

CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的承载力分析

文 / 李 冉 深圳市坪山城投宏源投资有限公司

摘要: 以径厚比和套箍指标为研究参数, 分析了CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的轴压承载力提高系数、延性系数和承载力的计算方法。结果表明: CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的承载力的提高主要取决于CFRP, 且CFRP能有效克服超薄壁钢管的局部屈曲现象; 构件的延性受CFRP和钢管的双重影响, 钢管径厚比为160(235/ f_y)的CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的延性最好; 通过多元回归推导出的承载力计算表达式, 其计算精度较好。
关键词: CFRP-超薄壁圆钢管混凝土; 承载力提高系数; 延性系数; 承载力计算式

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.038

引言

CFRP-圆钢管混凝土衍生于钢管混凝土, 是指将高强碳纤维材料粘贴于钢管混凝土结构的外围, 形成的多材料组合结构。CFRP-钢管混凝土结构因其高承载力、高施工性及高经济性, 在近年逐步成为工程结构领域的热点研究对象, 应用前景十分广阔。径厚比是影响CFRP-钢管混凝土结构承载力的一个关键变量, 目前针对CFRP-钢管混凝土尚未出台相应的设计规范和技术规程。文献显示, 钢管径厚比位于30~85区间内的CFRP-钢管混凝土构件力学性能研究成果较多^[1~4], 对径厚比在120以上时的研究较少; 而从套箍指标角度看, 现有试验试件基本是以钢管套箍作用为主导、碳纤维(CFRP)为辅助^[5~8], 而以碳纤维(CFRP)为套箍作用主导的试验研究则鲜有耳闻。因此, 为寻求

研究的完整性和实用性, 本文将构件径厚比区间设定为124~185, 并进行了9个轴压短柱的静力试验, 对大钢管径厚比、且以碳纤维(CFRP)为套箍作用主导的CFRP-钢管混凝土构件的承载力展开研究, 为工程设计与施工技术规程提供参考依据。

一、试件设计

试验试件9个, 根据钢管壁厚为1.2mm、1.4mm和1.8mm分为3组; 按CFRP套箍指标将试验试件划分为零粘贴钢管混凝土短柱3个、单层粘贴CFRP-钢管混凝土短柱3个和双层粘贴CFRP-钢管混凝土短柱3个。试件编号为Y-t_s-n, t_s表示钢管壁厚; n表示CFRP层数。试件核心混凝土强度设计为C30。钢材强度等级采用Q235级。CFRP型号为UT70-30型、抗拉强度3400MPa。各试件的基本参数如表1所示。

表1 试件的基本参数

| 试件编号 | D/mm | D _c /mm | D/t | ξ_s | ξ_{cf} | ξ | k _c | SI | DI | N _u /kN | | N _{ut} /kN |
|---------|-------|--------------------|-------|---------|------------|-------|----------------|--------|--------|--------------------|--------|---------------------|
| | | | | | | | | | | 式[3] | 式[5] | |
| Y-1.2-0 | 221.4 | 219 | 184.5 | 0.241 | 0 | 0.241 | 1.3940 | 1.3132 | 1.0066 | 1350.2 | 1372.1 | 1320.0 |
| Y-1.2-1 | 221.4 | 219 | 184.5 | 0.241 | 0.498 | 0.739 | 2.2180 | 1.9781 | 1.8305 | 2004.4 | 2030.9 | 1988.4 |
| Y-1.2-2 | 221.4 | 219 | 184.5 | 0.241 | 0.997 | 1.238 | 3.1645 | 2.7352 | 1.9713 | 2659.7 | 2690.9 | 2749.4 |
| Y-1.4-0 | 221.8 | 219 | 158.4 | 0.282 | 0 | 0.282 | 1.6381 | 1.4978 | 1.9602 | 1436.9 | 1439.1 | 1550.0 |
| Y-1.4-1 | 221.8 | 219 | 158.4 | 0.282 | 0.499 | 0.781 | 2.1714 | 1.9137 | 2.4419 | 2092.2 | 2099.2 | 1980.4 |
| Y-1.4-2 | 221.8 | 219 | 158.4 | 0.282 | 1.000 | 1.282 | 3.2207 | 2.7321 | 2.6775 | 2750.2 | 2761.9 | 2827.4 |
| Y-1.8-0 | 222.6 | 219 | 123.6 | 0.363 | 0 | 0.363 | 1.6783 | 1.4975 | 0.8197 | 1608.9 | 1572.5 | 1648.0 |
| Y-1.8-1 | 222.6 | 219 | 123.6 | 0.363 | 0.501 | 0.864 | 2.2759 | 1.9359 | 1.2141 | 2266.8 | 2235.2 | 2130.4 |
| Y-1.8-2 | 222.6 | 219 | 123.6 | 0.363 | 1.003 | 1.363 | 3.2401 | 2.6431 | 1.3556 | 2922.1 | 2899.2 | 2908.7 |

注: 表中D为钢管外径, ξ_s 和 ξ_{cf} 分别为钢管和CFRP的套箍指标, ξ 为总套箍指标值, k_c为核心混凝土强度提高系数, SI和DI分别为轴压承载力提高系数和延性系数, N_u和N_{ut}分别为承载力的计算值和试验值。

二、试件的破坏形态

图1显示了试验试件的破坏形态, CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的破坏形态显示: 试验试件中部的CFRP脆性断裂; 钢管产生径向鼓曲、管壁光滑但管径扩大, 未出现屈曲或压皱现象。



图1 所有试件的破坏形态

三、轴压承载力提高系数

根据文献[9]对试验构件轴压承载力提高系数的定

义: $SI = N_{ut} / N_{ue}$; 式中: N_{ut}为构件实测轴压承载力; N_{us}为名义轴压承载力, $N_{us} = f_{ck} A_c + f_y A_s$, A_c和A_s分别为混凝土和钢管的截面面积, f_{ck}表示混凝土的轴心抗压强度、f_y表示钢材的屈服强度。分别计算出各构件的SI值, 绘制SI~D/t、SI~ ξ_r 、SI~ ξ_s 关系曲线如图2所示。

图2(a)表明构件轴压承载力提高系数SI与径厚比D/t呈线性关系, 普通钢管混凝土, 即当CFRP层数n=0时, SI随D/t的增大而减小; 当缠绕粘贴CFRP时, 构件的轴压承载能力大幅度提高, 远超过截面钢材厚度增加带来的构件强度的提高, 导致SI~D/t直线斜率接近1。

图2(b), 构件的SI~ ξ_s 曲线表明, 当n=0时SI随 ξ_s 的增大先增大后减小, 呈抛物线关系, 研究表明^[9]这是由于钢管混凝土存在径厚比的限值, 超过其径厚比限值后, 钢管会发生局部屈曲, 一旦屈曲, 随着荷载的增加, 试件的侧向变形随之略微增大, 但屈曲后承载力

仍可维持在较高位。当 $n \neq 0$ 时，由于 CFRP 的侧向约束作用，钢管壁未出现明显的局部屈曲，因此 $SI \sim \xi_s$ 呈线性关系，再者，由于钢管壁厚超薄，其套箍指标的增大不能明显提高构件的轴压承载力， $SI \sim \xi_s$ 呈直线型。

图 2(c) 构件的 $SI \sim \xi_f$ 曲线表明， $SI \sim \xi_f$ 关系呈线性，构件 SI 系数随 ξ_f 的增大呈现明显线性增大，而 t 增大时直线斜率基本一致，表明 ξ_s 的影响效应相对 ξ_f 较弱。

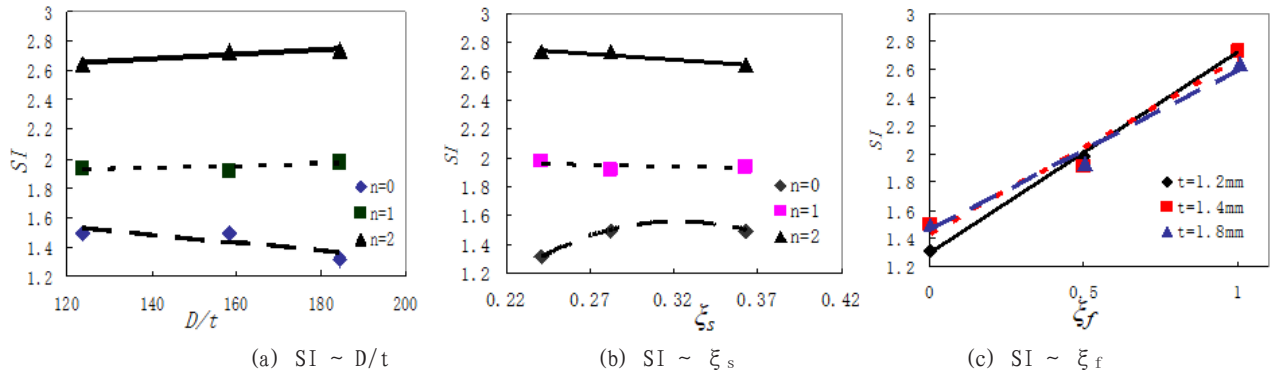


图 2 SI 影响关系曲线

四、延性系数

根据钢管混凝土的研究^[10]定义，钢管的延性系数 (DI) 指标为 $DI = \epsilon_{85\%} / \epsilon_y$ 。式中： $\epsilon_{85\%}$ 为荷载下降到峰值荷载的 85% 时所对应的纵向平均应变值； $\epsilon_y = \epsilon_{75\%} / 0.75$ ， $\epsilon_{75\%}$ 为荷载上升阶段达到 75% 峰值荷载时对应的纵向平均应变值，各构件的延性系数计算值见表 1。图 3 为依据计算的 DI 值绘制的延性系数 $DI \sim \xi_s$ 和 $DI \sim \xi_f$ 关系曲线。

双层粘贴 CFRP 的试件，此时 $\xi_f / \xi_s = 3.546$ ；钢管径厚比为 $D/t=158$ 。钢管径厚比约为 160 ($235/f_y$) 时构件的延性最好。

五、CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱承载力计算方法

CFRP-超薄壁圆钢管混凝土柱，属约束混凝土型构件，构件抗压强度的提高主要源于 CFRP 筒和钢管约束了混凝土侧向变形，使混凝土的应力状态处于三向受压。本文将粘贴 CFRP 筒及钢管对混凝土强度的提高效应，以参数 k_c 来表达：

$$k_c = \frac{N_{ut} - N_{us}}{N_{uc}} = \frac{N_{ut} - f_y A_s}{f_{ck} A_c} \quad (1)$$

式中 N_{ut} 为构件实测轴压承载力、 N_{us} 为构件截面钢管强度、 N_{uc} 为构件截面核心混凝土强度。

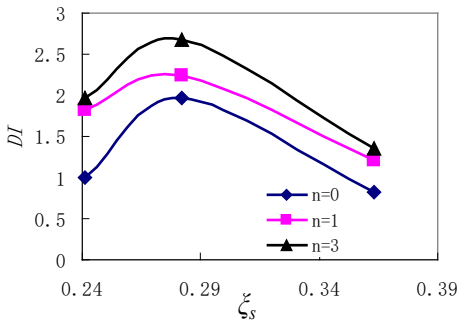
研究表明^[10]，薄壁钢管混凝土构件的核心混凝土强度提高系数 k_c 与截面的套箍指标 ξ 近似呈线性关系。因此，可将 ξ_f 和 ξ_s 相加得到 ξ ，再根据所做的轴压试件的试验数据进行线性回归分析，回归出 $k_c - \xi$ 的关系式，求出 N_u ，但由于 CFRP 和钢管的材料特征截然不同，它们对核心混凝土的作用机理也有所区别，上述计算方法中简单地将 ξ_f 和 ξ_s 相加得到 ξ ，回归得出的计算式的精度可能相对较低。为提高计算精度，我们也可以针对 $k_c - (\xi_f, \xi_s)$ 进行多元回归，回归出 $k_c - (\xi_f, \xi_s)$ 的关系式，求出 N_u 。下面将用两种方法分别计算。

首先，针对 $k_c - (\xi_f, \xi_s)$ 进行多元回归，如图 4 所示。图 4 表明，由点 $k_c - (\xi_f, \xi_s)$ 构成的曲面可近似为平面，因此拟合表达式为 $k_c = b_0 + b_1 \xi_s + b_2 \xi_f + \dots + b_n \xi_n$ ，自变量为 ξ_f 和 ξ_s ，因变量为 k_c ，拟合的参数表达为矩阵形式：

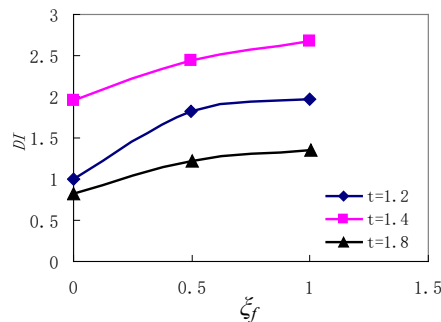
$$b = (A^T A)^{-1} A^T Y, \text{ 系数为:}$$

$$b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 1 & \xi_s(1) & \xi_f(2) & \dots & \xi_n(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \xi_s(K) & \xi_f(K) & \dots & \xi_n(K) \end{bmatrix}; k_c = \begin{bmatrix} k_c(1) \\ k_c(2) \\ k_c(3) \\ \dots \\ k_c(n) \end{bmatrix}$$

依据 9 个构件的轴压试验数据，分别计算出每个构件的 k_c 值，见表 1。借助 origin7.5 程序的多元回归模



(a) $DI \sim \xi_s$



(b) $DI \sim \xi_f$

图 3 DI 影响关系曲线

图 3 可知，延性系数随 ξ_s 的增大表现为先增后减，与 ξ_s 在 0.24 ~ 0.37 范围内呈抛物线关系；随 ξ_f 的增大而增大，与 ξ_f 在 0 ~ 1.0 范围内呈线性关系。图 3 表明，CFRP 和钢管均对试验构件的延性产生影响，延性系数最大试件为 Y-14-2，即钢管壁厚为 1.4mm 的

块或 Mat-lab 程序的多元线性回归函数 regress, 回归出的 $k_c - (\xi_f, \xi_s)$ 所在平面表达式为:

$$k_c = 1.0365\xi_s + 1.6387\xi_f + 1.2085 \quad (2)$$

将上式代入式 [1], 推导出试验构件轴压承载力 N_u 的计算表达式为:

$$N_u = (1.0365\xi_s + 1.6387\xi_f + 1.2085)A_c f_k + f_y A_s \quad (3)$$

式 [2] 中, k_c 对 ξ_f 和 ξ_s 分别求偏导得:

$\partial k_c / \partial \xi_s = 1.0365$; $\partial k_c / \partial \xi_f = 1.6387$ 。结果表明, ξ_f 对构件承载力提高系数的作用明显高于 ξ_s 。

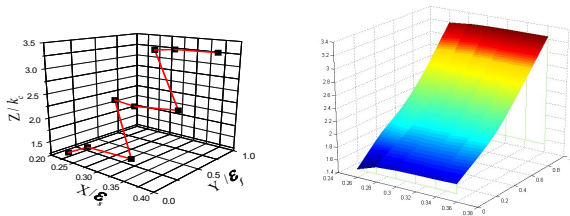


图 4 $k_c - (\xi_f, \xi_s)$ 关系平面

再对 $k_c - \xi$ 进行线性回归。令 CFRP 和钢管的套箍指标分别为 ξ_f 和 ξ_s , 令 $\xi = \xi_f + \xi_s$ 。依据 9 个轴压试件的试验数据进行线性回归, 如图 5 所示。回归出 $k_c - \xi$ 的关系式为:

$$k_c = 1.6270\xi + 1.0392 \quad (4)$$

再将上代入式 [1], 推导出试验构件轴压承载力 N_u 的计算表达式为:

$$N_u = (1.6270\xi + 1.0392)f_{ck} A_c + f_y A_s \quad (5)$$

图 6 为按式 [3]、[5] 分别计算的 CFRP- 超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的承载力计算值和试验值的对比情况。可见, 式 [3] 计算结果回归出的直线斜率更接近 1, 表明式 [3] 计算式的精度要高于式 [5]。

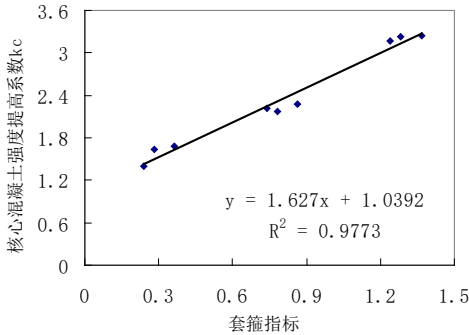


图 5 $k_c - \xi$ 关系曲线

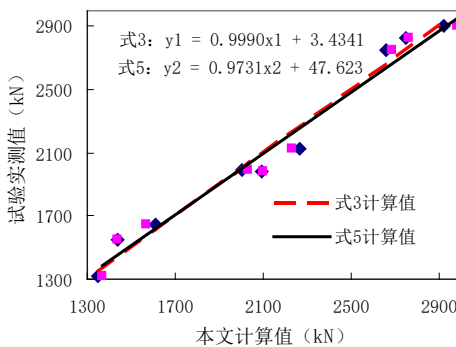


图 6 计算值与试验值比较

结语

(1) CFRP- 超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的破坏模式显示: 位于试件中部的 CFRP 材料脆性断裂; 钢管径向鼓曲, 管径增大, 管壁光滑, 无局部屈曲压皱现象。

(2) CFRP- 超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱构件轴压承载力提高系数 SI 与径厚比 D/t 呈线性关系。外粘碳纤维能改善超薄壁钢管的屈曲效应, 且效果明显, 表现为 $SI \sim \xi_s$ 曲线由抛物线关系转变为线性关系。 $SI \sim \xi_f$ 呈线性关系, 且 SI 受 ξ_f 的影响效应要强于 ξ_s , 表明该类构件的承载力提高主要取决于 ξ_f 。

(3) 构件的延性受 CFRP 和钢管的双重影响, 延性系数 DI 与 ξ_s 在 0.24 ~ 0.37 范围内呈抛物线关系, 与 ξ_f 在 0 ~ 1.0 范围内呈线性关系; 钢管的径厚比为 160 (235/ f_y) 时 CFRP- 超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的延性最好。

(4) 通过对试验数据的分析和回归, 分别提出核心混凝土提高系数 k_c 与套箍指标 ξ 的线性回归方程以及 k_c 与套箍指标组 (ξ_f, ξ_s) 多元回归方程, 并推导出关于 CFRP- 超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的承载力计算的两种表达式, 分析结果表明多元回归结果计算精度更高。

参考文献

- [1] 王庆利, 叶茂, 周琳. 圆 CFRP- 钢管混凝土构件受弯性能研究 [J]. 土木工程学报, 2008; 41(10): 30-38.
- [2] 王庆利, 谭鹏宇, 魏溯华. 圆 CFRP- 钢管混凝土压弯构件静力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008; 29(5): 67-74.
- [3] 王庆利, 刘洋, 董志峰. 圆 CFRP- 钢管混凝土扭转性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2009; 42(11): 91-101.
- [4] 顾威. CFRP 钢管混凝土柱的力学性能研究 [D]. 大连海事大学, 2007: 21-23.
- [5] 王庆利, 殷春晓, 刘凜. 圆 CFRP- 钢管混凝土受弯构件弯矩-曲率关系分析 [J]. 科学技术与工程, 2007; 7(22): 5823-5828.
- [6] 顾威, 关崇伟, 赵华等. 圆 CFRP 钢管复合管混凝土轴压短柱试验研究 [J]. 沈阳建筑工程学报, 2004; 20(2): 118-120.
- [7] Xiao Yan, He Wen-hui, Mao Xiao-yong. Development of confined concrete filled tubular (CCFT) columns [J]. Journal of Building Structures, 2004; 25(6): 59-66.
- [8] 毛明扬, 王庆利. 圆 CFRP 钢管砼轴压短柱静力性能分析 [A]. 第 18 届全国结构工程学术会议论文集 [C]. 广州, 2009.
- [9] 李佰寿, 张平, 金爱花等. 薄壁方形钢管再生块体混合短柱轴压试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012; 45(10) 125-134.
- [10] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.