

文章编号: 1004-4353(2014)01-0067-04

CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱 承载力的简化计算

李冉¹, 马丽娜², 刘秀琴², 张鸿梅^{1*}

(1. 延边大学工学院 土木工程系, 吉林 延吉 133002; 2. 延边建设工程质量检测鉴定有限公司, 吉林 延吉 133002)

摘要: 基于合理的 CFRP 筒、钢管和核心混凝土在极限荷载时的应力状态的假设, 采用极限平衡法并运用 MatLab 软件作为运算工具, 推导出钢管壁厚小于 2 mm、径厚比大于 120 的 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的承载力计算表达式. 结果表明: 相对于普通的 CFRP-钢管混凝土短柱, CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的钢管套箍指标被折减, 其承载力有所降低. 通过对 9 个构件的轴心受压试验表明, 计算表达式的计算值与试验值吻合良好.

关键词: CFRP-超薄壁圆钢管混凝土; 极限平衡法; 承载力计算表达式; MatLab

中图分类号: TU375.3

文献标识码: A

The bearing capacity of CFRP-super thin-wall round steel tube concrete axial compression short column simplified calculation

LI Ran¹, MA Lina², LIU Xiuqing², ZHANG Hongmei^{1*}

(1. Department of Civil Engineering, College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China;

2. Yanbian Construction Engineering Quality Detection Appraisal Co. Ltd., Yanji 133002, China)

Abstract: Based on the reasonable hypothesis of the stress state under the ultimate load of the CFRP tube, steel tube and the core concrete, using the limit equilibrium methods and taking the MatLab as the computational tool, we inferred the computational expressions of the bearing capacity of the CFRP-super thin-wall round steel tube concrete axial compression short column with the steel tube wall thickness less than 2 mm, and radius-thickness ratio more than 120. The calculation results shows that: compared with the common CFRP-concrete filled steel tubular short column, the steel tube's confinement index of the CFRP-super thin-wall round steel tube concrete axial compression short column was discounted, and the bearing capacity was reduced. The axial compression test of nine specimens indicates that the calculation result from the computational expressions can match well with the test result.

Key words: CFRP-super thin-wall round steel tube concrete; limit equilibrium method; computational expressions of bearing capacity; MatLab

CFRP-钢管混凝土结构是指用碳纤维布缠绕粘贴于钢管混凝土结构外围, 形成 3 种材料的组合结构. 近年来, CFRP-钢管混凝土结构以其高承载力、高施工性、高经济性成为结构工程领域的研究热点, 应用前景十分广阔. 王庆利等^[1]基于极限平衡理论, 推导出适用于 CFRP-钢管混凝土轴压短柱承载力的计算表达式. 张常光等^[2]基于双剪统一强度理论, 推导出的 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的承载力计

收稿日期: 2013-12-14

* 通信作者: 张鸿梅(1959—), 女, 教授, 研究方向为结构检测与加固.

算式,与文献[1]结果基本一致.刘凜等^[3]通过多元回归推导出圆 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的承载力指标的简化表达式.

目前,对 CFRP-圆钢管混凝土轴压短柱的研究^[3-10]中,构件的钢管壁厚较大(2 mm 以上),其应力状态基本假定为:考虑轴向压应力 σ_1 和环向拉应力 σ_2 ,不考虑径向应力 σ_3 .本文在对大径厚比的 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土短柱的试验中发现:当钢管壁厚小于 2 mm,径厚比 D/t 大于 120 时,其应力状态发生很大变化,即由于钢管的壁厚过小,导致超薄壁钢管筒体在内部混凝土粗骨料的挤压下,产生沿径向的大变形,筒体的内力传递被破坏,轴向应力 σ_1 无法发挥.另外,由于钢管壁薄,来源于 CFRP 和核心混凝土的内外挤压的钢管径向压应力 σ_3 被放大,且 σ_3 会对环向应力 σ_2 产生“折减”效应.基于上述钢管应力状态的变化,本文利用极限平衡理论推导出该类构件承载力的计算表达式,并将计算结果与试验结果作比较,验证了其可行性.由于钢管径厚比大于 120,为便于区分,本文将此类构件称为 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土构件.

1 基本假定

1) CFRP 筒. CFRP 筒为薄膜状套筒,只考虑环向拉应力.

2) 核心混凝土.在等侧压力 p 作用下的三向受压混凝土的强度 σ_c 与侧压力 p 之间的线性关系为

$$\sigma_c = f_{ck} + Kp, \quad (1)$$

其中 f_{ck} 为无侧压力时混凝土轴压强度标准值, K 为侧压力系数.

3) 钢管.文献[1]假定径向应力 $\sigma_3 = 0$,仅考虑钢管轴向应力 σ_1 和环向应力 σ_2 .本文针对 CFRP-超薄壁钢管混凝土轴压短柱,综合考虑试验结果和受力状态的分析,不考虑轴向应力 σ_1 ,假定钢管处于环向受拉和径向受压的双向应力状态,可近似认作

$$\sigma_3 = \sigma_{cf} - \sigma_s, \quad (2)$$

其中 σ_{cf} 和 σ_s 分别为 CFRP 和钢管对核心混凝土的侧压力. σ_2 和 σ_3 服从 Von Mises 屈服准则:

$$\sigma_2^2 - \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3^2 = f_y^2. \quad (3)$$

4) 假定钢管和 CFRP 可协同工作,不考虑可能的粘接滑移对承载力的影响.

2 计算式推导

核心混凝土、钢管和 CFRP 筒的受力状态如图 1 所示.由于钢管和 CFRP 筒超薄,假定其环向拉应力均匀分布,如图 1 所示.依据静力平衡可得:

$$2\sigma_2 t_s = \sigma_s d_c, \quad 2f_{cf} t_{cf} = \sigma_{cf} d_c. \quad (4)$$

其中 t_s 和 t_{cf} 分别为钢管和 CFRP 的厚度, f_{cf} 为 CFRP 的极限抗拉强度, d_c 为钢管内径.钢管和 CFRP 筒的横截面积 A_s 和 A_{cf} 可分别近似取为 $\pi d_c t$ 和 $\pi d_c t_{cf}$,于是有

$$A_s/A_c = 4t_s/d_c, \quad A_{cf}/A_c = 4t_{cf}/d_c. \quad (5)$$

由(4)和(5)式并结合文献[4]的定义,得

$$\sigma_{cf} = \xi_{cf}/2, \quad \sigma_s = \xi_s f_{ck} \sigma_2 / (2f_y). \quad (6)$$

在(2)、(3)、(6)式中, σ_s 、 σ_2 、 σ_3 为未知量,本文利用 MatLab 软件解方程组,并对计算结果进行化简,求得(7)式.由于(7)式较复杂,令 $t = f_y/f_{ck}$,将(7)式简化为(8)式.将(8)式带入(1)式,并取侧压力系数 $K = 4$,得极限承载力 N_u 的计算表达式(9)式.

$$\sigma_s = \frac{\xi_s^2 \xi_{cf} f_{ck}^3 - \xi_s \xi_{cf} f_{ck}^2 f_y + \xi_s f_{ck} (-3\xi_{cf}^2 f_{ck}^2 f_y^2 + 4\xi_s^2 f_{ck}^2 f_y^2 + 16f_{ck}^2 f_y^2 - 8\xi_s f_{ck}^3 f_y)^{1/2}}{2(\xi_s^2 + 4f_y f_{ck} + 2\xi_s 4f_y f_{ck})}, \quad (7)$$

$$\sigma_s = \xi_s f_{ck} (\xi_s \xi_{cf} - \xi_{cf} t + \sqrt{4\xi_s^2 t^2 - 3\xi_{cf}^2 t^2 + 16t^2 - 8\xi_s t}) / [2(4t + 2\xi_s t + \xi_s^2)], \quad (8)$$

$$N_u = A_c f_{ck} \left[1 + 2\xi_{cf} + 2\xi_s (\xi_s \xi_{cf} - \xi_{cf} t + \sqrt{4\xi_s^2 t^2 - 3\xi_{cf}^2 t^2 + 16t^2 - 8\xi_s t}) / (4t + 2\xi_s t + \xi_s^2) \right]. \quad (9)$$

在(9)式中令 $\nu = (\xi_s \xi_{cf} - \xi_{cf} t + \sqrt{4\xi_s^2 t^2 - 3\xi_{cf}^2 t^2 + 16t^2 - 8\xi_s t})$, 得

$$N_u = A_c f_{ck} (1 + 2\xi_{cf} + 2\nu \xi_s). \quad (10)$$

将 ν 看成是对 ξ_s 的折减系数. 分析 ν 的组成表明, ν 主要受 $4\xi_s^2 t^2 - 3\xi_{cf}^2 t^2 = 0$ 的影响. 当 $4\xi_s^2 t^2 - 3\xi_{cf}^2 t^2 = 0$ 时, 由于 ξ_s 和 ξ_{cf} 远小于 t , $\nu = (\xi_s \xi_{cf} - \xi_{cf} t + \sqrt{4\xi_s^2 t^2 - 3\xi_{cf}^2 t^2 + 16t^2 - 8\xi_s t}) \approx 1$, 此时(9)式退化为文献[1]中的计算式, 即(10)式中 $\nu = 1$ 时. 对于 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土而言, $\xi_s < \xi_{cf}$. 当 $4\xi_s^2 t^2 - 3\xi_{cf}^2 t^2 < 0$, 即 $\xi_s < 0.85\xi_{cf}$ 时, $\nu < 1$, ξ_s 被折减成 $\nu\xi_s$. 若 ξ_s 比 ξ_{cf} 越小, 则 ν 值也相应地越小, 而 ξ_s 被折减得更多.

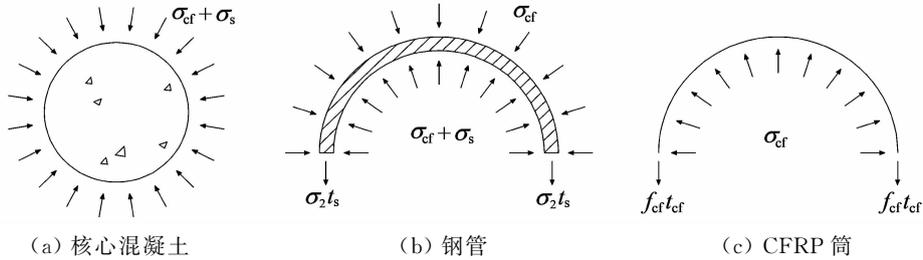


图 1 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱受力简图

3 试验结果

本文对 9 个轴心受压构件进行了试验. 试件主要参数为: 核心混凝土强度为 C30 级, $f_{ck} = 0.67 f_{cu} = 21.44 \text{ MPa}$, 钢管屈服强度 $f_y = 210 \text{ MPa}$, CFRP 抗拉强度 $f_{cf} = 3\,400 \text{ MPa}$, 其他参数及试验值 N_u^t 和计算值 N_u^c 见表 1. 加载制度为分级加载, 试验后的试件如图 2 所示.

表 1 计算值和试验值的比较

试件编号	D/mm	d _c /mm	t _s /mm	t _{cf} /mm	D/t	ξ _s	ξ _{cf}	N _u ^c /kN		N _u ^t /kN	(9) 式 N _u ^c /kN
								文献[1]	(9) 式		
Y-12-0	221.4	219	1.2	0	184.5	0.241	0	1 196.3	1 151.2	1 320	0.872
Y-12-1	221.4	219	1.2	0.167	184.5	0.241	0.498	2 000.2	1 941.4	1 988.4	0.976
Y-12-2	221.4	219	1.2	0.334	184.5	0.241	0.997	2 805.8	2 718.8	2 749.4	0.989
Y-14-0	221.8	219	1.4	0	158.4	0.282	0	1 262.5	1 216.9	1 550	0.785
Y-14-1	221.8	219	1.4	0.167	158.4	0.282	0.499	2 068.0	1 999.7	1 980.4	1.010
Y-14-2	221.8	219	1.4	0.334	158.4	0.282	1.000	2 876.8	2 763.0	2 827.4	0.977
Y-18-0	222.6	219	1.8	0	123.6	0.363	0	1 393.2	1 319.9	1 648	0.801
Y-18-1	222.6	219	1.8	0.167	123.6	0.363	0.501	2 202.0	2 083.5	2 130.4	0.978
Y-18-2	222.6	219	1.8	0.334	123.6	0.363	1.003	3 012.5	2 852.3	2 908.7	0.981



图 2 试验后试件

分析表 1 表明: 当双层粘贴 CFRP 时, 即 ξ_s/ξ_{cf} 分别为 0.242、0.282 和 0.362 时, 文献[1]的计算结果要明显高于试验值, (9) 式的计算结果更为合理. 当单层粘贴 CFRP 时, 即 ξ_s/ξ_{cf} 分别为 0.484、0.565

和 0.725 时, ν 的折减效应不明显, (9) 式与文献[1] 中计算式的计算结果相差很小, 均可使用。

图 3 为相应构件中截面的荷载-环向应变曲线 ($P-\epsilon_{\theta}$ 曲线). 由图可见, 钢管和 CFRP 的环向应变基本一致, 表明两种材料在环向可协同工作, 验证了基本假定 4).

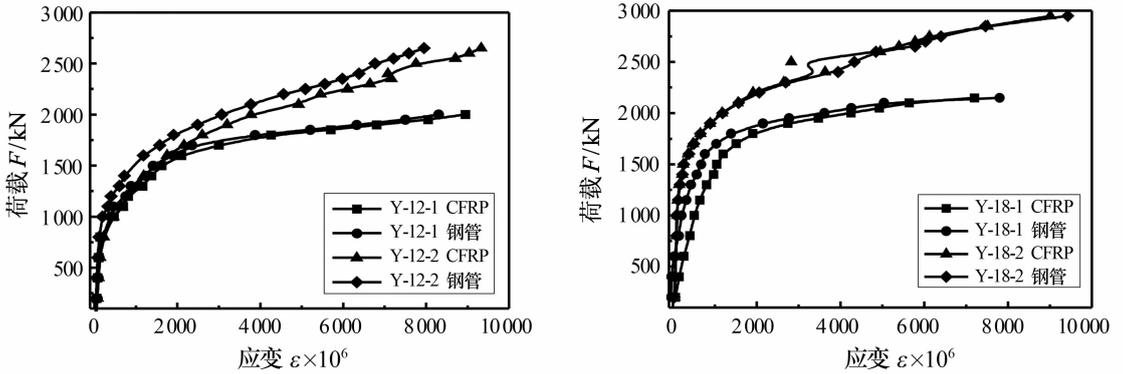


图 3 荷载-环向应变曲线

4 结论

本文基于合理的 CFRP 筒、钢管和核心混凝土在极限状态时的应力状态的假设, 采用极限平衡法并运用 MatLab 运算工具, 推导出钢管壁厚在 2 mm 以下、径厚比大于 120 时的 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的承载力计算表达式, 结论如下: ① 假定 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱中钢管的轴向应力 $\sigma_1 = 0$, 钢管处于环向受拉和径向受压的双向受力状态, 本文推导出的 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的极限承载力计算表达式的计算结果与试验结果吻合良好; ② 本文给出的计算表达式适用于以 CFRP 为套箍指标主导的 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土, 即 $\xi_s < 0.85\xi_{cf}$ 时的 CFRP-超薄壁圆钢管混凝土轴压短柱的极限承载力的计算. 对计算式的分析结果表明: 式中 ξ_s 比 ξ_{cf} 越小, ν 值也相应地越小, ξ_s 被折减得越多。

参考文献:

- [1] 王庆利, 赵春雷, 张海波, 等. CFRP-钢管砼轴压短柱承载力的简化计算[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(6): 612-615.
- [2] 张常光, 赵均海, 冯洪波. CFRP-钢管混凝土轴压短柱承载力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(增刊 2): 82-85.
- [3] 刘凇, 王庆利, 谭鹏宇. 圆 CFRP 钢管混凝土轴压短柱承载力指标[J]. 钢结构, 2008(增刊): 157-160.
- [4] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 35-54.
- [5] 顾威, 赵颖华, 孙国帅. CFRP-钢管混凝土轴压短柱的强度计算[J]. 工业建筑, 2007, 37(4): 42-44.
- [6] 王庆利, 王金鱼, 张永丹. CFRP-钢管砼轴压短柱受力性能分析[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 102-105.
- [7] 刘朝. 钢管约束高强混凝土短柱轴压承载力分析[D]. 长安大学, 2012.
- [8] 张鸿梅, 李欣, 金振宇. 碳纤维加固混凝土柱粘贴方法的试验研究[J]. 延边大学学报: 自然科学版, 2006, 32(4): 285-288.
- [9] 张永丹. CFRP-圆钢管混凝土偏压柱承载力回归分析[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2011, 13(4): 4-8.
- [10] Wang Y C, Restrepo J I. Investigation of concentrically loaded reinforced columns confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets[J]. Structure Journal, 2001, 98(3): 377-385.