

文章编号:1001-4888(2014)02-0189-11

CFRP-混凝土界面粘结的疲劳性能试验研究^{*}

彭晖^{1,2}, 王博¹, 张建仁^{1,2}, 李树霖¹

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要: 外贴 FRP 是重要的混凝土结构加固技术,但目前对外贴 FRP 加固混凝土结构的疲劳性能研究尚不充分,尤其对 FRP-混凝土粘结界面的疲劳退化规律和破坏模式的研究更为缺乏。本文采用双面剪切试件,通过 2 个静载试件和 4 个疲劳试件的试验研究,考察了粘结长度和胶层厚度等因素对 FRP-混凝土界面粘结疲劳性能的影响。通过分析沿粘结长度的 FRP 应变分布在疲劳循环过程中和疲劳后静载过程中的变化情况,讨论了不同粘结长度和粘结胶层厚度条件下的粘结界面疲劳退化规律和疲劳后静载性能。试验结果表明:胶层树脂-混凝土粘结界面是发生疲劳剥离破坏的薄弱环节;胶层厚度增大时,由于疲劳引起的界面损伤累积发展显著减小,疲劳后静载中胶层厚度较大试件的粘结承载力也更大;粘结长度增大时,界面粘结呈现更为明显的损伤退化,但由于试验粘结长度小于有效粘结长度,疲劳后的静粘结承载力仍更大。

关键词: 纤维增强聚合物 (FRP); 混凝土; 界面粘结; 疲劳荷载; 退化

中图分类号: TU378

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-107

0 引言

纤维增强复合材料(FRP, Fiber Reinforced Polymer)作为一种新型工程材料,由于具有高强的力学性能和优良的耐久性能,已得到土木和交通行业的广泛认可。外贴 FRP 片材加固混凝土结构技术因其工艺简单、施工方便,被广泛运用于各种旧桥维修加固中。国内外的试验研究和工程实践结果表明,FRP 与混凝土之间的粘结性能直接关系到对混凝土结构的加固效果,是该领域研究与应用发展的关键科学问题。疲劳荷载是工程结构承受的主要外部作用之一,也是 FRP-混凝土粘结性能的主要影响因素之一。在已有的 FRP 加固钢筋混凝土梁疲劳试验研究中,研究人员发现疲劳应力引起了 FRP-混凝土界面的剥离,并且这种剥离导致了 FRP 与混凝土内钢筋之间产生应力重分布,致使钢筋承受的疲劳应力增大而造成加固结构的疲劳寿命降低^[1-3]。因此,FRP-混凝土间界面粘结的疲劳性能对于 FRP 加固钢筋混凝土结构的整体疲劳性能具有重要影响。

目前国内外针对外贴 FRP-混凝土结构界面粘结疲劳性能的研究还非常有限,Bizindavyi 等^[4]采用 GFRP 加固素混凝土单剪模型研究了不同长度和宽度的粘结区域对疲劳寿命的影响,发现了界面粘结-滑移刚度在疲劳荷载作用下逐渐退化的现象。Ko 等^[5]采用双剪试件考察了循环荷载作用下 FRP-混凝土的界面粘结性能,考察了 FRP 种类、层数和滞回荷载形式等因素对界面粘结的影响。Yun 等^[6]采用了 CFRP 加固混凝土双剪模型,对外贴系统中不同荷载循环模式条件下粘结界面荷载-滑移曲线进

^{*} 收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008036),交通运输部应用基础研究项目(2010 318 000 006),长沙市科技计划项目(K1203038-11),长沙理工大学桥隧工程创新性项目

通讯作者: 彭晖(1976-),副教授,博士,主要从事桥梁结构耐久性能与先进复合材料应用研究。E-mail: Huipeng1210@gmail.com

行了分析,提出荷载循环幅值上限较高的情况下粘结界面的能量消散随着循环次数的增加而逐渐增大。Carloni 等^[7]在 FRP-混凝土界面单剪疲劳试验中观察到了明显的界面刚度软化,以及界面应力传递区域随着剥离裂缝发展而逐渐移动的现象。邓江东等^[8]应用红外探测技术观测了疲劳过程中 FRP-混凝土界面的损伤剥离发展过程,提出损伤演化可分为萌生、稳定发展和失稳发展 3 个阶段,稳定发展阶段约占界面疲劳总寿命的 99%,界面的疲劳寿命主要取决于 FRP 应力。Gheorghiu 等人^[9]采用 CFRP 加固钢筋混凝土梁弯剪模型,通过比较不同疲劳循环模式下的荷载—跨中挠度曲线得出结论,荷载循环上限的变化对粘结界面的疲劳损伤几乎没有影响,不同的循环模式下粘结界面疲劳累积损伤较为均匀。谢建和等^[10]探讨了该类加固梁中 FRP 与混凝土之间界面疲劳裂纹的扩展规律,基于界面裂纹尖端的力学分析模型推导了三点弯曲加固梁的界面裂纹应力强度因子(SIF)的计算公式,并结合加固梁的界面裂纹扩展实验,提出了该类加固梁界面疲劳裂纹扩展速率的半经验公式。另外,美国混凝土协会(ACI)的 440 委员会提出,疲劳荷载作用下 FRP 加固钢筋混凝土结构的钢筋应力上限不应超过其屈服强度的 80%^[11]。加拿大公路桥梁设计规范^[12]规定钢筋应力幅不超过 125MPa。

粘结长度是粘贴 FRP 加固的重要指标,也是 FRP 加固界面粘结性能研究中受到重点考察的因素之一,对于疲劳荷载作用下粘结长度对界面粘结性能的影响已经开展了一些研究,但研究结论间存在较大的分歧:Bizindaviyi 等^[4]认为粘结长度较大的试件疲劳寿命更长,粘结宽度较大试件的疲劳寿命明显大于粘结区域更狭长的试件。Nigro 等^[13]采用 CFRP 加固素混凝土试件进行单剪试验,研究了单调静载和循环荷载作用下不同粘结长度、加载路径对剥离荷载等界面粘结性能的影响,结果表明试验中施加的低周循环荷载未对界面粘结性能产生显著影响,不同粘结长度对应的剥离荷载也较为接近,但粘结长度减小时界面粘结的变形能力显著降低。Mazumdar 等^[14]通过 GFRP 的单边搭接试验发现,粘结长度增大引起了界面静载性能和疲劳强度的提高,但试验中不同粘结长度下疲劳强度与静力强度的比值基本相同。但 Ferreira 等^[15]进行的 GFRP 单边搭接试验则表明:粘结长度越大疲劳强度越小,在他们的试验中粘结长度为 30mm 的试件展现出了较粘结长度为 60mm 试件更好的疲劳性能。Meneghetti 等^[16]发现 CFRP 的单边搭接试验中,界面粘结的疲劳强度随粘结长度增加而增大。Y.-M. Jen 等^[17]则报告在他们所实施的铝片单边搭接试验中,除了 0.5mm 的胶层厚度外,胶层厚度为 1.0mm 和 1.5mm 时,粘结界面的疲劳性能都随着粘结长度的增加而降低。

胶层厚度是界面粘结的另一参数,虽然之前对胶层厚度的关注较少,仅就胶层厚度对界面粘结疲劳性能的影响开展了很有限的研究,但与粘结长度类似的分歧矛盾也同样出现在这些研究中:Tamura 等^[18]根据单剪试验研究结果提出:静载状态下 FRP-混凝土的粘结承载力随着胶层厚度的增大而提高,但在疲劳荷载下界面粘结的疲劳寿命随着胶层厚度增大而降低;疲劳循环过程中胶层厚度更小时界面剥离沿粘结长度方向的发展更加缓慢。Xu 等^[19]则认为粘结界面疲劳裂纹拓展速率随着胶层厚度的增加而逐渐减小。而 Mazumdar 等^[14]发现当胶层厚度从 0.127mm 变化至 1.651mm 时,0.33mm 的胶层厚度对应着最大的界面粘结承载力。

由上述文献报道可知,目前针对 FRP-混凝土界面粘结的疲劳性能开展的研究还较为有限,一方面是由于研究对象的复杂性和离散性(三种材料,两相界面),另一方面也因为测试手段、分析技术和研究方法的局限。对于这一方向的多个问题,不同人员所得出的结论间存在相当的分歧和矛盾,尚未能形成足够清晰和统一的认识,疲劳荷载作用下 FRP-混凝土界面的粘结行为及其变化规律尚未被很好把握。本文选取了胶层厚度和粘结长度作为主要考察的影响因素,对 FRP 外贴加固混凝土结构的界面粘结疲劳性能进行了初步的探索。

1 试验方案

1.1 试件设计

本文试验仅考察单纯剪切应力条件下 FRP-混凝土界面粘结的疲劳性能,采取混凝土双面剪切的试件形式,如图 1 所示。试件由两个 $150\times 150\times 300\text{mm}$ 的素混凝土棱柱组成,棱柱体的相对侧面分别用两根 $50\text{mm}\times 1.2\text{mm}$ 的碳纤维板连接;在两个混凝土棱柱中分别埋入一根 $\Phi 20$ 螺杆,埋入长度为

220mm,伸出长度约为 80mm;另外,为了避免在疲劳加载过程中两棱柱产生相对转动,在棱柱之间设置了 4 组导向机构。导向机构由分别置入混凝土棱柱的 2 根导向杆与 1 根联结管组成,联结管套住导向杆,形成对导向杆的约束,4 组导向机构形成完整约束,避免混凝土棱柱在疲劳荷载作用下发生相对转动。碳纤维板非粘结区长度均为 200mm,为了保证破坏发生在试验区,对非试验区的碳纤维板用碳纤维布进行缠绕围裹(仅静载试件 M-150-2A 未被围裹)。

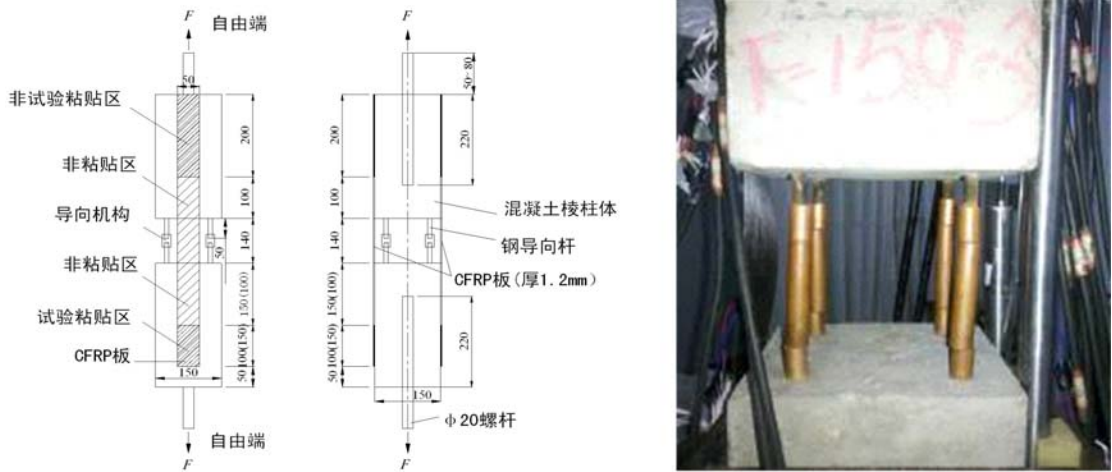


图 1 试件设计

Fig. 1 Design of specimens

本文试验共进行了 2 组静载试验和 4 组疲劳试验,主要考察粘结长度和胶层厚度等影响因素,试验区粘结长度分别设置为 100mm 和 200mm,胶层厚度分别设置为 1mm 和 3mm,具体试件参数设计如表 1 所示。试件编号中,“M”代表静载试件;“F”代表疲劳试件;100、200 代表粘结长度;1、3 代表胶层厚度。试件所使用的混凝土标号均为 C30,采用标准试验方法测得各个试件混凝土强度的平均值为 37.7MPa。碳纤维板和粘结树脂的力学性能如表 2 所示。

表 1 试件参数设置

Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	荷载	试验区粘结长度(mm)	非试验区粘结长度(mm)	胶层厚度(mm)
M-150-2A	静载	150	200	2
M-150-2B	静载	150	200	2
F-100-2	疲劳	100	200	2
F-200-2	疲劳	200	200	2
F-150-1	疲劳	150	200	1
F-150-3	疲劳	150	200	3

表 2 试验材料力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of materials

材料	检验项目	检验值
碳纤维板 (Sika-S512)	抗拉强度	2461 MPa
	受拉弹性模量	1.65×10^5 MPa
	伸长率	1.71%
粘结树脂 (Sikadur-30)	抗拉强度	31.7 MPa
	受拉弹性模量	2627 MPa
	伸长率	1.5%

1.2 测试装置及测点布置

试验中的静力荷载和疲劳荷载是由美国 MTS 公司生产的 MTS-810 提供。该设备荷载范围是士 100kN,最高频率 100Hz。另外使用 LVDT 数字位移传感器对粘结区端部和自由端的位移进行测量;自制了一套夹具和连接构件将 LVDT 数字位移传感器与碳板连接在一起,保证碳板上测试点的位移与 LVDT 铁芯的位移一致,如图 2 所示。



图 2 LVDT 测试 FRP 端部滑移

Fig. 2 Measuring slip at FRP end by LVDT

为了考察 FRP 板沿粘结长度的应变分布,在 FRP 的粘结长度内和非粘结区布置了多个 5mm×3mm 的电阻应变片,其中在粘结区应变片以 20mm 间距布置,非粘结区均布置一个应变片,具体应变片的分布如图 3 所示。

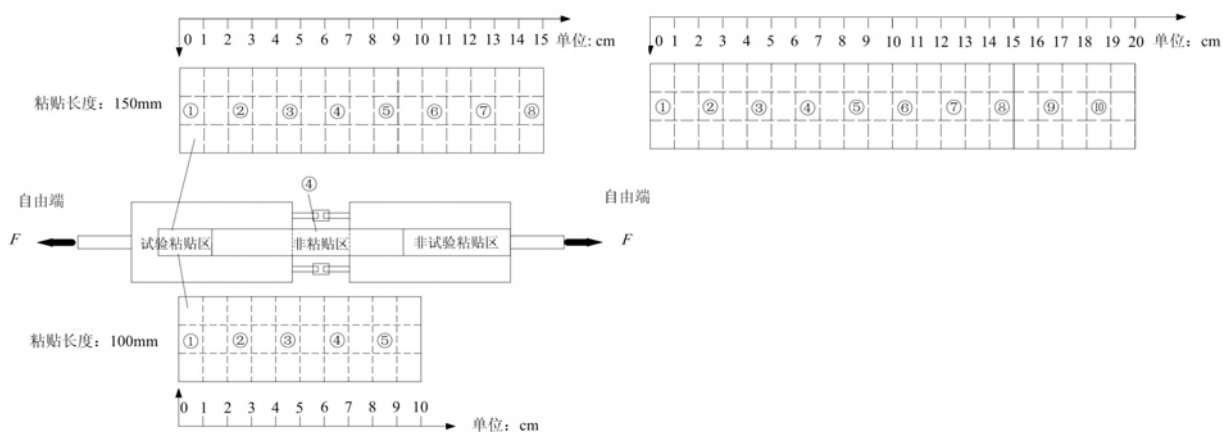


图 3 应变片布置示意图

Fig. 3 Disposal of strain gauges

1.3 试验加载方案

静载试验荷载分级为 2kN,在每级加载完毕之后,等待约 10 分钟,待应变稳定之后再读数。当试件发生破坏时停止加载,记录破坏时的极限荷载。

疲劳循环试验中,荷载上下限值根据静载试验结果确定。两个静载试验试件的平均极限荷载为 41.5kN,在表 3 中用 P_m 表示。已有研究中大多选取静载试验极限荷载的 40%~60%作为疲劳循环幅值的上限,如 Yun 等^[6]采用 45%和 60%的极限荷载;Al-Hammoud 等人^[20]采用 55%的极限荷载;Aidoo 等人^[21]采用 52%的极限荷载。本文试验选取了 20kN(48.2%的极限荷载)作为疲劳循环幅值上限,设定疲劳荷载幅值下限为 6kN(14.5%的极限荷载),疲劳加载频率为 5Hz。

在试验循环至 1 万次、5 万次、10 万次、25 万次、50 万次、100 万次和 150 万次时停机,然后进行最大荷载为当前疲劳荷载上限的静载试验,记录 FRP 应变和界面相对滑移数据。疲劳加载至 200 万次后,按 2kN 一级对试件进行静力加载,直至试件破坏为止。

2 试验结果及分析

2.1 胶层厚度对界面粘结疲劳性能的影响

表 3 给出了静载及疲劳试验的主要试验结果。图 4 描绘了具有不同胶层厚度的试件 F-150-1 和 F-150-3 在荷载循环过程中的 CFRP 应变分布的变化规律。对于试件 F-150-1, 经历 50 万次疲劳荷载后, 距离自由端 125mm 位置的粘结界面应变明显增大, 这表明在前 50 万次荷载循环中界面粘结疲劳损伤从靠近加载端的粘结端部(距自由端 150mm)发展到了这一位置; 100 万次循环时, 距离自由端 105mm 和 85mm 位置的 FRP 应变明显增大, 表明疲劳损伤沿板长在继续向自由端发展; 荷载循环 150 万次时, 从 FRP 应变分布可看出粘结界面的疲劳损伤延伸到了距离自由端 65mm 的位置; 150 万次循环后, 界面粘结疲劳损伤不再继续拓展。对于试件 F-150-3, 25 万次循环时, 距离自由端 125mm 位置的粘结界面应变略有增大, 这表明在前 25 万次循环中, 界面粘结疲劳损伤从粘结区靠近加载端的初始位置发展到这个位置; 25 万次循环之后, FRP 板上各点应变未再发生明显变化, 这说明在之后的疲劳荷载循环中界面粘结疲劳损伤不再明显发展, 终止于距离自由端 125mm 的位置。

表 3 主要实验结果

Tab. 3 Main test results

试件编号	试验荷载	P_{min} (kN)	P_{max} (kN)	$P_{min} / P_m (\%)$	$P_{max} / P_m (\%)$	P_u (kN)	疲劳次数	破坏模式
M-150-2A	静载	—	—	—	—	40	—	FRP 剥离破坏
M-150-2B	静载	—	—	—	—	43	—	FRP 剥离破坏
F-100-2	疲劳	6	20	14.5	48.2	44.5	2000000	混凝土拉剪破坏
F-200-2	疲劳	6	20	14.5	48.2	58.5	2000000	FRP 剥离破坏
F-150-1	疲劳	6	20	14.5	48.2	40	2000000	FRP 剥离破坏
F-150-3	疲劳	6	20	14.5	48.2	58	2000000	FRP 剥离破坏

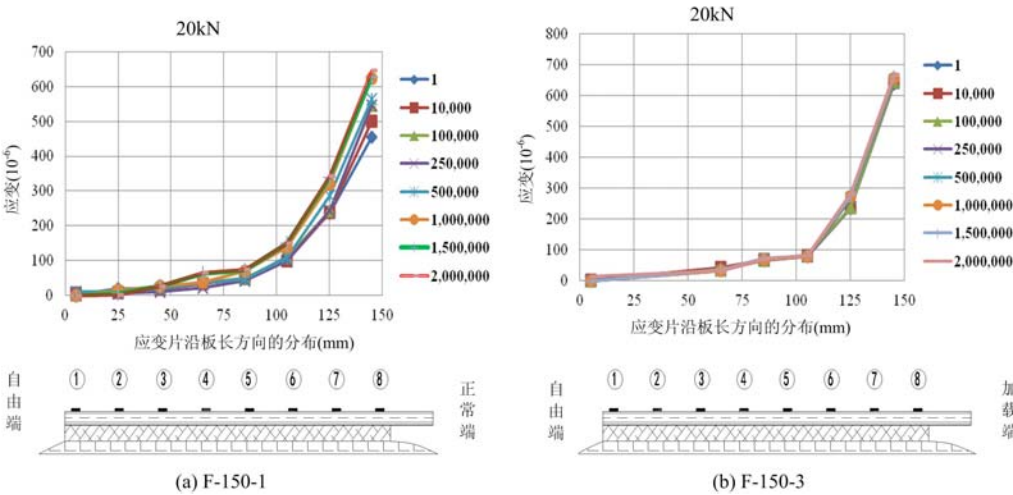


图 4 不同疲劳次数时不同胶层厚度试件的 CFRP 应变分布

Fig. 4 CFRP strain distribution of specimens with different adhesive thickness under fatigue

由上述 2 个试件的粘结界面疲劳损伤现象可知: 粘结界面疲劳损伤都是起始于靠近加载端的粘结端部(图 4 中 8 号应变片所在位置), 并且随着疲劳循环次数的不断增加逐渐向自由端拓展; 在粘结长度不变的情况下, 胶层厚度为 1mm 的试件 F-150-1 的粘结界面疲劳损伤发展到距离自由端 65mm 的粘结界面, 胶层厚度为 3mm 的 F-150-3 其粘结界面疲劳损伤发展到距离自由端 125mm 的粘结界面, 这一结果表明: 胶层厚度的增大显著减小了 CFRP-混凝土界面疲劳损伤的发展。Magalhaes 等^[22]的研究表明: 相对于粘结胶层厚度方向上的中部界面, 粘结胶层与被粘物的粘结界面更容易发生应力集中, 粘

界面损伤起始于这些薄弱界面,同时这些粘结界面更加容易发生粘结剥离破坏。由于混凝土的抗拉强度远远低于碳纤维板和胶层树脂,在碳纤维板、胶层树脂和混凝土三相物质相互组成的粘结界面中,树脂—混凝土粘结是最为薄弱的界面,因此粘结界面的疲劳损伤很大程度上取决于胶层树脂—混凝土粘结界面的疲劳退化。胶层厚度的增加使得界面粘结滑移的刚度减小,延性增大,因此在界面疲劳损伤发生和发展时,界面应力能获得更有效的重分布,从而使得 FRP-混凝土界面粘结的疲劳性能随胶层厚度的增大而提高。

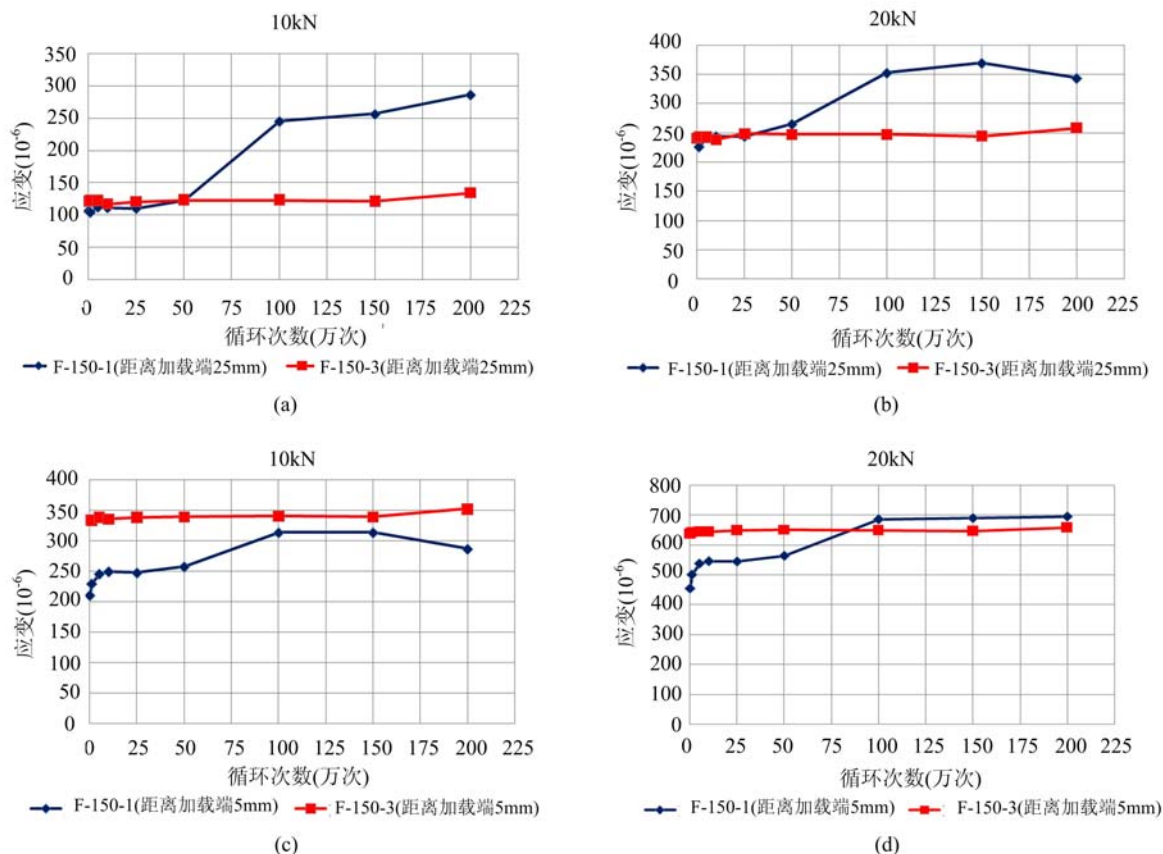


图 5 疲劳循环过程中不同胶层厚度试件的 CFRP 应变变化

Fig. 5 CFRP strain versus number of cycles for specimens with different adhesive thickness

图 5 描绘了上述 2 个试件中,距加载端 5mm、25mm 等位置处的 FRP 应变随疲劳次数增加的变化情况。由图 5 可以看出,在最初的 5 万次疲劳中,试件 F-150-1 在距加载端 5mm 处的 FRP 应变有一明显迅速增大,随后至 100 万次疲劳的过程中 FRP 应变仍持续提高,增长速率明显大于后 100 万次疲劳;同时,距加载端 25mm 处的 FRP 应变在 100 万次荷载循环后也出现了明显的增大。与之相比,试件 F-150-3 在整个疲劳循环过程中粘结界面应变增长较为不明显,由于试件 F-150-3 在距加载端 5mm 处的应变片位置存在一定误差(更靠近粘结端部),图 5(c)、(d)中 F-150-3 在 5mm 处的 FRP 应变水平高于试件 F-150-1,但从应变变化可明显看出, F-150-3 未出现由于界面粘结损伤发展引起的 FRP 应变显著增大,表现出了更好的抗疲劳性能。这应是因为胶层厚度较大的试件,粘结刚度更小,变形能力更强,所以抵抗循环应力的能力更强;当应力集中处的疲劳损伤引起粘结退化时,界面也可通过更有效的应力重分布来抑制损伤退化的发展。因此,控制胶层厚度保持相对较大的水平对提高粘结界面的耐疲劳性能有着积极的意义。Mall 等^[23]认为当粘结界面疲劳裂纹增长速率保持在较低的水平时,胶层厚度的变化对疲劳裂纹拓展速率的影响基本可以忽略;当粘结界面疲劳裂纹增长到较高的水平时,疲劳裂纹拓展速率随着胶层厚度的增加而呈减小的趋势,与本文的结论一致。

2.2 粘结长度对界面粘结疲劳性能的影响

如引言所述,虽然现有文献中针对粘结长度与 FRP 粘结界面疲劳性能间的相关性开展的研究非常

有限,但所得到的结论有较大分歧: Bizindavyi 等^[1]、Mazumdar 等^[14]和 Meneghetti 等^[16]都认为,增大粘结长度会引起界面疲劳强度的提高;而 Ferreira 等^[15]、Y.-M. Jen 等^[17]提出粘结界面的疲劳性能随着粘结长度的增加而降低; Nigro 等^[13]则认为当粘结长度与有效粘结长度相差不大时疲劳循环荷载对粘结界面强度的影响可以忽略。本文试验中,对具有不同粘结长度的试件的粘结疲劳性能进行了考察,图6描绘了200万次疲劳循环过程中,不同粘结长度试件在距加载端15mm、35mm处的FRP应变,以观察界面粘结疲劳损伤的发展。

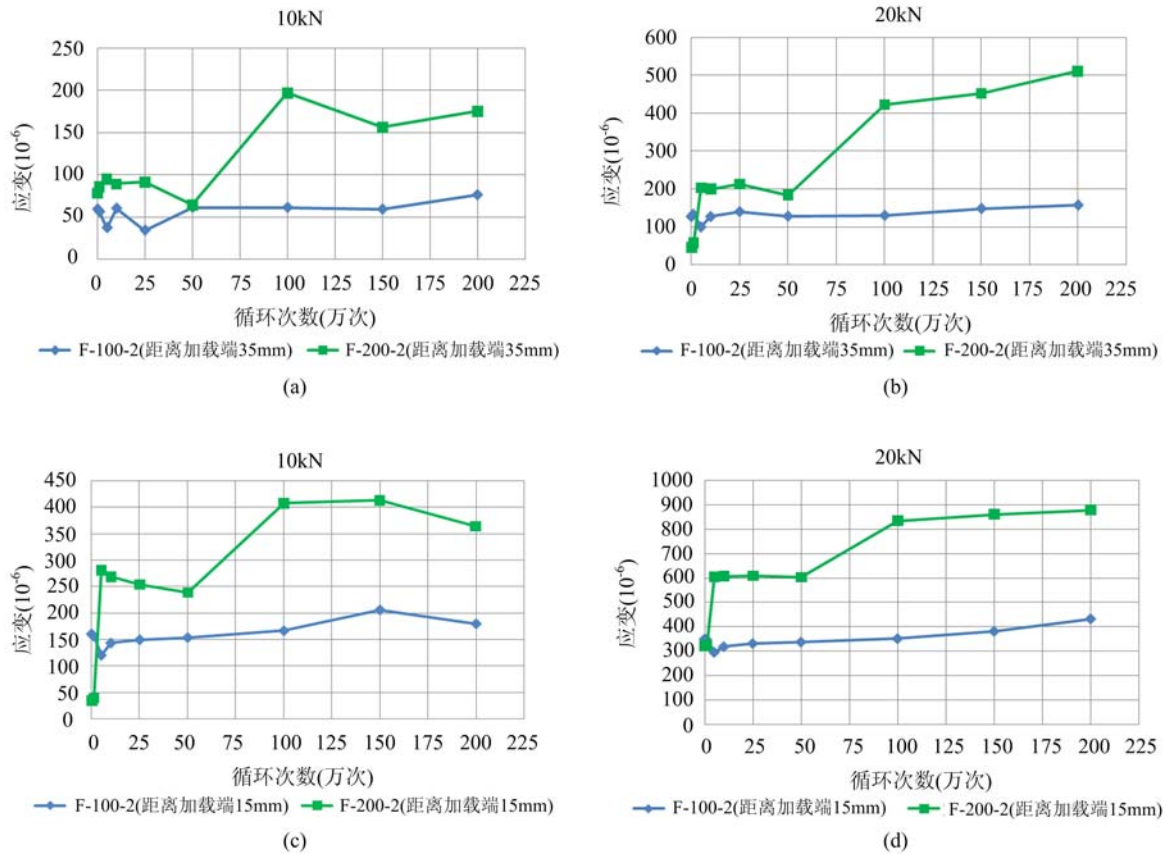


图6 疲劳循环过程中不同粘结长度试件的CFRP应变变化

Fig. 6 CFRP strain versus number of cycles for specimens with different bond length

从图6可以看出,在200万次的疲劳循环过程中试件F-100-2的FRP应变变化较不显著,除最初5万次疲劳FRP应变出现一些波动外(可能由测量误差引起),之后疲劳历程中距加载端15mm和35mm处的FRP应变基本呈现平稳缓慢的增长。与之相比,试件F-200-2的FRP应变则随着疲劳次数增加呈现出了较为明显的变化:在初始2万次循环过程中,F-200-2位于距加载端15mm处的FRP应变出现了显著增大,但距加载端35mm处的FRP应变则没有对应增大,表明该阶段界面损伤尚局限于距加载端15mm附近;当疲劳50万次以后,距加载端15mm和35mm的FRP应变都出现显著提高,说明粘结损伤已由15mm处发展至35mm处;100万次疲劳后,两点处的FRP应变变化放缓。根据本文试验观测,粘结长度较大的试件随着疲劳次数增加呈现出了较大的FRP应变增长,这有可能对应着更显著的疲劳损伤累积和发展,但鉴于试验数量有限,关于粘结长度对界面粘结疲劳性能的影响,作者将会在今后开展进一步的研究。

2.3 疲劳循环荷载滑移反应

在疲劳循环过程中,不同胶层厚度试件的荷载—FRP加载端滑移曲线如图7所示。从图中可以看出:疲劳100万次后,试件F-150-1和F-150-3的最大滑移值分别为0.098mm和0.136mm,随着胶层厚度的增大,界面的最大滑移值也相应增加,说明胶层厚度越大,界面粘结刚度越小,变形能力越强。随着疲劳次数增加,试件F-150-1的荷载—滑移曲线斜率逐渐减小,界面粘结刚度逐渐降低,呈现逐渐软化

的趋势,而试件 F-150-3 的荷载—滑移曲线斜率则未出现明显变化;这表明相同的疲劳荷载作用下,胶层厚度较小试件的 FRP-混凝土粘结界面出现了一定程度的损伤退化,与之相比胶层厚度较大试件的界面粘结其由疲劳引起的退化较不明显。值得指出的是,荷载—滑移曲线中有局部滞回曲线的残余滑移回退的现象,这可能是由于循环过程中 LVDT 传感器铁芯的轻微侧移所致。

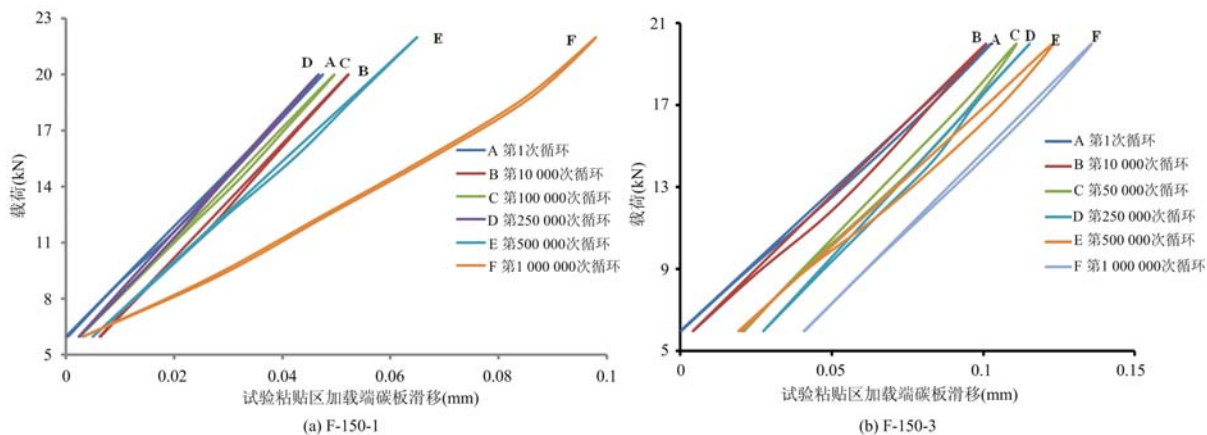


图 7 不同胶层厚度试件的 FRP 加载端荷载—滑移曲线

Fig. 7 Curves of load versus slip of specimens with different adhesive thickness

2.4 疲劳后静力反应

疲劳 200 万次后,所有疲劳试件均未发生破坏,然后对试件进行静力加载直至破坏,除试件 F-100-2 可能由于混凝土棱柱的初始缺陷发生棱柱破坏外,其他所有疲劳试件的破坏形式均为 FRP 剥离破坏,如图 8 所示。其中静载试件 M-150-2B 和两个疲劳试件 F-150-3、F-150-1 的剥离破坏发生在试验粘结区;另一个静载试件 M-150-2A 由于未用碳纤维布包裹约束非试验粘结区,剥离破坏发生在非试验区;疲劳试件 F-200-2 在设置了碳纤维布围裹约束的条件下仍然发生了非试验粘结区剥离破坏,如图 9 所示。剥离破坏前未观测到有界面剥离或混凝土开裂的迹象,剥离发生于树脂—混凝土界面,剥离后胶层完好并附有薄层混凝土,如图 8 所示。这是由于混凝土抗拉强度远低于胶层树脂和碳纤维板,因此界面微裂缝集中在混凝土中发展,并最终导致该界面发生剥离破坏。本文的上述试验破坏形态与 Nigro^[13]、Yun^[6] 和 Al-Rousan^[24] 等的试验结果相同。



图 8 FRP 剥离破坏形式

Fig. 8 Debonding between CFRP and concrete



图 9 疲劳试件 F-200-2 的破坏形式

Fig. 9 Failure mode of specimen F-200-2

如表 3 所示,经历了疲劳循环后,粘结长度较大的试件 F-200-2(200mm)的极限荷载达到 58.5kN,该试件非试验粘结区被碳布包裹,但是剥离依然发生在非试验粘结区,破坏过程中,CFRP 板挣脱了 CFRP 布的围裹约束,发生剧烈破坏,伴随着“砰”的巨响,飞溅出树脂和 CFRP 布的碎片,如图 9 所示。而粘结长度较小的试件 F-100-2 的极限荷载为 44.5kN,并且剥离发生在试验粘结区,粘结长度为 200mm 的试件的极限荷载相对粘结长度为 100mm 的试件增加了 31%。外贴的 FRP 片材与混凝土之

间存在着有效粘结长度:实际粘结长度小于这一长度值时,粘结承载力随粘结长度增大而提高;反之粘结承载力不随粘结长度增大而变化。根据 Chen&Teng 公式,本文试验所用 CFRP 板的有效粘结长度为 214.5mm,因此当 CFRP 板的实际粘结长度从 100mm 增加到 200mm 时,粘结承载力随之增大。虽然在疲劳过程中出现了 FRP 应变的显著变化,反映出 FRP-混凝土界面可能存在一定的粘结退化,但从疲劳后静载试验结果来看,粘结长度较大条件下疲劳后界面粘结承载力仍然显著高于粘结长度较小试件。在下一步试验研究中,作者将考察大于有效粘结长度的实际粘结长度对界面粘结疲劳性能的影响。

另外,胶层厚度为 3mm 的试件 F-150-3 的极限荷载达到 58kN,远远大于胶层厚度为 1mm 的试件 F-150-1(40kN)。这与疲劳试验中观测到的现象一致:胶层厚度较大时由疲劳引起的界面粘结退化较不明显。这表明,适当的胶层厚度增加将提高 FRP-混凝土粘结界面的疲劳性能。Tamura 等人^[18]认为静载试验中极限强度随着胶层厚度的增加而增加,López-González 等^[25]认为在静载试验中更大的胶层厚度有利于界面应力重分布,从而可提高极限荷载,均与本文的观点一致。图 10 描绘了疲劳后静载试验中,粘结长度相同而粘结胶层厚度不同的试件,在 20kN 和 40kN 时 FRP 应变的分布情况。从图 10 可以看出,胶层厚度较小(1mm)的试件,FRP 应变更大一些。结合前文图 5,这一现象应归功于胶层厚度更小时疲劳引起的界面退化更为显著。

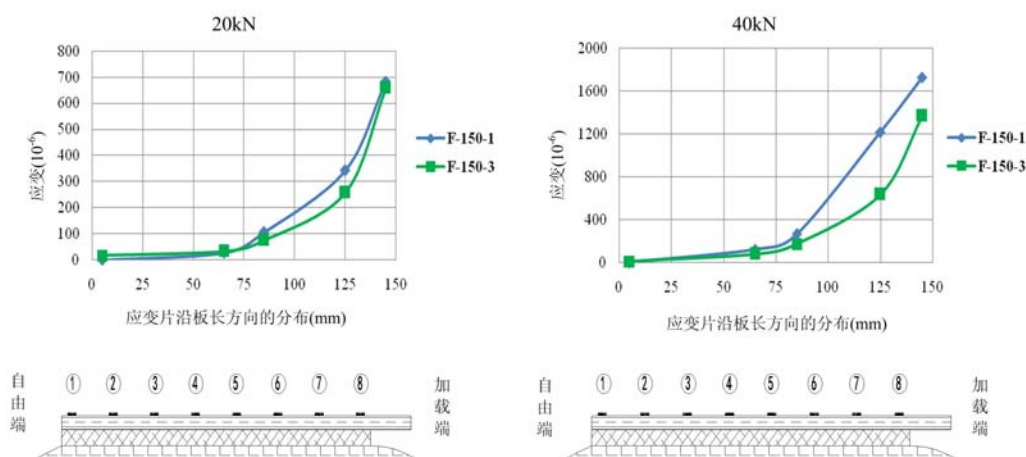


图 10 疲劳后静载中不同胶层厚度试件的 CFRP 应变分布

Fig. 10 CFRP strain distribution of specimens with different adhesive thickness after fatigue loading

3 结论

本文针对 FRP-混凝土界面粘结的疲劳性能,制作了外贴 CFRP 板一混凝土双剪试件,通过 2 组静载试验和 4 组疲劳试验,观测了疲劳过程中 CFRP 板一混凝土界面粘结性能随疲劳次数增加的变化规律;通过比较不同胶层厚度与粘结长度试件的疲劳反应,考察了胶层厚度、粘结长度等因素对界面粘结疲劳性能的影响,得到以下结论:

(1) 在疲劳荷载作用下,CFRP-混凝土的粘结界面出现了疲劳损伤,损伤起始于加载端的 CFRP 粘结端部,并随着疲劳次数的增加逐渐向自由端发展;

(2) 胶层厚度对 CFRP-混凝土粘结界面的疲劳性能有着显著影响,在本文试验中,当胶层厚度从 1mm 变化到 3mm 时,疲劳导致的界面损伤发展明显减小;在疲劳后进行的静载试验中,胶层厚度较大试件的粘结承载力也显著大于胶层厚度较小试件;

(3) CFRP-混凝土粘结界面的疲劳性能也受到粘结长度的影响,本文试验中粘结长度较大试件的界面粘结在疲劳荷载作用下呈现出更为显著的损伤退化;但在疲劳后静载试验中,粘结长度较大试件的粘结承载力仍然更高。考虑到本文试验中的试件粘结长度设置小于有效粘结长度,下一步工作将考察该参数超过有效粘结长度时对粘结界面疲劳性能的影响。

(4) 所有疲劳试件均经历了 200 万次疲劳未破坏,在疲劳后的静载试验中破坏形式为树脂一混凝土

土界面剥离,胶层树脂保持完好并附有薄层混凝土,说明本文试验中混凝土是发生疲劳剥离破坏的薄弱环节。混凝土强度提高是否会引起界面剥离破坏形式的变化有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Aidoo J, Harries K A, Petrou M F. Fatigue Behaviour of GFRP-Strengthened Reinforced Concrete Bridge Girders [C]. In Proc of the 3rd International Conference on Composites in Infrastructure, Montreal, 2002, 143—166.
- [2] Harries K, Aidoo J. Deterioration of FRP-to-concrete Bond under Fatigue Loading [C]. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005), Hong Kong, China, 2005.
- [3] Wu Z S, Kim J Y, Diab Hesham, Wang X. Recent Developments in Long-Term Performance of FRP Composites and FRP-Concrete Interface[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(5):891—903.
- [4] Bizindavyi L, Neale K, Erki M A. Experimental investigation of bonded fiber reinforced polymer-concrete joints under cyclic loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(2):127—134.
- [5] Ko Hunebum, Sato Yuichi. Bond stress-slip relationship between FRP sheet and concrete under cyclic load[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4):419—426.
- [6] Yun Y C, Wu Y F, Tang W C. Performance of FRP bonding systems under fatigue loading[J]. Engineering Structures, 2008, 30: 3129—3140.
- [7] Carloni Christian, Subramaniam Kolluru V, Savoia Marco, Mazzotti Claudio. Experimental determination of FRP-concrete cohesive interface properties under fatigue loading[J]. Composite Structures, 2011, 10:00326.
- [8] 邓江东, 宗周红, 黄培彦. FRP-混凝土界面疲劳性能分析[J]. 复合材料学报, 2010, 27(1):155—161 (Deng Jiangdong, Zong Zhouhong, Huang Peiyan. Analysis of FRP-concrete interfacial fatigue properties[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(1):155—161.
- [9] Catalin Gheorghiu, Pierre Labossie're, Jean Proulx. Response of CFRP-strengthened beams under fatigue with different load amplitudes[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21:756—763.
- [10] 谢建和, 黄培彦, 郭永昌, 刘锋. 预应力 FRP 加固 RC 梁界面疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 工程力学, 2011, 28(7):180—185, 216 (Xie Jian-he, Huang Pei-yan, Guo Yong-chang, Liu Feng. Study on Propagation Behavior of Fatigue Interface Crack in RC Beam Strengthened with Prestressed FRP[J]. Chinese Journal of Engineering Mechanics, 2011, 28(7):180—185, 216(in Chinese))
- [11] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures[S]. ACI 440.2R-08. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2008:44.
- [12] CSA Canadian highway bridge design code (CHBDC)[S]. CSA S6-06, CSA International, Toronto, 2006.
- [13] Nigro E, Ludovico M Di, Bilotta A. Experimental investigation of FRP-concrete debonding under cyclic actions [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 4:360—371.
- [14] Mazumdar S K, Mallick P K. Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC-SMC composites[J]. Polymer Composites, 1998, 2(19):139—146.
- [15] Ferreira J A M, Reis P N, Costa J D M, Richardson M O W. Fatigue behavior of composite adhesive lap joints [J]. Composites Science and Technology, 2002(62): 1373—1379.
- [16] Giovanni Meneghetti, Marino Quaresimin, Mauro Ricotta. Influence of the interface ply orientation on the fatigue behaviour of bonded joints in composite materials[J]. International Journal of Fatigue, 2010(32):82—93.
- [17] Jen Y-M, Ko C-W. Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 2(32):330—340.
- [18] Hiroya Tamura, Ueda Tamon, Furuuchi Hitoshi, Seiji Fujima. Effect of adhesive thickness on bond behaviour of carbon fiber sheet under static and fatigue loading [C]. The Second Official International Conference of International Institute for FRP in Construction for Asia-Pacific Region, 2009, 12:241—246.
- [19] Xu X X, Crocombe A D, Smith P A. Fatigue crack growth rates in adhesive joints tested at different frequencies [J]. Adhesion, 1996, 58:205—226.
- [20] Al-Hammoud R, Soudki K, Topper T. Fatigue flexural behavior of corroded reinforced concrete beams repaired with CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 2(1):42—51.
- [21] Aidoo J, Harries K A, Petrou M F. Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer-strengthened reinforced

- concrete bridge girders[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(6):501—509.
- [22] Magalhaes A G, Moura M F S F de, Goncalves J P M. Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2005, 25:313—319.
- [23] Mall S, Ramamurthy G. Effect of bond thickness on fracture and fatigue strength of adhesively bonded composite joints[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1989, 1(9):33—37.
- [24] Al-Rousan R, Issa M. Fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 3(25):3520—3529.
- [25] Julio C. López-González, Jaime Fernández-Gómez, Enrique González-Valle. Effect of adhesive thickness and concrete strength on FRP-concrete bonds[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16:705—711.

Experimental Study of CFRP-concrete Interfacial Bonding Fatigue Behavior

PENG Hui^{1,2}, WANG Bo¹, ZHANG Jian-ren^{1,2}, LI Shu-lin¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114; Hunan, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: Externally bonded FRP is an important technology for concrete structure reinforcement. However, the current study of fatigue behavior of externally bonded FRP for reinforced concrete structure is not sufficient, in particular, there is more lacking of the study of fatigue degradation and failure mode of FRP-concrete bonded interface. Total 6 double shear specimens, including 2 for static loading test and 4 for fatigue loading test, were manufactured, the effect of bonding length and adhesive layer thickness on the fatigue performance of FRP-concrete bonding interface was studied. By analyzing FRP strain distribution variation along the bonding length during fatigue cycle process and static loading process after fatigue loading, the fatigue degradation of FRP-concrete bonded interface and the post fatigue behavior were discussed under the conditions of different bonding lengths and different adhesive layer thickness. It is concluded from experimental results that the bonding interface between adhesive resin layer and concrete is a weak link of fatigue debonding failure. With the increase of adhesive layer thickness, the development of damage accumulation induced by cyclic load decreases obviously, and the bond capacity after fatigue process increases. The bond deterioration between FRP and concrete becomes more significant when bond length increases. However, due to the experimental bonding length is less than the effective bonding length, static carrying capacity of longer bonding interface is still greater than that of shorter bonding interface after fatigue.

Keywords: fiber reinforced polymer; concrete; interfacial bond; fatigue loading; degradation