## 膨潤評価式を導入した熱 - 水 - 応力連成解析コードの適用性に関する検討

京都大学	学生会員	操上広志*	正会員	小林晃、	大西有三
		ハザマ	正会員	千々松正和	
	茨城大学  正会員 小		小峯秀如	ŧ	
核	燃料サイク」	し開発機構	正会昌	杉田裕	伊藤彰

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において人工バリアや周辺岩盤の長期挙動を適切に予測することが安全 評価の信頼性を向上させる上で重要である。人工バリアやその周辺岩盤で起こると考えられる連成現象の解 析は、熱、水、応力等の挙動の時間空間的な変遷といった複雑な問題を取り扱うこととなり、これらの評価 は非常に複雑なものとなる。本研究は、小峯らの提案している膨潤評価式<sup>1)</sup>を連成現象モデル<sup>2)</sup>に導入し、 より信頼性の高いモデルの構築を目的とする。

2. 膨潤モデルの概要

小峯らによると、ベントナイトの最大膨潤応力 $\sigma_{symax}$ は、微視的に捉えると、負に帯電した層状体の間に 構築された拡散二重層のイオン濃度を薄めるために水分子が取り入れられることによって生じる反発力  $f_r$ と、 Van der Waals 力による引力  $f_a$ の和として以下のように表される。

$$\sigma_{swmax} = \frac{1}{CEC} \sum_{\substack{i=Na^+, Ca^{2+}, \\ K^+, Mg^{2+}}} \left[ EXC_i \left\{ (f_r)_i - (f_a)_i \right\} \right]$$
(1)

ただし、斥力を正とする。ここで、iはNa<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>のいずれかの交換性陽イオンを示す。また、*CEC* は陽イオン交換容量、 $EXC_i$ は交換性陽イオンiの交換容量である。

ベントナイトの膨潤に影響を及ぼすパラメータは、ベントナイトの種類に依存するものと依存しないもの に分けられる。ここで、化学反応などによるベントナイトの特性の変化や物質移行を考慮しなければ、パラ メータの中で時間的に変化するものは、温度と間隙比だけである。すなわち、連成現象の解析の中で、最大 膨潤応力は温度と間隙比のみで算出できることを意味している。図-1には膨潤評価式から算定される最大膨 潤応力の値を示す。しかし、この膨潤評価式では完全飽和での膨潤応力を求めることはできるが、不飽和か ら飽和に至るベントナイトの浸潤過程での膨潤応力の変化を捉えることができない。ここで、膨潤圧をベン トナイト層間の水分ポテンシャルの低下量と定義すると、膨潤応力の水分量による変化は水分特性曲線を用 いて表すことが出来る。すなわち、膨潤応力の変化量ムのsumaxを、水分ポテンシャルの変化量ムψを用いて、以 下のように表す。

(2)

$$\Delta \sigma_{\rm sw} = F(S_a) \Delta \psi$$

ここで、Fは膨潤圧が膨潤応力として外部に作用する割合を 表す関数であり、以下の関係を満たす。

$$\sigma_{sw\max} = \int_0^\infty F(S_e) d\psi = \int_0^1 F(S_e) \frac{\partial \psi}{\partial S_e} dS_e$$
(3)

運動量保存式(力のつりあい式)

$$\left\{\frac{1}{2}C_{ijkl}\left(\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}\right) + S_r \rho_{w0} g \Delta h \delta_{ij} - \xi F \rho_{w0} g \Delta h \delta_{ij} - \beta \Delta T \delta_{ij}\right\}_{,j} = 0 \quad (4)$$



図-1 膨潤評価式から算定される ベントナイトの最大膨潤応力の値

キーワード 高レベル放射性廃棄物、ニアフィールド、人工バリア、熱-水-応力連成現象、ベントナイト、膨潤 \*連絡先〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5129 FAX 075-753-5129

## 水の質量保存式

$$-\rho_{w}\frac{\partial\theta}{\partial\psi}\frac{\partial h}{\partial t} - \left[\chi\rho_{w}\frac{\rho_{w}gK_{ij}}{\mu}h_{,j} + (1-\chi)\left\{\xi\rho_{w}(D_{\theta})_{ij}\frac{\partial\theta}{\partial\psi}(h_{,j}-z_{,j}) + (1-\xi)\rho_{w}\frac{r_{k}\rho_{w}gK_{ij}}{\mu}h_{,j} + \rho_{w}(D_{T})_{ij}T_{,j}\right\}\right]_{,i}$$

$$+Q = 0$$

$$(5)$$

エネルギー保存式

$$\left(\rho c\right)_{m}\frac{\partial T}{\partial t} + \left\{\theta \rho_{w} v_{i} T - \left(\lambda_{m}\right)_{ij} T_{,j}\right\}_{,i} + \left\{L \rho_{w} \left(D_{\theta v}\right)_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \left(h_{,j} - z_{,j}\right)\right\}_{,i} + Q^{h} = 0$$

$$\tag{6}$$

式(3)における関数Fを、例えば、膨潤応力が飽和度、その平方根、2乗、3乗に比例するモデルとして、以下のように与えることができる。これらのモデルを図示したものを図-2に示す。ここでは以下のように定義した各関数を用いて計算を行い、実測値との比較を行った。

(a) 
$$F = \frac{1}{2}\sigma_{swmax}S_r - \frac{1}{2}\frac{\partial S_r}{\partial \psi}$$
 (b)  $F = \sigma_{swmax}\frac{\partial S_r}{\partial \psi}$  (c)  $F = 2\sigma_{swmax}S_r\frac{\partial S_r}{\partial \psi}$   
(d)  $F = 3\sigma_{swmax}S_r^2\frac{\partial S_r}{\partial \psi}$  (e)  $F = 2\sigma_{swmax}(1 - S_r)\frac{\partial S_r}{\partial \psi}$  (7)

4. モデルの適用性検討

図-3 には、クニゲル V1 に対して実施された膨潤試験の結果と今回構築した連成解析モデルで解析評価した結果を示す。実験はクニゲル V1 単体を用いて実施しており、供試体の寸法は直径 20mm、高さ 20mm である。また、供試体の乾燥密度は 1.6g/cm<sup>3</sup>、初期含水比は 9.0%である。解析においては式(7)に対応して初期の含水比に相当する膨潤圧を初期応力として与えている。浸潤開始からの解析結果は、関数 F に関して式(7-e)を採用した場合が最も実測値と合う結果となった(図-3 は式(7-e)を用いた結果)。これは、浸潤初期における飽和度の比較的低いときに膨潤応力の大部分が発揮されることを意味している。



5. まとめ

今回構築したモデルによりベントナイト材料の膨潤応力の発生状況をより高精度に予測できることが可能 となった。今後は、種類の異なるベントナイトおよびケイ砂混合材料に対する適用性を検討していくととも に、膨潤に伴うベントナイト内部の間隙構造等の変化予測、ベントナイト材料の力学挙動(変形挙動)等の 評価等を行っていく必要があると考えられる。

【参考文献】1) Komine, H. and Ogata, N.: New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 460-475, 2003.、2) Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M.: Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol.24, pp. 403-424, 2000.

-356-