

文章编号: 1000-4750(2017)06-0041-10

# 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱轴压试验研究

郭莹<sup>1,2</sup>, 刘界鹏<sup>1,2</sup>, 苗亚军<sup>3</sup>, 王宇航<sup>1,2</sup>, 许天祥<sup>1,2</sup>

(1. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;

2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 150090)

**摘要:** CFRP 材料具有强度高、质量轻、耐腐蚀和耐久性好等特点, 但在新建建筑中应用 CFRP 管混凝土柱施工复杂, 成本高昂, 而采用在薄壁钢管外缠绕 CFRP 布, 用钢管作为 CFRP 布的施工模板, 可大大简化施工过程, 且能满足对柱子截面形状的要求, 应用前景广阔。该文通过对圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱的轴压静力性能进行试验研究, 对比并建议了圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱的轴压承载力计算方法, 可供实际工程设计参考。

**关键词:** CFRP-钢复合管约束混凝土; 短柱; 轴压; 荷载-轴向变形曲线; 极限承载力

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.06.0442

## EXPERIMENTAL STUDY ON AXIAL BEHAVIOR OF CIRCULAR CFRP-STEEL COMPOSITE TUBE CONFINED CONCRETE STUB COLUMNS

GUO Ying<sup>1,2</sup>, LIU Jie-peng<sup>1,2</sup>, MIAO Ya-jun<sup>3</sup>, WANG Yu-hang<sup>1,2</sup>, XU Tian-xiang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University),

Ministry of Education, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** CFRP material has many advantages such as high strength, light weight, good durability and corrosion resistance, but the construction procedure of concrete columns confined by CFRP tube is rather complicated, leading to relatively high cost. Instead, CFRP can be utilized to strengthen steel tube confined concrete columns, in which steel tubes serve as the formwork for the construction of CFRP. Therefore, CFRP-steel tube confined concrete columns are very suitable for concrete structures because of their excellent mechanical properties and convenient construction. In this paper, the behavior of circular CFRP-steel tube confined concrete stub columns subjected to axial compression was investigated through experimental study. Associated methods for calculating the ultimate loading capacity of circular CFRP-steel tube confined concrete stub column were compared and recommended for practical design.

**Key words:** CFRP-steel tube composite confined concrete; stub column; axial compression; load-axial deformation relation; ultimate bearing capacity

收稿日期: 2016-06-08; 修改日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508052); 中央高校基本科研业务费项目(CDJZR12200025)

通讯作者: 刘界鹏(1978—), 男, 山东人, 教授, 博士, 重庆大学钢结构工程研究中心副主任、重庆大学土木工程学院结构工程研究所所长, 从事钢-混凝土组合结构、钢结构研究(E-mail: liujp@cqu.edu.cn).

作者简介: 郭莹(1975—), 女, 重庆人, 讲师, 博士生, 从事钢结构及组合结构理论研究(E-mail: guoying@cqu.edu.cn);

苗亚军(1989—), 男, 安徽人, 助理工程师, 硕士, 从事建筑结构设计研究(E-mail: 13S133059@hit.edu.cn);

王宇航(1985—), 男, 重庆人, 研究员, 博士, 从事钢-混凝土组合结构研究(E-mail: wangyuhang@cqu.edu.cn);

许天祥(1992—), 男, 重庆人, 博士生, 从事钢-混凝土组合结构研究(E-mail: xutianxiang@cqu.edu.cn).

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)由连续纤维和树脂基体材料复合而成,具有质量轻、强度高、耐腐蚀、耐疲劳等优点<sup>[1]</sup>。钢管约束混凝土柱是在竖向不连续的钢管内填充混凝土,钢管不直接承担纵向荷载,且只对核心混凝土起约束作用的一种组合柱<sup>[2]</sup>。薄壁钢管易加工成任意形状,因此在钢管约束混凝土柱的钢管外横向缠绕碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP),可为 CFRP 提供平面外刚度,将 CFRP 应用于新建建筑中。施工时可以先在工厂制作钢管,然后利用机械设备在钢管外横向缠绕 CFRP,最后在工程现场定位钢管并作为模板浇筑混凝土,整个过程中机械化程度高。CFRP 材料抗腐蚀能力强,而约束混凝土的抗压强度和变形能力能得到改善,因此 CFRP-钢复合管约束混凝土柱这种结构形式具有广阔的应用前景,可以应用于海洋工程、桥梁以及高层建筑中,例如海洋钻井平台、码头桩、桥墩、巨型框架柱等<sup>[3-5]</sup>。

Mirmiran 和 Shahawy<sup>[6]</sup>于 1996 年首次提出 FRP 管约束混凝土柱的概念,随后国内外学者开展了关于 FRP 约束混凝土柱的大量研究,结果表明外包 FRP 可以显著提高试件的承载力<sup>[5,7-8]</sup>。各国学者基于试验结果和理论模型提出了 FRP 约束混凝土圆柱的承载力计算公式并建立了约束混凝土的应力-应变本构模型<sup>[9-11]</sup>。目前对于 FRP-钢复合管约束混凝土柱这种结构形式的试验和理论研究均较少,主要针对 FRP-钢管混凝土柱的轴压、偏压及滞回性能进行了研究<sup>[12-21]</sup>。本文对圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱进行了轴压试验,研究其受力过程并对已有的约束混凝土轴压承载力计算方法进行了对比。

## 1 试验设计

### 1.1 试验方案

共设计了 8 个圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱和 4 个圆钢管约束混凝土短柱对比试件,加载方式为轴压加载,钢管厚度为 2 mm,CFRP 的层数为 2 层,单层 CFRP 的厚度为 0.167 mm,主要参数包括钢管径厚比、混凝土强度,如表 1 所示。

表 1 试件参数

Table 1 Specimen details

试件编号	直径/mm	试件高度/mm	混凝土强度/MPa	碳纤维层数
D200-40	200	600	40	0
D200-40-2-S1	200	600	40	2
D200-40-2-S2	200	600	40	2

(续表)

试件编号	直径/mm	试件高度/mm	混凝土强度/MPa	碳纤维层数
D200-60	200	600	60	0
D200-60-2-S1	200	600	60	2
D200-60-2-S2	200	600	60	2
D260-40	260	780	40	0
D260-40-2-S1	260	780	40	2
D260-40-2-S2	260	780	40	2
D260-60	260	780	60	0
D260-60-2-S1	260	780	60	2
D260-60-2-S2	260	780	60	2

### 1.2 试件加工

试件加工共分为 3 步: 1) 钢管加工: 按设计尺寸将钢板进行裁剪并卷成钢筒,在连接处施以对接焊缝,为保证焊缝处不成为薄弱区,在对接焊缝外侧焊接补强板,最后在钢筒一端焊接端板; 2) 浇筑混凝土: 试验采用人工拌制混凝土。将拌制好的混凝土分层倒入到钢筒中并充分振捣,同时浇筑混凝土立方体 (150 mm×150 mm×150 mm) 和棱柱体 (150 mm×150 mm×300 mm) 试块,以备强度检测使用。将混凝土与钢筒上表面浇筑齐平,用塑料薄膜封住上端部,将混凝土试块与试件同条件下养护,以便 28 d 后测试混凝土强度。然后用水泥砂浆找平试件上表面,焊接上端板; 3) 粘贴 CFRP: 将试件钢管在距离端板 100 mm 处开 10 mm 宽缝隙,以保证钢管不直接承担纵向荷载。清理钢管表面锈迹,并用丙酮或乙醇清洗,在设计位置处布置钢管应变片。按 CFRP 粘贴规程在钢管表面粘贴 CFRP,一周之后在设计位置处布置 CFRP 应变片。

### 1.3 材料属性

钢管和 CFRP 的材性指标如表 2 所示,混凝土的材性指标如表 3 所示。

表 2 钢管和 CFRP 材性指标

Table 2 Properties of steel tube and CFRP

材料	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/(×10 <sup>5</sup> MPa)	极限应变/με
钢管	264.3	390	1.88	—
CFRP	—	3400	2.35	16000

表 3 混凝土材性指标

Table 3 Properties of concrete

强度等级	立方体抗压强度/MPa	弹性模量/(×10 <sup>4</sup> MPa)
C40	57.1	3.146
C60	66.8	3.582

### 1.4 加载及测量方案

采用 1000 t 压力试验机进行轴压静力加载,如图 1 所示。

测量试件变形时,两个刚性环用螺栓分别拧紧

固定在试件的上下部，最后将 LVDT 上端固定在上端刚性环上，如图 2 所示，这种方式可测量两个刚性环之间试件的相对变形，精确度更高。试件的应变片布置如图 3 所示，绕钢管 180°对侧布置，对于圆 CFRP-钢复合管约束混凝土柱，内侧的应变片用于测量钢管应变，外侧的用于测量 CFRP 的应变。

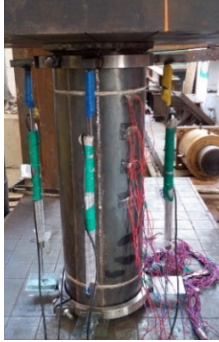


图 1 试件加载及量测装置  
Fig.1 Test setup

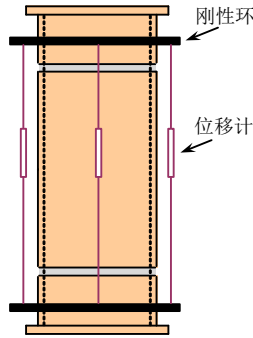
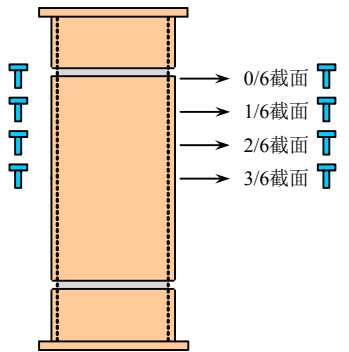
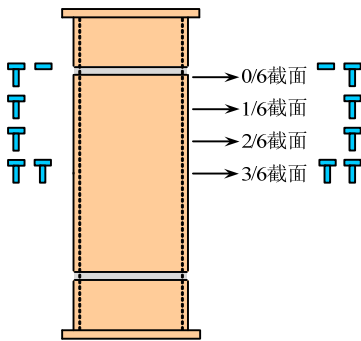


图 2 位移计布置  
Fig.2 Layout of LVDT



(a) 圆钢管约束混凝土柱



(b) 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土柱

图 3 应变片布置

Fig.3 Layout of strain gauges

## 2 试验结果

### 2.1 试验现象

#### 2.1.1 圆钢管约束混凝土短柱

4 个圆钢管约束混凝土短柱最终破坏结果相似，都呈现出明显的剪切破坏，剪切角约 65°。图 4 中给出了圆钢管约束混凝土短柱轴压试验典型破

坏模式。加载初期，试件的轴向变形随荷载线性增长，试件外观无明显变化；当荷载达到峰值荷载附近时，钢管割缝处混凝土出现竖向裂纹；峰值过后，轴向变形继续增长而荷载持续下降，试件表面钢管出现肉眼可见的剪切斜线，并逐渐发展；荷载下降至峰值荷载的 85%以后停止加载。试验结束后将钢管剖开，混凝土为明显的剪切破坏。

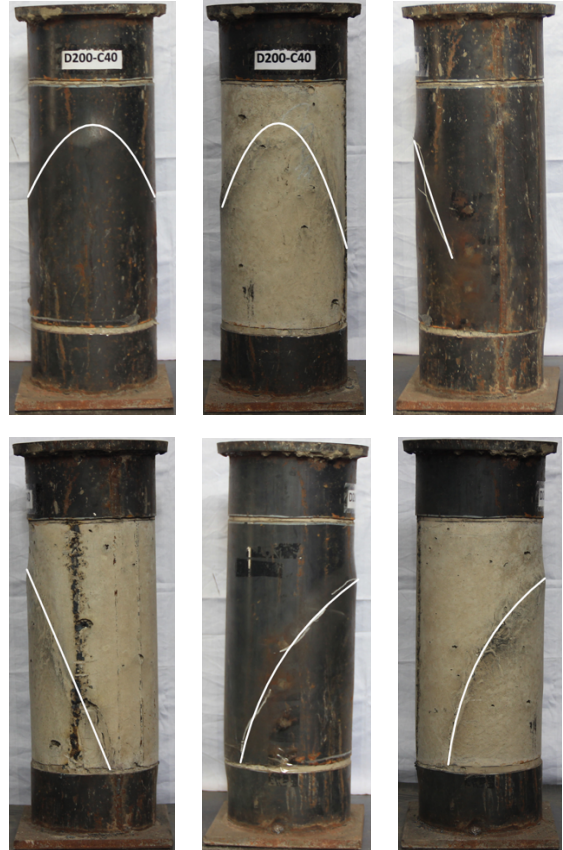


图 4 圆钢管约束混凝土短柱轴压破坏模式

Fig.4 Failure modes of circular steel tube confined concrete columns

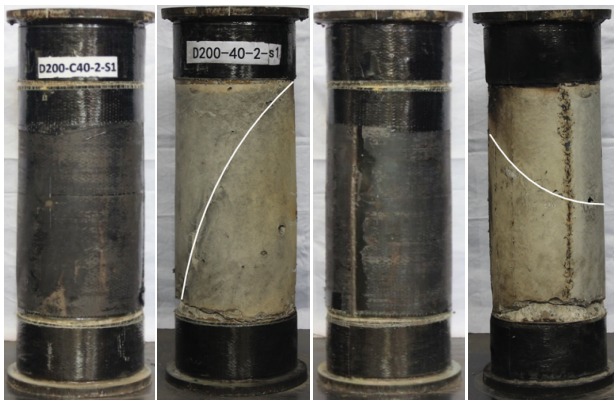
#### 2.1.2 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱

圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱峰值荷载时表现出了两种试验现象特征：一种是 CFRP 断裂，随后荷载迅速下降，如图 5(a)所示；另一种是 CFRP 没有发生断裂，试件出现了过大的轴向变形无法继续承载，如图 5(b)所示。如图 5 所示，试件最终破坏模式均为剪切破坏，与圆钢管约束混凝土柱类似，剪切角在 60°~65°之间。

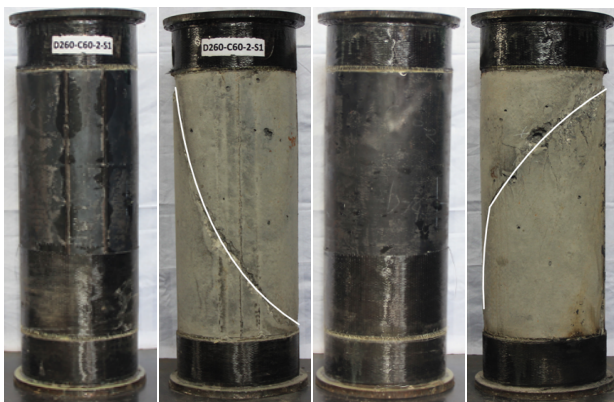
CFRP 断裂：加载初期荷载-变形曲线为线性关系，无声音。加载到一定荷载时，试件刚度变小，此时试件发出了噼里啪啦的声音，判断为环氧树脂被压碎或者拉断的声音，接近峰值荷载时环氧树脂的声音基本消失，开始出现 CFRP 断裂的声音，接

着就是大量 CFRP 断裂, 荷载迅速下降, 随后趋于稳定, 从荷载下降到荷载趋于稳定, 几乎在瞬间完成, 此段变形增加很小。持续加载, 直至轴向发生过大变形停止加载, 此时 CFRP 断裂声音消失。大部分试件中间部分 CFRP 全部断裂, 并且与钢管脱离, 另一部分试件 CFRP 中间上端或下端部分断开, 断裂后的 CFRP 基本成块状或条状, 少部分呈飞沫丝状。在钢管开缝处有轻微挤压现象, 但加载过程中并没有成为试件薄弱区。荷载加载至峰值荷载时认为试件失效。最终破坏形态如图 5(a)所示。

CFRP 未断裂: 仅 D260-60-2 一组中的两个试件在加载初期一直到峰值荷载阶段试验现象与其他试件的试验现象基本相同, 但是峰值荷载时未发生 CFRP 断裂现象, 最后荷载下降至峰值荷载的 85%时认为试件失效, 此时 CFRP 仍未断裂。主要原因是这组试件的径厚比较大、混凝土强度较高, CFRP 对试件的约束作用较弱。图 5(b)所示为未发生 CFRP 断裂的试件的 CFRP 布和钢管依次剥离之后试件的形态。



(a) CFRP 断裂



(b) CFRP 未断裂

图 5 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱轴压破坏模式

Fig.5 Failure modes of circular CFRP-steel composite confined concrete columns

## 2.2 荷载-轴向变形关系曲线

表 4 给出了本文中所有试件的峰值承载力和对应的变形值以及 CFRP-钢管约束混凝土试件与对比试件的峰值荷载和对应变形值的比值。可以看出, 当试件径厚比一定时, 随着混凝土强度提高, 试件峰值承载力和对应变形值提高幅度减小; 当试件混凝土强度一定时, 随着径厚比增大, 试件峰值承载力和对应变形提高幅度减小。但是当径厚比较大、混凝土强度较高时, CFRP 对钢管约束混凝土柱的承载力提高并不明显, 但是对变形值仍有一定程度提高。

表 4 试件承载力和变形

Table 4 Loading capacity and deformation of specimens

试件编号	$N_u/\text{kN}$	$U_p/\text{mm}$	$N_u/N_u^0$	$U_p/U_p^0$
D200-40	1861	3.50	1.00	1.00
D200-40-2-S1	2633	8.54	1.41	2.44
D200-40-2-S2	2755	9.47	1.48	2.71
D200-60	2723	3.35	1.00	1.00
D200-60-2-S1	3048	7.95	1.12	2.37
D200-60-2-S2	3017	4.86	1.11	1.45
D260-40	3320	3.61	1.00	1.00
D260-40-2-S1	3736	8.05	1.13	2.23
D260-40-2-S2	3610	8.55	1.09	2.37
D260-60	4060	3.79	1.00	1.00
D260-60-2-S1	4345	4.80	1.07	1.27
D260-60-2-S2	3847	4.29	0.95	1.13

注:  $N_u$  为试件峰值承载力, 对于对比试件为  $N_u^0$ ;  $U_p$  为试件峰值位移值, 取 4 个位移计读数的平均值, 对于对比试件为  $U_p^0$ 。

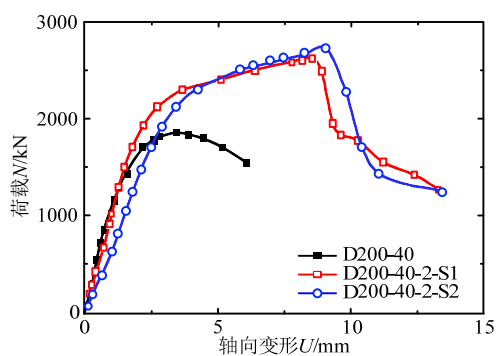
图 6 给出了 8 个圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱和 4 个圆钢管约束混凝土短柱的荷载-轴向变形曲线。圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱的荷载-轴向变形曲线有两个阶段, 第 1 阶段曲线与圆钢管约束混凝土基本重合, 第 2 段与其分离。通过圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱曲线的对比, 可以将荷载-轴向变形曲线分成 3 种类型: 两段上升型、两段水平型、抛物线型。当试件径厚比较小, 混凝土强度较低时, CFRP 的约束作用较强, 荷载-轴向变形曲线呈现两段上升型; 随着径厚比增大, 混凝土强度提高, CFRP 约束作用逐渐减弱, 荷载-轴向变形曲线第 2 段斜率逐渐减小, 最终成为抛物线型。

两段上升型: D200-40-2 一组中的两个试件在加载初期, 轴向变形随荷载值线性变化, 与圆钢管约束混凝土短柱对比试件的刚度非常接近。在超过钢管约束混凝土短柱对比试件峰值荷载后, 试件刚

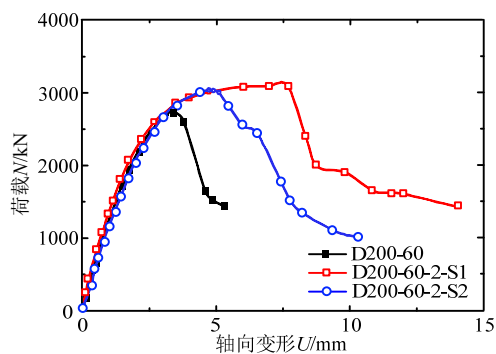
度变小, 轴向应变与荷载不再是线性关系, 曲线呈下凹形。此时试件的荷载-轴向变形曲线开始与圆钢管约束混凝土短柱对比试件的荷载-轴向变形曲线分离。持续加载, 圆钢管约束混凝土短柱达到峰值荷载, 最终失去承载力。而圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱荷载继续增加, 轴向变形与荷载再次呈线性关系, 且斜率与上一阶段下凹形曲线的末端切线斜率接近, 称为第二线性段刚度, 直至圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱达到峰值荷载, 然后 CFRP 断裂, 荷载急剧下降。

两段水平型: D200-60-2 和 D260-40-2 两组中的 4 个试件曲线形式与两段上升型基本类似, 区别在于第二线性段刚度接近于 0, 荷载基本保持不变, 轴向变形持续增加, 当轴向变形达到某一值时, 随着 CFRP 的断裂荷载急剧下降。

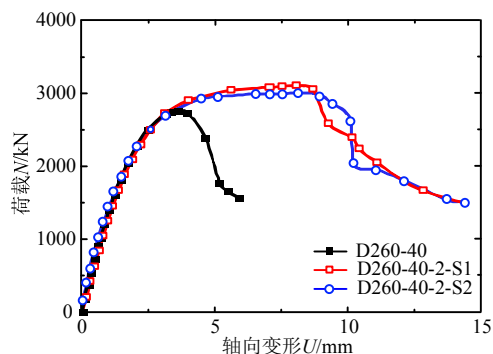
抛物线型: D260-60-2 一组中的两个试件的  $N-U$  关系曲线与钢管约束混凝土柱基本相同, 并且峰值荷载之后, 有明显的下降段。荷载降低至失效点时, CFRP 布没有发生断裂现象, 试件发生了过大的轴向变形。试件的峰值荷载与钢管约束混凝土柱基本相同, 并且最终破坏形态是剪切破坏, 因此可以推断对于抛物线型试件 CFRP 布基本未产生约束作用。



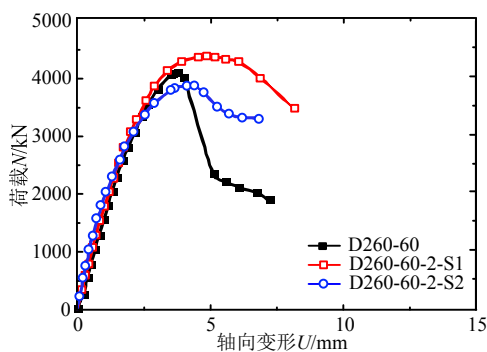
(a) D200-40



(b) D200-60



(c) D260-40



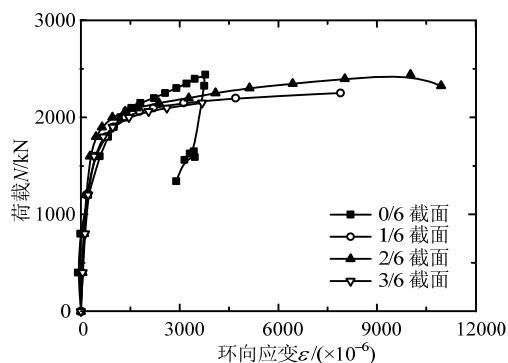
(d) D260-60

图 6 试件荷载-轴向变形关系曲线

Fig.6 Vertical load versus displacement curves

### 2.3 CFRP 的荷载-环向应变关系曲线

试验过程中得到了 CFRP 布的环向应变。由于 CFRP 布  $N-\varepsilon$  变形曲线基本相同, 图 7 列出了部分试件的 CFRP 的  $N-\varepsilon$  关系曲线。CFRP 布  $N-\varepsilon$  关系曲线与试件的荷载-轴向变形曲线非常相似: 在加载初期 CFRP 环向应变发展缓慢, 维持在低应变水平, 持续加载, CFRP 应变速率增大, 曲线斜率变小, 此为第二段。当试件进入第三阶段, CFRP 环向应变与荷载又呈现线性关系, 直至达到峰值荷载, 此时 CFRP 断裂。通过统计试验结果发现, 大部分测点碳纤维没有达到材料材性试验所测得的极限应变, 但相同参数的试件峰值承载力差别并不明显。



(a) D200-40-2-S1

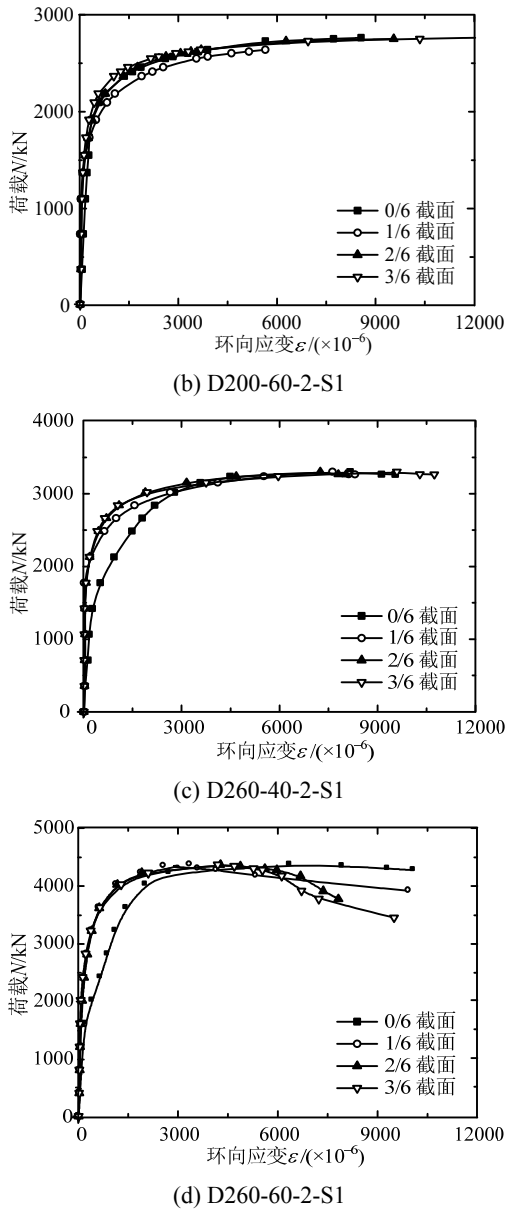


图 7 CFRP 的荷载-环向应变曲线  
Fig.7 Load versus lateral strain of CFRP

试件从 0/6 截面(开缝处)到 3/6 截面(中截面)CFRP 的环向应变有相同的趋势,说明 CFRP 环向应变沿截面高度遵循同样的发展路径。图 7 可以看出,在同级荷载下,CFRP 沿截面高度的环向应变并不完全相同。

2.4 钢管荷载-应力曲线

采用文献[22]给出的钢管应力-应变分析方法,得到试件的轴向荷载和钢管应力的关系曲线。图 8 所示为 4 个圆钢管约束混凝土短柱轴向荷载作用下 3/6 截面高度钢管的  $N-\sigma$  关系曲线,可以看出钢管应力发展非常相似。在加载初期,由于混凝土横向变形较小,钢管与混凝土的相互作用较小,导致钢管的纵向应力和环向应力都很小。进入弹塑性阶段

后,混凝土变形增大,钢管纵向应力和环向应力都快速增大,且钢管纵向应力大于环向应力。钢管在峰值荷载附近屈服,钢管屈服后,钢管纵向应力开始变小,而环向应力快速增加。

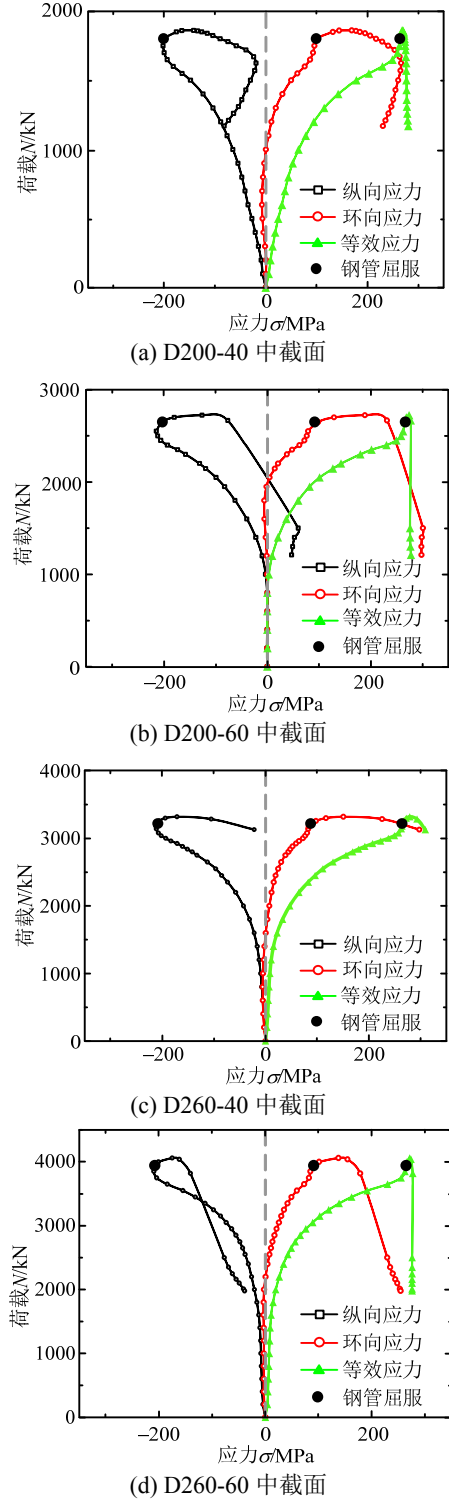


图 8 钢管约束混凝土柱中钢管的荷载-应力关系曲线  
Fig.8 Load versus stress relationship curves of steel tubes

图 9 所示为部分圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱的钢管 3/6 截面荷载-应力关系曲线。与钢管约

束混凝土短柱类似：在加载初期应力增长缓慢，进入屈服段之后，随着混凝土膨胀加剧，钢管应力增长加快，直至达到峰值荷载。与钢管约束混凝土柱不同的是，圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱钢管在峰值荷载之前屈服。

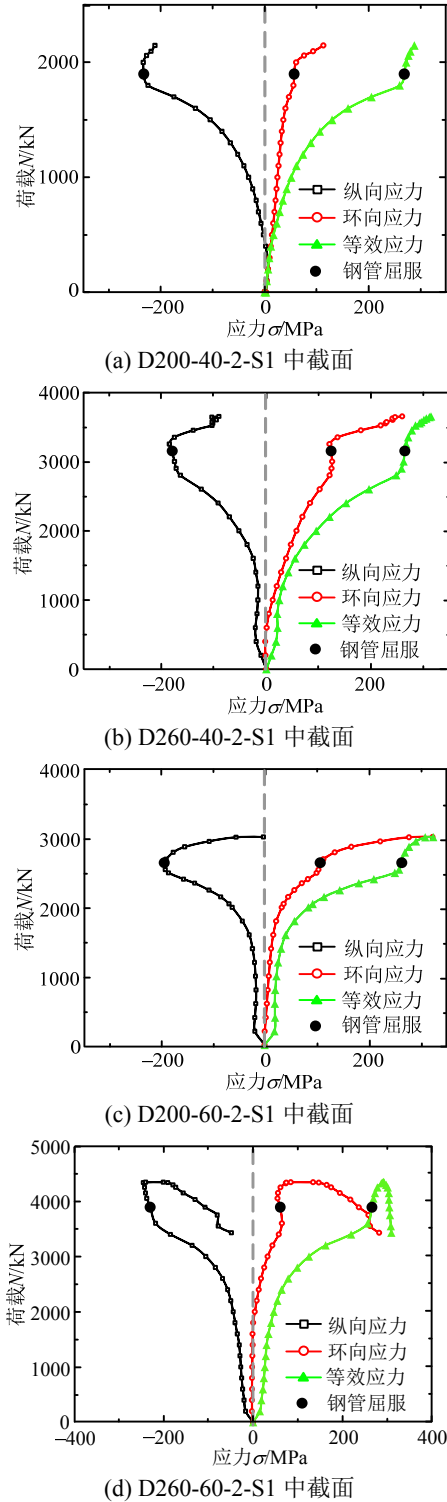


图 9 CFRP-钢复合管约束混凝土柱钢管荷载-应力关系曲线

Fig.9 Load versus stress relationship curves of steel tubes with CFRP

### 3 承载力计算方法

#### 3.1 摩尔-库仑模型

本文中全部试件破坏模式均为剪切破坏，荷载作用下形成剪切破坏面，将核心混凝土分割成上下两部分，由于钢管的约束使得核心混凝土除出现一条贯穿的主斜裂缝而形成破坏面外，主体和楔形块体没有明显的裂缝。参照文献[22]的分析方法，CFRP-圆钢管约束混凝土轴压短柱核心混凝土受力模型如图 10 所示。

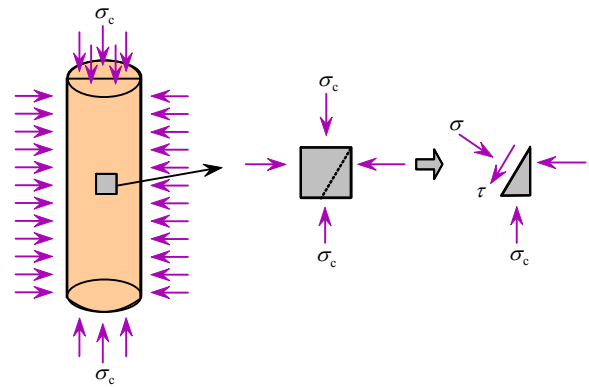


图 10 核心混凝土斜截面破坏应力模型

Fig.10 Mechanical state of confined concrete at failure mode

核心混凝土处于三向受压状态，钢管处于轴向和径向受压，横向受拉状态。由于钢管与混凝土之间的相互作用力  $p$  对钢管的受力分析影响不大，故忽略径向应力对钢管的影响。核心混凝土由于径向紧箍力的作用处于等侧压的空间应力状态。

摩尔-库仑强度准则表明<sup>[23-24]</sup>，抗剪强度由两部分组成，即摩擦强度  $\sigma \tan \varphi$  和粘聚强度  $c$ 。摩擦强度取决于剪切面上的正应力  $\sigma$  和混凝土的内摩擦角  $\varphi$ 。粘聚力取决于混凝土内各种材料间的物理化学作用力。

假设核心混凝土发生剪切破坏时，破坏面与水平面之间的夹角  $\alpha$ ，则由摩尔圆中的几何关系可以得出： $\alpha = 45^\circ + \varphi / 2$ 。对于混凝土内摩擦角约为  $\varphi = 30^\circ \sim 35^\circ$ ，混凝土棱柱体主斜裂缝的倾角  $\alpha = 58^\circ \sim 64^\circ$ ，本次所做的 12 个轴压短柱试件中剪切破坏面的倾角  $\alpha = 60^\circ \sim 65^\circ$ ，这也说明摩尔-库仑理论对本次试验适用。

对图 10 所示的核心混凝土分离体进行静力平衡分析，设单元上剪切破坏面的面积为  $d_s$ ，根据静力平衡条件可得平衡方程：

$$\begin{aligned}
 p \cdot d_s \cdot \sin \alpha - \sigma d_s \cdot \sin \alpha + \tau \cdot d_s \cdot \cos \alpha &= 0, \\
 \sigma_c \cdot d_s \cdot \cos \alpha - \sigma d_s \cdot \cos \alpha - \tau \cdot d_s \cdot \sin \alpha &= 0. \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中:  $\sigma_c$  为核心混凝土所受的纵向应力;  $p$  为钢管与核心混凝土之间的法向应力。

联立方程可求得破坏面上的应力为:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{(\sigma_c + p)}{2} + \frac{(\sigma_c - p)}{2} \cos 2\alpha, \\ \tau &= \frac{(\sigma_c - p)}{2} \sin 2\alpha.\end{aligned}\quad (2)$$

根据摩尔-库仑强度准则可求得:

$$\begin{aligned}c &= \frac{(\sigma_c - p)}{2} \sin 2\alpha - \\ &\left[ \frac{(\sigma_c + p)}{2} + \frac{(\sigma_c - p)}{2} \cos 2\alpha \right] \tan \varphi\end{aligned}\quad (3)$$

取混凝土棱柱体受轴压作用的极限状态, 可用摩尔圆描述, 即:  $p = 0$ ,  $\sigma_c = f_{cp}$ 。

$$c = \frac{f_{cp}}{2} [\sin 2\alpha - (1 + \cos 2\alpha) \tan \varphi] \quad (4)$$

由钢管与混凝土的相互作用可得紧箍力  $p$  与钢管横向应力以及 CFRP 横向应力之间的关系:

$$p = \frac{2t_1\sigma_{h1}}{D - 2t_1} + \frac{2t_2\sigma_{h2}}{D - 2t_2} \quad (5)$$

设圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱处于极限平衡状态时, 剪切面的应力状态可以用摩尔圆描述, 联立公式可得:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \frac{2c + p[(1 - \cos 2\alpha) \tan \varphi + \sin 2\alpha]}{\sin 2\alpha - (1 + \cos 2\alpha) \tan \varphi} = \\ &f_{cp} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left( \frac{2t_1\sigma_{h1}}{D - 2t_1} + \frac{2t_2\sigma_{h2}}{D - 2t_2} \right)\end{aligned}\quad (6)$$

即混凝土承受的轴向应力和约束材料环向应力的函数关系。

当不考虑钢管纵向应力的影响时, 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱基于斜截面破坏的承载力可由下式进行计算:

$$N = \sigma_c A_c \quad (7)$$

### 3.2 Mander 模型

Mander<sup>[25]</sup>根据 William 破坏准则得出的恒侧压下混凝土抗压强度公式为:

$$f_{cc} = f_{co} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (8)$$

式中:  $f_{cc}$  为约束混凝土的轴心抗压强度;  $f_{co}$  为非约束混凝土的轴心抗压强度;  $f_l$  为约束应力。

Mander 公式中考虑了侧压力和混凝土强度的双重影响, 研究结果表明, 该公式计算结果与钢管

约束混凝土柱的试验结果比较吻合。对于 CFRP-钢复合管约束混凝土柱, 核心混凝土在峰值荷载之前并不符合恒侧压条件, 随着荷载的增大, CFRP 提供的约束力也在增大, 因此此种情况属于变侧压, 本文用该公式近似计算。

### 3.3 Teng 模型

Teng 模型中基于大量数据统计得到核心混凝土抗压强度为<sup>[26]</sup>:

$$f_{cc} = f_{co} \left( 1 + 3.5 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (9)$$

CFRP 和钢管提供的最大约束力与 CFRP、钢管的厚度和强度以及受约束核心混凝土直径有关。由下式确定:

$$f_l = \frac{2f_y t_s + 2k_\varepsilon \varepsilon_{frp} E_{frp} t_{frp}}{d} \quad (10)$$

式中,  $k_\varepsilon$  为应变有效系数, 为 FRP 断裂时平均应变与材性试验应变的比值<sup>[27]</sup>。如图 11 所示, 本文参考文献[12-13]共 13 个试验结果平均值取为 0.73。

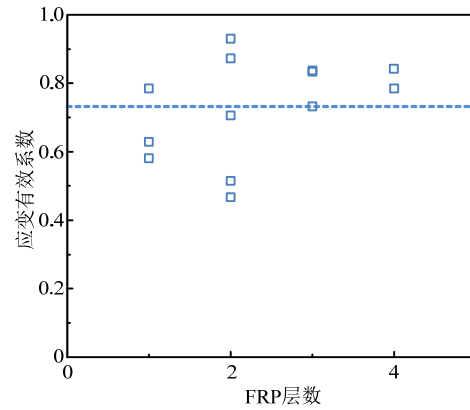


图 11 应变有效系数

Fig.11 Strain efficiency factor

可以看出无论 Mander 计算公式还是 Teng 的计算方法,  $f_{cc}$  都只与核心混凝土的侧向约束力以及无约束混凝土轴心抗压强度有关。CFRP-钢复合管约束混凝土短柱承载力公式为:

$$N = f_{cc} A_c \quad (11)$$

式中:  $N$  为试件轴压承载力;  $f_{cc}$  为核心约束混凝土的轴心抗压强度。

图 12 所示为试验实测承载力和计算承载力的对比情况。从图 12 可以看出, Mander 模型计算结果与试验结果相比偏大, Teng 模型计算结果和摩尔-库仑模型计算结果与试验值吻合较好。



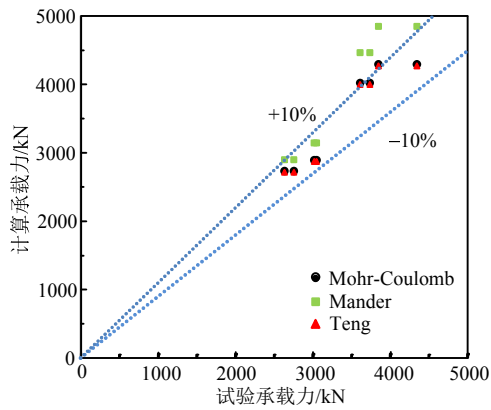


图 12 承载力计算结果对比

Fig.12 Comparison between test results and calculation results

## 4 结论

本文对圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱的轴压静力性能进行了试验研究和理论分析,对比了圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱的轴压承载力的计算方法,主要结论如下:

(1) 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱在轴压荷载作用下,峰值荷载时的特征现象有两种,第一类试件 CFRP 在峰值荷载时断裂,此时认为试件失效,外包 CFRP 可以较明显提高钢管约束混凝土轴向变形能力,当约束作用较强时,对承载力也有较明显提高;第二类试件 CFRP 在峰值荷载时没有断裂,并且当荷载下降至峰值荷载的 85% 时 CFRP 仍未断裂,此时认为试件失效。第二类特征现象仅出现在 D260-60-2 组中,由于试件径厚比大、混凝土强度高,因此外包 CFRP 布对试件的承载力和变形能力提高较小。

(2) 当轴向荷载较小时,CFRP-钢复合管约束混凝土短柱的荷载-变形曲线与圆钢管约束混凝土短柱基本重合,两曲线分离点在钢管约束混凝土柱的峰值荷载附近,此时钢管达到屈服。分离点之后存在三种荷载-变形曲线形式:两线上升型、两线水平型和抛物线型。

(3) 本文所做的 8 个 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱最终全部为剪切破坏。可采用摩尔-库仑模型、Mander 模型和 Teng 模型进行轴压承载力计算,经比较 Mander 模型计算结果与试验结果相比偏大,Teng 模型计算结果和摩尔-库仑模型计算结果与试验值吻合较好。

### 参考文献:

[1] 王文炜. FRP 加固混凝土结构技术及应用[M]. 北京:

中国建筑工业出版社, 2007: 19-23.

Wang Wenwei. Technology and application of concrete structures strengthened by FRP [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 19-23. (in Chinese)

- [2] 周绪红, 刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-5.  
Zhou Xuhong, Liu Jiepeng. Performance and design of steel tube confined concrete members [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-5. (in Chinese)
- [3] 滕锦光, 陈建飞. FRP 加固混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 209-214.  
Teng Jinguang, Chen Jianfei. Concrete structure strengthened by FRP [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 209-214. (in Chinese)
- [4] 翟存林, 魏洋, 李国芬, 曹兴. FRP-钢复合管混凝土桥墩设计与应用研究 [J]. 公路, 2012(1): 83-87.  
Zhai Cunlin, Wei Yang, Li Guofen, Cao Xing. Design and application of FRP-steel composite tube concrete piers [J]. Highway, 2012(1): 83-87. (in Chinese)
- [5] 陆伟, 袁鸿. 碳纤维约束混凝土短柱的强度计算 [J]. 山西建筑, 2005, 31(2): 15-16.  
Lu Wei, Yuan Hong. Strength analysis of short concrete columns confined with CFRP under axial compression [J]. Shanxi Architecture, 2005, 31(2): 15-16. (in Chinese)
- [6] Mirmiran Amir, Shahawy Mohsen. A new concrete-filled hollow FRP composite column [J]. Composites Part B, 1996, 27(3/4): 263-268.
- [7] 鲁国昌. FRP 管约束混凝土轴压性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2005.  
Lu Guochang. Study on behavior of concrete filled FRP tubes under axial compression [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [8] 王震宇, 王代玉, 吕大刚. FRP 约束混凝土圆柱应力-应变分析模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2): 200-206.  
Wang Zhenyu, Wang Daiyu, Lü Dagang. Stress-strain analytical model for FRP-confined concrete circular column [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(2): 200-206. (in Chinese)
- [9] 吴刚, 吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 1-9.  
Wu Gang, Lü Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column without a strain-softening response [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 1-9. (in Chinese)
- [10] Fardis Michael N, Kllalili Homayoun H. FRP-encased concrete as structural material [J]. Magazine of Concrete Research, 1982, 34(121): 191-202.
- [11] Lam L, Teng J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7): 471-489.

- [12] Tao Zhong, Han Linhai, Zhuang Jinping. Axial loading behavior of CFRP strengthened concrete-filled steel tubular stub columns [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2007, 1(10): 37–46.
- [13] Hu Yueming, Yu Tao, Teng Jinguang. FRP-confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 5(15): 850–860.
- [14] Choi Kang-Kyu, Xiao Yan. Analytical model of circular CFRP confined concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. *Composites for Construction*, 2010, 14(1): 125–133.
- [15] Park J W, Hong Y K, Hong G S, Kim J H, Choi S M. Design formulas of concrete filled circular steel tubes reinforced by carbon fiber reinforced plastic sheets [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 2916–2922.
- [16] 王庆利, 周博, 谭鹏宇. 圆 CFRP-钢管混凝土 (C-CFRP-CFST) 压弯构件的静力性能 [J]. *工程力学*, 2012, 29(增刊 II): 154–158.  
Wang Qingli, Zhou Bo, Tan Pengyu. Static performance of the concrete filled circular CFRP-steel tubular (C-CFRP-CFST) beam column [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29 (Suppl II): 154–158. (in Chinese)
- [17] Teng Jinguang, Hu Yueming, Yu Tao. Stress-strain model for concrete in FRP-confined steel tubular columns [J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 156–167.
- [18] 闫煦, 周博. 方 CFRP-钢管混凝土 (S-CFRP-CFST) 压弯构件滞回性能试验研究 [J]. *工程力学*, 2013, 30(增刊): 236–240.  
Yan Xu, Zhou Bo. Experimental study on hysteretic behavior of the concrete filled square CFRP-steel tubular (S-CFRP-CFST) beam column [J]. *Engineering Mechanics*. 2013, 30(Suppl): 236–240. (in Chinese)
- [19] Yu Tao, Hu Yueming, Teng Jinguang. FRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns under cyclic axial compression [J]. *Constructional Steel Research*, 2014, 94: 33–48.
- [20] Wei Yang, Wu Gang, Li Guofen. Performance of circular concrete-filled fiber-reinforced polymer-steel composite tube columns under axial compression [J]. *Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(20): 1911–1928.
- [21] Dong C X, Kwan A K H, Ho J C M. Axial and lateral stress-strain model for concrete-filled steel tubes with FRP jackets [J]. *Engineering Structures*, 2016, 126: 365–378.
- [22] 王玉银. 圆钢管高强混凝土轴压短柱基本性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.  
Wang Yuyin. Axial behavior of circular high strength concrete steel tube stub columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003. (in Chinese)
- [23] 陈希哲. 土力学地基基础 [M]. 第 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2011: 161–164.  
Chen Xizhe. Soil mechanics and foundation [M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 161–164. (in Chinese)
- [24] 王哲. 平面应变状态下混凝土力学行为的三轴试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(10): 62–71.  
Wang Zhe. Tri-axial experimental study of the mechanical behavior of concrete in plane strain state [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(10): 62–71. (in Chinese)
- [25] Mander. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of the Structural Engineering*, 1988, 114(8): 1827–1849.
- [26] Teng J G, Huang Y L, Lam L, Ye L P. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(2): 201–210.
- [27] Pessiki S, Harries K A, Kestner J T, Sause R, Ricles J M. Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001, 5(4): 237–245.