

CFRP- 钢管混凝土核心轴压短柱的承载力研究

鞠欢¹ 汤莹¹ 张常光²

(1. 靖江市建筑设计院有限公司, 江苏靖江 214500; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 在统一强度理论和基本假定的基础上, 考虑 CFRP- 钢复合管对核心区混凝土的侧向约束和外围钢筋混凝土套筒对极限承载力的贡献, 推导 CFRP- 钢管混凝土核心轴压短柱的极限承载力公式。通过与文献中试验结果进行比较, 验证理论公式的正确性, 并进一步分析总套箍指标、钢管的套箍指标和 CFRP 筒的套箍指标对承载力的影响, 为 CFRP- 钢管混凝土核心轴压短柱的极限承载力分析提供了一定的理论依据。

关键词: 统一强度理论; CFRP- 钢管混凝土核心柱; 极限承载力; 套箍指标

RESEARCH ON BEARING CAPACITY OF CONCENTRICALLY LOADED STUB COLUMNS REINFORCED BY CONCRETE FILLED CFRP-STEEL TUBE

Ju Huan¹ Tang Ying¹ Zhang Changguang²

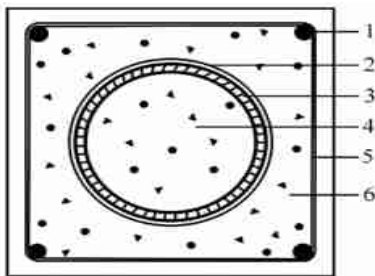
(1. Jingjiang Architectural Design Co. Ltd, Jingjiang 214500, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on unified strength theory and some essential suppositions, the ultimate bearing capacity formula of concentrically compressed stub columns reinforced by concrete filled circular CFRP-steel tube is deduced, considering the restriction of CFRP-steel tube to inner concrete and vertical bearing capacity of outer reinforced concrete. The results of the proposed formula are found in good agreement with experiment results. In the last, the effects of the total confinement factor, confinement factor of steel tube and confinement factor of CFRP on the ultimate bearing capacity are analyzed.

Keywords: unified strength theory; concentrically columns of concrete-filled CFRP-steel tube; ultimate bearing capacity; confinement factor

CFRP(carbon fiber reinforced polymer/ plastic, 碳纤维增强聚合物/ 塑料) - 钢管混凝土核心柱是指在圆 CFRP- 钢管混凝土柱^[1] 的外围浇筑钢筋混凝土的构件, 其截面如图 1 所示。与筒体内填混凝土结构^[2-3] 的受力原理相似, 都是利用外部套管(筒)与核心混凝土之间的受力特点, 使核心混凝土抗压强度大幅度提高, 以提高构件的承载力, 作为主要承受压力的构件。



1—纵筋; 2—CFRP 筒; 3—钢管; 4—核心混凝土;
5—箍筋; 6—外围混凝土

图 1 CFRP- 钢管混凝土核心柱截面

Fig. 1 Section of columns of concrete-filled CFRP-steel tube

但是筒体内填混凝土结构也有一些不足, 因此有学者研制了钢管混凝土核心柱^[4] 并在许多工程实践中取得成功, 与

钢管混凝土柱相比, 其在以下几方面得以改进: 增加结构刚度和延性; 容易做到强剪弱弯; 简化节点区的构造等。

在统一强度理论和假设的基础上, 本文考虑 CFRP- 钢复合管对核心区混凝土的侧向约束和外围钢筋混凝土套筒对极限承载力的贡献, 推导 CFRP- 钢管混凝土核心轴压短柱极限承载力表达式。通过与文献[1] 的试验结果比较, 验证了理论公式的正确性, 为此类构件承载力分析提供了一定的理论依据。

1 统一强度理论

1991 年俞茂宏教授考虑作用于双剪单元体上的两个较大切应力及其面上的正应力, 建立了一种全新的考虑 σ_2 影响的统一强度理论, 能十分灵活地适用于各种不同特性的材料, 其数学表达式为^[5]:

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_1$$
$$\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1a)$$

第一作者: 鞠欢, 男, 1983 年 10 月出生, 助理工程师。

E-mail: 1983ju@163.com

收稿日期: 2008- 10- 07

$$F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_1$$

$$\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1b)$$

$$a = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad b = \frac{(1+\alpha)\tau_s - \sigma_1}{\sigma_1 - \tau_s}$$

式中: σ_1 、 σ_c 、 τ_s 分别为材料的拉伸、压缩、剪切极限强度; α 为材料的拉压比, 对于韧性金属材料一般为 0.77~1.0, 脆性金属材料为 0.33~0.77, 岩土类材料一般小于 0.5; b 为在统一强度理论中引进的一个反映中间主切应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的参数, $0 \leq b \leq 1$ 。

2 基本假定

参考文献[1, 3, 5], 在分析计算中, 作如下假定:

1) CFRP 筒为薄膜套筒, 分别采用 JGN-C 建筑结构粘合剂和 JGN-P 建筑结构粘合剂作为粘浸胶和底胶, 纤维方向为环向, 故可以只考虑其沿纤维方向的拉应力, 而不考虑其对竖向承载力的贡献, 并设断裂之前为线弹性。

2) 钢管处于两压一拉的三向应力状态。由于钢管壁较薄, 一般均满足 $D/t_s \gg 20$ (D 为钢管外径), 因此可视为薄壁钢管, 近似认为钢管的径向应力为零。

3) 核心混凝土处于 $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 的三向受压状态, 根据统一强度理论推得其轴向抗压强度 f'_c 与侧向约束 σ_r 之间具有线性关系^[5]:

$$f'_c = f_{ck,i} + k\sigma_r \quad (2)$$

式中: $f_{ck,i}$ 为 $\sigma_r = 0$ 时核心混凝土轴心抗压强度标准值; $k = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$, φ 为核心混凝土的内摩擦角, 对钢管混凝土 $k = 3.0 \sim 4.0$, 常取 3.6^[2] 和 4.0^[4], 具体值可由试验确定。当 k 取 4.0 和 3.6 时, φ 分别为 36.87° 和 34.42°。

4) 在构件达到极限承载力时, 外围混凝土已被压碎并大块脱落, 故只考虑其竖向承载力而不考虑对核心混凝土提供的侧向约束。

5) 由于在外围钢筋混凝土中, 箍筋一般是按构造配筋的, 故不考虑其对周围混凝土的约束作用。

6) 以 CFRP 筒的破坏和外围混凝土压碎为 CFRP-钢管混凝土核心柱的承载力极限状态。

3 极限承载力

因极限承载力不受变形历史的影响, 故可用极限平衡法求解。

设 σ_{rs} 、 σ_{rf} 分别为钢管和 CFRP 筒对核心混凝土提供的侧压力, 由于 $d_c \gg t_s$, 所以用 d_c 近似替代 $d_c + 2t_s$ 。对于钢管和 CFRP 筒, 由材料力学知:

$$\sigma_{rs} = \frac{2t_s f_y}{d_c} \quad \sigma_{rf} = \frac{2t_f f_f}{d_c} \quad (3)$$

式中: d_c 为核心混凝土的直径; t_s 、 t_f 分别为钢管的壁厚、CFRP 筒的壁厚; f_y 、 f_f 分别为钢材的屈服强度、CFRP 筒沿纤维方向的极限抗拉强度。

将式(3)代入式(2), 得:

$$f'_c = f_{ck,i} + k(\sigma_{rs} + \sigma_{rf}) \quad (4)$$

根据基本假定, CFRP-钢管混凝土核心轴压短柱的极限承载力为:

$$N_u = N_{cs,o} + N_s + N_{c,i} \quad (5)$$

式中: $N_{cs,o}$ 为外围钢筋混凝土的极限承载力; N_s 为钢管的极限承载力; $N_{c,i}$ 为核心混凝土的极限承载力。

$$N_{cs,o} = \left[bh - \frac{\pi}{4}(d_c + 2t_s + 2t_f)^2 \right] f_{ck,o} + (f'_y - f_{ck,o}) A'_s \quad (6)$$

式中: b 、 h 分别为柱截面的宽和高; $f_{ck,o}$ 为外围混凝土抗压强度标准值; f'_y 、 A'_s 分别为竖向主筋的抗压强度、横截面积。

$$N_s = A_s f_y = \pi d_c t_s f_y$$

$$N_{c,i} = \frac{\pi d_c^2}{4} [f_{ck,i} + k(\sigma_{rs} + \sigma_{rf})] \quad (7)$$

将式(3)代入式(7), 再将式(6)和式(7)代入式(5), 得 CFRP-钢管混凝土核心轴压短柱的极限承载力为:

$$N_u = A_{c,o} f_{ck,o} + (f'_y - f_{ck,o}) A'_s + \left(1 + \frac{k}{2} \right) A f_y + \frac{k}{2} A f_f + A_{c,i} f_{ck,i} \quad (8)$$

其中 $A_{c,o} = bh - \pi(d_c + 2t_s + 2t_f)^2/4$; $A_s = \pi d_c t_s$;

$$A_f = \pi d_c t_f; \quad A_{c,i} = \pi d_c^2/4$$

式中: $A_{c,o}$ 、 A_s 、 A_f 、 $A_{c,i}$ 分别为外围钢筋混凝土、钢管、CFRP 筒、核心混凝土的近似横截面积。

4 试验校核和参数分析

4.1 试验校核

取文献[1]中的试验数据, 用本文所推导的式(8), 分别取 $k = 3.6$ 和 4.0 来计算 N_u , 计算比较结果见表 1。文献[1]共 12 个试件, $b = h = 200$ mm, $f_{ck,i} = 33.7$ MPa, $f_{ck,o} = 36.85$ MPa, 4 根 10 号主筋 $f'_y = 337$ MPa, $A'_s = 314$ mm², $f_f = 1260$ MPa, 试件其他参数见表 1。其中 D 为钢管外径, N_1 为文献中的试验结果。

从表 1 可以看出, 本文计算方法所得结果与试验实测值比较吻合, 验证了理论公式的正确性。并且随着 k 的增大, 即核心混凝土内摩擦角 φ 的增大, 极限承载力 N_u 逐渐增大。当 $k = 3.6$ 时, N_u/N_1 的平均值为 1.02, 均方差为 0.093 22; 当 $k = 4.0$ 时, N_u/N_1 的平均值为 1.05, 均方差为 0.080 97。

4.2 参数分析

设 $\xi_s = A_s f_y / (A_{c,i} \cdot f_{ck,i})$ 为钢管的套箍指标, $\xi_f = A f_f / (A_{c,i} f_{ck,i})$ 为 CFRP 筒的套箍指标, 则 $\xi = \xi_s + \xi_f$ 为总的套箍指标。总套箍指标 ξ 对承载力的影响, 如图 2 所示。

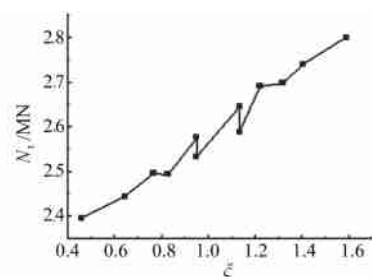


图 2 承载力与 ξ 之间的关系

Fig. 2 Relations between bearing capacity and ξ

表 1 文献试验数据与本文计算结果的分析

Table 1 Analysis of literature test results and calculation results in the paper

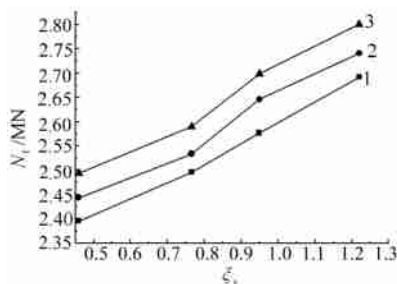
试件编号	f_c/MPa	D/mm	t_s/mm	t_f/mm	N_u/kN		N_u/kN	N_u/N_t	
					$k=3.6$	$k=4.0$		$k=3.6$	$k=4.0$
0-1.5	350	127	1.5	0	2 034	2 075	2 395	0.85	0.87
0-2.5	350	129	2.5	0	2 402	2 470	2 495	0.89	1.01
0-3.5	310	131	3.5	0	2 617	2 702	2 576	0.96	1.08
0-4.5	310	133	4.5	0	2 942	3 050	2 691	0.93	1.22
1-1.5	350	127	1.5	0.167	2 179	2 237	2 443	1.02	0.87
1-2.5	350	129	2.5	0.167	2 547	2 632	2 533	1.01	1.04
1-3.5	310	131	3.5	0.167	2 763	2 864	2 645	1.04	1.08
1-4.5	310	133	4.5	0.167	3 087	3 212	2 740	1.04	1.24
2-1.5	350	127	1.5	0.334	2 325	2 398	2 493	1.09	0.89
2-2.5	350	129	2.5	0.334	2 693	2 794	2 589	1.08	1.04
2-3.5	310	131	3.5	0.334	2 908	3 025	2 698	1.13	1.10
2-4.5	310	133	4.5	0.334	3 232	3 373	2 800	1.15	1.20

由图 2 可见,总套箍指标 ξ 越大,CFRP-钢管混凝土核心轴压柱的极限承载力越大。但提高幅度不大,说明通过提高 ξ 来提高承载力效果不显著。

均提高 295.1 kN;钢管内径每增大 1 mm,极限承载力平均提高 316.3 kN。

套箍指标 ξ_s 和 ξ_f 对承载力的影响,如图 3 和图 4 所示。

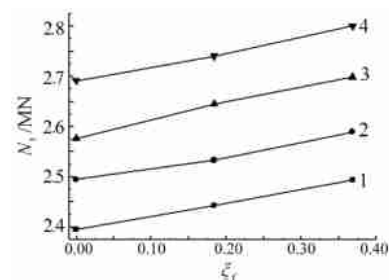
5 结论



1—0层CFRP; 2—1层CFRP; 3—2层CFRP

图 3 承载力与 ξ_s 之间的关系

Fig. 3 Relations between bearing capacity and ξ_s



1— $t_s = 1.5 \text{ mm}$; 2— $t_s = 2.5 \text{ mm}$; 3— $t_s = 3.5 \text{ mm}$; 4— $t_s = 4.5 \text{ mm}$

图 4 承载力与 ξ_f 之间的关系

Fig. 4 Relations between bearing capacity and ξ_f

由图 3 和图 4 可见,在其他条件相同的情况下, ξ_s 或 ξ_f 越大,CFRP-钢管混凝土核心轴压短柱的承载力越高,且基本呈线性关系,但提高幅度不大。由式(8)计算知,当 $k=3.6$ 时,粘贴一层 CFRP,极限承载力平均提高 147.5 kN,两层时平

1) 在假设的基础上,利用极限平衡法推导了 CFRP-钢管混凝土核心轴压短柱的极限承载力公式。

2) 通过与文献试验资料的比较,验证了理论计算公式的正确性,为此类构件的极限承载力分析提供了一定的理论依据。

3) 随着 k 的增大,即核心混凝土内摩擦角 φ 的增大,极限承载力逐渐增大。

4) 总套箍指标 ξ 增加对提高承载力的效果不显著,说明选择合适的 ξ 对 CFRP-钢管混凝土核心柱的经济性和承载力二者要兼顾。

5) 在其他条件相同的情况下,钢管的套箍指标 ξ_s 或 CFRP 筒的套箍指标 ξ_f 越大,CFRP-钢管混凝土核心轴压短柱的承载力越高,且基本呈线性关系,但提高幅度不大。

参考文献

[1] 王庆利,关崇伟,路建方,等. CFRP-钢管混凝土组合短柱的轴压试验[J]. 沈阳建筑工程学院学报:自然科学版,2004,20(3): 178-182.

[2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003:1-58.

[3] 顾威,赵颖华,尚东伟. CFRP-钢管混凝土轴压短柱承载力分析[J]. 工程力学,2006,23(1):149-153.

[4] 林立岩,张春良. 沈阳富林广场的钢管混凝土组合柱结构[J]. 建筑钢结构进展,2000,2(4):48-53.

[5] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,2003.

[6] 谭克锋,蒲心诚,蔡绍怀. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载力的研究[J]. 建筑结构学报,1999,20(1):10-15.

勘误:《工业建筑》2008年第38卷第9期中,第51页“污水厂建筑中的‘片’‘面’设计”文章第一作者的性别应为“女”。特此更正。