

割れ目ネットワークモデルの水理特性に 及ぼす割れ目スケール効果の影響

井尻裕二¹・澤田淳²・坂本和彦³・内田雅大⁴・
石黒勝彦⁵・梅木博之⁶・大西有三⁷

¹正会員 工修 大成建設株式会社 エンジニアリング本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

²核燃料サイクル開発機構 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

³検査開発株式会社 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

⁴工修 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

⁵工博 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

⁶工博 核燃料サイクル開発機構 (現在 原子力発電環境整備機構 技術部)

⁷フェロー会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

岩盤中の割れ目をモデル化する際に、原位置で観察したスケールとモデル化するスケールが大きく異なる場合には、割れ目特性のスケール依存性に注意する必要がある。わが国のトンネルやダムで観察された割れ目データを収集して、割れ目トレース長のスケール効果について検討した結果、割れ目トレース長の頻度分布は場所や岩種に関係なく負のべき乗分布にしたがうことが示された。また、花崗岩を対象として割れ目ネットワークモデルの水理特性について検討した結果、割れ目ネットワークモデルの水理特性は割れ目の大きさを表すべき乗分布のべき乗数に依存し、べき乗数が小さいほどモデル内に大きな割れ目が多くなりモデルの透水性は高くモデル内の地下水移行時間は短くなることが示された。

Key Words : *scale effect, trace length, power law distribution, discrete fracture network model, granitic rock*

1. はじめに

トンネルやダムなどの岩盤構造物においては、岩盤中の亀裂や断層などの割れ目に沿って岩盤が崩落したり多量の湧水が発生したりして岩盤構造物の機能や安全性に影響を及ぼすことが多い。近年、岩盤斜面の崩落事故などを契機にますます岩盤中の割れ目の重要性が認識され、岩盤構造物の安全性や経済性の観点から岩盤内の複雑な割れ目構造をモデル化して岩盤構造物の力学的安定性や岩盤の透水性を評価しようとする試みが盛んになってきている。たとえば、岩盤斜面を不連続変形法によりモデル化して落石に対する安全性を検討したり¹⁾、地下空洞で観察された割れ目にキープロック理論を適用して支保を合理的に設計する試みもなされている²⁾。さらに、高レベル放射性廃棄物の地層処分の分野では、亀裂性岩盤中の核種移行評価を行うために割れ目のモデ

ル化が数多く実施され、釜石鉱山においても坑道内への湧水量のシミュレーション³⁾やトレーサ試験のシミュレーション⁴⁾などに割れ目ネットワークモデルが適用されている。

このように岩盤中の割れ目をモデル化して力学的および水理学的評価を行うにあたっては、岩盤中の割れ目の幾何学的特性を把握することが非常に重要となるため、これまでに地表露頭や空洞壁面において数多くの割れ目観察が実施され、割れ目の方向、トレース長、頻度、空間分布などの統計的評価が行われてきた。しかし、既往の割れ目調査のほとんどが数メートル規模の非常に限られたスケールで実施されているのに対し、モデル化の対象としているスケールは数十メートルから数百メートル規模の大きなスケールであることが多い。

本論では、割れ目特性の中で最もスケール依存性が高いと考えられる割れ目のトレース長に着目し、

わが国における既往のトンネルや地下空洞の壁面およびダム基礎岩盤露頭など大小様々なスケールで測定された割れ目トレース長データを収集し、割れ目トレース長のスケール依存性について検討を行った。さらに、典型的な亀裂性岩盤である花崗岩を対象として割れ目トレース長のスケール効果を考慮した割れ目ネットワークモデルを構築し、割れ目トレース長のスケール効果が割れ目ネットワークモデルの水理特性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 割れ目トレース長分布のスケール効果

(1) 既往の研究

割れ目の幾何学的特性には、割れ目の方向、形状、トレース長、空間位置、頻度などがあり、これらの幾何学的特性の中でも割れ目の大きさを表すトレース長は最も観察スケールへの依存性が高いと考えられる。実際、菊間地下石油備蓄基地においては、岩盤空洞（高さ30 m、幅20.5 m）内で測定されたトレース長が数メートルから十数メートルの範囲にしか分布していないのに対し⁵⁾、500m四方の領域内には図-1に示すように数百メートル規模の割れ目が数多く存在していることが確認されている⁶⁾。したがって、観察スケールに比べてモデル化スケールが大きい場合には、大きな割れ目の頻度が過小評価される可能性が高いため、スケール効果に十分注意する必要がある。

従来、割れ目トレース長の頻度分布には、地表露頭や坑道壁面などの限られた断面内での観察結果に基づいて対数正規分布⁷⁾や負の指数分布⁸⁾が一般的に用いられてきた。特に、対数正規分布は、小さなスケールで観察された数メートル以下の小さなトレース長の分布傾向を精度よく捉えることができることから割れ目トレース分布として一般的に用いられてきた。しかし、小田・木村⁹⁾は、割れ目トレース長のフラクタル性を示した上でトレース長に平均値のような代表値は存在しないことを指摘し、対数正規分布のように平均値と分散で表される分布は観察したスケールでのみ有効でより大きなスケールには適用できないことを示唆している。

近年では数百メートル以上の規模の断層のトレース長分布にべき乗分布を適用している例が多く見られる^{10)~16)}。大野・小島¹⁷⁾は、40cm四方の壁面観察で得られた亀裂から50万分の1の地質図に描かれた断層まで大小様々なスケールで割れ目のトレース長を測定し、トレース長がべき乗分布にしたがうことを示している。

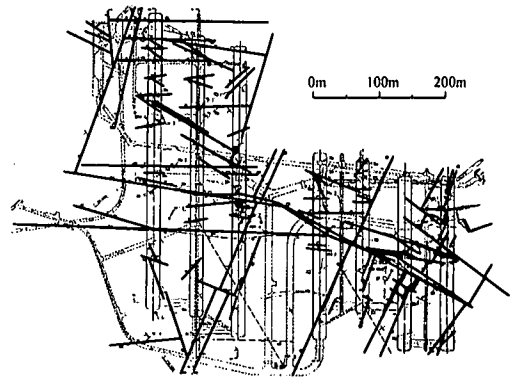


図-1 菊間地下石油備蓄基地における割れ目分布⁶⁾

表-1 割れ目トレース長データ収集サイト一覧

場所	観察断面の方向と大きさ	岩種
神岡鉱山試験坑道	鉛直 約 5×145m	片麻岩他
赤石地下発電所	鉛直+水平 約 11×28m [†]	砂岩・頁岩 互層
伊奈川地下発電所	鉛直+水平 約 16×32m [†]	花崗岩
スーパーカミオカンデ	鉛直 直径 40m	片麻岩
音羽ダム	水平 約 140×190m	チャート、 粘板岩他
菊間地下石油備蓄基地	水平 約 260×500m	花崗岩類
久慈地下石油備蓄基地	水平 約 468×540m	花崗岩
串木野地下石油備蓄基地	水平 約 468×555m	安山岩

[†] 赤石地下発電所と伊奈川地下発電所の観察断面の大きさはそれぞれ測定した5断面および4断面のうちの最短辺と最長辺の長さを記載した。

(2) スケール依存性の評価

トンネルやダムなどの岩盤構造物においては、施工中に地質とともに割れ目が観察され設計や施工に反映されているものの、施工後にこれらの割れ目の情報がデータベース化されている例は少ない。そこで、既往のトンネルや地下発電所などの空洞壁面やダムの基礎岩盤など大小様々なスケールで観察された割れ目マップを収集し、各マップごとにトレース長を測定して割れ目トレース長のスケール依存性について検討を行った。

割れ目データを収集したサイトは、表-1 に示す

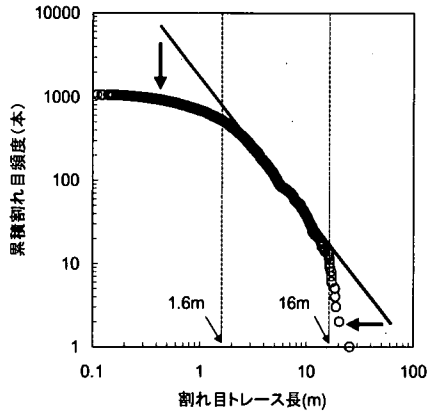


図-2 伊奈川地下発電所における割れ目トレス長の累積頻度分布

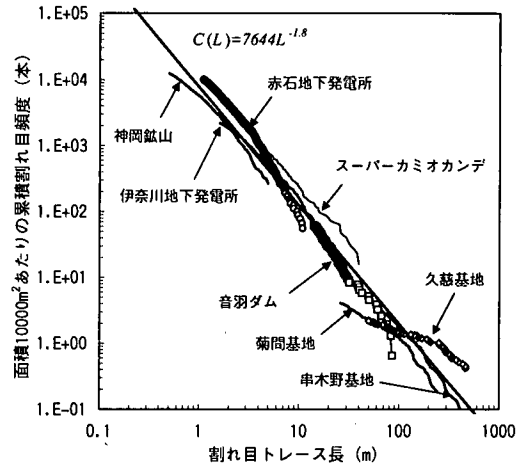


図-3 各サイトにおける面積10,000m²あたりの割れ目トレス長の累積頻度分布

ように神岡鉱山試験坑道¹⁸⁾、赤石地下発電所¹⁹⁾、伊奈川地下発電所²⁰⁾、スーパーカミオカンデ²¹⁾、音羽ダム²²⁾、菊岡・久慈・申木野地下石油備蓄基地^{6), 23)}の計8ヶ所で、地下石油備蓄基地では複数の並設空洞内の割れ目データに基づいて約500m四方の領域内の割れ目分布が得られている。収集したサイトの観察断面の一边の大きさは約5mから約550mまで約2桁の範囲に及んでいる。

これらのサイトのうち伊奈川地下発電所の空洞内で得られた割れ目トレス長の累積頻度分布を図-2に示す。図中、縦軸の累積割れ目頻度は横軸の割れ目トレス長よりも長いトレス長の総本数を表す。図-2に示すように伊奈川地下発電所で観察された割れ目トレス長の累積頻度は、トレス長が1m~10mの範囲ではほぼ直線上に分布し、べき乗分布にしたがうことがわかる。トレス長が1m以下の累積頻度がべき乗分布を表す直線よりも下側に分布するのは、大規模空洞内の割れ目観察においては空洞の安定性に影響を及ぼさないような小さなトレス長は必ずしも全てが記載されていないためと考えられる。また、トレス長が10m以上の累積頻度がべき乗分布を表す直線よりも下側に分布するのは、観察断面の最短辺16mよりも大きなトレス長は観察断面で切られて長さが過小評価されているためと考えられる。すなわち、観察断面に比較して小さなトレス長や観察断面よりも大きなトレス長は、その頻度や長さが過小評価されるため、頻度分布の信頼性は低いことから。そこで、以下の検討においては、各サイトの観察断面の最短辺の1/10倍以下の割れ目頻度は無視し、最短辺以上のトレス長は頻度には計上するが累積頻度分布図中にはプロット

しないこととする。

異なるスケールで観察されたトレス長の頻度分布を比較するために、各サイトで得られたトレス長の累積頻度を次式により面積10,000m²(100m×100m)あたりに換算したトレス長の累積頻度分布を図-3に示す。

$$C_k(L) = \frac{10,000}{A_k} c_k(L) \quad (1)$$

ここに、添え字 k ($=1, 2, \dots, 8$) はサイトを表し、 $C_k(L)$ は面積10,000m²あたりの累積頻度[本]、 $c_k(L)$ は観察断面における累積頻度[本]、 L はトレス長[m]、 A_k は観察断面の面積[m²]を表す。図-3より各サイトで得られたトレス長の累積頻度分布は、場所や岩種に関係なくほぼ直線上に分布し、次式で表されるべき乗分布にしたがうことがわかる。

$$C(L) \approx L^{-a} \quad (2)$$

ここに、 a は累積頻度分布のべき乗数を表す。最小二乗法により求められた回帰べき乗分布(図-3中の直線)は次式で表され、累積頻度分布のべき乗数 a は約1.8と求められる。

$$C(L) = 7644L^{-1.8} \quad (3)$$

割れ目トレス長の頻度 $N_k(L)$ [本] は、累積頻度

を微分して、

$$N_k(L) = \frac{dC_k(L)}{dL} \approx L^{-a-1} = L^{-b} \quad (4)$$

と求められ、割れ目トレース長の頻度分布のべき乗数 $b (=a+1)$ は約2.8となる。

既往の文献によると、大野・小島²⁴⁾は、わが国の10の地域で小さな割れ目から大きな断層を対象にトレース長を測定し、せん断割れ目のトレース長累積頻度分布のべき乗数 b は2.4~3.0 (べき乗数 a は1.4~2.0) と報告している。Bour and Davy²⁵⁾やRenshaw²⁶⁾は、既往の文献に基づいて断層のトレース長頻度分布のべき乗数 b を求め、それぞれ1.5~3.0および1.4~2.2に分布すると報告している。Bour and DavyやRenshawが求めたべき乗数が先の大野・小島の値や本論で求めた値よりも小さいのは、物理探査などを用いた断層調査では小さな断層ほど同定しにくいために頻度が過小評価され、その結果としてべき乗数も小さくなることが一因と考えられる。

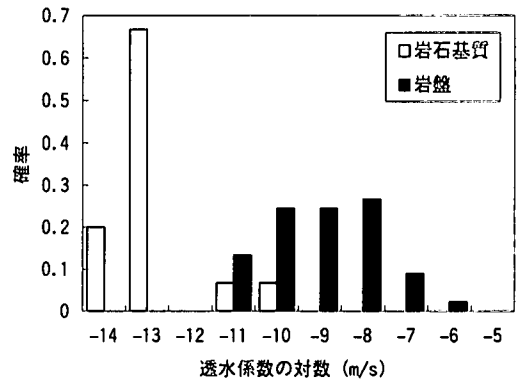
以上より、トンネルやダムなどの原位置割れ目データによるとわが国における割れ目トレース長の頻度分布のべき乗数 b は場所や岩種に関係なく約2.8と求められ、既往の文献によるとべき乗数 b は約2.0前後から最大3.0までの範囲に分布する可能性がある。

3. 割れ目ネットワークモデルの構築

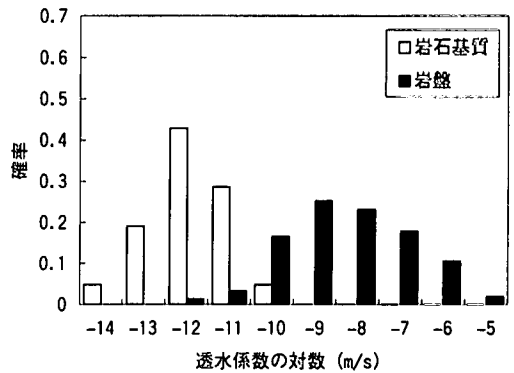
花崗岩は、典型的な亀裂性岩盤としてこれまでに数多くの割れ目調査が実施され、他の岩種に比べて割れ目の頻度も割れ目の連続性も高く^{27), 28)}、割れ目が発達した岩盤であることが知られている。

図-4(a), (b)に示す釜石鉱山および東濃地域の花崗岩を対象とした調査試験結果²⁷⁾によると、室内透水試験により測定された岩石基質部の透水係数は $10^{-14} \text{ m/s} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ に分布しているのに対し、原位置透水試験により測定された割れ目を含む岩盤の透水係数は $10^{-12} \text{ m/s} \sim 10^{-4} \text{ m/s}$ に分布し、岩石基質部の透水係数よりも数桁高い値を示している。したがって、花崗岩は、水理学的にも割れ目が支配的な岩盤であることがわかる。

3章では、この典型的な亀裂性岩盤である花崗岩を対象として、割れ目特性のスケール効果を考慮した割れ目ネットワークモデルを構築する。以下に、割れ目ネットワークモデルのモデル化手法、モデル構築に用いた花崗岩の割れ目特性データについて述べ、構築した割れ目ネットワークモデルの妥当性に



(a) 釜石鉱山



(b) 東濃地域

図-4 岩石基質と岩盤の透水係数の分布²⁷⁾

ついて検討する。なお、割れ目特性データの設定にあたっては、風化などの影響を受けていない地下深部の花崗岩を対象とする。

(1) モデル化手法

割れ目ネットワークモデルの構築にあたっては、まず割れ目特性データである割れ目の方向分布、形状、大きさ分布、頻度分布、空間分布および透水量係数分布を設定する。次に、これらの割れ目特性間に相関はないものと仮定してFracManコード²⁹⁾を用いて割れ目特性の分布統計量にしたがってモンテカルロシミュレーションによりモデル化領域内に割れ目を発生させる。モデル化領域に関しては、領域内のみ割れ目を発生させた場合は領域外にも発生させた場合よりも割れ目頻度が小さくなり割れ目の連結性が過小評価されるため²⁵⁾、図-5に示すように一辺150mの立方体領域内に割れ目の中心座標が入るように割れ目を発生させた後、発生領域中央の一辺100mの立方体領域を切り出して割れ目ネットワークモデルを作成した。

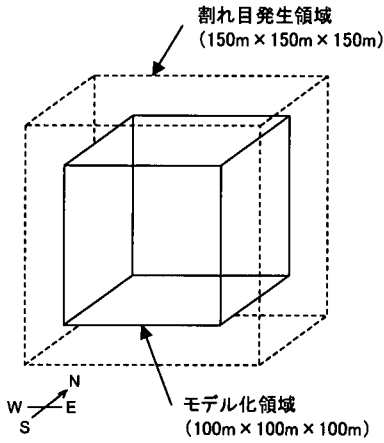


図-5 割れ目発生領域とモデル化領域

同じ割れ目特性を用いた場合でも、モンテカルロシミュレーションに用いる乱数のシード値ごとに異なる割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションが構築される。

(2) 割れ目特性データ

a) 方向分布

一般に、割れ目の方向は、同じサイト内でも場の応力や潜在クラックの方向が異なるため、局所的なスケールでは場所により変化することが知られている³⁰⁾。一方、割れ目の卓越方向は断層やリニアメントの卓越方向と相関を持つことが多く^{31, 32)}、渡辺ほか³³⁾は巨視的なスケールではある傾向を持つことを指摘している。実際、菊間地下石油備蓄基地では、ボーリング孔内で観察された割れ目の方向には顕著な規則性が認められない³⁴⁾のに対し、大規模空洞内で観察された割れ目は互いに直交する鉛直方向に卓越し規則性が認められる⁵⁾。また、木村³⁵⁾は、地下深部にいくほど割れ目の方向の規則性が高くなることを指摘している。

花崗岩は、岩種の中でもとくに割れ目の方向の規則性が高く³⁶⁾、互いに直交する3組の鉛直方向と水平方向の割れ目群が卓越することが知られており、地下深部では地表面近傍の応力解放にともなう水平方向の割れ目が少なくなるため直交2組の鉛直方向の割れ目群が卓越すると考えられる³⁷⁾。

そこで、割れ目ネットワークモデル内でモデル化する割れ目は、互いに直交する2組の鉛直方向の割れ目群とし、各割れ目群の卓越方向はモデル化領域の側面方向 (NS および EW 方向) と平行とした。また、各割れ目群の方向分布には、次式の確率密度

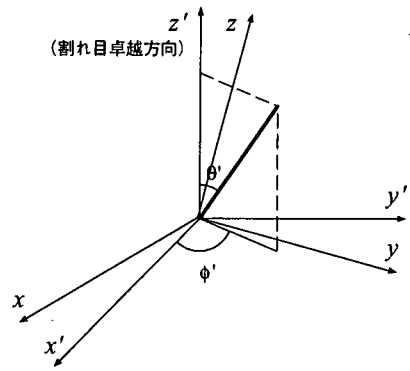


図-6 Fisher分布における偏向角 θ' と方位角 ϕ' の関係

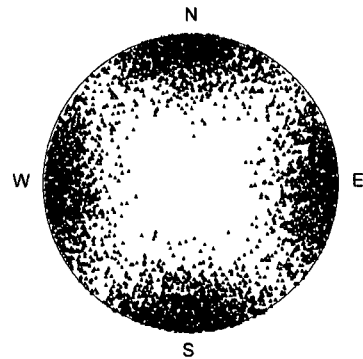


図-7 割れ目のシュミットネット下半球投影図

関数で表される Fisher 分布³⁸⁾を用いる。

$$f(\theta', \phi') = \frac{\kappa \sin \theta'}{2\pi(e^\kappa - e^{-\kappa})} e^{\kappa \cos \theta'} \quad (5)$$

ここに、 θ' は割れ目卓越方向からの偏向角($0 < \theta' < \pi$)、 ϕ' は方位角($0 < \phi' < 2\pi$)を表し (図-6 参照; 図中 x, y, z は絶対座標系, z' は割れ目卓越方向を表す), κ はばらつきを表す Fisher 定数で 10 とした。モデル化領域内に発生させた割れ目のシュミットネット下半球投影図を図-7 に示す。

b) 形状

原位置岩盤内で割れ目の形状を実際に測定したものはないものの、均質な弾性媒体中に発生するせん断割れ目は円盤形状を呈することが知られている³⁹⁾。Dershowitz⁴⁰⁾は、割れ目交差部で割れ目が切られることによって割れ目形状が多角形になることを指摘し、既往のモデル化研究では有限要素分割にも便利なことから割れ目を多角形によりモデル化している

例が多い^{40)~42)}。

割れ目ネットワークモデルの構築にあたっては、割れ目の形状は、次節に示す割れ目半径分布で表される円盤と等価な面積を有する六角形とする。

c) 半径分布

2次元平面上的の割れ目のトレース長分布がべき乗分布に従う場合には、3次元空間上の割れ目の半径分布もべき乗分布に従い、そのべき乗数はトレース長分布のべき乗数に1を加えた値で表されることが理論的に示されている^{9), 15), 43), 44)}。したがって、割れ目の半径分布には、次式の確率密度関数で与えられるべき乗分布を用いる。

$$f(r) = \frac{c-1}{r_{\min}} \left(\frac{r_{\min}}{r} \right)^c \quad (6)$$

ここに、 $r (\geq r_{\min})$ は割れ目半径[m]、 r_{\min} は割れ目の最小半径[m]、 $c (>1)$ はべき乗数で

$$c = b + 1 \quad (7)$$

と表わされる。2章に述べたように割れ目トレース長の頻度分布のべき乗数 b は約2.0~3.0の範囲に分布する可能性があることから、割れ目半径の頻度分布のべき乗数 c は約3.0~4.0の範囲に分布することになる。そこで、割れ目ネットワークモデルの構築にあたっては、割れ目半径分布のべき乗数を3.0~4.0の範囲で設定することとした。一辺100mの割れ目ネットワークモデル内の小さな割れ目は、割れ目ネットワークモデルの透水性にほとんど影響を及ぼさないと考えられることから(付録A参照)、モデル内に発生させる割れ目の最小半径 r_{\min} はモデル化領域の一辺100mの1/100倍である1mとし、最大半径は割れ目発生領域の一辺と同じ150mとする。

d) 頻度分布

割れ目頻度は、同じサイトでも測定場所によって異なるだけでなく、ボアホールテレビ観察や壁面観察などの測定方法、開口亀裂や湧水亀裂など測定する亀裂の性状や大きさ、測定者などによってばらつきがあることが知られている。たとえば、釜石鉱山の550mレベル坑道においては、ボアホールテレビ観察により得られたKD-90坑道周辺のボーリング孔内の割れ目頻度約5.7本/mに対し、目視観察により得られたKD-90坑道壁面のトレース長0.5m以上の割れ目の頻度は約7.2本/m、NW坑道壁面のトレース長3m以上の割れ目の頻度は約1.3本/mと報告

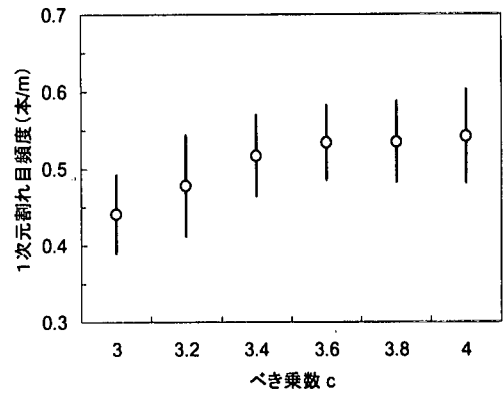


図-8 割れ目ネットワークモデル内の1次元割れ目頻度の分布 (3次元割れ目密度 $0.8\text{m}^2/\text{m}^3$)

されている³⁷⁾。また、ボーリング孔内の割れ目のうち開口割れ目の頻度は約1.3本/m、上記の坑道壁面で観察された割れ目のうち湧水割れ目の頻度は0.1~0.2本/mに分布している³⁷⁾。また、250mレベル坑道において観察された連続性と透水性がともに高い赤色変質をともなう割れ目の頻度は約0.3本/mと報告されている^{45), 46)}。

菊間地下石油備蓄基地においても、ボーリング孔内で観察された開口割れ目の頻度約1本/m³⁴⁾に対し、岩盤空洞(高さ30m、幅20.5m)壁面で観察された空洞の安定性に影響を及ぼすような比較的連続性の高い割れ目の頻度は0.25~0.5本/mと報告されている⁵⁾。

割れ目頻度の設定にあたっては、スケール効果を考慮して一辺100mのモデル化領域全体の透水性に寄与するような比較的大きなスケールで観察された連続性の高い割れ目を対象とし、菊間地下石油備蓄基地の大規模空洞内で観察された割れ目頻度0.5本/mを採用する。これは、釜石鉱山の坑道壁面で観察された連続性と透水性がともに高い赤色変質をともなう割れ目の頻度0.3本/mや湧水割れ目の頻度0.1~0.2本/mよりも大きい。

割れ目ネットワークモデルの構築には、入力データとして3次元割れ目密度(単位体積あたりの割れ目面積; 単位 m^2/m^3)が必要となるため、割れ目の最小半径を1mとして割れ目ネットワークモデル中の1次元割れ目頻度が0.5本/m前後となるような3次元割れ目密度を試行錯誤により求めた。3次元割れ目密度を $0.8\text{m}^2/\text{m}^3$ とした場合の割れ目ネットワークモデルのリアライゼーション10個における割れ目頻度の平均値と 1σ (標準偏差)を図-8にそれぞれ○と実線で示す。図からわかるように3次元

割れ目密度を $0.8\text{m}^2/\text{m}^3$ とした場合の割れ目頻度は各べき乗数とも 0.5 本/m 前後に分布することから、3次元割れ目密度は $0.8\text{m}^2/\text{m}^3$ と設定した。

e) 空間分布

一般に、せん断破壊により生じた比較的規模の大きな割れ目の周辺には小規模な分岐・派生した割れ目が密集することが知られている。また、大野・小島²⁴⁾は、14の地域における2次元平面内の割れ目の空間分布のフラクタル次元が $1.5\sim 1.99$ を示すことから割れ目の空間分布には疎密があることを指摘している。釜石鉱山においては、ボーリング孔内で観察された割れ目の深度分布に基づいて割れ目分布の不均質性が確認されている³⁾。さらに、KD-90坑道北側では、複数のボーリング孔間の水理応答と各ボーリング孔内の間隙水圧の分布から、岩盤内には図-9に示すような水理的に連続性が高い数十メートル規模のコンパートメントが形成され、コンパートメント間では互いに水理的な連続性が乏しいことが確認されている⁴⁷⁾。これは、図-10に示すような割れ目が不均質に分布して疎密構造を形成し、密な部分では数十メートル規模のクラスターを形成していることが一因と考えられる。割れ目の空間分布に関しては、これまでにフラクタル性を考慮した様々なモデル²⁹⁾が提案されているものの未だ研究途上で統一的な解釈は得られていない。

一方、既往の亀裂性岩盤のモデル化研究においては、割れ目の空間分布はランダムと仮定し割れ目の中心位置をポアソン過程に基づくBaecherモデル⁴⁸⁾により求めている例が多い^{49), 50)}。

以上より、割れ目が空間上に不均一に分布する場合は、釜石鉱山に見られるような数十メートル規模のコンパートメント構造が形成され、一辺100mのモデル化領域内の割れ目ネットワークモデルの水理的な連続性は乏しくなると考えられることから、割れ目ネットワークモデルの構築にあたっては、割れ目の空間分布はランダムとし、割れ目の中心位置はポアソン過程に基づくBaecherモデルにより求めることとした。

f) 透水量係数

単一割れ目の透水量係数は、既往の室内試験結果によると $10^{-10}\sim 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ の範囲^{51)~54)}に分布し、原位置試験結果によると釜石鉱山では $1.07 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ ⁵⁵⁾、ストリパ鉱山では約 $10^{-9}\text{m}^2/\text{s}$ ⁵⁶⁾と報告されている。すなわち、既往の室内試験や原位置試験により得られた数センチメートルから数メートルスケールの単一割れ目の透水量係数は $10^{-10}\sim 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ の範囲に分布する。

一方、これまでに一つのサイト内における割れ目

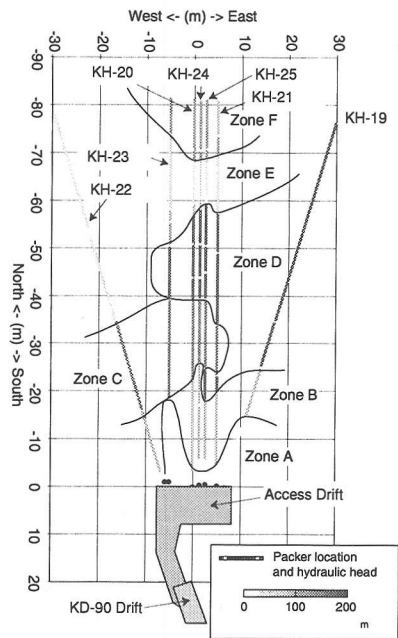


図-9 釜石鉱山におけるコンパートメント構造⁴⁷⁾

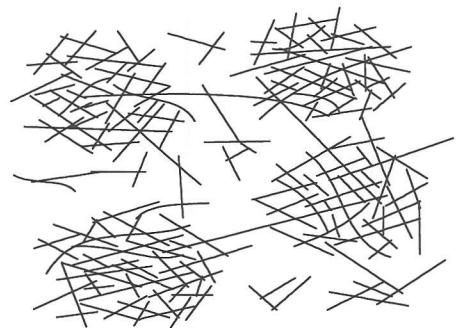


図-10 コンパートメント構造における割れ目分布の概念図

の透水量係数の分布を測定した例はない。そこで、釜石鉱山で実施したダブルパッカー式透水試験の全48試験区間で得られた透水量係数とポアホールテレビ観察により得られた開口割れ目の本数から、同じ試験区間内にある割れ目の透水量係数は等しいと仮定して、以下の式により各試験区間内の割れ目の透水量係数を算定し、釜石鉱山における透水量係数の分布を推定した³⁷⁾。

$$T_i = \frac{K_i \times L_i}{n_i} \quad (8)$$

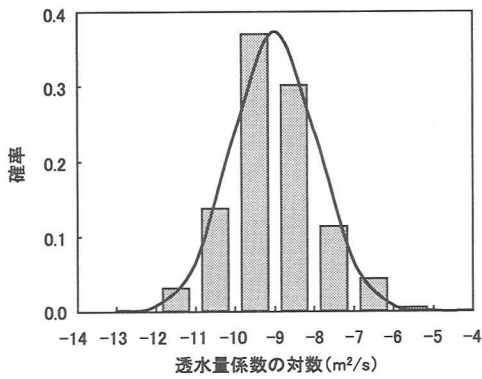


図-11 割れ目の透水量係数のヒストグラムと対数

ここに、添え字 i ($i=1, \dots, 48$) は試験区間を表し、 T_i , K_i , L_i , n_i はそれぞれ割れ目の透水量係数 [m^2/s]、透水試験により得られた透水係数 [m/s]、試験区間長 [m] および開口割れ目の本数 [本] を表す。全 48 試験区間より求められた割れ目の透水量係数の分布は、図-11 中のヒストグラムのように求められ、対数平均 $-8.99 m^2/s$ 、対数標準偏差 $1.07 m^2/s$ の対数正規分布 (図中の実線；算術平均 $2.18 \times 10^{-8} m^2/s$ 、標準偏差 $4.61 \times 10^{-7} m^2/s$) で表される。この透水量係数分布は、同じ試験区間内にある割れ目の透水量係数は等しいと仮定したために各試験区間内でのばらつきが平均化されているものの、前述した既往の文献より得られた単一割れ目の透水量係数の分布範囲 $10^{-10} \sim 10^{-5} m^2/s$ を包含している。

そこで、割れ目の透水量係数の分布は、図-11 中に示す対数正規分布 (対数平均 $-8.99 m^2/s$ 、対数標準偏差 $1.07 m^2/s$) とする。

以上で設定した割れ目特性データの一覧を表-2に示す。

(3) 割れ目ネットワークモデルの妥当性について

表-2 で設定した 6 つの割れ目半径分布のべき乗数に対してそれぞれ 10 個ずつ、計 60 個の割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションを構築した。そのうち、べき乗数 $c=3.0$ の場合の割れ目ネットワークモデルの鳥瞰図を図-12 に示す。図には割れ目ネットワークモデル内の全割れ目のうち任意に抽出した 25% の割れ目のみ表示した。

構築した割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションのうち、べき乗数が 3.0 と 4.0 の場合の割れ目ネットワークモデル内の任意の水平断面上における割れ目のトレース図をそれぞれ図-13(a) と (b)

表-2 割れ目特性データ

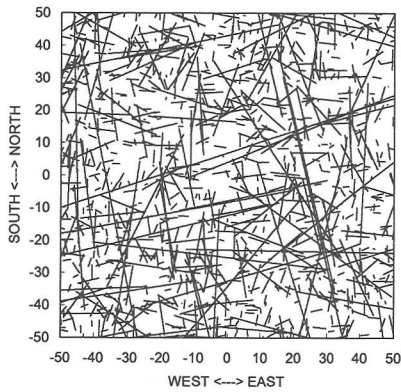
パラメータ	設定値
方向分布	直交 2 組の鉛直割れ目群 Fisher 分布 (Fisher 係数 10)
形状	六角形
半径分布	べき乗分布 (べき乗数 $c=3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0$) 最大半径 150m, 最小半径 1m
頻度分布	3 次元密度 $0.8 m^2/m^3$ (1 次元頻度約 0.5 本/m)
空間分布	Poisson 分布 (Baecher モデル)
透水量係数分布	対数正規分布 (対数平均 $-8.99 m^2/s$, 対数標準偏差 $1.07 m^2/s$)



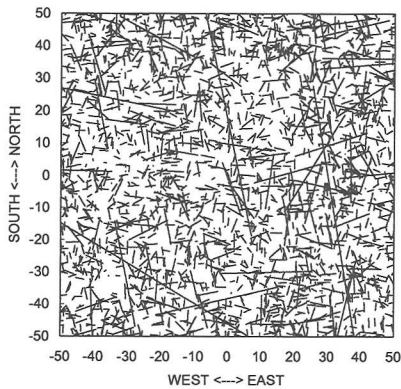
図-12 割れ目ネットワークモデル鳥瞰図

に示す。これらの図より、割れ目頻度 (3 次元割れ目密度) が等しい場合、べき乗数が小さいほど領域を横断するような大きな割れ目の数が多くなり、べき乗数が大きいほど大きな割れ目が少なく小さな割れ目が支配的になることが確認できる。

また、図-14 に示すように、各べき乗数ごとに 10 個のリアライゼーションから求められた割れ目ネットワークモデル内の任意の水平断面における面積 $10,000 m^2$ ($=100m \times 100m$) あたりの割れ目トレース長の累積頻度分布は、図-3 に示す原位置での観察結果に基づいて導出された式(3)で表されるべき乗分布とほぼ等しいことから、割れ目ネットワークモデルの構築に用いた割れ目半径分布と割れ目頻度は妥当であることが確認できる。



(a) べき乗数 $c=3.0$



(b) べき乗数 $c=4.0$

図-13 割れ目ネットワークモデル内の任意の水平断面における割れ目トレース図

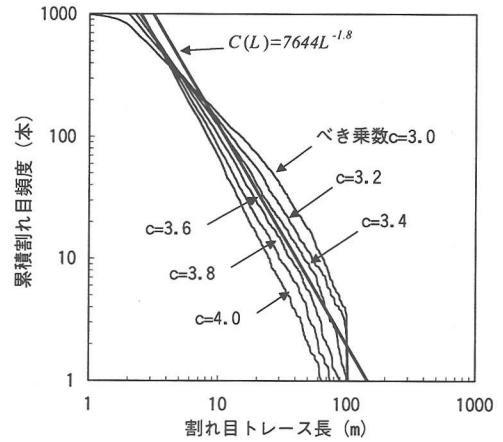


図-14 割れ目ネットワークモデル内の水平断面における割れ目トレース長の累積頻度分布

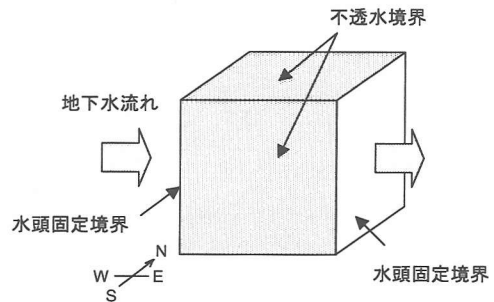


図-15 境界条件模式図

4. 割れ目ネットワークモデルの水理特性

4章では、構築した割れ目ネットワークモデルの有する水理特性を把握するために、水理解析により、構築した割れ目ネットワークモデル全体の透水係数を算定するとともに、移流のみを考慮した物質移行解析により割れ目ネットワークモデル内の平均地下水移行時間（トラベルタイム）を算定する。

(1) 算定方法

a) 透水係数

割れ目内の定常地下水流れの支配方程式を次式に示す。

$$T\nabla^2 h = 0 \quad (9)$$

ここに、 T は透水量係数[m²/s]、 h は全水頭[m]、 ∇^2

は2次元のラプラス演算子を表す。

境界条件は、図-15に示すように割れ目ネットワークモデルの相対する2つの側方断面に一定の動水勾配 Δh を保つように水頭固定境界を与え、その他の境界は全て不透水境界とする。水頭固定境界と不透水境界における境界条件をそれぞれ式(10)と式(11)に示す。

$$h_u(x, y, z) = h_1, \quad h_d(x, y, z) = h_2 \quad (10)$$

$$-T_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = 0 \quad (11)$$

ここに、 h_u および h_d はそれぞれ上流側と下流側断面における水頭[m]を表し、 h_1 および h_2 はそれぞれ上流側と下流側断面に与える固定水頭[m]、 n_i は境

界の法線方向の単位ベクトルを表す。

構築した割れ目ネットワークモデル内の割れ目を三角形要素に離散化し、与えられた境界条件のもとでガラーキン有限要素法を用いて支配方程式(9)を解き、割れ目ネットワークモデルの下流側境界の断面を通過する単位時間あたりの流量 Q [m^3/s]を求め、この流量 Q から次式により割れ目ネットワークモデル全体の透水係数を算定した。

$$K = \frac{Q}{A \cdot \Delta h} \quad (12)$$

ここに、 K は割れ目ネットワークモデル全体の透水係数[m/s]、 A は下流側境界の断面積 ($=10,000m^2$)、 Δh は与えた動水勾配を表す。

b) 平均地下水移行時間

移流のみを考慮した割れ目内の非定常物質移行の支配方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + q \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

ここに、 C は地下水中トレーサ濃度[mol/m^3]、 q は水理解析により求められた割れ目内地下水流速[m/s]を表す。

境界条件は、割れ目ネットワークモデルの上流側断面において時間 $t=0$ に次式で表される濃度固定境界を与える。

$$C_u(x, y, z) = C_0 \quad (t \geq 0) \quad (14)$$

ここに、 C_u は上流側断面における濃度[mol/m^3]、 C_0 は固定濃度[mol/m^3]を表す。

移流のみを考慮した物質移行解析により割れ目ネットワークモデルの下流側断面を通過するトレーサの濃度破過曲線を求め、図-16に示すように破過曲線の濃度が $0.5C_0$ となる時間 t_{50} を一辺100mの割れ目ネットワークモデル内を流れる平均地下水移行時間として求めた。

なお、水理解析および物質移行解析にはMAFICコード⁵⁷⁾を用いた。

(2) 解析結果および考察

各べき乗数ごとに10個の割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションから求められた割れ目ネットワークモデルの透水係数の平均値と割れ目ネットワークモデル内を流れる平均地下水移行時間の平均

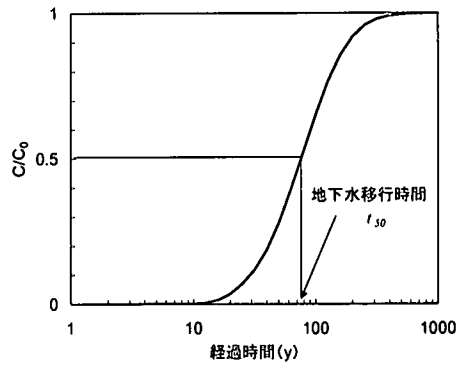


図-16 地下水移行時間算定

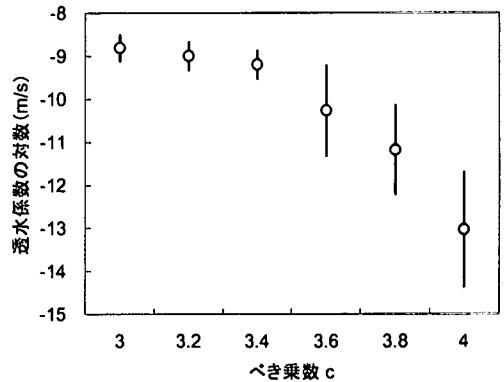


図-17 透水係数平均値

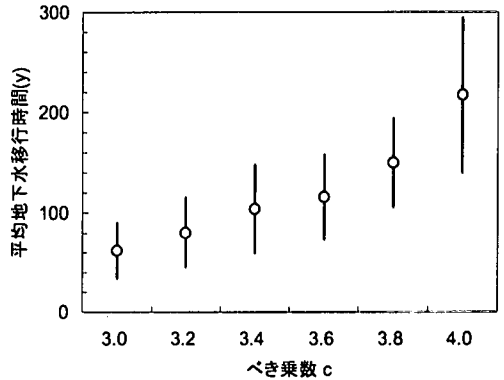


図-18 平均地下水移行時間

値をそれぞれ図-17と図-18に○で示す。これらの中には平均値から 1σ の範囲も実線で示した。

図-17 に示すように割れ目ネットワークモデルの透水係数の平均値は $10^{-8}m/s$ 以下で、原位置透水試験により求められた花崗岩の透水係数 $10^{-4}m/s$ (付録 B 参照) よりも小さい。これは、原位置透水試

験は、ボーリング孔周辺の数メートルから十数メートルの岩盤を対象としており、釜石鉱山で見られたような数十メートル規模のコンパートメント構造よりも小さなスケールを対象としているのに対し、一辺 100m の割れ目ネットワークモデルではコンパートメント構造よりも大きなスケールを対象としているため小さな割れ目の連結性が悪くなるのが原因と考えられる。

また、図-17および図-18に示すように、べき乗数が高いほど、透水係数の平均値は小さく平均地下水移行時間は長くなるとともに、透水係数および平均地下水移行時間のリアライゼーションごとのばらつきは大きくなっている。3章で述べたように、割れ目頻度が等しい場合、べき乗数が小さいほど領域を横断するような大きな割れ目の数が多くなり、べき乗数が高いほど小さな割れ目が支配的になる。すなわち、割れ目ネットワークモデルの透水性は、前者の場合は領域を横断するような大きな割れ目の透水性に依存し、後者の場合は小さな割れ目で構成されるネットワークの透水性に依存すると考えられる²⁹⁾。一般に、大きな割れ目が支配的な場合の方が小さな割れ目が支配的な場合よりも割れ目ネットワークモデルの透水性が大きくなると考えられる(付録C参照)ことから、べき乗数が小さいほど割れ目ネットワークモデルの透水係数は大きく平均地下水移行時間は短くなる。逆に、べき乗数が高いほど、割れ目ネットワークモデルの透水係数は小さな割れ目で構成されるネットワークの連結性および透水性に依存して小さくなるとともにそのばらつきは大きくなり、平均地下水移行時間は長くなる。

半径分布以外の割れ目特性が割れ目ネットワークモデルの透水係数に及ぼす影響に関しては、表-2の設定値に対して割れ目特性が現実的な範囲で感度解析を実施した。その結果、割れ目の方向分布をランダムとした場合の透水係数の変化は1/2倍以下、割れ目頻度を $1.2\text{m}^2/\text{m}^3$ とした場合の透水係数の変化は2倍以下で、透水量係数分布を1桁大きくした場合の透水係数は約1桁大きくなることがわかっている⁵⁸⁾。すなわち、割れ目ネットワークモデルの透水係数に及ぼす方向分布や頻度の影響は小さく、透水量係数分布の影響は大きいことがわかっている。

割れ目ネットワークモデルの透水係数とモデル化領域の大きさの関係については、割れ目の半径分布がべき乗分布であるため、割れ目構造がフラクタル性を有し、割れ目ネットワークモデルの透水係数は領域の大きさに依存しないと考えられる。ただし、対象とする領域が大きくなるほど領域内に含まれる断層の規模も大きくなり、実際の岩盤における規模

の大きな断層の透水量係数は表-2で設定した規模の小さい割れ目の透水量係数分布とは異なってくると考えられる。したがって、本論文で構築した割れ目ネットワークモデルは、あくまで数百メートルスケールの岩盤を対象としたものである。

5. まとめ

トンネル壁面やダム基礎岩盤などの大小様々なスケールで観察された割れ目トレース長データに基づいてトレース長の頻度分布を求めた結果、割れ目トレース長の頻度分布は、場所や岩種に関係なくべき乗分布にしたがいそのべき乗数は約2.8となることがわかった。断層を対象とした既往の文献値によると割れ目トレース長の頻度分布のべき乗数は約2.0~3.0の範囲に分布する可能性があるものの、断層の頻度が過小評価されている可能性も否定できないことから、今後はより大きなスケールでの断層頻度を含めて検討を行う予定である。

割れ目トレース長のべき乗分布から割れ目半径のべき乗分布を求め、花崗岩を対象として割れ目ネットワークモデルを構築し、その水理特性について検討した。その結果、構築した割れ目ネットワークモデルの透水性は、割れ目半径分布のべき乗数に依存し、べき乗数が高いほど、割れ目ネットワークモデル中に大きな割れ目は少なくなり、割れ目ネットワークモデルの透水係数は小さく、モデル内の地下水移行時間は長くなることがわかった。逆に、べき乗数が小さいほど、割れ目ネットワークモデル中には大きな割れ目が多くなり、割れ目ネットワークモデルの透水係数は大きく、地下水移行時間は短くなることがわかった。実際、既往のトンネル現場においては大規模な断層破砕帯から多量の湧水が見られる⁵⁹⁾ことが多いことから、岩盤中に大きな割れ目が多いほど岩盤全体の透水性が大きくなるのは妥当な結果と考えられる。割れ目ネットワークモデルの透水係数が原位置透水試験により得られた透水係数よりも小さいのは、透水係数を算定するスケールが大きくなるほど、小さな割れ目の連結性が悪くなるのが原因と考えられる。したがって、割れ目ネットワークモデルの構築にあたっては、割れ目半径分布に割れ目の観察スケール依存性を考慮したべき乗分布を用い、割れ目ネットワークモデルの水理特性に影響を及ぼすべき乗数の大きさに十分配慮することが重要であることがわかった。

今後は、深地層の研究施設などを通じて、割れ目特性に及ぼす割れ目の成因や地質環境の影響、および分岐・派生割れ目を含む割れ目の空間分布の不均

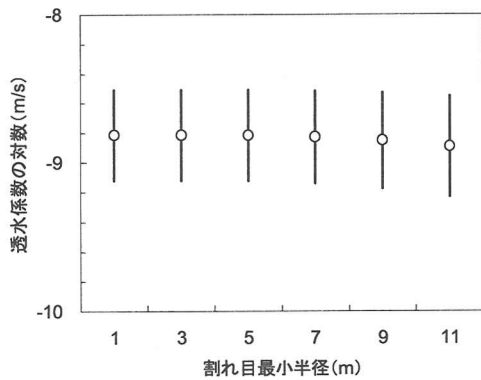


図-A1 割れ目最小半径と透水係数平均値の関係

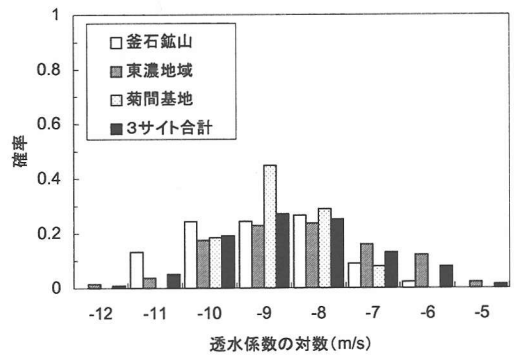
質性などについて調査研究を行い、割れ目ネットワークモデルの検証を行うとともに、より信頼性の高いモデルの開発を行う予定である。

謝辞：割れ目トレース長データの作成には、京大大学大津宏康助教授、土山富広氏、(財)地域地盤環境研究所田中誠氏、(株)ダイヤコンサルタント山田直之氏の御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。また、割れ目データの提供に御協力いただきました関係諸氏に感謝の意を表します。

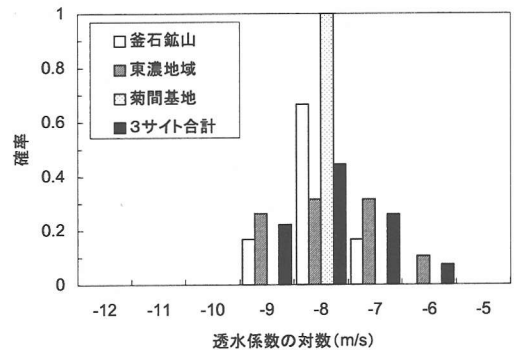
付録A 割れ目最小半径の影響

割れ目の最小半径が割れ目ネットワークモデルの透水性に及ぼす影響を評価するために、割れ目の最小半径を1m～11mの範囲で感度解析を実施した⁵⁸⁾。割れ目最小半径ごとに割れ目ネットワークモデルのリアライゼーションを10個ずつ構築し、水理解析により求めた割れ目ネットワークモデルの透水係数の平均値と1σの範囲を図-A1にそれぞれ○と実線で示す。

図に示すように各割れ目最小半径における割れ目ネットワークモデルの透水係数の分布は、割れ目最小半径が7m以上では若干低下するものの、最小半径が7m以下ではほとんど変化しないことがわかった。すなわち、割れ目最小半径が7m以下の小さな割れ目は、一辺100mの割れ目ネットワークモデルの透水係数にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。



(a) 試験区間毎の透水係数



(b) ボーリング孔毎の透水係数

図-B1 透水係数分布²⁷⁾

付録B 花崗岩の透水性

釜石鉱山、東濃地域、菊間地下石油備蓄基地³⁴⁾のボーリング孔内で実施されたダブルパッカー式透水試験の各試験区間(区間長 2.5～5.0m)で測定された局所的なスケールにおける透水係数は、図-B1(a)に示すように 10^{-9} m/s～ 10^{-8} m/s オーダー中心に 10^{-12} m/s～ 10^{-5} m/s オーダーに分布している²⁷⁾。

より巨視的なスケールにおける岩盤の透水性を評価するために、ボーリング孔ごとに各試験区間の透水係数 $K_n(i)$ [m/s]からそのボーリング孔全体の透水係数 K_n [m/s]を次式により算定する。

$$K_n = \frac{T_n}{L_n} = \frac{\sum_{i=1}^{I_n} K_n(i)L_n(i)}{\sum_{i=1}^{I_n} L_n(i)} \quad (B1)$$

ここに、添え字 n はボーリング孔、 T_n はボーリング孔 n における全試験区間の透水量係数[m²/s]、 L_n は

ボーリング孔 n における全試験区間の総区間長[m], $L_n(i)$ はボーリング孔 n における試験区間 i の区間長 [m], I_n はボーリング孔 n における試験区間総数を表し, 各ボーリング孔の総区間長は 3.0m~81.9m に分布している. 式(B1)により算定されたボーリング孔ごとの透水係数の分布を図-B1 (b)に示す. ボーリング孔ごとの透水係数は, 数メートルから数十メートルスケールにおける岩盤の透水係数を表し, 平均化されたために図-B1 (a)の試験区間ごとの透水係数よりも分布範囲は 10^{-9} m/s~ 10^{-5} m/s と小さくなっている. また, 各ボーリング孔の透水係数は, ボーリング孔内の透水性の高い試験区間の透水係数に依存するため, 分布の最頻値は図-B1 (a)よりも若干大きく 10^{-8} m/s オーダーとなっている.

既往の文献によると, 釜石鉱山の KD-90 坑道で実施された坑道規模透水試験^{60),61)}およびベンチレーション試験⁶²⁾, さらに菊間地下石油備蓄基地実証プラントへの湧水量解析⁶³⁾により求められた数十メートルスケールの巨視的透水係数はいずれも 10^{-8} m/s オーダーを示す.

以上より, 数メートルから数十メートルスケールの花崗岩の透水係数は 10^{-8} m/s 程度と考えられる.

付録C 割れ目ネットワークの透水性

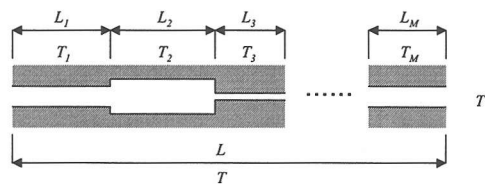
図-C1 (a)に示すように, 透水量係数の異なる割れ目が直列に連結した割れ目ネットワーク全体の透水量係数 T [m²/s]は, ネットワークを構成している個々の割れ目の透水量係数 T_m [m²/s]の調和平均により表される.

$$T = \frac{L}{\sum_{m=1}^M \frac{L_m}{T_m}} \quad (C1)$$

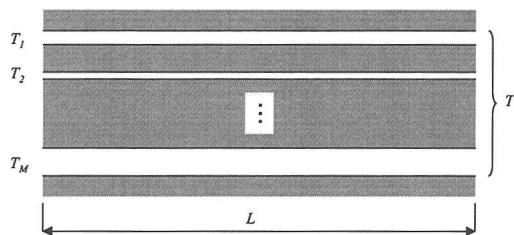
ここに, L および L_m は, それぞれ割れ目ネットワーク全体と個々の割れ目の長さ[m]を表し, M は割れ目の数を表す. したがって, 割れ目ネットワークモデル中に小さな割れ目が連結したネットワーク構造が支配的な場合は, 割れ目ネットワークモデルの透水係数はネットワーク中の最も小さな透水係数の値に依存すると考えられる.

一方, 図-C1 (b)に示すように, 透水量係数の異なる割れ目が並列した割れ目モデルの透水量係数は, 個々の割れ目の透水量係数の総和により表される.

$$T = \sum_{m=1}^M T_m \quad (C2)$$



(a) 割れ目が直列している場合



(b) 割れ目が並列している場合

図-C1 割れ目構造模式図

したがって, 割れ目ネットワークモデル中に領域を横断するような大きな割れ目が多い場合は, 割れ目ネットワークモデルの透水係数は領域を横断する大きな割れ目のうち最も大きな透水量係数の値に依存すると考えられる.

以上より, 割れ目の透水量係数の分布が等しい場合には, 小さな割れ目が支配的な割れ目ネットワークモデルの透水係数の方が, 領域を横断するような大きな割れ目が支配的な割れ目ネットワークモデルの透水係数よりも小さくなると考えられる.

参考文献

- 1) Ohnishi, Y. and Chen, G.: DDA analysis of rock fall in rock masses, *1st North American Rock Mech. Symp.*, 1996.
- 2) 手塚昌信, 大西有三, 田中誠, 西村毅: 大規模地下空洞掘削時におけるキープロック解析, 土木学会論文集, No.609/VI-41, pp.73-85, 1998.
- 3) Uchida, M., Doe, T.W., Dershowitz, W.S. and Wallmann, P.: Simulation of fracture flow to the Kamaishi validation drift, *Proc. Of the forth Annual International Conference of High Level Radioactive Waste Management*, pp.437-442, 1993.
- 4) 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 岩崎浩: 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発 (その2) -釜石鉱山 KD-90 坑道・トレーサー試験の解析-, 応用地質, 第 35 巻, 第 4 号, pp.2-12, 1994.
- 5) 羽出山吉裕, 大津宏康, 大矢敏雄, 岡本淳: クラッ

- クテンソル理論による地下空洞掘削時の原位置岩盤の透水性評価に関する一考察, 第 25 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.313-317, 1993.
- 6) 林信義, 田中耕一, 北村恵, 上山邦彦: 大規模地下空洞の施工実績—地下石油備蓄での例—, 電発調査資料 No.92, pp.344-440, 1993.
 - 7) 菊地宏吉, 三室俊昭, 大村富士夫, 原敏昭: 節理性岩盤のモデル化に関する研究, 第 16 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.126-130, 1984.
 - 8) Hudson, J.A. and Priest, S.D.: Discontinuities and rock mass geometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.339-362, 1979.
 - 9) 小田匡寛, 木村健司: 亀裂の寸法分布について—フラクタル性を仮定して—, 第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.55-60, 1990.
 - 10) Segall, P. and Pollard, D.D.: Joint formation in granitic rock of the Sierra Nevada, *Geological Society of America Bulletin*, Vol.94, pp.563-575, 1983.
 - 11) Gudmundsson, A.: Geometry, formation and development of tectonic fractures on the Reykjanes Peninsula, southwest Iceland, *Tectonophysics*, 139, pp.295-308, 1987.
 - 12) Scholz, C.H. and Cowie, P.A.: Determination of total strain from faulting using slip measurements, *Nature*, 346, pp.837-839, 1990.
 - 13) Gautier, B.D. and Lake, S.D.: Probabilistic modeling of faults below the limit of seismic resolution in Pelican Field, North Sea, Offshore United Kingdom, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 77, pp.761-777, 1993.
 - 14) Davy, P.: On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system, *J. of Geophysical Research*, Vol.98, No.B7, pp.12141-12151, 1993.
 - 15) Marret, R.: Aggregate properties of fracture populations, *J. Struct. Geol.*, 18(2/3), pp.169-178, 1996.
 - 16) Odling, N.: Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway, *J. Struct. Geol.*, 19, pp.1257-1271, 1997.
 - 17) 大野博之, 小島圭二: 岩盤割れ目のフラクタル (その 1) —フラクタル分布—, 応用地質, 33 巻 3 号, pp.11-24, 1992.
 - 18) 白旗秀紀, 玉井昭雄, 金田勉: 調査結果に基づく亀裂群の定量化と亀裂分布予測手法, 第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.283-288, 1994.
 - 19) 西村毅, 草深守人, 大橋敏行, 西川力: 水力発電所地下空洞の掘削に伴う岩盤亀裂調査とその定量化, 土木学会論文集, 418 号/Ⅲ-13, pp.45-53, 1990.
 - 20) 土居泰作, 山元政憲, 越井力, 磯野良隆: NATM による地下発電所の施工—関西電力(株)伊奈川第二水力発電所新設工事の例—, 間組技術研究所年報, pp. A-129-A-148, 1984.
 - 21) 竹村友之, 鶴見憲二, 西村毅: スーパーカミオカンデ空洞の掘削, 土と基礎, 第 46 巻, 第 6 号, pp.28-30, 1998.
 - 22) 大西有三, 大津宏康, 田中誠, 崎谷和貴: ダム基礎岩盤のグラウト止水効果の評価に関する一考察, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'98 発表論文集, pp.109-120, 1998.
 - 23) 岡本明夫: 地下石油備蓄岩盤タンクの水封評価—久慈・菊間・串木野基地について—, 東京大学工学博士論文, 1998.
 - 24) 大野博之, 小島圭二: 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, 1993.
 - 25) Bour, O. and Davy, P.: On the connectivity of three-dimensional fault networks, *Water Resources Research*, Vol.34, No.10, pp.2611-2622, 1998.
 - 26) Renshaw, C.E.: Connectivity of joint networks with power law length distributions, *Water Resources Research*, Vol.35, No.9, pp.2661-2670, 1999.
 - 27) 井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃: 我が国の岩盤の水理特性について, 核燃料サイクル開発機構東海事業所技術資料, JNC TN8400 99-090, 1999.
 - 28) 緒方正俊: 岩盤分類の要因としての岩盤の不連続面, 岩盤分類, 応用地質, 特別号, 応用地質学会, pp.17-24, 1984.
 - 29) Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P. and Thomas, A.: FracMan interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation, User documentation, version 2.6, Golder Associates Inc., Seattle, Washington, 1998.
 - 30) 田中和広, 田中靖治, 宮川公雄, 馬原保典, 安池慎治, 本荘静光: 割れ目岩盤における水理地質構造の調査手法の提案と適用, 応用地質, 第 36 巻, 第 6 号, pp.18-30, 1996.
 - 31) 小島圭二, 大塚康範, 山田敏博: 断層密度および規模の分布とその予測の試み, 応用地質, 第 22 巻, 第 1 号, pp.88-103, 1981.
 - 32) 越谷信, 長江亮二, 大上和良, 森田安彦: 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, 1991.
 - 33) 渡辺邦夫, 小原勝巳, 新城栄一: 岩盤中の割れ目系分布と透水異方性の調査例, 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.57-60, 1982.
 - 34) 下茂道人, 井尻裕二, 飯星茂, 橋本憲和, 長田和洋: トモグラフィ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, 1992.
- 35) 木村敏雄: 断層、とくに断層破砕帯の見方, 考え方, 応用地質, 第22巻第1号, pp.4-16, 1981.
 - 36) 緒方正慶: 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, 第19巻第1号, pp.12-20, 1978.
 - 37) 井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃: 我が国の岩盤における亀裂特性について, 核燃料サイクル開発機構東海事業所研究報告, JNC TN8400 99-091, 1999.
 - 38) Chilès, J.P. and de Marsily, G.: Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling, in *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, edited by Bear, J., Tsang, C.F. and de Marsily, G., p.181, 1993.
 - 39) Scholz, C.H.: *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, 1990. (柳谷俊訳: 地震と断層の力学, 古今書院)
 - 40) Dershowitz, W.S.: Rock joint systems, *Ph.D. Dissertation*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1984.
 - 41) Veneziano: Probabilistic model of joints in fractured rock, *Technical Report*, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1979.
 - 42) Herbert, A. and Splawski, B.: Prediction of inflow into the D-holes at the Stripa mine, *Stripa Project Technical Report*, TR90-14, 1990.
 - 43) Piggott, A.R.: Fractal relations for the diameter and trace length of disc-shaped fractures, *J. Geophys. Res.*, 102(8), pp.18121-18125, 1997.
 - 44) Berkowitz, B. and Adler, P.M.: Stereological analysis of fracture network structure in geological formations, *J. Geophys. Res.*, 103(B7), pp.15339-15360, 1998.
 - 45) 天野健二, 吉田英一, 笹本広: 釜石鉱山における栗橋花崗岩体中の割れ目形態と空隙構造, 平成7年度支部研究発表会・講演会予稿集, 日本応用地質学会中部支部, pp.9-12, 1995.
 - 46) Amano, K., Semba, T., Ota, K. and Yoshida, H.: Overview of fracture systems in the Kurihashi granodiorite at the Kamaishi mine, *Kamaishi International Workshop proceedings*, PNC TN7413 98-023, pp.III-1-1-10, 1998.
 - 47) Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W.: Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi mine, northwest Japan, *Engineering Geology*, 56, pp.75-96, 2000.
 - 48) Baecher, G.B., Lanney, N.A. and Einstein, H.H.: Statistical description of rock properties and sampling, *Proc. of the 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, 5C1-8, 1977.
 - 49) Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B. and Peaudecerf, P.: Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation 1. The flow model, *Water Resources Research*, Vol.26, No.3, pp.479-489, 1990.
 - 50) Dverstorp, B., Andersson, J. and Nordqvist, W.: Discrete fracture network interpretation of field tracer migration in sparsely fractured rock, *Water Resources Research*, Vol.28, No.9, pp.2327-2343, 1992.
 - 51) 渡辺邦夫, 星野吉昇: 岩盤中に発達する単一開口割れ目の透水係数の算定, 埼玉大学工学部地盤水理実験施設年報, Vol.6, pp.60-70, 1980.
 - 52) 多田浩幸, 木下直人, 若林成樹: 岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.139-144, 1994.
 - 53) Gale, J., MacLeod, R. and LeMessurier, P.: Site characterization and validation - Measurement of flowrate, solute velocities and aperture variation in natural fractures as a function of normal and shear stress, Stage 3, *Stripa Project Report* 90-11, 1990.
 - 54) Makurat, A., Barton, N., Vik, G. and Tunbridge, L.: Site characterization and validation - Coupled stress-flow testing of mineralized joints of 200 mm and 1400 mm length in the laboratory and in situ, Stage 3, *Stripa Project Report* 90-07, 1990.
 - 55) 動力炉・核燃料開発事業団: 地層処分研究開発の現状 (平成5年度), PNC TN1410 94-094, 1994.
 - 56) Abelin, H., Gidlund, J. and Neretnieks, I.: Migration in a single fracture, *Scientific Basis for Radioactive Waste Management V*, Materials Research Society, edited by W. Lutze, Elsevier Sci. Pub. Co., pp.529-538, 1982.
 - 57) Miller, I., Lee, G. and Dershowitz, W.: MAFIC matrix/fracture interaction code with heat and solute transport user documentation, version 1.6, Golder Associates Inc., Washington, 1999.
 - 58) 澤田淳, 井尻裕二, 坂本和彦, 亘真吾: 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研究報告, JNC TN8400 99-093, 1999.
 - 59) 足立紀尚, 大野公男: 3章 土質工学的諸問題とその対応 山地・丘陵部トunnel, 土と基礎, 第36巻第11号, pp.55-60, 1988.
 - 60) 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: 花崗岩における原位置試験 (平成2年度), 動力炉・核燃料開発事業団委託研究成

果報告書, 日鉄鉱業株式会社, PNC ZJ1380 91-001, 1991.

開発事業団委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社, PNC ZJ1380 92-001, 1992.

- 61) 福田和寛, 野口義文, 堀田政國: 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, 1992.
- 62) 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: 花崗岩における原位置試験 (平成 3 年度), 動力炉・核燃料

- 63) 下茂道人, 竹田直樹, 宮下国一郎, 青木謙治: 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, 1986.

(2000.11.17 受付)

EVALUATION OF SCALE EFFECTS ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF FRACTURED ROCK USING FRACTURE NETWORK MODEL

Yuji IJIRI, Atsushi SAWADA, Kazuhiko SAKAMOTO, Masahiro UCHIDA, Katsuhiko ISHIGURO, Hiroyuki UMEKI and Yuzo OHNISHI

It is important to take into account scale effects on fracture geometry if the modeling scale is much larger than the in-situ observation scale. The scale effect on fracture trace length, which is the most scale dependent parameter, is investigated using fracture maps obtained at various scales in tunnel and dam sites. We found that the distribution of fracture trace length follows negative power law distribution in regardless of locations and rock types. The hydraulic characteristics of fractured rock is also investigated by numerical analysis of discrete fracture network (DFN) model where power law distribution of fracture radius is adopted. We found that as the exponent of power law distribution become larger, the hydraulic conductivity of DFN model increases and the travel time in DFN model decreases.