

岩盤不連続面のせん断に伴う表面形状の変化と 水理学的特性におけるその影響

EVOLUTION OF JOINT SURFACE TOPOGRAPHY DURING SHEAR AND ITS EFFECT ON THE HYDRAULIC PROPERTIES

上原真一*・大西有三**・西山哲***・矢野隆夫***・斉藤竜平****

Shin-ichi UEHARA, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO and Ryohei SAITOH

Hydraulic properties of a rock joint are strongly controlled by the topography of joint surface and the distribution of aperture. In this study, we presented the results of laboratory measurements of flow and mechanical properties during direct shear tests. These results showed that the flow properties might change when shear stress reaches its maximum. In order to investigate the reason of this feature, the evolution of aperture distribution during shear was estimated with the topography data of the tested joints. However the results of the estimation did not provide clear explanation for the transient of hydraulic properties from the results of the estimation. This could be because of damage of joint surface topography during shear, which was observed at sheared specimens.

Key Words: rock joint, shear-flow coupling property, laboratory direct shear test, flow measurement, joint surface roughness

1. はじめに

岩盤内地下水の挙動を把握することは、高レベル放射性廃棄物や二酸化炭素の地層処置処分問題等に関連して非常に重要な課題である。岩盤全体の水理学特性は、その内部に分布する不連続面の性質に大きく依存すると考えられる。したがって、岩盤中の亀裂分布、および単一の亀裂の水理学特性を調べることは非常に重要である。これまで、岩盤中の亀裂系の流れに関する研究が数多く行われてきた。それらの多くでは、単一不連続面間の流量はその開口幅の 3 乗に比例するという関係が仮定されている。この関係は一般に三乗則と呼ばれるが、この関係は、不連続面が平行平板によって構成されている場合は成立する。しかしながら、岩盤中の不連続面には一般に起伏が存在するため、平行平板仮定が常に当てはまるとは限らない。特に不連続面を有する岩盤の応力状態が変化した場合、その開口の構造は大きく変化し、それに伴って水理特性も影響を受けることが考えられる。したがって、天然にみられる表面形状を持った不連続面について、応力下におけるせん断過程での水理学特性を調べることは重要である。

本研究では、天然亀裂の表面形状を模した供試体について、せん断透水室内試験を行った。供試体の水理学的挙動は、せん断に伴う開口幅の変化に大きく依存していることが考えられるので、供試体の表面形状データを用いて、せん断過程における開口幅分布の変化を推定した。その結果から、せん断過程における水理挙動特性を説明するためには、応力状態の変化によって生じる破壊などによる表面形状の変化を理解することの重要性を指摘

* 正会員 理学博士 京都大学大学院 工学研究科
** 正会員 工学博士 Ph.D. 京都大学大学院 工学研究科
*** 正会員 工学博士 京都大学大学院 工学研究科
**** 学生会員 修士(工学) 京都大学大学院 工学研究科

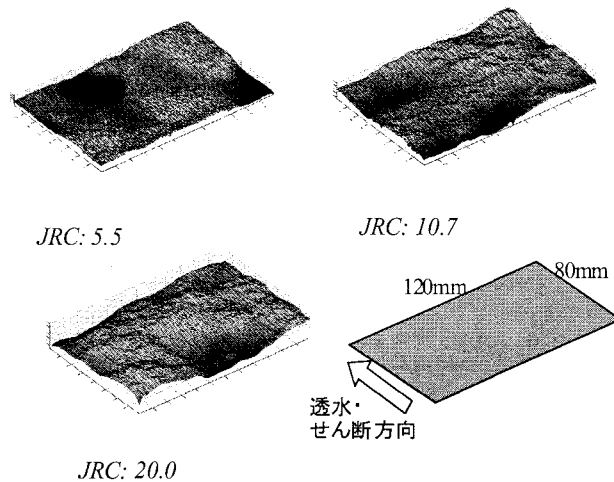


図-1 供試体の表面形状

する。

2. 不連続面のせん断変形に伴う流れの性質の変化

(1) 垂直応力一定条件下での一面せん断透水試験

従来、岩石の変形特性を調べるための室内実験として、一軸試験や三軸試験がさかに行われてきた。しかしながら、不連続面を含んだ岩石の特性を調べる際は、それらだけでは不十分である。こうした背景から、不連続面を直接せん断する、一面せん断試験が多用されている。

一面せん断試験には、その力学的境界条件から、垂直応力一定試験、鉛直方向の変位を制限する定体積試験、垂直方向の剛性一定試験などが挙げられる。これらのうち垂直応力一定試験は、他の 2

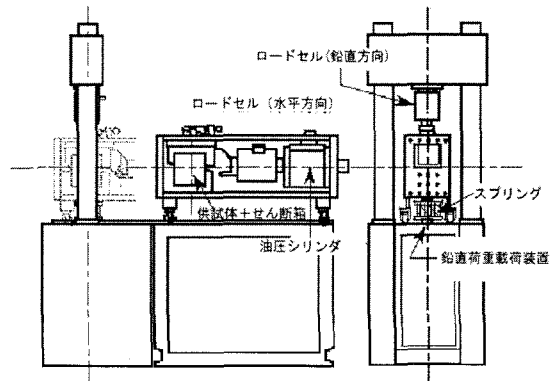


図-2 一面せん断試験機の概略

つに対しそのせん断特性は岩石の強度等の性質よりもラフネスの影響を強く受けると考えられる。本研究は不連続面表面形状がせん断挙動に及ぼす影響を見ることを目的としているので、垂直応力一定条件でせん断試験を行った。そのせん断過程において、いくつかの時点で変位を止め、せん断応力を加える方向と平行方向に水を流し、透水特性を計測した。垂直応力は 1.0MPa で一定とし、透水試験は動水勾配 12.5 で行った。

実験は、3通りのラフネスをもった供試体を用いて行った。供試体は、天然亀裂の表面形状をかたどり、モルタルにて作製した。供試体の平均一軸強度は約 43MPa である。供試体の大きさは(透水方向への奥行き) $\times$ (透水幅) $= 80\text{mm} \times 120\text{mm}$ である。せん断試験前の供試体の不連続面について、非接触型レーザー変位計(スポット径 0.1mm , 光源は $4.0\mu\text{m}$ の高分解機能を持った半導体レーザー)を用いた表面形状計測装置によって、 0.25mm 間隔の格子状の点における高低差を計測することにより、ラフネスを定量化した。本実験で用いた供試体の表面形状を図-1に示す。ここで、ラフネスは JRC であらわし、大きい JRC 値ほど表面の粗度が大きくなる。

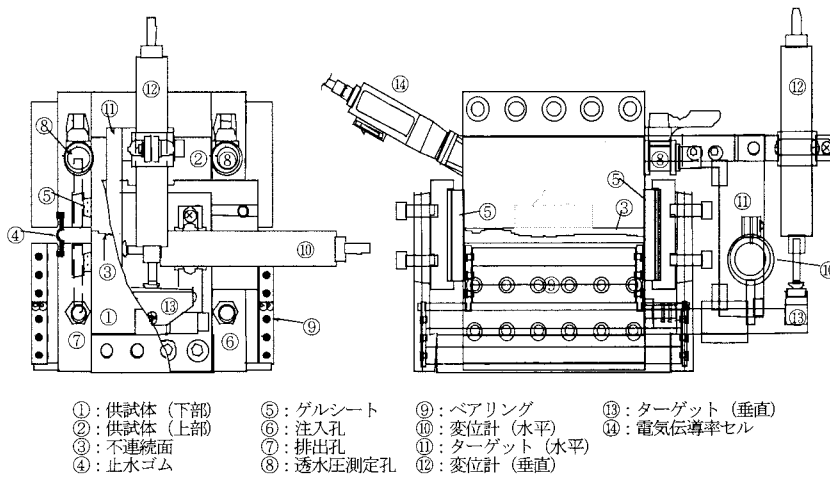


図-3 せん断箱

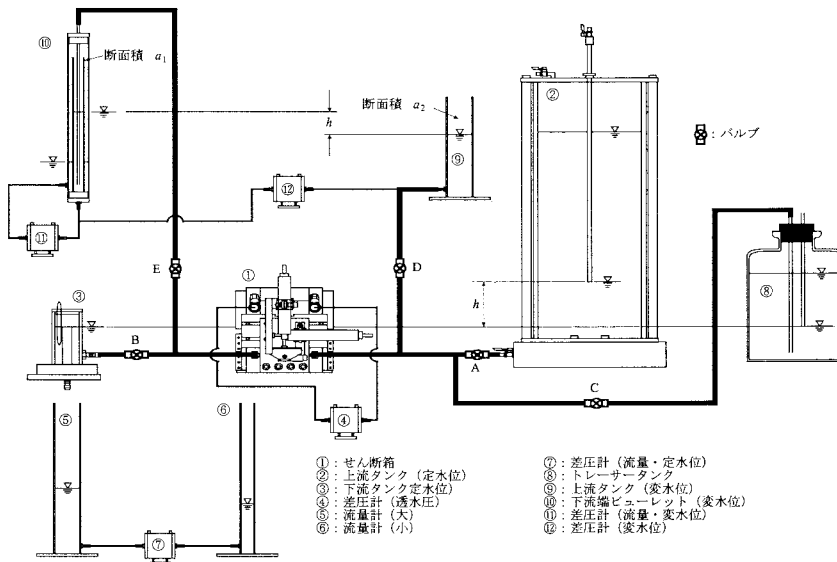


図-4 透水試験機構の概略図

本実験で用いた試験機は、一面せん断試験機に透水試験機構および間隙水止水機構を組み込んだものである²⁾。図-2にせん断装置部の概略を示す。供試体はカセット式のせん断箱(図-3)にセットされ、せん断装置に装着する。図-4にも示されているように、本実験装置の透水試験システムでは定水位および変水位透水試験を行うことができる。定水位透水試験においては上流タンク(図-4中②)と下流タンク(図-4中③)の水頭差を一定に保ち、また変水位透水試験においては差圧計(図-4中⑫)によって上流タンク(図-4中⑨)と下流端ビューレット(図-4中⑩)の圧力差を計測することで不連続面に作用する水頭差を算出している。本稿において示す結果はすべて変水位透水試験にて得られたものである。

せん断過程におけるせん断応力と力学的開口幅の測定結果を図-5に示す。ここで力学的開口幅について簡単に説明する。この値は、せん断前の力学的開口幅(ここでは初期開口幅と呼ぶ)に垂直変位量の測定値を加えたも

のである²⁾。初期開口幅は、せん断前に亀裂表面形状を壊さない程度に垂直方向の荷重の載荷・除荷を繰り返し、その際の垂直応力と垂直変位の関係から Barton³⁾の方法にしたがって求めた。このように求めた力学的開口幅は、亀裂がそれ以上閉塞しない状態からの垂直変位量である。したがって、実際の開口幅分布の平均値とは必ずしも一致しない。

せん断変位に伴うせん断応力の変化は、異なる供試体において同じような傾向を示す。せん断応力は **0.2, 3mm** の変位でピークに達したあと、せん断が進むにしたがって緩やかに減少する。せん断応力のピークの値およびピークに達したあとの残留応力の値は JRC 値が大きいものほど大きくなる。また、ピークから残留応力への変化量も、JRC 値が大きいものほど大きい値を示す傾向が見られる。力学的開口幅は、せん断変位が進むにしたがってどの供試体においても増加している。せん断応力がピークに達するせん断変位のあたりまでは、せん断変位に対する力学的開口幅の増加率は JRC が大きいほど大きくなる傾向にある。この結果は、ラフネスが大きいものほど表面起伏の傾斜角が全体的に大きい事を反映していると考えられる。

図-6a にせん断変位に伴う透水量係数の測定結果を示す。ここで透水量係数について少し説明する。一般に動水勾配によって生じる流れの流量を示すには透水係数を用いる。これは流れに垂直な面について単位面積あたりの流量に比例するパラメータである。しかしながら、今考えているのは不連続面に集中した流れであるので、“単位面積あたり”で考えるのは不適当である。そこで、不連続面の単位幅あたりの流量を考える。これをここでは透水量係数と定義する。つまり透水量係数とは、単位時間、単位動水勾配、そして不連続面の単位幅あたりを流れる流量をあらわす。

図-6a によると、透水量係数はせん断に伴って上昇する傾向にあり、その変化率はラフネスの大きいものほど大きい。この傾向は、力学的開口幅の変化に対応していると考えられる。また、せん断変位に対する透水量係数の増加量は、せん断応力が最大になる付近から、大きくなる傾向があるように見られる。前述したように、一般的に不連続面間の流れを記述する際、いわゆる三乗則というものが仮定される事が多い。ここで、力学的開口幅と透水量係数の関係を見てみる(図-6b)。同じ供試体については、力学的開口幅が大きいほど透水量係数が大きくなるという傾向が見られる。また、同じ力学的開口幅でみると、JRC が大きいほど透水量係数が小さくなっている。図-6b のグラフは対数軸を取っているのも、もし上述の三乗則が成り立つとすれば、透水量係数と力学的開口幅の関係はこのグラフ上で傾き 3 の直線上に乗ることが期待される。実際、力学的開口幅が **0.1mm** 以上の領域では、このような関係が見られる。しかしながら、力学的開口幅がある値 (10^{-2}mm のオーダー) よりも低い部分では、この関係が必ずしも成り立っていないように見える。同じ表面形状の供試体で、せん断変形を生じさせることなく垂直応力を変化させた場合の関係も合わせてみると(塗りつぶした印)、その傾向は顕著である。すなわち、力学的開口幅がある値よりも低い領域では、両者の関係が三乗則のそれよりも緩やかになっている。そのような変化(あるいは関係の折れ曲がり)が見られる力学的開口幅の値は表面のラフネスの度合いによって異なる。また、このような力学的開口幅と透水量係数の関係が変化する点は、最大せん断応力の付近にある。ここで観察された水理学的特性の変遷が実際におきているものであるとすれば、せん断過程のこの領域で、開口幅分布になんらかの変化がおきていることが予想される。例えば、せん断初期の段階ではその開口幅の分布は複雑であると思われ、流れの様子は平行平板間のものとは異なり、水は複雑な流路を選択的に流れている可能性が考えられる

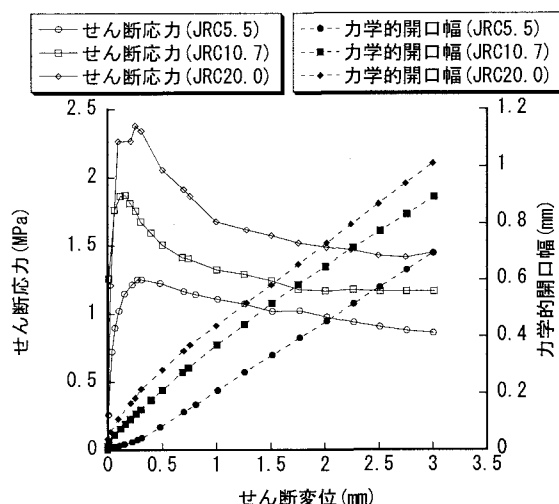
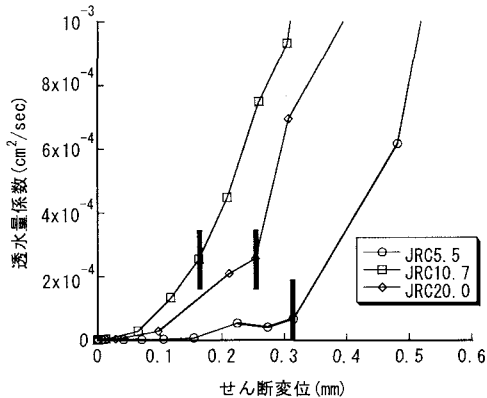


図-5 セン断変位とせん断応力、力学的開口幅の関係

(a)



：ピークせん断応力

(b)

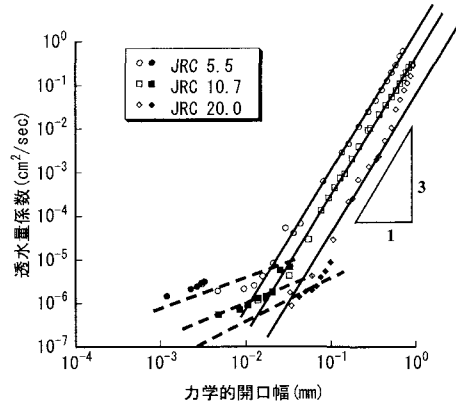


図-6 せん断変位及び力学的開口幅と透水量係数の関係。(b)の黒塗りの印は垂直荷重のみを載荷したときの結果を示す。

(チャネリング現象)^{1),4)}。そこで、この実験に用いられた供試体の表面形状から、せん断過程の開口幅分布を推定した。その具体的な方法は以下に述べる。

(2) 不連続面表面形状を用いてのせん断過程における開口幅分布の推定

レーザー変位式表面形状計測装置によってせん断試験前の供試体の表面形状を測定し、その起伏データからせん断過程における開口幅分布を推定した。このような開口幅分布の推定においては、せん断に伴って供試体上部下部ブロック間の距離をどのように変化させていくかということが重要になってくる。例えば過去の研究では、せん断の各段階で表面形状の接触変形を考え、その変形に必要な力の値が垂直応力に適合するように距離を設定しているものがある⁵⁾。本研究では、距離を決定する上での拘束条件として、力学的開口幅の測定値を用いる。まず、上下ブロック表面形状間の鉛直方向の平均距離が初期開口幅の推定値に等しくなるように、せん断初期における上下ブロック間の位置を決める。その後のせん断過程では、せん断方向・鉛直方向の移動量の測定値にあわせてそれらの相対位置を変えていく。この際、表面形状の変形や破壊は考えない。もし表面形状の接触や重なり合いが生じた場合、その領域における開口幅は0、すなわち完全に接していると考える。

このようにして推定した、上に述べた水理学的特性の遷移領域付近における開口幅分布変化の例を図-7に示す。また、開口幅分布を定量的に把握する試みとして、それぞれの供試体について接触率と変動係数も計算した(図-8)。ここで接触率とは、せん断表面全面積に対する接触面(開口幅が0の領域)の面積の比である。また変動係数とは、開口幅分布の標準偏差と平均開口幅の比である。ここでは上下部両方のブロックの表面形状を別々に測定し、解析に用いている。従って、上下ブロック表面形状の水平方向の初期位置が若干(1mm以下)ずれている可能性がある。

図-7をみると、せん断初期の開口幅分布はかなり不均一であり、平行平板仮定から大きく外れていることが推定される。また、開口幅分布の初期状態からの変化は、力学的開口幅の増加にしたがって大きくなることが見受けられる。しかしながら、図-6bで見られる水理学的特性が大きく変わる領域において、流れの様子の変化が予測されるようなはっきりとした開口幅分布の変化の様子は観察されない。図-8を見ると、確かに力学的開口幅の増加に伴って接触率、変動係数は共に減少するという傾向が見られる。しかしながら、水理特性の遷移領域付近で劇的な変化が起こっているという様子はない。むしろ接触率の値の変化は、より開口幅の大きな領域で急激で

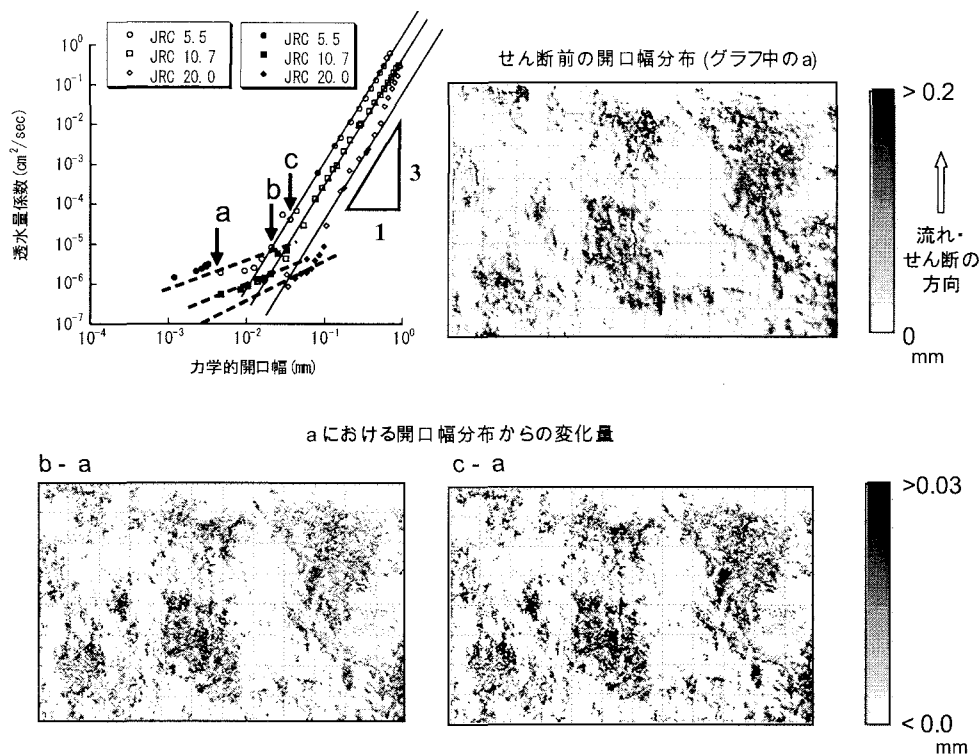


図-7 実験供試体の表面形状から推定した、せん断試験における初期開口幅分布及びそれからの変化（JRC 5.5）。白い部分は接触している部分（開口幅は0）。

ある。

推定された開口幅分布の変化が実際の水理特性にどのような影響を与えるかということを厳密に評価するためには、数値シミュレーション等を行う必要がある。しかしながら、もう一度図-7を見てみると、ここに示した開口幅分布で見られる空隙（白色でない領域）の、流れの方向への連結性がかなり悪いことが指摘される。この傾向は、透水実験の結果で“三乗則”の領域に入っているものについてもいえる。したがって、この開口幅分布データを使って流れのシミュレーションをしたとき、果たして透水量測定値を説明するのに十分な流れが再現できるかきわめて疑問である。このことから、ここで推定した開口幅分布は実際のもとは異なる可能性がある。その原因のひとつとして、せん断過程における表面形状の破壊が生じている可能性が考えられる。実験結果が示唆する水理学的性質の変化とせん断強度のピークの対応性は、接触面における表面形状の破壊という現象を両者が反映しているために見られたのかもしれない。以下、せん断後の供試体の表面形状を観察し、せん断過程における表面形状の破壊について考察する。

3. せん断による表面形状の損失の観察

せん断の際に、実際に表面形状の破壊や削れが起きているのかどうかを調べるために、せん断過程での供試体の表面形状変化を観察した。同じ表面形状を持つ3つのモルタル供試体について、垂直応力一定条件下でせん断試験をおこなった。それぞれ異なる変位までせん断を行い、実験後の供試体の表面形状をせん断前のものと比較した。ただし、ここでの供試体の表面形状は、前の章で示したのものとは異なり、その JRC 値は 11.3 である。供試体は先ほどの実験で用いたものと同じ成分のモルタルからつくり、また垂直応力も先ほどと同様 1MPa であ

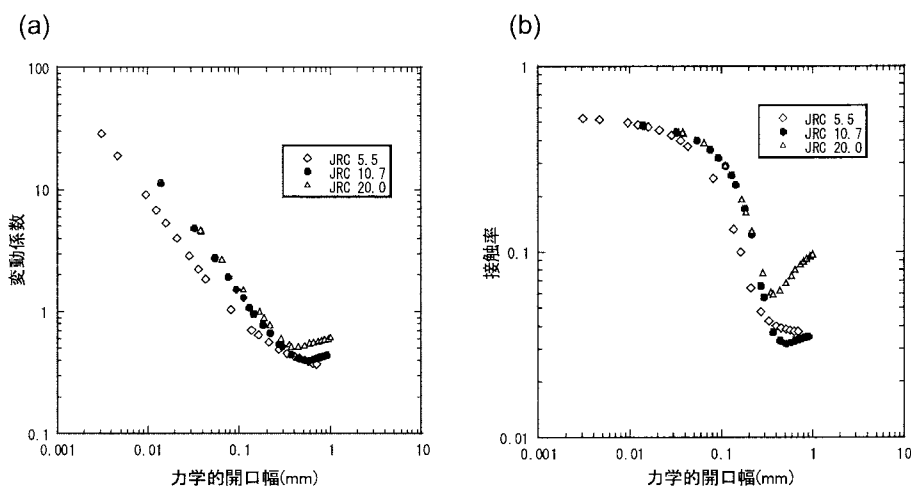


図-8 供試体表面形状から推定した開口幅分布の (a)変動係数 および (b)接触率

る。ただし実験は乾燥条件で行った。図-9a にせん断応力の測定値を示す。3 種類の実験はそれぞれ、最大せん断応力あたりの変位、2mm および 12mm でせん断を止めた。それぞれの実験で似たようなせん断応力の変化を示している。実験前の試料の表面形状、および各々の実験後の表面形状を、レーザー変位式計測装置を用いて測定した。

図-9b, c, d に、せん断方向に平行な測線について、それぞれの表面形状をせん断前のものと合わせて示す。図-9d、すなわちせん断変位が 12mm に達したものの結果を見ると、明らかにせん断によって欠けたと思われる形状が観察された。そのほかにも、より細かいスケールでせん断前の形状との不一致が見受けられる。この結果から、前出の一面せん断透水試験においても表面形状の破壊が起こっている可能性が強く示唆される。表面形状測定における供試体の位置決め精度や供試体間での表面形状のばらつきなどの問題から、上記の方法で同定可能な表面形状の変化量には限界があるが、前の章で議論した、力学的開口幅の小さい状況での不連続面間の流れには、0.1mm から 0.01mm オーダーの微小な開口幅の変化が影響している可能性がある。したがって、この方法でピーク付近での流れに影響を与える開口幅変化を捉えようとする際は、なんらかの工夫が必要であると言える。

4. おわりに

岩盤中の不連続面のせん断変形に伴う力学的および水理学的挙動を理解するうえで、その表面形状や開口幅の状態を解析することは必要不可欠である。本研究では、まず一面せん断透水試験の結果を紹介し、そこで示される水理学的特性を説明すべく、せん断に伴う開口幅の分布について表面形状のデータから調べた。その結果、単純に表面形状をかみ合わせて考えただけでは、現実的な流れの様子を説明できそうにないことがわかった。考慮すべき要因のひとつとして、表面形状のせん断時の破壊による変遷に注目し、これについて別の室内実験結果をもとに議論した。今後、より定量的な解析をおこなうためには、せん断透水試験でおこなったものと同一の供試体で同じような実験を行うべきである。しかしながら、本研究でも指摘したように、せん断初期の水理学的特性に影響を与えると考えられる微小な開口幅の変化を表面形状観察から捉えるためには、測定方法等で工夫が必要であると考えられる。これまで、せん断過程における表面形状の破壊を考慮に入れて、その力学的挙動を説明しようとしたモデルがいくつか提案されている^{9),10)}。このようなモデルによるせん断に伴う開口幅の変遷の推定も取り入れて解析を進めていくのもひとつの方法である。また、推定された開口幅をもとに流れの解析を行い、室内実

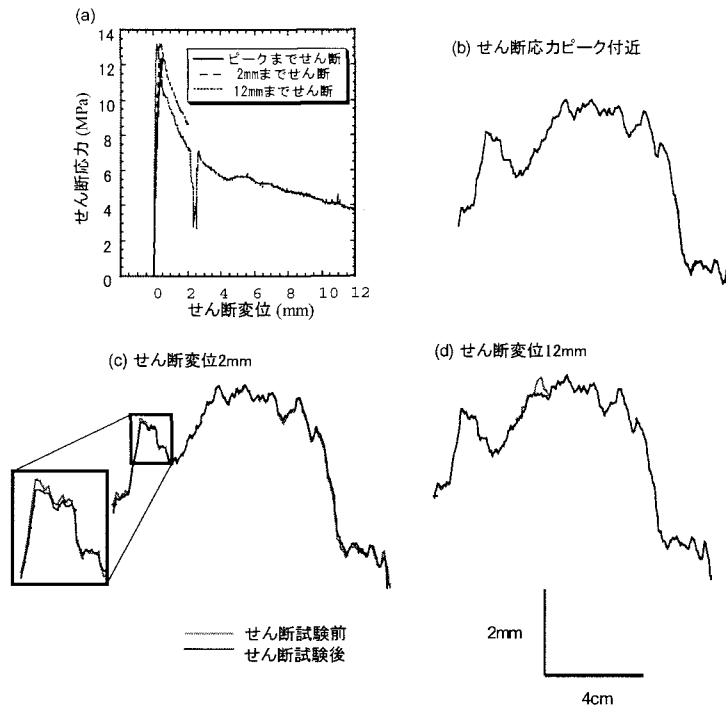


図-9 セン断過程各段階における、せん断に平行な方向の測線における表面形状分布

験結果と比較することもおこなっていく必要がある。

参考文献

- 1) Brown, S.R. : Fluid Flow Through Rock Joints: The Effect of Surface Roughness, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. B2, pp. 1337 - 1347, 1987
- 2) Chiba, S., Ohnishi, Y., Ohtsu, H., Nishiyama, S. : The Development of New Apparatus Considering the Effect of Shear Deformation on Hydraulic Characteristics of a Single Joint, Proceedings of the first Kyoto International Symposium on Underground Environment, Environmental Rock Engineering, edited by Saito & Muratam A. A. BALKEMA, 2003
- 3) Barton, N., Bandis, S., Bakhtar, K. : Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joing, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 3, pp. 121 - 140, 1985
- 4) 今村聡：単一亀裂の変形・浸透に関する考察、土と基礎、Vol. 37, No.6, pp.29 - 28, 1989
- 5) 三谷泰浩、江崎哲郎、田中誠一郎、和田圭仙：新しいせん断一透水同時実験装置の開発と GIS による不連続面内流れのシミュレーションに関する研究、第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 15 - 21, 2000
- 6) 大西有三、大津宏康、矢野隆夫、加藤雅弘、高田裕輔：離散化ラフネスデータを用いた岩盤不連続面のせん断挙動の推定法に関する研究、土木学会論文集、No. 645, III-50, pp.255 - 266, 2000
- 7) 岸田潔、津野究：摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化、土木学会論文集、No. 680, III-55, pp.245 - 261, 2001