

方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土 方柱轴心受压承载力

张瑞菊¹, 代岩²

(1. 四川省机场集团有限公司, 四川 成都 610202; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:采用统一强度理论,对方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱的轴心受压机理和约束模型进行分析,考虑方钢管材料的特点及对混凝土的约束作用,提出了方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱的轴心受压承载力计算公式,将计算公式与文献试验结果进行对比,验证了该理论公式的正确性,并得出统一强度理论参数 b 、钢管厚度 t 、参数 k 等因素对承载力的影响规律。该结果为此类方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力的计算提供了一定的理论依据。

关键词:统一强度理论;钢筋混凝土方形截面柱;自密实混凝土;方钢管;复合加固

中图分类号:TU398.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)04-0020-06

0 引言

钢筋混凝土柱已在工程中广泛应用,但由于在设计、施工和长期使用中受到各种因素的影响,导致其承载力不足,常需要对其进行加固修复。目前,单一材料加固和多种材料复合加固是工程中采用较多的加固方法,国内外对这两种加固方法进行了大量的试验研究和理论分析,研究成果已在工程实际中得到广泛应用^[1-2]。对于采用钢管混凝土组合结构对钢筋混凝土柱进行加固的方法,国外较早地开展了研究^[3],研究表明该方法可以提高钢筋混凝土柱的承载力和延性等^[4]。在国内,李鹏^[5]、蔡健^[6]等对圆形截面钢套管加固方形截面混凝土柱进行试验研究,结果表明,外套钢管加固法能提高混凝土柱的承载力和延性。卢亦焱等^[7-9]在钢套管加固柱间隙采用自密实混凝土填塞,后浇混凝土均匀密实地充满整个钢管,且试件破坏时界面没有发生明显滑移,新旧混凝土黏结性能良好,并在试验的基础上提出复合加固钢筋混凝土圆形截面短柱的承载力计算式。文献^[10]通过对方钢管自密实混凝土加固方形截面柱进行试验,研究钢管壁厚、后浇混凝土强度和加载方式对加固柱力学性能的影响,并在试验的基础上提出外套方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方形截面柱的轴压承载力计算式。以上研究大多是从试验研究回归总结或简化计算得到加固柱承载力计算公式,缺乏理论依据,有的也没有考虑中间主应力的影响,缺少深入、系统的理论分析。

在文献^[10]的基础上,考虑方钢管截面形状的影响,将其约束效应等效为对核心混凝土的有效环向应力,采用统一强度理论分析核心混凝土有效约束区和非有效约束区,并引入混凝土强度折减系数^[11],考虑侧向约束减弱的影响,推导出方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方形柱轴心受压承载力计算公式,与文献试验数据进行比较验证,得出各参数对极限承载力的影响特性。

1 统一强度理论

统一强度理论是俞茂宏在1991年基于双剪强度理论,建立的一种考虑中间主应力的影响,并能适用于各种不同特性材料的双剪统一强度理论^[12],其表达式为

收稿日期:2016-06-17 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.04.04

作者简介:张瑞菊(1992-),女,硕士研究生,主要从事道路与铁道工程的研究。E-mail: zhangruiju2016@126.com

张瑞菊,代岩.方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(3):20-25.

$$\begin{cases} F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ_1, σ_2 和 σ_3 分别为 3 个主应力, 并以拉应力为正; $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c}$, 是材料的拉压强度比, σ_t 和 σ_c 分别为材料的拉伸强度和压缩强度; b 是一个反映中间主应力效应的材料参数, 也是反映不同强度理论参数。

2 轴心受压破坏机理

在轴向荷载作用下, 方钢管自密实混凝土加固的钢筋混凝土柱的钢管、纵筋和核心混凝土直接承担荷载。试验研究表明^[10], 在加载初期, 试件处于弹性工作状态, 纵向变形均匀增长, 钢管的横向约束作用较小, 钢管和混凝土各自单独工作, 承载力主要由钢管和混凝土承担。随着加载的不断进行, 混凝土的横向变形加大, 钢管与混凝土之间产生径向压力, 混凝土处于三向受压应力状态。当荷载加载至极限荷载的 70%~80% 时, 试件的纵向变形加快, 试件中部附近钢管开始鼓曲并出现皱曲。加至极限荷载时, 试件鼓曲加剧, 钢管壁出现严重褶皱。试件破坏时, 新旧混凝土界面没有发生明显的滑移, 新旧混凝土黏结性能良好, 具有很好的延性。钢管壁较厚的试件钢管向外鼓曲严重, 沿高度方向甚至出现多处鼓曲; 钢管壁较薄的试件钢管壁褶皱严重, 焊缝位置有被撕裂的迹象。后浇混凝土强度的不同不会改变复合加固柱试件的破坏形态, 即使在钢管内填充高强混凝土的试件也表现出了良好的变形能力。

3 极限承载力

3.1 方钢管受力分析

对于方形截面, 通常是将其等效为圆形截面^[13], Varma et al^[14] 将方钢管对内部的核心混凝土的约束分为有效约束区和非有效约束区, 分界线为抛物线。Mader^[15] 通过有效面积的方法将非均匀约束转化为均匀约束, 即采用截面形状系数 k_e 将方钢管混凝土的非均匀侧向压力转化为圆形侧向压力, 其中截面形状系数 k_e 取为有效约束面积 A_e 与混凝土总面积 A_c 之比, 则方钢管的有效侧向压力 f_r 为

$$f_r = k_e \bar{f}_r \quad (2)$$

$$\bar{f}_r = \frac{2tf_\theta}{B-2t} \quad (3)$$

式中, $\bar{f}_r$ 为核心混凝土对方钢管内壁提供的平均侧压力; f_θ 为方钢管的环向应力; B 为方钢管的边长; t 为方钢管的厚度。

吴鹏^[16] 提出正多边形钢管任意边的约束混凝土模型及受力模型, 并引入约束均匀系数 m , 推导出截面形状系数计算公式为

$$k_e = 1 - \frac{8(1-m)tf_\theta}{B-2t} \quad (4)$$

极限状态时, 构件因环向屈服而破坏, 此时取 $f_\theta = f_s$, f_s 为钢管的屈服强度, 则有

$$k_e = 1 - \frac{8(1-m)tf_s}{B-2t} \quad (5)$$

式中, m 取 0~1, 来反映钢管对混凝土约束的均匀情况, m 越小约束越不均匀, m 越大约束越趋于均匀, 对正方形 m 取 0.4, 对圆形截面 m 取 1, 此时 $k_e = 1$ 。

将方钢管混凝土转化为圆钢管混凝土, 则有

$$\pi r_o^2 = B^2, \quad \pi r_i^2 = (B-2t)^2 \quad (6)$$

式中, r_o 为等效圆钢管混凝土的钢管外壁半径; r_i 为等效圆钢管混凝土的钢管内壁半径, $t' = r_o - r_i$ 为等效圆钢管混凝土的钢管壁厚。

等效圆钢管受到混凝土提供的均匀径向压应力 σ_r , 环向拉应力 σ_θ , 轴向压应力 σ_z , 此时钢管的轴向压

应力小于环向拉应力,则有

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{r_i \bar{f}_r}{t}, \quad \sigma_2 = \sigma_r = -\bar{f}_r, \quad \sigma_3 = \sigma_z = f_z \quad (7)$$

式(7)满足式(1),对于钢材,拉压比 $\alpha \approx 1$,当钢管屈服时,取 $f_\theta = f_s$,代入式(1)得

$$f_z = \frac{2bt}{B-2t} f_s \quad (8)$$

则方钢管的承载力为

$$N_{s1} = A_{s1} f_z = (4Bt - 4t^2) \frac{2bt}{B-2t} f_s \quad (9)$$

3.2 核心混凝土轴压强度

由文献[17]知,由于方钢管对核心混凝土的约束,使得核心混凝土处于三向受压的应力状态, $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$,满足式(1)的条件,代入得

$$\sigma_1 - \alpha \sigma_3 = f_t \quad (10)$$

式中, f_t 为混凝土抗拉强度, $f_t = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$, φ 为混凝土的内摩擦角, c 为混凝土的粘聚力; $f_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$, 本文采用棱柱体抗压强度,与其立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 的比值为 0.67。令 $k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{f_c}{f_t} = \frac{1}{\alpha}$,并按习惯一

般取压为正,拉为负得

$$\sigma_3 = f_c + k \sigma_1 \quad (11)$$

式中, σ_3 为核心混凝土的轴向压应力; σ_1 为碳纤维布对混凝土的有效约束应力, $\sigma_1 = f_{re}$ 。

式(11)与统一强度理论参数值 b 无关,这是由于中间主应力与最大主应力相等。文献[17]指出,公式(11)中 k 值大小与混凝土内摩擦角有关,根据混凝土三向受压状态可知,侧压力小则内摩擦角大,侧压力大则内摩擦角小,其大小具体值由试验确定,一般取 1.0~7.0 之间。

设等效钢管混凝土中,自密实混凝土受到钢管的紧箍力为 P_1 ,新旧混凝土界面压力为 P_2 ,则有 $P_1 = f_r$,由文献[10]试验现象可知,复合加固柱极限状态时新旧混凝土无滑移。由新旧混凝土变形协调,可得^[7]

$$\frac{P_2}{f_{c2}} = \frac{P_1}{f_{c1}} \quad (12)$$

式中, f_{c1} 和 f_{c2} 分别为新旧混凝土的棱柱体抗压强度。

由于考虑混凝土的有效约束与非有效约束很困难,本文采用混凝土的强度折减系数^[11] $\gamma_u = 1.67 D_c^{-0.112}$,来考虑侧向约束的减弱,其中 D_c 取方形截面柱的圆柱等效直径 D 。则外围自密实混凝土的轴压强度为

$$f_{\alpha} = f_{c1} + \gamma_u k P_1 \quad (9)$$

核心旧混凝土的轴压强度为

$$f_{ic} = f_{c2} + \gamma_u k P_2 \quad (10)$$

3.3 轴心受压承载力

方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力 N 包括 3 部分,其一为混凝土所提供的承载力 N_c ,其二为钢管所提供的承载力 N_{s1} ,其三为纵向钢筋所提供的承载力 N_{s2} 。其中

$$N_c = f_{\alpha} A_{\alpha} + f_{ic} A_{ic} \quad (12)$$

$$N_{s1} = f_z A_{s1} \quad (13)$$

$$N_{s2} = f_y A_{s2} \quad (14)$$

式中, A_{α} 和 A_{ic} 为外围自密实混凝土面积和核心旧混凝土面积; A_{s1} 为方钢管面积; A_{s2} 为纵向钢筋面积; f_y 为钢筋屈服强度。

文献[9]指出,混凝土材料利用率 α' 与极限状态时钢管的环向应力有直接关系,极限状态时的环向应

力越大,对核心混凝土的约束越强,利用率越高,混凝土材料的利用率 α' 与套箍率 ξ 有关,根据试件承载力反算出材料利用率 α' ,并拟合其关系式为: $\alpha'=1+0.020\ 05\xi^{-1.008\ 62}$ ($0.364\leq\xi\leq0.696$)。

则方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力计算公式为

$$N = f_z A_{s1} + f_y A_{s2} + \alpha' (f_{c1} A_{c1} + f_{c2} A_{c2}) \quad (16)$$

将以上分析的各参数代入上述承载力计算式化简可得

$$N = \frac{8bt^2(B-t)}{B-2t} f_s + f_y A_{s2} + \alpha' \left(1 + \frac{\gamma_u k}{f_{c1}} k_e \frac{2tf_s}{B-2t} \right) (f_{c1} A_{c1} + f_{c2} A_{c2}) \quad (17)$$

当 $\gamma_u = k_e = 1$ 时,对方钢管的边长和厚度分别做简单数学变换,则式(17)退化为圆钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形截面短柱轴压承载力计算公式

$$N = \frac{2b\pi(t')^2(D-t')}{D-2t'} f_s + f_y A_{s2} + \alpha' \left(1 + \frac{k}{f_{c1}} \frac{2t'f_s}{D-2t'} \right) (f_{c1} A_{c1} + f_{c2} A_{c2}) \quad (18)$$

式中, D 为圆钢管的外直径; t' 为圆钢管的厚度;材料利用率 α' 根据试件承载力反算,并拟合其关系式为: $\alpha'=1+0.418\xi^{-1.010\ 57}$ ($0.407\leq\xi\leq0.806$)。

4 算例分析

4.1 计算公式的验证

方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力采用式(17)计算,圆钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形截面短柱轴压承载力采用式(18)计算,取 $k=3.5$,将其代入计算公式进行计算,所计算出的承载力 N 与文献[10]、[8]试件试验值、文献公式计算值进行比较,将比较结果列于表 1,其中文献[10]中试件为方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱,文献[8]中试件为圆钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形截面短柱。

从表 1 中可以看出,所提出公式的计算值与实测试验数值之比的平均值为 1.01,与文献[10]、[8]的公式计算值相比,更接近于实测试验值。可见本文的计算公式所得结果比较符合试验,验证了本文公式的正确性。

表 1 计算结果与试验结果对比

编号	$B(D)/$ mm	$t(t')/$ mm	$b'(D')/$ mm	$f_{c1}/$ MPa	$f_{c2}/$ MPa	$f_s/$ MPa	$f_y/$ MPa	$N/$ kN	$N_e/$ kN	$N_w/$ kN	$N/$ N_e	$N_w/$ N_e	数据来源
SRC3-C50-A	220	2.8	150	34.91	21.84	296.3	384.2	2 453.99	2 445	2 435	1.00	1.00	文献[10]
SRC2-C50-A	220	1.78	150	34.91	21.84	307.1	384.2	2 217.74	2 217	2 204	1.00	0.99	
SRC4-C50-A	220	3.8	150	34.91	21.84	265.2	384.2	2 592.29	2 650	2 589	0.98	0.98	
SRC3-C40-A	220	2.8	150	32.70	21.84	296.3	384.2	2 420.47	2 320	2 372	1.04	1.02	
SRC3-C60-A	220	2.8	150	40.94	21.84	296.3	384.2	2 558.81	2 620	2 604	0.98	0.99	
FZ-2-C50-P2	219	1.8	154	35.23	22.00	390	365	2 251.32	2 265	2 161	0.99	0.95	文献[8]
FZ-3-C50-P2	219	3.25	154	35.23	22.00	352	365	2 932.58	3 029	2 571	0.97	0.85	
FZ-4-C50-P2	219	3.9	154	35.23	22.00	342	365	3 251.09	3 274	2 739	0.99	0.84	
FZ-3-C50-P1	219	3.25	154	35.23	22.00	352	365	2 932.58	2 908	2 571	1.01	0.88	
FZ-3-C50-P3	219	3.25	154	35.23	22.00	352	365	2 932.58	2 783	2 571	1.05	0.92	
FZ-3-C40-P2	219	3.25	154	28.82	22.00	352	365	2 989.70	2 768	2 547	1.08	0.92	
FZ-3-C60-P2	219	3.25	154	41.04	22.00	352	365	2 924.34	2 914	2 623	1.00	0.90	

表中: N 为本文公式计算值, N_e 为实测试验值, N_w 为文献公式计算值, b' 和 D' 分别为原柱边长和直径。

4.2 影响因素

由公式(17)知,当 f_{c1} 、 f_{c2} 、 f_s 、 f_y 及截面尺寸确定时,方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力与统一强度参数 b 、参数 k 、钢管壁厚 t 有关,为研究其影响,取文献[10]中试件 SRC3-C50-A 的试验参数进行计算,分别研究其在不同的统一强度参数 b 、钢管壁厚 t 、参数 t 下,方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力的变化情况。

当统一强度参数 b 从 0~1 变化,钢管壁厚 t 从 1.78~3.8 变化时,对应承载力的变化如图 1 所示。

由图 1 可以看出,当其它参数一定时,随着参数 b 的提高,方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力随之增加,说明考虑参数 b 即中间主应力效应及相应面上正应力对材料破坏的影响,可以更充分发挥材料的强度。当其它参数一定时,随着钢管壁厚 t 的提高,方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力 N 增加幅度较大,说明钢管壁厚 t 的影响显著,这与文献[10]的研究结论一致:随着外套钢管的壁厚增大,套箍系数越大,钢管对混凝土的约束作用越强,试件承载力越大。

当参数 k 从 1.5~3.5 变化时,对应承载力的变化如图 2 所示。由图 2 可以看出,当其它参数一定时,随着参数 k 的提高,方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力 N 随之呈线性增加。参数的增大表明核心混凝土的内摩擦角 φ 的增大,混凝土的抗拉强度增大。

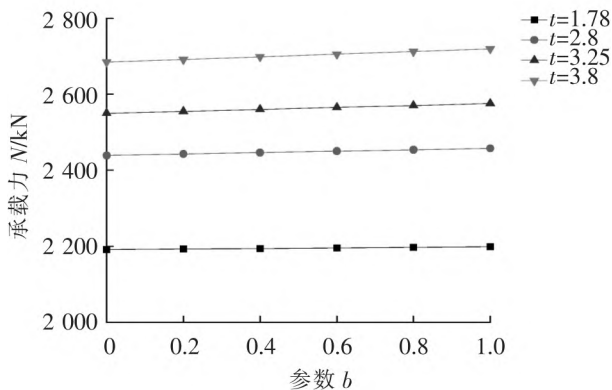


图 1 N 与 b 、 t 的关系

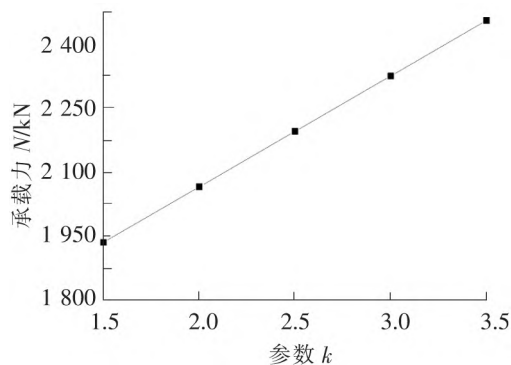


图 2 N 与 k 的关系

5 结论

(1)采用统一强度理论,推导出方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方柱轴心受压承载力的计算公式,并扩展得到圆钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形截面短柱轴压承载力计算公式,将理论计算结果与相关文献的试验结果做比较,验证了公式的正确性。

(2)随着统一强度理论参数 b 的提高,承载力 N 随之增加,说明考虑参数 b 即中间主应力效应及相应面上正应力对材料破坏的影响,可以更充分发挥材料的强度;随着钢管壁厚 t 的提高,承载力 N 增加幅度较大,说明随着外套钢管的壁厚增大,套箍系数越大,钢管对混凝土的约束作用越强。

(3)随着参数 k 值的增大,即随着核心混凝土内摩擦角 φ 的增大,承载力增大。

参 考 文 献

- [1] Ozbakkaloglu T, Lim J C. Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model[J]. Composites Part B Engineering, 2013, 55(12): 607-634.
- [2] 卢亦焱, 史健勇, 赵国藩. 碳纤维布和角钢复合加固轴心受压混凝土柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 18-23.
- [3] Priestley M J N. Design of seismic retrofit measures for concrete and masonry structures[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(6): 365-378.
- [4] Sezen H, Miller E A. Experimental evaluation of axial behavior of strengthened circular reinforced-concrete columns [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2011, 16(2): 238-247.
- [5] 李鹏, 易伟建. 钢套管加固钢筋混凝土柱的轴心受压试验研究[J]. 建筑技术开发, 2007, 34(1): 24-27.
- [6] 徐进, 蔡健. 圆形钢套管加固混凝土柱偏心受压性能研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(8): 14-17.
- [7] 卢亦焱, 龚田牛, 张学朋, 等. 外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形截面短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 121-128.
- [8] 薛继峰, 卢亦焱, 梁鸿俊, 等. 钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形短柱承载力研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2014, 47(6): 769-773.

- [9] 卢亦焱, 薛继锋, 张学朋, 等. 外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土中长圆柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 100-107.
- [10] 卢亦焱, 梁鸿俊, 李杉, 等. 方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方形截面短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7): 43-50.
- [11] Sakino K, Nakahara H, Morino S, et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.
- [12] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [13] 查晓雄, 余敏, 黎玉婷, 等. 实空心钢管混凝土轴压承载力的统一理论和公式[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(1): 1-7, 42.
- [14] Varma A H, Sause R, Ricles J M, et al. Development and validation of fiber model for high strength square concrete filled steel tube beam-columns[J]. American Concrete Institute Structural Journal, 2005, 102(1): 73-84.
- [15] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [16] 赵均海, 吴鹏, 张常光. 多边形空心钢管混凝土短柱轴压极限承载力统一解[J]. 混凝土, 2013(10): 38-43.
- [17] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

Bearing Capacity of Square RC Columns Strengthened with Self-compacting Concrete Filled Square Steel Tubes Under Axial Load

Zhang Ruiju¹, Dai Yan²

(1. Sichuan Province Airport Group Co. Ltd, Chengdu 610202, China;

2. School of Civil Engineering, Changan University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Using the unified strength theory, with material characteristic of square steel tube and their confinement to the concrete taken into consideration, the performing characteristics and confinement mechanism of the confined columns are studied. Based on the above analysis, the formulae for ultimate bearing capacity of square RC columns strengthened with self-compacting concrete filled square steel tubes under axial load are deduced. The comparisons between the calculation results and experiment results are carried out and the results show that the theory formulae are correct and viable. The effects of the parameters are considered in the theoretic analysis. The results offer the theoretical foundation for the research of the square RC columns strengthened with self-compacting concrete filled square steel tubes under axial load.

Key words: unified strength theory; square RC column; self-compacting concrete; square steel tube; combination strengthening