

間隙水と変形・応力の連成を考慮した地盤 構造物の設計に関する一考察

大津宏康*・大西有三**・亀村勝美***

本論文では、Biotの二相混合体理論に基づき、土質材料から軟岩および硬岩までを対象とした、一般的な場における地下水流動に関する支配方程式を誘導した。また、この支配方程式に基づき、間隙水と地盤、岩盤の変形との連成効果が地下水流動特性に及ぼす物理的な影響について考察を加えるとともに、地下水流動特性を合理的に評価するための設計手法を提案した。

Keywords : seepage, groundwater, coupled stress-flow analysis

1. 序 論

従来の土木工事における設計・施工段階での主たる検討項目は地盤・構造物の力学的安定性であり、その建設に伴う地下水流動特性に関しては、ただ単に止水するあるいは排水するという受動的な評価が大半であった。このため、設計段階では地下水の存在が考慮されていても、施工管理の段階では、地盤の変形・ひずみあるいは応力が主たる計測項目であり、地下水挙動の監視は、従たる計測項目とされていた。

これに対して、近年水封式燃料貯蔵施設が建設されるに到り、地下水挙動の評価に関する認識が変りつつある。すなわち、この施設では、地下水により燃料の漏洩を防ぐという意味で、より積極的な地下水制御という概念が導入されるため、地下水流動特性の評価が極めて重要な検討課題となっている。また、このような地下水流動特性解明への取り組みは、今後都市部での地下空間開発に伴う地下水環境への影響を軽減するために不可欠な検討課題となるものと予想される。

従来、地下水流動特性の評価手法としては、熱伝導理論のアナロジーであるポテンシャル場の問題としての浸透流解析が主として適用されてきた。しかし、このような解析理論を現実の問題に適用する場合には、そのモデル化の過程でいくつかの簡素化した概念を適用させざるを得ない。そして、このような解析上の制約条件は、地下水流動の評価の範囲を非常に狭いものとしている。実際に、従来の浸透理論では、浸透媒体を剛体でかつ多孔質体と仮定しているため、近年着目されつつある地下水流動特性に及ぼす地盤・岩盤の変形と間隙水との相互作用

の影響、岩盤での亀裂系流れの影響等を評価することはできない。

一方、地下水流動特性に及ぼす地盤・岩盤の変形と間隙水との相互作用の影響に関しては、Malpasset ダムの崩壊要因と推定されて以来、その評価が工学的に注目されてきた。本来、浸透理論において変形と間隙水の相互作用が合理的に評価されていない原因は、その支配方程式が、質量保存則としての連続式により表現されるものであり、物質の運動方程式である釣合式を必ずしも満足しないことにある。このため、トンネル掘削での地下水位の定価に伴う地盤沈下、斜面掘削による地下水位の変動に伴う斜面安定等の工学的な問題において、外力変化が地下水流動特性に及ぼす影響について合理的に評価することができなかった。このような課題を解消するために、地盤・岩盤の変形と間隙水との相互作用いわゆる連成効果に関する評価手法の開発が、多くの研究者によってなされてきた。それらの手法は、釣合式と連続式を間接的に関連付ける手法および直接的に関連付ける方法とに区分され、それぞれ非連成解析¹⁾および連成解析²⁾と呼ばれる。

ここで、間隙水と地盤・岩盤の変形との連成効果は、Hudson³⁾の研究に代表されるように、かなり幅広い捉え方がなされている。すなわち、連成効果を間隙水と変形の相互作用という言葉で捉えるならば、浸透現象における間隙水変化に伴う透水性の変化あるいはクイックサンド現象等も広い意味ではこの範疇に属するものと解釈される。しかし、本論文では連成効果に関して、Biotの圧密理論⁴⁾を基本とし、未知数に変形と間隙水圧を連立させ、連続式に変形項を導入することによってのみ、その影響が評価される現象と定義する。この狭義の定義の下では、前述の浸透現象に伴う物性変化等は、本論文における連成効果に関する検討の範疇から除外される。

地下水流動特性に対する解析手法に関して、近年、計

* 正会員 工修 大成建設(株) 土木設計部
(〒163 新宿区西新宿 1-25-1)

** 正会員 Ph.D 工博 京都大学助教授 工学研究科環境地球工学専攻

算機の普及に伴う解析技術の進歩により、地下水挙動評価に関する解析手法は、連成効果を考慮した手法が研究レベルのみならず設計レベルでも適用されつつある。この解析技術の目ざましい進歩に伴い、数学的なモデル化を行うことにより、境界値問題としての解は比較的容易に得られるようになってきたが、その反面物理的な現象に根ざしたこれらの解析手法の適用性に関する議論は必ずしも十分ではない。間隙水と地盤の変形との連成効果を理論に忠実に評価することが必要であるが、解析対象を一般的な土質材料から、軟岩および硬岩へと拡張した場合には、その連成効果の地下水流動に及ぼす影響は大きく変化する。このため、より合理的な地下水流動特性の評価を行う上では、対象とする地盤・岩盤材料の特性に応じた、モデル化手法の適用性とその適用限界に関する議論が必要である。さらに、材料特性およびその解析の目的に応じた工学的な判断として、連成効果を考慮すべき判定規準を設定し、これらの影響が無視されうる場合には、実用的な解析を行う上での解析手法の簡素化に対する議論も必要である。

このような観点から、本論文では、一般的な場を対象とした地下水流動特性の評価に関わる支配式を誘導し、間隙水と変形・応力との連成効果について新たな解釈を試みる。また、その連成効果の物理的な意味について考察を加えるとともに、地下水流動特性の合理的な評価手法について提言する。

2. 二相体における連続式の評価

近年の地下水流動特性評価に関する研究の流れは、従来の固体相と液体相の二相体としてのモデル化から、空気存在を考慮するとともに、圧力あるいは温度変化に伴う各相の状態変化をも考慮した、いわゆる多相体としてのモデル化へと移行しつつある。本論文に示す混合物理理論は、本来このような多相体の問題に対して拡張することは可能であるが、ここでは、固体相と液体相の相互作用の地下水流動特性に及ぼす影響に関する検討を目的とし、議論の対象をこの二相に限定するものとする。

地下水流動特性に関する支配方程式は、質量保存則としての連続式により表現され、この連続式で、非定常状態での単位時間当たりの系内への流出量および流入量の差は、系自体の体積変化と関連づけられる。この質量保存則に関わる系自体の体積変化は、系を構成する媒体の体積変化および間隙流体自体の体積変化等により生じるものであり、間隙水と地盤の変形との連成効果を評価する上では支配的な項目となる。

このような系の体積変化に関して、地盤の変形特性および間隙流体の圧縮性をも考慮した形式において表現される連続式は、Biotの多次元圧密理論にその萌芽を見ることができる。Biotは、材料を固体相と液体相の二

相に分離し、それぞれの相に対する構成則より連続式を誘導しているが、その特徴は次の構成式に集約される。

$$\theta = \alpha \varepsilon + \frac{1}{Q} \sigma \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 θ は体積含水率、 ε は骨格の体積ひずみ、 σ は間隙水圧である。この内、体積含水率 θ は、系の全体積に占める間隙水の割合を示す指標であり、飽和・不飽和浸透理論では $\theta = nS_r$ (n : 間隙率、 S_r : 飽和度)と表され、不飽和状態では飽和度に依存して変化し、飽和状態では間隙率に一致するものである。また、パラメータ α および $1/Q$ は、Biotにより提案された空気を含む間隙流体を仮定した不飽和土の挙動を考慮するために導入されたものである。しかし、このBiotの圧密理論は、その不飽和挙動を支配するパラメータ α 、 $1/Q$ の物理的な意味が不明確であるため、解析対象を飽和領域に限定した多次元場での圧密論基礎方程式として適用され、不飽和土をも考慮した理論として一般的な支持を得られてきたとはいえない。

ここで、Biot以降展開されている飽和領域での圧密理論において、間隙水圧に関わるパラメータ $1/Q$ は、間隙水を非圧縮性流体とした仮定の下で、材料の構造骨格の剛性が水の剛性に比べて充分小さいため無視されるとしている。もちろん、このような条件は土質材料の場合に限定されており、検討対象を軟岩あるいは硬岩とした場合には、材料の剛性は水に比べて無視できないオーダーから水とほとんど変わらないオーダーとなる。このため、一般的な場合においては飽和状態でも、パラメータ $1/Q$ は無視できない値となり、体積含水率 θ と骨格の体積ひずみ ε が等しくならない場合が生じる。

このような観点から、ここでは、Biot⁵⁾の二相混合物理理論に基づき、土質材料から岩盤材料に到るまでの広い範囲を対象としたより一般的な場での連続式の定式化を行い、この連続式を構成する各項目における、間隙水と地盤・岩盤の変形との連成効果に関わる物理的な意味および、既往の浸透理論での連続式との相関について検討を加えるものとする。なお、ここでの一般的な連続式についての議論の目的は、間隙水と変形との地下水流動特性に及ぼす影響について評価を加えることであるため、新たなパラメータの導入を必要とする不飽和領域での挙動に関しては言及せず、議論を飽和領域にのみに限定する。

(1) 二相体における連続式の誘導

間隙流体と構造骨格との相互作用を考慮した一般的な場を対象とする連続式の誘導は、二相混合物理理論に基づき行う。二相混合物理理論とは、地盤材料が連続する間隙と骨格からなっていることから、材料を固体相および液体相という抽象的な二つの相の重ね合わせにより表現するものである。また、この理論に関しては、これまでに

石原⁶⁾、岡⁷⁾により基本的な概念がまとめられるとともに、多孔質体の挙動に関する理論的考察がなされてきているので、これらの考え方に基づき検討を加える。

一般的な応力場での二相混合体の応力-ひずみ関係式は、石原による記号を用いて、以下のように表示される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{kk}^{(s)} &= \frac{1}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} (k_c \sigma^{(s)} - \alpha_c \sigma^{(f)}) \\ \varepsilon_{kk}^{(f)} &= \frac{1}{\alpha_b k_c - \alpha_c^2} (\alpha_b \sigma^{(f)} - \alpha_c \sigma^{(s)}) \dots\dots\dots (2) \\ \sigma^{(s)} &= \frac{1}{3} \sigma_{kk}^{(s)}, \quad \sigma^{(f)} = \frac{1}{3} \sigma_{kk}^{(f)} \end{aligned}$$

ただし、 $\varepsilon_{ij}^{(s)}$ 、 $\sigma_{ij}^{(s)}$ は各々ひずみテンソルおよび応力テンソル (s, f はそれぞれ固体相、流体相を示す指標) である。また α_b 、 α_c 、 k_c は混合体理論における材料定数を表す。ここで、固体相の体積ひずみ $\varepsilon_{kk}^{(s)}$ は、一般に地盤および岩盤で計測される変形に伴うひずみに相当するものである。

式 (2) に示す関係式で、二相混合体理論における各材料定数を土質力学における物理定数の関係を用いて表示し、一般的な応力場として、各相の応力について $\sigma^{(f)} = np$ 、 $\sigma^{(s)} = \sigma_m - np$ とすると、固体相および液体相のひずみに関してそれぞれ次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{kk}^{(s)} &= c_b \left[\sigma_m - \left(1 - \frac{c_s}{c_b}\right) p \right] \dots\dots\dots (3) \\ \varepsilon_{kk}^{(f)} &= \left[1 - \frac{1}{n} \left(1 - \frac{c_s}{c_b}\right) \right] \varepsilon_{kk}^{(s)} + \left[(c_1 - c_s) + \frac{c_s}{n} \left(1 - \frac{c_s}{c_b}\right) \right] p \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、それぞれ c_1 は間隙水の圧縮率、 c_s は土粒子実質部分の圧縮率、 c_b は土粒子骨格の圧縮率、 n は間隙率、 p は間隙水圧を表す。

この固体相のひずみ式は、いわゆる間隙水圧についての補正項目を含んだ有効応力と構造骨格のひずみの関係を表しており、この関係式を拡張することで、岡・中川⁸⁾により示された一般的有效応力の定義式が誘導される。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \beta \delta_{ij} p \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\beta = 1 - c_s/c_b$ であり、 σ_{ij} および σ_{ij}^0 は、それぞれ全応力テンソルおよび有効応力テンソルを表す。

一方、排水状態での系内の間隙のひずみ e_p は、岡⁷⁾の研究に示されるように、各相のひずみより次のように表示される。

$$\begin{aligned} e_p &= \varepsilon_{kk}^{(s)} - \varepsilon_{kk}^{(f)} \\ &= \frac{1}{n} \left(1 - \frac{c_s}{c_b}\right) \varepsilon_{kk}^{(s)} - \frac{1}{n} \left[n c_b \left(\frac{c_1}{c_b}\right) + (1-n) c_b \left(\frac{c_s}{c_b}\right) - c_s \left(\frac{c_s}{c_b}\right) \right] p \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

また、系の質量変化は、二相混合体の定義より次のように表される。

$$M = \rho_f e_p = \rho_f m e_p \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ρ_f および ρ_f' は、それぞれ液体相および間隙流体の密度を表す。したがって、一般的な場の地下水流動に伴う非定常状態での系内の質量変化は、式 (6) および式 (7) より次のように表される。

$$\begin{aligned} M &= \rho_f \left[\left(1 - \frac{c_s}{c_b}\right) \varepsilon_{kk}^{(s)} - \left\{ n c_b \left(\frac{c_1}{c_b}\right) + (1-n) c_b \left(\frac{c_s}{c_b}\right) - c_s \left(\frac{c_s}{c_b}\right) \right\} p \right] \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

式 (8) に示すように、一般的な場における地下水流動の非定常状態における系内からの質量変化は、飽和状態にあっても構造骨格の体積ひずみおよび間隙水圧に加えて、地盤・岩盤を構成する各材料の物理特性に依存した形式となる。

また、式 (8) に示す関係で特殊な条件として、土粒子実質部分の圧縮率 c_s が構造骨格の圧縮率 c_b に比べて充分小さい場合 ($c_s/c_b \rightarrow 0$) には、式 (5) より古典的な Terzaghi⁹⁾ の有効応力式 ($\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + p$) が成り立ち、さらに、間隙水の圧縮率 c_1 が構造骨格の圧縮率に比べて充分小さい場合 ($c_1/c_b \rightarrow 0$) には、質量変化は次のように簡素化される。

$$M = \rho_f \varepsilon_{kk}^{(s)} \dots\dots\dots (9)$$

以上のように誘導された系内の質量変化に基づき、系内への浸透水の流出量・流入量の差分との質量保存則および、浸透水の運動方程式としての Darcy の法則より、一般的な場における連続式が誘導される。

$$\left[k(\phi + z), i, i = -\beta \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} + \gamma_w \frac{1}{Q} \frac{\partial q}{\partial t} \dots\dots\dots (10) \right.$$

$$\left. \left. \begin{aligned} \beta &= 1 - \frac{c_s}{c_b} \\ \frac{1}{Q} &= n c_b \left(\frac{c_1}{c_b}\right) + (1-n) c_b \left(\frac{c_s}{c_b}\right) - c_s \left(\frac{c_s}{c_b}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11) \right.$$

ここに、それぞれ、 k は透水係数、 ϕ は圧力水頭、 z は位置水頭、 γ_w は水の単位体積重量を表す。

したがって、式 (10) に示すように、一般的な場における連続式が、地盤・岩盤を構成する材料の圧縮率に基づく係数を有する構造骨格の体積ひずみおよび間隙水圧の関数形として表されることから、Biot のパラメータ α および $1/Q$ の物理的な意味が次のように明確となる。

1) 体積ひずみに掛かる係数の比較より、Biot のパラメータ α は、土粒子実質部分の圧縮率と構造骨格の圧縮率の比より定義されるパラメータ $\beta (= 1 - c_s/c_b)$ と等価になることから、一般的な有効応力の定義式における補正項と等価になり、間隙水の圧縮性と無関係に定まるものである。

2) 間隙水圧に掛かる係数の比較より、Biot のパラメータ $1/Q$ は、式 (8) の右辺第 2 項に示される、間隙水圧に掛かる係数と等価になり、間隙水の圧縮率の項とこれに対する他の材料に関する圧縮率との比により定

められたものである。

以上の検討より、一般的な場における連続式は、体積含水率 θ と構造骨格の体積ひずみ ε が等しくない条件下で、地盤および岩盤を構成する材料の圧縮率に依存することを示した。また、従来の浸透理論および圧密理論における、体積含水率 θ と構造骨格の体積ひずみ ε が等しいとする仮定が、地盤および岩盤を構成する材料の圧縮率の内、構造骨格の圧縮率が卓越するという極めて特殊な条件下でのみ成り立つことが明らかになる。

(2) 質量変化に関わるパラメータの解釈

式(10)に示す質量変化に関わるパラメータに関して、Skempton¹⁰⁾ および赤井ら¹¹⁾による、各種地盤・岩盤材料における圧縮率に関するデータに基づき算定した結果を表-1に示す。この表の内、赤井らによる凝灰岩の変形係数は、ポアソン比を0.33に設定した場合、約1500~9000 kgf/cm²に相当する。

同表に示すように、体積ひずみに掛かるパラメータ β （あるいは α ）は、土粒子実質部分の圧縮率がほぼ一定であることから、構造骨格の圧縮率の増加に伴い減少するが、硬岩を除いて、一般的な土質材料および軟岩においてはほぼ1となっている。したがって、いわゆる土質材料に加えて、変形係数が数千 kgf/cm² オーダーの軟岩においても、古典的なTerzaghiの有効応力式の適用が可能である。

一方、間隙水圧に掛かるパラメータ $1/Q$ は、水の圧縮率を 48×10^{-6} (1/kgf/cm²)と設定した場合には、 $(3.7 \sim 33.4) \times 10^{-6}$ (1/kgf/cm²)となるが、その変化の幅は、構造骨格の圧縮率の分布幅に比べて小さくなっている。また、軟岩および土質材料では、このパラメータは構造骨格の圧縮率 c_b に比べて、1オーダー以上小さな値となる。このため、地下水流動に伴う系の質量変化に関して、軟岩および土質材料では構造骨格に関わる体積ひずみの項が支配的になるが、硬岩のように高い剛性を有する材料では、間隙水圧に掛かるパラメータの存在が無視されなくなる。

以上のように、地下水流動に伴う質量変化での、構造骨格の体積ひずみと間隙水圧に関わるひずみの関係は材料の構造骨格の圧縮率に依存して大きく変化する。

(3) 既往の連続式との相関に関する検討

浸透理論では、比貯留係数 S_s が非定常状態での系内の質量変化を表すパラメータとして用いられる。しかし、その定義は、単に系の体積変化と水頭変化を関係付けるのみであり、比貯留係数 S_s の物理的な意味についての解釈は不明瞭であるといえる。このため、比貯留係数の定義に関しては、異なる観点からその物理的な意味に基づく解釈が必要である。Narasimhanら¹²⁾は、比貯留係数 S_s の定義式に関して、多孔質媒体の変形特性を考慮し、以下のように誘導している。

表-1 質量変化に関わるパラメータの算定結果

材 料	圧縮率		β	間隙率 n	1/Q
	c b	c s			
石英質砂岩	5.8	2.7	0.53	0.05 ~ 0.10	3.71 ~ 5.18
花崗岩 (30m深さ)	7.5	1.9	0.75	0.05 ~ 0.10	3.72 ~ 5.18
Vermont大理石	17.5	1.9	0.89	0.05 ~ 0.10	4.00 ~ 5.18
コンクリート (近似値)	20	2.5	0.88	0.05 ~ 0.10	4.46 ~ 5.28
堆積岩 (凝灰岩)	110	2.0	0.98	0.20 ~ 0.40	11.16 ~ 19.31
堆積岩 (凝灰岩)	660	2.0	1.00	0.20 ~ 0.40	11.19 ~ 19.30
密な砂	1800	2.7	1.00	0.30 ~ 0.50	16.29 ~ 24.13
ゆるい砂	9000	2.7	1.00	0.50 ~ 0.70	25.35 ~ 33.53
London粘土 (過圧密)	7500	2.0	1.00	0.50 ~ 0.70	25.00 ~ 33.40
Gosport粘土 (正規圧密)	60000	2.0	1.00	0.50 ~ 0.70	25.00 ~ 33.40

単位 (10⁻⁶ 1/kgf/cm²)

単位 (10⁻⁶ 1/kgf/cm²)

$$S_s = \gamma_w (nc_1 + c_b) \dots \dots \dots (12)$$

この定義より、比貯留係数は、この間隙流体と構造骨格の圧縮性を表すパラメータであり、浸透流解析では、比貯留係数というパラメータを導入することで間接的に浸透現象に伴う構造骨格の変形特性を考慮しているものと解釈される。

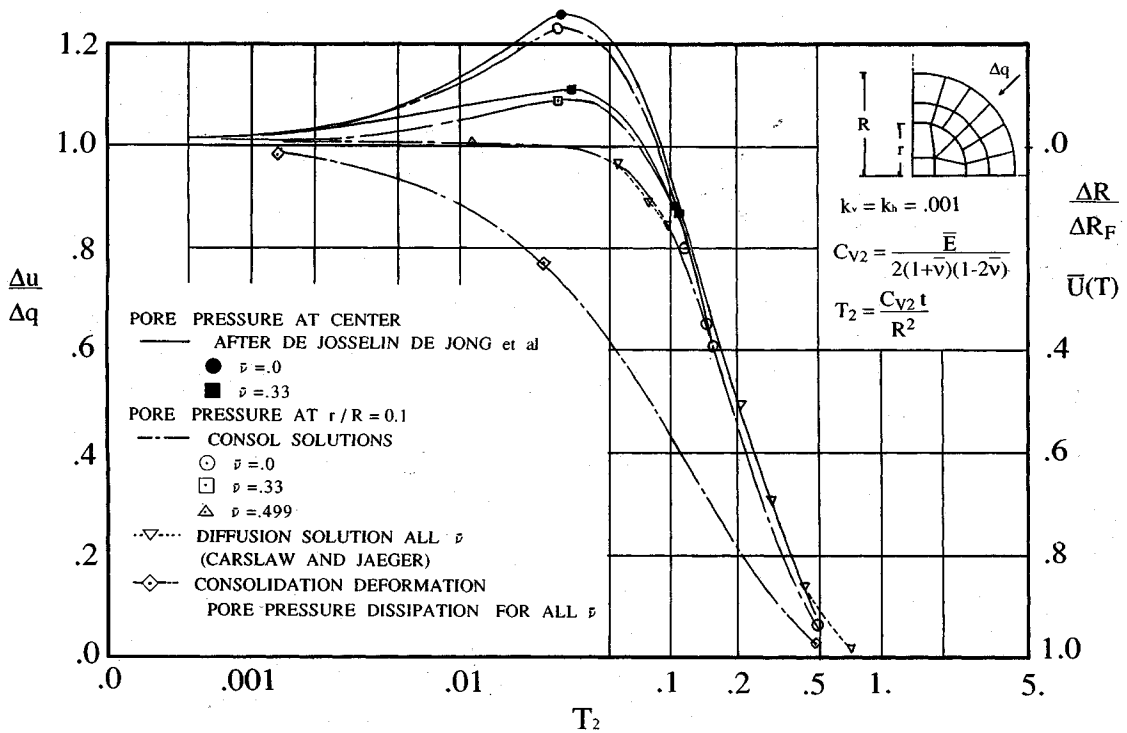
ここで、以上の誘導式と、前述の一般的な場に対する連続式との相関性について検討する。式(10)の連続式で、土粒子実質部分の圧縮率 c_s が構造骨格の圧縮率 c_b に比べて充分小さい場合 ($c_s/c_b \rightarrow 0$)を仮定して式を簡素化し、式(8)の構造骨格の体積ひずみ項に、有効等方応力-体積ひずみの関係式 $\varepsilon_m = c_b \sigma_m$ および、有効応力の定義式 $\sigma'_m = \sigma_m - \gamma_w \phi$ を代入すると、全応力が時間的に変化しない場合には、右辺の時間項に掛かる係数は、式(12)に示された比貯留係数と等価になる。

この結果より、浸透理論における連続式は、ここで誘導した一般的な場での連続式で、構造骨格の体積ひずみを、応力-ひずみの構成関係と有効応力の定義を適用することで簡素化したものであると位置づけられる。このため、浸透流解析と応力・浸透連成解析では、地下水流動に伴う系の体積変化の評価に関して以下のような相違が明らかになる。浸透流解析では、比貯留係数という単一のパラメータにより系の圧縮性に基づいて間接的に系の体積変化を評価する。これに対して、応力・浸透連成解析では、系内への釣合条件に基づく変形から直接的に系の体積変化を評価する。したがって、比貯留係数は、地下水流動に伴う体積変化の場所的不均一性を、第一次的な近似として解析領域全域に渡って平均化して評価するパラメータであると解釈される。

3. 外乱に伴う非定常的な間隙水圧応答の検討

理論的な観点から、間隙水と変形との連成効果の地下水流動特性への影響について考える場合、次の2段階での間隙水圧応答に関して評価する必要がある。

- 1) 圧力あるいは外力の変化に対する釣合条件を満足した間隙水圧応答
- 2) 1)の間隙水圧応答の再配分過程に伴う非定常状態での間隙水圧応答



図一 三軸供試体における圧密¹³⁾

(1) 再配分過程での間隙水圧応答に関する検討

議論を明確にするため、間隙水と変形との連成効果に関わる間隙水圧応答への影響の内、外力変動に伴う影響を取り除いた場での連成効果の持つ間隙水圧応答への影響、すなわち、浸透解析と応力・浸透連成解析で、一様な初期間隙水圧に対する間隙水圧の消散過程についてのみ考察を加える。

図一に示す Christian ら¹³⁾の研究での多次元圧密解析結果と拡散方程式の解の比較を示す。両解析結果で初期の過剰間隙水圧を等価にすることにより、両者の差異は非定常過程で体積変動率のモデル化の相違のみに限定される。この Biot 系の圧密方程式と拡散方程式型の圧密方程式の比較は、田村^{14), 15)}により理論的な考察が加えられているため、この理論に基づき検討を加える。

図一に示す円形の三軸供試体の圧密について、田村¹⁴⁾の圧密方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \nabla^2 u - \frac{2k\mu}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{R^2} \int_0^R s \nabla^2 u(s) ds \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 u は過剰間隙水圧を、 c_v は圧密係数を、 μ はラメの定数を、 R は円筒の半径を表す。

田村の式に示すように、Biot 系の圧密理論に基づく間隙水圧変化は、式 (13) の右辺第 2 項の補正項の存在により、ある点での変動のみならず解析領域全体の値に依存した形式となる。したがって、本質的にどのような材料を対象としても、Biot 系の圧密方程式により表現

された間隙水圧変化は、図一に示すように式 (13) の右辺第 2 項の補正項の影響により、拡散方程式の解析と異なる結果となる。ただし、このような両解析手法による間隙水圧の場所的変動の相違に対して、解析領域内の平均間隙水圧変動は、図一に示すように、いずれの方程式のいかなるポアソン比に対する解も一致する。この特性は、田村¹⁵⁾の研究に示されるように、Terzaghi-Rendulic 系の圧密理論の課題とされる全応力 σ_m が一定の仮定が、解析領域内で平均化すれば成り立つことによる。したがって、前述の比貯留係数が、地下水流動に伴う体積変化の場所的変動を平均化したパラメータであるとの定義の妥当性が裏付けられる。

一方従来より、図一の間隙水圧変化の比較に示すように、両解析手法による間隙水圧変化の相違がポアソン比に依存することが指摘されている。ただし、田村¹⁴⁾の指摘にあるように、Mandel-Cryer 効果による間隙水圧変化の特性は円筒座標系等でのポアソン比に依存する現象であり、本質的には連成効果とは無関係なものであることに留意する必要がある。さらに、この図に示された間隙水圧変化は、円周上の排水境界から最も離れた円の中心近傍のものであり、間隙水圧の変化が最も遅れる箇所であることに留意する必要がある。このため、排水境界に近い点での間隙水圧変化の相違は小さくなる。さらに、間隙水圧変化の相違が顕著に現れるのは、間隙水圧の再配分過程の初期の段階に限定されている。例えば、

表一2 変形係数と所定の時間係数への到達時間

変形係数	ポアソン比	圧密係数 c_v^*	$T_v=0.05$	$T_v=0.1$
100,000	0.25	5.871E+01	0.09	0.18
50,000	0.25	2.901E+01	0.18	0.36
10,000	0.30	7.476E+00	0.70	1.39
5,000	0.30	3.870E+00	1.35	2.69
1,000	0.35	1.083E+00	4.81	9.62
500	0.35	5.472E-01	9.52	19.04
100	0.35	1.107E-01	47.05	94.10

kgf/cm² cm²/sec day day

図一1に示す間隙水圧の経時変化では、時間係数 T_v が 0.1 以上の範囲で、両者の解析結果は極めて近似した結果となる。

ここで、間隙水圧の経時変化は圧密理論に準拠した場合、圧密係数 c_v 、透水係数 k および、経過時間 t の関数の無次元量として表される時間係数 T_v により支配される。このため硬岩および砂のような圧密係数 c_v の値が大きい材料では、粘性土に比較してわずかな経過時間 t に対して、拡散方程式と Biot 系の圧密方程式での間隙水圧応答の相違が極めて小さくなる時間係数 T_v の時間領域に到達する。したがって、連成効果の影響が、間隙水圧の変化速度との関係から、現実の施工に伴う計測のタイムスケールでは観測されない可能性がある。

試算として、変形係数をパラメータとして、拡散方程式と Biot 系の圧密方程式での間隙水圧応答の相違が小さくなる時間係数 $T_v=0.05, 0.1$ に到達するまでの時間を、表一2に示した。なお、同表に示す算定結果での解析条件は、それぞれ透水係数を $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/sec、影響半径を $R=30$ m、圧密係数を $c_v^*=k/[\gamma_w(\beta c_b + 1/Q)]$ と仮定している。

表一2に示すように、時間係数 $T_v=0.05, 0.1$ に到達するまでの経過時間は、変形係数の増加に伴い大きく変化する。すなわち、変形係数が 10 000 kgf/cm² を上回る場合には、経過時間が数時間のオーダーで時間係数 T_v が 0.1 に到達する。一方、変形係数が 100 kgf/cm² 程度の軟弱粘土の場合には、同じ時間係数に到達するのに約 47~94 日の時間を要する。

また、ここに示した時間係数 T_v は、解析領域全体の平均的な間隙水圧の変動を表すパラメータであることに留意する必要がある。すなわち、空洞内圧の変化あるいは掘削により、外乱の影響が直接作用する空洞壁面のような間隙水圧変化が最も大きい境界近傍では、一次元圧密理論での圧密度 U ~時間係数 T_v 関係に比較してより間隙水圧変化は早くなる。

一般に、構造物の建設に伴う地下水流動特性を評価する場合に、工学的な検討対象となるのは、圧力ないし外力の変化する箇所に近接した領域に限定される。このため、現象論に基づく工学的な判断として、このような場合には、連成効果の影響を考慮しなくても設計的な検討

は可能となる。

この連成効果を考慮するか否かの明確な規準を設定することは、設計理論の簡素化を行う上で極めて重要な課題である。ただし、田村の圧密方程式での拡散方程式との補正項が、境界の存在により定められることから、この規準を一般的な構造物の設計に対して一意的に設定することは困難である。しかし、平均的な透水係数として 10^{-6} cm/sec 程度と仮定した場合、表一2に示す関係より、地盤・岩盤の巨視的変形係数として、変形係数 10 000 kgf/cm² 程度を一応の目安とすれば、連成効果が顕著となる時間は 1 日程度である。したがって、この変形係数を上回る剛性を有する材料に関しては、連成効果の影響を工学的判断として評価する必要がないものと考えられる。

(2) 即時間隙水圧応答に関する検討

外力変動が比較的短時間に生じた場合には、非排水状態での載荷あるいは除荷となり、即時的な間隙水圧応答が生じる。この非排水条件下での外力変動に伴う即時的な間隙水圧変化は、系内での質量変化が生じないことから、式(8)で質量変化 M を零とすると、増分形の表示で次の関係が成り立つ。

$$\left(1 - \frac{c_s}{c_b}\right) \Delta \varepsilon_{kk}^{(s)} = \left\{ n c_b \left(\frac{c_1}{c_b}\right) + (1-n) c_b \left(\frac{c_s}{c_b}\right) - c_s \left(\frac{c_s}{c_b}\right) \right\} \Delta p \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_{kk}^{(s)}$ および Δp は、それぞれ非排水状態での外力変動に伴う体積ひずみ増分および間隙水圧増分を表す。

また、体積ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{kk}^{(s)}$ は、式(3)より次のように表される。

$$\Delta \varepsilon_{kk}^{(s)} = c_b \left[\Delta \sigma_m - \left(1 - \frac{c_s}{c_b}\right) \Delta p \right] \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $\Delta \sigma_m$ は非排水状態での外力変動に伴う平均主応力増分を表す。

式(14)に式(15)を代入すると、非排水状態での外力変動と間隙水圧変化は次のような関係式となる。

$$\Delta p = \frac{c_b - c_s}{(c_b - c_s) + n(c_1 - c_s)} \Delta \sigma_m \dots\dots\dots(16)$$

式(16)で、間隙水圧増分と平均主応力増分を結び付ける係数は、土質力学の間隙水圧係数 B に対応する。また、この係数は、岡⁹⁾により示された一般的な場での B 値の定義式と一致する。

このように、間隙水圧係数 B は、質量変化を表す式(8)の係数と同様に、構造骨格の圧縮率 c_b 、土粒子実質部分の圧縮率 c_s および間隙流体の圧縮率 c_1 の関数となる。したがって、間隙水圧係数 B は、変形と間隙水との連成効果を考慮することにより誘導されるパラメータである。また、通常飽和状態では B 値が 1 と設

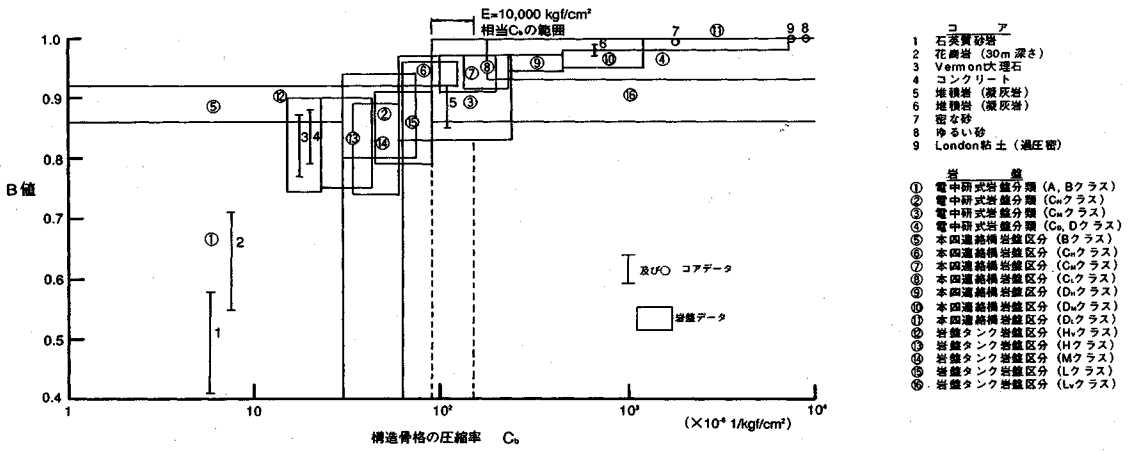


図-2 B値と構造骨格の圧縮率 c_0 との関係

定されるが、この仮定は式 (16) より、土粒子実質部分および間隙水の圧縮率が、構造骨格の圧縮率に比べて充分小さい場合にのみ成立することが明らかになる。

式 (16) に示すように、外力ないし圧力変動に伴う間隙水圧応答は、材料のダイレイタンス特性を考慮しない場合には、構造骨格の剛性による影響および、作用外力の成分による影響の二つの要因により支配される。

すなわち、前者は、外力変動とそれに伴い発生する間隙水圧変動を結び付ける B 値が構造骨格、固体相自体および間隙流体との圧縮率の関数形となることに起因する。一方、後者は、作用外力に対する応力場の応答の内、間隙水圧変動が等方応力成分の変動にのみ依存することに起因する。これらの要因による間隙水圧変動の影響について、以下に考察を加える。

a) 構造骨格の剛性による影響

外力変化に伴う間隙水圧応答は、式 (16) に示すように構造骨格、固体相自体および間隙流体の各圧縮率の関数として表される。この関係式で、Skempton⁷⁾および赤井ら⁸⁾による各種地盤・岩盤材料のコアでの圧縮率に加えて、電中研式岩盤分類¹⁶⁾、本州四国連絡橋建設時の花崗岩の岩盤区分¹⁷⁾および、大規模地下空洞建設時の岩盤区分¹⁸⁾での変形係数に基づき B 値を算定した結果を図-2 に示した。なお、同図に示す算定結果で、間隙水の圧縮率 c_1 は、 $48 \times 10^{-6} \text{ l/kgf/cm}^2$ と設定した。この内、赤井らによる凝灰岩の変形係数は、ポアソン比を 0.33 に設定した場合、約 $1500 \sim 9000 \text{ kgf/cm}^2$ に相当する。

また、岩盤では亀裂等の不連続面の影響によりマスとしての剛性が低下するため、設計には、平板載荷試験あるいは孔内載荷試験等の原位置試験により算定される亀裂を含んだ巨視的変形係数が適用される。ここでは、この考え方に準じて、巨視的変形係数を亀裂も含むマスとしての構造骨格の圧縮性を表すものと仮定した。

図-2 に示すように、片対数紙上でコアと岩盤のデータで有意な相違は認められず、 B 値は全般的に構造骨格の圧縮率 c_0 の増加に伴い放物線的に 1 に漸近する分布となる。この関係で、変形係数が 10000 kgf/cm^2 でポアソン比 ν を 0.25~0.35 とし算定した構造骨格の圧縮率 c_0 の範囲 ($90 \times 10^{-6} \text{ l/kgf/cm}^2 \sim 150 \times 10^{-6} \text{ l/kgf/cm}^2$) を上回る圧縮率を有する材料では、 B 値は近似的に 1 と見なすことができる。

すなわち、通常の土質材料では、構造骨格の圧縮率に比べて他の要因の圧縮率が充分小さいことより、 B 値が 1 の関係が成り立つ。また、岩盤での巨視的変形係数を含めた変形係数が数千 kgf/cm^2 オーダーの材料では、構造骨格の圧縮率が小さくなり他の要因の圧縮率の影響が現れてくるが、近似的には B 値を 1 と見なされる。

一方、岩盤での変形係数が 10000 kgf/cm^2 以上の硬質岩では、構造骨格の圧縮率が他の圧縮率に比べて無視できないオーダーとなるので、 B 値は材料の剛性が高くなるに連れて小さくなり 1 以下の値となる。このように、外乱に伴う非排水状態での水圧に及ぼす影響は、材料の剛性に依存して変化する。

この B 値を 1 以下として評価するための判定基準に関しても、前述の間隙水圧の再配分過程に関する議論と同様、材料の変形係数が 10000 kgf/cm^2 を上回るか否かが、そのおおまかな指標となる。つまり、外力変動に伴う間隙水圧変動の評価で、一般的な土質材料から変形係数が数千 kgf/cm^2 オーダーの軟岩の範囲では、従来の土質力学での B 値が 1 の仮定が適用可能である。

b) 作用外力の成分による影響

作用外力による応力の応答は Rendulic 面で表示されるように、等方応力成分 (例えば平均主応力 σ_m) および、せん断応力成分 (例えば正八面体せん断応力 τ_{oct}) に分けられる。

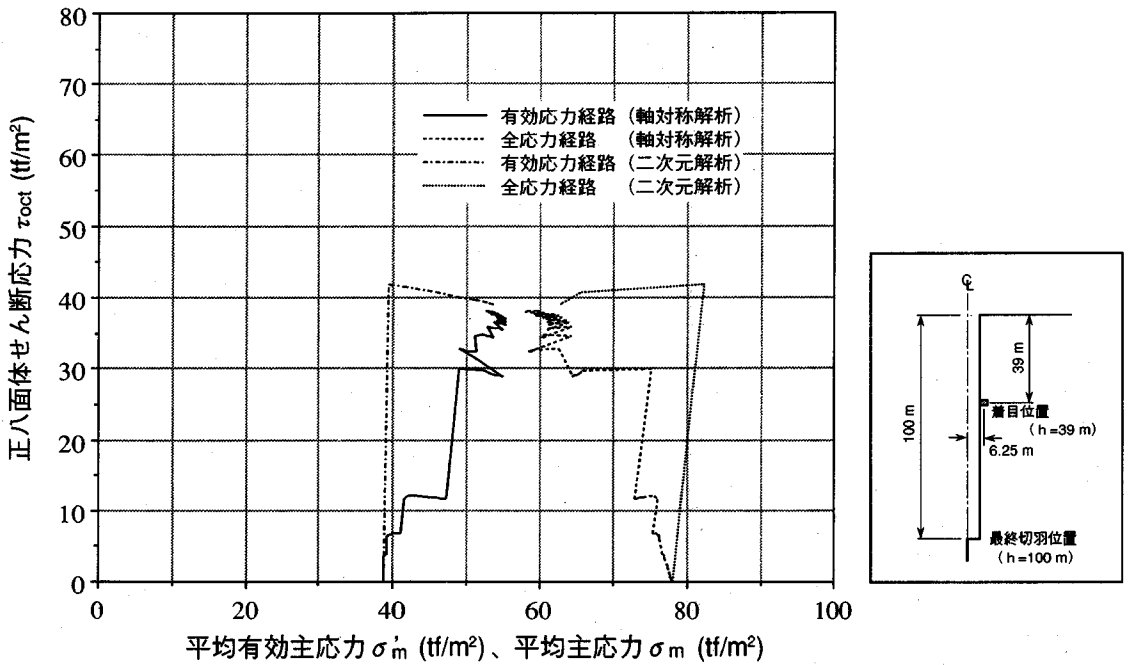


図-3 トンネル周辺の応力径路¹⁹⁾

ここで、作用外力による即時の間隙水圧応答は、理論的には式(16)に示すように、材料のダイレイタンス特性を無視した場合には、体積応力変動にのみ依存しせん断応力変動とは独立している。

これらの応力変動に対する過剰間隙水圧の発生量は、田村¹⁴⁾の研究に示されているように、その構造系により大きく変化する。例えば、一次元の応力場では、作用外力そのものが等方応力に相当する。また、半無限の円筒形の場合では、作用外力がせん断変形のみを受け持たれ等方応力の増分が零となる。

このような観点から、二次元平面ひずみ場での円孔モデルでの掘削問題では、外力変動に伴う間隙水圧応答の評価で、空洞への作用外力すなわち掘削解放力に対しては、せん断変形が卓越するため間隙水圧変動はほとんど零に近くなる。しかし、実際のトンネル掘削で作用する解放力に対しては、切羽面の存在により等方応力成分が発生するため、掘削に伴い間隙水圧は変化する。このため、二次元解析結果ではせん断応力変化を過大評価し、外力変動に伴う間隙水圧応答を適正に評価していない危険性がある。

このような掘削に伴う間隙水圧応答の評価についての例として、二次元平面ひずみ場と逐次掘削過程を考慮した軸対称場での立坑掘削解析結果¹⁹⁾を取り挙げる。なお、この解析事例では、解析対象を軟岩と想定しているので、Terzaghiの有力応力の定義および、間隙水圧係数 B が1を満足する条件を基礎式とし、ダイレイタンス特性

を考慮しない構造骨格を線形弾性体と仮定した応力・浸透連成解析手法を適用している。

図-3は、立坑周辺での二次元平面ひずみ場と軸対称場での有効応力径路を示したものであるが、このように両者の径路は全く異なる。特にMohr-CoulombあるいはDrucker-Prager等の破壊規準を想定した場合に、二次元平面ひずみ場の結果では、掘削直後が最も厳しい応力状態となるのに対して、軸対称場の結果では、掘削後の最終定常状態が最も厳しい応力状態となる。この相違は、逐次掘削による切羽の進行の影響を考慮するか否かによる。したがって、逐次掘削過程を考慮した結果から判断した場合には、二次元平面ひずみ場の解析での有効応力径路は、掘削直後の正八面体せん断応力 τ_{oct} を過大評価し、実現象とは異なる径路を追跡している危険性がある。

以上の議論より、外力変化に伴う連成効果が顕著に現れるのは、材料のダイレイタンス特性を考慮しない場合には、外力変動に伴う応答の成分の内、等方応力が卓越する場合に限定されること、ならびに連成解析を適用する上では、外力に対する応答を的確に評価する必要があるためにモデル化上の制約があることを示した。

4. 地下水流動の設計に関する検討

一般的な場での連続式を誘導し、連成効果に対する影響因子について考察を加えた結果に基づく、地盤・岩盤の連成効果の地下水流動特性に及ぼす影響は、表-3に

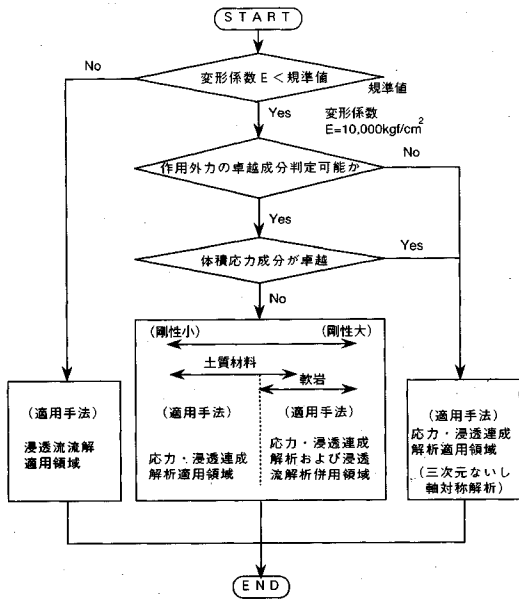


図-4 地下水流動の設計に関するフロー

表-3 地盤・岩盤の連成効果の地下水流動特性に及ぼす影響一覧表

		規準値 変形係数 $E=10,000 \text{ kgf/cm}^2$	
		(剛性小) 土質材料	(剛性大) 軟岩
せん断応力卓越場	即時的応答	影響小 (工学的には無視される)	影響さらに小 (工学的には無視される)
	再配分過程	影響中 (剛性低下に伴い影響が発生)	影響小 (工学的には無視される)
体積応力卓越場	即時的応答	影響大 (ほぼ B 値 = 1 が成立)	影響小 (B 値 < 1)
	再配分過程	最も影響大	影響小 (工学的には無視される)

c) せん断応力成分が卓越する場合には、再配分過程の間隙水圧応答で、前述の Christian ら¹³⁾の解との比較に示したように、材料の圧密係数が小さい場合には連成効果の影響が現れる。したがって、このケースは、材料の剛性に応じて浸透解析と連成系の解析手法を併用する中間領域に属する。ただし、表-3 に示した規準値にその変形係数が近い軟岩の場合には、工学的判断として浸透流解析が適用可能である。

5. 結 論

本研究で得られた結論は、以下のように要約される。

- 1) 一般的な場における地下水流動に関する支配方程式の誘導より、地下水流動特性は、理論的には間隙水と変形との相互作用としての、固体相と液体相の体積変化に支配され、従来の浸透流解析は、これらの体積変化について工学的な近似の下で簡素化した理論である。
- 2) 連成系の解析で評価される間隙水と変形との連成効果の地下水流動特性に及ぼす影響は、対象とする材料の特性に応じて大きく変化する。その一つの判定規準として、対象とする材料が変形係数 $10,000 \text{ kgf/cm}^2$ 程度を上回るか否かがある。
- 3) 連成効果はその作用外力の成分により大きく左右されることから、連成系の解析手法を適用する上では、そのモデル化において作用外力を適切に評価する必要があり、適用される解析手法は制約される。
- 4) 設計段階で地下水流動特性を合理的に評価するためには、連成系の解析の適用を次のような3つのケースに限定する必要がある。

(a) 掘削問題のように構造系の変化に伴い複雑な作用外力が作用する場合

(b) ダイレクタンシー特性を考慮しない場合に、材料の変形係数が、表-3 に示す規準値以下であり、かつ

示すように要約される。

同表に示す連成効果の地下水流動特性に及ぼす影響の評価より、設計に適用すべき地下水流動の評価手法の判定規準は、材料特性と、作用外力の二つに分けられる。

上記の規準より、地下水流動の設計に適用すべき評価手法の選択は、図-4 に示すフローに従い、以下に示すように行えばよいことになる。

- 1) 材料特性に関する判定規準は、対象とする材料の変形係数 E が $10,000 \text{ kgf/cm}^2$ 程度を上回るか否かとする。材料の物性がこの規準を上回る場合には、間隙水と変形との連成効果の影響が小さいため、地下水流動特性の評価には、浸透流解析が適用可能となる。このような材料で有効応力解析を実施する場合には、山上ら¹⁾の方法による浸透流解析により算定される浸透力を、独立した釣合式に物体力として代入する手法が適用可能となる。ただし、浸透力を評価する式で、 β が 1 以下となることに留意する必要がある。
- 2) 第2段階としては、その対象とする材料の変形係数が規準値を下回る場合で、構造系に作用する外力の成分について判定する。その際の判定規準に基づき適用される地下水流動特性に関する評価手法は、次のように区分される。

a) 掘削問題のように、二次元場と三次元場ではその作用外力の成分の評価が異なる場合および、作用外力の卓越成分が規定できない場合には、連成効果を考慮した解析手法が適用されるべきである。

b) 等方応力成分が卓越する場合には、連成効果を考慮した解析手法が適用されるべきである。

その作用外力での応答で等方応力成分が卓越する場合

(c) 作用外力に対する応答でせん断応力成分が卓越するが、材料の変形係数が表—3に示す規準値を大きく下回る場合

本論文では、地下水流動特性評価に関する試案を示したが、今後原位計測結果の分析により、この試案の妥当性について検討を加えて行く所存である。

参考文献

- 1) 山上拓男・植田康宏：有限要素法による圧密現象の一解法，土木学会論文報告集，第302号，pp.67～78，1980年10月。
- 2) 大西有三・村上 毅：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文報告集，第298号，pp.87～96，1980年6月。
- 3) Hudson, J. A. : Rock Mechanics Principles in Engineering Practice, Butterworths, pp. 62～63, 1989.
- 4) Biot, M. A. : General Theory of Three-dimensional Consolidation, Jour. Appl. Phys., Vol. 12, pp.152～164, 1941.
- 5) Biot, M. A. : Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media, Jour. Appl. Phys., Vol. 33, pp.1482～1498, 1962 .
- 6) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.58～59，1976年。
- 7) 岡二三生：2相混合体理論からみた有効応力の定義について，土木学会論文報告集，第299号，pp.59～64，1980。
- 8) 岡二三生・中川加明一郎：二相混合体よりみた有効応力概念について，第32回土木学会年次学術講演会講演集，—64，pp.114～115，1977年10月。
- 9) Terzaghi, K. : Theoretical soil Mechanics, John Wiley & Sons., New York, pp.11～15, 1943.
- 10) Skempton, A. W. : Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks, Conf. Pore Pressure and Suction in Soils, pp.4～16, 1960.
- 11) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：堆積軟岩（多孔質凝灰岩）の弾塑性挙動，土木学会論文報告集，第271号，pp.83～95，1978年3月。
- 12) Narasimhan, T. N. and B. Y. Kanehiro : A Note on the Meaning of Storage Coefficient, Water Resour. Res., Vol.16, No.2, pp.423～429, 1980.
- 13) Christian, J. T. and J. W. Boehmer : Plain Strain consolidation by Finite Elements, Proc. ASCE, SM 4, pp.1435～1457, 1970.
- 14) 田村 武：Biotの圧密方程式に関する一考察，土木学会論文報告集，第274号，pp.57～67，1978年6月。
- 15) 田村 武：多次元圧密における固有値問題とその応用，土木学会論文報告集，第293号，pp.79～89，1980年1月。
- 16) 菊地宏吉・斎藤和雄・楠健一郎：ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について，第14回国際ダム会議提出論文，1981。
- 17) 土木学会：本州四国連絡橋の耐震，地盤に関する調査研究報告書，pp.47～71，1981。
- 18) 宮永佳晴・福原 明：地下石油備蓄基地の設計について，電力土木，No.219，pp.63～74，1989年3月。
- 19) 大津宏康・瀧 治雄・亀村勝美：堆積軟岩における空掘削に伴う地下水流動特性評価に関する検討，第24回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.76～80，1992年2月。
(1991.12.4 受付)

A STUDY ON THE DESIGN OF GEOTECHNICAL ENGINEERING STRUCTURES CONSIDERING INTERACTION BETWEEN VOLUMETRIC STRAIN OF POROUS MEDIA AND PORE WATER

Hiroyasu OHTSU, Yuzou OHNISHI and Katsumi KAMEMURA

This paper described new generalized governing equation associated with groundwater behavior considering physical properties of wide range of porous media from soil material, soft rock to hard rock based on Biot's two phase mixture theory. Through the investigation of physical meaning of each term constituting the generalized equation, physical effect on the feature of groundwater-flow by means of interaction between volumetric strain of porous media and pore water was made clear, and from an engineering viewpoint, a new criterion is proposed, which clarifies the applicable methods to various type of design of seepage problem.