

I-561

一自由度系構造物の塑性率と塑性ひずみエネルギーの関係

東京電機大学 理工学部 学生員 ○井出周治
 東電設計（株） 正会員 松島 学
 東京電機大学 理工学部 正会員 松井邦人

1. はじめに

地震時に構造物の応力レベルを弾性範囲内に制限する弾性設計法は、これまで多くの設計規準等に採用されてきた。しかし、既往の地震記録によると、設計震度以上の最大加速度の地震力を受けることもしばしばあり、そのときの構造物の被害は、それほどでもないことが判ってきた。このことは、構造物の非線形性によるものであり、一般に損傷の指標として塑性率が用いられている。しかし、構造物の動的挙動を考えるならば、地震時に消費するひずみエネルギーを評価する必要がある。

本研究は、一自由度系で表される構造物を対象に、塑性率と塑性ひずみエネルギーの比較を行い、その関係について考察するものである。

2. 塑性ひずみエネルギーの評価

一自由度系に地動加速度 y_g が生じたときの運動方程式は、次式で表される。

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + Q(y) = -\ddot{y}_g \quad (1)$$

ここで、 m は質量、 c は減衰係数、 y , $\dot{y}$, $\ddot{y}$ はそれぞれ相対変位、相対速度、相対加速度、 $Q(y)$ は系の復元力である。式(1)の両辺を質量 m で除すと次式が得られる。

$$\ddot{y} + 2h\omega \dot{y} + q(y) = -\ddot{y}_g \quad (2)$$

ここで、 ω は固有円振動数、 h は減衰定数、 $q(y)$ は単位質量あたりの復元力である。式(2)に $y = \dot{y} dt$ を乗じて、地震動の継続時間 t_f にわたって積分すると、系のエネルギー応答に関する次式が得られる。

$$\int_0^{t_f} \dot{y} \ddot{y} dt + 2h\omega \int_0^{t_f} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_f} q(y) \dot{y} dt = - \int_0^{t_f} \ddot{y}_g \dot{y} dt \quad (3)$$

式(3)の左辺の第一項は運動エネルギー E_t 、第二項は減衰エネルギー E_h 、第三項は塑性ひずみエネルギー E_p と地動終了時の弾性ひずみエネルギー E_e である。右辺は、地震動による入力エネルギー E_i を表している。ただし、それぞれのエネルギー量は、単位質量あたりのものである。

構造物の損傷を評価するにあたり、塑性ひずみエネルギーが同じでも構造物の規模により、損傷度は異なることが予想される。そこで、本研究では図-1に示すように、塑性ひずみエネルギー E_p を系の最大弾性ひずみエネルギー E_e の2倍で除したものを累積塑性率 $\eta (=E_p/2E_e)$ と称し、損傷度を表す指標とした。この値は、もし一方方向のみの外力を受けた場合塑性率 μ と等値となり、構造物の繰返し変形による損傷度を評価できるものである。

3. 解析手法

対象とする構造物は、一自由度系で表されるものとし、その復元力特性は図-2に示す完全弾塑性モデルとした。構造物の固有周期 T_s を 0.4, 0.9, 1.2sec、降伏震度 α_y を 0.1, 0.15, 0.2 と設定し、系の減衰定数 h は 0.05 とした。入力地震動には、El Centro 1940 NS, Hachinohe 1968 NS, Taft 1952 S69E, Tohoku Univ. 1978 EW および金井・田治見のパワースペクトルに基づく模擬地震波を継続時間を変えて5波、また調和外力として周期

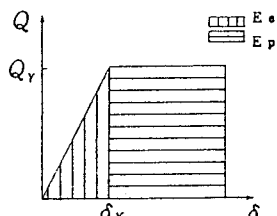


図-1 塑性ひずみエネルギーの概念図

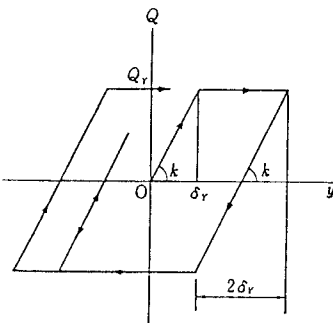


図-2 完全弾塑性モデル

0.6secのsine波を用いた。最大入力加速度はそれぞれ300galに調整した。応答の数値計算法には、Newmarkの β 法を用い、 $\beta=1/6$ とした。

4. 解析結果

(1) sine波を入力した場合

sine波を1周期から8周期まで変化させ構造物の応答解析を行い、塑性率 μ および累積塑性率 η とsine波の周期数 N_w との関係を求めた結果を図-3に示す。図に見られるように、塑性率 μ はsine波の周期数 N_w が増加してもほぼ一定値であるのに対し、累積塑性率 η はsine波の周期数 N_w に比例して増加している。このことから、累積塑性率 η は、地震動の継続時間を評価できる有効な指標であることがわかる。次に、塑性率 μ に繰り返し回数 N_p を乗じた値を新たな損傷指標とし、累積塑性率との相関を求めた。結果を図-4に示す。ここで、繰り返し回数 N_p は、正から負あるいは負から正の塑性変形の繰り返し回数であり、この交番性の塑性変形により構造物の損傷が進むものと考え定義した。図から、塑性率 μ に繰り返し回数 N_p を乗じることで累積塑性率 η との相関がかなり高くなることがわかる(相関係数 $r=0.987$)。このことから、塑性率 μ が地震動の継続時間を考慮できないことを、繰り返し回数 N_p で補ったものと考えることができる。

(2) 実地震波および模擬地震波を入力した場合

(1)と同様なことが実地震波でもあてはまるかどうかを確認する。図-5に実地震波および模擬地震波を入力した場合の、塑性率 μ と累積塑性率 η の関係を示す。塑性変形が小さいところでは、累積塑性率 η が増加すると塑性率 μ も増加し若干の相関がみられる。次に、塑性率 μ に繰り返し回数 N_p を乗じて累積塑性率 η との相関を求めた結果を図-6に示す。図から、sine波程ではないが、かなりの相関が得られた($r=0.972$)。従って、実地震波の場合でも、塑性率 μ と繰り返し回数 N_p で累積塑性率 η を評価できることがわかる。

(3) 繰り返し回数 N_p の推定

繰り返し回数を推定するにあたり、降伏震度 α_y と最大入力加速度 A_{max} の関係を次式で定義した。

$$\beta = \alpha_y \cdot g / A_{max} \quad (4)$$

設計時の最大入力加速度を300gal、降伏震度を0.2~0.4と仮定し、基準となる β の範囲を求め、その範囲内の各構造物の固有周期ごとに繰り返し回数を求めた。繰り返し回数 N_p が増加するほどその頻度は減少し、その最大回数は、固有周期 $T_s=0.4\text{sec}$ のとき25回、 $T_s=0.9\text{sec}$ のとき8回、 $T_s=1.2\text{sec}$ のとき7回となった。このように繰り返し回数を推定することにより、(2)の結果から、地震時に構造物の消費するひずみエネルギーを評価できると思われる。

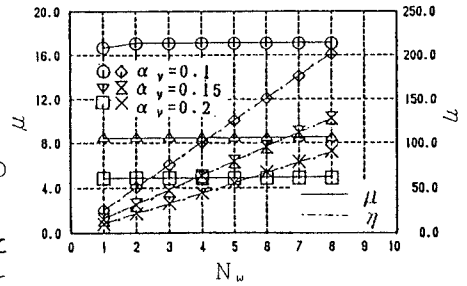


図-3 累積塑性率 η および塑性率 μ とsine波の周期数 N_w の相関

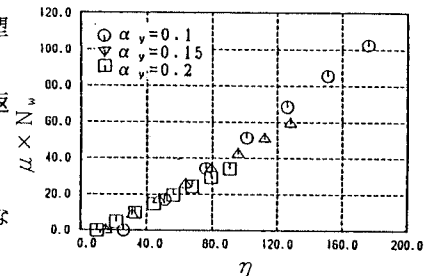


図-4 塑性率 $\mu \times$ 繰り返し回数 N_w と累積塑性率 η の相関(sine波)

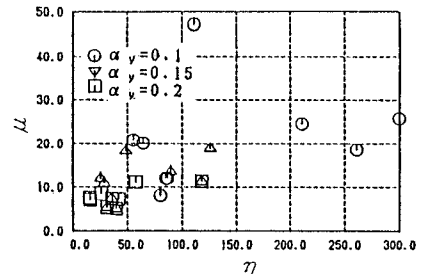


図-5 塑性率 μ と累積塑性率 η の相関(実地震波および模擬地震波)

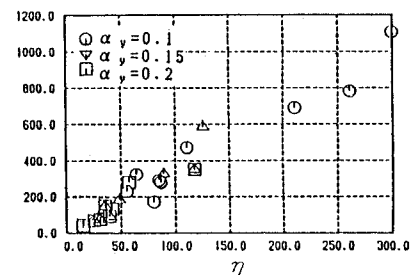


図-6 塑性率 $\mu \times$ 繰り返し回数 N_w と累積塑性率 η の相関(実地震波および模擬地震波)