

# 構造物の減衰とエネルギー吸収能力について

若 林 實

## 1. 緒 言

地震力に対して構造物が大きな減衰性をもつことが非常に望ましいことは古くから知られているところである。エネルギーの一部は一時構造物にひずみエネルギーと運動エネルギーとして蓄えられるが、最終的には地盤に逃げる部分を除くと、すべてのエネルギーは構造体や非構造体の粘弾性内部摩擦あるいは非弾性変形によって消費されなければならない。構造物の減衰性はまた風力による構造物の種々の振動を小さくするのにも重要な役割を持っている<sup>6,2)</sup>。

減衰は内部摩擦と外部摩擦とに分けられる。内部摩擦には、弾性範囲で考えられる粘性減衰や、非弾性域で接合部のすべりや部材の塑性変形によって生ずる構造減衰がある。外部減衰は構造物とそれを取巻く物質との相互作用によって生ずるもので、空気によるものや、基礎部で構造物と地盤との間の相互作用によるものがある。前者は小さいが、後者は弾性的に逸散するエネルギー<sup>8, 9, 10, 11, 14, 27, 91)</sup>、塑性変形によって消費されるエネルギー<sup>90, 95)</sup>などで、建物からエネルギーを解放する大きな役をする。上部構造が地盤に比して硬く、かつ上部構造が弾性振動をする場合に地下へ逸散するエネルギーは大きな役割をする<sup>92)</sup>。

弾性範囲の内部減衰は通常等価的な意味で粘性減衰の形で取扱われる。構造減衰はエネルギーの消費能力が大きく、大きな地震動を受けたときに、構造物を崩壊に到らしめないための重要な要素であるが、その容量を知ることが耐震性を検討する上に重要である。

地震動が衝撃性であれば、粘性や地下逸散による減衰は小さく、構造減衰がさらに重要となる。棚橋は1937年に速度ポテンシャルエネルギー説において、地震の構造物に対する破壊力の尺度は最大速度の2乗に比例し、構造物の耐震性は破壊までに蓄え得る準静的ポテンシャルエネルギーに比例すると主張し、耐震性における構造物のもつ靱性の重要性を指摘した<sup>9)</sup>。

構造物がどの程度の塑性変形に耐えられるか、また非線型応答結果がどの程度の塑性変形に達しているかを調べる基準として Newmark は全塑性変形の弾性変形に対する比を ductility factor と定義した<sup>24)</sup>。この定義は構造物の地震動に対する応答を議論する場合にしばしば用いられてきた。

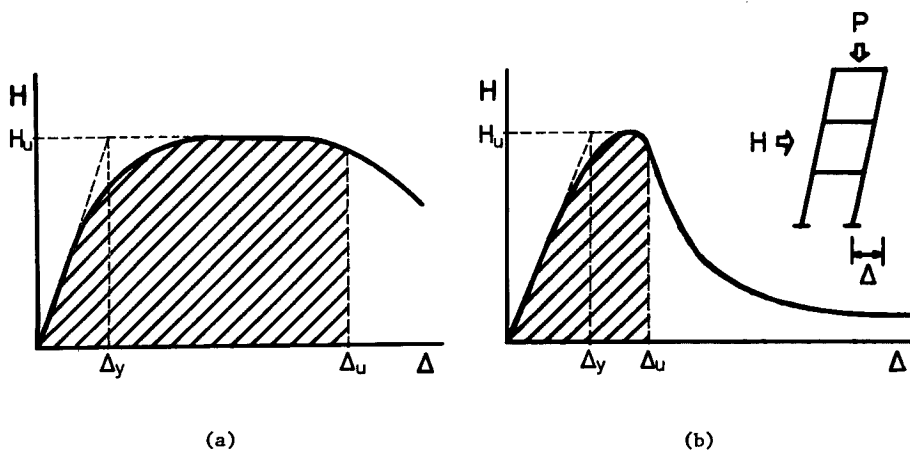


Fig. 1 Energy absorption capacity of frames.

Fig. 1 は単調な水平力が加わったときの 2 種類の骨組の性状を示したものである。最大耐力  $H_u$  は降伏強度、安定限界などで決まり、変形限界  $\Delta_u$  は鋼材の破断、コンクリートの圧壊、鋼部材の局部座屈や横座屈などによる急激な耐力低下、使用限界などによって決まるであろう。(a), (b) 両骨組の耐力は同じであっても、変形限界までに消費されるエネルギーは (a) の方が大きく、耐震的に優れている。また Fig. 2 はくり返し水平力を受ける骨組の履歴曲線の例である。この場合の変形限界は上記のほか、くり返しによる疲労や劣化も影響するからくり返し回数にも関係してくる。(a) の方が変形限界までに吸収しうるエネルギーが大であるとすれば、耐震的にも優れているといえる。

ここではまず各種の構造物をもつ粘性減衰について触れ、次に構造減衰に置換する方法について述べる。さらに材料、部材、接合部ならびに構造物の全体としての履歴特性について述べる。

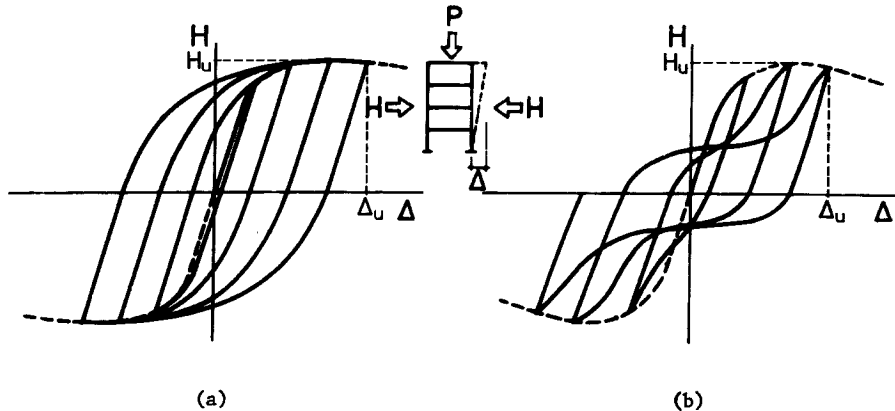


Fig. 2 Hysteresis loops of frames under repeated horizontal loading.

## 2. 粘性減衰と構造減衰

### 2.1 粘性減衰

既往の実験から得られた粘性減衰定数  $\nu$  (限界減衰に対する比) を材料別に大まかに整理すると、Table 1 に示すように鋼で 0.05~0.10%, コンクリートおよび鉄筋コンクリートで無きれつ状態では 0.5%, きれつのある状態では 1~2% である<sup>77)</sup>。プレストレストコンクリートの場合、プレストレスが十分でひび割れが生じない場合に 1.0%, 細いひびわれの生じた状態で 2.0% 程度である<sup>87)</sup>。

鋼構造物の減衰は、接合部の種類によってかなり影響をうける。文献(77)では設計荷重の 70% 位の荷重下で概略の値として、Table 2 に示すように溶接組立材で 0.5%, ボルト (高力ボルト) 組立材で 1%, リベット組立材で 2% という値を示している。文献(25)では裸の鋼構造物一般として 1~3%, コンクリートの純骨組として 1~8%, 通常の建物では 5~15% 程度としている。

建築構造物や橋梁などの粘性減衰定数を求めるには、通常起振機によって振動させて共振曲線から求める方法と、横から引張ったワイヤーを切断したり、あるいは起振機を急激に止めることによって生ずる自由振動によって求める方法などがとられるが、エネルギーが地下に逸散するので、上部構造だけの内部減衰を取り出すことは難しい。建築構造物についてあらゆる構造種別を一まとめにしてみたとき、1 次振動に対する減衰定数の測定結果をみると 1~10% とかなりの巾がある<sup>12, 16, 17, 25, 37, 50, 51, 58, 60, 70, 77, 84, 85)</sup>。また純鉄骨の建築の骨組だけの場合に Table 3 に示すように 2~3% 程度であったものに、仕上材をつけてから測ると 5~6% になった例でも明らかのように、2 次部材は内部減衰に大きな影響を与える<sup>51)</sup>。最近日本で行なわれている高層建築の実用設計のための動的解析には、鋼構造の場合 2~3%, 鉄筋コンクリートや鉄骨鉄筋

Table 1 Damping values of construction materials.

Material		Damping Factor (%)
Steel		0.05-0.1
Plain Concrete	Without Cracks	0.5
	With Cracks	1-2
Reinforced Concrete	Without Cracks	0.5
	With Cracks	1-2
Prestressed Concrete	Without Cracks	1
	With Cracks	1-2

Table 2 Typical damping values for different construction methods.

Method of Construction	Damping Factor (%)
Welded Assembly	0.5
Bolted (with High-strength Bolts) Assembly	1
Riveted Assembly	2

Table 3 Damping factor of a 9-story steel frame building.

Construction Stage	Damping Factor (%)
1. After the Erection of steel Frames	2.6-3.1
2. After the Casting of Floor Slabs	2.8-3.0
3. After the Completion of the Building	4.8-6.3

コンクリート構造の場合3～5%程度の値が慣習としてとられているが、文献(85)にはこれらの最近の高層建築の振動実験の資料が集められている。

文献(47)には橋梁の減衰性能に関する一般的記述と、現存する橋梁についての減衰定数の実測結果が述べられている。橋梁の場合の減衰定数は0.5～2%程度のものである<sup>47,77)</sup>。文献(22)では吊橋の測定結果からこの値は0.4～0.6%の間にあるとしている。文献(115)によると、橋の減衰の大部分は接合部や支点に起因するため、構成材料には関係せず、吊橋の場合0.5～1%、その他の橋ではスパンに関係し、スパン40m以上の場合1%前後、40m以下の場合1.5%程度である。またアーチダムでは0.2～0.5%が<sup>46)</sup>、また鉄塔では2～3%という値が報告されている<sup>79)</sup>。

粘性減衰として取扱われている微小振動から得られた減衰定数にも、ひび割れ面の摩擦、接合部の摩擦、地下逸散によるもの、その他の多くの種類の減衰が複合されたものであり、それらが完全に分離して解明されない限り、それらの値の適用性については限界があるといえる。

## 2.2 構造減衰と等価粘性減衰

構造物の弾性領域における内部減衰は前述のように非常に小さいが、構造物の変形が大きくなり、部材や接合部が非弾性域に入ると、いわゆる構造減衰すなわちこれらの塑性変形によるエネルギーの吸収が大きくなる。この構造減衰によって地盤から構造物に伝わった振動エネルギーを吸収して、構造物を破壊からのがれさせることができる。このような場合の構造減衰の作用の概要をみるためによく用いられるのが、等価粘性減衰の考え方である。これは Jacobsen がはじめて導入した考え方<sup>2)</sup>、正弦波の外力を受けて非線型の定常振動をする振動系をそれと同じ共振周期をもち1サイクル当りのエネルギーの消費が等しい粘性減衰定数をもつ線型振動系に置換するものである。

すなわち Fig. 3 のような復元力特性をもつ系では、バネ定数が一定にならないが、これを直線 AOC で表わされるバネ定数に置きかえ、そのかわりループ ABCDA の面積に相当する粘性減衰すなわち等価粘性減

衰定数をもたせる。これを  $\nu_{eq}$  とすると、

$$\nu_{eq} \equiv \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\text{ループ ABCDA の面積}}{\Delta OAE + \Delta OCF} \equiv \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

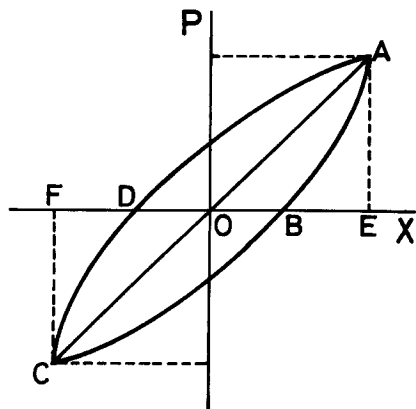


Fig. 3 Hysteresis characteristics of a nonlinear system.

となる。

この方法はエネルギー消費量をあらわす履歴曲線の面積  $\Delta W$  を、これに関連したエネルギー量  $W$  で割って無次元化するエネルギー比法であるが、 $W$  のとり方には後述のように種々の方法が考えられる。

Jacobsen は、その骨格曲線が線型、軟化バネ型、硬化バネ型である 3 種の振動系があるものとして、 $\nu_{eq}$  を求め、等価粘性減衰の概念は任意の非線型系に簡単に適用することはできないことを示し、結論として、近似公式として(2)式を使ってよいとした<sup>21)</sup>。

$$\nu_{eq} \equiv \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\text{ループの面積}}{\text{骨格曲線の下側の面積}} \equiv \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

Fig. 4 において Jacobsen の提案する  $W$  は  $W_3$  であるが、このほかに  $W_1$ <sup>45)</sup>,  $W_2$ <sup>3538)</sup>,  $W_4$  があり、文献(81)には Ramberg-Osgood 型の履歴曲線を用いた場合の  $W_1 \sim W_4$  の値が示されている。通常の軟化バネ型の履歴特性をもつ系では振幅が大きくなると共振周期が延びるので、Caughey は最小二乗法を用いて等価剛性と等価粘性減衰とを評価する方法を提案した<sup>19)</sup>。

$$\begin{aligned} W_1 &= A + B + C + D + E \\ W_2 &= D + E \\ W_3 &= C + D + E \\ W_4 &= E \end{aligned}$$

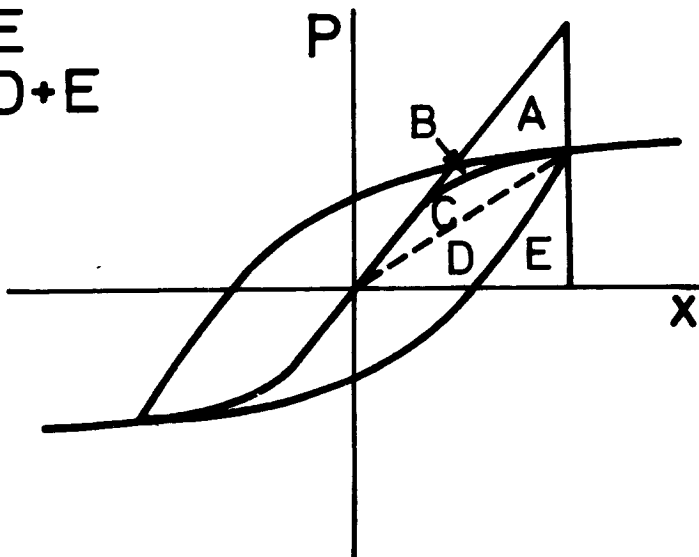


Fig. 4 Work areas taken for computation of  $\nu_{eq}$ .

文献(64)で Jennings は、1°共振振幅を合わせる方法、2°動的剛性を用いる方法、3°動的質量を用いる方法<sup>45)</sup>、4°一定の限界減衰を用いる方法、5°幾何学的剛性法<sup>38)</sup>、6°幾何学的エネルギー法<sup>21)</sup> について特徴を述べ、動的方法は理論的研究に役立つ、幾何学的方法是適用に便であり、振幅法は理解しやすく安全側の値を与えているとしている。Fig. 5 は完全弾塑性な履歴曲線をもつ場合の  $\nu_{eq}$  であるが<sup>64)</sup>、定義によってこのような差が生ずるので、実験値の整理などに際してはどの定義に従って  $\nu_{eq}$  を求めたかを明らかにしておく必要がある。

$\nu_{eq}$  のみを用いる方法では定性的な履歴減衰の性状を理解するにはよいが、履歴減衰が大きくなれば誤差が大きくなってこの考えの意味はなくなる。ある与えられた外乱のもとでの正確な応答量を知るには、復元力特性をそのまま使って解析をすればよい。 $\nu_{eq}$  の考えは、たとえば低サイクル疲労と耐震安全性の関係を確率統計的に扱うときなどに役立つものである<sup>93, 94)</sup>。部材接合部などの実験結果から得られたエネルギー消費性状を表わすのに  $\nu_{eq}$  の形を用いている文献は多い。

### 3. 履歴特性

#### 3.1 まえがき

地震力などの外力を受けたときの構造物の挙動を知るためには、構造物に加わる荷重と変形との関係を知る必要がある。構造物の非線型振動を取扱った初期においては、1 質点とバネとからなる系として取扱われていたものが、次第に多質点系に置換するようになったが、この段階では層に加わるせん断力と変形との関係が必要である。最近では部材や接合部などの応力と変形との関係から出発して骨組のままでの動的解析を行なうこともできるようになった<sup>9, 18, 34, 43, 55, 56, 72, 73, 78, 89, 107)</sup>。応答結果から構造物の各部分に生じているひずみなどを調べるには、質点系の解析をもとにするよりは、部材の応力と変形の関係をもとにして解析を行なうほうが望ましい。さらに進んで部材各部分の  $\sigma$ - $\epsilon$  関係に関する履歴特性を公式化して、これを用いて動的解析を行なうのが望ましいことも明らかである。

本節では上記のいずれの段階に限らず、よく用いられる履歴特性の公式化あるいは理想化について述べ、次に材料、部材および接合部、骨組全体の順で履歴特性の公式化について述べる。

#### 3.2 履歴特性の公式化

繰返し荷重を受ける材料、部材、接合部あるいは構造物の履歴特性のモデルとしてよく用いられる形は Fig. 6 のようである。

(a) は鋼材、鋼構造部材と骨組、溶接接合部などに通常用いられるもので、(b) および (c) はすべりの生ずるボルト接合部、座屈と塑性伸びがくり返される筋かい付骨組、せん断ひび割れを生じた鉄筋コンクリート部材および耐震壁などに用いられる。(d) はプレストレストコンクリート構造に用いられる。(e) および (f) は (a) を理想化したもので、(e) はひずみ硬化を無視する場合、(f) はひずみ硬化を考慮する場合の形であり、(g) は骨組に働く鉛直荷重が大きく P-d 効果が大きいような場合、(h) はひび割れ発生の前後で剛性の変化する鉄筋コンクリート部材や骨組、あるいは剛性の異なる骨組が組合わされた架構などに用いられる。(i), (j), (k) は他のものと組合わせて別の履歴曲線を作るのによく用いられる。

1935年に棚橋はりベット構造の接合部の履歴特性を Fig. 7 のような Masing のモデル<sup>1)</sup> と棚橋による Slip モデルを組合わせることによって説明した<sup>4, 28)</sup>。Masing のモデルでは荷重が増すときは上に凸、減少するときは下に凸で、除荷曲線 2-3-4-5 は骨格曲線 0-1-2 を 2 倍に拡大したものである。

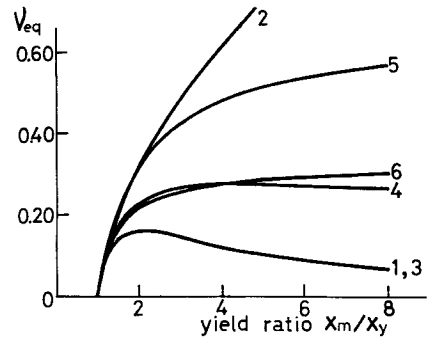


Fig. 5 Relationships between equivalent viscous damping coefficient and deflection amplitude.

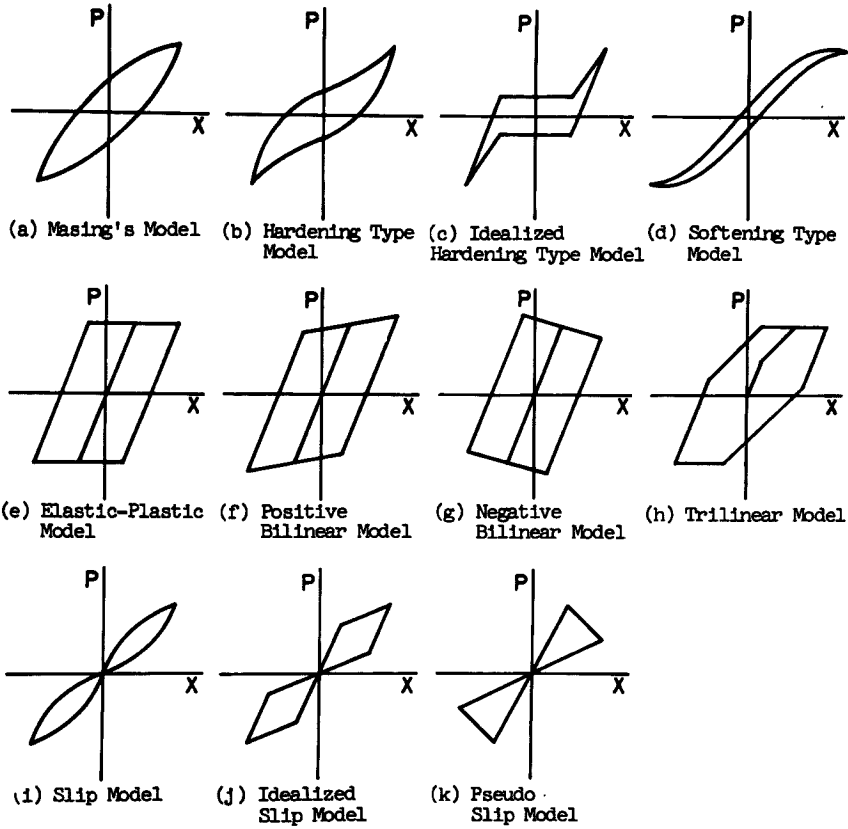


Fig. 6 Idealized hysteresis models.

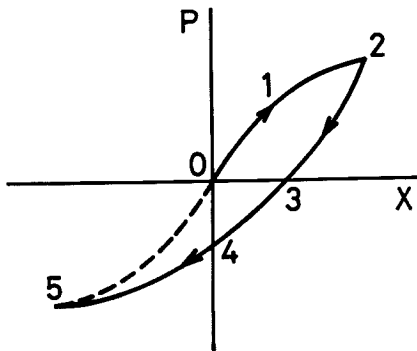


Fig. 7 Masing's model.

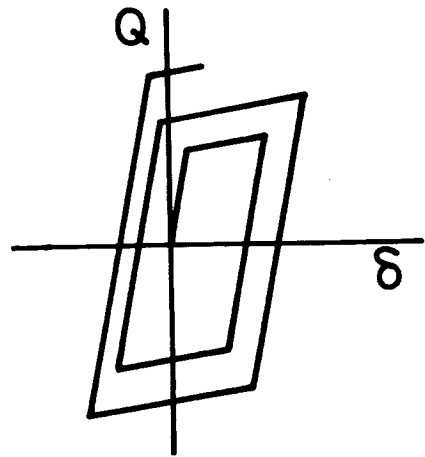


Fig. 8 Expanding model.

非線型の履歴特性として、最も多く用いられるのは完全弾塑性を含む bi-linear 型のモデルであろう。鋼材の  $\sigma-\epsilon$  と関係、部材のモーメント曲率関係、骨組の水平力 (Q)-水平たわみ ( $\Delta$ ) 関係もしばしば bi-linear 型におかれる。高層建築の下層部のように鉛直荷重が大きく、Q- $\Delta$  関係に P- $\Delta$  効果を考慮する必要があるとき Fig. 6 (g) のような負の bi-linear モデルが用いられる。bi-linear のモデル Q- $\Delta$  関係に用いた動的解析は文献 (13, 15, 23, 24, 34, 48) のほか数多くの解析で取扱われており、塑性変形による効果が量的に示されている。正の bi-linear な復元力特性の場合、振動は安定しているが、第 2 分岐の勾配が減り、negative bi-linear になると変形が次第に片方へづれてゆき、振動が発散する<sup>26)</sup>。

文献(76)では Fig. 8 のような復元力特性が次第に拡大してゆくモデルを用いている。これは柱の圧縮ひずみがくり返し曲げによって蓄積されてゆき、ひずみ硬化の影響で耐力が次第に上る状態を表わしている。

鉄筋コンクリート構造の骨組、耐震壁などでは変形の増大とともに次第に剛性が低下するので、このような性状を取入れたモデル化も試みられている<sup>(29, 53, 97, 98, 101)</sup>。Fig. 9 で I-III の間は完全弾塑性と同じであるが、負荷荷 IV の勾配は正の折返し点 (CYP<sub>p</sub>) と前の負の折返し点 (CYP<sub>n</sub>) とから決まる<sup>53)</sup>。

そのほか Fig. 10 のような退化 bi-linear モデル<sup>97)</sup> や、これと同じような退化の法則を用いた tri-linear のモデル<sup>98, 101)</sup> も試みられている Fig. 11。

文献(96)では鉄筋コンクリート構造物の履歴特性を表わすために、Fig. 6 の (f), (j), (k) の三つのモデルを組み合わせている。ここに (f) は材の曲げ変形, (j), (k) はせん断変形を表わしている。この組み合わせによって Fig. 12 のような硬化型の履歴特性をもち、その耐力が変形とともに低下していくことをモデル化している。また文献 (36) では鉄筋コンクリートの骨組で柱の軸力が大きい場合には Fig. 6 (k) の Pseudo slip モデルを用いることを提案している。

文献 (83) ではプレストレストコンクリート部材の履歴特性を Fig. 13 のような理想化した軟化型のモデルで表わしている。

履歴特性を曲線として取扱った代表的なものは Jennings によるものである<sup>33, 49)</sup>。これは Ramberg-Osgood<sup>7)</sup> の骨格曲線を用い、Masing の法則に従って履歴曲線を表わしたもので、Fig. 14 のようである。すなわち骨格曲線を 2 倍に引伸した形となっている。部材、接合部、骨組などの実験による履歴特性をこの曲線で表わしている文献は多い<sup>20, 54, 65, 80, 81, 108)</sup>。文献 (107) では部材のモーメント曲率関係を Ramberg-Osgood 型において骨組の動的解析を行なっている。文献 (74) では多くの線型弾性バネとすべり要素を組合わせたモデルによって Fig. 14 に似た Masing

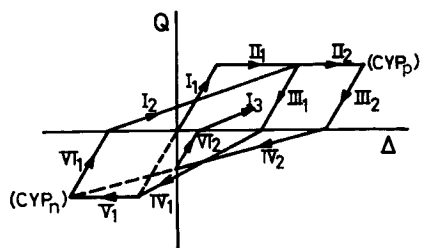


Fig. 9 Degrading bi-linear model.

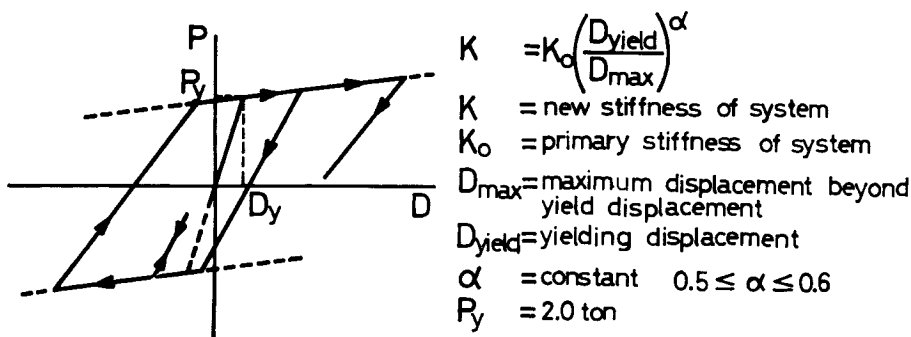


Fig. 10 Degrading bi-linear model.

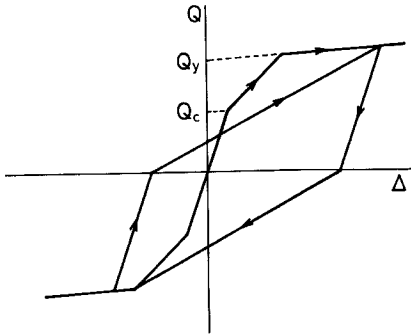


Fig. 11 Degrading tri-linear model.

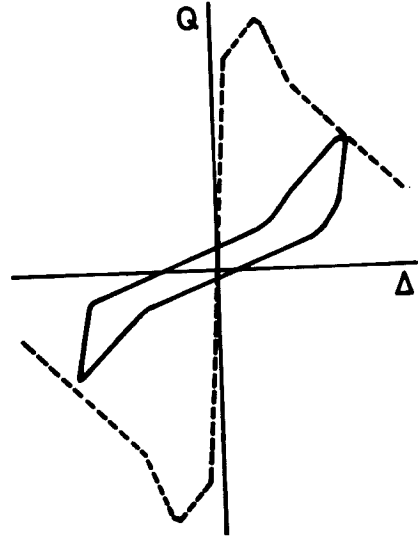


Fig. 12 S-shaped degrading model.

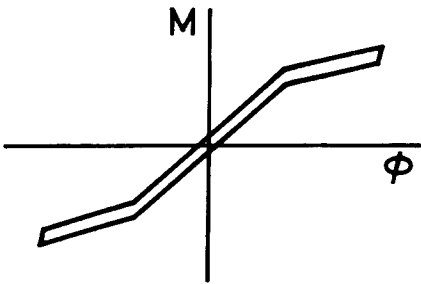


Fig. 13 Softening type model.

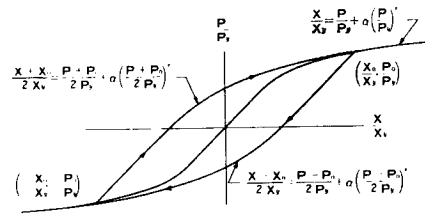


Fig. 14 Ramberg-Osgood model.

型の履歴曲線の公式化を行ない、エネルギー吸収やこのモデルを用いた動的応答の結果についても述べている。

以上は Masing 型の履歴特性であるが、筋かい付鉄骨骨組や鉄筋コンクリート骨組、あるいは柱がせん断破壊を起す鉄筋コンクリート骨組では硬化型の履歴曲線となる<sup>112, 113)</sup>。このような場合のモデル化についての文献は少ない。

Fig. 15 は筋かい付鉄筋コンクリートの骨組に関する履歴特性のモデルで骨格曲線に 2 個の定数、履歴曲線に 10 個の定数をもつ<sup>102)</sup>。文献(99)では 3 次曲線で履歴曲線を表わしている (Fig. 16)。

### 3.3 材料の履歴特性

金属、非金属材料など各種材料の履歴特性、減衰性については、文献(66)に基本的なことが詳細に述べられており、参考文献も多くあげられている。また、材料の低サイクル疲労については文献(30)に基本的なことが述べられている。

Fig. 17 は鋼材の単調荷重とひずみ振巾を漸増荷重したときの形を示したものであるが、図のように塑性ひずみ振巾の増大とともにループの面積、すなわち各サイクルで消費されたエネルギーは増大し、両者は log-log 目盛上で直線関係にある。また骨格曲線は Ramberg-Osgood の式であらわされ、履歴曲線は



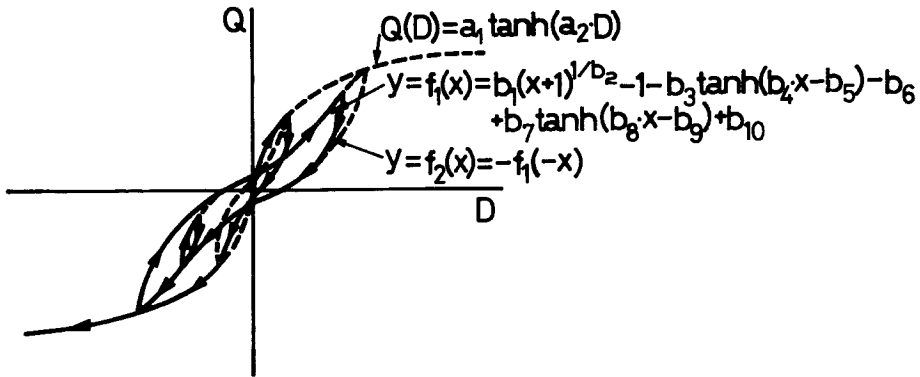


Fig. 15 S-shaped degrading model.

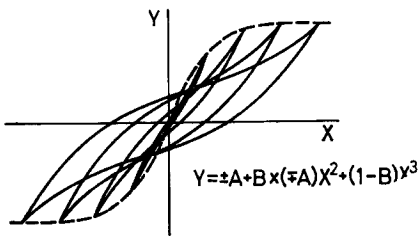


Fig. 16 S-shaped degrading model.

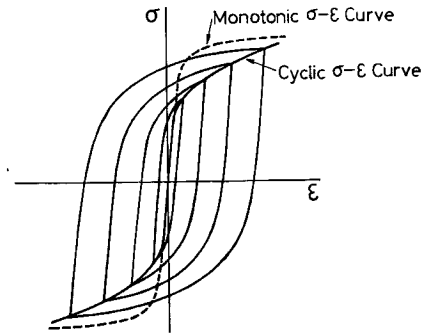


Fig. 17 Hysteretic stress-strain relationship of metal.

Masing の法則に従って表わすことができる。また解析の簡単のためにこれを完全弾塑性型や Positive bi-linear 型におくことも多い。

コンクリートについては単調載荷の場合でも耐力以後の塑性性状について未解決の問題が多く、弾塑性域にわたるくり返しについては実験資料が非常に少ない。Fig. 18 はコンクリートのシリンダーの大ひずみ領域におけるくり返し圧縮の試験結果の例で、もどりの曲線はひずみ振巾の増大とともに勾配がゆるやかになる<sup>31)</sup>。この文献には包絡線、除荷曲線、再負荷曲線の実験式が示されている。実際の曲げ部材のように引張りと圧縮とが交互に作用する場合、一定軸圧とくり返し曲げならびにせん断力が作用する部材におけるように、2 軸あるいは 3 軸応力下におけるくり返しに関する資料などはほとんどない。コンクリートと鋼材との付着履歴特性については文献(116)に実験結果とその公式化について述べられている。

### 3.4 部材と接合部に関する履歴特性

#### 3.4.1 鋼構造

鋼材の履歴法則を Ramberg-Osgood のような形あるいは bi-linear な形に仮定し、断面をいくつかの部分に集中させて、各部分に仮定した履歴法則を与えることによって、断面にくり返し曲げが作用するときのモーメント曲率 ( $M-\phi$ ) の履歴特性を求めることができ、これを用いて曲げ材の荷重変形の履歴特性を求めることができる<sup>88,100)</sup>。また文献(100)ではこのようなはりのエネルギー吸収能力、低サイクル疲労、全消費エネルギーなどについて述べている。一定軸力とくり返し曲げを受ける場合には漸増崩壊の問題がある<sup>44)</sup>。

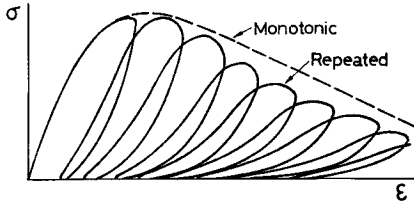


Fig. 18 Hysteretic stress-strain relationship of concrete.

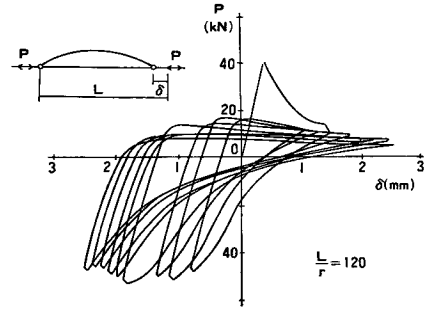


Fig. 20 Hysteresis loops of a bar under repeated tension-compression.

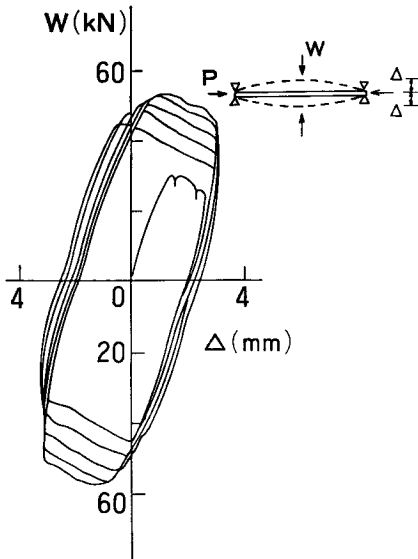


Fig. 19 Hysteresis loops of a beam-column.

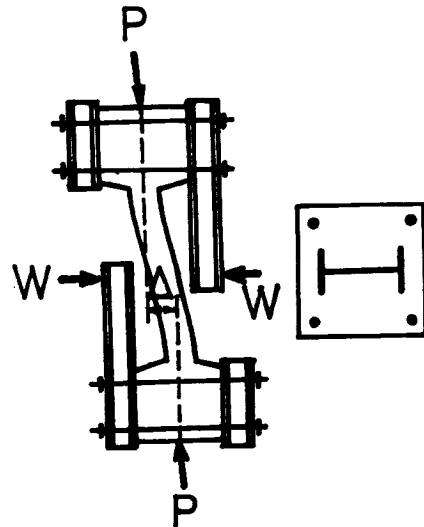


Fig. 21 Loading system of a column.

Fig. 19 のように一定軸力と正負のくり返し曲げを受ける材の履歴曲線は、 $P-\Delta$  効果によって拡大する履歴曲線第二分岐が負勾配の bi-linear になるが、ループは次第に拡大していくことが理論ならびに実験的に確かめられている<sup>44, 76, 88, 100, 111, 113</sup>。

曲げ材あるいは曲げと圧縮を受ける材で横座屈を伴うような場合の履歴特性に関する研究はほとんどない。曲げを受ける柱はりの溶接接合部の履歴特性は、はり部材の特性と同様に Fig. 6 (a) のようであるが、ボルトなどですべりの生ずる場合は Fig. 6 (b) または (c) のような形となるが、これらの履歴特性を理論的に求めるまでには到っていない<sup>59, 81, 67, 80, 108</sup>。

接合部パネルが降伏する場合も Fig. 6 (a) と同様な履歴特性を示す。筋かい材が座屈と引張降伏とのくり返しを受ける場合には Fig. 20 のような形となり、材の細長比が大きい程 1 サイクル当りの減衰性能は小さくなり、鉄筋ブレースのようなものでは定常振動では減衰は生じない<sup>103, 113</sup>。このような場合の解析については二、三の論文があるが未だ充分でない<sup>71, 103</sup>。

3.4.2 鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート構造

鉄筋コンクリート曲げ材については、理論的に求めた部材の履歴特性をモデル化する方法や<sup>31</sup>、鋼材につ

いては完全弾塑性型の  $\sigma-\epsilon$  関係を仮定し、コンクリートについては Fig. 18 を理想化したような  $\sigma-\epsilon$  関係を仮定して部材としての履歴曲線を求める方法が報告されている<sup>40,41,62,110</sup>。一定軸力とくり返し曲げを受ける鉄筋コンクリートまたは鉄骨鉄筋コンクリート部材についても、前記と同様な仮定を用いて求めることができる<sup>110</sup>。Fi.g 21 のように柱にせん断力が作用する場合には、ひび割れは必ずしも材軸に直角ではないから、理論解の精度は鋼構造の場合より低いものと思われる。Fig. 22 はこのような載荷法のもとで曲げ破壊を起こす鉄骨鉄筋コンクリート柱の履歴曲線の例である。履歴曲線は安定し、しかも紡錘形で1サイクルで消費されるエネルギーは大きい。Fig. 23 は同じ載荷法でせん断破壊したもので、ループはS字形でエネルギー消費能力は小さく、荷重のくり返しによる耐力低下も大きい。このようにせん断破壊を起こす場合の理論解は全く試みられていない。

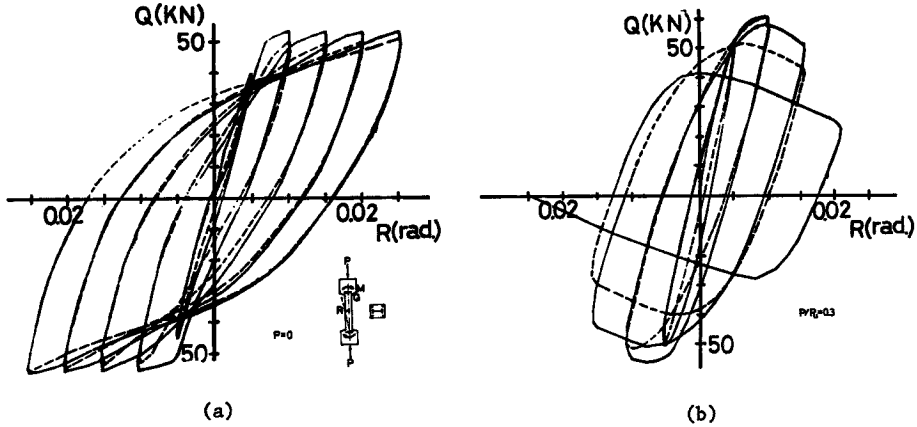


Fig. 22 Hysteresis loops of concrete-encased columns with full-web steel cross section under constant axial compression and repeated shear force failing in flexure.

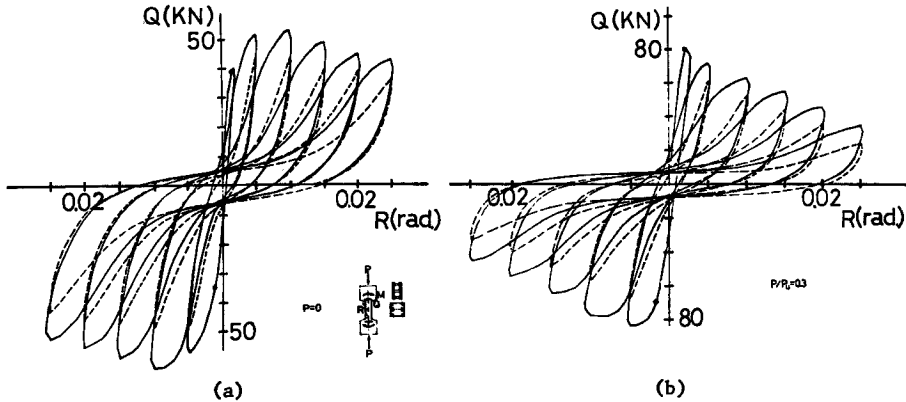


Fig. 23 Hysteresis loops of concrete-encased columns with open-web steel cross section under constant axial compression and repeated shear force failing in shear.

鉄筋コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリートなどの柱はり接合部のパネルがせん断で降伏する場合は、部材のせん断と同様な性状を示すが、この場合の理論曲線も全く試みられていない。

なお、鉄筋コンクリートの耐震壁についても多くの実験があるが、理論的に履歴曲線を求める段階には到っていない。最近、鉄筋コンクリート耐震壁の中に鉄骨ブレースをうめ込んだものも組立式鉄骨鉄筋コンクリート構造に用いられているが、これらについても理論曲線は求められていない。

### 3.5 骨組の履歴特性

#### 3.5.1 鉄骨骨組

Fig. 24 は一定の鉛直荷重と、くり返し水平力をうける筋かいのない骨組の実験結果である。このような場合について解析は余りないが、はりに対しては bi-linear な  $M-\phi$  関係、柱材に対しては Fig. 19 の

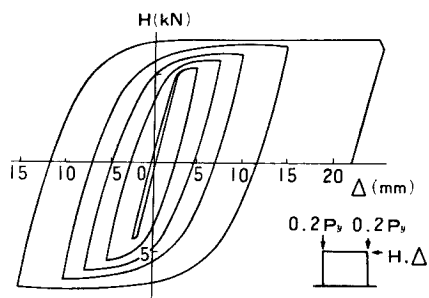


Fig. 24 Hysteresis loops of a braced steel full-scale portal frame under repeated horizontal loading.

ような  $M-\phi$  関係を用いて実験による履歴曲線をかなりの精度で追跡できる<sup>103)</sup>。Fig. 25 (a) は筋かいのある骨組の履歴曲線の実験値である。筋かい材については塑性ヒンジを仮定し、筋かいと骨組との相互作用を無視した解析で Fig. 25 (b) に示すように実験値をある程度追跡できるが<sup>103)</sup>、この問題の解明は今後の課題である。

#### 3.5.2 鉄骨コンクリート、プレストレストコンクリート、ならびに鉄骨鉄筋コンクリートの骨組。

文献 (32, 36, 50, 52, 69, 82, 102, 105) には鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートの骨組の実験資料が載っており、これらの骨組の履歴特性やエネルギー消費について述べられている。Fig. 26 は鉄骨鉄筋コンクリート骨組の履歴曲線の例である<sup>112)</sup>。

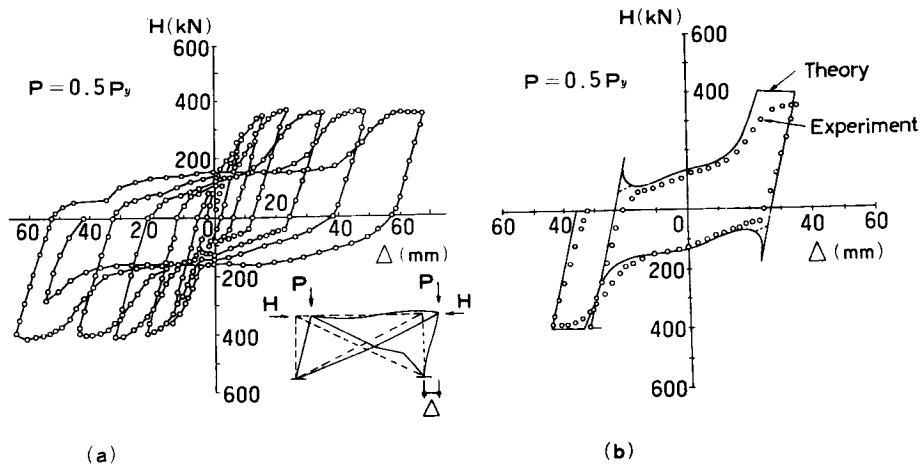


Fig. 25 Hysteresis loops of a braced steel full-scale portal frame under repeated horizontal loading.

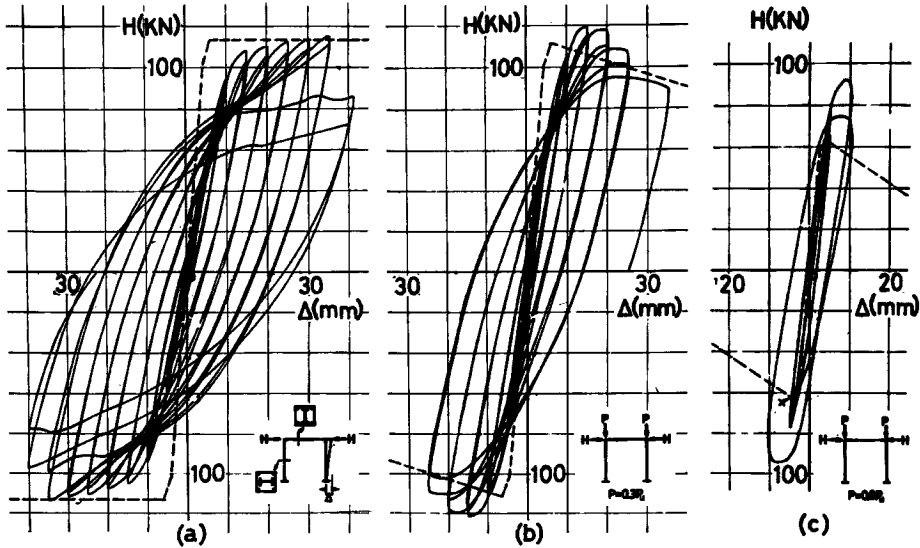


Fig. 26 Hysteresis loops of concrete-encased portal frame with full-web steel cross section under repeated horizontal loading.

#### 4. 結 論

未解決の問題点をあげると次のようである。

1. 等価的な量として測定されている粘性減衰の量についての資料が必要である。各種構造の構造体自身ばかりでなく仕上材の影響などの資料も必要である。減衰を正確に評価するためには等価的な減衰として扱われている減衰の要素を、粘弾性、内部摩擦、塑性、地下逸散等の要素に分離できることが望ましい。
2. 種々の構造に関する構造減衰性に関する資料が必要である。
3. 次の各履歴特性に関する実験的ならびに理論的研究が必要である。
  - a. 材料とくにコンクリートの履歴特性、とくに多軸応力下における履歴特性
  - b. 横座屈を伴うような鉄骨造の曲げ材や曲げ圧縮材の履歴特性
  - c. 種々の接合法をもつ鉄骨造の接合部の履歴特性
  - d. 引張による降伏と圧縮による座屈が繰返される鉄骨筋違の履歴特性
  - e. 鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート造の曲げ材、曲げ圧縮材、接合部の履歴特性、とくにせん断破壊を伴うような場合の履歴特性
  - f. 鉄筋コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート造の耐震壁の履歴特性
  - g. 鉄骨筋かいなしおよび筋かい付き骨組の履歴特性
  - h. 鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート構造物の履歴特性
4. 耐震設計の観点からすれば、多軸応力下における材料の応力ひずみ関係から出発して、構造物全体の履歴特性を理論的に求めることができるようにする必要がある。
5. 地震に対する構造物の安全性は、応答解析の結果を破壊規準に照して検討することによってのみ検討できるものであるから、低サイクル疲労による構造物の劣化、あるいは履歴曲線の劣化や転移などを考えた構造物の破壊規準を検討する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) Masing, G.: Eigenspannungen und Verfestigung Beim Messing, Proc. 2nd International Congress for Applied Mechanics, Zurich, 1926.
- 2) Jacobsen, L. S.: Steady Forced Vibration as Influenced by Damping, Trans. ASME, Vol. 52, No. 22, Part 1, 1930, p. 169.
- 3) Sezawa, K. and K. Kanai: Vibration of Building with Damping, Bull. Earthquake Research Institute, Tokyo University, Vol. XII, Part 4, Dec. 1934.
- 4) Tanabashi, R.: Tests to Determine the Behavior of Riveted Joints of Steel Structures under Alternate Bending Moments, Memoirs of the College of Engineering, Kyoto Imperial University, Vol. VIII, No. 4, 1935, p. 164.
- 5) Reissner, E.: Stationäre Axialsymmetrische, durch eine Schüttelnde Masse Erregte Schwingungen eines Homogenen Elastischen Halbraums. Ingenieur-Archiv, Vol. VII, 1936, p. 381.
- 6) Tanabashi, R.: The Resistance of Structures to Earthquake Shocks, Memoirs of the College of Engineering, Kyoto University, Vol. IX, No. 4, 1937, p. 191.
- 7) Ramberg, W. and W. R. Osgood: Description of Stress-strain Curves by Three Parameters, NACA TN 902, July, 1943.
- 8) Arnold, R. N., G. N. Bycroft and G. B. Waeburton: Forced Vibrations of a Body on an Infinite Elastic Solid, J. Applied Mechanics, Vol. 22, Sept. 1955, p. 391.
- 9) Tanabashi, R., T. Kobori, K. Kaneta and H. Muguruma: Ultimate Deflection Design Part I Consideration from the Viewpoint of Earthquake Resistant Structure, Proc. Symposium on Safety of Structure, Sept. 1955.
- 10) Toriumi, I.: Vibrations in Foundations of Machines, Technology Report of the Osaka University, Vol. 5, No. 146, 1955, p. 103.
- 11) Bycroft, G. N.: Forced Vibrations of a Rigid Circular Plate on a Semi-Infinite Elastic Space and on an Elastic Stratum, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 248, Series A, 1956, p. 327.
- 12) Hisada, T. and K. Nakagawa: Vibrations of Buildings in Japan Part II, Vibration Tests on Various Types of Building Structures up to Failure, Proc. 1st World Conference on Earthquake Engineering, 1956, p. 7II-1.
- 13) Tanabashi, R.: Studies on the Nonlinear Vibrations of Structures Subjected to Destructive Earthquakes, Proc. 1st World Conference on Earthquake Engineering, 1956, p. 6-1.
- 14) Tajimi, H.: Basic Theories on Aseismic Design of Structures, Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Vol. 8, No. 4, 1959, p. 170.
- 15) Ando, N.: Nonlinear Vibrations of Building Structures, Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1960, p. 1045.
- 16) Blume, J. A.: A Reserve Energy Technique for the Earthquake Design and Rating of Structures in the Inelastic Range, Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1960, p. 1061.
- 17) Blume, J. A. and J. F. Meehan: A Structural-dynamic Research Program on Actual School Buildings, Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1960, p. 1297.
- 18) Berg, G. V. and D. A. Dadeppo: Dynamic Analysis of Elasto-plastic Structures, Proc. ASCE, Vol. 86, EM2, Apr. 1960
- 19) Caughey, T. K.: Sinusoidal Excitation of a System with Bilinear Hysteresis, J. Applied Mechanics, Dec. 1960, p. 640.
- 20) Igarashi, S. and N. Taga: Hysteretic Characteristics and Structural Damping of Steel Structures

- under Alternate Lateral Loading, Trans. Architectural Institute of Japan, No. 120, Feb. 1966, p. 15.
- 21) Jacobsen L. S.: Damping in Composite Structures, Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1960, p. 1029.
  - 22) Kubo, K.: Aseismicity of Suspension Bridges Forced to Vibrate Longitudinally, Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1960, p. 913.
  - 23) Response Analyzer Committee: Non-linear Response Analyzers and Application to Earthquake Resistant Design 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1960, p. 649.
  - 24) Veletsos, A. S. and N. M. Newmark: Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions, Proc. 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1960, p. 895.
  - 25) Housner, G. W.: Vibration of Structures Induced by Seismic Waves, Shock and Vibration Handbook, Vol. III, McGraw-Hill, 1961, p. 50-1.
  - 26) Hisada, T., K. Nakagawa and M. Izumi: Earthquake Response of Structures Having Various Restoring Force Characteristics, Proc. Japan National Symposium on Earthquake Engineering, 1962, p. 63.
  - 27) Thomson, W. T. and T. Kobori: Dynamical Compliance of Rectangular Foundation on an Infinite Half-space, Dept. of Engineering Report No. 62-9, University of California, 1962, p. 1
  - 28) Tanabashi, R. and K. Kaneta: On the Relation between the Restoring Force Characteristics of Structures and the Pattern of Earthquake Ground Motions, Proc. Japan National Symposium on Earthquake Engineering, 1962, p. 57.
  - 29) Takeda, T.: Idealization of the Plastic Deformation of Reinforced Concrete Beams Subjected to the Alternate Loading, Trans. Architectural Institute of Japan, Vol. 76, Sept. 1962, p. 98.
  - 30) American Society for Testing and Materials: Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity, ASTM Special Technical Publication No. 378, 1964.
  - 31) Aoyama, H.: Moment-curvature Characteristics of Reinforced Concrete Members Subjected to Axial Load and Reversal bending, Proc. International Symposium of Flexural Mechanics of Concrete, 1964, p. 183.
  - 32) Bertero, V. and G. McClure: Behavior of Reinforced Concrete Frames Subjected to Repeated Reversible Loads, J. ACI, Vol. 61, Oct. 1964, p. 1305.
  - 33) Jennings, P. C.: Periodic Response of a General Yielding Structure, Proc. ASCE, Vol. 90, EM2, Apr. 1964, p. 131.
  - 34) Kobori, T. and R. Minai: Aseismic Design Method of Elasto-plastic Building Structures, Bulletin, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 68, Mar. 1964, p. 1.
  - 35) Medearis, K. and D. H. Young: Energy Absorption of Structures under Cyclic Loading, Proc. ASCE, ST1., Feb. 1964, p. 61.
  - 36) Odaka, T. and K. Saito: Experimental Study on the Restoring Force Characteristics in the Reinforced Concrete Structural Portal Frames, Trans. Architectural Institute of Japan, No. 106, Dec. 1964, p. 1.
  - 37) Penzien, J.: Damping Characteristics of Prestressed Concrete, J. ACI, Vol. 61, Sept. 1964, p. 1125.
  - 38) Rosenbluth, E. and I. Herrera: On a Kind of Hysteretic Damping, Proc. ASCE, Vol. 90, EM4, Aug. 1964, p. 37.
  - 39) Sinha, B. P., K. H. Gerstle and L. G. Tulin: Stress-strain Relations for Concrete under Cyclic Loading, J. ACI, No. 61-12, Feb. 1964, p. 195.
  - 40) Sinha, B. P., K. H. Gerstle and L. G. Tulin: Response of Singly Reinforced Beams to Cyclic Loading, J. ACI, No. 61-56, Aug. 1964, p. 1021.

- 41) Agrawal, G. L., L. G. Tulin and K. H. Gerstle: Response of Doubly Reinforced Concrete Beams to Cyclic Loading, J. ACI, No. 62-51, July 1965, p. 823.
- 42) Berg, G. V.: A Study of the Earthquake Response of Inelastic Systems, Proc. 34th Annual Convention of the Structural Engineers Association of California, Colorado, Oct. 1965, p. 63.
- 43) Clough, R. W., K. L. Benuska and E. L. Wilson: Inelastic Earthquake Response of Tall Buildings, Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1965, p. II-68.
- 44) Fujimoto, M. and H. Hagura: Research on the Elasto-plastic Analysis of Steel Section Subjected to Alternative Load, Trans. Architectural Institute of Japan, Part 1, No. 117, Nov. 1965, p. 10, Part 2, No. 121, Mar. 1966, p. 14, Part 3, No. 122, Apr. 1966, p. 1, Part 4, No. 125, July 1966, p. 8, Part 5, No. 133, Mar. 1967, p. 18.
- 45) Hudson, D. E.: Equivalent Viscous Friction for Hysteretic Systems with Earthquake-like Excitations, Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1965, p. II-185.
- 46) Hatano, T.: Vibration of Visco-elastic Body, Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1965, p. II-126.
- 47) Ito, M. and T. Katayama: Damping of Bridge Structures, Proc. Japan Society of Civil Engineers, No. 117, May 1965, p. 12.
- 48) Iwan, W. D.: The Dynamic Response of the One Degree of Freedom Bilinear Hysteretic System, Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1965, p. II-783.
- 49) Jennings, P. C.: Response of Yielding Structures to Statically Generated Ground Motion, Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1965, p. II-237.
- 50) Nakano, K.: Experiment on Behaviour of Prestressed Concrete Four Storied Model Structure under Lateral Force, Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. III, 1965, p. IV-572.
- 51) Watanabe, S., Y. Kida, and M. Higuchi: The Vibration Analysis of a Steel Structures: The Vibrational Test of Ohbayashi-gumi Building, Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1965, p. II-695.
- 52) Aoyama, H. T. Endo and T. Minami: Behavior of Reinforced Concrete Frames Subjected to Reversal of Horizontal Forces, Proc. 2nd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1966, p. 315.
- 53) Clough, R. W. and Johnston, S. B.: Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements, Proc. 2nd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1966, p. 227.
- 54) Igarashi, S., et al.: Plastic Behavior of Steel Frames under Cyclic Loading, Trans. Architectural Institute of Japan, No. 130, Dec. 1966, p. 8.
- 55) Kobori, T., R. Minai and T. Fujiwara: Response of Frames with Elastoplastic Joints to Earthquake, Proc. 2nd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1966, p. 215.
- 56) Kobori, T., R. Minai and T. Suzuki: Earthquake Response of Frame Structure Having Elastoplastic Joints, Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 9, Mar. 1966, p. 165, (in Japanese).
- 57) Muguruma, H., M. Tominaga and S. Okamoto: Mechanical Properties of Simply Supported Prestressed Concrete Beams under Repeated Loadings, RILEM International Symposium on the Effect of Repeated Loading of Materials and Structural Elements, Mexico City, Vol. V, Sept. 1966.
- 58) Nielsen, N. N.: Vibration Tests of a Nine-story Steel Frame Building, Proc. ASCE, Vol. 92, EM1, Feb. 1966, p. 81.
- 59) Popov, E. P.: Low-cycle Fatigue of Steel Beam-to-column Connections, RILEM International Symposium on the Effect of Repeated Loading of Materials and Structural Elements, Mexico City, Vol. VI, Sept. 1966.
- 60) Umemura, H., et al.: Forced Vibration Experiment on the Multi-story Steel Frames Apartment



- Building and its Analytical Study, Trans. Architectural Institute of Japan, No. 129, Nov. 1966, p. 1.
- 61) Yamada, M. and I. Nakaza: Low-cycle Fatigue to Riveted and High Strength Bolted Joints in Steel Beams, RILEM International Symposium on the Effects of Repeated Loading of Materials and Structural Elements, Mexico City, Vol. VI, 1966.
  - 62) Yamada, M. and H. Kawamura: Study on the Elasto-plastic Flexural Behavior of Reinforced Concrete Members Subjected to Axial Load (Part III), Trans. Architectural Institute of Japan, No. 136, June 1967, p. 15.
  - 63) Davenport, A. G.: Gust Loading Factors, Proc. ASCE, ST3, June 1967, p. 11.
  - 64) Jennings, P. C.: Equivalent Viscous Damping for Yielding Structures, Proc. ASCE, Vol. 94, EM1, Feb. 1968, p. 103.
  - 65) Kaldjian, M. J. and W. R. S. Fan: Earthquake Response of a Rambergosgood Structure, Proc. ASCE, ST10, Oct. 1968, p. 2451.
  - 66) Lazan, B. J.: Damping of Materials and Members in Structural Mechanics, Pergamon Press, 1968.
  - 67) Popov, E. P.: Performance of Steel Beams and their Connections to Columns during Severe Cyclic Loading, Contributions to the Expanded Discussion, 8th Congress of IABSE, Theme III, New York, Sept. 1968.
  - 68) Baron, F. and M. S. Venkatesan: Inelastic Response for Arbitrary Histories of Loads, Proc. ASCE, EM3, June, 1969, p. 763.
  - 69) Bertero, V. and B. Bresler: Seismic Behavior of Reinforced Concrete Framed Structures, 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969, p. B-2 109.
  - 70) Funabashi, I., K. Kinoshita and H. Aoyama: Vibration Tests and Tests to Failure of a 7-stories Building Survived a Severe Earthquake, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969. p. B-1 26.
  - 71) Fujimoto, M., T. Segawa and Y. Matsumoto: Elastic-plastic Analysis of a Braced Frame under Repeated Loading, Proc. of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, Aug. 1969. p. 1213.
  - 72) Goel, S. C.:  $P-\Delta$  and Axial Column Deformation in Aseismic Frames, Proc. ASCE, ST8, Aug. 1969.
  - 73) Hanson, R. D. and W. R. S. Fan: The Effect of Minimum Cross Bracing on the Inelastic Response of Multi-story Buildings, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1969, p. A-4 15.
  - 74) Iwan, W. D.: The Distributed-element Concept of Hysteretic Modeling and its Application to Transient Response Problems, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1969, p. A-4 45.
  - 75) Karsan, I. D. and J. O. Jirsa: Behavior of Concrete under Compressive Loadings Proc. ASCE, ST12, Dec. 1969, p. 2543.
  - 76) Kato, B. and H. Akiyama: The Ultimate Strength of the Steel Structures Subjected to Earthquake, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1969, p. A-4 59.
  - 77) Katayama, T.: Damping Characteristics of Building Structures, Trans. Architectural Institute of Japan, No. 157, Mar. 1969, p. 11.
  - 78) Kobori, T., R. Minai and T. Fujiwara: Earthquake Responses of a Frame Structure Having Elasto-plastic Joints, Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 12A, Mar. 1969, p. 321.
  - 79) Nielsen, N.: Dynamic Response on a 90-FT Steel Frame Tower, Proc. 4th World Conference

- on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969, p. B-1 126.
- 80) Popov, E. P. and R. B. Pinkney: Reliability of Steel Beam-to-column Connections under Cyclic Loading, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1969, p. B-3 15.
  - 81) Rea, D., R. W. Clough, J. G. Bouwkamp and U. Vogel: Damping Capacity of a Model Steel Structure, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969, p. B-2 63.
  - 82) Shiga, T. and J. Ogawa: The Experimental Study on the Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Frames, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969, p. B-2 165.
  - 83) Spencer, R. A.: The Nonlinear Response of A Multistory Prestressed Concrete Structure to Earthquake Excitation, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1969, p. A-4 139.
  - 84) Tamura, R., M. Murakami, Y. Osawa et al.: Vibration Test of a Large Model Steel Frame with Precast Concrete Panel Until Failure, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969, p. B-2 15.
  - 85) The Group for Dynamic Tests of High-Rised Buildings: Summarized Report on Dynamic Tests of High-rised Buildings and Co-operative Plan For Largescale Vibration Tests in Japan, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969, p. B-1 111.
  - 86) Umemura, H. and H. Aoyama: Evaluation of Inelastic Seismic Deflection of Reinforced Concrete Frames based on the Tests of Members, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I, 1969, p. B-2 91.
  - 87) Higashi, Y. and M. Ohkubo: Static and Dynamic Loading Tests of Reinforced Concrete Frames with Thin Spandrel or Wing Walls, Proc. U. S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering, 1970, p. 225.
  - 88) Igarashi, S., et al.: Inelastic Behavior of Structural Steel Sections under Alternative Loading, Trans. Architectural Institute of Japan, No. 170, Apr. 1970, p. 39.
  - 89) Kobori, T., R. Minai, and T. Fujiwara: Torsional Response of Framed Structures Considering a Yield Surface in Elasto-plastic Joints, Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 13A, Mar. 1970, p. 287.
  - 90) Kobori, T. and S. Setogawa: Numerical Analysis on Foundation Vibration by Finite Element Technique, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 501.
  - 91) Kobori, T. and T. Suzuki: Foundation Vibrations on a Viscoelastic Multilayered Medium, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 493.
  - 92) Kobori, T., R. Minai and Y. Inoue: On the Earthquake Response of Structural Systems Considering the Interaction Effects of the Ground, Bull. of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 20, Part 2, Dec. 1970, p. 105.
  - 93) Minai, R.: On the Aseismic Safety of Building Structures, Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 13A, Mar. 1970, p. 5.
  - 94) Minai, R. and T. Suzuki: Reliability Analysis of Aseismic Safety of Elasto-plastic Structures Considering Random Fatigue, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 723
  - 95) Minai, R. and Y. Inoue: On Earthquake Response of Ground-structure Systems, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 41.
  - 96) Murakami, M., T. Nishikawa, H. Aoyama and Y. Osawa: A Study on the Cause of Damage to the Hachinohe Technical College due to 1968 Tokachi-oki Earthquake (Part 2), Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 803.
  - 97) Neilsen, N. N. and F. A. Imbeault: Validity of Various Hysteretic Systems, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 707.
  - 98) Omoto, Y., T. Takeda, T. Moritaka and K. Yoshioka: Experimental Studies on Response of Struc-

- tures to Shock Wave Part I Reinforced Concrete Structures, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 579.
- 99) Shiga, T., J. Ogawa, A. Shibata and J. Shibuya: The Dynamic Properties of Reinforced Concrete Frames, Proc. U. S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering, 1970, p. 346.
  - 100) Tanabashi, R., Y. Yokoo, T. Nakamura, et al.: Load-deflection Behaviors and Plastic Fatigue of Wide-flange Beams Subjected to Alternating Plastic Bending, Trans. Architectural Institute of Japan, Part I, No. 175, Sept. 1970, p. 17, Part II, No. 176, Oct. 1970, p. 25, Part III, No. 177, Nov. 1970, p. 35.
  - 101) Takeda, T., M. A. Sozen and N. N. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 357.
  - 102) Tani, S., S. Nomura, T. Nagasaka and A. Hiramoto: Study on Restoring Force Characteristics of Reinforced Concrete Structures Static Analysis Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970, p. 691.
  - 103) Wakabayashi, M.: The Behavior of Steel Frames with Diagonal Bracings under Repeated Loading, Proc. U.S. — Japan Seminar on Earthquake Engineering 1970, p. 328.
  - 104) Wakabayashi, M., C. Matsui, K. Minami and I. Mitani: Inelastic Behavior of Full Scale Steel Frames, Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, N. 13A, Mar. 1970, p. 329.
  - 105) Blakeley, R. W. G. and R. Park: Seismic Resistance of Prestressed Concrete Beam-column Assemblies, J. ACI, Vol. 68, Sept. 1971, p. 677.
  - 106) Brown, R. H. and J. O. Jirsa: Reinforced Concrete Beams under Load Reversals, J. ACI, Vol. 68, May 1971, p. 380.
  - 107) Kobori, T., R. Minai and T. Fujiwara: Response Analysis of Elasto-plastic Frame Structure with Ramberg-OSGOOD Characteristics, Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 14A, Apr. 1971, p. 301.
  - 108) Krawinkler, H., V. Bertero and E. P. Popov: Inelastic Behavior of Steel Beam-to-Column Subassemblages, Earthquake Engineering Research Center Report No. EERC 71-7, University of California, Berkeley, Oct. 1971.
  - 109) Tanabashi, R., Y. Yokoo, M. Wakabayashi, T. Nakamura and H. Kunieda: Deformation-history Dependent Inelastic Stability of Columns Subjected to Alternating Loading, Preprint for RILEM Symposium on Experimental Analysis of Instability Problems on Reduced and Full-scale Models, Buenos Aires, Sept. 1971.
  - 110) Wakabayashi, M. and T. Yamaguchi: Elasto-plastic Behavior of Steel Reinforced Concrete Members, Trans. Architectural Institute of Japan, Extra, Nov. 1971, p. 777.
  - 111) Yamada, M., et al.: Elasto-plastische Biegeformänderungen von Stahlstützen mit I-Querschnitt, Der Stahlbau, Vol. 40, Ht. 3, Mar. 1971, p. 65.
  - 112) Naka, T., M. Wakabayashi and B. Kato: Elasto-plastic Behavior of Encased Structures, Invited Discussion to Symposium on Planning and Design Tall Buildings, ASCE-IABSE Joint Committee, 1972.
  - 113) Wakabayashi, M.: Frames under Strong Impulsive, Wind or Seismic Loading, State of Art Report to Symposium on Planning and Design of Tall Buildings, ASCE-IABSE Joint Committee, 1972.
  - 114) Wakabayashi, M.: Studies on Damping and Energy Absorption of Structures, Introductory Report for IABSE-Lisbon Symposium, 1973, p. 27.
  - 115) Ito, M., T. Katayama and T. Nakazono: Some Empirical Facts on Damping of Bridges, Preliminary Report for IABSE-Lisbon Symposium, 1973, p. 95.

- 116) Morita, S. and T. Kaku: Local Bond Stress-Slip Relationship under Repeated Loading, Preliminary Report for IABSE-Lisbon Symposium, 1973, p. 221.

## STUDIES ON DAMPING AND ENERGY ABSORPTION OF STRUCTURES

by *Minoru* WAKABAYASHI

### **Synopsis**

The significance of damping and energy absorption of structures and structural elements under earthquake excitation is first described, and then the details of these phenomena are discussed in relation to the equivalent viscous damping coefficient. Several mathematical models representing the hysteretic behavior of materials, members, connections and frames are introduced. The state-of-art is outlined for each of these subjects, referring to the recent publications. Finally, some important problems are indicated.