

剛基礎の面外非線形挙動について

岡山大学工学部 正員 廣瀬壮一

1. まえがき 地盤と構造物のインターフェイスでは滑りや剥離などの非線形現象が卓越し、その動的挙動は複雑になるものと考えられる。また、免震構造物の設計においては強震時における免震部分の動的な非線形挙動を解明する必要がある。このような背景のもとに、本研究では、境界要素法を用いて非線形バネで支持された2次元表面剛基礎の動的解析を試みた。

2. 基礎式 Fig.1に示すように、 $-a < x_1 < a$, $x_2=0$, $-\infty < x_3 < \infty$ なる半無限表面S上にある質量のない剛基礎が単位奥行き当たり $f_0 H(t)$ なる面外力を受けるものとする。(H(t):ステップ関数) 基礎と地盤はバネによって連結されており、そのバネは非線形挙動を示すものとする。

$w(x, t)$ を点x, 時刻tにおける地盤D内の変位とするとwは次の波動方程式を満足する。

$$\nabla^2 w = c^{-2} \partial^2 w / \partial t^2, \quad c = \sqrt{\mu / \rho} \quad (1)$$

ただし、 μ はせん断剛性、 ρ は密度、 c は波速を表わす。wを積分表現すると次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \int_{\tau/c}^t \int_S \{U(x, y; \tau) v(y, t - \tau) - T(x, y; \tau) \dot{w}(y, t - \tau)\} ds_y d\tau \\ = \begin{cases} w(x, t) & x \in D \cup S \\ 0 & x \notin D \cup S \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)におけるvは表面力であり、U、Tは次式で与えられる基本解である。

$$U(x, y; \tau) = \frac{1}{2\pi\rho c} \left(\frac{1}{\sqrt{(c\tau)^2 - r^2}} + \frac{1}{\sqrt{(c\tau)^2 - r'^2}} \right) \quad (3)$$

$$T(x, y; \tau) = -\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\partial r}{\partial n(y)} \frac{c\tau}{r\sqrt{(c\tau)^2 - r^2}} + \frac{\partial r'}{\partial n(y)} \frac{c\tau}{r'\sqrt{(c\tau)^2 - r'^2}} \right) \quad (4)$$

ただし、 $r = |x - y|$, $r' = |x - y'|$ ($y': y$ の x_1 軸に関する鏡像点)であり、 $n(y)$ はy点における法線を表わす。境界S上での境界条件は次のように表わされる。

$$f_0 H(t) = \int_S v(y, t) ds_y \quad (5)$$

さらに、表面力vは剛基礎の変位Wと地盤の変位wの差(W-w)の関数となる。例えば、バネが線形の場合は、

$$v(x, t) = k(W(t) - w(x, t)) \quad (6)$$

となる。もし、バネがFig.2に示すような非線形性を示すならば、バネ定数kを時々刻々変化させて計算を進めればよい。

3. 数値解析結果 式(2), (5), (6)を離散化し、連立させると、地盤変位wと剛基礎の変位Wを未知数とする連立一次方程式を構成することができる。地盤そのものは線形性を保っているの、式の離散化は通常の線形弾性波動の解析の場合と全く同様に行なえる。ここでは、時間軸を一定の間隔 $c\Delta t/a = 0.04$ で離散化し、境界Sを50個の一定要素に分割した。また、変位w、Wは時間に関しては一次関数で、空間に関しては一定要素を用いて離散化し、表面力vは時間に関しては階段関数で、空間に関しては変位と同様、一定要素により補間した。なお、剛基礎に作用する面外力の大きさは $f_0 = a\mu$ とした。

Fig.3はいくつかの時間ステップにおける境界S上の表面力vの分布を示したものである。左右対称

であるので、 $0 < x_1 < a$ における右半分の範囲での結果を示している。用いたバネはFig.2に示したような完全塑性型の非線形特性を持つもので、弾性域におけるバネ定数は $a k / \mu = 100$ であり、降伏力は $v_{cr} / \mu = 0.6$ と仮定した。Fig.4はバネが線形である場合の表面力分布をFig.3と同様に示したものである。両者を比較すると、バネが弾性の場合には、基礎端部において応力の特異性が見られるのに対して、非線形バネの場合にはバネが降伏して表面力が境界S上に平均的に分布することが解る。Fig.5は線形、および非線形バネで支持された剛基礎の変位 W の時間変化をプロットしたものである。非線形バネの場合はバネが降伏するため大きい変位を示している。

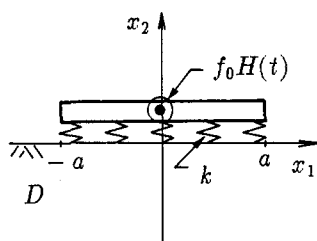


Fig.1 Model.

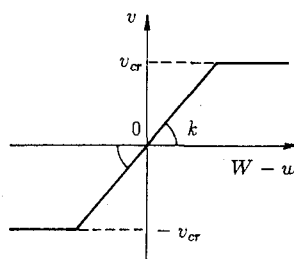


Fig.2 Nonlinear behavior of a spring.

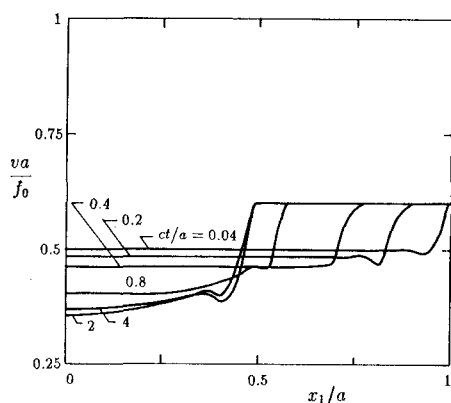
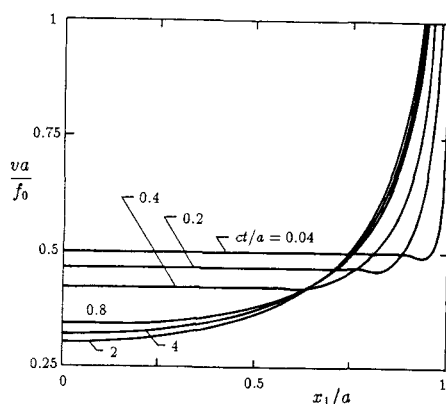
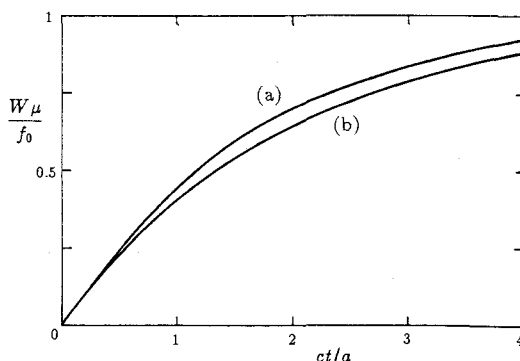
Fig.3 Traction distribution at a soil-foundation interface; Nonlinear linear spring with a $k / \mu = 100$ and $v_{cr} / \mu = 0.6$.Fig.4 Traction distribution at a soil-foundation interface; Linear spring with a $k / \mu = 100$.

Fig.5 Displacement of a foundation versus time. (a) Nonlinear spring; (b) Linear spring.