

地震動のエネルギー指標の構造物被害推定への適用

平井 俊之¹・澤田 純男²

¹株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ マネジャー
(〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目3番20号)

E-mail: hiraits@newjec.co.jp

²京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

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との関係について、一自由度系の応答計算を通じて検討した。応答計算の結果得られる塑性率や塑性ひずみエネルギーと地震動の強さを表す指標であるエネルギー指標・最大加速度値・最大速度値との各関係を比較することにより、構造物の被害推定に対するエネルギー指標の適用性を評価した。その結果、エネルギー指標は、最大加速度値や最大速度値と比較して、塑性率や塑性ひずみエネルギーとの相関が高く、ばらつきが小さいことが分かった。地震動のエネルギー指標は、構造物の被害推定への適用性を有しているといえる。

Key Words : *Energy index, Prediction of earthquake damage, Response of single-degree-of-freedom system, Plasticity rate, Plastic strain energy*

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¹⁾。地震被害想定を行うためには、まずその地域で発生が懸念される地震を想定し、対象とする地域における地震動の強さを面的に予測する必要がある。一般的には、まず断層を囲む数十km四方の範囲を対象として数百m四方単位のメッシュに細分し、そのメッシュ内では地震動の強さはほぼ等しいとしてメッシュごとに地震動の強さを予測する²⁾。つぎに、予測された地震動の強さから家屋やライフライン等の被害を予測する。さらに、予測される被害に対して耐震補強の実施等の予防策、地震発生直後の応急対策や長期的な復旧・復興計画を策定する。被害想定を行う対象構造物の数は数万～数百万にのぼり、一つ一つの剛性や強度の情報は十分ではないので、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想定することが行われている³⁾。地震被害想定においてよく用いられる指標は、計測震度、最大加速度値、最大速度値、加速度応答スペクトル、SI値等である。計測震度は、地震動の強さを表す指標として一般に

最も知られており、地震被害想定が市民にとってわかりやすいという利点がある。しかし、最大加速度値、最大速度値は瞬間的な地震動の強さを表す量であり、波形として予測した地震動の全体的な強さを反映した量でないことは明らかである。また、計測震度は物理量として明確ではないため、構造物の被害との対応は必ずしもよくない。

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、一自由度系の応答計算を通じて構造物の被害推定への適用について検討した。

2. 地震動のエネルギー指標

地震波の伝播に伴う地震のエネルギーの流れに関する研究はこれまでに数多くなされている。地震の規模に応じて震源から放射される地震のエネルギーは、震源を取り囲む任意の面におけるエネルギー密度の時間積分値に等しい。例えば、図-1に示す面 S_1 における以下の積分値は面 S_2 における積分値と等しい⁴⁾。

安芸ら⁵⁾は、一般的なエネルギーとして、運動エ

エネルギー、ひずみエネルギー、熱エネルギー等について説明し、ひずみエネルギー密度と運動エネルギー密度が等しいことを示している。その上で、均質媒質中を伝わる平面波の伝播方向に垂直な単位面積を横切って伝達される単位時間あたりのエネルギー量(伝達エネルギー束)は、 $\rho V_s \dot{u}^2$ (ρ は密度、 V_s は地盤のS波速度、 \dot{u} は粒子速度)であることを示し、伝播する地震エネルギーが波線チューブ内に閉じこめられており、震源を取り囲む任意の面における伝達エネルギー束の面積分は保存されていることを示した。また、多治米⁹⁾も、任意の表面積をもつ領域内でエネルギー流量の面積分が保存されていることを示している。このように、震源から発生した地震のエネルギーは、弾性体内において全体として保存されていることが過去の研究によって示されている。

地震動のエネルギーと地震動強さとの関係に関して、高木⁷⁾は、気象庁の震度と地震動のエネルギーとの相関について論じている。地震動のエネルギーは、面積素片を通る地震波動のエネルギーの合計としている。そして、震度を規定しているのは、加速度や速度ではなく、エネルギーであるという結論を得ている。また、秋山ら^{8),9)}は、構造物へのエネルギー入力と構造物のエネルギー吸収という観点から研究し、一質点系における運動方程式から、弾性エネルギー、塑性ひずみエネルギー、減衰による吸収エネルギーの釣り合い方程式を導き、構造物の被害をエネルギーの観点から検討している。この中で、構造物への入力エネルギーを速度に換算したエネルギー換算速度応答スペクトル(V_E スペクトル)を、構造物へ入力される設計用の地震荷重として提案している。国生ら¹⁰⁾は、地盤中の微小要素の運動エネルギーとひずみエネルギーの和を時間軸上で積分した量を地震波のエネルギーと定義し、兵庫県南部地震時のポートアイランドにおける観測記録を用いて、そのエネルギー量の収支について分析を行っている。野津ら¹¹⁾は、パワースペクトルの周波数による積分値をPSI(Power Spectrum Intensity)とよび、岸壁の被災の程度との関係を調べている。これによると、最大加速度値や最大速度値よりもPSIの方が、地震による岸壁の残留変形量との相関が高いという結果が得られている。また、井林ら¹²⁾は、地震動の継続時

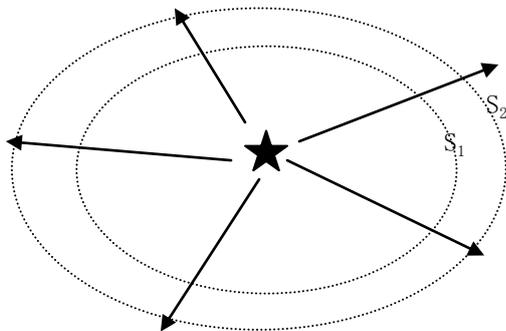


図-1 震源から放射された地震動と震源を取り囲む面 S1 及び面 S2

間全体にわたって構造物に入力される地震総入力エネルギーと、ある単位時間に相当するエネルギーとに着目し、弾性系の解析のみによってRC単柱橋脚の地震時の応答塑性率や履歴エネルギーを推定する手法を提案している。さらに、地盤の液状化と地震動のエネルギーとの関係についても、片田ら¹³⁾や風間ら¹⁴⁾によって研究されている。片田らは、オンライン地震応答載荷実験によりエネルギーの釣合式からひずみエネルギーの算定に必要な応答値等を測定して求め、液状化の進行状況をひずみエネルギーの蓄積の面から考察している。風間らは、水平成層地盤の液状化を判定する手法として地震時に地盤中で費やされた累積損失エネルギーと地盤材料が液状化時に蓄えうる累積損失エネルギーを対比する方法を提案しており、等価線形解析から累積損失エネルギーを簡易に推定する方法について検討している。このように、構造物の被害と地震動のエネルギーとの関係について多くの研究がなされており、ほとんどが構造物の被害と地震動のエネルギーとに密接な関係を見いだしている。

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、 $\dot{u}^2(t)$ は、地震動の上昇波の速度時刻歴波形であり、水平方向2成分の $\dot{u}_x(t)$ 、 $\dot{u}_y(t)$ と鉛直方向成分 $\dot{u}_z(t)$ を用いて次式で表される。

$$\dot{u}^2(t) = \dot{u}_x^2(t) + \dot{u}_y^2(t) + \dot{u}_z^2(t) \quad (2)$$

ρ 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。

地震動が、減衰のない弾性の水平多層構造内を伝播するとき、伝達関数の2乗の平均値にインピーダンスを掛けた量(NED: Normalized Energy Density)は、基盤への入射地震動の周波数特性が一定、つまり入力がデルタ関数やホワイトノイズである場合の E であり、エネルギー指標に類似の物理量として、各層内で保存されることが示されている¹⁵⁾が、一般に基盤における地震動の周波数特性は一定ではないため、 E は水平多層構造の各層内で保存される量とはならない。そのため、 E は地震動のエネルギーそのものではないが、エネルギーに関連した量であると考えられるため、エネルギー指標と呼ぶこととしている。

式(1)で算定されるエネルギー指標 E は、モーメントマグニチュードと等価震源距離を説明変数とした距離減衰式のばらつきが、最大加速度値や最大速度値よりも小さく、地震の規模や震源距離に応じて安定的に地震動の強さを評価できる指標であるという結果が得られている¹⁶⁾。

地震動のエネルギー指標を算出するためには、地

震動の時刻歴波形と算出位置における地盤の密度及びS波速度の値が必要である。観測記録から算定する際には、地震計設置位置において地盤調査が行われている必要がある。また、被害想定や耐震設計等に用いる入力地震動の波形から算定する場合には、波形の入力位置における密度とS波速度を決定する必要がある。

3. 一自由度系の応答解析

構造物の被害について、バイリニア型履歴特性を有する一自由度系の応答解析を通じて検討を行う。

一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。

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_0) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3)$$

復元力特性は図-2に示すように、バイリニアとした。非定常の地震動波形を入力する場合には、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る。バイリニアの場合には弾性部分と塑性部分を分離して積分を行う Operator Splitting法 (OS法)¹⁷⁾を用いて時間積分を行った。OS法は、系の剛性を2つに分割し、一つの部分には陽的積分法を、もう一つの部分には陰的積分法を適用するという混合積分法であり、バイリニア型のように、剛性軟化型のシステムに関しては絶対安定性をもつ。n+1ステップ目の応答において、OS法ではまず予測子変位 y を次式により算定する。

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{\Delta t^2}{4} \ddot{u}_n \quad (4)$$

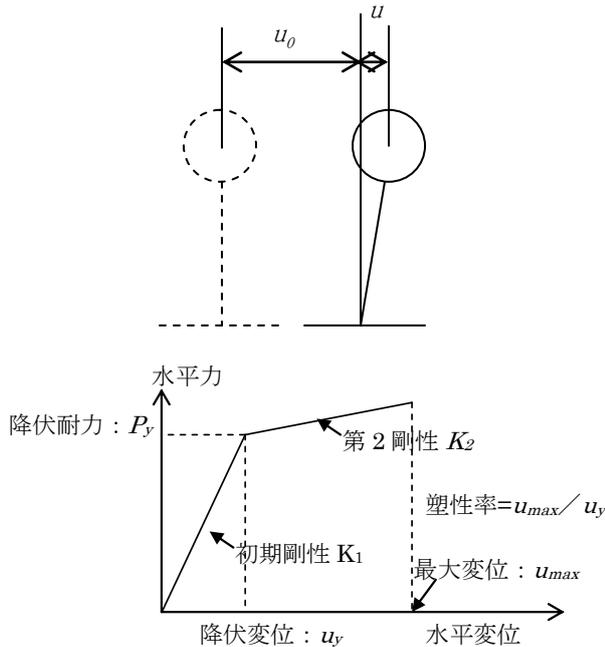


図-2 一自由度系のモデル

つぎに、次式により復元力 p を算定する。バイリニアの計算には、前ステップからの初期剛性によって決まる点と、正の降伏域にある点、及び負の降伏域にある点の3点の復元力を比較し、中間にある点を採用する。

$$\begin{aligned} p_{n+1} &= p_n + K_1(y_{n+1} - y_n) \quad \text{or} \\ p_{n+1} &= p_y + K_2(y_{n+1} - d_y) \quad \text{or} \\ p_{n+1} &= -p_y + K_2(y_{n+1} + d_y) \end{aligned} \quad (5)$$

K_1 は初期剛性、 K_2 は第2剛性である。加速度値を以下の式で求める。

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{-m\ddot{u}_{0n+1} - p_{n+1} - c(\dot{u}_n + \Delta t \ddot{u}_n/2)}{m + \frac{\Delta t c}{2} + \frac{\Delta t^2 K_1}{4}} \quad (6)$$

以下の式により速度と変位を求める。

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{\Delta t(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1})}{2} \quad (7)$$

$$u_{n+1} = y_n + \frac{\Delta t^2 \ddot{u}_{n+1}}{2} \quad (8)$$

そして、新たに求めた変位を用いて次式により復元力を更新する。

$$\begin{aligned} p_{n+1} &= p_n + K_1(u_{n+1} - u_n) \quad \text{or} \\ p_{n+1} &= p_y + K_2(u_{n+1} - d_y) \quad \text{or} \\ p_{n+1} &= -p_y + K_2(u_{n+1} + d_y) \end{aligned} \quad (9)$$

式(3)の両辺に $du = \dot{u}dt$ をかけ積分すると次式に示すエネルギーのつりあい式が得られる。

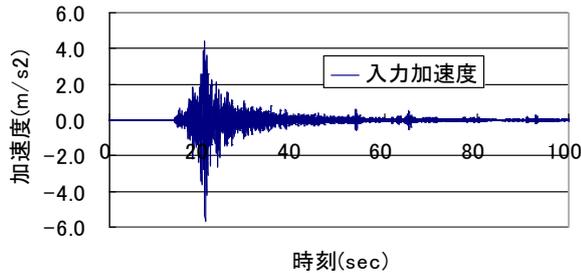
$$\int_0^t m\ddot{u}\dot{u}dt + \int_0^t c\dot{u}\dot{u}dt + \int_0^t k\dot{u}u dt = -\int_0^t m\ddot{u}_0\dot{u}dt \quad (10)$$

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。

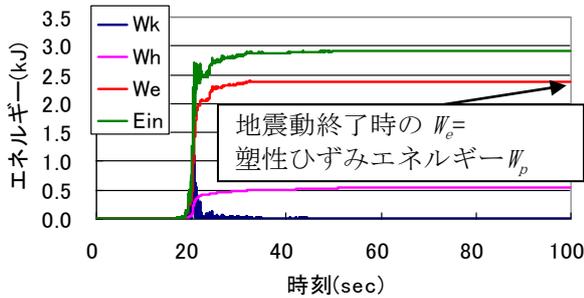
図-3に入力地震動及びエネルギーの時刻歴波形の例を示す。各時刻において、 $W_k + W_h + W_e = E_{in}$ が成立している。

4. 地震動の強さを表す指標と塑性率や塑性エネルギーとの関係

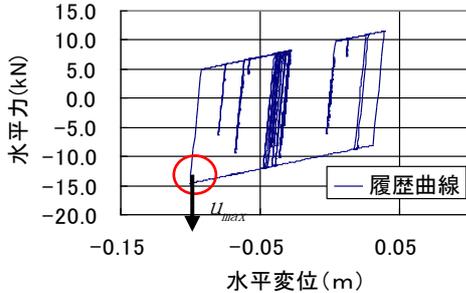
K-NET及びKiK-netにおける1996年以降の観測記録のうち、300gal以上が記録された377個の地震記録(K-NETで254個、KiK-netで123個)、754波形(NSと



(a)入力加速度波形(鳥取県西部地震のTTR009における観測波形(工学的基盤上に変換))



(b)エネルギー収支の時刻歴波形



(c)水平変位と復元力との関係

図-3 一自由度系の応答計算の例

EW) を用いて、一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)を用いることとした。

一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、エネルギー指標の算出にあたっては、地盤の密度は 2000kg/m^3 、S波速度は 300m/s と仮定した。パラメーター一覧を表-1に示す。

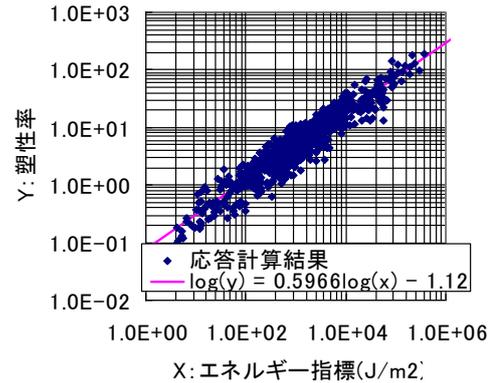
図-4に塑性率と各指標との関係を示す。エネルギー指標と最大速度値は塑性率と相関が高い。対数標準偏差は、エネルギー指標で0.189(0.65倍~1.55倍)、最大速度値で0.236(0.58倍~1.72倍)となり、エネルギー指標の方が若干小さい。最大加速度値と塑性率との関係は、対数標準偏差が0.524(0.3倍~3.33倍)で

表-1 一自由度系のパラメータ

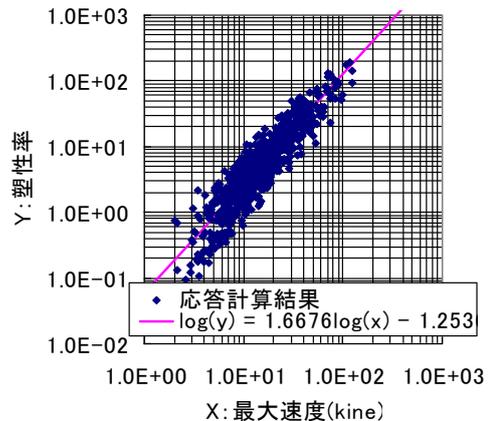
質量m (t)	減衰定数h	降伏耐力 P_y (kN)	降伏変位 d_y (m)	初期剛性 k_1 (kN/m)	第2剛性 k_2 (kN/m)	固有振動数f (Hz)
40	0.02	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.25

あり、他の指標よりも大きなばらつきであった。

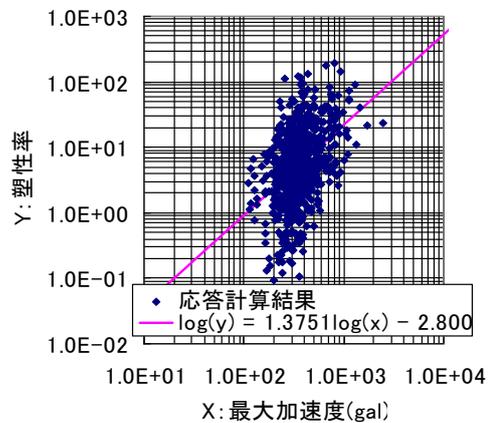
図-5に塑性ひずみエネルギーと各指標との関係を示す。塑性率が1以下のときは塑性ひずみエネルギーが非常に小さいため、塑性率が1以上のデータについてプロットした。エネルギー指標と塑性ひずみエネルギーとの関係は他の指標との関係よりもばらつきが小さいことがわかる。対数標準偏差は、エネルギー指標が0.372(0.42倍~2.35倍)、最大速度値が0.491(0.32倍~3.09倍)、最大加速度値が0.828(0.15倍~6.72倍)であった。ただし、塑性ひずみエネルギーが小さいデータは塑性率がほぼ1のデータであり、



(a)エネルギー指標(対数標準偏差0.189)

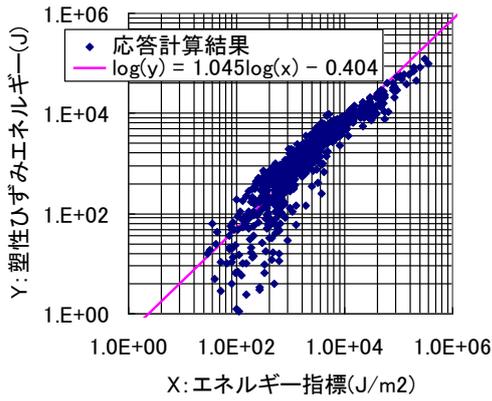


(b)最大速度値(対数標準偏差0.236)

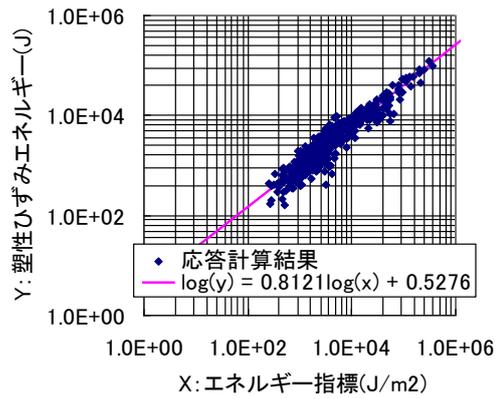


(c)最大加速度値(対数標準偏差0.524)

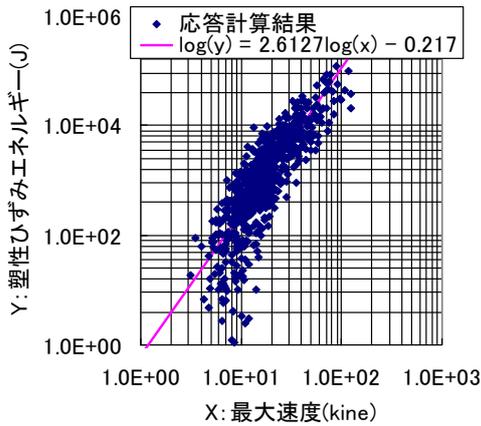
図-4 地震動の強さを表す指標と塑性率との関係



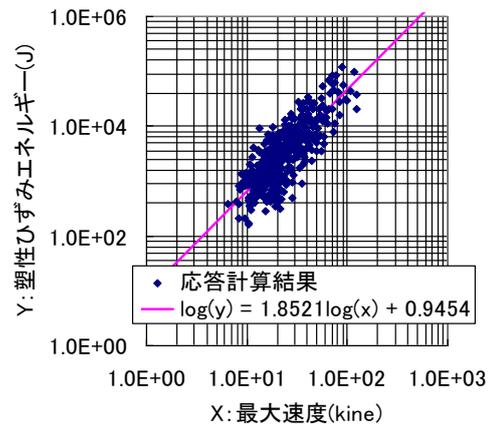
(a)エネルギー指標(対数標準偏差 0.372)



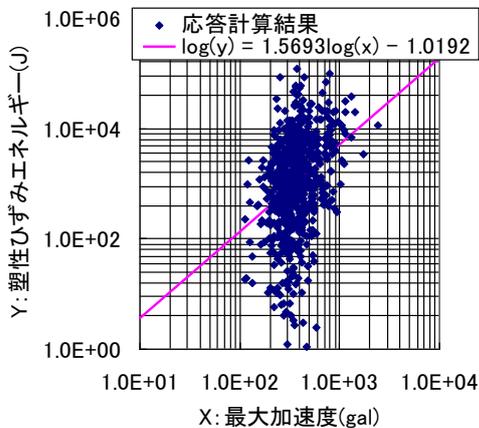
(a)エネルギー指標(対数標準偏差 0.174)



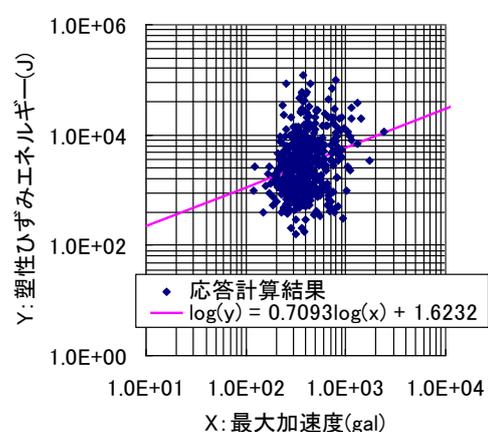
(b)最大速度値(対数標準偏差 0.491)



(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 0.828)



(c)最大加速度値(対数標準偏差 0.524)

図-5 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 1 以上)

図-6 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)

いずれの指標との関係においてもばらつきが大きく、両対数軸図上での直線状にならないため、塑性率が4以上のデータについて、図-6にプロットし直した。これによると、エネルギー指標と最大速度値については、両対数軸図上で直線関係がみられるようになった。エネルギー指標と塑性ひずみエネルギーの関係は非常にばらつきが小さいことがわかる。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。

一自由度系の計算には、質量や減衰定数、初期剛性等、いくつかのパラメータが必要なため、1ケースの計算だけでは一般的な傾向が示されているとは

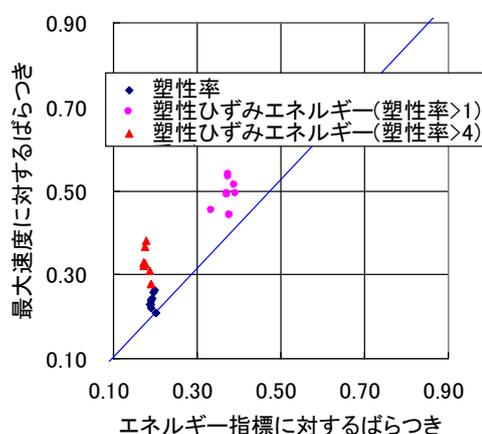
表-2 応答計算のパラメータスタディ結果

case	質量m (t)	減衰定数h	降伏耐力Py (kN)	降伏変位dy (m)	初期剛性k1 (kN/m)	第2剛性k2 (kN/m)	固有振動数f (Hz)	地震動の強さを表す指標と応答結果のばらつき(対数標準偏差)								
								塑性率			塑性ひずみエネルギー(塑性率>1)			塑性ひずみエネルギー(塑性率>4)		
								エネルギー指標	最大速度	最大加速度	エネルギー指標	最大速度	最大加速度	エネルギー指標	最大速度	最大加速度
1	40	0.02	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.25	0.189	0.236	0.524	0.372	0.491	0.828	0.174	0.325	0.524
2	20	0.02	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.76	0.201	0.209	0.487	0.379	0.442	0.790	0.191	0.279	0.478
3	80	0.02	9.8	0.004	2450.0	24.7	0.88	0.199	0.263	0.547	0.374	0.533	0.860	0.177	0.367	0.570
4	40	0.01	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.25	0.191	0.241	0.528	0.390	0.513	0.844	0.173	0.328	0.522
5	40	0.04	9.8	0.004	2450.0	24.7	1.25	0.189	0.228	0.516	0.391	0.493	0.847	0.173	0.321	0.514
6	40	0.02	19.6	0.004	4900.0	49.5	1.76	0.201	0.209	0.487	0.379	0.442	0.790	0.191	0.279	0.478
7	40	0.02	4.9	0.004	1225.0	37.1	0.88	0.196	0.258	0.545	0.375	0.538	0.869	0.179	0.381	0.576
8	40	0.02	9.8	0.002	4900.0	24.6	1.76	0.190	0.221	0.509	0.335	0.454	0.794	0.186	0.310	0.563
9	40	0.02	9.8	0.004	2450.0	12.3	1.25	0.191	0.242	0.531	0.372	0.489	0.826	0.174	0.325	0.521
10	40	0.02	9.8	0.004	2450.0	50.0	1.25	0.188	0.230	0.518	0.373	0.492	0.833	0.173	0.328	0.523
平均								0.194	0.234	0.519	0.374	0.488	0.828	0.179	0.324	0.527

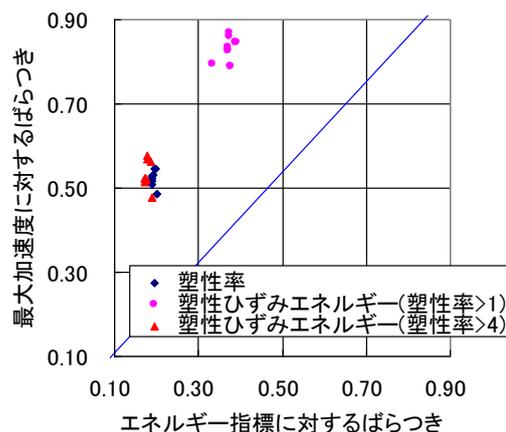
言えない。そこで、応答計算に必要なパラメータをいくつか変化させた10ケースのパラメータスタディを行った。表-2にパラメータスタディの結果を示す。また、エネルギー指標に対するばらつきと最大速度値あるいは最大加速度値に対するばらつきをグラフ上にプロットして図-7に示す。変化させたパラメータは、質量、減衰定数、降伏耐力、降伏変位、初期剛性、第2剛性であり、基本ケース(case1)から、あるパラメータだけ2倍あるいは0.5倍に変化させた。その結果、塑性率4以上のデータの塑性ひずみエネルギーについては、エネルギー指標を説明変数とした回帰式から推定した値と実際の応答計算結果との相違は対数標準偏差で0.179となり、最大速度値の0.324や最大加速度値の0.527と比べて非常に小さいことがわかった。これは、エネルギー指標も塑性ひずみエネルギーも共に、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。さらに、塑性率についても、エネルギー指標を説明変数とした回帰式から推定した値と実際の応答計算結果とが最も相関性が高いという結果が得られた。対数標準偏差の平均値でみると、エネルギー指標については0.194であるのに対し、最大速度値は0.234であり、最大加速度値は、0.519であった。塑性率は最大変位を降伏変位で割った値であるから、最大値の方が相関が高いと推測されるが、図-3に示すように、繰り返しの荷重によって徐々に変形が進行するケースが多いために、継続時間を考慮したエネルギー指標との相関が高くなっていると考えられる。

5. 結論

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



(a)エネルギー指標と最大速度値との比較



(b)エネルギー指標と最大加速度値との比較

図-7 一自由度系の応答値のばらつきと比較

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、さらに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大き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。

エネルギー指標の算出には、地震動の時刻歴波形の他に、地盤条件として、密度とS波速度の値が必要である。したがって、入力地震動の評価においては、入力位置における地盤条件を設定する必要がある。現位置の地盤情報は、地盤情報データベースの整備を期待しその活用を図るか、各構造物位置における地盤情報を何らかの方法によって推定することになる。

一自由度系の応答計算には地盤条件は必要ないため、エネルギー指標を算出するために地盤条件を仮定した。今後は、構造物と地盤との連成系を考慮した解析手法を用いてエネルギー指標と構造物被害との関係を検討していく必要がある。

また、本論では、数値計算によって構造物の被害とエネルギー指標との関係について検討を行ったが、今後、過去の被災事例を収集し、実被害の状況とエネルギー指標との関係について検討を行っていく必要がある。

謝辞：防災科学技術研究所により提供されているK-NET及びKiK-netの強震観測データを使わせていただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 大塚秀徳, 高橋和雄: 全国の市における地域防災計画「地震対策」の策定に関する調査, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第1部(B), pp.1008-1009, 1999.
- 2) 大西良広, 澤田純男: 上町断層について想定される地震動, 第36回地盤震動シンポジウム, pp.83-90, 2008.
- 3) 山口直也, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.325-336, 1999.

- 4) A.E.H. Love : A treatise on the mathematical theory of elasticity, DoverPubns, New York, 1927.
- 5) 安芸敬一, P.G.リチャーズ: 地震学 定量的アプローチ, 上西幸司, 亀伸樹, 青地秀雄共訳, 古今書院, 2004.
- 6) 多治米鏡二: 弾性波動論の基本, 槇書店, 1994.
- 7) 高木聖: 地震動の最大エネルギーと震度との関係, 気象研究所研究報告, 第20巻, 第1号, pp.79-89, 1969.
- 8) 加藤勉, 秋山宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9-18, 1975.
- 9) 桑山仁, 秋山宏, 桐野康則: フーリエ振幅スペクトルの平滑化による地震入力エネルギーの評価, 日本建築学会論文報告集, 第442号, pp.53-60, 1992.
- 10) 国生剛治, 本山隆一, 万谷昌吾, 本山寛: 表層地盤における地震波のエネルギーフローと性能設計, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.1-20, 2004.
- 11) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 平成12年度土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
- 12) 井林康, 中沢正利, 尾坂芳夫, 鈴木基行: 地震入力エネルギーおよび地震入力単位エネルギーを考慮したRC橋脚の損傷度評価法の提案, 土木学会論文集, No.676/V-51, pp.1-11, 2001.
- 13) 片田敏行, 阿部幸樹, 東山晃: ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和地盤の液状化過程の考察, 土木学会論文集, 第388号/III-8, pp.43-50, 1987.
- 14) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用: 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.161-177, 1999.
- 15) H. Goto, S. Sawada and T. Hirai : Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D case - Normalized Energy Density, Wave Motion, Vol. 48, pp. 603-613, 2011.
- 16) 平井俊之, 澤田純男: 地震動エネルギーの距離減衰等の特性, 土木学会地震工学論文集, 第30巻, pp.128-136, 2009.
- 17) 康大彦, 田中康介, 前田匡樹, 井上範夫: サブストラクチャー擬似動の実験による震災RC造建築物の残存耐震性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, 2002.

APPRICATION OF THE ENERGY INDEX OF SEISMIC WAVE TO THE PREDICTION OF EARTHQUAKE DAMAGE

Toshiyuki HIRAI and Sumio SAWADA

We study the relation between the energy index of seismic wave, which we focus attention on and earthquake damage of a structure by using results of calculating response of single-degree-of-freedom system. The applicability of the energy index to the prediction of earthquake damage is evaluated by

comparing relationships between calculated response, such as plasticity rate or plastic strain energy and index about strength of seismic wave, such as energy index or peak ground acceleration(PGA) or peak ground velocity(PGV). In the result, it is obvious that the energy index has more correlation to plasticity rate and plastic strain energy and has less variation in relation to the responses than PGA and PGV. So, it is concluded that the energy index of seismic wave has applicability to the prediction of earthquake damage of structures.