

強震下における一自由度系の履歴吸収エネルギーと 弾性応答値との関係について

ON THE RELATION BETWEEN HYSTERETIC ENERGY AND ELASTIC RESPONSES OF
SINGLE DEGREE OF FREEDOM SYSTEMS UNDER STRONG EARTHQUAKE MOTIONS

平尾 潔*・沢田 勉**・成行義文***・笹田修司****

By Kiyoshi HIRAO, Tsutomu SA WADA, Yoshifumi NARIYUKI and Syuji SASADA

In this study, numerical analysis was carried out for SDOF systems with bilinear hysteretic properties by use of six earthquake records. On the basis of the average value of six earthquakes, we discussed the effect of parameters such as natural period T , damping factor h , plastic stiffness p and yield level R on hysteretic energy E_{hp} , input energy E_{ip} and the ratio of E_{hp} to E_{ip} , in combination with the inspection of previous works. We also examined the effect of these parameters on the ratio of the equivalent velocity obtained from the square root of $2E_{hp}$ to the elastic spectral velocity V_{\max} and the ratio of E_{hp} to the elastic input energy E_{ie} , and the regression equations of these ratios were derived regarding the four parameters T , h , p and R . It was found that there was a close relation between E_{hp} and both V_{\max} and E_{ie} .

1. ま え が き

近年、強震下における建造物の損傷を総合的に評価する指標として履歴吸収エネルギー（塑性ひずみエネルギー）が注目されるようになり、建造物のエネルギー吸収能力とこの履歴吸収エネルギーとを対比した建造物の耐震設計法に関する研究が盛んに行われている^{1)~3)}。

エネルギー論の立場から強震下における建造物の安全性を論じた先駆的な研究として Housner の研究¹⁾がある。Housner は損傷に寄与する入力エネルギーと建造物のエネルギー吸収能力との対比から建造物の耐震安全性を論ずべきことを提案し、その際の損傷に寄与する入力エネルギーは弾性速度応答スペクトルと直接結びつけられると仮定した。その後、加藤ら²⁾は、Housner の基本概念を発展させ、実際の設計に適用することを目的として、より厳密に入力エネルギーを定義し、Housner の提唱した入力エネルギー等について種々検討した。その結果、地震の全継続時間内に建造物に加えらるる総入力エ

ネルギーは総質量および一次固有周期に依存し、復元力特性、減衰定数および降伏せん断力係数への依存度は無視できる程度であること、Housner の損傷に寄与するエネルギーに関する仮定は人略的に妥当であること、などの結論を得た。なお、安藤ら³⁾も加藤ら²⁾と類似な研究を行い、ほぼ同様な結果を得ている。

星谷ら⁴⁾は、地盤と構造系を簡単な力学モデルで表現して地震時の構造-地盤系のエネルギー入出力関係を検討し、地震動特性がこれらの諸量に対して重要な要因になることを指摘した。最近、大野・西岡ら⁵⁾は、Bilinear な復元力特性をもつ一自由度系を対象として、入力地震動のタイプの相違および構造諸特性が各エネルギー量に及ぼす影響を検討し、構造物が受ける塑性ひずみエネルギーの定量的な評価を試みた。そして、総入力エネルギーに対する塑性ひずみエネルギーの割合は、地震動特性によらず、主として構造特性のみに依存し、建造物の固有周期が 0.4~0.8 秒、降伏強度比が 0.3~1.0 の範囲では、減衰定数と弾塑性剛性比のみに依存する、と結論し、減衰定数および弾塑性剛性比からこのエネルギーの割合を安全側に略算するための近似式を提示している。家村ら^{6),7)}は、RC 橋脚を対象とした RC 部材に対するオンラインハイブリッド実験結果をもとに、履歴吸収エネルギーが RC 部材の損傷（劣下）ならびにエ

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部教授 土木工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

** 正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科 (同上)

*** 正会員 工修 徳島大学講師 工学部土木工学科 (同上)

**** 正会員 工修 阿南工業高等専門学校助手 土木工学科 (〒774 阿南市見林町青木 265)

エネルギー吸収能力の評価に有効な指標となることを示し、入力エネルギースペクトルの概念を導入した履歴吸収エネルギーの簡便な推定法を提案している。さらに、この推定に必要な入力エネルギースペクトルについても若干の考察を加えている⁸⁾。

上記のほかに、高力ボルト摩擦接合部に注目した金多ら⁹⁾の研究もあり、これらの研究により、強震下における構造物のエネルギー応答に関する基本的事項は明らかとなってきた。

しかし、エネルギー論に立脚した耐震設計法を確立するためには、主要な設計要因となる構造物の許容吸収エネルギーならびに履歴吸収エネルギーの簡便な評価方法を導く必要がある。前者については、さらに多くの実験を行い、蓄積されたデータに対する詳細な検討が必要と考えられる。また、本研究の対象とする後者の履歴吸収エネルギーについては、設計計算の簡便さ等を考え、弾性応答値との定量的な関係を明らかにする必要がある。加藤ら²⁾、安藤ら³⁾は、限られた解析結果から Housner の仮定を支持し、履歴吸収エネルギーは速度応答スペクトルから推定できるとしているが、これについては異論^{7),9)}もあり、家村ら^{7),8)}は入力エネルギースペクトルから推定することを提案しているなど、さらに検討を要する点が残されている。また、加藤ら²⁾、大野ら⁵⁾は構造物の降伏強度を表わすパラメーター、すなわち降伏強度比 R を、質量に重力加速度²⁾あるいは入力地震動の最大加速度⁵⁾を乗じた震度法的な地震力を基準にして定義している。しかしながら、時刻歴応答解析より得られる構造物の最大地震力、周知のようにその周期によって異なるから、このような降伏強度比 R の定義では、 R の値が同一であっても周期によって構造物の非弾性応答の程度が異なり、降伏強度比と非弾性応答の程度との対応関係が不明確になる。これに対し、応答解析より得られる最大地震力を基準として降伏強度比 R を定義した場合には、構造物の周期にかかわらず同一の R は同一の非弾性応答の程度を意味することになり、応答スペクトル法等で設計された構造物等では、このような定義の方が合理的と思われる。また、種々の異なる地震波を入力して解析結果を整理する場合、最大値応答に注目すれば⁹⁾安全側の結果が得られるが、星谷ら⁴⁾の研究にもあるように地震動特性に対する依存性が高いこの種の研究では、最大値応答のみに注目するとあまりにも特定の地震波の影響が反映され、一般性を失うおそれがある。

以上のようなことから、本研究では、Bi-linear な復元力特性をもつ一自由度系を対象として、上述のようにその降伏強度比を弾性最大地震力を基準に設定し、6つの実地震動を入力した場合のエネルギー応答解析を行った。そして、履歴吸収エネルギーの平均値応答を中心に、

その固有周期、減衰定数、弾塑性剛性比および降伏強度比に対する依存性を調べるとともに、実用設計では有用と考えられる弾性応答値（最大速度および入力エネルギー）と履歴吸収エネルギーとの関係を検討し、若干の考察を試みた。以下にその内容を述べる。

2. 入力地震動と構造物の諸特性

(1) 入力地震動

後述のように降伏強度比を弾性最大地震力を基準にして設定した場合、最大加速度には関係なく周波数特性が地震動特性を表わす主要な指標となる。そこで、本研究では周波数特性が比較的異なるとされる次の6つの地震動記録を用いて解析した。

- (a) 室蘭 S-241, N-S, 1968 年, 十勝沖地震
- (b) 八戸 S-252, N-S, 1968 年, 十勝沖地震
- (c) 釧路 S-733, N-S, 1973 年, 根室半島沖地震
- (d) El Centro S 00 E, 1940 Imperial Valley Earthquake
- (e) Los Angeles N 00 W, 1971 San Fernand Earthquake
- (f) Ferndale N 44 E, 1954 Eureka Earthquake

これら各地震動の加速度波形およびそのフーリエスペクトルを Fig. 1 に示す。なお、継続時間は図示のようにすべての地震動について 30 秒間とした。

(2) 構造物の諸特性

a) 復元力特性・弾塑性剛性比・降伏強度比

エネルギー応答値の復元力特性に対する依存性が低いことより^{2),3)}、本研究では、一自由度系の復元力特性として、Fig. 2 に示すような、基本的かつ取扱いが容易である Bi-linear 型を用いた。その際の弾塑性剛性比 p の値としては、実際の構造物でこの p の値があまり大きくなることは少ないものと考え、 $p=0.0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5$ の5つの値を採用した。また、本研究では、1. のまえがきで述べたような理由により、降伏強度 Q_y すなわち非弾性応答の程度を表わすパラメーターである降伏強度比 R を、時刻歴弾性応答解析より得られる最大地震力 Q_{\max} を基準として式 (1) で定義し、この R の値を、 $R=0.25$ (非弾性応答が強い場合)、 0.5 (中間的な場合)、 0.75 (弾性応答に近い場合) の3通りの場合について検討した。

$$R = \frac{Q_y}{Q_{\max}} = \frac{k \cdot x_y}{k \cdot x_{\max}} = \frac{x_y}{x_{\max}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 R は降伏強度比、 Q_{\max} および x_{\max} はそれぞれ弾性最大地震力、弾性最大応答変位、 Q_y および x_y はそれぞれ降伏強度、降伏変位であり、 k は弾性剛性である。なお、このように降伏強度比 R を定義すると、入力地震動の最大加速度の値そのものは R に無関係とな

が、履歴エネルギー等個々の応答値の入力地震動に対する依存性を検討する場合は各入力地震動の最大加速度は同一にしておく方が便利であり、ここでは便宜上、各入力地震動の最大加速度を 300 gal に設定して解析した。

b) 固有周期・減衰定数

解析の対象とした固有周期 T の範囲としては、多くの構造物がその範囲に入ると思われる、0.1 秒～5 秒の範囲を対象として、この範囲を対数軸上で 19 等分して得られる 20 通りの値 (Table 1 参照) について解析した。また、減衰定数 h の値としては、文献 10) などを参照し、0.01～0.1 の範囲を対象として、 $h=0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1$ について検討した。

3. 応答解析法

一質点系が地震加速度 $\ddot{x}_0(t)$ を受けた場合の運動方程式は、一般に次式のように表わされる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) = -m\ddot{x}_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 m は質量、 c は減衰係数、 x, \dot{x}, \ddot{x} は、それぞれ相対変位、相対速度および相対加速度、 $Q(x)$ は復元力であり、Fig. 2 に示す Bi-linear 系の場合には、この $Q(x)$ は次式のように表わされる。

$$Q(x) = \begin{cases} kx & : \text{弾性域} \\ pkx + (1-p)kx_y & : \text{塑性域} \\ k(x - x_r) + Q_r & : \text{除荷域} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 Q_r, x_r は弾性復活時の復元力および変位である。

式 (2) の両辺を質量 m と降伏変位 x_y

の積 mx_y で除すと次式が得られる。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2\bar{Q}(\bar{x}) = -\ddot{x}_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで

$$\begin{cases} \bar{x} = x/x_y, \quad \dot{\bar{x}} = \dot{x}/x_y, \quad h = c/2\omega m \\ \ddot{\bar{x}} = \ddot{x}/x_y, \quad \ddot{x}_0 = \ddot{x}_0/x_y, \quad \omega = \sqrt{k/m} \\ \bar{Q}(\bar{x}) = \begin{cases} \bar{x} & : \text{弾性域} \\ p\bar{x} + (1-p) & : \text{塑性域} \\ \bar{x} + (\bar{Q}_r - \bar{x}_r) & : \text{除荷域} \end{cases} \\ \bar{Q}_r = Q_r/Q_y, \quad \bar{x}_r = x_r/x_y \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

式 (4) の両辺に $dx = \dot{x}dt$ を乗じ、地震動の継続時間 t にわたって積分すれば、エネルギー応答に関する次式が得られる。

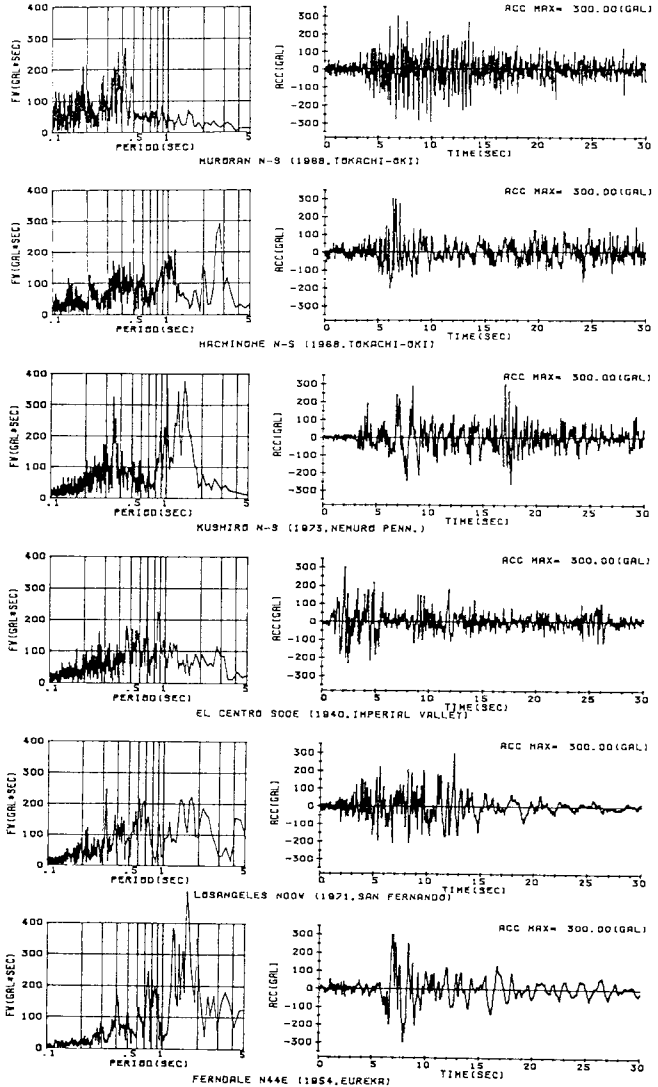


Fig.1 Accelerogram and Fourier Spectrum of Input Earthquakes.

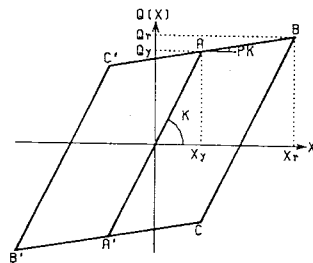


Fig.2 Bi-linear Hysteretic Characteristics.

$$\begin{aligned} & \int_0^t \ddot{x}\dot{x}dt + 2h\omega \int_0^t \dot{x}^2dt + \omega^2 \int_0^{\bar{x}_t} \bar{Q}(\bar{x})d\bar{x} \\ & = - \int_0^t \ddot{x}_0\dot{x}dt \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

式(6)の左辺第1項は運動エネルギー \bar{E}_k , 第2項は減衰エネルギー \bar{E}_a , 第3項は履歴エネルギー \bar{E}_h を表わし, 右辺は地震動による入力エネルギー \bar{E}_i を表わしている。なお, 上記の各エネルギーのうち運動エネルギー \bar{E}_k および履歴エネルギーに含まれる弾性ひずみエネルギー \bar{E}_{he} は振動終了時には0となる量であるが, 地震動記録に基づき継続時間を t 秒として入力した場合, 一般に, 入力終了時における \bar{E}_k および \bar{E}_{he} は0とはならない。そこで, 本解析では30秒間の実地震動記録に後続の0を若干追加して入力し, 入力終了時に $\bar{E}_k \approx 0$ となるように配慮し, また, 入力終了時における残留弾性ひずみエネルギー \bar{E}_{he} を, $\bar{E}_{he} = \omega^2 \bar{Q}_{end}^2 / 2$ (\bar{Q}_{end} は入力終了時の復元力) として求め, 履歴エネルギー \bar{E}_h からこの \bar{E}_{he} を減じて, 履歴吸収(塑性ひずみ)エネルギー \bar{E}_{hp} を, $\bar{E}_{hp} = \bar{E}_h - \bar{E}_{he}$ として求めるようにした。また, 式(6)より得られる各エネルギーは, 前述のように, $m\ddot{x}_y$ で正規化した式(4)に基づくものであり, 実際のエネルギーはこれらの値に $m\ddot{x}_y^2$ を乗じたものとなるが, 後述の解析結果においては, \ddot{x}_y^2 のみを乗じた単位質量当たりのエネルギー $E = \bar{E} \cdot \ddot{x}_y^2$ について検討している。また, 本解析では, 式(4)の解析に線形加速度法を用いているが, この方法では増分時間 Δt の値によって解析結果が異なることになる。そのため, 本研究では解析に先だって予備計算を行い, 減衰定数 h および周期 T の値に応じて Δt を種々変化させて検討し, Δt の相違による各応答値の差が0.5%以下になるような最大増分時間 Δt をTable 1のように決定し解析した。また, 式(6)の各エネルギー項の積分には, Δt が小さい(Table 1)ことを考慮して簡単のため台形公式を用いているが, この場合の精度を検討するために, 線形加速度法における速度の仮定(\dot{x} は t の2次関数)を用いて算定された各エネルギー量を厳密解とみなし, 2, 3の場合について比較した結果, すべて最大誤差0.5%以下となっていた。

4. 数値計算例および考察

前述の各地震動と構造諸特性に対して数値計算を行う, 最大変位, 累積塑性変位, 降伏回数, 各種エネルギー

等の最大値ならびに平均値応答について種々検討しているが, 紙面の都合上, ここでは, 履歴吸収エネルギー E_{hp} に注目し, この E_{hp} と非弾性入力エネルギー E_{ip} との関係, ならびに, E_{hp} と弾性最大速度 V_{max} (速度スペクトル) および弾性入力エネルギー E_{ie} (入力エネルギースペクトル) との関係について, 各入力地震動による平均値応答を中心に比較検討する。

(1) 履歴吸収エネルギー E_{hp} と非弾性入力エネルギー E_{ip} との関係

Fig. 3, 4は, 減衰定数 $h = 5\%$ に対する各入力地震動の E_{hp} , E_{ip} を比較したものである。図中の縦軸は単位質量当たりのエネルギー量(単位: cm^2/s^2), 横軸は対数表示による固有周期 T , R は式(1)で定義した降伏強度比, そして p はBi-linearな復元力特性(Fig. 2)における弾塑性剛性比を表わしている。なお, これらの横軸および R , p の意味するところは以下の図においてもすべて同様である。また, Fig. 3, 4と同様に入力地震動による比較を行った図では, 太い実線で室蘭, 破線で八戸, 一点鎖線で釧路を, 細い実線でEl Centro, 破線でLos Angeles, 一点鎖線でFerndaleの地震動を表わし, 各入力地震動による結果を区別している。

Fig. 3, 4より, E_{hp} および E_{ip} は, 入力地震動および固有周期に大きく依存し³⁾⁻⁵⁾, 各入力地震動による E_{hp} および E_{ip} の周期軸上での形状(大小)はFig. 2に示したフーリエスペクトルの包絡線の形状と対応していることがわかる。特に, 降伏強度比 R が大きく弾性応答に近い場合 ($R=0.75$) の E_{ip} にはこの傾向が顕著にみられる。また, 降伏強度比 R への依存性は比較的顕著であり, 見掛けの周期(弾性時周期)と実際の周期との相違に起因して, E_{ip} では, R が小さく非弾性応答が強くなると周期に対する依存性が小さくなる(曲線の形状がスムーズになる)傾向がみられる。また, E_{hp} においては, R が大きく弾性応答に近づくにつれて量的な減少が顕著にみられる。これに対し, 弾塑性剛性比 p に対する依存性は T および R に比べてあまり顕著でない。

なお, Fig. 3, 4の包絡線, すなわち, E_{hp} , E_{ip} の最大値応答は, 多くの周期範囲で, Ferndale および室蘭

Table 1 Time interval Δt (* 10^{-3} s) for damping factor h and natural period T .

$h \backslash T$	0.10	0.12	0.15	0.19	0.25	0.28	0.34	0.42	0.52	0.64	0.78	0.96	1.18	1.45	1.79	2.19	2.70	3.31	4.07	5.00	
0.010	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.50	2.50	3.33	3.33	5.00	5.00	10.0	10.0	20.0	20.0	20.0	20.0	10.0	10.0	10.0
0.025	2.50	2.50	3.33	3.33	3.33	3.33	5.00	5.00	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	20.0	20.0	10.0	10.0	10.0
0.050	2.50	2.50	3.33	3.33	5.00	5.00	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	20.0	10.0	10.0	10.0	10.0
0.075	3.33	3.33	3.33	5.00	5.00	5.00	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	20.0	10.0	10.0	10.0	10.0
0.100	3.33	3.33	3.33	5.00	5.00	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	20.0	10.0	10.0	10.0	10.0

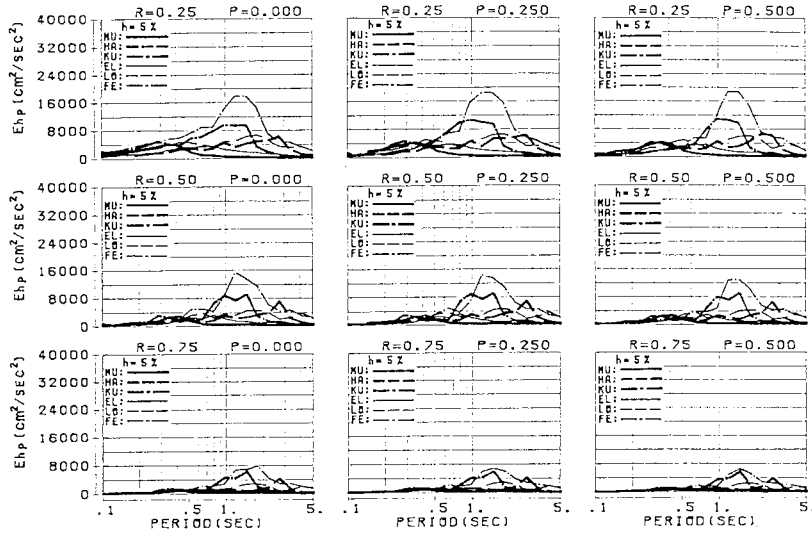


Fig.3 Hysteretic energy E_{hp} for each input earthquake ($h=5\%$).

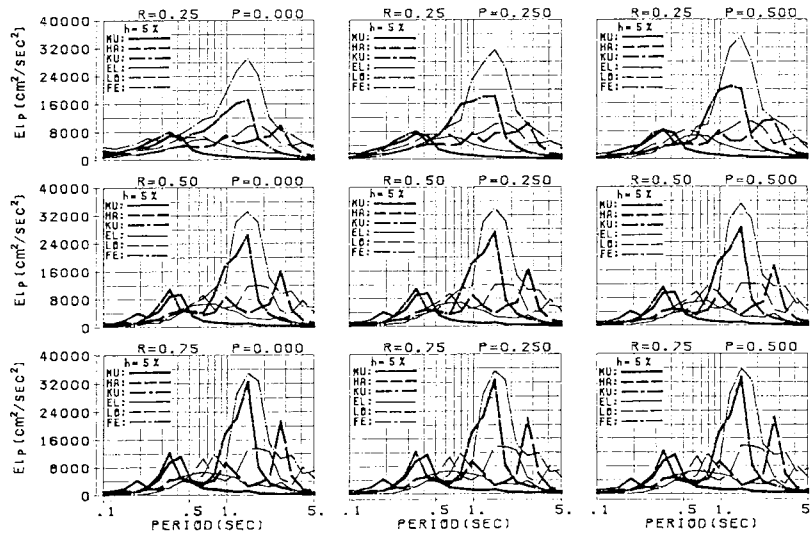


Fig.4 Input energy E_{ip} for each input earthquake ($h=5\%$).

の地震動の結果と一致している。このことより、数種の地震動を入力し解析結果を整理する場合、最大値応答のみに注目⁵⁾すると、結果的に特定の地震動による応答が支配的となり、解析結果の一般性を損なうおそれのあることがわかる。また、解析結果は省略したが、減衰定数 h への依存性は E_{ip} ではあまり顕著でなく、 E_{hp} では、 h の値が大きくなるほど E_{hp} が減少していく傾向がかなり顕著であった。

Fig.5 は、 E_{ip} に対する E_{hp} の比 E_{hp}/E_{ip} の値を各地震動について比較したものである。この図より、 E_{hp}/E_{ip} の値は、 E_{hp} 、 E_{ip} 個々の値に比べて、地震動および固有周期への依存性が比較的小さく安定したものと

なる⁵⁾ことがわかる。この E_{hp}/E_{ip} の標準偏差は、 $T < 0.3$ の短周期領域を除き、すべての h (1%~10%) に対して 0.1 以下となっており、最大値と平均値との差はほぼ標準偏差の 1.75 倍となっていた。また、本解析で用いた入力地震動に起因するものと思われるが、 E_{hp}/E_{ip} に限らずその他の応答値でも、最大値と平均値との差は標準偏差と上記のような関係にあった。

Fig.6 は、 $h=1\%$ (図中実線)、 5% (破線) および 10% (一点鎖線) の場合の E_{hp}/E_{ip} の平均値 (図中細線)、および、その回帰曲線 (太線) を示したものである。なお、回帰曲線は付録に示したように、本解析で考慮した構造諸特性すなわち固有周期 T 、減衰定数 h 、降伏強度比

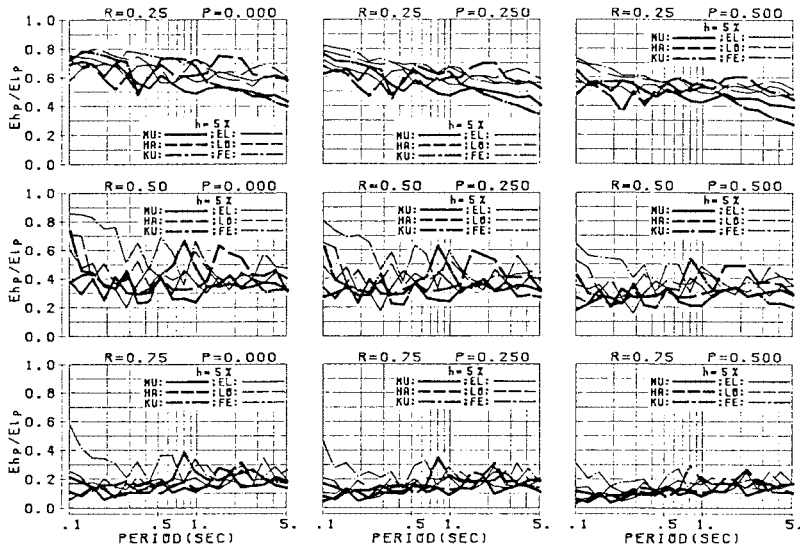


Fig.5 Ratio of hysteretic energy to input energy E_{hp}/E_{ip} for each earthquake ($h=5\%$).

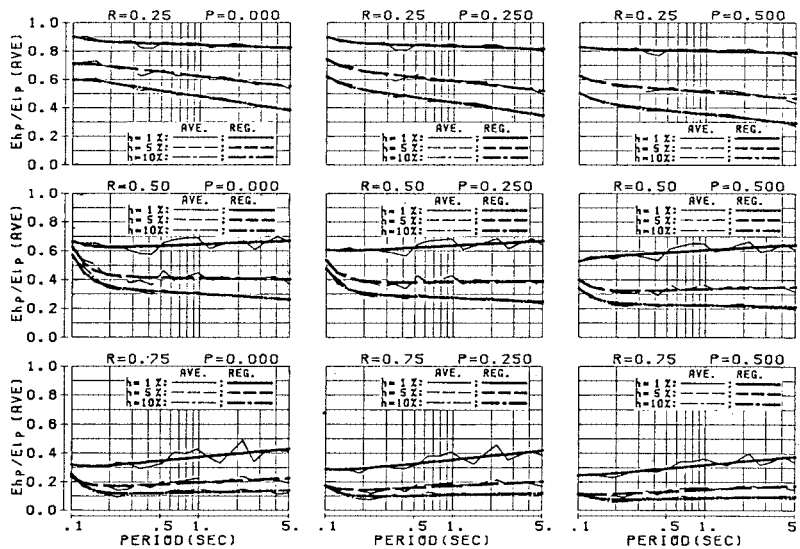


Fig.6 Average and regression curves of E_{hp}/E_{ip} .

R および弾塑性剛性比 p のすべてをパラメーターとして試行錯誤的に求めたものであり、式の形が複雑で実用性に欠ける面はあるが、解析結果をかなりの精度で近似している。

Fig.6より、 E_{hp}/E_{ip} の減衰定数 h に対する依存性は、 T 、 R および p を問わず、かなり顕著に現われている。 p に対する依存性は、 h に比べてかなり小さいが、 p が大きくなるにつれて、一様に小さくなる傾向がみられる。これに対し、 T への依存性は、 h および R と関係し、非弾性応答の強い $R=0.25$ の場合には、 T が大きくな

るほど E_{hp}/E_{ip} は減少する傾向にあり、 h が5%以上でその傾向が顕著となっている。そして、弾性応答に近い $R=0.75$ の場合には、これとは逆に、 T が大きくなるほど増加する傾向があり、 $h=1\%$ の場合に顕著となっている。なお、対象とした入力地震動、最大値と平均値、周期範囲および降伏強度比の定義等に相違があるため、単純な比較はできないものの、前述の減衰定数 h および弾塑性剛性比 p に対する E_{hp}/E_{ip} の依存性は既往の結果⁵⁾とよく似た傾向にある。

しかしながら、降伏強度比 R に対する依存性について

ては、図から明らかなように、 R が大きくなるにつれて E_{hp}/E_{ip} はかなり小さくなり、本例では既往の研究^{2),5)} のように、無視できる程度とはいいがたい結果となっている。このような相違は、1. のまえがきでも述べたように、降伏強度比 R の定義方法の相違によるものと考えられ、両定義方法の優劣はともかくとして、この種のエネルギー応答に関する研究では、今後検討を要する事項の1つと思われる。

(2) 履歴吸収エネルギー E_{hp} と弾性最大速度 V_{emax} との関係

前節で述べた E_{hp} と E_{ip} の関係 (E_{hp}/E_{ip}) は、 $E_{ip} = V_{emax}^2/2$ 、という関係が成立すれば^{1),2)}、 E_{hp}/E_{ip} の回帰式と弾性解析から得られる最大速度 V_{emax} (速度スペクトル) とから、容易に履歴吸収エネルギー E_{hp} が推定

でき⁵⁾ エネルギー論に立脚した耐震設計法では非常に有用なものとなる。しかし、 $E_{ip} = V_{emax}^2/2$ となる関係については多くの合意が得られているわけでもなく^{7),9)}、また、 E_{ip} と $V_{emax}^2/2$ の値が近いものとしても、直接 E_{hp} と V_{emax} との関係を求めておく方がより実用的である。本例は、このような観点から $E_{ip} = V_{emax}^2/2$ の検証を兼ね、 E_{hp} と V_{emax} との関係について検討したもので

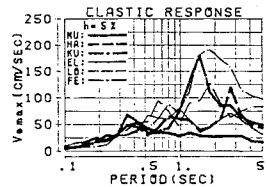


Fig. 7 V_{emax} for each input earthquake.

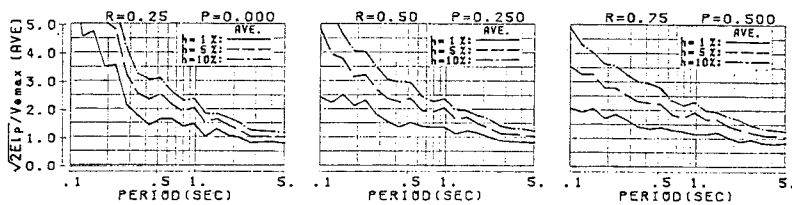


Fig. 8 Average of $\sqrt{2}E_{ip}/V_{max}$ for 6 input earthquakes.

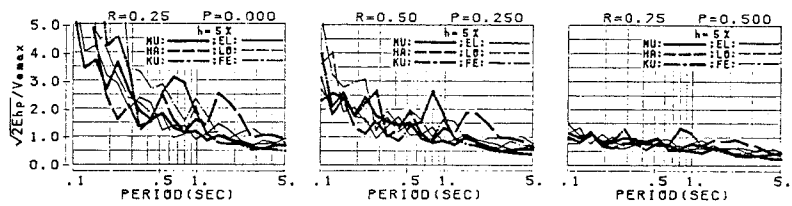


Fig. 9 $\sqrt{2}E_{hp}/V_{max}$ for each input earthquake.

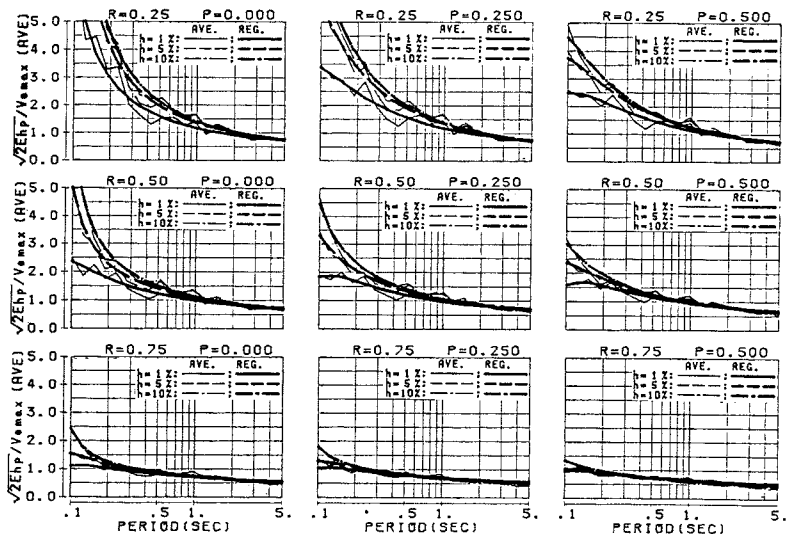


Fig. 10 Average and regression curves of $\sqrt{2}E_{hp}/V_{max}$.

ある。Fig. 8は、Fig. 4の E_{ip} より求めた等価速度 $\sqrt{2E_{ip}}$ の V_{emax} (Fig. 7に $h=5\%$ の場合を示す) に対する各地震動の比 $\sqrt{2E_{ip}}/V_{emax}$ の平均値の一部を示したものである。図より明らかなように、この比の値は T および h に対する依存性が強く、 $T < 2s$ の範囲では1より大きくかつ T が小さくなるほど大きな値となる傾向が顕著に現われている。このことより、 $E_{ip} \approx V_{emax}^2/2$ の仮定は $T > 2s$ の長周期範囲を除き、あまり精度のよい仮定とはいえない。

Fig. 9は E_{hp} と V_{emax} との関係を見るため、Fig. 3の E_{hp} より求めた等価速度 $\sqrt{2E_{hp}}$ の V_{emax} に対する比 $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ を比較したものであり、各地震動の $h=5\%$ の場合についてその一部を示したものである。前述の E_{hp}/E_{ip} と同様に、この値も E_{hp} 、 V_{emax} 個々に比べ、地震動による依存性は比較的小さく安定したものとなっている。

Fig. 10は、 $h=1\%$ 、 5% および 10% の場合の $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ の平均値、および、その回帰曲線(回帰式は付録参照)を示したものである。図より、この $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ は構造特性 T 、 h 、 p および R のすべてに対して依存性がみられ、 T 、 p および R が大きくなるにつれて小さくなり、逆に、 h が小さくなるほど大きくなっている。そして、比較的スムーズな形状を呈し、回帰曲線は平均値をよく近似している。前述のようにこ

の場合の回帰式も複雑で実用性に欠ける面があり、また、データ数が限られているため、この結果をもって、履歴吸収エネルギー E_{hp} を弾性最大速度 V_{emax} から推定できると結論づけるには早計すぎるが、本例はその可能性を示唆しているものと思われる。

(3) 履歴吸収エネルギー E_{hp} と弾性入力エネルギー E_{ie} との関係

Fig. 11は $h=5\%$ に対する前述の各地震動の弾性入力エネルギー E_{ie} を示したものである。Fig. 12は各減衰数に対するFig. 11のような E_{ie} とFig. 4の E_{ip} とから、各地震動による E_{ip}/E_{ie} の平均値を求めその一部を示したものである。図よりこの値は全体的に1より大きな値となり、 $T < 0.4s$ の範囲では T 、 R および p が小さくなるにつれてかなり大きな値となることがわかる。したがって、前述の E_{hp}/E_{ip} の関係と $E_{ip}=E_{ie}$ の仮定から E_{hp} を推定した場合、安全側ではあるが、あまり精度のよい推定値は得られないことが予想される。

そこで、本研究では、各地震動による E_{hp}/E_{ie} の値を求めて、 E_{hp} と E_{ie} の関係⁹⁾を直接比較してみた。Fig. 13はこの場合の $h=5\%$ に対する各地震動の E_{hp}/E_{ie} の一部を示したものであり、 $R < 0.5$ 、 $p \leq 0.25$ および $T < 1s$ の範囲を除けば、前述の $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ に比べ、各地震動によるばらつきは同程度あるいはそれ以下となっている。

Fig. 14は、 $h=1\%$ 、 5% および 10% に対する E_{hp}/E_{ie} の平均値および回帰曲線(回帰式は付録参照)を示したものであるが、 $R=0.25$ かつ $h=1\%$ に対する結果を除けば、この E_{hp}/E_{ie} もかなり安定した結果を示している。そしてごく短周期範囲を除き、この E_{hp}/E_{ie} の方が、前述の $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ よりも、固有周期に対する依存性が少なく、 $R \geq 0.5$ ではほぼ一定となっている。

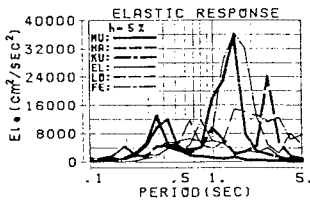


Fig. 11 E_{ie} for each earthquake.

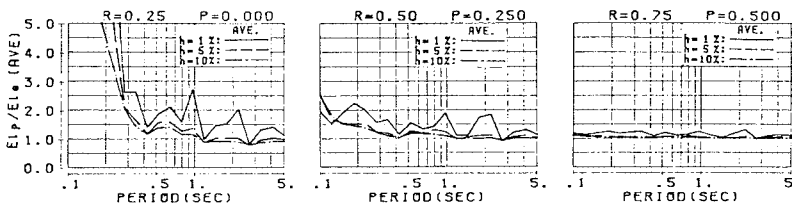


Fig. 12 Average of E_{ip}/E_{ie} for 6 input earthquakes.

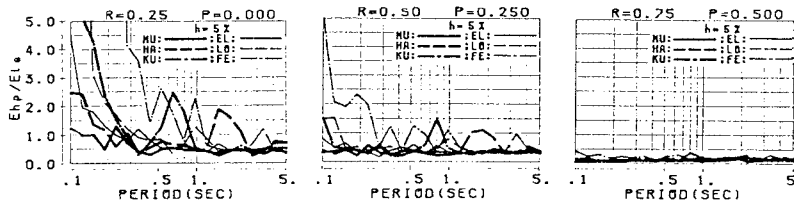


Fig. 13 E_{hp}/E_{ie} for each input earthquake.

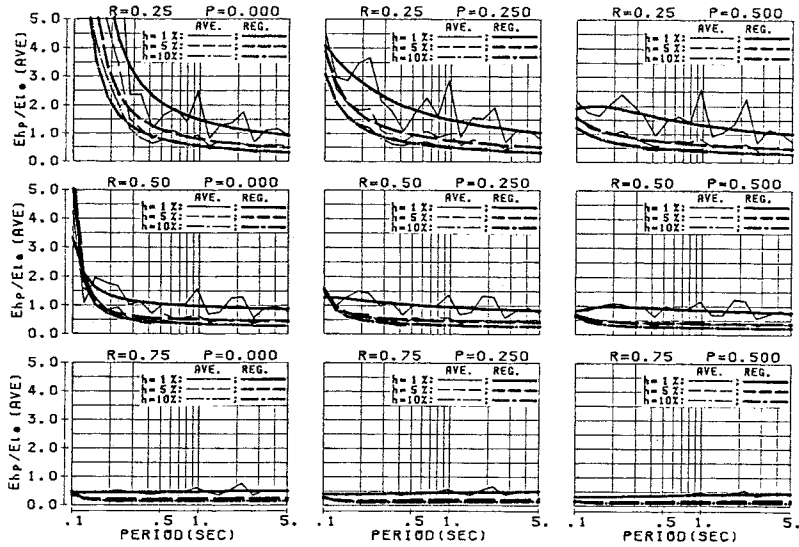


Fig. 14 Average and regression curves of E_{hp}/E_{ie} .

これらのことより、弾性入力エネルギー E_{ie} も弾性最大速度 V_{emax} と同様、履歴吸収エネルギー E_{hp} を推定するための良好な指標になるものと思われる。

5. まとめ

本研究では、エネルギー論に立脚した耐震設計法の重要な設計要因である履歴吸収エネルギー E_{hp} に注目し、数値計算結果をもとに、既往の研究結果の検証も兼ねてその推定に関連する E_{hp} と非弾性入力エネルギー E_{ip} 、弾性最大速度 V_{emax} 、および、弾性入力エネルギー E_{ie} との関係について比較検討し考察を加えた。

得られた結果を要約すれば以下のようなものである。

(1) 応答スペクトル法的立場から、時刻歴応答解析より得られる最大地震力を基準として降伏強度比 R を定義し、固有周期の異なる構造物の非弾性応答の程度が同一の R に対しては、ほぼ一定となるようにした本解析では、 E_{hp} ならびにこれに関連した諸量の R に対する依存性が顕著に現われ、震度法的立場から R を定義し固有周期に関係なく降伏せん断力を一定とした既往の研究とはかなり異なる結果となった。このことより、これらの両定義方法も含めこの種のエネルギー応答に関する研究では、この点に対する検討が必要と思われる。

(2) Housner¹⁾の提唱した $E = V_{emax}^2/2$ の仮定は、固有周期 T が2秒以下では入力エネルギー E を過小評価する結果となり、 T が小さくなるにつれてその傾向は顕著となる。また、 $E_{ip} = E_{ie}$ の仮定も、 $R \leq 0.5$ および $T < 1$ 秒の範囲では、 $E_{ip} > E_{ie}$ となり良好な仮定とはならない。これらのことより、 E_{hp}/E_{ip} の近似式を求め、 $E_{ip} = V_{emax}^2/2$ 、あるいは、 $E_{ip} = E_{ie}$ と仮定して、 V_{emax}

あるいは E_{ie} より E_{hp} を推定することには問題があるものと思われる。

(3) 等価速度 $\sqrt{2E_{hp}}$ と V_{emax} の関係、すなわち、 $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ は、地震動特性による依存性が比較的小さく、 T 、 h 、 R および p の構造諸特性との間に比較的良好な関数関係がみられる。また、 E_{hp} と E_{ie} の関係、すなわち、 E_{hp}/E_{ie} についても、一部の短周期範囲を除けば、 $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ とほぼ同様な傾向がみられる。したがって、結論(2)と関連して、計算が容易な弾性応答値 V_{emax} あるいは E_{ie} と E_{hp} との関係を明らかにし、これらの関係から E_{hp} を推定する方が実用的と思われる。

以上、本研究では履歴吸収エネルギーに注目し、既往の研究における若干の問題点、ならびに、その推定方法の方向性について指摘した。しかし、これらの結果は限られた計算例から得られたものであり、より実用的な推定方法等を導くためには、さらに詳細な検討を要するものと考えられ、これについては今後の検討課題としたい。

謝 辞：本研究で用いた地震記録の一部は、運輸省港湾技術研究所より公表された記録¹¹⁾に対して、後藤・亀田・杉戸・今西¹²⁾による誤差補正を施した記録であることを記して、関係者の方々に深甚なる謝意を表します。

付録 E_{hp}/E_{ip} 、 $\sqrt{2E_{hp}}/V_{emax}$ 、および E_{hp}/E_{ie} に対する回帰式

これらの諸量に対する回帰式は、最初、固有周期 T を変数として、減衰定数 h 、弾塑性剛性比 p 、降伏強度比 R ごとに回帰し、その回帰係数を h で、 h の係数を

Table of appendix Each variable f_k and coefficient C_{ijk} of regression equation (B).

k	f_k	$E_{hp}/E_{ip}(\text{ave.})$			$\sqrt{2E_{hp}/V_{\text{max}}}(\text{ave.})$			$E_{hp}/E_{ie}(\text{ave.})$		
		C_{1ik}	C_{2ik}	C_{3ik}	C_{21k}	C_{22k}	C_{23k}	C_{31k}	C_{32k}	C_{33k}
1	l	+9.99×10 ⁻¹	-2.21×10 ⁻²	+1.71×10 ⁻⁵	-1.31×10 ⁺⁰	+1.32×10 ⁺⁰	+1.52×10 ⁻²	-1.61×10 ⁺⁰	+2.22×10 ⁺⁰	+5.81×10 ⁻²
2	h	-3.48×10 ⁺⁰	-2.36×10 ⁺⁰	-2.23×10 ⁻³	-1.05×10 ⁺¹	+1.86×10 ⁺¹	-3.12×10 ⁻³	-3.23×10 ⁺¹	+1.20×10 ⁺¹	+8.19×10 ⁻²
3	P	-4.32×10 ⁻²	-2.14×10 ⁻²	+3.26×10 ⁻⁵	+1.09×10 ⁺⁰	-5.11×10 ⁻¹	-1.19×10 ⁻¹	+5.92×10 ⁺⁰	-4.67×10 ⁺⁰	-3.61×10 ⁻¹
4	R	-1.43×10 ⁻¹	+8.21×10 ⁻²	-6.55×10 ⁻⁵	+1.84×10 ⁺⁰	-1.02×10 ⁺⁰	-5.22×10 ⁻²	+5.66×10 ⁺⁰	-5.22×10 ⁺⁰	-1.91×10 ⁻¹
5	h ²	+2.28×10 ⁻²	+1.60×10 ⁻¹	+1.51×10 ⁻²	+7.20×10 ⁺¹	-1.22×10 ⁺²	-3.12×10 ⁺¹	+2.19×10 ⁺²	-1.46×10 ⁺²	-1.83×10 ⁺⁰
6	P ²	-4.46×10 ⁻²	-1.87×10 ⁻²	-5.25×10 ⁻⁵	-1.42×10 ⁺⁰	+4.32×10 ⁻¹	+1.27×10 ⁻¹	-6.55×10 ⁺⁰	+4.12×10 ⁺⁰	+4.17×10 ⁺¹
7	R ²	-8.23×10 ⁻¹	+3.17×10 ⁻³	+5.98×10 ⁻⁵	-1.49×10 ⁺⁰	-9.37×10 ⁺²	+4.26×10 ⁻²	-5.47×10 ⁺⁰	+2.84×10 ⁺⁰	+1.52×10 ⁺¹
8	h P	-1.51×10 ⁺⁰	-3.01×10 ⁺⁰	+4.05×10 ⁻³	-2.86×10 ⁺¹	+1.66×10 ⁺¹	+5.19×10 ⁻¹	-4.85×10 ⁺¹	+1.22×10 ⁺¹	+3.45×10 ⁺⁰
9	h R	-2.13×10 ⁺¹	+6.21×10 ⁺⁰	+1.09×10 ⁻²	+4.33×10 ⁺¹	-5.35×10 ⁺¹	+1.30×10 ⁻¹	+5.02×10 ⁺¹	-5.58×10 ⁺¹	+1.51×10 ⁺²
10	P R	+3.24×10 ⁻¹	+1.06×10 ⁻¹	-1.81×10 ⁻⁴	-4.52×10 ⁺⁰	+2.68×10 ⁺⁰	+3.91×10 ⁻¹	-2.39×10 ⁺¹	+2.01×10 ⁺¹	+1.17×10 ⁺⁰
11	h P ²	-1.12×10 ⁺¹	+7.64×10 ⁺⁰	-2.95×10 ⁻³	+6.18×10 ⁺¹	-5.45×10 ⁺¹	-5.82×10 ⁻¹	+9.96×10 ⁺¹	-5.87×10 ⁺¹	-4.41×10 ⁺⁰
12	h R ²	+2.31×10 ⁺¹	-5.15×10 ⁺⁰	-1.04×10 ⁻²	-4.41×10 ⁺¹	+4.69×10 ⁺¹	-1.68×10 ⁻¹	-4.92×10 ⁺¹	+4.60×10 ⁺¹	-1.81×10 ⁻¹
13	P R ²	-3.60×10 ⁻¹	-5.33×10 ⁻¹	+1.83×10 ⁻⁴	+4.50×10 ⁺⁰	-3.06×10 ⁺⁰	-3.10×10 ⁻¹	+2.22×10 ⁺¹	-1.93×10 ⁺¹	-9.22×10 ⁻¹
14	h P R	+8.10×10 ⁺⁰	+2.52×10 ⁺¹	-2.86×10 ⁻²	+1.63×10 ⁺²	-1.09×10 ⁺²	-1.00×10 ⁺⁰	+9.19×10 ⁺¹	+1.46×10 ⁺²	-1.60×10 ⁺¹
15	h P ²	+1.56×10 ⁺²	-5.46×10 ⁺¹	-7.54×10 ⁻²	-3.57×10 ⁺²	+4.49×10 ⁺²	+3.25×10 ⁻¹	-7.10×10 ⁺²	+8.29×10 ⁺²	+3.86×10 ⁺⁰
16	P R ²	-2.82×10 ⁻¹	+1.32×10 ⁻¹	+1.84×10 ⁻⁴	+6.62×10 ⁺⁰	-3.58×10 ⁺⁰	-4.14×10 ⁻¹	+2.79×10 ⁻¹	-2.09×10 ⁻¹	-1.36×10 ⁺⁰
17	h P ² R	+6.95×10 ⁺¹	-5.89×10 ⁺¹	+2.26×10 ⁻²	-4.49×10 ⁺²	+3.95×10 ⁺²	+9.43×10 ⁻¹	-5.48×10 ⁺²	+2.48×10 ⁺²	+2.11×10 ⁺¹
18	h ² P ²	-1.49×10 ⁺²	+4.93×10 ⁺¹	+7.41×10 ⁻²	+5.55×10 ⁺²	-4.12×10 ⁺²	+1.30×10 ⁻¹	+6.94×10 ⁺²	-7.83×10 ⁺²	-1.90×10 ⁺⁰
19	P ² R ²	+9.53×10 ⁻²	-2.34×10 ⁻¹	-1.56×10 ⁻⁴	-7.08×10 ⁺⁰	+4.24×10 ⁺⁰	+3.27×10 ⁻¹	-2.74×10 ⁺¹	+2.13×10 ⁺¹	+1.07×10 ⁺⁰
20	h P R ²	-2.30×10 ⁺⁰	+1.42×10 ⁺¹	-1.39×10 ⁻²	+1.19×10 ⁺²	-7.41×10 ⁺¹	-1.88×10 ⁺⁰	+2.45×10 ⁺²	-9.74×10 ⁺¹	-1.18×10 ⁺¹
21	h P R ²	+1.40×10 ⁺⁰	-1.46×10 ⁺¹	+1.09×10 ⁻²	-1.25×10 ⁺²	+7.26×10 ⁺¹	+1.59×10 ⁺⁰	-2.62×10 ⁺²	+1.10×10 ⁺²	+9.65×10 ⁺⁰
22	h P R ²	+1.88×10 ⁺¹	-2.83×10 ⁺¹	+7.36×10 ⁻²	-2.68×10 ⁺²	+2.04×10 ⁺²	+1.98×10 ⁺⁰	-4.57×10 ⁺²	+2.34×10 ⁺²	+1.48×10 ⁺¹
23	h P R ²	-4.34×10 ⁺⁰	-1.11×10 ⁺²	+1.06×10 ⁻¹	-7.73×10 ⁺²	+4.87×10 ⁺²	+4.38×10 ⁺⁰	-6.81×10 ⁺²	-3.95×10 ⁺²	+5.63×10 ⁺¹
24	h P ² R ²	+3.42×10 ⁺⁰	+2.62×10 ⁺¹	+4.61×10 ⁻³	+2.63×10 ⁺²	-1.84×10 ⁺²	-1.60×10 ⁺⁰	+4.62×10 ⁺²	-2.23×10 ⁺²	-1.20×10 ⁺¹
25	h ² P ² R	-8.54×10 ⁺¹	+2.22×10 ⁺²	-6.60×10 ⁻²	+1.98×10 ⁺³	-1.57×10 ⁺³	-3.41×10 ⁺⁰	+2.68×10 ⁺³	-1.10×10 ⁺³	-7.20×10 ⁺¹
26	h ² P R ²	+2.33×10 ⁺¹	+1.09×10 ⁺²	-9.08×10 ⁻²	+8.28×10 ⁺²	-4.89×10 ⁺²	-4.06×10 ⁺⁰	+6.63×10 ⁺²	+2.61×10 ⁺²	-4.66×10 ⁺¹
27	h ² P ² R ²	-6.25×10 ⁺¹	-2.07×10 ⁺²	+5.09×10 ⁻²	-1.99×10 ⁺³	+1.48×10 ⁺³	+2.88×10 ⁺⁰	-2.85×10 ⁺³	+1.17×10 ⁺³	+5.85×10 ⁺¹

p で、そして、 p の係数を R で帰属し試行錯誤的に求めたものであり、次式のである。

$$\left. \begin{aligned} E_{hp}/E_{ip} &= C_{11} + C_{12} \log_e(T) + C_{13} T^{-4} \\ \sqrt{2E_{hp}/V_{\text{max}}} &= \exp(C_{21} + C_{22} T^{-\frac{1}{3}} + C_{23} T^{4R-5}) \\ E_{hp}/E_{ie} &= \exp(C_{31} + C_{32} T^{-\frac{1}{3}} + C_{33} T^{4R-5}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(A)$$

ここで、 T は固有周期、 R は降伏強度比であり、 C_{11} ~ C_{33} は、付表に示す変数 f_k に対応する係数 C_{ijk} の積として次式により求められる関数である。

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^{27} (f_k \cdot C_{ijk}) \quad (i, j=1, 2, 3) \dots\dots\dots(B)$$

ただし付表中の f_k 欄における h は減衰定数、 P は弾塑性剛性比 p 、 R は降伏強度比を表わしている。

参考文献

- 1) Housner, G. W. : Behavior of Structures During Earthquakes, ASCE, EM4, pp.109~129, Oct. 1959.
- 2) 加藤・秋山：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，No. 235, pp. 9~18, 1975年9月。
- 3) 安藤・手塚・峯岸・田中：地震時に構造物が消費する塑性エネルギーについて その1~その3，建築学会大会学術講演梗概集，pp.691~696, 1977年10月。
- 4) 星谷・山崎：地震動エネルギーに基づく応答解析，土木

- 学会論文報告集，No.291, pp.1~14, 1979年11月。
- 5) 大野・西岡・藤野：構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価，土木学会論文報告集，No.333, pp.91~99, 1983年5月。
- 6) Iemura, H., Kato, T. and Kawatani, Y. : Hybrid Experiments on Earthquake Response of Original and Repaired RC Members, Proc. of the 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.825~832, Dec. 1982.
- 7) 山田・家村・西村：履歴吸収エネルギーによるRC橋脚模型の耐震性評価，第17回地震工学研究発表会講演梗概集，pp.231~234, 1983年4月。
- 8) 茅野・山田・家村：入力エネルギースペクトルによる地震動強度の評価と耐震設計法，土木学会第39回年次学術講演会講演梗概集I部，pp.889~890, 1984年10月。
- 9) 金多・西澤：高力ボルト摩擦接合部を有する架構の地震応答解析，第2報 エネルギー応答に関する考察，建築学会論文報告集，No.346, pp.91~99, 1984年12月。
- 10) 若林 実：耐震構造，森北出版，pp.9~10, 1981年。
- 11) 運輸省港湾技術研究所：港湾地域強震観測年報，港湾技研資料，1968年。
- 12) 後藤・亀田・杉戸・今西：デジタルフィルターによるSMAC-B 2型加速度記録の補正について，土木学会論文報告集，No.277, pp.57~70, 1978年9月。

(1985.9.12・受付)