

文章编号:1671-1637(2018)02-0023-08

基于裂缝宽度的部分预应力混凝土梁设计方法

杜进生¹, 刘 玲¹, 冯 威², 许 冰²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 西安公路研究院, 陕西 西安 710054)

摘 要:为了简化部分预应力混凝土梁的设计过程,减少设计试算的次数,缩小预应力筋用量的取值范围,提出了基于裂缝宽度的部分预应力混凝土梁设计方法;从正常使用状态的裂缝宽度出发,根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)(简称《公路规范》)中对裂缝宽度的规定,通过最大裂缝宽度求解受拉区普通钢筋的应力,并建立关于开裂截面中性轴高度的一元三次方程;根据预应力筋的有效应变要求,结合《公路规范》中最小配筋率的规定,得到了预应力筋用量的上、下限;给出了设计方法的主要步骤和具体验算过程,并设计了1根T形截面试验梁,以验证设计方法的合理性。研究表明:验算梁的抗弯承载力及预应力筋用量的上、下限满足规范要求;试验梁的荷载与挠度基本呈现三折线关系,在外荷载为50.0 kN时,试验梁跨中出现裂缝,外荷载为128.5 kN时,试验梁受拉普通钢筋屈服,外荷载为157.8 kN时,试验梁跨中混凝土压碎破坏,试验梁总体呈延性破坏特征,满足承载性能要求;在受拉普通钢筋屈服前,试验梁实测最大裂缝宽度为0.18 mm,未超过预估的最大裂缝宽度0.20 mm,满足正常使用要求。可见,提出的设计方法合理、可行,能够简化部分预应力混凝土梁的设计过程。

关键词:桥梁工程;部分预应力混凝土梁;设计方法;裂缝宽度;钢筋应力;预应力筋用量

中图分类号:U448.35

文献标志码:A

Design method of partially prestressed concrete beam based on crack width

DU Jin-sheng¹, LIU Ling¹, FENG Wei², XU Bing²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to simplify the design process of partially prestressed concrete (PPC) beam and reduce the number of trial calculation and the range of prestressed reinforcement amount, a design method of partially prestressed concrete (PPC) beam based on crack width was proposed. Starting from the crack width under normal service condition and based on the regulations of crack width in *Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts* (JTG D62—2004) (*Highway Code* for short), the stress of non-prestressed reinforcement in tensile region was derived based on the maximum crack width. A cubic equation was established to calculate the neutral axis height of cracking section. Then based on the requirements of effective strain of prestressed reinforcement and the provisions of the minimum reinforcement ratio in *Highway Code*, the maximum and minimum amounts of prestressed reinforcement were obtained. Key design procedure and a detailed design example were also presented. Furthermore, a T-shaped test girder was designed to verify the design proposed method. Research result shows that the flexural bearing capacity and the maximum and minimum

收稿日期:2017-12-12

基金项目:陕西省交通科技项目(13-19K);宁波市科技计划项目(2015C110020)

作者简介:杜进生(1966-),男,甘肃靖远人,北京交通大学教授,工学博士,从事部分预应力混凝土桥梁受力性能研究。

amount of prestressed reinforcement of designed girder can meet the code requirements. The load and deflection of test girder basically show a tri-line relationship. When the external load is 50.0 kN, crack occurs in the midspan of test girder. When the external load is 128.5 kN, the tensile non-prestressed reinforcement yields. When the external load is 157.8 kN, the concrete is broken in the midspan of test girder. The test girder designed by the proposed method exhibits the characteristics of ductile failure and can meet the requirements of bearing performance. The measured maximum crack width of test girder is 0.18 mm before the non-prestressed reinforcement yielding and less than the predicted maximum crack width 0.20 mm, which means that it can meet the requirements of normal use. Obviously, the proposed design method is reasonable and feasible for practical design. It can simplify the design procedure of PPC beam. 9 figs, 25 refs.

Key words: bridge engineering; partially prestressed concrete beam; design method; crack width; reinforcement stress; amount of prestressed reinforcement

Author resume: DU Jin-sheng(1966-), male, professor, PhD, jshdu@bjtu.edu.cn.

0 引 言

部分预应力混凝土结构在许多地区已经被接受并应用于实际工程当中^[1-2],但其并没有统一的定义。Naaman 提出部分预应力混凝土构件的必要与充分条件是构件中应有一定的预应力筋和非预应力筋共同承受外荷载^[3]。《部分预应力混凝土结构设计建议》中定义预应力度为 0~1 的构件为部分预应力构件;ACI-ASCE 联合委员会将部分预应力定义为使用预应力筋或预应力筋和非预应力筋组合的一种设计和施工方法。这种方法使得在使用阶段的恒载和活载作用下,由于受弯引起的混凝土拉应力及裂缝宽度均在允许范围之内,同时还能满足结构使用要求和强度要求。与全预应力混凝土结构相比,部分预应力混凝土结构能够提高其延性、吸能性、经济性和开裂后刚度,并能减小由预应力引起的结构反拱和徐变变形^[4-9]。合理地利用部分预应力混凝土结构,可以避免普通钢筋混凝土结构中由于变形和裂缝导致的不良后果^[10]。

在混凝土受弯构件设计中,美国主要有(极限)强度设计法(USD)和工作应力设计法(WSD)2 种方法^[3],其中工作应力设计法是指构件在工作荷载下的应力不得超过容许应力。全预应力混凝土梁主要根据工作应力设计,同时满足强度要求;钢筋混凝土梁则主要根据强度来设计,同时也可以采用工作应力设计法;部分预应力混凝土梁的设计方法介于二者之间,目前并没有关于部分预应力混凝土结构设计的具体规定和步骤。Naaman 等提出了一种同时满足使用要求和强度要求的部分预应力混凝土梁的

设计方法^[11];Karayannis 等对比了欧洲规范和美国规范,并分别基于 2 种规范中裂缝控制规定提出了部分预应力混凝土梁的设计方法^[12];Abeles 建立了满足承载能力极限状态要求的部分预应力混凝土梁的设计方法^[13],方法同时适用于普通钢筋混凝土梁和全预应力混凝土梁;孙宝俊等采用以拉应力系数控制裂缝的方法简化了部分预应力混凝土的设计计算^[14],方法能合理地选配预应力筋和普通钢筋;王勇强等根据卸载系数提出了基于部分预应力混凝土梁中裂缝闭合性能的裂缝控制设计方法,在设计中通过控制裂缝的允许宽度来确定预应力^[15]。与普通钢筋混凝土梁和全预应力混凝土梁不同的是,部分预应力混凝土梁由普通钢筋和预应力筋同时承受外荷载,这在其设计中增大了 2 种配筋组合的灵活性,但由于 2 种钢筋的取值范围较宽,使得设计试算过程变得更加冗杂,因此,在部分预应力混凝土梁的设计中,主要问题是如何合理地确定普通钢筋和预应力筋的用量,使其满足相应规范的强度要求和正常使用要求。

目前,对于部分预应力混凝土结构的设计,常采用的方法有预应力比率法、预应力度法、名义拉应力法^[16]、最佳预应力区间法、控制开裂法等^[17-18]。部分预应力混凝土梁的设计一般从应力出发,通过给定预应力度,进行反复试算配筋使其满足承载力和正常使用要求^[19]。现有部分预应力混凝土梁的设计方法需要进行反复试算及验算,以提高设计精度,或对其中的参数进行简化、舍弃,以减少试算配筋的次数,但这样会降低设计精度,导致配筋率有偏差。鉴于此,从正常使用状态下裂缝宽度出发,根据《公

路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62—2004)(简称《公路规范》)中对裂缝宽度的规定,计算普通钢筋应力和预应力筋用量的上限,并结合最小配筋率的要求,缩小预应力筋用量的取值范围,减少复核算次数,以简化部分预应力混凝土梁的设计过程。

1 基于裂缝宽度设计方法的建立

1.1 受拉区普通钢筋应力与裂缝宽度的关系

在部分预应力混凝土梁的设计中,裂缝的控制是通过控制其最大宽度来实现的,目前有多种部分预应力混凝土梁弯曲裂缝开展宽度的计算方法^[20-24]。《公路规范》规定:在Ⅰ、Ⅱ类环境中,钢筋混凝土构件的最大裂缝宽度为0.20 mm,而采用钢丝或钢绞线的预应力混凝土构件的最大裂缝宽度限定为0.10 mm。虽然《公路规范》未明确给出部分预应力混凝土梁的裂缝限制要求,但由于部分预应力混凝土梁的普通受拉钢筋一般布置在预应力筋外缘,部分预应力构件的最大裂缝宽度可采用和普通钢筋混凝土构件相同的限值,即0.20 mm。

《公路规范》规定,矩形、T形、I形截面钢筋混凝土构件及允许出现裂缝的预应力混凝土受弯构件的最大裂缝宽度 w 为

$$w = \frac{C_1 C_2 C_3 \sigma_s (30 + d)}{E_s (0.28 + 10\rho)} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{A_s + A_p}{b_w h_0 + (b_f - b_w) h_f} \quad (2)$$

$$C_2 = 1 + \frac{N_1}{2N_s} \quad (3)$$

式中: C_1 为钢筋表面形状系数; C_2 为作用(或荷载)长期效应影响系数; N_1 为按作用(或荷载)长期效应组合计算的内力; N_s 为按作用(或荷载)短期效应组合计算的内力; C_3 为与构件受力性质有关的系数; σ_s 为受拉区普通钢筋应力; E_s 为受拉区普通钢筋弹性模量; ρ 为纵向钢筋配筋率,当 $\rho > 0.020$ 时,取 $\rho = 0.020$,当 $\rho < 0.006$ 时,取 $\rho = 0.006$; d 为纵向受拉钢筋直径; A_s 为受拉区普通钢筋截面积; A_p 为受拉区预应力筋截面积; b_f 、 h_f 分别为构件受拉翼缘宽度和高度; h_0 为受拉区钢筋合力点至受压区边缘的距离; b_w 为腹板宽度。

在部分预应力混凝土梁中,普通钢筋对截面应力及变形的影响均较大^[25],因此,在初步计算 σ_s 时,配筋率 ρ 的取值不考虑预应力筋的影响。变换式(1)~(3)即可得到受拉区普通钢筋的应力为

$$\sigma_s = \frac{w E_s (0.28 + 10\rho)}{C_1 C_2 C_3 (30 + d)} \quad (4)$$

由此可见,根据《公路规范》中规定的最大裂缝宽度 w 可以确定部分预应力混凝土梁中受拉区普通钢筋的应力。由式(4)可知:受拉区普通钢筋应力的影响因素主要有最大裂缝宽度、钢筋参数(直径、等级和形状)、配筋率、荷载类型、构件受力形式等。

图1为钢筋直径不同时受拉区普通钢筋应力与配筋率的关系曲线,计算时带肋钢筋 $C_1 = 1.0$,长期效应影响系数 $C_2 = 1.4$,非板类受弯构件 $C_3 = 1.0$,钢筋等级为HRB400, $E_s = 2.0 \times 10^5$ MPa,最大裂缝宽度 $w = 0.15$ mm。由图1可知:当钢筋直径为18 mm,配筋率由0.01增大到0.02时,受拉区普通钢筋应力由169.64 MPa增大到214.28 MPa,增幅为26.3%,即当钢筋直径相同时,受拉区普通钢筋应力随配筋率的增大而增大;当配筋率为0.03,钢筋直径由20 mm减小至18 mm时,受拉区普通钢筋应力由248.57 MPa增大为258.93 MPa,增幅为4.2%,即当配筋率相同时,受拉区普通钢筋应力随钢筋直径的增大而减小。

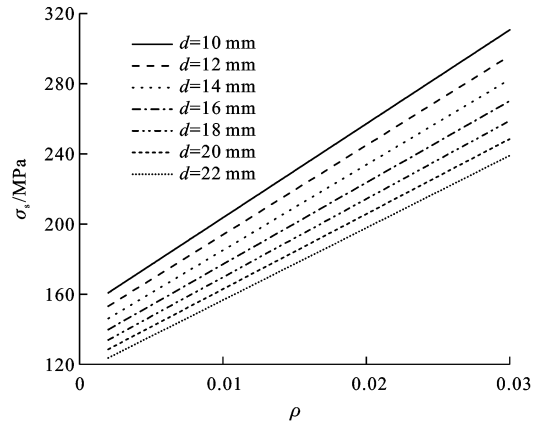


图1 不同钢筋直径下的 σ_s - ρ 曲线

Fig. 1 Relationship curves of σ_s - ρ under different reinforcement diameters

不同最大裂缝宽度下受拉区普通钢筋应力与配筋率的关系曲线见图2,计算时钢筋直径 $d = 14$ mm,其余参数与图1中相同,可知:当最大裂缝宽度为0.20 mm,配筋率由0.01增大到0.02时,受拉区普通钢筋应力由246.75 MPa增大到311.69 MPa,增幅为26.3%,即当最大裂缝宽度相同时,受拉区普通钢筋应力随配筋率的增大而增大;当配筋率为0.03,最大裂缝宽度由0.15 mm增大至0.20 mm时,受拉区普通钢筋应力由282.47 MPa增大为376.62 MPa,增幅为33.3%,即当配筋率相同时,受拉区普通钢筋应力随最大裂缝宽度的增大而增大。

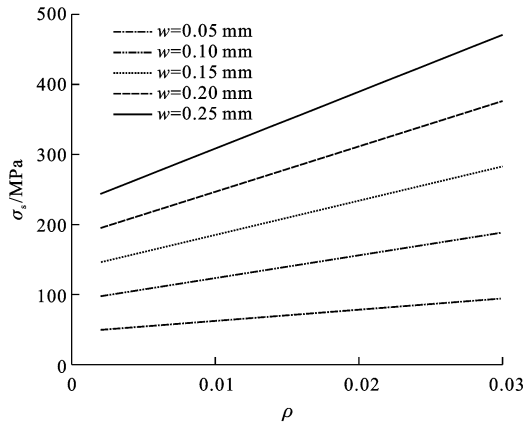
图2 不同最大裂缝宽度下的 σ_s - ρ 曲线Fig. 2 Relationship curves of σ_s - ρ under different maximum crack widths

图1、2对比可知:相较于钢筋直径,最大裂缝宽度对 σ_s - ρ 曲线的影响较大;当配筋率较大时,最大裂缝宽度对受拉区普通钢筋应力的影响较为明显。

1.2 预应力筋用量上限

计算部分预应力混凝土梁开裂截面中性轴位置时,依然遵循平截面假定。图3为T形截面梁的受力图示,其中: b'_f 、 h'_f 分别为受压翼缘宽度和高度; h_t 为截面总高度; A'_s 为受压区普通钢筋截面积; h_s 、 h'_s 、 h_p 分别为受压区混凝土边缘至受拉区普通钢筋、受压区普通钢筋、预应力筋中心的距离; x 为中性轴高度; F_s 、 F'_s 分别为受拉区和受压区普通钢筋内力; ϵ_c 、 ϵ'_c 分别为翼缘板最上、最下缘混凝土应变; ϵ_s 、 ϵ'_s 分别为受拉区和受压区普通钢筋应变; F_p 、 ϵ_p 、 $\Delta\epsilon_p$ 分别为预应力筋内力、有效应变及应变增量; F_c 为按受压翼缘宽度以及中性轴高度计算的混凝土内力; F'_c 为按受压区翼缘宽度与腹板宽度之差以及中性轴高度和受压翼缘高度之差计算的混凝土内力。

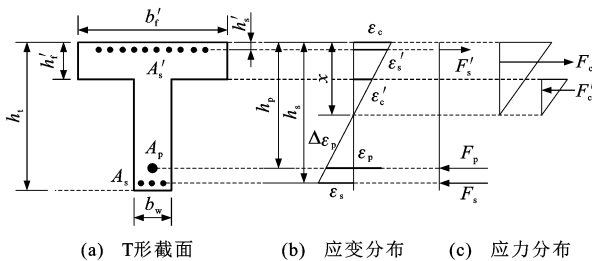


图3 T形截面应变与应力

Fig. 3 Strains and stresses of T-shaped section

根据式(4)可得到受拉区普通钢筋应力,进而可按式(5)、(6)求得 F_s 、 ϵ_s ,即

$$F_s = A_s \sigma_s \quad (5)$$

$$\epsilon_s = \sigma_s / E_s \quad (6)$$

已知受拉区普通钢筋应变,按照平截面假定可

以按式(7)~(10)求出 ϵ_c 、 ϵ'_c 、 ϵ'_s 以及 $\Delta\epsilon_p$,即

$$\epsilon_c = \frac{x \epsilon_s}{h_s - x} \quad (7)$$

$$\epsilon'_c = \frac{\epsilon_s (x - h'_f)}{h_s - x} \quad (8)$$

$$\epsilon'_s = \frac{\epsilon_s (x - h'_s)}{h_s - x} \quad (9)$$

$$\Delta\epsilon_p = \frac{\epsilon_s (h_p - x)}{h_s - x} \quad (10)$$

根据式(7)~(10)中的应变可求得受压区混凝土内力 F_c 与 F'_c 与 F'_s 、 F_p ,将式(7)代入 $F_c = b'_f x \epsilon_c E_c / 2$ (E_c 为混凝土弹性模量)可得

$$F_c = \frac{b'_f x^2 \sigma_s}{2 \alpha_E (h_s - x)} \quad (11)$$

式中: α_E 为钢筋与混凝土弹性模量比。

将式(8)代入 $F'_c = \epsilon'_c E_c (b'_f - b_w) (x - h'_f) / 2$ 可得

$$F'_c = \frac{(b'_f - b_w) (x - h'_f)^2 \sigma_s}{2 \alpha_E (h_s - x)} \quad (12)$$

将式(9)代入 $F'_s = A'_s \epsilon'_s E'_s$ 可得

$$F'_s = \frac{A'_s \sigma_s (x - h'_s)}{h_s - x} \quad (13)$$

式中: E'_s 为受压区普通钢筋弹性模量。

将式(10)代入 $F_p = A_p (\epsilon_p + \Delta\epsilon_p) E_s$ 可得

$$F_p = A_p \epsilon_p E_s + \frac{A_p \sigma_s (h_p - x)}{h_s - x} \quad (14)$$

由图3可得到T形截面力和力矩平衡关系为

$$F_c - F'_c + F'_s - F_s - F_p = 0 \quad (15)$$

$$\frac{2F_c x}{3} - \frac{2F'_c (x - h'_f)}{3} + F'_s (x - h'_s) +$$

$$F_s (h_s - x) + F_p (h_p - x) = M \quad (16)$$

式中: M 为正常使用阶段外荷载产生的弯矩。

将式(15)乘以 $h_p - x$ 后与式(16)联立并化简,可得

$$F_c \left(h_p - \frac{x}{3} \right) - F'_c \left(h_p - \frac{x}{3} - \frac{2h'_f}{3} \right) +$$

$$F'_s (h_p - h'_s) - F_s (h_p - h_s - 2x) = M \quad (17)$$

将式(5)、(11)~(13)计算所得内力代入式(17)中,可得到关于中性轴高度 x 的一元三次方程

$$Bx^3 + Dx^2 + Gx + H = 0 \quad (18)$$

$$B = -\frac{b}{2} \quad (19)$$

$$D = \frac{3b_w h_p}{2} \quad (20)$$

$$G = \frac{3h'_f (b'_f - b) (2h_p - h'_f)}{2} - 3\alpha_E (A_s h_s + A'_s h'_s) + 3\alpha_E h_p (A_s + A'_s) + \frac{3\alpha_E M}{\sigma_s} \quad (21)$$

$$H = -\frac{h'_f(b'_f - b)(3h_p - 2h'_f)}{2} + 3\alpha_E(A_s h_s^2 + A'_s h'^2_s) - \frac{3\alpha_E h_p(A_s h_s + A'_s h'_s) - 3\alpha_E M h_s}{\sigma_s} \quad (22)$$

再将计算所得内力代入式(15)中,可计算出预应力筋的有效应变 ϵ_p 为

$$\epsilon_p = \frac{\sigma_s}{A_p E_s (h_p - x)} \left[\frac{b'_f x^2 - (b'_f - b)(x - h'_f)^2}{2\alpha_E} + \frac{A'_s(x - h'_s) - A_s(h_s - x) - A_p(h_p - x)}{h_p - x} \right] \quad (23)$$

由式(23)可知,要计算预应力筋的有效应变 ϵ_p , 首先需要给出预应力筋面积 A_p , 由于部分预应力混凝土梁中预应力筋的有效应变 $\epsilon_p \geq 0$, 则预应力筋面积的最大值 $A_{p,\max}$ 为

$$\begin{cases} A_{p,\max} = \left\{ [b'_f x^2 - (b'_f - b_w)(x - h'_f)^2] / 2\alpha_E + \right. \\ \left. A'_s(x - h'_s) - A_s(h_s - x) \right\} / (h_p - x) \\ x \geq h'_s \text{ 且 } x \leq h_p \leq h_s \end{cases} \quad (24)$$

由此,可以根据部分预应力混凝土梁中预应力筋面积的上限 $A_{p,\max}$ 来选定实际的预应力筋面积 A_p , 并可根据式(14)计算所需的预应力。

1.3 普通钢筋和预应力筋下限

《公路规范》规定,混凝土受弯构件纵向受拉钢筋的最小配筋率 ρ_{\min} 应取式(25)中的较大值,同时还规定部分预应力混凝土受弯构件中受拉普通钢筋的截面积不应小于 $0.003b_w h_s$, 即

$$\rho_{\min} = \max\{0.002, 0.45f_t/f_y\} \quad (25)$$

$$A_s \geq 0.003b_w h_s \quad (26)$$

$$A_p \geq \rho_{\min} A_c - 0.003b_w h_s \quad (27)$$

式中: f_t 为混凝土受拉强度设计值; f_y 为钢筋屈服强度设计值; A_c 为混凝土截面积。

由此,确定了部分预应力混凝土梁中钢筋用量的下限,结合前述已经求出的预应力筋用量上限,可缩小预应力筋用量的取值范围。

1.4 承载力复核

部分预应力混凝土梁按正常使用极限状态的允许裂缝宽度要求进行设计后,需验算其抗弯承载力是否满足要求。在此仅给出第1类T形截面抗弯承载力复核公式,即

$$f_{py} A_p + f_y A_s = \alpha_s f_c b'_f x + f'_y A'_s \quad (28)$$

$$M_u = \alpha_s f_c b'_f x (h_s - x/2) + f'_y A'_s (h_s - h'_s) \quad (29)$$

$$M_1 \leq M_u \quad (30)$$

式中: f_{py} 为预应力筋抗拉强度设计值; α_s 为等效矩形应力系数; M_u 为构件的正截面抗弯承载力设计值; M_1 为承载力极限状态构件外弯矩; f'_y 为受压钢筋屈

服强度设计值; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值。

第2类T形截面及其他截面可参照《公路规范》进行。此外,部分预应力混凝土梁还应按照《公路规范》中第6.5.2条的要求进行挠度验算。

1.5 主要计算步骤

通过上述分析,基于裂缝宽度的部分预应力混凝土梁的设计步骤为:根据规范及工程实际给出最大裂缝宽度 w ; 根据式(26)中普通钢筋最小用量初步假定受拉区与受压区普通钢筋的用量; 根据式(4)计算开裂截面受拉钢筋应力; 根据式(18)~(22)计算中性轴高度; 根据式(24)计算预应力筋用量上限,并由此选定预应力筋用量; 根据式(25)验算是否满足普通钢筋和预应力筋用量下限要求; 根据式(27)复核抗弯承载力,若不满足承载力要求,则按所计算的预应力筋用量上下限,重新选定预应力筋用量进行设计,直至满足要求为止。

2 设计方法验算

混凝土标号为C40, $E_c = 3.25 \times 10^4$ MPa; 普通钢筋等级为HRB400, 直径 $d = 14$ mm, 弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5$ MPa; 预应力筋采用1860钢绞线; 使用阶段外弯矩 $M = 2000$ kN·m; 承载力极限状态外弯矩 $M_1 = 2200$ kN·m; 截面为T形, 尺寸见图4, 其中: $h_t = 900$ mm, $b_w = 300$ mm, $b'_f = 900$ mm, $h'_f = 200$ mm, $h'_s = 50$ mm, $h_s = 850$ mm, $h_p = 800$ mm。

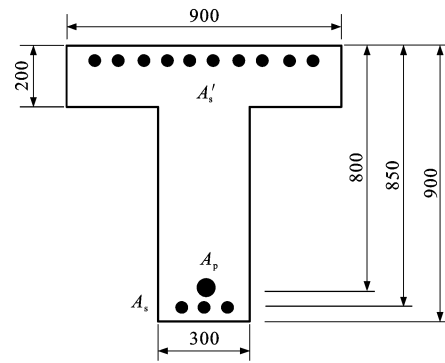


图4 T形截面尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Dimensions of T-shaped section (unit: mm)

采用基于裂缝宽度的设计方法对算例进行配筋设计并验算:

(1) 根据《公路规范》确定最大裂缝宽度 $w = 0.2$ mm。

(2) 初步假定普通钢筋用量, 根据式(26)可知 $A_s = 770 \text{ mm}^2 > 0.003b_w h_s = 765 \text{ mm}^2$, $A'_s = 462 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.002 < 0.006$, 则受拉区普通钢筋用量为 $5\Phi 14$, 受压区普通钢筋用量 $3\Phi 14$, 配筋率 $\rho = 0.006$ 。

(3) 计算开裂处普通钢筋应力, 取 $C_1 = 1.0, C_2 = 1.4, C_3 = 1.0$, 则根据式(4)计算可得 $\sigma_s = 220.78 \text{ MPa}$ 。

(4) 计算中性轴高度, 根据式(19)~(22)可得 $B = -150, D = 3.60 \times 10^5, G = 4.25 \times 10^8, H = -1.66 \times 10^{11}$, 将其代入式(18)中, 可解得中性轴高度 $x = 316.5 \text{ mm}$ 。

(5) 计算预应力筋面积的上限, 根据式(24)可得 $A_{p, \max} = 13\ 186.7 \text{ mm}^2$, 因此, 取 $A_p = 2\ 000 \text{ mm}^2 < A_{p, \max}$, 满足要求。

(6) 验算是否满足钢筋用量下限的要求, 根据式(25)、(26), $A_s = 770 \text{ mm}^2 > 0.003b_w h_s = 765 \text{ mm}^2$, 满足要求, $\rho = 0.0110 > \rho_{\min} = 0.0028$, 满足要求。

(7) 承载力复核, 经计算, 该 T 形截面为第 2 类 T 形截面, 则参照《公路规范》可得 $M_u = 2\ 406 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_1 = 2\ 200 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 因此, 该部分预应力混凝土梁满足抗弯承载力要求。

图 5 为不同外弯矩作用下算例 T 形梁预应力筋应变与受拉区普通钢筋应力的关系曲线, 在外弯矩发生变化时, 可用于合理估计预应力筋应变和受拉区普通钢筋应力, 可知: 在外弯矩保持不变时, 预应力筋应变随受拉区普通钢筋应力的增大而减小, 这也说明了在部分预应力混凝土梁受拉区, 由预应力筋和普通钢筋共同承担外荷载; 当外弯矩增大时, 曲线在 σ_s 较小时不连续, 这是由于预应力筋的应变在此时已超限; 外弯矩较小, σ_s 较大时, 可能会出现 $\epsilon_p < 0$ 的点而使曲线不连续; 若曲线中出现 $\epsilon_p < 0$ 的点, 意味着在相应的使用外弯矩下, 实际预应力筋用

量的上限小于式(18)中的计算值。

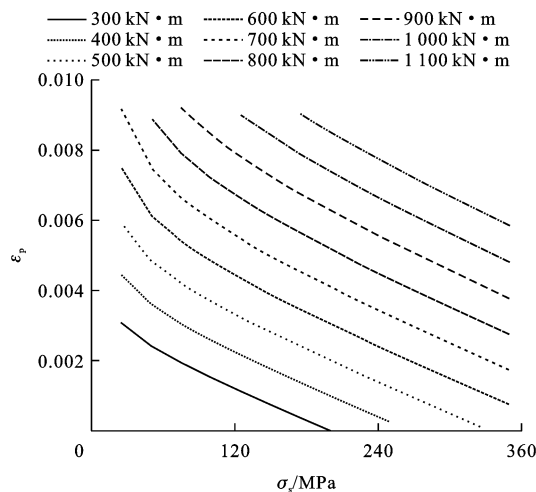


图 5 不同外弯矩下 ϵ_p - σ_s 关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of ϵ_p - σ_s under different external bending moments

3 设计方法验证

根据本文提出的方法及步骤, 设计了 1 根部分预应力混凝土 T 形试验梁, 在三分点位置对该试验梁进行对称加载。试验梁尺寸见图 6, 其中: $h_t = 300 \text{ mm}, b_w = 100 \text{ mm}, b'_f = 300 \text{ mm}, h'_f = 80 \text{ mm}$, 混凝土标号为 C40, 普通钢筋等级为热轧二级 HRB400(Φ)、二级带肋钢筋 HPB335(Φ), 钢绞线等级为 1860(Φ^s)。按使用阶段最大裂缝宽度为 0.2 mm 进行配筋设计, 设计使用荷载为 100 kN , 普通钢筋用量 $A_s = 402.2 \text{ mm}^2, A'_s = 785 \text{ mm}^2$ 。由式(4)计算

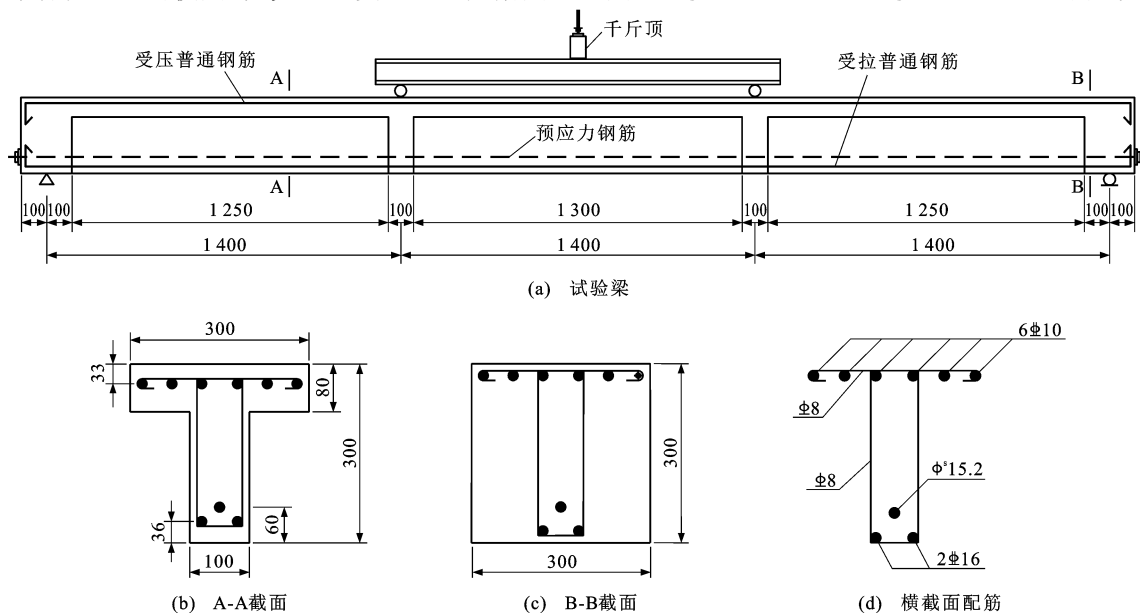


图 6 试验梁尺寸(单位: mm)

Fig. 6 Dimensions of test girder (unit: mm)

得到开裂截面受拉钢筋应力 $\sigma_s = 229.8 \text{ MPa}$; 由式(18)中的系数 $B = -50, D = 3.60 \times 10^4, G = 2.05 \times 10^7, H = -2.53 \times 10^9$, 计算得到中性轴高度 $x = 106.7 \text{ mm}$; 由式(24)计算得到预应力筋用量上限 $A_{p, \max} = 195.3 \text{ mm}^2$, 最终实际的预应力筋用量 $A_p = 140 \text{ mm}^2$ 。

当外荷载为 50.0 kN 时, 试验梁跨中部位出现裂

缝, 裂缝随外荷载的增加而不断发展, 大部分裂缝为竖向裂缝, 分布在三分点之间的纯弯段中; 外荷载为 128.5 kN 时, 受拉普通钢筋屈服; 外荷载为 157.8 kN 时, 梁跨中部混凝土压碎破坏。试验梁总体呈现出延性破坏的特征, 具有较好的受力性能。图 7 为加载过程中试验梁的裂缝分布, 图 8 为试验梁破坏形态, 设计使用荷载下实测裂缝最大宽度为 0.18 mm。

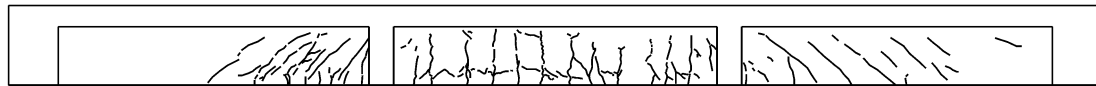


图7 试验梁裂缝分布

Fig. 7 Distribution of crack of test girder

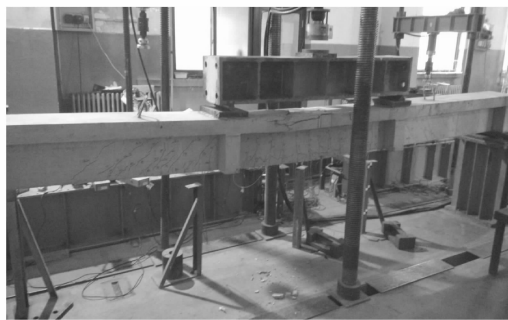


图8 试验梁破坏形态

Fig. 8 Failure mode of test girder

图 9 为试验梁荷载与跨中挠度全过程关系曲线, 可知: 荷载与挠度基本呈三折线关系, 分别以梁底部受拉区混凝土开裂和受拉区非预应力筋屈服为转折点; 第 1 阶段从开始加载到受拉区混凝土开裂, 该阶段荷载-挠度曲线近似为直线, 梁的挠度较小, 处于弹性受力阶段; 第 2 阶段从受拉区混凝土开裂到受拉区普通钢筋屈服, 受拉区有一部分混凝土退出工作, 跨中部位梁底出现裂缝并不断向上发展, 与第 1 阶段相比, 梁的变形速度有所增加; 当受拉区普通钢筋屈服后, 荷载-挠度曲线进入第 3 阶段, 挠度

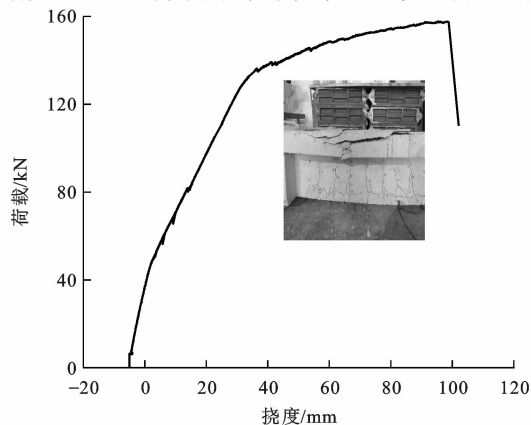


图9 试验梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 9 Load-midspan deflection curve of test girder

以更快的速度增加, 该阶段梁上新增加的荷载主要由预应力筋承担, 此时梁的裂缝发展更为迅速, 裂缝宽度也明显增大, 随着荷载的增加, 梁趋向破坏。受拉普通钢筋屈服以前, 实测最大裂缝宽度未超过预估的最大裂缝宽度 0.20 mm。按照本文方法设计的试验梁在正常使用阶段和承载能力极限状态下均表现出良好的受力性能。

4 结 语

(1) 根据《公路规范》中最大裂缝宽度的要求对部分预应力混凝土梁的设计过程进行了简化。首先根据最小配筋率来估计普通钢筋用量, 并按照规范规定的最大裂缝宽度计算受拉区普通钢筋应力。在此基础上, 建立了关于开裂截面中性轴高度的一元三次方程, 从而可得到预应力筋用量的上、下限。

(2) 按照提出的设计方法所确定的预应力筋用量的上、下限, 缩小了部分预应力混凝土梁设计过程中预应力筋用量的取值范围, 减少了复核算次数, 简化了部分预应力混凝土梁的设计过程。

(3) 按照提出的设计方法所设计的试验梁呈现出较好的受力性能, 设计方法验算及试验梁静载试验结果均表明提出的设计方法合理可行。

(4) 通过试验验证了本文设计方法在梁设计阶段的适用性, 其是否能够应用于梁体加固时钢筋用量的计算还有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] AU F T K, SU R K L, TSO K, et al. Behaviour of partially prestressed beams with external tendons[J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(6): 455-467.
- [2] DU J S, AU F T K, CHAN E K H, et al. Deflection of unbonded partially prestressed concrete continuous beams[J]. Engineering Structures, 2016, 118: 89-96.

- [3] NAAMAN A E. Partially prestressed concrete: review and recommendations[J]. PCI Journal, 1985, 30(6): 30-71.
- [4] 张耀庭, 张江, 杨力. 预应力度对预应力混凝土框架结构抗震性能影响研究[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 129-136.
ZHANG Yao-ting, ZHANG Jiang, YANG Li. Research on the effects of prestressing ratio on the seismic capacity of prestressed concrete frame structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 129-136. (in Chinese)
- [5] Joint ACI-ASCE Committee 423. State-of-the-art report on partially prestressed concrete (ACI 423. 5R-99) [R]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2000.
- [6] RAKA I G P, TAVIO, ASTAWA M D. State-of-the-art report on partially-prestressed concrete earthquake-resistant building structures for highly-seismic region [J]. Procedia Engineering, 2014, 95: 43-53.
- [7] MOAWARD M, MAHMOND A, EL-KARMOTY H, et al. Behavior of corroded bonded partially prestressed concrete beams[J]. HBRC Journal, 2018, 14(1): 9-21.
- [8] CHERN J C, YOU C M, BAZANT Z P. Deformation of progressively cracking partially prestressed concrete beams[J]. PCI Journal, 1992, 37(1): 74-84.
- [9] SCHOLZ H. Simple deflection and cracking rules for partially prestressed members[J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(2): 199-203.
- [10] AU F T K, DU J S. Partially prestressed concrete[J]. Progress in Structure Engineering and Materials, 2004, 2(6): 127-135.
- [11] NAAMAN A E, SIRIAKSOM A. Serviceability based design of partially prestressed beams, part 2—computerized design[J]. PCI Journal, 1979, 24(2): 68-89.
- [12] KARAYANNIS C G, CHALIORIS C E. Design of partially prestressed concrete beams based on the cracking control provisions[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 402-416.
- [13] ABELES P W. Design of partially prestressed concrete beams[J]. ACI Journal, 1967, 64(10): 669-677.
- [14] 孙宝俊, 郑文忠, 吕志涛. 部分预应力混凝土结构裂缝控制设计建议[J]. 中国公路学报, 1995, 8(2): 61-64.
SUN Bao-jun, ZHENG Wen-zhong, LU Zhi-tao. Crack-control design recommended for partially prestressed concrete structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(2): 61-64. (in Chinese)
- [15] 王勇强, 侯建国. 部分预应力混凝土梁考虑裂缝闭合性能的裂缝控制设计方法的研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(增): 1-5.
WANG Yong-qiang, HOU Jian-guo. Research on design methods of crack-controlling of partially prestressed concreted beams considering crack-closure[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(S): 1-5. (in Chinese)
- [16] 张昊宇, 郑文忠. 对用名义拉应力控制预应力混凝土受弯构件裂缝宽度方法的 2 点改进[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(6): 25-30.
ZHANG Hao-yu, ZHENG Wen-zhong. Two pieces of improvement on the crack width control method using nominal tensile stress for prestressed concrete flexural member[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(6): 25-30. (in Chinese)
- [17] 李子青, 万振江. 部分预应力混凝土桥梁设计方法的探讨[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(4): 147-151.
LI Zi-qing, WAN Zhen-jiang. Study on design method for partially prestressed concrete bridge [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(4): 147-151. (in Chinese)
- [18] 李忠诚, 李唐宁. 部分预应力 (PPC) 梁裂缝控制计算的探讨[J]. 建筑结构, 2001, 31(11): 24-28, 53.
LI Zhong-cheng, LI Tang-ning. Discussion on calculation of PPC beam crack controlling[J]. Building Structure, 2001, 31(11): 24-28, 53. (in Chinese)
- [19] SHAHAWI M E, BATCHELOR B D. Design methods for partially prestressed concrete—a review[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1987, 14(2): 269-277.
- [20] 蓝宗建, 温峰. 在使用荷载下出现裂缝的部分预应力砼梁裂缝宽度的计算[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(5): 19-27.
LAN Zong-jian, WEN Feng. Calculation of crack width in partially prestressed concrete beams under service load[J]. Journal of Building Structures, 1993, 14(5): 19-27. (in Chinese)
- [21] 于琦, 孟少平. 部分预应力混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法探讨[J]. 建筑结构, 2009, 39(3): 31-33.
YU Qi, MENG Shao-ping. Discussion on the method for calculating crack width of partial prestressed concrete beams[J]. Building Structure, 2009, 39(3): 31-33. (in Chinese)
- [22] 吴大宏, 赵人达. 基于神经网络的部分预应力混凝土梁荷载-裂缝模型研究[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(3): 231-235.
WU Da-hong, ZHAO Ren-da. The load and crack width model for partially prestressed concrete beams based on neural network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(3): 231-235. (in Chinese)
- [23] 杜生, 刘西拉. 无粘结部分预应力混凝土梁的挠度、裂缝宽度计算[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 70-73.
DU Jin-sheng, LIU Xi-la. Calculation of deflection and crack width in unbounded partially prestressed concrete beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 70-73. (in Chinese)
- [24] CHOWDHURY S H, LOO Y C. A new formula for prediction of crack widths in reinforced and partially prestressed concrete beams [J]. Advances in Structural Engineering, 2001, 4(2): 101-110.
- [25] 王军文, 梁志广, 李建中. 部分预应力混凝土梁的应力和变形[J]. 工程力学, 2002, 19(5): 108-113.
WANG Jun-wen, LIANG Zhi-guang, LI Jian-zhong. The stress and deformation of partially prestressed concrete beams [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(5): 108-113. (in Chinese)