

氏 名	こ すぎ まさ ゆき 小 杉 昌 幸
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 7 月 8 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 53 年 3 月 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	異方性岩石における水圧破碎に関する実験的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 八嶋 三郎 東北大学助教授 林 一夫

論 文 内 容 要 旨

近年、鉱石などの採掘やトンネルなどの掘削が深部化するとともに、地下発電所の建設や放射性廃棄物の地下保管のため、地下に大きな空洞を開削することが多くなっている。また、油井からの石油湧出や地熱井からの蒸気噴出を促進する開発や、高温乾燥岩体から熱エネルギーを抽出するケース・スタディのように地上における制御による地下深部の開発も行われている。このように、従来は開発の対象とならなかった条件の過酷な大規模開発や深部開発の必要性が今後ますます大きくなると予想される。

このような地下の空洞や人工き裂を合理的に設計し、その建設および造成を効率良く推進するためには、岩盤の挙動を適確に予測する必要がある。岩盤の物理的性質や岩盤内の応力状態を把握することがその基礎となるものである。しかし、岩盤は天然物であり、その構造や性質は極めて複雑であるため、岩盤から採取した供試体を用いて得られた物理的性質をそのまま岩盤全体の代表値とすることは困難である。このため、岩盤の異方性を考慮した応力や物性の原位置計測の必要性は大きくなっている。

従来、原位置応力計測法として、応力補償法、応力解放法、水圧破碎法などが用いられているが、ひずみゲージを介さずに直接圧力を計測し、深部における適用が比較的容易なため、水圧破碎法が注目されている。また、油井や地熱井の二次的的刺激法、さらに高温乾燥岩体開発における人工き裂の造成法として、水圧破碎が最も技術的に有効な方法とされている。

水圧破碎は、孔井の限定区間に流体圧を作用させ、人工き裂を造成しようとするものであるが、天然の岩盤を対象とするため、注入流体は既存き裂や節理などに流入する他、岩盤内へも浸透する。しかし、孔井に作用する流体圧や造成されたき裂方向は、岩盤内の応力状態、物性、既存き裂などに関する多くの情報をもたらしてくれる。

従来からの水圧破碎の解釈によると、人工き裂を造成するために必要な流体圧力と岩盤内応力との関係から破壊条件式が導かれ、そこでは岩盤の引張強度が破壊限界とされてきた。また、間隙水圧や浸透を考慮した有効応力概念が適用され、これらの影響について各種の実験に基づく検討もなされてきた。き裂の成長については、その機構が破壊力学的に開口型（モードⅠ）であることが実験的に確認され、破壊力学的観点から水圧破碎機構を解釈する試みがなされ、応力拡大係数を用いたき裂進展条件式が導かれた。

これらの研究に基づいた水圧破碎による原位置応力評価法としては、引張強度を用いた破壊条件式による岩盤内応力評価、破壊力学的解釈を加えたき裂造成後の圧力データによる評価、さらには破壊力学的なき裂進展条件式を用いた評価などが試みられてきた。

天然物である岩石を対象とした水圧破碎の解釈において、岩盤の異方性や浸透による有効応力の変化は水圧破碎機構に大きな影響を及ぼすものと考えられる。しかし、これらの解明はまだ不十分であり、等方性岩盤を仮定した破壊条件式において間隙水圧や浸透に関する補正係数を設定するにとどまり、異方性に関する考慮はほとんどなされていない。このように、従来から岩盤の異方性および浸透の影響を考慮した水圧破碎機構やき裂挙動に関する実験的研究の例はほとんどみられず、これらについて解明することは水圧破碎を原位置応力計測法として適用する上で工学的に重要である。

本研究は、天然の岩盤における水圧破碎機構およびき裂挙動に及ぼす岩盤の異方性の影響を明らかにするため実験的な検討を行い、これらの解明に基づいて、水圧破碎による岩盤内応力の評価法を検討しようとするものである。このため、水圧破碎における破壊限界と考えられる一軸引張強度および破壊靱性値における異方性を実験的に明らかにし、これに基づいて水圧破碎機構およびき裂挙動における岩石の異方性の影響について実験的に検討した。最後に、これらの解明に基づいて、原位置応力計測法としての水圧破碎実験について、岩盤の異方性および浸透の影響を考慮した新たな岩盤内応力評価法を提案し、原位置実験によってその適用性の検証を行って考察した。

第1章は緒論であり、本論文の意義と目的を述べ、本研究の内容が異方性岩石あるいは岩盤における水圧破碎機構の解明および異方性を考慮した岩盤内応力評価法の提案と検証であることを示している。

第2章では、水圧破碎における破壊限界とされる引張強度および破壊靱性に及ぼす岩石の異方性の影響に関する実験的検討について述べた。これによると、稲田花こう岩および江持凝灰質安山岩において一軸引張強度の異方性による差異が強度比で1.6以上と顕著であり、一方、曲げや水圧破碎による破壊靱性の異方性による差異（稲田花こう岩で1.2以下）が小さいことを明らかにした。

水圧破碎によるき裂初生は引張強度に大きく依存するので、これらの結果は水圧破碎に及ぼす岩石の異方性の影響を示唆するものであることを示した。

第3章では、異方性岩石における水圧破碎機構の解明を目的として行った応力状態、傾斜坑井およびき裂交差に関する実験的検討について述べた。水圧破碎における浸透の影響に関する実験的検討によると、破壊条件式における浸透の影響定数 $1/(2-A)$ は稲田花こう岩、甲府安山岩および江持凝灰質安山岩において $0.56 \sim 0.65$ となり、浸透が無い場合の1と比べてその影響が大きいことを示した。また、異なる二軸方向応力状態における水圧破碎実験の結果、稲田花こう岩の流理面に沿う方向のき裂が造成される場合の応力状態として、異方性の影響範囲が次式のように導かれることを示した。

$$\sigma_x < \sigma_y < \sigma_x + 20 \text{ kgf/cm}^2$$

このため、岩盤内の主応力方向を決定する際に、造成き裂方向に及ぼす異方性の効果を考慮する必要があることを明らかにした。さらに、傾斜坑井における水圧破碎実験の結果、坑井近傍の造成き裂は応力状態や岩石の異方性の影響に拘らず坑井軸に沿う方向に形成され、成長き裂は応力状態や異方性の影響によって方向転換する挙動を呈することを明らかにした。

第4章では、き裂挙動に依存する値として評価されるき裂開口圧力およびシャット・イン圧力に関する実験的検討、さらに、水圧破碎による造成き裂の水循環による挙動に関する実験的検討および数値解析評価について述べた。まず、き裂開口圧力に関する実験的検討の結果として、破碎圧力とき裂開口圧力との差から評価した異方性岩石の引張強度は従来からの破壊条件式と比較して注入流量の差異による影響が小さいことを示した。また、シャット・イン実験の結果、直径1cmの孔井に造成した10cm以下のき裂におけるシャット・イン圧力によってき裂面垂直方向応力を±20%以内の精度で評価できることを示した。岩石内造成き裂の水循環に関する実験的検討の結果、き裂挙動における岩石の異方性による差異は小さいものの、岩種によって水循環挙動の差異が大きいことを示した。また、き裂面の凹凸の接触による流体通路の形成を実験的に明らかにし、き裂面垂直方向応力が 100 kgf/cm^2 の場合、稲田花こう岩の流体通路は約0.5mm一様に開いた平面状き裂モデルに相当することを解析的に示した。

第5章では、異方性岩石における水圧破碎機構に関する総括的考察および原位置に適用するための工学的検証について述べた。はじめに、第2章から第4章までに示した実験的解明に基づき、岩盤の異方性を考慮した岩盤内応力評価法を新たに提案した。ここでは、岩盤の異方性の影響によって造成き裂方向が必ずしも主応力方向を表すものではないものとし、注入流量や浸透の影響が小さいき裂開口圧力およびシャット・イン圧力を用いて観測方程式を導いた。また、水圧破碎データの適確な評価のため、第3章および第4章の実験的検証に基づく原位置実験手順も同様に提案した。

つぎに、ここで提案した岩盤内応力評価法を地圧計測に適用することを目的として行った原位置水圧破碎実験による検討について述べた。岩盤の異方性を考慮した応力評価結果と等方性を仮定した応力評価結果との差異が主応力の大きさで約30%、その方向で約40°と大きく、岩盤の異方性の影響が顕著であることを示し、岩盤内応力評価において異方性の考慮が不可欠であることを明らか

にした。また、孔井壁面の型取り等によってき裂方向を標定することを勘案すれば、比較的小規模の造成き裂から水圧破碎データを得ることが望ましいことを示した。さらに、岩盤内応力評価における計算誤差の検討を行うことにより、原位置水圧破碎データの中から信頼性の高いデータを採用する必要があることを明らかにし、データの信頼性の検証としてここに提案した実験手順による圧力の再現性および臨界エネルギー解放率の評価に基づく方法が有効であることを示した。

これら一連の実験的検討の結果、ここに新たに提案した岩盤の異方性を考慮した岩盤内応力評価法および実験手順は水圧破碎による地圧計測法としての適用性が高いことを示した。

第6章は結論である。

以上、本研究では、異方性岩石における水圧破碎に関して破碎圧力、造成き裂方向およびき裂挙動の観点からその機構を実験的に解明し、これらに基づいて異方性岩盤における岩盤内応力評価法および原位置水圧破碎実験手順を提案した。また、地圧計測のための原位置水圧破碎実験を行い、ここに提案した評価法の有効性を検証するとともに、実験データの信頼性の検証法を示した。

審査結果の要旨

水圧破砕法は、石油井あるいは、ガス井の生産性を高めるために地下刺激法として開発されたものであり、近年では、地下深部からの熱エネルギー抽出のための人工き裂面作成法として注目されている新技術である。そこでは、機械構造の負荷応力に対応する地殻応力が主要設計因子の一つであり、水圧破砕法は地殻応力の現位置計測法として、現在大深度に対応できる唯一ともいえる方法である。本研究は、岩体の破壊に関する異方性に焦点をあて、破壊力学的評価を行うとともに、水圧破砕に及ぼすその影響を明らかにし、地殻応力計測のための異方性を考慮した水圧破砕理論を新たに提示して、その有効性を室内実験およびフィールド実験を通して検証したものである。本論文は、これらの成果をまとめたもので、全編6章より成る。

第1章は緒論である。

第2章では、水圧破砕において破壊限界を支配する引張強度および破壊靱性の異方性を実験的に検討し、実験に供した3種の岩石のいずれにおいても、顕著な異方性が見られることを示し、異方性が、水圧破砕におけるき裂初生に対し、大きい影響を及ぼし得ることを明らかにしている。新しい支配因子を抽出した意義は大きい。

第3章では、各種の封圧条件下で、傾斜坑井を用いた室内水圧破砕実験を行い、き裂形態、き裂初生方向及びき裂成長方向の検討を行っている。き裂形態は、異方性、封圧条件には影響されにくく、坑井母線に沿ったき裂が形成されやすいことを示すとともに、き裂初生方向ならびにき裂成長方向が異方性に大きく左右されることを見出している。これらは水圧破砕機構に係わる重要な知見である。

第4章では、水圧の時間履歴の検討を行い、そこから得られる情報の評価を行っている。くり返し加圧により得られるき裂開口圧は、圧入流量によらないことを実験的に明らかにするとともに、シャット・イン圧力からき裂面垂直方向応力を正確に算定し得るためのき裂規模についての検討を加え、従来の定性的説明から脱却した新しい知見を得ている。

第5章では、以上の成果を総合し、異方性岩体に適用できる水圧破砕法による地殻応力計測法を提案し、フィールドへの適用を通して方法の有効性を確認している。この方法は、従来空白であった大深度における異方性岩体内の地殻応力計測の工学分野を埋めるものとして注目に値する。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、水圧破砕に対する岩体の異方性の効果を明らかにし、その知見を総合して、異方性岩体内の地殻応力計測のための水圧破砕理論を新たに提示したもので、機械工学ならびに資源工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。