

(153) 履歴復元力特性における降伏力の非対称性を考慮した地震応答解析

東京都立工業高等専門学校 青木 繁

1. 緒言

構造物が過大な地震動入力を受ける場合に塑性変形を伴うことが多い。このような場合の応答特性を明らかにすることは、塑性域に達する応答を把握し、構造物の崩壊に至るプロセスを解明する上で重要な問題である。塑性変形を考慮した場合の解析には、履歴復元力特性を表わすための種々のモデルが提案されている¹⁾。また、これらのモデルを用いた研究が数多くなされている²⁾。一方、塑性変形に伴うエネルギー吸収作用によって地震応答量を低減する手法が研究され³⁾、動的信頼性の向上への適用性についても検討がなされている⁴⁾。しかしながら、多くの研究では対称な履歴モデルが用いられているが、履歴特性が非対称な場合には、対称な場合と比較して応答特性が異なると考えられる。

本報告では、実地震動記録を用いた応答解析によって、降伏力の非対称性が地震応答量に与える影響について検討した。まず、降伏力の非対称性が最大地震応答に与える影響について検討した。次に、履歴特性がない線形系の応答との比較をした。さらに、履歴特性によって吸収されるエネルギー量と地震応答量の関係について検討した。

2. 力学モデルおよび入力地震動

解析用の力学モデルとして、簡単のため図1に示すような1質点系モデルを用いた。質点の入力端に対する相対変位 $z(x-y)$ に注目すると、運動方程式は次のようになる。

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_n\dot{z} + f = -\ddot{y} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ζ は減衰比、 ω_n は固有円振動数、 f は復元力を表わす。復元力特性は、図2に示すような降伏力が非対称である完全弾塑性履歴特性で表わされるものとした。降伏力 F_1 は、履歴特性がない線形系の場合の復元力の最大値 $|R|_{\max}$ を基準に次式で定めた。

$$F_1 = \alpha |R|_{\max} \dots\dots\dots (2)$$

$|R|_{\max}$ は、線形系の最大応答変位 $|z_1|_{\max}$ を用いると、

$$|R|_{\max} = \omega_n^2 |z_1|_{\max} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α は降伏力の大きさを表わすパラメータである。もう一方の降伏力 F_2 は F_1 を基準に次式で定めた。

$$F_2 = \beta F_1 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 β は非対称性の強さを表わすパラメータである。

また、応答特性に影響を与えようと考えられる、塑性変形によって吸収されるエネルギー量を検討した。図3に

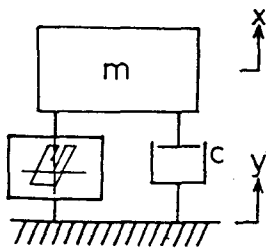


図1 解析に用いた力学モデル

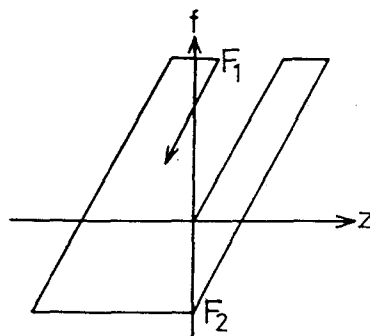


図2 完全弾塑性履歴復元力特性

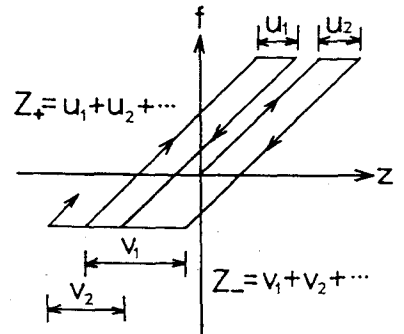


図3 塑性変形量の総和

示した正の側の塑性変形量の総和 Z_+ および負の側の塑性変形量の総和 Z_- を求め、次式によって吸収エネルギー量を求めた。

$$E_n = F_1 Z_+ + F_2 Z_- \dots \dots \dots (5)$$

パラメータの値としては、 ζ は0.01とした。固有周期 $T_n(2\pi/\omega_n)$ は0.05s~5.0sの間で選んだ。 α の値としては、降伏力が比較的大きい場合に対して0.7、小さい場合に対して0.3を選んだ。 β の値としては、非対称性が比較的弱い場合に対して0.8、比較的強い場合に対して0.5を選んだ。比較のために対称となる1.0も採用した。

入力地震動としては、El Centro NS方向記録波(1940)および十勝沖EW方向記録波(1968)を用いた。

3. 最大応答特性

降伏力の非対称性が地震応答の最大応答特性を表わす応答スペクトルに与える影響について検討した。そのために、絶対加速度、地表面に対する相対速度および相対変位の最大値、それぞれ $S_A(|\ddot{x}_{max}|)$ 、 $S_V(|\dot{z}_{max}|)$ および $S_D(|z_{max}|)$ を求めた。

図4、図5および図6にそれぞれにEl Centro NS方向記録波を入力とした場合の $\alpha=0.7$ に対する加速度、速度および変位応答スペクトルを示す。図中には、比較のため履歴特性がない線形系に対する結果を示した。加速度応答は履歴特性がある場合には線形系と比較して小さくなり、非対称性が強くなるほど低減率が大きくなる。速度応答に関しては、加速度応答ほどではないが、履歴特性がある場合には線形系と比較して小さくなり、非対称性が強くなるほど小さくなる。変位応答に関しては、履歴特性が対称である場合にはピーク近傍で線形系よりも小さくなる。一方、非対称性が強くなると応答が大きくなる。

この傾向は、十勝沖EW方向記録波を入力とした場合も同様であった。 $\alpha=0.3$ とした場合にも、応答の低減の割合は異なるが、ほぼ同様の傾向がみられた。

4. 応答低減係数

3章で述べた特徴を詳細に検討するために、履歴特性がない線形系の応答を基準とした応答低減率を求めた。そのため、線形系に対する加速度、速度および変位応答の最大値をそれぞれ $|\ddot{x}_i|_{max}$ 、 $|\dot{z}_i|_{max}$ および $|z_i|_{max}$ とした場合に、次式で定義される応答低減係数、それぞれ γ_A 、 γ_V および γ_D を求めた。

$$\begin{aligned} |\ddot{x}|_{max} &= (1 - \gamma_A) |\ddot{x}_i|_{max} \\ |\dot{z}|_{max} &= (1 - \gamma_V) |\dot{z}_i|_{max} \\ |z|_{max} &= (1 - \gamma_D) |z_i|_{max} \end{aligned} \quad (6)$$

便宜的に固有周期が0.05s~0.2sの場合を短周期域、0.25s~2.0sの場合を中周期域、2.5s~5.0sの場合を長周期域と分けて、それぞれの領域における各固有周期に対する応答低減係数の期待値を求めると、表1のようになる。とくに、中周期域に注目すると、非対称性が強くなるほど加速度および速度応答は低減され、変位応答は逆に増幅される。この傾向は他の領域でも全般にみられる。表2に $\alpha=0.3$ とした場合の応答低減係数を示す。加速度および速度応答は α が小さくなるほど低減されている。変位応答に関しては、中周期域で降伏力が対称である $\beta=1.0$ の場合には α が小さいほど低減されるが、履歴特性が非対称であると増幅される。

以上の結果から、降伏力が小さく、非対称性が強いほど加速度および速度応答が低減される。変位応答に関しては、履歴特性が対称な場合には卓越周期近傍では降伏力が小さいほど応答が低減される。一方、降伏力が非対称である場合には、非対称性が強くなるほど大きくなり、降伏力が小さいほど増加率が大きい。

5. 吸収エネルギー量

図7に $\alpha=0.7$ とした場合のEl Centro NS方向記録波に対する吸収エネルギー量を示す。非対称性が強くなるほど吸収エネルギー量が大きくなっている。また、 $\alpha=0.3$ とした場合についても検討した結果、全体的に α が小さい方が吸収エネルギー量は大きくなった。したがって、4章で述べた結果との対応から、吸収エネルギー量が大きいほど加速度および速度応答が低減されるといえる。また、変位応答に関しては、卓越周期近傍では

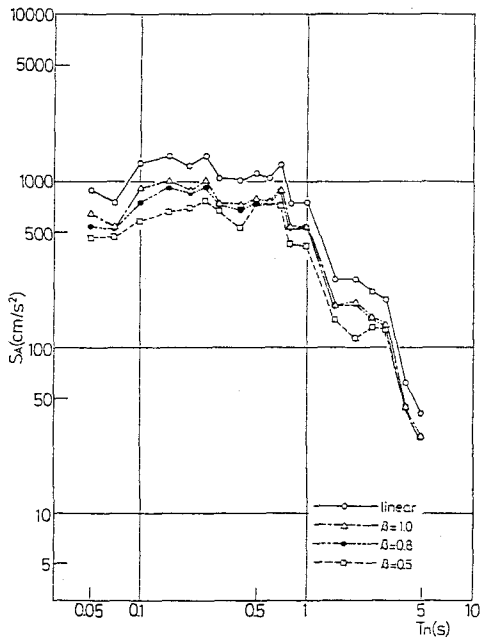


図4 加速度応答スペクトル
(El Centro NS, $\zeta=0.01$, $\alpha=0.7$)

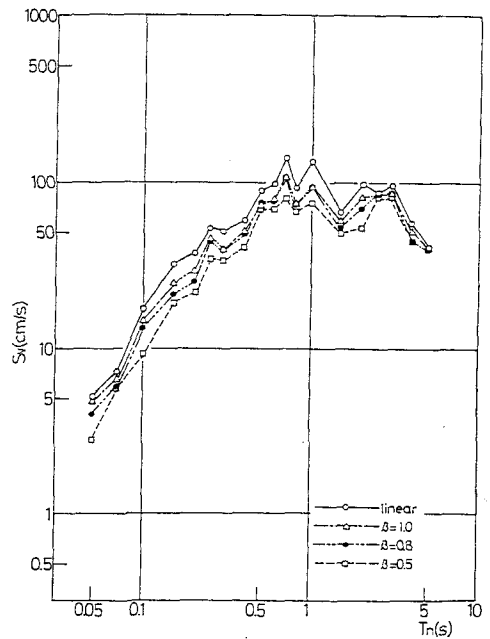


図5 速度応答スペクトル
(El Centro NS, $\zeta=0.01$, $\alpha=0.7$)

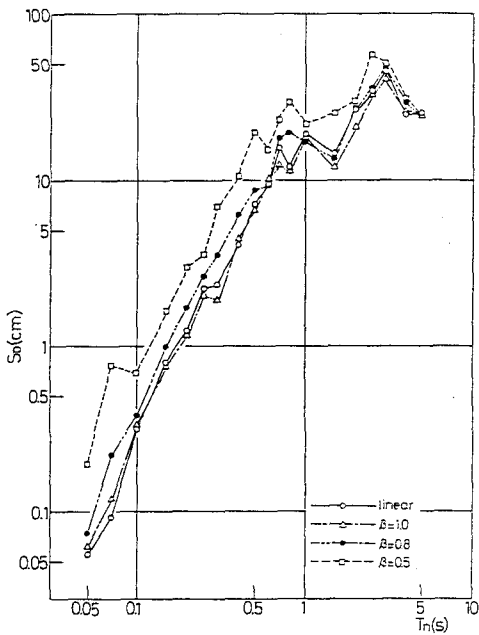


図6 変位応答スペクトル
(El Centro NS, $\zeta=0.01$, $\alpha=0.7$)

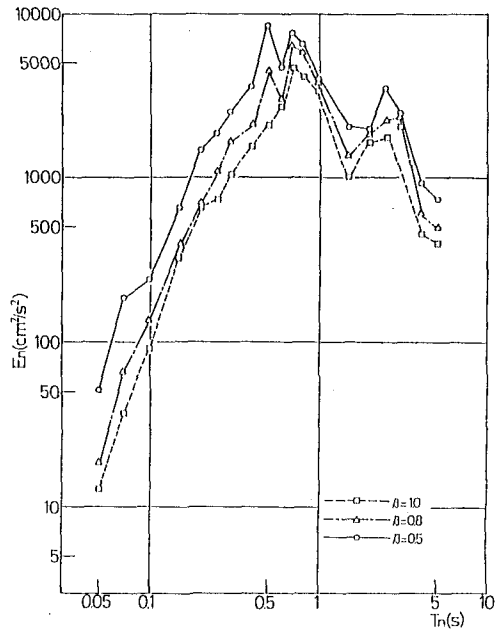


図7 履歴特性による吸収エネルギー量
(El Centro NS, $\zeta=0.01$, $\alpha=0.7$)

表1 応答低減係数の期待値 (El Centro NS, $\zeta=0.01$, $\alpha=0.7$)

T_n (s) \ β	加 速 度			速 度			変 位		
	1.0	0.8	0.5	1.0	0.8	0.5	1.0	0.8	0.5
0.05~0.20	0.27	0.35	0.47	0.14	0.25	0.39	-0.07	-0.51	-2.85
0.20~2.0	0.29	0.30	0.42	0.19	0.21	0.33	0.09	-0.20	-1.12
2.5~5.0	0.29	0.29	0.33	0.06	0.08	0.10	0.03	-0.05	-0.60

表2 応答低減係数の期待値 (El Centro NS, $\zeta=0.01$, $\alpha=0.3$)

T_n (s) \ β	加 速 度			速 度			変 位		
	1.0	0.8	0.5	1.0	0.8	0.5	1.0	0.8	0.5
0.05~0.20	0.67	0.69	0.69	0.26	0.22	0.03	-3.14	-7.35	-42.55
0.20~2.0	0.69	0.69	0.69	0.47	0.50	0.54	0.23	-1.07	-3.95
2.5~5.0	0.68	0.68	0.69	0.18	0.21	0.24	-0.03	-0.17	-1.09

履歴特性が対称な場合には吸収エネルギー量が大きいほど応答が低減されるが、それ以外の領域では必ずしもエネルギー吸収が応答の低減に結びついていない。また、履歴特性が非対称である場合にはエネルギー量が大きいほど応答が大きくなっている。

一方、図7と図4~図6の応答スペクトルの形状を比較すると、吸収エネルギー量のグラフの形状は速度応答スペクトルとよく似ている。したがって、吸収エネルギー量は速度応答スペクトルと深い関係があり、速度応答スペクトルから吸収エネルギー量を評価できる可能性があることが明らかになった。

6. 結言

履歴復元力特性をもつ構造物の地震応答について、降伏力の非対称性を考慮して検討した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 加速度および速度応答は降伏力が小さく、降伏力の非対称性が強いほど低減される。
- 2) 変位応答は降伏力が対称である場合には、入力卓越周期の近傍で降伏力が小さいほど低減される。それ以外の領域では応答の低減効果は小さい。また、降伏力が非対称である場合には、応答は大きくなる。
- 3) 履歴特性によって吸収されるエネルギー量は、降伏力が小さく、降伏力の非対称性が強くなるほど大きくなる。吸収エネルギー量のグラフの形状は速度応答スペクトルに似ている。

終わりに、本報告の計算は宮田工業(株)橋本敏行氏、豊橋技術科学大学 伊東正克氏(いずれも元東京都立工業高等専門学校学生)に負うところが多い。ここに、謝意を表す。

文献

- 1) Ang, A. H-S., Probabilistic Seismic Safety and Damage Assessment of Structures, Proc. of 9WCBE, Vol. VIII (1988), pp. 717-728
- 2) Zaiming, L., Katukura, H. and Izumi, M., Synthesis and Extension of One-Dimensional Nonlinear Hysteretic Models, Journal of Engineering Mechanics ASCE, Vol. 117, No. 1 (1991), pp. 100-109
- 3) Lee, M. C., The Design of Steel Energy Absorbing Restrainers and Their Incorporation into Nuclear Power Plants for Enhanced Safety, EERC University of California, Berkeley, No. UCB/EERC-79/08 (1979)
- 4) 青木・鈴木, 地震時における付加構造物系の初通過破壊確率推定法とその応用, 第7回日本地震工学シンポジウム論文集, (1986), pp. 1549-1554

連絡先 〒140 品川区東大井1-10-40 東京都立工業高等専門学校

TEL 03-3471-6331 FAX 03-3471-6338