山口 勉¹ 及 川 寧 己² 佐 藤 嘉 晃²
 厨 川 道 雄³ 天 満 則 夫² 小 林 秀 男²
 松 永 烈⁴

[UDC 622.83; 624.121.38]

Experimental Study on Determination of In-situ Stress State by DSCA

by Tsutomu YAMAGUCHI¹, Yasuki OIKAWA¹, Yoshiteru SATO¹, Michio KURIYAGAWA¹,
 Norio TENMA¹, Hideo KOBAYASHI¹ and Isao MATSUNAGA²

1. National Research Institute for Pollution and Resources, AIST, MITI, Onogawa, Tsukuba 305
2. New Energy and Industrial Technology Development Organization

The DSCA (Differential Strain Curve Analysis) which was proposed by Strickland and Ren in 1980 was applied to measure in-situ stress in the Kan-etsu 2nd tunnel. The basic assumption of the DSCA is that microcracks will be generated in a rock specimen by the stress relief when it is taken from borehole and the microcrack density is related to the earth stress. The object of this study is to validate this method. The overburden of the boreholes from which test specimens were taken was about 800 m. Fourteen test pieces were carefully formed into a cubic shape with a side length of about 30 mm. Total number of 18 foil strain gages were attached to each test piece, and hydro-static pressure up to about 50 MPa was applied on the test piece. The directions of principal strains were calculated using the outputs of 18 strain gages as a function of hydro-static pressure. From the relations between hydro-static pressure and principal strain, the directions of in-situ principal stresses were estimated. As a result, azimuths of principal stresses estimated from fourteen samples had almost the same tendency, although the dips of those were divided into two groups of different tendency. The ratio of the maximum, intermediate and minimum principal stress was estimated using both Strickland and Ren's method and Dey and Brown's method. The ratio estimated by the former method was 1.00:0.69:0.42 while the latter gave the ratio of 1.00:0.64:0.45. Finally, these results estimated from DSCA were compared with another method such as hydraulic fracturing method or stress relief methods. There were no apparent contradiction between these results.

KEY WORDS: DSCA, DSA, In-situ Stress, Hydraulic Fracturing

1. はじめに

岩盤内にエネルギーや圧気を貯蔵するための大規模な地下空間を構築しようとする場合、その安定性を評価するために原位置における初期地圧の大きさや方向を知ることが重要となる。また、地下深部から高温岩体のエネルギーを取り出すための人工的なき裂を水圧破砕によって造成しようとする場合にも、初期地圧の大きさや方向を知ることが重要である。岩盤内の初期地圧を測定する方法として、現在までにいくつかの方法が提案されている。これらは、原位置試験法と実験室における試験法とに大別することができる。すなわち、前者は原位置において孔井等を用いて直接初期地圧を測定する方法で、後者は孔井より採取されたコアを用いて実験室で測定を行う方法である。このうち、原位置試験法としては、

- 1) 水圧破砕法¹⁾
- 2) 応力解放法²⁾

3) ボアホール・ブレイクアウト法³⁾

4) AEの発震メカニズムによる方法⁴⁾

等が代表的な方法として挙げられる。一方、実験室における実験法としては、

5) DSCA⁵⁾

6) カイザー効果を用いたAE法⁶⁾

7) 変形率変化法⁷⁾

8) 非弾性ひずみ回復法⁸⁾

等を挙げることができる。一般に初期地圧の測定箇所が深くなればなる程、原位置試験のための設備は大きくなり、実験に要する費用も大きくなる。これに対して実験室実験の長所は、方位の明らかなコアを得ることができれば、実験精度を比較的容易に向上させることができ、実験数も数多く行うことができる点にあり、ルーチン化することによって時間と費用とが節減されることが期待できる。本報では上述の実験室実験のうち、DSCAに着目し、関越トンネル二期線工事の現場から得られたコアを用いて初期地圧の推定を行った結果について述べる。

2. DSCAの概略

Stricklandら⁵⁾により提案されたDSCA (Differential Strain Curve Analysis) は定方位コアを用いた初期地圧の推

* 1991年1月25日受付 4月2日受理

1. 正会員 工博 公害資源研究所資源開発部

2. 正会員 公害資源研究所資源開発部

3. 正会員 工博 公害資源研究所 首席研究官

4. 正会員 新エネルギー・産業技術総合開発機構地熱技術開発室

キーワード: DSCA, DSA, 原位置応力, 初期地圧, 水圧破砕

定法であり、一回の実験から三次元的な初期地圧の方向と、最大、中間および最小主応力の大きさの比を同時に求めることが可能であるという長所を有している。DSCAでは、コアに静水圧を加え周圧とひずみとの関係から初期地圧の状態を推定している。この方法が適用可能であるための前提条件として、

1) 試料コア内部には、応力解放時すなわち地下からのコアが地表へ取り出される際に微小き裂が発生し、

2) この微小き裂の発生する方向は、初期地圧に垂直な面内であることが必要である。

ここで、西松⁹⁾により提案されたレオロジー・モデルの一種であるストッパーを用いて、ある主応力方向の応力とひずみとを関連付けるモデルを考えると図1のようになる。このモデルのうち、スプリング(コンプライアンス β_0)とストッパー(すき間 η_0)とが並列に配置された要素は、応力解放により発生するき裂に関連する要素であり、また単独のスプリング(コンプライアンス β_m)は、マトリクス部を表す。このモデルに応力を加えるとひずみ-応力線図は図2のようになる。この図2では横軸に応力、縦軸にひずみをとっており、ひずみ-応力線の傾きはコンプライアンスを表すこととなる。図2を参考として、応力が解放された状態から、このレオロジー・モデルに対して徐々に応力を増加させていくと、見かけコンプライアンスが $(\beta_0 + \beta_m)$ の傾きでひずみが増加する。その後、応力が増加し、ストッパーが作動した時点で、 β_0 のコンプライアンスを持つスプリングの全体ひずみの増加に対する寄与がなくなり、ひずみ-応力線の傾きは β_m となる。また、ひずみ-応力線で、傾き β_m を持つ直線部を外挿するとひずみ軸との交点がストッパーのすき間 η_0 を与えることとなる。

既に述べたようにDSCAでは、コアに周圧を加え、周圧と主ひずみとの関係から主応力の大きさの比を求めている。これを求める方法としてStricklandら⁵⁾とDayら¹⁰⁾により、それぞれ別の方法が提案されている。西松のモデルを使って両者の方法を整理すると以下のようになる。

3) Stricklandらが提案した方法では、最大、中間および最小の各主ひずみ方向の β_0 の比を主応力の大きさの比と関連付け、

4) Dayらが用いた方法では、各主ひずみ方向の η_0 の大きさの比を主応力の大きさの比と関連付けている。

松木¹¹⁾により指摘されているように、 β_0 は考えている方向のき裂密度に関係する量である。また、 η_0 はき裂の全閉塞量に関係する量であるので、当然のことながら両者の方法では異なった物

Fig. 1
Stopper model
proposed by
Nishimatsu⁹⁾.

Fig. 2
Strain-stress
relation of the
stopper model.

理量を解析の対象としていることになる。本報では、簡単のため、Stricklandらの方法をコンプライアンス法、Dayらの方法をギャップ法と呼ぶことにし、コンプライアンス法とギャップ法の両者を用いて解析を行い、解析結果にどの程度の差異が生じるかを検討することにする。

3. DSCAの検討

Stricklandら⁵⁾の行ったDSCAの実験では、周圧ベッセルの中で岩石試験片と同時に、ひずみゲージを貼り付けた熔融石英ガラスを加圧し両者のひずみの差をとることによって、温度や計測器等のドリフトを相殺している。この方法はSimmonsら¹²⁾により提案されたDSA (Differential Strain Analysis)と呼ばれる方法であり、この方法を用いると 2×10^{-6} のひずみの測定精度が得られるとされている。このDSAは実験的には巧妙な手法であるが、岩石試験片のひずみを直接測定しないため、岩石試験片のひずみの絶対値を求めるためには石英ガラスの圧縮率が必要である。また、温度や計測器等のドリフト等がうまく相殺できれば良いが、場合によっては実験誤差が累積される可能性がないとは言えない。

DSCAの実験においては、ひずみを精度良く測定する必要があることは言うまでもない。そこでDSAを用いることの得失を実験的に検討することとした。そのために、熔融石英ガラスのみを周圧ベッセル内で加圧し、周圧とひずみとの関係を求めた。周知のように、熔融石英ガラスは内部にほとんど微小き裂が存在せず、これを静水圧で加圧した場合、周圧とひずみとの関係は完全な直線となることが期待される。この実験のために用いた石英ガラス(東芝セラミックス製T-1030)は1辺が50mmの立方体形状をしており、互いに 45° の角度をなす3素子型のロゼットゲージを立方体の各面に1枚ずつ貼り付け、合計で18成分のひずみ成分を測定することとした。石英ガラスからのリード線をデータロガーと結線する際にハンダ付けを行う必要がある。この際にひずみを観測すると、ハンダ付け直後からひずみは大きく変動する。そこで、以下に述べる岩石試験片に対する実験も含め、ハンダ付けが終了してから少なくとも半日以上放置し、実験装置全体の温度が安定してから、実験を行うこととした。石英ガラスにより得られた18成分のひずみの内、勾配が最も大きいものと小さいもの

Fig. 3
Strain-pressure
relation of fused
silica.

Fig. 4
Distribution of
residuals of strain
between fitted
straight line and
measured strain for
fused silica.

とを図3に示す。この図から分かるように周圧とひずみとの間には極めて良好な直線関係がある。そこで18枚のひずみゲージのうち、明らかに挙動のおかしい2枚と周圧の小さい部分とを除いて、各ひずみゲージより得られた測定値に対して最小自乗法を用いて直線回帰を行い、回帰式と測定値との残差を計算して、その分布を図4に示した。この図4から明らかなように残差の平均値はほぼゼロであり、系統的な片寄りも見られず、また標準偏差も 0.40×10^{-6} であるので、前述のDSAにより達成できるとされる 2×10^{-6} の精度よりも良い。そこで、この実験結果から、DSAを用いなくても十分な精度が得られると判断し、以下に述べるDSCAの実験では岩石試験片のみを周圧ベッセル内で加圧することとした。

4. 試料岩石

試料岩石コアは関越トンネル二期線工事の現場から得られたものである。この試料が採取されたボーリング孔では、佐藤ら¹³⁾により水圧破碎法を用いた応力測定の実験も実施されている。この水圧破碎法によって推定された実験結果については、DSCAによる実験結果と対比するために後述することとする。試料岩石コアが採取された場所は、湯沢側坑口から約4.5 kmの距離にある集塵室用のトンネルであり、この付近の被りはおよそ800 mである。ボーリング孔の配置を図5に示すが、このトンネルの方位はほぼN20°Wであり（以下、本報では磁北をNとする）、トンネル断面は高さ約8 m、幅約12 mの馬蹄形である。図5のようにトンネルの床面に直径66 mm、長さ約15 mの孔井を4本掘削した。このうち1本はほぼ鉛直（V孔井）であり、他の3本（I1, I2 およ

Table 1 Mechanical properties of sample rock.

Item	Number	Average	Standard deviation
Uniaxial compressive strength (MPa)	36	225	18
Brazilian tensile strength (MPa)	63	9.9	1.0
Young's modulus (GPa)		57.4	2.3
Poisson's ratio		0.24	0.03

Fig. 5 Schematic view of boreholes in Kan-etsu tunnel from which DSCA samples were taken.

Fig. 6 Schematic view of boreholes with natural fractures. Numbers with arrow show the positions from which the DSCA samples were taken.

Fig. 7 Coordinate system of DSCA sample.

びI3孔井)は鉛直方向より約30°傾いている。

コアリングに際しては、孔井の切口部にN方向を記載し、コア全長にわたってN方向を定めた。コアが天然き裂等により切断されている部分については、目視によって切断部をはさむ上下のコアの方位を合わせることとした。しかしながら、目視によって方位を決定することが著しく困難な箇所もあり、これらのコアは厳密な意味での定方位コアとは言えない。コア薄片の顕微鏡観察によれば、この岩石は完晶質の花崗閃緑岩で、平均の粒径は0.5 mm程度であり、また変質作用はほとんど受けていない。このコアの代表的な力学的性質を表1に示す。

5. 実験装置および実験方法

実験方法は以下の手順によった。

まず、上述の現場において得られたコアのうち比較的堅固な部分を選び、この部分から1辺の長さが約30 mmである立方体試験片を合計で14個作成した。これらの試験片にはKTS 01からKTS 14までの名前を付けたが、それぞれの試験片がどの孔井のどの深度から得られたかを図6に示す。図6から分かるように、1つの孔井のほぼ同一の深度からは2個ずつの試験片を作成しており、V, I1 および I3 孔井からは各4個ずつ、I2 孔井からは2個の試験片を作成した。この立方体試験片にはN方向および孔井内での上下方向が明らかになるように印を付けた。ひずみゲージは有効長5 mmの単軸の箔ゲージを用い、立方体の各面について互いに45°の角度をなすように3枚ずつ、合計で18枚のひずみゲージを用いた。図7に示す座標系を参考にとると、x, y および z 方向には4枚ずつ、また xy, yz および zx 方向には各2枚ずつのひずみゲージを貼り付けたことになる。ここでxy方向とはxy平面上で、x軸およびy軸と互いに45°の角度をなす方向である。ひずみゲージの接着には2液混合型のエポキシ系接着剤を用い、硬化するまで最低で24時間約0.02 MPaの圧力を重錘によって加えた。なお、コア試料表面の目詰めを目的として、ゲージの接着を行う前に上記の接着剤を試料表面に塗り込み、接着剤が乾燥した後に、サンド・ペーパーで表面を滑らかにした。接着の完了したひずみゲージに電気信号線を付けた後、周圧を加えるための油がコア試料の

Fig. 8 Block diagram of experimental apparatus.

Fig. 9 Pressure history applied to fused silica and DSCA samples.

内部に浸透しないようにシリコンゴムでコア試料全体を3度になんて被覆した。

実験装置全体の模式図を図8に示す。試験片に静水圧を加えるための周圧ベッセルは、常用耐圧が約50 MPaである。この周圧ベッセルには周囲に6個の電気信号取出し用の小孔が開いており、各孔には5組(10本)のリード線を持つ端子をはめ込むことができるので、合計で30組のひずみ信号が取出せる構造となっている。またベッセル内部に周圧を加えるためのブースタ・ポンプはサーボ制御式となっており、外部から与えるリファレンス電圧に追従して圧力が変化するようにになっている。本実験では、図9に示すように、周圧ベッセル内の試料コアに増加あるいは減少を直線的かつ周期的に繰り返す最大値約50 MPaの三角波を5周期加えた。周圧の増加あるいは減少速度は試験片 KTS 01 のみが約0.10 MPa/sであり、他の試験片では全て約0.05 MPa/sである。なお、Simmonsら¹²⁾によるDSCAの実験では、周圧をステップ状に増加させ、各ステップにおいて周圧を一定の値に保持し、ひずみが安定するまで1時間程度待ってから計測を行っている。この方法を用いると1回の実験時間が長くなるため、上述のような一定の速度で周圧を増加させることとした。周圧を複数回の周期にわたって加えた理由は、今後、DSCAとの併用を検討している変形率変化法が静水圧下においても適用が可能か否かについてのデータとするためである。従って、DSCAの解析では第1周期の周圧の増加する際に得られた周圧とひずみの関係のみを用いた。なお、本ブースタ・ポンプでは装置の性能上、第1周期目の加圧の開始時に最大で2 MPa程度の周圧が急激に加わるという欠点がある。また、18成分のひずみおよび周圧の測定はデータ・ロガーを用いて行い、全ての試験片について2秒に1回の割合でデータを採取した。

6. 実験結果および検討

ここでは、上述の14個の岩石試験片を用いて得られた実験結果

Fig. 10 Relations between pressure and strain for KTS02.

のうち、まず試験片 KTS 02 および KTS 07 の2例を選んで詳細な解析結果を示し、その他の試験片については一括して示すこととする。

6・1 試験片 KTS 02 より得られた実験結果

図10では岩石試験片 KTS 02 を加圧した際に得られた周圧と x , y , z , xy , yz および zx 方向のひずみとの関係を示す。ひずみの符号は圧縮を正としている。既に述べたようにこれらの方向にはそれぞれ複数枚のひずみゲージが貼り付けてあり、図中では、各方向の平均値、例えば x 方向では4枚のひずみゲージの平均値を示す。この岩石試験片 KTS 02 は図6で示したように鉛直な孔井V孔から得られた試験片であり、図7で示した座標系を用いると x の正の方向がE方向、 y の正の方向がN方向、 z の正の方向が孔井の鉛直上向き方向と一致する。この図10から明らかなように、いずれの方向のひずみも上に凸な滑らかな曲線となっている。

上述のように、岩石試験片には合計で6方向に対してひずみゲージが接着されており、最大、中間および最小主ひずみの大きさとそれぞれの主ひずみの方向を解析的に計算することができる。これら主ひずみの大きさおよび方向は周圧を増加させるとともに

Fig. 11 Relations between pressure and direction of principal strain for KTS02. θ is the angle between the direction and z -axis as shown in Fig. 7. Fig. 12 Relations between pressure and direction of principal strain for KTS02. ϕ is the angle between the direction and x -axis as shown in Fig. 7.

Fig. 13 Relations between pressure and analysed principal strain for KTS02.

変化する。図11および図12では、主ひずみの方向が周圧を増加させるとどのように変化するかを示している。図11で示した θ は図7を参照して、ある主ひずみの方向が z 軸となす角度であり、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の範囲を持つ。また、図12で示した ϕ は、同じく図7を参照して、ある主ひずみの方向を xy 平面に投影した方向が x 軸となす角度であり、 $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ の範囲を持つ。この図11および図12から明らかなように主ひずみの方向は、加圧開始から2 MPa以降である一定の方向に徐々に収束することが分かる。例えば、最大主ひずみの方向は θ が 108° に、 ϕ が 183° にそれぞれ収束している。DSCAではこの方向を初期地圧の主応力の方向とすることになる。

次に図13に、最大、中間および最小のそれぞれの主ひずみの大きさを計算して、横軸を周圧としてプロットした。この図から分かるように中間ひずみと最小ひずみの大きさはほぼ同じであり、最大ひずみは他のひずみの4～5割程度大きな値を持っている。この主ひずみ-周圧曲線から初期主応力の比を求めるために、まずコンプライアンス法を適用することにする。図13に示した主ひずみ-周圧曲線から各主ひずみ曲線に対してほぼ原点付近のコンプライアンス(図2では $\beta_0 + \beta_m$ に相当する)から、周圧が大きくなって主ひずみ-周圧線図がほぼ直線となった部分でのコンプライアンス(図2では β_m に相当する)の差をとれば、ストッパーと並列なスプリングのコンプライアンス(β_0)を求めることができる。コンプライアンス法では、各主ひずみの方向の β_0 の比が初期主応力の比となる。これらのコンプライアンスを図12より求めた後、得られた β_0 より計算される主応力の比(最大主応力の大きさを基準値とした)をまとめて表2に示した。

一方、ギャップ法を適用するために、まず、図13において周圧が十分に大きくなった時点での各主ひずみ曲線の直線部分を外挿してひずみ軸との交点の大きさを求めれば、これが各主ひずみ方向のストッパーの隙間に起因するひずみすなわち η_0 を与えることになる。ギャップ法では各主ひずみの方向の η_0 の比が初期主応力の比を与えることになるので、これらの値をまとめ、初期主応力の比を計算すると表3のようになる。

表2および表3で示したように、推定された最大、中間および最小主応力の比はコンプライアンス法で1.00:0.60:0.43となり、ギャップ法では1.00:0.53:0.43となる。従って、両者の方法からはほぼ同一の主応力比が得られたことになる。

6・2 試験片KTS07より得られた実験結果

次に、KTS07より得られた主ひずみ-周圧曲線を図14に示す。図14では参考のために周圧が十分に大きくなった時点での外挿直線をそれぞれの主ひずみ-周圧曲線に当てはめた結果についても示してある。この主ひずみ-周圧曲線に対して初期主応力の比を求めるために、まずコンプライアンス法を適用することにする。

Table 2 Estimated ratio of magnitudes of principal stresses for KTS02 using "Compliance method".

Direction of principal strain	$\beta_1 + \beta_m$ (GPa ⁻¹)	β_m (GPa ⁻¹)	β_1 (GPa ⁻¹)	Stress ratio
Maximum	0.03158	0.01714	0.01444	1.00
Intermediate	0.02027	0.01164	0.00863	0.60
Minimum	0.01712	0.01086	0.00626	0.43

Table 3 Estimated ratio of magnitudes of principal stresses for KTS02 using "Gap method".

Direction of principal strain	η_0 (x10 ⁻⁶)	Stress ratio
Maximum	362.5	1.00
Intermediate	192.7	0.53
Minimum	156.3	0.43

Table 4 Estimated ratio of magnitudes of principal stresses for KTS07 using "Compliance method".

Direction of principal strain	$\beta_1 + \beta_m$ (GPa ⁻¹)	β_m (GPa ⁻¹)	β_1 (GPa ⁻¹)	Stress ratio
Maximum	0.03479	0.01675	0.01804	1.00
Intermediate	0.02389	0.01320	0.01069	0.59
Minimum	0.02102	0.01024	0.01078	0.60

Table 5 Estimated ratio of magnitudes of principal stresses for KTS07 using "Gap method".

Direction of principal strain	η_0 (x10 ⁻⁶)	Stress ratio
Maximum	450.0	1.00
Intermediate	224.0	0.50
Minimum	282.3	0.63

各主ひずみの曲線に対してコンプライアンスを求めると、表4で示した値が得られ、同じくこの表中で示した主応力比が得られる。この表4で示したように中間主ひずみの方向の β_0 の大きさは0.01069 GPa⁻¹であり、最小主ひずみの方向の β_0 の値は0.01078 GPa⁻¹であるので、両者に大きな差異はないものの、前者が後者よりも小さいという実験結果が得られた。

一方、ギャップ法を適用すると表5に示した結果が得られた。この方法を適用した場合にも、前述のコンプライアンス法と同様

Fig. 14 Relations between pressure and analysed principal strain for KTS07. Straight lines A, B and C are the extrapolated lines on the high pressure part of each principal strain.

に、最小主ひずみの方向ではなく中間主ひずみの方向の η_0 の大きさが最も小さい。すなわち、図14から分かるように図中Cで示した最小主ひずみの外挿線のひずみ軸の切片は図中Bで示した最大ひずみの切片よりも大きな値を持っている。

従って、コンプライアンス法あるいはギャップ法のいずれの方法を適用してもKTS 07の試験片からは中間主ひずみの方向の主応力が最も小さい値として推定されるという、一見矛盾した結果が得られたことになる。このような実験結果が報告された例は今までにないが、これは次のように考えるべきであろう。すなわち、例えばコンプライアンス法を例にとれば、主応力比を決定するのはそれぞれの主ひずみの方向の β_0 の大きさの比からであり、主ひずみそのものの大きさからではない。すなわち、岩石コアに対して静水圧を加えた際に観測される最小主ひずみの方向が、必ずしも最小初期地圧の方向と一致する保証があるわけではない。従って、この試験片のように中間主ひずみの方向で最小の β_0 が得られた場合には、この方向はもともと最小初期地圧の方向であったと考えるべきであろう。ギャップ法についても同様である。そこで、この試験片 KTS 07 では中間初期地圧および最小初期地圧の加わっていた方向は、それぞれ最小主ひずみの方向および中間主ひずみの方向であると推定することとした。

なお、このKTS 07の試験片のように、中間主ひずみおよび最小主ひずみの方向と推定された中間初期地圧および最小初期地圧の方向とが一致しなかった試験片はこの試験片のみであり、他の13個の試験片ではいずれもこれらの方向は一致した。

6.3 その他の試験片より得られた実験結果

前節までで試験片 KTS 02 および KTS 07 の具体的な解析例について述べた。ここでは同様の解析方法を他の試験片について適用した結果についてまとめて述べることにする。まず、主ひずみの方向から推定された初期主応力の方向を孔井別にウルフ・ネットの下半球に投影した結果を図15の(a)から(d)までに示す。なお、図15の(b)から(d)までの、傾斜井から得られた岩石試験片についてはN方向に関する補正を行っていることは言うまでもない。これらの各図を見ると、同一の孔井から得られた試験片による各主応力の方向の推定結果はいずれの孔井においても、方位・傾斜とも

Fig. 15 Estimated directions of principal stresses of samples taken from: (a) well V; (b) well I1; (c) well I2; (d) well I3 on lower hemisphere of Wolf net. Open, half-solid and solid circles show the directions of maximum, intermediate and minimum principal stresses, respectively.

Table 6 Estimated ratio of magnitudes of principal stresses by "Compliance method" and "Gap method".

Sample name	Compliance method	Gap method
KTS01	1.00:0.80:0.44	1.00:0.68:0.34
KTS02	1.00:0.60:0.43	1.00:0.53:0.43
KTS03	1.00:0.79:0.47	1.00:0.71:0.48
KTS04	1.00:0.80:0.52	1.00:0.73:0.54
KTS05	1.00:0.53:0.37	1.00:0.50:0.44
KTS06	1.00:0.54:0.14	1.00:0.54:0.32
KTS07	1.00:0.59:0.60	1.00:0.50:0.63
KTS08	1.00:0.75:0.54	1.00:0.60:0.48
KTS09	1.00:0.55:0.55	1.00:0.67:0.58
KTS10	1.00:0.78:0.50	1.00:0.73:0.57
KTS11	1.00:0.58:0.33	1.00:0.57:0.37
KTS12	1.00:0.51:0.43	1.00:0.46:0.42
KTS13	1.00:0.95:0.22	1.00:0.95:0.26
KTS14	1.00:0.81:0.34	1.00:0.80:0.38

Magnitudes of intermediate and minimum stresses are normalized by the magnitude of maximum stress.

Fig. 16 Relation between estimated principal stress ratios by "Compliance method" and "Gap method". Half-solid circles and solid circles show ratios of intermediate and minimum principal stresses to maximum principal stress, respectively.

にほぼ一致していることが分かる。これに対して、異なった孔井から得られた結果を比較すると、2つのグループに分けることができる。1つのグループはV孔井とI2孔井からなるグループであり、もう1つのグループは、I1孔井とI3孔井からなるグループである。グループ内では最大、中間および最小の主応力の方位および傾斜はおおよそ一致している。しかしながら、グループ間を比較すると各主応力の方位は一致しているものの、傾斜は異なっていることが分かる。

次にコンプライアンス法およびギャップ法によって推定した主応力の大きさの比をまとめて表6に示す。この表6で示した数値をもとにコンプライアンス法とギャップ法とから得られた結果の間に明確な差異があるかどうかを検討することとした。図16では横軸にコンプライアンス法、縦軸にギャップ法によってそれぞれ推定された主応力の比をとって、各試験片コアより得られた中間および最小主応力の比をプロットした。このような図上で実験結果を整理した場合、ある試験片でコンプライアンス法とギャップ法によって全く同一の応力比が得られたならば、プロットされる点は図16に示す傾き45°の直線上に乗るはずである。図16から分かるように、主応力の比を表す点はほぼ傾き45°の直線の付近に位置し、この直線より特に上あるいは下に片寄る等の傾向は見られない。このことからある試験片コアに対してコンプライアンス法とギャップ法のいずれの方法を用いてもほぼ同一の結果が得られることが分かる。

Fig. 17

Estimated directions of principal stress on lower hemisphere of Wolf net. Open, half-solid and solid circles show the directions of maximum, intermediate and minimum principal stresses respectively. The directions named HF, SR1 and SR2 were estimated by hydraulic fracturing tests by Sato¹³⁾, stress relief method by Saito¹⁴⁾ and stress relief method by Hirata¹⁵⁾, respectively.

7. 他の方法による実験結果との比較

関越トンネルでは本報で述べたDSCAばかりではなく、他の方法によっても初期地圧の測定が実施されている。佐藤¹³⁾は、本岩石試験片の得られた孔井内での水圧破碎実験より主応力の大きさと方向とを求めた。計測された主応力の方向は、最大主応力が $N83^{\circ}E$ 、中間主応力が $N167^{\circ}W$ であり、最小主応力の方向は $N20^{\circ}W$ である。また、推定された主応力の大きさは、 18.3 MPa 、 2.7 MPa および 1.7 MPa という値であった。

次に、斉藤¹⁴⁾は、関越トンネル二期線内ではなく、一期線のトンネル内の3箇所において8素子坑底ゲージを用い、応力解放法によって初期地圧の測定を行った。この3箇所の内、本DSCA試験片が採取された箇所とほぼ同一の地質条件、深度（関緑岩、960 m）で行われた実験結果からは、主応力の値として、 22.9 MPa 、 10.7 MPa および 7.5 MPa という値が得られており、またそれぞれの方向は真北に対して $N76^{\circ}W$ 、 $N82^{\circ}E$ 、 $N177^{\circ}W$ であった。

一方、平田¹⁵⁾は、関越トンネル二期線内で本DSCAの試験片の得られた箇所とほぼ同一の箇所（被り820 m）において、応力解放法の一つである球状坑底ひずみ法を用いて、主応力状態を計測しており、主応力方向は最大、中間および最小の順に真北に対して $N47^{\circ}W$ 、 $N152^{\circ}E$ 、 $N113^{\circ}W$ であった。また、主応力比は $1.00:0.47:0.33$ となっている。

これらの結果をもとに、主応力の方向を図17にまとめた。この図17とDSCAにより得られた主応力の方向の図すなわち図15を比較すると以下のことが分かる。すなわち、方位に関してはDSCAおよびその他の手法で得られる測定結果はおおよそ一致している。これに対して傾斜を比較すると、DSCAで得られた(b)と(d)のグループと2つの応力解放法で得られた値とはおおよそ一致しており、同じくDSCAで得られた(a)と(c)のグループと水圧破碎法で得られた結果とが、大体一致している。従って、DSCAで得られた2つのグループの結果の内、どちらが正しいかについては不明であるものの、いずれのグループの結果を選んでも、DSCA以外の手法で得られた結果と一致する。

Table 7 Comparison between estimated principal stress ratio by different methods.

Method	Ratio of principal stresses
DSCA ("Compliance method")	1.00:0.69:0.42
DSCA ("Gap method")	1.00:0.64:0.45
Hydraulic fracturing ¹³⁾	1.00:0.15:0.09
Stress relief ¹⁴⁾	1.00:0.47:0.33
Stress relief ¹⁵⁾	1.00:0.25:0.21

次に、中間および最小主応力の最大主応力に対する比を一括して表7にまとめた。この表から明らかなように、DSCAによる比はコンプライアンス法あるいはギャップ法のいずれを適用しても、その他の手法よりも大きめの値が得られた。

8. おわりに

本報では、関越自動車道の関越トンネル二期線の工事現場より得られた14個のコアに対してDSCAを適用し、初期地圧の推定を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1) DSCAにより推定した初期主応力の方位はいずれの試験片でもおおよそ一致した。

2) これに対して、推定した初期主応力の傾斜は孔井毎での複数の結果を比較するとおおよそ一致するものの、孔井間を比較すると異なった傾斜を持つ2つのグループのあることが分かった。

3) DSCAでは、主応力比を推定する方法としてStricklandらおよびDeyらにより、それぞれ別の方法が提案されている。本報では両者の方法を適用して主応力比を求めたが、いずれの方法でもほぼ同一の値が得られた。

4) DSCAにより得られた結果を、同一の現場において実施された水圧破碎法および応力解放法による測定値と比較すると、主応力の方向に関しては両者は調和的であった。これに対して、主応力の比に関してはDSCAによる結果は、その他の結果と比較して大きめの値が得られた。

原位置における真の応力状態を知ることは困難であるが、DSCAを用いた場合に測定結果のばらつきが比較的少ないこと、また得られた結果が他の方法による実験結果と調和的であることから、DSCAを用いて地下の応力状態を実験から推定することはある程度可能であると考えられる。しかしながら、DSCAの概略の項で述べた応力解放時のき裂の発生機構については十分な解明がなされているとは言えない。今後はこの点について理論的な検討を進めるとともに実験例を増やすことが重要である。

謝辞 試験片コアの作製方法等については、山口大学工学部佐野修助教授および工技院地質調査所の西澤修主任研究官に貴重なご助言を頂いた。また、試料の採取に関しては関越トンネル二期線の工事事務所関係者のお世話になった。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば水田義明他：日本鉱業会誌，103 [1188]，75～85，(1987)
- 2) 例えば鈴木光他：日本鉱業会誌，83 [950]，793～799，(1967)
- 3) Zoback, M. D. et al.: J. Geophys. Res., 90, 5523～5530, (1985)
- 4) 佐々木俊二他：地震学会講演予稿集，B44，秋季大会，(1990)
- 5) Strickland, F. G. and N. K. Ren: Proc. 21st. U. S. Rock Mechanics Symposium, Rolla, Missouri, (1980)
- 6) 金川 忠他：電力中央研究所報告，研究報告381004，(1981)
- 7) 山本清彦他：地震学会講演予稿集No. 1，春期大会，(1983)
- 8) Warpinski, N. R. and L. W. Teufel: SPE 15368, 61st. Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, New Orleans, LA, (1986)
- 9) 西松裕一：材料，20，129～135，(1971)
- 10) Dey, T. N. and D. W. Brown: International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Sweden, (1986)
- 11) 松本浩二：地殻応力計測ワークショップ資料集，92～104，(1989)
- 12) Simmons, G. et al.: J. Geophys. Res., 79, 4283～4385, (1974)
- 13) 佐藤嘉晃他：第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演要旨集，441～445，(1990)
- 14) Saito, T. et al.: 5th. International Conference ISRM, Melbourne, Australia, (1983)
- 15) Hirata, A. et al.: submitted to International Conference ISRM, Aachen, German, (1991)