

論文

[2072] はり下端筋が折曲げ定着された RC 壁柱・はり接合部に関する解析的研究

正会員○和泉 信之(戸田建設構造設計部)

濱田 聡(戸田建設構造設計部)

谷地敏和夫(戸田建設構造設計部)

根本 大治(戸田建設構造設計部)

1. はじめに

中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造集合住宅の桁行方向の架構は、偏平な壁柱とはりから構成されるはり降伏型純ラーメン構造である(図-1)。一般に内部の壁柱に取りつくはり主筋は接合部内に通し配筋されることが多い。一方、このはり主筋を接合部内で重ねることなく、別々に折曲げ定着するディテールは、はりプレキャスト工法等施工上の利点が多いが、このような壁柱・はり接合部に関する研究は少なく、地震力に対するせん断抵抗機構はまだ十分に把握されていない。

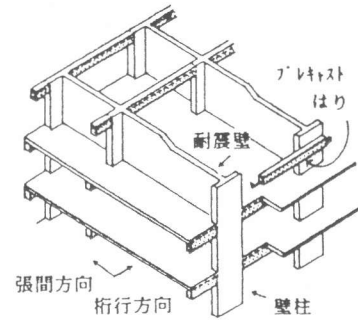


図-1 壁式ラーメン構造

本研究では、はり下端筋が折曲げ定着された壁柱・はり接合部のせん断抵抗機構を解明する第一歩として、はり下端筋の折曲げ部定着機構をボンドリンクによりモデル化し、はり降伏型十字型部分架構の有限要素解析を行い、接合部の内部応力状態から主なせん断抵抗機構を検討する。

2. 検討方法

本研究の流れを、図-2に示す。「定着モデル解析」では既往の折曲げ筋定着実験試験体の有限要素解析を行い、折曲げ部定着機構のボンドリンクによるモデル化方法を検討する。定着筋のボンドリンクの諸数値を変えて有限要素解析を行い、定着筋の応力分布及び平均付着応力等を実験結果と比較する。「接合部モデル解析」では定着モデル解析から得られた数値を用いて十字型部分架構水平加力実験のはり降伏型試験体の有限要素解析を行う。層せん断力-層間変位関係及びはり主筋の歪度分布等を実験結果と比較し、壁柱・はり接合部解析におけるはり主筋の折曲げ定着機構のモデル化の妥当性を検討する。さらに、接合部の主応力分布等から、地震力に対する主なせん断抵抗機構を検討する。なお、検討対象は壁柱の左右からはりが取りつく内部の壁柱・はり接合部とし、地震力に対してはりの曲げ降伏が壁柱及び接合部の破壊に対して先行するものとする。壁柱主筋及びはり上端筋は通し配筋定着、はり下端筋は折曲げ定着(水平長さ15d以上、総長さ30d程度、d:はり主筋径)とする。

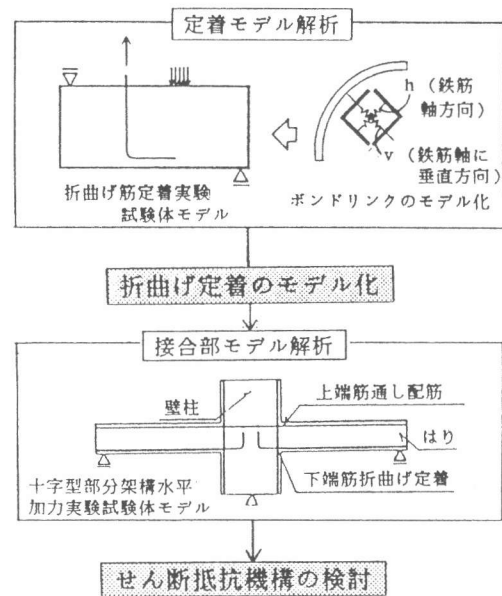


図-2 検討の流れ

3. 壁柱・はり接合部の地震時応力状態の検討

3.1 有限要素解析

本解析では、鉄筋、コンクリート、付着の材料非線形性を考慮した有限要素法による平面応力解析プログラムを使用する[1][2]。コンクリート要素には6節点三角形要素及び8節点四角形要素を、鉄筋要素には線材要素を用いる。分布ひび割れモデルによりひび割れの評価を行い、鉄筋とコンクリートの付着はボンドリンクによりモデル化する。解析は荷重増分により行い、不釣り合い力は次ステップで解除する。なお、計算量の節減のため単調荷重解析とする。

3.2 定着モデル解析

(1) 折曲げ定着筋のモデル化

折曲げ定着された主筋の定着機構は、直線部、折曲げ部及び余長部に区別して考え、既往の研究成果を考慮してボンドリンクによりモデル化する[3][4][5][6]。

①折曲げ部の付着応力は、曲げ内法部に生じる直応力による定着機構により付着機構のみの耐力より上昇すると考えられるため、折曲げ部の鉄筋軸に平行方向のボンドリンクの耐力は、直線部及び余長部より大きく設定する。

②折曲げ部の鉄筋軸に垂直方向のボンドリンクのばね定数は、折曲げ部の内側における局部的な支圧力による鉄筋のめり込み変形を考慮して直線部及び余長部より小さく設定する。

(2) 折曲げ筋定着実験試験体の有限要素解析[7]

筆者らは、既往の定着性能実験[3]における90°折曲げ定着タイプの試験体NO.9(定着長 30d、直線部定着長 15d、折曲げ内法半径3d、d:鉄筋径)を対象として、定着筋折曲げ部のボンドリンクの諸定数をかえた3ケースの有限要素解析を行い、折曲げ定着筋のモデル化について検討している。試験体配筋図及び要素分割図を図-4、5に、材料定数及びボンドリンク諸定数を表-1、2に示す。折曲げ部の付着耐力は、ケース1及び3では直線部より大きく設定し、ケース2では直線部と同一である。折曲げ部の鉄筋軸に垂直方向のボンドリンクのばね定数は、ケース1及び2では直線部より小さく設定し、ケース3では直線部と同一で非常に大きな値である。

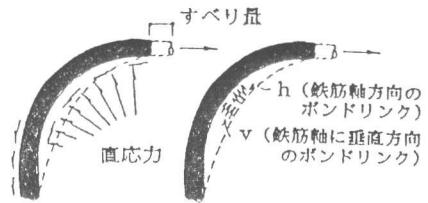


図-3 折曲げ定着部のモデル化

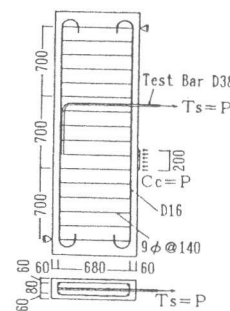


図-4 試験体

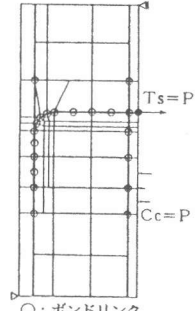


図-5 要素分割図

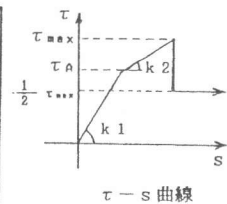
表-1 材料定数

鉄筋			
	鉄筋径	E_s (kgf/cm ²)	σ_y (kgf/cm ²)
柱筋	D16	2.1×10^6	3800
補強筋	9φ	2.1×10^6	3000
定着筋	D38	2.1×10^6	3800

コンクリート		
E_c (kgf/cm ²)	σ_B (kgf/cm ²)	f_t (kgf/cm ²)
2.71×10^5	332.0	20.0

表-2 ボンドリンクの諸定数

			τ_A (kgf/cm ²)	τ_{max} (kgf/cm ²)	K1 (kgf/cm ²)	K2 (kgf/cm ²)
直線部	h	全	40	60	1.50×10^4	5.00×10^3
	v	ケース	—	—	1.00×10^9	—
折曲げ部	h	ケー-1	100	120	1.50×10^4	5.00×10^3
		ケー-2	40	60	1.50×10^4	5.00×10^3
		ケー-3	100	120	1.50×10^4	5.00×10^3
	v	ケー-1	—	—	1.33×10^6	—
		ケー-2	—	—	1.33×10^6	—
		ケー-3	—	—	1.00×10^9	—
余長部	h	全	40	60	1.50×10^4	5.00×10^3
	v	ケース	—	—	1.00×10^9	—



h: 鉄筋軸平行方向
v: 鉄筋軸垂直方向

図-6に定着筋の応力分布を示す。ケース1では実験結果とほぼ同様の傾向を示しているが、ケース2では折曲げ部の付着力が小さいため折曲げ終点(W4)の応力が大きくなっている。また、折曲げ部の鉄筋軸に垂直方向のボンドリンクの剛性を直線部と同様に非常に大きくしたケース3では実験結果と違い、折曲げ部以降の鉄筋の応力が増大していない。図-7にケース1の直線部及び折曲げ部の平均付着応力-鉄筋応力関係を示す。直線部の平均付着応力の推移は鉄筋降伏まで実験結果とほぼ一致している。折曲げ部では柱面での定着筋の降伏以降解析値が実験値よりも高くなっているが、実験結果の傾向をほぼ表している。以上の結果から、解析では局部的なひび割れによる影響の評価は十分ではないが、ケース1の設定値により、加力端での鉄筋降伏レベルまで実験結果をほぼ表現できるものとする。

3.3 接合部モデル解析

(1) 解析対象試験体及び試験体のモデル化

解析対象試験体には、はり降伏型壁柱・はり接合部実験試験体(図-8)を用いる。試験体は実大の約1/3縮尺の十字型部分架構模型で、内部の壁柱・はり接合部の応力状態を想定して試験体の柱頭部に水平加力する(軸力は無し)。層間変形角1/100(rad)までは荷重制御、以後は変形制御とし、1/16(rad)まで正負交番繰返し載荷する。壁柱・はり接合部の横補強筋比は0.68%で、はり上端筋の通し配筋長さは42.3d、下端筋の折曲げ定着長さは水平16.3d、全長28d(d:はり主筋径)である。鉄筋及びコンクリートの材料定数を表-3に、試験体の要素分割図を図-9に示す。ボンドリンクは、壁柱・はり接合部及びはりのヒンジ領域の主筋節点に設ける。ボンドリンクの諸定数を表-4に示す。折曲げ定着部のボンドリンクの諸定数はコンクリート圧縮強度がほぼ同等であるので3.2で得られた数値とする。また、解析ははりの曲げ降伏後耐震設計で想定している大地震時の層間変形角の2倍の1/50(rad)程度の変形まで行う。

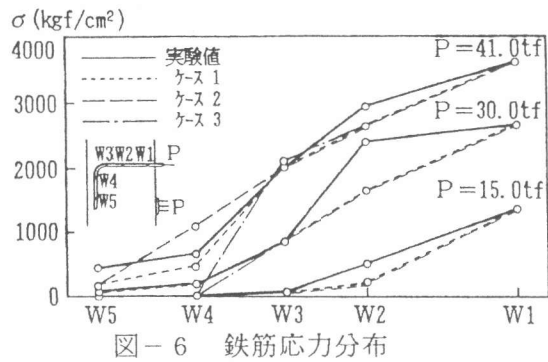


図-6 鉄筋応力分布

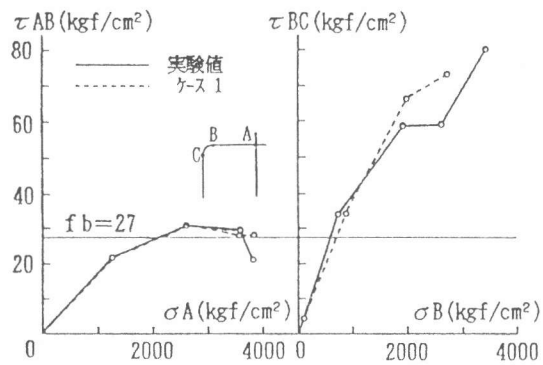


図-7 平均付着応力-鉄筋応力関係

表-3 材料定数

鉄筋			
鉄筋径	E_s (kgf/cm ²)	σ_y (kgf/cm ²)	
はり主筋	D13	1.78×10^6	3750
柱主筋	D10	1.85×10^6	3850
柱中段筋 補強筋	D6	1.78×10^6	3850

コンクリート		
E_c (kgf/cm ²)	σ_B (kgf/cm ²)	f_t (kgf/cm ²)
2.67×10^5	316.0	22.8

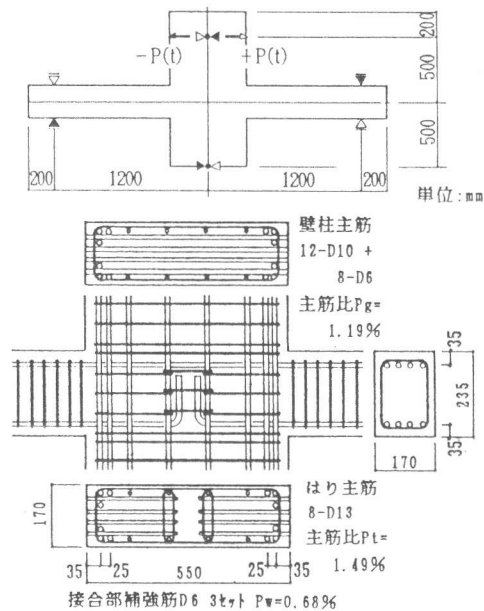


図-8 壁柱・はり接合部試験体

表-4 ボンドリンク諸定数

		τ_A (kgf/cm ²)	τ_{max} (kgf/cm ²)	K1 (kgf/cm ³)	K2 (kgf/cm ³)
直線部	h	40	60	1.50×10^4	5.00×10^3
	v	—	—	1.00×10^3	—
折曲げ部	h	100	120	1.50×10^4	5.00×10^3
	v	—	—	1.33×10^3	—
余長部	h	40	60	1.50×10^4	5.00×10^3
	v	—	—	1.00×10^3	—

h: 鉄筋軸平行方向 v: 鉄筋軸垂直方向
(記号は表-2参照)

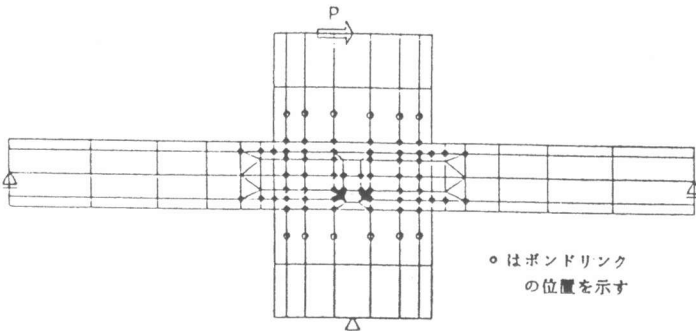


図-9 試験体要素分割

(2) 実験結果との比較

実験で得られた荷重変位関係を図-10に示す。層間変形角 $R=1/116$ (rad) では主筋が降伏した後、 $R=1/16$ (rad)では降伏荷重の約1.2倍まで耐力上昇して安定した曲げ降伏型の履歴性状を示している。実験における $R=1/50$ (rad)時の全体変形に占める接合部の変形は5%程度であり、接合部せん断変形の増大は見られない。実験による包絡線、単調載荷解析による層せん断力-層間変位関係及び諸事象の発生状況を図-11に示す。解析で得られたはり曲げひび割れ発生からはり主筋の降伏までの変形が実験結果に比べ若干小さいが、 $R=1/50$ (rad)程度まで、解析は実験結果をよく再現している。図-12では、はり上端筋の一部とはり下端圧縮部を結ぶ方向のひび割れ状況及び引張側のはり下端筋の折曲げ部とはり上端圧縮部を結ぶ方向のひび割れ状況が、主応力分布ともあわせよく対応しており、接合部内のせん断伝達方向を示唆している。

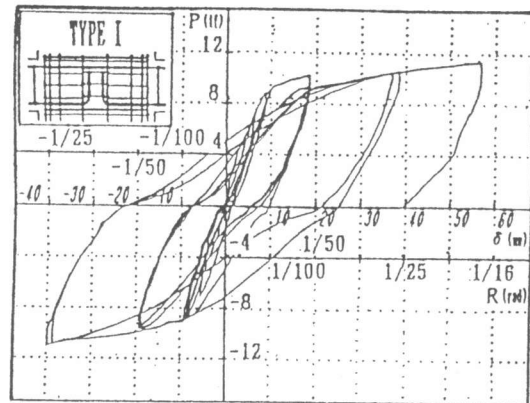


図-10 荷重変位関係

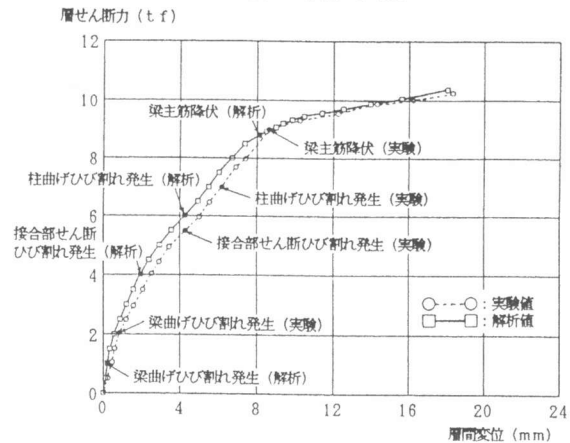


図-11 層せん断力-層間変位関係

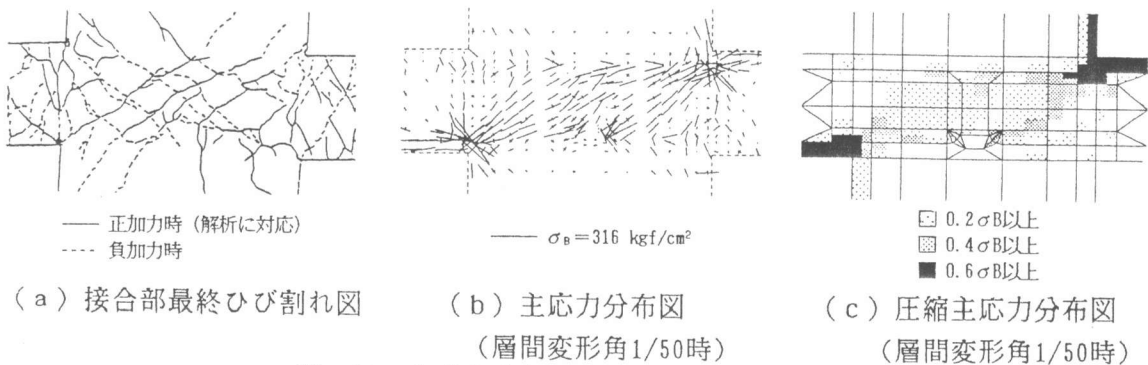


図-12 主応力分布及びひび割れ状況

はり主筋の歪度分布の比較を図-13に示す。はり上端筋、下端筋とも $R=1/50(\text{rad})$ まで接合部内に十分定着されており、解析結果は圧縮側歪度が若干異なるが、実験結果とほぼ同様である。ボンドリンクによる折曲げ定着筋のモデル化手法を用いた壁柱・はり接合部の解析モデルは、はりの曲げ降伏後、 $R=1/50(\text{rad})$ 程度の変形まで実験結果とよく対応している。解析で得られた $R=1/50(\text{rad})$ 時点での壁柱主筋及び接合部横補強筋の歪度分布をそれぞれ図-14、15に示す。実験の測定点における歪度は解析値とほぼ同等であり、また壁柱主筋及び接合部横補強筋による鉛直及び水平方向の引張力が接合部に作用していることがわかる。

3. 4 せん断抵抗機構の検討

(1) せん断抵抗機構

壁柱・はり接合部の内部応力状態から、図-16に示すストラット機構とサブストラット機構によるせん断抵抗機構が想定される。ストラット機構は、ストラット域内のはり主筋からの付着力、はり端部断面に作用する水平方向圧縮力、壁柱端部断面に作用する鉛直方向圧縮力及び壁柱中間主筋による鉛直方向引張力から形成されるものである。壁柱のせいは通常の柱の2倍程度あるので、通し配筋されるはり上端筋の付着がはり曲げ降伏後も良好であり、また壁柱端部の圧縮力の作用領域が大きいため、接合部主対角方向より角度の大きい領域でストラットが形成される。サブストラット機構は、はり折曲げ部からの定着力、はり端部断面に作用する水平方向圧縮力、壁柱端部断面に作用する鉛直方向圧縮力及び折曲げ部近傍の壁柱中間主筋による鉛直方向引張力から形成されるものである。この他に、トラス機構が考えられるが、接合部横補強筋量は多くなく、寄与は少ないものと思われる。

(2) パラメータ解析によるせん断抵抗機構の検討

想定されるせん断抵抗機構の検討のため、3. 3の接合部モデルを基本としたパラメータ有限要素解析を行う。引張側はり上端筋の接合部せいの $1/2$ の付着を無視して、はり上端筋の接合部内付着有効長さを $1/2$ としたケースA、引張側はり下端筋の接合部内の水平直線部の付着を無視したケースB及び壁柱中間主筋を無視し、接合部内横補強筋を $1/2$ 程度($p_w 0.34\%$)としたケースCについて壁柱・はり接合部の主応力分布の比較を図-17に示す。ケースAでは、主応力の角度が接合部主対角方向に近く圧縮ストラットの方向には、はり上端筋のストラット域内の付着力が関与してい

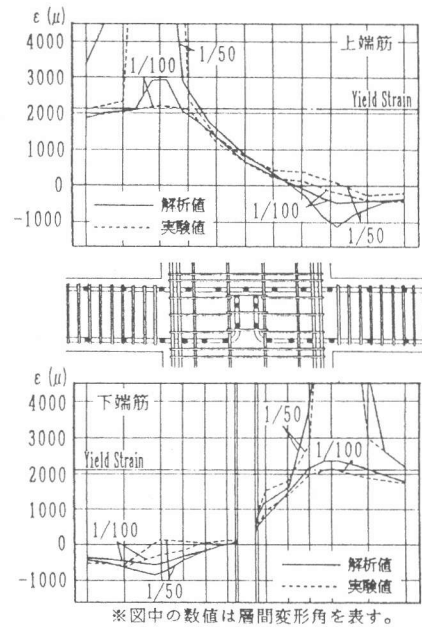


図-13 はり主筋の歪度分布

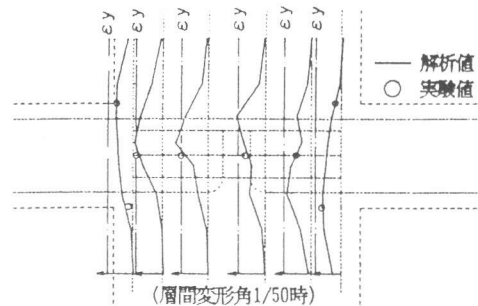


図-14 壁柱主筋の歪度分布

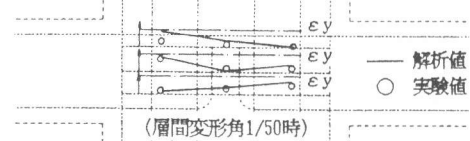


図-15 横補強筋の歪度分布

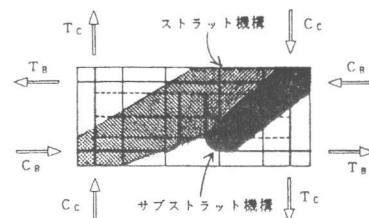


図-16 せん断抵抗機構モデル

ることがわかる。ケースBでは、はり下端筋の折曲げ部からはり上端圧縮部に向う主応力が大きく、サブストラット機構による応力の流れがより明瞭に見られる。ケースCでは、基本モデルと同様に接合部内の広い範囲で主応力が分布しており、トラス機構の寄与は明確ではない。

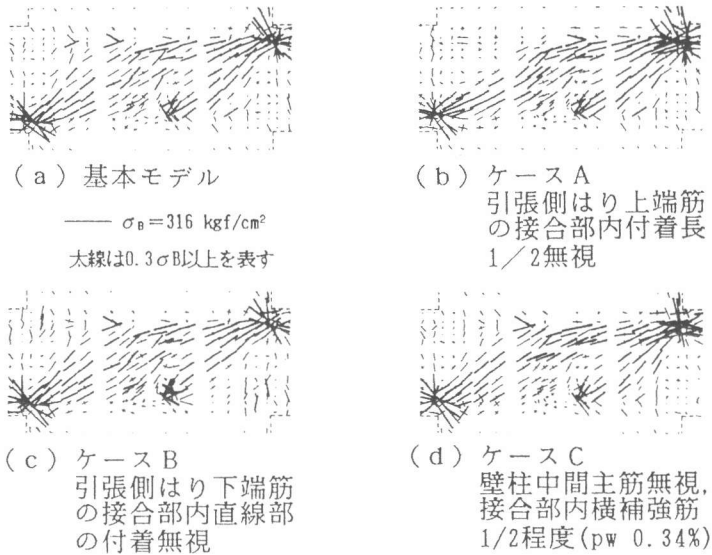
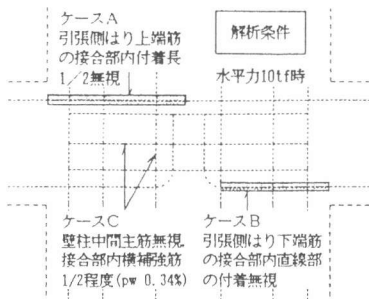


図-17 パラメータ解析における接合部主応力分布の比較

4. 結論

はり上端筋が通し配筋、はり下端筋が折曲げ定着されるはり降伏型壁柱・はり接合部の有限要素解析を行い、接合部内部応力状態の検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

本研究で用いた折曲げ筋の定着機構のボンドリンクによるモデル化は、壁柱・はり接合部に折曲げ定着されたはり下端筋の実験結果を主筋降伏レベルまで表現できる実用的方法である。

はりが曲げ降伏した後、層間変形角1/50程度までの変形における壁柱・はり接合部の主たるせん断抵抗機構は、通し配筋されるはり上端筋のストラット域内の付着力が寄与するストラット機構及び折曲げ部からの定着力によるサブストラット機構であるものと考えられる。

ただし、ボンドリンクの諸定数及び各せん断抵抗機構の耐力の定量的評価等は今後の課題である。

[謝辞] 本研究に際して、松崎育弘教授(東京理科大学)、野口 博教授(千葉大学)ならびに張愛暉博士(元千葉大学大学院)には懇切丁寧な御指導を戴きました。また、辰濃 達氏、岩淵 貴之氏はじめ東京理科大学松崎研究室の方々には御協力戴きました。ここに記して謝意を表します。

- [参考文献] 1)野口 博、長沼一洋：繰返し荷重を受けるRC部材のせん断解析モデル、第2回RCせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 97-104, 1983. 10
 2)張 愛暉、野口 博：RC造柱のせん断終局強度に及ぼす軸力の影響に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12, No. 2, pp. 329-332
 3)別所佐登志ほか：高層鉄筋コンクリート造骨組のU型はり主筋定着法に関する研究(その2、その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1795-1798, 1787. 10
 4)Minor, J. and Jirsa, J.O. : Behavior of Bent Bar Anchorages, ACI Journal, Proceedings Vol. 72, No. 4, pp. 141-149, April 1975
 5)Marques, J.L.G and Jirsa, J.O. : A Study of Hooked Bar Anchorages in Beam-Column Joints, ACI Journal, Proceedings Vol 72, No. 5 pp. 198-209, May 1975
 6)角 徹三、宮地省次：RC柱・はり外部接合部におけるはり筋定着機構に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9, No. 2, pp. 199-204, 1987. 8
 7)和泉信之ほか：梁下端筋が折曲げ定着された壁柱・梁接合部の有限要素解析による検討(その1～その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 661-666, 1991. 9