

論文 スラブ付き柱 RC・梁 S 混合構造接合部に関する解析的研究

内田和弘^{*1}・野口 博^{*2}

要旨：スラブを有し、柱 RC 梁 S から成る混合構造柱梁接合部試験体を対象として、スラブ幅をパラメータとした 3 次元非線形有限要素解析を行い、最大耐力、スラブのコンクリートや鉄筋の応力、ひずみを検討した。スラブ幅の異なる解析結果の比較より、コンクリートは、ほぼ日本建築学会 RC 規準のスラブ有効幅の範囲が圧縮で有効であり、スラブ筋は、引張側でほぼスラブ全幅にわたって有効であった。最大耐力に関してもスラブ幅の影響は小さく、RCS 構造のスラブの有効幅として RC 規準の有効幅程度が妥当であると考えられる。

キーワード：柱 RC・梁 S 混合構造、柱梁接合部、スラブ、3 次元 FEM 解析

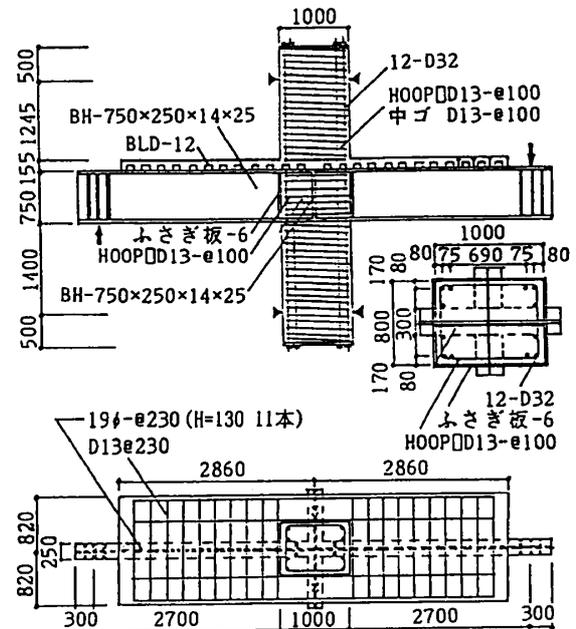
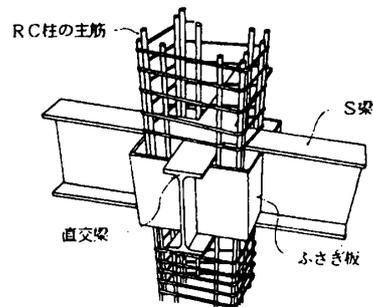
1. はじめに

柱 RC・梁 S 混合構造 (RCS 構造) の設計において、梁降伏型の崩壊メカニズムを計画する場合、柱や柱梁接合部などの非降伏ヒンジ部位には、スラブの合成効果や動的な効果を考慮して耐力余裕度が考慮される。ハイブリッド構造に関する日米共同研究で作成された RCS 構造柱梁接合部の実験データベース¹⁾によれば、436 体の柱梁接合部実験の内、スラブ付き試験体は 23 体と少なく、スラブの効果に関する検討は解析的には殆どなく、実験的にも不足している。

本研究では、既往のスラブ付き柱 RC 梁 S 接合部試験体を対象とした解析を行い、スラブが取り付けられた場合の接合部の挙動を調べると共に、スラブ幅を大きくした仮想試験体の解析を行い、スラブの有効幅を解析的に検討する。

2. 解析計画

解析対象試験体として、坂口ら²⁾が実施した No.13 試験体を選定した。同試験体は、日本建築学会 RC 規準³⁾の有効幅程度のデッキスラブを有する実物寸法試験体である。破壊モードは梁降伏型である。柱梁接合部のディテールは、

図-1 試験体形状 (No.13 (坂口ら²⁾))図-2 接合部ディテール (No.13 (坂口ら²⁾))

*1 (株)フジタ技術研究所構造研究部主任研究員 (前千葉大学大学院) 博士(工学) (正会員)

*2 千葉大学教授 工学部デザイン工学科・建築系 工博 (正会員)

梁貫通型のふさぎ板補強である。試験体の形状を図-1に、接合部形状を図-2に文献2より引用して示す。柱断面は、 $D_c \times B_c = 1000 \times 800$ (mm)で、梁断面は、 $H-750 \times 250 \times 14 \times 25$ である。接合部はふさぎ板（縞付き鋼板 CH-PL-6）で覆われている。また、デッキスラブ（BLD-12、厚さ155mm）が1640mmの幅で取り付けられている。スタッドコネクタは $\phi-19$ ($H=130@230$)が1列である。No.13試験体の柱せん断力-層間変形角関係を図-3に文献2より引用して示す。実験値と各部（接合部、柱、梁）の計算値の比較を表-1に示す。計算値の比較では、S梁の全塑性モーメントに対して、RC柱の曲げ耐力は1.58倍、柱梁接合部のせん断耐力は、1.3倍（日米RCS式¹⁾）および1.67倍（坂口式²⁾）、実験値は、1.4倍である。実験値は、日米RCS式によるせん断耐力を上回っているが、破壊モードは、接合部降伏後の梁崩壊型であったと報告されている。文献2ではNo.13試験体で想定している直交梁のスペンは明記されていないが、梁スペンが640cm、柱せいと幅の比 (D_c/B_c) が1.25であることから、直交梁スペンを480cm程度と想定し、2種類の解析ケースを設定した。

Case1: No.13試験体 (RC規準のスラブ有効幅相当 (164cm) をモデル化)

Case2: 仮想試験体 (スラブ全幅 (480cm) をモデル化)

3. 合成梁の予備解析

3次元FEM解析でスラブをモデル化する場合、コンクリート立方体要素と鉄筋線要素の組み合わせを用いる方法と鉄筋コンクリートシェル要素を用いる方法があるが、本解析では、前者を用いる。立方体要素を用いて曲げ問題を解析するには、剛性が高くなるなどの種々の問題が知られているが、柱梁接合部の解析を行う際には、スラブのみを細かく要素分割することは難しい。そこで、No.13試験体の解析に先立ち、合成梁の曲げ試験の予備解析を行い、適用性を検討する。解析対象は、平野らが実施した合成

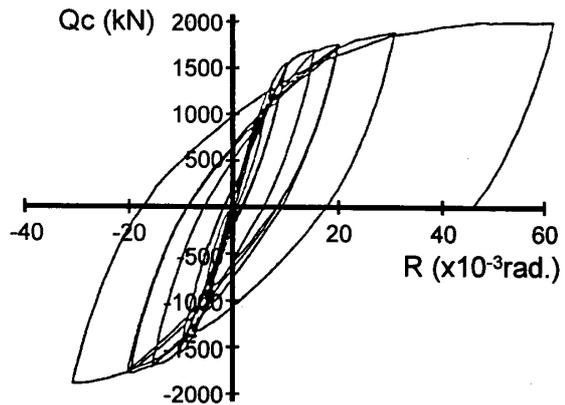


図-3 柱せん断力-層間変形角関係 (No.13 (坂口ら²⁾))

表-1 実験値と各部の計算値の比較 (耐力は、柱せん断力(kN)で表示)

	耐力	S梁単体の曲げ耐力に対する比率
実験値 ²⁾	2030.0	1.40
FEM解析値		
CASE1	2038.8	1.41
CASE2	2083.9	1.44
計算値		
柱梁接合部せん断耐力		
日米RCS式 ¹⁾	1882.5	1.30
坂口式 ²⁾	2419.2	1.67
RC柱曲げ耐力		
AIJ終局強度型 ⁶⁾	2285.2	1.58
S梁曲げ耐力		
S梁全塑性	1447.2	1.00
合成梁(限界状態 ⁷⁾)		
正曲げ	2183.3	1.51
負曲げ	1470.8	1.02
平均	1827.0	1.26
合成梁(各種合成構造 ⁸⁾)		
正曲げ	2066.6	1.43
負曲げ	1470.8	1.02
平均	1768.7	1.22
合成梁(各種合成構造 ⁸⁾ :幅=480cm)		
正曲げ	2566.0	1.77
負曲げ	1529.8	1.06
平均	2047.9	1.42

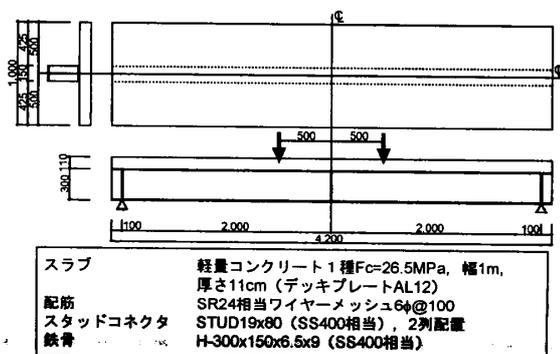


図-4 曲げ試験の概要 (合成梁曲げ試験 (平野ら⁴⁾))

梁の単純梁形式の正曲げ（スラブ圧縮），負曲げ（スラブ引張）実験⁴⁾である。曲げ試験の概要を図-4に示す。要素分割にあたっては，スラブ付き柱梁接合部の解析の場合と同程度の要素寸法比になるようにした。図-5に，荷重－変形関係の比較を示す。同図中には，平野らが実施した2次元FEM解析結果⁴⁾も併せて示す。平野らの解析では，スラブとS梁の相対ずれが接触面における仮要素により考慮されているが，本解析モデルではスラブとS梁の境界面で節点を共有し，考慮していない。正曲げに関しては，初期剛性がかなり高いが，最大荷重に関しては，実験結果と良い対応を示す。負曲げに関しては，剛性はほぼ一致し，最大荷重は実験結果よりやや低いものの，平野らの解析結果と対応している。

予備解析の結果から，正曲げの剛性が高いという点が明らかになったが，耐力評価ではほぼ妥当な結果が得られた。

4. 解析モデル

図-6に，Case1，Case2の要素分割図を示す。鉄骨梁ウェブ面での対称条件を利用して，全体の1/2をモデル化した。コンクリートには8節点立方体要素，鉄骨には4節点シェル要素，鉄筋には2節点線要素を用いた。柱主筋とコンク

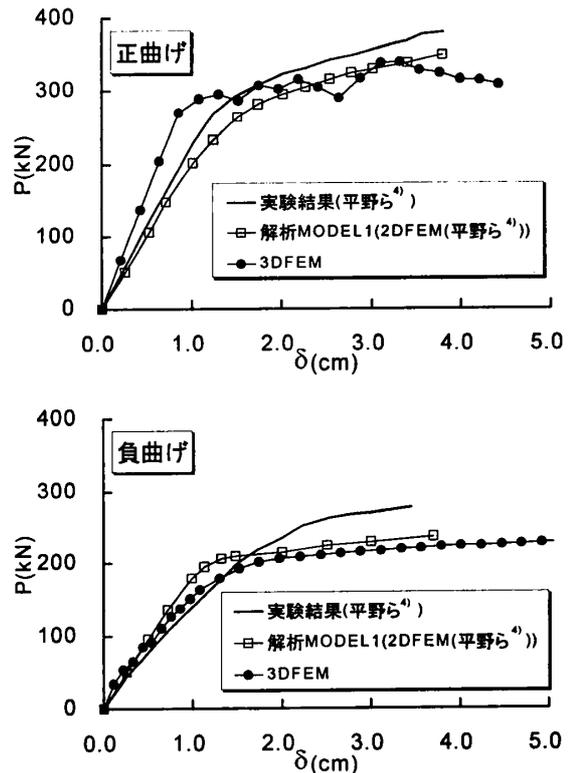


図-5 荷重－変形関係の比較
(合成梁の予備解析)

表-2 解析に用いた材料定数

コンクリート					
部位	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時の歪	圧壊後の収縮率	ヤング係数 (MPa)	引張強度 (MPa)
柱	26.5	0.00252	0.194	20496	2.3
接合部	28.3	0.00211	0.170	22359	2.1
鋼材					
部位	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)			
鉄筋					
D32 主筋	391.3	192210			
D13 帯筋, スラブ筋	349.1	186326			
鉄骨					
25mm 梁フランジ	357.0	210843			
14mm 梁ウェブ	363.8	203978			
6mm ふさぎ板	334.4	195152			
12mm デッキ	258.9	205940			
鉄筋とコンクリートの付着					
部位	付着強度 (MPa)	初期剛性 (N/mm ²)			
柱主筋	3.7	98.1			
接合部主筋	5.7	98.1			
鉄骨とコンクリート間の特徴					
部位	水平方向 (MPa)	鉛直方向 (MPa)	引張強度 (MPa)		
共通	9.8	98067	1.1		

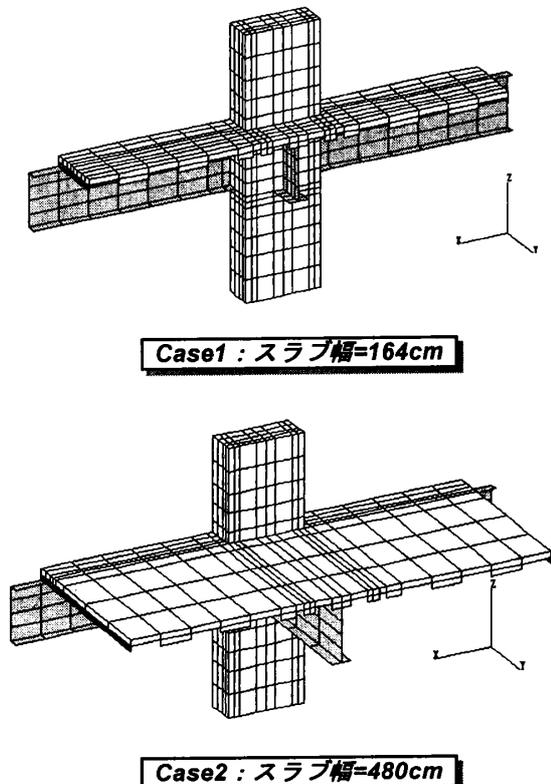


図-6 要素分割

リート間にはすべてボンドリンク要素を用い、接合部内で鉄骨とコンクリートが接する部分にはすべて接合要素を設けた。デッキプレートは、シェル要素を用い、凹凸の間隔は、柱近傍では実際の間隔に合わせている。スラブとS梁間のずれやスタッドはモデル化していない。Case1とCase2は、スラブ幅を変えるためにスラブの座標位置のみが異なり、スラブ筋比、材料データは同じである。解析に用いた材料定数を表-2に示す。材料モデルは文献5に示すモデルを用いている。

境界条件は、対称面において、全節点の対称面直交方向(Y方向)変位、シェル要素の節点の対称面内2軸(X,Z軸)の回転変位を拘束した。軸力導入時には、試験体脚部の柱のZ方向変位を、水平荷重時には、試験体の頂部および脚部のX方向変位を拘束した。加力は、軸力2648kNを載荷した後、梁端に強制変位を与え、変位制御で加力を行った。

5. 荷重-変形関係

実験結果と解析結果の柱せん断力-層間変形角関係の比較を図-7に示す。実験結果、解析結果および各計算値との比較を表-1に示す。Case1とCase2を比較すると、Case2の方がわずかに剛性、最大耐力とも大きい。その差は非常に小さい。実験結果と解析結果を比較すると、 $R=10(x10^{-3}rad.)$ までは、良好な対応を示す。 $R=10(x10^{-3}rad.)$ 以降、解析結果の方が剛性低下が少なく実験結果より荷重が高いが、最大荷重はほぼ一致している。表-1に示すように、合成梁としての曲げ耐力計算値は、S梁単体の曲げ耐力計算値の1.3倍程度(正負平均)であるが、実験結果および解析結果(Case1)の最大耐力は1.4倍程度まで上昇している。ただし、 $R=20(x10^{-3}rad.)$ では、実験値は1.23倍、解析値は1.35倍であり、S梁単体の曲げ耐力に対する余裕度として1.4倍程度が下限であると考えられる。また、RC規準のスラブ有効幅に相当するCase1とスラブ全幅をモデル化したCase2で

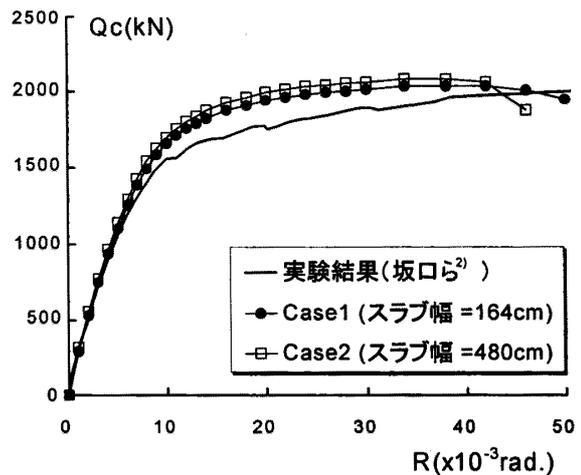


図-7 柱せん断力-層間変形角関係の比較

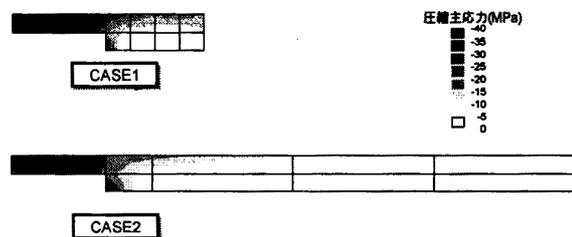


図-8 スラブ断面の圧縮主応力コンター図

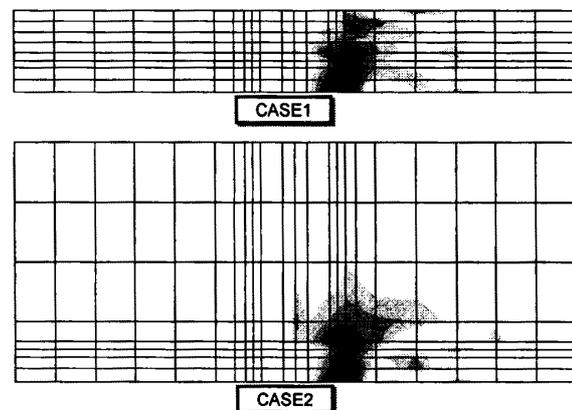


図-9 スラブ上面の圧縮主応力コンター図

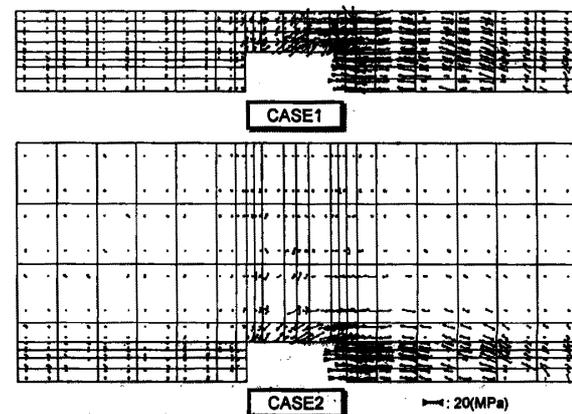


図-10 スラブ上面の圧縮主応力ベクトル図

は、最大耐力に殆ど差が見られないことから、RC 規準の有効幅の仮定が RCS 構造の有効幅としても妥当であると考えられる。

6. スラブの応力、ひずみ性状

図-8 に圧縮側スラブの柱フェイス位置断面のコンクリートの圧縮主応力コンター図を、図-9 にスラブ上面位置のコンクリートの圧縮主応力コンター図を、図-10 にスラブのコンクリートの圧縮主応力ベクトル図をそれぞれ示す。いずれも、層間変形角が、 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時のものである。図-11 に、スラブ筋のひずみ分布を示す。

Case1 と Case2 のコンター図を比較すると、スラブ幅の広い Case2 の方が圧縮主応力が 35MPa 以上の領域がやや広い。しかし、スラブ幅方向の分布に関しては、Case2 においても Case1 の有効幅に相当する位置より外側では応力は小さくなっている。ベクトル図に関しても、Case1 と Case2 の有効幅内の応力の流れ方に顕著な違いは見られない。これらのことから、コンクリートに関しては、スラブの有効幅の範囲内で、

主に応力伝達が行われていることが分かる。スラブ筋のひずみ分布をみると、引張側ではスラブ幅の広い Case2 においても、 $R=46(x10^{-3} \text{rad})$ では、全域のひずみが 0.0015 以上に達しており、有効幅を超える範囲でスラブ筋が有効に働いていたと考えられる。一方、圧縮側では、Case2 で圧縮ひずみとなっている領域は、Case1 の幅とほぼ同様の範囲であり、その範囲の外側では、引張ひずみとなっている。ただし、耐力の評価においては、スラブ筋が全幅有効に働いたとしても、中立軸位置の変動の少ない負曲げでの耐力上昇は、正曲げに比べ小さい（特に、スラブ配筋の少ないデッキスラブの場合）ので、RCS

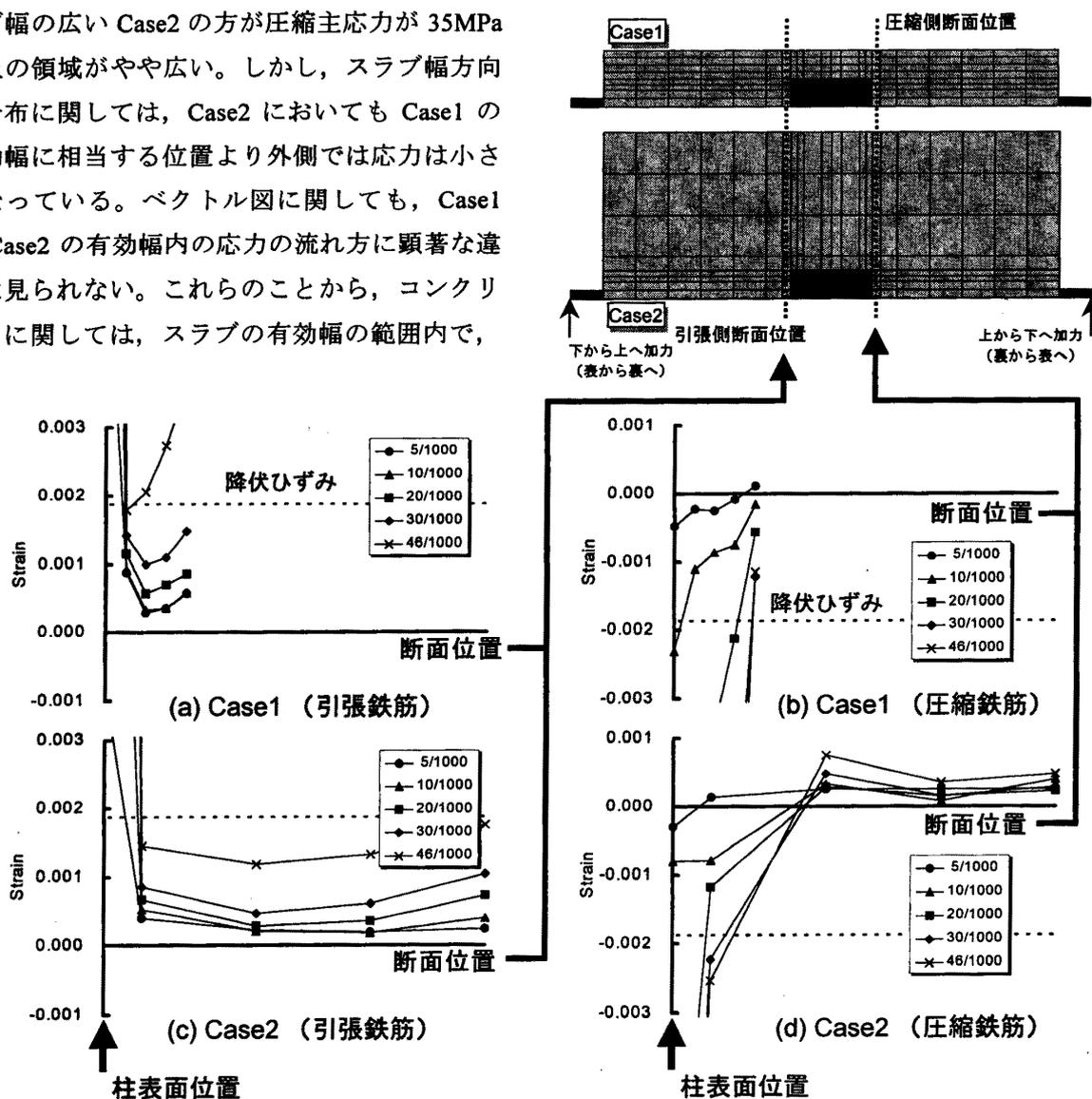


図-11 スラブ筋のひずみ分布

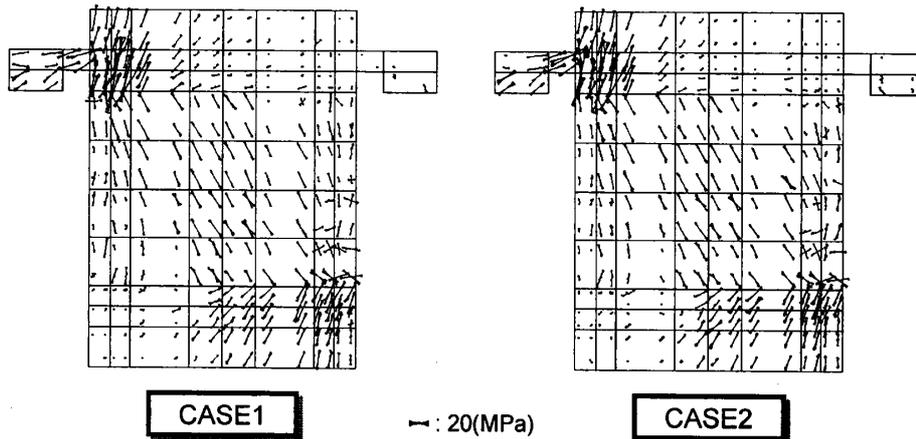


図-12 柱梁接合部の圧縮主応力ベクトル図

構造のスラブの有効幅としては、コンクリートの負担領域と対応する RC 規準の有効幅程度を考慮すればよいと考えられる。

7. 接合部の応力分布

図-12 に柱梁接合部の圧縮主応力ベクトル図を示す。同図は、梁フランジ内位置の要素の積分点の主応力ベクトルを示す。接合部内の応力の流れにも、スラブ幅の影響は見られない。

8. まとめ

スラブ付きの RCS 構造柱梁接合部の FEM 解析結果より得られた知見をまとめて示す。

- (1) RC 規準の有効幅相当のスラブを持つ柱梁接合部試験体のシミュレーション解析では、初期剛性、最大耐力に関して実験結果とよい対応が得られた。
- (2) スラブ幅の異なる 2 つの解析結果の最大耐力に顕著な違いは見られず、S 梁の全塑性モーメントの 1.4 倍程度であった。
- (3) コンクリートの応力分布より、コンクリートに関しては、ほぼ有効幅程度が圧縮で有効であり、スラブ筋のひずみ分布より、スラブ筋は、引張側でほぼ全幅にわたって有効であることがわかった。
- (4) RCS 構造のスラブの有効幅としては、コンクリートの圧縮応力の負担領域と対応する RC 規準の有効幅程度を考慮すればよいと考

えられる。

謝辞

本研究は、ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究（委員長：青山博之東京大学名誉教授）の一環として行われました。

参考文献

- 1) 建築業協会：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 柱 RC 梁 S 構造データベース検討結果最終報告書，1998.9
- 2) 坂口 昇：鉄筋コンクリート柱と鉄骨梁で構成される架構の力学的性状に関する研究，京都大学学位論文，1992.2
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1991
- 4) 平野道勝，石川孝重：有限要素法による合成梁の弾塑性解析，第 2 回電算機利用シンポジウム，pp.259-263，1980.3
- 5) 内田和弘，野口 博：梁貫通型接合部を有する柱 RC 梁 S 構造 2 層 2 スパン架構の力学的挙動に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No.514，pp.207-214，1998.12
- 6) 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・同解説，1990
- 7) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，1998
- 8) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，1985