

I-631 Bi-linear型復元力特性を有する2自由度系の塑性ひずみエネルギーの評価

財団法人 鉄道総合技術研究所 正員 渡邊 健
早稲田大学 正員 宮原 玄

1. はじめに 今日土木の分野でも注目されてきた地震時の構造物の損傷の程度を評価する指標として、塑性ひずみエネルギーがある。本研究では、この塑性ひずみエネルギーに注目し、2自由度系モデルに模擬地震波を入力し、モデルのパラメーターを変化させ、蓄積する塑性ひずみエネルギーとの関係について検討を行った。また、モデルの第1層と第2層に蓄積するエネルギーの比についても検討を行った。

2. 解析手法 外力として地震力が作用する場合の2自由度系の運動方程式は、以下のように表される。

$$M_1 \ddot{X}_1 + C_1 \dot{X}_1 - C_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + Q_1(X_1) - Q_2(X_2 - X_1) = -M_1 \ddot{U} \cdots ①$$

$$M_2 \ddot{X}_2 + C_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + Q_2(X_2 - X_1) = -M_2 \ddot{U} \cdots ②$$

ここに M :質量 X :変位 C :減衰定数 $Q(X)$:復元力 $\ddot{U}$:地震加速度
モデルの振動を一般的かつ、普遍的にするために以下の無次元量を導入する。

$$X_1 = \frac{X_1}{X_{Y1}} \quad X_2 = \frac{X_2}{X_{Y1}} \quad q_1(\chi_1) = \frac{Q_1(X_1)}{Q_{Y1}} \quad q_2(\chi_2) = \frac{Q_2(X_2)}{Q_{Y2}} \quad \tau = \omega_1 t$$

ここに X_Y :降伏変位 Q_Y :降伏復元力 χ :無次元変位 τ :無次元時間
 ω_1 :1層の弾性固有円振動数($=\sqrt{Q_{Y1}/MX_{Y1}}$) $q(\chi)$:無次元降伏復元力
以上より、①、②式を無次元化すると③、④式ようになる。

$$\ddot{\chi}_1 + 2h_1 \dot{\chi}_1 - 2h_2 (\dot{\chi}_2 - \dot{\chi}_1) + q_1(\chi_1) - \lambda q_2(\chi_2 - \chi_1) = -\ddot{u} \cdots ③$$

$$\alpha \ddot{\chi}_2 + 2h_2 (\dot{\chi}_2 - \dot{\chi}_1) + \lambda q_2(\chi_2 - \chi_1) = -\alpha \ddot{u} \cdots ④$$

ここに α :1層と2層の質量比(M_2/M_1) h :1層の減衰定数

λ :1層と2層の降伏復元力比(Q_{Y2}/Q_{Y1}) λ :無次元時間による微分

本研究で用いた2自由度系モデルはBi-linear型の復元力特性を有するものとした。Bi-linear型の復元力特性は、弾塑性剛性比を変化させることによって弾性域と塑性域の復元力を簡単に表すことができる。

次に、③、④式を無次元化時間0~ τ まで積分することにより、以下のエネルギー評価式を得る。

$$\int_0^\tau \dot{\chi}_1 \dot{\chi}_1 d\tau + \int_0^\tau 2h_1 \dot{\chi}_1^2 d\tau + \int_0^\tau q_1(\chi_1) \dot{\chi}_1 d\tau = \int_0^\tau 2h_2 (\dot{\chi}_2 - \dot{\chi}_1) \dot{\chi}_1 d\tau + \int_0^\tau \lambda q_2(\chi_2 - \chi_1) \dot{\chi}_1 d\tau - \int_0^\tau \ddot{u} \dot{\chi}_1 d\tau \cdots ⑤$$

$$\int_0^\tau \dot{\chi}_2 \dot{\chi}_2 d\tau + \int_0^\tau 2h_2 (\dot{\chi}_2 - \dot{\chi}_1) \dot{\chi}_2 d\tau - \int_0^\tau 2h_2 (\dot{\chi}_2 - \dot{\chi}_1) \dot{\chi}_1 d\tau + \int_0^\tau \lambda q_2(\chi_2 - \chi_1) \dot{\chi}_2 d\tau - \int_0^\tau \lambda q_2(\chi_2 - \chi_1) \dot{\chi}_1 d\tau \\ = - \int_0^\tau 2h_2 (\dot{\chi}_2 - \dot{\chi}_1) \dot{\chi}_1 d\tau - \int_0^\tau \lambda q_2(\chi_2 - \chi_1) \dot{\chi}_1 d\tau - \int_0^\tau \alpha \ddot{u} \dot{\chi}_2 d\tau \cdots ⑥$$

ここに ⑤式 左辺第1項:運動エネルギー 第2項:粘性減衰エネルギー 第3項:履歴エネルギー 右辺:第1層入力エネルギー

⑥式 左辺第1項:運動エネルギー 第2,3項:粘性減衰エネルギー 第4,5項:履歴エネルギー 右辺:第2層入力エネルギー

履歴エネルギーは振動中は弾性ひずみエネルギーと塑性ひずみエネルギーの和であり、振動終了時には塑性ひずみエネルギーのみになる。

本研究では、模擬地震動は震源での振動をホワイトノイズ、地盤を1自由度系と仮定し得られた応答を用いた。さらに、その最大加速度を50~300ガルまで考慮し、その間を50ガルずつ6タイプに分類し、それぞれ50本ずつ作成し、これらを入力地震動とした。

3. 解析結果 運動方程式のパラメーターを変化させることによって、各層に蓄積する塑性ひずみエネルギーとの関係を調べた。解析は、①各パラメーターを単独に変化させた場合 ②2つのパラメーターを同時に変化させた場合 について行い、パラメーターは以下の範囲で変化させた。

α :質量比(0.2~0.8) β (=BA):弾塑性剛性比の比(0.7~1.3) λ (=RA):降伏復元力比(0.7~1.3)

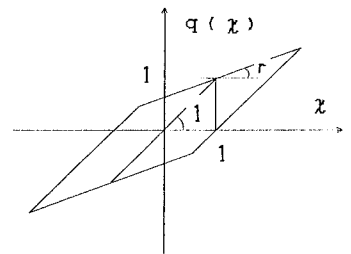


図1 Bi-linear型復元力特性

ν (=UA):降伏変位比(0.7~1.3) r_1 (=AK):第1層弾塑性剛性比 h_2 :第2層減衰定数(0.02~0.08)

また、特に断らない場合のパラメーターは次の値とした。 $\alpha=0.5$, $\beta=1.0$, $\lambda=1.0$, $\nu=1.0$, $r_1=1.0$, $h_2=0.05$

各タイプごとに以上のパラメーターの組み合わせにより塑性ひずみエネルギーを求め、50本の模擬地震動に対する平均を求めた。さらに、各タイプごとに地震の発生割合に応じた重みを乗じて平均を求める。また、第1層に対する第2層の塑性ひずみエネルギーの蓄積比(以後 塑性ひずみエネルギー比と呼ぶ)を求めた。塑性ひずみエネルギー比は、その値が1に近いほど各層の蓄積量は一定に近づき、構造物は安定すると考えた。以下に、各パラメーターと塑性ひずみエネルギー(PE)、塑性ひずみエネルギー比(CPE)との関係を示す。

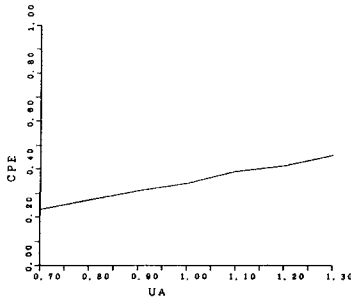


図2 UAと塑性ひずみエネルギー比の関係

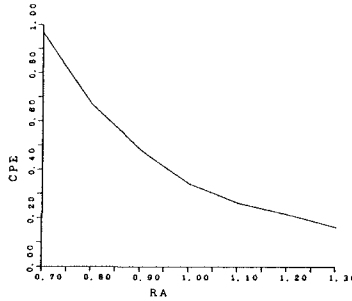


図3 RAと塑性ひずみエネルギー比の関係

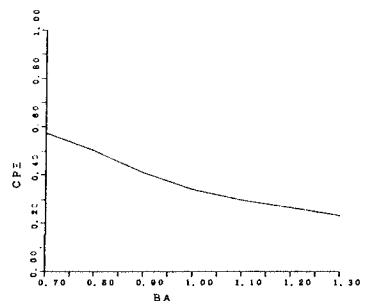


図4 BAと塑性ひずみエネルギー比の関係

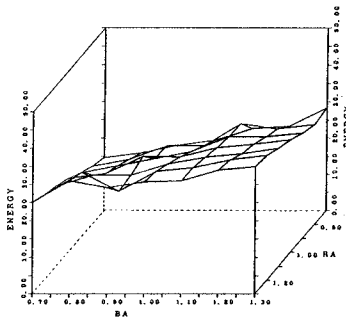


図5 BA, RAと第1層塑性ひずみエネルギーの関係

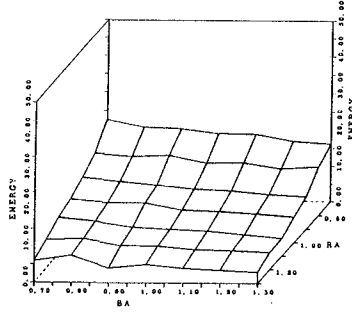


図6 BA, RAと第2層塑性ひずみエネルギーの関係

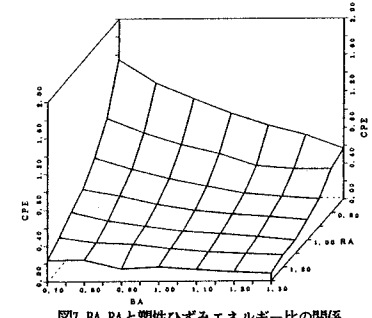


図7 BA, RAと塑性ひずみエネルギー比の関係

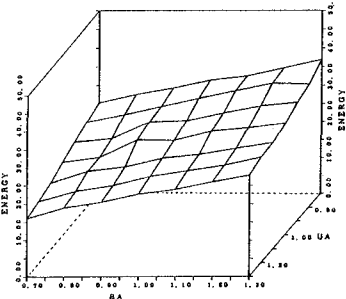


図8 BA, UAと第1層塑性ひずみエネルギーの関係

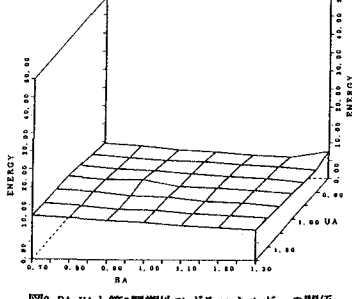


図9 BA, UAと第2層塑性ひずみエネルギーの関係

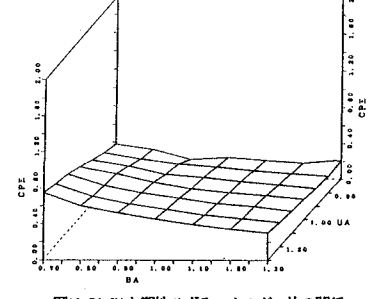


図10 BA, UAと塑性ひずみエネルギー比の関係

4. 結論 ①単独変化の場合 塑性ひずみエネルギー、塑性ひずみエネルギー比共に変化可能な量はあまり大きくならない。②同時変化の場合 増加傾向の似通ったパラメーターどうし(例えば BAとUA)の組み合わせは、かなりの範囲で変化可能である。以上より、構造物の設計の際に複数のパラメーターの組み合わせを考慮することにより、塑性ひずみエネルギーの蓄積量を可能なだけ少なく、塑性ひずみエネルギー比を1に近づけることが可能である。

5. 参考文献

松島 学他 信頼性解析に基づいた最適設計震度 土木学会第43回学術講演会概要集 など