

柱梁接合部の被害と研究 Damage to Reinforced Concrete Beam-Column Joint and Its Studies

北山 和宏¹⁾
KITAYAMA Kazuhiro

1)首都大学東京, 教授, 工学博士 (東京都八王子市南大沢 1-1, kitak@tmu.ac.jp)
Tokyo Metropolitan University, Professor, Doctor of Engineering

要 約

兵庫県南部地震は、鉄筋コンクリート (RC) 建物における柱梁接合部の多数の被害が国内で初めて報告された地震であった。その当時柱梁接合部の破壊は、過大な入力せん断力によってコアコンクリート内の斜め圧縮ストラットが圧壊して生じるせん断破壊と考えられた。しかしそれでは説明できない被災事例が散見された。その後、柱梁接合部の曲げモーメント抵抗機構の劣化によって接合部破壊が生じるという理論が提唱され、それによって多くの実験結果や被災事例を合理的に説明できることが明らかになった。本報では 1995 年から現在に至る柱梁接合部研究の潮流を概観し、柱梁接合部の破壊が RC 建物の耐震性能に与える影響について未解明の事象を含めて解説する。

キーワード： 柱梁接合部、せん断破壊、曲げ破壊、地震被害、実験、耐震性能

Keyword: Beam-Column Joint, Shear Failure, Flexural Failure, Damage by Earthquake, Test, Seismic Performance

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 建物における柱と梁との交差部分 (以下、柱梁接合部) の破壊は、図 1(a)のようにコンクリート内に形成される斜め圧縮ストラットが過大な入力せん断力によって圧壊して生じるせん断破壊であると従来は考えられた。柱梁接合部内の主筋に沿った付着は繰り返し载荷によって早期に劣化して、接合部内に形成されたトラス機構 (図 1(b)) は消失する。このため横補強筋は柱梁接合部のせん断終局耐力にほとんど寄与しないと説明された。これに基づいて本会の終局強度型設計指針¹⁾では、柱梁接合部への入力せん断力を制限することによって接合部の破壊を防止できるとした。

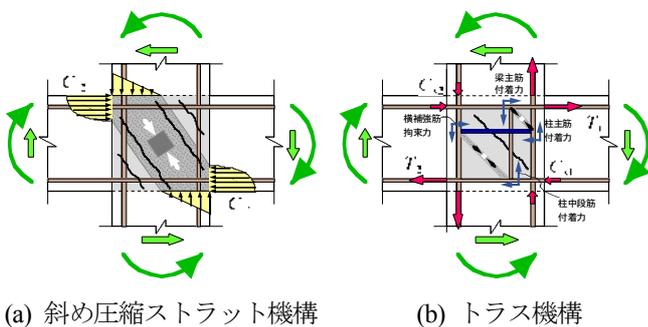


図 1 柱梁接合部内のせん断抵抗機構

しかしこの通説に対する疑義が提示された。柱梁部材の寸法や配筋によっては柱梁接合部の曲げモーメント抵抗機構が劣化してその破壊が先行し、柱梁部材に要求される曲げ耐力を発揮できないことが、理論と実験とによって示されたのである²⁻⁶⁾。

以上が本論の骨子である。RC 柱梁接合部の地震時挙動の解明や耐震性能評価手法の開発は、兵庫県南部地震 (1995 年) 以降の二十年のあいだに大きく進展した。これには周知のように塩原等・東京大学教授による当該研究の牽引が大きく寄与したが、それとともに多くの研究者や構造設計者による調査・検討や意見表明等も見過ごすことはできないであろう。

本論ではこの二十年における RC 柱梁接合部の破壊に関する研究の発展状況を概観し、現在の到達点を示す。それともなつて浮上した新たな課題や、本会から今後出版を予定している規準・指針類への最新の研究成果の反映について述べる。なお 2000 年 1 月に本会関東支部が開催したシンポジウムにおいて柱梁接合部に関する同様の課題が議論され、その当時の知見の到達点と解決すべき課題とが提示された⁷⁾ので適宜参照されたい。

2. 兵庫県南部地震による RC 柱梁接合部の被害の概要

本会ほか⁸⁾が 1997 年に編纂した阪神・淡路大震災調査報告⁸⁾では柱梁接合部の被害として、せん断ひび割れ、コンクリートの剥落、隅柱の接合部破壊、および中高層壁式ラーメン構造の柱梁接合部の四項目について事例が紹介された。

このように日本において従来はほとんど見られなかった柱梁接合部の損傷が兵庫県南部地震ではかなり観察された。損傷例を写真^{1,9,10)}に示す。そこで広沢雅也・工学院大学教授 [当時] を中心としてこの問題に対する調査検討が本会内で実施された。ここでは 1998 年に発刊されたその報告書⁹⁾を基にして、兵庫県南部地震での柱梁接合部の被害状況および分析の概要を以下に記す。

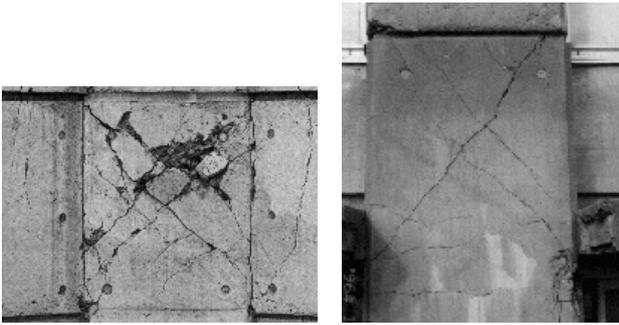


写真1 兵庫県南部地震による柱梁接合部の被害例
(左：文献¹⁰⁾、右：文献⁹⁾)

被害が報告された建物は 48 棟でそのほとんどは気象庁震度階 7 の地域に建つ。それらの建物の桁行方向は純フレーム構造に近かった。建設時期は不明な 8 棟を除いて 26 棟が 1980 年以降の建設であった。建物の被災区分は倒壊 13 棟、大破 17 棟および中破 18 棟であったが、この判定は柱梁接合部の損傷によって為されたものではない。柱梁接合部の損傷度は判定のある 18 棟のうち V が 1 棟、IV が 3 棟、III が 4 棟、II および I が各 5 棟であった。被害の特徴として、柱芯と梁芯とが偏心した柱梁接合部の損傷が多く見られたこと、短辺方向が 1~2 スパンの外柱梁接合部の損傷が顕著であったこと、などが挙げられた。

さらに詳細な検討を行なった 9 棟の建物の結果から以下が指摘された。

- a) 複数の階において多数の内柱梁接合部（1 スパン建物では外柱梁接合部）が一樣に顕著な損傷を受け、柱梁接合部の損傷が最も著しい被害となった建物が多い。
- b) 柱梁接合部の損傷は比較的小さな変形下で生じたものと、梁降伏あるいは柱降伏の発生後の層間変形角 2% 以上の大変形下で生じたものに分類できる。
- c) 柱梁接合部のせん断余裕度（梁・柱降伏時の接合部入力せん断力に対する柱梁接合部のせん断終局耐力の比）が 1.5 以上と大きいにもかかわらず、損傷度 III から V の被害を受けた接合部が多い。偏心接合部ではねじれによるせん断終局耐力の低下を考慮する必要がある。

3. その後の規準・指針類の整備状況と研究の進展

3.1 その後の規準・指針類の整備状況

兵庫県南部地震後の 1997 年に本会から刊行された靱性保証型設計指針¹¹⁾では、柱梁接合部に関する記述は終局強度型設計指針¹⁾から大幅に改訂されて進化した。すなわちその当時の最新の研究成果に基づき、柱梁接合部のせん断終局耐力の評価式、通し主筋の付着強度、折り曲げ主筋の定着強度などが示されるとともに、梁降伏後の接合部せん断破壊を防止することが設計目標に追加された。また内柱梁接合部を通し配筋される梁主筋の危険断面からの抜け出し量の評価法や、柱梁接合部のせん断

応力度とせん断変形角との関係における骨格曲線の評価手法なども例示された。

この成果をもとにして本会の RC 規準では 1999 年の改定¹²⁾によって、短期荷重に対する柱梁接合部のせん断応力の検定、内柱梁接合部を通し配筋される梁・柱主筋の付着の検定および柱梁接合部内のせん断補強筋の最小配筋量の規定等が新たに追加された。この基本的な考え方は 2010 年の改定¹³⁾においても踏襲された。

性能評価型設計法への移行の気運が二十世紀末に高まったことを受けて、本会では 2004 年に耐震性能評価指針（案）¹⁴⁾を刊行した。ここでは柱梁接合部のせん断力に対する復元力特性の骨格曲線の評価手法や各種限界状態の評価法が示された。柱梁接合部の斜めひび割れの幅、経験したせん断変形角の大きさ、あるいはコンクリートの剥落・圧壊などの損傷状況と耐震性能との関係を論じた点が特筆されよう。

しかしながら上記は全て、柱梁接合部はせん断破壊するという前提で記載されており、塩原^{2~4)}の提起した柱梁接合部の曲げモーメント抵抗機構の破壊（このような破壊を本論では便宜的に柱梁接合部の曲げ降伏破壊と記す）については未だ対応するに至っていない。

3.2 せん断破壊への疑い

十字形やト形の柱梁部分架構試験体を用いた実験によって、梁降伏後の繰り返し載荷や変形の増大にともない柱梁接合部が破壊する現象は広く知られている。この原因として、柱や梁において主筋降伏後にせん断破壊が生じると同様に、X 形に交差する斜めひび割れの幅や、それにとまなうコンクリート圧縮強度の低減があげられ、これらによって主筋降伏後に柱梁接合部がせん断破壊すると解釈された。

このような主筋降伏後の接合部せん断破壊を予測するために、接合部のせん断余裕度（本会指針等によって計算される柱梁接合部のせん断終局耐力を、梁あるいは柱が曲げ降伏するときの接合部入力せん断力で除した比）を用いた実験結果の分類が行われた。しかし柱梁接合部のせん断余裕度によって接合部の先行破壊はおおむね判別できるものの、主筋降伏後の接合部破壊や梁曲げ破壊を判別することは困難であることが、十字形柱梁部分架構実験の結果を統計的に分析した研究¹⁵⁾から読み取ることができる。

また梁降伏後の接合部せん断破壊では、柱梁部材のせん断破壊で見られるような耐力の急激な低下をとまなわないことが指摘された^{例えは¹⁶⁾}。さらに上述のように兵庫県南部地震での被害例において、柱梁接合部のせん断余裕度が 1.5 以上と大きくても、激しい損傷を生じた柱梁接合部が多数観察された。柱梁接合部のせん断破壊に関するこのような調査・研究の状況下で、藤井栄は「いずれにせよ“接合部のせん断破壊”が何によって定まっているかは未だ明確でない。」と 1999 年に記述した¹⁷⁾。

その後、兵庫県南部地震によって梁降伏が生じると

もに柱梁接合部が激しく損傷した RC 建物の挙動を検証するため、実大の柱梁部分架構試験体を用いた実験研究が石田・藤井ら¹⁸⁾によって行われた。その結果、柱梁接合部のせん断余裕度を 1 から 1.4 程度とした試験体は全て梁降伏後の繰り返し载荷によって耐力が低下し、柱梁接合部が破壊した。また、梁が偏心して柱に取り付く偏心接合部のせん断終局耐力は靱性保証指針による計算値にねじれによる低減係数（本会「阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計」⁹⁾による）を考慮しても十分に評価できなかったことを指摘した。このことは現在（2015 年 7 月）の知見から判断すると、柱梁接合部の曲げ降伏破壊が生じたと解釈できる可能性がある。

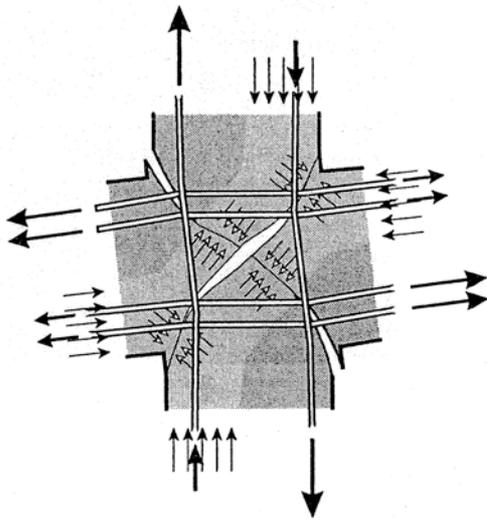


図 2 楠原・塩原¹⁹⁾による柱梁接合部の変形モデル

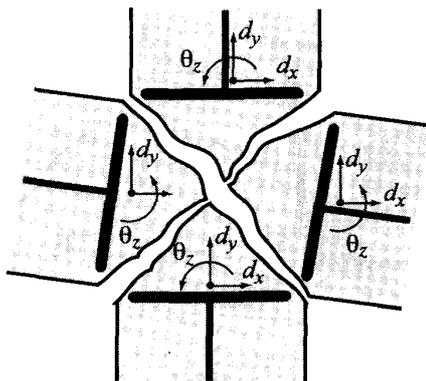


図 3 塩原²⁾による柱梁接合部の 9 自由度モデル

こうしたなかで、柱梁接合部は本当にせん断破壊するのかという根本的な疑問が提示されるに至る。1997 年に発表された楠原・塩原の研究¹⁹⁾がそれである。ここでは十字形柱梁部分架構の実験より、柱梁接合部が破壊したときに柱梁部分架構の層せん断力は低下するが接合部せん断力は低下しなかったことを報告した。また、接合部

内の梁主筋の付着劣化によって危険断面での圧縮鉄筋が引張りへと転化し、それにとまってコンクリートの圧縮領域が拡大して圧縮合力位置が梁中心に移動した結果、梁断面の応力中心間距離が減少して層せん断力が低下したとする見解を示した。この研究¹⁹⁾には柱梁接合部の変形機構として、接合部に生じた X 形の斜めひび割れによって分割された四つの部分が剛体として回転するというモデル（図 2）が提案されており、その後に発表される 9 自由度モデル²⁾（図 3）の萌芽が既にあらわれている。

さらに岸川・塩原²⁰⁾は翌 1998 年に、柱梁接合部の破壊は従来提起されたような斜め圧縮ストラットのコンクリートが圧壊することによって生じるせん断破壊ではなく、曲げモーメントに対する抵抗機構の劣化によって生じるものであることを初めて明確に指摘した。自身の研究¹⁹⁾をさらに発展させて、柱梁接合部の終局時の抵抗モーメントを推定するためのマクロ・モデルをあわせて提案した。

その一方で、柱・梁主筋が降伏することなく柱梁接合部のコンクリートが圧壊して破壊する現象（すなわち、従来の接合部せん断破壊）についての研究も継続的に行われてきた。例えば森田・北山ら²¹⁾は、十字形柱梁部分架構実験において接合部内の梁主筋あるいは柱主筋に沿った付着力が低下することによって接合部水平せん断力あるいは鉛直せん断力が低下し、柱梁部分架構の層せん断力が低下するに至ったことを報告した。この実験では柱梁接合部内の斜め圧縮ストラットに沿ってコンクリートが圧壊した（写真 2 参照）。柱主筋は降伏せず、梁主筋の一部が降伏するに留まったため、柱梁接合部はせん断破壊したと判断した。

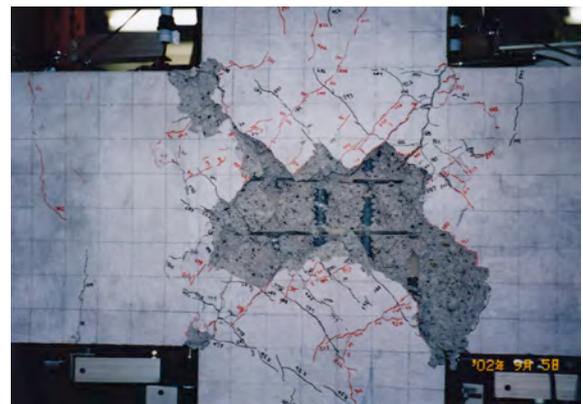


写真 2 柱梁接合部のせん断破壊（首都大学東京²¹⁾）

3.3 新たな破壊機構の提案 ～パラダイムの転換～

柱梁接合部のせん断破壊に対する疑念から塩原によって進められた研究は 21 世紀冒頭（2001 年）に一応の到達点に至った。その研究²²⁾では、図 4 のように柱梁接合部内の四分割された剛体がそれぞれ回転して破壊するモ

ードと、従来の梁曲げ降伏によって破壊に至るモードとを明確に区別した。図4(a)の四分分割モデルでは、接合部内の主対角に沿って開口する斜めひび割れだけでなく、入り隅部から接合部中央に向かって斜めに伸びるひび割れの開口も想定した。

また柱梁接合部を四分分割したモデルにおいて、斜めの危険断面を横切る鉄筋（梁・柱主筋および接合部横補強筋）に生じる力とコンクリートの圧縮力との釣り合いを用いて（図5）、数値計算によって接合部破壊時の層せん断力を得られることを示した。

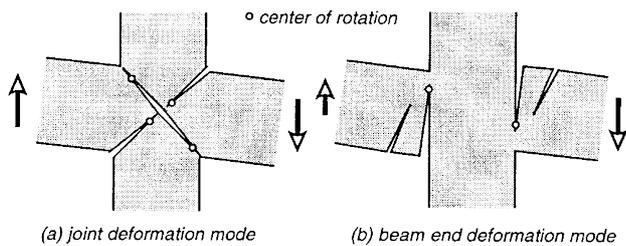


図4 柱梁接合部を含む部分架構の変形モード（塩原²²⁾

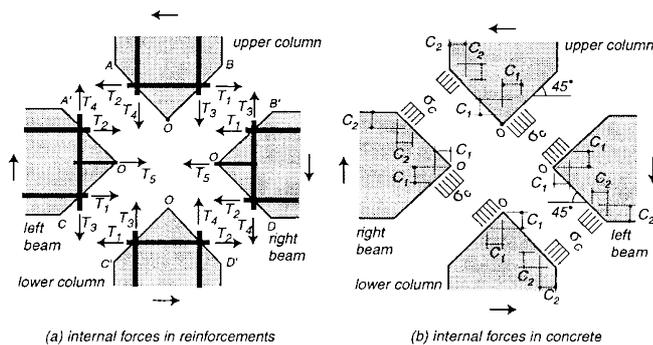


図5 四分分割された剛体の鉄筋およびコンクリートに作用する力の分布（塩原²²⁾

塩原らによるこうした一連の研究はさらに発展して、2008年から2009年にかけて「鉄筋コンクリート柱梁接合部」と題した三部作²⁻⁴⁾が塩原によって発表された。ここに至って、柱梁接合部の曲げ降伏破壊は学会内外にも広く知られるようになった。すなわち、柱・梁の主筋が降伏した後に柱梁接合部が破壊するのは曲げモーメント抵抗機構の喪失によるものであり、従来言われたようなせん断破壊ではない。柱・梁の主筋量が增大すると接合部内のコンクリートの圧壊が柱・梁主筋の降伏よりも先行し、接合部が破壊する（これが従来のせん断破壊に該当する）が、これは上述の四分分割モデルを用いて連続的に説明できる。

また塩原は提案した曲げ抵抗機構のマクロ・モデルから、以下を理論的に示した⁴⁾。

a) 梁曲げ終局耐力に対する柱曲げ終局耐力の比（柱梁曲

げ耐力比）が大きいほど柱梁接合部の破壊は生じにくくなり、梁の曲げ耐力が確実に発揮される。

b) 逆に柱梁曲げ耐力比が1程度と小さいと、梁の主筋量が少ない場合でも柱梁接合部の破壊が先行して、梁の曲げ耐力を発揮できない。

柱梁接合部の曲げ降伏破壊に対する柱梁曲げ耐力比の影響についてこの研究⁴⁾で具体的に言及されたことが、構造設計の現場には大きな衝撃を与えた。RC規準^{12,13)}や靱性保証型設計指針¹¹⁾等によって耐震設計された柱梁接合部では従来のせん断破壊は防止できるが、新たに提案された曲げ降伏破壊については検討が為されておらず、場合によっては柱梁接合部の曲げ降伏破壊によって建物の保有水平耐力が決定される事態が生じるからである。

柱梁接合部の曲げ降伏破壊に対する塩原の理論は当初、実験による検証例が少なかったことから、その後東京大学塩原研究室によって十字形、ト形およびL形のRC柱梁部分架構試験体による静的載荷実験が精力的に行われた^{例えは5,6,23)}。それらの実験結果はいずれも塩原による接合部破壊理論の妥当性を裏付けるものであった。

しかしそれらの実験では柱および梁断面サイズが同一で、かつ柱軸力を載荷しない試験体が多かった。そこで通常のRC骨組に見られるように梁幅よりも柱幅のほうが大きく、柱に軸力が作用する条件下で柱梁部分架構実験が幾つか実施された。例えば石木・北山ら²⁴⁾による研究では、柱梁曲げ耐力比が1.4から1.8の十字形柱梁部分架構実験において、接合部せん断余裕度が1.7程度と大きいにもかかわらず、梁および柱の主筋が降伏したあとに柱梁接合部が破壊した（写真3参照）。この結果は塩原の提唱する曲げ降伏破壊機構とおおむね一致することを指摘した。



写真3 柱梁接合部の曲げ降伏破壊（柱梁曲げ耐力比1.4、首都大学東京²⁴⁾）

柱梁接合部の破壊に対する塩原の理論はこのように実現象を妥当に評価できることが明らかとなった。柱梁接合部の曲げ降伏破壊時の終局耐力を陽なかたちで評価するための定式化が引き続き楠原・塩原^{25,26)}によって提案

された。そこでは、柱梁接合部の曲げ終局耐力が次の二つの成分の和として計算できることが示された；a) 梁主筋および接合部横補強筋の応力（すなわち、水平方向の鉄筋の応力）と梁軸力とによって負担されるモーメント、およびb) 柱主筋および柱中段筋の応力（すなわち、鉛直方向の鉄筋の応力）と柱軸力とによって負担されるモーメント、の二成分である。これに柱および梁のせん断力の影響が適宜考慮される。

なお、塩原の理論に触発されて、柱梁接合部の破壊機構の検討や終局耐力算定のためのモデルの提案等が他の研究者によってなされていること（例えば^{27,28}）を付記する。

4. 新たな課題と規準・指針類への反映

4.1 新たな課題

上述のように柱梁接合部の新しい破壊機構に対する理解は深化し、それにもなって研究者や構造設計者への周知は進みつつある。しかしながら柱梁接合部の曲げ降伏破壊に関する研究は途上であり、解決すべき課題が新たに浮上した。以下にそれらを列記して説明する。

4.1.1 柱梁骨組の復元力履歴ループの形状（エネルギー吸収性能）

柱梁接合部の従来の設計法^{11~13})では柱梁接合部内を通し配筋される主筋の付着性能をある程度保持することによって、架構の復元力履歴形状における極端なピンチ化を防止するように定めている。具体的には、柱梁接合部内の主筋に沿った付着強度に対する存在し得る最大付着応力度の比（付着指標）を1以下にする。また、この付着指標を小さくすることによって、等価粘性減衰定数（ここでは、復元力履歴ループの囲む面積の大小を表現する指標として利用）は大きくなること筆者の研究²⁹)で示された。

その後の新しい破壊機構の提案にもない、柱梁接合部が曲げ降伏破壊するときには接合部の斜めひび割れの開閉によって履歴ループのピンチ化が生じる(図6参照)ため、上述の付着指標の制限だけでは良好な履歴形状を確保するための条件にならないことが楠原ら³⁰)によって指摘された。この研究³⁰)では、エネルギー吸収能に富んだ紡錘形の履歴形状を賦与するための条件として、

- a) 梁曲げ耐力に対する柱梁接合部の曲げ終局モーメント²⁵)の比（接合部耐力比）、
- b) 接合部内を通し配筋される主筋の付着性状、および
- c) 柱軸力

の組み合わせを指摘したが、その詳細についてはさらに研究が必要であると記述された。

柱梁接合部の曲げ降伏破壊を生じないような骨組では、上述の付着指標の制限によってある程度のエネルギー吸収性能を確保できる。しかし柱梁曲げ耐力比が1に近く、接合部の曲げ降伏破壊が生じる骨組については今後さらなる研究が必要である。

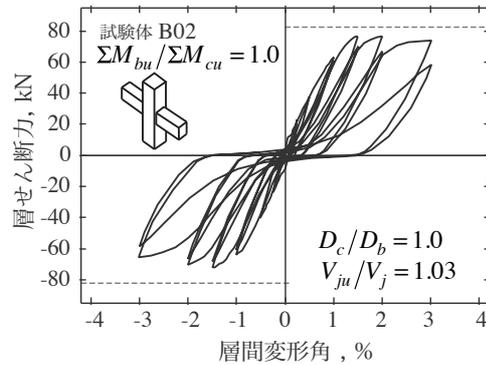
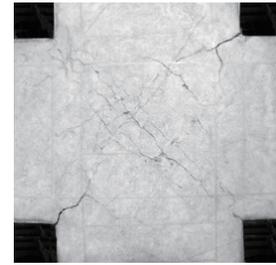


図6 柱梁接合部の曲げ降伏破壊と十字形部分架構の復元力特性⁵⁾

4.1.2 柱梁接合部の曲げ降伏破壊を生じる骨組の復元力履歴モデル

鉄筋コンクリート(RC)骨組の静的漸増載荷解析や地震応答解析を実施する際に、柱梁接合部は剛と仮定されることが多い。あるいは柱梁接合部の変形を一自由度のせん断変形と見なして、せん断応力度とせん断変形角との関係を設定することも適宜行われる(例えば³¹)。しかし柱および梁の断面寸法や配筋によっては、それでは不十分であることが塩原らの一連の研究によって示された。そこで、柱梁接合部の曲げ降伏破壊を再現できるマクロエレメント・モデルが田尻・塩原ら³²)によって提案され、その妥当性も検証されている³³)。

しかし構造設計の現場においてこのマクロエレメント・モデルを用いて構造解析することは煩雑であり実用的ではない。そこで柱・梁部材との応力の連続性と変形の適合条件とを満足しつつ、柱梁接合部における曲げモーメントと変形との関係を表現できる復元力特性モデルを構築することが必要になる。そのような復元力特性の具体例として楠原³⁴)は図7のように、柱梁接合部の斜めひび割れ発生点、接合部内主筋の降伏点および最大耐力点を結ぶ折れ線によるモデルを提示した。ただし柱梁接合部が曲げ降伏破壊する終局時の変形の定量評価は今後の課題である。立体骨組を対象として、水平二方向加力時の柱梁接合部のモデル化も必要である。

柱梁接合部は梁および柱部材の交点であるので、実務設計においてそれらの部材の諸元が与えられれば、接合部破壊や梁端部の曲げ破壊などの破壊モードが自動的に

判別されるとともに、その結果に基づいて変形を妥当な部位に集中させる必要がある。それらを可能とするモデルの開発が今後は求められる。

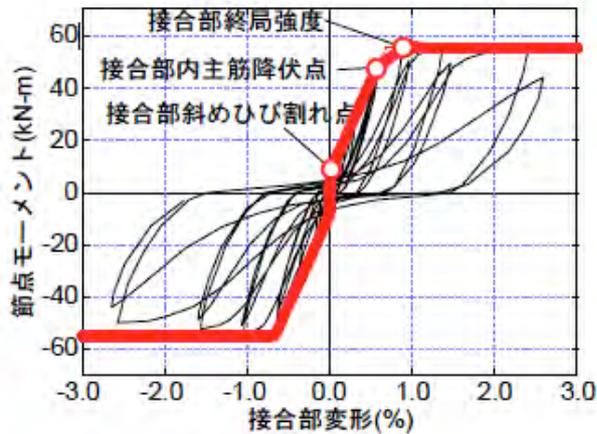


図7 柱梁接合部の復元力特性とモデル化の例(楠原³⁴⁾)

4.1.3 柱梁接合部の曲げ降伏破壊を生じる骨組の地震時挙動

柱梁接合部の曲げ降伏破壊を生じる骨組の地震時挙動や保有水平耐力に対する検討はほとんどなされていない^{33,35)}。楠原・金ら³³⁾は柱梁接合部の曲げ降伏破壊を再現できるマクロエレメント³²⁾を用いてRC骨組の非線形地震応答解析を行い、接合部降伏がある層の上下で同時に生じて損傷が集中すると(図8)、柱頭および柱脚で曲げ降伏が生じると同様に骨組が不安定になって層崩壊が引き起こされやすいことを指摘した。また柱梁接合部の曲げ降伏破壊を考慮した解析による応答層間変形は、柱梁接合部の塑性化を考慮しない従来の解析による応答値よりも二割程度過大になったことを報告した。

このように柱梁接合部の曲げ降伏破壊が層の上下で発生すると、従来推奨された梁曲げ降伏による全体崩壊形が形成される場合と比較して応答変位が増大したり、保有水平耐力が減少する可能性が高い。この課題は建物の構造設計において、柱梁接合部の曲げ降伏破壊を許容することの適否や、それを許容するときの判断基準等に直接結びつく事象である。RC建物の耐震安全性を確保する観点から、柱梁接合部が曲げ降伏破壊するときの骨組の地震時挙動を詳細に解明することが必要である。

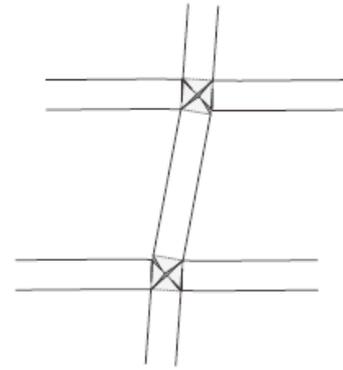


図8 柱梁接合部の曲げ降伏破壊による骨組の変形(楠原ほか³³⁾)

4.1.4 二方向水平力を受ける柱梁接合部の地震時挙動

梁や柱部材の曲げ破壊あるいは柱梁接合部のせん断破壊を調査対象として、立体柱梁部分架構試験体(スラブ付きを含む)に二方向水平力および柱軸力を載荷する実験は過去に多数行われている。しかし二方向水平力を受ける柱梁接合部を対象として、その曲げ降伏破壊の観点から実験結果を整理して現象の説明を試みた研究は多くはない(例えば^{36~39)}。

スラブのない立体隅柱梁部分架構試験体に一定圧縮軸力を与え、二方向水平力を載荷した実験研究³⁹⁾では、柱および梁主筋の降伏が発生したあと、写真4のように柱梁接合部内のコンクリートが圧壊して柱主筋が座屈するなど柱梁接合部が激しく破壊した。二方向水平力を受ける隅柱梁接合部の曲げ終局耐力は、楠原・塩原²⁶⁾によるT形接合部の曲げ終局耐力計算値を楕円補間することによって妥当に評価できたことを報告した。



写真4 立体隅柱梁接合部の曲げ降伏破壊(首都大学東京³⁹⁾)

また、実大4層RC建物に三方向地震動を入力する振動台実験が長江・田原ら⁴⁰⁾によってE-ディフェンスに

において行われた。この研究では内柱梁接合部での柱梁曲げ耐力比を1程度に設計し、接合部せん断余裕度は1.2程度とした。振動台実験の結果、内柱梁接合部では梁主筋および柱主筋がともに降伏し、X形の斜めひび割れの拡幅およびかぶりコンクリートの剥落が生じて、最終的に内柱梁接合部が破壊した。

この振動台実験では建物の保有水平耐力が計算値の1.3倍まで増大したため、柱梁接合部へのせん断入力が増大になって接合部がせん断破壊した可能性があるとして指摘された。ただし、柱梁曲げ耐力比が1程度と小さく、梁および柱主筋がともに降伏したことから、塩原の提唱する柱梁接合部の曲げ降伏破壊の観点から再検証が必要であると記述された。この論文⁴⁰⁾に記載された実験結果から判断して、内柱梁接合部は曲げ降伏破壊したと考えてよいであろう。

このように静的実験や振動台実験による研究はあるものの、スラブの拘束効果が柱梁接合部の曲げ降伏破壊に与える影響や、柱梁接合部が二方向水平力を受けるときの立体的な破壊面の把握とその力学挙動を妥当に評価できる立体的な柱梁接合部モデルの構築がさらに必要である。三次元有限要素解析によって二方向水平力を受ける柱梁接合部の曲げ降伏破壊を再現し、その性状を検証することも有益である^{例えば41)}。

4.1.5 外柱梁接合部における梁主筋の定着法の影響

外柱梁接合部（ト形接合部）における梁主筋は、通常は90度に折り曲げて必要な余長を確保してコアコンクリート内に定着される。ただし主筋量が多い場合や直交する二方向からの梁主筋が交錯して配筋が錯綜する場合には、梁主筋の端部に定着板を設置して直線のまま機械的に接合部内のコンクリートに定着することも多い。このような主筋の折り曲げや定着板による定着性能は、実験および解析による多くの研究によって検討されてきた。

ただし柱梁接合部が曲げ降伏破壊する際に主筋の定着法がその力学挙動に与える影響については、既往の実験研究の再検証を含めて今後実験や解析によって精査する必要がある⁴²⁻⁴⁴⁾。外柱梁接合部が曲げ降伏破壊する際の最大耐力は、梁主筋を折り曲げ定着したほうが機械式定着の場合よりも1.2倍程度増大したとする実験研究⁴²⁾もあり、外柱梁接合部の曲げ降伏破壊を許容する耐震設計を行う場合に、梁主筋の機械式定着を使用する際には当面のあいだ慎重な検討が望まれる。

なお本会で作成中の「鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説」（後述）においては、機械式定着を用いる場合には同規準（案）の規定を適用できない旨、解説に記載されている。

4.1.6 柱梁接合部の耐震補強法の確立

鉄筋コンクリート（RC）骨組の柱梁曲げ耐力比が1に近い建物は、わが国では中低層建物を中心に多数存在す

ると推定される。許容応力度設計ではそのような建物の柱断面は比較的大きく設計されるので、柱梁接合部が従来想定されたせん断破壊を生じることは少ないと考える。しかし柱梁接合部の曲げ降伏破壊は発生する可能性があるため、当該建物に要求する耐震性能によっては必要性を満足することができず、その場合には耐震補強の必要性が惹起する。

柱梁接合部の耐震補強工法として、a) 柱梁接合部を含む柱のコンクリートの増し打ち、b) 柱梁部材へのハンチの増設、c) 鋼板などによる巻き立て（Jacketing）、などが考えられる。しかし柱梁接合部を対象とした耐震補強についての実験研究は少ない^{例えば45-49)}。ハンチの増設の一例として、構面内の柱梁部材の入り隅部に方づえ状の鋼材を設置して損傷集中部位を柱梁接合部から梁部材中ほどに移動させる、Hinge relocation を応用した方法⁴⁰⁾が提案されたが、建物の使用を考えると実用的な適用範囲は限定せざるを得ない。それに対して水平ハンチの増設は柱梁接合部の体積を増大させることができ、Hinge relocation によって柱梁接合部を防護することは可能である^{48,49)}。ただし水平ハンチによる補強が柱梁接合部の曲げ降伏破壊に対して直接に有する有効性は不明である。

鋼板による巻き立て補強⁴⁵⁾は主に高速道路や鉄道の高架橋を対象としたもので、側柱梁接合部や隅柱梁接合部では実施が比較的容易でありその効果も期待できるが、建物の内柱梁接合部のように六面すべてに柱梁部材が貫入する場合には困難である。

なお楠原・塩原ら⁴⁷⁾は柱梁接合部の曲げ降伏破壊の理論から、図9のように上下の柱を補強部材でつないで拘束すると接合部の変形にともなって受動的な拘束力が発生して、それによって柱梁接合部の終局抵抗モーメントを増大できるとした。同研究⁴⁷⁾ではこの耐震補強法の有効性を検証するために、炭素繊維ストランドで補強した平面十字形柱梁部分架構実験の結果も示された。補強した場合の最大耐力は無補強の場合に較べて10%程度増大したが、柱梁接合部の曲げ降伏破壊を防止することはできなかったことが報告された。

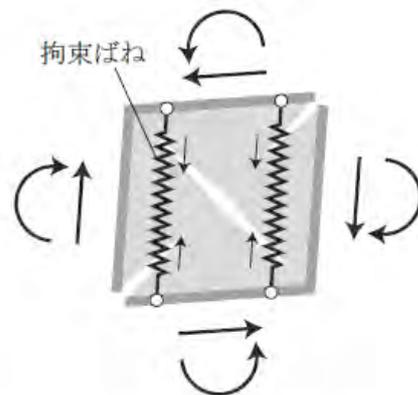


図9 鉛直ばねによる接合部変形の拘束（楠原ら⁴⁷⁾）

4.2 規準・指針類への反映

本会が2015年度内に刊行を予定する「鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説」⁵⁰⁾においては、これまで説明した柱梁接合部の曲げ降伏破壊を考慮して建物の保有水平耐力を算定することを要求する。同規準(案)の「20条 柱梁接合部」の本文(2015年5月現在)を抜粋して以下に示す。

- 1 柱梁接合部の剛性と強度は、柱梁接合部の形状、主筋の定着、および、主筋の降伏、横補強筋の降伏、コンクリートのひびわれとコンクリートの圧壊等の材料の非線形性を考慮して算定する。
- 2 柱梁接合部に接続する柱および梁の部材種別は、崩壊機構形成時に柱梁接合部が釣合破壊を起こす場合にFDとし、それ以外の場合には、柱梁接合部の影響を部材種別の判定に考慮しない。
- 3 柱梁接合部の接合部降伏破壊を考慮した各層の保有水平耐力が、それぞれの必要保有水平耐力を上回ることを確認する。 [下線は筆者]
～以下、略～

このように本文3項において、柱梁接合部の曲げ降伏破壊を考慮して建物の保有水平耐力の検定を行うことを求めている。そのための具体的な方法が解説に記述される。従来の設計法との連続性を考慮して、梁あるいは柱が曲げ降伏する時の耐力に対して接合部破壊が生じるときの強度低下率を乗じることで、建物の保有水平耐力を算定する。例えば十字形柱梁接合部の曲げ降伏破壊を考慮する場合の節点モーメントの強度低下率 β_j は略算的に以下によって求める。

$$\beta_j = \left\{ 1 - \frac{\Sigma A_t f_y}{b_j D_b F_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{M_{cu} + M'_{cu}}{M_{bu} + M'_{bu}} - 1 \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{\Sigma A_{jw} f_{jy}}{\Sigma A_t f_y} \right) \right\} \xi_r \dots (1)$$

ここで、

- ξ_r : 柱梁接合部のアスペクト比による補正係数 (表は省略)、
- b_j : 柱梁接合部の有効幅 ($= b_b + b_{a1} + b_{a2}$) (図は省略)、
- D_b : はりせい、
- F_c : コンクリートの設計基準強度、

M_{cu}, M'_{cu} : 上柱(下柱)の梁フェースでの曲げ終局時の節点モーメント(軸力は長期で算出)で、柱の曲げ耐力は接合部有効幅内にある柱主

筋のみを考慮して計算した値、

- M_{bu}, M'_{bu} : 左梁(右梁)の柱フェースでの曲げ終局時の節点モーメントで、T形梁の場合の梁曲げ耐力に考慮するスラブ筋は、保有水平耐力算定時に梁曲げ耐力に参入したものと同一とする、
- ΣA_{jw} : 柱梁接合部内の梁の上端筋と下端筋の間に配置された横補強筋の断面積の総和、
- f_{jy} : 柱梁接合部の横補強筋の降伏点、
- ΣA_t : 有効な引張り主筋の断面積、および
- f_y : 有効な引張り主筋の降伏点、である。

この(1)式では、柱梁曲げ耐力比、梁主筋の曲げ補強係数、梁主筋引張り力に対する接合部横補強筋引張り力の比、および接合部アスペクト比の四つの影響が陽な形で評価される。すなわち柱梁曲げ耐力比が大きいほど、梁主筋量が少ないほど、接合部横補強筋が多いほど、そして柱梁接合部の形状が正方形に近いほど、柱梁接合部の曲げ降伏強度は増大する(節点モーメントの強度低下率 β_j は1に近づく)。

本会ではこれとは別に、建築基準法で定める限界耐力計算の地平上にある「鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法に基づく耐震性能評価型設計指針(案)・同解説」を現在作成中である(発刊期日は未定)。この設計法では応答スペクトルおよび等価線形化法を用いることによって、建物の地震時の応答変形を陽に定められることが大きな特徴である。ここでは柱梁接合部の曲げ降伏破壊に至るまでの幾つかの限界状態が設定され、骨組のモデル化において柱、梁、耐震壁に加えて柱梁接合部の合理的なモデルの採用を求めている。また柱梁接合部の強度と剛性とを適切に保持するために、せん断破壊の防止や付着・定着性能の確保、必要な接合部横補強筋量などの保証設計の方法を定める。

同指針(案)では多層建物を一質点系に縮約した振動モデルを利用するため、その適用は一次モードの応答が卓越する建物に制限される。柱梁接合部の曲げ降伏破壊が発生する建物にそのような振動モードを確保できる可能性や、そのような振動モードへの応答制御の可能性については今後の検討が必要である。

5. おわりに

兵庫県南部地震(1995年)以降の二十年にわたって展開され、進展した鉄筋コンクリート柱梁接合部の研究内容を俯瞰し、現在の到達点と今後の課題とを整理した。高層RC建物の耐震設計では柱梁曲げ耐力比がおおむね2を超える場合もあり、そのような骨組の柱梁接合部で

は曲げ降伏破壊は生じ難いと思われ、従来のせん断破壊防止の配慮でその安全性を確保できると考える。しかし中低層建物では柱梁曲げ耐力比が1に近いことが多く、それらの柱梁接合部は曲げ降伏破壊する可能性が高い。

柱梁接合部の曲げ降伏破壊が生じると梁柱部材の曲げ終局耐力を発揮できないので、そのような骨組の耐震性能を適切に評価することが必要になる。それと同時に、柱梁接合部の曲げ降伏破壊を生じる建物に要求する耐震性能についての議論と、それに関する研究者や設計者のあいだにおける合意形成とが今後は求められる。そのためには理論のさらなる深化とともに、実験および解析による研究・検討を継続しようという強い意欲が必要となる。これらの目標に向けて、関係する諸氏の努力および協調を期待したい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針（案）・同解説、1988年10月。
- 2) 塩原 等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：見逃された破壊機構、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第631号、2008年9月、pp.1641-1648。
- 3) 塩原 等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：終局強度と部材端力の相互作用、日本建築学会構造系論文集、第74巻、第635号、2009年1月、pp.121-128。
- 4) 塩原 等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：梁曲げ降伏型接合部の耐震設計、日本建築学会構造系論文集、第74巻、第640号、2009年6月、pp.1145-1154。
- 5) 楠原文雄、塩原 等、田崎 渉、朴 星勇：柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第75巻、第656号、2010年10月、pp.1873-1882。
- 6) 楠原文雄、塩原 等：柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第693号、2013年11月、pp.1939-1948。
- 7) 北山和宏：第2章 阪神大震災と今後のRC構造設計（その2 柱・梁接合部）、日本建築学会関東支部シンポジウム「鉄筋コンクリート構造の設計」、2000年1月、pp.23-32。
- 8) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編 - 1 鉄筋コンクリート造建築物、1997年7月。
- 9) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計-特徴的被害の原因と設計への提案-、1998年10月。
- 10) 新井組技術研究部ほか：平成7年（1995年）兵庫県南部地震被災調査報告—ジュネス六甲—、新井組技術研究報告集、第8号、1995年10月。
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説、1997年7月。
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -、1999年11月。
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2010年2月。
- 14) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説、2004年1月。
- 15) 村上秀夫、藤井 栄、石渡康弘、森田司郎：鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部のせん断強度に関する検討（接合部データベース解析 その1）、日本建築学会構造系論文集、第503号、1998年1月、pp.85-92。
- 16) 村上秀夫、藤井 栄、森田司郎：鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部単位架構の変形性能に関する検討（接合部データベース解析 その2）、日本建築学会構造系論文集、第523号、1999年9月、pp.103-110。
- 17) 藤井 栄：(5)性能の確認～柱・梁接合部および耐震壁～、1999年度日本建築学会大会（中国）RC構造部門 パネル・ディスカッション「鉄筋コンクリート構造の性能設計と各種限界状態」資料、1999年9月、pp.29-38。
- 18) 石田健吾、嶋 晃平、東 健二、藤井 栄：鉄筋コンクリート十字型柱梁接合部の実大実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.3、2001年、pp.343-348。
- 19) 楠原文雄、塩原 等：接合部破壊が先行するRC柱はり接合部の接合部せん断力と接合部破壊の因果関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.2、1997年、pp.1005-1010。
- 20) 岸川聡史、塩原 等：鉄筋コンクリート造十字型柱梁接合部の接合部破壊とせん断抵抗機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.3、1998年、pp.523-528。
- 21) 森田真司、北山和宏、岸田慎司、西川孝夫：主筋付着性状を考慮した鉄筋コンクリート造内柱梁接合部のせん断強度に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第585号、2004年11月、pp.131-137。
- 22) Shiohara, H. : New Model for Shear Failure of RC Interior Beam-Column Connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Feb., 2001, pp.152-160。
- 23) 楠原文雄、焦 博文、塩原 等ほか：鉄筋コンクリート造L形柱梁接合部の耐震性能に及ぼす柱梁曲げ強度比の影響に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、2012年9月、pp.485-486。
- 24) 石木健士朗、平林幸泰、北山和宏、近藤慶一、福山 洋、壁谷澤寿一：RC十字形柱梁接合部パネルの破壊機構に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2構造IV、2011年8月、pp.497-498。
- 25) 楠原文雄、塩原 等：鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の終局モーメント算定法、日本建築学会構造系論文集、第75巻、第657号、2010年11月、pp.2027-2035。
- 26) 楠原文雄、塩原 等：鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の終局モーメント算定法、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第693号、2013年11月、pp.1949-1958。
- 27) Bashir Ahmad MUHSEN and H. Umemura : Estimation of shear strength of RC interior beam-column connections

- based on the strut model, 日本建築学会構造系論文集、第 77 巻、第 676 号、2012 年 6 月、pp.947-955.
- 28) 迫田丈志、三浦耕太、趙 敏洙、前田匡樹：機械式定着を有する RC 造ト形接合部の曲げ抵抗機構と終局強度に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.2、2010 年 7 月、pp.271-276.
- 29) 北山和宏：鉄筋コンクリート十字形柱・梁単位架構の等価粘性減衰定数の定量評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、C-2、2003 年 9 月、pp.457-458.
- 30) 楠原文雄、朴 星勇、塩原 等：鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部部分架構の履歴エネルギー吸収能に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、2012 年 7 月、pp.271-276.
- 31) 佐川隆之、趙 敏洙、迫田丈志、前田匡樹：外柱・梁接合部のせん断変形及び接合部形状が建物の耐震性能に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、C-2、2010 年 9 月、pp.695-696.
- 32) 田尻清太郎、塩原 等、楠原文雄：RC 柱梁接合部のための弾塑性骨組解析用マクロエレメント、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.2、2005 年 6 月、pp.415-420.
- 33) 楠原文雄、金 秀禧、塩原 等：接合部降伏する鉄筋コンクリート造骨組の地震応答解析、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻、第 686 号、2013 年 4 月、pp.847-855.
- 34) 楠原文雄：4.4 柱梁接合部に関する研究と課題
4.4.1 柱梁接合部の復元力特性、日本建築学会、鉄筋コンクリート構造シンポジウム「鉄筋コンクリート部材における性能評価の現状と将来（その 1）」、2015 年 1 月、pp.135.
- 35) 金 秀禧、楠原文雄、塩原 等：柱梁接合部マクロエレメントを用いた RC 造骨組の地震応答解析—主要動の継続時間をパラメータとした解析結果、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.2、2013 年 7 月、pp.271-276.
- 36) 中井俊太、富永暖子、坂下雅信、河野 進、澤口香織、山野辺宏治、福山 洋：直交梁を有する十字型柱梁接合部が 2 方向入力を受ける場合の耐震性能評価（その 2 実験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2012 年 9 月、pp. 513-514.
- 37) 西村康志郎、村岡 瞬、柳浦嵩史、大西直毅：梁曲げ降伏する鉄筋コンクリート隅柱梁接合部の応力伝達に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻、第 699 号、2014 年 5 月、pp.621-630.
- 38) 千葉卓哉、塩原 等、楠原文雄：柱梁強度比が小さい梁降伏型鉄筋コンクリート造スラブ付柱梁接合部の挙動その 1 十字形およびト形部分架構の水平加力実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2014 年 9 月、pp.411- 412.
- 39) 片江 拡、北山和宏：3 方向加力される鉄筋コンクリート立体隅柱梁接合部の耐震性能に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集、第 80 巻、第 713 号、2015 年 7 月、pp.1133-1143.
- 40) 長江拓也、田原健一、福山國夫、松森泰造、塩原 等、壁谷澤寿海、河野 進、西山峰広：4 階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験、日本建築学会構造系論文集、第 76 巻、第 669 号、2011 年 11 月、pp. 1961-1970.
- 41) 大西直毅、堀田淳司、飯場正紀、西村康志郎：FEM による二方向繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート内柱—梁接合部の解析的研究 その 1 その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2015 年 9 月、発表予定.
- 42) 楠原文雄、藤原圭佑、浅井勇太、塩原 等、田尻清太郎、福山 洋：鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の耐震性能におよぼす設計因子の影響に関する実験 その 5：強度と変形におよぼす設計因子の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2010 年 9 月、pp.399-400.
- 43) 足立智弘、西村英一郎、田才 晃、楠 浩一、清原俊彦：柱梁接合部降伏が生じる懸念のある RC ト形柱梁接合部における機械式定着性状に関する実験的研究：その 1 その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2013 年 8 月、pp.741-744.
- 44) 伊藤 衛、太田哲朗、鈴木裕介、前田匡樹：RC 造ト形柱梁接合部の構造性能に及ぼす定着工法及び横補強筋量の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.2、2014 年 7 月、pp.193-198.
- 45) Ghobarah, A., T. S. Aziz and A. Biddah : Rehabilitation of Reinforced Concrete Beam-Column Joints, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 1996, No.1394.
- 46) Sharma, A., R. Eligehausen and J. Hofmann : Numerical Modeling of Joints Retrofitted with Haunch Retrofit Solution, ACI Structural Journal, Vol.111, No.4, July-August, 2014, pp.861-872.
- 47) 楠原文雄、塩原 等、田尻清太郎、福山 洋：鉄筋コンクリート造柱梁接合部の CFRP による新耐震補強工法、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2009 年 8 月、pp.129- 132.
- 48) 上原修一、竹内卓也、山川哲雄：水平ハンチにより耐震補強した RC 造柱梁十字形接合部の性状に関する予備的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2012 年 9 月、pp.549-550.
- 49) 近藤智紀、上原修一、山川哲雄：床スラブと直交梁のある十字形接合部を水平ハンチにより補強した場合の耐震補強性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.2、2013 年 7 月、pp.289-294.
- 50) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説、2015 年 5 月版ドラフト（本文のみ公開）。