

废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度 尺寸效应试验

周静海,康天蓓,王凤池,杨健男

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究再生骨料取代率、废弃纤维掺入量和混凝土强度等级对废弃纤维再生混凝土立方体试件劈裂抗拉强度的尺寸效应. 方法 对15组边长为100 mm、150 mm、200 mm的立方体试件进行劈裂抗拉试验,通过尺寸效应度评价各参数对尺寸效应的影响规律;采用最小二乘法,验证经典尺寸效应理论模型对废弃纤维再生混凝土的适用性. 结果 随着再生骨料取代率的增加,劈裂抗拉强度尺寸效应增加;随着废弃纤维掺入量的增加,劈裂抗拉强度的尺寸效应先减小后增加,当废弃纤维掺入量为0.12%时,尺寸效应现象较小;混凝土的强度等级越高,强度的尺寸效应现象越明显;两种经典尺寸效应理论试验数据的拟合相关系数介于0.946~0.999. 结论 废弃纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度存在尺寸效应现象,与普通混凝土随强度等级的变化规律一致,Bazant尺寸效应理论无切口情况修正和Carpinteri分形尺寸效应适用于废弃纤维再生混凝土尺寸效应的分析.

关键词 废弃纤维;再生混凝土;劈裂抗拉强度;尺寸效应

中图分类号 TU528.01

文献标志码 A

Experimental Study on Size Effect of Splitting Tensile Strength of Waste Fiber Recycled Concrete

ZHOU Jinghai, KANG Tianbei, WANG Fengchi, YANG Jiannan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In this paper, the influence of the strength grade, the replacement rate of recycled aggregates and the volume incorporation of waste fibers on the splitting tensile strength size effect of waste fiber recycled concrete were studied. A total of 15 sets of cube specimens with side lengths of 100 mm, 150 mm and 200 mm were subjected to splitting tensile tests and the effect of various design variables on the size effect were evaluated by the size effect degree. The applicability of the theoretical model of size effect on waste fiber recycled concrete is verified by the least square method. As the replacement rate of recycled aggregates increases, the size effect of splitting tensile

收稿日期:2018-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51678374)

作者简介:周静海(1965—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事再生混凝土材料等方面研究.

strength increases. With the increase of the volume incorporation of the waste fibers, the size effect of the splitting tensile strength decreases first and then increases. When the volume incorporation of waste fibers is 0. 12% ,the size effect is the smallest. The higher the strength grade of concrete is, the more obvious the size effect of strength is. The fitting correlation coefficients between the two classical size effect theory test datas between 0. 946 ~ 0. 999. The conclusion of this paper is that the splitting tensile strength of waste fiber recycled concrete has a size effect and is consistent with the change of strength grade of ordinary concrete. The Bazant size effect theory and Carpinteri fractal size effect are suitable for the analysis of the size effect of waste fiber recycled concrete.

Key words: waste fiber; recycled aggregates; splitting tensile strength; size effect

由于生态环境的恶化和城镇化进程的加快,再生混凝土材料一直是当前的研究热点^[1-3].再生混凝土作为一种环境友好型的绿色建筑材料,不仅解决了建筑垃圾处理的难题,还缓解了自然资源紧缺的现实状况.已有研究表明^[4-6],再生混凝土本身力学性能不如普通混凝土,但在再生混凝土中加入纤维可以显著改善这一缺陷.在再生混凝土加入废弃的聚丙烯纤维,不仅可以改善再生混凝土的力学性能^[7-10],还具有“以废制废”的意义.

废弃纤维再生混凝土作为一种脆性材料,强度的尺寸效应是其固有的一种特性.研究表明混凝土的力学性能受尺寸效应影响较大^[11-12],而劈裂抗拉强度是混凝土强度中的一个重要部分.赵军等^[13]通过研究得出边长为 100 mm 与 150 mm 的自密实混凝土试件的劈裂抗拉强度尺寸换算系数可取为 0. 85.钱觉时等^[14]分别对边长 50 mm、100 mm、150 mm、200 mm 的超高强钢纤维混凝土、引气高强混凝土、超高强混凝土、高强混凝土试件的弯拉强度尺寸效应进行了试验分析,得到了适用于后两者的弯拉强度尺寸效应理论经验公式. MALHOTRA V M^[15]采用

Φ100 mm×200 mm 和 Φ150 mm×300 mm 两种圆柱体试件测定抗拉强度,试验结果表明前者的抗拉强度约比后者提高约 7%. CARPINTERI A^[16]为解决存在于直接拉伸试验中的弯曲应力问题,自制了加载装置,并得到了完整的拉伸曲线,研究表明,抗拉强度尺寸效应现象明显,横截面宽为 50 mm 试件的强度为 4. 33 MPa,当尺寸增大为 400 mm 时抗拉强度仅为 3. 17 MPa. 目前对纤维再生混凝土的尺寸效应研究较少报道,基于此,笔者研究再生骨料取代率、废弃纤维体积掺入量和混凝土强度等级对废弃纤维再生混凝土尺寸效应的影响.同时验证经典尺寸效应理论对废弃纤维再生混凝土的适用性.

1 试 验

1.1 原材料

采用普通硅酸盐水泥 P. O 42. 5;细骨料采用细度模数为 2. 7 的天然河砂,属于中砂;粗骨料主要有两种,一种是天然碎石,另一种是原始强度为 C40 的梁经人工破碎而形成的再生粗骨料,再生骨料和天然骨料的力学性能见表 1.

表 1 粗骨料技术指标

Table 1 Technical indexes of coarse aggregates

骨料类型	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎指标/%	吸水率/%	骨料粒径/mm
天然骨料	2 691. 1	6. 4	1. 12	5 ~ 25
再生粗骨料	2 214. 3	16	4. 36	5 ~ 25

废弃纤维来自回收的丙纶地毯,由聚丙烯纤维编织而成,经过人工拆剪成长度为

19 mm的废弃纤维,吸水率小于1%,形态如图1所示. 试验用水来自沈阳建筑大学结构实验室的普通自来水.

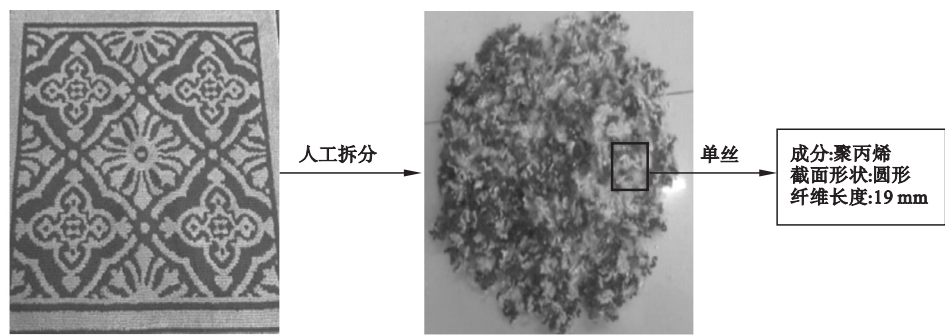


图1 废弃纤维

Fig.1 Waste fibers

1.2 配合比设计

试验共设计 100 mm、150 mm、200 mm 三种尺寸的立方体试件,强度等级分别为 C20、C30、C40. 为了研究再生骨料取代率的影响,设计废弃纤维取代率为 0 条件下,骨料取代率为 0、50%、100% 三种情况;为了探究废弃纤维体积掺入量的影响,设计再生骨料取代率为 50% 条件下,废弃纤维掺入量为 0、0.12%、0.16% 三种情况. 试验共计 15 组,每

组制作 3 个试件,共 45 个试件.

配制再生混凝土的用水量分为两部分^[2]:自由用水量和附加用水量. 当再生骨料取代率为 50% 时,加入附加用水量 10 kg/m³;当再生骨料取代率为 100% 时,加入附加用水量 20 kg/m³. 废弃纤维吸水率小于 1%,因此不考虑废弃纤维对混凝土配合比的影响. 试件的配合比见表 2.

表2 配合比设计

Table 2 The design of mixture ratio

编号	强度等级	水灰比	纤维掺入量/%	骨料取代率/%	材料单位体积用量/(kg·m ⁻³)					
					水泥	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	自由用水量	附加用水量
20NC	C20	0.58	0	0	319	645	1 251	0	185	0
20RC50	C20	0.58	0	50	319	645	626	626	185	10
20RC100	C20	0.58	0	100	319	645	0	1251	185	20
20FRC12-50	C20	0.58	0.12	50	319	645	626	626	185	0
20FRC16-50	C20	0.58	0.16	50	319	645	626	626	185	0
30NC	C30	0.54	0	0	352	650	1 208	0	190	0
30RC50	C30	0.54	0	50	352	650	604	604	190	10
30RC100	C30	0.54	0	100	352	650	0	1 208	190	20
30FRC12-50	C30	0.54	0.12	50	352	650	626	626	190	0
30FRC16-50	C30	0.54	0.16	50	352	650	626	626	190	0
40NC	C40	0.45	0	0	444	668	1 138	0	200	0
40RC50	C40	0.45	0	50	444	668	569	569	200	10
40RC100	C40	0.45	0	100	444	668	0	1138	200	20
40FRC12-50	C40	0.45	0.12	50	444	668	626	626	200	0
40FRC16-50	C40	0.45	0.16	50	444	668	626	626	200	0

1.3 试验方法

采用干拌法制备废弃纤维再生混凝土, 首先将水泥和砂子倒入搅拌机内搅拌至均匀, 将分散的废弃纤维均匀投放入搅拌机中搅拌 1 min, 加水继续搅拌 1 min 至水泥砂浆均匀, 随后加入再生骨料继续拌制 2~3 min, 使水泥砂浆充分包裹再生骨料, 即可出料盛入模具. 试件在混凝土养护室内进行养护, 温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 湿度为 95%, 养护至龄期 28 d 后进行劈裂抗拉强度试验.

劈裂抗拉试验按照规范《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002) 进行. 试验仪器采用 HYE-2000 型电液式恒

加载压力试验机, 加载速度控制在 0.05 MPa/s , 试验装置见图 2(a). 文献[17-18]研究表明, 试验过程中当垫条的宽度 b 与试件直径 D 的比值为 4% 时, 垫条对劈裂抗拉强度的影响很小甚至可以忽略不计. 试验所用垫条参数见表 3, 垫条摆放位置见图 2(b).

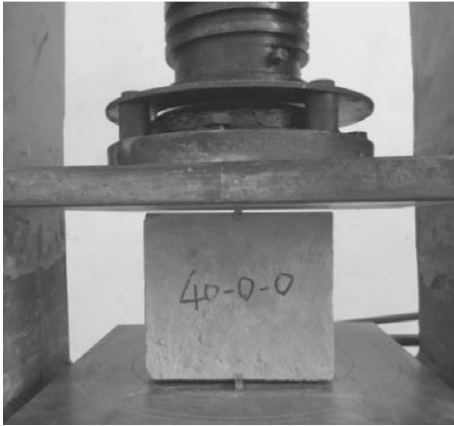
表 3 垫条尺寸

Table 3 The size of spacing strips

边长/mm	垫条断面尺寸/mm	$(b/D)/\%$
100	4×5	4
150	6×5	4
200	8×5	4



(a)压力机



(b)垫条摆放位置

图 2 劈裂抗拉强度试验装置

Fig. 2 Test device for splitting tensile strength

2 试验现象

普通混凝土在荷载达到极限承载力的 70% 左右时, 钢垫条上下方受局部压力位置会出现竖向微裂纹, 随着荷载的增大, 微裂缝继续延伸扩展, 最后形成贯通裂缝, 试件劈裂破坏时伴随清脆的响声, 破坏面位于上下垫条所在的平面区域. 从出现裂缝到试件破坏持续时间短, 表现出明显脆性特征.

再生混凝土的破坏发展过程与普通混凝土的破坏发展过程类似, 试件最初出现微裂缝是在极限承载的 60% 左右, 初始裂纹相比于普通混凝土明显变宽, 这是因为再生骨料

表面残留有老旧砂浆, 新旧砂浆粘结界面有许多缺陷, 会出现应力集中现象, 在这些区域会不断出现新裂纹. 从出现裂缝到试件劈裂破坏的持续时间变长, 破坏面多发生于再生骨料与砂浆界面处.

掺入废弃纤维的再生混凝土在加载到 70% 左右时, 钢垫条处受局部压力部位出现微裂纹, 继续加载, 裂纹发展缓慢, 废弃纤维对延缓再生混凝土破坏过程的作用显著, 与文献[19]所得结论相同. 同时, 废弃纤维的加入可以改变裂纹发展的路径, 废弃纤维再生混凝土的破坏形态并非像普通混凝土和再生混凝土一样上下贯穿, 裂纹较为竖直. 废弃

纤维体积掺入量越多,破坏时裂纹越不明显,裂纹发展得越曲折,并且试件破坏时完整性越好,相比于前两者脆性特征明显削弱.试件破坏形态如图3所示.

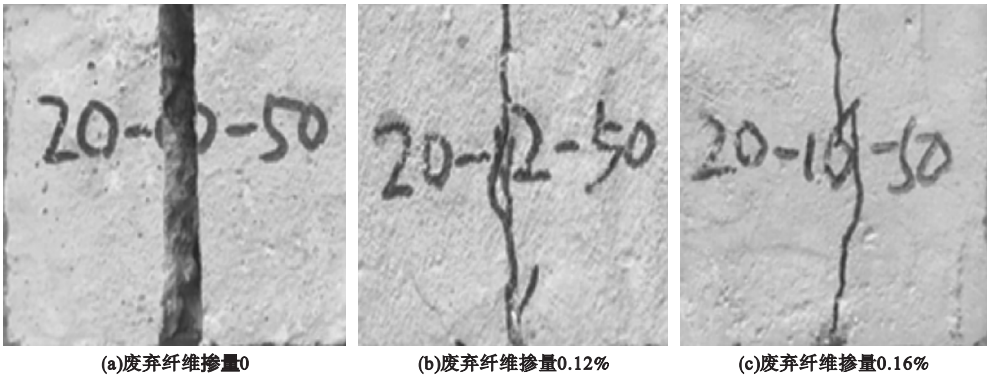


图3 不同废弃纤维体积掺量试件破坏形态对比

Fig. 3 Comparison of failure mode with different waste fibers volume content

3 劈裂抗拉强度尺寸效应分析

3.1 再生骨料取代率对尺寸效应的影响

《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)在各类型混凝土算术平均值的基础上,考虑工程实际对混凝土强度合格率的要求,即95%的强度合格率,采用尺寸换算系数对混凝土的尺寸效应进行评价.但文献[11]指出,我国的规范对尺寸效应的考虑过于保守,采用换算系数进行评价,当混凝土强度较低时,规范建议的强度换算系数较试验结果偏高,而当混凝土强度较高时,规范建议的换算系数较试验结果偏低.因此,引入尺寸效应度的概念对各类型试件的不同尺寸之间的尺寸效应程度进行定量分析,定义边长为100 mm的立方

体试件为基准试件,其他非基准尺寸试件与基准试件劈裂抗拉强度的差值占基准试件的百分比为尺寸效应度,更加直观地分析废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度的尺寸效应规律.

劈裂抗拉强度尺寸效应度 α 的计算如下:

$$\alpha_{150} = \frac{f_{cu,100} - f_{cu,150}}{f_{cu,100}} \times 100\% . \tag{1}$$

$$\alpha_{200} = \frac{f_{cu,100} - f_{cu,200}}{f_{cu,100}} \times 100\% . \tag{2}$$

式中: $f_{cu,100}$ 、 $f_{cu,150}$ 、 $f_{cu,200}$ 分别表示100 mm、150 mm、200 mm立方体试件抗压强度值.

尺寸效应度 α 越大,说明立方体劈裂抗拉强度的尺寸效应越明显.不同再生骨料取代率试件的尺寸效应如图4所示.

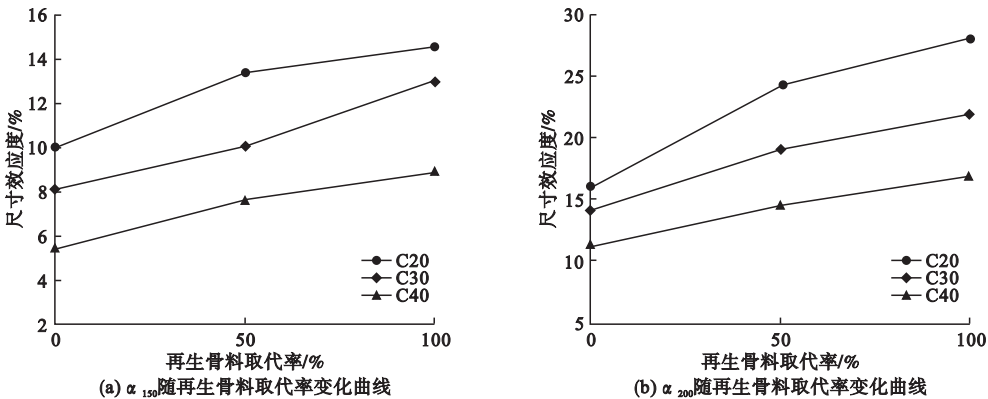


图4 尺寸效应度与再生骨料取代率关系

Fig. 4 The relationship between size effect degree and recycled aggregates replacement rate

由图4可以看出,各个类型混凝土试件的劈裂抗拉强度尺寸效应度 α_{150} 和 α_{200} 随再生骨料取代率增加而变大.究其原因,再生骨料内部存在大量的微裂缝和缺陷,水泥砂浆与再生骨料界面间的粘结力差,这种问题会随再生骨料取代率的增加和试件尺寸变大而更明显.进行劈裂抗拉试验时,在上下钢垫条作用下,拉应力区主要在钢条作用线所在平面内,应力区内部缺陷处极易发生开裂,随着试件尺寸的变大,缺陷变多,劈裂抗拉强度下降得越大,再生骨料取代率的增加从根本上增加了缺陷数量,导致再生混凝土呈现出的尺寸效应现象越显著.

3.2 废弃纤维掺入量对尺寸效应影响

尺寸效应度与废弃纤维掺入量的关系如

图5所示.由图可以看出,各强度等级下废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉试件的尺寸效应度 α_{150} 和 α_{200} 随废弃纤维掺入量的增加呈现出先下降后上升的趋势.这是由于再生混凝土中加入了废弃纤维可以缓解内部结构产生的应力集中,横亘于裂缝的无数条废弃纤维可以抑制裂缝继续发展,分担结构内部拉应力,当裂纹两端承受拉力与废弃纤维伸展方向平行时,这部分力就可以通过砂浆基体传递给纤维发挥桥接作用,弥补缺陷造成的影响,减缓劈裂抗拉强度损失率,尺寸效应现象变小.但是当废弃纤维体积掺入量过大时,纤维在制备过程中,不易分散从而出现抱团现象,在混凝土内部形成薄弱区,反而提高劈裂抗拉强度的下降速度,尺寸效应现象变明显.

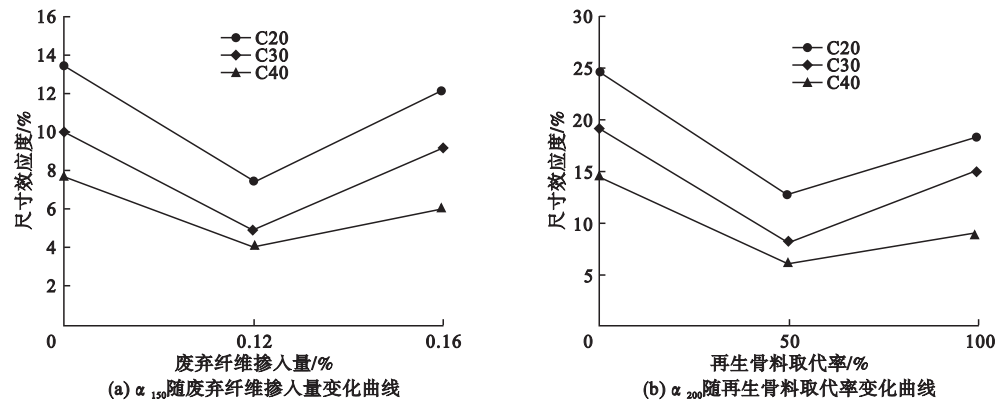


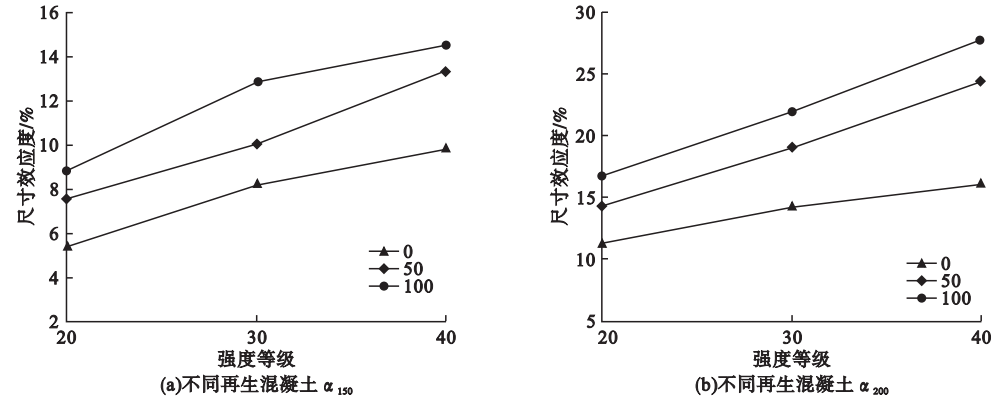
图5 尺寸效应度与废弃纤维掺入量关系

Fig. 5 The relationship between size effect degree and waste fibers volume content

3.3 强度等级对尺寸效应影响

尺寸效应度与强度等级的关系如图6所示.

劈裂抗拉强度的尺寸效应度 α_{150} 和 α_{200} 随强度等级增加而变大.



(a)不同再生混凝土 α_{150}

(b)不同再生混凝土 α_{200}

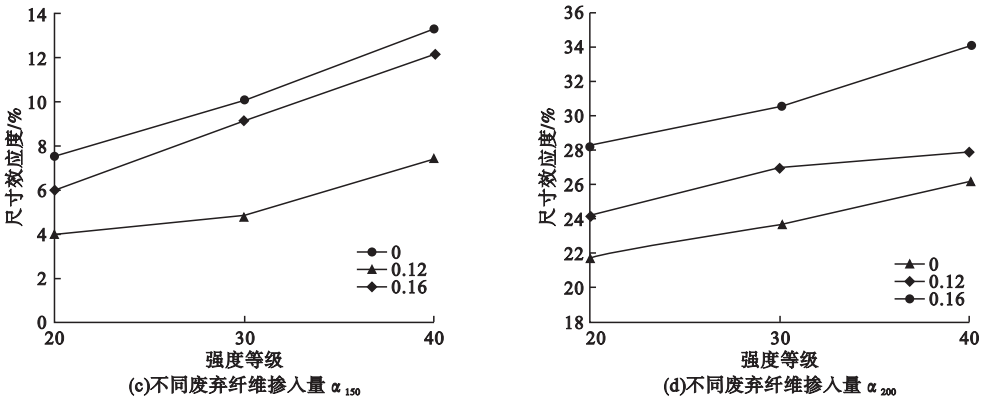


图 6 尺寸效应度与强度关系

Fig. 6 The relationship between size effect degree and strength

由图 6(a)、(b)可知, α_{150} 在再生骨料取代率不同时, 与强度的变化趋势一致, 而 α_{200} 在再生骨料取代率为 50% 和 100% 时, 与强度等级的变化趋势更明显, 强度等级 C40 分别较 C20、C30 增加 41%、21.79% 和 39.57%、21.14%。由图 6(c)(d)可知, 当废弃纤维体积掺入量为 0 和 0.16% 时, 尺寸效应较废弃纤维体积掺入量为 0.12% 时明显, 尺寸效应度 α_{150} 和 α_{200} 随着强度等级的增加而增加。这主要是因为当强度等级增加时, 混凝土的基体强度与骨料强度差异小, 在劈裂抗拉试验中相比于强度等级较低的混凝土, 裂缝会直接劈裂骨料而不是沿着界面延伸, 所以释放能量更大, 强度下降更快, 因此尺寸效应也就更明显。再生混凝土与废弃纤维再生混凝土的尺寸效应与强度等级的变化趋势与普通混凝土相同。

4 尺寸效应理论模型适用性

尺寸效应理论模型主要有 Weibull 统计尺寸效应理论、Bazant 尺寸效应理论和 Carpinteri 多重分形尺寸效应理论。文献[12]研究表明, Weibull 统计尺寸效应理论不适用于混凝土这种复合材料, 当尺寸范围在 1:20 的范围内, 可以应用 Bazant 尺寸效应理论, 当尺寸范围在 1:10 的范围内, 可以应用 Carpinteri 分形尺寸效应理论。因此, 笔者主要研究废弃纤维再生混凝土对 Bazant 尺寸

效应理论和 Carpinteri 分形尺寸效应理论两种尺寸效应的适用性。

Bazant 尺寸效应按照式(3)进行计算:

$$\sigma_{NA} = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \tag{3}$$

根据式(3), 对无切口情况下结构失效名义强度 σ_{NB} 进行定义, 引入尺寸极大时的名义强度 f_r^∞ , 则:

$$\sigma_{NB} = f_r^\infty \left(1 + \frac{D}{D_0} \right) \tag{4}$$

Carpinteri 尺寸效应理论利用式(5)进行计算:

$$\sigma_{NC} = f_t \sqrt{1 + \frac{l_{ch}}{D}} \tag{5}$$

式中: σ_{NA} 、 σ_{NB} 、 σ_{NC} 分别为不同尺寸模型的名义强度; B 为无量纲常数; f_t 为劈裂抗拉强度; D 为尺寸极大结构特征尺寸; D_0 为试件边长; l_{ch} 为结构的特征尺寸与组成结构的最大异质相的比值, 也就是与混凝土最大骨料粒径的比值。

采用最小二乘法的原理将试验数据和三个理论模型进行拟合, 结果见图 7。由图 7 拟合结果可知, 普通混凝土、再生混凝土、废弃纤维再生混凝土的劈裂抗拉试验数据的拟合与尺寸模型拟合的吻合程度较好, 相关系数都在 0.946~0.999, 说明三种理论尺寸模型都在一定程度上适用于废弃纤维再生混凝土。Bazant 尺寸效应拟合曲线在尺寸

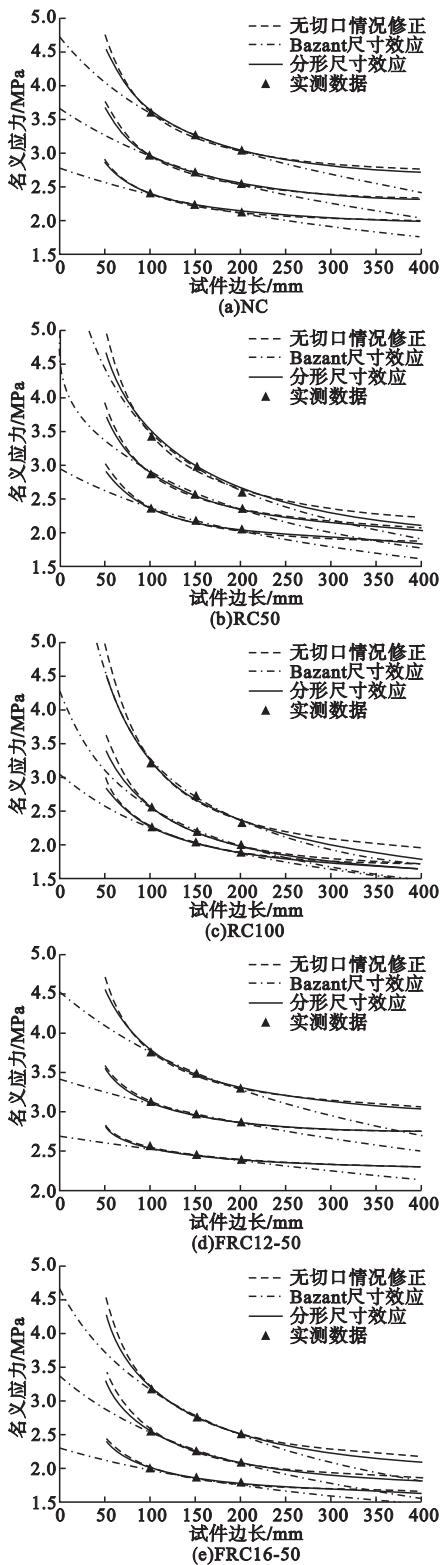


图7 理论模型拟合曲线与试验数据对比

Fig.7 Comparison between theoretical model fitting curves and experimental data

大于 300 mm 后,下降势头仍十分明显,与实际情况不符.而 Bazant 尺寸效应理论无切口情况修正和 Carpinteri 分形尺寸效应理论拟合曲线则出现平缓趋势,且变化趋势更接近于试验数据,更适合于废弃纤维再生混凝土的尺寸效应的分析.

5 结 论

(1)普通混凝土与再生混凝土的破坏形态基本相似,在劈拉试验中再生混凝土出现初始裂纹早于普通混凝土,多在新旧界面处破坏,再生混凝土的劈裂抗拉强度随再生骨料取代率增大而减小.废弃纤维再生混凝土在极限承载力为70%时出现初始裂纹,破坏时裂纹曲折度高且不明显,废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度随废弃纤维掺入量的增大表现出先变大后减小的趋势,废弃纤维掺入量为0.12%时,劈裂抗拉强度最大.

(2)废弃纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度存在尺寸效应现象,随着再生骨料取代率的增加,尺寸效应现象变得明显;废弃纤维掺入量增加,尺寸效应现象表现出先减小后增大的趋势;混凝土的强度等级越高,强度的尺寸效应现象越明显.

(3)Bazant 尺寸效应理论、Bazant 尺寸效应理论无切口情况修正和多重分形尺寸效应理论对劈裂抗拉试验数据的拟合相关系数介于0.946~0.999,拟合良好,其中 Bazant 尺寸效应理论无切口情况修正和 Carpinteri 多重分形尺寸效应理论预测结果吻合良好,更适用于废弃纤维再生混凝土尺寸效应的分析.

参考文献

[1] RICHARDSON A. Recycled materials in concrete[M]. London:Springer,2013.
[2] 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.)

- [3] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011) [J]. Construction & building materials, 2012, 31(6): 364—383.
- [4] OMARY S, GHORBEL E, WARDEH G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concrete properties [J]. Construction & building materials, 2016, 108: 163—174.
- [5] 周静海, 何海进, 孟宪宏, 等. 再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 464—468.
(ZHOU Jinghai, HE Haijin, MENG Xianhong, et al. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(3): 464—468.)
- [6] ISMAIL S, KWAN W H, RAMLI M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions [J]. Construction & building materials, 2017, 155: 296—306.
- [7] VAISHALI G G, RAO H S. Strength and permeability characteristics of fiber reinforced high performance concrete with recycled aggregates [J]. Asian journal of civil engineering, 2012, 13(1): 55—78.
- [8] CARNEIRO J A, LIMA P R L, LEITE M B, et al. Compressive stress - strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete [J]. Cement & concrete composites, 2014, 46(4): 65—72.
- [9] 周静海, 张东, 杨永生. 废弃纤维再生混凝土梁受弯性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(2): 290—296.
(ZHOU Jinghai, ZHANG Dong, YANG Yongsheng. Test study on flexural properties of waste fiber recycled concrete beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(2): 290—296.)
- [10] 周静海, 康天蓓, 王凤池, 等. 废弃纤维再生混凝土框架中柱节点抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(2): 235—242.
(ZHOU Jinghai, KANG Tianbei, WANG Fengchi, et al. Experimental study on the seismic behaviors of wasted fiber recycled concrete frame joints [J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(2): 235—242.)
- [11] 苏捷, 方志. 不同骨料组分混凝土立方体抗压强度尺寸效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 152—157.
(SU Jie, FANG Zhi. Experimental study on impact of aggregate mixture on dimensional effect of concrete cubic compressive strength [J]. Journal of building structures, 2014, 35(2): 152—157.)
- [12] 黄海燕, 张子明. 混凝土的统计尺寸效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 291—294.
(HUANG Haiyang, ZHANG Ziming. Statistical size effect of concrete [J]. Journal of Hohai university (natural science), 2004, 32(3): 291—294.)
- [13] 赵军, 高丹盈, 朱海堂. 钢纤维高强混凝土抗压性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2005(1): 24—27.
(ZHAO Jun, GAO Danying, ZHU Haitang. Experimental study on compressive properties of steel fiber reinforced high strength concrete [J]. New building materials, 2005(1): 24—27.)
- [14] 钱觉时, 杨再富, 黄煜镔, 等. 高强混凝土强度尺寸效应的试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 21(1): 1—4.
(QIAN Jueshi, YANG Zaifu, HUANG Yibin, et al. Experimental study on strength size effect of high strength concrete [J]. Journal of Huazhong university of science and technology (urban science edition), 2004, 21(1): 1—4.)
- [15] MALHOTRA V M. Effect of specimen size on tensile strength of concrete [J]. ACI journal, 1970, 66(6): 179—188.
- [16] CARPINTERI A. Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: Two different explanations based on fracture mechanics [J]. International journal of solids & structures, 1989, 25(4): 407—429.
- [17] ROCCO C, GUINEA G V, PLANAS J, et al. Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view [J]. Cement & concrete research, 2001, 31(1): 73—82.
- [18] TANG T. Effects of load-distributed width on split tension on unnotched and notched cylindrical specimens [J]. Journal of testing & evaluation, 1994, 22(5): 401—409.
- [19] 韩嵘, 赵顺波, 曲福来. 钢纤维混凝土抗拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 63—67.
(HAN Rong, ZHAO Shunbo, QU Fulai. Experimental study on the tensile performance of steel fiber reinforced concrete [J]. China civil engineering journal, 2006, 39(11): 63—67.)