Theoretical Examination of the Method for Measuring Three-dimensional In-situ
Stresses with Anelastic Strain Recovery of Rock

by Koji MATSUKI¹

1. Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980

Anelastic strain recovery method is one of inexpensive and simpler methods for measuring in-situ stresses at great depth. However, the method has been based on the critical assumptions that the vertical boring axis is one of principal directions and that vertical stress is given by overburden pressure, which are not always true for actual rock masses.

In this study, by deriving a fundamental equation on the anelastic strain recovery of isotropic visco-elastic material in general three dimensional stress state, the method for measuring three-dimensional in-situ stresses has been proposed. In the method, by measuring six independent anelastic normal strains of a core, six anelastic strain deviations and anelastic volumetric strain are determined first. From the former, the orientations of principal in-situ stresses and ratios of principal in-situ stress deviations are determined without the knowledge of anelastic strain recovery compliances of the core, in-situ pore pressure and temperature change in the core. Then, by evaluating pore pressure and by correcting the effect of temperature change on the anelastic volumetric strain, absolute three dimensional in-situ stresses are determined by measuring the anelastic strain recovery compliances of the rock core in both shear and volumetric modes in the laboratory.

KEY WORDS: Anelastic Strain Recovery, In-situ Stress Measurement, Three-dimensional Stresses, Visco-elastic Model

1. 緒 言

石油開発や地熱開発で行われる水圧破碎を用いた地下き裂の作製においては、地下き裂の工学的設計のために数kmにも及ぶ深度における地圧状態を正確に把握することが必要になる。これまでに、応力解放法を主体として種々の地圧計測法が提案され、また実際に用いられているが、これらのなかで地下深部に適用できるものは限られており、現在水圧破碎法が最も有力であると考えられる。しかし、水圧破碎法は計測深度が大きくなるに伴って費用がかさむことや地温が高い場合には適用できないなどの問題があり、とくに地熱開発の分野で水圧破碎法に代わり得る簡便な深部地圧計測法の開発が求められている。このため、近年、ボーリングコアを用いた方法が注目されている。これには、AEのカイザー効果を利用したもの(AE法)¹⁾、クラック密度の計測によるもの(DSA法)²⁾、非弾性ひずみ回復を用いたもの(Anelastic strain recovery法:以後ASR法と呼ぶ)³⁾⁴⁾、変形率の変化を用いたもの⁵⁾などが挙げられる。しかし、これらの方法は、その基礎となるメカニズムや原理が必ずしも十分に実証されていない

こと、岩石の挙動の正確な理解に基づいていないこと、また岩種に対する適用性が十分明らかではないことなどから、計測結果に対する信頼性は必ずしも高くないのが現状である。しかし、これらの方法は簡便でかつ低コストであり、その信頼性を高めることができれば、石油や地熱開発の分野のみならず地下構造物の安定設計など地下工学にかかわる幅広い分野に応用が可能であり、その意義も大きいと考えられる。

ボーリングコアを用いたこれらの方法はそれぞれの開発段階にあると言えるが、AE法やDSA法では、一応、三次元地圧またはその比が計測されるのに対して、これまでのASR法では、鉛直なボーリング軸方向が主応力方向でかつそれが被り圧で与えられると仮定している³⁾⁴⁾。これまでの多くの地圧計測結果⁶⁾によれば、この仮定が多くの場合正しくないことが知られており、従って、この仮定から求めた計測結果は著しく信頼性の低い結果を与えると言わざるを得ない。また、従来のASR法では、実際の岩石の非弾性ひずみ回復特性に関する研究がほとんどないまま、岩石の時間依存的変形挙動が応力の大きさに比例すると仮定している。しかし、クリープ変形に関する従来の研究⁷⁾が岩石の粘弾性的定数の応力依存性を明らかにしており、非弾性ひずみ回復特性の応力依存性についても検討の余地があることを示唆している。

このように、これまでのASR法を信頼できる地圧計測法に発展させるためには検討しなければならない多くの課題がある。なか

* 1991年6月5日受付 8月6日受理

1. 正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科

キーワード: 非弾性ひずみ回復, 地圧計測, 三次元地圧, 粘弾性モデル

Fig. 1 Scheme of anelastic strain recovery method for measuring in-situ stresses.

でも、主応力の一つが鉛直でかつ被り圧で与えられるという仮定を設けることなく、測定結果から直接三次元的な地圧を決定する方法を開発することは最も重要な課題である。本研究では、ASR法による三次元地圧計測法を開発することを目的として、まず一般的な三次元応力状態の等方粘弾性体におけるひずみ回復に関する理論的考察を行い、次に、それに基づいて三次元地圧計測法の提案を行う。

2. ASR法の基本原理および従来の研究

岩石に長時間一定の応力を加えた後除荷すると、瞬間的な弾性ひずみの解放後にも岩種によっては数日間もひずみの回復が続く⁸⁾。同一岩石であれば、それまでに加わっていた応力が大きいほどこの非弾性ひずみの回復量も大きい。従って、地下から採取されたボーリングコアについて非弾性回復ひずみを計測すれば地圧に関する情報が得られる。しかし、地圧を定量的に把握するためには、岩石の非弾性ひずみ回復特性を定量的に評価する必要があるため、これまでの研究では岩石を等方線形粘弾性体であると仮定している。

図1は、ASR法による地圧計測の基本骨格を示したものである。まず、非弾性回復ひずみを種々の方向について計測する。従来の研究では、コア軸方向および3つの半径方向の計4方向の非弾性ひずみを計測している。次に、岩石の粘弾性挙動のモデル化を通じて得られる単位解放応力当たりの非弾性回復ひずみの時間変化である非弾性ひずみ回復コンプライアンスから地圧と非弾性ひずみ回復量の関係を定め、これにより地圧を求める。

Blanton⁴⁾やWarpinskiら⁸⁾は、鉛直ボーリングによって得られるコアの非弾性回復ひずみについて、既に述べたように、鉛直方向が一つの主応力軸でありかつその主応力が被り圧で与えられると仮定して水平面内の地圧成分を求めている。Blanton⁴⁾は、ポアソン比が時間依存性を有せず、岩石の粘弾性挙動が一つのひずみ回復コンプライアンスで記述されると仮定することにより、岩石の非弾性ひずみ回復特性を知ることなしに、任意の時間間隔における非弾性ひずみ回復量から水平面内の最大および最小主応力を求める方法を提案している。しかし、これは、Warpinskiら⁸⁾が批判しているように、岩石の粘弾性挙動を正確に考慮しているとはいえない仮定である。一方、Warpinskiら⁸⁾は、岩石を図2で表される3要素の線形粘弾性モデルで表し、体積変形とせん断変形に関する非弾性ひずみ回復コンプライアンスを用いて水平面内の非弾性ひずみを定式化し、せん断変形に関する非弾性ひずみ回復コンプライアンスの係数 J_1 か水平最小主応力 σ_3 のどちらかを与えることにより最大水平主応力を求める方法を提案している。そして、例えば水圧破壊法によって求められた水平最小主応力 σ_3 を用いて最大水平主応力を決定している。

3. 等方粘弾性体における非弾性回復ひずみ

本章では、ASR法による地圧計測の理論的基礎を確立するために、三次元応力状態にある等方粘弾性体の応力がステップ状に

three-element model

Fig. 2 A linear visco-elastic model for anelastic strain recovery of rocks.

解放された場合の任意の方向の非弾性垂直ひずみについて考察する。

まず、等方粘弾性体としての岩石のラプラス変換後の構成則が、せん断変形と体積変形という2つの変形モードで表され、偏差応力 S_{ij} - 偏差ひずみ e_{ij} 関係および平均垂直応力 σ_m - 平均垂直ひずみ e_m 関係について次の式で与えられると仮定する⁹⁾。

$$\begin{aligned} P_S(s) \overline{S_{ij}} &= Q_S(s) \overline{e_{ij}}, \\ P_V(s) \overline{\sigma_m} &= Q_V(s) \overline{e_m} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 P 、 Q は、 s の関数であり、線形粘弾性体の場合は s の多項式である。また、下付きの添字 s 、 v は、それぞれ、せん断変形および体積変形に関するものであることを表し、 $\overline{S_{ij}}$ などは、 S_{ij} などをラプラス変換したものである。(1)式は、等方粘弾性体の三次元的な構成則を与える。このような粘弾性体の応力がステップ状に解放された場合の単位応力当たりのひずみの時間変化 - ひずみ回復コンプライアンス - は、(1)式より、せん断変形 J_S および体積変形 J_V について、それぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned} \overline{e_{ij}}/S_{ij} &= \overline{J_S(s)} = P_S(s)/(Q_S(s)s), \\ \overline{e_m}/\sigma_m &= \overline{J_V(s)} = P_V(s)/(Q_V(s)s) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 S_{ij} 、 σ_m は解放以前に加わっていた応力である。なお、岩石をある粘弾性モデルで表せば、ひずみ回復コンプライアンスはいわゆるクリープコンプライアンスの符号を変えたものと一致する。しかし、クリープコンプライアンスには、いわゆる三次段階が含まれることがあるのに対して、ひずみ回復コンプライアンスは必ず一定値に収束すると考えられるように、現実の岩石では応力レベルによってそれらが異なる可能性もあり、本研究では、ひずみ回復挙動をクリープ挙動と区別して扱う。

次に、(2)式は瞬間的に解放される弾性ひずみも含んでいるので、全ひずみ回復コンプライアンスから弾性ひずみを除いたそれぞれのモードの非弾性ひずみ回復コンプライアンスを J_{as} および J_{av} で表す。すなわち、時間を t で表すと、

$$J_{as}(t) = J_S(t) - J_S(0), \quad J_{av}(t) = J_V(t) - J_V(0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

なお、従来の研究で用いられている3要素モデル(図2)から得られる非弾性ひずみ回復コンプライアンスは次式で与えられる。

$$J_a(t) = (1/E_1) \{1 - \exp(-t/\lambda_1)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、せん断変形と体積変形に関するものは上式の定数が異なるだけで式の形は同じであり、 $\lambda_1 (= \eta_1/E_1)$ は遅延時間である。なお、 η_1 と E_1 は、それぞれ、図2のVoigt物体の粘性率とヤング率である。

今、三次元地圧と間隙水圧を受けているある点Oの方向余弦が (l, m, n) である方向の垂直ひずみ ε は(図3参照)、等方弾性体の場合、ひずみの変換式¹⁰⁾ならびに間隙水圧を考慮したHookeの法則¹¹⁾から、次式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon = (1/E) \{ & l^2 \sigma_x + m^2 \sigma_y + n^2 \sigma_z + 2lm \tau_{xy} + 2mn \tau_{yz} \\ & + 2nl \tau_{zx} \} - (\nu/E) \{ (m^2 + n^2) \sigma_x + (n^2 + l^2) \sigma_y \\ & + (l^2 + m^2) \sigma_z - 2lm \tau_{xy} - 2mn \tau_{yz} - 2nl \tau_{zx} \} \end{aligned}$$

Fig. 3 Normal strain in an arbitrary direction in a visco-elastic body.

$$-(1/3)(1/K-1/K_S)p_0-\alpha\Delta T \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、ここでは圧縮を正としており、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 K は見掛けの体積弾性率、 K_S は岩石実質部の体積弾性率、 α は線膨張係数、 p_0 、 ΔT はそれぞれ、間隙水圧と温度上昇である。なお、右辺第3項は、間隙水圧 p_0 によるある方向の膨張ひずみが、重ね合せの原理から、 p_0 と等しい静水圧によって生ずる圧縮ひずみ($p_0/3K$)と p_0 ならびにそれに等しい静水圧による圧縮ひずみ($p_0/3K_S$)との差で与えられることによる。また、ここでは、点Oが一樣な温度場にあると仮定している。

粘弾性体の場合のひずみは、上式をラプラス変換した後、対応原理⁹⁾を用いて、

$$3K \rightarrow Q_V/P_V, \quad E \rightarrow 3Q_S Q_V / (2P_S Q_V + Q_S P_V), \\ \nu \rightarrow (P_S Q_V - Q_S P_V) / (2P_S Q_V + Q_S P_V) \quad \dots\dots\dots (6)$$

なる置き換えを行うことにより、次のように求められる。

$$\bar{\epsilon}(s) = (2P_S/3Q_S + P_V/3Q_V)(l^2\bar{\sigma}_x + m^2\bar{\sigma}_y + n^2\bar{\sigma}_z + 2lm\bar{\tau}_{xy} + 2mn\bar{\tau}_{yz} + 2nl\bar{\tau}_{zx}) - (P_S/3Q_S - P_V/3Q_V)\{(m^2 + n^2)\bar{\sigma}_x + (n^2 + l^2)\bar{\sigma}_y + (l^2 + m^2)\bar{\sigma}_z - 2lm\bar{\tau}_{xy} - 2mn\bar{\tau}_{yz} - 2nl\bar{\tau}_{zx}\} - (1/3)(3P_V/Q_V - 1/K_S)\bar{p}_0 - \alpha\Delta T \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、Warpinskiら⁸⁾と同様、実質部の体積弾性率 K_S は時間依存性がないと仮定している。応力と間隙水圧がステップ状に解放された場合の粘弾性体の非弾性垂直ひずみは、 $\bar{\sigma}_x = \sigma_x/s$ 、 $\bar{p}_0 = p_0/s$ などを(7)式に代入した後、(2)式を用いて逆ラプラス変換することにより次式で与えられ、これがASR法による地圧計測のための基礎式となる。なお、この場合のひずみは、膨張が正である。

$$\epsilon_a(t) = (1/3)[(3l^2-1)\sigma_x + (3m^2-1)\sigma_y + (3n^2-1)\sigma_z + 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} + 6nl\tau_{zx}]J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、等方粘弾性体の応力と間隙水圧がステップ状に解放された場合のある方向の非弾性垂直ひずみは、地圧6成分と間隙水圧およびせん断変形と体積変形に関する非弾性ひずみ回復コンプライアンス、さらには応力が解放された後の岩石コアの温度変化に依存して決まる。

4. ASR法による三次元地圧計測法の提案

既に述べたように、従来のASR法では、被り圧で与えられる鉛直応力が一つの主応力であると仮定している。これは、従来の方法³⁾⁴⁾⁸⁾¹²⁾では、4方向の垂直ひずみしか計測していないことによる。すなわち、少なくとも6個の互いに独立な垂直ひずみを計測しなければ岩石コアの非弾性ひずみ6成分を一義的に決定できないことから、地圧に関する何等かの仮定を設ける必要が生ずるわけである。従って、ASR法を用いて完全な三次元地圧を決定するためには、測定により少なくとも非弾性ひずみ6成分を決定す

Fig. 4 Normal strains to be measured for determining three-dimensional in-situ stresses with ASR method by using (a) displacement transducers or (b) strain gauges.

る必要がある。

地下から採取された岩石コアの非弾性ひずみを一義的に決定するためには、例えば、図4(a)の矢印で示すような6方向について垂直変位を測定すればよい。また、DSA法²⁾と同様に、ロゼットゲージを用いて測定することも考えられる(図4(b))。ひずみ測定の信頼性を高めるためには、より多くの方向についてより多くのひずみを測定して最小自乗法などを用いることが望ましいが、たとえ多くの方向について測定したとしても、非弾性ひずみ6成分以上の情報は得られない。

(8)式より、例えば図4(a)に示した6方向の非弾性垂直ひずみと地圧は次の関係にある。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= (\sigma_x - \sigma_m)J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_y &= (\sigma_y - \sigma_m)J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_z &= (\sigma_z - \sigma_m)J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_{xy} &= \{\tau_{xy} - 0.5(\sigma_x - \sigma_m)\}J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_{yz} &= \{\tau_{yz} - 0.5(\sigma_y - \sigma_m)\}J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_{zx} &= \{\tau_{zx} - 0.5(\sigma_z - \sigma_m)\}J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これらの非弾性垂直ひずみから、次式などを用いて非弾性せん断ひずみ(テンソルひずみ)が求められる。

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{xy} - 0.5(\epsilon_x + \epsilon_y) \quad \dots\dots\dots (10)$$

従って、岩石コアのひずみ回復に伴う非弾性ひずみ6成分は、次のように表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= (\sigma_x - \sigma_m)J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_y &= (\sigma_y - \sigma_m)J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_z &= (\sigma_z - \sigma_m)J_{as}(t) + (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \\ \epsilon_{xy} &= \tau_{xy}J_{as}(t) \\ \epsilon_{yz} &= \tau_{yz}J_{as}(t) \\ \epsilon_{zx} &= \tau_{zx}J_{as}(t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、時間 t は応力解放後の経過時間である。ここで、上式から求められる平均垂直ひずみ e_m 、

$$e_m = (\sigma_m - p_0)J_{av}(t) + \alpha\Delta T(t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

を用いて偏差ひずみ e_x 等を求めると、これらは偏差応力 s_x 等と次の関係にある。

$$\begin{aligned} e_x &= s_x J_{as}(t), \quad e_y = s_y J_{as}(t), \quad e_z = s_z J_{as}(t) \\ e_{xy} &= \tau_{xy} J_{as}(t), \quad e_{yz} = \tau_{yz} J_{as}(t), \quad e_{zx} = \tau_{zx} J_{as}(t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(13)式から次のことがわかる。すなわち、各偏差ひずみが、対応する偏差応力とせん断変形に関する非弾性ひずみ回復コンプライアンスの積で表されることから、任意の時刻における偏差ひずみの主軸の方向は一定でかつ偏差応力の主軸の方向と一致する。従って、偏差成分と全成分の主軸の方向は同じである¹³⁾ことから、非弾性主ひずみの方向は時刻にかかわらず一定でかつ主応力の方向

を与える。さらに、任意の時刻における偏差ひずみの比を求めれば、当該岩石の非弾性ひずみ回復特性を知ることなしに、地圧の偏差成分の比が求められる。また、偏差ひずみは岩石試料内で一様な温度変化の影響を受けないので、温度が試料内で一様であれば、試料の温度が変化してもこれらのことは成り立つ。上記のことは、岩石が等方粘弾性体でかつ既に述べた2つの変形モードによって三次元的な変形挙動が支配されるという仮定から導かれる当然の帰結である。従って、逆に、非弾性ひずみの方向と偏差ひずみの比が時間にかかわらず一定であるかどうかをチェックすることにより、用いた仮定が当該岩石に対して正しいかどうか吟味することができる。

これらの偏差ひずみから、ある時刻 t における偏差主ひずみ e_i ($i=1, 2, 3$) を求めれば、(13)式より、これは偏差主応力 s_i と次の関係にある。

$$s_i = e_i(t) / J_{as}(t) \quad \dots\dots\dots (14)$$

従って、主応力 σ_i は、上式および(12)式より、次式で与えられる。

$$\sigma_i = \sigma_m + e_i(t) / J_{as}(t) \\ = e_i(t) / J_{as}(t) + \{e_m(t) - \alpha \Delta T(t)\} / J_{av}(t) + p_0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

すなわち、岩石の非弾性回復ひずみの測定から3次元の主応力を決定するためには、まず第1に平均垂直ひずみに及ぼす温度変化の影響の正確な補正と間隙水圧の評価が必要であり、さらに当該試料のせん断変形ならびに体積変形に関する非弾性ひずみ回復コンプライアンスを知る必要がある。これらのうち、温度変化の影響は計測深度が大きいほど問題となるが、非弾性ひずみとともに試料の温度を測定しておけば、ひずみ回復が完全に終了した後に当該試料を用いて線膨張係数を測定することにより補正できる。また、通常、測定は雰囲気温度を一定に保った状態で行うため、非弾性ひずみ回復量が大きくてかつ十分長く続く場合には、温度変化の影響が生じる初期のデータを無視することでも解決可能である。間隙水圧は検層等により測定または評価できる。非弾性ひずみ回復コンプライアンスは、計測に供した試料と同じコアを用いて、例えば三軸圧縮応力下で十分長い時間一定応力 σ_1, σ_3 を保持して応力を解放した後に生ずる軸方向および横方向の非弾性ひずみ ($\varepsilon_{1a}, \varepsilon_{3a}$) を実験室で測定することにより、次式から求めることができる。

$$J_{av}(t) = \{\varepsilon_{1a}(t) + 2\varepsilon_{3a}(t)\} / (\sigma_1 + 2\sigma_3) \\ J_{as}(t) = \{\varepsilon_{1a}(t) - \varepsilon_{3a}(t)\} / (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \dots\dots\dots (16)$$

なお、測定中の水分変化の影響を除くために、通常、測定は試料を被覆してから行うので、被覆材として耐圧性のものを選択することにより、非弾性ひずみの測定終了後に当該試料を用いて、一定時間静水圧を加えて除荷することにより体積変形に関する非弾性ひずみ回復コンプライアンスを直接求めることが可能である。ただし、既に述べたように、 J_{av} や J_{as} に応力依存性があると考えられることから、実験室でこれらを求める際に用いる応力の大きさには注意を要する。すなわち、できるだけ実際の地圧に近い値を用いることが望ましい。この点からの J_{av} や J_{as} の正確な評価法の確立は今後の研究課題であるが、例えば、鉛直応力を被り圧と仮定して求められる地圧の近似値を用いることが考えられる。このように、岩石の非弾性ひずみと非弾性ひずみ回復コンプライアンスの測定により三次元的地圧の大きさが決定される。

ところで、これまでは応力解放後の時間を問題にしていた。しかし、実際には、地下の岩石がボーリングによって応力解放を受けた後地上に上がってくるまでにはかなりの時間がかかる。図5は、応力が解放されてから時間 t_0 が経過した後に測定を開始した場合の非弾性ひずみ回復コンプライアンスへの影響を模式的に示したものである。応力解放後の経過時間が長いほど非弾性ひず

Fig. 5 Effect of elapsed time on the evaluation of anelastic strain recovery compliances.

み回復コンプライアンスの後半部分しか現れないので測定される非弾性ひずみも小さくなる。測定開始からの経過時間を t_m 、それに対応する非弾性ひずみ回復コンプライアンスを $J_a^*(t_m)$ とおけば、

$$J_a^*(t_m) = J_a(t_0 + t_m) - J_a(t_0) \quad \dots\dots\dots (17)$$

である。従って、これまでの式中の非弾性ひずみ回復コンプライアンス J_a の代わりに J_a^* を、また時間 t の代わりに t_m を用いれば、これまでのことがそのまま成り立つ。すなわち、岩石の非弾性ひずみ回復コンプライアンスがあたかも $J_a^*(t_m)$ であるかのように扱えばよい。このように、測定開始の時間遅れを考慮した場合、主応力の大きさは次式で与えられる。

$$\sigma_i = e_i^*(t_m) / J_{as}^*(t_m) + \{e_m^*(t_m) - \alpha \Delta T^*(t_m)\} / J_{av}^*(t_m) + p_0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

ただし、 $*$ は時刻 t_0 以後の変化量を表す。従って、非弾性ひずみ回復コンプライアンスとして実験室で求められる J_a のうち $t = t_0$ 以後の値を用いれば、(18)式から主応力を求めることができる。なお、既に述べたように、主応力の方向の評価には計測開始時刻の影響はない。

このような手順で三次元的地圧の方向と大きさを求めれば、岩石の粘弾性的変形挙動を特定の力学的モデルで表す必要はないが、種々の岩石の非弾性ひずみ回復挙動を比較したり、また通常の力学的試験から求められる物性値から岩石の非弾性ひずみ回復コンプライアンスを推定したりする上では有効である。ちなみに、図2に示した3要素モデルの場合、 $J_a^*(t_m)$ は次式で表される。

$$J_a^*(t_m) = \exp(-t_0/\lambda) J_a(t_m) \quad \dots\dots\dots (19)$$

すなわち、当該岩石の遅延時間 λ と測定開始時刻 t_0 との関係で J_a^* の J_a に対する低下率が決まる。

本研究で提案した ASR 法による三次元地圧の計測手順をまとめて図6に示した。同図に示した計測手順は、主として地熱開発への応用を意識したものであるが、岩石コアの温度変化が無視できる場合にはより簡便に精度のよい三次元地圧計測が可能である。

5. 結 言

本研究では、ボーリングコアを用いた地圧計測法の一つである非弾性ひずみ回復法 (ASR法) に注目し、より一般的な三次元地圧状態における等方粘弾性体についての任意の方向の非弾性垂直ひずみについて考察することにより、同方法を三次元地圧計測法

Fig. 6 The procedure for determining three dimensional in-situ stresses from anelastic strain recovery of an oriented core.

として拡張する方法について提案し、また実際の計測手順を示した。本方法は、まだ開発の初期段階にある。三次元地圧計測法としての ASR 法を真に信頼性のある方法にするためには、岩石の非弾性ひずみ回復コンプライアンスの応力依存性の検討、岩種による非弾性ひずみ回復特性の差異の評価と ASR 法の適用性判定法の開発、岩石の力学的異方性の影響の評価、さらには高精度の長期ひずみ計測法の開発等、多くの問題が残されている。しかし、岩種によっては、これまで不可能であった地下深部の地圧計測が経済的かつ簡便に行える方法であり、今後有力な方法となると期待される。

本研究を遂行するに当たり、東北大学工学部の鈴木舜一、高橋秀明ならびに阿部博之教授から貴重なご教示を賜った。また、本研究は文部省科学研究費（一般 C）ならびに民間等との共同研究費によった。記して感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 金川 忠ほか：第 7 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，193～198，(1987)
- 2) Strickland, F. G. et al. : Proc. 21st U. S. Sympo. on

- Rock Mech., 523～532, (1980)
- 3) Teufel, L. W. : Proc. 23rd U. S. Sympo. on Rock Mech., 238～245, (1982)
- 4) Blanton, T. L. et al. : SPE 11624, (1983)
- 5) Yamamoto, K. et al. : Tohoku Geophysical Journal, **33** [2], 127～147, (1990)
- 6) Brown, E. T. et al. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **15**, 211～215, (1978)
- 7) 山口 勉ほか：日鉱誌，**100** [1158], 631～635, (1984)
- 8) Warpinski, N. R. et al. : J. Petr. Tech., 405～414, (1989)
- 9) Flugge, W. : Visco-elasticity, 176～178, (1967), Blaisdell Pub. Co., Waltham
- 10) Jaeger, J. C. : 弾性・破壊・流動論（飯田没事訳），48～52, (1968), 共立出版
- 11) Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. : Fundamentals of Rock Mechanics, 211～214, (1976), John Wiley & Sons, Inc.
- 12) Wolter, K. E. et al. : Rock Mech. and Rock Engng., **22**, 273～287, (1989)
- 13) Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. : Fundamentals of Rock Mechanics, 32～33, (1976), John Wiley & Sons, Inc.