第20卷 第3期 华侨大学学报(自然科学版) Vol.20 No.3
1999年7月 Journal of Huaqiao University (Natural Science) Jul.1999

预应力砼梁截面的配筋与延性分析*

方德平 林雨生

(华侨大学土木工程系,泉州 362011)

摘要 讨论合理配筋的方法,使部分预应力砼梁既满足裂缝控制和承载能力的要求,又具有接近普通砼梁的延性. 提出适用于钢筋砼或预应力砼的梁或柱矩形截面的弯矩-轴力-曲率的计算方法;又提出适用于钢筋砼、部分预应力砼、预应力砼截面曲率延性的统一计算方法. 分析与预应力砼梁截面延性相关的主要因素并计算了两个最重要因素的预应力度(PPR)和配筋指数(ω)对延性的影响. 计算结果表明,延性随PPR和ω的增大而降低,当ω降低时,PPR对延性的影响更为敏感,与预应力梁的试验结果相符. 兼顾延性和抗裂的要求,一级抗震$\omega \leq 0.25$, PPR≤ 0.5;二级抗震$\omega \leq 0.35$, PPR≤ 0.7.

关键词 部分预应力砼,弯矩,曲率,预应力度,配筋指数,延性

分类号 TU 378.802

为使预应力砼梁能满足裂缝控制、承载力和抗震的要求,需要控制配筋限值,使其具有接近于普通砼结构的延性和耗能. 这是一个重要的研究课题[1]. 影响预应力梁弯曲延性的主要因素除了与普通砼梁相类似的一些因素以外,还与预应力筋含量、钢材的应力—应变关系、有效预应力和预应力筋位置等因素有关. 其中配筋指数ω和预应力度PPR是两个有直接影响的参数. 本文从理论上探讨这两个参数的效应.

1 基本假设

本文作以下基本假设. (1) 截面变形服从平截面假设. (2) 预应力筋、普通钢筋与砼的粘结良好. (3) 在预应力单独作用下或砼开裂前,构件处于线弹性状态. (4) 砼的应力-应变关系取用规范GB10-89的理论曲线,其方程为

$$\left.\begin{aligned} \sigma_c &= f_{cmk}[2\epsilon_c/\epsilon_o - (\epsilon_c/\epsilon_o)^2] \qquad (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_o), \\ \sigma_c &= f_{cmk} \qquad (\epsilon_o \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}), \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中f_{cmk}为砼弯曲抗压强度标准值,σ_c和ϵ_c为砼的应力和应变,$\epsilon_o = 0.002$, $\epsilon_{cu} = 0.0033$. 开裂后,不计裂缝截面处砼的拉应力. (5) 普通钢筋为理想弹塑性材料,其应力-应变关系为

$$\left.\begin{aligned} \sigma_s &= E_s\epsilon_s \qquad (\epsilon_s \leq \epsilon_y), \\ \sigma_s &= f_{yk} \qquad (\epsilon_s \leq \epsilon_y), \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中σ_s和ϵ_s为钢筋的应力和应变,f_{yk}为钢筋抗拉强度标准值,E_s为钢筋弹性模量,ϵ_y为钢筋

* 本文1998-12-30收到

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

屈服应变, $\epsilon_y = f_{yk}/E_s$; 忽略受压钢筋的影响 . (6) 预应力筋的应力–应变关系如图 1 所示 . 图中 E_p, E_1, E_2 为 3 段弹性模量, 其中 $E_1 = (\sigma_{0.2} - \sigma_e)/(\epsilon_{0.2} - \epsilon_e)$, $E_2 = (\sigma_{pu} - \sigma_{0.2})/(\epsilon_{pu} - \epsilon_{0.2})$. 本文只讨论有粘结的预应力砼 .

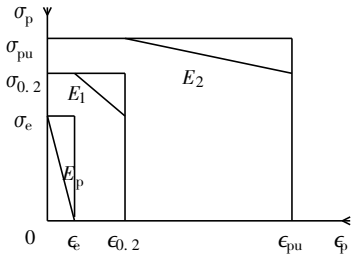
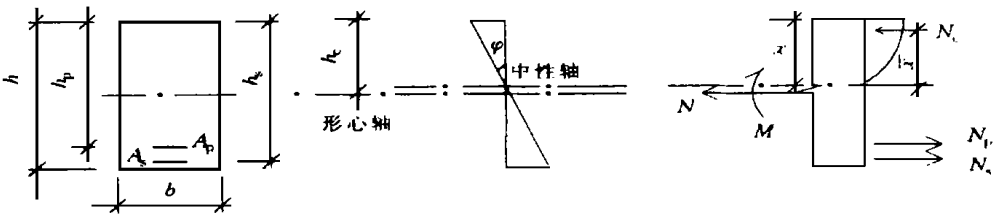


图1　预应力筋的应力- 应变关系

2　截面的弯矩–轴力–曲率关系

当截面承受的弯矩小于开裂弯矩时, 其 M–N–φ 关系依基本假设而容易求解. 因篇幅所限, 在此不予赘述 . 截面开裂后, M–N–φ 较为复杂, 本文将提出具体的计算方法. 在图 2 中, 砼、非预应力筋和预应力筋的合力分别为 N_c, N_s 和 N_p, 截面承受的弯矩和轴力分别为 M 和 N (N 以拉为正) .



(a) 截面　　(b) 应变　　(c) 应力

图 2　开裂截面的应变及应力

由弹性计算可得预应力筋处砼的应变为零时, 预应力筋的应变 ϵ_{po} 为

$$\epsilon_{po} = (N_{pe} - A_s\sigma_{l5})/E_pA_p + (N_{pe} - A_s\sigma_{l5})/E_cA_n + (N_{pe} - A_s\sigma_{l5})(h_p - h_c)^2/E_cI_n, \quad (3)$$

式中 N_{pe} 为有效预拉力, E_c 为砼弹性模量, A_n 和 I_n 分别为砼净截面(扣除预应力筋截面面积或孔洞面积, 但包括非预应力钢筋的换算截面面积) 面积和惯性矩, σ_{l5} 为砼收缩、徐变所引起的非预应力筋压应力(可按规范公式计算) . 预应力筋的应变为

$$\epsilon_p = \varphi(h_p - x) + \epsilon_{po}. \quad (4)$$

由式(4) 和图 1 的应力–应变关系, 可得预应力筋承受的总拉力(N_p) 为

$$N_p = C_1 + C_2(h_p - x)\varphi, \quad (5)$$

式中当 $\epsilon_p \le \epsilon_e$ 时, $C_1 = \epsilon_{po}E_pA_p$, $C_2 = E_pA_p$; 当 $\epsilon_e < \epsilon_p \le \epsilon_{0.2}$ 时, $C_1 = [\sigma_e + (\epsilon_{po} - \epsilon_e)E_1]A_p$, $C_2 = E_1A_p$; 当 $\epsilon_{0.2} < \epsilon_p \le \epsilon_{pu}$ 时, $C_1 = [\sigma_{0.2} + (\epsilon_{po} - \epsilon_{0.2})E_2]A_p$, $C_2 = E_2A_p$. 非预应力筋的应变为

$$\epsilon_s = \varphi(h_s - x) - \sigma_{l5}/E_s. \quad (6)$$

由式(6) 和式(2) 的应力–应变关系, 可得非预应力筋承受的拉力(N_s) 为

$$N_s = E_sA_s(h_s - x)\varphi - \sigma_{l5}/A_s. \quad (7)$$

当钢筋已屈服时, $\epsilon_s > \epsilon_y$, $N_s = f_{yk}A_s$.

由于砼的应力–应变曲线为分段曲线, 所以应分成两种情况来分析 . 第一种情况($\varphi x \le \epsilon_0$) 为 $N_c = f_{cmk}bx^2\varphi\epsilon_0 - f_{cmk}bx^3\varphi^2/3\epsilon_0^2$, $N_c\bar{x} = 2f_{cmk}bx^3\varphi/3\epsilon_0 - f_{cmk}bx^4\varphi^2/4\epsilon_0^2$. 第二种情况($\epsilon_0 < \varphi x \le \epsilon_{cu}$) 为 $N_c = f_{cmk}bx - f_{cmk}b\epsilon_0/3\varphi$, $N_c\bar{x} = f_{cmk}bx^2/2 - f_{cmk}b\epsilon_0^2/12\varphi^2$. 由平衡关系得

$$-N_c + N_p + N_s = N, \quad (8)$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

$$N_c\bar{x} + N_p(h_p - x) + N_s(h_s - x) = M + N(h_c - x). \quad (9)$$

已知 M 和 N,则可求出 x,φ的计算步骤.(1) 给定一个 x_i 值($x_i = ih/n$, n 为截面的等分数),对不同的 φ_j值($\varphi_j = j\epsilon_{cu}/nx_i$),依式(8)求出相应的 N_{ij}. 比较 N_{ij},N 和 $N_{i,j-1}$,从而找出满足式(8)解的 x_i 和 φ_k. 对于具体的 x_i 值,式(8)可能无解,也可能多解. 在本计算中,取截面等分数(n)为 100,i 和 j 的取值范围为 1 至 100. 把 x_i,φ_k代入式(9),求出相应的 M_{ik}.(2) 比较 $M_{i-1,k}$,M 和 M_{ik},从而找出满足式(9)的解 x,φ.(3) 依式(5),(7)计算预应力筋、非预应力筋的应力.

本文的 M-N-φ关系的计算方法,实现了梁、柱、预应力和普通砼截面的计算工作的统一.

3 算例分析

算例数据:砼为 C_{40};非预应力筋为Ⅱ级钢筋;预应力筋 $\sigma_e = 1\ 305$ MPa, $\sigma_{0.2} = 1\ 440$ MPa, $\sigma_{pu} = 1\ 670$ MPa;有效预拉应力 $\sigma_{pe} = 900$ MPa, $\epsilon_e = 6.252\times10^{-3}$, $\epsilon_{0.2} = 9.2\times10^{-3}$, $\epsilon_{pu} = 0.04$;截面 $b = 300$ mm, $h = 900$ mm, $h_s = 860$ mm, $h_p = 830$ mm. 本文对不同的配筋指数[$\omega = (f_{py}A_p + f_yA_s)/bh_of_c$]和预应力度[$PPR = f_{py}A_p/(f_{py}A_p + f_yA_s)$]进行了计算[1]. f_{py},f_y,f_c分别为预应力筋、非预应力筋抗拉强度设计值和砼轴心抗压强度设计值,其中 $f_{py} = 1\ 130$ MPa, $f_y = 310$ MPa, $f_c = 19.5$ MPa, h_o 为 N_p 和 N_s 合力点位置. 为体现材料的实际强度,在 M-N-φ关系的计算中,砼强度取其弯曲抗压强度标准值,非预应力筋强度取其抗拉强度标准值.

在图 3 中,φ_r 为荷载作用下所产生的曲率,即 φ和预应力反拱曲率的和. 结构的延性性质可取延性指数(μ)的大小来度量. 对于普通砼,延性的定义很明确,$\mu = \varphi_u/\varphi_y$,即受拉钢筋屈服时的弯矩为 M_y,相应的曲率为 φ_y,极限弯矩为 M_u,相应的曲率为 φ_u. 对于预应力砼,延性 μ 没有一个统一的定义[2,3]. 本文认为,对全预应力砼而言,其延性可定义为 $\mu = \varphi_u/\varphi_{0.2}$(预应力筋达到条件屈服点时的弯矩为 $M_{0.2}$,相应的曲率为 $\varphi_{0.2}$,对于部分预应力砼而言,由普通钢筋砼过渡到全预应力砼,可按 $\mu = \varphi_u/\varphi'$定义,式中 $\varphi' = (1-PPR)\varphi_y + PPR\varphi_{0.2}$. 这样的定义既体现了普通钢筋和预应力筋各自屈服的特点,又考虑各自所起的作用,同时适用于普通砼、部分预应力、全预应力砼. 从图3可看出 ω对截面曲率延性 μ 影响很大,同时 μ 随着 PPR 的增大而降低. 从图 4 可看出,截面延性随 PPR 和 ω的增大而降低;在 ω降低时,PPR 对延性的影响更为敏感,这与文献[1]的试验结果相符. 当 $\omega = 0.3$, $PPR = 1$, $\mu = 2.6$; $PPR = 0.6$ 时, $\mu = 3.2$, μ 提高

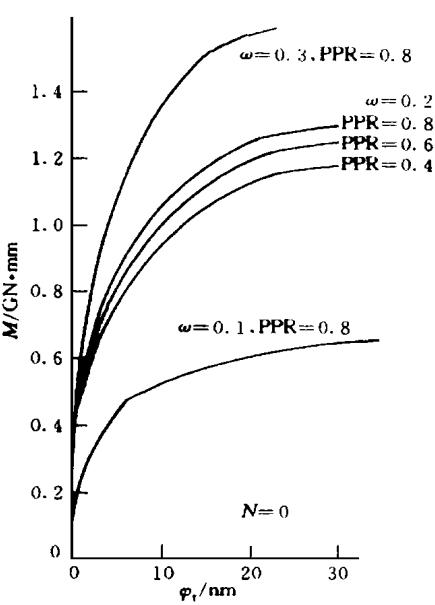


图 3 不同 ω和 PPR 的 M-φ_r曲线

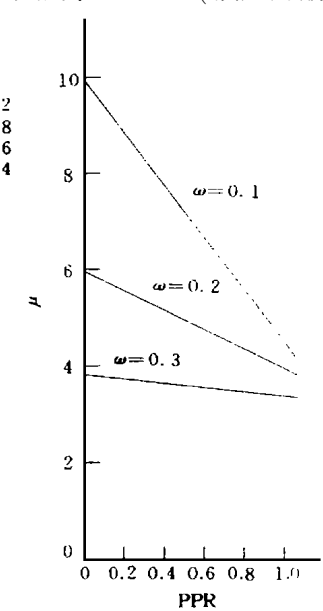


图 4 不同 ω的 μ-PPR 曲线

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www

了 23%, 可见部分预应力砼能有效地提高梁的延性 .

4　结论

综上所述, 可得几点结论 . (1) 由于影响部分预应力砼结构延性性能的因素较多, 故用 M-N-φ关系算法进行非线性分析, 可进一步认识其受力机理和各影响因素之间的关系 . (2) 本文提出的延性定义可适用普通、部分预应力、全预应力砼构件, 概念较为明确 . (3) 影响延性的最主要因素是 ω, PPR 也有一定影响; 当 ω较低时, PPR 的影响较为敏感 . (4) 理论计算表明, 若兼顾延性和抗裂的要求, 文献 [1] 所提的抗震配筋限值是适宜的, 即在一级抗震时, $\omega \leq 0.25$, PPR≤ 0.5; 二级抗震时, $\omega \leq 0.35$, PPR≤ 0.7.

本文为校科研基金资助项目 .

参　考　文　献

1　唐九如, 吕志涛 . 预应力混凝土延性框架抗震配筋限值研究 . 建筑结构学报, 1996, 17(1): 20～28
2　杜拱辰 . 部分预应力混凝土 . 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 30～56
3　林雨生, 方德平 . 部分预应力砼受弯构件的延性分析 . 华侨大学学报(自然科学版), 1996, 17(1): 28～34

Reinforcement and Ductility Analysis at the Section of Prestressed Concrete Beam

Fang Deping　　Lin Yusheng
(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract　A discussion is devoted to the method of reinforcement which enables beam of partially prestressed concrete(PPC) to meet the requirement of crack control and load bearing capacity and to have ductility close to that of common concrete beam. Then, the authors present a method applicable to calculating bending moment-axial force-curvature at the rectangular section of reinforced concrete (RC) or prestressed concrete (PC) beam or column; and present a unified formula for calculating curvature ductility at RC, PPC and PC beam section; and analyse main factors relevant to ductility at PC beam section; and calculate the effect of prestressed degree (PPR) and reinforcement index (ω) as two most important factors on ductility. The results from calculation reveal that the ductility decreases with the increase of PPR and ω, and the effect of PPR is even more sensitive at a low ω, which coincides with the results in literature. To give attention to the requirement of both ductility and crack resistance, the values of ω and PPR for earthquake resistance are chosen as follows: $\omega \leq 0.25$, PPR≤ 0.5 for 1st grade earthquake resistance; $\omega \leq 0.35$, PPR≤ 0.7 for 2nd grade one.

Keywords　partially prestressed concrete, bending moment, curvature, prestressed degree, reinforcement index, ductility

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww