

# 論文 繰り返し荷重を受けせん断破壊する RC 部材の挙動解析

水野要\*1・中村光\*2・檜貝勇\*3

要旨：本論文では、繰り返し挙動を考慮し得る有限要素法プログラムを開発し、正負交番繰り返し荷重を受け曲げ降伏後せん断破壊する RC 部材の挙動を解析的に評価する事を試みた。まず繰り返し荷重を受ける RC 部材に局所的なせん断挙動が発生する原因が荷重零点付近に表れる応力中立状態であることを示した後に、その挙動が繰り返しを経験していく毎に卓越していく性状を解析結果より明らかにした。また帯鉄筋量をパラメータとした解析を行うことで帯鉄筋量が繰り返し荷重下に生じるせん断挙動に及ぼす効果を調べた。

キーワード：有限要素法、繰り返し荷重、せん断挙動

## 1. はじめに

RC 部材が繰り返し荷重を受けると 1 方向荷重作用下に比べ変形能力が低下する現象が起きることは広く知られている。この現象を正確に捉えることは、地震による繰り返し荷重を受ける RC 構造物の耐震性能を検討する上で非常に重要である。そのため、この現象を理解するために現在に至るまで数多くの実験的検討が行われ、繰り返し荷重下で復元力が低下する現象と各種要因との関係がかなり明らかにされてきている。しかしながら実験的研究のみでは内部メカニズムや破壊に至る原因を明確にするには不十分であり、また寸法の大きな構造物の挙動については評価することができない等の問題が存在するため、繰り返し挙動を解析的に評価する手法の導入が望まれている。そこで本研究では、繰り返し挙動を考慮しうる非線形有限要素法プログラムを開発し、曲げ降伏後繰り返し荷重を受けせん断破壊に至る部材の挙動を解析的に評価するとともに、帯鉄筋量をパラメータとした解析を行い帯鉄筋の繰り返し荷重下の効果について評価を行った。

## 2. 解析方法

### 2. 1 解析モデル

本研究では、太田[1]が行った正負交番繰り返し荷重を受けせん断破壊する RC 部材のうち表-1 に示す 4 体を対象として解析を行った。図-1 (a) に太田が行った実験供試体 B の諸元ならびに配筋図を示す。供試体は断面高さ 40cm、断面幅 80cm、高さ 165cm の単一柱部材であり主鉄筋として 8D19 (引張鉄筋比は 0.82%) を配置したもので

表-1 供試体諸元

供試体	せん断スパン比	帯鉄筋間隔 (cm)	帯鉄筋比 (%)	軸方向鉄筋比 (%)	載荷	
					種類	軸応力度 (MPa)
A	4.0	20	0.08	0.82	1 方向載荷	1.0
B		20	0.08			
D		20	0.16			
F		40	0.04		繰り返し載荷	

- \*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)
- \*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)
- \*3 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

ある。また荷重として水平荷重を柱下端より 140cm の位置に作用させ（せん断スパン比 4.0）、軸方向応力度として 1.0MPa を載荷している。

図-1 (b) に有限要素解析を行うための要素分割図を示す。供試体は柱部分のせん断挙動を評価することを目的としているので、柱部分のみを対象とし、2次元四辺形アイソパラメトリック要素でモデル化を行った。なお鉄筋は、要素を RC 要素として取り扱うことで考慮して

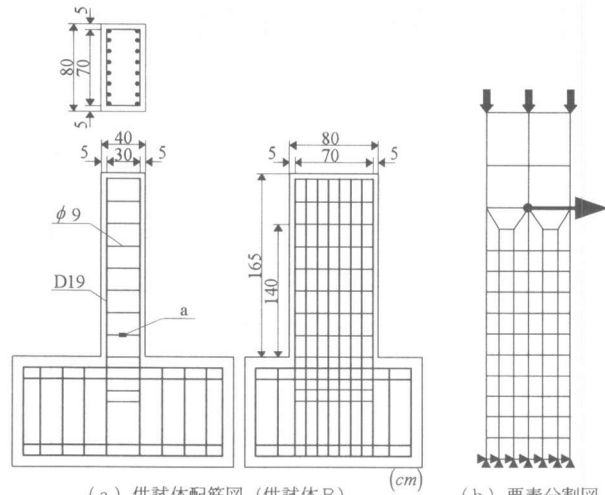


図-1 解析モデル

いる。また、軸力は柱上端の3接点に均等に分配した。解析はモデル下端より 140cm の柱中央の1点の変位を制御して行った。繰り返し荷重は降伏変位を  $\delta_y$  とした時、整数倍の変位、 $\delta_y$ 、 $-\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $-2\delta_y$ ...の地点に達したとき繰り返しを行った。非線形求解法としては、変位制御の増分解法とし、Newton-Raphson 法に従い収束計算を行った。なお要素分割の影響については今回の解析でほとんど生じないことを確認している。

## 2. 2 材料モデル

解析に用いたコンクリートの応力ひずみ関係を図-2 に示す。圧縮領域においては最大圧縮応力  $f'_c$  までを2次曲線としその後直線的に応力が0まで減少するモデルを用いている。一方引張領域においては、最大引張応力  $f_t$  までは初期勾配  $2f'_c/\epsilon_{c0}$  で応力が増加すると仮定し、最大引張応力後は軟化特性と破壊エネルギーを考慮した応力ひび割れ関係より応力を求める-3乗モデル[2]を用いた。応力ひび割れ幅関係を有限要素法に取り入れる場合は等価長さ  $leq$  を用いてひび割れ幅  $w$  をひずみ  $\epsilon$  に変換する必要がある。等価長さの定め方に関しては未だに不明な点が多いが本研究では要素の対角線に近い10cmとした。除荷時の応力ひずみ曲線は圧縮側、引張側ともに除荷点から線形に原点に戻る原点指向型とした。今回仮定したコンクリートの応力ひずみ関係は、繰り返しによる劣化特性を考慮せず、また原点指向型のためコンクリートが常に応力を有するというのでかなり安定的な応力ひずみモデルを採用していることになる。一方鉄筋に対しては圧縮・引張とも降伏点までは線形を保ち降伏点を超えると一定の降伏応力となる bi-linear 型を仮定した。除荷時の応力ひずみ曲線は単調載荷時の降伏線に交わるまでは初期剛性で応力が変化しそれ以降は降伏線上を移動する完全弾塑性モデルを仮定している。なおコンクリートのひび割れモデルとしては回転ひび割れモデルを用いた[3]。回転ひび割れモデルは、主ひずみ方向が変化した場合にひび割れ方向を主ひずみ方向に直交するように回転さ

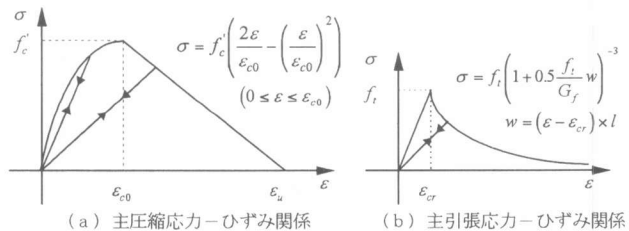


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

せて、主ひずみ方向と主応力方向を常に一致させるため、ひび割れ面でのせん断伝達に対する構成則を考える必要がない解析上簡便なモデルである。

材料定数はコンクリートに対しては圧縮強度  $f'_c = 28\text{MPa}$ 、圧縮強度時のひずみ  $\epsilon_{c0} = -0.002$ 、ひずみ軟化により応力が0になる時のひずみ  $\epsilon_u = -0.02$ 、引張強度  $f'_t = 2.24\text{MPa}$ 、破壊エネルギー  $G_f = 150\text{N/m}$ とした。鉄筋は軸鉄筋の降伏強度  $f_y = 373\text{MPa}$ 、帯鉄筋の降伏強度  $f_{yw} = 380\text{MPa}$ 、ヤング係数は軸鉄筋、帯鉄筋ともに  $2.0 \times 10^5\text{MPa}$ を用いている。これらの値は実験供試体より得られたもので全てのモデルについて共通である。

### 3. 繰り返しを受ける RC 部材のせん断挙動

図-3に繰り返し荷重を受ける供試体B、および1方向荷重を受ける供試体Aの解析より得られた荷重変位関係を示す。図中、実線が繰り返しを受ける供試体Bの、破線が1方向荷重を受ける供試体Aの解析結果である。また図中、曲げ理論に基づきファイバー法により解析を行った場合の荷重変位曲線を点線で併せて示してある。1方向荷重の場合非常に大変位(12cm)まで安定して解析が行われた。一方繰り返し荷重の解析は  $\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$  のように大変位領域で除荷するにつれて、その除荷勾配が緩やかになるとともに荷重零点付近で逆S字型につながる挙動が卓越するようになり、最終的には  $-3\delta_y$  から  $4\delta_y$  に向かう途中で収束することができずに解析が終了した。

今回の解析では、矩形部分のみの挙動を対象とし、抜け出しの影響を考慮していないため実験値の荷重変位関係と解析値を直接比較できないが実験での終局変位は約5cmで抜け出しと矩形部分の変位の比は約6:4であったことから、矩形部分のみの変位を比較すれば、解析で得られた終局変位とほぼ一致していることになる。また図-4および図-5に図-1のa点での解析ならびに実験より得られた、荷重とせん断補強鉄筋のひずみ関係を示しているがせん断補強鉄筋のひずみの増加傾向も解析結果と実験結果は定性的に一致しており、本解析は曲げ降伏後繰り返し荷重を受けせん断破壊する柱の定性的な挙動を概ね再現できるものであると言える。ここで除荷時ならびに荷重零

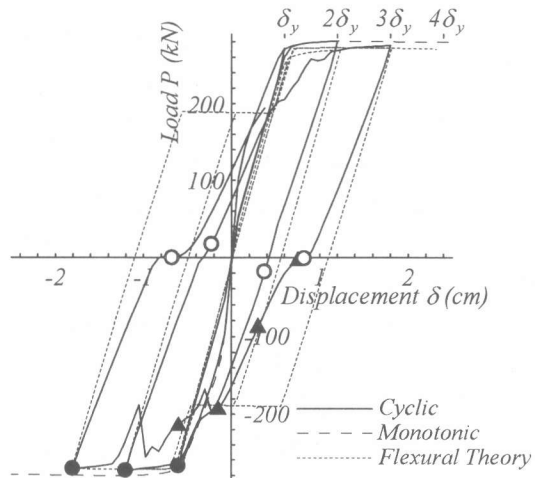


図-3 荷重変位関係

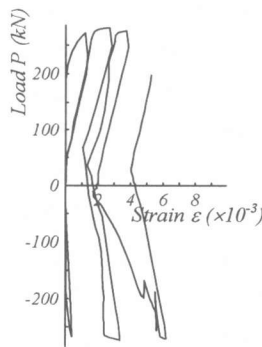


図-4 荷重帯鉄筋ひずみ関係 (解析)

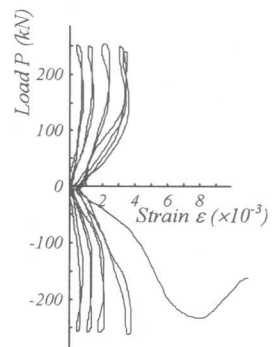


図-5 荷重帯鉄筋ひずみ関係 (実験)

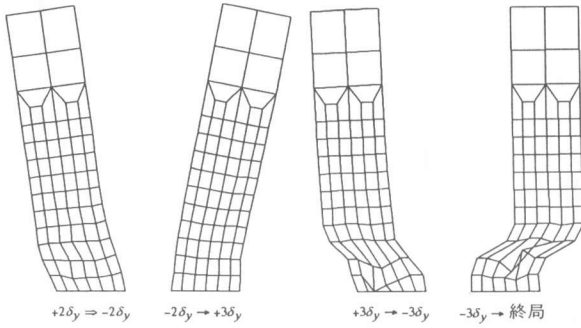


図-6 荷重零点付近の変位増分図

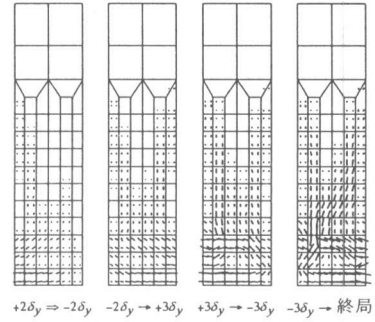


図-7 荷重零点付近のひび割れ図

点付近の挙動に注目すれば今回の解析結果は曲げ理論に基づく解析では得られないものであり大変位で繰り返し載荷を行うほど曲げの挙動と大きく異なる挙動が生じることが示されている。そこで荷重零点付近の挙動に注目し、その時点での変位増分図ならびにひび割れ図を図-6および図-7に示す。図はそれぞれ $+2\delta_y$ から $-2\delta_y$ 、 $-2\delta_y$ から $+3\delta_y$ 、 $+3\delta_y$ から $-3\delta_y$ 、 $-3\delta_y$ から終局に至る際に通過する荷重零点直後のものであり荷重変位曲線中の白丸にそれぞれ対応している。図を見れば大変位領域で繰り返しほど徐々に柱基部から断面高さ程度の位置までの間にせん断的な変形が卓越してくることが示されている。したがって、荷重変位関係において大変位で繰り返しを行うほど、荷重零点付近での逆S字タイプに近い挙動が卓越してくるのは、図-6に示すような柱基部でのせん断挙動が繰り返すごとに顕著になるためであることがわかる。そこで図-7に示すひび割れ図を見てみると荷重 $+2\delta_y$ から $-2\delta_y$ 、 $-2\delta_y$ から $+3\delta_y$ に向かう荷重零点でのひび割れ状況は、ひび割れが部材の片側に偏り応力の流れに特定の方向が生じていることがわかる。一方変位が大きくなる $+3\delta_y$ から $-3\delta_y$ 、 $-3\delta_y$ から終局に向かう途中の荷重零点では、ひび割れが部材に対して対称な形で発生している。このようにひび割れが部材に対して対称形を示す時に柱下端に局所的なせん断変形が卓越する挙動を示すのである。したがってこれらの現象をあわせて考えれば、繰り返し荷重を受ける柱部材は変位の小さい範囲ではひび割れの発生状況あるいは応力の流れが部材軸に対してある方向に卓越する方向性を持っていたものが、大変位で繰り返すごとに荷重零点付近で徐々にその方向性が失われ中立

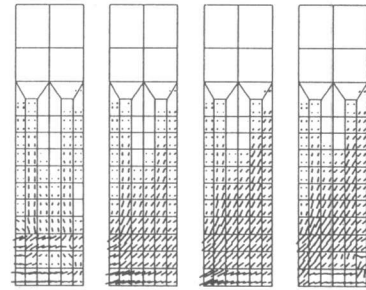


図-8 終局破壊に至るひび割れ図

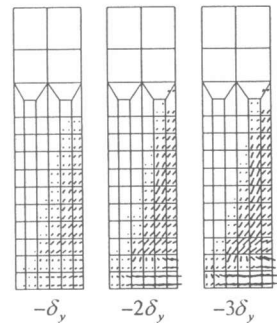


図-9 1方向載荷時のひび割れ図

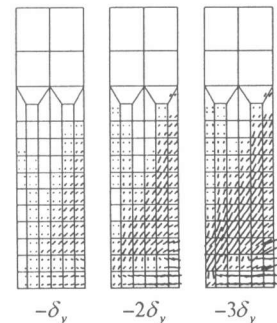


図-10 繰り返し載荷時のひび割れ図

的な応力状態を生じるようになり、その時点でせん断挙動が卓越していき、最終的にせん断破壊に至ることが解析結果より予想される。なお今回の解析においてコンクリートの応力ひずみ関係には繰り返しによる劣化の影響は考慮していない。それにも関わらず解析ではこのような大変位の繰り返しをすることによりせん断変形が卓越する挙動が再現されるのである。したがって、せん断変形が卓越する挙動は材料劣化の影響よりもあくまでも履歴による影響が大きいものと考えられる。

図-8に変位が $3\delta_y$ から $-3\delta_y$ に移動する間の荷重零点直後から破壊に至るまでの4地点のひび割れ図を示す。ひび割れ図はそれぞれ荷重変位曲線の三角印に対応している。荷重中立点で部材軸に対称に発生していたひび割れは、荷重が進むにしたがって柱最下端の曲げひび割れが閉じてゆき、同時に柱基部の荷重方向側から斜めひび割れが発達し局所化していくことがわかる。

図-9に1方向荷重を受ける供試体Aの、図-10に繰り返しを受ける供試体Bの、変位が $-\delta_y$ 、 $-2\delta_y$ 、 $-3\delta_y$ に達したときのひび割れ図を示す。図から明らかなように繰り返しを受ける供試体Bのせん断ひび割れは1方向荷重の供試体Aに比べ卓越している。このような1方向荷重と正負交番荷重との相違は荷重零点での中立的なひび割れ状況の発生がもっとも起因していると考えられる。またこのせん断ひび割れは繰り返しを経験していくことにより卓越していく。なお1方向荷重においても斜めひび割れの形成がみられるのは、今回の解析でコンクリートのひび割れモデルとして回転ひび割れモデルを用いたため、ひび割れが常に主軸方向ならびに鉄筋が存在する場合には剛性の大きな鉄筋軸方向に回転するという回転ひび割れモデルの特徴が顕著に生じたためと考えられる。

#### 4. 帯鉄筋量がRC柱の繰り返し挙動に及ぼす影響

帯鉄筋量が異なるB、D、Fの供試体の解析を行い、帯鉄筋量の繰り返し挙動に及ぼす影響について検討する。図-11、図-12にそれぞれ供試体F(帯鉄筋比0.04%)および供試体D(帯鉄筋比0.16%)に対する解析より得られた荷重変位関係を示す。前章で帯鉄筋比0.08%の供試体Bの結果を図-4に示したが図-11に示す帯鉄筋比が小さい供試体Fの結果は荷重零点付近でS字型に移行する挙動が供試体Bに比べ明らかに卓越していることがわかる。この荷重零点付近に生じる挙動が部材のせん断挙動に大きく影響することは既に述べたが、この結果は帯鉄筋比が小さくなるほど繰り返し中のせん断変形挙動がより支配的になることを意味している。一方図-12に示す帯鉄筋比0.16%の供試体Dでは荷重零点付近で顕著な変化は見られず帯鉄筋量を増やしたことで繰り返し中に生じるせん断変形挙動が大幅に軽減されていることがわかる。

また図-13、図-14に図-1のa点でのせん断補強筋のひずみ( $\epsilon_y$ )の変化を示すが、供試体Fでは $\epsilon_y$ の荷重に対する増加率が早期に大きくなり最終的にせん断補

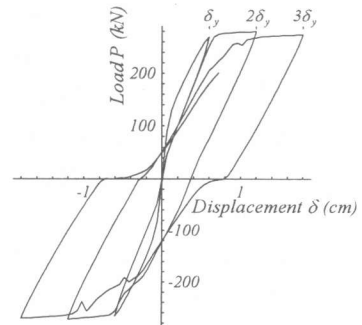


図-11 荷重変位図 (F)

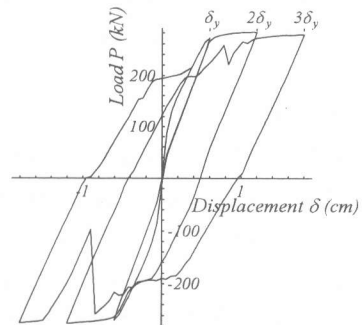


図-12 荷重変位図 (D)

強筋のひずみが非常に大きくなっている。それに対し供試体Dではせん断補強筋のひずみはほとんど増加していないことがわかる。このことから帯鉄筋量を増やすことでせん断変形挙動がかなり抑制されることは明らかである。帯鉄筋量を増やしていけば RC 部材の靱性は増大し曲げ降伏後の繰り返し荷重によるせん断破壊を防止することができるのは実験的にすでに明らかになっているが、今回の解析においても既往の実験結果と同様に帯鉄筋は RC 部材のせん断挙動を軽減させる上で非常に効果的であることが示された。

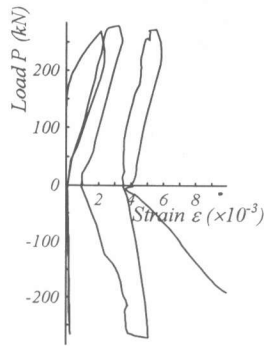


図-13  
荷重ひずみ図 (F)

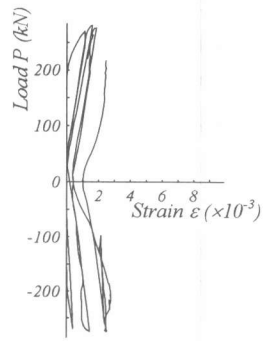


図-14  
荷重ひずみ図 (D)

## 5. 結論

繰り返し挙動を考慮しうる有限要素法プログラムを開発して正負交番繰り返し荷重を受け曲げ降伏後せん断破壊する RC 部材の挙動を解析的に評価した結果、次のような結論を得た。

- (1) RC 部材が正負交番荷重を受ける場合、変位の小さい範囲ではひび割れの発生状態ならびに応力の流れは部材に対して特定の方向性を持つが、変位が大きくなるにつれてその方向性が消失し荷重零点付近で中立的なひび割れ状態ならびに応力の流れが存在することになる。このことは1方向繰り返し載荷では生じない現象であり、繰り返し載荷を受けた場合に生じるせん断挙動はこのような中立的な状態が生じたとき顕著に発生することを解析的に明らかにした。
- (2) 大変位繰り返し中に生じるせん断挙動は材料特性よりも部材の履歴から生じる可能性の大きいことを示した。
- (3) 帯鉄筋は繰り返し中に生じるせん断変形を抑制することに効果的であることが解析的に示された。
- (4) 開発した有限要素法プログラムを用いれば繰り返し荷重を受けせん断破壊する RC 部材の挙動を概ね再現できる。

## 【参考文献】

- [1] 太田実：繰り返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第292号、pp.65-73、1979.12
- [2] 破壊力学の応力研究委員会研究報告書、日本コンクリート工学協会、Oct、1993
- [3] 山谷敦、中村光、飯塚敬一、檜貝勇：回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.359-364、1996.6