

钢筋砼梁正截面抗弯试验的计算机模拟

周衡稀

(华南农业大学工程技术学院, 广州, 510642)

摘要 文章提出了钢筋砼梁正截面抗弯试验的计算机模拟方法. 随着荷载的逐渐增加, 可在屏幕上显示出应力应变的分布和变化过程, 从而可进一步研究如何充分利用钢材的强化性能来进行延性构件的设计.

关键词 计算机模拟; 应力应变分析

中图分类号 TU 375.1; TU 317.1

钢筋砼梁正截面抗弯试验是建筑工程专业结构试验课的主要内容. 但目前该试验有不足之处. 首先, 试验过程只能测得截面的应变, 而截面的应力分布要由材料应力应变曲线转换得到. 在加载过程中截面中和轴上移的特性也只能从理论分析得出, 而不能直观其试验现象. 其次, 该试验需较多的经费投入, 若试验装置和技术手段不当, 还会导致试验结果不真实. 如果能借助于计算机的计算和图像显示功能, 将荷载逐级施加到模拟的构件上, 使其产生内力, 再利用已知的平截面假定和材料的应力应变关系建立平衡方程并求解, 便可得出截面应力图. 对应于每一级加荷, 可在屏幕上显示相应的截面应力图. 显然, 这样的软件对于学习钢筋砼构件弯曲基本理论起到形象化的作用. 此外, 由于荷载可以极缓慢的方式施加, 可使我们有可能会仔细分析截面的应力应变状态.

1 材料特性曲线

计算机模拟需对材料特性曲线量化.

1.1 钢材

本试验取 II 级钢. 采用的曲线形状(图 1)取自刘鸿文(1992)的报道. 曲线分 3 段, 第 3 段采用拟合 3 次 Lagrange 函数. 应力应变关系如下:

$$f_s(\epsilon) = \begin{cases} f_s(\epsilon)_1 = E_s \cdot \epsilon_s, & (0 \leq \epsilon_s < 0.0023), \\ f_s(\epsilon)_2 = 460 \text{ N/mm}^2, & (0.0023 \leq \epsilon_s < 0.0035), \\ f_s(\epsilon)_3 = 14.403 \times 10^6 \epsilon^3 - 195.74 \times 10^4 \epsilon^2 + 512.27 \times 10^2 \epsilon + 304.065, & (0.0035 \leq \epsilon_s \leq 0.028), \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_s ——钢材弹性模量, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$.

1.2 砼抗压及抗拉

本试验取 C40 砼, 采用的曲线形状(图 2)取自天津大学等(1980)的报道, 并拟合成 3 次 Lagrange 函数:

$$f_c(\epsilon) = -1.808 \times 10^9 \epsilon^3 - 2.076 \times 10^6 \epsilon^2 + 31.384 \times 10^3 \epsilon, \quad (0 \leq \epsilon_c \leq 0.0033). \quad (2)$$

取砼原点弹性模量 $E_c = 3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 砼开裂时的弹性模量近似取为 $1/4 E_c$, 可得出

C40 砼抗拉应力应变曲线(图3):

$$f_l(\epsilon) = -0.268 \times 10^{12} \epsilon^3 - 0.208 \times 10^8 \epsilon^2 + 3.250 \times 10^4 \epsilon, \quad (0 \leq \epsilon_1 \leq 0.015 \times 10^{-2}). \quad (3)$$

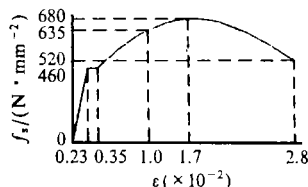


图1 II级钢应力应变曲线

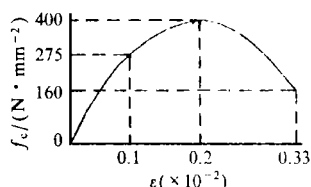


图2 C40 砼抗压应力应变曲线

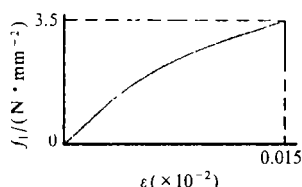


图3 C40 砼抗拉应力应变曲线

2 静力平衡方程和软件

计算机模拟试验的实质是建立和求解平衡方程,在给定内力的情况下求解砼应力分布.这时截面既要满足变形协调条件,还要满足静力平衡方程.变形协调条件由材料应力应变关系曲线和平截面假定(图4a)来满足,平衡方程则由截面应力分布图(图4b)写出,截面各应力的合力和合力矩如下:

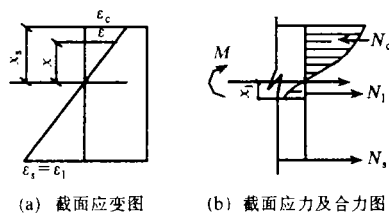


图4 截面应变及应力、合力图

$$N_s = \begin{cases} N_{s_1} = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s, & (0 \leq \epsilon_s < 0.0023), \\ N_{s_2} = 460 \cdot A_s, & (0.0023 \leq \epsilon_s < 0.0035), \\ N_{s_3} = A_s \cdot f_s(\epsilon)_3, & (0.0035 \leq \epsilon_s \leq 0.028), \end{cases} \quad (4)$$

式中: A_s ——受拉钢筋截面面积.

$$N_c = \int_0^{x_s} f_c(\epsilon) \cdot b \cdot dx, \quad (0 \leq \epsilon_c \leq 0.0033), \quad (5)$$

式中: b ——截面宽度.

$$N_l = \int_0^{x_1} b \cdot f_l(\epsilon) \cdot dx = \begin{cases} N_{l_1}, & (0 \leq \epsilon_1 < 0.00015), \\ N_{l_2}, & (\epsilon_1 \geq 0.00015), \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_1 ——拉区砼未开裂的高度,开裂前 $x_1 = h_0 - x_s$,开裂后 $x_1 = 0.00015x_s/\epsilon_c$.

N_l 采用分段函数,表示砼开裂前后的两种状态.

$$M_s = \begin{cases} M_{s_1} = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s (h_0 - x_s), & (0 \leq \epsilon_s < 0.0023), \\ M_{s_2} = 460 \cdot A_s (h_0 - x_s), & (0.0023 \leq \epsilon_s < 0.0035), \\ M_{s_3} = A_s \cdot f_s(\epsilon)_3, & (0.0035 \leq \epsilon_s \leq 0.028). \end{cases} \quad (7)$$

$$M_c = \int_0^{x_s} f_c(\epsilon) \cdot b \cdot x \cdot dx, \quad (0 \leq \epsilon_c \leq 0.0033). \quad (8)$$

$$M_l = N_l \cdot x_l = \begin{cases} N_{l_1} (h_0 - x_s), & (0 \leq \epsilon_1 < 0.00015), \\ N_{l_2} (0.00015x_s/\epsilon_c), & (\epsilon_1 \geq 0.00015). \end{cases} \quad (9)$$

以上 M_s 、 M_c 、 M_l 分别为钢筋拉力、砼压应力合力、砼拉应力合力对中和轴之距.

展开(4)~(9)式,并将由平截面假定得到的 $\epsilon_s = (h_0/x_s - 1)\epsilon_c$ 代入各式并整理,则方程中只有变量 x_s 和 ϵ_c .

以上 N 、 M 可组成截面静力平衡方程组.因为有些函数分段表示,因此,有必要将整个试

验过程进行分段. 与实际试验相似, 第一段为砼开裂前, 第二段为砼开裂到钢筋屈服, 考虑钢筋进入流动阶段后有强化阶段, 故将原来的第Ⅲ段分成Ⅲ_a、Ⅲ_b两段, 其中Ⅲ_b为钢筋强化阶段. 分段后各段应满足的平衡方程如下:

$$\text{I:} \begin{cases} N_c - N_{l_1} - N_{s_1} = 0, \\ M_c + M_{l_1} + M_{s_1} - M = 0, \end{cases} \quad (\varepsilon_s = \varepsilon_1 < 0.00015), \quad (10)$$

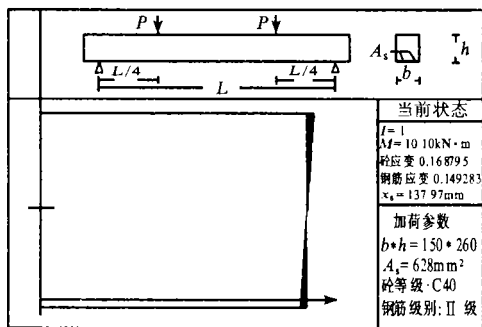
$$\text{II:} \begin{cases} N_c - N_{l_2} - N_{s_1} = 0, \\ M_c + M_{l_2} + M_{s_1} - M = 0, \end{cases} \quad (0.00015 \leq \varepsilon_s < 0.0023), \quad (11)$$

$$\text{III}_a: \begin{cases} N_c - N_{l_2} - N_{s_2} = 0, \\ M_c + M_{l_2} + M_{s_2} - M = 0, \end{cases} \quad (0.0023 \leq \varepsilon_s < 0.0035), \quad (12)$$

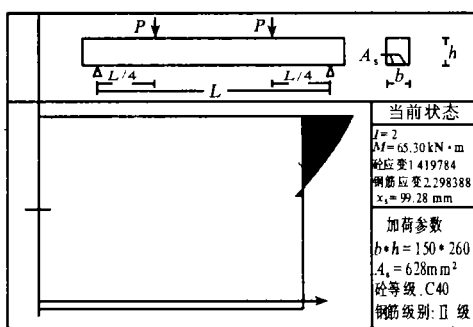
$$\text{III}_b: \begin{cases} N_c - N_{l_2} - N_{s_3} = 0, \\ M_c + M_{l_2} + M_{s_3} - M = 0, \end{cases} \quad (0.0035 \leq \varepsilon_s < 0.028), \quad (13)$$

式中: M ——截面弯矩, 单位 $N \cdot \text{mm}$, 在模拟试验中需逐渐加大, 直到应变达极限值.

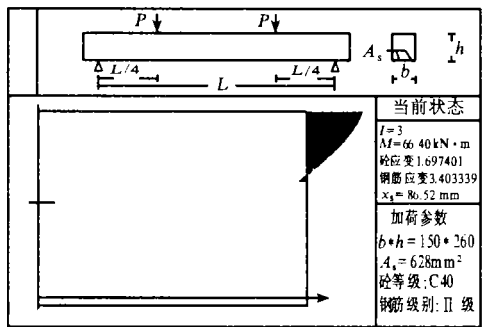
软件设计的核心是求解(10)~(13), 得出 x_s 和 ε_c , 并判断当前 ε_c 、 ε_s 所处的状态. M 的增加使 ε_c 逐渐增大. 在 M 增大的过程中, 当用某一阶段的方程组得出的 ε_c 已超界时, 本次计算结果无效, 采用前一次得到的 ε_c 、 x_s 为初始值, 进入下一阶段的方程求解. 这样, 程序中 M 的增加就相当于试验装置中荷载的增加. 以计算机的计算和图像显示功能, 算出的应力分布可立即显示在屏幕上. 从屏幕上显示的连续变化的图形, 可形象地看出截面的应力变化过程.



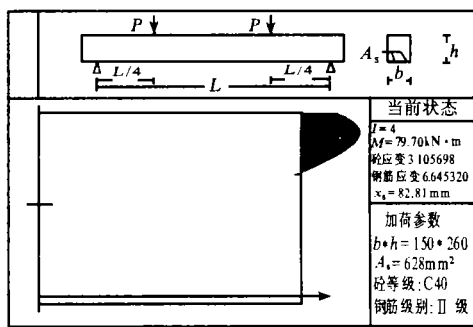
(a)



(b)



(c)



(d)

图5 屏幕显示的应力图

3 模拟计算结果的分析

本文选用的试验设计参数除前述提到的Ⅱ级钢、C40 砼外,截面为 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$,采用 2 根 $d = 20 \text{ mm}$ 的钢筋, $A_s = 628 \text{ mm}^2$. 图 5 为屏幕显示的截面应力图形. 为显示清楚起见,将砼拉应力值放大 10 倍标注.

在模拟试验中,发现了一些有趣的和值得进一步探讨的现象. 主要有以下内容:其一,初始中和轴的位置. 常规认为:中和轴在矩形截面中间,加钢筋后中和轴位置应向下移,这一点在模拟试验中得到证实. 其二,中和轴的移动情况. 过去我们认为在截面弯曲破坏过程中,中和轴总是不断上移,直到截面破坏,但在模拟试验中发现,中和轴上移有突变性,并且有相当的时间向下移. 在截面最后破坏前,也有中和轴向下移的现象. 而总体造成中和轴上移主要是由于砼开裂和钢筋屈服进入流动阶段形成的. 其三,截面应变与 M 的关系. 天津大学等(1980)给出的 $M/M_p \sim f$ 图表明,当 $M = M_p$ 时,砼受压区边缘应变 $\epsilon_c = \epsilon_{c \max}$,截面开始破坏. 计算机模拟只能做到这里为止,而得不出 $M \sim f$ 的下降段. 通常认为从钢筋屈服到截面破坏 M 的增量约 5%,但本模拟试验结果却有 18%,这或许与钢筋应力应变曲线中强化段的表达式有关,同时也提示我们如何利用钢筋的强化性能准确评价构件的强度储备和极限变形是一个值得探讨的问题.

4 讨论与结论

4.1 对钢筋砼梁正截面抗弯试验的计算机模拟,发现了实际实验所忽略或难以得到的一些现象;如中和轴初始位置及移动的性质.

4.2 对砼和钢材应力应变曲线的定量表达,可充分利用钢材的强化性能、定量计算构件的强度储备、对于延性结构设计有比较重要的意义.

4.3 本模拟试验的方法对其它级别的钢筋和砼也同样适用.

参 考 文 献

刘鸿文.1992.材料力学.第3版.北京:高等教育出版社,29

天津大学,同济大学,南京工学院,等.1980.钢筋砼结构.北京:中国建筑工业出版社,21

Computer Simulation of Bending Test on Reinforced Concrete Beam

Zhou Hengxi

(College of Polytechnic, South China Agric. Univ., Guangzhou, 510642)

Abstract In this paper computer simulation method is provided for bending test on reinforced concrete beam cross section. The distribution and variation process of stress and strain can be seen on the screen while load increasing. On this basis we can study how to use the utilization of the steel strengthening property abundantly to design the ductile members of the structure.

Key words computing simulation ; analysis of stress-strain

【责任编辑 柴 焰】