

文章编号: 1000-4750(2014)06-0124-08

# 基于荷载长期效应 RAC 梁裂缝宽度计算方法研究

刘 超<sup>1,3</sup>, 白国良<sup>2</sup>, 尹 磊<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程博士后科研流动站, 陕西, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055;  
3. 西安建筑科技大学理学院, 陕西, 西安 710055; 4. 江苏邮电规划设计院有限责任公司, 江苏, 南京 210018)

**摘 要:** 通过对不同取代率时再生混凝土(RAC)梁裂缝宽度进行长期加载试验研究, 分析了短长期荷载作用下正截面裂缝随时间变化而发展的规律。研究表明: 长期荷载作用下, 再生混凝土裂缝较普通混凝土的快速增长时期出现显著“后延”特点, 且增长期持续时间变长。以试验结果为依据, 拟合回归出内力臂系数、平均裂缝间距、钢筋应变不均匀系数计算公式, 建立了以综合法为理论基础的短期裂缝最大宽度计算公式, 通过多方数据校核满足计算精度, 结合长期裂缝宽度附加时变系数, 提出不同取代率时再生混凝土梁最大裂缝宽度计算公式。

**关键词:** 再生混凝土梁; 裂缝宽度; 长期试验; 计算方法; 时变系数

中图分类号: TU375.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.12.0974

## CALCULATION METHOD FOR CRACK WIDTH IN RAC BEAM BASED ON LONG-TERM LOADING EFFECTS

LIU Chao<sup>1,3</sup>, BAI Guo-liang<sup>2</sup>, YIN Lei<sup>4</sup>

(1. Materials Science and Engineering of Post-Doctoral Research Station, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;  
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;  
3. School of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;  
4. Jiangsu Posts & Telecommunications Planning and Designing Institute CO.LTD, Nanjing, Jiangsu 210018, China)

**Abstract:** Based on long-term crack width experiments on recycled aggregate concrete(RAC) beams with different recycled material replacement rates, the development of crack widths over time between the different beams was compared. The results show that the period of rapid cracking growth is postponed in recycled aggregate concrete beams, and also of longer duration than in normal concrete beams. The internal lever arm coefficient, average crack spacing, and steel strain non-uniformity coefficient were fitted, and a formula for calculating maximum short-term crack width is established. Its calculation results have satisfactory precision. After analyzing additional crack width time-varying coefficients, formula for maximum crack width an RAC beam with varying replacement rates is established.

**Key words:** recycled aggregate concrete beam; crack widths; long-term experiment; calculation method; time-varying coefficient

随着城市化高速发展, 同时兼顾环境保护与资源节约的再生混凝土技术越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>。再生混凝土及其结构的提出一方面消耗了数

目惊人的建筑垃圾, 另一方面缓解了天然骨料供应紧缺的棘手问题, 同时解决了环保和资源短缺的问题<sup>[2-3]</sup>。目前国内外对于再生混凝土的研究主要集

收稿日期: 2012-12-17; 修改日期: 2013-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308446); 中国博士后科学基金项目(2013M532022); 山西省博士后科学基金特别项目; 西安市科技计划项目(CXY1349(4)); 西安建筑科技大学创新团队项目

通讯作者: 刘 超(1982-), 男, 张家口市人, 副教授, 博士, 从事再生混凝土结构工程研究(E-mail: chaoliu@xauat.edu.cn).

作者简介: 白国良(1955-), 男, 陕西渭南人, 教授, 博士, 教育部重点实验室主任, 从事钢混组合结构与抗震工程研究(E-mail: guoliangbai@126.com);

尹 磊(1978-), 男, 马鞍山市人, 工程师, 硕士, 从事再生混凝土结构工程研究(E-mail: yinleixauat@126.com).

中在其基本材料性能以及基本构件承载力计算方法方面,而对于再生混凝土构件裂缝宽度计算方法的研究很少<sup>[4-5]</sup>。

南京航空航天大学的吴瑾等对短期荷载作用下再生混凝土梁的裂缝宽度进行了试验研究,郑州大学李平先等对 8 个再生混凝土简支梁进行了使用性能试验研究,研究结果表明:在其他条件相同时,再生混凝土梁较多出现裂缝的中断、汇合和分叉等现象表现出离散性大的特点;再生混凝土梁最大裂缝宽度较普通混凝土梁大;现行规范中受弯构件裂缝宽度计算方法已不适用于再生混凝土构件计算需进行计算公式修正<sup>[6-7]</sup>。

通过目前研究成果可以发现:关于再生混凝土构件裂缝宽度计算方法的研究很少,特别是尚无文献报道关于长期荷载作用下再生混凝土构件裂缝宽度的研究成果,而缺少长期效应考虑的再生混凝土裂缝宽度计算方法是不完善不系统的,这将导致工程设计人员无法对再生混凝土结构进行准确设

计,不能将该材料大规模应用于建筑结构中。因此本文针对长期荷载作用下不同取代率再生混凝土梁裂缝宽度进行试验研究,综合考虑短、长期荷载作用并提出再生混凝土梁裂缝宽度计算方法。

## 1 试验概况

### 1.1 再生粗骨料

本文试验所用的再生粗骨料均由陕西鑫生源渣土再生利用有限公司提供。依据现场调研结果,该公司生产再生骨料的废弃混凝土主要来源于城市拆迁,拆迁的旧建筑物主要为 20 世纪 70 年代、80 年代的建筑物、构筑物,拆除所在地为三环城区范围内,这种再生骨料来源具有地区性代表意义。其组成成分与材性指标详见表 1~表 2 所述。

表 1 再生骨料组成成分

原状石子/(%)	次生骨料/(%)	砂浆块/(%)	杂质/(%)
35	56	7	2

表 2 再生骨料与天然骨料材性指标对比表

Table 2 Recycled and natural aggregate material properties

骨料类型	表观密度/(kg/m <sup>3</sup> )	堆积密度/(kg/m <sup>3</sup> )	紧密密度/(kg/m <sup>3</sup> )	压碎指标/(%)	吸水率/(%)	含水率/(%)	
再生骨料	2601	1314	1459	18.3	4.67	实测最大 5.86	实测最小 2.53
天然石子	2658	1438	1593	10.6	0.69	实测最大 0.94	实测最小 0.35

### 1.2 试件设计

试验梁一共设计了 4 根,其中再生粗骨料取代为 100%的试件两个,取代率 50%和 0%的试件各一个,根据试验需要将一取代率为 100%的试验梁进行短期静力加载试验,以确定加载总重等控制数据。试验试件按照《混凝土结构试验方法标准》GB50152-92 要求,根据加载设备的吨位最终确定试件的尺寸为 130mm×260mm×2000mm。

### 1.3 加载设备与测点布置

本次长期加载试验在西安建筑科技大学教育部重点实验室地下静载加载区进行,加载设备采用课题组自主研发的“自平衡加载系统”进行长期加载,为保证加载值稳定,该系统采用杠杆重力式加载原理。试验时先预加载,预加载共分 3 级,每级加载值为预估总加载值的 5%,设备调试正常后卸载,然后重新分级加载直至正常使用极限状态,本次加载为废旧混凝土配重块加载,为防止长期持荷期间配重块吸水导致加载值增加,我课题组选用废弃两年以上的混凝土块作为加载砝码。加载至结构裂缝宽度达到 0.2mm 范围为限,停止加载。此时所

施加荷载值为正常使用阶段荷载值,即认为构件在正常使用极限状态下长期持荷。

本次长期加载试验测量主要内容包括:1) 再生混凝土应变。在梁的跨中截面上沿高度等间距布置五组混凝土应变测量仪。2) 再生混凝土裂缝观测。试验前先将试件表面刷白,并分成 5cm×5cm 的方格网以便观察和记录裂缝情况。试验过程中使用裂缝观测仪对再生混凝土裂缝进行观察测量,即时记录裂缝的发展和分布情况。3) 试验环境温湿度测量。由于温湿度对再生混凝土收缩性能以及长期性能的影响不容忽视,因此采用温湿度测量仪对构件加载处方圆 5m 范围内进行区域平均温湿度测量,测点布置详见图 2 所示。

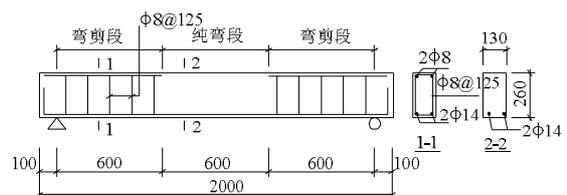


图 1 试件几何尺寸和配筋图 /mm

Fig.1 Specimen dimensions and reinforcement details

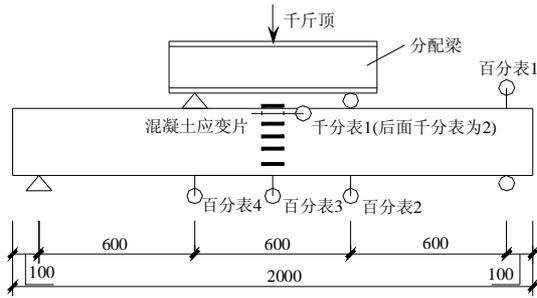


图 2 测点布置图 /mm

Fig.2 Reinforcing bar and RAC measuring points

### 1.4 长期加载记录与温湿度环境

本次长期加载持荷时间为 360d, 加载后一周内每天进行一次观察记录, 加载后一月内每周两次观测记录, 之后每周观测记录一次。由于温湿度环境对于混凝土收缩性能以及徐变会有较大影响进而对长期作用下的裂缝宽度产生影响, 因此本次试验对试验室温湿度环境进行观测记录并加以控制。为了防止因温湿度变化频繁或幅度过大造成的试验误差, 我课题组每日对试验室环境温湿度进行测量, 对试验室通风次数、暖气供给、雨季除潮采取相应措施, 如图 3~图 4 所示为试验加载周期内试验室温湿度变化图。加载周期内平均湿度 60.56%, 最大湿度 81%, 最小湿度 25%; 平均温度 18.98°C, 最高温度 28°C, 最低温度 15°C, 因此温湿度对于普通混凝土与再生混凝土、再生混凝土不同取代率之间是处于同一试验标准的, 并可以反映出两种混凝土对于同一温湿度环境的反应程度。

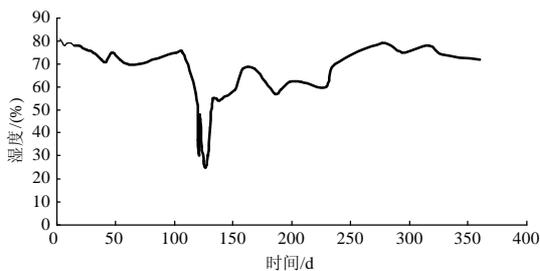


图 3 环境湿度变化曲线

Fig.3 Test environment moisture history

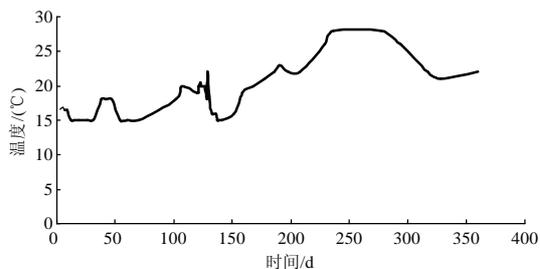


图 4 环境温度变化曲线

Fig.4 Test environment temperature history

## 2 全过程试验现象描述

### 2.1 短期加载试验现象

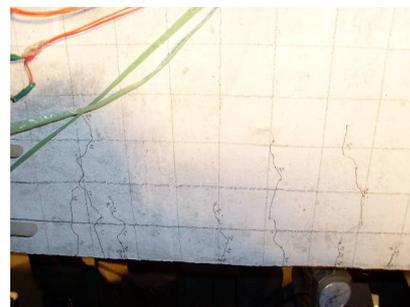
由初始时刻加载至正常使用极限状态时刻, 该段过程采用逐级加载的短期加载方式, 在这一阶段中三构件均有裂缝开展。短期荷载作用下, 再生骨料取代率不同的试验梁裂缝发展速度与宽度也呈现出不同的发展趋势, 取代率越高主裂缝旁分支裂缝发展速度越快。普通混凝土梁在纯弯段里垂直裂缝发展速度越快。普通混凝土梁在纯弯段里垂直裂缝条数较少且分布较均匀, 裂缝基本沿竖直方向发展, 再生混凝土裂缝开展分布不均匀。从总体上分析, 再生混凝土构件的裂缝开展随着取代率的变化表现出裂缝间距缩小、纯弯段裂缝数量增加、最大裂缝宽度减小的特点。



(a) 取代率 0% (普通混凝土)



(b) 取代率 50% (再生混凝土)



(c) 取代率 100% (再生混凝土)

图 5 裂缝分布图

Fig.5 Cracking distribution

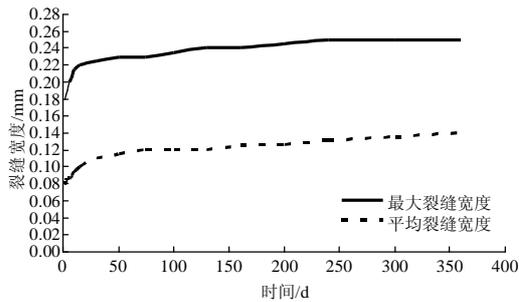
### 2.2 长期加载试验现象

当加载至正常使用极限状态后维持荷载不变,

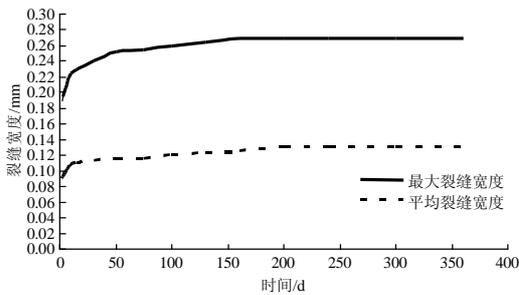
此时构件进入长期加载试验阶段。通过加载观测以裂缝发展不同特点为依据,可将长期加载时间分为1d~7d、7d~30d、30d~90d、90d~200d、200d~360d,上述5个发展阶段再生混凝土裂缝发展呈现出不同变化特点。

在最初的1周时间内普通混凝土梁的裂缝宽度增长速度较后期增长速度快,1周后裂缝宽度增长速度趋缓(如图6所示);加载期7d~30d内,100%取代率的再生混凝土梁裂缝依然延续上一阶段的快速发展,而普通混凝土裂缝发展速度明显趋缓;加载期30d~90d内,普通混凝土试件与再生混凝土试件均开始出现细小的新裂缝或是在主裂缝旁出现次生裂缝,随着取代率增加细小的新裂缝以及主裂缝旁出现的次生裂缝出现数量也不断增加(见图7);加载期90d~200d内,三试件细小新裂缝与主裂缝旁的次生裂缝出现的现象基本停止。加载期200d~360d内,3个试件裂缝发展均进入一个

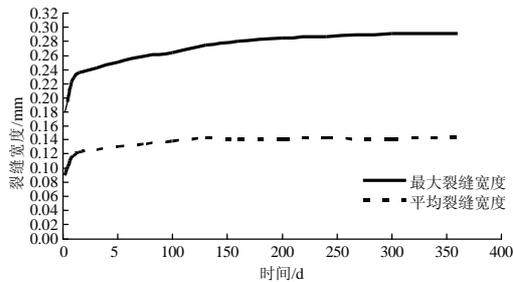
稳定时期,无论是裂缝宽度、新裂缝开展或是弯曲裂缝与斜裂缝宽度变化,均无较大变化。从图表中可以看到,该时期最大裂缝宽度与平均裂缝宽度曲线不断收敛,其中100%试件变化相对大,50%试件介于中间,长期荷载作用下试件裂缝发展趋于稳定。



(a) 普通混凝土裂缝宽度时间关系图



(b) 50%再生混凝土裂缝宽度时间关系图



(c) 100%再生混凝土裂缝宽度时间关系图

图6 长期荷载作用下试件裂缝时间变化曲线  
Fig.6 Crack width-time curve under long-term load



图7 再生混凝土主次裂缝中断、汇合

Fig.7 Cracking distribution in recycled concrete beams

### 3 再生混凝土梁裂缝宽度计算方法

#### 3.1 短期荷载作用下再生混凝土梁裂缝宽度计算公式

文献[8]指出,无粘结滑移理论对混凝土类材料亦有一定影响,因此本文结合混凝土相关理论,基于粘结滑移-无滑移理论的综合法建立短期荷载作用下裂缝最大宽度计算公式:

$$w_{\max} = t_s w_m = t_s (y\bar{e}_s - \bar{e}_c) l_{cr} = t_s a_y \bar{e}_s l_{cr} = t_s a_y \frac{M}{hh_0 A_s E_s} l_{cr} \quad (1)$$

上述计算模式计算的关键是系数 $h$ 、 $l_{cr}$ 、 $y$ 的取值和计算问题,因此结合试验结果对三系数分别进行数据回归拟合。

##### 1) 内力臂系数 $h$

通过钢筋应力计算公式 $s_s = M/hh_0 A_s$ 不难发现,通过试验实测出来的裂缝处钢筋应力 $s_s$ ,可以

求解得到内力臂系数  $h$ 。本文根据实测钢筋应力(变)值,反算内力臂系数并进行拟合回归分析得到内力臂系数  $h$  计算公式,如图 8 所示。

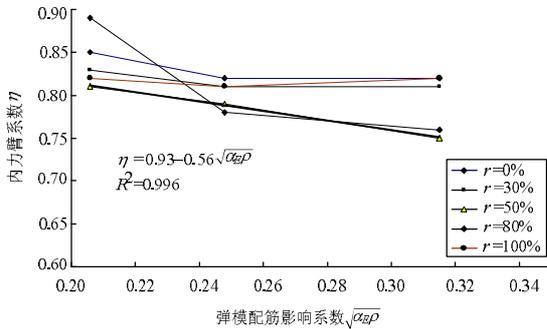


图 8 内力臂系数拟合回归公式图

Fig.8 Regression of internal lever arm coefficient

可见再生混凝土内力臂系数的选取与普通混凝土是有一定区别的,该系数与钢筋、再生混凝土弹性模量之比以及配筋率有关。那么再生混凝土梁内力臂系数的计算公式为:

$$h = 0.93 - 0.56\sqrt{a_E r} \quad (2)$$

式中:  $a_E$  为钢筋与再生混凝土弹性模量之比;  $r$  为构件配筋率。

对于不同换算配筋率,内力臂系数最终会稳定在一个固定数值,本文建议内力臂系数取该值为 0.80<sup>[9]</sup>。

### 2) 平均裂缝间距 $l_{cr}$

依据采用的综合理论,将粘结滑移理论与无滑移理论对平均裂缝间距的影响均得以体现,根据试验实测各试件纯弯段主要的垂直裂缝之间的距离进行数据回归分析,拟合再生混凝土平均裂缝间距计算公式如图 9 所示。

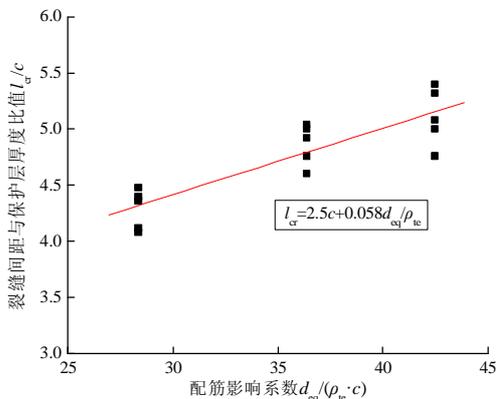


图 9 平均裂缝间距拟合公式图

Fig.9 Regression of average crack spacing

根据拟合公式,综合考虑粘结滑移-无滑移理论,得到在再生混凝土受弯构件受荷稳定阶段,平

均裂缝间距计算公式为:

$$l_{cr} = b \left( 2.5c + 0.058 \frac{d_{eq}}{r_{te}} \right) \quad (3)$$

式中:  $b$  为构件内力状态系数,  $b=1.0$ ;  $c$  为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离;  $d_{eq}$  为受拉区纵向钢筋的等效直径;  $r_{te}$  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;

### 3) 钢筋应变不均匀系数 $y$

钢筋不均匀系数为裂缝间钢筋应力平均值与裂缝截面处钢筋应力的比值,由于开裂截面处再生混凝土退出工作,原先承担的应力全部由钢筋承担,因此裂缝截面处的钢筋应力值较钢筋应力平均大。在本文试验中,纯弯段布置钢筋应力(变)测点 15 个,以荷载一定时测点中最大值为裂缝截面处钢筋应力值,以全部测点值平均值作为钢筋应力平均值,实测数据反算钢筋应变不均匀系数  $y$  计算公式:

$$y = \frac{\bar{e}_s}{e_s} = \frac{\bar{s}_s / E_s}{s_s / E_s} \leq 1.0 \quad (4)$$

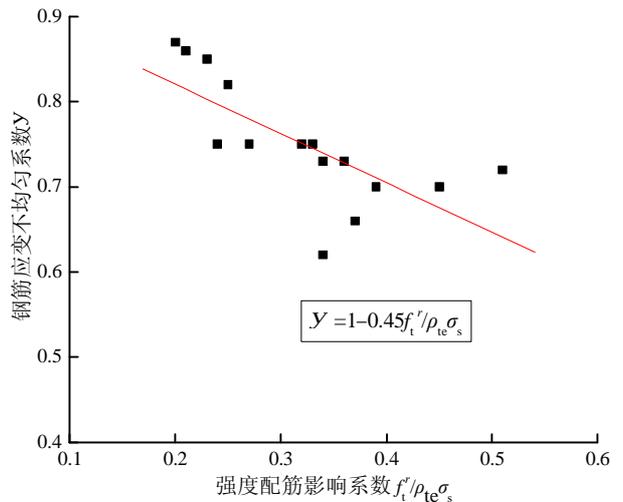


图 10 钢筋应变不均匀系数拟合公式图

Fig.10 Regression of steel strain non-uniformity coefficient

通过回归发现,再生混凝土钢筋应变不均匀系数  $y$  与再生混凝土抗拉强度、按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率、钢筋应力有关。

$$y = 1 - 0.45 f_t^r / r_{te} s_s \quad (5)$$

### 4) 短期荷载作用下再生混凝土梁裂缝最大宽度计算公式

依据丁大钧课题组研究成果<sup>[9]</sup>,引入宽度短期裂缝最大宽度修正系数  $t_s = w_{max} / w_m$ , 取值 1.66。这样,短期荷载作用下裂缝最大宽度计算公式:

$$w_{\max} = t_s w_m = t_s (y\bar{e}_s - \bar{e}_c) l_{cr} = t_s a_c y \bar{e}_s l_{cr} = t_s a_c y \frac{M}{h h_0 A_s E_s} l_{cr} \quad (6)$$

式中,  $a_c$  为裂缝间再生混凝土伸长对裂缝宽度的影响系数, 根据资料本文取值 0.85。

式(6)中其他系数的选取与计算均按照本节所述公式进行。

为验证上述公式的计算准确度, 将本文试验数

据结果以及国内相关研究者试验数据代入上述公式进行计算, 并将试验实测值与计算值相比以此对计算公式的准确度进行判断, 具体计算情况如表 3 所示。通过对试验梁的建议公式计算值与实测结果的比较后我们可以发现, 以实测结果与理论计算值的比值为统计样本, 其均值为 0.98, 标准差 0.149, 变异系数 0.1514。式(6)满足再生混凝土梁短期荷载作用下裂缝最大宽度计算精度要求。

表 3 实测结果与建议公式计算值比较

Table 3 Ratios of measured results to calculated values

研究者	试件	M/(kN·m)	最大裂缝宽度试验值/mm	最大裂缝宽度计算值/mm	试验值/计算值
本文	RBF-1-0	23.45	0.22	0.21	1.05
	RBF-1-30	20.75	0.23	0.18	1.28
	RBF-1-50	20.00	0.19	0.17	1.12
	RBF-1-80	23.15	0.20	0.21	0.95
	RBF-1-100	20.05	0.18	0.17	1.06
	RBF-2-0	34.50	0.25	0.24	1.14
	RBF-2-30	30.55	0.20	0.21	1.00
	RBF-2-50	33.70	0.22	0.24	1.00
	RBF-2-80	35.21	0.23	0.25	1.00
	RBF-2-100	33.65	0.21	0.24	0.95
	RBF-3-0	38.00	0.18	0.15	1.29
	RBF-3-30	43.50	0.16	0.17	0.94
	RBF-3-50	45.30	0.21	0.18	1.24
	RBF-3-80	45.00	0.20	0.18	1.11
	RBF-3-100	42.30	0.19	0.17	1.19
杨曦 <sup>[10]</sup>	L11	8.22	0.18	0.26	0.91
	L32	10.48	0.15	0.21	1.15
	L43	16.90	0.20	0.24	1.25
	L72	10.98	0.22	0.23	0.97
宋新伟 <sup>[11]</sup>	ZS-2-12	23.90	0.20	0.29	0.70
	ZS-3-12	33.90	0.26	0.25	1.07
	ZS-2-18	49.80	0.28	0.27	1.07
	ZS-2-18+14	62.40	0.22	0.23	1.01
肖建庄 <sup>[12]</sup>	BF50	27.90	0.29	0.30	1.02
	BF100	27.90	0.28	0.29	0.98

### 3.2 长期附加时变系数分析

本文采用系数法来综合反映长期收缩、徐变等因素带来的影响, 通过对长期加载过程中裂缝宽度附加增长时变系数进行分析, 提出再生混凝土裂缝长期扩大系数。

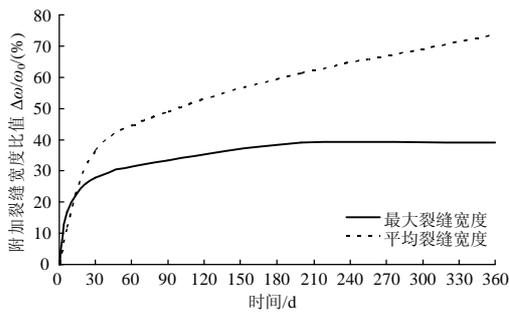
由上述试验现象不难看出, 长期荷载作用下裂缝的发展与裂缝宽度增长会经过几段时间过程, 如以加载至正常使用极限状态下为第 1d, 那么我们以长期荷载作用第 7d、第 30d、第 90d、第 200d 和第 360d 为时间点对再生混凝土裂缝宽度增长大小、速度进行分析对比。定义第 1 天裂缝宽度值(即短期裂缝宽度值)为  $w_0$ , 第  $i$  天的裂缝宽度值为  $w_i$ 。长期荷载作用下裂缝宽度如表 4 所示。

通过表 4 的数据可以发现如下规律, 对于长期荷载作用下普通混凝土最大裂缝附加宽度与平均裂缝附加宽度发展差异性很大, 而无论是 50% 低取代率或是 100% 高取代率的再生混凝土, 最大裂缝附加宽度与平均裂缝附加宽度发展近似, 如图 11 所示。这说明长期荷载作用较长时间后, 普通混凝土最大裂缝附加宽度增长较平均裂缝附加裂缝宽度增长小, 而再生混凝土最大裂缝附加宽度增长与平均裂缝附加裂缝宽度相似。随着长期荷载持续时间混凝土与钢筋之间的粘结应力出现松弛滑移徐变现象, 使得混凝土平均裂缝宽度增大明显, 而再生混凝土与钢筋交接界面区塑性化程度大间接造成再生混凝土与钢筋粘结滑移性能增强, 这样最大

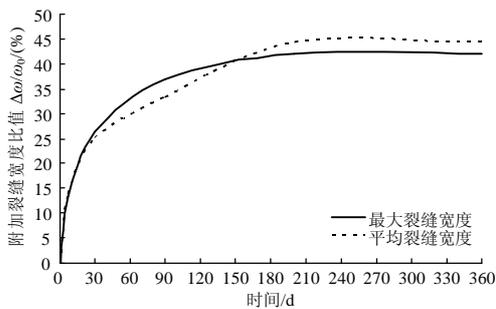
表 4 附加裂缝宽度对比表  
Table 4 Additional crack width contrast

/mm

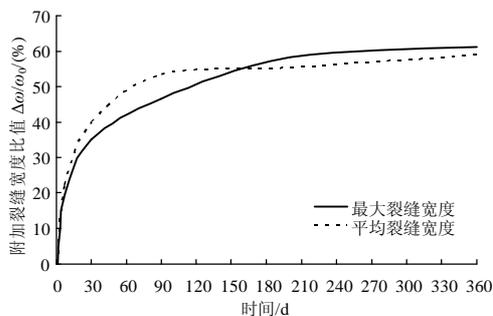
第 $i$ 天	1	7	30	90	200	360
普通混凝土最大裂缝宽度	0.180	0.210	0.230	0.240	0.250	0.250
$\Delta w = w_i - w_0$	0	0.030	0.050	0.060	0.070	0.070
$\Delta w / w_0$	0	16.67%	27.78%	33.33%	38.89%	38.89%
普通混凝土平均裂缝宽度	0.081	0.090	0.110	0.120	0.130	0.140
$\Delta w = w_i - w_0$	0	0.009	0.029	0.039	0.049	0.059
$\Delta w / w_0$	0	11.72%	36.55%	48.97%	61.38%	73.79%
50%再生混凝土最大裂缝宽度	0.190	0.215	0.240	0.260	0.270	0.270
$\Delta w = w_i - w_0$	0	0.025	0.050	0.070	0.080	0.080
$\Delta w / w_0$	0	13.16%	26.32%	36.84%	42.11%	42.11%
50%再生混凝土平均裂缝宽度	0.090	0.103	0.113	0.120	0.130	0.130
$\Delta w = w_i - w_0$	0	0.013	0.023	0.030	0.040	0.040
$\Delta w / w_0$	0	13.89%	25.00%	33.33%	44.44%	44.44%
100%再生混凝土最大裂缝宽度	0.180	0.215	0.243	0.264	0.285	0.290
$\Delta w = w_i - w_0$	0	0.035	0.063	0.084	0.105	0.110
$\Delta w / w_0$	0	19.44%	35.00%	46.67%	58.33%	61.11%
100%再生混凝土平均裂缝宽度	0.090	0.110	0.126	0.138	0.140	0.143
$\Delta w = w_i - w_0$	0	0.020	0.036	0.048	0.050	0.053
$\Delta w / w_0$	0	22.22%	40.00%	53.33%	55.56%	58.89%



(a) 普通混凝土附加裂缝宽度对比图



(b) 50%再生混凝土附加裂缝宽度对比图



(c) 100%再生混凝土附加裂缝宽度对比图

图 11 附加裂缝宽度-时间关系图

Fig.11 Additional crack width over time

裂缝宽度与平均裂缝宽度增长程度相似,从该现象可以推断再生混凝土与钢筋粘结滑移性能较普通混凝土强,这一结论与国内其他学者结论相同<sup>[13]</sup>。

而对于普通混凝土与再生混凝土、再生混凝土与再生混凝土不同取代率之间,附加裂缝宽度存在着一定规律性差异(如图 12 所示)。无论是最大裂缝宽度或是平均裂缝宽度,100%再生混凝土的附加裂缝宽度都较 50%再生混凝土与普通混凝土大,因此可以认为长期荷载作用下取代率越高的再生混凝土裂缝附加宽度越大,那么对于规范中对于混凝土裂缝宽度计算中的长期扩大系数,则不适宜应用于长期荷载作用下的再生混凝土裂缝宽度计算。

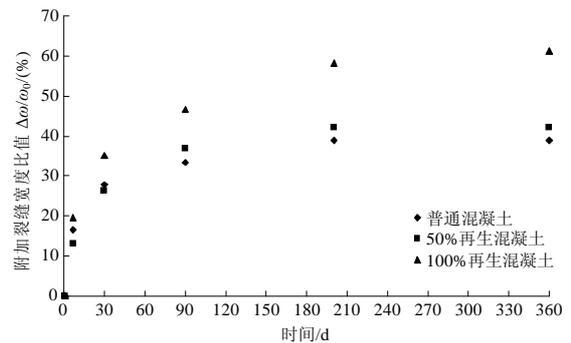


图 12 不同取代率最大裂缝附加宽度对比图

Fig.12 Maximum additional crack width for specimens with different replacement rates

### 3.3 再生混凝土梁最大裂缝宽度计算公式

根据表 4 数据可以计算,在长期荷载作用 360d 时,普通混凝土最大裂缝宽度较短期裂缝最大宽度

扩大 1.389 倍, 50% 取代率再生混凝土最大裂缝宽度较短期裂缝最大宽度扩大 1.421 倍, 100% 取代率再生混凝土最大裂缝宽度较短期裂缝最大宽度扩大 1.611 倍。按照文献[9]所述, 普通混凝土通常是在加载 3 年后裂缝宽度不发生变化, 规范对于普通混凝土长期扩大系数  $t_l$  取值为 1.5。那么依此计算, 50% 取代率再生混凝土长期扩大系数  $t_l$  为 1.53, 100% 取代率再生混凝土长期扩大系数  $t_l$  为 1.74。但是由上述的最大裂缝增长规律可以发现, 再生混凝土裂缝最大宽度增长期较普通混凝土长, 正如普通混凝土在加载期一年中裂缝扩大倍数为 1.389 倍小于其加载至稳定期三年时的 1.5 倍一样, 那么按照上节中附加裂缝宽度系数之间比例关系, 本文建议 50% 取代率再生混凝土长期扩大系数为 1.7, 100% 取代率再生混凝土长期扩大系数为 1.95。那么依据时变系数法, 结合短期裂缝最大宽度计算公式, 建立再生混凝土长期裂缝最大宽度计算公式为:

$$w_{\max} = t_l^r t_s a_s y \frac{M_K}{hh_0 A_s E_s} l_{cr} = t_l^r t_s a_s y \frac{M_K}{hh_0 A_s E_s} b \left( 2.5c + 0.058 \frac{d_{eq}}{r_{te}} \right) \quad (7)$$

式中:  $t_l^r$  为再生混凝土长期扩大系数, 当再生混凝土粗骨料取代率不大于 50% 时取值 1.7; 当大于 50% 时取值 1.95;  $y$  为钢筋应变不均匀系数,  $y = 1 - 0.45 f_t^r / r_{te} S_s$ ;  $M_K$  为按荷载效应的标准组合计算的弯矩值;  $h$  为内力臂系数, 计算公式见式(2);  $b$  为构件内力状态系数,  $b = 1.0$ ;

## 4 结论

(1) 在长期加载全过程中, 再生混凝土试件的裂缝较普通混凝土呈现出如下特点: 随着取代率增加, 主裂缝旁的次生裂缝与新生裂缝变多且分布不均, 特别是 100% 取代率试件的总体裂缝分布出现了主次裂缝汇合、中断等现象且多沿曲线发展; 同时再生混凝土裂缝较普通混凝土的快增长时期出现显著“后延”特点, 且增长期持续时间变长, 因此相同环境下的长期加载试验中, 再生混凝土裂缝宽度增长明显高于普通混凝土裂缝。

(2) 通过对最大裂缝附加宽度与平均裂缝附加宽度进行对比分析, 可以发现随着时间变化混凝土与钢筋之间的粘结应力出现松弛滑移徐变现象, 使得混凝土平均裂缝宽度增大明显, 而再生混凝土与钢筋交接界面区塑性化程度大间接造成再生混凝土

与钢筋粘结滑移性能增强, 这样最大裂缝宽度与平均裂缝宽度增长程度相似, 上述分析间接证明了再生混凝土与钢筋粘结滑移性能较普通混凝土强这一结论。

(3) 通过计算数据对比可以发现, 采用式(6)对短期荷载作用下的再生混凝土梁裂缝最大宽度进行计算是满足计算精度要求的, 同时也说明混凝土裂缝综合法理论依然适用于再生混凝土, 但最大裂缝宽度计算模式选取不同。

(4) 通过对裂缝宽度附加时变系数分析, 提出不同取代率情况下长期扩大系数, 采用系数法建立了适于长期荷载作用下的再生混凝土梁最大裂缝宽度计算公式。

## 参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 10-11.  
Xiao Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 10-11. (in Chinese)
- [2] 白国良, 刘超, 张锋剑. 再生混凝土结构基本受力行为研究[R]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2009: 7-8.  
Bai Guoliang, Liu Chao, Zhang Fengjian. Mechanical behavior research of recycled concrete structure [R]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009: 7-8. (in Chinese)
- [3] 刘数华, 冷发光. 再生混凝土技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 27-28.  
Liu Shuhua, Leng Faguang. Technology of recycled aggregate concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 27-28. (in Chinese)
- [4] 柳炳康, 陈丽华, 周安, 等. 再生混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 109-115.  
Liu Bingkang, Chen Lihua, Zhou An, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete beam-column interior-joints [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 109-115. (in Chinese)
- [5] 杨桂新, 吴瑾, 叶强. 再生混凝土梁挠度计算方法研究[J]. 工程力学, 2010, 28(2): 147-151.  
Yang Guixin, Wu Jin, Ye Qiang. Study on deflection of recycled concrete beams [J]. Engineering Mechanics, 2010, 28(2): 147-151. (in Chinese)
- [6] 吴瑾, 耿攀, 杨曦. 短期荷载作用下再生骨料混凝土梁正截面裂缝宽度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 107-114.  
Wu Jin, Geng Jiang, Yang Xi. Experimental research on crack widths of normal sections of recycled aggregate concrete beams under short term loading [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 107-114. (in Chinese)

(参考文献[7]-[13]转第 137 页)

- comparison of the use of natural frequency and mode shape data [C]// Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference. Las Vegas, Nevada, 1992, I: 522—528.
- [4] Johnson E A, Lam H F, Katafygiotis L S, et al. A Benchmark problem for structural health monitoring and damage detection [C]// Proceedings of the 14th Engineering Mechanics Conference. Austin, Texas, USA, 2000.
- [5] Povich C R, Lim T W. An artificial neural network approach to structural damage detection using frequency response functions [C]// Proceedings of the 1994 AIAA/ASME Adaptive Structures Forum, 1994: 151—159.
- [6] 伍雪南, 孙宗光, 毕波, 苏健. 基于吊索局部振动与神经网络技术的悬索桥损伤定位[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 203—206.  
Wu Xuenan, Sun Zongguang, Bi Bo, Su Jian. Damage location in a suspension bridge based on hanger local vibration and neural network technique [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 203—206. (in Chinese)
- [7] 孙宗光, 石健, 栗燕娜. 面向健康诊断的悬索桥试验模型设计与分析[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 192—195, 208.  
Sun Zongguang, Shi Jian, Li Yanna. Design and analysis of health-diagnosis-oriented test model of suspension bridges [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 192—195, 208 (in Chinese)
- [8] Ko J M, Sun Z G, Ni Y Q. Multi-stage identification scheme for detecting damage in cable-stayed Kap Shui Mun Bridge [J]. Engineering Structures, 2002, 24(7): 857—868.
- [9] Ko H, Baran R, Arozullah M. Neural network based novelty filtering for signal detection enhancement [C]// Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems. IEEE, Washington D C, 1992: 252—255.
- [10] Chen S S, Kim S. Neural network based signal monitoring in a smart structural system [C]// Proceedings of the SPIE, 1994, 2191: 176—186.
- [11] 孙宗光, 高赞明, 倪一清. 基于神经网络的损伤构件及损伤程度识别[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 18—22.  
Sun Zongguang, Ko Janming, Ni Yiqing. Identification of damaged members and damage extent in bridge deck by neural network [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 18—22. (in Chinese)
- [12] 孙宗光, 栗燕娜, 石健, 伍雪南. 损伤状态下悬索桥静动态响应的模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 59—63.  
Sun Zongguang, Li Yanna, Shi Jian, Wu Xuenan. Model test studies of static and dynamic responses of suspension bridge under damage conditions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(4): 59—63. (in Chinese)

(上接第 131 页)

- [7] 李平先, 宋新伟, 夏成. 钢筋再生混凝土筒支梁的使用性能研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(增刊 1): 27—31.  
Li Pingxian, Song Xinwei, Xia Cheng. Research on serviceable properties of reinforced recycled concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(Suppl 1) 1: 27—31. (in Chinese)
- [8] Frosch R J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3): 437—442.
- [9] 丁大钧. 钢筋混凝土构件抗裂度裂缝和刚度[M]. 南京: 南京工学院出版社, 1986: 82—87.  
Ding Dajun. Cracks and stiffness of reinforced concrete members [M]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology Press, 1986: 82—87. (in Chinese)
- [10] 杨曦. 再生混凝土梁正截面抗裂性能和裂缝宽度试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.  
Yang Xi. Experimental research on the behavior of the resistance of cracking and crack width of normal section for recycled concrete beams [D]. Nanjing: University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [11] 宋新伟. 再生混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.  
Song Xinwei. Experimental research on recycled concrete beams bending performance [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006. (in Chinese)
- [12] 肖建庄, 兰阳. 再生粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 特种结构, 2006, 23(1): 9—12.  
Xiao Jianzhuang, Lan Yang. Test and study on flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete beam [J]. Special Structures, 2006, 23(1): 9—12. (in Chinese)
- [13] 肖建庄, 李丕胜, 秦薇. 再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 13—16.  
Xiao Jianzhuang, Li Pisheng, Qin Wei. Study on bond-slip between recycled concrete and rebars [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(1): 13—16. (in Chinese)