

文章编号:1673-2049(2015)06-0001-07

钢管混凝土中钢管的纵向容许应力

刘永健¹, 姜磊¹, 张宁^{1,2}

(1. 长安大学 桥梁结构安全技术国家工程实验室, 陕西 西安 710064;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:针对钢管混凝土短柱轴心受压过程中钢管与核心混凝土在极限承载阶段时的多向应力状态, 引入钢管纵向容许应力折减系数与混凝土抗压强度提高系数, 对钢管混凝土的应力状态、轴压承载力计算进行理论分析, 给出各系数的计算方法, 并将计算值与试验值进行对比。结果表明:该方法计算值与试验值较为吻合;钢管纵向容许应力折减系数的引入有助于加深对钢与混凝土二者之间相互作用的认识, 在工程常用范围内可为钢管混凝土结构节点设计提供参考。

关键词:钢管混凝土; 极限承载力; 组合作用; 钢管; 纵向容许应力; 强度折减

中图分类号: TU311

文献标志码: A

Longitudinal Allowable Stress of Steel Tube in Concrete-filled Steel Tube

LIU Yong-jian¹, JIANG Lei¹, ZHANG Ning^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Bridge Structure Safety Technology, Chang'an University, Xi'an

710064, Shaanxi, China; 2. School of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest

A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: According to multiaxial stress state of steel tube and concrete under ultimate state in concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns under axial load, longitudinal allowable stress reduction factor of steel tube and compressive strength improvement factor of concrete were defined to analyze the stress state and calculate the axial bearing capacity, and the calculation methods of the factors were proposed. Comparison between the calculation values of the method and test values was carried out. The results show that the calculation results are in good agreement with the test results. The proposed longitudinal allowable stress reduction factor contributes to understanding interaction mechanism and can provide references for joint design of CFST structure in scope of engineering.

Key words: concrete-filled steel tube; ultimate bearing capacity; composite action; steel tube; longitudinal allowable stress; strength reduction

0 引言

钢管混凝土(CFST)结构的工作性能优势表现在钢管对其核心混凝土的约束作用, 使混凝土处于侧向围压状态, 轴向强度得以提高。同时, 混凝土的

存在阻止或延缓了钢管发生面外局部屈曲, 保证了钢材性能充分发挥。目前, 针对钢管混凝土轴压构件的极限状态研究主要集中在套箍效应计算方法, 即核心混凝土强度的提高模式, 而此时的钢管应力状态则关注不足。钢管混凝土短柱极限受压时, 钢

收稿日期: 2015-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178051, 51378068); 陕西省交通运输厅科研项目(13-26K)

作者简介: 刘永健(1966-), 男, 江西玉山人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: lyj_chd@gmail.com。

管管壁除主轴方向的纵向应力外,还受核心混凝土径向压力产生的环向应力,因此钢管处于多向应力状态。受金属材料体积畸变的影响,环向应力的产生将导致钢管纵向应力的折减。蔡绍怀^[1]、韩林海等^[2-4]、Ellobody 等^[5]、Sakino 等^[6-8]通过试验研究发现,在钢管和核心混凝土发生组合作用时,钢管管壁存在环向应力增加和纵向应力折减的趋势。可见,钢管混凝土构件受外荷载产生套箍作用时,会间接降低钢管纵向承载能力。

实际工程中,钢管混凝土结构多在钢管管壁上设置节点进行传力,如钢管混凝土上承式拱桥的桥面荷载通过立柱先传递到拱肋的钢管表面,钢管混凝土建筑结构中梁端剪力通过梁柱节点传递给钢管混凝土柱的钢管^[9-10]。若此时承受轴压的拱、柱产生套箍作用,钢管的纵向容许应力由于环向应力的增加而逐渐减小,则钢管可能在未完成与混凝土界面传力时就出现了纵向屈服破坏。另一方面,钢管混凝土轴压构件的验算往往忽略钢管环向应力的影响,此时得到的钢管管壁纵向承载力未做相应折减,导致结构设计低于真实的应力状态^[11-12]。

目前,钢管纵向容许应力受环向应力的折减规律与作用机理在钢管混凝土的研究中尚未得到重视。王玉银等^[13]实测了 36 个圆钢管高强混凝土轴压短柱的纵向和横向应变,仅利用钢管平面应力-应变关系研究钢管纵向应力变化情况,但缺少相关理论计算方法。本文通过引入钢管纵向容许应力折减系数,对钢管混凝土短柱的钢管应力状态、轴压承载力计算进行了理论分析,同时对钢管混凝土的钢管应力水平在工程范围内进行了讨论与对比,为钢管混凝土结构设计提供参考。

1 钢管混凝土短柱轴心受压过程

轴心荷载直接作用于钢管混凝土柱顶时,钢管与核心混凝土共同受力,变形协调,此时的受力状态见图 1(a),其中, N 为轴压荷载, ϵ 为应变, N_s 、 N_c 分别为钢管和混凝土轴压荷载, N_u 为极限荷载, ϵ_y 、 ϵ_u 分别为屈服应变和极限应变, σ_{sl} 为钢管纵向应力, σ_{cl} 为核心混凝土纵向应力, A_s 、 A_c 分别为钢管和混凝土截面面积。假设二者沿构件长度均匀分布,则其与自身横截面的数量积应等于轴压荷载 N 。轴压荷载 N 在轴心受压过程中分为几个典型阶段,通过荷载-应变曲线反映,见图 1(b)。初始加载时,构件处于弹性阶段,钢材的泊松比保持在 0.3 左右,而混凝土材料为 0.17,钢材的泊松比大于混凝土,

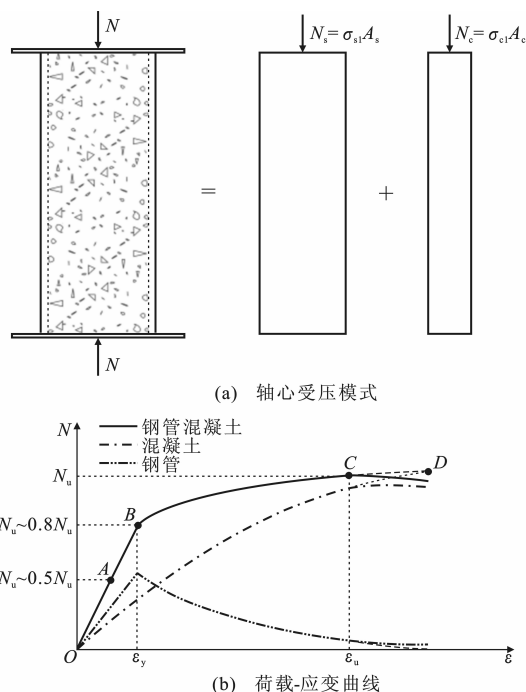


图 1 钢管混凝土轴压受力平衡简图

Fig. 1 Equilibrium Diagram of CFST Under Axial Load

钢管的径向膨胀变形略大,无法对核心混凝土提供横向约束,可认为二者均单向受力且无相互作用^[1]。

在弹性阶段,钢管混凝土所承受的轴向力发展较快,直至构件轴压荷载达到其极限荷载的 30%~50%,即荷载-应变曲线的 A 点,见图 1(b)。在这一过程中,混凝土泊松比增加到 0.5 以上,其横向变形超过钢管的相应变形,钢管开始约束混凝土,钢管与混凝土之间产生紧箍力。此后,核心混凝土与钢管均处于多向应力状态,混凝土三向受压,而钢管纵向和径向受压,环向受拉。多向应力下的钢管初始屈服时,轴压构件的荷载-应变曲线到达 B 点,轴压荷载在极限荷载的 60%~80% 范围内。核心混凝土受侧向围压作用,承载力可继续提高,而钢管表面出现剪切滑移线,但无明显变形。此后,构件轴力增加缓慢,而纵向应变增长变快。钢管进入塑性阶段,环向应力变大,对混凝土的约束作用不断增强,该曲线到达 C 点。C 点为钢管混凝土承载力最大值 N_u ,受压混凝土强度达到极限。最终,构件总承载力逐渐降低,形成荷载-应变曲线的下降段,构件的破坏形式表现为钢管管壁出现明显的鼓曲。

将钢管混凝土短柱轴心受压过程划分为 3 个阶段:弹性状态、塑性状态和极限状态(图 2)。钢管混凝土进入塑性状态后,钢管与核心混凝土发生组合作用,混凝土抗压强度因钢管紧箍力而得到提高,同时塑性、延性也明显改善,这是钢管混凝土力学性能

的主要优势。另一方面,钢管同样处于三向应力状态,即存在纵向压应力 σ_{s1} 、环向拉应力 σ_{s2} 和径向压应力 σ_{s3} ,见图 2(b),其中,径向压应力远小于其他 2 个应力,若忽略不计,则可认为钢管塑性应力沿着二维 Von Mises 屈服包络线运动,见图 3。由图 3 可以看出,屈服状态下的曲线 BC 段上,随着环向拉应力的增加,钢管的纵向屈服应力沿着曲线不断减小。这意味着钢管在提高核心混凝土抗压承载力的同时,其纵向应力强度不断降低。若考虑极限情况,钢管环向屈服应力能够到达曲线 D 点,即 $\sigma_{s2} = f_y$,其中 f_y 为钢管屈服点应力,则纵向屈服应力减小为 0,形成钢管约束混凝土。此时,钢管纵向无法承载,若管壁有传力节点,将会导致该部位无法进行传力而发生破坏。

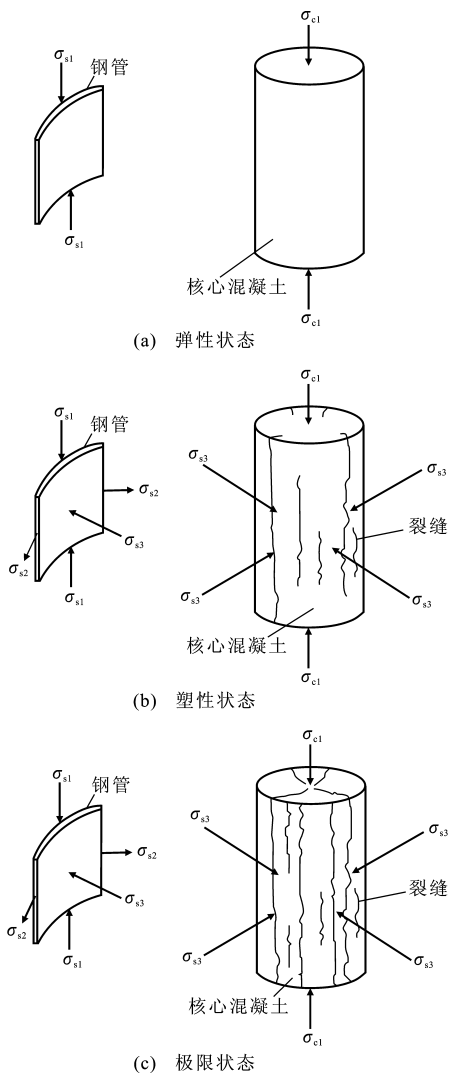


图 2 钢管混凝土各阶段应力状态

Fig. 2 Stress State of Each Stage of CFST

钢管混凝土达到极限承载阶段时,钢管的应力状态到达曲线的 C 点,这时的 σ_{s1} 也称为钢管纵向容

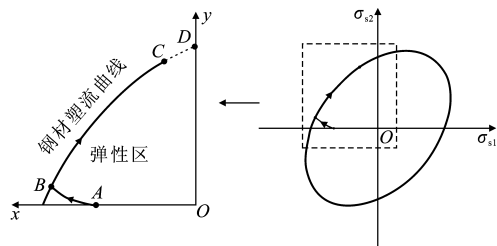


图 3 钢管屈服包络图和应力路径

Fig. 3 Yield Envelope and Stress Path of Steel Tube

许应力,该值应低于钢材的屈服强度。同样,受钢管套箍作用的影响,核心混凝土的纵向应力 σ_{c1} 应大于其单轴抗压强度。基于上述状态,引入修正系数,则钢管混凝土短柱的承载力表达式可写为

$$N_u = \sigma_{s1} A_s + \sigma_{c1} A_c = k_s f_y A_s + k_c f_c A_c \quad (1)$$

式中: f_c 为混凝土单轴抗压强度; k_s 为钢管纵向容许应力折减系数; k_c 为混凝土抗压强度提高系数。

值得注意的是,钢管混凝土受极限荷载 N_u 时,应使各材料的力学性能得到充分发挥,可认为核心混凝土为三轴受压破坏,同时钢管进入塑性状态。因此,应有 $k_s < 1, k_c > 1$,下文对修正系数的推导建立在该假设条件下。

2 极限承载力修正系数的计算

2.1 钢管容许应力折减系数

当组合作用产生时,混凝土三向受压,钢管纵向受压和环向受拉,钢管的应力-应变增量^[14]具有以下关系

$$\begin{bmatrix} d\sigma_{s1} \\ d\sigma_{s2} \end{bmatrix} = \mathbf{D}^p \begin{bmatrix} d\epsilon_{s1} \\ d\epsilon_{s2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{D}^p 为塑性刚度矩阵; ϵ_{s1} 为钢管纵向应变; ϵ_{s2} 为钢管环向应变,应变值以受拉为正。

定义钢管环向应变增量与纵向应变增量的比值 β 为

$$\beta = \frac{d\epsilon_{s2}}{d\epsilon_{s1}} \quad (3)$$

随着纵向应变的增加,钢管的纵向应力将减小,同时环向应力不断增加,可认为极限状态下二者趋于恒定,即

$$d\sigma_{s1} = d\sigma_{s2} = 0 \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2)可得

$$\beta = \frac{2\sigma_{s2} - \sigma_{s1}}{2\sigma_{s1} - \sigma_{s2}} \quad (5)$$

此时钢管满足 Von Mises 屈服准则,即

$$\sigma_{s1}^2 - \sigma_{s1}\sigma_{s2} + \sigma_{s2}^2 = f_y^2 \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得钢管混凝土极限状态的

σ_{s1} 和 σ_{s2} 分别为

$$\sigma_{s1} = \frac{\beta+2}{\sqrt{3(1+\beta+\beta^2)}} f_y \quad (7)$$

$$\sigma_{s2} = \frac{2\beta+1}{\sqrt{3(1+\beta+\beta^2)}} f_y \quad (8)$$

由式(1),(7)可得钢管纵向容许应力折减系数 k_s 为

$$k_s = \frac{\beta+2}{\sqrt{3(1+\beta+\beta^2)}} \quad (9)$$

2.2 混凝土抗压强度提高系数

约束混凝土峰值应力 σ_{cl}^{\max} 的计算采用 Mander 等^[15] 屈服条件,即

$$\sigma_{cl}^{\max} = f_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94\sigma_{s3}}{f_c}} - 2 \frac{\sigma_{s3}}{f_c} \right) \quad (10)$$

假设钢管混凝土的约束应力沿管壁均匀分布,如图 4 所示。

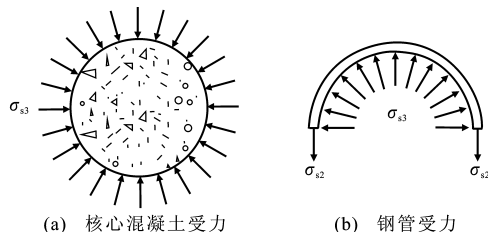


图 4 钢管受力示意

Fig. 4 Schematics of Stress of Steel Tube

由力的平衡关系,可建立径向压应力 σ_{s3} 与环向拉应力 σ_{s2} 的关系式,即

$$\sigma_{s3} = -\frac{2t\sigma_{s2}}{D-2t} \quad (11)$$

式中: D 为圆形钢管混凝土直径; t 为钢管厚度。

将式(11)代入式(10),可得混凝土峰值应力为

$$\sigma_{cl}^{\max} = f_c \left[-1.254 + 2.254 \sqrt{1 - \frac{15.88t\sigma_{s2}}{(D-2t)f_c}} + \frac{4t\sigma_{s2}}{(D-2t)f_c} \right] \quad (12)$$

由式(1),(8),(12)可得核心混凝土抗压强度提高系数 k_c 为

$$k_c = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 - \frac{15.88(2\beta+1)t}{\sqrt{3(1+\beta+\beta^2)}} \frac{f_y}{(D-2t)f_c}} + \frac{4(2\beta+1)t}{\sqrt{3(1+\beta+\beta^2)}} \frac{f_y}{(D-2t)f_c} \quad (13)$$

上述各式中 β 可由 Tomii 等^[16] 试验实测结果取值,其计算公式为

$$\beta = 0.9 \frac{\xi}{\xi+1} - 1.4 \quad (14)$$

式中: ξ 为套箍指标, $\xi = f_y A_s / (f_c A_c)$ 。

考虑极限情况,令 $k=0$ 时,则钢管环向拉应力 $\sigma_{s2} = f_y$,成为钢管约束混凝土结构,由式(1),(12)可得 k_c 为

$$k_c = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 - \frac{15.88t f_y}{(D-2t)f_c}} + \frac{4t f_y}{(D-2t)f_c} \quad (15)$$

公式(15)与文献[17]中钢管约束混凝土计算公式一致。

选取不同钢管混凝土参数范围代入式(9)和式(13)进行分析可知,当 $\xi=0.2 \sim 4.0$ 时, k_s 和 k_c 的取值随 ξ 呈对数关系变化,对计算值拟合可得

$$\left. \begin{aligned} k_s &= 0.184 \ln(\xi) + 0.623 \\ k_c &= 0.427 \ln(\xi) + 2.156 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3 承载力计算公式的验证

为验证简化公式的正确性,选取 324 个圆形钢管混凝土轴压短柱试验数据和 16 个圆形钢管约束混凝土轴压短柱试验数据进行对比,见表 1。

图 5 为承载力试验值与计算值对比,其中, N_1 , N_2 分别为钢管混凝土轴压承载力计算值和试验值, N_3 , N_4 分别为钢管约束混凝土轴压承载力计算值与试验值,虚线分别为计算值高于或低于试验值的 10%。对于钢管混凝土,承载力计算值与试验值比值的均值 $\mu=0.967$,均方差 $\sigma=0.127$,变异系数 $\sigma/\mu=0.131$;对于钢管约束混凝土,承载力计算值与试验值比值的均值 $\mu=0.993$,均方差 $\sigma=0.071$,变异系数 $\sigma/\mu=0.071$ 。钢管混凝土极限状态承载力计算值与试验值基本吻合,表明 k_s , k_c 的简化公式计算模型是可靠的。

4 工程中钢管纵向应力容许范围

以钢管混凝土拱桥为例,拱肋在实际工程中的常用混凝土强度等级为 C50,钢材等级为 Q345,根据《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)中第 3.3.3 条规定,钢管混凝土截面含钢率宜为 4%~20%,即 A_s/A_c 为 $\frac{1}{24} \sim \frac{1}{4}$,计算得到工程常用套箍指标 $\xi=0.28 \sim 1.73$ 。

取 $\xi=0.2 \sim 4.0$ 代入式(16),可得 k_s , k_c 与 ξ 之间的关系,见图 6。由图 6 可以看出:随着套箍指标 ξ 增大, k_s , k_c 有增大的趋势,在工程常用含钢率范围内,增长幅度比较大;当套箍指标 ξ 较大时, k_s , k_c

表 1 钢管混凝土轴压试验数据
Tab. 1 Test Data of CFST Under Axial Load

材料种类	D/mm	t/mm	f_c/MPa	f_y/MPa	试件数目	文献来源
钢管混凝土	238~361	4.5	21.1~61.6	507~525	6	[5]
	108~337	2.9~9.0	15.5~61.6	249~853	44	[6]~[8]
	168~169	2.6~5.0	15.6~30.2	200~338	11	[18]
	159~1020	5.0~13.0	13.2~37.3	291~382	9	[19]
	48~165	3.5~4.5	27.0	223~304	5	[20]
	131~134	2.4~6.2	15.0~21.9	235	5	[21]
	86~89	2.7~4.0	24.7~38.8	227	4	[22]
	76~102	2.2~2.4	45.7	380~390	9	[23]
	165	2.8	39.0~86.0	363	3	[24]
	101~319	3.0~10.0	19.4~41.9	335~452	26	[25]
	114	4.0~5.0	20.8~67.1	343	13	[26]
	111~200	2.0~6.3	53.4	323~484	33	[2]~[4]
	101~265	1.5~5.4	15.8~34.8	265~410	39	[27],[28]
	96~320	4.0~12.0	24.3~37.7	250~410	35	[29],[30]
	127~133	2.0~7.0	84.8	258~429	11	[31]
	77~210	2.0~4.5	17.1~39	232~603	23	[32]
	159~164	3.8~6.3	20.2	342~379	12	[33]
	133~168	3.3~5.4	29.1~49.4	325~392	36	[13]
钢管约束混凝土	133~159	3.3~6.1	70.0~75.0	332~392	16	[34]

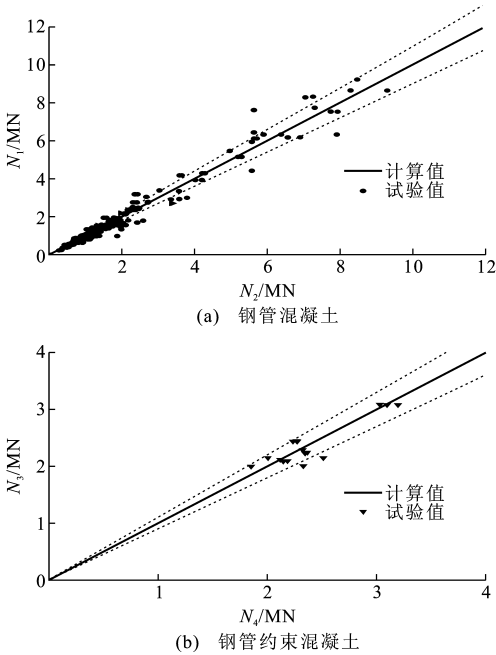


图 5 承载力计算值与试验值对比
Fig. 5 Comparison of Bearing Capacity Between Predicted Values and Experimental Values

增长幅度变缓,且 k_s 逐渐趋于 1。

在工程常用范围($\xi=0.28\sim1.73$)内,钢管的纵向容许应力在 $0.39f_y\sim0.72f_y$ 范围内,而混凝土的纵向抗压强度为 $1.61f_c\sim2.39f_c$ 。可见,极限状态下的钢管纵向强度折减程度较大,若进行该状态下

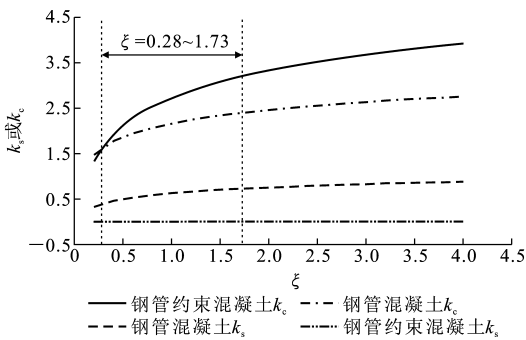


图 6 k_s, k_c 与 ξ 关系
Fig. 6 Relations Between k_s, k_c and ξ

的节点传力设计,应采取增大板厚等措施以避免钢管过薄而发生纵向屈曲破坏。

5 结 语

(1)钢管混凝土受轴压作用达到极限状态时,钢管与核心混凝土均处于多向应力状态。可分别考虑混凝土和钢管纵向承载力,其中三向受压的混凝土抗压强度得到提高,而塑性阶段的钢管纵向强度受到削弱。随着钢管环向应力的增加,其纵向容许应力不断降低。

(2)针对钢管混凝土轴压极限承载力公式,引入钢管纵向容许应力折减系数与混凝土抗压强度提高系数,且给出各系数的计算方法。通过对比分析可

知,该计算方法所得值与试验值较为吻合,有助于加深对钢管与混凝土二者之间相互作用的认识。

(3)计算发现,当钢管混凝土套箍指标在工程常用范围内时,钢管极限纵向容许应力为 $0.39f_y \sim 0.72f_y$,应在钢管混凝土结构节点设计时给予重视。

参考文献:

References:

- [1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
CAI Shao-huai. Modern Steel Tube Confined Concrete Structures[M]. Beijing:China Communications Press, 2003.
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社, 2000.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structure [M]. Beijing:Science Press,2000.
- [3] HAN L H, YAO G H. Influence of Concrete Compaction on the Strength of Concrete-filled Steel RHS Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003,59(6):751-767.
- [4] HAN L H, YAO G H. Experimental Behaviour of Thin-walled Hollow Structural Steel (HSS) Columns Filled with Self-consolidating Concrete (SCC) [J]. Thin-walled Structures,2004,42(9):1357-1377.
- [5] ELLOBODY E, YOUNG B, LAM D. Behaviour of Normal and High Strength Concrete-filled Compact Steel Tube Circular Stub Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research,2006,62(7):706-715.
- [6] SAKINO K, TOMII M, WATANABE K. Sustaining Load Capacity of Plain Concrete Stub Columns by Circular Steel Tubes[C]//ASCCS. Proceeding of the International Specialty Conference on Concrete-filled Steel Tubular Structures. Fukuoka: ASCCS, 1985: 112-118.
- [7] SAKINO K, HAYASHI H. Behaviors of Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Concentric Loadings[C]//ASCCS. Proceedings of the Third International Conference on Steel-concrete Composite Structures. Fukuoka:ASCCS,1991:25-30.
- [8] 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.
- [9] 刘永健,刘君平,池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结滑移力学性能试验[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2010,35(1):17-23,29.
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, CHI Jian-jun. Shear

Bond Behaviors at Interface of Concrete-filled Steel Tube[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition,2010,35(1):17-23,29.

- [10] 刘永健,刘君平,郭永平,等. 钢管混凝土界面粘结滑移性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(2): 53-57.
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, GUO Yong-ping, et al. Bond-slip Mechanics Behaviors of Structures Concrete Filled Steel Tubes[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2007,27(2):53-57.
- [11] 邓继华,周福霖,谭平. 圆钢管混凝土拱空间极限荷载计算方法研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(11): 28-35.
DENG Ji-hua, ZHOU Fu-lin, TAN Ping. Study on Method for Calculating Spatial Ultimate Load of Circular CFST Arch[J]. Journal of Building Structures, 2014,35(11):28-35.
- [12] HATZIGEORGIOU G D. Numerical Model for the Behavior and Capacity of Circular CFT Columns, Part I: Theory[J]. Engineering Structures, 2008,30(6): 1573-1578.
- [13] 王玉银,张素梅. 圆钢管高强混凝土轴压短柱剥离分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(增):31-34.
WANG Yu-yin, ZHANG Su-mei. Individual Behavior of Steel Tube and Concrete in CFST Stub Columns Subjected to Axial Compression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2003,35(S):31-34.
- [14] 陈惠发,SALEEB A F. 弹性与塑性力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
CHEN Hui-fa, SALEEB A F. Elasticity and Plasticity [M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2004.
- [15] 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.
- [16] TOMII M, YOSHIMURA K, MORISHITA Y. Experimental Studies on Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns Under Concentric Loading [C]// ASCE. Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads. New York:ASCE,1977:718-741.
- [17] 周绪红,刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京:科学出版社,2010.
ZHOU Xu-hong, LIU Jie-peng. Behavior and Design of Tube Confined Columns [M]. Beijing: Science Press,2010.
- [18] GARDNER N J. Use of Spiral Welded Steel Tubes in Pipe Columns[J]. Journal of the American Concrete

- Institute, 1968, 65(11): 937-942.
- [19] LUKSHA L K, NESTEROVICH A P. Strength Testing of Large-diameter Concrete Filled Steel Tubular Members[C]//ASCCS. Proceedings of the Third International Conference on Steel-concrete Composite Structures. Fukuoka: ASCCS, 1991: 67-72.
- [20] CHENG Y E, XU F, XU Z Y, et al. Experimental Research on Dynamic Behaviour of Basic Concrete Filled Steel Tubular Elements[C]//ASCCS. Proceedings of the Second International Conference on Steel-concrete Composite Structures. Fukuoka: ASCCS, 1988: 137-144.
- [21] WANG Z U, YANG S Z. Experimental Research of Comprehensive Strength and Comprehensive Modulus of Elasticity of Concrete Filled Steel Tube[C]//ASCCS. Proceeding of the International Specialty Conference on Concrete-filled Steel Tubular Structures. Fukuoka: ASCCS, 1985: 74-80.
- [22] GOODE C D. Four Tests[R]. Manchester: Manchester University, 1989.
- [23] KILPATRICK A E. Prediction of the Non-linear Behaviour of Concrete-filled Steel Tubular Columns [M]. Toowoomba: University of Southern Queensland, 1994.
- [24] BRIDGEM R, O'SHEA M. Australian Composite Code Concrete Filled Steel Tubes [C]//ASCCS. ASCCS Seminar on Concrete Filled Steel Tubes. Fukuoka: ASCCS, 1997: 59-74.
- [25] YAMAMOTO T, KAWAGUCHI J, MORINO S. Experimental Study of Scale Effects on the Compressive Behavior of Short Concrete-filled Steel Tube Columns [C]//ASCE. Composite Construction in Steel and Concrete IV. New York: ASCE, 2000: 879-891.
- [26] GIAKOUMELIS G, LAM D. Axial Capacity of Circular Concrete-filled Tube Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 1049-1068.
- [27] 钟善桐. 高层钢-混凝土组合结构[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003.
- ZHONG Shan-tong. High-rise Steel-concrete Composite Structure [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2003.
- [28] 钟善桐, 王用纯. 关于轴心受压钢管混凝土构件的工作性能和承载力计算的探讨[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1978(1): 1-33.
- ZHONG Shan-tong, WANG Yong-chun. Research on Behavior and Capacity of Concrete Filled Steel Tube Under Concentric Load[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 1978(1): 1-33.
- [29] 蔡绍怀, 焦占栓. 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 Shao-huai, JIAO Zhan-shuan. Behavior and Ultimate Strength of Short Concrete-filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Building Structures, 1984, 5(6): 13-29.
- [30] 蔡绍怀, 顾万黎. 钢管混凝土长柱的性能和强度计算[J]. 建筑结构学报, 1985, 6(1): 32-40.
- CAI Shao-huai, GU Wan-li. Behavior and Ultimate Strength of Long Concrete-filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Building Structures, 1985, 6(1): 32-40.
- [31] 谭克锋, 蒲心诚, 蔡绍怀. 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 Ke-feng, PU Xin-cheng, CAI Shao-huai. Study on the Mechanical Properties of Steel Extra-high Strength Concrete Encased in Steel Tubes[J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(1): 10-15.
- [32] 汤关祚, 赵炳泉, 竺惠仙, 等. 钢管混凝土基本力学性能的研究[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(1): 13-31.
- TANG Guan-zuo, ZHAO Bing-quan, ZHU Hui-xian, et al. Study on the Fundamental Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(1): 13-31.
- [33] 李云飞. 钢管混凝土轴心受压构件受力性能的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- LI Yun-fei. Experimental Research of the Concrete Filled Steel Tube Column Subjected to Axial Compress[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [34] 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, 68.
- ZHANG Su-mei, LIU Jie-peng, MA Le, et al. Axial Compression Test and Analysis of Circular Tube Confined HSC Stub Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 24-31, 68.