

# 論文 繰り返し載荷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

伊吉 允\*1・梅村恒\*2・市之瀬敏勝\*3・松澤敦行\*4

要旨:RC造部材を対象とした復元力特性モデルとして利用されるTakedaモデルでは、繰り返し載荷による耐力低下が考慮されていない。しかし、地震応答解析等によって建物の耐震性能を正しく評価するためには、耐力低下の効果を正確に表現するモデルが不可欠である。本研究では、既往の実験的研究で得られた荷重-変形関係を参照して、繰り返し載荷による耐力低下の効果を取り入れたモデルを提案した。曲げで耐力が決定する靱性の高い部材では、繰り返し載荷によって最大耐力が低下すると仮定するより、剛性を低下させる方が対応がよい。さらに、剛性低下の程度を決定する指標を示した。

キーワード:復元力特性, 耐力低下, 剛性低下, 繰り返し載荷, Takedaモデル

## 1. はじめに

RC造建物の設計法として靱性保証型耐震設計法が制定され、建物をもつ耐震性能を規定する枠組みが整理されてきている。性能規定型設計法では、設計のプロセスは規定されないが、設計された建物が持つ性能が要求されるようになり、応答解析による正しい評価を行うことがより重要になってきている。現在、地震応答解析等に使用するRC部材や建物の復元力特性モデルとして、Takedaモデルがよく利用されている。Takedaモデルは、除荷時剛性低下やひび割れによる部材の剛性低下に特徴をもち、スリップが発生せず、曲げで耐力が決定されるようなRC部材の復元力特性をよく表している。しかし、このモデルでは、変形が大きく進行した場合や繰り返し載荷によって耐力低下する点について考慮されていない。一方、既往の実験的研究では曲げ降伏後の正負繰り返し載荷を受けることにより耐力低下し、変形能力が著しく低下することが報告されている。これらの効果を現実的に表現して、耐震性を解析的に検討できる復元力特性モデルの開発が重要といえる。

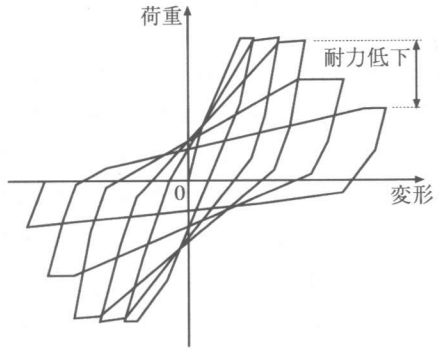


図-1 繰り返し載荷による耐力低下

本研究では、変形の増大に伴う耐力低下、繰り返し載荷による耐力の低下に着目し、既往の実験より得られた荷重-変形関係を参照して耐力低下を考慮した復元力特性モデルを開発する。

## 2. 繰り返し載荷により生じる耐力低下

繰り返し載荷による耐力低下に関しては、これまでに様々な報告がされている。ここでは、それらの研究を参照して、RC部材の復元力特性モデルに耐力低下を取り入れる方法を検討する。

一般的に、繰り返し載荷を受けるRC部材の荷

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

\*2 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)

\*3 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)

\*4 名古屋工業大学 工学部社会開発工学科 (会員外)

重-変形関係には次のような特徴が認められる。

- 1)一定変位の正負繰り返し载荷を行うと繰り返し回数増加にとまぬ最大荷重は低下する。
- 2)载荷履歴のパターンが荷重-変形関係の包絡線に影響を与える。

既往の実験的研究によると繰り返し载荷による耐力低下は必ずしも载荷荷重の大きさから決まらず、実験では载荷荷重の大きさを固定した状態での繰り返し载荷により、損傷が進行し破壊に至ることが観察される。また、定変位の繰り返し载荷の場合は、初期のサイクルに比べその後のサイクルが大きく耐力低下する現象もみられる。

一方向単調载荷時の荷重-変形曲線は、繰り返し载荷を受けた場合の包絡線の上限值であり、繰り返し回数および変位履歴が少ないほど一方向単調载荷時の荷重-変形関係曲線と一致する。また、急激に大きな変位まで载荷すると、その変位が大きいほど最大耐力以降の包絡線の低下も急激となる。このことから、载荷パターンも靱性に大きく影響するといえる。

理想的に設計された建物は柱が曲げ破壊することを想定しているので、曲げ破壊がせん断破壊に先行して起こる部材の特性を考える必要がある。図-2の荷重-変形曲線では、目立った耐力低下はみられず、大変形まで進行した時に大きく耐力低下すると考えられる。しかし、繰り返し载荷によりある一定変形時の耐力は低下しているが、変形の進行に伴い前回のループの耐力と同程度に回復しているために最大耐力はほとんど変化していない。この点に関して、最大耐力が低下すると仮定するより部材の剛性が低下すると仮定する方が対応がよいと考えられる。

文献[4]では、靱性の高いRC柱部材を対象として、繰り返し载荷によって起こる耐力低下を剛性を低下させることで表現している。この方法によって、部材実験で得られる荷重-変形関係をよく再現している。しかし、図-4のような片側の繰り返し载荷の荷重-変形曲線を再現できない等の問題もみられる。

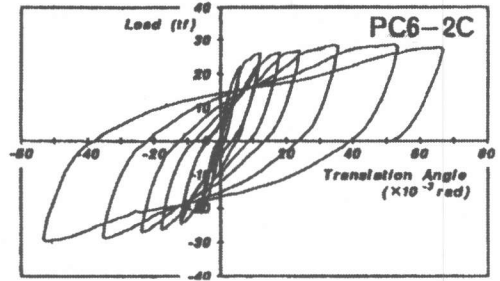


図-2 実験例1 (転載[3])

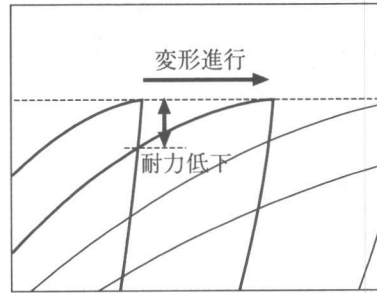


図-3 耐力低下の性状

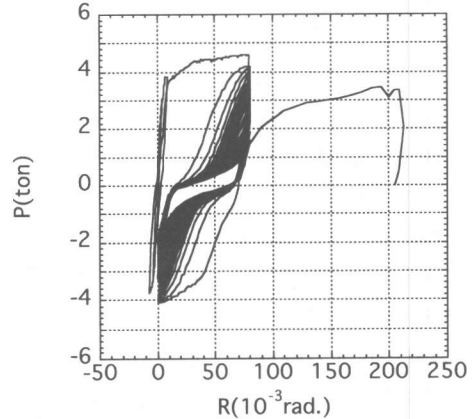


図-4 実験例2 (文献[5])

この他にも、大変形あるいは繰り返し回数の増大に伴って起きる著しい耐力低下は、さらに変形が進行したとしても耐力が回復するとは考えにくい。図-4の実験例においても繰り返し载荷によって剛性低下が生じているが、さらに変形が進行しても初期のサイクルと同程度の最大耐力まで回復しないと思われる。したがって、このような剛性の低下で表現できない大きな耐力低下に関しては最大耐力を低下させる必要がある。

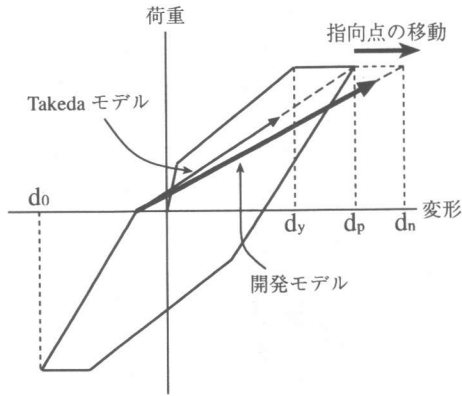


図-5 指向点の移動

### 3. 復元力特性モデル

RC部材の復元力特性モデルであるTakedaモデルでは、繰り返しの履歴則として復元力がせん断力 $Q=0$ を越えた後、前回までに経験したループのピークを指向するように剛性を決定する。ここでは、基本的にはTakedaモデルのルールを利用し、新たに繰り返し荷载による剛性低下と変位の増大にともなう起こる負勾配の耐力低下の影響を考慮したモデルの提案を行う。

繰り返し荷载による剛性低下は、変形の進行にともない部材の疲労・損傷が進行した影響のために、荷载時の剛性が低下し、前回の同方向のループに比較して耐力が回復しないと考える。これを本研究におけるモデルでは、前回までに経験した履歴ループのピークに当たる指向点の変位を増大させることにより、荷载時の剛性を低下させる方法をとる。

指向点の移動量の算定は、前回のループの変形量に関係が深いと考え、移動した新しい指向点の変位 $d_n$ を次のように表す。

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

$d_p$  : 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

$\chi$  : 剛性低下係数

剛性低下係数 $\chi$ は、指向点の変位増大量を決定するパラメータであり、 $\chi$ が大きいほど繰り返し荷载時の剛性低下の度合いは大きくなる。図-5

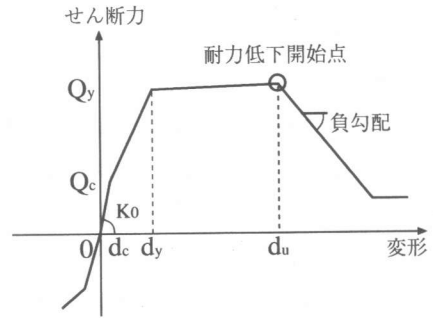


図-6 負勾配による耐力低下

に提案モデルの指向点の移動について示す。復元力が指向点まで達すると、応答点は再び除荷が起こるまで包絡線(任意の形状)上を移動する。

また、大変形時や繰り返し回数が増大による著しい耐力低下は、剛性低下だけを用いて表現した場合、変形の進行に伴い初期サイクルの耐力と同程度まで回復するため再現できない。そのため、モデルの包絡線に図-6に示すような負勾配の耐力低下線を取り入れて耐力低下を表現する。

### 4. 実験の再現

ここでは、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柱部材の荷重-変形関係の再現を行う。

開発した復元力特性モデルは、基本的にはTakedaモデルをもとに作成したものであり、また詳細なデータを用いずに行う地震応答解析を想定して、各種のパラメータはTakedaモデルで使用される一般的なものを使用した。表-1にTakedaモデルで使用される一般的なパラメータを示す。指向点の変位増大量を決定する剛性低下係数 $\chi$ は、実験結果をよく再現する値を使用した。

耐力低下開始点は、一方向単調荷载時で負勾配が生じ始める点、同様に負勾配についても一方向単調荷载時の値を使用するのがよいと考えられる。しかし、一方向単調荷载時の耐力低下に関する実験例は少なく、実際の実験結果から

定量化することも難しい<sup>5)</sup>。そのため、ここでは耐力低下開始点と負勾配も、実験結果をよく再現する値を使用した。

図-4に示す実験例2に対応する荷重-変形曲線を図-7に示す。この実験は、片側定変位繰り返し载荷を行ったもので、繰り返し回数の増加に伴い大きく耐力低下を起こしている。文献[4]

による復元力特性モデルでは、前回の反対方向の変位が小さいときには指向点が移動しないため再現できなかったが、本研究のモデルでは比

表-1 Takedaモデルの一般的なパラメータ

ひび割れ強度/降伏強度	1/3
降伏点剛性低下率 $\alpha$	0.25
除荷時剛性低下のパラメータ $\beta$	0.4

表-2 部材パラメータ

	$n_0$	$P_w$ (%)	$P_g$ (%)	$f_c$ (MPa)
実験2	0	0.96	1.63	28
実験3	0	0.96	1.63	30
実験4	0.46	0.62	1.3	24.3

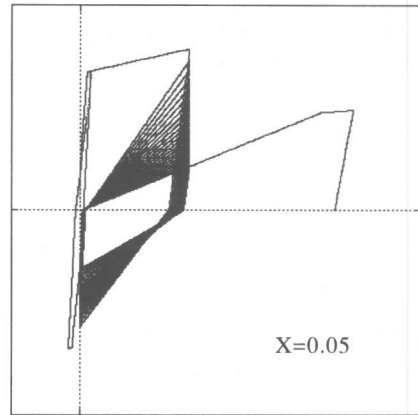


図-7 再現1-実験例2

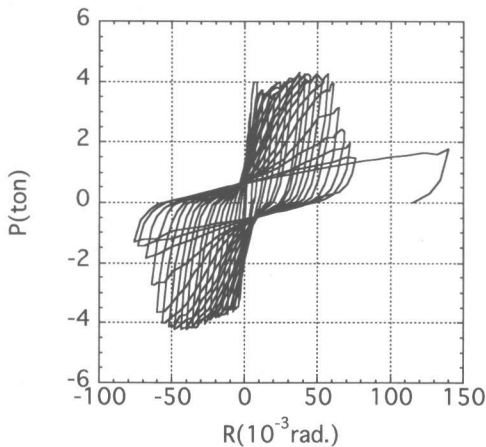


図-8 実験例3 (文献[6])

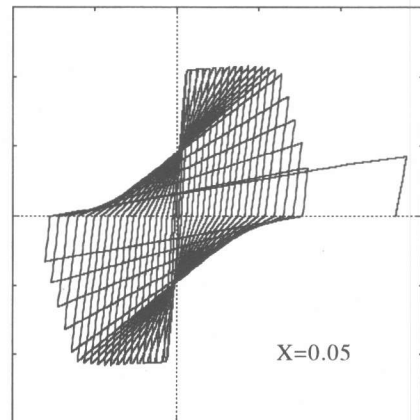


図-9 再現2-実験例3

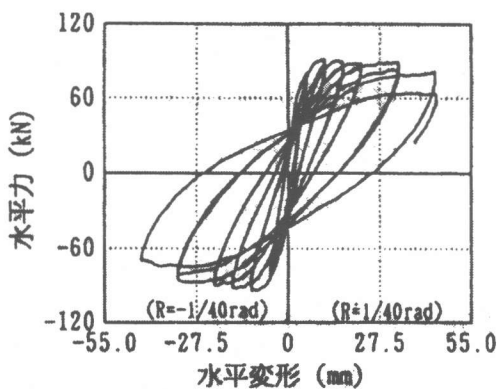


図-10 実験例4 (転載[7])

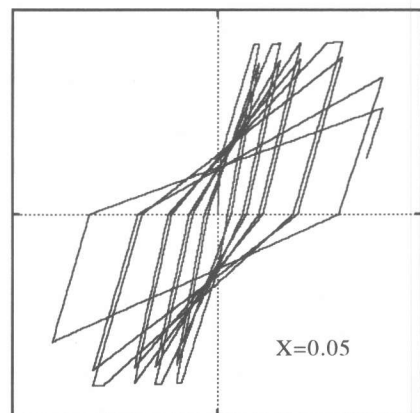


図-11 再現3-実験例4

較的よく再現できる。同様に、図-8、図-10に示した実験例を再現したものを図-9、図-11にそれぞれ示す。本モデルはTakedaモデルを基本にしているため、極端な紡錘形、逆S字型、スリップ性状が現れるものは再現できないが、耐力低下を剛性低下で表現する方法は妥当であるといえる。

## 5. 剛性低下係数

### 5.1 剛性低下係数の読みとり及び算出

本章では、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 $\chi$ を読みとり、部材のパラメータとの関係について検討する。

剛性低下係数 $\chi$ は以下の手順で読みとる。読みとり方法を図-12に示す。最大耐力の増減が安定した範囲内にある履歴ループのピークを滑らかな曲線で結ぶ。荷重-変形曲線を滑らかに延長して繰り返しによる指向点の移動量を読みとる。また、前のループの最大変位も読みとる。読みとった値を式(1)へ代入して剛性低下係数 $\chi$ を算出する。これらの作業は、誤差を伴うものであるが1つの実験データについて多くの数値を読みとって平均をとることで、ある程度安定した数値となると考えられる。

### 5.2 剛性低下係数と部材パラメータの関係

剛性低下に対して影響があると考えられる部材パラメータと剛性低下係数の関係についての考察を行う。部材パラメータとして、軸力比 $n_0$ 、横補強筋比 $p_w$ 、主筋比 $p_g$ 、コンクリート圧縮強度 $f_c$ を選んだ。これらのパラメータと剛性低下係数との関係を明確にするため、重回帰分析を行った。

目的変数である剛性低下係数 $\chi$ を4個の説明変数 $n_0$ 、 $p_w$ 、 $p_g$ 、 $f_c$ の回帰式で表すと、以下の式を得た。

$$\chi = 0.049 + 0.049n_0 - 0.03p_w - 0.005p_g + 8.7 \times 10^{-4} f_c \quad (2)$$

表-3に回帰分析の結果を、表-4に剛性低下係数と部材パラメータの相関係数を示す。図-13、図-

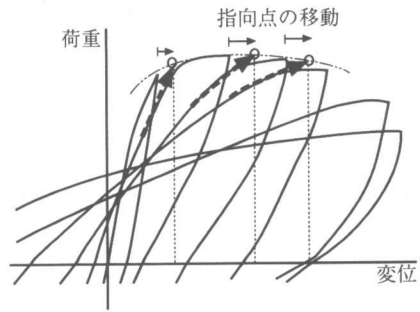


図12 指向点の移動量の読みとり

表-3 回帰分析

重相関係数	0.8235
寄与率	0.6781
自由度調整済み寄与率	0.6206
残差の標準偏差	0.0162

表-4 剛性低下係数との相関係数

コンクリート強度	0.5525
主筋比	-0.0960
横補強筋比	-0.2647
軸力比	0.3406

14、図-15、図-16に各部材パラメータと剛性低下係数の関係を示す。図-13、図-14、図-15はコンクリート強度 $f_c$ を23、100に固定して $p_w$ 、 $p_g$ はそれぞれ読みとりに使用した実験データの最小値と最大値を用いた直線を示した。同様に、図-16は軸力比を0、0.6に固定した場合について直線を示した。剛性低下係数と部材パラメータの関係は次のように考えられる。軸力比はコンクリートの圧壊を早める効果があり、コンクリート強度は高い値であるほどピーク後の耐力低下が急激になる傾向があるため、剛性低下係数と正の相関を示した。一方、横補強筋は引張力によってせん断力に抵抗し、主筋はひび割れ後も引張力を負担することより、その使用量が多くなれば剛性低下は起こりにくくなると考えられるように、剛性低下係数と負の相関を示した。RC部材の繰り返し載荷時の剛性低下の効果を決める係数であるため、予想された結果と同様のものであり、一般的なコンクリートの性質に対応している。

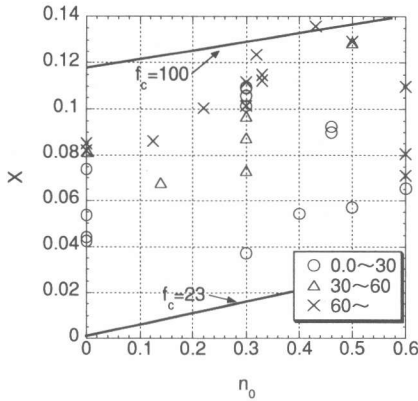


図-13 軸力比と剛性低下係数の関係

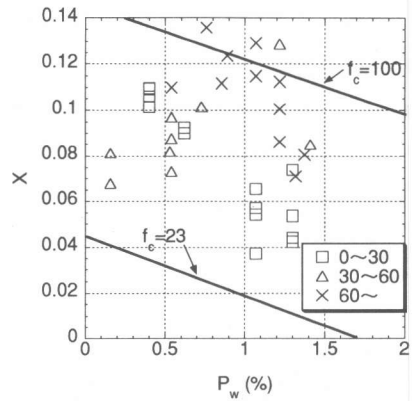


図-14 帯筋比と剛性低下係数の関係

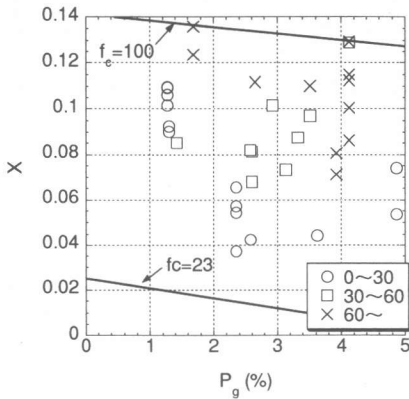


図-15 主筋比と剛性低下係数の関係

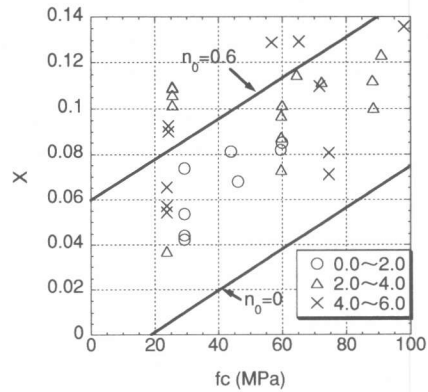


図-16 コンクリート強度と剛性低下係数の関係

まとめ

RC造部材や建物の復元力特性として利用されるTakedaモデルをもとにして正負繰り返し载荷により生じる耐力低下を剛性低下で再現する復元力特性モデルを提案した。提案モデルは、剛性低下の程度を決定する定数である剛性低下係数を必要とする。剛性低下係数 $\chi$ とRC部材の各種パラメータの関係を示す式を示した。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京理科大学助教授 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)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  
 2)Takeda,T., M.A.Sozan, and N.N.Nielsen,:Reinforced

Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, December 1970, pp.2557-73.

3)阿部康晴ほか:多段配筋を有するPCa柱部材の曲げ終局強度に関する研究(その2.実験結果との検証), 日本建築学会大会学術論文講演梗概集, pp.131-132, 1997.9

4)梅村恒, 境有紀, 南忠夫, 壁谷澤寿海:繰り返し载荷による耐力低下が地震応答に与える影響(その1)復元力特性モデルの開発, 日本建築学会大会学術論文講演梗概集, pp27-28, 1998.9

5)加藤大介, 鈴木広孝, 芝讓, 松田壮史:RC柱部材の復元力特性モデルの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.2, pp.743-748, 1996

6)衣笠秀行, 野村設郎:正負繰り返し履歴による曲げ降伏ヒンジの破壊性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.5, No.2, pp21-32, 1994.7

7)芝讓, 松田壮史, 遠藤健太郎, 加藤大介:変動軸力と斜め横力を受けるRC柱の靱性能評価実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.905-910, 1996