

# FRP 管 - 混凝土 - 钢管组合柱力学性能的 试验研究和理论分析

滕锦光<sup>1</sup>, 余 涛<sup>1</sup>, 黄玉龙<sup>1</sup>, 董石麟<sup>2</sup>, 杨有福<sup>3</sup>

(1. 香港理工大学 土木及结构工程系, 中国 香港; 2. 浙江大学 土木工程系, 杭州 310027;  
3. 福州大学 土木工程学院, 福州 350002)

**摘要:** FRP 管 - 混凝土 - 钢管组合柱(DSTC)是一种新型组合构件, 由 FRP 外管、钢管以及两者之间填充的混凝土三部分组成, 三种材料的协同互补和共同工作使该组合柱具有许多优于现有组合构件的力学性能。本文阐述了该新型组合构件的截面形式, 介绍了构件轴心受压和四点弯曲试验的结果, 并分析和探讨了其力学性能。试验结果表明, 尽管 DSTC 内部空心, 但 FRP 外管仍然可以对混凝土提供有效的约束, 使构件具有良好的延性。基于轴心受压试验所得到的应力 - 应变曲线, 对受弯构件进行了截面分析, 分析结果与试验结果基本吻合。

**关键词:** FRP; 组合柱; 轴心受压; 四点弯曲; 延性

中图分类号: TU 398.9

文献标识码: A

文章编号: 1671 - 9379(2006)05 - 0001 - 07

## Behavior of Hybrid FRP Concrete Steel Tubular Columns: Experimental and Theoretical Studies

TENG Jin guang<sup>1</sup>, YU Tao<sup>1</sup>, WONG Yu long<sup>1</sup>, DONG Shi lin<sup>2</sup>, YANG You fu<sup>3</sup>

(1. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;  
2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Hybrid FRP concrete steel double skin tubular columns are a new form of hybrid members recently proposed by the first author. The new column consists of an outer tube made of fiber reinforced polymer (FRP) and an inner tube made of steel, with the space between filled with concrete. In this new hybrid column, the three constituent materials are optimally combined to achieve several advantages not available with existing columns. In this paper, the section forms of the new column are first introduced. Results from axial compression tests and four point bending tests are next presented to demonstrate some of the expected advantages. These test results confirm that the concrete in the new column is very effectively confined by the two tubes, leading to a very ductile response. Based on the stress strain curves from the axial compression tests, a section analysis for the bending tests is described and is shown to predict the test results reasonably closely.

**Keywords:** FRP; hybrid columns; axial compression; four point bending; ductility

### 1 简介

近年来, 纤维增强复合材料(FRP)在既有结构的修复加固以及新建结构中得到越来越广泛的应用。与钢材

相比, FRP 具有较高的强度质量比和良好的耐腐蚀性能, 因此, 外贴 FRP 修复加固结构的技术得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。此外, FRP 的优越性能也可体现在新建结构中, 国际上已对全 FRP 结构以及 FRP 和其它材料组合而成的

收稿日期: 2006 - 03 - 27; 收到修改稿日期: 2006 - 04 - 17

基金项目: 国家杰出青年基金; 香港、澳门青年学者合作研究基金(50329802); 香港理工大学青年教授基金(1ZE - 06)

作者简介:

滕锦光(1964 -), 男, 博士, 教授, 主要从事 FRP 结构、钢结构、薄壳结构及结构力学的研究。E-mail: cejgteng@polyu.edu.hk

余 涛(1981 -), 男, 博士研究生, 主要从事 FRP - 钢 - 混凝土组合结构的研究。

结构进行了大量的研究,例如 FRP 桥板、FRP 管混凝土柱和桩以及 FRP 索等。

与钢材相比,FRP 也有其自身的缺点,如价格较高、线弹性性能、弹模强度比较低以及防火性能差,但这并不明显影响其用于既有结构的修复加固;首先,对于结构加固的总费用来说,材料价格并不是唯一的决定因素;其次,在加固应用中 FRP 通常用于抵抗拉力;第三,FRP 用于桥梁加固时,其耐火性能并不重要,而 FRP 用于建筑结构时,可通过限制加固量,使结构在 FRP 高温失效的情况下仍有足够的承载力。同时,也可采用防火涂料来提高 FRP 加固结构的耐火性能。

为了使 FRP 合理有效地用于新建结构,应尽量降低其自身缺点的影响,因此,当 FRP 用于新建结构时应遵循三个主要原则:1) 从结构的全寿命来考虑,造价合理;2) FRP 尽可能用于抵抗拉力;3) FRP 的耐火性能对设计不起决定作用。桥梁结构或其它户外结构自然满足原则 3,而前两个原则意味着 FRP 应与其它材料联合使用以形成组合结构。

基于上述讨论,可见组合结构领域应该是 FRP 在新建结构中应用的重点发展方向,且 FRP 应尽量与钢材或混凝土这两种传统的结构材料组合,这样才能降低结构的造价。本文介绍了由第一作者提出的一种新型组合构件,即 FRP 管-混凝土-钢管组合柱(DSTC)。该新型构件合理、优化地组合了 FRP、混凝土和钢材三种材料,是一种造价合理且性能优越的构件形式;同时介绍了该新型组合构件轴心受压和四点弯曲试验的结果,并分析和探讨了其力学性能。

## 2 新型组合柱

钢管混凝土是一种常见的组合柱形式,一般指在空钢管中灌注混凝土而形成的构件,核心混凝土可配或不配钢筋。双钢管柱则由两个同心放置的钢管及两钢管之间的混凝土组成。对双钢管柱的研究始于 20 世纪 80 年代后期<sup>[2]</sup>,随后国内外研究者对该类组合柱进行了系统深入的研究<sup>[3-8]</sup>。双钢管柱内部的空隙减轻了结构的自重,但对截面的抗弯刚度影响不大,且方便了设备管线的布置。

近年来,对 FRP 管混凝土柱力学性能的研究已有大量报道<sup>[9-13]</sup>。Fam 和 Rizkalla<sup>[12]</sup>还对双 FRP 管组合柱的性能进行了研究,其组成形式与双钢管柱相同,只是内、外管均为 FRP 管。与由钢管和混凝土组成的组合柱相比,由 FRP 管与混凝土组成的组合柱具有自重轻和耐腐蚀等优点。FRP 管混凝土柱作为桩或桥墩,有一些显著的优势,但作为建筑结构的柱子时,则存在诸如耐火性能差、与梁连接困难、施工阶段承载力差、破坏表现为脆性等缺点。另外,由于 FRP 管不仅需对混凝土提供约束,还需为柱子提供纵向的刚度和承载力,须采用较厚的 FRP 管,因而造价较高。

为了克服 FRP 管混凝土柱的缺点,本文的第一作者提出了一种由 FRP 外管、钢管内管以及两管之间填充的混凝土组成的新型组合构件:FRP 管-混凝土-钢管组合柱(DSTC)。与现有双管柱相比,DSTC 的内管为钢管而外管为主要包含环向纤维的 FRP 管。FRP 外管的主要作用是约束混凝土,从而提高构件的延性,钢管内部的空隙在需要时也可填充混凝土。新型组合柱的组成形式使其便于施工,同时具有良好的耐腐蚀和抗震性能。与双钢管组合柱相比,新型组合柱的优点包括:延性好,因为主要包含环向纤维的 FRP 外管只对混凝土提供约束而不存在受压屈曲的问题;不需进行防火保护,因为 FRP 外管只在施工时作为模板及在地震时为混凝土提供约束而无需在火灾时为柱子提供承载力;耐腐蚀性能强,因为钢管内管得到混凝土和 FRP 外管的有效保护。与双 FRP 管组合柱相比,新型组合柱的优点包括:钢管能有效支撑施工阶段荷载;可采用现有的钢管混凝土柱的节点技术,通过钢管,使该新型柱和梁易于连接;钢管的刚度较大,可从内部对混凝土提供较为有效的约束。同样,新型组合柱也优于普通的(即单管的)钢管混凝土柱、FRP 管混凝土柱以及钢骨混凝土柱等现有组合柱。

图 1 所示为该新型组合构件典型的截面形式,本文试验研究的对象为图 1(a)和 1(d)所示的由两个圆管组成的构件。DSTC 作为梁式构件时,钢管的位置可靠近受拉区,如图 1(d)所示。需要指出的是,对于由两个同心放置的管组成的新型组合构件,当构件内可能出现较大范围的受拉区时,构件内应配置一定的纵向钢筋或 FRP 纤维以防止产生过大的拉伸裂缝。

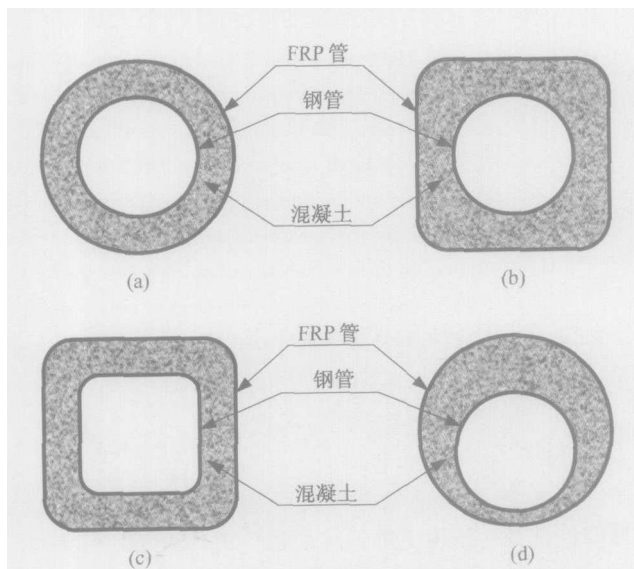


图 1 双管构件典型截面图

## 3 短柱轴心受压试验

要将新型组合柱推广到实际应用,必须进行大量的研究工作以了解其力学性能,并提出可靠的设计方法。

本文首先介绍短柱轴心受压试验的结果。

### 3.1 试件

共设计了包含三种截面的 6 个试件, 每种截面包含 2 个相同试件。所有试件的直径为 152. 2mm, 高度为 305mm, 钢管从同一根长钢管上切割得到。实际应用时, 外管应为预制 FRP 管, 但本次试验因买不到合适的预制 FRP 管而采用由湿粘法成型的外包 FRP 管, 其施工方法与加固柱试验中的外包管相同<sup>[14]</sup>。Shahawy 等<sup>[15]</sup>的研究表明, 两种制作 FRP 管的方法对组合柱性能的影响很小。外包管分别为 1 层、2 层和 3 层 FRP 管, 即外包 FRP 管有 3 种厚度。各试件设计的详细情况如表 1 所示。同时制作了 6 个 FRP 约束混凝土(FCC)圆柱体试件及 3 个空钢管试件以进行对比。

钢材性能由标准拉伸试验确定, 测得其屈服强度、抗拉强度和弹性模量分别为 352. 67MPa、380. 4MPa 和 207. 28GPa。依照 ASTM 规范<sup>[19]</sup>进行了 6 个 FRP 片状试件的拉伸试验, 结果表明, 按每层名义厚度为 0. 17mm 计算, FRP 的极限强度为 1825. 5MPa, 弹性模量为 80. 1GPa。混凝土的弹性模量、抗压强度及对应的峰值应变由圆柱体(152. 5mm × 305mm)试验测得, 分别为 30. 18GPa、39. 64MPa 和 0. 002628。

表 1 轴心受压试件一览表

试件	FRP 管	钢管
DS1A, DS1B	1 层	外直径= 76. 1mm 厚度= 3. 2mm
DS2A, DS2B	2 层	
DS3A, DS3B	3 层	

试件准备包括以下 3 个步骤:

- (1) 制作浇注混凝土的模具, 模具由一个 PVC 外管和一个钢内管组成, 并在钢管上粘贴应变片(图 2);
- (2) 浇注混凝土;
- (3) 待混凝土硬化后, 移去 PVC 管, 通过湿粘法在混凝土上形成 FRP 管(图 3)。

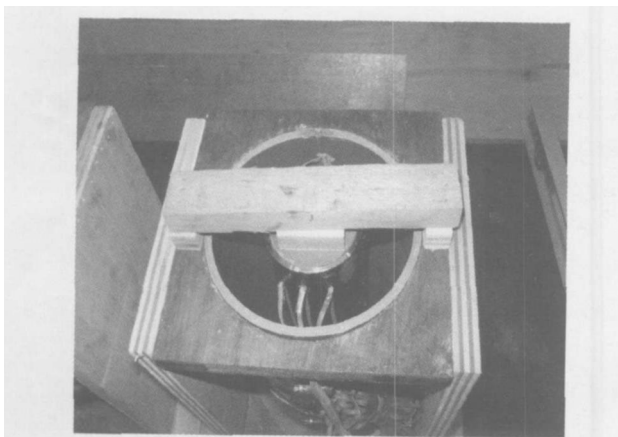


图 2 浇注混凝土用模具



图 3 湿粘法制作 FRP 管

FRP 管的所有纤维均沿环向布置, 纵向没有任何纤维, 搭接区域沿环向的长度为 150mm。

### 3.2 试验装置

每个试件的钢管上粘贴两个双向应变片(标距为 10mm), FRP 管上间隔 90° 粘贴四个双向应变片(标距为 20mm), 以测得轴向和环向应变。所有应变片均布置在试件的中部, 如图 4 所示。同时每个试件设置了两个线性差动位移计(LVDT)以测得中部 120mm 范围内的轴向变形。试验采用 MTS 加载, 位移控制速率为 0. 003mm · s<sup>-1</sup>。所有的试验数据, 包括应变、荷载及位移, 均由一个数据采集系统采集。

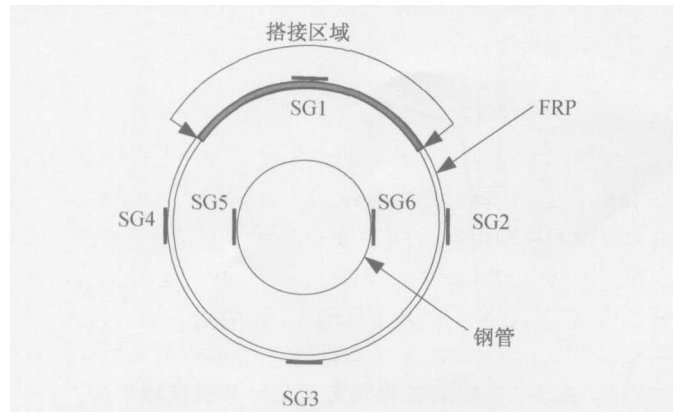


图 4 中截面应变片分布图

### 3.3 试验结果及分析

所有试件均表现出连续的荷载 - 变形关系曲线, 破坏表现为 FRP 管沿环向拉断。试件 DS2A 试验前和试验后的情景如图 5 所示。

所有试件的试验结果汇总于表 2 中。表中,  $P_{\infty}$  等于非约束混凝土的强度乘以环形混凝土的截面面积(为 543. 5 kN),  $P_s$  为试验所得空钢管的平均极限承载力(为 273. 8 kN)。因此, 如果组合柱各组成部分之间没有相互作用且 FRP 管的约束作用可以忽略, 其极限承载力应该

是 817.3 kN。试验所得组合柱的极限承载力用  $P_c$  表示,与极限承载力对应的应变用  $\epsilon_u$  表示。 $\epsilon_{co}$  为无约束混凝土的峰值应变。图 6 所示为三个空钢管试件的荷载 - 应变

曲线。图 7 所示为所有 DSTC 试件的轴向荷载 - 应变关系曲线,图中轴向应变由两个 LVDT 测得变形的平均值除以标距(120mm)得到。

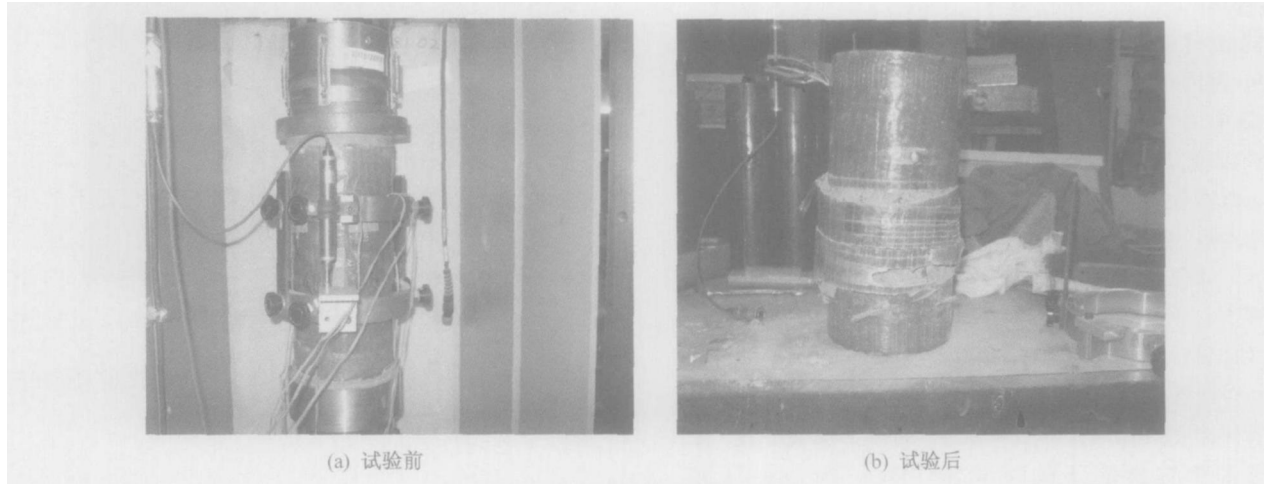


图 5 轴压短柱试验前后对比

表 2 轴心受压试验结果

试件	$P_c$ /kN	$P_c$ 平均值/kN	$P_c / (P_{co} + P_s)$	$\epsilon_u$ 平均值( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_u / \epsilon_{co}$
DS1A	793.75	811.5	0.99	14542	5.53
DS1B	829.27				
DS2A	1044.2	1034.5	1.27	20204	7.69
DS2B	1024.8				
DS3A	1214.0	1208.0	1.48	23541	8.96
DS3B	1201.9				

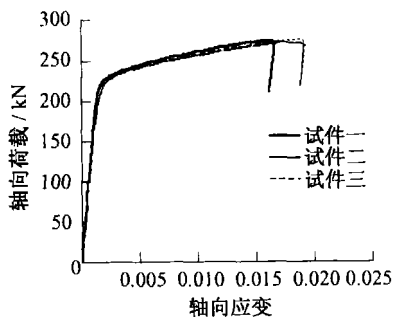


图 6 空钢管试件轴向荷载 - 应变曲线

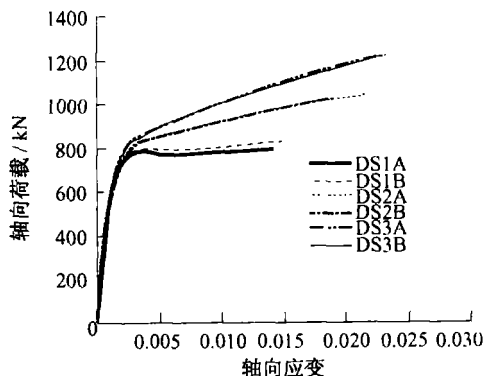


图 7 短柱试件轴向荷载 - 应变曲线

由表 2 可以看出,两个外包一层 FRP 管试件的承载力几乎一样,其平均值接近钢管和无约束混凝土单独承载力之和,这表明少量 FRP 约束并不能提高试件的承载力,但外包两层和三层 FRP 管试件的承载力分别比钢管和无约束混凝土两部分的承载力之和 27% 和 48%,可见,构件承载力的提高和 FRP 管的厚度有关,这与 FRP 约束混凝土柱的研究结果一致<sup>[1]</sup>。

从图 7 可以看出,外包两层和三层 FRP 管试件的荷载 - 应变曲线呈双线性特征,而外包一层 FRP 管试件的荷载 - 应变曲线接近理想弹塑性。所有 6 个试件的极限应变都相当大,外包一层、二层和三层 FRP 管试件极限应变的平均值分别为无约束混凝土峰值应变的 5.53、7.69 和 8.96 倍(见表 2)。

为了更直观地评价 DSTC 中 FRP 管对混凝土的约束程度,比较了 DSTC 和 FCC 试件中混凝土的应力 - 应变曲线,并与 Lam 和 Teng<sup>[17]</sup> 提出的应力 - 应变模型进行了比较,在用 Lam 和 Teng 模型计算时采用了 FCC 试件中 FRP 管的实际平均环向拉断应变。DSTC 中混凝土的应力由其承受的荷载除以其面积得到,混凝土承受的荷载假定等于整个试件所承受荷载减去相同轴向应变下空钢管受压试验所测得的荷载。当轴向应变超过空钢管

受压试验所得极限应变时,考虑混凝土的约束作用,假定钢管所承受荷载等于空钢管的极限承载力。需要指出的是,该假定忽略了 DSTC 中钢管在混凝土约束下所承受荷载和钢管试验所测得荷载的差异。

图 8~图 10 所示分别为外包一层、二层和三层 FRP 管的 DSTC 与 FCC 试件应力 - 应变曲线的比较,图中 FCC1A(B)、FCC2A(B)和 FCC3A(B)分别为外包一层、二层和三层 FRP 管的 FRP 约束混凝土圆柱体试件。可见, DSTC 中混凝土的应力 - 应变曲线和 FCC 试件中的

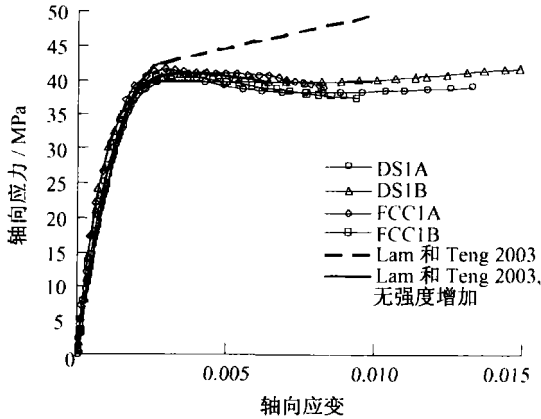


图 8 外包一层 FRP 管短柱试件应力 - 应变曲线比较

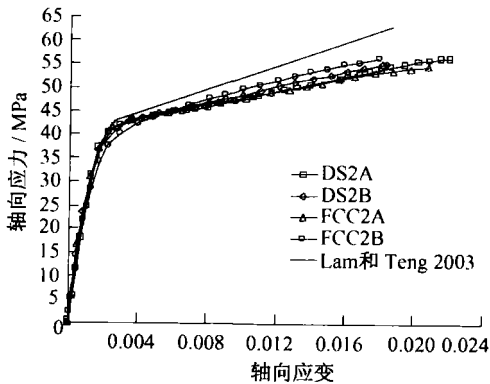


图 9 外包二层 FRP 管短柱试件应力 - 应变曲线比较

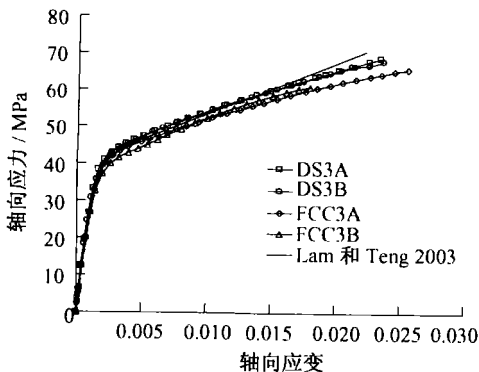


图 10 外包三层 FRP 管短柱试件应力 - 应变曲线比较

几乎重合。这表明,尽管内部空心,但由于钢内管的存在, DSTC 中混凝土受到 FRP 管的约束程度与 FCC 试件中的实心混凝土基本相同。

从图中还可以看出, Lam 和 Teng 模型较好地模拟了外包三层 FRP 管试件的性能,但过高地估计了外包一层和两层 FRP 管试件的性能。应该注意的是,外包一层 FRP 管试件的约束比(0.073)与 Lam 和 Teng 模型中定义的界限约束比(0.07)很接近,而 Lam 和 Teng<sup>[17]</sup>认为,当试件的约束比低于界限值时,可假设约束混凝土的极限强度没有增加。因此,采用 Lam 和 Teng 的无强度增加模型预测的应力 - 应变曲线也在图 8 中给出,可见,该预测曲线与试验结果吻合较好。因此,当混凝土被较少量 FRP 约束时, Lam 和 Teng 模型有必要进行改进。

### 4 四点弯曲试验

为了对图 1(d)所示 DSTC 梁式构件的力学性能作初步的了解,本次研究也进行了四点弯曲试验。

#### 4.1 试件

试验共包括 3 个试件,试件的直径为 152.5mm,长度为 1500mm,钢管从同一根长钢管上切割得到,钢管的偏心距(内外管中心的距离)均为 18.2mm。3 个试件的唯一区别为 FRP 外管的厚度。试件详细情况如表 3 所示。

表 3 四点弯曲试件一览表

试件	FRP 管	钢管
DSB1	无	外直径=76.1mm 厚度=3.5mm
DSB2	1 层	
DSB3	2 层	

钢材材性由标准拉伸试验确定。结果表明,钢材屈服强度(对应 0.2%残余应变)、抗拉强度和弹性模量分别为 340.3MPa、444.5MPa 和 192.8GPa。制作 FRP 管的材料和过程与轴压试验中的相同。混凝土的抗压强度和相应应变由圆柱体(152.5mm×305mm)试验测得,分别为 33.37MPa 和 0.002502。

#### 4.2 试验装置

试验装置如图 11 所示。沿试件截面 1 和 2 的圆周布置双向应变片(对试件 DSB1 只在截面 2 布置了应变片),在截面 1、2、3 以及两个加载截面安装 LVDT 以测量不同位置的位移;同时,在试件端部设置 LVDT 以测量混凝土和内、外管之间可能出现的滑移,在两个加载点分别设置传感器以量测荷载。所有的试验数据均由一个数据采集系统采集。

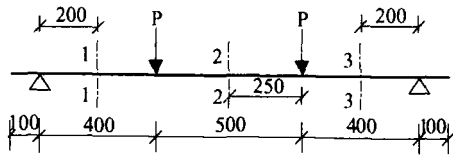


图 11 四点弯曲试验装置示意图

#### 4.3 试验结果

所有试件均表现出连续的荷载-变形曲线。对于试件 DSB2 和 DSB3, 当跨中位移达到约 125mm 时, 试验由于梁底空间的限制而终止。对于试件 DSB1, 随着荷载的增加, 在试件表面出现大量裂缝; 当整个加载装置显得有些不稳时, 基于安全考虑, 结束了试验。

图 12 给出了各试件的荷载-跨中挠度曲线(图中荷载为两个传感器测得荷载的平均值), 可见, 试件均表现出良好的延性。由于在试验终止时试件并没有完全破坏, 可以推测, 这些试件实际的延性比图 12 中显示的还要好。同时也可看出, 两个外包 FRP 管试件(DSB2 和 DSB3)的承载力比没有外包 FRP 管试件(DSB1)的承载力高很多, 且在变形的后期, 试件 DSB1 承受的荷载缓慢下降, 而试件 DSB2 和 DSB3 承受的荷载则持续增加或基本保持不变, 具有更好的延性。由图 12 还可看出, FRP 管的厚度对试件的抗弯承载力的影响不大, 试件 DSB2 (外包两层 FRP 管)的荷载-位移曲线仅比试件 DSB1 (外包一层 FRP 管)略高。

试件 DSB1 和 DSB2 试验结束后的状况如图 13 所示。由于试件 DSB1 没有 FRP 外管, 其抗剪能力较弱, 最终试件上出现了明显的剪切斜裂缝和弯曲裂缝, 如图 13 (a) 所示。由于试验结束时跨中位移达到梁跨的 1/10 左右, 所有试件在后期都出现了宽度较大的裂缝。对两个外包 FRP 管的试件, 两条主裂缝出现在两个加载点处或附近, 而其它次要裂缝则随机地分布在梁各处, 纯弯段和弯剪段都有, 如图 13(b) 所示。尽管试件 DSB2 和 DSB3 在试验中出现了较大的裂缝, 荷载值接近极限荷载前, 其刚度较大且基本不变(线弹性行为)(图 12)。

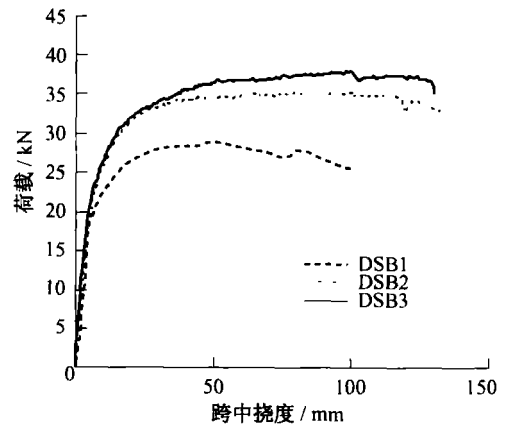


图 12 四点弯曲试件荷载-跨中挠度关系曲线

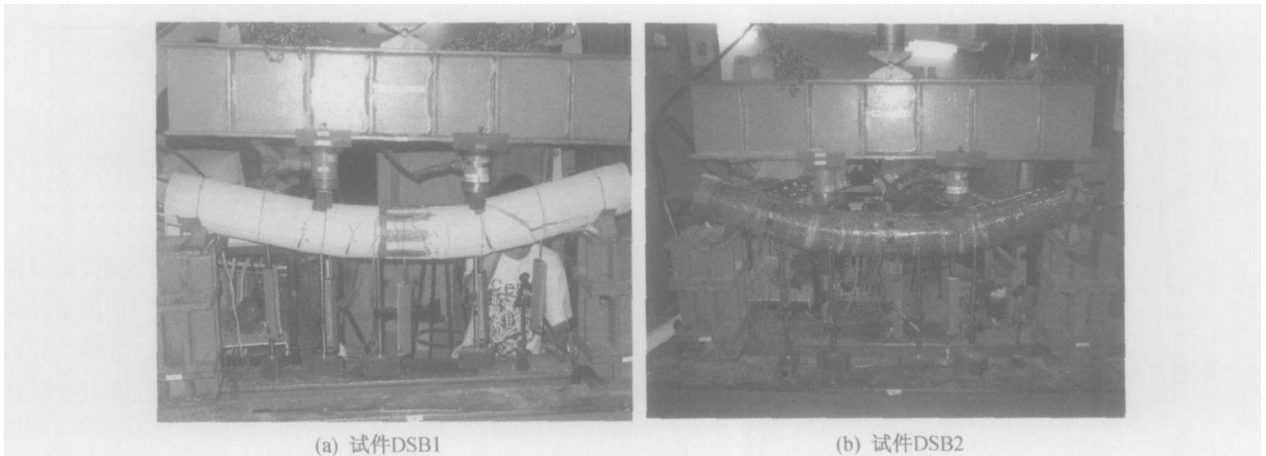


图 13 四点弯曲试件试验后的情景

#### 4.4 截面分析

基于平截面假定, 本次研究对梁式构件进行了数值分析, 并与试验结果进行了比较。进行截面分析时, 钢管的应力-应变关系采用标准试件拉伸试验结果; 由于 FRP 管不具有纵向纤维, 故忽略其纵向刚度/应力的影响。假设混凝土的初始受拉和受压弹性模量相同, 受拉混凝土为线弹性脆性材料, 根据四点弯曲试验数据, 假设其极限拉应变为  $130\mu\epsilon$ 。受压区混凝土的应力-应变曲

线通过以下方法得到: 1) 采用无约束混凝土强度及对应的峰值应变对轴压短柱试验得到的应力-应变曲线进行标准化; 2) 考虑梁式构件实际的无约束混凝土强度及对应的峰值应变, 由步骤 1 所得标准化应力-应变曲线获得所需的应力-应变曲线。在计算过程中, 混凝土极限压应变采用弯曲试验结束时梁顶部实测值。

截面分析步骤为:

- (1) 给定跨中截面受压区混凝土的最大应变;
- (2) 依据平截面假定、各组成材料本构关系以及力的

平衡条件,通过迭代确定截面中和轴位置;

(3) 通过数值积分求出截面弯矩。

图14(a)-(b)所示为截面分析得到的梁式构件荷载-应变曲线与试验结果比较,图中横坐标为跨中截面受压区顶端的应变。可见,对于外包一层FRP管的梁式构件,分析结果和试验结果吻合较好,而对于外包二层FRP管的梁式构件,分析结果存在一定误差,这可能是由于应力梯度的存在导致梁式构件中FRP管对混凝土的约束效果不如柱式构件好。

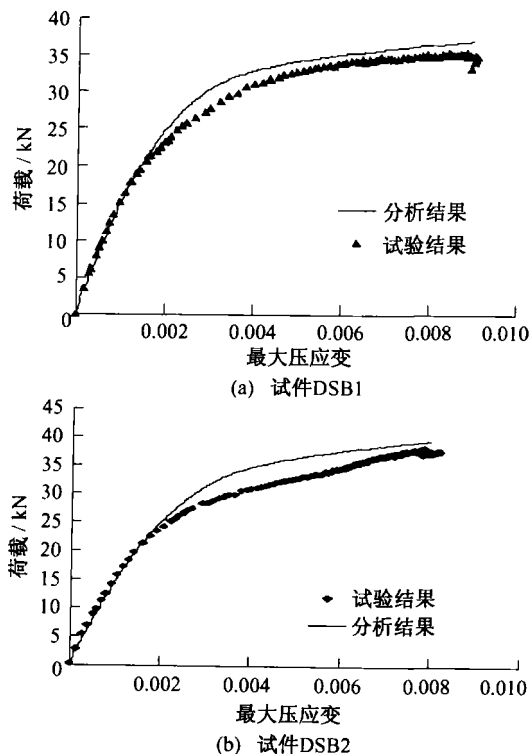


图14 四点弯曲试件分析结果与试验结果比较

## 5 结论

本文介绍了一种由FRP外管、钢内管和两管之间的混凝土组成的FRP管-混凝土-钢管组合柱。本文也介绍了新型组合构件轴心受压和四点弯曲试验的结果。弯曲试验构件的钢内管偏向截面的受拉区,以提高该构件的刚度和承载能力。试验结果表明,尽管该组合构件内部空心,但并不影响FRP管对混凝土的约束效果,构件的延性很好;同时FRP外管也可提高构件的抗剪能力。基于轴心受压试验所得到的应力-应变曲线,对梁式构件进行了截面分析,分析结果与试验结果基本吻合。除了良好的延性之外,该新型组合柱还具有许多其他优点:耐腐蚀性能强,施工方便,不需防火处理,造价合理等。

## 参考文献:

[1] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., FRP

Strengthened RC Structures, John Wiley & Sons Ltd 2002.

- [2] Shakir Khalil, H. and Illouli, S., Composite columns of concentric steel tubes. In Proceedings Conference on the Design and Construction of Non Conventional Structures 1, London, December 1987, pp. 73-82.
- [3] Shakir Khalil, H., Composite columns of double skinned shells. Journal of Constructional Steel Research 1991, 19, pp. 133-152.
- [4] Wei, S., Mau, S. T., Vipulanandan, C. and Mantala, S. K., Performance of new sandwich tube under axial loading: experiment. Journal of structural Engineering, ASCE 1995, 121(12), pp. 1806-1814.
- [5] 韩邦飞, 夏建国, 赵建明. 同种双钢管混凝土轴心受压构件的承载力的研究. 石家庄铁道学院学报 8(3), pp. 75-80. 1995.
- [6] Yagishita, F., Kitoh, H., Sugimoto, M., Tanihira, T. and Sonoda, K., Double skin composite tubular columns subjected to cyclic horizontal force and constant axial force. Proceedings of the Sixth ASCCS International Conference on Steel Concrete Composite Structures, 2000, pp. 497-503.
- [7] Zhao, X. L., Grzebieta, R. and Elchalakani, M., Tests of concrete filled double skin CHS composite stub columns. Steel and Composite Structures 2002, 2(2), pp. 129-146.
- [8] 陶忠, 韩林海, 黄宏, 方中空夹层钢管混凝土偏心受压柱力学性能的研究. 土木工程学报 2003, 36(2), pp. 33-40.
- [9] Mirmiran, A. and Shahawy, M., Behavior of concrete columns confined by fiber composites. Journal of Structural Engineering, ASCE 1997, 123(5), pp. 583-590.
- [10] 张东兴, 黄龙男, 王荣国, 赵景海. 玻璃钢管混凝土柱力学性能的试验研究. 哈尔滨建筑大学学报 2000, 33(1), pp. 73-76.
- [11] Fam, A. Z. and Rizkalla, S. H., Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber reinforced polymer tubes. ACI Structural Journal 2001, 98(4), pp. 451-461.
- [12] Fam, A. Z. and Rizkalla, S. H., Behavior of axially loaded concrete filled circular fiber reinforced polymer tubes. ACI Structural Journal 2001, 98(3), pp. 280-289.
- [13] Xiao, Y., Applications of FRP composites in concrete columns. Advances in Structural Engineering 2004, 7(4), pp. 335-343.
- [14] Lam, L. and Teng, J. G., Ultimate condition of FRP confined concrete. Journal of Composites for Construction, ASCE 2004, 8(6), pp. 539-548.
- [15] Shahawy, M., Mirmiran, A. and Beitelman, T., Tests and modeling of carbon wrapped concrete columns. Composites: Part B Engineering 2000, 31(6-7), pp. 471-480.
- [16] ASTM D 3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2000.
- [17] Lam, L. and Teng, J. G., Design oriented stress strain model for FRP confined concrete. Construction and Building Materials 2003, 17, pp. 471-489.