

論文

[2002] 混合構造接合部の有限要素解析

正会員○内田和弘 (フジタ技術研究所)

正会員 野口 博 (千葉大学建築学科)

1. はじめに

近年、大スパン化やプレキャスト化、省力化等の生産・施工性の向上が得られる混合構造の建物の開発が盛んに行われている。混合構造では、異種構造部材間の接合部での応力伝達が重要な問題であり、様々な接合形式が提案され研究・開発が進められている。しかし、研究の方法としては実験に基づくものがほとんどで、応力伝達機構も概念的なものが多いのが現状である。

本研究では、主に混合構造接合部の応力伝達機構を解析的に明らかにすることを目的として、RC構造とS構造からなる混合構造部材の2次元非線形有限要素解析プログラムの開発を行った。そして、今後普及が期待される柱RC、はりSの混合構造接合部試験体の解析を行い、解析モデルの妥当性の検討及び混合構造接合部の応力伝達の検討を行なった。

2. 解析対象試験体

2.1 解析対象試験体の選定

現在提案されている接合部のディテールを、接合部のせん断抵抗要素としてのSはりウェブの有無により、SRC系とRC系とに分類してみる。SRC系では、西村らが、SはりがRC柱を貫通するだけで特別な補強を行わない基本的な実験を行い、柱、はり、接合部の各耐力(曲げ・せん断)を発揮する以前に、図-1に示すようなてこ機構による柱端部の支圧破壊が起こることを指摘し、応力伝達機構を提案している[1]。この実験では、接合部内の柱主筋の付着力は喪失し主筋が曲げを負担できないために、柱の支圧破壊が支配的になっている。そこで、てこ機構に対する補強という観点からディテールの補強方法をみると、①接合部を剛にして柱主筋の付着を確保、②柱端部を補強して支圧耐力の向上、③柱主筋以外の曲げ伝達、④接合部内のはりフランジの減少または鉛直材の変更による支圧の軽減、

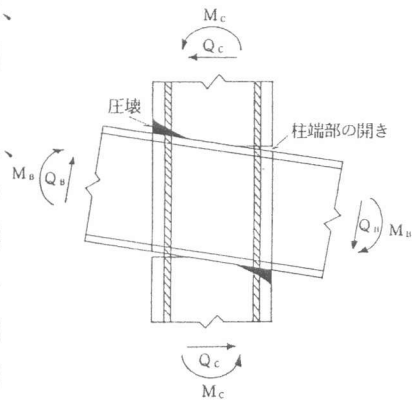
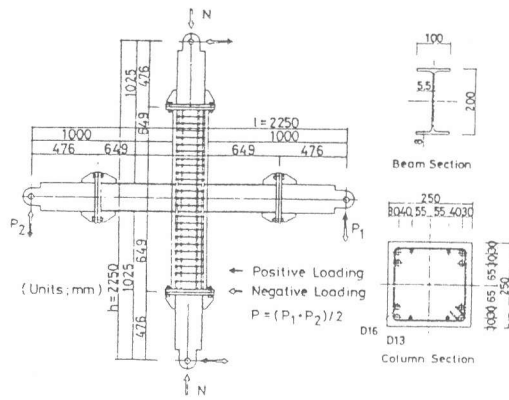


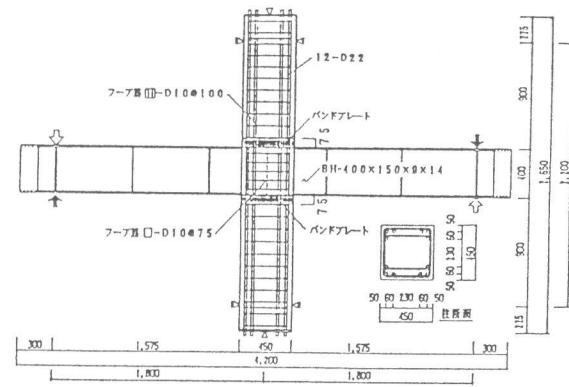
図-1 てこ機構による破壊

表-1 接合部のディテール

SRC系 (接合部内にSはりウェブ有り)			RC系 (Sはりウェブなし)
補強なし	バンドプレート補強 (柱端部)	鋼板補強 (接合部)	鉛直スチフナ補強 + 中央部RC



(1) ION試験体



(2) NO. 5試験体

図-2 試験体形状

等が効果的だと考えられる。本解析では、補強方法の中から代表的なものを2タイプ選び、①補強なし、②接合部を鋼板補強、③柱端部をバンドプレート補強の3種類を解析対象とした。また、RC系では、はりフランジ位置にのみ八角形に閉じた鉛直スチフナと中板が配置され、接合部中央部では両者を取り除いた接合部を選び、破壊モードの異なる2体を解析対象とした。各接合部のディテールを表-1に示す。

2.2 試験体の概要

SRC系では、補強なしのものは、西村らにより実験が行われたION試験体[1]、接合部鋼板補強のものは、坂口らにより実験が行われたNO.12試験体[2]、柱端部バンドプレート補強のものは三瓶らにより実験が行われたNO.5試験体[3]の3体である。RC系は、野口らにより実験が行われたUYN-1試験体[4]、YT-2試験体[5]の2体である。いずれの試験体も正負繰り返し载荷による十字型試験体で、IONを除きNO.12には 67.5kg/cm^2 、NO.5には 60kg/cm^2 、UYN-1、YT-2には 36kg/cm^2 の軸力が作用している。試験体の形状例を図-2に示す。破壊モードはIONがSはりのてこ機構による柱端部の支圧破壊、NO.12、NO.5、UYN-1の3体がSはりの曲げ降伏型、YT-2がSはり曲げ降伏後の接合部せん断降伏型である。

3. 材料特性のモデル化

コンクリート：ひびわれ発生前はDarwinらの等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル、ひびわれ発生後はひびわれ座標系の直交異方性モデルとした。圧縮応力-ひずみ関係にはSaenz式を、破壊条件にはKupferらの破壊条件を、ひびわれコンクリートの圧縮強度低減係数には野口式を用いた。圧縮応力-ひずみ関係を図-3に示す。ひびわれ面の低減せん断剛性にはAl-Mahaidi式を用いた[6]。鉄筋：主筋は線材要素または積層要素、せん断補強筋は積層要素とし、応力-ひずみ関係はバイリニア型とした。鉄骨：ウェブ部分はVon

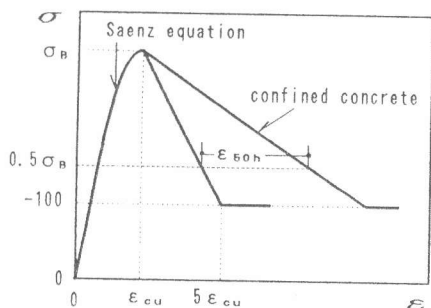


図-3 圧縮応力-ひずみ関係

-Misesの破壊条件に基づく弾塑性モデルとし、相当応力-相当ひずみ関係はバイリニア型とした。フランジ部分には鉄筋と同じ線材要素を用いた。付着：鉄筋とコンクリートの付着は、ボンドリンク要素による付着応力-すべり関係またはテンションスティフニング(白井式[6])を用いた。付着-すべり関係はバイリニア型とし、付着強度、付着剛性を表-2に示す。鉄骨とコンク

リートの付着は完全付着とした。ひびわれ：基本的には分布型ひびわれを用い、ひびわれの開口が顕著となる部分には、離散型ひびわれを用いた。

4. 解析モデル

有限要素分割の例を図-4に、解析に用いた材料定数を表-2に示す。点対象問題とし全体の1/2について、単調載荷により解析を行った。以下に、各解析モデルについて述べる。

IONでは、接合部の柱主筋の付着が早期に劣化することから、接合部内のボンドリンクの近傍のコンクリート要素にひびわれが発生することにより、ボンドリンクを切り離し応力を解放するようにモデル化した。接合部補強鋼板およびバンドプレートは、拘束効果のみを考慮し等価な補強筋として積層要素でモデル化した。鋼板で拘束された部分のコンクリートはコンファインドコンクリートとしてモデル化した。図-3に示すように強度の上昇は考慮せず、下降域の剛性のみをゆるやかにするParkらの提案式を白石が修正したモデルを用いた[7]。ここで、 ϵ_{50h} は鋼材を補強筋と同じ配筋間隔の等価な補強筋と評価して算定した。UYN-1、YT-2では、接合部内の八角形鉛直スチフナを1組で中板1枚として評価し、UYN-1に関しては直交方向のエンドプレートは省略した。また、接合部降伏型のYT-2では、実験で計測された接合部の対角方向の圧縮ひずみ（モールドゲージ）がシリンダーの最大圧縮ひずみの3倍以上に達することから、前述の鋼板で拘束されたコンクリートと同様のモデルを用いたCASE1と最大圧縮強度を1.5倍、最大圧縮ひずみを3.5倍としたCASE2の2種類の解析を行った。ION以外の試験体には直交ばりがあるが、本解析では直交ばりによるせん断抵抗は考慮していない。また、NO.12は実験ではスラブ付きであるが、簡単化のためスラブはスラブ筋のみ評価して線材要素でモデル化した。

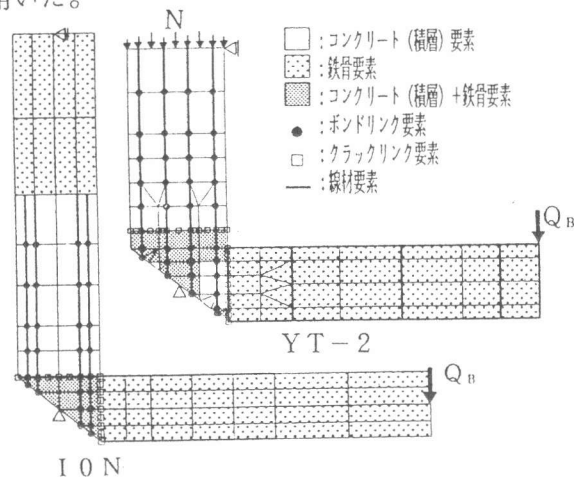


図-4 有限要素分割

表-2 材料定数

試験体	コンクリート					付着 τ_v	鉄骨			鉄筋		
	E_c	σ_B	σ_t	ϵ_{cu}			種類	E_s	σ_y	種類	E_s	σ_y
ION	2.03	292	27.3	2360	27.3	PL-5.5	2.17	3740	6- ϕ	1.99	1850	
						PL-8	1.96	3250	D-13	1.85	3670	
NO.5	2.29	273	23.4	2376	23.4	PL-16	1.92	2690	D-16	1.95	3850	
						PL-9	1.98	2730	D-10	1.87	3610	
						PL-12	1.67	3242	D-22	1.83	3763	
						PL-14	1.71	3046				
NO.12	接合部	289	21.8	2160*	21.8	PL-6	1.99	3409	D-13	1.90	3564	
						PL-12	2.07	3816	D-32	1.96	3987	
						PL-14	2.08	3713				
UYN-1	2.19	280	22.8	2140*	22.8	PL-25	2.15	3637				
						PL-5.5	1.93	4130	D-6	1.80	3648	
						PL-8	2.10	3714	D-10	1.78	3335	
						PL-9	2.10	3714	D-13	1.85	3623	
YT-2	3.89	403	36.1	1684	36.1	PL-12	2.11	2751	D-6	1.73	3811	
						PL-16	2.18	3027	D-10	2.17	8163	
									D-16	1.90	7323	

[単位] E_c ($\times 10^3$ kg/cm²), E_s ($\times 10^6$ kg/cm²), σ_B , σ_t , τ_v , σ_y (kg/cm²), ϵ_{cu} ($\times 10^{-6}$)
 [共通事項] E_{R1} =8000kg/cm², E_{R2} =400kg/cm² (付着-すべり関係)
 *: Povovicsの提案式により算定した値

5. 解析結果

5.1 変形状態

各試験体の最大荷重時の変形状態を図-5に示す。IONでは、てこ作用により柱とはりの境界部分のひびわれが大きく開き、柱端部の圧縮域が狭まり圧壊に至っている。鉄骨は、Sはりウェブの一部が圧縮降伏しているが、その他は降伏に至っていない。NO.12では、接合部ウェブのはり接合端で一部引張降伏しているが、ウェブ、補強鋼板共に健全で、変形の大部分をSはり端部

の塑性変形で占めている。NO.5では、Sはりの塑性変形が大きいが、接合部のウェブの降伏もかなり進んでいる。UYN-1では、柱、接合部の変形はわずかで、変形の大部分をSはり端部の塑性変形で占めている。YT-2(CASE1)では、接合部の変形がかなり進んでおり、接合部内のコンクリートの圧壊及び鉛直スチフナの降伏が広範囲にわたり生じていることが分かる。これらの変形性状は実験結果の特徴をよくとらえている。

UYN-1及びYT-2の層間変形に占める各変形成分の割合を図-6に示す。UYN-1では、実験と解析の変形成分の比率はほぼ良い対応を示している。YT-2では、実験の接合部の比率は、ほぼ50%で一定であるのに対し、CASE1では、 $R=10(\times 10^{-3} \text{rad.})$ では30%と小さいが、 $R=30(\times 10^{-3} \text{rad.})$ では50%と実験と同じ比率まで増大し、破壊に至っている。拘束効果による強度上昇も考慮したCASE2では接合部の比率は約30%と少なくなっている。

5.2 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形関係を図-7に示す。荷重は柱せん断力、変形は層間変形角である。IONでは、 $R=10(\times 10^{-3} \text{rad.})$ までほぼ実験値と解析値は良い対応を示し、最大荷重もほぼ一致しているが、最大荷重時の変形がやや小さめとなっている。最大耐力は柱圧縮域の要素の圧縮破壊により決定している。NO.12では、降伏開始までと降伏後の剛性は実験値と解析値はほぼ良い対応を示しているが、降伏域での剛性低下が解析の方が大きく、最大耐力に関しては、解析値が下回っている。これは解析ではスラブのコンクリートをモデル化していないので、降伏域での変形が大きくなったと考えられる。NO.5では、初期剛性は良い対応を示すが、降伏開始点が解析の方が遅れており、降伏後は解析値の方が全体的に高めとなっている。UYN-1では、初期剛性、降伏後の剛性、最大耐力に関しては実験値と解析値はほぼ一致している。曲げ降伏後の接合部降伏型のYT-2に関

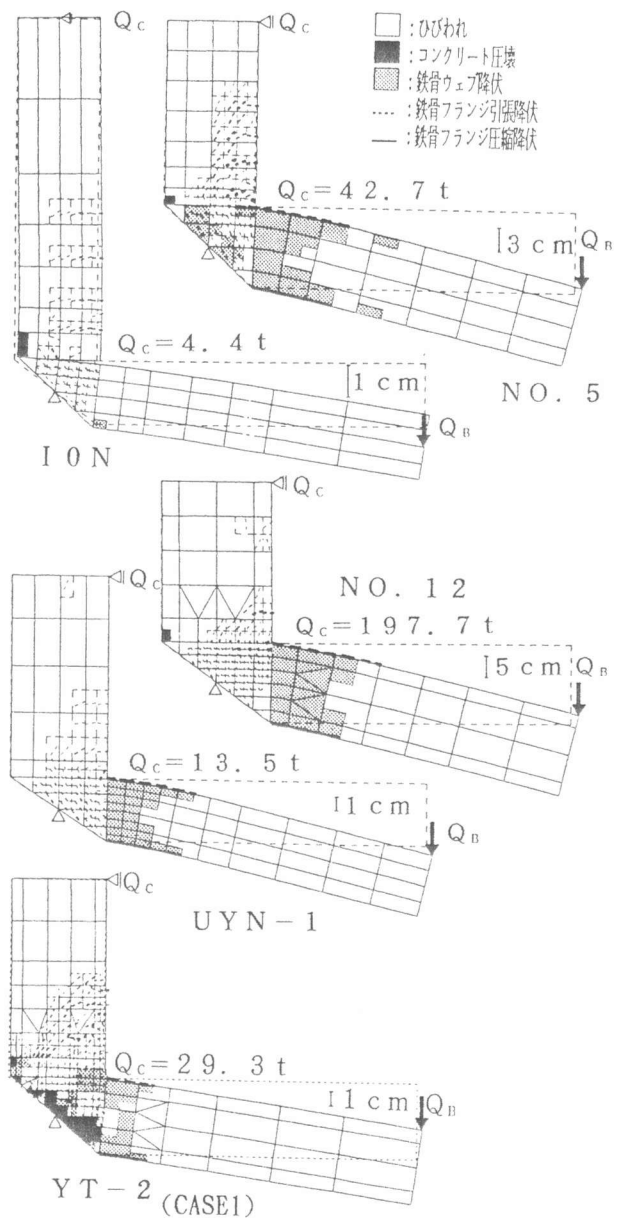


図-5 変形状態 (最大荷重時)

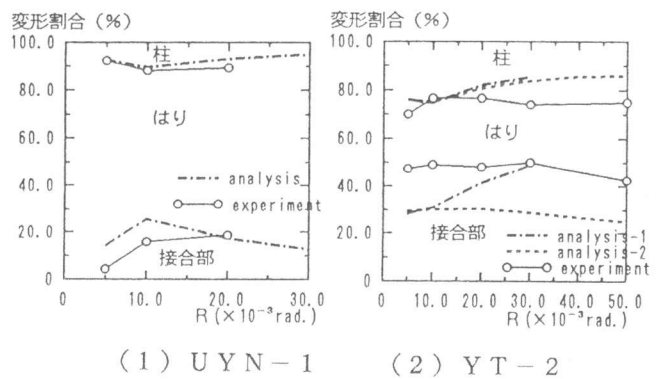


図-6 変形成分の割合

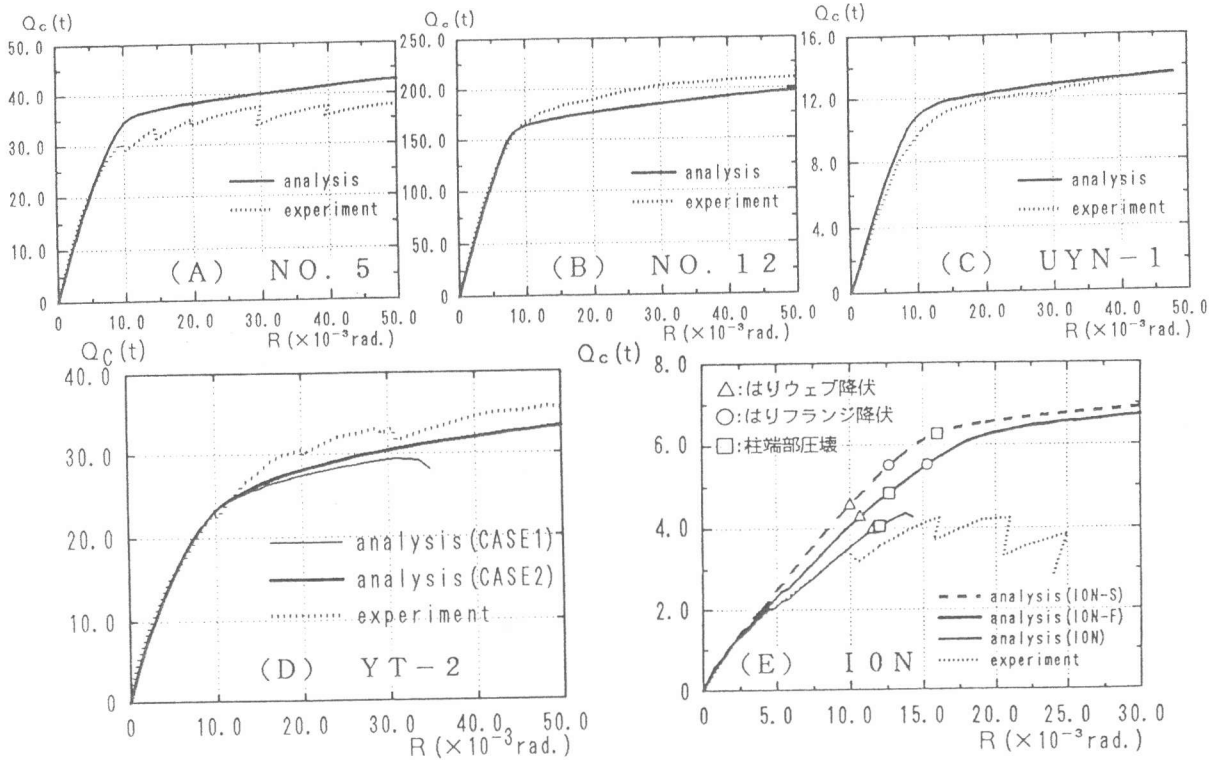


図-7 荷重-変形関係

しては、 $R=10(\times 10^{-3} \text{ rad.})$ までは、CASE1、CASE2とも実験結果と良く対応している。CASE1は、 $R=30(\times 10^{-3} \text{ rad.})$ で接合部及び柱端部の圧壊により耐力低下を起こしたのに対し、CASE2では、 $R=50(\times 10^{-3} \text{ rad.})$ まで耐力低下を起こさず実験結果とほぼ良い対応を示している。しかし、CASE2の接合部の変形成分は実験より少ないことから、接合部のコンクリートの強度上昇を考慮した結果、接合部が相対的に強くなりSはりによる変形が増大したものと考えられる。

6. 補強効果の検討

てこ機構による破壊を示したION に関して、接合部鋼板補強 (ION-S) と柱端部バンドプレート補強 (ION-F) を行った解析を行い、補強効果について検討する。

補強方法の解析モデルは前述のように鋼板で補強されているところをコンファインドコンクリートとしてモデル化する。また、ION-S では、柱主筋の付着性状が改善されることを考慮して、ION で用いたひびわれによりボンドリンクを切り放すモデルは用いないこととした。

荷重-変形関係を

図-7 (E) に示す。

$R=5(\times 10^{-3} \text{ rad.})$

以降、補強を行ったION-S、ION-Fは共にION よりも同一変形時の荷重は大きく、破壊モードもはりの曲げ降伏型に移行している。

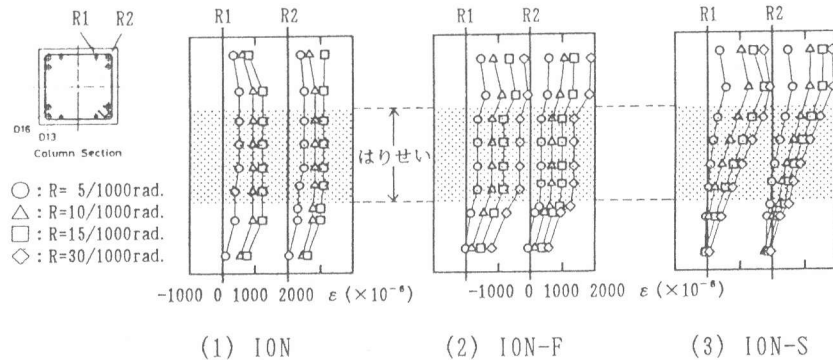


図-8 接合部の柱主筋ひずみ分布

ION-S では、 $R=13$
 $(\times 10^{-3} \text{rad.})$ でSは
 りフランジの降伏が
 始まり、 $R=16(\times 10$
 $^{-3} \text{rad.})$ で柱端部の
 圧壊が発生している。

ION-F では、 $R=13$
 $(\times 10^{-3} \text{rad.})$ で柱端
 部に圧壊が発生する
 が、バンドプレート

の拘束効果により急激な破壊は示さず、その後 $R=15(\times 10^{-3} \text{rad.})$ でSはりフランジの降伏が始まり、Sはりの塑性変形が増大している。

柱主筋の接合部内のひずみ分布を図-8に示す。ION、ION-Fでは接合部の付着は早期に喪失している。3ケースとも柱の圧縮域でも引張ひずみであるが、IONでは柱の引張域と圧縮域でのひずみ差がなく主筋は曲げに抵抗していない。ION-Fでは、端部拘束により多少改善されている。ION-Sでは、接合部内の主筋の付着が良好なため、主筋が曲げに十分抵抗していることが分かる。

接合部のコンクリートの圧縮応力度分布を図-9に示す。IONでは柱端部のひびわれが大きく開いているため柱からの圧縮力が端部の狭い領域からしか接合部に伝達されないため接合部の圧縮ストラットの領域も狭くなっている。また、応力も小さく、接合部のコンクリートが有効に機能する前に破壊に至っている。補強を行っているION-S、ION-Fでは、圧縮ストラットの領域が広くなっており、接合部のコンクリートが有効に機能していることが分かる。

7. まとめ

ディテールの異なる柱RC・はりSの混合構造接合部試験体5体の解析を行い、変形状態、荷重-変形関係に関しては実験結果をほぼ追跡することができた。また、てこ機構による柱端部の支圧破壊を示す試験体に接合部鋼板補強と柱端部バンドプレート補強の2つの補強を行い解析を行った結果、両者とも最大耐力、変形性能共に改善され、破壊モードも曲げ降伏型に移行し、補強方法がてこ作用に対して有効であることが分かった。今後、Sはりのてこ機構による支圧破壊等のコンクリートと鉄骨間の力学的性質の検討を行うと共に、本来3次元的な接合部を直接3次元で解析したり、部分的に3次元で解析しその結果を簡便な2次元にいかす等の方法によりさらに解析を進め、応力伝達機構の把握を行っていく予定である。

【参考文献】

- [1] 西村泰志, 南 宏一: はりS・柱RCで構成される内部柱はり接合部の応力伝達機構, 日本建築学会構造系論文報告集, 第401号, pp. 77~85, 1989. 7.
- [2] 杉本裕志, 坂口 昇: 鉄筋コンクリート柱と鉄骨梁で構成される架構(RCSS構法)耐力及び変形性能(その8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1323~1324, 1988. 10.
- [3] 三瓶昭彦, 佐々木仁ほか: プレストレストコンクリート柱と鉄骨梁で構成される混合構造工法に関する研究開発(その4, 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1643~1646, 1991. 9.
- [4] 米澤健次, 飯塚信一, 野口 博: 柱RC・梁Sの混合構造接合部の耐震性に関する実験的研究, 「混合構造の力学的挙動と設計・施工」に関するシンポジウム論文集, pp. 29~34, 1991. 12.
- [5] 米澤健次, 飯塚信一, 野口 博: 柱RC・梁Sの混合構造接合部の耐震性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集(投稿中), 1992.
- [6] 内田和弘, 野口 博: 混合構造接合部の有限要素解析, 「混合構造の力学的挙動と設計・施工」に関するシンポジウム論文集, pp. 15~20, 1991. 12.
- [7] 白石一郎, 狩野芳一ほか: 鉄筋コンクリート造耐震壁の最大せん断耐力に関する一考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第365号, pp. 144~155, 1986. 7.

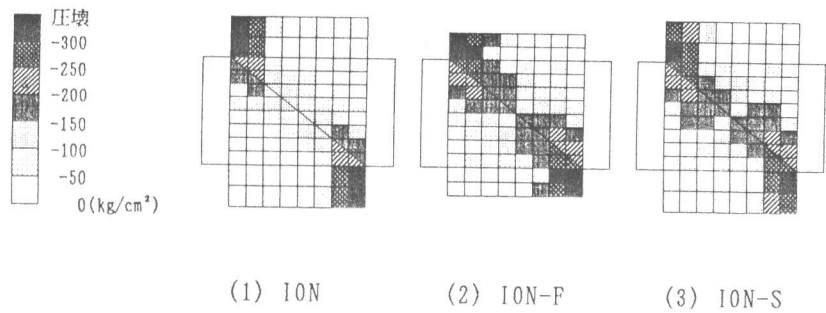


図-9 接合部のコンクリート圧縮応力度分布