

引文格式:杨 坤,胡阳阳,孙珊珊,等.多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱轴压承载力计算[J].建筑科学与工程学报,2025,42(2):58-66.
YANG Kun, HU Yangyang, SUN Shanshan, et al. Calculation of axial compression bearing capacity of concrete square columns confined by multi-spiral composite stirrups[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(2): 58-66.

DOI:10.19815/j.jace.2023.03027

多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱轴压承载力计算

杨 坤¹,胡阳阳²,孙珊珊¹,高晓敏³,吉康乐¹

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061; 2. 西安建筑科大工程技术有限公司,陕西 西安 710055;
3. 中建六局土木工程有限公司,天津 300457)

摘要:为研究多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱的轴心受压承载力,对7根该类型短柱进行了轴心受压试验,分析了箍筋间距、箍筋形式、箍筋强度对其轴压性能的影响。考虑到矩形外箍、圆螺旋内箍以及外围圆螺旋箍内的混凝土圆柱体对核心混凝土的多重约束作用,对多螺旋复合箍筋的约束机理进行了分析。基于双剪统一强度理论,推导出多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱的轴心受压承载力计算公式,并与试验结果、已有规范及学者提出的计算公式进行对比。结果表明:随着箍筋间距的减小或者箍筋强度的提高,多螺旋箍筋约束混凝土试件的强度和延性均提高;多螺旋复合箍筋的约束效果好于传统井字形复合箍筋,且五螺旋复合箍筋的约束效果好于四螺旋复合箍筋;提出的轴压承载力计算公式精度较高,验证了统一强度理论在多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱轴压承载力计算中的适用性;相比矩形外箍,圆螺旋内箍的间距与强度对约束混凝土方柱轴压承载力提高幅度的影响更为明显。

关键词:多螺旋复合箍筋;双剪统一强度理论;轴压承载力;试验研究;理论计算方法

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)02-0058-09

Calculation of axial compression bearing capacity of concrete square columns confined by multi-spiral composite stirrups

YANG Kun¹, HU Yangyang², SUN Shanshan¹, GAO Xiaomin³, JI Kangle¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. XAUAT Engineering Technology Co., Ltd., Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. China Construction Sixth Engineering Bureau Civil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to study the axial compression bearing capacity of concrete square columns confined by multi-spiral composite stirrups, an axial compression experimental study including 7 short columns of this type was carried out. The effects of stirrup spacing, stirrup form and stirrup strength on the axial compression bearing capacity of the columns were discussed. Considering the multiple confinement effect of rectangular outer hoop, circular spiral inner hoop and the concrete cylinder surrounded by outer spiral stirrups on core concrete, the confinement mechanism of multi-spiral composite stirrup was analyzed. Based on the twin shear unified strength theory, the calculation formula of axial compression bearing capacity of concrete square

收稿日期:2023-03-07

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(51708035);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-177)

作者简介:杨 坤(1982-),女,工学博士,副教授,E-mail:yangkun8224@126.com。

通信作者:孙珊珊(1986-),女,工学博士,高级工程师,E-mail:sunjin1986123@163.com。

columns confined by multi-spiral composite stirrups was derived and compared with the test results, existing national regulation and the calculation formulas proposed by scholars. The results show that the strength and ductility of multi-spiral stirrup confined concrete specimens increase with the decrease of stirrup spacing or the increase of stirrup strength. The constraint effect of multi-spiral composite stirrups is better than that of traditional cross-shaped composite stirrups, and the constraint effect of five-spiral composite stirrups is better than that of four-spiral composite stirrups. The proposed formula for calculating axial compressive capacity is of high accuracy, which verifies the applicability of the unified strength theory in the calculation of axial compression bearing capacity of concrete square columns confined by multi-spiral composite stirrups. Compared with the rectangular outer hoop, the spacing and strength of the circular spiral inner hoop have a more obvious effect on the increase of axial compression bearing capacity of the confined concrete square column.

Key words: multi-spiral composite stirrup; twin shear unified strength theory; axial compression bearing capacity; experimental investigation; theoretical calculation method

Author resumes: YANG Kun(1982-), female, PhD, associate professor, E-mail: yangkun8224@126.com; SUN Shanshan(1986-), female, PhD, senior engineer, E-mail: sunjin1986123@163.com.

0 引 言

震害研究表明,改善钢筋混凝土柱的延性性能可以有效地缓解和防止柱的严重破坏^[1]。相对于圆形螺旋箍筋,传统矩形箍筋由于对核心混凝土的约束力分布不均匀,其约束效果大打折扣,且其生产与组装均需耗费大量人工和时间,因此亟需对其进行优化设计。同时,提高建筑结构的質量并简化施工过程是建筑行业的主要目标之一,近年来预制技术的发展为螺旋箍筋的生产和应用提供了便利。传统的螺旋箍筋技术主要应用于圆柱,因此国内外许多学者也一直在寻找对矩形柱(方柱)更加有效的多螺旋约束形式。

Tanaka 等^[2-3]首先提出了采用双联锁螺旋箍筋改善钢筋混凝土柱延性的设计方法,并通过对 3 根联锁螺旋柱的拟静力试验,验证了所提方法的有效性。Kim 等^[4]研究了在单轴载荷作用下具有双联锁螺旋箍筋试件的强度和变形能力,并提出了预测双联锁螺旋箍筋试件的峰值应力和峰值应变计算式。Correal 等^[5-7]设计了 6 个大型双联锁螺旋箍筋柱并进行了拟静力试验,分析了剪力水平、螺旋箍筋的距离和交叉长度对抗震性能的影响,并给出了评估塑性铰长度、侧向力与位移关系、抗剪能力等相关设计建议。Ou 等^[8]提出了一种针对长圆形桥柱的新型七螺旋箍筋形式,并对 4 根该类型柱进行了高剪切应力下的试验研究,结果表明该类型箍筋配置

的约束效果更好。针对目前建筑中矩形截面柱比圆形截面柱适用范围更广的现状,同时为了解决上述联锁螺旋箍筋形式在混凝土模板制造和组装方面的难题,尹衍樑等^[9-13]尝试将联锁螺旋箍筋的概念扩展到矩形(方形)柱中,对大量混凝土柱试件进行了轴压试验和拟静力试验,提出了一种新颖的五螺旋箍筋约束形式,而 Weng 等^[14-16]将五螺旋箍筋应用于型钢混凝土矩形(方形)柱中,并通过大量试验证明了其在此类应用中的有效性。唐琼等^[17-18]基于五螺旋箍筋试验数据建立有限元模型进行对比验证,分析影响因素并提出了五螺旋箍筋柱轴压承载力计算式。尽管上述形式的约束在承载能力和延性方面都有优势,但仍有制造困难、不经济、梁柱连接拥堵、施工复杂以及混凝土保护层厚度大等问题,难以在现有建筑中实施。于是 Jing 等^[19]提出了一种高强多螺旋横向加固(MTSTR)的约束形式,通过对 12 根该类试件的轴压试验研究发现,该配筋形式可以在不增加施工难度的情况下提高混凝土柱的抗压强度和延性。Li 等^[20-21]通过对试验数据的拟合,相继提出了 MTSTR 柱的本构模型和承载力计算公式。

综上所述,目前国内针对多螺旋复合箍筋约束混凝土柱的性能研究较少,且缺乏较为系统的理论研究。因此,本文通过 7 根该类型柱的轴压试验,对其强度和延性进行分析,并结合搜集的试验数据,引入双剪统一强度理论,对多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱的轴压承载力进行研究。

1 试验研究

1.1 试验概况

对 7 根多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱和 1 根井字形箍筋约束混凝土方柱进行了轴压试验^[22],试件的截面尺寸为 260 mm×260 mm,柱子高度为 750 mm。试验主要研究了箍筋形式、箍筋强度和间距 3 种变化因素对轴向性能的影响,其中箍筋形式如图 1 所示。绑扎时先将矩形外箍与纵筋绑扎成钢筋笼,再将圆螺旋内箍与矩形外箍绑扎在一起,截面中心的圆螺旋内箍与外围圆螺旋内箍绑扎在一起;箍筋的直径为 8 mm,强度分别为 412、685、919 MPa;箍筋间距分别为 30、50、70 mm。试件中的纵筋直径为 8 mm,屈服强度为 355 MPa;混凝土设计强度等级为 C30,其中试件 A-2、A-3、B-2 和 C 由于人为原因重新进行了浇筑,具体参数见表 1。

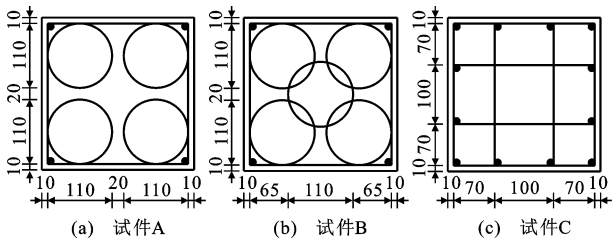


图 1 试件截面设计图(单位:mm)

Fig. 1 Design drawing of specimen section (unit:mm)

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	f_{cu}/MPa	箍筋			纵筋	
		D/mm	f_{yv}/MPa	s/mm	D/mm	f_y'/MPa
A-1	37.3	8	685	30	8	355
A-2	30.8	8	685	50	8	355
A-3	30.8	8	685	70	8	355
A-4	37.3	8	412	50	8	355
A-5	37.3	8	919	50	8	355
B-1	37.3	8	412	50	8	355
B-2	30.8	8	919	50	8	355
C	30.8	8	919	50	8	355

注: f_{cu} 为混凝土标准立方体抗压强度; D 为钢筋直径; f_{yv} 为箍筋屈服强度; s 为箍筋间距; f_y' 为纵筋屈服强度。

1.2 试验结果分析

图 2 为该试验中 8 根箍筋约束混凝土方柱的荷载-位移曲线。对比试件 A-1、A-2 和 A-3 可知,箍筋间距越大,峰值荷载及其位移的提高倍数越低,延性越差;对比试件 A-4 和 A-5 可知,箍筋强度越高,峰值荷载及其位移提高倍数越大,而试件 A-2 虽然箍筋强度较高,但由于混凝土强度低于前两者,最终

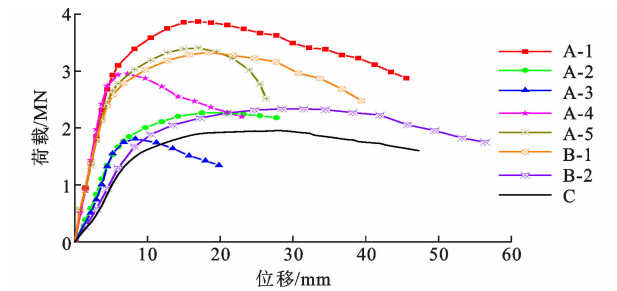


图 2 试件荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of specimens

峰值应力仍较低,此外试件 A-2 的曲线最平缓,屈服平台在 3 个试件中最长。对比试件 A-5、B-2 和 C 可知,多螺旋复合箍筋柱由于多重约束效应,其峰值荷载有明显的提高,但四螺旋复合箍筋柱的曲线下降段较陡,而五螺旋复合箍筋柱的曲线下降段更加平缓,位移提高倍数最大,延性更好。对比试件 A-4 和 B-1 可知,五螺旋复合箍筋柱的峰值荷载提高倍数更大,且峰值平台较长,曲线下降段更平缓。因此,多螺旋复合箍筋约束的约束效果好于井字形箍筋约束,且五螺旋复合箍筋约束好于四螺旋复合箍筋约束。

2 双剪统一强度理论

1991 年俞茂宏^[23]以双剪单元体和双剪屈服准则为基础,通过对中间主剪应力的研究,提出了一种考虑中间主应力 σ_2 影响的适用于各种不同材料的双剪统一强度理论。该理论表述为:考虑作用于单元体上的中间主剪切应力 F 以及相应正应力组合值 F' ,两者的组合达到某一极值时,材料发生破坏,其数学表达式可用混凝土凝聚力 c 和内摩擦角 φ 表示为^[24]

$$F = \tau_{13} + b\tau_{12} + \sin(\varphi)(\sigma_{13} + b\sigma_{12}) = (1+b)c\cos(\phi) \quad (1)$$

$$F' = \tau_{13} + b\tau_{23} + \sin(\varphi)(\sigma_{13} + b\sigma_{23}) = (1+b)c\cos(\phi) \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大主应力、中间主应力和最小主应力; σ_{13} 、 σ_{12} 、 σ_{23} 为十二面体或正交八面体主应力, $\sigma_{13} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, $\sigma_{12} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$, $\sigma_{23} = (\sigma_2 + \sigma_3)/2$; τ_{13} 、 τ_{12} 、 τ_{23} 为十二面体或正交八面体主切应力, $\tau_{13} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, $\tau_{12} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$, $\tau_{23} = (\sigma_2 - \sigma_3)/2$; b 为中间主剪应力及其相应的正应力对材料破坏影响的权系数。

对于核心约束混凝土,其极限应力状态为 $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$,比较公式(1)、(2)并将两式相减可得

$$F' - F = b[\tau_{23} + \sin(\varphi)\sigma_{23} - \tau_{12} - \sin(\varphi)\sigma_{12}] = b[1 - \sin(\varphi)](\sigma_1 - \sigma_3) \geq 0 \quad (3)$$

对于三向受压混凝土,可采用式(2),其主要应力形式可写为 $(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3)\sin(\varphi) = 2ccos(\varphi)$,整理可得

$$-\sigma_3 = \frac{2ccos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} - \sigma_1 \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (4)$$

对于混凝土材料,很少有人会去测定凝聚力 c 和内摩擦角 φ ,而是依旧采用混凝土圆柱体抗拉强度 f_t 和混凝土圆柱体抗压强度 f'_c 去表示。由单轴受压可知, $\sigma_3 = f'_c$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$,当满足莫尔强度准则时,由莫尔圆的几何关系可知

$$\left. \begin{aligned} f'_c &= 2ccos(\varphi)/[1 - \sin(\varphi)] \\ k &= [1 + \sin(\varphi)]/[1 - \sin(\varphi)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将其代入式(4)可得

$$-\sigma_3 = f'_c = k\sigma_1 \quad (6)$$

式(6)与 b 值无关,这是因为在钢管混凝土的混凝土应力状态中,中间主应力与最小主应力相等,所以在基于双剪统一强度理论分析时,取各 b 值的结果都相同,只受约束系数 k 的影响。 k 值可通过轴心受压短柱的试验数据回归分析^[25]获得,如式(7)所示。

$$k = 1 + \frac{1}{3.5(p/f'_c)^{0.697/3}} \quad (7)$$

式中: p 为混凝土受到的环向压应力。

3 承载力计算式推导

3.1 约束机理分析

以四螺旋复合箍筋约束混凝土方柱为例,轴向受压时,其横向与纵向截面的约束应力分布如图3所示。横向截面方向箍筋和纵筋绑扎处是通过钢筋拉伸刚度形成约束,约束效果较好,该处混凝土受到的约束力较大;箍筋各肢水平段是通过抗弯刚度形成约束,约束效果差,对混凝土的约束力较小,因而矩形外箍对混凝土的约束力沿箍筋的周长分布并不均匀[图3(a)],其约束力主要集中在箍筋角部,从而在截面内形成“拱效应”,使混凝土在箍筋截面内形成有效约束区[图3(a)中阴影部分]和非有效约束区。矩形外箍不仅对其所包围的核心混凝土起着约束作用,而且将螺旋箍内的混凝土圆柱体连接在一起,使其对核心混凝土产生横向约束^[26][图3(b)];圆螺旋内箍包围的区域不仅受到矩形外箍的约束,还受到了圆螺旋内箍的约束,形成了双重约束效应[图3(c)]。纵向截面方向在轴心压力作用下,由于

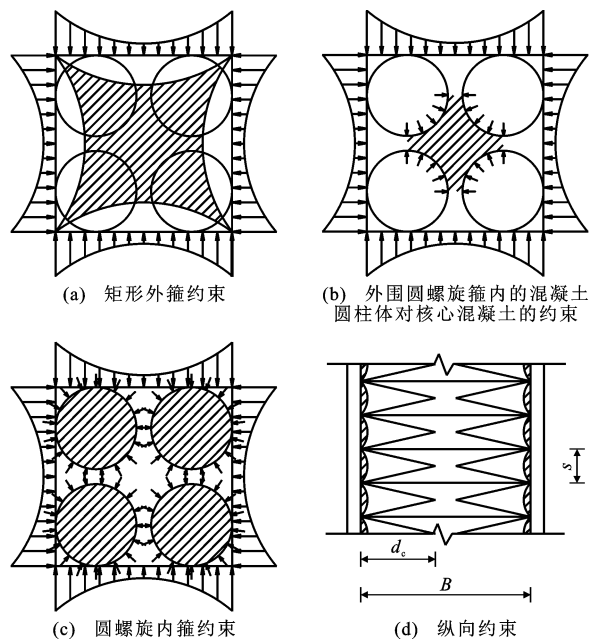


图3 约束作用

Fig. 3 Constraint effect

存在泊松效应,混凝土侧向膨胀,使得纵筋向外弯曲,相邻箍筋中间截面处混凝土的侧向膨胀最大,受到的约束作用最弱,即纵筋对相邻箍筋间混凝土的约束也形成了“拱效应”[图3(d)],其中 d_c 为螺旋约束直径, B 为方箍筋边长。

3.2 约束等效

在极限状态下,由于多螺旋复合箍筋具有多重核心约束机制,且矩形外箍的约束作用与圆螺旋内箍的约束作用之间有相互促进和增强的作用,故当箍筋较密时,假定在该约束下的混凝土可以近似达到钢管约束下的三向应力状态。基于此,本文分别将圆螺旋内箍、矩形外箍以及外围圆螺旋箍内的混凝土圆柱体(下文简称为钢筋混凝土圆柱体)对各自核心混凝土的约束等效为薄壁圆钢管约束^[4],从而计算多螺旋复合箍筋约束混凝土的承载力。

(1)圆螺旋内箍约束可按式(8)等效(图4)。

$$\left. \begin{aligned} t_{epc} &= (1 - s_c/d_c) A_{sc}/s_c \\ R_c &= d_c/2 \\ r_c &= R_c - t_{epc} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: s_c 为螺旋箍筋间距; A_{sc} 为螺旋箍筋截面面积; t_{epc} 为螺旋箍筋等效为薄壁圆钢管时的壁厚; R_c 和 r_c 分别为螺旋箍筋等效为薄壁圆钢管时的外半径和内半径。

(2)矩形外箍约束可先等效为方钢管约束,再由混凝土和等效方钢管面积等效原则,按式(9)等效为薄壁圆钢管约束(图5)。

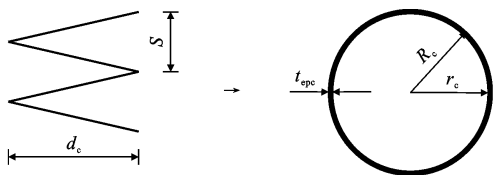


图 4 圆螺旋内箍约束等效

Fig. 4 Equivalent constraint of internal spiral stirrups

$$\left. \begin{aligned} t_{epc} &= (1 - s_s/B) A_{ss}/s_s \\ B^2 &= \pi R_c^2 \\ (B - 2t_{epc})^2 &= \pi r_c^2 \\ t'_s &= R_s - r_s \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

联立上式可得

$$\left. \begin{aligned} R_s &= B/\sqrt{\pi} \\ r_s &= (B - 2t_{epc})/\sqrt{\pi} \\ t'_s &= 2t_{epc}/\sqrt{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: A_{ss} 为方箍筋截面积; s_s 为方箍筋间距; t_{epc} 为矩形外箍等效为方钢管时的壁厚; R_s 和 r_s 分别为矩形外箍等效为薄壁圆钢管时的外半径和内半径; t'_s 为矩形外箍等效为薄壁圆钢管时的壁厚。

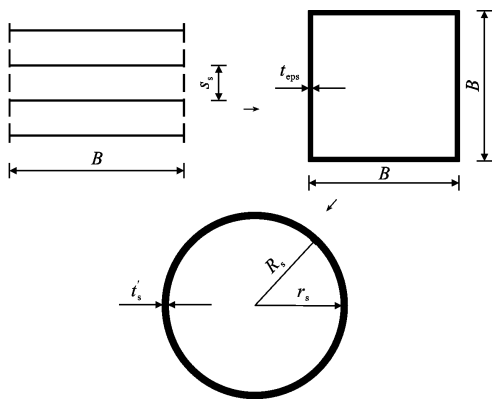


图 5 矩形外箍约束等效

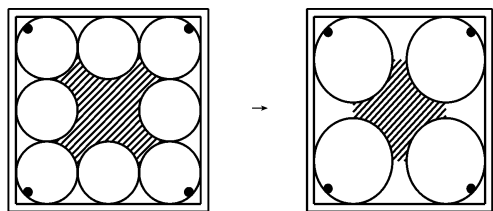
Fig. 5 Equivalent constraint of external stirrup

(3) 钢筋混凝土圆柱体对截面中心混凝土也有一定的约束作用, 约束区域如图 6(a) 中阴影所示。结合以上两种等效方法, 按图 6(b) 的思路, 将该部分约束按式(11)等效。

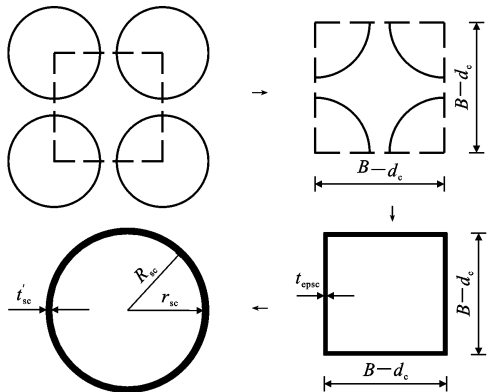
$$\left. \begin{aligned} t_{epsc} &= (1 - \frac{s_c}{B - d_c}) \frac{A_{sc}}{s_c} \left[\frac{(m-1)d_c}{B - d_c} \right] \\ (B - d_c)^2 &= \pi R_{sc}^2 \\ (B - d_c - 2t_{epsc})^2 &= \pi r_{sc}^2 \\ t'_{sc} &= R_{sc} - r_{sc} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

联立上式可得

$$\left. \begin{aligned} R_{sc} &= (B - d_c)/\sqrt{\pi} \\ r_{sc} &= (B - d_c - 2t_{epsc})/\sqrt{\pi} \\ t'_{sc} &= 2t_{epsc}/\sqrt{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$



(a) 钢筋混凝土圆柱体对核心混凝土的约束区域



(b) 钢筋混凝土圆柱体对核心混凝土的约束等效

图 6 钢筋混凝土圆柱体的约束区域及约束等效

Fig. 6 Constraint region and equivalent constraint of

reinforced concrete cylinder

式中: t_{epsc} 为钢筋混凝土圆柱体对截面中心混凝土的约束等效为薄壁方钢管约束时的壁厚; m 为矩形柱单边钢筋混凝土圆柱体个数; R_{sc} 和 r_{sc} 分别为钢筋混凝土圆柱体对截面中心混凝土的约束等效为薄壁圆钢管约束时的外半径和内半径; t'_{sc} 为钢筋混凝土圆柱体对截面中心混凝土的约束等效为薄壁圆钢管约束时的壁厚。

3.3 计算式推导

研究表明^[4], 将箍筋约束按式(13)等效为钢管约束时, 可以通过系数 $1 - s/d_c$ 对相应等效钢管的厚度进行折减。

$$t_{epc} = \frac{A_{sc}}{s} (1 - \frac{s}{d_c}) \quad (13)$$

另外, 本文在计算核心混凝土的峰值应力时, 考虑了构件的尺寸效应, 引入折减系数 γ_u ^[27] 对混凝土强度进行折减, 其表达式为

$$\gamma_u = 1.67 D_c^{-0.112} \leq 1 \quad (14)$$

式中: D_c 为等效薄壁圆钢管的内直径, 本文取 $2r_c$ 、 $2r_s$ 、 $2r_{sc}$ 。

对于箍筋而言, 主要承受环向拉应力; 对于薄壁圆钢管而言, 径向压应力远小于环向拉应力, 且在混凝土应变不断加剧的过程中, 薄壁圆钢管的轴向压应力不断减小, 环向拉应力不断增加, 从主要承受轴向压应力转变为主要承受环向拉应力^[28]。因此对

于本文等效后的薄壁圆钢管而言,只考虑环向拉应力 σ_0 ,其值为

$$\sigma_0 = -\sigma_1 = p = t f_{yv} / R \quad (15)$$

式中: t 为等效薄壁圆钢管的壁厚,取 t_{epc} 、 t'_{st} 和 t'_{sc} ; R 为等效薄壁圆钢管的外半径,取 R_c 、 R_s 、 R_{sc} 。

将公式(7)和(15)代入公式(6),可得到等效后薄壁圆钢管内混凝土的峰值抗压强度 f_{cc} 计算式为

$$f_{cc} = \gamma_u f'_c + \left[1 + \frac{1}{3.5(t f_{yv} / \gamma_u f'_c R)^{0.6973}} \right] \frac{t f_{yv}}{R} \quad (16)$$

式中: $f'_c = 0.8 f_{cu}^{[29]}$ 。

若式(13)中系数 $1 - s/d_c \leq 0$ 时,认为该约束形式并不能提高该约束区域内混凝土的峰值应力,即式(16)可简化为 $f_{cc} = \gamma_u f'_c$ 。

圆螺旋内箍约束混凝土短柱的轴压承载力 N_c 计算式为

$$N_c = \alpha f_{cci} \sum_{i=1}^n \pi R_i^2 \quad (17)$$

式中: n 为钢筋混凝土圆柱体个数; α 为混凝土约束折减系数^[30],当混凝土强度等级不超过 C50 时,取 1.0,当混凝土强度等级为 C80 时,取 0.85,其间接线性内插法确定; f_{cci} 为各等效薄壁圆钢管内混凝土的峰值抗压强度计算值。

计算矩形外箍约束混凝土短柱的轴压承载力时,由于矩形外箍本身约束的不均匀性以及拱效应的影响,本文采用矩形外箍的有效约束面积 $B^2/3$,并以系数 $1 + (4m-4)\pi R_c^2/B^2$ 考虑圆螺旋内箍的约束作用对矩形外箍约束的增强作用^[21]。若截面中心有互锁螺旋箍筋约束(图 1 中试件 B 截面)时,考虑各核心约束混凝土的峰值荷载不同步而引入叠加折减系数 $\beta^{[31]}$ 。因此矩形外箍约束核心混凝土的轴压承载力 N_s 计算式为

$$N_s = \beta \alpha f_{cc2} \left[1 + \frac{(4m-4)\pi R_{sc}^2}{B^2} \right] \frac{B^2}{3} \quad (18)$$

式中: f_{cc2} 为 t 取 t'_s 、 f_{yv} 取 f_{yvs} 、 R 取 R_s 、 D_c 取 $2r_s$ 时式(16)的计算值。

同理,在计算钢筋混凝土圆柱体约束核心混凝土的轴压承载力时,采用其包围的混凝土面积[图 6(a)中阴影面积],并按图 6(b)考虑其增强作用以及截面中央有无互锁螺旋箍筋约束的影响。钢筋混凝土圆柱体约束核心混凝土的轴压承载力 N_{sc} 计算式为

$$N_{sc} = \beta \alpha f_{cc3} \left[1 + \frac{(2m-3)\pi R_{sc}^2}{(B-d_c)^2} \right] [(B-d_c)^2 - (2m-3)\pi R_{sc}^2] \quad (19)$$

式中: f_{cc3} 为 t 取 t'_{sc} 、 f_{yv} 取 f_{yvc} 、 R 取 R_{sc} 、 D_c 取 $2r_{sc}$ 时

式(16)的计算值。

综上所述,基于双剪统一强度理论的多螺旋复合箍筋约束混凝土短柱的轴压承载力 N_u 计算式为

$$N_u = N_c + N_s + N_{sc} + f'_y A'_s \quad (20)$$

4 承载力计算式验证

4.1 已有规范及计算公式

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[30] 第 6.2.16 条和第 6.2.15 条规定,对于配置螺旋箍筋和配置普通箍筋的混凝土轴心受压短柱,其正截面受压承载力按式(21)、(22)计算。

配置螺旋箍筋时

$$N_u = 0.9 (f_c A_{cor} + f'_y A'_s + 2\alpha f_{yv} A_{sso}) \quad (21)$$

配置普通箍筋时

$$N_u = 0.9 (f_c A + f'_y A'_s) \quad (22)$$

式中:0.9 为考虑可能存在初始偏心的折减系数; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; A_{cor} 为混凝土核心区面积; f'_y 为纵筋抗压强度设计值; A'_s 为受压区纵筋总截面积; A_{sso} 为螺旋箍筋的换算截面面积; d_{cor} 为螺旋箍筋内径; A_{ss1} 为单根螺旋箍筋的截面面积; A 为构件全截面面积,当纵向普通钢筋的配筋率大于 3% 时, A 应改用 $A - A'_s$ 替代。

根据叠加原理^[18],基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[30] 的多螺旋复合箍筋约束混凝土短柱的轴压承载力计算公式为

$$N_u = 0.9 (f_c A_s + n \frac{8\alpha A_{ss1}}{sd_{cor}} f_{yv} A_{cor} + f'_y A') \quad (23)$$

Jing 等^[21] 基于 Mander 模型提出了一种预测 MTSTR 矩形混凝土柱的峰值承载力简化公式,即

$$N_u = 0.92 (1 + 0.1 f_{yvs} / f_{yvr}) \cdot [n f_{cc}^s A_{cc} + f_{cc}^r (b_c d_c - n A_{cc})] \quad (24)$$

式中: f_{yvs} 和 f_{yvr} 分别为圆螺旋内箍和矩形外箍的材料抗拉屈服强度; f_{cc}^s 和 f_{cc}^r 分别为峰值荷载作用下,受圆螺旋内箍约束的混凝土的抗压强度和受矩形外箍约束的圆螺旋内箍外的核心混凝土抗压强度; b_c 为矩形外箍筋的边长。

4.2 计算结果对比分析

由公式(20)、(23)、(24)共 3 个承载力计算式,对多螺旋复合箍筋约束混凝土短柱的轴压承载力进行计算,分别对应 N_{u1} 、 N_{u2} 和 N_{u3} ,结果如表 2、图 7 所示,其中 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 为对应的相对误差。

由表 2 和图 7 可知,基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[30] 修正的按叠加理论计算的

表 2 轴压承载力计算结果

Table 2 Calculation results of axial compression capacity

数据来源	试件编号	承载力试验值/kN	承载力理论计算值/kN			$\delta_1/\%$	$\delta_2/\%$	$\delta_3/\%$
			N_{u1}	N_{u2}	N_{u3}			
文献[19]	CLB-4-1	3 100	2 779.5	3 124.2	3 003.3	-10.34	0.78	-3.12
	CLA-4-2	3 300	3 117.3	3 166.4	3 184.4	-5.54	-4.05	-3.50
	CLA-4-1	3 350	3 117.3	3 233.8	3 238.8	-6.95	-3.47	-3.32
	CLA-6-1	2 900	2 723.2	2 812.1	3 026.5	-6.10	-3.03	4.36
	CLA-8-1	3 000	2 526.1	2 556.8	2 858.6	-15.80	-14.77	-4.71
	CHB-4-1	3 200	2 990.4	3 400.9	3 305.3	-6.55	6.28	3.29
	CHA-6-1	3 200	2 936.6	3 158.6	3 351.6	-8.23	-1.29	4.74
	CHA-4-2	3 500	3 313.6	3 507.7	3 506.8	-5.33	0.22	0.19
文献[26]	C1	3 350	2 779.3	2 905.2	3 318.1	-17.04	-13.28	-0.95
	C2	3 120	2 498.0	2 476.7	3 176.3	-19.94	-20.62	1.80
	C3	2 760	2 357.3	2 238.8	3 085.5	-14.59	-18.89	11.79
	C5	2 750	2 498.0	2 461.7	3 121.5	-9.17	-10.49	13.51
	C6	3 480	2 990.2	3 171.2	3 620.1	-14.07	-8.87	4.02
	C7	3 450	2 721.1	2 726.2	3 479.1	-21.13	-20.98	0.84
	C8	3 400	2 586.5	2 482.5	3 387.3	-23.93	-26.98	-0.37
	C10	3 350	2 721.1	2 711.2	3 421.9	-18.77	-19.07	2.15
本试验[22]	A-1	3 867	4 577.6	4 002.2	3 851.9	18.38	3.50	-0.39
	A-4	2 953	2 752.4	2 660.6	2 996.1	-6.79	-9.89	1.47
	A-5	3 406	4 020.6	3 462.9	3 438.5	18.04	1.67	0.95
	B-1	3 328	3 010.0	2 826.5	3 306.1	-9.55	-15.07	-0.65

注：由于本试验中试件 A-2、A-3 和 B-2 因为人为原因整体进行了重新浇筑，导致试验值偏离真实承载力，故分析中不考虑此 3 组数据。

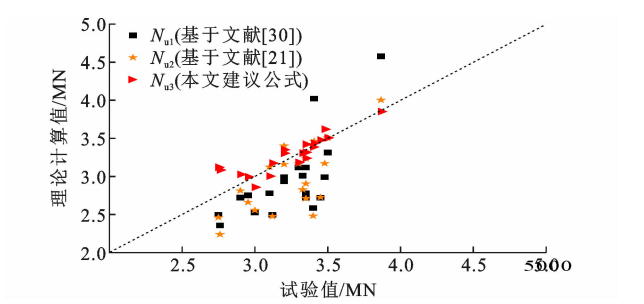


图 7 计算值与试验值对比

Fig. 7 Comparison between calculated and experimental values

理论值 N_{u1} 和 Jing 等^[21] 提出的承载力计算公式计算的理论值 N_{u2} 均比较接近试验值，这是因为该公式既考虑了混凝土和纵筋提供的竖向承载力，又考虑了箍筋对核心混凝土的约束作用。本文在此基础上增加考虑了钢筋混凝土圆柱体对截面中心混凝土的附加约束作用，因此从表 2 和图 7 可以看出，按本文所提出的承载力公式计算的理论值 N_{u3} 更接近试验值，与试验值的相对误差均值仅为 1.60%，且标准差为 0.045 1，总体上偏于安全。

4.3 影响因素分析

根据本文提出的基于双剪统一强度理论的多螺

旋复合箍筋约束混凝土方柱轴压承载力计算公式，分析箍筋间距 s 和箍筋强度 f_{yv} 对方柱轴压承载力 N_u 的影响，如图 8 和图 9 所示。分析可知：约束混凝土柱的承载力随着箍筋间距的减小或者箍筋强度的提高而提高，此结论与试验结果一致；相对于矩形外箍，圆螺旋内箍的箍筋间距与箍筋强度对轴压承载力的提高幅度影响更为明显。

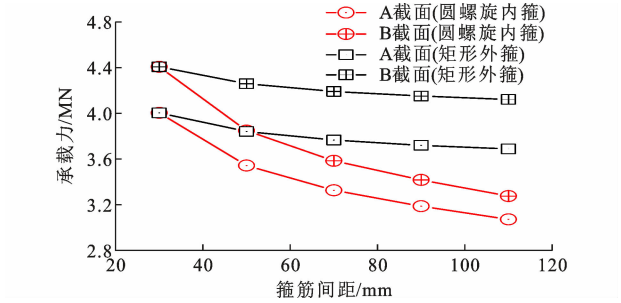


图 8 箍筋间距对承载力的影响对比

Fig. 8 Comparison of influence of stirrup spacing on bearing capacity

5 结 语

(1) 由于圆螺旋内箍和矩形外箍引起的多重约束机制，使得多螺旋复合箍筋对混凝土方柱提供更

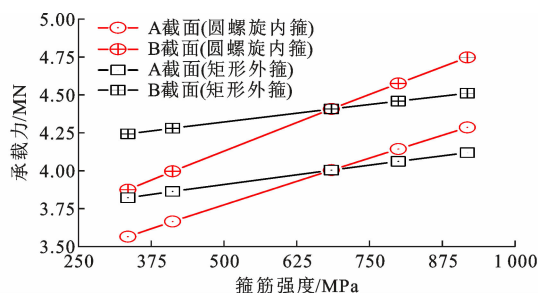


图 9 箍筋强度对承载力的影响对比

Fig. 9 Comparison of influence of stirrup strength on bearing capacity

有效的约束;箍筋间距越大,混凝土方柱的峰值荷载和峰值位移的提高倍数越低,延性越差;箍筋强度越大,混凝土方柱的峰值荷载和峰值位移的提高倍数越大;在同等条件下,五螺旋箍筋柱的强度及延性性能表现更好,整体约束效果明显优于四螺旋箍筋柱和井字形箍筋柱。

(2)通过对约束机理的分析,将多螺旋复合箍筋约束拆分为 3 个部分(矩形外箍约束、圆螺旋内箍约束以及钢筋混凝土圆柱体对中央核心区混凝土的约束)进行考虑,分别将各部分约束等效为薄壁圆钢管约束,并基于双剪统一强度理论推导出了多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱的轴压承载力计算式。

(3)结合本文和已有试验数据,将本文所提的多螺旋复合箍筋约束混凝土短柱轴压承载力计算公式与规范及学者提出的计算公式进行对比,结果表明:本文所提公式的计算精度较高,相对误差均值为 1.60%,标准差为 0.045 1,说明该公式具有较好的准确性和适用性,可为该类型约束混凝土方柱的设计计算提供理论依据。

参考文献:

References:

- [1] PRIESTLEY M J N, PARK R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading [J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(1): 61-76.
- [2] TANAKA H. Effect of lateral confining reinforcement on the ductile behaviour of reinforced concrete columns[D]. Canterbury: University of Canterbury, 1990.
- [3] TANAKA H, PARK R. Seismic design and behavior of reinforced concrete columns with interlocking spirals[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(2): 192-203.
- [4] KIM J K, PARK C K. The behaviour of concrete columns with interlocking spirals[J]. Engineering Structures, 1999, 21(10): 945-953.

- [5] CORREAL J F, SAIIDI M, SANDERS D H. Seismic performance of RC bridge columns reinforced with two interlocking spirals[M]. Reno: University of Nevada, 2004.
- [6] CORREAL J F, SAIIDI M S, SANDERS D, et al. Analytical evaluation of bridge columns with double interlocking spirals [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3): 314-323.
- [7] CORREAL J F, SAIIDI M S, SANDERS D, et al. Shake table studies of bridge columns with double interlocking spirals[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(4): 393-401.
- [8] OU Y C, NGO S H, YIN S Y, et al. Shear behavior of oblong bridge columns with innovative seven-spiral transverse reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(6): 1339-1350.
- [9] 尹衍樑. 矩形混凝土柱新的约束型式之研发(Ⅱ)外方内圆、组合螺箍及其衍生型式[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 1-12.
- YIN Yanliang. Researches and developments of alternative confinements for rectangular concrete columns (Ⅱ) [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 1-12.
- [10] 尹衍樑, 翁正强, 王瑞祯, 等. 预铸复合螺箍 SRC 柱之轴压行为研究[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 16-30.
- YIN Yanliang, WENG Zhengqiang, WANG Ruizhen, et al. Axial compressive behavior of precast SRC columns with multi-spirals[J]. Engineering Science, 2006, 8(12): 16-30.
- [11] 翁正强, 尹衍樑, 王瑞祯, 等. 五螺旋矩形 RC 柱之轴压试验与优化设计研究[J]. 结构工程, 2010, 25(1): 71-105.
- WENG Zhengqiang, YIN Yanliang, WANG Ruizhen, et al. Research on axial compression test and optimization design of five-screw hoop rectangular RC columns[J]. Structural engineering, 2010, 25(1): 71-105.
- [12] YIN Y L, WU T L, LIU T C, et al. Interlocking spiral confinement for rectangular columns[J]. Concrete international, 2011, 33(12): 38-45.
- [13] YIN S, WANG J C, WANG P H. Development of multi-spiral confinements in rectangular columns for construction automation[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2012, 35(3): 309-320.
- [14] WENG C, YIN Y, WANG J, et al. Seismic cyclic loading test of SRC columns confined with 5-spirals [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(5): 529-555.

- [15] 翁正强,尹衍梁,王瑞祯,等. 预铸五螺旋矩形 SRC 柱之轴压与反复载重抗震试验[J]. 建筑钢结构进展, 2007,9(6):12-19.
WENG Zhengqiang, YIN Yanliang, WANG Ruizhen, et al. Axial compression and seismic behavior of pre-cast rectangular SRC columns confined with 5-spirals[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(6): 12-19.
- [16] LIANG C Y, CHEN C C, WENG C C, et al. Axial compressive behavior of square composite columns confined by multiple spirals[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103: 230-240.
- [17] 唐 琼,李 易,陆新征,等. 多螺旋筋柱轴压承载力研究[J]. 工程力学, 2018,35(增 1):166-171.
TANG Qiong, LI Yi, LU Xinzheng, et al. Study on axial compression capacity of multi-spiral hoops confined concrete columns[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(S1): 166-171.
- [18] 刘成清,邓佑毅,方登甲,等. 新型五螺旋矩形短柱轴压承载力计算分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6):1157-1164,1174.
LIU Chengqing, DENG Youyi, FANG Dengjia, et al. Calculation method of axial compression capacity for rectangular short reinforced concrete columns confined with innovative five-spiral stirrups[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1157-1164, 1174.
- [19] JING D H, YU T, LIU X D. New configuration of transverse reinforcement for improved seismic resistance of rectangular RC columns: concept and axial compressive behavior [J]. Engineering Structures, 2016, 111: 383-393.
- [20] LI Y Z, CAO S Y, JING D H. Analytical compressive stress-strain model for concrete confined with high-strength multiple-tied-spiral transverse reinforcement[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2018, 27(2): e1416.
- [21] JING D H, HUANG L B. Effect of transverse reinforcement on rectangular concrete columns with MTSR[J]. Magazine of Concrete Research, 2019, 71(2): 71-84.
- [22] 杨 坤,郭书慧,王亚昆,等. 新型多螺旋复合箍筋约束混凝土方柱的轴压性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023,40(4):80-86.
YANG Kun, GUO Shuhui, WANG Yakun, et al. Experimental study on axial compression performance of square concrete column confined with new multi-spiral composite stirrups[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 80-86.
- [23] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
YU Maohong. Double shear theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [24] 史庆轩,戎 翀,任 浩,等. 基于统一强度理论的钢管混凝土柱承载力计算[J]. 力学季刊, 2015,36(4): 690-696.
SHI Qingxuan, RONG Chong, REN Hao, et al. Calculation of the compressive strength of concrete filled steel tube(CFST) based on the twin shear unified strength theory[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(4): 690-696.
- [25] 史庆轩,戎 翀,张 婷,等. 约束混凝土实用本构关系模型[J]. 建筑材料学报, 2017,20(1):49-54.
SHI Qingxuan, RONG Chong, ZHANG Ting, et al. A practical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1): 49-54.
- [26] LI Y Z, CAO S Y, JING D H. Axial compressive behaviour of RC columns with high-strength MTS transverse reinforcement[J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69(9): 436-452.
- [27] 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.
- [28] 张常光,赵均海,魏雪英,等. 外方内圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱的极限承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2008,25(4):78-82.
ZHANG Changguang, ZHAO Junhai, WEI Xueying, et al. Ultimate bearing capacity of CHS inner and SHS outer concrete-filled double skin tubes stub columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 78-82.
- [29] 赵均海,徐贤锋,李 艳. 带肋薄壁方钢管混凝土轴压短柱的极限承载力[J]. 混凝土, 2013(9):5-9.
ZHAO Junhai, XU Jianfeng, LI Yan. The ultimate bearing capacity for the concrete-filled square stiffened thin-walled steel tubular short columns under axial compression[J]. Concrete, 2013(9): 5-9.
- [30] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [31] 蔡绍怀,焦占栓. 复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算[J]. 建筑结构学报, 1997,18(6):20-25.
CAI Shaohuai, JIAO Zhanshuan. Behavior and ultimate load analysis of multibarrel tube-confined concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(6): 20-25.