

文章编号:1673-2049(2016)01-0030-08

无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁力学性能

程东辉,俞永志,董志鹏

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:设计制作了 5 根不同粗骨料替换率的无粘结预应力再生粗骨料混凝土试验梁,并采用两点加载对其进行正截面受弯性能试验,研究了无粘结预应力再生粗骨料混凝土的梁破坏形态、承载力、裂缝宽度及跨中挠度等力学性能。基于试验数据建立了与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)相协调的无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁预应力钢筋应力增量计算公式,提出了无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁的最大裂缝宽度及刚度的设计建议。结果表明:再生粗骨料替换率对无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁的破坏形态、裂缝宽度、跨中挠度影响不大;达到承载力极限状态时无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁的无粘结预应力钢筋应力增量比无粘结预应力混凝土梁的无粘结预应力钢筋应力增量大,但再生粗骨料替换率对应力增量的影响不显著。

关键词:再生粗骨料混凝土;替换率;力学性能;极限承载力;预应力钢筋

中图分类号:TU378 **文献标志码:**A

Mechanical Properties of Unbonded Prestressed Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam

CHENG Dong-hui, YU Yong-zhi, DONG Zhi-peng

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Five test beams of unbonded prestressed recycled coarse aggregate concrete with different replacement rates were designed and made. Then flexural performance tests of normal section were completed through two-point load. The mechanical properties, such as failure mode, bearing capacity, crack width and mid-deflection and so on, were studied. Coordinated with *Code for Design of Concrete Structures* (GB 50010—2010), the calculation formulas of stress increment of prestressed bar for unbonded prestressed recycled coarse aggregate concrete beam were build based on test data. Meanwhile, the suggestions of maximum crack width and stiffness for unbonded prestressed recycled coarse aggregate concrete beam were put forward. The results show that the replacement rate of recycled coarse aggregate has non-significant influence on failure mode, crack width and mid-span deflection. Compared with unbonded prestressed concrete beam, the stress increment of unbonded prestressed bar for unbonded prestressed recycled coarse aggregate beam is larger, but replacement rate of recycled coarse aggregate has non-significant influence on stress increment of unbonded prestressed bar.

Key words: recycled coarse aggregate concrete; replacement rate; mechanical property; ultimate bearing capacity; prestressed bar

收稿日期:2015-06-21

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2012RFXXS111)

作者简介:程东辉(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,工学博士,E-mail:chengdonghui2000@126.com。

0 引言

再生骨料混凝土简称再生混凝土,它是指将混凝土、砂浆、石、砖瓦等建筑垃圾经机械或人工破碎、筛分与清洗后,按一定的比例级配形成再生骨料,部分或全部代替天然骨料,并加入胶凝材料、砂、石、水、外加剂等拌制而成的新混凝土。再生粗骨料是指粒径大于 4.75 mm 的颗粒,再生细骨料是指粒径不大于 4.75 mm 的颗粒^[1]。

随着社会经济的不断发展,城市化进程不断加快,建筑垃圾产量逐年递增。当前,中国建筑垃圾处理手段缺乏,资源再生利用率极其低下,不仅污染了生态环境,更造成了社会资源的极大浪费,与国家提倡发展循环经济和建设资源节约型社会的目标背道而驰。为解决这些问题,对建筑垃圾的处理必须走可持续发展道路,而再生混凝土技术是适应可持续发展道路的最有效手段之一。

目前,再生混凝土的应用范围主要集中在道路工程与基础工程中,再生混凝土还没有广泛地应用到结构当中^[2-7]。目前各国学者对再生混凝土在结构中的应用研究主要集中在再生混凝土梁方面,并取得了一系列的研究成果^[8-19],但对预应力再生混凝土结构,特别是无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁的研究工作尚未展开,针对这一情况,本文通过试验开展无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁正截面力学性能的研究工作。

1 试验设计

1.1 混凝土再生粗骨料的选取

试验用混凝土再生粗骨料选取试验废弃的混凝土梁,废弃梁混凝土强度等级为 C40,废弃年限为 2 年,废弃梁所处环境为露天环境。通过颚式破碎机对废弃梁进行机械破碎,得到再生粗骨料,如图 1 所示。

表 1 给出了试验用天然骨料和再生骨料的物理性能指标。

1.2 试验梁制作

为了开展无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁力学性能的研究,根据试件混凝土中再生粗骨料替换率的不同,设计制作了 5 根无粘结预应力再生粗骨料混凝土试验梁。试验梁截面尺寸为 200 mm × 300 mm,长度为 4 000 mm,净跨为 3 800 mm,混凝土强度等级为 C40。梁中无粘结预应力钢筋采用 7 股 $\phi^{15.2}$ 钢绞线,钢绞线抗拉强度标准值 $f_{ptk} = 1\ 860$ MPa,张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.75f_{ptk}$ 。为改善试



图 1 再生粗骨料照片

Fig. 1 Photo of Recycled Coarse Aggregate

表 1 骨料的物理性能指标

Tab. 1 Physical Performance Indexes of Aggregates

骨料类型	吸水率/%	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压碎指 标值/%	堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空隙率/%
天然骨料	0.7	2 720	4.3	1 460	46
再生骨料	2.1	2 670	9.3	1 360	49

件的受力性能,在试件的混凝土受拉区配置 2C16 普通纵向受拉钢筋,强度等级为 HRB400。5 根试验梁再生粗骨料掺量分别占总骨料质量的 0%, 30%, 50%, 70%, 100%。试验梁编号及参数见表 2,试验用钢筋实测强度如表 3 所示。

表 2 试验梁参数

Tab. 2 Parameters of Test Beams

试验梁编号	再生粗骨料 掺量/%	混凝土立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	有效预应力 σ_{pe} /MPa
UPRCB-0	0	47.1	994.5
UPRCB-30	30	47.2	972.5
UPRCB-50	50	47.0	995.3
UPRCB-70	70	46.5	1 000.9
UPRCB-100	100	46.4	1 008.0

表 3 试验用钢筋实测强度

Tab. 3 Measured Strengths of Test Bars

钢筋种类	抗拉屈服强度 f_y /MPa	抗拉极限强度 f_c /MPa
HRB400	458	587
$\phi^{15.2}$	1 800	1 936

1.3 试验梁加载与数据测量

试验梁采用两点加载,加载点距近端支座距离为 1 300 mm,加载点间距为 1 200 mm。分级加载,每级 5 kN,直至试验梁破坏,预应力钢筋采用一端张拉。为了监测试验梁加载过程中力学性能的变化,在试验梁表面布置了如下装置:在加载点间的普通纵向受力钢筋表面等间距布置 7 片钢筋应变片,

间距为 200 mm;在距离跨中左右两侧各 50 mm 处布置预应力钢筋应变片,沿截面环向粘贴;为了测量试验梁沿截面高度方向的混凝土应变,在跨中处布置 5 片混凝土应变片;在梁顶加载点范围内连续布置 9 片混凝土应变片;在梁的支座上方和跨中架设位移计,以测量跨中挠度。利用数字自动采集系统测读并自动记录试验梁数据中各值的变化,并由裂缝观测仪测读裂缝宽度,记录裂缝开展情况。

试验梁加载及量测方案如图 2 所示,试验现场如图 3 所示。

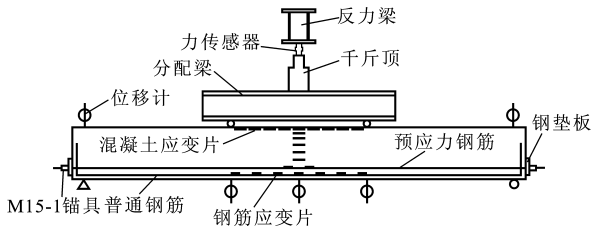


图 2 试验梁加载及量测方案

Fig. 2 Scheme of Loading and Measurement of Test Beam



图 3 试验现场

Fig. 3 In-site of Experiment

2 试验现象与试验结果

试验过程中,5 根试验梁受力后的破坏过程比较相近,具体表现为:随着荷载的增加,试验梁跨中处受拉区混凝土首先开裂,裂缝高度随着荷载的增加而不断加大;试验梁临近破坏时,非预应力钢筋首先受拉屈服,随后在荷载增加不大的情况下,加载点间受压区混凝土被压碎,试验梁宣告破坏,此时预应力钢筋均未屈服,如图 4 所示。

表 4 给出了试验梁各阶段弯矩实测值及相应的预应力钢筋应力增量实测值。由表 4 可以看出:试验梁达到承载力极限状态时,无粘结预应力混凝土梁中预应力钢筋的应力增量低于无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁中预应力钢筋的应力增量。

图 5 给出了 5 根试验梁在荷载作用下的跨中挠度变化情况。由图 5 可知:加载开始时,试验梁跨中

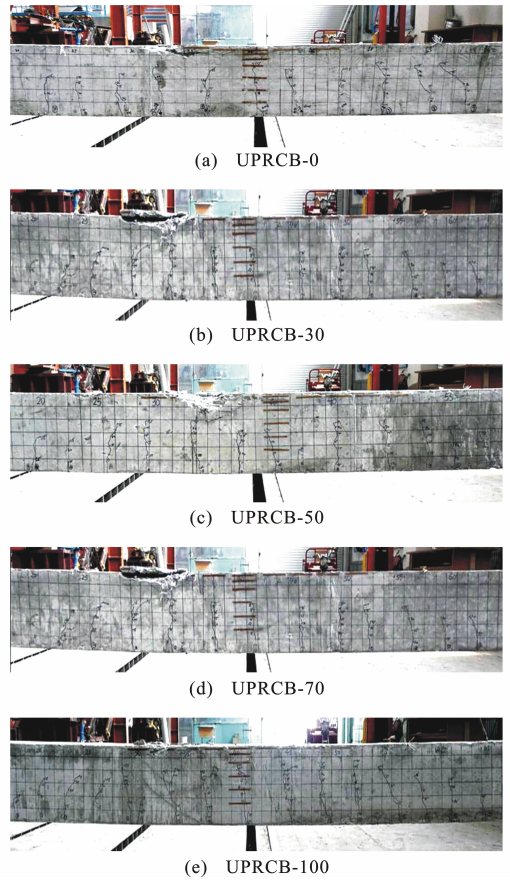


图 4 试验梁破坏形态

Fig. 4 Failure Modes of Test Beams

表 4 试验梁弯矩与预应力钢筋应力增量实测值

Tab. 4 Measured Values of Moments and Stress

Increments of Prestressed Bar for Test Beams

试验梁编号	$M_{cr}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_y/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$\Delta\sigma_p/\text{MPa}$
UPRCB-0	35	90	115	221.2
UPRCB-30	35	90	115	338.3
UPRCB-50	35	95	120	239.1
UPRCB-70	35	95	115	291.4
UPRCB-100	35	95	120	305.2

注: M_{cr} , M_y , M_u 分别为混凝土开裂弯矩、纵向受拉钢筋屈服弯矩和承载力极限状态弯矩实测值; $\Delta\sigma_p$ 为预应力钢筋应力增量实测值。

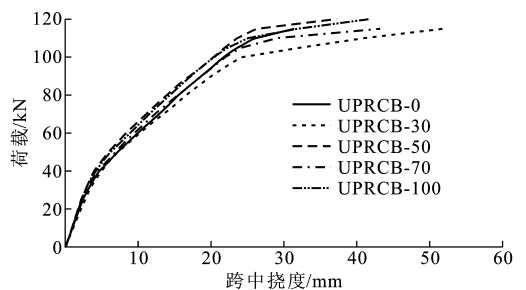


图 5 试验梁跨中挠度实测值

Fig. 5 Measured Values of Mid-span Deflection of Test Beams

挠度随荷载变化呈线性增加;当荷载增加至受拉区混凝土开裂时,荷载-挠度曲线发生第 1 个转折,此后随着荷载增加,试验梁跨中挠度的增长有所加快;当普通纵向受拉钢筋屈服时,试验梁荷载-挠度曲线发生第 2 个转折,随后在荷载增加不大的情况下试验梁变形增加迅速,直至破坏。

3 试验结果分析

3.1 平截面假定

图 6 给出了不同荷载 P 下 5 根试验梁跨中截面混凝土沿梁高方向应变变化曲线。由图 6 可以看出,各试验梁混凝土应变沿梁高方向基本符合平截面假定。

3.2 无粘结预应力钢筋应力增量分析

图 7 给出了试验梁无粘结预应力钢筋应力增量随着荷载增加的应力变化情况。由图 7 可以看出:5 根试验梁的无粘结预应力钢筋应力增量曲线呈现三折线,曲线转折点分别为受拉区混凝土开裂和普通纵向受拉钢筋屈服。在受拉区混凝土开裂后,无粘结预应力钢筋应力增速有所提高,当普通纵向受拉钢筋屈服后,施加的荷载主要由预应力钢筋承担,因此无粘结预应力钢筋在这一阶段的应力增速明显加大。

3.3 裂缝分布特点

图 8 为 5 根试验梁一侧裂缝分布及发展变化实测图,其中的数字为在该高度时的荷载等级。从图 8 可以看出:无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁的裂缝分布主要集中在加载点区间,裂缝间距比较均匀,破坏时受压区混凝土存有一定高度,有明显的破坏征兆,同时再生粗骨料的替换率对裂缝分布形态无明显影响。

4 无粘结预应力再生混凝土梁的设计方法

4.1 正截面承载力

承载力极限状态下无粘结预应力钢筋应力增量的确定是计算试验梁承载力的关键。公式(1)、(2)是《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010,以下简称《规范》)第 10.1.4 条中给出的无粘结预应力钢筋应力增量的计算公式,即

$$\Delta\sigma_p = (240 - 350\xi_0)(0.45 + 5.5 \frac{h}{l_0}) \quad (1)$$

$$\xi_0 = \frac{\sigma_{pe}A_p + f_yA_s}{f_c b h_p} \quad (2)$$

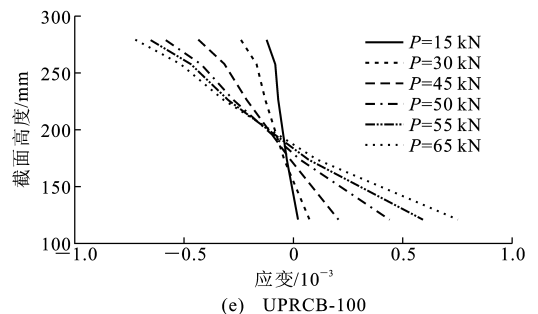
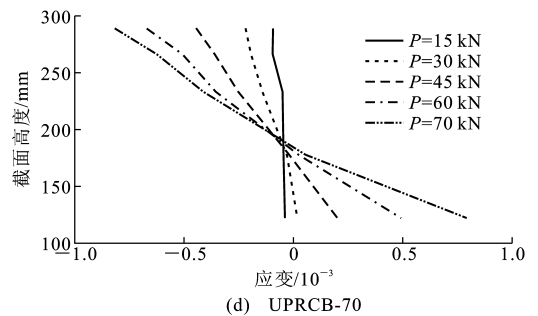
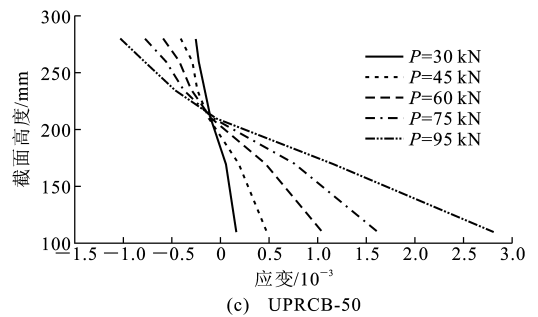
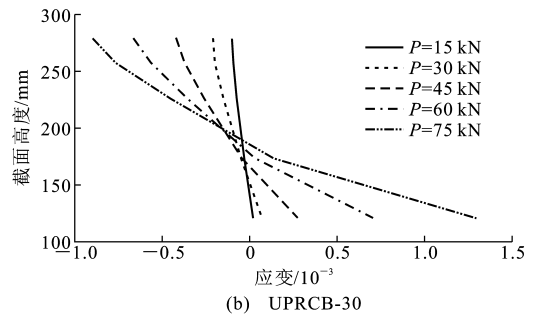
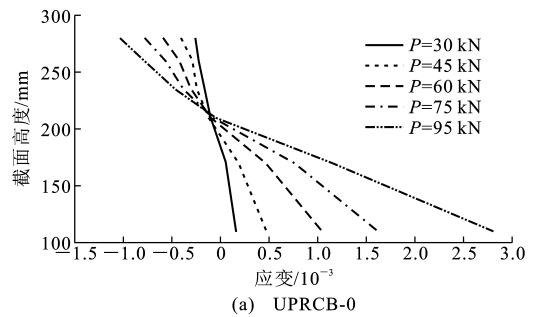


图 6 试验梁混凝土应变分布

Fig. 6 Concrete Strain Distributions of Test Beams

式中: $\Delta\sigma_p$ 为无粘结预应力钢筋应力增量; ξ_0 为综合配筋指标,不宜大于 0.4; h 为试验梁截面高度; l_0 为试验梁计算跨度; A_s 为受拉区纵向非预应力钢筋截

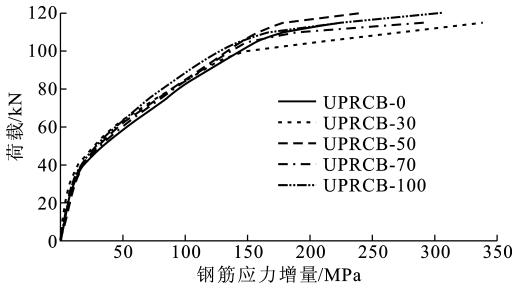


图7 试验梁荷载-预应力钢筋应力增量曲线
Fig. 7 Load-stress Increment Curves of Prestressed Bar of Test Beams

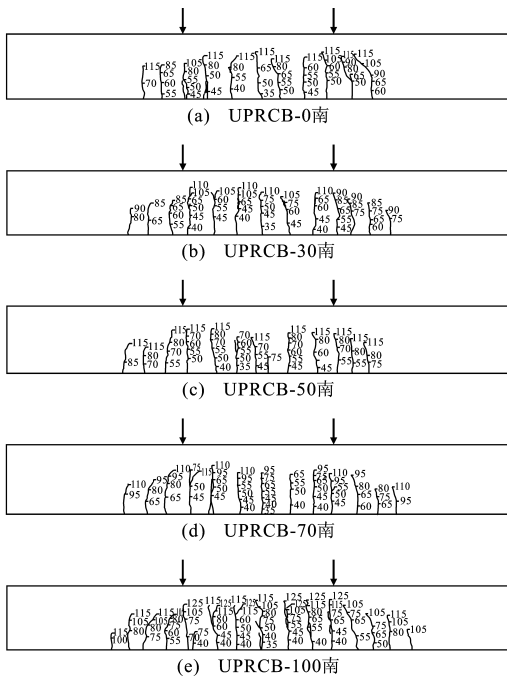


图8 试验梁裂缝分布(单位:kN)

Fig. 8 Crack Distributions of Test Beams (Unit:kN)

面面积; b 为试验梁截面宽度; A_p 为无粘结预应力钢筋的截面面积; h_p 为无粘结预应力钢筋合力点到截面受压边缘的距离。

以公式(1),(2)计算的无粘结预应力钢筋应力增量的计算值及试验过程中应力增量的实测值见表5。由表5可以看出:无粘结预应力再生混凝土梁在极限状态下的预应力钢筋应力增量比普通混凝土梁中预应力钢筋应力增量提高较多,这是由于再生骨料中的缝隙较天然骨料多,从而在极限状态下无粘结预应力再生混凝土梁的变形略大,导致无粘结预应力钢筋应力增量也相应增大。

考虑到与普通混凝土梁的差别仅为混凝土材料的不同,其他影响条件均相同,因此,对4根无粘结预应力再生混凝土梁在承载力极限状态下的钢筋应力增量进行拟合,建立了无粘结预应力钢筋应力增

表5 应力增量计算值与实测值

Tab. 5 Calculation and Measured Values of Stress Increments

试验梁编号	应力增量实测值 $\Delta\sigma_p^t$ /MPa	应力增量计算值 $\Delta\sigma_p^c$ /MPa	$\Delta\sigma_p^t(\Delta\sigma_p^c)^{-1}$
UPRCB-0	221.2	145.9	1.52
UPRCB-30	338.3	146.9	2.30
UPRCB-50	239.1	145.6	1.64
UPRCB-70	291.4	145.0	2.01
UPRCB-100	305.2	144.7	2.11

量计算公式,即

$$\Delta\sigma_p = \eta(240 - 350\xi_0)(0.45 + 5.5 \frac{h}{l_0}) \quad (3)$$

式中: η 为无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁预应力筋极限应力增量增大系数,取 $\eta=1.64$ 。

利用《规范》提出的无粘结预应力混凝土梁承载力计算方法并结合公式(3),对5根试验梁承载力进行计算并与实测值进行对比,其校核结果见表6。

表6 试验梁正截面受弯承载力校核结果

Tab. 6 Checking Results of Normal Section Flexural Bearing Capacities for Test Beams

试验梁编号	$M_{uc}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{ut}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{uc}M_{ut}^{-1}$
UPRCB-0	75.89	74.75	1.02
UPRCB-30	78.40	74.75	1.05
UPRCB-50	78.28	78.00	1.00
UPRCB-70	78.29	74.75	1.05
UPRCB-100	78.46	78.00	1.01

注: M_{uc} 、 M_{ut} 分别为试验梁极限弯矩的计算值与实测值。

4.2 最大裂缝宽度

对4根无粘结预应力再生混凝土试验梁的54条裂缝间距进行统计分析,并利用公式(4)~(6)进行计算验证,其结果如表7所示。

$$l_{cr} = 1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \quad (4)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (5)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \quad (6)$$

式中: l_{cr} 为裂缝间距; c 为最外层纵向受拉非预应力钢筋外边缘到混凝土受拉区边缘的距离; d_{eq} 为受拉区纵向非预应力钢筋等效直径; n_i 为受拉区第*i*种纵向非预应力钢筋根数; d_i 为受拉区第*i*种纵向非预应力钢筋公称直径; v_i 为受拉区第*i*种纵向受拉非预应力钢筋相对粘结特性系数,取 $v_i=1.0$; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉非预应力钢筋配筋率,当 $\rho_{te}<0.01$ 时,取 $\rho_{te}=0.01$; A_{te} 为

表 7 试验梁平均裂缝间距计算值与实测值

Tab. 7 Calculation and Measured Values of Average Crack Distances of Test Beams

试验梁编号	w_{mc}/mm	w_{mt}/mm	$w_{mc}w_{mt}^{-1}$
UPRCB-0	162.0	181.5	0.893
UPRCB-30		172.8	0.938
UPRCB-50		164.2	0.987
UPRCB-70		174.0	0.931
UPRCB-100		169.6	0.955

注: w_{mc} 、 w_{mt} 分别为试验梁平均裂缝间距的计算值与实测值。

有效受拉混凝土截面面积,取 $A_{te}=0.5bh$ 。

由表 7 可以看出,利用现有的计算方法计算无粘结预应力再生混凝土梁平均裂缝间距是可行的。

根据《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ 92—2004,以下简称《规程》)提出的计算方法,

表 8 试验梁最大裂缝宽度计算值与实测值

Tab. 8 Calculation and Measured Values of Maximum Crack Widths of Test Beams

$M_k/$ (kN·m)	UPRCB-0		UPRCB-30		UPRCB-50		UPRCB-70		UPRCB-100	
	w_{max}^c/mm	w_{max}^t/mm	w_{max}^c/mm	w_{max}^t/mm	w_{max}^c/mm	w_{max}^t/mm	w_{max}^c/mm	w_{max}^t/mm	w_{max}^c/mm	w_{max}^t/mm
32.5	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.09	0.07	0.09
45.5	0.20	0.18	0.20	0.18	0.20	0.18	0.20	0.19	0.20	0.18
58.5	0.36	0.32	0.35	0.32	0.35	0.33	0.35	0.33	0.35	0.33
71.5	0.51	0.48	0.50	0.49	0.50	0.48	0.51	0.50	0.50	0.50

注: M_k 为弯矩; w_{max}^c 为最大裂缝宽度计算值; w_{max}^t 为最大裂缝宽度实测值。

由表 8 可以看出,现有的无粘结预应力混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算公式对无粘结预应力再生混凝土梁最大裂缝宽度的计算结果与实测结果吻合较好,再生粗骨料掺量的变化对最大裂缝宽度无明显影响。

4.3 跨中挠度

公式(10),(11)分别为《规程》中提出的混凝土未开裂时的刚度计算公式和混凝土开裂时的无粘结预应力混凝土受弯构件刚度计算公式,即

$$B_s = \begin{cases} 0.85E_c I_0 & \text{混凝土未开裂} \\ \frac{0.85E_c I_0}{k_{cr} + (1 - k_{cr})\omega} & \text{混凝土开裂} \end{cases} \quad (10)$$

$$k_{cr} = \frac{M_{cr}}{M_k} \quad (11)$$

$$\omega = (1.0 + 0.8\lambda + \frac{0.21}{\alpha_E \rho})(1 + 0.45\gamma_f) \quad (12)$$

$$\gamma_f = \frac{(b_f - b)h_f}{bh_0} \quad (13)$$

式中: B_s 为受弯构件短期刚度; E_c 为混凝土弹性模量; I_0 为试验梁截面换算惯性矩;当 $k_{cr} > 1.0$ 时,取 $k_{cr} = 1.0$; λ 为无粘结预应力筋配筋指标与综合配筋

指标的比值, $\lambda = \frac{\sigma_{pe} A_p}{\sigma_{pe} A_p + f_y A_s}$; α_E 为无粘结预应力钢

利用公式(7)~(9)计算 5 根试验梁加载至 50 kN 后出现的最大裂缝宽度 w_{max} ,计算结果与实测结果如表 8 所示。

$$w_{max} = 1.28\alpha_{cr}\Psi\frac{\sigma_{sk}}{E_s}(1.9c + 0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (7)$$

$$\Psi = 1.1 - 0.65\frac{f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_{sk}} \quad (8)$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k - 0.75M_{cr}}{0.87h_0(0.3A_p + A_s)} \quad (9)$$

式中: E_s 为钢筋弹性模量; α_{cr} 为裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度影响系数,取 $\alpha_{cr} = 0.77$; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; h_0 为受弯构件截面有效高度; M_{cr} 为无粘结预应力混凝土梁正截面开裂弯矩; Ψ 为裂缝间纵向受拉非预应力钢筋应变不均匀系数,当 $\Psi < 0.4$ 时,取 $\Psi = 0.4$ 。

筋与混凝土弹性模量的比值; ρ 为试验梁纵向受拉钢筋配筋率, $\rho = \frac{A_p + A_s}{bh_0}$; γ_f 为受拉翼缘截面面积与腹板有效面积的比值; b_f 为试验梁翼缘宽度; h_f 为 T 型截面受弯构件翼缘高度。

利用公式(10)和公式(11)对 5 根试验梁的跨中挠度进行计算,计算值与实测值如图 9 所示。由图 9 可以看出,利用《规程》中提出的无粘结预应力混凝土受弯构件刚度计算公式对无粘结预应力再生混凝土梁的挠度进行计算,计算值略大于实测值,符合安全性要求,再生粗骨料掺量的变化对试验梁刚度影响不明显。

5 结 语

(1)无粘结预应力再生混凝土梁受力过程经历了弹性工作阶段、混凝土开裂阶段、破坏阶段,控制截面基本符合平截面假定;破坏时普通纵向受拉钢筋先屈服,受压区混凝土被压碎,无粘结预应力钢筋未达到受拉屈服强度;再生粗骨料的替换率对破坏形态没有显著影响。

(2)基于试验数据,对承载力极限状态下无粘结

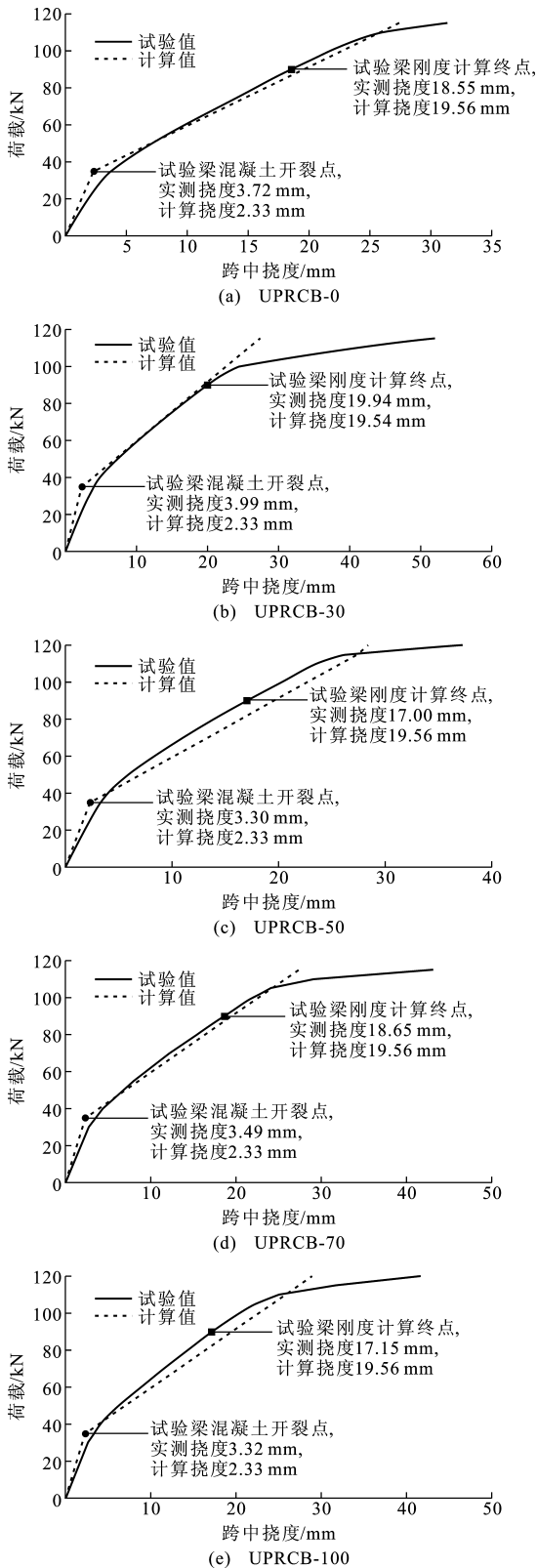


图9 试验梁跨中挠度试验值与计算值对比

Fig. 9 Comparison of Test and Calculation Values of Mid-span Deflections of Test Beams

预应力钢筋应力增量的计算公式进行修正,并对试验梁承载力进行验证,结果表明,计算值与实测值吻

合较好。

(3)利用《规程》中提出的计算公式对试验梁最大裂缝宽度及跨中挠度进行了计算,计算值与实测值吻合较好。

参考文献:

References:

- [1] JGJ/T 240—2011,再生骨料应用技术规程[S]. JGJ/T 240—2011, Technical Specification for Application of Recycled Aggregate[S].
- [2] 全洪珠,丁杰东,朱亚光,等.不同品质再生粗骨料对混凝土强度及耐久性影响的实验研究[C]//中国土木工程学会.首届全国再生混凝土研究与应用学术交流会论文集.上海:同济大学出版社,2008:283-289. QUAN Hong-zhu, DING Jie-dong, ZHU Ya-guang, et al. Experimental Study on Effects of Different Properties of Recycled Coarse Aggregates on Strengths and Durability of Concrete[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the First National Symposium on the Research and Application of Recycled Concrete. Shanghai: Tongji University Press, 2008:283-289.
- [3] 杨青.再生骨料的吸水率对再生混凝土物理力学性能的影响研究[D].杭州:浙江大学,2011. YANG Qing. Research on Physical and Mechanical Properties of Recycled Concrete Affected by Water Absorption of Recycled Aggregate[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [4] 水中和,潘志生,朱文琪.再生集料混凝土的微观结构特征[J].武汉理工大学学报,2003,25(12):99-103. SHUI Zhong-he, PAN Zhi-sheng, ZHU Wen-qi. Microscopic Structural Features of the Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(12): 99-103.
- [5] 袁孝文,解培民.路面混凝土的再生强度和弹性模量的研究[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(3):57-61. YUAN Xiao-wen, XIE Pei-min. Study on Intensity and Modulus of Elasticity of Recycled Pavement Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(3): 57-61.
- [6] 孙跃东,李莹.再生混凝土应用的生态性及经济性研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2007,26(5):36-39,45. SUN Yue-dong, LI Ying. Research on the Ecological and Economic Natures of Recycled Concrete Application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 26(5): 36-39, 45.

- 45.
- [7] 瞿尔仁,杨木旺,叶桂花,等.再生混凝土技术及其应用[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2003,26(6):1183-1187.
QU Er-ren, YANG Mu-wang, YE Gui-hua, et al. On the Application of Recycled Concrete[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2003, 26(6): 1183-1187.
- [8] 樊禹江,王社良,于洋,等.性能增强再生混凝土梁受弯性能试验研究[J].实验力学,2013,28(3):390-402.
FAN Yu-jiang, WANG She-liang, YU Yang, et al. Flexural Performance Experimental Study on the Enhanced Performance Recycled Concrete Beams[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3): 390-402.
- [9] TANAKA R, MIURA S, OHAGA Y. Experimental Study on the Possibility of Using Permanently Recycled Concrete for Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of the Society of Materials Science, 2002, 51(8):948-954.
- [10] 吴瑾,丁东方,杨曦.再生混凝土梁正截面开裂弯矩分析与试验研究[J].建筑结构,2010,40(2):112-114.
WU Jin, DING Dong-fang, YANG Xi. Experimental Research on the Cracking Moment of Normal Section for Recycled Concrete Beams[J]. Building Structure, 2010, 40(2): 112-114.
- [11] SONBE M. Shear Characteristic of RC Beam with Recycled Coarse Aggregate[C]//JSCE. Proceedings of the 25th JSCE Annual Meeting. Kanto Branch; JSCE, 1998:912-913.
- [12] 杨桂新,吴瑾,叶强.再生粗骨料钢筋混凝土梁短期刚度研究[J].土木工程学报,2010,43(2):55-63.
YANG Gui-xin, WU Jin, YE Qiang. Study on Short Term Stiffness of Reinforced Concrete Beams with Recycled Coarse Aggregates[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 55-63.
- [13] 徐明,高海平,陈忠范.高温下再生混凝土梁受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(6):42-52.
XU Ming, GAO Hai-ping, CHEN Zhong-fan. Experimental Research on Shear Behaviors of Recycled Concrete Beams Exposed to Fire[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6): 42-52.
- [14] 周静海,张薇,刘爱霞.再生粗骨料混凝土梁抗弯性能研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2008,24(5):762-767.
ZHOU Jing-hai, ZHANG Wei, LIU Ai-xia. Bend Performances of Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2008, 24(5): 762-767.
- [15] 邓志恒,杨海峰,罗延明,等.再生混凝土有腹筋筒支梁斜截面抗剪试验研究[J].工业建筑,2010,40(12):47-50.
DENG Zhi-heng, YANG Hai-feng, LUO Yan-ming, et al. Experimental Study on Shear Performance of Recycled Concrete Beam Contained with Web Bar[J]. Industrial Construction, 2010, 40(12): 47-50.
- [16] 刘超,白国良,尹磊,等.长期荷载作用下再生混凝土梁裂缝宽度试验研究[J].土木与工程学报,2014,47(1):82-87.
LIU Chao, BAI Guo-liang, YIN Lei, et al. Experimental Study on Crack Width of Recycled Aggregate Concrete Beam Under Long-term Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 82-87.
- [17] 郑丹,郭启华.无粘结预应力粗钢筋在斜拉梁桥中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(1):70-72.
ZHENG Dan, GUO Qi-hua. Application of Unbound Prestressed Crude Steel in Cable-stayed Bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(1): 70-72.
- [18] 陈云刚.再生混凝土界面强化试验的微观机理研究[J].混凝土,2007(11):53-58.
CHEN Yun-gang. Microscopic Mechanism Research Analysis About Strengthening Methods of Interfacial Zone in Recycled-aggregate Concrete[J]. Concrete, 2007(11): 53-58.
- [19] 石建光.再生骨料对混凝土性能影响的试验研究和计算分析[D].上海:上海大学,2011.
SHI Jian-guang. Experimental Research and Computational Analysis of Recycled Aggregate Concrete Performance[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.