

(37) スウェーデン Hard Rock Laboratory 坑道掘削に伴う地下水位低下予測解析
A Numerical Simulation of Drawdown during Excavation of the Access Tunnel
of the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden

内田 雅大*・澤田 淳*・ウィリアム デアショビツ **・ピーター ウォーلمان **
Masahiro UCHIDA, Atsushi SAWADA, William S. DERSHOWITZ and Peter C. WALLMANN

A set of numerical simulations of drawdown during excavation of the access tunnel of the Äspö Hard Rock Laboratory were carried out using discrete fracture network code, FracMan/MAFIC. A 2km length, 2km width and 1km depth region which includes whole island and the drift was modeled. A base case model comprises three components; deterministic shear zones, deterministic fractures which correspond to "conductor" in each packed-off interval, and stochastically generated background fractures. Also, sensitivity analyses were carried out with antifracture feature and intersection zone feature which models modified transmissivity along fracture intersection. The base case generally agreed with observation, whereas local heterogeneous responses require further calibration with a number of interference tests.

1. まえがき

スウェーデン南東部のエスポ(Äspö)島に建設され今年完成した地下研究施設においては、高レベル放射性廃棄物の処分の安全評価上の重要課題を調査、モデル化し、技術を実証するための包括的試験が計画されている。地下研究施設は、本土のSimpevarp からバルト海の下を通過する斜坑で結ばれており、斜坑は、Simpevarp からÄspö島南部までの間の約1500m 程を直線状に結んだ後、六角形のスパイラルを2 回繰り返して海面下460mの最下底部に到達している。このアクセストンネルの掘削に伴う間隙水圧変化のモニタリングがエスポ島内を始めとする周辺地域の40孔以上のボーリング孔において行われており、最大約84m の水位低下が観測されている。同時にアクセストンネル内においては、坑道湧水量のモニタリングも行われた。

これらのデータを使用し、ボーリングデータから構築されたモデルを用い、アクセストンネルの掘削に伴う間隙水圧変化の予測と実測の比較を行う試みが、スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社(SKB) の主催するモデリング・タスクフォースの課題として実施された。本論文においては、動燃が行った亀裂ネットワークモデルによる解析の結果を述べる。

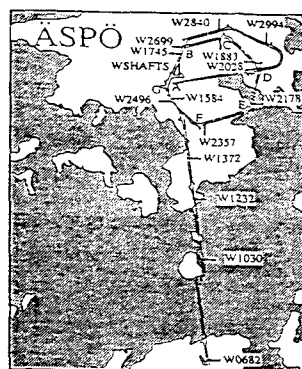
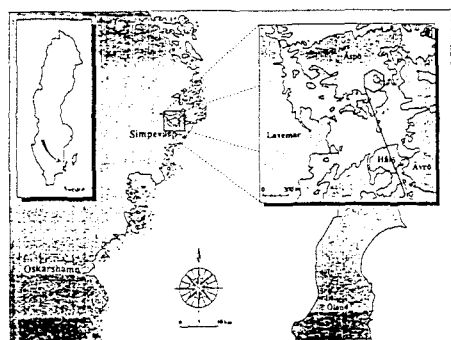
2. トンネルの掘削に伴う間隙水圧変化試験

トンネル掘削工程

今回の解析対象となったÄspö島に至るアクセストンネルは、図-1,2 に示すように、W0682 からÄspö島南部で六角形のスパイラルを一周したコーナーG 付近までである。その掘削工程は、1991年6 月から1993年5 月の約2 年間にわたっている。また、図中のWSHAFTS には、深さ215.5mのエレベーター立坑および2 本の換

* 動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所 環境技術開発部

** Golder Associates Inc.



気立坑の合計3本の立坑が掘削されている。

ボーリング孔

Åspö島およびその周辺地域には、多数のボーリング孔が掘削されており、それらのボーリング孔はパッケージで1～6区間に仕切られ、区間内の間隙水圧が常時モニタリングされている。今回の解析においては、Åspö島内の36孔および周辺地域に掘削された3孔の計39孔をモデル化した。

トンネル湧水量

今回の解析に使用されたトンネル湧水量データは、図-2 に示すように13ヶ所に設けられた堰において計測されている。各堰で計測された流量の経時変化は、図-3 に示すようになっている。

3. 解析手法とモデル化

3.1 解析手法

三次元亀裂ネットワークモデル
FracMan/MAFIC は、個々の亀裂を
多角形の平行平板で表現し、亀裂
を決定論的あるいは統計的に発生
させ、亀裂の空間分布をモデル化
することにより亀裂が連続して形
成する移行経路をモデル化するこ
とができる。

個々の亀裂内の流動は、連続の式と Darcy 則に基づき、以下の式で表現される。

$$q = S \cdot \partial h / \partial t - T \nabla^2 h \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S 、 T 、 q 、 ∇^2 は、それぞれ亀裂の貯留係数、亀裂の透水量係数、source/sink term、2次元ラプラス演算子である。

3.2 構造モデル

解析対象となる、アクセストンネルを含む2000m × 2000m × 1000m の領域をモデル化した。(1)破碎帯、(2)透水性亀裂、(3)background fractures、(4)antifractures and intersection zonesの4つの要素をそれぞれモデル化することにより目的とする構造モデルを構築した。

破碎帯：破碎帯は、SKB より提示された合計18枚を決定論的にモデル化した。破碎帯の透水量係数は、 $4.5 \times 10^{-4} \text{ m/s} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 、貯留係数は $0.5 \sim 2.6 \times 10^{-3}$ の範囲である。破碎帯の透水量係数は、全て SKB の値を使用しているが、貯留係数については、SKB が提示していないものについては、 $0.001T^2$ を与

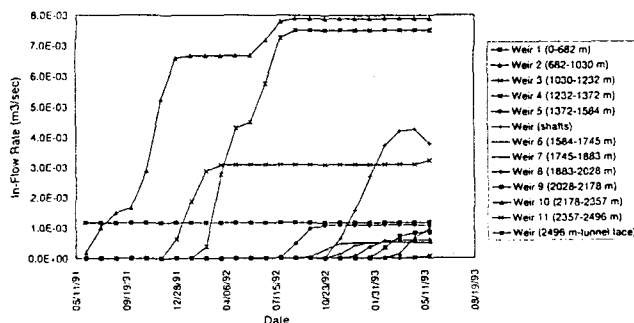


図-3 各堰における流量の継時変化

えた。

モデル化した破碎帯の透視図を、図-4 に示す。

透水性亀裂：透水性亀裂は、ボーリングの各パッカー区間毎に存在が記載されており、規模、透水性が不明であるが、各パッカー区間での水理応答を予測する上においてはモデル化するため、位置についてはパッカー区間の中央を通過すると仮定し、方向はボーリング孔に垂直を仮定した。また、透水性については、比較的高透水性であると予想されることから、破碎帯よりやや低い $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を仮定した。亀裂半径については、他のボーリング孔を直接横切ることがないよう半径30m を一律設定した。

モデル化した透水性亀裂の透視図を、図-5 に示す。

background fractures:background fractures については、小規模の割れ目が岩盤内には多数存在し、これらが破碎帯に囲まれたブロック内の透水性を支配するため統計的にモデル化した。亀裂半径については、地表で計測したトレース長データから対数正規分布、平均値13.7m、標準偏差12.7m を得た。亀裂方向については、アクセストンネル中の亀裂マップにおいて" 湿り " または " 滴下 " と記載されている亀裂の方向データから、bootstrap 法を用い、Fisher係数100 を仮定して発生させた。透水量係数については、破碎帯以外で行った30m 区間長のパッカー試験データから得た、対数正規分布、平均値 $3.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、標準偏差 $7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を使用した。発生させたbackground fracturesを図-6 に示す。

antifractures and intersection zones

基本ケースの他に、感度解析的に破碎帯の交差部の水理特性をモデル化する試みを行った。antifracture は、水理バリアとしての性質を有する破碎帯であり、破碎帯自体は高透水性を有するが、破碎帯を横断する方向の透水性は、断層粘土等の低透水性の物質が存在するため低透水性を有する可能性があるため、その効果をモデル化するものである。計算モデル上は、antifractureに指定された破碎帯と交差する全ての亀裂および破碎帯の交差部から指定範囲内（今回は50m）の要素の透水量係数は低減され、antifractureを横断する方向の透水性が低下するようモデル化される。今回は、NNW-7,NE-1を対象として、交差する亀裂/ 破碎帯の透水量係数を、1/100,および1/1000に低減した（図-7）。

intersection zonesは、指定された破碎帯あるいは亀裂同志の交差部の透水量係数を低下あるいは増加させるものである。今回は、NNW-7,NE-1を対象とし、交差部から50m 以内の要素の透水量係数を1/10,1/100,1/1000に低減した。

3.3 境界条件

上部境界条件：バルト海については、圧力一定境界とした。また、海底堆積物の影響を考慮し、バルト海の下20m の透水量係数を1/100 に低下させた。Åspö島については、内部節点としてモデル化した。

側方境界条件：側方境界については、静水圧境界とした。

下部境界条件：下部境界については、不透水境界とした。

内部境界：アクセストンネルについては、Time-varying flow boundary conditionとした。ボーリング孔については、パッカー区間の節点の合計流量を0 とした。

3.4 解析ケース

解析については、表-1 に示すように13ケースを行った。

4. 解析結果

各ボーリング孔毎の水位変化の実測値と解析値の差の絶対値の平均を図.8に示す。これから、基本ケースよりも実際の計測との差が少ないのが、ケース4 とケース7 であることがわかる。

また、特にケース2 は、差の絶対値も大きいだけでなく、差の増大する時期が他のケースと較べ早くから始まっており、本来供給されるべき水の供給が行われていないことを示唆している。

これらの解析の結果をまとめると、

- ①NNW-7 の透水量係数の低減は、応答を改善する。
- ②NE-1とNNW-7 の水理的連結性を弱くすることは応答を改善する。

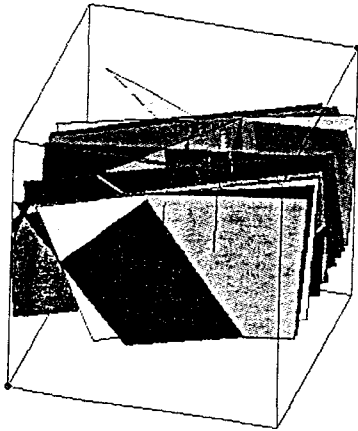


図-4 破碎帯モデル (手前が南)

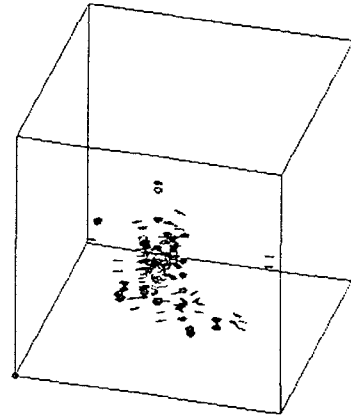


図-5 conductor の決定論的モデル

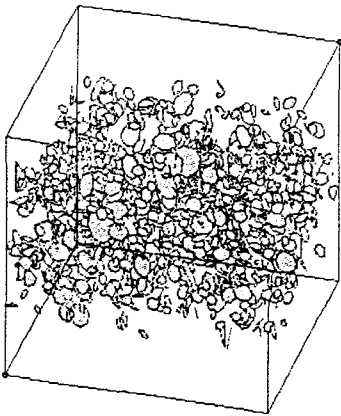


図-6 background fractures

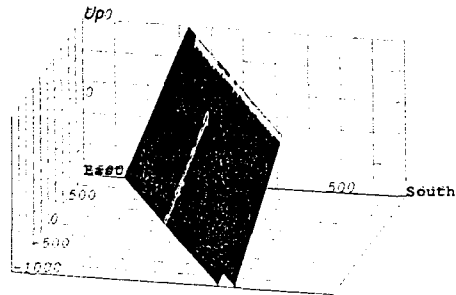


図-7 antifractureモデル
(NNW-7とNE-1の交差部)

表-1 解析ケース

ケース	側方境界条件	background fracture	破碎帯の透水量係数	貯留係数
1	静水圧	有り	基本ケース	基本ケース
2	不透水	有り	基本ケース	基本ケース
3	静水圧	無し	NNW-7, NE-1交差部1/1000	基本ケース
4	静水圧	無し	NNW-7, NE-1交差部1/1000	$0.001T^{0.5}$
5	静水圧	無し	NNW-7, NE-1交差部1/1000	$0.01 T^{0.5}$
6	静水圧	無し	NNW-7, NE-1交差部1/10	$0.001T^{0.5}$
7	静水圧	無し	NNW-7, NE-1交差部1/100	$0.01 T^{0.5}$
8	静水圧	無し	NNW-7: $T=0.1T$	
9	静水圧	無し	NNW-7: $T=0.01T$	
10	静水圧	無し	NNW-7, NE-2交差部1/10	
11	静水圧	無し	NNW-7, NE-2交差部1/100	
12	静水圧	有り	antifracture: NNW-7, NE-1交差部1/100	
13	静水圧	有り	antifracture: NNW-7, NE-1交差部1/1000	

③NE-1,NNW-7両方をantifractureにすると差が拡大する。

④側方境界を不透水境界とすると、水の供給が絶たれ応答を過大にする。

このことは、基本ケースでは、NNW-7への地下水の供給が多すぎること0示唆しており、これを改善するにはNNW-7自体の透水量係数の低減、NE-1との水理的連結性の低下をある程度考慮する必要があるが、NNW-7,NE-1両方をantifractureにすると水の供給が余りにも少なくなることを示唆している。

次に、特徴的なステップ状の水位低下を示したKAS02 孔における間隙水圧の継時変化を見てみると、図-9のように、区間.6(MA26)の大きな水位低下に最も近い水位低下を示したケース13でも、同じボーリング孔の他の区間で見ると、深い区間である区間MA21~MA23では、逆に解析の方が水位低下を過大評価しており、ローカルな現象をモデル化するにはローカルな不均質性をモデル化する必要があることがわかる。

これらのことから、今回の解析のように、破砕帯を均一な透水性でモデル化し、ローカルな透水量係数や各ボーリングで行った干渉試験(クロスホール水理試験)のデータを反映していないモデルではローカルな現象を正確に再現させることには限界があると考えられる。

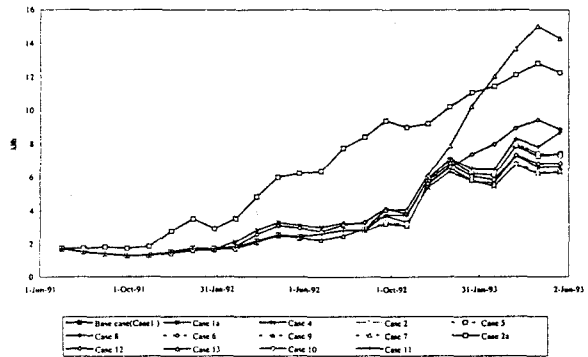


図-8 全区間の差の絶対値の平均値

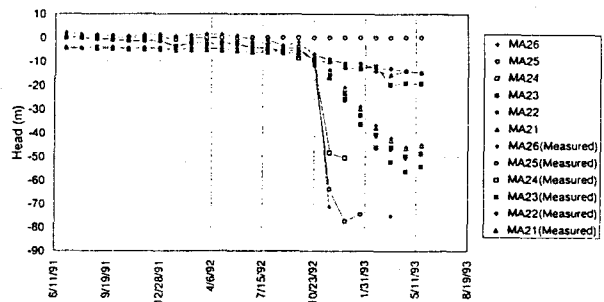


図-9 KAS-02の各区間の実測と解析結果の比較

5. まとめ

- ・SKB の提示した構造モデルは、立坑掘削前では実測値と解析値の差の絶対値の平均が2m程度、立坑掘削後で8m程度であり、モデル全体の平均的圧力応答は妥当と考えられる。
- ・圧力の実測値は同一孔の中でも異なる挙動を示しており、この挙動までモデル化するためには各ボーリング孔で行われた干渉試験に対してモデルのキャリブレーションを行う必要がある。
- ・坑道掘削に伴う水位低下の計測とモデル化は、水理モデルの検証に有効と考えられる。
- ・坑道湧水量を、内側境界条件に使用する手法は、緩み域の複雑な現象のモデル化を必要としない有効な方法と考えられる。

6. 参考文献

- 1)Uchida, M. et al.:Discrete-fracture modelling of the Äspö LPT-2, large-scale pumping and tracer test, SKB International Cooperation Report, 1994.
- 2)内田他: スウェーデンHRL 長期揚水試験とトレーサー試験の評価2.三次元亀裂ネットワークモデルによる解析とその結果, 第9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.157 ~162,1994.1.