

III-350 地下空洞周辺の応力-浸透-熱移動連成解析

(株)間組 正会員 小林 晃
京都大学 正会員 大西有三

1. はじめに

岩盤内に空洞を建設する時、応力の再分配によって空洞周辺の透水性が変化することはよく知られている。特に亀裂性岩盤の場合、その浸透特性は亀裂の存在の仕方に支配され、掘削による影響を的確に予測することは簡単ではない。さらに、放射性廃棄物処分施設のように熱源を有する場合には、その周辺地山の挙動は、応力-浸透-熱移動の連成した極めて複雑な現象となりその予測はさらに難しくなる。近年、放射性廃棄物処分について国際的に関心が集まっており、スウェーデンのストリーバ地方における国際共同研究をはじめ各国でこのような複雑な現象理解のために多くの実験や実測が行われている。しかし、この現象を実験的に理解することは容易ではなく、そのため解析的手法を用いてこのような連成現象を把握する試みも多々なされており、将来予測の一助として極めて有効と考えられている。本論では先述のような岩盤内地下空洞周辺の応力-浸透-熱移動連成挙動を理解するうえで有効となる解析手法を紹介し、ストリーバプロジェクトへの応用例を示す。

2. 考え方と理論

本論で用いた応力-浸透-熱移動連成挙動を解析する支配方程式、初期・境界条件および数値解析手法については参考文献に譲り、ここでは透水性-応力・温度関係の扱い方について述べる。

透水係数は固有透水係数 k_0 と動粘性係数 μ にわけて考え、 μ についてはその時点の温度での値を用いる。

k_0 は熱応力を含めた岩盤内の応力状態に依存している。本論では、Iwaiの実験成果を用いたKelsallらの手法を有限要素法に取り入れた。本論で用いた k_0 の応力依存関係式は以下のようである。

$$\frac{k_e}{k_{od}} = \frac{\left\{1 + A\left(\frac{\sigma_{eo}}{\xi}\right)t'\right\}^3}{\left\{1 + A\left(\frac{\sigma_e}{\xi}\right)t'\right\}^3}$$

ここで、 k_0 は σ_0 で表される応力状態での k_0 であり、 k_{od} が基準となる応力状態 σ_{od} 、例えば現位置透水試験を行った所の応力状態における k_0 であり、 k_{od} 、 σ_{od} とも既知とする。ここで用いた σ_0 は k_0 の方向と垂直な方向に働くその時点における有効応力であり、本論では k_0 の異方向性を考慮し、 σ_0 はその主方向に働く有効応力を用いている。また A 、 t' 、 ξ は亀裂に関する定数である。

この手法は元来、単一亀裂内の流れと亀裂面に垂直に働く繰返し荷重との実験関係式を岩盤の k_0 の応力依存式として用いているため、岩体自体の k_0 の応力依存性は無視できるものと仮定している。

3. ストリーバ広域透水試験でのケーススタディ

ストリーバプロジェクトでは、難透水性岩盤の広域透水係数を求める技術を確認するため、地下335mのところに実験室を設け、実験室内の湿度変化と実験室周辺のボアホールによる動水勾配測定結果を用いてThiemの式によって、広域の透水係数を測定する広域透水試験が行われている。

本論ではこの試験のうち実験室温度が20℃と30℃の時の結果と比較を行うが、空洞形状、水理境界、変位境界等の詳細なデータがないので図-1のようにモデル化し、初期状態の物性は表-1のように設定した。そして初期応力を $K_0=0.5$ として仮定し、空洞掘削を行った。

図-2はモデル空洞の側壁水平方向の水平方向透水係数分布と現地試験の結果の比較であるが、これによると空洞形状を4角形と仮定したにもかかわらず、その傾向をよく表している。この空洞付近の透水係数の減少は接線方向の応力増加によって亀裂が閉じるためと思われる。また同図では30℃に空洞温度が上昇した時には熱応力の発生により、さらに亀裂が閉じ透水係数が小さくなっている様子も実際と似ている。

表-1 初期状態の物性値

E	5×10^6 tf/m ²	ν	.33	k_0	1×10^{-16} m ²
Cvs	837 J/kg°C	KTs	3×10^{-3} kJ/msec°C	α_s	8×10^{-6}
A	.0276	ξ	.00217	t'	.728

表-2は温度変化による空洞内流入量変化である。これは水理境界が確かでないため定量的評価は難しいが、実測の20%の減少に対し、全ての非線形性を考慮した場合には32.9%の減少を、 k_0 の非線形性のみを考慮した場合には39.4%の減少を示しており、温度変化による流入量変化には、 μ の変化の影響が大きいことがわかる。

また、図-1には水頭分布図が併せ示してあるが、温度変化によって水頭値が大きくなっている様子がわかり、これも実際の傾向と似ている。

このようにみかけの k_0 の依存性として、亀裂内の関係式を用いてもストリーパプロジェクトで見られるような亀裂が浸透挙動において支配的であるような岩盤では本解析手法によりおおそ實際現象を再現できることがわかる。

また、図-3は実測値との比較はないが、鉛直方向透水係数の水平方向分布である。これによると、空洞壁面より7mほどの所に透水性の高いゾーンが見られ、弾性解析にもかかわらず、透水係数の変化により、ゆるみ域の発生も考察できることがわかる。

4. 結論

本論では、著者らがすでに開発した応力-浸透-熱移動連成解析コードに透水性-応力-温度の非線形関係を組み込み、ストリーパプロジェクトへの応用を試みた。その結果、ストリーパ地域のような亀裂性岩盤では亀裂内の透水性-応力関係を用いて連続体として解析しても、その非線形挙動をシュミレートできることと、 μ の非線形性は温度による流量変化に影響を与え、無視できないことがわかった。

参考文献

- 1) 小林晃：熱移動-浸透-応力連成解析について，間組研究年報，pp269-281，1985。
- 2) 大西有三，柴田祐章，小林晃：有限要素法による応力-浸透-熱移動連成問題解析手法，土木学会論文報告集No.370/Ⅲ-5，1986。
- 3) Kelsall, P.C., Case, J.B. and Chabaaes, C.R.: Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. vol 121, no. 3, pp. 123-135, 1984

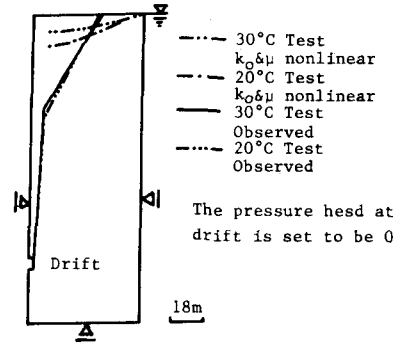


図-1 ストリーパ広域透水試験のモデルと水頭分布図

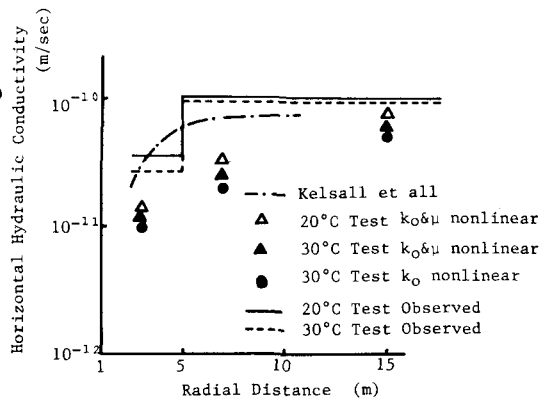


図-2 側壁水平方向の水平方向透水係数分布図

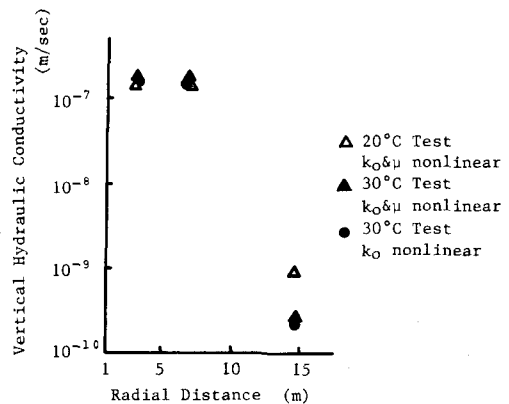


図-3 側壁水平方向の鉛直方向透水係数分布図

表-2 温度変化による空洞内流入量の変化 (ml/min)

非線形性を考慮した物性	空洞内流入量	
	空洞温度 20°C	空洞温度 30°C
k_0	31	18.8
μ	58.5	63.3
$k_0 \& \mu$	31	21
ストリーパ実測値	50	42