

2 相系地盤における波動吸収境界の 誤差評価

秋吉 卓¹・孫 遜²・瀧田邦彦³

¹正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

²学生会員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科 博士課程学生 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

³正会員 工博 八代工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒866-8501 八代市平山新町2627)

Biotの2相混合体理論とパラキシャル0次近似に基づいて、時間領域での $u-w$ 定式化として導かれていた、水で飽和した多孔質媒体の波動問題における吸収境界条件を、2次元有効応力解析プログラムに組み込み、2次元不整形地盤モデルに地震波が入力する場合の表層地盤の応答より、提案する吸収境界条件の妥当性を検討した。結果的に、提案する吸収境界条件が飽和多孔質媒体の非定常かつ非線形問題にも十分適用可能であることを示し、その精度と有効性を確認した。

Key Words : *absorbing(viscous) boundary conditions, Biot's 2-phase mixture theory, fluid-saturated porous media, paraxial approximation, liquefaction, far-field*

1. 結 論

土質動力学や地震工学の分野では、水で飽和した多孔質弾性体の動的解析は依然として重要な問題である。Biot¹⁾ が最初に飽和多孔質媒体の動的解析手法を確立して以来、これが他の多くの研究者に用いられてきたが、通常は時空間の離散化を伴う数値解析手法によって実行されてきた。固体-液体の連成問題の動的解析では、Ghaboussi・Wilson²⁾, Zienkiewicz・Shiomi³⁾, Prevost⁴⁾, Simonら⁵⁾は独特の有限要素モデルを用いており、それらの解析ではモデルにおける複雑な幾何学性、不均質性及び非線形性が考慮されている。しかしながら、単相媒体に応用される有限要素法に比べると、この2相媒体の計算では間隙水に関する自由度が追加されるので、相当な労力が要求される。また計算コストを下げるためには、計算対象の2相系モデルは有限な領域に限定される。したがって、有限領域の2相系モデルに無限領域での放射条件を持たせる特別な境界処理技術が必要となる。

単相媒体の動的解析では、これまでいくつかの手法が提案されてきているが、Lysmer・Waas⁶⁾の伝達境界は線形問題には確かに有効である。しかしながら、これらの方法は周波数依存形であるため、時間領域における非線形解析には応用できない。過渡的な問題では、Lysmer・Kuhlemeyer⁷⁾, Whiteら⁸⁾, 秋吉⁹⁾が

粘性境界を、またSmith¹⁰⁾は境界での反射を防ぐため、重複境界を提案している。Clayton・Engquist¹¹⁾は波数または分散性の近似的な取扱いであるパラキシャル(paraxial)境界を提案し、波動の入射角度による吸収能力を検討している。

水で飽和した多孔質媒体の動的解析では、Modarelli・Benzenati^{12),13)}は $u-p$ 定式化³⁾による吸収境界要素を提案し、パラキシャル近似次数ごとの吸収境界条件を示し、初等的な線形問題についてその有効性を示している。Degrande・De Roeck¹⁴⁾は $u-w$ 定式化³⁾による吸収境界を提案したが、周波数領域における定式化のため非線形問題への拡張が困難と思われる。以上のように2相系の吸収境界条件を非線形解析に適用して検討した例はとくに見られない。

著者らは、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導き、これより時間領域での粘性境界を提案した¹⁵⁾。この導出のプロセスは、最初にBiotの定式化の一般解をフーリエ変換形で導き、その後、局所的・過渡的インピーダンスを求めるため、パラキシャル0次近似でもって波数を簡略化することにより、粘性境界条件の時間領域表現を得るものである。この境界条件は、 $u-w$, $u-U$ 及び $u-p$ 定式化³⁾の何れにも対応する近似的解析解として得られており、これを組込んだ線形・非線形有限要素解析例より提案手法の有効性を文献に示した¹⁶⁾。すなわち、従来の有限要素解析で境界処理が検討さ

れているのと同様に、内部加振問題及び外部加振問題で波動の吸収処理について検討し、その妥当性を示している。本論文では、この手法を2次元不整形地盤モデルに適用して、無限領域に相当する地盤モデルの結果を参照解として、有限領域に吸収境界条件を用いた場合と用いない場合（自由境界条件）の応答値との誤差を定量化して比較し、有限領域の長さ、地盤構造及び入力波などの各種パラメータが提案する境界条件の波動吸収効果に及ぼす影響を検討するものである。

2. 運動方程式と吸収境界条件

(1) 運動方程式

飽和した多孔質媒体の微小ひずみに対する運動方程式として Biot¹⁾の方程式を利用する。ここで多孔質媒体は固体相と間隙水相からなる混相体とし、間隙水の加速度は固相のそれに比して小さいとして質量連成（付加質量）の効果は無視する。このとき固体-液体混相体の動的釣合方程式と間隙水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³⁾。

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

ここに、上辺の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っている；

$$\left. \begin{aligned} \sigma^T &= (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \\ u^T &= (u_x, u_y, u_z), \quad w^T = (w_x, w_y, w_z) \\ b^T &= (b_x, b_y, b_z) \\ \nabla^T &= (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z) \\ L^T &= \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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で、間隙水の変位 U との関係は $w=n(u-U)$ 、 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で、 $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$ 、 ρ_s は固体粒子の密度、 k は等方透水係数である。

線形等方弾性体の応力-ひずみ関係は次式で書ける。

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

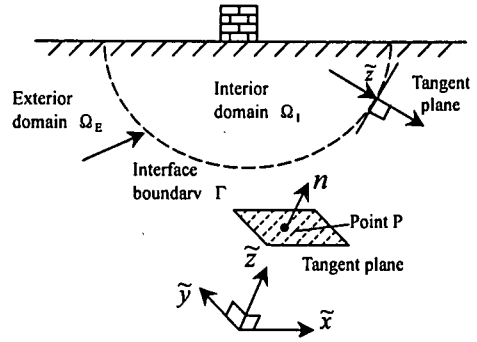


Fig.1 Typical infinite media

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

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クス、 $m^T = (1, 1, 1, 0, 0, 0)$ はKroneckerのデルタと等価であり、 α と Q は材料に関連する定数で次の関係がある；

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

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)で、 K_d は固体骨格(骨組)の体積弾性係数(率)である。

(2) 吸収境界条件

著者らが提案する、飽和多孔質媒体の動的解析における粘性境界条件の詳細については文献15)、16)に譲り、ここではその概要について簡単に記述する。

単相体の動的解析では、Claytonら¹¹⁾がパラキシャル近似により対象領域から屈折波を逸散させる局所的境界条件を開発している。この近似は高周波の波や入射角の小さい波には非常に精度がよいことが示されている。そこでこの概念を飽和多孔質媒体に対して一般化する。ここでFig.1のようにインターフェース境界面 Γ 上の任意点 P を考える。方向余弦 n は点 P の接平面の外向き(Ω_E 方向)が正で z 軸方向と同じである。したがって、点 P での接平面内の応力ベクトルの法線及び接線方向成分の0次展開のみをとると、インターフェース境界 Γ における周波数領域でのインピーダンス表現が近似的に得られ、その逆Fourier変換をとると時間領域におけるインピーダンス表現が可能となる。すなわち、インターフェース境界 Γ 上の局所的・過渡的なインピーダンスを求めることができるが、 $u-w$ 定式化によると粘性型の境界条件となり、粘性ダンパーを境界要素の節点に装着することになる。ここでは、吸収(粘性)境界条件

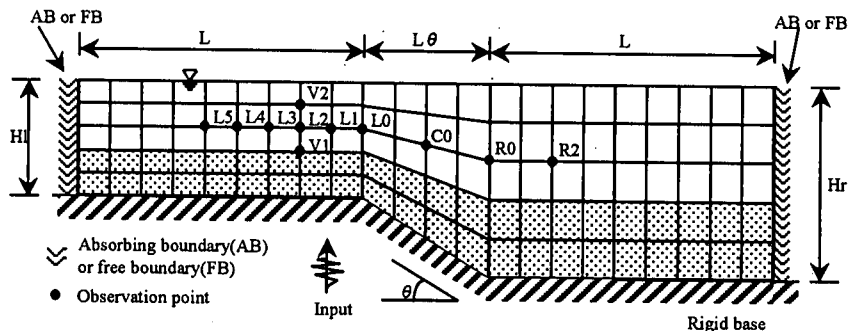


Fig.2 2D saturated dipping layer FE model subjected to vertical seismic wave

を有限要素プログラムなどに組み込む方法についての記述する。

Fig.1のように、境界面 Γ 上の点 P における局所座標系 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ によるときは、応力と変位の関係は、次の混合境界条件で表される。

$$\left\{ \tilde{\tau}_{xx}, \tilde{\tau}_{yy}, \tilde{\sigma}_z, 0, 0, -\tilde{p} \right\} = - \begin{bmatrix} c_{uu} & c_{uw} \\ c_{uw}^T & c_{ww} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{w} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ただし、上記の減衰マトリックス $c_{ij}(i,j=u \text{ or } w)$ については、

$$c_{uu} = \begin{bmatrix} \rho V_3 & 0 & 0 \\ 0 & \rho V_3 & 0 \\ 0 & 0 & \rho V_1 \end{bmatrix}, \quad c_{uw} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha Q/V_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$c_{ww} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q/V_1 \end{bmatrix}$$

および、 $V_1 = \sqrt{(\lambda + 2G + \alpha^2 Q)/\rho}$, $V_3 = \sqrt{G/\rho}$ 。

ただし、 $\tilde{\sigma}_z$ は Γ 面の外向き (\tilde{z} の正方向) が正の直応力 (全応力), $\tilde{\tau}_{xx}$, $\tilde{\tau}_{yy}$ はそれぞれ \tilde{x} , \tilde{y} 方向のせん断応力, \tilde{p} は間隙水圧である。記号中の頭部の \sim は局所座標系表示を示す記号である。式(6)より、吸収境界条件は粘性ダンパーと等価である。これを、非線形媒体にも適用していくためには、有限要素解析における剛性マトリックス D の中の弾性係数 λ や $\mu(G)$ が時間依存であるため、1時刻ステップ前の値を用いて非線形計算をしていく必要がある。

ここで、局所座標系 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ の物理量 \tilde{v} から全体座標系 (x, y, z) の物理量 v に変換するためのマトリックスを P として、次の関係を定義する。

$$\tilde{v} = Pv \quad (8)$$

したがって、振動中の自由 (無限) 領域からの寄与と内部からの波による寄与 (式(6))とを考えると、全体座標系の吸収境界条件は次式のようにになる。

$$\begin{Bmatrix} \tilde{t} \\ -\tilde{p}n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{t}^f \\ -\tilde{p}^f n \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} P^T c_{uu} P & P^T c_{uw} P \\ P^T c_{uw} P & P^T c_{ww} P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u} - \tilde{u}^f \\ \tilde{w} - \tilde{w}^f \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここに、 \tilde{t} , \tilde{p} はそれぞれ境界 Γ 上のトラクションと間隙水圧であり、 n は Γ 上の点 P における方向余弦ベクトル (外向き正; \tilde{z} と同方向)。添字 f は自由領域からの寄与を表す変数である。

上記の考え方は三浦らの方法¹⁷⁾と同じであり、解析対象の有限領域の計算においては、自由 (無限) 領域での時刻歴の計算が並行して行われる。

3. 解析モデルと吸収境界条件の適用例

(1) 数値計算モデルと参照解

提案する吸収境界条件の精度と有効性を示すために、飽和多孔質媒体が加振されたときの応答解析を行った。FEM数値解析は、すでに液状化解析のために開発している有効応力解析プログラムNUW2¹⁶⁾を用いた。NUW2の解析精度については既に文献¹⁶⁾で検討し、その有効性を示している。精度計算のための諸設定は次のようにした: ①4節点アイソパラメトリック有限要素を使用し、平面ひずみ状態とする。②数値積分ではNewmark法を用い、結果を安定させるためパラメータとして $\gamma = 0.60$ 及び $\beta = 0.3025$ としているので、 γ は若干の数値減衰をもたらす、 β は高周波での数値減衰を大きくする。しかし、提案する粘性境界以外は、要素の内部粘性減衰は用いていない。③弾性体表面は排水可能である。

次に、吸収境界条件の精度を検討するための基準となる参照解について以下のように定義する。本来、参照解としては無限に広がりを持つ地盤の応答を用いるべきであるが、ここでは解析の時間内に側方境界からの反射波が戻ってこないほど十分に広い有限地盤の応答を用いることとした。

Fig.2は、解析に用いる2次元不整形地盤標準モデルであり、剛基盤 (非排水とする) 上に初期せん断剛性などの異なる2種類の飽和多孔質媒体が表層として載っていて、剛基盤より鉛直上方にランダム波が

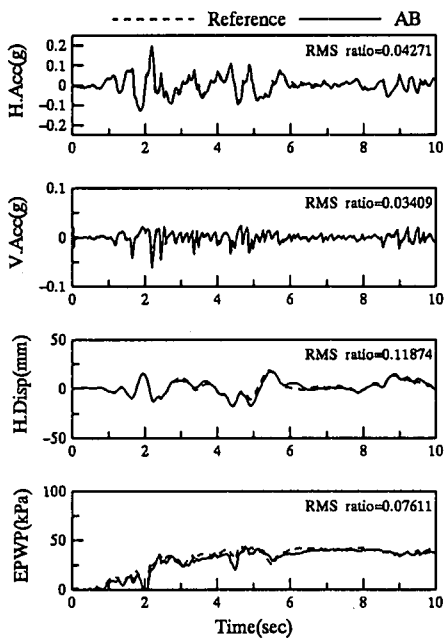


Fig.3 Responses with absorbing boundary at point L0

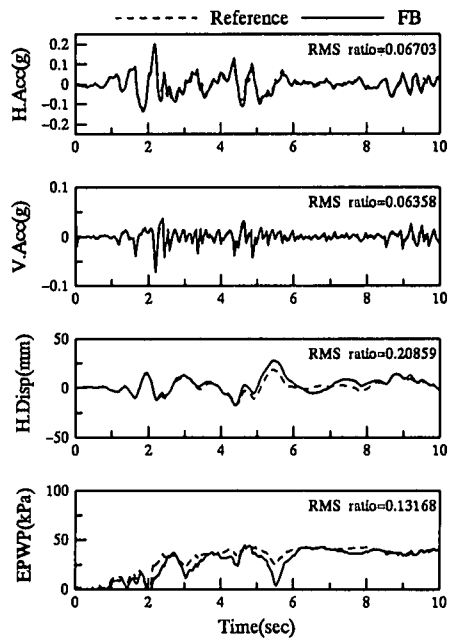


Fig.4 Responses with free boundary at point L0

同位相で入射する面内振動のモデルである。この地盤モデルにおける上下層の地盤の材料定数はTable 1に示しているが、表中の各パラメータは井合モデルにおける記号であり^{18),19)}、3軸試験の結果から内挿した値を採用している。幾何形状は、右側地点の要素が5m×5m、左側が5m×3m、両翼の層の長さはL=50m、傾斜部（不整形部）Lθ=20mでモデル水平長は120m、右側地点の層厚はHr=25m、左側層厚Hl=15mである。

解析に用いるランダム波としては、El Centro波(1940, NS成分；最大振幅：0.2g)を標準とし、これ以外に兵庫県南部地震のポートアイランドでの記録(1995)、千葉県東方沖地震の東大生研での記録(1987)及び十勝沖地震の八戸での記録(1968)も一部使用した。数値計算ではこれらの地震記録を平面SV波として剛基盤より入射させている。

著者らは厚さが一定の平行層地盤の応答を参照解として吸収境界の応答がこれとほぼ一致することを文献16)で確認している。この2次元不整形地盤モデルにおけるせん断波の平均伝播速度は約160m/s程度であり、応答解析時間を10秒間とすれば、側方の平行地盤部の長さを1000mにする場合には、中央の不整形部周辺域には不整形部から伝播して境界で反射した波は到達しないので、Fig.2の地盤モデルの応答は無限の広がりを持つ地盤の応答と等価になる

Table 1 Soil parameters for liquefaction analysis

Parameters	Upper layer	Lower layer
G_{m0} (kPa)	22990	65030
p_1	0.50	0.50
p_2	0.80	1.40
w_1	2.80	7.20
S_1	0.005	0.005
c_1	1.60	1.70
ϕ'_i (degree)	31	37
ϕ'_b (degree)	28	28
H_m	0.30	0.30

とみなしてよからう。すなわち、本研究では、Fig.2の2次元不整形地盤モデルの、左右の平行地盤部の長さをそれぞれ1000mとして、境界は自由境界(図中FB)とした場合の応答を参照解(図中Reference)として定義する。

(2) 2次元不整形地盤モデルへの適用

解析対象の2次元不整形地盤モデル(Fig.2)は、標準モデルの側方境界に、提案する吸収境界(図中AB)を設置したものとし、領域内のL0点を解析点とする。

Fig.3は、El Centro波に対する地盤の応答解析結果で、上図より水平加速度(:H.Acc)、鉛直加速度(:V.Acc)、水平変位(:H.Disp)及び間隙水圧(:EPWP)

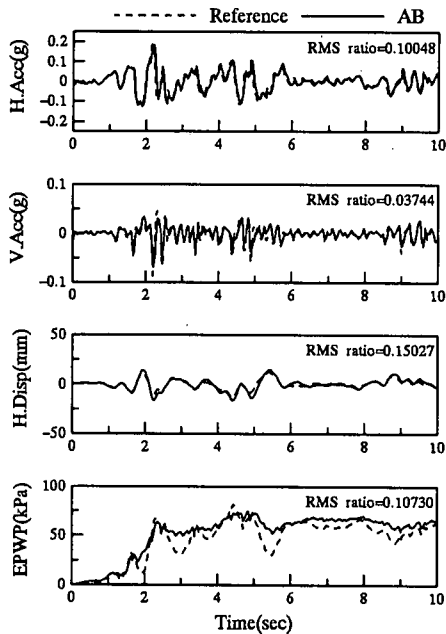


Fig.5 Responses with absorbing boundary at point R0

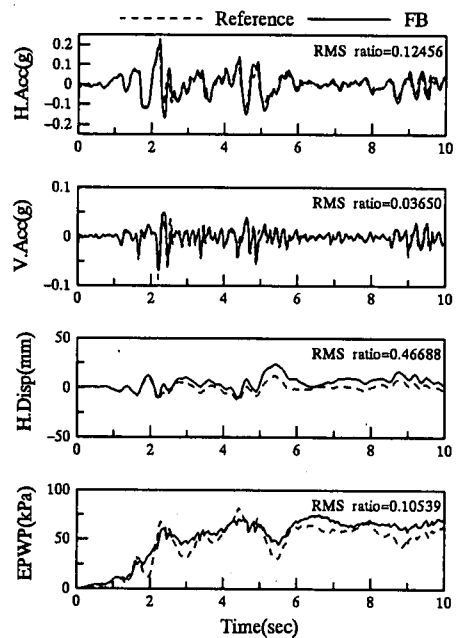


Fig.6 Responses with free boundary at point R0

の時間応答であり、それぞれ実線が吸収境界を設置した有限領域モデルの応答を、破線が参照解を表している。水平変位と間隙水圧に吸収境界と参照解との差がわずかに見られ、また間隙水圧は側方境界の影響で1秒以前の応答の初期から差が生じていると考えられるが、両者は比較的良好に対応している。

一方、Fig.4は、Fig.3と同じ有限領域モデルにおいて側方の境界を自由境界とした場合の結果を示したものである。自由境界の場合には、鉛直加速度に参照解との差が表われており、水平変位及び間隙水圧においても参照解との差がFig.3の吸収境界の場合よりも大きくなっている。このように、提案する吸収境界条件は非線形な問題である液状化解析において自由境界より精度のよい解を与えている。

さらに、Fig.2のR0を観測点とした場合の応答解析結果を、Fig.3,4の対として示したものが、Fig.5,6である。Fig.6の自由境界の場合に比べて、Fig.5の吸収境界の場合には参照解との差がFig.3,4の場合と同様、明らかに小さくなっており、吸収境界は参照解とよく対応している。観測点R0での応答波形は、観測点L0に比べて間隙水圧のレベルが若干大きくなっており、誤差もやや大きく出ているが、変位波形では自由境界に比べて参照解とよく対応しており、この観測点でも吸収境界の有効性が表われている。

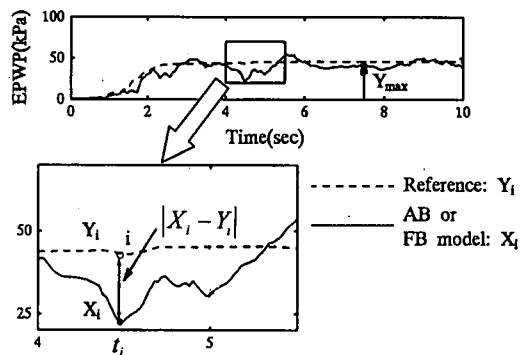


Fig.7 Differences between absorbing boundary and reference solution

4. 非線形 2 相系問題への吸収境界条件の適用性の検討

(1) 誤差の定量化

前節で示した参照解と、吸収境界及び自由境界を用いた場合の応答結果との食い違い（誤差）について定量的に検討するため、Fig.7に示すような誤差のRMS(root mean square)値を次式のように定義する。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (10)$$

ここに、 X_i ；時刻 t_i における吸収境界及び自由境界の応答、 Y_i ；時刻 t_i における参照解、 N ；データ総数。

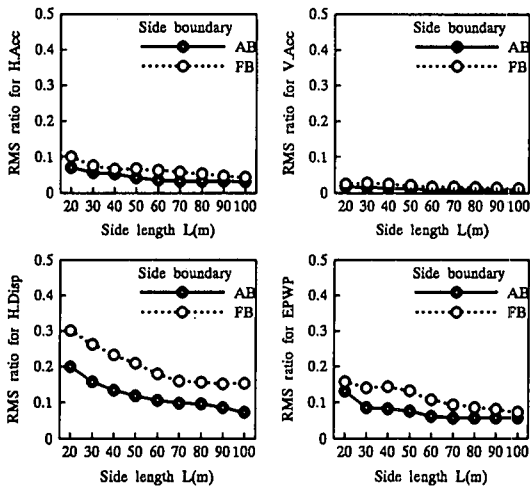


Fig.8 RMS ratio versus side length of parallel layers

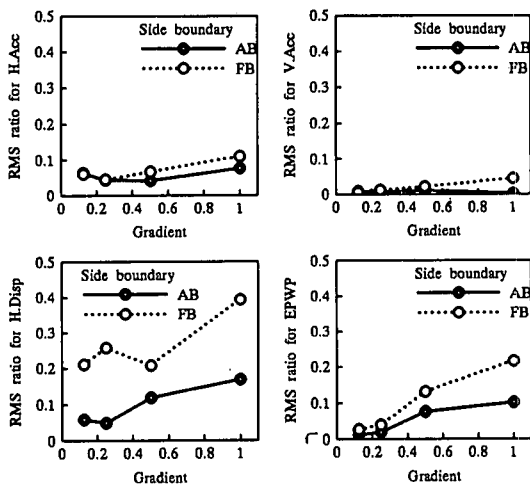


Fig.10 RMS ratio at L0 versus gradient of base surface

ここでは各応答と参照解との誤差のRMS値(式(10))を、参照解の最大振幅値(水圧は最大値)で除したRMS比(図中RMS ratio)でもって誤差の検討に用いる。

(2) 地盤モデルの側方平行部の長さの影響

Fig.2の地盤モデルの側方平行部の長さが解析結果に及ぼす影響について検討する。Fig.8, は側方平行部の長さLを20m~100mまで変化させたときの、有限領域モデルの観測点L0における吸収境界(AB)と自由境界(FB)のケースのRMS比を表わしたものである。Fig.8の上2図は、水平(:H.Acc)及び鉛直加速度(:V.Acc)のRMS比であり、下の2図は水平変位(:H.Disp)及び間隙水圧(:EPWP)のそれを表わしているが、吸収境界の効果が大いことが示されている。

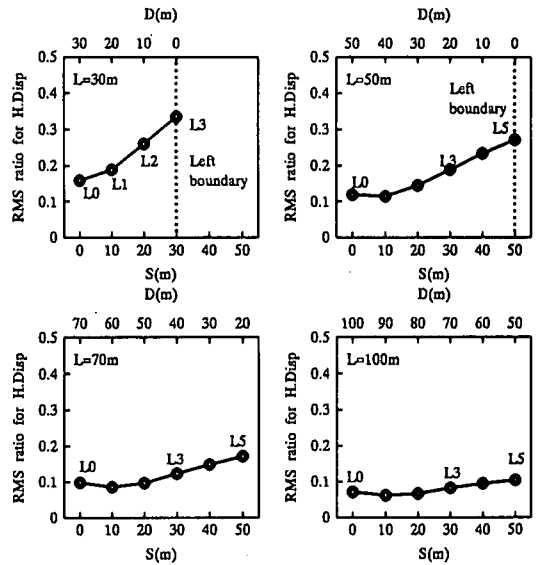


Fig.9 RMS ratio for horizontal displacement versus relative distance S or D (absorbing boundary)

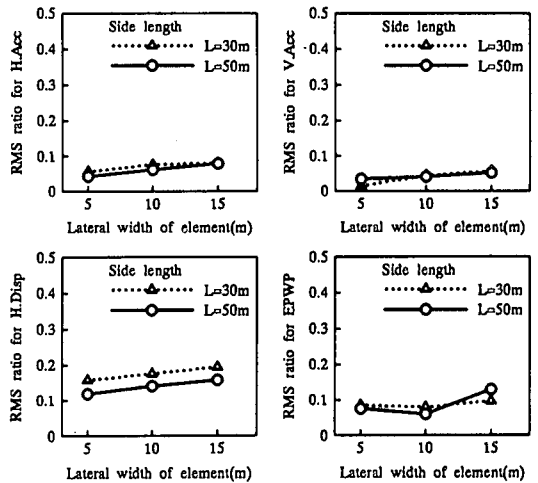


Fig.11 RMS ratio versus lateral width of element (with absorbing boundary)

加速度のRMS比は0.1以下の小さな値であり、誤差のRMS比は変位と間隙水圧で大きいことがわかる。当然ながら、RMS比は平行部の長さLが長くなるほど減少するが、これを50m以上にとっても誤差の変化は少なく、また何れの応答もRMS比が0.1以下と小さいことがわかる。以上より、このような地盤モデルの例では、側方の平行部の長さを50m程度とれば精度のよい解析が可能といえよう。

一方、Fig.9は、吸収境界を用いたケースで、側方の地盤平行部の長さ(L)が30,50,70及び100mの場合に、各観測点L0~L5のL0からの相対距離S, した

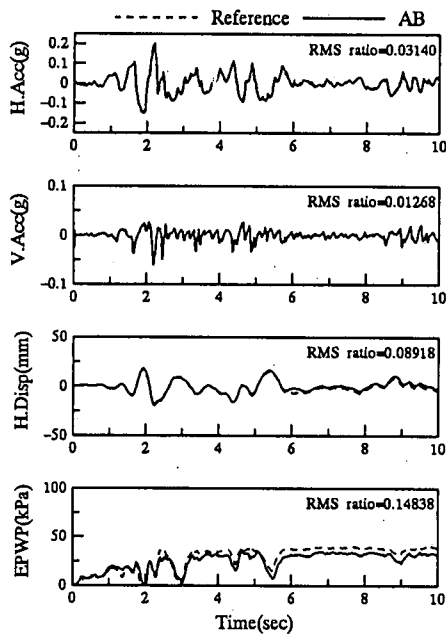


Fig.12 Responses with absorbing boundary at point L0

がって左方境界からの距離Dに対しては $D=L-S$ となり、両スケールで、水平変位の誤差のRMS比を图示している。平行部の長さは何れの場合でも、観測点が境界部に近いほど誤差が大きくなっており、解析の精度を上げるためにはある程度、観測点と境界部までの領域を確保する必要があるといえる。例えば、誤差のRMS比を0.15以下程度までに抑えるには、この解析例では、観測点と境界部の間に少なくとも30m程度の領域を設けるとよいことになる。

(3) 不整形地盤部の傾斜角の影響

Fig.2の地盤モデル中央(不整形部)の基盤傾斜角の正接(勾配)(図中Gradient)を0.125~1.0まで変化した場合の応答への影響について検討する。

Fig.10は、標準地盤モデルにおいて基盤傾斜の勾配を変化させ、これを横軸にとり、観測点L0における水平、鉛直加速度、水平変位及び間隙水圧のRMS比を图示したものである。基盤の傾斜が急になると、波動の反射・屈折などが複雑になり、側方境界が近いと境界面への入射角度の大きな波動の吸収効果が低下してきて¹⁵⁾、参照解との誤差も大きくなるものと考えられる。この傾向は水平変位と間隙水圧で強くなっており、特に自由境界の場合に顕著に現われるのに対して、吸収境界の場合は傾斜が0.5以下であれば誤差のRMS比は0.1程度以下に納まり、参照解とよく対応することがわかる。

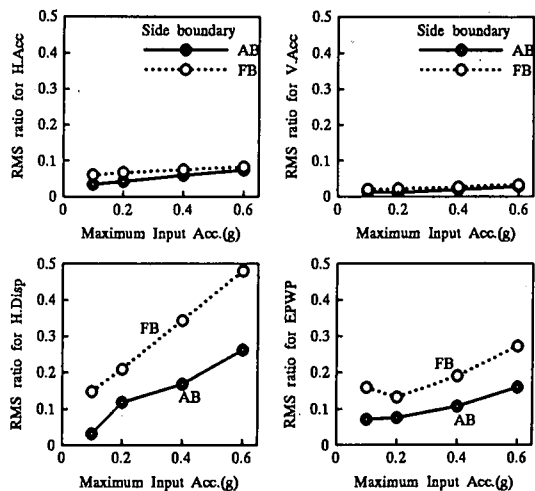


Fig.13 RMS ratio at point L0 versus maximum input acceleration

(4) 要素幅の影響

標準の地盤モデル(Fig.2)においては1要素の横幅を5mとしているが、要素幅は水平に伝播する波動の最小波長と関連するので、これを大きくすると応答波形の内短周期成分のカットされる部分も大きくなり、誤差を増加させることが懸念される。ここでは深さ方向の要素長さは一定として、要素幅のみを10m及び15mとした場合の吸収境界の誤差のRMS比について示したのが、Fig.11であり、要素の幅を横軸にとり、観測点はL0点として水平、鉛直加速度、水平変位及び間隙水圧のRMS比を图示している。RMS比は、水平変位及び間隙水圧において、要素幅15mの場合に若干増加する傾向が見られるが、この範囲ではそれほど大きな変動はなく、要素の大きさを変えても、提案する吸収境界条件は安定した解析結果を示している。

(5) 地盤剛性の影響

Fig.12は、標準地盤モデルにおいてTable1における下層の物性値からなる全層一様とした場合の結果であり、観測点L0での各応答の時刻歴を示している。標準地盤の物性値に対する結果であるFig.3の場合と比べると、加速度及び変位応答はほぼ同様の結果であり、わずかながら間隙水圧での誤差が大きくなっている。これは前者の上部層の地盤剛性が後者のそれよりも小さい分、非線形性が大きくなり波動のエネルギーを内部で消散する分の差として表れたことが1つの要因と考えられる。何れにしても地盤物性値は、表層地盤の非線形解析に強く影響するため、

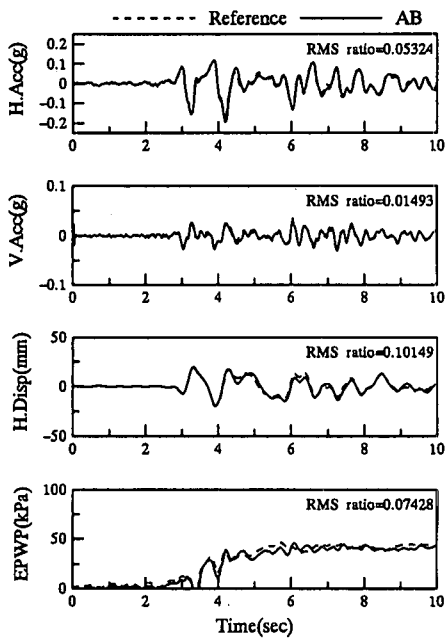


Fig.14 Responses with absorbing boundary at point L0 (Hyogo-ken Nanbu Earthquake)

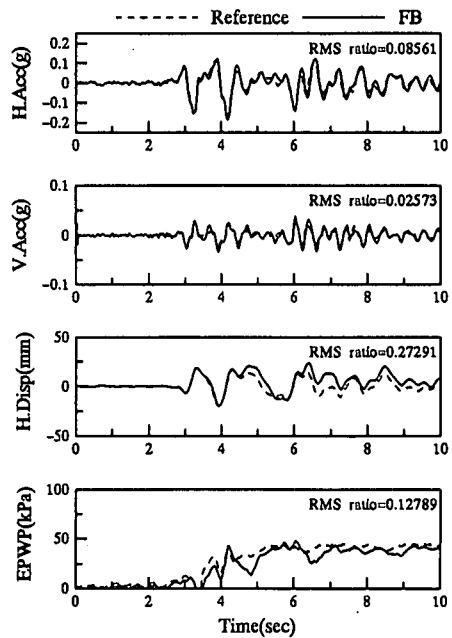


Fig.15 Responses with free boundary at point L0 (Hyogo-ken Nanbu Earthquake)

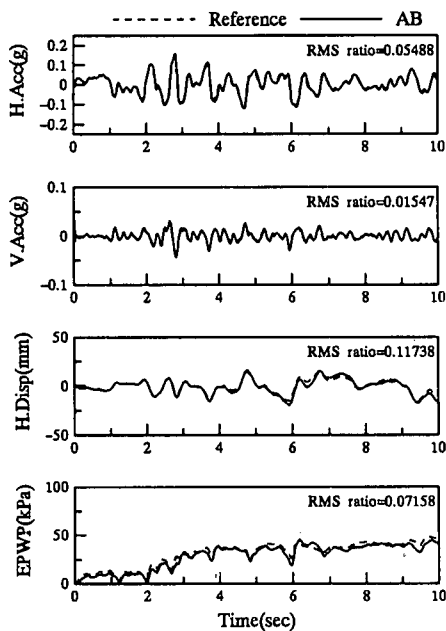


Fig.16 Responses with absorbing boundary at point L0 (Chiba-ken Toho-oki Earthquake)

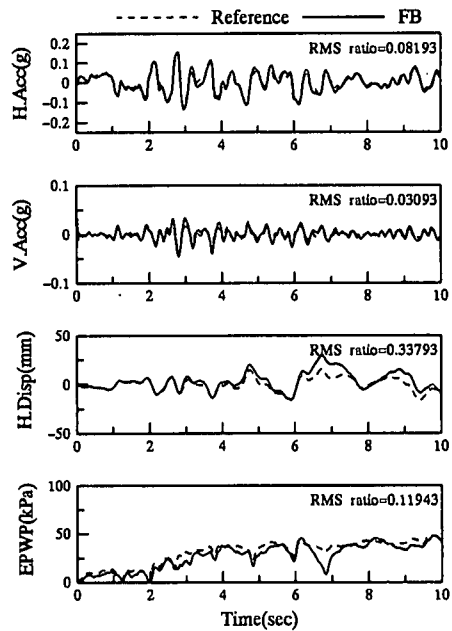


Fig.17 Responses with free boundary at point L0 (Chiba-ken Toho-oki Earthquake)

吸収境界条件の影響のみを抽出することは困難であるが、Fig.12の結果から判断すると、この程度の液化解析モデルに対しては、吸収境界条件は十分な適用性を有していると考えられる。

(6) 入力地震波の影響

Fig.13は、標準の地盤モデル(Fig.2)に対して、入力地震波の加速度最大値を変化させた場合の、観測点L0における誤差のRMS比を図示したものであり、各応答の配置はFig.8、10及び11と同様である。加速

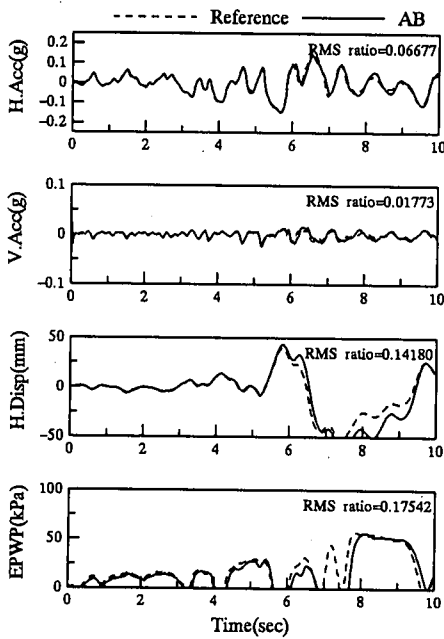


Fig.18 Responses with absorbing boundary at point L0 (Tokachi-oki Earthquake)

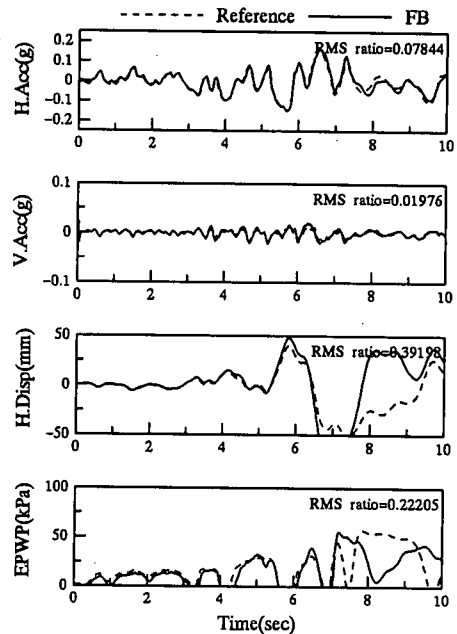


Fig.19 Responses with free boundary at point L0 (Tokachi-oki Earthquake)

度応答における誤差は、入力地震波形自体の差によって、参照解との差が大きくなる場合があるものの、自由境界に比べると吸収境界は十分に誤差を吸収している。

以上に、提案する飽和多孔質媒体の吸収境界条件は液状化のような非線形解析についても十分に精度よく適用しうることが示された。

に、入力地震波形自体の差によって、参照解との差が大きくなる場合があるものの、自由境界に比べると吸収境界は十分に誤差を吸収している。

以上に、提案する飽和多孔質媒体の吸収境界条件は液状化のような非線形解析についても十分に精度よく適用しうることが示された。

5. 結論

Biotの2相混合体理論に基づいて、 $u-w$ について若干の近似的な取扱いにより、吸収境界条件を粘性ダンパーとして時間領域で定式化できることを示した。これを飽和多孔質媒体へ適用したときの、提案する吸収境界条件の有効性を検証するため、2次元不整形地盤の有限領域の側方境界に提案する吸収境界を設置し、モデル地盤の下方より鉛直に過去の地震における観測波を入射させて、非線形(液状化)問題についての数値解析を行い、参照解との比較によりその精度と有効性について検討した。得られた成果は以下のように要約される。

最後に、Fig.14~19は、標準的地盤モデルに対して複数の地震波(最大加速度を0.2gとして)を入力したときの、観測点L0における各応答の時刻歴を示したもので、Fig.14,15は兵庫県南部地震のポートアイランドでの記録(1995)、Fig.16,17は千葉県東方沖地震の東大生研での記録(1987)及びFig.18,19は十勝沖地震の八戸での記録(1968)を用いた場合の結果であり、各図ともEl Centro波に対するFig.3, 4の結果と同様な傾向を示している。兵庫県南部地震と千葉県東方沖地震では、RMS比もFig.3,4の結果と同程度であるが、Fig.18,19の八戸記録の結果では、水平変位と間隙水圧の参照解との差が大きく出ており、RMS比も0.15程度とやや大きくなっている。しかしながら、八戸記録の場合でも、応答の位相は、自由境界の場合には大きくずれている部分があるのに対して吸収境界の場合は参照解とほぼ対応している。このよう

(1) 提案する吸収境界条件は飽和多孔質媒体の非線形応答の解析にきわめて有効かつ高精度な手法であることを示した。

(2) 側方の領域を無限領域と等価な1000mの長さ

とったモデルを参照解としてこれとの誤差を検討した結果、吸収境界を設置した有限領域の解析結果はその側方領域の長さを50m程度とすれば誤差は小さく、精度のよい結果を得ることができる。

- (3) 不整形地盤部の基盤傾斜や地盤剛性が異なる場合も吸収境界条件による解析結果は参照解と同様の安定した結果を示した。
- (4) 複数の異なる入力地震波に対して吸収境界を用いた結果、何れの地震波に対しても吸収境界条件は良好な結果を得ることを確認した。

参考文献

- 1) Biot, M.A. : Theory of propagation of elastic waves in a water-saturated porous solid, part I-low frequency range; part II-higher frequency range, *J. of Acoust. Soc. Ame.*, Vol.28, pp.168-191, 1956.
- 2) Ghaboussi, J. & Wilson, E.L. : Variational formulation of dynamics of fluid-saturated porous elastic solids, *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol.104, No.4, pp.947-963, 1978.
- 3) Zienkiewicz, O.C. & Shiomi, T. : Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, Vol.8, pp.71-96., 1984.
- 4) Prevost, J.H. : Wave propagation in fluid-saturated porous media: An efficient finite element procedure, *Int. J. Soil dyn. and Earthq. Eng.*, Vol.4, pp.183-202, 1985.
- 5) Simon, B.R., Zienkiewicz, O.C. & Paul, D.K. : Evaluation of $u-w$ and $u-\pi$ finite element methods for the dynamic response of saturated porous media using one-dimensional models, *Int. J. Num. Anal. Methods Geomech.*, Vol.10, pp.461-482, 1986.
- 6) Lysmer, J. & Waas, G. : Shear waves in plane infinite structures, *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol.98, No.1, pp.85-105, 1972.
- 7) Lysmer, J. & Kuhlemeyer, R.L. : Finite dynamic model for infinite media, *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol.95, No.4, pp.859-877, 1969.
- 8) White, W., Valliappan, S. & Lee, I.K. : Unified boundary for finite dynamic models, *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol.103, No.5, pp.949-964, 1977.
- 9) Akiyoshi, T. : Compatible viscous boundary for discrete models, *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol.104, No.5, pp.1252-1265, 1978.
- 10) Smith, W.D. : A nonreflecting plane boundary for wave propagation problems, *J. Comp. Phys.*, Vol.15, pp.492-503, 1974.
- 11) Clayton, R. & Engquist, B. : Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations, *Bull. Seism. Soc. America*, Vol.67, No.6, pp.1529-1540, 1977.
- 12) Modaressi, H. & Benzenati, I. : An absorbing boundary element for dynamic analysis of two-phase media, *Proc. IOWCEE*, pp. 1157-1161, 1992.
- 13) Modaressi, H. & Benzenati, I. : Paraxial approximation for poroelastic media, *Int. J. Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, Vol.13, pp.117-129, 1994.
- 14) Degrande, G. & De Roeck, G. : An absorbing boundary condition for wave propagation in saturated poroelastic media -Part I: Formulation and efficiency evaluation; Part II: Finite element formulation, *Int. J. Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, Vol.12, pp.411-432, 1993.
- 15) Akiyoshi, T., Fuchida, K. & Fang, H.L. : Absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media, *Int. J. Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, Vol.13, pp.387-397, 1994.
- 16) Akiyoshi, T., Fang, H.L., Fuchida, K. & Matsumoto, H. : A non-linear seismic response analysis method for saturated soil-structure system with absorbing boundary, *Int. J. Numer. and Analy. Meth. in Geomech.*, Vol.20, pp.307-329, 1996.
- 17) 三浦房紀, 沖中宏志 : 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析法, 土木学会論文集, 第404号/I-11, pp.395-404, 1989.
- 18) Iai, S., Matsunaga, Y. & Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 19) Iai, S., Matsunaga, Y. & Kameoka, T. : Analysis of un-drained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.

(1998. 4. 6 受付)

ERROR ESTIMATION OF ABSORBING BOUNDARY CONDITION FOR TWO-PHASE GROUND

Takashi AKIYOSHI, Xun SUN and Kunihiko FUCHIDA

Based on Biot's two-phase mixture theory and the paraxial approximation, the absorbing boundary conditions in the time domain for $u-w$ formulations are presented for the dynamic analysis of fluid-saturated porous media. Applying the absorbing boundary conditions to the liquefaction analysis of 2D dipping layer model, the efficiency of the proposed method is evaluated by comparing the response results with the reference solution defined as that of large scale ground model equivalent to infinite ground. Numerical results for the several parameters regarding the structures of the model ground and input seismic waves show the accuracy and efficiency of the proposed absorbing boundary conditions even for the nonlinear dynamic analysis of infinite fluid-saturated porous media.