

神戸大学工学部

正員 中山 昭彦

神戸大学工学部

学生員 ○横山 陽子

1. はじめに

地盤の動的相互解析を波動理論に基づいて行う場合、一般に地盤を弾性体や粘弾性体にモデル化するが、飽和地盤の動力学特性を解明するには水の影響を考えないわけにはいかない。そのため本研究では、Biot⁽¹⁾が示した土粒子と間隙水の連成運動を考慮した複合モデルに基づいてGarg⁽²⁾らが導いた運動方程式に、差分法を適用し数値計算を行う。既に1次元飽和地盤の解析は行われているため、今回2次元飽和地盤での波動伝播及び地表面の影響を見ることを目的とする。

2. 解析方法

図-1の2次元x-y座標系における一様な飽和地盤に点加振力が作用する場合を考える。飽和地盤は空隙を有する土と空隙を完全に満たす水で構成されるものとする。

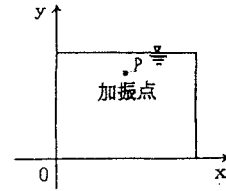


図-1 座標系

このとき、地盤と水の運動方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\begin{aligned}\rho_0^{(1)} \frac{\partial^2 u_x^{(1)}}{\partial t^2} &= \left(\frac{\partial \sigma_{xx}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(1)}}{\partial y} \right) + D \frac{\partial}{\partial t} (u_x^{(2)} - u_x^{(1)}) \\ \rho_0^{(1)} \frac{\partial^2 u_y^{(1)}}{\partial t^2} &= \left(\frac{\partial \sigma_{xy}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{(1)}}{\partial y} \right) + D \frac{\partial}{\partial t} (u_y^{(2)} - u_y^{(1)}) - g \rho_0^{(1)} \\ \rho_0^{(2)} \frac{\partial^2 u_x^{(2)}}{\partial t^2} &= \left(\frac{\partial \sigma_{xx}^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(2)}}{\partial y} \right) - D \frac{\partial}{\partial t} (u_x^{(2)} - u_x^{(1)}) \\ \rho_0^{(2)} \frac{\partial^2 u_y^{(2)}}{\partial t^2} &= \left(\frac{\partial \sigma_{xy}^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{(2)}}{\partial y} \right) - D \frac{\partial}{\partial t} (u_y^{(2)} - u_y^{(1)}) - g \rho_0^{(2)}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 u は変位、 σ は応力成分、 ρ_0 は密度を表し、肩文字(1)、(2)はそれぞれ地盤、水の値、 g は重力加速度を示す。

また、応力成分は次のように表される。

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{(1)} &= (a - 2\mu_r) \left(\frac{\partial u_x^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(1)}}{\partial y} \right) + c \left(\frac{\partial u_x^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(2)}}{\partial y} \right) + 2\mu_r \frac{\partial u_x^{(1)}}{\partial x} \\ \sigma_{xx}^{(2)} &= \mu_r \left(\frac{\partial u_x^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(1)}}{\partial y} \right) \\ \sigma_{xy}^{(1)} &= (a - 2\mu_r) \left(\frac{\partial u_x^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(1)}}{\partial y} \right) + c \left(\frac{\partial u_x^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(2)}}{\partial y} \right) + 2\mu_r \frac{\partial u_y^{(1)}}{\partial y} \\ \sigma_{xx}^{(2)} &= \sigma_{yy}^{(2)} = c \left(\frac{\partial u_x^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(1)}}{\partial y} \right) + b \left(\frac{\partial u_x^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(2)}}{\partial y} \right) \\ \sigma_{xy}^{(2)} &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、 a 、 μ_r は複合体のラーメ定数、 b は水の圧縮合成に関する係数、 c は地盤と水の間に起こる相互作用に関係する連成係数である。今回(1)式(2)式における係数は以下の値を用いた。 $\rho_0^{(1)} = 2.1812 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、 $\rho_0^{(2)} = 0.18 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、 $a = 2.754 \times 10^{11}$ 、 $b = 3.393 \times 10^9 \text{ (dyn/cm}^2\text{)}$ 、 $c = 9.278 \times 10^9 \text{ (dyn/cm}^2\text{)}$ 。

この式に2次精度陽解法であるMac Cormack法を用いて数値計算を行い、 x 方向 y 方向への変位を求める。まず、数値計算の精度を把握するために初期条件として $x=2$ での $u_x^{(1)} = u_x^{(2)} = 1$ として1次元的な扱いを

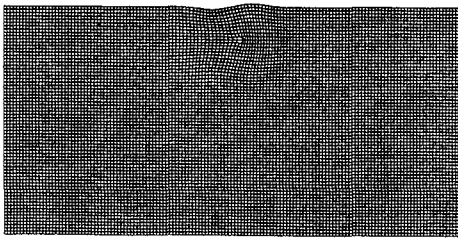
行い、Gargらが求めた解析計算と比較する。図-2は $D=0.219 \times 10^3$ (g/cm³s)の地盤での $x=0.1$ (m)の地点での伝播速度と時間の関係を示す。地盤、水ともに数値計算の伝播速度が解析計算に比べて小さくなっており、また若干始点も早くなっている。しかし波形はほぼ同じであり、波の伝達を調べる今回の研究には影響がないものとする。

3. 結果と考察

地表の影響を見るため、境界条件として $\sigma_{xy}^{(1)} = \sigma_{yy}^{(1)} = \sigma_{yy}^{(2)} = 0$ とし、また地表面では地盤と水のy方向変位は等しいと仮定した。図-3に高粘性地盤 ($D=0.219 \times 10^6$)での地盤の波動を示す。この図よりx方向へは圧縮波がy方向へはせん断力による回転性波が伝わっていき時間とともに全体へ広がっていくことがわかる。これは縦波、横波の両方が存在することを示す。地表のy方向への山が(a)にはみられ(b)ではx方向へ移動しているが、その振幅は加振点から離れるにつれ小さくなっている。図-4に低粘性地盤 ($D=0.219 \times 10^2$)の $t=6 \times 10^{-7}$ (sec)のときの地盤と水の動きを示す。1次元の高粘性地盤において、地盤と水は一体となって動くためほぼ同じ波動をしていることがわかってるが2次元の場合、せん断応力は地盤にのみ働くため、地盤と水は少し異なる動きをすることがわかる。

参考文献 1)Biot, M. A. : Theory of Propagation of Elastic Waves in a fluid-saturated Porous Solid, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, pp. 168-178. 2)Garg, S. K., Nayfeh, A. H., and Good, A. : Compressional Waves in fluid-saturated erastic polous media, J. Appl. Phys., 45, pp. 1968-1974.

(a) $t=4 \times 10^{-7}$ (sec)



(b) $t=6 \times 10^{-7}$ (sec)

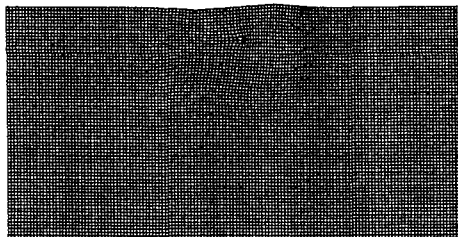


図-3 時間による変化

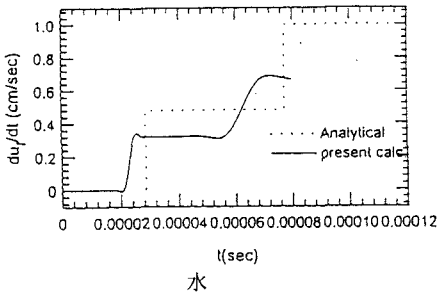
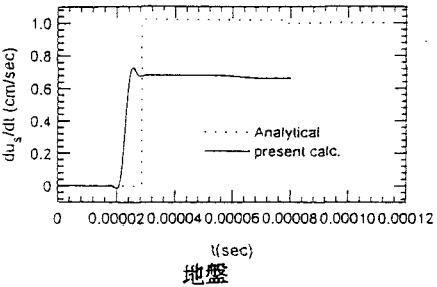
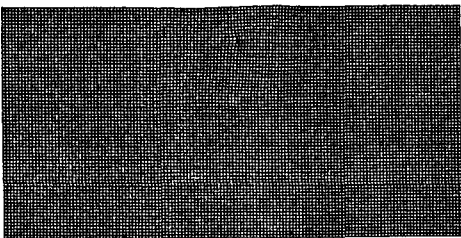


図-2 解析計算と数値計算の比較

(a)地盤 $t=4 \times 10^{-7}$ (sec)



(b)水 $t=4 \times 10^{-7}$ (sec)

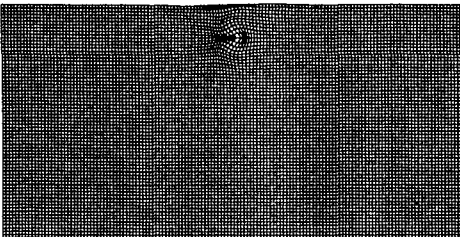


図-4 地盤と水の波動の違い