

文章编号:1673-2049(2013)03-0062-09

方、矩形钢管混凝土剪切性能研究现状

李志强¹, 陈以一^{1,2}

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 2000092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:总结了各国学者对方、矩形钢管混凝土剪切性能的研究现状,阐述了当前研究的特点与不足,指出了需要进一步研究的问题。鉴于剪跨比、轴压比、钢管对混凝土的约束效应等因素对剪切性能的影响较大,各种破坏形态的界限尚缺乏统一的判定标准,根据相关试验数据,对比了各种承载力公式的计算结果,分析了产生差别的原因。基于工程实际的需求,对未来研究工作提出了进一步的建议。

关键词:方、矩形钢管混凝土;剪切性能;剪跨比;轴压比;约束效应;承载力

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

Research Status on Shearing Performance of Square and Rectangular Concrete-filled Tubes

LI Zhi-qiang¹, CHEN Yi-yi^{1,2}

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Authors intended to summarize the research status on shearing performance of square and rectangular concrete-filled tubes (CFT) conducted by domestic and foreign scholars. Characteristics and shortcomings of current studies were demonstrated, further studies also were pointed out. Shearing performances were affected by many factors, such as shear-span ratio, axial load ratio and constraint effect of steel tubes, etc. Unified criteria on the boundaries of each failure pattern was not accepted by all the researchers. According to some test data, calculated results of various bearing capacity formulae were compared, and the reasons of difference were discussed. On the basis of practice requirements, several proposals on the future work were listed in the present research.

Key words: square and rectangular concrete filled tubes; shearing performance; shear-span ratio; axial load ratio; constraint effect; bearing capacity

0 引言

方、矩形钢管混凝土构件具有截面惯性矩大、制作简单、施工方便、对建筑功能影响较小等优点,在大型公共建筑、厂房、高层及超高层建筑中得到了越

来越广泛的应用。在工程实际中,方、矩形钢管混凝土构件往往用作承受压弯作用的柱,柱内一般存在剪力,某些条件下剪力对构件性能有较大影响。此外,柱与梁、桁架的连接部位是结构传力的关键部位,其抗剪性能尤其需要保证。目前针对圆钢管混

收稿日期:2013-07-12

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90815029);铁道部科研计划项目(2010G009-D)

作者简介:李志强(1984-),男,江西吉安人,工学博士研究生,E-mail: lzq19841983@163.com。

混凝土的剪切性能研究相对较为成熟,对方、矩形钢管混凝土的剪切性能则关注较少,而研究其轴压、压弯性能的较多。相关规范的规定也不完善,如文献[1],[2]中进行构件抗剪验算时采用的计算公式较为简单,只考虑钢管的抗剪强度而忽略了混凝土的作用;进行节点域抗剪验算时采用的计算公式又较为复杂。本文中笔者总结各国学者对方、矩形钢管混凝土构件和节点域抗剪问题的研究现状,梳理目前研究所采用的方法与特点,并提出进一步研究需要关注的问题。将相关文献的试验结果与一些规范以及研究者提出的承载力计算公式进行对比,分析各计算公式的适用条件与范围,并提出相关建议。

1 研究方法特点

钢、混凝土的剪切破坏机理不同,二者采用的破坏准则也不同。根据文献[3]中的描述,混凝土的剪切破坏是由于主拉或主压应力导致的拉裂或压碎,随剪跨比的变化有斜拉、剪压和斜压 3 种破坏形态。钢管腹板的剪切破坏属于材料塑性破坏,一般根据 Mises 准则,由是否达到屈服强度来判定。而方、矩形钢管混凝土构件是钢、混凝土 2 种材料组合而成,2 种材料的剪切破坏形态本身不同,因剪跨比、荷载条件、构造等因素的差别而带来的抗剪机理变化更为复杂。同为抗剪问题,因柱、梁构件抗剪与节点域抗剪具有不同特点,形成方、矩形钢管混凝土剪切问题的 2 大研究热点。

目前方、矩形钢管混凝土构件和节点抗剪性能及承载力的研究方法大体分 3 种:一是通过数值方法得到剪力-剪切变形全过程曲线,定义破坏准则,拟合出强度公式,如文献[4];二是通过试验数据拟合承载力计算公式,如文献[5];三是建立简化的理论分析模型,分别计算模型中各组成部分(如钢管、核心混凝土等部件)的抗剪强度并叠加得到承载力计算公式,如文献[6]~[11]等。第 1 种方法既可以得到承载力又可以得到剪切变形,能用于研究构件或截面的抗剪性能;第 2 种方法需要大量的试验数据;第 3 种方法多见于节点域的剪切性能研究。上述每种方法一般都需要采用其他方法辅助确定一些关键参数。

2 构件剪切问题研究现状

目前方、矩形钢管混凝土构件抗剪性能的研究较少,研究主要集中于压弯作用下的抗剪性能。研究者一般采用试验或有限元方法考察其抗剪性能,

较少提出有效的承载力计算公式。

文献[12]中对方钢管和圆钢管混凝土短柱进行了无轴力作用下单调与反复加载的抗剪性能试验,并用有限元法进行了验证。试件剪跨比 λ 较大,试验中均有弯曲破坏的特点。文献[13]中对 20 个方钢管混凝土柱的抗剪性能进行了试验研究,考察了轴压比 n 、剪跨比 λ 、混凝土强度、含钢率 α 等参数的影响。试验以荷载-位移曲线斜率发生明显变化的拐点作为屈服点,以峰值点作为极限荷载点。笔者认为剪跨比 0.15,0.75 的试件分别为剪切破坏和弯曲破坏,可将剪跨比的这 2 个数值作为剪切、弯剪、弯曲 3 种破坏形态的划界依据。但从文献来看,试验中剪跨比为 0.75 的试件仍然表现出剪切破坏的特点。文献[14]中完成了 22 个 T 形截面钢管混凝土构件的抗剪性能试验,试验参数包括剪跨比 λ 、轴压比 n (0,0.2,0.4)和套箍指标 ξ 。笔者认为试件的破坏形态随剪跨比不同而分为剪切破坏、弯剪破坏和弯曲破坏,且不受轴压力的影响。

文献[5]中进行了 6 个足尺方钢管混凝土柱的压弯抗剪承载力试验,主要参数为剪跨比 λ 和轴压比 n ,并且通过有限元参数分析提出了承载力计算公式,即

$$V_m = N_u[0.18 - 0.11\ln(\lambda)] + 0.1N \quad (1)$$

式(1)的适用范围为

$$0.15 < \lambda < 1.15$$

$$n \leq 0.1\lambda^2 - 0.36\lambda^2 + 0.42$$

式中: V_m 为剪切极限承载力; N_u 为按照文献[15]中所提出方法计算的试件轴心受压承载力; N 为杆件轴力。

式(1)由较少的数据点拟合而来,有效性不明确,适用范围也较小,且将轴压力对抗剪承载力的提高简单地设定为轴压力的 0.1 倍,但没有提出理论依据,没有给出试验数据的验证。

文献[15]中以构件受扭时纤维剪应变达到屈服应变 γ_{sc} 时的剪应力 τ_{sc} 作为方钢管混凝土组合剪切屈服点,横向受剪时则以其应力-应变(τ - γ)关系曲线上剪应变达到 0.01 时的剪应力作为方钢管混凝土抗剪强度,推导出的抗剪承载力计算公式用于构件纯剪时的截面强度计算,即

$$\left. \begin{aligned} V_u &= \gamma_v A_{sc} \tau_{sc} \\ \gamma_v &= 0.954 + 0.162\ln(\xi) \\ \gamma_{sc} &= 1\,500 + 20f_{cu} + 3\,500\sqrt{\alpha} \\ \tau_{sc} &= (0.455 + 0.313\alpha^{2.33})\xi^{0.25}f_{scy} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: V_u 为截面抗剪承载力; γ_v 为受剪时截面塑性

发展系数; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_{scy} 为轴心受压组合屈服强度指标。

文献[16]中认为矩形钢管混凝土纯剪构件的长度可统一按剪跨比为 0.15 的对比方形构件来计算,并定义剪应变达到 0.01 的剪力为构件抗剪承载力,根据有限元参数分析的结果拟合得到了矩形钢管混凝土纯剪承载力计算公式,即

$$\left. \begin{aligned} V_u &= 2Ht_w f_v + A_c \eta f_t \\ \eta &= 1.128 \ln(\xi) + 4.377 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: H, t_w, A_c 分别为与剪力方向平行的截面边长、钢管厚度和核心混凝土截面面积; f_v, f_t 分别为钢材抗剪强度与混凝土抗拉强度指标; η 为套箍指标 ξ 对核心混凝土抗剪强度的影响系数。

文献[4]中通过大量有限元参数分析后认为,剪跨比在 0.2~4 之间时钢管混凝土构件的抗剪承载力随剪跨比的增大而降低,剪跨比大于 4 或小于 0.2 时抗剪承载力的变化较为平缓。根据数值分析结果给出了破坏界限的定义,剪跨比不大于 0.2 时,钢管混凝土受剪构件破坏为剪切破坏;剪跨比在 0.2~4 之间时为弯剪破坏;剪跨比不小于 4 时为弯曲破坏。文献[17]中建议取 $\tau-\gamma$ 关系曲线上剪应变达到 0.01 时的剪力为抗剪强度,文献[4]中据此通过大量有限元分析提出了方钢管混凝土构件截面抗剪强度计算公式及 $\tau-\gamma$ 全过程曲线表达式,并给出了压、弯、剪

承载力的相关方程,即

$$\left. \begin{aligned} N/N_u &\geq 2\eta_0^{2.4} \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_u}\right)^2} \\ \left(\frac{N}{N_u} + a \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^2 &= 1 \\ N/N_u &< 2\eta_0^{2.4} \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_u}\right)^2} \\ \left[-b\left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c\left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: V 为截面剪力; M 为截面弯矩; M_u 为截面抗弯承载力; η_0 为钢管混凝土压弯构件相关曲线上的平衡点横坐标值; a, b, c 均为与钢管混凝土压弯构件相关曲线平衡点坐标有关的系数。

3 构件抗剪承载力计算公式对比

根据文献[5],[12],[13]中的试验数据,采用式(1),(4)进行钢管混凝土构件抗剪承载力计算,计算结果分别记为 V_{ca}, V_{cb} ,其与试验值 V_t 的对比情况如表 1 所示。式(1)针对杆件进行验算,无需关注截面内力分布,使用较为方便,但该公式未直接反映剪切破坏的本质原因。式(4)针对截面进行验算,需要考虑截面上的所有内力,反映了构件抗力的相关性。由表 1 可知,式(4)适用范围较大且一般偏于安全,但剪跨比较大时较为保守。

随着剪跨比的变化,式(1),(4)抗剪承载力计算

表 1 构件抗剪承载力计算值与试验值的对比

Tab. 1 Comparisons Between Calculated Results and Test Results of Shear Bearing Capacity of Members

构件编号	λ	n	α	ξ	V_t/kN	V_{ca}/kN	V_{cb}/kN	V_{cc}/kN	$V_{ca}V_t^{-1}$	$V_{cb}V_t^{-1}$	$V_{cc}V_t^{-1}$	数据来源
C1	0.90	0.00	0.15	1.77	9 057	7 077	8 529	20 572	0.78	0.94	2.27	文献[5]
C2	0.90	0.12	0.15	1.77	10 154	7 520	9 171	20 510	0.74	0.90	2.02	文献[5]
C3	0.65	0.00	0.15	1.77	11 192	8 285	11 075	20 572	0.74	0.99	1.84	文献[5]
C4	0.65	0.12	0.15	1.77	11 968	8 729	11 847	20 510	0.73	0.99	1.71	文献[5]
A1	2.87	0.00	0.12	1.56	188	不适用	95	672		0.51	3.58	文献[12]
A2	2.87	0.00	0.12	1.56	216	不适用	95	672		0.44	3.12	文献[12]
A3	2.87	0.00	0.12	1.56	198	不适用	95	672		0.48	3.39	文献[12]
S12-C1-1	0.15	0.00	0.07	1.12	264	241	296	296	0.91	1.12	1.12	文献[13]
S12-C1-2	0.15	0.25	0.07	1.12	323	257	291	291	0.80	0.90	0.90	文献[13]
S12-C1-3	0.15	0.50	0.07	1.12	384	273	267	267	0.71	0.69	0.69	文献[13]
S12-C1-4	0.15	0.60	0.07	1.12	392	280	249	249	0.71	0.64	0.64	文献[13]
S12-C2-3	0.15	0.50	0.07	0.60	446	402	302	302	0.90	0.68	0.68	文献[13]
S22-C1-3	0.15	0.50	0.11	2.11	500	382	485	485	0.76	0.97	0.97	文献[13]

值和试验值的对比情况见图 1。剪跨比较大时弯矩对钢管混凝土构件抗剪性能影响较大, $\lambda>0.5$ 时若采用式(4)进行计算而不考虑截面上的弯矩,抗剪承载力计算结果记为 V_{cc} ,其值往往偏于不安全。剪跨比在 1.0 以上的钢管混凝土构件抗剪试验数据较为

缺乏,其破坏机理与承载力是进一步研究需要关注的问题。

4 节点域剪切问题研究现状

方、矩形钢管混凝土结构节点形式较多,设计方

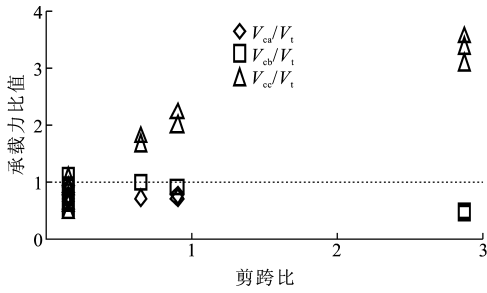


图1 承载力比值与剪跨比的关系

Fig. 1 Relations of Bearing Capacity Ratios and Shear-span Ratios

法均要求“强节点”,即塑性铰出现于梁端而此时节点核心区尚未发生破坏。目前各国对方、矩形钢管混凝土节点承载力的计算方法仍不完善,尚难准确判断节点的强弱,尤其是抗剪承载力的高低。早期的节点域抗剪承载力计算公式是基于截面抗剪模型推导出的(如文献[18]中的公式),近年来提出的斜压杆模型(如Fukumoto模型)则更符合试验情况。文献[19],[20]中统计了近年来各国部分钢管混凝土-钢梁节点的试验数据,将试验结果与AIJ规范公式、Fukumoto模型和Nishiyama模型的计算结果进行了对比分析,结果表明,Fukumoto模型和Nishiyama模型更为准确,具有更广泛的适用性。文献[21],[22]中基于软化桁架模型提出了用节点核心区非线性应力-应变模型来模拟剪力传递机制,采用叠加原理提出了节点核心区抗剪承载力计算公式。该模型考虑了轴压力的影响,但核心混凝土部分抗剪计算十分复杂。

文献[23]中介绍了方钢管混凝土梁柱节点极限抗剪承载力 V_j 的计算公式,即

$$V_j = 2.5 \frac{B}{h_b} A_c F_c + 1.2 A_{web} \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

式中: B 为方钢管宽度; F_c 为核心混凝土的抗剪强度; h_b 为钢梁高度,当 $2.5B/h_b > 4$ 时取4; A_{web} 为钢管腹板面积。

F_c 可按下式计算

$$F_c = \min\{0.12f'_c, 18 + 0.036f'_c\}$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

文献[11],[24]中进行了采用高强材料的钢管混凝土柱-钢梁节点抗震试验,经试验和理论分析,笔者基于叠加原理提出了实用的剪力-剪切变形三折线计算模型(Fukumoto模型)和相应的抗剪承载力计算公式,即

$$\left. \begin{aligned} V_{pu} &= V_{sy} + V_{cu} \\ V_{sy} &= A_w \sqrt{f_y^2 - \sigma_{sN}^2} / \sqrt{3} \\ \sigma_{sN} &= N A_s f_y / [A_s (A_s f_y + A_c f'_c)] \\ V_{cu} &= [h_c \tan(\theta) / 2 + 4 \sin(\theta) \sqrt{M_{fp} / (h_c f'_c)}] h_c f'_c \\ \theta &= \arctan(\sqrt{1 + (h_b / h_c)^2} - h_b / h_c) \\ M_{fp} &= d_c t_{fc}^2 f_y / 4 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: V_{pu} 、 V_{sy} 、 V_{cu} 分别为节点域、节点域钢管部分与节点域混凝土部分抗剪承载力; σ_{sN} 为钢管轴向应力; θ 为节点域混凝土斜压杆与钢管柱翼缘的夹角; M_{fp} 为钢管柱翼缘屈服弯矩; h_c 为核心混凝土截面高度; f_y 为钢管屈服强度; A_w 为钢管柱腹板面积; d_c 、 t_{fc} 分别为钢管柱翼缘宽度和厚度; A_s 为钢管截面积。

Fukumoto模型认为节点域剪力由钢管腹板与混凝土斜压杆共同承担,混凝土斜压杆由主体斜压杆和约束斜压杆组成。该模型能够考虑轴压力的影响,且能够考虑非线性阶段钢材和混凝土强度比值对轴压力在钢管柱壁和核心区混凝土之间分配比例的影响。

文献[10]中完成了采用超高强钢材和超高强混凝土的钢管混凝土柱-钢梁节点核心区抗震试验研究,并提出了节点核心区的受剪机理模型(Nishiyama模型)与抗剪承载力计算公式。该模型及抗剪承载力计算公式与文献[11],[24]中所提出的基本一致,仅钢管轴向应力 σ_{sN} 计算公式有所区别,即

$$\left. \begin{aligned} V_{pu} &= V_{sy} + V_{cu} \\ V_{sy} &= A_w \sqrt{f_y^2 - \sigma_{sN}^2} / \sqrt{3} \\ \sigma_{sN} &= N A_s E_s / [A_s (A_s E_s + A_c E_c)] \\ V_{cu} &= [h_c \tan(\theta) / 2 + 4 \sin(\theta) \sqrt{M_{fp} / (h_c f'_c)}] h_c f'_c \\ \theta &= \arctan(\sqrt{1 + (h_b / h_c)^2} - h_b / h_c) \\ M_{fp} &= d_c t_{fc}^2 f_y / 4 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: E_s 、 E_c 分别为钢材和混凝土的弹性模量。

Nishiyama模型将轴力按照钢管和混凝土的刚度进行分配,而文献[11],[24]中提出的模型将轴力按照钢管和混凝土的强度进行分配。

文献[8],[25]中在试验研究和理论分析的基础上,提出了方、矩形钢管混凝土柱与钢梁连接节点抗剪承载力计算公式,被现行《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159:2004)中所采用,即

$$V_j = \frac{2 N_y h_c + 4 M_{uw} + 4 M_{uj} + 0.5 N_{cv} h_c}{h_b} \quad (8)$$

其中

$$N_y = \min\left\{\frac{a_c h_b f_w}{\sqrt{3}}, \frac{t_{wc} h_b f_y}{\sqrt{3}}\right\}$$

$$M_{uw} = \frac{h_b^2 t_{wc} [1 - \cos(\sqrt{3} h_c / h_b)] f_y}{6}$$

$$M_{uj} = 0.25 b_c t_j^2 f_{yj}$$

$$N_{cv} = \frac{2 b_c h_c f_c}{4 + (h_c / h_b)^2}$$

式中: N_y 为钢管柱焊缝与腹板抗剪承载力的较大值; M_{uw} , M_{uj} 分别为钢管柱腹板和加劲板屈服弯矩; N_{cv} 为混凝土斜压杆抗压承载力; t_{wc} , t_j 分别为钢管柱腹板和内隔板的厚度; f_w , f_{yj} 分别为焊缝强度和内隔板钢材屈服强度; f_c 为核心混凝土轴心抗压强度; a_c 为钢管角部有效焊缝厚度; b_c 为核心混凝土截面宽度。

式(8)考虑了柱焊缝、柱腹板、内隔板和混凝土斜压杆对节点抗剪强度的贡献, 利用塑性铰理论得到内隔板节点的受剪承载力计算公式。

文献[7], [26], [27]中在带内隔板方钢管混凝土柱-钢梁节点(图2)抗震试验的基础上, 分析了节点核心区剪切受力机理, 建立了钢“框架-剪力墙”加混凝土“斜压短柱”受力模型及屈服机制。根据塑性极限分析, 给出了节点核心区受剪承载力计算的叠加公式, 即

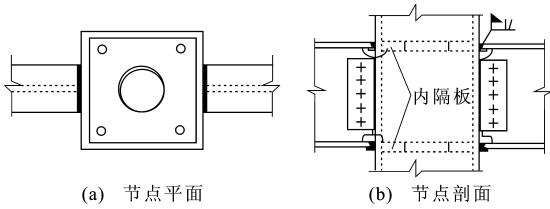


图2 带内隔板方钢管混凝土柱-钢梁节点

Fig. 2 CFST Column-beam Joint with Internal Diaphragms

$$V_j = (0.3 + 0.1\eta) b_c h_c f_c + \frac{A_w}{\sqrt{3}} \sqrt{f_y^2 - \sigma_{sN}^2} + \frac{d_c t_{fc}^2 f_y}{h_b - t_{fb}} \quad (9)$$

其中

$$\eta = \frac{N}{(A_c + \alpha_E A_s) f_c}$$

$$\alpha_E = E_s / E_c$$

$$\sigma_{sN} = N_s / A_s$$

$$N_s = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_c A_c} N$$

式中: t_{fb} 为梁翼缘的厚度。

文献[9], [28]中提出了带内隔板矩形钢管混凝土梁柱节点域受剪屈服机制, 根据薄腹板梁受剪理论分析节点域钢管受剪承载力, 基于斜压短柱理论分析节点域混凝土柱受剪承载力, 应用虚功原理与

叠加原理推导出节点域受剪承载力计算公式, 即

$$V_j = \frac{2 f_y h_c t_{wc}}{\sqrt{3}} + \frac{b_c t_{fc}^2 f_y}{h_b} + \frac{0.8 f_c b_c h_b h_c^2}{4 h_c^2 + h_b^2} \quad (10)$$

式(10)未考虑轴压比的影响, 将混凝土抗剪承载力乘以折减系数 0.8, 缺乏足够理论依据。

文献[6]中采用形状改变比能理论和混凝土斜压杆力学模型, 推导了内隔板式矩形钢管混凝土-钢梁节点核心区受剪承载力计算的叠加公式, 即

$$V_j = \frac{A_w}{\sqrt{3}} \sqrt{f_y^2 - \sigma_{sN}^2} + \frac{h_c b_c f_0 \sin(\theta) \cos(\theta)}{2} + 4 \sin(\theta) \sqrt{M_{fp} f_0 b_c} + \frac{b_c t_j^2 f_y}{h_b - t_{fb}} \quad (11)$$

其中

$$\sigma_{sN} = N_s / A_s$$

$$N_s = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_c A_c} N$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_c / 2}{h_b}\right)$$

$$M_{fp} = \frac{d_c t_{fc}^2 f_y}{4}$$

式中: f_0 为方钢管约束下混凝土纵向抗压强度。

文献[6]中的模型并未提出 f_0 的确定方法。

文献[29]中进行了 6 个方钢管混凝土柱与钢-混凝土组合梁连接节点的抗震试验, 在此基础上, 将节点域抗剪贡献分成钢管腹板、节点域钢管翼缘与内隔板或外隔板组成的钢板框架、节点域混凝土 3 个部分, 分别计算 3 个部分的剪力-剪切变形曲线并叠加, 得到节点的剪力-剪切变形骨架曲线, 并基于此提出了恢复力模型。文献[30]中在抗震试验的基础上提出简化模型, 将方钢管混凝土柱节点抗剪受力过程分为协同工作、共同工作、屈服强化和极限变形 4 个阶段。该模型认为剪力由钢管腹板和节点核心区混凝土共同承担, 而核心区混凝土抗剪又分成平面抗剪和压杆模式 2 个部分, 分别计算钢管腹板、混凝土直接抗剪与斜压杆抗剪模式的剪力-剪切变形曲线并叠加, 得到了方钢管混凝土柱节点的剪力-剪切变形全过程曲线。该方法可计算抗剪屈服承载力、极限承载力以及相应的剪切变形, 但忽略了钢管翼缘与内隔板组成的板式框架的抗剪承载力与变形, 缺乏理论依据。

文献[31]中根据试验和理论研究成果, 对方钢管混凝土柱穿心高强螺栓-端板节点核心区的受力机理进行了分析, 建立了节点核心区的受力模型和屈服机制, 推导了节点核心区的抗剪承载力计算公式。该公式考虑了轴压力的作用, 也考虑了钢管对

混凝土的约束效应。

目前已有多个关于方、矩形钢管混凝土节点域抗剪机理的理论模型,它们既有各自的优势也有相应的局限性。这些模型大多考虑了节点域混凝土斜压作用与钢管柱节点域的抗剪承载力,但对于节点内隔板、钢管柱焊缝抗剪承载力的考虑则各不相同。此外,对于核心混凝土强度的提高、轴压比的影响等因素的考虑也有所区别。Fukumoto 模型和 Nishiyama 模型均未考虑内隔板对节点抗剪强度的贡献,也未考虑钢管约束下核心区混凝土抗压强度的提高,使得计算值偏低。文献[8],[25]中提出的模型没有考虑柱轴力对节点核心区受力性能的影响,且表达式较为复杂。文献[6]中对 Fukumoto 模型进行了改进,考虑了轴力对钢管抗剪承载力的影响,但未考虑对混凝土抗剪承载力的影响。文献[7],[26],[27]中则认为轴压比对承载力的影响小于 5%,并采用经过修正的型钢混凝土节点抗剪公式计算混凝土抗剪承载力,缺乏理论依据。

5 节点域抗剪承载力计算公式对比

节点域剪切破坏的试验较少,文献[10],[24]中通过减小节点域板件厚度研究了节点域的剪切极限承载力。根据式(6)~(11)对文献[10],[24]中各试件进行验算,得到的节点域剪切承载力以 $V_{c6} \sim V_{c11}$ 表示,与试验值 V_{ij} 的对比情况见图 3,计算数据见表 2。由表 2 可知,式(6),(7),(11)具有较好的精度,其中式(6),(7)的计算结果差别较小且用于大高宽比试件时略显保守。式(8),(10)未考虑轴压比的影响,轴力较大时计算结果偏于不安全。式(9)根据型钢混凝土节点承载力公式计算钢管混凝土节点域混凝土抗剪承载力,计算结果具有一定的误差。

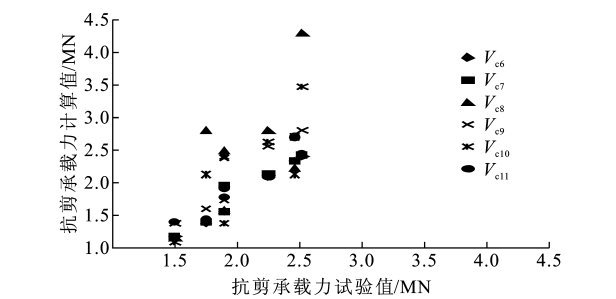


图 3 节点域抗剪承载力的计算值与试验值
Fig. 3 Calculated Results and Test Results of Shear Bearing Capacity of Joint Zone

6 进一步的研究方向

根据剪跨比的不同,方、矩形钢管混凝土构件受

表 2 节点域抗剪承载力计算值与试验值的对比
Tab. 2 Comparisons Between Calculated Results and Test Results of Shear Bearing Capacity in Joint Zone

构件编号	SP1	SP2	SP3	R1	R2	R3	R4
节点域高宽比	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
轴压比	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.20	0.20
V_{ij}/kN	1 501	1 905	2 464	2 252	1 744	2 520	1 887
V_{c6}/kN	1 174	1 551	2 335	2 108	1 400	2 401	1 946
$V_{c6}V_{ij}^{-1}$	0.78	0.81	0.95	0.94	0.80	0.95	1.03
V_{c7}/kN	1 174	1 551	2 335	2 121	1 412	2 421	1 958
$V_{c7}V_{ij}^{-1}$	0.78	0.81	0.95	0.94	0.81	0.96	1.04
V_{c8}/kN	1 158	1 573	2 222	2 791	2 788	4 285	2 507
$V_{c8}V_{ij}^{-1}$	0.77	0.83	0.90	1.24	1.60	1.70	1.33
V_{c9}/kN	1 396	1 734	2 698	2 564	1 607	2 807	2 374
$V_{c9}V_{ij}^{-1}$	0.93	0.91	1.10	1.14	0.92	1.11	1.26
V_{c10}/kN	1 102	1 389	2 122	2 630	2 135	3 454	2 400
$V_{c10}V_{ij}^{-1}$	0.73	0.73	0.86	1.17	1.22	1.37	1.27
V_{c11}/kN	1 408	1 782	2 712	2 096	1 439	2 444	1 932
$V_{c11}V_{ij}^{-1}$	0.94	0.94	1.10	0.93	0.83	0.97	1.02
数据来源	文献[24]	文献[24]	文献[24]	文献[10]	文献[10]	文献[10]	文献[10]

剪时有剪切、剪弯、弯曲 3 种破坏形态。文献[14]中针对 3 种破坏形态采用了 3 种不同的极限承载力判定标准:剪切型破坏根据试件形心处钢管剪应变达到 0.01 确定;弯曲型破坏根据跨中挠度达到 1/50 或 1/100 确定;弯剪型破坏根据荷载-位移曲线的峰值点确定。然而,由于准确地判定试件属于哪一种破坏形态较为困难,使得承载力计算公式并不完善。目前尚未有研究者给出完善的、定量的破坏形态判定标准,只能定性地判断试件属于哪种破坏形态。相关研究表明:随着剪跨比的变化,方、矩形钢管混凝土承载力的变化是连续的,剪跨比较大时的抗弯承载力与剪跨比较小时的纯剪承载力较为稳定。因而,是否可以从承载力的角度给出破坏形态的定量判断标准并由此确定 3 种破坏形态的剪跨比界限值,尚需进一步的研究。

各国有不少针对方、矩形钢管混凝土与钢梁连接节点的试验研究,但多是根据“强节点”要求设计试件,所谓的节点破坏出现在梁端而非节点域。一些学者设计了节点域较弱的试件进行抗剪试验,并提出了相关的力学模型解释其破坏机理。一些学者通过理论推导与有限元方法分析节点域抗剪性能,并提出简化模型与相应的承载力计算公式。这些力学模型有着各自的适用范围,承载力计算公式也各不相同。然而,节点域抗剪性能的研究仍不成熟,剪切破坏的试验数据较少且涵盖的参数有限,难以验

证提出的理论模型以及承载力计算公式。轴压比、高宽比、加劲板厚度、钢管约束效应等参数如何影响节点域的抗剪性能,目前尚缺乏统一的认识,如有些学者认为轴压比对抗剪性能影响显著,也有些学者认为影响较小。随着节点域高宽比的变化,破坏形态也随之变化,各破坏形态的界限尚不明确,但关注节点域高宽比参数的试验较为缺乏,因而,尚需要进行涵盖更多参数的节点域剪切试验研究。

超高层建筑巨型柱与伸臂桁架、带状桁架连接部位以及大型站房柱与桁架连接部位(图4),即桁架上、下弦杆之间的柱段,几何尺度、高宽比较大,其抗剪性能介于普通钢管混凝土柱-梁节点域与构件之间。现有的节点域抗剪模型与承载力计算公式大多针对核心区高度、高宽比较小的情况,针对几何尺度大、高宽比大等特殊情况的试验研究较为缺乏;现有的构件承载力计算公式较少,式(4)虽能计算复杂状态下的抗剪强度,但对于剪跨比较大的情况,计算结果存在偏差。已有研究者针对这一特殊研究对象进行试验与理论研究,但仍需进一步的深入探索。

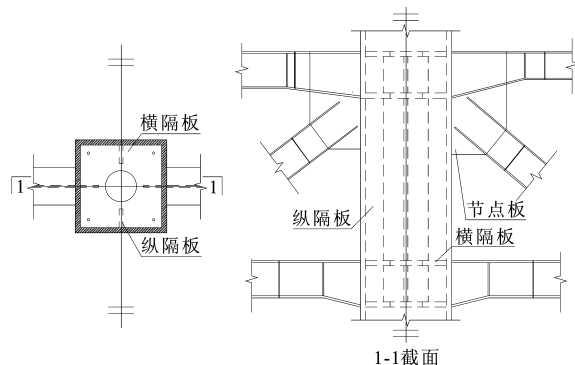


图4 钢桁架-方钢管混凝土柱节点示意

Fig. 4 Schematics of Joint Between Steel Truss and CFST Column

钢管混凝土多用于压弯构件,截面内力以轴力、弯矩为主,构件设计时剪力一般不起控制作用。钢管混凝土构件抗剪验算时,多数情况下剪跨比较大,破坏形态以剪弯为主。随着剪跨比的减小,几何参数、受力情况、破坏形态与节点域的情况较为接近。然而,研究者一般将构件、节点域剪切问题分开讨论,对二者的联系与区别关注较少,分析模型、承载力计算公式是否可以统一仍需进一步的研究。

7 结语

笔者总结了方、矩形钢管混凝土构件与节点域剪切问题的研究现状,并阐述了各种研究方法的特点。根据剪跨比与构造细节的不同,方、矩形钢管混凝土构件受剪时有剪切、剪弯、弯曲3种破坏形态,

基于有限元参数分析可给出各破坏形态的剪跨比界限值。节点域高宽比、剪跨比一般较小,且有加劲板件的约束,其剪切破坏模式一般为斜压杆机制,根据叠加原理分别求解各组件的剪切贡献可得到承载力计算公式。但目前的研究也有不足之处,进一步的探索需要关注以下问题:

(1)建立合适的力学模型以揭示剪切、剪弯、弯曲3种破坏形态的内在机理,并确定判别破坏形态的定量标准。

(2)确定3种破坏形态的剪跨比界限值。

(3)合理考虑钢管约束效应的有利作用,并评估轴压比、加劲板厚度等因素对承载力的影响。

(4)研究高宽比、剪跨比较大的节点域受剪机理与计算模型,并提出相应的承载力计算公式。

参考文献:

References:

- [1] ANSI/AISC 360-05, Specification for Structural Steel Buildings[S].
- [2] 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].
- [3] 舒士霖. 钢筋混凝土结构[M]. 2版. 杭州:浙江大学出版社,2003. SHU Shi-lin. Reinforced Concrete Structures[M]. 2nd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003.
- [4] 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]. 福州:福州大学,2006. YAO Guo-huang. Research on Behavior of Concrete-filled Steel Tubes Subjected to Complicated Loading States[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [5] 蔡健, 梁伟盛, 林辉. 方钢管混凝土柱抗剪性能试验研究[J]. 深圳大学学报:理工版, 2012, 29(3): 189-194. CAI Jian, LIANG Wei-sheng, LIN Hui. Experimental Study on Shear Resistance Performance of Concrete Filled Square Steel Tubular Columns[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2012, 29(3): 189-194.
- [6] 高春彦, 刘之峰, 李斌. 矩形钢管混凝土内隔板式节点抗剪承载力研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2008, 27(4): 355-358. GAO Chun-yan, LIU Zhi-feng, LI Bin. Research on Shear Capacity of Concrete-filled Rectangular Square Steel Joints with Inner Diaphragms[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2008, 27(4): 355-358.

- [7] 周天华,聂少锋,卢林枫,等.带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点设计研究[J].建筑结构学报,2005,26(5):23-29,39.
ZHOU Tian-hua, NIE Shao-feng, LU Lin-feng, et al. Design of Concrete-filled Square Tube Column and Steel Beam Joint with Internal Diaphragms[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(5): 23-29, 39.
- [8] 吕西林,李学平,余勇.方钢管混凝土柱与钢梁连接的设计方法[J].同济大学学报:自然科学版,2002,30(1):1-5.
LU Xi-lin, LI Xue-ping, YU Yong. Design Method for Connections Between Concrete-filled Square Tubular Columns and Steel Beams[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(1): 1-5.
- [9] 肖万松.矩形钢管混凝土梁柱节点域受剪承载力分析[D].武汉:华中科技大学,2007.
XIAO Wan-song. Analysis of Shear Load-bearing Capacity of Joint Region of CFRT Column and Beam [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [10] NISHIYAMA I, FUJIMOTO T, FUKUMOTO T, et al. Inelastic Force-deformation Response of Joint Shear Panels in Beam-column Moment Connections to Concrete-filled Tubes[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 244-252.
- [11] FUKUMOTO T, MORITA K. Elastoplastic Behavior of Steel Beam to Square Concrete-filled Steel Tube (CFT) Column Connections[C]//ASCCS. Proceedings of the 6th ASCCS Conference. Los Angeles: AS-CCS, 2000: 1-7.
- [12] 黄勇,陈伟刚,段莉.钢管混凝土短柱(剪力键)受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(12): 178-185.
HUANG Yong, CHEN Wei-gang, DUAN Li. Experimental Study on Shear Resistance Performance of Concrete Filled Steel Tube Shear Block Stub Columns [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 178-185.
- [13] 郭淑丽,陶忠.方钢管混凝土柱抗剪试验研究[J].福建工程学院学报,2011,9(6):550-554.
GUO Shu-li, TAO Zhong. Experimental Study of Square Concrete-filled Steel Tube Columns Subjected to Shearing[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2011, 9(6): 550-554.
- [14] 徐礼华,徐浩然,杜国锋,等.组合T形截面钢管混凝土构件抗剪性能试验研究[J].工程力学,2009,26(12):142-149.
XU Li-hua, XU Hao-ran, DU Guo-feng, et al. Experimental Study on Shear Resistance Performance of Composite T-section Concrete-filled Steel Tubular Members[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 142-149.
- [15] 韩林海.钢管混凝土结构——理论与实践[M].2版.北京:科学出版社,2007.
HAN Lin-hai. Structure of Concrete Filled Tubes: Theory and Practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [16] 王志滨,周继忠.矩形钢管混凝土构件剪切性能研究[J].广西大学学报:自然科学版,2013,38(1):28-35.
WANG Zhi-bin, ZHOU Ji-zhong. Research on Shear Property of Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Specimens[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2013, 38(1): 28-35.
- [17] 韩林海,钟善桐.钢管混凝土基本剪切问题研究[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1994,27(6):28-34.
HAN Lin-hai, ZHONG Shan-tong. The Behavior Studies for CFST Shearing Problem[J]. Journal of Harbin Institute of Architecture & Civil Engineering, 1994, 27(6): 28-34.
- [18] AIJ 1987, AIJ Standard for Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures[S].
- [19] 刘晓刚,樊健生,陶慕轩,等.钢管混凝土柱-钢梁节点核心区受剪承载力计算对比研究[J].建筑结构学报,2012,33(2):85-92,118.
LIU Xiao-gang, FAN Jian-sheng, TAO Mu-xuan, et al. Comparison and Analysis on Design Method of Shear Capacity of Panel Zone Between CFT Column and Steel Beam[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 85-92, 118.
- [20] 刘晓刚,樊健生,陶慕轩.钢管混凝土柱-钢梁节点核心区抗剪承载力计算方法对比研究[J].铁道科学与工程学报,2010,7(增):257-261.
LIU Xiao-gang, FAN Jian-sheng, TAO Mu-xuan. Comparison and Analysis on the Calculation Method of Shear Capacity of Panel Zone Between CFT and Steel Beam[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(S): 257-261.
- [21] CHENG C T, CHUNG L L. Seismic Performance of Steel Beams to Concrete-filled Steel Tubular Column Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(3): 405-426.
- [22] CHENG C T, CHAN C F, CHUNG L L. Seismic Behavior of Steel Beams and CFT Column Moment-resisting Connections with Floor Slabs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(11): 1479-1493.
- [23] 日本建筑学会. 钢筋钢筋混凝土结构计算标准及解说[M]. 冯乃谦,叶列平,陈延年,等,译. 北京:原子能出

- 版社,1998.
- Architecture Institute of Japan. Calculation Standard and Commentary of SRC[M]. Translated by FENG Nai-qian, YE Lie-ping, CHEN Yan-nian, et al. Beijing: Atomic Energy Press, 1998.
- [24] FUKUMOTO T, MORITA K. Elastoplastic Behavior of Panel Zone in Steel Beam-to-concrete Filled Steel Tube Column Moment Connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(12): 1841-1853.
- [25] 吕西林, 李学平, 余 勇. 矩形钢管混凝土柱与钢梁的连接节点设计方法[J]. 建筑结构, 2005, 35(1): 7-9, 12.
- LU Xi-lin, LI Xue-ping, YU Yong. Design Method of Connections Between CFRT Columns and Steel Beams[J]. Building Structure, 2005, 35(1): 7-9, 12.
- [26] 周天华. 方钢管混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能及承载力研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- ZHOU Tian-hua. Study on Seismic Behavior and Load-carrying Capacity of Concrete-filled Square Tubular Column to Steel Beam Connection[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [27] 周天华, 何保康, 陈国津, 等. 方钢管混凝土柱与钢梁框架节点的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 9-16.
- ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang, CHEN Guo-jin, et al. Experimental Studies on Seismic Behavior of Concrete-filled Steel Square Tubular Column and Steel Beam Joints Under Cyclic Loading [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 9-16.
- [28] 肖万松, 周 湘, 夏蕊芳, 等. 矩形钢管混凝土节点域受剪承载力计算[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2007, 24(2): 56-59.
- XIAO Wan-song, ZHOU Xiang, XIA Rui-fang, et al. Analysis of Shear Load-carrying Capacity of Concrete-filled Rectangular Tube Joint Region[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2007, 24(2): 56-59.
- [29] 聂建国, 秦 凯. 方钢管混凝土柱节点抗剪受力性能的研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(4): 8-17.
- NIE Jian-guo, QIN Kai. Research on Shear Performance of Concrete-filled Square Steel Tubular Column Connections[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 8-17.
- [30] 聂建国, 徐桂根. 方钢管混凝土柱节点的抗剪受力分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(6): 782-786.
- NIE Jian-guo, XU Gui-gen. Shear Deformation of Concrete Filled Square Tubular Column Connections [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(6): 782-786.
- [31] 何益斌, 黄 频, 冷巧娟, 等. 方钢管混凝土柱穿心高强螺栓-端板节点抗剪承载力研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 83-86.
- HE Yi-bin, HUANG Pin, LENG Qiao-juan, et al. Study on Shear-carrying Capacity of Through High Strength Bolts-end Plate Connection for Concrete Filled Square Steel Tube Column[J]. Building Structure, 2010, 40(4): 83-86.

《土木工程学报》2014 年征订通知

《土木工程学报》是中华人民共和国住房和城乡建设部主管, 中国土木工程学会主办的土木工程类综合性学术期刊, 以土木工程界中高级工程技术人员为主要读者对象; 主要报道结构工程、桥梁工程、岩土力学及地基基础、隧道工程、防护工程、道路及交通工程、建设管理等专业在科研、设计、施工等方面的重要成果及发展状况, 重视刊登结合工程实践的论著, 并报道行业综述、科技信息和动态, 促进国内外土木工程界的学术交流。

《土木工程学报》创刊于 1954 年 3 月, 现为美国《工程索引》(Ei) 收录期刊、北京大学工业技术类全国中文核心期刊、中国科技信息研究所中国科技核心期刊、中科院文献情报中心中国科学引文数据库核心期刊和武汉大学中国科学评价研究中心权威学术期刊。

《土木工程学报》为月刊, 大 16 开本, 每期定价 25 元, 全年共 300 元; 国内外公开发行, 国内邮发代号: 2-582, 国外发行代号: M288。《土木工程学报》2014 年征订工作已经开始, 欢迎各界有关单位及个人订阅。

地 址: 北京市三里河路 9 号住建部内 电 话: (010) 58934211 网 址: www.cces.net.cn
邮 编: 100835 传 真: (010) 58933912 E-mail: tumuxuebao@263.net