

钢纤维砼裂缝的分析与计算^{*}

曾 志 兴

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 通过分析钢纤维对裂缝的影响效果, 根据砼断裂力学的基本原理, 探讨了钢纤维砼抗裂度和裂缝宽度的计算模式, 并提出相应的计算公式, 与已有的试验研究结果相比较, 吻合较好。

关键词 钢纤维砼, 裂缝, 计算

分类号 TU 572. 02

钢纤维砼是在普通砼中加入一定量乱向分布的短钢纤维, 从而形成一种新型的多相复合材料。它不仅具有普通砼的优良特性, 而且能较大幅度提高砼的抗拉、抗折、抗剪强度以及延性、抗冲击性和抗疲劳性能。它尤其具有良好的阻裂作用, 能明显提高抗裂度并使荷载作用下的裂缝宽度大为减小, 这恰恰弥补了砼的不足之处。目前已在桥面、路面、机场跑道、隧道、铁路轨枕、港口与水利等工程中大量使用, 正日益显示其优越性并发挥良好效益。

目前作为砼学科中一个新的分支, 即钢纤维砼的基本理论及工程应用的研究还不够完善。砼本身的性能就已足够复杂, 加入钢纤维后更增加了问题的困难性。关于钢纤维砼的裂缝计算, 虽然已提出了一些理论和方法, 如我国的《钢纤维砼设计与施工规程》^[1]给出了抗裂度和裂缝宽度的计算公式, 但到目前为止还不能说已经认识很清楚, 国内外关于这方面的研究并不多见。这里尝试从断裂力学的角度, 探索钢纤维砼裂缝计算的新途径, 建立抗裂度和裂缝宽度的计算模式。

1 钢纤维对裂缝的影响

1. 1 钢纤维的阻裂作用

我们知道, 砼是一种各组分具有不同性质的多相复合材料, 而且是脆性的。在未受荷前, 由于收缩、湿热体积变化以及泌水、骨料下沉等原因, 在骨料和水泥胶块的接触面就已存在许多随机分布、不同尺寸和形状的微裂缝, 它是砼内部最薄弱的环节。在外荷载作用下微裂缝将不断产生、扩展, 并和孔隙、空洞等其他先天缺陷汇合连通, 产生较大的应力集中, 成为砼破坏的起源。其宏观表现为砼的抗拉强度很低。

掺入钢纤维后, 大大改善了砼的孔隙结构与性状。开裂前, 主要由砼基体受力, 钢纤维阻止砼内部微裂缝等缺陷的发展, 延缓了初裂的发生。开裂后, 尽管基体已发生开裂, 可是跨接在裂缝处的钢纤维仍承受砼基体与钢纤维接触界面传递的应力, 继续承受更大的荷载并产生

弹塑性变形。施加在砼基体上的荷载通过作用在界面上的粘结力传递到钢纤维上, 由于钢纤维的弹性模量较砼基体的弹性模量高十倍以上, 所以开裂后的大部分荷载是由钢纤维承受。当裂缝尖端与钢纤维相遇时, 因裂缝无法直接通过而偏转了方向, 从而缓冲了裂缝尖端处的应力集中程度, 相当于给砼基体施加了一个反向的应力场, 阻止了裂缝的扩展, 减小了裂缝的间距和宽度。

1.2 钢纤维的增强效率

从力学的意义上讲, 钢纤维对砼最有效的增强状态是钢纤维较密集地分布于应力大的部位, 钢纤维的取向最好是主拉应力方向。假设钢纤维在各个方向上都均匀分布, 因此我们有下列三种情况。

- (1) 与主拉应力方向相同的钢纤维对砼的增强效果最好。设增强效率系数为 η , 则 $\eta = 1$ 。
- (2) 与主拉应力方向垂直的钢纤维对砼的增强效果接近于零, 即 $\eta = 0$ 。
- (3) 与主拉应力方向成 θ 角的钢纤维, 可用 $\cos\theta$ 表示其增强作用, 即 $\eta = \cos\theta$ 。

影响钢纤维在砼中分布和取向的主要因素是振捣方法、时间及模板尺寸, 等等^[1]。在进行振动捣固时, 由于重力效应, 钢纤维将不断向模板的下部移动和集中, 并趋于在垂直于浇注方向的平面内取向。此外, 由于边壁效应, 靠近模板边壁的钢纤维将趋于在平行于边壁方向的平面内取向。

2 钢纤维砼的裂缝计算

按照裂缝在荷载作用下扩展形式的不同, 可以分为张开型(Ⅰ型)、滑开型(Ⅱ型)和撕开型(Ⅲ型)三种基本形式。对脆性材料而言张开型(Ⅰ型)是最常见也是最重要的形式。本文就这种正应力 σ 和裂缝面垂直而且扩展方向和 σ 作用方向垂直的Ⅰ型裂缝加以讨论。

由断裂力学知道, Ⅰ型裂缝尖端的应力场强度因子 K_I 可表示为

$$K_I = g\sigma \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

式中 g 为几何因子, σ 为平均拉应力。考虑试件几何形状的修正, g 主要与相对裂缝深度 a/h 有关, $g = g(a/h)$ 。

K_I 反映了裂缝尖端局部区域内应力场的强弱情况。我们知道^[6], 钢纤维的加入相当于在裂缝尖端施加一个反向应力场, 使应力场强度因子被抵消一部分。于是, 钢纤维砼的裂缝尖端应力场强度因子 K_{II} 可表示为

$$K_{II} = K_I - K_{I1}. \quad (2)$$

在式(2)中, K_I 为砼的应力场强度因子(无钢纤维), K_{I1} 则为钢纤维所引起应力场强度因子下降的部分。

砼的裂缝尖端附近存在着一个微裂区, 微裂区由许多微裂缝组成, 砼的断裂性能即受这些微裂缝的发生和发展的影响。对于这样的材料, 裂缝尖端的张开位移则是反映材料非线性特性的综合指标, 按断裂力学方法可求裂缝尖端垂直于裂缝方向的位移 δ 为

$$\delta = \frac{4K_I^2}{\pi\alpha E}, \quad (3)$$

式中 σ_s 为屈服极限, E 为弹性模量。

考虑钢纤维的影响后, 钢纤维砼的裂缝尖端张开位移 δ_f 可简化为

$$\delta_f = \frac{K_I^2}{\pi \sigma_s E_{fc}} \quad (4)$$

此处 σ_s 可取钢纤维砼的抗拉强度, 由文献^[1]可得, $\sigma_s = f_{ft} = (1 + \alpha N) f_t$; E_{fc} 为钢纤维砼的弹性模量, 可取与普通砼相同值, 即 $E_{fc} = E_c$.

2.1 抗裂计算

我们通常所说的抗裂是指宏观的抗裂, 即没有出现肉眼可见裂缝(裂缝宽度约为 0.02 mm)的情况, 而不是指微观的开裂. 在砼这样的材料中不可能也没有必要做到绝对地抗裂. 试验结果表明, 钢纤维的存在对砼的微观开裂的迟早并无影响, 钢纤维是在微观开裂之后才真正发挥作用.

当钢纤维砼出现可见裂缝时, K_{fc} 达到临界值 K_{fc} , K_{fc} 称为断裂韧度, 它表示材料本身所固有的抵抗裂缝扩展的能力, 与材料的其它力学性能指标一样需通过试验确定. 此时的应力 σ_c 即为构件的开裂应力. 由式(1), (2) 可得

$$\sigma_c = \frac{K_{fc} + K_I}{g \pi a} \quad (5)$$

采用一个大于 1 的提高系数 ψ 来考虑钢纤维的影响, 则

$$\sigma_c = \psi \frac{K_{fc}}{g \pi a} \quad (6)$$

ψ 主要和钢纤维的含量特征 $\lambda = \rho_l l / d_f$ 有关^[1], 可写成

$$\psi = 1 + A \lambda \quad (7)$$

A 可以通过试验数据的统计分析得到, 目前尚无这方面的试验数据, 还需做进一步的工作.

2.2 裂缝宽度计算

实际构件中裂缝的形状和位置较为复杂, 裂缝宽的计算显得困难. 本文选择常见的垂直裂缝, 根据文献^[6]的计算模型, 经推导(详细推导过程从略)后, 简化为钢纤维砼裂缝宽度 ω 的计算公式, 得

$$\omega = \frac{r + a + a_s}{r} \delta_f \quad (8)$$

式中 r 为微裂区边缘到裂缝尖端的距离, 根据非线性断裂力学有

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得

$$\omega = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 + a + a_s}{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2} \delta_f \quad (10)$$

式中 δ_f 为裂缝尖端张开位移, 可由式(4)确定.

由式(1)得 $K_I^2 = g^2 \pi a \sigma^2$, 这里的 σ 为名义拉应力, 它并不是实际应力, 而是间接表示 ω 的大小, 可以按 $\sigma = \frac{M}{W_0}$ 计算, W_0 为换算截面的弹性抵抗矩.

用式(10)求出的裂缝宽度计算值 ω 与大连理工大学的最大裂缝宽度实测值 ω_{\max} (7 根试

件,共 21 个试验数据) 比较后,得到 $x = \omega/\omega_{\max}$ 的平均值为 $\mu = 1.037$, 标准差 $\sigma = 0.161$, 变异系数 $C_v = 0.155$. 可见, 计算结果与试验数据之间的符合程度是令人满意的.

3 结束语

(1) 钢纤维应尽可能均匀地分布在砼基体中, 最好使钢纤维定向排列并处于有利的方向和部位, 以达到最佳受力状况, 发挥最大的增强效果.

(2) 钢纤维砼是在脆性的砼基体中加入少量的延性材料, 它虽然比普通砼塑性好, 但材质仍是偏脆性的, 而且内部有原生微裂缝和孔洞等缺陷, 这些与断裂力学的假定相符. 因此, 用断裂力学方法进行钢纤维砼裂缝的分析与计算不失为一种合理有效的手段.

(3) 所取的垂直裂缝模型与构件开裂的实际情况相符合^[6].

(4) 引用名义应力的概念, 使得开裂前后衔接起来.

(5) 按照这样的思路, 也可解决斜裂缝等问题的计算, 这方面的工作还有待更进一步深入研究.

参 考 文 献

- 1 中国工程建设标准化协会. CECS38:92 钢纤维砼结构设计规程. 北京: 中国计划出版社, 1992. 12~61
- 2 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维砼基本理论. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 110~249
- 3 陈本沛. 砼结构理论和应用研究的现状与发展. 大连: 大连理工大学出版社, 1994. 248~261
- 4 Zeng Zhixing, Chen Benpei. Research on calculation of the cracks in steel fibre reinforced concrete. In: Li Shien, eds. Proceedings of the ICFRC. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1997. 333~336
- 5 陈本沛. 煤矸石砼的强度及变形性能的研究. 华侨大学学报(自然科学版), 1994, 15(4): 405~408

Analysis and Calculation of Crack in Steel Fibre Reinforced Concrete

Zeng Zhixing

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract By analysing the effect of steel fibres on the cracks in concrete and applying the basic principle of fracture mechanics of concrete, the author discusses the method for calculating the crack strength of steel fibre reinforced concrete and the width of its cracks; and gives the corresponding calculating formula. The results tally with those from well known experiments.

Keywords steel fibre reinforced concrete, crack, calculation