

正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の三次元非線形FEM解析

自社開発ソフト“FINAL[®]”の精度向上

米澤 健次 長沼 一洋
江戸 宏彰

Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis for Reinforced Concrete Members under Reversed Cyclic Loading

Improvement in accuracy of in-house software "FINAL[®]"

Kenji Yonezawa Kazuhiro Naganuma
Hiroaki Eto

Abstract

A three-dimensional nonlinear finite element method has been developed for reinforced concrete (RC) members subjected to reversed cyclic loads. This has been difficult to achieve up to now. To simulate the behavior of RC members under seismic force, it is necessary to represent plural cracks in multi-directions. Therefore, a 3D multi-directional cracked concrete model under tri-axial cyclic stresses has been developed. Furthermore, the bond stress - slip model between concrete and reinforcing bars has been improved to enhance the analytical accuracy. Verification analyses were conducted for RC specimens including a beam, a viaduct Rahmen frame, columns and beam-column joints. It was thus found that the behaviors of RC members subjected to reversed cyclic loads can be simulated well, except for hysteresis loops in post-peak regions.

概要

従来は実施が困難であった、正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート(RC)部材に対する三次元有限要素法(FEM)解析のための材料構成モデルを開発した。地震力を受けるコンクリート系部材の挙動をFEM解析で予測するためには、多方向に複数のひび割れが表現できるひび割れモデルが必要である。そこで、三軸応力下において、任意の角度で交わり複数のひび割れが表現できる非直交分散ひび割れモデルを開発した。さらに、繰返し荷重下のRC部材の履歴特性に大きな影響を与える鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係を考慮するための解析モデルを導入した。これらのモデルを用いて、梁、高架橋フレーム、柱、及び柱梁接合部の既往の実験を対象として、正負繰返し載荷解析を実施し、モデルの適用性を検討した。その結果、最大耐力到達後の大変形時における履歴特性の解析精度に改良の余地はあるものの、繰返し荷重下におけるRC部材の挙動を良好に再現できることを確認した。

1. はじめに

RC部材の力学的挙動を再現するための有力なツールとして、近年、有限要素解析のニーズは高まっており、その解析技術の向上を目的に研究開発が活発に行われている。当社でもRC部材の非線形有限要素解析ソフト“FINAL”を開発し、1985年から現在に至るまで継続的にその解析精度の向上と適用範囲の拡大に取り組んできた。現在では本ソフトの使用性が向上し、パソコン上で解析及びポスト処理が可能になっており、広く実務に利用されつつある。FINALに関する研究開発は、原子力関連構造物のように面内せん断力を受けるRC壁体の解析精度の向上を目指して、1986~1988年にRC平板を用いた一連の基礎実験¹⁾を実施し、独自の構成則^{2), 3)}を開発した。その後、主に面部材を対象とした正負繰返し荷重に対する解

析技術⁴⁾の開発を経て、現在では時刻歴応答解析^{5), 6)}も可能になっている。一方、三次元解析に関しては、1990年より三軸応力下のコンクリート構成則の研究開発が始まり、単調荷重時における解析精度は向上している。コンクリートを対象とした三軸応力下の材料構成モデルを用いたFEM解析は、単調載荷で行われているものが殆どで、繰返し載荷解析が実施された例は殆どないのが現状である。

そこで、本研究では繰返し荷重下のRC部材を対象とした三次元FEM解析手法の開発を行った。繰返し荷重下におけるRC部材の挙動は単調荷重時の挙動と異なり、載荷経路の違いが強度及び靱性能に大きな影響を与えることが今までの実験等で明らかにされている。ゆえに、FEM解析により地震力を想定したRC部材の性能評価を行う場合には、載荷履歴の影響が考慮できる手法が不可欠と言

える。

繰返し荷重を受けるRC部材には、荷重の組合わせによって多方向にひび割れが生じる。FEM解析でその様々なひび割れパターンに対応するために、三軸応力下の非直交ひび割れモデルを開発した。このモデルでは、複数のひび割れが任意の角度で交わることができ、計9方向のひび割れが表現可能である。さらに解析精度を向上させるために、部材の履歴特性に大きな影響を与える鉄筋とコンクリート間の付着すべりモデルをより実際の挙動に近いものに改良した。

本報では、これらのモデルの開発と既往の実験を対象とした検証解析の結果について述べる。

2. 三軸応力下の非直交ひび割れモデル

地震力を想定した正負繰返し荷重を受けるRC部材には、荷重の組合わせによって多方向にひび割れが生じる。一例として、Fig. 1に引張軸力に加え正負繰返し水平力が作用した場合のひび割れパターンを示す。引張軸力による水平ひび割れと正負繰返し水平力による左右対称な斜めひび割れを想定した時、各々のひび割れが任意の角度で交わることがわかる。このように、RC部材の正負繰返し荷重解析を行う上では、様々な荷重条件に対応するひび割れパターンを再現できる解析モデルが必要である。

従来の三軸応力下におけるひび割れのモデル化は、固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルに大別される。三軸応力下の固定ひび割れモデルは、単一のひび割れ座標系（直交3方向）により表現されており、2、3本目のひび割れは常に1本目のひび割れに直交するものと限定される。一方、回転ひび割れモデルは、主ひずみ軸とひび割れ軸の一致を仮定したもので、主ひずみの回転に伴いひび割れも回転し、複数のひび割れの相互関係を表現できない。

そこで、任意の角度で交わることができ、最大9方向のひび割れを再現できる三軸応力下の非直交ひび割れモデルを開発した。平面応力下の非直交ひび割れモデルはすでに開発しており⁶⁾、そのモデルを三軸応力下へ拡張

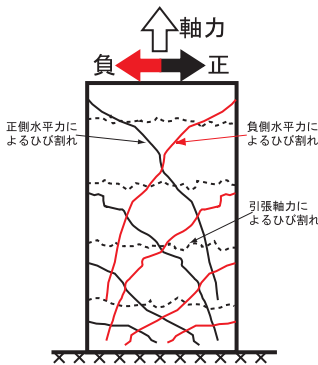


Fig. 1 ひび割れパターンのイメージ
Image of Crack Pattern

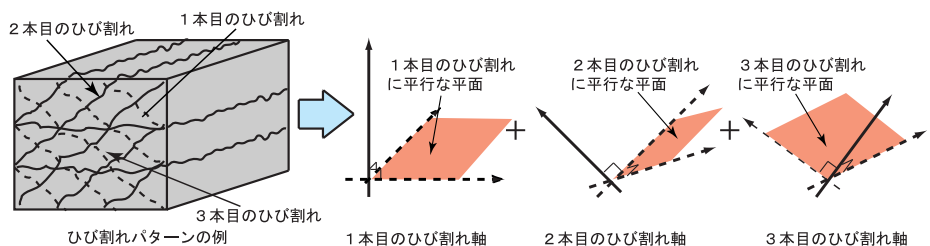


Fig. 2 3次元非直交ひび割れモデルの概念
Concept of 3D Multi-directional Crack Model

することを基本方針とした。本ひび割れモデルは1つの剛性評価点に対して、3つの独立した直交3方向ひび割れ座標系の組合わせにより、非直交なひび割れを表現している。Fig. 2に本ひび割れモデルの概念を示す。

繰返し載荷時の荷重の反転などによる主軸の回転を表現するために、ひび割れ発生前は、コンクリートの主軸方向を主応力方向に一致させ、初期の主軸方向より ± 45 度以上回転した場合は、それぞれの主軸の履歴データを入れ替える。ひび割れ後は、主軸方向はひび割れ方向に固定するが、ひび割れ方向のせん断伝達によって主応力方向はひび割れ方向と異なり、主応力がひび割れ強度に達した時、主応力と直交方向に新たなひび割れの発生を許容する。但し、ひび割れ軸と主応力方向の交差角の最大が20度以上の場合に限定した。

繰返し応力下における主軸の方向は、全てのひび割れが閉じている時は、主応力方向に一致させ、ひび割れが開いている場合には、既存のひび割れのうち、ひび割れ直交方向の引張ひずみが最も大きい軸に一致させる。

なお、繰返し載荷解析に適用するために、応力レベルが低い段階では等方弾性材料として扱い、主応力が引張強度以上、あるいは、主圧縮応力が一軸圧縮強度の0.3倍に達した後に、直交異方性体として扱う。

本モデルの妥当性の検証は文献⁷⁾を参照されたい。

単調載荷の場合であっても、1本目のひび割れが生じた後、ひび割れ面のせん断伝達により、2本目のひび割れが1本目と異なる方向に生じることがある。本モデルを用いることで、単調載荷解析の精度も向上するものと考えられる。

3. 鉄筋とコンクリート間の付着すべりモデル

鉄筋とコンクリート間の付着 - すべり関係に関しては、不明な部分が多く適用性に富む解析モデルは提案されていない。今までの研究では、この付着応力 - すべり関係は、繰返し回数、鉄筋周りのコンクリートの応力状態に大きく依存することが指摘されている。通常FEM解析で付着すべりを考慮する場合は、Fig. 3に示すように鉄筋要素とコンクリート要素の節点を別々に定義し、その間に接合要素を挿入し、付着応力 - すべり関係を定義する方法が一般的である。ここで、問題となるのは、接合要素の特性として与える付着応力 - すべり関係をどのように定義するかである。

鉄筋とコンクリート間の付着破壊は、大きく2種類に

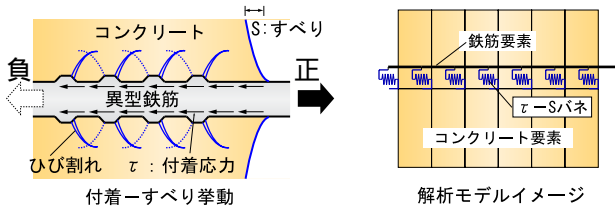


Fig. 3 付着すべり挙動のモデル化
Modeling of Bond Slip Behavior

大別されると考えられ、異形鉄筋のリブ周辺のコンクリートが局部的に圧壊してすべり出すモード（付着破壊）とリブのくさび作用によるコンクリートの割裂、いわゆる付着割裂破壊がある。例えば、基礎等マッシブなコンクリートに埋込まれた鉄筋の抜け出しは前者に相当し、柱や梁部材に対しては後者が支配的になると考えられる。最大付着応力レベルは、前者は後者に比べかなり大きくなる。

ここでは、両破壊モードともにElmorsi等⁸⁾の提案に基づいて、付着応力 - すべり関係を仮定した。Fig. 4に付着応力 - すべり関係を示す。本モデルの履歴特性は、過去に経験した包絡線上の最大すべり点を常に目指す除荷特性を仮定し、再載荷特性としては包絡線からの除荷点を目指すものと仮定している。ここで、包絡線の形状を決める係数として、 $\alpha_1, \alpha_2, S_1, S_2, S_3$ があり、すべりに関する係数 (S_1, S_2, S_3) はElmorsi等の提案に基づきTable 1に示すように設定した。しかし、Table 1に示す値はコンクリート強度が $20\text{N}/\text{mm}^2$ 、鉄筋D25の場合に限定される。鉄筋とコンクリート間の付着特性はコンクリート強度や鉄筋径に大きな影響を受けることは明白であり、これらの係数の算定法は今後の検討課題の一つに挙げられる。また、最大付着応力 (τ_1) は、RC靱性指針⁹⁾による付着割裂時の付着応力と付着破壊時の付着応力のいずれか小さい方の値を採用した。また、 α_2 は除荷・再載荷特性の直線から曲線に移行する点、つまり異形鉄筋のくさび作用から摩擦作用への移行を示し、森田・角等¹⁰⁾の提案に従い α_1 の0.18倍とする。除荷・再載荷特性の直線部の剛性は、 $40\text{N}/\text{mm}^3$ と仮定した。

4. コンクリートと鉄筋の材料モデル

コンクリートの応力 - ひずみ関係の履歴特性をFig. 5に、ひび割れ方向のせん断応力 - せん断ひずみ関係⁴⁾をFig.6に示す。三軸応力下の非直交ひび割れモデルの開発に当たり、平面応力下で適用されていたコンクリート構成則を三次元応力下へ拡張した。ここでは、主にひび割れ後のテンションスティフニング特性（以下、TS特性）、及びひび割れ面のせん断伝達特性（以下、GM特性）の構成則に着目した。TS特性はコンクリートの一軸圧縮強度、鉄筋比、ひび割れ方向の圧縮剛性低下率の関数とした長沼・山口モデル²⁾を、GM特性はひび割れ方向のせん断応力 - せん断ひずみ関係で表現する長沼モデル³⁾を三軸応力下に拡張した。ひび割れ方向のせん断応力 - せん断ひずみ関係における包絡線はコンクリートの一軸圧

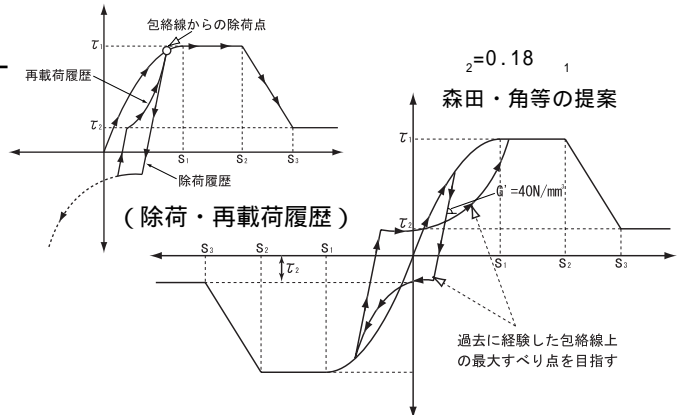
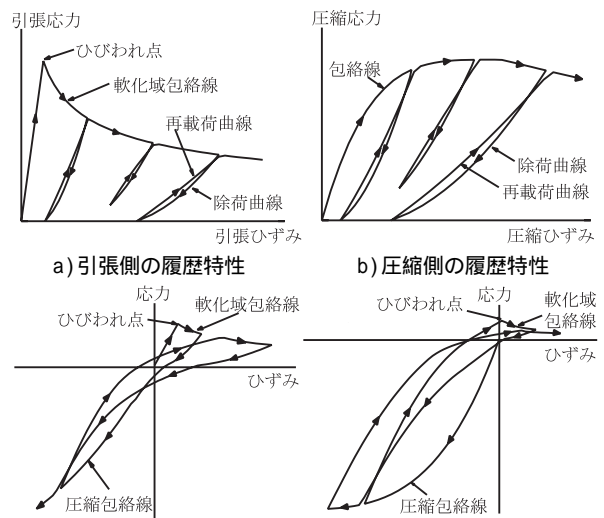


Fig. 4 付着応力 - すべり関係のモデル化
Idealized Bond Stress - Slip Relationship

Table 1 各変化点のすべり量

	Slip at Turning Points			
	拘束コンクリート	フープ筋の掛かった主筋	無拘束コンクリート 押抜き	引き抜き
S_1 (mm)	1.0	1.0	0.3	1.0
S_2 (mm)	3.0	3.0	0.3	3.0
S_3 (mm)	10.5	100.0	1.0	10.5



a) 引張側の履歴特性 b) 圧縮側の履歴特性

Fig. 5 コンクリートの応力 - ひずみ関係
Stress - Strain Relationship of Concrete

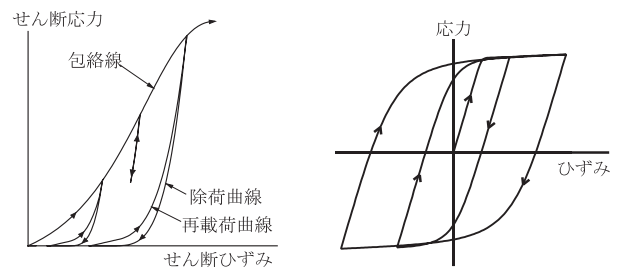


Fig. 6 ひび割れ方向のせん断応力 - せん断ひずみ関係
Shear Stress - Shear Strain Relationship Along Crack Direction

Fig. 7 鉄筋の応力 - ひずみ関係
Stress - Strain Relationship of Reinforcing Bar

縮強度，鉄筋量，ひび割れ直交方向ひずみ，及び，ひび割れ方向のせん断ひずみの関数で定義されている。なお，FINALでは，TS特性として出雲モデル¹¹⁾，GM特性としてはAI-Mahaidiモデル¹²⁾，山田・青柳モデル¹³⁾が使用可能である。それらのモデルは，ひび割れ直交方向ひずみの関数であり，平面応力下と三軸応力下で同様に取り扱うことができる。

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現し，三軸応力下の破壊条件としては，Ottosenの4パラメータモデル，及びWilliam-Warnerの5パラメータモデルが使用できる。圧縮側応力 - ひずみ関係の包絡線には三軸応力下の拘束効果を考慮できる修正Ahmadモデル¹⁴⁾が三次元解析では有効である。

鉄筋の応力 - ひずみ関係にはFig. 7に示すCiampi等の提案¹⁵⁾による修正Menegotto-Pintoモデルを用いた。

5. 検証解析

前述の材料モデルの検証として，既往の実験より梁試験体1体，高架橋フレーム試験体1体，柱試験体3体，及び柱梁接合部試験体2体を解析対象として選定した。柱及び柱梁接合部に関しては，破壊モードが異なる部材に対する解析精度を検討するために，曲げ降伏先行型とせん断破壊型の両ケースについて検討した。試験体はすべて，せん断力を正負交番繰返し載荷されている。

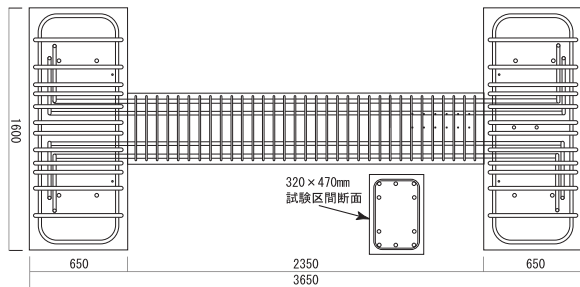


Fig. 8 梁の試験体形状
Configuration of Beam Specimen

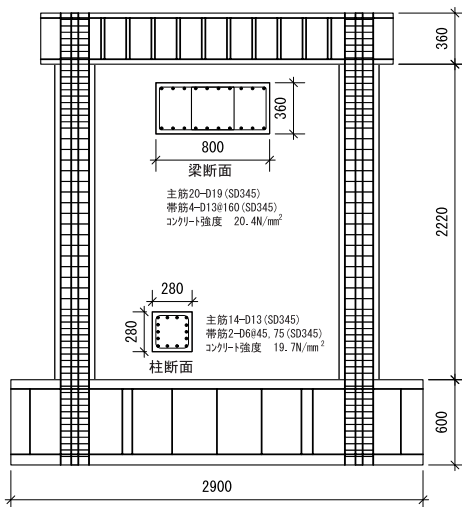


Fig. 9 高架橋フレームの試験体形状
Configuration of Viaduct Frame Specimen

5.1 解析対象試験体

梁の試験体概要¹⁶⁾

Fig. 8に試験体形状を示す。荷重条件として，両端の加力スタブが平行を保つように，逆対称モーメント分布の曲げせん断力を載荷している。破壊モードは曲げ降伏先行型である。

高架橋フレームの試験体概要¹⁷⁾

Fig. 9に試験体形状を示す。この試験体は，RC鉄道高架橋フレームを模擬しており，2本の柱と幅広い梁が取り付けいた門形フレームとなっている。柱に約2.1N/mm²の一定軸応力を保持させ，梁せい中央に水平力が載荷されている。破壊モードは柱の曲げ降伏先行型である。

柱試験体概要¹⁸⁾

Fig. 10に試験体形状を，Table 2に試験体諸元を示す。この実験は主筋強度及びせん断スパンを実験変数としており，破壊モードはそれぞれR-1は曲げ降伏先行型，R-3,R-5はせん断破壊型となっている。荷重条件として，柱頭に一定軸力を保持させ，逆対称モーメント分布の曲げせん断力が載荷されている。

柱梁接合部試験体概要

Fig. 11とFig. 12に2体の試験体形状を示す。Fig. 11の試験体は，ハーフプレキャスト(PCa)工法による柱梁接合部である。梁主筋は接合部内，柱主筋は柱脚部でネジスリーブ継手がなされている。実験は，柱頭に一定軸力を保持させた状態で，梁端にせん断力が載荷された。試験体は直交梁を有し，各梁と柱が偏芯している。破壊モードは梁曲げ降伏先行型である。

Fig. 12の試験体¹⁹⁾は十字型架構骨組であり，柱頭に一定軸力を保持させた状態で，梁端にせん断力を載荷している。破壊モードは接合部せん断破壊型である。

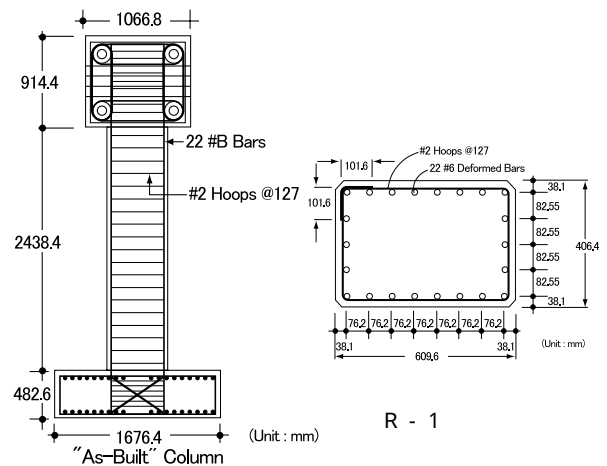


Fig. 10 柱の試験体形状
Configuration of Column Specimen

Table 2 柱の試験体諸元¹⁸⁾(単位:N/mm²)
Details of Column Specimens(unit:N/mm²)

試験体名	コンクリート強度	主筋降伏強度	Hoop筋降伏強度	軸力	せん断スパン比	破壊モード
R-1	38.0	317	361	507.3 (kN)	2	曲げ降伏先行
R-3	34.0	469	324		1.5	せん断破壊
R-5	32.8					せん断破壊

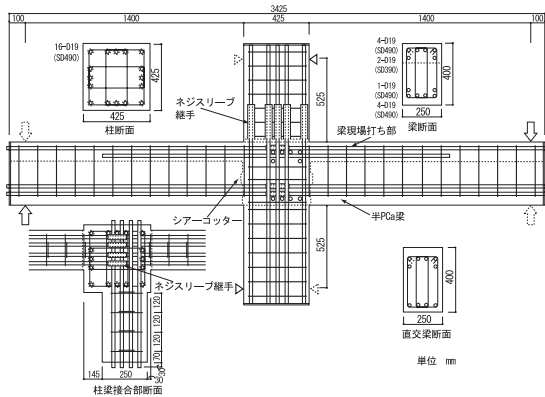


Fig. 11 柱梁接合部の試験体形状（梁曲げ降伏先行型）
Configuration of Beam-Column Joint Specimen
(Flexural Yielding Type)

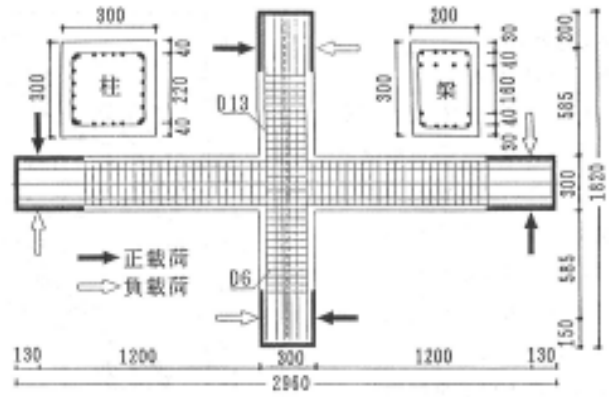


Fig. 12 柱梁接合部の試験体形状（せん断破壊型）¹⁹⁾
Configuration of Beam-Column Joint Specimen
(Panel Shear Failure Type)

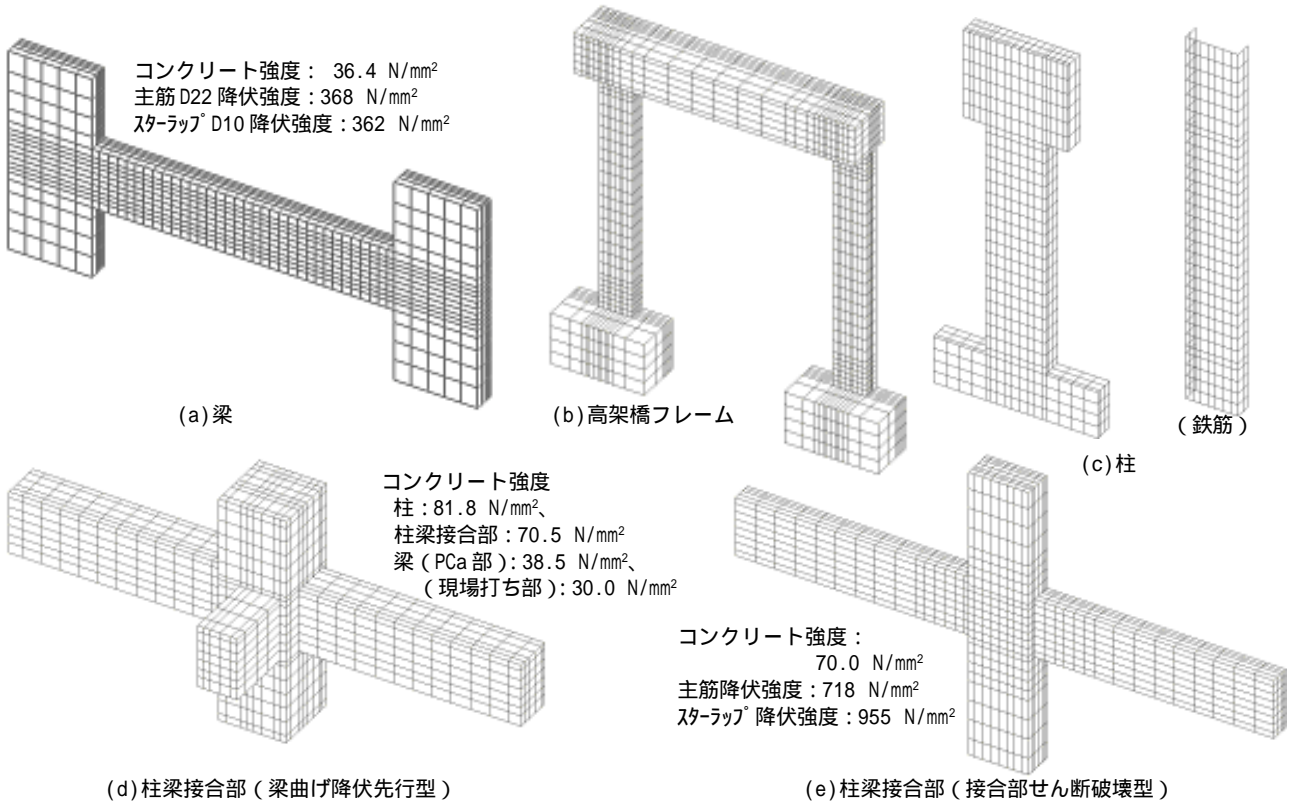


Fig. 13 解析のモデル（要素分割）

Analytical Models (Finite Element Mesh)

5.2 解析モデル

Fig. 13(a) ~ (e)に各解析モデルを示す。いずれもコンクリートは六面体要素，鉄筋はトラス要素を用いるか，またはコンクリートと鉄筋，各々の剛性の重ね合わせとしてモデル化した。試験体の形状が対称となるものは，半分をモデル化した。また，付着すべりモデルの有効性を確認するために，高架橋フレーム，梁及び柱梁接合部に関しては，鉄筋とコンクリート間に接合要素を挿入して付着すべりを考慮した解析と完全付着とした解析の2ケースを実施した。なお，柱に関しては，付着すべりの考慮の有無が解析結果に与える影響が殆ど生じなかったため，付着すべりモデルを用いた解析のみを示す。

5.3 解析結果

Fig. 14,及びFig. 15に梁と高架橋フレームの解析結果と実験結果の比較を示す。図より鉄筋とコンクリート間の付着すべりを考慮した解析と完全付着を仮定した各解析の実験結果との対応性を比較すると，包絡線に関しては殆ど違いはないが，完全付着を仮定した解析の方がより紡錘形の履歴ループを示し，エネルギー吸収能を過大評価する傾向がある。また，その傾向は変形が大きくなるほど顕著になる。付着すべりを考慮した解析は，梁に関しては実験結果よりも耐力が若干高くなる傾向にあるが，両試験体ともに包絡線及び履歴ループ形状ともに実験結果との対応性は良好である。しかし，大きな変形レベルにおいては，付着すべりモデルを用いた解析でも，実験に比べエネルギー吸収能を大きく評価する傾向を示す。梁の解析の耐力が若干高くなる原因として

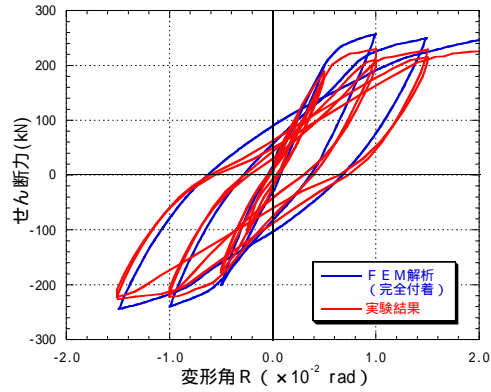
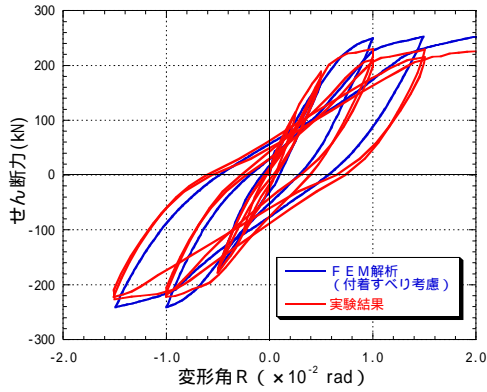


Fig. 14 梁の解析結果と実験結果の比較
Comparison Between Analysis Results and Test Results of Beam

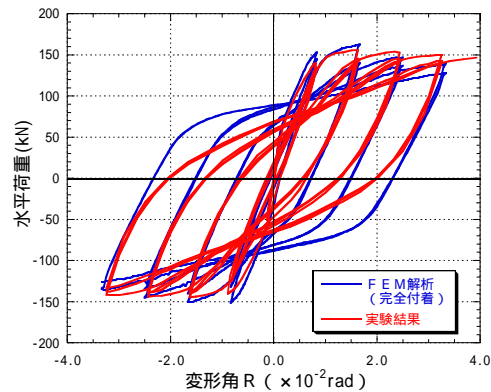
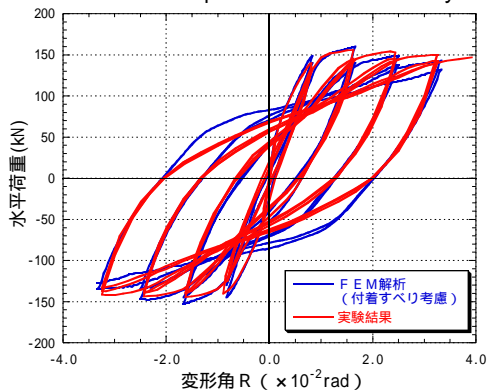


Fig. 15 高架橋フレームの解析結果と実験結果の比較
Comparison Between Analysis Results and Test Results of Viaduct Frame

は、解析におけるコンクリートのTS特性及びGM特性のモデルは、部材断面全体に鉄筋が均一に分布していると仮定して用いているが、実際は鉄筋周辺のコンクリートとコア内の鉄筋から離れた無筋コンクリート部分では異なる特性を示すことが考えられ、その部分が詳細にモデル化されていないことが挙げられる。TS及びGM特性の解析モデルは、断面内に比較的均一に鉄筋が分布する壁部材を対象として開発されたものであり、柱梁の主筋のように集中的に配筋された鉄筋に対する各特性の有効範囲は不明であり、今後、検討する必要がある。

Fig. 16に柱の解析結果と実験結果の比較を示す。図中の解析結果には実験結果の包絡線を示している。最大耐力以前では、3体ともに実験と解析の包絡線はほぼ一致し、履歴特性に関しては、解析の方が実験に比べ履歴ループが膨らみ気味であるが、履歴ループの形状は解析結果と実験結果と良好に対応している。一方、最大耐力以降については、せん断破壊したR-3,R-5では、実験において急激な耐力低下が生じており、解析結果は両者ともに変形性能を過大評価している。顕著な耐力低下のない曲げ降伏先行型のR-1に関しては、大きな変形領域まで解析と実験は良好な対応を示している。このことより、柱のせん断挙動に対して、包絡線、履歴特性ともに最大耐力以前に関しては実験結果を解析で良好に再現できるが、急激に耐力が低下する挙動の再現性については改良の余地があることがわかる。

Fig. 17に梁曲げ降伏先行型の柱梁接合部の解析結果と実験結果の比較を示す。鉄筋とコンクリート間の付着

すべりの考慮の有無による影響に関しては、梁及び高架橋フレームの解析結果と同様な傾向を示した。付着すべりを考慮した解析では、スリップ型の履歴曲線が再現されており、比較的大きな変形レベルまで実験結果を精度良く再現している。解析の耐力が若干高めになる原因としては、梁の解析と同様の要因が考えられる。

Fig. 18に接合部がせん断破壊する柱梁接合部の解析と実験の比較を示す。包絡線に関しては、付着すべりの考慮の有無に関わらず、解析結果は実験結果とほぼ一致し、特に、同じ変形での繰返し載荷で、1回目と2回目での剛性が低下する度合等、解析は実験結果を良好に再現している。しかし、履歴特性に関しては、解析は実験に比べエネルギー吸収能を過小評価する傾向を示した。

Fig. 19に梁曲げ降伏先行型の柱梁接合部の実験と解析から得られたひび割れ状況を示す。Fig. 19のひび割れ状況は、 $\theta = +16.12\text{mm}$ (部材角 $+1/100\text{rad}$)時に開いているひび割れのみを描いている。ひび割れの分布範囲やひび割れの方向は、解析と実験でほぼ良好に対応している。

Fig. 20に高架橋フレームの解析と実験から得られた等価粘性減衰定数の比較を示す。正側、負側ともに解析と実験の等価粘性減衰定数の推移はほぼ同様な傾向を示し、解析は曲げ降伏先行型の繰返し履歴挙動を良好に再現していることがわかる。

6. まとめ

三軸応力下の非直交ひび割れモデル及び鉄筋の付着す

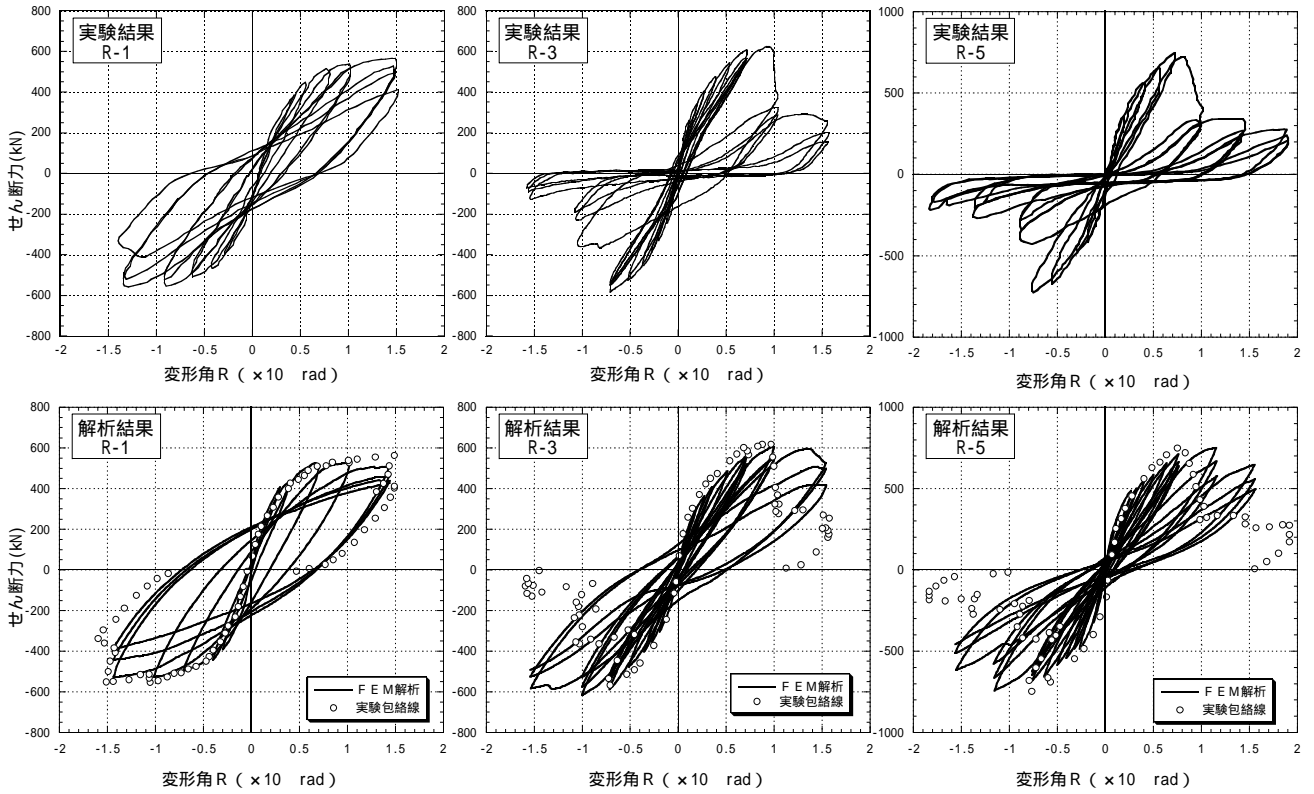


Fig. 16 柱の解析結果と実験結果の比較
Comparison Between Analysis Results and Test Results of Column

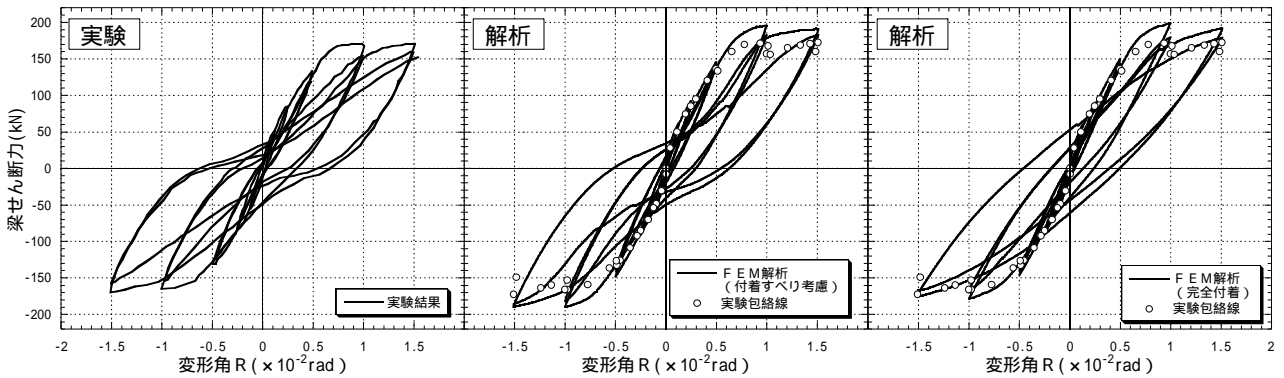


Fig. 17 柱梁接合部の解析結果と実験結果の比較 (梁曲げ降伏先行型)
Comparison Between Analysis Results and Test Results of Beam-Column Joint (Flexural Yielding Type)

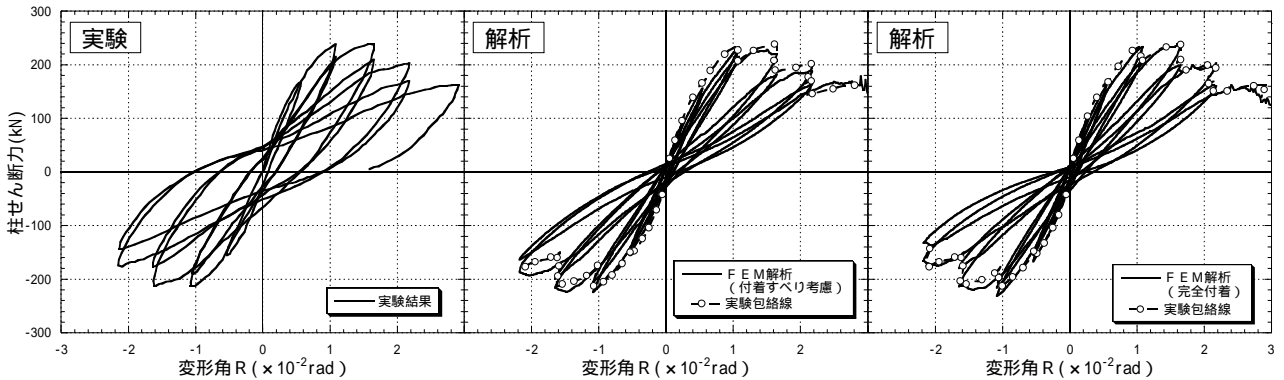


Fig. 18 柱梁接合部の解析結果と実験結果の比較 (接合部せん断破壊型)
Comparison Between Analysis Results and Test Results of Beam-Column Joint (Panel Shear Failure Type)

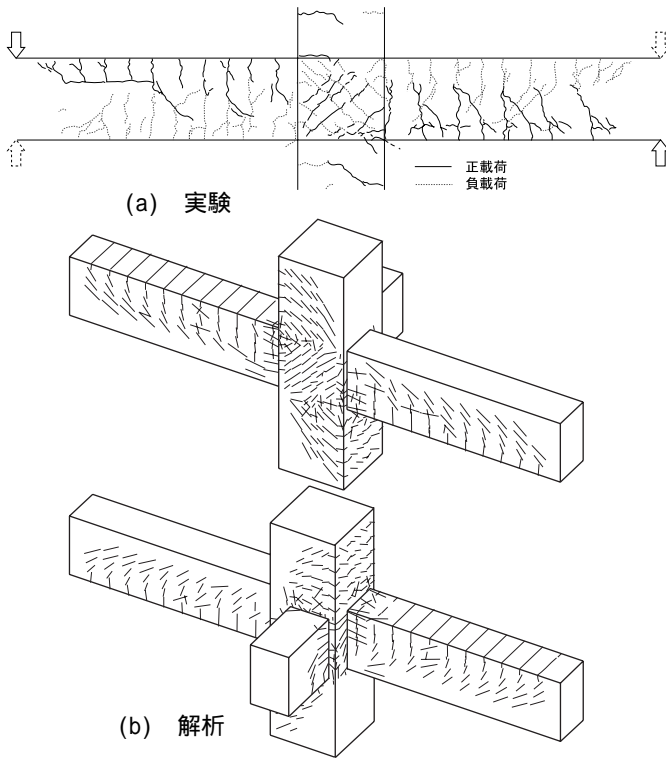


Fig. 19 RC柱梁接合部のひび割れパターン
(梁曲げ降伏先行型)
Crack Patterns of RC Beam - Column Joint
(Flexural Yielding Type)

ベリモデルを用いて、RC部材の三次元FEMによる正負繰返し載荷解析を実施した。

- 1) 鉄筋とコンクリート間の付着すべりを考慮することにより曲げ降伏先行型部材の荷重 - 変形関係の包絡線及び履歴特性を良好に再現できることがわかった。しかし、大変形領域の履歴特性については、エネルギー吸収能を過大評価する傾向にある。
- 2) 柱部材の曲げせん断挙動に対する解析精度は、最大耐力以前の履歴特性及び包絡線については良好であるが、せん断破壊により急激に耐力低下する挙動の再現性については改良の余地がある。
- 3) 接合部がせん断破壊する柱梁接合部の解析では、実験に比べ、履歴ループ面積を過小評価する傾向を示したが、包絡線及び繰返し載荷による剛性低下の度合等は良好に再現できた。

以上より、最大耐力以前においては、本解析手法により正負繰返し載荷時の非線形挙動が良好に再現できることがわかった。また、この解析手法は、立体架構部材の立体的な加力に対する力学挙動の再現にも有効である(解析例²⁰⁾)。なお、大変形領域や耐力低下域における挙動の再現性に関しては今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 武田寿一, 他3名: 鉄筋コンクリート平板の純せん断実験(その1,2), 建築学会大会, pp.899-902, 1989.10
- 2) 長沼一洋, 山口恒雄: 面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会梗概集(中国), pp.649~650, 1990.10

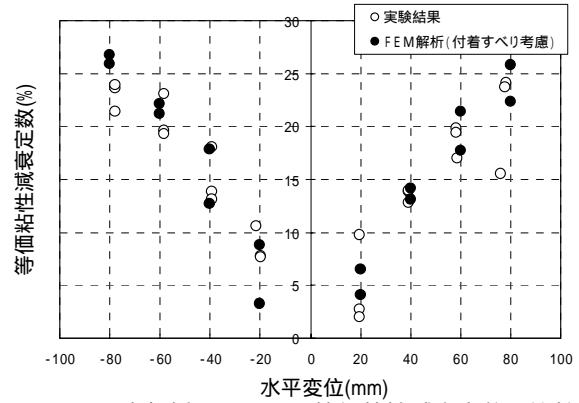


Fig. 20 高架橋フレームの等価粘性減衰定数の比較
Comparison of Equivalent Viscous Damping Factors

- 3) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 建築学会構造系論文集, 第421号, pp.39-48, 1991.3
- 4) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp.135~142, 2000.10
- 5) 長沼一洋, 栗本修, 江戸宏彰: プレストレストコンクリート格納容器模型の動的非線形解析, 日本建築学会構造系論文集, 第566号, pp.105~112, 2003.4
- 6) 長沼一洋, 栗本修, 江戸宏彰: 鉄筋コンクリート壁体の正負繰返し及び動的解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第544号, pp.125~132, 2001.6
- 7) 米澤健次, 長沼一洋, 江戸宏彰: 正負繰返し荷重を受けるRC柱の三次元FEM解析, 日本コンクリート工学年次大会論文集, 2003.7
- 8) Elmorsi, M., Kianoush, M.R., and Tso, W. K.: Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Can. J. Civ. Eng. Vol.27, pp.490-505, 2000
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997
- 10) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第229号, pp.15~24, 1975.3
- 11) 出雲淳一, 他: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 12) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979
- 13) 山田一宇, 青柳征夫: ひび割れ面におけるせん断伝達, 第2回RC構造の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, JCI-C5, pp.19-26, 1983.10
- 14) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.163-170, 1995.8
- 15) Ciampi, V., et al. Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No.UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkley, Nov., 1982.
- 16) 高見信嗣, 江戸宏彰: RC部材のひび割れ幅特性に関する実験, 日本建築学会大会梗概集, 構造 pp.485~486, 2000.9
- 17) 松本信之, 岡野泰之, 在田浩之, 曾我部正道, 涌井一, 大内一, 高橋泰彦: 鋼製ダンパー・ブレースを有するRC鉄道高架橋の耐震性能, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.45A, pp.1411~1422, 1999.3
- 18) Dowell, R. K. and Seible, F.: UCSD Shear Column Benchmark Tests, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ACI, International SP-205, pp.15-40, 2001
- 19) 柏崎隆志・野口博: 超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次報告集, Vol.13, No.2, pp.475-478, 1991
- 20) 米澤健次, 長沼一洋, 江戸宏彰: RC構造部材の三次元繰返しFEM解析の精度向上, 日本建築学会大会梗概集, 構造, pp.37-40, 2001.9