

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
山形県庁 高橋 剛
武蔵工業大学 学生員 古川 稔一

1. 序論

地震動による構造物の動特性の解析に初めてエネルギーの概念を導入したのは Housner であるが、その後、多くの研究者によって、構造物の塑性変形能力やエネルギー吸収能力に関する研究が行われてきた。^(1,2) 本研究では構造物の損傷に直接結びつく要因として塑性ひずみエネルギーに着目し、エネルギー的な観点からいくつかのパラメーターを定義して、種々な地盤特性と構造特性によって構造物内に蓄積される塑性ひずみエネルギーが、どのように影響を受けるかを解析していくものである。

2. モデルの選択とエネルギー式の定式化

この際に用いるモデルは主に一般にある中低層の構造物を対象とし、地盤-構造物系の動的相互作用を考慮して、Fig. 1 に示すような付加質量を考えた集中質点系のセン断型モデルを採用する。更に非線形解析を行なうため、復元力特性 $Q(x)$ として Bi-linear モデルを用いる。このモデルの運動方程式は

$$M(\ddot{X}_0 + \ddot{X}) + C\dot{X} + Q(X) = -M\ddot{U} \quad (1)$$

$$(m + m_0)\ddot{X}_0 + C_0\dot{X}_0 + K_0X_0 - C\dot{X} - Q(X) = -m\ddot{U} \quad (2)$$

$$\ddot{Y} = \ddot{U} + \ddot{X}_0 \quad (3)$$

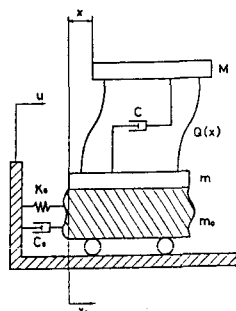


Figure 1 地盤-構造系モデル

ただし、ここでは自由地表面での加速度 $\ddot{U}$ による土の付加質量の慣性力はないものとする。今(1)、(3)式を合成し更に両辺に $\dot{X}$ を乗じ任意の時刻まで積分すると、振動時のエネルギー量の釣り合い式が得られる。

$$\int_0^t M\ddot{X}\dot{X}dt + \int_0^t C\dot{X}^2dt + \int_0^t Q(X)\dot{X}dt = - \int_0^t M\ddot{U}\dot{X}dt \quad (4)$$

左辺の第1項から、運動エネルギー $K(t)$ 、減衰エネルギー $D(t)$ 、ひずみエネルギー $W(t)$ を意味しており、 $W(t)$ は弾性ひずみエネルギー $W_e(t)$ と塑性ひずみエネルギー $W_p(t)$ の和と考えられる。右辺は動的相互作用を受けた後の構造物に入力されるエネルギーを意味し、有効入力エネルギー $E_n(t)$ と呼ぶ。一方、 $\ddot{U}$ によるエネルギーを総入力エネルギー $E_g(t)$ を定義すれば、 $E_g(t) = - \int_0^t M\ddot{U}\dot{X}dt$ と表わせる。

ここで、これらのエネルギー量と応答量を用いて、3つのパラメーターを定義する。

$$\eta_1(t) = E_n(t) / E_g(t) \quad (5)$$

$$\eta_2(t) = W_p(t) / E_n(t) \quad (6)$$

$$\eta_3 = |X|_{\max} / X_y = |\bar{X}|_{\max} \quad (7)$$

$\eta_1(t)$ は、有効入力エネルギー係数^(3,4)といい、地震動の持つエネルギーが構造物に伝達される割合を示すもので、地盤特性と構造特性に依存し、 $\eta_2(t)$ は、構造物の消費するエネルギー中の塑性ひずみエネルギーの占める割合を示すもので、塑性ひずみエネルギー係数と呼ぶ。更に耐震工学でよく用いられる非線形性の度合を表わすパラメーターとして、塑性率 η_3 とする。 X_y は構造物の降伏変位である。また実際に応答解析を行なうときは、(1)(2)(3)式を構造物の固有円振動数と降伏変位によって無次元化するが、 $\eta_1(t)$ 、 $\eta_2(t)$ 、 η_3 の値は基本方程式を無次元化するしないにかかわらず、同じ値をもつ。

3. 数値解析

以上のモデルによって数値解析を行ない、種々の地盤特性、構造特性における構造物内の塑性ひずみエネルギー

一を中心に検討していくが、その際の入力地震動加速度としては地盤特性の影響が入っていないものを選ぶ意味で、適当な envelope 関数を用いた white noise を使用する。また地盤特性としては地盤の固有周期 T_b に注目し、⁵⁾ 構造特性として構造物の固有周期 T_s と Bi-linear モデルの傾斜率 α を用いる。本研究で採用したモデルは中低層の構造物を対象としたものであるため、ここでは構造物の固有周期 T_s としては、0.4, 0.5, 0.6 sec の3種類を扱う。それに対応して構造物の降伏変位 x_y を 2.0, 2.5, 3.0 cm とする。また構造物の非線形性を表わす傾斜率 α の値は 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 の4種類を扱う。 $\alpha=1.0$ は構造系が弾性系であることを意味している。

4. 解析結果及び考察

構造物の固有周期に対して地盤特性値・傾斜率を変えながら数値解析を行ない各特性の影響を Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 に示すようにまとめた。これから次のようなことが言える。

- (1) Fig. 2 より、ス度目の $\dot{x}(t)$ の値がピークになった時点と、塑性ひずみエネルギーが蓄積され始める時点が一致しているのは興味深いことである。(どの数値計算をとっても共通している)
- (2) 構造物の固有周期を一定にして、傾斜率 α を次第に小さくしていくと塑性率は小さくなる。つまり、傾斜率が小さくなる程構造物に塑性ひずみエネルギーは蓄積され、構造物自体に入力されるエネルギーも小さくなる。(Fig. 3) なお塑性ひずみエネルギー係数 η は、 α が小さくなると、いくと次第に大きくなっていき、ある値に漸近していく傾向がある。(Fig. 4)
- (3) 傾斜率が一定のとき、構造物の固有周期 T_s が長くなっていくと扱っている T_b の範囲が狭いので一般的でないが) やはり、塑性ひずみエネルギーの蓄積が多くなる。
- (4) 構造物の固有周期を一定にしたとき、地盤の固有周期を変化させてみると、ある程度短周期のときは塑性率は大きくなり、或構造物の固有周期に近くなるにつれて塑性率は、次第に小さくなる。これは構造物と地盤の固有周期の一致による共振と考えられる。そこを過ぎると急激に小さくなる。しかも小さい傾斜率ほどその傾向は更に著幅される。

参考文献

- 1) 山原 若二: エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答, 建築学雑誌, No. 87, 9, 1971
- 2) 加藤 勉, 秋山 宏: 震動による構造物のエネルギー入力と構造物の損傷, 建築学雑誌, No. 215, 7, 1995
- 3) 鈴 勝, 山崎 武文: 構造物の損傷に影響を及ぼす非線形第5回日本地震工学シンポジウム論文集
- 4) 鈴 勝, 山崎 武文: 地震動エネルギーに基づく音解析, 土木学会論文報告集, No. 291, 1979, 11
- 5) 田谷 晃 宏: 建物と地盤の相互作用, 地震工学(建築篇), 彰国社

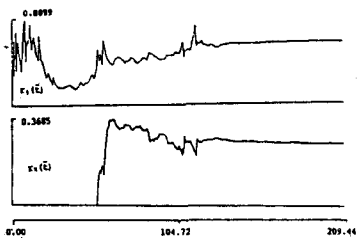


Figure 2 入力加速度 $a(t)$ と変位 $v(t)$ の時間履歴 (傾斜率 $\alpha=0.3$, $T_b=0.4$ sec, $x_y=2.0$ cm)

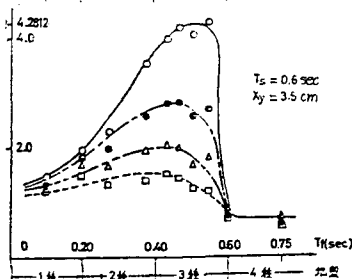
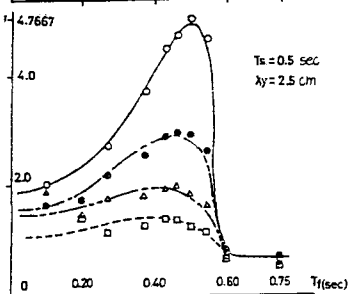
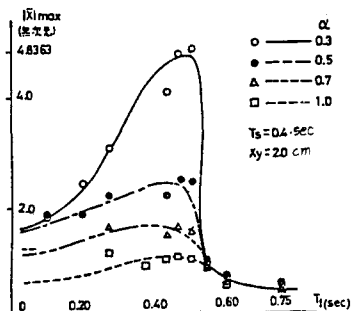


Figure 3 塑性率 $\dot{x}(t)_{max}$ (単位: cm/sec) と、地盤特性、傾斜率 α の関係

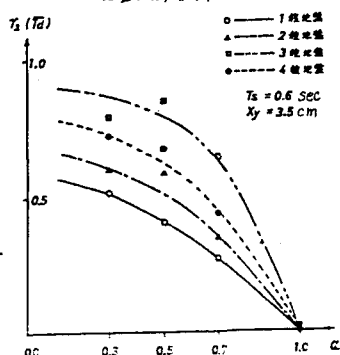


Figure 4 傾斜率 α による塑性ひずみエネルギー係数 η