

混凝土结构裂缝计算的讨论

陈洪波

(杭州应用工程技术学院土木系 杭州 310012)

谢方明

(浙江世界贸易中心工程指挥部)

摘 要 半个多世纪来,对混凝土结构裂缝的研究已经形成多种理论.文章讨论了其中代表性的裂缝理论及计算方法,分析了它们的特点与缺陷.

关键词 裂缝 混凝土结构 粘结

中图分类号 TU37-01

对混凝土结构裂缝的研究已经积累了大量的资料.半个多世纪以来,各国提出了多种裂缝理论和计算方法,它们包含着各种不同的变量和因素,表达形式也不相同.但是迄今对裂缝的研究尚未取得一致的意见.对影响裂缝宽度大小的主要因素的认定,以及在这些因素与裂缝宽度的定量关系方面尚有分歧.这种情况明显地反映在各国混凝土结构设计规范所采用的裂缝计算表达式中,据此计算所得结果的差异可达将近1倍.

裂缝问题的上述状况主要源于下列因素:

- (1)混凝土材料的非均质性和复杂性;
- (2)结构所处环境条件的多变性;
- (3)裂缝出现之后,钢筋与其周围混凝土相互作用区域的应力、应变状态的复杂性.

现有的各种裂缝理论大致可归纳为3类:粘结滑移理论、无滑移理论、一般裂缝理论.

各类理论都在一定深度上描述了裂缝这个物理现象,但也有各自的局限性和不确定性.

1 粘结滑移理论

它是关于裂缝的经典理论,由 R. Saligar 于 1936 年首次提出,在其后的 20 多年里经过许多学者的充实、完善逐渐成型.长期以来,被广泛地采用.

粘结滑移理论假定裂缝的开展是由于钢筋与其周围混凝土之间的变形协调破坏,钢筋发生滑移所致(图1).随拉力 N 增大,混凝土中的拉应力 σ_c 增大.当 σ_h 达到抗拉强度极限 f_t 时,构件截面将开裂,出现裂缝1.在裂缝截面,混凝土退出工作, $\sigma_c = 0$;钢筋承担全部拉力,钢筋应力 σ_s 产生突变.沿拉杆轴向的钢筋应力差 $\Delta\sigma_s$ 导致裂缝2侧钢筋与其周围混凝土之间产生粘结应力 τ ,并出现相对滑移.钢筋的拉力通过粘结应力 τ 传递给混凝土.混凝土应力 σ_c 随远离裂缝截面逐渐增大.

当 σ_c 增大至 f_t 时, 拉杆出现第 2 条裂缝. 随 N 增加, 新的裂缝出现, 直至裂缝间距减小到由 τ 累积引起的 σ_c 不致达到 f_t 时才稳定下来. 根据稳定裂缝间钢筋截离体的受力平衡可求得裂缝间距 l_m :

$$l_m = k \frac{f_t}{\tau} \cdot \frac{d}{\rho} \quad (1)$$

式中 d ——钢筋直径; ρ ——截面配筋率, $\rho = \frac{A_s}{bh_0}$; k ——系数, 对于给定截面, k 为常数, 则裂缝的宽度 w_m 为:

$$w_m = \int_0^{l_m} (\epsilon_s - \epsilon_c) dl \quad (2)$$

式中 ϵ_s, ϵ_c ——钢筋、混凝土的应变.

对于受弯构件, 亦可推得相似的计算式.

式(1)、(2)的前提是认为截面上混凝土的应力均匀分布, 截面变形始终保持平面, 因此裂缝 2 侧截面混凝土的滑移是平行的, 构件表面裂缝宽度与钢筋处的裂缝宽度相等.

大量的试验量测证明这种截面应力分布和裂缝形状的假设是不真实的. 按粘结滑移理论, 钢筋直径 d 与配筋率 ρ 的比值 $\frac{d}{\rho}$ 是裂缝间距 l_m 的主要变量, 且 $l_m \propto \frac{d}{\rho}$; 系数 k , 取决于钢筋与混凝土的粘结强度, 也与 l_m 成正比. 试验表明当 $\frac{d}{\rho} \rightarrow 0$ 时, l_m 并不也趋于 0, 而是接近某一个常量, 这个常量与钢筋的混凝土保护层厚度 c 有关. 此外, 从试验结果还发现 k 与粘结强度不成比例关系. 例如变形钢筋的粘结强度通常是光圆钢筋的 2 ~ 3 倍, 但实测裂缝平均宽度 w_m 只是光圆钢筋配筋构件的 0.8 倍左右. 根据实际拉杆截面上混凝土的变形分布是不均匀的, 推知钢筋对其周围混凝土的有效约束并不是在全截面区域上. 大量的试验表明钢筋的混凝土保护层厚度对裂缝宽度的影响不可忽略.

由于上述原因, 粘结滑移理论所得的计算结果与实际量测所得差异较大.

2 无粘结滑移理论

60 年代, B. B. Broms、后滕幸正等采用压力注入树脂或染色剂的方法研究了混凝土的裂缝开展^[1], 发现裂缝截面的变形不是平面变形, 靠近钢筋处混凝土的变形远大于其极限拉伸应变, 由此推得这种变形由混凝土内裂缝的原因引起. 混凝土的内裂缝影响了主裂缝的形态, 主裂缝在构件表面宽度最大, 而在钢筋周围宽度很小, 其值在 10^{-2}mm 数量级上(图 2). 与构件表面裂缝宽度相比, 可以把它略去不计, 即认为混凝土开裂后, 钢筋与其周围混凝土之间没有粘结滑移, 裂缝宽度完全是保护层混凝土的弹性回缩形成.

基于对裂缝开展机理的不同认识建立起来的无粘结滑移理论与粘结滑移理论形成明显的对立. 英国水泥及混凝土协会所做梁的试验支持了无粘结滑移理论观点.

无粘结滑移理论给出: 混凝土表面裂缝宽度 w_m 与量测点到最近钢筋形心之间的距离 t 成正比, 与该测点处的混凝土应变 ϵ_h 成正比(图 3). 据此可得裂缝宽度的计算表达式:

$$w_m = kt \cdot \epsilon_c \quad (3)$$

式中, k 为系数, 与钢筋的表面形状有关, 与混凝土材质非均匀性导致裂缝出现的随机性有关.

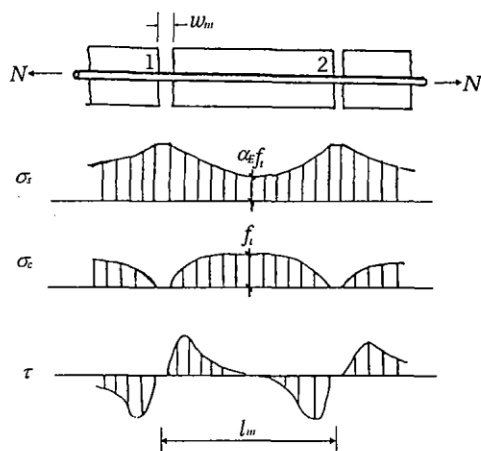


图 1 拉杆开裂后的应力分布

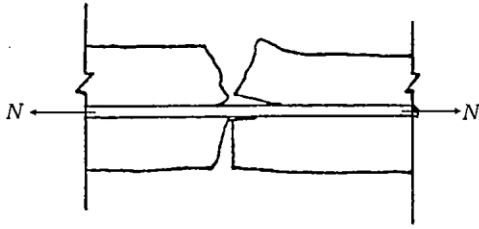


图2 观察到的裂缝形态

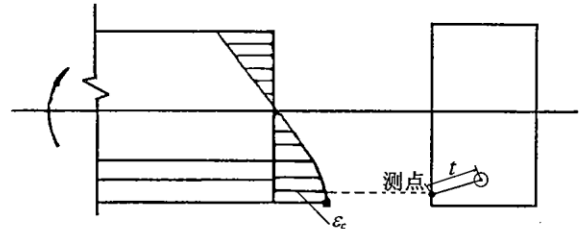


图3 无粘结滑移理论裂缝宽度计算示意图

在构件正常使用极限状态内,钢筋与其周围混凝土之间的相对滑移量很小,钢筋直径及表面形状引起的粘结应力差别很小,因此它们对裂缝宽度的影响不显著。

无粘结滑移理论涉及到关于裂缝的一个根本问题,即构件截面上钢筋对其周围混凝土的有效约束区域问题。依据该理论的计算结果,在大多数情况下比粘结滑移理论更贴近试验。但在某些情况下,例如混凝土保护层厚度过小或过大时,计算值明显地偏小或偏大。

3 一般裂缝理论

粘结滑移理论与无粘结滑移理论在实质上分别描述了构件混凝土裂缝机理的两种极端状态。而裂缝的真实情况则介于两种状态之间。于是结合两种理论的合理部分,提出了一般裂缝理论。

按照一般裂缝理论,裂缝间距:

$$l_m = k_1 c + k_2 \frac{d}{\rho} \quad (4)$$

式中 c ——钢筋的混凝土保护层厚度; k_1 、 k_2 ——系数。

上式右边第一项代表由混凝土保护层厚度 c 所决定的最小应力传递长度,第2项代表由于钢筋和它周围混凝土相对滑移引起的应力传递长度的增量。

混凝土材料本身的非弹性、非均质性以及内部微裂缝的存在,使得裂缝机理十分复杂。影响裂缝宽度的因素很多,裂缝是一个随机现象。近10年来,国际上趋向按一般裂缝理论用数理统计方法研究裂缝。

拉杆裂缝宽度的频率分布具有明显的偏态分布性质。这种分布规律已经被很多试验证实。图4为我国的拉杆试验所得裂缝宽度分布图。试验值与皮尔逊Ⅲ型分布较接近。若取最大裂缝宽度 w_{\max} 的超越概率为5%,则最大裂缝宽度 w_{\max} 与平均裂缝宽度 w_m 的比值 w_{\max}/w_m 约为2.5。

受弯构件裂缝宽度的频率分布接近正态分布。若取 w_{\max} 的超越概率为5%,则 $w_{\max}/w_m \approx 1.6$ 。

欧洲混凝土结构模式规范(CEB-FIP MC90)是应用一般裂缝理论的具代表性的例子,^[2]其基本裂缝宽度计算公式:

$$w_k = l_{s,\max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs})$$

式中 w_k ——在相应的作用效应组合下的特征裂缝宽度; $l_{s,\max}$ ——钢筋与其周围混凝土之间产生粘结滑移的长度。

$$l_{s,\max} = 2 \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{sE}}{4\tau_{bk}} \cdot \varphi_s$$

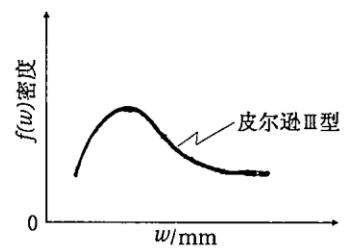


图4 轴拉杆件裂缝宽度分布

σ_{s2}, σ_{sE} ——分别为裂缝处、零点滑移处钢筋的应力; τ_{bk} ——平均粘结应力的较低分位值;
 φ_s ——钢筋直径(或并筋束的等效直径); $\varepsilon_{sm}, \varepsilon_{cm}$ ——分别为在 $l_{s, \max}$ 中, 钢筋、混凝土的平均应变;
 ε_{cs} ——混凝土的收缩应变。

相对而言, 该理论较其他理论更加贴近真实情况, 得到越来越多的认同, 并逐渐被各国规范接纳。

4 结 论

尽管裂缝问题的研究已有很长的历史, 但由于问题本身的复杂性, 迄今尚未得到圆满的解答, 还有许多问题有待进一步深入研究, 其中最主要的有:

- (1) 裂缝两侧钢筋与其周围混凝土之间产生粘结滑移长度上粘结应力 τ 分布的定性、定量研究。不同表面形状的钢筋产生的粘结应力及其破坏机理是不相同的。
- (2) 裂缝截面的应变梯度对裂缝宽度的影响。
- (3) 配置无粘结钢筋构件裂缝宽度的研究。
- (4) 荷载长期效应组合下, 裂缝宽度增大的定量估算。

参 考 文 献

- 1 Broms B B. Technique for investigation of internal cracks in reinforced concrete members. ACI Journal, 1965, (7)
- 2 CEB 欧洲国际混凝土委员会. 混凝土结构 1990 CEB-FIP 模式规范, 中国建筑科学研究院结构所规范室译. 北京: 中国建筑科学研究院出版, 1991. 266 ~ 271

Estimation of crack width in concrete structures

Chen Hongbo

(Hangzhou Institute of Applied Engineering Hangzhou 310012)

Xie Fangming

(World Trade Center Zhejiang)

Abstract The cracking in concrete structures have been approached for more than a half century. varied theories for estimating of crack width came into being. The representative crack theories and estimation methods are discussed, their feathures and defects are analysed in this paper.

Key words cark concrete structure bond