

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.03.007

CFRP网复合砂浆加固短肢剪力墙 连梁抗震性能试验研究

李如博, 蒋隆敏, 王 球

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了研究短肢剪力墙连梁震后加固的抗震性能, 按照1:3的比例设计了两个带有连梁的短肢剪力墙模型, 首先对原始试件进行同等程度的预损加载直至破坏, 两个试件均发生剪切破坏。根据破坏形态及破坏所发生部位, 采用碳纤维增强复合材料和复合砂浆来加固两个试件, 通过对加固试件进行低周循环加载试验, 获取加固试件的极限承载力和变形量, 重点分析了不同工况下加固试件的滞回性能和延性性能。研究表明: 采用CFRP网加固使试件承载能力、延性性能和耗能能力得到明显提高, 刚度退化速度变缓, 该结论和加固方法对实际工程连梁因配箍筋不足而进行的抗剪加固以提高抗震性能有较好的参考价值。

关键词: CFRP网; 高性能复合砂浆; 加固; 滞回性能; 延性性能

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)03-0049-07

引文格式: 李如博, 蒋隆敏, 王 球. CFRP网复合砂浆加固短肢剪力墙连梁抗震性能试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(3): 49-55.

Study on Seismic Performance of Short-Limb Shear Wall Coupling Beams Strengthened by CFRP Network Composite Mortar

LI Rubo, JIANG Longmin, WANG Qiu

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: For a better study on the seismic performance of short-limb shear wall coupling beams after earthquake, two short-limb shear wall models with coupling beams are designed with a ratio of 1:3. Firstly, the original specimens are subjected to the same degree of preload loading until they are destroyed, with the shear failure occurring in both specimens. The carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) mesh and composite mortar are used to reinforce the two specimens according to the fracture mode and the position of failure. The ultimate bearing capacity and deformation of the strengthened specimens can be obtained by low-cycle reciprocating loading tests, followed by an analysis of the hysteretic and ductile properties of the specimens under different working conditions. The results show that the bearing capacity, ductility and energy dissipation capacity of the specimens have been significantly improved by the CFRP mesh reinforcement, with the degradation rate of stiffness slowed down. The research conclusion and the proposed

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51741804), 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ5037)

作者简介: 李如博(1993-), 男, 河北石家庄人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用,
E-mail: 1435506564@qq.com

通信作者: 蒋隆敏(1963-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事结构加固方面的教学与研究,
E-mail: 527943658@qq.com

reinforcement method are of valuable significance for the shear reinforcement of the actual engineering coupling beam due to the lack of stirrups to improve the seismic performance.

Keywords: CFRP grid; composite mortar; reinforcement; hysteresis; ductility

0 引言

目前,短肢剪力墙结构体系已在各种工程中被广泛使用,但是对短肢剪力墙结构体系的研究还不够完善,设计时主要以异形柱的受力特征为依据,如此设计的短肢剪力墙连梁结构可能存在抗震性能不足的隐患,因此研究如何对短肢剪力墙连梁进行加固是非常有必要的。已有加固方法有很多,目前国内对用碳纤维增强复合材料(carbon fibre-reinforced polymer, CFRP)加固方法的研究和运用比较广泛和深入^[1-11],如王步等^[1]采用CFRP布加固框架梁柱外节点,研究表明采用适量CFRP条带黏贴在核心区侧面可以提高试件的抗剪性能。董江峰等^[2]研究了采用CFRP加固再生混凝土梁的受弯性能,实验结果表明加固后提高了试件的刚度和极限承载力。金浏等^[3]从细观角度对采用CFRP加固无腹筋混凝土梁剪切强度尺寸效应进行了研究,结果表明CFRP加固小尺寸构件的加固效果更好。

本文采用CFRP网高性能复合砂浆加固方法,该方法加固操作简便,并且加固效果显著。目前国内外对采用CFRP网复合砂浆用于连梁抗剪加固的研究比较少,因此采用CFRP网高性能复合砂浆对连梁进行抗剪加固具有一定的研究意义与价值。

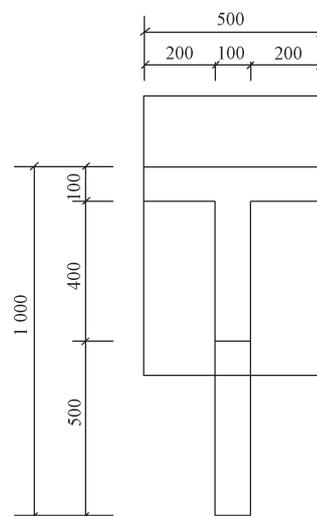
1 试验概况

1.1 试件制作

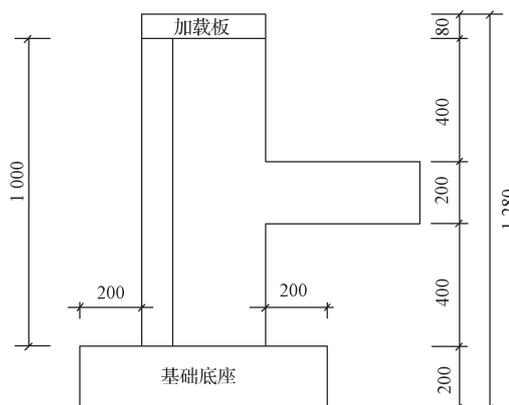
本试验选取高层建筑中短肢剪力墙结构体系边节点的墙梁反弯点单元作为试验模型。并制作了两个缩尺比例为1:3的短肢剪力墙试件,制作时在试件的上端和下端设置了加载板和垫块,方便做试验时对试件固定和施加轴力。试件编号分别为DZ1和DZ2,与之相对应的加固后的试件编号分别为JGDZ1和JGDZ2。试件浇筑采用的混凝土等级为C30。试件的具体尺寸如图1所示,所用钢筋情况如表1所示。

表1 试件配筋率

Table 1 Reinforcement ratio of specimens %				
试件编号	墙肢配筋		连梁配筋	
	腹板纵筋配筋率	墙肢纵筋配筋率	纵筋配筋率	配箍率
DZ1	0.741	0.858	1.57	0.151
DZ2	0.741	0.858	1.57	0.151



a) 试件平面图



b) 试件立面图

图1 试件尺寸图

Fig. 1 Size of specimens

1.2 加固方案与步骤

具体的加固细节与效果如图2所示。



a) 冲洗与修复

b) 固定



图2 加固详细图

Fig. 2 Reinforcement pictures

在高层剪力墙结构系统中, 墙梁节点部位通常具有楼板, 因此 CFRP 网不能全部包裹围包连梁, 所以本试验加固方法中, 采用 U 型 CFRP 网包裹连梁, 在靠近楼板的腹板部位开槽用于嵌入钢板以固定 CFRP 网。试件 DZ1 用一层 CFRP 网加固, 试件 DZ2 使用两层 CFRP 网加固, 并且搭配高性能复合砂浆与界面剂^[12-13]对连梁进行加固。

具体施工步骤如下:

1) 开槽、凿毛。根据加固方案, 梁端处开凿出一个长度为 1.5 倍梁高的凹槽, 凹槽的上边缘距离梁顶部为楼板的厚度。然后将需加固部位进行凿毛处理并且将梁底部棱角处进行倒角, 可有效防止 CFRP 网因棱角处的应力集中而出现破坏。最后, 将需要加固部位表面的裂缝开凿成 V 型口以利于灌浆, 并根据钢板上的孔的位置, 用钻孔机在凹槽处进行钻孔。

2) 冲洗与修复。用清水冲洗需要加固部位, 同时把试件上的混凝土碎块等清除掉, 便于后续将界面剂涂抹到裂缝中, 见图 2a。

3) 布置 CFRP 网。根据加固方案, 用钢板将网格端紧压在凹槽内, 并且将网格适度拉紧使其紧贴混凝土表面, 最后用螺丝将钢板固定, 见图 2b。固定好后, 在加固的部位涂抹界面剂, 见图 2c。

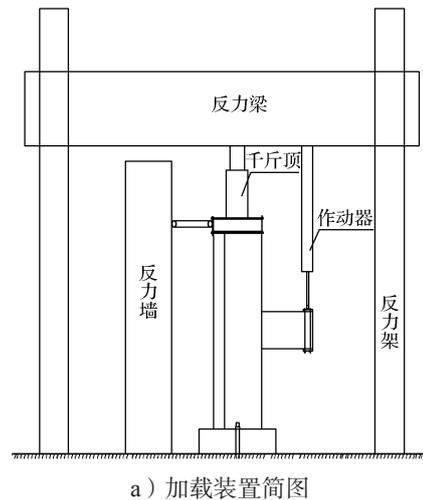
4) 涂抹砂浆。涂抹砂浆分 3 步进行: ①将需要

加固部位的凿毛面用砂浆压紧填实, ②涂抹时, 边涂抹边用工具捣实直至砂浆将 CFRP 网覆盖; ③涂抹至设计厚度, 约 20~25 mm, 并将表面抹平。如图 2d。

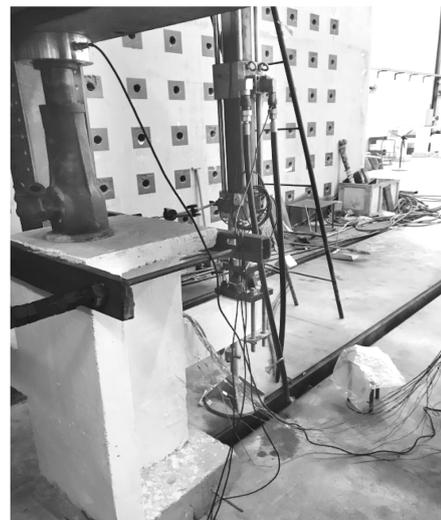
5) 浇水养护。在加固层表面适当洒水, 自然条件下养护 28 d。试件养护好后刷白, 见图 2e。

1.3 试件加载

试验的加载装置简图和现场布置如图 3 所示。



a) 加载装置简图



b) 实物加载装置图

图3 试验加载装置和现场图

Fig. 3 Loading device and test site drawing

试验所需设备有多通道多点伺服协调加载系统、作动器、机械千斤顶等。轴压比设置为 0.3, 通过力学关系得出需施加的轴压力为 1 520 kN, 在轴压比施加完成后对梁进行位移循环加载, 初始位移幅值为 1 mm, 之后每个循环在前一循环的基础上增加 1 mm 的位移循环加载, 在试件梁端箍筋屈服后, 每个循环在前一循环的基础上增加 2 mm 的位移循环加载。整个加载过程每级均循环两次。采用东华 3818 静态应变仪对试件的应变值进行实时采集, 观察试件的裂纹发展情况并进行实时记录, 同时观察电脑中施加荷载

值,当观察到荷载达到峰值荷载后,继续加载直到观察到的荷载下降到峰值荷载的85%时停止试验。

2 试验结果与分析

2.1 破坏过程与破坏形态

图4是各试件的最终破坏图。

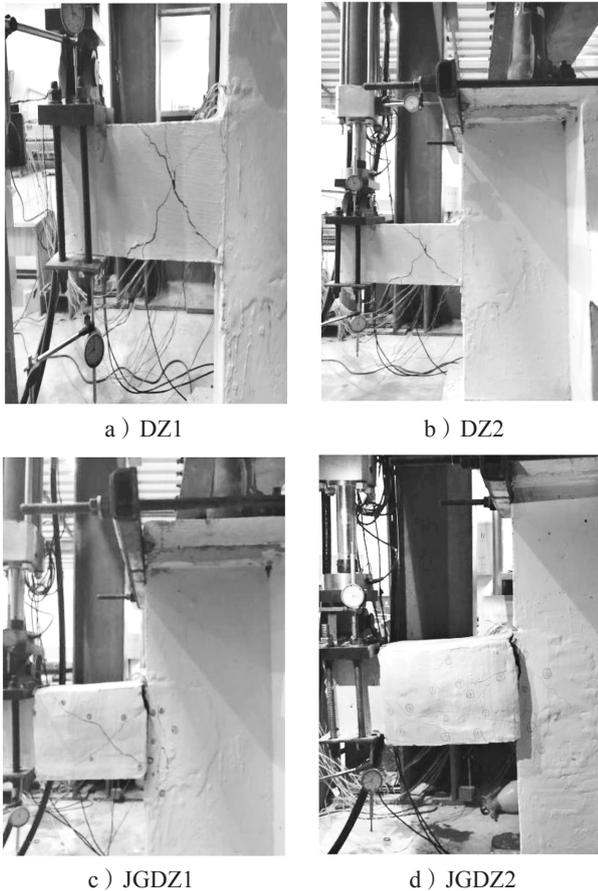


图4 试件最终破坏图

Fig. 4 Final failure pictures of specimens

对比试件DZ1的整体破坏过程同对比试件DZ2相一致。在加载前期,由于梁端的配箍率不足,梁的侧面出现形如X的交叉裂缝。随着试验的进行,裂缝加宽加长并且向梁根部扩展,形成两条交叉型裂纹,并且在裂纹发展区有少量混凝土被压碎,属于典型的剪切破坏模式。加固试件JGDZ1和JGDZ2在梁端也出现了交叉裂缝,随着试验的继续加载,两者的交叉裂缝不再扩展,而梁的根部以及梁与腹板的连接处处出现了新的裂缝,JGDZ1的最终破坏形态是梁根部的开裂变形严重,并且部分混凝土脱落,梁侧面有交叉状的细小裂缝,没有混凝土被压碎,梁与腹板连接处有比较多的细微裂缝,靠近梁根部的CFRP网局部断裂,是典型的弯剪破坏,破坏具有一定的脆性。JGDZ2的最终破坏形态是梁根部开裂变形严重,部分混凝土脱落,梁与腹板交接区域有许多细小的裂

缝,裂缝延伸到了剪力墙里面,试件的失效是由于梁内局部混凝土率先被压碎破坏,进而导致其承载能力迅速下降,是典型的弯曲破坏模式。

2.2 加固工作机理

U型围包连梁CFRP网中,与连梁轴线垂直的CFRP网线协同原梁箍筋承担了地震剪力。与连梁轴线平行的CFRP网线起到了很好的“成网”或“分布筋”作用,使各抗剪网线受力更均匀。在梁腹板上端嵌入的钢板和拧入的螺栓能牢固固定抗剪CFRP网,复合砂浆协同混凝土抗剪,发挥了很好的抗压剪、黏结、保护层、找坡和对混凝土裂缝的填充修补作用。界面剂优良的黏结性能和活性从微观上阻止了加固层的剥离,也对混凝土裂缝起到了很好的填实修复作用。加固前原试件箍筋严重不足,连梁出现交叉斜裂缝,发生剪切破坏。加固前试件破坏集中在梁的根部,加固后的试件破坏区域向剪力墙里转移,加固后连梁根部的应力集中扩散到剪力墙里,剪力墙起到了分担作用,进而提高了梁的承载力和延性。

2.3 试件滞回特性

本试验试件加固前后的滞回曲线如图5所示。

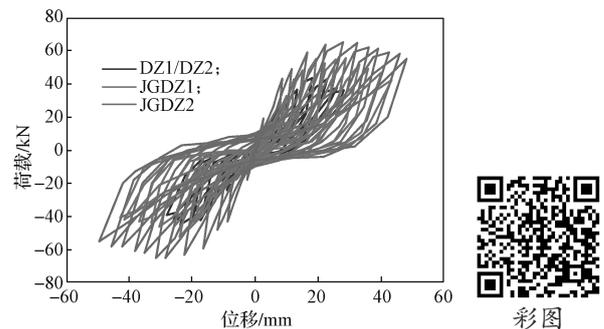


图5 试件加固前后的滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of specimens before and after reinforcement

比较DZ1和JGDZ1的滞回曲线,加载初期两者基本相同,随着加载的进行,JGDZ1的滞回环更饱满,且达到峰值荷载后荷载下降速度较缓,试件破坏时的变形程度更大,可见加固后试件的耗能能力和延性均明显提高。将试件DZ2与试件JGDZ2的滞回曲线进行比较可知,试件JGDZ2的滞回环更加饱满,刚度和延性也较试件DZ2有所提高。由图5可看出,试件JGDZ2的峰值荷载比试件JGDZ1的高,通过对比JGDZ1和JGDZ2的饱满度和面积大小,可知JGDZ2具有更高的耗能能力。同时,JGDZ2的刚度退化速度比试件JGDZ1小,且水平段更长,表明其延性性能更佳。由此可知两层加固抗震效果更好。

2.4 骨架曲线

图6为“T”型短肢剪力墙加固前后的骨架曲线。

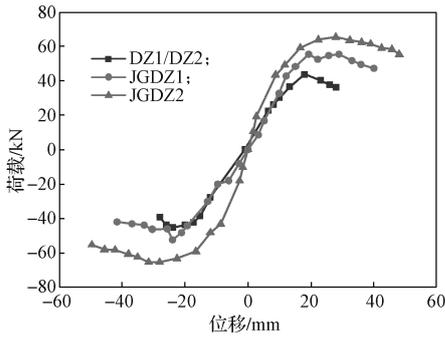


图 6 试件加固前后的骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of specimens before and after reinforcement

由图 6 可知, 试件加固后初始刚度都得到了提高,

且试件 JGDZ2 的刚度略大于 JGDZ1 的, 这说明试件加固后刚度有所提高, 且采用两层 CFRP 网加固的方法提高试件刚度的程度比一层加固的更大。JGDZ1 的承载力相对于 DZ1 的承载力略有增加, 而 JGDZ2 的承载力相对于 DZ2 的承载力明显增加, JGDZ1 承载力位于加固前试件与 JGDZ2 之间。在加载试验后期, JGDZ2 骨架曲线的斜率高于 JGDZ1 的, 且水平段更长, 这说明两层 CFRP 网加固对减缓试件后期的刚度退化和提高试件的延性更有效。

2.5 承载力及延性分析

各加固前后试件的荷载特征值、位移特征值和延性系数如表 2 所示。

表 2 各试件骨架特征点及延性计算结果

Table 2 Characteristic and ductility calculation results of the test specimens

试件编号	开裂荷载 /kN	屈服荷载 /kN	屈服位移 /mm	峰值荷载 /kN	峰值位移 /mm	极限荷载 /kN	极限位移 /mm	延性系数
DZ1	10.2	22.0	16.21	44.0	26.0	35.0	30.0	1.85
DZ2	10.0	22.5	16.19	43.0	26.0	34.0	30.0	1.86
JGDZ1	15.5	28.5	22.31	55.0	32.0	46.0	52.0	2.33
JGDZ2	18.5	29.0	22.45	68.0	34.0	57.0	60.0	2.67

由表 2 的试验结果可知, 对于各试件的峰值承载力, JGDZ2 最高, JGDZ1 次之, 原试件 DZ1 和 DZ2 的峰值承载力最低, 并且非常接近。试件 JGDZ2 和 JGDZ1 的峰值承载力比原试件的分别提高了 58.1% 和 27.9%, 试件 JGDZ2 的峰值承载力比试件 JGDZ1 的高 23.6%。对比各试件的延性系数发现, 试件 JGDZ2 和 JGDZ1 的延性系数比原试件的延性系数分别提高了 44.3%, 25.9%, 试件 JGDZ2 的延性系数比试件 JGDZ1 的高 14.6%。相比于原试件, 加固试件在 CFRP 网加固层的包裹下, 在加载中后期 CFRP 网筋协同箍筋一起受力, 极大地改善了试件的承载能力和延性性能, 而两层 CFRP 网加固效果更显著。

3 有限元分析

3.1 有限元模型的建立

本文对短肢剪力墙采用分离式建模模型, 在建模过程中对剪力墙上下两端、梁端刚体选用 solide45 单元, 混凝土和复合砂浆选用 solide65 单元, 二者取用 William-Warnker 破坏准则, 张开裂缝和闭合裂缝的剪力传递系数都取默认值; 碳纤维网选用 link8 单元。

3.2 模型边界条件

墙梁节点为短肢剪力墙体系上下反弯点位置, 对剪力墙下端 X、Y、Z 方向的平动进行约束, 允许其转动, 形成类似于球铰的作用是对剪力墙上端 X、Y 方向平动进行约束, 允许其转动, 如图 7 所示。

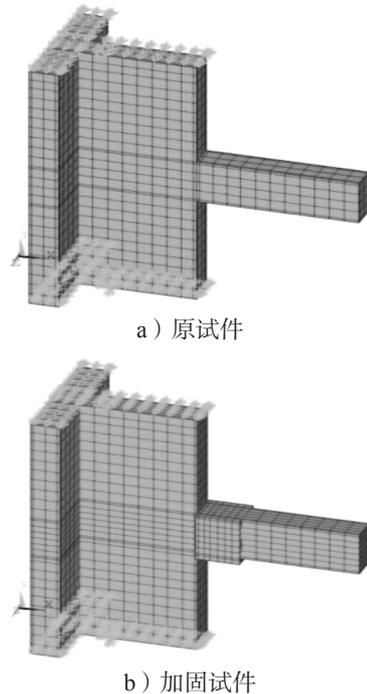


图 7 模型边界条件

Fig. 7 Model boundary conditions

3.3 模拟结果滞回曲线分析

为研究本文提出的加固方法对滞回性能的改善效果, 通过有限元计算, 得到如图 8 所示的滞回曲线。从图中可以看出, 两个加固试件的初始刚度和极限承载力均大于未加固试件的, 并且滞回环面积也大于未加固试件的。对比试件 JGDZ2 与试件 JGDZ1 的滞回

曲线可以发现, 试件 JGDZ2 的耗能能力和承载能力都高于试件 JGDZ1 的, 说明采用两层加固的加固效果更好, 这与试验得出的结论一致。

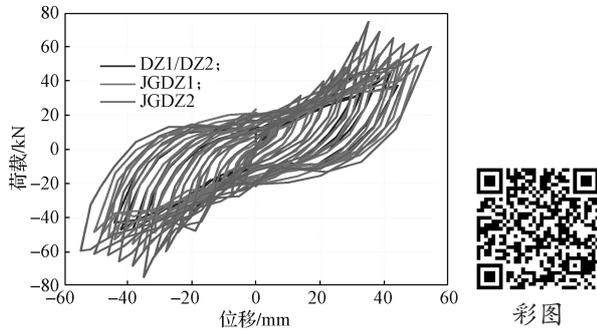


图 8 有限元计算的试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of specimens calculated by finite element method

3.4 模拟结果骨架曲线分析

模拟结果的骨架曲线如图 9 所示。从图中可以看出, JGDZ2 的极限承载力高于 JGDZ1, 而 JGDZ1 的极限承载力高于未加固试件的。并且通过对比 3 条曲线的水平段可知, 未加固试件最短, 两层加固试件最长, 一次加固试件居中, 说明加固可以改善试件的延性性能, 且两层加固对试件的延性性能提高程度更大, 这与试验得出的结论是一致的。

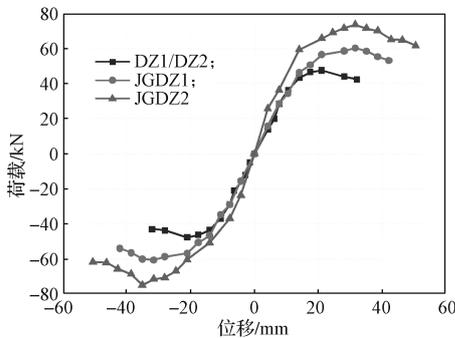


图 9 试件的骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

4 加固理论计算

4.1 加固梁斜截面承载力计算

在水平地震作用下, 试件受力如图 10 所示, 其中 N 为轴力, F 为施加的竖向荷载, V_c 为对试件施加荷载时剪力墙受到的水平方向的力, 其他字母代表试件各部分的尺寸。

由试验可知, 原试件梁端因配箍筋不足引起斜截面抗剪性能不足, 发生了剪切破坏, 是一种脆性的破坏。本试验的加固方案是在斜裂缝水平段采用 CFRP 网增强的高性能复合砂浆加固已有损伤试件, 该试验所用 CFRP 网格尺寸为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 、单丝直径为

1.2 mm , 计算时依据“等面积”原则对 CFRP 网筋进行简化, 即将多根 CFRP 网丝按横截面相等的原则等效为一根 CFRP 网丝参与梁端抗剪。最终得到加固梁斜截面承载力为

$$V_c = V_{cs} + f_{yv}' \frac{A_{sv}'}{s'} h_0$$

式中: V_{cs} 为混凝土与箍筋对斜截面承载力的贡献值; f_{yv}' 为 CFRP 网单筋屈服强度; A_{sv}' 为截面内各肢网筋总面积值, 即 $A_{sv}' = nA_{sv1}'$, 其中, n 为截面内网筋筋肢数, nA_{sv1}' 为 CFRP 网单筋面积; s' 为延梁纵筋方向等效碳纤维网筋间距; h_0 为梁截面有效高度。

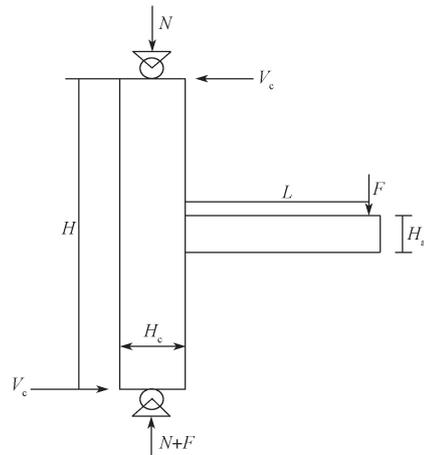


图 10 水平地震下的试件受力简图

Fig. 10 Stress diagram of test piece under horizontal earthquake

4.2 试验值及理论值的比较

梁端斜截面承载力的理论值和试验值结果对比如表 3 所示。从表 3 中可知: 通过公式计算出的未加固试件的承载力和试验得出的结果较为一致, 试件 JGDZ1 和 JGDZ2 的理论计算值要小于试验值, 分析原因可知, 在计算时未考虑高性能复合砂浆和钢板等对增强试件抗剪能力的贡献, 但总的说来, 试验值和理论值的误差在合理的范围之内。

表 3 梁端斜截面承载力结果

试件编号	试验值 /kN	理论值 /kN	破坏类型
DZ1、DZ2	43	44.3	剪切破坏
JGDZ1	55	51.4	弯剪破坏
JGDZ2	68	60.6	弯曲破坏

5 结论

1) 通过试验研究可知, 本文采用 CFRP 网和高性能复合砂浆相结合的加固方法是一种可靠而有效的加固方法。同时, 采用两层 CFRP 网加固的整体抗震效果要好于一层加固的。

2) 采用机械锚固 U 型 CFRP 网加固连梁的方法, 可以避免在实际工程加固过程中对连梁和楼板的进

一步破坏,而且钢板可以有效防止CFRP网发生剥离破坏,对实际工程有借鉴意义。

3)本文提出的加固方法不但加固效果比较显著,而且加固过程和工序简单,容易操作,在实际工程实际中有明显的优势。

参考文献:

- [1] 王步,武贤慧,李保坤.外贴碳纤维复合材料布加固空间框架梁柱外节点的研究[J].工业建筑,2018,48(1):189-194,211.
WANG Bu, WU Xianhui, LI Baokun. Investigation on Exterior Beam-Column Joints with Transverse Beams Upgraded by Externally Bonded CFRP Sheets[J]. Industrial Construction, 2018, 48(1): 189-194, 211.
- [2] 董江峰,袁书成,王清远,等.CFRP加固钢筋再生混凝土梁的弯曲性能研究[J].建筑结构学报,2019,40(6):71-78.
DONG Jiangfeng, YUAN Shucheng, WANG Qingyuan, et al. Flexural Behavior of RC Beams Made with Recycled Aggregate Concrete and Strengthened by CFRP Sheets[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(6): 71-78.
- [3] 金浏,夏海,蒋轩昂,等.基于三维细观分析方法的CFRP加固无腹筋混凝土梁剪切强度尺寸效应研究[J].建筑结构学报,2019,40(10):93-102.
JIN Liu, XIA Hai, JIANG Xuan'ang, et al. Study on Size Effect on Shear Strength of CFRP-Strengthened Concrete Beams Without Web Reinforcement Based on 3D Meso-Scale Analysis Method[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 93-102.
- [4] 唐义军.碳纤维布加固高温作用后的连续梁试验研究和可靠度分析[J].实验力学,2006,21(3):265-270.
TANG Yijun. Experiment Study and Reliability Analysis on RC Continuous Beam Under High Temperature Function Strengthened with CFRP Sheets[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(3): 265-270.
- [5] 何海,陆洲导,姜安庆.碳纤维加固对钢筋混凝土连续梁受力影响的初探[J].四川建筑科学研究,2004,30(1):57-58.
HE Hai, LU Zhoudao, JIANG Anqing. Mechanics Effect of RC Continuous Beam Strengthened by Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP)[J]. Building Science Research of Sichuan, 2004, 30(1): 57-58.
- [6] 卢春玲,王鹏,王强.预应力CFRP布加固混凝土柱轴心受压性能研究[J].工程抗震与加固改造,2019,41(4):99-107,166.
LU Chunling, WANG Peng, WANG Qiang. Study on Axial Compression Behavior of Concrete Columns Strengthened with Prestressed CFRP Sheets[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(4): 99-107, 166.
- [7] 陆洲导,谢群,何海.碳纤维布加固钢筋混凝土连续梁受弯性能研究[J].建筑结构,2005,35(3):33-35.
LU Zhoudao, XIE Qun, HE Hai. Test on Flexural Behavior of Continuous Reinforced Concrete Beam Strengthened with CFRP[J]. Building Structure, 2005, 35(3): 33-35.
- [8] 刘沐宇,刘其卓,骆志红,等.CFRP加固不同损伤程度钢筋砼梁的抗弯试验[J].华中科技大学学报(自然科学版),2005,33(3):13-16.
LIU Muyu, LIU Qizhuo, LUO Zhihong, et al. Flexural Performance of Different Damages Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2005, 33(3): 13-16.
- [9] 张涛涛.粘贴CFRP加固混凝土连续梁的试验研究和理论分析[D].南京:东南大学,2005.
ZHANG Taotao. Experimental Study and Theoretical Analysis of the Continuous RC Beams Strengthened with CFRP Sheets[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [10] 郑文忠,谭军,曾凡峰.CFRP布加固无粘结预应力连续梁受力性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(6):11-17.
ZHENG Wenzhong, TAN Jun, ZENG Fanfeng. Experimental Research on the Mechanical Property of Unbonded Prestressed Continuous Beams Reinforced with CFRP Sheet[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2008, 35(6): 11-17.
- [11] 方恩权,李进舜,张雷顺.CFRP-混凝土界面粘结行为解析分析[J].工业建筑,2007,37(7):66-69.
FANG Enquan, LI Jinshun, ZHANG Leishun. Analysis on the Interface Bond Performance of CFRP-Concrete[J]. Industrial Construction, 2007, 37(7): 66-69.
- [12] 湖南大学.高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程:CECS 242—2008[S].北京:中国计划出版社,2008:14-48.
Hunan University. CECS242—2008 Technical Specification for Concrete Structures Strengthened with HPFL: CECS 242—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 14-48.
- [13] 尚守平.高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计施工指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:43-48.
SHANG Shouping. Design and Construction Guidelines of Strengthening Concrete Structures with HPFL[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 43-48.

(责任编辑:申剑)