

# 非線形地震応答の評価指標としての地震動特性に関する一考察

中村 晋

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)

本報告は、構造物の非線形地震応答として最大応答変位に着目し、それに関連づけられる地震動指標を運動エネルギーに基づく最大加速度と最大速度の積で表される最大値指標を用い提案した。それは、構造物の応答変位と関連づけられる最大ポテンシャルエネルギーの比として入力地震動に応じた応答変位の比が求められるという考え方を、入力地震動についてもそのエネルギー指標の比と応答変位の比は関連づけられるという考え方に援用したものである。ここでは、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き、最大応答変位と地震動の最大値指標と関連づけられることを示した。さらに、その考え方は実地震波への適用の可能性を有することも示した。

**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に導入された各種土木構造物の耐震設計法のうち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大きな破壊力を有する可能性のあるレベル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採用している。その地震動は、対象とする地点で大きな強さの地盤震動が想定される複数の起震断層に対して、断層の震源特性、および伝播・増幅特性、つまり物理現象としての自然的要因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さや繰り返し変形による累積損傷過程に支配される。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、設計に用いる地震動を適切に選択することが必要となる。その選択に際して、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うまでもないことである。

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やエネルギースペクトルに基づく手法<sup>1)2)</sup>、地震被害や地震応答を地震動の震度<sup>3)</sup>、最大速度<sup>4)</sup>やスペクトル強度などと関連づける手法などがある。前者は、構造物の固有周期に応じた応答

を直接の評価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。後者は地震動自体の特性を地震被害などと関連づける評価指標とはしているものの、構造物の応答また損傷と関連づけた事例は極めて少ない。その理由の一つとして、構造物の応答は地震動と構造物の周波数特性などの相対関係に依存し、単一のスカラー指標で表現することが困難であることが挙げられる。

ここでは、構造物の非線形地震応答として最大応答変位に着目し、それに関連づけられる地震動指標をエネルギー的な地震動の強さ指標に基づき提案する。まず、基本的な考え方を示す。次に、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き、最大応答変位と地震動の評価指標の関係を示す。最後に、その関係が実地震波へも適用可能であることを示す。

## 2. 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

簡易的に構造物の非線形応答としての最大応答変位を評価する手法として、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その一つの指標である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つの規範は、地震動と構造物の周波数特性の差異に応じて選択することが適用上必要となる。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

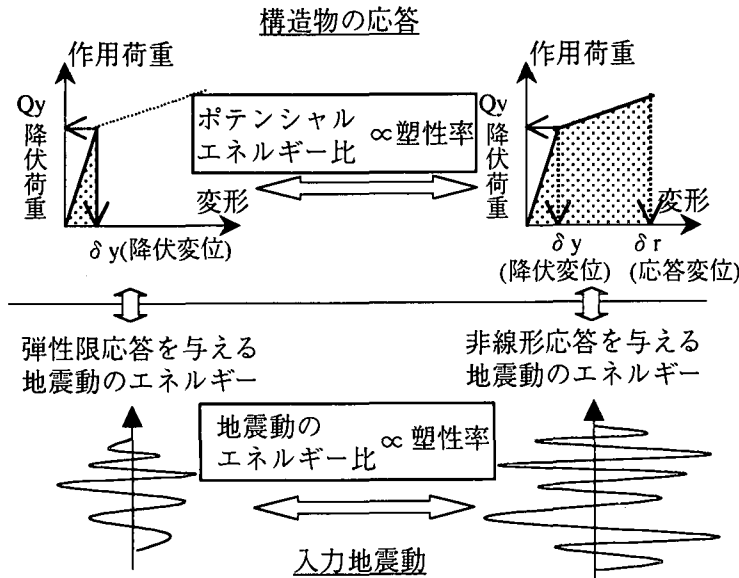


図-1 構造物の応答と入力地震動の関係

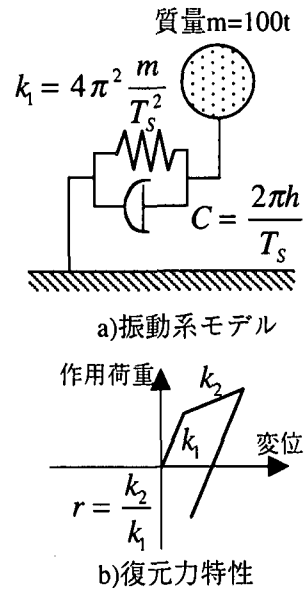


図-2 構造物の振動モデル

示す様に応答変位評価の基準となる降伏変位を応答変位とするポテンシャルエネルギーに着目すれば、両者の比、つまりエネルギー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。つまり、2つの規範を用いることなく統一的に応答を評価できることになる。しかし、これらは構造物の応答に基づく評価となっており、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連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間にもそのような関連が成り立つと推定される。その際、地震動の特性としてもエネルギーに基づく特性を用いることが必要になると考えられる。直接評価の可能な地震動の特性として、式(1)に示す速度Vの二乗に質量を乗じた運動エネルギーが考えられる。ここで、mは質量、Cは波動伝播速度、Δtは伝播時間を表す。その最大値について変形すると、最大運動エネルギーは式(2)の様に最大加速度と最大速度の積と地震動の中心周期<sup>9)</sup>および質量の積、言い換えれば地震動の最大値指標Iavと周波数特性指標(中心周期)に分離されることを示している。ここで、最大加速度と最大速度との積は地震動の最大運動エネルギーと関連のある地震動の最大値指標Iavを意味している。ここでは、そのエネルギー概念に基づく最大値指標を地震動の特性として用い、構造物の非線形応答がその特性により関連づけることができることを示す。

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

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

### 3. 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) 解析手法および条件

ここでは、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は振動系の弾性固有周期Tsより $m(2\pi/Ts)^2$ 、減衰定数hは5%とした。時間積分にはWilsonのθ法(θ=1.4)を用いた。また、復元力特性における降伏力Qyは0.4mg、降伏変位δyは降伏力と初期剛性の比として求めた。

解析パラメータには、振動系として固有周期と復元力特性の剛性比r(=第二剛性/初期剛性)、入力波として周期Tiを用いた。ここで、振動系の固有周期は0.5秒、1.0秒、1.5秒の3ケース、復元力特性の剛性比rは1/3、1/6、1/12の3ケースとした。

#### (2) 最大値指標と塑性率の関係

まず、振動系の弾性固有周期が1.0秒、剛性比rが1/6に対して、入力波の周期と所定の塑性率を与える最大値指標の関係を図-3に示す。ここで、所定の塑性率に応じた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。ここで、塑性率が1.0つまり、応答変位が降伏変位の際の最大値指標は次式に示す様に振動系の初期条件より得られる。

$$A_{\max} V_{\max} (\mu = 1) = 8\pi^3 \frac{\delta_y^2 T_s^2}{(T_i)^3} \frac{1}{\{1 - (\frac{T_s}{T_i})^2\} + 4h^2 (\frac{T_s}{T_i})^2} \quad (3)$$

最大値指標は振動系の固有周期時つまり共振時に最小となり、その値は塑性率に応じて大きくなっていく。ここで、最大値指標が最小値を与える周期は振

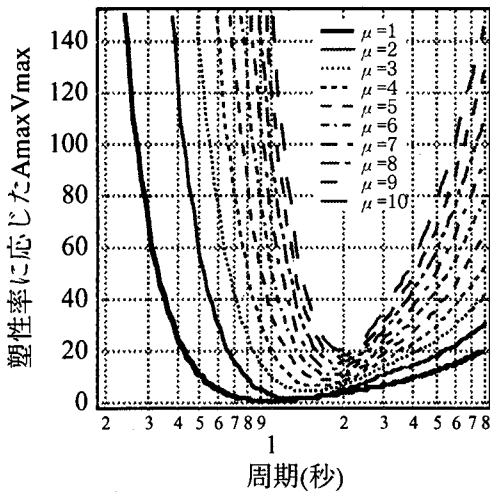


図-3 塑性率に応じた最大値指標と入力調和波の周期の関係

動系の非線形化に伴ない長周期側へ移動している。また、その周期より長・短周期側へ向かうにつれ大きな値となっている。その傾向は、振動系の固有周期、復元力特性の剛性比によらず同様である。

次に、応答塑性率が1.0となる最大値指標と他の塑性率を与える最大値指標との関係を、弾性固有周期が1.0秒で復元力特性の剛性比 $r$ が1/3, 1/6, 1/12の場合について図-4に示す。ここで、応答塑性率が1.0となる最大値指標を以後、弾性限最大値指標と呼ぶ。その関係は、入力波の周期を振動系の固有周期で基準化した基準化周期と所定の塑性率に応じた最大値指標の関係を示している。さらに、振動系の固有周期は、各塑性率ごとに最大応答変位時における等価剛性に基づいて算出した値とした。これより、弾性限最大値指標と各塑性率に応じた最大値指標の関係は線形関係にあり、その傾きは塑性率に応じ大きくくなっていることが分かる。

このことは、前章で示した地震動の特性間にも構造物のエネルギー比と塑性率と同様な関係が塑性率に応じた最大値指標と弾性限最大値指標の比率と塑性率の関係にも成り立つという推定が妥当であることを示している。さらに、エネルギー一定則や変位一定則が地震動と振動系の周波数特性に依存して選択されるという課題がその値を用いることにより回避されることを示している。ここで、その最大値指標の比率を基準化最大値指標と呼ぶ。

最後に、復元力特性における剛性比に応じた基準化最大値指標と塑性率の関係を図-5に示す。これより、剛性比が小さい完全弾塑性型に近い場合には、両者の関係はほぼ直線的であり、剛性比が大きくなるにつれ双曲線的な関係となっていることが分かる。この関係は、振動系の弾性固有周期、さらに降伏力によらず同じである。このことは、調和波に対する1自由度系の非線形応答は、復元力特性のみに依存した基準化最大値指標によって表すことができることを示している。つまり、基準化最大値指標は調和波に対する非線形応答の評価指標として有意であることを示している。

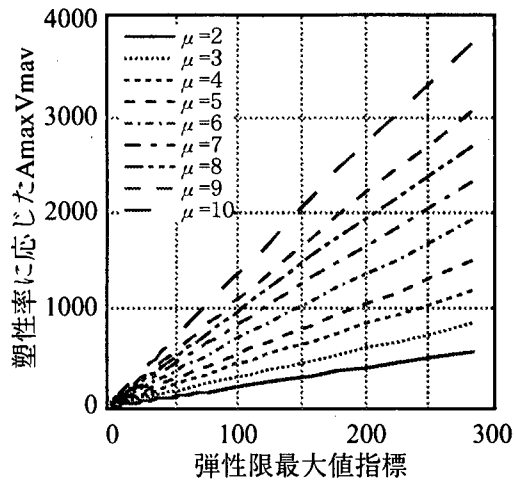


図-4 塑性率に応じた最大値指標と弾性限最大値指標の関係

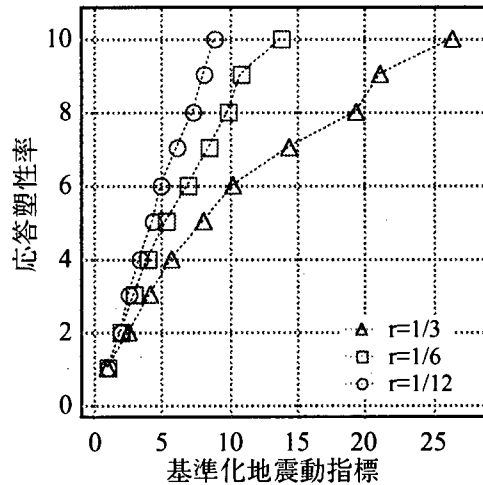


図-5 基準化地震動指標と塑性率の関係

#### 4. 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、実地震波の非線形応答を支配する地震動特性、さらにそれをを用いた非線形応答の評価に対して、前章で示した最大値指標の適用性を把握する。

まず、実地震波に対する最大値指標と振動系の非線形応答関係を検討する。振動系として、図-4に示した解析と同様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。また、入力地震動には、実地震波をウェーブレット変換および逆変換を用い周波数帯毎に分解した成分波を用いた。その際、実地震波として、周波数特性や継続時間の異なる1995年兵庫県南部地震における葺合で観測された記録(N330E, 以後fk波)、1994年三陸はるか沖地震により八戸港で観測された記録(NS成分, 以後hach波)および1998年岩手県内陸北部地震により極震源近傍の国民休暇村(長山)で観測された記録(NS成分, 以後naga波)の3つを用いた。図-6に塑性率(=1, 2, 4, 8, 10)に応じた最大値指標と入力地震動の周期の関係を示す。ここで、入力地震動の周期は、神山<sup>5)</sup>による最大速度と最大加速度の比として得られる中心周期とした。図には、図-4で示した調和波

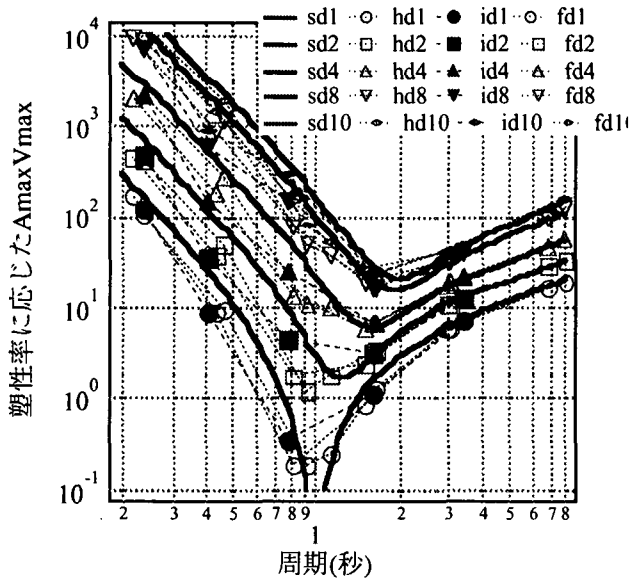


図-6 実地震波に対する塑性率に応じた最大値指標と調和波に対する関係の比較

に対する結果も合わせて示す。図より、各地震波に対する塑性率に応じた最大値指標はほぼ同程度であり、調和波に対する傾向と同様であることが分かる。

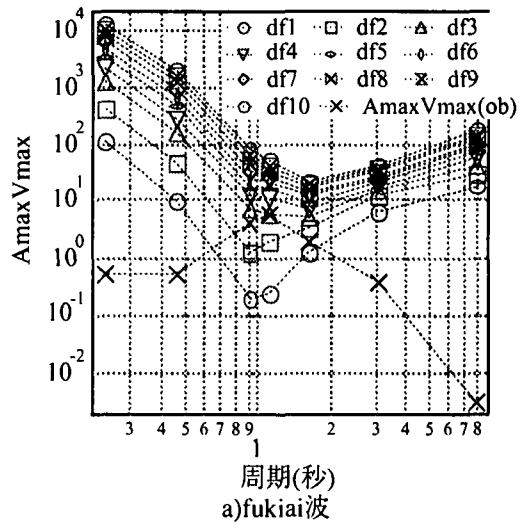
次に、図-6に示した地震波毎に塑性率に応じた最大値指標と成分波自体の最大値指標の関係を図-7に示す。ここで、成分波に対する塑性率はそれ自体の最大値指標と塑性率に応じた最大値指標を比較することにより得られ、各成分の塑性率の最大値が原地震波の最大塑性率に対応すると考えられる。すると、図より得られる最大塑性率は、fk波が3.0、hach波が1.5、naga波が1.0となる。原地震波に対する最大塑性率はfk波が4.5、hach波が1.6、naga波が1.2であり、fk波に対しては小さな評価となっているものの他の地震波に対してはほぼ適当な値を与えている。このことは、構造物の非線形応答の定量評価は今後検討課題であるが、それを支配する地震動特性として最大値指標の有意性を示していると考えられる。

## 5. あとがき

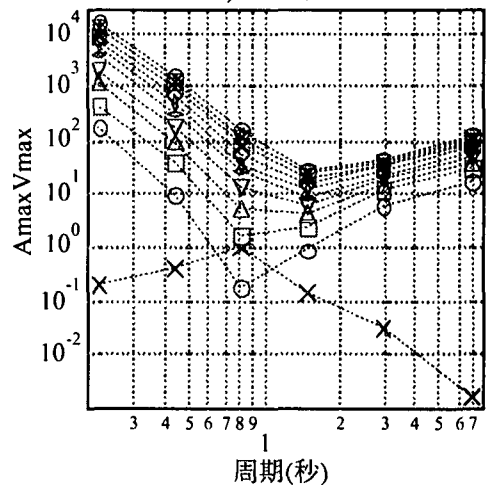
ここでは、構造物の非線形応答を支配する地震動特性として、地震動の運動エネルギーに基づく最大加速度と最大速度の積で表される最大値指標は有意であること、さらに、構造物の非線形応答が基準化された最大値指標、つまり地震動特性に基づいて評価できる可能性があることを示した。

## 参考文献

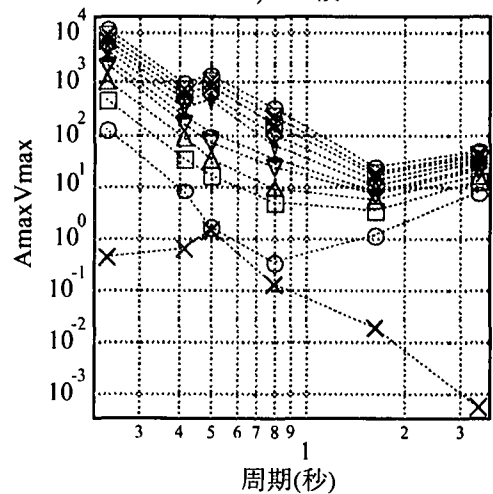
- 1)中島章典他, 鋼製橋脚の弾塑性最大応答変位の推定について, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.297-304, 1997
- 2)入江達雄他, エネルギーの釣り合いによる構造物の応答推定法の適用, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.793-799, 1997
- 3)長谷川浩一, 翠川三郎, 地域メッシュ統計を利用した



a) fukaii波



b) hach波



c) naga波

図-7 塑性率に応じた最大値指標と成分波の最大値指標の関係

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

- 4)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
- 5)Makoto K. : 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