

(40) 剛性低下型多層構造物の確率的地震応答解析と構造物の損傷集中に関する研究

尾崎昌凡<sup>\*</sup> 藤沢正視<sup>\*\*</sup> 石井勝<sup>\*\*\*</sup> 安田征一郎<sup>\*\*\*</sup>

1. 序

本研究はランダム振動理論による剛性低下型の復元力特性を有する多層構造物の実用的地震応答解析及び損傷集中を起こす多層構造物の復元力特性の評価法を確立することを目的とする。

最初に、剛性低下型の復元力特性を有する多層せん断系構造物をランダム振動理論によって地震応答解析する手法を紹介し、その代表的なモデルとしてピーク指向型の復元力特性を有する多層構造物について、最大応答スペクトル値と標準偏差を求め、時刻歴応答解析によって求めた最大応答値の平均値及び標準偏差と比較している。

次に、剛性低下型構造物の復元力特性を評価する方法を紹介し、多層構造物における損傷集中をその応答解析結果から評価する。

2. 地震動のモデル化

ランダム振動理論によって地震応答解析するために、地震動の水平方向加速度波形を(1)式で示しEパワースペクトル密度関数 $S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ と地震動の定常継続時間 $T_0$ で表現する。

$$S_{\ddot{x}_g}(\omega) = \frac{1 + 4\bar{\xi}_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{[1 + (4\bar{\xi}_g^2 - 2)\left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^4]} S_0 \quad (1)$$

ここに、 $\omega_g$ :地盤の固有振動数、 $\bar{\xi}_g$ :地盤の減衰定数、 $S_0$ : Constant White Noise である。

記録された国内地震波(66成分)について、地動の卓越周期 $T_g$ と地盤の減衰定数 $\bar{\xi}_g$ の関係を図-1に示す。一般に地盤の減衰定数 $\bar{\xi}_g$ は卓越周期 $T_g$ が短周期になる程小さく、長周期では大きくなっている。

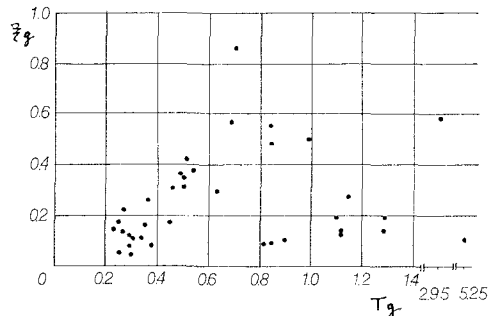


図-1 卓越周期 $T_g$ と減衰定数 $\bar{\xi}_g$ の関係

3. 多層せん断系構造物の線形応答解析

構造物が静止の状態から地動を受けて応答が定常状態になるまでの時間 $T_{cor}$ を(2)式で近似すると、図-2に示すように、20波の模擬地震波を用いたシミュレーションによる1質点系モデルのせん断力弾性スペクトルの平均値と、ランダム振動理論による応答スペクトル値の平均値( $P=0.368$ )は比較的によく一致する。従って、応答の等価な定常継続時間 $T_s$ は(3)式で表す。

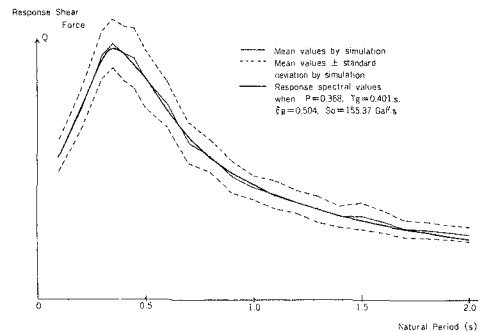


図-2 線形応答スペクトル値の比較

\*千葉大学教授 エ博 \*\*建設省建築研究所研究員 \*\*\*千葉大学 大学院生

$$T_{cov} = \frac{1.5}{\xi_i \omega_i} \quad (2)$$

$$T_p = T_D - T_{cov} \quad (3)$$

ここに、 $\xi_i$ :建物の一次減衰、 $\omega_i$ :建物の一次固有振動数である。

基礎固定の多層せん断系構造物が地動  $S\ddot{x}_g(\omega)$  を受けた時、応答の変位及び速度の分散は(4)及び(5)式で表わされる。

$$\sigma_{y_i}^2 \doteq \sum_{j=1}^n D_{ij} \lambda_{oj} = \sum_{j=1}^n D_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} S\ddot{x}_g(\omega) \cdot |H_j(\omega)|^2 d\omega \quad (4)$$

$$\sigma_{\dot{y}_i}^2 \doteq \sum_{j=1}^n D_{ij} \lambda_{ij} = \sum_{j=1}^n D_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} S\ddot{x}_g(\omega) \cdot \omega^2 \cdot |H_j(\omega)|^2 d\omega \quad (5)$$

$$D_{ij} = [\phi_{ij}^2 - 2\phi_{ij} \cdot \phi_{i+1,j} + \phi_{i+1,j}^2] \frac{\Gamma_j^2}{M_j^2} \quad (6)$$

$$\Gamma_j = [\phi_{ij}]^T \cdot [m_i] \cdot \{1\}, \quad M_j = [\phi_{ij}]^T \cdot [m_i] \cdot [\phi_{ij}] \quad (7)$$

$$\lambda_{oj} = \int_{-\infty}^{\infty} S\ddot{x}_g(\omega) \cdot |H_j(\omega)|^2 d\omega = \frac{S_0}{\omega_j^4} \pi \frac{A_2 A_3 - A_1 A_4 + A_3 B^2}{A_1 (A_2 A_3 - A_1 A_4) - A_3^2} \quad (8)$$

$$\lambda_{ij} = \int_{-\infty}^{\infty} S\ddot{x}_g(\omega) \cdot \omega^2 \cdot |H_j(\omega)|^2 d\omega = \frac{S_0}{\omega_j^4} \pi \frac{A_3 + A_1 B^2}{A_1 (A_2 A_3 - A_1 A_4) - A_3^2} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= 2 \left( \frac{\xi_g}{\omega_g} + \frac{\xi_j}{\omega_j} \right), & A_2 &= \frac{1}{\omega_j^2} + 4\xi_g \xi_j \frac{1}{\omega_g \omega_j} + \frac{1}{\omega_j^2} \\ A_3 &= 2 \left( \frac{\xi_g}{\omega_g \omega_j^2} + \frac{\xi_j}{\omega_j^2 \omega_j} \right), & A_4 &= \frac{1}{\omega_g^2 \cdot \omega_j^2}, & B &= \frac{2\xi_g}{\omega_g} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$|H_j(\omega)|^2 = \frac{1}{\omega_j^4 [1 + (4\xi_j^2 - 2) \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^4]} \quad (11)$$

また、 $\phi_{ij}$  及び  $m_i$  はモード及び質量マトリックスの要素、 $\omega_j$  及び  $\xi_j$  は  $j$  番目のモードに対する固有振動数及び減衰定数とする。

閾値を越えるピークの分布がポアソン過程に属すると仮定すると、応答の等価な定常継続時間  $T_S$  における最大応答変位の応答スベクトル値  $D_y$  は(12)式で示され、本論文では  $D_y$  の平均値を確率  $P=0.368$  の値で近似する。

$$D_{y_i} = \sigma_{y_i} \sqrt{2 \ln \left\{ \frac{\Omega_i}{\pi} \cdot T_S \cdot (-\ln P)^{-1} \right\}}, \quad \Omega_i = \frac{\sigma_{\dot{y}_i}}{\sigma_{y_i}} \quad (12)$$

#### 4. 多層せん断系構造物の非線形応答解析

本論文では、数多くの実験結果から、剛性低下型の復元力特性を有する構造物を次のようにモデル化する。

1) 剛性低下型の非線形モデルは図-3に示すように、正負の降伏レベルの高さがほぼ等しく、応答が降伏点を一度越える度に、それぞれ零に近い正の勾配の降伏後剛性を有する。

2) 応答が正又は負の降伏レベルを越えて、構造物が塑性域に進入すると、系の剛性は低下し同時に等価粘性減衰で評価される履歴ループを持つようになる。低下した剛性は反対側の降伏点と原点を結ぶ線上の任意の点で交差する。原点を通る場合を原点指向の剛性低下型モデルと定義し、反対側の降伏点を通る場合をピーク指向の剛性低下型モデルと定義する。

ランダム振動理論によつて、構造物の非線形応答を取り扱う場合の問題として、構造物の応答が狭帯域過程である場合に、閾値を越えるピークの分布はポアソン・クローシングの仮定に従つて独立に起こるのでなく、大きなピークは群集をなして発生する傾向があることである。

しかし、非線形応答では、応答が降伏レベルを越える毎にエネルギーを消費し、線形狭帯域過程である場合に予想される群集の数を減少させる傾向がある。

従つて、本論文では構造物の線形応答が狭帯域過程である場合でも、その非線形応答を取り扱う場合に、降伏レベルを越えるピークの分布をポアソン・クローシングと仮定して、非線形応答の近似的解析を行うこととする。

非線形応答解析の数値計算過程を次に示すように〔ステップ1〕より〔ステップN〕までに区分する。

〔ステップ1〕

各層の初期の剛性  $k_i(1)$ 、正の初期の降伏耐力  $\bar{Q}_{Yi}(1)$ 、同じく降伏変位  $\bar{D}_{Yi}(1)$  及び負の初期の降伏耐力  $\underline{Q}_{Yi}(1)$ 、同じく降伏変位  $\underline{D}_{Yi}(1)$  とする。ここで各記号の添字(1)は計算過程の〔ステップ1〕を表す。いま、図-4のように各層の正の降伏耐力  $\bar{Q}_{Yi}(1)$  が負の降伏耐力  $\underline{Q}_{Yi}(1)$  より低い場合は振幅が正の降伏耐力  $\bar{Q}_{Yi}(1)$  と等しい負の仮定の降伏耐力  $-\bar{Q}_{Yi}(1)$  を設定する。

正の降伏耐力  $\bar{Q}_{Yi}(1)$  が負の降伏耐力  $\underline{Q}_{Yi}(1)$  より逆に高い場合は以下すべて逆となるので説明を省略する。

構造物の応答が定常となった後、ある層例えばj層が最初に降伏する場合を考える。j層の応答の最大ピークの平均値が最初に正の降伏耐力  $\bar{Q}_{Yj}(1)$ 、または負の仮定の降伏耐力  $-\bar{Q}_{Yj}(1)$  に達し、さら

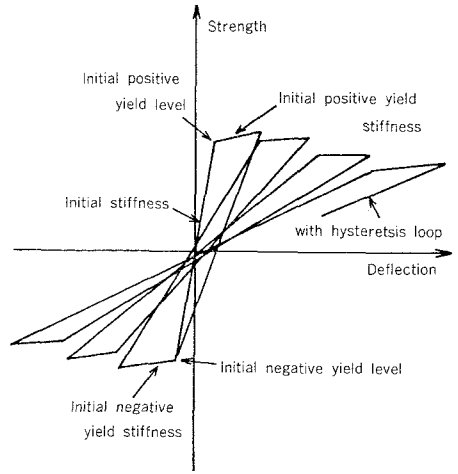


図-3 剛性低下型の復元力特性

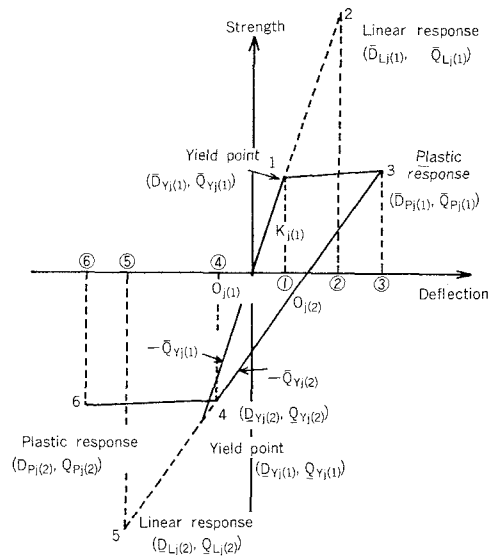


図-4 剛性低下型モデル

にその後最大ピークの平均値が  $\bar{Q}_{Y_i(1)}$  または  $-\bar{Q}_{Y_i(1)}$  を最初に大きく越えるまでの平均時間を (13) 式で近似する。

$$\left. \begin{aligned} E[T(1)] &= \text{Minimum } E[T_{i(1)}] = E[T_{j(1)}] \\ E[T_{i(1)}] &= \frac{2\pi}{\Omega_{i(1)}} \exp \frac{1}{2} \left\{ \frac{\bar{D}_{Y_i(1)}}{\sigma_{Y_i(1)}} \right\}^2 = \frac{2\pi}{\Omega_{i(1)}} \exp \frac{1}{2} \left\{ \frac{-\bar{D}_{Y_i(1)}}{\sigma_{Y_i(1)}} \right\}^2 \end{aligned} \right\} (13)$$

よ層の応答の最大ピークの平均値が正の降伏耐力  $\bar{Q}_{Y_i(1)}$  を越える確率と負の仮想の降伏耐力  $-\bar{Q}_{Y_i(1)}$  を越える確率は等しいので、正の降伏耐力を越える場合をケース (I<sub>j</sub>) とし、負の仮想の降伏耐力を越える場合をケース (II<sub>j</sub>) とし、まずケース (I<sub>j</sub>) について最初に計算する。もし、この構造物が降伏点を有しない場合、(13) 式で示した平均時間におけるよ層の線形系の応答スペクトル値の平均値  $\bar{D}_{L_j(1)}$ 、 $\bar{Q}_{L_j(1)}$  は (14) 式によって求められる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{D}_{L_j(1)} &= \sigma_{Y_j(1)} \sqrt{2 \ln \left\{ \frac{\Omega_{j(1)}}{\pi} E[T(1)] \right\}} \\ \bar{Q}_{L_j(1)} &= R_{j(1)} \cdot \bar{D}_{L_j(1)} \end{aligned} \right\} (14)$$

多層構造物のよ層の応答がその降伏レベルを越え、その最大ピークの平均値が単独に塑性域に進入する場合の研究は理論的に未だ解決されていないが、1自由度系のシミュレーションによる研究から塑性応答値のポテンシャルエネルギーは図-4に示すように線形応答スペクトル値の弾性ポテンシャルエネルギーとほぼ等しいと考えられる。従って図-4から幾何学的に塑性応答スペクトル値の平均値  $\bar{D}_{P_i(1)}$ 、 $\bar{Q}_{P_j(1)}$  が求められ、この値が次の〔ステップ2〕におけるよ層の降伏点の値  $\bar{D}_{Y_i(2)}$ 、 $\bar{Q}_{Y_i(2)}$  となる。添字 (2) は〔ステップ2〕を示す。同時に初期の剛性  $R_{j(1)}$  は〔ステップ2〕では図-4に示すように  $R_{j(2)}$  に変わり、初期の原点  $O_{j(1)}$  も  $O_{j(2)}$  に移動することになる。

よ層が降伏すると図-4の4角形の面積 ( $O_{j(1)}$ 、1、3、 $O_{j(2)}$ ) の履歴エネルギーがよ層以外の層にどのように影響を与えるか未だ理論的に解明されていないが、シミュレーションの結果によると、この履歴エネルギーは他の層の線形応答におけるポテンシャルエネルギーに比例して、他の層の応答値を低下させることが知られている。また同時によ層より上部の層は丁度その部分だけが独立した構造物となったように振動数が増加することも知られている。本計算ではこれらの影響を考慮し、〔ステップ1〕におけるよ層以外の層の応答値を計算している。

〔ステップ2〕

〔ステップ1〕の最後から次にある層 (例えばよ層以外の  $l$  層) の最大ピークの平均値がその層の正の降伏耐力または仮想の負の降伏耐力を越えるまでの平均時間を (15) 式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} E[T(2)] &= \text{Minimum } E[T_{i(2)}] = E[T_{l(2)}] \\ E[T_{i(2)}] &= \frac{2\pi}{\Omega_{i(2)}} \exp \frac{1}{2} \left\{ \frac{\bar{D}_{Y_i(2)}}{\sigma_{Y_i(2)}} \right\}^2 = \frac{\pi}{\Omega_{i(2)}} \exp \frac{1}{2} \left\{ \frac{D_{R_i(1)}}{\sigma_{Y_i(2)}} \right\}^2 \end{aligned} \right\} (15)$$

〔ステップ1〕の場合と同様、 $l$  層において正の降伏耐力を越える場合をケース (I<sub>l</sub>) とし、仮想

の負の降伏耐力を越える場合をケース(Ⅱ<sub>ℓ</sub>)とし、ケース(Ⅰ<sub>ℓ</sub>)についてまず計算する。

ℓ層が〔ステップ1〕に続いて〔ステップ2〕で連続してその層の降伏耐力を越える場合(j=ℓ)については次のように考える。〔ステップ2〕のℓ層の正の降伏耐力 $\bar{Q}_{Yj(2)}$ が負の降伏耐力 $Q_{Yj(2)}$ の絶対値より小さい場合は、仮想の負の降伏耐力 $-\bar{Q}_{Yj(2)}$ を設定する。この場合も〔ステップ1〕で説明したように応答の最大ピークの平均値が正の降伏耐力 $\bar{Q}_{Yj(2)}$ を越える確率と仮想の負の降伏耐力 $-\bar{Q}_{Yj(2)}$ を越える確率は等しいと考えられる。

ℓ層の応答スペクトル値の平均値を計算するために〔ステップ1〕で正の降伏耐力を越えた後、〔ステップ2〕では負の降伏耐力か、仮想の負の降伏耐力を越える場合を計算する。

即ち、仮想の負の降伏耐力を越えるまでの平均時間は(16)式で、負の降伏耐力を越えるまでの平均時間は(17)式で求められる。

$$E[T_{j(2)}] = \frac{\pi}{\Omega_{j(2)}} \exp \frac{1}{2} \left\{ \frac{-\bar{D}_{Yj(2)}}{\sigma_{Yj(2)}} \right\}^2 \quad (16)$$

$$E[T_{j(2)}] = \frac{\pi}{\Omega_{j(2)}} \exp \frac{1}{2} \left\{ \frac{D_{Yj(2)}}{\sigma_{Yj(2)}} \right\}^2 \quad (17)$$

従って〔ステップ2〕における各層の線形系の応答スペクトル値の平均値は(18)式によって計算できるので、〔ステップ1〕に示した方法で各層の〔ステップ2〕における最終応答値を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} D_{Li(2)} &= \sigma_{Yi(2)} \sqrt{2 \ln \left\{ \frac{\Omega_{Li(2)}}{\pi} E[T_{(2)}] + \exp \frac{1}{2} \left( \frac{D_{Ri(1)}}{\sigma_{Yi(2)}} \right)^2 \right\}} \\ Q_{Li(2)} &= k_{i(2)} \cdot D_{Li(2)} \end{aligned} \right\} (18)$$

〔ステップN〕

多層せん断系構造物の非線形応答スペクトル値の正負の平均値は〔ステップ1〕と〔ステップ2〕を交互に応答の等価な定常継続時間 $T_s$ まで繰り返すことにより求められる。

この場合、ℓ層が数回降伏する時は、ケース(Ⅰ<sub>j</sub>)で最初に正の降伏耐力を、次に負の降伏耐力を交互に越える場合を考える。次に、ケース(Ⅱ<sub>j</sub>)では最初に負の降伏耐力を、次に正の降伏耐力を交互に越える場合を考え、結局ℓ層の応答スペクトル値の正負の平均値は、ケース(Ⅰ<sub>j</sub>)の正負の応答とケース(Ⅱ<sub>j</sub>)の正負の応答をそれぞれ平均することによって求められる。

〔標準偏差〕

多層せん断系構造物の非線形応答スペクトル値の標準偏差は、各層の正負の非線形応答スペクトル値の分散を(19)及び(20)式で計算することにより(21)式から簡単に求めることができる。

$$\bar{V}_i = \sum_{n=1}^m \bar{V} \delta_i(n) = \sum_{n=1}^m \left\{ \bar{D}_{Yi}(n+1) - \bar{D}_{Yi}(n) \right\}^2 \quad (19)$$

$$\underline{V}_i = \sum_{m=1}^m \underline{V} \delta_i(m) = \sum_{m=1}^m \left\{ \underline{D}_{Yi}(m+1) - \underline{D}_{Yi}(m) \right\}^2 \quad (20)$$

$$\bar{\sigma}_i = \sqrt{\bar{V}_i}, \quad \underline{\sigma}_i = \sqrt{\underline{V}_i} \quad (21)$$

ここに  $\sigma$  及び  $\sigma_i$  は、 $i$ 層における正及び負の応答スペクトル値の標準偏差を表わす。

剛性低下型の多層せん断系構造物の代表的モデルとしてピーク指向の復元力特性を有する2つのタイプの構造物を選び、ランダム振動理論による応答解析の結果と、定常継続時間  $T_0=20.48$  秒の20波の模擬地震波を用いた時刻歴応答解析の結果との比較を行なった。

表1, 2は、本計算例に用いられた2つのタイプの剛性低下型4層構造物の力学的特性を示したものである。

図-5には、以上の2つのタイプの構造物の最大応答変位の塑性率の平均値及び標準偏差について、時刻歴応答解析の結果とランダム振動理論による応答解析の結果とが比較されている。

表-1 モデル Type 1

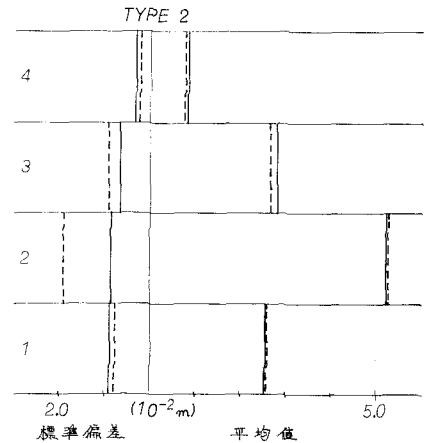
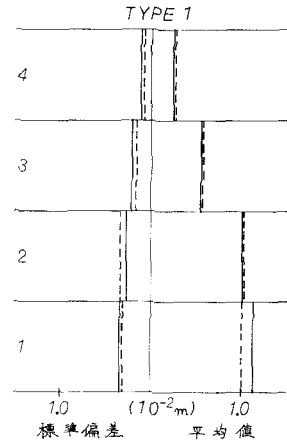
Story		4	3	2	1
Mass	(t)	98.0	98.0	98.0	98.0
Initial Stiffness	(KN/m)	80.16	80.16	80.16	80.16
Positive Yield Strength	(KN)	709.1	1311.2	1621.9	2002.4
Negative Yield Strength	(KN)	-709.1	-1311.2	-1621.9	-2002.4
Positive Yield Stiffness	(KN/m)	8.02	8.02	8.02	8.02
Negative Yield Stiffness	(KN/m)	8.02	8.02	8.02	8.02

Natural period for the 1st mode 0.2 sec., Damping 5%.

表-2 モデル Type 2

Story		4	3	2	1
Mass	(t)	98.0	98.0	98.0	98.0
Initial Stiffness	(KN/m)	12.83	12.83	12.83	12.83
Positive Yield Strength	(KN)	514.6	827.1	947.5	1441.3
Negative Yield Strength	(KN)	-514.6	-827.1	-947.5	-1441.3
Positive Yield Stiffness	(KN/m)	1.28	1.28	1.28	1.28
Negative Yield Stiffness	(KN/m)	1.28	1.28	1.28	1.28

Natural period for the 1st mode 0.5 sec., Damping 5%.



ランダム振動理論によるピーク指向の剛性低下型多層せん断系構造物に対する非線形応答スペクトル値の平均値は模擬地震波20波の時刻歴応答解析の最大応答変位の平均値と比較的によく一致している。最大応答変位の標準偏差については、両応答解析法による差違が大きい。

図-5 層間変位の最大応答値の比較

### 5. 多層せん断系構造物の損傷集中について

多層せん断系構造物が強い地動を受けた時、各層の弾性せん断力応答値に対し、相対的に耐力の低い層に大きな損傷集中が生じる。

ここでは、前述の剛性低下型多層せん断系構造物の非線形応答解析の手法を適用して、主として、2層～12層程度の構造物についてその損傷集中の度合を最大応答塑性率を尺度として解析的に調べたもので、同時に1質点系構造物の弾塑性応答についても同様な方法で計算して両者を比較している。

計算に使用した入力地震動は図-1の地動の卓越周期 $T_g$ と地盤の減衰定数 $\xi_g$ の関係を参照して図-2に示すように、地動の卓越周期 $T_g=0.4\text{ sec}$ 、地盤の減衰定数 $\xi_g=0.5$ と一応設定した。

図-2の応答スペクトルは地動の卓越周期より建物の固有周期が大きい部分では、ほぼ固有周期に反比例して応答スペクトル値が下がっている。また、地動の継続時間 $\tau$ 、建物の応答塑性率に及ぼす影響は比較的小さいので、ここでは定常継続時間 $T_D$ を約20秒程度とした。

図-6及び7は構造物の復元力特性を単純化のため、バイリニヤークのピーク指向型復元力特性として1質点系及び多層せん断系構造物の最大応答塑性率を計算したものである。多くの実験結果を参照にすると、剛性低下型の復元力特性を有する構造物では図-3に示すように、降伏すると履歴ループの包絡線の勾配は負になる場合もあるが、降伏後剛性は崩壊の最終段階まで負になることがないので、初期剛性に対する包絡線の勾配比 $\mu$ を $+0.1$ から $-0.1$ まで変化させて計算している。

剛性低下型の構造物では応答が降伏レベルを1度越えると剛性は低下し、同時にループを持つようになるので、このループを次のような形の等価粘性減衰で評価した。

$$\xi_{eq} = C_\xi \sqrt{(\mu^+ - 1) + (\mu^- - 1)} \quad , \quad (\mu^+ - 1) \geq 0 \quad , \quad (\mu^- - 1) \geq 0 \quad (22)$$

ここに、 $C_\xi$ ：等価粘性減衰の増加係数

$\mu^+$ ：応答の各段階における正の塑性率

$\mu^-$ ：応答の各段階における負の塑性率

柱部材等の既往の実験では、加力を正負対称に繰り返しているものが大部分であるので、今の所、既往の実験結果から $C_\xi$ の値を求めることは困難である。

図-6及び7には、この増加係数 $C_\xi$ の値を0から0.1まで変化させて最大応答塑性率を求めている。

ここで、図-6は1質点系構造物の弾性時の固有周期を0.5秒として、降伏レベルを弾性せん断力応答値の0.5、0.4、0.3、0.2倍に変化させて上から順に示してある。図の実線は最大応答塑性率の平均値を示し、破線は平均値+標準偏差の値を表わしている。降伏後のループの包絡線勾配が正の場合は応答は原点を中心として正負対称に変形するが、包絡線勾配が負になると応答は原点を離れて正の方向に偏ってくる傾向があることが図から判る。また、図中の太い実線はNewmark博士の原点指向型モデルを用いた応答解析の研究によるPotential Energy一定の法則から求めた最大塑性率の値を示している。

図-7は1次固有周期0.5秒の6層のせん断系モデルを使用して、その1層部分に生ずる損傷集中を最大応答塑性率で示したものである。このモデルの1層部分の耐力は、図-7に示すように弾性せん断力応答値の0.5、0.4、0.3、0.2倍となっているが、その他の層の耐力は1層の耐力よりも

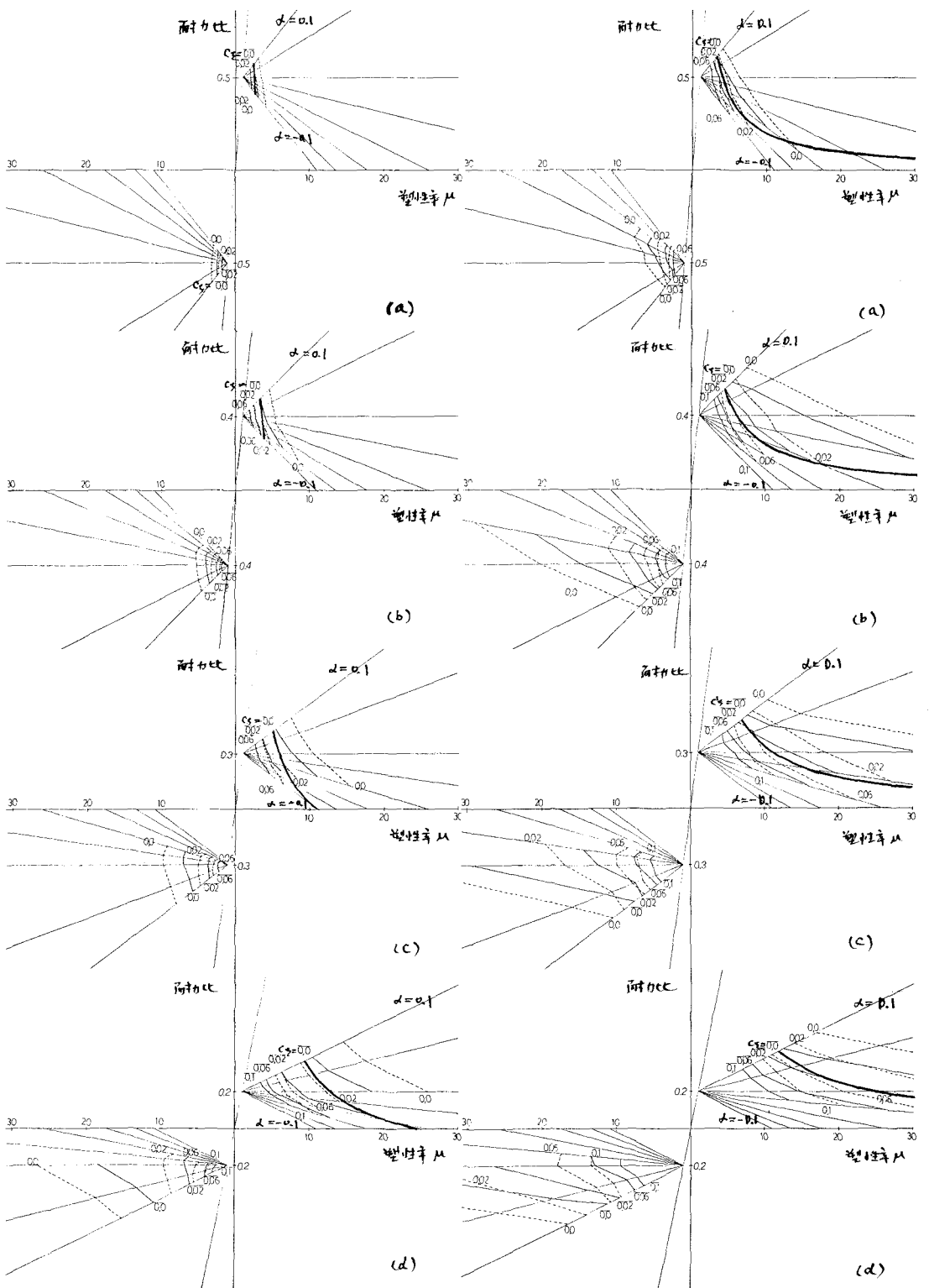


圖-6 1頂点系の最大応答塑性率

圖-7 多層せん断系構造物の損傷集中



それぞれ2割増とやや高くなっていて軽い損傷を受けている。図-7に示した1層部分の損傷集中の程度は、1層以外の層が全く弾性である場合の損傷集中の程度と大差がないことが計算で確かめられている。従って、多層せん断系構造物ではある層の耐力比だけが他の層の耐力比よりわずかに小さい場合でも、その層に大きな損傷集中が生ずる傾向がある。

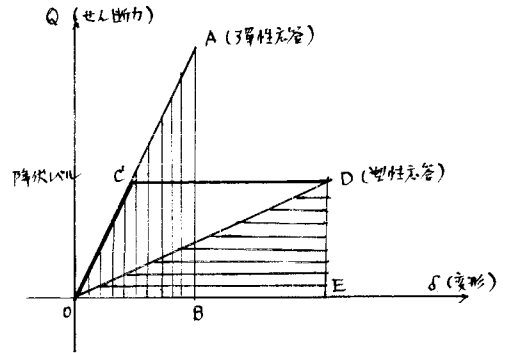


図-8 多層せん断系構造物の損傷エネルギー

図-7の太い実線は図-8に示した弾性の Potential Energy の面積 (O, A, B) が、

面積 (O, D, E) と等しくなるという仮定に基づいて最大応答塑性率を簡単に求めたものである。この事は前節で述べたようにある層の応答が単独にその層の降伏レベルを越えた場合、履歴エネルギーが他の層の線形応答におけるポテンシャルエネルギーに比例して他の層の応答値を低下させることから推測した結果である。

一般に多層せん断系構造物の損傷集中の程度は上層部分に生じる場合の方が、下層部分に生じる場合に比べてやや大きくなる傾向がある。また、層数の非常に多い建物で軽い損傷が全層に適当に分散されれば、大きな損傷集中は起りにくくなってくる。

剛性低下型の構造物の一次固有周期が地動の卓越周期より短い場合には同様な方法で最大応答塑性率を計算すると極めて大きな応答値を示すようになる。

#### [参考文献]

- 1) Caughey, T.K. and Stumpf, H.J.; "Transient Response of a Dynamic System Under Random Excitation," Journal of Applied Mechanics, pp.563-566, 1961.
- 2) Crandal, S.H.; "First-Crossing Probabilities of the Linear Oscillator," Journal of Sound and Vibration, Vol. 12, 1970.
- 3) Hou, S.; "Earthquake Simulation Models and Their Applications," M.I.T. Dept. of Civil Engineering Report R68-17, May 1968.
- 4) Karnopp, D. and Scharon, T.D.; "Plastic Deformation in Random Vibration," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 39, 1966.
- 5) Ozaki, M. and Sawai, A.; "A Practical Method for the Earthquake Response Analysis of Non-linear Structures with Origin-oriented Degrading Stiffness Systems by Random Vibration Theory," Trans. of A.I.J. No. 310, Japan.
- 6) Rice, S.L.; "Mathematical Analysis of Random Noise," Bell System Tech. J., 23: 282-332 (1944); 24: 46-156 (1945). Reprinted in N.Wax (ed.); "Selected Papers on Noise and Stochastic Processes," Dover, New York, 1954.
- 7) Vanmarcke, E.H. and Gazetas, G.; "Random Vibration Analysis of Inelastic Multi-Degree-of-Freedom Systems Subjected to Earthquake Ground Motions," Evaluation of Seismic Safety of Buildings. Report No. 7 Aug. 1976.
- 8) Yanev, P.I.; "Response of Simple Inelastic Systems to Random Excitation," SM Thesis, MIT, 1970.

EARTHQUAKE RESPONSE PREDICTION OF MULTI-STORY STRUCTURES WITH  
DEGRADING STIFFNESS SYSTEMS AND STUDY ON DAMAGE CONCENTRATION

by Masakazu OZAKI\*  
Masashi FUJISAWA\*\*  
Masaru ISHII\*\*\*  
Seiichiro YASUDA\*\*\*

This paper deals with non-linear response analysis of multi-story shear-type structures with degrading stiffness systems subjected to strong earthquake motion excitation based on the development of random vibration theory for linear systems, using the Poisson crossing assumption for the reason of simplicity.

As a representation of the degrading stiffness systems, the non-linear response spectral values and the standard deviations of the maximum relative floor displacements in multi-story shear-type structures with peak-oriented degrading stiffness systems derived by the random vibration response analysis are examined by simulation study using 20 artificially simulated earthquake motions with the stationary duration 20.48 sec. with good agreement.

In addition, damage concentration in multi-story shear-type structures with various patterns of the peak-oriented degrading stiffness systems is evaluated and compared with inelastic response of single-degree-of-freedom systems with the same patterns of degrading stiffness systems.

---

\* Prof. Dr. Engng., Chiba University

\*\* Research Engineer, Building Research Institute

\*\*\* Graduate Student, Chiba University