

京都大学工学部 正員 家村浩和 イリノイ大学工学部 A.H.-F. Ang
イリノイ大学工学部 Y.K. Wen イリノイ大学大学院 C.-T. Chiu

1. まえがき

構造物の塑性率における耐震性評価の指標としては、従来より最大塑性率応答が用いられて来た。しかし、この指標は、地震応答継続時間中のある時刻における最大値であり、繰返し荷重により構造物強度が劣化する場合には、必ずしも妥当ではない。こうした場合、構造物の履歴復元力特性により吸収された累積エネルギー量¹⁾より合理的な指標となり得る。本研究は、各種構造物における地震入力エネルギーの分担率を、等価線形化解法の応用により、解析的に予測する手法を示したものである。

2. 運動方程式と地震入力エネルギーの分担率

いま一自由度構造物 (m, c, K) の履歴復元力特性として、微分方程式で表示される Wen の提案した履歴ループ²⁾を採用するとともに、入力地震波の周波数特性として、ホワイトノイズ入力 $\ddot{z}_B$ に対する一自由度フィルタ ($\omega_B = 15.6 \text{ rad/sec}$, $\beta_B = 0.64$) の絶対加速度応答 ($\ddot{u}_B + \ddot{z}_B$) を用いると、運動方程式は次式ようになる。

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{\alpha K}{m}u + \frac{(1-\alpha)K}{m}Kz = -t_f \ddot{z} = -(t_f(\ddot{u}_B + \ddot{z}_B)) \quad \dots\dots(1)$$

$$\begin{cases} \dot{z} = -\beta|\dot{u}|z|z|^{n-1} - \gamma\dot{u}|z|^{n-1} + A\dot{u} = C_e\dot{u} + K_e z \\ \ddot{u}_B + 2\beta_B\omega_B\dot{u}_B + \omega_B^2 u_B = -\ddot{z}_B \end{cases} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 α : 弾塑性傾斜率、 z : 履歴成分、 $\beta \cdot \gamma \cdot A \cdot n$: 履歴形状を決定するパラメータ (Fig. 1 参照)、 $C_e \cdot K_e$: Atalik と Utku の手法³⁾により求められる等価線形定数、 t_f : Fig. 2 に示す入力の非定常包絡線である。地震入力エネルギーの分担率の期待値を求めるためには、式 (1) の両辺の各項に $du (= \dot{u}dt)$ と掛け (t_0, t_1) 区間にわたって積分し、期待値 $E[\cdot]$ を取ればよい。

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{2} E[\dot{u}^2(t_0)] + \frac{c}{m} \int_{t_0}^{t_1} E[\dot{u}^2] dt + \frac{\alpha K}{m} \int_{t_0}^{t_1} E[u^2] dt + \frac{(1-\alpha)K}{m} \int_{t_0}^{t_1} E[z\dot{u}] dt \\ & = \omega_B^2 \int_{t_0}^{t_1} E[u_B \dot{u}] dt + 2\beta_B \omega_B \int_{t_0}^{t_1} E[u_B \dot{u}] dt \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$E[w_K(t_0)] + E[w_0] + E[w_P] + E[w_H] = E[E_T]$$

すなわち、時刻 t_0 までの地震入力エネルギー E_T は、 t_0 での運動エネルギー w_K 、ポテンシャルエネルギー w_0 および (t_0, t_1) 時間中に粘性減衰および履歴特性により吸収されたエネルギー w_0, w_H に分解される。

3. エネルギー分担率の期待値の評価法

式 (1), (2) をマトリックス表示すると次式となる。

$$\dot{Y} + GY = F \quad \dots\dots(4) \quad \text{ただし} \quad \begin{cases} Y^T = (u_B, \dot{u}_B, 0, u, \dot{u}, z) \\ F^T = (0, -\ddot{z}_B, 0, 0, 0, 0) \end{cases}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_B^2 & 2\beta_B\omega_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -t_f\omega_B^2 & -2t_f\beta_B\omega_B & 0 & \frac{\alpha K}{m} & \frac{c}{m} & \frac{(1-\alpha)K}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_e & K_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

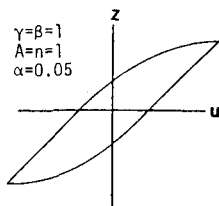


Fig. 1 Wen's Softening Hysteresis Loops

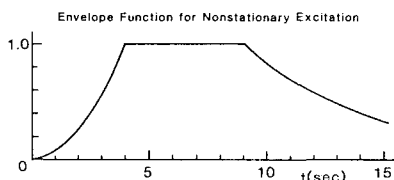


Fig. 2 Nonstationary Envelope Function

1 DOF Linear, Hysteretic and Deteriorating Hysteretic Structures

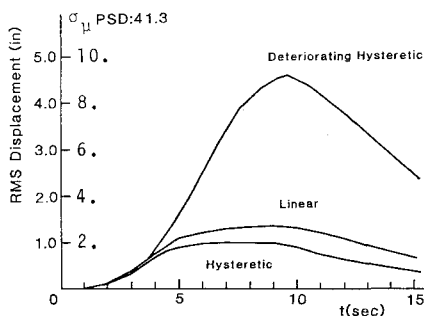


Fig. 3 RMS Displacement Response of Structures

さらにYの共分散マトリックスを $\underline{S}_Y = E[Y(t)Y^T(t)]$ とおくと、式(4)から次式のような共分散マトリックスの微分方程式が得られる。

$$\dot{\underline{S}}_Y = \underline{A} \underline{S}_Y + \underline{S}_Y \underline{A}^T + \underline{B} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\underline{B} = E[\underline{F}Y^T + Y\underline{F}^T]$ であるが、 $\ddot{y}_0$ がホワイトノイズであるから、定数マトリックスとなる。式(6)より $\underline{S}_Y$ を解けば、式(3)中の全ての期待値を評価でき、エネルギー分担率を決定できる。

4. 数値計算例

上記の手法により、弾性系(周期0.45秒, 減衰定数0.02), 履歴系(Figs.1,5のパラメーター)および劣化履歴系(Figs.6,7のパラメーター)のRMS変位応答($\sqrt{E[u]}$)およびエネルギー分担率を逐次積分により算出した。Fig.3に示したRMS変位応答を見ると、約4秒までモデルによる差は見られない。それ以降では、履歴減衰の効果により履歴系の応答が線形系のそれより小さくなっているが、劣化系は剛度および減衰性能の劣化により、線形系のそれよりも非常に大きくなっている。最大塑性応答は、履歴系で約6程度である。 $(u_{max}=30\mu)$ 弾性系におけるエネルギー分

担率を示したのがFig.4である。 $W_K \cong W_P$ であることおよび総入力エネルギーが粘性減衰によって吸収されることは、弾性系では当然のことである。Fig.5には、弾性系と同一の入力に対する履歴系の分担率を示した。履歴消費エネルギー W_H が非常に大きいこと、またそれによって W_K が小さくなっていること、

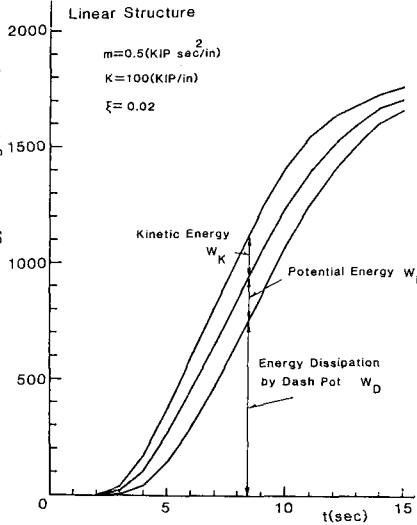


Fig.4 Energy Partitioning of Linear Structures

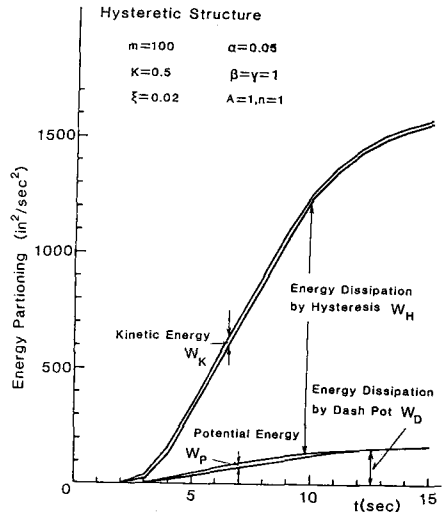


Fig.5 Energy Partitioning of Hysteretic Structures

剛度の低下(振動周期の増大)によって W_P が非常に小さくなっていることなどが注目される。Fig.6には、吸収したエネルギー量に応じて剛度と強度の劣化する履歴モデルを示した。その分担率をFig.7に図示した。7秒以降 W_H が増大しないのは、履歴エネルギーの吸収能力が完全に失われたことを示している。それ以降は、 W_K , W_P , W_D が増大している。構造物によって分担率が大きく異っても入力エネルギー E_T に大差のないのは興味深い。

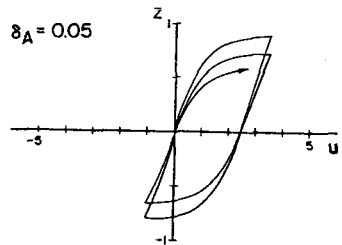


Fig.6 Structural Deterioration Caused by Decreasing A

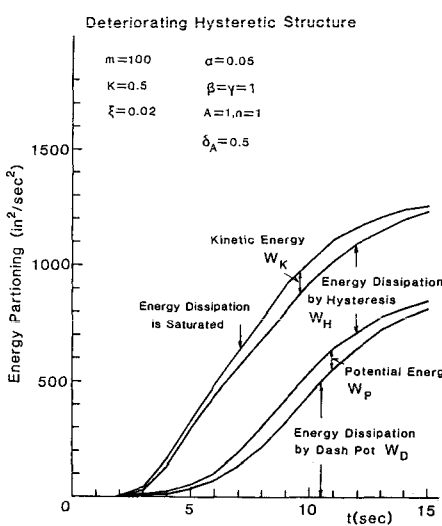


Fig.7 Energy Partitioning of Deteriorating Hysteretic Structures

参考文献 1) 家村他, 第6回地震工学シンポジウム, 2) Y.K.Wu, J. of Applied Mechanics ASME, Vol.46 1979, 3) Atalik, T.S. & Utku, S, Earthquake Eng. and Structural Dynamics Vol.4, 1976.