

徳島大学工学部 正員 成行 義文
 徳島大学工学部 正員 平尾 潔
 徳島大学工学部 学生員 窪田 和裕

1. まえがき 近年、強震下における構造物の耐震安全性をより合理的に評価するための指標として、入力エネルギー量ならびに履歴吸収エネルギー量が注目されている。これらのエネルギー量により、構造物の応答を、力と変形の相乗効果として、また地震動の継続時間の影響も含めて、総合的に捕らえることができるものと思われる。本研究では、簡単な多自由度履歴系を対象として、強震時における各質点からの入力エネルギー量、各層に分配される入力エネルギー量、および各層の履歴吸収エネルギー量等の分布に及ぼす系の質量分布ならびに剛性分布の影響について検討し、各エネルギー分布の推定式を示している。

2. 多自由度系のエネルギー釣合式 図-1のようなせん断型多自由度系の基礎からの相対変位{x}に関する運動方程式は周知のように式(1)で表わされる。

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + \{Q(x)\} = -[m]\{1\}\ddot{x}_0 \quad (1)$$

ここで、{Q(x)}は復元力ベクトルであり、本研究では、各層の復元力特性として一般によく用いられている図-2のようなbilinear型履歴モデルを用いている。式(1)を、対角要素を含む右上半分の要素がすべて1で、その他の要素がすべて0の正方マトリクス[D]を用いて、層間変位{x}に関する式に変換すると式(2)のようになる。

$$[D][m][D]^T\{\ddot{x}\} + [c_s]\{\dot{x}\} + \{Q(x)\} = -[D][m]\{1\}\ddot{x}_0 \quad (2)$$

ここで、[c_s]は、c_i(i=1,2,...,n)を対角要素とする対角マトリクスである。また、減衰係数は初期剛性比例型としている。式(2)の両辺に左から{x}^Tを乗じ、地震継続時間Tにわたって積分すると、多自由度系のエネルギー釣合式が式(3)のように得られる。

$$\sum_{i=1}^n m_i \dot{x}_i^2 / 2 + \sum_{i=1}^n \int_{x_0}^{x_i} c_i \dot{x}_i^2 dt + \sum_{i=1}^n \int_{x_0}^{x_i} Q_i(x_i) \dot{x}_i dt = \sum_{i=1}^n \int_{x_0}^{x_i} (-m_i \ddot{x}_i \dot{x}_i) dt \quad (3)$$

ここで、質点iの時刻tにおける運動エネルギーをW_{Ki}、i層の粘性減衰エネルギー、弾性ひずみエネルギーならびに塑性ひずみエネルギー(履歴吸収エネルギー)をそれぞれW_{Di}、W_{Ei}、W_{Hi}、また質点iからの入力エネルギーをE_iとすると、式(3)は、式(4)のように表わされる。

$$\sum_{i=1}^n W_{Ki} + \sum_{i=1}^n W_{Di} + \sum_{i=1}^n (W_{Ei} + W_{Hi}) = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

応答終了時には、W_{Ki}=W_{Ei}=0となるため、最終的なエネルギー釣合式は、式(5)のようになる。

$$\sum_{i=1}^n W_{Di} + \sum_{i=1}^n W_{Hi} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

ここで、W_{Hi}(=W_{Di}+W_{Hi})をi層に分配される入力エネルギーと定義する。また、各総エネルギー量を、添字iをとってそれぞれW_D、W_H、およびE(=W_i)で表わすと、各エネルギーの分布はそれぞれW_{Di}/W_D、W_{Hi}/W_H、E_i/E、W_{Hi}/E(i=1,2,...,n)で表わされる。また、W_{Hi}/Eは総入力エネルギーに対するi層の履歴吸収エネルギーの分担率、W_{Hi}/W_{Hi}はi層に分配された入力エネルギーに対する履歴吸収エネルギーの分担率を表わしている。

3. エネルギー分布に関する解析結果

本研究では、入力地震波として El Centro S00E(1940 Imperial Valley E.Q.,継続時間30秒)を用い、5自由度系を対象として解析を行なった。また、構造特性パラメータとして、質量比α_i(=m_i/m₁)、初期剛性比β_i(=k_{0i}/k₀₁)、降伏変位比ξ_i(=x_{yi}/x_{y1})、弾塑性剛性比γ_i、減衰定数h、入力強度比a(=(∑_{i=1}ⁿ m_i)x̄_{oP}/Q₀₁)、円振動数比p(=ω₀/ω₀)の7つを設定した。ここで、x̄_{oP}は入力波の平均パワーの平方根、ω₀は入力波の卓越円振動数、ω₀は系の弾性時1次固有円振動数であ

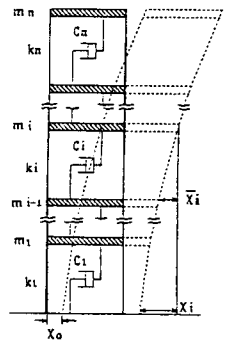


図-1 せん断型多自由度系

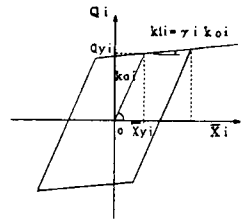


図-2 bilinear復元力特性

る。図-3は、エネルギー分布に及ぼす質量分布ならびに剛性分布の影響を調べるために、図中のcase 1 ~ case 7のようにパラメータ α_i, β_i を設定した場合の各エネルギー分布を示したものである。線種は、 h の違いを示している。また、その他のパラメータは、同図に示すように固定している。図-3より、 $E_i/E, W_{Ii}/E$ 、ならびに W_{Hi}/W_H に及ぼす質量分布および剛性分布の影響はかなり大きい、 h の影響は小さいことがわかる。同図の結果をもとに、 E_i/E の推定式について検討を行なった結果、式(6)により比較的精度よく推定し得ることがわかった。 $E_i/E \doteq \phi_i / \sum_{i=1}^n \phi_i$ (但し、 $\phi_i = \alpha_i [\sum_{k=1}^n \{(\sum_{k=j}^n \alpha_k) / \beta_j\}]$) —(6) また、同様に、 W_{Ii}/E については、式(7)により大旨推定できることがわかった。

$$W_{Ii}/E \doteq \varepsilon_i / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (\text{但し、} \varepsilon_i = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j}{\beta_i}) \text{ ————— (7)}$$

ただし、弾性か、あるいは塑性化がほとんど進行しないような層 i に対しては、式(7)において $\varepsilon_i = 0$ とすればよい。ここで、予め、各層の塑性化のレベルを予測する必要があるが、本研究では、式(8)を用いて検討を行なった。

$$\kappa_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{但し、} \lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j}{\beta_i}) \text{ ————— (8)}$$

その結果、大旨 $\kappa_i < 0.1$ の層については、弾性とみなすことができることがわかった。繁雑さを避けるため図には示していないが、式(6)、(7)による $E_i/E, W_{Ii}/E$ の推定結果は、解析結果と非常によく一致している。また、 W_{Hi}/W_H と W_{Ii}/E は、どの case もよく似ているが、これは、ある程度塑性化が進行した層においては、 W_{Hi}/W_{Ii} がほぼ等しくなるからだと思われる。

4. あとがき 本研究により、多自由度系における各質点からの入力エネルギーの分布(E_i/E)、ならびに各層に分配される入力エネルギーの分布(W_{Hi}/E)は、質量分布及び剛性分布がわかれば比較的簡単に推定できること、また、履歴吸収エネルギー分布(W_{Hi}/W_H)は W_{Ii}/E にほぼ等しいこと等がわかった。しかし、本研究では、簡単のため、他のパラメータを固定しており、今後、それらの影響についても検討する必要があるものと思われる。

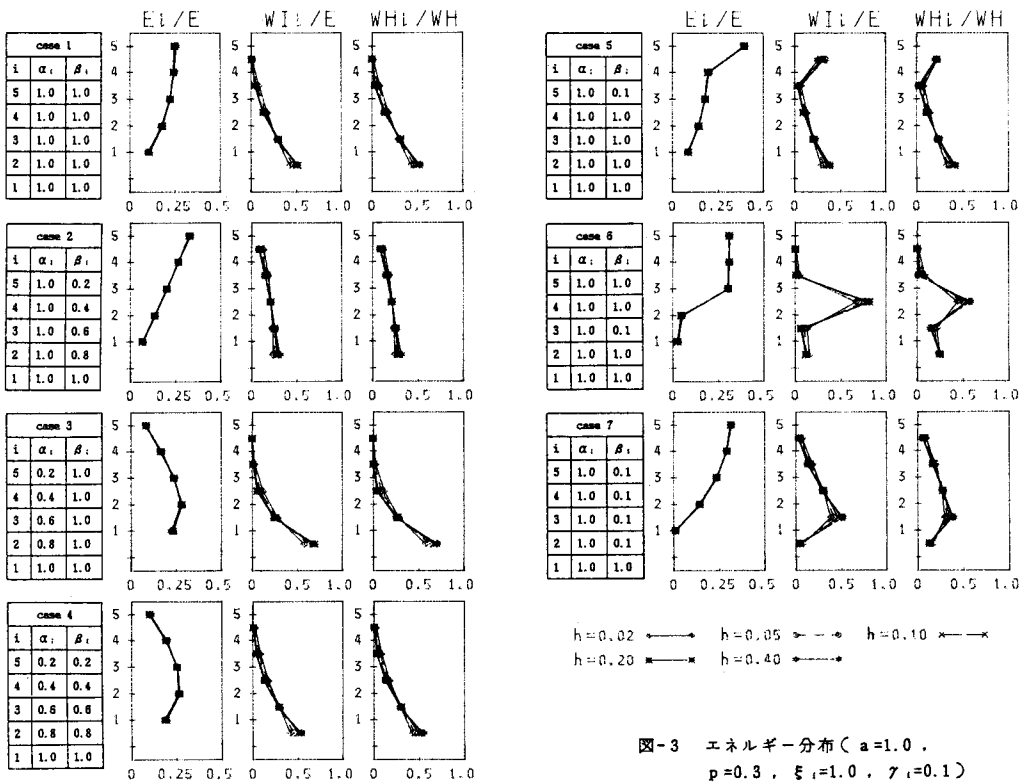


図-3 エネルギー分布 ($a=1.0, p=0.3, \xi_i=1.0, \gamma_i=0.1$)