



21世纪技术与工程著作系列·土木工程

Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame
Joints with Different Depth Beams

钢筋混凝土框架 变梁异型节点抗震

吴 涛 刘伯权 邢国华 著



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



钢筋混凝土框架变梁异型节点抗震

Seismic Behavior of Reinforced Concrete
Frame Joints with Different Depth Beams

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者近年来对钢筋混凝土变梁异型节点受力机理、抗震性能和设计方法研究工作及成果的总结,并对国内外相关研究做了介绍。

全书共六章,主要内容包括常规框架节点抗震研究、钢筋混凝土框架变梁异型节点试验研究、变梁异型节点分类标准与破坏机理研究、变梁异型节点非线性分析、变梁异型节点抗震设计方法及算例分析等专题。另外,对国内外混凝土节点抗震性能、混凝土构件抗剪的相关研究内容也做了较深入的阐述与分析。

本书可供结构工程专业的研究人员、教师、工程技术人员和大专院校的学生阅读,也可供相近专业的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土框架变梁异型节点抗震/吴涛,刘伯权,邢国华著. —北京:科学出版社,2010

(21世纪技术与工程著作系列·土木工程)

ISBN 978-7-03-028600-0

I. ①钢… II. ①吴…②刘…③邢… III. ①钢筋混凝土结构—框架结构—结点(结构)—抗震—研究 IV. ①TU375.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第158615号

责任编辑:任加林/责任校对:耿耘

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年9月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年9月第一次印刷 印张:11

印数:1-2 000 字数:205 000

定价:40.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

销售部电话 010-62140850 编辑部电话 010-62135517-8202

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

节点在框架中起着传递和分配内力，保证结构整体性的作用，是框架结构的重要部件之一。历次震害表明框架节点在地震作用下易发生多种类型破坏，且震后不易修复。国际上对地震区框架节点性能的研究已有近 60 年的历史，经过 20 世纪 70~80 年代系统的试验研究与理论分析，各主要国家依据各自传统建立了框架节点设计方法。我国在唐山地震后成立了框架节点专题研究组，系统地研究了框架节点的性能，并完成大量试验及理论分析工作，在此基础上建立了我国常规框架节点设计体系。20 世纪 90 年代以后，国际上常规框架节点研究趋势转向对已有试验数据进行统计分析，重新认识节点受力机理，提出新理论模型。我国由于经济高速发展，加之建设场地限制以及使用功能的需要，使得建筑平面布置和竖向体型日益复杂。在工业建筑方面，特别是冶金、电力、化工、矿山等的重载厂房，随着生产能力的不断扩大，为满足工艺需要，构件截面不断增加，而现阶段我国国情决定了在今后较长时期内结构体系仍主要采用钢筋混凝土材料建造，这就不可避免地产生许多非规则的钢筋混凝土框架节点，部分非规则节点则主要出现在我国，可以称之为具有中国特色的框架节点，如错层节点及本书研究的变梁异型节点等。我国 70% 以上大中型城市都属于抗震设防区，对该类具有中国特色的节点性能开展研究，建立合理的设计计算方法，对于保证含有该类节点结构整体的安全具有重要的现实意义和应用价值。

本书以常规节点研究成果为基础，考虑变梁截面异型节点受力特点，采用试验研究和理论分析相结合方法，系统全面地研究了变梁节点抗震性能、分类标准、破坏机理和设计计算方法，取得了一系列研究成果，建立了框架变梁异型节点理论模型，并提出了该类节点的设计方法。

感谢西安建筑科技大学白国良教授、朱佳宁博士和中国电力工程顾问集团西北电力设计院李红星博士在变梁变柱框架节点方面的基础性研究工作。感谢长安大学土木工程研究所研究生杨乐、姚显贵、张保亮、唐王龙、高爽、孙贤洋等，他们对本书个别章节进行了深入研究。本书引用了大量的参考文献，在此对本书所引用参考文献的作者表示谢意。

感谢国家自然科学基金“钢筋混凝土框架异型节点破坏机理及设计方法研究”（项目编号：50608004）及教育部高等学校博士点基金“钢筋混凝土框架异型节点破坏机理及设计方法研究”（项目编号：20060710004）对作者所进行的研究工作的资助。

全书共六章，具体分工如下：吴涛编写第 1、3、6 章，刘伯权编写第 2 章，邢国华编写第 4、5 章及附录。吴涛负责统稿。

钢筋混凝土框架节点研究涉及混凝土结构抗剪分析这一百年学术难题，吸引了一代又一代追求理论完善的结构工程师投身于节点受力机理研究，许多学者穷其一生积极探求，这都是我们学习的榜样；而远比常规节点复杂的异型节点，本书只是进行了积极探索。由于变梁节点问题的复杂性，限于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正，也欢迎广大读者就书中相关内容和资料进行交流。作者联系邮箱：wutao@chd.edu.cn。

作者

2010年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 框架节点受力特点与分类	1
1.1.1 框架节点受力特点	1
1.1.2 框架节点分类	2
1.1.3 框架节点震害	3
1.2 框架节点研究概况	6
1.2.1 常规节点研究	6
1.2.2 节点抗剪能力计算方法	7
1.2.3 变梁节点研究	8
1.3 本书的结构安排	10
参考文献	10
第 2 章 常规框架节点抗震研究	13
2.1 框架节点抗剪模型	13
2.1.1 斜压杆机理	13
2.1.2 桁架机构	14
2.1.3 约束机理	14
2.1.4 其他机理	15
2.2 节点抗剪强度影响因素	16
2.2.1 混凝土强度等级	17
2.2.2 节点几何尺寸	19
2.2.3 配筋率	19
2.2.4 轴压力	20
2.2.5 粘结性能	21
2.3 国外框架节点抗震设计方法	22
2.3.1 ACI-ASCE 352 建议设计方法	22
2.3.2 AIJ 建议设计方法	25
2.3.3 NZS3101 建议设计方法	28
参考文献	31
第 3 章 钢筋混凝土框架变梁异型节点试验研究	33
3.1 试验概况	33
3.1.1 试件模型的选取	33
3.1.2 试件设计与制作	33
3.1.3 加载装置及量测内容	35

3.2	试验方法	37
3.2.1	加载制度	37
3.2.2	加载程序	38
3.3	试验过程及破坏特点	38
3.3.1	初裂阶段	38
3.3.2	通裂阶段	39
3.3.3	极限阶段	39
3.3.4	破坏阶段	39
3.4	试验结果分析	43
3.4.1	滞回曲线	43
3.4.2	剪力-剪切变形骨架曲线	46
3.4.3	影响因素分析	47
3.4.4	特殊配筋构造措施	50
3.4.5	刚度退化	52
3.4.6	层间变形能力	53
3.4.7	节点耗能	55
	参考文献	57
第4章	变梁异型节点分类标准与破坏机理研究	58
4.1	变梁异型节点分类	58
4.1.1	常规节点受力特性	58
4.1.2	变梁节点受力特性	59
4.1.3	变梁节点分类标准	61
4.1.4	变梁节点特性对比	61
4.2	变梁异型节点破坏机理	62
4.2.1	常规节点破坏机理简述	62
4.2.2	变梁节点破坏机理分析	62
4.2.3	变梁节点破坏机理应用	62
	参考文献	69
第5章	变梁异型节点非线性分析	71
5.1	概述	71
5.2	改进斜压场理论	72
5.2.1	基本假定	73
5.2.2	MCFT理论简述	73
5.2.3	变梁节点计算模型	76
5.2.4	试验验证	79
5.2.5	常规节点抗剪计算	81
5.3	转角软化桁架模型	82
5.3.1	基本方程	82

5.3.2	RASTM 的计算过程	84
5.3.3	RASTM 的进一步研究	86
5.3.4	RASTM 对变梁节点进行抗剪分析	88
5.3.5	RASTM 计算结果	89
5.4	固角软化桁架模型	89
5.4.1	基本方程	89
5.4.2	FASTM 求解计算	92
5.4.3	FASTM 计算结果	92
5.4.4	各种计算结果对比分析	93
5.5	Attaalla 模型	96
5.5.1	引言	96
5.5.2	节点的剪切变形	97
5.5.3	$\tau - \gamma_u$ 关系的建立	105
5.5.4	节点受力行为	106
5.5.5	简化 Attaalla 模型	106
5.5.6	节点尺寸影响	107
5.5.7	Attaalla 模型在变梁节点中的应用	107
5.5.8	Attaalla 模型在常规节点中的应用	108
5.6	软化拉压杆模型	109
5.6.1	引言	109
5.6.2	软化拉压杆模型	109
5.6.3	模型简化	117
5.6.4	软化效应近似处理	117
5.6.5	拉压杆系数 K	117
5.6.6	软化拉压杆模型在变梁节点的应用	119
5.6.7	软化拉压杆模型在常规节点的应用	121
5.7	Pantazopoulou 模型	121
5.7.1	基本力学性能	122
5.7.2	求解过程	126
5.7.3	计算结果	129
	参考文献	131
第 6 章	变梁异型节点抗震设计方法及算例分析	136
6.1	现行规范设计方法	136
6.1.1	研究对象	136
6.1.2	节点核心区剪力计算	136
6.1.3	节点防止斜压破坏的控制条件	137
6.1.4	节点核心区抗剪强度	137
6.1.5	节点核心区构造要求	138
6.2	变梁异型节点设计方法	138

6.2.1	变梁节点研究对象	138
6.2.2	变梁节点剪力计算	138
6.2.3	变梁节点截面验算	139
6.2.4	变梁节点核心区抗剪强度	140
6.2.5	变梁节点核心区构造要求	141
6.3	变梁异型节点算例分析	141
6.3.1	建筑结构概况及配筋结果	141
6.3.2	核心区验算	142
6.3.3	建议截面设计方法	144
	参考文献	145
附录	国内外混凝土节点研究资料	146

Contents

PREFACE

1	INTRODUCTION	1
1.1	Force Characteristics and Classification of Frame Joints	1
1.1.1	Force Characteristics	1
1.1.2	Classification	2
1.1.3	Earthquake Hazards	3
1.2	Review of Existing Work	6
1.2.1	Frame Joint	6
1.2.2	Shear Strength Calculation	7
1.2.3	Interior Joint with Different Depth Beams	8
1.3	Outline of the Book	10
	References	10
2	SEISMIC BEHAVIOR OF BEAM-COLUMN JOINT	13
2.1	Failure Mechanism of Reinforced Concrete Joints	13
2.1.1	Strut Mechanism	13
2.1.2	Truss Mechanism	14
2.1.3	Confinement Mechanism	14
2.1.4	Others	15
2.2	Key Influence Parameters on Ultimate Joint Shear Behavior	16
2.2.1	Concrete Compressive Strength	17
2.2.2	Joint Panel Geometry	19
2.2.3	Confinement by Reinforcement	19
2.2.4	Column Axial Compression	20
2.2.5	Bond Demand	21
2.3	Design Methods of Joints Abroad	22
2.3.1	ACI-ASCE 352R Recommendations	22
2.3.2	AIJ Recommendations	25
2.3.3	NZS3101 Recommendations	28
	References	31
3	EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON BEHAVIOR OF RC JOINTS WITH DIFFERENT DEPTH BEAMS	33
3.1	Test Survey	33
3.1.1	Model Specimen Selection	33
3.1.2	Specimen Design	33

3.1.3	Test Setup and Instrumentation	35
3.2	Test Program	37
3.2.1	Loading Systems	37
3.2.2	Loading Procedure	37
3.3	Overall Behavior and Failure Pattern	38
3.3.1	First Crack Stage	38
3.3.2	Critical Crack Stage	39
3.3.3	Ultimate Stage	39
3.3.4	Failure Stage	39
3.4	Experimental Results Analysis	43
3.4.1	Load versus Displacement Hysteretic Curves	43
3.4.2	Joint Shear versus Shear Angle Skeleton Curves	46
3.4.3	Influence Factors	47
3.4.4	Special Reinforcement Arrangement and Details	50
3.4.5	Loss of Stiffness	52
3.4.6	Layer Deformation Capacity	53
3.4.7	Energy Dissipation	55
	References	57
4	CLASSIFICATION STANDARD AND FAILURE MECHANISM OF JOINT WITH DIFFERENT DEPTH BEAMS	58
4.1	Classification	58
4.1.1	Beam-Column Joint Characteristics	58
4.1.2	Characteristics of Interior Joint with Different Depth Beams	59
4.1.3	Classification Standard	61
4.1.4	Characteristics Comparison	61
4.2	Failure Mechanism	61
4.2.1	Beam-Column Joint Mechanism	62
4.2.2	Interior Joint with Different Depth Beams	62
4.2.3	Application	69
	References	69
5	NONLINEAR ANALYSIS	71
5.1	Introduction	71
5.2	Modified Compression Field Theory	72
5.2.1	Assumptions	73
5.2.2	Brief Introduction of MCFT	73
5.2.3	Analytical Model of Interior Joint with Different Depth Beams	76
5.2.4	Test Verification	79
5.2.5	Shear Strength Calculation of Ordinary Joints	81

5.3	Rotating Angle Softened Truss Model	82
5.3.1	Governing Equations	82
5.3.2	Solution Process	84
5.3.3	Further Analysis	86
5.3.4	Shear Analysis of Interior Joint with Different Depth Beams	88
5.3.5	Analysis Results	89
5.4	Fixed Angle Softened Truss Model	89
5.4.1	Governing Equations	89
5.4.2	Solution Process	92
5.4.3	Analysis Results	92
5.4.4	Calculation Results Comparison	93
5.5	Attaalla Model	96
5.5.1	Introduction	96
5.5.2	Shear Deformation of the Joint	97
5.5.3	Determination of $\theta - \gamma$ Relationship	105
5.5.4	Joint Shear Behavior	106
5.5.5	Simplified Design Model	106
5.5.6	Effects of Joint Geometry	107
5.5.7	Application in Interior Joint with Different Depth Beams	107
5.5.8	Application in Ordinary Joint	108
5.6	Softened Strut-and-Tie Model	109
5.6.1	Introduction	109
5.6.2	Softened Strut-and-Tie Model	109
5.6.3	Derivation of Simplified Equations	117
5.6.4	Approximation of Softening Effect	117
5.6.5	Strut-and-Tie Index K	117
5.6.6	Application in Interior Joint with Different Depth Beams	119
5.6.7	Application in Ordinary Joint	121
5.7	Pantazopoulou Model	121
5.7.1	Basic Mechanic of Reinforced Concrete Joints	122
5.7.2	Solution Process	126
5.7.3	Analysis Results	129
	References	131
6	DESIGN METHOD OF INTERIOR JOINT WITH DIFFERENT DEPTH BEAMS	136
6.1	Current Code Recommendations	136
6.1.1	Objects	136
6.1.2	Shear Force	136
6.1.3	Joint Core Zone Requirements	137
6.1.4	Shear Strength	137

6.1.5	Details	138
6.2	Interior Joint with Different Depth Beams Design Recommendations	138
6.2.1	Objects	138
6.2.2	Shear Force	138
6.2.3	Joint Core Zone Requirements	139
6.2.4	Shear Strength	141
6.2.5	Details	141
6.3	Calculation Example Analysis	141
6.3.1	Building Survey and Reinforcement Results	141
6.3.2	Seismic Check for the Core Zone	142
6.3.3	Design Recommendations	144
	References	145
APPENDIX	146

第 1 章 绪 论

1.1 框架节点受力特点与分类

1.1.1 框架节点受力特点

节点 (joints) 主要指框架梁与框架柱相交的节点核心区域以及临近核心区的梁端和柱端。节点在框架中起着传递和分配内力、保证结构整体性的作用,是框架结构的一个重要部件。

框架受力后,节点主要受到柱子传来的轴向力、剪力和弯矩,梁传来的剪力和弯矩。若梁柱轴线存在偏心,则会使节点承受扭矩。此外,混凝土收缩、徐变、温度变化以及工程中地基沉降等作用,都会在节点中产生内力和变形。

当框架在竖向荷载,如恒载、活载和雪荷载的作用下,中间层中节点受力如图 1.1 (a) 所示。可见,在竖向荷载作用下节点两侧梁端都承受负弯矩;柱子主要承受轴向力,接近轴心受压,柱端弯矩则较小。由于节点两侧梁上部钢筋都受拉,梁筋传入节点核心区的水平剪力较小。非地震区建造的框架节点或在地震区但不是承重框架中的节点均属于这种受力类型,这种节点主要承受竖向荷载,而不承受较大反复作用的水平荷载,该类节点主要满足强度上的要求即可。

当框架在水平地震作用下,中间层中节点受力如图 1.1 (b) 所示。在水平荷载作用下,节点两侧的梁端弯矩一正一负,使得贯穿节点核心区的梁筋一侧受拉、另一侧受压,此时梁筋传入节点的水平剪力远比竖向荷载作用下大得多。水平地震作用下,框架节点发生较大变形时,核心区仍能维持传递压力、剪力和弯

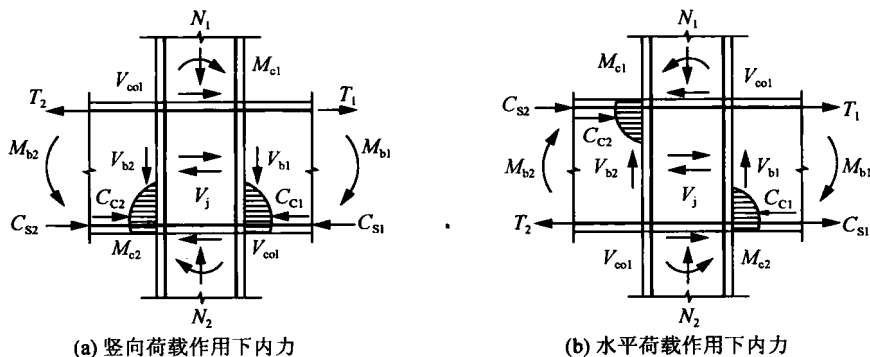


图 1.1 节点受力图

矩，这就要求研究纵筋屈服后节点的强度、刚度以及粘结退化等问题，从而保证结构整体的安全，这是国际上节点性能研究主要的研究对象。

1.1.2 框架节点分类

1. 常规节点分类

节点包括邻近核心区的梁端和柱端，各种内力是通过梁端和柱端传到节点核心的。梁柱的截面尺寸和梁端及柱端的配筋构造对节点核心的受力性能有直接影响^[1]，而节点核心区的构造也影响到邻近的梁端和柱端的强度、刚度和锚固性能，因此试验研究和设计时应统一考虑这个范围（即梁、柱组合体）的情况。对于一个平面框架，有各种基本形式的节点，如图 1.2 所示。即顶层边柱节点（┌型）；顶层中柱节点（┐型）；中间层边柱节点（└型）；中间层中柱节点（+型）。

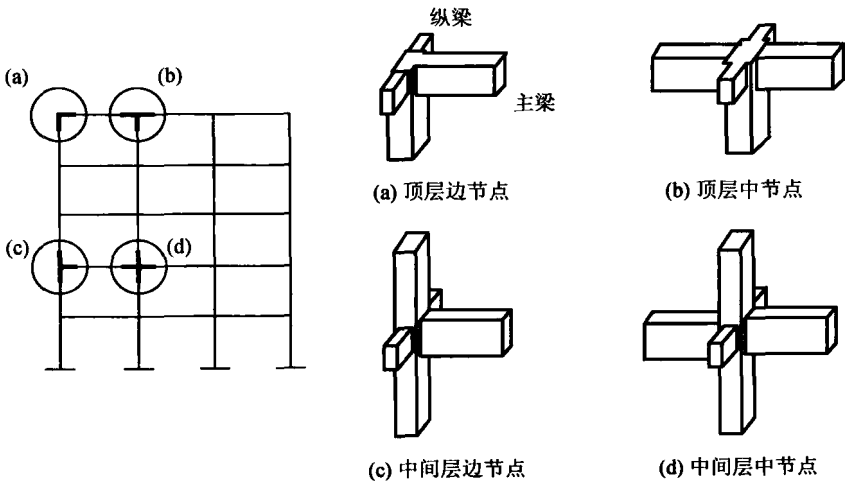


图 1.2 框架节点类型

实际工程中，框架结构都是空间框架，所以节点核心周边还有纵向直交梁，民用建筑中节点上还有现浇板，这样组合起来就有 10 种不同类型的节点。由于节点处梁柱布置形式及数量的不同，节点受力状况也不一样。例如，顶层┌型边节点是一个拐角节点，受荷后，节点受到张开或闭合的弯矩，特别是在张开弯矩作用下，节点区钢筋锚固性能是重要问题。顶层中节点，梁筋可以直通锚固，在水平荷载作用下，柱子的抗弯能力要比梁的抗弯能力弱，因此柱端容易出现塑性铰。

2. 非规则节点分类

随着经济的发展，因建设场地的限制、使用功能的需要，建筑的平面布置和竖向体型日益复杂，这就不可避免地产生了许多非规则钢筋混凝土框架节点，这里统称为框架异型节点。广义的框架异型节点包含的类型众多，从构成梁柱组合

体各构件的截面变化及相互组合方式上,介绍几类典型的框架异型节点。

1) 梁柱偏心节点

实际工程中,由于建筑立面的需要或者使用功能的要求,梁与柱的轴线往往不能重合,即形成梁柱偏心节点。与梁柱对中节点相比,偏心节点在节点核心区除了受到梁柱传来的弯矩、剪力和轴力作用,还要承受偏心引起的扭矩作用^[2~6]。研究表明,偏心节点的传力途径和受力机理较为复杂,承载能力和变形能力均比常规节点有所下降。

2) 宽扁梁柱节点

宽扁梁柱节点是指扁梁宽度大于柱宽的节点,由于它具有可以有效降低层高、避免管道穿梁、方便施工及降低工程造价等优点,在高层建筑中得到广泛应用。宽扁梁在结构设计中较易实现“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”的抗震设计理念^[7~11]。若设计和构造措施得当,能够改善框架节点的延性,增加节点区在地震作用下的变形能力。

3) 梁柱截面变化节点

随着国民经济快速增长,建筑向大型、大跨方向发展,出现了许多复杂体型的结构。在工业建筑和民用建筑中存在大量非常规节点,如大型火力发电厂结构的煤仓间框架节点、高层建筑结构转换梁处框架节点、四柱布置走廊框架节点等,这些非常规节点的特点在于节点核心处两侧梁截面和上下柱截面变化较大,如图 1.3 所示。其受力特征明显不同于常规节点,与常规框架节点相比,由于减少了对核心区的约束^[12,13],该类节点的承载能力和变形性能均有所下降。

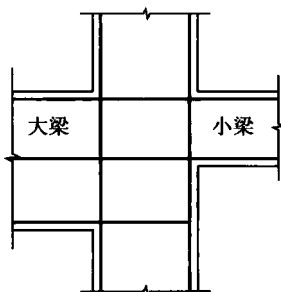


图 1.3 变梁异型节点

4) 错层节点

随着经济发展水平的提高,人们对住宅的功能要求、审美要求越来越高,设计者为了满足这种需求,推出了功能更加合理和空间层次更加丰富的变维框架结构体系。变维框架结构体系由于在竖向空间上根据使用要求实现了灵活变化,造成楼面大多不在同一水平面,从而在梁柱接头部位形成错层节点^[14~16]。从受力的角度看,与常规框架节点不同在于,错层节点在正向与反向荷载作用下,节点区的传力机构具有明显的差异,且错层高度对节点受力性能的影响显著。

1.1.3 框架节点震害

1. 节点震害

国内外多次地震经验表明^[17],钢筋混凝土框架结构具有较好的抗震性能。20世纪50年代以前,因框架层数不多,梁柱截面尺寸均较大,节点的体积也较大,加之梁柱构件强度低、延性好等原因,框架节点震害的例子较少。因此,以前对节点区的抗剪设计和构造要求很少注意,只将梁柱受力钢筋贯穿节点,在节

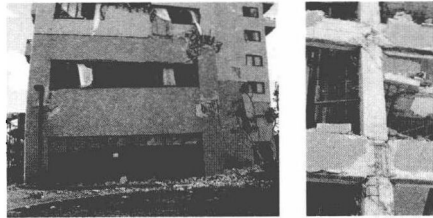
点核心区很少配箍筋，甚至为减少施工困难不配箍筋。

随着设计理论完善和建筑材料发展，大约自 20 世纪 60 年代以来，钢筋混凝土高层建筑发展很快，广泛使用了高强度等级的混凝土和大直径的高强变形钢筋，结构材料强度显著提高，构件尺寸明显减少，因而节点区截面尺寸也相应减少。另外，对梁、柱构件性能的大量研究，改善了构件的强度和延性。这样，框架结构的薄弱环节就转移到节点区域^[18]。

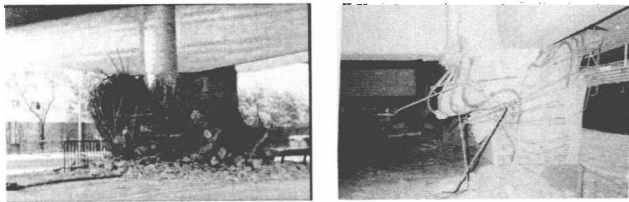
在 1974 年阿拉斯加地震、1967 年委内瑞拉地震、1968 年日本十胜冲地震、1985 年墨西哥地震以及 1994 年洛杉矶地震中都观察到节点严重损伤甚至破坏的实例。

1976 年 7 月 28 日凌晨 3 时 42 分，我国唐山发生 7.8 级强烈地震。这次地震破坏性极大，现浇框架震害多发生在柱子和节点区，节点区多发生剪切破坏。主要原因在于节点核心区箍筋太少，或者未放箍筋。

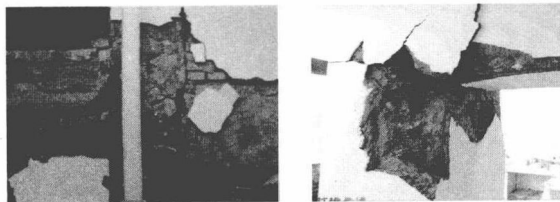
2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分，我国汶川发生 8.0 级特大地震。由于钢筋混凝土结构是常见的结构形式，其中框架结构和底框架结构尤为多见，在本次地震中，震区部分框架结构遭到严重破坏。框架震害主要发生在柱端和节点核心区^[19]，主要破坏形态为：柱端水平裂缝、柱端和节点的斜裂缝或交叉裂缝，震害严重者发生断裂、错位、混凝土崩落或钢筋压弯。部分框架节点破坏情况如图 1.4 所示。



(a) 美国地震节点典型破坏



(b) 日本地震节点典型破坏



(c) 中国（汶川）地震节点典型破坏

图 1.4 典型节点破坏图