わが国の標準法としての初期地圧測定法

横山幸也

深田地質研究所

Initial stress measurement techniques as a standard method in Japan

YOKOYAMA Tatsuya

Fukada Geological Institute

要旨:現在国内外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. 原位置測定法にはボアホールの変形やひずみの計測あるいは人為的な小規模破壊により岩盤の応 力を測定する方法と、ボアホール壁面やコアの破壊現象に基づいて岩盤の応力を評価する方法が ある.一方、室内試験法は、地圧を知りたい場所から採取された岩石の特性と地圧との相関関係 を利用する方法である.わが国ではこれまでに初期地圧測定法として水圧破砕法と2種の応力解 放法が基準化されており、いずれの方法も地盤工学会から公表された原位置測定法である.ここ では、これまでに国内外で開発された主な初期地圧測定法を概観したのち、現在わが国で標準的 に用いられている高剛性水圧破砕法と応力解放法としての円錐孔底ひずみ法について、それらの 測定原理と具体的な測定方法について解説する.また、これらの測定法の現場への適用例につい ても紹介する.

キーワード:初期地圧測定法,地盤工学会基準,円錐孔底ひずみ法,高剛性水圧破砕法

Abstract: Initial stress measurement methods currently used in Japan and overseas can be broadly classified into in-situ and laboratory methods. In-situ methods are based on borehole deformation or strain measurements, artificial small-scale fractures of borehole walls, or fracture phenomena on borehole walls or cores. On the other hand, the laboratory test methods utilize the correlation between the characteristics of the rock sampled from the location where the initial stress is to be determined. In Japan, the hydraulic fracturing method and two stress relief methods have been standardized as initial stress measurement methods, and both methods are in-situ measurement methods published by the Japanese Geotechnical Society. This paper reviews the major initial stress measurement methods that have been developed in Japan and other countries. Furthermore, the principles and procedures of both the high stiffness hydraulic fracturing method and the Compact Conical-ended Borehole Overcoring Technique as the stress relief method which are currently used as the standard in Japan, will be explained in detail. Finally, examples of field applications of these measurement methods will be presented.

Keywords: initial stress measurement, hydraulic fracturing technique, compact conical-ended borehole overcoring technique, JGS standard

1. はじめに

わが国や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.原位置測定法は地圧を知りたい場所で直接的 あるいは間接的に測定する方法である. これらの 方法では主にボーリングが利用され,ボアホール の変形やひずみの計測あるいは人為的な小規模破 壊により岩盤の応力を計測する方法と,ボーリン グ掘削に伴うボアホール壁面やコアの破壊現象の 観察に基づいて岩盤の応力を評価する方法があ る.一方,室内試験法は地圧を知りたい場所から 採取された岩石の特性と地圧との相関関係を利用 して測定する方法である.

ここでは、まず現在国内外で利用されている 主な初期地圧測定法を測定原理で分類し、各測定 法の技術的特徴について整理する.次に、国内で 最も標準的に利用されている水圧破砕法と応力解 放法について、それらの基本的な測定原理と具体 的な測定方法、およびこれら2つの手法の適用例 として、地下深部で得られた測定データと初期地 圧の解析結果について紹介する.

2. 国内外の初期地圧測定法

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 岩盤の破砕を利用する方法

岩盤の破砕を利用する水圧破砕法は,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, 岩盤に引張り破壊を生じさせるものであるが,最 近では水圧破砕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

測定法の分類	測定法の名称	概要
岩盤破砕法 Rock fracturing method	水圧破砕法 Hydraulic fracturing	水圧による孔内での人工き裂の生成 二次元/三次元、大深度でも測定可能 国内外多分野で実績多
	スリーブフラクチャリング法 Sleeve fracturing	スリーブによる孔内での人工き裂の生成 二次元,大深度でも測定可能 海外で実績あり
	乾式破砕法 Borehole-jack fracturing	孔内での人工き裂の生成による 二次元,大深度でも測定可能 新しく開発
応力解放法 Stress relief method	円錐孔底ひずみ法 Compact conical-ended borehole overcoring	小口径孔内での応力解放 三次元,日本オリジナル 国内外多分野で実績多
	埋設ひずみ法 Multi-axial strain	大口径孔内での応力解放 三次元,日本オリジナル 国内で実績多
	孔壁ひずみ法 Borehole wall strain	中口径孔内での応力解放 三次元,鉛直下向き測定可 海外で実績多
	孔径変化法 Borehole deformation	中口径孔内での応力解放 二次元,鉛直下向き測定可 海外で実績多
自然破壞觀察法 Auto breaking method	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 二次元,大きな側圧比の条件下で発生 海外石油井で実績多
	ドリリングインデュースド フラクチャリング Drilling induced fracturing	孔壁に発生する引張り破壊を利用 二次元,大深度でより有効 海外石油井で実績多
	コアディスキング Core disking	岩石コアの板状自然破壊を利用 二次元,大きな側圧比の条件下で発生 国内外で実績多
コア沿 Core-based method	AE 法 Acoustic emission	岩石のカイザー効果を利用 一次元, 一軸圧縮載荷試験 国内で実績多, 日本オリジナル
	DRA 法 Deformation rate analysis	岩石の非線形ひずみ挙動を利用 一次元,一軸圧縮載荷試験 国内外で実績あり,日本オリジナル
	DSCA 法 Differential strain curve analysis	岩石の非線形ひずみ挙動を利用 三次元,封圧載荷試験 国内外で実績多
	ASR 法 Anelastic strain recovery	岩石の非弾性変形挙動を利用 三次元,応力解放直後のひずみ回復測定 国内外で実績あり
	コア変形法 Diametrical core deformation analysis	応力解放後の岩石コアの弾性変形を利用 二次元,岩石コア直径の精密測定 新しく開発,日本オリジナル

表1 初期地圧測定法の種類とその特徴.

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.これらの方法で用い られる孔内挿入用ゾンデの例を図2に示す.

2.1.1 水圧破砕法

水圧破砕法は、ボアホールのある区間に水圧 を加え、岩盤に引張り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き裂の 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 Hubbert and Willis (1957) により 提案された.

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



としないことが挙げられる.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,のちに Cornet (1986),Mizuta et al. (1987)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. (1999) 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 よる修正水圧破砕法を提案した.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.

2.1.2 スリーブフラクチャリング法

1980年代前半, Stephansson (1983) はスリー ブフラクチャリング法を提案し,その後,この 方法は Serata et al. (1986),菅原ほか (1987), Mizuta et al. (1988) によって改良された.水圧 破砕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 位の圧カー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



図 2 岩盤破砕法に用いる孔内挿入用ゾンデの例. a:水圧破砕法(横山・船戸, 2021), b:スリーブフ ラクチャリング法(佐久間ほか, 1989), c:乾式破 砕法(Yokoyama et al., 2014).

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.

2.1.3 乾式破砕法

De la Curz (1977) 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ー対で構成され、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.破砕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カー変位関 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、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. (1997) 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 フラクチャリング法を提案した. また、佐野ほか (2007)、Yokoyama et al. (2010) は、同様の測定 原理を用いて乾式破砕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.

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.

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. 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3に示す4つ の方法に分けられる.こ れらの方法で用いられる 多素子ゲージの例を図4 に示す.

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一つであ 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,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個の独立した応力成分を決 定できる方法をOka et al. (1979)が開発した.

Sugawara and Obara (1986), Obara and Sugawara (1990)は、半球面状に加工した孔底に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. 最近に至り小林ほか (1990) および Sakaguchi et al. (1992) 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.

2.2.2 埋設ひずみ法

埋設ひずみ法は、1970年代後半金川ほか(1975) により開発された. 測定に用いる埋設型変位計 は5成分型から8成分型に改良され(金川ほか、 1983), 三次元応力解析が可能になった. 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. また、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) を行うことができる.

2.2.3 孔壁ひずみ法

孔壁ひずみ法は、1960年代後半にLeeman (1968)により提案され、Hiramatsu and Oka(1968) 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. (1983) 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.

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年代末にLeeman (1959)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. (1962)や Merrill (1967) 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、測定作業が容易である点が大きな特徴である. 国内でも、菅原ほか(1999)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.

2.3 自然破壊観察法

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、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5に示す3つの手法が ある.これらの方法で得られた観察例を図6に示す.

2.3.1 ボアホールブレイクアウト

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Leeman (1964)が初めて報

横山幸也



図7 コア法の供試体模式図(横山, 2017).

告した. その後 Zoback et al. (1985), Hickman et al. (1985) 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 が集中し,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を用いて, Plumb and Cox (1987), Cowtgill et al. (1993) 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.

2.3.2 ドリリングインデュースドフラクチャリング 1,000 m 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き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を使用することにより,水圧破砕と同種の発生原因で生じる.Stock et al. (1985)は、鉛直方向が1つの主応力軸であると仮定できるとき、引張りき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.

2.3.3 コアディスキング

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,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

アディスキングと呼ばれて おり,本来割れ目のない岩 盤でコア軸方向の引張り応 力が岩石の引張り強度を超 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、 菅原ほか (1978) はディスク形状と 地圧の関係式を提案した. その後, Haimson and Lee (1995) 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 Saito (1995) は、応力解放法で得られた中空のディスキングコ アを用いて、ディスキングが発生する地圧条件を 提案した. 松木ほか (1997) 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 引張り主応力分布を解析し、ディスキングが起き るための地圧範囲と具体的地圧条件式を提案して いる.

2.4 コア法

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法は, 図7に示す5つの方法である.これらの方法の 測定概念図を図8に示す.

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「カイザー効果」 (Kaiser, 1953) と呼ばれる現象を利用する方法で ある.この方法は、金川ほか(1977)、瀬戸ほか (1990) 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載荷時において、供試体に密 着させた圧電素子などを用いてAE を計測する. 作製した供試体の初期地圧成分の値を方向別に推 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.

2.4.2 DRA 法

DRA (Deformation Rate Analysis) 法は変形率

変化法とも呼ばれ,岩石の応力一ひずみ関係の非 線形性を利用する方法で,山本ほか(1983)に よって提案された.この方法では,岩石に一軸圧 縮応力を繰返し与えたとき,各繰返し時の同一応 カ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.横山ほか(1989)は, DRA 法と AE 法を同一供試体で同時に行う方法 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.

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, 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. (1974) や Siegfried et al. (1978) 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. (1980) によって初期地圧測定 に応用されてきた. この方法では, 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 カーひずみ関係から三次元主応力比とその方向が 求まる. 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.

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 Voight (1968) 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.Matsuki (1991), Matsuki and Takeuchi (1993) 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.

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、 船戸ほか(2005)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.この方法は、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.

3. 水圧破砕法

3.1 水圧破砕法の理論

3.1.1 測定法の概要

水圧破砕法は、国際的には ISRM の提案法 (Haimson and Cornet, 2003)やASTMの基準(ASTM International, 2008)として公開されている.国内に おいても地盤工学会(2020)が基準化した.ここ では、これらの標準法に準拠した測定法を概説す る.この方法は、ボアホールのある閉じた区間に水 圧を加え、孔壁に発生した引張りき裂の位置から 最大主応力の方向を、き裂の再開口時や閉口時の 応力条件から最大、最小主応力を求めるものであ る.水圧破砕法は、削孔されたボアホールに適用 可能な区間があれば比較的簡便に多深度測定が可 能であり、大深度にも適用が可能であるという特徴 を有する.また、測定されたデータから地圧を評 価するとき、岩盤の弾性係数などの物性値を必要 としないこともこの方法の特徴として挙げられる.

3.1.2 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 る水圧と流量の関係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 る二次元面内での応力状態は図 9 a)のようにな る.二次元面内での岩盤の応力を $S_{\rm H}$ (最大主応 力)、 $S_{\rm h}$ (最小主応力)とし、孔内の水圧 Pを増 加させていくとA点で引張り応力が最大となり、 A点の応力($\sigma_{\theta l}$)が岩盤の引張り強度を超えた とき、引張りき裂が生じる.このときの水圧 $P_{\rm b}$ (破 砕圧、Breakdown pressure)は、岩盤の引張り強 度を T、岩盤の間隙水圧を $P_{\rm p}$ としたとき次式で 表される.

$$P_{\rm b} = 3S_{\rm h} - S_{\rm H} + T - P_{\rm p} \tag{1}$$

次に、いったん水圧を初期状態まで戻した後、
 再度水圧を増加してき裂を再開口させる. 図9b)
 に示すようにこのき裂が再開口する瞬間の水圧
 *P*r(再開口圧, Re-opening pressure) は次式で表
 される.

$$P_{\rm r} = 3S_{\rm h} - S_{\rm H} - P_{\rm r} \tag{2}$$

この状態は、き裂が再開口する条件として式(1) のうち $T=0, P_p=P_r$ の条件を満たすときである. すなわち、き裂は既に生じているため岩盤の引張 り強度Tがゼロで、破砕区間の間隙水 EP_p はき 裂内に浸透する P_r に一致する.式(2)を変形し て次式を得る.

$$P_{\rm r} = (3S_{\rm h} - S_{\rm H})/2$$
 (3)

また、き裂が十分伸びた状態で水の圧入を急停止 した後、き裂の先端が閉じ始める瞬間に S_h と水 圧が平衡状態になるものと仮定すると、このとき の水圧 P_s (閉口圧、Shut-in pressure) は次式で 表される.

$$P_{\rm s} = S_{\rm h} \tag{4}$$



図9 水圧破砕試験における a) 孔周りの応力状態と b) 人口き裂の再開口. S_{H} :最大主応力, S_{h} :最小主応力, A: 引張り応力 $\sigma_{\theta 1}$ の集中箇所, B:圧縮応力 $\sigma_{\theta 2}$ の最大箇所, Pr:き裂の再開口圧 (Yokoyama and Ogawa, 2016).

以上の考え方に基づき、観測された $P_r \ge P_s$ か ら二次元面内での最大主応力 S_H と最小主応力 S_h を求めることができる.式(3) と式(4)から 次式に示す 2 つの観測方程式が得られる.

$$S_{\rm H} = 3S_{\rm h} - 2P_{\rm r} \tag{5}$$

$$S_{\rm h} = P_{\rm s} \tag{6}$$

なお,式(1)を観測方程式として用いることも 理論的には可能であるが,岩石の引張り強度 T は別途室内試験により求める必要があり,一般に 岩石の引張り強度は大きくばらつくことがあるた め,この式から得られる最大主応力 $S_{\rm H}$ は,参考 値として取り扱われる. 横山幸也



図 10 水圧破砕試験装置の例. a:水圧破砕用ダブルパッカーと地上装置, b:型撮り用シングルパッカーと地上装置(横山, 2017).

3.2 測定方法

3.2.1 使用機器

水圧破砕法による初期地圧測定では,加圧シ ステムのコンプライアンスが小さい高剛性の試験 装置を用いる.試験装置の構成例を図10に示す. この試験装置では,水圧破砕を行うための送水ポ ンプにシリンジポンプと内径2mmのステンレス 管を用いており,きわめて微小な送水レートを高 精度で,圧力0~50MPaの範囲で制御可能であ る.シリンジポンプを用いることにより送水に脈 動がなく,正確な流量の計測が可能であるため流 量計を必要としていない.

3.2.2 測定手順

ボーリングコアの観察とボアホールカメラ画 像の確認により,試験位置を選定する.選定した 位置において,図10b)に示したシングルパッカー で孔壁の型撮りを行い、その型撮り結果(以下「レ プリカ」)から自然割れ目や孔壁の乱れが認めら れないことを確認する.

次に、この試験位置まで図 10 a) に示した水 圧破砕用ダブルパッカーを挿入し、ダブルパッ カーを膨らませ水圧破砕試験を実施する.水圧破 砕試験は、1回の水圧破砕と複数回のサイクルで 行う再開口試験とで構成される.水圧破砕試験終 了後にダブルパッカーを回収し、型撮りパッカー による人工き裂のレプリカを撮り、人工き裂の生 じた方位を確認する.

3.3 データの整理と解析

3.3.1 測定データの整理

水圧破砕試験で得られた送水圧力/送水レー トー時間関係のデータを整理した例を図11に示 す.最初に大きな圧力値のピークを有するサイク



図 11 水圧破砕試験における圧力/送水レート-時間 関係と読取りデータの例 (Yokoyama et al. 2017).

ルは、水圧破砕による人工き裂の生成過程を示す. 続く3回のサイクルは、再開口試験におけるき裂 の再開口と閉口に伴う圧力変化を示す.この測定 データは送水系の剛性が高い(コンプライアンス が小さい)試験装置により得られており、再開口 圧や閉口圧を精度よく読み取ることができる.

3.3.2 再開口圧の読取り

き裂の再開口圧 Pr は、水圧破砕で生じた人工 き裂がいったん閉じた後、再度の送水加圧により き裂が開き始めるときの圧力と定義されている. この再開口圧は圧力一時間関係が直線から外れて いく時点の圧力であり、図 12 に示したような再 開口試験におけるデータから読み取る必要がある が、この圧力を正確に読み取ることは難しい.そ のため、0.1 秒間隔で収録されている圧力一流量 関係のデータの微係数 dp/dQ (MPa/l)を算出し、 単位流量毎の圧力増分のピーク位置から再開口圧 を判読する.判読結果の例を図 13a) に示す.

3.3.3 閉口圧の読取り

き裂の閉口圧 Ps は、水圧破砕で生じた人工き 裂が送水停止後にき裂先端で閉じ始める瞬間の圧 力と定義されている.この閉口圧も図 12 に示し たような圧力一時間関係から正確に読み取ること



閉口圧Psの読取り例(横山・船戸, 2021).

は困難であるため, Hayashi and Haimson (1991) の方法を用いる.この方法で閉口圧と判断される 圧力一時間関係の微係数 dt/dP (s/MPa)の高圧 側からの最初の変曲点が,理論的にき裂先端が閉 じ始める瞬間の圧力であるとされている.判読結 果の例を図 13b) に示す.

3.3.4 き裂の型撮り

き裂の型撮りは、シングルパッカーを利用し た型撮り装置を用いて行う.水圧破砕試験で生成 される人工き裂はきわめて微細な割れ目であるた め、型撮り装置の表面に可塑性ラバーを装着して、 試験区間において破砕圧と同程度の圧力を加圧し てき裂の跡を撮る.この型撮りで得られるき裂の 跡をレプリカと呼ぶ.図10b)に示した型撮り 用のシングルパッカーには方位磁石が装着されて おり、孔内でパッカーを孔壁に圧着してレプリカ を採取するときの方位を記録して、人工き裂の方 位を決定する.図14にレプリカの写真と方位の 決定されたき裂のトレースの例を示す.

3.3.5 応力解析

応力解析は、先に示した2つの観測方程式に よりボーリング孔軸に直交する二次元面内での最 大主応力 $S_{\rm H}$ と最小主応力 $S_{\rm h}$ を求めることになる.



応力解析に直接用いる観測パラメータは,再開口 圧 *P*r と閉口圧 *P*s の 2 つの値である.

また最大主応力の方位は、図14に示したよう なレプリカでの2条方向から求めるが、2条のき 裂間隔が180°から大きくそれる場合、き裂が斜 めに延びている場合、き裂が既存の割れ目の延長 上にある場合などがあるため、ほかの試験位置で のデータとも比較しながら評価することが必要と なる.

1回の水圧破砕試験で3回以上の再開口試験 データがあるので,一般には3回分の応力解析結 果の平均値をその深度での初期地圧とみなす.鉛 直応力はその試験位置の深度と周辺地質を構成す る岩石の平均的な密度から推定する.初期地圧測 定結果の深度分布図の例を図15に,主応力方向 分布図の例を図16に示す.

4. 応力解放法

4.1 応力解放法の理論

4.1.1 測定法の概要

ここでは、応力解放法の代表的な測定法として 円錐孔底ひずみ法を挙げ、以下にこの測定法の 詳細について述べる.現在国内で広く用いられて いる応力解放法は、ISRM指針(Sugawara and



図 14 き裂の型撮りで得られた a) レ プリカ写真と b) き裂のトレースの例.



図 15 水圧破砕法による初期地圧の深度分布表示の例 (Yokoyama and Ogawa, 2016).



図 16 初期地圧の主応カベクトルを,三角点測量によ る過去約 100 年間(1883 ~ 1994)の地殻ひずみ分布図 に重ねて示した例(Yokoyama and Ogawa, 2016).

Obara, 1999) と地盤工学会の基準(地盤工学会,
2012) として公開されている円錐孔底ひずみ法
(CCBO) である.この方法はわが国で開発・発展し,ASTM International (2008), BRITISH
STANDARD (1999), ISRM 指針(Sjoberget et al., 2003) などに比べ多くの長所を有する.

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. ほかの応 力解放法では、ひずみ計や変位計を設置するパイ ロット孔が直径 40 mm 前後で、応力解放を行う オーバーコアリング孔は直径 100 ~ 200 mm を必 要とする.

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4a)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 計を、同じ円錐形に加工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.

4.1.2 観測方程式

応力解析は、弾性論に基づいた円錐孔底ひず み法の観測方程式を用いる.測定箇所周辺の初期 地圧は均一で、岩盤は等方均質弾性体と仮定して いる.この観測方程式は、応力解放に伴い計測さ れるひずみ(解放ひずみ)と求めたい初期地圧と の関係で記述される.ひずみゲージの数は24枚 あり、すべての解放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最確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.

ここでは、まず円錐孔底の形状と 24 成分のひ ずみゲージの位置関係を示す座標系の定義を行 う.ボーリング孔軸を一つの座標軸とした直角座 標系 (x, y, z) と同様に、円柱座標系 (r, θ , z) および球座標系 (ρ , θ , φ) を図 17 のように定 める.次に各解放ひずみと初期地圧の関係を示す 連立方程式が記述され、最後にこの連立方程式を 最小二乗法で解くことにより初期地圧の6 応力成 分の最確値が求められる.

まず, 求めたい初期地圧を直角座標系(x, y,



図 17 円錐孔底の形状とひずみゲージ (Sugawara and Obara, 1999).



図 18 円錐孔底ひずみ法の測定状況の概要図 (横山, 2017).

z)の6応力成分と,球座標系の直ひずみ成分(ϵ_{ρ} , ϵ_{θ})として計測される解放ひずみをそれぞれ 次式で表すと,

 $\{\sigma\}^{T} = \{\sigma_{x}, \sigma_{y}, \sigma_{z}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\} (7) \\ \{\varepsilon\}^{T} = \{\varepsilon_{1}, \varepsilon_{2}, \cdots, \varepsilon_{n}\} (8) \\ \text{ここに, } n は計測される解放ひずみの数を示す. \\ 解放ひずみと初期地圧の関係は次式で表される.$

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{E} \cdot [A] \cdot \{\sigma\}$$
(9)

ここに、[A] は $n \times 6$ の係数マトリックスで、 境界要素法などの数値解析により計算される.初 期地圧 { σ }の最確値は、最小二乗法の原理から、 次の連立方程式を解いて求める.

$$\{\sigma\} = E \cdot \left[[A]^{\mathrm{T}} \cdot [A]^{-1} \cdot [A]^{\mathrm{T}} \cdot \{\varepsilon\} \right]$$
(10)

以上により初期地E { σ } が求められるが, 二軸感度試験を考慮した岩盤応力の算出方法 (Yokoyama et al., 2013) について以下に示す. 二 軸感度試験器で得られる周圧とひずみの関係は, 特殊な境界条件で与えられる. このため, FEM により同様の境界条件で得られた周圧とひずみ の関係から ρ , θ , ϕ 各ゲージの感度係数 E_{ρ} , E_{θ} , E_{ϕ} が求められている. このとき FEM で与えられ たヤング率を E とし, 次式で ρ , θ , ϕ 各ゲージ の補正係数 K_{n} を定義する.

 $K_n = E_n / E$, $(n = \rho, \theta, \varphi)$ (11) この補正係数は, 円錐孔底の形状と周圧の載荷範 囲が考慮された ρ , θ , φ 各ゲージの位置におけ る感度補正係数である. 次に, 二軸感度試験で直 接得られる応力ーひずみ関係から二軸感度係数 E_i を求め, 各ゲージが接着された状態での感度を補 正係数 E_{ci} とし, 次式で定義する.

 $E_{ci} = E_i / K_n$, $(i = 1 \sim 8)$ (12) E_{ci} は, 上記補正係数が考慮された ρ , θ , φ 各ゲージの位置における感度係数を表す. さらに, 最終 的な応力解析に使用するひずみとして、応力解 放で得られた 24 成分の解放ひずみ ε_{pi} ($i = 1 \sim$ 24)を次式で補正し、補正解放ひずみ ε_{ci} を得る.

4.2 測定方法

4.2.1 使用機器

この方法では、NQ ボーリング孔(孔径 76 mm) の孔底面を円錐状に研磨し、そこに3 成分ひずみ 計8組がモールドされた「ストレインセル」を貼 付し、同一の孔径でオーバーコアリングすること により岩盤の応力を解放する.図18に円錐孔底 ひずみ法の測定状況の概要図を示す.ボーリング の方向は、孔底にストレインセルを接着するため に、孔内の排水が容易である水平上向き5°前後 とする.測定深度は、坑道掘削による応力集中の 領域を避けるため、坑道直径の2倍以上深い位 置から行う.一方、ストレインセルの接着やオー バーコアリング作業などが確実に行える範囲を考 慮し、概ね50mより浅い深度で実施される.

4.2.2 測定手順

坑道などによる応力収集の影響がない深度ま でボーリングを行い,円錐ビットにより孔底の円 錐加工を行う.次に,ストレインセルを孔底に接 着し,約1時間の養生後にオーバーコアリング作 業を行う.測定項目は24成分のひずみと掘進長 であり,これらを自動静ひずみ計で記録する.オー バーコアリング終了後,ストレインセルの接着さ れたコアを回収する.回収されたコアは図19a)



に示すように、棒状でかつ円錐孔底のエッジ部に 損傷がない場合には、二軸感度試験を行うことが 望ましい.

一般には、応力解析に必要なヤング率(E)と ポアソン比(v)を求めるため回収コアを利用し て一軸繰返し試験を行う.岩石の弾性定数(E,v) は場所により少しずつ異なるため、回収できたコ アがある場合にはすべての回収コアで一軸繰返し 試験を行う.試験用の供試体は、図19b)のよう に一つの回収コアから異なる軸方向で採取する.

4.3 データの整理と解析

4.3.1 測定データの整理

オーバーコアリングで得られた解放ひずみー 掘進長関係のデータを整理した例を図 20 に示す. このデータは,解放ひずみ全 24 成分のうち,接 線方向の 8 成分をまとめたものである.この図か ら各成分の解放ひずみは,掘進長 200 mm 付近の 安定している値が読取られる.

二軸感度試験で得られた圧力-ひずみ関係の データを整理した例を図 21 に示す.このデータ も,ひずみ全 24 成分のうち,接線方向の 8 成分



図 20 オーバーコアリングでのひずみ-掘進長の例.



図 21 二軸感度試験での圧力-ひずみ関係の例.



図 22 一軸繰返し試験での載荷応カーひずみ関係の例.

をまとめたものである.ひずみ感度の値は,各成 分での圧力--ひずみ関係から直線補間して求める ものである.

ー軸繰返し試験で得られた応力ーひずみ関係 のデータを整理した例を図22に示す.この試験 では,段階的な5回の繰返し載荷による軸ひずみ と横ひずみの応力ーひずみ関係が得られており,



図 23 二次元での主応カベクトルで表現した例.



これらのデータから平均的なヤング率とポアソン 比を求めるものである.

4.3.2 応力解析

応力解析は、先に示した観測方程式により三次 元での主応力の大きさとそれらの方向を求めるこ とになる.応力解析に直接用いる観測パラメータ は、有意と考えられる複数の解放ひずみ、二軸感 度試験が実施されていれば各解放ひずみに対する ひずみ感度係数(ヤング率に相当)、一軸繰返し 試験で得られたヤング率とポアソン比からなる.

ひずみ感度係数を用いる応力解析では、測定 された個々の解放ひずみ別に、あるいは3枚のひ ずみゲージが1枚のセットになるロゼットゲージ ごとにひずみ感度を用いることが可能である.一 軸繰返し試験で得られたヤング率を用いる応力解 析では,測定点ごとに一つのヤング率を用いる. ポアソン比は,いずれの解析方法の場合でも一軸 繰返し試験で得られた測定点ごとの値を用いる.

応力解析で得られる数値データとしては、上 記の主応力表現と等価な6応力成分 σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}, で表現することもある. 三次元的な 応力状態を二次元的な任意の断面で表現するとき には、この6応力成分表示の方が数学的には扱い やすい. 応力解析で得られた二次元での主応力ベ クトルの例を図23に、三次元での主応力をシュ ミットネット上で表現した例を図24に示す. 例 えば、地下空洞やトンネルなどの地下構造物の長 手方向が図23の座標系でY軸方向であるとき、 空洞軸やトンネル軸の直交断面での二次元応力状 態は同図 c) のようになる. なお、計測された初 期地圧の方位基準の北が、真北と磁北のどちらで あるかを確認しておくことも必要である.

5. おわりに

これまでに国内外で開発されてきた初期地 圧測定法の主な種類とその特徴について紹介し た.また,現在,わが国で標準的に利用されてい る水圧破砕法と応力解放法について詳しく解説した.最近では,地表から100m以上の地下深部における三次元での初期地圧測定の要望が増えつつある.これらの要望に対しては,鉛直下向きでの応力解放法の開発が着手され,この方法の実現が期待されている.また,地熱資源の開発などでは地下数1000mでの地殻応力の評価が求められており,この要望に対してはコア変形法の改良が進められている.

なお、今回述べた総説は、著者が応用地質技術年報(2017)にまとめた内容に加筆修正を加えて整理したことを付記しておく.

文献

- Amadei, B. and Stephansson, O. (1997): *Rock stress and its measurement*. Chapman & Hall, London, 490p.
- ASTM International (2008): Standard Test Method for Determination of In Situ Stress in Rock Mass by Overcoring Method – USBM Borehole Deformation Gauge. D4623-08, 14p.
- ASTM International (2008): Standard Test Method for Determination of In-Situ Stress in Rock Using Hydraulic Fracturing Method. D4645-08, 7p.
- BRITISH STANDARD (1999): In-situ stress measurements, 73–77, BS 5930:1999.
- Cornet, F. H. (1986): Stress determination from hydraulic tests on preexisting fractures—the H.T.P.F. method. Proceedings of the ISRM International Symposium, Stockholm, 301–312.
- Cowgill, S. M., Meredith, P. G., Murrell, S. A. F. and Brereton, N. R. (1993): Crustal stresses in the North Sea from breakouts and other borehole data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **30**(7), 1111-1114.

- De la Cruz, R. V. (1977): Jack fracturing technique of stress measurement. *Rock Mechanics*, **9**, 27–42.
- 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 シンポジウム講演論文集, 261-266.
- Haimson, B. C. and Lee, M. Y. (1995): Estimating In Situ stress conditions from borehole breakouts and core disking — experimental results in granite.
 Proceedings of International Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, Tokyo, 19–24.
- Haimson, B. C., Cornet, F. H. (2003): ISRM Suggested Methods for rock stress estimation Part3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 1011–1020.
- 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. *Journal of Geophysical Research*, **96**(B11), 311–321.
- 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. *Journal* of Geophysical Research, **90**(B7), 5497–5512.
- Hiramatsu, Y. and Oka, Y. (1968): Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts, from measured strains or deformations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 5(4), 337–353.
- Hubbert, M. K. and Willis, D. G. (1957): Mechanics of hydraulic fracturing. *Petroleum Transactions*, *AIME*, **210**(01), 153–168, SPE-686-G.
- Ishida, T. and Saito, T. (1995): Observation of core discing and in situ stress measurements; Stress

criteria causing core discing. *Rock Mechanics* and *Rock Engineering*, **28**, 167–182.

- Ito, T., Evans, K., Kawai, K. and Hayashi, K. (1999): Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 36(6),811–826.
- 地盤工学会(2012):円錐孔底ひずみ法による初期 地圧の測定方法(JGS 3751-2012).
- 地盤工学会(2020):水圧破砕法による初期地圧の 測定方法,JGS3761-2017.新規制定地盤工学 会基準・同解説書
- Kaiser, J. (1953): Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen. Archiv für das Eisenhüttenwesen, **24**(1-2), 43–45.
- 金川 忠・林 正夫・仲佐博裕 (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, **258**, 63-75.
- 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,46-49.
- 金川 忠・日比野 敏・石田 毅(1986):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,385033.
- 小林昭一・吉川太・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,279-284.
- Leeman, E. R. (1959): The Measurement of changes in rock stress due to mining. *Mine Quarry Eng.*, 25, 7, 300–304.
- Leeman, E. R. (1964): The measurement of stress in rock, Parts I–III. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, **65**, 45–114, 254–284.

- Leeman, E. R. (1968): The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole—Laboratory and underground measurements. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **5**(1), 31–38.
- 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キング形状と三次元地 圧の関係. 資源と素材, 113(5), 317-324.
- Matsuki, K. (1991): Three-dimensional in situ-stress measurement with anelastic strain recovery of a rock core. Proceedings of the 7th ISRM Congress, ISRM-7CONGRESS-1991-110.
- Matsuki, K. and Takeuchi, K. (1993): Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. *International Journal* of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **30**(7), 1019–1022.
- Mizuta, Y., Sano, O., Ogino, S. and Katoh, H. (1987): Three dimensional stress determination by hydraulic fracturing for underground excavation design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.* **24**(1), 15–29.
- 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. Proceedings of 2nd Work Shop on Hydraulic Fracturing Stress Measurement, 205–244.
- Merrill, R. H. (1967): Three component borehole deformation gage for determining the stress in rock. US Bureau of Mines Report of Investigation, 7015.
- Obara, Y. and Sugawara, K. (1990): Field stress measurements in jointed rock. *In* Rossmanith H. P., ed. *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, 827–834.
- 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, 5978.

- 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*, **3**, 68–70.
- 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 a depth of 790 m, *International Journal* of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 20(2), 51–62.
- Plumb, R. A. and Cox, J. W. (1987): Stress directions in eastern North America determined to 4.5 km from borehole elongation measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B6), 4805-4816.
- 佐久間彰三・菊地慎二・水田義明・世良田章正(1989): ダブルフラクチャリング法による地山応力の測 定. 土木学会論文集, 406(III-11), 87-96.
- 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, 65-70.
- 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, 455–460.
- Serata, S. and Kikuchi, S. (1986): A diametral deformation method for in-situ stress and rock property measurement. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 4, 15–38.

- 瀬戸政宏・歌川 学・木山 保・勝山邦久 (1990): 繰り 返し載荷時の 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, 321-326.
- Siegfried, R. and Simmons, G. (1978): Characterization of oriented cracks with differential strain analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B3), 1269–1278.
- Simmons, G., Siegfried II, R. W. and Feves, M. (1974): Differential strain analysis: A new method for examining cracks in rocks. *Journal* of Geophysical Research, 79(29), 4383-4385.
- Sjoberg, J., Christiansson, R. and Hudson, J. A. (2003): ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 2: overcoring methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 999–1010.
- Stephansson, O. (1983): Rock stress measurement by sleeve fracturing. Proceedings of the 5th ISRM Congress, ISRM-5CONGRESS-1983-216.
- Strickland, F.G. and Ren, N.K. (1980): Use of differential strain curve analysis in predicting in-situ stress state for deep wells. Proceedings of the 21st U.S. Symposium on Rock Mechanics, ARMA-80-0523.
- 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, *Journal* of Geophysical Research, **90**(B10), 8691–8706.
- 菅原勝彦・亀岡美友・斎藤敏明・岡 行俊・平松良 雄(1978):コアディスキング現象に関する研究. 日本鉱業会誌, 94(1089), 797-803.
- 菅原勝彦・尾原祐三・荒木秀朗・有賀義明(1987):スリー ブフラクチャ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,181-186. 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,127-128.

- Sugawara, K. and Obara, Y. (1986): Measurement of Insitu Rock Stress by Hemispherical-ended Borehole Technique. *Mining Science and Technology*, 3(4), 287–300.
- Sugawara, K. and Obara, Y. (1999): Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 307–322.
- Voight, B. (1968): Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial inelastic strain tensor in drill cores. *Rock Mechanics & Engineering Geology*, 6, 201–215.
- 山本清彦・桑原保人・平沢朋郎(1983):変形率変 化を用いた先行応力の推定.地震学会講演予稿 集春季大会,245.
- 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 研究発表会講演論文集, 5-8.
- 横山幸也・大岡政雄・小川浩司 (2012): コアディ スキング法による初期地圧の推定. 資源・素材 2012, 265-268.
- 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, 129(12), 683-693.
- 横山幸也(2017):初期地圧測定法の現状と基準化. 応用地質技術年報, **36**, 71-91.
- 横山幸也・船戸明雄(2021): 兵庫県南部地震発生 から23年後の野島断層近傍の地殻応力状態, 深田地質研究所年報,22,33-51.
- Yokoyama, T. and Nakanishi, A. (1997): A proposal of geo-stress measurement technique by plate

fracturing. Proceedings of the International Symposium on Rock Stress Kumamoto, 143–148.

- Yokoyama, T., Ogawa, K., Sano, O., Hirata, A. and Mizuta, Y. (2010): Development of borehole-jack fracturing technique and in situ measurements. Proceedings of the ISRM International Symposium on In-Situ Rock Stress, ISRM-ISRS-2010-012.
- Yokoyama, T. and 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, **1**(1), 714–721.
- Yokoyama, T., Sano, O., Hirata, A., Ogawa, K., Nakayama, Y., Ishida, T. and Mizuta, Y. (2014): Development of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 9–19.
- Yokoyama, T. and Ogawa, K. (2016): New hydraulic fracturing system for in-situ stress measurement by using high stiffness mechanism, Proceedings of the ISRM International Symposium on In-Situ Rock Stress, ISRM-ISRS-2016-053.
- Yokoyama, T., Sakaguchi, K., and Ito, T. (2017): Reopening and shut-in behaviors under a large ratio of principal stresses in a hydraulic fracturing test, *Procedia Engineering*, **191**, 862–868.
- Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson R. N. (1985): Well bore breakouts and insitu stress. *Journal* of Geophysical Research, **90**(B7), 5523–5530.
- Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M., Castillo, D.
 A., Finkbeiner, T., Grollimund, B. R., Moos, D.B.,
 Peska, P., Ward, C. D. and Wiprut, D. J. (2003):
 Determination of stress orientation and magnitude
 in deep wells. *International Journal of Rock*Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8), 1049–1076.