

文章编号: 1000-4750(2009)03-0093-06

超高性能纤维改性混凝土断裂参数研究与应用

*吴香国^{1,2}, 徐世焯¹, 吴明喜³

(1. 大连理工大学土木工程学院, 大连 116024; 2. 哈尔滨工程大学建筑工程学院, 哈尔滨 150001; 3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 断裂参数研究是 UHPFRC(超高性能纤维改性混凝土)断裂性能研究的关键课题之一。该文假设钢纤维对应力强度因子和裂纹尖端张开位移的闭合作用服从线性分布, 短钢纤维三维乱向随机均匀分布于 UHPFRC 基质内, 推导了基于钢纤维几何性能参量和物理性能参量的 UHPFRC 断裂参数, 即临界应力强度因子和临界裂纹尖端张开位移的理论表达。据此推导了抗力阻值曲线的计算参数, 构造了 UHPFRC 的抗力阻值曲线。利用柔度理论和所构造的 R 曲线方程, 预报了具有不同初始刻槽的 UHPFRC 三点弯曲梁的载荷变形关系。同时开展了具有不同初始刻槽的三点弯曲梁加载试验。模型预报结果与实验数据对比表明: 该文给出的短钢纤维的桥联作用引起的应力强度因子衰减和裂纹尖端张开位移的闭合作用模型假设相对合理。由于给出的断裂参数是钢纤维的几何性能参量和物理性能参量的函数, 这样为开展基于断裂力学的纤维混凝土材料的微观组分配比设计提供了新思路。该文给出的 UHPFRC 双参数断裂模型, 还可作为 UHPFRC 结构安全评定有限元软件开发的模型参考。

关键词: 水泥基复合材料; 载荷变形; 断裂力学; 阻值曲线; 超高性能; 纤维改性

中图分类号: TU528.31; O346.1 **文献标识码:** A

FRACTURE PARAMETERS STUDY AND APPLICATION OF ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCEMENT CONCRETE

*WU Xiang-guo^{1,2}, XU Shi-lang¹, WU Ming-xi³

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Architecture Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The research on fracture parameters is one of the key projects on UHPFRC (ultra high performance fiber reinforcement concrete). The effects of steel fiber on stress intensity factor and crack tip opening displacement are assumed to be linear, and short steel fibers are assumed to distribute in UHPFRC randomly. Based on these assumptions, the fracture parameters, i.e. critical stress intensity factor and critical crack tip opening displacement, are expressed in terms of fiber geometrical parameters and physical parameters, and the computational coefficients of R -curve are derived accordingly. Next, load-deformation relationship of the three points bending UHPFRC beam are developed with different initial notches. At last, loading tests are carried out to verify the fiber reinforcement model.

Key words: cementitious composites; load-deformation; fracture mechanics; resistance curve; ultra high performance; fiber reinforcement

超高性能纤维改性混凝土(Ultra High Performance Fiber Reinforcement Concrete, 国际缩写为 UHPFRC), 作为混凝土研究领域在过去十余年的最

大贡献之一, 是新一代的纤维混凝土家族(FRC)的成员。UHPFRC 以其抗压强度超过 140MPa、抗弯折强度超过 40MPa、抗拉强度达到 12MPa—18MPa,

收稿日期: 2007-09-20; 修改日期: 2007-12-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50438010); 国家 973 项目(2002CB412709)

作者简介: *吴香国(1976—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副研究员, 博士, 主要从事新型材料与结构设计、工程力学等方向研究(E-mail: wuxiangguo@hrbeu.edu.cn);

徐世焯(1953—), 男, 湖北咸宁人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 主要从事混凝土断裂力学研究(E-mail: slxu@dlut.edu.cn);

吴明喜(1977—), 男, 黑龙江阿城人, 工程师, 硕士, 主要从事结构工程方向研究(E-mail: wumingxi722@hotmail.com).

以及较高的耐久性能等优异特点, 决定了其在建筑组合结构、近海结构、核结构、薄壁结构以及土木工程新型桥梁结构等工程领域具有远大应用前景。目前, 世界各国都在积极开展 UHPFRC 材料机理和结构设计理论研究。虽然 UHPFRC 结构规范在国际上尚未正式颁布, 但是一些发达国家已建造了 UHPFRC 预应力桥梁样板工程, 如澳大利亚建造的 Shepherds 桥梁^[1], 日本在 Iowa-US 建造的 Wapello 桥梁和 Kuysu 高速桥梁^[2], 以及由美国联邦公路管理局(FHWA)负责实施的 UHPFRC 短跨桥梁^[3]等。

在开展工程应用的同时, 各国学者深入研究其材料性能。作为准脆性材料, 断裂参数研究依然是 UHPFRC 安全评定的重要研究课题之一。许多学者开展了普通混凝土的断裂性能研究。Wecharatana 和 Shah 首先将抗力阻值曲线应用于混凝土材料的稳态裂纹增长和断裂过程区域性能^[4]。1992 年 Ouyang 和 Shah 利用纤维复合理论假设, 开展了纤维改性的基质韧度研究^[5]。2001 年 Banthia 和 Nandakumar 开展了低体积含量的聚合物纤维改性混凝土的裂纹增长抗力研究^[6]。1999 年, 徐世焯和 Reinhardt 在前人研究的基础上, 提出了著名的准脆性材料的双 K 断裂准则^[7]。2003 年 Dragoslav Sumarac 等人推导了三点弯曲普通混凝土梁的断裂抗力曲线^[8]。但关于 UHPFRC 的断裂性能研究尚无研究报导, 由于 UHPFRC 的超高性能和纤维改性特点, 为了推进其工程应用, 其断裂性能有待开展。

本文以双参数断裂模型为基础, 假设 UHPFRC 内钢纤维对裂纹应力强度因子和裂纹尖端张开位移的闭合作用服从线性分布, 并且钢纤维三维乱向随机均匀分布于 UHPFRC 基质内, 构造了纤维几何性能和物理性能参量表达的临界应力强度因子和临界裂纹尖端张开位移表达, 推导了抗力阻值曲线的计算参数。应用几何负结构的概念分析三点弯曲刻槽梁, 避免了非线性积分方程繁琐求解。利用柔度理论和所构造的 R 曲线方程, 编制了具有不同初始刻槽的 UHPFRC 三点弯曲梁的载荷变形关系理论预报数值流程图。同时开展了具有不同初始刻槽的三点弯曲梁加载试验。理论模型预报结果与实验数据对比表明, 本文给出的短钢纤维的桥联作用引起的应力强度因子衰减和裂纹尖端张开位移的闭合作用模型假设相对合理。由于给出的双断裂参数

是钢纤维的几何性能参量和物理性能参量的函数, 这为开展基于断裂力学的纤维混凝土材料的微分组分配比设计提供了新思路。本文给出的 UHPFRC 双参数断裂模型还可以作为开展基于有限元的 UHPFRC 结构安全评定软件开发的模型参考。

1 抗力阻值 R 曲线理论

具有初始裂纹长度 a_0 的结构在载荷作用下产生的应变能记为 U , 应变能对裂纹增长的释放率记为 G 。裂纹扩展在尖端需要耗散的能量记为 W , 且 W 关于裂纹长度 a 的变化率记为 R 。 R 作为准脆性材料的裂纹扩展的能量释放率, 是一个渐增上凸的函数, 称之为断裂抗力, 如图 1 所示。当满足下列条件时, 裂纹开始扩展:

$$G = R \quad (1)$$

对于准脆性材料, 裂纹保持稳态扩展至:

$$\frac{\partial G}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a} \quad (2)$$

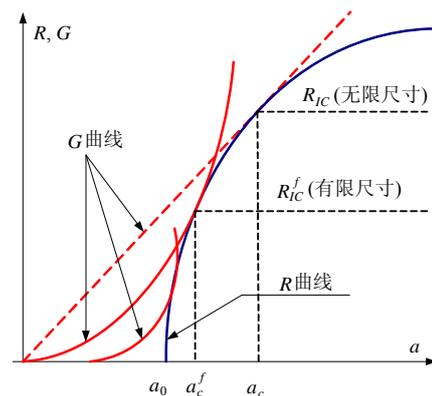


图 1 R 曲线的定义

Fig.1 The definition of R -curve

方程(1)和方程(2)是准脆性材料裂纹稳态扩展的一般准则, 同时满足方程(1)和方程(2)的裂纹长度是临界裂纹长度, 记为 a_c 。许多研究表明, a_c 不仅与材料性能有关, 而且也与试件几何和初始刻槽尺寸有关^[9]。这里将临界裂纹尖端张开位移 $CTOD_c$ 作为 UHPFRC 的断裂参数之一。根据双参数断裂模型, UHPFRC 的断裂参数定义为: 临界应力强度因子 K_{IC} 和临界裂纹尖端张开位移 $CTOD_c$ 。 K_{IC} 和 $CTOD_c$ 可通过刻槽梁试验测定。 R 曲线的一般表达式为^[10]:

$$R = \beta\psi(a - a_0)^{d_2} \quad (3)$$

$$\psi = 1 - \frac{d_2}{d_1} \left(\frac{\alpha a_0 - a_0}{a - a_0} \right)^{d_2 - d_1} \quad (4)$$

$$d_{1,2} = \frac{1}{2} + \frac{\alpha-1}{\alpha} \pm \left[\frac{1}{4} + \frac{\alpha-1}{\alpha} - \left(\frac{\alpha-1}{\alpha} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

其中： a 和 a_0 分别是裂纹总长度和初始刻槽长度。 α 是稳态裂纹临界增长参数，记为 $a_c = \alpha a_0$ ， β 是与 α 、 K_{IC} 以及刻槽长度相关的待定常量。

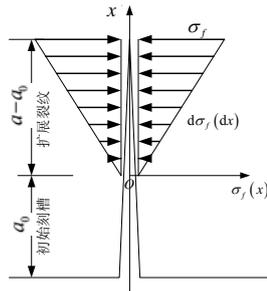
2 UHPFRC 双参数断裂模型

在确定 UHPFRC 的抗力阻值 R 曲线时，考虑钢纤维闭合作用，如图 2(a)所示。钢纤维的桥联作用使得应力强度因子和裂纹尖端张开位移减弱，因此 UHPFRC 的临界状态断裂合成双参数为：

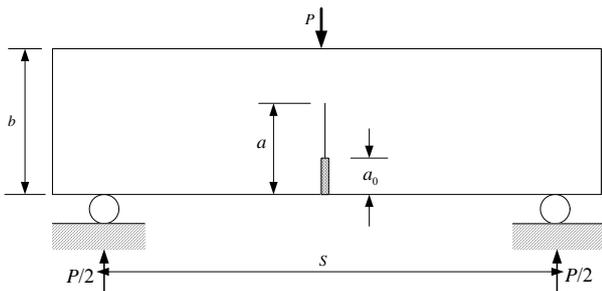
$$K_{IC} = K_I^P - K_I^{\sigma_f} \quad (6)$$

$$CTOD_c = CTOD^P - CTOD^{\sigma_f} \quad (7)$$

这里， K_I^P 和 $CTOD_c^P$ 分别是由外载 P 引起的应力强度因子和外载 P 裂纹尖端张开位移，而 $K_I^{\sigma_f}$ 和 $CTOD^{\sigma_f}$ 分别是由钢纤维桥联闭合作用 σ_f 引起的应力强度因子和临界裂纹尖端张开位移。



(a) 桥联应力作用模型



(b) 三点弯曲刻槽梁

图2 UHPFRC 三点弯曲刻槽梁分析示意图

Fig.2 Three points bending UHPFRC beam with initial notch

2.1 应力强度因子 K_I^P

如图 2(b)所示的三点弯曲刻槽梁，外载引起的应力强度因子为^[11]：

$$K_I^P = \sigma_P \sqrt{\pi a} g_1(a/b), \quad \sigma_P = \frac{3PS}{2b^2t} \quad (8)$$

其中，几何计算因子 $g_1(a/b)$ 与梁的跨高比有关：

$$g_1(a/b) = \frac{1.0 - 2.5a/b + 4.49(a/b)^2 - 3.98(a/b)^3 + 1.33(a/b)^4}{(1-a/b)^{3/2}} \quad (9)$$

2.2 应力强度因子 $K_I^{\sigma_f}$

如图 2(a)所示，作用在 UHPFRC 单位面积上的钢纤维桥联应力^[12]可以表示为：

$$d\sigma_f = \frac{\pi D_f \tau_{fm} L_f N_{uf} t}{2(a-a_0)} x dx \quad (10)$$

其中： L_f 、 D_f 和 τ_{fm} 分别是纤维的长度、直径和界面剪切强度； N_{ds} 为单位面积上的纤维根数^[12]：

$$N_{uf} = \frac{8V_f}{(L_f + 1)\pi D_f^2} \quad (11)$$

对于有限尺寸的单边刻槽板，在初始刻槽边缘作用力 P ，如图 3 所示，载荷引起的应力强度因子为^[11]：

$$K_I = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} g_2(a/b, x/a) \quad (12)$$

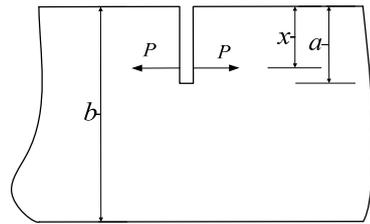


图3 受裂缘力作用的单边刻槽板

Fig.3 Single-edge cracked plate with wedge forces

由此得到本模型的相应微应力强度因子为：

$$dK_I^{\sigma_f} = \frac{2d\sigma_f}{\sqrt{\pi a}} g_2(a/b, x/a) \quad (13)$$

其中，几何计算因子 $g_2(a/b, x/a)$ 为：

$$g_2(a/b, x/a) = \frac{3.52(1-x/a)}{(1-a/b)^{3/2}} - \frac{4.35-5.28x/a}{(1-a/b)^{1/2}} + \left[\frac{1.30-0.30(x/a)^{3/2}}{\sqrt{1-(x/a)^2}} + 0.83 - 1.76 \frac{x}{a} \right] [1-(1-x/a)a/b] \quad (14)$$

将方程(10)代入方程(13)并积分，即可求得钢纤维闭合作用 σ_f 引起的应力强度因子为：

$$K_I^{\sigma_f} = \int_{a_0}^a \frac{8\sqrt{\pi a} V_f D_f \tau_{fm} L_f t}{(a-a_0)(L_f+1)\pi D_f^2} \frac{x}{a} g_2(a/b, x/a) dx \quad (15)$$

2.3 裂纹合成应力强度因子 K_I

根据方程(9)，应力强度因子 K_I 可以表达为：

$$K_I = \sigma_p \sqrt{\pi a} g_1(a/b) - \int_{a_0}^a \frac{8\sqrt{\pi a} V_f D_f \tau_{fm} L_f t}{(a-a_0)(L_f+1)\pi D_f^2 a} g_2(a/b, x/a) dx \quad (16)$$

2.4 CTOD_c 的确定

具有初始刻槽的三点弯曲梁的裂纹尖端张开位移可以表示为:

$$CTOD = CMOD_p \cdot g_3(a/b, a_0/a) - CTOD_{\sigma_f} \quad (17)$$

其中:

$$g_3(a/b, a_0/a) = \left\{ (1-a_0/a)^2 + \left(1.081 - 1.149 \frac{a}{b} \right) \left[\frac{x}{a} - (x/a)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (18)$$

$$CTOD_{\sigma_f} = \frac{K_I^2}{\sigma_{ys} E} = \frac{\sigma_p^2 \pi a}{\left[E \int_{a_0}^a d\sigma_f / (a-a_0) \right]} = \frac{\sigma_p^2 \pi a 2(a-a_0)}{EC(a+a_0)} \quad (19)$$

$$CMOD_p = \frac{4\sigma_p a}{E} g_2(a/b) \quad (20)$$

这里, 计算因子 C 是材料常数, 其理论计算式为:

$$C = \frac{1}{2} \pi D_f \tau_{fm} L_f N_{uf} \quad (21)$$

则

$$CTOD = \frac{4\sigma_p a}{E} g_2(a/b) \cdot g_3(a/b, a_0/a) - \frac{\sigma_p^2 \pi a 2(a-a_0)}{EC(a+a_0)} \quad (22)$$

2.5 参数 α 和 β 的确定

根据应力强度因子随裂纹发展的变化规律, 可以将混凝土的试件划分为几何正结构和几何负结构两类。对于几何正结构而言, 任何裂纹的扩展意味着结构的破坏。而对于几何负结构, 裂纹可以持续地稳态扩展至某一门槛值, 应力强度因子开始递减变化。显然, 具有初始刻槽的 UHPFRC 三点弯曲梁属于几何负结构^[12]。由 K_{IC} 和 $dK_I / da = 0$, 可唯一确定 α 和 β 。其中的两个未知临界参量 a_c 和 σ_{PC} 可由下列方程组求得:

$$\frac{d}{da} \left\{ \sigma_p \sqrt{\pi a} g_1(a/b) - \int_{a_0}^a \frac{2Ct}{(a-a_0)\sqrt{\pi a}} g_2(a/b, x/a) dx \right\} = 0 \quad (23)$$

$$CTOD_c = \frac{4\sigma_{PC} a_c}{E} g_2(a_c/b) \cdot g_3(a_c/b, a_0/a_c) -$$

$$\frac{\sigma_p^2 \pi a_c 2(a_c - a_0)}{EC(a_c + a_0)} \quad (24)$$

这样, α 可由 $a_c = \alpha a_0$ 求得。 β 可由 K_{IC} 和 α 求得。与 a_c 对应的 R 的稳态值 R_{IC} 与 K_{IC} 的关系为:

$$R_{IC} = \beta(\alpha a_0 - a_0)^{d_2} = (K_{IC})^2 / E \quad (25)$$

那么

$$\beta = (K_{IC})^2 (\alpha a_0 - a_0)^{-d_2} / E \quad (26)$$

这样, UHPFRC 的阻值 R 曲线由方程(3)可求得。

3 抗力阻值 R 曲线的应用

3.1 柔度控制方程

为了预报结构的载荷变形关系, 需要预先确定其柔度控制方程。根据线弹性断裂力学, 应变能释放率可以表示为:

$$G = \frac{P^2}{4\pi r} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (27)$$

其中, C 是载荷作用点的柔度。对方程(27)积分, 并根据 $G=R$, 结构的柔度表达式为:

$$C = \int_{a_0}^a \frac{2R}{b^2 \sigma^2} da \quad (28)$$

由此可确定结构的载荷作用点的变形。

3.2 数值计算流程图

根据上述模型, 编制了计算流程图如图 4 所示。

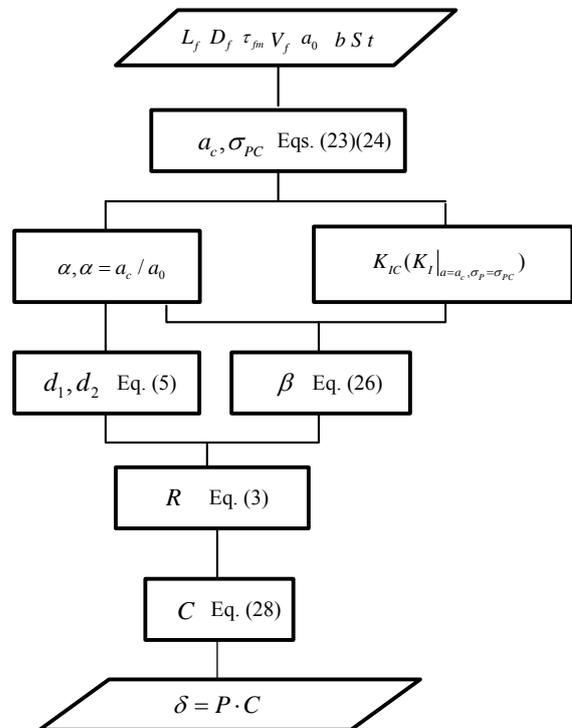


图 4 数值计算流程图

Fig.4 Flow chart of numerical calculation

4 试验设计与讨论

4.1 UHPFRC 配比与试验设计

本文开展了 UHPFRC 加载实验,材料的配比如表 1 所示。在小水灰比的条件下,获得较好流动性。采用实验室自主研发生产的短钢纤维,长度 13mm、直径 0.2mm,强制搅拌设备搅拌至 800 转。所有试件在 90±2℃和湿度保持 95%的蒸汽养护室,养护 48h。测试蒸汽养护 24h 的 UHPFRC 立方体抗压均值强度是 145MPa,其抗拉均值强度 12MPa。但在开展的直拉实验和三点弯曲实验中,由于实验设备误差和安装误差不可避免造成载荷偏心,导致 UHPFRC 表现出较低的挠度硬化和应变硬化特点,这将导致载荷变形曲线起始阶段的延性偏低。

表 1 UHPFRC 的配合比
Table 1 Mixing ratio of UHPFRC

水泥	硅灰	硅粉	细砂	水	消泡剂	膨胀剂	钢纤维	减水剂
1	0.25	0.3	1.1	0.22	0.005	0.005	0.02	0.04

本文设计了四类初始刻槽尺寸的三点弯曲梁试件,分别是 20mm、30mm、40mm 和 60mm,试件尺寸为 150mm×150mm×450mm,每类初始刻槽试件加工 2 个,共计 5 组 10 根梁。具有初始刻槽和不具有初始刻槽的试件加载结果如图 5(a)、图 5(b)

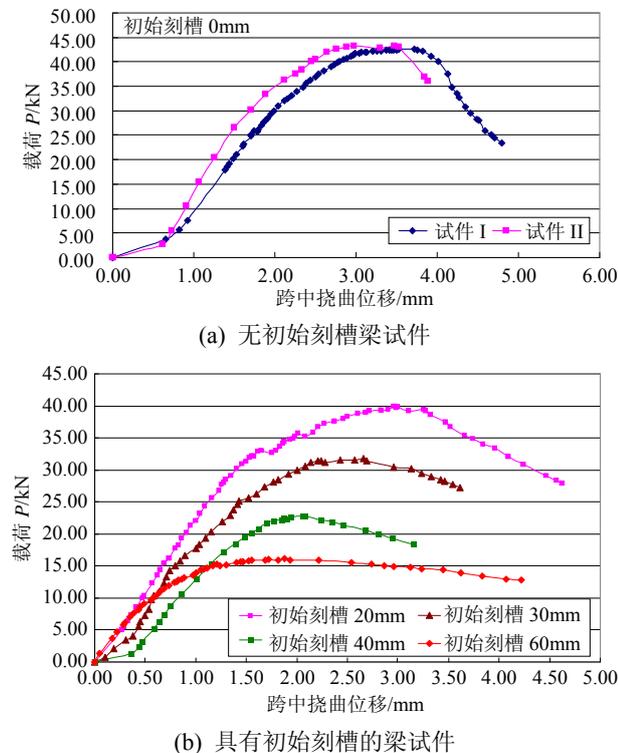


图 5 具有不同初始刻槽的三点加载弯曲梁实验结果
Fig.5 Test results of three points bending beam with different initial notch

所示。根据计算流程图的理论预报结果与实验结果的对比如图 6 所示。

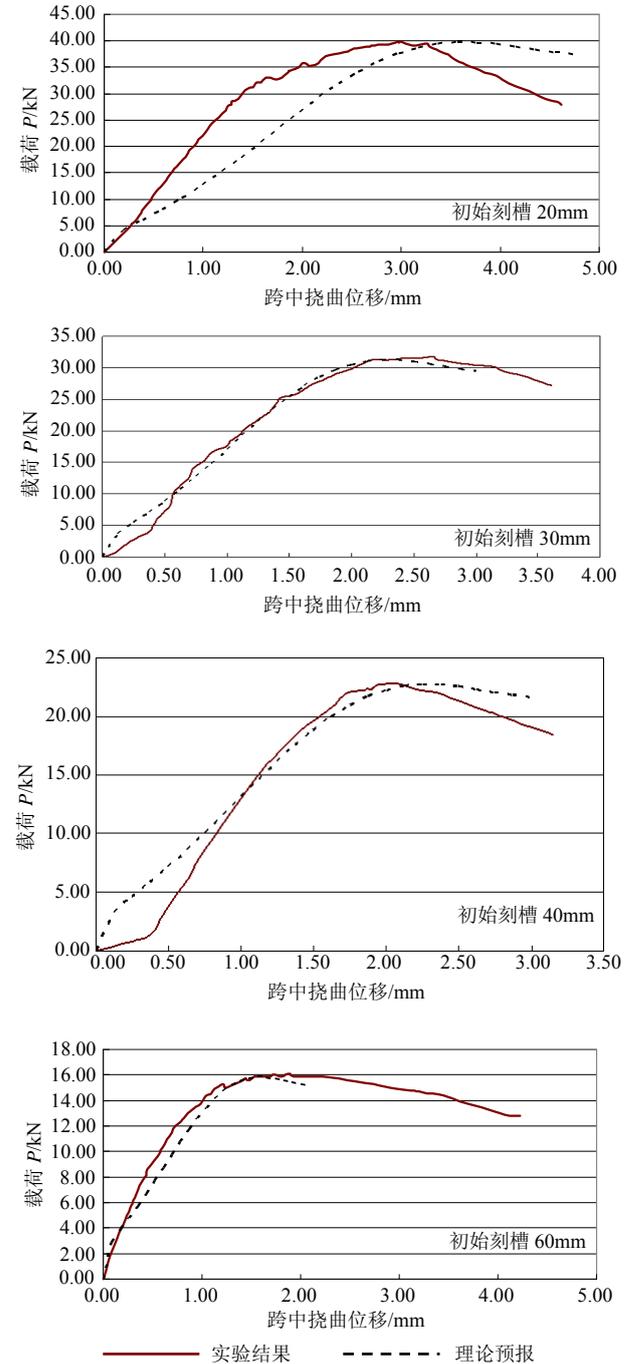


图 6 载荷变形曲线理论预报与实验结果对比
Fig.6 Comparison of computed loading deformation curve with that of test

结果表明:理论预报的最大载荷及载荷挠度变形趋势、峰值载荷及其相应的位移具有较好的一致性。而且材料表现为准脆性特点,并不具有挠度硬化特征。另外,在加载初始阶段二者存在一些差别,主要是由于载荷偏心缺陷所引起的,但对于测试峰值载荷影响不大。

5 结论

本文构造了 UHPFRC 的双参数断裂模型, 推导了双参数 K_{IC} 和 $CTOD_c$ 以及 R 曲线模型参数 α 、 β 的计算表达, 开展了三点弯曲梁的加载试验。结果表明, 给出的钢纤维桥联闭合作用引起的裂纹应力强度因子和裂纹尖端张开位移的衰减模型相对合理。推导的断裂参数和模型参数, 可作为 UHPFRC 断裂性能的评定参考。由于该断裂参数是钢纤维的几何参量和物理参量的分布函数, 这为开展 UHPFRC 材料的优化配比设计提供了基于断裂理论的渠道, 即基于断裂力学的 UHPFRC 材料的抗裂微观组分配比设计。另外, 本文给出的 UHPFRC 双参数断裂模型可作为开展基于有限元的 UHPFRC 结构安全评定软件开发的模型参考。

由于在计算过程中需要引用试件几何参量, 因此该断裂模型对于小尺寸结构依然是几何相关的, 这是其不足之处。下一步将双参数模型与双 K 断裂准则相结合, 期待得到以钢纤维性能参量表达的、适用于各类几何尺寸 UHPFRC 结构断裂参量。

参考文献:

- [1] Cavill B, Chirgwin G. The worlds first ductal road bridge Sherpherds gully creek bridge [C]. 21st Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia. Brisbane, 2003.
- [2] Okuma H. The first highway bridge applying ultra high strength fiber reinforced concrete in Japan [C]. 7th International Conference on Short and Medium Span Bridge. Montreal, Canada, 2006.
- [3] Graybeal B, Hartmann J, Perry V. Ultra-high performance concrete for highway bridge [C]. FIB Symposium. Avignon, 2004.
- [4] Wecharatana M, Shah S P. Predictions of nonlinear fracture process zone in concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1983, 109(5): 1231—1246.
- [5] Ouyang C S, Shah S P. Toughening of high strength cementitious matrix reinforced by discontinuous short fibers [J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22(6): 1201—1215.
- [6] Banthia N, Nandakumar N. Crack growth resistance of concrete reinforced with a low volume fraction of polymeric fiber [J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20(17): 1651—1653.
- [7] Xu S L, 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.
- [8] Sumarac D, Sekulovic M, Krajinovic D. Fracture of reinforced concrete beams subjected to three point bending [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2003, 12(1): 31—44.
- [9] Bazant Z P, Kazemi M T. Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete [J]. International Journal of Fracture, 1990, 44(2): 111—131.
- [10] Ouyang C S, Barzin M, Shah S P. An R -curve approach for fracture of quasi-brittle materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 37(4): 901—913.
- [11] Shah S P, Swartz S E, Ouyang C S. Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [12] Wu X G, Han S M, Kim S W, Kang S T. Shear failure load of SFR-UHPCC I-beam without stirrup based on limit analysis of concrete plasticity [J]. Key Engineering Materials, 2006, 324: 491—494.