

不同类型混凝土弯曲强度尺寸效应

曹擎宇¹, 孙伟², 郝挺宇¹, 苏波¹

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 东南大学材料科学与工程学院, 南京 211189)

摘要: 基于混凝土脆性的评价指标, 采用 Bazant 提出的基于能量释放的尺寸效应律的方法, 以普通混凝土、粉煤灰混凝土、轻骨料混凝土、纤维混凝土和聚合物改性混凝土为样本, 对其弯曲强度的尺寸效应进行研究, 定量表征不同类型混凝土的脆性。研究结果表明: Bazant 提出的尺寸效应律适用于不同种类混凝土的弯曲强度的尺寸效应评价; 从尺寸效应律曲线分析可知, 轻骨料混凝土比其他混凝土呈现明显的脆性断裂行为, 而纤维混凝土和聚合物改性混凝土的脆性断裂行为不明显, 粉煤灰对于混凝土脆性的改善也具有一定的作用; 线性断裂理论在一定尺寸范围内比非线性断裂理论更适用于混凝土断裂行为的评价。

关键词: 轻骨料; 钢纤维; 聚合物; 尺寸效应; 弯曲强度; 脆性

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)09-1311-05

Size Effect on Flexural Strength of Various Concrete

CAO Qing-yu¹, SUN Wei², HAO Ting-yu¹, SU Bo¹

(1. Central Research Institute of Building and Construction, MCC, Beijing 100088, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Based on brittleness evaluating index of concrete, the normal concrete, fly ash concrete, lightweight aggregate concrete, fiber concrete and polymer-modified concrete were selected as sample, and the size effect on flexural strength by the method of the Bazant's size effect law was presented to show the brittleness degree of concrete. The Bazant's size effect law gave a very good fit to the flexural strength of concrete measured from beams of different sizes. As observed in the size effect curves, the fracture behavior of lightweight concrete seemed more brittle than that of the other HPC, and fiber concrete and polymer-modified concrete showed less brittle than normal concrete, moreover, fly ash was less benefit for brittle decreased. Linear elastic fracture mechanics may still be less applicable to concrete in the normal size range than nonlinear fracture mechanics.

Key words: lightweight aggregate; steel fiber; polymer; size effect; flexural strength; brittleness

混凝土的力学性能随结构几何尺寸的变化而变化的现象即混凝土的尺寸效应,它是准脆性材料的固有特征。研究表明,混凝土的断裂行为证实了强度尺寸效应与裂缝尖端的断裂过程区密切相关^[1-3]。目前,国际上常采用非线性断裂力学模型、

虚拟裂缝模型、钝带裂缝模型和双参数模型等用于混凝土强度尺寸效应的分析与预测^[1-4]。其中 Bazant 提出的基于能量释放的尺寸效应律在对混凝土弯曲强度、劈裂抗拉强度、扭转强度尺寸效应的分析中被广泛应用^[5-6]。

收稿日期: 2011-11-16.

基金项目: 铁道部科技研究开发计划资助项目(2010GCKY02); 中冶工程技术中心研发资助项目(0032012001)。

作者简介: 曹擎宇(1982—),男,工程师,主要从事先进水泥基复合材料方面的研究, E-mail: acher0@126.com.

通信作者: 孙伟(1935—),女,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事先进水泥基复合材料和混凝土结构服役特性方面的研究, E-mail: sunwei@seu.edu.cn.

随着混凝土技术的发展,高性能混凝土在建筑工程中的应用日益广泛,高性能混凝土在保证混凝土强度的基础上,对混凝土耐久性和韧性提出了更高的要求,而混凝土强度尺寸效应即是混凝土脆性的反映,混凝土脆性越大,强度尺寸效应越明显^[7-8]. 本文对普通混凝土、粉煤灰混凝土、轻骨料混凝土、纤维混凝土和聚合物改性混凝土的弯曲强度尺寸效应行为进行实验研究.

1 实验

1.1 原材料、配合比设计及试件准备

水泥采用 P·II52.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰为 II 级,烧失量为 9.8%;砂为中粗河砂,细度模数 2.6;石子为破碎卵石,粒径范围 5~15 mm;压碎指标 5.3%,堆积密度 1.480 t/m³;轻骨料采用页岩陶粒,堆积密度 940 kg/m³,筒压强度 7.9 MPa,粒径范围 5~15 mm;纤维选用钢纤维和纤维素纤维,其物理力学性质见表 1;聚合物乳液选用苯乙烯-丙烯酸酯共聚物,玻璃化温度为 -10℃,最低成膜温度为 0℃;外加剂选用 FOX-8H 高性能分散剂,减水率 ≥ 30%,用量根据新拌混凝土流动性控制在胶凝材料质量的 0.5%~0.8%.

实验选用混凝土水胶比为 0.32,除基准混凝土外,其余各组中均使用粉煤灰掺量 30% 等质量取代水泥,钢纤维和纤维素纤维的体积掺量分别为 0.8% 和 0.1%,苯乙烯-丙烯酸酯共聚物的掺量为胶凝材料质量的 5%,各组混凝土具体配合比见表 2.

表 1 纤维的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical property of fiber

纤维	抗拉强度/ GPa	弹性模量/ GPa	极限 伸长率/%
钢纤维	3.20	200.0	3.8
纤维素纤维	0.55	8.5	3.5

各组混凝土搅拌过程的投料顺序为石子、砂、胶凝材料先搅拌 30 s,然后放入水搅拌 3 min 后浇筑成型.对于纤维素纤维混凝土,成型时投料顺序为石子、砂、纤维素纤维先搅拌 30 s,然后放入胶凝材料搅拌 30 s,最后放入水搅拌 3 min.试件成型结束后,先自然养护 1 d 后拆模,然后放入养护室进行标准养护(温度 20 ± 2℃,湿度 > 90%) 60 d 后取出进行实验.本文以 PC-1 为基准混凝土.

表 2 混凝土配合比设计

Table 2 Concrete mix design

编号	水泥	粉煤灰	水	砂	碎石	页岩陶粒	钢纤维	纤维素纤维	聚合物乳液
PC-1	450		140	720	1 050				
PC-2	315	135	140	680		550			
PC-3	315	135	140	720	1 050				
PC-4	315	135	140	720	1 050		45		
PC-5	315	135	140	720	1 050			1.1	
PC-6	315	135	140	720	1 050				25

1.2 测试方法

1.2.1 混凝土试件尺寸

每组混凝土均成型 4 个尺寸的试件,试件高度分别为 40、100、200、400 mm,由于试件的宽度对混凝土断裂行为影响不大^[9],将高度为 200 mm 和 400 mm 的混凝土试件的宽度均设计为 150 mm,切口的高度为试件高度的 0.3 倍,每组混凝土试件的尺寸、跨度和切口高度如表 3 所示.

1.2.2 实验设计

实验采用三点弯曲梁法,如图 1 所示.实验设备为 ONINORM 2000 电液伺服万能电子试验机.按照《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005)的要求进行实验,采用位移控制,加载速率为 0.1 mm/min.

表 3 每组混凝土试件尺寸

Table 3 Size specimens for each group

试件尺寸(高 × 宽 × 长) / mm	跨度 L / mm	预置裂缝 高度 / mm
40 × 40 × 160	120	12
100 × 100 × 400	300	30
200 × 150 × 800	600	60
400 × 150 × 1 600	1 200	120

1.3 数据分析理论方法

Bazant 提出的带切口的几何相似混凝土试件的基于能量释放的尺寸效应律如图 2 所示.

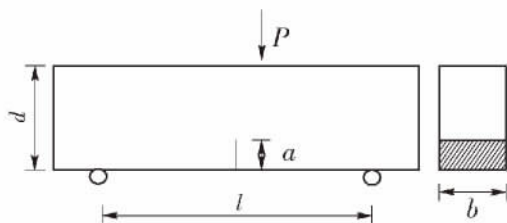


图 1 三点弯曲梁法加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-points beam method

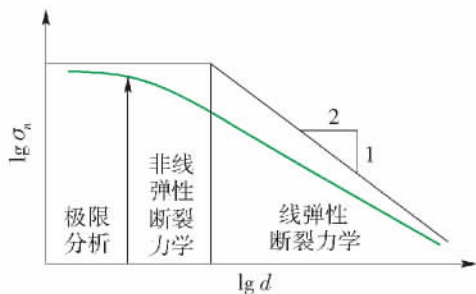


图 2 Bazant 提出的尺寸效应律

Fig. 2 Size effect law proposed by Bazant

名义强度与试件尺寸的关系表达式为

$$\sigma_n = \frac{Bf_t'}{\sqrt{1+\beta}}, \beta = \frac{d}{d_0} \quad (1)$$

式中: f_t' 为材料的抗拉强度; β 为材料脆性指数, 当 $\beta < 0.1$ 时, 材料是延性的, 名义强度可认为接近塑性或屈服极限, 但当 $\beta > 10$ 时, 材料是脆性的, 名义强度可用线弹性断裂理论进行预测. B 和 d_0 为经验常数, 相似结构的名义强度定义为

$$\sigma_n = c_n \frac{P_u}{bd} \quad (2)$$

式中: c_n 为系数; P_u 为试件破坏荷载; b 为试件宽度; d 为试件的特征尺寸, 一般认为是梁的高度.

为了方便使用尺寸效应律, 可将式 (1) 转化为

$$\left(\frac{f_t'}{\sigma_n}\right)^2 = \frac{1}{d_0 B^2} d + \frac{1}{B^2} \quad (3)$$

将实验数据采用线性回归的方式拟合成 $Y = AX + C$ 的形式, 其中 $X = d$, $Y = (f_t'/\sigma_n)^2$, 然后可根据

$$B = \frac{1}{\sqrt{C}}, d_0 = \frac{C}{A} \quad (4)$$

计算参数 B 和 d_0 .

2 结果与讨论

2.1 基本力学性能

各组混凝土力学强度值如表 4 所示. 比较基准混凝土, 当粉煤灰等质量取代水泥后, 混凝土抗拉强

度和劈裂抗拉强度均提高 10%, 而轻骨料混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度则下降 22%; 纤维混凝土抗压强度略有升高, 但劈裂抗拉强度有较大幅度的提高, 其中钢纤维混凝土提高近 3 倍, 而聚合物改性混凝土的抗压强度有一定的下降, 但劈裂抗拉强度提高近 60%. 拉压比可以反映混凝土的脆性, 拉压比越小, 混凝土脆性越大. 从表 4 中可知, 混凝土中掺加粉煤灰、纤维和聚合物都会降低混凝土的脆性, 其中纤维和聚合物的效果最为明显, 而轻骨料取代普通骨料则增大了混凝土的脆性.

表 4 各组混凝土基本力学性能指标

Table 4 Basic strength index for each group

试件编号	抗压强度 / MPa	劈裂抗拉强度 / MPa	拉压比 / %
PC-1	68.2	3.64	5.49
PC-2	73.4	4.07	5.62
PC-3	52.7	2.78	5.26
PC-4	74.8	10.84	14.49
PC-5	70.5	5.08	7.21
PC-6	63.8	5.86	9.18

2.2 弯曲强度

采用三点弯曲梁法实验的带有切口的混凝土梁的名义弯曲强度 σ_n 可采用

$$\sigma_n = \frac{3Pl}{2bd^2} \quad (5)$$

计算. 式中: P 为试件的破坏荷载; l 、 b 、 d 分别为试件的跨度、宽度和高度. 各组混凝土不同尺寸梁的名义应力如图 3 所示. 实验结果表明: 各组混凝土的名义弯曲强度均随着试件尺寸的增大而减小且减小幅度逐渐降低, 并有趋向某一常数的趋势, 但轻骨料混凝土这一趋势并不明显, 即当试件尺寸为 100 ~ 200 mm 和 200 ~ 400 mm 时, 名义弯曲强度分别减小

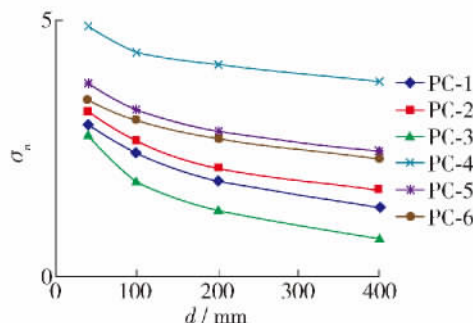


图 3 混凝土梁的尺寸对名义弯曲强度的影响

Fig. 3 Influence of beam size on nominal flexural strength

29%和27% ,而基准混凝土相应的减小率仅为15%和12% ,掺加粉煤灰后这个值变为13%和8% ;而对于聚合物改性混凝土和纤维混凝土在[100 400]减小量基本相同且在试件尺寸达到200 mm后将逐渐趋向一稳定值 ,钢纤维混凝土趋势最为明显。

总之 ,混凝土作为准脆性材料均具有尺寸效应 ,但轻骨料混凝土的弯曲强度尺寸效应最为明显 ,这

将导致在大尺度结构中其承载能力大幅度减小 ;普通混凝土次之 ,掺加粉煤灰后有所改善但效果并不明显 ;纤维混凝土和聚合物改性混凝土的尺寸效应行为最不明显 ,尤其是钢纤维混凝土。

为了评价尺寸效应律 ,对名义弯曲强度进行线性拟合 ,使用劈裂抗拉强度 f_{ts} 代替混凝土抗拉强度 f_t 线性回归方程如图4所示。

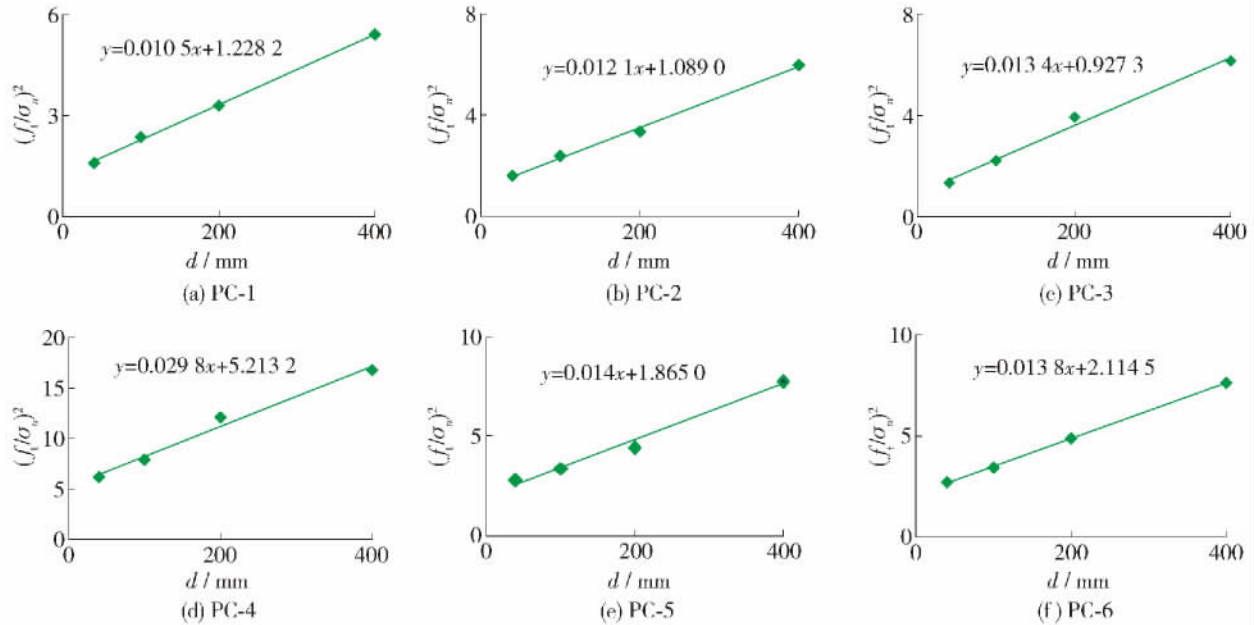


图4 各组混凝土尺寸效应律回归曲线

Fig. 4 Linear regression for determining constants in size effect law

由上述线性回归方程 ,依照式(4)计算参数 C 、 A 、 B ,代入尺寸效应律表达式(1) ,即可得到各组混凝土的弯曲强度的尺寸效应律 ,见表5。

将各组混凝土的尺寸效应律分别以 $X = \log(\sigma_n / (Bf_t))$ 和 $Y = \log d$ 绘图 ,如图5所示。图中结果显示 ,各组混凝土的弯曲强度尺寸效应律均可用Bazant提出的基于能量释放的尺寸效应律表达。

尺寸效应律曲线分为2个部分 ,即小尺寸范围内为稳定常数 ,可采用极限理论或非线弹性断裂力学理论进行分析 ,在较大尺寸范围内为斜率 $-1/2$ 的直线(见图3) ,可用线弹性断裂力学理论进行分析。

尺寸效应律曲线下降越陡 ,即混凝土脆性越大 ,从图5可明显看出 ,轻骨料混凝土尺寸效应律在试件尺寸超过100 mm后 ,与其他混凝土相比明显变陡 ,即其脆性最大 ;而纤维混凝土 ,尤其是钢纤维混凝土和聚合物改性混凝土曲线平缓 ,即其脆性较小。

表5 各组混凝土弯曲强度尺寸效应律表达式

Table 5 Size effect law equations for each group

编号	B	d_0 /mm	尺寸效应律表达式
PC-1	0.90	116.9	$\sigma_n = \frac{0.90f_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{116.9}}}$
PC-2	0.96	90.2	$\sigma_n = \frac{0.96f_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{90.2}}}$
PC-3	1.04	69.2	$\sigma_n = \frac{1.04f_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{69.2}}}$
PC-4	0.44	174.9	$\sigma_n = \frac{0.44f_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{174.9}}}$
PC-5	0.73	133.2	$\sigma_n = \frac{0.73f_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{133.2}}}$
PC-6	0.47	153.2	$\sigma_n = \frac{0.47f_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{153.2}}}$

由此可见,粉煤灰对混凝土脆性有一定的改善作用,但效果并不明显。

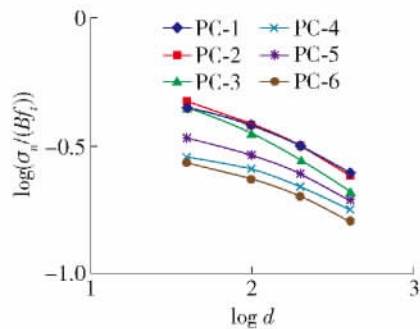


图5 不同混凝土弯曲强度尺寸效应律

Fig.5 Size effect law of flexural strength for different concrete

3 结论

1) Bazant 提出的基于能量释放的尺寸效应律可以很好地解释不同类型混凝土的弯曲强度尺寸效应行为。

2) 轻骨料混凝土的断裂过程呈现出明显的脆性,而钢纤维混凝土和聚合物改性混凝土的断裂过程中脆性得到明显改善。

3) 线弹性断裂理论在一定尺寸范围内适用于混凝土的断裂行为的分析。

4) 从改善混凝土脆性的角度出发,掺加纤维和聚合物的效果最为明显,而粉煤灰具有一定的改善作用,但效果不明显。

参考文献:

[1] MIHASHI H, OKAMURA H, BAZANT Z P. Size effect in

concrete structure [M]. London: E&FN Spon, 1994: 231-233.

[2] FERRETTI Daniele, BAŽANT Zpeněk P. Stability of ancient masonry towers: moisture diffusion, carbonation and size effect [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1379-1388.

[3] LANAS J, ALVAREZ J I. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 1867-1876.

[4] KARIHALOO B L, ABDALLA H M, XIAO Q Z. Deterministic size effect in the strength of cracked concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(2): 171-198.

[5] ZHOU F P, BALENDRAN R V, JEARY A P. Size effect on flexural, splitting tensile, and torsional strength of high-strength concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(10): 1725-1736.

[6] JENQ Y S, SHAH S P. Mixed-mode fracture of concrete [J]. International Journal of Fracture, 1988, 36(9): 1624-1632.

[7] 徐定华,徐敏. 混凝土材料学概论[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 87-92.

[8] 冯乃谦,邢峰. 高性能混凝土[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 134-136.

[9] 吴智敏,赵国藩,徐世烺. 大尺寸混凝土试件的断裂韧度[J]. 水利学报, 1997(6): 67-70, 76.

WU Zhi-min, ZHAO Guo-fan, XU Shi-lang. Fracture toughness of large-scale concrete specimens [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(6): 67-70, 76. (in Chinese)

(责任编辑 梁洁)