

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.021

含V型切口混凝土梁I、II复合型断裂特性研究*

童谷生, 罗翔

(华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013)

摘要: 通过采用三点弯曲加载, 结合电阻应变片法以及数字图像相关法, 研究初始缝高比、偏心距以及切口角度对V型切口混凝土梁荷载值和断裂过程区的影响, 最后运用有限断裂力学进行理论分析, 并与平均应力准则做比较。试验结果说明, 起裂荷载和破坏荷载的变化随着缝高比的增大而减小, 不同范围内的切口角度对起裂荷载和破坏荷载的影响也有差别, 起裂荷载和破坏荷载随着加载偏心距增加而增大起裂时刻和最大荷载时刻的断裂过程区等于裂缝长度, 而失稳时断裂过程区远远小于裂缝长度, 断裂过程区以切口角度 120° 为界, 具有不同的变化趋势; 平均应力准则下的裂缝扩展长度随着切口角度的增加整体呈现下降趋势, 无论是临界破坏荷载还是裂缝扩展角度, 有限断裂力学准则的理论预测值较平均应力准则更为接近试验结果。

关键词: 混凝土; V型切口; 荷载值; 断裂过程区; 有限断裂力学

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0655-09

Study on Fracture Characteristics of V-notched Concrete Beams

TONG Gusheng, LUO Xiang

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Using three-point bending loading and combining with resistance strain gauge method and digital image correlation method, the effects of initial seam height ratio, eccentricity and notch angle on the load value and fracture process area of V-notched concrete beam are studied. Finally, finite fracture mechanics is applied to conduct theoretical analysis. The result is compared with the average stress criterion. The test results show that the variation of the cracking load and the failure load decrease with the increase of the joint height ratio. The notch angles in different ranges have different impact on the cracking load and the breaking load. The cracking load and the breaking load increase with the eccentricity. The fracture process zone corresponding to the time of crack initiation and the maximum load is equal to the length of the fracture. But the fracture process zone at failure is much smaller than the fracture length. Fracture process zone has a different change rule when the notch angle reaches 120° . The crack propagation length under the average stress criterion decreases with the increase of the notch angle. The theoretical prediction value of the finite fracture mechanics criterion is closer to the experimental results than the average stress criterion regardless of the critical failure load or the crack propagation angle.

Keywords: concrete; V-notch; load value; fracture process zone; finite fracture mechanics

* 收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(11242006, 11462005)资助

作者简介: 童谷生(1962-), 男, 教授, 博士。主要从事结构强度与加固设计理论研究。Email: tonggusheng@126.com

引言

混凝土作为当今最重要且需求量最大的建筑材料,在各种内部因素和环境因素作用下混凝土产生的裂缝,将严重影响其结构使用安全,因此研究含切口构件的剩余强度具有重要意义。目前对混凝土断裂特性的研究主要是针对直裂缝,如 A. Hillerborg 等^[1]提出虚拟裂纹模型来研究裂缝的扩展;徐世烺等^[2]提出非线性双参数模型来描述混凝土断裂破坏的全过程。但在工程实际中,裂缝开裂后,孔口前端为含一定开口角度的V型孔口,除此之外,有一些构件也根据结构构造的要求开设一定形状的孔口,包括V型孔口。含V型切口混凝土复合加载型式破坏的研究及其断裂特性缺少相关的研究。

有限断裂力学准则(FFM)是耦合了能量准则和平均应力准则,最早由 Z. Hashin^[3]提出, D. Leguillon^[4]通过对断裂力学中脆性材料裂纹扩展的能量准则和脆性破坏的应力准则的研究,认为裂纹萌生的必要条件是同时满足能量准则和应力准则; D. Taylor 等^[5]对一系列不同材料的短裂纹和缺口进行试验,发现有限断裂力学可以对脆性断裂和疲劳行为进行准确预测; P. Cornetti 等^[6]在有限断裂力学框架中引入一种新的破坏准则,所提出的方法依赖于有限距离不是材料常数而是结构参数的假设; Z. Sun 等^[7]基于多边形的比例边界有限元方法应用于两个基于有限断裂力学的失效准则,以预测应力集中的裂纹萌生,即凹口和孔;童谷生等^[8]将有限断裂力学引入FRP-混凝土界面黏结强度的预测,分析了界面破坏能和峰值剪切应力与胶层厚度及混凝土强度之间的联系。与其他理论对比有限断裂力学的优点是它认为裂缝扩展是分步的,扩展的距离称为有限距,有限距是结构常数,而非材料参数;材料发生破坏时不仅要满足能量准则,同时也要考虑应力平均准则,这使得有限断裂力学的预测会更加贴合试验结果。

本文为了研究不同缝高比、不同切口角度及偏心距对V型切口混凝土梁的断裂特性影响,对有限断裂力学公式进行相应推导,从理论上预测不同因素影响下的临界扩展角度 θ_c 、破坏荷载 F_c 和裂缝尖端的临界距离 Δ_c ,同时本文还运用平均应力准则进行预测,最后与相应的试验结果进行比较。

1 有限断裂力学理论推导

1.1 V型孔口尖端附近应力场与平均应力断裂准则

为了运用有限断裂力学原理,首先给出含V型切口尖端应力场,如图1所示。

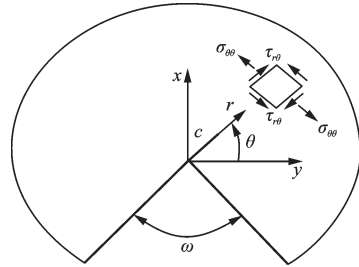


图1 裂缝尖端建立坐标系和离裂缝尖端距离c的某点
Fig.1 V-notch coordinate systems and the point with a distance c to the notch tip

注:c表示裂缝长度;θ表示裂缝方向与y轴的夹角;ω表示V型切口开口角度;σ_{θθ}、τ_{rθ}表示沿裂缝方向距离处的应力场

由文献[9]可知尖端附件的应力场 $\sigma_{\theta\theta}(r, \theta)$ 表示为:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{K_I^*}{(2\pi r)^{1-\lambda_I}} f_{\theta\theta}^I(\theta) + \frac{K_{II}^*}{(2\pi r)^{1-\lambda_{II}}} f_{\theta\theta}^{II}(\theta) \quad (1)$$

式中, λ_I, λ_{II} 表示I型荷载(对称荷载)、II型荷载(反对称荷载)条件奇异性指数; K_I^*, K_{II}^* 表示I、II型荷载条件广义强度因子;而参数 $f_{\theta\theta}^I(\theta)$ 和 $f_{\theta\theta}^{II}(\theta)$ 表达式为:

$$f_{\theta\theta}^I(\theta) = \frac{1}{C_I} \left\{ \begin{array}{l} \cos[(1+\lambda_I)(\pi-\omega/2)] \cdot \\ \cos[(1-\lambda_I)(\theta-\pi/2)] - \\ \cos[(1-\lambda_I)(\pi-\omega/2)] \cdot \\ \cos[(1+\lambda_I)(\theta-\pi/2)] \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$f_{r\theta}^{II}(\theta) = \frac{1}{C_{II}} \left\{ \begin{array}{l} (1+\lambda_{II})\sin[(1-\lambda_{II})(\pi-\omega/2)] \cdot \\ \cos[(1+\lambda_{II})(\theta-\pi/2)] - \\ (1-\lambda_{II})\sin[(1+\lambda_{II})(\pi-\omega/2)] \cdot \\ \cos[(1-\lambda_{II})(\theta-\pi/2)] \end{array} \right\} \quad (3)$$

其中,

$$C_I = \cos[(1+\lambda_I)(\pi-\omega/2)] - \cos[(1-\lambda_I)(\pi-\omega/2)] \quad (4)$$

$$C_{II} = (1 + \lambda_{II}) \sin[(1 - \lambda_{II})(\pi - \omega/2)] - (1 - \lambda_{II}) \sin[(1 + \lambda_{II})(\pi - \omega/2)] \quad (5)$$

而有限断裂力学方法的应力条件为: 裂缝扩展长度上的平均应力值大于材料的极限抗拉强度, 即:

$$\int_0^{\Delta} \sigma_{\theta\theta}(r, \theta) dr \geq \sigma_u \Delta \quad (6)$$

式中, Δ 表示裂缝尖端扩展的长度; σ_{ij} 表示混凝土的极限抗拉应力。平均应力准则满足此公式即可。

将公式(1)代入公式(2)有:

$$\frac{K_I^*}{\Delta^{1-\lambda_I}} f_{\theta\theta}^I(\theta) + \frac{K_{II}^*}{\Delta^{1-\lambda_{II}}} f_{\theta\theta}^{II}(\theta) \geq \sigma_u \quad (7)$$

其中,

$$f_{\theta\theta}^I(\theta) = \frac{f_{\theta\theta}^I(\theta)}{\lambda_I (2\pi)^{1-\lambda_I}} \quad (8)$$

$$f_{\theta\theta}^{II}(\theta) = \frac{f_{\theta\theta}^{II}(\theta)}{\lambda_{II} (2\pi)^{1-\lambda_{II}}} \quad (9)$$

1.2 V型孔口区附近裂缝扩展能量条件

有限断裂力学能量条件为裂缝增量 Δ 上所获得的能量超过创造新裂缝面所需的能量, 即:

$$\int_0^{\Delta} G(c, \theta) dc \geq G_c \Delta \quad (10)$$

式中, G_c 表示能量释放率; $G(c, \theta)$ 表示在 θ 方向, 裂缝长度 c 处的能量释放率。

根据 Irwin 关系, 平面应变条件下裂缝驱动力可表示为:

$$G(c, \theta) = \frac{K_I^2(c, \theta)}{E'} + \frac{K_{II}^2(c, \theta)}{E'} \quad (11)$$

式中, (K_I, K_{II}) 分别为 I、II 应力强度因子; $E' = E/(1 - \nu^2)$, E 为杨氏弹性模量, ν 为材料泊松比。

裂缝尖端长度为 c 和角度 θ 方向的短裂缝的应力强度因子, 可以根据文献[10]中给出的近似解析权函数 g 应用效果叠加的方法得到。最终将得到的结果代入公式(10)并结合 $G_c = K_{Ic}^2/E'$, 能量平衡最后形式可写为:

$$(K_I^*)^2 \bar{\beta}_{11}(\theta) \Delta^{2\lambda_I - 1} + K_I^* K_{II}^* \bar{\beta}_{12}(\theta) \Delta^{\lambda_I + \lambda_{II} - 1} + (K_{II}^*)^2 \bar{\beta}_{22}(\theta) \Delta^{2\lambda_{II} - 1} \geq K_{Ic}^2 \quad (12)$$

其中,

$$\bar{\beta}_{11} = \frac{\beta_{11}^2 + \beta_{21}^2}{2\lambda_I} \quad (13)$$

$$\bar{\beta}_{12} = \frac{\beta_{11}\beta_{12} + \beta_{21}\beta_{22}}{\lambda_I + \lambda_{II}} \quad (14)$$

$$\bar{\beta}_{22} = \frac{\beta_{12}^2 + \beta_{22}^2}{2\lambda_{II}} \quad (15)$$

式中, $\bar{\beta}_{11}$, $\bar{\beta}_{12}$ 和 $\bar{\beta}_{22}$ 为 θ 每 5° 增幅在 $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 对应的权函数 g 的取值, 这些取值通过渐进匹配方法得到。

图2给出了V型切口角度 $\omega = 45^\circ$ 时的权函数 g 的近似值, 当开口角度 ω 变化时, 可以采用同样的方法来确定 $\bar{\beta}_{ij}$ 。

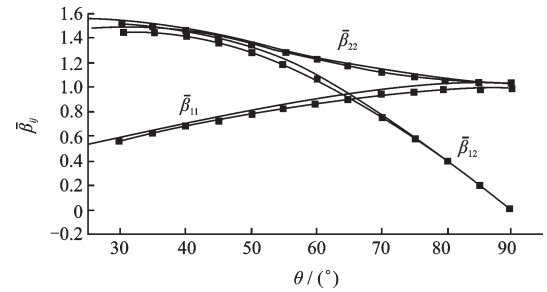


图2 文献[11]用权函数 g 和文献[9]通过数值模拟得到的函数 $\bar{\beta}_{ij}$ ($\omega = 45^\circ$)

Fig.2 Functions $\bar{\beta}_{ij}$ for predictions obtained by using the weight function components g presented in [11] (continuous line) and numerical values reported in [9] ($\omega = 45^\circ$)

1.3 含V型孔口区有限断裂原理描述

由于有限断裂力学要同时满足能量准则和应力准则, 因此公式可以写为:

$$\frac{K_I^*}{\Delta^{1-\lambda_I}} \left[f_{\theta\theta}^I(\theta) + m(\Delta) f_{\theta\theta}^{II}(\theta) \right] \geq \sigma_u \quad (16)$$

$$(K_I^*)^2 \Delta^{2\lambda_I - 1} \left[\bar{\beta}_{11}^2(\theta) + m(\Delta) \bar{\beta}_{22}^2(\theta) + m(\Delta) \bar{\beta}_{12}^2(\theta) \right] \geq K_{Ic}^2 \quad (17)$$

式中, $\bar{\beta}_{ij}$ 随裂缝扩展角度 θ 的取值由图2得出; K_{Ic} 为断裂韧度; 无量纲参数 m 为复合系数, 可表示为:

$$m(\Delta) = \frac{K_{II}^*}{K_I^*} \Delta^{\lambda_{II} - \lambda_I} \quad (18)$$

公式(16)、(17)中的 K_I^* 是唯一依赖于外加荷载的量, 而 m 与外加荷载无关。当 K_I^* 达到临界广义应力强度因子 K_{Ic}^* 时, 构件开始断裂。公式(16)、(17)为一个方程组, 里面含有两个未知数临界裂缝增量 Δ_c 和 K_{Ic}^* 。经过联立式(16)、(17)方程组得到 Δ_c 与临界扩展角度 θ_c , 以及 K_{Ic}^* 与 Δ_c 、 θ_c 的关系式为:

$$\Delta_c = \frac{\left[\bar{f}_{\theta\theta}^1(\theta_c) + m(\Delta_c) \bar{f}_{\theta\theta}^{II}(\theta_c) \right]^2}{\bar{\beta}_{11}^2(\theta_c) + m(\Delta_c) \bar{\beta}_{12}^2(\theta_c) + m^2(\Delta_c) \bar{\beta}_{22}^2(\theta_c)} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_u} \right)^2 \quad (19)$$

$$K_{Ic}^* = \frac{\left[\bar{f}_{\theta\theta}^1(\theta_c) + m(\Delta_c) \bar{f}_{\theta\theta}^{II}(\theta_c) \right]^{1-2\lambda_1}}{\left[\bar{\beta}_{11}^2(\theta_c) + m(\Delta_c) \bar{\beta}_{12}^2(\theta_c) + m^2(\Delta_c) \bar{\beta}_{22}^2(\theta_c) \right]^{1-\lambda_1}} \cdot \frac{K_{Ic}^{2(1-\lambda_1)}}{\sigma_u^{1-2\lambda_1}} \quad (20)$$

对于三点弯曲试件来说,根据文献[12]可知临界破坏荷载与广义应力强度因子关系为:

$$K_{Ic}^* = \frac{F_c l}{t b^{1+\lambda}} f^* \left(\frac{d}{b}, \omega \right) \quad (21)$$

式中, l 为试件跨度; t 为试件厚度; b 为试件高度; F_c 为破坏荷载; $f^* \left(\frac{d}{b}, \omega \right)$ 为形状参数, 它的确定方法为:

$$f^* \left(\frac{d}{b}, \omega \right) = f \left(\frac{d}{b} \right) + \left(\frac{\omega}{\pi} \right)^\beta \left[g \left(\frac{d}{b} \right) - f \left(\frac{d}{b} \right) \right] \quad (22)$$

其中,

$$f \left(\frac{d}{b} \right) = 2.9 \left(\frac{d}{b} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{d}{b} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{d}{b} \right)^{5/2} - 37.6 \left(\frac{d}{b} \right)^{7/2} + 38.7 \left(\frac{d}{b} \right)^{9/2} \quad (23)$$

$$g \left(\frac{d}{b} \right) = \frac{1.5}{(1-d/b)^2} \quad (24)$$

而 β 随缝高比取值由图 3 给出。

有限断裂力学运用求解步骤为:

(1) 在 $20^\circ \leq \theta_c \leq 90^\circ$ 中每 1° 取一个值代入公式(19), 得到相应的裂缝扩展长度 Δ_c 的表达式, 再联立式(18), 可以得到裂缝尖端临界距离 Δ_c 的隐式方程, 运用 Matlab 软件进行逆二次插值法计算 θ_c 的值, 进一步可以得到 Δ_c 的解。

(2) 把步骤(1)中算到的 Δ_c 和 θ_c 代入公式(20) 求出 K_{Ic}^* 。

(3) 最后将算到的 K_{Ic}^* 代入公式(21), 求出对应的破坏荷载 F_c 。

根据平均应力准则本文也做相应推论, 得到裂缝增量 Δ_c 为:

$$\Delta_c = \frac{2}{\lambda \cdot \psi(2\alpha)} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_u} \right)^2 \quad (25)$$

式中, λ 为特征值; $\psi(2\alpha)$ 为关于切口角度的函数, 它的取值可以由图 4 给出。

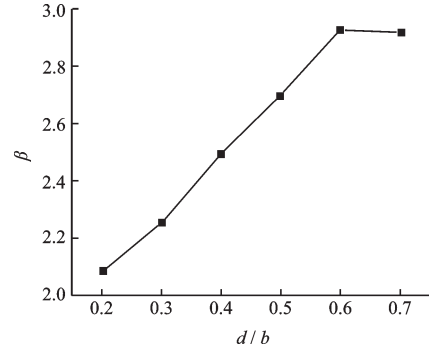


图3 β 随缝高比变化的关系

Fig.3 Value β changing with crack height ratio

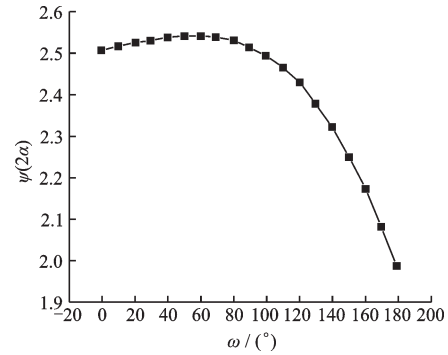


图4 函数 $\psi(2\alpha)$ 随 V 型切口角度的关系

Fig.4 Value $\psi(2\alpha)$ changing with V notch angle

2 试验概况

2.1 试验材料

根据《混凝土结构试验方法标准》^[12], 设计强度为 C30 混凝土配合比见表 1, 用 P.O.42.5 级的普通硅酸盐水泥, 粒径为 5~16 mm 连续级配石灰石碎石, 粒径为 0.35~0.5 mm 的中砂和水搅拌而成。

表 1 混凝土试件配合比

Table 1 Mix proportion of concrete specimens

混凝土设计 强度等级	材料用量/(kg·m ⁻³)			
	水泥	水	沙子	石子
C30	400	190	610	1 235

2.2 试件制备

试件采用木模成型, 尺寸统一规格为 100 mm×100 mm×440 mm, 试件按切口深度可分为 10、20、30、40 mm, 切口角度为 0°、30°、60°、90°、120°、150°六种, 混凝土浇筑按照《混凝土结构工程施工规范》^[13] 进行浇筑, 养护 28 d。按加载方式分为跨中加

载,偏心 10 mm 加载,偏心 30 mm 加载。试件按照切口深度-切口角度-偏心距进行编号,如 30-60-1,其表示为切口 30 mm,切口角度 60°,加载偏心距为 100 mm 的试件,每组试件做 3 个。

3 试验过程

3.1 混凝土力学性能测试

试验前对同批制作的 3 个标准立方体 (150 mm × 150 mm × 150 mm) 试块在微机控制压力试验机 (WHY-2000) 上进行加压试验记录抗压强度 $f_{cu,k}$ 。根据文献 [14] 计算抗拉强度 $f_{t,k}$ 和弹性模量 E ,再由施士昇 [15] 提出剪切模量 G 和弹性模量 E 之比约为 0.40,以及二者与泊松比的关系确定泊松比 ν ,结果见表 2。将测试到的抗压强度代入经验公式得到断裂韧性 $K_{IC} = 0.645 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

表 2 混凝土材料的基本性能参数

Table 2 Basic performance parameters of concrete materials

试块 编号	$f_{cu,k}/\text{MPa}$		$f_{t,k}/\text{MPa}$	E_c/GPa	泊松比 ν
	记录	平均值			
C30-1	38.58				
C30-2	38.27	38.62	5.72	44	0.25
C30-3	39.01				

3.2 起裂荷载的测定

本试验采用电阻应变片法测定起裂荷载,其原理在胡少伟等 [16] 研究中已经介绍过,这种方法是采用电阻应变片对称粘贴在试件裂缝尖端处监测应变的变化情况,如图 5 所示。

通过裂缝尖端两侧的应变变化曲线判断,在试

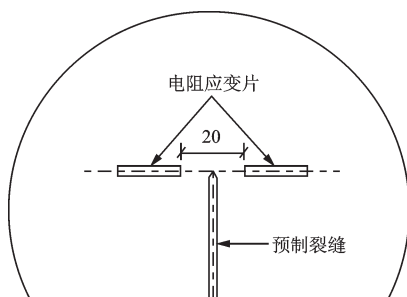


图 5 混凝土应变片布置

Fig.5 Layout of strain gauges on concrete

件起裂前其应变会随荷载增大而增大,到一个荷载临界点时应变随荷载慢慢减少,这个荷载临界点即起裂荷载,图 6 为试件 30-0-0-1 的应变-荷载曲线,其中最大应变处所对的荷载即为起裂荷载。

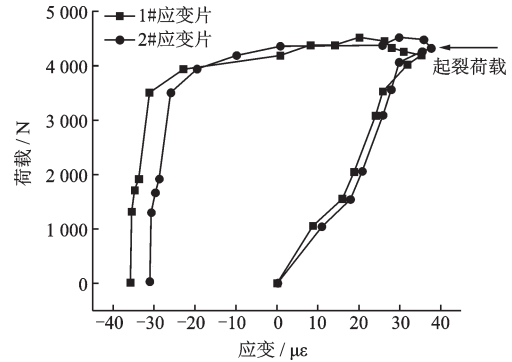


图 6 试件 30-0-0-1 在 1# 和 2# 处应变与荷载的关系曲线

Fig.6 Relationship between strain and load at 1# and 2# of test piece 30-0-0-1

3.3 断裂过程区的测定

对于脆性材料或者准脆性材料来说断裂过程区 (简称 FPZ) 是由荷载作用下产生的微裂纹所形成的分布区。基于 L. Saucedo 等 [17] 和 B. Shen 等 [18] 采用数字图像技术 (DICM) 研究断裂过程区,此方法精度高、操作方便,于是本文采用 DICM 确定不同荷载作用下的断裂过程区尺寸。DICM 是通过捕捉加载前后的图片,分析所采集的试件图片表面的像素变化来分析试件表面点的位移,数字图像相关法测量系统分析图片是通过识别试件表面的斑点来辨别的,故需要对每个试件表面进行处理,如图 7 所示。

通过 Vic-2D 软件将 DICM 采集到的图像进行分析,得到起裂-失稳前-失稳时的应变场如图 8 所示。

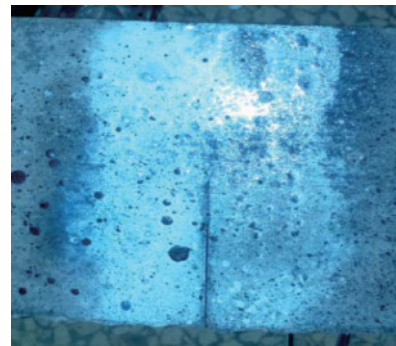


图 7 试件表面喷漆处理

Fig.7 Spray painting treatment on specimen surface

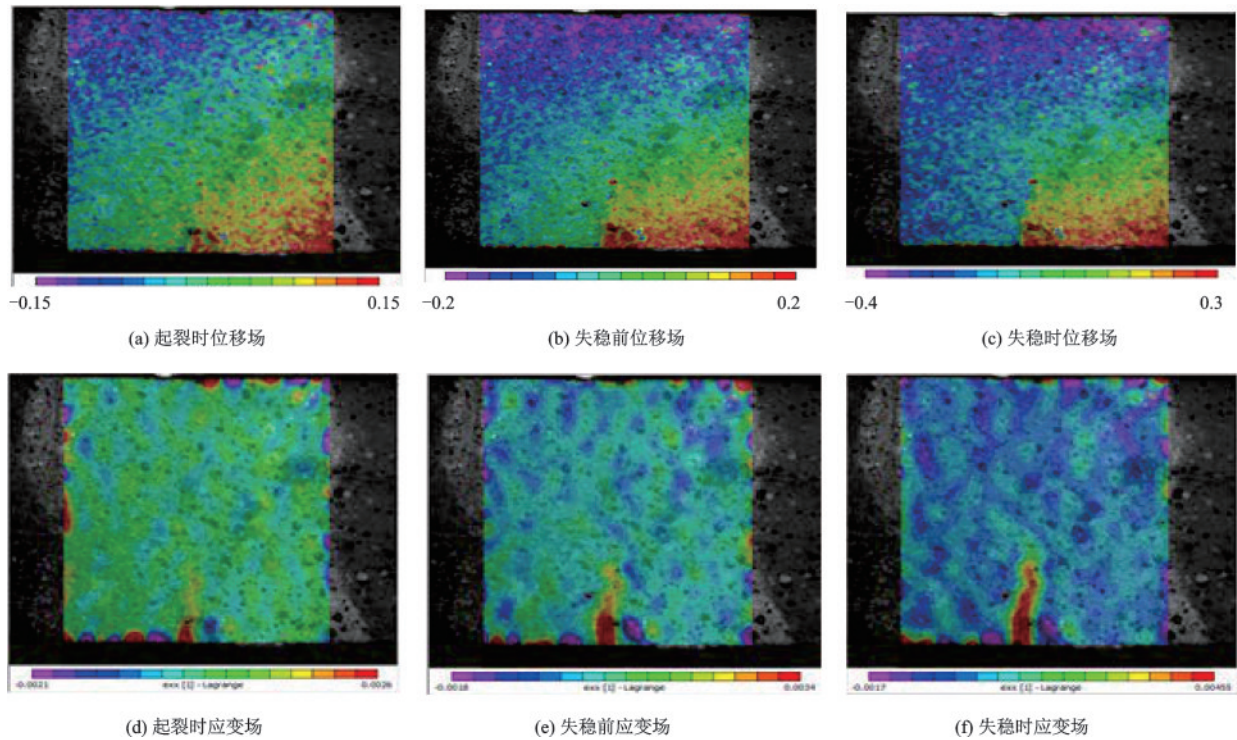


图8 各个荷载时刻的位移场和应变场

Fig.8 Displacement field and strain field at each loading moment

先确定预制切口尖端像素坐标,最后将 Vic-2D 软件得到的对应尖端各个荷载时刻的水平位移导入 Origin9.0 软件,图 9 为 10-0-0-1 试件各个时刻的水平位移。

由此可以算出相应 y 像素坐标裂缝左右边界点之间相对位移差值,该差值即为该荷载时刻的裂缝宽度,再通过 y 轴找上方何处像素 x 坐标为 0 位置,该位置对应的 y 轴像素坐标即为裂缝长度。

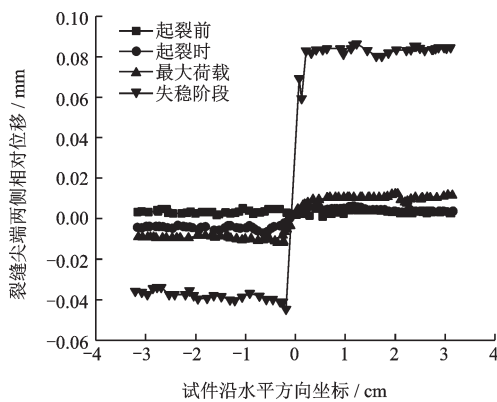


图9 各个荷载时刻试件计算区位移场分布

Fig.9 Displacement field distribution of calculation area at each loading time

4 试验结果分析

4.1 含不同缝高比的 V 型切口梁对荷载值和断裂过程区研究

根据起裂荷载测量原理,做试验所用混凝土试件的切口角度均为 0° ,有 5 种不同初始缝高比,加载方式均为跨中加载,记录不同时刻荷载值和相应的应变值,再通过 Origin9.0 绘制应变—荷载曲线,从而找到起裂荷载,其结果如图 10 所示。

由 DICM 原理同样分析这 5 种缝高比的应变云

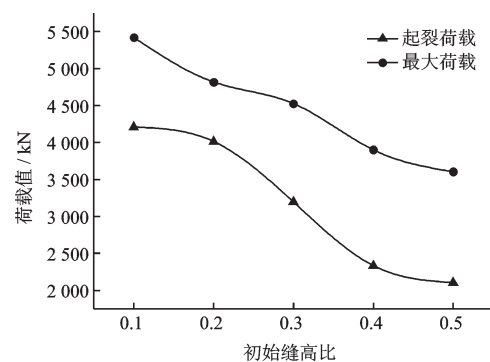


图10 初始缝高比对荷载值的影响

Fig.10 The influence of crack height ratio on load

图,借助 Vic-2D 软件得到各个荷载下断裂过程区的尺寸,其结果见表 3。

4.2 含不同切口角度的 V 型切口梁的荷载值和裂过程区研究

研究影响起裂荷载的第二个因素为 V 型切口角度,做实验所用的混凝土试件的缝高比均为 0.3,切口角度有 6 种不同形式,加载方式均为跨中加载,结果如图 11 所示。

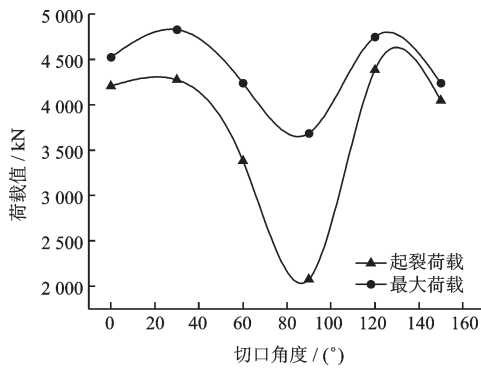


图 11 切口角度对荷载值的影响

Fig.11 The influence of crack height ratio on load

由 DICM 原理分析这 6 种切口角度的应变云图,借助 Vic-2D 软件得到各个荷载下的断裂过程区的尺寸,其结果见表 4。

4.3 有限断裂力学预测结果分析

实验对含 V 型切口混凝土试件的三点弯曲实验,其中 V 型切口包括 $\omega=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$,考虑偏心 0、100、300 mm 加载的试件,实验结果与有限断裂准则预测结果的对比见表 5。另外本文还采用了平均应力准则进行预测,与有限断裂力学准则预测结果进行比较。

5 结 论

(1) V 型切口试件的起裂荷载和破坏荷载的变化随着缝高比的增大而减小;切口角度在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 变化时,起裂荷载和破坏荷载随着切口角度的增大而减小,在 $90^\circ\sim 120^\circ$ 变化时,它们随着切口角度的增大而增大,在 $120^\circ\sim 150^\circ$ 变化时,它们随着切口角度的增大而减小;起裂荷载和破坏荷载随着加载偏心距增加而增大。

表 3 缝高比变化对应的各个荷载时刻的断裂过程区的尺寸

Table 3 The size of the fracture process zone at each load moment corresponding to the change in crack height ratio

试件编号	起裂位置断裂过程区宽度/ 10^{-3} mm			断裂过程区的长度/mm		
	起裂时刻	最大荷载时刻	失稳时刻	起裂时刻	最大荷载时刻	失稳时刻
10-0-0	5.65	11	96.09	4.370	6.400	20.329
20-0-0	4.23	14	100	7.277	11.972	42.403
30-0-0	2.55	20.01	80.28	7.217	17.241	54.955
40-0-0	6.59	15.64	90	9.324	18.916	66.899
50-0-0	6.22	7.78	100	6.944	20.255	70.115

表 4 V 型切口角度变化对应的各个荷载时刻的断裂过程区的尺寸

Table 4 The size of the fracture process zone at each load moment corresponding to the V-shaped notch angle change

试件编号	起裂位置断裂过程区宽度/ 10^{-3} mm			断裂过程区的长度/mm		
	起裂时刻	最大荷载时刻	失稳时刻	起裂时刻	最大荷载时刻	失稳时刻
30-0-0	2.55	20.01	80.28	7.217	17.241	54.955
30-30-0	2.830 5	22.211 1	89.110 8	8.010 87	19.137 51	61.000 05
30-60-0	2.397	18.809 4	75.463 2	6.783 98	16.206 54	51.657 7
30-90-0	2.448	19.209 6	77.068 8	6.928 32	16.551 36	52.756 8
30-120-0	3.06	24.012	96.336	8.660 4	20.689 2	65.946
30-150-0	3.57	28.014	112.392	10.103 8	24.137 4	76.937

表5 根据FFM准则和平均应力准则对含V型切口混凝土试件预测结果

Table 5 Prediction results of concrete specimens with V-shaped incisions according to FFM criteria and average stress criterion

试件编号	实验结果		K_I^*/K_{II}^*	FFM准则			平均应力准则		
	$\theta_c/(^\circ)$	F_c/N		$\theta_c/(^\circ)$	F_c/N	Δ_c/mm	$\theta_c/(^\circ)$	F_c/N	Δ_c/mm
30-0-0	90	4 525	1.12	90	4 680	8.1	90	4 828	8.12
30-0-1	82	4 810	1.08	79	4 861	6.56	79	4 895	8.14
30-0-3	73	5 310	1.05	82	5 265	6.78	72	4 989	8.15
30-30-0	90	4 830	1.18	90	4 088	7.8	90	4 185	7.32
30-30-1	82	4 890	1.25	77	4 881	7.9	89	4 985	7.95
30-30-3	74	5 595	1.19	78	5 135	8.2	70	6 259	7.9 4
30-60-0	90	4 240	1.11	90	3 820	7.6	90	3 565	6.63
30-60-1	80	5 280	1.06	79	4 861	7.9	79	4 888	7.85
30-60-3	73	5 660	0.87	72	5 965	7.8	72	5 989	7.85
30-90-0	90	3 687	1.23	90	4 088	7.4	90	4 185	6.12
30-90-1	82	4 162	0.99	87	3 881	7.4	89	3 985	7.56
30-90-3	84	4 481	0.96	88	4 135	7.3	80	4 259	7.56
30-120-0	90	4 750	0.98	90	4 980	7.48	90	5 128	6.53
30-120-1	77	5 012	1.07	73	4 820	7.0	73	4 565	7.32
30-120-3	70	5 250	1.14	79	4 861	6.9	69	4 888	7.32
30-150-0	90	4 240	1.44	90	3 965	6.5	90	4 989	6.46
30-150-1	75	4 750	1.36	78	5 088	7.2	70	5 185	7.16
30-150-3	72	5 250	1.19	77	5 881	7.2	69	4 985	7.16

(2) 起裂时刻和最大荷载时刻的断裂过程区等于裂缝长度,而失稳时断裂过程区远远小于裂缝长度。证明断裂过程区长度从开始至最大荷载后仍是扩展并增大,至失稳阶段,断裂过程区产生滑移,并且迅速减小;当V型切口角度小于120°时,断裂过程区随切口角度增大而减小,当V型切口角度大于120°时,断裂过程区随切口角度增大而增大。

(3) 平均应力准则下的裂缝扩展长度随着切口角度的增加整体呈下降趋势,而切口角度不变的情况下,裂缝的扩展长度在跨中加载时较小,而小位移偏心加载的裂缝扩展长度基本相同。

(4) 有限断裂力学准则与平均应力准则对比,无论是临界破坏荷载还是裂缝扩展角度,有限断裂力学准则预测的破坏荷载和裂缝扩展角度值与试验结果更吻合。

参考文献:

[1] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of

crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement & Concrete Research, 1976, 6(6):773-781.

[2] 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(2):32-38.
 Xu Sh L, Zhao G F. Double K-fracture criterion for crack propagation in concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1992(2) :32-38. (in Chinese)

[3] Hashin Z. Finite thermoelastic fracture criterion with application to laminate cracking analysis[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1996, 44(7) :1 129-1 145.

[4] Leguillon D. Strength or toughness: a criterion for crack onset at notch[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2002, 21:61-72

[5] Taylor D, Cornetti P, Pugno N. The fracture mechanics of finite crack extension [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72:1 021-1 038

[6] Cornetti P, Pugno N, Carpinteri A, et al. Finite fracture mechanics: a coupled stress and energy failure criterion [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73

- (14):2 021-2 033.
- [7] Sun Z, Ooi E T, Song C. Finite fracture mechanics analysis using the scaled boundary finite element method [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 134: 330-353.
- [8] 童谷生, 赖泽坤. 基于有限断裂力学的FRP-混凝土界面粘结强度研究[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(4):13-21.
Tong G Sh, Lai Z K. Research on FRP-concrete interface bond strength based on finite fracture mechanics [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2017, 34(4): 13-21. (in Chinese)
- [9] Sih G C. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems[J]. *International Journal of Fracture*, 1974, 10(3):305-321.
- [10] Priel E, Bussiba A, Gilad I. Mixed mode failure criteria for brittle elastic V-notched structures [J]. *International Journal of Fracture* 2007, 144: 65-247.
- [11] Berto F, Campagnolo A, Lazzarin P. Fatigue strength of severely notched specimens made of Ti-6Al-4V under multiaxial loading [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(5):503-517.
- [12] 混凝土结构试验方法标准: GB 50152—1992[S]. 北京:中国建筑科学研究院, 2012.
Standard for test methods of concrete structures: GB 50152—1992[S]. Beijing: China Academy of Building Sciences, 2012. (in Chinese)
- [13] 混凝土结构工程施工规范: GB 50666—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
Code for construction of concrete structures: GB 50666—2011 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [14] 李家康, 王 巍. 高强混凝土的几个基本力学指标 [J]. *工业建筑*, 1997, 27(8):50-54.
Li J K, Wang W. Several basic mechanical indexes of high strength concrete [J]. *Industrial Construction*, 1997, 27(8):50-54. (in Chinese)
- [15] 施士昇. 混凝土的抗剪强度、剪切模量和弹性模量 [J]. *土木工程学报*, 1999, 32(2):47-52.
Shi Sh Sh. Shear strength shear modulus and elastic modulus of concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1999, 32(2):47-52. (in Chinese)
- [16] 胡少伟, 范向前, 陆 俊. 缝高比对不同强度等级混凝土断裂特性的影响 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 23(2):162-168.
Hu Sh W, Fan X Q, Lu J. Effect of seam height ratio on fracture characteristics of concrete with different strength grades [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 23(2):162-168. (in Chinese)
- [17] Saucedo L, Yu R C, Ruiz G. Fully-developed FPZ length in quasi-brittle materials [J]. *International Journal of Fracture*, 2012, 178(1/2):97-112.
- [18] Shen B, Paulino G H. Direct extraction of cohesive fracture properties from digital image correlation: a hybrid inverse technique [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(2):143-163.

(本文责编:池营营)