

海洋平台动力分析的一个简化方法

田 千 里 刘 玉 标

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文提供了一个分析结构——基础耦合响应的简化方法。用SAPV计算上部固端悬臂结构后,将它变换为一个随频率变化的等价刚性质量,使问题简化为位于柔性基础上的刚体振动问题。用本法计算了一个简化的平台模型的随机响应。

一、引 言

在土木工程领域,结构与基础的耦合分析十分重要,基础承受上部结构传来的外载与惯性载荷,后者又取决于系统的变形,因此二者互相依赖,必须作耦合分析。对于海洋平台来说还有波浪载荷,情况更加复杂。一座平台从方案研究到定型设计,到安装后的校核,须要进行多次耦合分析。在此过程中随着实践与认识的深化,结构与基础性能参数也不断受到修改,如果每一次参数修改都要对结构——基础系统作一次完整的重分析,其计算量将很可观。通常处理结构基础耦合问题多采用固端模态综合法[1],当基础具有大阻尼或非线性时,变换后的动力方程不能去耦,求解起来还是麻烦。文献[2]还曾指出,对于应力响应计算,如果只取少数模态会导致较大误差,因此还应进一步寻求更为简便的方法。本文在前文[3]的基础上提出一个简化算法,在分析结构—地基时选取基础的平移与转动作为基本独立变量,在求得上部固端结构根部之内力后将上部结构折算成一个等价的随频率变化的刚体,使问题简化为座于柔性基础上的刚体振动问题。

二、平台的随机动力响应分析

将结构与桩基沿接合面切开,设接合面为一刚性平面,对于重力式平台,这一假设是符

本文 1983 年 11 月 7 日收到

合实际情况的,对于桩基导管架平台,文献[4]指出,对于土质较硬的情况,也可以采用这一假设.根据具有16根桩的实际平台的静力计算结果[5].也表明了这个假设是可行的,如果此刚性平面之质量为 m_0 , 惯性矩为 I_0 , 则系统之运动方程式有如下形式:

$$\underline{M}\ddot{\underline{x}} + \underline{C}\dot{\underline{x}} + \underline{K}\underline{x} = \underline{F}(t) \quad (1)$$

$$Q_0 + m_0\ddot{y} + Q_b = 0 \quad (2)$$

$$M_0 + I_0\ddot{\theta} + M_b = 0 \quad (3)$$

结构之计算模型简化图如图 1. (1)式为上部结构之运动方程, $\dot{\underline{x}}$ 为绝对加速度矢量, 其中第 j 个元素为:

$$\dot{\underline{x}}_j = \dot{\underline{x}}_j + \dot{y} + h_j\dot{\theta} \quad (4)$$

y, θ 分别为结构底面之刚体平移与转角, “..”代表对时间的二次导数, $\underline{F}^{(t)}$ 为流载体荷矢量. 下标“-”代表矩阵, 下标“~”代表矢量, Q_b, M_b 为结构—基础接合面的水平切力及倾覆力矩, 它们与地基变形之关系为:

$$\begin{Bmatrix} Q_b(t) \\ M_b(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{yy}^* & k_{y\theta}^* \\ k_{\theta y}^* & k_{\theta\theta}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (5)$$

由互易原理知 $k_{y\theta}^* = k_{\theta y}^*$, 它们与 $k_{yy}^*, k_{\theta\theta}^*$ 分别代表地基的水平—转动耦合、水平、与转动的动刚度系数(阻抗函数). 对于桩基导管架平台, 如果已经通过: (1)解析法, 或 (2)有限元素法, 或 (3)弹性地基梁法求得了单桩顶端的刚度为:

$$\begin{Bmatrix} k_{zz}^{*(j)} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy}^{*(j)} & k_{y\theta}^{*(j)} \\ 0 & k_{\theta y}^{*(j)} & k_{\theta\theta}^{*(j)} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z_j \\ y_j \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{zj} \\ F_{yj} \\ M_{\theta j} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

根据桩冠顶部变形后仍保持为一刚性平面的假设, 如图 2 所示, 则有:

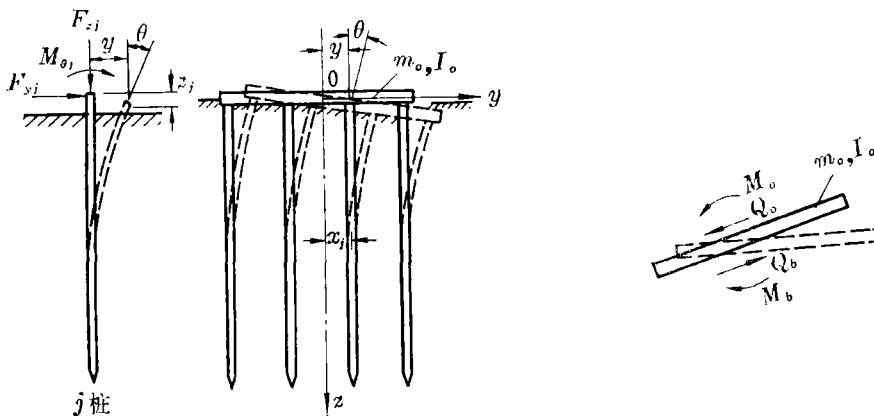


图 2

$y_i = y$ (j 桩顶之平移)

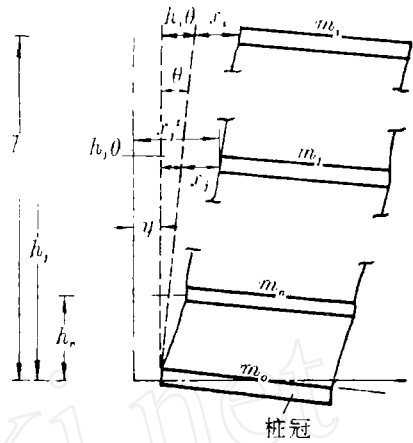


图 1

$$z_j = z + \theta x_j \quad (j \text{ 桩顶之垂直位移})$$

$$\bar{M}_{\theta j} = F_{z_j} x_j + M_{\theta j} = k_{z_j}^{(j)} (\theta x_j^2 + z x_j) + M_{\theta j} \quad (j \text{ 桩顶之弯矩})$$

$$M_b = \sum_{j=1}^n \bar{M}_{\theta j} = \sum_{j=1}^n k_{z_j}^{(j)} \theta x_j^2 + \sum_{j=1}^n M_{\theta j} \quad (\text{桩冠弯矩})$$

(6)式中 F_{z_j} , F_{y_j} , $M_{\theta j}$ 分别为第 j 根单桩顶端之轴向力,水平切力及弯矩, z_j , y_j , θ 分别为该组力与力矩作用下之轴向,水平位移及转角, $k_{z_j}^{(j)}$, $k_{y_j}^{(j)}$, $k_{\theta}^{(j)}$, $k_{z\theta}^{(j)}$ 分别为桩顶之轴向、水平、转动及水平—转动耦合刚度系数,当考虑土壤及辐射阻尼时,它们都是复数,代表使桩顶在该方向产生单位变形时所需施加的力或力矩。由单桩桩顶刚度可以求得桩群冠部刚度阵[6]为

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n k_{z_j}^{(j)} & \sum_{j=1}^n k_{z\theta}^{(j)} \\ \sum_{j=1}^n k_{z\theta}^{(j)} & \sum_{j=1}^n k_{\theta}^{(j)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_b \\ M_b \end{Bmatrix} \quad (7)$$

令

$$\sum_{j=1}^n k_{z_j}^{(j)} = k_{z_z}^*, \quad \sum_{j=1}^n k_{z\theta}^{(j)} = k_{z\theta}^*$$

$$\sum_{j=1}^n k_{\theta}^{(j)} = k_{\theta\theta}^*, \quad \sum_{j=1}^n k_{z\theta}^{(j)} x_j^2 + \sum_{j=1}^n k_{z\theta}^{(j)} = k_{z\theta}^*$$

便可得到(5)式。

对于重力式平台 $k_{z_z}^*$, $k_{z\theta}^*$, $k_{\theta\theta}^*$ 等复刚度系数可由刚印在弹性半空间上振荡之解析解确定[7]

(2)(3)两式分别为基础刚性平面之水平与转动运动方程(见图2), Q_0 为上部结构之根部切力:

$$Q_0 = -I^T \{ \underline{C} \dot{\underline{x}} + \underline{K} \underline{x} \} = I^T \{ \underline{M} \ddot{\underline{x}} - \underline{F} \} \quad (8)$$

M_0 为上部结构根部之倾覆力矩:

$$M_0 = -h^T \{ \underline{C} \dot{\underline{x}} + \underline{K} \underline{x} \} = h^T \{ \underline{M} \ddot{\underline{x}} - \underline{F} \} \quad (9)$$

式中

$$I^T = \{1, 1, \dots, 1\}, h^T = \{h_1, h_2, \dots, h_n\} \quad (10)$$

因为这里采用线性谱分析,所以用线性波理论及 Morison 公式计算流体载荷。(1)式中 \underline{M} 已包括了流体附加质量, \underline{C} 中已包括了线性化处理后的流体附加阻尼。文献[1][6]中对此都有论述,这里只作简单说明如下。首先用 Airy 波理论计算水质点速度与加速度,设向右进行波的断面为:

$$\eta(x, t) = \frac{A}{2} \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

k 为波数, A 为波高

海平面下深度 z_j 处的水质点速度为:

$$\dot{u}_j = \omega \frac{A}{2} G_j(\omega) \cos(kx_j - \omega t) \quad (12)$$

定义 $S_{\eta\eta}(\omega_r)$ 为一前进波高谱在离散频率 ω_r 处之坐标,则随机波速可表为

$$\dot{u}_j = \sum_{r=1}^n \sqrt{2} \bar{S}_{\eta\eta}(\omega_r) \Delta\omega_r G_{rj} \cos(kx_j - \omega_r t + \psi_r) \quad (13)$$

ψ_r 为均匀分布于 $0 \sim 2\pi$ 区间内之随机相角

$$G r_j = \frac{\cos h^k r_j + H}{\sinh^k r_j} \quad (14)$$

H 为水深, $\omega_r^2 = gk \tanh^k r_j H$, g 为重力加速度

设一个节点同时汇集了 g 根杆件, 各杆件的方向余弦不同, 但都用节点流速代表该半杆之流速, 则作用于 j 点之总波力矢量为:

$$\tilde{P}_j = \sum_g \left\{ \frac{\rho L_g A_g}{2} [N_g] (\ddot{u}_j + (C_{Mg} - 1) \{\dot{u}_j - \dot{v}_j\}) + \frac{\rho}{2} L_g D_g C_{Dg} a_{ng} [N_g] \{\dot{u}_j - \dot{v}_j\} \right\} \quad (15)$$

其中 $N_g = \underline{I} - \hat{S}_g \hat{S}_g^T$, \underline{I} 为单位矩阵, \hat{S}_g 为沿 g 杆之单位方向矢量, 上标 T 代表转置,

$$a_{ng} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \sigma |\dot{r}_{ng}|, \quad |\dot{r}_{ng}| = |\dot{u}_{ng} - \dot{v}_{ng}|, \quad \sigma \text{ 为方差.}$$

a_{ng} 为统计线性化处理后的阻尼系数, ρ 为海水密度, A_g 为杆件面积, D_g 为杆件直径, C_{Mg}, C_{Dg} 分别为惯性和阻力系数.

令

$$\begin{aligned} \alpha_j &= \frac{\rho}{2} \sum_g C_{Mg} L_g A_g N_g \\ \beta_j &= \frac{\rho}{2} \sum_g C_{Dg} L_g D_g a_{ng} N_g \\ M_{aj} &= \frac{\rho}{2} \sum_g (C_{Mg} - 1) L_g A_g N_g \end{aligned}$$

则

$$P_j = \alpha_j \dot{u}_j + \beta_j \dot{u}_j - M_{aj} \dot{v}_j - \beta_j v_{jj} \quad (16)$$

$P_j = \alpha_j \dot{u}_j + \beta_j \dot{u}_j$ 为只与流速、流体加速度有关的载荷

$M_{aj} \dot{v}_j$ 为流体附加惯性力

$\beta_j v_{jj}$ 为流体附加阻尼力

$v_j = \dot{x}'_j$ 为结构变形速度

\tilde{F}_j 为第 j 个节点之流体力矢量, (三个方向) 组合 $\tilde{F}_j, j=1, 2, \dots, n$ 便得到(1)式中的力矢量 \tilde{F} .

设上部结构共有 n 个自由度, 则(1)(2)(3)式共有 $n+2$ 个自由度. 现在对它们进行富里叶变换, 并令

$X, Y, \phi, \mathcal{F}, \Gamma_b, M_b$ 分别代表 $x, y, \theta, F, Q_b, M_b$ 之富氏变换对, 则有:

$$-\omega^2 M X + i\omega C X + K X = \mathcal{F} + \omega^2 M \{ I Y + h \phi \} \quad (17)$$

$$-I^T \{ i\omega C + K \} X - \omega^2 m_0 Y + \Gamma_b = 0 \quad (18)$$

$$-h^T \{ i\omega C + K \} X - \omega^2 I_0 \phi + \bar{M}_b = 0 \quad (19)$$

令

$$[-\omega^2 M + i\omega C + K]^{-1} = H$$

$$X = H \mathcal{F} + \omega^2 H M \{ I Y + h \phi \} \quad (20)$$

将(20)代入(18),(19)并利用(5)式, 并令:

$$i_{yy}^* = h_{yy} + i\omega C_{yy}$$

$$h_{y\theta}^* = h_{y\theta} + i\omega C_{y\theta}$$

$$l_{\theta\theta}^* = l_{\theta\theta} + i\omega C_{\theta\theta}$$

式中 $i = \sqrt{-1}$

则可求得:

$$\begin{bmatrix} k_{yy} + i\omega C_{yy} - \omega^2(m_0 + I^T [i\omega C + K] H M I) & -\omega^2 I^T [i\omega C + K] H M h + k_{y\theta} + i\omega C_{y\theta} \\ -\omega^2 h^T [i\omega C + K] H M I + k_{\theta y} + i\omega C_{\theta y} & k_{\theta\theta} + i\omega C_{\theta\theta} - \omega^2(I_0 + h^T [i\omega C + K] H M h) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} Y \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} I^T [i\omega C + K] H \\ h^T [i\omega C + K] H \end{Bmatrix} \mathcal{F} \quad (21)$$

其中 $I^T [i\omega C + K] H M I$ 为上部固端结构底部作单位加速度之水平运动时,根部之切力。

$h^T [i\omega C + K] H M I$ 为相同条件下根部之弯矩。

$h^T [i\omega C + K] H M h$ 为上部固端结构底部作单位角加速度之转动时,根部之弯矩。

这些量均可用通用有限元程序计算出来,在假设上部结构具有比例阻尼时可用 SAPV 计算,注意到流体附加阻尼是非比例阵,故需用近似的方法使之能对角化[1]。

令
$$m_0 + I^T [i\omega C + K] H M I = m_{e q} \quad (22)$$

$$I_0 + h^T [i\omega C + K] H M h = I_{e q} \quad (23)$$

$$I^T [i\omega C + K] H M h = h^T [i\omega C + K] H M I = m_{y\theta} \quad (24)$$

则(21)式变为

$$\begin{bmatrix} k_{yy} - \omega^2 m_{e q} + i\omega C_{yy} & -\omega^2 m_{y\theta} + k_{y\theta} + i\omega C_{y\theta} \\ -\omega^2 m_{y\theta} + k_{\theta y} + i\omega C_{\theta y} & k_{\theta\theta} - \omega^2 I_{e q} + i\omega C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} I^T [i\omega C + K] H \\ h^T [i\omega C + K] H \end{Bmatrix} \mathcal{F} \quad (25)$$

(25)式是一个等效二自由度体系之动力方程。由此可见,不论上部结构多么复杂,具有多少个自由度,只要用通用有限元程序求出其底部作单位简谐运动时之根部切力与弯矩,则此 $n+2$ 个自由度体系可以被化简为一个2自由度体,再进行响应分析就十分简单了。

令
$$\begin{Bmatrix} Y \\ \phi \end{Bmatrix} = Z, \quad \begin{Bmatrix} I^T [i\omega C + K] H \\ h^T [i\omega C + K] H \end{Bmatrix} \mathcal{F} = \bar{F} \quad (26)$$

将式(21)写成:

$$Z = \bar{H} \bar{F} = \bar{H} \mathcal{F} \quad (27)$$

则有

$$\begin{bmatrix} S_{yy}(\omega) & S_{y\theta}(\omega) \\ S_{\theta y}(\omega) & S_{\theta\theta}(\omega) \end{bmatrix} = \bar{H} S_{FF} \bar{H}^T \quad (28)$$

上式中上标“*”代表共轭,上标“T”代表转置。

V_b, \bar{M}_b 分别为 Q_b, M_b 之富氏变换对,则有:

$$\begin{Bmatrix} V_b \\ \bar{M}_b \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{yy} + i\omega C_{yy} & k_{y\theta} + i\omega C_{y\theta} \\ k_{\theta y} + i\omega C_{\theta y} & k_{\theta\theta} + i\omega C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y \\ \phi \end{Bmatrix} \quad (29)$$

$$= -H_Q \begin{Bmatrix} Y \\ \phi \end{Bmatrix} \quad (30)$$

故有

$$\begin{bmatrix} S_{Q_b Q_b} & S_{Q_b M_b} \\ S_{M_b Q_b} & S_{M_b M_b} \end{bmatrix} = H_Q \begin{bmatrix} S_{yy} & S_{y\theta} \\ S_{\theta y} & S_{\theta\theta} \end{bmatrix} H^{*T} \quad (31)$$

这个方法对于处理非线性基础刚度阵十分方便, 因为基础刚度与 $\sigma_{Q_b Q_b}, \sigma_{M_b M_b}$ 是互相依赖的, 必须迭代求解, 对于自由度很多的体系迭代一次计算量很大。现在每一次只须对两个自由度进行运算, 计算量将大为减少。我们曾用固端模态综合法列出结构基础耦合方程, 用复模态法与复矩阵求逆法计算了系统的传递函数, 编制了计算响应谱与方差的程序, 引用了文献 [8] 的例题, 在其计算模型的底部增加了水平与扭转弹簧代表基础的柔性, 改变弹簧常数与阻尼计算了大量结果, 研究基础参数对平台响应的影响, 对此简化模型, 用本文方法计算的结果与它的结果完全吻合, 而计算时间节省约 90%。

参 考 文 献

- [1] J. Penzien and S. Tseng: Three-Dimensional Dynamic Analysis of Fixed Offshore Platforms, Numerical Methods in Offshore Engineering, 1978.
- [2] H. Vugts et al: Modal superposition & Direct Solution Techniques in the Dynamic Analysis of Offshore Structures, 2nd Int. Conf. on BOOS, 1979.
- [3] 田千里, 李盛章: 用 SAPV 程序计算具有干摩擦之隔振问题振动与冲击, 1982 年第 4 期.
- [4] J. Penzien: Structural Dynamic of Fixed Offshore Structures, 1st. Int Conf. on BOOS. 1976
- [5] 大连工学院: “DASOS-J” 程序考题实例集 1982
- [6] C. C. Angelides and J. J. Connor: Response of Fixed Offshore Structures in Random Sea, Earthq. Engng. 8 Struct. Dyn. Vol. 8. 1980
- [7] Y. O. Bereguo, & M. Novak: Coupled Horizontal and Rigid Vibration of Embedded Footings Canadian Geotechnical J. Vol. 9. Nov. 1972
- [8] A. E. Mansour & D. N. Millman: Dynamic Random Analysis of Fixed Offshore Platforms, O. T. C. Paper 2049 1975

A NEW WEIGHTED RESIDUAL ANALYSIS— SEGMENTAL LINE COLLOCATED METHOD

Xu Yonglin Chien Bo He Fubao
(Zhejiang University)

Abstract

In this paper, the line collocated method is investigated and a new numerical method—segmental line collocated method (SLCM) is presented for the bending analysis of thin plate problem. SLCM can be successfully used to solve various boundary conditions for thin plate problems. This paper presents some requirements and the theoretical proof for the implements of line collocation. Many numerical examples are calculated by means of SLCM. Compared with the theoretical solutions, it shows that the results by SLCM are very accurate. At last, this paper indicates that the SLCM is especially effective in the plate bending problems with the line loading conditions.

A SIMPLIFIED METHOD FOR THE DYNAMIC ANALYSIS OF OFFSHORE PLATFORMS

Tian Qianbi Liu Yubao
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

A simplified method for the dynamic analysis of the structure-foundation interaction of offshore platforms is presented in this paper. After calculated by SAPV, the clamped upperstructure is transformed to a frequency-dependent equivalent mass, and this makes the problem as simple as the vibration of a rigid body on elastic foundation. The random response of a simplified model of a platform was then calculated by this method.

MEASUREMENT FOR THE CRACK TIP OPENING DISPLACEMENTS AND STRESS INTENSITY FACTORS BY A LASER SPECKLE METHOD

Chen Huabi
(Xian Jiaotong University)

In this paper the technique of laser speckle interferometry is applied to crack problems in fracture mechanics. For the plates with various cracks under simple tension, the crack tip opening displacements are measured and the stress intensity factors are calculated. The experimental results are compared with the known solutions of same crack problems. It has been shown that the accuracy of experiment is satisfactory in engineering application.