# 論文 FEM 解析による RC 柱·梁接合部の性能評価,メカニズムの検討及び 接合部補強法の提案

張 大長\*1·柏崎隆志\*2·野口 博\*3

要旨:本研究では,塩原らの接合部変形モード <sup>1)</sup>を検証するための RC 柱・梁接合部試験体 S3、S4 の 2 次元、3 次元 FEM 解析に基づき,柱・梁接合部のせん断抵抗機構の検討,性能評 価を行った。既往の柱・梁接合部補強法を検討すると共に,接合部の力学特性により柱・梁 接合部のせん断性能を改善できる接合部補強法を提案し,仮想試験体の解析を行い,提案し た柱・梁接合部補強法の有効性を検討した。

**キーワード**: 柱・梁接合部、有限要素法、せん断性能、抵抗機構、せん断抵抗機構の検討、 性能評価、柱・梁接合部補強法。

## 1. はじめに

従来の研究では, RC 柱・梁接合部の破壊 のメカニズム(せん断抵抗機構など)は、マ クロモデル的に圧縮ストラットとトラスの圧 縮や対角線方向のひび割れで分断される要素 の破壊機構で論じられてきた。最近,破壊機 構成立後の補強された接合部の内部ひび割れ を観察し、その後の破壊進行状況を調べ、破 壊機構及び靭性確保を検討するための研究も 行われている。RC 接合部の B モードと J モ ードの破壊モード及びせん断強度式を検証す るために,塩原らは,接合部内主筋に定着板 を用いて定着強度と剛性を高めモーメント伝 達機構の劣化を阻止するという接合部補補強 法を提案し,実験研究を行った <sup>1)</sup>。即ち,柱 のフェイスでねじ異形鉄筋の梁主筋と曲げ剛性 の高い孔あき定着板を板の両側でナットで固定 し,これらの柱の両側の定着板を鋼製タイプレ ートで溶接して連結する補強法である。その内, S3 は従来補強型の試験体, S4 は従来の補強法 と塩原らの補強法で補強された試験体であった。

本文では、塩原らの RC 柱・梁接合部の試験体 S3、S4 の 2 次元、3 次元 FEM 解析<sup>2)3)</sup>に基づい て,塩原らの接合部補強法で補強される前後の 柱・梁接合部のせん断抵抗機構の検討,性能評価 を行い,塩原らの接合部補強法が接合部のせん 断力を増大させる主な原因について検討した。 さらに,既往の接合部補強法を調べると共に, 柱・梁接合部のせん断性能を改善できる接合部 補強法を提案し,提案した補強法による柱・梁 接合部の仮想試験体を作って検討解析を行い, 提案した補強法の有効性を検討した。

2. 柱・梁接合部のメカニズムの検討

#### 2.1 接合部の荷重・変形成分及び抵抗機構

軸力と水平荷重を受ける柱・梁接合部パネル の荷重成分と変形成分を,図1に示す。パネル の荷重成分は軸力、せん断力と曲げモーメント より構成されている。各荷重成分により,それ ぞれ軸方向の圧縮変形,せん断変形及び4つの 剛体回転による曲げ変形が生じる。4つの剛体 回転による曲げ変形は,接合部のせん断変形を 表現できる。十形 RC 柱・梁接合部のせん断抵 抗機構については,主にトラス機構及び圧縮ス トラット機構より説明されている<sup>4</sup>。

## 2.2 梁主筋の付着状況がせん断抵抗機構に 与える影響

柱、梁主筋の付着をボンドリンクと完全付着 として,試験体 S3 の 2 次元 FEM 解析により 層間変形角 0.3%、0.8%と 2%のような増加に伴 って接合部パネルの応力流れは,図 2(a)に示す。

\*1 千葉大学 大学院自然科学研究科 工修 (正会員) \*2 千葉大学助手 工学部 工修 (正会員) \*3 千葉大学教授 工学部 工博 (正会員) 本研究では,接合部の最大耐力まで梁主筋の 付着破壊が発生せず,主筋の抜け出しによる変 形が小さい場合には付着良好,逆には付着が悪 いと考える。異なる梁主筋の付着性状による



圧縮ストラット及びトラス機構の進行状況が 違う。図2(b)に示すように,付着良好の場合 には,最大耐力まで対角線方向の圧縮ストラ ットが維持して圧縮破壊せず,パネルのトラ ス機構も維持している。しかし,付着不良の 場合には,最大耐力まで圧縮ストラットのコ ンクリートは圧縮破壊が発生し,圧縮ストラ ットの幅は大きくなり,接合部のトラス機構 は劣化している。従って,主筋の付着性状が 接合部の応力流れ,せん断抵抗機構の変化過 程に及ぼす影響があることが分かった。

- 2.3 接合部パネルの応力状態の変化
- (1) 接合部パネルの応力状態

図3に FEM 解析による異なる付着性状の 接合部パネルの応力状態を示す。梁主筋の付 着不良の場合には,対角線方向の圧縮ストラ ットのコンクリートは圧縮破壊して圧縮スト ラットの幅が大きくなり,梁危険断面のコン クリートの圧縮領域も大きくなっている。し かし,付着良好の場合には,対角線方向の圧 縮ストラットは圧縮破壊せず,梁危険断面の コンクリートの圧縮領域が小さい。



## (2) 梁危険断面の応力中心間距離の変化

図4に試験体S3,S4の梁危険断面の応力中 心間距離j<sub>b</sub>をdに対する比を示す。荷重の増加 に伴い、試験体S3のj<sub>b</sub>が小さくなっているが, S4のj<sub>b</sub>の変化はS3より小さい。従って,梁危 険断面の応力中心間距離j<sub>b</sub>の増大によって,塩 原らの補強法は梁主筋の定着強度と剛性を高 め,接合部曲げモーメントの抵抗能力を増大 させることがわかった。

2.4 接合部のせん断力を増大させる主な要因

実験から,塩原らの補強法で補強された試験体 S4 のせん断力は S3 より 28%大きかった。それらの要因は以下の2 つと考える。

(1) せん断抵抗機構と破壊モードの変化

実験と解析では,試験体 S3 は接合部せん断 破壊したが,S4 は梁曲げ圧縮破壊した。塩原ら の補強法は,接合部の破壊モードを S3 の接合 部せん断破壊 J モードから S4 の梁危険断面の 曲げ圧縮破壊 B モードへ移行させる。また,**図** 2(b)に示すように耐力まで S4 はトラス機構と 圧縮ストラットが共存し,せん断力と曲げモー メントを負担する。しかし,付着劣化に伴い, S3 のトラス機構の領域は小さくなり,圧縮スト ラットは主にせん断力を負担する。

(2) 梁危険断面の応力中心間距離 j<sub>b</sub>の増大

試験体の梁主筋の主筋力は低下しておらず, 梁曲げモーメントの低下とそれに伴う層せん断 力の低下は,梁危険断面の応力中心間距離j<sub>b</sub>の 減少が原因と考えられる。S4 の最大せん断耐 力は梁の曲げ強度によって決まる。従って, S4 の j<sub>b</sub>はS3 より大きいことが,S4 のせん断 力を増大させる1つの原因である。

3. 試験体 S3、S4 に関するせん断性能評価

柱・梁接合部としてのせん断性能は,直接に

骨組全体の構造性能に影響を与える。既往の実験結果からの復元力特性の包絡線の特性点として、せん断ひび割れ発生 A 点,コンクリートの 圧壊開始 B 点,最大耐力 C 点があげられる <sup>5)</sup>。

実験と FEM 解析で得た試験体 S3、S4 のせん 断応力 - せん断変形角の関係は,図5 に示す。 特性点 A、B、C、D の応力、ひずみ値は,表1 に示す。実験値は主筋の応力により計算した。 (1)区間 A - B, せん断ひび割れ成長,ひび割 れ本数の増加及びひび割れ幅の拡大過程

図5と表1に示す接合部のせん断ひび割れの 発生A点の解析値は実験とほぼ対応できる。実 験ではコンクリートの圧壊開始B点を判断しに



図 5 試験体 S3 , S4 の平均せん断応力 -平均せん断変形角の関係

表1 実験と FEM 解析で得た試験体 S3、S4 特性点の応力、ひずみ値

項	目	A 点		B点		C 点		D点	
		せん <b>断変形</b> 角 (%)	せん断応力 (MPa)						
<b>S</b> 3	Test	0.0316	1.417	-	-	2.51	9.85	-	-
	2D	0.0302	1.296	0.485	7.52	1.38	9.43	2.302	8.54
	3D	0.0298	1.23	0.432	8.63	1.103	9.872	2.26	9.18
S4	Test	0.00149	1.717	-	-	1.60	10.76	-	-
	2D	0.0155	1.92	0.718	10.36	1.346	10.82	-	-
	3D	0.0132	1.81	0.736	9.92	1.41	11.3	-	-

くかったが,解析では各ステップの応力状況よ りわかる。試験体 S4 の圧縮破壊開始 B 点のせ ん断変形角及びせん断応力は,S3 より大きい。 また,S4 の区間 A - B は,S3 より大きい。試 験体 S4 のパネルのコンクリートの圧縮破壊が 遅いことにより,塩原らの補強法は接合部パネ ルのせん断性能を改善できることが認められた。

## (2) 区間 B-C, 圧壊ひずみの進行

解析で得られた S3, S4 の耐力点 C のせん断 変形角は実験値より小さい評価が現れている。 S3 のせん断変形角は 0.55%頃からせん断変形 が急速に増大し, = 1.2%頃,最大せん断応力 に達した。S4 は S3 より遅く,最大せん断変形 角になると,最大せん断力に達した。

## (3) 耐力点 C

最大せん断応力点のせん断変形角は,既往の 研究ではおおよそ 1%前後の大きさになること が指摘されている。

FEM 解析では,平均せん断変形角が1.2%の時,試験体S3 は最大せん断応力に達し,実験ではパネル部分のかぶりのコンクリートが剥落した。せん断変形角1.5%の時,試験体S4 は最大せん断応力に達し,補強タイプレートは降伏し,水平せん断滑りが発生した。

## (4)区間C-D:耐力低下

実験では,試験体 S3、S4 の区間 C - D が観 察されてなった。しかし,FEM 解析では,S3 の区間 C - D が現れ,せん断応力の低下が発生 した。試験体 S4 の C 点は最大せん断変形角の せん断応力耐力点であり,区間 C - D が現れて いない。

## 4. 柱・梁接合部補強法の提案

## 4.1 従来の柱・梁接合部の補強法

柱・梁接合部の性能を改善するために、近年, 接合部のせん断性能と接合部補強法に関する数 多くの研究を行われてきた。補強目的より,い くつかの補強方法を図6に示している。

図 6 の(a)は,無補強で主筋のみの配筋とし た方法である。図 6 の(b)は帯筋のみで接合部 を補強した方法である。 図6の(c)(d)は,溶接閉鎖形の斜補強筋を用 いて柱と梁の主筋の交差する位置に斜め補強を 施した方法である。梁曲げ降伏後の接合部の変 形を抑制することができる<sup>6)</sup>。

図6の(e)~(g)は,ほぼ主筋交差位置を通るリ ング筋を梁せい内に収まるように配筋する方法 である。斜補強筋を梁せい内の小領域内に収め るために,溶接閉鎖型の円形補強筋を用いて, せん断補強とコンクリート膨張拘束効果を期待 する。リング筋と帯筋を十分に配した場合には, 大変形時にも接合部の変形と劣化を抑制する十 分な補強効果があった<sup>6</sup>。

図 6 の(h)は,塩原らの梁主筋と曲げ剛性の 高い孔付き定着板を板の両側でナットで固定し, それらの柱の両側の定着板を鋼製タイプレート で溶接して連結する補強法である<sup>1)</sup>。



力伝達経路の冗長性を図り、信頼性を増すこと である。接合部の力学特性,変形状況,応力流 れ及び既往の各補強方法の補強方法に基づいて, 新しい補強法の注目点は以下の6つがあった。

- ) 柱·梁接合部パネルで高いせん断応力に 抵抗できる。
- )梁主筋の付着補強効果がある。
- ) せん断耐力を高めるため,斜めの圧縮ス トラットの圧縮耐力を高める。
- ) 接合部の対角線方向のひび割れの発生と 開き及び回転変形を抑制できる。
- )施工が簡単にできる。
- ) 立体接合部でも適用できる。

## (2) 新しい柱・梁接合部補強法

本研究では,図7に示す接合部補強法を提案 する。梁主筋と曲げ剛性の高い孔付き定着板(ア ンカープレート)を板の両側でナットを用いて 固定し,柱両側に定着板を2枚鋼製X形タイプ レートで溶接して連結する補強法である。

X 形のタイプレートは本補強法の主な特徴で ある。X 形のタイプレートは,主対角線方向の 高い圧縮応力と,副対角線方向の高い引張応力 に抵抗し,接合部パネルの中央部で高いせん断 力にも抵抗できる。さらに,アンカープレート による梁主筋の付着補強もできる。この補強法 により,接合部のせん断耐力とせん断変形及び, 斜めひび割れの発生と開きなどのせん断性能を 改善することが期待されている。

補強法(a):X 形タイプレートは柱両側に置く。 補強法(b):X 形タイプレートは柱せい内に収 まるように置く補強法である。

**補強法(c)**:柱の両側でX形タイプレートと付 加タイプレートを採用する補強法である。

**補強法(d)**:立体柱梁接合部に対して,4 枚鋼 製X形タイプレートを柱のフェイスに置く。

## 4.3 新しい柱・梁接合部補強法の検証解析

(1) 仮想試験体と要素分割及び境界条件

検証解析を行うための仮想試験体は塩原らの



試験体 S3, S4 と同じな寸法と材料特性を採用 し,図8(a)の補強法による十字型 RC 柱・梁接合 部を仮想する。補強アンカープレートは S4 の ような高い曲げ剛性を仮定し,X形のタイプレ ートの断面寸法は,厚さ 5mm×幅 54mm と, 厚さ 3mm×幅 54mm の2 種類を選定する(S4 のタイプレートは 3.2mm×90mm)。2 次元 FEM 解析の要素分割と境界条件は,図8(b)に 示す。加力を単調載荷として,柱に一定軸力を かけて,梁端に変位制御で徐々に載荷する。

(2) 解析結果

**層せん断力 - 層間変形角の関係** FEM 解析 による仮想試験体の層間せん断力 - 層間変形角 関係を図9に示す。仮想試験体の最大耐力は, 試験体 S4 とほぼ同じであるが,A 点までの上 昇段は,S4 のように剛性低下が著しく現れてい ない。A 点には梁主筋が降伏し,梁危険断面の コンクリートは圧縮破壊が進行している。その 時,X 形のタイプレートはまだ圧縮・引張降伏 してないため,接合部パネルのせん断変形が小 さい。梁危険断面の圧縮領域のコンクリートの 圧縮破壊に伴い,接合部は最大耐力に達した。 試験体 S4 も仮想試験体も,梁の強度が接合部



耐力を支配することがわかった。

変形状況 仮想試験体の変形を,図10に示 す。2 種類の X 形補強タイプレートの仮想試験 体の変形が大体同じであり,接合部のせん断変 形が小さく、梁の変形は速く進行している。最 後には、梁が曲げ圧縮破壊したが、接合部パネ ルが破壊していないことがわかった。



に示す。2 種類の X 形補強タイプレートの仮想 試験体の応力分布が大体同じである。最後破壊 まで接合部パネルの応力が流れ,対角線方向に 圧縮ストラットが維持されている。

**接合部パネルのせん断変形の比較** 仮想試 験体の接合部パネルのせん断変形の比較を図 12 に示す。 仮想試験体のパネルせん断変形の進 行が S4 より遅く,層間変形角 R=1.3%からパ ネルのせん断変形が大きな増加が示されていな い。せん断変形を抑制することによって、提案 した補強法が有効であることがわかった。

#### 5 結論

(1) 接合部のメカニズムの検討によって,梁 主筋の付着劣化が発生するまで, 接合部にはト ラス機構とストラット機構が共存しているが, 付着劣化に伴い、トラス機構の効果は小さくな り,最終にはコンクリートの圧縮ストラット機 構は主なせん断力 曲げモーメントに抵抗する。

(2) 荷重の増加に伴い,試験体 S3のj<sub>b</sub>は小 さくなっているが、S4の jbの変化が小さかった。 S4 の j<sub>b</sub>の増大はせん断力を増大させる主な原 因と考えられる。

(3) 柱・梁接合部のせん断性能評価に基づき, 補強された試験体 S4 は S3 より良好なせん断性 能を持つことがわかった。塩原らが提案した接 合部補強法は接合部せん断性能の向上に有効で あることが認められた。

(4) 検証解析により 提案した接合部補強法 が接合部せん断性能と破壊モードを改善するの に有効であることがわかった。しかし,実験研 究とさらなる FEM 解析がまた必要である。

#### 参考文献

- 1) Safaa ZAID, Hitoshi SHIOHARA and Ahunsuke OTANI: Test of a Joint Reinforcing Detail Improving Joint Capacity of R/C Interior Beam-Column Joint, The 1<sup>st</sup> Japan-Korea Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, Oct. 29-30, 1999, Faculty Club House, Seoul National University, Seoul, Korea
- 2) 張大長,野口博,柏崎隆志,新しい柱・梁接合部補強法に よる柱・梁接合部せん断性能に関する2次元 FEM 解析の 研究,コンクリート工学年次論文報告集,JCI, Vol.23,
- 研究, コングリート上学年次調文報告集, JCI, Vol.23, No.3, PP403-408, 2001,6.
   3)野口博,張大長,柏崎隆志,新補強法による RC 柱梁接合部のせん断性能の3次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, JCI, Vol.24, No.2, PP397-402, 2002,6.
   4)青山博之:鉄筋コンクリート建物終局強度型耐震設計法,

- 4) 育山博之: 試励コンクリート建物総回選及主要の展示1/4, 技報堂出版,1990.8.
  5) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造物の性能評価型耐震 設計指針・同解説(案),2002.7.10.
  6) 鈴木武文・石橋一彦・堀部明久・井口良平,十字形内柱・ 梁接合部の補強方法に関する実験的研究,コンクリート工 世界が発文性。50.02,408, Vol. 24, No.2,2002 学年次論文集,pp403-408,Vol.24,No.2,2002.