

(18) 耐震補強効果の動的簡略化解析手法

(その1) ラーメン・筋違混合系(Deteriorating System)の地震応答特性

○山田隆夫^{*}, 太田 勲^{**}, 堀江文雄^{***}

§1. 序 構造物の耐震補強要素には、復元力特性が安定した紡錘形を示すものと、筋違等に見られる slip を示すものが考えられる。鉄骨造に於ては、耐震要素として、筋違が用いられる場合が多いが、地震入力に対する耐力の不足を、Bi-linear 特性を有する耐震要素で補うべきか、slip 特性を有する要素で補うべきかは難しい問題で、⁽⁵⁾ いわゆる deteriorating System の地震応答特性を調べておく事は重要である。deteriorating System の研究には、谷野村⁽⁴⁾, N.C. Gates⁽²⁾ があげられる。

谷野村⁽⁴⁾ は、復元力特性は、単調増加のスケルトンカーブと、頂点がスケルトンカーブ上にトレスレ、変位の4次関数で表わされる固有ループ(characteristic Loop)により表現されるとした、(Fig.1)。スケルトンカーブの線形限界の耐力を降伏耐力 Q_y , 変位を降伏変位 Δ_y とし、また、最大耐力の漸近値を終局耐力 Q_u と定義している。降伏耐力と終局耐力の比、定常ループの囲む面積及び、スケルトンカーブの弾性剛性をパラメータとして、実地震波の応答解析を行ない、入力 330 gal の場合について、最大応答変位、速度、加速度の値を検討している。然し、降伏耐力をこのように選ぶ以上、終局耐力を一定とし、降伏耐力を変化させても、変位がある程度大きくなれば、スケルトンカーブは、終局耐力に漸近するから、最大応答変位は殆んど一定になり、顕著な差は出ない。また、スケルトンカーブで決めた降伏変位も、最大塑性率を検討する際の基本となるものであるから、その物理的意義を明確にしておく必要がある。

N.C. Gates⁽²⁾ は、deteriorating 系の復元力は Fig 2 の Upper Locus, Lower Locus に漸近するとし、更に、これは Fig 3 の直線から或る Slip (C) Type, Bi-linear (Y) Type, Elastic (E) Type の組合せにより表わされるとした。パラメータ $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を表 1 の6つの Model に限定して、実地震波応答解析を行ない、非線形応答スペクトルを求め、等価線形化法として、ASE法(Average Stiffness and Energy Method)を提案し、この種の deteriorating 系に適用した場合の精度について検討している。然し、ここで選んだパラメータの内、Model 5 は比較的、実際の構造物の挙動に近いものの、C-Type の $f_b \sim f_c$ 間の剛性を初期剛性 k_c のまま一定としている事、及び、Lower Locus の $x=0$ に於ける耐力を示すものとして、 $(f_b + 2f_c)/(f_b + f_c)$ を直接のパラメータとして選んでいない事が問題である。より現実に近い為には、少なくとも $\beta \approx 10 \sim 20$, $\gamma = 0.05 \sim 0.8$ 程度をカバーしておく必要がある。

復元力特性は、できる限り、実際の構造物の挙動を正確に表現しうるものでなければ、応答解析結果から構造物の安全性を評価する上で役に立たない。

§2. 復元力特性のモデル化 単一筋違材の復元力は既往の実験等⁽³⁾ から、極めて簡単化すれば Fig.4. のように Bi-linear 部分と Slip 部分で表わされる。ここで Bi-linear 部分の耐力や、一度座屈した部材が再引張され、引張降伏へ近づく時の剛性は初期剛性とは異なるが、これらの値は、概ね細長比と ductility によって決められる。

筋違とラーメンの混在する系で、両者の耐力が干渉する事なく分離して扱い得ると仮定すれば、系の復元力は Fig.5 に示すように、筋違分の復元力とラーメンの Bi-linear 復元力、及び加工硬化を表わす弾

性分の和として表わされる。ここで更に、筋違の Slip 部分のみを残して、その Bi-linear 部分をラ-メンの Bi-linear 部分へ移しておくと、Fig. 6 のように系の復元力は、完全な Slip 部分と Bi-linear 部分及び弾性部分の和として表わされる。系の Total 復元力を見て解るように、Fig. 5 と Fig. 6 の差は、初期の単調載荷時の復元力を除けば、殆んどない。Fig. 6 のようにすると、所要の復元力をつくる際の筋違とラ-メンの組合せが flexible になる。Fig. 6 に於てパラメータ α, β, δ, e を下記のように選ぶ。

$$k_s = \beta K_0, \quad k_R = \delta K_0, \quad k_E = e K_0 \quad (1)$$

$$K_0 = k_0 + k_R + k_E = (\beta + \delta + e) K_0 \quad (2)$$

$$\therefore \delta = 1 - (\beta + e) \quad (3)$$

$$f_p = y f_s + y f_R, \quad \alpha f_p = y f_R \quad (4)$$

$$\therefore y f_s = (1 - \alpha) f_p \quad (5)$$

§ 3. 振動方程式の無次元化

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + K_0 f(x) = -m a \quad (6)$$

$$\omega_0^2 = K_0/m \quad (7)$$

$$c = 2h K_0/\omega_0 \quad (h: \text{減衰定数}) \quad (8)$$

(6), (7), (8) より

$$\ddot{x} + 2h \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 f(x) = -a \quad (9)$$

$$\mu = x/x_y, \quad \dot{\mu} = \dot{x}/x_y, \quad \ddot{\mu} = \ddot{x}/x_y \quad (10)$$

$$g(\mu) = f(x)/x_y \quad (\mu: \text{ductility}) \quad (11)$$

(9), (10), (11) より

$$\ddot{\mu} + 2h \omega_0 \dot{\mu} + \omega_0^2 g(\mu) = -a/x_y \quad (12)$$

降伏加速度: a_y とすると

$$K_0 x_y = m a_y \quad (13)$$

$$x_y = (m/K_0) a_y = a_y/\omega_0^2 \quad (14)$$

(12), (14) より

$$\begin{aligned} \ddot{\mu} + 2h \omega_0 \dot{\mu} + \omega_0^2 g(\mu) &= -\omega_0^2 \frac{a}{a_y} = -\omega_0^2 \frac{a}{a_y} \frac{a_{max}}{a_{max}} \\ &= -\omega_0^2 \rho \frac{a}{a_{max}} = -\hat{a} \end{aligned} \quad (15)$$

(a_{max} : 入力加速度 a の最大値)

$$\rho = a_{max}/a_y \quad (16)$$

$$(12), (15) \text{ より } a = \hat{a} \cdot x_y \quad (17)$$

§ 4. 復元力の無次元化 ($x \rightarrow \mu$ 変換) (Fig. 7)

(1) Slip 要素

$$f_s = k_s x = \beta K_0 \mu x_y \quad (18)$$

$$g_s = f_s/K_0 x_y = \beta \mu \quad (19)$$

$$f_p = K_0 x_y \quad (20)$$

$$y f_s = (1 - \alpha) f_p = (1 - \alpha) K_0 x_y \quad (21)$$

$$y g_s = y f_s/K_0 x_y = 1 - \alpha \quad (22)$$

$$y \mu_s = y g_s/\beta = (1 - \alpha)/\beta \quad (23)$$

(2) Bi-linear 要素

$$f_R = k_R x = \delta K_0 \mu x_y \quad (24)$$

$$g_R = f_R/K_0 x_y = \delta \mu \quad (25)$$

$$y f_R = \alpha f_p = \alpha K_0 x_y \quad (26)$$

$$y g_R = y f_R/K_0 x_y = \alpha \quad (27)$$

$$y \mu_R = y g_R/\delta = \alpha/\delta \quad (28)$$

(3) Elastic 要素

$$f_e = k_E x = e K_0 \mu x_y \quad (29)$$

$$g_e = f_e/K_0 x_y = e \mu \quad (30)$$

(4) Total

$$g(\mu) = g_s(\mu) + g_R(\mu) + g_e(\mu) \quad (31)$$

§ 5. 振動解析に用いたパラメータ

復元力を規定するパラメータとして、

$\alpha = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$, $\beta = 0.1, 0.2$, $e = 0.05$ を選んだ。Fig. 8 は、過去の筆者の筋違付架構の実験例⁽⁴⁾ に対して、パラメータ α, β, e を上記のように選んで、復元力を示したものであるが、かなり良く特徴をつかんでいると思われる。パラメータの値として、上述の範囲をカバーしておけば、一般の場合に対して も有効であると考えられる。

地震応答解析は、固有周期 $T = 0.1 \sim 1.0$ 秒迄 (0.1 秒おき)、減衰 $h = 0.05$ とし、(i) EL CENTRO NS 1940, (ii) TAFT EW 1952 (iii) HACHINOE EW 1968 (iv) MIYAGIOKI EW 1978 の入力レベル $\rho = 1.5, 2.5$ とし変位・速度・加速度・履歴吸収エネルギー・地震入力エネルギー等を 20 秒間に亘り求めた。

§ 6. 応答解析結果と考察

(1) 最大応答変位 (Fig. 10)

- (i) ρ の影響 $\rho=2.5$ の時の値は、 $\rho=1.5$ の値に対して、 α, β の値に関係なく、概ね2倍程度である。
- (ii) α の影響 α が大きくなると、一般に応答値は減少する。また、 α が小さい時は、地震波の特性と関係する為か、特に $\alpha=0.2$ では、ハブ波の応答値が他波の値にくらべかなり大きくなっている。この現象は α が大きくなると多少薄れる。
- (iii) β の影響 地震波形のスペクトル特性と β の相違による非線形性から、多少の差は出るが、その差は高々 10% 程度で何れか大きいという訳ではない。

(2) 最大応答速度 (Fig. 11)

- (i) ρ の影響 $\rho=2.5$ の時の値は、 $\rho=1.5$ の値に対して、 α, β の値に関係なく一般に大きくなるが、この値は、 $\alpha=0.2$ で $0.7/0.4=1.75$ 、 $\alpha=0.4\sim 0.8$ では $0.6/0.4=1.5$ 程度である。
- (ii) α の影響 α が大きくなると一般に応答は減少し、特に短周期側にその傾向は強い。また α が小さい時は、地震波の特性と関係する為か、ハブ波の応答値が多少、他波の値にくらべ大きい。この傾向は、 α が大きくなると薄れる。
- (iii) β の影響 変位の項と同じ。

(3) 地震入力エネルギー (Fig. 12)

- (i) ρ の影響 $\rho=2.5$ の時の値は $\rho=1.5$ の値に対して α, β の値に関係なく一般に大きい。この値は $\alpha=0.2$ で $1.5/0.55=2.7$ 、 $\alpha=0.4\sim 0.8$ で $1.2/0.5=2.4$ 倍程度である。
- (ii) α の影響 α の値による相違は顕著でないが、 $\alpha=0.2$ の時の値は多少大きい。一般に最大値を示す固有周期は α が大きくなるにつれ長周期側へずれている。また、全ての α に対して、地震波の特性と関係からか、ハブ波、宮城波の値が他波の値よりかなり大きい。
- (iii) β の影響 変位の項と同じ。

§ 7. 結 論

耐震補強の為の基礎資料を得る事を目的として、*deteriorating* 系の復元力特性のモデル化を行ない実地震4波に対する応答特性を多少パラメトリックに求め、その特徴を概観的に論じた。今後は確率論的又は統計的な検討を加えていきたい。

§ 8. 文 献

- (1) 谷野村・永坂・平松：鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性(その3)。建論 No. 228, p. 50, 2.
- (2) N.C. Gates.: The Earthquake Response of Deteriorating Systems. C.I.T. EERL, 77-03.
- (3) 若林・野中・中村・森野・吉田：繰返し軸方向力を受ける部材の挙動に関する実験。京大防災研年報, p. 48, 4.
- (4) 山田・高梁・田中：球形クワ支持構造の履歴載荷実験と弾塑性解析。29回、構造工学シンポ, p. 58, 2.
- (5) 山田・堀江・太田他：軽量鉄骨事務所建築物の耐震補強例。

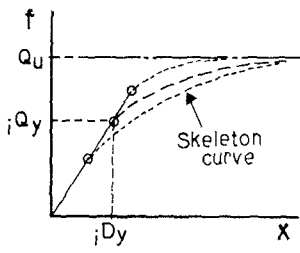


Fig. 1-1

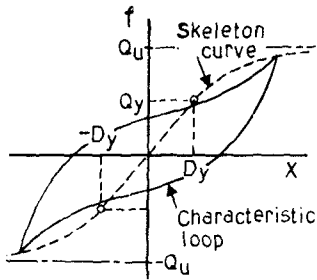


Fig. 1-2

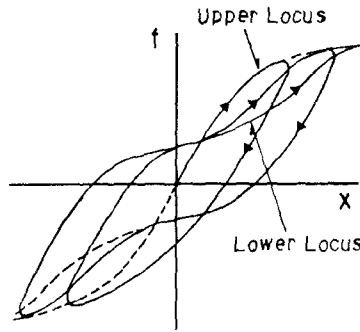


Fig. 2

Table. 1

Model	$\alpha = \frac{k_e}{k_0}$	$\beta = \frac{k_s}{k_c}$	$\gamma = \frac{x_s}{x_c}$	$\delta = \frac{f_b}{f_c}$
1		0.2	1.0	0.1
2		0.2	1.0	0
3	0.05	1.0	1.0	0
4		0.2	0.6	0.1
5		5.0	0.6	0.1
6		Bi-Linear		

($k_0 = k_s + k_c + k_e$)

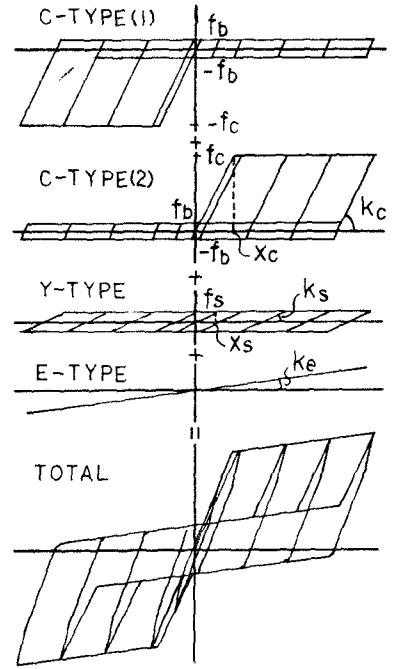


Fig. 3

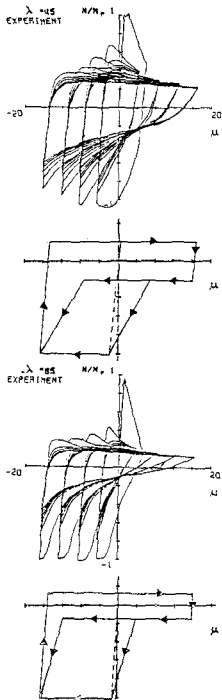


Fig. 4

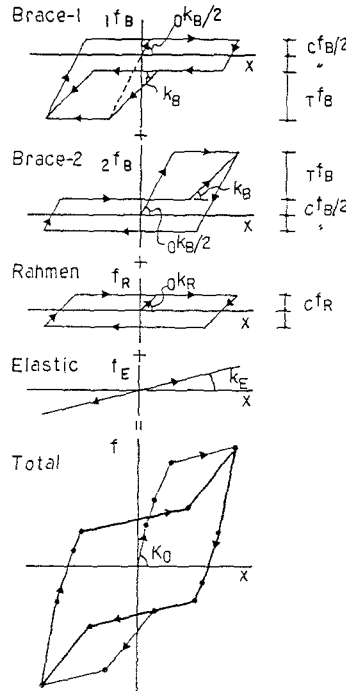


Fig. 5

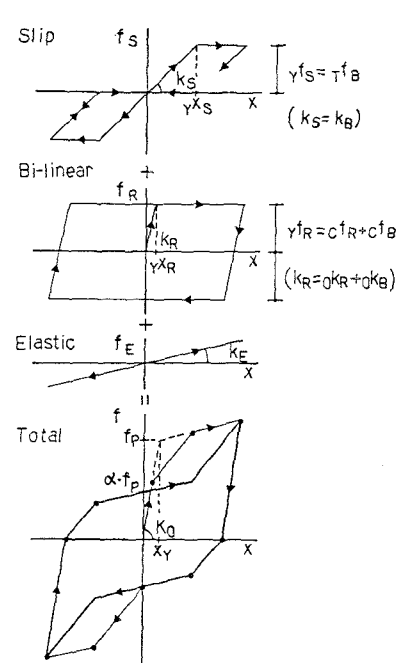


Fig. 6

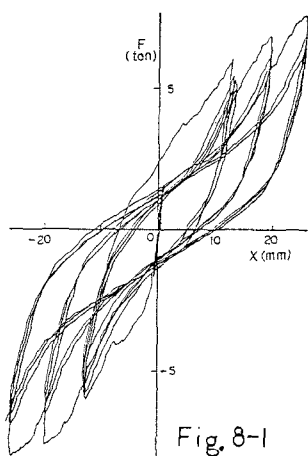
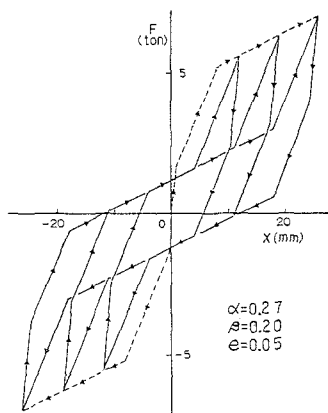


Fig. 8-1



$\alpha=0.27$
 $\beta=0.20$
 $e=0.05$

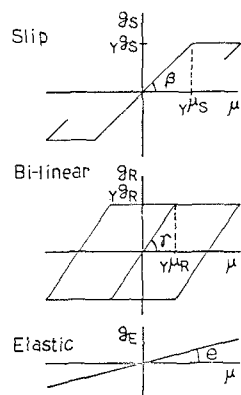


Fig. 7

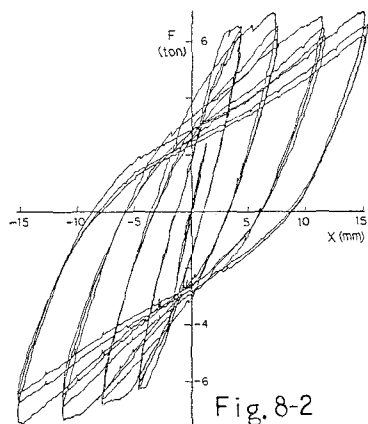
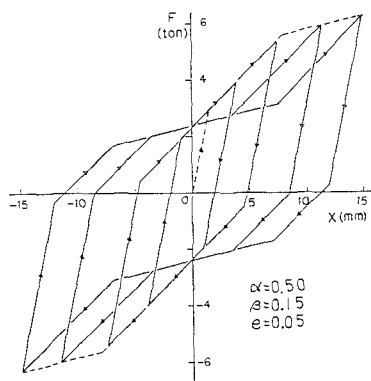


Fig. 8-2



$\alpha=0.50$
 $\beta=0.15$
 $e=0.05$

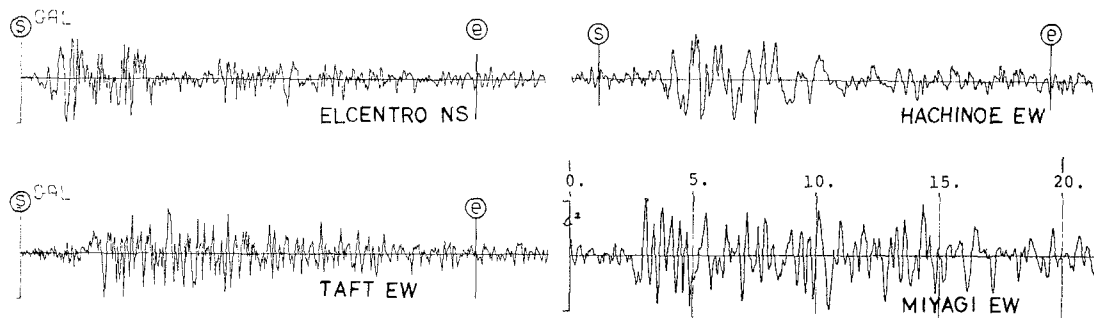


Fig. 9 λ力地震波 (20秒間)

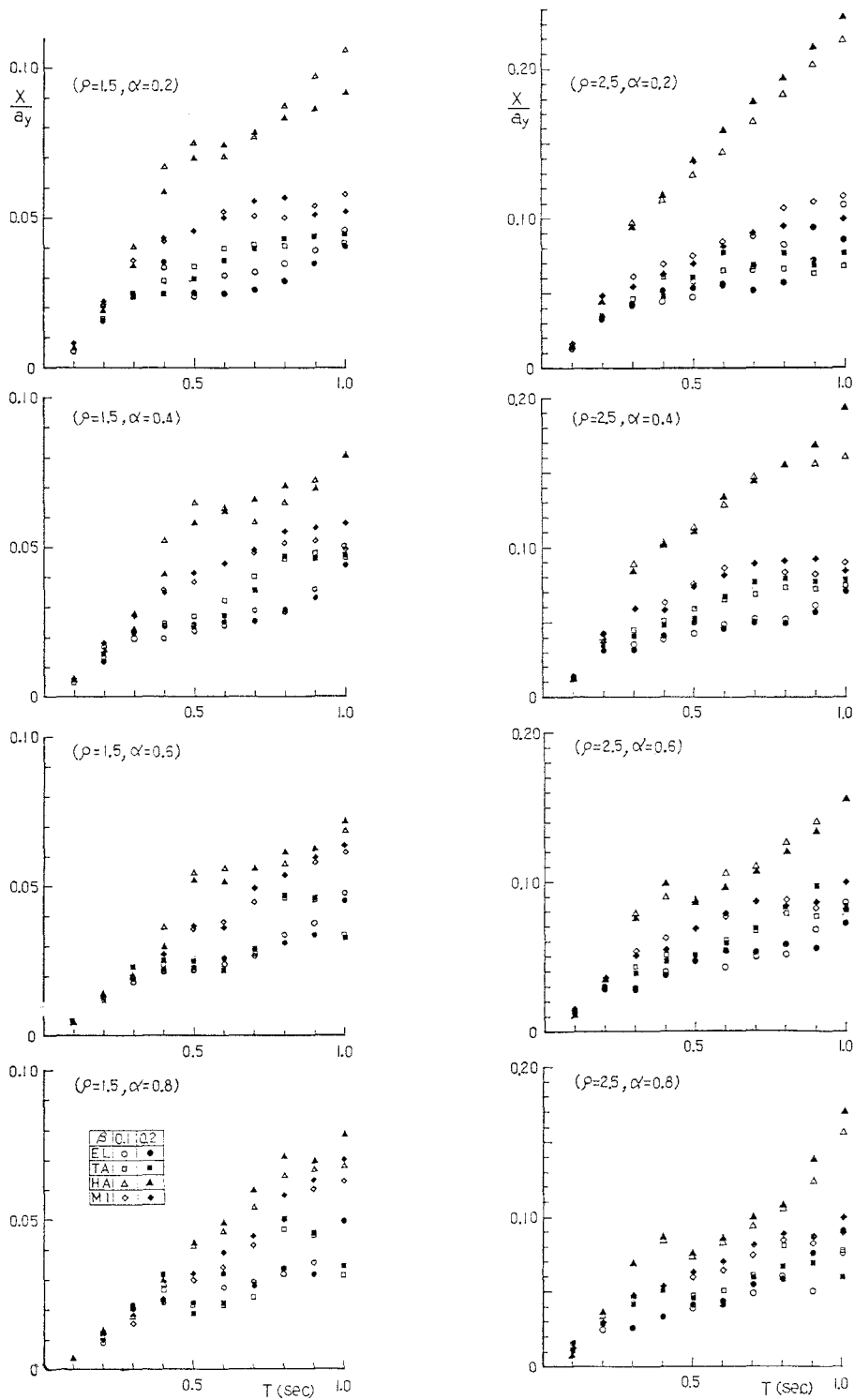


Fig.10

Fig.11

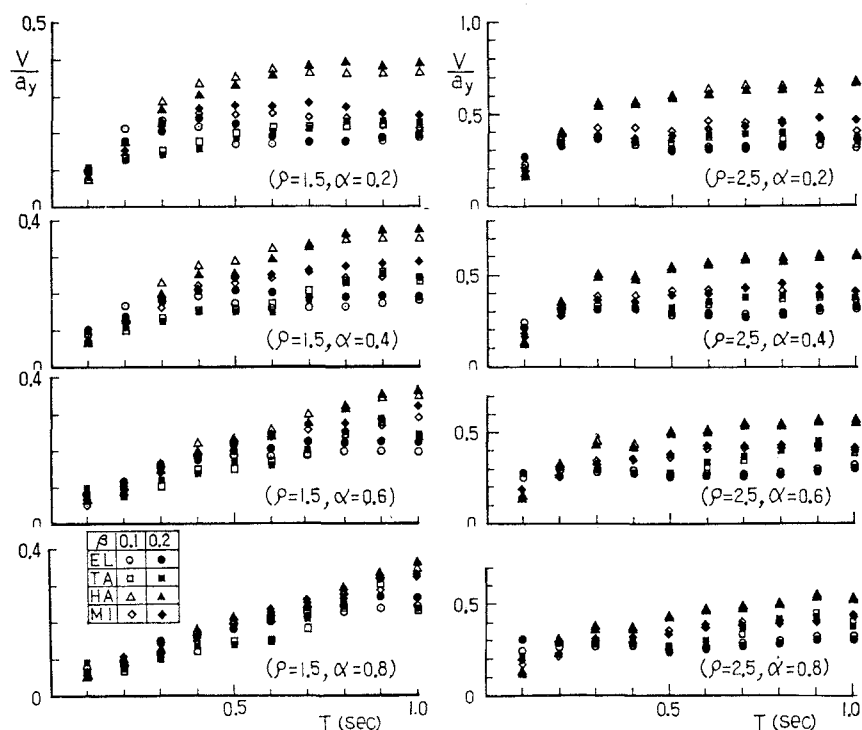
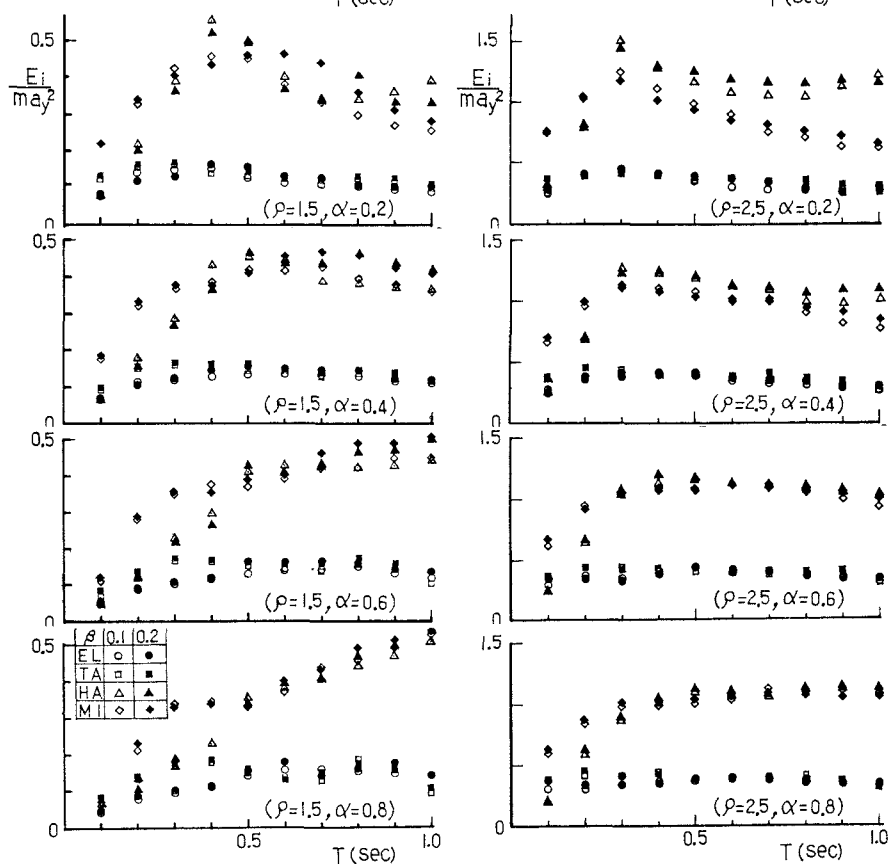


Fig.12



Simple Dynamic Analysis Methods on the Effect of Reinforcement

(Part I) Earthquake response analysis of deteriorating system :

T. Yamada *1
T. Ohta *2
F. Horie *2

There are two methods in strengthening on seismic resistant design. One is to provide the seismic resistant structural elements with bi-linear stable hysteresis loops and the other is to provide those with slip hysteresis loops. Structures with slip elements present deteriorating characteristics. Therefore, it is important to study the dynamic behavior of deteriorating systems under excitations due to a severe earthquake.

The studies on this subject have been developed by Dr. Tani and N.C. Gates et al. However since the analytical parameters are limited in particular case in these works, the results are not always applicable for design of general deteriorating structures.

In this thesis, at first the authors propose simple and effective hysteresis models. Numerical studies on the response of typical systems are performed in using four real observed earthquake accelerograms.

Then, the results of the response such as displacement, velocity and dissipation energy are presented.

Finally, the effect of parameters defining the hysteresis loop is discussed.

-
- 1) Nippon Kokan K.K.
 - 2) Laboratory of Horie Architecture and Engineering