



CFRP 组合加固改善高强混凝土方柱抗剪性能试验研究

王苏岩^{*1}, 曹怀超², 鲁伟¹, 王泽源¹, 梁金永¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 辽宁电力勘测设计院, 辽宁 沈阳 110179)

摘要: 利用低周反复荷载试验手段,研究了4种不同CFRP(carbon fiber reinforced polymer)布加固方式(横向包裹CFRP布、横向包裹CFRP布和植螺栓杆组合,以及横向包裹CFRP布和宽、窄夹板组合)对高强混凝土柱抗剪性能的作用.通过分析以上4种不同加固方式对试件的延性、塑性铰转动能力,以及刚度退化等方面的影响,得到如下结论:4种加固方式均可改善抗剪不足高强混凝土方柱的抗剪性能,有效提高试件的变形能力,其中横向包裹CFRP布和窄夹板组合加固方式加固效果最好;同时,在试验基础上提出适用于高强钢筋混凝土柱的刚度退化模型,并与试验结果进行比较,发现试验结果与模型吻合较好.

关键词: 加固;延性;抗剪性能;碳纤维布;高强混凝土;方柱

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201401011

0 引言

根据“强柱弱梁,强剪弱弯”的设计原则,在地震发生时,混凝土柱构件应避免发生剪切破坏,因为混凝土柱构件的剪切破坏表现为突然的脆性破坏,这势必导致结构发生严重破坏甚至倒塌,引发灾害.混凝土随着强度等级的提高其延性会越来越差,所以说高强混凝土柱构件的剪切破坏更需要引起足够的重视.在抗震维修加固时,需要对抗剪强度不足的柱构件进行抗剪加固,从而使其不会发生剪切破坏^[1-3].

FRP(fiber reinforced polymer)因具有抗拉强度高、自重轻、施工便捷、抗腐蚀性和耐久性好、热膨胀系数与混凝土相近、可塑性好等优点^[1,4-7]而被应用于各种结构加固中.关于利用FRP加固混凝土柱的研究国内外学者已经进行了大量工作,对于利用FRP加固后混凝土柱的剪切性能研究中,Anggawidjaja等^[8]发现纤维复合材料可有效提高弯剪强度,同时可增大柱子的延性;Nanni等^[9]进行了26个构件的低周反复试验,发现加固后的构件破坏形式由斜向剪切破坏变为弯曲破坏;李忠献等^[10]通过利用CFRP(carbon fiber

reinforced polymer)布加固钢筋混凝土短柱,发现随着碳纤维布用量的增加,柱的抗剪承载力显著提高,同时短柱的破坏模式由剪切型破坏转变为弯剪型破坏甚至变为弯曲型破坏;张智梅等^[11]利用FRP组合加固技术加固抗剪强度不足的混凝土柱,发现可以有效提高柱的抗剪能力.

由于FRP约束矩形柱时所提供的约束是不均匀的,FRP对矩形柱约束存在非有效约束区域^[12],鉴于此,Wu等^[13]提出了利用横向包裹CFRP布和植筋组合的加固方式.而余文华^[14]在此基础上又提出了一种主动组合加固方式:利用横向包裹CFRP布和夹板组合的加固方式.该加固方式提供的有效约束区面积更大,加固后柱的延性更好.本文专门对这种CFRP布与夹板组合的加固方式加固抗剪不足的高强混凝土方柱进行试验研究.

1 试验概况

一般的剪切破坏都是由箍筋不足或箍筋构造有缺陷造成的,试验中通过减少柱构件塑性铰区的箍筋配箍率来模拟造成柱构件剪切破坏的原因.本试验共有5个试件,其中1个试件作为对比

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2013-11-28.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878035).
作者简介: 王苏岩*(1958-),女,教授,E-mail:suyanwang1958@yahoo.com.cn.

试件不做加固处理,另外 4 个试件分别采用横向包裹 CFRP 布、横向包裹 CFRP 布与植螺栓杆(简称植筋)、横向包裹 CFRP 布与宽夹板和横向包裹 CFRP 布与窄夹板 4 种方式进行加固处理.具体分组情况见表 1.

表 1 试件分组

Tab.1 Grouping of specimens

试件编号	轴压比	加固方式
C-1	0.417	对比试件
C-2	0.417	3层横向 CFRP 布
C-3	0.417	3层横向 CFRP 布+植筋
C-4	0.417	3层横向 CFRP 布+宽夹板
C-5	0.417	3层横向 CFRP 布+窄夹板

1.1 试件设计

试验中柱模型设计为倒 T 形悬臂受力构件,具体尺寸及配筋详图见图 1,其中箍筋间距在加固区域为 150 mm,非加固区域为 100 mm,箍筋加密区为 50 mm.为了保证试验时试件底座不发生破坏,在设计时对底座进行了加强.

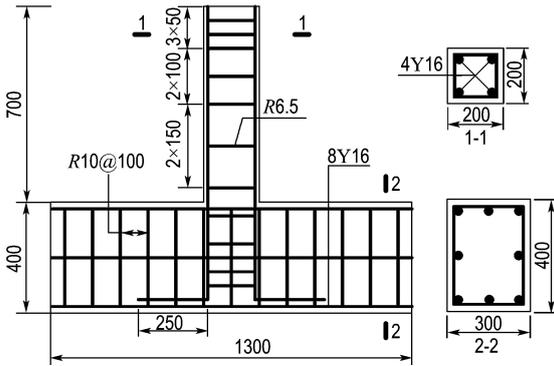


图 1 试件截面尺寸及配筋图

Fig.1 Section dimensions and reinforcements of specimens

1.2 材料性能

试验采用的混凝土为 C60 高强商品混凝土,箍筋为 I 级热轧光面钢筋,纵筋为 II 级热轧螺纹钢筋,纤维布型号为 HITEC-C300(南京),延伸率为 1.7%,粘贴纤维布采用广东泛达化工有限公司生产的爱牢达结构胶,包括底胶(XH180A/B)和浸渍胶(XH7307A/B).具体的材料力学性能见表 2.

1.3 试件加固

试件的加固范围为距离柱底端 500 mm,全包加固,纤维布层数均为 3 层,搭接长度为 150 mm.在粘贴纤维布之前试件要做倒角处理,倒角半径为 20 mm.对于另外 3 根组合加固的试件,夹板采用厚度为 6 mm 的普通钢板,为了进行效

果对比,植筋组合加固方式与夹板组合加固方式均采用直径为 8 mm 的碳钢 4.8 级螺栓,两种加固方式的植筋数量与位置均相同,具体的尺寸及植筋的位置见图 2.植筋位置处钻孔直径为 10 mm,采用 Hilti HIT-RE 500 胶进行植筋,对于夹板组合加固方式在粘贴完 CFRP 布后要立即将螺帽拧上,采用扭矩扳手对其施加一定的压力(5 N·m),以防止纤维布结构胶固化后造成表面不平整导致夹板的锚固效果不好,在试验加载之前再将试件螺帽压力调整到预设值(25 N·m).为了更为有效地传递压力,夹板采用了面积逐渐增大的形式,并在螺帽与夹板间放入了垫片.

表 2 材料力学性能

Tab.2 Mechanical properties of materials

材料名称	弹性模量/ GPa	立方体抗压强度/ MPa	钢筋屈服强度/ MPa	极限抗拉强度/ MPa	每层厚度/ mm
混凝土	35.2	67.2	—	—	—
箍筋 $\phi 6.5$	196.0	—	413.9	532.6	—
纵筋 $\phi 16$	184.0	—	364.4	536.4	—
碳纤维布	242.0	—	—	3 988.0	0.167
结构胶	3.6	—	—	53.0	—

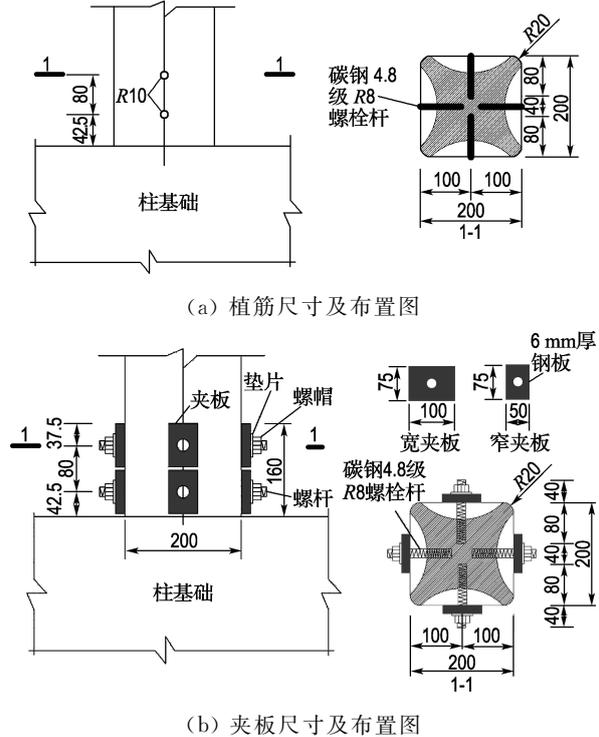


图 2 植筋和夹板加固方式布置详图

Fig.2 Location of embedding bars and clamping plates

1.4 试验装置及加载规则

试验装置如图 3 所示,每个试件都承受恒定

的竖向力和周期性的水平力作用,由油压千斤顶来施加,分别采用 300 kN 和 2 000 kN 量程的传感器量测水平力和竖向力,钢筋应变和纤维布应变由电阻应变片量测,试件的水平侧移采用位移计量测,以上所有数据均由 IMC 数据采集系统进行计算机采集。

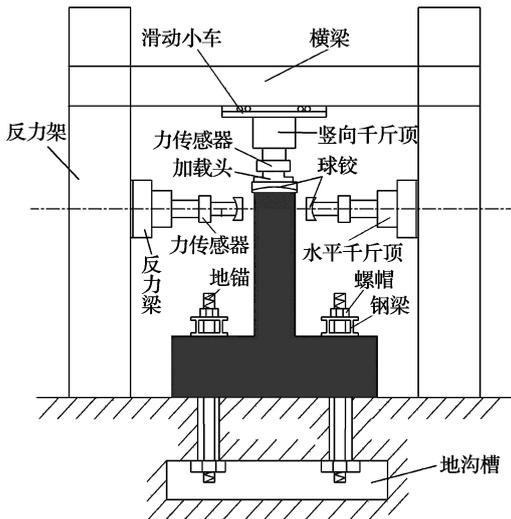


图3 试验装置

Fig. 3 Test setup

试验过程中竖向荷载恒定,数值为 720 kN。水平荷载采用力和位移混合控制的加载制度,即开始时采用力控制,分两级加载,每级加载 1 次,大小约为屈服荷载理论值的 1/2 和 3/4,分别取为 50 kN 和 75 kN;屈服后采用位移控制,每级加载 3 次,直到试件水平荷载下降到最大值的 85% 时试验停止。

2 试验结果与分析

2.1 试件破坏形态

对比试件 C-1 柱发生了明显的剪压破坏,在力的控制阶段变形很小,当荷载达到 73 kN 时,出现两条水平裂缝,随着荷载增加水平裂缝开始向斜下方发展为斜裂缝,倾斜角约为 45° 。2 倍的屈服位移时,出现了多条斜裂缝,其中左右两个方向各有一条主斜裂缝为临界斜裂缝,与水平线约成 60° ,之后裂缝继续开展,宽度增加,混凝土保护层开始脱落,最后角部混凝土大面积脱落,试件因不能承受竖向荷载而试验终止。此时临界斜裂缝宽度已经达到 3.5 mm 左右,角部混凝土脱落高度约 400 mm,试件纵筋已经露出。

C-2 柱在水平荷载达到 120 kN 时底部出现裂缝,当在 2 倍屈服位移时在距离基础顶面 200

mm 处纤维布出现白色通长裂缝,同时发出噼啪的响声,发现纤维布底部有混凝土碎片掉出,此时碳纤维布已经发挥作用;当达到 4 倍屈服位移时底部开始有大量的混凝土剥落,纤维布开始连续发出更大的响声,此时承载力已下降至 85%,停止加载。试验结束后剥掉纤维布,去除松散的混凝土,发现混凝土脱落情况较 C-1 柱轻。如图 4(a)和(b)所示。

利用 CFRP 布和植筋组合加固的 C-3 试件在试件屈服时,纤维布开始发出响声,纤维布在距离根部 130 mm 处产生水平白色裂缝,3 倍屈服位移时柱根部产生裂缝,5 倍屈服位移时荷载下降到 85% 以下,试验停止。而利用夹板和 CFRP 布组合加固 C-4 和 C-5 试件试验现象基本同 C-3,而当试验结束后拆除这 3 个试件外包的纤维布发现 C-4 和 C-5 混凝土破坏脱落程度要小于 C-3,说明夹板的锚固约束作用效果好于植筋。

试验过程中可以发现除了 C-1 为剪压破坏以外,其余 4 个加固后的试件破坏形式均为弯曲破坏,表明这 4 种加固方式均可以有效提高试件的抗剪承载力,使抗剪峰值荷载高于抗弯峰值荷载,从而使试件实现了由剪压破坏到弯曲破坏的转变。观察试件破坏形态可以发现混凝土剥落主要集中在试件的塑性铰区域,C-1 混凝土脱落高度最大,C-2 至 C-5 依次减小。具体试件破坏形态见图 4。

2.2 试验结果分析

2.2.1 滞回曲线分析 各试件的滞回曲线如图 5 所示。对比试件的滞回曲线发现未加固试件 C-1 的变形能力较低,延性很差,后期强度退化较快;而经过加固后的试件变形能力明显得到了大幅度提高。从图 5 可以看出采用 3 种组合加固方式的试件的变形能力要高于仅采用 CFRP 布包裹的试件,而 3 种组合加固方式中采用 CFRP 布与窄夹板的组合方式变形能力最好,最终变形甚至达到了 6 倍的屈服位移。可以证明这 4 种加固方式均可有效参与试件的抗剪,以弥补箍筋不足所引起的抗剪承载力不足,改善破坏形态,增加试件的变形能力。

观察发现加固后试件的滞回曲线随着水平侧移的增加开始呈现捏缩现象,水平侧移越大,捏缩有越严重的趋势。作者分析认为,这是由于随着试件水平侧移的增加,试件内部裂缝越来越多、裂缝宽度越来越大,而裂缝在张开到闭合的过程中荷载的变化很小而位移的变化较大,因此导致滞回曲线中出现了位移变化很大而荷载变化很小的捏缩段,且位移越大,裂缝开展越充分,捏缩现象越严重。

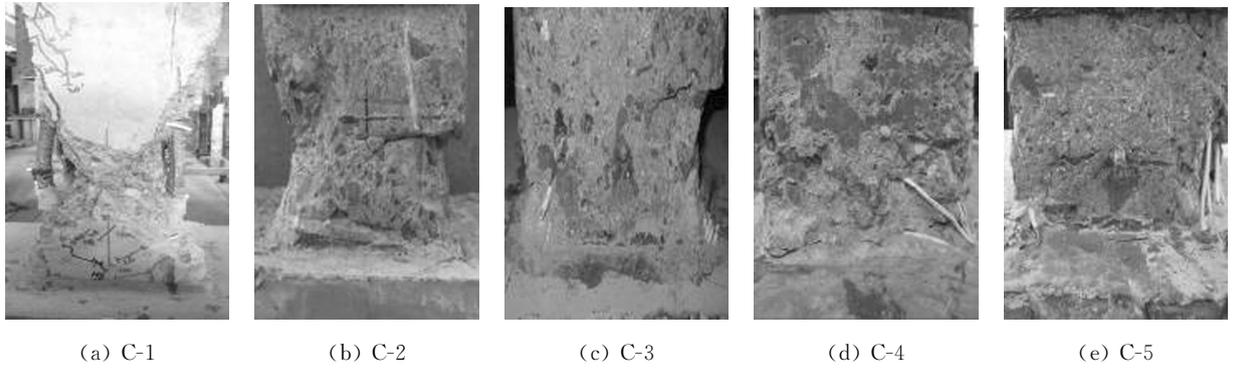


图4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of specimens

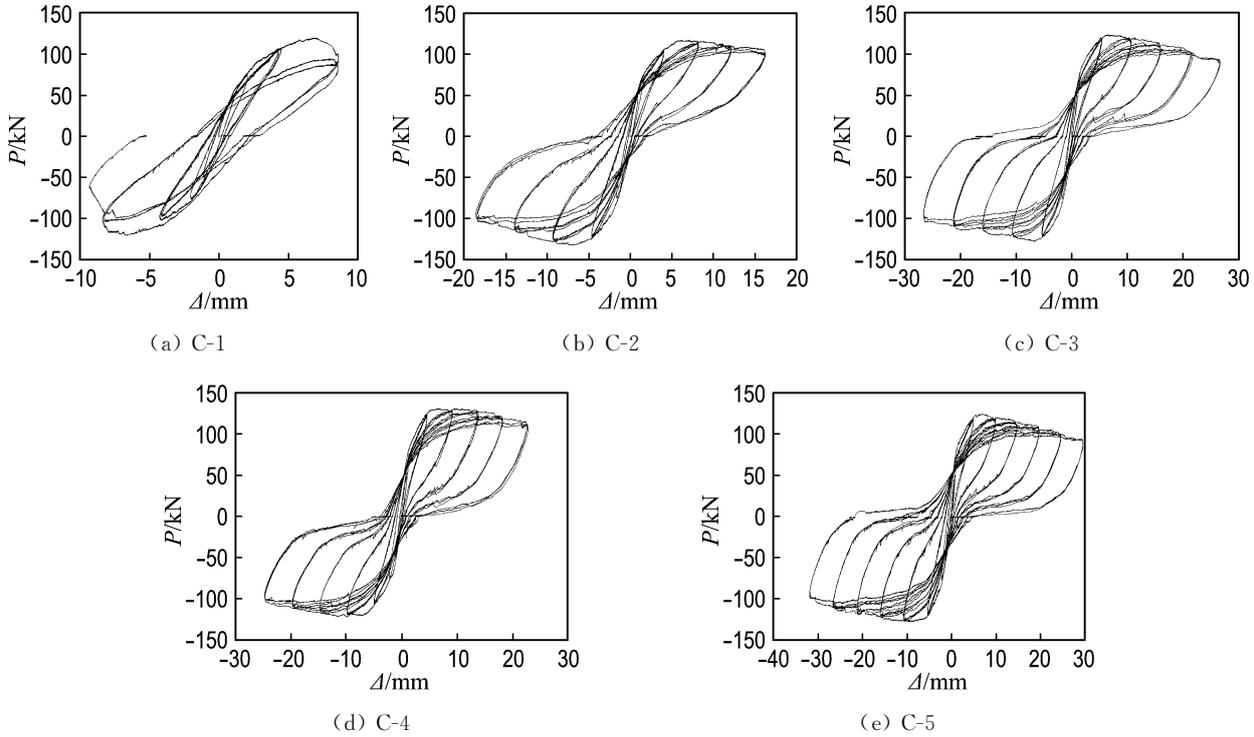


图5 试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of specimens

2.2.2 延性分析 本文采用位移延性系数 μ_{Δ} 、能量延性系数 μ_A 、累计耗能 E_{sum} 和塑性铰转角 θ_p 这4个参数^[14]作为评价试件延性性能的指标。各参数计算方法如下：

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

$$\mu_A = A_u / A_y \quad (2)$$

$$E_{sum} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

$$\theta_p = (\Delta_u - \Delta_y) / h \quad (4)$$

式中： Δ_u 为试件的极限位移，取水平荷载下降到最大值的85%时对应的水平侧移； Δ_y 为屈服位移，按照能量法^[14]计算，两者均取试件两侧计算

结果的平均值。 A_u 为试件荷载位移骨架曲线中极限位移所对应的骨架曲线与横坐标轴所围成的面积； A_y 为屈服位移对应骨架曲线与横坐标轴所围成的面积， A_y 和 A_u 分别称为骨架曲线中屈服能量和极限能量，各试件骨架曲线见图6； E_i 为单周滞回耗能， i 为加载周数， n 为总加载周数； h 为剪跨区长度，取600mm。具体的计算结果见表3。

从图6和表3同时可以看出加固对试件承载力的影响很小，对比试件C-1承载力达到极值后迅速下降，很快达到破坏，这反映出高强混凝土柱剪切破坏时延性很差，结构破坏时留给人们逃离的时间较短，容易造成灾难性后果。加固后试件承

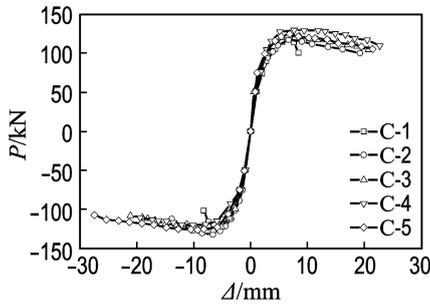


图6 试件骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of specimens

承载力达到最大值后下降比较平缓,延性较好.表3中加固后试件的屈服位移和屈服能量变化不大,而位移延性系数、能量延性系数、累计耗能和塑性铰转角提高非常显著,4个参数显示出不同加固方式的加固效果是一致的,从能量角度衡量延性性能的两个参数能量延性系数和累计耗能较位移延性系数提高明显,尤其累计耗能提高幅度已

表3 试验计算结果

Tab. 3 Calculation results of test

试件编号	最大荷载/kN	提高幅度/%	屈服位移/mm	极限位移/mm	位移延性系数	提高幅度/%	屈服能量/kJ	极限能量/kJ	能量延性系数	提高幅度/%	累计耗能/kJ	提高幅度/%	塑性铰转角/ 10^{-3} rad	提高幅度/%
C-1	119.10	—	3.76	8.32	2.21	—	0.245	0.756	3.08	—	2.322	—	7.6	—
C-2	124.68	4.7	3.42	16.52	4.83	118	0.239	1.750	7.31	137	13.670	489	21.8	187
C-3	124.80	4.8	3.36	20.40	6.07	175	0.245	2.279	9.32	202	23.066	893	28.4	274
C-4	124.90	4.9	3.76	23.64	6.29	185	0.261	2.613	10.02	225	29.258	1160	33.1	336
C-5	125.58	5.4	3.62	24.44	6.75	205	0.255	2.708	10.61	244	30.901	1231	34.7	356

以上结果充分说明夹板组合加固方式可以用于加固抗剪不足的高强混凝土方柱,而加固后的试件完全可以改善原试件破坏时脆性大、延性差的缺点,以达到延性破坏的理想破坏模式.

2.2.3 刚度退化分析 为了反映试件的刚度退化情况,采用 K_i 与 K_0 ^[14] 的比值作为评价刚度的参数.其中 K_i 为某级加载水平荷载峰值点处对应的刚度,取正负两个方向的平均值; K_0 为初始刚度,定义为在骨架曲线中当水平荷载达到峰值荷载的 1/3 时对应的刚度.

根据上面的定义及试件的骨架曲线可以得到加载试件的刚度退化情况,如图7所示.从图中可以看出:在加载初期,试件处于弹性阶段,刚度退化比较迅速,加固后的试件刚度略高于对比试件;随着位移和荷载的增加,其下降均趋于平缓,进入屈服阶段后,C-2和C-3的退化曲线基本重合,而C-4和C-5基本重合,采用夹板组合加固方式的C-4与C-5两个试件的刚度退化更缓慢一些,整

达到了1231%.从计算结果可以得出:组合加固方式优于仅用CFRP布加固方式;夹板组合加固方式优于植筋组合加固方式;窄夹板组合加固方式优于宽夹板组合加固方式,利用窄夹板组合加固试件的位移延性系数和塑性铰转角已经分别达到了加固前的3倍和4倍,试件的延性性能得到大幅度的改善.分析认为组合加固方式相对于仅用CFRP布加固方式能更好地增大混凝土柱的有效约束面积,加固后延性性能较好;由于通过螺帽提前对试件施加了一定的预压力,夹板组合加固方式相当于一种主动的约束方式,相对于被动的植筋加固方式,这种组合加固方式不仅扩大了有效约束区域而且还能使约束作用更早地发挥出来,所以约束效果更好;由于窄夹板的面积仅为宽夹板的1/2,在相同的螺帽预压力下,窄夹板的平均预压应力要大于宽夹板,导致约束作用更强,因此窄夹板组合加固方式效果要优于宽夹板组合加固方式.

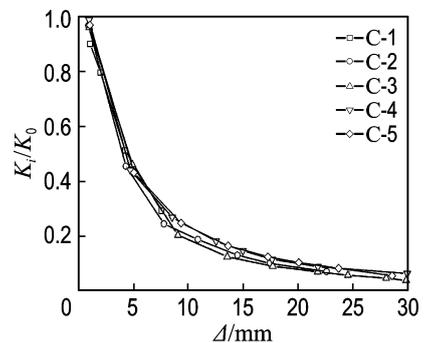


图7 试件刚度退化比较

Fig. 7 Comparison of stiffness degradation of specimens

体上位于C-2和C-3两个试件的上方,这是由于夹板的主动约束作用使试件的刚度略有提高而导致试件在屈服后刚度下降相对缓慢一些;在试验后期加固后试件刚度退化曲线逐渐趋于平行水平轴的直线,说明试件在试验后期刚度基本维持一个恒定值,仍然可以保持一定的承载力不降低,从而增加试件的延性;采用夹板组合加固后试件的刚度退

化曲线与其他加固方式的刚度退化曲线相差不大,所以夹板组合加固不会过大地改变试件的刚度。

根据5个试件的刚度退化曲线的整体趋势,作者在常鹏等^[15]的墙体刚度退化模型基础上通过数值拟合提出了高强混凝土柱的双段刚度退化模型如下:

$$K/K_0 = 1; 0 \leq \Delta < \Delta_c \quad (5)$$

$$K/K_0 = 0.006(\Delta/h)^{-0.825}; \Delta_c \leq \Delta \leq \Delta_u \quad (6)$$

式中: K_0 为初始刚度; Δ 为试件水平侧移值; Δ_c 和 Δ_u 分别为试件开裂荷载和荷载降低至最大值的85%时对应的水平侧移值; h 为剪跨区长度,取600 mm。

将拟合后的双段模型曲线和5个试件的刚度退化数据点绘于同一图中,如图8所示。模型曲线的测定系数 $R^2=0.9477$,拟合程度较好。5个试件开裂时所对应的转角 Δ_c/h 的平均值为 $1/613$ rad,因此可以认为试件的转角在 $1/613$ rad之前为弹性阶段,刚度不变,当转角超过 $1/613$ rad之后试件刚度按幂函数规律变化。

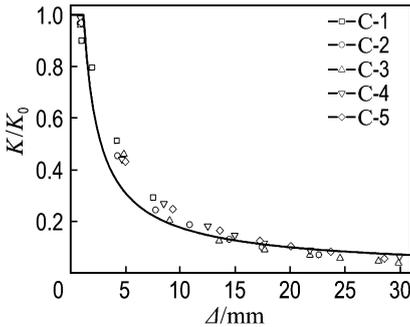


图8 刚度退化非线性拟合曲线

Fig. 8 The non-linear fitting curve of stiffness degradation

3 结论

(1)采用横向包裹CFRP布、横向包裹CFRP布和植螺栓杆组合方式,以及横向包裹CFRP布和宽、窄夹板组合方式4种加固方式均可改变抗剪不足高强混凝土方柱的破坏形态,有效提高试件的抗剪承载力,使试件由原来的剪切破坏模式转变为延性较好的弯曲破坏模式。

(2)采用窄夹板组合方式改善抗剪不足高强混凝土柱试件的效果最好,对试件的延性性能提高较明显,这与文献^[15]中所得出的结论是一致的,夹板组合加固方式中夹板使仅植螺栓杆的被动加固变为夹板组合的主动加固,所以发挥效果更好,建议优先采用。

(3)本文中各种加固方式对试件的刚度影响不大,加固前后的试件刚度变化趋势基本一致,基于此,文中提出了适用于高强混凝土柱的双段刚度退化模型,模型与本文试验数据拟合较好。但由于受试件数量所限,文中仅考虑了水平侧移和柱高度两个参数,至于刚度退化是否还与其他参数有关,还需进一步研究。

(4)采用夹板组合加固方式植螺栓杆时,应注意保证胶水充满孔洞且不溢出,以免胶水固化后造成试件的表面不平整,使夹板不能有效地传递预压力,导致约束效果不好。在工时为了达到上述要求,可按胶水占满孔洞的2/3左右的标准使用胶枪进行灌胶,然后采用旋入方式放入螺栓,再用胶带进行封口处理。

参考文献:

- [1] 滕锦光,陈建飞,史密斯 S T,等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, Smith S T, et al. FRP: Strengthened RC Structures [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 陈肇元,朱金铨,吴佩刚. 高强混凝土及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
CHEN Zhao-yuan, ZHU Jin-quan, WU Pei-gang. High Strength Concrete and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese)
- [3] 贾金青,姜睿,厚童. 钢管超高强混凝土框架柱抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2006, 39(8):14-18.
JIA Jin-qing, JIANG Rui, HOU Tong. An experimental study on the seismic performance of steel reinforced super high-strength concrete columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(8):14-18. (in Chinese)
- [4] Li J, Bakoss S L, Samali B, et al. Reinforcement of concrete beam-column connections with hybrid FRP sheet [J]. Composite Structures, 1999, 47(1-4):805-812.
- [5] LI Hong-nan, ZHOU Ying-wu, WANG Su-yan, et al. Fracture parametric study on bond behaviour between FRP laminates and high strength concrete with experiments [J]. Key Engineering Materials, 2007, 348-349:913-916.
- [6] Balaguru P, Nanni A, Giancaspro J. FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures [M]. New York: Taylor & Francis

- Group, 2009.
- [7] Tsonos A G. Effectiveness of CFRP-jackets and RC-jackets in post earthquake and pre-earthquake retrofitting of beam-column subassemblages [J]. **Engineering Structures**, 2008, **30**(3):777-793.
- [8] Anggawidjaja D, Ueda T, Dai J, *et al.* Deformation capacity of RC piers wrapped by new fiber-reinforced polymer with large fracture strain [J]. **Cement and Concrete Composites**, 2006, **28**(10):914-927.
- [9] Nanni A, Norris M S. FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression [J]. **Construction and Building Materials**, 1995, **9**(5):273-281.
- [10] 李忠献, 许成祥, 景萌, 等. 碳纤维布加固钢筋混凝土短柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, **23**(6):41-48.
LI Zhong-xian, XU Cheng-xiang, JING Meng, *et al.* Experimental research on seismic behavior of reinforced concrete short columns strengthened with carbon fiber sheets [J]. **Journal of Building Structures**, 2002, **23**(6):41-48. (in Chinese)
- [11] 张智梅, 刘涛, 桂钰, 等. 组合FRP技术改善混凝土矩形柱的抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(10):15-20.
ZHANG Zhi-mei, LIU Tao, GUI Yu, *et al.* Experimental study on the shearing behavior of concrete rectangular columns strengthened using hybrid FRP method [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, **41**(10):15-20. (in Chinese)
- [12] Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, *et al.* Effect of column parameters on FRP-confined concrete [J]. **Journal of Composites for Construction**, 1998, **2**(4):175-185.
- [13] WU Yu-fei, LIU Tao, WANG Lei-ming. Experimental investigation on seismic retrofitting of square RC columns by carbon FRP sheet confinement combined with transverse short glass FRP bars in bored holes [J]. **Journal of Composites for Construction**, 2008, **12**(1):53-60.
- [14] 余文华. CFRP增强高强混凝土柱延性性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
YU Wen-hua. Study on ductility performance of reinforced high strength concrete columns confined by CFRP [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] 常鹏, 姚谦峰. 密肋复合墙体水平承载力及抗侧刚度研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, **30**(4):50-53.
CHANG Peng, YAO Qian-feng. Lateral resistance and stiffness of multi-ribbed composite slab [J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2006, **30**(4):50-53. (in Chinese)

Experimental investigation on shear behavior of high strength concrete square columns retrofitted with CFRP hybrid methods

WANG Su-yan^{*1}, CAO Huai-chao², LU Wei¹, WANG Ze-yuan¹, LIANG Jin-yong¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Liaoning Electric Power Survey and Design Institute, Shenyang 110179, China)

Abstract: In order to investigate the effects of these four retrofitting CFRP hybrid methods (wrapped CFRP sheets method, embedded bolt bar combining with wrapped CFRP sheets hybrid method and wide or narrow clamping plates with wrapped CFRP sheets hybrid method) on the shear behavior of high strength concrete square columns, low reversed cyclic loading test is used to systematically analyze the ductility, rotation capacity of the plastic hinge and stiffness degradation. The experimental results show that all the retrofitting methods mentioned above can effectively improve the shear behavior and deformation of specimens. Meanwhile, the narrow clamping plates with wrapped CFRP sheets hybrid method is the best one among the four methods. In addition, a subsection model of stiffness degradation is proposed, and the calculated results are also in good agreement with experimental data.

Key words: retrofitting; ductility; shear behavior; CFRP sheet; high strength concrete; square column