

双参数 Weibull 分布砖混骨料再生 混凝土损伤模型

于保阳,张 政,王 浩,黄禹田

(沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究砖混骨料再生混凝土再生骨料中砖块的质量分数对再生混凝土抗冻性能的影响,为砖块质量分数不统一的再生骨料的再利用提供技术支持。方法 对再生骨料中不同砖块质量分数的再生混凝土进行冻融循环后的单轴压缩试验,确定再生混凝土经冻融及荷载作用的损伤变量 D ,并基于双参数 Weibull 概率函数及 Lemaitre 等效应变理论建立再生骨料中不同砖块含量的再生混凝土冻融循环作用后单轴受压本构模型。结果 所得的本构模型与试验曲线拟合度较好;损伤变量 D 与应变的关系呈 S 型曲线,曲线的陡峭程度反映了初始损伤 D_n 的大小及试件抵抗荷载的能力;得到了冻融循环次数、再生骨料中砖块质量分数与损伤变量的关系,经冻融循环后再生混凝土中再生骨料的砖块质量分数由 0 到 30% 时初始损伤度增加了 32.5%。结论 再生骨料中砖块质量分数的增加,能够加快再生混凝土损伤演化的速度,使再生混凝土抗冻性能劣化。

关键词 再生混凝土;砖混骨料;双参数 Weibull 概率函数;Lemaitre 等效应变理论

中图分类号 TU502

文献标志码 A

Damage Model of the Brick Aggregate Recycled Concrete Based on Two-parameter Weibull Distribution

YU Baoyang, ZHANG Zheng, WANG Hao, HUANG Yutian

(School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To investigate the effect of brick content in brick aggregate recycled concrete on the frost resistance of recycled concrete, uniaxial compression tests were carried out on recycled concrete with different brick contents following freeze-thaw cycling tests. Determine the damage variable D for recycled concrete subjected to freeze-thaw and loading, and a uniaxial compressive principal structure model for the recycled concrete with different brick contents after freeze-thaw cycles was established based on the two-parameter Weibull probability function and the Lemaitre's

收稿日期:2022-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422)

作者简介:于保阳(1980—),男,教授研究员级高级实验师,主要从事结构工程与建筑新材料等方面研究。

strain equivalence principle theory. The obtained intrinsic structure model fitted well with the test curves. The relationship between the damage variable D and the strain is S-shaped, and the steepness of the curve reflects the magnitude of the initial damage D_n and the ability of the specimen to resist the load. After freeze-thaw cycles the initial damage of recycled concrete brick content increased by 32.5% from 0 to 30%, indicating that the increase in brick content accelerates the rate of damage evolution of recycled concrete and deteriorates the frost resistance of recycled concrete.

Key words: recycled concrete; brick and mortar aggregates; two-parameter Weibull probability function; Lemaître's strain equivalence principle

随着我国城镇化建设的不断发展,城区的改造、拆除,产生了大量的建筑垃圾。据不完全统计,2020 年我国建筑垃圾的年产量达到了 30 亿 t^[1]。目前我国对建筑垃圾的处理主要以堆弃、填埋为主,但建筑垃圾数量不断增长以致可供堆弃的场地日趋紧张^[2]。为了实现我国的“双碳”目标^[3],大力发展再生能源,将建筑垃圾经加工后制成再生骨料进行二次利用,是促进资源可持续利用的有效途径^[4]。

近年来,国内外学者对建筑垃圾的再生利用开展了大量研究^[5-8]; I. S. Al-Haydari 等^[9]利用再生混凝土骨料、碎砖骨料取代不同比例的天然骨料进行了单轴压缩试验,得出骨料类型的不同会影响再生混凝土的破坏模式及应力应变关系。马昆林等^[10]构建了砖混骨料再生混凝土单轴受压损伤模型,得出再生混凝土损伤变量与应变的关系。陈宗平等^[11]对再生混凝土掺入不同的比例的再生骨料并进行三轴试验,得出多种应力作用的应力-应变本构方程。

砖混类再生混凝土是再生骨料中含旧混凝土又含砖块的再生混凝土,我国早期的建筑物多为砖混结构,对于砖混骨料的利用分为分拣利用与直接利用,国内外学者研究了砖混骨料分离技术^[12-13],但考虑到对建筑垃圾的充分利用,直接利用砖混骨料十分必要。含砖块的再生混凝土由砖块、旧混凝土、旧砂浆、新砂浆、天然骨料等构成,其内部组成结构复杂,当砖块质量分数发生变化,再生混凝土

土在环境变化与荷载作用下的损伤演化规律值得研究。鉴于此,笔者研究砖混骨料再生混凝土再生骨料中砖块的质量分数对再生混凝土抗冻性能的影响,基于 Weibull 概率密度函数,结合 Lemaître 应变等效理论,建立了再生骨料中不同砖块质量分数的再生混凝土经冻融循环后单轴受压本构模型,并得出再生混凝土经单轴受压作用下损伤变量随应变增加的发展规律。

1 试 验

1.1 试验材料

水泥采用山水牌 42.5 级普通硅酸盐水泥,细骨料为天然砂,拌合水为自来水,天然粗骨料为最大粒径 20 mm 的石灰岩。再生粗骨料取自沈阳李相固废回收站堆弃的建筑垃圾,经筛分挑选后分为旧混凝土与砖块,如图 1 所示。采用《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ52—2006)中的方法测得粗骨料的技术指标如表 1 所示,减水剂选用萘系减水剂。

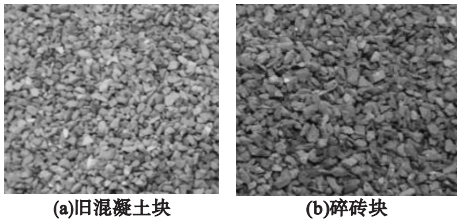


图 1 筛分挑选后的再生粗骨料

Fig. 1 The recycled coarse aggregate after sieving and selection

表1 粗骨料技术指标

Table 1 The technical specifications of coarse aggregates

粗骨料种类	吸水率/%	表观密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	压碎指标/ %
石灰岩	2.25	2.667	9.8
旧混凝土	8.53	2.312	19.8
砖块	13.58	1.996	31.2

表2 再生混凝土配合比

Table 2 The proportions of recycled concrete

$\rho(\text{水})/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{水泥})/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶 质量比	$\rho(\text{细骨料})/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{天然碎石})/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{旧混凝土})/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{砖块})/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{减水剂})/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
190	500	0.38	602	559	559.0	0	5
190	500	0.38	602	559	503.1	55.9	5
190	500	0.38	602	559	447.2	111.8	5
190	500	0.38	602	559	391.3	167.7	5

制备 48 个长 \times 宽 \times 高为 100 mm \times 100 mm \times 300 mm 混凝土试件,经 28d 标准条件养护后进行冻融试验及单轴压缩试验。

冻融试验根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)的要求,采用快冻法进行冻融循环试验。由于再生骨料中砖块的质量分数的变化造成了试件所承受的最大冻融循环次数不同。单轴压缩试验的加载装置及试件的破坏状态如图 2 所示。

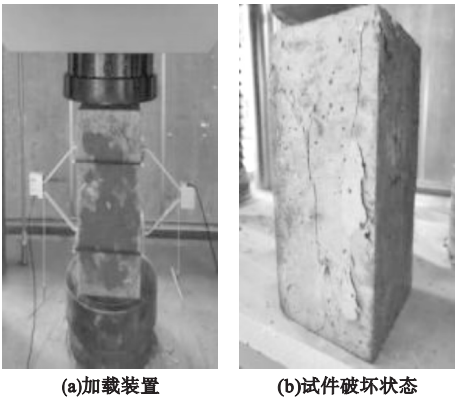


图2 单轴压缩试验

Fig. 2 The uniaxial compression test

2 试验结果及分析

未经冻融循环的不同砖块质量分数的再

1.2 试验方法

为了探究再生骨料中砖块质量分数对再生混凝土经冻融循环后单轴受压损伤演化规律,考虑将在粗骨料中掺入 50% 的再生骨料,并在再生骨料中控制砖块质量分数,砖块质量分数为 0 ~ 30%,每组级差为 10%,其余材料用量保持一定,所用配合比见表 2。

生混凝土应力 - 应变如图 3 所示。不同砖块质量分数的再生混凝土经冻融循环的应力 - 应变曲线如图 4 所示。曲线特征指标见表 3。其中混凝土的静态弹性模量 E 为峰值应力($0.4\sigma_c$)时的割线模量。

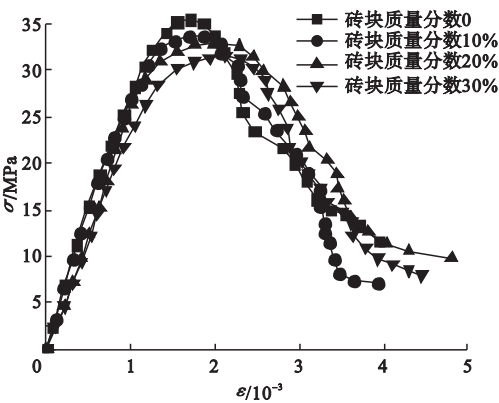


图3 未经冻融循环含砖块再生混凝土应力 - 应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curves of brick aggregate recycled concrete before freeze-thaw cycles

由图 3 可知,随着再生骨料中砖块质量分数的增加未经冻融循环的再生混凝土峰值点下移,当再生骨料中砖块质量分数由 0 增加至 30% 时峰值应力下降了 10.95%、峰值应变增加了 19.34%、弹性模量降低了 25.3%。

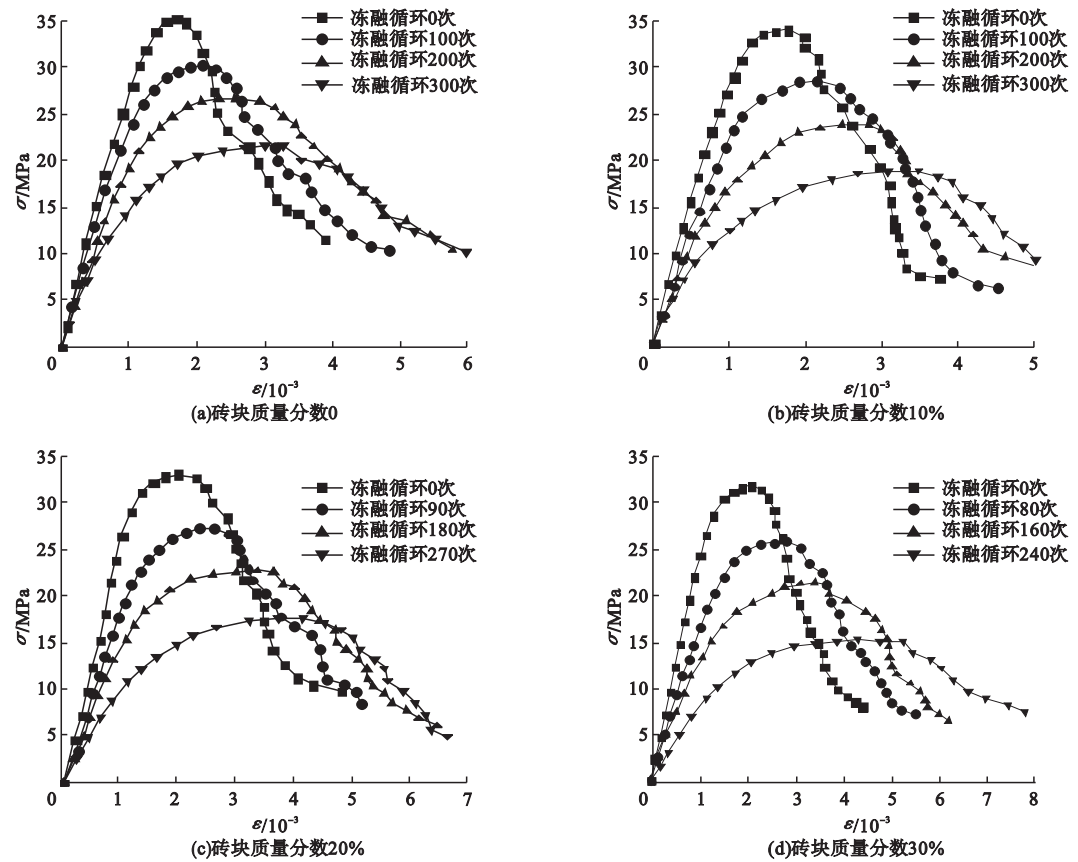


图 4 不同砖块质量分数的再生混凝土经冻融循环后应力 - 应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of brick aggregate recycled concrete with different block contents after freeze-thaw cycles

表 3 应力 - 应变曲线特征指标

Table 3 The characteristic index of stress-strain curves

再生骨料中砖块质量分数/%	冻融循环/次	峰值应变 $\varepsilon_c/10^{-3}$	峰值应力 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa
0	0	1.71	35.43	30.15
	100	2.12	30.45	27.06
	200	2.60	26.91	22.42
	300	3.04	21.79	16.76
10	0	1.85	33.64	29.29
	100	2.25	28.17	23.47
	200	2.95	23.61	17.82
	300	3.64	18.63	15.86
20	0	1.98	32.85	26.50
	90	2.60	27.21	19.43
	180	3.35	22.61	17.73
	270	14.00	17.63	11.72
30	0	2.12	31.55	22.53
	80	2.85	25.61	17.36
	160	3.44	21.19	13.67
	240	34.00	15.13	7.46

由图 4 可知,当再生骨料中砖块质量分数一定时,随着冻融循环次数的增加,应力 - 应变曲线趋于平缓,代表试件的抗压能力下降。这是由于随着冻融循环次数的增加,水在试件内部的微裂缝及孔隙内发生冻胀作用,冻胀产生的张力使试件内部不断产生微小裂纹,从而使损伤不断积累,造成了试件强度的降低。当再生骨料中砖块质量分数增加时,试件可承受的最大冻融循环次数降低,试件受冻融作用发生劣化的速度加快。这是由于砖块骨料具有强度差、吸水率高的缺点,当经历冻融循环时,随着再生骨料中砖块质量分数的增加,试件内部吸水量增大,水的冻胀作用对试件影响增大,导致试件的抗冻性降低,承受荷载的能力下降。

3 损伤本构模型的建立

3.1 本构模型建立条件

在建立再生混凝土本构模型前作以下假设:未经冻融循环的含砖块再生混凝土初始损伤度为0;再生混凝土在单轴压缩过程中首先在界面处出现损伤;损伤变量阈值为 $D=1$ 。

3.2 不同砖块质量分数的再生混凝土冻融循环损伤本构模型

法国学者 J. Lemaitre^[14]提出了应变等效假说,当有效应力作用在受损材料上所产生的应变与名义应力作用在无损材料上引起的应变等效。因此通过无损材料的本构方程可以推导出受损材料的应变本构关系。根据 Lemaitre 应变等效假说将发生损伤后的应力应变关系引入损伤变量 D :

$$E = \frac{\hat{\sigma}}{\varepsilon} = (1 - D) \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; D 为损伤变量; $\hat{\sigma}$ 为名义应力; σ 为有效应力; ε 为应变。

将含砖块的再生混凝土的内部视为由无数个微元组成,损伤破坏的微元数目与微元总数目的比值称为损伤变量。将不同砖块质量分数的再生混凝土视为不同的无损材料,并将经冻融循环后的再生混凝土视为初始损伤,初始损伤随冻融循环次数的增加而累积,可以得出经冻融循环后含砖块的再生混凝土的初始损伤变量 D_n :

$$D_n = 1 - E_0/E_n. \quad (2)$$

式中: D_n 为 n 次冻融循环后的再生混凝土损伤变量; E_0 为未经冻融循环的再生混凝土弹性模量; E_n 为经 n 次冻融循环后的再生混凝土弹性模量。

冻融循环后进行单轴受压试验,由应变等效原理经 n 次冻融循环的再生混凝土本构关系为

$$\sigma = E_n \varepsilon (1 - D_h). \quad (3)$$

式中: D_h 为经荷载产生的损伤变量。

将式(2)带入式(3)可得:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon E_0} = (1 - D_n)(1 - D_h). \quad (4)$$

式(4)左侧代表了含砖块的再生混凝土经冻融与荷载共同作用的总损伤变量 D ,总损伤变量 D 通过经冻融后的损伤变量 D_n 和与荷载后的损伤变量 D_h 可表示为

$$D = D_n + D_h - D_n D_h. \quad (5)$$

Weibull 分布是以链条模型为基础并结合了概率论与统计学的破坏理论^[17],文献[16-17]都得出利用 Weibull 概率密度函数描述混凝土强度劣化发展规律是可行的。当混凝土承受荷载时假设微元强度的分布服从 Weibull 分布,则其分布函数可表示为

$$f(F) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{F}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{\alpha}\right)^{\beta}\right]. \quad (6)$$

式中: F 为微元强度的分布变量; α 为尺度因子; β 为 Weibull 形状因子。

在单轴压缩条件下,将混凝土中受损伤的微元数目定义为 N ,微元总数定义为 M :

$$N = M \int_0^{\varepsilon} f(F) dF = M \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \right\}. \quad (7)$$

则荷载损伤变量 D_h 可表示为

$$D_h = \frac{N}{M} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{\beta}\right]. \quad (8)$$

经冻融循环后经荷载作用下的总损伤变量 D 可表示为

$$D = 1 - \frac{E_n}{E_0} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{\beta}\right]. \quad (9)$$

根据总损伤变量 D 与应力、应变以及初始弹性模量的关系可以得到含砖块的再生混凝土在冻融循环作用下的单轴受压本构关系如式(10)所示。

$$\sigma = E_n \varepsilon \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{\beta}\right]. \quad (10)$$

3.3 模型参数的计算

根据式(10)的再生混凝土本构模型,推导模型中的尺度因子 α 、形状因子 β 。对式(10)等式两侧进行两次对数变形可得:

$$\ln \left[-\ln \left(\frac{\sigma}{E_n \varepsilon} \right) \right] = \beta \ln \left(\frac{\varepsilon}{\alpha} \right). \tag{11}$$

令 $x = \ln \varepsilon, \lambda = \beta \ln \alpha, y = \ln \left[-\ln \left(\frac{\sigma}{E_n \varepsilon} \right) \right]$ 。

则式(11)可表示为 $y = \beta x - \lambda$ 。

通过试验数据的应力、应变、弹性模量求得 x, y 值,并对所求的 x, y 值利用最小二乘法拟合,所得斜率即为该本构模型的形状因子 β 。由 $\lambda = \beta \ln \alpha$ 可求得本构模型的尺度因子 α 。

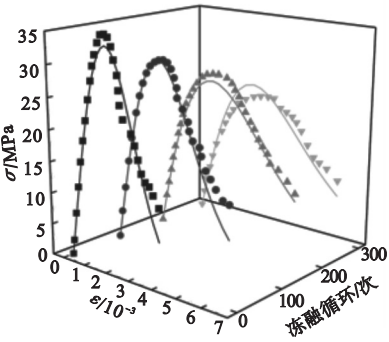
通过计算得到不同砖块质量分数的再生混凝土不同冻融循环次数下单轴受压本构模型的 α, β 值见表 4。

3.4 模型合理化验证

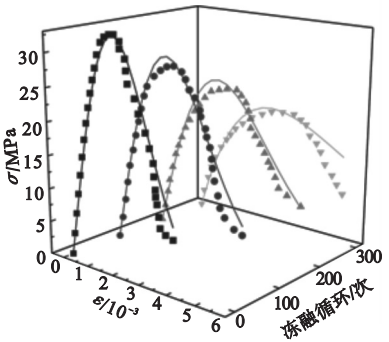
根据 3.3 节所求得的 α, β 值,结合试验测得的应力、应变、弹性模量,经过计算得到了本构模型的应力 - 应变曲线,并与试验曲线进行对比,结果见图 5。

表 4 本构模型参数 α, β
Table 4 The intrinsic structure model of parameters

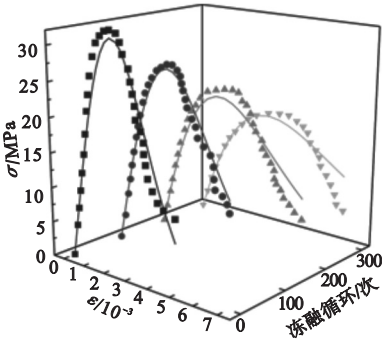
		α, β		
再生骨料中砖块质量分数/%	冻融循环/次	$\alpha/10^{-3}$	β	R^2
0	0	2.48	2.31	0.983
	100	2.65	1.93	0.962
	200	2.96	1.42	0.974
	300	3.04	1.46	0.935
10	0	2.57	2.22	0.977
	100	2.73	1.88	0.954
	200	3.07	1.72	0.956
	300	3.21	1.16	0.921
20	0	2.93	2.16	0.971
	90	3.28	1.83	0.962
	180	3.52	1.45	0.945
	270	3.82	1.18	0.912
30	0	3.04	2.23	0.965
	80	3.45	1.80	0.971
	160	3.75	1.34	0.922
	240	36	0.95	0.934



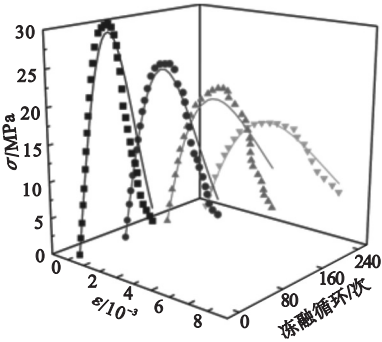
(a)砖块质量分数0



(b)砖块质量分数10%



(c)砖块质量分数20%



(d)砖块质量分数30%

图 5 试验曲线与本构模型对比

Fig. 5 Comparison between test curves and the intrinsic structure model

由图 5 可知,试验曲线与构建的再生混凝土损伤本构模型拟合度较好。本构模型与试验曲线的上升段重合度较高,在下降段由于再生骨料的多相性造成了曲线的波动。所建立的再生骨料中不同砖块质量分数的再生混凝土冻融循环后单轴受压本构模型,可以描述不同冻融循环次数下不同砖块质量分数的再生混凝土力学性能变化。

4 含砖块的再生混凝土损伤变量的变化特性

4.1 损伤变量 D 的变化特性

损伤变量 D 的演化规律可以反应试件的损伤发展规律。根据式(9)计算出不同砖块质量分数下再生混凝土损伤变量 D ,如图 6 所示。

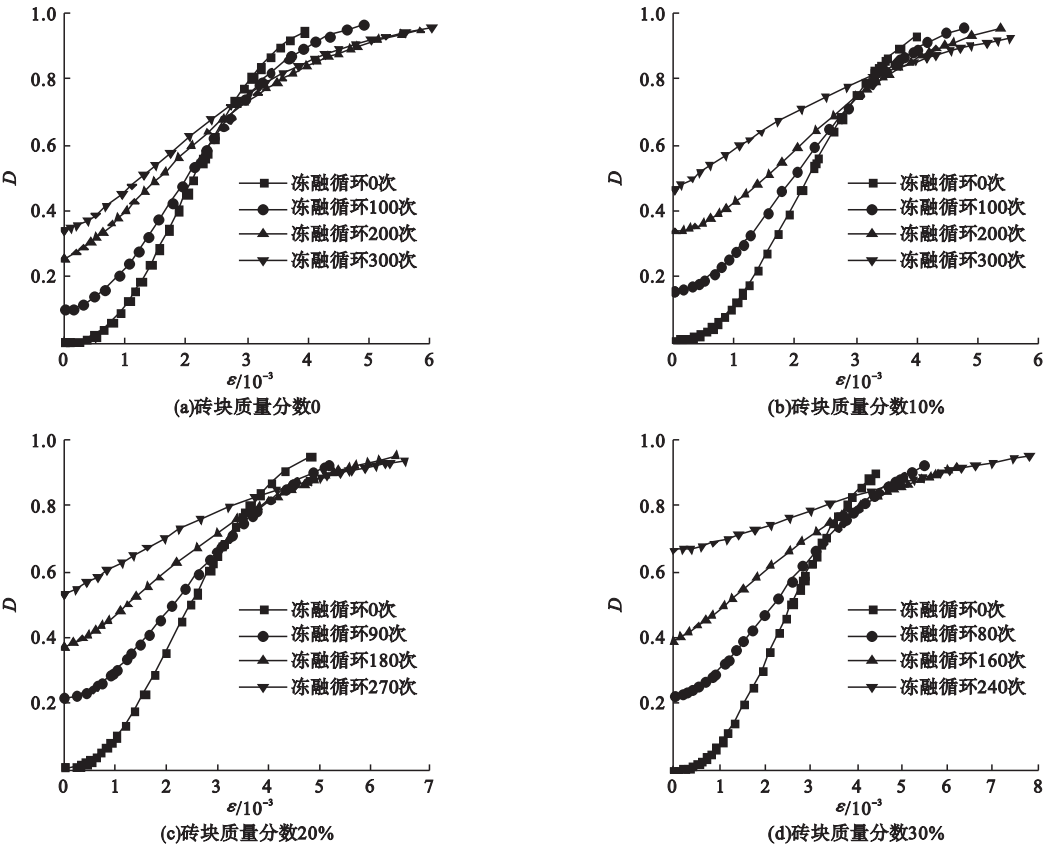


图 6 不同砖块质量分数再生混凝土损伤变量 D 变化趋势

由图 6 可知,损伤变量 D 的发展趋势呈单调递增的“S”型曲线,当曲线处于第一个平缓阶段时试件为线弹性,此时试件损伤发展较慢,曲线由平缓到陡峭阶段为混凝土损伤快速发展阶段,当曲线由陡峭向平缓过度时为混凝土的破坏阶段。

当再生骨料中砖块质量分数一定时,随着冻融循环次数的增加,S 型曲线逐渐变得平缓,这是由于荷载损伤变量 D_h 主要发展阶段

为 S 型曲线最陡峭的阶段,此时试件内部的损伤快速积累。而经冻融循环的再生混凝土,由于其初始损伤变量 D_n 的积累随冻融循环次数的增加而累积,导致其在荷载阶段未积累过多的荷载损伤变量 D_h ,试件即发生损坏。

4.2 D_n 与冻融循环次数、砖块质量分数的关系

由图 6 可得出,当再生骨料中的砖块质量分数不同,不同冻融循环次数下试件的初

始损伤度的增大程度存在差异。为了探究砖块质量分数 r 与冻融循环次数 n 对初始损伤

变量 D_n 的影响规律,确定初始损伤变量 D_n 与冻融循环次数 n 的关系(见图 7)。

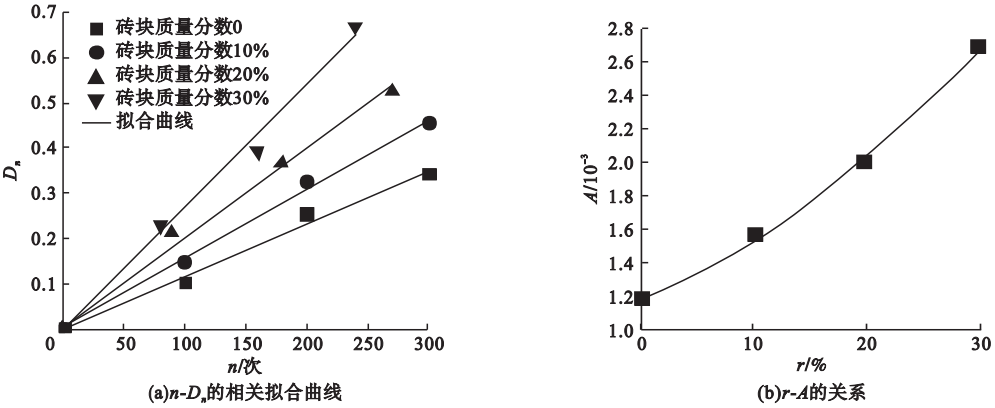


图 7 D_n 与 n, r 的关系

Fig. 7 The relationship between D_n and n, r

由图 7(a)可知初始损伤变量 D_n 与冻融循环次数 n 呈线性关系故采用式(11)的形式进行拟合。

$$D_n = An. \tag{11}$$

式中: A 为拟合参数。

所得不同砖块质量分数的 A 值见表 5。

表 5 不同砖块质量分数的 A 值

Table 5 A-values for different block contents

砖块质量分数/%	拟合参数 A	R^2
0	0.001 17	0.995
10	0.001 56	0.998
20	0.002 00	0.996
30	0.002 70	0.995

拟合 A 值与砖块质量分数 r 的关系式(12), A 与 r 的关系如图 7(b)所示。

$$A = 0.001\ 18 + 0.002\ 7r + 0.007\ 5r^2, \tag{12}$$
$$R^2 = 0.995.$$

将式(12)带入式(11)中即得到初始损伤变量 D_n 与冻融循环次数 n 、砖块质量分数 r 的关系如式(13)所示。

$$D_n = 0.001\ 18n + 0.002\ 7nr + 0.007\ 5nr^2. \tag{13}$$

5 结 论

(1)针对建筑废料内砖块质量分数的不确定性,笔者分析了再生骨料内砖块质量分

数为 0 ~ 30% 的再生混凝土抗冻性,对建筑废料中砖块质量分数为 30% 以下的再生混凝土的充分利用具有指导意义。

(2)笔者研究得出了总损伤变量 D 与应变的关系,总损伤变量随应变的增加呈“S”型曲线单调递增,“S”型曲线越平缓,混凝土的初始损伤变量 D_n 越大,其在损伤发展阶段积累较少的损伤即发生破坏,宏观表现为混凝土抵抗荷载的能力降低;再生骨料中砖块质量分数的增加会使混凝土的初始损伤变量 D_n 增加,证明砖块质量分数的增加会加快再生混凝土冻融循环后的损伤演化速度。

(3)通过分析再生骨料中砖块质量分数对初始损伤变量 D_n 的影响,得出了初始损伤变量 D_n 与冻融循环次数 n 及再生骨料中砖块质量分数 r 的关系。

参考文献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2021 (3): 8 - 22.
(National Bureau of Statistics. Statistical bulletin on national economic and social development of the People's Republic of China in 2022 [J]. China statistics, 2021 (3): 8 - 22.)
[2] CHEE L W, KIM H M, SOON P Y, et al. Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: a review [J]. Journal of cleaner production, 2018, 195:

- 226-239.
- [3] 靳惠怡. 中国建筑材料联合会推进建筑材料行业碳达峰、碳中和行动倡议书[J]. 中国建材, 2021(2): 21-23.
(JIN Huiyi. China construction materials federation initiative to promote carbon peaking and carbon neutral action in the construction materials industry [J]. China building materials, 2021(2): 21-23.)
 - [4] 张红. 依利用固废建设生态文明[J]. 混凝土世界, 2020(5): 8-11.
(ZHANG Hong. Legal utilization of solid waste to build ecological civilization [J]. Concrete world, 2020(5): 8-11.)
 - [5] 郭凯, 苗航, 周静海. 氧化石墨烯对再生混凝土气体渗透性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 692-698.
(GUO Kai, MIAO Hang, ZHOU Jinghai. Effect of graphene oxide on gas permeability of recycled concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(4): 692-698)
 - [6] 郭远新, 李秋义, 李倩倩, 等. 高品质再生粗骨料混凝土配合比优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(1): 19-25.
(GUO Yuanxin, LI Qiuyi, LI Qianqian, et al. Mix proportion optimization of high quality recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(1): 19-25.)
 - [7] HOSSAIN F, SHAHJALAL M, ISLAM K, et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber [J]. Construction and building materials, 2019, 225: 983-996.
 - [8] BELEN G F, FERNANDO M A, DIEGO C L, et al. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate [J]. Construction and building materials, 2011 (25): 2335-2342.
 - [9] AI-HAYDARI I S, MASOOD G G, MOHAMAD S A, et al. Stress-strain behavior of sustainable polyester concrete with different types of recycled aggregate [J]. Materials today: proceedings, 2021, 46(10): 5160-5166.
 - [10] 马昆林, 黄新宇, 胡明文, 等. 砖混再生粗骨料混凝土损伤本构关系[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 131-141.
(MA Kunlin, HUANG Xinyu, HU Mingwen, et al. Damage constitutive model of brick-concrete recycled coarse [J]. Journal of building materials, 2022, 25(2): 131-141.)
 - [11] 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 compression [J]. China civil engineering journal, 2015, 48(12): 23-33.)
 - [12] 胡魁, 韩森, 薛雪, 等. 建筑垃圾再生骨料砖矸分离设备的研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 172-177.
(HU Kui, HAN Sen, XUE Xue, et al. Research of separation between clay brick and concrete in construction waste recycled aggregate [J]. Highway engineering, 2016, 41(3): 172-177.)
 - [13] HU K, CHEN Y, NAZ F, et al. Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste [J]. Waste management, 2019, 85: 396-404.
 - [14] 孙骁晓, 郭小明. Lemaitre 损伤模型的两数值算法及其对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 387-392.
(SUN Xiaoxiao, GUO Xiaoming. Two numerical algorithms of Lemaitre damage model and the comparison [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2019, 47(4): 387-392.)
 - [15] 关斌, 牛荻涛, 王家滨, 等. 基于 Weibull 强度理论的混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. 混凝土, 2015(5): 5-9.
(GUAN Hu, NIU Ditao, WANG Jiabin, et al. Study of the freezing-thawing damage constitutive model of concrete based on Weibull's strength theory [J]. Concrete, 2015(5): 5-9.)
 - [16] 张广泰, 刘诗拓, 耿天娇, 等. 基于 Weibull 分布的冻融循环下纤维混凝土损伤模型[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12078-12084.
(ZHANG Guangtai, LIU Shituo, GENG Tianjiao, et al. On damage model of fiber concrete based on the Weibull distribution in freezing-thawing cycle [J]. Science technology and engineering, 2020, 20(29): 12078-12084.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)