

Ⅲ-B 391

有限要素法を用いた飽和・不飽和領域における応力-浸透流連成解析

中央大学大学院 学生員 ○西宮 暁
中央大学 正会員 川原 睦人

1. はじめに

近年の地盤工学における一つの興味は、地震による液状化や圧密のような瞬間的な現象である。これらの現象は土骨格の変形と水の浸透現象の相互作用により生じるので、それぞれを連成して解析を行う必要がある。また、設計や維持管理のために地盤解析を行う際に、飽和領域だけでなく不飽和領域まで含めた解析を行う必要がある。なぜなら、多くの地盤は飽和しておらず、特に、不飽和領域においては負の間隙水圧やそれに伴う毛細管力の発生が、地盤の挙動に影響を及ぼすからである。

そこで本研究は、Biotの理論に基づくu-p形式の解法を飽和・不飽和領域に対して拡張し、その妥当性を検討するものである。

2. 飽和・不飽和領域への拡張

u-p形式の解法を飽和領域から不飽和領域を含む問題に拡張するには、有効応力の定義式と連続の式に対して修正を行う必要がある。

有効応力の定義式

飽和・不飽和領域において、土骨格の間隙が水と空気であらと満たされていると仮定し、それぞれの飽和度を S_w, S_a とすると、 $S_w + S_a = 1$ である。ただし、 $0 \leq S_w, S_a \leq 1$ 。

また、それぞれの間隙圧を p_w, p_a で表すと、有効応力の定義式は飽和・不飽和領域において次のように表される。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} (S_w p_w + S_a p_a) \quad (1)$$

後の定式化の簡便のために、間隙内の空気の流れによる抵抗力は小さいとして間隙圧を無視して考える、つまり式(1)において $p_a = 0, p \equiv p_w$ と置くと、有効応力の定義式は次のように表される。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} S_w p \quad (2)$$

連続の式

連続の式に対しては、飽和度の変化によって発生する貯留項を考慮する必要がある。

$$n \frac{\partial S_w}{\partial t} = n \frac{\partial S_w}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} = C_s \dot{p} \quad (3)$$

ここで、 C_s は比水分容量であり、飽和領域では0となる。

この貯留項(3)を加えることで、連続の式が飽和・不飽和領域において次のように表される。

$$S_w \dot{\epsilon}_{ii} = \dot{w}_{i,i} + \left(C_s + \frac{n S_w}{K_w} \right) \dot{p} \quad (4)$$

3. 不飽和浸透特性

不飽和領域において、飽和度 S_w 、透水係数 k や比水分容量 C_s を間隙水圧から推定することが、前述の修正を用いた基礎方程式について計算を進める上で必要である。したがって、本研究では式(5)、(6)で表されるvan-Genuchtenモデルをこれらの不飽和特性の推定に適用した。

$$S_w(\psi) = \left\{ \frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right\}^{1-1/n} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} k_r(\psi) &= \frac{k_{ij}(\psi)}{k_{ij}^s} \\ &= S_w^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_w^{1/m})^m \right\}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

上式において、 ψ は間隙水圧水頭、特に'サクシヨン'と呼ばれ、不飽和領域においては負の値をとる。 α, n, m は限界毛管水頭や土の物性から定まるパラメータであり、 $m = 1 - 1/n$ である。 k_r, k, k^s はそれぞれ比透水係数、不飽和透水係数、飽和透水係数である。図1にこれらの関係を体積含水率に対して示す。そして、比水分容量 C_s は式(3)で示されたように θ - ψ 曲線の勾配として定義される。

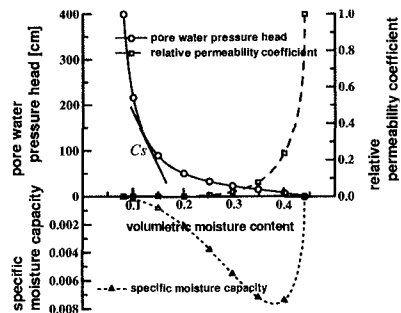


図1 不飽和浸透特性

キーワード : 飽和・不飽和領域, u-p形式の解法, 有限要素法

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL. 03-3817-1814 FAX. 03-3817-1803

4. 数値解析例

水位の変化を伴った飽和・不飽和領域における解析例として、本システムの妥当性を検討するために、赤井・宇野が行なった砂模型実験との比較を行なった。解析モデルを図2に示す。解析領域は、0.33m×3.15mの長方形の飽和・不飽和領域である。解析では透水性基盤上0.3mの高さに初期水位が存在し、瞬時に0.2mの水位低下が起こるものと仮定している。

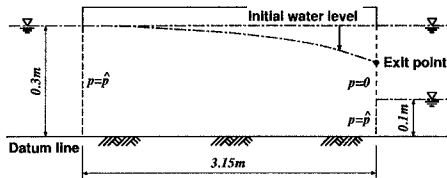


図2 解析モデル

境界条件としては、土骨格の変位に関して地表面は拘束がなく、両側面は水平方向固定、下面是鉛直方向固定としている。また、間隙水圧に関して両側面の浸潤面は静水圧分布、右側面の浸出面は自由表面と見なせるので0と規定している。

赤井・宇野が行なった実験と同じ物性値を用いて準静的問題を解析し、図3に示すように60, 120, 300, 2400秒において得られた解を水面形に関して実験結果と比較した。ここで、水面形は間隙水圧水頭が0となる点を結んだ線である。この図において実線は計算結果、そして点は実験結果を示す。これら計算結果と実験結果との間には、最大で8.9%の誤差が認められた。この誤差はvan-Genuchtenモデルを用いた不飽和特性の推定の際の材料に依存するパラメータの決定により生じたものであると考えられる。しかしながら浸透全体を通して、水面形状の概形が捕らえられていることやその最大誤差が10%以下であることから、本システムが浸透現象を十分に追従していることが分かる。

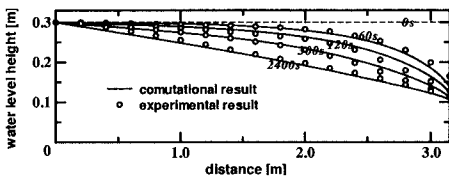
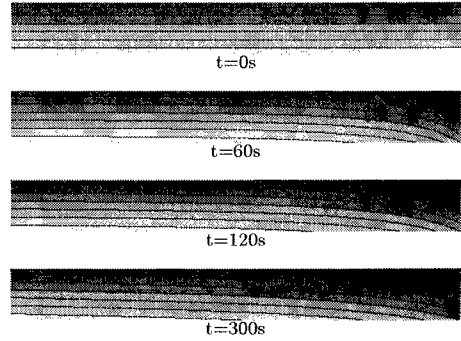


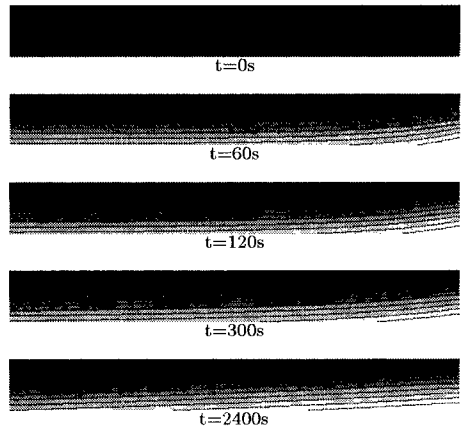
図3 60, 120, 300, 2400秒での水面形に関する実験値との比較

さらに土骨格の変形と水の浸透現象の相互作用を評価するために、図4に0, 60, 120, 300, 2400秒における間隙水圧と有効応力の分布図を示す。ここで、有効応力とは水平方向と鉛直方向の和として定義する。また、これらの図において濃淡のより薄い部分ほど圧力が高いことを示している。これらの結果より、間隙水圧が低下するのに伴って、全

応力を一定に保つように有効応力が増加する、つまり、間隙水圧と有効応力が有効応力の定義式(3)を満たすように、相互に作用しながら定常状態に向かうという定性的な挙動が捕らえられている。



(a) 間隙水圧



(b) 有効応力

図4 60, 120, 300, 2400秒での間隙水圧と有効応力の分布

5. おわりに

本論文では、Biotの理論に基づくu-p形式の解法を飽和・不飽和領域に対して拡張し、準静的問題を解析することで、その妥当性を検討した。その結果、定量的な挙動を捕らえることができた。したがって、今後は動的問題に対しても妥当性を検討する所存である。

参考文献

- [1] M.A.Biot, General Theory of Three-dimensional Consolidation, J. of Applied Physic 12, pp155-164, 1941.
- [2] 赤井 浩一, 大西 有三, 西垣 誠, 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集第264号, pp87-96, 1977.