

DOI: 10.7511/jslx20200912001

纤维再生混凝土单向板承载力极限状态方程 及可靠度计算

符勇强¹, 方圣恩^{*1,2}, 林志平³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108;

2. 福州大学 土木工程防震减灾信息化国家地方联合工程研究中心, 福州 350108;

3. 福建省高速公路集团有限公司, 福州 350001)

摘要:当前缺少计算纤维再生混凝土单向板处于承载力极限状态时的可靠度计算公式。为此,首先基于纤维再生混凝土的本构关系,推导了受压区等效矩形应力图系数;然后根据单向板破坏控制因素确定随机变量统计参数,建立纤维再生混凝土板的受弯承载力极限状态方程;接着结合验算点法推导可靠度计算公式,研究了纤维加入前后再生混凝土单向板可靠度指标的变化,以及纵筋配筋率和活恒载效应比对指标的影响。结果表明,纤维的加入和纵筋配筋率的增加均提升了再生混凝土单向板的可靠性,但可靠度指标随着活恒载效应比的增大而降低。同时,所提出的可靠度公式可作为纤维再生混凝土单向板工程可靠度计算时的参考。

关键词:纤维再生混凝土单向板;受弯极限状态;等效矩形应力图系数;活恒载效应比;可靠度公式

中图分类号: TU528; O213.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2022)01-0007-06

1 引言

我国每年因生产建设对砂石和土地等自然资源的消耗巨大。旧建(构)筑物拆除时产生的混凝土废料数量庞大,主要采取就地掩埋的方式,容易污染环境和浪费资源^[1]。而混凝土废料经过一系列处理可以加工成再生骨料,然后加入胶凝材料、水和外掺料等拌制成再生混凝土^[2],有利于资源回收利用,符合当前我国的绿色发展理念。

与天然碎石相比,再生骨料吸水性大,在破碎过程中会受到损伤,骨料内部细观结构复杂,裂纹多,强度变异性大,限制了再生骨料混凝土在受力结构和构件中的运用^[3]。文献[4]对不同取代率下再生混凝土 RC(recycled concrete)单向板进行试验研究,通过试验数据拟合得到 RC 单向板承载力计算公式。同时,文献[5]表明,随着 RC 强度提高,RC 组合框架承载力提高不大,但变形能力逐渐降低。对于 RC 梁受弯和受剪时的可靠指标,可通过合理增加配筋量来保证与普通混凝土 OC(ordinary concrete)梁一致^[6]。

通过在再生骨料混凝土中添加纤维,制备纤维增强再生混凝土 FRC(fiber-reinforced recycled

concrete),能有效提高再生混凝土的力学性能^[7-9]。研究指出,纤维的加入提升了再生混凝土受弯构件的耐久性和承载力^[10]。文献[11]研究了纤维掺量和长度对 FRC 本构规律的影响。与此同时,文献[12]对 FRC 单向板进行受力试验研究,指出 FRC 单向板承载力较 RC 有所提高,略低于 OC 单向板。在混凝土开裂→钢筋屈服→极限承载过程中,纤维和钢筋能够协同工作。但是,对于 FRC 构件的可靠度计算,仍需参考普通混凝土,没有形成完整的计算方法,缺乏针对性的理论公式。

有鉴于此,本文基于现行规范和已有的研究成果,分别对 OC 单向板、RC 单向板以及 FRC 单向板进行可靠度分析。考虑了 FRC 单向板抗弯承载力的影响因素,根据 FRC 本构关系,确定了 FRC 受压区等效矩形应力图系数,进一步推导了 FRC 单向板的抗弯极限状态方程。在上述成果的基础上,从可靠度的角度出发,基于验算点法推导了 OC,RC 以及 FRC 单向板的可靠度计算公式。以期纤维增强再生混凝土板的可靠度设计以及计算提供参考,从而推动其在工程中的可靠应用。

2 FRC 单向板受弯承载力 极限状态方程

分别对 OC 单向板、RC 单向板以及 FRC 单向板承载力计算公式进行推导,确定板的抗弯极限状

收稿日期:2020-09-12;修改稿收到日期:2021-01-15.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51578158)资助项目.

作者简介:方圣恩*(1980-),男,博士,教授,博士生导师.

态方程。

可以单筋矩形截面受弯构件分析 OC 单向板的承载力,确定单向板的破坏形式,即纵向钢筋屈服,同时受压区混凝土压碎。考虑截面尺寸、混凝土强度、钢筋强度以及荷载等随机变量影响承载力的计算,引入计算模式不定性系数 $K^{[13]}$ 。

OC 单向板受弯承载力计算公式和极限状态方程 Z 为

$$f_y A_s = \alpha_1 f_c b x$$

$$M_u = f_y A_s (h_0 - x/2) = f_y A_s h_0 - f_y^2 A_s^2 / 2\alpha_1 f_c b \quad (1)$$

$$Z = K f_y A_s h_0 - K f_y^2 A_s^2 / 2\alpha_1 f_c b - S_G - S_Q \quad (2)$$

式中 M_u 为极限弯矩, α_1 为等效矩形应力图系数, f_c 和 f_y 为混凝土轴心抗压强度和钢筋抗拉强度, A_s 为钢筋截面面积, b 和 h_0 分别为截面宽度和有效高度, S_G 为恒载, S_Q 为活载。

对于 RC 单向板,文献[4]采用与 OC 单向板相同配合比(骨料取代率 γ 为 0, 50% 和 100%)进行分析,提出了 RC 单向板受弯承载力计算公式,引入参数 $\mu = M_s / M_t$, M_s 为数值模拟值或理论计算值, M_t 为试验实测值。以普通混凝土为标准,提出 μ 关于 γ 之间的函数表达式为

$$\mu = 1 - 0.2168\gamma - 0.0063\gamma^2 \quad (3)$$

$$M_t \leq \mu \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) \quad (4)$$

式中 μ 为理论计算值与试验实测值的比值。

本文取 $\gamma = 50\%$,通过式(3)计算得到 $\mu = 0.89$,建立 RC 单向板受弯承载力的计算公式和极限状态方程 Z 为

$$f_y A_s = \alpha_1 f_c b x$$

$$M_u = 0.89 f_y A_s (h_0 - x/2) =$$

$$0.89 f_y A_s h_0 - 0.89 f_y^2 A_s^2 / 2\alpha_1 f_c b \quad (5)$$

$$Z = 0.89 K f_y A_s h_0 - 0.89 K f_y^2 A_s^2 / 2\alpha_1 f_c b -$$

$$S_G - S_Q \quad (6)$$

对于 FRC 单向板,以聚丙烯纤维为例,文献[11]对 FRC 本构关系进行研究, $\gamma = 50\%$,聚丙烯纤维体积掺量为 0.8%,通过试验数据拟合得到本构参数 $b = 1.394$, $a = 3.020$ 。本构关系中,考虑混凝土的非线性发展,应力应变关系曲线由上升段和下降段组成,采用如下分段有理分式表达。

$$y = \frac{bx - x^2}{1 + (b-2)x} \quad (0 \leq x < 1) \quad (7)$$

$$y = \frac{x}{a(x-1)^2 + x} \quad (x \geq 1) \quad (8)$$

同时,文献[12]对 FRC 单向板进行试验,但并未给出 FRC 单向板承载力计算公式。根据式

(7,8)确定 FRC 的本构方程,通过积分得到 FRC 应力应变曲线与横轴极限压应变 ϵ_{cu} 为基准所围面积 $C_{cu} = 0.0022$,以及所围面积形心到坐标原点的距离 $y_{cu} = 0.002$,进而求得系数 $k_1 = 0.667$, $k_2 = 0.6061$,由公式 $\alpha_1 = k_1/2(1 - k_2)$ 计算得到 $\alpha_1 = 0.85^{[15]}$ 。

建立 FRC 单向板受弯承载力计算公式和极限状态方程 Z 为

$$f_y A_s = 0.85 f_c b x$$

$$M_u = f_y A_s (h_0 - x/2) \quad (9)$$

$$Z = K f_y A_s h_0 - (K f_y^2 A_s^2 / 2) \times 0.85 f_c b - S_G - S_Q \quad (10)$$

式中 a 和 b 为聚丙烯纤维再生混凝土的本构参数, ϵ_{cu} 为极限压应变, C_{cu} 和 y_{cu} 为混凝土压应力-应变曲线所围面积以及面积形心到坐标原点的距离, k_1 和 k_2 为聚丙烯纤维再生混凝土的压应力-应变曲线系数。

对于其他纤维再生混凝土,亦可通过本构关系确定极限状态方程,按上述方式进行类似推导。

3 FRC 单向板受弯极限状态可靠度计算公式

分别对 OC 单向板、RC 单向板以及 FRC 单向板处于承载力极限状态时的可靠度计算公式进行推导,用于计算单向板抗弯极限状态时的可靠度。

3.1 OC 单向板可靠度计算

根据式(2)确定的极限状态方程计算其梯度函数 Z' , 令

$$m = f_y A_s, \quad n = K f_y A_s / f_c b = Km / f_c b \quad (11)$$

$$Z = K h_0 m - 0.5 mn - S_G - S_Q \quad (12)$$

$$Z' = [h_0 m - 0.5 m^2 / f_c b, Km, K h_0 A_s - A_s n, 0.5 mn / f_c, K h_0 f_y - f_c n, -1, -1, 0.5 mn / b] \quad (13)$$

式中 m 和 n 为设定简化函数。

式(12)在极限状态某点 x^* 处按 Taylor 级数展开并保留一次项,则 Z 的均值为

$$\mu_Z = Z(x_i^*) + \sum_{i=1}^8 Z'(\mu_{X_i} - x_i^*) \quad (14)$$

将各自变量方差乘以梯度函数平方和开方,则 Z 的方差为

$$\sigma_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^8 Z'^2 \sigma_{X_i}^2} = \sum_{i=1}^8 Z' \sigma_{X_i} \left[Z' \sigma_{X_i} / \sqrt{\sum_{i=1}^8 Z'^2 \sigma_{X_i}^2} \right] \quad (15)$$

令 $\alpha_{X_i} = Z' \sigma_{X_i} / \sqrt{\sum_{i=1}^8 Z'^2 \sigma_{X_i}^2}$, 则可靠指标 β 为

$$\beta = \frac{\left[Z(x_i^*) + \sum_{i=1}^8 Z'(\mu_{X_i} - x_i^*) \right] / \sqrt{\sum_{i=1}^8 Z'^2 \sigma_{X_i}^2}}{\left[Z(x_i^*) + \sum_{i=1}^8 Z'(\mu_{X_i} - x_i^*) \right] / \sum_{i=1}^8 Z' \sigma_{X_i} \alpha_{X_i}} \quad (16)$$

将式(16)的 β 与分母相乘并化简,

$$\mu_{X_i} - x_i^* - \beta \sum_{i=1}^8 Z' \sigma_{X_i} \alpha_{X_i} / \sum_{i=1}^8 Z' = 0 \quad (17)$$

得到新的验算点:

$$x_i^* = \mu_{X_i} - \beta \sigma_{X_i} \alpha_{X_i} \quad (18)$$

式中 Z' 为梯度函数, μ_Z 和 σ_Z 分别为 Z 的均值和方差, x^* 初始迭代时可取 μ_{X_i} , α_{X_i} 为灵敏度系数, μ_{X_i} 和 σ_{X_i} 分别为自变量均值和方差。

3.2 RC单向板可靠度计算

根据式(6)确定的极限状态方程计算其梯度函数 Z' ,令

$$m = f_y A_s, \quad n = K f_y A_s / f_c b = K m / f_c b \quad (19)$$

$$Z = 0.89 K h_0 m - 0.5 \times 0.89 m n - S_G - S_Q \quad (20)$$

$$Z' = [0.89 h_0 m - 0.45 m^2 / f_c b, 0.89 K m, 0.89 K h_0 A_s - 0.89 A_s n, 0.45 m n / f_c, 0.89 K h_0 f_y - 0.89 f_c n, -1, -1, 0.45 m n / b] \quad (21)$$

根据式(20,21)确定RC单向的板极限状态方程和梯度函数,按上述OC单向板计算流程(14~18)计算RC单向板的可靠度。

3.3 FRC单向板可靠度计算

以聚丙烯纤维为例,根据式(10)确定的极限状态方程计算其梯度函数 Z' ,令

$$m = f_y A_s, \quad n = K f_y A_s / 0.85 f_c b = K m / 0.85 f_c b \quad (22)$$

$$Z = K h_0 m - 0.5 m n - S_G - S_Q \quad (23)$$

$$Z' = [h_0 m - 0.5 m^2 / f_c b, K m, K h_0 A_s - A_s n, 0.5 m n / f_c, K h_0 f_y - f_c n, -1, -1, 0.5 m n / b] \quad (24)$$

根据式(23,24)确定FRC单向板的极限状态方程和梯度函数,按上述OC单向板计算流程(14~18)计算FRC单向板的可靠度。

4 试验算例

本文试验单向板模型选自文献[12],分别对两块聚丙烯纤维增强的FRC板、一块RC板及一块OC板进行静载试验, $\gamma = 50\%$,聚丙烯纤维体积掺量为0.8%。板的尺寸为2400 mm×1600 mm,净跨为2000 mm,板厚60 mm,混凝土采用C40,钢

筋为III级钢,间距200 mm。铸铁块加载,模拟均布荷载作用。当加载至20 kN左右时,各板受拉钢筋开始屈服。最终OC,RC和FRC单向板的极限承载力分别为37 kN,33 kN和35 kN。可见加入纤维后,板的极限承载力有所提升。

表1 单向板随机变量统计参数^[14]

Tab.1 Statistical features of random variables of one-way slabs^[14]

随机变量	分布类型	κ_x	δ_x
计算模式不定性系数 $x(1)=K$	正态分布	1.00	0.04
截面有效高度 $x(2)=h_0$	正态分布	1.00	0.02
钢筋强度设计值 $x(3)=f_y$	对数正态分布	1.14	0.06
混凝土强度设计值 $x(4)=f_c$	正态分布	1.35	0.19
钢筋截面面积 $x(5)=A_s$	正态分布	1.00	0.03
恒载 $x(6)=G$	正态分布	1.060	0.070
活载 $x(7)=Q$	极值I型	0.689	0.288
截面宽度 $x(8)=b$	正态分布	1.00	0.02

注: κ_x 为随机变量X的均值与标准值的比值, δ_x 为随机变量X的变异系数。

4.1 单向板可靠度计算

加载至20 kN左右时(受拉钢筋开始屈服),恒载(板自重)均值为

$$S_G = \frac{1}{8} q_G l^2 = \frac{1}{8} \times 0.24 \times 2000^2 = 1.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{S_G} = 1.06 \times 1.2 = 1.27 \text{ kN} \cdot \text{m} = 1270000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

活载均值为

$$S_Q = \frac{1}{8} q_Q l^2 = \frac{1}{8} \times \frac{20}{1.6 \times 2} \times 1.6 \times 2^2 = 5.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{S_Q} = 0.689 \times 5.0 = 3.445 \text{ kN} \cdot \text{m} = 3445000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

混凝土强度均值为 $\mu_{f_c} = 1.35 \times 19.1 = 25.785 \text{ N/mm}^2$,

钢筋抗拉强度均值 $\mu_{f_y} = 456 \text{ N/mm}^2$,截面有效高度均值 $h_0 = 46 \text{ mm}$,钢筋面积均值 $A_s = 453 \text{ mm}^2$,

截面宽度均值 $b = 1600 \text{ mm}$,对于OC单向板钢筋屈服时状态,采用式(2)计算可靠度为

$$Z = 1 \times 456 \times 453 \times 46 - 1 \times 456^2 \times 453^2 / 2 \times 25.785 \times 1600 - 1270000 - 3445000$$

进而根据式(11~18)编制可靠度计算程序,计算得到OC单向板钢筋屈服时,可靠度指标 $\beta = 3.3165$ 。

对于RC单向板钢筋屈服时状态,采用式(6)计算可靠度为

$$Z = 0.89 \times 456 \times 453 \times 46 - 0.89 \times 456^2 \times 453^2 / 2 \times 25.785 \times 1600 - 1270000 - 3445000$$

得到RC单向板钢筋屈服时,可靠度指标 $\beta = 2.8202$ 。

对于FRC单向板钢筋屈服时状态,采用式

(10)计算可靠度为

$$Z=1 \times 456 \times 453 \times 46 - 1 \times 456^2 \times 453^2 / 2 \times 0.85 \times 25.785 \times 1600 - 1270000 - 3445000$$

得到 FRC 单向板钢筋屈服时,可靠度指标 $\beta=3.2746$ 。

规范[14]规定,对于普通住宅和办公楼,为保证结构具有一定的安全储备,(梁、柱和板)延性破坏时的可靠度指标 $\beta \geq [\beta]=3.2$ 。由计算结果可知,OC 和 FRC 单向板延性破坏时的可靠度均大于规定值。因此,按式(9,10)对 FRC 单向板进行抗弯承载力设计和可靠度设计是满足要求的。

继续加载至极限承载力时,恒载(板自重)均值为

$$S_G = \frac{1}{8} q_G l^2 = \frac{1}{8} \times 0.24 \times 2000^2 = 1.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{S_G} = 1.06 \times 1.2 = 1.27 \text{ kN} \cdot \text{m} = 1270000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

OC 单向板活载均值为

$$S_Q = \frac{1}{8} q_Q l^2 = \frac{1}{8} \times \frac{37}{1.6 \times 2} \times 1.6 \times 2^2 = 9.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{S_Q} = 0.689 \times 9.25 = 6.37325 \text{ kN} \cdot \text{m} = 6373250 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

RC 单向板活载均值为

$$\mu_{S_Q} = 0.689 \times 8.25 = 5.68425 \text{ kN} \cdot \text{m} = 5684250 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

FRC 单向板活载均值为

$$\mu_{S_Q} = 0.689 \times 8.75 = 6.02875 \text{ kN} \cdot \text{m} = 6028750 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

按上述计算流程计算单向板处于极限承载力状态时的可靠度指标,得到 OC 单向板 $\beta=0.8318$, RC 单向板 $\beta=0.7600$, FRC 单向板 $\beta=0.9743$ 。

对比 RC 和 FRC 板不同承载时的可靠度,可见纤维的加入对板的抗弯刚度起到了强化效果,提高了 RC 单向板的安全性。

4.2 活恒载效应比和纵筋配筋率影响分析

上述算例中,保持其他参数不变,分析活载与恒载效应比 S_G/S_Q 对可靠度指标的影响,结果如图 1 所示。可以看出,OC 单向板和 FRC 单向板可靠度相差不大。随着活恒载效应比的增大,即活载效应的比重增大,各板的 β 值均减小。变异系数对可靠度的影响体现在各自变量的方差取值,这是由于活载变异系数比恒载大,即活载方差大。可见活载变异性越强,对板的可靠度影响也越大。

在基准受拉纵筋配筋率 $\rho=0.47\%$ 的基础上,保持其他参数不变,改变极限状态方程中纵筋面积均值及方差取值,进一步分析 0.5ρ , 1.0ρ 和 1.5ρ

对可靠指标的影响,结果如图 2 所示。可以看出,随着 ρ 的提高,OC, RC 和 FRC 单向板的 β 值均有明显提升,因此纵筋配筋率对单向板的可靠度影响很大。

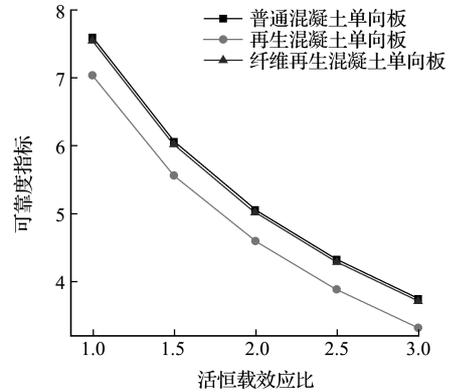


图 1 活恒载效应比-可靠度关系曲线
Fig. 1 Relationship between live-dead load effect ratio and reliability

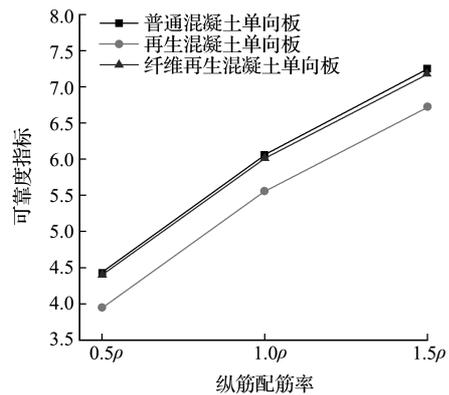


图 2 纵筋配筋率-可靠度关系曲线
Fig. 2 Relationship between reinforcement ratio and reliability

5 结论

由于纤维增强再生混凝土板构件受力性能的研究处于开始阶段,可得到的样本数据非常少,此外,关于纤维再生混凝土的设计方法国内外仍不统一,值得后续进一步研究。为此,本文以聚丙烯纤维为例,基于 FRC 本构关系,结合 FRC 单向板极限承载状态影响因素,推导了适用于 FRC 单向板可靠度的计算公式,并对该方法进行了验证,得到如下结论。

(1) OC 和 FRC 单向板延性破坏时的可靠度指标均大于规范值,按式(9,10)对 FRC 单向板进行正截面受弯承载力设计和可靠度验算均能满足延性要求。

(2) 随着活恒载效应比的增大,OC, RC 和

FRC单向板的可靠度均减小。OC和FRC板的 β 值很接近,纤维的加入能够提升RC单向板的可靠度。此外,可以通过提高纵筋配筋率来有效提升单向板的可靠度。

(3) 本文所推导的FRC单向板可靠度的计算公式适用于聚丙烯纤维再生混凝土,对于其他(如碳和玄武岩)纤维再生混凝土,可通过本构关系确定等效矩形应力图系数,进一步确定单向板的极限状态方程,并按本文提出的方法计算可靠度。

参考文献(References):

- [1] Huo X S, Yu A T W. Analytical review of green building development studies[J]. *Journal of Green Building*, 2017, **12**(2):130-148.
- [2] Shi C J, Li Y K, Zhang J K, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 466-472.
- [3] Rakshvir M, Barai S V. Studies on recycled aggregates-based concrete[J]. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 2006, **24**(3):225-233.
- [4] 陈宗平,何天瑀,徐金俊. 钢筋再生混凝土板的受力性能及承载力计算方法[J]. 广西大学学报, 2015, **40**(1):1-10. (CHEN Zong-ping, HE Tian-yu, XU Jin-jun. Research on calculating method of mechanical performance and bearing capacity calculation method of reinforced recycled coarse aggregate concrete slabs [J]. *Journal of Guangxi University*, 2015, **40**(1):1-10. (in Chinese))
- [5] 马辉,席嘉诚,黄成,等. 水平荷载下型钢再生混凝土柱-钢梁组合框架受力性能非线性数值分析[J]. 计算力学学报, 2020, **37**(3):307-315. (MA Hui, XI Jia-cheng, HUANG Cheng, et al. Nonlinear numerical analysis on mechanical performance of steel reinforced recycled concrete columns-steel beams composite frame under horizontal loads [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, **37**(3):307-315. (in Chinese))
- [6] 张凯建,肖建庄,丁陶,等. 基于可靠度的再生混凝土梁最小配筋率研究[J]. 同济大学学报, 2016, **44**(2):213-219. (ZHANG Kai-jian, XIAO Jian-zhuang, DING Tao, et al. Reliability-based study on minimum reinforcement ratio of recycled aggregate concrete beams [J]. *Journal of Tongji University*, 2016, **44**(2):213-219. (in Chinese))
- [7] 王兴国,程飞,王一新,等. 纤维改性再生混凝土材料性能研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(12):106-113. (WANG Xing-guo, CHENG Fei, WANG Yi-xin, et al. Research progress on properties of fiber modified recycled concrete [J]. *FRP/Composite Materials*, 2019(12):106-113. (in Chinese))
- [8] Kim S B, Yi N H, Kim H Y, et al. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, **32**(3):232-240.
- [9] 周静海,赵庭钰,吴迪,等. 废弃纤维再生混凝土收缩性能试验研究[J]. 建筑技术, 2020, **51**(1):25-28. (ZHOU Jing-hai, ZHAO Ting-yu, WU Di, et al. Experimental study on shrinkage performance of waste fiber recycled concrete [J]. *Architecture Technology*, 2020, **51**(1):25-28. (in Chinese))
- [10] Chen A J, Han X Y, Chen M, et al. Mechanical and stress strain behavior of basalt fiber reinforced rubberized recycled coarse aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **260**:119888.
- [11] 周静海,刘丹,董健飞. 废弃纤维再生混凝土的本构关系[J]. 混凝土, 2013(2):54-58. (ZHOU Jing-hai, LIU Dan, DONG Jian-fei. Constitutive relation of waste fiber recycled concrete [J]. *Concrete*, 2013(2):54-58. (in Chinese))
- [12] 王建超,张丁元,周静海,等. 废弃纤维再生混凝土简支单向板承载力研究[J]. 混凝土, 2018(1):26-30. (WANG Jian-chao, ZHANG Ding-yuan, ZHOU Jing-hai, et al. Experimental study on bearing capacity of simply supported recycled concrete slab [J]. *Concrete*, 2018(1):26-30. (in Chinese))
- [13] 肖建庄,张凯建,胡博,等. 基于可靠度分析的再生混凝土材料分项系数[J]. 工程力学, 2017, **34**(6):82-91. (XIAO Jian-zhuang, ZHANG Kai-jian, HU Bo, et al. Reliability-based study on partial coefficient of recycled aggregate concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, **34**(6):82-91. (in Chinese))
- [14] 住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准: 建筑结构可靠性设计统一标准. GB50068-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Unified standard for

reliability design of building structures. GB50068-2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准: 混凝土结构设计规范 GB50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Ministry of

Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Code for design of concrete structures. GB50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

Ultimate bearing capacity equation and reliability estimation of fiber-reinforced recycled concrete one-way slabs

FU Yong-qiang¹, FANG Sheng-en^{*1,2}, LIN Zhi-ping³

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. National & Local Joint Engineering Center for Seismic and Disaster and Informatization of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. Fujian Expressway Group Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Currently there are no reliability formulas for the ultimate bearing capacity of fiber-reinforced concrete (FRC) one-way slabs. First, the coefficient for equivalent rectangular compressive stress was deduced based on the constitutive relation of fiber-reinforced concrete. Second, the statistical features of random variables were determined according to the control factors corresponding to the failure of one-way slabs. Then the bending limit state equation of fiber-reinforced recycled concrete one-way slabs was established. Lastly, the checking point method was incorporated with the limit state equation to derive the reliability formula. The variations of the reliability index of recycled concrete one-way slabs with and without fibers were investigated, together with the influence of the longitudinal reinforcement ratio and the live-dead load effect ratio. The analysis results show that the addition of fibers, as well as the increase of longitudinal reinforcement ratio, can improve the reliability of recycled concrete one-way slabs, while the increase of live-dead load effect ratio reduces the reliability index. The proposed reliability formula can be used as a reference for reliability calculation of fiber-reinforced recycled concrete one-way slabs.

Key words: fiber-reinforced recycled concrete one-way slabs; bending limit states; coefficient of equivalent rectangular stress area; live-dead load effect ratio; reliability formula

引用本文/Cite this paper:

符勇强, 方圣恩, 林志平. 纤维再生混凝土单向板承载力极限状态方程及可靠度计算 [J]. 计算力学学报, 2022, 39(1): 7-12.

FU Yong-qiang, FANG Sheng-en, LIN Zhi-ping. Ultimate bearing capacity equation and reliability estimation of fiber-reinforced recycled concrete one-way slabs [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(1): 7-12.