

論文 正負繰返し荷重を受ける RC 柱の三次元 FEM 解析

米澤 健次^{*1}・長沼 一洋^{*2}・江戸 宏彰^{*3}

要旨：RC柱の曲げせん断実験を対象とした三次元 FEM 繰返し載荷解析を行った。本解析では筆者等が開発した三軸応力下におけるコンクリートの非直交ひび割れモデルを拡張し、独立した3つのひび割れ座標系を考慮できるモデルを用いた。まず、1要素レベルの解析により非直交ひび割れモデルの有効性を示し、さらに、せん断破壊した3体のRC柱の解析を行い、部材レベルにおける解析精度を確認した。その結果、解析では最大耐力以降の急激な耐力低下挙動は再現できなかったが、最大耐力以前における実験結果の包絡線および履歴特性を良好に再現できた。

キーワード：三次元 FEM 解析, 履歴特性, 繰返し載荷解析, 非直交ひび割れ

1. はじめに

近年、計算環境の飛躍的な進歩に伴い、三次元 FEM 解析も数多く行われるようになってきた。今までの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あったが、最近では、載荷経路を考慮した繰返し載荷解析も行われ始めている^{1),2)}。

繰返し荷重下における RC 部材の挙動は単調載荷下の挙動と異なり、この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、地震力を想定した RC 部材の性能評価には、繰返し載荷による影響の考慮が不可欠と言える。

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は、任意の角度で交わることができ、複数のひび割れを表現できるモデルが必要となる。

そこで、筆者等は、三軸応力下の繰返し構成則の開発を目的とし、独立した2つの直交3方向ひび割れ座標系を有する三軸応力下の非直交分散ひび割れモデル²⁾を開発した。このモデルでは、非直交な2つのひび割れ座標系それぞれで直交3方向、計6方向のひび割れが表現可能

である（以下、独立2方向ひび割れ座標系モデル）。

本研究では、あらゆる荷重の組合わせに対応するために、このひび割れモデルをさらに拡張し、独立なひび割れ座標系を3つに増やし、計9方向のひび割れを表現できるモデルに改良した。そして、非直交なひび割れが生じる荷重条件下において要素レベルの解析を行い、本モデルの有用性を確認した上で、せん断破壊する RC 柱の曲げせん断実験を対象とした三次元繰返し FEM 解析を実施した。実験結果と解析結果を比較することにより、本解析手法の精度と適用性を確認した。

2. 三軸応力下の非直交分散ひび割れモデル

従来の三軸応力下のひび割れのモデル化法は、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。回転ひび割れモデルでは、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。一方、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。

*1 (株)大林組技術研究所建築構造研究室副主任研究員 博士(工学)(正会員)

*2 (株)大林組技術研究所建築構造研究室主任研究員 博士(工学)(正会員)

*3 (株)大林組技術研究所建築構造研究室室長 工博 (正会員)

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が設定可能で、計9方向のひび割れを許容できる。また、互いのひび割れ座標系は、任意の角度で交わることができる。図-1に本ひび割れモデルの概念を示す（独立3方向ひび割れ座標系モデル）。

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。

3. 材料構成則

本研究では大林組開発ソフト”FINAL”に前述のひび割れモデルを導入し使用した。

本研究で用いたコンクリートの応力-ひずみ関係の履歴特性を図-2, 3に示す。履歴特性の詳細は、参考文献³⁾を参照されたい。

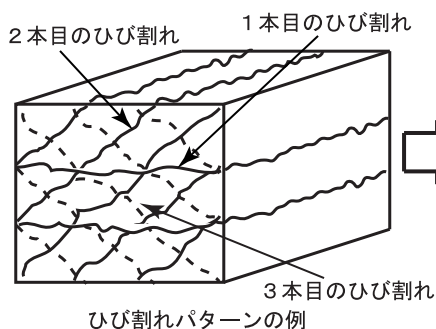


図-1 非直交分散ひび割れモデルの概念

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パラメータモデルを用いた。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⁴⁾を用い、引張側ではひび割れが生じるまでは線形弾性を仮定し、ひび割れ後のテンションスティフニング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を関数としたモデル⁵⁾を用いた。ひび割れ面のせん断伝達特性は、図-4に示すモデル

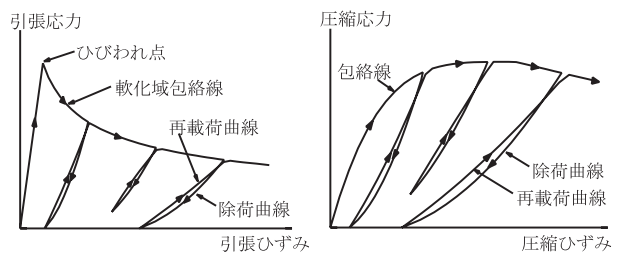


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

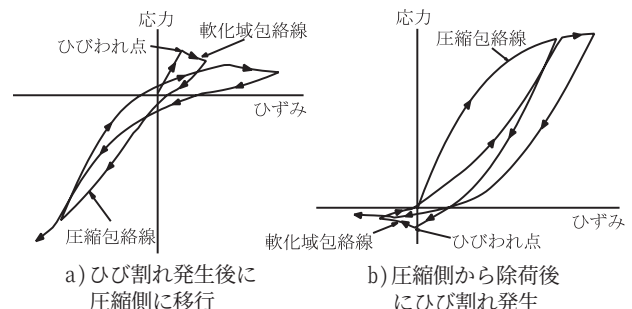


図-3 コンクリートの引張～圧縮間の履歴特性

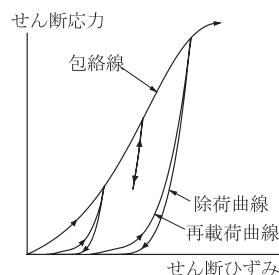


図-4 ひび割れ面のせん断伝達特性

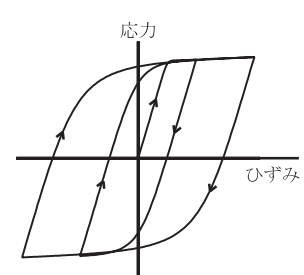


図-5 鉄筋の応力-ひずみ関係

ル³⁾⁶⁾を用いた。

鉄筋には図-5に示す Ciampi 等の提案⁷⁾による修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。

4. 要素レベルの解析

本ひび割れモデルによる解析例として、まず単一の六面体要素の例を示す。図-6に示すように、要素の下面を固定し上面に鉛直変位を与え、水平なひび割れを生じさせ、上面の鉛直変位は一定に保持したまま水平力を与えた。要素は、各辺が単位長さの立方体とし、各辺に平行な3方向(x,y,z)に鉄筋比1.5%の等量配筋を設定した。

水平力の荷重パターンとして、単調荷重、正負繰返し荷重の2ケースとし、文献2)に示す独立2方向ひび割れ座標系モデルを用いた場合と独立3方向ひび割れ座標系の本モデルを用いた場合を比較した。

図-7にせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。比較のため、単調荷重の場合においては、

初期ひび割れ方向に主軸が固定される従来の固定ひび割れモデルと本モデルの両者の結果を示す。

まず、水平力を単調荷重した場合(図-7(a)参照)について、従来の固定ひび割れモデルの場合は、1本目のひび割れに対して直交方向にしかひび割れが許容できないため、主応力が引張強度を越えても、新たなひび割れが許容できず、ひび割れ面のせん断伝達特性モデルによるせん断応力-せん断ひずみ関係が直接描かれる。

非直交ひび割れモデルを用いた場合、単調荷重では、せん断応力 2.0N/mm^2 程度で1本目のひび割れに対して、図-6(a)に示すように 55.5° の交角の方向に新たなひび割れが生じ、その後は鉄筋の引張力と2本目のひび割れに平行なコンクリートの圧縮力で水平力を負担するメカニズムが再現されている。

正負繰返し荷重した場合については、独立2方向ひび割れ座標系モデルを用いた場合、図-

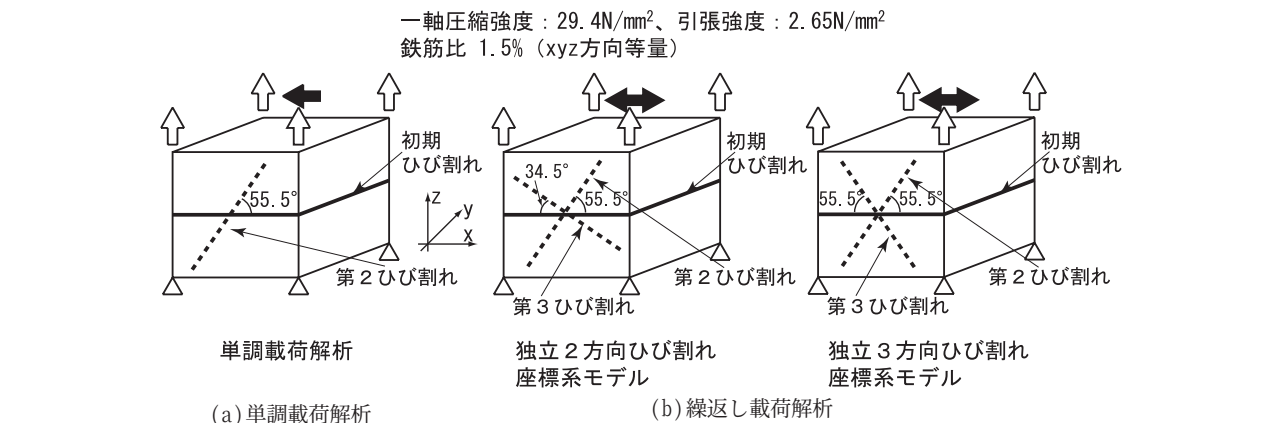


図-6 1要素解析の境界条件とひび割れ状況

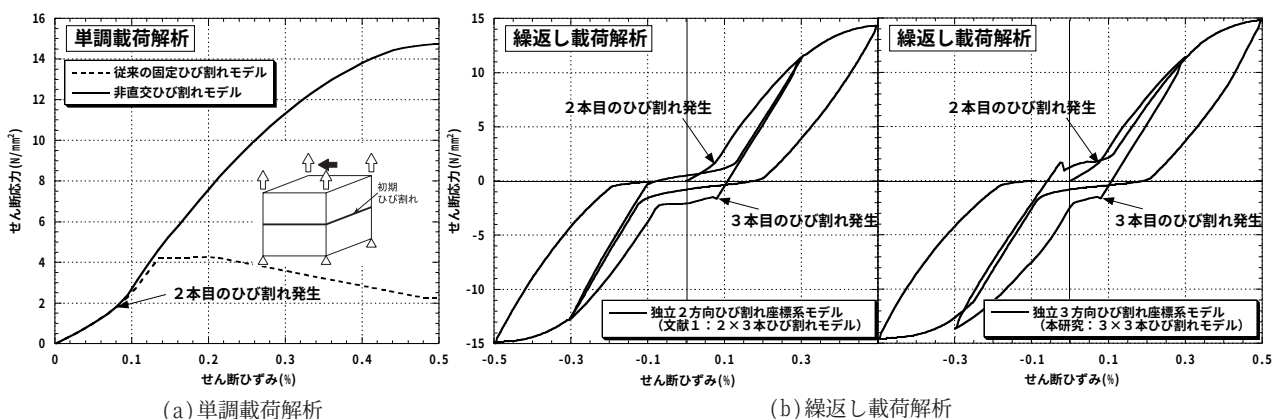


図-7 1要素解析によるせん断応力-せん断ひずみ関係

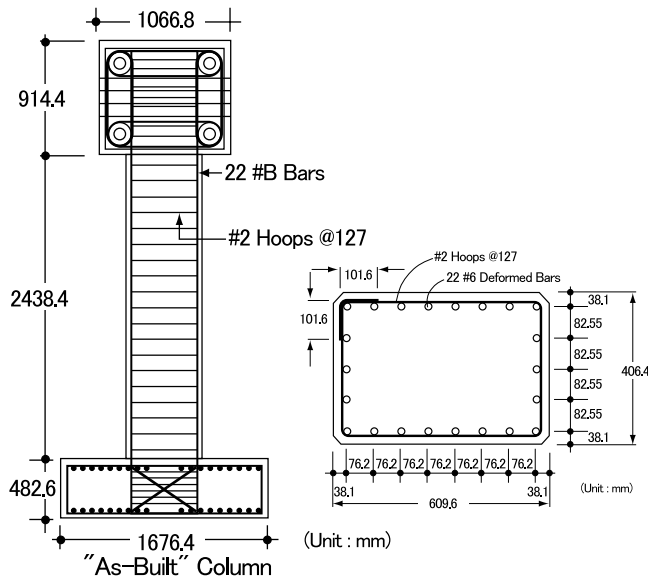


図-8 RC柱試験体形状

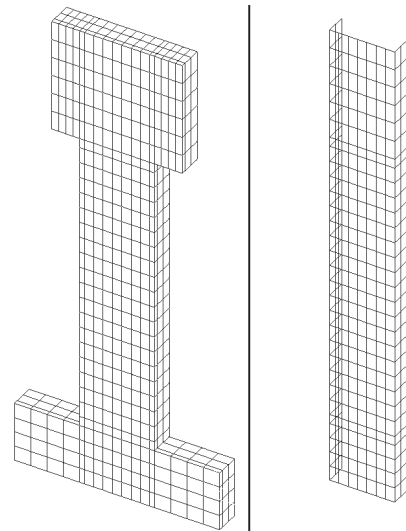


図-9 解析モデル

表-1 試験体諸元

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
R-1	38.0	317	361	507.3 (kN)	2
R-3	34.0	469	324		1.5
R-5	32.8				

6 (b)に示すように、負荷荷時に生じる3本目のひび割れは2本目のひび割れに対して直角方向に限定され、このような荷重パターンでは正負非対称なひび割れ状況となる。一方、独立3方向ひび割れモデルの場合は、3本目のひび割れが2本目のひび割れと左右対称の方向に生じる。ゆえに3つの非直交ひび割れが生じるような荷重パターンの場合、独立2方向ひび割れ座標系ではひび割れ状況を適切に表現できない。

正負繰返し载荷を受けるせん断応力-せん断変形関係（図-7 (b)参照）においては、独立2方向と3方向のひび割れ座標系モデルを比較すると、3本目のひび割れが生じた後の履歴に差異が見られ、本モデルを用いた場合はほぼ正負対称となり、主軸が各ひび割れ座標軸の間で適切に入れ替わっていることが確認できる。

以上より、本モデルにより3つの非直交ひび割れが生じる場合の正負繰返し挙動を表現できることを確認した。

5. 曲げせん断を受けるRC柱の解析

解析例として、カリフォルニア大学サンディ

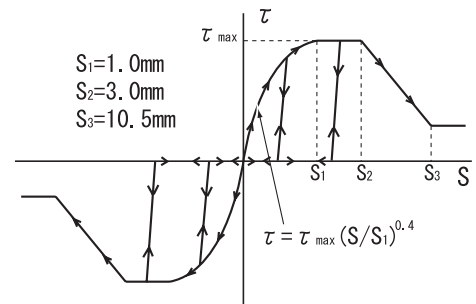
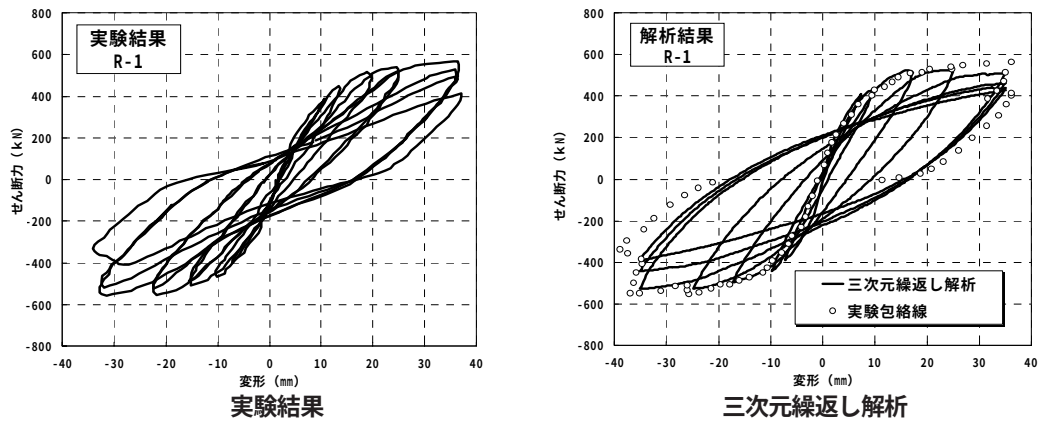


図-10 τ-S関係モデル
(鉄筋とコンクリート間)

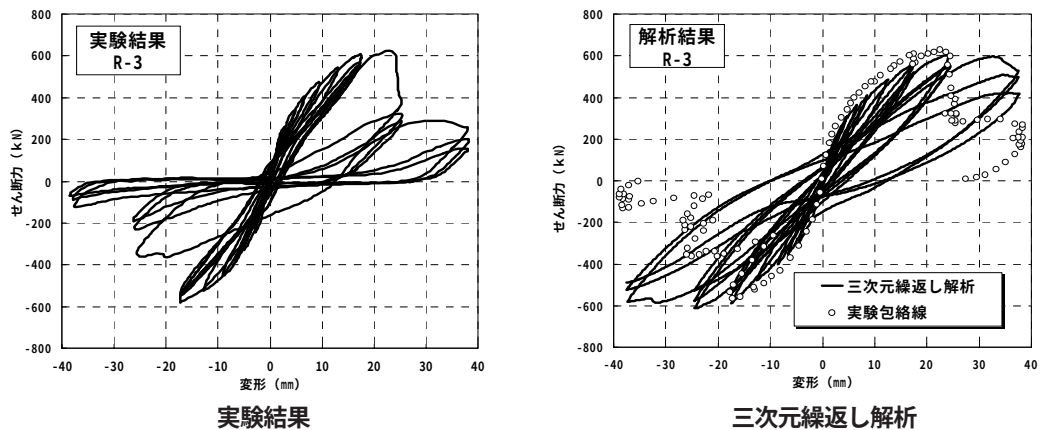
エゴ校で実施されたRC柱の曲げせん断実験⁸⁾を対象として紹介する。主筋強度、せん断スパンを実験変数とした3体の解析を行った。図-8に解析対象とした試験体の形状を、表-1に試験体の諸元を示す。3体ともに断面形状および主筋本数、せん断補強筋比は同一である。破壊モードは3体ともにせん断破壊であった。実験時の加力は、柱頭に一定軸力を保持したまま逆対称曲げモーメント分布になるように水平力が载荷されている。

5.1 解析モデル概要

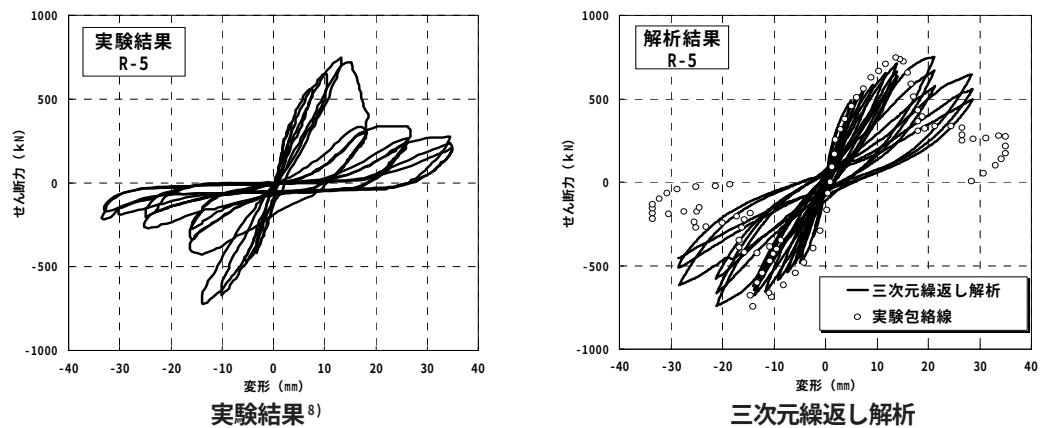
図-9に解析モデルを示す。コンクリートは8節点六面体要素、鉄筋はトラス要素を用いてモデル化し、対称性を利用して半分のみをモデル化した。鉄筋の節点とコンクリートの節点間に接合要素を挿入し、鉄筋とコンクリート間の付着応力(τ)-相対すべり(S)関係を図-10に示すように設定した。最大付着応力はRC靱



(a) R-1 試験体の荷重－変位関係の比較



(b) R-3 試験体の荷重－変位関係の比較



(c) R-5 試験体の荷重－変位関係の比較

図－11 実験と解析の荷重－変形関係の比較

性指針⁹⁾より算定し、スケルトンはElmorsi等¹⁰⁾に従い決定した。なお、コンクリートにはひび割れたコンクリートの圧縮劣化特性⁶⁾を考慮した。

加力は実験と同様に柱頭に一定軸力を保持し、加力スタブおよび基礎版が平行を保つように正負交番載荷を行った。

5.2 解析結果

図-11に解析と実験から得られた荷重－変形関係の比較を示す。図中の解析結果においては

実験結果の包絡線も示している。

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を膨らみ気味に評価しているが、定性的な傾向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、実験ではR-3,R-5で急激な耐力低下が生じ、解析結果はいずれも靱性能を過大評価している。顕著な耐力

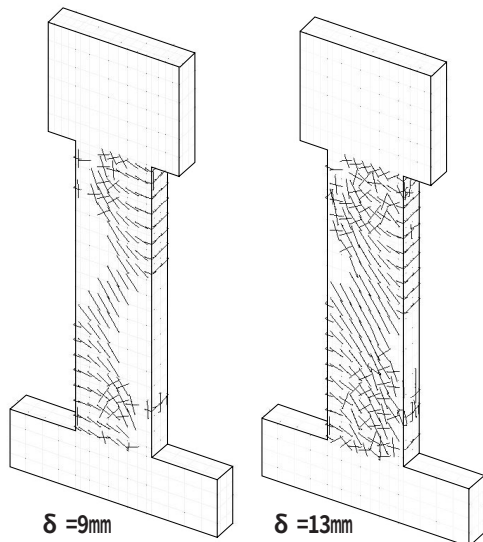


図-12 解析から得られたひび割れ状況
(R-3試験体)



(R-1 試験体) (R-3 試験体)
図-13 試験体破壊状況⁸⁾

低下のない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。

図-12に解析から得られたR-3のひび割れ状況と図-13にR-1とR-3の破壊状況を示す。実験では、R-3,R-5共に柱頭及び柱脚にせん断ひび割れが生じ、急激に耐力が低下するが、R-1は曲げ降伏が先し、急激な耐力低下は生じなかった。図-12示すように解析結果のひび割れ性状は実験結果とほぼ対応している。

以上より、本解析は、RC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良好に再現できることがわかる。しかし、急激に耐力が低下する挙動に対する解析精度については改良の余地がある。

6. まとめ

コンクリートの三軸応力下における非直交分散ひび割れモデルを用いて、RC柱の三次元繰返しFEM解析を実施した。以下に得られた知見を示す。

1) 本解析モデルを用いることにより、最大耐力以前の包絡線及び履歴特性に関しては、解析は実験結果を精度良く再現できた。

2) 最大耐力以降に関しては、急激な耐力低下が生じる脆性的な破壊モードを再現できなかった。

脆性的な破壊を示す部材のポストピーク挙動に対する解析精度については検討の余地がある。

【参考文献】

- 1) 土屋智史・市川 衡・前川宏一：ねじりと曲げ／せん断力を交番載荷したRC柱部材の応答解析，コンクリート工学年次報告集，Vol.22，No.3，pp.103-108，2000
- 2) 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解析手法，コンクリート工学年次報告集，Vol.23，No.3，pp.13-18，2001
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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，鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1)，日本建築学会構造系論文報告集，第421号，pp.39～48，1991.3
- 7) Ciampi, V., et al. Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations", Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982.
- 8) R. K. Dowell and F. Seible : UCSD Shear Column Benchmark Tests, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ACI, International SP-205, pp.15-40, 2001
- 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(案)・同解説，1997
- 10) Mostafa Elmorsi, M.Reza Kianoush, and W. K. Tso: Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Can. J. Civ. Eng. Vol.27, pp.490-505, 2000