

## プレストレスト コンクリート建築物の問題点

中野清司\*

### 1. まえがき

プレストレスト コンクリートがわが国で一般に用いられるようになってから、すでに20年近くになる。この間に技術的な問題点が次々に解決され、実用のレベルにおいては、ほとんど確立された構造技術に成長している。しかしながら、設計計画全般にわたる事項や構造・施工の研究的レベルの事項については、未解決の問題が数多く残されている。本文では、これらの諸事項について系統的に整理するための骨組の提案を行ない、次に若干の事項について考察することにする。

### 2. プレストレスト コンクリートの設計計画上の問題点

#### (1) 問題点の分類

問題を整理するため、まず図-1に示す建物の用途発生から設計までのプロセスを考えてみる。図-1の②～⑥で各種のチェックや選択が行なわれるが、いずれもいわゆる性能に関するものである。したがって②の段階においても⑥の段階においても構造性能が問題になるが前者と後者とではかなり内容の密度が異なっている。

**a) 基本条件の整理の段階** ここでは水準項目としては表-1の10項目が考えられる。表-1には他種構造との相対的優劣を三段階表示で示してあり、また問題点を備考に記入してある。

この段階では、あまり細かい議論は不用であるが、PS建物の需要を盛んにするためには、評価Cの項目を少なくすること、評価Bの項目のうち比較的容易なものをAに引上げることが必要である。当面耐火性と増改築を行なう場合の具体的工法を研究しなければ、PS建築物の大幅な発展は期待できない。

**b) 略設計における設計条件の設定の段階** この段階では、具体的な設計に必要な設計条件を数値あるいは

\* 工博 建設省建築研究所 第四研究部長

図-1 (a) 建物の用途発生から設計までの検討プロセス

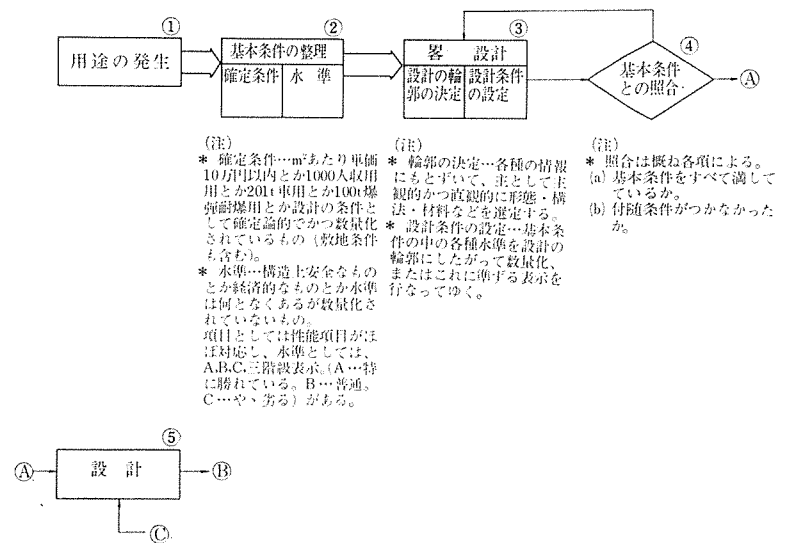


図-1 (b)

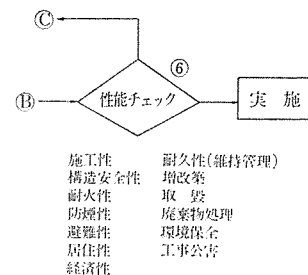


表-1 基本条件の水準

性能項目	評価	備考
1. 施工性	B	(含工期)
2. 構造安全性	B	
3. 耐火性	C	爆裂に関する定説がない。
4. 居住性	B	剛性低下・長周期化等将来の問題はある。
5. 経済性	B	
6. 耐久性	B	PC鋼材の腐食の問題は残されている。
7. 維持管理	B	
8. 増改築の難易	C	実例が少なく、工法的検討・研究がない。
9. 取こわしの難易	B	有利となる可能性はあるが、研究がない。
10. 工事公害	B	同上

これに準ずる表示によって決定しなければならない。表-2にはこれらの条件項目を示してある。表-2にあげ

表-2 設計条件の設定

性能項目	条件設定項目
1. 施工性	1-1 工数(大・中・小) 1-2 工種(多・中・少) 1-3 精度(高・中・低) 1-4 信頼性(高・中・低) 1-5 工期(短・中・長) 1-6 特殊機器(多・中・少)
2. 構造安全性	2-1 応答量支配要因 2-1-1 固有周期 2-1-2 減衰定数 2-1-3 質量分布 2-1-4 剛性分布 2-1-5 荷重～変形特性 2-2 限界状態の基準の指定 2-2-1 長期耐力 2-2-2 短期耐力 2-2-3 長期剛性 2-2-4 短期剛性 2-3 靱性率 2-4 荷重・外力 2-4-1 常時 2-4-2 非常時 2-5 安全度 2-5-1 常時 2-5-2 非常時
3. 耐火性	3-1 火災荷重 3-2 耐火時間 3-3 防煙 3-4 避難
4. 居住性	4-1 骨組の弾性域振動特性 4-2 床の弾性域振動特性 4-3 温度変形 4-4 クリーブ変形
5. 経済性	5-1 工事費 5-2 維持管理費
6. 耐久性	6-1 構造性能 6-2 耐火性能 6-3 居住性能
7. 維持管理	7-1 構造躯体 7-2 内外装仕上 7-3 設備
8. 増改築の難易	8-1 柱 8-2 はり 8-3 床組 8-4 壁 8-5 設備
9. 取こわしの難易	9-1 移築 9-2 取こわし
10. 工事公害	10-1 騒音 10-2 振動 10-3 飛散物・泥土 10-4 廃棄物 10-5 地下埋設物毀損 10-6 周辺交通 10-7 地盤沈下 10-8 井戸等の水枯れ 10-9 電波障害 10-10 煙・悪臭 10-11 火災

た条件設定項目の大部分は、設計が完了しあるいは施工計画が決定しないと明確にならない事柄であるが、少なくとも目標とする数値あるいは程度は設計開始前に定めておくことが望ましい。現実の設計において条件を設定しているものは、この中の一部に過ぎない。このあたりにも今後の研究の問題点があると思われる。

**c) 基本条件との照合** 前段で設計条件が設定されたら、一応 (a) それらが基本条件を満足しているか、(b) 付随条件の有無などを検討してみる必要がある。ここでいう付随条件とは、基本条件と直接かかわりのない条件であり、設計の輪郭をきめる段階でまぎれこんだ各種の条件である。これらを整理すると代替設計案が出やすくなる。

**d) 性能チェック** 設計ができ上がった段階で当然行なわれるのがこのチェックである。項目としては表-2の各項目とほぼ一致する。この段階では、主として(a)各項目の数量化、(b)部分的あるいは総合的な性能表示と評価を行なうのが狙いである。すなわち、表-1の水準において概念的に評価された各項目の具体的裏付けを固め、かつ各性能間のバランスがうまく取れているかどうかをチェックする。

(2) 各項目に関する検討

以上に述べた各項目の総合的検討を行なうためには、多方面の資料の収集・分析が必要である。たとえば施工

性などについても次のような観点から研究を行なう必要がある。すなわち、PS建築物の施工性は、一般にRC造、S造と比べて特に大差はないと考えられている。表-1で評価をBとしてあるのは、このようなばく然たる根拠によっている。より具体的に施工性を検討するためには、現場工事、工場生産部品などについて、表-2の1-1～1-6項について精査したデータが必要である。現在のところこの種のデータの発表されたものが見当たらない。省力化・コストダウンが切実に要請されている現状にかんがみて、この方面の調査・研究が望まれる。

構造の分野に関してもほぼ同様の事柄がいえる。PC構造固有の問題も、さらに一般的なレベルで広くかつ深く研究を進めなければ根本的解決が得られない。この一例として、構造上重要な要因の一つである接合部の構造性能について荷重～変形特性(表-2の2-1-5項)を中心として次節でややくわしく検討してみることにする。

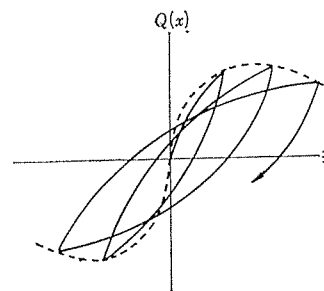
3. 接合部の構造性能

接合部の構造性能について、われわれが通常得るのは次の情報であろう。

- 1) 耐力
- 2) 最大変形量
- 3) 荷重—変位曲線

普通の構造計算では耐力の理論値を求めうる場合があるが、一般には上記の諸情報は実験によって求められる(たとえば図-2に示すような荷重—変位曲線)。実際の

図-2 荷重—変位曲線



構造物の安全性と、これらの情報がどのような関係で結びられているかという点が、われわれの最大の関心事である。上記の関係を明らかにするのが、構造的観点に立った、“接合部の特性の評価”である。1)の耐力との最大変形量とはすでに数量化されているので、第一次のデータ処理が終了しており、不完全ながら異なった接合部相互の構造性能の比較の指標として使用することができる。3)の荷重—変位曲線は、アナログ的表示として提供されているので、数多くの情報を含んでいるが、適当な処理によって数値化した特性値を抽出しなければならない。図-2は多数回の正負繰返し載荷を行なった場合

であるが、より簡単な実験の場合には単調荷重のデータのみが提供される。数多くの実験結果の検討の結果として単調荷重試験の荷重—変形曲線は、繰返し荷重試験の荷重—変形曲線の包絡線（たとえば図—2の点線）とほぼ一致すると考えてよい。この包絡線のことを Skeleton curve あるいは Backbone curve と呼び、繰返し荷重によるループを Hysteresys loop（履歴ループ）と呼ぶ。

Backbone curve からは通常

- 1) 最大荷重（耐力）： $P_u$
- 2) 最大荷重時変形量： $\delta_u$
- 3) 最大変形量： $\delta_{max}$
- 4) 初期剛性： $K_1$
- 5) 塑性剛性： $K_2, K_3, \dots$
- 6) 降伏荷重： $P_y$
- 7) 降伏変形量： $\delta_y$
- 8) じん性率： $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$

などを求める。

履歴ループからは通常

- 9) 履歴減衰量（通常は、等価粘性減衰定数： $h_e$  で代用することが多い）
- 10) 剛性劣化量
- 11) スリップ率

などを求める。これらの特性は Backbone curve および履歴ループの含む情報のすべてではないが、構造物の特性に関係が深いと考えられるので、まずこれらの特性を抽出し、数量化して、構造物の特性との関係を検討するのが通常の手法である。上記の 1)～11) の諸特性を実験データから読み取るわけであるが、 $P_u, \delta_u, \delta_{max}, K_1$  等は実用上自明であるが、その他の特性については、一定のプロセスをあらかじめきめないと、読取りあるいは数量化のための変換誤差が大きくなる可能性がある。このために、実験曲線のモデル化を行なうことが多い。すなわち、あらかじめ、ある種の数学モデルを設定しておき、このモデルの諸特性を解析的に表現しておく。次に Curve fitting の手法によって実験曲線をモデルに Fit させる。つまりモデルに含まれている諸定数の値を実験曲線になるべく忠実に定めていく。

現在までに多数のモデルが提案されているが、以下にそのうちの若干のものを紹介する。

### (1) 履歴曲線

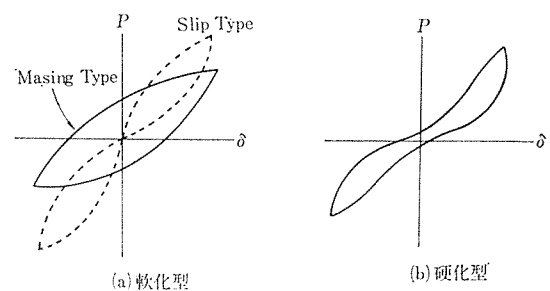
履歴曲線の型は大別して次の2つになる<sup>7)</sup>。

- 1) 軟化型 (Softening type) … 図—3 (a)

これは紡すい型であり、一般に降伏現象を伴う構造部材の示す特性である。

- 2) 硬化型 (Stiffening type) … 図—3 (b)

図—3 履歴曲線の型



これは逆S型であり、すべりを伴う構造部材たとえば木造骨組、鉄骨仕口、鉄筋コンクリートばりの鉄筋継手などの示す特性である。

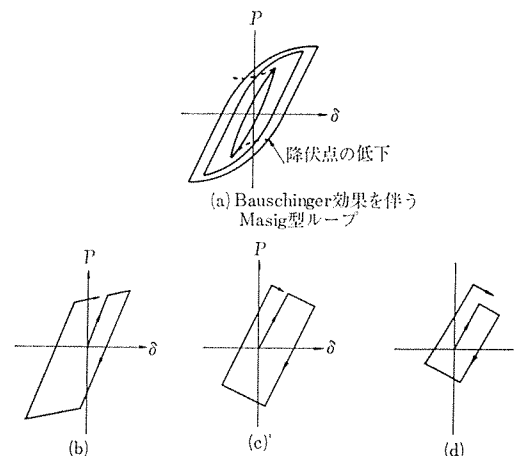
軟化型は形態の上ではさらにこれを2つに合せて、

- ① Masing 型
- ② Slip 型

に分けることができる<sup>17)</sup>。小高らによれば<sup>11), 12)</sup> 鉄筋コンクリート造の骨組は軟化型に属し、柱の軸力が小さい間は Masing 型、柱軸力が大きくなると Slip 型を示す(図—3 (a) 参照)。

鉄骨ラーメンの場合も、基本的には軟化型の特性を示すが、図—4 (a) に示す Bauschinger 効果を伴う多重 Masing 型になる傾向がある<sup>17)</sup>。若林らによると鉄骨ラ

図—4 鉄骨ラーメンの復元力特性



ーメンの履歴曲線はさらに 図—4 (b)～(d) に示す3つの型に分けられる。(b) は柱に軸力がなく、あるいは小さいときで、かつはり断面が降伏する場合である。(c) は柱に軸力があるが柱断面は弾性状態にあり、はり断面が降伏する場合である。(d) は柱に高軸力があり、かつ柱降伏の場合である。

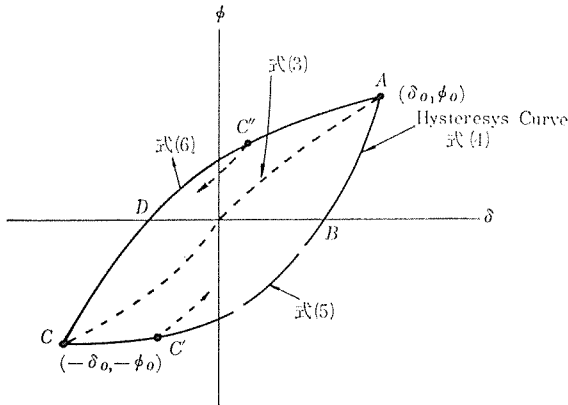
### (2) 履歴曲線のモデル化

前節に示したように、構造実験から求められた履歴曲線は、いくつかのパターンに分類できる。これだけでも構造物の設計を行なう際に参考になるが、もう一歩進めて履歴曲線を数学モデルで表わしておく、構造物の特

性を定量的に表わすのに便利である。なお以下に述べるモデルは主として軟化型である。

a) Ramberg-Osgood モデル<sup>2), 10), 17), 24)</sup> この手法は、軟化型の曲線を3つのパラメータによって表現しよ

図-5 Ramberg-Osgood Curve



うとするものである(図-5)。基本式を示すと

$$\delta = \alpha\phi + \beta\phi^r \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $\delta$ : 無次元化された変位

$\phi$ : 無次元化された力

$\alpha, \beta, r$ : 曲線の形状パラメーター

のとおりである。上記の表現は1943年にRambergとOsgoodによって提案されたものであるが<sup>2)</sup>、その後P. C. Jennings, M. J. Keldjan, S. C. Goel, G. V. Bergなどにより用いられ、若干の修正を経て、現在でも国内外の研究者に用いられている。ここでは五十嵐などの提案した修正Jennings公式について詳述する<sup>17)</sup>。

まずこの公式は ① 線型弾性域, ② Bi-linear 域, ③ ひずみ硬化現象, Bauschinger 効果を取り入れる点に特長がある。

公式は ① Skeleton curve と ② Hysteresys curve の2つに分けて与えられている。Skeleton curve は単調荷重曲線に相等し, Hysteresys curve はいわゆる履歴ループである。

1) Skeleton curves

$$(1+\alpha)\delta = \phi + 2\phi^r \dots \dots \dots (2)$$

ここに  $\delta = \frac{X_m}{X_Y}$  ..... 変位

$\phi = \frac{P_m}{P_Y}$  ..... 荷重

$\alpha$ : 正定数.....パラメーター

$r$ : 正奇定数...パラメーター

$(X_m, P_m)$ : 最大荷重時の変位と荷重

$(X_Y, P_Y)$ : 降伏荷重時の変位と荷重

式(1)との相違は,

$$\alpha \rightarrow \frac{1}{1+\alpha}, \beta \rightarrow \frac{\alpha}{1+\alpha}$$

になった点で、形状パラメーターは1つ減って  $\alpha, r$  の2つになっている。

2) Hysteresys curve

$$(1+\alpha)\frac{\delta-\delta_i}{2} = \frac{\phi-\phi_i}{2} + \alpha\left(\frac{\phi-\phi_i}{2}\right)^r \dots \dots (3)$$

ここに  $(\delta_i, \phi_i)$  は減力点における変位と荷重である。

図-5の  $\overrightarrow{ABC}$  曲線,  $\overleftarrow{CDA}$  曲線は  $(\delta_i, \phi_i)$  をそれぞれ  $(\delta_0, \phi_0)$  あるいは  $(-\delta_0, -\phi_0)$  として式(3)を適用すれば

$\overrightarrow{ABC}$  曲線は

$$(1+\alpha)\frac{\delta-\delta_0}{2} = \frac{\phi-\phi_0}{2} + \alpha\left(\frac{\phi-\phi_0}{2}\right)^r \dots (4)$$

$\overleftarrow{CDA}$  曲線は

$$(1+\alpha)\frac{\delta+\delta_0}{2} = \frac{\phi+\phi_0}{2} + \alpha\left(\frac{\phi+\phi_0}{2}\right)^r \dots (5)$$

で表わすことができる。

3) 履歴分岐: 図-5の  $C'$  点あるいは  $C''$  点で除荷された場合は分岐点(除荷点)の座標を  $(\delta_R, \phi_R)$  として式(3)に代入すれば履歴分岐の方程式をうる。形はまったく式(4), (5)と同じである。

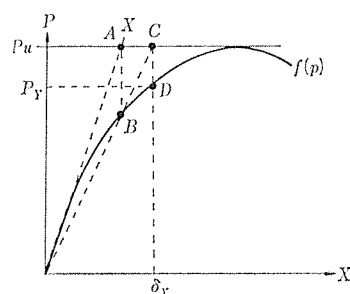
式(2)~(5)において  $\frac{1}{1+\alpha} \rightarrow \alpha, \frac{\alpha}{1+\alpha} \rightarrow \beta$  と書き直せば、前述のとおり通常の3つの形状パラメーターをもつ方程式になる。

実用上の問題としては,

① 式(1)に示す変位, 力の無次元化の方法である。式(2)~(5)では、降伏点の座標  $(X_Y, P_Y)$  で、変位  $X_m$ , 荷重  $P_m$  を除して無次元化している。これがもっとも一般的な方法で工学的意味もつけやすいが、実験曲線から  $(X_Y, P_Y)$  を求めるのはそれほど簡単ではない。現在用いられている方法を列挙すると

- ② 明瞭な折れ曲り点のある場合は当然その点をとる
- ③ P S 構造では場合によってきれつ点を用いることがある(当然降伏点ではない)。
- ④ GYMM (General Yield Monet Method) にもとづく方法<sup>11)</sup>。この方法は図-6に示すように、実験で求めた荷重~変位曲線  $f(\rho)$ , 最大耐力  $P_u$ , 計算で求めた弾性剛性  $OX$  の三つのデータから

図-6 G.Y.M.M の求め方



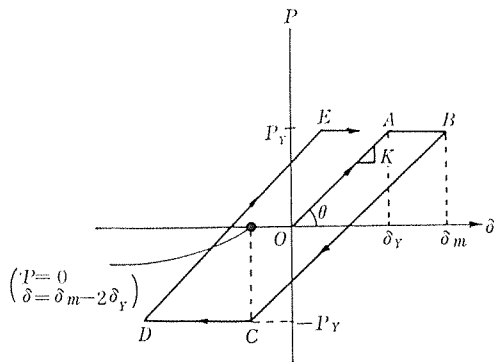
同図の A → B → C → D の順序に図上で求めた D 点の座標を (X<sub>Y</sub>, P<sub>Y</sub>) とする。

などである。この点に関しては構造種別ごとにさらに検討を必要とするが、式 (1)~(5) は連続曲線であるので曲線の形の表現のためには、(X<sub>Y</sub>, P<sub>Y</sub>) の決め方は二次的な意味しかない。

② a, b, c の値の決定は、実測データの組 (X<sub>i</sub>, P<sub>i</sub>) に関して最少二乗法系統の Curve-fitting を行なえばよい。原理は簡単であるが、かなりの量の実測データを統計的に処理する必要がある。これに関する第二のアプローチは、f(P), の理論値を求め、これから a, b, c を決定する方法がある。

b) Elasto-Plastic モデル これは図-7 に示すように tan θ = k の勾配をもつ直線と水平な直線から成る

図-7 荷重-復元力特性



平行四辺形モデルである。Masig 型履歴特性に比較的忠実であり、何よりも数学的取扱いが簡単であるのでよく用いられる。図-7 で k, P<sub>Y</sub>, delta<sub>Y</sub> が定めれば、

区間 O~A P = k delta 0 ≤ delta < delta<sub>Y</sub> (6)

” A~B P = P<sub>Y</sub> delta<sub>Y</sub> < delta < delta<sub>m</sub> (7)

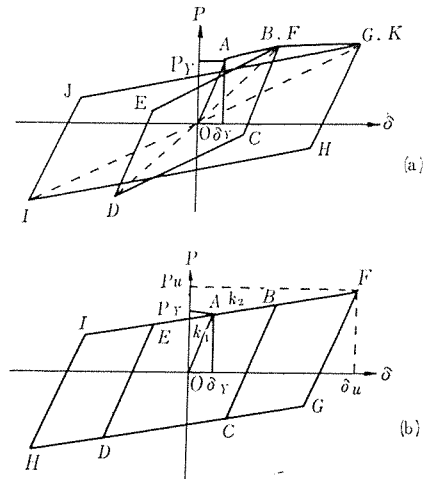
” B~C P = P<sub>Y</sub> - k(delta<sub>m</sub> - delta) (delta<sub>m</sub> - 2\*delta<sub>Y</sub>) < delta < delta<sub>m</sub> (8)

によってループの軌跡が定まる。式 (6)~(8) は表現は簡単であるが、実際の構造物の R<sub>Y</sub>, delta<sub>X</sub> を決める場合、実験曲線からこれらの量を決めるには、かなり大胆な仮定を設けなければならない。実際には弾性計算で P<sub>Y</sub> を決めてしまうことが多く、かなりの誤差を覚悟しなければならない。

e) Bi-linear (双一次) モデル これは基本的には初期勾配 k<sub>1</sub> と降伏後の勾配 k<sub>2</sub> の二つの直線より成る折線ループである。軟化型履歴特性の 2 つのタイプ、Masing タイプ、Slip タイプに対応してモデルを考えていくのが便利である。

1) Masing タイプ：これは鉄筋コンクリート等のラーメンにおいて柱の軸力のごく小さい場合に適合するといわれている<sup>11)</sup>。図-8 にその概要を示してある。図-

図-8 Bi-linear モデル



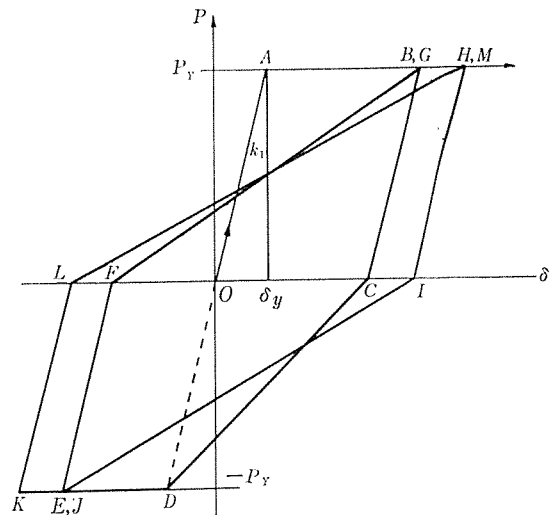
8 (a) は実際の構造実験結果に比較的忠実なものである。各ループは除荷点 (B および G) の原点 O に関する対称点 (D および I) を結んだ BD, GI 線を対角線とする紡鐘形である。図からわかるように第二折線の勾配がそのつど変化する。計算の複雑さはともかくとして、モデル化に必要なパラメーターが多過ぎて実用的でない。図-8 (b) は実用的見地にとって簡略化したものである。パラメーターとしては降伏点の座標 (P<sub>Y</sub>, delta<sub>Y</sub>)、耐力の座標 (P<sub>u</sub>, delta<sub>u</sub>) の 2 つでよい。すなわち A, F 点とこれらの原点 O に関する対称点 D, H が定めれば IF, HG 直線と初期勾配 OA に平行な IH, FG 直線とから成るループが形成される。この方法によれば第 2 勾配 k<sub>2</sub> は

$$k_2 = \frac{P_u - P_Y}{\delta_u - \delta_Y} \dots\dots\dots (9)$$

のごとく一義的に定まり実用上便利である。

図-9 は Bi-linear モデルではないが Elasto-plastic モデルと図-8 (a) に示した第 2 勾配が荷重ステップごとに変化する性質とを結合したモデルである<sup>29), 30)</sup>。この

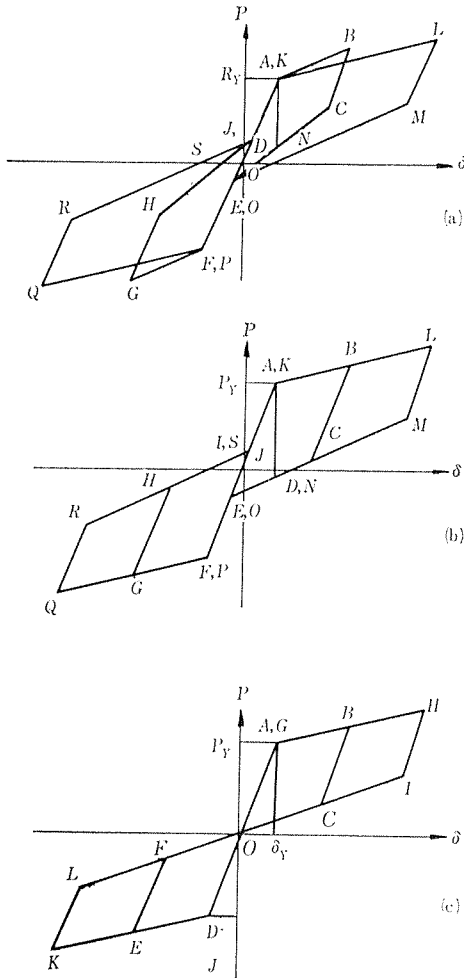
図-9 Clough の剛性低下モデル



モデルは降伏点の座標  $(P_Y, \delta_Y)$ ,  $(-P_Y, -\delta_Y)$  から A 点と D 点が定まると容易に作図できる。O → A → B と進んで B より OA に平行線を引き、これが  $\delta$  軸と交わる点を C とする。次に C → D → E → F と進み、除載点 B と F を結びこれが G 点となる。以下同様の作図を繰り返す。

2) Slip タイプ (双葉モデル) : 軟化型の一つであるが、図-3 (a) に示すように複紡すい型になる。柱に軸力がある場合はこのタイプになるといわれている<sup>11)</sup>。図-10 はこの種のモデルである<sup>11)</sup>。いずれのモデルも初

図-10 Slip タイプのモデル<sup>11)</sup>



期剛性を表わす線(たとえば 図-10 (a) の AF 直線)の両側に紡すい形が付いているような形をしている。図-10 (a), (b), (c) の順に簡略化が行なわれている。図-10 (a) は実際にもっとも近いが第二勾配が荷重ステップごとに変化するので不便である。図-10 (b) では第2勾配を荷重ステップにかかわらず一定としてある。ただもどり線 M, C, D (N), E(O) 等は M 点と D 点 (残留変形に相当する) が決まらなると描けない。図-10 (c) はさらに簡略化したもので I 点を決めれば描ける。

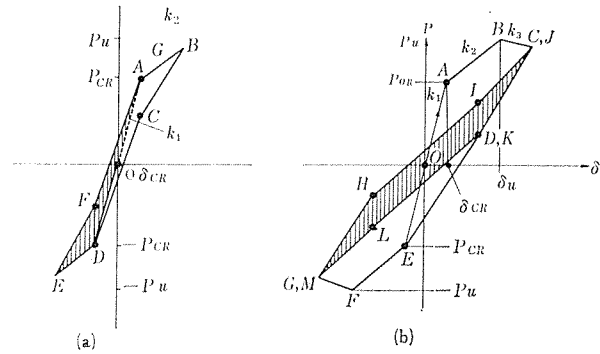
d) P S 構造のモデル プレストレスト コンクリート構造の復元力特性は、鉄筋コンクリート構造とかなり異なることは、多くの実験結果によって示されている。これらの実験データを見ると、主要な相違点は次の2点であると思われる。

- 1) ループが偏平である。
- 2) Slip タイプと硬化型 (図-3 (a), (b) 参照) の中間の特性を示す。

1) の特性を表現するには軟化型のモデルのパラメータを変えるだけでよいが、2) の特性をモデル化するのはむずかしい。この点を解決する方法の一つに Clough の剛性低下モデル(図-9)の考え方を導入した Blakeley の手法がある<sup>29)</sup>。

Blakeley は Back-borne curve として、図-11 (b)

図-11 Blakeley のモデル



に示すようにきれつ荷重 ( $P_{CR}$ ), 耐力 ( $P_u$ ), 耐力以後の三段階に対応する3つの直線 OA, AB, BC (図-11 (b)) を用いる。上記各直線の勾配はそれぞれ  $k_1, k_2, k_3$  である。すなわち一種の Tri-linear 型とする。履歴特性は2つの段階、すなわち 1)  $P_{CR} < P < P_u$  の場合 (図-11 (a)) と 2)  $P_u < p$  (図-11 (b)) に分けて与える。しかし基本的には同じ考え方をとっている。

1)  $P_{CR} < P < P_u$  (図-11 (a)) : 図-9(a) の O → A → B は勾配  $k_1, k_2$  を与えれば決まる。C 点は  $(\alpha P_{CR}, \delta_{CR})$  の座標をもつ。 $\alpha$  は実験等より定めるパラメータである。D 点は A 点の原点に関する対称点、F 点は  $(-\alpha P_{CR}, -\delta_{CR})$  の座標をもつ。Backborne curve は OAB である。図-11 (a) を見ると一種の Slipping タイプと考えることができる。

2)  $P > P_u$  (図-11 (b)) : この段階では最大変位に対応する点 (図-11 (b) の C (J), G (M)) と2組の基準点 (D, H), (I, L) によってループが決定する。

I, L 点は  $(\beta P_u, f(\delta_{max}, \delta_u))$  の座標をもつ。 $\beta$  は定数であり、 $f(\delta_{max}, \delta_u)$  は最大変位  $\delta_{max}$ , 耐力に対応する変位  $\delta_u$  の関数である。

D, H 点は  $((\beta P_u - \delta P_u), f(\delta_{max}, \delta_u))$  の座標を

もつ。 $r$  は定数であり  $r P_u$  は剛性低下の程度を示す。  
 図-11 (b) は軟化型の Slip タイプとも考えられるが、  
 硬化型の特性を示している。

(3) 履歴曲線の評価

実験あるいはこれにもとづくモデル化によって履歴曲線が得られた場合、構造設計上これをどう活用するかという点について考えてみる。

**a) 履歴曲線の安定限界** 最大変位  $\delta_{max}$  と繰返し回数  $n$  に関するデータ。 $\delta_{max}$  の値が大きくなると  $n$  は小さくなる傾向がある。地震時には構造物は大変形をかなり繰り返して受ける。 $\delta_{max} \sim n$  の関係が明らかでない履歴ループを用いると、計算上はループが安定しているはずなのに、繰返し载荷によって、ループの形が崩れ、危険をもたらすことも考えられる。

$\delta_{max} \sim n$  に関する定説はないが、広沢によると次のとおりである<sup>31)</sup>。

1) 激震時について、応答解析で得られている塑性率は、建物の耐力や剛性が過度に小さくない場合は、3~4程度である。

2) 最大応答値の 70~80% 以上の応答値の出現回数は 10 回前後と報告されている例がある。

3) 一定変形の繰返し载荷による構造性能の変化は10回程度の繰返しで目安がつけられる例が多い。

以上の見地をたって、建築研究所短柱実験委員会では柱の実題について、次の加力方法を取っている。

$P_y$  を降伏荷重、 $\delta_y$  を降伏変形として

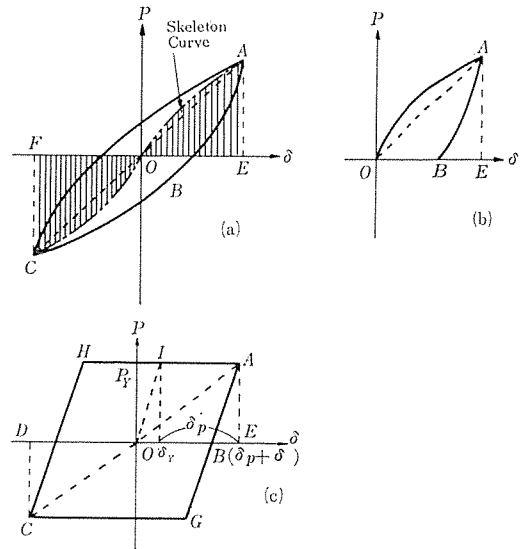
- ①  $\pm 0.7 P_y \sim 1$  回      ⑧  $\pm 3.0 \delta_y \sim 1$  回
- ②  $\pm 1.0 \delta_y \sim 10$  回    ⑨  $\pm 6.0 \delta_y \sim 2$  回
- ③  $\pm 2.0 \delta_y \sim 10$  回    ⑩  $\pm 8.0 \delta_y \sim 2$  回
- ④  $\pm 1.0 \delta_y \sim 1$  回    ⑪ + 方向で破壊まで
- ⑤  $\pm 3.0 \delta_y \sim 10$  回
- ⑥  $\pm 2.0 \delta_y \sim 1$  回
- ⑦  $\pm 4.0 \delta_y \sim 10$  回

の計 48 ループの加力を行なう。

以上のように、履歴ループは (a) 10 回程度の繰返し载荷に対して安定であり、(b) 塑性率が 3 以上あることが一つの評価のポイントになる。

**b) 等価粘性減衰定数** 履歴ループの描く面積はエネルギーの消費量に対応する。したがって、この面積の大小によって、構造物の振動減衰性を比較することができる。比較の手法として等価粘性減衰定数によるものが便利である<sup>5),7)</sup>。これは図-12(a) に示す Masing type の履歴曲線を描いて振動する構造物を  $\overline{AC}$  に相当する一定のばね定数を持ち、次に示す等価減衰定数  $h_e$  をもって振動していると考えることに相当する。 $h_e$  の値は、図-12 (a) の場合

図-12 等価粘性減衰



$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{面積 } ABCD}{\text{面積 } (\triangle OAE + \triangle OCE)} \dots\dots (10)$$

図-12 (b) の場合 (1/2 ループの実測値しかない場合に用いる)

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{面積 } OAB}{\text{面積 } \triangle OAE} \dots\dots\dots (11)$$

図-12 (c) の場合

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{(2 P_Y) \cdot (2 \delta_p)}{P_Y (\delta_Y + \delta_p)} = 0.64 \frac{\delta_p}{\delta_Y + \delta_p} \dots\dots\dots (12)$$

上記の式 (10)~(12) は略算式で、より厳密にはたとえば式 (10) の分母として Skeleton curve と横座標軸のなす面積 (図-12 (a) 参照) を用いるべきである<sup>6),17)</sup>。しかし実用上は式 (10)~(12) で十分である。

Ramberg-Osgood モデル (式 (3)) の等価粘性減衰定数は、

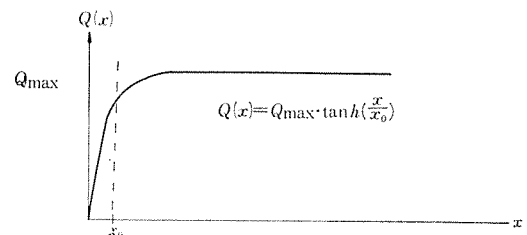
$$h_e = \frac{2\alpha(1+\alpha) \cdot \frac{1}{\pi} \left( \frac{\partial-1}{\partial+1} \right) \phi_0^{\gamma-1}}{[1+\alpha\phi_0^{\gamma-1}]^2} \dots\dots\dots (13)$$

となる<sup>17)</sup>。

**c) 負勾配部分を有する Skeleton curve の評価**

Skeleton curve として 図-13 に示す双曲線関数と直線とを用いる場合<sup>32)</sup> を考える。ここで必要な曲線の

図-13

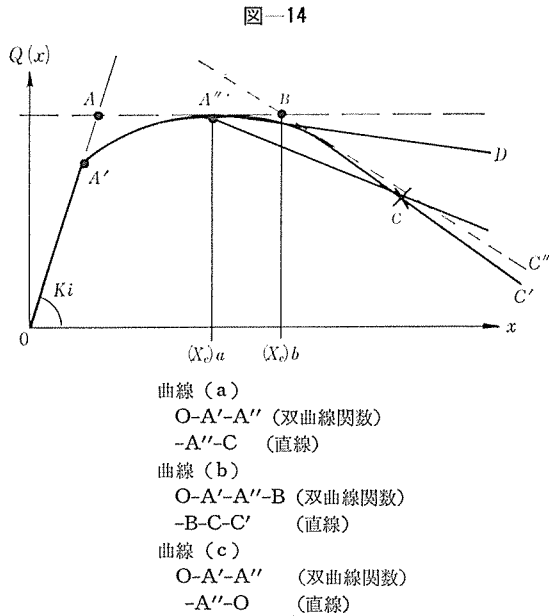


問題点シリーズ・3

パラメーターは

- 1) 最大荷重  $Q_{max}$
- 2) 初期剛性  $Q_{max}/x_0$
- 3) 耐力低下点の変位  $x_e$
- 4) 直線部勾配  $K$

の4つである。上記 1), 2) は求められたとき 3) の決定に迷うことがある。これは 図-14 に示すように、



実験で得られる耐力低下部は通常曲線であり、モデル化には 図-14 (a), (b), (c) の3つの方法が考えられるからである。図-14 の (c) は  $x_e$  は適正評価であるとしても  $K$  を過大評価 (一般に危険側) している。図-14 (a) は  $K$  を過小評価している。(b) は耐力低下部に  $\alpha K_i$  (図では  $\alpha \doteq 0.2$ ) の勾配をもつ接線  $BC''$  を引き  $AA''$  直線との交点を  $B$  とする。双曲線部分は  $O-A'-A''-B$  と考え、直線部分は  $BC$  とする。 $C$  点は実験曲線の最終点である。曲線 (b) の手法が正当化されれば、多数の実験曲線を整理、比較するのに便利であると思われる。上記の正当性を検討する方法を文献 32) に示す研究をもとにして考えて見る。上記の研究によれば、次の事実が指適される。

- 1) 負勾配 (耐力減衰) のある Skeleton curve をもつ構造物系が、負勾配域に入るような大変形を受けると、一般に数サイクルで崩壊に達する。
- 2) ただし、次の2つの場合は例外である。
  - a) 負の勾配が初期勾配 (図-14 の  $K_i$ ) の  $\alpha$  倍より小さいとき
  - b) 最大荷重時の変位 (図-14 の  $x_e$ ) が負勾配部分をもたない同一の Skeleton curve をもつ同一の構造物系の最大変位応答  $x_m$  の  $\beta$  倍以上であるとき

上記の 1) については原則的に問題はない、2) については、十分な事例研究と理論の裏付けを必要とするが、上記文献に示されている若干の事例研究の結果では、(a) については  $\beta=0.6, \alpha \leq 0.3$ , (b) については  $\beta > 0.95$  となっている。これらの点についてさらに研究が進めば、上述の実験曲線のモデル化の正当性も許価しうようになるだろう。

(4) モデル化手法の検討

上述のように、モデル化の手法にも数多くの提案がある。実際にどの手法を用いるかを定める際に、その選択の基準として次の各項目が考えられる。

- 1) 現実の構造特性に忠実であること
- 2) モデル化に必要な諸定数の計算が簡単なこと
- 3) 構造物の解析が容易であること

これらの条件は両立しないことが多い。すなわち、忠実性を重視すると計算が面倒になるのが通常である。また、モデルの忠実性は、実際に種々の事例を計算して見ないと判定できない。このほかに、これはモデル化以前の問題であるが、実験そのものが不適当であって、モデル化以降の構造検討が無意味になる場合もある。このようなことは注意してさげなければならないが、現在の構造的知識ではさげられない場合もあり、むしろこのような場合が通常であると考えた方が妥当かも知れない。したがって、もとになるデータの不十分さを度外視して、あまり精緻なモデルを用いた煩雑な計算を行なうのは工学的な態度ではない。以下に、上記の諸事項について概観してみる。

a) 実験データの妥当性 荷重-変形曲線は実験条件によって大幅に変わるものである。典型的な例として 図-15 に示す6つの荷重-変形曲線について検討して見る<sup>33)</sup>。これらは  $40 \times 60$  cm の断面の鉄筋コンクリー

図-15 実験曲線の例

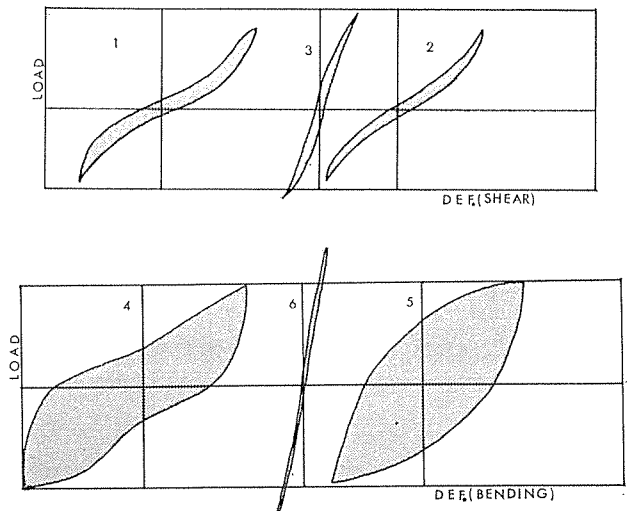




表-3 試験条件

図-15の番号	試験の種類	鉄筋の継手	軸力の有無
1	せん断試験	あり	なし
2	"	あり	75 kg/cm <sup>2</sup> 一定軸力
3	"	なし	なし
4	純曲げ試験	あり	なし
5	"	あり	75 kg/cm <sup>2</sup> 一定軸力
6	"	なし	なし

ト部材の実験であって、試験の条件は表-3に示すとおりである。これら6つの曲線を比較すると、次の事柄がわかる。

- 1) 軸力の有無によって、曲線の形状は大きく変化する。
- 2) 鉄筋継手の有無によって履歴ループの形状が多少変わる。
- 3) 曲げ試験の場合では履歴ループの形状は大きく変わる。

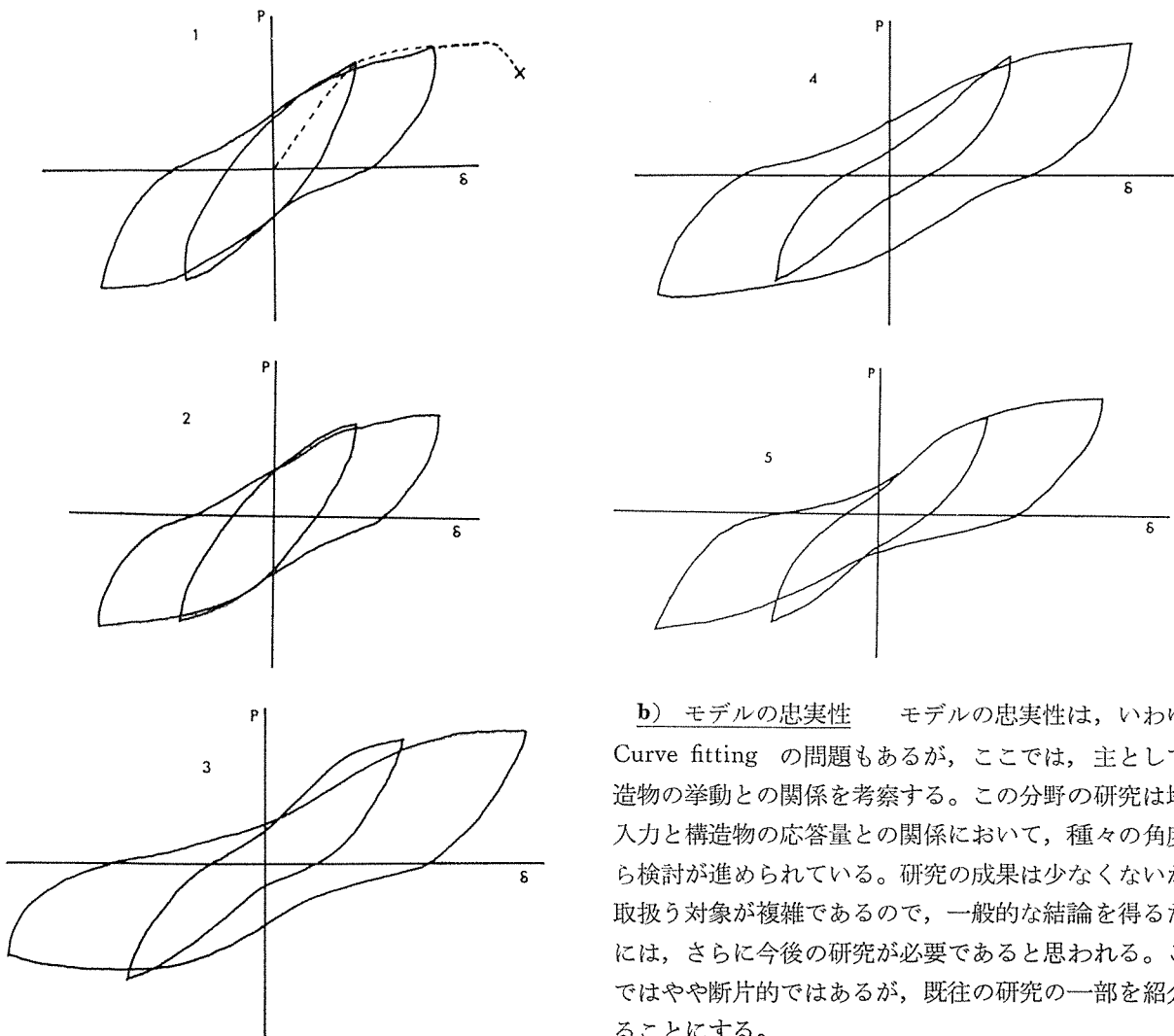
上記の3)項は当然のことであるが、単純ばりの実験

で、一点集中加力を行なう場合と、純曲げ加力を行なう場合とでもかなり相違が見られる。図-16の5つの曲線は表-4の試験条件のもとに行なわれた実験結果であるが<sup>34)</sup>、一点集中加力の場合(図-16(3~5))と純曲げの場合(図-16,(1,2))とでは、他の条件は同一でも明らかに履歴ループの形状が相違する。表-5には試験条件と変形特性との関連を示してある。構造物の設計にあたって、あらかじめ部材実験などで、復元力特性を求める場合があるが、一定の制約の中で試験を行なうわけであるから、実験計画と試験結果の適用性の判定には細心の注意が必要である。

表-4 試験条件

図-16の番号	試験の種類	鉄筋の継手
1	純曲げ	全鉄筋に継手あり
2	"	半数鉄筋に継手あり
3	中央集中荷重	継手 1か所
4	"	継手 2か所
5	"	継手 なし

図-16



**b) モデルの忠実性** モデルの忠実性は、いわゆる Curve fitting の問題もあるが、ここでは、主として構造物の挙動との関係を考察する。この分野の研究は地震入力と構造物の応答量との関係において、種々の角度から検討が進められている。研究の成果は少なくないが、取扱う対象が複雑であるので、一般的な結論を得るためには、さらに今後の研究が必要と思われる。ここではやや断片的ではあるが、既往の研究の一部を紹介することにする。

表-5 試験条件と特性値

○：特に関係のあるもの  
△：関係あるもの，×：関係のないもの

試験の条件	1. 軸力	2. 鋼材の継手	3. せん断スパン比	4. 鋼材の付着
特性値				
1. 最大荷重 $P_u$	○	×	○	○
2. 最大荷重時変形量 $\delta_u$	○	×	○	○
3. 最大変形量 $r_{max}$	○	△	○	○
4. 初期剛性 $K_1$	○	△	○	○
5. 塑性剛性 $K_2, K_3...$	○	×	○	○
6. 降伏荷重 $P_Y$	○	×	○	○
7. 降伏変形量 $\delta_Y$	○	×	○	○
8. じん性率 $\mu$	○	△	○	○
9. 履歴減衰量	○	△	○	○
10. 剛性劣化量	○	△	○	○
11. スリップ率	○	△	○	○

1) 復元力特性のモデルと変位応答量の関係：この研究<sup>35)</sup>は、復元力特性として 1) 線型, 2) 双一次型, 3) スリップ型, 4) 劣化剛性型 1, 5) 劣化剛性型 2, 6) 劣化剛性型 3, の 6 種類, 構造系の固有周期を 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.4 の 6 種類, 入力波形は El Centro NS 1940, Taft EW 1952, Hachinohe EW 1968 の 3 種類について, 粘性減衰 5% の一質点系の応答解析を行なったものである。結果の一部を 図-17, 18 に取りまとめている。これらの図は横軸に構造系の固有周期をとり, 縦軸に変位応答最大値の倍率をとっている。図-17 の倍率  $\alpha_1$  は双一次型の応答最大値と劣化剛性型 1 との比を, 図-18 の倍率  $\alpha_2$  は線型の応答最大値と劣化剛性型 1 との比を表わす。これらの図から復元力特性の決定は構造物の安全性は非常に大きな影響があることがわかる。すなわち, ①  $\alpha_2$  はともかくとして,  $\alpha_1$  の数値が, 特に短周期の部分で大きい。② 入力地震波によって, 応答量は大幅に変動する。等の事柄がこの図から読みとれる。なお劣化剛性型 1, 2, 3 相互の応答量の相違はわず

図-17

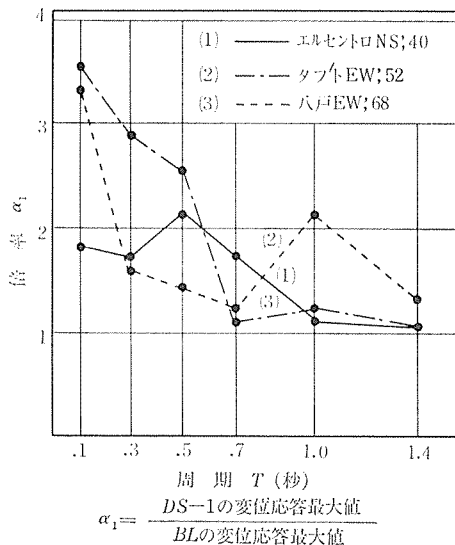
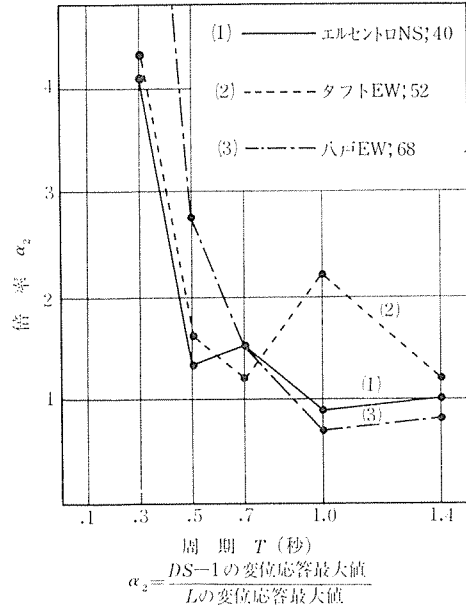


図-18



かであった。これらの研究結果から, 復元力特性は応答量に大きな影響をもたらすことは確かであるが, 復元力特性の中のどの要因が支配的であるのか, また入力地震波の諸特性とどう関連づけられるかなどは, 今後に残された興味ある問題であろう。

2) 復元力特性の若干のパラメーターと変位応答量との関係：この研究<sup>36)</sup>は, 復元力特性をいくつかのパラメーターで代表させ, それぞれのパラメーターと変位応答量との関係をしらべたものである。

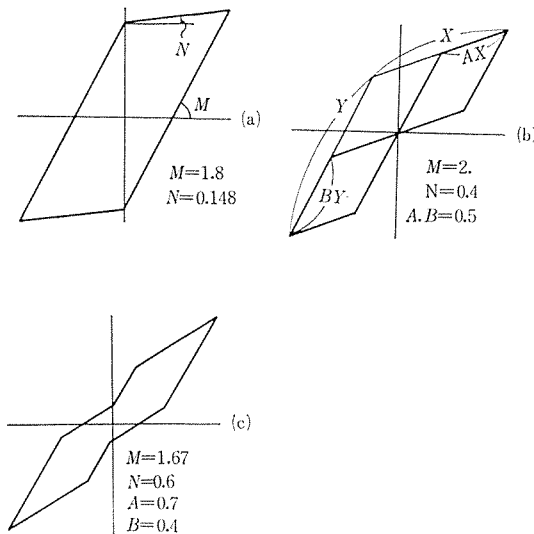
復元力特性には, Backbone curve として, アークタンジェント関数を用い, 履歴ループとして, 双一次モデル, 双葉モデル, スリップ双一次モデルを用いている。これらの履歴ループは 図-19 に示すように M, N, A, B の 4 パラメーターによって統一的に表現される。A, B がスリップ率を表わし, A=B=0 の場合 (図-19 (a)) が双一次型, A=B=0.5 (図-19 (b)) の場合が双葉型, A, B を上記以外の値とする一般のスリップ型となる。等価粘性減衰定数に比例するループ面積は

$$A=4 \frac{(M-1)(N-1)}{N-M} (1-2B+2AB) \dots (14)$$

で与えられる。

このようなモデルのパラメーターを変化させて一質点系 ( $T=1$  秒,  $h=3\%$ ) の応答をしらべた結果, ① ループ面積が大きいほど応答は小さい, ② パラメーター A, B の影響は小さい, ③ ループ面積一定の場合はスリップ型の応答が双一次型より大きい, 等の事実がわかった。上記の研究は数多い研究のうちの一部にすぎないが, このような系統的アプローチによって, 少しずつ問題の核心が解明されていくことを期待したい。

図—19



#### 4. 結 び

以上に述べたように、プレストレスト コンクリート建築物の今後の課題は、建築物として備えるべき諸特性をできるだけ系統的に把握して、プレストレスト コンクリート構造物の特色を十分発揮できるような適用法を確立することである。

#### 参 考 文 献

略記号：建論＝日本建築学会論文報告集，建論（大）＝同上大会号

- 1) von Heydekamp, G.S. : Damping Capacity of Materials, Proc. of ASTM, Part 1, 1931.
- 2) Ramberg, W. and W.R. Osgood : Description of stress strain Curves by three parameters, NACA, TN 902, 1943.
- 3) Tanabashi, R., : Test to determine the behavior of welded joint of Structural steel under alternate bending moment, J. of the Japanese Welding Society, vol. 9, No. 12, 1939.
- 4) 金多 潔：釘接合部の構造減衰性並びに剛性に関する研究，京大防災研年報，No. 3, 昭 34-12.
- 5) Jacobsen, L.S. : Friction Effect in composite structures subjected to earthquake Vibration, Technical Report, Stanford Univ., 1959.3.
- 6) Jacobsen, L.S. : Damping in composite structures, Proc. of 2nd W.C.E.E., 1960.
- 7) 大沢 胖，柴田明德：構造部材の履歴特性と振動減衰性，建論（大），No. 66, 昭 35.10.
- 8) 坂本 順，五十嵐定義，角田重喜千：鋼構造節点の履歴特性並びに構造減衰性に関する実験的研究，建論，No. 昭 75, 37.8
- 9) 小林啓美，最上達雄：地震動による重層建築物の変形(その1. 数値解析法とその精度)，建論，No. 95, 昭 39.2
- 10) Jennings, P.C. : Periodic response of a general yielding structure, Proc. of ASCE. EM 2, 1964-4.
- 11) 小高昭夫，斎藤勝彦：構造物の復原力特性に関する実験的研究（I）—鉄筋コンクリート構造純ラーメンに関する実験一，建論，No. 106, 昭 39.12

- 12) 小高昭夫，斎藤勝彦：構造物の復原力特性に関する実験的研究（II）—鉄筋コンクリート構造純ラーメンに関する実験一，建論，No. 122, 昭 41.4
- 13) 小高昭夫，鈴木孝明：高層建築物の地震波による応答解析（I）（デジタル計算機による解析ならびに解析例），建論，No. 108, 昭 40.2
- 14) 小高昭夫，鈴木孝明：同上（II）（軒高31mの現行規格による設計建物の応答解析），建論，No. 109, 昭 40.3
- 15) 小高昭夫，鈴木孝明：同上（III）（降伏剪断力係数分布に関する考察），建論，No. 114, 昭 40.8
- 16) Iwan, W.D. : The steady-state response of the double bilinear Hysteretic Model, J. of Applied Mechanics, ASME, 1965-12.
- 17) 五十嵐定義，多賀直恒：繰返し荷重をうける鋼構造架構の履歴特性と構造減衰性，建論，No. 120, 昭 41.2
- 18) 小堀鐸二，南井良一郎，外1名：弾塑性ジョイントを含む架構の地震応答，京大防災研年報，No. 9, 昭 41.3
- 19) 小堀鐸二，南井良一郎，藤原悌三：弾塑性ジョイントをもつ架構の地震応答—軸力を考慮した場合，日本地震工学シンポジウム講演集，昭 41.10
- 20) 小堀鐸二，南井良一郎，藤原悌三：弾塑性ジョイントをもつ架構の応答解析—梁柱強度比の応答に及ぼす影響，建論（大），昭 43.10
- 21) 木下勝彦，榎田 裕：構造物の減衰機構に関する研究(高次の減衰性による高次応答影響)，建論（大），昭 43.10
- 22) 木下勝彦：同上（層に任意の減衰を与えた場合の高次減衰について），建論（大），昭 43.10
- 23) 小堀鐸二，外4名：高層構造物の適正動力学的特性，建論（大），昭 44.8
- 24) 多賀直恒：鋼構造物の弾塑性履歴法則とその応用，建論（大），昭 44.8
- 25) 若林 実，松井千秋：鉄骨ラーメンの弾塑性研究に関する実験的研究（その1） 矩形断面部材より成る門形ラーメン，建論，No. 192, pp. 11~22, 昭 47.2
- 26) 若林 実，松井千秋：同上（その2）H型鋼材より成る門形ラーメン，建論，No. 193, 昭 49.3
- 27) 若林 実，松井千秋，三谷 勲：同上（その3）H型鋼材より成る十字形ラーメン，建論，No. 194, 昭 47.4
- 28) 若林 実，松井千秋，三谷 勲：同上（その4）繰返し水平力をうけるH型鋼集合材，建論，No. 195, 昭 47.5
- 29) Blakeley, R.W.G., : Ductility of Prestressed Concrete Frames Under Seismic Loading, PH.D. Thesis, University of Canterbury, 1971.
- 30) Clough, R.W., : Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements, University of California Structural Engineering Laboratory, Report No. 66-16, 1966-10.
- 31) 広沢雅也：鉄筋コンクリート柱の崩壊防止に関する総合研究，秋季講演会主要研究論文集，建設省建築研究所，昭 47.9
- 32) 谷 資信，外4名：鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性（動的特性その4），建論（大），昭 46.11
- 33) 菊池利武，外5名：グリップジョイント工法による異形鉄筋継手の性能試験（第2報）建論（大），昭 47.10
- 34) 増田誠一，外1名：スリーブ継手を用いたプレキャストコンクリート部材の曲げおよび剪断耐力に関する実験的研究，建論（大），昭 47.10
- 35) 志賀敏男，外2名：鉄筋コンクリート骨組の復元力特性のモデル化とその地震応答—II，建論（大），昭 47.10
- 36) 野村設郎，外3名：各種復元力特性を有する系の地震応答（その1），建論（大），昭 46.11