

文章编号:1007-9629(2022)02-0131-11

## 砖混再生粗骨料混凝土损伤本构关系

马昆林<sup>1,\*</sup>, 黄新宇<sup>1</sup>, 胡明文<sup>2</sup>, 彭琳娜<sup>3</sup>, 张鑫全<sup>2</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙, 410075; 2. 中铁城建集团有限公司, 湖南 长沙 410208;  
3. 湖南建工集团有限公司, 湖南 长沙 411029)

**摘要:**为了研究取代率和配合比设计方法对砖混再生粗骨料混凝土力学性能的影响,采用应变等价性原理并基于 Weibull 函数分布建立了砖混再生粗骨料混凝土损伤本构模型,并结合分布参数与取代率的函数关系,修正了损伤本构模型,探讨了损伤变量和损伤变量发展速率与应变的关系.结果表明:本构模型曲线与试验曲线的相关性较高,模型参数  $a, b$  与取代率之间满足二次函数关系,分别反映了峰值应力、峰值应变和混凝土的脆性;砖混再生粗骨料混凝土的总损伤  $D$  由初始损伤  $D_R$  和荷载损伤  $D_C$  组成,掺入砖混再生粗骨料对混凝土造成了初始损伤,总损伤变量随应变增加呈 S 型单调递增,损伤变量发展速率呈先增大后减少的趋势;砖混再生粗骨料混凝土的配合比设计方法对其损伤程度和损伤变量发展速率有一定影响.

**关键词:**砖混再生粗骨料;配合比设计方法;Weibull 分布;损伤本构关系;损伤变量

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.004

## Damage Constitutive Model of Brick-Concrete Recycled Coarse Aggregates Concrete

MA Kunlin<sup>1,\*</sup>, HUANG Xinyu<sup>1</sup>, HU Mingwen<sup>2</sup>, PENG Linna<sup>3</sup>, ZHANG Xinquan<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. China Railway Urban Construction Group Co., Ltd., Changsha 410208, China; 3. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha 411029, China)

**Abstract:** In order to study the effect of substitution rate and mix design methods on mechanical properties of brick-concrete recycled coarse aggregate concrete, a damage constitutive model was established based on the hypothesis of strain equivalence and Weibull distribution. By considering the functional relation between distribution parameters and substitution rate, the damage constitutive model was modified, and then the performance of the damage variable and development rate of damage variable with the increase of strain were discussed. The results show that the constitutive model curves have a high correlation with the test curves, and the model parameters  $a, b$  meet the quadratic functional relation with substitution rate, reflect the peak stress, peak strain and the brittleness of concrete respectively. The whole damage  $D$  of brick-concrete recycled coarse aggregate concrete consists of initial damage  $D_R$  and load damage  $D_C$ , and initial damage  $D_R$  is caused by the brick-concrete recycled coarse aggregate mixed. With the increase of strain, the whole damage variable increases monotonically in a shape of S, and the development rate of damage variable first increases and then decreases. The mix design methods have an influence on damage degree and damage development rate of brick-concrete recycled coarse aggregate concrete.

收稿日期:2020-10-06; 修订日期:2020-12-21

基金项目:长沙市科技计划重大专项(kh2005213);中南大学深化创新创业教育改革项目(2020CG040);中南大学研究生校企联合创新项目(160170003).

第一作者(通讯作者):马昆林(1976—),男,云南昆明人,中南大学教授,博士生导师,博士.E-mail: makunlin@csu.edu.cn

**Key words:** brick-concrete recycled coarse aggregate; mix design method; Weibull distribution; damage constitutive relation; damage variable

中国快速发展的基础设施建设消耗了大量建筑材料.为了获取足够的建筑材料,人们加大了对自然资源的开采,造成自然资源总量逐年下降并趋于枯竭.许多城市限制了对天然砂石资源的开采,导致建筑材料获取困难,价格上涨.与此同时,城市发展过程中拆除的老旧建筑物所产生的建筑垃圾约占城市垃圾总量的30%~40%<sup>[1]</sup>,这些建筑垃圾的处理方式主要以填埋、堆放为主,对周围生态环境造成了严重危害<sup>[2]</sup>.而将建筑垃圾制备成再生骨料并应用到建筑领域可促进资源可持续发展,实现循环经济,很好地缓解资源枯竭问题<sup>[3]</sup>.

力学性能是混凝土材料宏观性能中最重要的性能,而本构关系是深入研究再生混凝土力学性能的重要内容.Duan等<sup>[4]</sup>研究发现再生混凝土力学性能受再生骨料的种类、来源和掺量影响较大.肖建庄<sup>[5]</sup>将碎混凝土块作为再生骨料,针对不同再生骨料来源和掺量的再生混凝土展开研究,发现再生骨料掺量不同的再生混凝土应力-应变曲线形状相似,但再生骨料掺量的增加会降低再生混凝土峰值应力,增大峰值应变.Beln等<sup>[6]</sup>通过研究也得到了相似的结论,并提出了不同取代率下的再生混凝土本构模型.Zhou等<sup>[7-8]</sup>发现再生卵石骨料混凝土比再生碎石骨料混凝土具有更优异的力学性能,并提出了再生卵石、再生碎石骨料混凝土的本构关系.Xiao等<sup>[9]</sup>提出了经过修正的再生混凝土本构模型,发现成分复杂、质量较差的再生骨料会使再生混凝土应力-应变曲线具有更大的变异性.

实际上,中国城市发展中拆除的建筑物多为砖混结构,此类再生骨料中含有大量的碎砖、碎瓦、碎砂浆块和低强度的碎混凝土块<sup>[10]</sup>.相关学者对砖混再生骨料的物理特性<sup>[11]</sup>、砖混再生骨料混凝土的力学性能进行了研究<sup>[12]</sup>,但对砖混再生骨料混凝土的受压损伤变化特性还有待进一步研究.本文采用砖混再生粗骨料制备了再生混凝土,讨论了砖混再生骨料混凝土的受压力学特性,并基于Lemaitre应变等价性原理建立了相应的损伤本构模型,研究了砖混再生骨料混凝土的力学性能和损伤演变规律.

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

水泥(C):兆山新星集团湖南水泥有限公司生产的P·O 42.5水泥,性能指标满足GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》的要求.粉煤灰(FA):湖南湘潭电厂的F类II级粉煤灰.矿渣(SL):湖南湘潭钢厂提供的S95级磨细矿渣.砂子(S):机制砂,细度模数3.1,表观密度2 670 kg/m<sup>3</sup>.碎石(G):天然石灰石,采用两级配,石子粒径分别为5~16 mm和16~31.5 mm.再生粗骨料(RCA):粒径分别为5~20 mm和20~30 mm,由湖南建工环保股份有限公司提供,其实测性能和各组成的质量分数见表1.减水剂(SP):聚羧酸高效减水剂,减水率(质量分数,本文涉及的减水率、含量、比值等均为质量分数或质量比)为15.1%,固含量为20.4%.拌和水(W):自来水.

表1 再生粗骨料主要性能指标及组成

Table 1 Performance indexes and compositions of recycled coarse aggregate

Size/mm	Performance index				$w/\%$					
	Crushing index (by mass)/%	Water absorption (by mass)/%	Apparent density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Concrete	Brick	Tile	Sundries	Dust	Clay lump
5-20	27.60	17.50	2.54	1.27	59.40	34.40	2.10	0.80	2.50	0.80
20-30	28.50	16.40	2.55	1.25	57.95	36.80	1.90	0.75	2.00	0.60

### 1.2 配合比及试验方法

考虑到再生骨料较大的吸水率对混凝土工作性能的影响,本试验分别采用普通混凝土配合比设计方法(B组)和附加用水量配合比设计方法(C组)进行再生混凝土配合比设计.用砖混再生粗骨料以不同取代率( $R$ )替代天然石灰石粗骨料,附加用水量则考虑再生粗骨料吸水率和取代量计算得到.普通混凝土配合比设计见表2,附加用水量配合比设计见表

3.按表2、3所示配合比制备各组混凝土,在搅拌机中拌和后测试各组新拌混凝土坍落度;成型各组混凝土试件并标养到不同龄期,分别进行抗压强度和应力-应变曲线测试.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 工作性

图1为再生粗骨料取代率对混凝土工作性影响

表2 普通混凝土配合比设计  
Table 2 Mix proportions of recycled concrete

No.	C	FA	SL	S	G	RCA		W	SP	R/%
						kg/m <sup>3</sup>				
						5-20 mm	20-30 mm			
B1	186.00	85.00	40.00	789.00	1 105.00	0	0	150.00	3.11	0
B2	186.00	85.00	40.00	789.00	939.00	66.00	100.00	150.00	3.11	15
B3	186.00	85.00	40.00	789.00	773.00	133.00	199.00	150.00	3.11	30
B4	186.00	85.00	40.00	789.00	607.00	199.00	299.00	150.00	3.11	45
B5	186.00	85.00	40.00	789.00	442.00	265.00	398.00	150.00	3.11	60
B6	186.00	85.00	40.00	789.00	275.00	330.00	495.00	150.00	3.11	75
B7	186.00	85.00	40.00	789.00	0	442.00	663.00	150.00	3.11	100

表3 附加用水量配合比设计  
Table 3 Mix proportions of recycled concrete with additional water

No.	C	FA	SL	S	G	RCA		W	SP	Additional water	R/%
						kg/m <sup>3</sup>					
						5-20 mm	20-30 mm				
C1	186.00	85.00	40.00	789.00	1 105.00	0	0	160.00	2.49	0	0
C2	186.00	85.00	40.00	789.00	884.00	89.00	133.00	160.00	2.49	15.60	20
C3	186.00	85.00	40.00	789.00	663.00	177.00	265.00	160.00	2.49	31.20	40
C4	186.00	85.00	40.00	789.00	442.00	265.00	398.00	160.00	2.49	46.80	60
C5	186.00	85.00	40.00	789.00	221.00	354.00	530.00	160.00	2.49	62.40	80
C6	186.00	85.00	40.00	789.00	0	442.00	663.00	160.00	2.49	78.00	100

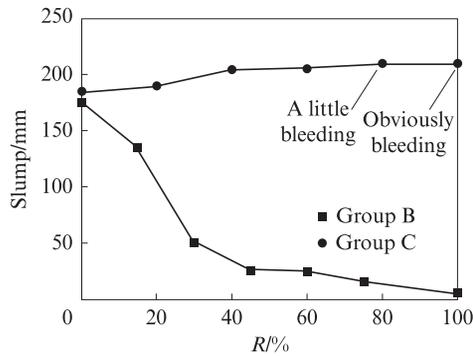


图1 再生混凝土工作性测试结果  
Fig. 1 Results of slump of recycled concrete

的测试结果.由图1可知,随着再生粗骨料取代率的增加,B组和C组试件工作性的变化不同.B组试件在取代率为30%以内时,其坍落度随着取代率的增加而显著降低;当取代率大于30%以后,其坍落度均小于50 mm,混凝土呈现干硬状态,工作性较差,这是因为再生粗骨料吸水率较大,吸附了大量混凝土用拌和水所致.采用附加用水量方法制备的C组试件坍落度随着取代率的增加稍有增大,但不显著;当取代率大于80%以后,混凝土出现泌水.这是由于再生粗骨料的吸水率是浸泡至完全饱和时的吸水率,骨料浸泡时间超过了24 h,而混凝土拌和时间加测试时间较短,

部分附加用水并未被再生粗骨料吸收,从而使混凝土中自由水增多,出现泌水.工作性测试表明,将普通混凝土配合比设计方法直接用于再生混凝土配合比设计难以满足工作性要求,而采用附加用水量配合比设计方法可以满足再生混凝土的工作性要求.

2.2 抗压强度

图2为养护龄期对再生混凝土抗压强度的影响.由图2可知,再生混凝土与普通混凝土的强度发展规律相同,均为随着龄期的增长,混凝土强度逐渐增加,特别是前7 d的强度增长较快.当龄期相同时,B组试件抗压强度均大于C组试件,这是由于B组试件中没有添加附加用水,使其水灰比低于C组试件,水化反应生成的水泥浆体和界面过渡区的孔隙率较低,因此其抗压强度高于C组试件.

2.3 应力-应变曲线

图3为B组和C组试件的应力-应变曲线.由图3可知,取代率不同的再生混凝土应力-应变曲线的变化不同.随着取代率的增加,B组试件应力-应变曲线的变化特点较为明显,其峰值应力逐渐减小,峰值应变逐渐增加,曲线上升段的斜率逐渐减小,但下降段无明显变化;C组试件峰值应力、峰值应变的变化规律与B组试件不同,其峰值应力和峰值应变均呈

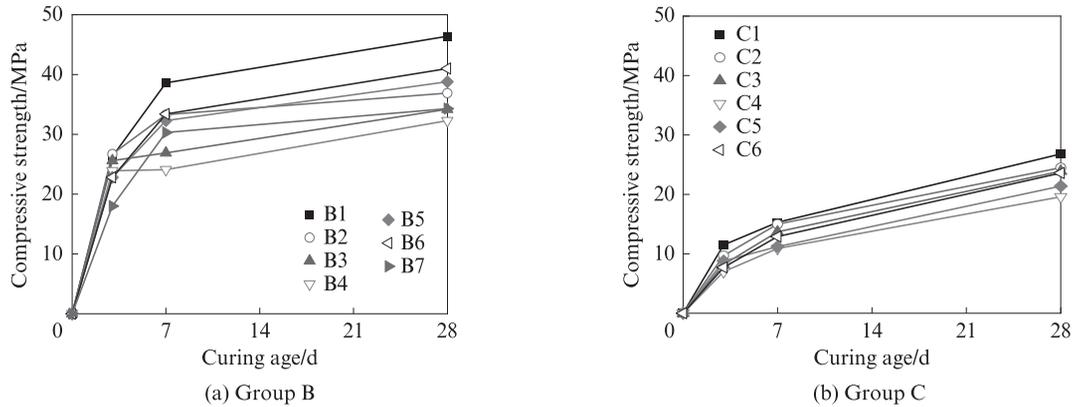


图2 养护龄期对再生混凝土抗压强度的影响  
Fig. 2 Influence of curing ages on compressive strength of recycled concrete

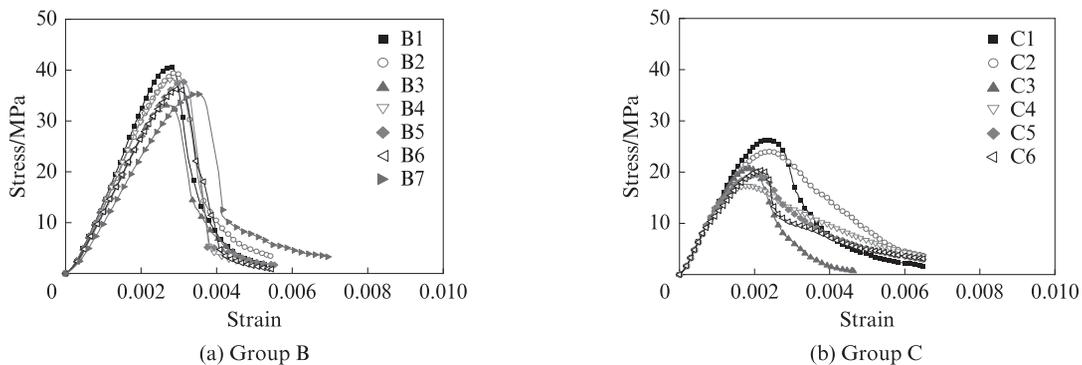


图3 再生混凝土的应力-应变曲线  
Fig. 3 Stress-strain curves of recycled concrete

现出先减小再增加的趋势,曲线上升段的斜率相似,而下降段斜率出现一定程度的减小.进一步对各组试件的应力-应变曲线进行分析,求出其各特征参数:28 d抗压强度 $f_c$ 、峰值应力 $\sigma_p$ 、峰值应变 $\epsilon_p$ 、弹性模量 $E$ (应力 $\sigma=0.4\sigma_p$ 的割线模量),结果列于表4.由表4可知:与取代率为0%的普通混凝土试件相比,当取代率为100%时,B组和C组试件的抗压强度分别下降了26.08%和11.94%,弹性模量分别下降了33.23%和4.67%,峰值应力分别下降了12.97%和22.64%;B组试件的峰值应变增加了26.81%,C组试件的峰值应变下降了8.02%.这表明掺入再生粗骨料后,B组和C组试件的力学性能出现了不同程度的下降,其中C组试件受取代率的影响较B组试件小.

### 3 再生混凝土损伤本构模型

#### 3.1 模型建立

由于砖混再生粗骨料除了含有骨料颗粒以外,还包括碎瓷砖、碎瓦和木屑等其他杂质颗粒,使砖混再生混凝土的组成种类繁多,内部结构复杂.其中,经过破碎得到的再生粗骨料由于表面含有微裂纹和砂浆,骨料质量较差且吸水率较大.在高水灰比环境

表4 再生混凝土应力-应变曲线特征参数

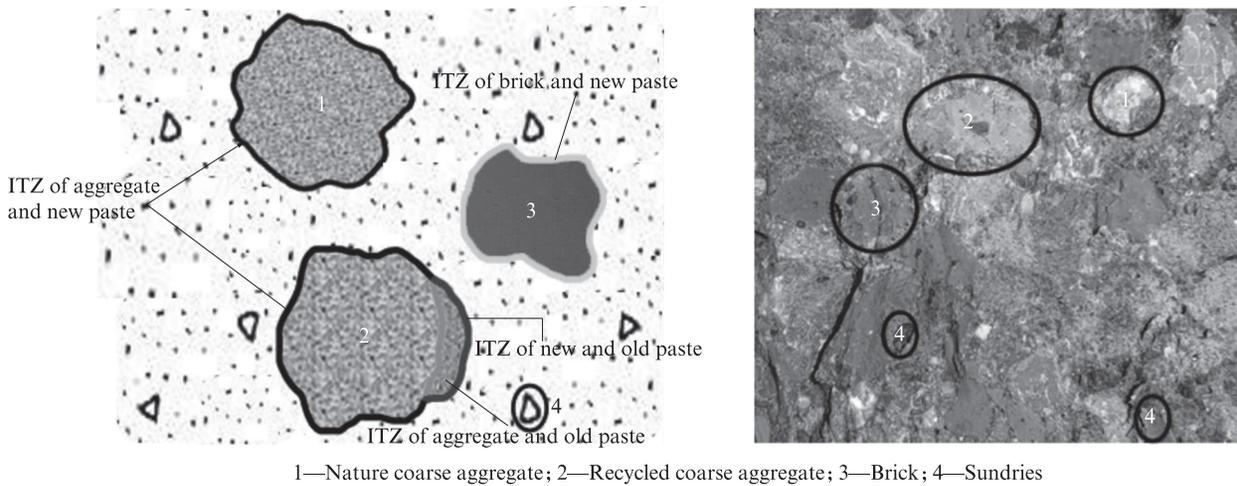
Table 4 Characteristic indexes of stress-strain curves of recycled concrete

No.	$f_c$ /MPa	$\sigma_p$ /MPa	$\epsilon_p$	$E$ /GPa
B1	46.4	40.64	0.002 76	16.28
B2	36.9	39.41	0.002 87	15.36
B3	34.2	33.06	0.002 72	13.64
B4	32.3	38.19	0.002 80	15.04
B5	38.8	37.74	0.003 10	12.98
B6	41.0	36.27	0.002 98	13.32
B7	34.3	35.37	0.003 50	10.63
C1	26.8	26.28	0.002 37	13.91
C2	24.5	24.02	0.002 30	13.82
C3	23.9	20.76	0.001 82	14.11
C4	19.6	17.40	0.001 78	13.73
C5	21.4	19.47	0.002 04	13.86
C6	23.6	20.33	0.002 18	13.26

下,再生粗骨料周围容易形成水膜,生成粗大的板状氢氧化钙晶体,从而增加了界面过渡区的孔隙率,降低了再生混凝土的强度<sup>[13]</sup>.在杂质颗粒中,由于碎红砖<sup>[14]</sup>、木屑和泥块的强度均低于骨料颗粒,将对再生混凝土的力学性能造成不利影响,而碎瓷砖虽然对

再生混凝土 28 d 抗压强度有一定的增长作用<sup>[15]</sup>,但由于含量较少,所以影响并不显著.综合多方面因素

考虑认为,掺入砖混再生粗骨料会降低混凝土的力学性能.图4为再生混凝土界面结构.



1—Nature coarse aggregate; 2—Recycled coarse aggregate; 3—Brick; 4—Sundries

图4 砖混再生混凝土界面结构

Fig. 4 ITZ structure of recycled concrete

为深入研究单轴受压荷载作用下,砖混再生粗骨料取代率对混凝土力学性能的影响,将再生混凝土的破坏过程视为一个连续发展的过程,并作以下假设:(1)再生粗骨料和天然粗骨料在混凝土中分布均匀;(2)砖混再生粗骨料中碎砖、碎瓦以及碎混凝土块在不同混凝土试件中的含量不一定相同(原因是再生粗骨料的成分分布不均匀);(3)再生混凝土在受压破坏时,再生骨料与水泥浆体的界面过渡区首先出现损伤,而天然骨料与水泥浆体的界面过渡区也在损伤发展过程中出现损伤,2种损伤同时发展,导致混凝土破坏;(4)将再生混凝土的界面过渡区视为由无数个界面微元组成,界面存在初始损伤,在破坏前为线弹性关系,同时界面微元强度服从Weibull分布.

根据 Lemaitre 应变等价性原理可知<sup>[16]</sup>,名义应力作用在损伤材料上的应变与有效应力作用在无损伤材料上的应变相等,该原理可用下式表示:

$$\epsilon = \frac{\sigma^*}{E} = \frac{(1-D)\sigma}{E} \quad (1)$$

式中: $\epsilon$ 为应变; $\sigma^*$ 为名义应力; $\sigma$ 为有效应力; $D$ 为损伤变量.

将破坏界面微元数目与总界面微元数目之比定义为损伤变量,同时将损伤变量的发展过程分为2个阶段.

将第1阶段损伤变量定义为初始损伤,初始损伤由掺入再生粗骨料造成,并随再生粗骨料掺量的增加而增大.由损伤力学理论可知<sup>[17]</sup>,混凝土材料的宏观力学性能响应能表征材料内部的劣化程度,因此

取代率为 $R$ 的再生混凝土初始损伤变量 $D_R$ 为:

$$D_R = 1 - \frac{E_R}{E_0} \quad (2)$$

式中: $E_0$ 为取代率为0%的混凝土弹性模量; $E_R$ 为取代率为 $R$ 的混凝土弹性模量; $D_R$ 为掺入再生粗骨料所引起的混凝土初始损伤变量.

第2阶段损伤变量主要在再生混凝土承受荷载作用阶段发展.由应变等价性原理可知,取代率为 $R$ 下的再生混凝土本构关系为:

$$\sigma = E_R \epsilon (1 - D_C) \quad (3)$$

式中: $D_C$ 为荷载引起的损伤变量.

将式(2)代入式(3)中,可得:

$$\sigma = E_0 \epsilon (1 - D_C)(1 - D_R) \quad (4)$$

总损伤变量 $D$ 为:

$$D = D_R + D_C - D_R D_C \quad (5)$$

荷载损伤变量 $D_C$ 可表示为荷载下破坏的界面微元数目 $n$ 与总界面微元数 $N$ 之比:

$$D_C = \frac{n}{N} \quad (6)$$

由于界面微元强度服从 Weibull 分布,其概率密度函数为:

$$\varphi(F) = \frac{b}{a} \left(\frac{F}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{F}{a}\right)^b\right] \quad (7)$$

式中: $F$ 为界面微元强度的分布变量;参数 $a$ 和 $b$ 为 Weibull 分布的分布参数.

在一定应变条件下,破坏的界面微元数目 $n$ 与总界面微元数 $N$ 的关系可表示为:

$$n = N \int_0^\epsilon \varphi(\epsilon) dF = N \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{a} \right)^b \right] \right\} \quad (8)$$

将式(6)与式(3)代入式(8)中,可得不同取代率下再生混凝土的损伤本构模型:

$$\sigma = E_R \epsilon \exp \left[ 1 - \left( \frac{\epsilon}{a} \right)^b \right] \quad (9)$$

结合式(2)和式(4),可得到不同取代率下再生混凝土的总损伤变量  $D$ :

$$D = 1 - \frac{E_R}{E_0} \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{a} \right)^b \right] \quad (10)$$

### 3.2 模型参数的物理意义

图5为固定参数  $E_R$  和  $b$  时,改变分布参数  $a$  对混凝土损伤本构模型曲线的影响.由图5可见,随着分布参数  $a$  的增加,模型曲线形状未出现明显变化,但峰值应力和峰值应变均增大.因此分布参数  $a$  主要反映再生混凝土峰值应力和峰值应变的大小, $a$  越大则峰值应力越大,峰值应变也越大.

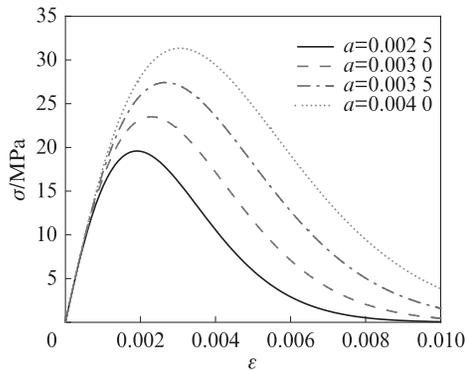


图5 分布参数  $a$  对混凝土损伤本构模型曲线的影响  
Fig. 5 Effect of parameter  $a$  on concrete damage constitutive model curves

图6为固定参数  $E_R$  和  $a$  时,改变分布参数  $b$  对混

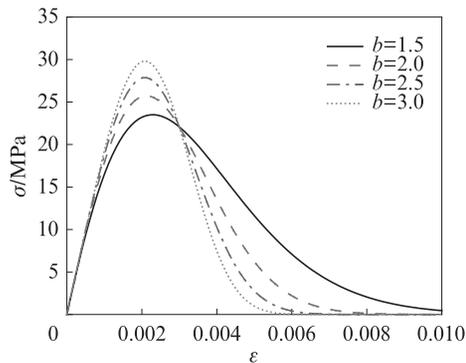


图6 分布参数  $b$  对混凝土损伤本构模型曲线的影响  
Fig. 6 Effect of parameter  $b$  on concrete damage constitutive model curves

凝土损伤本构模型曲线的影响.由图6可见,随着分布参数  $b$  的增加,模型曲线的下降段明显变陡,且峰值应力增加,峰值应变减小,这说明混凝土脆性增大.因此  $b$  增大则混凝土峰值应力增大,峰值应变减小,脆性增大.分布参数  $b$  主要反映再生混凝土的峰值应变和脆性, $b$  增大则混凝土峰值应变减小,脆性相应增大.

### 3.3 本构模型分布参数计算及验证

再生混凝土损伤本构模型有  $a, b$  共2个未知分布参数,在应力-应变曲线峰值点处满足  $\epsilon = \epsilon_p, \sigma = \sigma_p$ ,代入式(9)可得:

$$\frac{\sigma_p}{E_R \epsilon_p} = \exp \left[ - (\epsilon_p/a)^b \right] \quad (11)$$

对式(9)求导,可得混凝土损伤本构模型曲线斜率与应变的关系:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E_R \exp \left[ - (\epsilon/a)^b \right] \left[ 1 - b (\epsilon/a)^b \right] \quad (12)$$

由于曲线峰值点处斜率为0,可得:

$$E_R \exp \left[ - (\epsilon_p/a)^b \right] \left[ 1 - b (\epsilon_p/a)^b \right] = 0 \quad (13)$$

整理式(11)、(13)可得:

$$a = \frac{\epsilon_p}{(1/b)^{1/b}} \quad (14)$$

$$b = \frac{1}{\ln (E_R \epsilon_p / \sigma_p)} \quad (15)$$

根据表4中各组试件的峰值应力和峰值应变,结合式(14)、(15)计算出对应的分布参数  $a$  和  $b$ ,列于表5.

表5 Weibull分布参数  
Table 5 Results of Weibull distribution parameters

No.	$a$	$b$
B1	0.003 48	9.97
B2	0.003 67	8.93
B3	0.003 49	8.69
B4	0.003 51	10.24
B5	0.003 70	15.53
B6	0.003 70	11.14
B7	0.004 24	13.67
C1	0.003 32	4.41
C2	0.003 29	3.57
C3	0.002 53	4.71
C4	0.002 57	2.94
C5	0.002 95	2.68
C6	0.003 15	2.84

对表5中的分布参数与取代率使用二次函数进行拟合,并移除了分布参数 $b$ 中B5和C3试件2个较大偏离点(这2点可能是砖混再生粗骨料中各组分在各试件中比例不同造成的),可得到分布参数随取代率的变化函数.图7为分布参数与再生粗骨料取代率之间的变化关系.由图7可知,分布参数 $a$ 和 $b$ 均与二次函数有一定的相关性,其中分布参数 $b$ 的拟合情况较好,相关系数 $r$ 均大于0.95.从拟合结果可知,B组和C组试件的分布参数 $a$ 、 $b$ 的变化规律相同,均随着取代率的增加呈先减少后增大的趋势,这说明再生粗骨料的掺量较少时,再生混凝土的延性增加,峰值应变增加;而掺量较多时,再生混凝土的脆性增加,峰值应变减

小.此外,配合比方法决定了再生粗骨料对混凝土性能的影响程度,C组试件的脆性和峰值应变均小于B组试件,同时曲线顶点对应的取代率均大于B组试件.

根据计算得到的弹性模量 $E_R$ 对取代率 $R$ 进行线性拟合,并将较大的偏离点B4和C3试件移除后,建立再生混凝土弹性模量 $E_R$ 与取代率 $R$ 之间的函数关系.拟合结果如图8所示.由图8可知:随着取代率的增加,2组试件的弹性模量总体呈下降趋势,其中B组试件的弹性模量变化更为显著,并与取代率呈良好的线性关系,相关系数 $r$ 达到了0.945;C组试件的弹性模量变化程度小于B组试件,数据点之间的弹性模量变化不显著,相关系数 $r$ 为0.713.

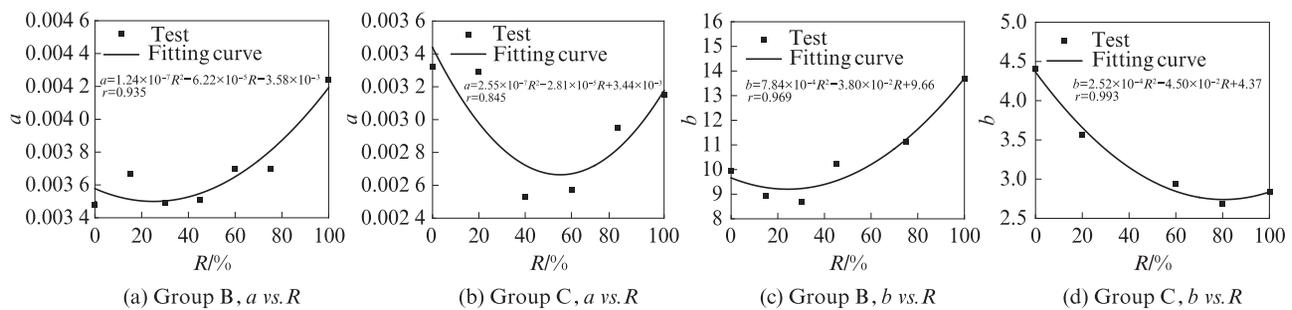


图7 Weibull分布参数与取代率的关系

Fig. 7 Relationship between Weibull distribution parameters and substitution rate

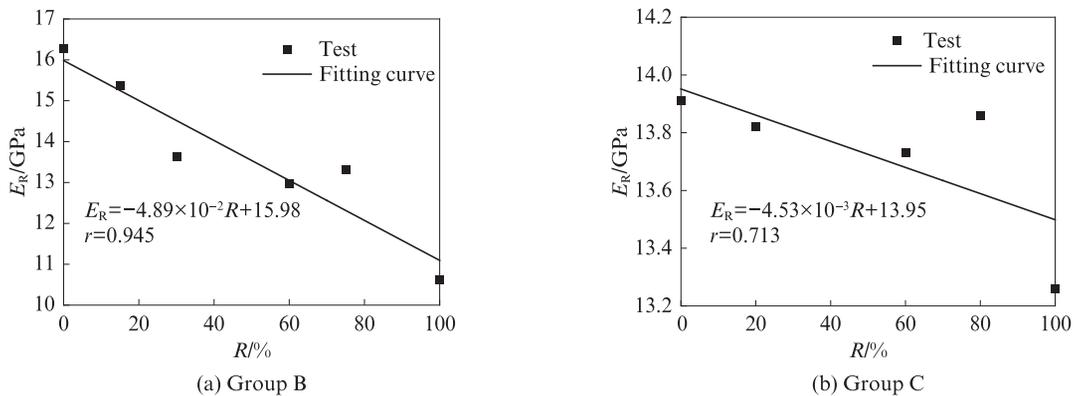


图8 弹性模量 $E_R$ 与取代率 $R$ 的关系

Fig. 8 Relationship between  $E_R$  and  $R$

为了研究砖混再生粗骨料掺量对混凝土损伤的影响,分别将B组和C组试件的弹性模量 $E_R$ 和分布参数 $a$ 、 $b$ 与取代率的函数关系代入到式(9)中进行修正,并将修正后的损伤本构模型与试验曲线进行对比,对比结果如图9、10所示;同时求得相关系数列于表6.

由图9、10可知:本文建立的损伤本构模型能够很好地反映不同取代率下砖混再生粗骨料混凝土的应力-应变关系,其中B组试件应力-应变曲线的上升段和下降段与本构模型均有着良好的吻合程度,

其相关系数均在0.97以上;C组试件应力-应变曲线在峰值应力前的上升段与损伤本构模型吻合度较高,下降段的拟合相关性稍低.由于再生混凝土在使用期间的力学性能变化主要体现在峰值应力前的曲线变化规律,因此本文建立的损伤本构模型能够较好地描述不同取代率下的再生混凝土力学性能变化情况.

### 3.4 损伤变量变化特性

由损伤力学理论可知,材料损伤的不断累积最终导致了材料强度的降低<sup>[17]</sup>.为了探究不同取代率

下,2组试件两阶段的损伤发展特性,首先结合式(2)和图8计算出其初始损伤变量 $D_R$ ;然后结合式(10)、图7和初始损伤变量 $D_R$ 计算荷载损伤变量 $D_C$ .

图11为不同取代率下再生混凝土的总损伤变量 $D$ 随应变的变化关系.由图11可知,当取代率为0%,且未承受荷载时(应变为0时),混凝土的初始损伤变量 $D_R$ 和荷载损伤变量 $D_C$ 均为0,此时混凝土总损伤变量为0;随着应变的增加,B组和C组试件在不同取代率下的损伤演化规律相似,均呈“S”形从初始损伤开始单调递增至1.0.

由图11(a)可知,随着取代率的增加,B组试件的初始损伤变量 $D_R$ 逐渐增大,当取代率为100%时,初始损伤变量 $D_R$ 为0.31.随着荷载的增加,B组试件的应变逐渐增大,当应变在0~0.0025之间时,B组试

件的损伤变量随应变的增大未见明显变化;但是当应变在0.0025~0.0040之间时,B组试件的损伤变量迅速增大,趋近于1.0.这表明B组试件主要是在应变由0.0025增加到0.0040的过程中发生破坏.

由图11(b)可知,随着取代率的增加,C组试件的初始损伤变量 $D_R$ 并未见明显增大.当取代率为0%、20%、40%、60%、80%和100%时,C组试件的初始损伤变量分别为0.007、0.013、0.019、0.026和0.032;但是随着荷载的增加,应变由0.0010增加到0.0030时,C组试件的损伤逐渐增大并大于0.600.这表明由于采用了附加用水量的配合比设计方法,C组试件中再生骨料的掺入对其初始损伤影响不显著,但是在荷载作用下,会使其应变逐渐增大,损伤逐渐发展.

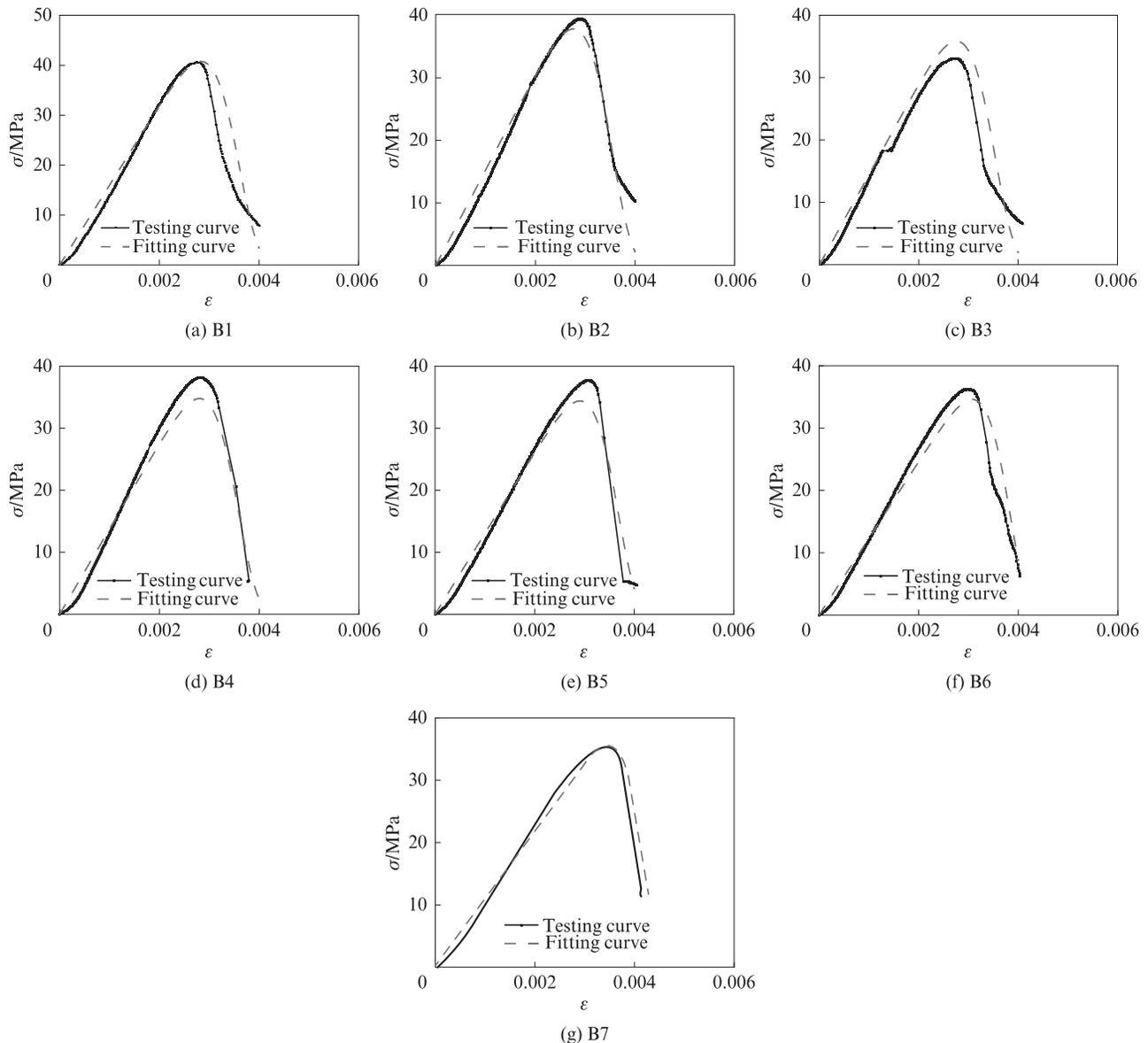


图9 B组试件的试验曲线和模型曲线  
Fig. 9 Testing and fitting curves of group B

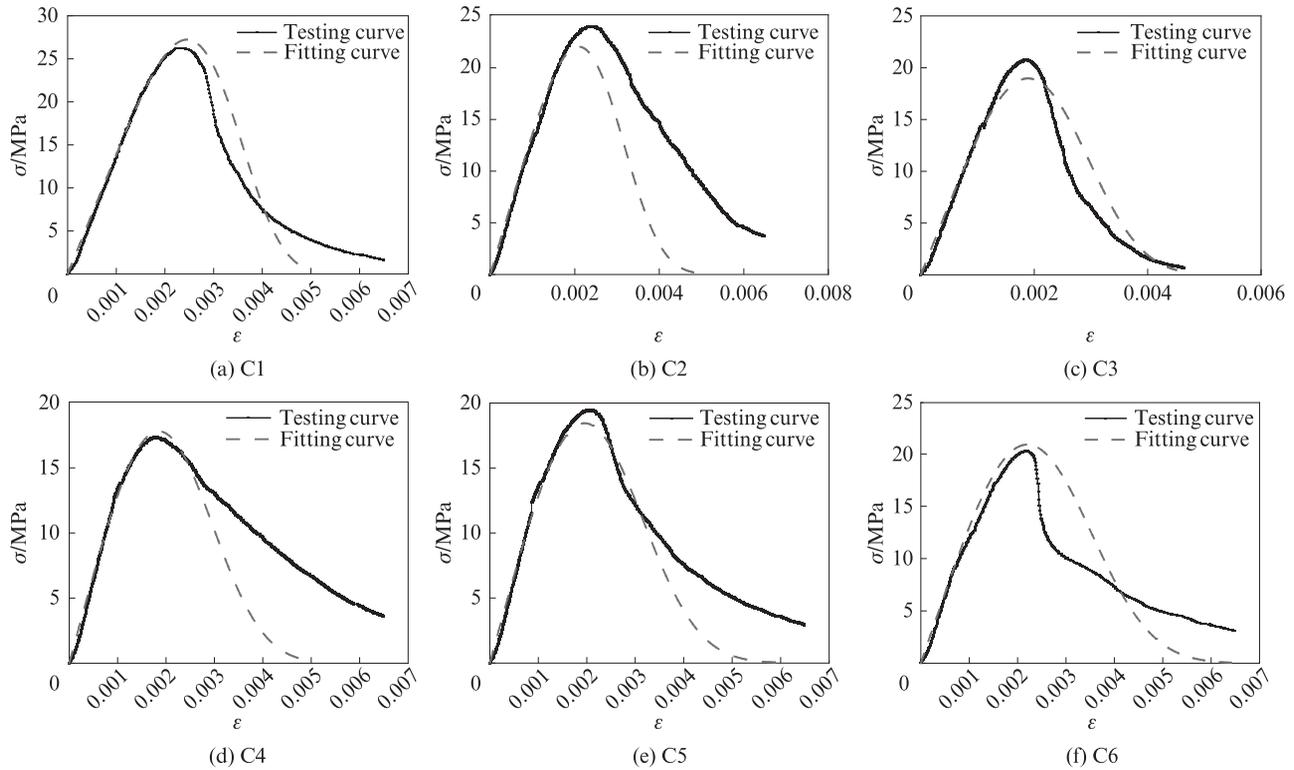


图10 C组试件的试验曲线和模型曲线  
Fig. 10 Testing and fitting curves of group C

表6 本构模型相关参数

Table 6 Related parameters of constitutive model

No.	$E_R$	$a$	$b$	Damage constitutive model	$r$
B1	159 80	0.003 58	9.66	$\sigma=159\ 80\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 58)^{9.66}]$	0.972
B2	152 47	0.003 51	9.27	$\sigma=152\ 47\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 51)^{9.27}]$	0.976
B3	145 13	0.003 51	9.23	$\sigma=145\ 13\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 51)^{9.23}]$	0.977
B4	137 80	0.003 55	9.54	$\sigma=137\ 80\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 55)^{9.54}]$	0.992
B5	130 46	0.003 65	10.20	$\sigma=130\ 46\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 65)^{10.20}]$	0.985
B6	123 13	0.003 81	11.22	$\sigma=123\ 13\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 81)^{11.22}]$	0.984
B7	110 90	0.004 20	13.70	$\sigma=110\ 90\epsilon\cdot\exp[-(x/0.004\ 20)^{13.70}]$	0.993
C1	139 50	0.003 44	4.37	$\sigma=139\ 50\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 44)^{4.37}]$	0.993
C2	138 59	0.002 98	3.66	$\sigma=138\ 59\epsilon\cdot\exp[-(x/0.002\ 98)^{3.66}]$	0.888
C3	137 69	0.002 72	3.15	$\sigma=137\ 69\epsilon\cdot\exp[-(x/0.002\ 72)^{3.15}]$	0.962
C4	136 78	0.002 67	2.85	$\sigma=136\ 78\epsilon\cdot\exp[-(x/0.002\ 67)^{2.85}]$	0.923
C5	135 88	0.002 82	2.74	$\sigma=135\ 88\epsilon\cdot\exp[-(x/0.002\ 82)^{2.74}]$	0.979
C6	134 97	0.003 18	2.84	$\sigma=134\ 97\epsilon\cdot\exp[-(x/0.003\ 18)^{2.84}]$	0.948

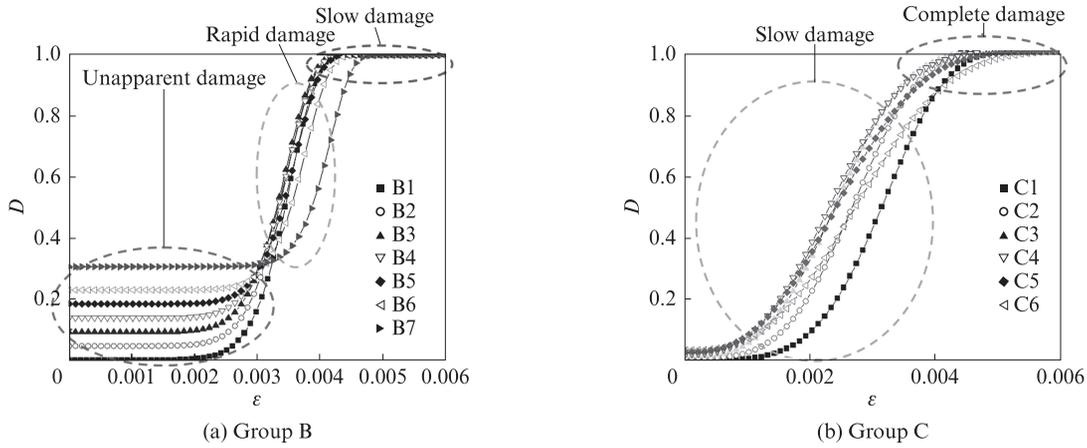


图11 不同取代率下总损伤变量D的变化规律  
Fig. 11 Change regularity of D with different replacement rate

结合式(12)将损伤变量对应变求导,可得不同取代率下,B、C组试件损伤变量发展速率的变化规律:

$$\frac{dD}{d\varepsilon} = \frac{E_R}{E_0} \frac{b}{a} (\varepsilon/a)^{b-1} \cdot \exp[-(\varepsilon/a)^b] \quad (16)$$

图12为各组试件的损伤变量发展速率变化规

律.由图12可知,B组和C组试件的损伤变量发展速率随着应变的增加均呈先增加后减少的趋势,同时损伤变量发展速率最大值对应的应变与应力-应变曲线中的峰值应变值相近,说明在达到峰值应变时,再生混凝土已经破坏.

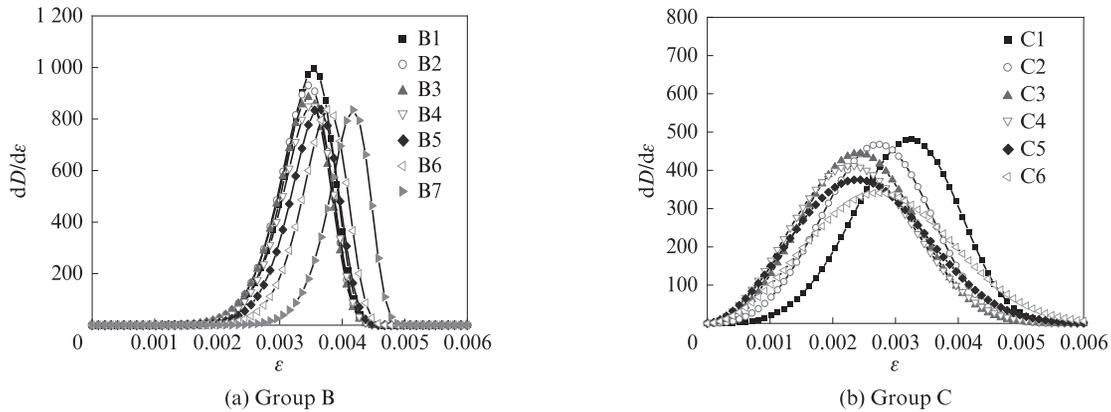


图12 再生混凝土损伤变量发展速率的变化规律  
Fig. 12 Development rate of damage variable of recycled concrete

对于B组试件,当其应变小于0.0020时,由荷载造成的损伤变量发展速率几乎为0,此时再生混凝土仍处于线弹性阶段;当其应变大于0.0020时,损伤变量发展速率迅速增加,且在峰值应变附近达到损伤变量发展速率的最大值.随着取代率的增加,损伤变量发展速率的最大值逐渐降低,对应的应变则逐渐增加,当取代率为100%时,损伤变量发展速率最大值相比于普通混凝土降低了16.31%,对应的应变增加了21.96%.这说明采用普通混凝土配合比设计方法制备再生混凝土时,再生骨料的掺入降低了混凝土损伤变量发展速率的最大值,即当损伤变量发展速率还较低时,应变就快速增大,损伤变量达到最大值,材料发生破坏.

C组试件并无明显的弹性阶段,当应变从0开始增加时,由荷载作用造成的损伤便逐渐加速发展.随着取代率的增加,C组试件损伤变量发展速率的最大值逐渐降低,但对应的应变逐渐减小;当取代率为100%时,损伤变量发展速率的最大值相比于普通混凝土降低了29.03%,对应的应变降低了15.61%.这说明采用附加用水量配合比设计方法制备再生混凝土时,再生骨料的掺入降低了混凝土损伤变量发展速率的最大值,即混凝土在荷载作用下出现较小应变时,其损伤变量就开始增大.

### 4 结论

(1)砖混再生粗骨料的掺入降低了混凝土力学

性能.相比于普通混凝土,当砖混再生粗骨料取代率为100%时,采用普通混凝土配合比设计方法和附加用水量配合比设计方法制备的B组和C组试件的抗压强度降低了26.08%和11.94%,弹性模量降低了33.23%和4.67%.采用附加用水量配合比设计方法制备的再生混凝土能减少再生粗骨料对混凝土力学性能的影响,配合比设计方法对再生骨料混凝土的工作性有一定影响.

(2)建立的损伤本构模型能够较好地满足不同配合比设计方法和取代率下再生混凝土的应力-应变关系,大部分拟合曲线的相关系数大于0.92.其中模型参数 $a$ 对拟合曲线形状影响不显著,主要反映了峰值应力和峰值应变的大小;参数 $b$ 对拟合曲线下降段形状影响较大,主要反映了再生混凝土的峰值应变和脆性.

(3)砖混再生粗骨料混凝土的总损伤由初始损伤和荷载损伤组成.掺入砖混再生粗骨料对混凝土造成了初始损伤,总损伤变量随应变增加呈S型单调递增,最终趋近于1.0.损伤变量发展速率随应变的增加先增大后减小,掺入再生骨料降低了混凝土损伤变量发展速率的最大值,加速了损伤变量的累积.

#### 参考文献:

- [1] DUAN H B, LI J H. Construction and demolition waste management: China's lessons[J]. Waste Manage and Research, 2016, 34(5):397-398.
- [2] LU W S, CHIB, BAO Z K, et al. Evaluating the effects of green building on construction waste management: A comparative study of three green building rating systems [J]. Building and Environment, 2019, 155:247-256.
- [3] 肖建庄,夏冰,肖绪文.工程结构可持续性设计理论架构[J].土木工程学报,2020,53(6):1-12.  
XIAO Jianzhuang, XIA Bing, XIAO Xuwen. Theoretical framework for sustainability design of engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6):1-12. (in Chinese)
- [4] DUAN Z H, HOU S D, XIAO J Z, et al. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253:119865.
- [5] 肖建庄.再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1445-1449.  
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, 35(11):1445-1449. (in Chinese)
- [6] BELN G F, FERNANDO M A, CARRO-LPEZ D, et al. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5):2335-2342.
- [7] ZHOU C H, CHEN Z P. Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:497-506.
- [8] 陈宗平,陈宇良,徐金俊,等.多轴受力状态下再生混凝土的破坏准则及应力-应变本构关系研究[J].土木工程学报,2015,48(12):23-33.  
CHEN Zongping, CHEN Yuliang, XU Jinjun, et al. Experimental study on failure criterion and stress-strain constitutive equation of recycled coarse aggregate concretes under multiaxial[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(12):23-33. (in Chinese)
- [9] XIAO J Z, ZHANG J K, ALI A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181:753-771.
- [10] DING T, XIAO J Z. Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai[J]. Waste Management, 2014, 34(11):2327-2334.
- [11] HU K, CHEN Y J, FALAK N, et al. Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste[J]. Waste Management, 2019, 85:396-404.
- [12] 马昆林,黄新宇,胡明文,等.砖混再生粗骨料混凝土力学性能及工程应用研究[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2600-2607.  
MA Kunlin, HUANG Xinyu, HU Mingwen, et al. Mechanical properties and engineering application of brick-concrete recycled coarse aggregates concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8):2600-2607. (in Chinese)
- [13] XIAO J Z, LI W G, SUN Z H, et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37:276-292.
- [14] 陈杰,耿悦,王玉银,等.含碎红砖再生混凝土基本力学性能及其应力-应变关系[J].建筑结构学报,2020,41(12):184-192.  
CHEN Jie, GENG Yue, WANG Yuyin, et al. Basic mechanical properties and stress-strain relationship for recycled concrete including crushed clay bricks[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12):184-192. (in Chinese)
- [15] 王长远,王功勋,裴启文,等.全组分利用废瓷砖制备混凝土及其耐久性[J].混凝土,2017(11):181-184.  
WANG Changyuan, WANG Gongxun, PEI Qiwen, et al. Preparation and durability of concrete using the whole component of waste ceramic tile[J]. Concrete, 2017(11):181-184. (in Chinese)
- [16] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear Engineer and Design, 1984, 80(1):233-245.
- [17] 余寿文.损伤力学[M].北京:清华大学出版社,1997:26-32.  
YU Shouwen, Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997:26-32. (in Chinese)