

熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 八代工業高等専門学校 正員 淵田 邦彦
 熊本大学大学院 学生員 ○方 火浪

1. まえがき 液状化に代表される、水で飽和した多孔質媒体の動的問題は有限要素法などの数値解法が主体であるが、非線形問題となることが多く、そのため多くの要素分割したがって多変数で時間領域で解かねばならないため種々の困難に直面している。本解析では、固液2相系の無限領域を等価な有限領域に近似する粘性境界を $u-w$ の定式化で導き、数値解析より上述問題への有効性を示した。

2. 解析手法⁽¹⁾ Biotの多孔質媒体理論⁽²⁾を基にした、固体-液体相の運動方程式と間隙流体の動的釣合に対する一般化されたDarcy則は次のように書ける。⁽³⁾

$$L^T \sigma + \rho b = \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w} \quad (1)$$

$$-\nabla p + \rho_f b = \rho_f \ddot{u} + \rho_f / n \ddot{w} + \dot{w} / k \quad (2)$$

ただし、 u, w は固体相の変位と間隙流体の相対変位、 σ は全応力、 b は体積力、 n は空隙率、 ρ, ρ_f は固液混相体と間隙流体の密度、 $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$ 、 ρ_s は固体粒子の密度、 k は等方透水係数。一方、線形等方弾性体の応力-歪は次式となる。

$$\sigma = D\varepsilon - \alpha m^T p, \quad p = -\alpha Q m^T \varepsilon - Q \zeta \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon = Lu$ および $\zeta = \nabla^T w$ は、固体の歪と間隙流体の体積歪、 D は排水下の材料剛性マトリクス、 $m^T = (1, 1, 1, 0, 0, 0)$ 、 $\alpha = 1 - K_d / K_s$ 、 $1/Q = n/K_f + (\alpha - n)/K_s$ 、 K_s, K_f は固体および間隙流体の体積弾性率、 K_d は固体骨格の体積弾性率。

式(1)-(3)のFourier変換をした後、波数に関する1次近似のみを取り上げると、逆変換後ではFig. 1の仮想境界上の点Pにおけるインピーダンスは、次の時間領域における表示となる(： $u-w$ 定式化)。

$$\sigma = -\frac{\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q}{V_1} \dot{u}_z - \frac{\alpha Q}{V_1} \dot{w}_z$$

$$\sigma_{zx} = -\frac{\mu}{V_3} \dot{u}_x, \quad \sigma_{zy} = -\frac{\mu}{V_3} \dot{u}_y, \quad V_3 = \sqrt{\mu/\rho}$$

$$p = \frac{\alpha Q}{V_1} \dot{u}_z + \frac{Q}{V_1} \dot{w}_z, \quad V_1 = \sqrt{(\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q)/\rho}$$

ただし、 z 方向は、Fig. 1の境界外向きを正方向とし、波動は、 P_1 波(圧縮波；伝播速度 V_1)、 P_2 (ρ, V_2)、 S 波(せん断波； V_3)が存在するが、 P_2 波は減衰が著しいため、ここでは無視している。

ここで、Fig. 2のような粘性境界面に入射する2次元平面調和波 P_1 波、 P_2 波および SV 波を考える。このときポアソン比 $\nu = 0.2$ 、 $Q/\mu = 26.664$ とする。Fig. 3は、粘性境界における全反射波(P_1, P_2, SV)と入射波の有効エネルギーの比(境界面直角成分)である。速度の遅い波が入射すると臨界角が存在するが、平均的にはこの2相系の粘性境界は P_1 波、 P_2 波及び SV 波の入射に対してそれぞれ92%、87%、84%の吸収能力があることを示している。

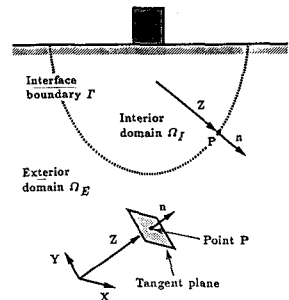


Fig. 1 Typical infinite media

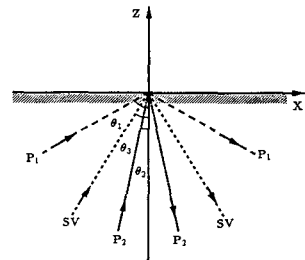


Fig. 2 Incident plane waves on absorbing boundary

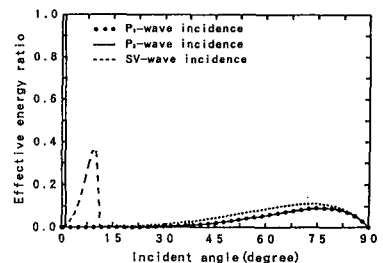


Fig. 3 Effective energy ratio for incident plane waves

同様に、 u - U および u - p による定式化も可能である。

3. 数値計算例 飽和多孔質体の動的解析ではFEMプログラムNUW2⁽⁴⁾を使用し、Newmark法で数値解析した。

〔1次元問題〕 既存の解析解⁽⁵⁾と比較するためそれと同じ物性値を用いた。荷重は、Fig. 4のように、ステップ荷重で、表面では排水可能とし、100mの深さのところに粘性境界と比較のために固定境界を設置している。

Fig. 5と6より、深さ45mの地点の変位と間隙水圧に関しては、粘性境界による数値解と解析解とは良く一致しているのに対し、固定境界では時間とともに食い違いが増大する。

〔2次元問題〕 Fig. 7のように、 8×8 要素を解析対象領域とし、その境界に粘性境界条件を適用している。荷重は、矩形半波とし、比較のための参照解としては 20×20 要素（側方固定境界）の反射波が対象領域に戻ってくる前のものを用いている。Fig. 8と9はそれぞれ解析領域中のB点の鉛直変位と間隙水圧の時刻歴で、物性値は $\lambda = 83.3 \text{ kPa}$, $\mu = 125 \text{ kPa}$,

$K_s = 1.0 \times 10^8 \text{ kPa}$, $K_r = 1.0 \times 10^3 \text{ kPa}$, $\rho = 1.7 \text{ t/m}^3$, $\rho_r = 1.0 \text{ t/m}^3$, $k = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^4/(\text{N} \cdot \text{s})$, $n = 3.0$, $\alpha = 1.0$ である。図より、粘性境界による数値解は、参照解にはほぼ追従しているのに対し、固定壁では反射波の影響が大きく実用性に乏しい。

4. おわりに これまでBiotの固液2相混合体理論に基づく無限領域での飽和多孔質体の動的解析のために、時間領域での u - w 定式化による粘性境界条件について検討してきた。数値計算例によって、提案する粘性境界は反射波を十分に吸収して、過渡的な動的問題にも耐え得ることが示された。

参考文献：(1) T. Akiyoshi, K. Fuchida & H. L. Fang, Absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media, Int. J. SDEE (投稿中). (2) M. A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a water-saturated porous solid, parts I & II, J. ASA, 28, 168-191, 1956. (3) O. C. Zienkiewicz & T. Shiomi, Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solutions, Int. J. NAMG, 8, 71-96, 1984. (4) T. Akiyoshi, K. Fuchida, H. Matsumoto, T. Hyodo & H. L. Fang, Liquefaction analysis of sandy ground improved by sand compaction piles, Int. J. SDEE, 12, 299-307, 1993. (5) B. R. Simon, O. C. Zienkiewicz & D. K. Paul, An analytical solution for the transient response of saturated porous elastic solid, Int. J. NAMG, 8, 381-398, 1984.

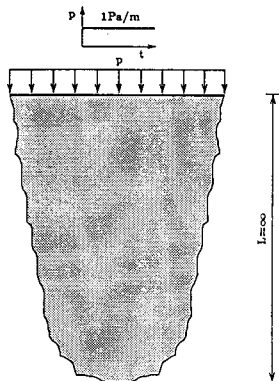


Fig. 4 One-dimensional transient dynamic problem

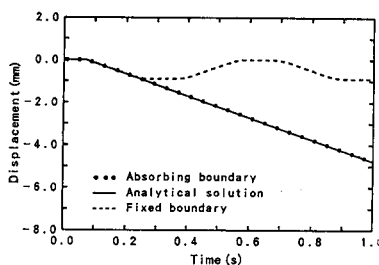


Fig. 5 Time histories of displacements for one-dimensional transient dynamic problem

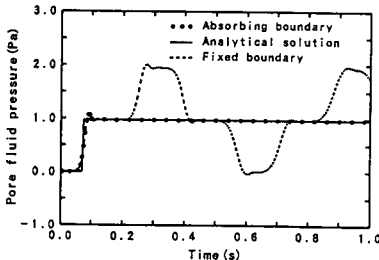


Fig. 6 Time histories of fluid pore pressures for one-dimensional transient dynamic problem

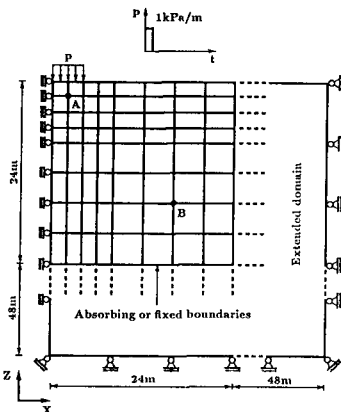


Fig. 7 Two-dimensional transient dynamic problem

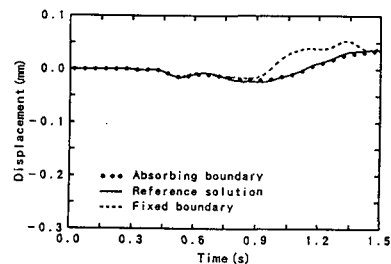


Fig. 8 Time histories of vertical displacements for two-dimensional transient dynamic problem

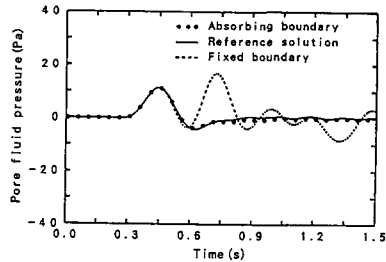


Fig. 9 Time histories of fluid pore pressures for two-dimensional transient dynamic problem