

# 構造部材の復元力特性のモデル化

若林 實・渡辺 泰志

## HYSTERESIS MODEL FOR STRUCTURAL MEMBERS

By *Minoru WAKABAYASHI, Yasushi WATANABE*

### Synopsis

Many models have been developed in order to simulate the hysteretic behavior of the structural members, however, most of them are ambivalent, only applicable to some particular cases. In this paper, it is tried to make a reasonable model by means of superposing several fundamental models. And remarkable characteristics of the model are investigated. Finally, several applications of this model are shown, and it is proved that the presented model can simulate the hysteretic behavior that obtained from experimental studies well.

### 1. 序

構造物の動的応答解析を行なう場合、その復元力特性のモデル化が必要となる。その場合、モデルに要求される事項として次のようなものが掲げられる。

- 履歴法則が明確で分り易い。
- 実際の復元力特性と比べ、余り大きく異ならない。
- パラメータが多くない。
- 応用、適用範囲が広い。

現在、相当数の復元力特性のモデルが存在するが、上に掲げた事項を十分満足していると思われるモデルは数少ない。しかも、現存するモデルは、そのほとんどが個別の（すなわち、鉄骨部材に対する、あるいは鉄筋コンクリート（RC）部材に対するモデル、さらに細分して、曲げ破壊を生ずるような場合、あるいはせん断破壊を生ずるような場合に対する）モデルであり、それらの採用についても、場合に応じて、多数のモデルの中から適切なものを選ぶと言う方法がとられている。

本論文は、単純な複数のモデルを組み合わせ<sup>1)</sup>、いくつかのパラメータを設定することによって、構造部材の復元力特性を広範囲にわたって表現することができ、かつ、上述した条件を満足するようなモデルを作ることが可能であることを示し、さらに、そのようにして作られたモデルの特徴、および応用例について紹介しようとするものである。

### 2. 既存の代表的なモデル

復元力特性のモデル化の研究は、近年の計算機の発展に伴い、多く行なわれてきており<sup>2),3)</sup>、比較的複雑なモデルまで提案されてきている。ここでは、現在までに考案された代表的な復元力特性のモデルについて簡単に説明する。

#### (1) Bilinear 型モデル (Fig.1)

このモデルは、主に鋼製の柱、はりなどが、くり返し水平力、あるいはモーメントを受けた場合の、力（ $Q$ ）－変位（ $X$ ）関係を表現するために多く用いられている。また、このモデルは非常に簡単な履歴法則を持っているにもかかわらず、比較的正確に現象を表現できる。このモデルに、いくらかの工夫を付加する

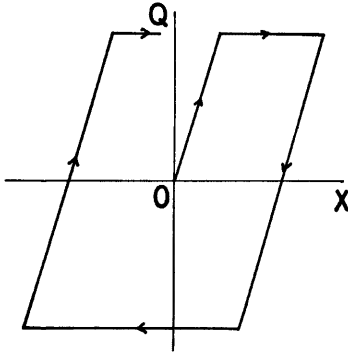


Fig. 1 Bilinear model

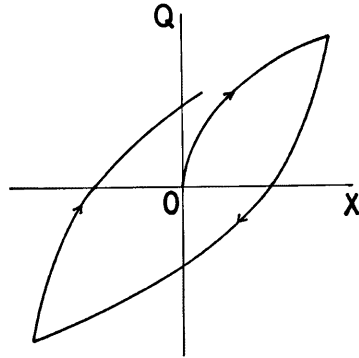


Fig. 2 Ramberg-Osgood model

ことによって、第二勾配やバウシinger効果なども表現することができる。しかし、そのループの形状、および履歴法則などから考えて、このモデルをそのままRC系の部材に適用する場合には、多少の困難があると思われる。

### (2) Ramberg-Osgood 型モデル (Fig. 2)

このモデルは、元来、金属の応力-ひずみ関係を記述するために考案されたものであり、Jennings によって、非線形性を有する復元力特性のモデルとして使用されるようになった。その曲線は、解析関数による廻女曲線と分枝曲線との接続によって構成される。このモデルによると、鋼材などの力-変位関係を、実験で得られるものと同様な曲線で与えることができ、その再現性も比較的良好であると言われる。このモデルも、鋼材に対しては有効であるが、Bilinear 型の場合と同様の理由から、RC系の部材に対しては不適当なモデルであると考えられる。

### (3)劣化 Trilinear 型 (D-Tri) モデル (Fig. 3)

このモデルは、RC系の部材のうち、曲げ破壊を生ずるような材の力-変位関係を表現するために使われるモデルであり、実験で得られる復元力特性への対応も、それ程悪くはない。しかし、鉄筋のすべりを伴

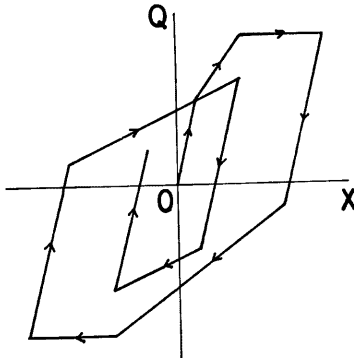


Fig. 3 Degrading trilinear model

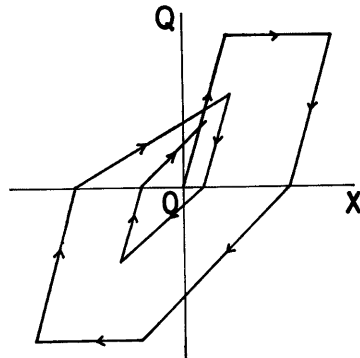


Fig. 4 Clough model

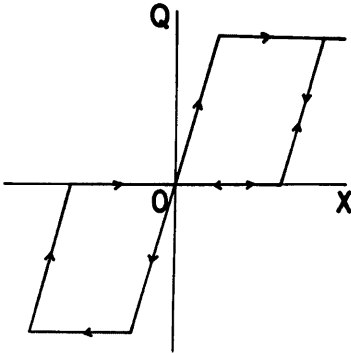


Fig. 5 Slip model

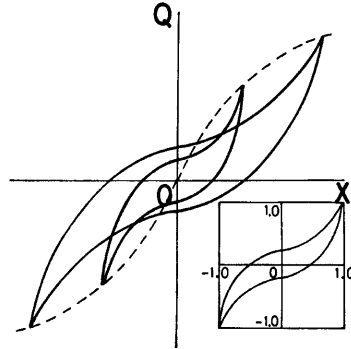


Fig. 6 N. C. L. model

うような場合には、そのすべり性状を表現することができず、曲げ破壊を生ずるような材の中でも、鉄筋のすべりが生じない部材に対してのみ有効であると考えられる。

(4)Clough 型モデル (Fig.4)

このモデルは、前述の劣化 Trilinear 型 (D-Tri) モデルと多少似ているが、小振巾時の挙動が D-Tri 型モデルとは異なる。すなわち、このモデルでは、小振巾時の挙動が実際の部材の挙動に、より近くなるように作られている。D-Tri 型モデルと同様に、このモデルでも、すべりを伴うような場合の記述はできない。また、このモデルと D-Tri 型モデルとの、同一地震動に対する、一質点系振動子の応答を比較した研究<sup>4)</sup>によれば、これら二つの応答の間には極端な差は見られないので、小振巾における履歴挙動を細かく表現することは、大振巾の場合程重要ではないように思われる。

(5)Slip 型モデル (Fig.5)

このモデルに見られるような形状の復元力特性としては、たとえば、鉄筋かい付骨組の復元力特性が掲げられる。一般に、このモデルは、それ自身単独で使われることはあまりなく、他のモデルと重ね合わせて使われることが多い。本論文においても、このモデルを使用しており、多少の工夫を付加することによって、実際の復元力特性に見られる、すべり性状を適切に表現する事ができる。

(6)N. C. L. 型モデル (Fig.6)

このモデルは、静的正負くり返し载荷実験によって得られた復元力特性を、各定常ループに関して、変位、復元力を、それぞれの最大値によって無次元化すると、大略一つのループに収束する傾向があることを利用して、固有ループとよばれる無次元化ループと、スケルトンカーブとを組み合わせる復元力

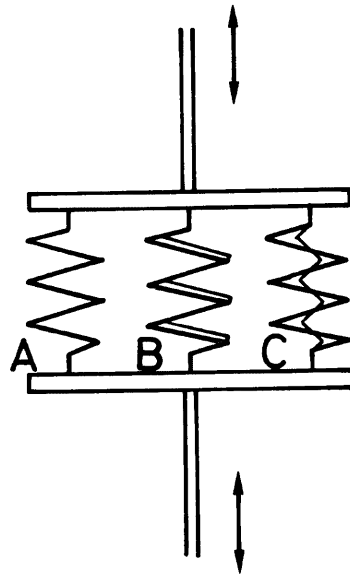


Fig. 7 General concept of superposition

特性のモデル化をするものであり、最大耐力の70%程度までは、良好に実際の復元力特性を再現し得ると言われる。しかし、そのループの構成上、常にループの等価粘性減衰定数が一定になるような不都合もある。

### 3. 重ね合わせの概念

本論文における重ね合わせの方法は、概念的には、いくつかの異った特性を有したバネを Fig.7 のように結合させるものである。すなわち、各バネに同一変位を与えた時の、各バネの復元力を単純に加え合わせたものを、全体の復元力とするものである。ここで、全体の復元力の値を1と考えた場合、それに占めるバネCの寄与分を  $RC(0 \leq RC \leq 1)$  とし、残りの、バネAとバネBの復元力の和に占める、バネBの割合を  $RB(0 \leq RB \leq 1)$  とし、A, B, C, の各バネに対する独立の復元力特性、および全体の復元力特性を変位  $x$  の関数として、それぞれ  $f_A(x)$ ,  $f_B(x)$ ,  $f_C(x)$ ,  $F(x)$  とすれば、 $F(x)$  は(1)式のように表現される。

$$F(x) = \{(1-RB) \cdot f_A(x) + RB \cdot f_B(x)\} \cdot (1-RC) + RC \cdot f_C(x) \dots\dots\dots(1)$$

上式より明らかなように、 $RB=RC=0$  の時は、 $F(x)=f_A(x)$ ;  $RB=1, RC=0$  の時は、 $F(x)=f_B(x)$ ;  $RC=1$  の時は、 $F(x)=f_C(x)$  となる。 $RB, RC$  に、 $0 \leq RB$  又は  $RC \leq 1$  の条件の下に、0から1までの様々の値を与えることにより、種々の復元力特性を  $F(x)$  によって表現させることが可能となる。

本論文では、上述の  $f_A(x)$ ,  $f_B(x)$ ,  $f_C(x)$  に対応する復元力特性として、Fig. 8~10 に示すようなモデルを採用している。

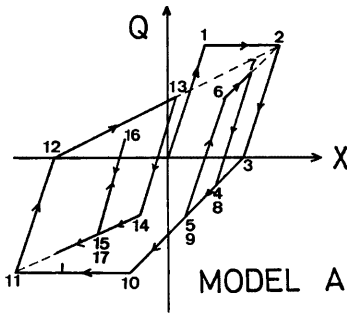


Fig. 8 Model A

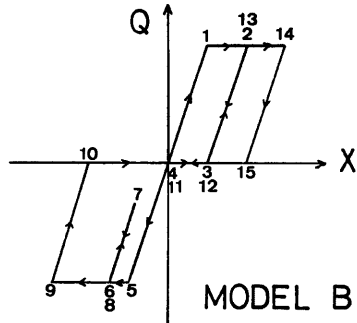


Fig. 9 Model B

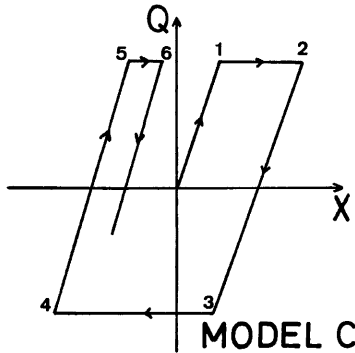


Fig. 10 Model C

4. 重ね合わせの基礎となるモデルについて

Fig. 8, 9, 10 に示すモデルを、以下モデルA, モデルB, モデルC と称する。

(1)モデルA

このモデルの詳細を、Fig. 11 に示す。ここで、初期勾配を  $K_0$ 、降伏力をそれぞれ  $x_c$ 、 $Q_c$  とし、 $|x| \geq x_c$  なる変位  $x$  に対して、塑性率  $\mu$  を  $\mu \equiv |x|/x_c$  と与える。

変位  $x$  の大きさが、0 から徐々に増加し、 $|x_{m1}| \leq x_c$  なる点、 $x_{m1}$  で折り返す時は、初期勾配  $K_0$  で折り返すが、 $|x_{m1}| > x_c$  なる点、 $x_{m1}$  で折り返す時は、その点での塑性率を  $\mu_{m1} = |x_{m1}|/x_c$ 、 $0 \leq a_c \leq 1$  として、 $K_{m1} = K_0 \cdot (1/\mu_{m1})^{a_c}$  で与えられる勾配  $K_{m1}$  で折り返す。ここで、 $a_c = 0$  ならば、 $K_{m1}$  は常に  $K_0$  に等しくなり、初期勾配で折り返すことになる。 $a_c = 1$  ならば、 $K_0 = Q_c/x_c$  より、 $K_{m1} = (Q_c/x_c) \cdot (x_c/|x_{m1}|)$  となり、原点を指向する勾配となる。 $0 < a_c < 1$  ならば、 $K_{m1}$  は当然上述した二つの勾配の中間の値を取るようになる。

復元力が上述の勾配  $K_{m1}$  で戻り、復元力の符号が逆転すると、直線は反対側の最大点（最大変位の大きさが  $x_c$  より小さい時は、点  $(x_c, Q_c)$  又は  $(-x_c, -Q_c)$  をこの場合の最大点と考える。）を指向する勾配  $K_{m12}$ 、すなわち、反対側最大変位を  $x_{m2}$  とすると、 $K_{m12} = Q_c/(|x_{m1}| + |x_{m2}| - Q_c/K_{m1})$  の勾配で進み、反対側最大点を超過するまでは、Fig. 8 に示すような、Bilinear と同様の履歴法則に従う。また、反対側最大点を超過してから折り返す時は、最初に述べたように、その点での塑性率と、 $a_c$  の値によって戻り勾配が決定される。

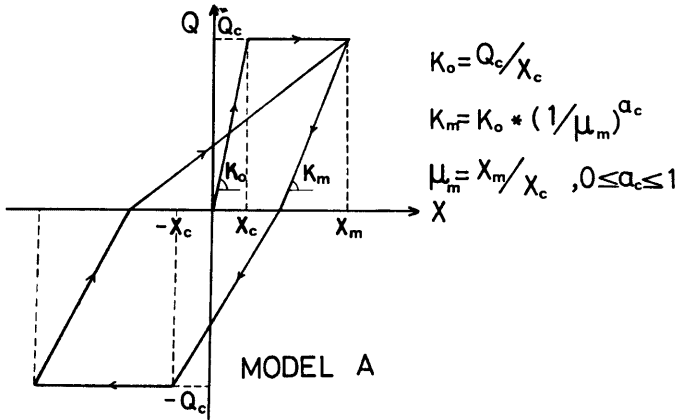


Fig. 11 Formulation of model A

(2)モデルB

このモデルの詳細を Fig. 12 に示す。モデルAと同様に、初期勾配を  $K_0$ 、降伏変位、降伏力をそれぞれ  $x_c$ 、 $Q_c$  とし、 $|x| \geq x_c$  なる変位  $x$  に対して、塑性率  $\mu$  を、 $\mu \equiv |x|/x_c$  と与える。変位  $x$  の大きさが、0 から徐々に増加して行き、 $|x_{m1}| \leq x_c$  なる点  $x_{m1}$  で折り返す時は、初期勾配  $K_0$  で折り返すが、 $|x_{m1}| > x_c$  なる点  $x_{m1}$  で折り返す時の勾配  $K_{m1}$  は、その点での塑性率を  $\mu_{m1} = |x_{m1}|/x_c$ 、 $0 \leq a_c \leq 1$  として、 $K_{m1} = K_0 \cdot (1/\mu_{m1})^{a_c}$  で与えられる。復元力が上述の勾配で戻り、復元力が0（すなわち、 $x_{m1}$  が正の場合には、変位が  $x_{m1}$  から戻り、 $x_{m1} - Q_c/K_{m1}$ ）となると、履歴曲線は、反対側最大変位を  $x_{m2}$  ( $|x_{m2}| \leq x_c$  の時は  $x_{m2} \geq 0$  ならば  $x_c$  を、 $x_{m2} \leq 0$  ならば  $-x_c$  をこの場合の最大変位と考える)として、 $\text{sgn}(x_{m2}) \cdot (|x_{m2}| - Q_c/$

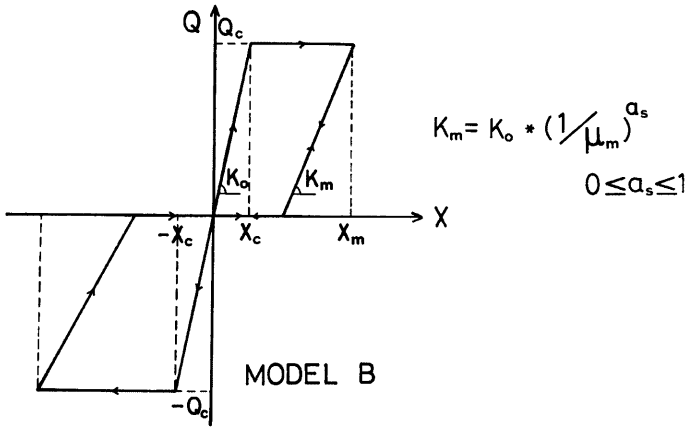


Fig. 12 Formulation of model B

$K_{m2}$ ), (ただし,  $\text{sgn}(x_{m2})$  は  $x_{m2}$  の符号,  $K_{m2} = K_0 \cdot (1/\mu_{m2})^{a_s}$ ,  $\mu_{m2} = |x_{m2}|/x_c$  の点まで変位軸上を移動し, それから  $K_{m2}$  の勾配で進む。変位  $x$  の値が大きくなって,  $x_{m1}$ ,  $x_{m2}$  のいずれかの最大変位点を超過した時は, 新たな最大変位点を以前のものと置換した形で上述の履歴法則に従って動く。このモデルは, 以上の説明からも分かるように, 通常の Slip 型モデルに劣化性を与えたモデルである。

(3)モデルC

このモデルは, 通常の Bilinear 型モデルであり, よく知られたモデルであるので, ここでは説明は略す。

5. 重ね合わせによってできるループの幾何的性質

ここでは簡単のため, モデルAとモデルBとの重ね合わせによってできるループの, 幾何的性質について述べる。すなわち, (1)式において,  $RC=0$  とした場合に相当するループについて述べる。

ループの形状は,  $a_1, a_2$  の大小関係によって,  $a_1 > a_2, a_1 = a_2, a_1 < a_2$  の三つに分類される。この内,

その応用上, 現実的な形状および履歴法則を有するものは,  $a_1 \geq a_2$  の場合であると考えられるので, ここでは,  $a_1 \geq a_2$  の場合についての幾何的性質に関してのみ述べる。この場合のループの一般的形状を Fig.13 に示す。この図から分かるように, 図示されたループは, 一般的に次のような特徴を有する。

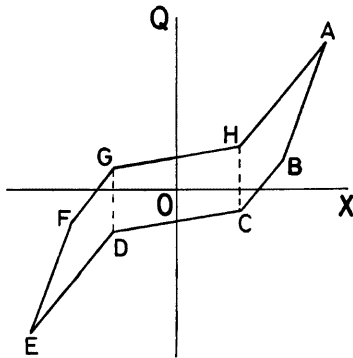


Fig. 13 General shape of the loop composed of model A and model B

- $AB \parallel EF, BC \parallel AH, CD \parallel GH$
- H点とC点とは同一変位を共有し, D点とG点も同一変位を共有する。
- B点, G点においては, 必ず正の復元力を持ち, C点, D点においては, 必ず負の復元力を持つ。
- $a_1 = a_2$  の時は, B点とC点, F点とG点は一致する。

Fig.14 は,  $RB=0.5$  とした場合に,  $a_1, a_2$  をパラメトリックに変化させた時の, ループの形状の変

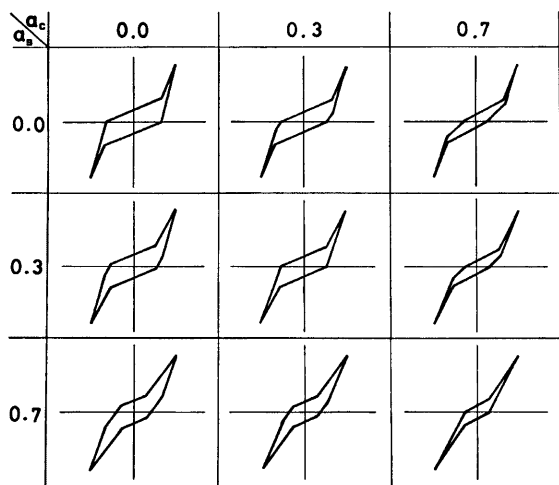


Fig. 14 Transmutation of the loop's shape under the parametrical variation of the values of  $a_c$  and  $a_s$  ( $RB=0.5$ ; constant)

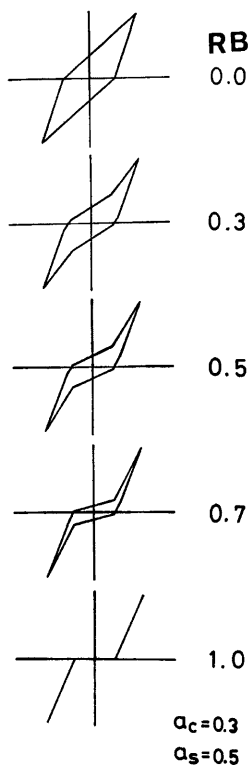


Fig. 15 Transmutation of the loop's shape under the parametrical variation of the value of  $RB$  ( $a_c=0.3$ ,  $a_s=0.5$ ; constant)

化を図示したものである。(参考のため、 $a_c > a_s$  の場合のループも図示しておく。) 縦の列、すなわち  $a_c$  一定の列では、ループの面積はすべて一定となる。また、 $a_c$  が 0 に近づくにしたがって、ループのすべり性状は顕著となり、 $a_c$  が 1 に近づくにしたがって、ループはやせてくる。**Fig.15** は、 $a_c=0.5$ ,  $a_s=0.3$ ; 一定として、 $RB$  をパラメトリックに変化させた時の、ループの形状の変化を図示したものである。 $RB=0$  でモデルAが、 $RB=1$  でモデルBが表わされ、 $0 < RB < 1$  なる  $RB$  で、モデルAとモデルB との中間の形状が表わされる。

このように、 $a_c$ ,  $a_s$ , および  $RB$  の値を適当に定めることによって、比較的多くのループの形状を、表現することが可能となる。

### 6. ループとスケルトンカーブとの結合

次に、今までに述べて来たループを、スケルトンカーブと結合させる方法を考える。前述のループでは、言わば、スケルトンカーブを完全弾塑性型として与えてきたが、任意のスケルトンカーブとループとを結合させるには、前項での降伏力  $Q_c$  を、定数としてではなく、変位  $x$  の関数として与えればよい。すなわち、スケルトンカーブを与える関数を、 $SKELT(x)$  とし、正負最大変位をそれぞれ  $x_1$ ,  $x_2$ 、として、正負降伏力をそれぞれ、 $SKELT(x_1)$ ,  $SKELT(x_2)$  で与えるようにすればよい。このようにして定められた正

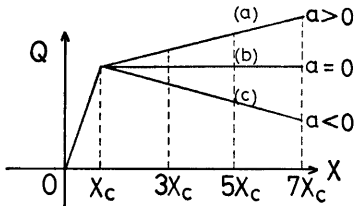


Fig. 16. Skeleton curve

負降伏点 ( $x_1$ , SKELT ( $x_1$ )), ( $x_2$ , SKELT ( $x_2$ ))の間における挙動を、前項で述べた法則に従うように、また、最大変位が超過される毎に、新たな降伏点を設定されるようにすることによって、任意のスケルトンカーブとループとを結合させる事ができる。ただし、今までは、 $\mu \equiv |x|/x_c$  のように、塑性率  $\mu$  を与えてきたが、ここでは新たに、言わば、広義の塑性率として、 $\mu_a \equiv (|x|/x_c) \cdot (\text{SKELT} (x_2) / |\text{SKELT} (x)|)$  なるものを導入し、これを前述した通常の塑性率の代わりに使うことにする。たとえば、Fig.16 に示すようなスケルトンカーブを有する復元力特性に対して、この広義の塑性率の考え方を導入した場合、 $X=3X_c$  における通常の塑性率は (a), (b), (c), のどの場合についても  $\mu=3$  で等しいが、広義の塑性率は、Fig.16 において、 $a=0.1$  とした場合、(a), (b), (c), それぞれについて、2.5, 3.0, 3.75, となる。すなわち、スケルトンカーブの第二勾配が正の時、広義の塑性率は通常の塑性率よりも小さくなり、第二勾配が負の時は逆に大きくなる。

ここで、モデルA、モデルBに同一のスケルトンカーブを与え、上述した広義の塑性率の考え方を導入して重ね合わせた時にできるループの、無次元化ループの特徴を調べる。簡単のため、スケルトンカーブは Fig.16 に示すような、Bilinear 型で、第二勾配が正(a), 0(b), 負(c), の三種類のものを採用した。Fig.17 に各場合の無次元化ループを示す。これからわかるように、第二勾配が正の場合には、塑性率の増大に伴って無次元化ループは収束し、第二勾配が0、または負の場合には、正側、負側のそれぞれの剛性の高い部分が、無次元化変位軸の正負両端の方へ移動して行く性質があることがわかる。このような無次元化ループの性質は、実際の構造部材

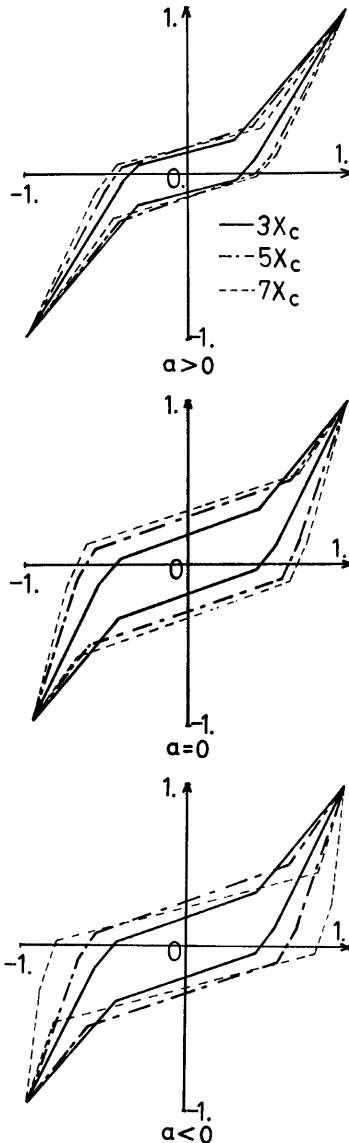


Fig. 17 Three types of transmutation of normalized loops with bilinear skeleton curve. (a; the value of the second gradient of the skeleton curve)



の履歴ループにも、よく見られる性質である。また、実験によって得られた履歴曲線のスケルトンカーブを、その最大耐力までは、およそ Bilinear として近似できることなどを考え合わせると、N. C. L. 型モデルにおいて、最大耐力の70%程度まで、実際の復元力特性を良好に再現し得ると言うことも、説明できる。

7. 劣化の導入

履歴曲線における、ループのくり返しによる耐力低下、すなわち、劣化を、いかにモデルの中に組み入れるかを次に考える。既往の研究によれば、定変位振巾のくり返し载荷を与えた場合の、履歴曲線の耐力の低下の割合は、対数目盛上でくり返し回数に比例すると言われる<sup>5)</sup>。しかし、それらを定量的に把握する方法は、確立されていないのが現状であるので、ここでは、劣化を定性的に導入する方法について述べる。

構造部材の復元力特性についての実験的研究などに示されている、多数の履歴曲線を見ると、劣化について次のような事項が指摘できよう。

- (1)、くり返し回数が多くなるにしたがって、一回に生ずる耐力低下の割合は小さくなる。
- (2)、すべり性状の顕著なもの程、耐力低下の度が高い。

このうち、(2)の性質より、劣化の挙動をすべてモデルBに受け持たせる。

Fig. 18 に、モデルBの挙動を示す。図に示すように、直線AB, CDの勾配をそれぞれ  $K_{AB0}$ ,  $K_{CD0}$  とし、その値の大ききの低下によって、劣化を表現する。その際、その低下の割合を、直線ABの勾配についてはB点を正方向に、直線CDの勾配についてはC点を負方向に  $x$  軸上を通過する回数、 $n_B$ ,  $n_C$  によって評価する方法を採用する。以下に、その具体的な方法について述べる。

まず、弾性域において、 $n_B$ ,  $n_C$  に共に1の値を与えておく。そして、新たに塑性域に入る毎に、その時点での変位が正ならば  $n_B$  を、負ならば  $n_C$  を1に設定しなおす。履歴曲線が点Bを変位軸に関して、正方向に通過する場合は、 $n_B+1$  を改めて  $n_B$  の値とし、点Cを負方向に通過する場合は、 $n_C+1$  を改めて  $n_C$  の値として設定しなおす。ここでは、直線ABおよびCDの勾配を、それぞれ  $n_B$ ,  $n_C$  の関数として  $K_{AB}(n_B)$ ,  $K_{CD}(n_C)$ 、また、その低下率を、それぞれ  $D_{AB}(n_B)$ ,  $D_{CD}(n_C)$  とし、それらが、以下の関係式によって結び付けられるものとする。

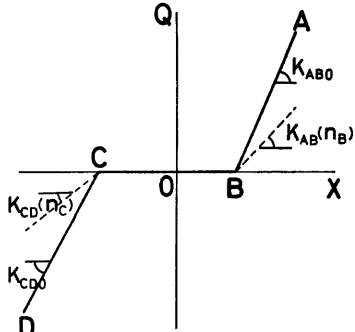


Fig. 18 Formulation of deterioration

$$K_{AB}(n_B) = K_{AB0} \cdot D_{AB}(n_B) \dots\dots\dots(2)$$

$$K_{CD}(n_C) = K_{CD0} \cdot D_{CD}(n_C) \dots\dots\dots(3)$$

さらに、 $D_{AB}(n_B)$ ,  $D_{CD}(n_C)$  を次式によって与える。

$$D_{AB}(n_B) = (1-C) + C \cdot (1/n_B) \dots\dots\dots(4)$$

$$D_{CD}(n_C) = (1-C) + C \cdot (1/n_C) \dots\dots\dots(5)$$

$$(0 \leq C \leq 1)$$

このように、 $D_{AB}(n_B)$ ,  $D_{CD}(n_C)$  を規定することによって、(1)で述べたような履歴曲線の挙動を表現することが可能となる。(4), (5)式中、 $(1-C)$  は、式の形からわかるように、 $n_B$ , あるいは  $n_C \rightarrow \infty$  となった時の  $D_{AB}(n_B)$ ,  $D_{CD}(n_C)$  の値、同時に、その下限値である。

このような、B点、あるいはC点を通過する回数によって履歴曲線の劣化を制御する方法は、次のような点で不都合を有する。すなわち、B点、あるいはC点の前後にわたって、何回も変位が増減するような場合には、実際の場合に比して、劣化を大きく見積る可能性がある。しかし、くり返し回数がそれ程多くなく、劣化が極端に大きくないか、あるいは、ある程度より大きくならないような場合には、ここで述べたような劣化の制御の方法が、それ程障害となるとは思われない。ここに述べた方法以外にも、たとえば、文献5)において述べられているような、変位に関する移動距離の累積和によって、劣化を制御する方法を応用することも可能である。

次に、Fig. 19 に図示するような場合、すなわち、劣化が生じてから戻るといった場合について説明する。まず、Fig. 19 に於てA→Bと履歴曲線が進み、さらにそれから変位が増加してゆく時は、履歴曲線の勾配  $K(x)$  は、履歴曲線がスケルトンカーブに達するまでは、(6)式によって与えられるものとする。

$$K(x) = K_0 \cdot (1/\mu_0)^{n_E} \cdot \frac{f(x)}{\text{SKELT}(x)} \dots\dots\dots(6)$$

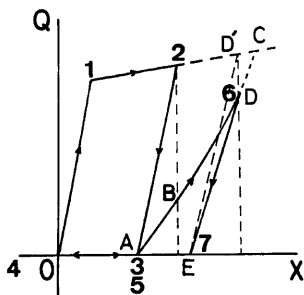


Fig. 19 Behavior of model B considering deterioration

ここに、 $f(x)$  は履歴曲線を表わす関数である。したがって、上述の勾配で変位が増加する場合、履歴曲線は曲線BCのようなになる。また、曲線BCの途中、D点から戻る場合には、その点における勾配で直線的に戻ることになる。この勾配に戻った場合、履歴曲線が  $x$  軸と交わる点Eは、履歴曲線がスケルトンカーブ上の点  $D'$  から戻って  $x$  軸と交わったと考えた場合の交点に等しい。図中、D点の勾配は、見方を変えれば直線  $ED'$  の勾配が劣化して直線  $ED$  の勾配になったと見することもできる。その際、前述した  $D_{AB}(n_B)$  などの剛性低下率は、ちょうど  $f(x)/\text{SKELT}(x)$  で与えられる。故に、この場合の前述した  $n_B, n_C$  に相当する値は、これを今  $n_E$  とおくと、(2)、(6)式より(7)式の関係を満たす。

$$\frac{f(x)}{\text{SKELT}(x)} = (1-C) + C \cdot (1/n_E), \quad (0 \leq C \leq 1) \dots\dots\dots(7)$$

(7)式を  $n_E$  について解けば、 $n_E$  は(8)式で与えられる。

$$n_E = \frac{C}{(f(x)/\text{SKELT}(x)) - (1-C)} \dots\dots\dots(8)$$

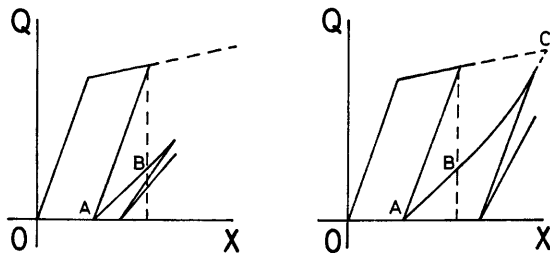


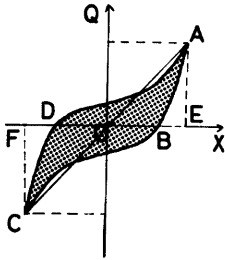
Fig. 20 Comparison of the deteriorating rate

D点における勾配は、この  $n_B$  によって直線 ED' の勾配が劣化したものと考えることができる。このように、前述した  $n_B, n_C$  などの通過回数を、単に 1, 2, ……のような自然数に限定せず、ここで述べたような形の有理数にまで拡張すれば、履歴曲線の劣化をこれによって一貫して取り扱うことが可能となる。また、履歴曲線がD点から戻ってきて、E点を通してから反転して、E点を  $x$  軸上において正方向に通過する時は、 $n_B+1$  を改めて  $n_B$  とし、それによって定められる勾配が進むことになる。このような方法により劣化を規定すると、Fig. 20 に示すように、B点付近で戻った場合と、C点付近で戻った場合とでは、次サイクルにおける耐力低下は前者に比して後者の方が大きくなり、実際の履歴曲線に見られる傾向を表現することが可能となる。

8. 等価粘性減衰定数

モデルAとモデルBとの重ね合わせによって構成されるモデルの等価粘性減衰定数  $\nu_{eq}$  を、Fig. 21 に示す定義に従って求めると(9)式のようになる。

$$\nu_{eq} = \frac{(1-RB)}{\pi} (1-\mu_{Qx}^{-Q-a_0}) \dots\dots\dots(9)$$



$$\nu_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{LOOP} \cdot \text{ABCD}}{\Delta \text{OAE} + \Delta \text{OCF}}$$

Fig. 21 Work areas taken for computation of  $\nu_{eq}$

9. モデルの各パラメータの求め方

(1)、対応させようと思う履歴曲線の中から、一つのループを取り出し、そのループの変位、復元力を、それぞれのループの最大変位、最大復元力によって無次元化し、無次元化ループを作る。

(2)、対応させようと思う履歴曲線のスケルトンカーブを折線で近似する。

(3)、(1)で求めた無次元化ループを前述した重ね合わせによって構成されるループの幾何的性質に従うような多角形で近似する。(Fig. 22)

(4)、(3)で得られた多角形のループから、Fig. 22 に示す  $\gamma_{as}, \gamma_{as}, K_1$  の値を測定する。

(5)、もとの履歴曲線より、取り出したループの広義の塑性率  $\mu_{Qx}$  を計算する。

(6)、(4)(5)で得られた  $\gamma_{as}, \gamma_{as}, K_1, \mu_{Qx}$  を以下の(10)~(12)式に代入し、RB,  $a_e, a_s$  の値を計算する。

$$RB = \frac{R_{as} - K_1}{R_{as} - R_{as}} \dots\dots\dots(10)$$

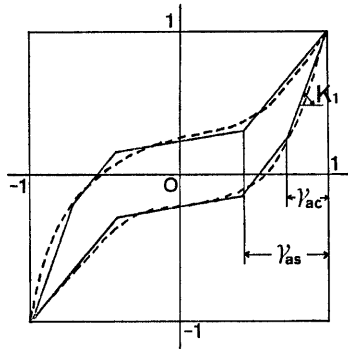


Fig. 22 Definition of  $\gamma_{as}, \gamma_{as}$  and  $K_1$

$$a_i = 1 - \frac{\log R_{qs}}{\log \mu_{qs}} \dots\dots\dots(11)$$

$$a_s = 1 - \frac{\log R_{qs}}{\log \mu_{qs}} \dots\dots\dots(12)$$

ここで,  $R_{qs} = 1/\gamma_{qs}$ ,  $R_{ss} = 1/\gamma_{ss}$

10. 応 用 例

今までに述べてきた方法により構成されるループの, 実際実験等で得られた履歴曲線への対応例を, 以下に四例示す。

(1). 1層1スパン, RC造筋かい付ラーメンの, 各柱頭に, 1.5tの軸力を載荷し, 静的正負くり返し水平力載荷実験によって得られた, 水平力-水平変位関係(文献6)への対応例(Fig.23)。 $a_s$ ,  $a_c$ ,  $RB$ の値は前述の方法により求め, 以下の値となった。

$$a_s = 0.88, a_c = 0.38, RB = 0.58$$

(2). タイプレート形式の腹材を持つ非充腹形式のSRC柱に, 軸力0の下でくり返しせん断力を作用させた時に得られた履歴曲線(文献7)への対応例(Fig.24)

$$a_s = 0.7, a_c = 0.0, RB = 0.7$$

(3). (2)において軸力比を30%とした場合に得られた履歴曲線(文献7)への対応例(Fig.25)。

$$a_s = 0.63, a_c = 0.0, RB = 0.59$$

(4). 模型レンガ造壁の静的正負くり返し水平力載荷実験によって得られた履歴曲線, および同条件の試験

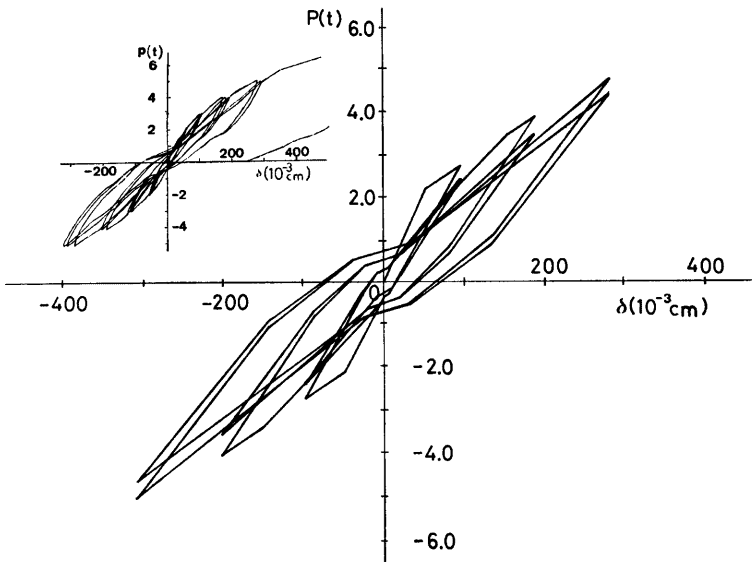


Fig. 23 Example of application (1)

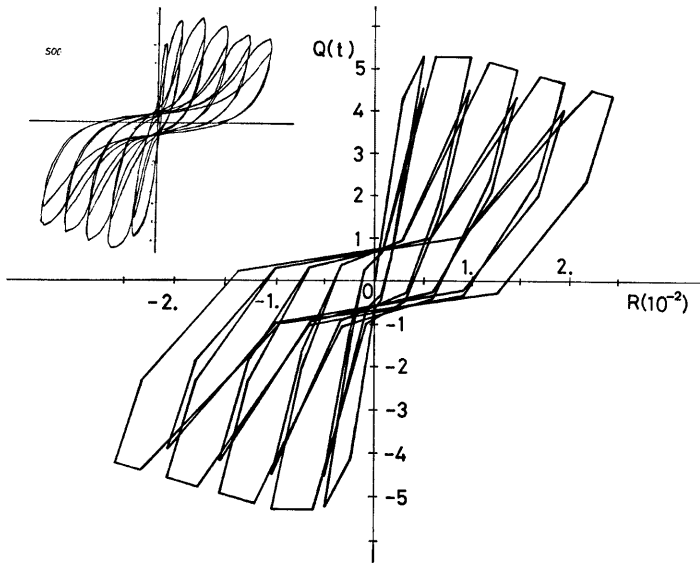


Fig. 24 Example of application (2)

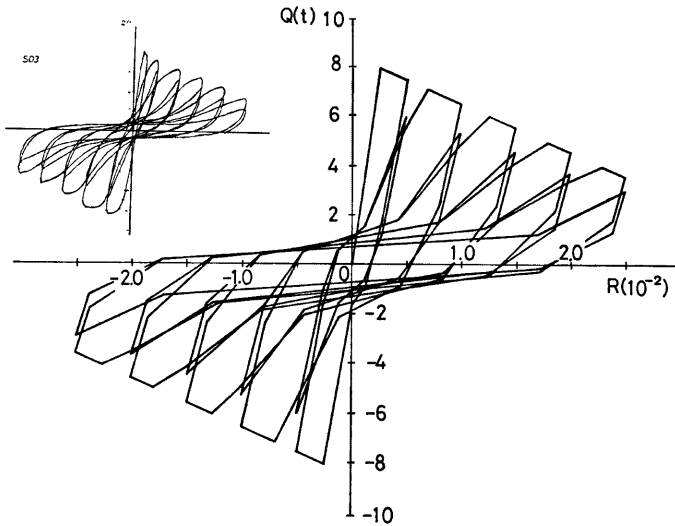


Fig. 25 Example of application (3)

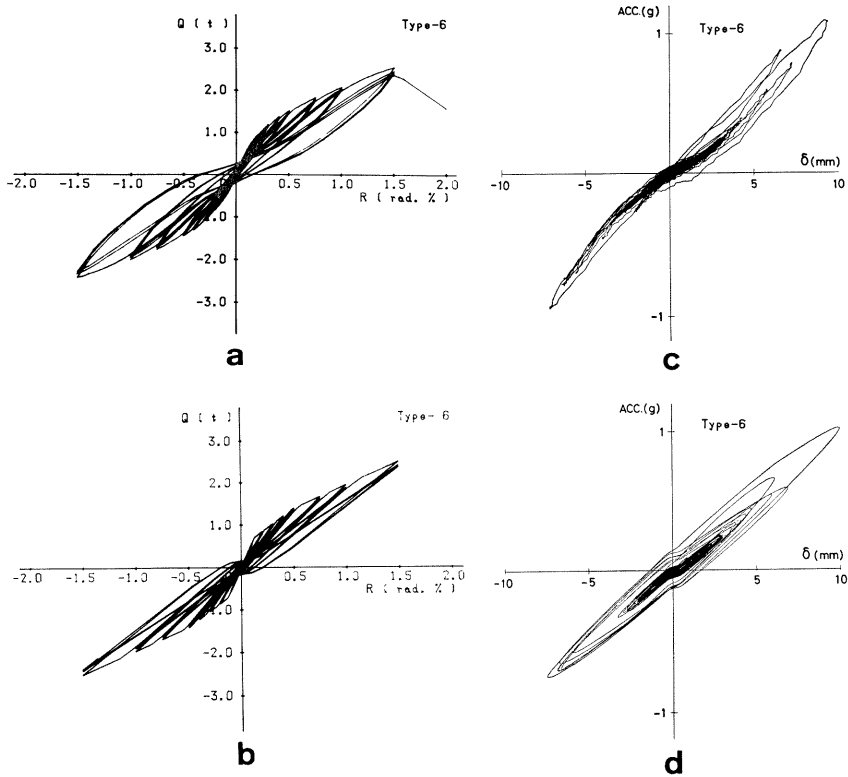


Fig. 26 Example of application (4)  
static; a: experiment, b: presented model  
dynamic; c: experiment, d: presented model

体の振動台による動的実験によって得られた履歴曲線（応答加速度—変位）（文献8）への対応例（Fig.26）。動的実験については、地動入力波形（El-Centro, NS成分, 1940年, 時間軸を1/2にしたもの）および応答加速度, 応答変位の時刻歴の対応例を Fig.27 に示す。静的実験より得られたループに対する, モデルの各パラメータの値は次のとおりである。

$$a_s=0.93, a_e=0.50, RB=0.74$$

尚, 動的実験への対応に対しては, モデルの各パラメータの値は, 静的実験に対するのと同じものを用いた。また, 上の(1)~(4)のいずれについても, スケルトンカーブは実験結果に基づき, 折線で近似した。尚, Fig. 23~25 中, 左上の図が実験により得られた復元力特性である。

## 11. 結 語

いくつかの異種のモデルを重ね合わせることによって, 新たなモデルを構成する方法は, 非常に単純なものであるが, 今迄に述べてきたように, この方法にいくらかの工夫を付加することによって, 比較的良好に

構造部材の復元力特性を表現し得るモデルを作ることが可能であることが示された。しかしながら、劣化の導入をはじめとして、いくつかの問題点が残されていることは否定できない。また、ここで設定した種々のパラメータも、単に実際の現象を表現させるために設けたものであり、理論的、あるいは物理的な意味を与えられているものではない。したがって、そのようなパラメータによって構成されたモデルは、その性質上何ら理論的、物理的裏付けを持たない。しかし、本論文で提案されているような、簡単で比較的实际の現象を適切に表現することのできるモデルは、構造物の地震時の挙動を近似的に把握したいような場合、あるいは同一階にいくつかの異なった性質を持つ柱が存在する時の、強い地震力下における各柱の水平力負担の割合の変化を求める場合に対して有効であろうと思われる。

今後、本論文において設定されたいくつかのパラメータが何らかの形で、理論的に構造部材を構成する材料、その他力学的条件と結びつけることができれば、ここで紹介したモデルは、さらに有力なものとなるであろう。

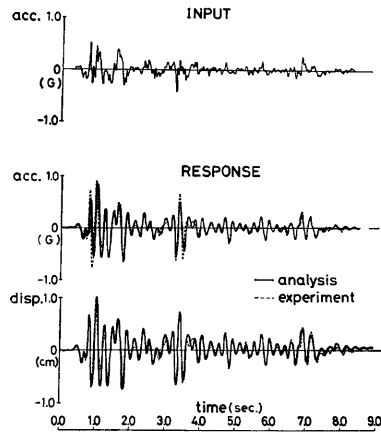


Fig. 27 Comparison of time histories obtained from experiment with those obtained from analysis using presented model

参 考 文 献

- 1) Bazán, E. and R. Meli: Seismic analysis of structures with masonry walls, Proc 7th World Conf. on Earthquake Eng., Istanbul, 1980.
- 2) 若林 實: 構造物の減衰とエネルギー吸収能力について, 京都大学防災研究所年報, 第17号, 昭49. 4.
- 3) 谷 資信: 骨組構造の解析, 技報堂, 昭51. 12, pp. 112-121.
- 4) Otani, S.: Hysteretic Models of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis, Journal of The Faculty of Eng. The University of Tokyo, Vol. XXXVI, No. 2, 1981.
- 5) 谷 資信・平松 晃・渡辺俊彦・石川 泰・森 伸之: 鉄筋コンクリート構造の崩壊過程を考慮した地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭51. 10, pp. 1283-1284.
- 6) 谷 資信: 骨組構造の解析, 技報堂, 昭51. 12, pp. 105
- 7) 若林 實・南 宏一・中村 武: 繰返しせん断力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の履歴特性に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第15号, 昭47. 4, pp. 69-97.
- 8) 若林 實・藤原佛三・中村 武・下戸芳寛: 補強煉瓦造の耐震性に関する実験的研究 (その1), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 昭58. 6.