

# 論文 RC 部材の繰り返し挙動に影響を及ぼす各種要因の検討

水野 要\*1・中村 光\*2・檜貝 勇\*3

**要旨：**RC 部材の復元力が、正負交番繰り返し荷重を受け曲げ降伏後に低下する現象に対し、繰り返し荷重下の復元力低下に影響を及ぼすことが予想される各種要因について有限要素法を用いて解析的に評価する事を試みた。その結果、軸引張りと直交変位を受ける主鉄筋の挙動が、鉄筋の降伏応力の低下、ひいては部材の復元力低下に大きな影響を及ぼしている可能性を示した。また帯鉄筋量をパラメータとした解析を行い、帯鉄筋のせん断変形抑制効果が復元力低下の防止に有用であることを示した。

**キーワード：**繰り返し荷重、せん断挙動、復元力、有限要素法

## 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が広く知られている。過去にこの現象を理解するため活発な研究が行われ成果の蓄積が進みつつあるが、繰り返し荷重下の RC 部材の挙動に影響を及ぼす要因の複雑かつ多様さのため、内部メカニズムや破壊に至る原因は必ずしも明確にされてはいない。

著者らは、繰り返し挙動を考慮し得る非線形有限要素法によりそのメカニズムの検討を行い、解析結果に基づき復元力低下に結びつくメカニズムについての言及を行ったが、解析結果において実験で見られるような明確な復元力の低下を再現することはできなかった<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、これまでに著者らが開発してきた非線形有限要素法に、曲げ降伏後の復元力低下に影響を及ぼしていると考えられる各種要因をモデル化して組み込み、この現象を解析的に検討することを試みた。また、帯鉄筋量をパラメータとした解析を行い帯鉄筋量が復元力低下に及ぼす影響を調べた。

## 2. 解析方法

本章で示す解析方法を基本解析とし、本論文では 4 章で示す繰り返し中の復元力低下に及ぼすと考えられる各種要因を個別に考慮した解析を行った。

### 2.1 解析モデル

解析モデルは、断面高さ 40cm、断面幅 80cm、高さ 165cm の単一柱部材であり、せん断スパン比 4.0、軸方向鉄筋比 0.82%、帯鉄筋比 0.08% とした。また、軸応力度として 1.0MPa を載荷している。供試体諸元ならびに材料諸元は、太田<sup>2)</sup>が行った正負交番載荷を受ける RC 部材の実験供試体に基づいて定めた。なお、太田の実験供試体は曲げ降伏後せん断破壊したものであるため、本研究でも上記の破壊モードを対象とし、かぶりの圧壊または主鉄筋の座屈による復元力の低下は対象外とした。

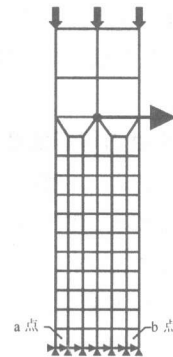


図-1 要素分割図

\*1 パシフィックコンサルタンツ(株) 北海道支社 工修 (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)

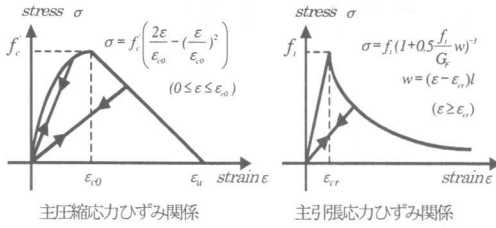


図-2 コンクリートの応力ひずみ関係

図-1 に有限要素解析を行うための要素分割図を示す。供試体は柱部分のみを対象とし、モデル化を行った。また、解析は変位制御で行い、変位が降伏変位  $\delta_y$  の整数倍 ( $\delta_y, -\delta_y, 2\delta_y, \dots$ ) の時点に達したとき繰り返しを行った。

## 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減少するモデルを用いた。一方、引張領域においては、最大引張応力  $f_t$  までは初期勾配で応力が増加し、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幅 ( $w$ ) 関係より応力を求める3乗モデル<sup>3)</sup>を用いた。除荷時の挙動は圧縮、引張側ともに原点指向型とした。一方、鉄筋に対して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 *bi-linear* 型を仮定した。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. 既往の解析結果<sup>1)</sup>

2章で示した解析方法に基づいて得られた解析結果は既に報告しているが、ここではその概要を簡単に記す。

図-3 に解析より得られた荷重変位関係を示す。荷重変位関係の特徴は、 $2\delta_y, 3\delta_y$  のように、大変位領域で繰り返す毎に荷重零点付近で逆S字型につながる挙動が卓越してくることである。また、部材の挙動は、荷重変位曲線が大変位領域の荷重零点付近で逆S字型の挙動を示すときのみ、図-4 に示すような部材に対して対称な

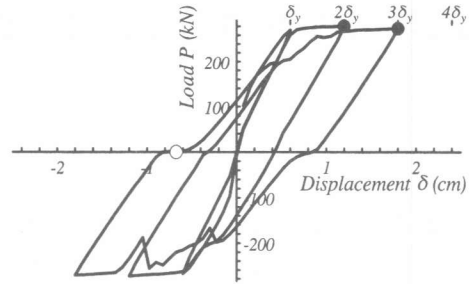


図-3 荷重変位関係

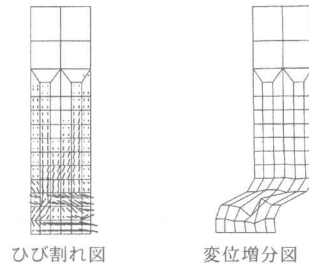


図-4 大変位領域荷重零点付近の部材の挙動 (図-3 白丸印点)

形で発生するひび割れと、断面高さ程度の位置までの間に卓越するせん断挙動が観察された。

このことから 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生じ、その時点でせん断挙動が顕著に発生するという結論を得た。しかしながら、荷重変位関係においてはせん断挙動が顕著に発生した後も曲げ耐力を有し、実験で見られるような復元力が繰り返し毎に低下する現象を再現することはできなかった。

## 4. 繰り返し荷重下の復元力低下に影響を及ぼす要因の検討

前述したように、従来の解析では繰り返し荷重下で曲げ降伏後せん断挙動が卓越するメカニズムを示したが、復元力が正負繰り返し荷重下の終局時に低下する現象をとらえられることができなかった。そこで、繰り返し荷重下の復元力低下に影響を及ぼしていると考えられるいく

つかの要因を取り上げ、その影響について検討した。

#### 4.1 バウシinger効果

2章では、鉄筋を *bi-linear* 型でモデル化した。が、繰り返し応力を受ける鉄筋には、バウシinger効果が生じる。そこで、福浦ら<sup>3)</sup>が提案した繰り返し応力下の鉄筋モデルを用い、バウシinger効果を考慮した解析を行った。

図-5 に解析より得られた荷重変位関係を示す。図より明らかなように復元力が低下する挙動は生じていない。したがって、繰り返し荷重下で RC 部材の復元力が低下する現象にはバウシinger効果は影響を及ぼしていないと考えられる。しかしながらこの解析では、完全弾塑性型の鉄筋モデルではとらえきれない、荷重零点後に荷重が勾配を変化させながらなめらかに除荷点を目指す挙動が再現されており、実験結果をより正確に再現できるものと考えられる。そこで本節以降の全ての解析においては、鉄筋の応力ひずみモデルにはこのモデルを採用することにした。

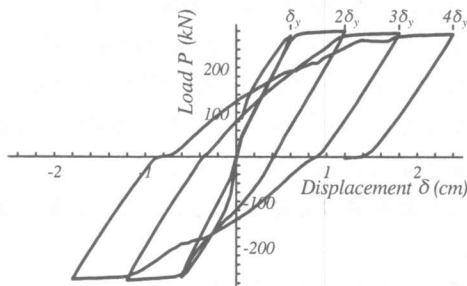


図-5 荷重変位関係

#### 4.2 繰り返し荷重下のコンクリートの応力ひずみモデル

2章の解析では除荷時のコンクリートの応力ひずみ関係を原点志向型としたが、このモデルはコンクリートが常に応力を有し、また塑性ひずみが生じないというモデルであった。そこで、図-6 に示すようなモデルを仮定し繰り返し応力下のコンクリートの応力ひずみ曲線が復元力に及ぼす影響を検討した。

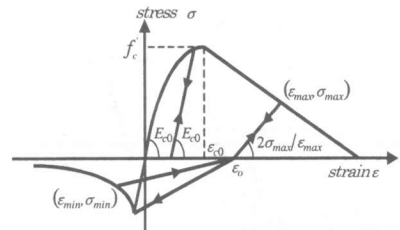


図-6 応力ひずみ関係

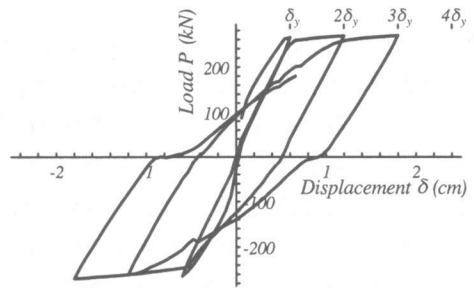


図-7 荷重変位関係

図-6 において、応力ひずみ関係の包絡線は2章と同様である。除荷時の挙動は、圧縮領域では過去の最大圧縮ひずみ  $\epsilon_{max}$  が  $\epsilon_0$  以下の場合には初期勾配と等しい傾きの直線に沿って、以上の場合には傾き  $2\sigma_{max}/\epsilon_{max}$  の直線に沿って応力が減少する。一方、引張領域では圧縮側の塑性ひずみ点  $(\epsilon_0, 0)$  を線形に目指すものとした。また、応力が圧縮から引張り、あるいは引張りから圧縮に転じるときはそれぞれ過去の最大ひずみ点を目指すかと仮定した。

図-7 に解析より得られた荷重変位関係を示す。バウシinger効果のみを考慮した解析に比べ荷重零点付近で逆S字型につながる挙動が若干ではあるが卓越する結果を示しており、コンクリートの除荷時の挙動は荷重零点時の部材のせん断挙動に少なからぬ影響を及ぼしていると考えられる。しかしながら復元力の低下する挙動は示されておらず、繰り返し応力のモデルの違いは、復元力が低下する現象を直接的には支配していないことが予想される。

#### 4.3 鉄筋とコンクリートの付着

RC 要素を用いた有限要素法解析においては、鉄筋とコンクリートの付着は完全であり両者の

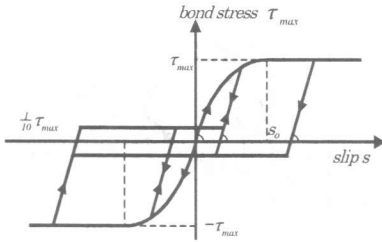


図-8 付着応力すべり関係

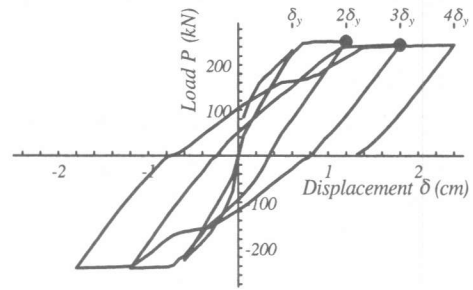


図-9 荷重変位関係

間にすべりは生じないとする仮定を用いる。しかし実際の RC 構造では付着すべりは存在し、特に斜めひび割れとの交差部における軸方向引張り鉄筋の付着すべりの増加が斜めひび割れ幅の拡大、さらには局所化をおこし、部材の挙動を大きく支配している可能性が考えられる。そこで軸方向引張り鉄筋を軸力のみ抵抗するトラス要素でモデル化し鉄筋要素の節点とコンクリート要素の節点の間に付着すべり関係（鉄筋軸方向および軸直角方向）を考慮した非線形バネ要素を用いることで付着の及ぼす影響を検討した。なお、帯鉄筋はこれまでどおり RC 要素で取り扱っている。

異形鉄筋の付着すべり関係の包絡線は  $\tau_{max}$  までは以下に示す 2 次放物線でモデル化を行った。

$$\tau = \tau_{max} \left( 2 \frac{s}{s_0} - \left( \frac{s}{s_0} \right)^2 \right) \quad (1)$$

$$\tau_{max} = 0.9 f_c', \quad s_0 = 0.2mm$$

ここで  $f_c'$  はコンクリートの圧縮強度、 $s$  はすべりである。また、除荷・再載荷時の関係は Tassios ら<sup>9)</sup>の提案したモデルを用いて図-8 に示すような関係を用いている。

図-9 に解析より得られた荷重変位関係を示す。図よりわかるように付着すべりを考慮した解析においても完全付着を仮定した解析結果と同様の荷重変位関係が得られ、繰り返し荷重下で復元力が低下する挙動は現れていない。

ここで図-10 に示す、図-3 および図-9 の荷重変位曲線中の黒丸印に対応する、変位が  $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$  のひび割れ図を見れば、付着の有無によるひび割れ状況の違いは必ずしも明確ではない。今回の解析では軸方向鉄筋のみに付着の効果

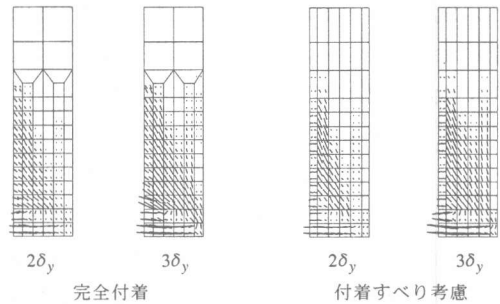


図-10 ひび割れ図

考慮したが、帯鉄筋に対しても同様の効果を考慮した、より詳細な検討が今後必要と思われる。

なお、荷重変位関係において 2 章の解析結果よりも曲げ耐力自体が低いのは、鉄筋をトラス要素でモデル化するための要素分割の関係上主鉄筋位置をより部材の中心側にしたためであり、このことは 1 方向載荷の解析にこのモデルを適用した結果から確認している。

#### 4.4 軸引張りと直交変位を受ける鉄筋の挙動

図-11 に 2 章の解析より得られた供試体下部の主鉄筋位置に対応する図-1 中の a および b 点の荷重せん断ひずみ関係を示す。図によれば主鉄筋位置のせん断ひずみは、除荷時に荷重が

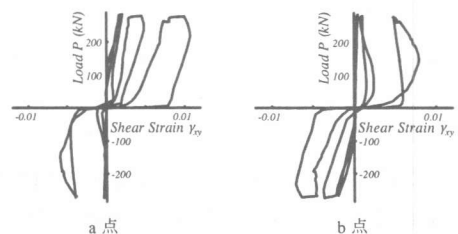


図-11 荷重せん断ひずみ関係

零点を越えた直後で急増しており、主鉄筋には軸方向ひずみの他、かなりのせん断ひずみが生じる可能性が示されている。

軸方向ひずみとせん断ひずみを同時に受ける鉄筋の挙動については、Maekawa ら<sup>6)</sup>がコンクリートのせん断ひび割れと交差する鉄筋の引き抜け挙動について実験的に検討を行い、ひび割れ面に沿ってせん断変位が導入される場合、鉄筋の引抜け耐力は常に全断面降伏応力を下回ることを明らかにしている。これは、ひび割れ界面での鉄筋が局所的な曲げおよびせん断力を受けることで、鉄筋断面には直応力のみならずせん断応力  $\tau_s$  が発生するからである。さらに Maekawa らはせん断応力が鉄筋の降伏応力に及ぼす効果に対して Von-Mises の降伏基準を適用し以下の式を導いている。

$$f_y' = f_y \sqrt{1 - 3(\tau_s / f_y)^2} \quad (2)$$

ここで  $f_y'$  は低下した鉄筋の降伏応力、 $f_y$  は鉄筋の降伏応力、 $\tau_s$  は鉄筋に作用するせん断応力である。そこで本解析についてもこのせん断応力の影響を考慮した解析を行った。

図-12 に解析より得られた荷重変位関係を示す。図によれば  $2\delta_y$  までの比較的変位の小さい範囲では復元力は曲げ耐力と一致するが、荷重零点時にせん断挙動が顕著になる大変位領域では繰り返しを行うにつれ復元力が低下していく事が分かる。このような結果は、前述した他要因の検討においては得られなかったことであり、繰り返し荷重を受ける RC 部材の復元力低下に軸引張りと同直交変位を受ける主鉄筋の挙動が大きく影響を及ぼしていることを予想させる結果と言える。

ここで表-1 に示す、図-1 中 a および b 点の主鉄筋降伏応力を見れば主鉄筋の降伏応力は繰り返しを行う毎に徐々に低下している事が分かる。

この解析結果を既往の研究で明らかにしたこととあわせて考えれば、次のようなメカニズムを推測することができる。すなわち、繰り返し

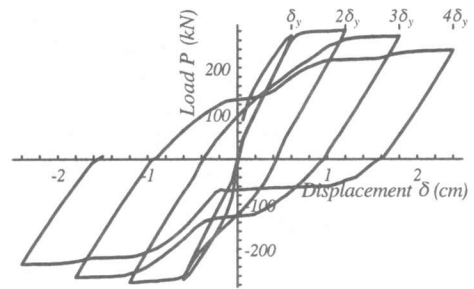


図-12 荷重変位関係

表-1 主鉄筋降伏応力

繰り返し量		初期	$+\delta_y$	$+2\delta_y$	$+3\delta_y$	$+4\delta_y$
降伏応力 (MPa)	a 点	372	372	371	355	291
	b 点	372	371	368	343	245

荷重を受ける RC 部材は大変位領域の荷重零点で卓越したせん断変形を生じる。この時に主鉄筋が軸方向と直角な方向にせん断応力を受けることで主鉄筋の降伏応力が低下し、さらには部材全体の復元力が低下する挙動につながるものである。

このような挙動は 1 方向繰り返し載荷では生じない繰り返し荷重下の RC 部材特有のものであり、このメカニズムの相違が、繰り返し荷重下で変形能力および復元力が低下する一つの原因と考えられる。

### 5. 帯鉄筋が復元力低下に及ぼす影響

帯鉄筋量を先に示したモデルの 2 倍（帯鉄筋比 0.16%）および半分（帯鉄筋比 0.04%）に仮定したモデルに対して、降伏応力の低下モデルを適用した場合の解析結果を図-13 に示す。供試体の復元力に注目すれば、変位が  $2\delta_y$  程度の小さな範囲で繰り返しを行っているときには、帯鉄筋比による大きな違いは見られないが、 $3\delta_y, 4\delta_y$  のように大変位領域で繰り返しをうけると、帯鉄筋比の小さいモデル(0.04%)ではより復元力が低下する挙動を示している。一方帯鉄筋比の大きいモデル(0.16%)では復元力の低下が緩やかなものになるとともに、終局変位が増加している。

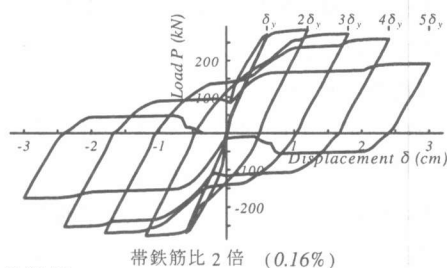
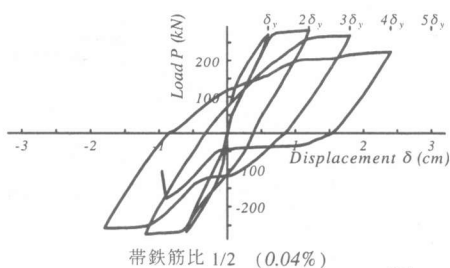


図-13 荷重変位関係

ここで、表-2 に示す  $4\delta_y$  時の a 点の主鉄筋の降伏応力を見れば、等しい繰返し変位量を受けているにもかかわらず帯鉄筋比が半分 of 供試体では降伏応力の低下が顕著である。一方、帯鉄筋比が 2 倍 of 供試体では降伏応力の低下が明らかに抑制されている。

既往の実験結果などからも、帯鉄筋が繰返し中のせん断挙動を抑制するために効果的であることは明らかであり、この帯鉄筋のせん断変形抑制効果が、鉄筋の降伏応力の低下、ひいては急激な復元力の低下を防止するのに役立つと思われる。

表-2 主鉄筋降伏応力

	初期降伏応力 (MPa)	$4\delta_y$ 時降伏応力 (MPa)
帯鉄筋比 1/2 (0.04%)	372	281
標準供試体 (0.08%)	372	291
帯鉄筋比 2 倍 (0.16%)	372	318

※ ( ) 内は帯鉄筋比 (%)

## 6. 結論

繰返し荷重下の復元力低下に影響を及ぼすと考えられる各種要因について有限要素法を用いて解析的に評価する事を試みた結果、次のような結論を得た。

- (1) 繰返し荷重下の RC 部材の復元力低下には、軸引張りと同変位を受ける鉄筋の挙動が影響を及ぼしている可能性が大きいことを解析的に明らかにした。
- (2) せん断変形の卓越が主鉄筋のせん断ひずみの増加、ひいては復元力の低下に影響を及ぼしているメカニズムが推測されることを

示した。

- (3) 帯鉄筋のせん断変形抑制効果が主鉄筋の降伏応力の低下、さらには復元力の低下を抑制している可能性を示した。

## 参考文献

- 1) 水野要, 中村光, 檜貝勇: 繰返し荷重を受けせん断破壊する RC 部材の挙動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.795-800, 1997.6
- 2) 太田実: 繰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
- 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
- 4) 福浦尚之, 前川宏一: RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰返し履歴モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5
- 5) Tassios, T.P. and Yannopoulos, P.J.: Analytical Studies on Reinforced Concrete Members under Cyclic Loading Based on Bond Stress-Slip Relations, ACI Journal, 5-6, pp.206-216, 1981
- 6) Maekawa, K. and Qureshi, J.: Computational Model for Reinforcing Bar Embedded in Concrete under Combined Axial Pullout and Transverse Displacement, J. Materials, Conc. Struct., Pavements., JSCE, No538/ V-31, pp.227-239, May.1996