

熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 熊本大学工学部 学生員 古賀 淳一
 熊本大学工学部 学生員 大塚 茂広

1. まえがき 動的な荷重の作用する地中あるいは地表面上の構造物の設計には、地盤のはね剛性が分っているといふと便利であるが、通常は静的な地盤係数やばね定数で代用することが多い。最近ようやく離散化地盤に適した境界条件（低塑性境界）がいくつか提案されるに^{1)~6)}戻んで、地中での波動の遠散性を考慮した線形解析が行なえるようになった。だが、大変形・大荷重の作用時の非線形・遠散性が同時に考慮された解析は未だ十分ではない。そこで本研究では、地盤の応力-歪関係の非線形性を等価線形化して取扱ひ、準線形問題に置きかえ地盤の水平複素ばね剛性について解析した。加振点より離れた低塑性境界では、上下（鉛直）のせん断ばねのみが所伏することを確認されたので、Lysmerらの境界条件を適用して、地盤内の応力の再配分を行なっている。

2. 解析手法 FIG. 1 の内部領域 (I) の運動方程式は次式のように書ける。

$$[M]_I \{\ddot{\Psi}\}_I + [K]_I \{\Psi\}_I = \{F\}_I + \{T\}_L + \{T\}_R \quad \text{----- (1)}$$

ここに 添字 I は領域 I 内の物理量あるいは状態量を表わすものとし、

$[M]_I$: 質量, $[K]_I$: 剛性, $\{F\}_I$: 荷重, $\{\Psi\}_I$: 水平 (x 軸方向) 変位であり、 $\{T\}_L$, $\{T\}_R$: 左右の境界に加えるべき境界力。

なお、復元力 R は FIG. 2 のように履歴性を有しているため、一般には (1) 式の左辺第 2 項のような形に書き変えられないが、本研究では定常調和振動をしている時に、復元力 R' は等価粘性減衰係数 C_e および等価ばね係数 k_e でも、次式のように表わせると仮定している；

$$R' = C_e \dot{\delta} + k_e \delta = [i\omega C_e(\delta_0) + k_e(\delta_0)] \delta_0 \exp(i\omega t) \quad \text{----- (2)}$$

ここに δ , $\dot{\delta}$: 相対変位, 相対速度であり、 δ_0 : 相対変位振幅である。

$$\left. \begin{aligned} C_e &= \frac{4}{\pi\omega} k_1 \left(1 - \frac{k_2}{k_1}\right) \frac{\delta_1}{\delta_0} \left(1 - \frac{\delta_1}{\delta_0}\right) \Pi(\delta_0 - \delta_1) \\ k_e &= k_1 - k_1 \left(1 - \frac{k_2}{k_1}\right) \left(1 - \frac{\delta_1}{\delta_0}\right) \Pi(\delta_0 - \delta_1) \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (3)}$$

ただし、 $\Pi(\)$ は step function である。

そこで (1) 式を定常調和振動の形に書き直すと

$$(-\omega^2 [M]_I + [K]_I + [L] + [R]) \{\bar{\Psi}(i\omega)\}_I = \{\bar{F}(i\omega)\}_I \quad \text{----- (4)}$$

ここに、 $[L]$, $[R]$: 左右境界での境界マトリックスであり、次式で与えられる。

$$[L] = [A]_L [Q]_L [H]_L [Q]_L^T [A]_L^T, [R] = [A]_R [Q]_R [H]_R [Q]_R^T [A]_R^T \quad \text{----- (5)}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} k_1 & \\ & k_2 \end{bmatrix} = [k]_H, [H] = \begin{bmatrix} 1 - \exp(i\omega a) & \\ & 1 - \exp(i\omega a) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -i\omega a & \\ & -i\omega a \end{bmatrix}, (0 < a \ll 1 \text{ とする}) \quad \text{----- (6)}$$

であり、 $[k]_H$ はせん断応力 τ_{xz} より得られるせん断ばね剛性、また $[H]$, $[Q]$ は波数とモ-デルマトリックスであり、地盤全体が一樣な自由せん断振動をしている状態と得られる。すなわち、ある k 列目の柱状地盤について

$$[M]_k \{\ddot{\Psi}\}_k + \{T\}_k = \{0\} \quad \text{----- (7)}$$

ここに $\{T\}_k$ は τ_{xz} に相当する復元力であり、 x の正方向への低塑性に対して $\{\Psi\}_k = \{\Psi\}_{k-1} \cdot \exp(-i\omega a)$ より

$$\{T\}_k = [k]_V \{\Psi\}_k + [k]_H (2\{\Psi\}_k - \{\Psi\}_{k-1} - \{\Psi\}_{k+1}) = [k]_V \{\Psi\}_k + [2 - \exp(i\omega a) - \exp(-i\omega a)] [k]_H \{\Psi\}_k$$

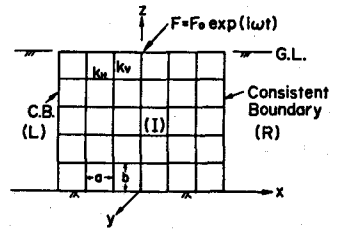


FIG. 1 FINITE DYNAMIC MODEL

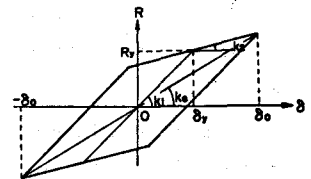


FIG. 2 BILINEAR STRESS-STRAIN CURVE

$$\cong ([k]_v + (\alpha a)^2 [k]_h) \{ \psi \}_h \quad \text{------(8)}$$

ただし, $[k]_v$ はせん断応力 τ_{xz} より得られるせん断ばね剛性で, $[k]_v = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix}$ ------(9)

(8)式を(7)式に代入して整理すると, 次の波数と固有モードに関する方程式をうる。

$$([C] - (\alpha a)^2 [A]) \{ \psi \}_h = \{ 0 \} \quad \text{------(10)}$$

ただし, $[C] = \omega^2 [M]_h - [k]_v$, $[A] = [k]_h$ ------(11)

(10)式より 波数 $k_1, k_2, \dots, k_n$ およびモードマトリクス $[Q] = [Q_1, \dots, Q_n]$ をうるが, FIG. 3 の計算例で見ると, 加振点より離れた左右の境界では鉛直方向の応力 (τ_{xz}) のみが降伏し, 水平方向の応力 (τ_{xy}) は降伏しないので, 線形として計算した時の応力値 (FIG. 2 の復元力) が降伏応力 R_y を越えた場合は等価はねに置き換えて, 全体の応力の再配分を行なえばよいことになる。上記の降伏の違いは, 外力の振動数 ω が地盤の固有振動数 ($\omega_1 = 2.846 \text{ rad/sec}$, ----) に近いときは, 全層一様な共振状態に近づくため, 水平方向への伝播が起こりにくくなることによるものと思われる。加振点の周りの地盤には相当大きな力 (あるいは変形) が強制されるので, τ_{xz} , τ_{xy} ともに降伏しやすくなっている。一方基礎面には常時大きなせん断力が働くため, τ_{xz} は降伏しやすい状態にあり, 建物のベースシェーの關係に類似している。

簡単のため, 数値計算例として地表面を点加振した場合を対象にしている。FIG. 4 の (a) は複素ばね $K = K_1 + iK_2$ の実数部を示しているが, 当然のことながら入力レベルに依存している。入力レベル F_0 と降伏応力 R_y の比 $F_0/R_y > 2$ で線形よりの筋が顕著に現われ出し, K_1 の低下のため共振点の位置が低周波数側へ移動することが示されている。同図 (b) は K の虚数部 K_2 を示したものであるが, 共振点近傍では遠散しない波動エネルギーを τ_{xz} の履歴特性が消費するため, かなり減衰効果が期待されることが分る。しかし, F_0/R_y の増大とともに K_1 と同様に K_2 も全般的に低下する傾向にあるが, これは必ずしも減衰効果が低下することではないことは, 同図 (c) での位相特性によって示される。全般的には遠散のみの場合 (実線) より, 遠散・履歴の共存の場合 (点線) の方が位相差は大きく, それだけ減衰効果は大きいと考えられる。

何らかの方法で, 実地盤での微小振動測定より遠散効果を考慮した地盤のばね剛性が算出されたときは, 同地盤の土の一面せん断試験での応力-歪履歴曲線の結果と組み合わせることにより, 現地盤の大振動時の復元力特性を予測しうることが理論的には可能であることが示された。その他の数値計算結果と考察については講演時に述べる予定である。

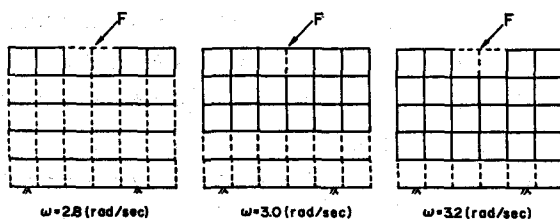


FIG. 3 ILLUSTRATION OF YIELDED SPRINGS (Dotted Lines) ($\omega = 2.846 \text{ rad/sec}$, ($F_0/R_y = 3$))

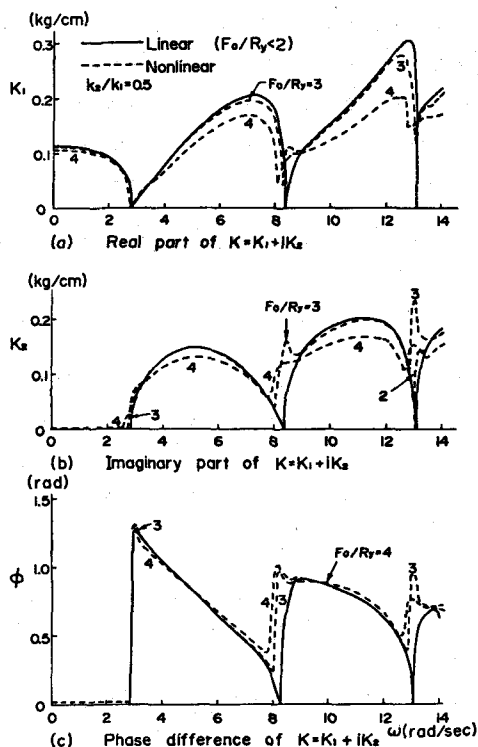


FIG. 4 COMPLEX STIFFNESS OF SOIL

参考文献 1) Lysmer, J. et al, Joul. of EM Div., ASCE, Vol. 95, No. EM4, Aug., 1969, pp. 897-907, 2) Lysmer, J., Bull. of SSA, Vol. 60, No. 1, Feb., 1970, pp. 97-104, 3) Lysmer, J. et al, Joul. of EM Div., ASCE, Vol. 98, No. EM1, Feb., 1972, pp. 95-105, 4) 田嶋 宏・下村 寿男, 日本建築学会論文報告集, 第243号, 1976, S, pp. 41-51, 5) Kausel, E. et al, Joul. of EM Div., ASCE, Vol. 103, No. EM4, Aug., 1977, pp. 567-578, 6) Akiyoshi, T., Joul. of EM Div., ASCE, Vol. 104, No. EM5, Oct. 1978, pp. 1253-1269