

矩形钢管混凝土受弯构件材料本构关系 与失效判据研究

杨绿峰^{1,2} 解威威^{1,2} 戎艳^{1,2} 蒋莉芳^{1,2}

(1. 广西大学防灾减灾与工程安全广西重点实验室, 广西南宁 530004;

2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要: 为了正确评估矩形钢管混凝土(CFST)受弯构件的承载力, 提出钢管和核心混凝土材料本构关系的修正模型, 建立 CFST 受弯构件的承载力失效判据。首先, 考虑受拉区钢管双轴受拉有利应力状态及受压区钢管双轴拉压不利应力状态, 并基于矩形 CFST 轴压短柱试验数据库, 通过回归分析建立约束混凝土峰值应力表达式, 在此基础上建立矩形钢管混凝土材料本构关系的修正模型。其次, 基于构件承载能力极限状态, 并合理考虑受拉区钢管的应变强化段, 提出矩形 CFST 受弯构件的承载力失效判据。最后依据纤维模型法和试验数据库对比分析 CFST 受弯构件的不同材料本构关系和失效判据的精度及适用性。结果表明, 所建立的 CFST 构件材料本构关系和承载力失效判据能够更加准确地反映矩形 CFST 构件的抗弯能力, 具有更高的计算精度和广泛的适用性。

关键词: 矩形钢管混凝土; 抗弯性能; 本构关系; 失效判据; 纤维模型

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)01-0060-11

Constitutive relations and failure criterion for rectangular concrete-filled steel tube members under pure bending

Yang Lufeng^{1,2} Xie Weiwei^{1,2} Rong Yan^{1,2} Jiang Lifang^{1,2}

(1. Guangxi Key Lab of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Lab of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to evaluate the ultimate bearing capacity of rectangular concrete-filled steel tube (CFST) members under pure bending, the modified constitutive relations were proposed for steel tube and core concrete, and the bearing capacity failure criterion was developed. Firstly, by taking into account the favorable biaxial tensile state of the steel tube in tension zone and the unfavorable biaxial compressive-tensile state of the steel tube in compression zone, the modified constitutive relations were developed for steel tube. Then, the test database of short rectangular CFST members under axial compression was adopted to obtain the peak stress expression by means of regression analysis, and the modified constitutive relation of core concrete was presented. Moreover, taking into consideration the strain hardening of steel in tension zone, the bearing capacity failure criterion was defined based on the limit state of ultimate loading capacity. Finally, the accuracy and applicability of different constitutive relations and failure criteria were verified by means of the test database and the fiber model method. Results show that the proposed constitutive relations and failure criterion can lead to higher accuracy with wide range of application for the bending capacity of rectangular CFST members under pure bending.

Keywords: rectangular concrete-filled steel tube; flexural behavior; constitutive relation; failure criterion; fiber model

E-mail: lfyang@gxu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738004)、国家自然科学基金面上项目(51478125)

作者简介: 杨绿峰, 博士, 教授

收稿日期: 2018-03-15

引 言

矩形钢管混凝土 (Concrete-Filled Steel Tube, 简记为 CFST) 具有良好的承载能力和延性性能, 节点连接方便, 在建筑工程中应用广泛^[1]。

为研究矩形 CFST 的抗弯性能, 国内外学者开展了大量的试验研究^[2-10], 观测了不同截面几何尺寸和材料强度下构件的破坏全过程。试验结果表明, 矩形 CFST 构件具有良好的抗弯性能, 内填混凝土延缓了钢管的局部屈曲, 提高了构件的承载能力及延性, 部分构件甚至因变形过大而未测得荷载-位移曲线下降段^[2,5]。但是模型试验数据量有限且成本较高, 深入研究需要借助于数值模拟。有限元法^[11-12]和纤维模型法^[12-15]是两种主要的数值模拟方法, 其中纤维模型法概念直观、表达式简洁, 计算效率高^[16], 是开展矩形 CFST 构件受力性能分析的有力工具, 但其计算精度与材料本构关系和受弯构件失效判据密切相关^[17-18]。

国内外规范采用了不同的失效判据定义矩形 CFST 构件抗弯承载力, 包括变形判据 (如最大应变/位移判据) 和力判据 (如最大内力/应力判据)。国家标准《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014) (简称 CFST 国标)^[19]和福建省地方标准《钢管混凝土结构技术规程》(DBJ/T 13-51—2010) (简称 CFST 地标)^[20]以钢管最大应变达到 0.01 (10000 $\mu\epsilon$) 作为 CFST 受弯构件失效的判据, 属于变形判据; 中国工程建设标准化协会标准《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159:2004) (简称 CFST 会标)^[21]、美国钢结构协会规范 ANSI/AISC 360—10《Specification for Structural Steel Buildings》(简称 AISC)^[22]、欧洲标准化协会规程 EC4(2004)《Design of Composite Steel and Concrete Structures》(简称 EC4)^[23]等利用极限平衡理论, 通过假定截面应力状态, 推导出构件的抗弯承载力, 属于力判据。两类判据尽管表达方式不同, 但都限制了构件截面的塑性发展程度, 且均未考虑钢管的应变强化, 使得构件难以充分发挥其承载能力。模型试验表明矩形 CFST 受弯构件在变形较大的情况下仍然能够继续承载^[2,5], 且在受力后期钢管会进入应变强化, 因此规范公式往往会低估构件的真实抗弯承载力, 有必要考虑矩形 CFST 受弯构件承载力极限状态, 建立更加合理的失效判据。

为此, 本文提出了钢管和核心混凝土本构关系修正模型, 基于承载力极限状态, 建立了矩形 CFST 受弯构件的承载力失效判据, 通过纤维模型法计算结果与试验数据的对比分析, 验证了本文建立的失效判据和材料本构关系修正模型的精度和适用性。

1 材料本构关系修正模型

材料本构关系能够综合反映材料的受力性能, 常以应力-应变关系表示, 是开展矩形 CFST 构件抗弯性能分析的基础。

1.1 钢材本构关系修正模型

当前常用的钢管本构模型有理想弹塑性模型^[17,24-25]、应变强化模型^[12-13,15]和考虑钢管屈曲折减模型^[11], 且大多未区别受拉区和受压区钢管受力状态的差异^[12-13,15,17,24-25]。事实上, 对于受弯构件而言钢管受拉区和受压区的受力状态具有显著区别, 其中受拉区钢管处于纵向和环向都受拉的双轴受拉有利应力状态, 因而在本构关系中考虑应变强化能更加真实反映受拉区钢管的受力特性。鉴于 Tao 等^[26]建立的钢管本构关系模型能够同时适用于低碳钢和高强钢, 且有效考虑了钢管强度对本构关系特征点的影响, 这里通过将该模型的强化段简化为线性上升段建立受拉区钢管的本构关系:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & 0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s < \varepsilon_p \\ f_y + (f_u - f_y) \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} & \varepsilon_p \leq \varepsilon_s < \varepsilon_u \\ f_u & \varepsilon_u \leq \varepsilon_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_s 为钢管弹性模量, ε_y 、 ε_p 和 ε_u 分别表示屈服应变、塑性段结束应变和强化段结束应变, f_y 和 f_u 分别为屈服强度和极限抗拉强度, 有:

$$\frac{f_u}{f_y} = \begin{cases} 1.6 - 2 \times 10^{-3}(f_y - 200) & 200 \leq f_y \leq 400 \\ 1.2 - 3.75 \times 10^{-4}(f_y - 400) & 400 \leq f_y \leq 800 \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_y} = \begin{cases} 15 & f_y \leq 300 \\ 15 - 0.018(f_y - 300) & 300 \leq f_y \leq 800 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \begin{cases} 100 & f_y \leq 300 \\ 100 - 0.15(f_y - 300) & 300 \leq f_y \leq 800 \end{cases} \quad (4)$$

与受拉区不同, 受压区钢管处于环向受拉、纵向受压状态, 而理想弹塑性模型能够在一定程度上反映受压区钢管所处的双轴拉压不利应力状态^[17],

且形式简单，因此本文采用理想弹塑性模型模拟受压区钢管的本构关系：

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s < \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (5)$$

上述 CFST 受弯构件的本构关系如图 1 所示。

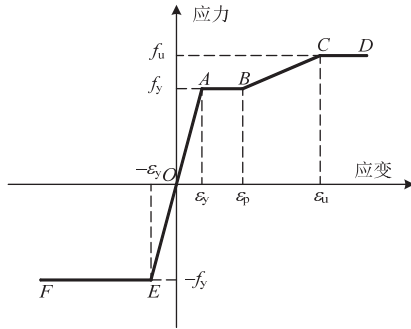


图 1 钢管本构关系修正模型

Fig.1 The modified constitutive relation of steel

1.2 核心混凝土峰值应力和本构关系

(1) 受拉区核心混凝土本构关系

当前对于矩形 CFST 受弯构件受拉区核心混凝土的贡献看法不一^[4,11,17,25]，Hajjar 和 Gourley^[17]依据文献[27]采用线性上升段和非线性下降段的本构关系；Lai 和 Varma^[11]考虑受拉区混凝土达到极限拉应力后退出工作；韩林海^[12]采用沈聚敏等^[28]建立的受拉混凝土两折线本构模型；Liang^[13]同样采用两折线本构模型。另一方面，文献[4,24-25]直接忽略了受拉区混凝土对矩形 CFST 构件截面强度的贡献。由于混凝土抗拉强度低，在 CFST 受弯构件进入承载力极限状态之前就已经退出工作，因而通常不考虑受拉区混凝土的贡献。

(2) 受压区核心混凝土的峰值应力

对于受压区混凝土，不同本构模型在峰值应力、曲线下降段等构成上存在明显差异^[9,12-13]，增加了材料本构关系的遴选难度，影响了数值模拟的计算精度，为此本文通过建立峰值应力 f_0 表达式，建立核心混凝土本构关系。

峰值应力是受压区混凝土本构关系的重要参数，可以利用矩形 CFST 轴压短柱承载力试验数据研究确定，这里搜集并遴选矩形 CFST 轴压短柱承载力试验数据 N_{ut} 共 224 组，见表 1。需要说明的是，本文选取长细比小于 12 的轴压短柱试件，避免试件受压稳定对分析结果产生影响。为了便于对比分析文献中不同的混凝土强度指标，需要将圆柱体抗压强度 f'_c 和立方体抗压强度 f_{cu} 转换为轴心抗压强度

标准值 f_{ck} ，并采用如下的强度指标转化关系式^[29-30]：

$$f_{ck} = 0.88 \times 0.4 f_{cu}^{7/6} \quad (6)$$

$$f'_c = \begin{cases} 0.8 f_{cu} & f_{cu} \leq 50 \text{MPa} \\ f_{cu} - 10 & f_{cu} > 50 \text{MPa} \end{cases} \quad (7)$$

并考虑混凝土抗压强度的尺寸效应^[29]：

$$f_{cu} = 1.17 f_{cu,10}^{0.95} - 0.7 \quad (8)$$

式中： $f_{cu,10}$ 表示 100mm 立方体的抗压强度，在无可靠的数据情况下，混凝土圆柱体强度的尺寸效应也可采用式 (8) 进行换算。

表 1 CFST 轴压构件试验数据库

Table 1 Test database of members under axial loading

来源	数量	H/t	长细比	f_y	f_{ck}
文献[31]	4	35.0~47.2	10.4	228	41.2
文献[32]	30	30.0~133.7	10.4	282~404	34.5~59.3
文献[33]	20	20.5~36.5	10.4	321.1~330.1	8.9~37.4
文献[34]	7	24	8.7	343.3~386.3	25.5~28.6
文献[35]	13	24~30	3.5~8.7	340~362.5	31.5~37.4
文献[36]	18	20~50	10.4	239.8~403.37	30.8
文献[37]	6	40~60	10.4	227	24.7~32.5
文献[38]	12	51~91	8.9~10.5	318.3~380	24.8~54.3
文献[39]	3	34.5~57.1	10.4	291	54.2
文献[40]	6	20~50.7	10.4	385~458	23.8~68.8
文献[41]	6	24~43.7	10.4	550	50.7~60.2
文献[42]	8	26.5~35.0	10.4	495	50.0~75.0
文献[43]	8	20.7~34.5	10.4	300~495	45.9~90.2
文献[44]	6	25.8~54.2	10.4	250~506	39.0~70.1
文献[45]	4	47.4~71.2	10.4	255.1~305.1	66.7~78.0
文献[10]	6	22~42	10.4	750	22.3~26.0
文献[46]	9	34.9~75	10.4	300~348	14.4~29.0
文献[47]	10	40.4~71.8	10.4	279.9~283.6	31.7~42.7
文献[48]	48	18.4~74	10.4	262~835	20.1~64.8
合计	224	20~133.7	3.5~10.5	227~750	8.9~90.2

矩形 CFST 轴压短柱核心区混凝土的峰值应力 f_0 可根据表 1 所示的承载力 N_{ut} 的试验实测值确定。由于矩形 CFST 轴压短柱试件达到承载力极限状态时，钢管将发生塑性屈服，此时核心混凝土的峰值应力为：

$$f_0 = \frac{N_{ut} - f_y A_s}{A_c} = f_{ck} + f'_0 \quad (9)$$

式中： A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土的截面面积； f_{ck} 为无约束混凝土抗压强度； f'_0 表示核心混凝土在钢管约束下抗压强度得到提升的部分，与外围钢

管的广义宽厚比 R 及核心混凝土的抗压强度 f_{ck} 有关, 且有:

$$f'_0 = a f_{ck}^b R^c \quad (10)$$

$$R = \frac{H}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}} \quad (11)$$

式中: a 、 b 和 c 为待定系数; H 和 t 分别为钢管截面高和钢管壁厚。

进而, 利用表 1 中的 CFST 轴压短柱承载力试验数据, 结合式 (9) 通过回归分析可以求得式 (10) 中的待定系数 a 、 b 和 c , 由此得到矩形钢管约束混凝土峰值应力 f_0 表达式:

$$f_0 = f_{ck} + 5.92 f_{ck}^{0.25} R^{-1.58} \quad (12)$$

为了检验本文建立的峰值应力 f_0 的表达式的合理性, 基于表 1 中 $n=224$ 组试验数据计算现有不同计算模型的残差平方和 Π 和残差均方差 $\|\delta\|_2$:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n (f_{0c}^i - f_{0t}^i)^2 \quad (13)$$

$$\|\delta\|_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \Pi} \quad (14)$$

式中: f_{0c}^i 和 f_{0t}^i 分别为表 1 中第 i 个试件核心混凝土峰值应力的模型计算值和试验值, 其中试验值需根据式 (9) 和试件承载力实测值 N_{ut} 确定。

表 2 不同峰值应力表达式结果

Table 2 Results from different expressions of peak stress

来源	峰值应力	Π	$\ \delta\ _2$
文献[11]	式(15)	37022.9	12.9
文献[13]	式(16)	27440.5	11.1
文献[12]	式(17)	34139.9	12.3
文献[43]	式(18)	29263.9	11.4
本文	式(12)	24444.4	10.4

$$\frac{f_0}{f'_c} = 0.8 + 0.18 \left(\frac{H/t}{100} + \frac{f_y/f'_c}{30} \right) \leq 1.10 \quad (15)$$

$$f_0 = 1.85 D_c^{-0.135} f'_c \quad (16)$$

$$f_0 = f'_c \left[1 + \left(\frac{24}{f'_c} \right)^{0.45} (-0.0135 \xi^2 + 0.1 \xi) \right] \quad (17)$$

$$\frac{f_0}{0.85 f'_c} = 1 + \frac{1 - 0.65(H/B - 1)^3}{1 + 0.05(f'_c/50)^{5.65}} (0.37 \xi^{0.82} - 0.19 \xi) \quad (18)$$

不同模型的残差平方和 Π 和均方差 $\|\delta\|_2$ 的计算结果如表 2 所示, 从中可见, 本文建立的峰值应力模型均方差和残差平方和最小, 表明本文模型相比于现有模型能够与试验数据吻合更好。而且当钢管的广义宽厚比 $R \rightarrow \infty$ 时, $f_0 \rightarrow f_{ck}$, 物理意义明确, 具有广泛的适用性。

(3) 受压区核心混凝土的修正本构关系

接着对比本构关系上升段和下降段形式。本构关系曲线通常包括上升段(加载阶段)、水平段(塑性流变阶段)和下降段(卸载阶段), Tomii 和 Sakino^[9]、张正国和左明生^[49]、Hajjar 和 Gourley^[17]、Liang^[13]、Liu^[25]、韩林海^[12]、Lai 和 Varma^[11]等分别建立了矩形钢管约束混凝土受压本构关系, 这里利用峰值应力 f_0 与峰值应变 ε_0 对各本构关系进行标准化处理, 结果如图 2 所示。

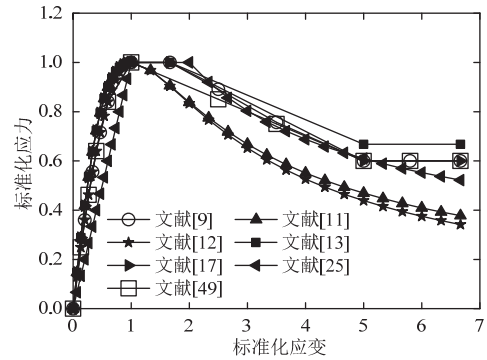


图 2 混凝土本构模型

Fig.2 Constitutive relations of concrete

由图 2 可知, 与普通混凝土相比, 核心混凝土在侧向压力下的卸载曲线具有更强的延性, 但不同模型之间仍有一定差别; 对于上升段, 除文献[25]采用的直线型外其余模型间差异不大, 简单起见本文选用二次抛物线模型; 对于水平段, 通常采用塑性水平段^[9,13,17,25]; 对于下降段, 从图 2 可以看出, 文献[11-12]模型延性较低, 其余模型较为接近, 其中文献[13]模型的延性最好。考虑到钢管对核心混凝土的约束作用使得核心混凝土处于三轴受压应力状态, 延性得到显著提升, 因此这里采用文献[13]的双折线下降段模型。由此得到核心混凝土受压本构关系修正模型:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_0 [2\varepsilon_c / \varepsilon_0 - (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^2] & \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f_0 - f_0(1 - \beta) \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{0.015 - \varepsilon_0} & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0.015 \\ \beta f_0 & \varepsilon_c > 0.015 \end{cases} \quad (19)$$

式中： f_0 、 ε_0 和 β 分别表示峰值应力、峰值应变和残余应力段系数，且有：

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} + \left[1330 + 760 \left(\frac{f_{ck} - 20}{20} \right) \right] \xi^{0.2} \quad (20)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (21)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & H/t \leq 24 \\ 1.5 - H / (48t) & 24 < H/t < 48 \\ 0.5 & H/t \geq 48 \end{cases} \quad (22)$$

需要说明的是，式(19)涉及了套箍系数 ξ 和高厚比 H/t 两个系数，套箍系数 ξ 包含了矩形截面的宽 B 、高 H 和壁厚 t ，能够综合反映矩形截面的几何特性，而在 f_0 和 β 的计算中仅考虑了 H/t ，由于 $H > B$ ，因此以 H/t 作为指标计算结果将偏于保守，更加可靠。同时 f_0 和 ε_0 中考虑了钢管强度的影响，因此式(19)能够综合体现材料和几何参数对受压混凝土本构关系的影响。另外，新建立的峰值应力 f_0 的计算表达式考虑了三轴受压应力状态对混凝土强度的提升作用。

2 矩形 CFST 受弯构件失效判据

2.1 试验数据库

为了验证本文提出的 CFST 受弯构件本构关系，这里选取文献[2-10]共计 84 组矩形 CFST 梁抗弯试验数据建立数据库，如表 3 所示。该数据库涵盖了不同高宽比、高厚比、钢材屈服强度和混凝土抗压强度的 CFST 构件，具有广泛代表性。

2.2 矩形 CFST 构件抗弯性能分析的纤维模型法

对于矩形 CFST 纯弯构件，纤维模型法的基本假设包括：①截面上某一点的纵向应力只取决于该点的纵向纤维应变；②截面应变满足平截面假定，并假定各单元内应变均匀；③钢材与混凝土之间无相对滑移。

纤维模型法的计算步骤为：

(1) 给定跨中横向挠度 f_m ，此时跨中截面形心处的应变为 ε_c ，如图 3 所示。在迭代计算之初可取 $f_m=1.0\text{mm}$ ， $\varepsilon_c=0$ 。根据平截面假定可以求得图 3 各纤维单元形心处的应变：

$$\varepsilon_i = \varepsilon_c + \phi y_i \quad (23)$$

式中： y_i 为各单元形心坐标，如图 3 所示， ϕ 为截面曲率。

表 3 CFST 纯弯构件试验数据库

Table 3 Test database of CFST members under pure bending

来源	数量	H/B	H/t	f_y (MPa)	f_{ck} (MPa)
文献[9]	4	1.0	23.5~44.1	198.0~311.0	12.5~16.9
文献[8]	12	0.6~1.7	16.0~39.7	377.0~432.0	34.2~39.4
文献[4]	16	1.0~2.0	20.5~51.2	293.8~330.1	16.7~26.0
文献[6]	18	1.0	46.7~105.3	235.0~282.0	43.9~59.6
文献[7]	8	1.0~1.7	15.0~18.8	410.0	32.1~54.1
文献[5]	6	1.0~1.6	31.0~67.9	316.6~319.3	71.9
文献[2]	12	1.0~1.7	30.5~42.8	409.0~495.0	56.4~82.1
文献[3]	5	1.0	42.0~102.0	300.0	23.0~37.8
文献[10]	3	1.0	22.0~42.0	750.0	24.2~26.0
合计	84	0.6~2.0	15.0~105.3	198.0~750.0	12.5~82.1

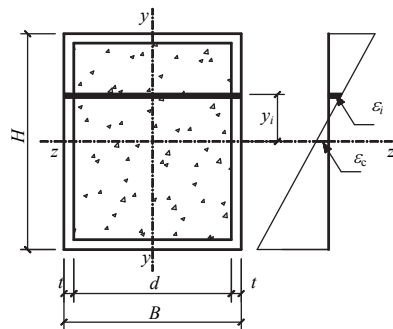


图 3 截面纤维单元与应变分布

Fig.3 Fiber element and strain distribution of the section

根据文献[4-6]，可以采用正弦半波曲线建立 CFST 梁的横向挠度曲线：

$$f = f_m \sin(\pi x / L) \quad (24)$$

式中： L 为梁的计算长度。则跨中曲率为

$$\phi = (\pi / L)^2 f_m \quad (25)$$

(2) 根据钢管和混凝土的本构关系计算各纤维单元的应力，进而叠加计算跨中截面轴力与弯矩：

$$N = \sum_{i=1}^n (\sigma_{si} A_{si} + \sigma_{ci} A_{ci}), M = \sum_{i=1}^n (\sigma_{si} A_{si} + \sigma_{ci} A_{ci}) y_i \quad (26)$$

式中： σ_{si} 、 σ_{ci} 分别代表单元 i 中钢管和混凝土的应力， A_{si} 、 A_{ci} 分别为单元 i 中钢管和混凝土的面积。

(3) 校核跨中截面内外力平衡条件，对于纯弯构件有 $N=0$ 。因而算法收敛判据为

$$\left| \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} \right| \leq \delta \quad (27)$$

式中： N^+ 、 N^- 分别表示 CFST 截面上受拉区和受压区的轴向合力的绝对值， δ 是收敛容差，取为 1%。

(4) 若式(27)不满足，则将 ε_c 增大至 $\varepsilon_c + \Delta\varepsilon_c$ ，

这里取 $\Delta\varepsilon_c=10^{-5}$ ，并重复步骤 (1)~步骤 (4)，直至满足式 (27) 定义的收敛准则。由此得到弯矩-跨中挠度 ($M-f_m$) 曲线上的一点。

(5) 将 f_m 增大至 $f_m+\Delta f_m$ ，这里取 $\Delta f_m=1.0\text{mm}$ ，然后重复步骤 (1)~步骤 (4)，可得 $M-f_m$ 曲线上新的一点。重复上述过程，得到整条 $M-f_m$ 曲线。进一步地，根据 ε_c 、式 (23) 和式 (25) 以及曲线 $M-f_m$ ，可以得到弯矩-最大拉应变 ($M-\varepsilon_{t,\max}$) 曲线。

(6) 根据 $M-\varepsilon_{t,\max}$ 曲线和构件截面失效判据确定抗弯承载力。

2.3 承载力失效判据

上述步骤的第 (6) 步强调构件失效判据是确定矩形 CFST 构件抗弯承载力的基础。CFST 国标和 CFST 地标以钢管最大拉应变达到 0.01 (10000 $\mu\varepsilon$) 作为 CFST 受弯构件失效的判据，属于变形判据，此时钢管尽管发生塑性变形，尚未发生应变强化；AISC 和 EC4 等规范利用极限平衡理论，通过假定截面应力状态，推导出构件的抗弯承载力，属于力判据，其中钢管应力最大等于屈服强度，因此也未考虑发生应变强化。为了检验不同失效判据的合理性，特从表 3 所示的试验数据库中选取三根试件，利用纤维模型法计算其抗弯承载力，并和试验结果相比较。这里不失一般性地选取文献[3]中编号 NS12、文献[6]中编号 SB1-2、文献[5]编号 13 的三个试件(本文分别记为 N1、N2 和 N3)为分析对象，试件具体参数如表 4 所示，三个试件的几何参数和材料参数各异，具有一定的代表性。纤维模型法计算结果如图 4 所示。

表 4 N1~N3 试件具体参数

Table 4 Detailed parameters of N1-N3

来源	编号	H(mm)	B(mm)	t(mm)	f_y (MPa)	f_{ck} (MPa)
文献[3]	N1	246	246	3	300	28.14
文献[6]	N2	140	140	3	235	43.91
文献[5]	N3	175.57	133.6	2.9	319.28	71.92

由图 4 可知，在弯矩-应变曲线达到峰值点之前，抗弯承载力随最大拉应变增加而增加，当钢管最大拉应变超过 0.01 时，该增长趋势保持不变，表明构件仍有较强的承载能力，由此说明，CFST 国标和 CFST 地标以钢管最大拉应变达到 0.01 作为失效判据定义抗弯承载力，只是考虑了正常使用要求，不能正确预测 CFST 构件的抗弯承载力。

为此本文基于承载能力极限状态，建立矩形 CFST 受弯构件的承载力失效判据，认为 CFST 构件

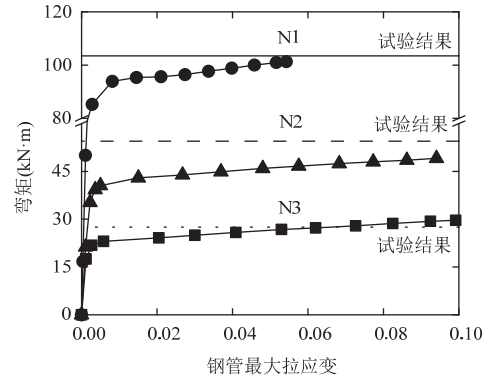


图 4 跨中弯矩与最大拉应变

Fig.4 Comparison between calculated and test results of mid-span moments

的截面弯矩达到截面抗弯强度时构件进入失效临界状态，即承载能力极限状态。同时将 CFST 受弯构件的承载能力极限状态定义为荷载-位移曲线的峰值点所对应的受力状态，如图 4 中的 N1 构件；若荷载-位移曲线无明显下降段（如图 4 中的 N2 和 N3 构件），则该极限状态定义为受拉区钢管最大拉应力（应变）达到图 1 中强化段 BC 的 50%时的受力状态。此时钢管仍有 50%的应变强化段作为安全储备。

进一步地，利用纤维模型法计算不同失效判据下的 CFST 构件抗弯承载力。以表 4 中 N1~N3 试件为分析对象，对比不同失效判据的计算结果，如表 5 所示，从中可以看出，采用不同失效判据时，矩形 CFST 构件抗弯承载力计算结果具有明显差别，由此说明失效判据对截面承载力计算结果有较大影响。另一方面，AISC 和 EC4 都采用力判据，但由于限制了钢管发生应变强化，导致计算结果普遍偏小；CFST 国标和 CFST 地标都采用变形判据，但由于两者采用的塑性发展系数计算公式不同导致结果存在较大差异。

表 5 不同失效判据下代表性构件的承载力

Table 5 Bearing capacity of representative members under different failure criteria (kN·m)

构件	试验值	变形判据		力判据	
		CFST 国标	CFST 地标	AISC	EC4
N1	103.5	112.6	93.6	65.5	97.7
N2	27.5	29.3	24.7	21.7	24.4
N3	54.45	53.9	49.0	40.0	44.8

最后，基于表 3 中 84 组受弯试件的实测试验数据，统计分析不同失效判据下的计算结果 M_{uc} 与试验值 M_{ut} 之间的误差：

$$\mu_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{M_{uc}^i}{M_{ut}^i}, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{uc}^i}{M_{ut}^i} - \mu_r \right)^2} \quad (28)$$

式中： $n=84$ 是表3中试件总数； M_{uc}^i 和 M_{ut}^i 分别为第*i*个试件抗弯承载力的计算值和试验实测值。

不同失效判据下的计算结果如表6所示，从中可见，采用现行规范中的失效判据时的整体计算误差在9%左右，最大超过11%。而采用本文建立的承载力失效判据时整体计算误差为3.6%，能够取得远高于现行失效判据的计算精度，再次验证了本文建立的承载力失效判据的合理性。

表6 设计规范中不同失效判据的计算误差

Table 6 Errors of results from different failure criteria in design codes

结果	变形判据		力判据		本文承载力判据
	CFST 国标	CFST 地标	AISC	EC4	
μ_r	1.098	0.928	0.884	0.910	0.964
误差	9.8%	7.2%	11.6%	9.0%	3.6%
σ_r	0.218	0.118	0.112	0.089	0.105

3 本构关系准确性和适用性分析

3.1 受拉区混凝土考虑方式合理性分析

现有研究对受拉区混凝土贡献考虑方式不一，本文考虑混凝土抗拉强度低，忽略其对矩形CFST构件抗弯性能的贡献，首先定量分析这种考虑方式的合理性。为此，本文不失一般性地选取文献[8]中编号CB12、文献[4]中编号RB1-1、文献[5]中编号7试件（本文分别记为N4、N5、N6）的抗弯强度试验结果，试件具体参数如表7所示，可见，三个试件的几何和材料参数差异明显，具有代表性。然后利用纤维模型法计算上述三个试件的截面抗弯强度，结果如图5所示。由图5可知，是否考虑受拉区混凝土得到的截面极限弯矩基本吻合，相差不足0.1%。由此可知，受拉区混凝土对CFST构件抗弯强度的贡献可以忽略不计。因此，本文建立核心混凝土本构关系时不再考虑受拉区混凝土的作用和特性。

表7 N4-N6试件具体参数

Table 7 Detailed parameters of N4-N6

来源	编号	H(mm)	B(mm)	t(mm)	f_y (MPa)	f_{ck} (MPa)
文献[8]	N4	152	152	4.8	389	39.36
文献[4]	N5	120	120	3.84	330.1	16.67
文献[5]	N6	149.63	149.63	2.95	319.28	71.92

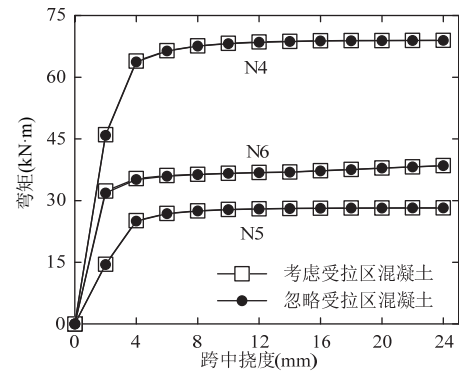


图5 受拉区混凝土贡献对比

Fig.5 Contribution of concrete in tension zone

3.2 本构关系准确性验证

基于本文建立的矩形CFST受弯构件承载力失效判据，利用本文建立的钢管和混凝土本构关系修正模型建立纤维模型法，据此计算试验数据库中84个CFST构件的抗弯强度 M_{uc} ，与试验值 M_{ut} 的比较如图6所示，从中可以看出，数据点基本分布在等值线附近，表明计算结果与试验结果基本吻合，验证了本文建立的材料本构关系能够准确预测构件的抗弯承载力，具有较高的计算精度和稳定性。

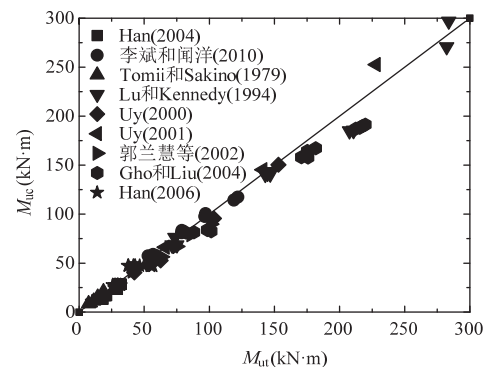


图6 计算结果与试验结果对比

Fig.6 Comparison between calculated and test results

为了比较本文建立的材料本构关系修正模型与原有的材料本构关系的合理性，这里进一步采用不同文献中提供的钢管混凝土材料本构关系，并利用纤维模型法计算 M_{uc}/M_{ut} 的均值和变异系数，计算结果如表8所示。需要说明的是，文献[13]未明确给出钢管的极限抗拉强度计算公式，文献[9]未给出强化模量取值，因此这里不便于对比这两篇文献的本构关系。由表8可知，文献[11,17,25,49]的本构模型均未考虑钢管发生应变强化，因而低估构件抗弯承载力约10%；文献[12]的本构模型尽管考虑了钢管的应变强化，但混凝土本构关系的下降段过于

陡峭，从而低估了核心混凝土的延性，导致计算结果仍偏小约 7%。相比之下，采用本文建立的本构模型时 M_{uc}/M_{ut} 均值的计算结果很接近于 1，误差为 3.6%，表明本文建立的 CFST 受弯构件的材料本构模型能够更加准确反映钢管和混凝土的受力性能，相比现有的本构模型能够取得更高的计算精度。

表 8 材料本构关系对比

Table 8 Comparison of different constitutive relations

材料本构模型	均值	变异系数
文献[49]	0.893	0.094
文献[17]	0.901	0.090
文献[25]	0.891	0.091
文献[12]	0.935	0.110
文献[11]	0.861	0.089
本文模型	0.964	0.109

进一步地，通过与弯矩-应变曲线试验实测结果对比，验证本文本构模型的合理性。由于大多数文献未给出弯矩-应变曲线的测试结果，这里只能选取文献[8]中唯一给出的 CB31 试件的弯矩-应变测试曲线作为基准。通过与本文模型的计算结果相比较，如图 7 所示，从中可见，无论是对于受压区还是受拉区最外边缘钢管，本文模型的计算结果均与试验结果吻合良好，再次证明本文建立的本构关系修正模型的合理性。

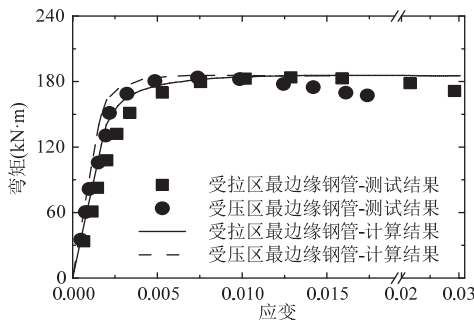


图 7 弯矩-应变结果

Fig.7 Results of moment versus strain

3.3 本构关系和失效判据的适用性验证

矩形 CFST 纯弯梁的内力-位移全过程曲线能够综合表征构件的抗弯性能。这里根据本文建立的 CFST 受弯构件材料本构关系修正模型和承载力失效判据建立纤维模型法，并据此计算 CFST 梁跨中截面弯矩与挠度的全过程曲线，并与试验结果对比分析，由此验证本文建立的本构关系修正模型和失效判据在不同类型矩形 CFST 构件中的适用性。

(1) 不同高宽比情况

根据文献[4,7-8]给出的不同高宽比矩形 CFST 受弯构件试验数据，编号分别为 CB31、CB52、CFSTB-4 和 RB3-1，利用纤维模型法计算试件的跨中弯矩-挠度曲线，并与试验结果对比，结果如图 8 所示。从中可以看出，计算结果与试验结果基本吻合，表明本文建立的材料本构关系修正模型和承载力失效判据能够很好地适用于不同高宽比的矩形 CFST 受弯构件。

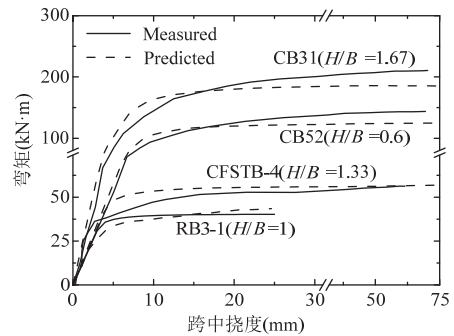


图 8 不同高宽比结果

Fig.8 Results under different height-to-width ratios

(2) 不同高厚比情况

根据文献[3,8,10]给出的不同高厚比矩形 CFST 受弯构件试验数据，编号分别为 CB41、HSS19、NS6 和 HS12，利用纤维模型法计算试件的跨中弯矩-挠度曲线，并与试验结果对比，结果如图 9 所示，从中可以看出，计算结果与试验曲线基本吻合，表明本文建立的材料本构关系修正模型和失效判据能够很好地适用于不同高厚比的矩形 CFST 受弯构件。

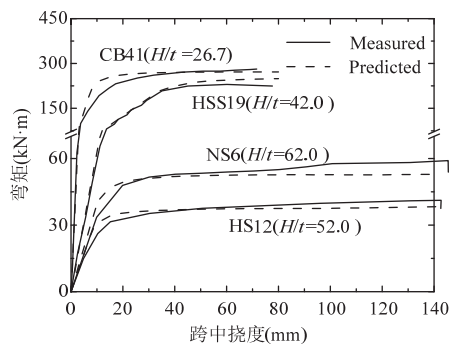


图 9 不同高厚比结果

Fig.9 Results under different height-to-thickness ratios

(3) 不同混凝土强度情况

根据文献[6,8,10]给出的不同混凝土强度矩形 CFST 受弯构件试验数据，编号分别为 CB12、HSS13、SVA-1 和 SB2-1，利用纤维模型法计算试件的跨中弯矩-挠度曲线，并与试验结果对比，结果

如图 10 所示。从中可以看出，计算结果与试验结果基本吻合，表明本文建立的材料本构关系修正模型和失效判据能够很好地适用于不同混凝土强度的矩形 CFST 受弯构件。

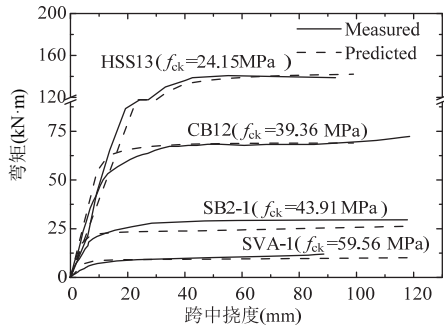


图 10 不同混凝土强度结果

Fig.10 Results under different concrete strengths

(4) 不同钢管强度情况

根据文献[3,6-7,10]给出的不同钢管强度的矩形 CFST 受弯构件试验数据，编号分别为 NS12、CFSTB-3、HSS6 和 SB5-1，利用纤维模型法计算试件的跨中弯矩-挠度曲线，并与试验结果对比，结果如图 11 所示。从中可以看出，计算结果与试验结果基本吻合，表明本文建立的材料本构关系修正模型和失效判据能够很好地适用于不同钢管强度的矩形 CFST 受弯构件。

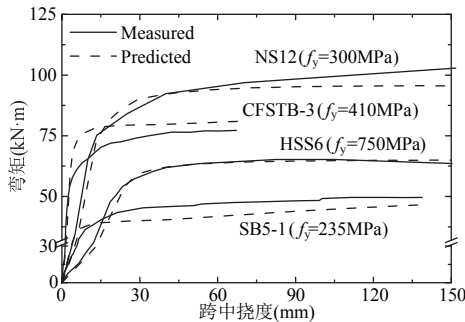


图 11 不同钢管强度结果

Fig.11 Results under different steel strength

从上述不同构件几何尺寸和材料强度下纤维模型法的计算结果与试验结果的对比分析可以看出，本文建立的 CFST 材料本构关系和失效判据具有广泛的适用性。

4 结语

本文建立了钢管和核心混凝土的本构关系修正模型，提出了矩形 CFST 受弯构件的承载力失效

判据。研究结果表明：

(1) 本文基于构件承载能力极限状态提出的矩形 CFST 受弯构件的承载力失效判据，考虑了钢管的应变强化性能，能够更加准确反映矩形 CFST 受弯构件在承载能力极限状态下的抗弯强度。

(2) 本文建立的矩形 CFST 受弯构件的材料本构关系修正模型，能够准确反映钢管和混凝土在多向应力状态下的受力性能，具有更高的计算精度，与试验结果相比总体误差不超过 4%，能够适用于不同材料强度和几何尺寸的矩形 CFST 受弯构件，具有广泛适用性。

参 考 文 献

- [1] Han L H, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100(8): 211-228
- [2] Gho W M, Liu D L. Flexural behaviour of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(11): 1681-1696
- [3] Uy B. Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(3): 341-352
- [4] Han L H. Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(2): 313-337
- [5] 郭兰慧, 张素梅, 王玉银. 方形、矩形钢管高强混凝土受弯构件的理论分析与试验研究[J]. 钢结构, 2002, 17(6): 29-33 (Guo Lanhui, Zhang Sumei, Wang Yuyin. Experimental research and theoretical analysis on flexural behavior of high-strength concrete-filled square and rectangular steel tubes [J]. Steel Construction, 2002, 17(6): 29-33 (in Chinese))
- [6] Han L H, Lu H, Yao G H, et al. Further study on the flexural behaviour of concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(6): 554-565
- [7] 李斌, 闻洋. 矩形钢管混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(6): 51-52, 80 (Li Bin, Wen Yang. Study on mechanical properties of concrete-filled rectangular steel tube beams [J]. Building Structure, 2010, 40(6): 51-52, 80 (in Chinese))
- [8] Lu Y Q, Kennedy D J L. The flexural behaviour of concrete-filled hollow structural sections [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21(1): 111-130
- [9] Tomii M, Sakino K. Elasto-plastic behaviour of concrete filled square steel tubular beam-columns [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1979(280): 111-120
- [10] Uy B. Strength of short concrete filled high strength steel box columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(2): 113-134
- [11] Lai Z, Varma A H. Effective stress-strain relationships for analysis of noncompact and slender filled composite

- (CFT) members [J]. *Engineering Structures*, 2016, 124(1): 457-472
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016 (Han Linhai. *Concrete filled steel tubular structures—theory and practice* [M]. Beijing: Science Press, 2016 (in Chinese))
- [13] Liang Q Q. Performance-based analysis of concrete-filled steel tubular beam-columns, part I: theory and algorithms [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(2): 363-372
- [14] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003 (Zhong Shantong. *Concrete-filled steel tubular structures* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese))
- [15] 李黎明, 姜忻良, 陈志华, 等. 矩形钢管混凝土抗弯性能数值分析与简化计算[J]. *天津大学学报*, 2007, 40(8): 990-994 (Li Liming, Jiang Xinliang, Chen Zhihua, et al. Numerical analysis of CFRT under bending load and its simplified calculating method [J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(8): 990-994 (in Chinese))
- [16] 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 Jian, Long Yueling. Constitutive relationship of rectangular CFT columns with binding bars [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(2): 137-143 (in Chinese))
- [17] Hajjar J F, Gourley B C. Representation of concrete-filled steel tube cross-section strength [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(11): 1327-1336
- [18] 唐广青, 肖岩, 张倚天. 方钢管混凝土轴压短柱承载力与全曲线综述研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(8): 103-111 (Tang Guangqing, Xiao Yan, Zhang Yitian. Study of bearing capacity and complete stress-strain curves for concrete filled square steel tube columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(8): 103-111 (in Chinese))
- [19] GB 50936—2014 钢管混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014 (GB 50936—2014 Technical code for concrete filled steel tubular structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 (in Chinese))
- [20] DBJ/T 13—51 钢管混凝土结构技术规程[S]. 福州: 福建省住房和城乡建设厅, 2010 (DBJ 13—51 Technical specification for concrete-filled steel tubular structures [S]. Fuzhou: Fujian Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, 2010 (in Chinese))
- [21] CECS 159 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004 (CECS 159 Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members [S]. Beijing: China Planning Press, 2004 (in Chinese))
- [22] ANSI/AISC 360 Specification for structural steel buildings [S]. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2010
- [23] Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structures [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- [24] 李四平, 霍达, 王菁, 等. 偏心受压方钢管混凝土柱极限承载力的计算[J]. *建筑结构学报*, 1998, 19(1): 41-51 (Li Siping, Huo Da, Wang Jing, et al. Ultimate strength of concrete filled square steel tubular columns under eccentric compression [J]. *Journal of Building Structures*, 1998, 19(1): 41-51 (in Chinese))
- [25] Liu D L. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(8): 839-846
- [26] Tao Z, Wang X Q, Uy B. Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(9): 1306-1316
- [27] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. *ACI Structural Journal*, 1986, 83(2): 219-231
- [28] 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 Jumin, Wang Chuanzhi, Jiang Jianjing. *Finite element analysis of reinforced concrete and limit analysis of plate and shell* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993 (in Chinese))
- [29] 余志武, 丁发兴. 混凝土受压力学性能统一计算方法[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(4): 41-46 (Yu Zhiwu, Ding Faxing. Unified calculation method of compressive mechanical properties of concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(4): 41-46 (in Chinese))
- [30] 陈肇元, 朱金铨, 吴佩刚. 高强混凝土及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992 (Chen Zhaoyuan, Zhu Jinquan, Wu Peigang. *High-strength concrete and its applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992 (in Chinese))
- [31] Han L H. Tests on stub columns of concrete-filled rhs sections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(3): 353-372
- [32] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究[D]. 福建: 福州大学, 2006 (Yao Guohuang. *Research on behavior of concrete-filled steel tubes subjected to complicated loading states* [D]. Fujian: Fuzhou University, 2006 (in Chinese))
- [33] 陶忠. 方形截面钢管混凝土力学性能研究及承载力的理论分析与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1998
- [34] Shakir-khalil H, Zeghiche J. Experimental behaviour of concrete-filled rolled rectangular hollow-section columns [J]. *Structural Engineer*, 1989, 67(19): 343-353
- [35] Shakir-khalil H, Mouli M. Further tests on concrete-filled rectangular hollow-section columns [J]. *Structural Engineer*, 1990, 68(20): 405-413
- [36] 周明. 方钢管混凝土构件力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000
- [37] 吕西林, 余勇, 陈以一, 等. 轴心受压方钢管混凝土短柱的性能研究: I 试验[J]. *建筑结构*, 1999(10): 41-43
- [38] 贺锋, 周绪红, 唐昌辉. 钢管高强混凝土轴压短柱承载力性能的试验研究[J]. *工程力学*, 2000, 17(4): 61-66 (He Feng, Zhou Xuhong, Tang Changhui. Experimental

- research on bearing behavior of high-strength-concrete-filled steel tube under axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(4): 61-66 (in Chinese))
- [39] 郎葵, 杨志坚, 蒋连接. 方钢管高强混凝土短柱轴压试验研究[J]. *低温建筑技术*, 2011, 33(11): 42-45 (Lang Yan, Yang Zhijian, Jiang Lianjie. Experimental study of high strength CFSST stub columns under axial compression load [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2011, 33(11): 42-45 (in Chinese))
- [40] Dennis L, Leroy G. Structural design of stainless steel concrete filled columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(11): 1275-1282
- [41] Liu D L, Gho W M, Yuan J. Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(12): 1499-1515
- [42] Liu D L. Tests on high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(7): 902-911
- [43] Liu D L, Gho W M. Axial load behaviour of high-strength rectangular concrete-filled steel tubular stub columns [J]. *Thin-walled Structures*, 2005, 43(8): 1131-1142
- [44] Young B, Ellobody E. Experimental investigation of concrete-filled cold-formed high strength stainless steel tube columns [J]. *Thin-walled Structures*, 2006, 62(5): 484-492
- [45] 刘界鹏, 张素梅, 郭兰慧. 方钢管约束高强混凝土短柱轴压力学性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(10): 1542-1545 (Liu Jiepeng, Zhang Sumei, Guo Lanhui. Axial compression of behavior square tube confined high strength concrete (HSC) short columns [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(10): 1542-1545 (in Chinese))
- [46] Tomii M, Yoshimura K, Morishita Y. Experimental studies on concrete-filled steel tubular stub columns under concentric loading [C]//*Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads*, ASCE, 1977: 718-741
- [47] 郭兰慧, 张素梅, 刘界鹏. 不同加载模式下方钢管混凝土力学性能试验研究与理论分析[J]. *工程力学*, 2008, 25(9): 143-148 (Guo Lanhui, Zhang Sumei, Liu Jiepeng. Behavior of concrete-filled SHS steel tubes under different loading conditions [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(9): 143-148 (in Chinese))
- [48] 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
- [49] 张正国, 左明生. 方钢管混凝土轴压短柱在短期一次静载下的基本性能研究[J]. *郑州工学院学报*, 1985, 6(2): 19-32 (Zhang Zhengguo, Zuo Mingsheng. Research on behavior of concrete filled square steel tubes under short-term static load at a time [J]. *Journal of Zhengzhou University of Technology*, 1985, 6(2): 19-32 (in Chinese))

杨绿峰 (1966—), 男, 博士, 教授。主要从事工程结构承载安全性、结构体系可靠度和混凝土结构耐久性等方面研究。

解威威 (1990—), 男, 博士。主要从事钢-混凝土组合结构承载安全性方面的研究。

戎 艳 (1993—), 女, 硕士研究生。主要从事钢-混凝土组合结构承载安全性方面的研究。

蒋莉芳 (1991—), 女, 硕士研究生。主要从事钢-混凝土组合结构承载安全性方面的研究。