

初期地圧測定法の現状と基準化

横山幸也*

Current Status and Standardization of Initial Stress Measurement Techniques

Tatsuya YOKOYAMA*

Abstract

This report outlines initial stress measurement techniques and their standards used in Japan and abroad. First, the development process of each technique classified by the measurement principle is introduced, and their technical features and applicability are described. The strengths and weaknesses of individual techniques that have been used in practice, as well as their actual performances, are also explained. Next, suggested methods of initial stress measurement techniques used in Japan and abroad are overviewed together with related codes and standards. Entities stipulating international codes or standards for initial stress measurement techniques are listed, and standards published by them are summarized. Finally, the paper introduces technical improvement works being conducted in Japan for two measurement techniques currently considered to be the most practical, as well as a strategy to be taken toward future international standardization.

Key words: Review, Initial stress, Measurement technique, International code, Standard

要 旨

国内外で利用されている初期地圧測定法とそれらの基準について概説する。まず、測定原理で分類される各測定法の開発の経緯を振り返り、これらの技術的特徴や適用性について述べる。また、実用化されている個別の手法について、それらの長所や短所について解説し、測定の実績についても触れる。次に、国内外における初期地圧測定法の規格、基準、提案法について概観する。ここでは、初期地圧測定法に関する国際規格や基準を定めている機関について整理し、各機関で公開されている基準についてとりまとめる。最後に、現在最も実用的と考えられる二つの測定法に関して、我が国で行っている技術的な改良作業について紹介し、今後の国際的な基準化に向けて我々のとるべき姿勢について述べる。

キーワード：初期地圧，測定法，総説，基準化

*応用地質（株）技術本部

*OYO Corporation Engineering Headquarters

1. はじめに

最初に、用語の定義について触れる。「初期地圧」とは、自然状態での岩盤内に存在する応力を意味する。ある場所における初期地圧は、岩盤の物性に自重や造構運動が作用し、地域性のある三次元的な応力状態として認識される。初期地圧は、主に鉱山や土木の分野で用いられる用語で、同様の意味で「一次地圧」、「初期応力」あるいは「地山応力」とも称される。これらの用語はいずれも、岩盤に人工的な改変を加える前の応力状態について用いられる。これに対して、自然の岩盤にトンネルや空洞掘削などの人工的な改変を加えたとき、これらの掘削面周辺の応力状態は「二次地圧」と称される。本稿では、この初期地圧や二次地圧を総称して「地圧」と称す。一方、地球科学の分野では初期地圧とほぼ同じ意味で「地殻応力」という用語が用いられるが、こちらの方はより深く広範囲な地殻の応力状態を指すことが多い。

世界各国で利用されている初期地圧測定法は、原位置測定法と室内試験法に大別されるが、わが国でもいくつかの方法が開発あるいは改良され、測定実績をあげている。最近では、工学分野において大空洞やトンネルを設計するときの初期条件を決定するときや、理学分野において地殻応力の値あるいは変化を把握する目的で、世界の多くの場所で初期地圧測定または地殻応力測定が行われている。

国内では、これまでに地下発電所、原子力発電所あるいは長大トンネルなどの立地調査の一環として多くの測定がなされてきた。今後は、海外での新興国において同様の必要性が高まっていくことが予想され、我々の技術を国際的なスタンダードとして認められることが肝要である。将来、後述するような海外で開発された初期地圧測定法が国際的な規格に登録された場合、国際入札にきわめて不利な状況となる可能性がある。そうなれば、これまでに我々が培ってきた国内の技術者、測定機器、あるいは基準やノウハウなどの技術資源を有効活用できなくなり、日本の技術が諸外国で採用されなくなることが危惧される。

本稿では、まず、測定原理で分類される各測定法の開発の経緯を振り返り、これらの技術的特徴について述べる。次に、国内外における初期地圧測定法の規格、基準、提案法について概観する。最後に、現在最も実用的と考えられる二つの測定法に関して、我が国で行っている技術的な改良作業について紹介し、今後の国際的な基準化に向けて我々のとるべき姿勢について述べる。

なお、本稿では英語の「Standard」を「規格」または「基準」、「Suggested Method」を提案法と呼び、「Standardization」を「基準化」と称す。国内外で公開されている、具体的な規格、基準、提案法については3章で述べる。

2. 主な初期地圧測定法

地圧測定法は、鉱山の地下深部坑道の安全性を評価するため1950年頃からその開発が始まり、その後土木分野や地球科学分野でこの手法が適用されるようになってきた。開発当初は、主に坑道壁面周辺の二次地圧が測定対象であったが、その後、岩盤の初期地圧を評価することを目的とした測定法が開発されてきた。ここでは、現在、国内外で利用または開発されている測定法の種類とその特徴について整理した。表1に、各測定法を4つの測定原理に分けて示す。

2.1 岩盤の破碎を利用する方法

岩盤の破碎を利用する水圧破碎法は、1950年頃から石油開発の坑井刺激法として始まり、現在の初期地圧測定法として発展してきた。この測定法は、ボアホールのある区間に水圧を作用させ、岩盤に引張破壊を生じさせるものであるが、最近では水圧破碎と同様にボアホールのある限られた区間に水圧以外の方法で直接圧力をかけ、圧力と岩盤の破壊や変形との関係から地圧を求める方法も提案され、その適用例の報告も見られるようになってきた。これらの地圧測定法を、圧力を作用させる媒体の違いにより分類すると、図1に示す3つの方法に分けられる。

2.1.1 水圧破碎法

水圧破碎法は、ボアホールのある区間に水圧を加え、岩盤に引張破壊を生じさせる技術を応用して、ボアホール壁面に発生した引張り裂の方向から最大主応力の方向を、き裂の再開口時と閉口時の圧力から最大、最小主応力を求める方法である。この方法は、1950年代にHubbert¹⁾により提案され、Scheidegger²⁾、Kehle³⁾、Fairhurst⁴⁾、Haimson⁵⁾らによって改良された。

この方法の長所は、鉛直下向きの1,000m以上のボアホールでも測定できること、地圧を評価するとき岩盤の弾性定数を必要としないこともこの方法の特徴である。この方法はボアホールに直交する二次元平面での応力状態を求める測定法であるが、Cornet⁶⁾、Mizuta et al.⁷⁾により1つのボアホールで三次元での初期地圧を決定できる方法が示された。この方法はHTPF (Hydraulic Test on Pre-existing Fractures) 法と呼ばれ、ボアホールと交差する6つ以上の独立した自然き裂の直応力成分の地圧を計測することにより、三次元応力状態が決定できる。

Ito et al.⁸⁾は、き裂開口プロセスの理論的解析結果から再開口圧を与える条件を修正し、加えて測定システムの高剛性化を実現することによる修正水圧破碎法を提案した。これにより、得られる初期地圧の最大主応力の大きさの信頼性が向上した。図2に水圧破碎法で用いる測定装置の例を示す。

表 1 初期地圧測定法の種類とその特徴

	原測定理／手法	特徴	開発者, 参考文献
岩盤の破砕 Borehole fracturing	水圧破砕法 Hydraulic fracturing	孔内での人工き裂の生成による 深度 1000m 以上でも測定可能 国内外で実績多	Hubbert ¹⁾ , Scheidegger ²⁾ , Kehle ³⁾ , Fairhurst ⁴⁾ , Haimson ⁵⁾ , Cornet ⁶⁾ , Mizuta et al. ⁷⁾ , Ito et al. ⁸⁾
	スリーブ破砕法 Sleeve fracturing	孔内での人工き裂の生成による 深度 1000m 以上でも測定可能	Stephansson ⁹⁾ , Serata et al. ¹⁰⁾ , 菅原ら ¹¹⁾ , Mizuta et al. ¹²⁾
	乾式破砕法 Borehole-jack fracturing	孔内での人工き裂の生成による 深度 1000m 以上でも測定可能 国内で開発中	De la Curz ¹³⁾ , Yokoyama et al. ¹⁴⁾ , Sano et al. ¹⁵⁾ Yokoyama et al. ¹⁶⁾
応力解放 Stress relief by overcoring	円錐ひずみ孔底法 Compact conical-ended borehole overcoring	孔内での応力解放, 小孔径(φ 76mm) 国内外で実績多, 日本オリジナル 鉛直下向きを開発中	Oka et al. ¹⁷⁾ , Sugawara and Obara ¹⁸⁾ , Obara and Sugawara ¹⁹⁾ , 小林ら ²⁰⁾ , Sakaguchi et al. ²¹⁾
	埋設ひずみ法 Multi-axial strain gauge	孔内での応力解放, 大孔径(φ 222mm) 国内で実績多 日本オリジナル	金川ら ²²⁾ , 金川ら ²³⁾
	孔壁ひずみ法 Borehole wall strain	孔内での応力解放, 中孔径(φ 116mm) 海外で実績多 鉛直下向き測定可	Leeman ²⁴⁾ , Hiramatsu and Oka ²⁵⁾ , Pine et al. ²⁶⁾
	孔径変化法 Borehole deformation	孔内での応力解放, 中孔径(φ 116mm) 海外で実績多 鉛直下向き測定可	Leeman ²⁷⁾ , Obert et al. ²⁸⁾ , Merrill ²⁹⁾ , 菅原ら ³⁰⁾
孔壁やコアの自然破壊 Borehole / cores breaking	ボアホールブレイクアウト Borehole breakout	孔壁に発生する圧縮破壊を利用 大きな側圧比の条件下で発生	Leeman ³²⁾ , Zoback et al. ³³⁾ , Hickman et al. ³⁴⁾ , Plumb and Cox ³⁵⁾ , Cowtgill et al. ³⁶⁾
	ドリリングインデュースド フラクチュアリング Drilling induced fracturing	孔壁に発生する引張り破壊を利用 深度 1000m 以上でより有効	Stock et al. ³⁷⁾ , Okabe et al. ³⁸⁾ , Zoback et al. ³⁹⁾
	コアディスクング Core dinking	コアの板状自然破壊を利用 大きな側圧比の条件下で発生	菅原ら ⁴⁰⁾ , Haimson and Lee ⁴¹⁾ , Ishida and Saito ⁴²⁾ , 松木ら ⁴³⁾ , 横山ら ⁴⁴⁾
岩石コアの利用 Core-based	AE 法 Acoustic emission	岩石のカイザー効果を利用 国内で実績多, 日本オリジナル	Kaiser ⁴⁵⁾ , 金川ら ⁴⁶⁾ , 瀬戸ら ⁴⁷⁾
	変形率変化法 Deformation rate analysis	岩石の非線形ひずみ挙動を利用 日本オリジナル	山本ら ⁴⁸⁾ , 横山ら ⁴⁹⁾
	DSCA 法 Differential strain curve analysis	封圧下での岩石のマクロクラック とひずみの関係を利用 国内外で実績多	Simmons et al. ⁵⁰⁾ , Siegfried et al. ⁵¹⁾ , Strickland et al. ⁵²⁾ , 松木ら ⁵³⁾
	ASR 法 Anelastic strain recovery	応力解放直後における岩石の非弾性 変形挙動を利用	Voight ⁵⁴⁾ , Teufel ⁵⁵⁾ , Wolter and Berckhermer ⁵⁶⁾ , Matsuki ⁵⁷⁾ , Matsuki and Takeuchi ⁵⁸⁾

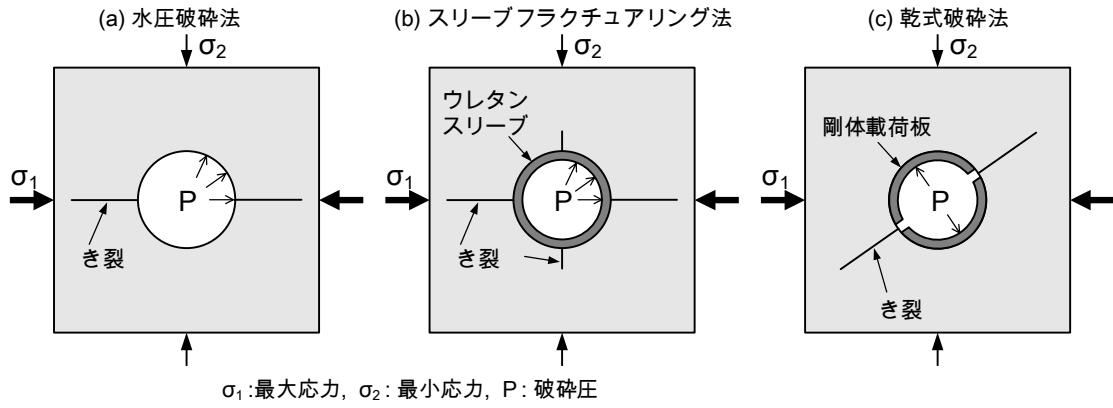


図1 岩盤の破砕を利用する方法の概念図

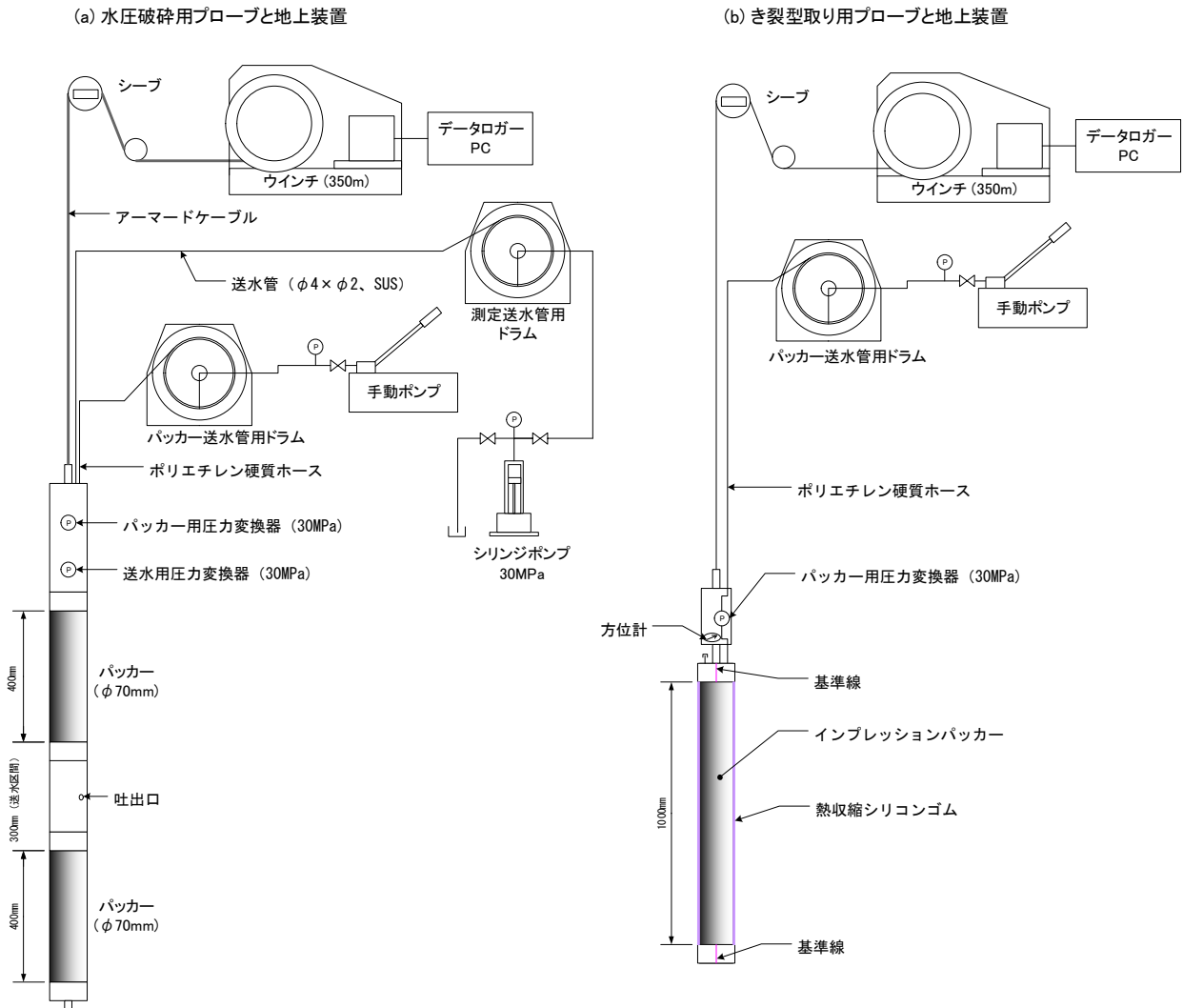


図2 水圧破砕法に使用する測定装置の例, (a)水圧破砕用プローブと地上装置は水圧破砕試験で孔壁に人工き裂をつくる試験装置, (b)き裂型取り用プローブと地上装置は人工き裂の方位を求める装置

水圧破碎試験装置は、水圧破碎用プローブとき裂型取り用プローブそれぞれの地上装置からなる。水圧破碎用プローブを含む送水システムは、従来から用いられてきた送水ロッドのような大容量の送水管を断面積が小さく剛性の大きいステンレス管に変更し、送水ポンプにシリンジポンプが使用されている。この送水システムにより送水圧と送水量のきわめて高精度な制御が実現されている。

2.1.2 スリーブフラクチュアリング法

1980年代前半、Stephansson⁹⁾はスリーブフラクチュアリング法を提案し、その後、この方法はScrata et al.¹⁰⁾、菅原¹¹⁾、Mizuta et al.¹²⁾によって改良された。水圧破碎法ではボアホール孔壁への加圧に水を用いているのに対し、この方法ではウレタンスリーブを介して油圧で孔壁を加圧する。き裂が発生してもき裂に流体が流入しないので、水圧破碎法のように圧力が低下することはない。き裂の発生は、ウレタンチューブの内圧とボアホールの半径方向変位の圧力-変位関係から確認する。加圧により発生するき裂は、最初にボアホール軸直交断面での最大主応力方向に生じ、その後も加圧を継続すると最小主応力方向にき裂が発生する。最初に発生するき裂を“一次き裂”、次に発生するき裂を“二次き裂”と呼ぶ。図3にスリーブフラクチュアリング法の測定装置の例を示す。

2.1.3 乾式破碎法

De la Curz¹³⁾は、ボアホール内にき裂を発生させる方法としてボアホールジャッキを用いる方法を提案した。ボアホールジャッキは、載荷面がボアホール孔壁と同じ曲率を持つ半円形断面の剛性の大きいプレート一対で構成され、油圧によりプレートがボアホールを押し広げる方向に載荷する。破碎面の方向はプレートの載荷方向と直交であり、き裂の発生はジャッキの圧力-変位関係から読みとる。この方法では、孔軸に平行な任意の方向の縦き裂を造成できるため、近接した3深度以上で異なる方向のき裂を発生させ、孔軸に直交する二次元断面での応力成分を求めることが可能となる。Yokoyama et al.¹⁴⁾はこの考え方を応用し、模型実験や数値解析に基づいたプレートフラクチュアリング法を提案した。また、佐野¹⁵⁾、Yokoyama et al.¹⁶⁾は、同様の測定原理を用いて乾式破碎法と称する地圧測定法を提案し、新たな測定器の開発を行った。この測定器は、プレートが孔壁に密着できて、割れ目を発生させる位置も制御されている。図4に乾式破碎プローブの写真を示す。この試験装置では、ボアホールの孔壁に半割れのプレートを圧着し油圧ジャッキの載荷で岩盤に人工き裂を発生させる。除荷後、再度加圧したときのき裂再開口時の圧力を読み取り、き裂面に直交する方向の地圧を算定する。

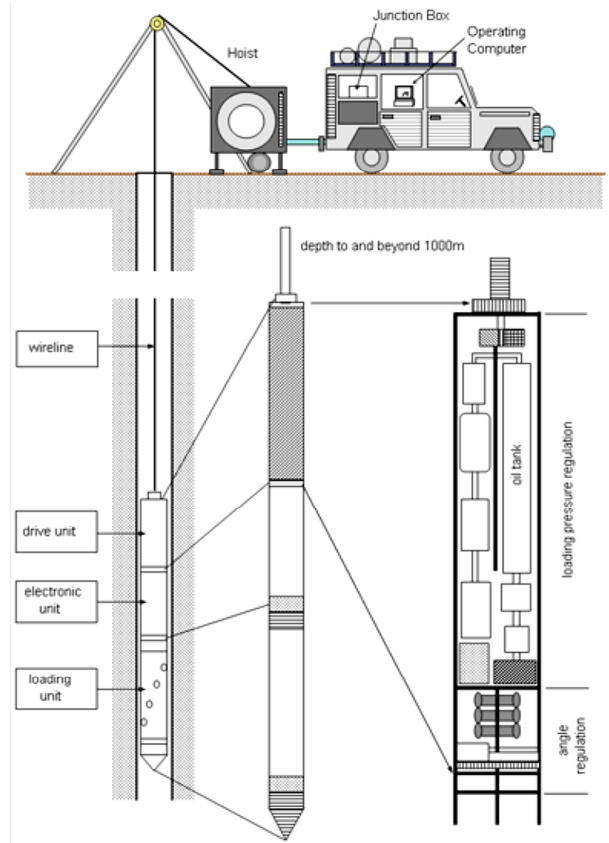


図3 スリーブフラクチュアリング法に使用する測定装置¹⁰⁾の例

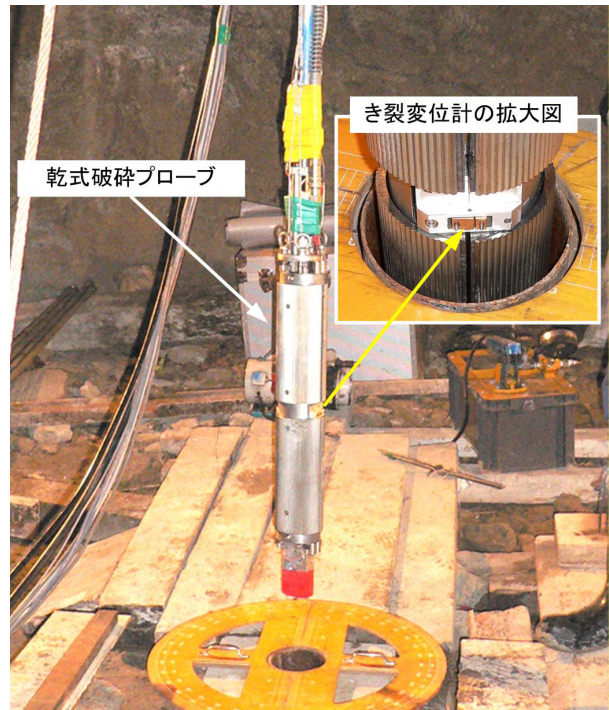


図4 乾式破碎法に用いる乾式破碎プローブ¹⁶⁾

2.2 応力解放法

1950年代後半に提案された応力解放法は、応力の作用している岩盤から岩石サンプルを切り離すときの応力解放過程で生じる岩石のひずみや変位を計測し、弾性論に基づき地圧を算定するものである。応力を解放させる作業にはボーリングを用い、このときの作業を「オーバーコアリング」と呼ぶことから、応力解放法をオーバーコアリング法ともいう。応力解放法は、わが国の鉱山や土木分野における初期地圧測定法として最も実績の多い手法である。この手法の大きな特徴は、岩盤を等方均質な弾性体と仮定して地圧を算定するところにあり、観測方程式が明解で三次元での初期地圧を求めることができる。しかし一方では、岩盤を弾性体と仮定していることから、割れ目や不均質性などにより岩盤が極端な非弾性的挙動を示すときには、応力の解析結果に少なからぬ誤差を生じることもある。また、測定できる深度は、ひずみ計や変位計をボアホール内に確実に設置する作業上の制約から、通常ボアホールの孔口から50m程度が限界である。現在よく用いられている応力解放法は、ひずみや変位の測定を行う位置の違いにより分類すると、図5に示す4つの方法に分けられる。

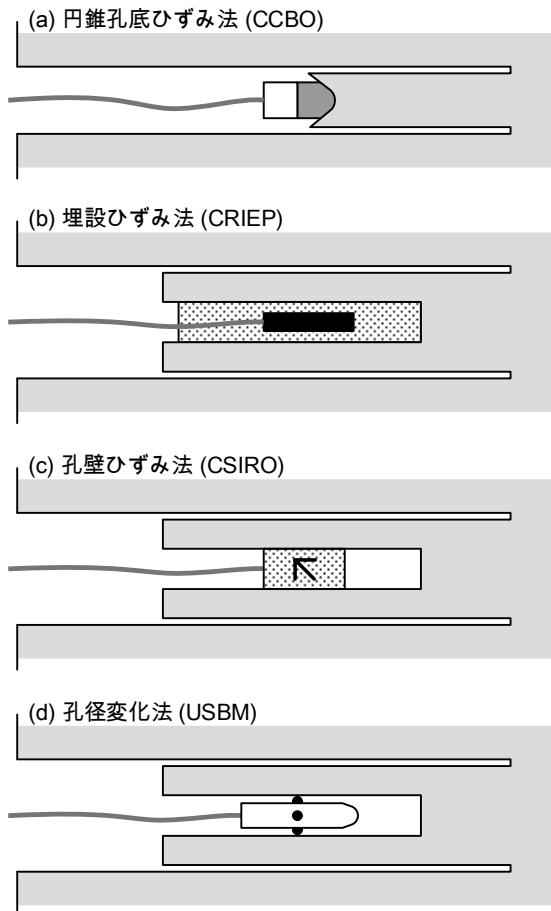


図5 各種応力解放法の概念図

2.2.1 円錐孔底ひずみ法

円錐孔底ひずみ法は、1950年代後半に初めて提案された孔底ひずみ法の改良型で、現在わが国で最も多く利用されている応力解放法のひとつである。孔底ひずみ法は、ボアホールの孔底面にひずみゲージを貼付して応力解放するもので、Oka et al.¹⁷⁾はフラットな孔底に貼付した8素子ゲージを用いて1つのボアホールのみで6個の独立な応力成分を決定できる方法を開発した。Sugawara and Obara¹⁸⁾, Obara and Sugawara¹⁹⁾は、半球面状に整形した孔底に16素子ゲージを貼付する球状孔底ひずみ法を開発している。最近に至り小林ら²⁰⁾およびSakaguchi et al.²¹⁾によって、ひずみゲージ貼付のための小孔径ボアホールと同一孔径でオーバーコアリングできる円錐孔底ひずみ法が提案されている。この方法は、24個のひずみ測定値を用いて最小二乗法により応力値を算定するため測定精度が高く、国内での測定実績も多い。図6に円錐孔底ひずみ法の測定概要図を示す。

2.2.2 埋設ひずみ法

埋設ひずみ法は、1970年代後半金川ら²²⁾により開発された。測定に用いる埋設型変位計（多軸ひずみ計）は、開発当初二次元応力解析用の5成分型であったが、その後、金川ら²³⁾によって三次元応力解析が可能な8成分型に改良された。この方法は、柔らかいモールド材に配置された8成分多軸ひずみ計をボアホール内にセメントミルクで固定し、応力解放に伴うボアホールの三次元的な形状変化を測定するものである。ひずみ計を直接孔壁に接着しないため、軟岩から硬岩までの幅広い測定対象に適用可能である。もう一つの大きな特徴は、多軸ひずみ計の埋設された回収コアを用いて、ひずみ計素子それぞれのキャリブレーション（ひずみ感度試験）を行うことにある。埋設ひずみ法はわが国で独自に開発された地圧測定法であり、国内の地下発電所や原子力発電所の立地調査に多くの実績を有している。図7に埋設ひずみ法の現位置測定概念図を示す。

2.2.3 孔壁ひずみ法

孔壁ひずみ法は、1960年代後半 Leeman²⁴⁾により提案され、Hiramatsu and Oka²⁵⁾により孔壁のひずみと6個の独立な応力成分との関係が完全な解析解として明らかにされた。この方法は、小孔径ボアホール壁面の3箇所に4成分ひずみ計を貼付し、大孔径ボーリングの削孔により応力解放したときのひずみから、三次元応力を決定するものである。孔壁に直接ひずみゲージを貼付することが難しいため適用例は少なかったが、CSIRO（オーストラリア鉱山局）で開発されたCSIRO HI Cellを用いた測定例がPine et al.²⁶⁾により報告されてからは海外での測定例が多くみられ、わが国でも数例の実績がある。図8に孔壁ひずみ法に用いる12素子ひずみ計を示す。

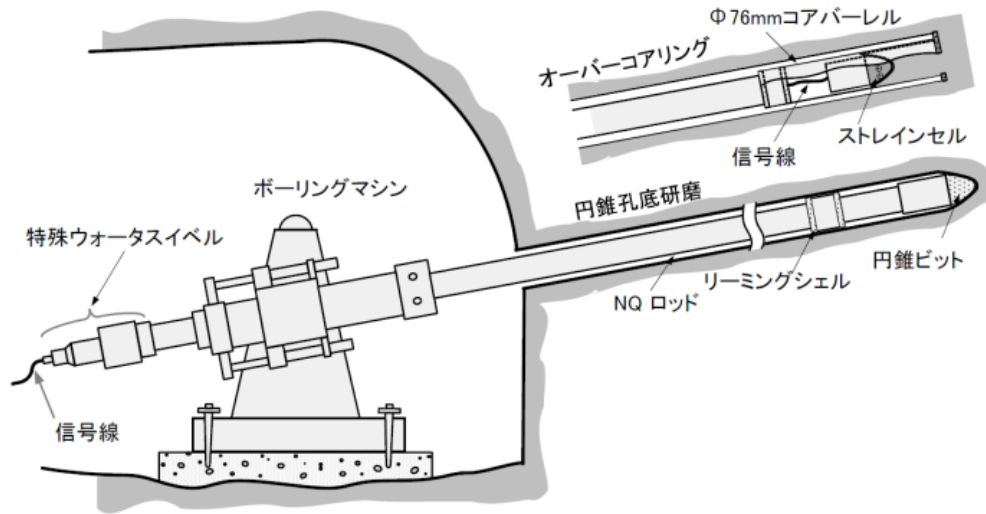


図6 円錐孔底ひずみ法の原位置測定概要図

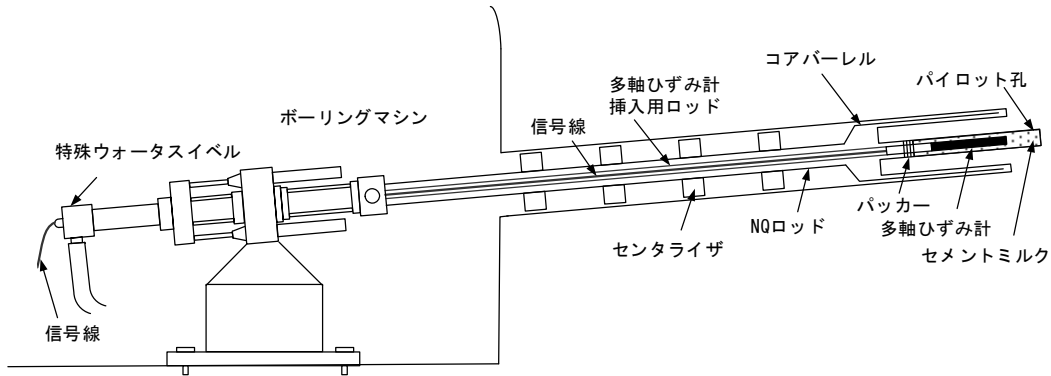


図7 埋設ひずみ法の原位置測定概念図

2.2.4 孔径変化法

孔径変化法は、多くの研究者により研究されており、1950年代終りに Leeman²⁷⁾は、CSIR (南アフリカ共和国の国立機械工学研究所) I型およびII型を、Obert et al.²⁸⁾や Merrill²⁹⁾は USBM (アメリカ鉱山局) 型を開発した。この方法は、小孔径ボアホールの直径を応力解放前後で測定し、その変化量からボアホール軸に直交する二次

元地圧を決定するものである。この方法では、測定器をボアホール内に機械的に固定することで応力解放前後の孔径変化が計測できるため、測定作業の容易な点が大きな特徴である。国内でも、菅原ら³⁰⁾が三次元的な孔径変化が計測できるデータロガー内蔵型の孔径変化測定器を開発した。図9に孔径変化法に用いる3成分ゲージを示す。

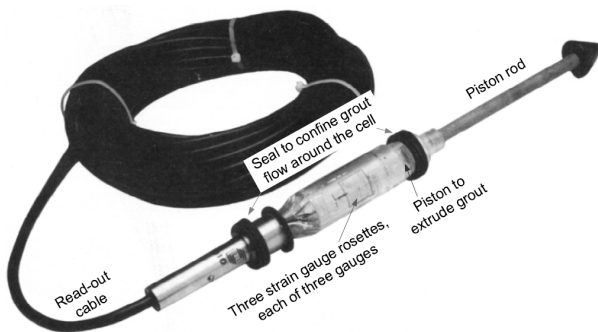


図8 孔壁ひずみ法に用いる12素子ひずみ計 (CSIRO HI セル)³¹⁾



図9 孔径変化法に用いる3成分ゲージ (USBM ゲージ)³¹⁾

2.3 孔壁やコアの自然破壊を利用する方法

岩盤にボアホールを削孔したとき、ボアホールの孔壁やボーリングコアに破壊現象が起こることがある。ここではこれまでに述べた原位置での能動的な測定手法とは異なり、ボアホール削孔に伴い自然に発生する破壊現象を観察することにより、地圧を推定する方法について述べる。特に、ボアホールに発生する破壊現象を利用する方法の開発は、ごく最近進歩の著しいボアホール壁面の観察機器の発達によるところが大きい。現在、孔壁や岩石コアの破壊現象を利用する方法としては、図10に示す3つの手法がある。

2.3.1 ボアホールブレイクアウトの利用

側圧比の大きな応力状態にある岩盤に鉛直方向のボーリングを行ったとき、ボアホール壁面の縦方向に2条の連続的な剥離状の破壊が生じることがある。この破壊現象はボアホールブレイクアウトと呼ばれ、1960年代に Leeman³²⁾が初めて報告した。その後 Zback et al.³³⁾, Hickman et al.³⁴⁾らは、ボアホール壁面形状のデータを詳細に分析し応力測定法の一つとして提案した。ボアホールブレイクアウトは山はねの破壊現象と類似しており、両者とも円筒形の壁面の圧縮破壊によるものである。ボアホール軸に直交する円筒形断面において最小圧縮主応力方向の壁面に最も大きな圧縮応力が集中する。この圧縮応力が壁面を構成する岩盤の圧縮強度を超えたとき破壊が起きる。ボアホールテレビューアなどの高精度なボアホール径測定装置の発達によって、Plumb and Cox³⁵⁾, Cowt Gill et al.³⁶⁾らは、北米および北海地域の採油井などでボアホールの拡大した方向と応力場に関して膨大なデータを収集している。図11にボアホールブレイクアウトの観察例を示す。

2.3.2 ドリリングインデュースドフラクチュアリング

側圧比の大きな応力状態にある岩盤に1000m以上の鉛直ボーリングを行ったとき、ボアホールに雁行状に配列した引張り裂が観察されることがある。この現象は比重の大きい掘削泥水の使用することにより、水圧破碎と同種の発生原因で生じる。Stock et al.³⁷⁾は、鉛直方向が1つの主応力軸であると仮定できるとき、引張り裂は孔壁面の最大圧縮主応力の軸方向に発生するため、これらのき裂は最大主応力の方向を推定する方法として利用できることを報告している。Okabe et al.³⁸⁾は、ある範囲の深度で地圧状態が同様であると仮定すると、いくつかの深度で測定された引張り裂の位置と傾きおよびボアホールの方向から、三次元初期地圧状態を推定する方法も提案している。図12に Zback et al.³⁹⁾によるドリリングインデュースドフラクチュアリングの観察例を示す。

2.3.3 コアディスクキングの利用

ボアホール軸の直交断面内での地圧が、ボアホール軸方向の地圧の数倍ある岩盤にボーリングを行ったとき、コア径の2/3割程度で、ほぼ同じ厚さでディスク状に分離したコアが採取されることがある。この現象はコアディスクキングと呼ばれており、本来割れ目のない岩盤でボーリングビット先端部において、コア軸方向の引張応力が岩石の引張強度を超えたときに、コアがディスク状に破断するものと考えられている。ディスクキングコアから初期地圧の情報を推定する試みは古くから行われているが、菅原ら⁴⁰⁾はディスク形状と地圧の関係式を提案した。その後、Haimson and Lee⁴¹⁾はディスクの形状から、コア軸方向が主応力の一つであると仮定し地圧の主応力方向を推定した。Ishida and Saito⁴²⁾は、応力解放法で得られた中空のディスクキングコアを用いて、ディスクキングが発

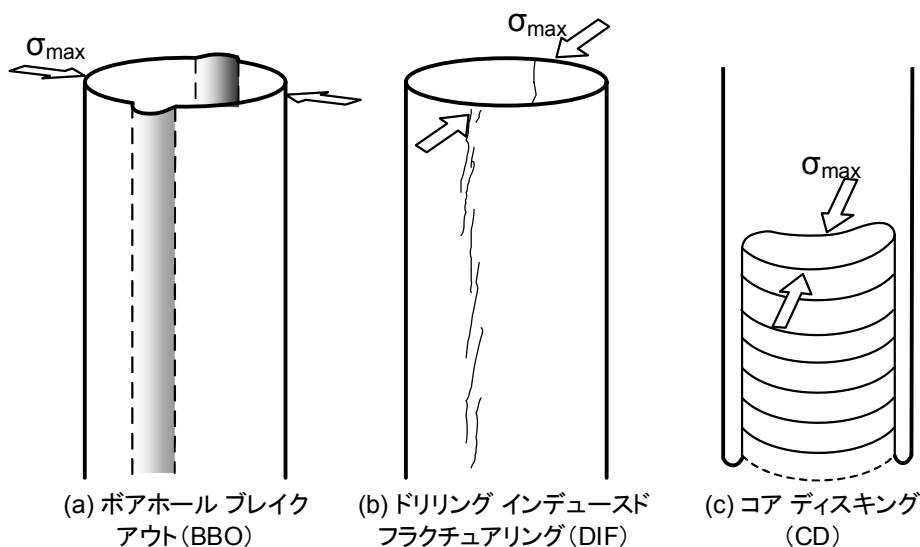


図10 孔壁やコアの自然破壊を利用する方法の概念図

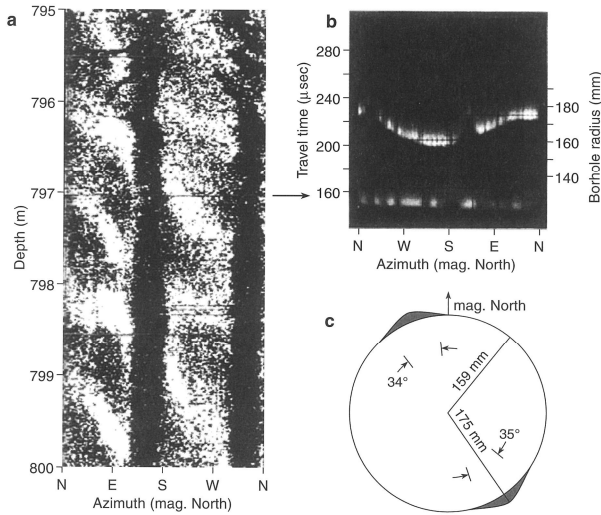


図 11 ボアホールブレイクアウトの観察例³³⁾。a ボアホールテレビユーア画像, b ボアホール内径の音波速度測定でのオシロスコープ画像, c ボアホール内径計測を基に作成したボアホール断面形状

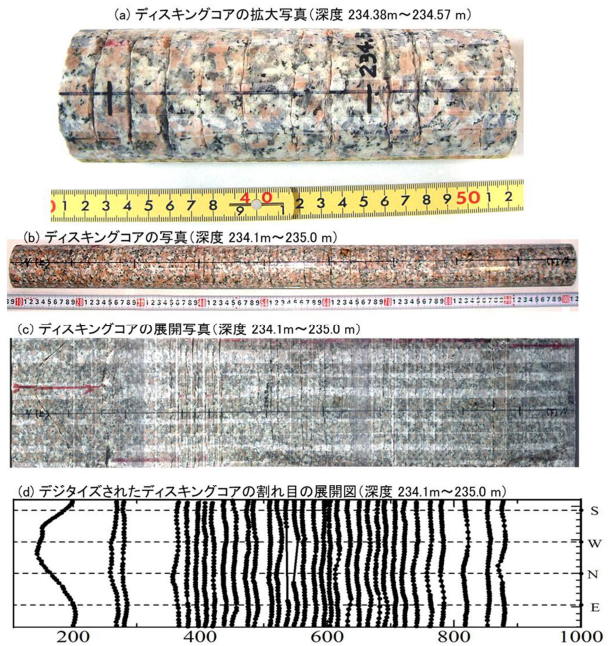


図 13 ディスキングコアと展開画像⁴⁴⁾。(a) ディスキングコア, (b) 同全体写真, (c) 同展開写真, (d) 同デジタルサイズされた展開画像

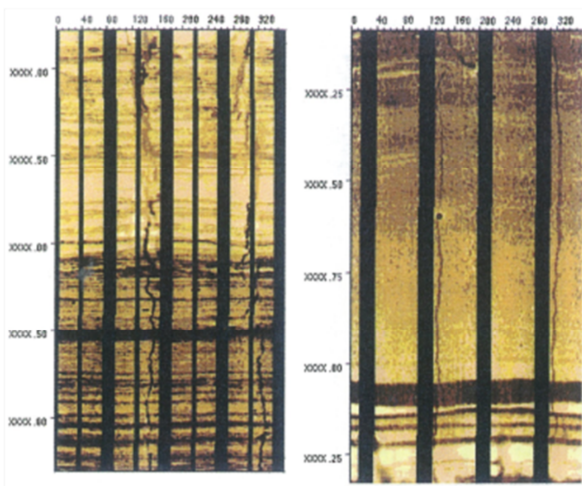


図 12 ドリリングインデュースドフラクチュアリングの観察例³⁹⁾

生ずる地圧条件を提案した。松木ら⁴³⁾は、軸対称物体非軸対称荷重問題の有限要素法コードを用いて、一般的地圧条件におけるコア内部およびコア下部の引張主応力分布を解析し、ディスクングが起きるための地圧範囲と具体的地圧条件式を提案している。図 13 に横山ら⁴⁴⁾が応力解析に用いたディスクングコアの側面展開写真およびデジタルサイズされた展開画像を示す。

2.4 岩石コアを利用する方法

1970年代から、室内で岩石供試体を用いて原位置の地圧を推定する方法が提案されてきている。これらの方法は、原位置での方法に比べ測定作業が容易であり、定方位の供試体さえ採取できれば適用深度に限界のない点が大きな特徴である。現在、実用的に用いられている主な測定方法は、図 14 に示す 5 つの方法である。

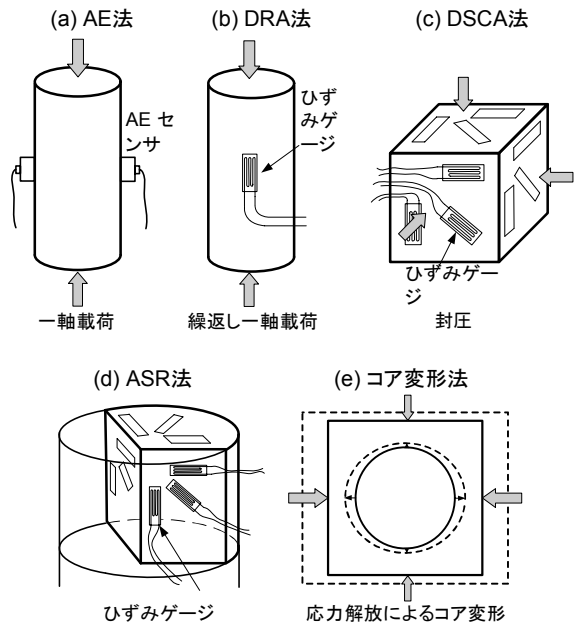


図 14 岩石コアを利用する方法の概念図

2.4.1 AE 法

AE (Acoustic Emission) とは、岩石などの塑性材料が圧縮や曲げなどの変形の生じるような荷重を受けたときに発生する微小破壊音のことをさし、AE の周波数は可聴帯域を超えることが多い。AE 法は、材料が一度受けた荷重の大きさまでは AE がほとんど発生しないという「カイザー効果」と呼ばれる現象を利用して初期地圧を求める方法である。1950 年代初め Kaiser⁴⁵⁾は、多結晶金属材料の引張試験時において繰返し荷重履歴を受けた

材料が、過去の最大履歴荷重に達するまでは AE をほとんど発生しないという現象を発見した。この現象はカイザー効果と呼ばれ、金属材料の非破壊検査によく用いられるようになった。カイザー効果を利用して初期地圧を推定する方法は、金川ら⁴⁶⁾、瀬戸ら⁴⁷⁾によって提案された。この方法では、岩石供試体の一軸圧縮荷重時において、供試体に密着させた圧電素子等を用いて AE を計測する。作製した供試体の方向別に初期地圧成分の値を推定することができるため、独立した 6 方向以上の供試体を用いることにより、三次元での初期地圧を算定することができる。図 15 に岩石の繰り返し荷重時に見られる AE のカイザー効果の概念図を、図 16 に AE 法で用いられる供試体の例を示す。

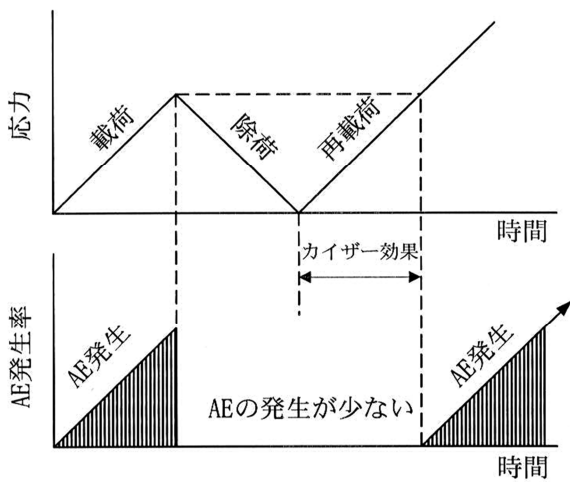


図 15 岩石の繰り返し荷重時に見られる AE のカイザー効果の概念図⁴⁹⁾

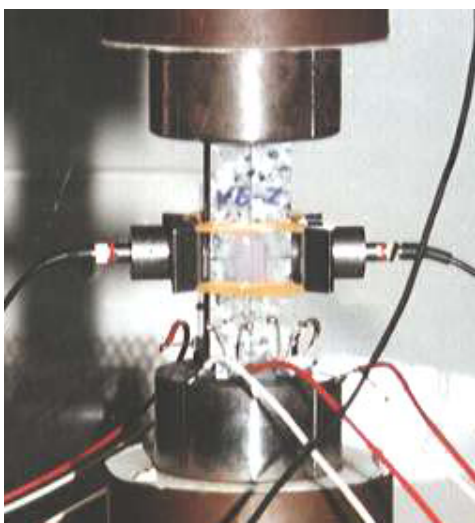


図 16 AE 法に用いられる供試体の例。直方体に整形された岩石の側面に AE センサとひずみゲージが接着された状態

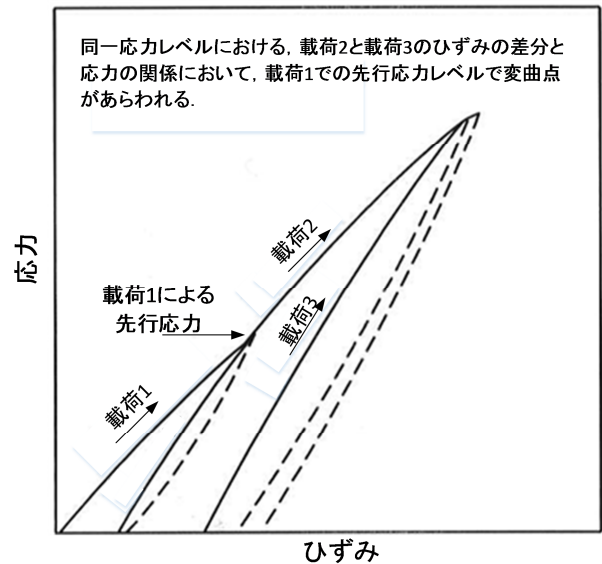


図 17 岩石の繰り返し荷重時に見られるひずみのヒステリシスの概念図 (横山ら⁴⁹⁾に加筆)

2.4.2 DRA 法

DRA (Deformation Rate Analysis) 法は変形率変化法とも呼ばれ、岩石の応力-ひずみ関係の非線形性を利用する方法で、山本ら⁴⁸⁾によって提案された。この方法では、岩石の応力-ひずみ関係において、岩石に一軸圧縮応力を繰り返し与えたとき、各繰り返し時の同一応力レベルにおけるひずみの差と応力のヒステリシスが利用される。この差ひずみと応力の関係における変曲点が、岩石が受けていた先行応力に一致するものと仮定されている。DRA 法は AE 法と同様に、岩石供試体の一軸圧縮荷重を行い、その供試体の軸方向の初期地圧成分を測定するため、三次元での初期地圧を評価することができる。これを利用して、横山ら⁴⁹⁾は、DRA 法と AE 法を同一供試体で行う方法を提案して、それぞれの測定結果をクロスチェックしている。図 17 に岩石の繰り返し荷重時に見られるひずみのヒステリシスの概念図を示す。

2.4.3 DSCA 法

DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法は差ひずみ曲線解析法とも呼ばれ、定方位コアから切り出した立方体の試料に静水圧を作用させる方法である。この方法は、Simmons et al.⁵⁰⁾や Siegfried et al.⁵¹⁾によって、岩石供試体内のクラックの定量化評価法として開発された。その後、Strickland et al.⁵²⁾によって初期地圧測定に応用され、現在に至るまで多くの研究者によって研究が行われてきた。DSCA 法では、地圧から解放された岩石に封圧をかけたとき、マイクロクラックの閉塞に伴う収縮変形が地圧成分の大きさに応じて変化する。この現象を利用して、静水圧下におけるマイクロクラックの閉塞する圧力を、立方体の供試体に貼付された 6 枚以上のひずみゲージの応力-ひずみ関係から求める。この方法では、三次元主応力比とその方向が求まるが、地圧の値は岩石試料を採取

した深度から推定される土被り圧をその鉛直応力成分と仮定して、他の応力成分を求める。この方法の大きな特徴は、1 個の供試体から三次元での初期地圧が推定できるところにあるが、松木ら⁵³⁾は DSCA 法の基本仮定や解析理論についてはまだ検討の余地があることを指摘している。図 18 に DSCA 法の測定原理の概念図を示す。

2.4.4 ASR 法

ASR (Anelastic Strain Recovery) 法は非弾性ひずみ回復法とも呼ばれ、掘削直後のボーリングコアの非弾性的なひずみの回復を計測する方法である。この方法は Voight⁵⁴⁾により、岩石の短時間での回復ひずみが全体の回復ひずみに比例すると仮定できれば、初期地圧測定法として有効であることが示唆された。岩石が等方均質で線形粘弾性であると仮定すれば、応力解放により回復する非弾性ひずみの主ひずみ方向は、初期地圧の主応力方向に一致する。この方法は、多くの研究者が比較的深い深度から採取された定方位コアに適用しており、中でも Teufel⁵⁵⁾は直径方法の変位を計測するためのディスクゲージを用い、Wolter and Berckhermer⁵⁶⁾は差動トランス式変位計を用いた計測結果を報告している。Matsuki⁵⁷⁾、Matsuki and Takeuchi⁵⁸⁾は、定方位コアの非弾性回復ひずみのデータから原位置の三次元応力の大きさと方向を決定するための理論解を導いた。図 18 に ASR 法の測定原理の概念図を示す。

2.4.5 コア変形法

コア変形法は、応力解放に伴うボーリングコアの断面形状変化から初期地圧を推定する方法で、船戸ら⁵⁹⁾により考案された。この方法は、定方位ボーリングコアの断面形状を深度方向に連続的に計測し、得られた平均的な楕円形状から孔軸に直交する二次元での初期地圧の主応力方向を推定する。岩石の弾性定数を仮定すれば、主応力差の大きさが算定できる。ボーリングコアは、回転ビットで切削されることによって原位置応力から解放される。その際、切削される瞬間のコアは直径 d_0 の真円で、切削されたコアは応力解放に伴って弾性的に変形し、その変形量は解放応力に比例する。コア軸に直交する面内応力が異方的であれば、コアの断面は真円ではなくわずかに扁平となる。そこで、コアの断面形状を精密に求めることにより、二次元応力を算定することができる。この方法は、応力解放に伴うコアの変形から地圧を求めるという原理においては、コア自体をセンサとした応力解放法の一つといえる。コアを整形する必要もなく非破壊の測定ができること、コア径に制約はなく比較的短いコアでも測定できることなどから適用範囲は広く、他のコア法との併用も容易である。図 19 にコア変形法測定装置の概念図を示す。

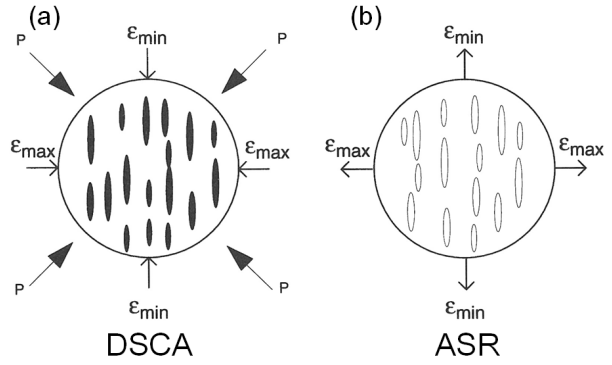


図 18 DSCA 法と ASR 法の測定原理の概念図⁶⁰⁾。

(a)DSCA 法では地圧から解放された岩石に封圧をかけたとき、マイクロクラックの閉塞に伴う収縮変形があらわれる。(b)ASR 法では岩石が地圧から解放されたとき、マイクロクラックの開放・進展が非弾生的な膨張変形としてあらわれる

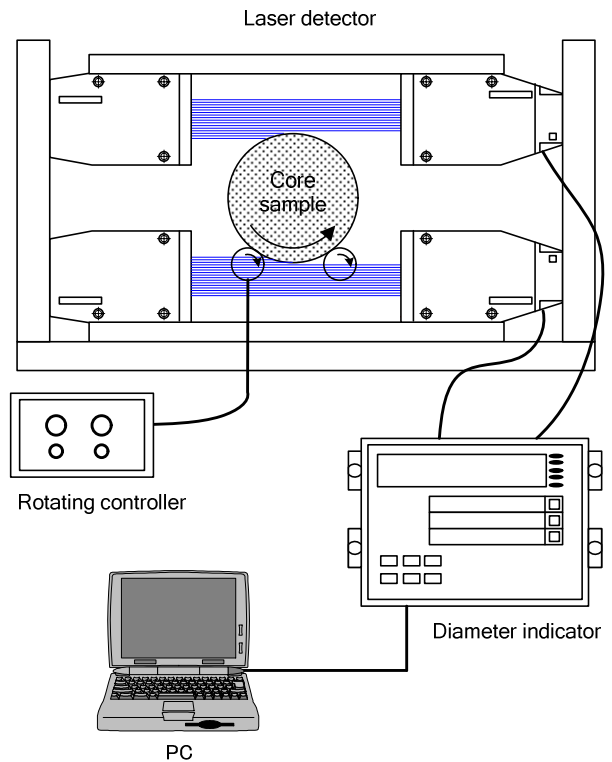


図 19 コアの外形測定装置の概念図⁵⁹⁾。ローラーでコアを回転させながら上下のエッジを 2 台のレーザー計測器で検出する装置

3. 国内外での初期地圧測定法の規格／基準

工学分野での国際規格 (International standard) は、ある国における技術的課題を国際協力に基づいて解決したいとき、文化や地域性が異なるゆえの技術的障壁を取り除き、優れた技術を汎用的に利用するために必要とされる制度である。また、新技術・製品の国際的普及のためにも、技術内容が国際的に理解できる形で共有化されていることが重要である。

3.1 国際規格と学会基準

国際規格は国際標準化団体が策定した規格であり、現在国際標準団体として最も大きな組織は国際標準化機構 (International Organization for Standardization, 略称 ISO) である。この組織の規格は ISO の名称で呼ばれる。ヨーロッパでは、ユーロを含む 30 カ国が加盟する欧州標準化委員会 (Comité Européen de Normalisation, 略称 CEN) があり、一貫した標準規格と仕様の開発・保守・配布を行っている。この組織で標準化された規格はヨーロッパ規格 (EN) の名称で呼ばれる。CEN の技術委員会が制定する地盤系の基準である欧州構造基準 (いわゆるユーロコード) が 2010 年 4 月から欧州での統一構造基準となったことから、ユーロコードが ISO の規格制定にも大きな影響を及ぼしている。

一方、初期地圧の分野における国際的な規格では、まだ ISO や CEN での基準化の動きはなく、工業規格では世界最大規模の標準化団体である ASTM International (米国試験材料協会: 旧称 American Society for Testing and Materials) が発行する規格にその一部がみられる。一旦発行された個別の規格は、数年に一度改定が行われているが、初期地圧に関する最新の規格は 2008 年に 2 種類の規格^{61),62)}が改定されている。また、英国規格協会 (British Standards Institution, 略称 BSI) によって制定されたイギリスの国家規格 (British Standards, 略称 BS) でも、初期地圧に関する規格⁶³⁾が発行されている。初期地圧に関する最新の規格は、1999 年版に 2 種類の規格が発行されている。

初期地圧の分野においては、上記の国際規格以外にも岩盤工学関係の学会で独自に制定している基準や提案がある。国際的には国際岩の力学学会 (International Society for Rock Mechanics, 略称 ISRM) の専門技術委員会で各種技術の標準化を目指した「Suggested Method」が発行され、これまでも 1987 年⁶⁴⁾、1999 年⁶⁵⁾および 2003 年^{66),67)}に初期地圧測定法に関する Suggested Method が提案されている。ここでは、この Suggested Method も ISRM の学会基準として取り扱う。国内においては、地盤工学会 (The Japanese Geotechnical Society, 略称 JGS) から 2012 年に初期地圧測定法に関する JGS の学会基準^{68),69)}が発行されている。

3.2 初期地圧測定法の規格／基準

1987 年以降に発行されているこれらの規格／基準について表 2 に整理した。測定法としては、表 1 で分類した「岩盤の破碎」を利用する方法の一つである「水圧破碎法」と「応力解放法」の全ての方法である。「孔壁やコアの自然破碎」を利用する方法や「岩石コア」を利用する方法については、まだ規格や提案法は発行されていない。一方、国内では岩石コアを利用する方法の適用も多く、2000 年には資源・素材学会の秋季大会において「岩盤力学・岩盤工学の新展開: 深部地圧計測法の標準化」と題した企画発表において、ASR 法⁷⁰⁾、DSCA 法⁷¹⁾、DRA 法⁷²⁾および AE 法⁷³⁾の各標準的な手法が提案されている。また、このセッションでは水圧破碎法の標準法⁷⁴⁾についても提案されている。さらに、ISRM の国内ワーキンググループから AE 法の標準化の試みがなされている⁷⁵⁾。

これまでに発行されている水圧破碎法の規格／基準のうち、ASTM International と BS ではともに三次元での 3 主応力のうちの 하나가鉛直応力であり、この鉛直応力は土被り圧であると仮定している。水圧破碎試験で求められる値は、ボアホールに直交する平面内における最大・最小主応力とその方位である。これらの規格で示されている基本的な測定法では、ボアホールの割れ目のない区間を図 2 に示したような上下二つのパッカーで仕切り、水圧破碎時の圧力、シャットイン後のき裂閉口圧、再加圧時のき裂再開口圧と岩石の引張強度から二次元での最小主応力と最大主応力を求めるものである。最大主応力の方向は、別途ボアホールに挿入するインプレッションパッカーを用いた人工き裂の方位測定により求める。一方、2003 年に ISRM で提案された方法では、既存のき裂を積極的に利用した HTPF と称される方法により、1 つのボアホールでの測定により、三次元的な初期地圧の測定が可能であることが示された。

応力解放法の規格／基準では、原理的には図 5 で示した 4 つの方法が基本となっており、いずれの方法も測定法として理論的背景が明確である。現在も適用実績の多い方法は、BS と ISRM で基準化されている CSIRO HI セル (図 8) を用いた孔壁ひずみ法、JGS で基準化されている 24 素子ストレインセル (図 20) を用いた円錐孔底ひずみ法 (CCBO) である。ASTM International と ISRM で基準化されている USBM ゲージ (図 9) を用いた孔径変化法も古くから実績の多い方法ではあるが、この方法は 1 つのボアホールでは二次元での応力測定に限られるため最近では利用頻度が少なくなってきた。BS と ISRM で基準化されている Borre probe⁶⁶⁾ (図 21) を用いた孔壁ひずみ法は、測定のためのゾンデにひずみ計とデータロガーが内蔵されており、応力解放法が不得意とする鉛直下向きのボアホールでも深さ 600m 以上での実績がある。

表2 国内外で公表されている初期地圧測定法の規格/基準

基準化の組織	測定法	規格/基準/ 提案者	規格/基準/提案法のタイトル	公開年
ASTM	水圧破砕法	D4645-08	Standard Test Method for Determination of In-Situ Stress in Rock Using Hydraulic Fracturing Method	2008
	孔径変化法 (応力解放法)	D4623-08	Standard Test Method for Determination of In Situ Stress in Rock Mass by Overcoring Method-USBM Borehole Deformation Gauge	2008
BS	水圧破砕法	BS5930	30.2.6 Hydraulic fracturing technique	1999
	孔壁ひずみ法 (応力解放法)	BS5930	30.2.2 Determination of the in-situ triaxial state of stress in rock	1999
ISRM	水圧破砕法	Haimson B.C. and Cornet F.H.	ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)	2003
	孔壁ひずみ法 (応力解放法)	Sjöberg J., Christiansson J., Hudson A.	ISRM Suggested Method for rock stress estimation-Part 2: overcoring methods	2003
	孔底ひずみ法 (応力解放法)	Sugawara K. and Obara Y.	Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique.	1999
	孔径変化法 (応力解放法)	Commission on testing methods	Suggested Method for Rock Stress Determination	1987
	孔壁ひずみ法 (応力解放法)	Commission on testing methods	Suggested Method for Rock Stress Determination	1987
地盤工学会 (JGS)	埋設ひずみ法 (応力解放法)	JGS3741-2012	埋設ひずみ法による初期地圧の測定方法	2012
	孔底ひずみ法 (応力解放法)	JGS3751-2012	円錐孔底ひずみ法による初期地圧の測定方法	2012

ASTM : American Society for Testing and Materials International

BS : British Standard

ISRM : International Society of Rock Mechanics

JGS : 地盤工学会 (The Japanese Geotechnical Society)



図20 円錐孔底ひずみ法に用いる24素子ひずみ計

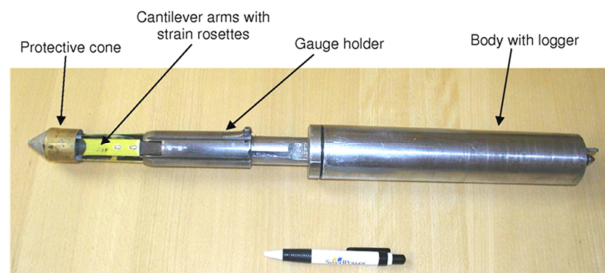


図21 孔壁ひずみ法に用いるデータロガー内蔵型のひずみ計⁶⁶⁾

4. 初期地圧測定法の基準化と国際化

これまでみてきたように、初期地圧測定法の世界的な基準化の動きは、現時点では「水圧破砕法」と「応力解放法」に絞られている。「孔壁やコアの自然破碎」を利用する方法や「岩石コア」を利用する方法も、多くの現場での適用例が報告されているが、具体的な基準化の動きは見られない。このように基準化に対する手法別にみられる活動度の違いは、測定方法の理論的背景の違いによるものと思われる。すなわち、前者二つの方法に比べ後者二つの方法には、解析方法に理論的に未解明な部分が多いため、基準化の提案を行うまでに至らないものと推察される。

わが国においても、水圧破砕法と応力解放法は初期地圧測定法として適用される頻度が高い。これらの方法は、測定に要するコストは他の方法比べ高くなるが、測定結果により高い信頼性を求められるときには、この両者どちらかの方法が採用される。この二つの方法の使い分けは、地表から深い場所での初期地圧を知る必要があるときや調査坑道などが開削されていない段階においては水圧破砕法が適用される。一方、初期地圧を知りたい箇所付近まで調査坑道や空洞が開削されているときには、応力解放法が適用される。これら二つの方法の測定結果の信頼性については、測定される物理量が異なるため直接的な比較はできないが、応力解放法では1回の測定で三次元応力が解析できるため、得られる情報量が多いためより有利な方法と考えられている。これら両者の特徴には、それぞれ測定可能な深度や得られる地圧成分において互いに補い合う要素があるため、水圧破砕法と応力解放法は最も重要な測定方法と位置づけられる。今後は、これまで国内で基準化してきた水圧破砕法と応力解放法が、国際的な規格になるべく道筋を模索していくことが重要である。

4.1 国際規格に付加すべき新しい水圧破砕法

現在、国内で主に用いられている水圧破砕法は、先に示した ASTM International, BS および ISRM の規格や基準で示されている方法（ここでは、「従来法」と呼ぶ）に観測方程式と測定システムに修正を加えたもの（ここでは、「修正法」と呼ぶ）である。以下に、これらの修正すべき考え方と試験装置の改良点についての概要を述べる。

4.1.1 修正法の観測方程式

水圧破砕法は、水圧により造成した岩盤の新たなき裂が開口あるいは閉口するとき、観測される水圧変化から岩盤に作用する応力を算定する方法である。等方均質弾性体の仮定できる岩盤にボアホールを削孔したとき、孔軸に直交する二次元面内でのボアホール周りの応力状態は図 22 のようになる。このとき、二次元面内での岩盤の初期地圧が最大主応力 S_H 、最小主応力 S_h とすると、 S_H 軸と交差する孔壁 A 点の応力 ($\sigma_{\theta 1}$) および S_h 軸と交差

する孔壁 B 点の応力 ($\sigma_{\theta 2}$) はそれぞれ式(1)、式(2)で表される。

$$\sigma_{\theta 1} = 3S_h - S_H \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta 2} = 3S_H - S_h \quad (2)$$

このとき、圧縮応力を正とすると $\sigma_{\theta 1} < \sigma_{\theta 2}$ となり、円孔内の水圧 P を増加させていくと A 点で引張応力が最大となり、ある時点で引張き裂が生じる。このときの水圧 P_b (破碎圧, Breakdown pressure) は、岩盤の引張強度を T 、岩盤の間隙水圧を P_p としたとき式(3)で表される。

$$P_b = 3S_h - S_H + T - P_p \quad (3)$$

次に送水を止め、送水管のバルブも解放して水圧が低下し、き裂が閉じた後に再度送水し水圧を増加させたとき、図 23 に示すようにこのき裂が再開する瞬間の水圧 P_r (き裂再開口圧, Re-opening pressure) は式(4)で表される。

$$P_r = (3S_h - S_H) / 2 \quad (4)$$

き裂再開口時においては、岩盤の引張強度 $T=0$ 、岩盤の間隙水圧 P_p は一旦開いたき裂内部の水圧 P_r と同一と考える。次に、き裂が十分伸びた後、水の圧入を急停止（以下、シャットイン）したときのき裂先端が閉じ始める瞬間の圧力が最小主応力 S_h と平衡状態になるものと仮定すると、このときの水圧 P_s (き裂閉口圧, Shut-in pressure) は式(5)で表される。

$$P_s = S_h \quad (5)$$

以上が新しい考え方に基づいた水圧破砕法の観測方程式で、二つの観測パラメータ P_r と P_s から岩盤の初期地圧（最大主応力 S_H 、最小主応力 S_h ）を求めることができる。

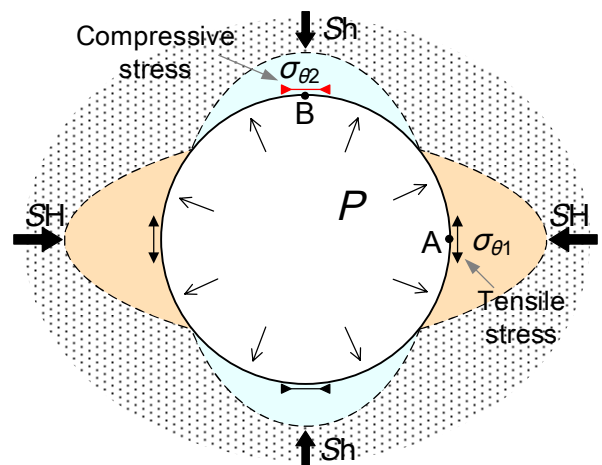


図 22 二次元面内でのボアホール周りの応力状態

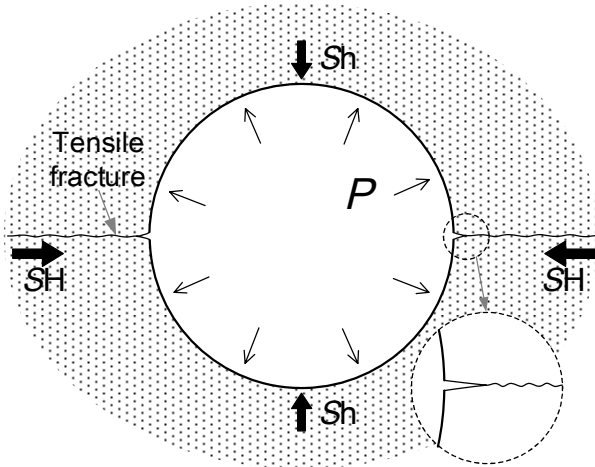


図 23 水圧破砕試験におけるき裂の再開口時の模式図

4.1.2 従来法の観測方程式

修正法と従来法での考え方の大きな違いは、き裂の再開口時における再開口前のき裂の内部の水圧の考え方にある。修正法では、一旦開いたき裂は閉じた後でもそのき裂の内部には孔内に加えられる水圧が同等に生じているものとする。一方、従来法では閉じたき裂は密着し、き裂の内部にはき裂ができる前と同じ初期状態の間隙水圧のみが存在しているとする。この考え方に基づく観測方程式は式(6)で表される。

$$P_r = 3S_h - S_H - P_p \quad (6)$$

修正法の式(4)と従来法の式(6)とを S_H を左辺として書き換えると、それぞれ式(4')と式(6')となる。

$$S_H = 3S_h - 2P_r \quad (4')$$

$$S_H = 3S_h - P_r - P_p \quad (6')$$

S_H を求める方法としては、式(3)を用いることもできる。

式(3)の S_H を左辺に移項して書き換えると、式(3')となる。

$$S_H = 3S_h - P_b + T - P_p \quad (3')$$

この観測方程式は、従来法、修正法とも同じ式であり、 S_H を求めるための方程式としては有効であるが、岩石の引張強度 T の値にばらつきが生じやすいため、この式から得られる S_H は参考値として取り扱う考え方が一般的である。

4.1.3 加圧系のコンプライアンス

水圧破砕試験で直接得られるパラメータのうち最小主応力 S_h を与えるき裂開口圧 P_s の読み取りは、Hayashi and Himson⁷⁶⁾が示した水の圧入を急停止した後の圧力低下曲線から求める方法が最も信頼性が高いものと考えられる。しかし、最大主応力 S_H は P_r と P_s の値に依存しており、 P_s の信頼性は確保されてもき裂の再開口圧 P_r の信頼性は水圧破砕システムの加圧系のコンプライアンスに大きく左右されることが Ito et al.⁸⁾により指摘されている。ここでのコンプライアンスとは、ある閉じた系における注入量と圧力変化の関係であり、コンプライアンスが小さいほど剛性の大きい加圧システムであり、送水に対してより鋭敏な圧力変化が得られることになる。従って、水圧破砕試験に用いる装置では、加圧系の容積はできる限り小さく、かつ加圧系の配管の剛性はできるだけ大きなシステムが理想的である。このようなシステムであれば、き裂の再開口試験において送水圧と送水量関係の変化からより精度よく再開口圧を求めることが可能となる。

修正法の考え方に対応した水圧破砕試験装置の概念図を図 2(a)に示した。この試験装置が従来法で用いられていた装置と大きく異なる点は、送水管に容積が小さく剛性の大きいステンレス管が、送水ポンプにシリンジポンプが使用されていることにある。この送水システムによ

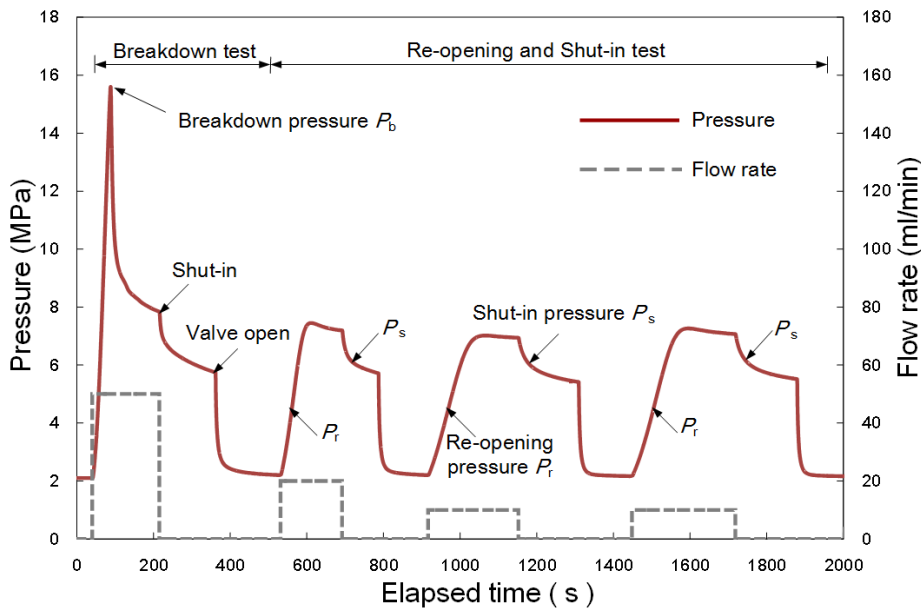


図 24 低コンプライアンス (高剛性) の加圧系を用いた水圧破砕試験の圧力と流量の経時変化の例 (Yokoyama et al.⁷⁷⁾)

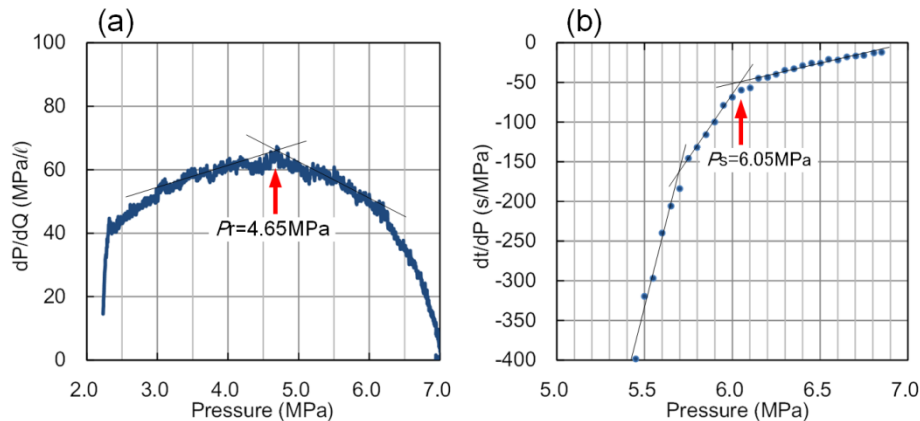


図 25 (a) : き裂再開口試験での再開口圧 P_r の読取り例, (b) : シャットイン試験での閉口圧 P_s の読取り例

りコンプライアンスの大幅な低下が可能となり、送水圧と送水量のきわめて高精度な制御が実現されている。この試験装置で得られた実際の水圧破碎試験時における送水圧と送水量の経時変化の例⁷⁾を図 24 に示す。この試験データから、20~10 ml/min 前後のきわめて微小な流量を高压で制御できていることや、送水開始と同時に鋭敏な圧力変化が観測されていることから、きわめて小さなコンプライアンスを持つ測定システムであると言える。

図 24 で示したき裂再開口圧 P_r とき裂閉口圧 P_s の読取り例を図 25 に示す。 P_r は図 24 のき裂再開口のための送水による圧力上昇区間において、水圧-送水レート関係の微係数のピークから求める (図 25(a))。 P_s は図 24 のシャットイン後において、圧力の経時変化の微係数に着目した最初の変曲点から求める (図 25(b))。

4.2 国際規格としての円錐孔底ひずみ法

現在国内で広く用いられている応力解放法は、表 2 に示した ISRM と JGS の基準として公開されている円錐孔底ひずみ法 (CCBO) である。この方法はわが国独自の方法で、ASTM International, BS および ISRM の規格や基準で公開されている他の方法に比べ多くの長所を有する。まず円錐孔底ひずみ法の優位性について整理する。次に、この方法の信頼性と適用性の向上を目指した改良に関する研究について紹介する。

4.2.1 円錐孔底ひずみ法の優位性

円錐孔底ひずみ法の大きな特徴は、ひずみ計を設置するためのパイロット孔とオーバーコアリング孔の孔径が同一であることにある。測定は $\phi 76\text{mm}$ の比較的小さい孔径のボアホールで行われるため、ボーリング掘削にかかわる労力が少ない。他の応力解放法では、ひずみ計や変位計を設置するパイロット孔が $\phi 36\text{mm}$ ~ $\phi 46\text{mm}$ 程度で、応力解放を行うオーバーコアリング孔は 100~200m 程度を必要とする。このため、2 種類の孔径のボア

ホール掘削とお互いのボアホールの孔軸を一致させるためのセンタリング技術とその資材が必要となる。

もう一つの大きな特徴は、ひずみゲージの接着方法にある。図 20 に示したような円錐形のモールド材の表面に 3 軸のロゼットゲージ 8 組がセットされたストレインセルと呼ばれるひずみゲージを、同じ円錐形に成型されたボアホールの孔底に接着剤で接着する。接着剤は粘性のあるシアノアクリレート系のいわゆる瞬間接着剤を用いるため、接着後の養生は 1 時間で十分である。また、接着前の孔底の岩盤状況はボアホールカメラで容易に確認できるため、確実に割れ目のない箇所を選定することができる。

また、ストレインセルに配置されているひずみゲージの数は 24 枚あり、全てのひずみデータが有意な場合には 1 回の測定で 24 個の連立方程式が得られる。未知数である 6 つの応力成分は、これらの方程式を最小二乗法で解くことにより得られる。このため、応力解析で得られる応力成分は、多くの観測値を基に計算された平均値として与えられるため、算定される初期地圧の信頼性が高い。

4.2.2 ひずみ感度の補正に関する改良

円錐孔底ひずみ法では、応力解析に用いる岩石のヤング率はオーバーコアリングで回収されたコア (以下、回収コア) から切り出した供試体を用いて一軸繰返し試験により求めている。他の、応力解放法では同じくオーバーコアリング回収コアに三軸や二軸の等方圧を載荷したとき、与えた圧力に応じて生じるひずみの大きさ (以下、ひずみ感度) を求めて、このひずみ感度係数を応力解析に利用している。一般に応力解放法で解析される地圧の大きさは、応力解析に用いるヤング率あるいはひずみ感度係数と比例関係にある。すなわち、解析に用いるこれらのヤング率や感度係数の正確さが解析結果の信頼性を左右することになる。

回収コアにひずみゲージが装着された状態で直接ひずみ感度を求めない円錐孔底ひずみ法では、測定精度を低下させる要因として、岩石物性の不均質性やひずみゲージの接着性に起因するひずみ感度のばらつきが考えられる。つまり、理想的には解放ひずみの測定箇所が様な弾性体であり、かつ原位置で得られる解放ひずみと室内での一軸繰返し試験でのひずみが同じひずみ感度で計測される必要がある。実際には図 26 に示すように原位置で計測されるひずみは円錐孔底のひずみ計測位置でストレインセルにより計測され、応力解析に用いるヤング率は回収コアからくり抜かれる一軸繰返し試験用供試体で計測される。もし、円錐孔底のひずみ計測位置と試験用供試体とで岩石の剛性に場所的なばらつきがある場合、あるいは接着不良によるひずみゲージの感度低下があれば、解析される初期地圧に誤差が生じることになる。

Yokoyama et al.⁷⁸⁾ は上記のような課題に対して、円錐孔底ひずみ法に直接的な感度試験を導入し、解析結果の信頼性の向上を目指した提案をしている。二軸感度試験器を用いて円錐孔底にストレインセルが接着された状態で回収コアに周圧を作用させたとき、周圧と円錐孔底のひずみとの関係を測定する。図 27 に示すように回収コアのストレインセル接着部に周圧を作用させ、このときの圧力-ひずみ関係からひずみ感度係数を得るものである。このキャリブレーション試験を行うことにより、ひずみ感度の補正あるいは個々のひずみ感度係数のばらつきを応力解析に取り込むことができ、より信頼性の高い初期地圧測定法になる。

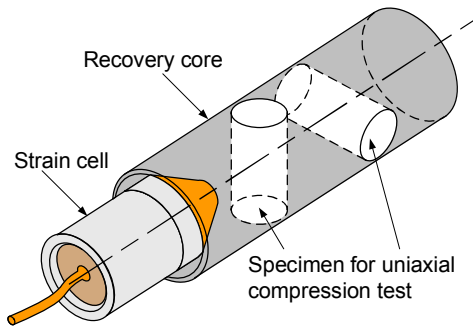


図 26 一軸繰返し試験に用いる回収コアの概念図³¹⁾

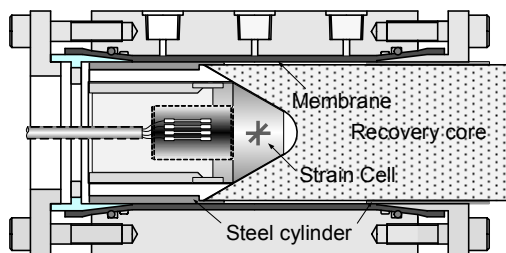


図 27 二軸感度試験に用いる感度試験器の概要図³¹⁾

4.2.3 深部地圧計測のための円錐孔底ひずみ法の改良

円錐孔底ひずみ法では、ボアホールの孔底にひずみゲージを接着する必要があることから、孔内水を排出するため水平より上向きのボアホールに適用されてきた方法である。坂口ら⁷⁹⁾は円錐孔底ひずみ法を下向きの深い深度でのボアホールに適用範囲を広げること目標に、「下向き円錐孔底ひずみ法」と称する方法の開発を行ってきた。この方法では、解放ひずみを測定するためのひずみゲージには従来の円錐孔底ひずみ法と同様のストレインセルを用いるが、ストレインセルの孔底へ接着方法に工夫を凝らし、下向きの深い深度にも対応できるようデータロガーを一体化した貼り付け装置が開発された。ボアホール孔径は、貼り付け装置の複雑化やデータロガー一体化のため、従来の NQ (孔径 76mm) から HQ (孔径 98mm) に変更されているが、コンパクトオーバーコアリングの長所であるパイロット孔とオーバーコアリング孔が同一孔径である点は維持されている。下向き円錐孔底ひずみ法での、パイロット孔の掘進、貼り付け装置の挿入、ストレインセルの接着、およびオーバーコアリングに至るまでの一連の作業手順を図 28 に示す。

この下向き円錐孔底ひずみ法の検証実験では、新たな測定装置として、孔底加工用特殊円錐ビット、孔底に移動するまでストレインセルを泥水から保護するための機構を有する貼り付け装置、窒素ガス噴射機能付きストレインセルユニット、ストレインセル貼り付け圧制御機構、簡易方位傾斜測定装置、孔内用小型データロガー等が開発された。この方法は、室内での検証実験がほぼ終了しており、実際の大深度ボアホールへの適用が待たれるところである。

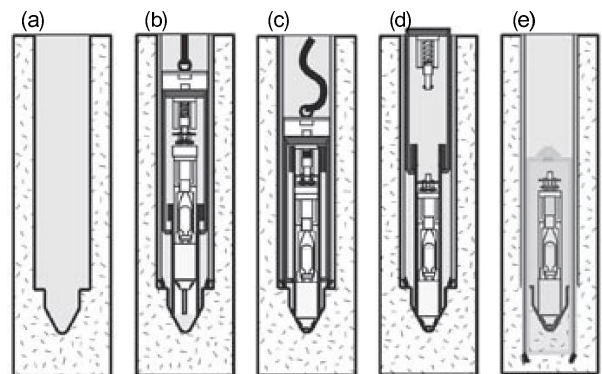


図 28 深部地圧計測のための円錐孔底ひずみ法のひずみ計の設置手順。(a)円錐ビットによる孔底の研磨、(b)インナーチューブの孔底到達状況、(c)ひずみゲージの孔底への接着と養生、(d)接着後ひずみゲージとデータロガーを残し貼り付け装置の回収、(e)オーバーコアリングの掘進作業⁷⁹⁾

5. おわりに

東南アジアや中近東における新興国での大規模な地下岩盤開発プロジェクトでは、ヨーロッパの設計コンサルタントがその国の政府から相談を受け各種調査の仕様書を作成することが多い。この仕様書作成においては、当然ながらヨーロッパでの規格や新しく提案されている基準を参考にされるため、岩盤調査の関係ではBS, ASTM InternationalあるいはISRMの規格や基準に準拠した方法が主体となる。特に初期地圧の分野においては、これまで述べてきたとおり、わが国で開発された方法の国際基準としてはISRMのSuggested Methodで公表されている円錐孔底ひずみ法のみである。今後は、この円錐孔底ひずみ法が技術的に高い信頼性と広い適用範囲を有する初期地圧測定法として国際的認知されるようより一層の改良を進めていきたい。

一方、水圧破砕法は国内での基準化の動きが進んでおり、基本的な測定方法は応力解放法と異なりヨーロッパでの基準と同じ手法に基づいている。しかし、従来から用いられている水圧破砕法は、先に述べたわが国で採用されている方法に対し、観測方程式や測定システムに関して重大な相違点がある。従って、この水圧破砕法についても早急な国内基準化と合わせて、国際基準についても国際会議を通じた提案をしていく必要がある。

さらに、孔壁や岩石コアの破壊現象を利用する方法や岩石コアを利用する他の初期地圧測定法については、いずれの方法もまだ国際的にも基準化されていない。DSCA法やASR法のように利用頻度が高く測定方法の考え方や測定手順が確立されつつある方法については、基準化の動きを進めていくべきと考える。今後は、我が国が得意とする測定手法の開発や測定装置の改良についても積極的に取り組み、これらの成果を国際会議の場で公表し、海外の研究者や技術者と意見を戦わすことが重要と考える。

参 考 文 献

1) Hubbert, K.M. and Willis, D.G. (1957) Mechanics of hydraulic fracturing. *Petrol. Trans. AIME*, T.P. 4597, 210, p. 153-166.
 2) Scheidegger, A.E. (1962) Stresses in the Earth's crust as determined from hydraulic fracturing data. *Geologie und Bauwesen*, 27, p. 45-53.
 3) Kehle, R.O. (1964) Determination of tectonic stress through analysis of hydraulic well fracturing. *J. Geophys. Res.*, 69, p. 252-273.
 4) Fairhurst, C. (1964) Measurement of in situ rock stresses with particular references to hydraulic

fracturing. *Rock Mech. Eng. Geol.*, 2, p. 129-147.
 5) Haimson, B.C. (1978) The hydro fracturing stress measuring method and recent field results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15, p. 167-178.
 6) Comet, F. H. (1986) Stress determination from hydraulic tests on preexisting fractures -the HTPF method, in *Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements*, Stockholm, Centek Publ., Lulea, Sweden, p. 301-312.
 7) Mizuta, Y., Sano, O., Ogino, S. and Katoh, H. (1987) Three dimensional stress determination by hydraulic fracturing for underground excavation design, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 24*, p. 15-29.
 8) Ito, T., Evans, K., Kawaiand, K., Hayashi, K. (1999) Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 36, p. 811-826.
 9) Stephansson, O. (1983) Rock stress measurement by sleeve fracturing. in *Proc. 5th Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM)*, Melbourne, Balkema, Rotterdam, p. 129-137.
 10) Serata, S. and Kikuchi, S. (1986) A diametral deformation method for in situ stress and rock property measurement. *Int. J. Min. Geol. Eng.*, 4, p. 15-38.
 11) 菅原勝彦, 尾原祐三, 荒木秀朗, 石村豊 (1987) スリーブフラクチュアリングによる地圧測定. 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 181-186.
 12) Mizuta, Y., Sakuma, S., Katoh, H. and Kikuchi, S. (1988) Stress and stress change measurements by hydraulic fracturing and double fracturing for safe underground excavation. *Proc. 2nd Int. Work Shop on Hydraulic Fracturing Stress Measurement*, p. 205-244.
 13) De la Cruz, R.V. (1977) Jack fracturing technique of stress measurement. *Rock Mech.*, 9, p. 27-42.
 14) Yokoyama, T. and Nakanishi, A. (1997) A proposal of geo-stress measurement technique by plate fracturing. *Proc. of the international symposium on rock stress Kumamoto*, p. 143-148.
 15) 佐野修, 横山幸也, 小川浩司, 折田隆三, 中山芳樹, 板本昌治, 桑原和道, 陳渠, 平田篤夫, 水田義明 (2007) ボアホールジャッキ式応力測定の検証実験. *Proceedings of the 28th West Japan Symposium on Rock Engineering*, p. 65-70.
 16) Yokoyama, T., Ogawa, K., Sano, O., Hirata, A. and Mizuta, Y. (2010) Development of borehole-jack fracturing technique and in situ measurements. *Rock Stress and Earthquakes*, p. 93-100.

- 17) Oka, Y., Kameoka, Y., Saito, T. and Hiramatsu, Y. (1979) Investigations on the new method of determining rock stress by the stress relief technique and applications of this method. *Rock Mechanics in Japan*, Vol.3, p. 68-70.
- 18) Sugawara, K. and Obara, Y. (1986) Measurement of In-situ Rock Stress by Hemispherical-ended Borehole Technique. *Int. J. Min. Sci. & Tech.*, Vol. 3, p. 287-300.
- 19) Obara, Y. and Sugawara, K. (1990) Field stress measurements in jointed rock. *Proc. of Int. Conf. on Mech. of Jointed and Faulted Rock*, Vienna, p. 827-834.
- 20) 小林昭一, 吉田太, 打田靖夫 (1990) 円錐形状孔底ひずみゲージによる原位置応力測定. 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 279-284.
- 21) Sakaguchi, K., Obara, Y., Nakayama, T., Sugawara K. (1992) Accuracy of rock stress measurement by means of conical-ended borehole technique. *Journal of MMIJ*, 108, p. 455-460.
- 22) 金川忠, 林正夫, 日比野敏 (1975) 初期地圧測定に関する二,三の考察. 第9回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 46-49.
- 23) 金川忠, 日比野敏, 石田毅 (1983) オーバーコアリング法による3次元地圧計測法—埋設型8成分ゲージの開発—, 電力中央研究所報告, No.385033.
- 24) Leeman, E. R. (1968) The Determination of the complete state of stress in rock in a single borehole laboratory and underground measurements. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.5, p. 337-353.
- 25) Hiramatsu, Y. and Oka, Y. (1968) Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts from measured strains or deformations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol.5, p. 337-353.
- 26) Pine, R. J., Tunbridge, L.W. and Kwakwa, K. (1983) In-situ stress measurement in the Carnmenellis Granite-I. Overcoring tests at South Crofty Mine at depth of 790m. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.20, No.2, p. 51-62.
- 27) Leeman, E.R. (1959) The Measurement of changes in rock stress due to mining. *Mine Quarry Eng.*, Vol.25, No.7, p. 300-304.
- 28) Obert, L., Merrill, R.H. and Morgan, T.A. (1962) Borehole deformation gauge for determining the stress in mine rock. *US Bureau of Mines Report of Investigation RI 5978*.
- 29) Merrill, R.H. (1967) Three component borehole deformation gage for determining the stress in rock. *US Bureau of Mines Report of Investigation RI 7015*.
- 30) 菅原隆之, 石島洋二, 石関崇 (1999) 孔径変化法のための測定器の開発, 資源・素材学会春季大会講演集, p. 127-128.
- 31) 横山幸也 (2013) わが国で開発・改良された初期地圧測定法の基準化と国際化, *Journal of MMIJ* Vol.129, p. 683-693.
- 32) Leeman, E.R. (1964) The measurement of stress in rock-Parts I, II and III. *J. S. Afr. Min. Metall.*, 65, p. 45-114.
- 33) Zoback M.D., Moos D.L., Mastin L. and Anderson R.N. (1985) Wellbore breakouts and in situ stress. *J. Geophys. Res.*, 90, p. 5523-5530.
- 34) Hickman, S.H., Healy, J.H. and Zoback, M.D. (1985) In-situ stress, natural fracture distribution, and borehole elongation in the Auburn geothermal well. *J. Geophys. Res.*, 90, p. 5497-5512.
- 35) Plumb, R.A. and Cox, J.W. (1987) Stress directions in eastern North America determined to 4.5km from borehole elongation measurements. *J. Geophys. Res.* 92(B6), p. 4805-4816.
- 36) Cowt Gill, S.M., Meredith, P.G., Murrelland, A.F., Brereton, N. R. (1993) Crustal stresses in the North Sea from breakouts and other borehole data. in *Proc. 34th US Symp. Rock Mech.*, Madison, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30, p. 113-116.
- 37) Stock, J.M., Healy, J.H., Hickman, S.H. and Zoback, M.D. (1985) Hydraulic fracturing stress measurements at Yucca Mountain, Nevada and relationship to the regional stress field, *J. Geophys. Res.* 90(B10), p. 8691-9706.
- 38) Okabe, T., Shinohara, N., Takasugi, S. and Hayashi, K. (1996) Earth's crust stress field estimation by using vertical fractures caused by borehole drilling. *Proc. VIII th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling*, Tsukuba, p. 265-270.
- 39) Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peka, P., Ward, C.D. and Wiprut, D.J. (2003) Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40: p. 1049-1076.
- 40) 菅原勝彦, 亀岡美友, 斎藤敏明, 岡行俊, 平松良雄 (1978) コアディスクング現象に関する研究. *日本鉱業会誌*, 94 巻, 1089 号, p. 797-803.
- 41) Haimson, B.C. and Lee, M.Y. (1995) Estimating in situ stress conditions from borehole breakouts and core diskings - experimental results in granite. in *Proc. Int. Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth*, Tokyo, Japan, 8th ISRM Congress, p. 19-24.

- 42) Ishida, T. and Saito, T. (1995) Observation of core discing and in situ stress measurements; Stress criteria causing core discing, *Rock Mech. Rock Engng*, 28(3), p. 167-182.
- 43) 松木浩二, 本郷公, 坂口清敏 (1997) 引張主応力解析に基づくコアディスク形状と三次元地圧の関係. *資源と素材*, Vol.113, p. 317-324.
- 44) 横山幸也・大岡政雄・小川浩司 (2012) コアディスク法による初期地圧の推定. *資源・素材* 2012 (秋田), P. 256-268.
- 45) Kaiser, J. (1953) Erkenntnisse und Folgerungen aus der messung von metallischen Werkstoffen. *Arch. Eisenhutt.*, 24, 1/2, p. 43-45.
- 46) 金川忠, 林正夫, 仲佐博祐 (1977) 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み. *土木学会論文報告集*, 第 258 号, p. 63-75.
- 47) 瀬戸政宏, 歌川学, 木山保, 勝山邦久 (1990) 繰り返し载荷時の AE 特性による地圧の推定. 第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 321-326.
- 48) 山本清彦, 桑原保人, 平澤朋朗 (1983) 変形率変化法を用いた先行応力の推定, *地震学会講演予稿集春季大会*, p. 245.
- 49) 横山幸也, 田中達吉 (1989) AE 法と変形率変化法を併用した初期地圧測定, *日本応用地質学会 平成元年度研究発表会*, p. 5-8.
- 50) Simmons, G., Siegfried, R.W. and Feves, M. L. (1974) Differential strain analysis: a new method for examining cracks in rocks. *J. Geophys. Res.*, 79, p. 4383-4385.
- 51) Siegfried, R.W. and Simmons, G. (1978) Characterization of oriented cracks with differential strain analysis. *J. Geophys. Res.*, 83, p. 1269-1278.
- 52) Strickland, F.G. and Ren, N.-K. (1980) Use of differential strain curve analysis in predicting the in-situ stress state for deep wells. in *Proc. 21st US Symp. Rock Mech.*, Rolla, University of Missouri Publ., p. 523-532.
- 53) 松木浩二 (1989) DSA による地殻応力計測. *資源・素材材学会 地殻応力計測ワークショップ資料集*, p. 92-104.
- 54) Voight, B. (1968) Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill cores. *Felsmechanik und Ingenieurgeologi*, 6, p. 201-215.
- 55) Teufel, L. W. (1983) Determination of in-situ stress from anelastic strain recovery measurements of oriented core. *Symposium on low permeability gas reservoirs*. Denver, Colorado, SPE/DOE 11649: p. 421-430.
- 56) Wolter, K.E. and Berckhemer, H. (1989) Time dependent strain recovery of cores from KTB-deep drilling hole. *Rock Mech. Rock Eng.*, 22, p. 273-287.
- 57) Matsuki, K. (1991) Three-dimensional in situ stress measurement with anelastic strain recovery of a rock core. in *Proc. 7th Cong. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM)*, Aachen, Balkema, Rotterdam, Vol.1, p. 557-560.
- 58) Matsuki, K. and Takeuchi, K. (1993) Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. in *Proc. 34th US Symp. Rock Mech.*, Madison, also published in *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30, p. 1019-1022.
- 59) 船戸明雄, 陳渠, (2005) ボーリングコアの変形を利用した地圧評価. 第 34 回岩盤力学に関する国内シンポジウム講演論文集, p. 261-266.
- 60) Amadei, B. and Stephansson, O. (1997) *Rock stress and its measurement*. Chapman and Hall, p.289.
- 61) ASTM International: D4645-08 (2008) Standard Test Method for Determination of In-Situ Stress in Rock Using Hydraulic Fracturing Method1. p. 1-7.
- 62) ASTM International: D4623-08 (2008) Standard Test Method for Determination of In Situ Stress in Rock Mass by Overcoring Method-USBM Borehole Deformation Gage1. p. 1-14.
- 63) BRITISH STANDARD : BS 5930:1999, (1999) In-situ stress measurements. p. 73-77.
- 64) COMMISSION ON TESTING METHODS : *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 24(1987), p. 55-73.
- 65) Sugawara, K., Obara, Y. (1999) Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical- ended borehole overcoring (CCBO) technique. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36(3): p. 307-322.
- 66) Sjoberg, J., Christiansson, R., Hudson, J.A. (2003) ISRM Suggested Methods for rock stress estimation- Part 2: overcoring methods. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, p. 999-1010.
- 67) Haimson, B.C., Cornet, F.H. (2003) ISRM Suggested Methods for rock stress estimation-Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, p. 1011-1020.
- 68) 地盤工学会 (2012) 地盤工学会基準 (JGS 3551-2012) 円錐孔底ひずみ法による初期地圧の測定方法.
- 69) 地盤工学会 (2012) 地盤工学会基準 (JGS 3541-2012) 埋設ひずみ法による初期地圧の測定方法.
- 70) 松木浩二 (2000) ASR 法の標準法. *資源・素材秋季大会*, p. 63-66.
- 71) 及川寧己, 山口勉(2000) DSCA の標準法. *資源・素*

材秋季大会, p. 67-70.

- 72) 山本清彦 (2000) DRA の標準法. 資源・素材秋季大会, p. 71-76.
- 73) 瀬戸政宏, 歌川学, 相馬宣和, E. Villaescusa (2000) AE 法の標準法. 資源・素材秋季大会, p. 77-80.
- 74) 伊藤高敏, 林一夫 (2000) 水圧破砕法の標準法. 資源・素材秋季大会, p. 81-84.
- 75) 標準情報 (TR) (2001) 岩石コアの A E 測定方法—地圧測定技術 (案) .
- 76) Hayashi, K. and Haimson, B.C. (1991) Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination of in situ minimum compressive stress. *J Geophys Res*; 96:18, p. 311-321.
- 77) Yokoyama, T. and Ogawa, K. (2015). Rock Stress Measurement Technique by using High Stiffness Hydraulic Fracturing System. *ISRM Congress 2015 Proceedings - Int'l Symposium on Rock Mechanics - ISBN: 978-1-926872-25-4*.
- 78) Yokoyama, T., Ogawa, K., Sakaguchi, K. (2013) Improved CCBO technique by using a new biaxial test for strain sensitivities . *Proceedings of the 6th International Symposium on In-situ Rock Stress*. p. 713-720.
- 79) 坂口清敏, 後藤匡雄, 竹田英主, 原雅人, 鈴木康正, 松木浩二 (2007) 下向き円錐孔底ひずみ法の測定精度に及ぼす接着剤の影響と地圧評価の高精度化. *Journal of MMIJ*, Vol.123, No.2, p. 68-74.