

文章编号: 1000-4750(2015)01-0072-09

ECC 修复震损剪力墙抗震性能试验研究

张远淼, 余江滔, 陆洲导, 张 锐

(同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘 要: 该文采用拟静力试验研究了采用高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)修复后的震损钢筋混凝土剪力墙的抗震性能。先对剪力墙进行了初次拟静力试验, 剪力墙呈现剪切破坏, 混凝土压溃, 脚部钢筋压弯、屈服甚至断裂, 然后采用 ECC 对震损的钢筋混凝土剪力墙进行了修复, 随后进行了再次拟静力试验。通过对比分析前后两次试验结果, 从剪力墙破坏模式、承载能力、延性、耗能能力、刚度退化、钢筋效用发挥等方面的差异, 综合评价 ECC 用于修复震损剪力墙的有效性。试验结果表明: a) 剪力墙的承载能力基本得到恢复; b) 在保证承载能力的前提下, 剪力墙的延性得到提高, 改变剪力墙的破坏模式, 由脆性破坏转化为延性破坏; c) 提高墙体的耗能能力; d) 避免剪力墙脚部混凝土的压溃和钢筋的屈曲, 依靠 ECC 与钢筋良好的变形协调性, 提高脚部钢筋的利用率。

关键词: 高延性纤维增强水泥基复合材料; 剪力墙; 拟静力试验; 修复; 抗震性能

中图分类号: TU317+.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0642

EXPERIMENTAL TEST ON ASEISMIC BEHAVIOR OF DAMAGED REINFORCED CONCRETE SHEAR WALL REPAIRED WITH ECC

ZHANG Yuan-miao, YU Jiang-tao, LU Zhou-dao, ZHANG Rui

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The aseismic behavior of damaged reinforced concrete (RC) shear wall repaired with the engineered cementitious composite (ECC) was studied by a pseudo-static test. The shear wall was tested by an initial pseudo-static test to severe damage in a shear mode with crushing of concrete, yielding and fracture of a steel bar, then repaired with ECC and retested. The response of the RC shear wall in the twice pseudo-static tests was compared to evaluate the followings, such as the efficiency of repairing a damaged RC shear wall with ECC in term of a failure mode, the bearing capacity, the displacement ductility, the energy dissipation, the stiffness degradation and the utilization of a steel bar. The test results indicate that: a. the bearing capacity of a shear wall is restored; b. on the premise of assuring bearing capacity, the ductility of a shear wall is improved, and the failure mode is changed from brittle failure into ductile failure; c. the energy dissipation capacity is also enhanced; d. rely on the good coordination between ECC and a steel bar, the crushing of concrete and buckling of a steel bar is avoided, and the utilization of a steel bar is improved.

Key words: engineered cementitious composite (ECC); shear wall; pseudo-static test; repair; seismic behavior

钢筋混凝土剪力墙作为结构的主要抗侧力构件抵抗地震作用或者风荷载作用, 在结构中扮演十

分重要的角色。多次震后调查发现^[1], 剪力墙都遭受不同程度的破坏, 对剪力墙的修复与加固问题也

收稿日期: 2013-07-18; 修改日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478362)

通讯作者: 余江滔(1975-), 男, 湖北武汉人, 副研究员, 工学博士, 从事混凝土结构抗火及抗震加固研究(E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn).

作者简介: 张远淼(1985-), 男, 湖北黄石人, 博士生, 从事混凝土结构抗震加固研究(E-mail: abeier04201@126.com);

陆洲导(1957-), 男, 上海人, 教授, 工学博士, 从事混凝土结构抗火及抗震加固研究(E-mail: lzd@tongji.edu.cn);

张 锐(1989-), 男, 黑龙江人, 硕士生, 从事混凝土结构抗震后加固研究(E-mail: tongjizk1@163.com).

亟需解决。针对这一问题,国内外许多学者进行了剪力墙的加固试验研究,主要采用粘钢加固^[2-3]、外包钢加固^[4-5]、纤维材料加固^[6-14]等方法。通过试验的结果可以得到以下一些结论:1)粘钢加固:采用不同的粘钢加固方式能够提高混凝土剪力墙的水平承载力,但是对混凝土剪力墙的延性没有明显的提高;在破坏模式上,粘钢加固时墙体端部的锚固方式对混凝土剪力墙的破坏形式和承载力等性能指标有比较明显的影响,如果没有处理好墙体端部的锚固,难以保证墙体端部的受力性能,试件将会出现墙体根部抬起,钢筋拉断等破坏,墙体底部破坏严重,没有达到改变墙体破坏模式的目的;2)纤维加固:针对震损剪力墙及抗剪能力设计不足的剪力墙,FRP加固技术不失为一种快速、有效的加固方式,但是由于FRP的线弹性力学特征、耗散能量较少、容易粘结失效、需要极好的锚固措施等因素影响了FRP效能的全部发挥;3)大量的剪力墙试验表明,剪力墙的非线性变形能力受到腹板混凝土的压碎和受压区混凝土的剪切、压碎混合破坏的限制。如果某种加固技术能够延缓受压区混凝土的压碎,推迟边缘构件钢筋的拉断和屈曲,提高墙体的抗剪切能力,将会对剪力墙的非线性变形能力有极大的提升,这种加固方法解决了剪力墙破坏的核心问题。

高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)^[15]作为一种新型材料备受关注。与传统的刚性建筑材料相比,其弹性模量相对较低,有较强的变形能力,具有类似金属材料拉伸强化的特征,极限拉应变可稳定地达到3%以上;与传统水泥基材料在抗拉荷载下单一裂纹的宏观开裂模式不同,ECC表现为多条细密裂纹的微观开裂模式,具有优越的裂缝分散能力;使用ECC的结构除了具有抗坍塌能力,还具有高损伤承受能力,遭受地震破坏后的残余裂缝宽度很小,能够极大减少地震后的修补费用^[16]。从某个角度讲,结构的剪切破坏其实就是受拉破坏,增强材料的受拉性能就是直接提高剪切性能。Li等^[17]、Kanda等^[18]、Canbolat等^[19]、Fischer等^[20]的相关试验研究表明:ECC在剪切应力条件下承受斜拉力而呈多缝开裂,ECC的拉伸延性好即意味着其剪切延性也好;由于ECC优良的剪切延性,箍筋的数量可以减少甚至取消;另外,ECC与钢筋一样具有拉伸弹塑性特性,良好的拉伸延性使得钢筋达到塑性屈服时二者仍能保持很好的变形协调性。

由于ECC具有以上的优势,如果将ECC用于修复震损钢筋混凝土剪力墙不失为一种具有良好前景的修复加固技术。邓明科等^[21]采用了拟静力试验研究了2片未加固砖墙与2片ECC面层加固砖墙的抗震性能并进行了比较。试验结果表明:ECC面层加固的砖墙能有效限制墙体的开裂和迫害,提高砖墙的延性和耗能能力,改善砖墙的剪切脆性破坏模式,提高墙体的损伤容限,减小砌体结构的震后加固费用。梁兴文等^[22]将ECC应用于剪力墙底部的塑性区,形成配筋ECC,并对这种剪力墙的抗震性能进行了研究。试验表明,采用ECC增强的混凝土试件的抗损伤能力和变形延性都有提高,裂缝细密而且受压区混凝土没有明显压溃现象,保护层没有剥落,可以减小强震后的修复费用。

为了研究ECC在震损RC剪力墙抗震性能修复中的应用效果,本文先对剪力墙进行了初次拟静力试验,剪力墙呈现剪切破坏,混凝土压溃,脚部钢筋压弯、屈服甚至断裂,随后对震损的钢筋混凝土剪力墙采用ECC进行了修复,进行了再次拟静力试验,对比剪力墙的初次拟静力试验和修复后的再次拟静力试验,分析前后两次试验试件破坏模式、承载能力、延性、耗能能力、刚度退化、钢筋效用发挥等方面的差异,综合评价ECC用于剪力墙抗震性能修复的作用

1 试件设计

剪力墙BZ2的试件尺寸和配筋如图1所示。

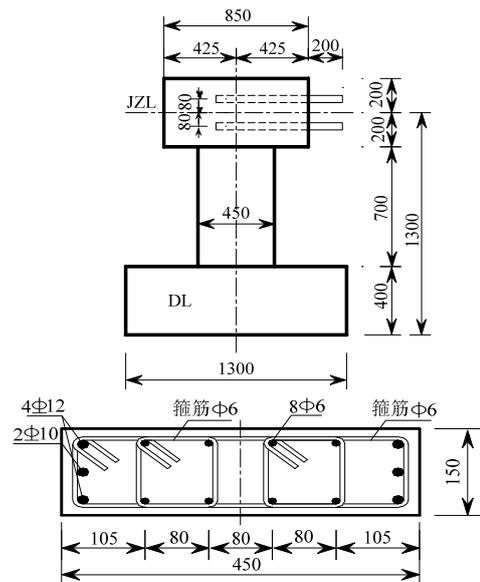


图1 剪力墙BZ2尺寸及配筋 /mm

Fig.1 Dimension of shear wall and corresponding reinforcement

剪力墙试件按照《混凝土结构设计规范》^[23] 墙体具体介绍见文献[24—25]。进行配筋设计。试件的配筋与试验参数设置如表 1。

表 1 剪力墙参数表

Table 1 Key parameters of the shear wall

编号	暗柱纵筋		全截面纵筋		箍筋/暗柱箍筋		水平分布筋		轴力/ 轴压比/kN
	纵筋	配筋率/(%)	竖向分布筋	配筋率/(%)	箍筋	配箍率/(%)	分布筋	配筋率/(%)	
BZ-2	4Φ12+2Φ10	2.38	8Φ6	1.23	Φ6@100	0.75	Φ6@100	0.37	450/0.45

试件所用混凝土采用 C30 商品混凝土浇筑。混凝土为细石混凝土，配合比为水泥：沙子：细石：水=1：1.55：3.61：0.51。水泥为 425#普通硅酸盐水泥，沙子为细沙，细石最大粒径为 10mm，水是普通自来水。通过混凝土轴心受压试验测得所用混凝土棱柱体抗压强度平均值为 40.1MPa，弹性模量为 30244MPa。所用钢筋见下表 2：直径Φ6 的钢筋为 HPB235 级圆钢，试件中Φ10、Φ12、Φ18 均为 HRB335 级螺纹钢。表 2 中括号数值表示焊接钢筋节点的强度值。

表 2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical property of steel

钢筋直径	Φ6	Φ10	Φ12	Φ18
屈服强度/MPa	354	420	419(378)	385
极限抗拉强度/MPa	456	546	596(407)	559

ECC 的配比见文献[26]，同批次测得的 ECC 拉伸应力应变曲线见图 2。配置 ECC 的 PVA 纤维的各项性能指标见表 3。

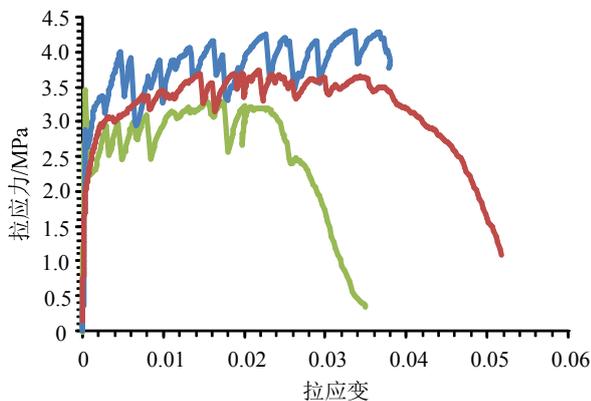


图 2 ECC 拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Tensile stress-train curves of ECC

表 3 PVA 纤维各项性能指标

Table 3 Performance indexes of PVA

纤维名称	长度/mm	直径/ ($\times 10^{-6}$ m)	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ (%)
KURARAYK-II	12	39	1600	40	7

2 修复过程

剪力墙在初次拟静力试验后遭到了破坏，脚部钢筋屈服并发生屈曲甚至拉断，需要对已经损坏的钢筋进行置换。采用的修复钢筋统一为 Φ12，屈服应力与极限应力见上表 2。为了得到一种最为简单有效的钢筋连接方式，先研究了不同连接方式(为搭接焊接和对接焊接)、不同搭接长度(为 3mm、4mm、5mm 与 6mm)下的连接强度。通过试验结果可知，对接焊接的强度普遍不足，而且考虑到在剪力墙的角部进行钢筋对接，操作空间不大，施工难度较大，而且对接的质量难以保证。而相对于搭接焊接方式，搭接长度在 3mm~4mm 的试件多从焊接部分出现破坏，搭接长度在 5mm~6mm 的试件多从钢筋处断裂，试件屈服应力与极限应力接近于原钢筋，所以在实际的焊接工作中，保证搭接长度为 5mm~6mm。

在确定钢筋的焊接方式和焊接长度后，将对受损钢筋进行置换，具体的过程如下：首先将受损钢筋周围混凝土进行清除；然后采用上述选取的钢筋在侧面进行搭接焊接；将原先未断的钢筋剪断；在新置换的钢筋粘贴应变片，测试焊接的效果。在清除混凝土与焊接时，为了避免底部钢筋因搭接焊接导致的重叠，且保证底部钢筋在最大受力位置只有一根钢筋受力，所以需要尽量凿除底梁一部分混凝土，使钢筋焊接位置尽量错开原来最大受力的位置。在钢筋焊接工作完成后，清除掉钢筋及混凝土上的焊渣，以免影响钢筋、混凝土与 ECC 的黏结效果。

在钢筋置换后，进行 ECC 置换浇筑，如图 3。沿开裂的主裂缝进行混凝土清除，并凿除试件断面处松散的混凝土，暴露部分的粗骨料(图 3(b))。采用木支撑将试件支撑起来，然后再进行 ECC 灌入浇筑，浇筑好的试件如图 3(c)所示。试件浇筑好后，在室内自然养护 56d 进行再次拟静力试验。经 ECC 修复后的试件命名为 R-BZ2。



(a) 钢筋置换焊接示意图



(b) 混凝土清除后的试件正面图



(c) ECC 浇筑后的试件正面图

图 3 钢筋置换及 ECC 浇筑后的试件正面图

Fig.3 Facade view of shear wall BZ2 after replacing steel and casting with ECC

3 加载制度

采用拟静力试验进行 ECC 修复剪力墙的抗震性能研究，即在一定的轴向压力作用下，对试件进行水平低周反复加载试验。试验过程中申克机的荷载值、位移计和钢筋表面应变片的数据由计算机通过 DH3818 动静态应变测试系统进行采集，试验中可确定若干个控制点通过计算机进行实时监控。拟静力试验加载装置见图 4。

初次拟静力试验时，即首先施加竖向荷载至预定值，并在试验过程中保持不变，然后施加水平荷载，水平加载采用荷载变形混合控制的加载制度。再次拟静力试验时采用位移加载制度，按照与初次试验时相同的转角进行加载，具体加载制度见图 5。

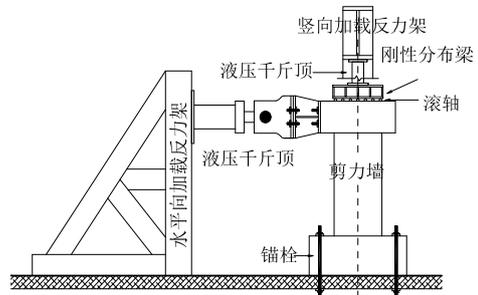


图 4 拟静力试验加载装置

Fig.4 Experimental setup for quasi-static test

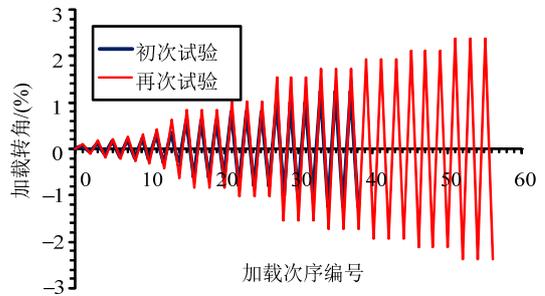


图 5 往复位移加载制度

Fig.5 Cyclical displacement loading process

4 剪力墙 BZ2 与 R-BZ2 试验结果

4.1 破坏情况对比

剪力墙 BZ2 在初次拟静力试验后，两端脚部混凝土完全压碎，局部钢筋向外屈曲，有明显开展的斜裂缝，在接近全高范围内出现略大于 45° 的双向斜裂缝；墙顶、墙脚水平裂缝未贯通，没有形成明显塑性铰，在达到极限状态时，试件突然破坏。该试件属于剪切破坏，脆性十分明显，构件的延性较差。试件破坏情况如图 6 所示。

经 ECC 修复后的剪力墙 R-BZ2 在再次拟静力试验中，首先裂缝从图 7(a)中 A 位置(施加正向推荷载时)及 D 位置(施加负向拉荷载时)出现，为混凝土与 ECC 黏结界面开裂，裂缝沿黏结面发展成斜裂缝并延伸穿过 ECC，并不断发展至墙脚(图 7(b))，形成了明显的交叉裂缝 AB 和 DC，两者相比，AB 更为明显。随着荷载的不断施加，A 位置黏结面处钢筋发生屈曲，将作为保护层的 ECC 拱开，导致 ECC 保护层脱落，最终，黏结界面处钢筋发生平面

外屈曲导致试验结束。总的来说，裂缝首先从薄弱区即混凝土与 ECC 黏结界面出现，并形成交叉的斜向裂缝，最终剪力墙 R-BZ2 因界面处钢筋的屈曲而破坏。

相比于试件 BZ2，R-BZ2 试件具有以下几个特点：a) 在 R-BZ2 中均未看到墙脚 ECC 出现压溃、局部钢筋的屈曲；b) 墙面上大量裂缝产生并汇集成主裂缝；c) 混凝土与 ECC 的黏结界面为薄弱环节，试件首先从该处出现裂缝并不断形成主裂缝，最终导致试件破坏。



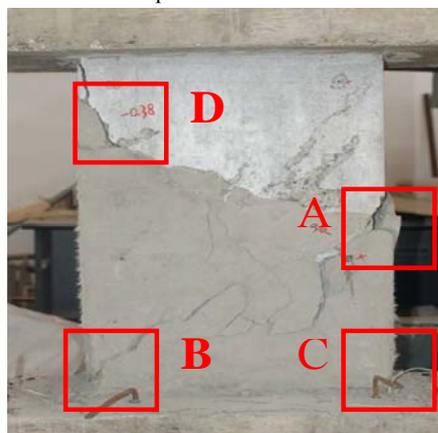
(a) 试件 BZ2 正面



(b) 试件BZ2钢筋屈曲

图 6 BZ2 初次拟静力试验后的破坏情况

Fig.6 Damage of shear wall specimen BZ2 in the initial quasi-static test



(a) 试件 R-BZ2 正面



(b) 墙脚混凝土斜裂缝

图 7 R-BZ2 再次拟静力试验后的破坏情况

Fig.7 Damage of shear wall specimen R-BZ2 in the quasi-static retesting

4.2 滞回曲线

图 8 为剪力墙 BZ2 及修复后剪力墙 R-BZ2 的滞回曲线。通过滞回曲线的比较，可以发现：

1) 试件 BZ2 的滞回曲线由加载初期的梭形曲线迅速过渡为反 S 形，而试件 R-BZ2 随变形的加大，滞回环表现出更为明显的捏拢效应，这是因为纤维有效限制裂缝的张开，但是当裂缝闭合时，纤维不能提供压力阻止裂缝闭合；

2) 试件 BZ2 进入屈服后，表现出一定的强度强化，达到极限强度后试件迅速破坏，脆性破坏，延性很差；试件 R-BZ2 表现为明显的延性特征，在加载到较大位移下荷载并没有明显下降。

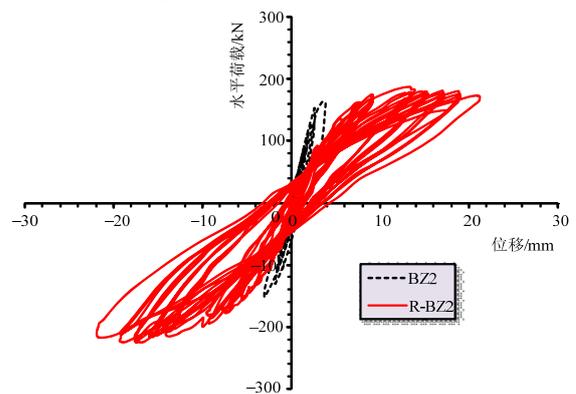


图 8 试件 BZ2 与试件 R-BZ2 的滞回曲线

Fig.8 Comparison of hysteretic curves of BZ2 and R-BZ2

4.3 骨架曲线

力-位移滞回曲线中滞回环峰值点连线得到试件的骨架曲线。试件 BZ2 与试件 R-BZ2 的骨架曲线见下图 9。通过骨架曲线的比较，可以得到：

1) 相比于试件 BZ2，试件 R-BZ2 具有较低的承载能力，正、反向承载力分别是初始试件承载力

的 67%、97%；

2) 试件 BZ2 正向承载力大于负向承载力，而试件 R-BZ2 正向承载力明显小于负向承载力，这是因为在正向加载时，混凝土与 ECC 界面形成了更为明显的斜裂缝 AB，导致承载力的降低；

3) 在延性方面，试件 R-BZ2 在位移不断增大的情况下，承载力几乎保持不变，表现为明显的延性特征，而试件 BZ2 在达到极限强度后突然破坏，骨架曲线没有下降段，延性很差。

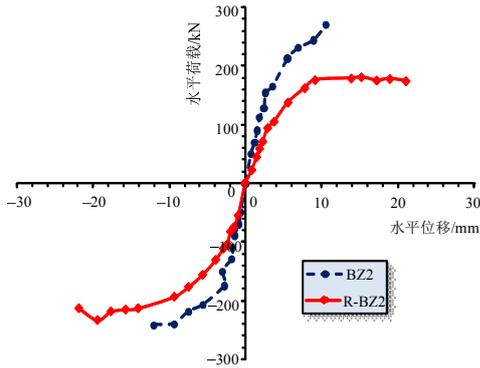


图 9 试件 BZ2 与试件 R-BZ2 的骨架曲线比较

Fig.9 Comparison of skeleton curves of BZ2 and R-BZ2

4.4 割线刚度

通过试验测得的峰点荷载值及其对应的位移，可计算试件在不同加载时刻的刚度变化。试件 BZ2 与试件 R-BZ2 割线刚度下降比较见图 10。通过割线刚度曲线的比较，可以得到：

1) 与试件 BZ2 相比，试件 R-BZ2 初始刚度较小，为初始试件刚度的 60%左右，因为 ECC 相比于普通混凝土具有较低的弹性模量；

2) 试件 BZ2 与试件 R-BZ2 的割线刚度随着水平的继续增加而不断下降；试件 R-BZ2 割线刚度下降速率明显要小于试件 BZ2。

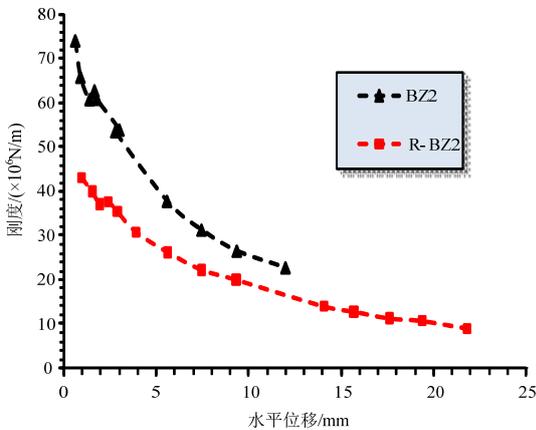


图 10 试件 BZ2 与试件 R-BZ2 的割线刚度比较

Fig.10 Comparison of secant stiffness of BZ2 and R-BZ2

4.5 延性分析

在结构抗震中，延性被看作是与强度同等重要的概念，是评估结构抗震性能优劣的重要指标。通常用位移延性系数来衡量构件延性的大小，即指构件在 85%最大承载力时的极限位移与其屈服位移之比。由于本试验构件脆性破坏，没有明显的下降段，故将试件最终破坏状态作为极限状态，相应的荷载和位移分别为极限荷载和极限位移。采用朱伯龙^[27]提出的屈服位移确定方法，确定位移延性系数，详见表 4。

表 4 为试件 BZ2 与试件 R-BZ2 的正向加载及反向加载时的位移延性系数。通过比较可知，正向加载时，BZ2 与试件 R-BZ2 的位移延性系数分别为 1.60、2.85，后者是前者的 1.78 倍，反向加载时，BZ2 与试件 R-BZ2 的位移延性系数分别为 2.48、3.17，后者是前者的 1.28 倍。通过延性系数对比，说明试件 R-BZ2 的延性要明显好于试件 BZ2。

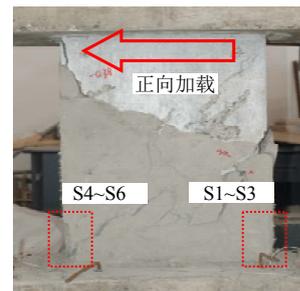
表 4 位移延性系数

Fig.4 Displacement ductility factor of BZ2 and R-BZ2

加载方向	受力阶段	BZ2		R-BZ2	
		荷载值/ kN	位移值/ mm	荷载值/ kN	位移值/ mm
正向	屈服阶段	219.80	6.58	屈服阶段	157.09 7.39
	峰值阶段	269.49	10.54	峰值阶段	180.41 15.24
	极限阶段	269.49	10.54	极限阶段	173.70 21.09
	延性系数		1.60	延性系数	2.85
反向	屈服阶段	201.20	-4.83	屈服阶段	-176.75 -6.88
	峰值阶段	-241.39	-12.01	峰值阶段	-234.13 -19.38
	极限阶段	-241.39	-12.01	极限阶段	-213.85 -21.82
	延性系数		2.48	延性系数	3.17

4.6 钢筋应变分析

为了监测置换钢筋在再次拟静力试验中的效用，在每个钢筋上粘贴应变片。应变片粘贴的位置见图 11。在初次拟静力试验中，试件 BZ2 在相同位置粘贴应变片，可以通过前后两次试验时，钢筋应变的差异来反映 ECC 对钢筋的作用。



(a) 钢筋应变片粘贴位置示意图



(b) 钢筋应变片粘贴示意图

图 11 试件 R-BZ2 钢筋应变片粘贴位置

Fig.11 Layout of strain gauges of R-BZ2

图 12 与图 13 为试件 R-BZ2 与试件 BZ2 相同位置钢筋应变随荷载变化图。通过比较,可以发现:

1) 试件 BZ2 的脚部竖向钢筋在较低的荷载下(混凝土开裂后)就开始发挥主要作用,荷载-应变曲线逐渐变得圆满,耗散大量能量,随着水平荷载的施加,钢筋耗能不断增大;达到一定荷载时,钢筋出现屈服退出工作;而对于试件 R-BZ2,在荷载作用下钢筋耗散较少能量,大部分的能量耗散由 ECC 承担。

2) 试件 R-BZ2 在墙脚两侧的钢筋应变表现不同的变化规律。应变片 S1~S3 最大应变为 2000 个微应变左右,较小且多为梭形,耗散的能量不大,而应变片 S5~S6 的荷载-应变曲线由加载初期的梭形曲线迅速过渡为反 S 形,说明钢筋参与受力,具有明显的变形,且应变值不断增大,耗散能量相对较大;两侧钢筋的应变变化规律的不同与墙体破坏情况有关,从图 11(a)上明显看出,在墙体左墙脚(S4~S6 处)出现明显的、宽度很大的宏观裂缝,ECC 在此退出工作,而钢筋的效用发挥出来,这与普通混凝土的规律相同。而墙体右墙脚(S1~S3 处)的 ECC 只出现竖向的受压裂缝,没有明显的水平向宏观裂缝,所以此处钢筋与 ECC 协同工作,在 ECC 出现宏观裂缝之前,ECC 发挥主要作用。通过两侧钢筋应变的变化规律的差异,可以发现 ECC 能够避免剪力墙两端脚部混凝土的压溃和局部钢筋的屈曲,提高脚部钢筋的利用率。

3) 结合剪力墙 R-BZ2 的破坏模式可以知道,由于薄弱区即 ECC 与混凝土黏结界面的存在,导致试件首先从该处出现裂缝并不断形成主裂缝,并延伸至墙脚,最终导致试件破坏。如果没有薄弱区的存在,依靠 ECC 与钢筋的良好的变形协调能力和自身具有较强的变形能力,我们推测剪力墙应该

还具有更好的延性,即使 ECC 形成了宏观裂缝,在加载的后期,还有钢筋逐渐发挥效用。因为没有处理好 ECC 与混凝土黏结界面问题,依靠剪力墙试件 R-BZ2 的试验结果会低估 ECC 的对剪力墙的修复效果。

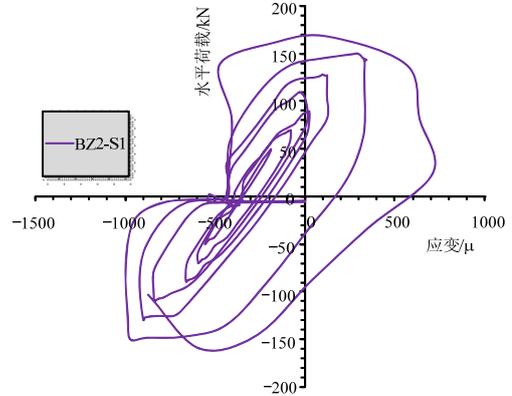


图 12 试件 BZ2 钢筋应变片 S1 应变值

Fig.12 Strain values measured by strain gauge S1 of BZ2

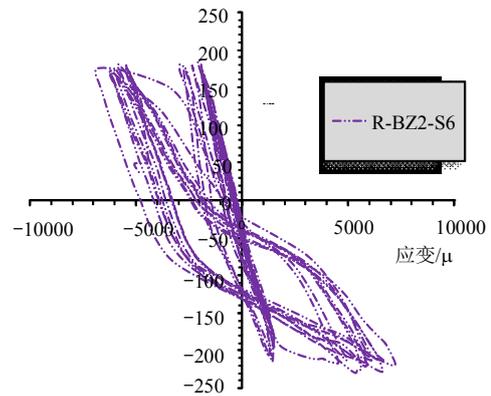


图 13 试件 R-BZ2 钢筋应变片 S6 应变值

Fig.13 Strain values measured by strain gauge S6 of R-BZ2

4.7 耗能分析

试件的能量耗散能力,应以荷载-位移曲线所包围的面积来衡量。本文计算了剪力墙试件 BZ2 与试件 R-BZ2 在每级荷载下的耗散的能量及累积耗能,见图 14~图 15。通过耗能比较可知:

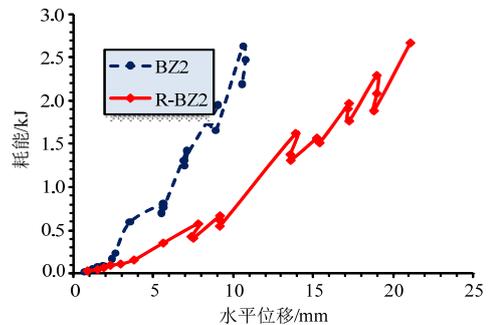


图 14 试件 BZ2 与 R-BZ2 的耗能比较

Fig.14 Comparison of dissipated energy of BZ2 and R-BZ2

1) 在加载的初期, 剪力墙试件 BZ2 与试件 R-BZ2 的耗能相差不大, 随后在达到相同水平位移下, BZ2 的耗能明显要大于 R-BZ2; 这一现象与钢筋的作用有关, 混凝土开裂后, 钢筋迅速参与工作, 发挥主要作用, 耗散大量能量, 而 ECC 此时并没有退出工作, 钢筋与 ECC 发挥同等的效用;

2) 通过两个试件的累积耗能可以看出, 随着位移水平的不断增大, 试件 R-BZ2 仍然具有很强的耗能能力, 其试件的耗能总量甚至超过试件 BZ2;

3) 对于普通钢筋混凝土构件, 在耗散能量和提高延性上, 钢筋起到主要作用, 而当钢筋的效用过早发挥时, 整个混凝土构件的耗能水平和变形能力只局限于钢筋; 而 ECC 能够推迟钢筋效用的发挥, 能够满足承载能力和延性要求的前提下, 又具有一定的耗能和延性储备。

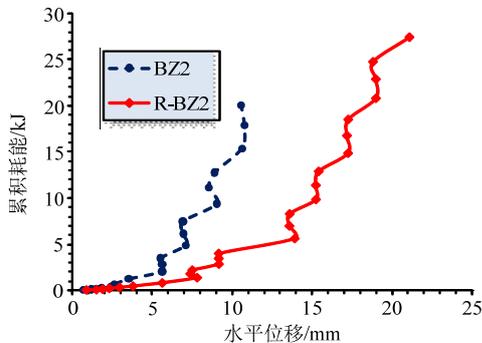


图 15 试件 BZ2 与 R-BZ2 的累积耗能比较

Fig.15 Comparison of cumulative dissipated energy of BZ2 and R-BZ2

5 结论

本文通过拟静力试验, 研究 ECC 对震损剪力墙的修复作用, 得出以下结论:

(1) 初次试验中, 原剪力墙脚部混凝土压碎, 斜裂缝明显, 构件发生剪切破坏, 强度退化严重, 属于脆性破坏; 采用 ECC 材料修复后的试件在破坏时墙脚部分未出现压碎现象, 钢筋完好, 未屈服。

(2) 以 ECC 修复后的剪力墙较之原试件, 剪力墙的承载能力基本得到恢复; 在保证承载能力的前提下, 剪力墙的延性得到提高, 改变剪力墙的破坏模式, 由脆性破坏转化为延性破坏; 提高墙体的耗能能力; 避免剪力墙墙脚混凝土的压溃和局部钢筋的屈曲, 依靠 ECC 与钢筋良好的变形协调性, 提高脚部钢筋的利用率。

(3) 由于 ECC 与混凝土的黏结界面的存在, 试件首先从界面处出现裂缝并不断形成主裂缝, 并延

伸至墙脚, 最终导致试件破坏。这说明 ECC 与混凝土的黏结界面成为构件的薄弱部位。采用 ECC 修复构件时, 需要特别关注黏结界面的处理措施, 有关这一问题还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 周颖, 吕西林. 智利地震钢筋混凝土高层建筑震害对我国高层结构设计的启示[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 17-23.
Zhou Ying, Lü Xilin. Lessons learnt from damages of reinforced concrete tall buildings in Chile Earthquake and revelations to structural design in China [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 17-23. (in Chinese)
- [2] 章红梅, 吕西林. 粘钢加固钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 结构工程师, 2007, 23(1): 72-76.
Zhang Hongmei, Lü Xilin. Experiment study on seismic behavior of reinforced concrete walls strengthened by bonded steel [J]. Structural Engineers, 2007, 23(1): 72-76. (in Chinese)
- [3] 盛光远. 粘钢加固钢筋混凝土剪力墙抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Sheng Guangyuan. Researches on the seismic behavior of RC shear wall strengthened with bonding steel plate [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [4] 刘卓. 外包钢加固钢筋混凝土剪力墙的抗震性能试验研究与有限元分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2009.
Liu Zhuo. Experimental research and finite element analysis on seismic behavior of reinforced concrete shear wall strengthened by enveloped steel [D]. Shenyang: Shenyang Architectural University, 2009. (in Chinese)
- [5] 梅许江, 苏明周, 石韵, 蒋春云. 角钢加固剪力墙墙肢底部试验研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 86-90.
Mei Xujiang, Su Mingzhou, Shi Yun, Jiang Chunyun. Experimental research on application of angle steel in reinforcement of limb base of a shear wall [J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2012, 31(5): 86-90. (in Chinese)
- [6] 曾洪超. FRP 加固混凝土竖向构件的抗震性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
Zeng Hongchao. Study on seismic performance of RC vertical components strengthened with FRP [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [7] 邓宗才, 曾洪超. 层内混杂 FRP 加固混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(10): 1504-1508.
Deng Zongcai, Zeng Hongchao. Experiment on seismic performance of reinforced concrete shear walls strengthened with hybrid FRP [J]. Journal of Beijing university of technology, 38(10): 1504-1508. (in Chinese)

- [8] 丰卉梅. 不同类型片材加固剪力墙性能比较研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
Feng Huimei. Comparative research on behavior of reinforced concrete shear wall strengthened with different types of sheet [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. (in Chinese)
- [9] 刘明学. 碳纤维布提高剪力墙延性的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
Liu Mingxue. Experimental study on increasing the ductility of reinforced concrete shear walls strengthened by carbon fiber sheet [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [10] Dan D. Experimental tests on seismically damaged composite steel concrete walls retrofitted with CFRP composites [J]. *Engineering Structures*, 2012, 45(12): 338—348.
- [11] Zhou H, Attard T L, Zhao B, et al. Experimental study of retrofitted reinforced concrete shear wall and concrete-encased steel girders using a new CarbonFlex composite for damage stabilization [J]. *Engineering Failure Analysis*, Available online 20 February, 2013, 35(12): 219—233.
- [12] Antoniadis K K, Salonikios T N, Kappos A J. Tests on seismically damaged reinforced concrete walls repaired and strengthened using fiber-reinforced polymers [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(3): 236—246.
- [13] Li B, Lim C L. Tests on seismically damaged reinforced concrete structural walls repaired using fiber-reinforced polymers [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(5): 597—608.
- [14] Sinan Altin, Özgür Anil, Yagmur Koprman, Emin Kara M. Hysteretic behavior of RC shear walls strengthened with CFRP strips [J]. *Composites: Part B: Engineering*, 2013, 44(1): 321—329.
- [15] Li V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(4): 531—536.
Li V C. Progress and Applications of Engineered Cementitious Composites [J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(4): 531—536. (in Chinese)
- [16] Fischer G, Li V C. Intrinsic response control of moment-resisting frames utilizing advanced composite materials and structural elements [J]. *AIC Structural Journal*, 2003, 100(2): 166—176.
- [17] Li V C, Mishra D K, Naaman A E, et al. On the shear behavior of engineered cementitious composites [J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1994, 1(3): 142—149.
- [18] Kanda T, Watanabe S, Li V C. Application of pseudo strain hardening cementitious composites to shear resistant structural elements [J]. *Aedificatio Publishers, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3*, AEDIFICATIO Publishers, D-79104 Freiburg, Germany, 1998, 3: 1477—1490.
- [19] Canbolat B A, Parra-Montesinos G J, Wight J K. Experimental study on seismic behavior of high-performance fiber-reinforced cement composite coupling beams [J]. *ACI Structural Journal-American Concrete Institute*, 2005, 102(1): 159—166.
- [20] Fischer G, Li V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(6): 781—790.
- [21] 邓明科, 高晓军, 梁兴文. ECC 面层加固砖墙抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(6): 168—174.
Deng Mingke, Gao Xiaojun, Liang Xingwen. Experimental investigation on seismic behavior of brick wall strengthened with ECC splint [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(6): 168—174. (in Chinese)
- [22] 梁兴文, 郑雨, 邓明科, 寇佳亮, 车佳玲. 塑性铰区采用纤维增强混凝土剪力墙的变形性能研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(3): 256—262.
Liang Xingwen, Zheng Yu, Deng Mingke, Kou Jialiang, Che Jialing. An investigation of deformation behavior of the shear wall with fiber-reinforced concrete in plastic hinge region [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(3): 256—262. (in Chinese)
- [23] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [24] 唐波. “一”字形扁柱、短肢剪力墙拟静力试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
Tang Bo. Experimental study on flat column with shallow rectangular section and short-pier shear wall [D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese)
- [25] 魏亮亮. 水平推力作用下短肢剪力墙的试验和数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
Wei Liangliang. Experimental study and numerical analysis of short-pier shear wall under horizontal load [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese)
- [26] Kanda T, Li V C. Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006, 4(1): 59—72.
- [27] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 28.
Zhu bolong. Structure seismic test [M]. Beijing: Seismological Press, 1989: 28. (in Chinese)