

钢管混凝土受压构件中钢管约束效能计算分析

潘立

中国建筑科学研究院有限公司建筑结构研究所, 北京

收稿日期: 2022年1月27日; 录用日期: 2022年2月16日; 发布日期: 2022年2月23日

摘要

对于钢管混凝土结构中常见类型与规格的受压构件, 其内填普通混凝土因成型与降温收缩而可能脱离钢管, 即钢管与混凝土之间界面出现脱粘裂隙。此大概率现象使钢管约束混凝土的实际效能有所降低, 使此类构件的组合截面始终协调变形的设计验算假定不一定或不完全符合实际情况, 由此增大了钢管混凝土结构的空动力特性计算的失真程度。基于解析钢管混凝土受压构件组合截面的各项变形, 说明了钢管被动约束内填混凝土的基本条件, 推导了关联钢管约束效能的轴压比限值与相关函数, 并提出了可供相关规范修订及钢管混凝土结构设计与施工参考的实用技术建议。

关键词

钢管混凝土构件, 受压组合截面, 混凝土成型与降温收缩, 钢管与内填混凝土之间脱粘裂隙, 钢管被动约束效能, 轴压比

Calculation Analysis for Steel Tube Restraint Efficiency of Compression Concrete-Filled Steel Tubular Members

Li Pan

Institute of Building Structures, China Academy of Building Research, Beijing

Received: Jan. 27th, 2022; accepted: Feb. 16th, 2022; published: Feb. 23rd, 2022

Abstract

For common type and specification compression members in concrete-filled steel tubular structures, the filled ordinary concrete may be separated from the peripheral steel tube due to its forming and cooling shrinkage, *i.e.* the debonding crack may appear between the two. The greater probability phenomenon definitely reduces the practical constraint efficiency of the steel tube to

the filled concrete, and makes the design check assumption that the composite section is always in line with the strip deformation uncertainly or incompletely in line to the actual situation, which may evidently increase the calculation deviation on spatial dynamic characteristics of concrete-filled steel tubular structures. Based on the analytical method, composite section deformations of concrete-filled steel tubular members in compression are analyzed, necessary conditions for the filled concrete confined by outer steel tube are explained, limit values of axial compression ratio and relative functions about the tube restraint efficiency are deduced, and then dependent practical suggestions are suggested which can be used as available reference for revision of relevant codes, design and construction of concrete-filled steel tubular structures.

Keywords

Concrete-Filled Steel Tubular Members, Compression Composite Section, Forming and Cooling Shrinkage of Concrete, Debond Crack between Steel Tube and Filled Concrete, Passive Restraint Efficiency of Steel Tube, Axial Compression Ratio

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

超高层建筑或高层重载组合结构中, 钢管混凝土通常被用于竖向承压构件。由于其外套钢管可约束内填混凝土的受压侧向变形, 使各向受压混凝土的抗压强度有所提高, 内填混凝土使外套钢管免于过早失稳屈服, 而使构件组合截面具有相对较高的受压承载力。为此多年来, 钢管混凝土被广泛用于结构中按常规增大材料强度及构件截面受限的承压构件。

至今为止, 钢管混凝土受压构件的各阶段设计验算均依据以下基本假定: 设计荷载组合作用下, 钢管与内填混凝土之间界面无缝隙/无脱粘, 两者可始终协调变形、共同工作。分析研究表明, 此假定仅在满足特定条件, 即内填混凝土的收缩变形小于其同向受压侧向变形时, 才符合工程实际情况。

钢管混凝土构件中, 如果内填混凝土因成型与降温收缩脱离外套钢管, 即两者之间界面存在较宽脱粘裂隙, 见图 1, 钢管便难以有效约束内填混凝土受压侧向变形。此大概率现象降低了外套钢管的被动约束效能, 使相应设计验算假定不完全或不一定成立, 是较多常见钢管混凝土结构中程度不同存在的普遍情况。当钢管与内填普通混凝土之间界面无构造拉结措施或其作用较弱时, 内填混凝土收缩可能使该部位出现裂隙; 当两者之间构造拉结措施的作用较强时, 填充混凝土内部亦可能出现收缩裂缝, 见图 2。

钢管混凝土受压构件中, 钢管在弹性范围内约束内填混凝土受压变形的程度与轴压比 δ 有关, 两者之间界面无脱粘情况下, 其约束程度随 δ 增加而增大。 δ 较小时, 混凝土受压变形及钢管被动约束该变形的现象不明显, 此时如计入混凝土收缩影响后, 该约束作用可能不存在。因此, 对应钢管开始出现约束作用的 δ 可记为 δ_{\min} 。

钢管混凝土结构整体模型计算分析时, 如忽略受压构件中钢管与内填混凝土之间的脱粘裂隙, 及其对这些构件刚度的影响, 则难以准确推算结构各项空间动力特性; 如无视部分承压构件 $\delta \leq \delta_{\min}$ 情况, 则可能误判钢管混凝土构件受力性能、使设计偏于不安全。

由此可见, 钢管混凝土构件的受力性能和钢管混凝土结构的动力特性, 均与构件外套钢管的约束效能密切相关, 对此进行了解析计算研究, 结果可用于推测既有或待建钢管混凝土结构中钢管与混凝土之间脱空/脱粘情况, 及相关规范修订和此类结构设计及施工参考。

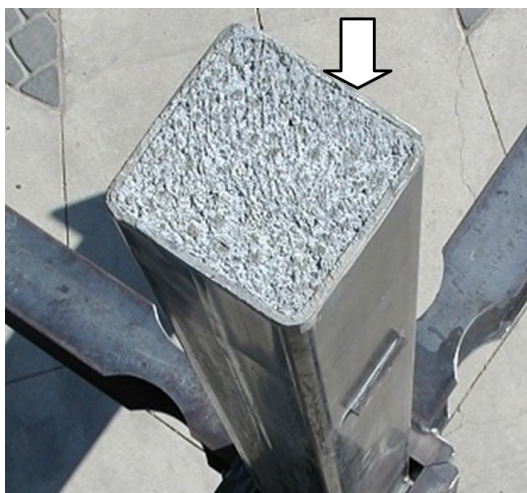


Figure 1. Debonding crack of concrete filled rectangular steel tube

图 1. 矩形钢管内填混凝土脱粘裂缝

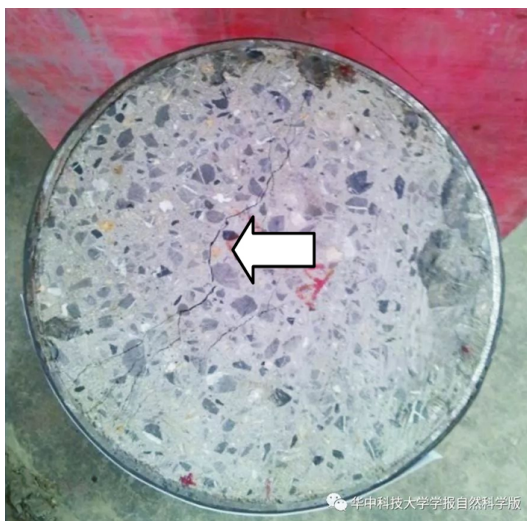


Figure 2. Shrinkage crack of concrete filled steel tube

图 2. 钢管内填混凝土收缩裂缝

2. 钢管混凝土组合截面应力分析

对于组合结构中的钢管混凝土轴压构件，设钢管截面为 A_s (mm^2)，钢材抗压强度设计值为 f_y' (N/mm^2)，钢管截面刚度为 $A_s E_s$ ；设内填混凝土截面为 A_c (mm^2)，混凝土轴心抗压强度设计值为 f_c (N/mm^2)，混凝土截面刚度为 $\gamma A_c E_c$ 。 γ 为塑性调整系数，宜控制 $0.7 < \gamma \leq 1.0$ 。设钢管混凝土构件组合截面作用轴压荷载为 $\delta(A_s f_y' + A_c f_c)$ ，其中 δ 为设计轴压比，基于组合截面各部位按刚度分配轴压荷载，可解出外套钢管的截面压应力 σ_s' ，

$$\sigma_s' = \frac{\delta(A_s f_y' + A_c f_c) E_s}{A_s E_s + \gamma A_c E_c} \quad (1.1)$$

同理，可解出设计轴压荷载作用下钢管内填混凝土的截面压应力 σ_c' ，

$$\sigma'_c = \frac{\delta(A_s f'_y + A_c f_c) \gamma E_c}{A_s E_s + \gamma A_c E_c} \quad (1.2)$$

依据钢管混凝土构件组合截面各部位受压变形协调条件，外套钢管在弹性范围内，可列出

$$\frac{\sigma'_s}{E_s} = \frac{\sigma'_c}{\gamma E_c} \quad (1.3)$$

随构件组合截面轴压荷载增大，钢管内填混凝土的 σ'_s 趋近或达到 f_c 时， γ 值有所减小。此时为保持组合截面受力平衡， σ'_c 增速减小伴有 σ'_s 值较快增大。

钢管混凝土构件受压极限状态下， σ'_c 达到最大值 βf_c 。 β 为套箍约束增大系数， $\beta \geq 1.0$ ，可参照现行相关规范[1][2]、标准[3]计算确定(β 可对其中相应公式中套箍系数 θ 所在括弧内的各项求和确定)。设 $\alpha_E = E_s/E_c$ ，根据式(1.3)可列出

$$\sigma'_s = \frac{\alpha_E \beta f_c}{\gamma} \leq f'_y \quad (1.4)$$

式(1.4)反映了变量 σ'_s 与 f_c 之间的对应关系，与 δ 值及两者界面是否脱粘无关。

3. 钢管约束内填混凝土分析

钢管混凝土构件中，内填混凝土因成型与降温收缩可能在 δ 较小时脱离钢管内壁，此时如果钢管内壁缺少栓钉等构造拉结措施，两者之间界面则可能出现脱空裂隙。钢管内填混凝土受压后伴有侧向(垂直于受压方向)增大变形，但该侧向变形需先抵消混凝土截面同向收缩后继续增大，迫使混凝土挤压钢管内壁才可能使钢管产生被动约束效能。

设钢管内填混凝土的截面成型收缩为 $\Delta_{c,s}$ ， $\Delta_{c,s} = \varepsilon_{c,\max} D_c$ ，其中 $\varepsilon_{c,\max}$ 为混凝土终极收缩应变，参照文献[4]附录 K 可取 $\varepsilon_{c,\max} = 0.00030 \sim 0.00045$ ； D_c 为圆形钢管的内径、或与 $\Delta_{c,s}$ 同向的矩形钢管内腔边长。

设钢管内填混凝土的截面降温收缩为 $\Delta_{c,t}$ ， $\Delta_{c,t} = \alpha_c \Delta_T D_c$ ，其中 α_c 为混凝土线膨胀系数，可取 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ [4]； Δ_T 为最大降温值($^\circ\text{C}$)。

钢管内填混凝土截面受压后，其侧向(平行于受压截面)变形为 $\Delta_{c,p}$ ，基于材料力学可列出

$$\Delta_{c,p} = D_c \frac{\nu_c \sigma'_c}{\gamma E_c} = \frac{\delta(A_s f'_y + A_c f_c)}{A_s E_s + \gamma A_c E_c} D_c \nu_c \quad (2.1)$$

式(2.1)中 ν_c 为混凝土泊松比，取 $\nu_c = 0.2$ [4]或根据试验确定。

钢管混凝土构件承压时，外套钢管能够被动约束内填混凝土侧向变形须满足以下基本条件： $\Delta_{c,p} > \Delta_{c,s} + \Delta_{c,t}$ ，由此可解出轴压比 δ 应满足以下不等式，

$$\delta > \frac{(\varepsilon_{c,\max} + \alpha_c \Delta_T)(A_s E_s + \gamma A_c E_c)}{\nu_c (A_s f'_y + A_c f_c)} \quad (2.2)$$

如果 δ 不满足式(2.2)要求，设计验算时应取套箍约束增大系数 $\beta = 1.0$ (注：根据现行相关规范[1][2]、标准[3]确定的 β 值不适当恒大于 1.0)。

4. 钢管内壁挤压应力

对于钢管混凝土受压构件，设内填混凝土满足变形条件 $\Delta_{c,p} > \Delta_{c,s} + \Delta_{c,t}$ ，此时钢管内壁作用混凝土挤压应力 ρ_r (作用于圆形钢管内壁的径向压应力，或作用于矩形钢管内壁的正向压应力)。可列出

$$\begin{aligned}\rho_r &= 0.5(\Delta_{c,p} - \Delta_{c,s} - \Delta_{c,t})\gamma E_c / D_c \\ &= 0.5 \left[\frac{\nu_c \delta (A_s f_y' + A_c f_c)}{A_s E_s + \gamma A_c E_c} - (\varepsilon_{c,\max} + \alpha_c \Delta_T) \right] \gamma E_c\end{aligned}\quad (3.1)$$

显然 $\Delta_{c,p}$ 趋近于 $\Delta_{c,s} + \Delta_{c,t}$ 、或 δ 趋近于 δ_{\min} 时，有 ρ_r 趋近于 0。

对于圆形钢管混凝土受压构件， ρ_r 作用下，单位高度钢管的环向拉力为 $\rho_r R_s$ ， R_s 为钢管的半径。此时限 $\rho_r R_s \leq t_s f_y$ ，其中 t_s 、 f_y 分别为钢管的壁厚与钢材抗拉强度设计值。对于矩形钢管混凝土受压构件，钢板在 ρ_r 作用下的侧弯变形与截面弯拉组合应力可近似依据两端固接单向板模型、或根据有限单元模型计算分析确定。

钢管混凝土结构建造施工期间，初始填入钢管且呈塑性的混凝土在自重作用下挤压钢管内壁，挤压应力沿高度非均匀分布并与内填/浇筑高度有关。鉴于此项挤压作用远小于硬化混凝土后期受压侧向变形的相应值，此处予以忽略。

5. $\Delta_{c,p}$ 、 $\Delta_{c,s}$ 与 $\Delta_{c,t}$ 的计算值与组合分析

已知钢管混凝土构件的混凝土截面成型收缩 $\Delta_{c,s} = \varepsilon_{c,\max} D_c$ ，取混凝土终极收缩 $\varepsilon_{c,\max} = 0.00030 \sim 0.00045$ ，在 $D_c = 500 \sim 1900$ mm 范围内，可列出相应计算值，见表 1。

Table 1. Lateral forming shrinkage of concrete filled steel tube $\Delta_{c,s}/\text{mm}$
表 1. 钢管内填混凝土侧向成型收缩 $\Delta_{c,s}/\text{mm}$

D_c/mm	$\varepsilon_{c,\max}$			
	0.00030	0.00035	0.00040	0.00045
500	0.150	0.175	0.200	0.225
600	0.180	0.210	0.240	0.270
700	0.210	0.245	0.28	0.315
800	0.240	0.280	0.320	0.360
900	0.270	0.315	0.360	0.405
1000	0.300	0.350	0.400	0.450
1100	0.330	0.385	0.440	0.495
1200	0.360	0.420	0.480	0.540
1300	0.390	0.455	0.520	0.585
1400	0.420	0.490	0.560	0.630
1500	0.450	0.525	0.600	0.675
1600	0.480	0.560	0.640	0.720
1700	0.510	0.595	0.680	0.765
1800	0.540	0.630	0.720	0.810
1900	0.570	0.665	0.760	0.855

已知钢管混凝土构件的混凝土截面降温收缩 $\Delta_{c,t} = \alpha_c \Delta_T D_c$ ，取 $\alpha_c = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ [4]，在 $\Delta_T = 10 \sim 25^\circ\text{C}$ 及 $D_c = 500 \sim 1900 \text{ mm}$ 范围内，可列出相应计算值，见表 2。

Table 2. Lateral cooling shrinkage of concrete filled steel tube $\Delta_{c,t}/\text{mm}$
表 2. 钢管内填混凝土侧向降温收缩 $\Delta_{c,t}/\text{mm}$

D_c/mm	降温 10°C	降温 15°C	降温 20°C	降温 25°C
500	0.050	0.075	0.100	0.125
600	0.060	0.090	0.120	0.150
700	0.070	0.105	0.140	0.175
800	0.080	0.120	0.160	0.200
900	0.090	0.135	0.180	0.225
1000	0.100	0.150	0.200	0.250
1100	0.110	0.165	0.220	0.275
1200	0.120	0.180	0.240	0.300
1300	0.130	0.195	0.260	0.325
1400	0.140	0.210	0.280	0.350
1500	0.150	0.225	0.300	0.375
1600	0.160	0.240	0.320	0.400
1700	0.170	0.255	0.340	0.425
1800	0.180	0.270	0.360	0.450
1900	0.190	0.285	0.380	0.475

对于钢管混凝土构件的混凝土受压侧向变形 $\Delta_{c,p}$ ，见式(2.1)，取 $\nu_c = 0.2$ [4]，参照 σ'_c 达到 f_c 时的应变约为 0.002 [4]，在 $D_c = 500 \sim 1900 \text{ mm}$ 、 $\frac{\sigma'_c}{E_c} = 0.0015 \sim 0.0030$ 及 $\gamma = 0.9 \sim 0.7$ 范围内，可列出相应计算值，见表 3。

选择同一 D_c ，叠加表 1 与表 2 相应计算值并将其与表 3 对应计算值比较可见， σ'_c/E_c 较小时，钢管内填混凝土截面成型收缩 $\Delta_{c,s}$ 与降温收缩 $\Delta_{c,t}$ 之和不小于其受压侧向变形 $\Delta_{c,p}$ ，即 $\Delta_{c,s} + \Delta_{c,t} \geq \Delta_{c,p}$ ，此时外套钢管对内填混凝土无约束作用， $\beta = 1.0$ 。 σ'_c/E_c 较大时，虽有 $\Delta_{c,s} + \Delta_{c,t} < \Delta_{c,p}$ ， $\beta > 1.0$ ，但由 $\Delta_{c,p}$ 产生的 ρ_r 有所减小，即钢管对内填混凝土的约束效应有所降低。

现有钢管混凝土受压构件的试验研究，因受限于关注范围或加荷条件，基本选用较小比例的缩尺模型为研究对象。已知众多相关有限元计算研究，可能受限于仿真分析难度，均假定外套钢管与内填混凝土两者始终保持协调变形。因此这些研究未涉及实际工程中 $\Delta_{c,s}$ 、 $\Delta_{c,t}$ 与 $\Delta_{c,p}$ 的组合情况，未涉及 $\Delta_{c,s}$ 与 $\Delta_{c,t}$ 对相关构件设计和结构空间动力特性的影响。这亦是至今为止，相关规范[1] [2]、标准[3]不要求，相关设计不考虑 $\Delta_{c,s}$ 、 $\Delta_{c,t}$ 对套箍约束增大系数 β 影响的主要原因。

Table 3. Lateral deformation of concrete filled steel tube under compression
表 3. 钢管内填混凝土受压侧向变形 $\Delta_{c,p}/\text{mm}$

σ'_c/E_c	0.0015	0.0020	0.0025	0.0030
D_c/mm	$\gamma = 0.9 \sim 0.7$			
500	0.17~0.21	0.22~0.29	0.28~0.36	0.33~0.43
600	0.20~0.26	0.27~0.34	0.33~0.43	0.40~0.51
700	0.23~0.30	0.31~0.40	0.39~0.50	0.47~0.60
800	0.27~0.34	0.36~0.46	0.44~0.57	0.53~0.69
900	0.30~0.39	0.40~0.51	0.50~0.64	0.60~0.77
1000	0.33~0.43	0.44~0.57	0.56~0.71	0.67~0.86
1100	0.37~0.47	0.49~0.63	0.61~0.79	0.73~0.94
1200	0.40~0.51	0.53~0.69	0.67~0.86	0.80~1.03
1300	0.43~0.56	0.58~0.74	0.72~0.93	0.87~1.11
1400	0.47~0.60	0.62~0.80	0.78~1.00	0.93~1.20
1500	0.50~0.64	0.67~0.86	0.83~1.07	1.00~1.29
1600	0.53~0.69	0.71~0.91	0.89~1.14	1.07~1.37
1700	0.57~0.73	0.76~0.97	0.94~1.21	1.13~1.46
1800	0.60~0.77	0.80~1.03	1.00~1.29	1.20~1.54
1900	0.63~0.81	0.84~1.09	1.06~1.36	1.27~1.63

6. 轴压比 δ 的限值函数

基于前述分析, 设 δ_{\min} 为 δ 的适宜下限值, $\delta \leq \delta_{\min}$ 时, 钢管混凝土受压构件中外套钢管对内填混凝土无约束作用。由 $\Delta_{c,p} = \Delta_{c,s} + \Delta_{c,t}$, $\delta = \delta_{\min}$, 并代入其变量前述表达式后可解出

$$\delta_{\min} = \frac{(\varepsilon_{c,\max} + \alpha_c \Delta_T)(A_s E_s + \gamma A_c E_c)}{\nu_c (A_s f'_y + A_c f_c)} \quad (5.1)$$

再设 δ_{\max} 为 δ 的适宜上限值, δ 趋近于 δ_{\max} 时, 钢管混凝土受压构件中混凝土呈现较大侧向变形, 且处于受压极限状态, 此时钢管局部因屈服而外鼓变形。取式(1.2)中 $\sigma'_c = \beta f_c$ 、 $\delta = \delta_{\max}$, 代入相应变量表达式后可解出

$$\delta_{\max} = \frac{\alpha_E A_s + \gamma A_c}{A_s f'_y + A_c f_c} \cdot \frac{\beta f_c}{\gamma} \quad (5.2)$$

钢管混凝土受压构件设计时, 无疑需验算控制 $\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}$ 。为使 $\delta_{\max} > \delta_{\min}$, 以确保钢管可发挥约束内填混凝土、提高其抗压强度的作用, 联立(5.1)与(5.2)两式后可解出

$$\frac{\beta f_c \nu_c}{\gamma E_c} > \varepsilon_{c,\max} + \alpha_c \Delta_T \quad (5.3)$$

式(5.3)中不等号左侧为钢管内填混凝土受压截面侧向极限应变, 不等号右侧为钢管内填混凝土的侧向终极收缩应变与最大降温收缩应变之和。

设计验算如不满足式(5.3)则表明, 钢管混凝土受压构件在承载能力极限状态下, 钢管对内填混凝土无约束作用。钢管混凝土受压构件设计时, 可用式(5.3)不等号两侧的差值定量判断极限状态下钢管对内填混凝土的被动约束效能。

对于圆形或矩形钢管混凝土组合截面, 两者在可比条件下, $\Delta_{c,p} > \Delta_{c,s} + \Delta_{c,t}$ 时, 前者环向受拉, 钢管约束内填混凝土的效能较高、 β 值随之较大; 后者因钢板侧弯, 钢管约束内填混凝土的效能较低、 β 值相对较小, 这也是实际工程中矩形钢管不得已选用较大壁厚以增加侧弯刚度/约束效能的主要原因。

7. 争议相关规范要求

文献[1]第 4.1.11 条要求: “直径大于 2 m 的圆形钢管混凝土构件及边长大于 1.5 m 的矩形钢管混凝土构件, 应采取有效措施减小钢管内混凝土收缩对构件受力性能的影响。”

文献[2]第 7.3.2 条要求: “矩形钢管混凝土柱边长大于等于 2000 mm 时, 应设置内隔板形成多个封闭截面; 矩形钢管混凝土柱边长或由内隔板分隔的封闭截面边长大于或等于 1500 mm 时, 应在柱内或封闭截面中设置竖向加劲肋和构造钢筋笼。”

文献[3]第 15.2.3 条要求: “矩形钢管混凝土柱应考虑角部对混凝土约束作用的减弱, 当长边尺寸大于 1 m 时, 应采取构造措施增强矩形钢管对混凝土的约束作用和减小混凝土收缩的影响。”第 15.3.3 条要求: “圆形钢管混凝土柱应采取有效措施保证钢管对混凝土的环箍作用; 当直径大于 2 m 时, 应采取有效措施减小混凝土收缩的影响。”

上述相关规范、标准要求, 均未涉及大多数实际工程中普遍选用直径 < 2.0 m 的圆形钢管混凝土受压构件, 及长边尺寸 < 1.0~1.5 m 的矩形钢管混凝土受压构件。对于这些常见构件, 长期以来较多设计者普遍认为相关规范、标准无要求即允许钢管与内填混凝土的界面不设栓钉等构造拉结措施, 且在确定 β 时可以不考虑 $\Delta_{c,s}$ 和 $\Delta_{c,t}$ 的不利影响。此做法不能确保这些规范、标准中相关计算式关于钢管与内填混凝土之间协同工作的假定(含非轴压钢管混凝土受压构件)符合实际情况, 并可能高估钢管混凝土构件的受压承载力、不同程度误判其所在结构的动力特性/抗震性能。

已知普通混凝土材料的终极收缩变形随 D_c 值增大而增加, 且基本不受配筋影响。因此前述规范、标准要求或其条文解释认为, 较大规格钢管内设置钢筋笼或箍筋可有效减小或控制内填混凝土的收缩变形, 其合理性和有效性似应受到质疑。

参照相关规范[1][2]、标准[3]关于型钢外侧设置栓钉要求, 钢管混凝土构件的钢管内壁如设置栓钉, 可有效减少或避免钢管与内填混凝土之间脱粘裂隙。此时虽然仍难以阻止混凝土内部出现收缩拉应力或裂缝, 但明显有利于确保钢管混凝土构件的外套钢管与内填混凝土能够始终协同工作。

8. 结论与建议

为避免结构设计高估钢管混凝土构件的受压承载力, 使相应验算条件满足相关规范、标准关于外套钢管与内填混凝土协同工作的假定, 参照相关试验研究[5][6][7]及上述分析, 提出以下结论与建议。

1) 钢管混凝土受压构件承载力验算复核或确定套箍约束增大系数 β 时, 需基于验算酌情考虑内填混凝土成型收缩 $\Delta_{c,s}$ 与降温收缩 $\Delta_{c,t}$ 的不利影响。

2) 钢管混凝土受压构件轴压比 δ 的适宜下限值 δ_{\min} 与适宜上限值 δ_{\max} , 可分别依据式(5.1)、式(5.2)计算确定。

3) $\delta \leq \delta_{\min}$ 时, 钢管被动约束效能不存在。 $\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}$ 时, 钢管对内填混凝土的被动约束效能随 δ

增加而增大。 $\delta \geq \delta_{\max}$ 时, 钢管被动约束效能不再增加。

4) 对于钢管混凝土结构中 $\delta \leq \delta_{\min}$ 或内填混凝土受压侧向变形 $\Delta_{c,p} \leq \Delta_{c,s} + \Delta_{c,r}$ 的受压构件, 设计应取 $\beta = 1.0$, 即不考虑钢管对内填混凝土存在被动约束作用。

5) 钢管内填混凝土宜首选性能适宜的补偿收缩混凝土[8], 以减小其终极收缩 $\varepsilon_{c,\max}$ 、提高钢管被动约束效能, 并基于现场同条件养护试件及标准试验方法确定其限制膨胀率。

6) 相关规范、标准今后修订时, 对直径小于 2.0 m 的圆形钢管混凝土受压构件, 及边长小于 1.0~1.5 m 的矩形钢管混凝土受压构件, 宜酌情要求钢管内壁增设栓钉等构造拉结措施。

7) 对于既有钢管混凝土结构, 用本文解析方法可计算判别钢管与内填混凝土是否脱空/脱粘, 或定量推算钢管的被动约束效能。

参考文献

- [1] 哈尔滨工业大学, 中国建筑科学研究院. GB 50936-2014. 钢管混凝土技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ 138-2016. 组合结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 中冶京诚工程技术有限公司. GB 50017-2017. 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [4] 中国建筑科学研究院. GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] 任庆英, 赵庆宇, 刘文珽, 等. 内壁设置栓钉的大尺寸截面钢管混凝土柱界面黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(12): 105-113.
- [6] 许开成, 黄财林, 陈梦成, 等. 钢管内壁粗糙程度对钢管混凝土界面黏结性能的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(S1): 420-424.
- [7] 梁江浩, 吕西林, 殷小澍, 等. 设置栓钉的方钢管混凝土柱抗震性能试验[J]. 结构工程师, 2012, 28(2): 116-121.
- [8] 中国建筑材料科学研究总院, 长业建设集团有限公司. JGJ/T 178-2009. 补偿收缩混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.