

Äspö Hard Rock Laboratory建設に伴う地下水 流動の変化に着目した解析モデルの検証

長谷川琢磨¹・田中靖治²・馬原保典³・五十嵐敏文⁴

¹正会員 工修 電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:t-hase@criepi.denken.or.jp

²正会員 工博 電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³正会員 工博 京都大学 原子炉実験所 (〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目)

⁴正会員 工博 北海道大学 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

スウェーデンSKBのÄspö Hard Rock Laboratoryを対象として、事前調査に基づいて構築した数値解析モデルの妥当性を検証するために、トンネル建設に伴う水圧と塩化物イオン濃度の変化を解析した。トンネル建設時の地下水流動は、トンネルが高透水帯を通過する際の湧水によって主に引き起こされており、バルト海水の流入が顕著であった。このため、トンネル建設の進捗や湧水の時系列変化、バルト海などをモデル化し、高透水帯の位置や透水性を校正することにより、水圧や塩化物イオン濃度の変化を概ね再現することが出来た。トンネル建設に伴う地下水流動は、広範囲において大きい水圧や水質の変化を引き起こすため、解析モデルの妥当性の検証に有効であった。

Key Words : *groundwater flow, solute transport, numerical analysis, tunnel construction, high-level radioactive waste*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の安全評価では、「地下水移行シナリオ」が重要であるとされている¹⁾。この地下水移行シナリオでは、地下水を輸送媒体として、処分施設から漏出した核種の生物圏への到達が評価される。核種は崩壊性であるため、生物圏に到達する時間が遅いほど、到達量が低減され安全評価上有利である。このため、地下水の流速や流向の評価は、到達量を評価するうえで非常に重要である。

特に、ここで対象とする地下水挙動は非常に遅く、直接的に評価することが困難なため、地下水流動解析など間接的な方法により評価される。この解析モデルの入力パラメーターは、ボーリング孔での透水試験、トレーサー試験などに基づいて推定される。ただし、これらが対象とするスケールは、評価対象に比べて非常に小さいため、解析モデルが広域の地下水流動をどの程度再現できているかを確認しておく必要がある。

この広域の地下水流動の再現性は、自然状態での水圧分布を対象として確認される場合が多いが、降雨涵養量などの境界条件が不明な場合が多く、その妥当性の判断も困難な場合が多い。

また、近年では地化学物質の分布などによる広域地下水流動の検証も試みられている^{2)・3)}が、過去の環境の変化や、物質の特性の評価などが困難であることが多い。

これらの理由から、解析モデルの妥当性を検証し、信頼性の向上を図るために、比較的大きい地下水流動を引き起こすトンネル建設時に着目した数値解析モデルの検証を試みた。ここでは、放射性廃棄物処分のための地下研究施設である Äspö Hard Rock Laboratory (以下 Äspö HRL)を対象とした。

本研究は、スウェーデン核燃料廃棄物管理会社 (SKB) が高レベル放射性廃棄物処分の国際共同研究として実施している地下水流動・物質移行解析の高度化のためのタスクフォースの一部であり、TASK5 と呼ばれている。このタスクは、トンネル建設時の地下水の水圧の変化だけでなく、水質の変化もあわせて評価することにより、地下水流動の理解をさらに深めることを目指している。このタスクでは参加機関による様々な検討が行われており、離散割れ目モデルを用いたアプローチや、地下水の起源に着目した検討なども実施されている⁴⁾。

ここでは当所が実施した施設建設時の地下水流動と保存性物質である塩化物イオン濃度の変化の数値解析について説明する。これらに基づいて、支配的な現象、解析

において考慮すべき点、解析モデルの妥当性について、地下水流動だけでなく物質移行からも検討する。

2. 解析対象サイトの情報

(1) サイトの概要⁹⁾

Äspö は図-1 に示すようにバルト海の内湾に位置する三角形の形をした島であり、大きさは東西 1.5 km、南北 1 km 程度である。島とその周辺は平坦で、最大・最小標高はそれぞれ、15 m と -9 m である。

Äspö HRL は、斜坑、スパイラルトンネル、エレベータおよび換気用シャフトと試験坑道から構成されている。トンネルは Äspö の外側から 7 % の下降勾配で掘削され、Äspö の下で 2 周し、全長 3600 m、深度 450 m に達する。トンネル直径は 5 m である。

トンネル建設は、入り口から 3200 m 付近までが発破工法、3200~3600 m が TBM 工法で建設されている。トンネルは、1990 年 10 月に建設が開始され、2 年後の 1992 年 10 月にシャフトの深度 220 m 地点、入り口から 1660 m 地点に到達し、さらに 1 年後にスパイラルを一周回りシャフトの深度 340m 地点、入り口から 2590 m 地点、さらに 1 年後にシャフトの深度 450 m 地点、3380 m 地点に到達し、最終的に 3600 m まで達する。シ

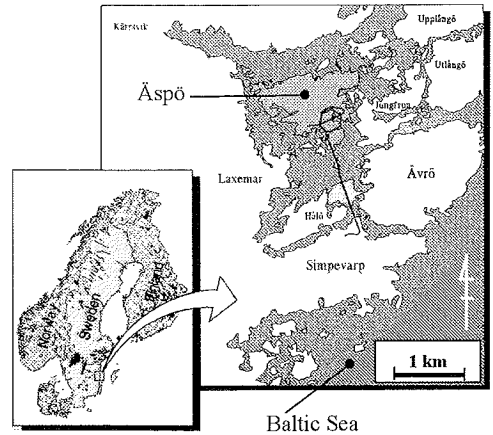


図-1 Äspö 位置図

ャフトは、トンネルがシャフト位置まで到達後に、ライズボーリング（上向き掘削）により建設されている。

この研究施設の深部において、処分施設や施設に用いられる材料の性能や、処分施設周辺の岩盤中の地下水流動・核種移行などを調査・評価する方法の研究が実施されている。

(2) 水理地質状況

Äspö でのサイト特性調査は、地表調査、ボーリング調査、地下施設での調査という手順で実施されており、

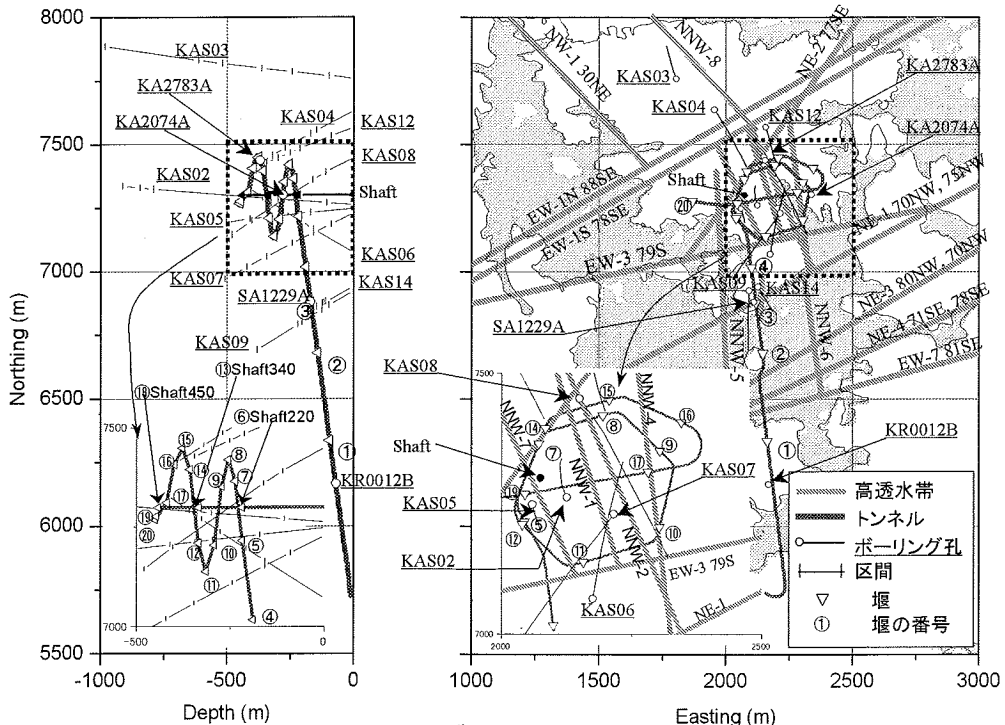


図-2 Äspö HRL の概念図

(トンネル、シャフト、高透水帯、ボーリング孔、堰の位置)

この結果は Rhen et al.⁹⁾によってまとめられている。この結果に基づいて水理地質状況を説明する。

Äspö は、Trans-Scandinavian Granite-Phuphyry Belt と呼ばれる花崗岩体に属しており、主要な岩体は Äspö diorite, Smaland granite, Green stone, Fine-grained granite で構成されている。これらの岩石は U-Pb 法によれば、約 18 億年前に生成したものであるとされている⁹⁾。構造的には、大局的に N-S, E-W に主要な構造帯があり、Äspö 島レベルでは、NE-ENE がもっとも卓越した構造帯となっている。これらの構造帯も約 18 億年前に形成されたと考えられている。

Äspö の透水特性は、主要な地下水の流動経路となる高透水帯(HCD: Hydraulic conductor domain)と、それ以外のあまり地下水が流動しない母岩部(HRD: Hydraulic Rock Mass Domain)とに大別される。

高透水帯は、母岩部に比べて数オーダー程度透水性が高く、幅数十メートルの領域であり、現在までに 17 の高透水帯が確認されている。各高透水帯を対象に数カ所から十数カ所において透水試験が実施されている。これらをまとめたものを表-1 に示す。表-1 には、それぞれの高透水帯の幅の推定値、透水量係数の対数平均値、対数標準偏差を示す。Freeze⁹⁾によれば、透水係数はオーダーでばらつくことが多く、対数正規分布するといわれている。このため、表-1 のように整理した。表-1 の透水量係数の校正値は、後述の解析の結果、校正された値である。

高透水帯は、比較的鉛直に近い傾斜をしているため、平面的に図-2 のように示した。

母岩部は、高透水帯以外の部分を示し、透水係数の対数平均値は、 1.0×10^{-9} m/s のオーダーである。この透水係数は、試験スケールに依存し、表-2 で与えられる。透水係数の異方性や深度依存性は明確にされていない。

比貯留係数は、岩盤の圧縮率、間隙率から見積もることも可能である⁷⁾。Äspö の花崗岩は非常に硬く、母岩部分の間隙率は、炉乾燥法によれば、0.08~0.68%である。このため、比貯留係数は非常に小さい値であると推定される。Äspö で実施された揚水試験などから、数十メートルの幅の高透水帯において、貯留係数が 10^{-5} 程度の結果が得られている。貯留係数は帯水層厚と貯留係数の積で与えられるため、比貯留係数は、 10^{-6} 1/m 程度と推定される。

物質移行の重要なメカニズムに移流と分散がある。移流による輸送量を評価するためには、地下水の移行に対して有効な間隙率を評価する必要がある。この有効間隙率は、高透水帯を対象に実施された長期揚水試験⁹⁾や青い目を対象として実施された TRUE 試験⁹⁾などのトレーサー試験で調査されている。これらのトレーサー試験は、五十嵐ら¹⁰⁾、田中ら¹¹⁾により、数値解析による評価が

なされている。これらの結果から非常に小さい有効間隙率が得られている。

原位置でのトレーサー試験から、有効間隙率は透水系数の関数として次のように与えられている⁹⁾。

表-1 高透水帯の透水量係数の対数平均値と対数標準偏差⁹⁾

高透水帯名称	高透水帯の幅 (m)	試験数	透水量係数の対数平均値 (m ² /s)	透水量係数の対数標準偏差 (-)	透水量係数の校正値 (m ² /s)
EW-1N	30	4	5.2×10^{-7}	1.60	
EW-1S	30	4	1.2×10^{-5}	1.17	
EW-3	15	4	1.7×10^{-5}	0.54	8.5×10^{-5}
EW-7	10	3	1.5×10^{-5}	1.27	
NE-1	30	16	2.2×10^{-4}	0.51	1.1×10^{-4}
NE-2	5	12	1.2×10^{-7}	2.14	
NE-3	50	9	3.2×10^{-4}	0.46	
NE-4	40	8	3.1×10^{-5}	0.79	
NW-1	10	3	4.1×10^{-7}	1.08	
NNW-1	10	7	8.6×10^{-6}	0.82	2.2×10^{-6}
NNW-2	20	4	2.4×10^{-5}	1.06	
NNW-3	20	1	2.0×10^{-5}	—	1.0×10^{-4}
NNW-4	20	8	6.5×10^{-5}	1.05	
NNW-5	10	3	4.0×10^{-6}	0.84	2.0×10^{-5}
NNW-6	20	1	1.4×10^{-5}	—	
NNW-7	20	5	7.5×10^{-6}	0.87	1.5×10^{-5}
NNW-8	20	3	8.4×10^{-6}	0.13	

表-2 母岩部の透水系数の対数平均値と対数標準偏差⁵⁾

スケール (m)	試験数	透水系数の対数平均値 (m/s)	透水系数の対数標準偏差 (-)
3	548	6.7×10^{-10}	1.90
9	181	2.2×10^{-9}	1.91
15	108	3.5×10^{-9}	1.86
24	66	6.7×10^{-9}	1.77
30	53	6.0×10^{-9}	1.80

表-3 堰の集水区間とその区間で交差する高透水帯

(集水区間は、堰で区切られたトンネル(T)・シャフト(S)の区間を示し、xは高透水帯とトンネル・シャフトの交差を表す。)

堰の名称	集水区間 (m)	高透水帯名称																
		EW-1N	EW-1S	EW-3	EW-7	NE-1	NE-2	NE-3	NE-4	NNW-1	NNW-2	NNW-3	NNW-4	NNW-5	NNW-6	NNW-7	NNW-8	
①DMA682G	T	0 ~ 682																
②MA1030G	T	682 ~ 1030			x													
③MA1232G	T	1030 ~ 1232																
④MA1372G	T	1232 ~ 1372				x												
⑤MA1584G	T	1372 ~ 1584		x														
⑥Sha#220	S	0 ~ 220																x
⑦MA1745G	T	1584 ~ 1745					x											x
⑧MA1883G	T	1745 ~ 1883						x				x	x					
⑨MA2028G	T	1883 ~ 2028							x								x	
⑩MA2178G	T	2028 ~ 2178																
⑪MA2357G	T	2178 ~ 2357										x	x					
⑫MA2496G	T	2357 ~ 2496							x									x
⑬Sha#340	S	220 ~ 340					x											
⑭MA2699G	T	2496 ~ 2699																x
⑮MA2840G	T	2699 ~ 2840										x	x					
⑯MA2994G	T	2840 ~ 2994						x							x			
⑰MA3179G	T	2994 ~ 3179													x			
⑱Sha#450	S	340 ~ 450																
⑲MA3411G	T	3179 ~ 3426					x					x	x					x
⑳MA3426G	T	3426 ~ 3600															x	

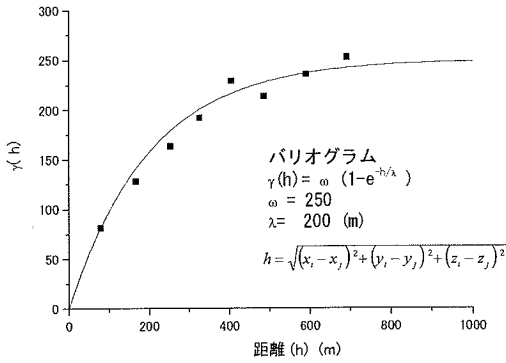


図-3 全水頭分布のバリオグラム

$$n_e = 34.87K^{0.753} \quad (1)$$

ここに、 n_e は有効間隙率、 K は透水係数(m/s)である。

分散係数についても、前述のトレーサー試験の結果から評価されている。ここで得られた分散係数は、Gelhar¹²⁾により指摘されているように、試験スケールに依存する傾向がある。一般的に、縦分散長は流動距離の約 1/10、横分散長は縦分散長の約 1/10 であるといわれている。

(3) 地下水の流動状況

トンネル建設に伴う水圧の変化は、図-2 に示す KAS02~09, KAS12, KAS14 の 10 本のボーリング孔の 54 区間において連続モニタリングされている。これらの計測結果に基づいて、地盤統計学的手法であるクリッキングを用いて水圧分布を推定した。クリッキングは、

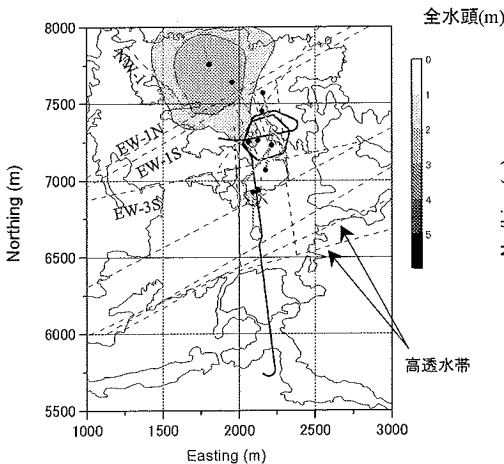
値を求めたい点に対して、距離に基づいて各観測データの重み付けを決定し、値を推定する方法である¹³⁾。

ここでは、トンネル建設後の全水頭の観測結果を用いてバリオグラムを計算した結果、図-3 に示すように、指数関数型で近似できた。このため、このバリオグラムを用いて Ordinary Kriging¹⁴⁾を行った。Ordinary Krigingでは推定点に近い観測点 5 点を用いて推定値を計算した。また、バルト海において全水頭が 0 になるように、Äspö を囲むように全水頭 0 の観測点を 9 点配置し条件付けを行った。

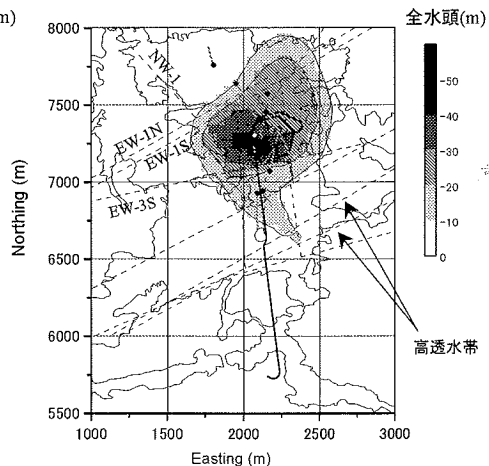
クリッキングによるトンネル建設前後の深度 100 m での全水頭分布を推定した結果を図-4 に示す。

トンネル建設前の水圧分布は、Äspö の中心部において水圧が高く、海に近づくにつれて水圧が低下する傾向にあり、Äspö に涵養した降雨が、バルト海に流れる形態を示している。水圧は島の北西部で最も高く、島の南部で低くなっている。この水圧の高い部分の分布は、高透水帯の EW-1N と NW-1 に囲まれるように分布しており、高透水帯のない領域と調和的である。これらから、地下水の流れは高透水帯によって規制されていると考えられる。なお、全水頭の基準面は海水面とした。

トンネル建設時の地下水流動は、トンネル建設の進捗と密接に関係している。表-3 はトンネルと高透水帯の交差する場所を堰の区間ごとに示したものである。トンネルへの湧水量は、図-2 に示した堰において計測されている。堰はトンネルに約 150 m 間隔で設置されており、その名称はトンネル入り口から堰までの距離を示している。トンネルは下降勾配のため、堰間での湧水は下の堰に集まり、流量が計測される。



(1) トンネル建設前の全水頭分布



(2) トンネル建設後の全水頭分布

図-4 クリッキングにより推定したトンネル建設前後の全水頭分布
(断面は海水面から-100mの水平断面、全水頭は海水面を基準面とした)

トンネル建設の進捗を図-5 に示す。図中の数字は、堰やシャフトの建設時期を示している。堰での流量は、図-6 のように表される。湧水量の多い区間は、高透水帯と交差していることがわかる。たとえば、表-3 から④ MA1372G は NE-1、⑥ Shaft220 は NNW-7、⑬ MA3179G は NNW-4 と交差している。ただし、グラウトなど止水処理の影響で、湧水量は必ずしも高透水帯の透水係数に依存していない。

トンネル建設後の水圧変化(図-4)は、スパイラルトンネルを挟む EW-1S と EW-3 の高透水帯間で特に大きく、その分布形態は、高透水帯に強い影響を受けている。ただし、東西方向に観測孔がないため、水圧低下の東西方向への広がり是不明である。トンネル建設後の最大の水圧低下は、約 50m であり、スパイラルトンネルの中心部で発生している。

これらの結果から、地下水流動はトンネル建設によるトンネルへの湧水により主に引き起こされており、特に高透水帯からの湧水が、水圧低下を引き起こすうえで支配的な役割を担っていることがわかる。

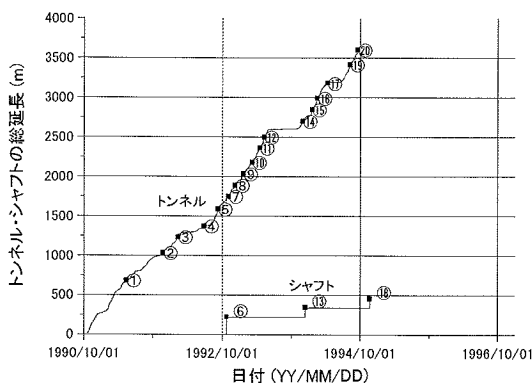


図-5 トンネル・シャフト建設の進捗

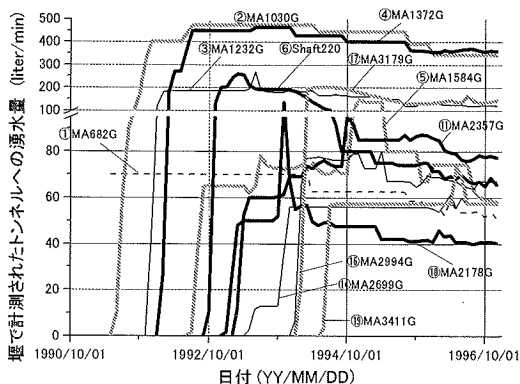


図-6 各堰で計測された湧水量の経時変化

(4) 水質の分布形態

Äspö HRL では、各種の水質項目が計測されている。ここでは、特徴的な水質分布を明らかにするために主成分分析¹⁵⁾を実施した。主成分分析は、トンネル建設前後の全データに対して、各項目についてデータを正規化して実施した。対象とした項目は、Na, K, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄, δD, ³H, δ¹⁸O である。

主成分分析の結果得られた第一、第二主成分軸をそれぞれ x 軸、y 軸としてプロットしたものを図-7 に示す。Laaksoharju et al.¹⁶⁾は、Äspö の地下水はバルト海水、降水、深部の海水、氷河の溶解水から形成されていると解釈している。これは、Äspö 周辺の環境が、海水、氷河期、バルト海と変遷してきたためと考えられる。

図-7 には、現在のバルト海水、降水、氷河の溶解水、深部の海水をエンドメンバーとしてプロットした。サンプリングした地下水の分布は、降水とバルト海水、氷河期の水をベースとした構成になっている。

第一、第二主成分軸はそれぞれ以下で与えられ、寄与率はそれぞれ、40%、31%である。

$$F_1 = 0.48[\text{Na}] + 0.19[\text{K}] + 0.44[\text{Ca}] + 0.15[\text{Mg}] - 0.27[\text{HCO}_3] + 0.47[\text{Cl}] + 0.45[\text{SO}_4] - 0.03[\text{D}] - 0.12[\text{Tr}] - 0.06[\text{^{18}O}] \quad (2a)$$

$$F_2 = 0.07[\text{Na}] + 0.41[\text{K}] - 0.09[\text{Ca}] + 0.43[\text{Mg}] + 0.23[\text{HCO}_3] - 0.02[\text{Cl}] + 0.00[\text{SO}_4] + 0.51[\text{D}] + 0.18[\text{Tr}] + 0.53[\text{^{18}O}] \quad (2b)$$

第一主成分は、主要イオンと Na, Cl の係数が大きくなっており、海水の濃度や溶存イオン量を表す軸と考えられる。第二主成分は、安定同位体(水素と酸素の同位体)に対して係数が大きくなっており、地下水の起源を表す軸と考えられる。これらの結果から、第一主成分に大きく寄与し、地下水起源にも関係するとともに、岩盤への吸着等の影響がほとんどないと考えられる塩化物イオン濃度を図化した。また、後述する物質移行解析の対象とした。

塩化物イオン濃度分布を把握するために、クリッキングを実施した。トンネル掘削前の塩化物イオン濃度は、57 点で計測されている。これらを用いてバリオグラムを計算した。塩化物イオン濃度のバリオグラムは、図-8 に示すように、深度方向に 10 倍の異方性を考慮することにより、線形のモデルで近似できた。このバリオグラムを用いて Ordinary Kriging を実施した。Ordinary Kriging では推定点に近い観測点 5 点を用いて推定値を計算した。また、島とバルト海での濃度の違いを表すために、領域全体において 20 点で条件付けを行った。

クリッキングにより推定したトンネル建設前の塩化物イオン濃度の分布を図-9 に示す。この濃度分布には、深度が深くなるにつれて濃度が高くなる傾向が見られる。深部の塩化物イオン濃度は、現在のバルト海の塩化物イ

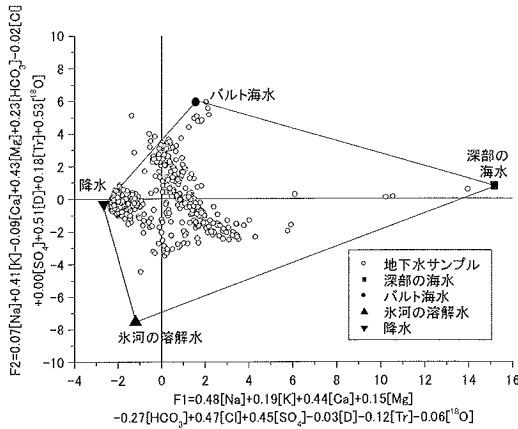


図-7 主成分分析結果

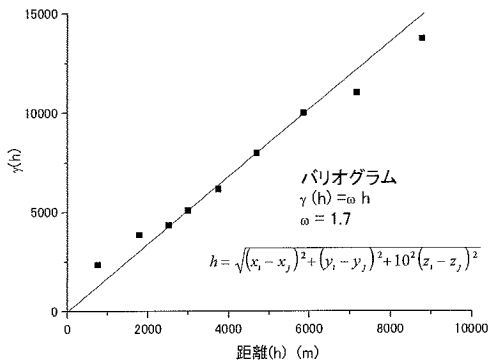


図-8 塩化物イオン濃度分布のバリオグラム

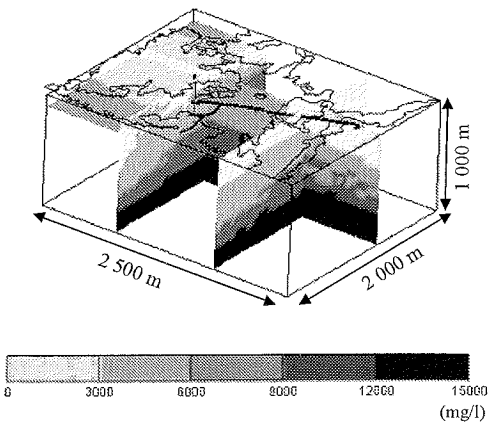


図-9 クリッキングで推定したトンネル掘削前の塩化物イオン濃度の分布

オン濃度より高い。また、Äspö などの島では降雨の涵養により、塩化物イオン濃度が低くなっている。

トンネル建設に伴い、高透水帯を通してバルト海水が

トンネル内に流入する。これは、トンネルへの湧水量が、降雨涵養量に比較して非常に大きく、主要な地下水の供給源はバルト海になるためである。また、Mahara et al.¹⁷⁾によれば、水素・酸素同位体比から見ても、Äspö の地下水は徐々にバルト海の海水組成に近づいていく傾向が確認されている。これらの結果から、Äspö の地下水は、深部に存在する海水(化石海水)と氷河の溶解水、バルト海水、降水によって形成されているが、将来的にはバルト海水との混合が進んでいくものと考えられる。

3. モデル化手法

(1) サイトのモデル化

この解析では、Äspö HRL 建設に伴う地下水の挙動の再現を目的としている。ここでは、高透水帯からの湧水とバルト海水の流入が顕著であるため、トンネル、シャフトと Äspö と周辺のバルト海を含む領域をモデル化した。解析領域は図-2 に示す南北 2500 m、東西 2000 m の Äspö HRL の入り口から終端までを含む領域とした。鉛直方向は、深部からの地下水の供給は有意でないと考えて海面から 1000m までを解析領域とした。この領域を図-10 に示すメッシュに分割した。ここで Äspö と周辺は平坦なため、地表面と海底面の形状はモデル化していない。解析メッシュは、母岩部を 6 面体要素で表し、トンネルを線要素で表した。高透水帯は、スマード割れ目モデルを用いて、交差した要素に物性値を体積で重み付けして組み込んだ。節点総数は 96,441 であり、要素総数は 6 面体要素と線要素がそれぞれ 90,000 と 151 である。メッシュ分割は細かいところで 25 m の分割、粗いところで 50 m の分割とした。スマード割れ目モデルについては後述する。

地下水流動・物質移行解析の物性値は、水理地質状況を考慮して以下のように設定した。高透水帯の透水量係数には、表-1 の透水量係数の対数平均値を、母岩の透水性には、表-2 の 30 m スケールの透水試験の対数平均値である 6.0×10^{-9} m/s を用いた。比貯留係数は前述の揚水試験結果に基づいて 1.0×10^{-6} /m とした。有効間隙率は透水量係数の関数として式(1)で与えた。縦分散長は移行距離を 1 km と仮定して、移行距離の 1/10 の 100 m とした。横分散長は縦分散長の 1/10 程度であるが、ここでは数値解の安定性を考慮して 1/5 の 20 m とした。

(2) 数値解析手法

解析には FEMWATER/FEMWASTE^{18), 19)}を参考に、当所で開発した地下水流動解析コード FEGM/FERM^{20), 21)}

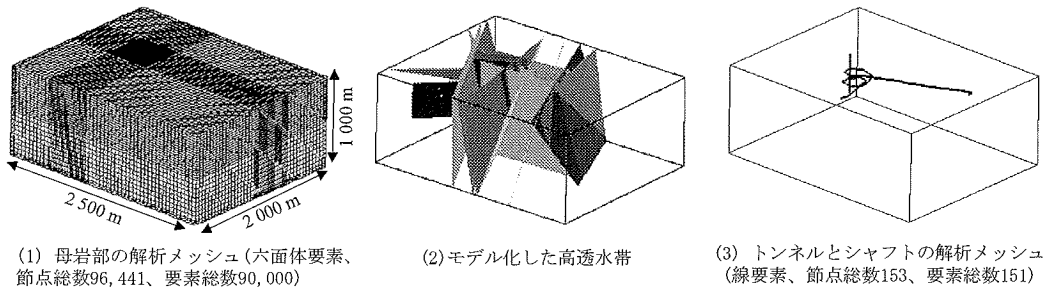


図-10 解析メッシュの概念図

を用いた。この解析手法は、アイソパラメトリック要素とガラーキン法を用いた有限要素法である。解析では、以下の地下水流動方程式と物質移行方程式を解いた。

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = 0 \quad (3)$$

ここに、 S_s は比貯留係数、 h は全水頭、 t は時間、 x_i は座標、 k_{ij} は透水係数テンソル、 Q は流入流出量である。

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = n D_{ij} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - M \quad (4)$$

ここに、 n は有効間隙率、 C は濃度、 D_{ij} は分散係数テンソル、 V_i はダルシー流速、 M は流入流出フラックスである。また、分散係数(D_{ij})は以下のように与えられる。

$$n D_{ij} = \alpha_T |V| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{|V|} + n D_a \tau \delta_{ij} \quad (5)$$

ここに、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散長、 D_a は分子拡散係数、 τ は屈曲率、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

ここでは、高透水帯をモデル化するためにスメアード割れ目モデルを用いている。スメアード割れ目モデルは図-11に示すように、割れ目部が要素と交差する場合に、母岩部の物性に割れ目部の物性を反映する方法であり、式では次のように表される^{20),21)}。

$$k'_{ij} = \frac{V_m k_{mij} + V_f k_{fij}}{V} \quad (6)$$

ここに、 k_{ij} は高透水帯の透水係数を考慮した母岩の透水係数テンソル、 V は要素体積、 V_m は母岩の体積、 V_f は割れ目の体積、 k_{mij} は母岩の透水係数テンソル、 k_{fij} は割れ目の透水係数テンソルである。

有効間隙率(n_0)についてもスメアード割れ目モデルを用いて物性を割り当てた。

(3) 初期条件・境界条件

地下水流動と物質移行の初期条件・境界条件を図-12に示す。

a) 地下水流動

水圧の変化は、トンネルが高透水帯を通過する際の湧水によって引き起こされている。水圧は非定常的な変化が顕著であったため、トンネルの建設状況と湧水を非定常的にモデル化した。このトンネル建設を表現するために、トンネルの建設にあわせて、建設された区間に線要

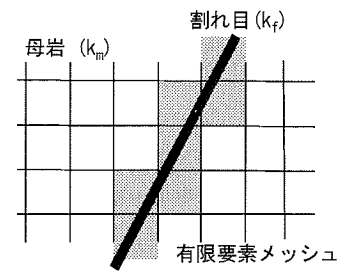


図-11 スメアード割れ目モデルの概念図

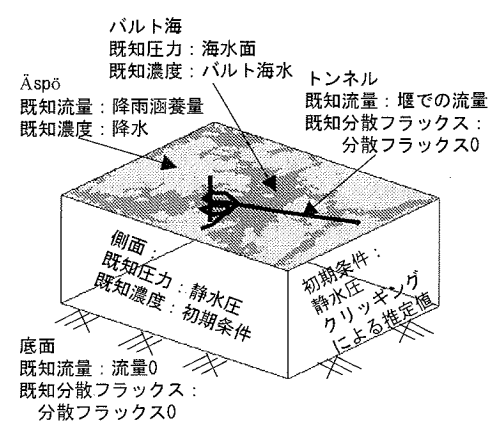


図-12 地下水流動・物質移行解析の境界条件の概念図

素を追加し、高い透水性を与えた。

トンネル建設時には止水処理が実施されており、この効果を解析モデルに反映することは困難なため、既知流量境界条件を用いた。堰区間への湧水量の時間変化(図-6)を模擬するために、堰の位置の節点に湧水量を既知流量境界条件として与え、堰区間内の節点を高透水の線要素で連結した。また、各堰区間は互いにつながらないようにした。

解析領域上面の境界条件は、島で既知流量境界条件、バルト海で海水面を基準とした既知圧力境界条件とした。Åspöとその周辺の島での降雨涵養量は、トンネル建設前の過剰間隙水圧を再現できる 11 mm/y を解析期間一定として与えた。

底面の境界は、地下水の供給がないと仮定し、不透水境界条件とした。側面の境界は、トンネル建設による影響が及ばないと仮定し、既知圧力境界条件としてバルト海水面を基準とした静水圧を与えた。

初期条件は、バルト海水面を基準とした静水圧とした。

b) 物質移行

物質移行解析では分布が特徴的であると考えられる塩化物イオン濃度を解析した。

境界条件は、地下水流動の境界条件において既知圧力と既知流量境界条件とした海と島は、既知濃度境界条件とした。降水とバルト海の塩化物イオン濃度として、それぞれ、0.0 g/l と 3.7 g/l とした。水質の変化は、主にバルト海水の流入によって発生するため、海の領域を詳細にモデル化した。次に、トンネルでは流出フラックスが未知なため、内部と外部の濃度勾配がないと仮定し、分散フラックス 0 の境界条件とした。周辺の境界条件は、トンネル建設地点から離れているため、初期分布で既知濃度境界条件とした。底面は、分散フラックス 0 の境界条件とした。

初期条件はクリッキングにより推定したトンネル建設前の塩化物イオン濃度分布(図-9)を用いた。

(4) 解析条件

非定常の地下水流動・物質移行解析を実施した。

解析期間は、トンネル建設の開始(1990年10月1日)から終了の2年後迄(1997年1月1日)とし、時間刻みは15日を用いた。ただし、物質移行解析において計算が困難な場合は時間刻みを小さくした。各ステップにおいてトンネル建設の進捗と湧水量の変化を反映した。

時間積分は、地下水流動では後退差分法、物質移行ではクラック・ニコルソン法を用いた。

地下水流動解析では、厳密には不飽和による透水係数の変化を考慮する必要がある。しかし、非線形計算は多大な計算時間を要するため、この影響を無視した。また、密度の影響についても同様な理由から無視した。密度の

影響は、バルト海水の塩分濃度が海水の 1/4 程度と低く、トンネル建設時の地下水流動はトンネルへの湧水が支配的であり、評価時間が短時間であるため、小さいと考えられる。

トンネルは線要素でモデル化したが、トンネル周辺での分割が粗い場合、流量や圧力の再現性が低くなる可能性がある。この再現性を確認するために井戸理論式と比較を行った。

$$Q = 2\pi T \frac{s_0}{\ln(R/r_0)} \quad (8a)$$

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (8b)$$

ここに、 Q は流量、 T は透水量係数、 s_0 は井戸内の水位低下量、 r_0 は井戸半径、 R は影響圏半径、 r は井戸中心からの距離、 s は井戸中心からの距離 r における水位低下量である。

数値解析では、トンネル周辺のメッシュ分割の代表長である 25 m の正方メッシュで 1000 x 1000 m の領域を作成し、単位厚さを仮定して透水量係数を 1 m²/s として、領域の中心点の圧力を 1 m 低下させた。また、理論式では、式(8a)と(8b)を用いて、トンネルを模擬して井戸半径(r_0)を 2.5 m、影響圏(R)を 500m として、透水量係数を 1 m²/s、井戸内の水位低下量を 1 m とし、流量と水圧の低下を比較した。この結果、両者の流量と圧力の誤差は、数パーセント以下であった。このため、トンネルを線要素で表現しても、十分な精度で流量と圧力分布を計算できると考えられる。

物質移行解析において、割れ目を有する岩盤では、割れ目部と母岩部を分けてモデル化することが多い。これは、混在する状態で解析した場合に、体積の小さい割れ目部の物性値が母岩の物性値に平均化され、物質の移行速度が遅くなるためである。ここでは、高透水帯の幅が非常に大きく、母岩の間隙率が高透水帯よりも小さいため、平均化による高透水帯の物性の変化は小さいと考えられる。

4. 解析結果

地下水流動解析では、実測値と解析結果を一致させるために、高透水帯の位置や透水性を変えて多数の感度解析を実施した。ここではまず、校正したモデルによる解析値と実測値を比較した結果について述べた後、校正方法とその問題点について述べる。

物質移行解析では、前述の校正した地下水流動モデルで得られた解析結果の流速を用いて塩化物イオン濃度を

解析した結果について述べる。

(1) 実測と解析の水圧変化の比較

各観測区間の実測値と解析結果の水圧の変化を図-13にそれぞれ点と線で示す。観測区間 KAS02:0-113 は、KAS02 がボーリング孔名、0-113 が観測区間で数値は地表面からの距離(m)を示している。

水圧の実測値は、図-2 に示すボーリング孔の 54 区間で毎日観測されている。ただし、計測器の故障などのため、実測値にバラツキの大きいところや実測値が欠落した期間もあり、トンネル建設終了時の観測区間数は、開始時の約半分である。

水圧の解析値は、ボーリング孔の区間を 6 分割し、中央 5 点での水圧の平均値をその区間での水圧とした。

水圧の実測値では、1992 年 10 月と 1994 年 10 月に比較的大きい水圧の変化が観測されている。1992 年 10 月の水圧の低下は、トンネルへの湧水量の観測結果(図-6)から、シャフト建設に伴う水圧の変化である。特に、KAS02 はシャフトに近いので、上部のセクションでは大きな水圧の低下が発生している。1994 年 10 月の水圧の低下は、KAS02 や KAS12 などの下部の区間で観測されている。この時、スパイラルトンネルの中心の直線区間を建設しており、これらの観測区間もスパイラルトンネル内部にあるため、これらはトンネルの建設による影響であると考えられる。

解析結果は、トンネルの建設と湧水量の時間的変化をモデル化することにより、トンネル建設によって不規則

に発生する水圧変化の特徴を概ね再現できている。

再現性について確認するために、タイムステップ(15日)ごとの全水頭の実測値と解析値を、それぞれ横軸と縦軸にとった結果を図-14 に示す。実測と解析が同じになるのは、 $y=x$ の直線であるため、この直線での相関係数を求めた。この結果、解析値と実測値の相関係数は 0.88 であった。水圧の変化が大きくかつ不規則であることを考えれば、高い再現性が得られている。

また、解析から得られたトンネル建設後の水圧の分布を図-15 に示す。解析値は実測の水圧の低下(図-4)をおおむね再現できている。

図-16 に示すように、解析に用いた透水量係数は、校正した場合を除き対数平均値を用いており、校正した透水量係数も対数平均値から 1σ 内に収まっている。このことから、透水量係数の対数平均値は、広域的な地下水流動を評価する際に、有効な指標になることがわかる。

(2) パラメーターの校正

トンネル建設時の水圧の変化を解析し、高透水帯の透水量係数を校正した。校正の方法とその問題点を以下に述べる。

a) トンネルの進捗と水圧変化の関係

前述のように、KAS02 の 1992 年 10 月と 1994 年 10 月の水圧の低下は、それぞれシャフトを建設した時期と、スパイラルトンネルの中心の直線部分を建設した時期に一致する。また、それらの位置に対応する⑥Shaft220 と⑱MA3411G において、その時期に湧水量の増加が観測

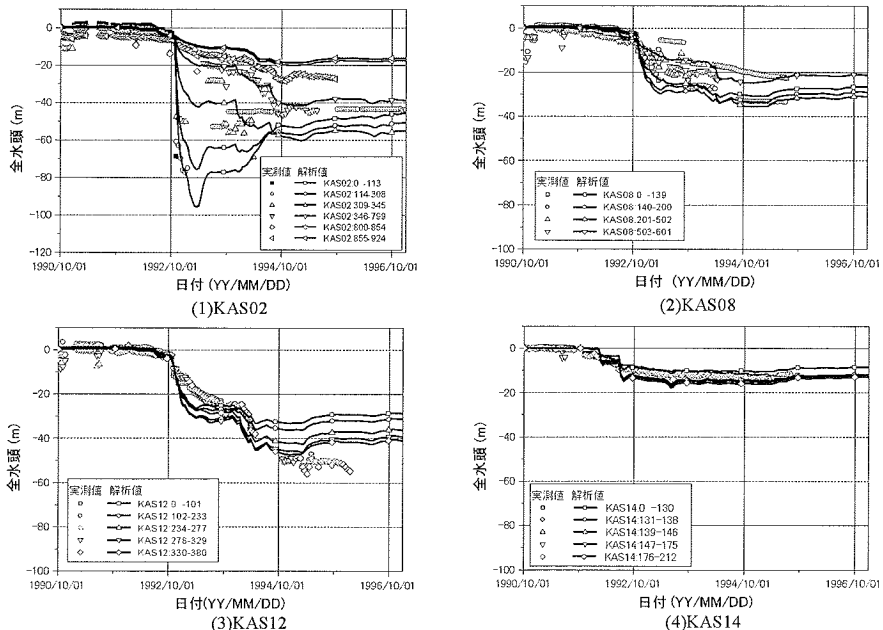


図-13 実測値と解析値の水圧変化の比較

されている。表-3 から⑥Shaft220 は NNW-7、⑩MA3411G は NNW-1, NNW-2, NNW-7 と交差しており、これらの高透水帯からの湧水が水圧の低下の原因であると考えられる。KAS02 は NNW-7 に近いため、NNW-7 の水圧の低下が、KAS02 で観測されていると考えられる。これらのことから、この水圧低下には NNW-7 の透水性の感度が高いと推定される。

上記のように、水圧の変化はトンネル建設と湧水により引き起こされており、これらの位置的・時間的な関係から原因となっている高透水帯を推定することが出来る。これらの関係から、透水係数を校正した。また、これらの関係を明確に把握するためには、トンネル建設の進捗や湧水量の変化を非定常的にモデル化することが重要である。

b) 透水係数の感度

水圧の低下はいくつかの高透水帯が相互に絡み合っ発生している場合があり、前述のような直接的な関係だけでは校正に限界がある。このため、各高透水帯が水圧

の低下に与える影響について、感度解析を実施した。感度解析は、高透水帯の透水量係数を元の値から1オーダー小さい値に変化させて実施した。この変化による水圧の絶対値の変化を以下の式で求め、パラメーターの感度を検討した。

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n |p_{oi} - p_{ci}| \quad (9)$$

ここに、 ΔH は水圧の変化量、 n は観測点数、 P_{oi} は基本ケースでの水圧、 P_{ci} は高透水帯の透水性を変えた場合の水圧である。

この式は、高透水帯の透水性を変えたことによつてどの程度の水圧の低下が発生するかを示している。これらを整理した結果を図-17 に示す。この結果、水圧の低下は、NE-1, NNW-7, NNW-2, EW-1S, NNW-4 の透水性に敏感であることがわかった。このうち、EW-1S は、他の高透水帯と異なり、トンネルと交差していない。この高透水帯は、他の高透水帯に地下水を供給するなど、

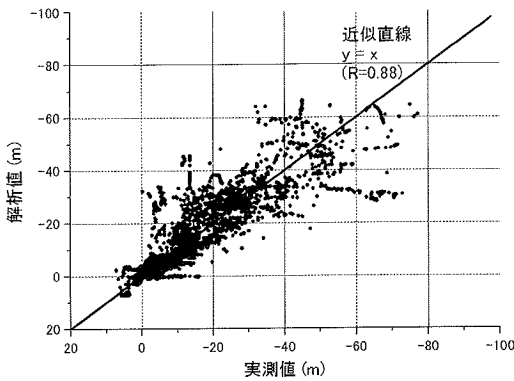


図-14 全水頭の実測値と解析値の比較

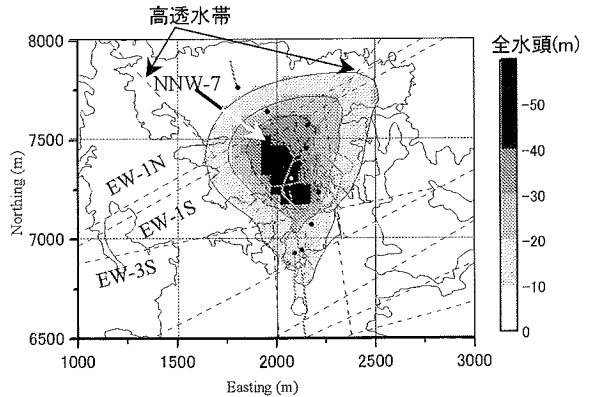


図-15 トンネル建設後の全水頭分布図の解析結果

(海面から-100mの水平断面、全水頭の基準面は海面)

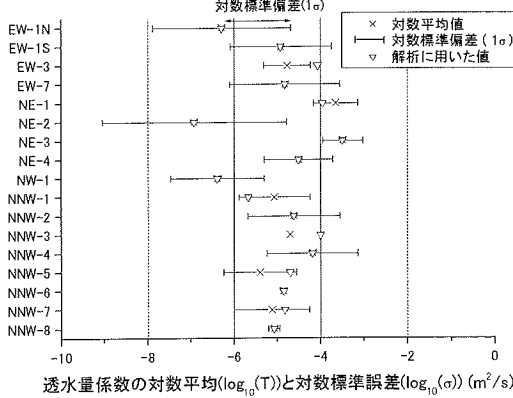


図-16 解析に用いた高透水帯の透水量係数と透水試験結果の関係

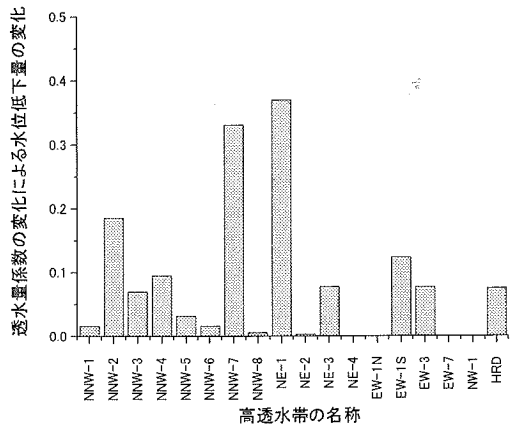


図-17 各高透水帯の透水量係数の感度解析結果

間接的に影響していると考えられる。

透水量係数の校正はこの感度にも着目し、トライ・アンド・エラーで実施した。この結果得られた透水量係数の校正値を表-1の右端の欄に示した。この校正値を用いて計算した結果が図-13~15である。

c) モデルの校正上の問題点

高透水帯の透水性の校正を実施する際の問題点として以下が挙げられる。

先に述べた⑨MA3411G などでは、トンネルと多数の高透水帯とが交差する。トンネル建設時には、止水処理が施されているため、湧水量は必ずしも高透水帯の透水性に比例しない。このモデル化では、湧水量は堰区間に割り当てており、各高透水帯に対しては湧水量を割り当てていない。このため、実際には1つの高透水帯からの湧水であっても、モデルでは、湧水量は堰区間で交差した各高透水帯に割り振られ、実際とは異なる水圧低下を起こす可能性がある。これらの不整合は、地下水流動を評価するうえで誤った解釈を導く可能性があるため、現地において湧水量や湧水地点を確認しておく必要がある。

前述の透水量係数の感度において、一部の高透水帯は、感度が高かったが感度の低いものも多かった。感度の低い高透水帯は、結果に影響を及ぼさないため、妥当性の確認が困難である。このため、主要な高透水帯には、トンネル建設前に観測孔を配置しておく必要がある。

また、以下のようなモデル化の誤差が発生する可能性がある。

高透水帯とトンネルやシャフトの交差によって引き起こされる地下水の流れは収束流である。このため距離の変化に非常に敏感であり、高透水帯の位置や観測位置の少しのズレで、水圧の低下が大きく変化する可能性がある。

このモデル化では、堰区間は高透水性の線要素でモデル化されているため、堰区間を構成する節点では、ほぼ

同じ水圧の低下を発生する。しかし、実際の水圧の低下は、高透水帯とトンネルとの交差点において発生し、他の領域ではほとんど発生しない。このため、トンネルに近い観測孔では、この影響で水圧低下が大きく評価される可能性がある。

水圧と湧水量では、水圧の観測結果が毎日なのに対して、湧水量は一ヶ月の平均値を与えており、この平均化が誤差の原因となる可能性がある。

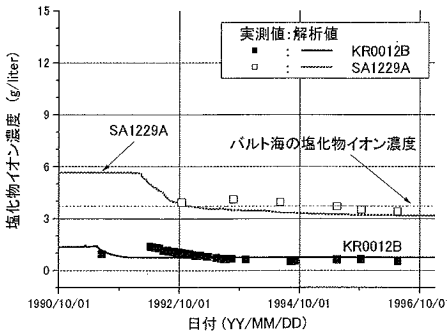
(3) 物質移行における実測値と解析結果の比較

地下水の水質に関しては、ボーリング孔における水圧観測のように、連続的かつ定期的にとられたデータが少ない。このため、サンプリング回数が比較的多い観測区間を対象として評価する。ここで対象とした観測区間は、トンネル内から高透水帯にむけて掘削されたボーリング孔(図-2)である。このため、トンネルが建設されるまでのデータは存在しない。ここでは、前述の塩化物イオン濃度を評価する。

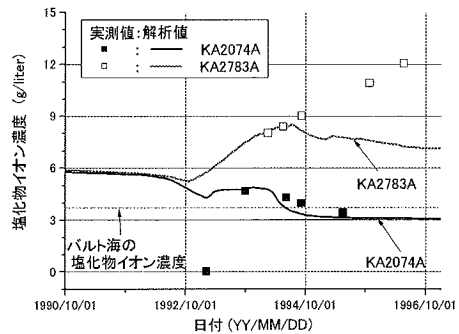
塩化物イオン濃度の実測値と解析値を図-18に示す。実測値は点で解析値は線で表示した。

実測値から、トンネルの建設によってそれぞれ濃度が変化することがわかる。浅部に位置する観測区間は、建設後短時間で降水やバルト海水の組成に近づく傾向が見られる。深部では、浅部に比べて、バルト海水の浸入が遅く、その影響が見られない場合もある。

実測値と解析結果を比較すると、浅部の観測区間では、実測値と解析値はよい整合が得られている。これらの観測区間での塩化物イオン濃度は、降水、バルト海水など、観測区間の上部の境界条件に近づいており、上部境界からの供給が支配的であると考えられる。これらの観測区間では、非常に短時間で地下水が入れ替わったと考えられるが、どの程度の時間で入れ替わったかは、観測の時間間隔が長いと十分に把握できていない。



(1) 浅部の観測区間



(2) 深部の観測区間

図-18 濃度分布の解析結果

KA2074A の塩化物イオン濃度の実測値は、複雑な挙動を示しており、いったん降水程度まで低下した後、初期状態近くまで回復し、その後バルト海水の濃度に近づいている。これは、トンネル建設直後には、観測区間の上の島に涵養した降水が流入していたが、この量には限りがあるため、徐々にバルト海からの涵養が支配的になってきたものと考えられる。解析結果では、最終的にバルト海の海水に近づく挙動は一致しているが、この低下、上昇、低下という挙動は十分に再現できていない。これは、バルト海水に近づく過程での濃度変化は、初期条件に依存しているが、初期条件はクリッキングにより推定されており、実測値の変化を再現するだけの解像度がないためと考えられる。

KA2783B では、徐々に塩分濃度が高くなる傾向を示している。これは、NNW-2 を通じて深部からの塩化物イオン濃度の高い水が上昇するためと考えられる。解析では上昇する傾向は見られているものの、ある程度の濃度に達した後、濃度が低下する傾向が見られる。これは、底部の境界を 1000 m としており、それより深部の塩化物イオン濃度の高い地下水の供給を再現できないためであると考えられる。

塩化物イオン濃度の変化は、スパイラルトンネルの 1 周目では、上部にバルト海という安定な地下水の供給源があり、高透水帯を通してバルト海水が供給されるという比較的単純な流れになる。このため、現象を再現することができたと考えられる。また、2 周目以降では、深部からの地下水の供給の寄与が大きくなる。この深部の塩化物イオン濃度の分布に関する情報が不十分なため再現性があまり良くなかったと考えられる。

水質の変化は、水圧と異なり、地下水の移動に伴って発生するため、変化が遅く、初期条件への依存性が高い。このため、水質の変化を用いて解析モデルを検証するためには、初期条件の把握、サンプリング間隔の設定が重要である。

5. まとめ

本研究では、Äspö HRL の建設に伴う地下水の水圧および水質の変化の特徴をまとめ、これを数値解析により評価した。

Äspö HRL の建設時の地下水流動と水質の変化には以下の特徴がある。

- ・地下水流動は、トンネルが高透水帯を横切る際の湧水によって主に引き起こされている。
- ・水質の変化は、高透水帯を通して流入するバルト海水によって主に引き起こされている。

地下水流動が上記のような特徴を有するため、Äspö

とその周囲のバルト海を含む数キロの領域を、トンネル、シャフト、主要な 17 の高透水帯、母岩部を考慮して解析モデルを作成した。

トンネル建設時の水圧と塩化物イオン濃度の変化は、トンネル建設の進捗や湧水量の変化に対応していると見られるため、トンネル建設の進捗とそれに伴う湧水量の経時変化を流量既知境界条件としてモデル化し、水圧と塩化物イオン濃度の変化を非定常 3 次元地下水流動・物質移行解析により評価した。

水圧の変化を地下水流動解析で評価することにより、以下のことがわかった。

- ・地下水流動において高透水帯が支配的な役割を担っている。このため、高透水帯の位置や透水性の設定が水圧の変化を再現する上で重要である。
- ・トンネル建設の進捗、湧水量、水圧の変化は、応答の時間から高透水帯の位置、応答の大きさから高透水帯の透水係数を評価できるため、モデルの検証において有益な情報になる。このため、トンネル建設の進捗や湧水量を境界条件としてモデル化する必要がある。
- ・校正によって得られた高透水帯の透水量係数は、透水試験の対数平均値に比較的近い値であった。このことから、この値は広域的な地下水流動を評価する際に有効な値であることが確認できた。

塩化物イオン濃度の変化を物質移行解析で評価することにより、以下のことがわかった。

- ・浅部では上部からの地下水の供給が顕著であるため、地下水の供給源となる Äspö やバルト海の領域を境界条件としてモデル化する必要がある。
- ・深部では上部からの供給が相対的に少なくなるため、境界条件よりも初期状態の把握が重要になる。
- ・水質の変化は、主に地下水の移動に伴って発生するため、水圧の変化に比べて非常に遅い。このため、境界条件だけでなく初期状態の把握も重要になる。

事前調査の調査結果に基づいて構築した地下水流動解析モデルを用いて、地下水流動だけでなく物質移行も概ね再現できた。物質移行に関しては、一部の高透水帯のみについてしか評価していないが、地下水の流向、流速の観点からも解析モデルの妥当性が確認できた。

このようなトンネル建設時の地下水流動の評価は、自然状態での水圧分布に比べ、地下水流動はトンネルへの湧水によって引き起こされるため、入力明確であり、広範囲に大きい地下水流動が発生する可能性が高い。このため、解析モデルの信頼性の向上を図るうえで有効な情報になると考えられる。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、SKB の Piter Wikberg 氏、SWESCO の Ingvar Rhen 氏、Contera の John Smellie 氏、Geopoint の Marcus Laaksoharju 氏には多大な基礎資

料を提供していただき、議論をしていただいた。また、解析にあたっては、株式会社計算力学センターの達橋直之氏、株式会社電力計算センターの井出尚大氏に多大なご協力を頂いた。末筆ですがここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会：高レベル放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方について(第1次報告), 2000.
- 2) Castro, M. C., Goblet, P., Ledoux, E., Violette, S. and de Marsily, G.: Noble gases as natural tracers of water circulation in the Paris basin 2. Calibration of a groundwater flow model using noble gas isotope data, *Water Resour. Res.*, Vol.34, No.10, pp.2467-2483, 1998.
- 3) Sheets, R.A., Bair, E.S. and Rowe, G.L.: Use of $^3\text{H}/^4\text{He}$ ages to evaluate and improve groundwater flow models in a complex buried-valley aquifer, *Water Resour. Res.*, Vol.34, No.5, pp.1077-1089, 1998.
- 4) 内田雅大, Bill Dershowitz, Richard Metcalfe, Dawn Shuttle, Mark Cave, 竹内真司: 地下水水質変化を考慮した水理解析の試み—スウェーデン エスポ地下研究施設での例—, 第11回岩盤力学シンポジウム, D05, 2002.
- 5) Rhen, I., Gustafson, G., Stanfors, R. and Wikberg, P.: Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5, Models based on site characterization 1986-1995. SKB Tech. Rep., TR-97-06, 1997.
- 6) Freeze, R.A.: A stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, *Water Resour. Res.*, Vol.11, No.5, pp.725-741, 1975.
- 7) Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, 1990.
- 8) Rhen, I., Svensson, U., Andersson, J-E., Andersson, P., Eriksson, C-O., Gustafsson, E., Itner, T. and Nordqvist, R.: Äspö Hard Rock Laboratory: Evaluation of the combined long term pumping test and tracer test(LPT2) in borehole KAS06. SKB Tech. Rep., TR92-32, 1992.
- 9) Elert, M.: Evaluation of modeling of the TRUE-1 radially converging and dipole tests with conservative tracers. The Äspö Task Force modeling of groundwater flow and transport of solute, SKB Tech. Rep., TR-99-04, 1999.
- 10) 五十嵐敏文, 田中靖治, 河西基, 宮川公雄: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究(その2) —長期揚水・トレーサー移行試験に対する3次元スミアード割れ目モデルの適用—, 電中研研究報告 U94054, 1995.
- 11) 田中靖治, 宮川公雄, 五十嵐敏文: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究(その4) —トンネル掘削が地下水流動に与える影響に関する数値解析—, 電中研研究報告 U99064, 2000.
- 12) Gelhar, L.W.: Stochastic Subsurface hydrology from theory to application, *Water Resour. Res.*, Vol.22, No.9, pp.135s-145s, 1986.
- 13) de Marsily, G.: Quantitative hydrogeology, Academic Press Inc., pp.284-337, 1986.
- 14) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: GSLIB, Geostatistical software library and user's guide, Oxford university press, 1998.
- 15) Laaksoharju, M., Skarman, C. and Skarman, E.: Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information, *Applied Geochemistry*, Vol.14, No.7, pp.861-871, 1999.
- 16) Laaksoharju, M., Tullborg, E.-L., Wikberg, P., Wallin, B. and Smellie, J.: Hydrogeochemical conditions and evolution at the Äspö HRL, Sweden, *Applied Geochemistry*, Vol.14, No.7, pp.835-859, 1999.
- 17) Mahara, Y., Igarashi, T., Hasegawa, T., Miyakawa, K., Tanaka, Y. and Kiho, K.: Dynamic changes in hydrogeochemical conditions caused by tunnel excavation at the Äspö Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden, *Applied Geochemistry*, Vol.16, pp.291-315, 2001.
- 18) Yeh, G.T. and Ward, D.S.: FEMWATER: A Finite-Element Model of Water Flow Through Saturated-Unsaturated Porous Media, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-5567, 1980.
- 19) Yeh, G.T. and Ward, D.S.: FEMWASTE. A Finite-element model of waste transport through saturated-unsaturated porous media, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-5601, 1981.
- 20) 河西基, 田中靖治, 五十嵐敏文: 高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発(その1) —割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法—, 電中研研究報告 U93054, 1994.
- 21) 河西基, 田中靖治, 五十嵐敏文: 高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発(その2) —割れ目系岩盤中の熱および核種の移行解析手法—, 電中研研究報告 U94053, 1995.
- 22) 土質工学会: 現場技術者のための土と基礎シリーズ 19 根切り工事と地下水—調査・設計から施工まで—, 1991.

(2003. 4. 30 受付)

VALIDATION OF GROUNDWATER FLOW MODEL USING THE CHANGE OF GROUNDWATER FLOW CAUSED BY THE CONSTRUCTION OF ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY

Takuma HASEGAWA, Yasuharu TANAKA, Yasunori MAHARA and Toshifumi IGARASHI

A numerical model based on results during pre-investigation phases was applied to the groundwater flow change caused by the construction of Äspö HRL. The drawdowns and chloride concentration during tunnel construction were simulated to validate the numerical model. The groundwater flow was induced by inflow from the Baltic Sea to the tunnel through the hydraulic conductor domain (HCD). The time series of tunnel progress and inflow, boundaries of the Baltic Sea, transmissivity and geometry of HCD are therefore important in representing the groundwater flow. The numerical model roughly represented the groundwater flow during tunnel construction. These simulations were effective in validating the numerical model for groundwater flow and solute transport.