

# 地震動のエネルギー的評価指標に基づく 非線形地震応答の推定に関する基礎的研究

中村 晋<sup>1</sup>・室野剛隆<sup>2</sup>・芦谷公稔<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 日本大学助教授 工学部土木工学科(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-3-38)

<sup>3</sup>正会員 理修 (財)鉄道総合技術研究所研究室長 防災技術研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-3-38)

本論では、構造物の非線形地震応答として最大塑性率に着目し、地震動の最大運動エネルギーに基づく指標を用いた最大塑性率の推定手法を提案した。その手法の特徴は、構造物の非線形応答に関連する地震動の特性として最大運動エネルギーに基づく最大値指標を用いたこと、その地震動のエネルギー指標の規準量と構造物の応答のポテンシャルエネルギー比に関連づけたこと、地震動の最大値指標の周波数特性に基づく最大塑性率を推定する手法を示したことにある。その手法は、非線形復元力特性を有する1自由度の振動モデルを用いた地震応答解析による最大塑性率との比較により、地震被害想定などへの適用に有意な精度を有していることが明らかとなった。

**Key Words :** *index of earthquake ground motion, non-Linear response, ductility factor*

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、耐震設計法に導入された2段階設計法では、従来の設計地震動であるレベル1地震動に加え、内陸の活断層なども考慮したレベル2地震動に対しても構造物が所要の耐震性能を満足する必要があるという考え方を用いている。その地震動は、対象とする地点で大きな破壊力が想定される複数の起震断層の震源特性、および伝播・増幅特性に基づいて設定する必要がある。一方、構造物の損傷や破壊は、地震時における構造物の非線形な変形挙動のうち変形の大きさや繰り返し変形による累積損傷過程に支配されることが指摘されている<sup>1)</sup>。さらに、構造物の地震時挙動は、地震動の特性と構造物の振動特性の相対関係によって支配される。このことから、構造物の損傷に影響を及ぼす地震動は構造物に応じて異なることになる。すると、先に示したレベル2地震動の強さが震源特性に応じた定性的な概念であることから、複数の起震断層に対するレベル2地震動より、設計に用いる強さを有する地震動を適切に選択することが必要となる。その際、構造物の非線形応答を支配する地震動の強さを定量的に表現する指標が必要であることはいまでもないことである。その指標は、地域防災計画を策定する上での地震被害想定、また地震直後、地震動の面的分布に基づいて推定された地震被害を用いた警報などを行う上でも極めて有用となる。

構造物の非線形応答を支配する地震動特性を評価する試みとして、最大応答変位に着目した非弾性応答変位スペクトル<sup>2)</sup>、エネルギースペクトル<sup>3)</sup>や瞬間

入力エネルギー<sup>4)5)</sup>に基づく手法、地震被害や地震応答を地震動の最大速度<sup>6)</sup>、震度<sup>7)8)</sup>やスペクトル強度<sup>9)</sup>などと関連づける手法などがある。先の3つの手法は、構造物の固有周期に応じた応答を直接の指標として地震動の特性を評価するものであり、地震動自体の特性を直接評価するものとなっていない。しかし、瞬間エネルギー入力に基づく考え方<sup>4)</sup>のうち、応答履歴1/2サイクルに着目し、瞬間最大入力エネルギーより算出される振動系の累積消費エネルギーと降伏変位時の仕事エネルギーとの比を構造物の応答塑性率と関連づける試みは、その物理的意味が明確であり、地震動自体の指標を評価する上でも有用となると考えられる。一方、後者は地震動の最大振幅などの地震動自体の特性、震度およびスペクトル強度などの振動系の応答特性を加味した指標を地震被害などと関連づける手法である。スペクトル強度はその物理的意味が曖昧であること<sup>9)</sup>、震度は地震毎に被害との相関関係が異なること<sup>10)</sup>や最大振幅は構造物と地震動の周波数特性の相対関係に応じ、最大加速度また最大速度のいずれかを単一の指標とすることが困難であるなどの本質的課題を有している。さらに、地震動の特性と構造物の応答また損傷との関係は、いずれも物理的ではなく、現象として統計的に関連づける試みが行われており、物理的に有意な地震動特性とはなっていない。これらより、地震動自体の特性として、構造物の周波数特性との相対関係を加味し、物理的に両者を関係づけることが可能な指標を評価することが期待されている。

ここでは、地震動の最大運動エネルギーに基づく強さ指標を用い、構造物の非線形地震応答として最

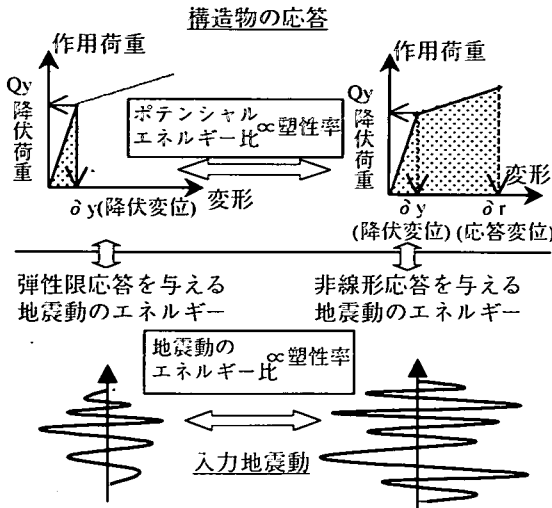


図-1 構造物の応答と入力地震動の関係

大塑性率を推定する手法を提案する。まず、地震動と構造物の応答、双方のエネルギー特性を関係づけることにより、構造物の応答を評価する手法の基本的考え方を示す。その際、地震動の運動エネルギーに基づく指標は従来の最大加速度・速度を直交2成分とする座標空間の座標変換により得られる最大加速度と最大速度の積と両者の比である周波数特性により構成され、構造物の地震応答を適切に推定するための指標となることを示す。次に、バイリニア型非線形復元力特性を有する1自由度系の振動モデルを対象とした調和波に対する応答解析に基づき、所定の塑性率に対して基準化した地震動のエネルギー指標と基準化した構造物の応答のエネルギー特性との関係を提案する。最後に、その関係を用い、実地震動の周波数毎のエネルギー指標に基づく最大塑性率の推定手法を示し、その適用性を示す。

## 2. エネルギーに基づく構造物の非線形地震応答の評価指標としての地震動特性の考え方

非線形応答として構造物の最大応答変位を簡易的に推定する手法として、従来、線形応答により得られる最大ポテンシャルエネルギーまたは最大変位に基づくエネルギー一定則や変位一定則が用いられてきた。これら2つの規範の適用に際して、地震動と構造物の周波数特性の差異に応じた選択を行うことが必要となる。しかし、両規範とも、線形応答により得られる最大ポテンシャルエネルギーを応答変位評価の基本としている。すると、図-1に示す様に降伏変位および所定の応答変位に対するポテンシャルエネルギーに着目すれば、それらエネルギーの比は降伏変位に対する応答変位の比つまり塑性率と関係づけることができる。言い換えれば、2つの規範を用

いることなく、応答を推定できることになる。また、Fajfar<sup>11)</sup>は、単調載荷時のポテンシャルエネルギーと繰り返し載荷過程における履歴消費エネルギーの比較により、構造物の降伏変位と降伏荷重の積に関連する弾性エネルギーにより規準化された履歴消費エネルギーが構造物の応答つまり塑性率と関係づけられることを示している。このことは、構造物の応答状態量を表すスカラー量の一つであるエネルギーに着目すれば、構造物の応答が弾性限である降伏変位となった状態のエネルギーにより規準化されたある状態のエネルギーは構造物の応答量と関係していることを示している。しかし、これらは構造物の応答に基づく推定となっており、地震動の特性を直接評価してはいない。

ここで、図-1に示したように、構造物の応答のエネルギー比と塑性率が関係づけられるとすると、それらの応答を支配する地震動の特性のうち、エネルギーに基づく特性にもそのような関係が成り立つと推定される。地震動のエネルギー特性として直接求めることが可能な特性には、式(1)に示す速度 $V$ の二乗に質量 $m$ を乗じた運動エネルギーが考えられる。ここで、 $C$ は波動伝播速度、 $\Delta t$ は伝播時間を表す。その時間変動量である運動エネルギーの特性を規定するスカラー指標には、最大運動エネルギー $E_{max}$ 、最大瞬間エネルギー $\Delta E_{max}$ などが考えられる。

まず、式(2)に示す最大運動エネルギーに着目する。式(2)の様に最大運動エネルギーを変形すると、最大加速度と最大速度の積(= $A_{max}V_{max}$ )と地震動の中心周期<sup>12)</sup>( $T_{av} = 2\pi V_{max}/A_{max}$ )および質量の積、言い換えれば地震動の最大値指標 $I_{av}$ と周波数特性指標 $T_{av}$ に分離することができる。ここでは、それら2つの指標を地震動の最大運動エネルギーに基づく強さ指標と呼ぶ。境<sup>9)</sup>が示した地震動の破壊力指標であるスペクトル強度比は、その構成因子である最大震度が武村<sup>13)</sup>により示された震度境界との関係で表される最大加速度と最大速度との積、有効周期が中心周期に対応するとみなすことより、表現形式が異なるものの最大運動エネルギーと同じ物理的意味を有していると考えられる。

$$E = \frac{1}{2}(\rho \cdot C \cdot \Delta t) \cdot V^2 = \frac{1}{2}m \cdot V^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{max} &= \frac{1}{2}mV_{max}^2 = \frac{1}{2}m \cdot A_{max} \cdot V_{max} \frac{V_{max}}{A_{max}} \\ &= \frac{1}{4\pi}m \cdot A_{max} \cdot V_{max} \left( 2\pi \frac{V_{max}}{A_{max}} \right) \\ &= \frac{1}{4\pi}m \cdot A_{max} \cdot V_{max} \cdot T_{av} \end{aligned} \quad (2)$$

一方、最大瞬間エネルギー $\Delta E_{max}$ は式(3)に示す様に加速度と速度の積で表される瞬間エネルギーの最

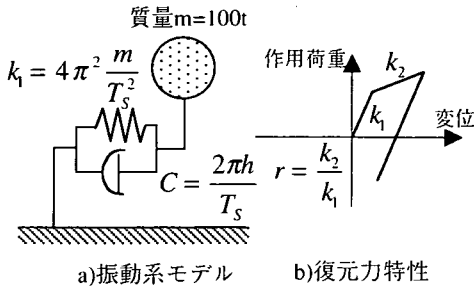


図-2 構造物の振動モデル

大値を表すが、式(2)と異なり地震動の周波数特性が内在することになる。ここで、中村らによる構造物への瞬間入力エネルギーのエネルギー増分を考慮する時間間隔  $\Delta t^i$  は、振動系の履歴サイクルの1/2、つまり最大応答変位時に至る履歴過程である。地震動と応答には位相差があるので等価ではないが、地震動のエネルギーも運動エネルギーが最大応答変位に至る履歴サイクル過程での最大値となる、つまりエネルギー増分の時間間隔を運動エネルギーが0からそのサイクルの最大値までの時刻とすることが有意であると考えられる。すると、時間増分を地震動の中心周期の1/4に相当するとすれば、最大瞬間エネルギーは最大運動エネルギーの最大値指標と等価になる。しかし、瞬間入力エネルギーは、表現形式として最大値と周波数特性に分離した形式で表すことができず、構造物の特性を地震動の指標に加味することが困難となる。

$$\Delta E_{\max} = m \cdot (A \cdot V)_{\max} \quad (3)$$

以上より、地震動の特性として、最大運動エネルギーに着目し、構造物の応答のエネルギー比とを関係づけることにより構造物の非線形応答を推定する手法を次章以下に示す。

### 3. 最大運動エネルギーに基づく地震動の強さ指標の特性

ここでは、地震動の強さ指標である最大値指標と周波数特性指標の特性と、従来の地震動強さ指標である最大加速度、最大速度また震度との関係を示す。さらに、振動系の非線形応答解析に及ぼす地震動の最大運動エネルギーの影響を把握するため、最大運動エネルギーと最大応答変位との発生時刻の比較を行う。これらは、非線形復元力特性を有する1自由度の振動モデルを対象とした調和波、さらに実地震記録に対する非線形応答解析を実施し、入力地震動の振幅レベルと塑性率との関係に基づいて考察する。

表-1 解析に用いた地震記録の諸元

No	地震	発生年 規模	観測点 (成分)/略称	PGA ( $m/s^2$ )	PGV ( $m/s$ )
1	Imperial Valley地震	1940 6.7(ML)	El Centro (NS)/Elcn	3.41	0.36
2	十勝沖地震	1968 7.9	八戸港(EW) Hach68	1.81	0.32
3	釧路沖地震	1993 7.8	釧路港(NS, 地中/Kushiro	2.04	0.20
4	三陸はるか沖地震	1994 7.5	八戸港(EW) Hach93	6.76	0.45
5	兵庫県南部地震	1995 7.2	ポートアイランド (NE,地中)/PI 葦合(NS) Fuki	5.35 8.03	0.51 1.23
7	鹿児島県北西部地震	1997 6.3	阿久根(NS) Akune 宮城野(EW) Miyagino	2.92 4.93	0.43 0.36
9	岩手県内陸北部地震	1998 6.1	長山(NS) Naga	7.15	0.40
10	鳥取県西部地震	2000 7.3	日野(NS) Hino	9.24	1.09
11	芸予地震	2001 6.4	三原(NS) Mihara	6.51	0.11

#### (1) 解析手法および条件

解析には、図-2に示すバイリニア型の復元力特性を有する1自由度系の振動モデルを用いた。ここで、質量  $m$  は100t、初期剛性  $k_1 (=m(2\pi/T_S)^2)$  は振動系の弾性固有周期  $T_S$  より算出し、減衰定数  $h$  は5%とした。時間積分にはWilsonの  $\theta$  法 ( $\theta=1.4$ ) を用いた。また、復元力特性における降伏荷重  $Q_y$  は0.4mg、降伏変位  $\delta_y$  は降伏荷重と初期剛性の比として求めた。振動系の解析パラメータには、弾性固有周期  $T_S$  と復元力特性の剛性比  $r$  (=第2剛性/初期剛性) を用いた。

入力波として、調和波は0.2秒から8秒の間を対数軸上で100等分した周期を基本周期  $T_1$  とする加速度成分、実地震記録は表-1に示す11の地震記録を用いた。表-1に示す記録は、従来より耐震設計に用いられてきた地震の記録と最近我が国で地震被害をもたらした内陸型地震と海洋性地震による記録である。

#### (2) 調和波入力に対する入力波の振幅と応答変位の関係に基づく考察

ここでは、振動系の塑性率が1から5となる様に調整した調和波の加速度振幅と周期の関係を求め、塑性率に応じた調和波の最大加速度振幅と最大速度振幅の関係を図-3に示す。用いた振動系の弾性固有周期は1.0秒、剛性比  $h$  は1/6とした。塑性率に応じた調和波の加速度振幅は二分法により求めた。また、最大速度は調和加速度波形の積分、つまり最大加速度振幅を円振動数で割ることにより求めた。

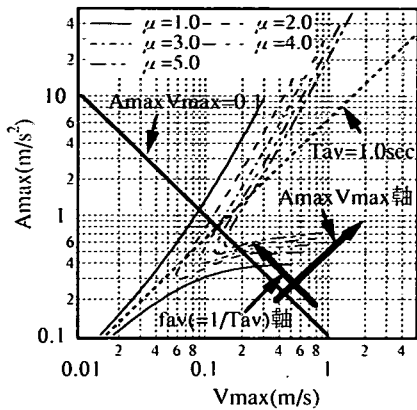


図-3 塑性率に応じた調和波入力地震動の最大加速度と最大速度の関係

図-3は、水平軸を最大速度、鉛直軸を最大加速度とする座標系で、塑性率に応じた最大加速度と最大速度の関係を表現している。ここで、入力調和波の周期  $T_i$  は中心周期  $T_{av}$ 、そのものであることから、最大速度と最大加速度の比と関係づけられる。入力調和波の周期が構造物の弾性固有周期と一致すると共振現象が生じることから、構造物の弾性固有周期1.0秒と入力調和波が一致する際の最大加速度と最大速度の関係を図に合わせて示す。その関係は、波線で示す様に右上に45度方向の軸となり、その軸を  $T_{av}$  軸と呼ぶ。  $T_{av}$  軸より下側は入力調和波の周期が1.0秒以上、つまり相対的に構造物の固有周期が入力波の周期より短い領域である。その領域では、最大速度と最大加速度の関係は、最大速度0.15m/s以上の着目すると、最大速度軸にはほぼ平行な関係、つまり塑性率は最大速度ではなく最大加速度に依存していることを示している。一方、その軸の上側は構造物の固有周期が入力波の周期より長い領域であり、塑性率に応じた最大加速度と最大速度の関係は最大加速度軸に偏った傾きを有している。このことは、塑性率が最大加速度より最大速度の変化に強く依存していることを示している。これらは、2つの強度指標（最大加速度、最大速度）と構造物の応答の関係が構造物と入力波の周波数特性との相対関係に依存するという従来の知見と調和し、いずれも構造物の応答を支配する統一的な地震動の評価指標とならないことを示している。

次に、図-3の最大速度と最大加速度の関係と、式(4)に示した地震動の最大運動エネルギーに基づく2つの指標の関係を考察する。ここで、周波数特性指標である中心周期は、その逆数である中心周波数としている。まず、式(4)の両辺の自然対数を式(5)の様にマトリックス表示することにより、図-3の水平・鉛直軸と2つの指標の自然対数の関係を得ることができる。このことにより、2つの指標は、図-3の水平・鉛直軸、つまり最大速度と最大加速度の軸を45

度反時計回りに変換した座標変換の関係にあることが分かる。ここで、変換され右上方向へ45度の軸は最大加速度と最大速度の積、つまり最大値指標を表し、左上方向へ45度の軸は入力地震動の中心周波数つまり周波数指標を表している。すると、前述の  $T_{av}$  軸を正確に表現すれば、  $T_{av}$  が1.0秒を与える最大値指標軸となるが、以後前述の様にその周期と合わせて  $T_{av}$  軸と呼ぶ。ここで、構造物の弾性固有周期と同じ値を与える  $T_{av}$  軸を中心に考えると、同じ最大値指標ではその軸の左上また右下方向、つまり入力波の周期が大きくまた小さくなるにつれ、構造物の応答が小さくなっている。また、ある入力波の周期に対しては、最大値指標が大きくなるにつれ構造物の応答が大きくなっている。このことは、構造物の非線形応答は、最大値指標の大きさと、構造物と入力波との周波数特性の相対関係を規定する周波数特性指標の2つ、つまり地震動の最大運動エネルギーに基づく強さ指標によって統一的に評価できる可能性があることを示している。

$$\left. \begin{aligned} C &= A_{\max} V_{\max} \\ \frac{2\pi}{T_{av}} &= 2\pi \cdot f_{av} = \frac{A_{\max}}{V_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \log C \\ \log(2\pi f_{av}) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \log V_{\max} \\ \log A_{\max} \end{pmatrix}$$

$$= \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos 45 & \sin 45 \\ -\sin 45 & \cos 45 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \log V_{\max} \\ \log A_{\max} \end{pmatrix} \quad (5)$$

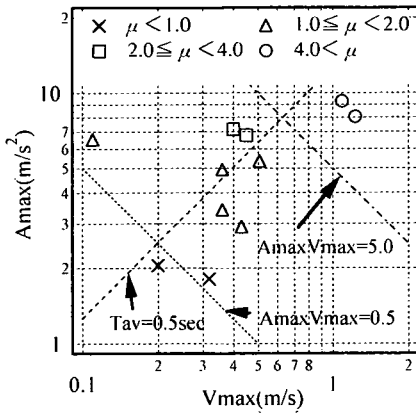
最後に、武村<sup>13)</sup>は2つの異なる震度の境界はある最大速度と最大加速度の積の値つまり最大値指標と関係づけられることを示している。その関係は、式(6)に示す様に対象とする震度内での最大値指標の上・下限値、言い換えれば最大値指標のみの情報を与え、構造物と地震動の周波数特性の相対関係を規定する周波数特性指標の情報が欠けている。このことは、同一の構造物を対象とし、同一の震度を有する地震動に対しても周波数特性が異なれば被害程度が異なること、つまり、震度と地震被害の関係は地震毎にばらつきがあるという知見<sup>10)</sup>と整合する。

$$10^{l-6} \leq A_{\max} V_{\max}(l) \leq 10^{l-5} \quad (6)$$

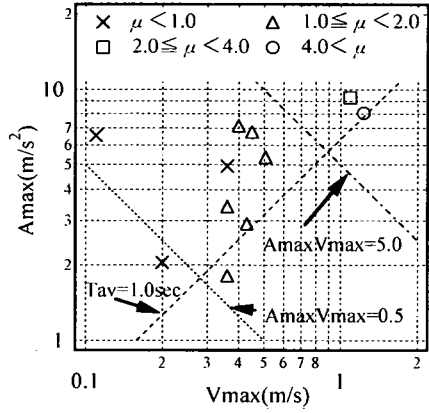
以上の様に、最大運動エネルギーに基づく2つの地震動の強度指標は、これまでの地震動の強度指標との関係が明確であるとともにそれらの課題を回避できる極めて有用な指標であることが分かる。

### (3)実地震記録に対する入力地震動振幅と応答変位の関係に基づく考察

ここでは、表-1に示した実地震記録を入力波とし、



a)固有周期0.5秒



b)固有周期1.0秒

図-4 地震記録に対する最大塑性率と地震動の最大加速度および最大速度の関係

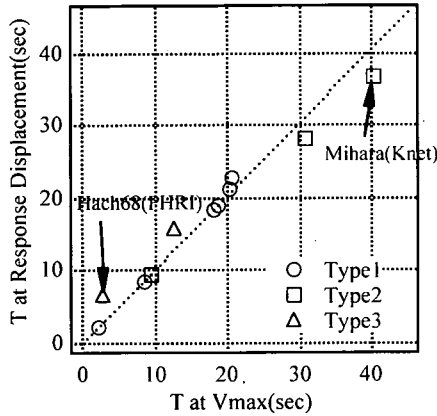
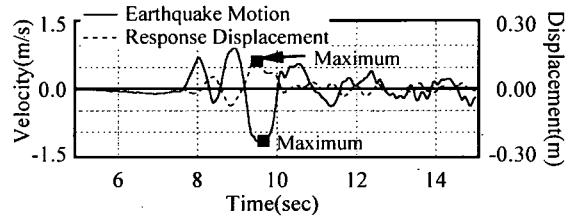
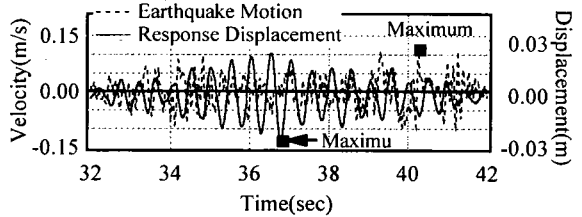


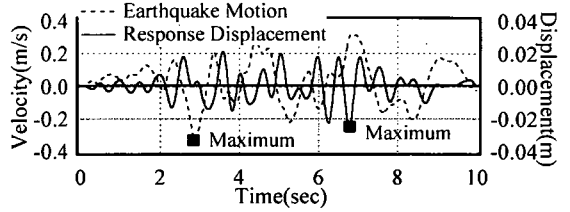
図-5 最大速度と最大応答変位の発生時刻の比較



a)Type1(Fuki)



b)Type2(Mihara)



c)Type3(Hach68)

図-6 各Typeの速度と応答変位時刻歴の比較

振動系の非線形応答を評価するための指標として、最大運動エネルギーに基づく2つの強度指標の適用性を把握する。各入力波に対する最大塑性率と2つの強度指標の関係を、前項の図-3と同様に入力波の最大加速度と最大速度を直交座標の水平・鉛直軸とした図-4に示す。対象とした振動系の弾性固有周期は0.5秒と1.0秒、復元力特性の剛性比 $n$ は1/12である。図には、構造物の弾性固有周期と入力波の中心周期の関係を把握するため、振動系の弾性固有周期に等しい入力波の中心周期を有する $T_{av}$ 軸、さらに最大塑性率と最大値指標の関係を把握するための補助となるよう最大値指標が5.0および0.5となる軸を示す。

振動系の弾性固有周期が0.5秒の場合、 $T_{av}$ 軸の右上方向、つまり最大値指標が大きくなるにつれ、最大塑性率が大きくなる傾向が見られる。また、弾性固有周期が1.0秒における最大塑性率が1.0から2.0の場合、 $T_{av}$ 軸より離れる、言い換えれば入力波の中心周期と弾性固有周期との差異が大きくなるにつれ、その応答を与えるために必要な最大値指標も大きくなるという傾向が見られる。これらは調和波入力

傾向と類似しており、2つの強度指標が実地震記録に対しても有用であることを示しているが、同時に中心周期という単一の周波数特性指標で実地震記録の周波数特性を代表させるためには工夫が必要となることも示している。

#### (4)地震動の運動エネルギーと応答変位の最大発生時刻の比較

地震動の最大運動エネルギーと最大応答変位との発生時刻の比較には、表-1に示す11の地震記録を用

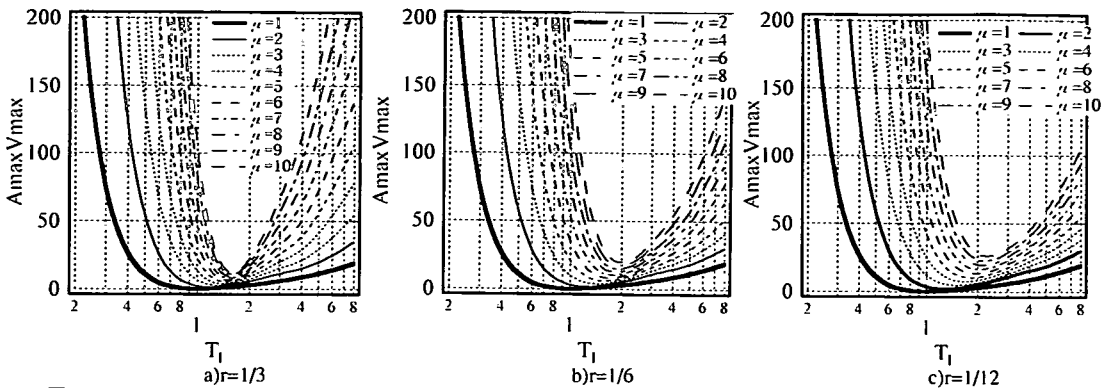


図-7 剛性比に応じた塑性率毎の最大値指標 ( $A_{\max} V_{\max}$  :  $m^2/s^3$ ) と入力波の周期 ( $T_i$  : sec) の関係 (固有周期1.0秒)

いた。ここで、運動エネルギーの最大値発生時刻は最大速度の発生時刻とした。

非線形地震応答解析により得られた最大応変位と地震動の最大運動エネルギーの発生時刻の比較を図-5に示す。非線形応答解析では、振動系の弾性固有周期を1.0秒、復元力特性の剛性比を1/12とした。

両者の関係は図に示すように3つのタイプに分類される。Type1は、その一例として示した図-6(a)の地震動の速度成分と応変位の時刻歴の様に両者の最大値がほぼ同時刻、または最大速度が発生してから中村ら<sup>4)</sup>により定義された瞬間最大入力エネルギーの発生時間  $\Delta$  内に最大応答が発生する場合であり、両者はよい対応を示していると考えられる。Type2は、その一例として示した図-6(b)の様に応変位の最大値が地震動の速度成分の最大値より先に発生する場合である。例では、最大応変位は35秒周辺で生じているものの、地震動の速度成分の最大値は約4秒後に生じている。ここで、地震動の中心周期  $T_{av}$  は0.11秒と振動系の固有周期よりかなり短く、地震動に含まれる振動系の固有周期近傍成分の特性と最大応答は関連しているものと推定される。Type3は、図-6(c)に示した様にType2と逆で、地震動の速度成分の最大値が応変位の最大値より先に発生する場合である。応変位の最大値は7秒付近に生じているものの、同程度の応変位が地震動速度成分の最大値を与える時刻近傍でも生じている。ここで、地震動の中心周期  $T_{av}$  は1.11秒と振動系の固有周期よりやや長周期にあり、振動系の非線形化に伴う固有周期の延びに伴い、地震動の主要な周期成分と重なり大きな応答を示した結果であると推定される。Type2と3に見られる様に、振動系の最大応答と地震動の運動エネルギーは直接的ではなく、振動系と地震動の相対的な周波数特性の関係を介して関連しているものと推定される。このことは、前項で示した結果と整合している。

#### 4. 調和波を対象とした最大値指標に基づく非線形地震応答の評価手法

##### (1) 最大値指標の規準化

ここでは、調和波を入力地震動とし、前章と同様の非線形復元力を有する1自由度系の振動モデルの応答と入力波の最大運動エネルギーの関係を、入力波の塑性率に応じた最大値指標と中心周期の関係として明らかにする。

まず、入力波の周期と塑性率に応じた最大値指標の関係を、剛性比毎に図-7に示す。ここで、振動系の弾性固有周期は1.0秒とした。また、目標とする塑性率は1から10までの間を1.0毎に変化させた。各塑性率に対応する最大値指標は二分法を用い、入力波の最大加速度振幅を変化させることにより求めた。ただし、塑性率が1.0つまり、応変位が降伏変位  $\delta_y$  の際の最大値指標は、次式に示す様に振動系の弾性剛性に対する線形振動方程式の定常解により求め、弾性限最大値指標と呼ぶ。

$$A_{\max} V_{\max} (\mu = 1) = 8\pi^3 \frac{\delta_y^2 T_i}{(T_S)^4} \left[ \left\{ 1 - \left( \frac{T_S}{T_i} \right)^2 \right\}^2 + 4h^2 \left( \frac{T_S}{T_i} \right)^2 \right] \quad (7)$$

ここで、 $T_S$ 、 $T_i$  は振動系の弾性固有周期、入力波の周期、 $h$  は減衰定数 (振動モデルと同様に0.05を使用) を表す。

図より、最大値指標は入力波の周期が振動系の固有周期と一致、つまり共振時に最小となり、周期毎の所定の塑性率を与える最大値指標は塑性率に応じて大きくなっている。また、その最大値指標が最小値を与える周期は、塑性率の増加つまり非線形化の程度、さらに剛性比が小さくつまり非線形性の程度が強くなるにつれ、長周期側に移動している。また、最大値指標は、その最小値を与える周期より長・短

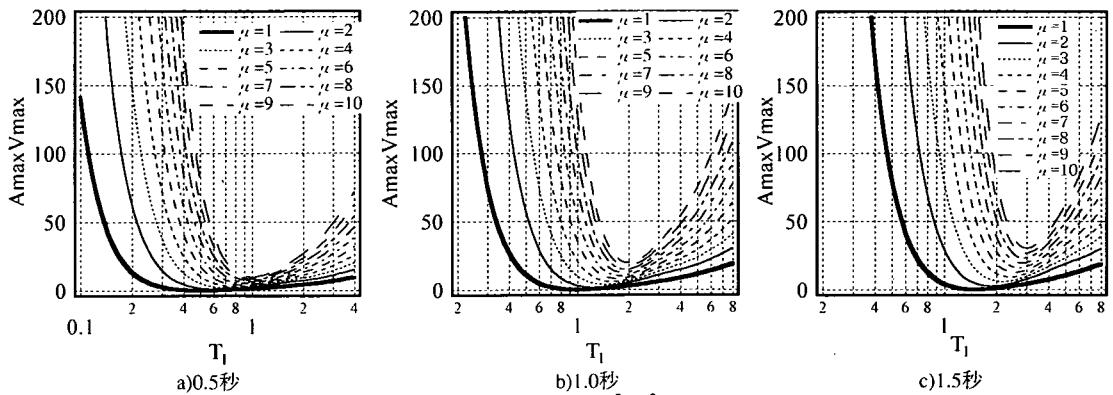


図-8 固有周期に応じた塑性率毎の最大値指標( $A_{\max} V_{\max} : \text{m}^2 / \text{s}^3$ )と入力波の周期( $T_i : \text{sec}$ )の関係(剛性比  $r = 1/6$ )

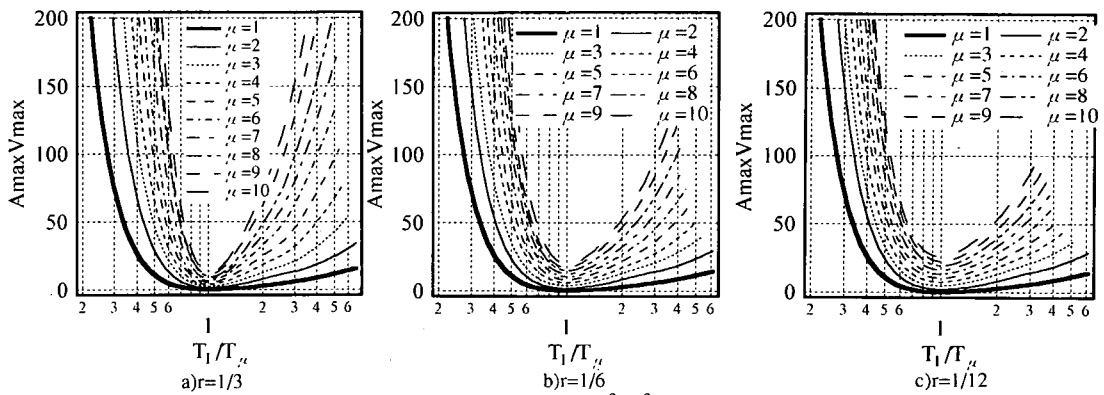


図-9 塑性率毎の最大値指標( $A_{\max} V_{\max} : \text{m}^2 / \text{s}^2$ )と規準化された周期の関係

周期側にて大きな値を示している。また、剛性比を  $1/6$  とした際、振動系の弾性固有周期に応じた入力波の周期と塑性率に応じた最大値指標の関係を図-8 に示す。弾性固有周期に応じて、塑性率毎の最大値指標が最小値を与える周期は異なるものの他の傾向は弾性固有周期によらず同様である。

次に、図-7, 8 に示した入力波の周期と塑性率に応じた最大値指標の関係における周期軸を振動系の非線形化に応じた等価固有周期で規準化する。このことは、塑性率つまり非線形化の影響も含む振動系の固有周期の変化に依存しない入力波の周期との相対周期、つまり規準化周期と最大値指標の関係として再構成することを意味する。ここで、規準化周期は式(8)に示した様に入力波の周期  $T_i$  と塑性率毎の振動系の等価固有周期  $T_\mu$  の比として定義する。その際、等価周期は最大応答変位時の荷重と変位の比として得られる剛性に対する固有周期として算出し、式(9)の様に塑性率、剛性比と弾性固有周期  $T_s$  の関数として得られる。この値は図-7, 8 における最大値指標の最小値を与える周期より若干小さな値を与えるが、ここでは、式(9)により得られた等価固有周期を用いる。この様に、塑性率に応じた等価固有周期で規準化された塑性率毎の最大値指標は、式(10)に示す規準化周期に対する最大値指標と表す。

$$T_\mu^* = \frac{T_i}{T_\mu} \quad (8)$$

$$T_\mu = \sqrt{\frac{\mu}{1 + (\mu - 1)r}} \cdot T_e(\mu=1) \quad (9)$$

$$I_{av}^\mu(T^*) = A_{\max} V_{\max}(\mu, T^*) \quad (10)$$

規準化された周期と塑性率毎の最大値指標の関係を剛性比毎に図-9に示す。図より、剛性比つまり非線形化の程度に応じて、塑性率毎の規準化周期と最大値指標の関係は異なっていることが分かる。しかし、図には示していないが、剛性比が同一で弾性固有周期が異なる場合に対する規準化周期と最大値指標は、周期の規準化により正規化され、図-9に示した剛性比毎の特性とほぼ同じ特性を有している。このことは、非線形応答に及ぼす入力地震動の特性が、塑性率つまり非線形化の程度、剛性比つまり非線形性の強さおよび振動系の等価固有周期と入力波の周期の相対的關係に依存していることを示している。

次に、図-9に示した塑性率毎の最大値指標と規準化周期の關係のうち剛性比が  $1/6$  の場合について、塑性率に応じた最大値指標と規準となる塑性率に応じた最大値指標との關係として再構成し、図-10に示す。ここで、規準となる最大値指標は弾性限最大値指標とした。この關係は、弾性限を含む塑性率に

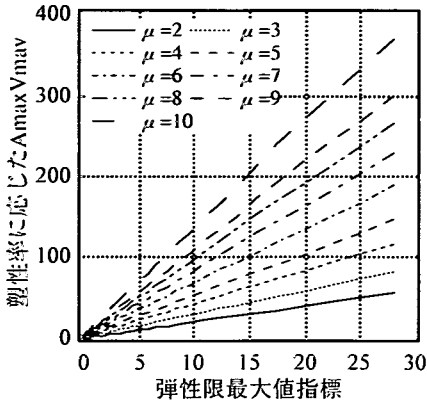


図-10 弾性限最大値指標と塑性率毎の最大値指標との関係

応じた振動系の等価固有周期に対する相対周期が同一となる入力波の最大運動エネルギー比と見なすことができる。図より、弾性限最大値指標と塑性率毎の最大値指標はほぼ直線的な関係にあり、その傾きは塑性率とともに増加していることが分かる。ここで、剛性比1/6で塑性率3に対応する最大値指標と弾性限最大値指標との比率と弾性限最大値指標の関係を、弾性限最大値指標の小さな領域で図-11に示す。その比率は、弾性限最大値指標が1.0より小さくなるにつれ、かなり大きな値となっていることが分かる。次に、図-11と同じ条件に対して、規準化周期と塑性率に応じた最大値指標の関係を図-12に示す。ここで、塑性率3に対する最大値指標は履歴減衰を有する振動系への入力波の特性であり、減衰定数を5%とした弾性限最大値指標との減衰特性の差異が規準化周期1.0近傍、つまり振動系の等価固有周期と入力波の周期が対応する共振周期近傍で大きくなっていることが分かる。このことを踏まえ、塑性率毎の最大値指標との比較に用いる弾性限最大値指標、つまり線形振動系の応答評価に用いる減衰定数は、塑性率に応じた振動系の復元力特性の履歴減衰と等価になるように設定する。その減衰定数は、式(11)から(13)に示す柴田<sup>14)</sup>により提案されているバイリニア型復元力特性を有する1自由度系の定常な非線形応答に基づく履歴減衰に等価な減衰定数 $h_{er}(\mu, r)$ の評価式に基づき算出する。

$$h_{er}(\mu, r) = \frac{1}{2C(\mu)} \{2h\sqrt{C(\mu)} - S(\mu)\} \quad (11)$$

$$C(\mu) = \frac{1}{\pi} \left[ (1-r)\theta^* + r\pi - \frac{1-r}{2} \sin 2\theta^* \right] \quad (12)$$

$$S(\mu) = -\frac{4(1-r)}{\pi\mu} \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right) \quad (13)$$

$$\theta^* = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2}{\mu} \right)$$

この方法により算出した塑性率3に対する減衰定

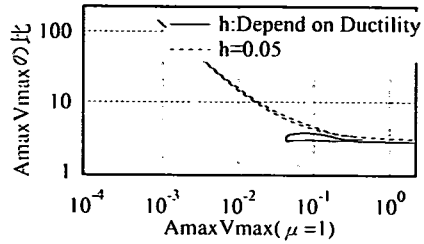


図-11 規準化された周期に対する塑性率3の最大値指標と弾性限最大値指標( $h = 5\%$ , 塑性率相当)の比の特性

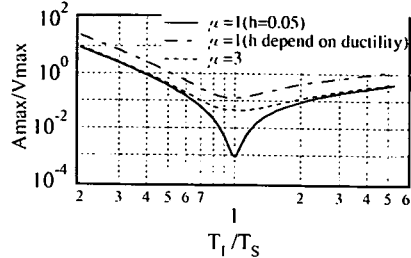


図-12 規準化された周期と塑性率3および弾性限最大値指標( $h = 5\%$ , 塑性率相当)の関係

数を用いた弾性限最大値指標と塑性率3に対する最大値指標の比率は、図-11の様に弾性限最大値指標によらずほぼ同程度の値となることが分かる。これは、図-12に示した減衰特性に配慮した弾性限最大値指標が、塑性率3に対する最大値指標と共振周期近傍においても他の周期と同様な相対関係となっていることによっている。よって、塑性率に応じた規準化周期に対する最大値指標との比較に用いる弾性限最大値指標の評価には、比較対象とする塑性率に応じた等価履歴減衰定数を考慮することとする。

最後に、式(14)に示す塑性率毎の最大値指標と弾性限最大値指標との比率、言い換えれば、振動系の等価固有周期に対する相対周期が同一となる入力波の規準化最大運動エネルギー比 ${}_R E_E(\mu, r)$ を求める。ここで、その規準化運動エネルギー比を規準化最大値指標と呼ぶ。

$${}_R E_E(\mu, r) = \frac{I_{av}^{\mu}(T_{\mu}^*)}{I_{av}^1(T_{\mu=1}^*)} \quad (14)$$

振動系の弾性固有周期が1.0秒の場合について、剛性比に応じた塑性率と規準化最大値指標の関係を図-13に示す。さらに、剛性比=1/6の場合について、振動系の3つの弾性固有周期に対する塑性率と規準化最大値指標の関係を比較を図-14に示す。両図より、規準化最大値指標と塑性率の関係は、振動系の固有周期また入力波の周期によらず、剛性比毎に図に示す一つの関係として得られることかわかる。さらに、振動系の復元力特性を規定する剛性比以外の



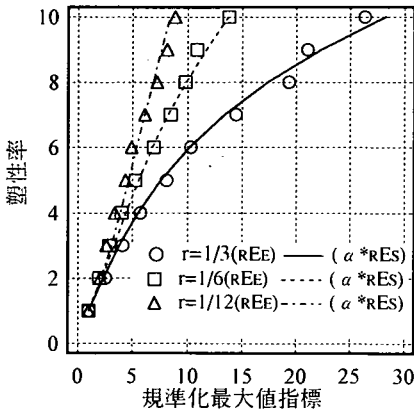


図-13 剛性比に応じた規準化最大値指標と塑性率の関係

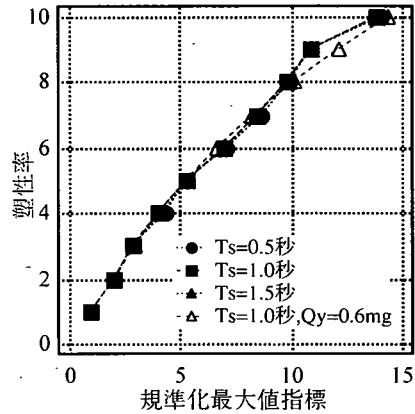


図-14 弾性固有周期および降伏荷重に応じた規準化最大値指標と塑性率の関係 (剛性比  $r=1/6$ )

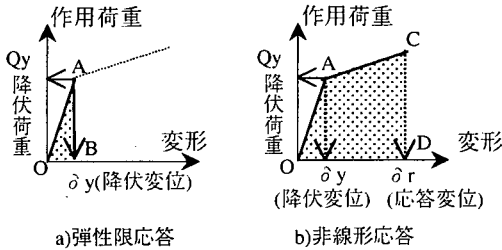


図-15 復元力特性に基づく弾性限応答および非線形応答におけるポテンシャルエネルギー

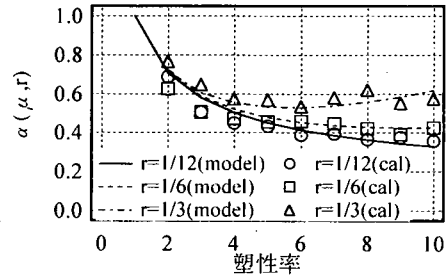


図-16 剛性比に応じた塑性率と影響関数  $\alpha$  の関係

パラメーターである降伏荷重の影響を把握するため、図-14に、降伏荷重を0.6mg、剛性比 $r=1/6$ 、振動系の弾性固有周期1.0秒とした際の塑性率と規準化最大値指標の関係も合わせて示す。これより、降伏荷重の差異も、最大値指標の規準化により、正規化されることが分かる。以上より、規準化最大値指標と塑性率の関係は、振動系の復元力特性のうち、正規化のできない剛性比のみに依存することが明らかになった。つまり、地震動の運動エネルギーの規準化という概念に基づく規準化最大値指標は、振動系の応答が入力波の振幅のみならず振動系と入力波の相対的周波数特性に依存するという、地震動特性のスカラ指標としての表現を困難とする課題を回避できるという意味でも有用な指標であることが分かる。

## (2) 規準化最大値指標に基づく塑性率の評価手法

ここでは、2章で示したエネルギーに基づく構造物の非線形応答に関する考え方に基づき、地震動の最大運動エネルギー比に対応する規準化最大値指標と構造物の応答のエネルギー比との関連づけを行う。

構造物の応答に関するエネルギー比 ${}_R E_S(\mu, r)$ は、規準化最大値指標と同様に弾性限応答と塑性率 $\mu$ に対する静的なポテンシャルエネルギー比として算出することができる。図-15に示す静的な復元力特性、つまり荷重と変位の関係より、弾性限での静的なポ

テンシャルエネルギー $E_{Se}$ は式(15)、塑性率 $\mu$ に対するポテンシャルエネルギー ${}_R E_S(\mu, r)$ は式(16)に示す様に得られる。すると、その比である構造物の応答のエネルギー比 ${}_R E_S(\mu, r)$ は式(17)の様に表すことができる。

$$E_{Se} = \frac{Q_y \delta_y}{2} (\text{面積 } \triangle AOB) \quad (15)$$

$${}_R E_S(\mu, r) = \frac{Q_y \delta_y}{2} (1.0 + 2(\mu - 1) + r(\mu - 1)^2) (\text{面積 } \square AOCDB) \quad (16)$$

$${}_R E_S(\mu, r) = \frac{E_S(\mu, r)}{E_{Se}} = 1.0 + 2(\mu - 1) + r(\mu - 1)^2 \quad (17)$$

このエネルギー比は、塑性率および剛性比のみの関数であり、前項で示した規準化最大値指標の支配因子と調和している。

規準化最大値指標は、前章で示した様に塑性率に応じた振動系の等価固有周期に対する相対周期毎の弾性限に対する塑性率に応じた運動エネルギー比と見なすことができる。このことより、構造物の応答のポテンシャルエネルギー比は、式(18)の様に関連係数 $\alpha$ を介して地震動の運動エネルギー比と関連づけることができるとする。その関連係数 $\alpha$ は両エネルギー比の支配因子である剛性比および塑性率の関

数となることは明らかである。その影響関数は、図-13に示した規準化最大値指標と式(17)より得られる構造物の応答のエネルギー比との塑性率毎の比率として、図-16の様を得られる。この関数は、塑性率1.0の時1.0となること、塑性率が1から5にかけて急激に値が低下することおよび各塑性率に対し剛性比の増加とともに値が大きくなることを勘案し、式(19)の様にモデル化した。式(19)により算出された影響関数を図-16に合わせて示す。ここで、評価対象とする影響係数と式(19)により算出した影響関数との相関係数 ( $r^2$ ) は0.95と高い相関を示している。

$${}_R E_E(\mu, r) = \alpha(\mu, r) {}_R E_S(\mu, r) \quad (18)$$

$$\alpha(\mu, r) = \frac{1 + (\mu - 1)^2 (4.45 \times 10^{-2} r - 3.30 \times 10^{-3})}{\sqrt{\mu}} \quad (19)$$

ここで得られた式(17)、(19)の積として算出した塑性率と規準化最大値指標の関係を図-13に合わせて示す。図に示した様に、式(19)の影響関数と式(17)による構造物の応答に関するエネルギー比を用いることにより塑性率毎の規準化最大値指標を精度良く推定できることが分かる。言い換えれば、地震動の運動エネルギーに基づく規準化最大値指標は式(17)、(18)、(19)に示した関係により構造物のポテンシャルエネルギー比と有意に関連づけられ、2章で示した考え方は有意であることを示している。

## 5. 実地震波を対象とした非線形地震応答の評価への最大値指標の適用性

ここでは、前章で示した調和波に対する塑性率に応じた規準化最大値指標と構造物のポテンシャルエネルギー比の関係を踏まえ、実地震動に対する非線形復元力特性を有する1自由度系の振動モデルの非線形応答の評価手法とその適用性を示す。その際、評価の対象とする非線形応答は、最大塑性率とする。

### (1) 評価手法

最大塑性率は、式(20)に示す様に最大応答変位と降伏変位の比として得られる。ここで、最大応答変位は、振動系の応答変位を定常不規則過程と見なすと、Kiuregianの手法<sup>15)</sup>を用い式(21)に示すように応答変位のパワースペクトルに関する0次モーメント  $\lambda_{X,0}$  とピーク係数  $P_X$  に基づき、期待値として表すことができる。最大応答変位をその期待値とすることにより、最大塑性率は式(22)で表されるように周期  $T_i$  毎の塑性率の自乗和に基づいて、期待値  $\bar{\mu}_{\max}$  として評価することができる。ここで、ピーク関数  $P_X$  は式(24)に示す継続時間  $T$ 、単位時間当たりのゼロ線交差関数  $\nu$ 、パワースペクトルの形状関数  $\beta$  により表される。

$$\mu_{\max} = \frac{X(t)_{\max}}{X_y} \quad (20)$$

$$\bar{X}(t)_{\max} = P_X \sqrt{\lambda_{X,0}} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{\max} &= \frac{P_X \sqrt{\lambda_{X,0}}}{X_y} = P_X \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} P_X(\omega) d\omega}{X_y^2}} \\ &= P_X \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\infty} |F_X(\omega)|^2 d\omega}{X_y^2} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} &= P_X \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|F_X(\omega_i)|}{X_y} \right)^2 \Delta\omega} \\ &= P_X \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu(T_i))^2 \frac{2\pi}{T}}{T}} \\ &= \left. \begin{aligned} P_X &= \sqrt{2 \ln \nu_e T + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln \nu_e T}}} \\ \nu_e &= \begin{cases} \nu & \beta < 0.69 \\ \nu & \beta \geq 0.69 \end{cases} \\ \nu &= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}}, \beta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}} \end{aligned} \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

以上より、地震動に対する振動系の最大塑性率を求めるとい問題は、振動系の応答変位を定常不規則過程と見なすことにより周期  $T_i$  毎の塑性率に基づく、最大塑性率の期待値を求めるとい問題に置き換えられる。その周期毎の塑性率は、前章の調和波に対して得られた振動系の塑性率に応じた規準化最大値指標と構造物の応答のポテンシャルエネルギー比の関係をを用いることにより求めることができる。ここで、その関係である式(18)は、周期毎の地震動の最大値指標に応じた塑性率、つまり非線形の最大応答変位とその変位時の等価剛性の関係を与える構成式であるとも見なすことができる。この様に、周期毎に異なる応答変位と等価剛性に関係に基づき時間領域での最大塑性率、言い換えれば最大応答変位を推定するという考え方は、入力地震動のエネルギー指標より応答変位と等価剛性の関係が一意的に決定されることを除けば、杉戸ら<sup>16)</sup>が提案している周波数毎のひずみに応じた剛性を用いた非線形地震応答解析法と同様となっている。このことから、実地震動に対する時間領域での最大塑性率を求めるために、調和波に対して得られた式(18)による周期毎の塑性率を用いるという考え方は支持されるものと考えられる。以下に、実地震動に対する周期毎の塑性率を求める手法を示す。

まず、地震動の最大値指標は、地震動の加速度成分および速度成分のフーリエ振幅の積  $A(\omega_i) V(\omega_i)$  として得ることができる。一方、式(18)における地

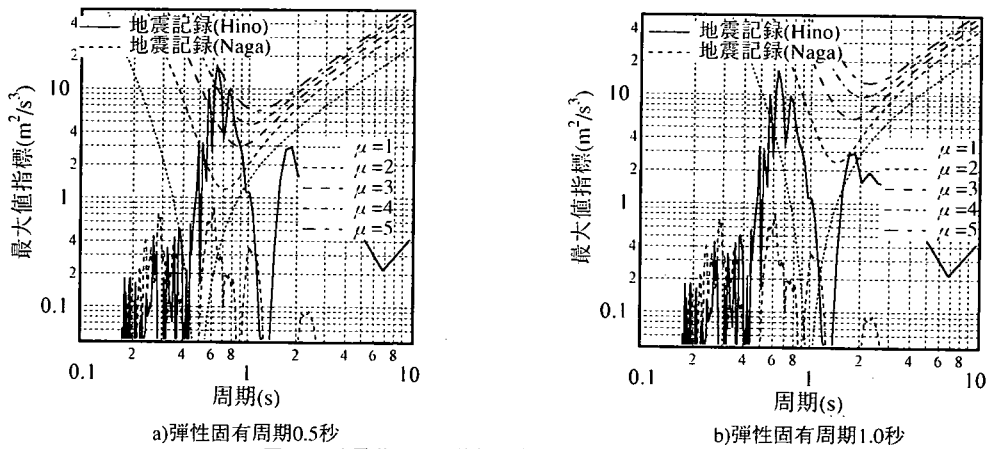


図-17 地震動の最大値指標と必要最大値指標の比較

震動の特性は、規準化最大値指標における分子項（式(14)参照）、つまり塑性率に応じた等価固有周期  $T_\mu$  で規準化された周期に対する調和波の最大値指標  $I_{av}^\mu(T_\mu)$  を用いている。地震動の最大値指標に対応する塑性率は未知であることから、周期の規準化を行うことができない。よって、最大値指標の規準化は、塑性率を仮定し、式(24)に示す様に塑性率に応じた等価固有周期  $T_\mu$  に対する弾性限最大値指標を求めることにより可能となる。しかし、地震動の特性に基づいて規準化最大値指標を評価する際、地震動の最大値指標は塑性率を陽な変数とする関数となっていないため直接評価を行うことができない。

$$I_{av}^\mu(\mu, r) = 8\pi^3 \frac{\delta_v^2 T_l}{T_\mu (T_S)^3} \left[ \left\{ 1 - \left( \frac{T_\mu}{T_l} \right)^2 \right\}^2 + 4h(\mu, r)^2 \left( \frac{T_\mu}{T_l} \right)^2 \right] \quad (24)$$

ところで、式(18)の両辺に式(24)で得られる弾性限最大値指標を乗じることにより、式(25)に示す様に地震動の最大値指標と構造物の塑性率および諸特性に関する関数を分離することができる。ここで、右辺は構造物に塑性率  $\mu$  の応答が生じるために必要な地震動の最大値指標を意味し、構造物の特性は既知であるとする塑性率のみの関数となる。すると、所定の地震動の最大値指標に対する塑性率は、その両辺の差がゼロとなる際の塑性率として求めることができる。ここで、式(25)の両辺の差である式(26)を塑性率評価のための目的関数  $f(\omega_i, \mu)$  と定義する。

$$A(\omega_i)V(\omega_i) = I_{av}^\mu(\mu, r) \cdot \alpha(\mu, r) E_S(\mu, r) \quad (25)$$

$$f(\omega_i, \mu) = A(\omega_i)V(\omega_i) - I_{av}^\mu(\mu, r) \cdot \alpha(\mu, r) E_S(\mu, r) = 0 \quad (26)$$

以上、実地震動に対する最大塑性率は、式(26)に基づいて得られた周期毎の塑性率を式(22)に代入す

ることにより得られる。ここで、地震動の最大値指標が塑性率1.0に対する弾性限最大値指標より小さい場合、言い換えれば塑性率が1.0以下の場合、その塑性率は対象となる周期における地震動の加速度フーリエ振幅に対する1質点系の応答変位の理論解を降伏変位で除すことにより求めることができる。

## (2)適用性

まず、式(25)における右辺、地震動の最大値指標と左辺である塑性率  $\mu$  が生じるために必要な地震動の最大値指標（以後、必要最大値指標と呼ぶ）の関係を図-17に示す。地震動として、表-1に示した実地震波のうち、周波数特性の異なる岩手県内陸北部地震（No.9；Naga波）、鳥取県西部地震（No.10；Hino波）の2つの地震記録を対象とした。構造物の特性として、弾性固有周期は0.5秒と1.0秒、復元力特性のうち剛性比は1/12とした。地震動の最大値指標と比較する必要最大値指標の塑性率は1から5とし、図-17に合わせて示した。ここで、両地震動に対する非線形地震応答解析により得られる最大塑性率は、構造物の弾性固有周期が0.5秒の場合、Hino波が5.4、Naga波が2.2、弾性固有周期が1.0秒の場合、Hino波が2.3、Naga波が1.0となっている。

まず、図に示す地震動の最大値指標と塑性率毎の必要最大値指標を比較すると、構造物の弾性固有周期が0.5秒の場合、Hino波の最大値指標は周期0.6から0.7秒の間で塑性率5に対応する必要最大値指標を越える値、Naga波では周期0.5から0.7秒にて塑性率1と2に対応する必要最大値指標の間の値となっている。一方、弾性固有周期が1.0秒の場合、Hino波の最大値指標は周期0.5から1.1秒の間にて塑性率1と2に対応する必要最大値指標の間、周期1.7と2.0秒にて塑性率2程度の値となっている。また、Naga波の最大値指標は周期1.0秒近傍にて僅かに塑性率1の必要最大値指標を越えている。この様に、地震動の最

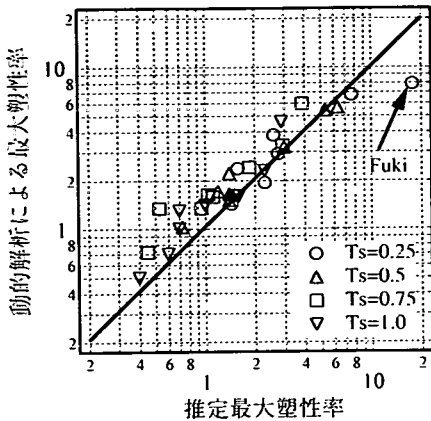


図-18 推定最大塑性率と動的解析による最大塑性率の比較

大値指標と塑性率に応じた構造物の必要最大値指標の関係は、構造物の応答に関する傾向をよく表している。これらは、地震波の周波数特性に基づく最大値指標が構造物の非線形応答を表す指標として有意であることを示している。

次に、前項で示した手法により推定された最大塑性率の期待値（以後、推定最大塑性率と呼ぶ）と非線形復元力特性を有する1自由度系の非線形地震応答解析による最大塑性率（以後、動的解析による最大塑性率と呼ぶ）の比較を図-18に示す。その際、地震波には、表-1に示した11地震のうち8地震（1,3,5,6&9,10,11）の記録を用いた。構造物として、弾性固有周期は0.25, 0.5, 0.75および1.0秒の4ケース、復元力特性のうち剛性比 $r$ は1/12とした。また、式(27)に基づく周期毎の地震動の最大値指標に対する塑性率の評価には、二分法を用いた。これより、Fuki波（No.6）に対する構造物の弾性固有周期0.25秒のケースを除き、概ね推定最大塑性率はその大きさによらず動的解析による最大塑性率より小さな値となっていることが分かる。両者の差異を把握するため、動的解析による最大塑性率と推定最大塑性率の比率を $\beta$ とし、 $\beta$ と動的解析による最大塑性率の関係を図-19に示す。提案された地震動の周波数特性に基づく最大塑性率の評価手法は、構造物の弾性固有周期や地震動の特性によらず動的解析による最大塑性率に近い推定値を与えていることが分かる。ここで、 $\beta$ の平均値は1.22、標準偏差は0.28となっている。このことから、動的解析による最大塑性率は、次式に示すように地震動の最大値指標の周波数特性より推定された最大塑性率に動的解析への換算係数 $\beta$ を乗じることにより、評価が可能となる。

$$\mu_d = \beta \cdot \bar{\mu}_{\max} \quad (27)$$

ここで提案した非線形復元力特性を有する1自由

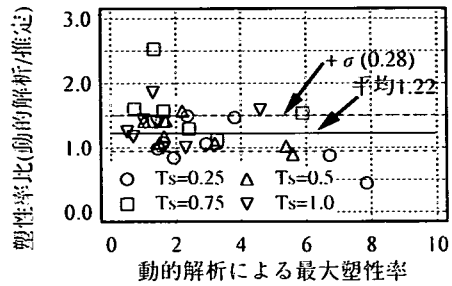


図-19 動的解析による最大塑性率への換算係数

度の振動モデルの最大塑性率を推定する手法は、動的解析による推定値を比較的良好な精度で推定可能であり、地震被害想定やレベル2地震動の選択に対して有用な手法であると考えられる。

## 6. あとがき

ここでは、構造物の非線形地震応答として最大応答変位と等価な最大塑性率に着目し、地震動の最大運動エネルギーに基づく指標を用いた最大塑性率の推定手法を提案し、その適用性を明らかにした。本論の特徴のひとつは、構造物の非線形応答に関連する地震動の特性として、最大運動エネルギーに基づく2つの指標を定義し、震度などとの関係を踏まえ、その物理的意味を明らかにしたことにある。その2つの指標は最大加速度と最大速度の積による最大値指標と両成分の比として定義される周波数特性指標である。後者の指標は、運動エネルギーの最大値をもたらす地震動成分の中心周期に相当する。次の特徴は、構造物の弾性限応答時のポテンシャルエネルギーとその応答をもたらす地震動の最大運動エネルギーを規準量とした、地震動の規準化最大値指標、つまり最大運動エネルギー比と構造物の応答のポテンシャルエネルギー比を関係づけたことにある。その関係は、バイリニア型の非線形復元力特性を有する1自由度系の振動モデルを対象とした調和波に対する応答解析に基づいて提案した。3番目の特徴は、地震記録が得られている場合、2番目の特徴で示した関係を用い、地震動の最大値指標の周波数特性に基づく最大塑性率を推定する手法を示したことにある。その適用性は、前述の振動モデルを用いた地震応答解析による最大塑性率との比較により行った。これらより、以下のことが明らかになった。

- i) 地震動の最大運動エネルギーに基づく最大値指標と周波数特性指標、さらに両者を包括する最大値指標の周波数特性は、構造物の非線形応答を支配する指標として有意である。
- ii) 震度は地震動の最大値指標と関連するスカラー量であり、構造物と地震動の相対的な周波数特性の関係を考慮することが困難である。

iii)地震動の最大値指標の周波数特性に基づく最大塑性率の推定手法は、動的解析に基づく最大塑性率との差異が平均で1.22倍と工学的に有意な評価であり、地震被害想定などへの適用が可能である。

#### 参考文献

- 1) 中埜良昭：RC 構造物の損傷評価に関する最近の研究，コンクリート工学，Vol.29，No.5，pp.67-71，1991
- 2) 中島章典，深山大介，大塚久哲，佐藤貴志，鈴木基行：鋼製橋脚の弾塑性最大応答変位の推定について，土木学会論文集，No.570/I-40，pp.297-304，1997
- 3) 入江達雄，松田泰治，スマヤ アラン：エネルギーの釣り合いによる構造物の応答推定法の適用，構造工学論文集，Vol.43A，pp.793-799，1997
- 4) 中村孝也，堀則男，井上範夫：瞬間入力エネルギーによる地震動の破壊特性評価と応答変形の推定，日本建築学会構造系論文集，第 513 号，pp.65-72，1998
- 5) 中村友紀子，壁谷澤寿海：瞬間エネルギーを用いた等価線形化法による弾塑性応答変形の推定，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp.2573-2578，1998
- 6) 長谷川浩一，翠川三郎：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物郡の震害予測，日本建築学会構造系論文集，第 505 号，pp.53-59，1998.3
- 7) 岡田成幸，鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのパラナルビリティ関数群の構成，地震，Vol.2，No.44，pp.93-108，1991
- 8) 大西淳一，山崎文雄，田山聡，高野辰雄，福田直三：高速道路の地震被害と地震動強さの関係，pp.423-426，1997
- 9) 境有紀，南忠夫，壁谷澤寿海：地震動の性質を簡便に表現する方法，第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム，pp.265-268，1998
- 10) 諸井孝文，武村雅之：1995 年兵庫県南部地震による気象庁震度と住宅全壊率の関係，地震，第 2 輯，第 52 巻，pp.11-24，1999
- 11) Fajfar, P. : Equivalent Ductility Factors, Taking into Account Low-Cycle Fatigue, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.21, pp.837-848, 1992
- 12) Kamiyama, M. : Spectral Characteristics of Strong Ground Motions in Terms of Peak Values, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.(J.S.C.E.)*, No.531/I-34, pp.35-49, 1996
- 13) 武村雅之：過去の地震被害から見た断層近傍での強震動，第 10 回日本地震工学シンポジウム パネルディスカッション資料集，pp.45-50，1998
- 14) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，pp.120-123，1986
- 15) Kiuregian, A. D. : A Response Spectrum Method for Random Vibration Analysis of MDF Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.9, pp.415-435, 1981.
- 16) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994

(2001.11.9 受付)

## BASIC STUDY FOR ESTIMATING NONLINEAR RESPONSE OF STRUCTURE BASED ON ENERGY INDEX OF EARTHQUAKE GROUND MOTION

Susumu NAKAMURA, Yoshitaka MURONO and Kimitoshi ASHIYA

The objective of this paper is to propose the method for estimating the nonlinear response of the structure with SDOF. The characteristics of the method is as follows: Maximum index based on kinetic energy of earthquake ground motion is used as the characteristics of earthquake ground motion to represent the non-linear response of structure. The normalized energy index is related with normalized potential energy of structure response. The method to estimate maximum ductility factor by use of frequency characteristics of maximum index is proposed by developing the relationship mentioned second characteristics. The applicability was confirmed by the comparison with the maximum ductility factor calculated by non-linear seismic response of structure with SDOF.