

論文 ブレース付き混合構造の解析的研究

内田和弘^{*1}・野口 博^{*2}・三瓶昭彦^{*3}・佐藤 健^{*4}

要旨：柱R C・梁Sの混合構造にR C耐震壁に代わる耐震要素としてブレースを適用する場合、柱がR Cであるため柱梁接合部へのブレースの接合方法が検討課題となる。そこで、本論文では、ブレースの接合位置が接合部周辺に及ぼす影響及び純ラーメンとの応力伝達の違い等を検討することを目的として3次元非線形有限要素解析を行った。解析結果からブレースを梁端に接合する場合、梁端が早期にせん断降伏すること、柱梁接合部の応力は梁に近い部分を除き純ラーメンの接合部に比べ緩和されることなどがわかった。

キーワード：有限要素解析、混合構造、偏心ブレース、柱梁接合部

1. はじめに

柱R C・梁Sの混合構造は、純ラーメン構造以外に耐震壁などの耐震要素と組み合わせて用いられることが多い。しかし、耐震壁は剛性が高く、韌性に乏しいため、変形能力に優れた混合構造との組み合わせには不合理となる場合がある。そこで、適切な水平力分担割合と変形制御を行うためには、ブレースとの組み合わせが有力な手段となる。また、偏心K型ブレースのように偏心部分の塑性変形を利用して圧縮ブレースの座屈を回避することにより良好な履歴が得られるブレースの適用が有効であると考えられる[1]。

しかし、柱R C・梁Sの接合部にブレースを取り付けるためには、ブレースと柱梁接合部との接合法やブレースによって新たに接合部へ力の伝達が行われることによる応力集中などの問題がある。そこで、本論文では、4階建純ラーメンの建物の部分架構を想定した試験体を基本モデルとし、偏心ブレース付き仮想試験体の3次元非線形有限要素解析を行い、偏心ブレースが接合部周辺に及ぼす影響及び純ラーメン構造との応力伝達の違い

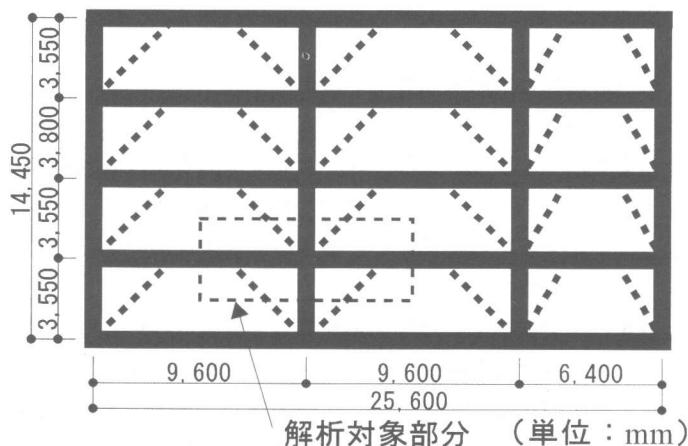


図-1 解析対象建物Y方向軸組図

*1 (株)フジタ技術研究所建築研究部構造2グループ主任研究員（正会員）

*2 千葉大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 (株)フジタ技術研究所建築研究部構造2グループ主席研究員（正会員）

*4 (株)フジタ技術研究所建築研究部構造2グループ主任、工修（正会員）

について検討を行った。

2. 解析対象

解析対象建物はX方向6スパン、Y方向3スパンの地上4階、地下1階で上部構造を柱RC・梁Sとした両方向とも純ラーメンの混合構造である。図-1にY方向の軸組図を示す。本解析では破線で示すようにY方向に偏心K型プレースを耐震要素として配置することを想定し、図中の点線で囲んだ十字型接合部を解析対象部分とした。同接合部は本建物設計時に模型実験を実施しており、解析では実験を行ったJN2試験体[2]を基本モデルとした。JN2試験体の配筋図を図-2に示す。同試験体は、実大の約1/2縮尺のスラブ付き十字型架構試験体で、RC柱の柱頭柱脚の外周は鉄骨バンドプレートで被覆してある。破壊モードは梁降伏型である。

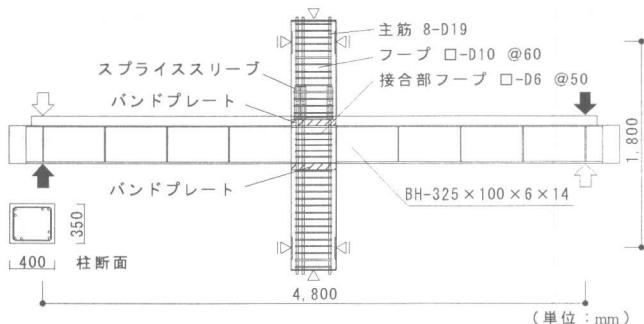


図-2 配筋図

表-1 材料の力学的性質

単位: kgf/cm ² (歪を除く)				
コンクリート	圧縮強度	圧縮強度時の歪(x10 ⁻⁶)	割裂強度	弾性係数(x10 ⁵)
	柱 277	2559	24.4	2.11
スラブ	229	1823	25.3	2.43
	降伏強度	引張強度	弾性係数(x10 ⁵)	使用箇所
鉄骨	P6	3463	4670	2.05 梁ウェブ
	P9	3243	4622	2.19 バンドプレート
	P12	3970	5617	2.14 バネルウェブ
	P14	2893	4368	2.14 梁フランジ
鉄筋	D6	3603	5060	1.90 バネルフープ、スラブ
	D10	3887	5313	1.97 柱フープ
	D19	4913	6633	1.92 柱主筋

3. 解析の種類と解析対象のモデル化

解析は以下の4ケースを実施した。

ケース1: 柱梁十字型接合部（基本モデルであるJN2試験体）。

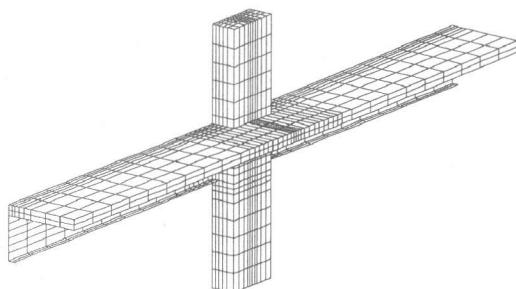
ケース2: ケース1からスラブを取り除いたもの。

ケース3: プレースの材軸の芯ができるだけ接合部の中心に近づけたもので、梁及びバンドプレートに接続されている。

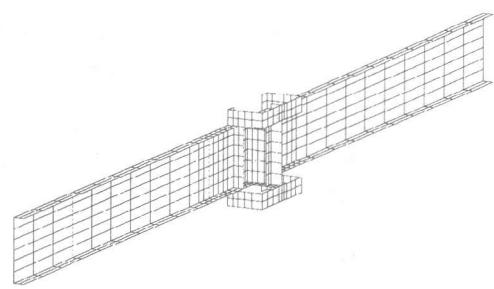
ケース4: プレースを梁の端部より離して接続されたもの（端部偏心）。

ケース2～4は仮想試験体である。ケース1ではJN2試験体の実験結果と比較を行い、解析方法の妥当性を検証し、ケース2～4の比較で、プレースの接合位置の影響及び純ラーメンの接合部との応力状態の違いを検討する。使用材料はプレースを除きすべてJN2試験体と同じとし、プレースは梁中央部での降伏が先行するように強度を十分強く仮定した。解析に用いた材料の力学的性質を表-1に示す。

ケース1、2、4の有限要素分割を図-3～5にそれぞれ示す。図-1に示すY方向フレームの破線で囲んだ部分を取り出し解析対象とした。解析は対称性を考慮して、梁ウェブの中心軸から1/2を解析モデルとした。境界条件は対称面では面ローラー支持、柱の支持点ではピン支持とした。また、プレースに関しては、建物全体の増分解析結果より、解析対象部分での上下階の



(a) 全体



(b) 鉄骨

プレース負担力に差がないことから上下階のプレースが釣り合うようにプレース境界点間に従属関係 [3] を与えて解析を行った。加力方法は、柱に軸力 ($\sigma_0 = 30 \text{kgf/cm}^2$) 載荷した後、梁端部の変位制御で載荷を行った。実験では正負繰り返し載荷であるが解析では簡単化のため単調載荷を行った。

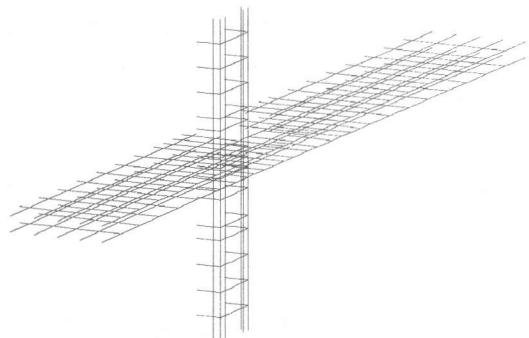
4. 材料モデル

コンクリートの構成則には、 Darwin-Pecknold[4] の等価 1 軸ひずみに基づく直交異方性亜弾性モデル（2 次元）を 3 次元に拡張して用いている [5]。1 軸の応力-ひずみ関係は、引張り側ではひび割れが入るまでは線形を仮定し、圧縮側では、上昇域で Saenz [6] の式を用い、最大応力以降の下降部分は直線で表している。3 軸応力下のコンクリートの破壊条件は Willam、Warnke[7] の 5 パラメーターモデルを用い、破壊曲面の算定は Kupfer[8] の実験結果に基づいている。ひび割れのモデルには、分布ひび割れモデルを用いている。ひび割れたコンクリートの圧縮強度の低減は行っていない。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型としている。鉄骨の構成則は、Von-Mises の降伏条件に基づく弾塑性モデルを用いている。鉄骨の座屈、鉄筋及びコンクリートの付着特性は本解析では考慮していない。

5. 解析結果

5. 1 スラブ付き十字型試験体

図-6 に柱せん断力-層間変形角関係を、図-7 に柱せん断力-柱頭部主筋のひずみ関係を、



(c) 鉄筋

図-3 有限要素分割（ケース 1）

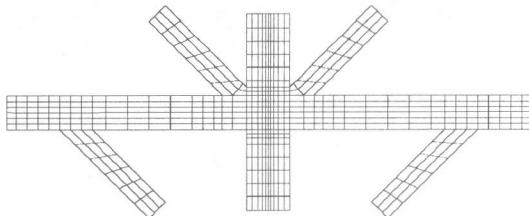


図-4 有限要素分割（ケース 3）

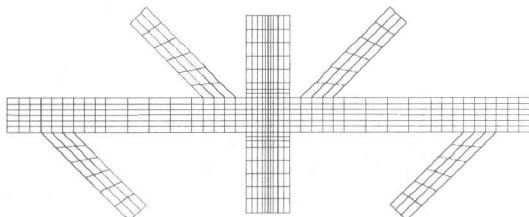


図-5 有限要素分割（ケース 4）

図-8に柱せん断力-接合部フープ筋のひずみ関係を、図-9にバンドプレートの水平方向のひずみ分布をそれぞれ実験結果と解析結果（ケース1）を併せて示す。図-5～8を見ると解析結果は良好に実験結果と一致していることがわかる。ただし、実験結果では、 $R=30 \times 10^{-3}$ rad. で最大耐力に達した以降、耐力が頭打ちになっているのに対し、解析結果では荷重が増大している。破壊モードは実験解析とも梁の曲げ降伏型で一致しているが、最大耐力以降のRC部分の劣化を解析では過小評価していると考えられる。バンドプレートのひずみは解析値の方が小さめであるが、分布形状は概ね一致している。

5. 2 ブレース付き仮想試験体

図-10にケース2～4の水平力-層間変形角関係を示す。ケース2は梁の曲げ降伏で、ケース3、4は梁中央部のせん断降伏で耐力が決まっている。ケース3、4とも $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad. で梁中央部のブレース近傍でせん断降伏が始まり、ケース3では梁の端部でも $R=2.0 \times 10^{-3}$ rad. でせん断降伏が開始している。ケース3、4ともほとんどの水平力をブレースが負担しているが、梁端部も偏心させたケース4の方が柱の負担が大きくなっている。ケース3と4ではブレースの位置を変えているのでせん断降伏する梁中央部のスパンが変わっており、耐力に差が出ている。

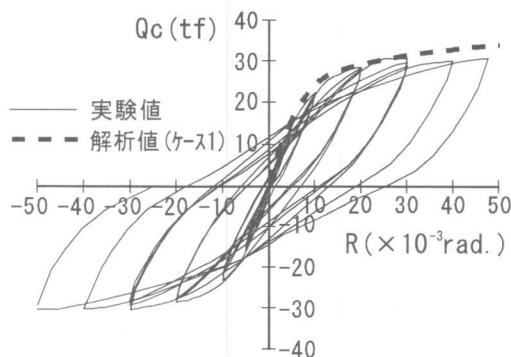


図-6 柱せん断力-層間変形角関係

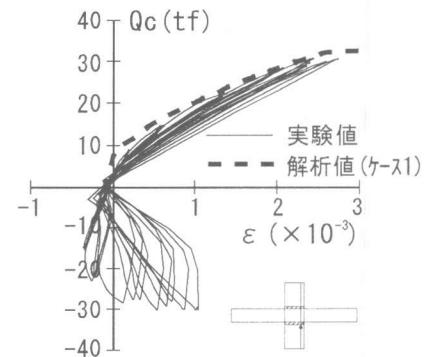


図-7 柱せん断力-主筋ひずみ関係

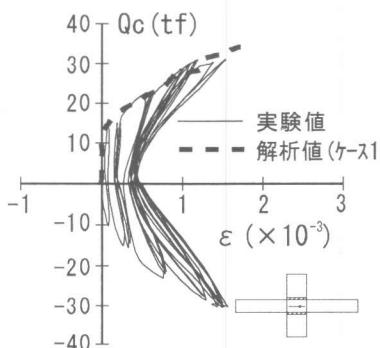


図-8 柱せん断力-フープ筋ひずみ関係

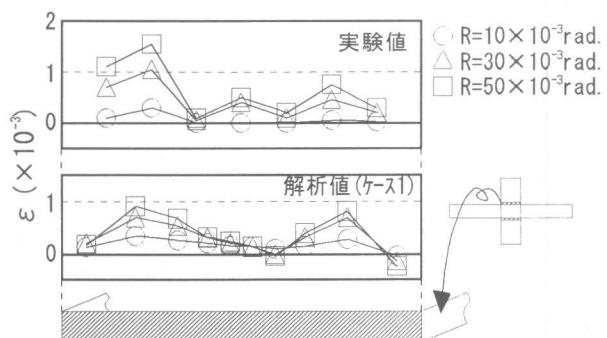


図-9 バンドプレートのひずみ分布

6. 接合部及び接合部周辺の応力状態

ケース2～4の接合部周辺の鉄骨の梁ウェブ断面のせん断応力度分布を図-11に、鉄骨フランジの端部の断面でのコンクリートの圧縮主応力度分布を図-12にそれぞれ示す。同図は $R=20 \times 10^{-3}$ rad. 時のものである。せん断応力度分布を見ると、ケース2では梁から大きな曲げモーメントが作用し接合部ウェブに大きなせん断応力が発生しているが、ケース3、4では梁から直接入力するせん断力としてはケース2よりかなり大きいが曲げモー

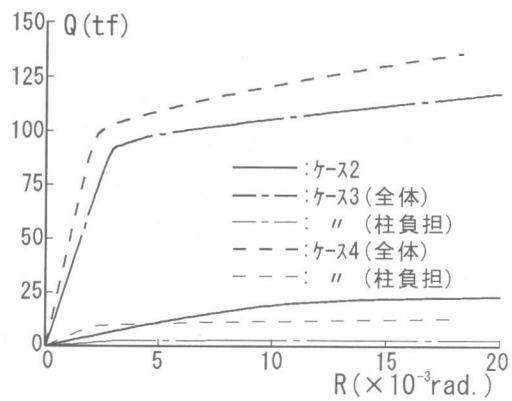


図-10 水平力一層間変形角関係

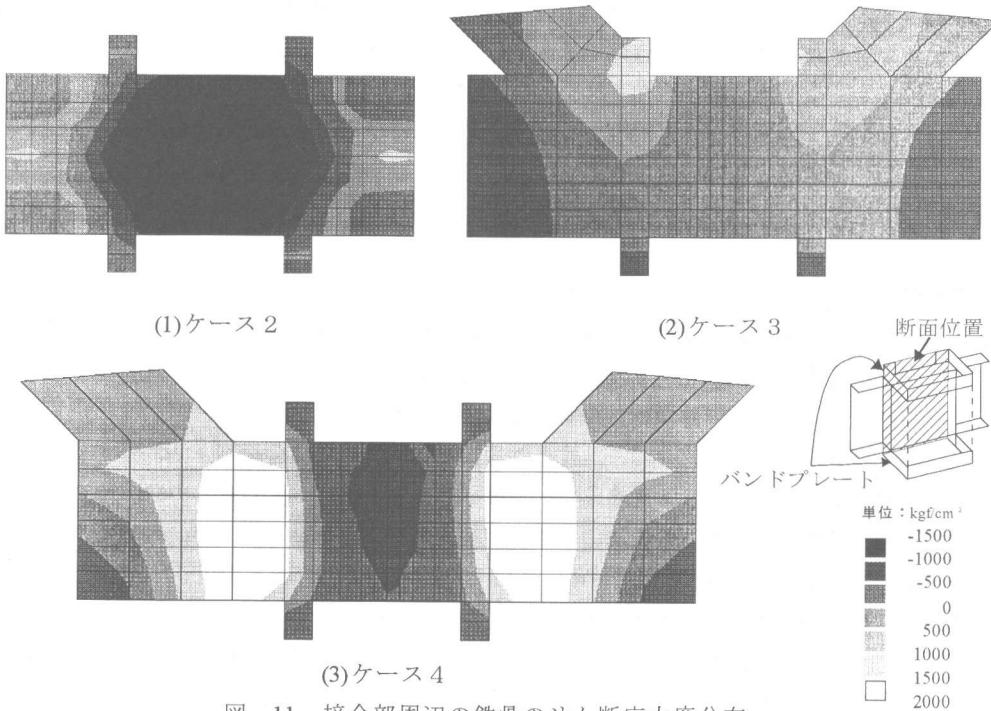


図-11 接合部周辺の鉄骨のせん断応力度分布

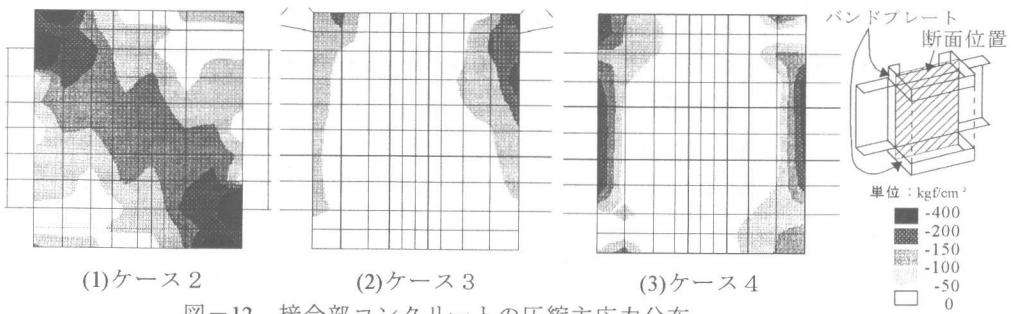


図-12 接合部コンクリートの圧縮主応力分布

メントが小さいため接合部内のせん断応力は小さくなっている。また、ケース2、3と4ではせん断応力は逆向きに作用している。プレースをバンドプレートに接合したケース3では、引張側プレースからバンドプレート部分に直接引張力が入るため、バンドプレートのリブの梁フランジ近傍に降伏が生じている。また、梁端部に偏心してプレースを取り付けたケース4では、梁の端部のせん断応力が大きく、梁の中央部と共にせん断降伏が生じており、端部を偏心させてプレースを取り付けるためには補強が必要である。コンクリートの主応力分布を見てもケース2では対角線上に応力が分布しているがケース3、4では梁の近傍に応力集中が見られるものの接合部内の応力は小さい。

7. まとめ

4階建純ラーメンの実施設計建物の部分架構を想定した試験体を基本モデルとし、偏心プレース付き仮想試験体の3次元非線形有限要素解析を行った結果以下の知見を得た。

①本解析において基本モデルのスラブ付き十字型架構の挙動を精度良く追跡することができた。
②プレースを付けた場合、接合部内のコンクリート部分の応力は、梁及びバンドプレートの近傍を除けば、十字型架構に比べ緩和される。

③プレースを梁端部に偏心させて接続する場合、梁端部に早期にせん断降伏が生じる。

今後は、プレースが片側にのみ取り付く場合の検討及び実際の施工を考慮したプレースの接合位置や補強方法などを検討していく予定である。

参考文献

- 1) 佐藤 健、五味晴人、胡木清人、内田和弘：偏心K型プレース付き柱RC・梁S構造の設計法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、1995（投稿中）
- 2) 三瓶昭彦、佐々木仁、岸井知行、山本哲夫、小林 進、久保田勤、五味晴人、松戸正士、松原洋志：プレキャ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6、7、10）、日本建築学会大会梗概集、pp1899-1902、1907-1908、1992.8
- 3) 山田嘉昭、横内康人：有限要素法による弾塑性プログラミング、培風館、1981
- 4) Darwin, D. and Pecknold, D. A. : Analysis of R/C Shear Panels under Cyclic Loading, J. Struct. Div. ASCE, vol. 102, no. ST2, Proc. Pap. 11896, 355-369., 1976
- 5) 雨宮 篤、内田和弘、野口 博：鉄筋コンクリート部材の3次元非線形有限要素解析プログラムの開発、コンクリート工学年次論文報告集、pp21-26、VOL. 14、No2、1992
- 6) Saenz, L. P. : Discussion of "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete" by Desai and Krishnan, Proc. ACI, vol. 61, no. 9, 1229-1235., 1964
- 7) Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H. : Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, J. Am. Concr. Inst., vol. 66, no. 8, 656-666., 1969
- 8) Willam, K. , J. and Warnke, E. , P. : Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete, IABSE Seminar on Concrete Structure subjected Triaxial Stresses, Bergamo, 1-30., 1974