

矩形钢管混凝土节点域抗剪承载力分析

Analysis of Shear Capacity of Concrete Filled Rectangular Steel Tubular Joints

冯付

Fu Feng

中国建筑设计研究院有限公司 中国·北京 100031

China Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100031, China

摘要: 在钢—混凝土组合结构中节点是连接柱与梁的关键部位也是薄弱部位,所以是钢—混凝土组合结构研究的重点。所以,对节点进行研究并使之日益成熟对工程建设具有重要意义。

Abstract: In the steel-concrete composite structure, the joint is not only the key part connecting the column and beam, but also the weak part, so it is the focus of the research of steel-concrete composite structure. Therefore, it is of great significance to study the node and make it more and more mature for engineering construction.

关键词: 矩形钢管混凝土; 节点域; 极限承载力

Keywords: rectangular concrete steel pipe; node domain; ultimate bearing capacity

DOI: 10.12346/etr.v3i11.4689

1 引言

论文将工程实践、试验、理论推导结合起来,对矩形钢管混凝土组合结构的节点域进行研究。利用斜压杆模型与虚功原理推导出简化的节点域极限承载力公式,使之便于应用于工程设计。

2 矩形钢管混凝土组合结构节点中国研究现状

2000年,哈尔滨工业大学研究所的张大旭等人结合李哲等人的低周期反复荷载试验:研究了四个角钢组成的外包钢节点的抗剪性能,回归了核心混凝土极限抗剪承载力公式,总结出节点核心区抗剪承载力公式。

研究得出结论:外包钢节点可以比普通钢节点的极限抗剪能力提高30%左右。总结出的圆形钢管混凝土节点核心区抗剪承载力公式不适合于矩形钢管混凝土节点抗剪强度计算;而且得出的计算公式是基于力学推导方法,不适合在工程实际中应用。

2009年,吴轶等人共设计了3个1:2比例的内隔板式方钢管混凝土柱—钢筋混凝土梁组合节点模型试件,通过

低周期反复加载试验表明:此类节点试件具有良好的承载能力、变形能力以及延性,承载力在达到最大值后下降缓慢,表现出延性破坏特点,具有良好的耗能能力和抗震性能^[1]。

目前中国及其他国家对钢管混凝土节点的研究已经从圆形钢管混凝土延伸到矩形钢管混凝土,对于影响矩形钢管混凝土组合结构节点抗震性能的因素已经有了定性的研究,已经具备一定的理论、技术、经济基础。

3 矩形钢管混凝土节点域承载力分析

3.1 节点域受力机理概述

论文主要研究内隔板式矩形钢管混凝土组合结构节点域^[2]的受力机理,目前对于钢筋混凝土结构受力机理的研究经常采用以下几种方法。

3.1.1 剪摩擦机理

节点发生剪切破坏时,节点剪力一般由两部分承担:一部分是由于梁柱的弯曲压应力引起的核心区摩擦阻力;一部分是箍筋所承担的屈服剪力。这种受力体系的形成,主要是由于节点在核心区混凝土受剪破坏、箍筋屈服破坏,核心区纵筋屈服破坏时均会在混凝土对角线处形成斜裂缝,核心混

【作者简介】冯付(1984-),男,中国北京人,硕士,工程师,从事工程结构抗震研究。

凝土被斜裂缝分割成两部分，两部分混凝土之间的摩擦力相互抵消^[3]。

3.1.2 斜压杆机理

斜压杆受力机理主要适用于于节点域的核心区箍筋较少或者没有箍筋的情况。此时节点域承载力主要由核心混凝土承担，但是核心混凝土破坏又不严重，该类节点的梁或柱所承担的承载力比较低，在节点域的纵筋发生屈服时，混凝土很可能产生不至于破坏核心区混凝土的交叉斜裂缝，即混凝土起着斜压杆的作用承担剪力。

3.1.3 桁架机理

桁架机理是指节点域的核心混凝土形成几乎平行的很多细条，节点核心区的剪力需要借助箍筋和纵筋来分散压力，不能以弹性方式通过混凝土的受压传递，纵筋用于平衡斜压杆的竖向分力，箍筋用于平衡斜压杆的水平分力，从而形成桁架机制。

3.2 节点域抗剪承载力

在节点域设计中，节点达到极限承载力的破坏过程是：首先腹板发生剪切屈服，接着内隔板与翼缘相交的四角形成塑性铰，进而形成机动体系，最后混凝土达到极限承载力节点发生破坏。论文采用塑性极限分析方法对节点进行分析，节点域的抗剪承载力公式可按如下形式进行叠加：

$$V_j = V_w + V_p + V_{cv} \quad (1)$$

3.2.1 钢管壁柱腹板

钢管壁柱腹板可看作理想的均质弹塑性材料，论文在计算中只考虑剪力与压力的作用，受力单元2。当节点域达到极限承载力时，钢管壁柱腹板已经开始屈服，处于剪切流动状态，由第四强度理论进行分析可得：

$$f_y = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

钢管壁柱腹板的主应力：

$$\text{主拉应力：} \sigma_1 = \frac{\sigma_c}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_c}{2}\right)^2 + \tau^2}, \quad \sigma_2 = 0 \quad \text{主压应力：}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_c}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_c}{2}\right)^2 + \tau^2}.$$

其中， σ_c 为柱轴向力传到节点的压应力，将 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 代入式(2)可得钢管壁柱腹板屈服时的剪应力为：

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{3}(f_y - \sigma_c)^2} \quad (3)$$

因此，钢管壁柱腹板的剪切承载力为：

$$V_w = \frac{2f_y}{\sqrt{3}}th \quad (4)$$

3.2.2 内隔板

内加强环即内隔板也具有一定的抗剪能力，当其达到极限状态时，内隔板四角形成塑性铰。内隔板与钢管壁形成机动体系，内加强环进入全塑性状态。由此可知每个塑性铰的

极限弯矩为：

$$M_p = \frac{1}{4}b_c t_j^2 f_j \quad (5)$$

根据平衡条件，可得内隔板承担剪力与塑性弯矩的关系：

$$V_p \cdot (h_b - t_{bf}) = 4M_p \quad (6)$$

将(6)代入(7)，可得内隔板受剪承载力的计算公式：

$$V_p = \frac{f_j b_c t_j^2}{h_b - t_{bf}} \quad (7)$$

3.2.3 核心区混凝土

节点在初裂前基本处于弹性工作状态，节点中起主要抗剪作用的是混凝土，随着荷载加大，核心区混凝土的对角线方向将产生斜裂缝，由于钢管壁柱腹板的约束作用，组合节点的受剪承载力比普通钢筋混凝土高很多。斜压杆模型简图如图1所示。

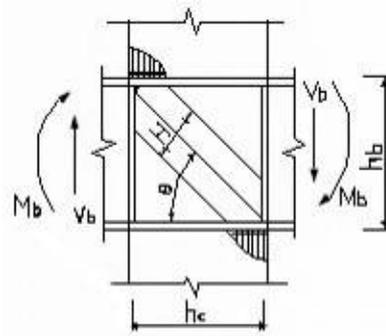


图1 混凝土斜压杆模型图示

节点核心区混凝土的抗剪承载力为：

$$V_c = f_c b_j H \cos \theta \quad (8)$$

$$H = \alpha \sqrt{h_c^2 + h_b^2} \quad (9)$$

$$h_b = \beta h_c, \quad H = \alpha \sqrt{1 + \beta^2} \cdot h_c \quad (10)$$

所以混凝土斜压杆的受剪承载力公式为：

$$V_c = f_c b_j h_c \alpha \sqrt{1 + \beta^2} \cos \theta \quad (11)$$

令 $\gamma = \alpha \cos \theta \sqrt{1 + \beta^2}$ ，节点有效宽度受不同因素影响，论文近似取柱内混凝土截面宽度 b_c ，所以剪力承载力公式可以表示为：

$$V_c = \gamma f_c b_c h_c \quad (12)$$

式(12)中， γ 为剪力影响系数，反映了不同因素对节点承载力的约束作用。论文借助他人实测的试验成果推导出剪力影响系数 γ 。具体算法为用试验得出的节点极限承载力减去按照理论公式计算的柱腹板以及内隔板承载力，公式如下：

$$\gamma = \frac{V_j - V_w - V_p}{b_c h_c f_c} \quad (13)$$

根据上述条件，引用文献的试验数据，根据公式(13)求得剪力影响系数如表1所示。

剪力影响系数 γ 取表 1 中四组试验数据的平均值, 即 $\gamma = 0.218$ 。综上, 可得节点域受剪承载力的公式为:

$$V_j = V_w + V_p + V_{cv} = \frac{2f_y}{\sqrt{3}}th + \frac{f_j b_c t_j^2}{h_b - t_{bf}} + 0.218 f_c b_c h_c \quad (14)$$

3.2.4 节点域抗剪力承载公式比较

依据 CECS159:2004《矩形钢管混凝土结构技术规程》第 7.1.5 条的规定, 节点域的剪切承载力设计值为 V_j^i , 计算如下:

$$V_j^i = \frac{2N_y h_c + 4M_{pw} + 4M_p + 0.5N_e h_c}{h_b} \quad (15)$$

$$N_y = \min \left\{ \frac{a_c h_b f_w}{\sqrt{3}}, \frac{th_b f_y}{\sqrt{3}} \right\} \quad (16)$$

$$M_{pw} = \frac{h_b^2 t [1 - \cos(\sqrt{3}h_c / h_b)] f_y}{6} \quad (17)$$

$$M_p = \frac{1}{4} b_c t_j^2 f_j \quad (18)$$

$$N_e = \frac{2b_c h_c f_c}{4 + (h_c / h_b)^2} \quad (19)$$

现在分别用论文推导出的节点域抗剪承载力计算公式 14 与规范中的节点域抗剪承载力计算公式 (15)~(19) 计算引自文献的试件, 比较两者的不同, 比较结果如表 2 所示。

比较表 2 的结果可以得出结论: 在计算柱腹板承载力时, 论文的计算方法与规范相同; 随着钢管柱腹板厚度的增加, 计算的核心混凝土承受的承载力与规范计算的承载力比值逐渐增大, 主要原因是钢管壁越厚, 对核心混凝土的约束作用越明显, 论文推导的公式是基于试验结果得出的剪力影响系数, 考虑到了各种因素的综合作用对核心混凝土的承载力的影响, 所以论文得出的结果更加接近于实际受力情况。推导结果与规范结果相差在 -1.3% ~ +2.7% 符合要求, 该公式明显比规范公式简单, 这对设计应用有重要意义。

4 结语

从节点域的受力机理出发, 利用斜压杆模型以及虚功原理, 引用他人试验数据推导出较为简单适合于工程实际的节点域承载力计算公式。基于实验数据的限制及试验数据不足的缺点, 如果试验条件允许, 多提取数据将提高其准确性与可靠性, 更加接近工程实际。

表 1 剪力影响系数

试件编号	柱腹板剪力 V_w (KN)	内隔板剪力 V_p (KN)	极限承载力试验值 V_j (KN)	剪力影响系数 γ
YG-1	242.05	5.88	388	0.203
YG-2	242.05	5.88	391	0.187
YG-3	194.63	5.88	367	0.241

表 2 节点域抗剪承载力比较

模型比较	柱腹板 (KN)	内隔板 (KN)	核心混凝土 (KN)	节点域 (KN)
规范 V_j^i	2680	106	966	3752
论文 V_j	2680	109	912	3702
比较 V_j / V_j^i	1.000	1.028	0.944	0.987
规范 V_j^i	3144	146	819	4099
论文 V_j	3144	150	881	4165
比较 V_j / V_j^i	1.000	1.027	1.076	1.016

参考文献

[1] 吴轶, 蔡健. 内隔板式方钢管混凝土柱—钢筋混凝土梁节点试验[J]. 建筑结构, 2010, 40(7): 88.

[2] CECS159:2004 矩形钢管混凝土技术规程[S].

[3] 白国良, 秦福华. 型钢钢筋混凝土原理与设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.