

## 構造物の復元力特性の形状が動的応答に 及ぼす影響について

若 林 實・渡 辺 泰 志

### ON THE INFLUENCE OF THE SHAPES OF HYSTERESIS LOOP OF STRUCTURES ON THEIR DYNAMIC RESPONSES

By *Minoru WAKABAYASHI, Yasushi WATANABE*

#### Synopsis

There are many loop's shapes in experimentally obtained hysteresis loops of structures. Thus, it is needed to investigate behaviours of these structures under the excitation of earthquakes using mathematical hysteresis model which can express many shapes of hysteresis loop.

In this paper, it is tried to investigate behaviours of structures which have many types of hysteresis loop under the excitation of white noise. It is shown that the hysteresis area of the loop has much influence on the responses; max. displacement, max. ductility ratio, and if the area is the same one, the resulting responses are almost the same in spite of its shape.

#### 1. 序

以前より、構造物を対象とした一質点系弾性及び弾塑性地震応答解析は、数多くなされて来ている。そうした多くの研究成果を基に、一質点系弾性地震応答解析の結果によって一質点系弾塑性地震応答の最大値を予測する為の資料や方法などが発表されて来ている。しかし、それらのほとんどは、バイリニア型モデルや D-Tri 型モデルを使用した弾塑性地震応答解析によるものである。バイリニア型モデルも、D-Tri 型モデルも、その簡易性については非常に優れているが、実際の構造物に見られるようなループの特性を、必ずしも良く表現しているとは言えない。

一般に、実験などにおいて見られる構造物等の履歴ループを特徴付けている因子としては、次のようなものがあげられる。すなわち、

- ・スケルトンカーブ
- ・ループの面積
- ・ループのすべり性状

などである。上述のように、バイリニア型モデルや、D-Tri 型モデルを弾塑性地震応答解析に使用することは、バイリニア型モデル、あるいは D-Tri 型モデルによって表現し得るような履歴特性を有した構造物に対しては、比較的信頼性のおける応答結果を与えるであろう。しかし、短柱や剪断破壊を伴うような耐震壁等の耐震要素に見られるような、バイリニア型モデルや D-Tri 型モデルによっては表現し難い履歴特性を持った耐震要素を有する構造物に対しては、前述のバイリニア型モデルや D-Tri 型モデルを使用することによって得られた結果が、どれだけの信頼性を有し得るか、非常に疑問となるところである。また、スケルトンカーブについても、その形状が地震応答にどのような影響を与えるかについての研究なども比較的すくない。動的耐震設計の立場から考えれば、構造物の履歴特性が何らかの形で、比較的数少ないパラメータによって特徴付けられ、それらのパラメータと関係付けられた復元力特性モデルを使用した弾塑性地

震応答結果が得られていれば、非常に都合がよいと考えられる。

本論文においては、以上のような観点に立って、履歴特性の幾何的要素が、一質点系弾塑性地震応答にどのような影響を与えるかについて調べる。

### 2. 解析方法

#### i) 基礎方程式について

一般に、一質点系振動子を支配する微分方程式は(1)式のように与えられる。

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + F(x(t)) = -m \cdot \ddot{y}(t) \dots \dots \dots (1)$$

$m$ : 質量,  $c$ : 減衰係数,  $\ddot{y}(t)$ : 地動加速度,  $x(t)$ : 質点の相対変位,  $\dot{x}(t)$ : 質点の相対速度,  $\ddot{x}(t)$ : 質点の相対加速度,  $t$ : 時間,  $F(x(t))$ : 復元力

本論文では(1)式における  $F(x(t))$  を文献(1)で説明した復元力特性モデルによって表現し,  $\ddot{y}(t)$  として後述するホワイトノイズを使用し, 四次のルンゲークッタ法を使って数值的に(1)式を解く手法を採用した。すなわち, 第  $k$  ステップにおける変位, 速度をそれぞれ  $x, \dot{x}$  とした時に, 第  $k+1$  ステップへ移行する際の変位増分  $\Delta x$ , 及び速度増分  $\Delta \dot{x}$  を求め,  $x + \Delta x, \dot{x} + \Delta \dot{x}$  をそれぞれ第  $k+1$  ステップの変位, 及び速度とする方法である。

#### ii) 入力地動加速度について

構造物の地震応答解析に際して使用される入力地動加速度は, その性質上二種類に大別できる。すなわち, 強震計などから得られた実地震波によるものと, 数学的に COS 波などを重ね合わせて作成される人工地震波によるものである。本論文では, 復元力特性を規定する各パラメータが, 一質点系の弾塑性応答にどのような影響を与えるかを調べることを主な目的としている。その為, 入力地動加速度としては, 際立った周波数特性を持つものは好ましくない。従って, ここでは入力地動加速度として, 周波数域 0~10Hz のホワイトノイズを作成し入力した。

以下に, 本論文で使用したホワイトノイズの作成方法を示す。

$\ddot{y}(t)$ : 地動加速度

$$\ddot{y}(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \text{COS}(2\pi \cdot f_i \cdot t + \phi_i) \dots \dots \dots (2)$$

ここで,

$$f_i = f_L + \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta f$$

$$\Delta f = (f_H - f_L) / N$$

$f_H, f_L$ : 作成しようとするホワイトノイズが有する周波数減の上限, 下限。

$N$  : 周波数の分割数

$\phi_i$  : 0~2 $\pi$  の一様乱数

$$A_i = \sqrt{2 \cdot S_s(\omega_i) \cdot \Delta \omega / \pi} \text{ or } \sqrt{G_s(\omega_i) \cdot \Delta \omega / \pi}$$
$$= \sqrt{4 \cdot S_f(f_i) \cdot \Delta f} \text{ or } \sqrt{2 \cdot G_f(f_i) \cdot \Delta f}$$

$$\omega_i = 2\pi \cdot f_i, \Delta \omega = 2\pi \cdot \Delta f$$

$S_s(\omega_i)$ ;  $\omega_i$  に関する両側パワースペクトル密度

$S_f(f_i)$ ;  $f_i$  に関する両側パワースペクトル密度

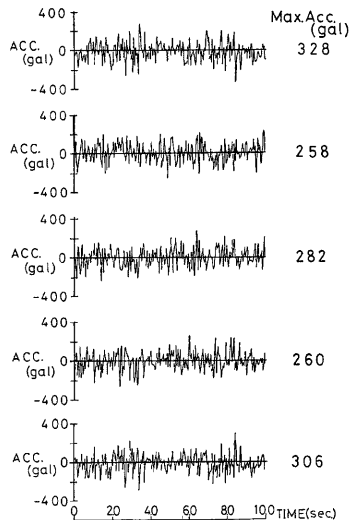


Fig. 1 Five white noises for analysis

$$G_o(\omega_i) = 2 \cdot S_o(\omega_i)$$

$$G_f(f_i) = 2 \cdot G_f(f_i)$$

本論文では、 $f_H = 10\text{Hz}$ ,  $f_L = 0\text{Hz}$ ,  $N = 50$ ,  $S_o(\omega_i) = 400\text{gal}^2 \cdot \text{sec}$ , 継続時間10秒とし、 $\phi_i$ を様々に変えることによって、等しいパワーを持ち、時刻歴の異なるホワイトノイズを五つ作成し、使用している。その五つのホワイトノイズの時刻歴を Fig. 1 に示す。

### 3. 解析モデルについて

本論文においては、解析の対象とするモデルを以下の二種類に大別する。

- i) スケルトンカーブのプロポーションを一定とし、ループの形状を決定するパラメータ、弾性固有周期、及び降伏震度を変化させるモデル。
- ii) ループの形状を決定するパラメータと降伏震度ある程度限定し、スケルトンカーブの降伏点以後の勾配を変化させるモデル。

このように解析モデルを大別した理由は、i) においてループの形状を決定するパラメータの、一質点系の応答に及ぼす影響を、弾性固有周期及び降伏震度毎に把握し、その結果によってループの形状を決定するパラメータ、降伏震度を絞り、ii) においては、それらの限定されたパラメータ、降伏震度に対して、スケルトンカーブの降伏点以後の勾配が、一質点系の応答にどのような影響を及ぼすかを調べる事を、本論文の具体的な目的としていることによる。

### 4. 一定のプロポーションを有するスケルトンカーブを持つ一質点系の弾塑性地震応答性状

#### i) 解析パラメータ

- ・スケルトンカーブ

ここでは、Fig. 2 に図示するようなスケルトンカーブを想定する。今迄に行われて来た実験的研究等を参考にすると、Fig. 2 中の各変数の間には、大略次のような関係があると言える。

$$Q_c = \frac{1}{2} \cdot Q, \sim \frac{1}{4} \cdot Q,$$

$$x_c = \frac{1}{4} \cdot x, \sim \frac{1}{10} \cdot x,$$

本論文では、以下のように各変数を設定した。

$$Q_c = \frac{1}{2} Q, \quad x_c = \frac{1}{4} x,$$

- ・降伏震度 ( $C_y$ )

下式で定義されるものとする。

$$C_y \equiv Q_y / w, \quad w: \text{mass の重量}$$

- ・弾性時固有周期 ( $T_1$ )

下式で定義されるものとする。

$$T_1 = 2\pi \sqrt{m/k_1}, \quad k_1 = Q_c / x_c, \quad m = w/g$$

$g$  : 重力加速度

以上のように、降伏震度  $C_y$ , 弾性時固有周期  $T_1$  をパラメータとすると、上述のスケルトンカーブの各変数の値は以下のように表現される。

$$Q_y = C_y \cdot w$$

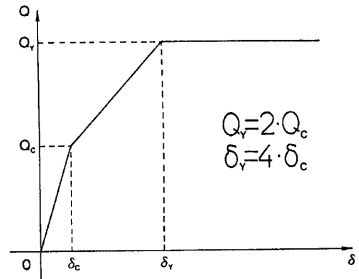


Fig. 2 Skeleton curve used in this analysis

$$Q_c = \frac{1}{2} \cdot Q_r = \frac{1}{2} \cdot C_r \cdot w$$

$$x_r = \frac{g}{2\pi^2} \cdot C_r \cdot T_1^2 \approx 49.65 \cdot C_r \cdot T_1^2$$

$$x_c = \frac{1}{4} x_r \approx 12.41 \cdot C_r \cdot T_1^2$$

ここに述べた、スケルトンカーブに関わる2つのパラメータ、 $C_r, T_1$ は、言わば復元力特性の外枠を決定するパラメータである。一方、文献(1)において設定したパラメータ  $a_s, a_c, D$  は、ループの形状そのものを決定するパラメータである。従って、個々の復元力特性モデルは、この場合 ( $a_s, a_c, D, C_r, T_1$ ) の計5つのパラメータによって決定される。しかしながら、これらのすべてのパラメータの、考えられるすべての組み合わせに対して解析を行う事は、可成りの時間と労力を要し、果して、そのような解析がどれだけの意味を有するか、非常に疑問となる所である。本論文では、この点を考慮し、Table 1 に示すように、各パラメータの値を絞った。この場合の、パラメータ ( $a_s, a_c, D$ ) の組み合わせによって形成されるループの形状を Fig. 3 に図示する。ただし、 $D$  については、 $D=0.2$  及び  $0.6$  のものについてのみ図示してある。尚、劣化については、文献(1)の(4)、(5)式中の  $C$  の値を  $0.4$  で一定としており、 $D$  の値が大きいく程、劣化の度合は大きくなる。また、粘性減衰定数は3%で、すべての例に対して一定としている。解析結果は、前述の5つの各入力波に対する応答を平均し、整理したものである。

Table 1 Parameters for analysis

$C_r$	$(a_s, a_c)$	$D$	$T_1$
0.05	(0.2, 0.0)	0.2	0.2
0.1	(0.4, 0.0)	0.4	0.4
0.2	(0.4, 0.2)	0.6	0.6
0.3	(0.6, 0.0)	0.8	0.8
0.4	(0.6, 0.2)		1.0
0.5	(0.6, 0.4)		(sec.)
	(0.8, 0.0)		
	(0.8, 0.2)		
	(0.8, 0.4)		
	(0.8, 0.6)		

$$C_r = Q_r/W$$

ii) 解析結果

Fig. 4~Fig. 9 は、弾性固有周期に対する最大応答変位の変化を ( $a_s, a_c$ ) の各組毎に、 $D$  の値をパラメータとして図示したものである。Fig. 4~Fig. 9 の各図は、それぞれ降伏震度  $C_r=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  の各場合に相当する解析結果である。これらの図より、一般に以下の事柄が観察される。すなわち、

- 周期  $T_1$  の増大に伴って、最大応答変位は大きくなる。
- 降伏震度  $C_r$  が、 $0.05 \sim 0.1$  程度の小さい場合には、弾性固有周期  $T_1=0.6$  秒 $\sim$ 0.8秒で最大応答変位の増加があまりみられない部分があるが、 $C_r=0.2 \sim 0.5$  では、ほとんどの場合について、最大応答変位の増加の仕方は、ほとんど直線的である。
- 降伏震度  $C_r$  の値の大ききにかかわらず、 $D$  の値の増大に伴い、変位は増大するが、 $D=0.6 \sim 0.8$  にわたる最大応答変位の増加の割合は、他の同じ  $D$  の値の増分に対するそれよりも、いく分大きくなっている。この傾向は、 $C_r \leq 0.2$  の場合について顕著である。
- $C_r$  が  $0.05 \sim 0.2$  と大きくなるにつれて、最大応答変位は急激に押さえられる。しかし、 $0.2$  以上の降伏震度  $C_r$  の場合は、 $C_r$  の値にかかわらず、各周期に対して、ほぼ同程度の最大応答変位を示す。
- Fig. 4~Fig. 9 の各図は、前述した5つの地動加速度による応答結果を平均したものであるが、各入力波毎の応答結果を比較すると、 $C_r$  の値が小さい場合ほど、入力波の相違による最大応答変位のばらつきは大きい。

Fig. 10~Fig. 15 は、弾性固有周期  $T_1$  に対する最大応答塑性率の変化を、( $a_s, a_c$ ) の各組毎に、 $D$  の値をパラメータとして図示したものである。Fig. 10~Fig. 15 の各図は、それぞれ  $C_r=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  の各場合の結果である。これらの図より、以下の事柄が観察される。すなわち、

- 降伏震度  $C_r$  の値の大ききにかかわらず、弾性固有周期  $T_1=0.2$  秒 $\sim$ 0.4秒にかけて、最大応答塑性率は  $T_1=0.2$  秒における応答値の40% $\sim$ 60%に減少している。

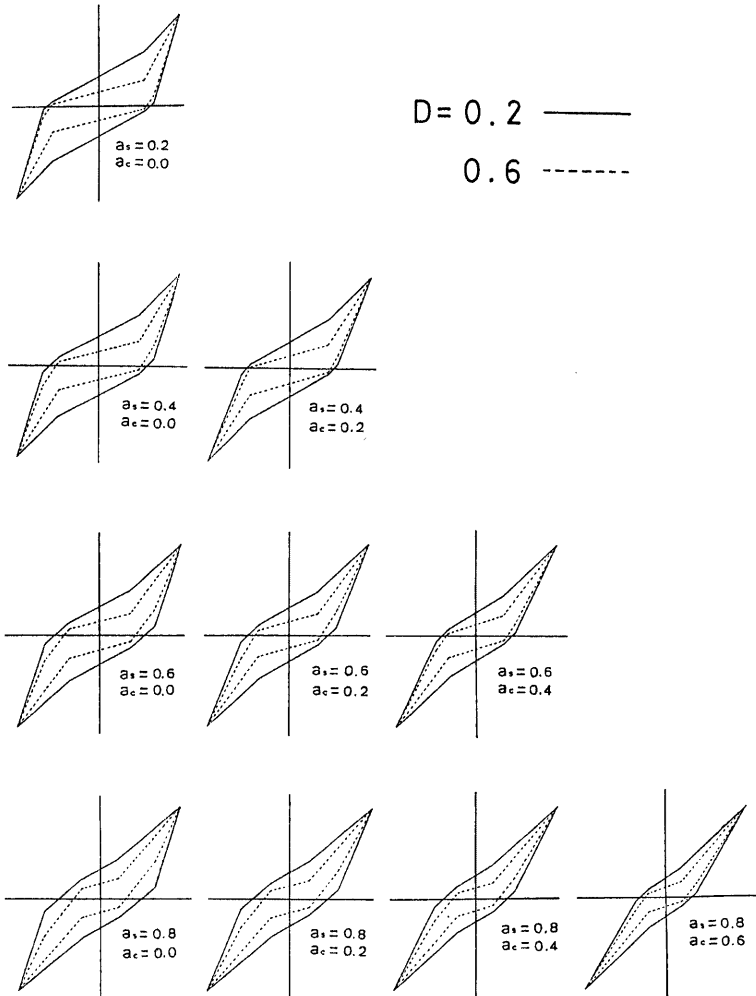


Fig. 3 Loop's shapes constructed by parameters shown in the Table 1

- 最大応答塑性率は、 $C_r$ の増大と共に減少して行き、 $C_r=0.5$ の場合では、 $T_1 \geq 0.4$ 秒において、ほとんどが降伏域にまで達していない。
- $D$ の値が大きいく程、最大応答塑性率は大きくなるが、 $T_1$ が1.0秒程度の比較的長い周期になると、 $D$ の値による最大応答塑性率の相違は小さくなる。また、 $T_1=0.2$ 秒程度の比較的短周期の領域では、 $D$ の値の大きさによる最大応答塑性率に、可成りの差違が認められる。

Fig. 16～Fig. 21 は、 $(a_s, a_c)$ の各組み合わせに対して、弾性固有周期  $T_1$  をパラメータとした場合の、 $D$

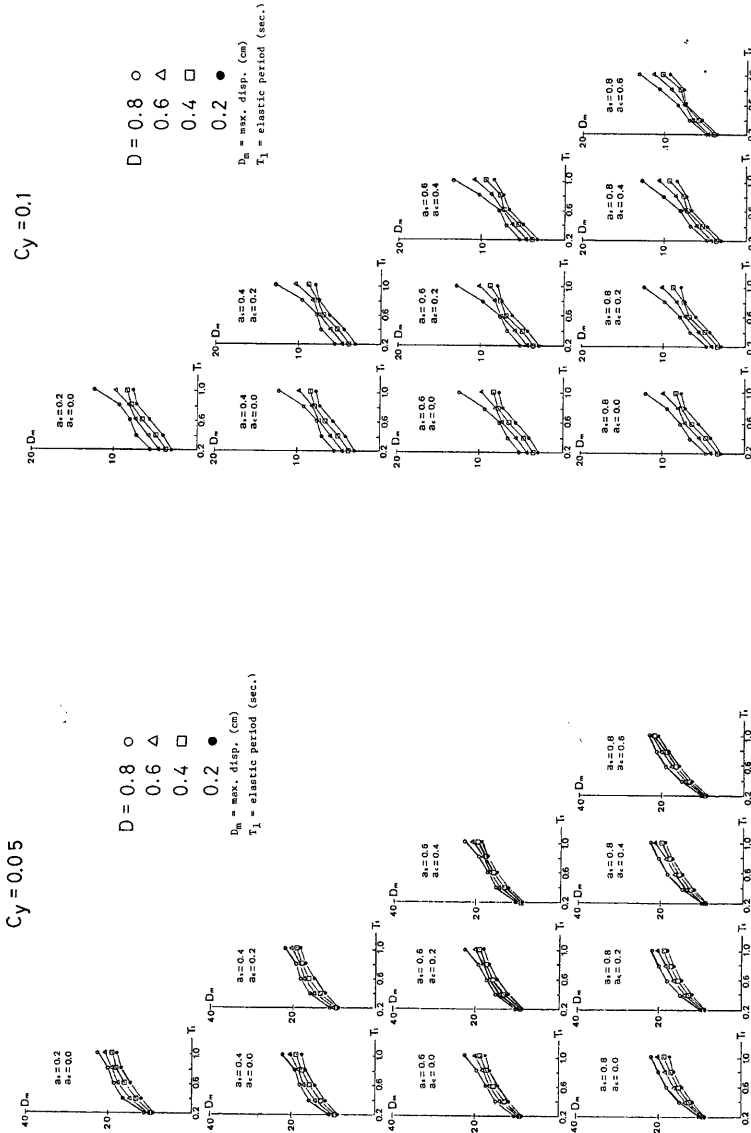


Fig. 5 Disp. spectra in case of  $C_y = 0.1$

Fig. 4 Disp. spectra in case of  $C_y = 0.05$

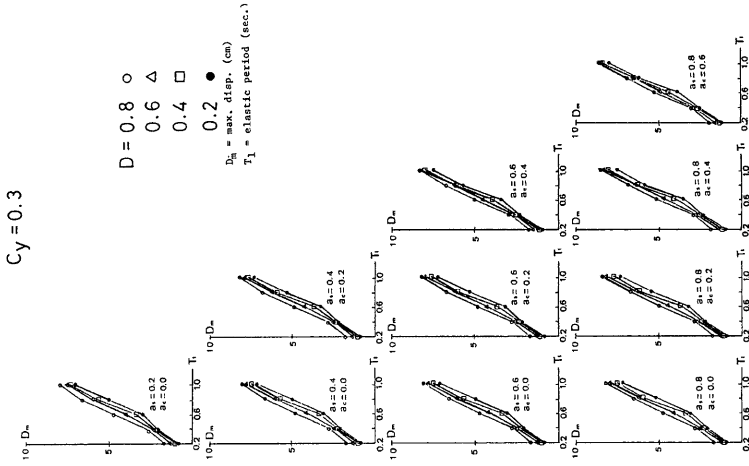


Fig. 7 Disp. spectra in case of  $C_y = 0.3$

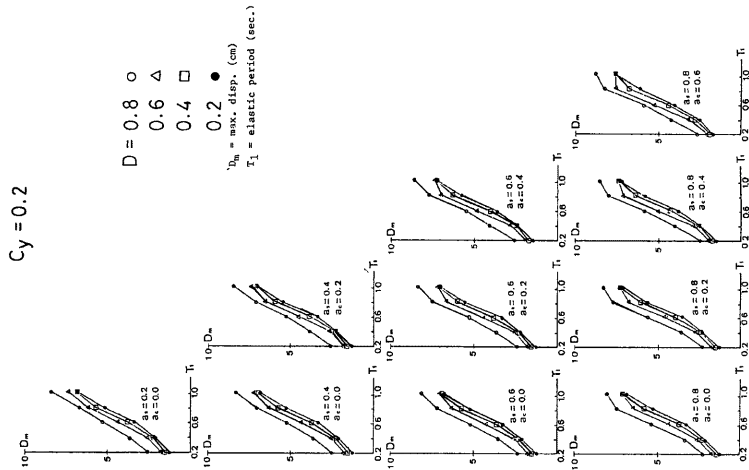


Fig. 6 Disp. spectra in case of  $C_y = 0.2$

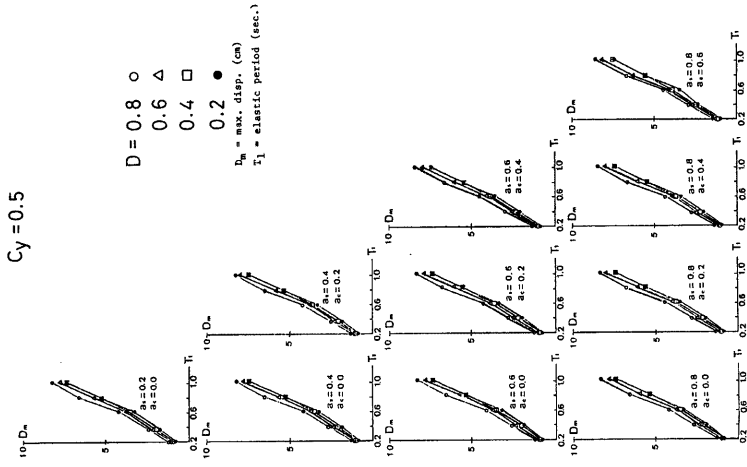


Fig. 9 Disp. spectra in case of  $C_y = 0.5$

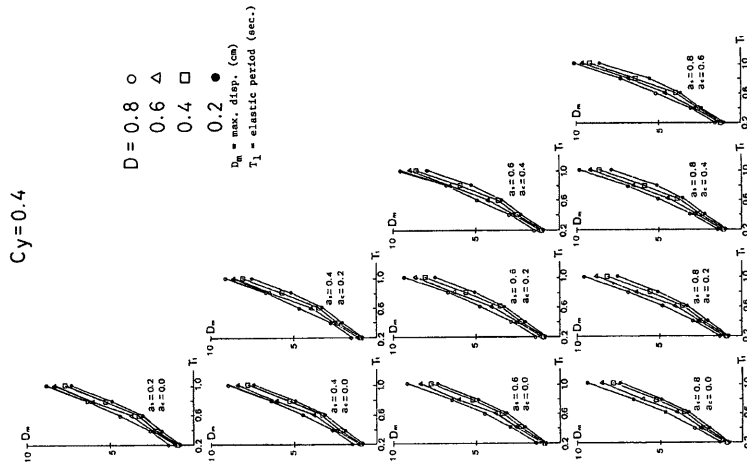


Fig. 8 Disp. spectra in case of  $C_y = 0.4$



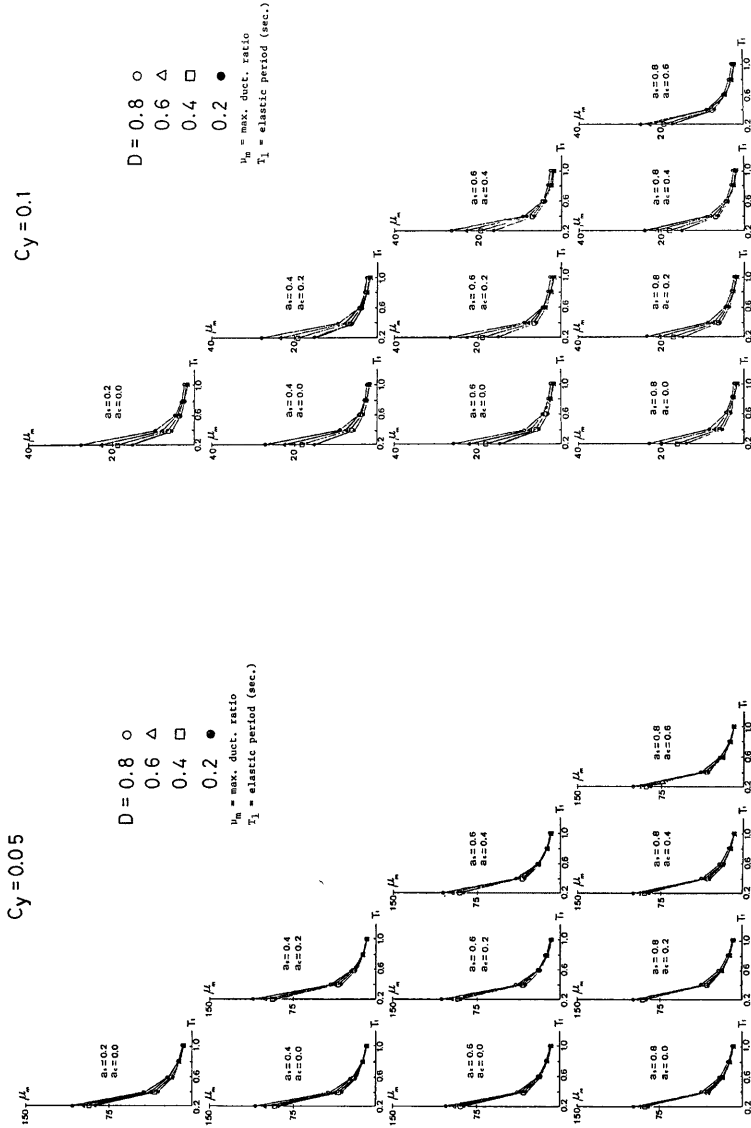


Fig. 10 Ductility ratio spectra in case of  $C_y = 0.05$

Fig. 11 Ductility ratio spectra in case of  $C_y = 0.1$

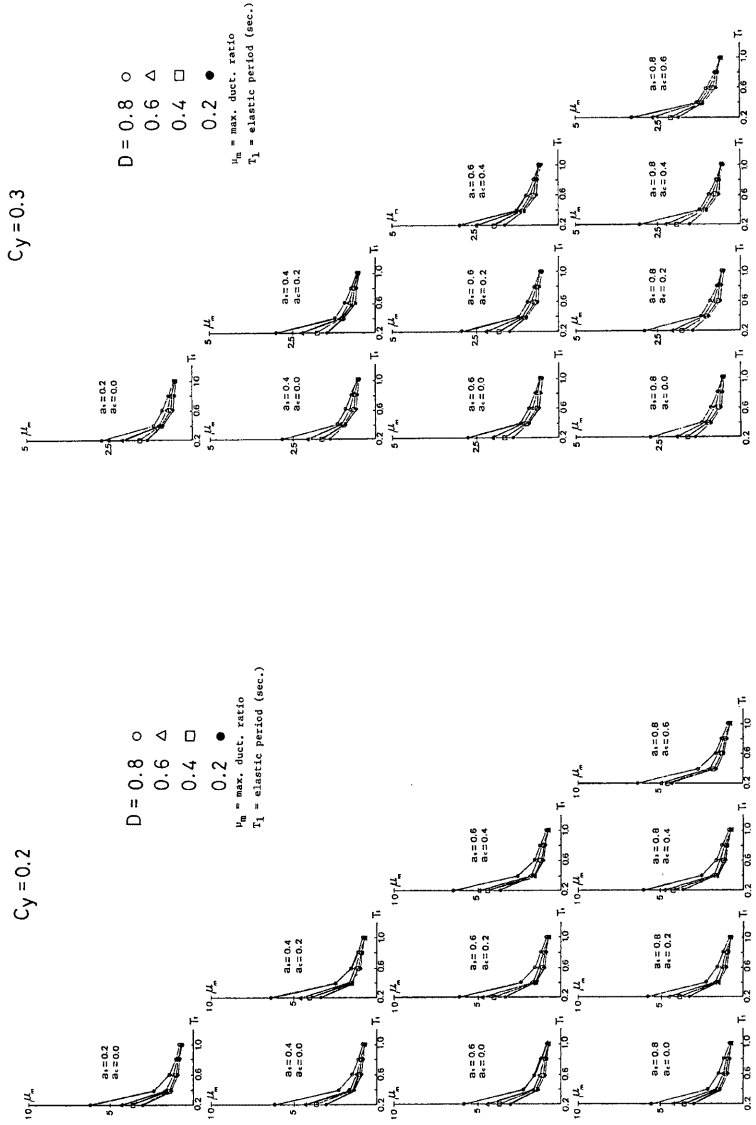


Fig. 13 Ductility ratio spectra in case of  $C_y = 0.3$

Fig. 12 Ductility ratio spectra in case of  $C_y = 0.2$

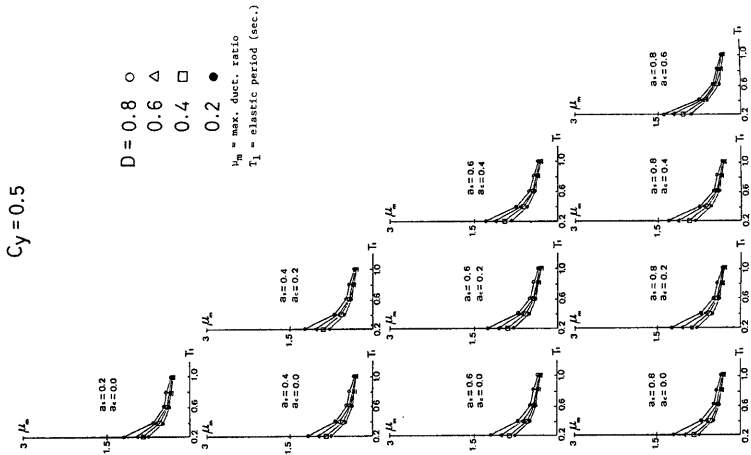


Fig. 15 Ductility ratio spectra in case of  $C_y = 0.5$

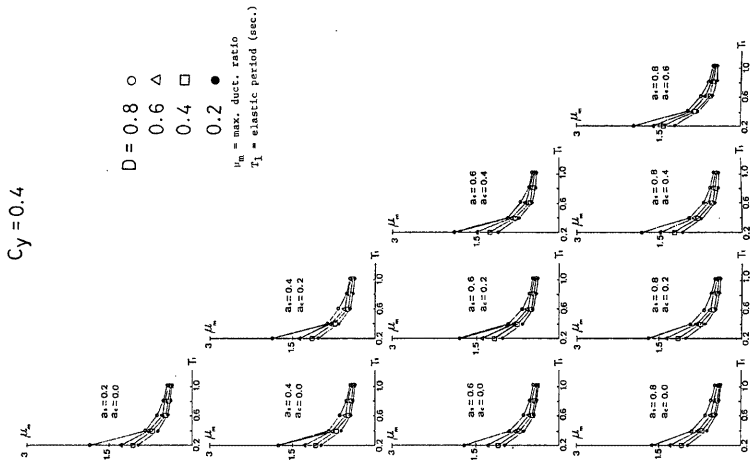


Fig. 14 Ductility ratio spectra in case of  $C_y = 0.4$

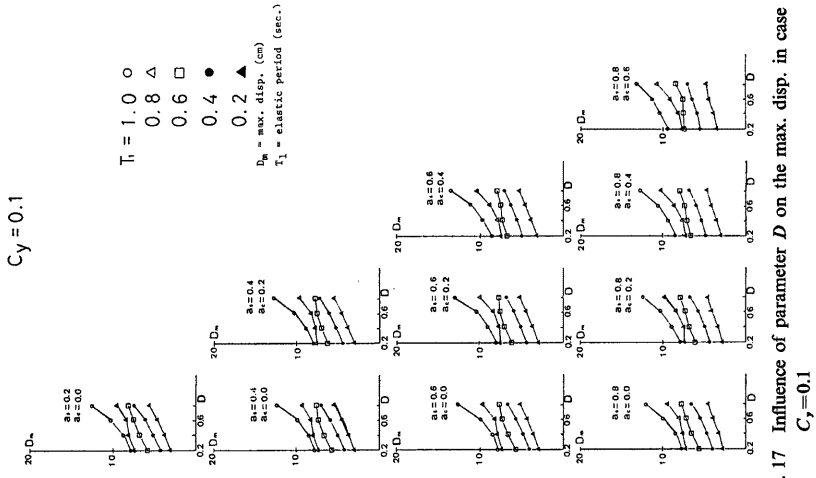


Fig. 17 Influence of parameter  $D$  on the max. disp. in case of  $C_y = 0.1$

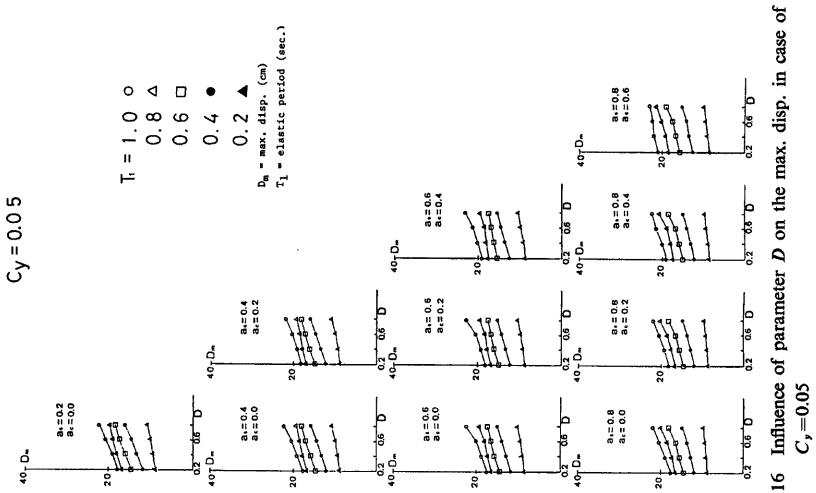


Fig. 16 Influence of parameter  $D$  on the max. disp. in case of  $C_y = 0.05$

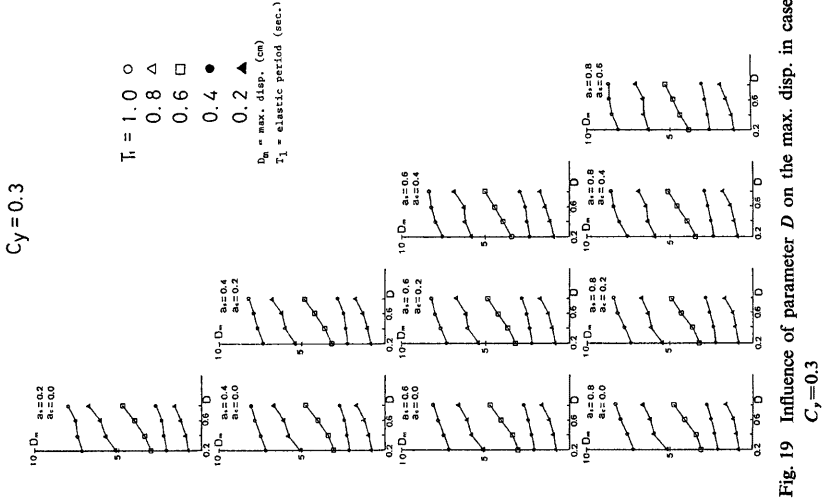


Fig. 19 Influence of parameter  $D$  on the max. disp. in case of  $C_y = 0.3$

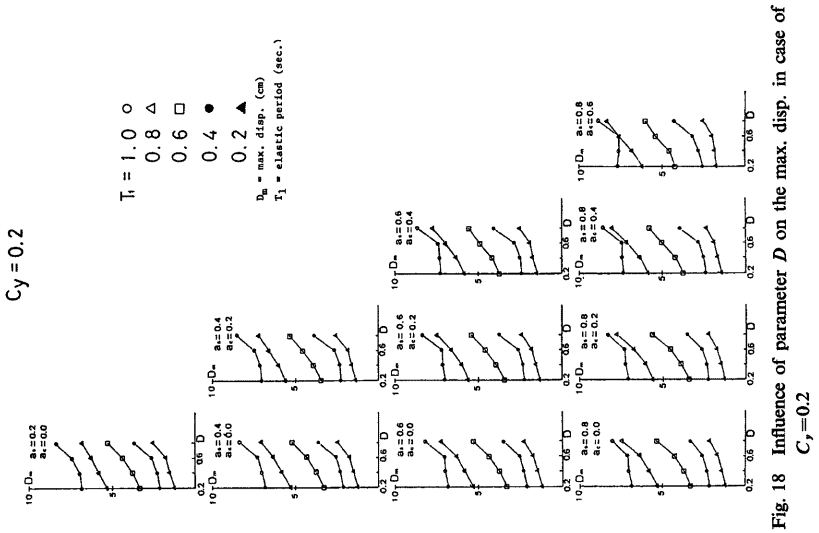


Fig. 18 Influence of parameter  $D$  on the max. disp. in case of  $C_y = 0.2$

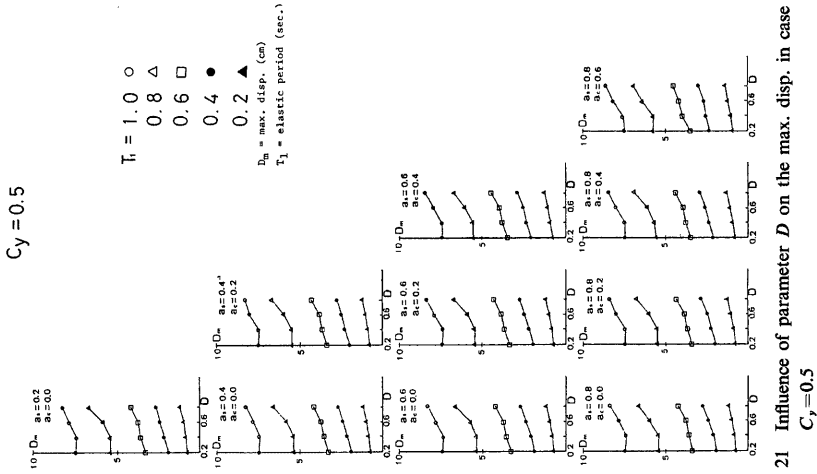


Fig. 21 Influence of parameter  $D$  on the max. disp. in case of  $C_y = 0.5$

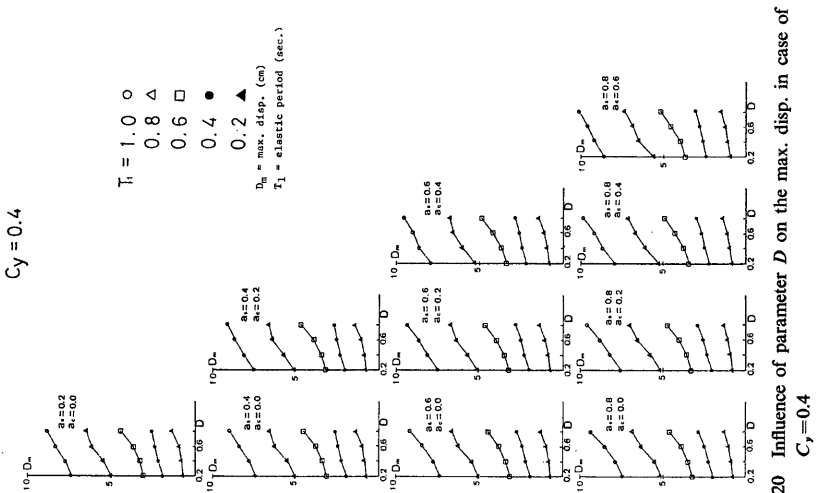


Fig. 20 Influence of parameter  $D$  on the max. disp. in case of  $C_y = 0.4$

の値による最大応答変位の変化を示したものである。これらの図より、以下の事柄が観察される。

- すべての降伏震度  $C_y$  に対して、 $D$  の値の増加と共に最大応答変位は増大する。その増大の仕方は、ほぼ直線的であるが、弾性固有周期  $T_1 = 0.8$  秒～1.0秒の、比較的長周期のものに対しては、 $C_y = 0.3 \sim 0.5$  の範囲で、 $D = 0.2 \sim 0.4$  にかけて、 $D$  の値が増加しても応答にあまり変化が見られない場合がある。また、 $D$  の値が0.6程度までは直線的に最大応答変位が増大するが、 $D = 0.6 \sim 0.8$  にかけて、比較的大きな変位の増大が見られる場合もある。
- $C_y = 0.05 \sim 0.1$  の降伏震度が小さい場合には、 $D$  の値に対する最大応答変位の増加の割合は、 $a_c$  の値が小さい程大きい。

Fig. 22～Fig. 27 は、各降伏震度  $C_y$  において、 $a_s$  及び  $a_c$  の各パラメータの値の大きさが、最大応答変位に及ぼす影響を示したものである。すなわち、上二段の各図は、 $a_s$ 、 $D$  の値を一定とし、 $a_c$  の値を変化させた時の最大応答変位の変化する様子を、各弾性固有周期  $T_1$  をパラメータとして図示している。また、下二段は、 $a_s$ 、 $D$  の値を一定として、 $a_c$  の値を変化させた時の最大応答変位の変化する様子を、上段の図と同様に、各弾性固有周期  $T_1$  をパラメータとして図示したものである。これらの図より、 $a_s$ 、 $a_c$  について以下の事柄が指摘できる。

—  $a_s$  について —

- 降伏震度  $C_y$  が0.2以下の場合には、 $a_c$  の値が増すに従って最大応答変位は幾分下りきみとなる。
- $C_y \geq 0.3$  のものについては、 $a_s$  の値による最大応答変位の違いはほとんど見られない。

—  $a_c$  について —

- 降伏震度  $C_y$  の値にかかわらず、 $a_c$  の値が大きくなる程、最大応答変位は増大する傾向がある。
- $D$  の値が小さい程、 $a_c$  の値の増加に対する最大応答変位の増大の割合は大きい。また、その割合の大きさは、同一降伏震度内では、長周期になる程大きくなる事が概ね言える。

このように、 $a_s$ 、 $a_c$ 、 $D$  の各パラメータの値の変化に対する最大応答変位、最大塑性率応答等を比較すると上述した3つのパラメータの内、 $D$  がそれらの応答に対して最も影響力があり、次いで、 $a_c$  であると言える。パラメータ  $a_s$  の値の大きさは、上述の各応答に対してわずかな影響しか与えない。すなわち、文献(1)の等価粘性減衰定数(9)式の表現からもわかるように、 $a_c$  や  $D$  などの、履歴ループの面積に直接関わるパラメータは、最大応答変位、塑性率に比較的大きな影響を与えるが、 $a_s$  のように、履歴ループのスリップ性状等には関係をもしても、その面積には無関係なパラメータは、最大応答変位、塑性率等にはほとんど影響を与えない。従って、ここで解析の対象としたような、あるいは、それに類似したスケルトンカーブを有する復元力特性を持つ一質点系の弾塑性地震応答に関しては、復元力特性の履歴ループの形状よりも、履歴ループの面積が適正に評価されている事が、最も重要な要件であると言うことができる。

Fig. 28～Fig. 31 は、各降伏震度に対する最大応答変位を図示したものである。前述のように、 $a_s$  の値の大きさは最大応答変位にほとんど影響を与えない。従って、ここでは  $a_s = 0.8$  とし、各図は  $a_c$ 、 $T_1$  を一定とし、 $D$  の値をパラメータとして描かれている。これらの図より、以下の事柄が指摘できる。

- $T_1 = 0.2$  秒では、 $D = 0.2 \sim 0.6$  の場合に、 $C_y \geq 0.3$  において最大応答変位はほぼ一定となる。
- $T_1 = 1.0$  秒では、 $C_y \geq 0.2$  のすべての  $D$  に対して最大応答変位はほぼ一定となる。
- すべての  $T_1$  に対して、 $C_y \geq 0.2$  の場合に、比較的大きな変位ののびが見られる。
- 総じて、短周期領域においては、エネルギー一定則が、長周期領域においては、変位一定則が成立するようであるが、それは、降伏震度がある程度以上で、しかも、履歴ループが比較的太いものに対してあてはまる法則のようである。

Fig. 32 は、Fig. 28～Fig. 31 の各図から得られた要求耐力比(要求降伏震度)スペクトルを図示したものである。これらの図より、以下の事柄が指摘できる。すなわち、

- $a_c$  が大きくなる程与えられた最大塑性率を実現させるために要求される降伏震度は高くなる。
- $D$  の値が大きいか、与えられた最大塑性率を実現させるために要求される降伏震度は高くなる。この傾

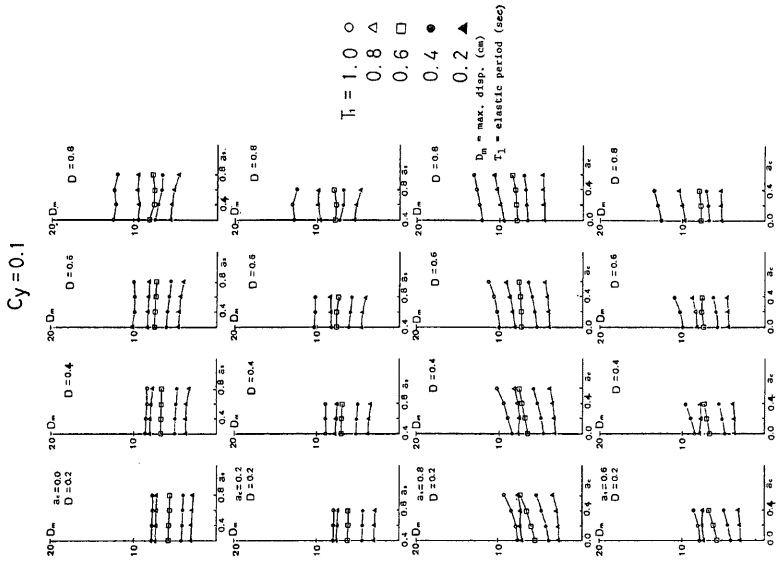


Fig. 22 Influence of parameters  $a_e$  (upper),  $a_s$  (lower) on the max. disp. in case of  $C_y = 0.05$

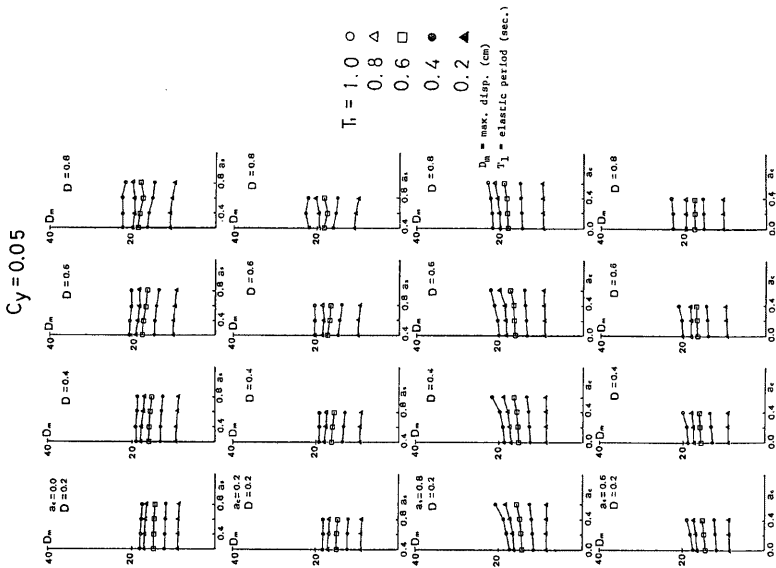


Fig. 23 Influence of parameters  $a_e$  (upper),  $a_s$  (lower) on the max. disp. in case of  $C_y = 0.1$



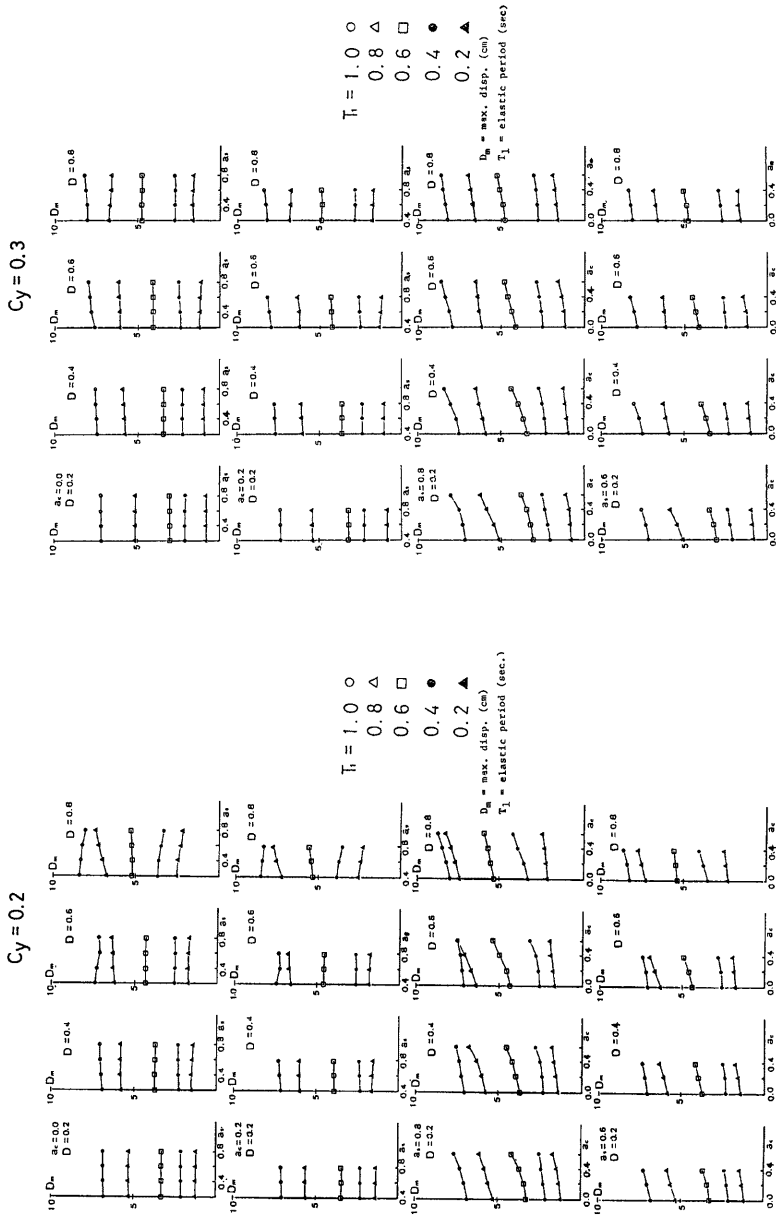


Fig. 25 Influence of parameters  $a_c$  (upper),  $a_e$  (lower) on the max. disp. in case of  $C_r = 0.3$

Fig. 24 Influence of parameters  $a_c$  (upper),  $a_e$  (lower) on the max. disp. in case of  $C_r = 0.2$

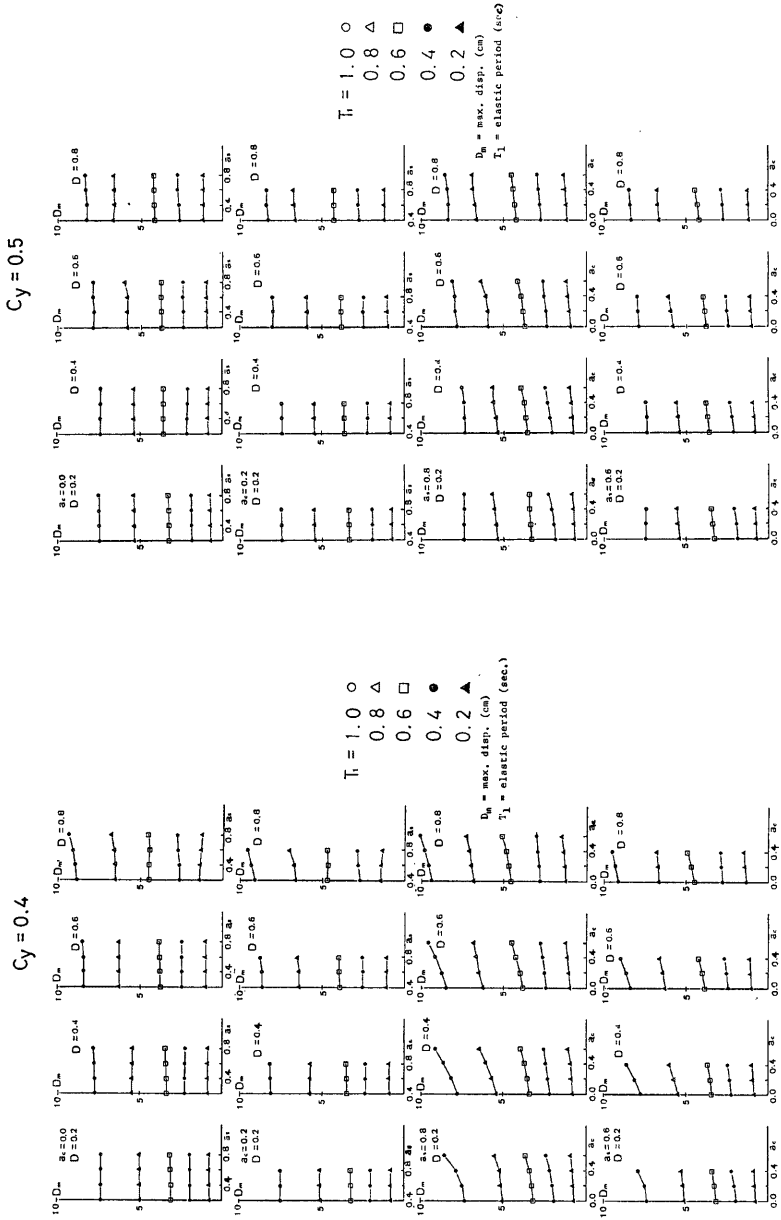


Fig. 27 Influence of parameters  $a_z$  (upper),  $a_e$  (lower) on the max. disp. in case of  $C_y=0.5$

Fig. 26 Influence of parameters  $a_z$  (upper),  $a_e$  (lower) on the max. disp. in case of  $C_y=0.4$

向は、短周期の場合に特に顕著に見られる。各周期について、 $D=0.2$  のものと、 $D=0.8$  のものとを比較すると、同一最大塑性率に対する要求降伏震度は、 $D=0.8$  に対するものが、 $D=0.2$  に対するものに比して10%~30%程度高くなっている。

- 最大塑性率  $\mu=4$  程度の、あるいはそれ以上の塑性率が許容でき、かつ長周期の場合には、要求降伏震度そのものは、 $D$  の値によって大きく変わらない。

Fig. 33 は、 $a_s=0.6$ ,  $a_e=0.2$ ,  $T_1=0.6$  秒とし、 $D$  をパラメータとした時の変位応答波形及び履歴応答曲線

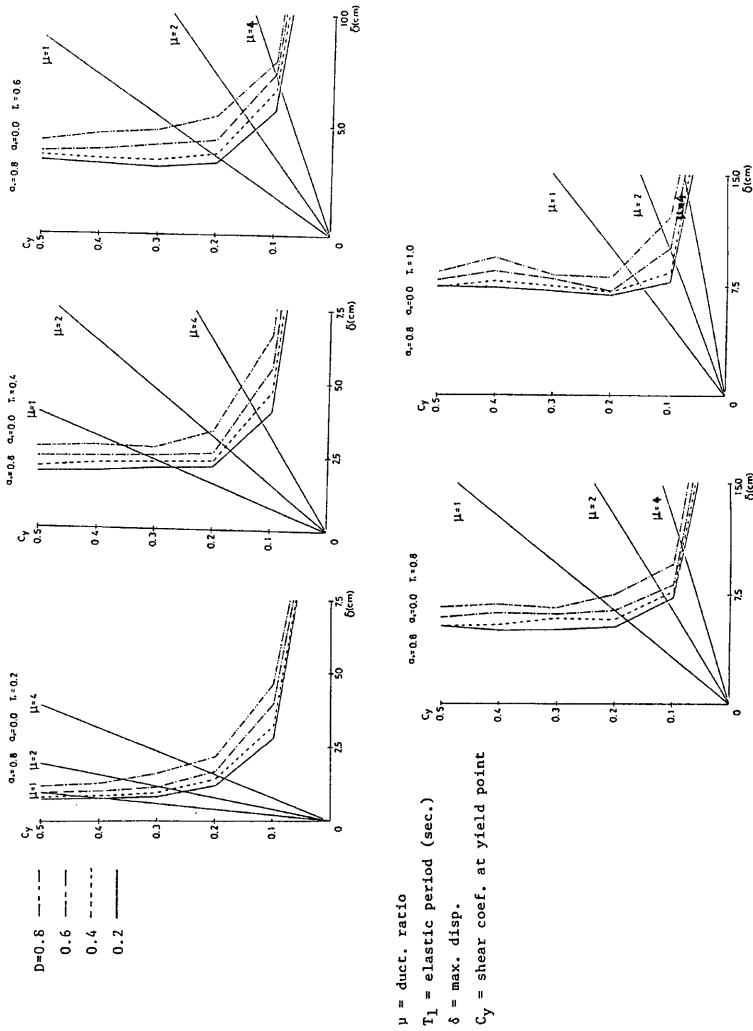


Fig. 28 Relation between  $C_y$  and max. disp. in case of  $a_s=0.8$ ,  $a_e=0.0$

を示すものである。応答波形を見ると、すでに3秒あたりから  $D$  の値による波形の相違が認められる。また、4秒～6秒にかけて、 $D$  の値が大きいものについて、一時的に周期の延びが見られる。8秒以後では、 $D$  の値による応答波形の相違が大きくなっている。すなわち、 $D$  の値が大きい場合程、振巾が大きくなっている。

Fig. 34 は  $a_c=0.2, D=0.6, T_1=0.6$  秒とし、 $a_c$  をパラメータとした場合の、変位応答波形及び履歴応答曲線を示すものである。応答波形を見ると、波形に  $a_c$  の値による大きな差が認められるのは7秒以後で

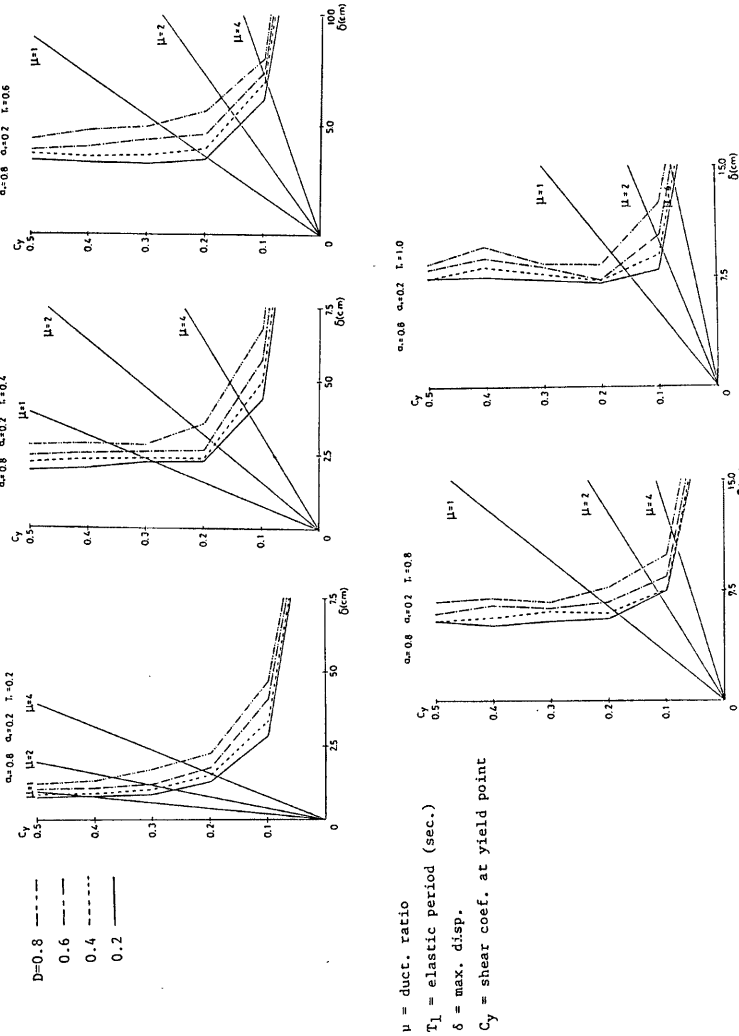


Fig. 29 Relation between  $C_y$  and max. disp. in case of  $a_c=0.8, a_c=0.2$

ある。しかし、8秒迄は最大応答変位に関してはほとんど差がない。この図に示した例では、8秒以後にくらかの最大応答変位の相違が見られるが、他のこの場合と同様に、 $a_e$ ,  $D$ ,  $T_1$  を一定として、 $a_e$  をパラメータとした場合の変位応答波形を見ると、この図に示される6秒から8秒にわたる現象がくり返され、最大応答変位は、結果的に  $a_e$  にほとんど無関係なものとなっている。すなわち、 $a_e$  の値が大きいものは、変位振幅が大きく、変位が揺り返されて小さくなっても、結局再び大きく戻され、 $a_e$  の値の小さいものは、変位の揺り返しが小さく、かつ、変位が再度反転してからの戻りが小さいため、結果的に  $a_e$  の値の大小は、

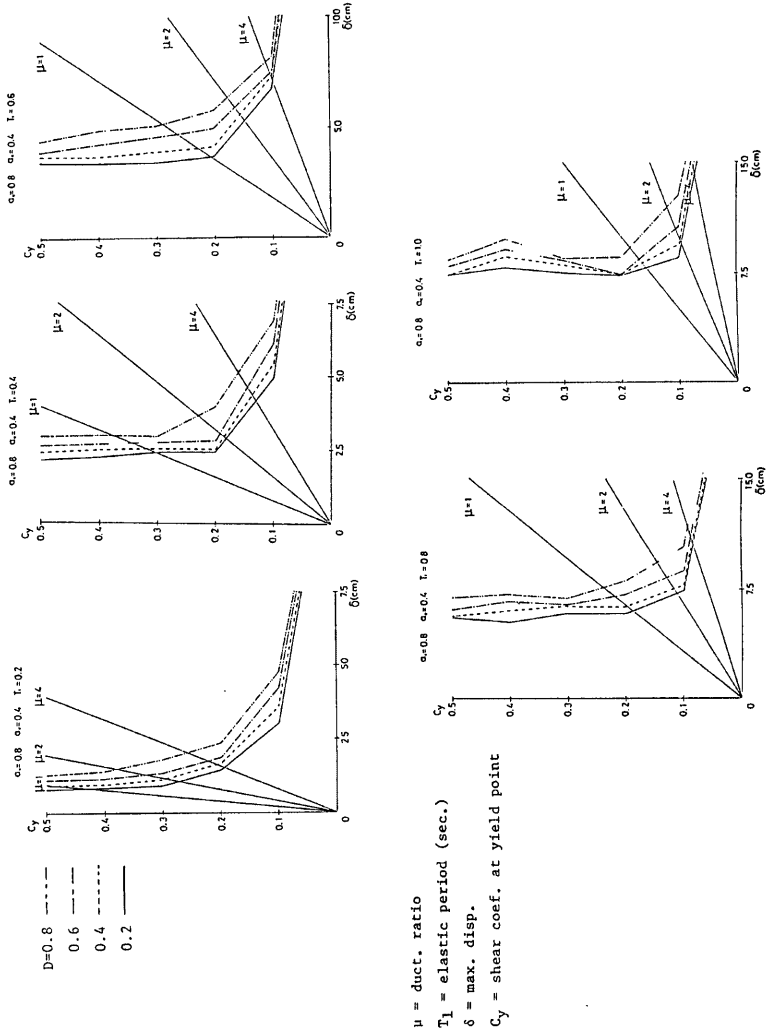


Fig. 30 Relation between  $C_y$  and max. disp. in case of  $a_e = 0.8$ ,  $a_c = 0.4$

最大応答変位に対して大きな影響を及ぼさないことになる。しかし、この図に示されるように、応答波形そのものは、 $a_c$  の値によって比較的大きな影響を受ける。

Fig. 35 は、 $a_s=0.8, D=0.4, T_1=0.6$  秒とし、 $a_c$  の値をパラメータとした場合の変位応答波形及び履歴応答曲線を示すものである。応答波形を見ると、8秒迄は  $a_c$  の値による大きな応答波形の相違は認められない。 $a_c$  の値が小さい程、最大変位は小さくなっているが、各  $a_c$  によるそれらの差違は、比較的小さいと言える。

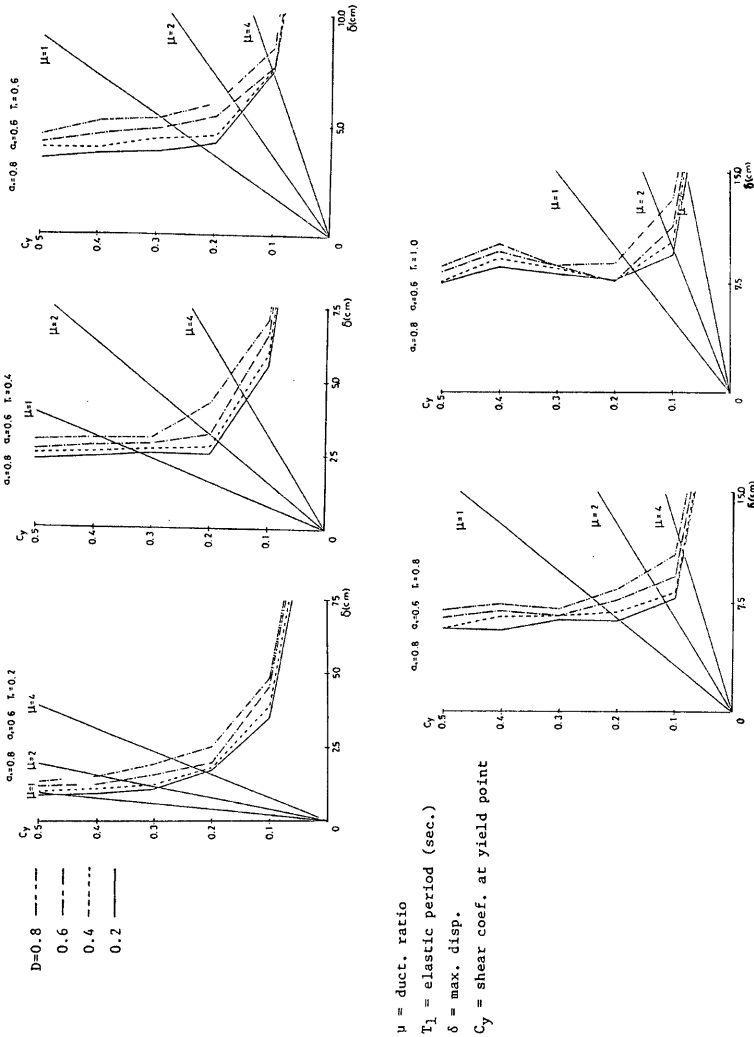


Fig. 31 Relation between  $C_y$  and max. disp. in case of  $a_s=0.8, a_c=0.6$

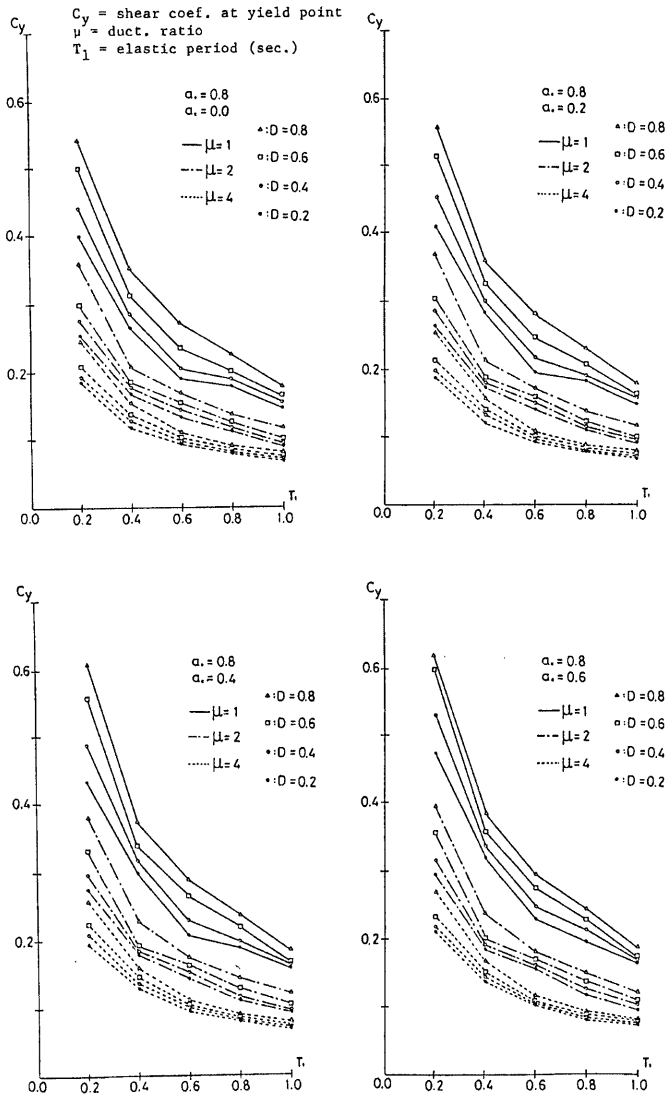


Fig. 32 Required strength ratio spectrum attained from Fig. 28–Fig. 31

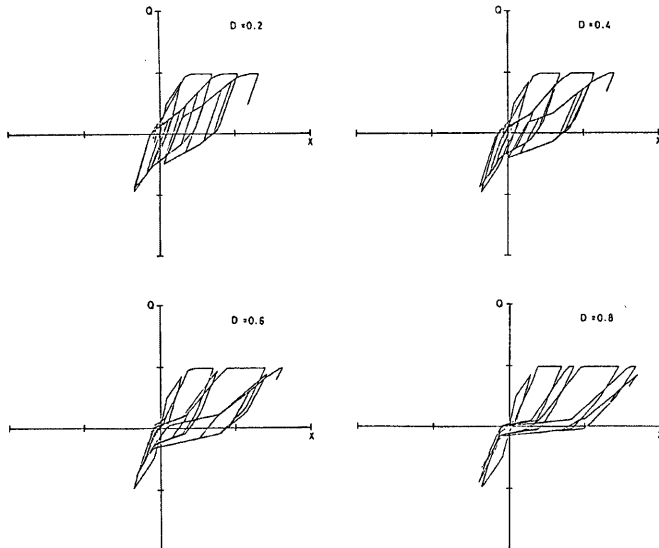
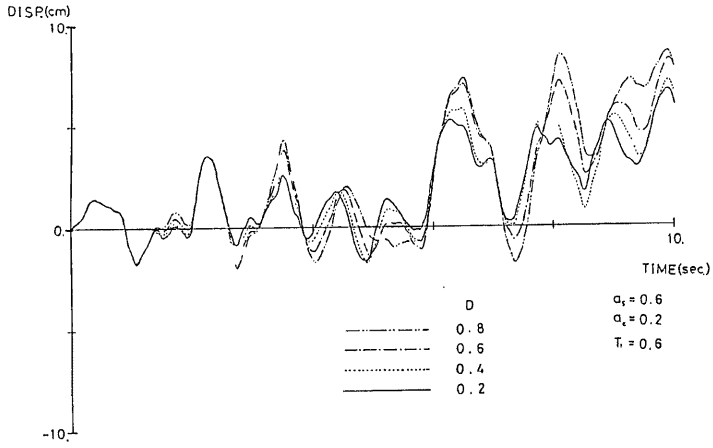


Fig. 33 Comparison of time histories of disp. (upper), comparison of hysteretic responses (X: disp., Q: shear forces) (lower) by the values of D



以上のように、各パラメータによる変位応答波形を比較すると、最大応答変位については、概ね  $D a_s$ ,  $a_s$  の順で影響力を持つと考えられる。しかし、波形そのものを観察すると、 $a_s$  の値が応答波形に及ぼす影響は、最大応答変位に対する程小さくはない。

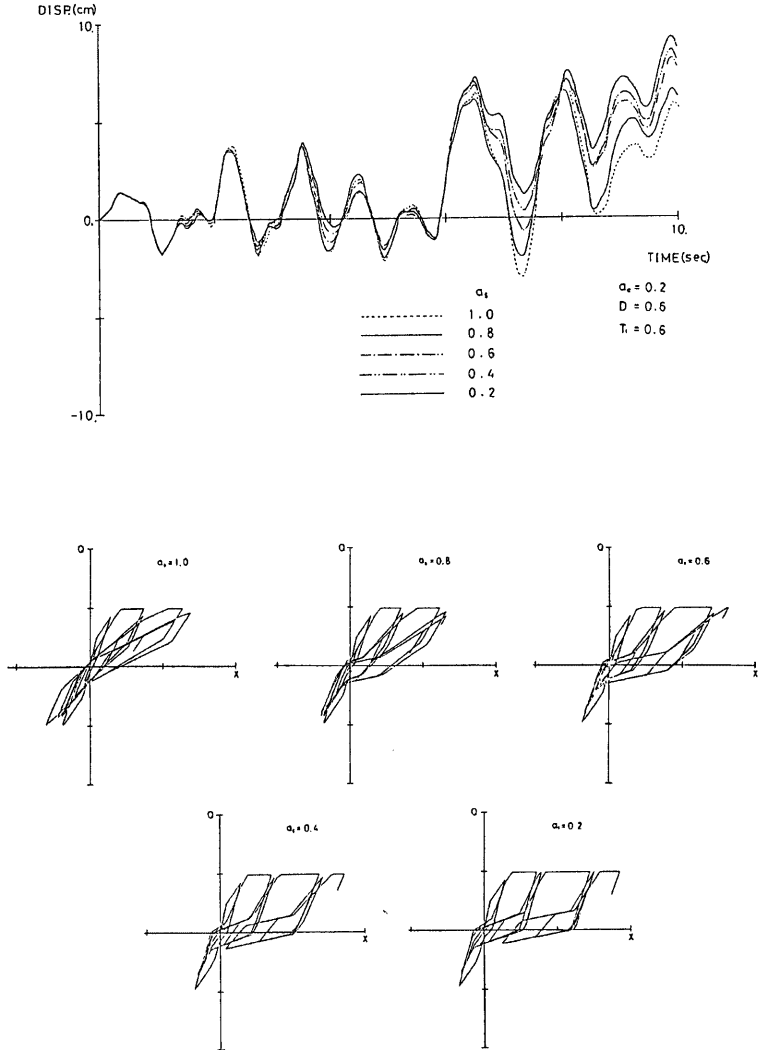


Fig. 34 Comparison of time histories of disp. (upper), comparison of hysteretic responses (X: disp., Q: shear forces) (lower) by the values of  $\alpha_s$ ,

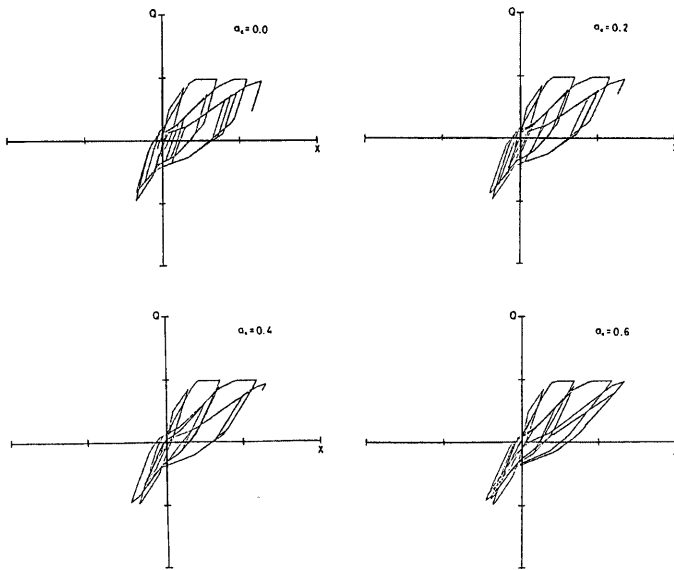
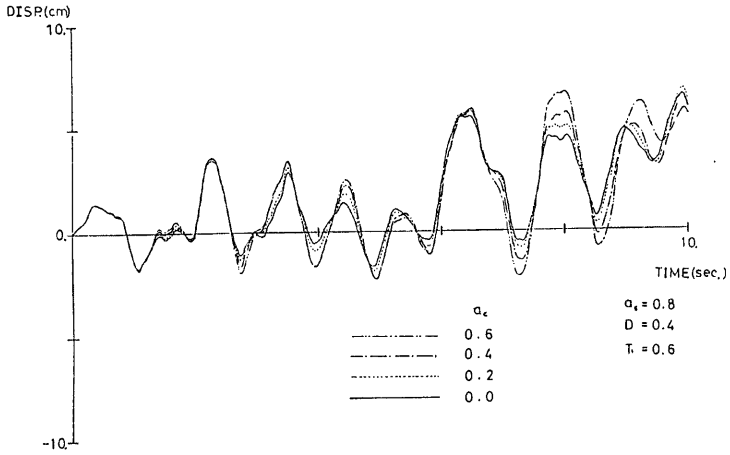


Fig. 35 Comparison of time histories of disp. (upper), comparison of hysteretic responses (X: disp., Q: shear forces) (lower) by the values of  $\alpha_c$

5. 降伏点以後のスケルトンカーブの勾配が変化した時の、一質点系の弾塑性地震応答性状

Fig. 36 に図示するような、降伏点以後のスケルトンカーブが、降伏点剛性  $K_y$  に対する比  $\gamma$  にして、 $-0.05 \sim 0.05$  となる、計五つの剛性を有する復元力特性のそれぞれについて、一質点系弾塑性地震応答解析を行った。ただし、 $\gamma < 0$  のものについては、耐力が降伏耐力の 20% になったところで、スケルトンカーブの勾配を 0 とし、それ以後の耐力低下が生じないようにしている。また、ループのパラメータ  $a_1, a_2$  はそれぞれ 0.6, 0.4 で一定とし、結果は前述の 5 つの入力波による応答を平均したものである。

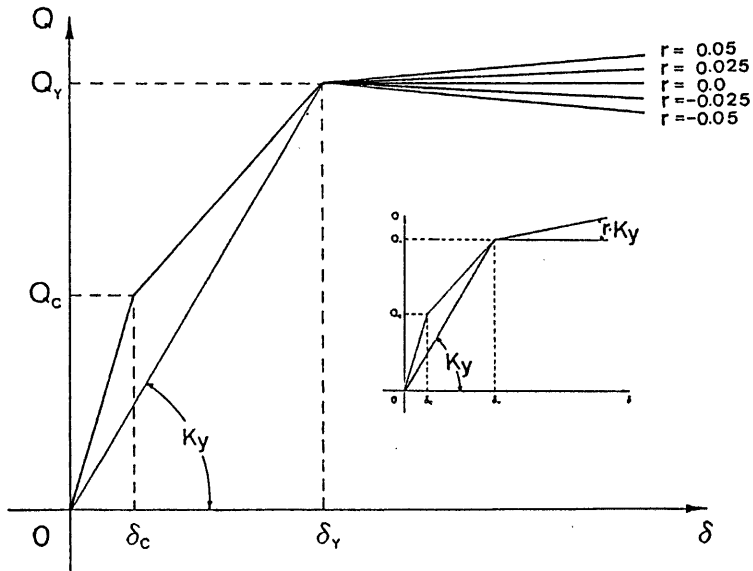


Fig. 36 Skeleton curves used in this analysis

Fig. 37 上段は、降伏震度  $C_y=0.1$  とし、各  $D$  の値について、 $\gamma$  をパラメータとした場合の弾性固有周期  $T_1$  に対する最大応答変位を示したものである。これらの図より次の事柄が指摘できる。

- $\gamma$  の増大と共に、最大応答変位は押さえられる。
- 短周期の領域における最大応答変位に対する  $\gamma$  の影響は大きい。特に  $\gamma < 0$  の場合については、その値の影響が顕著である。
- 長周期の領域においては最大応答変位に対する  $\gamma$  の影響はわずかである。
- 弾性固有周期  $T_1=0.2$  秒における最大応答変位は、 $D$  の値の大きさにかかわらずほとんど同じであるが、 $T_1=0.4$  秒では、 $D=0.8$  の時に  $\gamma=-0.05$  において可成りの最大応答変位の増大がみられる。

Fig. 37 下段には、 $C_y=0.2$  とし、 $C_y$  以外のパラメータは、すべて上述の Fig. 37 上段の場合と同じものを使用した時の解析結果が示されている。Fig. 37 上段と同様の傾向がここにおいても見られるが、 $C_y=0.1$  の場合に比して、短周期領域における最大応答変位ののびは非常に小さいものとなっている。Fig. 37 に対する、それぞれの最大応答塑性率については、Fig. 38 に示してある。

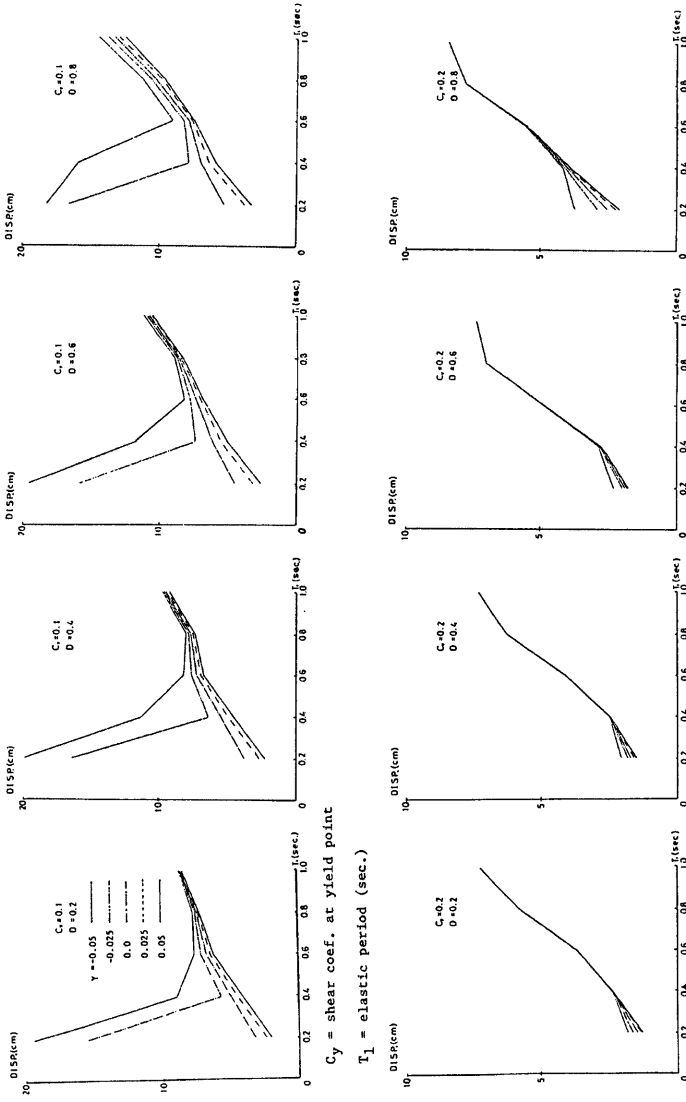


Fig. 37 Disp. spectrum when the values of  $\gamma$  changed

$C_y$  = shear coef. at yield point  
 $T_1$  = elastic period (sec.)

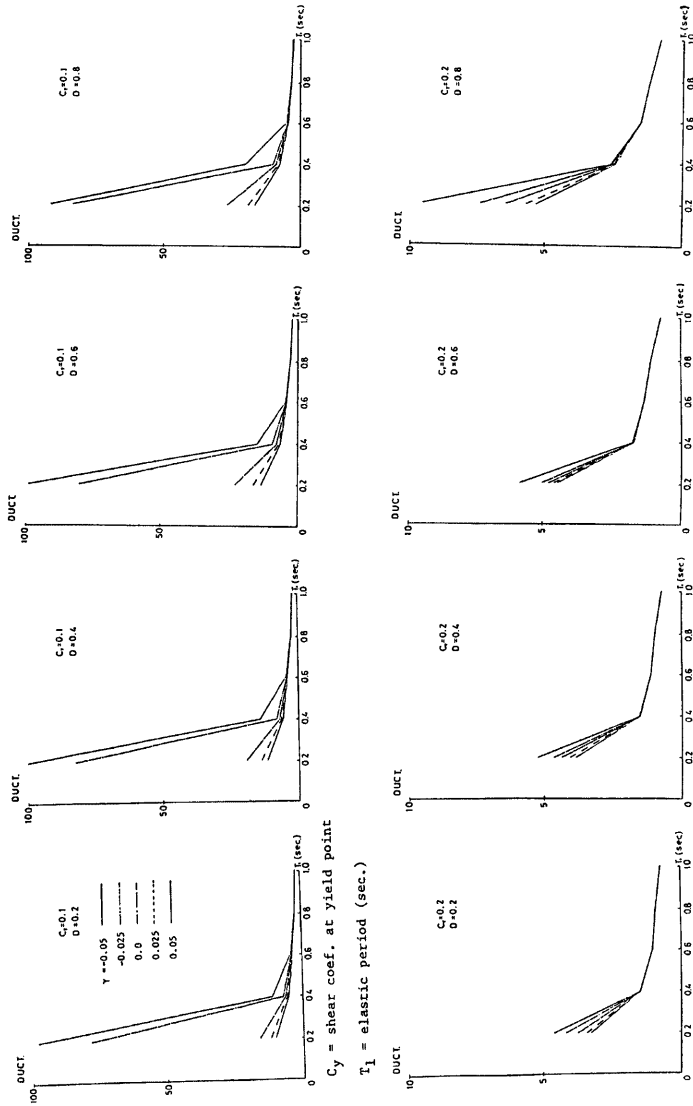


Fig. 38 Duct. ratio spectrum when the values of  $\gamma$  changed

以上, Fig. 37~Fig. 38 に示されるように, 本解析で使用している入力地動の加速度レベルに対して, 降伏震度が0.2以上ある場合には, 降伏点以後のスケルトンカーブの勾配の範囲が  $\gamma$  にして  $-0.05 \sim 0.05$  程度ならば, その値が最大変位, 塑性率応答に及ぼす影響は比較的小さい。しかし, 降伏震度  $C_y=0.1$  程度の低い降伏震度においては, 特に短周期の領域で,  $\gamma$  が負の場合に極端に大きな応答を生じさせることになる。

Fig. 39 は,  $a_s=0.6, a_c=0.4, D=0.6, T_1=0.2$  秒とし,  $\gamma$  をパラメータとした場合の変位応答波形とその履歴曲線を示したものである。すでに2秒のところから, 応答波形に,  $\gamma$  による顕著な相違が認められる。

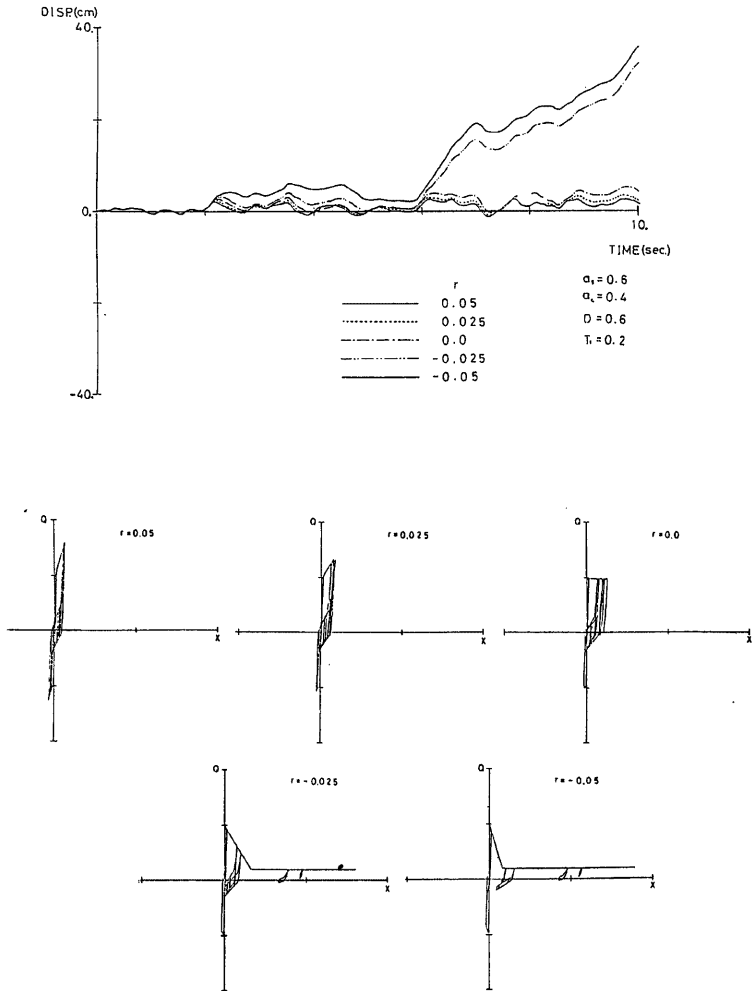


Fig. 39 Comparison of time histories of disp. (upper), comparison of hysteretic responses (X: disp., Q: shear forces) (lower) by the values of  $\gamma$

6秒以後では、 $\gamma < 0$  のものは、降伏耐力の20%まで耐力の低下を生じており、結果として非常に大きな変位を達成しているのがわかる。

## 6. 結 語

本論文で行なわれた解析により得られた結果を、集約すると以下のようになろう。

・スケルトンカーブが比較的安定したもの（降伏点以後の剛性が0以上である場合）に対する応答変位等は、履歴ループの面積を大きくすることによって、おさえることができる。また、定常履歴ループの面積が同じであれば、ループの形状そのものは、最大応答変位等に大きな影響を与えない。

・スケルトンカーブの降伏点以後の勾配が負である場合、入力地動の加速度レベルに比して降伏震度  $C_r$  がある程度小さいと、短周期領域において、ほとんどの場合、最大応答変位等は、スケルトンカーブのみによって決定されてしまう。

## 参 考 文 献

- 1) 若林 實・渡辺泰志：構造部材の復元力特性のモデル化，京都大学防災研究所年報，第26号，昭58.4
- 2) Otani, S.: Hysteresis Model of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis, Journal of The Faculty of Eng. The University of Tokyo, Vol. XXXVI, No. 2, 1981
- 3) 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
- 4) Iwan, W.D.: A Model for the Dynamic Analysis of Deteriorating Structures, Proc. 5th. W.C. E. E., 1977
- 5) 野村設郎・市川文久・金谷光秀・仲山国重：各種復元力特性を有する系の地震応答（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭46, 11
- 6) 村上雅也・西本好男・萩原 勲：Tri-Linear型の復元力特性を持つ一質点系の応答に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭47.10
- 7) 谷 資信・野村設郎：スケルトンカーブと履歴ループとが地震応答に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭48.10
- 8) 青山博之・芳村 学：DEGRADING TRI-LINEAR MODELを用いた地震応答の弾性応答からの推定法（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭50.10
- 9) 渡部 丹・藤堂正喜：設計用模擬地震動に関する研究（その1），日本建築学会論文報告集，第303号，昭56.5
- 10) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，1981