

管桩——桩芯砼组合构件受弯承载力的近似计算

朱海堂 祝彦知
(郑州工业大学水环系) (河南省建设总公司)

摘 要: 本文基于管桩——桩芯砼组合构件截面的应力分布假设,从理论上探讨并提出了预应力砼管桩——桩芯砼组合构件受弯承载力的近似计算公式,可供工程界设计时参考应用。

关键词: 组合构件、受弯承载力

中图分类号: TU473.11

为适应我国国民经济迅速发展之需要,码头、道路、桥梁以及高架立交建筑等交通运输工程建设也日新月异,对它们的运输能力等方面的要求也越来越高,导致作用于这些结构物基础之上的荷载值越来越大,从而,预应力砼管桩基础以其优良的受力特性而得到广泛的应用。在这种结构型式,一般在预应力管桩顶部的桩芯内充填现浇钢筋砼桩芯笼,使处于地面以下的预应力砼管桩与上部结构整体结合,从而能有效地传递内力,并减小结构的水平变位。这种特殊的结构型式及其内力传递方式,其结构的破坏通常不是发生在空心管桩段,而是由于应力集中的影响,由充填钢筋砼的实心管桩段的承载能力所控制。因而,在实际工程设计中,不仅要计算预应力砼管桩本身以及上部结构的承载能力,还必须计算预应力砼管桩在充填钢筋砼桩芯笼后所具有的承载能力。但目前尚没有这种结构的承载力计算方法。本文力图从力学模型出发,探索预应力砼管桩在充填桩芯砼后即管桩——桩芯砼组合构件受弯承载力的近似计算方法,供工程设计时参考。

1 应力分布假设

管桩——桩芯砼组合构件由预制的预应力砼管桩与现浇的圆形普通钢筋砼桩芯笼所组成。预应力钢筋沿管桩环形截面周边均匀配置,圆形桩芯笼内的普通钢筋沿圆形截面周边均匀布置。为简化计算,对于沿周边均布的预应力钢筋和非预应力钢筋,分别用一个与其总面积 A_p 和 A_s 相同而半径分别为 r_p 和 r_s 的圆环代替。

1.1 截面几何特征

截面的几何特征尺寸示于图 1。图中阴影部分代表截面受压区。

管桩环形截面总面积为: $A_1 = \pi(r_1^2 - r_2^2)$

管桩对应于圆心角 $2\pi\alpha$ 的扇形区域面积为: $A_{1\alpha} = \pi\alpha(r_1^2 - r_2^2)$, 该区域形心距截面中心 Z_1
$$= \frac{r_1 + r_2}{2} \cdot \frac{\sin\pi\alpha}{\pi\alpha}$$

桩芯笼圆形截面总面积为: $A_2 = \pi r_2^2$

桩芯笼对应于圆心角 $2\pi\alpha$ 的弓形区域面积为: $A_{2\alpha} = \pi\alpha r_2^2 - \frac{1}{2} r_2^2 \sin 2\pi\alpha$; 矢高 $h = r_2(1 - \cos\pi\alpha)$; 区域形心距截面中心为 $Z_2 = \frac{2r_2 \sin^3 \pi\alpha}{3(\pi\alpha - \sin\pi\alpha \cos\pi\alpha)}$ 。

1.2 截面应力分布假设

在构件全截面内, 砼包括预制砼和现浇砼两部分, 钢筋也包括预应力钢筋和非预应力钢筋两部分, 因而其截面应力分布极其复杂, 很难对组合构件的受弯承载力进行精确计算。为了探求管桩——桩芯砼组合构件极限受弯承载力的近似计算方法, 对在极限荷载作用下的截面应力分布进行如图 2 所示的塑性简化假设。其中: 图 2(a) 为当截面受压区应力按等效矩形应力简化时的中和轴位置及受压区域, α 为等效矩形应力图形的相对受压区面积; 图 2(b)、(c) 分别为截面受压区管桩砼及桩芯砼的应力分布; 图 2(d)、(e) 分别为截面上预应力钢筋及非预应力钢筋的应力分布。

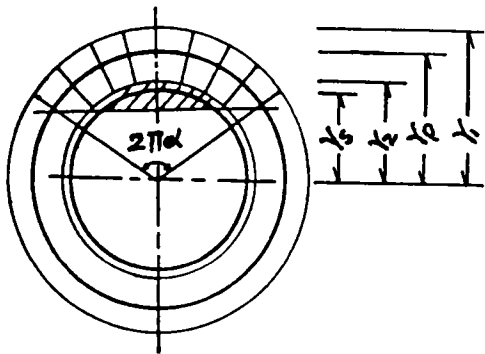


图 1 截面几何参数

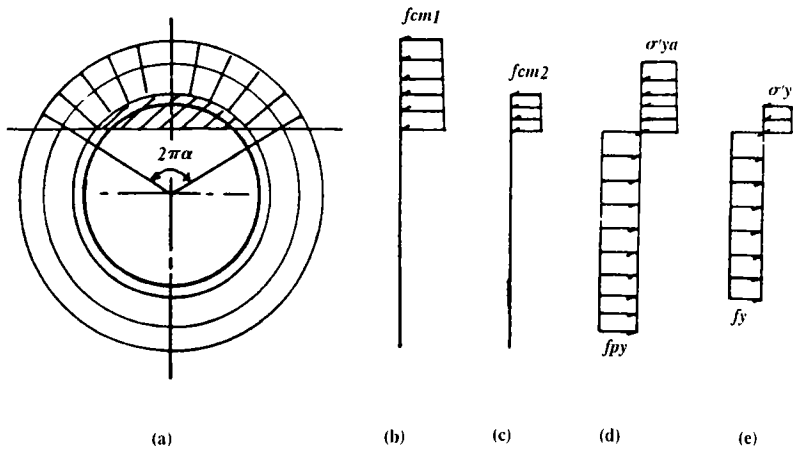


图 2 简化的截面应力状态

1.3 中和轴位于桩芯笼内外的界限值 α_0

由图 3 可以看出, 在极限荷载下, 截面中和轴位于管桩桩芯笼边缘切线位置时, 界限值 α_0 有下列关系:

$$r_2 = \frac{r_1 + r_2}{2} \cos \pi \alpha_0$$

即, 界限值

$$\alpha_0 = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{2r_2}{r_1 + r_2} \tag{1}$$

若 $\alpha > \alpha_0$, 表示截面中和轴位于桩芯笼之内; 若 $\alpha < \alpha_0$, 则表示截面中和轴位于桩芯笼以外, 桩芯笼全截面处于受拉状态。

2 管桩——桩芯砼组合构件受弯承载力计算公式的推导

2.1 截面内力

2.1.1 管桩截面受压区砼的压力合力 C_{c1} 及其对截面中心的内力矩 M_{c1}

$$\begin{aligned} C_{c1} &= A_{1a} f_{cm1} \\ &= \alpha A_1 f_{cm1} \\ M_{c1} &= C_{c1} Z_1 \end{aligned} \tag{2}$$

$$= \frac{r_1 + r_2}{2} f_{cm1} A_1 \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} \quad (3)$$

2.1.2 桩芯截面受压区砼的压力合力 C_{c2} 及其对截面中心的内力矩 M_{c2}

当 $\alpha > \alpha_0$ 时

$$C_{c2} = A_{2a} f_{cm2} = (\alpha A_2 - \frac{1}{2} r_2^2 \sin 2\pi \alpha) f_{cm2} \quad (4)$$

$$M_{c2} = C_{c2} Z_2 = (\pi \alpha r_2^2 - \frac{1}{2} r_2^2 \sin 2\pi \alpha) f_{cm2} \frac{2r_2 \sin^3 \pi \alpha}{3(\pi \alpha - \sin \pi \alpha \cos \pi \alpha)} = \frac{2 \sin^3 \pi \alpha}{3\pi} f_{cm2} A_2 r_2 \quad (5)$$

$$\text{当 } \alpha \leq \alpha_0 \text{ 时 } C_{c2} = 0 \quad (6)$$

$$M_{c2} = 0 \quad (7)$$

2.1.3 管桩受压预应力钢筋的合力 C_1 及其对截面中心的内力矩 M_1

$$C_1 = \alpha A_p \sigma'_{ya} \quad (8)$$

$$M_1 = \alpha A_p \sigma'_{ya} r_p \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} = A_p \sigma'_{ya} r_p \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} \quad (9)$$

式中: $\sigma'_{ya} = f_{py} - (\sigma_{cm} - \sigma_l)$

2.1.4 桩芯受压非预应力钢筋的合力 C_2 及其对截面中心的内力矩 M_2

当 $\alpha > \alpha_0$ 时

$$C_2 = \alpha A_s f_y \quad (10)$$

$$M_2 = \alpha A_s f_y r_s \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} = A_s f_y r_s \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} \quad (11)$$

当 $\alpha \leq \alpha_0$ 时

$$C_2 = 0 \quad (12)$$

$$M_2 = 0 \quad (13)$$

2.1.5 管桩受拉预应力钢筋的合力 T_1 及其对截面中心的内力矩 M_{t1}

$$T_1 = (1 - \alpha) A_p f_{py} \quad (14)$$

$$M_{t1} = (1 - \alpha) A_p f_{py} r_p \frac{\sin \pi (1 - \alpha)}{\pi (1 - \alpha)} = A_p f_{py} r_p \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} \quad (15)$$

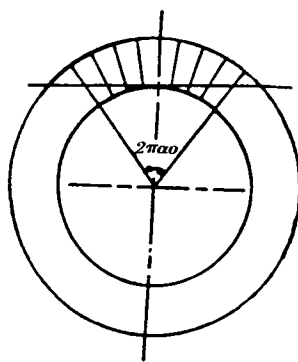
2.1.6 桩芯受拉非预应力钢筋的合力 T_2 及其对截面中心的内力矩 M_{t2}

当 $\alpha > \alpha_0$ 时

$$T_2 = (1 - \alpha) A_s f_y \quad (16)$$

$$M_{t2} = (1 - \alpha) A_s f_y r_s \frac{\sin \pi (1 - \alpha)}{\pi (1 - \alpha)} = A_s f_y r_s \frac{\sin \pi \alpha}{\pi} \quad (17)$$

当 $\alpha \leq \alpha_0$ 时



$$T_2 = A_s f_y \quad (18)$$

$$M_{t2} = 0 \quad (19)$$

2.2 基本公式的导出

由内力平衡条件:

$$C_{c1} + C_{c2} + C_1 + C_2 = T_1 + T_2 \quad (20)$$

$$M_u = M_{c1} + M_{c2} + M_1 + M_2 + M_{t1} + M_{t2} \quad (21)$$

将式(2)~(19)代入式(20)~(21)、整理并注意到 $f_y = f_y$, 则得到如下关系式:

当 $\alpha > \alpha_0$ 时

$$\alpha A_1 f_{cm1} + (\alpha A_2 - \frac{1}{2} r_2^2 \sin 2\pi\alpha) f_{cm2} + \alpha A_p (f_{py} + \sigma'_{ya}) + 2\alpha A_s f_y = A_p f_{py} + A_s f_y \quad (22)$$

$$M_u = \frac{r_1 + r_2}{2} f_{cm1} A_1 \frac{\sin \pi\alpha}{\pi} + \frac{2 \sin^3 \pi\alpha}{3\pi} f_{cm2} A_2 r_2 + [A_p r_p (f_{py} + \sigma'_{ya}) + 2A_s f_y r_s] \frac{\sin \pi\alpha}{\pi} \quad (23)$$

当 $\alpha \leq \alpha_0$ 时

$$\alpha = \frac{A_p f_{py} + A_s f_y}{A_1 f_{cm1} + A_p (f_{py} + \sigma'_{ya})} \quad (24)$$

$$M_u = \left[\frac{r_1 + r_2}{2} f_{cm1} A_1 + A_p (f_{py} + \sigma'_{ya}) r_p \right] \frac{\sin \pi\alpha}{\pi} \quad (25)$$

式中:

M_u ——极限受弯承载力

A_1, A_2 ——分别为管桩环形截面总面积、桩芯圆形截面总面积

r_1, r_2 ——分别为管桩的外环半径、内环半径;

A_p, A_s ——分别为全部纵向预应力钢筋面积、全部纵向非预应力钢筋面积

f_{py}, f_y ——分别为预应力钢筋和非预应力钢筋的抗拉强度

r_p, r_s ——分别为预应力钢筋和非预应力钢筋所在圆半径

f_{cm1}, f_{cm2} ——分别为管桩砼与桩芯砼的弯曲抗压强度值

σ'_{ya} ——受压区预应力钢筋在强度计算时的应力值

α ——等效矩形应力图形的相对受压面积。

式(22)~(25)即为预应力砼管桩——桩芯砼组合构件受弯承载力的基本计算公式。

3 基本公式的应用方法

当应用式(22)~(25)计算预应力砼管桩——桩芯砼组合构件的受弯承载力时,可按以下步骤进行:

(1)根据管桩的几何尺寸,按式(1)计算中和轴位置界限值 α_0 ;

(2)利用式(24),计算相对受压区面积 α ;

(3)若 $\alpha \leq \alpha_0$,则可按式(25)计算构件的受弯承载力;

若 $\alpha > \alpha_0$,表明中和轴位于桩芯砼内,式(24)~(25)不再适用。此时,应按式(22)重新计算相对压区面积 α ,并按式(23)计算构件的受弯承载力。

4 计算实例

某先张预应力砼管桩,外径为 550mm,内径为 350mm。沿轴向配有预应力钢筋 12 Φ 12 (冷拉Ⅳ级),配筋周径 486mm,张拉控制应力为 $\sigma_{con} = 572 \text{ N/mm}^2$,预应力损失为 $\sigma_l = 126 \text{ N/mm}^2$ 。管桩砼强度等级为 C60。桩芯内浇筑 C30 砼,沿圆周均匀配置Ⅱ级钢筋 8 Φ 14,配筋周径 320mm。这一管桩——桩芯砼组合构件受弯承载力的具体计算如下:

(1)特征参数值

$$A_1 = \frac{\pi \cdot 550^2}{4} = 141372 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi \cdot 350^2}{4} = 96211 \text{ mm}^2$$

$$r_1 = \frac{550}{2} = 275 \text{ mm}, r_2 = \frac{350}{2} = 175 \text{ mm}$$

$$A_p = 1357 \text{ mm}^2, r_p = 243 \text{ mm}$$

$$A_s = 1231 \text{ mm}^2, r_s = 160 \text{ mm}$$

按《港口工程技术规范(1987)》,钢筋及砼的强度指标值分别为:

$$f_{py} = 700 \text{ N/mm}^2, f'_{py} = 400 \text{ N/mm}^2, f_y = 310 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cm1} = 40.5 \text{ N/mm}^2, f_{cm2} = 22 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{su} = f_{py} - (\sigma_{cm} - \sigma_l) = 400 - (572 - 126) = -46 \text{ N/mm}^2$$

(2) 计算 α_0

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{1}{\pi} \arccos \frac{2r_2}{r_1 + r_2} \\ &= \frac{1}{\pi} \arccos \frac{2 \times 175}{275 + 175} \\ &= 0.216 (\text{弧度}) \end{aligned}$$

(3) 按式(24)计算相对受压面积 α

$$\alpha = \frac{1357 \times 700 + 1231 \times 310}{141372 \times 40.5 + 1357 \times (700 - 46)} = 0.201 < \alpha_0 = 0.216$$

(4) 按式(25)计算组合构件的受弯承载力

$$\begin{aligned} M &= \left[\frac{275 + 175}{2} \times 40.5 \times 141372 + 1357 \times (700 - 46) \times 243 \right] \frac{\sin 0.201\pi}{\pi} \\ &= 2.826 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm} \\ &= 282.6 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国交通部:《港口工程技术规范》(1987),下卷,北京:人民交通出版社,1988.
- 2 M. J. Tomlinson:《Pile Design and Construction Practice》,Third edition,1987.
- 3 施岚青,张玉祥:《混凝土结构设计规范学习指导》,地震出版社,1991.10.
- 4 朱海堂:预应力钢筋混凝土管桩与桩帽连接节点抗弯性能试验研究,硕士论文,郑州工学院,1992.

Approximate Calculation on Flexural Capacity of Composite Member with Pipe Pile and Pile Core Concrete

Zhu Haitang

(Zheng zhou University of Technology)

Zhu Yanzhi

(Henan Office of Construction Corporation)

Abstract Based on the stress distribution assumption of Cross Section, approximate formula for calculating the flexural capacity of the composite member with prestressed concrete pipe pile and pile core concrete is proposed theoretically.

Key words Composite member, Flexural capacity.