

## 地震動のエネルギー指標の構造物被害推定への適用

株式会社ニュージェック 正会員 ○平井 俊之  
 京都大学防災研究所 正会員 澤田 純男

## 1. はじめに

地方自治体等において、地域防災計画を策定するために、地震被害想定が行われている。地震被害想定では、数多くの構造物に対して地震による被害を推定するため、地震動波形を用いて個々の構造物の動的応答を求めるのではなく、過去の被害地震における構造物の被害の分析から求められた地震動の強さを表す指標と構造物の被害との関係式から、対象とする地震が発生した場合の被害を見積もることが多い。こういった簡便な手法を用いて構造物の被害推定を行うためには、構造物の被害と相関が高い地震動強さ指標を用いることが望ましい。本研究では、地震動のエネルギー指標に着目し、地震による構造物の被害推定への適用について検討した。

## 2. 検討方法

本研究では、式(1)に示すように、地盤内のある位置において、上昇波(SH 波)の伝播に伴うエネルギーの流れを地震動の全時刻歴にわたって積分した値をエネルギー指標  $E$  として用いる。

$$E = \rho V_s \int_0^{\infty} \dot{u}^2(t) dt \quad (1)$$

ここで、 $\dot{u}(t)$  は地震動の上昇波の速度時刻歴波形であり、 $\rho$  および  $V_s$  は、それぞれその地盤の密度および S 波速度である。構造物は、バイリニアの履歴特性を持つ 1 自由度系としてモデル化した。1 自由度系に地動加速度  $\ddot{u}_0$  が作用した場合の運動方程式は、次式で表される。

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_0) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2)$$

$m$  は質量、 $c$  は減衰定数、 $k$  はバネ定数である。非定常の地震動波形を入力する場合には、(2)式の運動方程式を時間軸に対して離散化し逐次計算を行って応答を求めた。(2)式の両辺に  $du = \dot{u}dt$  をかけて積分するとエネルギーのつりあい式が得られる。

$$\int_0^t m\ddot{u}\dot{u}dt + \int_0^t c\dot{u}\dot{u}dt + \int_0^t ku\dot{u}dt = -\int_0^t m\ddot{u}_0\dot{u}dt \quad (3)$$

左辺第 1 項～第 3 項はそれぞれ時間  $t$  における運動エネルギー  $W_k$ 、減衰により消費されたエネルギー  $W_h$ 、弾性ひずみエネルギーと塑性ひずみエネルギーの和  $W_e$  である。右辺は地震による振動系への総入力エネルギー  $E_{in}$  である。地震終了時には、弾性ひずみエネルギーは微小であり、 $W_e$  は主に塑性ひずみエネルギー  $W_p$  となる。

K-NET 及び KiK-net における 1996 年以降の観測記録のうち、300gal 以上が記録された 377 個の地震記録(K-NET で 254 個、KiK-net で 123 個)、754 波形(NS と EW) を入力地震動として用い、1 自由度系の応答計算を行った。観測波形は、0.1～10Hz のバンドパスフィルタを通過させた後で用いた。構造物の損傷度合いを評価する指標として、塑性率(最大変位  $u_{max}$ /塑性変位  $u_p$ )及び塑性ひずみエネルギー( $W_e$ )を用い、入力地震動の強さを評価する指標として最大加速度値、最大速度値、エネルギー指標を用いることとした。1 自由度系の応答計算のモデルには、地盤条件が考慮されないため、地震動エネルギー算出にあたっては、地盤の密度は  $2000\text{kg/m}^3$ 、S 波速度は  $300\text{m/s}$  と仮定した。

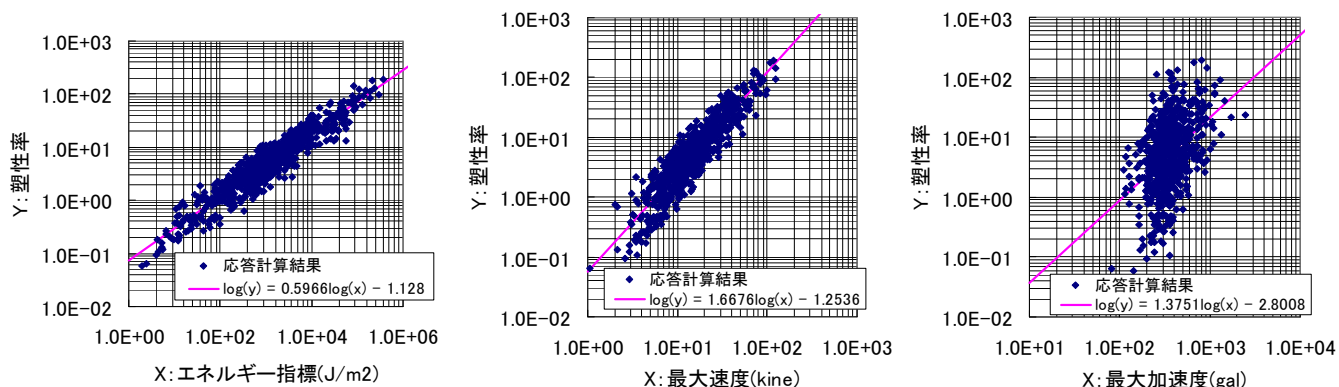
地震動の強さを表す指標(最大加速度値、最大速度値、エネルギー指標)と構造物の損傷度合いとの関係を比較することにより、構造物の被害推定へのエネルギー指標の適用性について検討した。

キーワード エネルギー指標、地震被害推定、1 自由度系応答、塑性率、塑性ひずみエネルギー

連絡先 〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20 株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ TEL 06-6374-4590

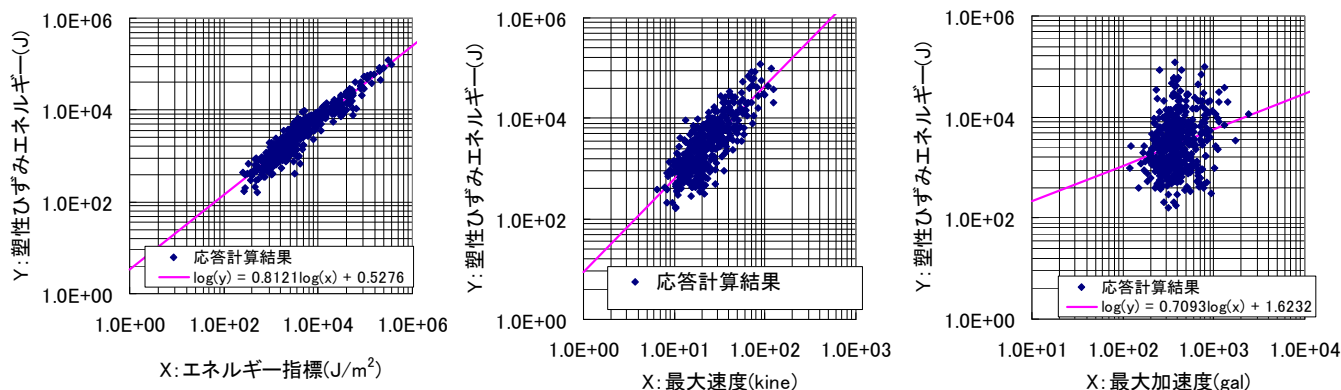
### 3. 検討結果

図-1 に塑性率と各指標との関係を示す。エネルギー指標と最大速度値は塑性率と相関が高い。対数標準偏差は、エネルギー指標で 0.189(0.65 倍～1.55 倍)、最大速度値で 0.236(0.58 倍～1.72 倍)となり、エネルギー指標の方が若干小さい。最大加速度値と塑性率との関係は、対数標準偏差が 0.524(0.3 倍～3.33 倍)であり、他の指標よりも大きなばらつきであった。図-2 に塑性ひずみエネルギー(塑性率 4 以上)と各指標との関係を示す。エネルギー指標と塑性ひずみエネルギーとの関係は他の指標との関係よりもばらつきが小さいことがわかる。これは、地震動エネルギーも塑性ひずみエネルギーとともに、地震動の時刻歴波形全体を対象として算出する量であるためであると考えられる。対数標準偏差は、エネルギー指標が 0.174(0.67 倍～1.49 倍)、最大速度値が 0.325(0.47 倍～2.11 倍)、最大加速度値が 0.524(0.3 倍～3.33 倍)であった。さらに、エネルギー指標と塑性エネルギーの関係は、塑性エネルギーが大きくなるほどばらつきが小さくなっていることから、大きな被害が想定されるほど地震動強さとの関係の信頼性が高くなるといえる。



(a)エネルギー指標(対数標準偏差 0.189) (b)最大速度値(対数標準偏差 0.236) (c)最大加速度値(対数標準偏差 0.524)

図-1 地震動の強さを表す指標と塑性率との関係の例



(a)エネルギー指標(対数標準偏差 0.174) (b)最大速度値(対数標準偏差 0.325) (c)最大加速度値(対数標準偏差 0.524)

図-2 地震動の強さを表す指標と塑性ひずみエネルギーとの関係(塑性率 4 以上)

### 4. おわりに

エネルギー指標の大きさと塑性率との関係は、ばらつきが最大加速度値や最大速度値と塑性率との関係よりも小さいことがわかった。また塑性率が高く被害が大きい場合には、エネルギー指標と塑性ひずみエネルギーとの関係は、最大速度値や最大加速度と塑性ひずみエネルギーとの関係に比べて非常にばらつきが小さかったことから、大きな被害が予測される場合には、被害程度の推定精度が向上することが期待される。エネルギー指標は、最大値はそれほど大きくないが継続時間が長く繰返し荷重が多い地震動に対する被害推定に適していると考えられ、大阪近辺における東南海・南海地震の想定地震動のように、最大値が上町断層の想定地震動ほど小さくなくても継続時間が長い地震動に対しては、エネルギー指標を用いることにより、合理的な被害推定を行うことができると考えられる。