



土木工程结构研究新进展丛书

钢结构半刚性连接

设计理论及其工程应用

王燕 著

中国建筑工业出版社

土木工程结构研究新进展丛书

钢结构半刚性连接设计 理论及其工程应用

王燕 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢结构半刚性连接设计理论及其工程应用/王燕著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 1

(土木工程结构研究新进展丛书)

ISBN 978-7-112-12742-9

I. ①钢… II. ①王… III. ①半刚接—钢结构—
结构设计 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 247963 号

本书重点介绍了作者长期在钢结构半刚性连接的基础理论和设计方法等方面进行研究的一些成果, 具体内容包括: 半刚性连接的转动刚度和结构内力分析、外伸端板撬力作用、背板加强型节点设计、高强度螺栓承受拉力作用分析、半刚性连接结构的稳定性能以及动力和抗震性能六个方面。内容系统、全面、新颖。

本书适合从事结构设计的技术人员及科研人员参考使用, 也适合高等院校土木工程专业研究生参考使用。

* * *

责任编辑: 王 梅 咸大庆

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 赵 颖

土木工程结构研究新进展丛书 钢结构半刚性连接设计理论及其工程应用 王 燕 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11½ 字数: 288 千字

2011 年 2 月第一版 2011 年 2 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-12742-9
(20028)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

钢结构半刚性连接在工程中得到了大量应用,但目前尚未形成系统的分析和设计理论,研究工作与实际工程应用相比相对滞后。本书针对钢结构半刚性连接的基础理论和设计方法进行了较为系统和深入的研究,研究工作主要涉及半刚性连接的转动刚度和结构内力分析、外伸端板撬力作用、背板加强型节点设计、高强度螺栓承受拉力作用分析、半刚性连接结构的稳定性能以及动力和抗震性能等六个方面的内容。

在半刚性连接的转动刚度和结构内力分析研究方面,通过试验、理论分析和数值模拟方法,对各种半刚性连接节点的弯矩-转角关系、滞回性能、初始刚度、单元刚度矩阵、内力计算公式等进行了深入研究和分析。得到了各种半刚性连接的初始转动刚度、弯矩-转角关系曲线和半刚性连接结构的内力分析方法。

在半刚性连接考虑撬力作用分析研究方面,针对外伸端板与 T 形连接设计中考虑撬力影响的问题,利用 ANSYS 进行了三维非线性有限元分析,考虑了材料非线性、几何非线性、高强度螺栓的预拉力、端板间接触压力的影响。证明了撬力的存在以及螺栓拉力的分布是以受压翼缘位置为转动中心的梯形分布,提出了外伸端板连接中螺栓拉力的计算模型。研究了高强度螺栓受拉连接采用外伸端板或 T 形接头的破坏机理以及撬力作用计算理论,提出了实用的工程设计方法。

在半刚性连接背板加强型节点研究方面,利用组件法,推导了带有背板加强的 T 形件承载力和初始刚度公式,研究了柱翼缘带有背板的 T 形件的承载力公式、端板塑性铰线分布模式以及等效 T 形件有效长度的取值方法。提出了柱翼缘加强板背板厚度的取值方法,以及半刚性连接背板加强型节点域承载力的设计方法。

在半刚性连接高强螺栓承受拉力性能研究方面,研究了高强螺栓外伸端板连接中端板厚度、螺栓直径、节点域加劲肋、端板加劲肋等部件对高强螺栓的承受拉力作用下的应力分布和承载力影响。提出了高强螺栓承受拉力作用下简化计算模型,为外伸端板高强螺栓连接的工程应用提供了设计依据。

在半刚性连接钢框架稳定分析研究方面,从节点的半刚性和梁柱剪切变形两个方面考虑,通过引入梁柱线刚度比修正系数,推导了计算长度系数稳定方程,考虑了节点半刚性对柱稳定性能的影响。研究了考虑梁柱剪切变形无侧移和有侧移半刚接框架柱计算长度系数取值计算公式,提出了半刚性连接钢框架稳定分析的计算方法,为工程应用提供了理论分析依据。

在半刚性钢框架动力和抗震性能研究方面,通过理论和数值分析方法,研究了半刚接钢框架节点刚度对结构自振频率的影响,分析了结构顶点位移、柱底剪力随荷载自振频率、半刚性节点刚度之间的规律性变化,编制了动力分析程序。为半刚性钢框架动力和抗震性能研究提供了理论分析依据。

本书是作者多年来创新性研究工作的总结。为解决半刚性连接钢框架的设计和应用问

题,从1997年至今,在历时长达10多年的研究工作期间,本书作者指导的青岛理工大学钢结构新型节点课题组的研究生彭福明、厉见芬、刘秀丽、栾焕强、杨文惠、苏波、刘慧、郑杰、王萌、孙颖等在本课题研究工作中出色地完成了大量的试验、计算以及数值分析等工作,在此谨向他们表示诚挚的感谢!本书的研究工作还先后得到了国家自然科学基金项目(50778092)、山东省自然科学基金项目(Y97F06090、Y2002F15、Y2006F10)、山东省高等学校科技计划项目(J05F02)、青岛市建设委员会科技发展项目(JK05-3、JK07-20)的资助。

需要特别说明的是,清华大学的石永久教授、王元清教授、施刚副教授对本书的研究工作给予了大力支持和帮助。中冶建筑研究总院的资深专家柴昶、总工程师侯兆新对本书的研究工作提出了积极和宝贵的建议,作者特此致谢!刘芸博士、刘秀丽博士、郁有升副教授、研究生任艳然、张莉雅、王薇等为本书的编辑和出版做了大量工作,在此向他们表示衷心的感谢!

限于作者水平,错误和不足之处在所难免,均需要在今后的研究工作中不断完善和改进,同时诚恳欢迎有关专家和读者对发现的错误和不妥之处给予批评和指正。

2010年12月

目 录

第 1 章	半刚性连接钢结构的研究与应用现状	1
1.1	半刚性连接钢结构的类型和特点	1
1.2	国内外研究与应用现状	5
1.3	参考文献	12
第 2 章	半刚性连接受力性能研究	18
2.1	半刚性连接节点的转动刚度和结构内力分析	18
2.2	半刚性连接钢框架外伸端板节点滞回性能试验研究	26
2.3	半刚性连接节点受力性能数值模拟	32
2.4	参考文献	53
第 3 章	半刚性连接外伸端板撬力作用研究	54
3.1	半刚性连接外伸端板撬力作用有限元分析	54
3.2	半刚性连接外伸端板撬力作用设计方法研究	67
3.3	参考文献	80
第 4 章	半刚性连接背板加强型节点研究	81
4.1	外伸端板连接背板加强型节点的有限元数值模拟结果	81
4.2	端板连接背板加强型节点的受拉承载力分析	90
4.3	背板等效 T 形件的有效长度分析研究	93
4.4	参考文献	97
第 5 章	半刚性连接高强度螺栓承受拉力性能研究	98
5.1	高强度螺栓外伸端板连接的计算方法	98
5.2	高强度螺栓承受拉力作用的有限元分析	101
5.3	参考文献	113
第 6 章	半刚性连接钢框架稳定性能研究	115
6.1	考虑二阶效应的半刚接钢框架结构内力分析	115
6.2	半刚接钢框架柱的计算长度系数取值研究	129
6.3	考虑剪切变形的半刚接钢框架柱计算长度系数取值研究	144
6.4	参考文献	155

第 7 章 半刚性钢框架动力和抗震性能研究	157
7.1 多高层半刚接钢框架的稳态谐响应分析	157
7.2 多高层半刚接钢框架地震响应分析	163
7.3 半刚性端板节点对多层钢框架抗震设计的影响分析	171
7.4 参考文献	178

第 1 章 半刚性连接钢结构的研究与应用现状

1.1 半刚性连接钢结构的类型和特点

连接在钢结构中占有很重要的地位，其特性将直接影响钢结构设计技术的安全性、可靠性、经济指标和使用性能。钢结构的连接节点，按其构造形式和力学性能，可以划分为刚性连接、铰接连接和半刚性连接三种形式。但在传统钢结构分析设计中都将连接简化为完全刚接或铰接，虽然这种简化模型使结构分析和计算过程得到简化，在一般情况下也能满足工程使用要求，但是其计算结果不能正确反映结构实际受力情况。研究结果表明，完全刚性节点的假定意味着相邻杆件之间的斜率完全是连续的，弯矩的全部或者大部分从梁传到柱。典型钢框架梁与柱刚性连接时，梁翼缘与柱采用全熔透焊缝连接，腹板和柱采用高强度螺栓摩擦型连接。这种刚性节点刚度大、承载力高，具有一定的延性和韧性。但是节点的构造复杂，施工难度较大，在强烈地震作用下，在梁上、下翼缘焊缝通过孔位置处易发生脆性断裂现象^{[1.1][1.2]}。理想铰接的假设则意味着，梁的特性像一个简支杆件，梁不会传递弯矩给柱。与梁腹板相连的高强度螺栓，除应承受梁端剪力外，尚应承受偏心弯矩的作用。铰接节点构造简单、施工难度小；但是节点的刚度小，延性和韧性不好，地震耗能性能差，故对结构的抗风、抗震都不利。当连接的刚性程度处在完全刚性和理想铰接情况之间的中间状态，即为半刚性连接。试验研究表明^{[1.3][1.4]}，在实际工程中采用的全部连接形式所具有的刚度，都处在完全刚性和理想铰接的两种极端情况之间，即节点都具有有限的刚性。钢框架或组合框架采用半刚性连接可以比刚接或铰接连接节约 10% 以上的钢材^[1.5]，半刚性连接的主要形式有：

(1) 外伸式端板连接

外伸端板连接是梁与柱连接的常用方式。端板在工厂与梁端上下翼缘及腹板焊接，在现场采用高强度螺栓与柱连接。外伸式端板连接分为两类：仅在受拉边的外伸式端板连接和在受拉及受压两边的外伸式端板连接(图 1-1a)。当结构承受交变荷载时，一般使用双边的外伸式端板连接。当节点承受的力不是很大，可以采用齐平式端板连接(图 1-1b)。

(2) 单腹板角钢连接

单腹板角钢连接由一个角钢，用螺栓或者用焊缝连接到柱子及梁的腹板上(图 1-1c)。最常用的形式是角钢在工厂与柱焊接，而梁则在现场用螺栓与角钢连接。单板连接是用一块板来取代连接角钢，它所消耗的材料比单角钢少，同时偏心的影响也小(图 1-1d)，这类连接的刚度很小，柔性很大。

(3) 双腹板角钢连接

双腹板角钢连接由两个角钢用焊缝或者用螺栓连接到柱子及梁的腹板上(图 1-1e)。这类连接能够承受的弯矩为全固端弯矩的 20%，连接柔性较大。

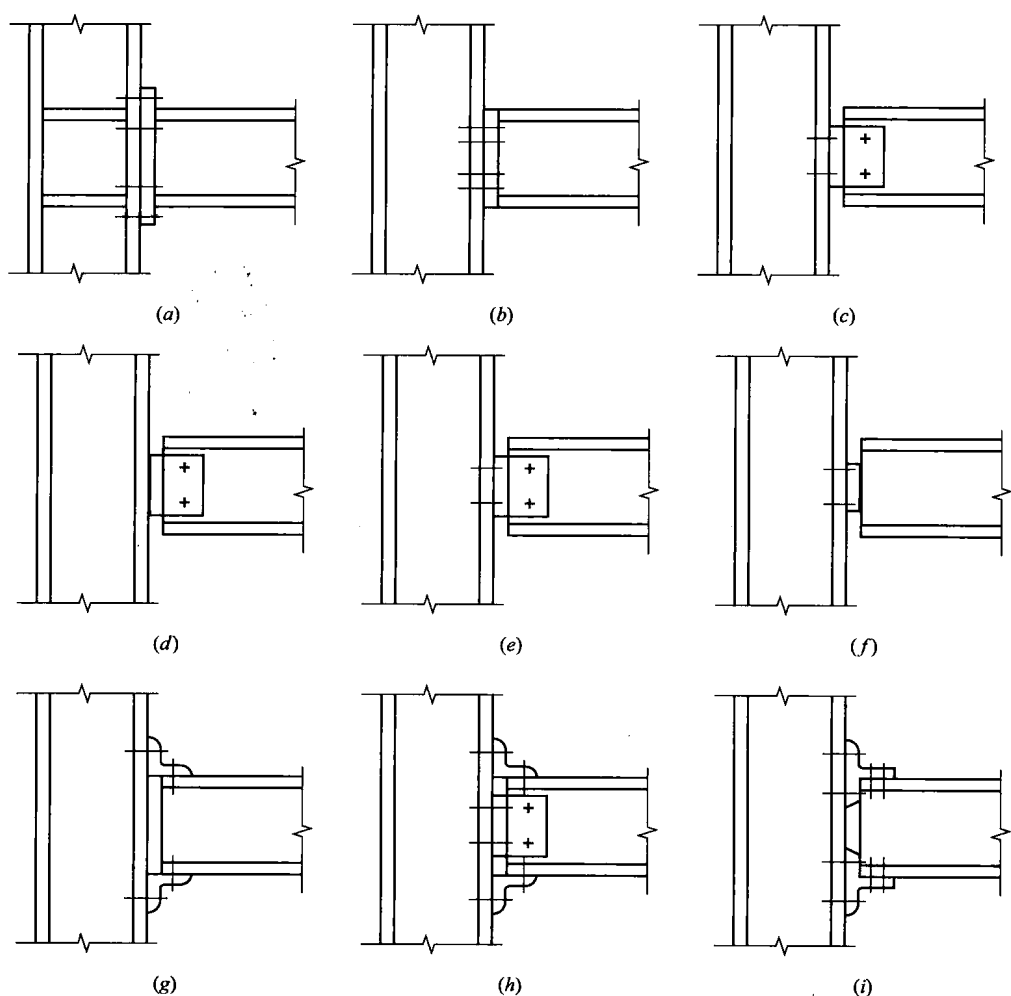


图 1-1 半刚性连接的形式

(a)外伸式端板连接；(b)齐平式端板连接；(c)单腹板角钢连接；(d)单腹板板连接；(e)双腹板角钢连接；
(f)矮端板连接；(g)顶底角钢连接；(h)带双腹板角钢的顶底角钢连接；(i)短 T 型钢连接

(4) 矮端板连接

矮端板连接由一个长度比梁高小的端板采用焊接与梁腹板相连，用螺栓与柱翼缘相连(图 1-1f)。这类连接的弯矩-转角特性与双腹板角钢连接相似，能够承受的弯矩为全固端弯矩的 20%，连接柔性较大。

(5) 顶底角钢连接

这种连接是由设在梁的上下翼缘处的两个角钢用螺栓与梁和柱相连(图 1-1g)。底角钢只传递垂直反力，同时对梁不应产生很大的约束弯矩；顶角钢仅用作保持侧向稳定，不能承担任何重力荷载。但根据试验结果，这类连接可以抵抗一些梁端弯矩。

(6) 带双腹板角钢的顶底角钢连接

这类连接是顶底角钢连接与双腹板角钢连接的组合(图 1-1h)。具有一定的连接刚度，这类连接在 AISC(ASD)^[1.4] 规范中被视为类型 3 连接(即半刚性连接)。

(7) 短 T 型钢连接

这种连接是由设在梁的上下翼缘处的两个短 T 型钢用螺栓与梁和柱相连(图 1-1i)。它被认为是最刚劲的半刚性连接之一, 当与双腹板角钢一起使用时, 尤为刚劲, 可当作刚性连接。

多高层钢框架的梁柱连接节点采用刚性连接虽然其受力性能好, 但构造复杂、施工难度大; 采用铰接节点构造简单, 但刚度和耗能性能差, 对结构抗震不利; 而采用半刚性连接则兼有刚接和铰接的长处。其优点具体表现在以下几方面:

- (1) 因考虑了节点区域的相对变形, 可缓解杆件内应力集中;
- (2) 地震作用下, 节点部位能量耗散作用可以降低位移反应;
- (3) 灾后结构加固设计较容易处理;
- (4) 半刚性节点引入结构分析, 推动对结构设计过程的重视;
- (5) 设计能够更接近结构的真实情况。

半刚性连接承载性能好、构造简单、施工速度快、质量比较容易得到保证, 在欧美已经得到广泛应用, 例如, 在欧洲, 常采用螺栓端板连接; 在美国, 常采用角钢连接。在我国, 规范中尚未有半刚性连接的设计方法, 但在工程中已有应用。

梁端弯矩通过连接节点能够传到柱子多少, 与梁柱连接处的初始转动变形密切相关。当梁与柱的连接刚度很大, 如短 T 型钢连接就接近刚性节点, 而当两者的连接截面减少至很少, 如梁腹板与柱翼缘采用单腹板角钢连接就接近铰接节点。对于梁与柱的连接, 其转动变形刚度可以采用连接弯矩的函数表达。当连接施加一个弯矩 M 时, 它的转动量为 θ 。图 1-2 给出了各种常用的半刚性连接的弯矩-转角 ($M-\theta$) 特性^{[1.6][1.7]}。

单腹板角钢连接是很柔的连接, T 型钢连接则是十分刚性的连接。从图 1-2 可以观察到以下几点:

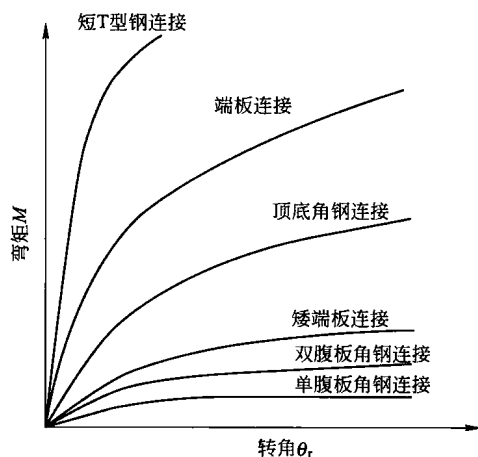


图 1-2 不同连接节点的弯矩-转角关系曲线

(1) 所有的连接表现出来的 $M-\theta$ 特性, 均处在理想铰接条件(水平轴)和完全刚性条件(垂直轴)之间。

(2) 弯矩相同时, 连接的柔性愈大, θ 值愈大。反之, 对于指定的 θ 值, 柔性大的连接在相邻杆之间传递的弯矩就要少些。

(3) 连接所能传递的最大弯矩(极限受弯承载力), 在较为柔性的连接中要降低。

(4) 半刚性连接的 $M-\theta$ 关系在全部实际加载范围内一般是非线性的。

连接的非线性特性来自多种因素, 其中一些重要的因素如下:

① 连接组合材料本身不连续。连接是由螺栓及型钢, 如角钢、短 T 型钢等组合配置而成。这种形式使得不同加载阶段, 各组合件之间互相会产生滑移和错动。

② 连接组合中一些组合件产生局部屈服。这是引起连接非线性特性的主要因素。

③ 连接组合中的孔眼、扣件以及构件之间的承压接触引起应力和应变集中。

④ 在连接附近, 梁与柱的翼缘和/或腹板的局部屈曲。

⑤ 在外荷载影响下整体的几何变化。

在欧美等国家和地区, 采用端板连接的钢结构比较常见, 主要应用在中层框架中。梁柱截面一般为 I 或 H 形。端板与梁翼缘通常采用全熔透对接焊缝连接, 与梁腹板通常采用角焊缝连接, 所有焊接工作均在工厂完成, 焊接质量有较高保证。端板和柱翼缘通常采用高强度螺栓连接, 施工方便。典型梁柱端板连接如图 1-3 所示。为了避免钢柱腹板发生局部屈曲, 可在柱腹板设置横向或斜向加劲肋, 如图 1-3(b)、(c) 所示。为了保证钢梁的连续性, 梁梁拼接一般采用两端外伸式, 如图 1-4 所示。此外, 端板连接在我国及国外还广泛应用于门式刚架轻钢结构中, 作为刚架梁柱的连接以及梁梁拼接, 如图 1-5 所示。刚架梁柱连接时可采用端板平放、竖放和斜放等形式。

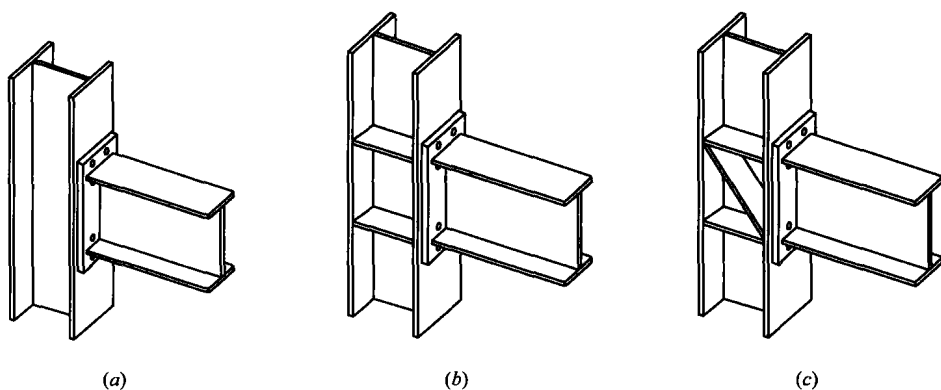


图 1-3 梁柱端板连接

(a) 无加劲肋; (b) 横向加劲肋; (c) 斜向加劲肋

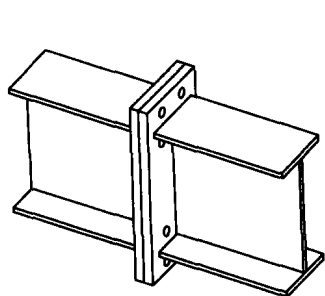


图 1-4 梁梁端板连接

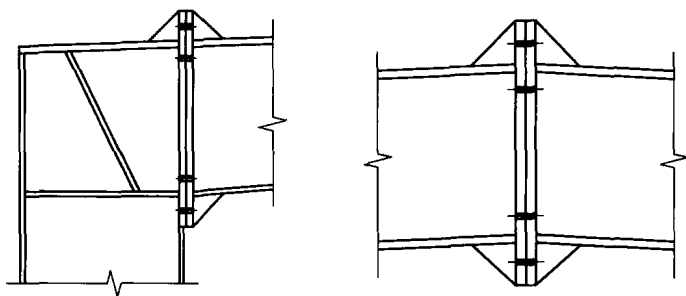


图 1-5 刚架外伸端板连接节点

根据端板形式不同, 可分为外伸式(图 1-6a、b、c、e、f)、平齐式(图 1-6d)两类。其中, 外伸式又可分为两端外伸(图 1-6a、b、e、f)和一端外伸(图 1-6c)两种。两端外伸式以其刚度大、承载力高、受力合理而广泛采用, 一端外伸式常用来承担单向荷载。根据受力需要, 柱腹板和端板外伸部分可设置加劲肋(图 1-6b、e、f), 螺栓的排列方式也很多(图 1-6b、e、f)。柱腹板加劲肋主要是用来提高节点域刚度和承载力, 特别是防止节点域受压区失稳破坏; 端板加劲肋主要提高端板外伸部分的刚度和承载力。

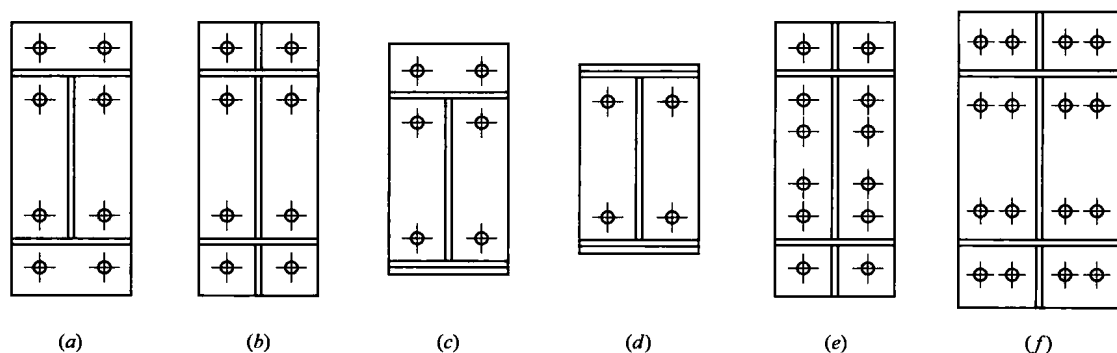


图 1-6 端板连接的类型

1.2 国内外研究与应用现状

1.2.1 半刚性节点的研究现状

半刚性节点连接由于自身构造特点，具体的构造形式种类繁多，可变的几何参数也很多。而且连接是由多个较小的连接组件构成，各组件之间存在复杂的受力关系，特别是接触问题，再加上螺栓预拉力等，这些都使得半刚性连接的受力特性成为非常复杂的问题。尽管如此，从 20 世纪 60 年代开始，国内外很多研究者采用多种不同的方法，对半刚性节点连接作了大量的研究。早期研究的主要手段是单向加载静力试验和弹塑性力学分析，较为系统地研究了国外常用类型端板连接的静力性能，包括一端和两端外伸式、平齐式、中柱和边柱节点等，得到多种不同的节点破坏模式，分析了端板厚度、螺栓直径、柱腹板加劲肋、端板缝隙等对节点性能的影响以及节点破坏机理，研究了撬力的大小、分布及其影响，提出了相应的端板连接设计方法。

随着计算机技术的飞速发展，20 世纪 70 年代开始采用有限元进行分析；已有的有限元分析，一部分是通过有限元方法有效地分析了试验中很难测量的节点细部受力状态，包括接触问题、撬力等；大部分则倾向于通过大量计算进行参数分析，回归分析形成设计计算公式，虽然可以得到比较精确的结果，但过程繁琐，得到的公式比较复杂，而且公式中的参数往往没有明确的物理意义。

后来又出现了循环加载试验以研究其滞回特性和抗震性能。还有一些研究者建立了梁柱连接试验数据库，每个数据库都包含了大量的连接试验数据。已有的循环荷载试验对于节点构造、端板厚度、螺栓大小、加载方式等对节点滞回性能、延性、破坏模式的影响进行了一定的研究，但是试验数量还比较少，所包括的节点构造类型非常有限，研究也不够系统化。

对于梁柱连接，从实用目的，只需考虑转动变形，通常用连接弯矩的函数来表达，即 $M-\theta$ 关系。对于半刚性钢框架结构分析设计，各国规范都要求由节点的 $M-\theta$ 关系作为设计依据，所以探讨一种简单而准确的表达式来描述半刚性连接 $M-\theta$ 特性一直是国内外集中研究的一个方面。早在 20 世纪 30 年代，国外学者就对半刚性梁柱连接的弯矩-转角关系进

行研究。综合目前的文献资料,关于连接性能的研究方法,可归纳为如下五种:

(1) 试验测定法。试验测定法是通过半刚性节点的试验研究,来确定连接弯矩-转角曲线的方法。它是目前唯一公认的获得连接真实弯矩-转角曲线的有效方法,可以完整准确地反映连接性能的全过程,获得可靠数据,但费用昂贵,且连接刚度受多因素影响,因此所收集的数据不能包罗万象。到目前为止,通过收集试验数据已形成了 Nethercot、Kishi-Chen 等数据库^{[1.8]~[1.17]},它们涵盖了各种连接节点的相关试验数据。在国内施刚^[1.18]针对门式刚架轻型房屋端板节点开展了单向加载静力试验研究,并采用特殊方法对螺栓拉力分布的受力状态进行了实测,给出了各试件梁柱节点弯矩-转角关系曲线。彭福明^[1.19]针对钢框架外伸端板节点试件在反复荷载作用下进行了拟静力试验研究,给出了各试件的梁柱节点弯矩-转角关系曲线,证明了外伸端板半刚性梁柱节点的延性和转动能力主要是依靠端板的变形来实现,在弹塑性阶段强度和刚度衰减速度较慢,滞回曲线饱满,节点抗震性能较好。王秀丽等^[1.20]针对不同构造形式的角钢连接半刚性节点在反复荷载历程下的破坏试验,对节点的受力特征及抗震性能进行了研究,分析了半刚性节点的约束关系和滞回性能。完海鹰等^[1.21]通过试验研究了双腹板、顶底角钢半刚性连接节点的滞回曲线模型,并用改进的双线性模型模拟试件的滞回曲线,提出了改进的恢复力模型。

(2) 曲线拟合法。该方法是将试验数据拟合成表达式,目前所产生的拟合曲线模型主要有:线性模型^{[1.22]~[1.24]}、多项式模型^[1.25]、B 样条模型^{[1.26]~[1.27]}、幂函数模型^{[1.28]~[1.30]}、指数函数模型^[1.31]。在这些模型中,线性模型公式简单,但计算精度差,尤其是刚度在折点处将产生跳跃;多项式模型能很好地代表 $M-\theta$ 特性,但是主要缺点在于多项式的性质,在某一范围内会出现负值,这在实际中是不可能的,而且如果采用切线刚度法,负刚度会导致框架结构分析中发生数值计算的困难;B 样条模型能够回避负刚度问题,并能很好地表达 $M-\theta$ 特性,但在曲线拟合过程中需要大量的试验数据;幂函数模型和指数模型的常数确定比较困难,其中有些模型过于复杂,计算精度不高,或者最后趋近于水平线 $M=M_u$,忽略了强化段。

(3) 塑性分析法。为弥补试验数据的不足,理论分析必不可少。采用的主要方法为塑性铰线理论(Yield Line Method)^{[1.32]~[1.33]}。对于外伸式端板连接,钢柱腹板及其翼缘组合体、端板与钢梁翼缘(腹板)组合体的受力和 T 形连接很相近,在对该部分进行受力分析时可借鉴 T 形连接的计算方法,即“T 形连接法”(T-Stub Method)^{[1.34]~[1.35]}。塑性分析法可分为两类:一类是先确定外力作用下节点各组件的内力分布,验算各组件承载力是否满足要求或是计算确定组件的几何参数,为英国规范 BS5950: Part 1^[1.36]、美国联邦紧急管理署 FEMA-350^[1.37]等国家现行设计规范所采用,按这一方法计算连接的承载力,须通过比较方能确定最薄弱的组件并据此反算连接的承载力;二是先计算各组件的抗力,进而确定连接的抗力并验算其能否承受外力作用,为 EC 3^{[1.38]~[1.39]}欧洲等国家所采用,该方法可直接计算连接的承载力,但在设计时需要多次反复调整,工作量较大。在国内,李国强等^{[1.40]~[1.41]}利用塑性分析和组件法,提出平端板连接组合节点承受负弯矩塑性抗弯承载力的计算方法,给出其各组件承载力的计算方法,组件包括钢筋、螺栓、柱腹板、梁翼缘、混凝土楼板等,使用该方法同样可以计算平端板连接梁柱纯钢节点在承受负弯矩作用时的受弯承载力。舒兴平^[1.42]利用 EC 3、EC 4 的组件法针对已有端板连接组合节点初始转动刚度分析方法,提出了端板连接组合节点负弯矩作用下节点初始转动刚度的详细计算步

骤,给出了初始转动刚度组件法分析模型。王萌等^[1.43]利用 EC 3、EC4 的组件法,推导了带有背板加强的 T 形件承载力和初始刚度公式,研究了柱翼缘带有背板的 T 形件的承载力公式、端板塑性铰线分布模式以及等效 T 形件有效长度的取值方法,分析了柱翼缘背板厚度对模型承载力、柱翼缘受拉区变形以及应力分布的影响。

(4) 解析法。解析法计算连接的弯矩-转角曲线有两种途径:一种是将连接中的主要部件分离出来,在某些假定的基础上获得荷载-变形关系的表达式,通过各部件表达式的协调计算获得 $M-\theta$ 曲线,如现行欧洲规范 EC 3^{[1.38][1.39]}采用的连接弯矩-转角关系曲线及相应的三线性模型曲线。一种是对主要部件单独进行试验,以获得实测荷载-变形曲线和拟合表达式,再通过协调计算求出连接的 $M-\theta$ 曲线^[1.45]。解析法分析清楚、计算简单,适用于主要部件受力很明确的连接。石永久等^[1.44]针对半刚性端板连接梁柱节点连接提出了相应的弯矩-转角($M-\theta$)曲线形式及简化计算方法,能够较好地计算端板连接的弯矩-转角($M-\theta$)全曲线,特别是能够准确地计算端板连接在节点弯矩小于节点抗弯承载力设计值时的节点转角,满足结构设计要求。刘永华、张耀春等^[1.45]针对钢框架考虑连接柔性的 $M-\theta$ 模型,建立了能够同时考虑几何、材料和连接非线性的精细塑性铰法三维梁柱单元,单元采用稳定函数考虑二阶效应和剪切变形,采用切线模量和抛物线函数考虑沿单元长度和截面的逐渐屈服,采用 Kishi-Chen 幂函数模型和修正梁单元方法模拟半刚性连接的非线性行为。

(5) 有限单元法。Krishnamurthy^[1.46]是最早采用有限单元法研究端板连接的学者之一。采用二维有限元模型,通过对螺栓杆单元外侧结点施加荷载实现了对高强螺栓预拉力的模拟。Jenkins 等^[1.47]采用有限单元法研究了端板弯曲、柱翼缘弯曲、螺栓拉伸等因素对节点弯矩-转角特性的影响。Tarpay et al. (1981) 用有限元法计算了腹板单角钢和单侧外伸端板连接特性^[1.48]。Wheeler^[1.49]采用有限单元法对方管梁柱端板连接进行了有限元研究,方管梁采用 8 结点线性块单元,螺栓头和端板间、螺栓杆和孔壁间都有界面元(Interface Elements),其中螺栓头和端板间的界面元用来阻止二者的相对滑移,螺栓杆和孔壁间的界面元用来防止二者相互“穿透”。板件和螺栓的材料模型都为弹性-塑性-强化模型。文献首次考虑了端板的初始残余变形,研究发现:端板的初始变形降低了连接的刚度,且不可忽略;当端板与梁采用对接焊缝时,焊缝对连接的强度、刚度几乎没有影响,但当采用角焊缝时,影响较大。Kukreti^[1.50]对两端外伸加劲端板连接中的螺栓撬力和节点刚度问题进行了有限元研究,计算得出的转角比试验结果略偏小,弹塑性阶段的螺栓内力偏差较大。20 世纪 90 年代以后,Bahaari 和 Sherbour 利用有限元对端板连接进行了大量二维和三维弹塑性分析^[1.51],采用 T 形件连接模拟端板受拉区来研究螺栓撬力问题,有限元方法逐渐开始考虑越来越多的影响因素。Sherbourne 和 Bahaari 对 34 个柱上设置加劲肋和 19 个无加劲肋的一端外伸式端板连接进行了弹塑性分析,采用多元线性回归得到了节点的 $M-\theta$ 曲线计算公式^{[1.52][1.53]}。

Chang-Koon Choi 和 Gi-teek Chung^[1.54]利用有限元方法分析了端板节点的特性,他们采用了完全的三维分析模拟节点的工作状态,进行了弹塑性分析,考虑了螺栓的预拉力以及接触面的受力情况,把节点作为一个完整的结构进行了分析和研究。

Bursi^{[1.55][1.56]}等人运用自主开发的有限元软件包 LAGAMINE 分析了 T 形件与 T 形件之间的螺栓连接,进行了两种类型 14 个外伸式端板连接的试验,并进行了 4 个试件的试验以验证有限元计算结果。

Bose^[1.57]等人用商业有限元软件包 LUSAS 分析了平齐式端板连接在单向荷载下的性能,用节点单元模拟接触,并且进行了6个试件的试验以验证计算结果,对比了节点的 $M-\theta$ 曲线和螺栓应变的变化全过程,计算结果符合较好;但是模型中没有考虑焊缝、螺栓头等的影响,且无法模拟试验中出现的柱腹板受压区屈曲和螺栓的螺纹剥落等现象。

在国内,郭兵^[1.58]采用有限元软件 ANSYS 对两端外伸加劲式和两端外伸无加劲式端板连接节点进行了循环荷载下的有限元分析,分析了端板厚度、螺栓直径、端板加劲肋、螺栓排列和不同形式端板等因素对节点连接性能的影响,并将有限元计算的变形图与试验变形图进行了比较,变形形式较为一致,但有限元变形值偏大。

荆军^{[1.59][1.60]}采用 SAP93 对门式刚架轻型房屋钢结构中的端板连接进行了弹性分析,通过温度应力施加螺栓预拉力,采用杆单元模拟接触面,通过计算结果的分析以及与试验数据的比较,研究了端板连接螺栓拉力分布规律、节点抗弯承载力和影响因素,以及节点刚度特性对刚架性能的影响。施刚^{[1.19][1.61]}运用 ANSYS 5.7 对门式刚架钢结构中的端板连接试验进行了弹塑性有限元分析计算,接触面均通过创建接触分别用三维目标单元 TARGE170 和三维8节点面-面接触单元 CONTA174 进行模拟,高强度螺栓均采用三维预拉单元 PRETS179 施加预拉力,而不是采用传统的初始应变或者温度应力的方法。廖新军^[1.62]运用 ANSYS6.1,采用类似方法,对门式刚架结构中的端板连接试验进行了弹塑性有限元分析计算,经过试验验证后,又计算了多个模型,分析了端板厚度、连接形式、加劲肋、梁截面高度、螺栓布置等因素对节点受力性能的影响。郑杰^[1.63]采用有限元分析软件 ANSYS 对外伸端板与 T 形连接的撬力作用影响进行了三维非线性分析,考虑了材料的非线性、几何非线性、高强度螺栓的预拉力、端板间接触压力的影响。模型主要考虑了端板厚度、端板加劲肋、螺栓直径及螺栓位置等的变化,证明了撬力的存在,建议节点设计中应当考虑其对螺栓带来的不利影响。螺栓拉力的分布是以受压翼缘位置为转动中心的梯形分布,为此提出了外伸端板连接中螺栓拉力的计算模型。李国强等^[1.64]采用 ANSYS 有限元分析软件和 Eurocode 3 中的组件法对加入垫板的平齐式端板连接梁柱节点进行了模拟。童根树等^[1.65]进行了螺栓角钢连接节点的三维非线性有限元分析。综上所述,有限元法可以计算各种连接类型,全面考虑各种因素的影响和各种非线性问题。但是目前的有限元计算模型多按整体构造,并以二维平面问题计算,网格数目多,耗费机时多,不利于进行影响因素和参数分析。

1.2.2 半刚性钢结构的研究现状

国内外关于半刚性连接杆系钢结构的理论分析方法大多是在刚性连接杆系钢结构分析方法基础上的修正和发展。主要有两种修正的方法:

一种是由 Wu 和 Chen^{[1.66][1.67]}首先提出的。他们假定梁柱连接 $M-\theta$ 关系为线性,用共轭梁法导出单刚修正矩阵,然后把该修正矩阵乘以刚性连接的单元刚度矩阵即得到了半刚性连接杆单元的刚度矩阵。分析了半刚接钢框架结构的内力特征,证实了连接柔性对钢框架内力和侧移的不利影响,提出了考虑弯矩-转角非线性关系,按部分约束设计钢框架的计算理论。此法比较适合于半刚接钢框架的一阶或二阶弹性分析。Romstadt 和 Subramanian^[1.68]以双线性模型来表示双腹板角钢半刚性连接的 $M-\theta_r$ 关系,应用经典梁柱理论进行了单跨单层半刚接钢框架的弹性稳定分析,并建议在确定框架杆件的有效长度时应考虑半刚性连接的影响。Goto 和 Chen^{[1.69][1.70]}由考虑杆件的几何非线性和连接的材料非线性的

梁柱控制微分方程建立了单元刚度矩阵,用迭代法求解结构割线刚度方程,对柔性连接钢框架进行了二阶弹性分析。

另一种是以 Liu 和 Chen^[1.71]提出的方法为代表,该法是将梁柱连接作为杆件混合单元的子单元,应用塑性铰概念和荷载增量控制法并采用静力凝聚法对刚性连接钢框架的梁单元刚度进行修正,以建立半刚性连接梁柱单元非线性分析刚度矩阵,该法可用于半刚性连接钢框架的二阶弹塑性和弹塑性大位移分析。Frye 和 Morris^[1.72]采用多项式模型表示半刚性连接的 $M-\theta$ 关系,连接刚度取割线刚度,假定杆件由两个弹簧单元和梁柱单元组成,用静力凝聚法建立了混合单元的割线刚度矩阵,应用塑性铰理论和迭代法进行了框架结构的二阶弹塑性分析。他们还通过对无量纲参数的研究,得出了一些有关半刚性连接对无支撑钢框架极限承载力影响的结论。

在国内,丁洁民和沈祖炎采用抗弯弹簧模拟梁柱连接^[1.73],通过引入塑性铰概念,推导了梁柱单元非线性广义刚度方程,并应用综合离散化的计算模型,把经典的 Rayleigh-Ritz 法和有限元法结合,进行柔性连接钢框架的二阶弹塑性极限承载力研究。刘小强和吴惠弼应用梁柱理论和塑性铰概念^{[1.74][1.75]},推导了全拉格朗日列式的半刚性连接梁柱单元切线刚度矩阵,进行半刚性钢框架的弹塑性分析。李国强、沈祖炎^{[1.76][1.77]}对半刚性连接的钢框架进行了静动力反应的非线性分析研究,基于弹塑性铰概念提出了一种按杆系进行钢框架弹塑性静动力反应计算的非线性分析模型,通过试验和计算分析发现,节点刚度对半刚性连接钢框架地震位移反应的影响较大,而节点强度对半刚性连接钢框架地震位移反应的影响较小。徐伟良^{[1.78][1.79]}应用泛函的最小势能原理,将传统的梁柱法和有限元法结合,建立梁柱简化塑性区单元模式的非线性增量刚度矩阵,用于半刚接钢框架的二阶弹塑性大位移分析。郭成喜^[1.80]导出了半刚性钢框架结构分析的一般方程,讨论了半刚性简单门式刚架的内力特征,提出了改进刚柔性界定的建议。王燕等^[1.81]对半刚性钢框架柱的稳定性能进行了分析,从梁柱剪切变形两个方面考虑,通过引入梁柱线刚度比修正系数,对刚接钢框架柱的计算长度系数的公式进行了修正。王元清^[1.82]等采用有限元分析方法,将半刚性连接节点视为弹簧单元,采用有限元软件 SAP2000 对半刚性端板连接多层钢框架进行了模态分析、反应谱分析和 Push-over(静力弹塑性)分析。研究结果表明,采用半刚性端板连接的钢框架结构,相对于理想刚接的情况,结构在多遇和罕遇地震作用下结构的抗震性能较为显著。王燕、苏波^[1.83]建立了具有不同节点初始刚度的半刚接多层钢框架及相应刚性框架的计算模型,研究了节点刚度对结构自振频率的影响以及结构在谐振荷载作用下的响应,对地震波激励下的结构进行了时程分析。分析结果表明,半刚接框架节点的柔性对结构自振频率产生较大的影响,节点柔性越大,结构自振频率降低也越大,结构的抗震设计应考虑节点柔性的影响,半刚接钢框架顶点位移和柱底剪力时程曲线在地震波激励时间内表现出良好的稳定性。王来等^[1.84]进行了一榀两跨三层带双腹板顶底角钢半刚性连接平面钢框架结构的低周反复荷载试验。通过试验研究了半刚性钢框架在循环荷载作用下的弹塑性性能,分析了带双腹板顶底角钢半刚性连接对钢框架性能的影响。方有珍、顾强等^[1.85]对半刚接钢框架(柱弱轴)-内填剪力墙结构进行了水平循环荷载作用下的滞回性能试验研究,分析了结构的抗侧刚度变化、裂缝开展过程与破坏模式、结构的耗能和抗震延性和安全性等整体性能。试验结果表明,试件结构具有较好的延性、耗能性能和安全储备,钢框架柱脚和梁柱半刚性连接部位形成塑性铰。

1.2.3 半刚性钢结构的应用现状

试验和理论分析的研究结果表明,在实际工程中运用的全部连接形式所具有的刚度,都处在完全刚性和理想铰接的两种极端情况之间,端板连接更是典型的半刚性连接。对于半刚性钢框架的结构分析设计,各国规范都要求以节点的弯矩-转角($M-\theta$)关系作为设计依据。

我国现行的钢结构设计规范提出^[1.86]:梁与柱的半刚性连接只具有有限的转动刚度,在承受弯矩的同时会产生相应的交角变化,在内力分析时,必须预先确定连接的弯矩-转角($M-\theta$)特性曲线,以便考虑连接变形的影响。但是,规范并没有给出弯矩-转角($M-\theta$)曲线的具体计算方法。

在国外规范中,美国 ASD(美国钢结构设计规范)^[1.87]和 LRFD^[1.88]规范均只计算承载力,而不计算变形,仅仅要求对于采用半刚性连接的结构,在结构分析设计时要考虑节点的强度、刚度和延性。

美国 ASD 中关于容许应力设计列出了三种类型的连接^[1.87]:

(1) 刚性框架(连续框架):假设梁与柱的连接有足够的刚度,能保持相交杆件之间原有的角度不变。这种类型的连接用于弹性分析。

(2) 简支框架(无约束、杆端自由):假定结构承受重力荷载时,主梁和次梁连接只传递剪力,不传递弯矩,且可以不受约束地转动。

(3) 半刚性框架(部分约束):假定连接可以传递垂直剪力,也能够传递部分弯矩。

美国 LRFD 规范的荷载抗力系数设计分类方法^[1.88]:该规范在条文中规定了两种类型的连接:完全约束型(FR)和部分约束型(PR)。FR 型相当于 ASD 的类型 1,PR 型则包括了 ASD 的类型 2 和类型 3。

欧洲规范对半刚性端板连接的承载力、初始转动刚度、 $M-\theta$ 曲线的计算作出了详细规定。最新欧洲钢结构设计规范(EN 1993-1-1:2004)^{[1.89][1.90]}提出的典型节点 $M-\theta$ 曲线如图 1-7 所示,图中定义了节点三个主要性能指标,即抗弯承载力设计值 $M_{j,Rd}$ 、初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 、转动能力 θ_{Cd} 。EN 1993-1-1:2004 修改了原规范 EN 1993-1-1:1992^[1.91]根据节点 $M-\theta$ 全曲线划分节点类型的方法,而完全根据节点初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 把钢框架梁柱节点分为铰接、刚接和半刚性节点。当 $S_{j,ini}$ 不小于某一规定值时,节点为刚性节点,欧洲规范将这一界限定为:无支撑结构为 $25EI_b/L_b$,有支撑结构为 $8EI_b/L_b$,如图 1-8 中区域 1 所示,其中 EI_b/L_b 为梁的线刚度;当 $S_{j,ini} \leq 0.5EI_b/L_b$ 时,节点为铰接节点,如图 1-8 中区域 3 所示;在刚接和铰接之间的部分属于半刚性节点,如图 1-8 中区域 2 所示。

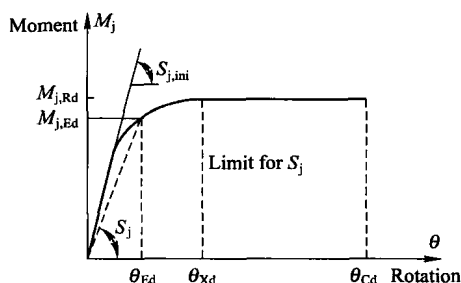


图 1-7 节点弯矩-转角($M-\theta$)曲线

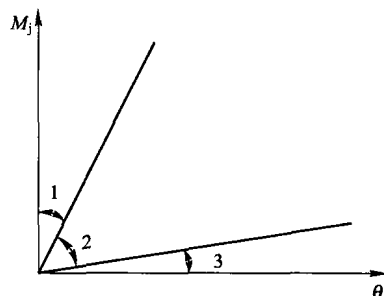


图 1-8 刚度分类标准