

熊本大学工学部

正員 〇秋吉 卓

八代工業高等専門学校

正員 瀬田邦彦

1. まえがき 基礎構造物の動特性については、Lysmerらの伝播境界^{1),2)}の導入によって、多くの解析が可能となり、かつその成果も挙がりつつある。一方、定常調和振動における履歴非線形性は等価化されるときは、単なるばねとダッシュポットに置き換えられるが、通常の有限要素解法において応力-歪関係等を等価化することはそれほど容易ではない。そこで本研究では、川井の提案したRBS要素³⁾を用いて、基礎構造物の複素ばね剛性を求め、検討を行なってみた。このRBSモデルでは、応力-歪関係が極めて単純であり、ばねは剛体要素間の接触面にしか存在しないので、非線形・破壊の取扱いに適しているようである。

2. 解析手法 通常の有限要素法と同様のエネルギー理論より要素間の剛性マトリックス $[K]$ 、および各要素重心の質量マトリックス $[M]$ が導かれ、同様の定式化がなされるが、ここでは省略する(文献3)参照)。

このときFIG.1のような系の運動方程式は、次式のように書ける。

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

ここでは、2次元平面モデル(FIG.1)を考えているので、 $\{x\}$ は水平・上下・回転変位に関するベクトルであり、 $\{F\}$ は外力ベクトルである。さらに $\{F\}_L$ 、 $\{F\}_R$ はモデル地盤の左右伝播境界の境界力であるが、境界要素の幅 a が小さいときは近似的に、水平・上下・回転境界力 $\{x\}_B$ 、 $\{y\}_B$ 、 $\{m\}_B$ の間の連成は無視され、定常調和振動時は次式の形に書き表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \{x\}_B &= [D]_x [a]_x [H]_x [a]_x^T [D]_x \cdot \{u\}_B \\ \{y\}_B &= [D]_y [a]_y [H]_y [a]_y^T [D]_y \cdot \{v\}_B \\ \{m\}_B &= [D]_m [a]_m [H]_m [a]_m^T [D]_m \cdot \{\phi\}_B \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 $[D]$ 、 $[a]$ 、 $[H]$ は各々、境界の剛性マトリックス、モーダルマトリックスおよび変換マトリックス(対角)であり、各成分ごとに異なる値をとる。また $\{u\}_B$ 、 $\{v\}_B$ 、 $\{\phi\}_B$ は境界の水平・鉛直・回転変位ベクトルであり、添字Bは左方境界(L)または右方境界(R)の各れがをとる。

したがって、(2)を用いて境界力 $\{F\}_L$ 、 $\{F\}_R$ を次式のように書き表わす。

$$\{F\}_L = [L]\{x\}_L, \quad \{F\}_R = [R]\{x\}_R \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $\{x\} = \{x\}_0 \exp(i\omega t)$ 、 $\{F\} = \{F\}_0 \exp(i\omega t)$ なる定常振動を考えると、(3)を(1)に代入することにより、次の関係を得る。

$$(-\omega^2 [M] + [K] - [L] - [R])\{x\}_0 = \{F\}_0 \quad \text{----- (4)}$$

ところで(4)は入出力の振幅の関係を与えるので、構造物の重心点における(FIG.1参照)水平・回転変位を X 、 ϕ とし、頂部に作用する水平力 F および回転モーメント M に対する複素ばね剛性を各々 K_{xx} 、 $K_{x\phi}$ および $K_{\phi x}$ 、 $K_{\phi\phi}$ とすると、これら入出力の関係は次式のように表わされよう。

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{x\phi} \\ K_{\phi x} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} \quad \text{----- (5)}$$

したがって、 F 、 M が単独に作用したときの変位を X_1 、 ϕ_1 ； X_2 、 ϕ_2 とすると、複素ばね剛性 K_{xx} 、 $K_{x\phi}$ 、 $K_{\phi x}$ 、 $K_{\phi\phi}$ は次の連立方程式の解として得られる。

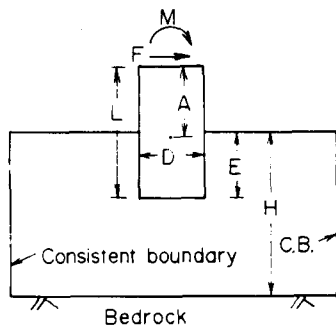


FIG.1 地盤と基礎構造物モデル

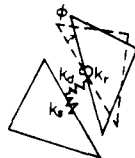


FIG.2 RBS 平面要素

..... Tension crack
 ----- Yielded spring
 ——— Linear spring

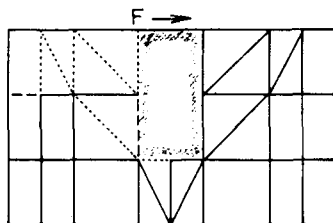
(b) $F_0/Ga = 3.33 \times 10^{-3}$

FIG.3 降伏したばねの例

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{x\phi} \\ K_{\phi x} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ \phi_1 & \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \quad \text{---- (6)}$$

ただし、 A は作用点と重心までの長さである。
さらに、モーメントを発生しないように F を作用させたときの、水平・回転はば剛性を K_s および K_ϕ とすると、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_s &= K_{xx} - \frac{K_{x\phi} K_{\phi x}}{K_{\phi\phi}} \\ K_\phi &= K_{\phi\phi} - \frac{K_{x\phi} K_{\phi x}}{K_{xx}} \end{aligned} \right\} \quad \text{---- (7)}$$

ところで、非線形地盤では相反作用は成立しないので、一般的には $K_{x\phi} \neq K_{\phi x}$ であり、両者の差は F, M の大きさに依存する。

3. 数値計算結果 ここでは二次元平面モデルを扱うとしているが、興行幅の長い基礎構造物を対象にした場合に相当する。解析上は興行幅を $1m$ としている。また無次元振動数 $a_0 = a\omega/V_s$ (a : 代表長, ω : 円振動数, V_s : 横波の伝播速度) の a は $2m$ としている。また地盤の剛性は深さとともに漸増させた。

FIG. 3 では基礎の後方に引張破壊が生じているが、この程度の荷重では前方にすべりは発生していない。FIG. 4 以降では K_s, K_ϕ は次式のように実部・虚部に分解されている。

$$\left. \begin{aligned} K_s &= K_{s0} (k_1 + i a_0 c_1) \\ K_\phi &= K_{\phi 0} (k_2 + i a_0 c_2) \end{aligned} \right\} \quad \text{---- (8)}$$

ただし、 $K_{s0}, K_{\phi 0}$ は静的 ($\omega=0$) の値である。
FIG. 4 は土の粘性減衰が剛基礎に与える効果を示しているが、 K_s, K_ϕ は減衰定数 c_1, c_2 が小さいと ω に対する変動が非常に激しくなる。また K_s に比べて K_ϕ の ω に対する低下は著しくないが、この傾向は Veletsos⁵⁾ や Kausel⁶⁾ の結果なるが、考察は講演時に仰ずる。

参考文献 1) Lysmer, J. et al, Joul. of EM Div., ASCE, Vol. 95, No. EM 4, Aug., 1969, pp. 859-877, 2) Lysmer, J. et al, Joul. of EM Div., ASCE, Vol. 98, No. EM 1, Feb., 1972, pp. 85-105, 3) 川井忠孝, 「生研セミナー」, コース 39: 物理モデルによる連続体力学諸問題解析, 生産技術研究奨励会, 1978.10, 4) 土坂豊三他, 土木学会論文報告集, 第291号, 1979.1, pp. 29-40, 5) Veletsos, A.S. et al, Joul. of SM-F Div., ASCE, Vol. 97, No. SM 9, Sep., 1971, pp. 1227-1248, 6) Kausel, E. et al, Joul. of EM Div., ASCE, Vol. 101, No. EM 6, Dec., 1975, pp. 771-785.

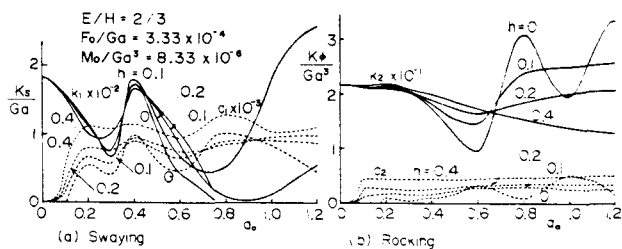


FIG. 4 粘性減衰の効果 (剛基礎)

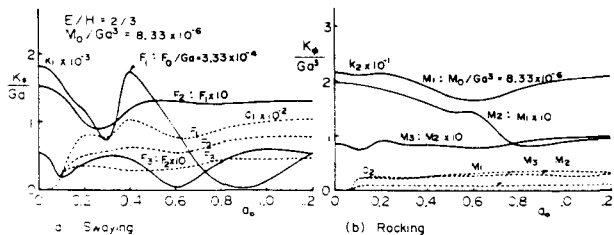


FIG. 5 履歴非線形性の効果 (剛基礎)

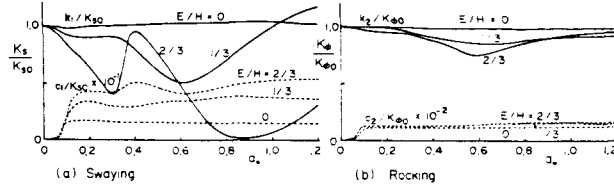


FIG. 6 根入れ効果 (剛基礎)

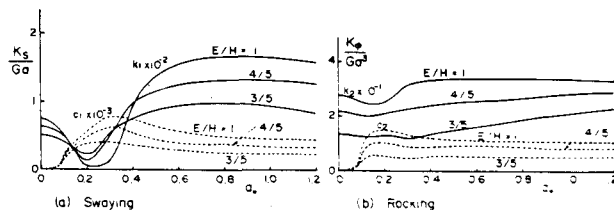


FIG. 7 根入れ効果 (柔基礎)

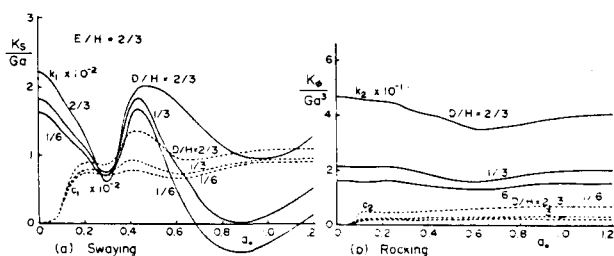


FIG. 8 底面幅の効果 (剛基礎)

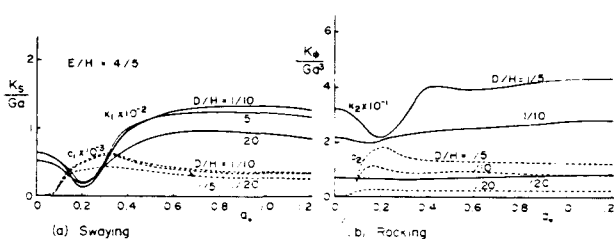


FIG. 9 底面幅の効果 (柔基礎)