

钢框架结构震害的 计算机模拟

刘洪波 著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

钢框架结构震害的 计算机模拟

刘洪波 著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

钢框架结构震害的计算机模拟/刘洪波著. —哈尔滨:
黑龙江大学出版社, 2008. 12
(黑龙江大学学术文库)
ISBN 978 - 7 - 81129 - 084 - 4

I. 钢… II. 刘… III. 钢结构: 框架结构 - 抗震 - 计算机模拟 IV. TU391 - 39 TU352. 1 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 121536 号

责任编辑 陈雪峰

封面设计 张 骏

钢框架结构震害的计算机模拟

刘洪波 著

出版发行	黑龙江大学出版社
地 址	哈尔滨市南岗区学府路 74 号 邮编 150080
电 话	0451 - 86608666
经 销	新华书店
印 刷	哈尔滨市石桥印务有限公司
版 次	2009 年 2 月 第 1 版
印 次	2009 年 2 月 第 1 次印刷
开 本	880 × 1230 毫米 1/32
印 张	5.625
字 数	130 千
书 号	ISBN 978 - 7 - 81129 - 084 - 4

定 价 20.00 元

凡购买黑龙江大学出版社图书,如有质量问题请与本社发行部联系调换

版权所有 侵权必究

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外对钢框架结构的研究现状	5
1.2.1 国外的研究现状	5
1.2.2 国内的研究现状	8
1.3 计算机模拟的研究意义	11
第2章 钢框架结构的震害及规律	14
2.1 静力作用下钢框架结构的受力特点	14
2.1.1 强度破坏	15
2.1.2 失稳破坏	16
2.2 钢框架结构的震害	18
2.2.1 节点连接破坏	18
2.2.2 构件破坏	25
2.2.3 结构倒塌	26
2.3 重力荷载与水平地震荷载在节点产生的弯矩	27
2.4 本章小结	29
第3章 有限元模型验证	31
3.1 引言	31
3.2 壳元节点模型	33
3.2.1 单向荷载作用	33

3.2.2 往复荷载作用	36
3.3 实体单元模型	39
3.3.1 栓焊混合节点	39
3.3.2 组合梁	45
3.4 本章小结	49
第4章 节点域的性能和模型	50
4.1 工字梁与H型钢柱翼缘连接	51
4.1.1 节点域的弹性性能	51
4.1.2 节点域的强度和屈服后性能	52
4.1.3 节点域模型	53
4.2 工字梁与H型钢柱腹板连接	56
4.2.1 腹板连接各部分刚度分析	57
4.2.2 梁翼缘连接板等效剪切刚度	61
4.2.3 梁连接板抗弯刚度	63
4.2.4 腹板连接各部分强度分析	67
4.2.5 腹板连接的简化模型	68
4.3 工字梁与箱形柱连接	69
4.3.1 节点域的刚度分析	72
4.3.2 节点域的强度分析	79
4.3.3 简化模型	84
4.4 轴力对节点域性能的影响	85
4.5 侧梁对节点域性能的影响	88
4.6 本章小结	91
第5章 梁柱节点焊缝应力强度因子的参数分析	93
5.1 引言	93
5.1.1 应力强度因子	94
5.1.2 断裂韧度的确定方法	95

5.2	焊接结构裂缝的产生和扩展	97
5.3	梁柱节点附近应力分布	99
5.3.1	应力分布	99
5.3.2	梁翼缘的正应力大小	102
5.3.3	扇形切角部位应力分布	104
5.4	水平荷载作用下梁柱节点焊缝的应力强度因子	106
5.4.1	I型应力强度因子分布	106
5.4.2	K_I 随裂缝深度变化	107
5.4.3	K_I 随各参数的变化情况	108
5.4.4	公式归纳	113
5.4.5	应力强度因子最大值	116
5.5	竖向荷载作用下梁柱节点焊缝的应力强度因子	120
5.5.1	均匀设计法	123
5.5.2	公式拟合	127
5.6	焊接残余应力对焊缝断裂性能的影响	128
5.7	本章小结	130
第6章	钢框架结构平面模型	132
6.1	引言	132
6.1.1	加荷速度对材料力学性能的影响	133
6.1.2	结构整体性评定方法	134
6.2	混凝土楼板对钢框架受力性能的影响	139
6.3	钢框架结构平面模型	146
6.3.1	楼板	146
6.3.2	模型	148
6.4	钢框架结构震害模拟	150
6.4.1	结构体系	150
6.4.2	地震动记录	152

6.4.3 阻尼	152
6.4.4 震害	153
6.4.5 分析结果	154
6.5 本章小结	158
参考文献	160
物理量名称及符号	175

第1章 绪论

1.1 研究背景

开始于18世纪中期的英国工业革命不但导致社会、思想和人类文明的巨大进步,而且对建筑产生了深远的影响。工业革命是社会生产从手工工场向大机器工业的过渡,是生产技术的根本变革,同时又是一场剧烈的社会关系变革。一方面是生产方式和建造工艺的发展,另一方面是不断涌现的新材料、新设备和新技术,为近代建筑的发展开辟了广阔的前途。

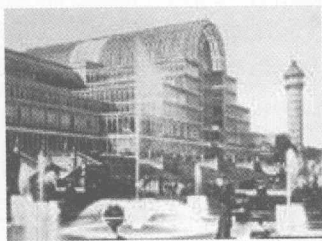


图 1-1 水晶宫

Fig. 1-1 Crystal palace



图 1-2 巴黎圣日内维夫图书馆

Fig. 1-2 Ste-Genevieve library

第一座完全以铁架和玻璃构成的巨大建筑物是巴黎植物园的温室,而最著名的则是1851年建造的伦敦“水晶宫”,见

图 1-1。钢框架结构最初在美国得到发展,其主要特点是以生铁框架代替承重墙,外墙不再担负承重的使命,从而使外墙立面得到了解放^[1]。1858~1868 年建造的巴黎圣日内维夫图书馆和英国利兹货币交易所(见图 1-2,图 1-3),是初期生铁框架形式的代表。

第一座依照现代钢框架结构原理建造起来的高层建筑是 1883~1885 年建造的芝加哥家庭保险公司大厦,共十层,它的外形仍然保持着古典的比例,见图 1-4。钢结构建筑从此在世界各地蓬勃发展。美国、日本、英国、澳大利亚等发达国家建造了大量钢框架结构的住宅。

20 世纪初期,钢结构建筑开始在中国出现,比较有代表性的是 1916 年公和洋行设计的上海有利大楼(见图 1-5),它采用钢框架结构,原为 6 层,后加一层,现为 7 层。1934 年兴建,1937 年建成的钢框架结构的广州爱群大厦(见图 1-6),15 层,高 64 m。新中国成立后,由于经济和技术的原因,80 年代前没有兴建一幢高层钢结构建筑。1985 年以后,由于外资工程的兴建,建筑用钢材的发展,高层钢结构建筑开始在我国出现。1983 年开始策划与设计的北京长富宫中心工程是 26 层钢结构建筑,见图 1-7。它采用纯钢框架结构,由中日合作设计,考虑到当时国内缺乏制作与安装的经验,采用了最简单的结构形式与节点作法,以易于保证工期和质量。对于柱网较大的 26 层钢结构,纯框架的水平刚度显然比较小,自振周期为 2.9 s,150 gal 地震波作用下层间位移是 1/250,300 gal 地震波作用下层间位移是 1/95;能够满足 8 度设防要求。当时,我国尚无高层钢结构设计规程,参考国外规定,层间位移角限制在常遇地震作用时为 1/200,罕遇地震作用时为 1/100。自进入 20 世纪 90 年代以来,

我国钢结构建筑的发展十分迅速,特别是一些城市标志性高层建筑的建成,为钢结构在我国的发展揭开了新的一页。如 1999 年建成的上海金茂大厦(高 421m,88 层),它采用钢框架—钢筋混凝土核心筒混合结构,见图 1-8。



图 1-3 英国利兹货币交易所

Fig. 1-3 Leeds exchange



图 1-4 芝加哥家庭保险公司大厦

Fig. 1-4 Home insurance

随着国民经济的发展和钢产量连年突破亿吨大关,国产钢材在数量品种、质级、材性方面基本上都能满足国内建筑钢结构用钢的要求。尤其是轻钢结构市场非常兴旺,压型钢板、H 型钢及高频焊接轻型 H 型钢等经济截面型材,和与之配套的用于维护结构的轻质高强节能板材,都为多层、中高轻钢结构住宅建筑的发展创造了条件^[2]。轻钢结构住宅建筑的应用受到前所未有的关注和重视。轻型钢结构住宅结构体系通常采用框架体系和双重抗侧力体系。纵横向都设成钢框架,门窗设置灵活,可提供较大的开间,便于用户二次设计,满足各种生活需求。钢框架考虑楼盖的组合作用,运用在低多层住宅中,一般都能满足抗侧力要求。



图 1-5 有利大楼

Fig. 1-5 Yau Lee building

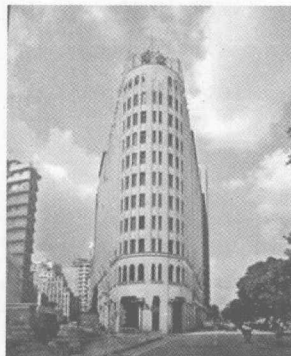


图 1-6 爱群大酒店

Fig. 1-6 Ai Qun hotel

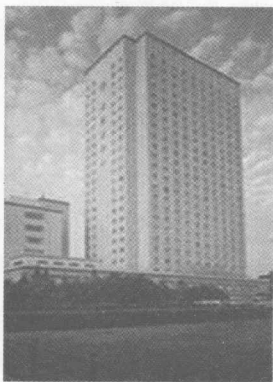


图 1-7 北京长富宫

Fig. 1-7 Chang Fu Gong Hotel

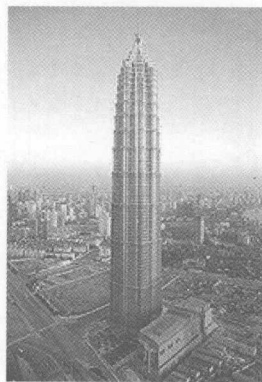


图 1-8 上海金茂大厦

Fig. 1-8 Jin Mao building

在过去的三十多年里,在发达国家的多发地震地区,焊接抗弯钢框架结构 WSMF(Welded Steel Moment Resistant Frames)是最流行的结构形式之一。梁柱焊接节点在抗弯钢框架结构中扮演着举足轻重的角色^[3],很久以来,人们认为梁柱焊接节点具有

很好的韧性,在地震作用下可以充分的发展塑性变形,吸收地震能量,保持结构稳定。1994年1月17日发生在美国加州圣费南多谷地的北岭地震(Northridge Earthquake)和正好一年后1995年1月17日发生在日本兵库县南部地区的阪神地震(Kobe Earthquake)是两次陆域型强震。地震改变了人们对梁柱焊接节点的看法,被认为抗震性能卓越的现代钢框架结构焊接节点并未如期望的那样如期形成塑性铰,以耗散地震的能量,保持结构的完整,而是遭受了严重的破坏,而且梁柱节点的破坏主要发生在梁柱焊接接头处,且多为脆性破坏^[4]。

1.2 国内外对钢框架结构的研究现状

伴随着钢框架结构的出现和发展,对钢框架的结构的研究就没有停止过。早期钢结构的研究主要以试验研究为主,这时的计算机硬件速度还很慢,计算机软件也不发达。伴随着计算机的发展,钢框架结构的有限元分析也由粗到细。开始以杆元为主,主要研究钢框架结构构件和整体的材料非线性和几何非线性,由平面到空间,由静力到动力。随着大型通用有限元软件的出现,开始利用壳元和实体元研究钢框架结构构件、各种形式的节点以及钢框架结构整体性能^[5-9]。

1.2.1 国外的研究现状

在美国 Northridge 地震和日本 Kobe 地震之前,为了了解焊接节点的强度和延性,美、日等国都进行了真实结构的试验^[10],并用有限元来模拟分析,计算出梁柱节点的应力分布情况。

早在 60 年代初,日本东京大学仲威雄、加藤勉教授等人就

率先对工字型梁柱节点部位进行了试验研究和理论分析。试验结果显示应力分布的规律为:工字型梁柱节点域中心处的主剪应力值最大,向四周递减。节点域在较大的剪切作用下,屈服从节点域部分的中心开始,随着荷载的增加,屈服范围逐渐扩大,进而整个节点域屈服,导致节点破坏^[11]。

1975年,美国斯坦福大学的 Krawinkler、Bertero 和 Popov 教授在低周往复加载伪静力试验和有限元分析的基础上,对工字型梁柱节点域的受力性能和变形进行了详细的分析。并提出了一种理想的节点域的弹塑性计算模型,为节点域性能进一步研究奠定了基础^[12]。在 1988 年, Tsai 和 Popov 研究发现节点域塑性剪切变形过大,将在梁柱翼缘的焊接处产生应力集中,这就会给梁柱的焊接节点带来难题。北岭地震验证了这一点。1992 年 King 和 White 等人对钢框架进行了一系列非线性分析和试验^[13],而后,他们又对钢框架上塑性铰的形成进行了分析^[14]。

在美国 Northridge 地震和日本阪神地震之后,针对钢框架结构节点震害产生的原因^[15],震害的维修方法^[16],梁柱焊接节点的改进形式的研究层出不穷^[17]。其中新型节点主要包括两大类,一种削弱型节点(Reduced Beam Sections)^[18-20],另一种是加强型节点^[21-23](Reinforced Moment Connections)。它们的原理都是将梁柱连接在构造上使塑性铰外移。

1995 年, Uang 等人把 Northridge 地震中的一栋十三层钢框架结构的震害发生情况与有限元弹塑性分析结果进行比较,研究表明节点域在能量耗散方面起到了关键的作用^[24]。1997 年 John 根据假定梁柱节点断裂后,节点将失去刚度和强度,建立梁柱节点塑性模型。并利用这个模型对 Uang 所研究建筑进行了地震响应分析。分析结果与建筑实际地震记录进行比较,该模

型能够在一定程度上估计钢框架结构的破坏程度^[25]。但由于没有考虑节点域变形、组合楼板、竖向荷载及竖向地震作用的影响,所以模型有待进一步改进。

2000年,Masayoshi 等人在静力条件下分析梁柱节点断裂后,钢框架结构的弯矩重分布情况。分析结果表明如果在节点变形很大时,节点发生断裂,尔后的弯矩重分布,将不会引起新的断裂^[26]。同年,Nicolas 等人通过对6个钢框架模型的非线性分析,研究了钢框架梁柱节点断裂对层间变形的影响^[27]。

2002年,美国 Kee 等人,在前人节点域模型的基础上,建立了能够用来分析单向荷载和循环荷载作用下钢框架节点域的变形,同时能够考虑楼板对节点域变形影响的模型^[28]。

2003年,Kuntiyawichai 和 Burdekin 采用有限元方法研究在动荷载作用下,加载速度对钢框架梁柱节点焊缝断裂韧度的影响,并提出了简化计算方法^[29]。2005年,Binnur 等人利用欧洲经济共同体提出 SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedure) “结构整体性评定方法”对不同钢框架梁柱节点类型的焊缝断裂性能进行评定,发现通过在梁柱节点处加盖板的方法能够提高节点焊缝的断裂性能^[30]。

2006年,美国 Janise 和 Stephen 为了研究梁柱节点断裂对钢框架整体抗震性能的影响,对三分之一比例的空间钢框架模型进行了一系列的振动台试验研究和有限元分析。研究发现梁柱节点的断裂对钢框架整体性能的影响是非常复杂的,受很多因素的影响,包括梁柱节点断裂的个数、断裂分布位置、激振力的频谱特征和幅值等。节点的断裂并不一定对钢框架整体抗震性能产生负面的影响,尤其当梁柱节点发生断裂的个数较少时。另一方面,从试验结果和有限元结果可以看出,大量的节点断

裂,将导致钢框架强度大大降低,甚至倒塌^[31]。

1.2.2 国内的研究现状

1990年,北京建筑设计院崔鸿超^[32]等人对钢框架结构的梁柱节点在低周反复荷载作用下进行了试验研究,介绍了梁柱节点区在模拟地震荷载作用下的变形、内力变化和破坏特点,以及影响节点区承载能力的因素等。文章指出,在节点区,由于柱截面较强,梁及其连接的破坏成为框架节点区破坏的主要形式,而破坏前的延性主要取决于连接(如焊缝)的强度及梁的整体和局部稳定。最后文章又对钢框架节点设计提出了几点分析和建议:在设计时要遵循“强柱弱梁”的原则,注意既不要使梁及其连接强于柱,又不要过早的进入塑性;在考虑梁柱连接时,要尤其注意焊缝的质量。

1994年,同济大学的沈祖炎和李国强提出的矩阵化的二阶弹塑性分析理论,该理论易于程序化,可用于受水平风或地震作用的钢框架的响应计算。算例分析结果表明,要准确预测钢框架的弹塑性受力性能,必须在分析中考虑节点域的剪切变形,构件的剪切变形和几何非线性^[33]。1998年他们又结合梁柱节点低周反复荷载试验的断裂现象,指出梁柱焊接连接脆性断裂对节点承载力影响极大,而脆性断裂的原因主要有焊接缺陷、构造不合理及设计方案欠妥等^[34]。

1998年,北京冶金部建筑研究总院的田亚军和哈尔滨建筑工程大学的张耀春教授通过12层钢模型结构的振动台试验,观测了纯框架、框架-支撑结构在地震动激发下的动力反应。试验结果发现框架-支撑结构的抗侧移刚度较由相同梁柱截面组成的纯框架结构的大,其中层剪力和加速度反应增加很多,层位移并

没减少,说明结构的动力反应和静力反应存在着质的区别。高层建筑的柱脚约束条件对上部反应影响很大,对于特定的结构和地震动激励,选择适当的柱脚构造处理就有可能减小地震反应。由于地基基础并非绝对刚性固定,地基土对高层结构动力反应的影响也是不可忽略的^[35]。

2000年,湖南大学的徐红胜、舒兴平和尚守平根据节点域的变形特点,提出了一种考虑节点域剪切变形影响的空间钢框架分析方法,并用该方法对纯框架和框架-支撑体系进行了分析比较,算例表明,在多高层钢框架结构中,节点域的剪切变形对整个结构侧移影响很大,不应忽略。但在框架-支撑结构中,节点域的剪切变形对整个结构侧移影响显著减小,其影响作用基本可以忽略^[36]。

2001年,天津大学霍立兴等人测试了在不同加载速率下,典型建筑用钢焊接接头的断裂韧度值^[37]。在准确把握材料在动载荷下本构关系的基础上,通过局部法,实现了由静载断裂韧度值对动载下接头断裂行为的成功预测。表明基于威布尔应力的局部法可有效地评定接头在高加载速率下的断裂行为。试验结果表明,材料在动载下无论是屈服强度还是抗拉强度均有一定的提高,塑性有了一定的降低;常温下动载对于16Mn钢母材和焊缝的断裂韧度是有利的;Q235B钢常温下,焊缝的断裂韧度值较低,且动载对母材的断裂韧度影响较大,钢的抗震性能较差^[38]。他们还采用有限元软件ANSYS对建筑钢结构中比较常见的梁柱焊接节点在模拟地震循环载荷作用下进行了弹塑性有限元分析。引入耗能系数作为焊接节点耗散地震能量的衡量指标,计算了不同形式的焊接节点在循环载荷作用下的耗能系数^[39]。

2003年,同济大学刘永明、陈以一、陈扬骥在杆端多弹簧弹塑性模型中引入了断裂机制,采用根据J积分撕裂模量法建立的判别裂纹失稳的失效评定图设定模型参数。归纳出适用于整体结构分析的考虑节点局部断裂的非线性弹簧模型^[40]。

2004年,北京工业大学的李洪泉等人通过钢框架结构的多次振动台模拟试验,应用损伤力学理论,建立钢框架结构在地震作用下考虑损伤累积效应的双线性恢复力模型,结构在地震作用下的动力分析采用层间模型,通过试验和计算的对比,在多次地震作用后,由于框架结构的层间模型产生了强度和刚度的退化,考虑损伤累积效应后的计算结果更符合试验结果,为地震作用后的结构的修复和抗震能力的评估提供分析基础^[41]。

国内学者对新型延性节点也开展了大量的研究,研究主要集中在削弱型节点。2001年冶金部建筑研究总院杨尉彪和中国建筑科学研究院高小旺等人结合实际工程对狗骨式节点进行了试验研究,探讨了其在模拟地震荷载作用下的性能^[42]。试验结果表明,通过对节点附近梁上下翼缘进行合理的削弱可以增加节点的延性,同时对节点的刚度、强度影响很小,很好地改善了节点性能。并在试验研究和数值计算的基础上提出了一种狗骨式节点设计方法。2003年,北京交通大学谢晓栋等对钢结构翼缘削弱型节点进行参数分析^[43],并得出采用翼缘削弱的方法可以有效的降低柱表面翼缘的受力,同时使塑性铰最先在削弱截面处形成和发展,有效的避开了脆弱的翼缘焊缝区。同年,北京交通大学杨勇等人基于以往的研究成果提出了一种改进型节点—焊接孔扩大型狗骨节点,也是一种塑性铰外移的节点。利用有限元程序对其进行受力性能分析和抗震性能分析,结果表明:焊接孔扩大型狗骨节点兼有焊接孔扩大型节点和普通狗骨