

論文 繰り返しによる耐力低下を考慮した鉄筋コンクリート部材の復元力特性のモデル化

梅村恒*1・境有紀*2・南忠夫*3・壁谷澤寿海*3

要旨：RC 造建物を想定した復元力モデルとして地震応答解析によく用いられる Takeda モデルでは、繰り返し载荷による耐力の低下が考慮されていない。一方、部材実験などでは耐力低下が変形に大きな影響を及ぼすことが指摘されている。本研究では、既往の実験で得られた RC 部材の荷重—変形関係を参照して、繰り返し载荷による耐力低下を復元力特性に取り入れる方法を提案した。靱性の高い部材を対象とした場合の耐力低下の方法としては、繰り返しによって最大耐力を低下させるよりも、剛性を小さくする方が妥当である。また、部材のパラメータによって、剛性低下の大きさを見積もる方法を示した。

キーワード：復元力特性、耐力低下、繰り返し载荷、RC 部材実験、Takeda モデル

1. はじめに

RC 造建物の設計法は、終局強度型設計法[1]から靱性保証型設計法[2]へと発展し、大きな塑性変形が発生する場合を想定して、靱性を確保することを要求するようになってきている。建物が大きく変形する場合まで考慮して建物の保有性能を正しく評価するためには、より妥当かつ一般的な建物のモデルが必要である。現在、RC 造部材や建物の復元力特性のモデルとして Takeda モデル[1]がよく使われている。スリップが発生せず、曲げで耐力が決定されるような普通コンクリートを用いた RC 柱の復元力特性をよく表しているとされるが、このモデルでは変形が大きく進行した場合や、繰り返し载荷を受けた場合などの耐力の低下が考慮されていない。一方、部材実験などでは、大きく変形が進行する場合や正負繰り返し载荷を受けるとき、主筋の座屈などによって場合によっては大きく耐力が低下することが指摘されており、これらの効果を、地震応答解析のための建物の復元力特性に取り入れていく必要がある。変形の進行に伴う耐力の低下に関してはいくつかの研究がある。文献[4]では、最大変形時及び終局

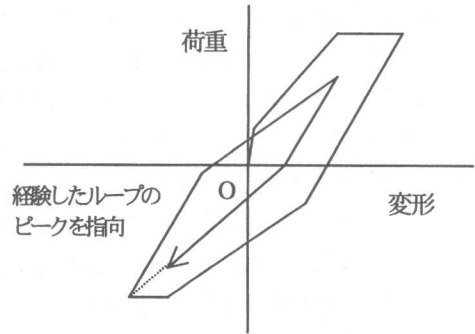


図1 Takeda モデル

時(最大耐力の 80%にまで耐力が低下する点)の変形を求めてスケルトンカーブを決定する方法を提案している。繰り返し载荷による耐力の低下に関しては、そのメカニズムに関しては解明されつつあるものの(例えば[5]), 地震応答解析などに取り入れられるように定量化したものは少ない。

本研究では、繰り返しによる耐力の低下のみに着目し、既往の実験的研究で得られた柱部材の荷重—変形関係を参照して、Takeda モデルを基に、耐力低下を考慮した復元力特性のモデルを開発する。

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻, 修士(工学) (正会員)

*2 東京大学地震研究所助手, 工博(正会員)

*3 東京大学地震研究所教授, Ph.D.(正会員)

*4 東京大学地震研究所教授, 工博(正会員)

2. 既往のモデルと実験例

せん断破壊する柱部材の耐力低下に関しては、いくつかの研究がある。松島[6]は、せん断破壊する柱の繰返し载荷による耐力低下を考慮したモデルを提案している。これは復元力0の点を通るときに一定の割合で最大耐力を減じていくモデルで、減少の割合を1割から2割として地震応答解析を行うと非常に大きく耐力が低下し、最大応答値も大きく変化する。減少の割合を適正に決定すれば、極めて脆性的に破壊する短柱などの復元力を表現できると考えられる。

しかし、理想的に設計された建物は柱が曲げモードで崩壊することを想定しているため、一般の建物を対象とした地震応答解析のための復元力モデルを開発するには、曲げ破壊する柱の特性を把握する必要がある。せん断破壊する柱は、繰返し载荷を受けることによって早い段階で主筋が座屈して耐力低下するのに対し、曲げ破壊する柱では主筋が座屈する前に、ひび割れの進行や付着の劣化によって徐々に耐力が低下するなど、せん断破壊とは大きく異なる特性を示すことが考えられる。ここでは、曲げ破壊する柱の実験的研究を参照して、耐力低下のルールについて検討する。

図2、図3は、曲げ降伏がせん断破壊に先行するように設計された柱部材の曲げせん断実験による、部材の荷重—変形関係の例である。一定変形量の繰返し载荷を受ける図2の部材は、松島らのモデルのように繰返しが発生するたびに最大耐力が低下しているように見えるが、繰返しの度に変形量を増大させている図3の部材では、図4に示すように、変形が進行することによって耐力が回復し、非常に大きな塑性変形に至るまで最大耐力はほとんど変化していない。図3の部材でも载荷方法を変えれば、このような性状を示すと考えられる。すなわち、曲げで耐力が決定する靱性の高い部材を対象とした場合、繰返し载荷による耐力低下に関しては、損傷によって最大耐力が低下すると仮定するよりも、部材の剛性が低下すると考えた方が実験結果との対応がよい。

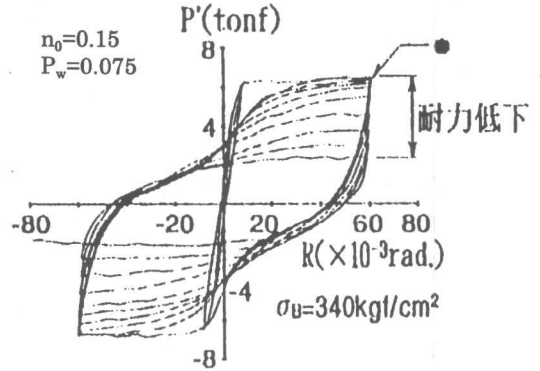


図2 柱部材の繰返し载荷実験例1(転載[5])

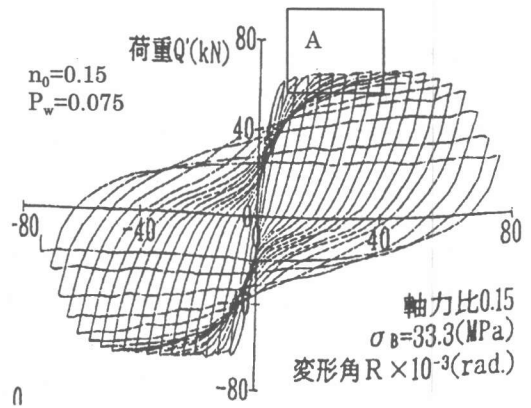


図3 柱部材の繰返し载荷実験例2(転載[7])

繰返しによって耐力が低下するが、
変形の進行に伴って耐力は回復する

図3のA
拡大模式図

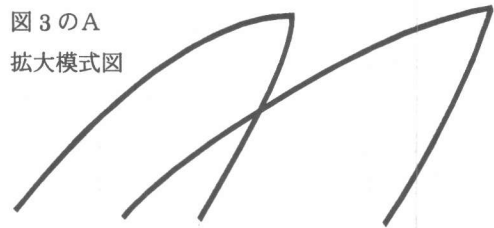


図4 耐力低下の性状

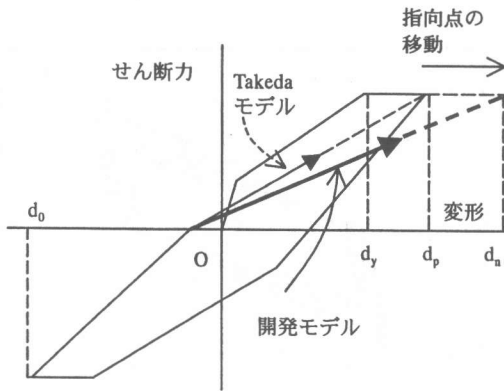


図5 耐力低下の考え方

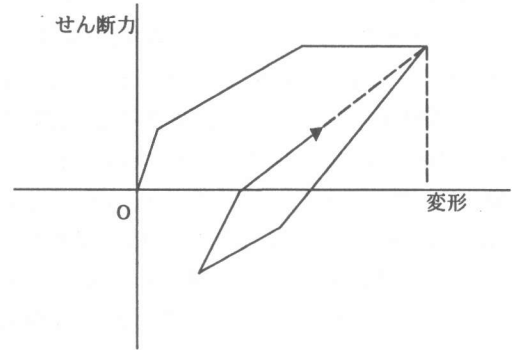


図6 前回の反対方向の変位が小さいとき

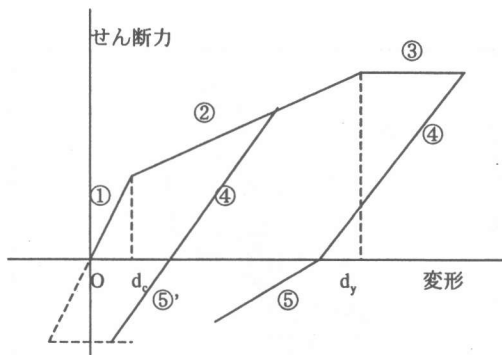


図7 モデル概要

表1 提案モデル概要

ルール	状態
①	弾性
②	ひび割れ後降伏前
③	降伏後
④	②, ③, ⑤から除荷
⑤	④から復元力の符号反転後
⑤'	④で、反対側がひび割れる前

3. 繰り返し載荷による耐力低下のルール

RC 部材の復元力特性のモデルでは、復元力が0の直線を横切った後、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のが妥当とされている。ここでは、繰り返し載荷による耐力低下は、反対方向への載荷によって部材の損傷が進行することにより、前回までに経験したループのピークに当たる指向点の変位が増大すると考えて、指向する点を移動させて剛性を低下させる方法をとる(図5)。

指向点の移動の大きさは、前回の反対方向への変形の大きさに関係が深いと考え、これを降伏変位で除したものを規準とする。すなわち、前回の反対方向の最大変位を d_0 、降伏変形を d_y 、前回の同じ方向の指向点を d_p としたとき、移動した新しい指向点の変位 d_n を次のように表す。

$$d_n = d_p \times \left(1 - \frac{d_0}{d_y} \times \chi \right) \quad (1)$$

χ は指向点の変位増大量を決めるパラメータである。ただし、前回の反対方向の変位が小さく、反対方向のピークまでの履歴が変位 $d=0$ の直線を横切らなかったとき(図6)には、繰返し載荷による損傷の進行はないと考え、(1)式で $d_0=0$ とする。

提案したモデルの概要を表1及び図7に示す。基本的には Takeda モデルと同様の規則で、④から⑤に移行する際に、図5、式(1)に示した指向点の移動が生じるものとする。ただし、ひび割れ発生前、又は前回の反対方向の変位が小さいときには、指向点の移動は生じない。

4. 実験データとの比較

Takeda モデルを基本とし、前章で述べた耐力低下のルールを加えた復元力モデルを用いて、既往の実験的研究で得られた柱部材の荷重—変形関係を再現する。Takeda モデルのパラメータを実験のデータから計算することもできるが、ここでは、詳細なデータを用いずに行う地震応答解析を念頭に置いて、一般的なパラメータを用いた。用いたパラメータを表2に示す。降伏変位，降伏耐力，および指向点変位の増大量を決めるパラメータ χ は、実験で得られた荷重—変形関係を最も良く再現するように定めるように定めた。

本モデルは Takeda モデルを基にしているため、

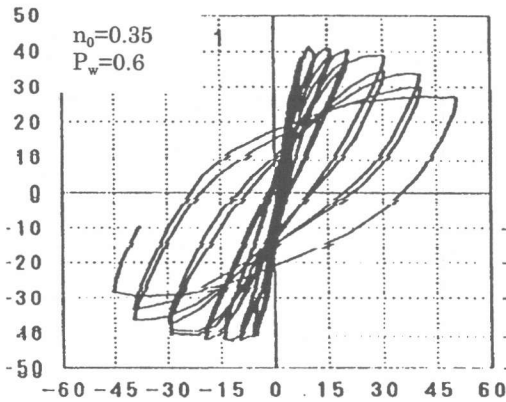


図9 柱部材の繰り返し載荷実験例3 (転載[8])

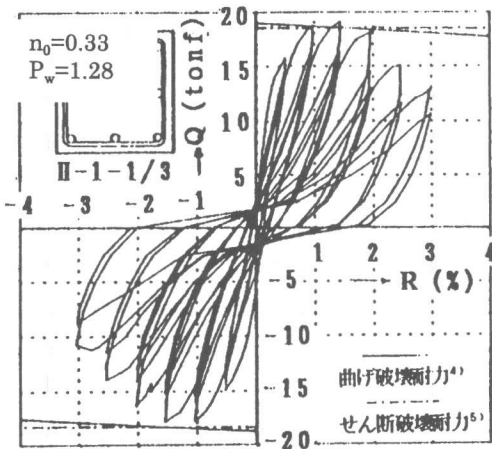


図11 柱部材の繰り返し載荷実験例4 (転載[9])

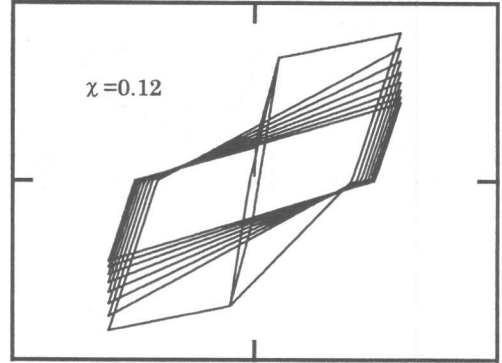


図8 実験の再現 I—実験例1

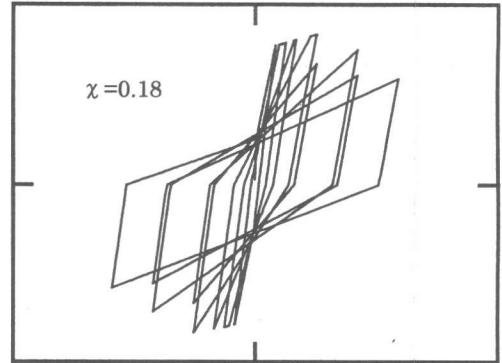


図10 実験の再現 II—実験例3

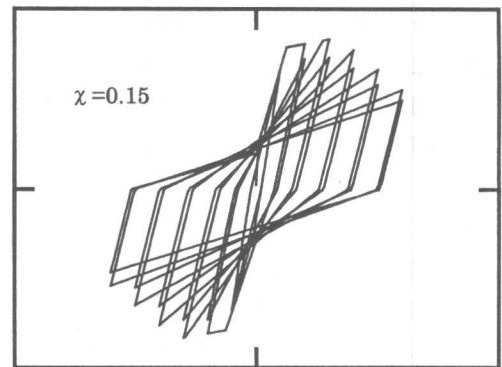


図12 実験の再現 III—実験例4

スリップ性状が強く現れるものは再現できない。また変形の進行による耐力の低下を考慮していないので大変形まで追うことはできない。ここでは、大きな耐力低下が生じる前の段階までの耐力低下の状態に注目する。

実験例 1 に対応する復元力の履歴を図 8 に示す。 $\chi=0.12$ とした。この実験では比較的大きな塑性変形を繰り返しており、繰り返しの回数が多くなるときの大きく耐力が低下している。本モデルでは大変形時の大きな耐力低下は考慮していないため、実験ほどの大きな低下は再現できないが、繰り返し回数の少ないうちは耐力低下の傾向をとらえている。同様に既往の研究(実験例 3,4)で得られた荷重—変形関係、図 9、図 11 を再現したものを、図 10、図 12 にそれぞれ示す。Takeda モデルを基本にしているので、極端に太った紡錘形や逆 S 字型を追うことはできないが、耐力低下のさせ方は妥当であるといえる。以下で述べる繰り返しによる耐力低下は、指向点の移動による剛性の低下を意味する。

5. 耐力低下の効果と部材のパラメータの関係

以上の例では試行錯誤によって耐力低下の効果を決定する定数 χ を求めた。本章では既往の実験的研究で得られた荷重—変形関係の図から χ を読み取り、部材のパラメータとの関係について考察する。

耐力低下のメカニズムは複雑で、多くのパラメータの影響を受けると考えられる。本研究では解析的な考察は行わず、実験で得られた荷重—変形関係から読み取った χ と、部材のパラメータの関係について検討する。

図 13 に示すように、部材の降伏耐力を決定し、荷重—変形関係の曲線を滑らかに延長して繰り返しの指向点の移動を読み取り、式(1)に代入して χ を求める。読み取りは困難で大きな誤差を伴うが、一つの実験データについて多くの数値を読み取って平均をとることにより、ある程度安定した数値となる。

耐力低下に対する影響が特に大きいと思われる

表 2 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 α_y	0.25
降伏後剛性	$0.01 \times K_0$
除荷時剛性低下のパラメータ β	0.4

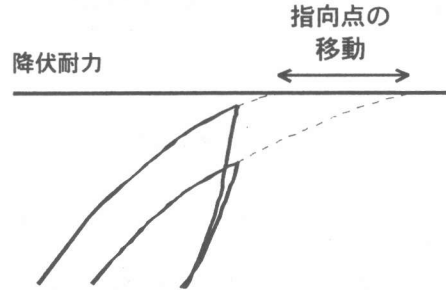


図 13 χ の読み取り

部材のパラメータとして、コンクリートの局所的圧壊を早める柱の軸力と、コアコンクリートを拘束する横補強筋の量が考えられる。読み取った χ と柱部材の軸力比 n_0 、 χ と補強筋比 P_w との関係を図 14、図 15 にそれぞれ記号で示す。予想されるように、 n_0 に対して正の相関、 P_w に対して負の相関が見られる。 n_0 、 P_w に対する χ の大小の傾向を明確にするために平面の当てはめを行った結果、以下の式を得た。

$$\chi = 0.12n_0 - 0.011p_w + 0.068 \quad (2)$$

重相関係数は 0.64 となった。当てはめた平面のうち、 P_w を 0.1、3.0 に固定した場合について図 14 に、 n_0 を 0、0.8 に固定した場合について図 15 に直線で示す。耐力低下の効果を決定する定数 χ は、コンクリートや鉄筋の特性、配筋方法など、多くのパラメータの影響を受けることが考えられるが、 n_0 と P_w でおおむね表現できる。

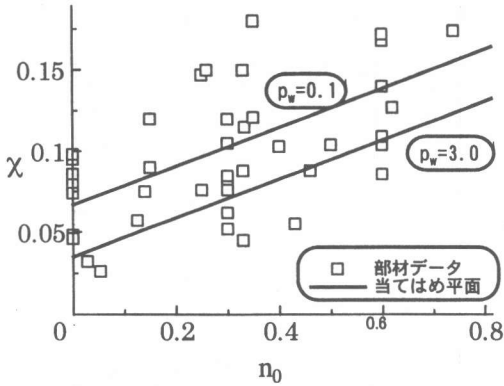


図 14 軸力比と χ の関係

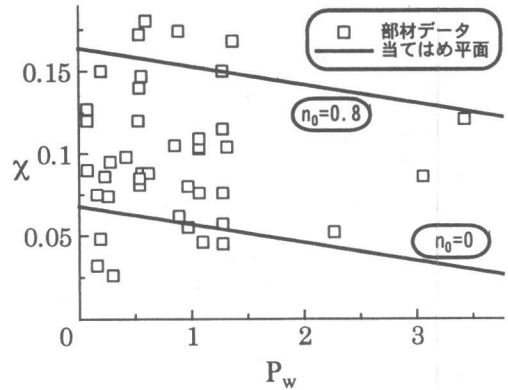


図 15 補強筋比と χ の関係

6.まとめ

代表的な RC 柱部材の復元力特性モデルである Takeda モデルを改良し、正負繰り返し載荷による耐力の低下を考慮した、靱性の高い RC 柱部材の復元力特性モデルを提案した。提案モデルでは、Takeda モデルのパラメータに加えて、正負繰り返し載荷による耐力低下の効果を決定する定数 χ を与える必要がある。

RC 柱部材のパラメータである、軸力比及び横補強筋比と、定数 χ とを関連付ける式を示した。

7.参考文献

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- [2] 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
- [3] Takeda, T., M.A. Sozen, 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.
- [4] 加藤大介，鈴木広孝，芝譲，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報告集，Vol.18, No.2, pp.743-748, 1996.6
- [5] 衣笠秀行，野村設郎，西村徹，西村俊彦：RC 柱部材の曲げ降伏後の繰り返し載荷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, 1994.6

- [6] 松島豊：構造物の復元力特性に関する考察—十勝沖地震による被害から，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.587-588, 1969.
- [7] 藤野隆，野村設郎，衣笠秀行：曲げ破壊する柱部材の正負繰り返し載荷における破壊挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.2, pp.737-742, 1996.6
- [8] 黄楷，李康寧，壁谷澤寿海：高軸力を受ける高強度鉄筋コンクリート柱の強度と変形能力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，12-2, pp.427-432, 1990.6
- [9] 江崎文也：RC 正方形断面柱の変形性能に及ぼすプレート帯筋の補強効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.2, pp.531-536, 1993.6