地盤-建物連成系の塑性応答量に関する確率論的考察

——地盤が弾性的場合——

正 会 員 洪

起*

§1. 序

地震時における構造物の挙動は、構造物自身のもつ振動特性だけでなく、地盤の特性とも密接に関係している。特に、地震時における構造物の被害を考えると、構造物系の振動特性だけでは説明しきれない場合が多く、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した地震応答解析が不可欠のものになっている。

地震による構造物の被害は、構造物に有効に入力するエネルギーの吸収の度合であり、この有効に入力するエネルギー^{*1}とは地盤と建物の連成によって構造物に供給されるエネルギーである。

このような地盤建物連成系のエネルギー授受を考慮した応答に関する研究は、山原¹⁾、星谷²⁾、小堀、井上³⁾、小堀、浅野⁴⁾等がある。山原は入力加速度波形として調和波形を用い、エネルギーの平衡条件から構造物の応答を論じ、その結果、次のような結論を得た。入力加速度がいくら大きくても、地盤の卓越周期と構造物の固有周期が共振したとしても、その結果として構造物が破壊するだけの有効入力エネルギーがなければ、構造物は破壊しない。また、星谷は地盤と建物を簡単な力学モデルで表わし、エネルギーを総入力エネルギー、有効入力エネルギー、塑性歪エネルギーに分類し、振動系の吸収エネルギーや靱性率等に及ぼす要因（構造特性と地盤特性）の影響を統計的に解析している。小堀、浅野は履歴構造物のランダム応答を求める Fokker-Planck の方程式による解析手法を開発し⁵⁾、この手法を用いて地盤-建物連成系の弾塑性ランダム応答性状に基礎的な検討を加えている。筆者も地盤特性として金井、田治見の周波数特性を用いた場合のエネルギー入力と吸収エネルギーを解析的に求める解法について述べた⁶⁾。

しかしながら、ランダム入力に対する構造物への入力エネルギーや構造物の損傷に直接関係すると思われる履歴吸収エネルギーに及ぼす地盤の影響について検討した文献は非常に少ない。

このような見地から、本報告は、前報告⁶⁾と少し見方

を変え、波動論的立場でホワイトノイズが地盤経由で構造物に入力する有効入力エネルギーの統計量を解析的に評価し、この有効入力エネルギーに及ぼす地盤特性の影響、さらに定常応答状態での塑性応答量に及ぼす地盤特性の影響について述べようとするものである。

§2. 基本モデルの振動方程式

本報告は、地盤と振動系を簡単な力学モデルで表わし、有効入力エネルギーの統計量を波動論的解析によって得ようとするものである。そこで、星谷²⁾と同じように Fig. 1 のようなモデルを考える。

振動系直下の地表面では進行波 y_U が上昇し、構造物を振動させることによって、一部が吸収され、残りが反射波 y_D として構造物の直下から下方へ後退する。結局、構造物の基礎底面を振動させる変位 y_E は $y_E = y_U + y_D$ になる。また、加速度は $\ddot{y}_E = \ddot{y}_U + \ddot{y}_D$ になる。

このような簡単なモデルは地盤-建物系の力学モデルの特殊な場合に相当する。このような地盤建物系に対して従来から一般に用いられた方法は、地盤を等価質量で置換した自由度系に対して自由表面上で記録された地震波を入力させるものである^{3), 4)}。それゆえ、このモデルが地震時のそれらの挙動を十分に説明できるとは思えない。しかしながら、地盤が剛な場合の入力エネルギーに及ぼす地盤の影響、さらに構造物の吸収エネルギーに及ぼす地盤の影響の定性的傾向に関する基本的情報を得る

Fig. 1 Soil structure system

* 日本マーク株式会社・工博

(昭和56年10月6日原稿受理日・討論期限昭和57年9月末日)

*1 以下、このエネルギーを有効入力エネルギーと呼ぶ。

うえでは十分と考える。

本論で取扱う構造系の振動方程式は次式で表現できるものとする。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + KF(x, \bar{\alpha}, t) = \ddot{y}_E(t, 0) \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし, x : 変位, m : 質量, c : 減衰係数, K : バネ定数, $\ddot{y}_E$: 入力, $\cdot = \partial/\partial t$ で, $F(x, \bar{\alpha}, t)$ は Bilinear 型の復元力特性である。 $\bar{\alpha}$ は第 2 分岐勾配を表わす。尚, x_y を降伏変位, Q_y を降伏強度とする。

また, 構造物基礎底面のせん断力の釣合いは Fig. 1 から次式になる。

$$A \cdot \tau(t, 0) = K \cdot F(x, \bar{\alpha}, t) + c\dot{x} \dots\dots\dots (2.2)$$

但し, A : 構造物基礎の底面積

さらに, 地盤内要素の剪断力の釣合式

$$\tau(t, z) = \mu \cdot \frac{\partial y_E(t, z)}{\partial z} \dots\dots\dots (2.3)$$

を考慮すると, 次のような波動方程式が得られる。

$$\frac{\partial^2 y_E(t, z)}{\partial t^2} = \lambda^2 \cdot \frac{\partial^2 y_E(t, z)}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

(2.3) 式の μ は Lamé の定数であり, (2.4) 式の λ は弾性地盤の剪断波速度である。また地盤密度を ρ とすると, $\mu = \rho \lambda^2$ の関係がある。(2.4) 式の一般解は次式になる。

$$y_E(t, z) = y_U\left(t + \frac{z}{\lambda}\right) + y_D\left(t - \frac{z}{\lambda}\right) \dots\dots\dots (2.5)$$

結局, (2.1), (2.2), (2.5) 式を整理すると, 地盤が弾性の場合の地盤建物連成系の基本振動方程式として次の 3 つの式が得られる²⁾。

$$\left(m + \frac{c}{A\rho\lambda}\right)\ddot{x} + \left(c + \frac{K \cdot F'(x, \bar{\alpha}, t)}{A\rho\lambda}\right)\dot{x} + K \cdot F(x, \bar{\alpha}, t) = 2\ddot{y}_U(t) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\left(m - \frac{c}{A\rho\lambda}\right)\ddot{x} + \left(c - \frac{K \cdot F'(x, \bar{\alpha}, t)}{A\rho\lambda}\right)\dot{x} + K \cdot F(x, \bar{\alpha}, t) = 2\ddot{y}_D(t) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\ddot{y}_U(t) + \ddot{y}_D(t) = \ddot{y}_E(t) \dots\dots\dots (2.8)$$

ただし, $F'(x, \bar{\alpha}, t)$ は x に関する微分を表わす。

振動系が弾性の場合 $\dots\dots F'(x, \bar{\alpha}, t) = 1$

振動系が塑性の場合 $\dots\dots F'(x, \bar{\alpha}, t) = \bar{\alpha}$

(2.6) 式は想定した入力加速度 $2\ddot{y}_U(t)$ を構造物へ入力したとき, 地盤との連成を考慮したときの構造物の応答を求める式である。(2.7) 式はそのときの後退波 $\ddot{y}_D(t)$ を求める式である。(2.8) 式は構造系に有効に入力する構造物基礎底面の加速度 $\ddot{y}_E(t)$ を求める式である。地盤が完全に剛な場合には $\rho\lambda = \infty$ である。

時間 (t_1, t_2) における構造物への入力エネルギー w_E は次式で表わされる。

$$w_E = \int_{t_1}^{t_2} \ddot{y}_E(t) \dot{x}(t) dt \dots\dots\dots (2.9)$$

以後, 確率変数を大文字で表わすものとする。

§3. 履歴振動系における有効入力エネルギーの期待値と分散

入力がホワイトノイズで, 地盤が剛な場合の入力エネルギーの期待値は, 振動系の粘性減衰と固有円振動数に依存しないため, 弾性振動系への入力エネルギーから直接履歴吸収エネルギーを推定することができた。しかしながら, 地盤と建物の連成を考慮したときの有効入力エネルギーは, (2.6) 式の速度の項の係数から分かるように, 復元力の時間微分, すなわち履歴系の復元特性の影響を受けることになる。このような場合に, より簡単に吸収エネルギーの統考量を得る 1 つの方法は, 前報¹⁰⁾と同様に, 共振円振動数 ω_r と等価粘性減衰 β_e を持つ等価線形振動系に置換することである。結局, 次式

$$\ddot{X} + 2\beta_e\omega_r\dot{X} + \omega_r^2 X = \ddot{Y}_E(t, 0)/m$$

から有効入力エネルギーを推定する。この時, 地盤建物連成系の基本方程式は, (2.6)~(2.8) 式と同様に得られ, 次の 3 つの式になる。

$$m\left[1 + \frac{2\beta_e\omega_r m}{A\rho\lambda}\right]\ddot{X} + m\left[2\beta_e\omega_r + \frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}\right]\dot{X} + m\omega_r^2 X = 2\ddot{Y}_U(t) \dots\dots\dots (2.6)'$$

$$m\left[1 - \frac{2\beta_e\omega_r m}{A\rho\lambda}\right]\ddot{X} + m\left[2\beta_e\omega_r - \frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}\right]\dot{X} + m\omega_r^2 X = 2\ddot{Y}_D(t) \dots\dots\dots (2.7)'$$

$$\ddot{Y}_U(t) + \ddot{Y}_D(t) = \ddot{Y}_E(t) \dots\dots\dots (2.8)'$$

入力が確定函数の場合と同じように, 入力がホワイトノイズの場合の地盤建物連成系の基本方程式として, (2.6)'~(2.8)' 式が誘導できるためには, 入力波の変位と速度が微分可能でなければならない。すなわち, 入力加速度 (ホワイトノイズ) の変位と速度が 2 乗平均の意味で有限でなければならない。実際ホワイトノイズの変位と速度の 2 乗平均は有限ではないが, ここでは入力波を有限な周波数領域をもつホワイトノイズと考え, 微分可能と仮定した。

応答時間 (t_1, t_2) における有効入力エネルギーの期待値は (2.8)' 式から式になる。

$$E[W_E] = \int_{t_1}^{t_2} E[(\ddot{Y}_U(t) + \ddot{Y}_D(t)) \dot{X}(t)] dt \dots\dots\dots (3.1)$$

(3.1) 式は, Fig. 1 において進行波 $\ddot{Y}_U(t)$ による入力エネルギーと後退波 $\ddot{Y}_D(t)$ による入力エネルギーの和, すなわち, (2.6)' 式と (2.7)' 式から得られる次の 2 式の和で表わされる。

$$E[\ddot{Y}_U(t) \dot{X}(t)] = m\left[\beta_e\omega_r + \frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}\right] \int_{t_1}^{t_2} E[\dot{X}^2(t)] dt \dots\dots\dots (3.2)$$

$$E[\ddot{Y}_D(t) \dot{X}(t)] = m\left[\beta_e\omega_r - \frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}\right] \int_{t_1}^{t_2} E[\dot{X}^2(t)] dt \dots\dots\dots (3.3)$$

(3.2) 式と (3.3) 式を (3.1) 式に代入すると次式に

なる。

$$E[W_E] = 2m\beta_e\omega_r \int_{t_1}^{t_2} E[\dot{X}^2(t)] dt \dots\dots\dots (3.4)$$

地盤が完全に剛体の場合の定常状態における振動系の 2 乗平均応答は次式になる。

$$E[\dot{X}^2] = \frac{\pi S_0}{2\beta_e\omega_r m^2} \dots\dots\dots (3.5)$$

ただし、 $\omega_0^2 = \frac{K}{m}$: 弾性系の円振動数

地盤と構造系の連成を考えたときの想定した入力波に対する構造系の 2 乗平均応答は、(2.6)' 式から得られる。その値は、(3.5) 式の形式がそのまま適用されるから次式になる。

$$E[\dot{X}^2] = \frac{\pi S_0}{2\beta_e\bar{\omega}_0 m^2} \dots\dots\dots (3.6)$$

ただし

$$\bar{\beta} = \frac{2\beta_e\omega_r + \frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}}{2\bar{\omega}_0 \left(1 + \frac{2\beta_e\omega_r m}{A\rho\lambda}\right)}$$

$$\bar{m} = m \left(1 + \frac{2\beta_e\omega_r m}{A\rho\lambda}\right)$$

$$\bar{\omega}_0^2 = \omega_r^2 \frac{m}{\bar{m}}$$

(3.6) 式を (3.4) 式に代入すると、有効入力エネルギーの期待値が次のように得られる。

$$E[W_E] = \frac{\pi S_0}{m} \cdot (t_2 - t_1) \cdot G_E \dots\dots\dots (3.7)$$

ただし、

$$G_E = \frac{1}{\left(1 + \frac{\omega_r m}{2\beta_e A\rho\lambda}\right) \left(1 + \frac{2\beta_e\omega_r m}{A\rho\lambda}\right)} \dots\dots\dots (3.8)$$

地盤が剛体の場合には、 $\rho\lambda = \infty$ であるから $G_E = 1$ になる。

一方、有効入力エネルギーの 2 乗平均値は (2.8)' 式から次のように表わされる。

$$E[W_E^2] = \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[(\ddot{Y}_U(\tau_1)\dot{X}(\tau_1) + \ddot{Y}_D(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)) \cdot (\ddot{Y}_U(\tau_2)\dot{X}(\tau_2) + \ddot{Y}_D(\tau_2)\dot{X}(\tau_2))] d\tau_1 d\tau_2 \dots\dots\dots (3.9)$$

(3.9) 式は次式になる。

$$E[W_E^2] = \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\ddot{Y}_U(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\ddot{Y}_U(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

$$+ 2 \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\ddot{Y}_U(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\ddot{Y}_D(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

$$+ \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\ddot{Y}_D(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\ddot{Y}_D(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 \dots\dots\dots (3.10)$$

(3.10) 式の第 1 項は、進行波 $\ddot{Y}_U(t)$ による有効入力エネルギーの 2 乗平均値であるから、(2.6)' 式から次式になる。

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\ddot{Y}_U(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\ddot{Y}_U(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

$$= \frac{m^2}{4} \cdot \left(2\beta_e\omega_r + \frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}\right)^2$$

$$\cdot \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

また、第 2 項は (2.6)' 式と (2.7)' 式から

$$2 \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\ddot{Y}_U(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\ddot{Y}_D(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

$$= \frac{m^2}{2} \left[(2\beta_e\omega_r)^2 - \left(\frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}\right)^2 \right]$$

$$\cdot \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

になる。第 3 項は (2.7)' 式から

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\ddot{Y}_D(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\ddot{Y}_D(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

$$= \frac{m^2}{4} \left(2\beta_e\omega_r - \frac{\omega_r^2 m}{A\rho\lambda}\right)^2$$

$$\cdot \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2$$

になる。これらの 3 つの式を (3.10) 式に代入し、さらに積分値の中の期待値の項を展開*2 すると次式になる。

$$E[W_E^2] = (2\beta_e\omega_r m)^2 \cdot \left[\int_{t_1}^{t_2} E[\dot{X}(t)^2] dt \right]^2$$

$$+ 2(2\beta_e\omega_r m)^2$$

$$\cdot \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^{t_2} E^2[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 \dots\dots\dots (3.11)$$

(3.11) 式の $E[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)]$ は地盤特性を考慮したときの定常状態での速度応答 $\dot{X}(t)$ の自己相関関数である。この関数は、(3.6) 式と同様に (2.6)' 式から得られ次式になる。

$$E[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)]$$

$$= \frac{\pi S_0}{2\beta_e\bar{\omega}_0 m^2} \left[e^{-2\bar{\beta}\bar{\omega}_0(\tau_2 - \tau_1)} \cdot \left\{ \cos \bar{\omega}_d(\tau_2 - \tau_1) \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{\bar{\beta}\bar{\omega}_0}{\bar{\omega}_d} \cdot \sin \bar{\omega}_d(\tau_2 - \tau_1) \right\} \right] \quad \tau_2 - \tau_1 \geq 0$$

$$\dots\dots\dots (3.12)$$

ただし、

$$\bar{\omega}_d^2 = (1 - \bar{\beta}^2)\bar{\omega}_0^2$$

$\bar{\beta}$, $\bar{\omega}_0$, $\bar{m}$ は (3.6) 式を参照

(3.12) 式を (3.11) 式に代入し、(3.4) 式の W_E の期待値を考慮すると、有効入力エネルギーの分散は次式になる。

$$V[W_E] = 2\pi S_0 \sigma_{\dot{X}}^2 \cdot (t_2 - t_1) \cdot G_V \dots\dots\dots (3.13)$$

ただし、 $\sigma_{\dot{X}}^2$: 定常状態での速度応答の分散

$$G_V = \frac{1}{\left[1 + \frac{\omega_r m}{2\beta_e A\rho\lambda}\right]^2} \dots\dots\dots (3.14)$$

地盤が剛体の場合には、 $\rho\lambda = \infty$ であるから $G_V = 1$ に

*2 $\dot{X}(t)$ がガウス分布のとき次式が成立する。

$$E[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)\dot{X}(\tau_2)]$$

$$= E[\dot{X}(\tau_1)^2] + 2E[\dot{X}(\tau_1)\dot{X}(\tau_2)]$$

なる。

(3.7) 式の $E[W_E]$ と (3.13) 式の $V[W_E]$ は, Fig. 1 で表わされる地盤建物連成系において, 構造物に有効に入力するエネルギーの期待値と分散である。

地盤が剛体の場合, 構造物への入力エネルギーは地表面に到達する入力加速度が全て有効に入力するエネルギーに等しく, 可能な最大入力エネルギーを意味する。

全ての構造物は地盤と構造の両特性を受けて, 可能な最大入力エネルギー (地盤が剛体の場合の入力エネルギー) の一部が有効入力エネルギーとして入力される。それ故, この両特性がどのように入力エネルギーに効いてくるかを示すパラメーターとして「有効係数」を設定することは有意義なことと考える。従って, 定常応答状態において, 地盤が剛体の場合と弾性体の場合の夫々の入力エネルギーの期待値の比で有効係数を定義する方が合理的であろうと考え, 有効係数 g_E を次式で定義した^{*3}。

$$g_E = \frac{E[\dot{Y}_E(t)\dot{X}(t)]}{E[\dot{Y}(t)\dot{X}(t)]} \quad (3.15)$$

ただし, $E[\dot{Y}_E(t)\dot{X}(t)]$: 地盤が弾性の場合の入力エネルギーの期待値

$E[\dot{Y}(t)\dot{X}(t)]$: 地盤が剛体の場合の入力エネルギーの期待値

この時, (3.15) 式の g_E は (3.8) 式の G_E に等しくなる。さらに, $\beta_e^2 \ll 1$ とすると g_E は次式で近似される。

$$g_E = \frac{1}{1 + \frac{\bar{\omega}_r}{2\beta_e}\kappa} \quad (3.16)$$

ただし,

$$\bar{\omega}_r = \omega_r/\omega_0, \quad \kappa = \frac{\omega_0 m}{A\rho\lambda}$$

入力エネルギーの標準偏差の比で有効係数を定義する場合も考えられるが, この場合は (3.16) 式に等しくなる²⁾。

§4. 履歴吸収エネルギーの統計量

前報と同様に有効入力エネルギーと履歴吸収エネルギーを何等かの関係で結びつけておく必要がある^{5), 6)}。

前報では定常状態での入力エネルギーと吸収エネルギーは一定な比率 $\bar{\mu}$ を有すると仮定した。本報でもこの仮定が成立するとすれば, 履歴吸収エネルギーの期待値と分散は次式になる。

$$E[W_H] = \bar{\mu} E[W_E], \quad V[W_H] = \bar{\mu}^2 V[W_E] \quad (4.1)$$

ただし, $E[W_H], V[W_H]$: 履歴吸収エネルギーの期待値と分散

結局, 地盤經由で構造物に入力したときの吸収エネルギーの統計量も前報同様, 変数 $\omega_r, \beta_e, \sigma_{\dot{X}}^2, \bar{\mu}$ を求める

ことに帰着する。

ホワイトノイズを受ける Bi-linear 系が共振状態にあるときのパワーバランス式は次式になる¹⁰⁾。

$$m\beta\omega_0\omega_r^2r^2 + \frac{m}{2\pi}\omega_0^3r^2\sqrt{\alpha}(1-\alpha)\sin^2\theta^* = E[\bar{W}_E] \quad (4.2)$$

ただし, $E[\bar{W}_E]$: 単位時間当りの有効入力エネルギー

$$\left. \begin{aligned} \theta^* &= \cos^{-1}\left(1 - \frac{2x_y}{r}\right) \quad r > x_y \\ \omega_r^2 &= \omega_0^2 \left\{ \bar{\alpha} + \frac{1-\bar{\alpha}}{\pi} \cdot \left(\theta^* - \frac{1}{2} \sin 2\theta^* \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

そのとき, $\bar{\mu}$ は次式になる。

$$\bar{\mu} = \frac{\omega_0(1-\bar{\alpha})\sin^2\theta^*}{2\pi\beta\omega_r + \omega_0(1-\bar{\alpha})\sin^2\theta^*} \quad (4.4)$$

また, 次の3つの式が成立するものと仮定する¹⁰⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\dot{X}}^2 &= \omega_r^2 \sigma_X^2, \quad \sigma_X^2 = \frac{1}{2} r^2 \omega_r^2 \\ \beta_e &= \frac{2(1-\bar{\alpha})x_y\omega_0^2}{\pi\omega_r^2r^2} (r-x_y) \quad r > x_y \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

(4.2)~(4.5) 式において, 振幅 r をパラメーターにして収束計算を行うと, 夫々の変数 $\omega_r, \beta_e, \sigma_{\dot{X}}^2, \bar{\mu}$ が求まる。

§5. 解析結果の考察

本報告で述べたような地盤-建物連成系の塑性応答量を求める解析手法の妥当性は, 直接的にはシミュレーションによるほかはないが, Fig. 1 のような単純な連成系に関する限り, 地盤が弾性の場合の解析手法として十分である。地盤が剛な場合の塑性応答量を求める解析手法については, すでに前報¹⁰⁾で検証済みである。

Fig. 2 は (3.10) 式で定義される有効係数を図示したものである。実線は非線形性の強い $\bar{\alpha}=0.1$ の場合の図であり, 破線は非線形性の弱い $\bar{\alpha}=0.5$ の場合の図である。入力レベルは無次元パワースペクトル $\bar{S}_0^{*4}$ が 0.075 と 0.175 の2つの場合を計算した。Fig. 3 は (5.1) 式で定義される式を図示したものである。

$$g_W = \frac{\text{地盤が弾性の場合の履歴吸収エネルギーの期待値}}{\text{地盤が剛な場合の履歴吸収エネルギーの期待値}} \quad (5.1)$$

Fig. 2, Fig. 3 の両図ともパラメーター κ の増大と共にほぼ直線的に減少する傾向を示す。この減少の度合は, 非線形性の度合の小さいほど, すなわち $\bar{\alpha}$ の値が大きいほど大きい。また, 入力レベルの小さいほど, 有効係数 g_E の減少の度合が大きい。Fig. 3 の履歴吸収エネルギーと κ の関係式 (5.1) 式も Fig. 2 と同様な傾向を示す。Fig. 2 と Fig. 3 の比較から, パラメーター

*4 無次元パワースペクトル $\bar{S}_0$ と有次元パワースペクトル S_0

は次式で関係づけられる。 $\bar{S}_0 = \frac{\omega_0 S_0}{\alpha_y^2}$ (α_y : 降伏加速度)

*3 この有効係数は, 星谷が定義した有効係数を入力ホワイトノイズの場合に適用したものである²⁾。

Fig. 2 Effect of the κ on the parameter g_E Fig. 3 Effect of the κ on the parameter g_W

κ の増大と共にパラメータ g_E と g_W が減少する度合は Fig. 3 の方が大きい。結局、地盤と建物の連成効果が非線形性の度合を表わす $\bar{\alpha}$ の値が大きいほど、構造物の損傷に直接関係する履歴吸収エネルギーの抑制に有利に作用する。この傾向は入力レベルの小さいほど大きい。また、Fig. 2 の一点鎖線は地盤-弾性構造物連成系の有効係数

$$g_E = \frac{1}{1 + \frac{mK}{A\rho\lambda c}} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ただし、 K, c は (2.1) 式で定義される。

を図示したものである。このように有効係数 g_E が減少する傾向は、 κ の増大による地盤逸散減衰の増大の結果であると推定される。また、(3.16) 式からもこのような傾向は明らかであり、同様な結果が文献 8), 9) にも指摘されている。

地盤が剛な場合に構造系に入力されるエネルギーは、

Fig. 4 Effect of the $\bar{\alpha}$ on the parameter g_E Fig. 5 Effect of the $\bar{\alpha}$ on the parameter g_W

(3.16) 式において $\rho\lambda = \infty$ とすると、 $g_E = 1$ となるから入力エネルギーの最大、すなわち総入力エネルギー E_T である。地盤特性、構造特性の影響を受けて総入力エネルギーの一部が有効入力エネルギーとして構造系に入力される。構造系の降伏加速度がある程度高く、応答が弾性範囲内に留まる場合には、この有効入力エネルギーは構造系の粘性減衰による吸収エネルギーによって消費される。それゆえ、Fig. 2 の一点鎖線で表わされる g_E の値は、 E_T に対する粘性減衰による吸収エネルギーの比であり、又 $1 - g_E$ の値は、 E_T に対する地盤特性や構造特性によって逸散されるエネルギーの比の最大値に相当する。

Fig. 4, Fig. 5 は構造系の非線形性の度合を表わす $\bar{\alpha}$ とパラメータ g_E と g_W の関係を図示したものである。図から分かるように、 $\bar{\alpha}$ の増大と共に両パラメータは直線的に減少する傾向を示す。非線形性が弱いほど、すなわち $\bar{\alpha}$ が大きいほど入力エネルギーと履歴吸収エネルギーの抑制に有利に働らく。また、このような両パラメータの減少の傾向は g_E に比べて g_W の方が大きい。これは、粘性減衰によって消費される吸収エネルギーに及ぼす地盤と構造の両特性の影響は履歴吸収エネルギーに影響に比べて小さいことを意味する。

§ 6. 結 論

Fig. 1 のような単純な地盤建物連成系がホワイトノイズを受けたときの塑性応答量を求める解析手法を論じ、同時に弾性地盤という条件のもとで、入力エネルギーと塑性応答量に及ぼす構造特性と地盤特性の影響を検討した。結論を要約すると次のようになる。

(1) 地盤が剛体の場合の入力エネルギーの期待値に対する地盤が弾性体の場合の入力エネルギーの期待値の比として有効係数 g_E を定義した。この式は、おのこの場合の入力エネルギーの標準偏差の比とほとんど同じである。

(2) 地盤と建物の連成効果は、非線形性の度合を表わす $\bar{\alpha}$ の増大と共に g_E と g_W の両パラメータを直線的に減少させ、有効入力エネルギーと履歴吸収エネルギーの抑制に有利に働らく。この傾向は入力レベルの小さいほど大きい。

(3) g_E と g_W の両パラメータに及ぼす地盤特性と構造特性の影響の度合は、 g_E に比べ g_W の方が大きい。

なお、本報告で述べた結論は、Fig. 1 のような単純な連成系に関するものであるという条件を受けるのはもちろんである。

参 考 文 献

- 1) 山原 浩：「エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答」, 日本建築学会論文報告集, No. 187, 昭和46年9月
- 2) 星谷 勝, 山崎武文：「地震動エネルギーに基づく応答解

- 析」, 土木学会論文報告集, No. 291 号, 昭和54年11月
- 3) 田治見宏：「山原の論文“エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答”に対する討論」, 日本建築学会論文報告集, No. 193, 昭和47年3月
- 4) 富沢 稔ほか：「“エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答”論文に対する若干の質疑」, 日本建築学会論文報告集, No. 193, 昭和47年3月
- 5) 洪 起, 田中 尚：「ホワイトノイズを受ける1自由度系の履歴吸収エネルギー」, 日本建築学会論文報告集, No. 270 号, 昭和53年8月
- 6) 洪 起：「確率論手法による構造物の必要塑性応答量解析」, 第1報「non-white noise を受ける1自由度系の履歴吸収エネルギー」, 日本建築学会論文報告集, No. 289 号, 昭和55年3月
- 7) 岡本舜三：「耐震工学」, オーム社
- 8) 小堀鐸二, 井上 豊, 河野允宏, 前田幸典：「地盤構造物連成系のランダム応答」, 日本建築学会論文報告集, No. 255 号, 昭和52年5月
- 9) 小堀鐸二, 浅野幸一郎：「ランダム外乱を受ける地盤履歴系の動的解析」, 日本建築学会論文報告集, No. 300 号, 昭和56年2月
- 10) 洪 起：「履歴構造物の耐震安全性解析」, 日本建築学会論文報告集, No. 309 号, 昭和56年8月

SYNOPSIS

UDC : 624.042.7 : 620.1

PROBABILISTIC INVESTIGATION FOR THE PLASTIC RESPONSE OF SOIL-STRUCTURE SYSTEM

by Dr. GI HONG, Member of A.I.J.

This paper describes an analytical method to estimate the plastic response in simple soil-structure system subjected by white noise, and the effect of the soil condition on input energy and plastic response in hysteretic structures is discussed.