

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.012

双缝混凝土三点弯曲梁断裂性能试验

胡少伟^{1,2}, 尹阳阳¹, 王 强³

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210024;
3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究双缝混凝土三点弯曲梁的断裂性能, 分别对初始缝高比为 0.4 的单缝, 主缝缝高比为 0.4、次缝缝高比为 0.2~0.4 及主次缝间距为 120 mm 和 160 mm 的双缝标准混凝土三点弯曲梁, 共 24 个试件进行了试验研究。基于双 K 断裂理论, 分析了次缝缝高比及主次缝间距对实测的荷载-裂缝张口位移 $P-\delta$ 曲线的影响。结果表明: 随着次缝缝高比的增大, 试件的起裂荷载从 4.65 kN 增至 7.12 kN, 增大 53.1%, 最大荷载从 7.37 kN 增至 8.22 kN, 增大 11.5%; 随着主次缝间距的增大, 试件的起裂荷载、最大荷载及其比值均同步先增大后减小, 且当主次缝间距为 80 mm 时, 均达到最大。相比单缝试件, 次缝缝高比越大, 实测 $P-\delta$ 曲线线性段的斜率越高, 主次缝间距越大, $P-\delta$ 曲线线性段的斜率越小。

关键词: 双缝混凝土; 三点弯曲梁; 双 K 断裂理论; 荷载-裂缝张口位移曲线; 断裂性能

中图分类号: TU375.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2019)03-0265-06

Experimental study on the fracture properties of three-point bending concrete beam with double cracks

HU Shaowei^{1,2}, YIN Yangyang¹, WANG Qiang³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To obtain the fracture properties of three-point bending concrete beam with double cracks, 24 specimens were tested in this paper. The initial crack-depth ratio of the specimens with a single crack is 0.4. For the specimens with double cracks, the initial crack-depth ratio of the main crack (MC) is 0.4 and it is 0.2~0.4 for the secondary crack (SC), while the distances between the SC and MC are 120 mm and 160 mm, respectively. Based on the double-K fracture theory, the effect of the crack-depth ratio of SC and the distance between SC and MC on the initial load, the maximum load, and the $P-\delta$ curve were studied. The results indicate that, with the increase of the crack-depth ratio of the SC from 0 to 0.4, the initial load of the specimens increased from 4.65 kN to 7.12 kN by 53.1%, and the maximum load increased from 7.37 kN to 8.22 kN by 11.5%. With the increase of the distance between SC and MC, the initiation load, the maximum load and the ratio of initial load to maximum load increased at first and then decreased. Meanwhile, values of them reached to the peaks when the distance was 80 mm. Compared to single crack specimens, the bigger the ratio of the SC, the larger the slope of the linear segment of measured $P-\delta$ curve; the larger the distance between SC and MC, the smaller the slope of linear segment.

Key words: concrete with double cracks; three-point bending beam; double-K fracture theory; $P-\delta$ curve; fracture properties

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51739008); 国家重大科研仪器研制项目(51527811)
作者简介: 胡少伟(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土断裂力学研究。E-mail: hushaowei@nhri.cn
引用本文: 胡少伟, 尹阳阳, 王强. 双缝混凝土三点弯曲梁断裂性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 265-270.
HU Shaowei, YIN Yangyang, WANG Qiang. Experimental study on the fracture properties of three-point bending concrete beam with double cracks[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 265-270.

自1961年,Kaplan^[1]首次将Griffith理论应用于研究混凝土以来,国际上对混凝土断裂性能的研究已有近60a年的发展。我国从1973年的水利大检查中因很多大坝出现裂缝开始引起学者们对混凝土断裂性能的关注^[2-4],至今我国对混凝土断裂性能的研究也已近50a。较为著名的是我国学者徐世烺等^[5]提出的双K断裂理论,指出对于一般对裂缝要求较低的混凝土结构,确定出其失稳断裂韧度即可较好地满足工程要求,但对于对裂缝有严格要求的结构,如高坝、输水结构等,确定出其起裂断裂韧度也十分重要。而后Xu等^[6]又基于线性渐进叠加假设,并考虑了荷载-张口位移曲线($P-\delta$)的非线性,通过解析方法得到了双K断裂参数,完善了双K断裂理论。

在双K断裂准则中, $P-\delta$ 曲线对确定混凝土的断裂性能有决定性的作用,通过实测混凝土试件 $P-\delta$ 曲线由线性转为非线性的转折点及峰值点可以确定出其起裂荷载和最大荷载,进而可以求出混凝土试件的起裂断裂韧度和失稳断裂韧度。目前我国的DL/T5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》^[7]即采用了这一方法。因此,研究 $P-\delta$ 曲线的影响因素,对工程实践有很重要的参考价值。胡少伟等^[8]研究了不同混凝土强度对 $P-\delta$ 曲线的影响。王瑾瑾等^[9]分别采用最大拉应力准则、裂尖处应力强度因子为零的裂缝扩展准则以及以起裂韧度为参数的裂缝扩展准则,计算了5种不同强度等级混凝土三点弯曲梁试件的 $P-\delta$ 曲线,并与试验结果对比,发现以起裂韧度为参数的裂缝扩展准则更适用于不同强度混凝土材料的断裂分析。徐晓良等^[10]研究了钢筋对 $P-\delta$ 曲线的影响,发现钢筋混凝土少筋梁的起裂点并非是 $P-\delta$ 曲线的第一个峰值点,而是在第一个峰值点之前。徐世烺等^[11]分析了不同试件厚度对 $P-\delta$ 曲线的影响。

然而,上述学者均是仅针对带单一裂缝的试件进行研究,而实际的坝体及其他结构物中的裂缝往往有多条,由此,研究混凝土试件中次缝对主缝 $P-\delta$ 的影响,对研究混凝土的断裂性能很有意义。Kachanov^[12]曾利用叠加法研究了共线裂缝间的相互影响;Li等^[13]对Kachanov的方法进行了修正,使其适用于裂缝距离较近时的情况;Swartz等^[14]采用双缝三点弯曲梁研究了混凝土I-II复合型断裂性能;Zhang等^[15]利用改进的随机骨料生成和填充(RAGP)算法建立了一系列混凝土双缝三点弯曲梁模型,分析了缝位置、骨料分布和级配对断裂的影响。本文在上述文献基础上,采用试验的方法对带有两条平行裂缝的三点弯曲梁的断裂性能进行了研究。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验采用标准三点弯曲梁试件($S/h=4$),设计了1组单缝及5组双缝试件,每组浇筑4个试件,共计24个试件,所有试件一次性浇筑完成,试件形式如图1所示。其中, P 为外荷载, L,S,h 及 t 分别为试件长度、跨度、高度及厚度, a_0 为单缝及双缝试件主缝缝长, a_1 为双缝试件次缝缝长, d_0 为双缝试件主次缝间距。

试件尺寸均为 $L\times t\times h=1\,000\text{ mm}\times120\text{ mm}\times200\text{ mm}$,试件的预制裂缝选用厚度为3 mm钢板制作,并在用于预制裂尖的钢板一侧制作成 15° 尖角,以符合裂缝尖端形态。试验采用的混凝土由饮用水、P·O42.5级水泥、最大粒径20 mm的石灰岩碎石、天然河砂配制,配合比为水:水泥:砂:石子=0.44:1:1.225:2.485,并采用自落式搅拌机搅拌而成。标准立方块28 d龄期抗压强度为49.2 MPa,抗拉强度为3.51 MPa,弹性模量为44.8 GPa。并据文献[7]中的断裂韧度公式计算得本试验所用混凝土的起裂断裂韧度与失稳断裂韧度分别为 $0.782\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $1.105\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。试件参数见表1。

1.2 加载方案及测试内容

所有试验均在500 t压力机上进行,采用不大于10 N/s加载速率连续加载,直至试件断裂破坏停止加载。加载过程中通过预先粘贴的50 mm长应变片测测点应变,最大量程为5 t的荷载传感器测跨中荷载,最大量程为2 mm的夹式引伸计测量单缝及双缝缝端 δ 值。荷载及各测点的应变采用东华公司生产的DH-5902型

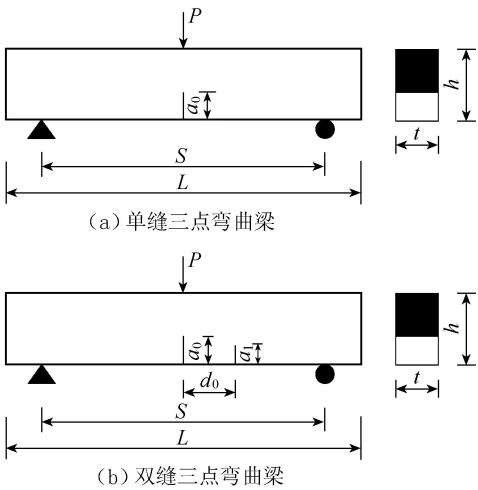


图1 试件形式

Fig.1 Specimen form

表 1 试件参数
Table 1 Parameters of specimens

试件编号	a_0/mm	a_1/mm	a_0/h	a_1/h	d_0/mm	缝间跨比 d_0/h
TPBS0-11 ~4	80	0	0.4	0	0	0
TPBDC02-1 ~4	80	40	0.4	0.2	80	0.1
TPBDC03-1 ~4	80	60	0.4	0.3	80	0.1
TPBDC04-1 ~4	80	80	0.4	0.4	80	0.1
TPBDD120-1 ~4	80	80	0.4	0.4	120	0.15
TPBDD160-1 ~4	80	80	0.4	0.4	160	0.2

注:试件编号中 TPB 代表三点弯曲梁,S 代表单缝,D 代表双缝,0、02、03 和 04 分别对应单缝、次缝缝高比为 0.2、0.3 和 0.4,120 和 160 分别对应缝间距为 120 mm 和 160 mm。

动态应变测试系统进行采集。加载装置如图 2 所示。

图 3 给出了单缝及双缝试件的应变片分布,并通过在预制裂缝口两侧粘贴厚度为 8 mm 的四棱柱钢片,将夹式引伸计安装在钢片刀口位置,直接测出缝端 δ 值。试验中主要采集数据包括:荷载 P 、图 3 所示应变片处混凝土应变 ε 、主次缝缝端 δ 值。

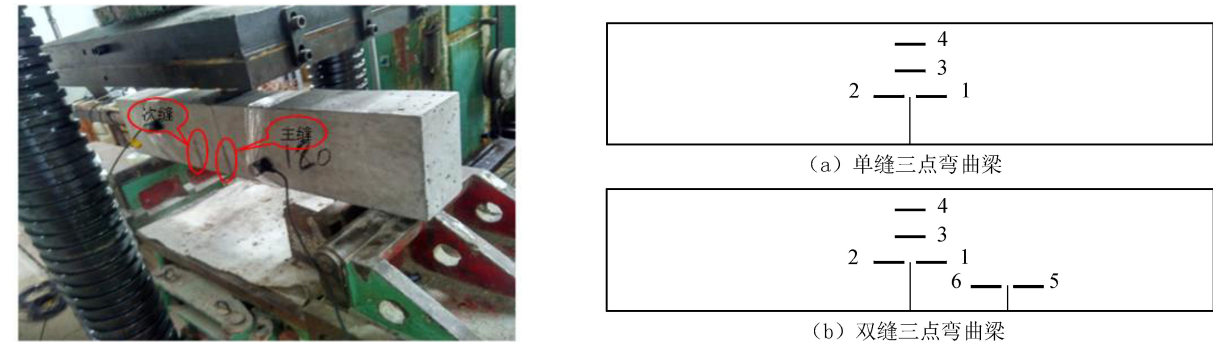


图 2 试验装置
Fig.2 Test device

图 3 应变片分布
Fig.3 Distribution of the strain gauges

2 试验结果与分析

2.1 起裂荷载与最大荷载的确定

常用确定起裂荷载 P_{ini} 和最大荷载 P_{max} 的方法有应变片法^[16-17] 和 $P-\delta$ 曲线法^[6-7]。对于应变片法,如图 4 所示,在初始加载阶段,随着荷载的增加,预制缝尖端受拉,裂尖两侧应变片的应变值 ε 基本呈线性增加;当荷载达到 P_{ini} 时,裂缝尖端处混凝土因受拉产生应力集中而开裂,积蓄的应变能释放,荷载-应变($P-\varepsilon$) 曲线上应变值达到最大;随着荷载的进一步增加,裂尖处应变逐渐减小,故 $P-\varepsilon$ 曲线转折点对应的荷载即试件的 P_{ini} ,峰值点对应的荷载为 P_{max} 。对于 $P-\delta$ 曲线法,如图 5 所示,随着荷载的增加,预制裂缝尖端因受拉而张开, $P-\delta$ 曲线呈线性逐渐增大;当荷载达到 P_{ini} 时,由于微裂缝的出现, $P-\delta$ 曲线由线性进入非线性,直至达到峰值荷载,当达到峰值荷载后, $P-\delta$ 曲线呈现上凹式加速扩展直至试件断裂,故 $P-\delta$ 曲线由初始段到非

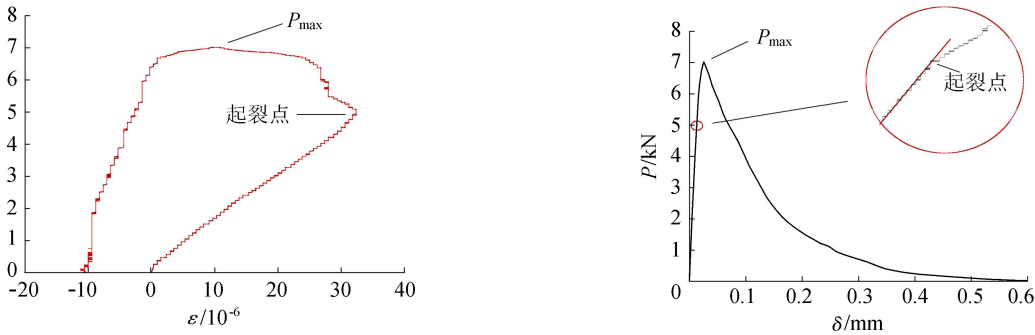


图 4 应变片法
Fig.4 $P-\varepsilon$ method

图 5 $P-\delta$ 曲线法
Fig.5 $P-\delta$ curve method

线性段的转折点所对应的荷载即为试件的 P_{ini} ,峰值点对应的荷载为 P_{max} 。由于测点的应变片值受混凝土表面的光滑程度及环境温度等影响较大,并且裂缝的开裂总是起始于处于平面应力状态的试件表面^[18-19],故人为地根据 $P-\varepsilon$ 曲线确定试件的 P_{ini} 和 P_{max} 存在较大的误差,本文根据文献[7]推荐的 $P-\delta$ 曲线法确定试件的 P_{ini} 和 P_{max} 。表2给出了试验测得的 P_{ini} 和 P_{max} 的具体数值。个别试件养护及搬运过程中损坏,因此共得到了21个有效数据。

表2 起裂荷载及最大荷载
Table 2 Initial load and maximum load

试件编号	P_{ini}/kN	P_{max}/kN	P_{ini}/P_{max}	试件编号	P_{ini}/kN	P_{max}/kN	P_{ini}/P_{max}
TPBS0-1	4.850	7.017	0.691	TPBDC04-1	6.358	8.391	0.758
TPBS0-2	4.053	7.036	0.576	TPBDC04-2	7.670	8.480	0.904
TPBS0-3	5.040	8.069	0.625	TPBDC04-3	8.055	8.490	0.949
TPBDC02-1	5.084	7.367	0.690	TPBDD120-1	6.492	8.209	0.791
TPBDC02-2	5.617	7.070	0.794	TPBDD120-2	7.188	8.120	0.885
TPBDC02-3	5.904	8.480	0.696	TPBDD120-3	6.049	8.197	0.738
TPBDC02-4	6.140	8.260	0.743	TPBDD120-4	7.638	8.028	0.951
TPBDC03-1	7.711	8.824	0.874	TPBDD160-2	5.664	6.981	0.811
TPBDC03-2	6.513	7.780	0.837	TPBDD160-3	5.668	7.093	0.799
TPBDC03-3	5.784	7.912	0.731	TPBDD160-4	5.904	7.833	0.754

2.2 试验现象

对于单缝试件,初始加载阶段,随着荷载的增大,裂尖处逐渐产生微小的裂纹,表现在 $P-\delta$ 曲线上即局部放大后对应的一个个台阶;随着荷载的进一步增加,微小裂缝不断发展连通形成宏观裂缝直至试件断裂。对于双缝试件的主缝观察到同样的现象,即所有的双缝试件均是从主缝处断裂破坏,且次缝均未观察到起裂。由于混凝土的黏聚力作用,使得单缝试件和双缝试件的主缝均观察到裂缝存在一个稳定扩展过程,即断裂过程区^[20]。裂缝扩展路径上可能会遇到粗骨料,由于骨料强度大,故裂缝会绕开骨料,继续发展,表现为裂缝的扩展路径出现少量的偏斜,这与文献[15]中的结果相同。又由于素混凝土属准脆性材料,多数情况下,裂缝沿竖直方向穿过整个试件截面而破坏,破坏形式符合 I 型断裂。

2.3 荷载-裂缝张口位移曲线

图6给出了不同缝高比及不同缝间距情况下试件的 $P-\delta$ 曲线。由图6可知,因次缝的存在降低了试件的刚度,使双缝试件主缝的最大张口位移值较单缝时大,且随次缝缝高比与主次缝间距的增加而增大;双缝试件的 $P-\delta$ 曲线初始段的斜率较单缝时大,且随着次缝缝高比的增大而增大,随着缝间距的增大而减小,这是因次缝缝高比增大时,随着荷载的增加,次缝的张口位移值也在增大,对主缝的分担作用也越明显,但次缝的这种分担作用随着缝间距的增大而减小;从中还可知,随着次缝缝高比逐渐增大,主缝 $P-\delta$ 曲线上初始的线性段逐渐增长,非线性段逐渐减短,即断裂过程区长度变短,表明次缝的存在使试件的脆性增大。

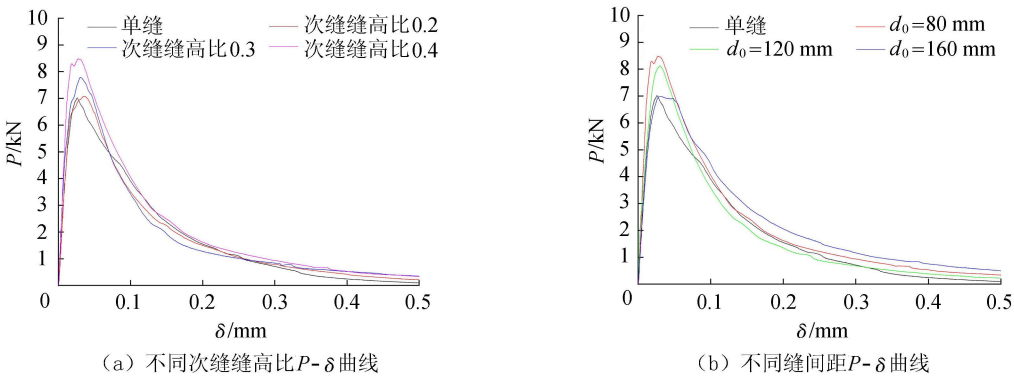


图6 $P-\delta$ 曲线
Fig.6 $P-\delta$ curves

2.4 起裂荷载与最大荷载

图7给出了试件起裂荷载 P_{ini} 和最大荷载 P_{max} 的变化规律。由图7(a)可知,随着次缝缝高比从0.2、

0.3 到 0.4 的变化,试件的 P_{ini} 从 4.65 kN 增大到 7.12 kN,增大 53.1%, P_{max} 从 7.37 kN 增大到 8.22 kN,增大 11.5%, P_{ini}/P_{max} 从 0.63 增大到 0.87;可见,由于次缝的存在分担了一部分荷载,且对 P_{ini} 的分担作用明显高于 P_{max} ,又因 P_{ini}/P_{max} 增大,说明试件的脆性在不断地增大,也即试件更加危险。由图 7(b)可知,随着缝间距从 0、80 mm、120 mm 到 160 mm 的变化,试件的 P_{ini} 与 P_{max} 均同步先增大、后减小,且当缝间距为 80 mm 时,均达到了最大值,从减小的趋势可以看出,当缝间距为 160 mm 时试件的 P_{max} 与单缝时几乎相等,但 P_{ini} 高 23.7%;从中还可知 P_{ini}/P_{max} 先增大、后减小,但总体较单缝试件高,即较单缝时危险。

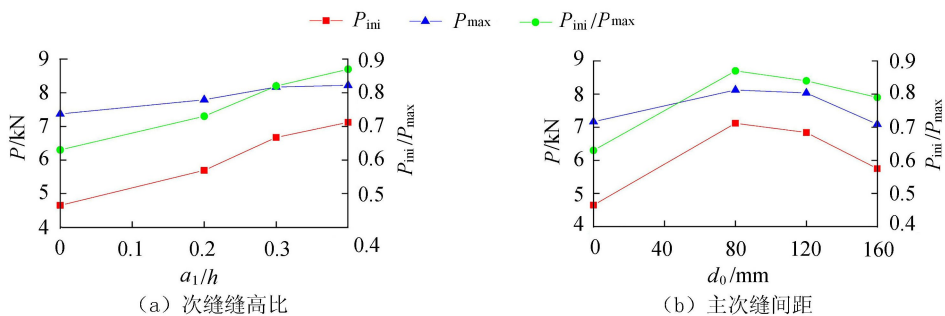


图 7 不同次缝缝高比及不同缝间距 P_{ini} 、 P_{max} 与 P_{ini}/P_{max} 变化

Fig.7 Variations of P_{ini} , P_{max} , and P_{ini}/P_{max} with crack-depth ratio of SC and distance between SC and MC

3 结 论

- a. 双缝试件断裂时对应的最大张口位移值较单缝大,断裂过程区长度较单缝短;由于次缝的分担作用,双缝试件 P - δ 曲线初始段的斜率较单缝时大,且随着次缝缝高比的增大而增大,随着缝间距的增大而减小。
- b. 随着次缝缝高比增大,试件的起裂荷载、最大荷载及其比值均逐渐增大;随着次缝缝间距增大,试件的起裂荷载、最大荷载及其比值则同步先增大、后减小,且当缝间距为 80 mm 时,均达到了最大值。
- c. 双缝试件起裂荷载与最大荷载比值总体较单缝试件高,即双缝试件脆性大,也即更危险。

参考文献:

[1] KAPLAN M F. Crack propagation and the fracture of concrete[J]. Journal of the American Concrete Institute,1961,58(5): 591-610.

[2] 章佺,许念增,龚安特. 混凝土坝坝墩的断裂力学分析[J]. 工业建筑,1979,9(1):42-48. (ZHANG Quan, XU Nianzeng, GONG Ante. Fracture mechanics analysis of concrete dam pier[J]. Industrial Construction, 1979,9(1):42-48. (in Chinese))

[3] 潘家铮. 断裂力学在水工结构设计中的应用[J]. 水利学报,1980, 11(1):47-61. (PAN Jiazheng. Application of fracture mechanics to the design of hydraulic structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1980,11(1):47-61. (in Chinese))

[4] 于晓中,居襄. 混凝土断裂韧性的研究[J]. 力学与实践,1980,2(4):69-71. (YU Xiaozhong, JU Rang. Research on fracture toughness of concrete[J]. Mechanics in Engineering, 1980, 2(4):69-71. (in Chinese))

[5] 徐世烺,赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双 K 断裂准则[J]. 土木工程学报,1992,25(2):32-38. (XU Shilang, ZHAO Guofan. A double-K fracture criterion for the crack propagation in concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1992,25(2):32-38. (in Chinese))

[6] XU Shilang, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2):151-177.

[7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工混凝土断裂试验规程:DL/T 5332—2005[S]. 北京:中国电力出版社,2006.

[8] 胡少伟,范向前,陆俊. 强度等级对混凝土双 K 断裂参数的影响[J]. 水电能源科学,2012(9):77-81. (HU Shaowei, FAN Xiangqian, LU Jun. Influence of strength grade on double-K fracture parameters of concrete[J]. Water Resources and Power, 2012(9):77-81. (in Chinese))

[9] 王瑾瑾,董伟,王强,等. 混凝土 I 型裂缝扩展准则比较研究[J]. 工程力学,2016,33(5):89-96. (WANG Cuijin, DONG Wei, WANG Qiang, et al. A comparative study on propagation crition of concrete mode I crack[J]. Engineering Mechanics,

- 2016, 33(5):89-96. (in Chinese))
- [10] 徐晓良,杨树桐. 钢筋混凝土少筋梁断裂特性试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(增刊1):239-243. (XU Xiaoliang, YANG Shutong. Experimental study on fracture behavior of lightly reinforced concrete beam[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(Sup 1):239-243. (in Chinese))
- [11] 徐世烺,熊松波,李贺东,等. 混凝土断裂参数厚度尺寸效应的定量表征与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(5):57-71. (XU Shilang, XIONG Songbo, LI Hedong, et al. Quantitative characterization and mechanism analysis on thickness-dependent size effect of concrete fracture[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5):57-71. (in Chinese))
- [12] KACHANOV M. A simple technique of stress analysis in elastic solids with many cracks[J]. International Journal of Fracture, 1985, 28(1): R11-R19.
- [13] LI Y P, THAM L G, WANG Y H, et al. A modified Kachanov method for analysis of solids with multiple cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(9):1115-1129.
- [14] SWARTZ S E, LU L W, TANG L D. Mixed-mode fracture toughness testing of concrete beams in three-point bending[J]. Materials & Structures, 1988, 21(1):33-40.
- [15] ZHANG Chuanchuan, YANG Xinhua, GAO Hu, et al. Heterogeneous fracture simulation of three-point bending plain-concrete beam with double notches[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2016, 29(3):232-244.
- [16] 徐世烺,周厚贵,高洪波,等. 各种级配大坝混凝土双K断裂参数试验研究:兼对《水工混凝土断裂试验规程》制定的建议[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11):50-62. (XU Shilang, ZHOU Hougui, GAO Hongbo, et al. An experimental study on double-K fracture parameters of concrete for dam construction with various grading aggregates[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11):50-62. (in Chinese))
- [17] 李晓东,董伟,吴智敏,等. 小尺寸混凝土试件双K断裂参数试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2):166-171. (LI Xiaodong, DONG Wei, WU Zhimin, et al. Experimental investigation on double-K fracture parameters for small size specimens of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2):166-171. (in Chinese))
- [18] SWARTZ S E, REFAI T M E. Influence of size effects on opening mode fracture parameters for precracked concrete beams in bending[M]. New York:Springer, 1989:242-254.
- [19] HU Xiaozhi, GUAN Junfeng, WANG Yusuo, et al. Comparison of boundary and size effect models based on new developments[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 175(15):146-167.
- [20] XU Shilang, REINHARDT H W. Determination of double-determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture Part I: experimental investigation of crack propagation[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 111-149.

(收稿日期:2018-01-04 编辑:张志琴)