

土-水 2 相系の吸収境界の非線形モデルへの適用性

熊本大学大学院 学生員○野口豊剛
 熊本大学工学部 正 員 秋吉 卓
 八代工業高等専門学校 正 員 瀧田邦彦
 熊本大学大学院 学生員 孫 遜

1. はじめに 地盤のような複雑な系の動的解析を行う際は、離散系として無限領域を有限領域として扱うため、その境界処理方法が重要な問題となる。本研究では、水で飽和した多孔質媒体の動的解析における仮想境界での吸収境界条件を、時間領域で定式化し^{1),2)}、これを2次元非線形有効応力解析プログラム「NUW2」³⁾に組み込み、不整形地盤モデルを用いて吸収境界の適用性を自由境界の場合と比較検討する。

2. 解析手法 Biotの多孔質媒体理論に基づき、固体-液体混相体の運動方程式と、間隙流体の動的釣合による一般化されたDarcy法則は次式のように書ける^{4),5)}。

$$L^T \sigma + \rho b = \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w}, \quad -\nabla p + \rho_f b = \rho_f \ddot{u} + (\rho_f / n) \ddot{w} + \dot{w} / k \quad (1)$$

ただし、 u と w はそれぞれ固相の変位と間隙水の相対変位、 $w = n(u - U)$ 、 U は間隙水の変位、 σ は全応力、 b は体積力、 p は間隙水圧、 n は空隙率、 L は微分演算子、 ρ と ρ_f はそれぞれ固液混相体と間隙水の密度、 $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$ 、 ρ_s は固体粒子の密度、 k は等方透水係数。

式(1)のFourier変換を行い、波数に関する0次近似のみを取り上げると、逆変換後はFig.1のインターフェース境界上の点Pにおける、時間領域のインピーダンス表現が可能となる。すなわちFig.1の境界 Ω_E の接平面に直交する局所直交座標(2次元平面)を採用すると、 $u-w$ 定式化²⁾では、内部領域の波動に対する吸収境界条件を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= -(\rho V_1) \dot{u}_z - (\alpha Q / V_1) \dot{w}_z \\ \tau_{zx} &= -(\rho V_3) \dot{u}_x, \quad \tau_{zy} = (\rho V_3) \dot{u}_y \\ p &= (\alpha Q / V_1) \dot{u}_z + (Q / V_1) \dot{w}_z \end{aligned} \quad (2)$$

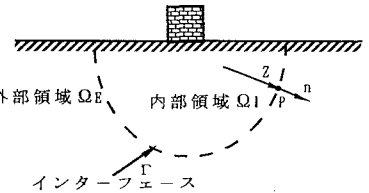


Fig.1 無限領域モデル

ただし、 $\alpha = 1 - K_d / K_s$ 、 $1/Q = n / K_f + (\alpha - n) K_s$ 、 K_s と K_f はそれぞれ固体と間隙水の体積弾性係

数、 K_d は固体骨格の体積弾性係数である。また、 $V_3 \equiv \sqrt{\mu / \rho}$ 、 $V_1 \equiv \sqrt{(\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q) / \rho}$ とし、 z 方向は、Fig.1の境界外向きを正とする。ここで減衰の著しい P_2 波は省略している。式(2)による境界条件と、自由領域の解による境界条件とを重ね合わせることで、有限要素プログラムに組み込むことができる²⁾。さらに、弾性係数 λ, μ の時刻変化がわかれば、非線形問題に適用できる³⁾。

3. 数値計算例 飽和多孔質媒体の動的解析は、2次元有効応力解析プログラム「NUW2」^{1),2),3)}を用い、数値積分はNewmarkの β 法によった。ここでは、Fig.2のような2次元不整形地盤モデルを解析対象領域とし、不整形部の両側左右の平行層地盤長をそれぞれ(l_1, l_r)とすると、傾斜角度(θ)および最大加速度の変化による影響を波形のくい違い誤差として評価し、吸収境界条件の適合性を自由境界モデルと比較検討する。

【吸収境界と自由境界の比較】Fig.2の剛基盤よりエルセントロ波(1940, NS成分, 最大0.2g)を、平面SV波として入射させた。Table 1は解析に用いた材料定数である。Fig.3は、Fig.2の両側平行部の長さ $l_1 = l_r = 50\text{m}$ の場合のA点における、吸収境界および自由境界を持った地盤の水平方向変位の応答波形である。A点での側方境界からの反射波をなくすために平行地盤長を1000mの長さとした地盤モデル(自由境界条件)の場合の応答を参照解としたが、その応答波形を破線で示している。自由境界の条件では、参照解と振幅にかなりのくい違いがあり、境界での反射波の影響が現れていると考えられる。一方、吸収境界条件の場合の応答波形は、参照解とほぼ同様な波形となっており、自由境界条件の場合に比べて吸収境界は十分に効果を発揮していることがわかる。

【最大加速度の変化による影響】Fig.4は、数値解析の精度を検討するため、Fig.3と同様の解析対象ポイント(Fig.2のA点)において、提案する吸収境界条件と自由境界条件のそれぞれの水平方向変位応答と参照解のそれとのくい違い相対誤差をR.M.S. ($[\sum (X_i - Y_i)^2 / N]^{\frac{1}{2}}$; X_i : 応答波形, Y_i : 参照解, N : 対象時間区間)として求め、参照解の最大応答値との比として示したもので、それらを入力の前最大加速度の変化に対して示している。提案する吸収境界の場合は、自由境界よりも誤差が十分に小さく、境界処理の効果が現れており、

吸収境界は、大きな加速度入力に対しても適用可能であるといえよう。

【平行地盤長、傾斜角度の変化による影響】 Fig. 5 は、Fig. 4 と同様、吸収境界条件の場合の水平方向変位応答と参照解との違いの相対誤差の R. M. S. を示したもので、傾斜角度をパラメータとして、不整形部両側の平行地盤層の長さに対して示したものである。傾斜角度が大きい場合は誤差 R. M. S. も大きくなるが、平行地盤を長くすれば誤差は減少し、提案する吸収境界条件は、様々な不整形地盤において十分適用可能といえる。

4. まとめ 飽和多孔質媒体の動的問題における、時間領域での吸収境界条件を 2 次元非線形有効応力解析に組み込んだ数値解析による検討の結果、提案手法が地盤の液状化と不整形性にも十分適用可能であることを示した。

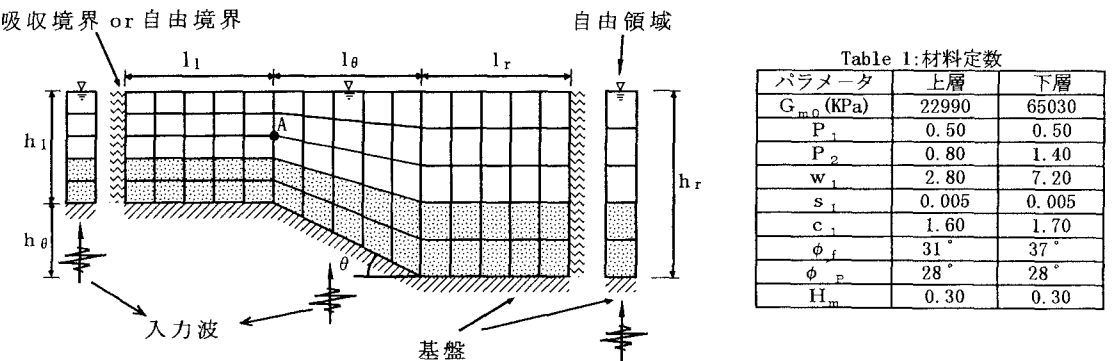


Fig. 2 2次元不整形モデル

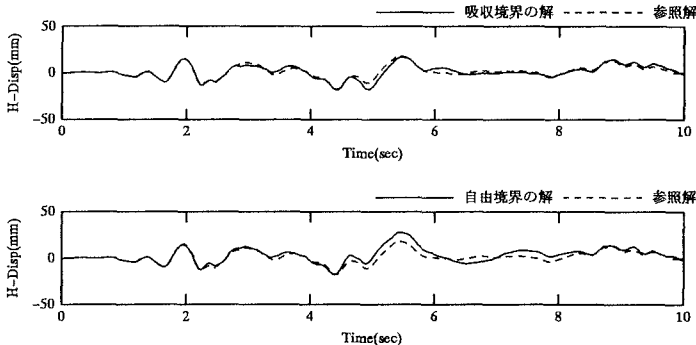


Fig. 3 水平方向変位の応答波形 ($\theta=0.5$, $l_1=l_r=50m$)

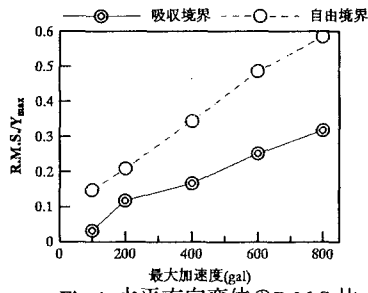


Fig. 4 水平方向変位のR.M.S.比

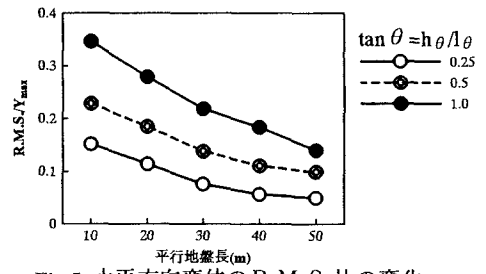


Fig. 5 水平方向変位のR.M.S.比の変化 (吸収境界)

参考文献 1) 秋吉他, 平成 6 年度土木学会年次学術講演会概要集, I, pp. 1306-1307, 1994. 2) Akiyoshi, T. et al, Soil Dyn. and Earthq. Eng., 13 (6), pp. 387-397, 1994. 3) Akiyoshi, T. et al, Soil Dyn. and Earthq. Eng., 125, pp. 299-307, 1993. 4) Biot, M. A., J. of Acoustic. Soc. Ame., 28, pp. 168-191, 1956. 5) Zienkiewicz, O. C. & Shiomi, T., Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 8, pp. 71-96., 1984.