

钢筋混凝土迭合梁受拉钢筋应力控制计算

张雷顺

宋如玉

郭进军

(郑州工业大学水环系) (郑州市政工程管理处) (郑州工业大学水环系)

摘 要 本文根据试验和有限元计算结果,建立了一种受拉钢筋应力控制计算公式。

关键词 钢筋混凝土;迭合梁;受拉钢筋;应力。

中图分类号 TU37

1 二次受力迭合梁工作特点

对二次受力迭合梁,由于一期荷载的作用,在预制梁内将产生应力,而迭合层没有。为叙述方便,称其为荷载预应力和荷载预应变。正是这种局部荷载预应力使迭合梁具有不同于整浇梁或一次受力迭合梁的受力性能。

迭合梁在施加二期荷载后,由于预应变的存在,整个截面实际应变与整浇梁有较大区别,它为荷载预应变和二期荷载引起的应变增量的叠加,由试验实测和有限元计算结果看,迭合梁内的应变,可较好地近似为双线性,在迭合面应变发生突跃变化,迭合层上部混凝土受压,下部受拉;预制梁混凝土上部受压,下部受拉;纵向钢筋受拉。这种以迭合面为分界面,预制梁和迭合层具有不同的应变变化规律特性,将一直持续到裂缝穿过迭合面时为止。

对整浇梁或一次受力迭合梁,在荷载作用下产生的截面弯矩,由整个截面的混凝土和钢筋承担,而对二次受力的迭合梁,一期荷载产生的弯矩仅由预制梁截面的混凝土和钢筋承担,这样,在施加与整浇梁荷载相同的二期荷载时,势必造成迭合梁钢筋受拉应力大于整浇梁钢筋受拉应力,二者 的差值称为钢筋应力超前值。

根据我们和其它试验资料,以及我们进行的有限元分析结果来看,在二期荷载作用下,随着荷载的增大,裂缝高度的增加,一期荷载引起的钢筋应力 σ 值是发生变化的,但是在钢筋屈服前的相当长一段内,应力 σ 值变化不大,用 σ 的最大值来表示具有较好的近似性,若认为平截面假设在加载中恒成立,则钢筋应力 σ 值为一常量。

迭合梁纵向受力钢筋应力超前,不但会引起迭合梁裂缝宽度、挠度较大,也会使纵向受拉钢筋较早地达到屈服强度,因此设计时必须加以控制。

对迭合梁,一期荷载引起的截面弯矩 M_1 ,仅作用于预制构件截面,后浇混凝土应变为零。而对整浇梁,同样的 M_1 ,由于作用在整个截面上,而使截面上部的混凝土产生压应变。这就造成了迭合梁相对整浇梁,其迭合层混凝土受压应变滞后现象。

根据试验和有限元分析,迭合层混凝土受压应变滞后,在二期荷载作用下一直持续到钢筋屈服之后。根据我们的试验,在钢筋屈服时,受压区应变仅为 $350 \sim 550 \mu\epsilon$ 。

迭合层混凝土的受压应变滞后,使得迭合梁在受拉钢筋达流限后,受压区混凝土还有较大的潜力可供使用。相对整浇梁来说,在受拉钢筋屈服后,迭合梁还可以施加较大的荷载才

能使受压区混凝土达极限压应变·若钢筋屈服后,具有强化段,则显然迭合梁极限承载力将高于整浇梁,若钢筋屈服后,进入流动,则其极其承载力将也不低于整浇梁.

2 受拉钢筋应力控制计算公式

根据试验和有限元计算的截面应力状态(见图 1),以及前面的分析,在推导受拉钢筋应力控制计算公式中,特作如下几条假定:

- (1) 变形的平截面假设成立.
- (2) 一期荷载引起的钢筋应力最大值 σ_1 不变.
- (3) 受压区混凝土处于弹性状态,应力与应变成比例.
- (4) 受拉区混凝土不参加工作.

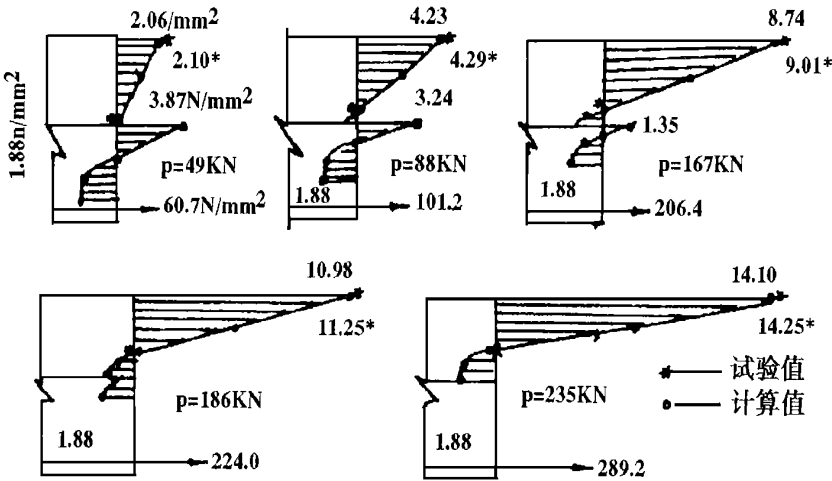


图 1 截面应力状态

在这些假定下,截面应变与应力简化为图 2. 图中 ϵ_2 为二期荷载 M_2 引起的钢筋应变, σ 为钢筋应力,它为一期与二期荷载引起的钢筋应力之和,即

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \tag{1}$$

M 为一期与二期荷载引起的截面弯矩,即 $M = M_1 + M_2$ (2)

由图 2 可得

$$\alpha(h_0 - a_1) = \alpha \epsilon_2 a_1$$

$$\frac{\alpha A_s}{b} = \frac{1}{2} a_1 \sigma$$

$$\alpha A_s (h_0 - \frac{1}{3} a_1) = M$$

式中, $\alpha = E_c / E_s$, E_c 为受压区混凝土的弹性模量, E_s 为钢筋的弹性模量,记

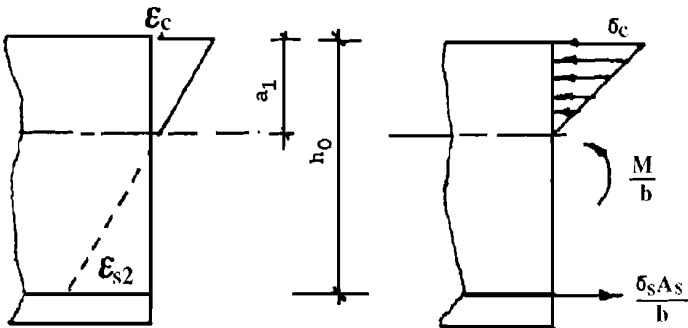


图 2 截面应变与应力简化图

$$\sigma = \zeta f_y \tag{3}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{3} \frac{a_1}{h_o} \tag{4}$$

则上面三个式子可改写为

$$\sigma(h_o - a_1) = \alpha \zeta f_y - \alpha_1) a_1 \tag{a}$$

$$\zeta f_y A_s = \frac{1}{2} b a_1 \sigma \tag{b}$$

$$\zeta f_y A_s \eta h_o = M \tag{c}$$

由(b)可得

$$\sigma = \frac{2 \zeta f_y A_s}{b a_1}$$

将其代入(a),有

$$a_1^2 + \frac{2 \zeta f_y A_s}{\alpha (\zeta f_y - \alpha_1)} a_1 - \frac{2 \zeta f_y A_s}{\alpha (\zeta f_y - \alpha_1)} h_o = 0 \tag{d}$$

记

$$\omega = \frac{2 \zeta f_y A_s}{\alpha (\zeta f_y - \alpha_1)} = \frac{2 A_s}{a b h_o} \cdot \left(\frac{\zeta}{\zeta - \frac{\alpha_1}{f_y}} \right) \cdot h_o = \frac{2 \alpha \rho \zeta'}{\zeta - \zeta_1} h_o = 2 \omega_{h_o}$$

其中

$$\alpha = E_s/E_c, \rho = \frac{A_s}{b h_o} \tag{5}$$

$$\zeta_1 = \frac{\alpha_1}{f_y}, \omega = \frac{\alpha \rho \zeta'}{\zeta - \zeta_1} \tag{6}$$

将 ω 代入(d),可得

$$a_1 = \left(\frac{\omega + 1}{(\omega + 1)^2 - 1} - \omega \right) h_o \tag{7}$$

把(7)式代入(4)式,有

$$\eta = 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\omega + 1}{(\omega + 1)^2 - 1} - \omega \right) \tag{8}$$

一期荷载引起的截面弯矩,作者在《钢筋混凝土梁板桥迭合整修技术》一文中已给出,它为

$$M_1 = \eta \alpha h_{o1} A_s \tag{9}$$

内力臂系数 η 为

$$\eta = 1 - \frac{1}{3} \left[\frac{\rho \alpha + 1}{(\rho \alpha + 1)^2 - 1} - \rho \alpha \right] \tag{10}$$

式中, $\rho = A_s/bh_{o1}$, h_{o1} 为预制梁截面有效高度,由(C)以及(9)式,可得

$$\begin{aligned} M_2 &= \zeta f_y A_s \eta h_o - \eta_1 A_s h_{o1} \\ &= \omega A_s \eta h_o + \eta_1 A_s \eta h_o \left(1 - \frac{\eta h_{o1}}{\eta h_o} \right) \end{aligned}$$

从中可解得

$$\omega = \frac{M_2 - \eta_1 A_s \eta h_o \left(1 - \frac{\eta h_{o1}}{\eta h_o} \right)}{\eta h_o A_s}$$

再把

$$\sigma_1 A_s = \frac{M_1}{\eta h_{01}}$$

代入,有

$$\sigma_2 = \frac{M_2(1 - \beta)}{\eta h_o A_s} \tag{11}$$

其中

$$\beta = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{\eta h_o}{\eta h_{01}} - 1 \right) \tag{12}$$

计算表明,内力臂系数 η 与 η 相差不多,为方便,可取 η/η 为 1,于是

$$\beta = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{h_o}{h_{01}} - 1 \right) \tag{13}$$

这样,我们便推得了纵向钢筋应力控制计算公式为

$$\sigma_1 + \sigma_2 \leqslant 0.9 f_y \tag{14}$$

其中:

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{\eta A_s h_{01}}, \quad \sigma_2 = \frac{M_2(1 - \beta)}{\eta h_o A_s} \tag{15}$$

3 计算比较

在 GBJ10-89 规范中,钢筋应力控制计算公式与(14)式相同,但 σ_1 和 σ_2 与(15)式不同,它们为

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{0.87 A_s h_{01}}, \quad \sigma_2 = \frac{0.5(1 + \frac{h_1}{h}) M_2}{0.87 A_s h_o} \tag{16}$$

该公式相当于(15)式中 η 、 η 取 0.87,影响系数 β 取

$$\beta = 0.5 \left(1 - \frac{h_1}{h} \right) \tag{17}$$

时的表达式.李树瑶教授在九四年《水力发电学报》上,根据其试验点,取 $M_1/M_{u1} > 0.25$ (M_{u1} 为预制梁极限弯矩)的下包线方程为

$$\beta = 0.45 \left(1 - \frac{h_1}{h} \right) \tag{18}$$

表 1 将李树瑶教授的试验结果和我们的试验结果与(13)、(17)、(18)三式的计算结果进行了比较

表 1 (13) 、(17) 、(18) 三式计算结果比较

| $b \times h$ (mm × mm) | $\frac{h_1}{h}$ | $\frac{h_{01}}{h_0}$ | M_1 (kN · m) | M_2 (kN · m) | $\frac{M_1}{M_2}$ (%) | $\frac{M_1}{M_u}$ (%) | $\beta_{观}$ | $\beta_{季}$ | $\beta_{文}$ | $\beta_{试}$ |
|---------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 950×420 | 0.55 | 0.49 | 18.30 | 197.00 | 9.3 | 26 | 0.00 | 0.00 | 0.095 | 0.10 |
| 144×445 | 0.306 | 0.278 | 2.77 | 65.00 | 4.3 | 25 | 0.35 | 0.31 | 0.11 | 0.11 |
| 150×444 | 0.318 | 0.285 | 7.93 | 53.60 | 14.8 | 61 | 0.34 | 0.31 | 0.37 | 0.37 |
| 150×350 | 0.400 | 0.366 | 2.76 | 30.39 | 9.1 | 231 | 0.30 | 0.27 | 0.16 | 0.11 |
| 150×453 | 0.280 | 0.247 | 6.75 | 75.97 | 8.9 | 66 | 0.36 | 0.32 | 0.27 | 0.30 |
| 150×348 | 0.402 | 0.3665 | 2.76 | 38.60 | 7.1 | 24 | 0.30 | 0.27 | 0.12 | 0.11 |
| 150×347 | 0.403 | 0.367 | 5.59 | 25.56 | 21.9 | 46 | 0.30 | 0.27 | 0.32 | 0.35 |
| 150×352 | 0.398 | 0.361 | 5.58 | 31.46 | 17.7 | 46 | 0.30 | 0.27 | 0.31 | 0.35 |
| 148×358 | 0.397 | 0.356 | 6.63 | 28.50 | 23.3 | 46 | 0.30 | 0.27 | 0.42 | 0.40 |
| 150×350 | 0.414 | 0.379 | 7.06 | 28.10 | 25.1 | 63 | 0.29 | 0.26 | 0.41 | 0.40 |
| 149×310 | 0.442 | 0.405 | 2.27 | 30.55 | 7.4 | 20 | 0.28 | 0.25 | 0.11 | 0.11 |
| 150×308 | 0.555 | 0.523 | 2.85 | 33.34 | 8.5 | 22 | 0.22 | 0.20 | 0.08 | 0.12 |
| 150×304 | 0.550 | 0.518 | 7.21 | 22.66 | 31.8 | 47 | 0.23 | 0.20 | 0.30 | 0.27 |
| 150×307 | 0.537 | 0.509 | 7.18 | 21.63 | 33.2 | 45 | 0.23 | 0.21 | 0.32 | 0.31 |
| 150×303 | 0.548 | 0.518 | 9.86 | 13.02 | 75.7 | 61 | 0.23 | 0.20 | 0.66 | 0.35 |
| 149×311 | 0.518 | 0.486 | 9.96 | 14.78 | 67.4 | 65 | 0.24 | 0.22 | 0.62 | 0.40 |

通过比较可以看出,对于经常使用的 $M_1/M_2 < 40\%$ 的迭合梁,本文给出的计算公式较好地反映了 β 值的变化规律,它与试验值吻合相当好,因此,建议在 $M_1/M_2 < 40\%$ 时,按本文提供的公式进行钢筋应力控制分析计算.

参 考 文 献

1 中华人民共和国国家标准.混凝土结构设计规范(GBJ10-89)

2 李树摇,赵顺波,王运霞.钢筋混凝土迭合梁受力试验研究.水力发电学报.1994 年 3 月

3 装配整体梁板研究专题科研组.装配整体梁板设计方法的试验研究.建筑结构学报.1982 年 6 月

4 裘进荪,林俊侠,张国英.钢筋混凝土迭合梁的试验研究.浙江大学学报.1991 年 1 月

5 郑州工学院张雷顺等.中小型钢筋混凝土梁板桥迭合整修分析与技术研究报告.1995 年 8 月

6 张雷顺,杨建水.钢筋混凝土双向板开裂与破坏的非线性有限元分析.水利学报.1994 年 4 月

Calculation of Reinforcing Steel for
Reinforced Concrete Pile-up Beam

Zhang Leishun Song Ruyu * Guo JinJun

(Zhengzhou University of Technology)

(Zhengzhou City Administration Engineering Management Department)

Abstract Based on pile-up beam tests and finite element analysis of reinforced concrete, a new type formula of reinforcing steel stress for reinforced concrete pile-up beam is established in this paper.

Keywords reinforced concrete; pile-up beam; reinforcing steel; stress