

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.02.006

悬挑十字交叉基础梁节点荷载分配方法探讨

林丽萍, 罗婉, 贺建清

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 将半无限长梁自由端无限延伸, 形成无限长梁; 基于 Winkler 地基上无限长梁的解答, 求得集中力偶作用下原半无限长梁自由端处的剪力和弯矩。利用半无限长梁自由端需满足弯矩及剪力为零的条件, 求得需在自由端施加的外荷载。分别计算外荷载和集中力偶在作用点处产生的挠度, 叠加求得集中力偶作用下半无限长梁在作用点处的挠度, 并提出集中力偶作用下的悬挑影响系数计算公式。根据静力平衡和变形协调条件, 建立竖向荷载和力矩共同作用下具有悬挑的十字交叉基础的节点分配荷载的一般公式。

关键词: Winkler 地基; 十字交叉基础梁; 半无限长梁; 节点; 荷载分配

中图分类号: TU471

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)02-0031-07

Investigation on Load Distribution of the Joint of Cantilever Crossed Foundation Beam

Lin Liping, Luo Wan, He Jianqing

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Semi-infinite beam is extended from free end to infinitely long beam. Based on solutions for infinitely long beam on Winkler foundation, the shear force and bending moment at the free end of semi-infinite beam under the concentrated couples are derived. The external load applied at the free end is obtained by using the condition of the free end to meet zero moment and zero shear. The deflections at the action points are calculated separately under external loads and concentrated couples and the deflection at the action points are calculated under superposition of concentrated couples and external loads, and the calculation formula for cantilever influence coefficient with the action of concentrated couple is presented. According to the conditions of static equilibrium and deformation compatibility, general formulas for distribute load on joints of cantilever crossed foundation beams under vertical load and moments are given.

Keywords: Winkler foundation; crossed foundation beam; semi-infinite beam; joint; load distribution

1 研究背景

对于荷载较大的高层建筑, 如果地基软弱, 且土的压缩性或柱荷载沿两个柱列方向不均匀, 需要基础纵横两向都有一定的抗弯刚度, 以减少地基变形, 防止过大的不均匀沉降时, 常采用双向设置的十字交叉基础^[1-4]。此种基础刚度较大, 能有效地减小柱基之间的沉降差, 从而满足地基承载力和地基变形

的要求, 以保证建筑物的可靠性^[5]。

十字交叉基础是由柱网下的纵、横相连的条形基础组成的一种空间体系, 其与地基相互作用的理论分析相当复杂。目前, 因考虑上部结构-基础-地基共同作用的分析方法尚不成熟, 工程上常采用一些近似计算方法来解决节点处柱荷载的分配问题。文献[6]给出了 Winkler 地基上十字交叉基础梁包含有限长梁及节点不在梁端的半无限长梁的节

收稿日期: 2015-01-21

基金项目: 湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S140009)

作者简介: 林丽萍(1989-), 女(满族), 吉林辽源人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩土工程,

E-mail: 1286979743@qq.com

点分配荷载的一般公式。文献[7]基于无限长 Winkler 地基梁的解答,推导出具有悬挑的十字交叉基础梁柱荷载分配系数的公式。文献[8]给出了合理的重叠基底反力调整方法及计算公式,并通过算例对节点力调整前后基底反力及内力的变化进行了对比。文献[9]提出了一种计算位于双参数地基模型上,具有悬挑的十字交叉基础梁柱荷载分配系数的方法。文献[10]建立了满足地基承载能力要求的基础底板宽度的计算公式。文献[11]提出了空间框架-十字交叉基础梁与弹性地基相互作用简化分析的超元法。文献[12]提出了弹性地基上十字交叉梁考虑上部结构影响的超元法。以上研究在对节点处荷载进行分配时,考虑了地基与基础的共同作用,且满足静力平衡和变形协调2个条件,但均忽略了上部结构传来的力矩对节点位移的影响;文献[13]中虽有提及,但没有给出考虑力矩影响的节点荷载简化分配方法。

在工程实际中,为调整结构荷载中心与基底平面形心相重合和改善角柱与边柱下地基受力条件,常在转角和边柱处,基础做构造性延伸。本文基于 Winkler 地基上无限长梁的解答,推导出集中力偶作用下半无限长梁在作用点处挠度,提出了集中力偶作用下的悬挑影响系数计算公式;根据静力平衡和变形协调条件,建立竖向荷载和力矩共同作用下具有悬挑的十字交叉基础的节点分配荷载一般公式。

2 Winkler 地基上梁节点荷载分配计算

2.1 Winkler 地基上梁挠曲微分方程

Winkler 地基上梁的荷载分配分析见图 1。图中: x 为到远点的距离; p 为基底反力, $p(x)$ 为点 x 处的基底反力; q 为分布荷载, $q(x)$ 为点 x 处的分布荷载; M 为弯矩; V 为剪力。

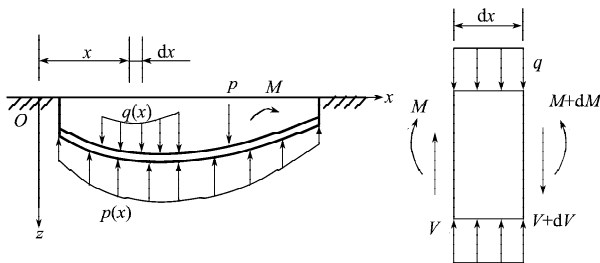


图1 Winkler地基上节点荷载分配分析简图

Fig. 1 Sketch of load distribution of joint on Winkler foundation

Winkler 地基上梁挠曲微分方程为^[14-15]

$$E_c I \frac{d^4 w}{dx^4} = q(x) - kbw, \quad (1)$$

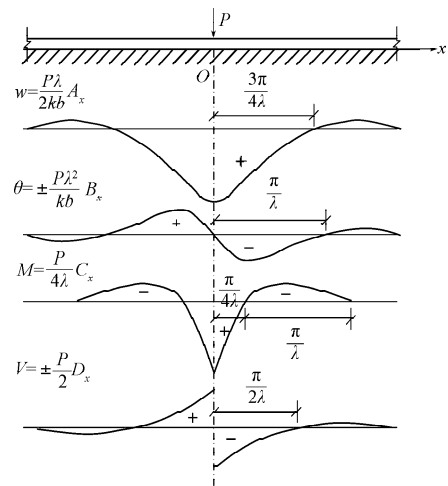
式中: E_c 、 I 分别为基础梁的弹性模量和惯性矩;

k 为地基抗力系数;
 b 为基础梁的宽度;
 w 为梁的挠度。

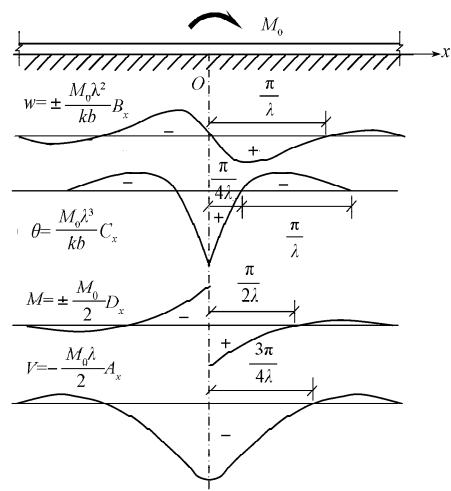
2.2 Winkler 地基上无限长梁的节点荷载分配

在 Winkler 地基上的无限长梁上分别施加一集中力 P 、集中力偶 M_0 , 从而得无限长梁的挠度 w 、转角 θ 、弯矩 M 及剪力 V , 见图 2^[16]。图中, λ 为弹性地基梁的特征系数, A_x, B_x, C_x, D_x 均为参数,且

$$\begin{cases} A_x = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x), \\ B_x = e^{-\lambda x} \sin \lambda x, \\ C_x = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x), \\ D_x = e^{-\lambda x} \cos \lambda x, \\ \lambda = \sqrt[4]{\frac{kb}{4E_c I}} \end{cases} \quad (2)$$



a) 梁上施加集中力 P



b) 梁上施加集中力偶 M_0

图2 Winkler地基上无限长梁的挠曲和内力
 Fig. 2 Deflection and inner force of infinite beam on Winkler foundation

2.3 Winkler 地基上半无限长梁集中力作用点处挠度

如图3所示,在半无限长梁上作用集中力 P_0 , 作用点 O 距梁端 A 的距离为 l ($l < \pi/\lambda$), 则作用点 O 处梁的挠度^[7]

$$w = \frac{P_0 \lambda}{2kb} [A_l(C_l + 2D_l) - 2B_l(C_l + D_l) + 1]. \quad (3)$$

令

$$\alpha = A_l(C_l + 2D_l) - 2B_l(C_l + D_l) + 1, \quad (4)$$

从而得

$$w = \frac{P_0 \lambda}{2kb} \cdot \alpha, \quad (5)$$

式中 α 为集中力作用下的悬挑影响系数。

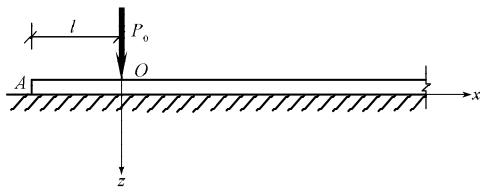


图3 集中力作用下的半无限长梁

Fig. 3 Semi-infinite beam under concentrated force

图4为集中力作用下悬挑影响系数曲线。

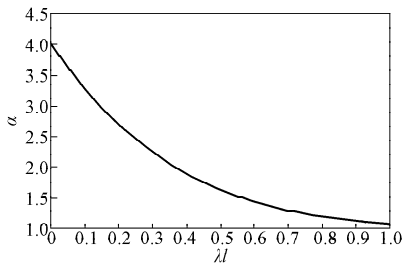


图4 集中力作用下的悬挑影响系数曲线

Fig. 4 Cantilever-influence coefficient curve under concentrated force

2.4 Winkler 地基上半无限长梁集中力偶作用点处的挠度

如图5所示,在半无限长梁上施加集中力偶 M_0 , 作用点 O 距梁端 A 的距离为 l ($l < \pi/\lambda$), 利用叠加原理求解作用点 O 处梁的挠度, 求解方法如下:

将梁从 A 端向外无限延伸形成无限长梁, 按无限长梁方法求解力偶 M_0 在 A 截面产生的弯矩 M_a 、剪力 V_a 。由于原半无限长梁 A 端为自由端, 弯矩及剪力均为 0, 故在无限长梁 A 处加上弯矩 M_a 、剪力 V_a 以抵消 M_0 在无限长梁上 A 处产生的弯矩 M_a 、剪力 V_a , 满足自由端弯矩及剪力为 0 的条件。求得弯矩 M_a 、剪力 V_a 后, 分别求力偶 M_0 、弯矩 M_a 、剪力 V_a 在无限长梁 O 处的挠度, 然后叠加求出 O 处的挠度。

求解步骤如下:

1) 根据图2b中公式, 力偶 M_0 在无限长梁 A 截面产生的弯矩 M_a 、剪力 V_a 为

$$\begin{cases} M_a = -\frac{M_0}{2} D_l, \\ V_a = -\frac{M_0 \lambda}{2} A_l. \end{cases} \quad (6)$$

2) 根据在无限长梁 A 处施加的弯矩 M_a 、剪力 V_a , 在该处产生的弯矩、剪力分别为 $-M_a$ 、 $-V_a$ 的条件, 由图2中公式, 建立如下方程:

$$\begin{cases} \frac{M_a}{4\lambda} + \frac{V_a}{2} = \frac{M_0}{2} D_l, \\ -\frac{M_a}{2} - \frac{V_a \lambda}{2} = \frac{M_0 \lambda}{2} A_l. \end{cases} \quad (7)$$

求解方程(7)得

$$\begin{cases} M_a = -2M_0 \lambda (A_l + D_l), \\ V_a = M_0 (A_l + 2D_l). \end{cases} \quad (8)$$

3) 由图2中公式分别求得力偶 M_0 、弯矩 M_a 、剪力 V_a 在无限长梁 O 处的挠度, 叠加得

$$w = -\frac{M_0 \lambda^2}{kb} [(A_l + D_l) A_l - (A_l + 2D_l) B_l]. \quad (9)$$

令

$$\beta = (A_l + D_l) A_l - (A_l + 2D_l) B_l, \quad (10)$$

从而得

$$w = -\frac{M_0 \lambda^2}{kb} \cdot \beta, \quad (11)$$

式中 β 为集中力偶作用下的悬挑影响系数。

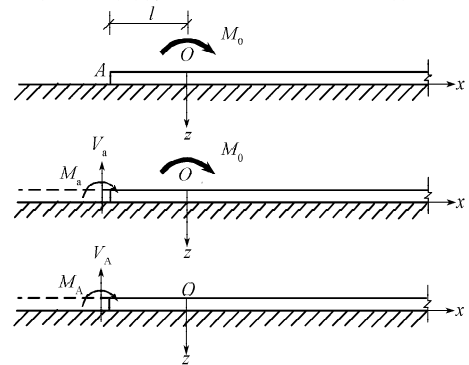


图5 集中力偶作用下的半无限长梁内力和挠度计算

Fig. 5 Calculation of deflection and inner force of semi-infinite beam under concentrated couples

图6为集中力偶作用下悬挑影响系数曲线。

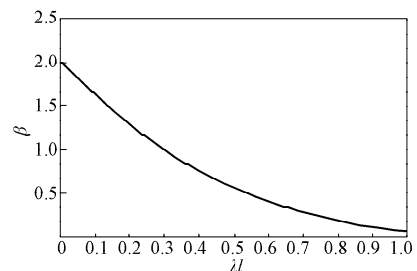


图6 集中力偶作用下的悬挑影响系数曲线

Fig. 6 Cantilever-influence coefficient curve under concentrated couples

3 十字交叉基础节点荷载分配

在如图7所示的十字交叉基础简图上,任一交叉点处都作用有从上部结构传来的竖向荷载 F_i 和 x, y 方向的力矩 M_{ix}, M_{iy} 。不考虑扭转变形的影响,即一个方向的条形基础有转角时,不引起另一方向条形基础的内力, M_{ix}, M_{iy} 分别由 x, y 方向基础承担^[17]。

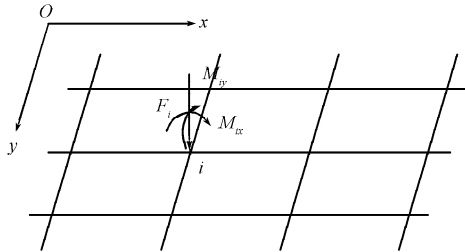


图7 十字交叉基础简图

Fig. 7 Sketch of crossed foundation beams

考虑基础与地基的共同作用,对任一节点,荷载分配必须满足以下2个条件:

1) 静力平衡条件。节点处分配在 x, y 方向条形基础的竖向荷载之和等于柱荷载,即

$$F_i = F_{ix} + F_{iy}, \quad (12)$$

式中: F_i 为任一节点上作用的柱荷载;

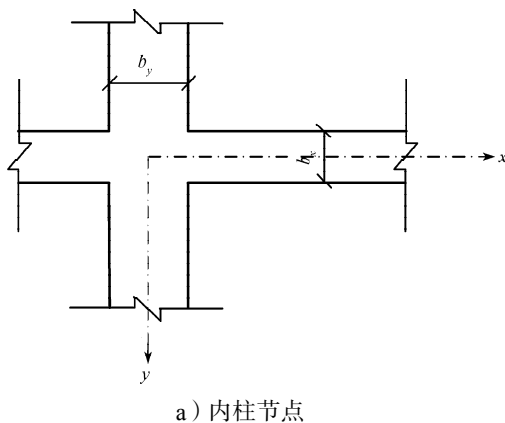
F_{ix}, F_{iy} 分别为分配在 x, y 方向条形基础梁上的竖向荷载。

2) 变形协调条件。即 x, y 方向条形基础梁在节点处的挠度相等。

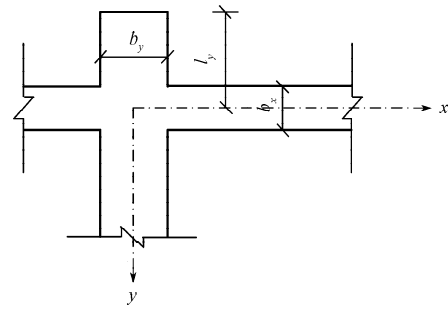
$$w_{ix} = w_{iy}, \quad (13)$$

式中, w_{ix}, w_{iy} 分别为 x, y 方向条形基础梁在节点处的挠度。

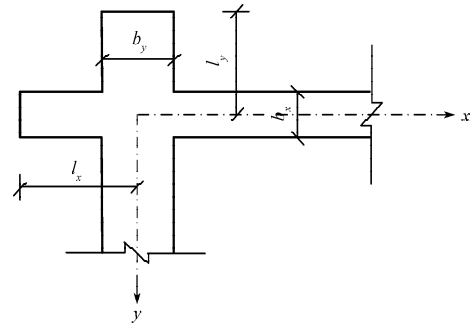
文献[13]在分配十字交叉基础节点荷载时,把交叉基础分成6种不同的类型,本文采用文献[7]的分类方法,统一把节点分成3类:内柱节点,见图8a;边柱节点,见图8b;角柱节点,见图8c。



a) 内柱节点



b) 边柱节点



c) 角柱节点

图8 交叉基础节点类型

Fig. 8 Various joints of crossed foundation beams

3.1 内柱节点荷载分配

对内柱节点(图8a所示), F_{ix}, F_{iy} 分别为柱荷载 F_i 分配在 x, y 方向条形基础梁上的竖向荷载。根据Winkler地基上无限长梁的解, x 方向条形基础梁在 F_{ix} 作用下, i 节点产生的挠度为

$$w_{ix} = \frac{F_{ix}}{2kb_x S_x}, \quad (14)$$

式中: b_x 为 x 方向基础宽度;

S_x 为 x 方向基础的弹性特征长度, $S_x = 1/\lambda_x$ 。

同理, y 方向条形基础梁在 F_{iy} 作用下, i 节点产生的挠度为

$$w_{iy} = \frac{F_{iy}}{2kb_y S_y}, \quad (15)$$

式中: b_y 为 y 方向基础宽度;

S_y 为 y 方向基础的弹性特征长度, $S_y = 1/\lambda_y$ 。

由式(12)~(15)解得

$$\begin{cases} F_{ix} = F_i \cdot \frac{b_x S_x}{b_x S_x + b_y S_y}, \\ F_{iy} = F_i \cdot \frac{b_y S_y}{b_x S_x + b_y S_y}. \end{cases} \quad (16)$$

3.2 边柱节点荷载分配

对边柱节点(图8b所示),节点柱荷载 F_i 可分解为作用在无限长梁上的 F_{ix} 和作用在半无限长梁上的 F_{iy} 。由式(5)和式(11)可知, y 方向条形基础梁在 F_{iy}, M_{iy} 作用下, i 节点产生的挠度为

$$w_{iy} = \frac{F_{iy}}{2kb_y S_y} \cdot \alpha_y - \frac{M_{iy}}{kb_y S_y^2} \cdot \beta_y, \quad (17)$$

式中: α_y 为 y 方向基础梁集中力作用下的悬挑影响系数;

β_y 为 y 方向基础梁集中力偶作用下的悬挑影响系数。

由式(12)~(14)和式(17)解得

$$\begin{cases} F_{ix} = F_i \cdot \frac{\alpha_y b_x S_x}{\alpha_y b_x S_x + b_y S_y} - M_{iy} \cdot \frac{2\beta_y b_x S_x}{(\alpha_y b_x S_x + b_y S_y) S_y}, \\ F_{iy} = F_i \cdot \frac{b_y S_y}{\alpha_y b_x S_x + b_y S_y} + M_{iy} \cdot \frac{2\beta_y b_x S_x}{(\alpha_y b_x S_x + b_y S_y) S_y}. \end{cases} \quad (18)$$

若 y 方向基础梁无悬挑, 则取 $l_y=0$ 。由式(4)和式(10)可得 $\alpha_y=4, \beta_y=2$ 。从而式(18)变为

$$\begin{cases} F_{ix} = F_i \cdot \frac{4b_x S_x}{4b_x S_x + b_y S_y} - M_{iy} \cdot \frac{4b_x S_x}{(4b_x S_x + b_y S_y) S_y}, \\ F_{iy} = F_i \cdot \frac{b_y S_y}{4b_x S_x + b_y S_y} + M_{iy} \cdot \frac{4b_x S_x}{(4b_x S_x + b_y S_y) S_y}. \end{cases} \quad (19)$$

3.3 角柱节点荷载分配

对角柱节点(图8c所示), 节点柱荷载 F_i 可分解为分别作用在半无限长梁上的竖向荷载。同3.2节类似, x 方向条形基础梁在 F_{ix}, M_{ix} 作用下, i 节点产生的挠度为

$$w_{iy} = \frac{F_{ix}}{2kb_x S_x} \cdot \alpha_x - \frac{M_{ix}}{kb_x S_x^2} \cdot \beta_x, \quad (20)$$

式中: α_x 为 x 方向基础梁集中力作用下的悬挑影响系数;

β_x 为 x 方向基础梁集中力偶作用下的悬挑影响系数。

由式(12)~(13)和式(17)~(18)解得

$$\begin{cases} F_{ix} = F_i \cdot \frac{\alpha_y b_x S_x}{\alpha_y b_x S_x + \alpha_x b_y S_y} + \\ M_{ix} \cdot \frac{2\beta_x b_y S_y}{(\alpha_y b_x S_x + \alpha_x b_y S_y) S_x} - \\ M_{iy} \cdot \frac{2\beta_y b_x S_x}{(\alpha_y b_x S_x + \alpha_x b_y S_y) S_y}, \\ F_{iy} = F_i \cdot \frac{\alpha_x b_y S_y}{\alpha_y b_x S_x + \alpha_x b_y S_y} - \\ M_{ix} \cdot \frac{2\beta_x b_y S_y}{(\alpha_y b_x S_x + \alpha_x b_y S_y) S_x} + \\ M_{iy} \cdot \frac{2\beta_y b_x S_x}{(\alpha_y b_x S_x + \alpha_x b_y S_y) S_y}. \end{cases} \quad (21)$$

若角柱任一方无悬挑, 由式(4)和式(10)可得 $\alpha_x=\alpha_y=4, \beta_x=\beta_y=2$, 从而式(21)变为

$$\begin{cases} F_{ix} = F_i \cdot \frac{b_x S_x}{b_x S_x + b_y S_y} + \\ M_{ix} \cdot \frac{b_y S_y}{(b_x S_x + b_y S_y) S_x} - \\ M_{iy} \cdot \frac{b_x S_x}{(b_x S_x + b_y S_y) S_y}, \\ F_{iy} = F_i \cdot \frac{b_y S_y}{b_x S_x + b_y S_y} - \\ M_{ix} \cdot \frac{b_y S_y}{(b_x S_x + b_y S_y) S_x} + \\ M_{iy} \cdot \frac{b_x S_x}{(b_x S_x + b_y S_y) S_y}. \end{cases} \quad (22)$$

在将节点上的柱荷载进行分配的过程中, 基底面积重复计算一次, 使基底单位面积上的反力较实际的反力减少, 计算结果偏于不安全, 必须进行调整修正。经调整后, i 节点 x, y 方向基础梁上的荷载为^[16]

$$\begin{cases} F'_{ix} = F_{ix} + \frac{F_{ix}}{F_i} \cdot \Delta A_i \cdot p, \\ F'_{iy} = F_{iy} + \frac{F_{iy}}{F_i} \cdot \Delta A_i \cdot p, \end{cases} \quad (23)$$

式中: ΔA_i 为 i 节点多算了的基底面积;

p 为调整前的基底压力平均计算值。

4 算例

本文选取文献[12]中算例, 图9为某框架结构基础平面。

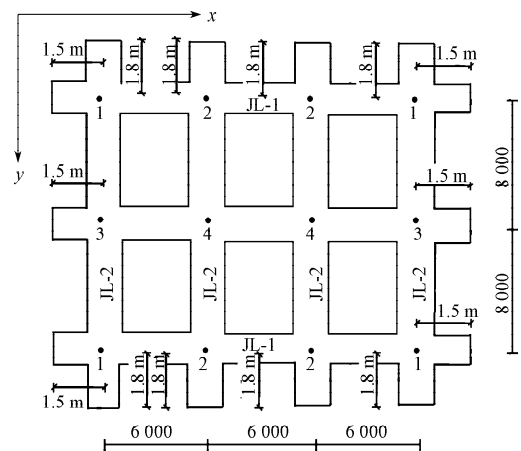


图9 计算实例

Fig. 9 The calculation example

已知柱荷载 $F_1=2\ 400\text{ kN}, F_2=3\ 200\text{ kN}, F_3=4\ 000\text{ kN}, F_4=4\ 500\text{ kN}$; 弯矩 $M_{1x}=30.0\text{ kN}\cdot\text{m}, M_{1y}=33.8\text{ kN}\cdot\text{m}$,

$M_{2x}=23.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{2y}=28.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{3x}=35 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{3y}=33.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{4x}=26.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{4y}=28.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。持力层地基抗力系数 $k=5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$, 基础混凝土弹性模量 $E_c=2.55 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, x 方向基础梁的宽度、惯性矩、悬挑长度分别为 3.0 m , 0.127 m^4 , 1.5 m , y 方向基础梁的的宽度、惯性矩、悬挑长度分别为 2.0 m , 0.110 m^4 , 1.8 m 。

4.1 节点荷载分配

对 JL-1 基础梁, 有 $b_x=3.0 \text{ m}$, $I_x=0.127 \text{ m}^4$,

$$S_x = \frac{1}{\lambda_x} = \sqrt[4]{\frac{4E_c I_x}{kb_x}} = 3.05 \text{ m}, \lambda_x \lambda_x = \frac{l_x}{S_x} = \frac{1.5}{3.05} = 0.43。$$

由式 (4) 和式 (10) 得: $\alpha_x=1.80, \beta_x=0.70$ 。

对 JL-2 基础梁, 有 $b_y=2.0 \text{ m}$, $I_y=0.110 \text{ m}^4$,

$$S_y = \frac{1}{\lambda_y} = \sqrt[4]{\frac{4E_c I_y}{kb_y}} = 3.26 \text{ m}, \lambda_y \lambda_y = \frac{l_y}{S_y} = \frac{1.8}{3.26} = 0.55。$$

由式 (4) 和式 (10) 得: $\alpha_y=1.52, \beta_y=0.48$ 。

采用式 (16)、式 (18) 和式 (21) 分别计算分配在 x, y 方向条形基础梁上的竖向荷载 F_{ix}, F_{iy} , 计算结果见表 1。

表1 节点竖向荷载分配

Table 1 Distribution of vertical load on joints

节点	F_{ix}/kN	F_{iy}/kN
1	1 301.59	1 098.41
2	2 176.17	1 023.83
3	1 758.99	2 241.01
4	2 627.63	1 872.37

4.2 分配荷载调整

作用在诸节点上集中力的总和为

$$\sum F = 39\ 400 \text{ kN};$$

基础的实际底面积为

$$\sum A = 315.8 \text{ m}^2;$$

交叉基础各节点重叠的基地面积之和为

$$\sum \Delta A = 72 \text{ m}^2;$$

调整前的基底压力平均计算值为

$$p = \frac{\sum F}{\sum A + \sum \Delta A} = 101.6 \text{ kPa}。$$

由式 (16) 可得各节点经调整后的分配荷载。计算结果见表 2。

表2 节点分配荷载调整

Table 2 Adjustment of distributed loads on joints

节点	F'_{ix}/kN	F'_{iy}/kN
1	1 707.55	1 441.00
2	2 685.23	1 263.33
3	2 088.17	2 660.39
4	3 064.73	2 183.83

5 结语

1) 基于对 Winkler 地基上无限长梁的解答, 推导出集中力偶作用下半无限长梁在作用点处的挠度, 提出了集中力偶作用下的悬挑影响系数的计算公式。

2) 根据静力平衡和变形协调条件, 建立了竖向荷载和力矩共同作用下交叉交叉基础的边柱和角柱节点分配荷载的一般公式。

参考文献:

[1] 王 燕, 李华军, 厉见芬. 半刚性梁柱节点连接的初始刚度和结构内力分析[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 65-69.
Wang Yan, Li Huajun, Li Jianfen. Initial Stiffness of Semi-Rigid Beam-to-Column Connections and Structural Internal Force Analysis[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 65-69.

[2] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 102-113.
Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on Weak Beam-Strong Column Design Method of RC Frame Structures[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 102-113.

[3] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 154-163.
Zai Jinmin, Zai Jinzhang. High-Rise Building Foundation Analysis and Design[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994: 154-163.

[4] Dooley K L, Bracci J M. Seismic Evaluation of Column-to-Beam Strength Ratios in Reinforced Concrete Frames[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(6): 843-851.

[5] French C W, Moehle J P. Effect of Floor Slab on Behavior of Slab-Beam-Column Connections[J]. ACI Special Publication, 1991(123): 225-258.

[6] 李方圆. 交叉交叉基础梁的节点荷载分配问题[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(3): 294-297.
Li Fangyuan. Problems on Load Distribution for the Joint of Crossed Foundation Beams[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1998, 30(3): 294-297.

[7] 陈 沙, 王贻荪. 交叉交叉地基梁柱荷载分配工程实用统一算法[J]. 勘察科学技术, 1999(4): 42-46, 54.
Chen Sha, Wang Yisun. Practical Unified Algorithm in Construction for Distribution of Column Load on Crossed Foundation Beam[J]. Site Investigation Science and Technology, 1999(4): 42-46, 54.

[8] 秦植海, 李根生, 张维圈. 柱下钢筋混凝土交叉交叉基础节点力的分配[J]. 力学与实践, 1999, 21(5): 22-24.
Qin Zhihai, Li Gensheng, Zhang Wei-quan. Pressure

- Distribution at Nodal Point of Reinforced Concrete Crossed Foundation Under Column[J]. Mechanics and Engineering, 1999, 21(5): 22-24.
- [9] 邱 畅,王贻菽. 基于双参数地基模型的十字交叉梁柱荷载分配系数工程实用算法[J]. 勘察科学技术, 2000(5): 22-27.
- Qiu Chang, Wang Yisun. The Engineering Practical Calculation Method of Criss-Cross Beam and Column Load Distribution Coefficient Based on Double-Parameter Foundation Model[J]. Site Investigation Science and Technology, 2000(5): 22-27.
- [10] 王 龙,朱彦鹏,李庆福. 十字交叉梁基础合理基础底板宽度的计算方法[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(3): 98-100.
- Wang Long, Zhu Yanpeng, Li Qingfu. Calculation Method for Reasonable Width of Baseplate of Grillage Foundation [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2002, 28(3): 98-100.
- [11] 孙建琴, 刘 勇, 李从林. 空间框架-十字交叉基础梁与弹性地基相互作用简化分析的超元法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 225-227.
- Sun Jianqin, Liu Yong, Li Conglin. Super Element Method for Analyzing Interaction of Space Frame-Grillage Foundation Beams on Elastic Foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 225-227.
- [12] 孙建琴, 李从林, 刘 勇. 弹性地基上十字交叉梁考虑上部结构影响分析的超元法[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 28-32.
- Sun Jianqin, Li Conglin, Liu Yong. Super Element Method for Analyzing Grillage Beams on Elastic Foundation Considering Influence of Upper Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(2): 28-32.
- [13] 张季容,朱向荣. 简明建筑基础计算与设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 53-60.
- Zhang Jirong, Zhu Xiangrong. Concise Manual of Buildings Foundation Calculation and Design[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997: 53-60.
- [14] Selvadurai A P S. Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979: 202-205.
- [15] 杨学祥. 均布荷载下一端固定的文克尔地基梁的基底压力特性及其工程意义[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 76-79.
- Yang Xuexiang. The Feature of Foundation Pressure on Winkler Foundation Beam with One Fixed End and Its Application[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 76-79.
- [16] 周景星, 李广信, 虞石民, 等. 基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 54-63.
- Zhou Jinxin, Li Guangxin, Yu Shimin, et al. Foundation Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 54-63.
- [17] 龚晓南,褚 航. 基础刚度对复合地基性状的影响[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 67-73.
- Gong Xiaonan, Chu Hang. The Influence of Base Stiffness on Status of Composite Foundations[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 67-73.

(责任编辑: 邓光辉)