

III-301

岩質材料の応力・浸透連成挙動に関する基礎的研究

佐藤工業（株）（正）○原田 浩二
 名古屋大学工学部（正）京谷 孝史
 名古屋大学工学部（正）市川 康明
 名古屋大学工学部（正）川本 脩万

1. はじめに

半無限安定空間としての岩盤は、石油地下備蓄、放射性廃棄物の地下処理や電力貯蔵施設など、多様なプロジェクトが今後ますます増加するものと予想される。特に、放射性廃棄物における地下水による核種移行の問題や石油備蓄における水封の問題など岩盤中の水の挙動を正確に把握し、変形・破壊との連成挙動を知ることが重要な意味を持ち始めた。そこで、岩盤における水と応力の連成挙動に対し、混合体理論の立場から有限要素法による数値解析を定式化すると共に、岩質材料における連成挙動に関する基礎的データを得ることを目的に室内試験を行い、変形と水の流量を調べた。

2. 応力・浸透連成理論に基づく数値解析

混合体理論に基づいた応力浸透連成場における支配方程式は、水で飽和された材料に対して誘導した。本試験では、岩質材料と水の弾性係数を比較した結果、水の密度変化も考慮することにした。そこで、以下の式を得る。

[質量保存則]

$$\alpha \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{K_s} \frac{\partial \bar{\sigma}_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v}_s = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla h) \quad , \quad \alpha = \frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_w} \quad (1)$$

[運動方程式（つりあい式）]

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \bar{\rho} \mathbf{b} = \nabla \cdot (D \boldsymbol{\epsilon}) - (1-\beta) \nabla p + \bar{\rho} \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad , \quad \beta = \frac{1}{K_s} \cdot \frac{1}{\text{tr}(\mathbf{D}^{-1} \mathbf{I})} \quad (2)$$

ここで、 h ：水頭ポテンシャル、 $\bar{\sigma}_e = 1/3 \text{tr} \boldsymbol{\sigma}_e$ ($\boldsymbol{\sigma}_e$ ：間隙水圧 $p=0$ 時の応力)、 K_s, K_w ：固相、液相の各々の圧縮性を表す剛性係数、 $\mathbf{v}_s$ ：固相の物質点の速度、 $\mathbf{k}$ ：透水テンソル、 n ：間隙率、 $\boldsymbol{\sigma}$ ：応力、 $\bar{\rho}$ ：混合体密度、 $\mathbf{b}$ ：体積力、 $\boldsymbol{\epsilon} = D \boldsymbol{\epsilon}$

次に、上記(1),(2)式に適当な境界条件、初期条件、構成則のもとで、有限要素法を適用する。諸条件をTable.1に、軸差応力一軸ひずみ関係をFig.1に、軸差応力の経時変化をFig.2に、各単位時間の水の流量の経時変化をFig.3に示す。

Table.1 Material constant for analyses

	Case 1	Case 2	Case 3
Density of Water ρ_w (kgf/cm ³)		1.0×10^{-3}	
Compressibility of water K_w (kgf/cm ³)		2.0×10^4	
Density of solid ρ_s (kg/cm ³)		1.0×10^{-3}	
Compressibility of solid K_s (kgf/cm ³)	7.300×10^4	7.300×10^4	7.300×10^4
Young's modulus of skelton E (kgf/cm ²)		7.300×10^9	
Poisson's ratio of skelton ν		0.222	
Porosity n		0.399	
Applied pressure of water (kgf/cm ²)	25.0		5.0

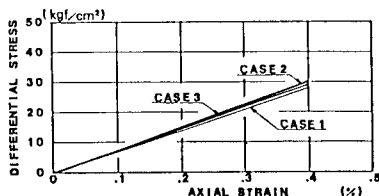


Fig.1 Relation between differential stress and axial strain

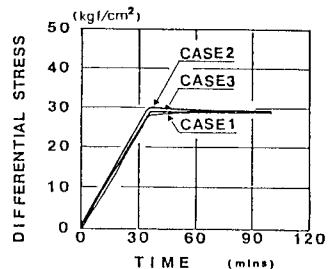


Fig.2 Change of differential stress at different times

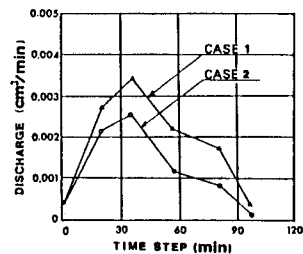


Fig.3 Discharge of water at different times

3. 実験

岩質材料の応力・浸透場を調べることを目的として、従来の三軸圧縮試験用圧力セルを改良して(Fig. 4)、供試体に水を浸透させながら三軸圧縮試験を行った。本実験は、大谷石を用いて、間隙水圧により、材料の基本的変形挙動がどのように変化するか調べることを第一の目的として、供試体が十分に弾性限内にあると考えられる範囲で行った。試験方法は、ひずみ制御で行い、通常の1/10の速度である1分間に0.01%とした。次に、定常状態から同一の供試体を用いて拘束圧（油圧）25kgf/cm²のもとで、水圧を20、15、10、5 kgf/cm²の順に4ケースの実験を行った。以後、水圧 5、10、15、20 kgf/cm²の4ケースをそれぞれケースA、B、C、Dとする。材料の物性値をTable.2に、軸差応力-軸ひずみ関係をFig.5に、軸差応力の経時変化をFig.6に、水の流量の経時変化をFig.7に示す。また、載荷前後での透水係数の変化はTable.3のようになるが、弾性域内での実験にもかかわらず、増加する傾向がある。

Table.2 Material constant

YOUNG'S MODULUS	74 20 kgf/cm ²
POISSON'S RATIO	0.156
UNIAXIAL STRENGTH	9 5 kgf/cm ²
POROSITY	39.88 %
DRY DENSITY	1.442 g/cm ³

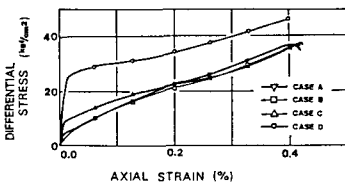


Fig.5 Relation between differential stress and axial strain

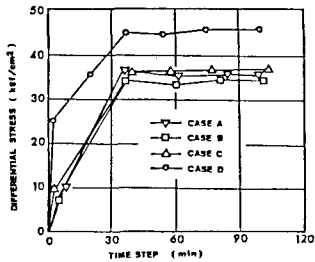


Fig.6 Change of differential stress at different times

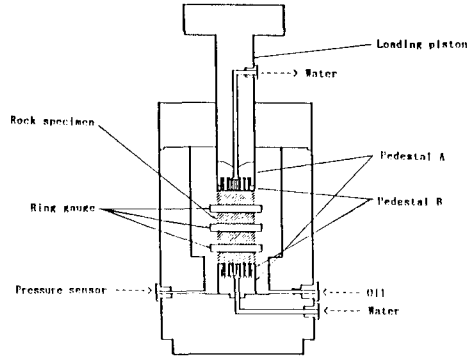
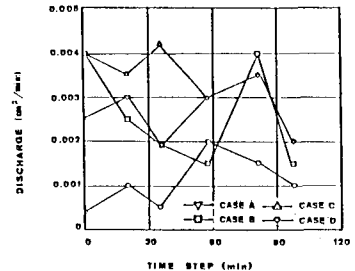


Fig.4 Pressure cell

Table.3 Coefficients of permeability

	Before loading (cm/sec.)	After loading (cm/sec.)
Case A	2.515×10^{-7}	2.683×10^{-7}
Case B	1.761×10^{-7}	1.380×10^{-7}
Case C	9.101×10^{-8}	1.714×10^{-7}
Case D	1.685×10^{-8}	4.192×10^{-8}

Fig.7 Discharge of water at different times



4. おわりに

水で飽和された大谷石の弾性限度内での浸透・圧縮試験の結果は、連成理論による数値解析が予測した結果とはかなり異なった。その主たる原因として考えられるのは、既存間隙の不均質な配置および弾性的変形挙動には影響を及ぼさない程度のマイクロクラックの増加による水の移動の偏りであり、このことから、水が存在しない時には問題とならないような微視的な構造およびその変化も、水が存在する場合の変形挙動では極めて重要な因子となることが推測される。今後、巨視的不連続面の形成といった複雑な構造変化と水の移動の関係を明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) Green, A. E. and Naghdi, P. M.; "On basic equations for mixtures", Quart. J. Mech. and Applied Math., Vol. XXII, pp. 427-438 (1969)
- 2) Nikolaevsky, V. N.; "Mechanics of Fluid-Saturated Geomaterials : Discusser's report", Mechanics of Geomaterials, Z. Bazant (ed.), John-Wiley & Sons, pp. 379-401 (1985)