

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.015



矩形钢套筒约束混凝土轴心受压应力-应变关系

高龙^{1a,1b}, 周珉^{1b,2}, 高永^{1a,1b}, 黄宗明^{1a,1b}

(1. 重庆大学 a. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; b. 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 后勤工程学院 军事土木工程系, 重庆 401311)

摘要:进行了 6 个矩形钢套筒约束混凝土试件的轴心受压试验, 试验结果表明: 矩形钢套筒能够对其内部混凝土形成有效约束, 显著提高混凝土受压峰值应力, 使约束混凝土受压应力-应变曲线的下降段更加平缓, 有效改善混凝土的极限变形能力。在试验的基础上, 通过对试验中钢套筒的应变和钢套筒内混凝土的受力状态进行分析, 给出了矩形钢套筒对混凝土横向有效约束力的计算方法, 借用 Mander 模型, 进一步提出了受约束混凝土单轴受压应力-应变计算模型。将计算模型与试验的钢套筒约束混凝土应力-应变曲线进行对比, 二者吻合良好。

关键词:型钢混凝土; 剪力墙; 钢套筒; 约束混凝土; 应力-应变关系

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)03-0102-08

Stress-strain relationship of rectangle steel tube confined concrete under axial compression

Gao Long^{1a,1b}, Zhou Min^{1b,2}, Gao Yong^{1a,1b}, Huang Zongming^{1a,1b}

(1a. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education;

1b. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: Six rectangle steel tube confined concrete columns were investigated experimentally under axial compression. The experimental results show that: The rectangle steel tube can effectively confine internal concrete and obviously improve the peak stress. In addition, the descending branch of confined concrete stress-strain curve is gentler and the ultimate deformation ability of concrete is improved effectively. On the basis of experiments, a method to calculate the effective transverse confined stress provided by the rectangle steel tube was proposed through analyzing the strain of steel tubes and the stress state of core zone concrete. Furthermore, a model to determinate the stress-strain relationship of rectangle steel tube confined concrete under axial compression was put forward reference to the Mander's model. Computation results of the stress-strain curve of rectangle steel tube confined concrete were in good agreement with the experimental results.

Keywords: steel reinforced concrete; shear walls; steel tubes; confined concrete; stress-strain relationship

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51178486)

作者简介: 高龙 (1992-), 男, 主要从事结构抗震研究, E-mail: china-gao-long@hotmail.com.

Received: 2017-02-22

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51178486)

Author brief: Gao Long (1992-), main research interest: seismic research of structures, E-mail: china-gao-long@hotmail.com.

普通型钢混凝土的中高剪力墙在受到反复水平作用时,破坏模式通常表现为两端边框区域混凝土过早压溃,剪力墙极限变形能力较差。为避免边框混凝土的过早压溃,在墙的两侧边框受压区底部一定高度范围内设置钢套筒,通过钢套筒对混凝土的约束,以提高该部位混凝土的承载力及极限变形能力,从而改善型钢混凝土剪力墙的变形和耗能能力。由于受到试验数量和经费的限制,针对该类剪力墙的大量研究工作需要借助有限元数值模拟方法,而确定有限元模型中钢套筒内部约束混凝土的应力-应变关系则是需要解决的首要问题。

对于约束混凝土,许多研究者进行了深入研究,取得了丰硕的成果。Mander 等^[1-2]、史庆轩等^[3]针对圆形箍筋、螺旋箍筋、矩形箍筋的约束混凝土进行了深入研究,给出了约束混凝土的峰值应力与约束应力之间的关系,并提出了约束混凝土的等效单轴应力-应变关系。对于圆形箍筋和圆形螺旋箍筋约束混凝土,箍筋对核心区混凝土的约束力可以认为是各向均匀的,而方形箍筋和矩形箍筋约束混凝土,由于箍筋对核心区混凝土的约束并不是各向均匀分布的,一般采用等效成均匀分布约束力,再用约束系数来近似考虑约束力的不均匀分布^[2]。Saatcioglu 等^[4]参考 Mander 模型,提出了计算矩形箍筋约束混凝土有效约束力的简化表达式。

钢管约束混凝土中钢管对核心混凝土的约束作用不同于箍筋对混凝土的约束作用,由于箍筋面积比较小,且沿构件轴向提供的约束不连续,而钢管对混凝土的侧向约束沿着轴向是连续分布的,能给混凝土提供更大的约束力。到目前为止,学者们对各种不同形式的钢管混凝土柱进行了广泛研究^[5-9],对受约束混凝土的应力-应变关系,总体思路以 Mander 本构模型为基础,通过试验结果的回归,拟合约束系数,最后提出钢管混凝土柱的等效单轴应力-应变模型。对于套筒柱(约束钢管混凝土),研究人员也进行了广泛的研究,Tomii 等^[10]首先提出套筒柱的概念,并对套筒柱的抗震性能进行了试验研究。张素梅等^[11]对约束圆钢管高强混凝土柱进行了试验和分析,结果表明:当钢管不承担纵向荷载时,钢管对核心混凝土的约束更有效,当混凝土强度较高时,Mander 模型计算的峰值应变比试验结果高很多。周绪红等^[12]对方形钢套筒柱进行了研究,给出了方形钢套筒截面约束区与非约束区的划分模型,并给出了当轴向荷载达到峰值时,钢管横向应力的计算方法。另外, Hany 等^[13]、Lu 等^[14]、Shirmohammadi 等^[15]、Ziaadiny 等^[16]、Afifi 等^[17]对

纤维增强复合材料约束混凝土进行了研究,并提出了纤维增强复合材料约束混凝土应力-应变关系模型。

综上所述,Mander 等^[1-2]提出的约束混凝土模型均是针对箍筋约束混凝土,文献^[5-9]研究的是钢管同时需要直接承压的普通钢管混凝土柱,张素梅等^[11]和周绪红等^[12]的研究主要是约束圆钢管、约束方形钢管混凝土,文献^[13-17]研究的主要是纤维增强复合材料约束混凝土。上述各类约束混凝土模型均不能直接用于本文剪力墙端部矩形钢套筒约束混凝土应力-应变关系的计算。为此,笔者进行了6个独立钢套筒约束混凝土试件的轴压试验,根据试验结果和对已有的研究成果进行总结和借鉴,给出了计算钢套筒约束混凝土中有效约束力的方法,在此基础上,进一步提出了套筒约束混凝土柱核心区混凝土单轴受压应力-应变关系模型。

1 试验研究

1.1 试件设计

考虑到边框底部设置钢套筒的剪力墙(如图1所示)在轴压力和水平力共同作用下,边框钢套筒以及内部的混凝土主要承受轴向压力,设计了6个独立钢套筒约束混凝土试件,重点研究钢套筒对该区域混凝土的约束效果,并提出约束区混凝土的应力-应变关系。

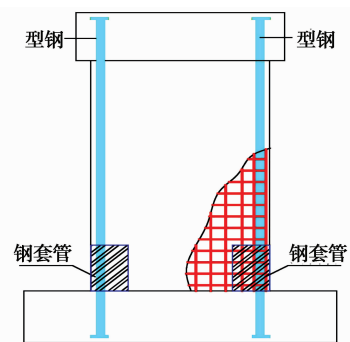


图1 设矩形钢套筒的剪力墙示意图

Fig. 1 Sketch of the shear wall with rectangle steel tubes

为保证剪力墙水平分布筋能够伸入边缘构件进行锚固,钢套筒在靠近腹板一侧须采用缀板进行连接,设计了3个带缀板的钢套筒约束混凝土试件(A组)。考虑到带钢套筒型钢混凝土剪力墙在实际受力过程中,钢套筒内部靠缀板一侧的混凝土除了受到缀板的约束以外,还受到腹板区域混凝土的有效约束,其实际受力情况可能与全封闭的钢套筒约束混凝土试件更为接近,为此,又设计了3个全封闭的钢套筒约束混凝土试件(B组)。

图 2 给出了两组试件的示意图。所有试件内部混凝土横截面长 240 mm,宽 90 mm,钢板厚 5 mm,缀板厚 10 mm,钢板与钢板间、钢板与缀板间均采用焊接。所有试件套筒高 $h=400$ mm,为保证钢套筒不直接承受轴向力,在试件的上下两端,混凝土凸出钢套筒 10 mm,试件总高度为 420 mm。

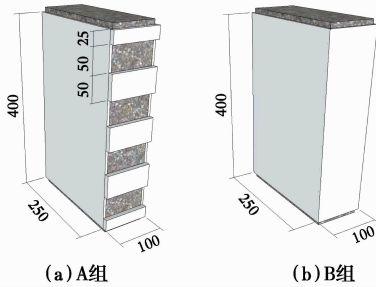


图 2 试件示意图

Fig. 2 The details of specimens

试件中采用的钢板为 Q235 钢,根据《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[18] 标准,制作了 3 个标准拉伸试样。拉伸试验在重庆大学材料学院建材试验室完成,根据 3 个试样的拉伸试验数据计算得到的钢材屈服强度和弹性模量的平均值见表 1。混凝土设计强度为 C40,浇筑试件时,预留了 3 个标准立方体试块,标准试块和试件在相同条件下养护 20 d,在试验加载当天对标准试块进行强度测试。测试在重庆大学土木工程学院岩土试验室完成,取 3 个标准试块立方体抗压强度的平均值作为混凝土立方体强度 f_{cu} ,结果见表 1。

表 1 材料参数表

Table 1 Properties of materials

混凝土立方体强度/MPa	钢材屈服强度/MPa	钢材弹性模量/GPa
39.1	390	243

1.2 试验加载及测量内容

由于钢套筒在剪力墙中所处区域为墙体受压侧底部边框区域,其受力状态接近于单轴受压,因此,试验中所有试件均采用电液伺服压力试验机 YAS-500 轴向单调加载。试验采用力控制加载,当轴力小于 500 kN 时,每级增加 100 kN;当轴力在 500~800 kN 时,每级增加 50 kN;当轴力大于 800 kN 时,每级增加 20 kN。试验在重庆大学结构实验室完成,试验装置如图 3 所示。

试验中,测量内容包括:试件的轴向力、轴向变形和钢套筒的应变。为测量试验过程中钢套筒的应变状态,在试件的长边和短边方向沿纵向均匀布置

了应变片,应变片布置如图 4 所示。轴向力和轴向变形由试验机自动采集,钢套筒的应变通过 DH3816 静态应变采集仪进行采集并保存。



图 3 加载装置

Fig. 3 Loading device

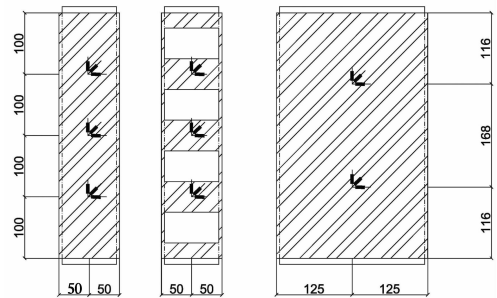


图 4 应变片布置图

Fig. 4 Strain gages arrangement of specimens

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

加载初期,试件基本保持弹性,混凝土和套筒均无明显变形,轴向力-位移曲线基本保持直线;当轴力接近峰值时,混凝土压缩变形增长变快;峰值荷载后,混凝土压缩变形迅速增大;最后,混凝土发生过的压缩变形,加载随后终止。整个加载过程中,所有试件长边方向中部的钢板略有外鼓,短边方向的钢板无明显外鼓,所有试件的焊缝均未发生破坏,带缀板试件的缀板无明显变形。加载终止时,钢套筒仍未与加载板直接接触,钢套筒未直接承受轴向力,试件照片如图 5 所示。



图 5 试件照片

Fig. 5 Pictures of specimens

2.2 力-位移曲线

各试件的峰值荷载和峰值位移见表 2。由于同组各试件的力-位移曲线差异不大,将每组 3 个试件曲线取平均值作为该组试件的力-位移曲线,结果如

图 6(a)所示,带缀板的试件峰值荷载为 932 kN,全封闭的试件峰值荷载略大,为 939 kN。将试件所受的力除以试件横截面积得到混凝土轴向的平均压应力,试件的轴向总变形除以试件的高度,得到混凝土的平均压应变,混凝土受压平均应力-应变曲线如图 6(b)所示。两组试件力-位移曲线峰值荷载前基本一致,四面全封闭的混凝土试件下降段较平缓,带缀板试件下降段开始略为陡峭,随后下降变平缓。

表 2 试件峰值荷载和峰值位移

Table 2 Peak load and peak displacement of specimens

组别	试件	峰值位移/mm	平均值	峰值荷载/kN	平均值
A	1	1.38		966.9	
	2	1.68	1.52	926.8	932.0
	3	1.49		902.4	
B	1	1.49		951.2	
	2	1.63	1.62	921.2	939.0
	3	1.74		944.6	

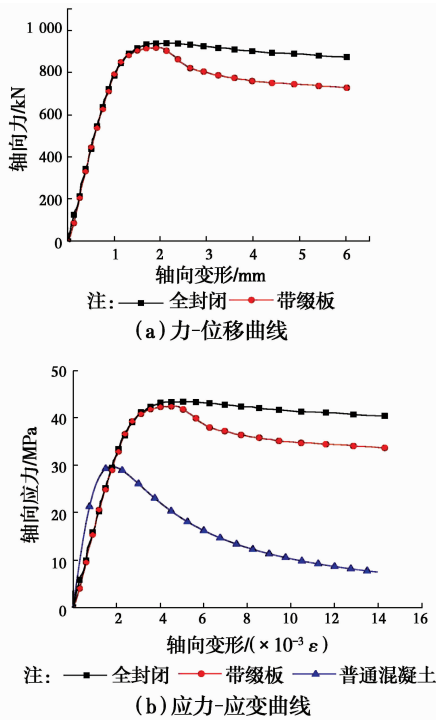


图 6 力-位移曲线和应力-应变曲线

Fig. 6 Force-displacement curves and stress-strain curves

为对比约束混凝土与普通混凝土的差异,根据混凝土标准试块所测得的混凝土立方体强度 f_{cu} ,取混凝土轴心抗压强度 $f_{co} = 0.76 f_{cu}$, $\epsilon_{co} = 0.002$ 。基于 Mander 模型^[2]计算得到普通混凝土的应力-应变曲线,并一同绘于图 6(b),对比结果表明,采用矩形钢套筒约束后,约束区混凝土的峰值应力较普通混凝土有较大提高,约束混凝土应力-应变曲线的下降段更平缓。

2.3 应力分析

试验过程中,各试件钢套筒短边及长边各测点的对应方向应变测试结果均比较接近,将短边及长边应变结果取均值后,得到加载过程中各试件钢管应变与试件轴向荷载关系如图 7 所示,受拉为正,受压为负。

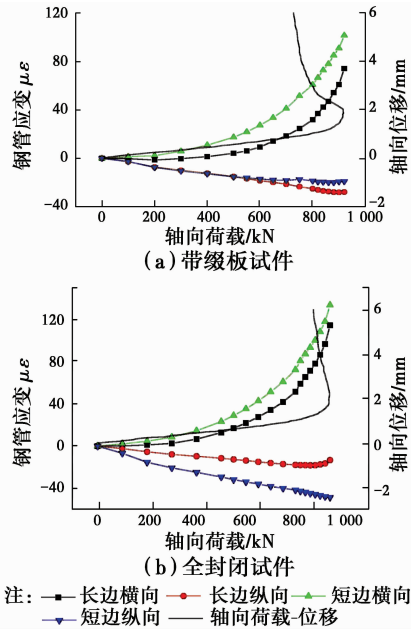


图 7 钢管应变-轴向荷载曲线

Fig. 7 Curves of the steel tube strain-axial load

根据应变测试结果,由广义虎克定律,按平面问题,根据式(1)、(2)计算钢管应力,并根据第四强度理论计算相应的折算应力,试件钢管折算应力-荷载曲线如图 8 所示。

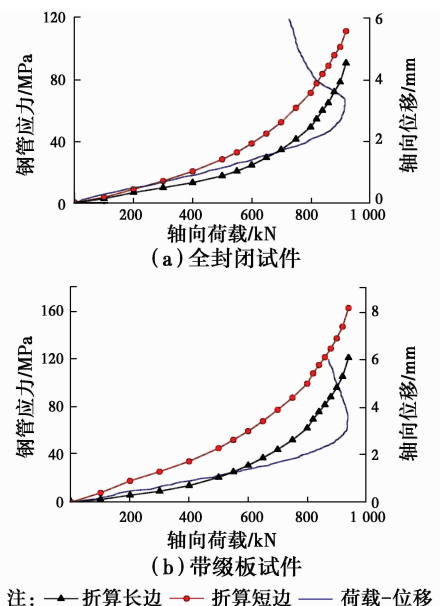


图 8 试件钢管应力-荷载曲线

Fig. 8 Curves of steel tube stress-load of specimens

$$\sigma = D\epsilon \quad (1)$$

$$D = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

从图 7 和图 8 可以看出:当轴向荷载达到峰值时,带缀板试件长边钢管横向应力为 74.1 MPa,短边钢管横向应力为 101.4 MPa;全封闭的钢管应力在各个方向上均比带缀板的偏大一点,其长边钢管横向应力为 114.3 MPa,短边钢管横向应力为 133.5 MPa。最大应力出现在全封闭试件短边,其横向拉应力为 133.5 MPa,纵向压应力为 48.4 MPa,折算应力为 163 MPa。

由上述应力结果可见,当荷载达到峰值时,钢套筒应力均低于材料的屈服应力,因此,在钢套筒的应力计算时,可按线弹性材料考虑。由于剪力墙受压区底部的钢套筒内部混凝土在缀板连接一侧仍然有腹板的混凝土进行有效的约束,试验又表明,当钢套筒一侧采用缀板连接时,缀板和焊缝均没有发生明显的变形和破坏,因此,剪力墙中钢套筒约束的混凝土实际受力情况可能与全封闭的套筒柱更为接近。为了方便计算,在推导钢套筒约束混凝土应力-应变关系时,以全封闭试件为对象。

3 核心区混凝土应力-应变关系

3.1 基本方程

约束混凝土的单轴受压应力-应变关系,以及约束混凝土的峰值应力和峰值应变,可以参照 Mander 模型^[2]确定,计算表达式为式(3)~式(5)。在 Mander 模型中,峰值时刻箍筋已经屈服,因此,该模型假定峰值后箍筋对混凝土的约束力保持不变。本文钢套筒约束混凝土柱中,峰值荷载后,钢套筒的应力还会增加,钢套筒对混凝土的有效约束力会有所增长,但考虑钢套筒应力的增长将使计算变得十分复杂。本文偏于保守,不考虑峰值后钢套筒应力的增长,同样假定有效侧向约束力在峰值后保持不变。

$$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (3)$$

$$f_{cc} = f_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_1}{f_{co}}} - 2 \frac{f_1}{f_{co}} \right) \quad (4)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中: $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}$; $r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$; $E_{sec} = \frac{f_c}{\epsilon_{cc}}$ 。 f_c 为约束混凝土的应力; f_{cc} 为约束混凝土的峰值应力; f_{co} 为素

混凝土的峰值应力; f_1 为有效侧向约束力; ϵ_c 为约束混凝土应变; ϵ_{cc} 为约束混凝土峰值应变; ϵ_{co} 为普通混凝土峰值应变。

求解上述应力-应变关系的核心问题,是求解有效侧向约束力,有效侧向约束力可由有效约束系数和侧向约束力求得^[2,12],由于矩形钢管两个方向的侧向约束力不同,需要利用等效约束力的概念。

$$f_1 = k_e f'_1 \quad (6)$$

式中: f_1 为等效侧向约束力,指截面整体的等效侧向约束力; k_e 为与截面整体形状有关的有效约束系数。

3.2 有效约束系数

约束系数定义为^[12]

$$k_e = \frac{A_c}{A_c} \quad (7)$$

式中: A_c 为核心混凝土有效约束区面积; A_c 为核心混凝土总面积。

参照文献[12],方形钢套筒约束构件的核心混凝土约束模型如图 9(a)所示,图中阴影部分为约束区,假定核心混凝土距角部 0.1 倍总长范围内为有效约束区,而距边缘 0.1~0.9 倍总长范围内为非约束区,非约束区曲线为起始点处与边夹角为 45°的抛物线。假定矩形钢套筒约束试件的核心混凝土的约束模型仍满足文献[12]的规定,可得矩形钢套筒约束构件有效约束区如图 9(b)所示。

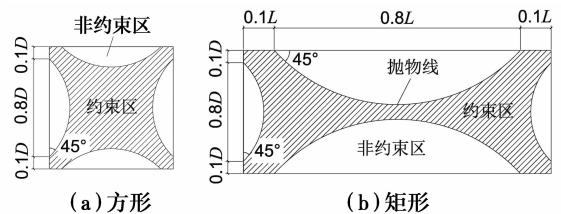


图 9 约束模型示意图

Fig. 9 Diagram of confined models

为验证上述关于矩形钢套筒有效约束区计算方法的合理性,采用大型通用有限元软件 ABAQUS,建立三维实体模型进行分析。有限元模型中,混凝土材料采用塑性损伤模型,钢板采用经典弹塑性模型,混凝土单元为 C3D8,钢套单元为 S4,将核心区混凝土及钢套筒沿截面宽度方向划分为 5 个单元,沿截面长度方向划分为 13 个单元;沿柱高方向,将核心混凝土划分为 21 个单元,将钢套筒划分为 20 个单元。有限元模型中钢套筒与内部混凝土之间采用切向无摩擦、法向硬接触的接触属性,有限元模型图如图 10 所示。核心区混凝土底面建立轴向固定约束,顶面施加轴向压缩位移,模拟轴向加载下钢套筒对混凝土的约束情况。

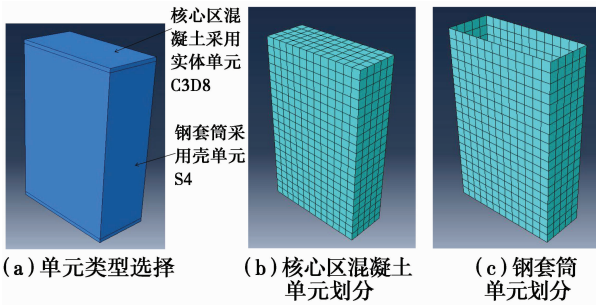


图 10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

模拟结果表明,在轴压力作用下,矩形截面角部区域混凝土的约束效果最强,长边中点处约束最弱,钢套筒内部混凝土的约束情况如图 11 所示,与图 9 (b)所示约束模型基本一致,说明本文关于矩形钢套筒约束混凝土试件有效约束区的假设是合理的。

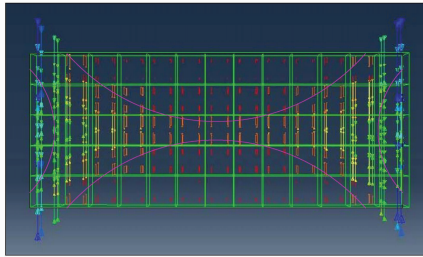


图 11 矩形钢套筒约束混凝土有限元模拟示意图

Fig. 10 Finite element simulation diagram of the rectangular steel tube confined concrete

根据图 9(b)所示,经几何计算,核心混凝土有效约束区的面积为

$$A_c = L \times D - 0.213(L^2 + D^2) \quad (8)$$

3.2 等效约束力

对矩形截面而言,其长边、短边对应的侧向约束力数值上不等,根据文献[7]提出的等效方法:核心区混凝土受到的整体约束力 f'_1 应该在 x (长边)和 y (短边)方向的侧向约束力 f'_{lx} 和 f'_{ly} 之间,当 $A_c = L^2$ 或者 $A_c = D^2$ 时,截面形状均为正方形,相应的等效约束力 f'_1 分别为长边方向的侧向约束力 f'_{lx} 和短边方向的侧向约束力 f'_{ly} ,假定 f'_1 按线性变化。

$$f'_1 = \frac{f'_{lx}(A_c - D^2) + f'_{ly}(L^2 - A_c)}{L^2 - D^2} \quad (9)$$

式中: x (长边)和 y (短边)方向的侧向约束力 f'_{lx} 和 f'_{ly} 可根据静力平衡条件,由式(10)计算(图 12)。

$$f'_{lx} = 2\sigma_{xhp}/L \quad (10a)$$

$$f'_{ly} = 2\sigma_{yhp}/D \quad (10b)$$

式中: t 为钢管壁厚; σ_{xhp} 和 σ_{yhp} 分别为峰值力时长边和短边钢管的横向应力。

式(10)中钢套筒的横向应力可以参考文献[12]

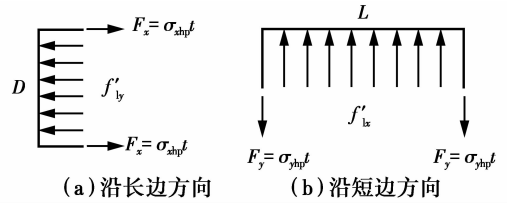


图 12 矩形钢管横向受力图

Fig. 12 Transverse force diagram of rectangular steel tube

中的公式计算。需要说明的是,文献[12]中的公式是针对方形钢管约束混凝土提出来的,其两个方向长度和厚度均相等,因此,在回归分析钢管应力与钢管宽厚比的时候,并没有区分长短边方向。矩形钢管与方形钢管有所不同,短边方向钢管中的力是因长边方向混凝土与钢管之间的相互作用而产生的(如图 12 所示),所以,计算短边方向钢管的横向应力时,应该采用长边方向的边长,计算长边方向的横向应力采用短边方向的边长。

$$\sigma_{xhp} = 0.1(D/t)^{0.5} f_{215} \quad (11a)$$

$$\sigma_{yhp} = 0.1(L/t)^{0.5} f_{215} \quad (11b)$$

式中: f_{215} 为 Q235 钢材的设计强度, $f_{215} = 215$ MPa。

4 方法的验证

将式(11)计算得到的矩形钢套筒约束混凝土试件的钢管横向应力与试验结果进行对比,如表 3 所示。结果表明,长边方向的理论计算值稍比试验值偏小,短边方向理论计算值稍比试验值偏大,但误差均在可接受范围之内,说明采用式(11)计算钢套筒横向应力是合理的。

表 3 等效约束力

Table 3 Equivalent confined force

方向	试验值/MPa	公式计算值/MPa
长边方向	114.3	91.2
短边方向	133.5	149.0

为验证提出的矩形钢套筒约束混凝土应力-应变关系的正确性,以 B 系列试件为对象,采用式(3)~式(11),得出应力-应变计算曲线,具体步骤如下:

- 1)根据式(9)~式(11),计算出等效侧向约束力 f'_1 ;
- 2)根据式(7)~式(8),计算出有效约束系数 k_c ;
- 3)根据式(6),计算出有效侧向约束力 f_1 ;
- 4)根据式(3)~(5),计算出核心区混凝土的单轴受压应力-应变曲线。

将应力-应变计算曲线与应力-应变试验曲线列于图 13 中。由图 13 可见,利用本文所给方法计算

出来的约束混凝土应力-应变曲线与试验曲线吻合良好。

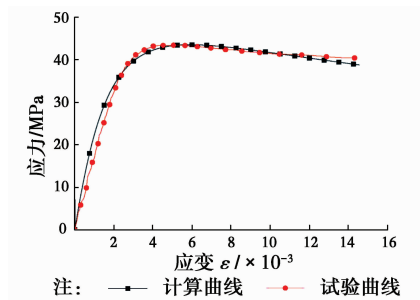


图 13 计算的约束混凝土应力-应变曲线与全封闭试件的试验曲线对比

Fig. 13 The contrast of computation stress-strain curve of confined concrete and test curve of totally enclosed specimens

5 结论

根据试验结果和理论分析,可以得到以下结论:

1) 四面全封闭试件和带缀板试件的力-位移曲线在峰值荷载前基本一致,全封闭试件下降段较平缓,带缀板试件下降段略为陡峭。在整个加载过程中,两组试件的焊缝没有发生明显破坏,带缀板试件的缀板没有发生明显变形。

2) 矩形钢套筒能对其内部混凝土形成有效约束,约束混凝土的峰值应力大幅度提高,应力-应变曲线的下降段更加平缓,试件变形能力得到了明显改善。

3) 在 Mander 模型和方钢管柱研究基础上提出的矩形钢套筒约束混凝土应力-应变关系计算模型,能够较为准确地反映出钢套筒混凝土的峰值应力和变形能力的改善效果,计算曲线与试验曲线吻合良好。

参考文献:

[1] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Observed stress-strain behavior of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 114(8): 1827-1849.

[2] 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.

[3] 史庆轩,王南,田园,等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压应力-应变全曲线研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4):144-151.

SHI Q X, WANG N, TIAN Y, et al. Study on stress-strain relationship of high-strength concrete confined

with high-strength stirrups under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4):144-151. (in Chinese)

- [4] SAATCIOGLU M, RAZVI S R. Strength and ductility of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6):1590-1607.
- [5] SRINIVASAN C N, SCHNEIDER S P. Axially loaded concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(10):1202-1206.
- [6] 蔡健,龙跃凌. 带约束拉杆矩形钢管混凝土的本构关系[J]. 工程力学, 2008, 25(2):137-143.
- CAI J, LONG Y L. Constitutive relationship of rectangular CFT columns with binding bars [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 137-143. (in Chinese)
- [7] 郭小平. 矩形钢管混凝土中核心混凝土的本构关系[J]. 湖南交通科技, 2011, 37(2):74-79.
- GUO X P. Constitutive relationship of concrete core confined by rectangular steel tube [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2011, 37(2): 74-79. (in Chinese)
- [8] FENG P, CHENG S, BAI Y. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression [J]. Composite Structures, 2015, 123: 312-324.
- [9] KATWAL U, TAO Z, HASSAN M K. Simplified numerical modelling of circular concrete-filled steel tubular stub columns [M]. Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges, CRC Press, 2016: 223-230.
- [10] XIAO Y, TOMII M, SAKINO K. Experimental study on the design method to prevent the shear failure of reinforced concrete short circular columns by confining in steel tube [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1986, 8: 535-542.
- [11] 张素梅,刘界鹏,马乐. 圆钢管约束高强混凝土轴压短柱的试验研究与承载力分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 24-31.
- ZHANG S M LIU J P MA L XING T. Axial compression test and analysis of circular tube confined HSC stub columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 24-31. (in Chinese)
- [12] 周绪红,甘丹,刘界鹏,等. 方钢管约束钢筋混凝土轴压短柱试验研究与分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 68-74
- ZHOU X H, GAN D, LIU J P, et al. Experiment and analysis on square tubed reinforced concrete stub columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 68-74. (in Chinese)

- [13] HANY N F, HANTOUCHE E G, HARAJLI M H. Axial stress-strain model of CFRP-confined concrete under monotonic and cyclic loading [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(6): 04015004.
- [14] LU Y, LI N, LI S, et al. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 74-85.
- [15] SHIRMOHAMMADI F, ESMAEILI A, KIAEIPOUR Z. Stress-strain model for circular concrete columns confined by FRP and conventional lateral steel [J]. *Engineering Structures*, 2015, 84: 395-405.
- [16] ZIAADINY H, ABBASNIA R. Unified cyclic stress-strain model for FRP-confined concrete circular, square and rectangular prisms [J]. *Structural Concrete*, 2016, 17(2): 220-234.
- [17] AFIFI M Z, MOHAMED H M, BENMOKRANE B. Theoretical stress-strain model for circular concrete columns confined by GFRP spirals and hoops [J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 202-213.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2010 [S]. 北京:中国标准出版社,2010. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)