

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

日本大学 正 中村 晋¹⁾, (財)鉄道総合技術研究所 正 室野剛隆²⁾, 正 芦屋公稔²⁾

1.はじめに

従来、線形応答により得られる最大変位に基づくエネルギー一定則や変位一定則が、構造物の非線形応答のうち最大応答変位を簡易的に推定する手法として用いられてきた。それら2つの規範を適用する際、地震動と構造物の周波数特性の差異に応じていずれかを選択することが必要となる。ここで、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、2つの規範を用いることなく、それらエネルギーの比は塑性率と関係づけることができる。それらの応答を支配する地震動のエネルギー特性にもそのような関係が成り立てば、構造物の非線形応答を地震動の特性より直接推定することが可能となる。このことは、地震直後の構造物の損傷推定や地震防災計画の策定に際して、地震動を直接の評価指標とすることが可能となることを意味する。

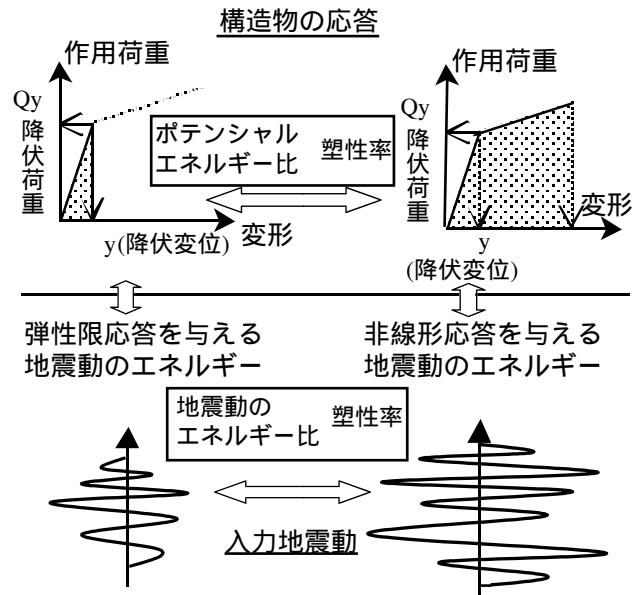


図-1 構造物の応答と入力地震動の関係

ここでは、構造物の非線形応答を評価するための地震動の特性として、運動エネルギーに基づく評価指標を示し、その特性を考察する。

2.エネルギーに基づく地震動特性の評価指標

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、tは伝播時間を表す。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 ΔE_{max} などが考えられる。

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

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

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

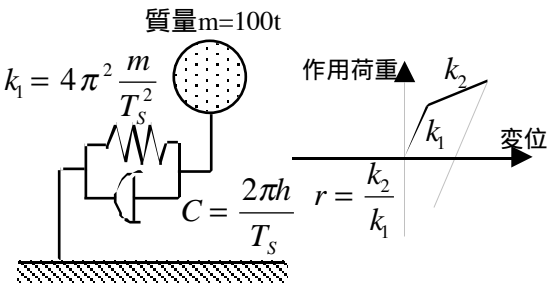
まず、最大運動エネルギーに着目する。式(2)の様に最大運動エネルギーを変形すると、最大加速度と最大速度の積と地震動の中心周期¹⁾ ($T_{av} = 2\pi V_{max} / A_{max}$) および質量の積、言い換えれば地震動の最大値指標 I_{av} と周波数特性指標 T_{av} に分離することができる。ここでは、それら2つの指標を地震動の最大運動エネルギーに基づく強さ指標と呼ぶ。境²⁾が示した地震動の破壊力指標であるスペクトル強度比は、その構成因子である最大震度が武村³⁾により示された震度境界との関係で表される最大加速度と最大速度との積、有効周期が中心周期に対応するとみなすことより、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。

一方、最大瞬間エネルギー ΔE_{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大値を表すが、式(2)と異なり地震動の周波数特性が内在し、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。

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と考察

(1)調和波入力に対する入力波の振幅と応答変位の関係

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自由度の振動系の塑性率が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。ここで、初期剛性 k_1 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の法 ($\alpha = 1.4$)を用いた。用いた振動系の弾性固有周期は1.0秒、剛性比 r 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。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。



a)振動系モデル b)復元力特性
図-2 構造物の振動モデル

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

地震動指標、運動エネルギー、非線型応答, 1)〒963-9642 郡山市田村町徳定字中河原1, Tel(Fax):024-956-8712 (8858)

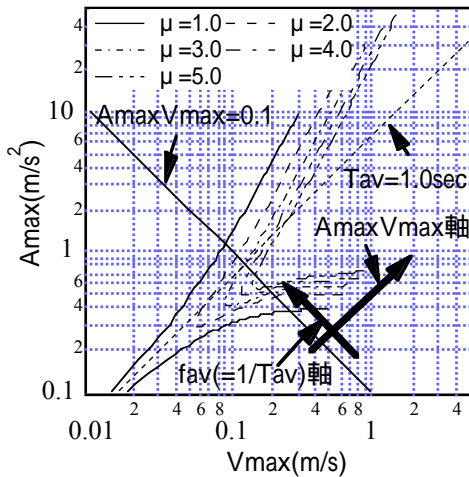


図-3 塑性率に応じた調和波入力地震動の最大加速度と最大速度の関係

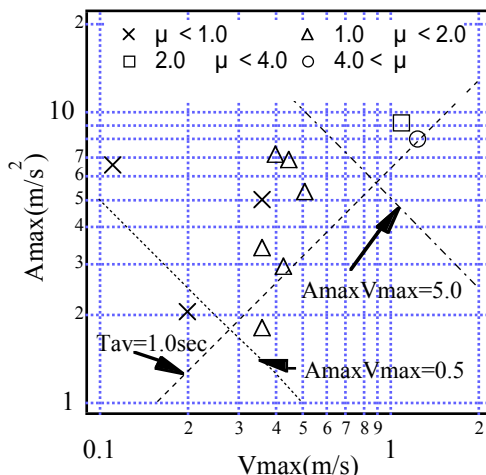


図-4 地震記録に対する最大塑性率と地振動の最大加速度および最大速度の関係

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} そのものであり最大速度と最大加速度の比と関係づけられ、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波線で示す。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(構造物の固有周期が入力波の周期より短い領域)であり、最大速度0.15m/s以上の着目すると、最大速度軸にほぼ平行な関係、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)に示した最大運動エネルギーに基づく地震動の2つの指標の関係を考察する。

$$\left. \begin{aligned} C &= A_{\max} V_{\max} \\ \frac{2\pi}{T_{av}} &= 2\pi \cdot f_{av} = \frac{A_{\max}}{V_{\max}} \end{aligned} \right\} (4), \begin{pmatrix} \text{Log} C \\ \text{Log}(2\pi f_{av}) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \text{Log} V_{\max} \\ \text{Log} A_{\max} \end{pmatrix} \\ = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos 45 & \sin 45 \\ -\sin 45 & \cos 45 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \text{Log} V_{\max} \\ \text{Log} A_{\max} \end{pmatrix} \quad (5)$$

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)の様に変換することにより、図-3の水平・鉛直軸と2つの指標の自然対数の関係が得られる。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。

(2)実地震記録に対する入力地震動振幅と応答変位の関係

ここでは、1995年兵庫県南部地震を含む最近の地震により得られた11の実地震記録を入力波とした際の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、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1.0秒、復元力特性の剛性比 r は1/12である。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の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。

4.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のエネルギー特性として、最大運動エネルギーに基づく最大値指標(最大加速度と最大速度の積)と周波数特性指標の2が有用な指標であることを示した。それを用いた構造物の非線形応答の推定手法については別報⁴⁾を参照されたい。

参考文献

- 1)M.Kamiyama: 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, 2)境有紀他: 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, 3)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, 4)中村晋, 室野剛隆, 芦谷公稔: 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検討, 土木学会論文集(投稿中)