■■■ 論文

室内水圧破碎実験により造成されたき裂の幅の推定*

山下 貢¹ 山口 勉² 厨川 道雄³

An Estimation of Fracture Width of an Artificial Fracture made by Laboratory Hydraulic Fracturing Test

by Mitsugu YAMASHITA¹, Tsutomu YAMAGUCHI² and Michio KURIYAGAWA³

1. Tsukuba University, Graduate School

2. National Institute of Resources and Environment, Onogawa, Tsukuba 305

An artificial fracture made by hydraulic fracturing plays an important role as a heat exchanger in Hot Dry Rock geothermal system. An estimation on distribution of fracture width before hydraulic fracturing is necessary in designing HDR system. A laboratory test was carried out to estimate the width of an artificial fracture. A cubic rock specimen, Inada granite, was set into a rigid steel frame, and hydraulic pressure was applied to make a fracture. After hydraulic fracturing, water was injected. A flow rate of injected water was increased step by step. An injection pressure, flow rate and displacements of free surfaces were measured during these injection tests. Unlikely to similar experiments done before, the displacements of the free surfaces which was parallel to fracture were measured. Based on the experiment result, the distribution of fracture width and pressure along the fracture was estimated by using combine analysis of analytical and Finite Element Method. By the analysis proposed in this paper, the distribution of fracture width and pressure, which had been hard to be measured, could be estimated successfully.

KEY WORDS : Hot Dry Rock, Hydraulic Fracturing, Fracture, Fracture Width, Cubic Law

1. はじめに

地下深部の高温の岩盤から熱エネルギーを抽出する方法の一つとして、高温岩体発電システムの研究開発が進められている。高温岩体発電システムでは、水圧破碎によって岩盤内に作られたき裂が熱交換面として重要な役割を果たす。しかしながら、実際に地下深部で作られたき裂の開口幅（厚み）がどの程度の大きさであるかは必ずしも明確ではない。水圧破碎を行い、引き続き水を圧入して人工き裂を進展させる場合、き裂は坑井周辺では大きく開口し、き裂先端での開口幅は小さくなることが予想される。最も単純な場合としてき裂が円盤状であると仮定し、水圧破碎の際の総注水量とき裂の容積とが等しいとしても、き裂幅の分布を知ることなしに、人工き裂の進展距離を求めることはできない。高温岩体発電システムでは、人工き裂の進展範囲を必要以上に大きくするとき裂周辺の岩盤への漏水が大きくなるため、き裂の進展範囲を適当な大きさにとどめておくことが必要である。したがって、水圧破碎を行う前に、開口幅がどの程度の大きさでどのような分布をするかを予測することが重要な課題となる。また、高温岩体発電システムでは、抽熱の際に注入井から人工き裂へ水を圧

入するため、これに必要な注水動力が大きいことは望ましくない。注水動力は注水流量と注水圧より定まるが、注水圧を求めるためにもき裂幅やき裂内の水圧の分布を知ることが重要である。

これまでにき裂の透水性に関しては多くの実験室実験が行われてきた。これらの実験は、円柱形で中心孔（円柱中心軸に沿って掘削された小孔）を持つ岩石試験片にあらかじめ軸方向と直交する単一のき裂を作成し、軸方向に荷重を加えた状態で、き裂に水を流し、流量とき裂の開きや軸荷重との関連からき裂の垂直剛性やき裂の浸透率の荷重（応力）依存性を求めるものである。水は通常、中心孔から円柱の外周部に向かって流すが、小島ら¹⁾は逆に外周部から中心部に向かって流している。このような実験室実験として、Ravenら²⁾により岩石試験片の寸法効果を調べた例、Walsh³⁾により有効間隙圧の影響を調べた例、小林ら⁴⁾によりサイクリック負荷の影響を調べた例等が挙げられる。理論的研究については、Whitherspoonら⁵⁾やTsangら⁶⁾、Gandhi⁷⁾によりき裂の凹凸といわゆる三乗則との関連を調べた例がある。また松木ら⁸⁾はき裂内の間隙分布に着目してき裂面形状や初期間隙分布を測定し、周波数特性やフラクタル性について検討を行っている。これらの実験室実験では、いずれも円柱試験片の上・下端面を載荷装置のプラテンで拘束しており、結果として、き裂の開口量はき裂面の凹凸により局所的には分布するものの、全体としてはある平均値を持つことを仮定して解析が行われている。すなわち、き裂は円柱試験片の中心孔から外周部まで、平均としてある一定の幅を持つこととしている。

本報で述べる実験は、従来の実験室実験とは異なり、立方体試

* 1996年5月7日受付 5月29日受理 資源・素材学会平成8年度春季大会（平成8年3月30日）において一部発表

1. 学生会員 筑波大学大学院 工学研究科博士課程

2. 正会員 工博 資源環境技術総合研究所地殻工学部岩盤工学研究室長

3. 正会員 工博 資源環境技術総合研究所地殻工学部長

〔著者連絡先〕 FAX 0298-58-8508（資源研・地殻工学部）

キーワード：高温岩体発電システム、水圧破碎、き裂、き裂開口幅、三乗則

試験片内にき裂面を作成し、このき裂面に平行な試験片表面を自由面とし、ある一定の流量をき裂に流した際に観測される試験片表面の変位から、き裂幅を求めることを試みた。また、水圧破碎孔とは別に、き裂に向かって小孔を掘削し、き裂内の水圧を直接測定することを試みた。これらの実験結果を基に、軸対称有限要素法を用いて、試験片の表面変位から、き裂の開口幅を推定した結果について述べる。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた岩石供試体は稲田花こう岩である。稲田花こう岩は茨城県笠間市稲田産で、主成分鉱物は石英、カリ長石、斜長石および黒雲母で、その粒径は3~5 mmの粗粒花こう岩である。弱面（リフト面）に垂直に載荷した場合の一軸圧縮強度は約20 MPa、一軸引張強度は約4.2 MPaである⁹⁾。

試験装置の概略図を図1に示す。実験に用いた稲田花こう岩は一片が20 cmの立方体の形状をしており、水圧破碎のためにリフト面に対して直交して直径1 cmの小孔を削孔した。この供試体を図1に示すような鋼鉄製の剛性枠の中に入れる。その後、供試体と剛性枠との隙間（上下面および左右の面）に、合計で4枚のフラットジャッキを挿入し、フラットジャッキに油圧で8 MPaの応力を加えた。一般にこの装置を用いて水圧破碎を行うと、き裂が水圧破碎孔に沿って発生する場合と、水圧破碎孔に垂直に発生する場合とがある。今回のように、水圧破碎孔をリフト面に直交して削孔し、フラットジャッキにより8 MPaの側圧を加えると、極めて少数の例を除いて、き裂は水圧破碎孔に対して直交して、すなわち、自由面に平行に発生する。

図2では、計測装置の概略図を示した。岩石表面変位の計測は、分解能0.25 μm の空気圧駆動型（センサ保持圧約0.05 MPa）のLVDT式変位計を用いた。これらの変位計は図2で示す供試体の手前側とその裏側（以下では便宜的に表面と裏面と呼ぶ）で、水圧破碎孔の中心から左右にそれぞれ2, 5, 8 cmの位置に合計

図1 実験装置の概略図

図2 水圧破碎実験計測装置概略図

図3 水圧破碎実験に用いたパッカーの形状

で12カ所設置した。ここでは図2に示すように表面のLVDTを左から順にLVDT 1~6、裏面についても左から順にLVDT 7~12と呼ぶことにする。LVDTにより計測した供試体表面の変位量は、アンプ、フィルタを介してデータロガーに記録し、圧力・流量はそれぞれ圧力変換器（最大使用圧力50 MPa）、流量計からアンプを介して変位量の計測と同一のデータロガーに取り込んだ。また、圧力および流量に関しては、データロガーへの記録と同時に、時間送り型のペンレコーダによっても記録した。なお、データロガーのサンプリング間隔は、水圧破碎時には10 ms間隔、それに続く注水実験では50 msとした。

実験の手順は以下の通りである。まず水圧破碎によりき裂を作成する。送水するためのポンプは内容積が約50 cm^3 の復動式ブースターポンプを使用し、水圧破碎時の流量は約10 cm^3/min とした。この水圧破碎では、き裂が発生した直後に送水を停止する。その後、作成したき裂に対して流量を4段階程度に変化させながら注水を行い、そのときの表面変位・圧力・流量の計測を行った。また、2つの供試体については、フラットジャッキによる拘束の影響を調べるために、一旦側圧を開放してから再び側圧を載荷し、流量を同じく4段階に変化させて表面変位等の計測を行った。その後、4つの供試体については水圧破碎孔の中心から約4 cmおよび8 cm離れた位置に新規に2カ所の小孔（直径1 cm）を掘削し、新規に削孔した孔内のき裂の位置にパッカーを設置した後注水して、その箇所における水圧の測定を行った。さらに、4個の供試体については、実験の最後に赤インクを混入した水を注入し、実験後に供試体をき裂面に沿って二つ割りにし、実際に水が流れた面の確認を行った。

水圧破碎に使用したパッカーは図3に示すように加圧区間の前後を2個ずつのゴムによってシールするもので、パッカー両端のナットを締め付けることによってゴムを膨張させ孔壁に固定する。パッカーの加圧区間はそれぞれが約4 cmである。また水圧分布を計測する場合にはこのパッカーを圧力計測用として使用した。この場合、パッカーをき裂位置に設置して加圧区間から流れ込んでくる水をパッカーの端部に取り付けられた圧力変換器（最大使用圧力5 MPa）で計測した。

3. 実験結果

本実験で使用した花こう岩供試体の一覧表を表1に示す。4つの供試体で実験終了後に、赤インクによってき裂面を着色し、き裂面から供試体を二つ割りにすることによって実際に水が流れた面の確認を行った。その結果、いずれの供試体でもき裂面は図4に示すように4辺のうちの1辺に色の付いていない部分が存在した。この着色されていない部分で岩石供試体は、完全には分離していないと考えられ、図4の(a)に示すように、その1辺に対してLVDTによる測線が平行な場合には観測される供試体表面変位が左右ほぼ対称になることが考えられる。また、図4の(b)に示すように、着色されていない部分が、LVDTによる測線に直交する場合には、観測される表面変位が、左右非対称となると思われる。この考えに基づき、表1では観測された岩盤表面変位が

表 1 岩石供試体一覧

供試体名	表面変位	実験内容	
		圧力分布計測	分割
93Y17	非対称		○
93Y19	非対称	○	
93Y20	非対称	○	
94Y02	非対称		
94Y03	非対称		
94Y04	対 称		○
94Y05	対 称		
94Y06	対 称		
94Y07	対 称		
94Y08	対 称		
94Y09	非対称		
94Y10	非対称	○	
94Y13	非対称		○
94Y15	対 称		○
94Y19	対 称	○

図 4 インクで着色されたき裂面の状況と LVDT 設置位置

左右対称であるものと非対称であるものを区別した。以下では、観測された岩盤表面変位が対称であるものの代表例として供試体 94Y19、非対称であるものの代表例として供試体 94Y02 により得られた実験結果について述べる。

3・1 岩盤表面変位が対称である実験結果（供試体 94Y19）

水圧破碎時に観測された圧力と供試体表面変位のうち、左側 (LVDT 1~3) の変位量の変化を図 5 に示す。ここで示した変位量は、図 2 で示した LVDT により観測された変位のうち、き裂を挟んで向かい合う位置の LVDT (例えば、1 と 7) の変位をたし合わせたものである。図 5 から分かるようにブレイクダウンの瞬間から送水を停止するまでの約 3 s の間に圧力は 24.4 MPa から約 2 MPa 程度まで急激に減少している。また表面変位はブレイクダウン直後から観測され始め、ボーリング孔に近づくに従い大きくなっている。この間の表面変位を詳細に検討してみると、その設置された位置によって変位の立ち上がり開始時刻には差がな

図 5 水圧破碎時に観測された圧力と岩石供試体表面変位の経時変化

かった。このことからブレイクダウンの瞬間に水圧破碎き裂は、供試体の端部にまで進展しているものと考えられる。当初、本実験によりき裂が順次進展していく課程を観測したいという目論見があったが、進展過程を観測するためには原位置等で対象とする供試体 (岩盤) を大きくする必要があることが分かった。図 5 から、送水を停止して圧力を完全に開放しても変位は残留していることが分かる。残留変位量もまた、水圧破碎孔に近いほど大きくなっている。

その後、水圧破碎で作成したき裂に対して、注水流量を 4 段階に変化させて注水実験を行い、その時の表面変位、注水圧力の変化を計測した。図 6 にこの注水実験時の圧力と流量の経時変化を、また図 7 に表面変位のうち左側 (LVDT 1~3) の変位量の結果を、図 8 に各流量で表面変位がほぼ安定した時の表面変位量を示す。図 6 において計測期間中に圧力および変位の低下があるのは復動式プースターポンプの切り替わりが原因である。また時刻の原点で変位量が 0 でないのは、水圧破碎を行う直前の LVDT 設

図 6 注水実験時の圧力と流量の経時変化

図 7 注水実験時に観測された岩石供試体表面変位の経時変化

図 8 定常状態における岩石供試体の表面変位と流量との関係
 r は注水孔中心軸からの距離である。

図9 定常状態における岩石供試体の表面変位と流量との関係
rは注水孔中心軸からの距離である。

置位置を変位0としたためである。したがって、図6において時刻0sにおける変位量の値は水圧破碎後の残留変位量を表していることになる。図8から分かるように圧力と表面変位は流量の増加とともにそれぞれ増加している。また、図8では水圧破碎孔を挟んだ左右の変位量の対称性が顕著に示されている。注水期間中の変位量はすべて、最もボーリング孔に近い変位量が最も大きい。これはき裂内の圧力が分布していることやフラットジャッキにより供試体側面が拘束されていることが原因であろう。

次にフラットジャッキによる側面拘束の影響を調べるために、一旦フラットジャッキの圧力を開放し、再度8 MPaの拘束圧を加えてから、前の実験と同じく流量を4段階に変化させた実験を行った。この結果を図9に示した。図中の表面変位は、フラットジャッキによる拘束圧を開放した時点で供試体自体が動いたために、変位量の原点を0に再設定した。すなわち、図9で示した変位量は水圧破碎開始前からの絶対的な変位量ではなく、この注水試験の直前の変位量を0とした相対的な変位量である。したがって、それまでの実験による残留変位量は含まれていない。図9から明らかなように、水圧破碎孔に近いほど変位量が大きくなるという全体的な傾向は以前の実験と大差がない。しかしながら、側圧を開放する前の実験と比較すると、同一の流量に対して注水圧力が約2/3程度にまで低下していた。そのため流量をある値から次の段階へと増加させた際の変位の相対変化量も、側圧開放前の注水実験と比較して小さくなっている。これは、水圧破碎によるき裂が供試体の端面まで進展し、その後フラットジャッキと供試体間の摩擦力により拘束を受けていた端面の変位が、側圧を除去したときに開放され、微小ではあるが程度開いた状態で再び拘束されたためであると思われる。

さらに水圧破碎孔からの注水時のき裂内の水圧を直接計測するために、LVDTの測線上で、水圧破碎孔から4 cm、8 cmの位置に注水孔と平行に直径1 cmの小孔を掘削し、き裂を挟み込む位置にパッカーを設置して圧力を計測した。き裂の位置に関しては、供試体の端面でき裂が確認できたことと、一連の実験でき裂がリフト面に平行に入っていたことから容易に識別することが可能であった。また、この注水試験では圧力計測用の小孔を削孔したために、合計で12点のLVDTを設置することが困難になったため、水圧破碎孔から1.5 cmおよび9 cm離れた位置に合計で10点のLVDTを設置して変位量を測定した。注水開始後は圧力計測用のパッカーラインからの空気抜きを行うため、1段階目の流量で注水する時間を長く取り、観測される圧力が安定した後流量を順次増加させていった。この実験結果を図10に示す。図10から明らかなように水圧破碎孔から4 cm離れた位置では、いずれの流量においても注水圧の約50%の圧力が観測されてい

図10 注水孔および注水孔から離れた位置(4 cm, 8 cm)での圧力の経時変化

図11 定常状態における岩石供試体の表面変位と流量との関係
rは注水孔中心軸からの距離である。

る。これに対して8 cm離れた位置では圧力は一定でなく、また非常に小さいことが分かった。

3・2 岩盤表面変位が非対称である実験結果（供試体94Y02）

図11には、水圧破碎孔からの距離とLVDTにより観測された変位量を、流量をパラメータとしてプロットした。変位量は、図8と同様にき裂を挟んで対向するLVDTにより観測された変位量をたし合わせてある。図11より明らかなようにこの供試体では、いずれの流量に対しても向かって左側の変位量が大きく、右側の変位量は小さいことが分かる。この供試体では、赤インクを混入した水を注水してき裂面を特定する実験は行わなかったが、実験終了後に供試体側面を観察すると、変位量が小さい側面以外ではき裂面を観察することができた。

図12 解析に用いた軸対称有限要素モデル

4. 解析方法および解析結果

4・1 軸対称有限要素法モデル

解析には簡単のために図12に示す軸対称有限要素法モデルを用いた。大きさは10 cm × 10 cmであり、対称軸は水圧破碎孔の中心軸であり、供試体の下半分のみを考慮したメッシュ分割を行っている。このモデルでは解析の対象とする岩石供試体を半径方向に23、高さ方向に17の要素に分割した。このモデルにおいて半径方向の最も外側の列には、岩石供試体とフラットジャッキとの滑りを考慮するために便宜的に剛性の小さな要素を配置し、その外側の節点の変位を固定することとした。このモデルのき裂部分（上端面）に水圧相当の力が加わると、モデルの下端面の変位（岩石供試体の表面変位に相当）が計算されることになる。このモデルには側圧に相当する8 MPaの応力を加えた後、次に述べるき裂内の水圧分布を加えることにより実験をシミュレートした。なお、各メッシュのヤング率およびポアソン比は実験結果を参考として、それぞれ25 GPa、0.16とした。

4・2 き裂内水圧分布の計算

き裂内の水圧分布を求めるために、次に述べる解析式を使用することとした。

一般に平行な平板間に放射状に流体が流れる場合、層流では次式が成り立つことが知られている。

$$dh/dr = (12\mu Q)/\{(2t)^3 \rho g 2\pi\} \cdot (1/r) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここでき裂の厚み $2t$ は一定であり、 h は水頭、 r は半径方向の距離、 μ は水の粘度、 Q は流量、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。放射状流において、積分範囲を r_w （中心孔の半径）から r_e （外周の半径）として(1)式を積分するといわゆる3乗則と呼ばれる次式が得られる。

$$h = (12\mu Q)/\{(2t)^3 \rho g 2\pi\} \cdot \ln(r_e/r_w) \quad \dots\dots\dots (2)$$

これらの式は平行な平板間の放射状流について成立する式であるが、図13に示すように、平板ではなく平均として高さ k の凹凸がある場合、摩擦項 f を用いて(1)式を修正する必要がある。すなわち(1)式は、

$$dh/dr = (12\mu Q)/\{(2t)^3 \rho g 2\pi\} \cdot f \cdot (1/r) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。

摩擦項 f に関しては、次の実験式が提案されている。

$$f = 1 + 17(k/4t)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f = 1 + 8.8(k/4t)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(4)式はLomizeにより⁴⁾、(5)式はLouisにより¹⁰⁾提案された式である。両者の式を書き直すと、それぞれ、

$$f = 1 + (6.61k/4t)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (4)'$$

$$f = 1 + (4.26k/4t)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (5)'$$

となる。本報における解析では、 k は測定値ではなくあてはめのためのパラメータとして用いている。したがって、本報の解析では、いずれの式を用いてもその違いは k の値の差異となって表れるだけである。いずれの式が正しいか、あるいは新たな実験式が導き出せるのかについては、 k を測定して初めて明らかになる

図13 表面が粗いき裂断面の概念図

t はき裂の厚さの半分、 k はき裂表面の凹凸の高さである。

図14 解析手順のフローチャート

(1)～(5)は本文4・3に対応する。

ことである。そこで、以下の解析には、とりあえずLomizeにより提案された(4)式を用いることとした。本報の解析対象のように、き裂面が平行でない場合には、(3)式を半径方向に積分して、

$$h(r) = (3\mu Q)/(4\pi\rho) \times \int_{r_w}^r \{1 + 17(k/4t(r))^{1.5}\} \cdot \{1/rt(r)^3\} dr \quad \dots\dots\dots (6)$$

が得られることとなる。大気圧からの差圧を考えると、本報で述べた実験の場合、

$$h(r_e) = 0$$

の境界条件のもとで、半径方向のき裂厚みの分布 $t(r)$ 、および凹凸を表すパラメータ k を与えることにより、注水圧 $h(r_w)$ が求められることとなる。

4・3 解析手順

解析の目的は、観測量である供試体表面変位、流量、注水圧から、き裂幅の分布およびき裂内圧力の分布を求めることである。なお、実験の最後にき裂に対して直接削孔し、水圧を求めた実験結果についても解析を行い、本解析手法が正しいか否かの検証を行うこととした。解析のフローチャートを図14に示す。このフローチャートを参照して解析の手順を以下に述べる。

(1) 4段階に変化させた流量のうち、最大の流量についてまず解析を行う。本実験では、供試体表面変位は測定しているが、き裂幅を直接測定しているわけではない。そこで、初期条件として、き裂幅の分布（図8などで与えられる）と供試体表面変位 m とが等しいとする。なお、この段階では、水圧破碎孔中心からの距離と変位量との間は直線で近似した。

(2) 仮定したき裂厚み分布式をもとに、式(6)から注水圧を求める。この際に流量が最大の段階でのあてはめ（すなわち最初のあてはめ）であるならば、パラメータ k を変化させ、計算結果と実測値とが合致するように調整する。この結果、き裂内の水圧の分布が求まることになる。

(3) 軸対称有限要素法により、前項で計算した水圧分布から、供試体表面変位 c を計算する。この際に調整するパラメータは、フラットジャッキによる拘束の影響を考慮するためのモデル外周のメッシュの剛性率である。計算結果である表面変位 c と実測値である表面変位 m とを比較し、両者が一致したならば、この流量でのあてはめを終了する。

図15 解析結果より得られた供試体表面変位の計算値と実測値との比較

r は注水孔中心軸からの距離である。図中◆, ▲, ●, ■は流量がそれぞれ $11.6 \text{ cm}^3/\text{min}$, $17.4 \text{ cm}^3/\text{min}$, $26.0 \text{ cm}^3/\text{min}$, $32.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ における表面変位の実測値である。

図16 解析結果より得られたき裂幅半分の分布

r は注水孔中心軸からの距離である。

図17 解析式(6)より得られた圧力と実測値との比較

r は注水孔中心軸からの距離である。図中◆, ▲, ●, ■は流量がそれぞれ $11.6 \text{ cm}^3/\text{min}$, $17.4 \text{ cm}^3/\text{min}$, $26.0 \text{ cm}^3/\text{min}$, $32.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ における注水圧力の実測値である。

(4) 表面変位の計算値と実測値をもとに、両者の比を考慮してき裂幅の分布を修正し、ステップ(2)に戻る。

(5) 流量を次の段階に減少させ、ステップ(1)に戻る。

以上のあてはめが終了すると、4段階の流量でそれぞれき裂幅の分布とき裂内の圧力分布は(6)式を満足し、き裂幅の分布と表面変位との分布は、有限要素法による力学的な釣り合い条件を満足することとなる。

図18 解析結果より得られた供試体表面変位の計算値と実測値との比較

r は注水孔中心軸からの距離である。図中◆, ▲, ●, ■は流量がそれぞれ $11.0 \text{ cm}^3/\text{min}$, $15.7 \text{ cm}^3/\text{min}$, $22.8 \text{ cm}^3/\text{min}$, $31.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ における表面変位の実測値である。

図19 解析式(6)より得られた圧力と実測値との比較

r は注水孔中心軸からの距離である。図中◆, ▲, ●, ■は流量がそれぞれ $11.7 \text{ cm}^3/\text{min}$, $16.7 \text{ cm}^3/\text{min}$, $22.7 \text{ cm}^3/\text{min}$, $32.1 \text{ cm}^3/\text{min}$ における注水圧力の実測値である。

4・4 解析結果（観測変位が対称の場合）

供試体表面変位が対称であった供試体の例として供試体94Y19の解析結果の例について述べる。この供試体では得られた表面変位量が左右対称であったため、変位量については左右の平均値を用いることとした。既に述べたように、図7で示した岩石供試体の表面変位量は、き裂を挟んで対向する位置の変位量を足し合わせたものである。表面変位量がき裂を挟んで岩石試料片の表側と裏側で対称であるとすれば、図7で示した表面変位量の半分の量が実際に岩石試料片の表側あるいは裏側で変位した量になる。そのため図7で示されている変位を半分にして以下の解析を行った。対象としたのは図7で示した実験結果のうちの後半部分（600～1,200 s）である。図15は上述の解析の結果により得られた供試体表面変位の実測値と計算値との比較である。この図から明かなように、実測値と計算値とはいずれの流量においてもほぼ一致させることができた。このとき、供試体試料内のき裂幅の分布および水圧の分布は、図16および図17のようになる。図16で示したき裂幅の分布と、図15で示した表面変位の実測値を比較すると、両者ともほぼ同一の形状をしているが、前者は後者と比較して注水孔付近で20%程度大きいことが分かる。このことから、き裂幅の80%程度が表面変位として観測されるということがいえる。また図17から分かるように、注水圧の実測値と計算値はおおよそ合致した。

図20 解析結果より得られた供試体表面変位の計算値と実測値との比較

r は注水孔中心軸からの距離である。図中◆, ▲, ●, ■は流量がそれぞれ12.0 cm³/min, 19.5 cm³/min, 26.0 cm³/min, 32.0 cm³/minにおける表面変位の実測値である。

次に、一旦フラットジャッキによる拘束を開放し、再度側圧を載荷した状態での注水試験について解析を行った。実験結果については図9で示したが、既に述べたように図9の変位量は水圧破碎前からの絶対的な変位量ではないので解析を行うためには、実験開始前の残留変位量を何らかの方法で仮定する必要がある。そのため、残留変位量が注水孔からの距離にかかわらず一定である場合や、拘束開放前の残留変位量がそのまま残っている場合等、いくつかの場合について試行錯誤的に、供試体表面変位に関して計算値と観測値のあてはめを行った結果、最終的にはこの両者の中間程度で最もよい合致をみた。このあてはめ結果については図18に示す。このことから、フラットジャッキによって拘束されていたき裂の端面は、側圧の開放により開口するが、その開口量はき裂の上下面が完全に平行になるほどではなく、注水孔に近づくほど、側圧の開放による開口変位量を加えた残留変位量が大きかったと推定される。

また、図19では、き裂に対して直接削孔し、き裂内部の圧力を測定した実験に対する解析結果を示した。この図では各流量におけるき裂内部の水圧の計算値と、注水圧の実測値（距離0.5 cm）とき裂内圧の実測値（距離4 cm）とを併せて示してある。図から明らかなように、き裂内部の圧力の計算値と実測値はいずれの流量についてもほぼ一致する。このことは、本解析方法が有効であることを示していると考えられる。

4・5 解析結果（観測変位が非対称の場合）

図11では、測定された供試体表面変位が左右で非対称の場合について供試体94Y02の実験結果を示した。しかし、本報のシミュレーションでは、単純な軸対称有限要素法を用いて解析を行っており、原理的に非対称な変位の分布を取り扱うことができなかった。ここでは、参考のためにき裂が供試体端面まで達したと思われる左側（LVDT 1～3）のみにについて解析を試みた。試験片表面変位のあてはめ結果を図20に示すが、図から分かるように、上述のような問題点があるにもかかわらず、実測値と計算値の両者はほぼ一致している。厳密には三次元有限要素法等を使用すべきであろうが、これは今後の課題としたい。

5. ま と め

高温岩体発電システムで地下深部のき裂が熱交換面として重要な役割を果たす。本報では、この地下き裂を設計する際に必要不可欠なデータであるき裂幅の分布を求めるための実験室実験の結果について述べた。岩石供試体は一辺が20 cmの立方体の形状

をした稲田花こう岩を用い、剛性枠の中に供試体を挿入して水圧破碎および注水実験を行った。この実験は従来の研究とは異なり、き裂面が岩石供試体の自由面と平行に作成されている。人工き裂造成後に、流量を4段階に変化させて注水試験を行い、注水圧および岩石供試体表面の変位量を観測した。この実験結果を基に、解析式と軸対称有限要素法を組み合わせた解析を行い、直接的には測定が困難であるき裂幅の分布とき裂内水圧との分布を求めた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) き裂内の圧力分布として(6)式を用い、軸対称有限要素法による解析を行った結果、岩石供試体の表面変位の実測値と観測値とがいずれの流量においてもほぼ一致した（図15）。このことから、き裂の内部では摩擦項を考慮した三乗則すなわち(6)式が成立すると思われる。

(2) 本報で述べた解析の結果、従来は測定が困難であったき裂幅およびき裂内の水圧分布を推定することが可能となった（図16および図17）。

(3) フラットジャッキによる供試体側面の拘束を一旦開放し、再び拘束した状態で注水試験を行った。その結果、側圧の開放により拘束されていたき裂端面は開口するが、側圧開放後のき裂開口量、すなわち側圧開放前の残留変位量と、側圧の開放による変位量を足し合わせた開口量の分布は、き裂の上下面が平行になるほどではなく、注水孔に近づくほど大きいと推測された。

(4) 作成されたき裂に対して、新規に小孔を削孔し、この小孔を介して流量を4段階に変化させながらき裂内の圧力を実測した結果、いずれの流量においても、小孔の位置における水圧の計算値と実測値とがほぼ一致することが明らかとなった（図19）。

以上の結果より、本報で述べた解析手法の有効性が示されたと考える。

一方、今後の検討課題としては以下の2項目が挙げられる。

(5) 解析に軸対称有限要素法を用いたが、表面変位が左右非対称であった場合には、別の解析方法を適用する必要がある。

(6) 高温岩体発電システムで新規にき裂を造成する場合には、き裂が時間とともにどのように進展していくかを予測することが重要である。本報で述べた実験室実験では、き裂幅がある流量に対して一定の値となった状態について解析を行ったため、き裂進展の経時的変化を取り扱うことができなかった。これに関しては、対象とする岩石供試体の寸法を大きくして実験を行う必要がある。

引 用 文 献

- 1) 小島 隆・村井 正・松本浩二：日本地熱学会誌，Vol. 17，p. 285-295，(1995)
- 2) Raven, K. G. and J. E. Gale. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, p. 251-261, (1985)
- 3) Walsh, J. B. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, p. 429-435, (1981)
- 4) 小林秀男・及川寧己・山本英生：資源・素材学会春季大会講演要旨集，p. 63-64，(1994)
- 5) Witherspoon, P. A., J. S. Y. Wang, K. Iwai and J. E. Gale. : Water Resources Research., Vol. 16, p. 1016-1024, (1980)
- 6) Tsang, Y. W. and Witherspoon, P. A. : J. Geoph. Res., Vol. 86, NO. B10, p. 9287-9298, (1981)
- 7) Gandi, A. F. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, p. 249-257, (1978)
- 8) 松本浩二・小島 隆・村井 正：日本地熱学会誌，Vol. 17，p. 213-232，(1995)
- 9) 小杉昌幸：異方性岩石における水圧破碎に関する実験的研究，東北大学学位論文，(1987)
- 10) Louis, C. : Rock Mechanics Research Report No. 10, Imp. Coll., London, (1969)