

自密实轻骨料混凝土断裂全过程分析

吴熙¹, 范兴朗², 吴智敏¹

(1. 大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:为研究自密实轻骨料混凝土的断裂特性,引入以起裂断裂韧度为参数的裂缝扩展准则,采用数值方法分析了自密实轻骨料混凝土三点弯曲梁裂缝扩展的全过程,得到了不同缝高比的自密实轻骨料混凝土梁在三点荷载下的荷载-裂缝口张开位移曲线,并根据裂缝扩展准则,计算了自密实轻骨料混凝土的断裂过程区长度和裂缝扩展阻力曲线。结果表明:试验和计算的荷载-裂缝口张开位移曲线吻合良好,验证了裂缝扩展准则的正确性;试验断裂过程区长度随着裂缝增长先增大,达到完整断裂过程区长度后减小;自密实轻骨料混凝土的裂缝阻力随着裂缝长度增加而不断增大,初始缝高比对裂缝扩展阻力曲线数值和形状的影响并不明显。

关键词:自密实轻骨料混凝土;三点弯曲梁;断裂过程区;裂缝扩展阻力曲线

中图分类号: TU528.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)06-0036-04

Analysis of crack propagation in self-compacting lightweight concrete//WU Xi¹, FAN Xinglang², WU Zhimin¹
(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to study the fracture characteristics of self-compacting lightweight concrete (SCLC), the crack propagation criterion, which uses initial cracking toughness as the main parameter is used to numerically analyze the complete process of crack propagation in SCLC three-point bending beam. The criterion was verified by the reasonable agreement between calculated and experimental load-crack mouth opening displacement. According to the criterion, the length of fracture process zone (FPZ) and K_R -curves of SCLC can be obtained. The results show that FPZ length increases with the crack extension and decreases after the full FPZ length. K_R of SCLC specimens increases as the crack length increases and K_R -curves of SCLC specimens, with different initial crack length ratio, shows insignificant differences in terms of shape and value.

Key words: self-compacting lightweight concrete; three-point bending beam; fracture process zone; K_R -curves

自密实轻骨料混凝土是在自密实混凝土和轻骨料混凝土的基础上发展起来的一种新型混凝土。自密实轻骨料混凝土可自密实成型,能减小施工难度,同时表观密度小,轻质高强,近年来已受到学者的广泛关注。由于对自密实轻骨料混凝土有较高的工作性能要求,配合比和工作性能是当今研究自密实轻骨料混凝土的重点^[1-4],而对于自密实轻骨料混凝土的断裂行为研究较少。

准确描述自密实轻骨料混凝土裂缝发展变化是提高自密实轻骨料混凝土断裂性能的基础。本文根据裂缝扩展准则,描述了自密实轻骨料混凝土的断裂全过程,得到了不同初始缝高比的自密实轻骨料三点弯曲梁的荷载-裂缝口张开位移曲线,并将计算

结果和试验结果进行比较,同时计算了三点弯曲梁在裂缝发展过程中断裂过程区长度以及基于黏聚力的裂缝扩展阻力曲线。

1 裂缝扩展准则

最早判断材料断裂的准则是在线弹性断裂力学基础上由 Irwin 提出的^[5]。考虑到混凝土裂缝前端的断裂过程区引起的非线性,线弹性断裂力学的准则并不能直接运用于混凝土^[6]。为了准确描述混凝土断裂过程,徐世烺等^[7-11]引入起裂的概念,采用应力强度因子,提出了基于虚拟裂缝模型的裂缝扩展准则;其中,Dong 等^[8-10]认为,当外力引起的应力强度因子和黏聚力引起的应力强度因子的差值达到

混凝土的起裂断裂韧度时,裂缝开始扩展,裂缝扩展准则可表示为

$$K(P,a) - K^c(\Delta a) = K_{Ic}^{ini} \quad (1)$$

式中: $K(P,a)$ 为外力引起的应力强度因子; $K^c(\Delta a)$ 为黏聚力引起的应力强度因子; K_{Ic}^{ini} 为起裂断裂韧度; P 为作用于三点弯曲梁的外荷载; a 为裂缝长度; Δa 为裂缝扩展长度。

利用该准则,可以把裂缝发展的每一增量步 Δa 看作一个完整的断裂过程,均经历裂缝起裂和扩展两个阶段。这表明,在任意裂缝长度 a 时,裂缝是否扩展可如下判断:当 $K(P,a) - K^c(\Delta a) < K_{Ic}^{ini}$ 时,裂缝不扩展;当 $K(P,a) - K^c(\Delta a) = K_{Ic}^{ini}$ 时,裂缝起裂;当 $K(P,a) - K^c(\Delta a) > K_{Ic}^{ini}$ 时,裂缝扩展。一旦裂缝扩展,裂缝长度增加为 $a + \Delta a$,仍采用裂缝扩展准则判断裂缝是否满足下一步的扩展条件。据此,裂缝发展的全过程便能根据该准则进行描述。

该准则不仅可以用于 I 型断裂,也可以推广至 I - II 复合型断裂^[10]。现有的研究成果^[8,10]表明,利用该准则可以准确地预测裂缝发展全过程,并计算任意裂缝长度 a 时的外荷载 P ,进而求解由外力引起的应力强度因子。

2 裂缝扩展过程分析

根据裂缝扩展准则,为了判断裂缝是否发展,必须求得 $K(P,a)$ 、 $K^c(\Delta a)$ 和 K_{Ic}^{ini} 。

对于给定裂缝长度 a ,如图 1 所示的三点弯曲梁的 $K(P,a)$ 计算公式^[12]为

$$K(P,a) = \frac{6M}{BD^2} k_\beta(\alpha) \quad (2)$$

其中
$$k_\beta(\alpha) = \frac{\sqrt{\alpha}}{(1 - \alpha)^{3/2}(1 + 3\alpha)} \cdot$$

$$\left\{ p_\infty(\alpha) + \frac{4}{\beta} [p_4(\alpha) - p_\infty(\alpha)] \right\}$$

$$p_4(\alpha) = 1.90 + 0.41\alpha + 0.51\alpha^2 - 0.17\alpha^3$$

$$p_\infty(\alpha) = 1.99 + 0.83\alpha - 0.31\alpha^2 + 0.14\alpha^3$$

$$\alpha = a/D \quad \beta = S/D$$

式中: M 为外力 P 作用在试件上引起的弯矩; B 为试件宽度; D 为试件高度; S 为试件跨度。

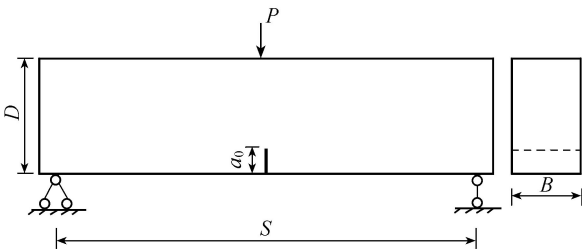


图 1 三点弯曲梁

起裂断裂韧度 K_{Ic}^{ini} 也由式 (2) 确定^[13],此时 $P = P_{ini}$, $a = a_0$ (a_0 为初始裂缝长度, P_{ini} 为试验测得的裂缝起裂荷载)。

根据黏聚力模型,由黏聚力引起的应力强度因子^[14]为

$$K^c(\Delta a) = \int_{a_0}^a 2\sigma(x) F_2\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{D}\right) / \sqrt{\pi a} dx \quad (3)$$

其中

$$F_2\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{D}\right) = \frac{3.52\left(1 - \frac{x}{a}\right)}{\left(1 - \frac{a}{D}\right)^{3/2}} - \frac{4.35 - 5.28\frac{x}{a}}{\left(1 - \frac{a}{D}\right)^{1/2}} + \left[\frac{1.3 - 0.3\left(\frac{x}{a}\right)^{3/2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}} + 0.83 - 1.76\frac{x}{a} \right] \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{x}{a}\right) \frac{a}{D} \right]$$

式中 $\sigma(x)$ 为坐标 x 处的黏聚力。

目前,混凝土的软化曲线已出现多种形式,软化曲线的形状和相关参数的数值与混凝土断裂能 G_F 有关^[7,15]。针对轻骨料混凝土,本文采用 Reinhardt 等^[16]提出的指数型软化曲线:

$$\frac{\sigma(w)}{f_t} = \left[1 + \left(c_1 \frac{w}{w_0} \right)^3 \right] \exp\left(- c_2 \frac{w}{w_0} \right) - \frac{w}{w_0} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (4)$$

式中: f_t 为混凝土的抗拉强度; w 为裂缝相对位移; w_0 为黏聚力为零时的裂缝相对位移,可根据断裂能 G_F 确定; c_1 和 c_2 为常数,对于轻骨料混凝土, $c_1 = 3$, $c_2 = 5.64$ 。

对于长度为 a 的裂缝,裂缝张开位移可由下式计算^[17]:

$$w = V \left\{ \left(1 - \frac{x}{a} \right)^2 + \left[1.081 - 1.149 \frac{a}{D} \right] \cdot \left[\frac{x}{a} - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

式中 V 为裂缝口张开位移 (crack mouth opening displacement, CMOD), 其计算公式^[12]为

$$V = \frac{24Ma}{BD^2E} v_\beta(\alpha) \quad (6)$$

其中
$$v_\beta(\alpha) = 0.8 - 1.7\alpha + 2.4\alpha^2 + \frac{0.66}{(1 - \alpha)^2} +$$

$$\frac{4}{\beta} (-0.04 - 0.58\alpha + 1.47\alpha^2 - 2.04\alpha^3)$$

式中 E 为混凝土的弹性模量。

根据裂缝扩展准则,结合公式 (1) ~ (6), 可以计算三点弯曲梁在任意时刻的荷载 P 、断裂过程区

长度、裂缝口张开位移 V 等参数。具体步骤如下:

- a. 输入试件尺寸参数 (B 、 D 、 S 等) 和基本材料参数 (f_t 、 E 、 G_F 等)。
- b. 令 $P=P_{ini}$, $a=a_0$, 根据式 (2) 确定 K_{Ic}^{ini} 。
- c. 对于任意的裂缝长度 a , 假定荷载 P , 求解当前荷载下的 $K(P, a)$ 和 $K^c(\Delta a)$, 并判定是否满足裂缝扩展准则。若裂缝扩展准则不满足时, 重新假定 P , 直至满足裂缝扩展准则。
- d. 计算当前裂缝长度 a 下的 V 和断裂过程区长度等。
- e. 持续增大裂缝长度至 $a+\Delta a$, 求解满足裂缝扩展准则的 P 、 V 等, 直到试件破坏。

3 自密实轻骨料混凝土三点弯曲梁的断裂特性

采用三点弯曲梁研究自密实轻骨料混凝土的裂缝发展全过程。自密实轻骨料混凝土的配合比为 1 : 0.428 : 1.965 : 1.048 : 0.471 (水泥、粉煤灰、河砂、轻骨料、水质量比)。为了满足自密实混凝土的工作性能, 添加了适当的高效复合减水剂, 以增加混凝土的流动性。为了研究缝高比的影响, 配制了 4 组不同缝高比的自密实轻骨料混凝土三点弯曲梁试件, 尺寸均为 100 mm × 100 mm × 500 mm, 净跨为 460 mm, 跨高比为 4.6, 初始缝高比分别比为 0.3、0.4、0.5、0.6。每组试件为 3 个, K_{Ic}^{ini} 和 G_F 均取 3 个试件的试验结果平均值作分析。三点弯曲梁的起裂断裂韧度和断裂能见表 1, 自密实轻骨料混凝土三点弯曲梁的试验详情可见文献 [18]。

表 1 自密实轻骨料混凝土的断裂参数

试件编号	a_0/mm	$K_{Ic}^{ini}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$G_F/(\text{N} \cdot \text{m})$
1	30	0.33	69.79
2	40	0.51	59.33
3	50	0.65	55.54
4	60	0.69	54.18

3.1 荷载-裂缝口张开位移曲线

根据裂缝扩展准则计算的自密实轻骨料混凝土试件的荷载-裂缝口张开位移曲线和试验测得的 3 条荷载-裂缝口张开位移曲线见图 2。从图 2 可见, 试验值和计算值结果吻合良好, 验证了裂缝扩展准则的正确性。可见, 只需测得自密实轻骨料混凝土的基本材料参数, 如抗拉强度、弹性模量和断裂能等, 就可以根据裂缝扩展准则准确地描述自密实轻骨料混凝土裂缝发展的全过程。

3.2 断裂过程区长度变化

混凝土的断裂过程区长度为虚拟裂缝尖端至黏聚力为零处的长度。自密实轻骨料混凝土的三点弯曲梁的断裂过程区长度见图 3。由于试件的初始缝高比不同, 为了消除韧带长度对试验结果的影响, 在图 3 中采用裂缝扩展长度和韧带长度的比值 $\Delta a/(D-a_0)$ 为横坐标。由图 3 可以看出, 在达到完整断裂过程区长度之前, 断裂过程区长度随着裂缝的扩展线性增大, 当裂缝扩展长度达到 0.7 倍的韧带长度左右时, 试件 1~4 的断裂过程区长度达到最大值, 此时的断裂过程区长度为完整断裂过程区长度。完整断裂过程区长度的最大值和初始缝高比有关, 初始缝高比越小, 完整断裂过程区长度越大。不过,

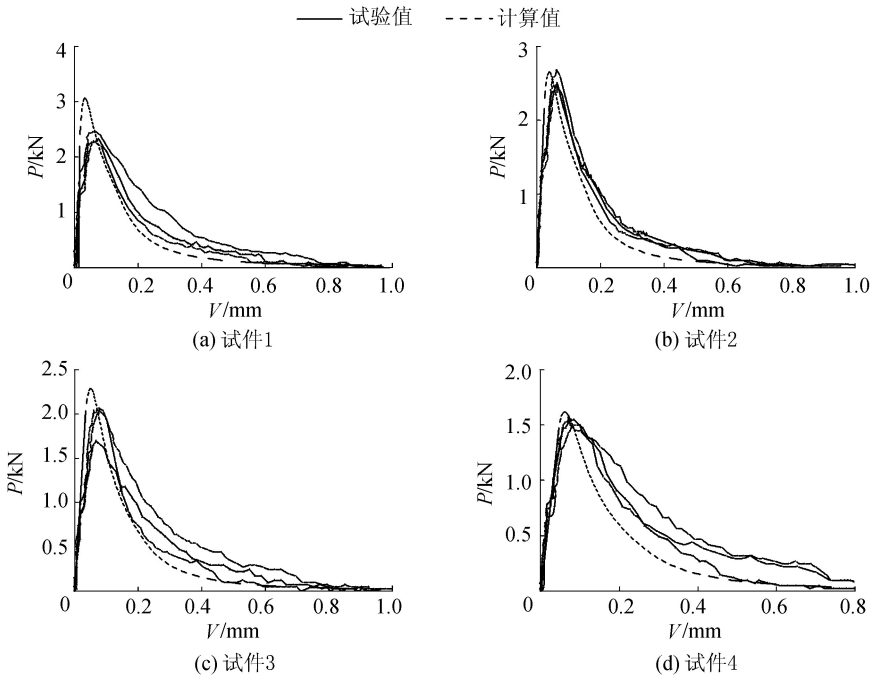


图 2 自密实轻骨料混凝土的荷载-裂缝口张开位移曲线

从图3可以看出,完整断裂过程区长度和韧带长度的比值约为0.7,基本不随初始缝高比变化。当断裂过程区长度达到完整断裂过程区长度之后,随着裂缝长度增加,断裂过程区长度逐渐减小,这是由于三点弯曲梁韧带较短,断裂过程区受到边界条件的约束,无法自由发展^[19]。本文计算出的断裂过程区长度的变化趋势和文献[20-21]中观察到的断裂过程区长度变化相同。

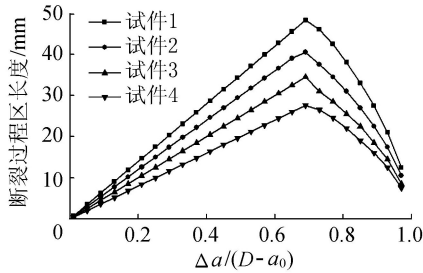


图3 自密实轻骨料混凝土的断裂过程区长度

3.3 自密实轻骨料混凝土的裂缝扩展阻力曲线

混凝土裂缝扩展阻力曲线可以判断裂缝的稳定发展状态,并可以应力强度因子的形式表达。一般混凝土的裂缝扩展阻力 $K_R^{[22]}$ 可以表示为

$$K_R = K^c(\Delta a) + K_{Ic}^{ini} \quad (13)$$

根据裂缝扩展准则,求出 $K^c(\Delta a)$ 和 K_{Ic}^{ini} 之后,可以根据式(13)求出自密实轻骨料混凝土的裂缝扩展阻力曲线。图4为4组自密实轻骨料混凝土试件的裂缝扩展阻力曲线,可以看出,裂缝扩展阻力随着裂缝长度增加单调上升。在裂缝发展前期,不同缝高比试件的裂缝扩展阻力曲线略有差异,但是该差异随着裂缝长度逐渐接近试件边界时逐渐减小。

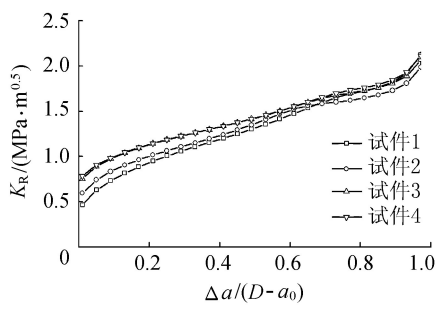


图4 裂缝扩展阻力曲线

4 结 论

a. 根据裂缝扩展准则,只需尺寸参数和基本的材料参数,就可以得到自密实轻骨料混凝土三点弯曲梁裂缝发展的全过程。根据裂缝扩展准则计算的荷载-裂缝口张开位移曲线和试验结果吻合良好,验证了裂缝扩展准则的正确性。

b. 自密实轻骨料混凝土的三点弯曲梁的断裂过程区长度随着裂缝长度增长先增大,达到完整断

裂过程区长度之后又随着裂缝长度增加而减小。完整断裂过程区长度约为韧带长度的0.7倍。

c. 在本文的研究范围内,自密实轻骨料混凝土的裂缝扩展阻力随着裂缝增大逐渐增大,和初始缝高比的相关性不明显。

参考文献:

- [1] SHI Caijun, WU Yanzhong. Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder[J]. ACI Materials Journal, 2005, 102(5): 355-363.
- [2] CHOI Y W, KIM Y J, SHIN H C, et al. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1595-1602.
- [3] HWANG C, HUNG M. Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(8): 619-626.
- [4] WU Zhimin, ZHANG Yunguo, ZHENG Jianjun, et al. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2087-2092.
- [5] ANDERSON T L. Fracture mechanics: fundamentals and applications[M]. London: CRC Press, 1995.
- [6] WECHARATANA M, SHAH S P. Slow crack growth in cement composites[J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1982, 108(ST6): 1400-1413.
- [7] 徐世焯. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [8] DONG Wei, WU Zhimin, ZHOU Xiangming. Calculating crack extension resistance of concrete based on a new crack propagation criterion[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 879-889.
- [9] 吴智敏, 董伟, 许青. 混凝土 I-II 复合型裂缝扩展准则及扩展全过程的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 180-187. (WU Zhimin, DONG Wei, XU Qing. Propagation criterion for mixed mode I-II crack propagation and numerical simulation of the whole propagation process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 180-187. (in Chinese))
- [10] WU Zhimin, RONG Hua, ZHENG Jianjun, et al. A numerical method for mixed-mode I-II crack propagation in concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(11): 1530-1538.
- [11] 邓爱民, 徐道远. 混凝土 I-II 复合型拉剪断裂试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 428-432. (DENG Aimin, XU Daoyuan. Tensile-shear fracture tests on I-II mixed model of concrete[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(4): 428-432. (in Chinese))

(下转第44页)

4048. (LIAO Hongqiang, HE Donglin, GUO Zhancheng, et al. Influence of steel slag powder with different contents on properties of foam concrete [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (10): 4044-4048. (in Chinese))
- [6] TSAKIRIDIS E P, TSIVILIS S. Utilization of steel slag for portland cement clinker production [J]. Journal of Hazardous Material, 2008, 152 (2): 805-811.
- [7] WANG Qiang, YAN Peiyu. Characteristics of hydration products of steel slag [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38 (9): 1731-1734.
- [8] 胡曙光, 王红喜, 丁庆军. 钢渣基高活性微膨胀掺合料的制备与性能研究 [J]. 混凝土, 2006, 28 (8): 47-49. (HU Shuguang, WANG Hongxi, DING Qingjun. The preparation of a high activated and slight expansive admixture base on steel slag and the study on its performance [J]. Concrete, 2006, 28 (8): 47-49. (in Chinese))
- [9] 黄辉. 钢渣的活性激发及其应用现状 [J]. 粉煤灰综合利用, 2012, 26 (2): 51-54. (HUANG Hui. The excitation and application of the activity for steel slag [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2012, 26 (2): 51-54. (in Chinese))
- [10] 白忠. 水工混凝土冲磨破坏研究进展 [J]. 科技信息, 2007, 14 (36): 463-464. (BAI Zhong. Hydraulic concrete abrasion research progress [J]. Science & Technology Information, 2007, 14 (36): 463-464. (in Chinese))
- [11] JGJ 55—2000 普通混凝土配合比设计规程 [S].
- [12] GBT 50080—2002 普通混凝土拌合物性能试验方法标准 [S].
- [13] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- [14] 吴伟伟, 杨钱荣. 钢渣水硬活性及在水泥混凝土中的应用研究进展 [J]. 粉煤灰综合利用, 2009, 23 (6): 51-54. (WU Weiwei, YANG Qianrong. Research progress on hydraulic activity of steel slag and its application in cement and concrete [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2009, 23 (6): 51-54. (in Chinese))
- [15] SHI C J. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production [J]. Cem Concr Res, 2002, 32 (3): 459-462.
- [16] 冯乃谦. 新实用混凝土大全 [M]. 北京: 中国科学出版社, 2005.
- [17] 韩素芳. 混凝土工程病害与修补加固 [M]. 北京: 中国海洋出版社, 1996: 203-205.
- (收稿日期: 2013-09-05 编辑: 徐娟)
- +++++
- (上接第 39 页)
- [12] GUINEA G V, PASTOR J Y, PLANAS J, et al. Stress intensity factor, compliance and CMOD for a general three-point-bend beam [J]. International Journal of Fracture, 1998, 89 (2): 103-116.
- [13] XU Shilang, ZHU Yu. Experimental determination of fracture parameters for crack propagation in hardening cement paste and mortar [J]. International Journal of Fracture, 2009, 157 (1): 33-43.
- [14] JENQ Y S, SHAH S P. A fracture toughness criterion for concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21 (5): 1055-1069.
- [15] 何敏, 张东焕, 王利民, 等. 混凝土断裂过程区拉伸软化的本构关系 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (4): 8-12. (HE Min, ZHANG Donghuan, WANG Limin, et al. Constitutive relation for tension softening of concrete in fracture process zone [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 (4): 8-12. (in Chinese))
- [16] REINHARDT H W, CORNELISSEN H A W, HORDIJK D A. Tensile tests and failure analysis of concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112 (11): 2462-2477.
- [17] JENQ Y S, SHAH S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111 (10): 1227-1241.
- [18] 吴熙, 付腾飞, 吴智敏. 自密实轻骨料混凝土的双 K 断裂参数和断裂能试验研究 [J]. 工程力学, 2010, 27 (增刊 2): 249-254. (WU Xi, FU Tengfei, WU Zhimin. Experimental study on double-K fracture parameters and fracture energy of self-consolidating lightweight concrete [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (Sup2): 249-254. (in Chinese))
- [19] MOREL S, LESPINE C, COUREAU J L, et al. Bilinear softening parameters and equivalent LEFM R-curve in quasibrittle failure [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47 (6): 837-850.
- [20] WITTMANN F, HU X. Fracture process zone in cementitious materials [J]. International Journal of Fracture, 1991, 51 (1): 3-18.
- [21] WU Zhimin, RONG Hua, ZHENG Jianjun, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78 (17): 2978-2990.
- [22] XU S L, REINHARDT H W. Crack extension resistance and fracture properties of quasi-brittle softening materials like concrete based on the complete process of fracture [J]. International Journal of Fracture, 1998, 92 (1): 71-99.
- (收稿日期: 2013-08-15 编辑: 熊水斌)