

# 再生混凝土早期抗开裂性能试验研究

肖建庄, 胡 博, 丁 陶

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 采用刀口约束法试验,研究了再生粗骨料取代率及粉煤灰、矿粉的掺量对再生混凝土早期抗开裂性能的影响.以单位面积平板上的总开裂面积为主要指标评价了试件的抗开裂性能.研究表明,随着再生粗骨料取代率的增加,试件总开裂面积逐渐增大;取代率为 100% 的再生混凝土试件的总开裂面积是普通混凝土试件的 1.5 倍左右.掺入粉煤灰可以有效改善再生混凝土的抗开裂性能,当粉煤灰掺量达到 30% 时,试件的总开裂面积相比不掺矿物外加剂的对照组下降了 72.1%.矿粉对于再生混凝土开裂面积的抑制作用不及粉煤灰有效,但其有助于减小裂缝分布的离散性.

**关键词:** 再生混凝土; 早期; 抗开裂性能; 再生粗骨料取代率; 粉煤灰; 矿粉

**中图分类号:** TU528

**文献标志码:** A

## Test of Cracking Resistance of Recycled Aggregate Concrete at Early Stage

XIAO Jianzhuang, HU Bo, DING Tao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The influence of the recycled coarse aggregate (RCA) replacement ratio, the amount of fly ash and slag powder on the cracking resistance of recycled aggregate concrete (RAC) during the early age was investigated by means of knife-edge binding method in this paper. The total cracking area in flat of 1 m<sup>2</sup> was applied as the main indicator to evaluate the cracking resistance for specimens. The results show that the total cracking area of RAC decreases with the increase of RCA replacement ratio. When the RCA replacement ratio reaches 100%, the total cracking area of RAC is 1.5 times that of natural aggregate concrete (NAC). The fly ash can effectively improve the cracking resistance of RAC. Compared to the control group without mineral admixture, the total cracking area of RAC specimens with fly ash accounting for 30% of the binder decreases by 72.1%. The effect of restraining the cracking area with slag powder is

weaker than that with fly ash. However, the slag powder can decrease the discreteness of crack distribution.

**Key words:** recycled aggregate concrete (RAC); early stage; cracking resistance; recycled coarse aggregate replacement ratio; fly ash; slag powder

混凝土早龄期收缩性能和裂缝控制问题<sup>[1]</sup>是现代水泥混凝土工程技术中的一项重大课题.普通混凝土的开裂性能已经得到较为深入的研究<sup>[2-3]</sup>.再生混凝土技术作为推动土木工程可持续发展的主要途径之一,近年来得到了国内外科研和技术人员的高度重视,对其结硬后的力学性能和耐久性能进行了研究<sup>[4]</sup>,但相对而言,对再生混凝土早期开裂性能的研究较少.

由于再生粗骨料的掺入,使得再生混凝土中粗骨料与水泥石的界面结构更为复杂<sup>[5]</sup>,增大了其收缩与徐变的发生与发展<sup>[6]</sup>,导致其早龄期抗开裂性不同于普通混凝土.已有研究表明,粉煤灰作为高性能再生混凝土的主要矿物外掺料之一,可以提高其流动性,并可有效改善再生混凝土的孔结构<sup>[7]</sup>;而矿粉不仅可以部分取代再生混凝土中水泥的用量,还可以有效降低其初凝过程中的水化热.但这两种常用的外掺料,对再生混凝土早期抗开裂性能产生的影响还未见公开文献报道.

本文以再生粗骨料的取代率以及粉煤灰和矿粉的掺量为主要参数,研究再生混凝土的组分对其早龄期抗开裂性能的影响,为再生混凝土早龄期开裂性能的控制提供研究基础.

## 1 试验设计

### 1.1 试验原料

水泥为 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,粉煤灰质量

收稿日期: 2014-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(51325802);上海市科委创新行动计划(14231201300)

第一作者: 肖建庄(1968—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为再生混凝土. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

等级为 II 级,矿粉质量等级为 S95;砂为普通天然黄砂,规格为中砂;拌和水为自来水;天然粗骨料为天然碎石,最大粒径 25 mm,连续级配;再生粗骨料粒径为 5~25 mm,基本性能见表 1.

## 1.2 配合比设计

结合再生混凝土在工程中的实际制备方法,对粗骨料进行预润湿处理至饱和面干状态,以再生粗骨料取代率以及矿物外加剂掺量为变量,并控制水

灰质量比为 0.425,将配合比按编号分为 8 组,见表 2. 其中 mix1~mix4 不掺任何矿物外掺料,用以研究再生粗骨料的取代率对早期抗开裂性能的影响;mix5~mix8 的再生粗骨料取代率均为 100%,按照与水泥等质量取代的原则,分别单掺 15%及 30%的粉煤灰或矿粉,研究不同粉煤灰或矿粉掺量对再生混凝土早期抗开裂性能的影响.

表 1 粗骨料基本性能

Tab.1 Properties of coarse aggregates

粗骨料类型	堆积密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	吸水率/%	含泥质量分数/%	压碎指标/%
天然	1 430	2 840	1.0	0.2	4.04
再生	1 304	2 583	3.5	1.1	10.50

表 2 配合比设计

Tab.2 Design of mixture proportion

配合比编号	再生粗骨料取代率/%	原材料用量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )						
		水泥	粉煤灰	矿粉	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	水
mix1	0	400			817	947		170
mix2	30	400			817	284	663	170
mix3	50	400			817	474	474	170
mix4	100	400			817		947	170
mix5	100	340	60		817		947	170
mix6	100	280	120		817		947	170
mix7	100	340		60	817		947	170
mix8	100	280		120	817		947	170

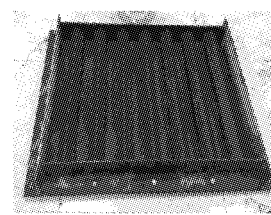
## 1.3 试验方法

国内外检验评价混凝土收缩开裂性能的方法主要有圆环法<sup>[8]</sup>、单轴约束法、平板法<sup>[9]</sup>等. 其中,圆环法由于端部提供的约束有限,其开裂敏感性较差,需经过较长时间才能检测到试件出现初始裂缝;单轴约束法对试验仪器要求较高,不能对大量试件进行同步对比,且不利于现场检测;传统平板法虽然具有简单、易操作的特点,但其裂缝产生无规律性,使得试验结果难以合理量化统计以及后处理<sup>[10-11]</sup>.

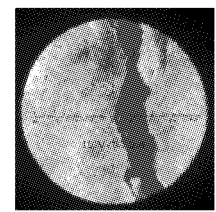
本文根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009)<sup>[12]</sup>,选用刀口约束法来测定及评价再生混凝土的收缩开裂性能. 试验装置如图 1a 所示,在平板模具底部平行铺设 7 个钢制裂缝诱导器,可有效提高试件的开裂敏感性,并可以预先控制裂缝产生的位置,便于后期结果量化处理.

试验在温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度为  $(60 \pm 5)\%$  左右的室内进行. 将拌制好的混凝土浇筑至平板模具内,振捣并抹平上表面. 试件成型 30 min 后,调节风扇位置及档位,使试件表面上方风速为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右. 24 h 后,观察裂缝数量(以肉眼可见为准)、长度和宽度. 裂缝长度用直尺测量,并精确到 0.1 mm;裂缝宽度用放大倍数为 100 倍的显微镜观测,并精确

到 0.02 mm. 图 1b 所示为显微镜观测下的再生混凝土裂缝.



a 诱导开裂式平板模具



b 显微镜下观测的裂缝

图 1 试验装置及裂缝观测

Fig.1 Testing device and measurement of cracks

## 1.4 试件设计

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009)要求,本文试验每组平板试件个数均为 2 个,各组试件的参数及基本力学性能见表 3. 试件按照配合比不同命名,其中“NC”,“RC”分别代表普通混凝土和再生混凝土,其后数字代表再生粗骨料的取代率;“F”,“K”分别代表矿物外掺料为粉煤灰和矿粉,其后数字代表掺量的百分数. 对于各配合比混凝土,测量其初始坍落度及相应立方体试块在早龄期的抗压强度.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果

#### 2.1.1 裂缝情况及数据

试件在成型 4~6 h 后开始出现初始裂缝. 成型 24 h 后观测各组试件的裂缝产生情况. 图 2 显示了 4 块具有代表性的平板裂缝情况, 其中 RC100-B 试件为基本对照组试件.

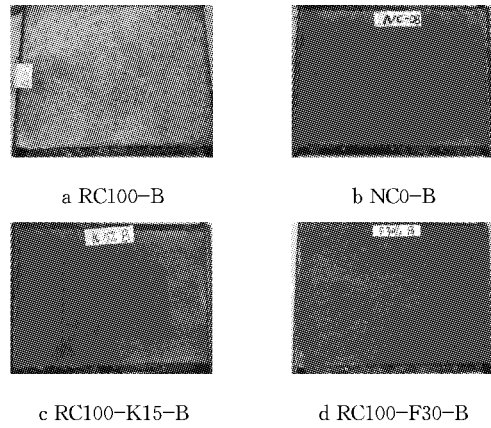


图 2 平板开裂结果

Fig.2 Cracking of flats

将各平板 7 条裂缝诱导器按顺序依次编号为 No. 1~No. 7, 利用显微镜观测各编号对应裂缝的最大宽度, 并用直尺测量各编号对应裂缝的长度. 各平板试验结果见表 4.

#### 2.1.2 开裂性能评价指标

根据试件的开裂情况, 按《普通混凝土长期性能

表 3 试件设计

Tab.3 Design detail of specimens

试件编号	配合比编号	坍落度/mm	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
NC0	mix1	175	24.62	36.72
RC50	mix2	180	25.22	36.56
RC70	mix3	175	23.45	34.22
RC100	mix4	175	23.31	33.34
RC100-F15	mix5	180	22.24	31.35
RC100-F30	mix6	185	22.05	30.12
RC100-K15	mix7	175	23.45	35.12
RC100-K30	mix8	175	23.22	33.54

表 4 裂缝数据

Tab.4 Data of cracks

试件编号	裂缝长度/mm							裂缝最大宽度/mm						
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
NC0-A	145.6	425.8	296.2	0	515.2	122.2	252.3	0.18	0.42	0.22	0	0.34	0.24	0.24
NC0-B	233.1	247.4	132.1	94.6	367.2	249.7	0	0.32	0.40	0.42	0.24	0.44	0.34	0
RC50-A	342.2	274.0	577.3	17.2	157.2	499.2	32.3	0.22	0.26	0.28	0.12	0.22	0.66	0.14
RC50-B	134.6	226.2	0	457.1	230.1	261.8	0	0.26	0.22	0	0.76	0.18	0.24	0
RC70-A	125.4	134.6	0	442.6	76.3	124.3	0	0.22	0.18	0	1.12	0.24	0.22	0
RC70-B	0	547.1	231.5	0	600.0	138.8	52.1	0	0.72	0.32	0	0.42	0.16	0.12
RC100-A	22.3	437.6	125.5	540.5	0	440.6	0	0.12	0.34	0.20	0.52	0	0.78	0
RC100-B	217.6	193.4	168.2	600.0	480.2	71.1	237.2	0.42	0.44	0.54	0.46	0.34	0.12	0.24
RC100-15F-A	207.9	0	204.3	140.9	0	308.6	232.5	0.32	0	0.38	0.32	0	0.38	0.34
RC100-15F-B	0	127.8	468.2	0	283.5	142.1	210.0	0	0.34	0.44	0	0.36	0.26	0.22
RC100-30F-A	157.8	0	0	245.6	243.5	0	227.8	0.36	0	0	0.24	0.22	0	0.24
RC100-30F-B	82.4	0	277.8	0	298.5	0	193.4	0.26	0	0.22	0	0.26	0	0.28
RC100-15K-A	120.3	317.3	275.1	417.3	0	409.2	378.4	0.22	0.46	0.32	0.42	0	0.44	0.32
RC100-15K-B	0	482.4	332.5	122.1	389.1	216.8	70.3	0	0.72	0.40	0.14	0.38	0.44	0.12
RC100-30K-A	222.6	288.5	377.6	231.6	453.1	263.0	176.3	0.24	0.28	0.34	0.22	0.22	0.24	0.28
RC100-30K-B	257.3	286.4	356.3	167.4	429.4	351.7	254.9	0.24	0.32	0.26	0.32	0.24	0.30	0.20

和耐久性能试验方法》(GB/T 50082—2009)有关规定计算裂缝的评价指标, 具体计算方法如下:

(1) 第  $i$  条裂缝开裂面积  $S_i$  按下式计算:

$$S_i = \frac{1}{2} W_i L_i \quad (1)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  条裂缝的最大宽度, mm;  $L_i$  为第  $i$  条裂缝的长度, mm.

(2) 每条裂缝的平均开裂面积  $a$  按下式计算:

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (2)$$

式中:  $N$  为肉眼可见的总裂缝数目.

(3) 单位面积的裂缝数目  $b$  按下式计算:

$$b = \frac{N}{A} \quad (3)$$

式中:  $A$  为平板的面积,  $m^2$ .

(4) 单位面积上的总开裂面积  $c$  按下式计算:

$$c = ab \quad (4)$$

(5) 裂缝变异系数  $\delta$  按下式计算:

$$\delta = \frac{1}{\bar{S}} \sqrt{\sum_{i=1}^{14} (S_i - \bar{S})^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{S}$  为同配合比试件 14 条裂缝面积的平均值。

对于每组的两块试件,取其指标  $a, b, c$  的平均值,列于表 5 中,其中指标  $c$  用于对试件抗开裂能力进行宏观评价。另外,考虑到每块平板上 7 条裂缝诱导器布置均匀,本文将同配合比的两块平板上共 14 条诱导器对应位置的单条裂缝开裂面积作为样本,计算裂缝变异系数,可在一定程度上反映试件早期裂缝分布的离散性。

表 5 裂缝评价指标(平均值)

试件编号	裂缝数目	$a/\text{mm}^2$	$b/\text{m}^{-2}$	$c/(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$\delta$
NC0	6.0	43.06	12.50	538.26	0.76
RC50	6.0	51.06	12.50	632.93	1.17
RC70	5.0	67.08	10.42	698.77	1.54
RC100	6.0	67.64	12.50	819.44	0.94
RC100-F15	4.5	46.45	9.38	427.21	1.04
RC100-F30	4.0	27.39	8.33	228.28	1.09
RC100-K15	6.0	61.92	12.50	773.94	0.86
RC100-K30	7.0	38.88	14.58	566.99	0.31

## 2.2 试验分析

以单位面积平板上的总开裂面积(后略去统一的单位面积分母,直接取该总开裂面积值)为主,并结合裂缝最大宽度、裂缝初始开裂时间及裂缝变异系数共 4 个方面对再生混凝土早期抗开裂性能进行

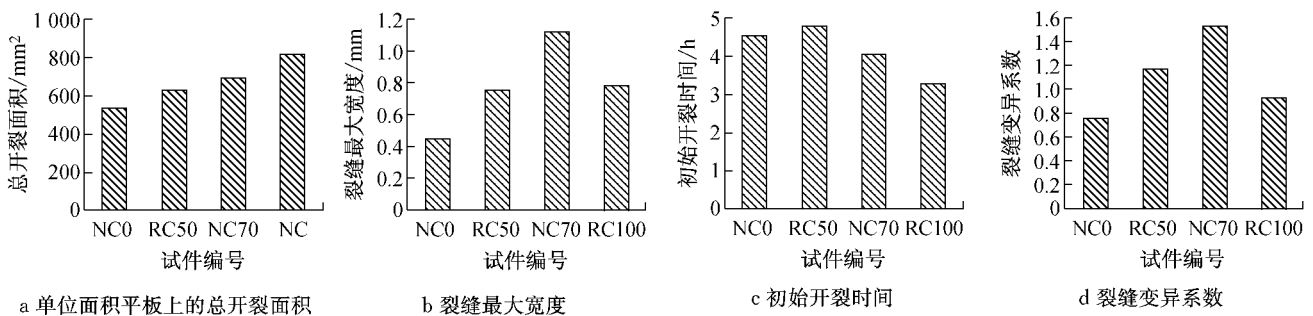


图 3 再生粗骨料取代率对混凝土抗开裂性能的影响

Fig. 3 Effect of RCA replacement ratios on cracking resistance of RAC

### 2.2.2 粉煤灰掺量

图 4 反映了粉煤灰及矿粉掺量对再生混凝土抗裂性能的影响(由于图 4 中各组试件再生粗骨料的取代率均为 100%,在绘制图 4 时将各组试件名中表征取代率的“100”略去)。分析图 4a 可以发现,对于取代率为 100%的再生混凝土,随着粉煤灰掺量的上升,总开裂面积大幅减小,当粉煤灰掺量为 15%和 30%时,总开裂面积分别为 427.21 mm<sup>2</sup> 及 228.28 mm<sup>2</sup>,对比无粉煤灰掺量的再生混凝土对照组 RC100,分别下降了 47.9%和 72.1%。并且可以发现,粉煤灰掺量为 15%的再生混凝土其总开裂面积

综合分析。

### 2.2.1 再生粗骨料取代率

图 3 分析了再生粗骨料取代率对混凝土抗裂性能的影响。通过图 3a 可以发现,随着再生粗骨料取代率的提高,总开裂面积近似呈线性上升,取代率为 100%的再生混凝土其总开裂面积为普通混凝土的 1.5 倍左右。结合图 3b,即裂缝最大宽度分布图可知,取代率为 70%的再生混凝土,其最大宽度达到 1.12 mm,取代率为 50%及 100%的再生混凝土试件裂缝最大宽度也达到 0.80 mm,而普通混凝土的最大裂缝宽度仅为 0.44 mm。可见再生粗骨料对于混凝土的抗裂性能存在较明显的不利影响。根据图 3c 反映的各试件初始开裂时间可以发现,随着再生粗骨料取代率的提高,裂缝初始开裂的发生时间提早。再生粗骨料取代率为 100%的再生混凝土试件,在成型 3 h 左右即出现裂缝,此时试件表面尚未风干。

另外,根据图 3d 可以发现,再生粗骨料取代率为 70%的再生混凝土其裂缝的变异系数最高,取代率为 50%的再生混凝土次之,而普通混凝土和取代率为 100%的再生混凝土的裂缝变异系数相对较低,裂缝变异系数值的分布随着取代率变化呈现中间高两端低的形式。

低于不掺矿物外掺料的普通混凝土试件 NC0,最大裂缝宽度与其相同;而当再生混凝土的粉煤灰掺量达到 30%时,总开裂面积仅为 NC0 的 42.4%。图 4c 则显示随着粉煤灰掺量的提高,裂缝初始产生的时刻有效延缓。因此,粉煤灰的掺入,可以有效提高再生混凝土的抗裂性能,弥补其与普通混凝土的差异。

另外,分析图 4d,当粉煤灰掺量为 15%和 30%时,裂缝的变异系数相比对照组试件 RC100 仅有少量提高,由此可以发现粉煤灰的掺入对于再生混凝土裂缝分布的离散性并没有较大影响。

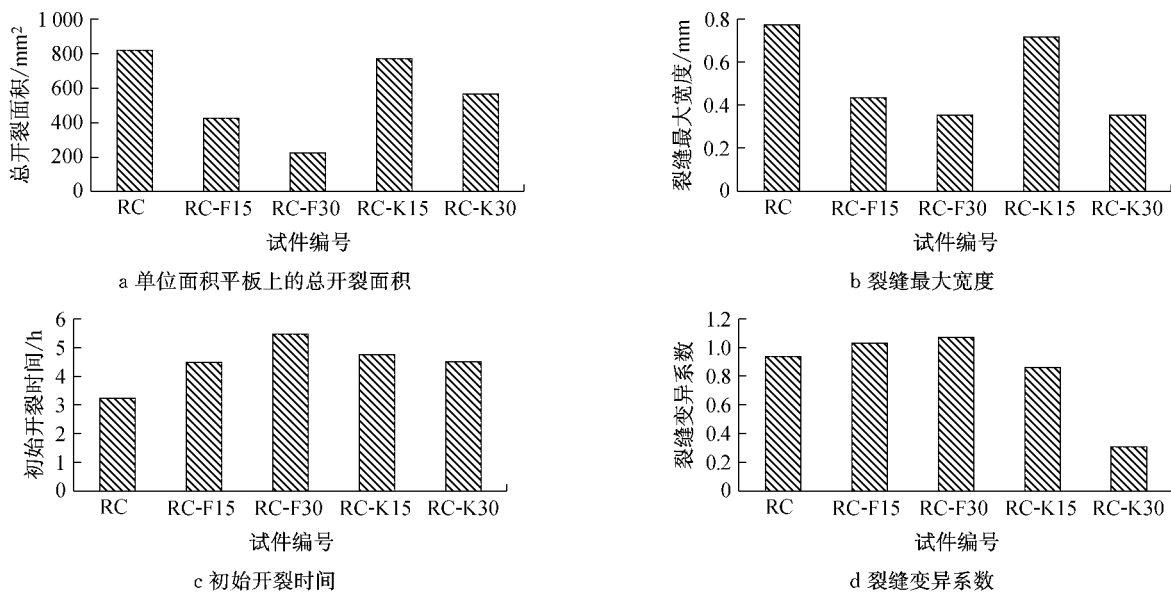


图 4 粉煤灰、矿粉掺量对再生混凝土抗开裂性能的影响

Fig.4 Effect of fly ash or content of slag powder on cracking resistance of RAC

### 2.2.3 矿粉掺量

矿粉常和粉煤灰复掺以达到两者的“优势互补”。本文为单独研究矿粉对混凝土抗开裂性能的作用,选择单掺 15% 及 30% 的矿粉,以达到与单掺粉煤灰对比的目的.通过试验分析可以发现,矿粉掺量为 15% 和 30% 的再生混凝土试件组 RC100-K15 和 RC100-K30,其总开裂面积相比无掺量的对照组 RC100,分别降低了 5.6% 和 30.8%;另外,可以发现即使再生混凝土的矿粉掺量达到 30%,其裂缝的总开裂面积仍高于不掺任何矿物外掺料的普通混凝土.从中可以得知矿粉对于改善再生混凝土抗开裂性能的作用低于粉煤灰.

然而通过图 4d 可以看到,当矿粉掺量达到 30% 时,裂缝变异系数仅为对照组 RC100 的 33.0%.由

于裂缝宽度很小且混凝土试件在早龄期阶段颜色较深,照片难以清晰反映裂缝的实际情形,故通过现场定位及详细观测绘制裂缝的 CAD 图(在制图时将各裂缝最大宽度放大 10 倍,且不考虑裂缝宽度沿长度的变化,均以最大宽度表征).图 5 反映了 RC100-A 及 RC100-K30-A 两个试件裂缝的样式及分布.可以发现,RC100-A 试件裂缝分布没有一定的规律性,在 No. 6 号上出现了宽度较大的裂缝,而 No. 5 和 No. 7 上没有裂缝;相反,RC100-K30-A 各裂缝诱导器上的裂缝长度及宽度分布均匀,其裂缝呈现细而长的形式.因此矿粉的掺入对于降低再生混凝土开裂性能的离散性有较好的作用,有利于裂缝均匀分布,避免出现过大宽度的裂缝.

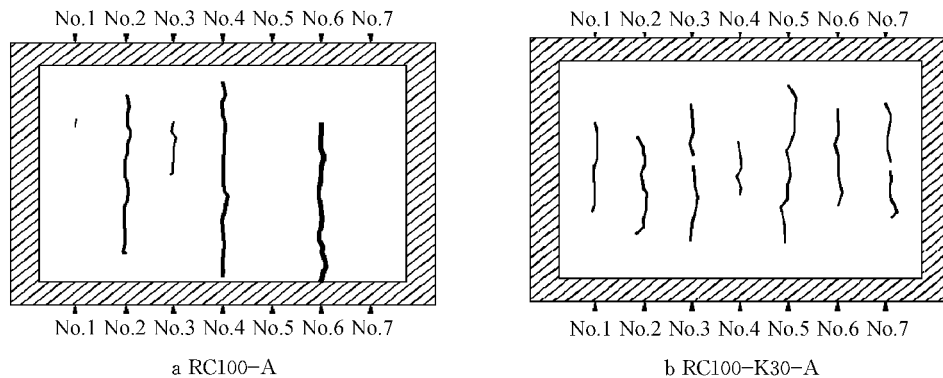


图 5 平板裂缝样式及分布

Fig.5 Distribution of cracks in slabs

## 3 抗开裂性能影响的机理分析

### 3.1 再生粗骨料

再生混凝土内部结构中存在着新、老界面过渡区,界面过渡区的性能往往制约着再生混凝土的力学性能和耐久性能<sup>[13]</sup>.由于再生粗骨料在制备过程中采

用的是机械破碎的方法,在老界面处难免会产生内部微裂纹及初始损伤,相对于普通混凝土界面,过渡区更为薄弱,导致了再生混凝土裂缝在外界因素作用下更容易产生并进一步发展。

另一方面,再生粗骨料表面往往附着有大量的砂浆及粉尘,使得再生粗骨料与水泥石之间的新界面过渡区比较疏松,厚度范围较大,且孔隙率较高,这些特性导致了再生粗骨料具有较强的吸水性。郭远臣等<sup>[14]</sup>的研究表明再生粗骨料与水的接触角较小,水分的扩散速率较大,使得再生混凝土的干燥收缩较大。在本次试验过程中,试件在成型后并没有按标准养护,相反采用风扇直吹试件上表面,加速试件表面的脱水,使得干燥收缩效应更加突出。

综上所述,由于再生混凝土相比普通混凝土在早龄期阶段有更大的干燥收缩变形,在受到约束的情况下将产生较大的收缩拉应力,且界面过渡区相对较为薄弱,内部裂缝容易扩展,因此其抗开裂性能往往要低于普通混凝土。

在裂缝分布离散性方面,由于不同再生粗骨料取代率将会明显影响骨料的总体级配,且当粗骨料同时包含天然骨料及再生骨料时,两种骨料在水泥浆体中下沉性能存在差异,将引起再生混凝土在初凝阶段塑性收缩不均匀,从而导致裂缝分布的离散性更大。根据本文数据可以发现,再生粗骨料取代率为 50% 及 70% 的再生混凝土平板试件在总开裂面积上虽然低于取代率为 100% 的再生混凝土,但均出现了个别较大宽度的裂缝。RC70-A 试件裂缝最大宽度达到 1.12 mm,超过了再生粗骨料取代率为 100% 的试件最大裂缝宽度,出现了较大的变异性。

### 3.2 粉煤灰

粉煤灰可以有效地改善混凝土的和易性与耐久性,在高性能混凝土中得到了大量的应用。粉煤灰颗粒细小,比表面积大,吸附性能好,具有较好的微集料效应。当其分散并黏附于再生粗骨料表面时,可以有效降低水分在骨料下表面的聚集效应,使得再生粗骨料界面过渡区的孔结构趋于密实,减少了有害孔及裂隙<sup>[7]</sup>。另一方面,郭远臣等<sup>[14]</sup>研究表明粉煤灰对再生混凝土界面孔结构的改善有利于降低其与水的润湿性,减小再生混凝土水分扩散及蒸发的速率,从而一定程度上抑制了干燥收缩。

此外,粉煤灰的活性较低,早期较少参与水化反应,且水泥的水化产物包裹在部分粉煤灰颗粒表面,进一步阻止了粉煤灰的水化。因此,在再生混凝土早龄期阶段,粉煤灰的掺入可以有效减少水化放热量,

抑制再生混凝土的温度收缩。

### 3.3 矿粉

与粉煤灰相似,矿粉也具有微集料效应,可以有效填充再生混凝土骨料浆体间空隙,改善界面过渡区结构。但是,矿粉相比粉煤灰具有较高的活性,易较早发生水化反应,对于控制水化热及抑制温度收缩不如粉煤灰有效。因此,矿粉对于增强再生混凝土抗开裂性能的作用要低于粉煤灰。

然而,矿粉活性较高的特性对于再生混凝土早龄期抗裂性能也有其积极的一面。在混凝土初凝阶段,水泥的水化反应使得混凝土粗骨料与水泥石界面过渡区存在着较多的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体,这些晶体有择优取向、定向排列的特性,对界面过渡区的均匀性存在不利作用。而矿粉中的活性成分能与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体发生二次水化反应,减小了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体数量及尺寸,并削弱了其取向度<sup>[15]</sup>。观察裂缝分布形式图 5b 不难发现,掺入了矿粉的试件各诱导器上均出现了裂缝,可以推测其内部微裂缝发展比较均匀,而 RC100-A 试件出现了个别较大宽度的裂缝,这可能是聚集的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体在早龄期诱导界面过渡区裂缝定向扩展、贯通的结果。因此,矿粉通过调整再生混凝土早龄期水化产物结构,改善了界面过渡区的不均匀性,从而使裂缝分布的离散性有了一定的减小,避免了较大宽度裂缝的出现。

## 4 结论

(1) 再生粗骨料的微观孔结构特性,使再生混凝土相比普通混凝土具有较大的干燥收缩性,且其界面过渡区较为薄弱。随着再生粗骨料取代率的提高,再生混凝土总开裂面积逐渐增大。取代率为 100% 的再生混凝土其总开裂面积为普通混凝土的 1.5 倍。

(2) 当再生粗骨料取代率为 50% 和 70% 时,再生混凝土裂缝分布的离散性较普通混凝土大,易出现较大宽度的裂缝,取代率为 70% 的再生混凝土裂缝最大宽度达到 1.12 mm。当取代率达到 100% 时,其离散性和普通混凝土较为接近。

(3) 粉煤灰通过微集料效应,可以有效改善再生混凝土界面过渡区的孔结构,并一定程度上抑制再生混凝土的收缩,从而显著减小再生混凝土的开裂面积,弥补了再生混凝土与普通混凝土抗开裂性能的差异。

(4) 矿粉可以一定程度上抑制再生混凝土的开

裂面积,但其效果要低于粉煤灰.而当矿粉掺量达到 30%时,可以显著降低再生混凝土裂缝分布的离散性,使裂缝呈现细而长的均匀分布形式.

(5) 粉煤灰及矿粉的掺入均有利于提高再生混凝土的抗开裂性能,且表现了各自的优点,可以进一步研究两者在复掺的情况下对于再生混凝土抗开裂性能的作用.

#### 参考文献:

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.  
WANG Tiemeng. Control of cracking in engineering structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [2] 王国杰, 郑建岚, 林方向, 等. 高性能混凝土胶凝材料体系开裂敏感性试验研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 388.  
WANG Guojie, ZHENG Jianlan, LIN Fangxiang, *et al.* Experimental study on the cracking resistance of cementitious system of high performance concrete[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2006, 34(3):388.
- [3] Altoubat S A, Lange D A. Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(4): 323.
- [4] XIAO Jianzhuang, LI Wengui, FAN Yuhui, *et al.* An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 31(6):364.
- [5] LI Wengui, XIAO Jianzhuang, SUN Zhihui, *et al.* Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 1045.
- [6] Domingo-Cabo A, Lázaro C, López-Gayarre F, *et al.* Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2545.
- [7] Valeria C, Giacomo M. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC[J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(2): 269.
- [8] McDonald D B, Krauss P D, Rogaila E A. Early-age transverse deck cracking[J]. Concrete International, 1995(4):49.
- [9] Kraai P. A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete [J]. Concrete Construction, 1985, 30(9):775.
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials. PP34-99 Standard practice for estimating the cracking tendency of concrete [S]. [S. l.]: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999.
- [11] 刘岩, 王培铭, 郭延辉, 等. 混凝土开裂性能测试多道应力诱导平板式方法[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(6): 666.  
LIU Yan, WANG Peiming, GUO Yanhui, *et al.* Study on concrete crack properties by test slab method with stress risers [J]. Journal of Building Materials, 2007, 9(6): 666.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50082—2009 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [13] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [14] 郭远臣, 王雪, 何运祥. 再生骨料混凝土吸湿性能及对干燥收缩的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3):386.  
GUO Yuanchen, WANG Xue, HE Yunxiang. Isothermal sorption of recycled aggregate concrete and its influence on drying shrinkage[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3):386.
- [15] 王力伟. 矿渣微粉在预拌混凝土中大规模应用[J]. 混凝土, 2007, 10:64.  
WANG Liwei. Large scale application of super fine slag powder in ready mixed concrete[J]. Concrete, 2007, 10:64.