



空洞掘削に伴う周辺岩盤の 微視的構造の変化

石島文代 杉原弘造 吉田英一

東濃地科学センター

資料番号：99-8

Change of Microscopic Structure of Rock Mass Around
Drift Induced by Excavation

Fumiyo Ishijima Kozo Sugihara Hidekazu Yoshida
(Tono Geoscience Center)

地下空洞の掘削によって生じる周辺岩盤の微視的構造の変化を把握し、それに基づいて掘削損傷領域の範囲を推定するために、釜石鉱山の既存坑道の周辺岩盤より採取した花崗閃緑岩試料を用いて、微小き裂の観察と微小き裂数の計測を行った。その結果、坑道壁面の近傍では、発破損傷によって生じたと思われる、岩盤中の石英・長石粒子の内部や複数の鉱物粒子に交差する明瞭な微小き裂が認められた。また、微小き裂数の計測より推定される掘削損傷領域の範囲は、坑道壁面から約0.5m以内と考えられた。これは、試料採取位置付近で実施された弾性波測定等から推定された掘削損傷領域の範囲とおおむね一致した。

1. はじめに

一般に、地下に空洞を掘削することにより、その周辺岩盤の特性が変化すると考えられる。筆者らは、このように掘削によって岩盤の特性が変化する領域を、「掘削影響領域」と呼んでいる。掘削影響領域がどの程度の範囲にまで広がっているのか、またその領域ではどのような変化が生じているのかを把握することは、地下構造物の最適な設計・施工や安定性の評価を行う上で重要な要素のひとつである。このような観点から、昭和62年度より、地層科学研究の一環として掘削影響試験を実施してきている。その目的は、掘削影響領域の特性やその広がりを把握することである。その結果、坑道壁面から数m以内の範囲で、透水性・変形性等の岩盤特性や応力状態等の岩盤状態の変化が観測された¹⁾。

掘削影響領域が生じる主な要因としては、応力再配分、不飽和領域の発生および掘削による損傷の3つの現象が挙げられる。岩盤が掘削による損傷を受けると、その岩盤中に、既存の微小き裂・間隙の開口や閉塞、および新たな微小き裂の生成

等が起こり、岩盤の微視的構造が変化すると考えられる。岩盤の微視的構造とは、岩石を構成する鉱物粒子や、鉱物粒子の内部・粒界に存在する微小き裂および粒子間の間隙等の構造をいう。岩盤の微視的構造の変化は、岩盤特性変化の要因のひとつであるだけでなく、微小き裂や間隙が水みちや物質の収着場所となる可能性が高いことから、物質移行特性評価の観点からも、その変化する範囲を把握することは重要である。

ここでは、地下空洞の掘削によってその周辺岩盤の微視的構造にどのような変化が生じるのか、また微視的構造が変化する領域の範囲がどれくらいであるのかを把握するために、既存坑道の周辺岩盤に存在する微小き裂の観察と計測を行ったので、その結果について報告する。

2. 掘削影響領域の概念

筆者らは、現在までに東濃鉱山や釜石鉱山において実施された掘削影響試験の研究成果に基づき、図1に示すような坑道周辺岩盤の掘削影響領域の概念モデルを考えている。掘削影響領域は、

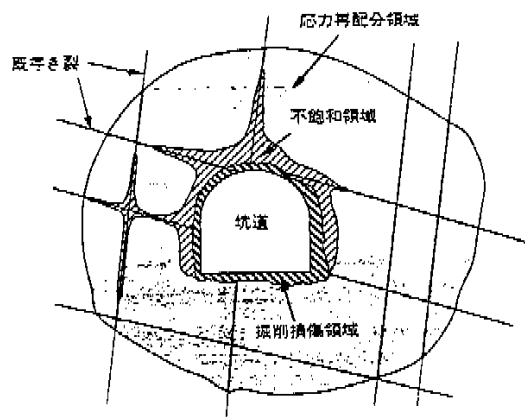


図1 掘削影響領域の概念図

応力再配分領域・不飽和領域・掘削損傷領域が複合した領域と考えられる。応力再配分領域とは、空洞掘削に伴って岩盤の応力状態が初期の状態から変化する領域のことである。不飽和領域とは、掘削した空洞内に地下水が流出し、逆に岩盤内に空気が浸入することにより、水理学的に不飽和状態となる領域のことである。また、掘削損傷領域とは、既存き裂の開口や閉塞、および新たな微小き裂の発生等、岩盤の微視的構造の変化が生じる領域のことである。本研究では、この掘削損傷領域を対象としている。

3. 対象岩盤と地質条件

現在、地層科学研究の対象とされている岩種は、堆積岩（東濃鉱山）と結晶質岩（釜石鉱山）の2種類である。本研究においても、これらの両岩種を対象とする必要があるが、強度が高く、天然の間隙が少なく、試料作成作業や微視的構造評価が容易であることから、まずは結晶質岩を今回の調査の対象にすることとした。

用いた試料は、釜石鉱山250mレベル坑道（海拔

表1 250mレベル坑道で採取された岩石コアの物性値（栗橋花崗閃緑岩）

サンプル数	単位体積重量 (g/cm^3)	有効空隙率 (%)	飽和度 (%)	弾性波速度(km/s)	
				P波 (縦波) 速度	S波 (横波) 速度
26	2.77 ± 0.01	0.46 ± 0.07	53.6 ± 4.5	5.71 ± 0.34	2.64 ± 0.19

※値は、(平均値) $\pm$ (標準偏差) で表示

約250mにある坑道)から水平方向に穿孔した試錐孔のコアである。釜石鉱山周辺の地質の詳細については、北山らの報告がある²⁾。図2に250mレベル坑道およびその周辺の地質を示す。この坑道は、昭和50年度に発破工法によって掘削された坑道で、地表からの深度が約730m、坑道の形状は $2.5 \times 3 \text{ m}$ の矩形、向きはほぼ南北方向である。この坑道の周辺の地質は、花崗閃緑岩、粘板岩、スカリン等であるが、試料を採取した試錐孔(KDK-1孔)は、栗橋花崗閃緑岩体中に位置している。250mレベル坑道で採取されたコアの物性値(栗橋花崗閃緑岩)を表1に示す。KDK-1孔は、平成5年度に250mレベル坑道の壁面に対して垂直な方向に穿孔された、長さ10m、 $\phi 76 \text{ mm}$ の試錐孔である。

4. 実施内容

坑道掘削によって周辺岩盤の微視的構造が変化した範囲を把握するために、坑道壁面から異なる距離で採取したコアより薄片試料を作成し、顕微鏡観察と微小き裂の計数を行って、坑道壁面からの距離と微小き裂数の関係を評価した。なお、今回の調査で計数の対象とした微小き裂は、長さ約0.1mm～数mm(鉱物粒子の大きさ程度)のものである。実施内容の詳細について以下に述べる。

4.1 薄片試料の作成

250mレベル坑道では、弾性波を利用した物理探査が実施された。その結果、坑道壁面近傍でき裂

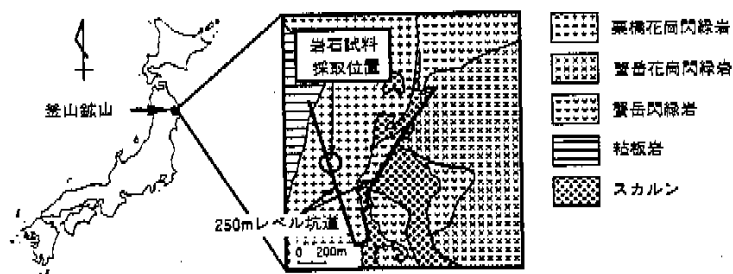


図2 釜石鉱山250mレベル坑道周辺地質図

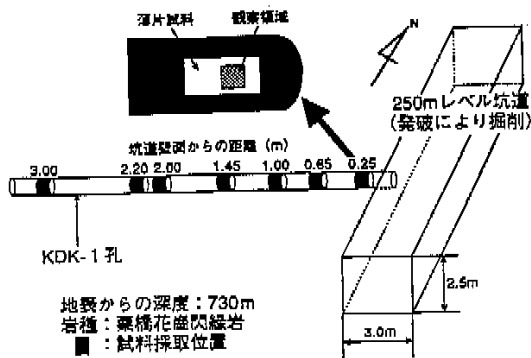


図3 試料の採取位置と薄片試料の作成方向

の開口やヘアークラックの集中に起因すると考えられる弾性波伝播速度の変化が観測され、その範囲から、掘削影響領域は坑道壁面から約1m以内と推察された³⁾。この領域と微視的構造の変化から推定される掘削損傷領域の範囲を比較するため、今回の計測では、この領域の内部、境界付近およびその外側を含む範囲を対象にすることとした。薄片試料は、採取したコアの坑道壁面から3m以内の部分（坑壁から0.25、0.65、1.00、1.45、2.00、2.20、3.00m）の7カ所で作成した（図3）。薄片試料の採取位置は、坑道壁面から2mまでは約0.5mピッチを薄片試料作成の基準とし（天然き裂やコア採取時の分離により採取不可能な部分は、その前後で作成）、さらに掘削損傷領域が坑道壁面から数十cm以内である可能性もあるため、坑道壁面近傍の部分の測点を1点追加した。ただし、薄片試料を作成した中には、岩石が変質して赤色を呈している部分（1.45、2.00m）も含まれる。また、2.20mの部分は、2.00m以深の部分の予備として作成したものである。薄片試料は、試験孔の孔軸方向（図3）に、各点でそれぞれ1枚ずつ作成した。

薄片試料を作成する際、切断・研磨等の作業により、新たな微小き裂が生じる可能性がある。このような微小き裂とコア採取時までに生じている微小き裂との識別を行うために、薄片試料の作成前に、採取したコアに蛍光剤を添加したレジンによる染色・固化の処理を施した。染色・固化処理の詳細な方法については、西山らの報告がある⁴⁾。この処理を施した薄片試料を用い、紫外線ランプを照射して微小き裂を計数した。照射により、微小き裂に浸透したレジンが蛍光を発するので、微小き裂の識別が容易になる。

4.2 薄片試料の観察方法

薄片試料の観察は、以下の手順で実施した。

(1) 顕微鏡写真の撮影

各薄片試料について、1辺1cmの任意の領域の顕微鏡写真を撮影した。撮影した領域の大きさは、薄片試料の大きさから決定した。また、写真は偏光顕微鏡および光源に紫外線ランプを用いた実体顕微鏡の2種類で撮影した。偏光顕微鏡による写真は鉱物の種類を確認するため、実体顕微鏡による写真は実際に微小き裂を計数するためである。

(2) スキャンラインの設定

撮影した顕微鏡写真の坑道壁面に垂直な方向と平行な方向の2方向に、2mm間隔で長さ10mmの直線（スキャンライン）をそれぞれ6本づつ、薄片試料一枚につき12本づつ引いた（ただし、薄片の大きさによっては、スキャンラインの長さや数が少ない場合もある）。これは、スキャンラインの長さやスキャンラインを引く場所によって、微小き裂数にばらつきがあるかどうか評価するためである。

(3) 微小き裂の計数

各スキャンラインと交差する微小き裂を目視で識別し、計数した。

(4) 微小き裂の分類

栗橋花崗閃緑岩の主要構成鉱物は、石英、長石、および黒雲母や角閃石等の有色鉱物であること、また、微小き裂の入りやすさは鉱物の種類や粒子の内部か粒界かでそれぞれ異なると考えられることから、計数した微小き裂を以下の5タイプに分類した。

- ①石英粒子内部に存在する微小き裂
- ②長石粒子内部に存在する微小き裂
- ③有色鉱物粒子内部に存在する微小き裂
- ④粒界に存在する微小き裂
- ⑤複数の鉱物粒子に交差する微小き裂

(5) 微小き裂頻度の算出

各薄片試料の鉱物含有率はそれぞれ異なっているため、各タイプの微小き裂数がそれぞれの鉱物含有率に依存することも考えられることから、計数した微小き裂数はそのまま比較できない。このため、各タイプごとに、以下の式を用いてスキャンライン1mmあたりに存在する微小き裂の数（微小き裂頻度）を求めた。

$$F = X / L$$

ここに、F：微小き裂頻度、X：各タイプの微小き裂数、L：鉱物粒子がスキャンラインと交差する部分の長さの合計である。ただし粒界および複

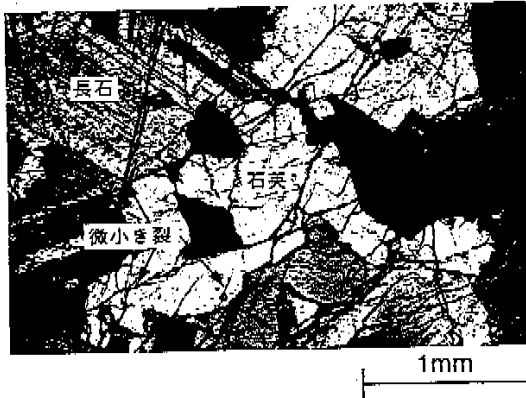


写真1 薄片試料の偏光顕微鏡写真（坑道壁面から0.25m）

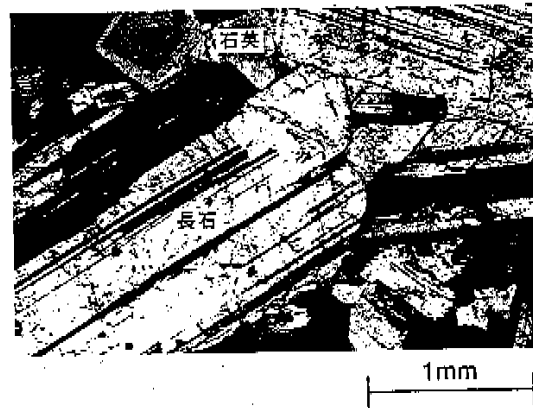


写真2 薄片試料の偏光顕微鏡写真（坑道壁面から1.00m）

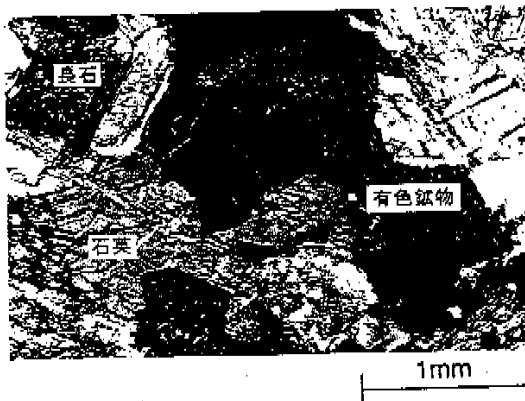


写真3 薄片試料の偏光顕微鏡写真（坑道壁面から1.45m）

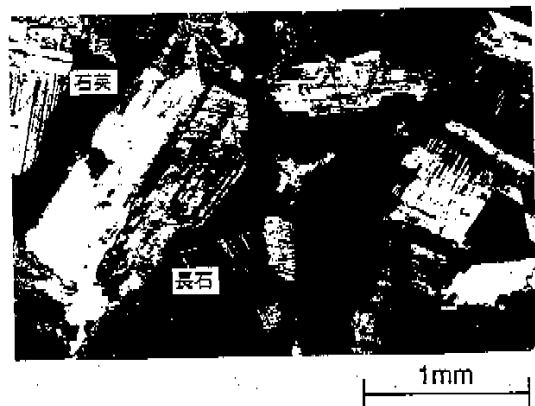


写真4 薄片試料の偏光顕微鏡写真（坑道壁面から3.00m）

数の鉱物粒子に交わるものについては、便宜上、 L = スキャンライン全長とした。

5. 結果・考察

5.1 顕微鏡写真の観察

写真1および写真2は、坑道壁面からの距離が0.25mおよび1.00mの部分における薄片試料の顕微鏡写真である。坑道壁面から0.25mの部分では、石英粒子や長石粒子の内部、および複数の粒子に交差するような明瞭な微小き裂が認められる。これに対して、坑道壁面から1.00mの部分では、そのような微小き裂は認められない。その他の薄片試料についても、写真1に認められるような微小き裂は確認できなかった。したがって、坑道壁面から0.25mの部分にのみ見られる明瞭な微小き裂は、その他の微小き裂と異なる原因により生じた

と考えられる。

5.2 坑道壁面からの距離と微小き裂数および微小き裂頻度の関係

(1) 微小き裂数

図4に、坑道壁面からの距離と微小き裂数の関係を示す。微小き裂数は、長さ10mmのスキャンライン1本当りの平均値である。各薄片試料の微小き裂の総数は、3ヶ所（0.25、1.45、3.00m）で突出していることが分かる。また、坑道壁面に垂直な方向と平行な方向とでは、微小き裂数の差はほとんど認められなかった。

(2) 微小き裂頻度

図5に坑道壁面からの距離と微小き裂頻度の関係を示す。石英粒子の内部および長石粒子の内部の微小き裂頻度は、ばらつきが大きい。特に、坑

道壁面から0.25、1.45、3.00mでは石英粒子中の微小き裂頻度が、坑道壁面から0.25、3.00mでは長石粒子中の微小き裂頻度が大きくなっている。有色鉱物粒子内部の微小き裂頻度は、石英や長石ほど顕著ではないが、坑道壁面から1.45および3.00mで若干大きくなっている。複数粒子と交差する微小き裂頻度についても、坑道壁面から0.25、1.45、3.00mの部分がその他の部分よりも若干大きくなっている。一方、粒界に存在する微小き裂については、微小き裂頻度と坑道壁面からの距離との関係はほとんど認められなかった。

(3) 微小き裂頻度が大きくなった理由

坑道掘削による新たな微小き裂の生成や既存き裂の変化の要因としては、①発破損傷、②応力再配分が挙げられる。発破損傷については、一般的に発破地点からの距離が離れるほど発破による岩盤の振動速度が減衰するといわれているため、坑壁からの距離が近いほど発破損傷を受けやすいと考えられる。一方、応力再配分については、その影響は局所的に現れ、また坑道壁面に垂直な方向と平行な方向とでは応力の大きさや方向が異なるため、生じる微小き裂の数にも坑道壁面に垂直な方向と平行な方向とで異方性があると考えられる。

坑道壁面から0.25mの部分で微小き裂頻度が大きくなったのは、写真1に見られる明瞭な微小き裂が数多く存在するためである。これらの明瞭な微小き裂には、複数の鉱物粒子に交差する微小き裂も数多く含まれる。この部分が坑道壁面に最も近いことや、微小き裂頻度の異方性や岩石の変質が認められないこと、250mレベル坑道周辺の応力状態と強度からこの付近で破壊が生じるほどの応力集中が起きたとは考えにくいこと、さらにこのような微小き裂が他の部分には認められないこと等から、これらの微小き裂は発破損傷によって生じた可能性が大きい。

坑道壁面から1.45mの部分は、岩石が赤色変質を受けていることがコア観察により確認されている。顕微鏡観察でも変質した鉱物粒子が見られた。また、特に石英粒子の内部には多くの微小き裂が認められた(写真3)。岩石の変質は、坑道掘削時に生じるものではないことから、坑道壁面から1.45mの部分で微小き裂頻度が大きくなったのは、変質作用に伴って何らかの力が生じ、それによって特に石英粒子の内部に多くの微小き裂が生じたためと考えられる。一方、コア観察からは、坑道壁面から2.00mの部分でも赤色の変質部が認められたが、微小き裂頻度は大きくならなかった。

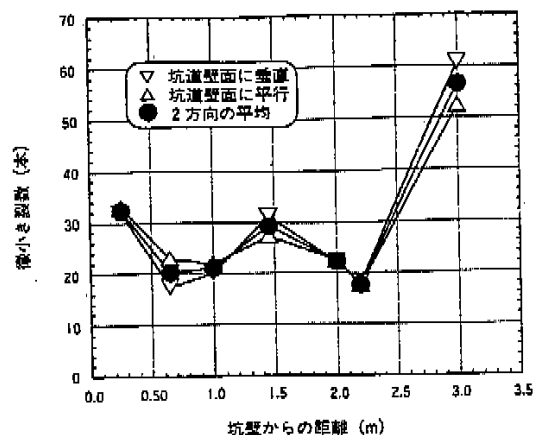


図4 坑道壁面からの距離と微小き裂数の関係(5タイプ合計)

これは、コアの一部に未変質部があり、この部分で薄片試料を作成したためと考えられる。なお、2.00mの部分の顕微鏡観察では、変質した鉱物粒子はほとんど認められなかった。

坑道壁面から3.00mの部分では、特に石英粒子や長石粒子内部に存在する細く短い微小き裂が多く認められた。この部分は、コア観察により健岩部であることが確認されており、坑壁からの距離も離れている。薄片試料の観察からも、写真1で数多く見られるような明瞭な微小き裂は認められない(写真4)。これらのことから、発破損傷の影響で微小き裂頻度が大きくなった可能性は低い。また、坑道壁面に垂直な方向と水平な方向とで微小き裂数にほとんど差がないため、応力再配分に

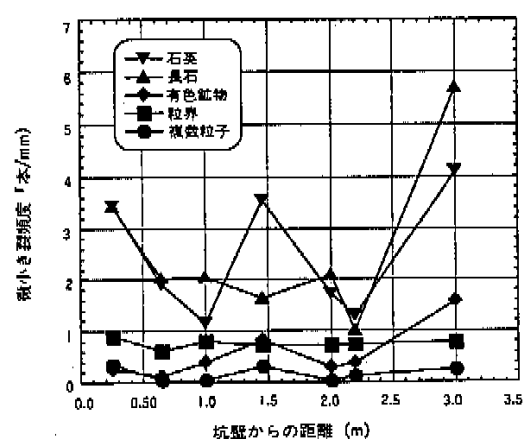


図5 坑道壁面からの距離と微小き裂頻度の関係

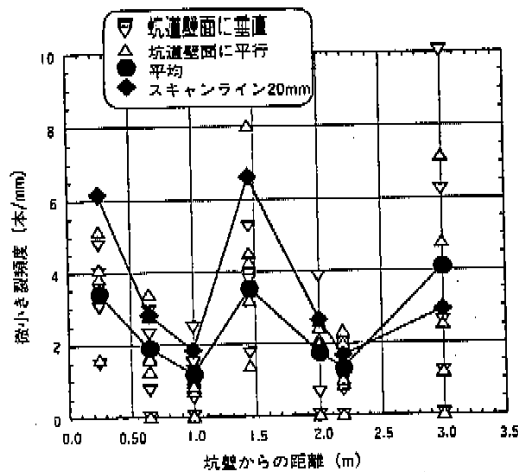


図6 坑道壁面からの距離と微小き裂頻度の関係 (石英)

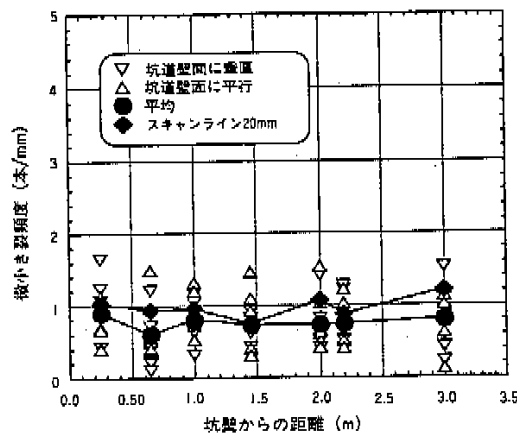


図7 坑道壁面からの距離と微小き裂頻度の関係 (粒界)

よるものとも考えにくい。したがって、微小き裂頻度が大きくなった原因は坑道掘削によるものでなく、他の原因によるものと思われる。その原因としては、坑道掘削以前に局所的な応力集中が生じていたこと等が考えられるが、今回の調査では、その原因を特定するには至らなかった。これについては今後の検討が必要である。

以上のことから、微小き裂頻度が大きくなった部分のうち、発破損傷によって微小き裂が新たに発生したと思われるのは、坑道のごく近傍の岩盤（今回の調査では坑壁から0.25mの部分）のみであり、その範囲から、掘削損傷領域は坑道壁面から約0.50m以内と推察される。

5.3 微小き裂頻度のばらつきの評価

本研究で微小き裂の計数に用いたスキャンラインを用いる手法は、岩石に存在する微小き裂を全て計数するものではなく、微小き裂の一部を抽出しているにすぎない。したがって、スキャンラインを引く位置の違いによる微小き裂頻度のばらつきや、別のスキャンラインを引いた場合のデータの再現性について評価する必要がある。

図6および図7は、石英粒子内部と粒界について、各スキャンライン（坑道壁面に垂直方向、平行方向）ごとの微小き裂頻度を示したものである。同時に、同じ薄片試料において今回の調査以前に実施した長さ20mmのスキャンラインを用いた場合の微小き裂頻度（坑道壁面に垂直方向、平行方向の平均）の計測結果も示す。

図5で各薄片試料における微小き裂頻度のばらつきが大きかった石英では、各スキャンラインごとの微小き裂頻度のばらつきも大きく、一枚の薄片試料で最大約10本/mmのばらつきが見られる。長さ10mmの全スキャンラインでの平均値と長さ20mmのスキャンラインでの結果を比較すると、微小き裂頻度の絶対値としては両者に差が認められるものの、坑壁からの距離が0.25、1.45、3.00mの3ヶ所で微小き裂頻度が大きくなる傾向については、両者で比較的一致している（図6）。粒界の場合は、長さ10mmの全スキャンラインでの平均値と長さ20mmのスキャンラインでの結果はほぼ一致し、坑道壁面からの距離による微小き裂頻度の変化はほとんど認められない（図7）。

以上の結果から、本手法により求められた微小き裂頻度にはばらつきがあるため、微小き裂頻度の値のみを指標として掘削損傷領域の範囲を正確に求めることは現段階では困難であるが、坑道壁面からの距離と微小き裂頻度との関係の傾向を把握することは十分可能であるといえる。この際、微小き裂頻度のばらつきをできるかぎり小さくするためには、コア観察により明らかに変質部と分かる部分を避けて薄片試料を作成することが望ましい。さらに、薄片試料を観察して、微小き裂の特徴やコア観察からは判断しにくい変質の有無などを確認し、その結果と微小き裂頻度を考慮することにより、掘削損傷領域の範囲を推察することは可能である。

5.4 岩盤特性値との比較

250mレベル坑道では、坑道周辺岩盤の掘削影響調査として、弾性波を利用した調査や、透水試験、孔内載荷試験等の岩盤特性調査（PS 検層、弾性波

屈折法等)を実施している。これらの結果によると、PS検層や弾性波屈折法による測定では、坑道壁面から0.50~1.00mの領域で弾性波の伝播速度が低下していることが認められており、このことから掘削損傷領域の範囲が坑道壁面から約1m以内であることが推定された³⁾。今回の微小き裂計測からは、坑道掘削によって微小き裂が生じたと考えられる範囲は約0.50m以内と推察された。これは、岩盤特性調査から得られた掘削損傷領域の範囲とおおむね一致するものといえる。また、坑道壁面からの距離と岩盤特性の変化について見てみると、KDK-1孔およびその周辺の試錐孔で実施された孔内載荷試験により、坑壁から0.50m以内の領域では、変形係数が健全部と比較して小さくなっていることが分かった⁴⁾。この領域は、坑道掘削によって微小き裂が生じたと考えられる範囲とよく一致しており、掘削による岩盤特性の変化の要因のひとつが微小き裂の発生であることを示しているといえる。

6. おわりに

釜石鉱山250mレベルの既存坑道の周辺岩盤で微小き裂の観察と計数を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 坑道壁面の近傍(今回の調査では坑道壁面から0.25m)の岩盤では、石英粒子の内部、長石粒子の内部および複数の粒子に交差してそれぞれ明瞭な微小き裂が観察された。これらの微小き裂は、発破損傷によって生じた可能性が大きい。
- (2) 薄片試料の観察と微小き裂頻度から、掘削損傷領域の範囲は坑道壁面から約0.50m以内と推察された。
- (3) 本手法により求められた微小き裂頻度にはばらつきがあるものの、薄片試料の観察結果を考慮することにより、掘削損傷領域の範囲を推察することは可能である。

また、微小き裂頻度のばらつきを小さくするには、薄片試料作成に際して、岩石の変質部を避けることが望ましい。

- (4) 今回の調査により推察された掘削損傷領域の範囲と、岩盤特性調査から得られた掘削損傷領域の範囲は、おおむね一致した。また、掘削による岩盤特性の変化の要因のひとつが微小き裂の生成であることが推察された。

今後は、新規掘削坑道の周辺岩盤において掘削前後に今回のような微小き裂調査を実施し、坑道掘削に伴う周辺岩盤の空隙構造の変化を評価する。また、今回の調査では、坑道掘削後20年以上経過した坑道の周辺岩盤を対象としたため、掘削損傷領域の範囲が坑道掘削直後から変化している可能性がある。このため、今回得られた結果と新規掘削坑道周辺での調査結果を比較して、坑道掘削後の経過時間と微小き裂の変化との関係性を評価する。さらに、今回用いたスキャンライン法では、微小き裂頻度のばらつきが認められた。このばらつきは、微小き裂を目視で識別する際の人的要素を含んでいる可能性があるため、今後、画像処理手法を導入する等の調査手法の改良を行って、微小き裂の識別基準を統一し、さらに微小き裂の長さ、幅、方向、形状なども定量的に評価する予定である。

参考文献

- 1) T.Sato, K.Sugihara, et al.: "Geoscientific studies at the Tono mine and the Kamaishi mine in Japan", Proc. ISRM Int. Congress on Rock Mechanics 1, p47-51 (1995).
- 2) 北山 真, 小川 豊: "地層科学研究 3, 釜石における原位試験", 動燃技報, 85, p150-162 (1993).
- 3) 松井裕哉, 佐藤健紀, 他: "弾性波を利用した結晶質岩における既存坑道周りの掘削影響調査", 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p336-340 (1996).
- 4) 西山 季, 楠田 啓, 他: "蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出", 資源と素材, 108, 10, p573-579 (1990).
- 5) 石井康夫, 西田 佑, 他: 最新発破技術, 森北出版, p157 (1984).
- 6) K.Sugihara, H.Matsui, et al.: "Study on Excavation Disturbance in the Kamaishi Mine, Japan", International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste (投稿中).