 轴竖直向上, 坐标系的原点 o 位于承台底面 (如图 1)。节点 3、4 是将承台看作刚性梁时的两个端点, 分别位于承台的底部和顶部。

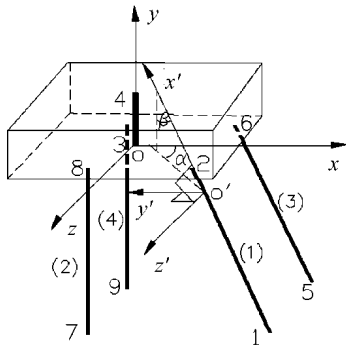


图 1 刚性承台桩基结构布置

Fig. 1 Structural layout of rigid cap and pile

作用在承台上的外荷载都向刚性梁上的节点等效简化。刚性承台梁的每个节点都具有 6 个自由度, 即

$$F = (F_x \ F_y \ F_z)^T, M = (M_x \ M_y \ M_z)^T \quad (1)$$

$$U = (U_x \ U_y \ U_z)^T, \theta = (\theta_x \ \theta_y \ \theta_z)^T \quad (2)$$

则, 在整体坐标下承台刚度方程为

$$\begin{pmatrix} F_3 \\ M_3 \\ F_4 \\ M_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_3 \\ \theta_3 \\ U_4 \\ \theta_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, 分块子矩阵 $g_{ml} (m, l = 1, 2, 3, 4)$ 的具体表达式见文献 [5]。

2.2 整体坐标系下地面以上且不与刚性承台相连的桩基单元刚度方程

设局部坐标系 $o'x'y'z'$, 该坐标系符合右手螺旋法则, $o'x'$ 沿桩身轴向, 节点 2、6、8 等为桩顶与承台刚接点, (1)、(2)、(3)、(4) 等为与承台相接的桩的单元号, β_i 为桩的轴线与 y 轴的夹角, α_i 为桩的轴线的水平投影与 x 轴的夹角 (如图 1)。局部坐标系下, 桩基单元的刚度方程为

$$\begin{pmatrix} F'_{ji} \\ M'_{ji} \\ F'_{si} \\ M'_{si} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U'_{ji} \\ \theta'_{ji} \\ U'_{si} \\ \theta'_{si} \end{pmatrix} = [K] \begin{pmatrix} U'_{ji} & \theta'_{ji} & U'_{si} & \theta'_{si} \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

下标中, s, j 代表节点号, i 代表桩基单元号, 分

块子矩阵 $k_{ml} (m, l = 1, 2, 3, 4)$ 的具体表达式详见文 [5]。

设桩基单元 i 在整体坐标系下的位移为 $(U_{ji} \ \theta_{ji} \ U_{si} \ \theta_{si})^T$, 在局部坐标系下的位移为 $(U'_{ji} \ \theta'_{ji} \ U'_{si} \ \theta'_{si})^T$, 则:

$$\begin{pmatrix} U'_{ji} \\ \theta'_{ji} \\ U'_{si} \\ \theta'_{si} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{ji} \\ \theta_{ji} \\ U_{si} \\ \theta_{si} \end{pmatrix} = [B] \begin{pmatrix} U_{ji} & \theta_{ji} & U_{si} & \theta_{si} \end{pmatrix}^T \quad (5)$$

其中:

$$[b_i] = \begin{pmatrix} -\cos \alpha_i \sin \beta_i & \cos \beta_i & -\sin \alpha_i \sin \beta_i \\ -\cos \alpha_i \cos \beta_i & \sin \beta_i & -\sin \alpha_i \cos \beta_i \\ -\sin \alpha_i & 0 & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

同样, $(F'_{ji} \ M'_{ji} \ F'_{si} \ M'_{si})^T$ 为桩基单元 i 在局部坐标系下的节点力, 桩基单元 i 在整体坐标系下的节点力为 $(F_{ji} \ M_{ji} \ F_{si} \ M_{si})^T$, 则

$$\begin{pmatrix} F_{ji} \\ M_{ji} \\ F_{si} \\ M_{si} \end{pmatrix} = [B]^T \begin{pmatrix} F'_{ji} \\ M'_{ji} \\ F'_{si} \\ M'_{si} \end{pmatrix} \quad (7)$$

则, 整体坐标系下地面以上且不与刚性承台相连的桩基单元刚度方程为

$$\begin{pmatrix} F_{ji} \\ M_{ji} \\ F_{si} \\ M_{si} \end{pmatrix} = [B]^T [K] [B] \begin{pmatrix} U_{ji} \\ \theta_{ji} \\ U_{si} \\ \theta_{si} \end{pmatrix}^T \quad (8)$$

2.3 整体坐标系下与刚性承台相连的桩基单元刚度方程

在整体坐标系下, 桩基与承台刚性梁相连的节点为从节点, 承台刚性梁与桩基相连的节点为主节点, 则从节点在整体坐标系下的位移和转角用主节点 3 在整体坐标系下的位移和转角表示如下:

$$\begin{pmatrix} U_{si} \\ \theta_{si} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & a_i \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_3 \\ \theta_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中, I 为单位矩阵,

$$[a_i] = \begin{pmatrix} 0 & Z_i & -Y_i \\ -Z_i & 0 & -X_i \\ Y_i & X_i & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

(X_i, Y_i, Z_i) 为桩单元 i 的桩顶节点在整体坐标系中的坐标值。

将桩基从节点 s 的节点力等效转换成主节点 3 的节点力, 则:

$$\begin{pmatrix} F_{ji} \\ M_{ji} \\ F_{si} \\ M_{si} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & a_i^T & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{ji} \\ M_{ji} \\ F_{si} \\ M_{si} \end{pmatrix} =$$

$$[A]^T \begin{pmatrix} F_{ji} & M_{ji} & F_{si} & M_{si} \end{pmatrix}^T \quad (11)$$

因此，与刚性承台相连的桩基单元在整体坐标系下以主节点位移及节点力所表示的单元刚度方程为

$$\begin{pmatrix} F_{ji} & M_{ji} & F_{3i} & M_{3i} \end{pmatrix}^T = [A]^T [B]^T [K] [B] [A] \begin{pmatrix} U_{ji} & \theta_{ji} & U_3 & \theta_3 \end{pmatrix}^T \quad (12)$$

3 桩、土相互作用模型

假定地基反力系数在地面处为零，地面以下按比例增加，则地面以下沿桩各点的地基反力为 $p = myb_0 x$ ，其中， m 为地基系数，随地基土的类别而变， b_0 为等效桩宽， y 为点到地面距离。如图 2 所示，将桩周土地基反力等效成弹簧，地面以下桩基单元长度为，仅在桩基单元节点上设置弹簧，作用在节点上的弹簧刚度系数可采用节点力等效的方法进行计算，所以节点 s 上的弹簧刚度系数为 $k_{Ts} = m(2y_s + y_j)b_0 l/6$ ，节点 j 上的弹簧刚度系数 $k_{Tj} = m(2y_j + y_s)b_0 l/6$ 。其中 y_s, y_j 分别是节点 s, j 距离地面的距离。设空间局部坐标系下的节点弹簧刚度系数矩阵 k_{T33}, k_{T11} 为

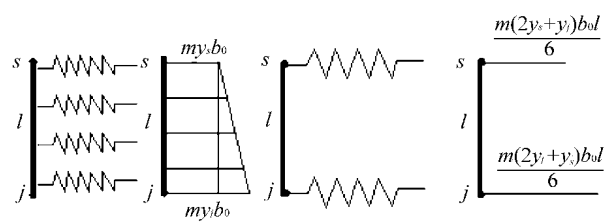


图 2 桩土相互作用示意图
Fig. 2 Interaction between pile and soil

$$K_{T33} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{Ts} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Tj} \end{pmatrix}; K_{T11} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{Tj} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Ts} \end{pmatrix} \quad (13)$$

则考虑桩、土相互作用时，地面以下桩基梁单元在局部坐标系下的刚度方程为

$$\begin{pmatrix} F'_{ji} & M'_{ji} & F'_{si} & M'_{si} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} K_{11} + K_{T11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} + K_{T33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U'_{ji} \\ \theta'_{ji} \\ U'_{si} \\ \theta'_{si} \end{pmatrix} \quad (14)$$

采用与 (8) 式相同的变换，可得地面以下桩基梁单元在整体坐标系下的刚度方程。参照文 [5] 的方法，把所有单元刚度矩阵集成为整体刚度矩阵。

4 桩基与波浪力相互作用模型

作用在地面以上桩基梁单元上的波浪力 P 和力矩 M 的大小按海港水文规范确定^[4]：

$$P = \begin{cases} nkP_{l\max} & P_{D\max} \leq 0.5P_{l\max} \\ nkP_{D\max} \left(1 + 0.25 \frac{P_{l\max}^2}{P_{D\max}^2} \right) & P_{D\max} > 0.5P_{l\max} \end{cases} \quad (15)$$

$$M = \begin{cases} nkM_{l\max} & M_{D\max} \leq 0.5P_{l\max} \\ nkP_{D\max} \left(1 + 0.25 \frac{M_{l\max}^2}{M_{D\max}^2} \right) & P_{D\max} > 0.5P_{l\max} \end{cases} \quad (16)$$

其中， k 为群桩系数， n 为桩基建筑物所在地区有附着生物存在时，由于糙率和柱体直径增加的影响系数。 $P_{D\max}, P_{l\max}, M_{D\max}, M_{l\max}$ 的确定参考海港水文规范^[4]。

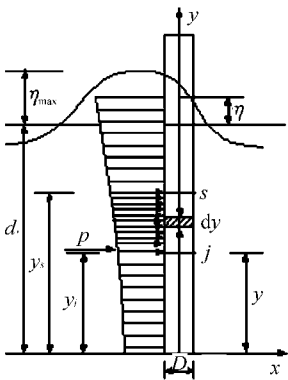


图 3 波浪力对桩的作用
Fig. 3 Pile under wave loads

如图 3 所示， d 为水深， y_j, y_s 为节点 j, s 距离水底面的高度， t 为波浪力 P 与 x 轴的夹角， s, j 是梁单元的两个节点，将作用在梁单元上的波浪力和力矩都等效到梁单元的节点 j ，则

$$\begin{aligned} F_j &= \begin{pmatrix} F_{ji} & F_{ji} & F_{ji} \end{pmatrix}^T, \\ M_j &= \begin{pmatrix} M_{ji} & M_{ji} & M_{ji} \end{pmatrix}^T \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} F_{ji} &= P \cos t, F_{ji} = 0, F_{ji} = P \sin t, \\ M_{ji} &= -M \sin t, M_{ji} = 0, M_{ji} = -M \cos t \end{aligned} \quad (18)$$

5 算例

在以上原理和推导的公式基础上，作者采用 FORTRAN 语言编写了相应的有限元程序。用程序分析了以下两个算例，并分别与北京大学的 SAP84 结构分析软件 (教育版)^[6] 计算结果及规范^[4,7] 给出的计算方法所得结果进行了对比。

算例 1 某靠船墩桩基布置如图 4 所示 (俯视图)，其桩的位置坐标如表 1 所示。

几何尺寸：10.00(长)，10.00(宽)，1.20(高)；墩台的力学属性取为： $EA = 6.682499 \times 10^{11}$ ， $GI_p = 8.120467 \times 10^9$ ， $EI_y = 1.127672 \times 10^{10}$ ， $EL = 1.127672 \times 10^{10}$ 。桩基截面均为正方形截面，边长为 0.45 m，弹模 $E = 3.300 \times 10^7$ kPa，剪切弹模 $G = 1.415 \times 10^7$ kPa，所有桩底均为固定端约束。

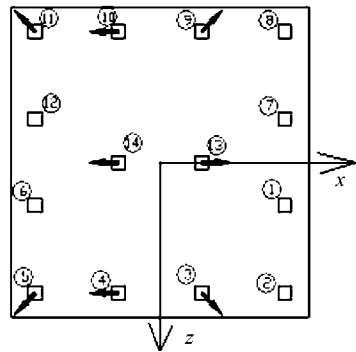


图 4 某靠船墩桩基布置图
Fig 4 Layout of fender piles

墩台底部中心承受的荷载： $F_x=-350\text{ kN}$ ， $F_y=-3970\text{ kN}$ ， $F_z=235.2\text{ kN}$ ， $M_x=-1239.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ ， $M_y=2275\text{ kN}\cdot\text{m}$ ， $M_z=-2235.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

首先，用本文作者编制的刚性承台桩基内力计算有限元程序（FEPPRC）分析此靠船墩的桩基内力。其次，采用北京大学力学系的 SAP84 结构分析软件（教育版）进行计算，其中，承台单元为带旋转自由度的三维实体非协调单元，桩基单元为三维梁单元，其桩基内力计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知：刚性承台桩基内力计算有限元程序（FEPPRC）计算结果与 SAP84 结构分析软件（教育版）计算结果相当吻合。说明了刚性承台桩基有限元程序计算结果是可靠的。

算例 2 某水域波高 $H=3.33\text{ m}$ ，周期 $T=6.5\text{ s}$ ，波长 $L=65.2\text{ m}$ ，设计高水位 -3.5 m ，水深 $d=21.5\text{ m}$ ，波向流向与 x 轴平行，桩全长 60 m ，在泥面以上桩长 25 m ，如图 5 所示。

水的重度 $r=1.03\text{ t/m}^3$ ， $g=9.8\text{ m/s}^2$ ， $C_d=1.2$ ， $C_m=2.0$ ，承台长 8 m ，宽 8 m ，高 5 m ，采用 4 根设计直径为 1 m 的钢筋混凝土桩，桩侧地基的比例系数 $m=12\,000\text{ kPa/m}^3$ 。桩身受压弹性模量 $E_k=29\times 10^6\text{ kPa}$ ，桩身惯性矩（按设计桩径 1 m 考虑） $I=\pi/64$ ，作用于承台底面坐标原点处的外荷载为： $V=2\,000\text{ kN}$ ； $M=1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ ； $H=400\text{ kN}$ 。

首先，用本文作者编制的刚性承台桩基内力计算有限元程序（FEPPRC）计算此高桩承台在波浪力及荷载作用下的桩基内力，结果如表 3 所示。

其次，按规范^[4]及文献 [7] 给出的方法分别计算波浪力和外荷载单独作用下的桩基内力，并将

表 1 各桩位置坐标
Tab 1 Coordinates of piles

桩号	桩顶坐标			桩底坐标			桩号	桩顶坐标			桩底坐标		
	x/m	y/m	z/m	x/m	y/m	z/m		x/m	y/m	z/m	x/m	y/m	z/m
1	4.2	0	1.4	4.2	-13	1.4	8	4.2	0	-4.2	4.2	-13	-4.2
2	4.2	0	4.2	4.2	-13	4.2	9	1.4	0	-4.2	3.6	-12.5	-6.4
3	1.4	0	4.2	3.6	-12.5	6.4	10	-1.4	0	-4.2	-4.2	-11.4	-4.2
4	-1.4	0	4.2	-4.2	-11.4	4.2	11	-4.2	0	-4.2	-6.1	-10.8	-6.1
5	-4.2	0	4.2	-6.1	-10.8	6.1	12	-4.2	0	-1.4	-4.2	-11.3	-1.4
6	-4.2	0	1.4	-4.2	-11.3	1.4	13	1.4	0	0	4.6	-12.9	0
7	4.2	0	-1.4	4.2	-13	-1.4	14	-1.4	0	0	-4.2	-11.4	0

表 2 FEPPRC 和 SAP84 结果比较

Tab 2 Results compare between FEPPRC and SAP84

桩号	N/kN		Q_y/kN		Q_z/kN		$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$		$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$		$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$	
	FEPPRC	SAP84	FEPPRC	SAP84	FEPPRC	SAP84	FEPPRC	SAP84	FEPPRC	SAP84	FEPPRC	SAP84
1	-381.190	-381.178	-0.233	-0.232	-1.673	-1.666	7.033	-7.076	10.761	10.717	2.087	2.083
2	-362.440	-362.350	1.709	1.704	-1.673	-1.666	7.033	-7.076	10.761	10.717	-10.534	-10.499
3	-577.270	-577.413	2.442	2.434	-0.642	-0.639	6.961	-7.004	5.743	5.721	-16.847	-16.798
4	258.700	258.929	2.368	2.359	4.373	4.358	7.559	-7.606	-28.338	-28.252	-13.217	-13.162
5	-443.660	-443.807	3.832	3.816	7.706	7.675	8.057	-8.107	-44.888	-44.717	-22.536	-22.443
6	-109.830	-109.734	-0.316	-0.301	6.312	6.288	8.091	-8.141	-35.793	-35.657	2.364	2.358
7	-399.940	-400.004	-2.174	-2.168	-1.673	-1.666	7.033	-7.076	10.761	10.717	14.708	14.665
8	-418.690	-418.828	-4.116	-4.104	-1.673	-1.666	7.033	-7.076	10.761	10.717	27.329	27.247
9	270.670	270.912	-4.990	-4.975	-0.577	-0.574	6.818	-6.861	5.324	5.303	34.423	34.323
10	-1112.400	-1112.709	-5.361	-5.341	4.373	4.358	7.559	-7.606	-28.338	-28.252	32.000	31.880
11	-109.360	-109.213	-7.448	-7.416	7.864	7.832	7.891	-7.940	-45.767	-45.591	43.926	43.749
12	-131.400	-131.391	-3.258	-3.245	6.312	6.288	8.091	-8.141	-35.793	-35.657	19.069	18.993
13	-94.281	-94.217	-1.184	-1.180	-0.794	-0.790	6.688	-6.730	7.489	7.465	8.432	8.410
14	-426.840	-426.893	-1.497	-1.491	4.373	4.358	7.559	-7.606	-28.338	-28.252	9.392	9.359

计算结果叠加,即为波浪力和荷载共同作用下的桩基内力(表 3)。

由表 3 结果可知本文的程序可方便地计算出高桩承台在波浪力和其他外荷载共同作用下的桩基内力,且结果可靠。

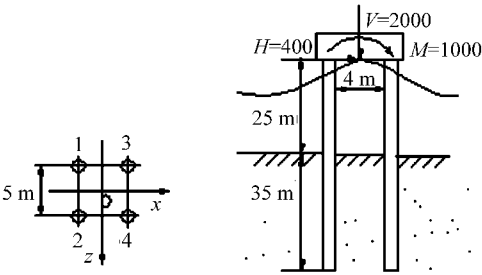


图 5 结构布置图
Fig. 5 Structure layout

表 3 FEPPRC 和规范结果比较

Tah 3 Results compare between FEPPRC and code

桩号	N/kN		Q_y /kN		Q_z /kN	
	规范	FEPPRC	规范	FEPPRC	规范	FEPPRC
1	171	207	117	104	0	0
2	171	207	117	104	0	0
3	-1171	-1207	117	96	0	0
4	-1171	-1207	117	96	0	0

桩号	M_y /(kN·m)		M_x /(kN·m)		M_z /(kN·m)	
	规范	FEPPRC	规范	FEPPRC	规范	FEPPRC
1	0	0	0	0	-1529	-1539
2	0	0	0	0	-1529	-1539
3	0	0	0	0	-1529	-1496
4	0	0	0	0	-1529	-1496

6 结 论

(1) 将刚性承台模拟成一根竖直刚性梁,无需在有限元计算时要考虑承台单元与桩基梁单元的自由度耦合问题,更不需要对承台划分单元,能节省内存,减少工作量,计算方便、快捷。

(2) 通过对两个工程算例的计算表明:将承台模拟成一根竖直刚性梁,将桩基模拟成线弹性梁,以承台与桩基相连的节点作为主节点,桩基与承台相连的节点为从节点的计算方法是正确的、合理的、可靠的,也进一步验证了刚性承台桩基内力计算有限元程序(FEPPRC)的可靠性。

(3) 将桩—土—承台作为整体,考虑了桩与承台的相互作用、桩与土的相互作用、桩与波浪力的相互作用,更符合实际结构的受力状态,计算的结果更准确、合理。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通部行业标准. 公路桥涵设计通用规范(JTJ021-89)[S]. 北京:人民交通出版社,1990.
[2] 中华人民共和国交通部行业标准. 高桩码头设计与施工规范(JTJ291-98)[S]. 北京:人民交通出版社,1998.
[3] 李元音,毕梦雄. 关于承台强度几种计算方法的分析比较[J]. 港工技术,2002,6(2):15-17.
[4] 中华人民共和国交通部行业标准. 海港水文规范(JTJ213-98)[S]. 北京:人民交通出版社,1998.
[5] 匡文起,张玉良,辛克贵. 结构矩阵分析和程序设计[M]. 北京:高等教育出版社,1989.
[6] 袁明武. SAP84 结构分析通用程序使用手册[EB/OL]. <http://www.sap84.mech.pku.edu.cn>
[7] 交通部第一航务工程勘察设计院编. 海港工程设计手册(中)[M]. 北京:人民交通出版社,1994.

The New Computing Method of Internal Force of Piles Under the Interaction of Piles, Soils and Rigid Cap

LIU Zuo qiu^{1,2}, WEN Shao rong^{1,2}, ZHOU Cui ying^{1,2}, FU Ming hui¹

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
(2. Research Centre of Underground Engineering and Information Technology, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: An efficient computing method is brought forward to resolve the interaction work of piles, soils and rigid cap. Firstly, the computing method is based on FEM of bar with the rigid cap as an erect rigidity bar and a pile as a linear elastic beam. Then, the node of the rigid cap connected with a pile is act as main node, while the node of pile connected with rigid cap is act as subordinate node. The stiffness equation of rigid cap and pile groups is deduced from the above supposition. Secondly, with using the design of pile foundation by M method, the stiffness equation of pile under the interaction of piles and soils is derived. Finally, wave force is equivalent to the panel load on the corresponding element of piles. Based on the stiffness equations, the finite element program is obtained through the language of FORTRAN. Examples show that this computing method is reliable and reasonable.

Key words: rigid cap; internal force of pile; interaction between piles and soils; wave force; FEM