

废弃纤维再生混凝土受弯构件裂缝 宽度计算方法

周静海^{1,2},赵冰野¹,梁意博¹,康天蓓¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学绿色宜居乡村建设研究院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出废弃纤维再生混凝土受弯构件的裂缝宽度计算方法,为废弃纤维再生混凝土受弯构件的设计和工程应用提供参考。**方法** 对4根废弃纤维再生混凝土梁进行正截面受弯静力加载试验,分析试验梁的裂缝发展过程和分布规律。评估不同规范中废弃纤维再生混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法的适用性,在现有规范基础上对计算公式进行修正。**结果** 随着再生骨料取代率的增加,梁构件主裂缝的宽度增加,适量地掺入废弃纤维可以抑制次生裂缝的产生。将不同规范中裂缝宽度计算值与试验值对比,采用中国规范计算的平均偏差最小,而采用欧洲规范计算的平均偏差最大。**结论** 利用笔者推导得出的公式计算得到的裂缝宽度计算值与试验值的平均偏差值为0.04 mm,该公式适用于废弃纤维再生混凝土受弯构件的裂缝宽度计算。

关键词 废弃纤维;再生混凝土;受弯构件;裂缝宽度

中图分类号 TU318

文献标志码 A

Calculation Method for Crack Width of Waste Fiber Recycled Concrete Flexural Components

ZHOU Jinghai^{1,2}, ZHAO Bingye¹, LIANG Yibo¹, KANG Tianbei¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Green and Livable Rural Construction Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The method for calculating the crack width of waste fiber recycled concrete flexural components was proposed to provide a reference for the design and engineering application of waste fiber recycled concrete flexural components. On four waste fiber recycled concrete beams, cross-section bending static loading tests were performed, and the crack development process and distribution law of the test beams were investigated. By assessing the suitability for the calculation

收稿日期:2022-11-04

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52108235);辽宁省教育厅高等学校创新团队(LT2019011)

作者简介:周静海(1965—),男,教授,博士,主要从事再生混凝土力学性能与耐久性能等方面研究。

method of the crack width of the flexural components for waste fiber recycled concrete in different codes, the calculation equations were revised based on the existing codes. The primary crack width of the beam components expanded as the recycled aggregate replacement rate increased, and secondary cracks could be prevented by using the appropriate amount of waste fibers. Comparing the calculated values of the crack widths in the different codes with the test values, the smallest average deviations were calculated using the Chinese code, while the largest average deviations were calculated using the European code. The average deviation between the calculated and tested crack widths using the formula derived by the author is 0.04 mm, which is applicable to the calculation of the crack width of flexural components of waste fiber recycled concrete.

Key words: waste fiber; recycled concrete; flexural components; crack width

建筑业的可持续发展正受到建筑垃圾无处安放^[1]和自然资源枯竭^[2-3]的双重压力,再生混凝土的综合开发与利用符合节约资源、保护环境的要求^[4]。将建筑垃圾中约占质量分数40%的废弃混凝土循环使用制备成再生混凝土,逐渐成为研究焦点。再生混凝土的产生使混凝土形成了一个“产生—废弃—重生”的循环,是一种环境友好型的绿色建筑材料^[5]。

与普通混凝土相比,再生混凝土的力学性能均有所降低^[6-7]。采用废弃纤维作为再生混凝土的加强纤维,不仅可以提高再生混凝土抗压强度与抗劈裂强度,使再生混凝土构件具有更好的延性和抗弯性能^[8],更具有“以废治废”的重要意义。纤维与水泥基胶凝材料结合,优化了再生混凝土内部细观结构^[9]。周静海等^[10-11]研究表明,废弃纤维的体积分数为0.12%时,对废弃纤维再生混凝土梁的抗弯性能提升效果较好;废弃纤维体积分数过大时不易分散均匀,易在水泥基体中形成薄弱区,因此废弃纤维存在较优掺量。S. Kazemi等^[12]提出纤维在细观尺度上的桥接作用,在宏观尺度上表现为纤维混凝土的抗拉强度和抗裂性能提高。王晓初等^[13]研究表明,梁开裂后碳纤维对混凝土梁受力钢筋的应变影响不明显。陈君君等^[14]研究表明,聚丙烯纤维通过抑制裂缝的发展从而提高了再生混凝土的力学性能。苏俊等^[15]研究表明,在荷载作用下普通混凝土呈

明显的脆性破坏特征,纤维混凝土呈延性破坏特征。

废弃纤维再生混凝土作为一种新型绿色建材,现有规范中的裂缝计算公式是否适用于废弃纤维再生混凝土梁受弯构件裂缝的计算还未明确。基于此,笔者利用中国规范《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)(简称中国规范GB)、美国规范(ACI318—08)(简称ACI)和欧洲规范(EN1992—1—1—2004)(简称EN)中普通混凝土受弯构件裂缝宽度的计算式来计算废弃纤维再生混凝土受弯构件裂缝宽度,并在评估计算结果的基础上对中国规范GB中公式进行修正,以期得到更适合废弃纤维再生混凝土受弯构件裂缝宽度的计算公式。

1 试验

1.1 试验材料

再生粗骨料来自于强度C40的废弃梁柱节点,经过破碎、筛选、清理等步骤后制备而成。再生粗骨料的表观密度为2560 kg/m³,堆积密度为1390 kg/m³,压碎指标14.6%。天然粗骨料为天然碎石,表观密度为2750 kg/m³,堆积密度为1892 kg/m³,压碎指标5.11%。两种粗骨料的粒径均为5~25 mm。细集料采用天然河砂,细度模数为2.7。选取P·O42.5普通硅酸盐水泥。废弃纤维源自废弃的丙纶地毯,经人工拆分为废弃纤维束(见图1)。



图1 废弃纤维
Fig.1 Waste fibers

废弃纤维束长度为19 mm,密度为

表1 混凝土配合比

Table 1 Concrete mix ratio kg·m⁻³

编号	w(水泥)	w(砂)	w(天然骨料)	w(再生骨料)	w(自由水)	w(附加水)
NC	390	709	1 156	0	195	0
FRC	390	709	578	578	195	10

抗压、抗拉强度及弹性模量的试验分别按照中国规范 GB、美国规范 ACI 和欧洲规范 EN 执行,试验结果见表2。废弃纤维再生混凝土编号分别为 FRC-08-50、FRC-12-50、FRC-16-50,对应废弃纤维体积分数分别为 0.08%、0.12%、0.16%,再生粗骨料取代率均为 50%。

表2 试件力学性能

Table 2 Mechanical properties of specimen

编号	规范	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
NC-0-0	GB	38.61	2.35	32.30
	ACI	30.50	1.84	26.20
	EN	31.49	2.09	31.04
FRC-08-50	GB	36.81	2.29	31.80
	ACI	29.08	1.79	25.56
	EN	30.02	2.03	30.59
FRC-12-50	GB	37.18	2.30	31.90
	ACI	29.37	1.81	25.68
	EN	30.33	2.04	30.69
FRC-16-50	GB	36.51	2.28	31.70
	ACI	28.84	1.79	25.40
	EN	29.78	2.02	30.52

1.3 试验设计及加载方案

试验共设计制作 4 根简支试验梁,保护层厚度为 25 mm,试验梁的长为 2 250 mm,宽为 150 mm,高为 300 mm。纵向受力钢筋和弯剪区架立钢筋采用直径为 18 mm 的

0.92 g/cm³,断裂伸长率 15% ~ 30%,吸水率小于 0.1%,在制备废弃纤维再生混凝土时可忽略废弃纤维吸水率带来的影响。

1.2 配合比

普通混凝土(NC)和废弃纤维再生混凝土(FRC)的配合比列于表1中。有效水灰质量比均为 0.5,拌合水分为自由水和附加水两部分,有效水灰质量比采用自由水进行计算,而附加水的目的是减小再生骨料高吸水率对废弃纤维再生混凝土配合比的影响^[9-10]。

HRB400 热轧钢筋,箍筋采用直径 8 mm 的 HPB235 热轧钢筋。为消除剪力对废弃纤维再生混凝土梁正截面受弯性能的影响,在跨中 L/3 内均不设架立筋以及箍筋,形成 750 mm 的纯弯段,保证梁的跨中只受弯矩影响而不受剪力影响。试件配筋情况如图 2 所示。

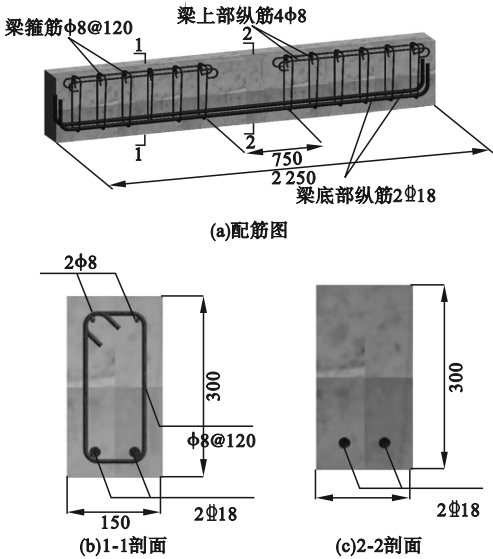


图2 废弃纤维再生混凝土梁配筋图
Fig.2 Reinforcement diagram of waste fiber recycled concrete beam

钢筋骨架绑扎完成后,在纯弯段粘贴8个钢筋应变片,用于测定在加载过程中纵向钢筋的应变。粘贴后的应变片如图3所示。

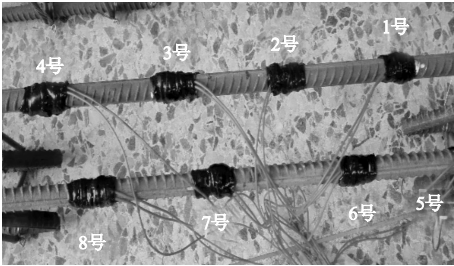
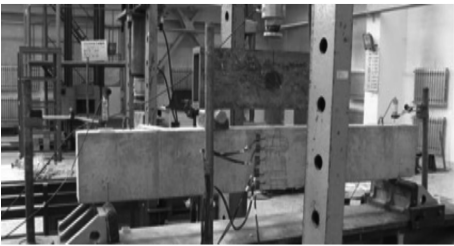


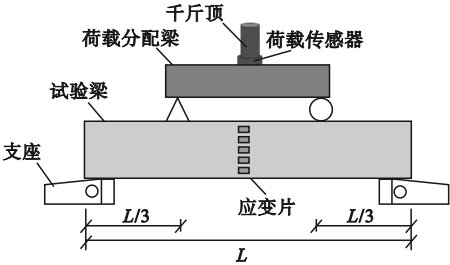
图3 钢筋应变片

Fig. 3 Strain gauges on steel reinforcements

试验采用跨中两点对称集中加载,加载装置如图4所示。支座处和跨中底部设置位移计测定挠度,跨中沿高度方向粘贴混凝土应变片,配备DH3816静态应变测试仪读取试验过程中钢筋和混凝土应变,加载过程中利用裂缝观测仪和裂缝观测卡尺测定梁在不同等级荷载下的主裂缝宽度值和主裂缝之间的裂缝间距值。



(a)试验现场



(b)示意图

图4 加载装置

Fig. 4 Loading device

2 试验现象

图5~图8分别为试验梁在不同荷载下裂缝的分布图。所有试验梁均在荷载达到25~30 kN时出现第一条裂缝,对比试件NC-0-0,FRC-08-50和FRC-12-50可知,废弃纤维的加入在一定程度上抑制了裂缝的发展,梁表面裂缝宽度和数量均减小。分析原因是由于废弃纤维在细观尺度上具有桥接作用,抑制了裂缝在水泥基体中的开展,同时废弃纤维可以在一定程度上减小混凝土早期收缩,从而抑制混凝土开裂^[8]。当废弃纤维体积分数为0.16%时,由于废弃纤维交叠或分布不均匀,在试件内部形成薄弱区,从而造成了试件梁表面裂缝增加,但多为细小裂缝。

图9为试验梁的荷载-平均裂缝宽度曲线,图10为荷载-最大裂缝宽度曲线。由图可知,再生混凝土的裂缝数量和宽度均多于普通混凝土,再生混凝土的多重界面性^[2,5,6]

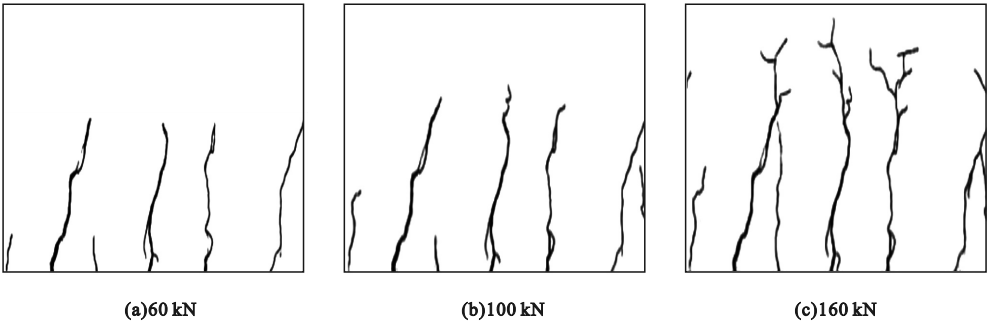


图5 试件 NC-0-0 裂缝分布及形貌

Fig. 5 Crack distributions and morphology of specimen NC-0-0

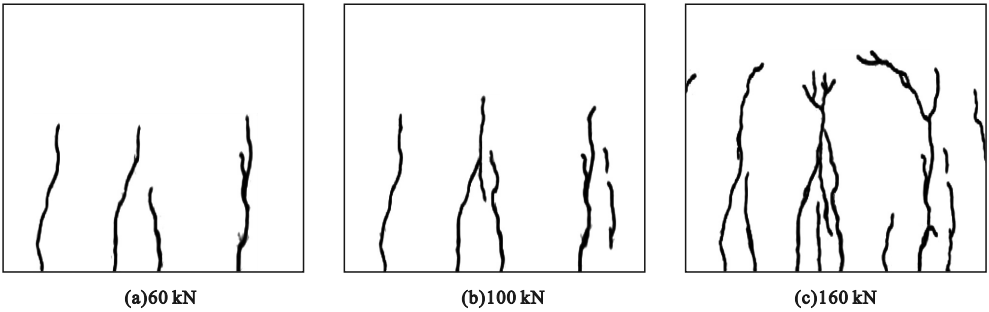


图 6 试件 FRC-08-50 裂缝分布及形貌

Fig. 6 Crack distributions and morphology of specimen FRC-08-50

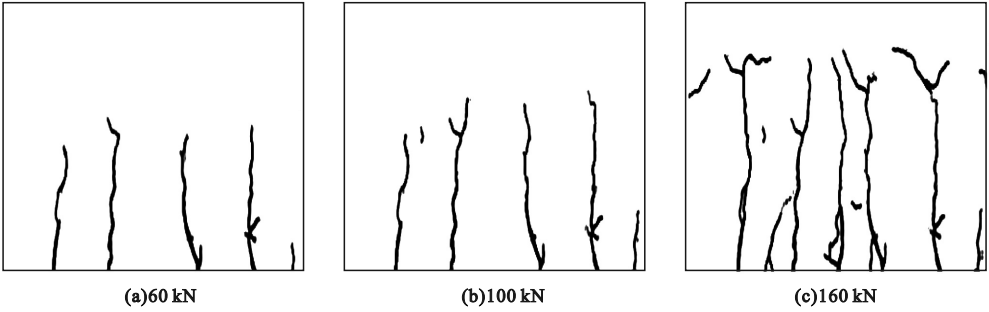


图 7 试件 FRC-12-50 裂缝分布及形貌

Fig. 7 Crack distributions and morphology of specimen FRC-12-50

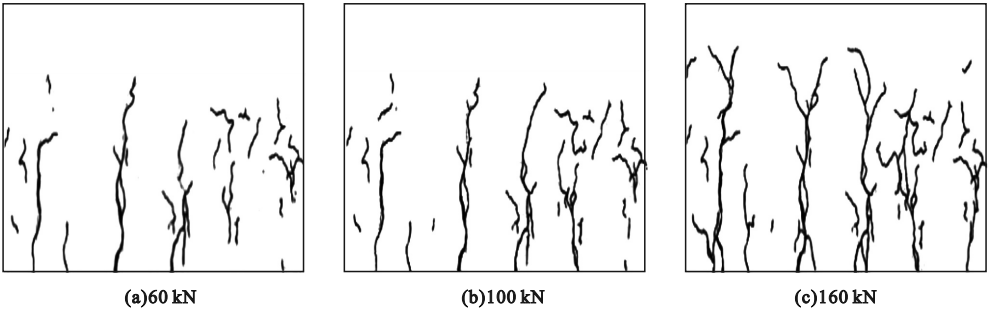


图 8 试件 FRC-16-50 裂缝分布及形貌

Fig. 8 Crack distributions and morphology of specimen FRC-16-50

降低了抗裂性能,掺入废弃纤维后抗裂能力有所改善。当试验荷载小于试验梁开裂荷载时,试验梁表面无裂缝产生;随着荷载的增大,试验梁底面开始出现横向微裂缝;随着荷载的继续增大,底部微裂缝开始向梁侧面发展,纯弯段裂缝数量不断增加,并逐渐向梁顶延伸。值得注意的是,在再生骨料取代率不变的情况下,试验梁的抗裂能力并非随着废弃纤维的掺量增加而增强,试验梁 FRC-12-50 的抗裂能力明显优于试验梁 FRC-16-50,说明废弃纤维掺量不是越大越好,所以笔者选取 FRC-12-50 进行后文分析。

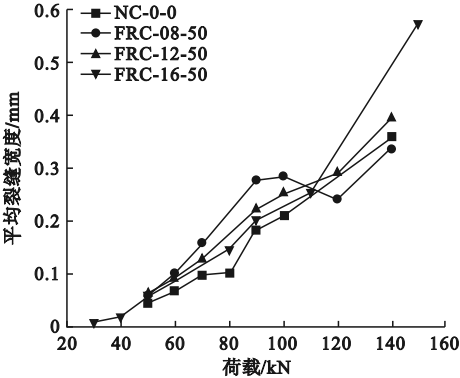


图 9 试验梁荷载-平均裂缝宽度曲线

Fig. 9 Load-average crack width curves of specimen

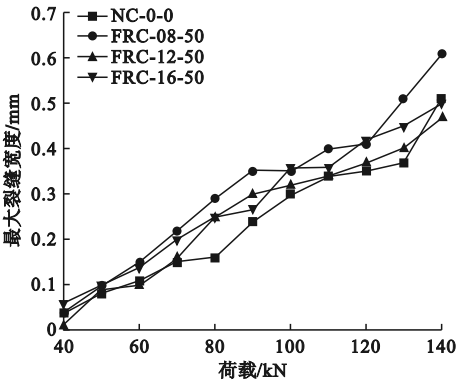


图 10 试验梁荷载-最大裂缝宽度曲线
Fig. 10 Load-maximum crack width curves of specimen

3 现有规范裂缝宽度计算方法

3.1 最大裂缝宽度计算方法

中国规范 GB 规定,普通钢筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算式为

$$\omega_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{sk}}}{E_s} l_m \tag{1}$$

式中: α_{cr} 为构件受力特征系数,取 1.9; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; σ_{sk} 为纵向受拉钢筋应力; E_s 为钢筋弹性模量; l_m 为平均裂缝间距。

美国规范 ACI 通过对混凝土保护层厚度、钢筋应力和钢筋在受拉区混凝土中的分布情况等影响因素对裂缝宽度控制的效果进行评价。其中 Gergely-Lutz 公式和 Frosch 公式应用最广泛,两个公式都是以黏结-无滑移理论为基础建立的。

Gergely-Lutz 裂缝宽度 ω 计算公式为

$$\omega = 0.076 \beta f_s \sqrt[3]{d_c A} \tag{2}$$

式中: β 为构件受拉表面至中和轴距离与钢筋中心至中和轴的距离之比; f_s 为裂缝处钢筋应力; d_c 为受拉面至最近钢筋中心的距离; A 为包围全部钢筋且形心与钢筋重心相同的有效受拉区面积。

Frosch 裂缝宽度计算式为

$$\omega = 2\,000 \frac{f_s}{E_s} \beta \sqrt{d_c^2 + (s/2)^2} \tag{3}$$

式中: s 为钢筋间距。

欧洲规范 EN 中,混凝土裂缝宽度计算包括钢筋平均应变与混凝土平均应变之差和最大裂缝间距两部分。最大裂缝间距 $\omega_{r,\max}$ 按照式(4)计算:

$$\omega_{r,\max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{p,eff}}}, s \leq 5 \left(c + \frac{d_{\text{eq}}}{2} \right) \tag{4}$$

式中: k_1 为钢筋黏结特征系数,取 0.8; k_2 为应变分布系数,取 0.5; $k_3 = 3.4$ 、 $k_4 = 0.425$ 为欧洲规范 EN 规定值; $\rho_{\text{p,eff}}$ 为有效配筋率。

三种规范用于废弃纤维再生混凝土的计算,需明确以下几点:①三种规范最主要的区别是理论基础不同;②计算试验梁所受荷载时,中国规范 GB 和欧洲规范 EN 是按照准永久荷载组合值计算的,考虑了时间因素 γ_G 和荷载分项系数 γ_Q ,使计算出来的加载弯矩值偏大。美国规范 ACI 直接采用加载力,未考虑折减系数,因此美国规范 ACI 更接近于实际的短期加载;③对于裂缝处钢筋应力,中国规范 GB 采用了受弯截面内力平衡来计算,其中涉及了内力臂系数对计算结果的影响,美国规范 ACI 和欧洲规范 EN 采用材料力学纯弯曲正应力的求解过程计算。

3.2 各规范的适用性

试件 FRC-12-50 的荷载-裂缝宽度的试验值和三种规范的计算值对比如图 11 所示。从图中可以看出,梁最大裂缝宽度,中国规范 GB 的计算值在 75 kN 以后略小于试验值,75 kN 以前略大于试验值。美国规范 ACI 的 Gergely-Lutz 和 Frosch 公式求解出来的裂缝宽度均小于裂缝宽度试验值。欧洲规范 EN 与美国规范 ACI 有相似的结果。计算值与试验值产生差异的主要原因:①与普通混凝土相比,再生粗骨料的多界面性易于裂缝开展,但废弃纤维在裂缝间起到桥接作用,在持续荷载的作用下,中国规范 GB 中 ψ 的贡献度增加,因此随着荷载的增加,计算值与试验值偏差变大;②由于再生骨料的掺入导致混凝土梁的收缩变形加大^[10],利于裂缝的产生。

由图 11 可知,三种规范中,使用中国规范 GB 得到的最大裂缝宽度计算值与试验值平均误差值最小,为 0.031 51 mm;欧洲规范 EN 平均误差值最大,为 0.103 3 mm;美国规范 ACI 中 Gergely-Lutz 和 Frosch 计算得到的平均误差值介于中国规范 GB 和欧洲规范 EN 之间。因此,中国规范 GB 更适用于废弃纤维再生混凝土受弯构件最大裂缝宽度的计算。

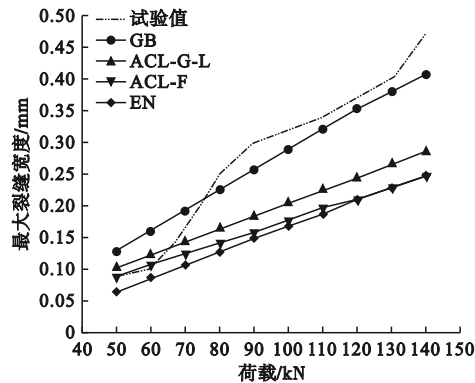


图 11 FRC-12-50 荷载与最大裂缝宽度

Fig. 11 Load and maximum crack width of FRC-12-50

4 废弃纤维再生混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法

根据上述研究可知,不论是普通混凝土 NC-0-0,还是废弃纤维再生混凝土 FRC-12-50,中国规范 GB 计算结果都更接近于试验值,因此笔者以中国规范 GB 为基础,提出废弃纤维再生混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法。通过引入废弃纤维和再生骨料影响系数,建立废弃纤维再生混凝土受弯构件的裂缝宽度计算公式。

废弃纤维和再生骨料的加入会影响钢筋与混凝土的粘结性能,进而影响裂缝间距和裂缝宽度。在应用中国规范 GB 进行计算时主要体现在三方面:①废弃纤维和再生骨料的加入会影响纵向受拉钢筋应变不均匀系数 ψ ;②在计算平均裂缝宽度时,会用到裂缝处钢筋和混凝土的应变差,混凝土的影响简化为裂缝间混凝土自身伸长对裂缝宽度的影响

系数;③废弃纤维的加入抑制了裂缝的开展,从而影响了平均裂缝间距和平均裂缝宽度。

4.1 钢筋应力计算

钢筋应力值为混凝土裂缝宽度计算中的一个重要参数,中国规范 GB 中受弯构件的钢筋应力 σ_{sk} 计算式为

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{\eta A_s h_0} \tag{5}$$

式中: η 为正常使用阶段裂缝截面处内力臂系数,对于常用的普通混凝土强度等级,可近似取 0.87; M_k 为按荷载效应的标准组合计算的弯矩值; A_s 为受拉区纵向钢筋截面面积; h_0 为截面有效高度。

式(5)中, η 为与混凝土材料相关的系数,因此通过试验实测钢筋应力试验值来修正 η 。本次试验中测得了在不同加载力的情况下,受弯段各处的钢筋应变试验值 ε_s' ,根据胡克定律可以求出对应的钢筋应力试验值 σ_{sk}' ,内力臂系数试验值 η' 和钢筋应力试验值 σ_{sk}' 结果见表 3。将内力臂系数试验值 η' 去掉最大值 0.71 和最小值 0.53,取平均值 0.56,代入式(5)中,得到废弃纤维再生混凝土钢筋应力 $\sigma_{sk,r}$ 计算式

$$\sigma_{sk,r} = \frac{M_k}{0.56 A_s h_0} \tag{6}$$

利用式(6)计算废弃纤维再生混凝土受弯构件裂缝处钢筋应力计算值 $\sigma_{sk,r}$,结果见表 3。

表 3 钢筋应力试验值 σ_{sk}' 和计算值 $\sigma_{sk,r}$
Table 3 Measured value σ_{sk}' and calculated value $\sigma_{sk,r}$ of rebar stress

荷载/ kN	M_k / (kN·m)	σ_{sk}' /MPa	η'	$\sigma_{sk,r}$ /MPa
50	17.0	171.8	0.71	217.0
60	20.4	231.8	0.63	260.4
70	23.8	294.8	0.58	303.8
80	27.2	349.2	0.56	347.2
90	30.6	386.8	0.57	390.6
100	34.0	435.8	0.56	434.0
110	37.4	494.0	0.54	477.4
120	40.8	543.6	0.54	520.8
130	44.2	594.8	0.53	564.2
140	47.6	539.0	0.53	607.6

不同荷载下,废弃纤维再生混凝土钢筋应力的计算值和试验值见图 12。从图中数据可以计算得出,计算值和试验值的平均偏差值为 19.2 MPa,在规范允许范围内。

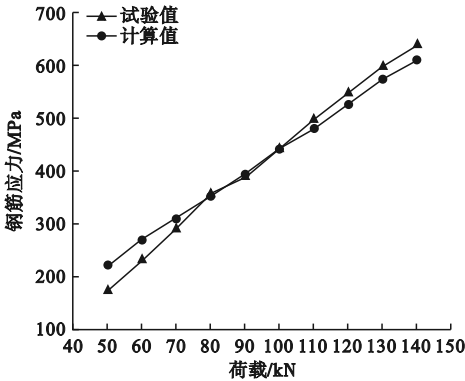


图 12 钢筋应力计算值与试验值对比

Fig. 12 Comparison between calculated and experimental values of steel bar stress

4.2 钢筋不均匀系数

钢筋不均匀系数 ψ 与混凝土抗拉强度、有效受拉配筋率、钢筋与混凝土的粘结性能和裂缝处的钢筋应力等因素有关,中国规范 GB 规定:

$$\psi = k_5 + k_6 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \cdot \sigma_{sk}}.$$

(7)

式中: f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度; k_5 和 k_6 为系数; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率; $f_{tk}/\rho_{te} \cdot \sigma_{sk}$ 用符号 X 表示。

钢筋不均匀系数试验值 ψ' 为裂缝区内钢筋应变的平均值 ε_{sm}' 与最大裂缝处钢筋应变值 ε_{sk}' 的比值,即

$$\psi' = \frac{\varepsilon_{sm}'}{\varepsilon_{sk}'}.$$

(8)

由式(7)和式(8)计算可得 X 和 ψ' , 结果见表 4。其中, X 中的 σ_{sk} 取表 3 中的 σ_{sk}' 值。对 X 和 ψ' 值进行线性拟合,可求得适用于废弃纤维再生混凝土的系数 $k_5 = 0.83$ 、 $k_6 = -0.4$ 。将系数带入式(7)中,可得到适用于废弃纤维再生混凝土的钢筋不均匀系数:

$$\psi_r = 0.83 - 0.4 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \cdot \sigma_{sk,r}}.$$

(9)

ψ_r 的计算结果见表 4。

表 4 FRC-12-50 钢筋不均匀系数

Table 4 Steel reinforcement uneven coefficient of FRC-12-50

荷载/kN	X	ψ'	ψ_r
50	0.234	0.770	0.739
60	0.195	0.750	0.754
70	0.167	0.759	0.765
80	0.147	0.769	0.773
90	0.130	0.772	0.779
100	0.117	0.778	0.784
110	0.107	0.786	0.788
120	0.098	0.788	0.792
130	0.090	0.811	0.795
140	0.084	0.804	0.797

通过表 4 得出适合于梁 FRC-12-50 的钢筋不均匀系数的计算值和试验值的平均偏差值为 0.009,偏差值在规范允许范围内。

4.3 平均裂缝宽度

中国规范 GB 中平均裂缝宽度的计算式为

$$\omega_{m,r} = 1.36 \psi_r \frac{\sigma_{sk,r}}{E_s} l_m.$$

(10)

式中: α_c 为裂缝间混凝土自身伸长对裂缝宽度的影响系数,普通混凝土构件 α_c 近似取 0.85。

为得到适用于废弃纤维再生混凝土的 α_c 值,把 ω_m' 、 σ_{sk}' 、 ψ' 、 l_m' 带入式(10)中可得到 α_c' ,将 α_c' 去掉最大值和最小值后取平均值,可得到废弃纤维再生混凝土 α_c 取 1.36,则有废弃纤维再生混凝土受弯构件平均裂缝宽度计算式为

$$\omega_{m,r} = 1.36 \psi_r \frac{\sigma_{sk,r}}{E_s} l_m.$$

(11)

由式(11)计算得出废弃纤维再生混凝土平均裂缝宽度,结果见表 5。通过表中数据计算得出试验值与计算值平均偏差值为 0.032 mm,满足规范要求。

表 5 FRC-12-50 平均裂缝宽度

Table 5 Average crack width of FRC-12-50			
荷载/kN	α_c'	ω_m'/mm	$\omega_{m,r}/\text{mm}$
50	0.706	0.063	0.121
60	0.847	0.093	0.149
70	0.986	0.128	0.176
80	1.289	0.193	0.203
90	1.314	0.223	0.230
100	1.333	0.253	0.258
110	1.444	0.303	0.285
120	1.547	0.355	0.312
130	1.523	0.380	0.339
140	1.462	0.394	0.367

4.4 最大裂缝宽度

中国规范 GB 规定,对于矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面的钢筋混凝土受拉、受弯和偏心受压构件,按荷载效应的准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度 ω_{\max} 按式 (1) 计算。

为了考虑废弃纤维再生混凝土材料特点对裂缝宽度的影响,引入宽度影响系数 τ :

$$\omega_{\max,r} = \tau \omega_{\max} \tag{12}$$

影响系数 τ 通过试验值确定,不同荷载下的试验值 τ' 可按式 (13) 计算

$$\tau' = \frac{\omega_{\max}' E_s}{\alpha_{cr} \psi' \sigma_{sk}' l_m'} \tag{13}$$

式中: ω_{\max}' 为最大裂缝宽度试验值, τ' 和 ω_{\max} 结果见表 6。

表 6 FRC-12-50 最大裂缝宽度

Table 6 Maximum crack width of FRC-12-50			
荷载/kN	τ'	ω_{\max}'/mm	$\omega_{\max,r}/\text{mm}$
50	0.531	0.09	0.14
60	0.482	0.10	0.17
70	0.652	0.16	0.20
80	0.881	0.25	0.22
90	0.932	0.30	0.26
100	0.883	0.32	0.29
110	0.854	0.34	0.32
120	0.848	0.37	0.35
130	0.844	0.40	0.38
140	0.918	0.47	0.41

将 τ' 去掉最大值和最小值后取平均值,可得到废弃纤维再生混凝土的宽度影响系数为 0.8,则废弃纤维再生混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算式为

$$\omega_{\max,r} = 0.8 \alpha_{cr} \psi_r \frac{\sigma_{sk,r}}{E_s} l_m \tag{14}$$

$\omega_{\max,r}$ 的计算结果见表 6。

按照式 (14) 计算的废弃纤维再生混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算值与试验值见图 13。由图可知,荷载达到 80 kN 后,试验值与计算值的吻合程度较高,平均偏差值为 0.04 mm,符合规范要求,由此可以得出,笔者推导的计算式合理。

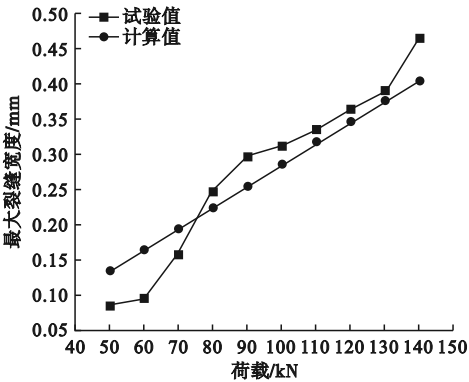


图 13 最大裂缝宽度计算值与试验值对比

Fig. 13 Comparison between the calculated and measured maximum crack width values

5 结 论

(1)再生骨料的掺入会加大梁的主裂缝宽度,而废弃纤维对减小再生混凝土梁主裂缝宽度效果明显,适量的废弃纤维可以抑制次生裂缝的产生,废弃纤维的掺量并非越大越好,本次试验中最优掺量为 0.12%。

(2)以废弃纤维再生混凝土梁 FRC-12-50 的试验数据为基础,使用三种规范计算得到的最大裂缝宽度计算值与试验值平均偏差的关系:欧洲规范 EN 结果大于美国规范 ACI 结果,美国规范 ACI 结果大于中国规范 GB 结果。中国规范 GB 更适用于废弃纤维再生混凝土受弯构件最大裂缝宽度的计算。

(3)文中给出的废弃纤维再生混凝土受弯构件最大裂缝宽度建议公式,计算值与试验值的平均偏差值为0.04 mm,建议公式适用性良好。

参考文献

- [1] 姚宇峰,金宝宏,梁少阳,等.干湿再生粗骨料对再生混凝土力学性能的影响[J].混凝土,2018(1):88-90.
(YAO Yufeng, JIN Baohong, LIANG Shaoyang, et al. Impact of wet recycled coarse aggregate on the mechanical properties of recycled concrete [J]. Concrete, 2018(1): 88-90.)
- [2] 彭勇军.再生混凝土性能影响因素分析及耐久性研究[J].建筑结构,2021,51(9):75-78.
(PENG Yongjun. Analysis of influencing factors on performance of recycled concrete and research on its durability [J]. Building structure, 2021, 51(9): 75-78.)
- [3] WU H, ZUO J, ZILLANTE G, et al. Status quo and future directions of construction and demolition waste research: a critical review [J]. Journal of cleaner production, 2019, 240: 1-16.
- [4] 王磊,李泉龙,陈杏.再生粗骨料混凝土的变形性能及影响因素分析[J].建筑结构,2016,46(2):30-34.
(WANG Lei, LI Quanlong, CHEN Xing. Deformation property and influencing factor analyses of recycled coarse aggregate concrete [J]. Building structure, 2016, 46(2): 30-34.)
- [5] 刘书贤,魏小刚,王伟,等.再生粗骨料对再生混凝土性能的影响[J].建筑结构,2014,44(14):18-20.
(LIU Shuxian, WEI Xiaogang, WANG Wei, et al. Influence of recycled coarse aggregate on recycled concrete performance [J]. Building structure, 2014, 44(14): 18-20.)
- [6] MEDINA C, ZHU W, HOWIND T, et al. Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete [J]. Journal of cleaner production, 2014, 68: 216-225.
- [7] MENG D, WU X, QUAN H, et al. A strength-based mix design method for recycled aggregate concrete and consequent durability performance [J]. Construction and building materials, 2021, 281: 122616.
- [8] KANG T, LI S, JIN L, et al. Size effect on compressive behaviours of waste fiber-reinforced recycled aggregate concrete [J]. European journal of environmental and civil engineering, 2022, 26(15): 7811-7824.
- [9] XIAO J, HAN N, LI Y, et al. Review of recent developments in cement composites reinforced with fibers and nanomaterials [J]. Frontiers of structural and civil engineering, 2021, 15(1): 1-19.
- [10] 周静海,林东野,康天蓓,等.废弃纤维再生混凝土梁抗弯性能研究[J].工业建筑,2021,51(5):70-75.
(ZHOU Jinghai, LIN Dongye, KANG Tianbei, et al. Study on flexural behavior of waste fiber recycled concrete beams [J]. Industrial building, 2021, 51(5): 70-75.)
- [11] 周静海,张东,杨永生.废弃纤维再生混凝土梁受弯性能试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(2):290-296.
(ZHOU Jinghai, ZHANG Dong, YANG Yongsheng. Test study on flexural properties of waste fiber recycled concrete beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(2): 290-296.)
- [12] KAZEMI S, LUBELL A. Influence of specimen size and fiber content on mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. ACI materials journal, 2012, 109(6): 675-684.
- [13] 王晓初,刘洪涛.碳纤维混凝土受弯构件抗弯性能试验研究[J].混凝土,2013(8):129-139.
(WANG Xiaochu, LIU Hongtao. Experimental research on flexural mechanical behavior of carbon fibril reinforced concrete flexural members [J]. Concrete, 2013(8): 129-139.)
- [14] 陈君君,关晓迪,马迪.不同纤维对再生混凝土材料性能的影响[J].合成纤维,2022,51(5):70-75.
(CHEN Junjun, GUAN Xiaodi, MA Di. Effect of different fibers on the properties of recycled concrete materials [J]. Synthetic fiber, 2022, 51(5): 70-75.)
- [15] 苏骏,赵家玉,李磊.钢-PVA混杂纤维再生混凝土梁抗弯性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2021(6):50-55.
(SU Jun, ZHAO Jiayu, LI Lei. Experimental study on flexural behavior of steel-PVA hybrid fiber reinforced recycled concrete beams [J]. Concrete and cement products, 2021(6): 50-55.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)