

圆钢管混凝土(CCFST)短柱轴心受压承载力统计分析

廖慧娟, 周云, 陈太平

(湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:针对广泛收集的529根圆钢管混凝土(circular concrete-filled steel tube, CCFST)短柱轴心受压试验结果,以套箍系数、混凝土强度、钢材强度和钢管直径为参数,分析GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》中CCFST短柱轴心受压承载力计算公式的准确性和适用性。分析结果表明,GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》虽可以合理预测CCFST短柱的轴压承载力,但结果的离散性较大,且在某些参数超出规范限值时偏于不安全。基于分析结果,综合考虑到混凝土强度效应、钢材强度效应,并引入尺寸效应,提出一个新的CCFST轴压短柱承载力的计算公式,该公式在预测CCFST轴压短柱承载力时离散性更小,并且适用范围更广。

关键词:圆钢管混凝土短柱;轴心受压;混凝土强度;钢材强度;尺寸效应

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2018)13-1545-07

Statistical analysis of axial capacity of circular concrete-filled steel tube (CCFST) stub columns

LIAO Huijuan, ZHOU Yun, CHEN Taiping

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the widely-collected test results of 529 circular concrete-filled steel tube (CCFST) stub columns under axial compression, the parameters including confinement factor, concrete strength, steel strength and diameter of steel pipe were collected to analyze the accuracy and applicability of technical code for concrete filled steel tubular structures (GB 50936—2014) in calculating the axial capacity of CCFST stub columns. The analysis showed that although technical code for concrete filled steel tubular structures (GB 50936—2014) can reasonably predict the axial capacity of CCFST stub columns, the results were discrete and insecure when some parameters exceeded the specification limits. According to the results, taking into account the effects of concrete strength, steel strength and column size, a new formula that was less discrete in predicting the axial capacity of CCFST stub columns was proposed and it had a wider application range.

Keywords: circular concrete-filled steel tube stub columns; axial compression; concrete strength; steel strength; size effect

圆钢管混凝土柱(CCFST)中钢管对核心混凝土的套箍约束作用使核心混凝土处于三向受压状态,使核心混凝土具有更好的抗压强度和压缩变形能力;同时,由于内填混凝土的支撑作用,钢管的几何稳定性及承载能力得以提高。由于钢管和混凝土的相互作用,二者优势互补,钢管混凝土柱具有承载力高、延性好、耐疲劳、耐冲击等优点。如今,CCFST以其优越的自身性能,正在被越来越广泛地应用于高层建筑、超高层建筑、地下结构以及大跨桥梁等复杂的建筑工程中。

迄今为止,各国都颁布了CCFST的设计规程或规范。国外相关的设计规程主要有欧洲EC4(2004)规范^[1]、美国AISC 360-10(2010)规范^[2]、ACI 318-11规范^[3]、日本AIJ-SRC(2001)规程^[4]、澳大利亚AS 5100(2004)规程^[5]等。我国先后颁布了多部国家行业标准,分别为JCJ 01-89《钢管混凝土结构设计与施工规程》^[6]、CECS 28:90《钢管混凝土结构设计与施

工规程》^[7]、CECS 104:99《高强混凝土结构技术规范》^[8]、CECS 28:2012《钢管混凝土结构技术规范》^[9]和DL/T 5085-1999《钢—混凝土组合结构设计规程》^[10],最终于2014年颁布了我国第一部钢管混凝土国家标准GB 50936-2014《钢管混凝土结构技术规范》^[11]。

上述规范中,关于短柱承载力的计算理论主要可分为3类。第1类为统一理论,即不区分钢管和混凝土,将混凝土和钢管看成一种新的材料,由组合截面面积和组合材料抗压强度相乘得到构件的承载力^[10-11];第2类为套箍混凝土理论,该理论认为钢管对核心混凝土的约束作用与螺旋箍筋的作用类似^[7-9,11];第3类为叠加理论,即认为混凝土和钢管单独受力,分别计算出钢管和混凝土的承载力,再叠加即得到构件的承载力^[1-4],以ACI 318-11规范为代表。3种方法各有优缺点,其中叠加原理是最简单也最基础的。

收稿日期:2018-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51338004)

第一作者:廖慧娟(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为钢管混凝土轴心受压承载力

通信作者:周云,副教授,主要研究方向为结构健康监测及动力识别,zhouyun05@hnu.edu.cn

尽管国内外学者对 CCFST 进行了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果,但是现有的研究也存在一些局限性。以 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》为例,其适用范围为混凝土立方体抗压强度为 30~80 MPa,钢材强度为 235~420 MPa。本文通过大量国内外的 CCFST 轴心受压的试验结果,分别以套箍系数、混凝土强度、钢材强度和钢管直径为参数,分析其对 GB 50936—2014 中关于 CCFST 短柱轴心受压承载力计算方法的准确性和适用性的影响。在分析结果的基础上,基于叠加原理,通过数据拟合分析,提出一个适用范围更广、准确性更高的 CCFST 轴压短柱承载力的计算公式。

1 CCFST 短柱设计方法

GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》(以下简称《规范》)中关于 CCFST 短柱轴心受压承载力的计算有 2 个公式,分别是基于统一理论和套箍理论提出来的。

1.1 基于统一理论的计算公式

《规范》中(5.1.2-1)公式是基于统一理论,通过

套箍系数设计值 θ_1 来考虑钢管和混凝土之间的相互作用,以下简称(5.1)式。该公式应用范围很广,不仅可以计算实心 and 空心的 CCFST 短柱的轴心受压承载力,还可以计算空心的 CCFST 短柱的轴压承载力;不仅可以计算圆形的钢管混凝土短柱轴压承载力,还可以计算正方形、正八边形、正十六边形等其他形状的钢管混凝土短柱的轴压承载力。具体计算公式参见文献[11]。

1.2 基于套箍混凝土理论的计算公式

《规范》中(6.1.2-1)公式是基于套箍混凝土理论,采用套箍指标 θ_2 考虑钢管对核心混凝土抗压强度的提高,以下简称(6.1)式。其具体计算公式参见文献[11]。

2 参数分析

2.1 试验数据介绍

通过大量查阅国内外文献,收集了 38 篇关于 CCFST 短柱轴心受压试验的文献,其中包含了 529 根 CCFST 短柱轴心受压的试验数据,见表 1。从表 1 可以看出,收集到的数据非常多,参数范围也

表 1 文献详细信息

序号	D/mm	t/mm	L : D	f_y /MPa	f_{cu} /MPa	数据个数	数据来源
1	96~320	2~12	0.8~4.2	235~410	33~55.7	43	[12]
2	108~165.5	4~4.35	3.0~3.1	248.7~338.9	34.8~35.7	6	[13]
3	152~219	4.5~10	3.0~3.2	280~377	75~85.5	10	[14]
4	111.3~165.7	2~5.1	2.4~3.0	309.5~433	76.8	8	[15]
5	108~133	1~7	3.5	232~439	96.4~109.2	18	[16]
6	133	4.7	3.5	352	52.8~79.2	4	[17]
7	150~273	3~4.5	2.6~3.3	318.3~380	38.3~75.1	21	[18]
8	151~165	1~8	3.0~3.4	338~438	80.1~84.4	28	[19]
9	114.3~219	2.34~3.9	4	315~373	66~80	14	[20]
10	133.1~167.8	3.29~5.2	3	325.3~392	44.2~73.8	33	[21]
11	120~180	1.49~1.51	3.1~3.5	222.7	47	6	[22]
12	273	7	3	385	70.2	3	[23]
13	320~400	1.51~2.71	3	294~359.1	30~33.6	18	[24]
14	138~139	3.95~4	3	289.5	115.5~136.5	2	[25]
15	114~168	5~10	2.0~2.9	365~425	85.9~131.1	5	[26]
16	114.3	2.74~5.9	2.6	235~355	62.6~113.6	6	[27]
17	114~167	3.1~5.6	2.1~2.2	300	53~70	6	[28]
18	114.3	3.35	3	287.33	65.1~111.9	3	[29]
19	114.3	6	3	342.95	39.1~111.9	5	[30]
20	100	1.9	3	404	121.6	4	[31]
21	89.32~112.56	2.74~2.89	3~3.8	360	22.2~29.7	48	[32]
22	165~219	2.72~4.78	3~3.1	350	42.6~77.2	9	[33]
23	108~450	2.96~6.47	3	279~823	36~97.3	36	[34]
24	60~250	1.87~2	3	282~404	85.2~90	26	[35]
25	120~240	1.48	3	307	39	9	[36]
26	114.26~115.04	3.75~5.02	2.6	343~365	31.4~104.9	13	[37]
27	152.4	3.12	3	347	65.5	5	[38]
28	159	4.8	4.1	433	79.4	2	[39]
29	159	5~10	4.1	355~422	52.3~117.2	12	[40]
30	152	1.7	3.3	270	83.7~85.7	4	[41]
31	54	0.5~2.16	2.2	450	53.4~121.4	9	[42]
32	76~152	1.68~4.9	2	363~633	31~53.8	12	[43]
33	133.05~159.1	3.23~6.17	3	331.7~392	83.8~89.3	18	[44]
34	100~200	3	3	303.5	58.5	12	[45]
35	165.2	3.7	3	366	35.9~88	8	[46]
36	182.48~346.49	1.99~4.69	3	311.6~362.5	64.8	18	[47]
37	153~477	1.54~11.4	2	290~345	85.4	36	[48]
38	127~203	4.2~9.6	3.6~3.9	349~427	115.4~123.4	9	[49]

注: D 为钢管外径; t 为钢管壁厚; L 为钢管混凝土短柱的高度; f_y 为钢管的屈服强度; f_{cu} 为 150 mm×150 mm×150 mm 混凝土立方体抗压强度。

非常广,并且大量试验的参数取值都超出了规范的限值。所以很有必要以此试验数据为基础,讨论套箍系数、混凝土强度、钢材强度和钢管直径对《规范》公式准确性的影响,并研究超出《规范》限值的数据的规律。

2.2 套箍系数的影响

套箍系数对《规范》中 CCFST 轴压短柱承载力计算方法准确性的影响如图 1 及表 3 所示。其中, $N_{5.1}$ 代表(5.1)公式的计算值, $N_{6.1}$ 代表(6.1)公式的计算值, N_{ep} 代表实测值。红色的虚线为数据的趋势线,趋势线斜率的绝对值越大,说明混凝土强度对公式准确度的影响越大,并且当趋势线位于 1.0 下方时,表示公式的计算值大于试验值,则说明公式计算值不安全。

从图 1 中可以看出:图 1(a)中红色趋势线的斜率绝对值比图 1(b)中趋势线的斜率绝对值大,且图 1(b)中红色趋势线随着套箍系数的变化几乎没有什么变化,说明套箍系数对(5.1)式的准确性的影响比较大,对(6.1)式几乎没有影响。图 1 中的 2 条红色趋势线都是上升的直线,说明随着套箍系数的增大,2 个计算公式都偏于更加保守。

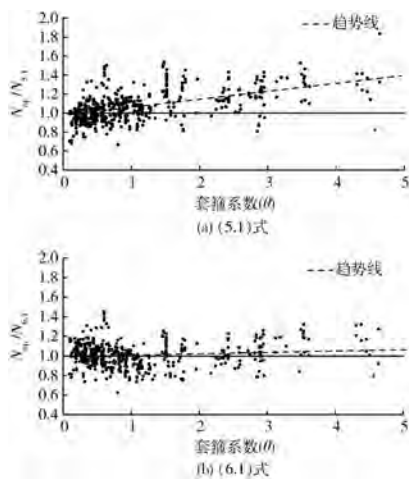


图 1 套箍系数的影响

由表 2 可知:当套箍系数小于规范的限值 0.5 时,试验值和(5.1)式计算值的比值小于 1.0,说明(5.1)式在套箍系数小于 0.5 时不安全;不管套箍系数在哪个区间,试验值和(6.1)式的比值变异系数都要小于试验值和(5.1)式的比值变异系数,说明(6.1)式的离散性比(5.1)式的离散性小,且该规律不因套箍系数的大小而变化。

表 2 套箍系数的影响

套箍系数	n	$N_{ep}/N_{5.1}$		$N_{ep}/N_{6.1}$	
		μ	δ	μ	δ
<0.5	187	0.978	0.103	1.136	0.093
[0.5, 2.0]	252	1.087	0.148	1.094	0.134
>2.0	90	1.238	0.148	1.172	0.132

注: n 为满足相应条件的试件数量; μ 和 δ 分别代表试验值和公式计算值的比值平均数和变异系数,变异系数越小说明离散性越小。

2.3 混凝土强度的影响

混凝土强度对《规范》中关于 CCFST 轴压短柱承载力计算方法的准确性的影响如图 2 及表 3 所示。图 2 中竖向黑色的虚线代表规范中混凝土强度的限值,为 30~80 MPa。图 2(a)中红色趋势线的斜率绝对值比图 2(b)的大,说明混凝土强度对(5.1)式的影响要大于对(6.1)式的影响。且随着核心混凝土强度的提高,试验值和 2 个公式计算值的比值均逐渐降低,当核心混凝土强度大于 90 MPa 时,试验值和(5.1)式计算值的比值小于 1.0,说明(5.1)式在核心混凝土强度大于 90 MPa 时不安全。

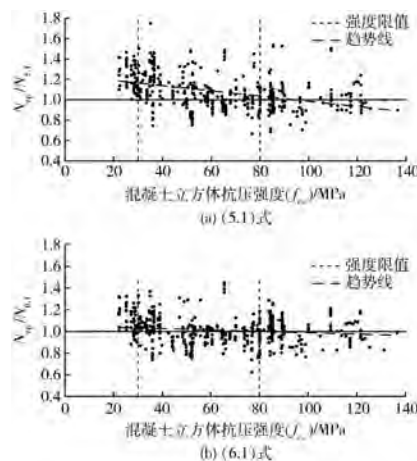


图 2 混凝土强度的影响

表 3 混凝土强度的影响

混凝土强度/MPa	n	$N_{ep}/N_{5.1}$		$N_{ep}/N_{6.1}$	
		μ	δ	μ	δ
<30	49	1.237	0.093	1.222	0.105
[30, 80]	292	1.083	0.169	1.099	0.131
>80	188	1.017	0.130	1.131	0.104

从表 3 可以看出:当试验数据在核心混凝土强度的限值范围之内时,2 个公式的平均值相差不大,(6.1)式的变异系数比(5.1)式的变异系数小,说明在《规范》的混凝土强度限值范围内,(6.1)式的离散性相比(5.1)式要小。当核心混凝土强度小于规范的限值 30 MPa 时,2 个公式计算值的平均值分别为 1.237 和 1.222,而核心混凝土强度大于 80 MPa 时分别为 1.017 和 1.131,说明 2 个公式在计算低强度混凝土的 CCFST 短柱时,其结果要比计算高强度混凝土的 CCFST 短柱的结果偏于保守。

2.4 钢材强度的影响

钢管强度对《规范》中 CCFST 轴压短柱承载力计算方法的准确性的影响如图 3 及表 4 所示。图 3 中竖向黑色的虚线代表规范中钢管强度的规范限值,为 235~420 MPa。图 3(a)中红色趋势线趋于一条水平线,其斜率绝对值比图 3(b)中趋势线的斜率绝对值小,说明核心混凝土强度对(5.1)式的影响要

比对(6.1)式的影响小,且钢管强度对(5.1)式的影响非常小。钢管强度越高,试验值和 2 个公式计算值的比值越小。且当钢管强度大于 650 MPa 时,试验值与(6.1)式的比值小于 1.0,说明(6.1)式在钢管强度大于 650 MPa 时不安全。

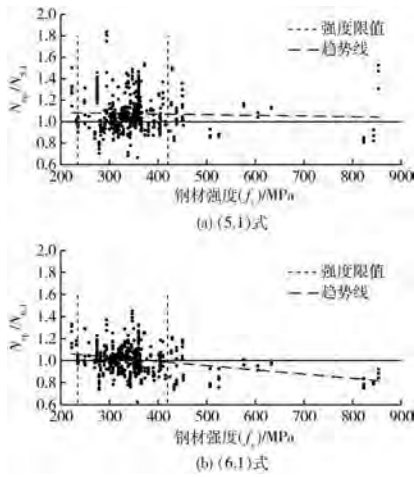


图 3 钢管强度的影响

表 4 钢管强度的影响

钢材强度/ MPa	n	N _{ep} /N _{5.1}		N _{ep} /N _{6.1}	
		μ	δ	μ	δ
≤420	470	1.075	0.157	1.131	0.117
>420	59	1.067	0.186	1.046	0.152

表 4 中,由于钢管强度小于 235 MPa 的数据只有 8 个,并且这 8 个数据的钢管强度都大于 220 MPa,与 235 MPa 相差不大,因此本文不予单独统计。从表 4 可以看出:不管钢管强度处在哪个强度区间,2 个公式的平均值相差都不大,但(6.1)式的变异系数比(5.1)式的变异系数小,说明不管钢管强度在哪个范围,(6.1)式的离散性相比(5.1)式都要小。

2.5 钢管直径的影响

尺寸效应是准脆性材料的普遍性质,对于 CCFST 而言,表现为强度随着构件尺寸的增大而减小,钢管直径的影响就是典型的尺寸效应。钢管直径对《规范》中 CCFST 轴压短柱承载力计算方法的准确性的影响如图 4 及表 5 所示。

图 4 中,试验数据中钢管直径的范围为 50~444 mm。图 4(a)中红色趋势线的斜率绝对值比图 4(b)的大,说明钢管直径对(5.1)式的准确性的影响要比(6.1)式的影响大。图 4(a)中红色趋势线在钢管直径大于 200 mm 时小于 1.0,说明在钢管直径大于 200 mm 时不安全。图 4 中的 2 条红色趋势线随着钢管直径的增大而减小,说明 CCFST 短柱轴压承载力具有明显的尺寸效应,《规范》2 个公式均没有考虑到这一点。

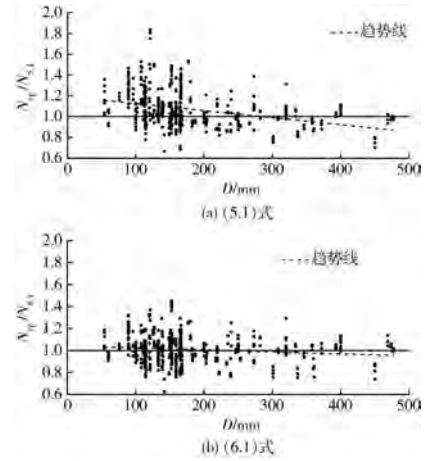


图 4 钢管直径的影响

表 5 钢管直径的影响

钢管直径/ mm	n	N _{ep} /N _{5.1}		N _{ep} /N _{6.1}	
		μ	δ	μ	δ
<200	411	1.103	0.159	1.131	0.125
≥200	118	0.974	0.118	1.090	0.113

从表 5 可以看出:不管钢管直径小于 200 mm 还是大于 200 mm,(6.1)式的变异系数都比(5.1)式的变异系数小,说明(6.1)式的离散性相比(5.1)式要小。当钢管直径大于 200 mm 时,试验值和(5.1)式计算值的比值小于 1.0,说明在钢管直径大于 200 mm 时,(5.1)式不安全。

3 CCFST 短柱轴心受压承载力计算公式

3.1 公式推导

钢管直径对 CCFST 轴压短柱承载力的影响很大,为了综合考虑混凝土强度和钢管强度的影响,并引入尺寸效应,基于叠加原理,本文利用 1stopt 软件的拟合功能得到一个基于独立参数的计算公式,其具体的计算表达式如下:

$$N = \eta_d (1.6A_c f_{ck,15}^{0.9} + 16A_s f_y^{0.6}); \quad (1)$$

$$\eta_d = \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-0.1}, D_0 = 150 \text{ mm}. \quad (2)$$

式中: N 为 CCFST 短柱轴心受压承载力; η_d 为 CCFST 柱尺寸效应调整系数; f_{ck,15} 为 150 mm×150 mm×300 mm 混凝土棱柱体抗压强度标准值; f_y 为钢管屈服强度; D 为钢管外直径; A_c 为混凝土横截面积; A_s 为钢管横截面积; D₀ 为参照直径。

3.2 试验校核

图 5 为理论计算值与 529 个试验结果的比较,图中 N₍₁₎ 为式(1)的计算值。从表 6 的结果可以得出:试验值与(5.1)式比值的变异系数最大,为 0.161,其次是(6.1)式,为 0.123,试验值与式(1)比值的变异系数最小,为 0.109。说明式(1)计算结果的离散性最小。根据参数分析的结果,式(1)可以用于计算混

混凝土立方体强度为 20~140 MPa、钢管强度为 235~800 MPa 的 CCFST 短柱轴心受压的承载力。

为了更好地反映计算公式与试验结果之间的偏差,在图 5 中添加了一15%和+15%误差线,如图中虚线所示。由图 5 可以看出,试验值和《规范》中 2 个公式计算值的比值比较分散,超出误差线的数据较多,而试验值与式(1)计算值的比值比较集中,83.0%的数据都在误差线之间,说明式(1)计算值更加准确。

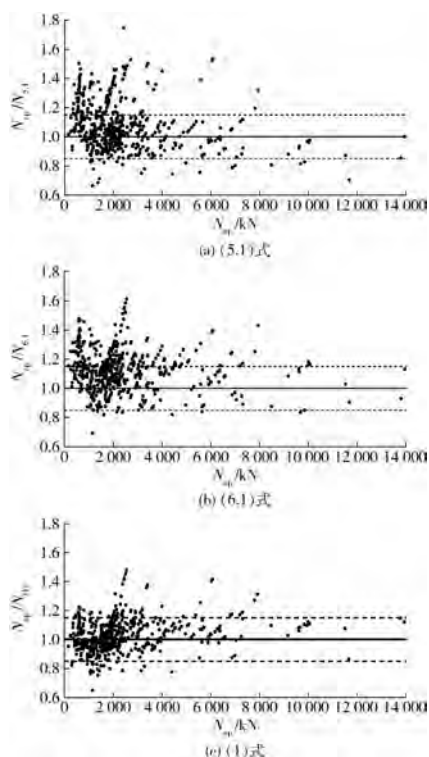


图 5 试验值与计算值比较

从表 6 中可以看出,应用(5.1)式时,误差在±15%以内的数据为 70.1%,应用(6.1)式时,误差在±15%以内的数据只有 58.8%;而应用式(1)时,误差在±15%以内的数据达到了 83.0%,远高于《规范》公式的结果,说明式(1)计算结果的准确性最好。

表 6 试验值与计算值比较

$N_{ep}/N_{5.1}$			$N_{ep}/N_{6.1}$			$N_{ep}/N_{(1)}$		
μ	δ	$P_{0.15}$	μ	δ	$P_{0.15}$	μ	δ	$P_{0.15}$
1.075	0.161	70.1%	1.124	0.123	58.8%	1.036	0.109	83.0%

注: $P_{0.15}$ 为误差在±15%以内的试验数据的百分数。

4 结 论

1) GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》中的 2 个公式都可以比较准确地预测 CCFST 短柱轴心受压的承载力,但是 2 个公式都有其局限性。(5.1)式在混凝土强度大于 90 MPa 或钢管外径大于 200 mm 时会偏于不安全,而(6.1)式会在钢管强

度增大时偏于不安全。

2)套箍系数、混凝土强度、钢管强度和钢管直径会不同程度地影响两个公式的准确性。仅利用一个套箍系数并不能很好地描述 CCFST 短柱的轴心受压承载力,钢管混凝土短柱轴心受压承载力主要与混凝土强度、钢材强度等基本参数有关,同时尺寸效应的影响很大,不可忽视。

3)综合考虑到混凝土强度和钢管强度对 CCFST 短柱轴心受压承载力的影响,并引入尺寸效应,基于叠加原理,通过拟合分析得到一个准确度更高的计算公式,适用于钢材强度为 235~800 MPa、混凝土立方体强度为 20~140 MPa 的 CCFST 短柱承载力计算。可为工程应用和规范修订提供参考。

(由于印刷关系,查阅本文电子版请登录 <http://www.paper.edu.cn/journal/zgkjlw.shtml>)

[参考文献] (References)

- [1] Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structures, part 1.1: general rules and rules for buildings [S]. London: British Standards Institution, 1994.
- [2] ANSI/AISC 360-10. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago-Illinois: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [3] ACI Committee 318. Building Code requirements for structural concrete and Commentary [S]. Detroit: American Concrete Institute, 2011.
- [4] AIJ-SRC. Standards for structural calculation of tubular steel concrete composite structures [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2001.
- [5] Standards Australia, AS5100. 6-2004 Bridge design, Part 6; steel and composite construction [S]. Sydney: Standards Australia International Ltd, 2004.
- [6] JCJ 01-89 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
JCJ 01-89 Design and construction rules of concrete filled steel tube structure [S]. Shanghai: Tongji University Press, 1990. (in Chinese)
- [7] CECS 28 : 90. 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.
CECS 28 : 90. Specification for Design and Construction of Concrete-Filled steel Tubular structures [S]. Beijing: China Planning Press, 1992. (in Chinese)
- [8] CECS 104 : 99. 高强混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
CECS 104 : 99. Technical specification for high-strength concrete structures[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [9] CECS 28 : 2012. 钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
CECS 28 : 2012. Technical specification for concrete-filled steel tube structure [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [10] DL/T 5085—1999 钢-混凝土组合结构设计规程[S].
DL/T 5085—1999. Design rules for steel-concrete com-

- posite structures [S]. (in Chinese)
- [11] GB 50936—2014. 钢管混凝土结构技术规范[S]. GB 50936—2014. Technical specification for concrete filled steel tube structure [S]. (in Chinese)
- [12] 蔡绍怀, 焦占拴. 钢管混凝土短柱的基本性能和强度计算[J]. 建筑结构学报, 1984, 5(6): 13-29. CAI Shaohuai, JIAO Zhanshuan. Calculation of basic properties and strength of concrete filled steel tubular short columns [J]. Journal of Building Structures, 1984, 5(6): 13-29. (in Chinese)
- [13] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 63-64. CAI Shaohuai. Modern concrete filled steel tube structure [M]. Beijing: People's Transportation Press, 2007: 63-64. (in Chinese)
- [14] 顾维平, 蔡绍怀, 冯文林. 钢管高强混凝土的性能与极限强度[J]. 建筑科学, 1991(1): 23-27. GU Weiping, CAI Shaohuai, FENG Wenlin. Performance and ultimate strength of high strength concrete filled steel tube [J]. Architecture Science, 1991(1): 23-27. (in Chinese)
- [15] 韩林海. 钢管高强混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]. 工业建筑, 1997(11): 39-44. HAN Linhai. Theoretical analysis and experimental research on axial pressure mechanical properties of high-strength concrete filled steel tube [J]. Industrial Construction, 1997(11): 39-44. (in Chinese)
- [16] 谭克锋, 蒲心诚. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载能力的研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(1): 10-15. TAN Kefeng, PU Xincheng. Study on performance and ultimate bearing capacity of super high strength concrete filled steel tube [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(1): 10-15. (in Chinese)
- [17] 谭克锋. 钢管超高强混凝土的强度及本构关系预测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(4): 10-13. TAN Kefeng. Prediction of strength and constitutive relation of super high strength concrete filled steel tube [J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2003, 35(4): 10-13. (in Chinese)
- [18] 贺锋, 周绪红. 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. Experimental study on the bearing capacity of high-strength concrete filled steel tubular axially loaded short columns [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(4): 61-66. (in Chinese)
- [19] 余志武, 丁发兴, 林松. 钢管高性能混凝土短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 41-47. YU Zhiwu, DING Faxing, LIN Song. Research on mechanical behavior of high performance concrete filled steel tubular short columns [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2): 41-47. (in Chinese)
- [20] 王力尚, 钱稼茹. 钢管高强混凝土柱轴向受压承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2003(7): 46-49. WANG Lishang, QIAN Jiaru. Experimental study on axial compression bearing capacity of high strength concrete filled steel tube columns [J]. Building Structure, 2003(7): 46-49. (in Chinese)
- [21] 张素梅, 王玉银. 圆钢管高强混凝土轴压短柱的破坏模式[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 1-10. ZHANG Sumei, WANG Yuyin. Failure mode of high strength concrete filled steel tube short columns under axial compression [J]. Journal of Civil Engineering, 2004, 37(9): 1-10. (in Chinese)
- [22] 杜国锋, 徐礼华, 徐浩然, 等. 钢管混凝土 T 形短柱轴压力学性能试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2008(3): 188-190. DU Guofeng, XU Lihua, XU Haoran, et al. Experimental study on axial compressive behavior of T-shaped concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2008(3): 188-190. (in Chinese)
- [23] 唐嘉敏. 钢管高强混凝土短柱轴压性能试验研究[C]//庆祝刘锡良教授八十华诞暨第八届全国现代结构工程学术研讨会. 天津: 天津大学出版社, 2008: 1650-1655. TANG Jiamin. Experimental study on axial compression behavior of high-strength concrete filled steel tube stub columns [C]// Proceedings of celebrating the 80th anniversary of Professor Liu Xiliang and the 8th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: Tianjin University Press, 2008: 1650-1655. (in Chinese)
- [24] 王战. 薄壁圆钢管混凝土构件轴压力学性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. WANG Zhan. Experimental study on axial compression mechanical properties of thin-walled circular concrete-filled steel tubular members [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [25] LAI M H, HO J C M. Experimental studies of spiral-confined HSCFST columns under uni-axial compression [J]. Construction and Architectural Engineering, 2014, 8(6): 576-582.
- [26] LAI M H, HO J C M. Experimental and theoretical studies of confined HSCFST columns under uni-axial compression [J]. Earthquakes & Structures, 2014, 7(4): 527-552.
- [27] EKMEKYAPAR T, AL-ELIWI B J M. Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns and design specifications [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 105: 220-230.
- [28] ABED F, ALHAMAYDEH M, ABDALLA S. Experimental and numerical investigations of the compressive behavior of concrete filled steel tubes (CFSTs) [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80(1): 429-439.
- [29] OLIVEIRA W L A D, NARDIN S D, CRESCE A L H, et al. Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(12): 2103-2110.

- [30] BECK A T, OLIVEIRA W L A D, NARDIM S D, et al. Reliability-based evaluation of design code provisions for circular concrete-filled steel columns [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(10): 2299-2308.
- [31] YU Q, TAO Z, WU Y X. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns [J]. *Steel Construction*, 2008, 46(4): 362-370.
- [32] GUPTA P K, SARDA S M, KUMAR M S. Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(2): 182-193.
- [33] YU Z W, DING F X, CAI C S. Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(2): 165-174.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] HAN L H, YAO G H, CHEN Z B, et al. Experimental behaviors of steel tube confined concrete (STCC) columns [J]. *Steel & Composite Structures*, 2005, 5(6): 459-484.
- [37] GIAKOUMELIS G, LAM D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(7): 1049-1068.
- [38] FAM A, QIE F S, RIZKALLA S. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(4): 631-640.
- [39] ZHOU D, QIAN J. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns: discussion [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130: 152-153.
- [40] JOHANSSON M. The efficiency of passive confinement in CFT columns [J]. *Steel & Composite Structures*, 2002, 2(2): 379-396.
- [41] PRION H G L, BOEHME J. Beam-column behavior of steel tubes filled with high strength concrete [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1994, 21(2): 207-218.
- [42] LAHLOU K, AİTCIN P C, CHAALLAL O. Behaviour of high-strength concrete under confined stresses [J]. *Cement & Concrete Composites*, 1992, 14(3): 185-193.
- [43] GARDNER N J, JACOBSON E R. Structural behavior of concrete filled steel tubes [J]. *ACI Structural Journal*, 1967, 64(7): 404-413.
- [44] 张素梅, 刘界鹏, 马乐, 等. 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 Sumei, LIU Jiepeng, MA Le, et al. Experimental research and bearing capacity analysis of circular steel tube confined high-strength concrete columns under axial compression [J]. *Civil Engineering Journal*, 2007, 40(3): 24-31. (in Chinese)
- [45] HAN L H, YAO G H. Behaviour of concrete-filled hollow structural steel (HSS) columns with pre-load on the steel tubes [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(12): 1455-1475.
- [46] HE L, ZHAO Y G, LIN S. Experimental study on axially compressed circular CFST columns with improved confinement effect [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 140: 74-81.
- [47] 陈鹏, 王玉银, 刘昌永, 等. 圆钢管混凝土轴压性能尺寸效应试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(S1): 249-257.
CHEN Peng, WANG Yuyin, LIU Changyong, et al. Experimental study on size effect of axial compression performance of round steel tube concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(S1): 249-257. (in Chinese)
- [48] CHEN Peng, WANG Yuyin, LIU Changyong, et al. Experimental research on the size effect of the concrete filled steel tubular under axial compression [J]. *Chinese Journal of Architectural Structures*, 2017, 38(S1): 249-257. (in Chinese)
- [49] WANG Y, CHEN P, LIU C, et al. Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 120: 397-407.