

文章编号:1673-2049(2012)03-0081-09

组件法用于钢结构节点性能分析的研究进展

陈颖智^{1,2}, 童乐为^{1,2}, 陈以一^{1,2}

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

摘要: 为了促进现行欧洲规范 Eurocode 3 推荐的组件法在中国钢结构节点性能分析中的应用, 系统地介绍了组件法的基本思想、研究进展、分析方法及其在各国中的应用, 讨论了钢框架梁柱节点的承载力、转动刚度、转动能力和耗能能力等节点性能; 根据研究的节点类型、荷载条件和节点性能指标, 对近 10 多年来组件法在各国钢结构节点分析中的主要应用进行了分类总结; 最后, 指出了组件法在钢结构节点性能研究中存在的问题和不足, 给出了未来研究工作的建议。

关键词: 钢结构; 节点性能; 组件法; 承载力; 滞回模型; 综述

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A

Research Developments of Component Method for Behavior of Joints in Steel Structures

CHEN Ying-zhi^{1,2}, TONG Le-wei^{1,2}, CHEN Yi-yi^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to promote the application of component method recommended by current Eurocode 3 in the analysis of behavior of joints in steel structures in China, authors gave a detailed introduction of basic idea, research development, analytical procedure and application of the component method at home and abroad. The behaviors of beam-to-column joints in steel frames such as bearing capacity, rotation stiffness, rotation capacity and energy dissipation capacity were discussed. Based on the joint types, loading condition and joint performance index, main applications of the component method in analysis of joints of steel structures in recent ten years were classified and summarized. Finally, the insufficiencies in research of component method for behavior of joints in steel structures were pointed out, and the suggestions to be investigated in the future were also provided.

Key words: steel structure; behavior of joint; component method; bearing capacity; cyclic model; review

0 引言

节点是 2 个或 2 个以上的结构构件相连接的区域, 通常包括部分被连接构件、节点区、连接件等部分。节点是钢结构体系中最复杂的部分, 耗费占整

个钢结构费用较大的比重^[1]。节点性能包括节点的强度、刚度、转动能力和耗能能力等要素, 对钢结构整体的刚度、稳定性、承载能力和抗震性能等有重要影响。随着钢结构的发展, 节点形式的不断改进, 节点性能呈现出多元性和复杂性, 节点研究一直是钢

收稿日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51038008)

作者简介: 陈颖智(1986-), 男, 山东新泰人, 工学博士研究生, E-mail: 09yzchen@tongji.edu.cn。

结构研究的主要领域之一^[2]。

目前,评估节点性能的方法主要有 3 种^[3]:

(1) 试验研究。采用足尺或缩尺的节点试验,通常可以反映节点的实际力学行为,但由于试验较昂贵,因此常作为节点理论研究的验证手段。为有效利用已有的试验数据,世界范围内的试验数据库已建立。如 Abdalla 等^[4]在 SCDB 项目建立的半刚性节点数据库(1950~1994 年);葡萄牙米尼奥大学和布拉大学在欧洲项目 Cost Project 建立的半刚性节点数据库 SeRiWWW(1985~1998 年)^[5];美国在 1994 年 Northridge 地震后成立的 SAC 委员会在对钢框架梁柱节点大量研究后也建立了相应的节点试验数据库(1997~2000 年)^[6]。数据库的主要缺陷是需要长期的管理来更新和升级试验数据。

(2) 数值模拟。随着计算机的飞速发展,采用大型有限元软件对节点进行精细化有限元分析成为可能,但通常由于初始应力、接触和几何缺陷等问题而难以准确实现模拟,数值模拟常用于节点参数分析。

(3) 组件法。组件法是将节点拆分为多个基本组件,每个组件由线性或非线性的弹簧模拟,通过弹簧的串、并联组合计算,将各基本组件进行组装,获得节点整体的力学行为。现行欧洲钢结构设计规范 EN 1993-1-8:2002^[7](Eurocode 3,以下简称 EC3)推荐采用组件法进行节点设计,EC3 的附录 J 中给出了定量描述组件贡献和组件组合的表达式。组件法自 1992 年引入 EC3 后,广泛用于钢结构的节点力学行为(强度、刚度和转动能力)研究中,并得到了一些便于工程设计的分析模型和实用计算方法^[8-12]。与试验研究和数值模拟相比,组件法具有明确的物理意义,其建立的力学模型有利于理解节点的工作机理,并可确定各组件的失效顺序^[13]。Nethercot^[14]认为“组件法是模拟不同类型节点的强度、刚度和转动能力的共同基础”,并将其列为 20 世纪后半叶节点研究的关键进展之一。

近年来在国外,随着组件法研究的不断深入,组件法在节点性能分析中的应用范围不断扩大,在不同的节点类型(端板连接的梁柱节点、梁梁节点^[15]、空间结构节点^[16])、不同荷载条件(高温^[17-18]、动力^[19])下均有成功的应用。在中国,组件法研究及其应用开展较晚,石永久、李国强、陈以一等最先开始了这方面的研究工作。研究主要集中在端板连接钢梁柱节点静力性能(常温下节点转动刚度^[20-23]、承载力;高温下节点转动刚度和承载力^[24]),以及端板半刚性组合梁柱节点在常温下的静力性能(承载

力^[25-26]、转动刚度^[27])。目前,中国对于组件法的基础研究较少,在节点研究中,采用组件法的比例很小,应用范围也相对局限,有关组件法的系统介绍,中国文献很少。

鉴于此,为促进组件法在中国钢结构节点分析中的应用,本文中笔者主要介绍了组件法的基本思想、发展和应用,并探讨了有待进一步研究的问题。

1 组件法的基本思想和发展

1.1 组件法的基本思想

梁柱连接和节点定义示意如图 1 所示^[28]。现行的欧洲规范 EC3 采用组件法预测梁柱节点的转动行为。按照组件法的思想,任意节点均可被简化为 3 个不同的区域:受拉区、受压区和受剪区。在每个区域中,由若干变形源(称为“组件”)组成了节点的整体响应。理论上,若节点的各基本组件得以合理的表征,组件法可适用于任意节点形式和任意荷载条件^[29]。

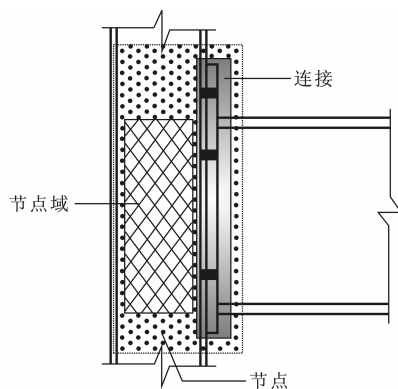


图 1 梁柱连接和节点定义

Fig. 1 Definition of Beam-to-column Connection and Joint

组件法对一个节点的分析过程大致包括 3 个基本步骤:①对一给定节点,确定有效组件;②描述各个组件的本构关系(荷载-位移关系);③将所有组件装配成由弹簧和刚性杆构成的力学模型,此组装结构的荷载-位移响应即用于模拟整个节点的弯矩-转角关系。

图 2 为基本组件模型。图 2 中, K 为弹簧轴向刚度, Δ 为弹簧变形量, F 为外荷载, F_{Rd} , F_u 分别为组件达到塑性和极限强度时的外荷载, Δ_u 为组件的变形能力, k_e , k_{p-1} 分别为组件的轴向初始刚度和屈服后刚度。节点的基本组件由非线性弹簧模拟[图 2(a)]。对于一般组件,弹簧的本构关系可以简化为理想弹塑性,计算精度也有所保证,欧洲规范 EC3

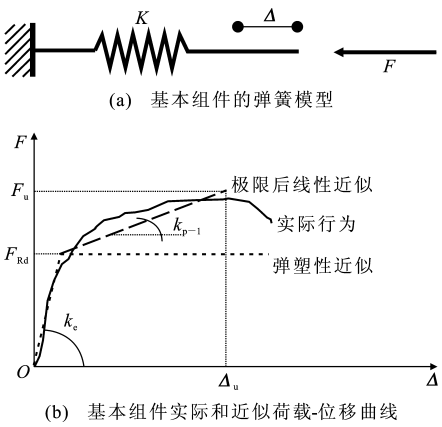


图 2 基本组件模型

Fig. 2 Models of Basic Component

即是如此假设,认为极限后刚度为 0,并未考虑应变硬化和几何非线性,对节点组件的变形能力也未有精确描述。为描述组件的极限后行为,需要对刚度和变形能力这 2 个特性参数进行描述。Jaspart 等^[30]认为极限后行为可以用线性描述[图 2(b)],并提出了描述这 2 个参数的简化方法,针对不同的组件给出了特征参数的表达式。

图 3 为外伸式端板连接钢梁柱节点的组件法模型及其等效简化模型。图 3 中, M 为节点所受的弯矩, Φ 为节点转角, z 为节点高度。按照 EC3,节点组件划分见表 1。假设:①受压弹簧位于受压区中心,即为梁的下翼缘中心;②受拉弹簧位于相应的螺栓排位置,螺栓变形与其到受压区中心的距离成正比,力的大小取决于组件的刚度。每个组件的本构关系都可由试验得到的非线性荷载-位移曲线表征,将这些组件组装成一个力学模型[图 3(b)],通过弹簧的串、并联组合计算,可评估节点整体的承载力、转动刚度和转动能力等力学行为,并获得节点的弯矩-转角曲线。

对单调加载情况,EC3 Part1-8 中给出了 20 种基本的节点组件的设计抗力、刚度系数和转动能力表达式。

对循环加载情况,EC3 Part1-8 中尚未给出各基本组件的相应设计信息,但最新的研究表明,组件法的思想可以由单调加载延伸至循环加载情况,并可以通过基本组件的耗能能力来评估节点的耗能能力^[31]。与单调加载情况不同,此时节点的组件尚需根据是否耗散能量进行划分,其中,为避免板件受压屈曲和螺栓受拉脆性失效,不考虑受压板件和受拉螺栓参与耗能,即受压板件和受拉螺栓始终处于弹性阶段,不发生屈服滞回耗能,故主要的耗能组件

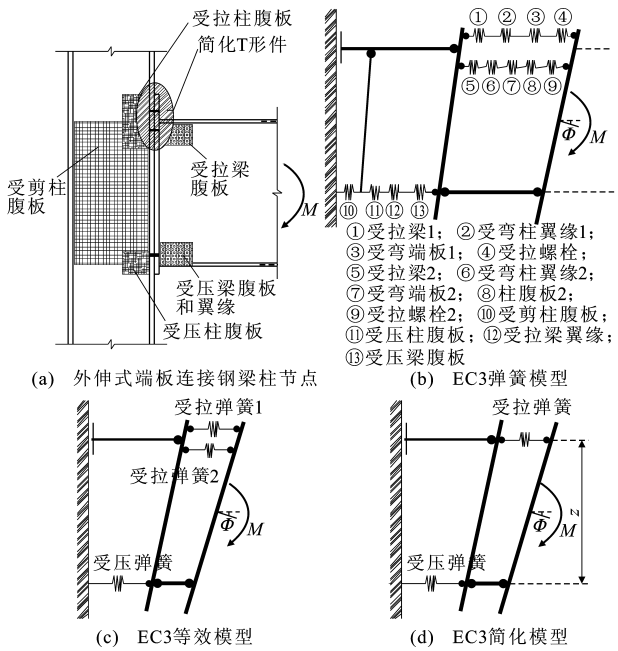


图 3 EC3 组件的弹簧模型及其简化模型

Fig. 3 Spring Model and Simplification Model for Components Given in EC3

是:受剪柱腹板、受弯柱翼缘、受拉梁/柱腹板和受弯端板,见表 1^[32-33]。各耗能组件的滞回模型可由试验获得,组装得到节点整体的滞回模型,从而可预测节点在循环荷载下的响应,由此可知节点通过各耗能组件耗散输入的地震能量的形成。进行节点设计时,通过设计组件的相对强弱,即可控制节点的耗能部位、顺序及耗能能力。

表 1 EC3 关于节点组件的划分		
Tab. 1 Classifications of Components of Joint in EC3		
区域	有效组件	是否耗能
受剪区	受剪柱腹板	是
	受压柱腹板	否
	受压梁翼缘	否
受压区	受压梁腹板	否
	受弯柱翼缘	是
	受拉柱腹板	是
受拉区	受弯端板	是
	受拉梁腹板	是
	受拉螺栓	否

1.2 组件法的发展

1992 年,组件法引入欧洲钢结构设计规范 EC3 ENV-1993-1-1,经过不断的改进^[34],逐渐形成了现行欧洲钢结构设计规范 EC3 Part1-8 中的节点设计方法。EC3 中的组件法主要适用于纯钢结构,其节点形式主要是欧洲热轧 I 或 H 型钢构件或焊接组合构件主轴相连构成的,对其他节点形式,并未提供

相应组件的设计公式。

为了扩大组件法的应用范围,欧洲研究项目 COST C1 的部分研究人员对 EC3 附录 J 中未包含的新组件进行了大量基础性研究^[35],获得了新组件的力学行为(强度、转动刚度和转动能力),以期将之转化为简单易行的设计方法,方便工程设计人员应用。研究主要涉及:①节点连接方式的改变,如构件由强轴连接变为弱轴连接(图 4);②构件截面类型的改变,如厚实构件变为薄柔构件;③构件材料等级的改变,普通强度钢材变为高强度钢材;④构件截面形状的改变,由 H 或 I 型钢截面变为空心管截面。

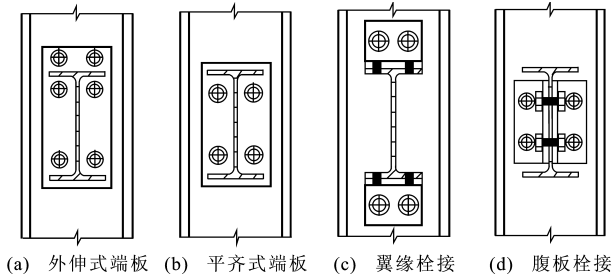


图 4 钢梁与 H 型钢截面柱弱轴连接节点

Fig. 4 Beam-to-H Section Column Minor-axis Joints

欧洲钢结构设计规范 EC3 Part1-8 表 6.1 中给出了节点基本组件强度、刚度的设计公式,但对基本组件的转动能力仅作了粗略规定。为了提高节点延性的预测精度,精确地描述节点的全过程非线性弯矩-转角曲线,Simoes Da Silva 等^[36]基于等效后屈曲模型对焊接连接梁柱节点在弯矩作用下的强度、刚度进行预测,结果与试验结果相吻合。同时,对于某些结构的梁柱节点(如坡屋面门式钢架),梁的轴力较大,不可忽略,为此,Simoes Da Silva 等又将其模型扩展至弯矩和轴力共同作用下的情况,与试验结果对比表明,其模型可以清晰地确定节点全过程中轴力和弯矩的相互作用,从而精确地预测节点的全过程力学行为;此模型也可精确地估计节点的延性行为,并确定各组件的失效顺序,为节点的塑性设计提供了依据。但此模型较为复杂,提出之后并未得到广泛应用。

组件法最初是用于 EC3 钢结构的节点设计,后来,也逐渐用于钢混组合结构的节点研究中。欧洲组合结构规范 EN 1994-1-1:2005(Eurocode 4,以下简称 EC4)^[37]就推荐采用 EC3 的组件法作为组合结构梁柱节点的设计基础,受拉钢筋被视作一种与钢结构节点中的受拉螺栓类似的基本组件,并给出了相关的设计信息。

随着钢结构节点研究的不断发展,对组件法也

提出了挑战。在组件法应用范围不断扩展的同时,针对节点基本组件的研究也逐渐深入,主要涉及节点域(或柱腹板)受剪、受压的力学行为。半刚性节点是近些年节点研究的热点^[38],节点域是影响半刚性节点性能的重要因素,对于节点域在剪力和压力作用下的模型,EC3 中的弹簧模型无法考虑节点的尺寸,以及节点域内力的相互作用对节点域变形的影响,故采用了一个变换参数 β ,此参数依赖于节点域上的弯矩和剪力作用,影响弹簧的刚度和强度。由于其初始值未知,因此在计算时需要假设初始值,然后进行迭代计算。Bayo 等^[39]指出,在弹塑性分析时,变换参数 β 可能导致计算不收敛,并且变换参数 β 的限值(0~2)可能引起内力计算的严重误差。为此,Bayo 等基于组件法的思想提出了一种分析钢结构边部和内部半刚性节点全过程行为的新方法,此方法基于一种新的有限弹塑性四节点单元,由此避免了采用变换参数 β ,也就避免了迭代过程,此法可扩展至三维框架节点。

对于纯钢结构,EC3 中弹塑性分析时采用了理想弹塑性模型进行简化,后来,一些替代模型逐渐被采用,如 Krawinkler 等的三线性模型(针对柱腹板受剪,如图 5 所示)以及 Kuhlmann 和 Kühnemund 模型(针对柱腹板受压,如图 6 所示)。图 5 中, V_{wp} 为柱腹板承受的剪力, γ 为柱腹板的剪切变形, $V_{wp,y}, V_{wp,p}, \gamma_y, 4\gamma_y$ 分别为对应于节点域屈服和柱翼缘屈服时的剪力和剪切变形, $K_{cws,h}$ 为残余刚度。图 6 中, F_{cwc}, Δ_{cwc} 分别为柱腹板受压时承受的外力及其轴向变形, $F_{cwc,Rd}, F_{cwc,u}, \Delta_{e,cwc}, \Delta_{u,cwc}$ 分别为柱腹板达到屈服强度和极限强度时的外力和变形。

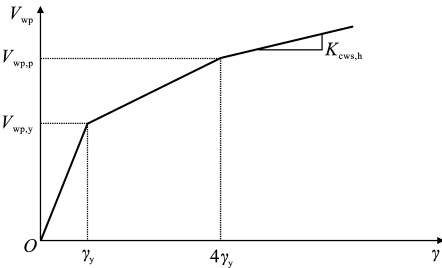


图 5 Krawinkler 等的三线性模型(柱腹板受剪)

Fig. 5 Trilinear Model (Column Web in Shear) from Krawinkler et al.

EC3 中仅给出了单调加载情况下节点基本组件的设计信息,但在地震频发的国家和地区,对地震作用下节点力学行为的准确预测更加重要,尤其在 1994 年美国 Northridge 地震和 1995 年日本 Kobe 地震之后,各国学者对循环荷载下节点的力学行为

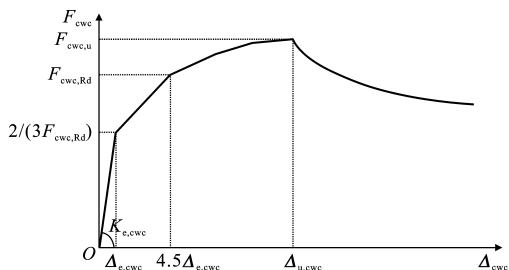


图 6 Kuhlmann 和 Kühnemund 模型 (柱腹板受压)

Fig. 6 Kuhlmann and Kühnemund's Model
(Column Web in Compression)

进行了大量研究。组件法的研究也逐渐由单调加载情况延伸到循环加载情况。Kim 等^[40]建立了节点域受剪的滞回模型(图 7);Piluso 等^[41]进行了 T 形件的循环加载试验,建立了 T 形件的滞回模型(图 8);Hu 等^[42]通过试验和理论分析,建立了 T 形件更高精度的滞回模型。这些研究为组件法应用于循环加载下钢结构节点性能的研究奠定了基础。图 7 中, M_y^p 为节点域承受的弯矩, M_y^p 为节点域屈服弯矩, γ 为节点域变形, α 为量纲一的参数, K_e 为弹性刚度, K_1, K_2, K_3 均为弹性后线性刚度, K_t^{bl} 为边界线塑性刚度。图 8 中, F, δ 分别为 T 形件承受的外力及其变形量, F_y, F_{max} 分别为 T 形件达到屈服强度和极限强度时的外力, δ_y, δ_{max} 分别为 T 形件达到屈服强度和极限强度时的位移, K_0 为初始刚度, K_1 为第 1 圈再加载时的刚度, α' 的角度。

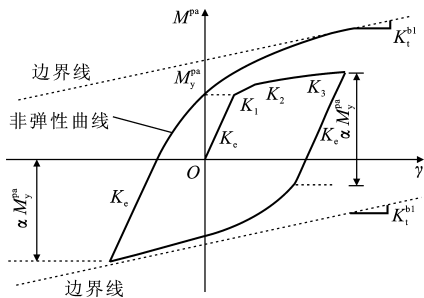


图 7 节点域受剪滞回模型

Fig. 7 Shear Panel Zone Cyclic Model of Joints

近年来,组件法也逐渐由常温延伸至高温条件,李国强等^[43]较早开展了螺栓高温性能的基础研究,Heidarpour 等研究了 T 形件的高温性能,Strejcek 等研究了节点域受剪的高温性能,这些研究为组件法在高温条件下的钢结构节点性能分析做了探索。Al-Jabri^[44]综述了近年来高温下梁柱节点性能的研究进展,目前高温条件下基本组件的力学性能研究还较少,组件法在火灾高温条件下的应用尚需要大量的基础性研究。

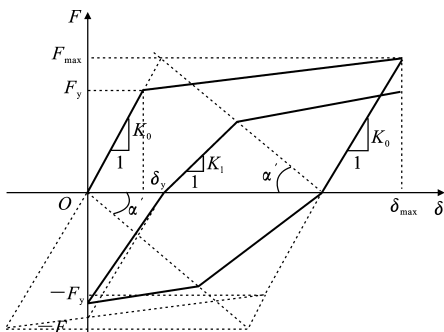


图 8 T 形件滞回模型

Fig. 8 T-stub Cyclic Model

2 组件法的应用

20 世纪 90 年代,组件法被欧洲钢结构设计规范 EC3 Part1-8 采用,用于节点设计,极大地推动了组件法在节点性能评估方面的应用。10 年后,组件法逐渐被中国学者采纳,石永久、李国强、陈以一等最先将组件法应用于节点性能研究中。近 10 多年来,组件法在各国钢结构节点性能研究中的主要应用见表 2。

组件法在各国钢结构节点中的应用大致可以做以下分类:

(1) 研究对象

组件法目前主要用于钢结构梁柱节点的性能研究。涉及的节点类型主要是梁柱节点(以外伸式端板连接为主);其他的节点类型包括:柱脚节点^[45]、梁梁节点;近年来,组件法也开始应用于空间结构的节点性能研究(如单层网壳螺栓端板节点),以及不锈钢材料的螺栓连接梁柱节点中^[46],取得了良好的效果。另外,值得一提的是,在钢框架结构中,混凝土楼板往往对梁柱节点性能的提高有诸多益处,如减小钢梁截面;近年来,组件法在半刚性梁柱组合节点(螺栓端板/角钢连接、栓焊连接^[47])、主次梁连接节点^[48]的研究中也得到了应用,获得了节点的基本力学参数,并建立了一些适合工程设计的分析模型、实用计算公式和设计方法。节点基本组件的性能研究是组件法应用的基础,为更准确地预测节点的性能,必须提高基本组件(如受剪柱腹板、T 形件)力学行为的预测精度。随着新型节点的不断出现、节点组件类型的不断增加,研究对象也将势必继续扩展。

(2) 研究荷载条件

组件法目前应用最多的荷载条件是常温、单调、静力(弯矩作用)。近年来,随着钢结构节点性能研究的不断深入,组件法应用的荷载条件也不断发展

表 2 组件法在各国钢结构节点分析中的主要应用

Tab. 2 Main Applications of Component Method in Analysis of Joints of Steel Structures at Home and Abroad

节点类型		荷载条件	研究内容	文献来源
端板连接梁柱节点 (外伸式、平齐式)	常温、单调、静力		承载力	文献[15]
			初始转动刚度	文献[8],[15],[23],[49],[50]
			转动能力	文献[10]
			弯矩-转角曲线	文献[9],[20],[31],[46],[51]
	高温、单调、静力		承载力、转动刚度	文献[24]
	常温、循环、静力		耗能能力	文献[32],[33]
半刚性梁柱组合节点 (端板连接、角钢连接等)	常温、单调、静力		承载力	文献[11],[25],[26],[47]
			初始转动刚度	文献[11],[27],[53]
			弯矩-转角曲线	文献[12]
	常温、循环、动力		弯矩-转角曲线	文献[19]
半刚性主次梁组合节点		常温、单调、静力	弯矩-转角曲线	文献[48]
其他节点类型	梁梁节点	常温、单调、静力	承载力、转动刚度	文献[15]
	柱脚节点	常温、单调、静力	弯矩-转角曲线	文献[45]
	梁腹板连接节点	常温/高温、单调、静力	承载力、转动刚度	文献[52]
	单层网壳节点	常温、单调、静力	转动刚度	文献[16]

变化,主要趋势是:①由单调荷载到循环荷载;②由静力作用到动力作用;③由单一弯矩作用到弯矩和轴力共同作用;④由常温到高温。

(3)研究目的

组件法目前在钢结构节点性能研究中的应用不断增多,主要用以确定节点的弯矩-转角曲线或基本的力学参数(承载力、转动刚度和转动能力),特别是组件法也开始用于钢结构节点耗能能力的分析。利用组件法建立的力学模型对节点进行参数分析,确定各组件对节点性能的贡献,明确节点的工作机理,提高节点力学行为的预测精度,提出适合于工程设计的分析模型和实用计算方法。

3 存在的问题和未来研究工作的建议

结合已有的研究,笔者认为组件法在钢结构节点性能研究中的应用尚存在一些问题和不足,建议至少需要进行以下 4 个方面的深入研究:

(1)组件法目前主要应用于单调荷载、静力荷载条件下的节点性能研究,对于循环荷载、动力荷载条件下的研究还较少,其中,节点的耗能能力对钢结构整体的抗震性能有着重要的影响,是需要研究的重点。节点的耗能能力是节点各耗能组件的耗能能力总和的体现,文献[2]中的研究表明:节点的耗能能力可由不同组件提供,不同组件耗能能力的发挥和发挥程度,与相关的变形模式及不同破坏模式的出现顺序密切相关。在节点耗能设计时,通过不同耗能组件相对强弱的设计,便可控制节点的耗能部位和顺序,选择最优的耗能组合。Iannone 等和

Latour 等对组件法用于循环荷载下节点耗能能力的分析已进行了初步研究,但节点耗能组件的滞回模型精度仍有待进一步提高。

(2)在地震作用和其他极端动力荷载下,结构应具有抵抗局部破坏和倒塌破坏的能力,这就要求:一方面,节点连接部分应具有足够的强度、延性和耗能能力,以避免节点连接破坏而引发结构整体连续性破坏甚至倒塌;另一方面,节点域部件局部破坏后,节点仍需满足最低强度和耗能能力的要求,以保证结构的整体性^[54]。鉴于组件法的基本思想及其在钢结构节点性能研究中的应用情况,将组件法应用于钢结构抗连续性倒塌破坏的节点设计也是值得探讨的一个方向。

(3)除地震作用外,火灾引起的高温作用也会对钢结构造成破坏甚至倒塌,对于高温下钢结构节点性能的研究相对还较少^[55]。组件法目前也主要应用于常温条件,由于火灾高温对钢材性能特别是力学性能影响显著^[56],故将组件法用于高温下节点性能研究尚需进一步的基础性研究,如螺栓等基本组件在高温下的力学性能。

(4)目前 EC 3 Part1-8 中规范有关组件法的规定还不够完善,例如:①规范中钢材强度等级适用范围为 S235~S460,EN 1993-1-12:2007^[57]也仅仅将个别条文的钢材等级适用范围提高到 S700,当前高强度钢材发展迅速,强度等级已超出规范的适用范围;②规范中一些基本组件的刚度和转动能力设计信息尚未给出;③规范中梁柱节点主要是 H 型钢或 I 型钢梁柱节点、强轴相连形式,对于方或圆钢管柱-

I 型钢梁以及弱轴相连的节点形式,未给出相应组件的设计公式,这些需求都为未来组件法的深入研究提供了方向。

4 结 语

组件法在过去的 20 年里,在钢结构节点性能研究中得到了广泛应用,其优越性也逐渐凸显,组件法已成为研究节点性能的一种精细化的重要工具。本文中系统介绍和总结了组件法的基本思想、研究进展、应用现状、存在的问题和未来需要进一步研究的工作,有助于促进组件法在中国钢结构节点研究中的发展和应用。

参考文献:

References:

- [1] BIJLAARD F. Eurocode 3, a Basis for Further Development in Joint Design[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(11): 1060-1067.
- [2] 陈以一, 王伟, 赵宪忠. 钢结构体系中节点耗能能力研究进展与关键技术[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 81-88.
CHEN Yi-yi, WANG Wei, ZHAO Xian-zhong. Development and Key Technical Issues on Energy Dissipation Capacity of Joints in Steel Structures[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 81-88.
- [3] NEVES L A C, CRUZ P J S, HENRIQUES A A R. Reliability Analysis of Steel Connection Components Based on FEM[J]. Engineering Failure Analysis, 2001, 8(1): 29-48.
- [4] ABDALLA K M, CHEN W F. Expanded Database of Semi-rigid Steel Connections[J]. Computers & Structures, 1995, 56(4): 553-564.
- [5] CRUZ P J S, SIMOES DA SILVA L, RODRIGUES D S, et al. Database for the Semi-rigid Behaviour of Beam-to-column Connections in Seismic Regions[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46(1): 233-234.
- [6] 杨强跃, 郑悦. 钢框架梁柱节点连接方式的介绍与分析[J]. 建筑结构, 2004, 34(6): 44-48.
YANG Qiang-Yue, ZHENG Yue. Analysis on the Connection Form for Beam-column Joints of Steel Frame[J]. Building Structure, 2004, 34(6): 44-48.
- [7] EN 1993-1-8:2002, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-8: Design of Joints[S].
- [8] FAELLA C, PILUSO V, RIZZANO G. Experimental Analysis of Bolted Connections: Snug Versus Preloaded Bolts[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(7): 765-774.
- [9] SIMOES DA SILVA L, COELHO A M G. A Ductility Model for Steel Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(1): 45-70.
- [10] BEG D, ZUPANCIC E, VAYAS I. On the Rotation Capacity of Moment Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3): 601-620.
- [11] GIL B, BAYO E. An Alternative Design for Internal and External Semi-rigid Composite Joints. Part II: Finite Element Modelling and Analytical Study[J]. Engineering Structures, 2008, 30(1): 232-246.
- [12] LEMONIS M E, GANTES C J. Mechanical Modeling of the Nonlinear Response of Beam-to-column Joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 879-890.
- [13] SIMOES DA SILVA L, COELHO A M G. An Analytical Evaluation of the Response of Steel Joints Under Bending and Axial Force[J]. Computers & Structures, 2001, 79(8): 873-881.
- [14] NETHERCOT D A. Connection Research and Its Impact on Practice During the Dowling Era[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(11): 1165-1170.
- [15] DANIUNAS A, URBONAS K. Analysis of the Steel Frames with the Semi-rigid Beam-to-beam and Beam-to-column Knee Joints Under Bending and Axial Forces[J]. Engineering Structures, 2008, 30(11): 3114-3118.
- [16] LOPEZ A, PUENTE I, AIZPURUA H. Experimental and Analytical Studies on the Rotational Stiffness of Joints for Single-layer Structures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 731-737.
- [17] HEIDARPOUR A, BRADFORD M A. Behaviour of a T-stub Assembly in Steel Beam-to-column Connections at Elevated Temperatures[J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2893-2899.
- [18] STREJCEK M, REZNICEK J, TAN K H, et al. Behaviour of Column Web Component of Steel Beam-to-column Joints at Elevated Temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1890-1899.
- [19] RASSATI G A, LEON R T, NOE S. Component Modeling of Partially Restrained Composite Joints Under Cyclic and Dynamic Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 343-351.
- [20] 石永久, 施刚, 王元清. 钢结构半刚性端板连接弯矩-转角曲线简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 19-23.

- SHI Yong-jiu, SHI Gang, WANG Yuan-qing. A Simplified Calculation Method for Moment-rotation Curve of Semi-rigid End-plate Connections[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 19-23.
- [21] 王素芳, 陈以一. T 形件连接初始刚度的理论计算模型[J]. 工业建筑, 2007, 37(10): 80-83.
- WANG Su-fang, CHEN Yi-yi. Theoretical Model for the Initial Stiffness of Bolted T-stub Connection[J]. Industrial Construction, 2007, 37(10): 80-83.
- [22] 王素芳, 陈以一. 加强式端板连接节点的初始刚度与抗弯承载力[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 774-778.
- WANG Su-fang, CHEN Yi-yi. Initial Stiffness and Moment Resistance of Reinforced Joint with End-plate Connection[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(5): 774-778.
- [23] 王素芳, 陈以一. 梁柱端板连接节点的初始刚度计算[J]. 工程力学, 2008, 25(8): 109-115.
- WANG Su-fang, CHEN Yi-yi. Calculation of Initial Stiffness of Beam-to-column End-plate Joint[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(8): 109-115.
- [24] WANG W Y, LI G Q, DONG Y L. Experimental Study and Spring-component Modeling of Extended End-plate Joints in Fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(8): 1127-1137.
- [25] 李国强, 石文龙. 平端板连接半刚性梁柱组合节点的抗弯承载力 I: 负弯矩作用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 23-29.
- LI Guo-qiang, SHI Wen-long. Moment Capacity of Semi-rigid Composite Beam-column Joints with Flush End Plate Connections: I. Under Negative Moment[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 23-29.
- [26] 石文龙, 李国强. 平端板连接半刚性梁柱组合节点的抗弯承载力 II: 正弯矩作用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 30-35.
- SHI Wen-long, LI Guo-qiang. Moment Capacity of Semi-rigid Composite Beam-column Joints with Flush End Plate Connections: II. Under Positive Moment[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 30-35.
- [27] 高 婧, 石文龙, 李国强, 等. 平端板连接半刚性梁柱组合节点的初始转动刚度[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 55-61.
- GAO Jing, SHI Wen-long, LI Guo-qiang, et al. Initial Rotational Stiffness of Semi-rigid Composite Beam-to-column Joints with Flush End Plate Connections[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 55-61.
- [28] COELHO A M G, BIJLAARD F. High Strength Steel in Buildings and Civil Engineering Structures; Design of Connections[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(3): 413-429.
- [29] COELHO A M G. Characterization of the Ductility of Bolted End Plate Beam-to-column Steel Connections [D]. Portugal: University of Coimbra, 2004.
- [30] JASPART J P, MAQUOI R. Prediction of the Semi-rigid and Partial-strength Properties of Structural Joints[C]//SSRC. Proceedings of the SSRC Annual technical Session and Meeting. Bethlehem: Lehigh University, 1994.
- [31] LATOUR M, PILUSO V, RIZZANO G. Cyclic Modeling of Bolted Beam-to-column Connections; Component Approach[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(4): 537-563.
- [32] DEMONCEAU J F, JASPART J P, WEYNAND K, et al. Steel Connections with Four Bolts Per Horizontal Row—Application of Eurocode 3[C]//SDSS. Proceedings of SDSS' Rio 2010 International Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures. Rio de Janeiro: SDSS, 2010: 567-572.
- [33] IANNONE F, LATOUR M, PILUSO V, et al. Experimental Analysis of Bolted Steel Beam-to-column Connections; Component Identification [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(2): 214-244.
- [34] JASPART J P, WEYNAND K, STEENHUIS M. The Stiffness Model of Revised Annex J of Eurocode 3 [C]//BJORHOVDE R, COLSON A, ZANDONINI R. Connections in Steel Structures III. Oxford: Pergamon Press, 1996: 441-452.
- [35] STEENHUIS M, JASPART J P, GOMES F, et al. Application of the Component Method to Steel Joints [C]//MAQUOI R. Proceedings of the Control of the Semi-rigid Behavior of Civil Engineering Structural Connections. Liege: COST, 1998: 125-143.
- [36] SIMOES DA SILVA L, COELHO A M G, LUCENA NETO E L. Equivalent Post-buckling Models for the Flexural Behaviour of Steel Connections[J]. Computers & Structures, 2000, 77(6): 615-624.
- [37] EN 1994-1-1: 2005, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1. 1: General Rules and Rules for Buildings[S].
- [38] DIAZ C, MARTI P, VICTORIA M, et al. Review on the Modeling of Joint Behaviour in Steel Frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(5): 741-758.
- [39] BAYO E, CABRERO J M, GIL B. An Effective Com-

- ponent-based Method to Model Semi-rigid Connections for the Global Analysis of Steel and Composite Structures[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(1): 97-108.
- [40] KIM K D, ENGELHARDT M D. Monotonic and Cyclic Loading Models for Panel Zones in Steel Moment Frames[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(5): 605-635.
- [41] PILUSO V, RIZZANO G. Experimental Analysis and Modelling of Bolted T-stubs Under Cyclic Loads[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(6): 655-669.
- [42] HU J W, LEON R T, PARK T. Mechanical Modeling of Bolted T-stub Connections Under Cyclic Loads Part I: Stiffness Modeling[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(11): 1710-1718.
- [43] 李国强, 李明菲, 殷颖智, 等. 高温下高强度螺栓 20MnTiB 钢的材料性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(5): 100-104.
- LI Guo-qiang, LI Ming-fei, YIN Ying-zhi, et al. Experimental Studies on the Behavior of High-strength Bolts Made of 20MnTiB Steel at Elevated Temperatures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(5): 100-104.
- [44] AL-JABRI K S. Modelling and Simulation of Beam-to-column Joints at Elevated Temperature; a Review[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2011, 348(7): 1695-1716.
- [45] JASPART J P, VANDEGANS D. Application of the Component Method to Column Bases[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1998, 48(2/3): 89-106.
- [46] BOUCHA I R A, AVERSENG J, ABIDELAH A. Analysis of the Behaviour of Stainless Steel Bolted Connections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(11): 1264-1274.
- [47] 石永久, 奥晓磊, 王元清, 等. 钢框架梁柱栓焊连接组合节点抗弯承载力分析[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2010, 29(1): 67-70.
- SHI Yong-jiu, AO Xiao-lei, WANG Yuan-qing, et al. Flexural Strength of Bolt-welded Composite Connections in Steel Frame Structures[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2010, 29(1): 67-70.
- [48] DE OLIVEIRA T J L, DE MIRANDA BATISTA E. Modelling Beam-to-girder Semi-rigid Composite Connection with Angles Including the Effects of Concrete Tension Stiffness[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(8): 1865-1879.
- [49] 李国强, 司洋, 郝坤超. 垫板对平齐式端板连接梁柱节点性能的影响[J]. *建筑科学与工程学报*, 2009, 26(4): 7-13.
- LI Guo-qiang, SI Yang, HAO Kun-chao. Influence of Inserted Plate on Behavior of Flush End-plate Beam-to-column Joints[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2009, 26(4): 7-13.
- [50] 吴兆旗, 张素梅, 姜绍飞. 梁柱端板连接节点初始转动刚度计算模型[J]. *工程力学*, 2009, 26(6): 226-232.
- WU Zhao-qi, ZHANG Su-mei, JIANG Shao-fei. Calculation Model of Initial Rotational Stiffness of Steel Beam-to-column End-plate Connections[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(6): 226-232.
- [51] COELHO A M G, BIJLAARD F S K, SIMOES DA SILVA L. Experimental Assessment of the Ductility of Extended End Plate Connections[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(9): 1185-1206.
- [52] BZDAWKA K, HEINISUO M. Fin Plate Joint Using Component Method of EN 1993-1-8 [J]. *Journal of Structural Mechanics*, 2010, 43(1): 25-43.
- [53] 舒兴平, 张再华, 王元清. 端板连接组合节点初始转动刚度分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2007, 34(11): 12-15.
- SHU Xing-ping, ZHANG Zai-hua, WANG Yuan-qing. Analysis on the Initial Rotational Stiffness of End-plate Beam-to-column Composite Joint[J]. *Journal of Hunan University: Natural Science*, 2007, 34(11): 12-15.
- [54] 江晓峰, 陈以一. 建筑结构连续性倒塌及其控制设计的研究现状[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 1-8.
- JIANG Xiao-feng, CHEN Yi-yi. A Review on the Progressive Collapse and Control Design of Building Structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 1-8.
- [55] 李国强, 吴波, 韩林海. 结构抗火研究进展与趋势[J]. *建筑钢结构进展*, 2006, 8(1): 1-13.
- LI Guo-qiang, WU Bo, HAN Lin-hai. Development of the Research on Fire-resistance of Structures[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2006, 8(1): 1-13.
- [56] 李国强, 吴波, 蒋首超. 工程结构抗火研究进展与建议[J]. *建筑钢结构进展*, 2010, 12(5): 13-18.
- LI Guo-qiang, WU Bo, JIANG Shou-chao. State-of-the-art and Suggestions of Research on Fire Resistance of Structures [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2010, 12(5): 13-18.
- [57] EN 1993-1-12: 2007, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-12: Additional Rules for the Extension of EN 1993 up to Steel Grades S700[S].