

# CFRP 约束混凝土柱的抗震性能

The Seismic Behavior of Concrete Columns  
Confined with CFRP

张 剑<sup>1</sup>, 许广兴<sup>2</sup>

(1 空军工程大学 工程学院, 西安 710038; 2 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

ZHANG Jian<sup>1</sup>, XU Guang-xing<sup>2</sup>

(1 College of Engineering, Airforce Engineering University, Xi an 710038, China;

2 Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

摘要: 根据约束混凝土原理, 碳纤维增强塑料(CFRP) 约束混凝土抗震性能的研究正日益受到国内外研究人员的关注。本工作从材料性能、结构实验、影响因素及工作机理等方面阐述了 CFRP 约束混凝土柱抗震性能的研究现状, 并就技术发展趋势进行了探讨, 对发展需求提出了一些建议。

关键词: CFRP 约束混凝土; 加固; 抗震性能

中图分类号: TU591 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)02-0054-04

**Abstract:** On the basis of the confinement concrete system, the research on seismic behavior of the columns confined with carbon fiber reinforced plastics(CFRP) is paid much attention by researchers of many countries. The paper presented the state of art of CFRP confining concrete columns from the material character, structural experiments, the effect factors and the confinement mechanism and so on. Finally, some suggestions are presented according to the practical requirements.

**Key words:** CFRP-confined concrete; strengthening; seismic behavior

近年来, 采用碳纤维增强塑料(即 Carbon Fiber Reinforced Plastics, 简称 CFRP) 对混凝土、钢或其它材料构件进行修复、加固、翻新的新技术, 在国内外深受重视并已经获得了较多的应用和发展, 其优越性已在多处被损坏建筑的修复中得到验证<sup>[1]</sup>。中国是世界上混凝土结构使用最多的国家。资料表明, 国内有相当多的混凝土结构面临老化、强度不足、耐久性和安全性过低的问题, 需要对这些结构补强加固, 提高耐久性, 保证正常使用; 另一方面, 随着科学技术和经济的发展, 要求具有更高强度和耐久性的新型多功能混凝土结构, 因此, 研究和开发高性能的纤维增强材料是工程建筑材料发展的必然趋势。

中国是一个地震多发国家, 建筑物的抗震加固技术是工程抗震领域研究与应用的一个重要方面。柱是建筑物中重要的受力构件。在地震荷载作用下, 柱的破坏会导致建筑物倒塌。由于短柱在地震中极易发生脆性剪切破坏, 因此, 如何改善短柱的抗震性能是钢筋混凝土结构加固中亟待解决的一个问题, 采用碳纤维布加固钢筋混凝土短柱是一种有效的方法<sup>[1-4]</sup>。

CFRP 补强加固技术能够改善混凝土柱的延性, 并且具有高强高效、施工便捷、耐久性及耐腐蚀性好、

适用面广、自重轻、不增加结构尺寸等优点, 本工作对 CFRP 改善混凝土柱抗震性能的有关技术问题进行了研究。

## 1 CFRP 的特点

碳纤维是一种碳含量超过 90% 的纤维状碳材料, 是以有机纤维-聚丙烯晴(PAN) 纤维、粘胶纤维、沥青纤维等原丝经过预氧化、碳化、石墨化等高温固相反应工艺过程制备而成, 有择优取向的石墨微晶是其主要构成。CFRP 是由多股连续碳纤维采用基底材料(例如聚酰胺树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂等) 胶合后, 经过特制的模具挤压、拉拔而成型。

CFRP 的主要特点有: (1) 抗拉强度高。CFRP 的抗拉强度最高可达 7000MPa, 且在达到抗拉强度之前, 几乎没有塑性变形产生。(2) 抗腐蚀性极强。其强度不受酸碱腐蚀介质的影响。(3) 密度小, 施工方便。其密度一般为 1.70~1.80g/cm<sup>3</sup>, 仅为钢材的 25% 左右, 建筑结构中采用 CFRP 时, 施工方便, 可节约劳动力成本, 当用于旧有结构的维修加固时效果更为明显。(4) 热膨胀系数与混凝土相近。当 CFRP 与混凝土协

同工作时,两者间不会因环境温度变化产生大的温度应力。(5)耐久性好。CFRP 抗疲劳性能优良,疲劳寿命普遍高于钢材。

2 实验方法分析

2.1 加固形式和步骤

2.1.1 加固形式

环向约束时,纤维的缠绕通常有两种形式:全包式(类似于钢管混凝土)和间隔式(类似于箍板加固)。全包式可使构件沿柱高均匀受力,约束效果显著。在间隔式中,纤维对较远处混凝土的约束作用较小,混凝土受力不均匀,未包裹处的混凝土横向应变较大,易成为破坏的薄弱环节。

据资料显示<sup>[5]</sup>,对于CFRP 约束混凝土柱,碳纤维布之间的间隙对柱的承载力和延性都有影响:间隙率越大,构件承载力和延性系数越低。因此,在对钢筋混凝土柱进行修复加固时,应当尽量避免间隙的存在。

2.1.2 加固步骤

试件加固步骤如下:首先,将试件表面打磨平整,去掉表面老化的混凝土层,并将浮灰清除干净;其次,用丙酮溶液清洗混凝土表面,并彻底风干;在正式粘贴碳纤维布之前,先对混凝土表面做干燥处理,随后在混凝土表面均匀涂抹一层饱满的粘接剂,再将已裁剪好的碳纤维布粘贴上去,纤维受力方向与柱中心线垂直,粘贴时沿碳纤维受拉方向按压赶出气泡,以使碳纤维布与混凝土表面紧密粘结。当粘贴层数多于一层时,重复以上过程。碳纤维布的包裹范围为整个柱身,端部应根据实际情况保证一定的搭接宽度。最后,在外层碳纤维布表面再涂抹一层粘接剂,以保证碳纤维布充分浸润树脂。在充分养护之后,即可进行实验。加固过程如图 1 所示。

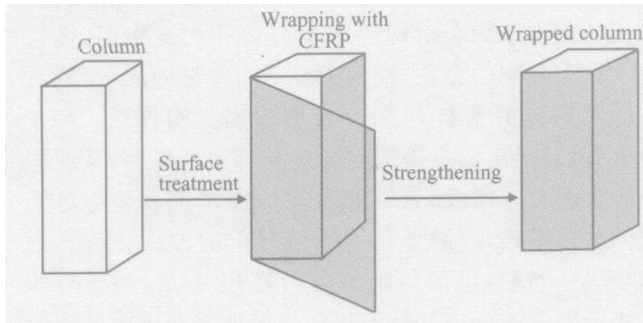


图 1 加固过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of strengthening process

2.2 实验装置

短柱加载在静力台座上,试件通过一定的装

置固定在静力台上,在柱顶利用油压千斤顶通过固定反力架上的横梁施加轴向荷载,并在实验过程中轴向力保持恒定,水平荷载通过固定在设备上的拉压千斤顶施加。从而形成推-卸-拉-卸的加荷循环,如此循环往复施加水平荷载。实验装置施加的荷载,在产生水平剪力的同时,还在柱端形成一组相应的弯矩。图 2 为某型实验装置。

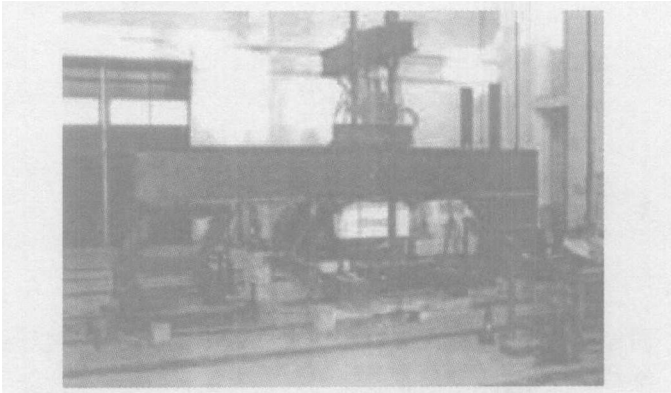


图 2 实验装置

Fig. 2 Apparatus for test

2.3 加载形式和制度

2.3.1 加载形式

目前,CFRP 约束混凝土柱抗震性能实验按加载形式可分为两类:一是低周反复加载,可分为变幅对称加载和变幅不对称加载两类,一般实验中均为变幅对称加载。试件同时受轴向力和反复水平力的作用。由此得到滞回曲线,可计算试件的延性指标,对 CFRP 加固性能给以定量的评价。二是地震模拟振动台实验,通过输入地震波,模拟真实的地震情况,对加固试件的实际抗震性能给以定性的评价。以上两类方法中,地震模拟振动台实验由于装置复杂,费用较高,较少采用,多数是通过计算机仿真技术来模拟地震作用的。所以现今研究最多的是低周反复实验。而且在此类实验中,可以综合研究轴压比、剪跨比、剪压比的大小,分析它们对柱抗震性能的影响。

2.3.2 加载制度

采用荷载-变形混合控制的加载制度。首先施加轴力至预定值(按一定轴压比控制),然后循环加卸水平力。在柱屈服之前,采用荷载控制并逐级加载,每级反复循环一次,直至试件屈服,达到屈服位移;试件屈服后,采用变形控制,变形值取屈服时试件的最大位移值,并以该位移值的倍数为级差,进行控制加载,每级荷载下反复加载循环一次,直至荷载下降到峰值荷载的 85%,此时认为柱破坏,实验结束。图 3 为加载制度示意图。

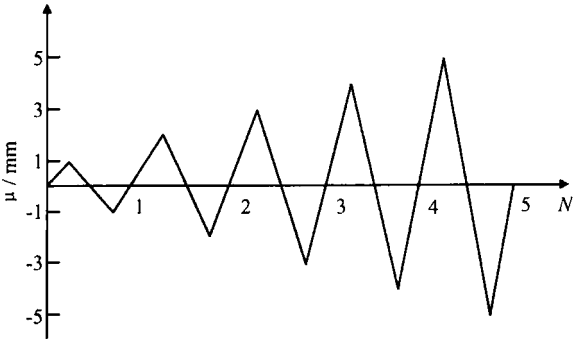


图 3 加载制度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading method

3 影响因素分析

经过碳纤维布横向包裹加固的短柱，其延性在不同程度上得到改善，改善程度和剪跨比、轴压比、碳纤维布的层数、构件截面形状等因素有关，总体来说改善效果显著，滞回环面积明显增大，说明构件的耗能能力增大，延性提高。

3.1 剪跨比的影响

剪跨比的不同会导致试件的受力特点不同<sup>[6]</sup>。CFRP 包裹后的弯曲破坏型(大剪跨比)模型与弯剪破坏型(小剪跨比)模型相比，前者具有更好的滞回耗能特性，但其损伤度也较大。低周反复荷载作用下，两种柱模型的恢复力曲线都变得丰满起来，但弯剪破坏模型在位移幅值较大时，捏拢现象较为明显。由实验的破坏形式可看出，对剪跨比较小的钢筋混凝土柱，通过 CFRP 加固方式，可以改变其脆性的剪切破坏模式，并获得满意的位移延性曲线。

3.2 轴压比的影响

轴压比是影响短柱抗震性能最主要的因素之一。随着轴压比的增加，试件的滞后性能变差，极限变形能力呈现出明显的减小趋势，而碳纤维加固混凝土短柱，可以延缓压区混凝土的屈服区域的进一步发展，可有效阻止构件的高剪压破坏<sup>[7]</sup>。

3.3 CFRP 加固层数的影响

对碳纤维加固混凝土柱施加低周往复荷载时，随着碳纤维加固量的增加，试件由延性较差的压剪脆性破坏逐渐转变为延性较好的正截面压弯破坏，能够实现强剪弱弯的抗震要求<sup>[8]</sup>。与此同时，碳纤维布存在着使用效率问题，当碳纤维布粘贴层数较少时，它的使用效率较高，加固柱的延性提高幅度大；当碳纤维布粘贴层数较多时，加固柱的延性提高幅度较小。

3.4 构件截面形状的影响

用相同的 CFRP 对构件进行加固时，圆形截面的

构件强度和延性的提高要优于方形截面构件<sup>[9]</sup>。

此外，通过对柱先包碳纤维再加轴力和先加轴力再包碳纤维两种不同的加载途径的对比实验，结果发现，先包碳纤维再加轴力，碳纤维对柱的约束更为有效，对柱的抗剪承载力的提高幅度较大<sup>[10]</sup>。

4 理论分析

4.1 延性提高机理分析

用碳纤维布横向包裹钢筋混凝土短柱来提高其延性时，碳纤维布的主要作用体现在两个方面<sup>[11]</sup>：

(1) 碳纤维布的作用类似于受剪箍筋，在斜裂缝出现后协助箍筋承受剪力。由于碳纤维的抗拉强度远远大于箍筋的抗拉强度，所以这种作用是十分明显的。钢筋混凝土短柱用碳纤维布包裹后，相当于增加了配箍率，使其抗剪承载力得以提高，从而有可能使实验柱在外荷载作用下发生具有一定延性的正截面受弯破坏，而非脆性的斜截面受剪破坏，破坏形态的变化直接决定了构件变形性能的改善。

(2) 碳纤维布还会对短柱内部的混凝土起到约束作用。当受压区混凝土达到峰值应力后，其横向膨胀变形急剧增加，碳纤维环向应变显著增长，环向约束力增加，这就使得混凝土的应力-应变曲线的下降段变得平缓，极限压应变得以提高，因而推迟了受压区混凝土的破碎，充分发挥了纵向钢筋的塑性变形性能，显著改善了构件的延性。

需要特别指出的是，碳纤维布的第二种作用只有在构件发生具有弯曲破坏特点的破坏形态时，才会处于主导地位。而钢筋混凝土短柱变形性能的改善，关键在于破坏形态的转变。因此，碳纤维布通过协助箍筋共同承受剪力来提高构件变形能力是其主要作用。

4.2 低周反复加载的计算原理

当构件受一定轴压比时，在低周反复荷载作用下，不仅柱顶水平力会对构件产生剪切和力矩作用，而且由于较大曲率的存在，轴向力会产生位移效应，所以对混凝土的抗剪及抗弯能力要求较高。构件受 CFRP 约束后，混凝土的极限应力和应变都得到提高，从而构件的极限曲率增大，延性和抗震性能得到改善。对于此种加载形式，一般是利用数值分析的方法分析其中的非线性问题，进而得到构件的弯矩-曲率( $M-\phi$ )曲线和极限曲率。由计算所得的屈服曲率和极限曲率的比值，计算构件的延性系数。

5 结束语

(1) 抗震性能实验主要分为静力实验和地震模拟

振动台实验。其中静力实验的开展占全部抗震性能实验的 80% 以上。因此, 应该加强拟动力实验及地震模拟振动台实验。

(2) CFRP 延伸率较小, 对改善被加固构件的延性贡献有限, 因此, 可采用混杂纤维增强塑料( 譬如在 CFRP 中掺入延伸率较高的玻璃纤维) 提高其韧性和断裂延伸率。

(3) 深入研究 CFRP 对不同截面构件的约束性能, 提出相应的简化计算公式。构件的截面形状直接影响了 CFRP 的约束效果。大多数研究仍停留在矩形和圆形上, 没有充分考虑其它截面形式( 如空心截面), 今后应加强此方面的实验研究和理论研究。

(4) 进一步深入和完善 CFRP 约束混凝土结构和构件抗震性能的研究。在建立准确的恢复力模型的基础上, 得出 CFRP 约束混凝土结构和构件在地震作用下的合理计算方法, 从而为 CFRP 约束混凝土抗震设计提供更为准确的参考。

参考文献

[1] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

[2] 张轲, 岳清瑞, 叶列平. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱滞回耗能分析

(上接第 53 页)

[4] 张义文, 上官永恒. 粉末高温合金的研究与发展[J]. 粉末冶金工业, 2004, 14(6): 30- 43.

[5] 国为民, 张凤戈, 张莹, 等. 镍基粉末高温合金的组织、性能与成型和热处理工艺关系的研究[J]. 材料导报, 2003, 17(3): 11- 15.

[6] TELESMA N J, KANTZOS P, GAYDA J, et al. Microstructural variables controlling time-dependent crack growth in a P/M superalloy[A]. GREEN K A, POLLOCK T M, HARADA H, et al. Superalloy, 2004[C]. Warrendale: TMS, 2004. 215- 224.

[7] GAYDA J. Alloy10: A 1300 F Disk Alloy[R]. Washington: NASA /TM- 210810, 2001.

[8] GAYDA J, FURRER D. Dual-microstructure heat treatment[J]. Advance Materials & Process, 2003, (7): 36- 40.

[9] GAYDA J, GABB T P, KANTZOS P T. Heat treatment devices and method of operation thereof to produced dual microstructure superalloy disk[s P]. US Patent: 6660110B1, 2003- 12- 09.

[10] GABB T P, TELESMA N J, KANTZOS P T, et al. Effect of high temperature exposure on fatigue life of disk[A]. GREEN K A, POLLOCK T M, HARADA H, et al. Superalloy, 2004[C]. Warrendale: TMS, 2004. 269- 274.

[11] MOURER D P, WILLIAMS J L. Dual heat treat process development for advanced disk applications[A]. GREEN K A, POLLOCK T M, HARADA H, et al. Superalloy, 2004[C]. Warrendale: TMS, 2004. 401- 408.

[12] GABB T P, ELLIS D L, KENNETH M, et al. Detailed micro-

及目标延性系数确定[J]. 工业建筑, 2001, 31(6): 5- 8.

[3] 赵彤, 刘明国, 谢剑, 等. 碳纤维布改善高强混凝土柱延性的实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 46- 52.

[4] COLE C. FRP Jacketed Reinforced Concrete Columns[R]. Detroit: University of Missouri, 2001.

[5] WONG HO MAN. Behavior of Columns Wrapped with FRP[D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 1999.

[6] 卓卫东. 桥梁延性抗震设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2000.

[7] 许成祥, 李忠献, 蔡卫东, 等. 碳纤维布加固钢筋混凝土短柱在反复荷载下的受力性能实验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(4): 92- 96.

[8] 张柯, 岳清瑞, 叶列平, 等. 碳纤维布加固混凝土柱改善延性的实验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 16- 19.

[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实验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 41- 48.

[11] 赵彤, 周晓洁, 谢剑. 碳纤维布改善钢筋混凝土短柱( = 1.5) 抗震性能的实验研究[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(12): 10- 13.

收稿日期: 2006-05-08; 修订日期: 2006-09-30

作者简介: 张剑(1979- ), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事建筑结构工程研究, 联系地址: 陕西省西安市空军工程大学工程学院五系研究生 15 队(710038)。

structure characterization of the disk alloy ME3[R]. Washington: NASA/TM- 213066, 2004.

[13] MOURER D P, HURON E S, BAIN K B, et al. Superalloy optimized for high-temperature performance in high pressure turbine disk[P]. US Patent: 6521175B1, 2003- 02- 18.

[14] GAYDA J, GABB T P, KANTZOS P T. The effect of dual microstructure heat treatment on an advanced nickel-base disk alloy [A]. GREEN K A, POLLOCK T M, HARADA H, et al. Superalloy, 2004[C]. Warrendale: TMS, 2004. 323- 330.

[15] LOCQ D, CARON P, RAUJOLS, et al. On the role of tertiary precipitates in the creep behaviour at 700 of a PM disk superalloy [A]. GREEN K A, POLLOCK T M, HARADA H, et al. Superalloy, 2004[C]. Warrendale: TMS, 2004. 179- 188.

[16] GAYDA J. The effect of tungsten and niobium additions on disk alloy CH98[R]. Washington: NASA/TM- 212471, 2003.

[17] SCHIRRA J J, REYNOLDS P L, HURON E S, et al. Effect of microstructure (and heat treatment) on the 649 properties of advanced P/M Superalloy disk materials[A]. GREEN K A, POLLOCK T M, HARADA H, et al. Superalloy, 2004[C]. Warrendale: TMS, 2004. 341- 350.

收稿日期: 2006-08-16; 修订日期: 2006-12-12

作者简介: 胡本芙(1937- ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事粉末高温合金的研究, 联系地址: 北京科技大学材料科学与工程学院(100083)。