

筑波大学 学生員 郭 献群

筑波大学 正員 西岡 隆

1. まえがき 地震による構造物への入力エネルギーと構造物の固有のエネルギー吸収能力の対比関係で構造物の耐震安全性を評価するためには、入力エネルギーを正確に、しかも簡潔に予測することが重要である。入力エネルギーは地震動の特性と構造物の特性に依存するものであり、この両者が絡み合っで入力エネルギーを左右するため、入力エネルギーとの関連性を定量的に解明することは容易ではない。本研究では構造物の特性が入力エネルギーに及ぼす影響を考察すると共に、地震動の特性と入力エネルギーの関連性を解明し、入力エネルギーを評価する方法を検討したものである。

2. 構造特性の影響 1 質点弾性減衰系の運動方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{z}(t)$$

ここに、 x : 地盤に対する質点の相対変位、 h : 減衰定数、 ω_0 : 系の固有周波数 $\sqrt{k/m}$ 、 $\ddot{z}$: 地動加速度

入力エネルギーの時間領域での計算式と周波数領域での計算式は次の二つの式で与えられる。

$$E = -m \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{z}(t) \cdot \dot{x}(t) dt, \quad E = m \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{W}(\omega, \omega_0, h) \cdot |\ddot{Z}(\omega)|^2 d\omega$$

すなわち、弾性減衰系への入力エネルギーは地動加速度のエネルギー・スペクトル $|\ddot{Z}(\omega)|^2$ の重み付き平均値である。弾塑性系の場合は、等価線形化法を用いて求めた等価固有周波数と等価減衰定数を弾性減衰系の計算式に代入することにより、弾塑性系への入力エネルギーを近似的に評価することが可能である。ところで、重み付き関数 $W(\omega, \omega_0, h)$ は図1に示すように h が零に近づくほど、重みが ω_0 の近傍に集中する。 $h=0$ のとき、入力エネルギーは $E = 1/2 \cdot m \cdot |\ddot{Z}(\omega_0)|^2$ で表される。しかし、 h による重みの総量 $\int_{-\infty}^{\infty} \ddot{W}(\omega, \omega_0, h) \cdot d\omega = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} h / \sqrt{1-h^2}$ ($h=0$ の場合、0.5, $h=0.1$ の場合、0.47) の変化はわずかである。したがって、減衰あるいは塑性化による主な効果は入力エネルギー・スペクトルを平滑化することであり、入力エネルギーの全体的なレベルはほぼ一定である。弾性無減衰系、弾性減衰系と弾塑性系への入力エネルギーの比較の一つ例 ($Sve = \sqrt{2} \cdot E/m$) を図2に示した²⁾。この図からも、弾塑性系と弾性減衰系の傾向は相似することが明らかになる。したがって、エネルギーの観点から、弾性減衰系についての検討結果は弾塑性系にも適用できると考えられる。

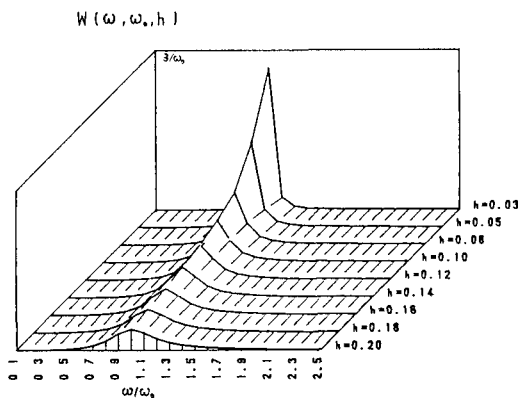
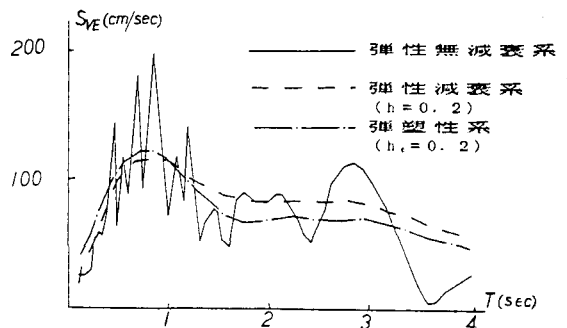
図1 重み付き関数 W 

図2 構造特性の影響(EL CENTRO, 1940, NS)

3. 人工地震波による解析 分布がそれぞれ異なる三つのタイプの人工地震波を用いて、1 質点弾性減衰系への入力エネルギーと地震動特性値（地動加速度の全パワー $P = \int_{-\infty}^{\infty} |\ddot{z}(t)|^2 dt$ 、最大地動加速度

$\ddot{z}_{max}$ 、継続時間 T_d 、地震動の卓越周期 T_g ）の関連性を期待値のレベルで定量的に解析した。得られた結果は簡略記号を用いて、次の式にまとめられる。

$$\bar{E} = \bar{P} \cdot T_g \cdot S_E(T_g/T_a, h_g, h)$$

$$\bar{E} = \bar{z}_{max}^2 \cdot C_t(T_g, T_d) T_g \cdot S_E(T_g/T_g, h_g, h)$$

ここに、 $\bar{E}$ は入力エネルギーの期待値、 $\bar{P}$ は地動加速度の全パワーの期待値、 $\bar{z}_{max}$ は最大地動加速度の期待値、 T_d は強震の継続時間、 T_g は地震動の卓越周期、 h_g は地震波の周波数成分の分布から定まる特性値である。 $S_E(T_g/T_g, h_g, h)$

は正規化された平均入力エネルギー・スペクトルで、その一例を図4に示した。 $C_t(T_g, T_d)$ は地動最大加速度を地震動の強度として用いる場合、継続時間の影響による修正項であり、継続時間 T_d との関係は図3に示されている。この結果から、入力エネルギーを評価するために、震度法あるいは修正震度法で一般に使われている地盤の最大加速度の2乗を修正項 C_t で補正しなければならないことがわかる。それに対して、最大加速度と継続時間を総合的に反映できる地動加速度の全パワーは地震動の強さのパラメータとして適している。また、卓越周期は構造物の固有周期との対比関係で入力エネルギーを左右するほか、固有周期の全領域で構造物への入力エネルギーに大きな影響を及ぼす一つの特性値である。

4. 実地震波による解析 以上の期待値レベルでの結果を参考して、8つの典型的な実地震記録による正規化入力エネルギー・スペクトル $S_E = E(T_g, h) / P / T_g$ を求めた。 $h = 0.1$ の場合の8つの S_E の上限包絡線とその平均値を図5に示す。終局耐震安全性を検討する際に、一般の構造物では少なくとも $h = 0.1$ 程度の減衰があると考えられている。したがって、 $h = 0.1$ の S_E の上限包絡線を用いて、安全側の入力エネルギーを $E = P \cdot T_g \cdot S_E$ の関係から予測することができる。

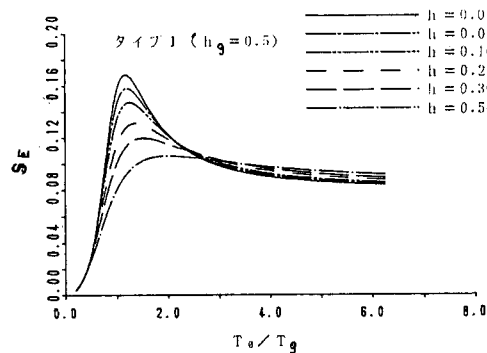


図4 正規化平均入力エネルギー・スペクトル

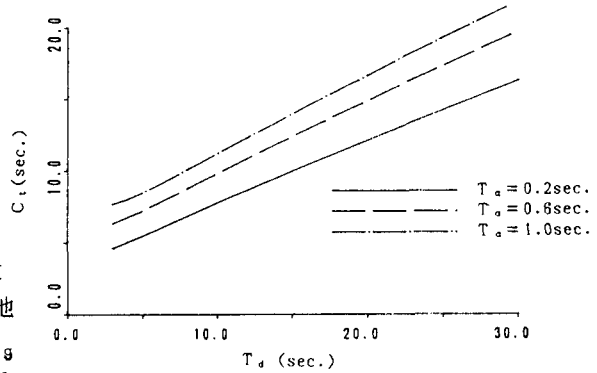


図3 継続時間の影響

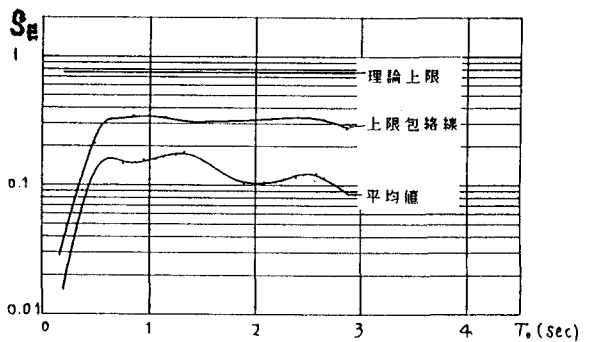


図5 正規化入力エネルギー・スペクトル($h=0.1$)

参考文献 (1) Housner, G.W.: Limit design of structures to resist earthquake, Proc. of 1st WCEE, 1956 (2) 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, 建築学会論文報告集, 第235号, 昭和50年9月 (3) 大野 友則 西岡 隆 藤野 陽三: 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, 第333号, 1983年5月。