

我が国の岩盤の水理特性について

(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構

東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

我が国の岩盤の水理特性について

(研究報告)

井尻裕二*、澤田淳*、赤堀邦晃*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における天然バリアの性能評価研究においては、我が国の地下岩盤の水理特性を把握しておく必要がある。本技術資料は、既往の文献ならびに釜石鉱山や東濃鉱山で実施した調査試験結果をもとに、我が国における地下の岩盤の水理特性に関してまとめたものである。その結果、地下岩盤の透水性に関しては、場所によりばらつきがあるものの平均して一般部の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s を中心に分布し、断層破碎帯の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-3}$ m/s に分布していることがわかった。また、岩盤の透水性は、深度とともに低下する可能性があることから、地下深部の処分場レベルの岩盤の透水係数はさらに低くなる可能性が示された。岩盤の中で特に花崗岩は、亀裂中の流れが支配的な典型的な亀裂性岩盤に分類され、安山岩や凝灰岩を除くその他の結晶質岩や先新第三紀堆積岩も亀裂性岩盤に分類されることが示された。一方、安山岩や凝灰岩に加えて新第三紀堆積岩は、岩石基質の透水性が高く亀裂だけでなく岩石基質中の流れも有意な亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤に分類されることが示された。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

Hydrological characteristics of Japanese Rock

Yuji Ijiri*, Atsushi Sawada*, Kuniaki Akahori*

Abstract

It is crucial to evaluate the hydrogeological characteristics of rock in Japan in order to assess the performance of geosphere. This report summarizes the hydrogeological characteristics of various rock types obtained from broad literature surveys and the fields experiments at the Kamaishi mine in northern Japan and at the Tono mine in central Japan. It is found that the hydraulic conductivity of rock mass ranges from 10^{-9} m/s to 10^{-8} m/s, whereas the hydraulic conductivity of fault zone ranges from 10^{-9} m/s to 10^{-3} m/s. It is also found that the hydraulic conductivity tends to decrease with depth. Therefore, the hydraulic conductivity of rock mass at the depth of a repository will be smaller than above values. From the investigations at outcrops and galleries throughout the country, fractures are observed as potential pathways in all rock types. All kinds of crystalline rocks and pre-Neogene sedimentary rocks are classified as fractured media where fracture flow is dominant. Among these rocks, granitic rock is considered the archetype fractured media. On the other hand, andesite, tuff and Neogene sedimentary rocks are considered as intermediate between fractured media and porous media where flow in fractures as well as in rock matrix are significant.

* System Analysis Group, Waste Isolation Division, Tokai Works

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 我が国の岩盤の透水性	2
2.1 一般部の透水性	5
2.1.1 透水係数測定値による検討	5
2.1.2 トンネル湧水量による検討	8
2.1.3 まとめ	10
2.2 断層破碎帯の透水性	11
2.3 地下深部の透水性	12
2.3.1 透水係数と深度の関係	12
2.3.2 透水係数と応力の関係	17
2.3.3 まとめ	18
2.4 掘削影響領域の透水性	19
3. 我が国の岩盤の地下水浸透特性	22
3.1 地下水浸透経路	22
3.2 亀裂性岩盤と多孔質岩盤による分類	24
3.2.1 亀裂の透水性	25
3.2.2 亀裂の連続性	27
3.2.3 地下水浸透特性による岩盤の分類	30
4. まとめ	33
5. 参考文献	35
6. 謝辞	39
付録 A 釜石鉱山および東濃鉱山におけるボーリング孔毎の透水係数一覧	40
付録 B 断層破碎帯を含む岩盤の透水性について	41
付録 C 岩石基質の透水性	43
付録 D 第2次取りまとめにおける岩種とモデル	44

目 次

	頁
図 2.1 岩盤の透水係数 (佐藤ほか、1978)	3
図 2.2 原位置で測定された透水係数 (Brace, 1980)	3
図 2.3 透水係数分布図	4
図 2.4 各透水試験区間の透水係数頻度分布 (花崗岩)	6
図 2.5 各ボーリング孔の透水係数頻度分布 (花崗岩)	7
図 2.6 各ボーリング孔の透水係数頻度分布 (砂岩、泥岩、凝灰岩)	7
図 2.7 地質別トンネル比湧水量 (石井・佐久間、1977)	9
図 2.8 深度と透水係数の関係 (Snow, 1968)	13
図 2.9 花崗岩地域における深度と透水係数の関係 (渡辺・小島、1980)	13
図 2.10 花崗閃緑岩地域における深度と透水係数の関係 (本島・堀、1982)	13
図 2.11 深度と透水係数の関係 (木下ほか、1993)	14
図 2.12 スウェーデンにおける透水係数と深度の関係	14
図 2.13 フィンランドにおける透水係数と深度の関係 (Poteri and Laitinen、1999)	15
図 2.14 フィンランド Hästholmen 島における透水係数と深度の関係 (Löfman、1999)	15
図 2.15 スイス Wellenberg の泥質岩における 透水係数と深度の関係 (Mazurek et al., 1998)	16
図 2.16 天然亀裂の透水量係数と封圧の関係 (Iwano, 1995)	17
図 2.17 地下発電所空洞掘削による透水性の変化 (本島・堀、1982)	21
図 2.18 亀裂の開口による掘削影響領域内での透水性増加概念図	21
図 3.1 移行経路概念図	22
図 3.2 地下水浸透メカニズムによる岩盤の分類	24
図 3.3 岩盤と岩石基質の透水係数の分布	26
図 3.4 亀裂密度と連結点数の関係 (斎藤ほか、1999)	28
図 3.5 露頭および鉋山坑道で測定した 2 次元亀裂密度分布 (斎藤ほか、1999)	28
図 3.6 亀裂性岩盤と多孔質岩盤による分類	32
 付録	
図 B.1 処分場領域の断層を含む岩盤の透水性評価方法概念図	42
図 C.1 花崗岩における間隙率と透水係数の関係 (渡辺、1984)	43
図 D.1 岩盤モデルと透水係数の関係模式図	45

目 次

	頁
表 2.1 透水試験測定値一覧	4
表 2.2 地質別トンネル比湧水量一覧 (石井・佐久間、1977)	9
表 2.3 断層破碎帯の透水係数分布 (米田・小屋開地、1993)	11
表 2.4 断層破碎帯の透水係数 (田中・井上、1995)	11
表 2.5 掘削影響領域実測データ一覧	20
表 3.1 露頭・鉦山坑道調査箇所一覧 (21 地点 43 調査箇所)	23
表 3.2 亀裂断続率による岩盤の分類 (緒方、1984)	29
表 3.3 地下水浸透特性と岩盤の分類	31
付録	
表 A.1 釜石鉦山および東濃鉦山におけるボーリング孔毎の透水係数一覧	40
表 B.1 処分場領域内の断層の諸元と透水係数上昇率	42

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における天然バリアの性能評価研究においては、地表面近傍の応力解放による擾乱や風化などの影響を受けていない我が国の地下岩盤の水理特性を把握しておく必要がある。本技術資料は、既往の文献ならびに釜石鉱山や東濃鉱山で実施した調査試験結果をもとに、我が国における地下の岩盤の水理特性に関してまとめたものである。2章では、岩種毎に地下の岩盤の巨視的な透水係数を定量的に評価するとともに、岩盤の透水係数と深度との関係から地下深部の透水性について検討する。また、空洞の掘削に伴い空洞周辺に生じる緩み域内での透水性についても言及する。3章では、日本各地の露頭や鉱山坑道で実施した地質調査に基づいて岩盤中の主な地下水浸透経路として岩石基質と断層・亀裂に着目し、亀裂性岩盤と多孔質岩盤という観点から亀裂内の流れが支配的か否かによって我が国の岩盤の分類を試みた。

2. 我が国の岩盤の透水性

我が国の岩盤の透水性に関しては、佐藤ほか（1978）は既往の文献調査により図 2.1 に示すような岩種毎の透水係数の分布図を作成している。これによると、室内よりも原位置で測定された値の方が大きく、花崗岩は室内で $10^{-21} \sim 10^{-9} \text{m/s}$ ($10^{-19} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$) の範囲に分布しているのに対し、原位置では $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ ($10^{-5} \sim 10^{-1} \text{cm/s}$) の範囲に分布している。一方、海外では Brace（1980）が文献調査により図 2.2 に示すような透水係数の分布図を作成しており、チャートや玄武岩などの透水性が高い傾向にあるものの、その他の岩種での顕著な傾向は認められず、花崗岩の透水係数は $10^{-15} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ ($10^{-10} \sim 10^{-3} \text{darcy}$) の範囲に分布していることがわかる。

これらの研究では測定データ数が限られているために、サイクル機構では日本全国のダムやトンネル等の土木工事現場で測定された透水係数を中心に文献調査を実施し、23 種類の公開文献から 1517 件の透水係数データベースを構築した（梅田ほか、1995）。また、釜石鉱山や東濃鉱山において原位置透水試験を実施し、数多くの透水係数を取得している（表 2.1 参照）。

しかし、既往の文献より得られた透水係数データベースに関しては、断層破碎帯部や地表面近傍の風化部を除いたとしても、

- 土木工事で主に用いられているルジオンテストでは、1～3 ルジオンで難透水性岩盤とされ、それ以下の数値に対しては施工上問題がないことから測定されることは希であり、文献では 1 ルジオン ($1.33 \times 10^{-5} \text{cm/s}$) 以下については具体的な数値が記載されていない場合が多い、
- 土木関係の文献に発表されている透水係数データは、特に岩盤の透水性が施工上問題となったダムやトンネルのものが多く、断層破碎帯のデータも数多く含まれている可能性が高い、
- ダム等の地表面近傍のデータが多い、

などの理由により、図 2.3 に示すように釜石鉱山、東濃鉱山および菊間地下石油備蓄基地で測定された透水係数に比べて大きくなる傾向を示し、地下岩盤の透水性を過大に評価する可能性があることがわかった。

そこで、我が国の地下岩盤の透水性を評価するにあたっては、釜石鉱山、東濃鉱山、菊間地下石油備蓄基地で測定された透水係数を用いることとした。また、断層破碎帯を除く一般部と断層破碎帯部とは透水係数が大きくことなることから、一般部と断層破碎帯部の透水性は別々に評価することとした。さらに、既往の研究や釜石鉱山での測定結果に基づいて掘削影響領域の透水性についても検討を行う。

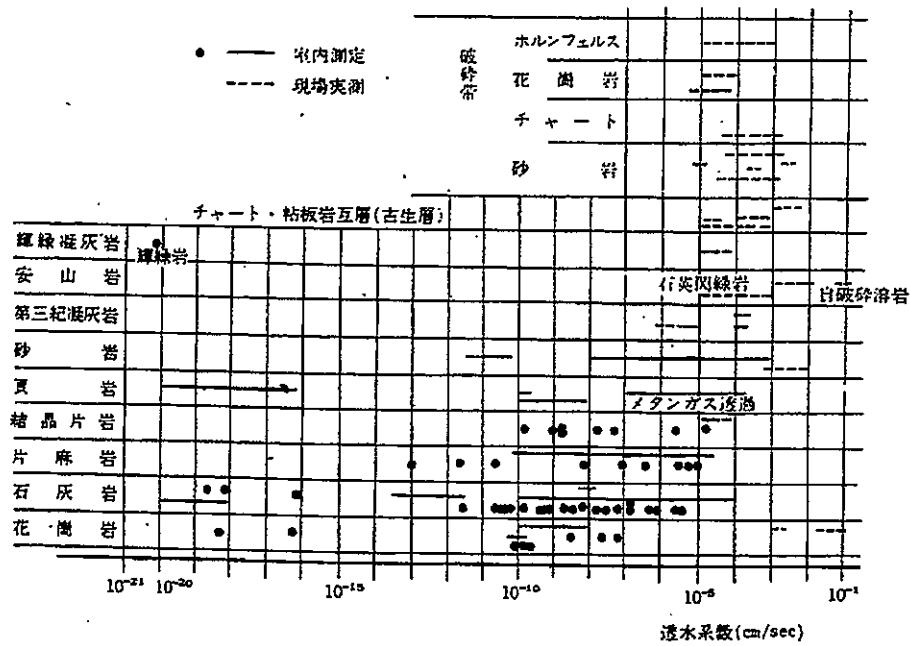


図 2.1 岩盤の透水係数 (佐藤ほか、1978)

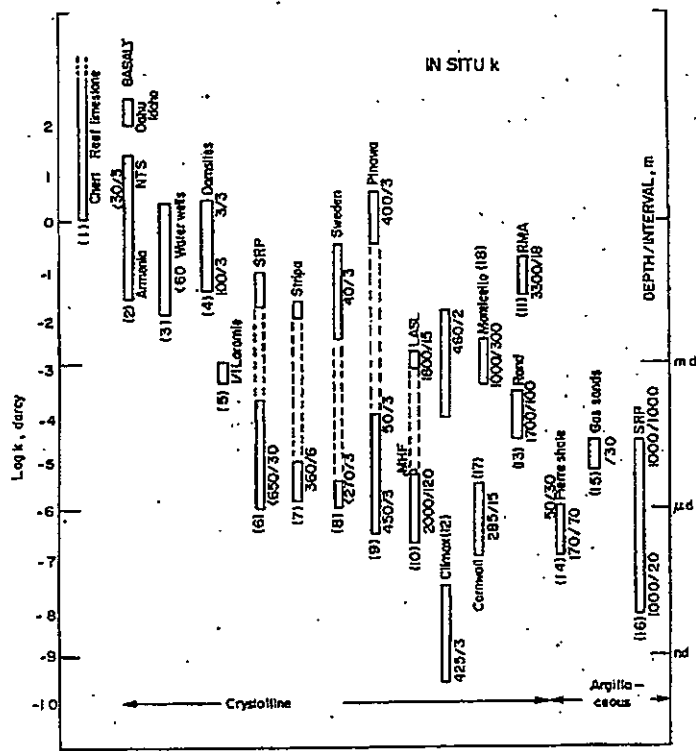


図 2.2 原位置で測定された透水係数 (Brace, 1980) [深度/測定区間長]

- | | |
|---|--|
| (1) 頁岩中のチャート、亀裂性石灰岩、珊瑚質石灰岩 | (10) 花崗閃綠岩 (ニューメキシコ州ロスアラモス地熱地帯) |
| (2) 玄武岩 (アルマニア、ネバダ試験場、アイダホ州オアフ) | (11) 結晶質岩 (デンバー) |
| (3) 亀裂性変成岩 (北コロラド州、深度 60m 以下) | (12) 花崗岩 (高透水値は掘削の影響有り) |
| (4) 結晶質岩 (アメリカ西部のダムサイト) | (13) 珪岩 (トンネルへの湧水量より算定) |
| (5) 花崗岩露頭 (ワイオミング州ララミー) | (14) ピア頁岩 (パッカー試験) |
| (6) 結晶質岩 (南キャロライナ州アイケン近郊バン川平野、測定限界: $1 \mu d$) | (15) 砂 (Rulison and Gasbuggy サイトの揚水試験) |
| (7) 花崗岩 (ストリバ鉱山) | (16) 第三紀泥岩 (南キャロライナ州アイケン近郊) |
| (8) 花崗岩、片麻岩 (スウェーデン) | (17) 花崗岩 (イギリス Cornwall、注水試験) |
| (9) バソリス (マニトバ州ピナワ近郊、測定限界: $0.5 \mu d$) | (18) (南キャロライナ州 Monticello Reservoir) |

表 2.1 透水試験測定値一覧

サイト名	釜石鉾山	東濃鉾山	菊間地下石油備蓄基地*
岩種	栗橋花崗閃緑岩	花崗岩 堆積岩 [砂岩, 泥岩, 凝灰岩]	領家花崗閃緑岩
土被り	260m	30~200m	約 50m
ボーリング孔	計 6 孔 [KE-3,6,7 ; KH-2,3,5]	計 20 孔 [AN-1,3,6,8; SN-3,4,6; · HN-1; DH-1,2,3,4; TH-1~8]	計 2 孔 [No.1,3]
試験区間長	0.6~5m	2.3~19m	5m
試験区間数	45 区間	187 区間 [花崗岩 131 ; 砂岩 37 ; 泥岩 11 ; 凝灰岩 8]	38 区間
透水係数分布 範囲	$10^{-11} \sim 10^{-5}$ m/s	花崗岩: $10^{-12} \sim 10^{-4}$ m/s 砂岩 : $10^{-10} \sim 10^{-4}$ m/s 泥岩 : $10^{-11} \sim 10^{-7}$ m/s 凝灰岩: $10^{-10} \sim 10^{-8}$ m/s	$10^{-10} \sim 10^{-6}$ m/s

* 菊間地下石油備蓄基地のデータは、下茂ほか (1992) による。

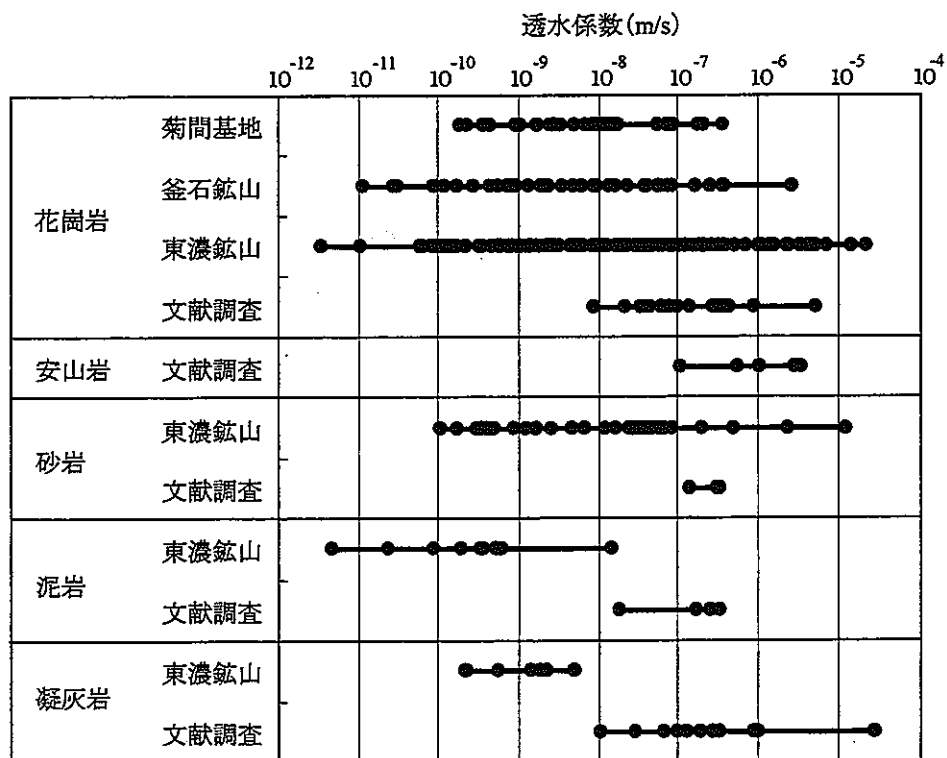


図 2.3 透水係数分布図

(菊間地下石油備蓄基地のデータは、下茂ほか (1992) より引用)

2.1 一般部の透水性

2.1.1 透水係数測定値による検討

釜石鉱山、東濃鉱山および菊間地下石油備蓄基地では、表 2.1 に示すように複数のボーリング孔内で実施されたダブルパッカー式の透水試験により透水係数が測定されており、各試験区間で得られた透水係数の分布は、図 2.4 に示すようにいずれのサイトにおいても 10^{-9}m/s ~ 10^{-8}m/s オーダー中心に分布していることがわかる。ただし、これらの透水係数は、試験区間 2.5~5m で測定された局所的なスケールでの透水係数の分布を表している。

そこで、より巨視的なスケールでの透水係数を評価するために、同じボーリング孔内で測定された各試験区間の透水係数 K_i から以下の式を用いてボーリング孔毎の透水係数 K' を算定した。

$$K' = \frac{\sum_{i=1}^N K_i L_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (2.1)$$

ここに、 L_i は試験区間長 [m]、 N はボーリング孔内の総試験区間数を表す。式 (2.1) により求められた花崗岩および堆積岩の透水係数の分布をそれぞれ図 2.5 および図 2.6 に示す (付録 A 参照)。

(1) 花崗岩

図 2.5 からわかるように各ボーリング孔の透水係数の分布は、各試験区間の透水係数の分布よりもばらつきは小さくなり、各ボーリング孔の透水係数がボーリング孔内に存在する透水性の高い区間の透水性に依存することからピーク位置は若干透水性の大きい方へシフトし 10^{-8}m/s オーダーの頻度が最も高くなっている。

ここで、釜石鉱山 KD-90 坑道 (幅 4m×高 3m×長 37.5m) で実施された坑道規模透水試験 (長ほか、1991; 福田ほか、1992) とベンチレーション試験 (長ほか、1992) 結果によると巨視的な透水係数はそれぞれ $2.07 \times 10^{-8}\text{m/s}$ 、 $2.38 \times 10^{-8}\text{m/s}$ と報告されており、ボーリング孔の透水係数から推定された巨視的透水係数の値と一致する。また、菊間基地においても、実証プラントのトンネルおよび空洞 (幅 15m×高 20m×長 112m) への湧水量解析により求められた岩盤の巨視的透水係数は $2.5 \times 10^{-8}\text{m/s}$ と報告されており (下茂ほか、1986)、ボーリング孔の透水係数から推定された巨視的透水係数 10^{-8}m/s オーダーは、比較的大きなスケールで求められた巨視的透水係数とほぼ一致している。

以上より、数 m スケールの花崗岩の透水係数は比較的広い範囲に分布するものの、十数 m から数十 m スケールの花崗岩の巨視的透水係数は 10^{-8}m/s オーダーに分布すると考えられる。

(2) 堆積岩 (砂岩、泥岩、凝灰岩)

花崗岩と同様に、図 2.6 に示す東濃鉱山で測定された透水係数データから求められたボーリング孔毎の透水係数の分布によると、東濃鉱山に分布する堆積岩の巨視的透水係数は、砂岩で

10⁻⁸m/s オーダー、泥岩で 10⁻¹⁰m/s オーダー、凝灰岩で 10⁻⁹m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。

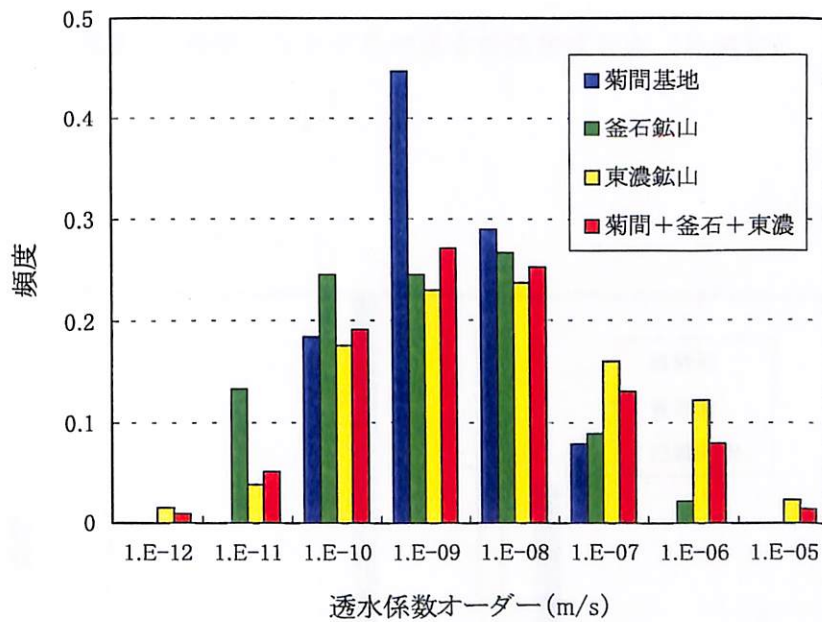


図 2.4 各透水試験区間の透水係数頻度分布 (花崗岩)

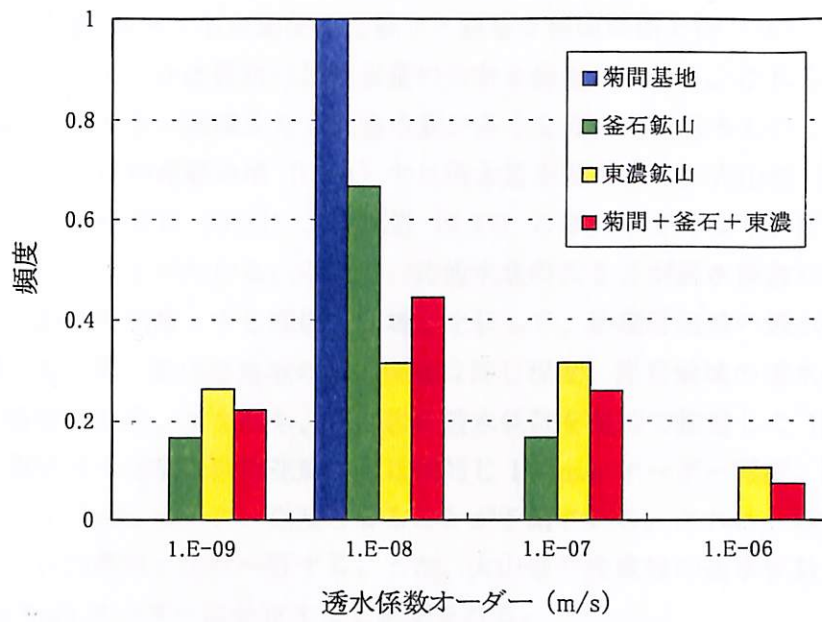


図 2.5 各ボーリング孔の透水係数頻度分布 (花崗岩)

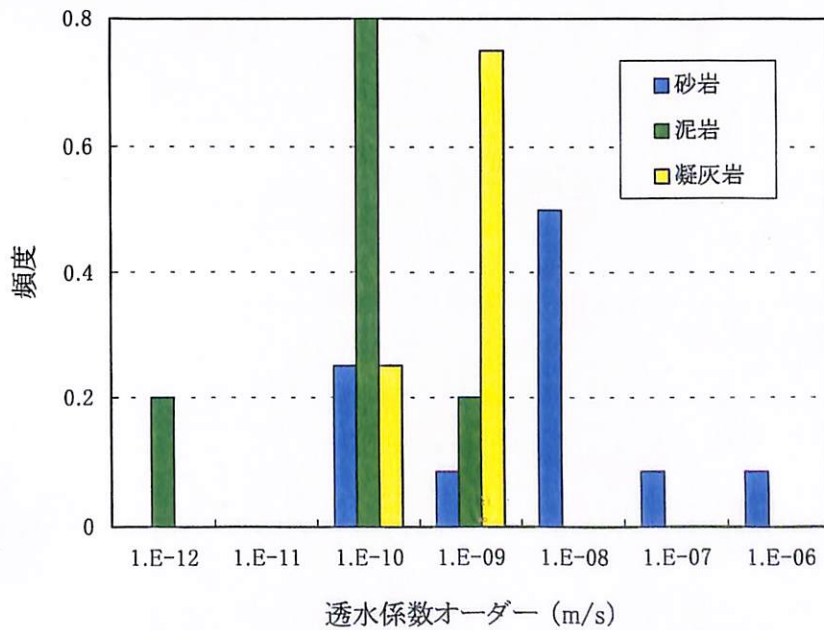


図 2.6 各ボーリング孔の透水係数頻度分布 (砂岩、泥岩、凝灰岩)

2.1.2 トンネル湧水量による検討

石井・佐久間(1977)は、鉄道トンネルへの恒常湧水量測定結果を取りまとめ、比湧水量(単位 km あたりの湧水量)がトンネル延長や土被りと顕著な相関関係を持たないことを示した上で、図 2.7 と表 2.2 に示すような地質別の比湧水量の分布を報告している。これらの図表によると、破碎帯の多い地域では少ない地域よりも比湧水量が多くなるのはもちろんのこととして、破碎帯の少ない岩盤においては砂礫層地域(0.84)で比湧水量が最も多く、火山岩(0.30)、砂岩・頁岩・凝灰岩(0.25)、深成岩(0.20)、変成岩(0.17)の順に小さくなり、泥岩地域(0.07)で最も少なくなっていることがわかる。ここで、比湧水量の大きさが透水係数の大きさに比例すると仮定すれば、花崗岩を代表とする深成岩地域と比較して、砂礫層地域の透水係数は高く、火山岩、砂岩・頁岩・凝灰岩、変成岩地域の透水係数は同じ程度、泥岩地域の透水係数は1オーダー程度低くなると推測される。すなわち、花崗岩の透水係数を前節で推定した 10^{-8}m/s オーダーとすると、砂岩や凝灰岩の透水係数は花崗岩とほぼ同じ 10^{-8}m/s オーダー程度、泥岩の透水係数は花崗岩よりも低く 10^{-9}m/s オーダー程度となることが予測される。これは、前節の東濃鉱山での透水係数から得られた傾向とほぼ一致する。また、火山岩や変成岩の透水係数に関しては、花崗岩とほぼ同じ 10^{-8}m/s オーダーに分布すると推定される。

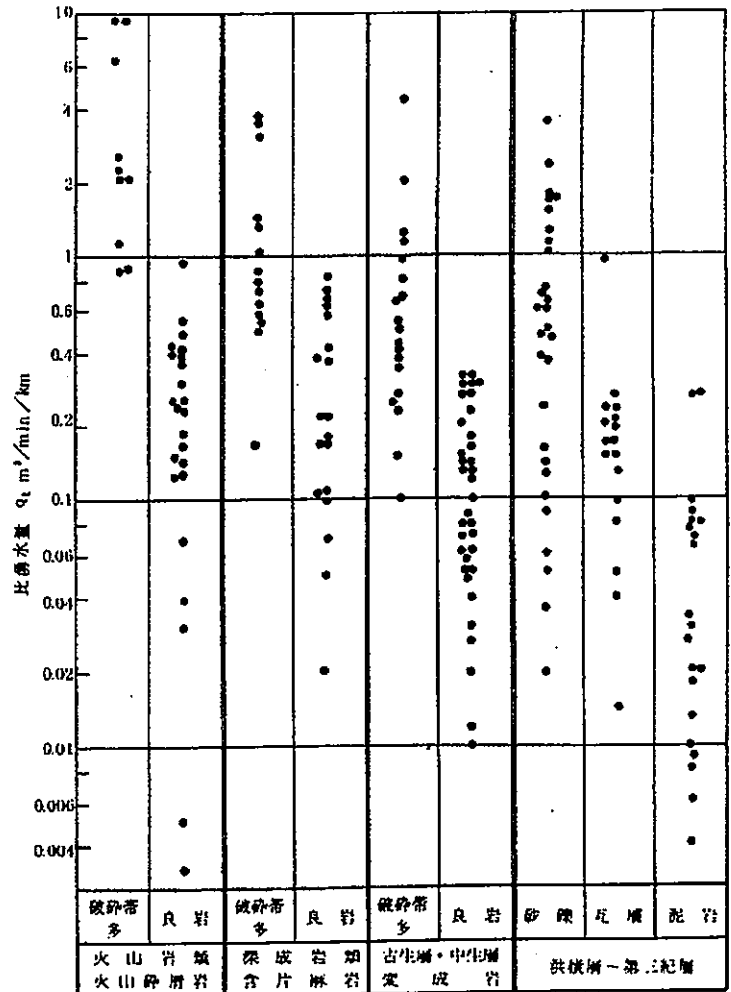


図 2.7 地質別トンネル比湧水量 (石井・佐久間、1977)

表 2.2 地質別トンネル比湧水量一覧 (石井・佐久間、1977)

地質分類		比湧水量の範囲 (m ³ /min/km)	平均比湧水量 (m ³ /min/km)
火山岩、火山砕屑岩*		0.85 ~ 10.0	3.71
		0.035 ~ 0.90	0.30
深成岩 (含片麻岩) *		0.17 ~ 3.80	1.38
		0.018 ~ 0.84	0.20
変成岩 (古生層、中生層) *		0.10 ~ 4.50	0.79
		0.00 ~ 0.95	0.17
第三紀 ~ 洪積世	砂礫層	0.02 ~ 3.60	0.84
	砂岩・頁岩・凝灰岩	0.014 ~ 0.95	0.25
	泥岩	0.00 ~ 0.26	0.07

* 上段：破碎帯の多い地域、下段：破碎帯の少ない地域

2.1.3 まとめ

我が国の岩盤の巨視的透水係数に関して得られた知見を以下に示す。

- 花崗岩の透水係数は、 10^{-8} m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。
- 花崗岩以外の結晶質岩の透水係数に関しては、透水係数データが少なく定量的な評価は難しいものの、トンネル湧水量から推定すると花崗岩と同様 10^{-8} m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。
- 砂岩や凝灰岩の透水係数は、 10^{-9} ~ 10^{-8} m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。
- 泥岩の透水係数は、 10^{-9} m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。

以上より、我が国の岩盤の巨視的な透水係数は、岩種に関係なくおおよそ 10^{-9} ~ 10^{-8} m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。

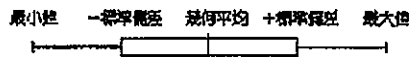
2.2 断層破碎帯の透水性

断層破碎帯の透水係数は、表 2.3 に示す文献調査（米田・小屋開地、1993）によると亀裂性岩盤と新第三紀堆積岩中で多少の違いは見られるものの $10^{-9} \sim 10^{-4} \text{m/s}$ ($10^{-7} \sim 10^{-2} \text{cm/s}$) に分布している。一般に、断層は中心にある粘土部とその周辺の破碎帯角礫部から構成されていることが多く、粘土部よりも角礫部の方が透水性は大きく、表 2.4 に示す断層破碎帯の透水係数測定値（田中・井上、1995）によると、粘土部で $10^{-8} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ ($10^{-6} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$)、角礫部で $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ ($10^{-4} \sim 10^{-1} \text{cm/s}$) に分布していることがわかる。

以上より、断層破碎帯の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ に分布すると考えられ、角礫部の方が粘土部よりも透水性が大きくなる傾向が認められる。なお、断層破碎帯を含む岩盤の巨視的透水係数は、一般部の透水係数を $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ 、断層破碎帯の透水係数を $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ とした場合には、一般部の透水係数とあまり変わらないと考えられる（付録 B 参照）。

表 2.3 断層破碎帯の透水係数分布（米田・小屋開地、1993）

岩種	透水係数 (m/s)		
	最大値	最小値	平均値
亀裂性岩盤	2.3×10^{-5}	1.6×10^{-9}	5.7×10^{-7}
新第三紀堆積岩	1.6×10^{-6}	1.0×10^{-8}	1.1×10^{-7}



岩種	データ数	透水係数 (cm/s)																		
		10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}									
亀裂性岩盤 (12ヶ所)	34																			
新第三紀堆積岩 (新第三紀堆積岩)	6																			

表 2.4 断層破碎帯の透水係数（田中・井上、1995）

岩石種	地質年代	断層・破碎帯内物質幅	粘着力 (kg/cm ²)	内部摩擦角 (度)	透水性 (cm/s)	変形性 (kg/cm ²)	地点
砂岩、粘板岩	中生代	粘土質 10~15cm	0.25	35	$10^{-3} \sim 10^{-4}$		一つ瀬 黒四 高根第一
花崗閃緑岩	中生代	粘土質 1~30cm	2~3	30~40			
縞状チャート	古生代	砂質 5~6m 角礫質 10~15m	5~6	40~45	$10^{-1} \sim 10^{-4}$	$4 \sim 10 \times 10^3$	
花崗岩	中生代	粘土質 9m	0.5	20	$10^{-4} \sim 10^{-5}$		奈川渡
ホルンフェルス	古生代	角礫質 砂質	0.5	20	10^{-3} 10^{-4}		
砂岩	古生代	粘土質 角礫質			10^{-5} 10^{-3}		水殿
粘板岩、チャート	古生代	粘土質			$10^{-3} \sim 10^{-4}$ 10^{-4}		

2.3 地下深部の透水性

2.1 節で求めた岩盤の巨視的な透水係数は、地表面近傍の擾乱や風化の影響の少ない地下 30m ~ 260m で測定された透水係数から推定した値である。ここでは、既往の岩盤の透水係数と深度の関係および透水係数と応力の関係に基づいて、地下深部の処分場レベル（地下 1000m）における岩盤の透水性について検討を行う。

2.3.1 透水係数と深度の関係

Snow (1968) は、岩種の異なる 35 のダムサイトでの透水係数測定結果より透水係数が深度とともに減少する透水係数の深度依存性を示し、亀裂開口幅も深度とともに減少することから透水係数の深度依存性は亀裂開口幅の減少に起因していることを指摘している（図 2.8 参照）。渡辺・小島（1980）も花崗岩地域での測定結果から図 2.9 のような透水係数の深度依存性を示し、実験データとの比較から透水係数の深度依存性は上載圧（土被り圧）の増加に伴う亀裂の透水性の低下、すなわち亀裂開口幅の減少に起因していることを指摘している。本島・堀（1982）は、新高瀬川発電所の花崗閃緑岩地域で深度 300m までの透水係数の分布を測定して図 2.10 に示すような関係を求め、深度 50m までの地表面近傍では深度依存性があることを示している。以上の結果より、岩盤の透水係数には亀裂開口幅の減少に起因した深度依存性が認められるものの、いずれの場合も深度 100m までの地表面近傍での結果であり、100m 以深での深度依存性については言及していない。

地下深部での透水係数の深度依存性に関する既往の研究は少なく、我が国では、木下ほか（1993）が結晶質岩で透水係数を測定し、深度 200m から 1000m の間で開口亀裂の数の減少に伴う図 2.11 に示すような顕著な深度依存性があることを報告している。一方、釜石鉱山の 550m レベル坑道（土被り 260m）と 250m レベル坑道（土被り 730m）から花崗閃緑岩中に削孔されたボーリング孔で測定された透水係数からは顕著な深度依存性は認められていない。

海外では、地層処分研究に関連していくつかの文献が見られ、スウェーデンの 6 つのサイト（Finnsjön、Fjällveden、Gideå、Klipperås、Kamlunge、Svartboberget）では、図 2.12(a) に示すように深度 700m までの透水係数の幾何平均が深度依存性を呈することが報告されている（SKB, 1992）。このうち Kamlunge サイトの透水係数のプロットを図 2.12(b) に示す（Neretnieks, 1993）。フィンランドの 4 つの花崗岩サイト（Hästholmen、Kivetty、Olkiluoto、Romuvaara）においても、図 2.13 に示すような深度依存性が確認されている（Poteri and Laitinen, 1999）。このうち Hästholmen サイトでは、図 2.14 に示すように母岩部と破碎帯部の透水係数はともに深度依存性を呈することが報告されている（Löfman, 1999）。一方、カナダの地下研究施設（花崗岩）での透水試験結果によると深度 200m から 700m の間では顕著な深度依存性は確認されていない（Davison et al., 1994）。

スイス Wellenberg の透水性の低い Palfris 泥質岩層における流量検層とパッカー式透水試験の結果によると、透水量係数は図 2.15 に示すように地表面近傍 $3 \times 10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ から深度 600m の $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 以下まで顕著な深度依存性を示し、それ以下では $10^{-9} \sim 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ でほぼ一定となることが確認されている（Mazurek et al., 1998）。

以上より、岩盤の透水係数は、深度 100m までの地表面近傍では顕著な深度依存性が認められ

るものの、深度 100m 以深の地下深部ではサイトにより一般部や破碎帯部に拘わらず緩やかな深度依存性を示す場合と示さない場合が存在する。また、花崗岩に限らず堆積岩においても顕著な深度依存性を示すことから、岩種には依存しないと考えられる。

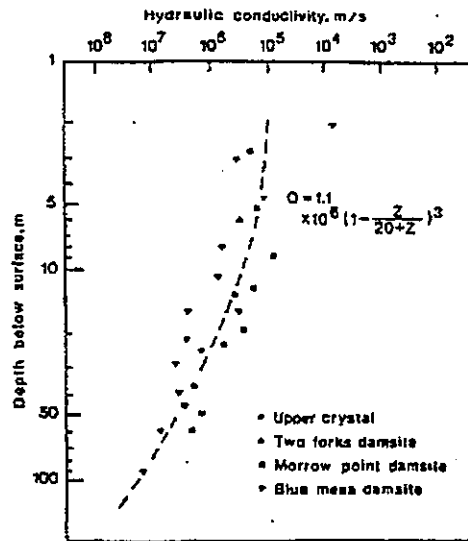


図 2.8 深度と透水係数の関係 (Snow, 1968)

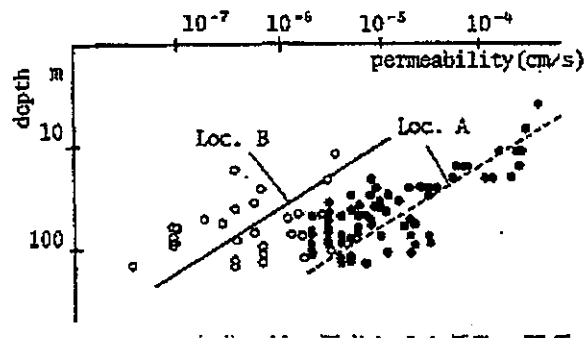


図 2.9 花崗岩地域における深度と透水係数の関係 (渡辺・小島, 1980)

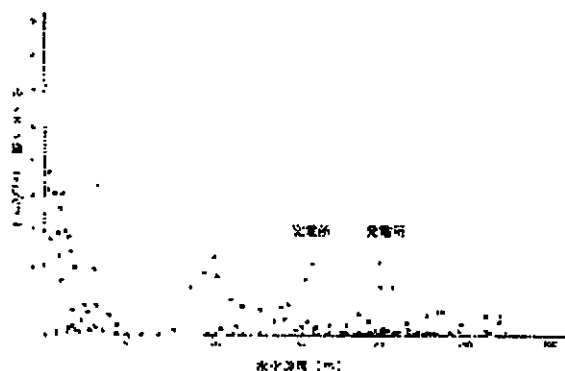


図 2.10 花崗閃緑岩地域における深度と透水係数の関係 (本島・堀, 1982)

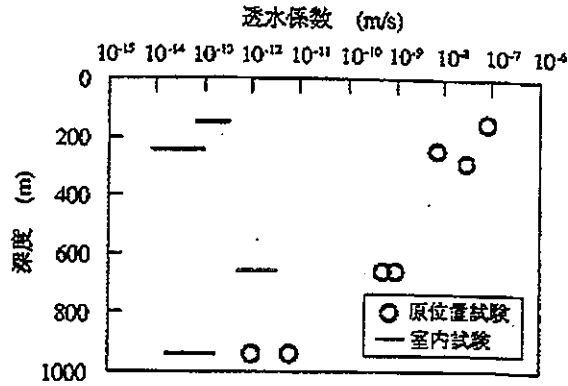
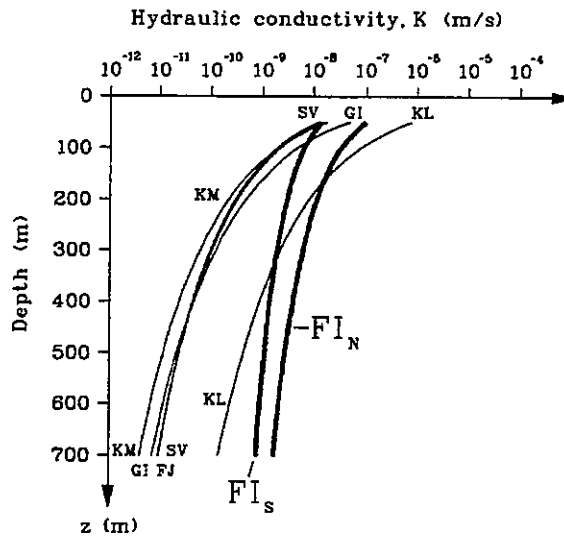
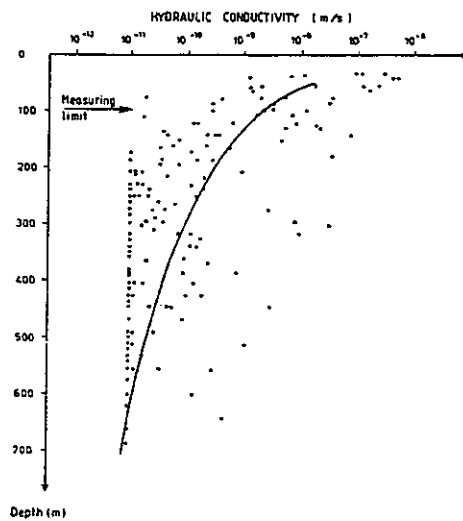


図 2.11 深度と透水係数の関係 (木下ほか、1993)



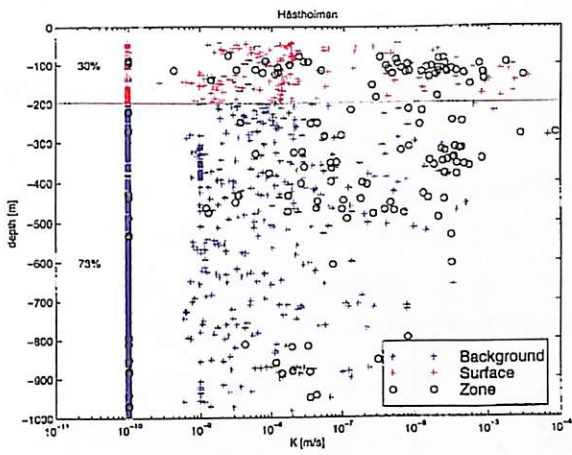
(a) 6 サイト (SKB, 1992)



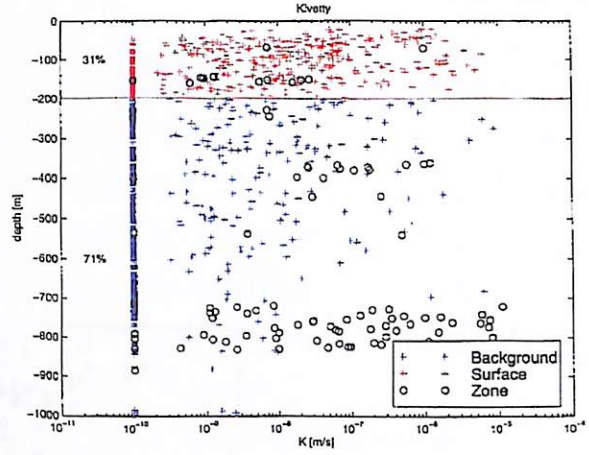
(b) Kamlunge サイト (Neretnieks, 1993)

図 2.12 スウェーデンにおける透水係数と深度の関係

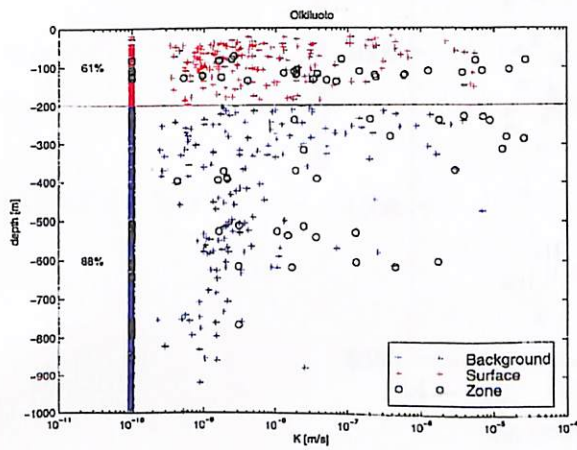
図(a)中の記号はそれぞれ FI_N =Finnsjön 北部、 FI_S =Finnsjön 南部、 FJ =Fjällveden、 GI =Gideå、 KL =Klipperås、 KM =Kamlunge、 SV =Svartboberget を表す。



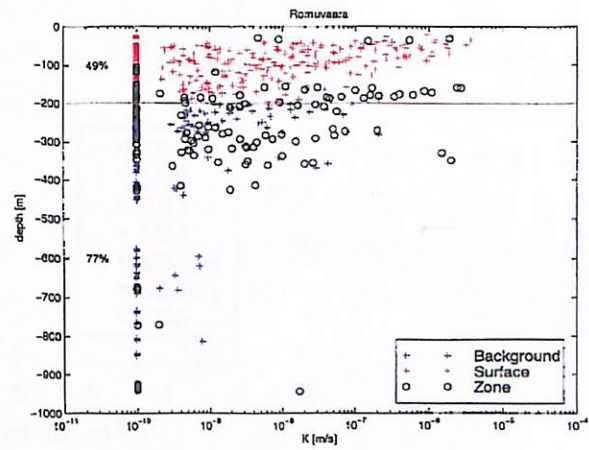
(a) Hästholmen



(b) Kivetty

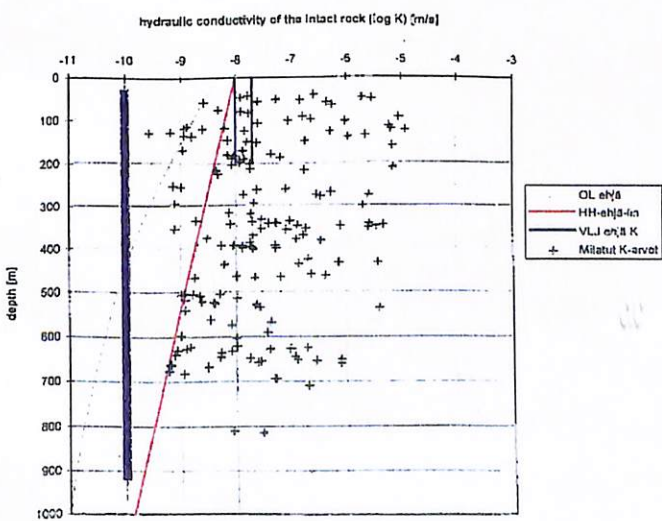


(c) Olkiluoto

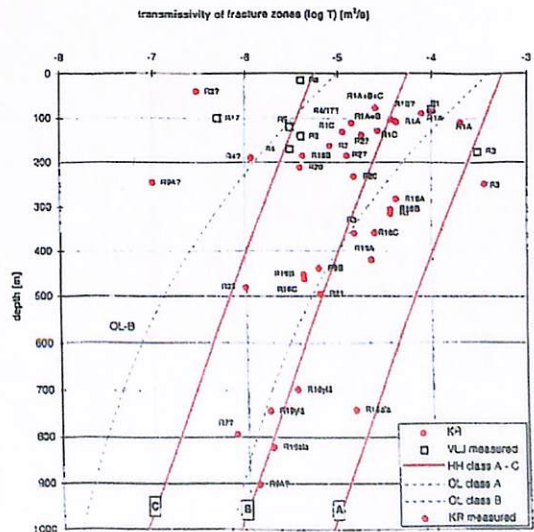


(d) Romuvaara

図 2.13 フィンランドにおける透水係数と深度の関係 (Poteri and Laitinen、1999)



(a) 母岩



(b) 破碎帯

図 2.14 フィンランド Hästholmen 島における透水係数と深度の関係 (Löfman、1999)

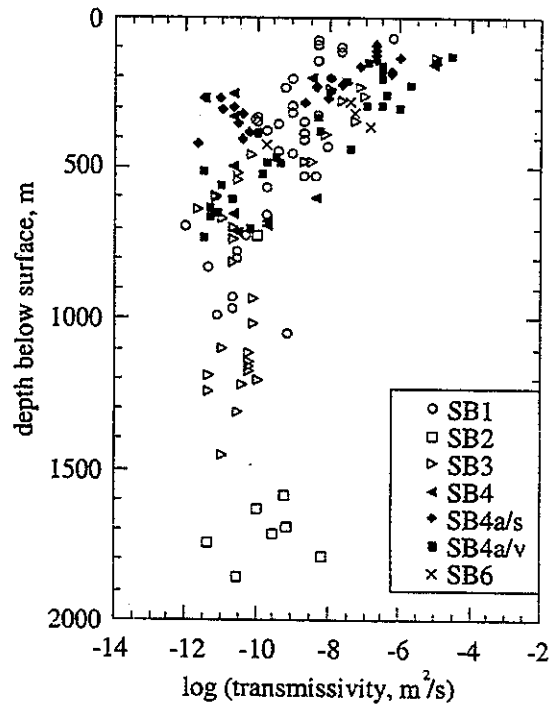


図 2.15 スイス Wellenberg の泥質岩における透水係数と深度の関係 (Mazurek et al., 1998)

2.3.2 透水係数と応力の関係

透水係数の応力の関係に関しては、これまでに数多くの室内試験が実施され、岩石基質の透水係数は応力の増加とともに減少することが知られている(例えば、Brace et al., 1968; Zoback and Byerlee, 1975; Bernabe, 1986)。亀裂の透水性に関しても、Kranz et al. (1979) や Walsh (1981) は、人工的に作成した亀裂を用いた室内試験により応力依存性を呈することを確認している。また、Iwano (1995) は、菊間地下石油備蓄で採取した天然亀裂を含む花崗閃緑岩の試料を用いて透水試験を実施し、図 2.16 に示すように封圧が 0.5~20Mpa の範囲で亀裂の透水量係数が 2 桁以上変化することを示している。ここで、地下 1000m の亀裂にかかる封圧を最大 17Mpa (=1000m × (2.7t/m³ - 1.0t/m³)) 程度と仮定すると、地下 1000m の亀裂の透水量係数は、Iwano (1995) の結果に基づけば地表面近傍の亀裂の透水量係数よりも最大で 2 桁近く低下することとなる。ただし、引張り亀裂と圧縮亀裂では亀裂面にかかる応力も異なり透水性も異なる(越谷ほか、1991) ことから、亀裂によって応力依存の程度は異なると考えられる。

原位置で透水係数の応力依存性を測定した例は少ないものの、2.3 節によると掘削した空洞周辺の岩盤の透水性が応力解放により 1~2 桁程度増加することから、地下深部の亀裂の透水量係数は地表面近傍の亀裂の透水量係数よりも 1~2 桁低くなると考えられる。

以上より、岩石基質と亀裂の透水性は、応力の増加とともに減少することから、地下深部で応力が増加するほど岩盤の透水係数は減少すると考えられる。

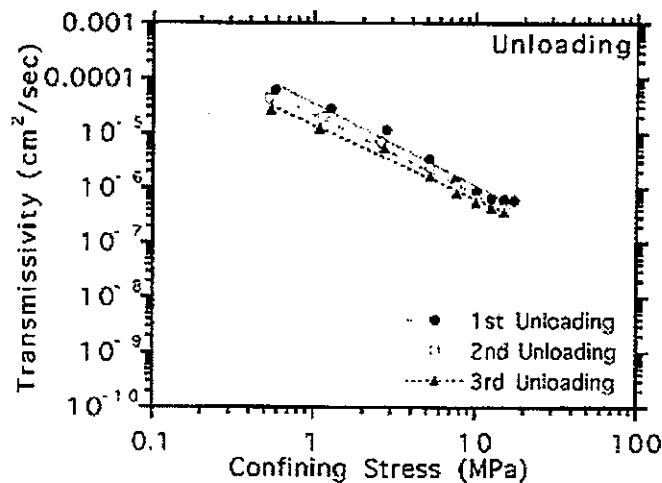


図 2.16 天然亀裂の透水量係数と封圧の関係 (Iwano, 1995)

2.3.3 まとめ

以上より、岩盤の透水係数は、一般部や破碎帯部に拘わらず深度 100m までの地表面近傍では深度とともに顕著に減少し、深度 100m 以深の地下深部ではサイトにより応力の増加に伴う緩やかな深度依存性を示す場合がある。したがって、地下 1000m の処分場レベルの岩盤の巨視的な透水係数は、2.1 節の地下 30m~260m での測定値から推定された透水係数（一般部の透水係数 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s；断層破碎帯の透水係数 $10^{-9} \sim 10^{-3}$ m/s）と同等かもしくはそれ以下となる可能性がある。

2.4 掘削影響領域の透水性

一般に、空洞掘削に伴い空洞周辺の岩盤には緩み域（以下、「掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone: EDZ）」という）が生じ、緩んだ領域内の透水性は増加すると考えられている。以下では、既往の研究に基づいて掘削影響領域の大きさ（幅）とその透水性について述べる。

既往の研究によると、掘削影響領域の幅と透水性は、表 2.5 に示すように発破掘削の場合と機械掘削の場合で異なる。Martin et al. (1992) は、掘削影響領域の幅と透水性は、掘削方法以外にも空洞の大きさや形状、岩盤の応力状態（応力の大きさ、主応力の方向など）、亀裂特性（亀裂の方向や頻度など）、岩盤の力学特性などによっても影響を受けることを指摘している。しかし、掘削影響領域に関する実測データが十分でないために、掘削方法以外の影響に関しては未だ解明されていないのが現状である (Walker et al., 1997)。そこで、以下では、発破掘削の場合と機械掘削の場合の掘削影響領域の幅と透水性について述べる。

発破掘削の場合は、スウェーデンのハードロック研究所（以下「HRL」と略す）での測定結果によると、掘削影響領域の幅は坑道側壁で 0.3m、底盤で 0.8m、透水性は底盤から 0.5m の範囲で 2 桁増加している (Emsley et al., 1997)。カナダの地下研究施設（以下「URL」と略す）では、底盤部の掘削影響領域の幅は 0.3m 以下、透水性の増加は 1~2 桁と報告されている (Chandler et al., 1996)。釜石鉱山では、掘削影響領域の幅は 1~2m、透水性の増加は 2~3 桁に分布している (核燃料サイクル開発機構, 1999)。本島・掘 (1982) の新高瀬川地下発電所における空洞掘削前後の透水係数測定結果によると、図 2.17 に示すように大規模な空洞掘削に伴う影響領域は大きく空洞壁面から 20m の範囲にわたって岩盤の透水性が 1~2 桁増加している。アメリカ Edgar 鉱山 (Ubbes et al., 1989) や日本各地のトンネル (桜井, 1983) においては、掘削影響領域の透水性は測定されていないものの、掘削影響領域の幅は 1m 程度と報告されている。また、東濃鉱山の新第三紀堆積岩における立坑周辺岩盤での測定結果によると、掘削影響領域の幅は約 1m、透水性の増加は 2~3 桁と報告されている (松井ほか, 1992)。ただし、発破掘削の場合は、HRL や URL の底盤部に見られるように発破量の違いにより岩盤の損傷の程度が異なったり (Martin et al., 1992)、ストリパ鉱山に見られるようにスキン効果により掘削影響領域の透水性が低下する例 (Olsson, 1992) もあるため定量的な評価は難しいものの、発破掘削による掘削影響領域の幅は 1m 程度、透水性の増加は 1~2 桁程度と考えられる。

機械掘削の場合は、カナダ URL では、掘削影響領域の幅は数 cm 程度（掘削面積の約 1%）にも拘わらず、水平応力が高いために掘削に伴う応力解放により亀裂が生じ、掘削影響領域の透水性が 6~7 桁増加したと報告されている (Chandler et al., 1996)。このような現象は、サイトの岩盤特性や応力状態に大きく依存するため定量的な評価は難しい。東濃鉱山の新第三紀堆積岩においては、水平坑道壁面から 0.3m 以上離れた位置での透水性の変化は認められていない (Sato et al., 1999)。

トンネルボーリングマシン (TBM) を用いた場合には、スウェーデン HRL では、掘削影響領域の幅はわずか 0.03m で、透水性の増加は認められていない (Emsley et al., 1997)。また、スイスのグリムゼルでは、掘削影響領域の幅は 1m、透水性の増加は 1 桁と報告されている (Frieg et al., 1996)。日本各地のトンネルでは、掘削影響領域の幅は 0.5m 以下と報告されている (桜井, 1983)。カナダ URL のように透水性の増加が応力解放に伴う亀裂の発生に起因する場合は除けば、機械掘削による掘削影響領域の幅は数 cm から 0.5m 以下、透水性の増加は 1 桁程度と

考えられる。

ただし、以上に述べた掘削影響領域の透水性の増加幅は、各サイトで測定された値のうちの最大値であり、測定値の中には透水性の増加がない場合や透水性が低下している場合もあり、スウェーデン HRL でも掘削影響領域の透水性が増加するかどうか明確な答えは得られていないことが報告されている (Olsson et al., 1996)。

掘削影響領域内の透水性の異方性に関しては、図 2.18 に示すように処分坑道掘削に伴い岩盤が坑道内側へ変位することによって坑道周辺の応力が再配分されるため、坑道に直交する亀裂の透水性は変化しないものの、坑道半径方向の亀裂は閉塞して透水性が低下し、坑道円周方向の亀裂は開口して透水性が増大すると考えられる。実際、既往の性能評価研究では、坑道方向の透水性の増加のみ考慮し、坑道直交方向の透水性の増加は考慮していない例がある (例えば、SKB、1992; Nagra、1994)。

表 2.5 掘削影響領域実測データ一覧

サイト	岩種/空洞径	方法	掘削影響領域幅	透水性増加率
ハートロック研究所、スウェーデン (Emsley et al., 1997)	閃緑岩 5m	発破	側壁 0.3m、底盤 0.8m	2 桁 (底盤 0.5m 内)
		TBM	0.03m	(測定値なし)
地下研究施設、カナダ (Chandler et al, 1996)	花崗岩類 3.5m	発破	0.3m 以下	1~2 桁
		機械	0.01m 程度	6~7 桁
ストリパ鉱山、スウェーデン (Olsson, 1992)	花崗岩 5m	発破	0.8m 以下	スキン効果により 低下
グリムゼル、スイス (Frieg et al., 1996)	花崗閃緑岩 3.5m	TBM	1m	1 桁
Edgar 鉱山、アメリカ (Ubbes et al., 1989)	花崗片麻岩 5m×3m	発破	0.5~1m	(測定値なし)
釜石鉱山、日本 (核燃料サイクル開発機構、1999)	花崗閃緑岩 3×3.5m	発破	1~2m	2~3 桁
新高瀬川地下発電所、日本 (本島・堀、1982)	花崗岩類 54.5×27m	発破	20m 程度	1~2 桁
各地トンネル、日本 (桜井、1983)	硬岩 5m	発破	1.0m	(測定値なし)
		TBM	0.5m 以下	(測定値なし)
東濃鉱山*、日本 (松井ほか、1992; Sato et al, 1999)	新第三紀堆積岩 6m/3m	発破	1.0m	2~3 桁
		機械	0.3m	増加なし

* 発破掘削は立坑 (内径 6m) での測定結果 (松井ほか、1992)、機械掘削は水平坑道 (高さ 3m、幅 3m) での測定結果 (Sato et al., 1999) による。

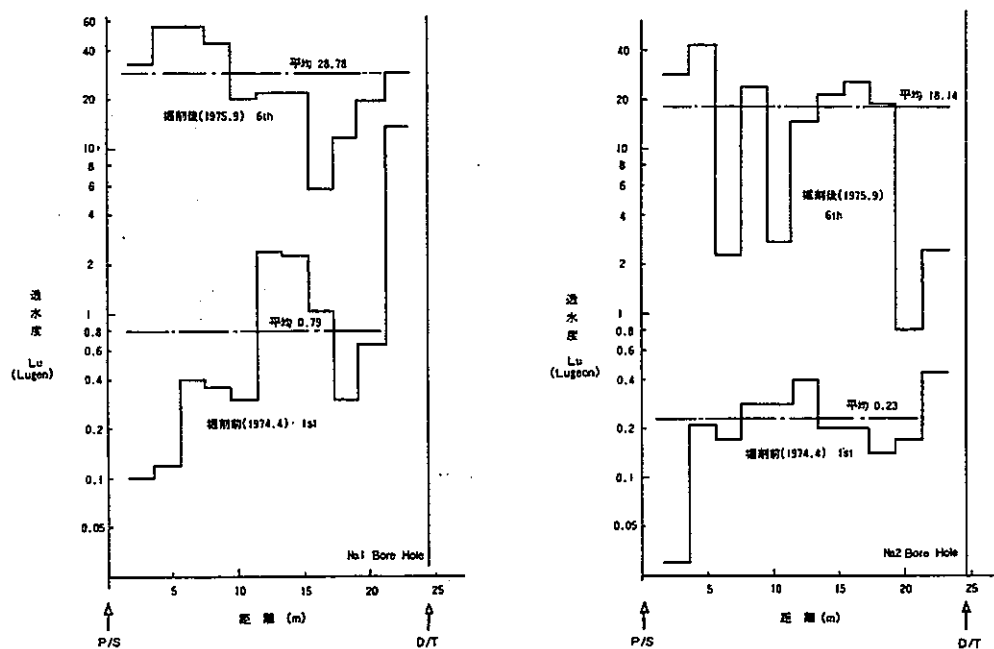


図 2.17 地下発電所空洞掘削による透水性の変化 (本島・堀、1982)

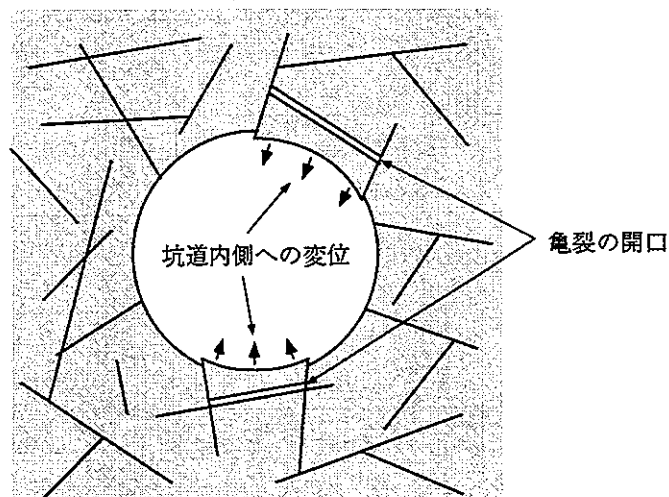


図 2.18 亀裂の開口による掘削影響領域内での透水性増加概念図

3. 我が国の岩盤の地下水浸透特性

一般に、地下水は岩盤中の透水性の高い岩石基質部や亀裂中を選択的に流れ、亀裂中の流れが支配的であるか岩石基質中の流れが支配的であるかによって、いわゆる亀裂性岩盤と多孔質岩盤に大きく分類される。ここでは、様々な岩種における岩盤の地下水浸透特性について検討を行い、亀裂性岩盤と多孔質岩盤への分類を試みた。

3.1 地下水浸透経路

様々な岩種における岩盤中の地下水浸透特性を把握するために、サイクル機構では表 3.1 に示す日本各地 21 地点の露頭および鉱山坑道の 43 箇所において地質調査を実施した（斎藤ほか、1999）。その結果、調査を実施した全ての地点で断層や亀裂が確認され、その一部において湧水や地下水が流れた痕跡が認められたことから、断層や亀裂が大なり小なり岩盤の透水性に寄与していることが確認された。また、一部の新第三紀堆積岩においては、透水性の高い砂岩や凝灰岩などの岩石基質からの湧水も認められ、亀裂とともに岩石基質中の流れも有意であることが確認された。断層や亀裂、岩石基質以外の岩盤中の支配的な地下水浸透経路となり得る地質構造としては、図 3.1 に示すように結晶質岩では脈、堆積岩では脈、層理、層理境界面、片理、壁開、不整合面などが観察された。しかし、これらの脈、層理、層理境界面、片理、壁開、不整合面は、断層や亀裂よりも存在頻度が少なく岩盤の透水性への影響も小さいと考えられることと、サイト毎にその分布特性や構造特性および水理特性も異なるため定量的な評価が難しいことから、以下では岩盤中の地下水浸透経路として岩石基質および断層・亀裂のみを取扱うこととした。

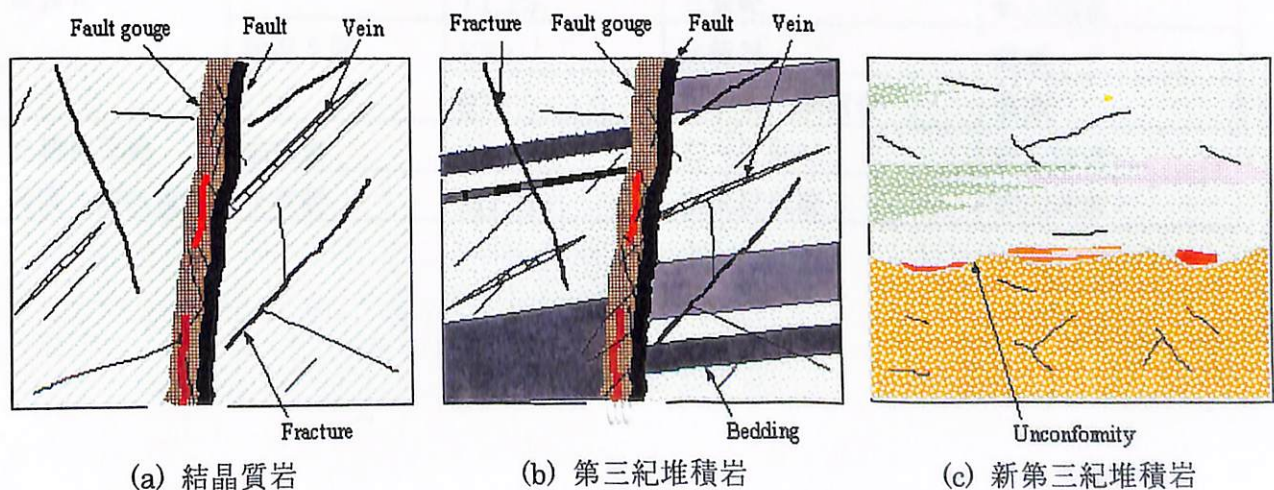


図 3.1 移行経路概念図

表 3.1 露頭・鉦山坑道調査箇所一覧 (21 地点 43 調査箇所)

区分	岩種	調査箇所略号	岩盤年代	調査箇所
結晶質岩 (酸性)	流紋岩	I1,I2	白亜紀末	鉦山坑道
	花崗閃緑岩	I3,I4	白亜紀末	露頭
	花崗閃緑岩	OS1,OS2	中新世	露頭
結晶質岩 (塩基性)	斑札岩	A3,A4	二疊紀	鉦山坑道
	玄武岩	HM1,HM2	中新世後期～鮮新世	露頭
	輝緑岩	S1,S2	白亜紀後期	鉦山坑道
	緑色片岩	SB1a,b,SB2	白亜紀	露頭
	安山岩	YN1,YN2	鮮新世	露頭
新第三紀 砂質岩	砂泥互層	BS1	中新世～鮮新世	水路トンネル壁
		NS3	鮮新世前期	露頭
	砂岩	NS4	鮮新世前期	露頭
		ST1	中新世前期～中期	露頭
	珪藻土	N1,N2	中新世中期～後期	露頭
新第三紀 泥質・凝灰質岩	泥岩	BS2	中新世～鮮新世	水路トンネル壁
		NS1,NS2	鮮新世	露頭
		O3	中新世中～後期	鉦山坑道
	頁岩	O1,O2	中新世中期	鉦山坑道
	凝灰岩	H1,H2	中新世前期～中期	鉦山坑道
		O4	中新世中期～後期	鉦山坑道
		Y1,Y2	中新世後期	露頭
先新第三紀 砂質岩	砂岩	KS1	始新世	露頭
		T1,T2	三疊紀	鉦山坑道
	砂泥互層	KS2	始新世	露頭
		ST2	始新世～漸新世	露頭
先新第三紀 泥質・凝灰質岩	粘板岩	A1,A2	二～三疊紀	鉦山坑道
	千枚岩	M1,M2	白亜紀後期	鉦山坑道

3.2 亀裂性岩盤と多孔質岩盤による分類

岩盤の地下水浸透特性は、岩石基質や亀裂の透水性および亀裂の構造に依存する。すなわち、岩盤は、図 3.2 に示すように亀裂の透水性が低く岩石基質の透水性と変わらない場合には亀裂の構造に拘わらず多孔質岩盤に分類され、亀裂の透水性が高くても亀裂の連続性が低い場合には多孔質岩盤と亀裂性岩盤の特性を併せ持つような岩盤に分類され、亀裂の透水性が岩石基質の透水性よりも高く亀裂の連続性も高い場合には亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤に分類される。

そこで、岩種毎の地下水浸透特性を評価するために、岩種毎の亀裂の透水性とその連続性について検討を行った。

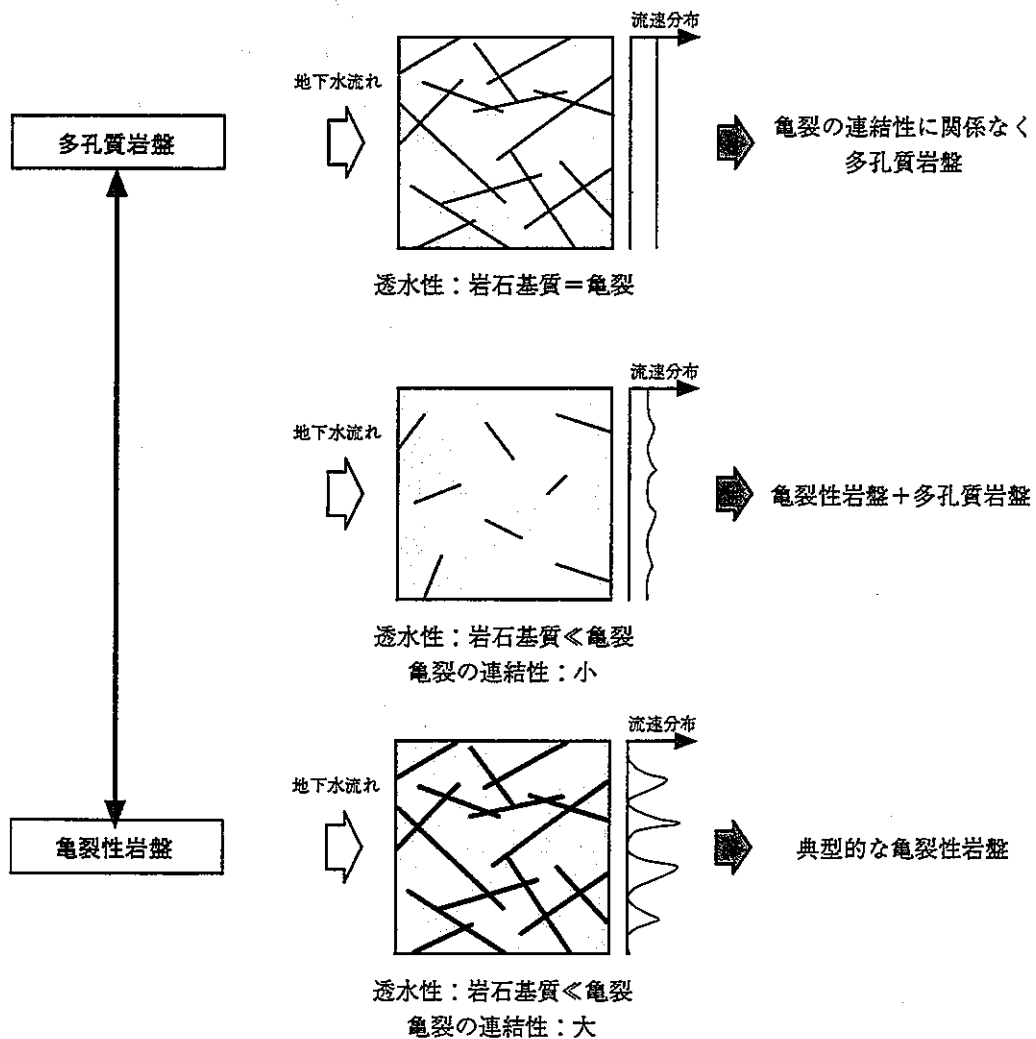


図 3.2 地下水浸透メカニズムによる岩盤の分類

3.2.1 亀裂の透水性

亀裂を含まない岩石基質部の透水係数と亀裂を含む岩盤の透水係数を比較することによって、岩盤中の亀裂内の流れが支配的であるか否かについて検討を行う。釜石鉱山、東濃鉱山および菊間地下石油備蓄基地 (Iwano, 1995; 下茂ほか, 1992) において室内透水試験および原位置透水試験により測定された岩石基質部の透水係数と亀裂を含む原位置岩盤の透水係数を図 3.3 に示す。この図より、岩種毎に以下のような知見が得られた。

なお、図 3.3 中の既往の文献調査 (Üçpirtli and Aydan, 1997; 梅田ほか, 1995) より得られた岩石基質部の透水係数と岩盤の透水係数は同じサイトで測定された値ではないため直接比較することはできないものの参考として掲載した。ここで、砂岩および泥岩の岩石基質の透水係数文献値に関しては、年代区分がなされていないものの、東濃鉱山での値とほぼ同じであることから新第三紀堆積岩の値を示すと考えられる。

(1) 花崗岩 (釜石鉱山、東濃鉱山、菊間基地)

- 釜石鉱山の花崗閃緑岩は、岩石基質の透水係数が $10^{-14} \sim 10^{-9}$ m/s に分布しているのに対し、ボーリング孔内で測定された亀裂を含む岩盤の透水係数は $10^{-11} \sim 10^{-5}$ m/s と高く、岩盤の透水性が亀裂に支配されていることがわかる。また、東濃鉱山や菊間地下石油備蓄基地および文献値に関しても同様の傾向が認められる。

(2) 安山岩 (文献)

- 安山岩は、岩石基質の透水性が $10^{-11} \sim 10^{-7}$ m/s、岩盤の透水係数が $10^{-7} \sim 10^{-5}$ m/s で、岩石基質の透水性が花崗岩よりも高いことから、花崗岩よりも岩石基質部の流れが有意な岩盤と考えられる。

(3) 新第三紀砂岩・泥岩 (東濃鉱山)

- 東濃鉱山の砂岩は、岩石基質の透水係数が $10^{-13} \sim 10^{-8}$ m/s、岩盤の透水係数が $10^{-10} \sim 10^{-4}$ m/s と花崗岩よりも岩石基質と岩盤の透水係数が重複する部分が多く、亀裂だけでなく岩石基質中の流れも有意な岩盤と考えられる。
- 東濃鉱山の泥岩は、岩石基質の透水係数が $10^{-13} \sim 10^{-11}$ m/s、岩盤の透水係数が $10^{-12} \sim 10^{-7}$ m/s と岩石基質と岩盤の透水係数が重複する部分が少ないものの、岩盤の透水係数が花崗岩よりも小さく亀裂内の流れも花崗岩ほど支配的ではないと考えられる。

(4) その他の堆積岩 (文献)

- 先新第三紀堆積岩は、新第三紀堆積岩よりも間隙率が小さく (谷口ほか, 1999) 岩石基質の透水係数も小さくなる (付録 C 参照) ため、新第三紀堆積岩よりも亀裂内の流れが支配的になると考えられる (泥岩の岩盤の透水係数文献値は $10^{-8} \sim 10^{-6}$ m/s と東濃鉱山よりも大きく、

3.2.2 亀裂の連続性

日本各地の露頭および鉱山坑道調査（表 3.1 参照）での測定結果によると、亀裂密度と亀裂の連続性には図 3.4 に示すような相関関係が認められ、亀裂密度が高いほど亀裂の連続性も高いと考えられる。そこで、岩盤が構造的に亀裂性岩盤となり得るか否かについて検討を行うために、図 3.5 に示す露頭・鉱山坑道調査で得られた 2 次元亀裂密度分布と表 3.2 に示す緒方（1984）の亀裂断続率測定結果に基づいて岩種毎の亀裂の連続性を検討した結果、以下のような知見が得られた。

(1) 花崗岩（酸性結晶質岩）

- 花崗岩は、他の岩種と比べて亀裂密度が比較的高く、堆積岩よりも亀裂の断続率が小さいことから、亀裂の連続性が高い岩盤と考えられる。

(2) 塩基性結晶質岩

- 塩基性結晶質岩は、亀裂密度が花崗岩や先新第三紀堆積岩とあまり変わらないことから、亀裂の連続性が比較的高い岩盤と考えられる。

(3) 新第三紀堆積岩

- 新第三紀堆積岩は、他の岩種と比較して亀裂密度の小さいものが多く、堆積岩（第三紀の砂岩、頁岩、凝灰角礫岩）の亀裂断続率は結晶質岩（花崗岩や閃緑岩）よりも大きいことから、亀裂の連続性はあまり高くない岩盤と考えられる。

(4) 先新第三紀堆積岩

- 先新第三紀堆積岩は、亀裂密度が結晶質岩とほぼ同じ程度で新第三紀堆積岩よりも大きく、堆積岩（第三紀の砂岩、頁岩、凝灰角礫岩）の亀裂断続率は結晶質岩（花崗岩や閃緑岩）よりも大きいことから、亀裂の連続性は比較的高く結晶質岩と新第三紀堆積岩の中間程度の岩盤と考えられる。

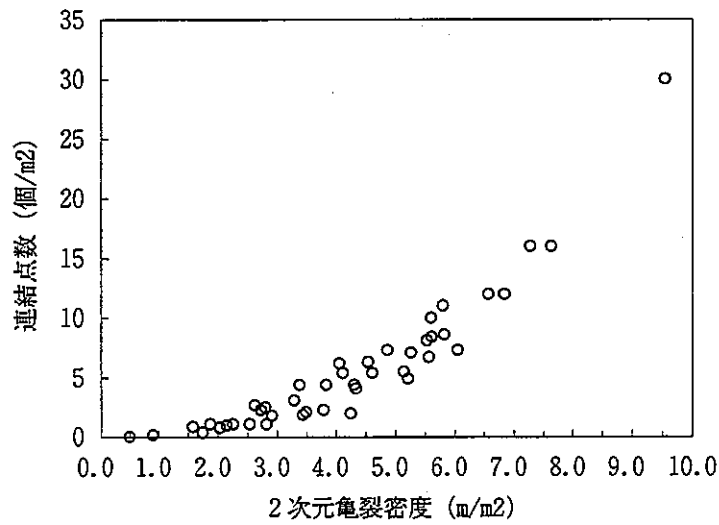


図 3.4 亀裂密度と連結点数の関係 (斎藤ほか、1999)

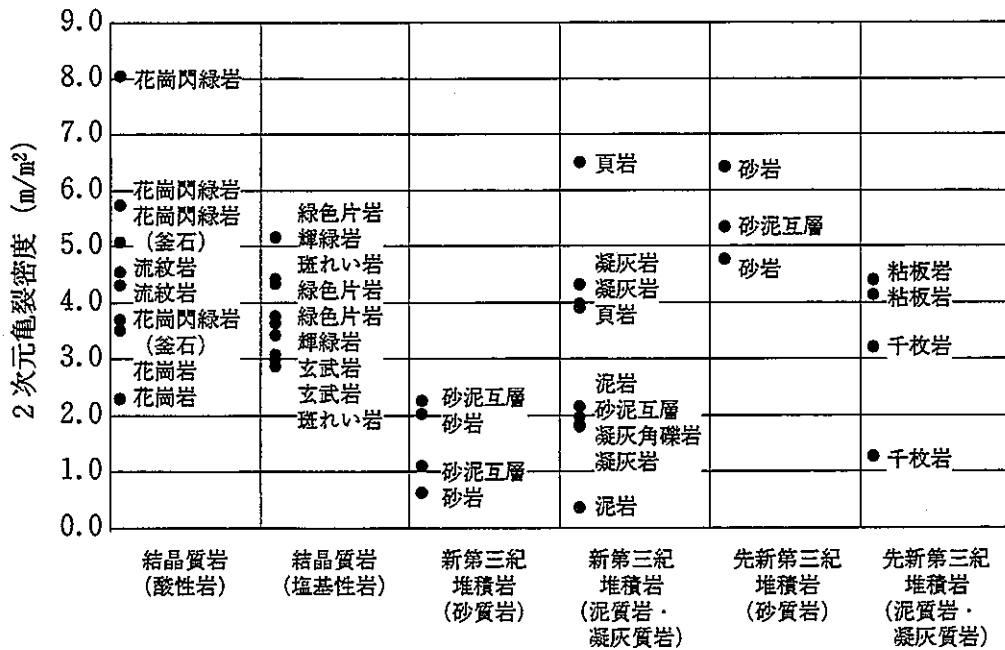


図 3.5 露頭および鉱山坑道で測定した2次元亀裂密度分布 (斎藤ほか、1999)

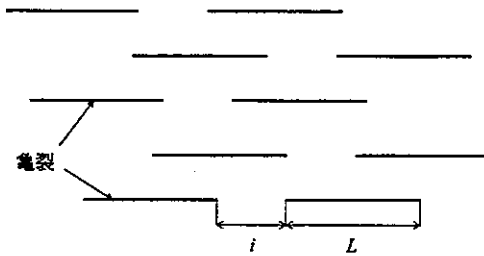
表 3.2 亀裂断続率による岩盤の分類 (緒方、1984)

岩盤区分	亀裂断続率 ¹⁾	岩種
塊状節理岩盤	0.6~1.0	第三紀の砂岩、頁岩、凝灰角礫岩
断続節理岩盤	0.4~0.6	花崗岩、閃緑岩
連続節理岩盤	0.0~0.4	流紋岩、安山岩、玄武岩 ²⁾

1) 亀裂の断続率 a は、以下のように表される (緒方、1978)。

$$a = \frac{i}{L+i} \quad (0 \leq a \leq 1) \quad (3.1)$$

ここに、 i と L はそれぞれ延長線上の亀裂不連続部と亀裂部の長さを表す (下図参照)。



2) 板状、柱状節理を有する特殊な場合を対象としているため亀裂の連続性が高くなっており、流紋岩、安山岩、玄武岩の一般的な特徴として評価しないこととする。

3.2.3 地下水浸透特性による岩盤の分類

岩種毎に亀裂の透水性と連続性に関して得られた知見を表 3.3 にまとめるとともに、地下水浸透特性による亀裂性岩盤と多孔質岩盤への分類を試みる。

(1) 花崗岩（酸性結晶質岩）

- 花崗岩は、岩石基質と岩盤の透水性の差が大きく、他の岩種と比べて亀裂の密度も連続性も高いことから、亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤と考えられる。

(2) 塩基性結晶質岩

- 塩基性結晶質岩は、亀裂密度が花崗岩とあまり変わらないことから、亀裂性岩盤に近い傾向を有すると考えられる。ただし、安山岩は、岩石基質の透水性が大きいことから、亀裂だけでなく岩石基質中の流れも有意な亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。

(3) 新第三紀堆積岩

- 新第三紀堆積岩は、花崗岩と比較して岩石基質と岩盤の透水性の差が小さく亀裂の連続性も低いことから、亀裂だけでなく岩石基質中の流れも有意な亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。

(4) 先新第三紀堆積岩

- 先新第三紀堆積岩は、新第三紀堆積岩よりも岩石基質の間隙率が小さく岩石基質の透水係数も小さくなり（付録 C 参照）、新第三紀堆積岩よりも亀裂が発達して亀裂の連続性が高くなるため、新第三紀堆積岩よりも相対的に亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤に近くなると考えられる。
- 砂岩および泥岩は、岩石基質と岩盤の透水性の差が大きく花崗岩と同じような傾向を示すことから亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤と考えられるものの、亀裂の連続性は花崗岩ほど高くはない。
- 凝灰岩は、岩石基質の透水性が大きいことから、亀裂だけでなく岩石基質中の流れも有意な亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。

以上より、我が国における岩盤は、図 3.6 に示すように亀裂性岩盤から多孔質岩盤へと広く分布し、その中でも特に花崗岩は亀裂内の流れが支配的な典型的な亀裂性岩盤と考えられる。その他の結晶質岩や先新第三紀堆積岩の多くも亀裂性岩盤に分類されると考えられるものの、安山岩や凝灰岩は比較的岩石基質の透水性が高いことから亀裂だけでなく岩石基質中の流れも有意な亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。新第三紀堆積岩は、岩石基質中の流

れも有意で、亀裂の密度や連続性も小さいことから、安山岩や凝灰岩と同様、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。

表 3.3 地下水浸透特性と岩盤の分類

岩種	亀裂の透水性	亀裂の構造	特徴
酸性結晶質岩 (花崗岩)	岩石基質と岩盤の透水性の差が大きく亀裂の流れが支配的 (花崗岩)	特に花崗岩類の亀裂の連続性は大きい	花崗岩は典型的な亀裂性岩盤
塩基性結晶質岩	安山岩は岩石基質の透水性が大きく岩石基質中の流れも有意	亀裂の連続性は比較的大きい (花崗岩よりは小さい)	安山岩は亀裂性+多孔質性、その他は亀裂性
新第三紀砂岩	岩石基質と岩盤の透水性の差が小さく、岩石基質中の流れも有意	堆積岩の亀裂の連続性は結晶質岩よりも小さい	亀裂性と多孔質性を併せ持つ岩盤
新第三紀泥岩			
新第三紀凝灰岩			
先新第三紀砂岩	新第三紀堆積岩よりも亀裂の流れが支配的	堆積岩の亀裂の連続性は結晶質岩よりも小さい	亀裂性岩盤
先新第三紀泥岩			
先新第三紀凝灰岩	岩石基質と岩盤の透水性の差が小さく岩石基質中の流れも有意		亀裂性と多孔質性を併せ持つ岩盤

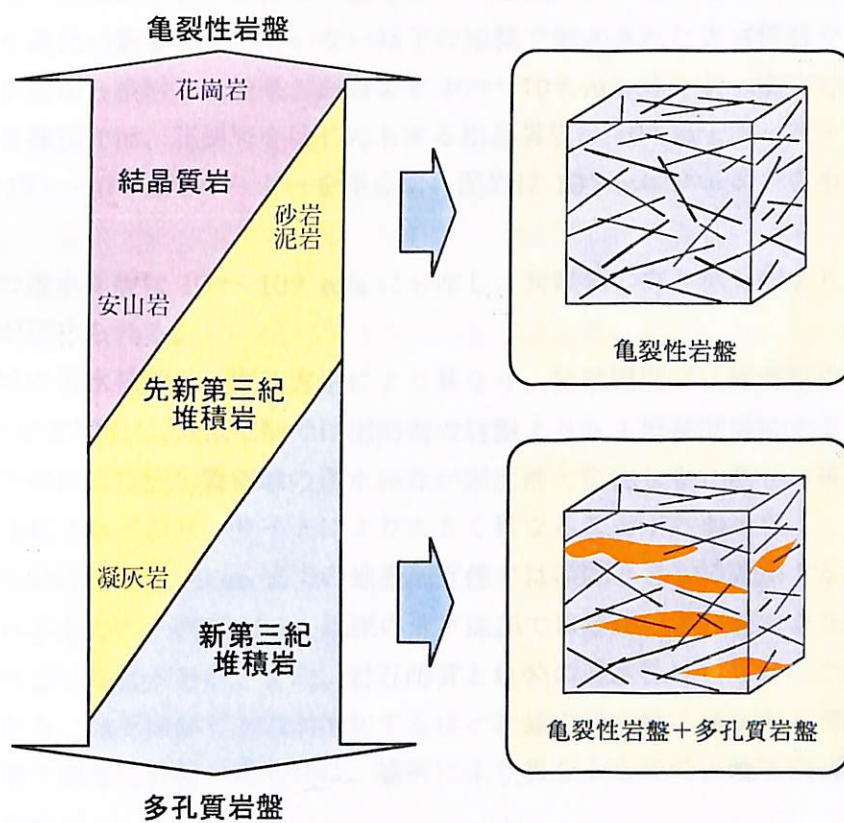


図 3.6 亀裂性岩盤と多孔質岩盤による分類

4. まとめ

我が国の岩盤の水理特性について検討した結果、岩盤の透水性に関して以下のような知見が得られた。

- 我が国の岩盤の巨視的な透水係数は、釜石鉱山、東濃鉱山、菊間地下石油備蓄基地の地表面近傍の擾乱や風化の影響を受けていない地下の岩盤で測定された透水係数や日本全国のトンネルへの湧水量から検討した結果、おおよそ 10^{-9} ~ 10^{-8} m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。岩種別では、花崗岩をはじめとする結晶質岩は 10^{-8} m/s オーダーを中心に、砂岩や凝灰岩は 10^{-9} ~ 10^{-8} m/s オーダーを中心に、泥岩は 10^{-9} m/s オーダーを中心に分布すると考えられる。
- 断層破碎帯の透水係数は 10^{-9} ~ 10^{-3} m/s に分布し、角礫部の方が粘土部よりも透水性が大きくなる傾向が認められる。
- 掘削影響領域の透水係数は、掘削方法により異なり、発破掘削では掘削前の岩盤よりも平均して1~2桁程度増加し、機械掘削では掘削前の岩盤よりも1桁程度増加すると考えられる。ただし、局所的には掘削影響領域の透水係数が掘削前と変化しない場合や掘削前よりも低下する場合も確認されており、サイトにより大きく異なることがわかった。
- 岩盤の透水係数は、深度100mまでの地表面近傍では深度とともに減少する顕著な深度依存性が認められるものの、深度100m以深の地下深部では場所により緩やかな深度依存性を示す場合と示さない場合がある。また、岩石基質と亀裂の透水性はともに応力の増加に伴い減少することから、地下深部で応力が増加するほど岩盤の透水性は低下する可能性がある。したがって、地下深部の岩盤の透水性は、場所により異なるものの、地下浅部の透水性よりも低い可能性がある。
- 岩石基質の透水係数は、同じ岩種どうしでは間隙率が小さいほど透水性は低くなり、間隙率の等しい岩種間では花崗岩（結晶質岩）よりも堆積岩の方が、砂岩よりも粘土分の多い泥岩の方が透水性が低くなる傾向がある。

また、岩盤の地下水浸透特性に関して以下のような知見が得られた。

- 調査した全ての岩盤で亀裂が観察され、その一部で湧水や地下水の流れた痕跡が認められたことから、亀裂が岩盤の透水性に大なり小なり寄与していることが確認された。
- 岩盤の中でも特に花崗岩は、亀裂の透水性や連続性が高く、亀裂内の流れが支配的な典型的な亀裂性岩盤に分類される。
- 花崗岩以外の結晶質岩も、亀裂性岩盤に分類される。ただし、安山岩は、岩石基質の透水性が大きく、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。
- 先新第三紀の砂岩および泥岩は、亀裂の連続性は花崗岩ほど高くないものの、新第三紀堆積岩よりも亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤に分類される。
- 凝灰岩は、岩石基質の透水性が大きく、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。
- 一部の新第三紀堆積岩においては、透水性の高い砂岩や凝灰岩などの岩石基質からの湧水も

認められ、亀裂とともに岩石基質中の流れも有意であることが確認された。また、新第三紀堆積岩は、花崗岩よりも岩石基質と岩盤の透水性の差が小さく亀裂の連続性も低いことから、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤と考えられる。

5. 参考文献

- 石井政次、佐久間文彦 (1977) : トンネル湧水の地形・地質的分類、鉄道技術研究報告、No.1041
- 梅田浩司、柳澤孝一、米田茂夫 (1995) : 日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成、地下水学会誌、第 37 巻第 1 号、pp.69-77.
- 緒方正虔 (1978) : 硬質岩盤における節理分布の数量モデル化およびその適用に関する考察、応用地質、19 巻 1 号、pp.12-20
- 緒方正虔 (1984) : 岩盤分類の要因としての岩盤の不連続面、応用地質、特別号、pp.17-24
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) : 釜石原位置試験総括報告書、JNC TN7410 99-001.
- 木下直人、安部透、竹村友之、横本誠一 (1993) : 原位置透水試験によるトンネル周辺岩盤の水理特性の調査、第 25 回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.481-485.
- 越谷信、長江亮二、大上和良、森田安彦 (1991) : 南部阿武隈山地花崗岩中の断裂系と地下水、応用地質、第 32 巻第 4 号、pp.23-39.
- 斎藤茂幸、杉山和稔、諸岡幸一、池田則生 (1999) : ニアフィールド岩盤中の物質移行経路のモデリングに関する基礎研究 (VI)、三菱マテリアル株式会社、核燃料サイクル開発機構委託研究資料、JNC TJ1400 99-014.
- 桜井春輔 (1983) : トンネル掘削に伴うゆるみ領域の研究、トンネルと地下、14 巻 1 号、pp.35-41
- 佐藤邦明、渡辺邦夫、小田部淳 (1978) : 断層のトンネル湧水に与える影響、埼玉大学工学部地盤水理実験施設年報、Vol.4、pp.60-80
- 下茂道人、竹田直樹、宮下国一郎、青木謙治 (1986) : 岩盤内空洞掘削と地下水環境—菊間実証プラント—、土と基礎、34-11、pp.57-63.
- 下茂道人、井尻裕二、飯星茂、橋本憲和、長田和洋 (1992) : トモグラフィーとクロスホール透水試験による岩盤内地下水浸透経路の調査、第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.31-35.
- 田中和広、井上大栄 (1995) : 断層の定義、考え方、土と基礎、第 43 巻第 3 号、pp.11-14.
- 谷口航、長谷川宏、岩佐健吾、佐藤稔紀 (1999) : 地層処分場設計のための地質環境基本特性、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TN8400 99-053.

- 長久、野口義文、森田誠也、中村直昭、岩崎浩、堀田政國、穂刈利之 (1991) : 花崗岩における原位置試験 (平成 2 年度)、動力炉・核燃料開発事業团委託研究成果報告書、日鉄鉱業株式会社、PNC ZJ1380 91-001.
- 長久、横井浩一、野口義文、森田誠也、中村直昭、岩崎浩、守屋俊文、堀田政國、穂刈利之 (1992) : 花崗岩における原位置試験 (平成 3 年度)、動力炉・核燃料開発事業团委託研究成果報告書、日鉄鉱業株式会社、PNC ZJ1380 92-001.
- 福田和寛、野口義文、堀田政國 (1992) : 花崗岩盤における巨視的透水係数の評価、第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.26-30.
- 松井裕哉、杉原弘造、佐藤稔紀、吉岡尚也 (1992) : 堆積岩地山における坑道周りの力学的・水理学的な特性変化、動力炉・核燃料開発事業団技術報告書、PNC TN7410 92-046.
- 本島勲、堀義直 (1982) : 地下発電所周辺における地質と地下水問題、日本応用地質学会、昭和 57 年度シンポジウム及び研究発表会予稿集、pp.19-24.
- 米田茂夫、小屋開地稔 (1993) : 地盤の透水性に関する文献調査 (その 2)、PNC ZJ7308 93-005、Vol.1.
- 渡辺邦夫、小島圭二 (1980) : 断層・割れ目系岩盤中の地下水流れと関与する地質量の計測と評価、日本応用地質シンポジウム、pp.2-16.
- Bernabe, Y. (1986) : The effective pressure law for permeability in Chelmsford granite and Barre granite, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol.23, pp.267-275.
- Brace, W.F. (1980) : Permeability of crystalline and argillaceous rocks, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol.17, pp.241-251.
- Brace, W.F., Walsh, J.B. and Frangos, W.T. (1968) : Permeability of granite under high pressure, *J. of Geophysical Research*, vol.73, pp.2225-2236.
- Chandler, N.A., Kozak, E.T. and Martin, C.D. (1996) : Connected pathways in the EDZ and the potential for flow along tunnels, *EDZ Workshop*, pp.25-34.
- Davison, C.C., Brown, R.A., Everitt, R.A., Gascoyne, M., Lodha, G.S., Martin, C.D., Soonawala, N.M., Stevenson, D.R., Thorne, G.A. and Whitaker, S.H. (1994) : The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste : Site Screening and Site Evaluation Technology, *AECL-10713, COG-93-3*, p.154.

- Emsley, S., Olsson, O., Stenberg, L., Alheid, H.J. and Falls, S. (1997) : ZEDEX – A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring, SKB Technical Report 97-30.
- Frieg, B., Marschall, P., Blümling, P., Albert, W., Kull, H. and Liedtke, L. (1996) : The near-field programme and the tomography and borehole sealing projects, Nagra Bulletin, No.27, pp.18-42.
- Iwano, M. (1995) : Hydromechanical characteristics of a single rock joint, Massachusetts Institute of Technology, Doctoral dissertation.
- Kranz, R.L., Frankel, A.D. Engelder, T. and Scholz, C.H. (1979) : The permeability of whole and jointed Barre granite, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol.16, pp.225-234.
- Löfman, J. (1999) : Site scale groundwater flow in Hästholmen, POSIVA 99-12.
- Martin, C.D., Kozak, E.T. and Chandler, N.A. (1992) : Hydraulic properties of the excavation-disturbed zone around underground openings, Proc. of 45th Canadian Geotechnical Conference, pp.89:1-10.
- Mazurek, M., Lanyon, G.W., Vomvoris, S. and Gautschi, A. (1998) : Derivation and application of a geologic dataset for flow modeling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, J. of Contaminant Hydrology, Vol.35, pp.1-17.
- Nagra (1994) : Kristallin-I, Safety Assessment Report, Technical Report 93-22.
- Neretnieks, I. (1993) : Solute transport in fractured rock - Applications to radionuclide waste repositories, Academic Press Inc., Flow and contaminant transport in fractured rock chapter 2, pp.39-128.
- Olsson, O. (ed) (1992) : Site characterization and validation – Final report, Stripa Project Report 92-22.
- Olsson, O., Emsley, S., Bauer, C., Falls, S. and Stenberg, L. (1996) : ZEDEX – A study of the zone of excavation disturbance for blasted bored tunnels, Vol.1-3, SKB International Cooperation Report 96-03.
- Poteri, A. and Laitinen, M. (1999) : Site-to-canister scale flow and transport in Hästholmen,

Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara sites, Helsinki, POSIVA 99-15.

Sato, T., Kikuchi, T. and Sugihara, K. (1999) : In-situ experiment on excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rocks at Tono mine, central Japan, Engineering Geology, Kanaori, Y. (ed.), (in printing).

SKB (1992) : SKB 91, Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety, SKB Technical Report 92-20.

Snow, D.T. (1968) : Rock fracture spacings, openings and porosities, Proceedings of ASCE 96, pp.73-91.

Ubbes, W.F., Yow, J.L. and Hustrulid, W.A. (1989) : Application of the results of excavation response experiments at Climax and the Colorado School of Mine to the development of an experiment for the Underground research laboratory, Proc. of OECD/NEA Workshop on Excavation Response in Geological Repositories for Radionuclide Waste, Winnipeg, Canada 1988. OECD/NEA 1989.

Üçpirtli, H. and Aydan, Ö. (1997) : A data-base system for seepage characteristics of intact rocks discontinuities and rock masses, The International Symposium on Rock Mechanics and Environmental Geotechnology, Chongqing, China.

Walker, D., Rhün, I. and Gurban, I. (1997) : Summary of hydrogeological conditions at Aberg, Beberg, Ceberg, SKB TR97-23, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden.

Walsh, J.B. (1981) : Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol.18, pp.429-435.

Zoback, M.D. and Byerlee, J.D. (1975) : Permeability and effective stress, Am. Ass. Petrol. Gela. Bull., vol.59, pp.154-158.

6. 謝辞

本書の作成にあたっては、核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター 佐藤稔紀氏、Golder Associates Inc.の Dr. Simon Emsley の御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

付録 A 釜石鉱山および東濃鉱山におけるボーリング孔毎の透水係数一覧

表 A.1 釜石鉱山および東濃鉱山におけるボーリング孔毎の透水係数一覧

岩種	ボーリング孔名	試験区間×区間数	総区間数	総試験区間長(m)	透水係数(m/s)	
花崗岩 菊間基地 (計 38)	No.1	2.5m×19	19	47.5	1.39×10 ⁻⁸	
	No.3	2.5m×19	19	47.5	4.85×10 ⁻⁸	
釜石鉱山 (計 45)	KE-3	0.8m×5, 2m×1	6	6.0	7.51×10 ⁻⁹	
	KE-6	0.6m×5	5	3.0	1.17×10 ⁻⁸	
	KE-7	0.6m×5	5	3.0	4.85×10 ⁻⁸	
	KH-2	5m×6	6	30.0	4.86×10 ⁻⁷	
	KH-3	5m×7, 3m×1	8	38.0	4.74×10 ⁻⁸	
	KH-5	2.5m×15	15	37.5	2.63×10 ⁻⁸	
	東濃鉱山 (計 131)	AN-1	2.3m×13, 2.6m×20	33	81.9	7.61×10 ⁻⁷
		AN-3	2.6m×24	24	62.4	7.75×10 ⁻⁷
AN-6		5.1m×2, 3m×1	3	13.2	2.18×10 ⁻⁹	
AN-8		2.5m×5	5	12.5	1.05×10 ⁻⁷	
SN-4		5.0m×6, 5.1m×3	9	45.3	1.22×10 ⁻⁸	
SN-6		2.5m×5	5	12.5	8.45×10 ⁻⁷	
HN-1		5.1m×2	2	10.2	1.38×10 ⁻⁸	
DH-1		2.5m×13	13	57.5	7.14×10 ⁻⁸	
DH-2		2.5m×5	5	12.5	4.24×10 ⁻⁶	
DH-3		2.5m×6	6	15.0	1.40×10 ⁻⁸	
DH-4		3m×7, 8m×3	10	45.0	3.08×10 ⁻⁶	
TH-1		19m×1	1	19.0	1.20×10 ⁻⁹	
TH-2		10.8m×1	1	10.8	4.76×10 ⁻⁸	
TH-3		5.1m×1	1	5.1	2.73×10 ⁻⁹	
TH-4		5.1m×2, 4.1m×1	3	14.3	1.87×10 ⁻⁷	
TH-5		5.1m×2	2	10.2	3.98×10 ⁻⁹	
TH-6		5.1m×2	2	10.2	1.93×10 ⁻⁸	
TH-7		5.1m×3, 12m×1	4	27.3	7.87×10 ⁻⁹	
TH-8	5.1m×2	2	10.2	3.32×10 ⁻⁷		
砂岩 東濃鉱山 (計 37)	AN-6	5.1m×1	1	5.1	1.94×10 ⁻⁷	
	SN-3	5.0m×4, 2.3m×1	5	22.3	3.10×10 ⁻⁸	
	SN-4	5.0m×4	4	20.0	7.98×10 ⁻¹⁰	
	SN-6	2.5m×3	3	7.5	4.22×10 ⁻⁸	
	DH-2	2.5m×3	3	7.5	4.89×10 ⁻⁶	
	TH-1	5.0m×4	4	20.0	1.50×10 ⁻⁸	
	TH-3	5.1m×7	7	35.7	1.81×10 ⁻⁸	
	TH-4	5.1m×1	1	5.1	3.24×10 ⁻¹⁰	
	TH-5	5.1m×2	2	10.2	3.35×10 ⁻⁹	
	TH-6	5.1m×2	2	10.2	1.60×10 ⁻⁸	
TH-7	5.1m×2	2	10.2	2.11×10 ⁻⁸		
TH-8	5.1m×3	3	15.3	8.37×10 ⁻¹⁰		
泥岩 東濃鉱山 (計 11)	AN-6	5.1m×4	4	20.4	3.67×10 ⁻⁹	
	SN-3	1.0m×1	1	1.0	4.40×10 ⁻¹²	
	HN-1	2.7m, 5.0m, 5.1m	3	12.8	3.20×10 ⁻¹⁰	
	TH-2	5.1m	1	5.1	1.84×10 ⁻¹⁰	
	TH-5	5.1m	1	5.1	3.44×10 ⁻¹⁰	
	TH-6	5.1m	1	5.1	3.20×10 ⁻¹⁰	
凝灰岩 東濃鉱山 (計 8)	TH-4	5.1m×3	3	15.3	4.17×10 ⁻¹⁰	
	TH-5	6.6m	1	6.6	1.39×10 ⁻⁹	
	TH-6	5.1m×3	3	15.3	1.41×10 ⁻⁹	
	TH-7	5.1m	1	5.1	4.78×10 ⁻⁹	

付録 B 断層破碎帯を含む岩盤の透水性

2 章では、断層破碎帯を含まない一般部と断層破碎帯の透水係数を別々に評価し、断層破碎帯の角礫部の透水係数は、一般部の透水係数よりも大きいことがわかっている。ここでは、断層破碎帯を含む岩盤の透水係数を試算する。ただし、一般部の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s (2.1.3 参照) のうち 10^{-9} m/s を、断層破碎帯の透水係数は表 2.4 のうち縞状チャートを除いた角礫部の透水係数 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ m/s (2.2 参照) を用いることとする。

まず、大野・小島 (1993) の断層の長さと同度の関係式より処分場領域内に含まれる長さ 500m 以上の断層の長さと同数を求める。

$$\begin{aligned} \log N_1 &= C - D_L \cdot \log L \\ N_\alpha &= N_1 \cdot \alpha^{D_g} \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

ここに、 L : 断層の長さ [m]

N_1 : 1m^2 あたりの長さ L 以上の断層の本数 [本]

C : 定数

D_L : 長さのフラクタル次元

N_α : 処分場領域 ($\alpha\text{m} \times \alpha\text{m}$) 内の長さ L 以上の断層の本数 [本]

D_g : パターンのフラクタル次元

ただし、 C 、 D_L 、 D_g はそれぞれ火成岩地域の平均値 0.6、1.6、1.5、各処分場領域の 1 辺の長さ α は表 B.1 中の値を用いて算定した。次に、大野・小島 (1989) の断層の長さと同幅の関係式より処分場領域内に含まれる断層の幅を求め、断層の長さと同数から処分場領域内の断層が占める総面積を求める。

$$\log L = 2.7 + 0.7 \log W \quad (\text{B.2})$$

ここに、 W は断層の幅 [m] を表す。

次に、図 B.1 に示すように断層が地下水流れの方に連続して分布すると仮定した場合の断層を含む処分場領域の岩盤の透水係数を次式より算定し、断層破碎帯を含まない岩盤の透水係数に対する透水係数の増加率を求めた。

$$K = \frac{K_h d_h + K_f d_f}{D}$$

表 B1 に求めた。この結果によると、処分場領域の大きさにより断層が透水性に及ぼす影響は異なるものの、最大でも 10% 以下の透水性の上昇しか見られず、断層を含む岩盤の透水性は断層を含まない一般部の透水係数 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s とあまり変わらないことがわかる。

表 B.1 処分場領域内の断層の諸元と透水係数上昇率

処分場	パネル数	1	2	4	4
	一辺の長さ	2600m	2100m	1600m	1200m
処分場領域 内の断層の 諸元	最大長さ	3700m	2600m	1600m	1000m
	総本数	24本	17本	10本	5本
	総延長	約24km	約15km	約8km	約4km
	総面積	104,006m ²	51,911 m ²	19,214 m ²	5,992 m ²
	Ddf	40.0 m			
透水係数 増加率 ¹⁾	解析ケース① ²⁾	0.2%	0.3%	0.6%	0.8%
	解析ケース② ²⁾	2.2%	3.3%	5.7%	8.2%

1) 透水係数上昇率 = (断層を含む岩盤の透水係数 - 一般部の透水係数) / (一般部の透水係数)

2) 解析ケース①：一般部の透水係数 10^{-9} m/s、断層破碎帯の透水係数 10^{-6} m/s

解析ケース②：一般部の透水係数 10^{-9} m/s、断層破碎帯の透水係数 10^{-5} m/s

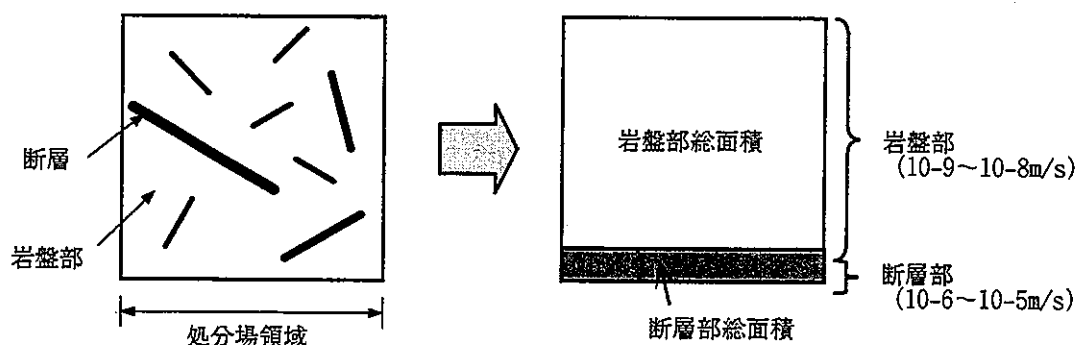


図 B.1 処分場領域の断層を含む岩盤の透水性評価方法概念図

参考文献

大野博之、小島圭二 (1989)：フラクタル性を考慮した岩盤割れ目の寸法評価と透水性、第7回 岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.157-162

大野博之、小島圭二 (1993)：岩盤割れ目のフラクタル (その2) - フラクタル特性と分布のばらつき -、応用地質、34巻2号、pp.12-26

付録 C 岩石基質の透水性

既往の研究によると、堆積岩においては岩石基質の透水係数と間隙率に相関関係が認められ、間隙率が同じ堆積岩では粘土分が多いほど透水係数が小さくなることが知られている（渡辺、1984）。渡辺（1984）は、微小亀裂の発達した花崗岩試料を用いて透水試験を実施し、図 C.1 中に示すような透水係数と間隙率の相関性を求め、以下のような関係式を導いている。

$$k = 8.45 \times 10^{-10} \times \lambda_p^6 \quad (\text{間隙率} < 5\%) \quad (C.1)$$

$$k = 1.10 \times 10^{-7} \times \lambda_p^3 \quad (\text{間隙率} > 5\%) \quad (C.2)$$

ここに、 k は透水係数 [cm/s]、 λ_p は間隙率 [%] を表す。さらに渡辺（1984）は、既往の文献により得られた値との比較から、図 C.1 に示すように微小亀裂の発達した花崗岩は間隙率が同じ堆積岩に比べて透水係数が大きくなることを示している。

以上より、岩石基質の透水性は、同じ岩種でも間隙率により透水係数が桁で変化し、間隙率が小さいほど透水性は低くなる。したがって、同じ堆積岩では、一般に新第三紀堆積岩の方が先第三紀堆積岩よりも間隙率が大きいことから、透水性も高くなると考えられる。また、間隙率の等しい岩種間では、花崗岩（結晶質岩）よりも堆積岩の方が、砂岩よりも粘土分の多い泥岩の方が透水性が低くなる傾向がある。

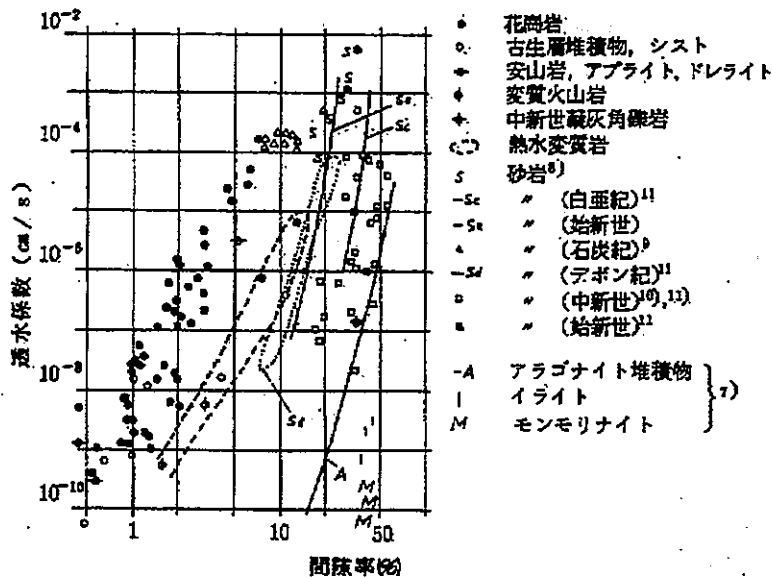


図 C.1 花崗岩における間隙率と透水係数の関係（渡辺、1984）

- 7) Levorson, A.I. (1958) : Geology of petroleum, San Francisco, W.H. Freeman & Co., p.133.
- 8) Fatt, I., and Davis, D.H. (1952) : Reduction in permeability with overburden pressure, Trans. A.I.M.E., vol.195, p.329.
- 9) Bell, F.G. (1978) : Petrographical factors relating to porosity and permeability in the Fell sandstone, Q. J. Eng. Geol., vol.11, pp.113-126.
- 10) 石油技術協会 (1973) : 日本の石油鉱業と技術, pp.1-430.
- 11) 新潟県 (1977) : 新潟県地質図説明書, pp.208-209.

参考文献

渡辺邦夫 (1984) : 山地地下水解析上の諸問題 (その3)、地下水と井戸とポンプ、第 26 巻、第 11 号、pp.2-8.

付録 D 第 2 次取りまとめにおける岩種とモデル

第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）の天然バリアの安全評価における岩盤のモデル化について述べる。

本書に記したように、我が国の岩盤は亀裂性岩盤と亀裂性岩盤と多孔質岩盤の性質を併せ持つ岩盤の大きく 2 種類に分類される。そこで、亀裂性岩盤に対しては亀裂ネットワークモデルを用いた安全評価を、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の性質を併せ持つ岩盤に対しては亀裂ネットワークモデルと連続体モデルの重ね合せを用いた安全評価を実施することとした。

亀裂性岩盤に関しては、データ量の豊富な花崗岩を対象として亀裂ネットワークモデルを構築した（澤田ほか、1999）。ただし、構築した亀裂ネットワークモデルの透水性は、釜石鉱山の 550m レベル（深度約 260m）での実測データに基づいているため、処分場深度 1000m での安全評価には、透水性を 1 桁低減したモデルを採用した（図 D.1 参照）。花崗岩以外の亀裂性岩盤であるその他の結晶質岩や先新第三紀堆積岩に対しては、実測データが少ないことから花崗岩と同じモデルを適用している。

亀裂性岩盤と多孔質岩盤の性質を併せ持つ岩盤に関しては、新第三紀堆積岩を対象として亀裂ネットワークモデルと連続体モデルの重ね合せより評価を実施している（井尻ほか、1999）。ここで、亀裂ネットワークモデルの透水性は釜石鉱山の花崗岩をベースに、連続体モデルは東濃鉱山の先新第三紀堆積岩（深度 20～200m）での実測データに基づいて設定している。地表面近傍における透水性の深度依存性は顕著であることから、軟岩地域での処分場深度 500m における安全評価には、透水性を 1 桁低減したモデルを採用した（図 D.1 参照）。ただし、亀裂ネットワークモデルと連続体モデルの重ね合せよりも亀裂ネットワークモデル単体での評価の方が保守的な評価となることから、結果的には亀裂性岩盤と同じ亀裂ネットワークモデルを用いて安全評価を実施した。

以上より、第 2 次取りまとめにおいては、岩種に関わらず硬岩地域（結晶質岩、先新第三紀堆積岩；処分場深度 1000m）においても軟岩地域（新第三紀堆積岩；処分場深度 500m）においても、釜石鉱山の透水性を 1 桁低減した亀裂ネットワークモデルを用いて安全評価を実施することとした。

参考文献

井尻裕二、澤田淳、坂本和彦、亘真吾、Erik K. Webb、中島研吾、長坂和佳、野邊潤（1999）：
多孔質岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TN8400 99-092.

核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—、分冊 3 地層処分システムの安全評価、JNC TN1400 99-023.

澤田淳、井尻裕二、坂本和彦、亘真吾（1999）：亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TN8400 99-093.

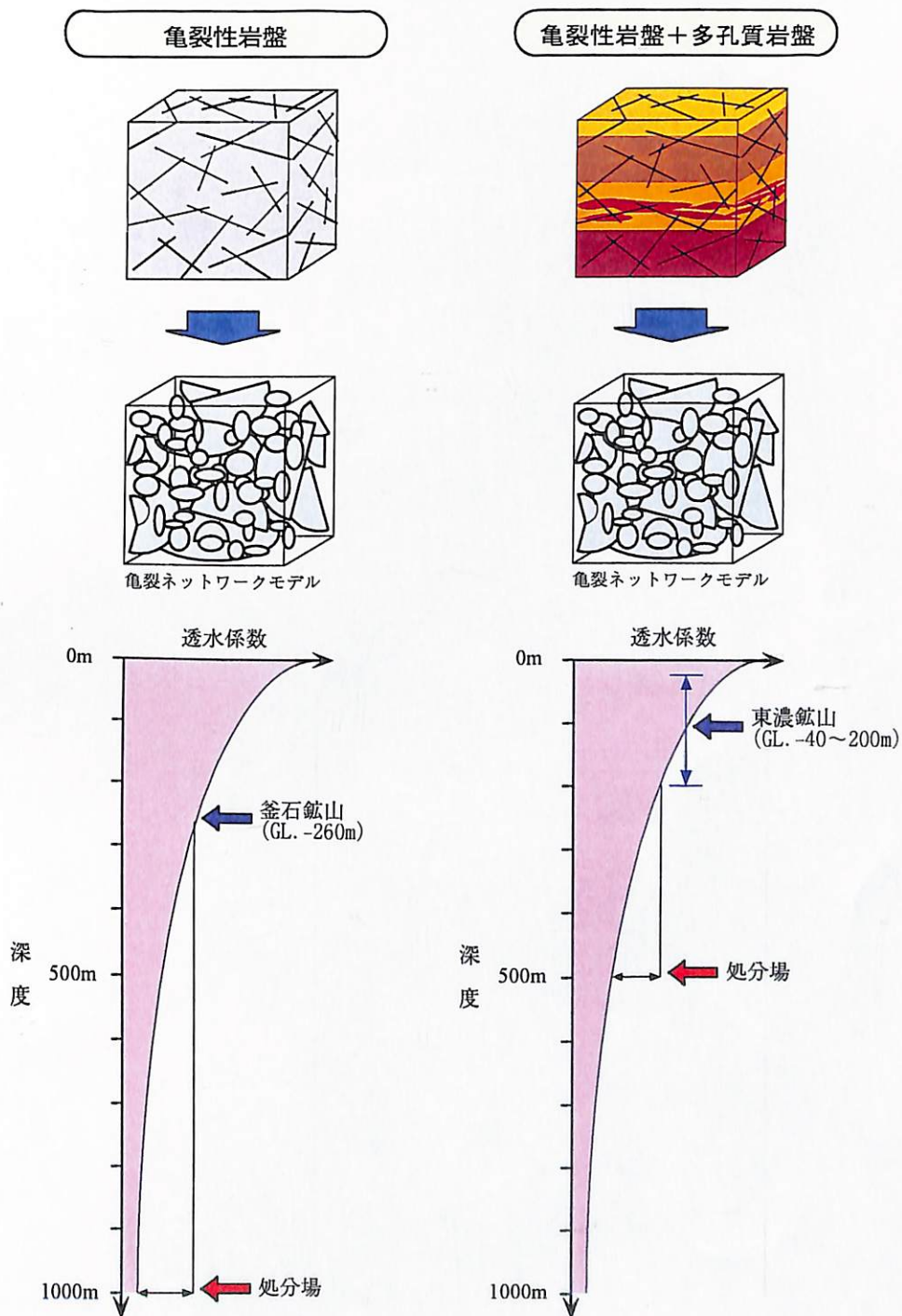


図 D.1 岩盤モデルと透水係数の関係模式図