

文章编号:1671-6833(2005)04-0001-04

钢筋钢纤维高强混凝土梁正截面开裂弯矩的计算方法

高丹盈, 张启明, 管巧艳

(郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 通过 12 根钢筋钢纤维高强混凝土梁的试验, 分析钢纤维对钢筋高强混凝土梁正截面抗裂弯矩的影响. 实验结果表明, 钢纤维的加入提高了钢筋高强混凝土梁的正截面开裂弯矩, 并随着钢纤维体积率的增加呈增长的趋势, 增加幅度在 40%~100% 之间; 纵向钢筋配筋率、梁的高度以及钢筋的强度等级对钢筋高强混凝土梁的开裂弯矩也有影响; 开裂弯矩随纵筋配筋率的增大以及随截面高度的减小而增大. 结合现行有关规范, 提出了钢筋钢纤维高强混凝土梁截面抵抗塑性影响系统的计算公式和钢筋钢纤维高强混凝土梁开裂弯矩的计算公式, 并用试验数据验证了该公式的正确性.

关键词: 钢纤维; 高强混凝土; 开裂弯矩

中图分类号: TU 528.572 文献标识码: A

0 引言

目前, 国内外对钢纤维高强混凝土基本力学性能已进行深入的研究^[1~9], 结果表明, 钢纤维的加入明显地提高高强混凝土的抗拉能力, 但对钢纤维增强高强混凝土构件的研究还较少. 本文将钢纤维应用到钢筋高强混凝土梁中, 对钢纤维增强钢筋高强混凝土梁正截面抗裂性能及其计算方法进行了试验研究, 给出了相应的计算公式.

1 试验概况

本次试验设计了 12 根钢筋钢纤维高强混凝土梁, 混凝土设计强度等级为 C70, 主要变化参数为: 纵筋配筋率、钢纤维体积率、梁高、钢筋强度等级等. 试验变化参数具体情况及钢筋实测强度见表 1 和表 2. 试验采用三分点对称加载, 测试内容

包括钢筋应变、混凝土应变、挠度等. 试验梁的尺寸、加载装置和测试内容见图 1. 开裂弯矩的实测值见表 3.

表 1 试验变化参数

Tab. 1 The parameters of tests			
配筋率 $\rho/\%$	钢纤维体积率 $\rho_f/\%$	梁高 h/mm	钢筋强度等级
0.77	0	200	Ⅱ级
1.39	0.5	250	
2.10	1.0	300	Ⅲ级
2.70	1.5	350	
	2.0		

表 2 钢筋强度实测值

Tab. 2 The tensile strength of reinforcement MPa					
钢筋等级	Ⅱ级 14	Ⅲ级 14	Ⅱ级 16	Ⅲ级 16	Ⅲ级 20
屈服强度	360.6	478.9	364.5	488.8	466.9
极限强度	549.1	662.8	547.0	646.4	617.4

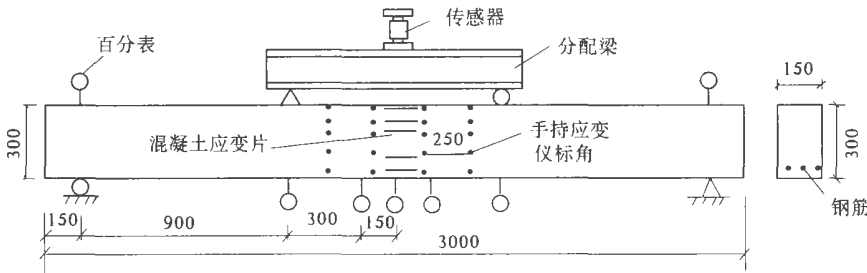


图 1 试验梁的加载装置图

Fig. 1 The test device figure of beam under load

收稿日期: 2005-07-20; 修订日期: 2005-09-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579068); 河南省杰出人才创新基金资助项目(0321000700)

作者简介: 高丹盈(1962-), 男, 河南三门峡人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事新型建筑复合材料研究.

表 3 开裂弯矩试验值和计算值

Tab.3 The test results and calculation results of crack-resistant moment

试件编号	计算弯矩 $M_{fcr}/(kN \cdot m)$	试验弯矩 $M_{fcr}^0/(kN \cdot m)$	M_{fcr}/M_{fcr}^0
2-1.5-Ⅱ-300	19.008	18.00	1.056
1-1.5-Ⅲ-300	17.906	15.75	1.137
2-1.5-Ⅲ-300	19.215	20.25	0.949
3-1.5-Ⅲ-300	20.321	20.25	1.004
4-1.5-Ⅲ-300	20.784	20.25	1.026
2-0-Ⅲ-300	13.960	11.25	1.241
2-0.5-Ⅲ-300	15.163	15.75	0.963
2-1.0-Ⅲ-300	16.504	20.25	0.815
2-2.0-Ⅲ-300	20.556	22.50	0.914
2-1.5-Ⅲ-250	13.769	18.00	0.765
2-1.5-Ⅲ-200	9.818	11.25	0.873
2-1.5-Ⅲ-350	25.102	24.30	1.033

说明:试件“2-1.5-Ⅲ-300”表示“纵筋配筋量-钢纤维体积率-钢筋强度等级-梁高”。

2 钢纤维体积率对开裂弯矩的影响

为了更加准确地反映钢纤维对开裂弯矩的影响,这里引入无量纲参数 α_{cr} ,以消除截面尺寸和混凝土强度对开裂弯矩的影响。 α_{cr} 的关系式为

$$\alpha_{cr} = \frac{M_{fcr}}{bh^2 f_t} \tag{1}$$

式中: b 为梁的宽度,mm; h_0 为截面有效高度,mm; M_{fcr} 为开裂弯矩,kN·m; f_t 为同强度等级混凝土抗拉强度设计值,MPa,按有关规范的规定取值; α_{cr} 为开裂弯矩相对值。

将本文开裂弯矩的试验结果(见表 3)代入式(1),得到钢筋钢纤维高强混凝土梁开裂弯矩相对值与钢纤维体积率变化的关系,见图 2。

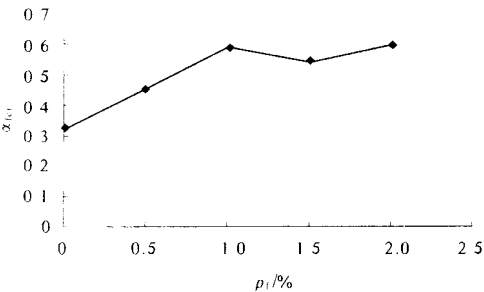


图 2 开裂弯矩相对值随钢纤维体积率的变化图
Fig.2 The relation of relative cracking moment with fiber volume ratio

从图 2 中可看出,随着钢纤维体积率的增加,钢筋钢纤维高强混凝土梁开裂弯矩相对值(α_{cr})

总体呈增长的趋势.钢纤维体积率为 1.5% 的梁的开裂弯矩相对值出现了稍低于含量为 1.0% 的梁的现象,这种现象可能是由于钢纤维体积率为 1.5% 的梁在浇筑振捣时不太均匀,出现了较薄弱截面的缘故.总的来说,钢纤维的加入显著提高了钢筋高强混凝土梁的开裂弯矩相对值,并随着钢纤维体积率的提高,开裂弯矩相对值也在不断提高,最多可提高约 89%.可见,钢纤维的加入延迟了裂缝的开展,提高了钢筋高强混凝土梁的抗裂性能.

另外,纵向钢筋配筋率、梁的高度以及钢筋的强度等级对钢筋高强混凝土梁的开裂弯矩也有影响.由表 3 的试验结果经计算表明,开裂弯矩相对值随纵筋配筋率的增大以及随截面高度的减小而增大.

3 正截面抗裂计算模型及计算方法

作者把借助于放大镜,用肉眼可见到的第一条裂缝出现时的弯矩定义为钢筋钢纤维高强混凝土梁正截面的开裂弯矩.试验结果表明,钢纤维的加入,提高了钢筋钢纤维高强混凝土梁受拉区混凝土的抗拉能力.同时,钢筋钢纤维高强混凝土梁开裂时,拉区混凝土的塑性变形较普通高强混凝土充分,具体表现为中性轴偏向压区一边,开裂时的极限拉应变有所提高等.因此,钢纤维对钢筋高强混凝土梁开裂弯矩的影响主要是对拉区混凝土抗拉强度的提高以及混凝土受拉区塑性影响系数的提高.基于以上分析,要想计算钢筋钢纤维高强混凝土梁的开裂弯矩,主要就是确定钢纤维高强混凝土的抗拉强度及梁受拉区的塑性影响系数.

钢纤维增强钢筋钢纤维高强混凝土梁开裂时,梁的受拉区呈现一定的塑性变形,应力分布图形为曲线形,最大应力达到钢纤维高强混凝土的极限抗拉强度 f_{ft} ;受拉边缘达到钢纤维混凝土极限拉应变 ϵ_{fu} ;梁受压区的钢纤维混凝土处于弹性阶段,应力分布图形为直线形,受压区边缘钢纤维高强混凝土应力为 σ_c ,受压区边缘钢纤维高强混凝土应变为 ϵ_c .依据以上分析,可得钢筋钢纤维高强混凝土梁的正截面抗裂计算模型如图 3 所示.

根据图 3 所建模型,可得梁正截面开裂弯矩计算公式为

$$M_{fcr} = f_{ft} W_{fs} = M_c + M_s \tag{2}$$

式中: M_{fcr} 为开裂弯矩; W_{fs} 为截面对受拉边缘的弹塑性抵抗矩; f_{ft} 为钢纤维高强混凝土的抗拉强

度; M_{fc} 为钢纤维高强混凝土承担的弯矩; M_s 为钢筋承担的弯矩。

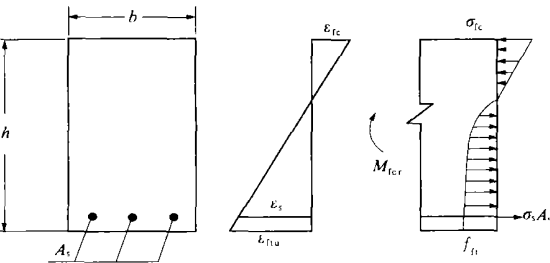


图 3 正截面抗裂计算模型

Fig. 3 The calculating model of cracking moment

由于受拉区应力分布为曲线形, 所以直接求解开裂弯矩 M_{cr} 的方法比较麻烦. 为了简便起见, 本文仍然参照普通钢筋混凝土构件的处理方法, 也采用等效换算的方法, 换算后截面及其应力分布图见图 4. 因而有

$$M_{cr} = \gamma_{ft} W_{f0} \quad (2)$$

式中: γ 为梁的截面抵抗矩塑性影响系数; W_{f0} 为梁折算截面对受拉边缘的弹性抵抗矩.

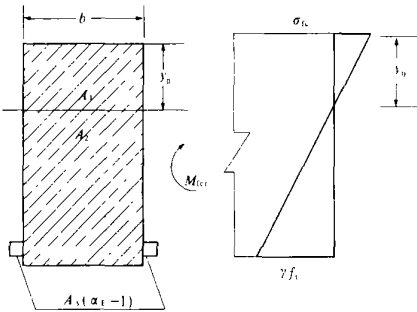


图 4 换算截面及其应力分布图

Fig. 4 The equivalent section and stress distribution

对比 2) 式和 3) 式可得:

$$\gamma = W_{fs} / W_{f0} \quad (3)$$

所以只需求出 γ 和 f_{ts} 就可以方便地得到钢筋钢纤维高强混凝土梁的开裂弯矩 M_{cr} 的计算值.

3.1 γ 的确定

为了确定截面对受拉边缘的弹塑性抵抗矩 W_{fs} , 本文采用了图 5 的简化计算模型, 把受拉区分为弹性区和塑性区.

图 5 中, x_c 为受压区高度, x_e 为受拉区弹性部分高度, x_p 为受拉区塑性部分高度. 为了简化计算, 假定 $\epsilon_{tu} = 2\epsilon_{f0}$, 即: $x_e = x_p = \frac{h-x_c}{2}$, ϵ_{f0} 为钢纤维高强混凝土应力达到抗拉强度时的应变, ϵ_{tu} 为钢纤维高强混凝土的极限拉应变, ϵ_s 为钢筋

应变.

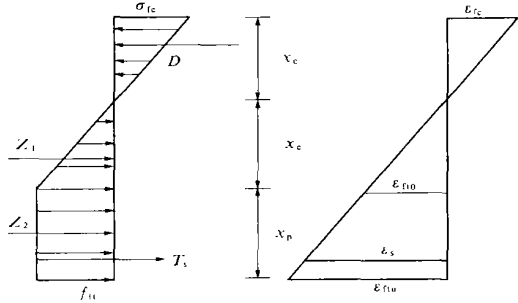


图 5 正截面抗裂简化计算模型

Fig. 5 The simplified calculation model

由图 5, 利用材料力学公式, 可求出:

$$W_{fs} = \frac{2bx_c^3}{3(h-x_c)} + \frac{11b(h-x_c)^2}{24} + 2\alpha_E \rho b h_0 \frac{(h_0-x_c)^2}{h-x_c} \quad (4)$$

式中: α_E 为纵向钢筋弹性模量与钢纤维高强混凝土弹性模量的比值; ρ 为纵向钢筋配筋率.

按照等效变换的原则把钢筋转换为等量的钢纤维高强混凝土, 见图 4. 依据图示及材料力学公式, 可得

$$W_{f0} = \frac{I_{f0}}{h-y_0} \quad (5)$$

$$I_{f0} = \frac{1}{3}by_0^3 + \frac{1}{3}b(h-y_0)^3 + A_s(\alpha_E-1)(h_0-y_0)^2 \quad (6)$$

$$y_0 = \frac{\frac{1}{2}bh^2 + A_s h (\alpha_E-1)}{bh + A_s (\alpha_E-1)} \quad (7)$$

式中: I_{f0} 为梁换算截面的惯性矩.

把式 4) 和式 5) 代入式 3), 得

$$\gamma = \frac{(h-y_0)}{8(h-x_c)}.$$

$$\left[\frac{16bx_c^3 + 11b(h-x_c)^3 + 48\alpha_E \rho b h (h_0-x_c)^2}{[by_0^3 + b(h-y_0)^3 + 3A_s(\alpha_E-1)(h_0-y_0)^2]} \right] \quad (8)$$

式 8) 计算起来较为复杂, 参考现行规范及文献 2~4 和本文试验数据, 引入公式 9), 有

$$\gamma = \gamma_m \left(0.9 + \frac{50}{h} \right) \quad (9)$$

式中: γ_m 为混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数基本值, 在此取为 1.55.

将本文试验数据分别利用式 8) 和式 9) 进行计算, 式 9) 与式 8) 计算所得 γ 比值的平均值为 0.989, 均方差为 0.025, 变异系数为 0.025, 验证了式 9) 的正确性.

3.2 f_{ft} 的确定

依据我国现行《钢纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004) 的计算模式, 取

$$f_{ft} = f_t (1 + \alpha \lambda) \tag{10}$$

式中 f_t 为素混凝土的抗拉强度; λ 为钢纤维含量特征参数, 当 $\lambda > 1.2$ 时, 取 $\lambda = 1.2$; α 为钢纤维对混凝土抗拉强度的影响系数, 由试验确定. 采用本文试验数据回归分析得: $\alpha = 0.6$.

3.3 M_{cr} 的确定

确定了 λf_{ft} 以后, 就可利用式(2) 计算 M_{cr} . 用式(2) 对 12 根钢筋钢纤维高强混凝土梁正截面开裂弯矩进行计算, 试验值与计算值对比见表 3. 计算值与试验值之比的平均值为 0.981, 均方差为 0.127, 变异系数为 0.130, 可见符合较好.

4 结论

(1) 钢纤维的加入提高了钢筋高强混凝土梁的正截面开裂弯矩, 并随着钢纤维体积率的增加呈增长的趋势, 增加幅度在 40%~100% 之间. 与在普通强度混凝土梁中加入钢纤维相比, 在钢筋高强混凝土梁中加入钢纤维, 开裂弯矩提高的幅度更大.

(2) 利用试验数据, 运用材料力学公式并参

考相关文献, 建立了钢筋钢纤维高强混凝土梁截面抵抗矩塑性影响系数的计算公式和钢筋钢纤维高强混凝土梁开裂弯矩的计算公式.

(3) 纵向钢筋配筋率、梁的高度以及钢筋强度等级对钢筋高强混凝土梁的开裂弯矩也有影响. 开裂弯矩随纵筋配筋率的增大以及随截面高度的减小而增大.

参考文献:

[1] CECS 38:2004, 纤维混凝土结构技术规程[S].
[2] 窦利萍, 李凤兰. 钢筋钢纤维混凝土梁正截面抗裂计算方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2002, 23(2): 35~38.
[3] 赵顺波, 李树瑶. 配筋和混凝土保护层厚度对钢筋混凝土受弯构件抗裂度影响的试验研究[J]. 港口工程, 1992, (4): 20~25.
[4] 姜宁辉, 蒋永生. 配有高强钢筋的高强混凝土梁抗裂与裂缝宽度验算[J]. 建筑结构, 1998, (4): 24~27.
[5] 高丹盈, 赵军, 朱海堂. 钢纤维混凝土设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
[6] 赵军, 宋纪文, 黄石安. 钢筋钢纤维混凝土梁正截面抗裂计算方法[J]. 郑州大学学报(自然科学版), 2000, 32(2): 37~40.

Calculating Method for Crack-resistant Moment of Steel Fiber Reinforced High-strength Concrete Beams with Reinforcement

GAO Dan-ying, Zhang Q-ming, GUAN Qiao-yan

(School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : Based upon the tests on 12 steel fiber reinforced high-strength concrete beams with reinforcements, the effect of steel fiber on the normal cross sectional crack-resistant moment of steel fiber reinforced high-strength concrete beams is analysed. The test results show that the normal cross sectional crack-resistant moment increases with the increase of steel fiber volume ratio, and the longitudinal reinforcement ratio, the height of beam and reinforcement grade have the impact on the crack-resistant moment. Together with the criterion of China, the formula for calculating crack-resistant moment of steel fiber reinforced high-strength concrete beams is presented, and the correctness of the formula is validated by the test data.

Key words : steel fiber; high-strength concrete; crack-resistant moment