二相系定式化の違いが間隙率の異なる飽和互層地盤の地震時挙動に及ぼす影響

大成建設 技術センター 正会員 ○字野 浩樹 非会員 船原 英樹

1. はじめに水で飽和した地盤の挙動は,土骨格と間隙水からなる多孔質体でモデル化され,土骨格の変位 *u*,間隙水の変位 *U*,間隙水の土骨格に対する相対変位 *w*,間隙水圧 *p* を用いて記述される。間隙水に関する 3 つの変数 *U*, *w*, *p* のうち,どれを選択するかによって定式化の方法と適用範囲が異なるが,既往の研究^{例えば,1),2)}によると,高周波数成分を含む地震動や透水性の高い地盤に対しては間隙水の慣性が無視できないため,*u*-*U* 定式化や *u*-*w* 定 式化のように,間隙水の変位 *U* あるいは相対変位 *w* を定式化に組み込む必要がある。これらの定式化の解析解は地 盤の材料特性が線形弾性で均質な条件に対して示されているが ^{3),4},実際の地盤は物性の異なる地層が堆積しており,このような不均質な条件で定式化の違いによる影響を具体的に検討した事例は見当たらない。

そこで、本検討では、間隙率が互層状に分布する1次元弾性 FEM モデルを用いて *u-U* 定式化と *u-w* 定式化による数値実験を行い、定式化の違いが飽和地盤の地震時挙動に及ぼす影響を調べた。

2. 支配方程式 Biot の多孔質体理論による支配方程式を以下に示す(*U*を*u*^fで表記)。以下では液相の加速度の固相に対する相対移流項⁵が十分小さいと仮定されている。微小ひずみを仮定し、土粒子は非圧縮性としている。

<u>1. 固相のつり合い式</u>		<u>5. 土骨格の構成式</u>	
$(1-n)\rho^{s}\ddot{u}_{i}^{s} - n^{2}\frac{\rho^{w}g}{k}\left(\dot{u}_{i}^{f} - \dot{u}_{i}^{s}\right) = \frac{\partial\sigma_{ij}^{\prime}}{\partial x_{i}} - (1-n)\frac{\partial p^{w}}{\partial x_{i}} + (1-n)\rho^{s}b_{i}$	Eq.(1)	$\Delta\sigma_{ij}' = D_{ijkl}\Delta\varepsilon_{kl}^s$	Eq.(5)
<u>2. 液相のつり合い式</u>		<u>6. 間隙水の構成式</u>	
$n\rho^{w}\ddot{u}_{i}^{f} + n^{2}\frac{\rho^{w}g}{k}(\dot{u}_{i}^{f} - \dot{u}_{i}^{s}) = -n\frac{\partial p^{w}}{\partial x_{i}} + n\rho^{w}b_{i}$	Eq.(2)	$\Delta p^{w} = -\frac{K^{w}}{n} \left(\Delta \varepsilon_{kk}^{s} + \Delta \zeta_{kk}^{fs} \right), \zeta_{ii}^{fs} = \frac{\partial w_{i}^{fs}}{\partial x_{i}}$	Eq.(6)
<u>3. 間隙水のつり合い式</u> (加速度を考慮した Darcy 則)		<u>7. 有効応力の定義</u>	
$\rho^{w}\ddot{u}_{i}^{s} + \frac{\rho^{w}}{n}\ddot{w}_{i}^{fs} + \frac{\rho^{w}g}{k}\dot{w}_{i}^{fs} = -\frac{\partial p^{w}}{\partial x_{i}} + \rho^{w}b_{i}$	Eq.(3)	$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - p^w \delta_{ij}$	Eq.(7)
4. 多孔質体のつり合い式		8. 平均相対変位の定義	
$ ho \ddot{u}_i^s + ho^w \ddot{w}_i^{fs} = rac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + ho b_i$	Eq.(4)	$w_i^{fs} = n(u_i^f - u_i^s)$	Eq.(8)

 u_i^s , u_i^f , w_i^{fs} は土骨格の変位、間隙水の変位と平均相対変位であり、 ρ^s , p^w , ρ は土粒子、間隙水、多孔質体の各密度である。n, k, K^w は間隙率,透水係数、間隙水の体積弾性係数であり、 $g \geq b_i$ は重力加速度と物体力である。

既往の研究にならい、本検討においても *u-U* 定式化では式(1)(2)を用い、*u-w* 定式化では式(3)(4)を用いる。さらに、両定式化では、間隙水の圧縮性を考慮し、式(6)を用いて間隙水圧*p^w*を消去する。各つり合い式の空間離散化には1次要素による FEM を適用し、時間離散化には Newmark のβ法を適用する。

3. 解析条件 1 次元土柱を模擬した解析モデルを図 1 に示す。層厚は 40m とした。有限 要素の高さは 0.2m とし,底面の鉛直変位は固定した。水理的境界条件については,底面 を非排水条件,地表面を排水条件とした。土骨格の構成則は線形弾性モデルとした。間隙 率 n は,要素内で一定とし,深度方向 5m ピッチで互層状に 2 通り分布させた。シリーズ 1 では上層から n を 0.420, 0.450, 0.420, ····, 0.450 と変化させ,シリーズ 2 では 0.300, 0.450, 0.300, ····, 0.450 と変化させた。透水係数 k は 1.0×10⁻⁸, 1.0×10⁻⁷, ····, 1.0×10⁻¹m/s とし, 数値実験という位置付けの下,各解析ケースで均質に与えた。地盤の密度 ρ , ヤング係数 *E*, ポアソン比 v は, ρ =2.0g/cm³, *E*=2.0×10⁴kN/m², v=0.25 とした。間隙水は密度 ρ^{w} = 1.0g/cm³,体積弾性係数 K^{w} =2.2×10⁶kN/m² とし,重力加速度 g μ 9.81m/s² とした。



荷重条件については鉛直地動加振とし,波形は加速度振幅 *A_{max}*=0.1m/s²,波数 *N*=10 波 図1 解析モデルの正弦波とした。一様な周波数 *f* は解析ケースごとに 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0Hz と設定した。

計算時間間隔 Δt は 0.001s, Newmark の β 法の係数は β =0.3025, γ =0.6 とした。Rayleigh 減衰は考慮していない。

キーワード *u-U* 定式化, *u-w* 定式化, 間隙率, 周波数, 透水係数, 有限要素法 連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 045-814-7217 使用した解析プログラムの妥当性については、紙面の都合上、詳細な解析結果は割愛するが、両定式化ともに、 均質な間隙率の場合に Simon et al.(1984)³⁾の1次元弾性土柱に対する解析解と一致することを確認している。

4. 解析結果 代表的な k と f の組合せに対し,地層間の間隙率の差異が大きいシリーズ 2 で得られた地表面での土 骨格の鉛直加速度時刻歴を図 2 に示す。図中の誤差は u-U 定式化の u-w 定式化に対する値であり,次式で求めた。

誤差 $E_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} |\Delta A_i|}{\sum_{i=1}^{n} |A_i|}$ (A_i : ステップiでの u-w 定式化による結果, ΔA_i : ステップiでの両定式化の差異) Eq.(9)

それぞれのfの $k=1.0 \times 10^{-7}$ m/s と 1.0×10^{-4} m/s において、u-w 定式化による時刻歴波形はほぼ同様である。

さらに、地表面での土骨格の鉛直加速度時刻歴に対し、式(9)で求めた誤差の分布図を図3に示す。図3では下限 値を0.01%、中央値を1%、上限値を100%として色分けしている。図2および図3より、*u-U*定式化と*u-w*定式化 の誤差は概ね高周波数で高透水性ほど大きく、その傾向は地層間の間隙率の差異が大きいほど顕著になっていると 言える。誤差の要因としては、間隙水の平均流速と間隙水圧が有限要素の隣接面で連続している必要があるが、*u-U*定式化においては間隙率の異なる地層境界面で不連続になることが挙げられる⁵。



		10 -	10	10 -	10 -	10	10-	10-	10			10-	10	10 -	10 -	10	10 -	10-	10	1	00%
	10	-3.2	-2.2	-1.2	-0.3	0.5	1.0	1.4	1.8		10	-1.7	-0.7	0.3	1.3	1.9	2.0	2.0	2.0		00 /0
	5	-3.1	-2.1	-1.1	-0.1	0.6	1.1	1.1	0.9		5	-1.6	-0.6	0.4	1.3	1.6	1.6	2.0	2.5		
f	3	-3.1	-2.1	-1.1	-0.2	0.6	0.9	0.7	0.5	f	3	-1.6	-0.6	0.3	1.1	1.4	1.3	1.5	1.9		0/
(Hz)	2	-3.2	-2.2	-1.2	-0.2	0.5	0.8	0.4	0.2	(Hz)	2	-1.7	-0.7	0.2	1.0	1.1	1.1	1.2	1.4	1	70
	1	-3.5	-2.5	-1.5	-0.5	0.2	0.4	-0.2	-0.4		1	-2.0	-1.0	-0.1	0.5	0.7	0.6	0.7	0.7		
0	.5	-3.9	-2.9	-1.9	-0.9	-0.3	-0.2	-0.7	-0.9	(0.5	-2.4	-1.4	-0.5	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1		0.01%
(a) シリーズ 1									r	(b) シリーズ 2										.0170	

図3 地表面における土骨格の鉛直加速度の誤差分布(図中の数値は百分率の常用対数)

5. まとめ 本検討では,間隙率が互層状に分布する1次元弾性土柱の地震時挙動を対象に *u-U* 定式化と *u-w* 定式 化による数値実験を行い,一例ではあるが,両定式化の誤差を定性的かつ定量的に評価した。

参考文献 1) 塩見ら: 二相系方程式における近似解析 (u-p 系)の考察,第21回地盤工学研究発表会,pp.631~632,1986.2) 岡ら:相対加速度を考慮した有限変形液状化解析解析法の適用性,土木学会第57回年次学術講演会,pp.1077~1078,2002.3) Simon et al.: An analytical solution for the transient response of saturated porous elastic solids, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.8, pp.381~398,1984.4) Gajo and Mongiovi: An analytical solution for the transient response of saturated linear elastic porous media, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.19, pp.399~413, 1995. 5) 豊田・野田: u-w-p 定式化に基づく水~土骨格連成計算における制約条件としての非排水条件の実装と検証,計算工学 講演会論文集,Vol.23,G-10-06,2018.