

氏 名	伊 藤 高 敏
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学 位 授 与 年 月 日	平 成 5 年 3 月 18 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 61 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻 前期課程修了
学 位 論 文 題 目	深部地殻応力計測評価のための水圧破碎機構の 解明に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 林 一夫      東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 高橋 秀明      東北大学教授 松木 浩二

## 論 文 容 容 要 旨

トンネルの掘削、水圧破碎による石油・天然ガスの増産、地下に潜在する天然熱流体からの地熱エネルギーの抽出などの古い歴史を有する技術分野に加え、近年では、高温乾燥岩体エネルギーの抽出、地下発電所の建設、核廃棄物の地下保管、超伝導コイルによる電力の地下備蓄、地下化学反応炉等の地下空間を、多様に、かつ、積極的に利用する計画が提案ないし実現しつつある。そこでは、地下空間の利用が、より大規模化およびより深部化の傾向を示している。このような地下空間の利用において、地下に潜在する天然の応力、すなわち、地殻応力は、鋼構造物における負荷応力に相当するもので、地下空間設計における第一因子であるとともに、安全性、寿命等を支配する主要因子の一つである。このため、地殻応力の正確な評価なくしては、上述の新しい技術の将来展望は開けないといっても過言ではない。また、地球物理学的観点からみると、地殻応力は、地震、火山の噴火等に代表される地殻内の自然現象を支配する最大の力学因子である。したがって、地殻内諸現象解明のためには地殻応力の大きさおよび方向、さらに、地殻応力の地域的分布、増加速度等の地下情報の定量的把握が不可欠である。

地殻応力の計測評価法としてこれまで提案されている方法の一つに水圧破碎による方法がある(図1)。この方法ではまず、地殻内に掘削したボアホールの所要区間を二つの栓(パッカーエレメント)により仕切る。次に、この区間に水を圧入し水圧を負荷して、岩体内にき裂を作成するとともに、そのき裂を開口・閉口させる。そして、このとき観測される破碎圧、き裂開口圧、き裂閉

口圧という三種類のボアホール水圧とき裂発生方位とから、予め理論的に求めたそれらの観測データと地殻応力との関係に基づいて地殻応力の大きさと方向を評価する。なお、この方法は、鉛直下向きに掘削されたボアホールでボーリング可能な深度まで測定可能であること、ひずみ等の量を介さずに直接応力の大きさを評価できること、既存のボアホールでの測定が可能でボアホールを新たに掘削する必要がないこと、一本のボアホールで深さ方向に多数の点で測定できることなど、他の方法にない多くの利点を有する。このため、この方法が深部の地殻応力を計測評価する方法として最も有力と考えられており、米国を中心に欧米ならびに日本でも実際に相当数の計測が試みられるに至っている。

しかしながら、これまで実施された多数の水圧破碎のフィールド実験および水圧破碎の室内実験を通して、この方法には根本的な問題があることが次第に明らかになってきた。すなわち、

上記の破碎圧、き裂開口圧およびき裂閉口圧それぞれに関して、従来の理論に反する実験事実が明らかになってきたことである。まず、破碎圧については、破碎圧がボアホール径および加圧時のボアホール水圧の上昇速度（以下、加圧速度と呼ぶ）に依存して変化するという事実が実験的に明らかにされているが、これらの現象を従来の理論で説明することは困難である。このため、前者の破碎圧のボアホール径依存性という問題については、ボアホール壁面上に微小き裂が存在するとした考え方に基づく解釈が試みられているが、あくまで定性的な説明にとどまっている。また、元々、破碎圧に関するこのような問題点を回避するための新たな水圧データとして提案されたき裂開口圧についても、予想に反し、圧入流量に依存して変化するという実験事実が明らかになり、その一方で、別々の水圧データであるはずのき裂開口圧とき裂閉口圧が、計測実施地域によらず常に近い傾向があるという指摘もなされている。さらに、き裂閉口圧について従来の理論では、水圧を負荷してき裂を開口させてから加圧配管の途中にあるバルブを閉じて水の圧入を停止（以下、この操作をシャットインと呼ぶ）した後に一定値に安定したときのボアホール水圧をき裂閉口圧とすれば良いとしている。しかしながら、実際の水圧破碎では、一般にボアホール水圧はシャットイン後徐々に減少し続けて一定値とならない。このため、徐々に減少し続けるシャットイン後のボアホール水圧降下曲線（以下、シャットイン曲線と呼ぶ）から、き裂閉口圧を決定する方法がいくつか提案されているが、現在のところ確定的な方法は存在しない。これらの問題はいずれも、地殻応力計測時の

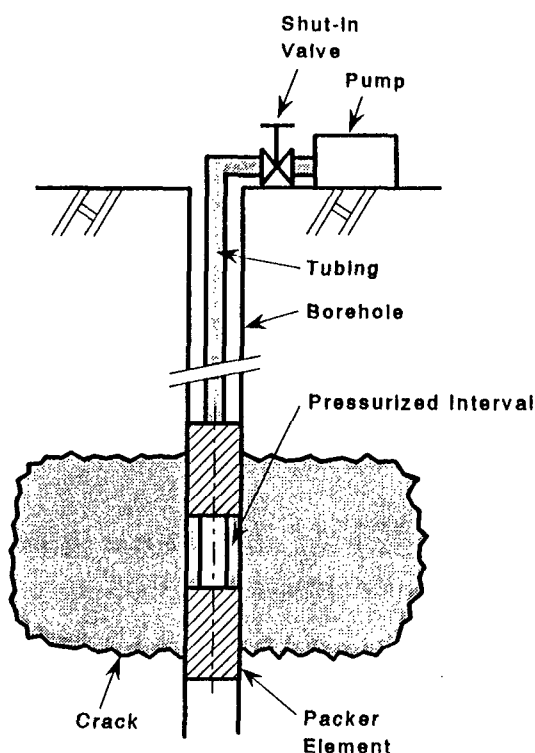


図1 水圧破碎による地殻応力計測評価法のセットアップ概念図

水圧破碎に伴うき裂挙動が解明されていないことに原因がある。

以上の背景のもとに本研究では、水圧破碎地殻応力計測値法確立に不可欠な、破碎圧、き裂開口圧およびき裂閉口圧等の水圧データと地殻応力との関係解明を目的として、水圧破碎時の、き裂初生、き裂進展、き裂閉口、ならびに、き裂開口の各過程における岩体の力学的挙動とそれに伴うボアホール水圧の変化挙動について理論的および実験的に詳細に検討した。この結果、本研究で得られた主な知見をまとめると次のようになる。

- (1) 水圧破碎時のボアホール壁からの縦き裂初生挙動を評価するため、特性距離破壊基準を導入した。これは、応力集中点を原点とする極座標を考え、原点からある特性距離  $d$  だけ離れた各点での最大周方向引張応力成分が最大となる点での最大周方向引張応力の有効応力成分が、岩体の引張強度に達したときに破壊が起きるというものである。ここで、特性距離  $d$  は材料固有の物性値であり、引張強度と破壊靱性値から決定することができる。また、有効応力としてはTerzaghiの有効応力を用いる。この特性距離破壊基準により、従来説明不可能であった破碎圧のボアホール径依存性、および、加圧速度依存性の定量的評価が可能となった。
- (2) 破碎圧には上限値と下限値が存在する。透水性が悪く、かつ、特性距離が比較的大きい岩体の場合、加圧速度が大きくなるにつれて破碎圧は急激に大きくなり、上限値に漸近する。一方、透水性が良く、かつ、特性距離が比較的小さい岩体の場合、加圧速度が変わっても破碎圧はあまり変化せず、下限値に近い値となる。なお、従来より用いられてきたHubbert— Willis および Haimson — Fairhurst が導いた破碎圧の評価式はそれぞれ、特性距離に比べてボアホール径が十分大きい場合の破碎圧の上限値と下限値を与える。
- (3) 縦き裂初生後一定流量で圧入を続けると、き裂初生以降のボアホール水圧の大きさとき裂面垂直方向の地殻圧縮応力の大きさととの差は、き裂初生からの経過時間の立方根の逆数に正比例するという特性がある。
- (4) したがって、この関係を用いるとき裂面垂直方向の地殻圧縮応力の大きさを次のようにして評価できる。まず、水圧破碎実験により得られたき裂初生以降のボアホール水圧の経時変化を、縦軸をボアホール水圧とし、横軸をき裂初生からの経過時間の立方根の逆数としたグラフにプロットすると、プロットした各点はある直線上に分布する。次に、その直線を横軸の原点を通る縦軸を横切るように外挿する。このとき、外挿した直線が縦軸と交わる点の水圧の大きさが、き裂面垂直方向の地殻圧縮応力の大きさと等しくなる。
- (5) 一定圧入流量で再加圧した際に縦き裂が開口し始めるときのボアホール水圧は、地殻応力および圧入流量によらず従来の理論で与えられているき裂開口圧の半分となる。ただし、き裂が開口してもすぐにはボアホール水圧と時間との関係に顕著な変化は現われず、いわゆるき裂開口圧、すなわち、ボアホール水圧と時間との関係が明らかに非線形になり始めるときのボアホール水圧（以下、見かけのき裂開口圧と呼ぶ）は、き裂が開口し始めるときのボアホール水圧より高くなる。
- (6) 見かけのき裂開口圧の大きさは、き裂線方向の地殻圧縮応力の大きさが変わってもほとんど変化しない。また、見かけのき裂開口圧の大きさは、圧入流量が小さくなるほど小さくなり、き裂

面垂直方向の地殻圧縮応力の大きさに近づく。したがって、圧入流量を種々変化させて見かけのき裂開口圧を測定し、その結果から圧入流量が小さくなる時の漸近値としてき裂面に垂直な方向の地殻圧縮応力の大きさを評価できる。

- (7) 上記(6)の結果は、横き裂の場合にも、その傾きの大きさいかによらず、また、地殻主応力比によらずそのまま当てはまる。
- (8) ボアホールと直交し、かつ、ボアホール軸に対して軸対称な地殻圧縮応力を受ける横き裂を対象とし、シャットイン後のき裂閉口挙動を解析してシャットイン曲線を求め、それに及ぼす諸因子の影響について検討した。その結果、次のことがわかった。すなわち、ボアホール水圧の大きさがき裂面垂直方向の地殻圧縮応力の大きさに等しくなったとき、き裂全体が同時に閉じてしまう。また、シャットイン曲線の形状はき裂長さが変わってもほとんど変化しないが、逸水係数の影響は強く、逸水係数が大きくなるほどシャットイン曲線のこう配が大きくなる。また、逸水係数が同じでも、き裂閉口挙動の違いから、縦き裂の場合の方が横き裂の場合よりシャットイン曲線のこう配が全体的に大きくなる。
- (9) 横き裂のシャットイン後の水圧降下には、シャットイン直後に起こるき裂進展が終了してからき裂が閉じるまでの段階およびき裂全体が閉じた以降の段階の各段階で、ボアホール水圧の時間変化率の逆数がボアホール水圧に比例するという特性がある。
- (10) 上記の特性を利用すれば、き裂閉口圧を明確に決定できる。すなわち、シャットイン曲線をボアホール水圧の時間変化率の逆数とボアホール水圧との関係に整理し直し、それを二直線近似したときの二直線の交点を検出すれば、その交点のボアホール水圧として、き裂閉口圧が与えられる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

水圧破碎法による地殻応力の計測評価は、大深度での地殻応力を計測評価できる最も有力な方法である。欧米を中心に世界各国で、この方法によると相当数の計測が実際に試みられているが、これらの経験を通して、この方法には、基本的な問題点が内包されていたことが次第に明らかになってきた。この解決のためには、水圧破碎機構の解明が必要不可欠である。

本論文は、地殻応力計測評価のための水圧破碎における、破碎圧、き裂開口圧およびき裂閉口圧等の水圧データと地殻応力との関係解明を目的として、水圧破碎時の、き裂発生、き裂進展、き裂閉口、ならびに、き裂開口の各過程における岩体の力学的挙動とそれに伴うボアホール水圧の変化挙動を、破壊力学による解析と室内水圧破碎実験により明らかにしたもので、全7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、水圧破碎によるボアホール壁からのき裂初生を、新たな破壊基準を導入して論じ、破碎圧と地殻応力との関係を明らかにしている。これは従来未解明であった破碎圧のボアホール径依存性、加圧速度依存性を明解に説明するものであり、画期的成果である。

第3章では、縦き裂進展に伴うボアホール水圧の時間変化挙動を解析し、き裂面垂直方向の地殻圧縮応力の大きさを評価する新たな手法を提案している。

第4章では、再加圧時の縦き裂開口挙動の解析を行い、き裂開口圧と地殻応力との関係ならびに同関係に及ぼす圧入流量の影響を明らかにしている。

第5章では、縦き裂とは対照的にボアホールと直交する横き裂の再加圧時のき裂開口挙動を解析し、き裂開口圧と地殻応力との関係ならびに同関係に及ぼす圧入流量の影響を明らかにしている。

第6章では、横き裂について、き裂閉口挙動を解析し、水圧降下曲線からき裂閉口圧を客観的に決定する方法を新たに提案している。これは、き裂閉口圧の決定法に関する従来の議論に終止符を打つものとして高く評価できる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、水圧負荷を受けるボアホール壁上の、き裂の力学的挙動の詳細な解析と室内水圧破碎実験による検証を通して、地殻応力計測評価のための水圧破碎機構の解明を行ったもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。