

UHTCC 加固混凝土梁断裂行为分析

范兴朗¹, 潘剑云², 吴熙¹, 吴智敏¹

(1. 大连理工大学海岸与近海工程实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 浙江农林大学园林学院, 浙江 临安 311300)

摘要:超高韧性水泥基材料(UHTCC)在结构加固改造中具有巨大潜力,运用断裂力学方法研究了UHTCC 加固混凝土梁的开裂行为,其中混凝土以及 UHTCC 的开裂采用虚拟裂缝模型模拟。通过引入裂缝扩展准则以及裂缝口张开位移的协调条件,建立整体控制方程;通过叠加原理计算得到裂缝尖端净应力强度因子,最后得到荷载-裂缝口张开位移曲线。断裂力学方法计算结果与试验结果吻合良好,为 UHTCC 加固混凝土梁的设计提供了一种有效的计算手段。

关键词:断裂力学;混凝土;超高韧性水泥基材料;裂缝扩展准则;权函数

中图分类号:TU528.58 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)01-0053-04

Analysis of fracturing behaviors of UHTCC-strengthened concrete beams//FAN Xinglang¹, PAN Jianyun², WU Xi¹, WU Zhimin¹ (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Landscape and Architecture College, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract: Due to the potential advantages of ultra-high toughness cementitious composite (UHTCC) in structure strengthening and retrofitting, a fracture-mechanics based model is presented. We thus want to analyze the fracture behavior of UHTCC-strengthened concrete beams using the proposed method. The cracking of concrete and UHTCC are both modeled by fictitious crack model. The global equations are built on the basis of the crack extension criterion and the compatibility condition of the crack opening displacement. The K-superposition method is applied to calculate the net crack tip stress intensity factor. By comparing with experimental results, it is shown that the proposed model can accurately capture the overall structural behavior.

Key words: fracture mechanics; concrete; UHTCC; crack extension criterion; weight function

随着混凝土结构服役年限的增加或者服役条件的改变,结构会出现承载能力不足、刚度退化、裂缝宽度过大等各种问题;另外,由于设计规范的更新,早期的一些结构已经不能适应现有规范的要求^[1-2]。由于经济性的考虑,对既有结构进行加固已经成为业主的主要选择。传统的加固方法主要是粘贴钢板法,该方法将钢板采用高性能的黏结剂粘贴于混凝土构件的表面,使钢板与混凝土形成统一的整体,利用钢板良好的抗拉强度达到增大构件承载能力及刚度的目的^[3-4]。该方法的缺点是钢板自重重大,易腐蚀,施工不方便,导致钢板和混凝土之间的黏结性能不能很好地得到保证。近20年来,随着材料工艺的提高,纤维增强高分子材料(FRP)逐渐进入工程师的视野,FRP材料强度大,自重小,耐腐蚀,施工方便,目前已经在实际工程中得到广泛的应用^[5]。但由于混凝土与FRP材料之间的黏结性能不太理想,往往导致FRP的强度不能完全发挥,且结构的破坏

模式与传统结构不同,增加了加固设计的难度^[6-7]。

超高韧性水泥基材料(UHTCC)通过对材料内部结构进行调整、优化,使材料在拉伸时通过多条细密裂缝以提高材料的韧度,使得材料出现准应变强化特征^[8-11],具有轻质高强、高能耗以及高弯曲性能,而且与普通混凝土的黏结性能好。

本文基于断裂力学原理对UHTCC加固混凝土梁的断裂过程进行分析,其中混凝土以及UHTCC的裂缝都通过虚拟裂缝模型进行模拟,利用裂缝扩展准则以及裂缝口张开位移的协调条件建立控制方程,并将得到的计算结果与已有的一些试验结果进行比较。

1 计算公式的推导

图1所示为一个UHTCC加固三点弯曲预制裂缝混凝土梁,其中,梁的宽度为 B ,梁的高度为 H ,梁的长度 $L=4H$,初始裂缝长度为 a_0 ,UHTCC的厚度

为 t_0 。

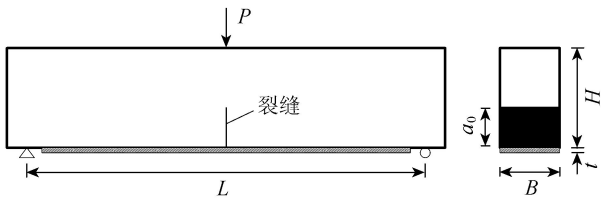


图1 在受拉面浇注 UHTCC 的混凝土三点弯曲线

1.1 基本假设

在做理论推导前,为了简化采用以下基本假设^[8]:①在裂缝扩展过程中,裂缝张开位移为一线性函数;②在整个裂缝扩展过程中,UHTCC 与混凝土界面处的变形一致;③在 UHTCC 的整个开裂过程中,不考虑未开裂区域的弹性变形;④将 UHTCC 对混凝土三点弯曲梁的作用等效为一对集中力作用在梁的底缘;⑤虚拟裂缝面上黏聚力与裂缝张开位移的关系采用双线性软化本构关系。

1.2 混凝土以及 UHTCC 的本构关系

目前,对于混凝土的软化曲线已经有了很多研究,本文采用欧洲模式规范的双线性形式^[12],即

$$\sigma = \begin{cases} f_t \left(1.0 - 0.8 \frac{w}{w_1} \right) & w \leq w_1 \\ f_t \left(0.25 - 0.05 \frac{w}{w_1} \right) & w_1 < w \leq w_c \end{cases} \quad (1)$$

其中 $w_1 = G_F / f_t$ $w_c = 5G_F / f_t$
式中: w 为裂缝张开位移, mm; f_t 为混凝土抗拉强度, MPa; G_F 为混凝土断裂能, N/mm。在没有实测资料的情况下 f_t 与 G_F 可通过欧洲模式规范提供的公式进行确定。

根据朱榆等^[8]的研究结果,UHTCC 的本构关系可以用式(2)来表达:

$$\sigma = \begin{cases} 10E_t \frac{w_u}{1.5} & w_u \leq 1.5\varepsilon_{tfc} \\ \sigma_{tfc} + 10E_u \left(\frac{w_u}{1.5} - \varepsilon_{tfc} \right) & 1.5\varepsilon_{tfc} \leq w_u \leq 1.5\varepsilon_{tfu} \end{cases} \quad (2)$$

式中: w_u 为总裂缝宽度; E_t 为抗拉弹性模量; E_u 为应变硬化弹性模量; σ_{tfc} 和 ε_{tfc} 分别为抗拉初裂应力和应变; ε_{tfu} 为极限抗拉应变。

1.3 断裂过程分析

本文采用虚拟裂缝模型对梁的断裂过程进行分析。根据虚拟裂缝模型原理,当裂缝尖端处应力达到 f_t 时,裂缝扩展。由于裂缝尖端处应力有限,即不存在应力奇异性,根据断裂力学原理,其裂缝尖端处的净应力强度因子 $K_{net} = 0$ ^[13]。净应力强度因子 K_{net} 可以表达为

$$K_{net} = K_p - K_c - K_u = 0 \quad (3)$$

式中: K_p 、 K_c 、 K_u 分别为外荷载、混凝土黏聚力以及 UHTCC 的桥联应力产生的应力强度因子。

利用权函数方法,外荷载 P 产生的应力强度因子可以写成

$$K_p = \int_0^a \sigma(x) h(x, a) dx \quad (4)$$

式中: $\sigma(x)$ 为外荷载作用下未开裂梁的裂纹面部位处应力; $h(x, a)$ 为预开口三点弯曲梁对应的权函数,其中 a 为裂缝长度, x 为裂缝任意处的坐标。

类似地,混凝土黏聚力所产生的应力强度因子 K_c 和 UHTCC 的桥联应力产生的应力强度因子 K_u 分别表示为

$$K_c = \int_0^a \sigma(w) h(x, a) dx \quad (5)$$

$$K_u = \sigma(w_u) h(0, a) \quad (6)$$

式中: $\sigma(w)$ 为混凝土断裂过程区的黏聚力; $\sigma(w_u)$ 为 UHTCC 产生的桥联应力。

对于三点弯曲梁,权函数可以表示为下列函数形式^[14]:

$$h(x, a) = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \frac{1}{\sqrt{1-\rho}} \left[1 + \sum_{(\nu, \mu)} \frac{A_{\nu\mu}}{(1-\rho)^{3/2}} (1-\rho)^{\nu+1} \right] \quad (7)$$

其中

$$\rho = x/a$$

式中: $A_{\nu\mu}$ 为权函数系数, $A_{\nu\mu}$ 可以由表 1 查得; ν, μ 为系数。

表1 权函数系数

ν	$A_{\nu\mu}$				
	$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=2$	$\mu=3$	$\mu=4$
0	0.4980	2.4463	0.0700	1.3187	-3.0670
1	0.5416	-5.0806	24.3447	-32.7208	18.1214
2	-0.1928	2.5586	-12.6415	19.7630	-10.9860

方程(3)隐含着外荷载 P 以及裂缝口张开位移 w_{CMOD} 两个未知量。为了求解这个方程,必须再增加一个辅助方程。根据叠加原理,裂缝口张开位移可以写成下面的形式:

$$w_{CMOD} = w_p + w_c + w_u \quad (8)$$

式中: w_p 、 w_c 和 w_u 分别为在外荷载、混凝土黏聚力和 UHTCC 桥联应力作用下的裂缝口张开位移。

同样,相应荷载作用下裂缝口张开位移可以用权函数表达,根据 Fett 等^[15]的研究结果,有

$$w_p = \frac{2}{E'} \int_0^a h(x, \xi) K_p(\xi) d\xi \quad (9)$$

$$w_c = \frac{2}{E'} \int_0^a h(x, \xi) K_c(\xi) d\xi \quad (10)$$

$$w_u = \frac{2}{E'} \int_0^a h(x, \xi) K_u(\xi) d\xi \quad (11)$$

对于平面应力, $E' = E$; 对于平面应变, $E' = E / (1 - \mu^2)$,

这里 E 为弹性模量。

2 试验验证

为了验证所提出的计算方法,采用文献[16]的试验结果进行比较分析。试验中所用试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 1\,000\text{ mm}$,初始缝高比为 0.4。所有混凝土试件均采用 C30 商品混凝土。试验中测得混凝土的抗压强度为 44.68 MPa,弹性模量为 34.28 GPa。UHTCC 的材料参数分别为: $E_t = 17.5\text{ GPa}$, $E_{tu} = 0.48\text{ GPa}$, $\sigma_{tfc} = 0.48\text{ MPa}$, $\varepsilon_{tfc} = 0.02\%$, $\varepsilon_{ifu} = 4.2\%$, UHTCC 条带厚度为 10 mm、20 mm 和 30 mm 的各组试件两支座间的自重荷载分别为 0.377 kN、0.391 kN、0.404 kN。

试验与理论计算的荷载-裂缝口张开位移曲线见图 2。由图 2 可以看出,计算结果与试验结果吻合良好。值得指出的是,对于条带厚度 20 mm 与 30 mm 的试件,试验结果存在跳跃,这是由于条带开裂后试件突然卸载引起的。本文计算结果没有考虑卸载的影响。

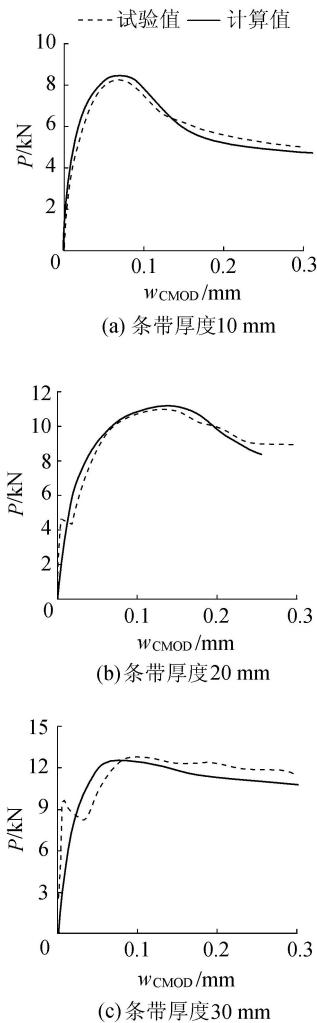


图 2 荷载-裂缝口张开位移曲线

3 结 语

UHTCC 由于其表现出准应变强化特性以及与混凝土界面的良好黏结特性,使得其在今后的加固工程中将成为一种有竞争力的加固材料。本文运用断裂力学方法研究了 UHTCC 加固混凝土梁的开裂行为,其中混凝土以及 UHTCC 的开裂均通过虚拟裂缝模型进行模拟。通过引入裂缝扩展准则以及裂缝口张开位移的协调条件,建立了整体控制方程。本文方法计算结果与试验结果吻合良好,为 UHTCC 加固混凝土梁的设计提供了一种有效的计算手段。

参考文献:

[1] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3): 24-36. (YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(3): 24-36. (in Chinese))

[2] 徐镇凯,袁志军,胡济群. 建筑结构检测与加固方法[J]. 工程力学,2006,23(增刊2): 117-130. (XU Zhengkai, YUAN Zhijun, HU Jiqun. The inspection and strengthening methods on building structures [J]. Engineering Mechanics,2006,23(Sup2): 117-130. (in Chinese))

[3] 任伟,贺拴海,赵小星,等. 粘贴钢板加固持荷钢筋混凝土 T 型梁模型试验[J]. 中国公路学报,2008,21(3): 64-68. (REN Wei, HE Shuanhai, ZHAO Xiaoxing, et al. Model test on preloaded RCT-beam strengthened by bonded steel plates [J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(3): 64-68. (in Chinese))

[4] 曾宪桃,车惠民. 粘贴玻璃钢板加固混凝土梁疲劳试验研究[J]. 土木工程学报,2001,34(1): 33-38. (ZENG Xiantao, CHE Huimin. A fatigue test of reinforced concrete beam strengthened by GFRP plate [J]. China Civil Engineering Journal,2001,34(1): 33-38. (in Chinese))

[5] MEIER U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites [J]. Construction and Building Materials,1995,9(6): 341-351.

[6] BUYUKOZTURK O, HEARING B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP [J]. Journal of Composites for Construction,1998,2(3): 138-144.

[7] BUYUKOZTURK O, HEARING B. Crack propagation in concrete composites influenced by interface fracture parameters [J]. International Journal of Solids and Structures,1998,35(31/32): 4055-4066.

[8] 朱榆,徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料加固混凝土三点弯曲梁断裂过程的研究[J]. 工程力学,2011,28

(3): 69-77. (ZHU Yu, XU Shilang. Study on fracture process of concrete three-point bending beams retrofitted with UHTCC[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (3): 69-77. (in Chinese))

[9] 李庆华,徐世焱. 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料受弯构件理论分析[J]. 工程力学, 2010, 27 (7): 92-102. (LI Qinghua, XU Shilang. Theoretical analysis on flexural behavior of reinforced ultra-high toughness cementitious composite members[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (7): 92-102. (in Chinese))

[10] 李庆华,徐世焱. 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料弯曲性能计算分析与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31 (3): 51-61. (LI Qinghua, XU Shilang. Analysis and experiment of reinforced ultra-high toughness cementitious composite flexural members [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31 (3): 51-61. (in Chinese))

[11] 张秀芳,徐世焱. 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料 (RUHTCC)梁弯曲性能影响的几何参数分析[J]. 工程力学, 2010, 27 (2): 78-83. (ZHANG Xiufang, XU Shilang. Papameteric study on the effect of beam geometry

on flexural behavior of steel reinforced ultra-high toughness cementitious composites (RUHTCC) beams [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (2): 78-83. (in Chinese))

[12] CEB-FIP. CEB-FIP Model Code 1990 [M]. Lausanne, Switzerland: Thomas Telford Ltd, 1993.

[13] MAI Y. Cohesive zone and crack-resistance (R)-curve of cementitious materials and their fibre-reinforced composites[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69 (2): 219-234.

[14] FETT T, MUNZ D. Stress intensity factors and weight functions [M]. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1997.

[15] FETT T, MUNZ D. Influence of crack-surface interactions on stress intensity factor in ceramics [J]. Journal of Materials Science Letters, 1990, 9 (12): 1403-1406.

[16] 朱榆. 混凝土断裂及阻裂理论的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

(收稿日期: 2013 - 01 - 20 编辑: 骆超)

欢迎订阅《水资源保护》杂志

中国科技核心期刊
RCCSE 核心期刊

ISSN 1004-6933
CN 32-1356/TV

《水资源保护》是由河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会主办的科技期刊。该期刊针对我国水资源短缺、用水效率不高、水污染严重等突出问题,探讨水资源保护工作中的基础研究、防治技术、宏观管理及水环境治理问题,重点关注水环境、水资源和大江大湖的环境生态问题和可持续发展问题。主要栏目有科学研究、应用技术、综合述评、管理研究等。

《水资源保护》是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库统计源期刊,已被美国化学文摘(CA)数据库、美国《剑桥科学文摘》(CSA)数据库、波兰哥白尼索引(IC)数据库、中国期刊网、中国数字化期刊群、水信息网、北极星网、中华期刊网、中文科技期刊数据库、中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)等收录和引用,长期以来一直都是水利界和环保部门备受关注的重点期刊,2012 年被教育部科技司授予“中国高校特色科技期刊”称号。

《水资源保护》主要读者对象为全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生,邮发代号:28-298,双月刊,96 页,12 元/期,全年共计 72 元,每逢单月 20 日出版。可向当地邮局订阅,若无法从邮局订阅,亦可登陆本刊网站下载征订单订阅。

编辑部地址:南京市西康路 1 号 河海大学《水资源保护》编辑部

邮政编码:210098

电话/传真:(025)83786642

E-mail:bh@hhu.edu.cn

http://kbb.hhu.edu.cn/web/indexbh.asp? d_id=37