

刚性墩台桩基础的等刚度模拟

丁兆铭 王立新

(江苏省交通规划设计院 南京 210005)

11448.315

10
34-36

摘要 在桥梁上、下部结构综合计算时,为方便计算,对用“m”法计算的桩基础采用等刚度模拟桩基方法,建立斜单柱模型和斜双柱模型,以竖直对称布置桩基础对应的计算模型作为特例,推导相应的计算公式.计算模型的参数由桩基础刚度矩阵的9个刚度系数求得,方法简单,原理清晰,适用于一般性的桥梁、码头等刚性墩台桩基础类型.

关键词 桩基;等刚度;模拟;结构计算 桥梁.墩台桩基础

桥梁结构计算中有些结构如连续刚架结构体系、拱梁组合体系等桥梁需要将上、下部结构作为整体进行分析计算,才能得到真实地反映上、下部结构相互作用的结果.由于桩基础形式多样,结构受力复杂,影响因素很多,因此在结构计算中往往采用简化模拟方法,即建立简单的计算模型模拟桩基础,既能真实反映桩基础对上部结构的影响,又便于结构计

算.文献[1]采用柔度法将图1(a)所示的实际桩基础等效模拟为图1(c)所示的双柱模型;文献[2]采用刚度模拟的方法,将图1(a)所示的桩基础等效模拟为图1(b)所示的竖直单柱模型或竖直双柱框架模型(图1(c)).这两种模拟方法概念清楚,但这类计算模型及相应公式仅适用于对称布置的竖直桩基础,对于工程实际中许多类型的桩基础如非对称布

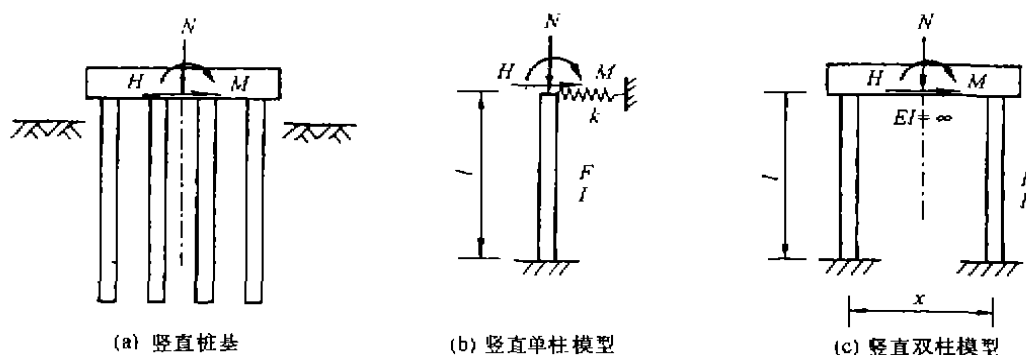


图1 竖直桩基等刚度模拟示意图

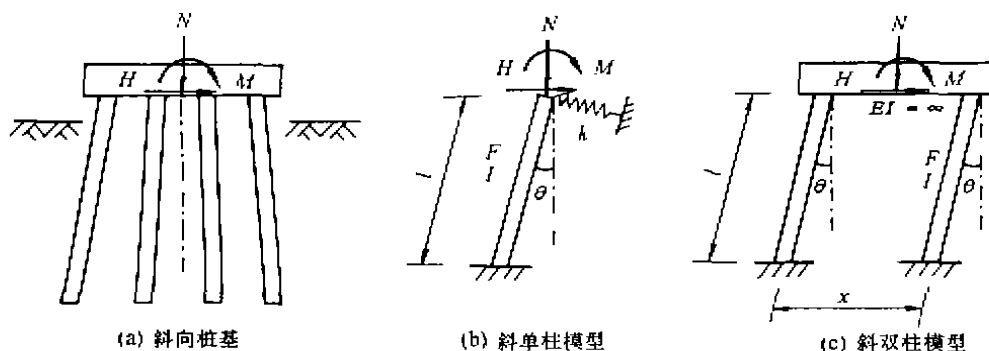


图2 斜向桩基等刚度模拟示意图

第一作者简介:丁兆铭,男,工程师,从事水工结构设计工作.

置的群桩、斜桩等则不能很好地进行模拟.本文在此基础上进一步深化,建立了斜单柱模型(图 2(b))和斜双柱模型(图 2(c)),以等刚度模拟即计算模型的刚度与所模拟桩基础的刚度完全相等的方法,来模拟一般类型的刚性墩台桩基础,包括非对称布置的群桩、斜桩等,并导出了相应计算模型的各种参数.

目前桥梁桩基础的计算广泛采用的是“m”法,对于多排群桩基础,其顶为一刚性承台,假定承台与桩顶的联结为刚性,并考虑土侧向的影响,群桩在外荷载 N, H, M 作用下的计算,可归结为求解方程^[3]:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{aa} & \gamma_{ab} & \gamma_{a\beta} \\ \gamma_{ba} & \gamma_{bb} & \gamma_{b\beta} \\ \gamma_{\beta a} & \gamma_{\beta b} & \gamma_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ \beta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ N \\ M \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_0, b_0, β_0 为桩顶承台中心在外荷载作用下产生的位移;

$\begin{bmatrix} \gamma_{aa} & \gamma_{ab} & \gamma_{a\beta} \\ \gamma_{ba} & \gamma_{bb} & \gamma_{b\beta} \\ \gamma_{\beta a} & \gamma_{\beta b} & \gamma_{\beta\beta} \end{bmatrix}$ 为桩群刚度矩阵,综合

反映了地基、地质、基础形式、基础几何特征及边界条件, $\gamma_{aa}, \gamma_{ab}, \gamma_{a\beta}, \gamma_{ba}, \gamma_{bb}, \gamma_{b\beta}, \gamma_{\beta a}, \gamma_{\beta b}, \gamma_{\beta\beta}$ 9 个元素为桩群刚度系数,其中 $\gamma_{ba}, \gamma_{aa}, \gamma_{\beta a}$ 分别为承台产生单位横轴向位移 ($a_0 = 1$) 时所有桩顶对承台作用的竖轴向反力之和、横轴向反力之和及反弯矩之和, $\gamma_{bb}, \gamma_{ab}, \gamma_{\beta b}$ 分别为承台产生单位竖向位移 ($b_0 = 1$) 时所有桩顶对承台作用的竖轴向反力之和、横轴向反力之和及反弯矩之和, $\gamma_{\beta\beta}, \gamma_{a\beta}, \gamma_{\beta a}$ 分别为承台绕坐标轴原点产生单位转角时所有桩顶对承台作用的竖轴向反力之和、横轴向反力之和及反弯矩之和.

根据等刚度模拟的原则,桩基础计算模型的推导,是利用桩基础刚度矩阵已知的 9 个元素来导出计算模型的各个参数,即得到等刚度模拟的斜单柱模型和斜双柱模型.

对于桩基础的一般情况,刚度矩阵中的 9 个刚度系数一般并不为零,只有为对称布置的竖直桩基础时有: $\gamma_{ab} = \gamma_{ba} = \gamma_{b\beta} = \gamma_{\beta b} = 0$, 这样刚度矩阵中其余 5 个刚度系数不为零.由此可推导出对称竖直布置桩基础的单柱模型和双柱模型.

1 斜单柱模型

根据结构力学,图 3 所示等截面超静定梁单元其刚度为

$$\text{抗推刚度} \quad K = 12i/l^2 \quad (2)$$

$$\text{抗弯刚度} \quad S = 4i \quad (3)$$

$$\text{相干系数} \quad T = 6i/l \quad (4)$$

$$\text{轴向抗压刚度} \quad V = E_h F/l \quad (5)$$

式中: $i = \frac{EI}{l}$, I 为截面惯性矩; F 为截面积.

计算模型采用图 2(b)所示下端固定、上端有一弹簧约束的斜单柱.为方便表述,按等刚度模拟的原则,直接用桩基础的刚度系数代替模型的刚度系数.该模型柱顶的刚度系数为

$$\gamma_{aa} = V \sin^2 \theta + (K + k) \cos^2 \theta \quad (6)$$

$$\gamma_{ab} = \gamma_{ba} = [V - (K + k)] \sin \theta \cos \theta \quad (7)$$

$$\gamma_{\beta a} = \gamma_{a\beta} = -T \cos \theta \quad (8)$$

$$\gamma_{bb} = V \cos^2 \theta + (K + k) \sin^2 \theta \quad (9)$$

$$\gamma_{\beta b} = \gamma_{b\beta} = T \sin \theta \quad (10)$$

$$\gamma_{\beta\beta} = S \quad (11)$$

式中: θ 为计算模型与轴线的夹角,其正负号规定与桩基础“m”法计算中的规定相同; k 为弹簧的弹性系数(见图 4).

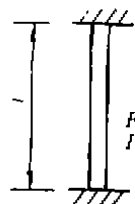


图 3 两端固定等截面

梁单元

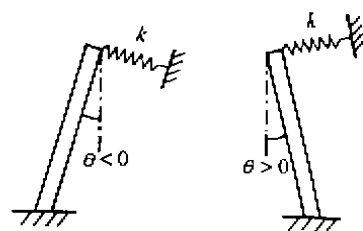


图 4 斜柱倾角方向示意图

将式(2)~(5)代入式(6)~(11),并解这些方程,可得:

$$l = \frac{3\gamma_{\beta\beta}}{2\gamma_{\beta b}} \sin \theta \quad (12)$$

$$I = \frac{3\gamma_{\beta\beta}^2}{8E\gamma_{\beta b}} \sin \theta \quad (13)$$

$$\theta = \arctan\left(-\frac{\gamma_{\beta b}}{\gamma_{a\beta}}\right) \quad (14)$$

$$F = \frac{(\gamma_{aa} + \gamma_{bb}) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{ab}}{2E_h \sin \theta \cos \theta} \cdot l \quad (15)$$

$$k = \frac{1}{2} \left(\gamma_{aa} + \gamma_{bb} - \frac{\gamma_{ab}}{\sin \theta \cos \theta} \right) - \frac{12EI}{l^3} \quad (16)$$

为方便实用计算,计算模型为常用的矩形截面,根据

矩形截面 $I = \frac{bh^3}{12}$ 及 $F = bh$, 可得:

$$h = \sqrt{\frac{12I}{F}}$$

$$b = \frac{F}{h}$$

式中: b 为模型截面的宽度; h 为模型截面的高度.

2 对称竖直布置桩基础的单柱模型

作为斜单柱模型的特例,对于对称竖直布置的桩基础,刚度矩阵中 $\gamma_{ab} = \gamma_{ba} = \gamma_{\beta b} = \gamma_{b\beta} = 0$, 由 $\theta = 0$, 代入式(6)~(11), 可解得:

$$l = -\frac{3\gamma_{\beta\beta}}{2\gamma_{a\beta}}$$

$$I = -\frac{3\gamma_{\beta\beta}^2}{8E\gamma_{\alpha\beta}}$$

$$F = -\frac{3\gamma_{bb}\gamma_{\beta\beta}}{2E_h\gamma_{\alpha\beta}}$$

$$k = \gamma_{\alpha\alpha} - \frac{4\gamma_{\alpha\beta}}{3\gamma_{\beta\beta}}$$

3 斜双柱模型

用斜双柱框架模拟桩基础(见图 2(c)), 框架横梁的刚度设为无限大, 柱距为 x , 每根柱的长度为 l , 截面积为 F , 截面惯性矩为 I , 为方便计算, 设柱截面为 $b \times h$ 的矩形截面, 斜柱与轴线夹角为 θ , θ 的正负号规定同斜单柱模型。

按计算模型与所模拟的桥梁桩基础刚度相等的原则, 可建立下列方程:

$$\gamma_{\alpha\alpha} = 2(V\sin^2\theta + K\cos^2\theta) \quad (17)$$

$$\gamma_{\alpha\beta} = \gamma_{\beta\alpha} = 2(V - K)\sin\theta\cos\theta \quad (18)$$

$$\gamma_{\beta\alpha} = \gamma_{\alpha\beta} = -2T\cos\theta \quad (19)$$

$$\gamma_{bb} = 2(V\cos^2\theta + K\sin^2\theta) \quad (20)$$

$$\gamma_{\beta\beta} = \gamma_{\alpha\alpha} = 2T\sin\theta \quad (21)$$

$$\gamma_{\beta\beta} = 2S + (V\cos^2\theta + K\sin^2\theta) \frac{x^2}{2} \quad (22)$$

将式(2)~(5)代入式(17)~(22), 并解这些方程, 可得:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\gamma_{\beta\beta}}{\gamma_{\beta\alpha}}\right)$$

$$l = \frac{4\gamma_{\beta\beta}\cos\theta}{(\gamma_{\alpha\alpha} + \gamma_{bb})\sin\theta\cos\theta - \gamma_{\alpha\beta}}$$

$$F = \frac{l}{4E_h} \left[(\gamma_{\alpha\alpha} + \gamma_{bb}) + \frac{\gamma_{\alpha\beta}}{\sin\theta\cos\theta} \right]$$

$$I = \frac{l^3}{48E} \left[(\gamma_{\alpha\alpha} + \gamma_{bb}) - \frac{\gamma_{\alpha\beta}}{\sin\theta\cos\theta} \right]$$

$$x = \sqrt{\frac{4}{\gamma_{bb}} \left(\gamma_{\beta\beta} - \frac{8EI}{l} \right)}$$

4 对称竖直布置桩基础的双柱模型

竖直双柱框架模型为斜双柱模型的特例, 由 $\theta = 0$ 可得:

$$l = -\frac{2\gamma_{\beta\alpha}}{\gamma_{\alpha\alpha}}$$

$$I = -\frac{\gamma_{\beta\alpha}^2}{3E\gamma_{\alpha\alpha}^2}$$

$$F = -\frac{\gamma_{bb}\gamma_{\beta\alpha}}{E_h\gamma_{\alpha\alpha}}$$

$$x = \sqrt{\frac{4\gamma_{\beta\beta}}{\gamma_{bb}} - \frac{16\gamma_{\beta\alpha}^2}{3\gamma_{\alpha\alpha}\gamma_{bb}}}$$

5 算例

某群桩基础, 由 4 排 12 根桩组成, 坐标原点选在承

台底面群桩的重心位置, 如图 5 所示, 图中 c 表示地基系数。经计算, 该群桩基础的刚度矩阵元素为:

$$\gamma_{\alpha\alpha} = 0.334487 \times 10^6 \text{ kN/m}$$

$$\gamma_{\alpha\beta} = \gamma_{\beta\alpha} = 0.0 \text{ kN/m}$$

$$\gamma_{\alpha\beta} = \gamma_{\beta\alpha} = -0.145588 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$\gamma_{bb} = 0.829618 \times 10^7 \text{ kN/m}$$

$$\gamma_{b\beta} = \gamma_{\beta b} = 0 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$\gamma_{\beta\beta} = 0.153305 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$$

按前述公式计算, 可得:

单柱模型

$$\theta = 0, l = 15.795 \text{ m}, I = 3.170 \text{ m}^4$$

$$F = 4.598 \text{ m}^2, k = 0.1501 \times 10^6 \text{ kN/m}$$

$$h = 2.876 \text{ m}, b = 1.598 \text{ m}$$

双柱模型

$$\theta = 0, l = 8.705 \text{ m}, I = 0.481 \text{ m}^4$$

$$F = 1.267 \text{ m}^2, x = 1.822 \text{ m}$$

$$h = 2.135 \text{ m}, b = 0.593 \text{ m}$$

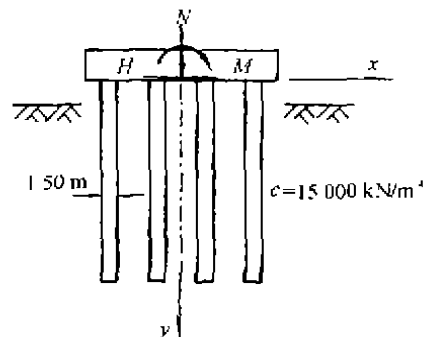


图 5 桩基础算例

6 结 语

本文建立的斜单柱模型和斜双柱模型可用来精确模拟一般的刚性墩台桩基础, 而竖直对称布置桩基础对应的计算模型为特例。计算模型的参数可由桩基础刚度矩阵的 9 个刚度系数求得, 方法简单, 原理清晰。对桁架式、墩式高桩码头, 以往桩基受力忽略地基土的侧向作用, 本文方法按等刚度模拟桩基础, 既考虑土对桩侧向作用, 又可将上、下部结构作为整体分析, 具有一定的应用价值。

参考文献

- 1 鲍卫刚. 桥梁承台桩基柔度的模拟. 华东公路, 1992(5): 16 ~ 17
- 2 李靖森. 桥梁结构综合计算中柔性深基础支承模型的建立. 公路, 1994(4): 1 ~ 6
- 3 凌治平主编. 基础工程. 北京: 人民交通出版社, 1986

(收稿日期: 1999-03-01 编辑: 张志琴)