

# 論文 繰返し荷重を受ける RC 面材に関する非線形 FEM 解析モデルの開発

櫻井 輝雄<sup>\*1</sup>・柏崎 隆志<sup>\*2</sup>・野口 博<sup>\*3</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート (RC) 部材が地震時の正負繰返し荷重を受けた場合を想定し, 有限要素法 (FEM) を用いて, RC 平板と耐震壁の 2 次元非線形解析を行った。その過程で, 既往の研究を参考にコンクリートの応力-ひずみ関係やひび割れ方向のせん断特性の, 除荷・再載荷時を含んだ履歴モデルを開発, 提案した。さらに既存の鉄筋の履歴モデルと組み合わせて, 解析の精度を向上させている。解析結果から, 最大耐力, 除荷・再載荷時剛性, 残留ひずみ量, 履歴面積等において, 実験との良好な対応が見られた。

**キーワード:** 正負繰返し荷重, 非線形解析, 有限要素法, 構成則

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計指針<sup>1)</sup>によれば, 耐震性能確保のために建物の構成骨組に一定の水平力を保持させ, 地震時の変形を限度内に留めるとともに, 靱性に富む全体曲げ降伏機構により入力するエネルギーを消費しようとする終局強度型の設計が志向されるようになった。そのためには, 地震時の正負繰返し荷重下で, 構造物が吸収するエネルギーをできる限り正確に予測する必要がある。しかし, せん断や付着の問題にも対応可能な有限要素法を用いた非線形解析では, 繰返し載荷時の材料挙動のモデル化が困難なために, 単調載荷時の解析に比べると解析例は少なく, 解析から繰返し劣化機構を検討するような研究は数少ないのが現状である。

そこで本研究ではまず, 野崎<sup>2)</sup>が開発した 2 次元非線形 FEM 解析プログラムに, コンクリートの応力-ひずみ関係における引張~圧縮域間の履歴モデルや, 鉄筋の正負多曲線モデル, そしてひび割れコンクリートの繰返しせん断履歴特性を組み込むことから始めた。これによって除荷・再載荷時の接線剛性やスリップ剛性, 残留ひずみ量, 繰返し劣化性状といった特有な性質を精度よく表

現することができる。次に, 組合せ応力を受ける RC 平板と柱, 梁に囲まれた RC 耐震壁の繰返し載荷実験の解析を通して履歴ループを再現し, それらの解析モデルの有効性を検証した。

## 2. 解析モデル

### 2.1 コンクリート及び鉄筋の繰返しルール

本解析では既往の実験的研究から得られているコンクリートの繰返し挙動に関する知見と長沼ら<sup>3)</sup>のモデル化を参考に図-1~図-4のように, 応力-ひずみ関係において, 圧縮・引張両応力域における履歴と, 圧縮~引張間の相互関係の履歴を定める。また, 鉄筋に関しては, 図-5に示すように, Ciampi<sup>7)</sup>らが提案した修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。

### 2.2 RC 要素の損傷モデル

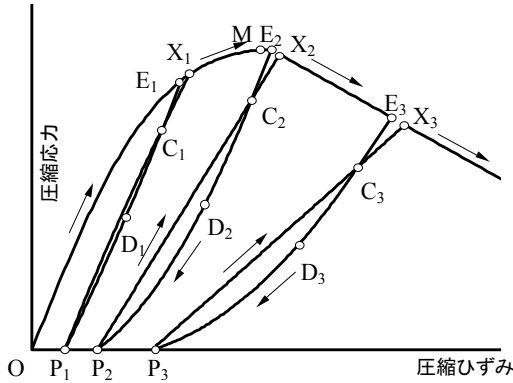
コンクリートは 8 節点を有するアイソパラメトリック要素で表現し, コンクリートの破壊条件については, Kupfer らの実験に基づくモデル<sup>8)</sup>を用いた。主軸の方向は, ひび割れ前においては主応力方向とし, ひび割れが生じるとその時点での主軸方向を保持し, その後は変化させない, 固定ひび割れモデルとした。この方向はモールの応力円

\*1 前田建設工業 (株) (前千葉大学大学院自然科学研究科博士前期課程) 工修 (正会員)

\*2 千葉大学助手 工学部デザイン工学科 工修 (正会員)

\*3 千葉大学教授 工学部デザイン工学科 工博 (正会員)

順序：O→E→C→D→P→C→X  
 E点：除荷点  
 C点：コモンポイント( $\sigma_C = 5/6\sigma_E$ )  
 D点：剛性変化点( $\sigma_D = 1/2\sigma_E$ )  
 P点：圧縮側残留ひずみ点(Karsan<sup>4</sup>)らの提案式)  
 X点：包絡線復活点 M点：最大強度点



O～M間：圧縮包絡線(Saenzら<sup>5</sup>)の式)  
 E～D間：圧縮ひずみに応じた傾きを持つ直線(長沼ら<sup>3</sup>)  
 D～P間：2次曲線 P～X間：直線

図-1 コンクリートの圧縮履歴のモデル化

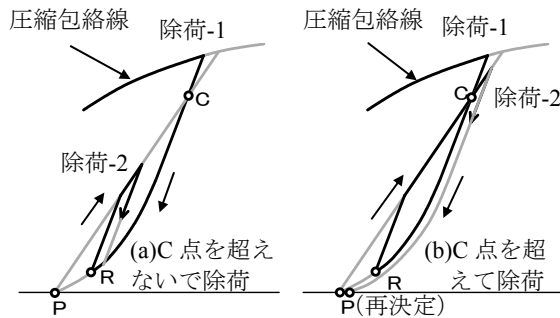


図-2 圧縮域での除荷・再載荷ルール

から各荷重ステップごとに求めた。また、ひび割れた RC 要素の非線形挙動の特徴について、①付着によるひび割れ直交方向の引張剛性 (Tension Stiffening 効果) については、図-3 に示したように白井らによる式<sup>6</sup>を、②ひび割れ面に沿ったせん断剛性は前川ら<sup>9</sup>が提案した、コンクリートのひび割れ面に沿った接触密度関数を利用したせん断応力伝達構成則に、飯塚<sup>10</sup>の鉄筋のダボ剛性をコンクリートの等価剛性に置換したモデルを重ね合わせて評価した。せん断剛性 G は、前川らの式によって求められたせん断剛性を  $G_m$ 、飯塚のダボ剛性を  $G_i$  とすれば、 $G = G_m + G_i$  で表される。この  $G_m$ 、 $G_i$  はともに、ひび割れ平行方向のせん断ひずみと直交方向の引張ひずみの関数として定義付け

T点：ひび割れ点 F点：引張域除荷点  
 H点：引張域残留ひずみ J点：圧縮域剛性復活点

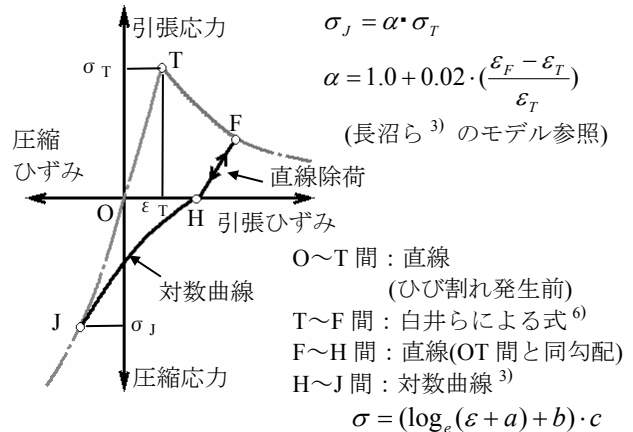
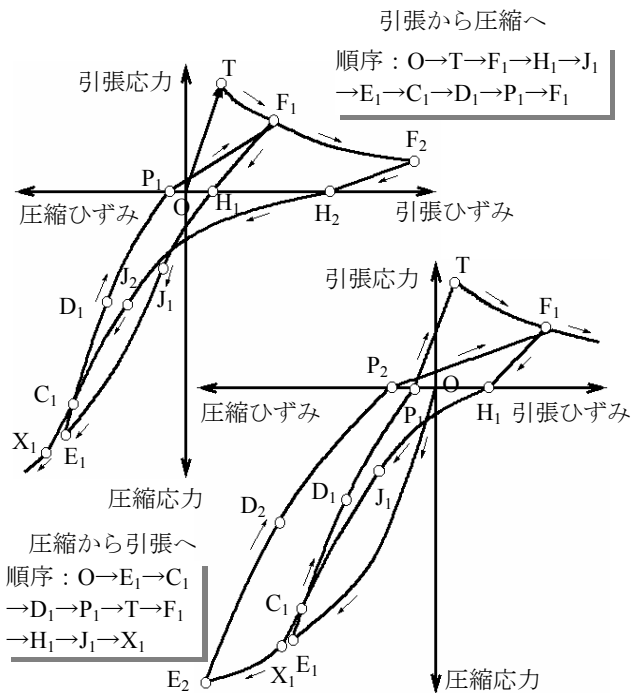


図-3 コンクリートの引張履歴のモデル化



T点：ひび割れ発生点 F点：引張側除荷点  
 J点：圧縮側包絡線復活点 E点：圧縮側除荷点  
 P点：残留ひずみ点 C点：コモンポイント

図-4 コンクリートの圧縮～引張間の履歴

られており、圧縮/引張とせん断の交差効果は G 値の変動によって表現されるモデルである。図-6 にせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。なお、除荷・再載荷時の履歴形状に関しては長沼<sup>3</sup>の提案式を用いた。③ひび割れ平行方向の圧縮強度は、ひび割れ幅 (引張ひずみ) と一軸圧縮強度をパラメータとして強度低下を考慮した野口・飯塚式<sup>10</sup>

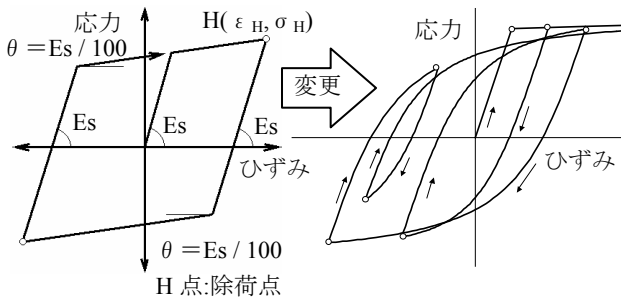


図-5 鉄筋の履歴ルール

(左)従来型 Bi-Linear (右) Menegotto-Pinto model

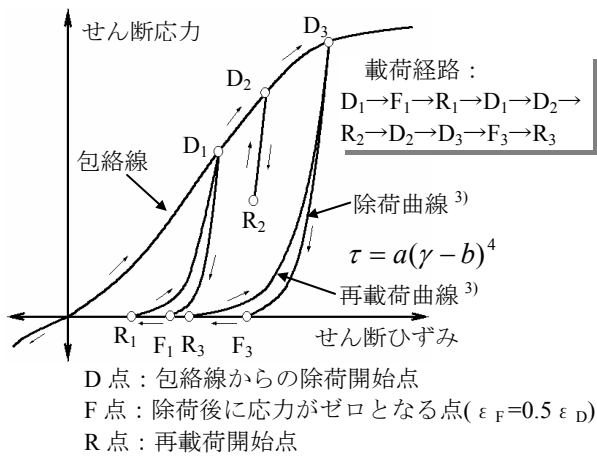


図-6 ひび割れ方向のせん断履歴のモデル化

を用いた。

### 3. RC 平板試験体の解析

#### 3.1 解析概要

本解析で選定した対象試験体は、Collins, Stevens ら<sup>11)</sup>の RC 平板のうち、純せん断繰返し荷が行われた SE8, SE9 (実験パラメータ: 補強筋比) と 2 軸圧縮力とせん断力が同時に作用する SE10 である。表-1 に試験体諸元、図-7 に試験体形状及び荷重装置、図-8 に解析における要素モデルと境界条件を示す。実験では図-7 に示すように、配筋方向に一樣な純せん断応力場を想定しているため、1 要素でも十分に応力状態を再現できると思われる。解析プログラムは 2 章で述べた各材料の繰返し履歴を導入した 2 次元非線形 FEM 解析プログラムを使用した。その際、鉄筋についてはコンクリートの要素剛性マトリックスに、配筋方向に定義された鉄筋の要素剛性マトリックスを座標変換して加算するコンクリート積層要素を用いて表現

表-1 RC 平板試験体の諸元

試験体名		SE 8		SE 9		SE 10	
試験体寸法 (mm)		1625 × 1625 × 285					
計測範囲 (mm)		1524 × 1524					
荷重方法		正負繰返し純せん断力				繰返しせん断 + 二軸圧縮応力	
α		0		0		-1/3	
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	37.5		44.2		34	
	圧強時ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	2.60		2.65		2.20	
割裂強度 (MPa)		3.4		4.3		4.0	
配筋方法		X	Y	X	Y	X	Y
鉄筋比 (%)		2.94	0.98	2.94	2.94	2.94	0.98
配筋間隔 (mm)		72		72		72	
使用鉄筋		20M	10M	20M	20M	20M	10M
降伏強度 (MPa)		492	479	422	422	422	479

α: 載荷されるせん断力に対する二軸圧縮力の比率

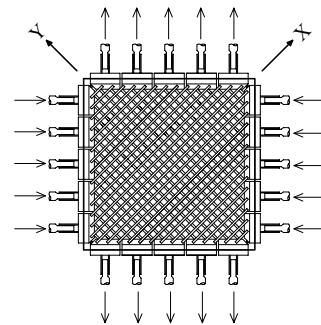


図-7 Collins らの実験<sup>11)</sup>における荷重装置の概要

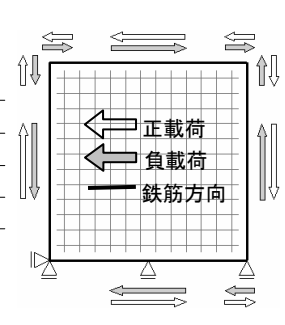


図-8 RC 平板の境界条件

した。解析における荷重は矢印の方向に荷重制御して、各辺 1:4:1 の割合で荷重を与える。(本解析結果より、各積分点の応力およびひずみの均一場を再現できていた。)

#### 3.2 解析結果

SE8 及び SE9 試験体の実験及び解析から得られたせん断応力-せん断ひずみ関係を図-9 に示す。不等量配筋の SE8 試験体は鉄筋降伏型で、鉄筋が降伏ひずみを大きく越えるレベルまで繰返し荷が行われている。解析と実験を比較すると、最大耐力、包絡線、除荷・再載荷曲線、スリップ域での履歴に関して、各サイクルで良い対応を示した。また第 3 及び第 4 サイクルにおける、せん断応力約 6MPa の定応力振幅の履歴形状は、実験結果に見られるような定応力時の上界せん断ひずみの増加を良く表現できていると言える。しかし鉄筋が等量配筋されている SE9 試験体については、弾性限界応力は実験値とほぼ一致しているが、その後のせん断ひずみ量が小さい結果となった。この原因として、本研究の解析モデルには繰返し回数

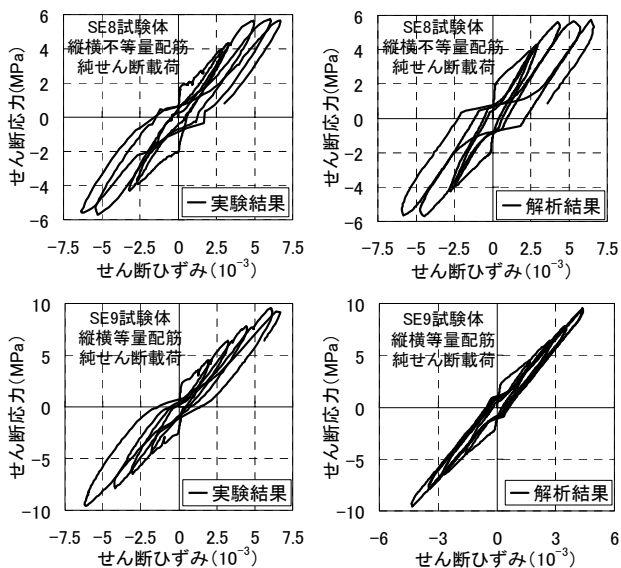


図-9 SE8,9のせん断応力-せん断ひずみ関係

を含んだコンクリート耐力の劣化性状が考慮されていないことが挙げられる。履歴面積においては、定性的な傾向は表現できているものの、解析では実験値をやや過小評価した。また、実験では $\tau \div \sigma = 9.55$ のサイクルにおいて、コンクリートの圧縮破壊と鉄筋の局所的な降伏が起こり、せん断ひずみが徐々に増加して、履歴ループが膨らんでいる。一方、解析ではほとんどひずみは増加していない。これは解析を通して鉄筋が降伏しなかったためである。ループ形状を改善するにはコンクリートに埋め込まれた鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を勘案し、実際の挙動に則した鉄筋降伏応力を取り入れれば良い。

図-10にSE10試験体のせん断応力-せん断ひずみ関係、せん断応力-縦方向ひずみ関係を示す。SE10は直交二方向で鉄筋比が異なり、ひび割れ面でのずれが顕著になるため、ひび割れ方向のせん断伝達を調べるのに適すると考え、ひび割れ後のせん断剛性を Al-Mahaidi モデル<sup>12)</sup>で表現した場合も比較検討した。このモデルはひび割れ直交方向の引張ひずみの関数としてせん断剛性の低下を表現するが、除荷後の対応を定義していないため、図-10(右下)のように除荷時に剛性が低下し過ぎて、ひずみが大きく膨らんでいる。一方、本モデルでの解析(右上)は実験結果を概ね再現できることが認められた。

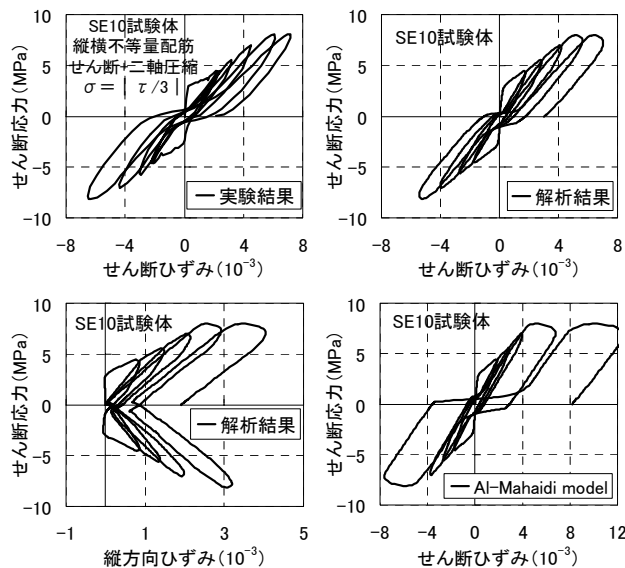


図-10 SE10のせん断応力-せん断ひずみ関係

#### 4. RC 耐震壁の解析

3章で示したように、本モデルはRC平板の解析において、比較的良好な対応をもたらすことが確認できた。ここでは、より一般的なRC構造物への妥当性を検討する目的で、RC耐震壁の解析を行う。

##### 4.1 実験概要

解析対象試験体は、昭和57年に青山らが実施したRC耐震壁の繰返し載荷実験<sup>13)</sup>から、一体打ちで製作されたP2004、P2012及びP4012である。表-2に試験体諸元、図-11に試験体詳細を示す。パラメータは、柱主筋量と、柱せいの変化(P4012はP2012の2倍の柱せいを持つ)による、周辺架構フレームの壁体への拘束である。荷重は左右両側柱の柱頭にそれぞれ118kN(12.0tf)の軸方向力を載荷した後、試験体上部の梁両端を押し引きしてせん断力を与えた。実験時の破壊性状は、P2004は壁板上部のスリップ状破壊により急激に耐力を失い、P2012では側柱近傍の壁脚部にスリップ状

表-2 RC耐震壁試験体の諸元

試験体名		P2004	P2012	P4012
試験体制作方法		一体打ち		
コンクリート圧縮強度 (MPa)		28.15	29.13	
柱寸法 (mm)		200×200	400×200	
側柱	柱主筋	配筋	4-D13	12-D13
		降伏強度 (MPa)	360.9	
	柱せん断補強筋	配筋	D6-@50	
壁体		降伏強度 (MPa)	391.3	355
	縦横補強筋	配筋	D6-@75ダブル	
		降伏強度 (MPa)	391.3	355

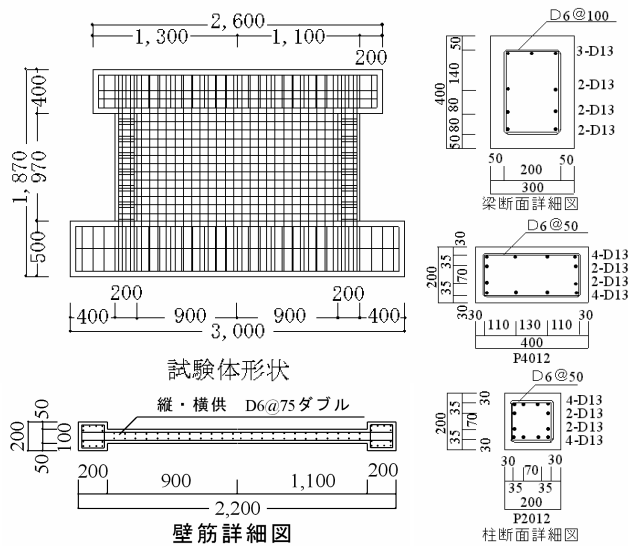


図-11 RC耐震壁試験体の詳細図

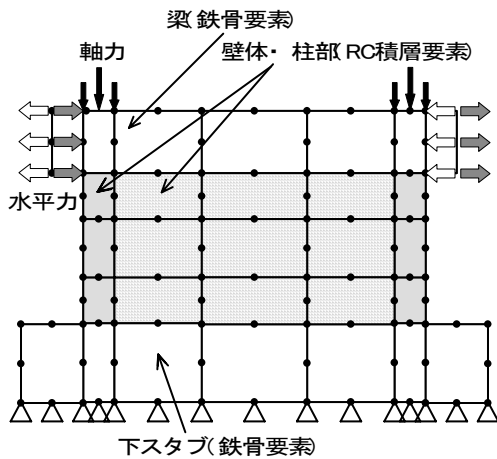


図-12 P2012 試験体の要素分割と境界条件

の破壊が生じると共に、壁中央部で斜めひび割れに沿ってコンクリートに圧壊が生じた。一方、P4012 では壁中央部分コンクリートに圧壊が生じて破壊に至った。

#### 4.2 解析概要

図-12 に解析における要素分割と境界条件を示す。本解析においても平板の解析と同様に、鉄筋はコンクリート積層要素を用いて表現し、鉄筋とコンクリート間の相対すべりは考慮せずに完全付着を仮定した。ひび割れは分布ひび割れモデルとした。荷重方法は、実験の加力スケジュールと同様に第1ステージで柱頭節点に等分布軸力を負荷した後、梁両端に変位制御しながら繰返しせん断力を荷重した。

#### 4.3 解析結果の検討

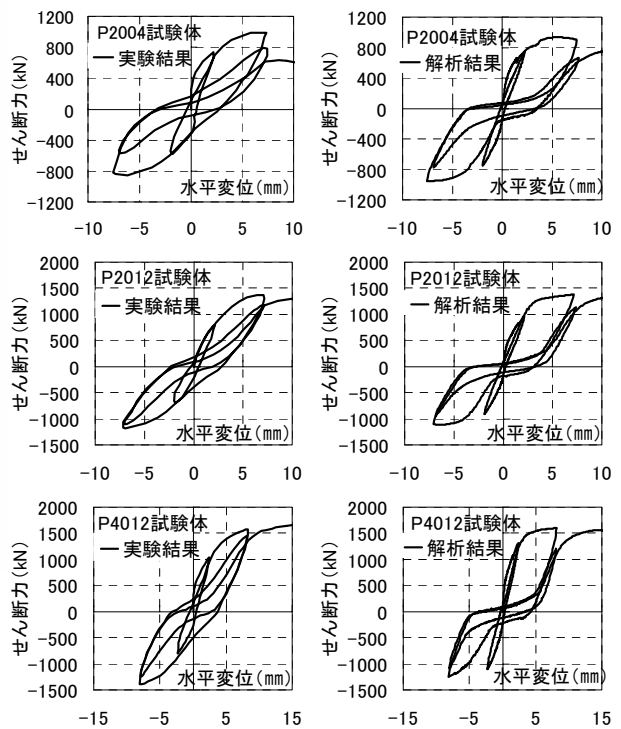


図-13 RC耐震壁のせん断力-水平変位関係

図-13 に、P2004、P2012 及び P4012 試験体のせん断力-水平変位関係を示す。各試験体とも、除荷・再載荷時剛性及び残留変位について良好な対応を示し、第2・第3サイクルにおける同一変位繰返し振幅下では、実験に見られる耐力低下を解析でも、やや大きめにではあるが確認できた。しかし、各試験体の第2、第3サイクルにおいて顕著のように、残留変形を経て負荷が始まる辺り、あるいは再載荷から残留変形を経て正側の荷重が始まる辺りから、解析値が実験値の内側を通る逆S字型の履歴をたどっている。これはひび割れ閉合時付近の骨材の噛み合いによる剛性復活を解析が過小評価していることを意味している。よって、図-3 に示したコンクリートの引張～圧縮域間における点 H (引張域残留ひずみ) から点 J (圧縮域剛性復活点) までの履歴モデルの再検討が必要である。つまり、図-14 に示すように、せん断ひずみの増大によって生じるひび割れ面の局部的な接触効果を考慮して、せん断ひずみが大きくなる程、圧縮応力上昇曲線とこの履歴間が引張側にシフトするモデルである<sup>10)</sup>。また、各試験体とも初期剛性から引張側柱鉄筋降伏までの剛性が 1～

2 割上回っているが、この要因としては、本解析では柱部及び壁体とスタブ部分は完全に固定され、柱脚部のずれを考慮していないことが考えられる。よってスタブと壁板との間に、クラックリンク要素等を挿入してスリップを表現すれば、さらに包絡線を実験に近づけることが可能となるであろう。

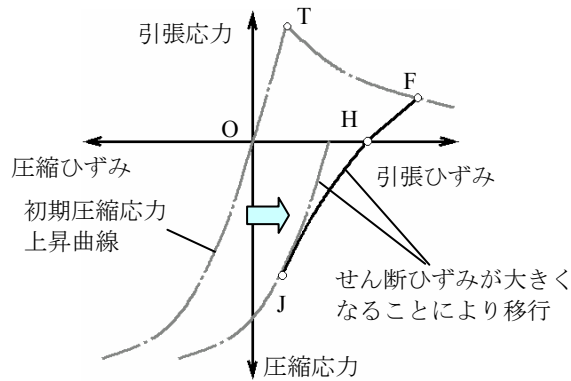


図-14 コンクリート履歴へのせん断ひずみの影響

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、材料の繰返し履歴ルールを用いて RC 平板および RC 耐震壁を対象とした 2 次元有限要素解析を行った。その結果、荷重-変形関係における除荷・再載荷履歴の形状や各サイクルの残留変位について、実験値を概ね良く評価できることを示した。繰返し解析に関する今後の課題として、繰返し履歴モデルを導入した離散ひび割れ要素等を用いて、より実験の特質に近い形で解析する必要がある。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990.11
- 2) 野崎幸男：正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート面材の非線形有限要素解析，千葉大学博士論文，1999.9
- 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，135-142，2000.10
- 4) Karsan, I.D. and Jirsa, J.O. : Behavior of Concrete Under Compressive Loadings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.95, No.ST12, pp.2543-2563, Dec.1969
- 5) Saenz, L.P. : Discussion of "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete" by Desayi and Krishnan, Proc. of ACI, Vol.61, No.9, pp1229-1235, 1964
- 6) 佐藤稔雄，白井伸明：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究（その 6）（その 7），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1615-1618，1978.9
- 7) Ciampi, V. and Paolo, E. : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars under Generalized Excitations, Report No.UCB/EERC-82/23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Nov.1982
- 8) Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H. : Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, Jour. Of Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, Aug.1973
- 9) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5
- 10) 飯塚崇文：普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリートの構成則と有限要素解析に関する研究，千葉大学学位論文，1992
- 11) Stevens, N.J., Uzumeri, S.M. and Collins, M.P. : Analytical Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loadings, Publication No.87-1, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Jan.1987
- 12) Al-Mahaidi, R. S. H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report No.79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Jan.1979
- 13) 青山博之，加藤大介，勝俣英雄：増設 RC 耐震壁の耐力と変形能の評価に関する実験的研究（その 1）（その 2）実験概要，日本建築学会学術講演梗概集，pp1407-1410，1982.10