

CFRP 加固高强混凝土柱抗震性能和延性研究

王吉忠*, 王苏岩, 黄承逵

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过试验对 9 根低周反复荷载作用下碳纤维布加固高强混凝土柱的抗震性能和延性进行了研究. 分析了碳纤维布加固高强混凝土柱抗震性能的影响因素和加固效果. 用有限元数值模拟方法对抗震柱加固后的力学性能进行了数值模拟. 试验和有限元分析结果表明, 加固柱的抗震性能和延性得到明显改善. 有限元分析结果与试验结果符合较好, 为碳纤维布加固高强混凝土的数值分析提供了参考.

关键词: 碳纤维布; 高强混凝土; 滞回曲线; 延性

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A

0 引言

自从钢筋混凝土结构问世以来, 世界各国在工程中所使用的混凝土强度等级就不断提高. 20 世纪 60 年代, 美国已有强度相当于我国 C50 到 C60 的商品混凝土. 在我国推广应用高强混凝土有了良好的基础, 其应用将越来越广泛. 例如, 在建筑工程中, 高强混凝土可以应用于高层建筑底部的柱子、梁、顶板和剪力墙以及大跨度屋盖等; 在桥梁工程中, 高强混凝土可用来建造大跨度桥梁、桥墩等; 在港口和海洋工程中, 高强混凝土可用于建造码头、船坞、防波堤和采油平台等. 但随着强度的提高, 混凝土的脆性变得越来越大, 变形能力有所减弱, 破坏也变得更为突然. 碳纤维材料具有抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀, 以及便于施工、施工质量有保证等优点, 利用碳纤维布横向包裹高强混凝土柱, 通过约束柱的横向变形而对混凝土柱起到加固的作用, 从而有效地改善高强混凝土脆性大、变形能力差、破坏较突然的缺点, 柱的延性、抗剪能力和抗震性能也可以得到明显的提高, 这已在国内外的很多试验研究中得到了证实^[1~4]. 本文对 9 根加固后的高强混凝土柱的抗震性能进行试验研究, 并用有限元方法模拟试验过程.

1 试验介绍

1.1 试件设计与材料性能

试验共设计 9 个试件, 混凝土强度等级为 C75, 其中水泥用量为 480 kg/m³, 水灰比为 0.34. 混凝土配合比为 $m(\text{水泥}) : m(\text{水}) : m(\text{砂子}) : m(\text{石子}) : m(\text{减水剂}) = 1 : 0.34 : 1.315 : 2.56 : 0.01$. 试件均为倒 T 形, 截面尺寸为 200 mm × 200 mm, 柱高为 800 mm, 剪跨比为 4.0. 采用对称配筋, 每侧纵筋为 2 ϕ 16, 柱两端箍筋进行了加密, 具体尺寸及配筋见图 1. 为避免柱端因承受较大的竖向力而发生局部受压破坏, 在柱端 200 mm 范围内增设了钢筋网片. 试件设计时考虑的主要参数有柱轴压比、碳纤维布加固量、碳纤维布粘贴方式和加载顺序. 碳纤维布采用封闭式粘贴, 纤维方向与柱轴向垂直, 纤维布搭接长度为 100 mm, 粘贴方式如图 2. 试验用碳纤维布 (CFC-200) 及粘结剂的主要力学指标分别为抗拉强度 3 400 MPa, 弹性模量 230 GPa, 计算厚度 0.111 mm, 单位质量 200 g/mm²; 拉伸强度 3 400 MPa, 剪切强度 230 MPa, 正拉粘结强度 0.111 MPa, 弹性模量 2 605.7 MPa. 试件编号及主要参数见表 1.

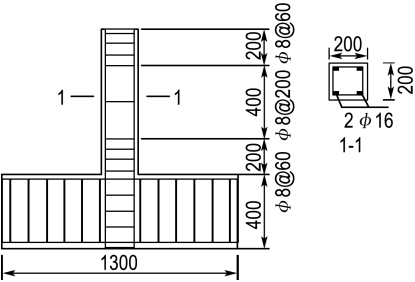


图 1 试件截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Section dimensions and reinforcements of specimen (unit:mm)

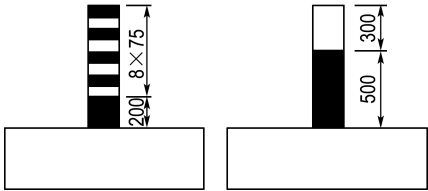


图 2 试件加固方式(单位:mm)

Fig. 2 Strengthening schemes of specimen (unit:mm)

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Primary parameters of specimens

试件编号	混凝土立方体抗压强度/MPa	试验轴压比	纤维布层数	纤维布粘贴方式	箍筋	加载顺序
RS	76.8	0.232			φ8@200	对比柱
CS2	81.0	0.232	2	全包高 500 mm	φ8@200	先加固后加载
CS3	75.5	0.232	3	全包高 500 mm	φ8@200	先加固后加载
CS4	75.1	0.232	4	全包高 500 mm	φ8@200	先加固后加载
CSY3	75.3	0.232	3	全包高 500 mm	φ8@200	先预裂后加固
RL	75.3	0.418			φ8@120	对比柱
CL3	80.2	0.418	3	全包高 500 mm	φ8@120	先加固后加载
CLY3	76.1	0.418	3	全包高 500 mm	φ8@120	先预裂后加载
CLT3	83.5	0.418	3	条带	φ8@120	先加固后加载

1.2 试验加载方案

所有试件都承受恒定的竖向力和低周期性的水平力,通过油压千斤顶施加. 竖向液压千斤顶选用 5 000 kN 油压千斤顶,安装在滑动小车上,在试验过程中可随柱顶端左右移动,以保持荷载垂直作用,通过安装在千斤顶上的荷载传感器进行力的量测和控制. 加载装置如图 3 所示. 水平荷载和位移信号通过荷载传感器、位移计及动态电阻应变仪输送到 X-Y 函数记录仪内. 钢筋应变、纤维布应变通过电阻应变片测量. 加载程序采用荷载变形混合控制加载. 首先施加轴力至预定值,然后循环加卸水平力. 构件屈服前,采用水平荷载来控制,分级加载,每级荷载循环一次. 试件屈服后采用水平位移控制加载,水平位移值取试件屈服位移的整数

倍,每级按位移控制循环一次. 构件承载力(水平荷载)下降到峰值荷载的 85%时,结束试验.

2 试验结果及分析

2.1 试验结果的滞回曲线

滞回曲线是结构抗震性能的综合体现,是进行抗震性能分析的主要依据. 滞回曲线中滞回环越饱满,说明结构的耗能能力越强,抗震性能越好. 图 4 为试验中试件在低周反复荷载作用下的滞回曲线.

分析各图不难看出,粘贴纤维布加固的试件在起初正反向加卸载所形成的滞回环不明显,说明试件处于弹性阶段;随着荷载的增加,试件内部出现裂缝,数次反复加载后,曲线向位移轴倾斜,滞回环面积增大,荷载回零时位移回不到零点,试件有残余变形,进入了非弹性工作阶段,有很好的耗能能力. 本次试验中,碳纤维布均未出现断裂现象,比较 RS、CS2、CS3 的滞回曲线,可以看出,单从滞回曲线上看,随着纤维布层数的增多,构件的耗能能力有所提高,但不明显,这与纤维布的约束性能并未充分利用有关,具体效果见后述的延性分析. 图 4(e)表明,在柱产生轻微损伤时,加固后柱仍可以有较好的抗震性能.

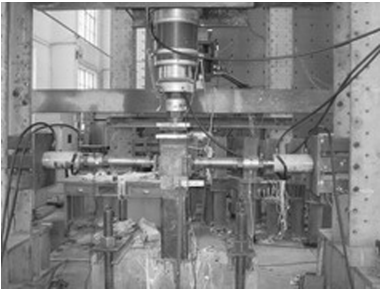


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading setup

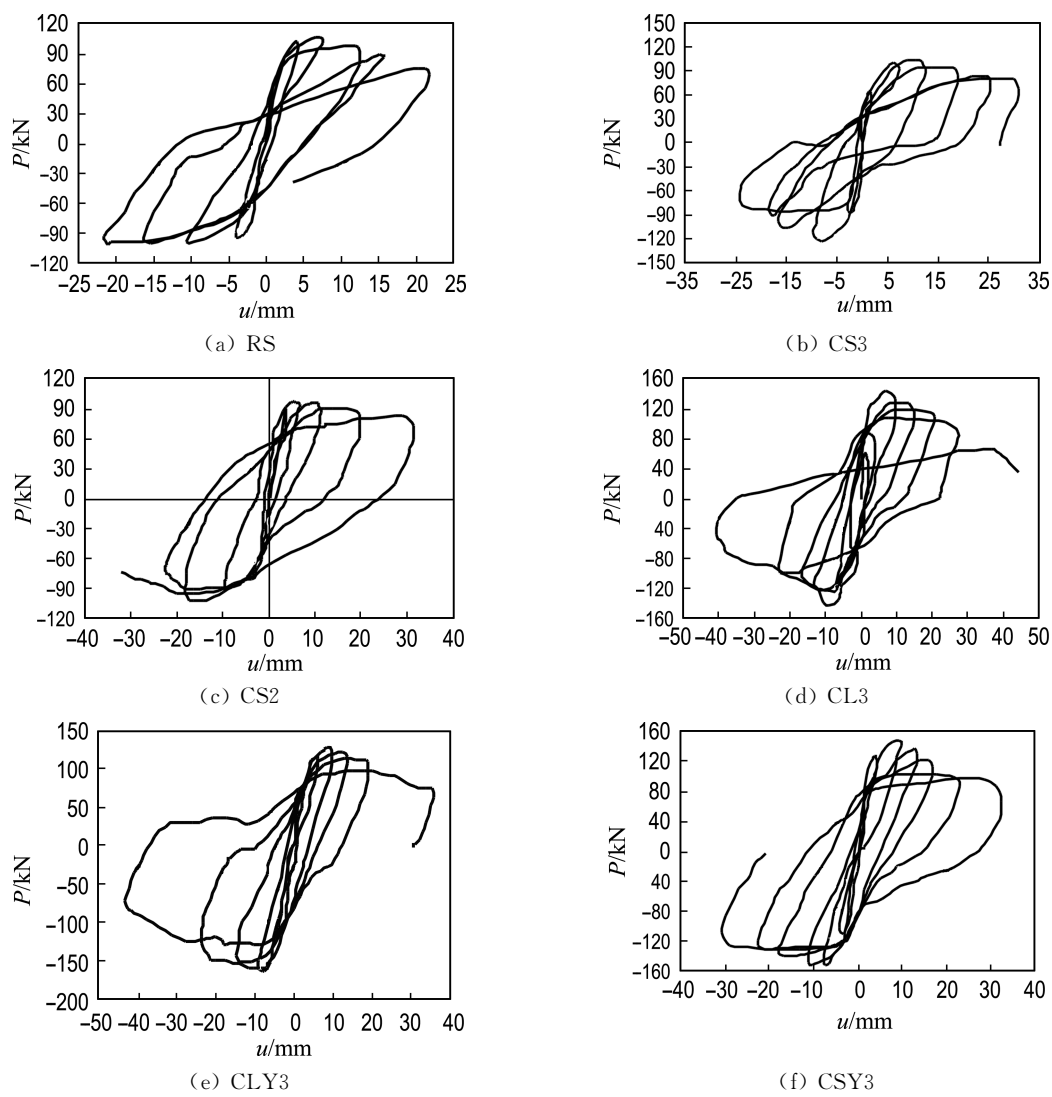


图 4 试验滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves in the test

2.2 承载力及延性分析

确定构件延性系数时采用如下定义^[5~7]：

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y \tag{1}$$

式中： Δ_u 为构件的极限位移，取构件的水平荷载下降到峰值荷载的85%时的位移； Δ_y 为构件的屈服位移，取受拉区主钢筋达到屈服应变时构件的位移。由试验结果计算所得的极限荷载 P_u 和延性系数 μ_{Δ} 及它们的提高幅度见表2。不难看出，不同轴压比柱加固后柱能承受的水平极限荷载和柱的延性都有了一定程度的提高。相同条件下，轴压比大的柱比轴压比小的柱的水平极限荷载提高幅度大，这是由于大轴压比柱其破坏更接近于小偏压破坏，横向纤维布的约束使受压区混凝土的抗压强度提高；而低轴压比柱其破坏是以受拉区钢筋屈服为主要原因，纤维布的约束作用不充分，故其承载力提高并不明显。而对于延性，轴压比大的柱

提高幅度较轴压比低柱小(如CS3和CL3)；纤维布层数的变化对水平极限荷载的提高影响不大，但对延性有一定影响(如CS2、CS3和CS4延性系数分别为6.0、6.3和6.8)；其他条件相同时，预裂试件CLY3和CSY3的延性系数分别为5.1和6.8，未预裂试件CL3和CS3的位移延性系数分别为4.9和6.0，可见轻微预损伤后加固柱的延性有所增大。因为试件在产生一定的裂缝后，重新受力时，混凝土继续开裂，体积膨胀，激发了外包纤维布的环向伸长，使得侧向约束力增大，混凝土的极限应变提高，因而延性增大。其他条件相同时，沿柱高条带加固试件(CLT3)的延性系数为5.7，柱底部全包试件(CL3)的延性系数为4.9，可见沿柱高条带加固能较好地提高柱的延性。试验结果是否具有普遍性还是个例尚有待于更深入的研究。

表 2 由试验结果计算所得的延性系数

Tab. 2 Calculated ductility modulus according to the result of test

试件编号	试验极限荷载/kN	试验极限荷载提高幅度/%	延性系数计算值	延性系数提高幅度/%
RS	96.6	—	4.9	
CS2	102.4	6.0	5.5	12.2
CS3	102.4	6.0	6.0	22.4
CS4	99.5	3.0	6.3	28.0
CSY3	98.5	2.0	6.8	30.8
RL	120.0	—	4.4	
CL3	140.8	17.3	4.9	11.1
CLY3	140.5	17.1	5.1	15.9
CLT3	133.2	11.0	5.7	29.5

3 加固试件的有限元分析

3.1 单元的选取

(1) 混凝土单元

高强混凝土单元用实体单元 solid65,该单元可以综合考虑包括塑性和徐变引起的材料非线性、大位移引起的几何非线性、混凝土开裂和压碎引起的非线性等多种混凝土的材料特性^[8~10].用 ANSYS 软件中 solid65 单元特有的 concrete 模型定义混凝土的强度准则,并关闭混凝土的压碎特性.高强混凝土单元的本构关系通过输入数据表(TableData)的形式自行输入能够反映混凝土材料性质的应力-应变关系曲线(如图 5).并采用 William-Warnke 五参数破坏准则.

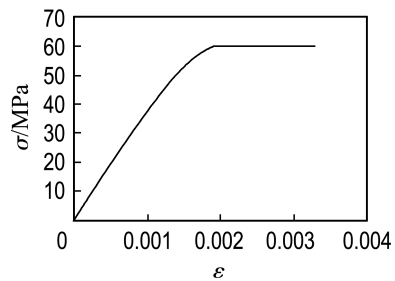


图 5 混凝土本构关系
Fig. 5 Concrete stress-strain curve

(2) 纤维布单元

外包碳纤维布材料单元采用 ANSYS 软件中的 shell41 膜单元,该单元只能承受拉力作用,没有抗弯、抗压能力,符合碳纤维布在混凝土中的受力状况.CFRP 材料的应力-应变关系采用理想弹性模型.在 ANSYS 中,用 CFRP 单元厚度的变化来模拟其用量的增加.为了使纤维布只在拉伸的

状态下有刚度,把 shell41 单元的 Keyopt(1)选项的值设为 1.在本分析中,只考虑纤维布的横向受力,在柱的轴线方向受力很小,可以忽略不计,此时纤维布是各向异性材料.

(3) 其他单元

钢筋采用 link8 单元类型,应力-应变关系曲线为理想弹塑性模型.另外选用 solid45 单元作为刚支座的单元类型,通过刚支座给混凝土柱施加约束和作用力可以减小应力集中,从而使计算过程更容易收敛一些.

3.2 有限元模型的建立

在建立有限元模型时,钢筋和混凝土采用分离式模型,通过节点把二者结合在一起,不考虑钢筋和混凝土的相对滑移.为了在非线性计算时使用大变形选项,把纤维布划分为三角形单元,并应在局部坐标系下进行,使各个面上的纤维布单元处在各自的局部坐标系下,这样做可以使纤维布的受力状态更符合实际情况.具体的有限元模型见图 6.

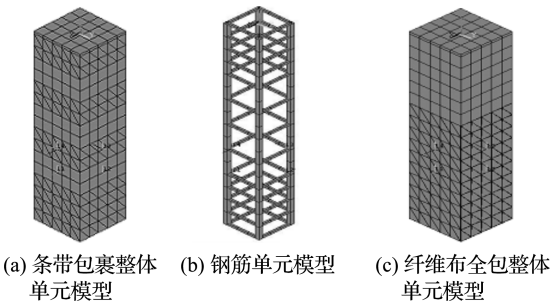


图 6 CFRP 加固高强混凝土柱有限元模型
Fig. 6 Finite element model of high-strength concrete column confined by CFRP

3.3 ANSYS 有限元软件的计算结果

用 ANSYS 软件对试验进行模拟计算后,所

得各个试件在低周反复荷载作用下的滞回曲线见图 7.

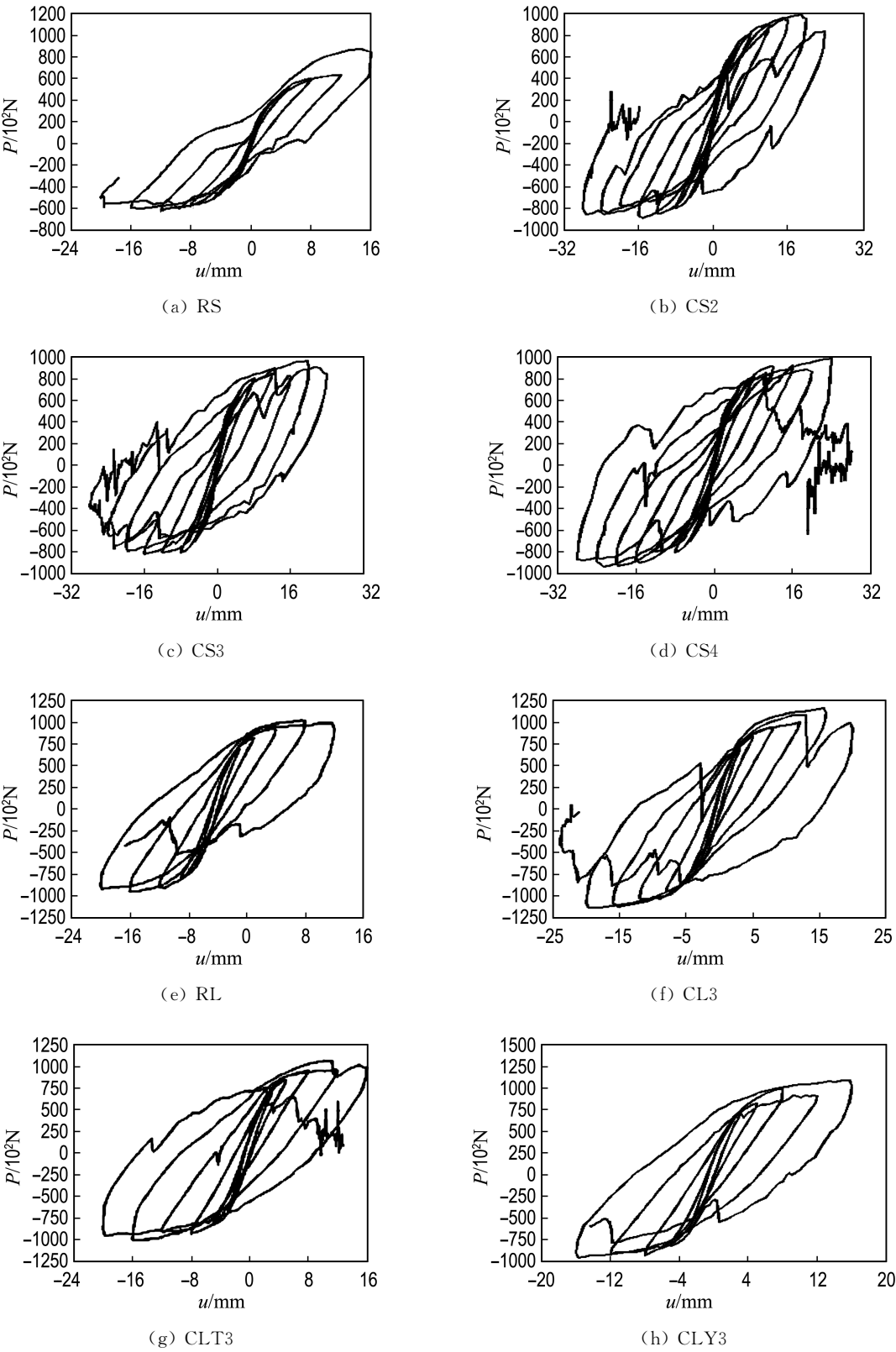


图 7 ANSYS 计算所得滞回曲线

Fig. 7 Calculated hysteresis curves by ANSYS

比较由 ANSYS 软件计算所得的高强混凝土柱的滞回曲线和试验所得的滞回曲线,可以看出二者的形状有所不同,前者峰值应力后应力的下降不是很明显,应力下降后的滞回曲线比较难得到,而后的滞回曲线比较饱满和完整. ANSYS 软件在试件达到峰值应力后,试件局部已发生破坏,此时计算比较难收敛而终止,这使得应力下降后的滞回曲线难以得到. 不过总的来看,二者各自的滞回曲线中滞回环的饱满程度有着相同的变化趋势,对加固效果有着相同的结论. 由试验的滞回曲线所得的结论都可以在 ANSYS 计算所得的滞回曲线中得到验证.

图 7(d)表明当纤维布层数增加到 4 层时,对柱子抗震性能的改善已经不明显了. 纤维布使用效率的问题有待进一步研究. 图 7(f)和(g)表明,在柱子延性改善方面条带加固效果要略好于全包

500 mm 的加固效果,但差异不明显. 而由前文可知,在柱子承载力的改善方面全包加固要好于条带加固. 综合分析各图可知,轴压比对 CFRP 的加固效果影响较明显,轴压比大的试件加固后柱子的承载能力相对提高幅度大些,而延性的改善方面较低轴压比柱子差(如图 7(a)、(e)、(c)和(f)). 用 ANSYS 软件可以得到试件达到峰值应力时的应力和应变值,但在应力下降后,试件的局部已发生破坏,致使计算过程不能收敛,也就比较难以得到荷载下降后的滞回曲线和水平荷载下降到峰值荷载的 85%时的位移,不能对结构延性系数的变化给予指示. ANSYS 计算的极限荷载值如表 3. 计算值相对试验值比较保守,但随着碳纤维布加固量和加固形式的变化,高强混凝土柱水平极限荷载的变化趋势二者基本是相同的. 有限元计算结果和试验结果是相符合的.

表 3 试验结果与 ANSYS 结果比较
Tab. 3 Comparison of the result of ANSYS and the result of test

试件编号	试验极限荷载/kN	试验极限荷载提高幅度/%	ANSYS 计算极限荷载/kN	ANSYS 计算极限荷载提高幅度/%
RS	96.6		90.6	
CS2	102.4	6.0	98.8	9.1
CS3	102.4	6.0	97.2	7.3
CS4	99.5	3.0	97.6	7.7
CSY3	98.5	2.0	97.3	7.4
RL	120.0		102.4	
CL3	140.8	17.3	116.2	13.5
CLY3	140.5	17.1	114.2	11.5
CLT3	133.2	11.0	112.4	9.8

4 结 论

- (1)用碳纤维布横向包裹来加固高强混凝土柱,其滞回性能均得到了较好的改善,捏拢现象缓解,滞回环变得饱满,极限水平位移增大,抗震耗能能力增强.
- (2)随着纤维布用量的增加,延性效果也随之提高,但当纤维布用量达到一定程度时,提高幅度已不明显,而且纤维布没断裂条件下纤维布层数对承载力的提高效果影响甚微. 所以工程中应注意充分利用碳纤维布的材料性能,避免不必要的浪费.
- (3)在纤维布用量相同时,沿柱高条带加固延

- 性效果好于部分全包加固,而承载力提高幅度较部分全包小.
- (4)纤维布横向加固对高轴压比柱承载力提高效果明显,对低轴压比柱效果不大;而对延性的提高都有较好效果,且低轴压比柱提高效果更显著些.
- (5)用 ANSYS 有限元分析可以较好地模拟碳纤维布加固高强混凝土结构的试验过程,计算结果与试验结果符合较好. 这为今后加固结构的数值分析提供了参考. 但在极限荷载以后由于计算难以收敛,此后构件的受力过程比较难得到.

参考文献:

- [1] 赵 彤,戴自强. 碳纤维布增强钢筋混凝土柱抗震能力的试验研究[J]. 建筑结构,2000, **30**(7):31-34
- [2] XIAO Y, WU H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets [J]. **Journal of Material in Civil Engineering**, 2000, **12**(2):139-146
- [3] 张 珂,岳清瑞. 碳纤维布加固混凝土柱改善延性的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, **30**(2):16-19
- [4] YAN Xia. Seismic performance of high-strength concrete columns [J]. **Journal of Structural Engineering**, 1998, **111**(3):241-251
- [5] MONTOYA E,VECCHIO F J,SHEIKH S A. Numerical evaluation of the behaviour of steel and FRP confined concrete columns using compression field modeling [J]. **Engineering Structures**, 2004, **26**(11):1535-1545
- [6] LI B. Strength and ductility of reinforced concrete and frames constructed using high-strength concretes [D]. Christchurch: University of Canterbury, 1994
- [7] SAATCIOGLU M, BAINGO D. Circular high-strength concrete columns under simulated seismic loading [J]. **Journal of Structural Engineering**, 1999, **125**(3):272-280
- [8] 陆新征,冯 鹏,叶列平. FRP 布约束混凝土方柱轴心受压性能的有限元分析[J]. 土木工程学报, 2003(2): 46-51
- [9] 郝文化,刘春山. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005
- [10] 白 葳,喻海良. 通用有限元分析 ANSYS8.0 基础教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005

Research on ductility and earthquake-resistance of high-strength concrete column confined by CFRP

WANG Ji-zhong*, WANG Su-yan, HUANG Cheng-kui

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Ductility and earthquake-resistance of nine high-strength reinforced concrete columns confined by CFRP were researched. A group of repeating low frequency lateral loads and constant axial load acted on those columns. The factors that impact the ductility and earthquake-resistance of high-strength reinforced concrete column confined by CFRP and the result of the test were principally researched. The method of finite element numerical calculation is used to simulate the mechanical behavior of high-strength reinforced concrete columns confined by CFRP. The result of finite element simulation and the result of the test show that the ductility and earthquake-resistance of confined column have an obvious improvement. The result of finite element simulation is coincident with that of the test, which provides a reference for the numerical analysis of high-strength concrete confined by CFRP.

Key words: carbon fiber composite sheet; high-strength reinforced concrete; hysteresis curve; ductility