

(79) 液状化解析における吸収境界条件の有効性

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
鉄建建設	正員	尻無濱昭三
熊本大学大学院	学生員	後藤賢史

1. はじめに 水で飽和した多孔質媒体の動的解析は、液状化に代表されるように、時間領域の非線形問題となるため解析上種々の困難を伴う場合が多い。本研究では、飽和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、時間領域での粘性境界条件として定式化^{1),2)}、これを非線形FEM有効応力解析³⁾に組み込んで、境界処理を考慮した有限領域の液状化解析手法として提案する。非線形有限要素モデルの数値計算により提案手法の有効性を検討した。

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)}。

$$\left. \begin{aligned} L^T \sigma + \rho b &= \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w} \\ -\nabla p + \rho_f b &= \rho_f \ddot{u} + (\rho_f/n) \ddot{w} + \dot{w}/k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、ドットは時間微分で、ベクトル・マトリックス・テンソルは通常の表記法に従う；

$$\begin{aligned} \sigma^T &= (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \\ u^T &= (u_x, u_y, u_z), \quad w^T = (w_x, w_y, w_z) \\ b^T &= (b_x, b_y, b_z) \\ \nabla^T &= (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z) \\ L^T &= \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \end{aligned}$$

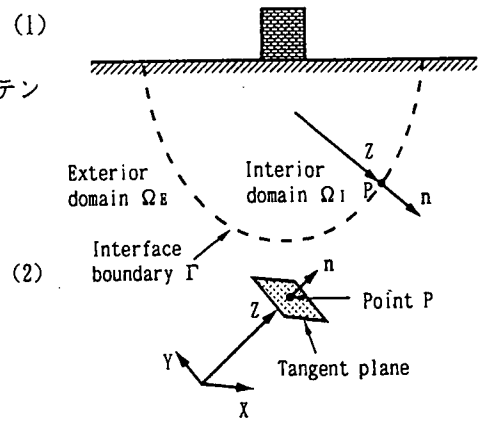


Fig.1 Typical infinite media

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、 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。一方、線形等方弾性体の応力-ひずみは次式で書ける。

$$\sigma = D\varepsilon - \alpha m p \quad (3)$$

$$p = -\alpha Q m^T \varepsilon - Q \zeta \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon = Lu$ と $\zeta = \nabla^T w$ はそれぞれ固体のひずみと間隙水の体積ひずみ、 D は排水状態の材料剛性マトリックス、 $m^T = (1, 1, 1, 0, 0, 0)$ 、 α と Q は材料に関連する定数で次の関係がある；

$$\alpha = 1 - K_d/K_s, \quad 1/Q = n/K_f + (\alpha - n)/K, \quad (5)$$

ただし、 K_s と K_f はそれぞれ固体と間隙水の体積弾性係数(率)、 K_d は固体骨格(骨組)の体積弾性係数(率)である。式(1)、(2)のFourier変換を行い、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($u-w$ 定式化)²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz} &= -[(\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q)/V_1] \dot{u}_z - (\alpha Q/V_1) \dot{w}_z \\ \sigma_{zx} &= -(\mu/V_3) \dot{u}_x \\ \sigma_{zy} &= -(\mu/V_3) \dot{u}_y \\ p &= (\alpha Q/V_1) \dot{u}_z + (Q/V_1) \dot{w}_z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} V_3^2 &\equiv \mu/\rho \\ V_1 &\equiv \sqrt{(\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q)/\rho} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし、 z 方向は、Fig.1の境界外向きを正とし、波動は、 P_1 波(体積波；伝播速度 V_1)と S 波(せん断波； V_3)が存在する。減衰マトリクスを用いて境界でのトラクションを表わせば、領域内への外力として、式(5)の粘性境界条件を有限要素プログラムに組み込むことができる²⁾。

3. 数値計算例 飽和多孔質媒体の動的解析は、液状化解析のために著者らが開発している有効応力解析プログラムNUW2³⁾を用いた。数値積分はNewmark法によった。前報^{1),2)}で、半無限飽和多孔質体の表面を鉛直加振する問題により、本解析手法の有効性を示した。ここでは、剛基盤より表層へランダム波が入射する問題に本解析手法を適用し、検討する。

[2次元平行層モデル] Fig.2のような、 5×5 要素を解析対象領域とし、側方境界に提案する粘性境界を設置して剛基盤よりEl Centro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は粘性境界条件を設置したモデルのB点におけるそれぞれ変位、加速度及び間隙水圧応答であり、Fig.4は、Fig.2の右側の2次元柱状モデルの繰り返し境界による応答で、 5×5 要素の2次元モデルの参照解である。Fig.3, Fig.4より両者はほぼ同等な結果となっており、液状化のような非線形解析において、本研究の粘性境界条件は妥当な結果を与えることがわかる。

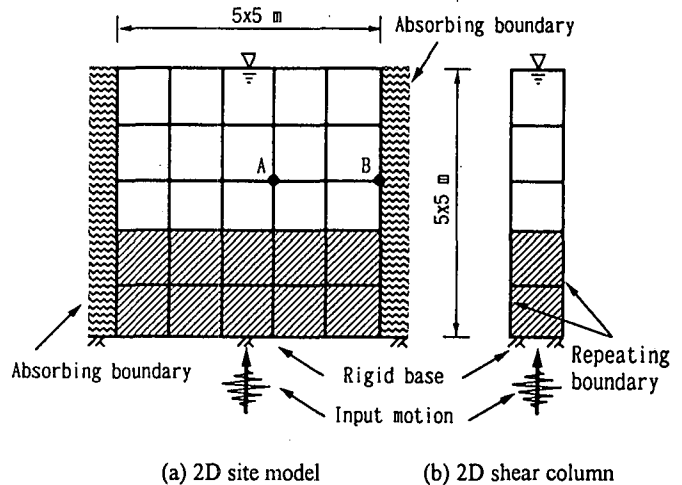


Fig.2 2D site model and 2D shear column model

Table 1: Soil for liquefaction analysis

Parameters	Upper layer	Lower layer
G_{m0} (kPa)	22990	65030
ρ_1	0.50	0.50
ρ_2	0.80	1.40
w_1	2.80	7.20
s_1	0.005	0.005
c_1	1.60	1.70
ϕ_r	31°	37°
ϕ_o'	28°	28°
H_m	0.30	0.30

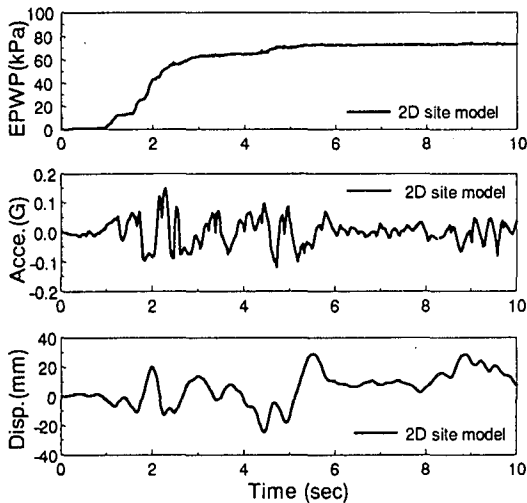


Fig.3 Responses of 2D site model

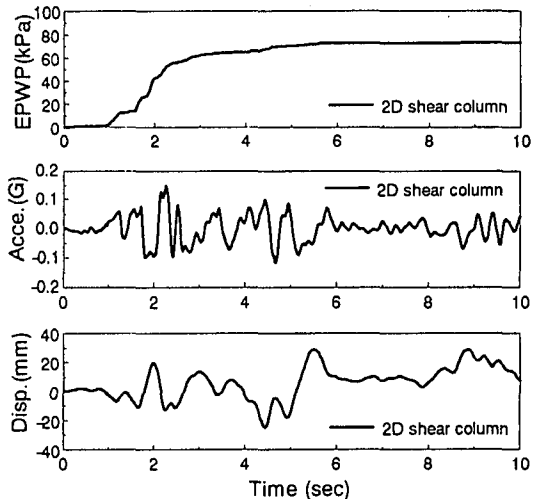


Fig.4 Responses of 2D shear column

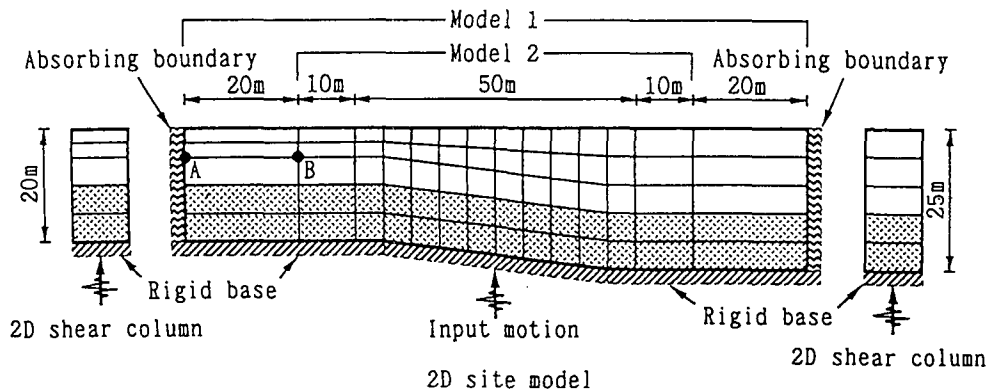


Fig.5 2D site model with irregular boundary

[2次元不整形モデル] Fig.5は、傾斜した基盤とその両側に平行な表層が連なる不整形地盤モデルであり、Model 1は両側の平行部の長さを35m、Model 2は15mとしている。Fig.6,7は、地盤及び入力Fig.2と同様の条件で解析したときの、Model 1, 2のそれぞれ点A, Bにおける変位及び間隙水圧応答の結果を示している。Fig.6,7より、当然のことながら両側平行部が長いModel 1の結果が、2次元柱状モデルの解に近くなることがわかる。またFig.8はModel 1において側方を自由境界とした場合の、Fig.9は側方境界を固定した場合の同様の結果である。Fig.6,8より、自由境界の場合は、変位応答に参照解との大きな差が生じるのに対し、本研究で提案する吸収(粘性)境界条件は変位応答においても十分適用可能となることがわかる。一方、Fig.9の固定境界の場合、境界での反射波の影響で、参照解である2次元柱状モデルの結果と全く異なる波形が示されているが、吸収境界条件を用いたFig.6の結果は、変位及び間隙水圧応答ともに参照解とほぼ一致しており、本研究で提案する吸収(粘性)境界条件は、液状化解析に十分適用可能といえる。

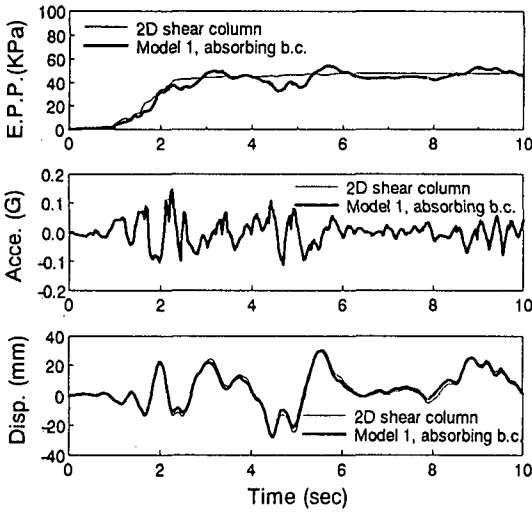


Fig.6 Responses (Model 1, point A, absorbing b.c.)

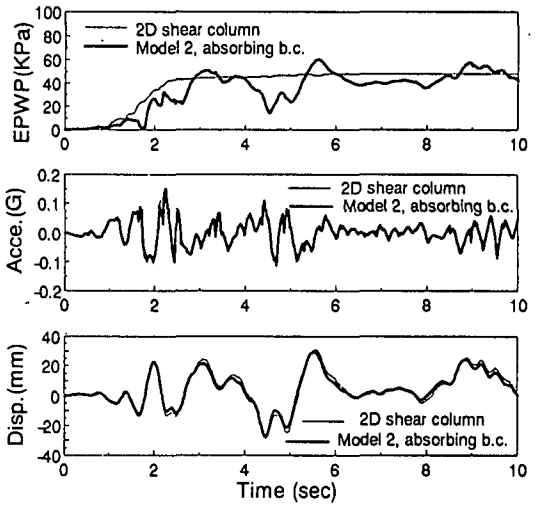


Fig.7 Responses (Model 2, point B, absorbing b.c.)

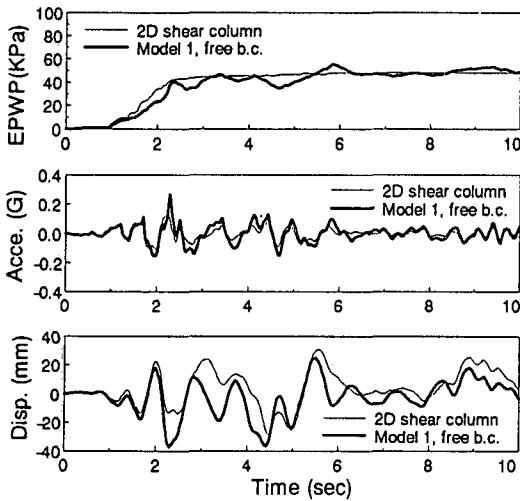


Fig.8 Responses (Model 1, point A, free boundary)

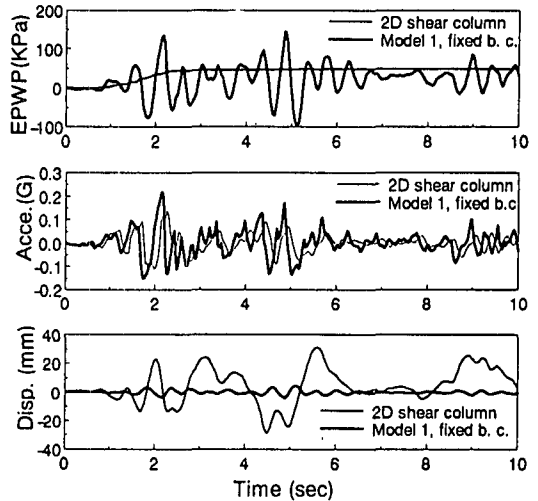


Fig.9 Responses (Model 1, point B, fixed b.c.)

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(粘性)境界条件を導いた。これを2次元FEM有効応力解析に組み込み、数値解析による検討の結果、提案する吸収(粘性)境界条件が非線形な動的問題に適用可能であることを示した。

参考文献 1)秋吉他, H 6年度土木学会年次学術講演会概要集, 1, 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., 12-5, pp.299-307, 1993. 4) Biot, M.A., J. of Acoust. Soc. Ame., 28, pp.168-191, 1956. 5) Zienkiewicz, O.C. & Shiomi, T., Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 8, pp.71-96., 1984.