

引用本文:任志刚,徐圣海,李培鹏,等.圆端形钢管混凝土偏压柱截面优化研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(4):1-12.

REN Zhi-gang, XU Sheng-hai, LI Pei-peng, et al. Sectional Optimization of Round-ended Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Eccentric Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(4): 1-12.

DOI:10.19815/j.jace.2020.08031

圆端形钢管混凝土偏压柱截面优化研究

任志刚,徐圣海,李培鹏,刘 闯

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘要:为研究圆端形钢管混凝土(RRCFST)柱的截面优化方法,基于混凝土分区思想将RRCFST截面分割为中部矩形与2个半圆形,分别采用不同的混凝土约束本构关系,利用有限元软件ABAQUS建立有限元模型,并用13个RRCFST柱构件的试验结果与有限元结果进行对比,验证了模型的合理性。通过有限元建模方法设置3组共462个RRCFST柱模型,在保证每组内各模型混凝土与钢材的强度及用量恒定的情况下,细致研究了截面高宽比对RRCFST柱偏压承载能力的影响。通过有限元分析RRCFST柱轴向压力-弯矩($N-M$)破坏曲线中的直线段部分与截面高宽比的关系,进一步验证了GB 50396—2014中钢管混凝土短柱偏压构件设计方法对RRCFST短柱构件的适用性。根据RRCFST短柱偏压构件设计方法,控制混凝土与钢材的强度及用量不变的情况下,通过偏压验算式推导得到RRCFST短柱构件的 $N-M$ 破坏荷载包络曲线表达式。提出基于材料强度及用量层面的RRCFS短柱偏压承载力验算方法及满足承载要求的截面高宽比计算方法,为截面优化研究及工程应用提供参考。结果表明:在固定材料强度及用量不变的条件下,RRCFST短柱的 $N-M$ 破坏荷载包络曲线由一段直线段及2段曲线段组成;推导得到上述包络曲线表达式后,可在构件设计过程中直接计算判断所用材料是否足量,并计算确定构件最优截面尺寸。

关键词:圆端形钢管混凝土;截面优化;截面高宽比;承载力;包络曲线

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)04-0001-12

Sectional Optimization of Round-ended Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Eccentric Compression

REN Zhi-gang, XU Sheng-hai, LI Pei-peng, LIU Chuang

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: In order to study the sectional optimization method of round-ended rectangular concrete-filled steel tubular (RRCFST) columns, the finite element model was established by using ABAQUS based on the idea of concrete partition that the round-ended rectangular section of concrete was divided into middle rectangle and two semi-circular cross-sections for using different concrete constitutive relationships, the simulation results were compared with the test results of 13 RRCFST stub columns, and the rationality of the model was verified. Then three groups of 462 RRCFST column models were set up by using the finite element modeling method, under the condition that the strength and amount of concrete and steel of each model in each group were

收稿日期:2020-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51778512)

作者简介:任志刚(1974-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:renzg@163.com。

constant, the influence of aspect ratio on load bearing capacity of RRCFST column under compression was studied in detail. The relationship between the straight line part of the axial compression-bending moment (N - M) failure curve of RRCFST column and the aspect ratio was analyzed by finite element method, and the applicability of the design method of concrete-filled steel tubular (CFST) members under eccentric compression proposed by GB 50396-2014 for RRCFST stub column members was further verified. According to the design method of eccentric compression RRCFST members and assuming that the strength and amount of concrete and steel were constant, the N - M failure load envelope curve expression of RRCFST members based on level of material strength and amount was derived by using the eccentric pressure checking formula. The bearing capacity checking method of RRCFST stub column under eccentric compression based on level of material strength and amount, and the calculation method of aspect ratio that meeting the bearing requirements were both proposed, which provided the reference for sectional optimization research and engineering application. The results show that the N - M failure load envelope curve of RRCFST short column consists of a straight line segment and two curved segments under the condition that the material strength and dosage remain unchange. After deriving the expression of the envelope curve, it can directly calculate and judge whether the material is sufficient or not in the process of component design, and calculate the optimal section size of the component.

Key words: RRCFST; sectional optimization; aspect ratio; bearing capacity; envelope curve

0 引言

钢管混凝土 (Concrete-filled Steel Tube, CFST) 构件具有承载力高、延性好、制作方便、装配性强、施工周期短等优点,被广泛用于桥梁及装配式结构中。圆端形钢管混凝土 (Round-ended Rectangular Concrete-filled Steel Tube, RRCFST) 构件结合了矩形钢管混凝土构件抗弯承载能力强与圆形钢管混凝土构件轴压承载力大、延性好的特点^[1],逐渐被应用于大型桥梁工程中,如武汉后湖大桥塔柱、厦门杏林湾路段边墩等,图 1 为武汉后湖大桥塔柱,其中, H , B , t 分别为截面高度、宽度和外钢管壁厚度。

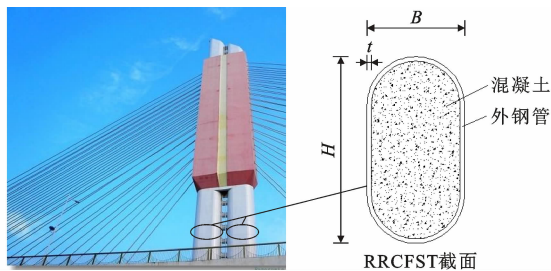


图 1 武汉后湖大桥塔柱

Fig. 1 Tower Column of Wuhan Houhu Bridge

对于圆形或矩形钢管混凝土短柱构件,其轴压极限承载力与构件截面高宽比 H/B 无关^[2-4],对于 RRCFST 短柱构件而言,因其外管壁对核心混凝土

提供的侧向约束效应介于圆形和矩形钢管之间^[5-6],特殊的截面形式使得构件截面高宽比 H/B 与其轴压极限承载力密切相关^[7-10]。在承载阶段, RRCFST 短柱钢管对核心混凝土提供的约束效应主要集中在圆弧段,随着截面高宽比 H/B 的变化,钢管对核心混凝土的约束效应也发生变化^[1,11-12]。由此则产生了以材料充分利用为目标的 RRCFST 偏压柱截面优化问题:在所使用的材料强度及用量给定的情况下,随着 RRCFST 柱截面高宽比 H/B 的增加,构件轴压承载力减小,同时构件绕强轴的抗弯承载力显著提高^[13]。因此产生了基于钢材及混凝土合理、充分利用的 RRCFST 构件截面高宽比 H/B 选取问题。

在现有相关 RRCFST 构件的研究中,少有研究与 RRCFST 构件截面优化相关。本文通过 Python 语言利用有限元软件 ABAQUS 建立了一定数量的 RRCFST 偏压柱模型,细致研究了圆端形截面高宽比 H/B 对构件极限受荷能力的影响,并提出了基于材料强度及用量层面的构件承载力快速验算、截面快速确定方法。

1 数据来源及试验简介

1.1 数据来源

本文引用文献[7]中圆端形钢管混凝土短柱轴

压试验数据作有限元模型验证,具体构件参数见表 1,其中 L 为构件长度, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, f_y 为钢材屈服强度, e 为加载线与截面强轴的距离, $N_{u,e}$ 为试验测得构件极限承载力, $N_{u,0}$ 为有限元方法分析得到的构件极限承载力,所引用 10 个构件截面高宽比 $H/B=2\sim 4$ 。

1.2 试验简介

除引用上述 RRCFST 构件轴压试验数据外,笔者所在课题组也进行了相应的圆端形钢管混凝土柱偏压试验。混凝土强度由同条件成型养护的立方体

试块测得,其强度为 30.0 MPa。钢材采用 Q235 钢材,对 4 个标准钢材试件进行拉伸试验,测得其屈服强度为 254 MPa,极限抗拉强度为 318 MPa,弹性模量 E_s 为 2.06 GPa,详细内容见文献[14]。

RRCFST-1,RRCFST-2,RRCFST-3 为圆端形钢管混凝土构件,其截面高宽比 $H/B=1.5\sim 2.5$,具体构件参数见表 1。

偏压试验在湖北工业大学结构大厅 500 t 压力机上进行,构件两端固定方式为铰接,实际采用 2 个圆柱铰替代,如图 2 所示。试验采用分级加载方式

表 1 构件参数与极限承载力

Tab. 1 Parameters and Ultimate Bearing Capacity of Specimens

构件编号	H/mm	B/mm	t/mm	L/mm	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	e/mm	$N_{u,0}/\text{kN}$	$N_{u,e}/\text{kN}$	$N_{u,e}/N_{u,0}$
WST7-A	608	186	3.75	1 200	39.3	311	0	4 826	4 980	1.03
WST7-B	605	194	3.77	1 200	39.3	311	0	4 944	5 120	1.04
WST8-A	805	190	3.74	1 600	39.3	311	0	6 521	6 289	0.96
WST8-B	806	191	3.67	1 600	39.3	311	0	6 493	6 345	0.98
WST9-A	405	198	3.75	800	57.4	311	0	4 203	4 473	1.06
WST9-B	405	198	3.70	800	57.4	311	0	4 180	4 468	1.07
WST10-A	610	196	3.80	1 200	57.4	311	0	7 201	6 858	0.95
WST10-B	606	189	3.77	1 200	57.4	311	0	6 905	6 550	0.95
WST11-A	805	190	3.68	1 600	57.4	311	0	9 065	8 318	0.92
WST11-B	805	194	3.80	1 600	57.4	311	0	8 799	8 525	0.97
RRCFST-1	225	150	4.00	675	30.0	254	40	1 253	1 245	0.99
RRCFST-2	300	150	4.00	920	30.0	254	25	1 638	1 569	0.96
RRCFST-3	375	150	4.00	1 160	30.0	254	30	1 732	1 796	1.04
平均值										0.99

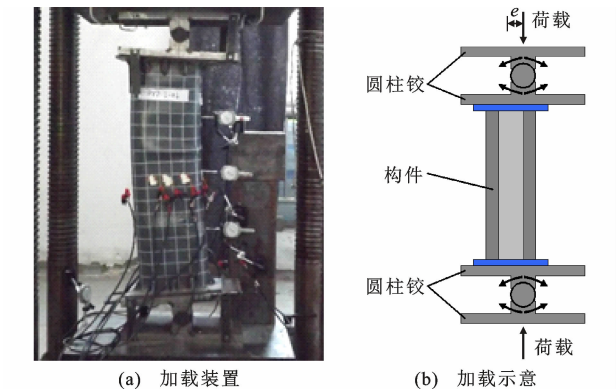


图 2 加载装置及示意图

Fig. 2 Loading Device and Diagram

进行加载,按估算最大荷载的 10% 逐级增加,当荷载即将达到估算最大荷载时,缓慢减小荷载增速至估算最大荷载的 5%;每级荷载的持荷时间为 2~3 min,接近破坏时慢速连续加载直至构件破坏。

2 有限元模型建立与验证

2.1 概述

本文采用非线性有限元分析软件 ABAQUS 进

行模型建立及分析计算。考虑到模型及所加荷载的对称性,所有模型均采用 1/2 模型进行建模分析。模拟采用加载线方式施加位移荷载,荷载通过大刚度弹性加载板传递给钢管混凝土柱。

在网格划分方面,采用 C3D8R 实体单元对加载板及分割为规则几何形状后的混凝土进行结构化网格划分;外钢管采用 S4R 壳体单元进行结构化网格划分。为保证有限元模拟结果的精确性,设置初始网格尺寸为 50 mm,逐步缩小进行多次试算,发现结构化网格尺寸缩小至 20 mm 以下时,构件极限承载力计算结果波动较小并趋于稳定,后文根据模型具体尺寸,取网格尺寸均为 15 mm 至 20 mm,以综合考虑结果准确性与计算速度。

关于初始缺陷对 RRCFST 柱受压承载能力的影响,取初始偏心距 e_0 予以考虑。已有学者证明一定取值范围内的偏心距 $e_0=0,t/10,t,L/1\ 000$ 对 RRCFST 短柱模型的分析结果影响均较小^[8]。本文统一按照文献[15]中建议的初始偏心距 $e_0=L/1\ 000$ 以考虑 RRCFST 短柱及中长柱的初始缺陷影响。

模型各部件之间的相互作用方式如下:加载板与钢管、核心混凝土分别采用耦合(Coupling)、绑定(Tie)的作用方式;外钢管与核心混凝土之间法向接触采用硬接触(Hard Contact),切向接触采用惩罚性摩擦(Penalty)接触方式,摩擦因数取 0.5^[11]。加载线与其正上方的参考点耦合(Coupling),限制参考点水平方向平动和沿 x, y 方向转动,并通过在 z 方向施加位移的方式实现构件上边界约束与模型加载。完整模型的网格划分及加载示意如图 3 所示。

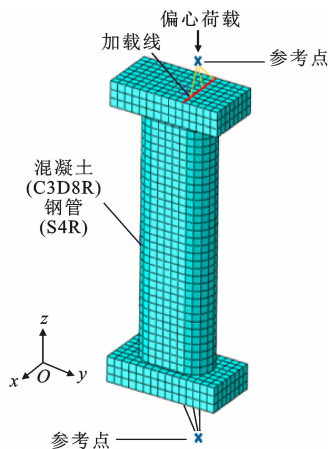


图 3 网格划分及加载示意图

Fig. 3 Grid Generation and Loading Diagram

2.2 混凝土本构关系

模型中混凝土采用塑性损伤模型,流动偏心率取 0.1,双轴等压强度与单轴强度比取 1.225,黏性系数取 1×10^{-5} ^[16]。

基于圆端形钢管混凝土构件具有圆形及矩形构件的力学特点,现有研究已提出并使用了多种有限元建模方案,并在承载力方面取得了较好的预测结果。Ding 等^[7]运用钢管混凝土统一本构关系进行了有限元分析;Hassanein 等^[8]提出将核心混凝土部件分为圆端区域及矩形区域,分别使用对应的圆形钢管混凝土本构^[17]与矩形钢管混凝土本构^[18-19]以进行有限元建模分析,分区示意如图 4 所示;王静峰等^[20]提出等效方法,根据圆端形截面高宽比将 RRCFST 构件等效为圆形或矩形钢管混凝土构件,再使用相应的圆形或矩形钢管混凝土本构关系进行有限元分析。

合理的混凝土本构关系选取决定着有限元模型的科学性与结果的准确性。上述相关学者的 RRCFST 构件研究表明,多种混凝土本构关系均可较准确预测 RRCFST 柱构件的极限承载力。经对比发现,在现有常用于 RRCFST 构件有限元分析的混凝土本构关系中,基于混凝土分区思想并使用圆

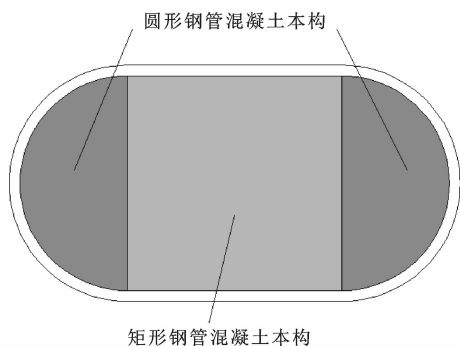
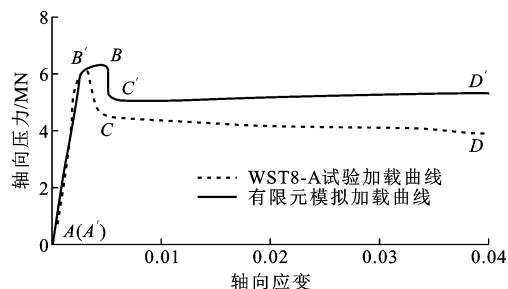


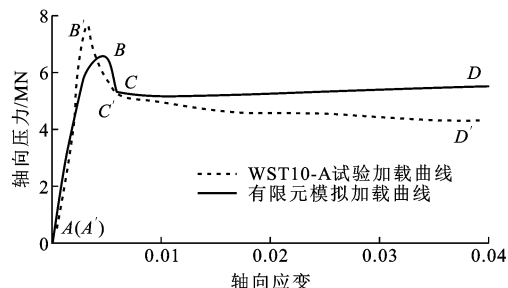
图 4 分区模型截面示意图

Fig. 4 Sectional Diagram of Partition Model

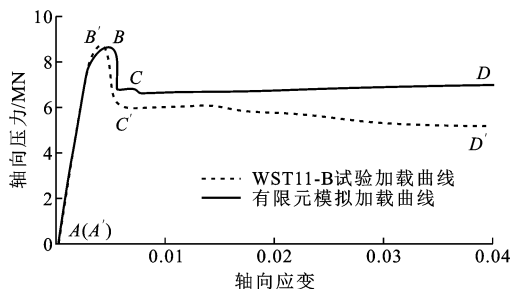
角矩形及圆形钢管混凝土本构关系所得模型轴力-轴向应变曲线与试验曲线在全加载阶段拟合更好,其中使用混凝土分区模型的部分模拟曲线^[4]与使用圆角矩形及圆形钢管混凝土本构关系^[4]的模拟曲线如图 5、6 所示。



(a) 构件WST8-A



(b) 构件WST10-A



(c) 构件WST11-B

图 5 文献[4]荷载-轴向应变曲线

Fig. 5 Load-axial Strain Curves of Literature [4]

现根据文献[4]提出的分区建模思想,将模型混凝土构件的截面分为半圆形区域与矩形区域后,使用圆形、矩形钢管混凝土受压本构关系^[4]进行有限

元模拟分析。

2.2.1 圆形、矩形钢管混凝土本构关系

圆形、矩形钢管混凝土本构关系为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\beta_0 = \begin{cases} (2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\xi + 0.5)^7} f'_c \times 0.5 \geq 0.12 & \text{圆形截面} \\ \frac{f'_c{}^{0.1}}{1.2 \sqrt{1 + \xi}} & \text{矩形截面} \end{cases} \quad (2)$$

$$\eta = \begin{cases} 2 & \text{圆形截面} \\ 1.6 + \frac{1.5}{x} & \text{矩形截面} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$; $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$; $\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}}$; $\epsilon_0 = \epsilon_c + 800 \xi^{0.2} \times 10^{-6}$; $\sigma_0 = f'_c$; $\epsilon_c = (1\ 300 + 12.5 f'_c) \times 10^{-6}$; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; σ, ϵ 分别为核心混凝土应力及应变; ϵ_0 为受约束核心混凝土达到峰值应力 σ_0 时的应变; ϵ_c 为无钢管约束混凝土达到峰值应力时的应变; A_s, A_c 分别为钢管和混凝土的截面面积。

混凝土弹性模量取 $E_c = 4\ 730 \sqrt{f'_c}$ 。

2.2.2 混凝土受拉软化本构

混凝土受拉软化本构采用沈聚敏等^[21]的推荐公式计算,其本构关系曲线如图 6 所示(其中, σ_t 和 U_t 分别为混凝土受拉应力和对应的裂缝宽度, σ_{t0} 和 U_{t0} 分别为混凝土最大受拉应力和应力下降至 0 时对应的裂缝宽度, G_f 为单位面积内产生一条连续裂缝所需要的能量),表达式为

$$\sigma_{t0} = 0.26 \times (1.25 f'_c)^{2/3} \quad (4)$$

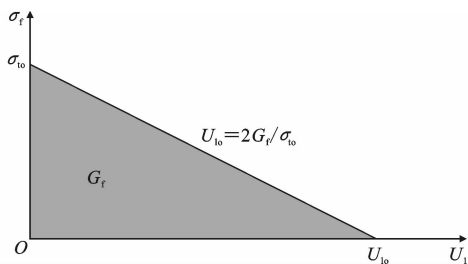


图 6 混凝土受拉软化模型

Fig. 6 Concrete Softening Model Under Tension

针对不同的混凝土强度, σ_{t0} 和 U_{t0} 的关系有所不同,取决于 G_f 的取值。当混凝土强度为 C20 时, $G_f = 40 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,而对于 C40 混凝土, $G_f = 120 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,其他强度混凝土取线性插值计算^[14]。

2.3 钢材本构关系

钢管的本构关系采用 Von Mises 屈服准则下的钢材弹塑性硬化本构模型^[22],其表达式为

$$\sigma_i = \begin{cases} E_s \epsilon_i & \epsilon_i \leq \epsilon_y \\ f_y & \epsilon_y < \epsilon_i \leq \epsilon_{st} \\ f_y + \zeta E_s (\epsilon_i - \epsilon_{st}) & \epsilon_{st} < \epsilon_i \leq \epsilon_u \\ f_u & \epsilon_i > \epsilon_u \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_i, ϵ_i 分别为钢材的等效应力及对应的应变; E_s 为钢材的弹性模量; f_u 为钢材的极限强度,取 $f_u = 1.5 f_y$; ζ 为强化系数; ϵ_y 为钢材屈服时的应变; ϵ_{st} 为钢材强化时的应变; ϵ_u 为钢材达极限强度时的应变, $\epsilon_u = \epsilon_{st} + 0.5 f_y / (\zeta E_s)$,取 $\epsilon_{st} = 12 \epsilon_y$, $\epsilon_u = 120 \epsilon_y$, $\zeta = 1/216$ 。

3 模型验证

上述有限元方法分析得到各构件极限承载力 $N_{u,0}$ 与试验结果对比如表 1 所示,其中最大偏差为 7%,平均偏差为 1%,表明上述建模方法对构件极限承载力预测结果良好。图 7 为有限元模拟加载曲线与试验实测加载曲线,由图 7 可知,使用钢管混凝土本构关系的模拟加载曲线与试验曲线吻合较好。证明该建模方法具有合理性与可靠性。

4 RRCFST 偏压构件截面优化

实际偏压 RRCFST 柱设计中,经计算得到构件所承受的最不利荷载组合(轴向压力 N ,弯矩 M)后,预设构件的材料强度 f_y, f_{cu} 及构件尺寸参数 H, B, L ,进而开展相应承载力验算及其他验算。若承载力验算不满足,则考虑增大构件尺寸、材料强度、变换截面高宽比等参数后重复上述步骤,直至满足要求。实际上,上述设计步骤缺少对材料使用效率的考虑:在承载力验算不通过进而考虑增大构件尺寸、材料强度时,可能忽略截面高宽比 H/B 变化对 RRCFST 构件承载能力的影响。

在材料强度及用量不变的条件下,通过改变 RRCFST 构件截面的高宽比 H/B ,即可改变构件所能承受的最大组合荷载(N_{\max}, M_{\max})大小。通过细致研究截面高宽比 H/B 与构件所能承受的最大组合荷载(N_{\max}, M_{\max})的关系,进而确定给定材料情况下不同截面高宽比的 RRCFST 柱构件所能承受的所有最不利荷载(N, M)的总和,即可达到基于材料强度及用量层面的 RRCFST 柱构件承载力快速验证、截面选优的目的,从而简化设计过程,并充分发挥钢、混凝土材料组合受力效果,提高材料利用

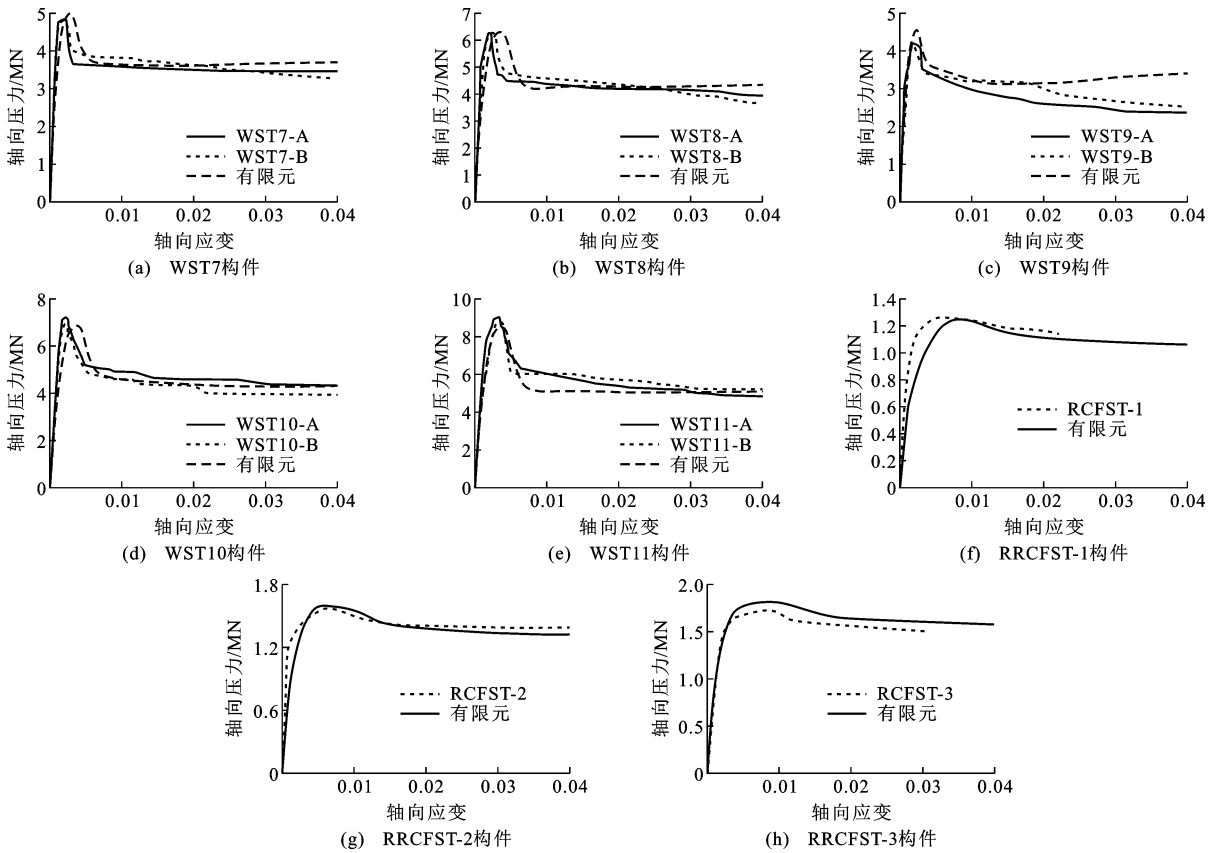


图7 构件荷载-轴向应变曲线

Fig. 7 Load-axial Strain Curves of Specimens

效率。

4.1 模型参数设计

为细致研究截面高宽比对构件承载能力的影响,现设置 A,B,C 三组构件进行分析。每组均含有构件 154 个,且每组内各构件的材料用量(A_s, A_c)、材料强度(f_{cu}, f_y)、构件长度 L 作为基本参数保持相同,通过改变构件截面高宽比 H/B 及荷载偏心率 e/H 以探究截面高宽比 H/B 与构件极限组合荷载(N_{max}, M_{max})的变化关系,具体构件参数及有限元模拟结果如表 2 所示。将表 2 结果汇总并以图形方式展示,如图 8 所示,其中 A,B,C 组构件长度 $L=0.8$ m。A,B 组模型的区别在于混凝土强度 f_{cu} 、钢材屈服强度 f_y 不同;A,C 组模型的区别在于钢材用量及混凝土材料用量不同。

4.2 参数分析

目前各国家地区尚缺少计算 RRCFST 构件压弯承载能力的相关规范。对于圆端形钢管混凝土偏压构件的承载能力计算,文献[23]进行了大量的 RRCFST 偏压柱构件有限元模拟试验,验证了《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50396—2014)[2]中 CFST 构件压弯承载设计模式对 RRCFST 偏压短

柱构件设计的准确性与稳定性,本文不再作重复验证,其 CFST 构件压弯破坏曲线可根据式(6),(7)得到,但将其运用于 RRCFST 偏压短柱构件设计时,要注意将 N_0, M_0 及相关系数更换以适用于 RRCFST 构件。

对于 $\frac{N_e}{N_0} \geq 2\eta_0$

$$\frac{N_e}{N_0} + \frac{\alpha\beta_m M_e}{M_0} \leq 1 \quad (6)$$

对于 $\frac{N_e}{N_0} < 2\eta_0$

$$-\frac{bN_e^2}{N_0^2} - \frac{cN_e}{N_0} + \frac{\beta_m M_e}{M_0} \leq 1 \quad (7)$$

式中: $\alpha=1-2\eta_0$; $b=(1-\zeta_0)/\eta_0^2$; $c=2(\zeta_0-1)/\eta_0$; $\xi \leq 0.4$ 时 $\eta_0=0.5-0.245\xi$, $\xi > 0.4$ 时 $\eta_0=0.1+0.14\xi^{-0.84}$; $\zeta_0=0.18\xi^{-1.15}+1$; η_0, ζ_0 为约束效应系数 ξ 的衍生系数; β_m 为等效弯矩系数,在本文中取值为 1; N_e 为构件极限轴向承载力; M_e 为构件极限抗弯承载力; N_0 为 RRCFST 短柱轴压承载力; M_0 为 RRCFST 短柱主轴抗弯承载力。

对于 N_0 ,按以下经验公式取值[7]

$$N_0 = A_c f_c + [1 + (0.8 + \frac{0.9B}{H})\xi] \quad (8)$$

表 2 A 组构件轴向压力和弯矩

Tab. 2 Ultimate Axial Force and Bending Moment of Group A Specimens

e/H	$H/B=1.0$		$H/B=1.2$		$H/B=1.5$		$H/B=1.8$		$H/B=2.1$		$H/B=2.4$		$H/B=2.7$		$H/B=3.0$		$H/B=3.3$		$H/B=3.6$		$H/B=4.0$	
	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)
0.00	5 271	4.2	5 105	4	4 636	3.7	4 159	3.3	4 140	3.3	4 125	3.3	4 066	3.3	4 077	3.3	3 908	3.1	3 883	3.1	3 825	3.1
0.05	4 601	91.0	4 378	93	4 012	88.0	3 762	74.0	3 671	77.0	3 617	80.0	3 559	82.0	3 544	87.0	3 450	99.0	3 517	94.0	3 408	97.0
0.10	4 124	147.0	3 938	150	3 618	144.0	3 408	140.0	3 292	137.0	3 218	142.0	3 163	146.0	3 146	152.0	3 025	171.0	3 116	165.0	3 008	170.0
0.20	3 284	218.0	3 180	225	2 975	226.0	2 828	225.0	2 692	228.0	2 633	231.0	2 575	238.0	2 556	247.0	2 499	256.0	2 557	251.0	2 408	274.0
0.30	2 628	256.0	2 594	269	2 471	276.0	2 364	280.0	2 246	283.0	2 170	285.0	2 116	293.0	2 099	305.0	2 049	315.0	1 966	325.0	1 941	334.0
0.40	2 156	278.0	2 151	295	2 079	307.0	1 996	314.0	1 895	317.0	1 810	321.0	1 759	325.0	1 739	336.0	1 674	348.0	1 649	355.0	1 574	366.0
0.50	1 786	287.0	1 791	306	1 750	322.0	1 674	329.0	1 589	332.0	1 509	334.0	1 456	355.0	1 438	348.0	1 415	362.0	1 390	372.0	1 374	382.0
0.60	1 546	297.0	1 560	322	1 523	336.0	1 468	346.0	1 399	352.0	1 342	357.0	1 291	361.0	1 265	374.0	1 237	382.0	1 216	383.0	1 232	391.0
0.70	1 357	303.0	1 373	326	1 349	346.0	1 299	357.0	1 237	361.0	1 180	365.0	1 148	374.0	1 125	387.0	1 091	391.0	1 073	400.0	1 083	402.0
0.80	1 205	306.0	1 208	326	1 208	354.0	1 166	366.0	1 117	373.0	1 077	381.0	1 018	382.0	1 008	394.0	984	403.0	963	409.0	891	417.0
1.00	980	308.0	1 011	327	983	358.0	956	374.0	918	382.0	881	388.0	847	393.0	837	408.0	815	415.0	806	427.0	748	431.0
1.50	655	305.0	647	322	660	357.0	649	378.0	625	388.0	598	394.0	581	403.0	577	420.0	563	428.0	552	438.0	515	442.0
2.50	390	300.0	378	310	391	350.0	385	372.0	377	389.0	351	388.0	355	404.0	349	422.0	341	430.0	333	438.0	248	442.0
16.00	59	286.0	57	293	59	333.0	58	355.0	55	365.0	56	384.0	54	396.0	54	415.0	53	426.0	50	418.0	31	436.0

注:A 组构件全为短柱,其混凝土截面面积 $A_c=71\,416\,\text{mm}^2$,钢管截面面积 $A_s=6\,581\,\text{mm}^2$,长度 $L=0.8\,\text{m}$,混凝土轴心抗压强度 $f_{cu}=30\,\text{MPa}$,钢材屈服强度 $f_y=235\,\text{MPa}$;B 组构件全为短柱,其混凝土截面面积 $A_c=71\,416\,\text{mm}^2$,钢管截面面积 $A_s=6\,581\,\text{mm}^2$,长度 $L=0.8\,\text{m}$,混凝土轴心抗压强度 $f_{cu}=40\,\text{MPa}$,钢材屈服强度 $f_y=345\,\text{MPa}$;C 组构件全为中长柱,其混凝土截面面积 $A_c=17\,854\,\text{mm}^2$,钢管截面面积 $A_s=1\,842\,\text{mm}^2$,长度 $L=0.8\,\text{m}$,混凝土轴心抗压强度 $f_{cu}=30\,\text{MPa}$,钢材屈服强度 $f_y=235\,\text{MPa}$;B、C 组构件与 A 组构件完全相同;因篇幅原因,B、C 组构件有限元模拟结果汇总表省略,仅在图 8 中以散点形式表示。

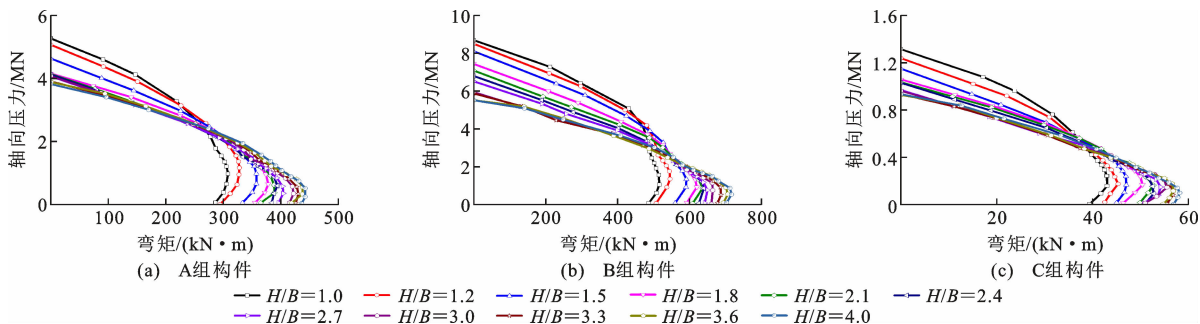


图 8 构件 N-M 曲线

Fig. 8 N-M Curves of Specimens

对于 M_0 , 按以下经验公式取值^[23]

$$M_0 = \gamma_m f_{sc} W_{sc} \quad (9)$$

$$f_{sc} = \begin{cases} [1.14 + 0.27\xi + 0.75(H/B)\xi] f_{ck} & 1 \leq H/B \leq 1.44 \\ (1.18 + 0.85\xi) f_{ck} & 1.44 < H/B \leq 4 \end{cases} \quad (10)$$

式中: γ_m 为截面塑性发展系数; W_{sc} 为受弯构件绕强轴的截面模量; f_{sc} 为实心钢管混凝土抗压强度设计值。

对比图 8(a), (b) 与图 8(a), (c) 可知, 尽管 A, B 组构件之间具有不同的材料强度, A, C 组构件之间具有不同的材料用量, 其 N-M 曲线均可近似看作一段直线与一段抛物线组成, 此结果也验证了式 (6), (7) 的破坏曲线特点。

4.2.1 截面高宽比与轴压承载力的关系

现分析破坏曲线的直线段部分, 将图 8 中各曲线直线段部分单独取出, 绘制成图 9 以方便分析总结。

将 A, B, C 组构件 $e=0$ (轴压荷载) 情况下的有限元分析最大承载力相关结果绘制成图 10(a)。可以看出, 在截面高宽比 $H/B=1\sim4$ 的范围内, 随着截面高宽比 H/B 的增加, RRCFST 构件的最大轴压承载力减小, 且其变化速率变小。显然此结果与式 (8) 所反映的规律是一致的。

4.2.2 截面高宽比与破坏曲线直线段的斜率关系

由图 10(b) 各组构件直线段斜率散点拟合曲线可以看出, 其直线段的斜率总为负值, 随着截面高宽比的增大而增大, 且增大速率变小。结合 GB 50396—2014 中直线段计算式, 经变换得到斜率 k 为

$$k = -\frac{\alpha\beta_m N_0}{M_0} \quad (11)$$

不难看出, 在各材料用量不变的条件下, RRCFST 短柱偏压承载力有限元分析结果与上述设计模式中破坏曲线直线段斜率变化规律一致。

4.2.3 截面高宽比与 N-M 极限荷载曲线直线段右端点的关系

N-M 极限荷载曲线直线段的右端点是 N-M 极限荷载曲线中的关键点, 它是直线段与抛物线段的分界点, 如图 11(a) 中的 B 点。为较全面地研究 RRCFST 柱构件破坏曲线直线段随截面高宽比 H/B 变化的特性, 现将 A, B, C 三组构件各自近似直线段的 B 点取出, 并绘制成图 10(c)。可以看出, 当截面高宽比 H/B 变化时, B 点 N 随着弯矩 M 的增加而减小。

探究当截面高宽比 H/B 变化时 B 点在 N-M 曲线上的移动规律。根据式 (6), 对于直线

$$\frac{N_e}{N_0} + \frac{\alpha\beta_m M_e}{M_0} = 1 \quad (12)$$

当取

$$\frac{N_e}{N_0} = 2\eta_0 \quad (13)$$

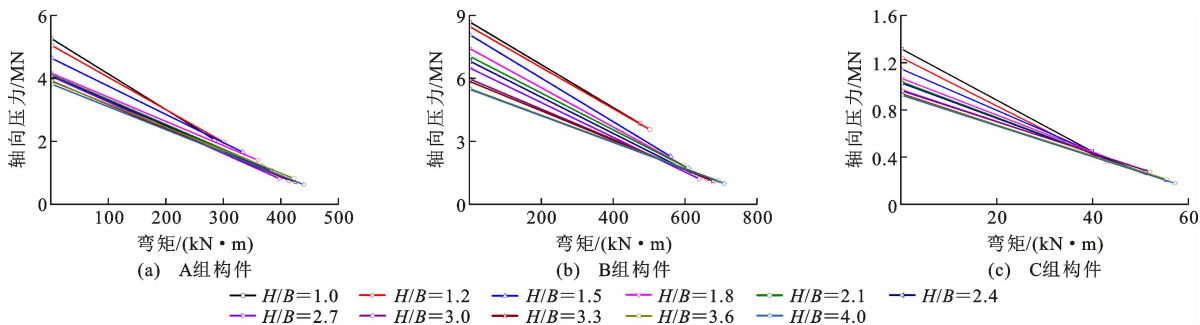
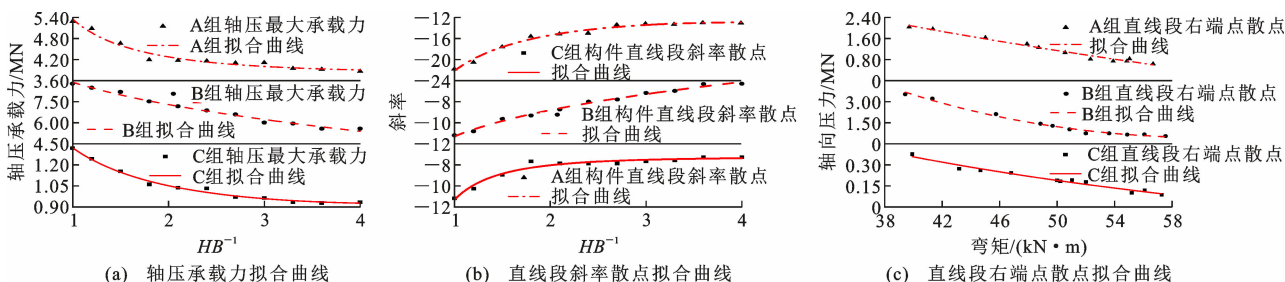
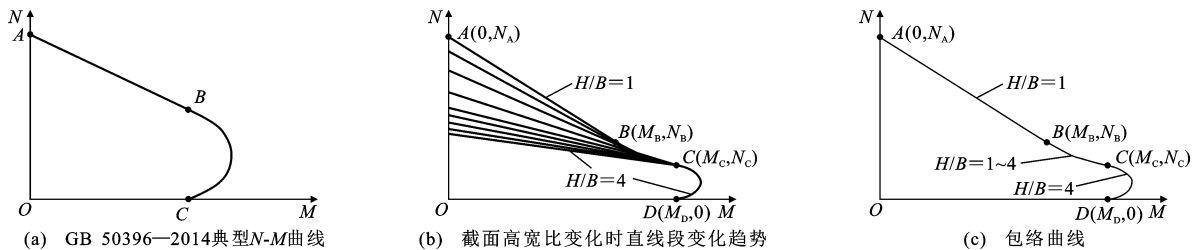
在直线段取得右部端点 B。现将此条件及相关参数代入直线方程, 得

$$\left. \begin{aligned} N_e &= 2\eta_0 N_0 \\ M_e &= M_0 = \gamma_m f_{sc} W_{sc} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

显然, 在各材料截面面积 (A_c, A_s)、材料强度 (f_c, f_y) 不变的条件下, N_0 随着截面高宽比 H/B 的增大而减小, 由此 N_e 随截面高宽比 H/B 的增大而减小。对于构件抗弯能力 M_e , 由于 W_{sc} 随着截面高宽比 H/B 增大而增大, 因此构件抗弯能力也增大。

以上为根据式 (14) 分析所得 B 点的运动轨迹, 反映在 N-M 破坏曲线中即为一条单调递减的曲线, 如图 11(b) 中的 BC 段曲线所示, 其规律与图 10(c) 中有限元模拟结果一致。

通过上述分析方法结合文献 [4] 相关计算公式可知, 矩形 CFST 短柱构件其轴压极限承载力与截面高宽比 H/B 无关, 由此 B 点运动轨迹为一条水平的直线段, 具体分析过程不再赘述。

图9 构件 $N-M$ 曲线直线段Fig. 9 Linear Section of $N-M$ Curves of Specimens图10 $N-M$ 曲线直线段特征Fig. 10 Characteristics of Linear Section of $N-M$ Curves图11 $N-M$ 包络图Fig. 11 $N-M$ Envelope Diagram

4.3 破坏包络曲线

根据上述增大截面高宽比 H/B 与破坏曲线的变化特点,在给定材料强度(f_c, f_y)及材料用量(A_c, A_s)情况下,可定性绘制出固定柱长 L 的 RRCFST 偏压构件的 $N-M$ 破坏包络图,如图 11(c)所示。

直线 AB 段为截面高宽比 $H/B=1$ 时对应的 $N-M$ 破坏曲线直线段。曲线 BC 段为截面高宽比 H/B 由 1 增加至 4 时 $N-M$ 破坏曲线直线段的右端点运动轨迹,曲线 CD 段为截面高宽比 $H/B=4$ 时 RRCFST 短柱构件对应的 $N-M$ 破坏曲线二次抛物线段。

以上定性绘制出了给定材料强度及用量情况下固定柱长的 RRCFST 偏压构件的 $N-M$ 破坏包络图,其为材料强度及用量层面的破坏包络图,与具体 RRCFST 短柱构件的截面高宽比 H/B 无关。

4.3.1 基于材料强度及用量的破坏荷载包络曲线方程

图 11(c)中 A 点对应构件截面高宽比 $H/B=1$ 时 $e=0$ 的轴压破坏点,即 A 点纵坐标 N_A 为轴压情况下圆形钢管混凝土柱的最大承载力,可通过式(8)取 $H/B=1$ 得到。若将 A 点纵坐标记作 N_A ,则将其表示为

$$N_A = N_0 = F_{\text{RRCFST}}(A_c, A_s, L, f_y, f_c, \mu, H/B=1) \quad (15)$$

式中: F_{RRCFST} 为轴压情况下圆端形钢管混凝土短柱构件的极限承载力; μ 为考虑柱端约束条件的计算长度系数,按现行国家标准《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[24]取值。

图 11(c)中 B 点为截面高宽比 $H/B=1$ 的圆形钢管混凝土构件 $N-M$ 破坏曲线直线段右端点。为方便标记,令

$$M_{\text{RRCFST}}(A_c, A_s, L, f_y, f_c, \mu, H/B) = M_0 \quad (16)$$

式中: M_{RRCFST} 为圆端形钢管混凝土柱主轴抗弯承载力。

结合式(8), 则 B 点坐标(M_B, N_B)为

$$\begin{aligned} M_B &= M_{\text{RRCFST}}(A_c, A_s, L, f_y, f_c, \mu, H/B=1), \\ N_B &= 2\eta_0 F_{\text{RRCFST}}(A_c, A_s, L, f_y, f_c, \mu, H/B=1) \end{aligned} \quad (17)$$

可推导出直线 AB 段方程, 令

$$\begin{aligned} \rho_{AB}(A_c, A_s, f_y, f_c, L, \mu, M, N) &= \\ \frac{N}{F_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B=1)} - \\ \frac{2\eta_0 - 1}{M_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B=1)} M \end{aligned} \quad (18)$$

则直线段 AB 方程($0 < M \leq M_B$)为

$$\rho_{AB}(A_c, A_s, f_y, f_c, L, \mu, M, N) = 1 \quad (19)$$

对于曲线 BC 段, 可根据变化截面高宽比 $H/B=1 \sim 4$ 得到 B 点运动轨迹的参数方程, 即

$$M = M_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B) \quad (20)$$

$$N = 2\eta_0 F_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B) \quad (21)$$

式中: $1 \leq H/B \leq 4$; $M_B < M \leq M_C$, $M_C = M_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B=4)$ 。

对于图 11(c)中二次抛物线 CD 段, 可取截面高宽比 $H/B=4$ 对应的 RRCFST 偏压构件破坏曲线二次抛物线段, 根据式(7)可得其曲线表达式为

$$-\frac{bN^2}{N_{0,D}^2} - \frac{cN}{N_{0,D}} + \frac{\beta_m M}{M_{0,D}} = 1 \quad (22)$$

$$N_{0,D} = F_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B=4) \quad (23)$$

$$M_{0,D} = M_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B=4) = M_C \quad (24)$$

式中: b, c, β_m 按式(7)取值, 且 $M > M_{0,D}$ 。

至此, 推导得到 N - M 包络曲线各段的表达式为

$$\rho = \begin{cases} \rho_{AB}(A_c, A_s, f_y, f_c, L, \mu, M, N) & 0 < M \leq M_B \\ M = M_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B) \\ N = 2\eta_0 F_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B) & M_B < M \leq M_C \\ -\frac{bN^2}{N_{0,D}^2} - \frac{cN}{N_{0,D}} + \frac{\beta_m M}{M_{0,D}} = 1 & M > M_{0,D} \end{cases} \quad (25)$$

4.4 优化设计方法

对于圆形 CFST 柱构件, 其截面形式固定, 因此不存在材料强度及用量层面的三段式 N - M 破坏荷载包络曲线; 对于矩形 CFST 柱构件, 因其轴压极限承载力与截面高宽比无关的特性, 其材料强度及用量层面的 N - M 破坏荷载包络曲线仍与截面高宽比无关, 也不存在上述针对截面高宽比 H/B 的截面

优化问题。

对于一般 RRCFST 偏压短柱构件设计, 已知最不利荷载组合点(M_e, N_e)与柱端部固定方式(μ), 在预设材料用量及强度(A_c, t, L, f_y, f_c 已知)时, 可快速判断假定量的材料能否通过变换截面高宽比 H/B 以满足设计承载力要求。根据已知条件计算得到 $M_B, M_C, M_{0,D}$ 后进行判断。

若 $0 < M_e \leq M_B$, 则

$$\rho_{AB}(A_c, A_s, f_y, f_c, L, \mu, M_e, N_e) \leq 1 \quad (26)$$

若式(26)成立, 则可直接取截面高宽比 $H/B=1$ 以满足压弯承载力要求。

若 $M_B \leq M_e \leq M_C$, 则将 $M = M_e$ 代入式(20)可求出 H/B 的解 $\bar{\theta}$ 。由此根据式(21)判断

$$N_e \leq 2\eta_0 F_{\text{RRCFST}}(A_c, t, L, f_y, f_c, \mu, H/B=\bar{\theta}) \quad (27)$$

若式(27)成立, 则可取截面高宽比 $H/B=\bar{\theta}$ 以满足压弯承载力要求。

若 $M_C \leq M_e$, 可直接取截面高宽比 $H/B=4$, 再对式(7)进行验算, 若成立, 则取截面高宽比 $H/B=4$ 以满足压弯承载力要求。

若以上条件均不满足, 则表明不存在某一截面高宽比 H/B 的 RRCFST 构件能够满足预设材料使用情况下的压弯承载要求, 此时必须增加材料强度或材料用量并再次进行压弯承载力验算。

5 结 语

(1)在保证材料强度与材料用量不变的情况下, RRCFST 构件的截面高宽比 H/B 越大, 其 N - M 极限荷载曲线直线段右端点 B 的极限轴向承载力 N_e 变小, 而极限抗弯承载力 M_e 增大。

(2)基于 GB 50396—2014 中的 CFST 压弯构件设计模式, 推导得到了一般设计过程中给定材料用量(A_s, A_c)及材料强度(f_{cu}, f_y)条件下针对 RRCFST 偏压短柱构件的破坏荷载包络曲线表达式, 此材料强度及用量层面的包络曲线表达式与截面高宽比 H/B 无关。若以后有学者提出其他形式 RRCFST 构件轴压、纯弯等承载力计算公式, 本文基于控制材料强度及用量恒定的包络曲线推导思想也可为相应的截面优化研究提供参考。

(3)基于所提出的 RRCFST 偏压短柱构件的破坏荷载包络曲线表达式, 提出了快速判断给定材料下能否设计出满足承载力要求的 RRCFST 短柱构件的方法, 并能够在材料足够的情况下直接计算确定 RRCFST 偏压短柱构件的截面高宽比 H/B 。由上述方法得到的截面高宽比 H/B 是精确值, 所对

应的截面为满足承载力要求的理论最佳截面,钢管厚度 t 、截面高度 H 、宽度 B 均为精确值,在实际工程设计中仍需要适当放大取整以便于施工。

参考文献:

References:

- [1] 李德山,池思源,王志滨.圆端形钢管混凝土柱偏压力学性能研究[J].福州大学学报:自然科学版,2016,44(4):538-542.
LI De-shan,CHI Si-yuan,WANG Zhi-bin. Mechanical Behavior of Round-end Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Eccentric Load[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2016, 44(4): 538-542.
- [2] GB 50396—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S].
GB 50396—2014, Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures[S].
- [3] CECS 159:2004, 矩形钢管混凝土结构技术规程[S].
CECS 159: 2004, Technical Specification for Structures with Concrete-filled Rectangular Steel Tube Members[S].
- [4] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [5] 谢恩普,王志滨,林盛,等.圆端形钢管混凝土轴压短柱的机理分析[J].福州大学学报:自然科学版,2015,43(4):517-522.
XIE En-pu,WANG Zhi-bin,LIN Sheng, et al. Mechanism Analysis on Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2015, 43(4): 517-522.
- [6] 王志滨,陈靖,谢恩普,等.圆端形钢管混凝土柱轴压性能研究[J].建筑结构学报,2014,35(7):123-130.
WANG Zhi-bin,CHEN Jing,XIE En-pu, et al. Behavior of Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 123-130.
- [7] DING F X, FU L, YU Z W, et al. Mechanical Performances of Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Round Ends Under Axial Loading[J]. Thin-walled Structures, 2015, 97: 22-34.
- [8] HASSANEIN M F, PATEL V I. Round-ended Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Short Columns: FE Investigation Under Axial Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 140: 222-236.
- [9] 谷利雄,丁发兴,付磊,等.圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J].中国公路学报,2014,27(1):57-63.
GU Li-xiong,DING Fa-xing,FU Lei, et al. Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 57-63.
- [10] 任志刚,张铭,魏巍,等.圆端形钢管混凝土中长柱轴压性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):18-27.
REN Zhi-gang,ZHANG Ming,WEI Wei, et al. Axial Compression Performance of RCFST Middle Long Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 18-27.
- [11] 李培鹏,任志刚.圆端形钢管混凝土短柱轴压性能仿真分析[J].武汉理工大学学报,2014,36(9):96-101.
LI Pei-peng,REN Zhi-gang. Simulation Analysis of Round-ended Rectangular CFST Stub Columns Under Axial Load[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(9): 96-101.
- [12] 任志刚,肖萌.圆端形钢管混凝土构件纯弯力学性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):44-53.
REN Zhi-gang,XIAO Meng. Mechanical Behaviors of Concrete-filled Round End Steel Tubular Members Under Pure Bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 44-53.
- [13] RASA A R,王静峰,沈奇罕. RECFST 构件抗弯性能和抗弯承载力计算方法[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2019,42(2):230-236.
RASA A R,WANG Jing-feng,SHEN Qi-han. Flexural Performance and Bending Capacity Calculation Methods of Round-ended Elliptical Concrete-filled Steel Tubular (RECFST) Members[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2019, 42(2): 230-236.
- [14] 魏巍.圆端形钢管混凝土构件偏压力学性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
WEI Wei. Research on Eccentric Compressive Behavior of Round-ended Concrete-filled Steel Tubular Members[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [15] HASSANEIN M F, ELCHALAKANI M, PATEL V I. Overall Buckling Behaviour of Circular Concrete-filled Dual Steel Tubular Columns with Stainless Steel External Tubes[J]. Thin-walled Structures, 2017,

- 115;336-348.
- [16] HAN L H, YAO G H, ZHAO X L. Tests and Calculations for Hollow Structural Steel (HSS) Stub Columns Filled with Self-consolidating Concrete (SCC) [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(9):1241-1269.
- [17] LIANG Q Q, FRAGOMENI S. Nonlinear Analysis of Circular Concrete-filled Steel Tubular Short Columns Under Eccentric Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(2):159-169.
- [18] MANDER J A B, PRIESTLEY M J N. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804-1826.
- [19] MASAHAIDE T, KENJI S. Elasto-plastic Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-columns [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1979, 280:111-122.
- [20] 王静峰, 於忠华, 沈奇罕, 等. 圆端形椭圆钢管混凝土受扭性能数值分析及抗扭承载力计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3):7-15.
- WANG Jing-feng, YU Zhong-hua, SHEN Qi-han, et al. Torsional Behavior Numerical Analysis and Torsion Bearing Capacity Calculation of Circular-end Elliptical Concrete-filled Steel Tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3):7-15.
- [21] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1993.
- SHEN Ju-min, WANG Chuan-zhi, JIANG Jian-Jing. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete and Shell Limit Analysis[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1993.
- [22] 丁发兴, 余志武. 钢管混凝土短柱力学性能研究——理论分析[J]. 工程力学, 2005, 22(1):175-181.
- DING Fa-xing, YU Zhi-wu. Theoretical Analysis of Mechanical Properties of Concrete-filled Tubular Steel Stub Columns[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1):175-181.
- [23] WANG J F, SHEN Q H. Numerical Analysis and Design of Thin-walled RECFST Stub Columns Under Axial Compression[J]. Thin-walled Structures, 2018, 129:166-182.
- [24] GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].
- GB 50017—2017, Standard for Design of Steel Structures[S].