

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.020

CFRP-混凝土界面 4ENF 断裂试验研究

陈 瑛^{1,2}, 乔丕忠^{2,3}

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061 ; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 ;
3. Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Pullman WA 99164-2910, USA)

摘要 : 为了研究 CFRP-混凝土的 II 型和混合型断裂能量释放率(energy release rate, ERR), 进行了铝板调整 CFRP-混凝土 4ENF 断裂试验. 根据 Timoshenko 梁(TB)模型、双参数弹性基础上的 4 点受弯端部切口试件(four-point bending end-notched flexure specimen, 4ENF)梁度模型和多亚层柔性节点模型的 J 积分方法求得了 ERR. 试验结果表明 : 在相同的黏接条件下, II 型或混合型断裂破坏方式有 3 种 : (a)剥离发生在胶层-混凝土界面和界面混凝土上 ; (b)剥离始于胶层-混凝土界面或界面混凝土且混凝土梁发生破坏 ; (c)剥离发生在界面混凝土上且混凝土梁发生破坏. II 型或复合层刚度大于混凝土刚度的混合型断裂试件, 可以获得较高的 ERR. 若复合层刚度小于混凝土层刚度, 裂缝始于胶层-混凝土界面, 发展到一定长度后沿界面混凝土发展, 并导致混凝土发生斜拉破坏, ERR 很低. 通过试验表明, 本 4ENF 可以有效地对 II 型和混合型 CFRP-混凝土界面断裂进行研究.

关键词 : 4 点受弯端部切口试件 ; CFRP-混凝土 ; 能量释放率 ; II 型断裂 ; 混合型断裂

中图分类号 : TU37 **文献标识码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2009)01-0096-04

近年来, 传统材料与复合材料的界面力学性能得到了广泛的关注. 虽然目前国内外对双材料界面断裂性能开展了一系列的试验和理论研究, 但许多模型需要借助于复杂的数值分析工具. 尽管目前可以精确测量荷载值及加载点位移, 但裂纹长度的测量却很困难. 在 ENF 开裂区域和裂纹尖端存在剪力作用, 该剪力产生的摩擦会影响 ERR 的测量^[1-2]. 此外, 由于裂纹的迅速扩展, 在进行断裂试验之前需进行柔度试验^[3], 从而降低了试验精度.

Martin 等^[4]将 ENF 进一步改进为 4 点受弯端部切口试件(four-point bending end-notched flexure specimen, 4ENF). 与 ENF 不同, 在位移控制下的 4ENF 试验裂纹扩展稳定, 故可以得到几个数据点. 由于 4ENF 试件的裂纹尖端位于纯弯段, 不受剪力的影响, 与其他 II 型断裂试验相比, 摩擦力的影响减小, 剪切变形以及剪力引起的裂纹尖端变形对 4ENF 能量释放率的影响不像对其他试件如 ENF 那样显著^[5-6]. 此外, 4ENF 能量释放率与裂纹长度无关, 试验时仅需测量临界荷载便可根据双参数弹性地基上(beam on elastic foundation, BEF)的 4ENF 模型、多亚层柔性节点解析模型或 Timoshenko 梁理论模型求得 ERR, 无须像其他试件(如 ENF)那样测量裂纹的扩展长度和进行柔度试验^[6-7]. 实际上, 要精确测量裂纹长度是很困难的. 因此, 4ENF 试件具有其他试件无法比拟的优越性.

本文提出的调整型 4ENF 是进行 II 型和混合型 FRP-混凝土界面以及其他双材料界面断裂性能研究的有力工具. 本试验利用环氧树脂将 CFRP 织物和 3 种不同厚度的混凝土梁胶结起来, 在 CFRP 下面胶结铝板, 通过调整铝板和混凝土梁的相对厚度, 得到期望的 II 型或混合型加载. 数据处理采用 Timoshenko 梁理论、弹性地基上的 4ENF 梁度理论^[6]和多亚层柔性节点模型的 J 积分方法^[7], 分别得到 II 型和混合型断裂韧度. 断裂试验在美国 Akron 大学的 MTS 试验机上进行.

1 材 料

混凝土的配合比为 1:1.577:2.365:0.4 (水泥、砂、石子、水的质量之比), 石子的粒径为 3.2 ~ 9.5 mm. 试件浇筑成型后采用蒸汽养护, 28 天后开始测试. 试验按 ASTM 相关规范操作, 测得的混凝土抗拉强度、抗压强

收稿日期 : 2008-03-11

基金项目 : 美国国家科学基金 (EHR-0090472)

作者简介 : 陈瑛 (1970—), 女, 山东诸城人, 博士后, 主要从事结构工程和复合材料力学研究.

度和弹性模量分别为3.14 MPa、34.24 MPa 和27 579 MPa，泊松比为 0.2. 环氧树脂胶法向刚度、剪切刚度和抗拉强度分别为 3 102.6 MPa、1123.9 MPa 和 75.8 MPa，泊松比为 0.38. CFRP 织物为单层 CF130，厚度为0.165 1 mm. 碳纤维拉伸弹性模量和剪切弹性模量分别为 2.275×10^5 MPa 和 0.93×10^5 MPa，泊松比为 0.2. 铝板的拉伸弹性模量为 69 982 MPa，泊松比为 0.35.

2 4ENF 试验

2.1 4ENF 试件制作步骤

铝板调整 FRP-混凝土 4ENF 试件是将铝板、CFRP 和混凝土胶结起来，试件尺寸与加载情况如图 1 所示. 在 CFRP 和混凝土之间预置胶带，可得到长度为 $a = 267$ mm 的初始切口. 该长度可保证切口端部免受加载点压应力的影响.

2.2 断裂试验

铝板调整 CFRP-混凝土 4ENF 断裂试验包括 II 型断裂和混合型断裂试验. 其中试件 M 混凝土厚度为 51 mm，混凝土层与 FRP-铝复合材料层的弯曲刚度相等，为 II 型加载断裂试验；混合型断裂试件 S 和试件 L 各有 6 个，混凝土梁厚度分别为 38 mm 和 64 mm. 所有试件铝板厚度均为 38 mm.

试验加载采用位移控制，加载速度为 0.5 mm/min，最大位移限定为 25 mm. 为了减小试验机本身变形的影响，梁跨中的横向变形由固定于梁底的 MTS 开口位移计测量. 荷载通过传感器测量，利用采集软件记录荷载和挠度. 试验时持续加载，直到荷载位移曲线出现第 2 个明显的峰值为止. 所有试验裂纹均稳定扩展.

3 ENF 试验结果与讨论

3.1 界面破坏方式

试验得到的破坏方式有 3 种(图 2)(a)破坏方式 A. 剥离发生在胶层-混凝土界面和界面混凝土上. 试件 M_1 、 M_2 、 M_3 、 S_1 、 S_2 和 S_6 的裂纹在胶层-混凝土界面扩展一定长度后，又在混凝土界面内发展直到试件末端. 胶层-混凝土界面剥离，图 2(a)中显示黑色的为清晰的 FRP 表面，界面混凝土剥离发生在不足 1 mm 的混凝土表层内，图 2(a)中显示为浅灰层部分.(b)破坏方式 B. 剥离始于胶层-混凝土界面或界面混凝土且混凝土梁发生破坏. 试件 M_4 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 和 L_5 裂缝始于胶层-混凝土界面，发展一定长度后沿界面混凝土发展，并引发一混凝土斜裂缝，该裂缝随荷载增加延伸至右加载点下发生斜拉破坏. 在混凝土梁侧面可观察到明显的裂缝.(c)破坏方式 C. 剥离发生在界面混凝土且混凝土梁发生破坏. 试件 M_5 和 L_6 破坏方式与 B 类似，但裂缝始于界面混凝土.



图 2 断裂界面：破坏方式
Fig. 2 Fractured interfaces：Failure modes

3.2 荷载-位移曲线

图 3 为典型的 II 型、混合型断裂试件 S 和试件 L 的荷载-位移曲线. 图中荷载是将力传感器测出的荷载平均到 2 个加载点得到的，位移是跨中的挠度. 曲线上有两三个明显的峰值荷载. 第 1 个峰值荷载前的荷载-位移为线弹性关系，当试件内的弹性能随着荷载的增加积累到一定程度时，裂缝开始发展并释放部分能量. 荷载-位移曲线的突然下降表明裂缝开始发展. 图 3(b)为图 3(a)的第 1 个明显峰值荷载附近的荷载-位移曲线的放大部分，从该图可以明显地看出荷载的波动. 起裂后，由于 CFRP 织物和混凝土之间的桥联作用，荷载继续增加，荷载-位移依然为线性关系，但柔度要比第 1 个峰值荷载前的柔度大，此时裂缝沿界面扩展，达到第

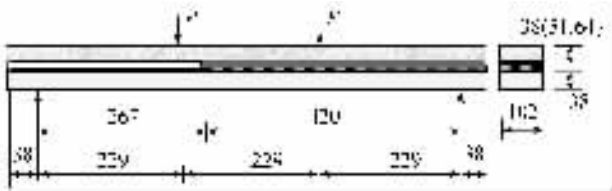


图 1 4ENF 尺寸与加载情况(尺寸单位 mm)
Fig. 1 Configuration and loading of 4ENF (unit：mm)

2 个峰值时表示界面破坏(对试件 L 为混凝土破坏). 此后荷载-位移曲线虽然继续增加, 但主要依靠铝板的变形和摩擦力作用.

Ⅱ型断裂 4ENF 的 ERR 根据 Timoshenko 梁(TB)模型^[6]和双参数弹性地基上(BEF)的 Timoshenko 梁 4ENF 模型^[6]进行计算, 混合型断裂的 ERR 可由多亚层柔性节点模型的 J 积分方法^[7]求得. 表 1 列出了 4ENF 峰值荷载的均值和变异系数. 根据 Timoshenko 梁(TB)模型和双参数弹性基础上(BEF)的 4ENF 模型算出的 ERR 分别为 0.75 N/mm 和 0.74 N/mm.

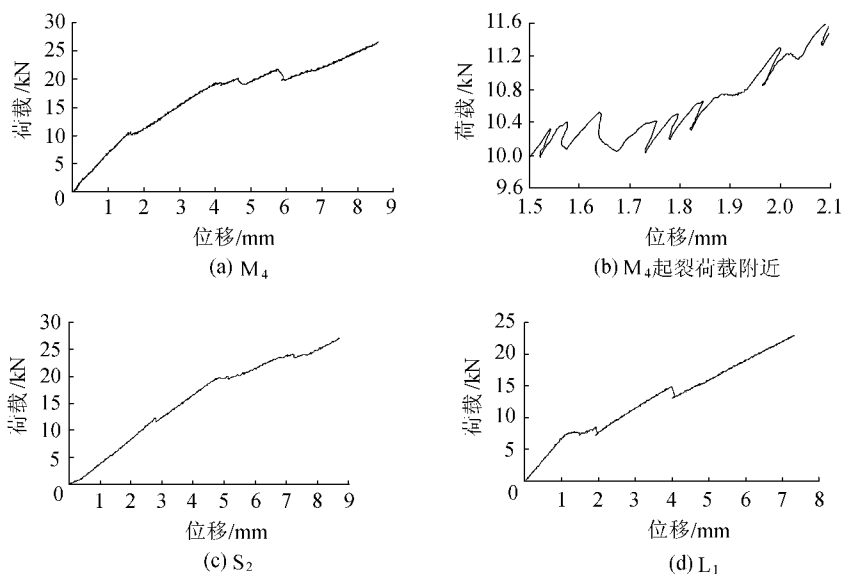


图 3 不同试件的荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of different specimens

表 1 CFRP-混凝土 4ENF 的峰值荷载

Table 1 Peak loads of CFRP-concrete 4ENF

试件编号	峰值荷载/kN	破坏方式	试件编号	峰值荷载/kN	破坏方式	试件编号	峰值荷载/kN	破坏方式
M ₁	19.14	A	S ₁	19.63	A	L ₁	8.51	B
M ₁	17.06	A	S ₁	20.23	A	L ₁	8.45	B
M ₁	16.96	A	S ₂	12.20	A	L ₁	14.52	B
M ₂	12.88	A	S ₂	19.55	A	L ₁	14.87	B
M ₂	19.10	A	S ₂	19.98	A	L ₂	9.25	B
M ₂	19.52	A	S ₃	12.70	B	L ₂	14.02	B
M ₃	16.32	A	S ₃	12.95	B	L ₃	7.85	B
M ₃	16.75	A	S ₃	13.00	B	L ₃	13.99	B
M ₃	16.87	A	S ₃	19.40	B	L ₃	14.32	B
M ₃	13.94	A	S ₄	12.66	B	L ₄	8.31	B
M ₄	10.32	B	S ₄	12.61	B	L ₄	10.58	B
M ₄	10.40	B	S ₄	16.81	B	L ₄	10.71	B
M ₄	10.52	B	S ₄	16.64	B	L ₄	10.99	B
M ₄	10.41	B	S ₅	10.21	B	L ₅	6.60	B
M ₄	21.67	B	S ₅	10.86	B	L ₅	12.43	B
M ₅	14.42	C	S ₅	19.97	B	L ₅	12.88	B
M ₅	14.45	C	S ₆	8.21	A	L ₆	7.57	C
M ₅	18.67	C	S ₆	16.77	A	L ₆	7.67	C
S ₁	17.39	A	S ₆	16.81	A	L ₆	12.39	C
S ₁	19.65	A	L ₁	7.38	B	L ₆	12.66	C
S ₁	19.85	A	L ₁	8.01	B	L ₆	13.24	C

注: 试件 M 的峰值荷载均值为 15.47 kN, 试件 S 的峰值荷载均值为 15.82 kN, 试件 L 的荷载均值为 10.74 kN.

表 2 给出了按 J 积分方法算出的试件 S 和试件 L 的 ERR (用 J 表示)及其Ⅱ型分量(用 J_{II} 表示)以及 J_{II} 与 J 的比值,其中试件 L 的 $J_{II}/J=91\%$,试件 S 的 $J_{II}/J=85\%$. 与 Timoshenko 梁(TB)模型和双参数弹性基础上的 4ENF 模型(BEF)的计算的Ⅱ型断裂结果相比,可以看出试件 S 的 ERR 最大,试件 M 次之,试件 L 最小.这是因为试件 L 混凝土的弯曲刚度大于铝和 CFRP 的复合材料层的弯曲刚度,4ENF 中性轴位于混凝土梁内,混凝土承受较大的拉应力,易在混凝土内先出现裂缝,最后发生斜拉破坏,使承载力降低.所以,由试件 L 测量的断裂韧度更代表混凝土的断裂韧度值,而不能代表 CFRP-混凝土界面的断裂韧度值.而试件 S 的混凝土的弯曲刚度小于铝和 CFRP 的复合材料层的弯曲刚度,4ENF 中性轴

表 2 CFRP-混凝土界面和混凝土的断裂韧度

Table 2 Fracture toughness of CFRP-concrete interface and concrete

试件	$J/(N \cdot mm^{-1})$	$J_{II}/(N \cdot mm^{-1})$	$J_{II} \cdot J^{-1}/\%$
S	0.97	0.82	0.85
L	0.24	0.22	0.91

位于铝板内 ,以界面破坏形式 A 为主 ,故 ERR 较高 .所以 ,由试件 M 和 S 来分别测量 II 型和混合型 CFRP-混凝土界面断裂韧度更有效和正确 .

4 小 结

首先进行了铝板调整 CFRP-混凝土 4ENF 断裂试验 ,研究了 CFRP-混凝土的II型和混合型 ERR ,然后根据 Timoshenko 梁(TB)模型、双参数弹性基础上的 4ENF 柔度模型和多亚层柔性节点模型的 J 积分方法求得了 ERR .

试验结果表明 :在相同的黏接条件下 ,II 型或混合型断裂可以有几种不同的破坏方式 ;II 型或复合层刚度大于混凝土刚度的混合型断裂试件 ,剥离主要发生在胶层-混凝土界面和界面混凝土上 .若复合层刚度小于混凝土层刚度 ,裂缝始于胶层-混凝土界面 ,发展到一定长度后沿界面混凝土发展 ,并导致混凝土发生斜拉破坏 ,ERR 很低 .用铝板调整 FRP-混凝土 4ENF 试件 ,并对上、下两亚层的刚度比进行调整 ,可以得到 II 型或混合型断裂加载条件 ,并可以方便地进行能量释放率分解 .这是一般 FRP-混凝土“伪 II 型”剪切试验和弯曲试验所做不到的 .因此 4ENF 具有其他试件无法比拟的优越性 .

参考文献 :

[1] CARLSSON L A ,GILLESPIE J W ,Jr. ,PIPES R B .On the analysis and design of end notched flexure(ENF) for mode II testing[J] . Journal Compos Mater ,1986 20 594-604 .

[2] MALL S ,KOCHHAR K N .Finite element analysis of end-notched flexure specimens[J] . Journal of Composite Technology Research , 1986 8 54-57 .

[3] DAVIDSON B D , ALTONEN C S , POLAHA J J . Effect of stacking sequence on delamination toughness and delamination growth behavior in composite end-notched flexure specimen[M]//Composite materials : testing and design , ASTM STP 1274 . DEO R B ,SAFF C R . [S . 1 .] :American Society for Testing and Materials , 1996 393-413 .

[4] MARTIN R H ,DAVIDSON B D . Mode II fracture toughness evaluation using a four point bend end notched flexure tes[J] .Plastics , Rubber and Composites ,1999 28(8) 401-406 .

[5] 陈瑛 ,乔丕忠 ,姜弘道 ,等 .弹性地基上的 4ENF 柔度分析[J] .工程力学 2008(5) :152-156 .

[6] 陈瑛 ,乔丕忠 .4ENF 黏聚解析模型分析[J] .河海大学学报 :自然科学版 2008 36(2) 238-241 .

[7] 陈瑛 .双材料梁界面力学模型及其在 FRP-混凝土界面断裂研究中的应用[D] .南京 :河海大学 2006 .

Fracture tests on CFRP-4ENF interfaces

CHEN Ying^{1, 2} , QIAO Pi-zhong^{2, 3}

- (1 . School of Civil Engineering , Shandong University , Jinan 250011 , China ;
- 2 . College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
- 3 . Department of Civil and Environmental Engineering , Washington State University , Pullman WA 99164-2910 , USA)

Abstract : Interface fracture tests using aluminum beam-contoured CFRP-concrete four-point bend end-notched flexure (4ENF) specimens (4ENF) were performed to determine the energy release rates (ERR) of mode II and mixed mode fracture . By using the Timoshenko beam model , the double-parameter 4ENF model on elastic foundation , and the J-integration of multi-layer flexible model , the corresponding ERRs were obtained . The test results show that under the same bonding condition , the fracture patterns of the mode II and mixed mode of the CFRP-concrete interface are as follows : (1) The crack occurs on the CFRP-concrete interface and in the concrete near the interface ; (2) The crack occurs on the CFRP-concrete interface and in the concrete near the interface , and the concrete beam breaks ; (3) The crack occurs in the concrete near the interface , and the concrete beam breaks . When the bending stiffness of the aluminum-FRP compound layer is larger than that of concrete , the specimens for the mixed mode fracture yield a higher ERR , representing the real ERR measurement of CFRP-concrete interface . When the bending stiffness of the compound layer is smaller than that of concrete , the specimens produce cracks at the concrete near the interface or within the concrete beam , thus measuring the ERR of the concrete , rather than that of CFRP-concrete interface . As demonstrated in this study , the 4ENF specimens , if used properly , can be used effectively to characterize mode-II and mixed mode fracture of CFRP-concrete bonded interface .

Key words : 4ENF specimen ; CFRP-concrete bonded interface ; energy release rate ; mode II fracture ; mixed mode fracture