

論文 耐力低下を考慮した RC 部材の復元力特性モデルの開発

梅村 恒^{*1}・市之瀬 敏勝^{*2}・大橋 一仁^{*3}・前川 純一^{*4}

要旨：既往の実験的研究では，RC部材が正負繰り返し荷重を受けることにより，耐力低下開始点が単調荷重時より後退することが報告されている。本研究では繰り返し荷重に伴うコンクリートの内部の残留ひずみがRC部材のせん断抵抗機構の破壊を生じさせる要因となると考え，「累積損傷変形」という概念を用いて耐力低下開始点の移動を考慮した復元力特性モデルを開発した。開発したモデルを用いて，繰り返し荷重を受けるRC部材の荷重-変形関係を再現した。耐力開始点の移動を考慮することにより，RC部材の様々なパターンの荷重履歴を表現することができる。

キーワード：鉄筋コンクリート，荷重履歴，耐力低下，剛性低下

1. はじめに

既往の実験的研究では，RC部材が正負繰り返し荷重を受けることにより，曲げ降伏後に耐力低下を起こすことが報告されている¹⁾²⁾が，耐力低下を適切に考慮した簡便な復元力特性モデルの提案は少ない。文献³⁾では，繰り返しによる剛性低下と変形の進行に伴う耐力劣化を同時に考慮することにより，既往の実験で得られた荷重-変形関係の包絡線をよく再現するモデルを提案している。しかしこのモデルでは，部材が多数の繰り返し荷重を受けるとき，単調荷重を受けの場合と比較して大幅に変形能力が低下する現象を再現することができない。このような場合，繰り返し荷重を受けた際に，スケルトンカーブにおける耐力低下開始点を移動させるルールが必要である。

本研究では，繰り返し荷重に伴う新たな変形がRC部材の耐力低下の要因になると考え，耐力低下開始点の移動を考慮した復元力特性モデルを開発する。

2. 復元力特性モデルの提案

2.1 剛性低下

RC部材が繰り返し荷重を受けるとき，ひび割れの開閉に伴って損傷が進行し，荷重時に剛性が低下して，前回の同方向のループと比較して耐力が回復しないと考える。文献³⁾ではTakedaモデルを基本として，指向点の移動という形で剛性低下を考慮している。指向点移動の考え方を図-1に示す。移動の量は以下の式で表される。

$$d_n = d_p + (d_{max} - d_{min}) \times \chi \quad (1)$$

d_n : 新しい指向点
 d_p : 前回の同方向の指向点
 d_{max} : 前回の同方向の最大変位
 d_{min} : 前回の反対方向の最大変位
 χ : 剛性低下係数

履歴モデルとして簡便に使用できるように，履歴のみから与えられる指標として前回のループの幅 $d_{max} - d_{min}$ を基準としている。剛性低下係数は，部材および荷重方法のパラメータに応じて決定する。

2.2 剛性低下係数

剛性低下係数 χ は指向点の変位増加量を決定するパラメータであり，値が大きいほど繰り返し

*1 名古屋工業大学助手 工学部システムマネジメント工学科 博士(工) (正会員)

*2 名古屋工業大学教授 工学部システムマネジメント工学科 工博 (正会員)

*3 大成建設(株) 工修 (正会員)

*4 関東自動車工業(株)

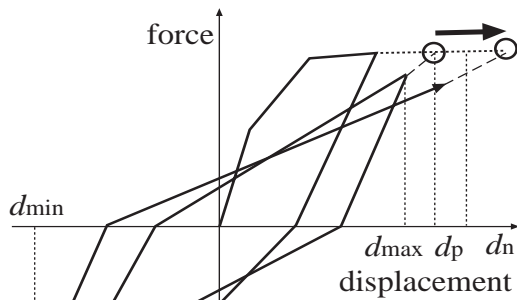


図-1 指向点の移動

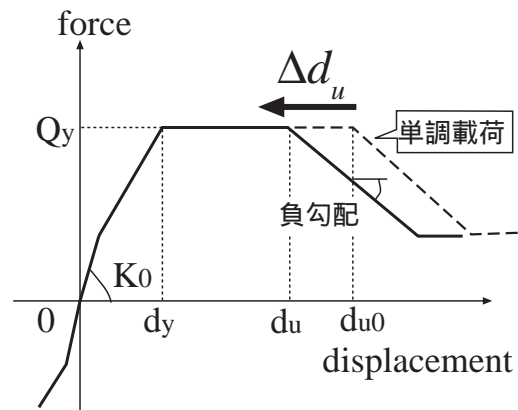


図-2 耐力低下点の移動

し荷重時の剛性低下の度合いが大きくなる。既往の実験的研究で得られた荷重 - 変形関係から剛性低下係数 χ を読み取り、剛性低下に対して影響を及ぼすと考えられるパラメータに対して重回帰分析を行った。影響の大きな4つの説明変数を選び、以下の回帰式を得た。

$$\chi = 0.12 + 0.00069f_c - 0.039p_w + 0.016n_0 - 0.019\lambda$$

- f_c : コンクリート強度 (MPa)
- p_w : 横補強筋比 (%)
- n_0 : 軸力比
- λ : シアスパン比

重回帰係数は0.76であった。各パラメータと剛性低下係数 χ との相関係数を表-1に示す。コンクリート強度が高いほどピーク後の耐力低下が急激になる傾向がある。また、軸力比はコンクリートの圧壊を早めるので、剛性低下係数と正の相関を示す。一方、横補強筋比が大きくなれば剛性低下は起こりにくくなり、シアスパン比が大きくなれば靱性が増すため、剛性低下係数と負の相関を示す。

表-1 剛性低下係数 と 部材パラメータの相関係数

コンクリート強度 f_c	0.55
横補強筋比 p_w	-0.26
軸力比 n_0	0.34
シアスパン比 λ	-0.11

2.3 累積損傷変形による耐力低下

図-2に示すように、始めは単調载荷のスケルトンカーブに沿って指向点を移動させる。繰り返し荷重を受けた際、図-2の d_u だけ耐力低下開始点を後退させる。

RC部材の耐力低下の原因として、繰り返し荷重を受けた際、柱断面内のコンクリートにひび割れが生じ、内部ひずみが蓄積してコンクリートの圧縮強度が減少し、トラス機構による応力伝達機構が劣化することが考えられる。

ここで、RC部材の繰り返し荷重実験で得られた全体変形と横方向ひずみの関係⁴⁾を図-3に示す。コンクリートの横方向ひずみとは、柱断面の膨らみをピアノ線付き変位計で測定し、柱せいで除したものである。図-3の下の図は、上の図の太線で囲んだ部分を拡大したものである。新たな変位の増大に対して生じたコンクリートの横方向ひずみ増分を $\Delta\varepsilon$ 、変位が0に戻った時の残留ひずみ増分を $\Delta\varepsilon_r$ とする。1サイクルあたりのコンクリートの新たな変位の増大に対して生じたひずみ増分 $\Delta\varepsilon$ と残留ひずみ増分を $\Delta\varepsilon_r$ の関係を図-4に示す。図中の $\Delta\varepsilon_r$ は耐力低下前、 $\Delta\varepsilon$ は耐力低下後のコンクリートのひずみを表している。 $\Delta\varepsilon_r$ と $\Delta\varepsilon$ がよく対応していることがわかる。つまり、変形の増分と部材内部のひずみ、すなわち耐力低下に関わる部材の損傷に関係があると言える。耐力低下後に残留ひずみが大きくなる傾向が見られるが、ここでは簡単のために変形の増分と耐力低下開始点の移動が線形関係

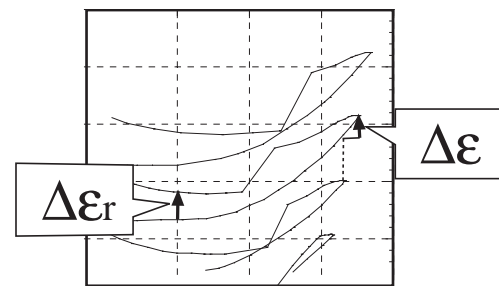
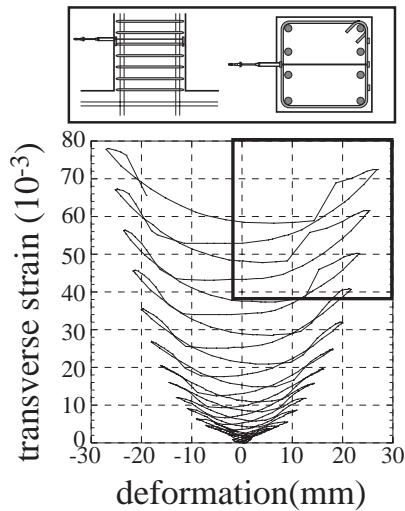


図-3 コンクリートの横方向ひずみ

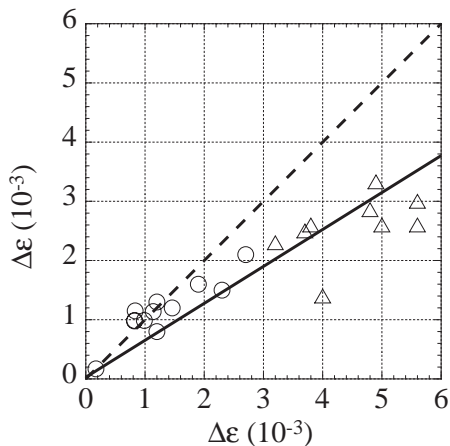


図-4 $\Delta\varepsilon$ と $\Delta\varepsilon_r$ の関係

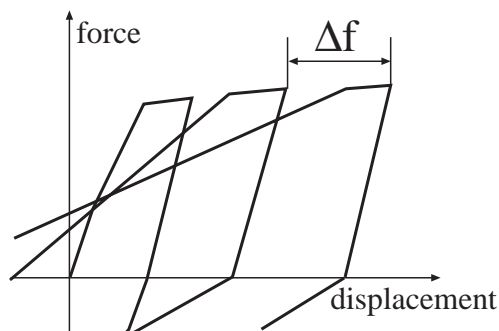


図-5 損傷変形増分

にあると仮定し、耐力低下開始点を以下の式で示す。繰り返し载荷を受ける時に新しく進展した変形を損傷変形増分 Δf でを用いて、部材の耐

$$\Delta d_u = \gamma \sum \Delta f \quad (3)$$

Δd_u : 繰り返し载荷後の耐力低下開始点
(移動する)

γ : 累積損傷変形係数

Δf : 損傷変形増分(前回より進んだ変形)

力低下を累積損傷変形 $\gamma \Delta f$ で表す(図-5)。

3. 実験の再現

前章で提案した復元力特性モデルを用いて、既往の実験的研究で得られた部材の荷重 - 変形関係の再現を行う。衣笠らの実験シリーズのうち、軸力無しの場合¹⁾を5通り、軸力有り²⁾の場合を3通り選び、再現の対象とした。

3.1 設定したモデルパラメータ

対象とした試験体の諸元を表-2に示す。コンクリート強度は、軸力無しで27-30MPa、軸力有りで30-34MPaという値ではらついている。他は軸力比を除いて同じ条件である。再現に用いた Takeda モデルのパラメータを表-3に示す。繰り返し時の剛性低下を決定する剛性低下係数は、式(2)により、軸力無しでは0.06、軸力有りでは0.07を用いた。

3.2 軸力無し試験体の再現

(1) 単調载荷

単調载荷実験で得られた荷重 - 変形関係を図-6(a)に示す。単調実験の载荷の荷重 - 変形関係を参考にして、再現で用いるスケルトンカーブ

表-2 部材パラメータ

	n_0	p_w (%)	p_g (%)	f_c (MPa)	λ
軸力無し	0	0.75	1.9	27-30	2.5
軸力有り	0.15	0.75	1.9	30-34	2.5

表-3 Takeda モデルのパラメータ

ひび割れ強度 / 降伏強度	1月3日
降伏点剛性低下率 α	0.3
除荷時剛性低下率 β	0.4

を図-6(b)のように決定した。ただし、本実験では単調荷荷の場合のみ降伏強度が大きくなっているため、荷重をスケルトンカーブの荷重を係数倍した。累積損傷変形係数を定量化するためには、単調荷荷を含む多くの実験結果を収集する必要がある。本研究では適切に決定することによって荷重-変形関係を再現できることを示すため、試行錯誤によって、実験結果をよく再現する値 1.70 とした。

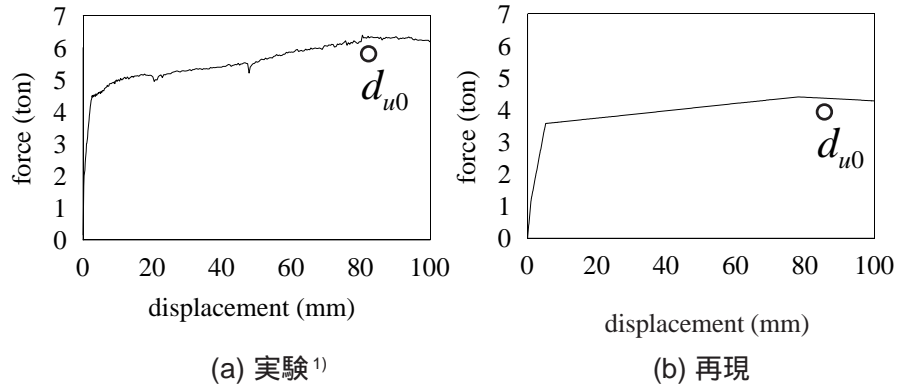


図-6 単調荷荷

を定量化するためには、単調荷荷を含む多くの実験結果を収集する必要がある。本研究では適切に決定することによって荷重-変形関係を再現できることを示すため、試行錯誤によって、実験結果をよく再現する値 1.70 とした。

(2) 定変位繰り返し荷荷

両側 20 mm , 両側 30mm , 片側 40mm の定変位繰り返し荷荷を受けた部材の履歴を、図-7(a) , 8(a) , 9(a) にそれぞれ示す。すべての場合に、繰り返し回数の増加によって剛性が大幅に低下している。しかし最終的な耐力を見ると、図-7(a) , 9(a) では最大耐力近くまで耐力が回復するのに対し、図-8(a)のみ耐力が大幅に低下している。

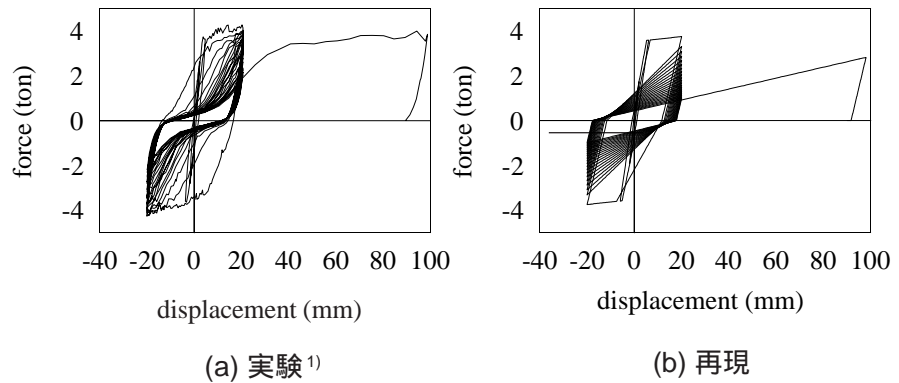


図-7 両側 20mm の定変位繰り返し荷荷

本研究のモデルで再現した履歴を図-7(b) , 8(b) , 9(b) にそれぞれ示す。Takedaモデルに基づくモデルなので実験で見られるスリップ性状を再現できないものの、各サイクルのピークの荷重につ

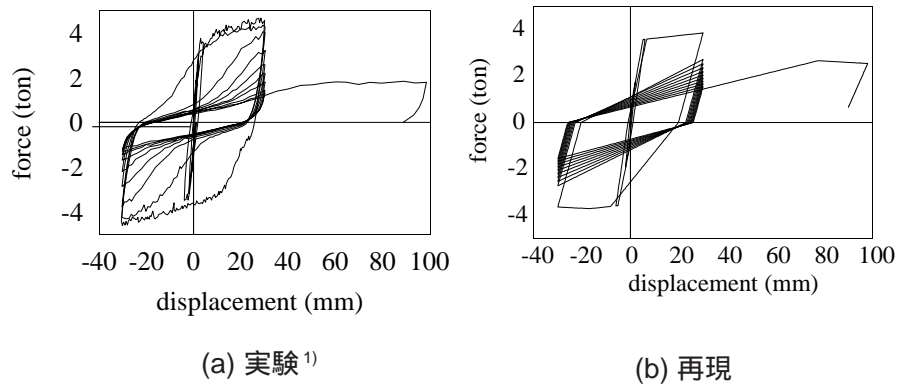


図-8 両側 30mm の定変位繰り返し荷荷

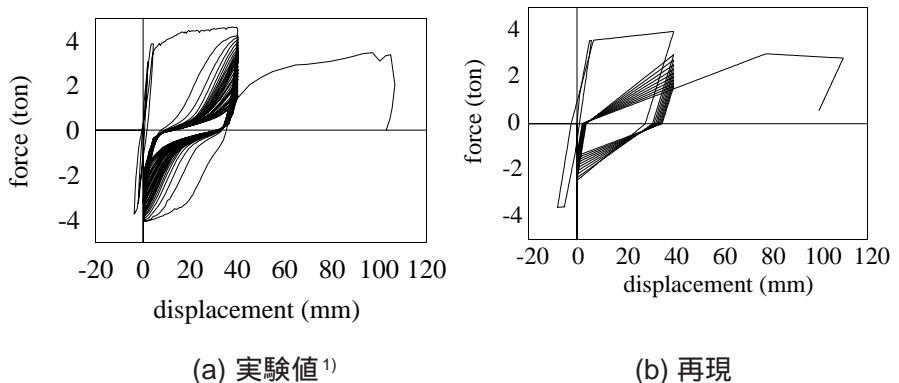


図-9 片側 40mm の定変位繰り返し荷荷

では実験結果とよく対応している。

(3) 漸増繰り返し载荷

2mm ピッチの片側漸増繰り返し载荷, 両側漸増繰り返し载荷を受ける部材の履歴を図-10(a), 11(a)にそれぞれ示す。

また本研究のモデルで再現した履歴を図-10(b), 11(b)にそれぞれ示す。

図-10 場合, 剛性低下による見かけの耐力低下が実験よりも早く起こってしまう。これは, この実験の場合, 剛性低下係数が部材のパラメータに対する平均的な値よりも小さく, 剛性低下係数を過大評価しているためと考えられる。

一方図-11 の場合, 最終的な耐力を過大評価している。これは, 大振幅で非常に多数の繰り返しを受ける場合, 本研究のモデルよりも急激に耐力低下開始点が移動する可能性を示している。本研究では変形の増分と移動量を線形関係としたが, 実際にはひずみの増分が大きくなると残留ひずみは曲線的に大きくなるという2.3の結果と対応している。

3.3 軸力有り試験体の再現

(1) 単調载荷

実験で得られた単調载荷の履歴を図-12(a)に, 再現に用いたスケルトンカーブを(b)に示す。実験結果では耐力低下がみられないが, 耐力低下開始点 d_{u0} と負勾配は軸力無し試験体と同様であると仮定して大変形時を外挿した。また累積損傷変形係数は, 軸力なしの場合と同様に実験結果をよく再現する値1.70を使用した。

(2) 定変位繰り返し载荷

両側20mmの定変位繰り返し载荷, 両側30mmの定変位繰り返し载荷を受ける部材の履歴を

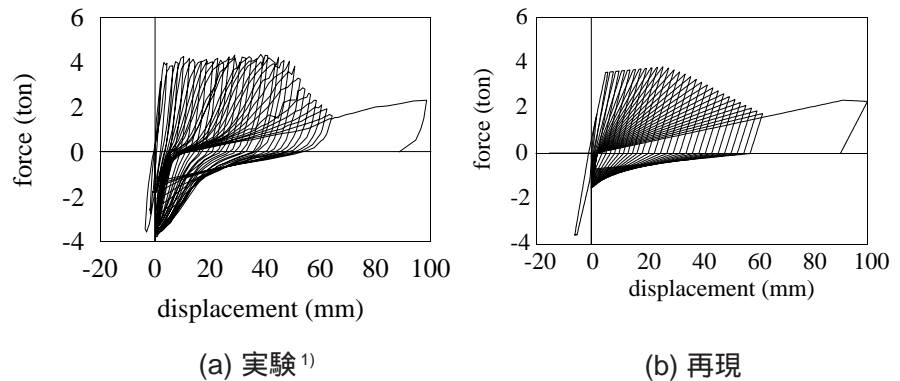


図-10 2mm ピッチの片側漸増繰り返し载荷

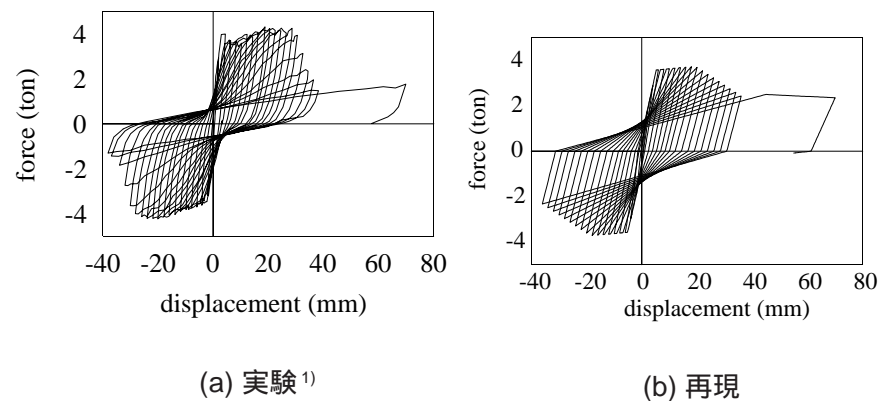


図-11 2mm ピッチの両側漸増繰り返し载荷

図-13(a), 14(a)にそれぞれ示す。繰り返し回数の増加に伴い剛性が次第に低下していき, 同変位の耐力も低下している。本研究のモデルで再現した履歴を図-13(b), 14(b)に示す。各サイクルのピークの荷重をよく再現している

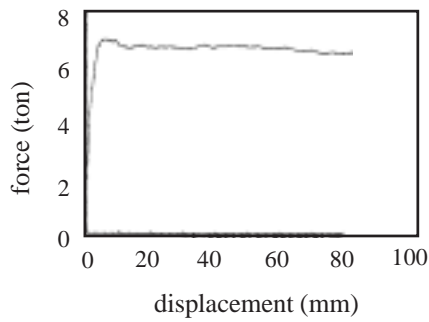
(3) 漸増繰り返し载荷

2mm ピッチの両側漸増载荷を受ける部材の履歴を図-15(a)に, 再現履歴を(b)に示す。実験で見られる大幅な耐力低下を再現できていない。単調载荷で用いたスケルトンカーブの負勾配を軸力無し試験体と同様に仮定したが, 軸力がある場合には負勾配がさらに大きい可能性が考えられる。

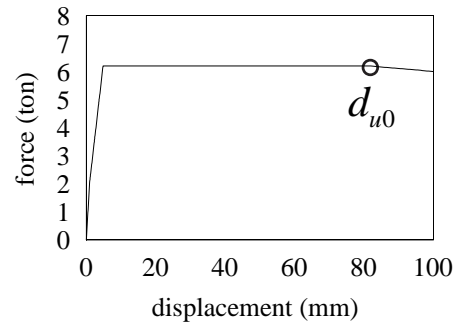
4. まとめ

繰り返し载荷に伴うRC部材のコンクリートの損傷が耐力低下の要因になると考え, 耐力低下開始点の移動を考慮した復元力特性モデルを開発した。開発したモデルを用いて, 繰り返し载荷を受けるRC部材の荷重-変形関係を再現し

た。繰り返しによる剛性低下，大変形時の耐力劣化及び繰り返しによる耐力開始点の移動を適切に考慮することにより，RC部材の様々なパターンの荷重履歴を表現することができる。



(a) 実験²⁾



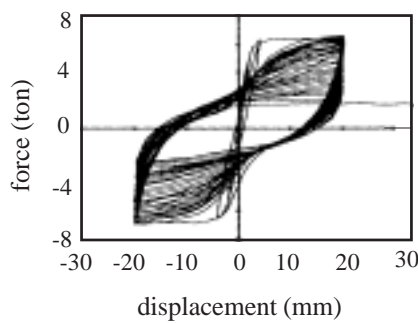
(b) 再現

図-12 単調荷重

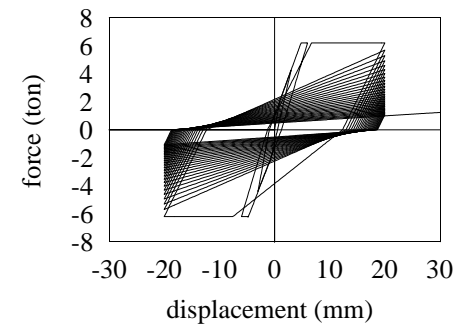
謝辞：東京理科大学助教 教授衣笠秀行先生より実験データを提供して戴きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)衣笠秀行,野村設朗:正負繰り返し履歴による曲げ降伏ヒンジの破壊性状,コンクリート工学論文集, Vol.5, No.2, pp21-32, 1994.7
- 2)衣笠秀行,野村設朗:RC柱部材の曲げ降伏後の繰り返し荷重によって発生する破壊のメカニズムについて,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp485-490, 1994.7
- 3)伊吉允,梅村恒,市之瀬敏勝:繰り返し荷重により耐力低下する鉄筋コンクリート部材の復元力特性モデル,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp1297-1302, 2001.7
- 4)岡野忠司,今井正洋,市之瀬敏勝:繰り返し荷重を受けるRC部材の3次元のせん断破壊,コンクリート工学論文集, Vol. 22, No.3, pp571-576, 2000.7

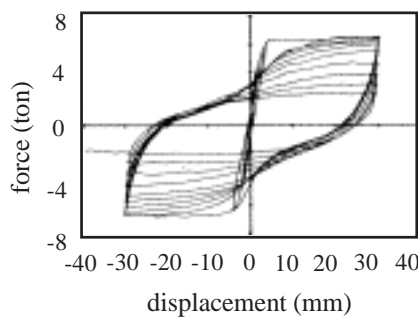


(a) 実験²⁾

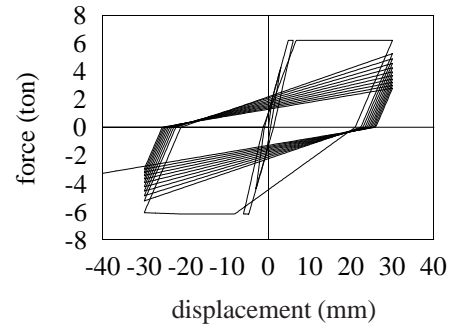


(b) 再現

図-13 両側 20mm の定変位繰り返し荷重

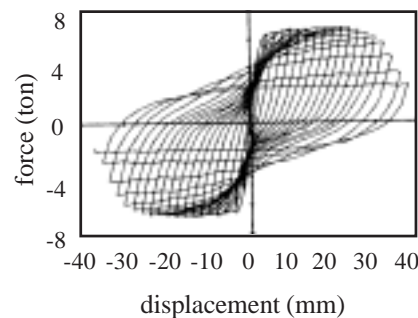


(a) 実験¹⁾

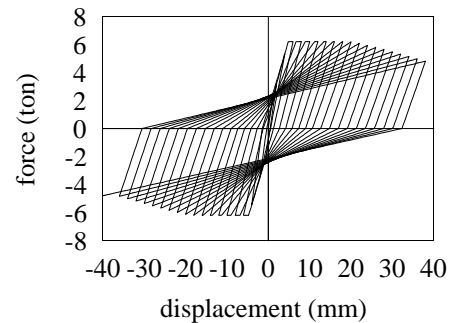


(b) 再現

図-14 両側 30mm の定変位繰り返し荷重



(a) 実験²⁾



(b) 再現

図-15 2mm ピッチの両側漸増荷重