

地圧の精密評価法の開発

小杉 昌幸¹⁾

1. はじめに

地下空間は、古来から、鉱山の開発、隧道やトンネルなどとして利用され、さらに昨今は、地下揚水発電所、地下石油備蓄、各種貯蔵庫など、その利用が多方面に展開されている。また、近年は大都市地下の多角的利用が特に注目されており、将来的に地域エネルギー地下供給システム、超電導地下実験都市、地下ハイテク・センターなど、地下の特性を生かした空間利用のニーズが高まりつつある。

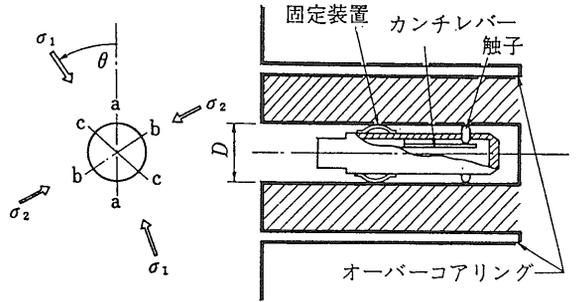
このような地下空間の安定設計には、岩盤内地圧（岩盤内応力または地殻応力）の状態が重要な情報の一つと考えられている。つまり、岩盤内の空間を一つの構造物とすれば、その空間を包む構造材料である岩盤の力学的特性と構造物に加わる力である地圧の状態は、構造問題を力学的に解き明かす上で基本的な要素となる。

一般に、地下空間の高度利用に係わる要素的研究としては次の開発課題が考えられている。

- (1) 三次元地下調査技術
- (2) 不連続性岩盤の評価・解析技術
- (3) 経済的掘削技術
- (4) 地下空洞強化技術
- (5) その他の岩盤特性の評価技術
- (6) 地下へのアクセス及び運用技術
- (7) 原位置での実証実験

ここで、(6)の要素を除く全ては先の力学特性と地圧の評価に密接に関連しており、とりわけ、構造設計への解析的アプローチでは基本的な入力データとなる。

一方、地下の岩盤は、緻密で均質な岩石、ジョイントやき裂などによる不連続岩塊の集合、さらには粘土を挟む断層などが複雑に組み合わさっており、多くの岩盤は構造的に不均質で力学的にも複雑な状態を呈していると考えられている。このため、岩盤特性について、劣化や割れ目などの複雑な因子を考慮した評価がなされ、多くの岩盤分類法に関する研究成果が紹介されている（土木



第1図 USBM のボアホール・ゲージによる地圧計測

学会, 1983)。

他方、設計施工に関する因子としては、空洞の寸法形状や支保形式、地圧などが考えられる。比較的浅い岩盤を利用するトンネル等の開発では、地圧はそれ程大きくないため、岩盤の密度に深さを乗じて求めた鉛直方向の圧力（土覆り圧または被覆岩盤圧）が用いられている。しかし、深い岩盤や地殻変動の影響を被った岩盤では、従来からの等方体を仮定した地圧評価と異なる状態を呈する 경우가多く、その設計において、トンネル空間等を開削する以前の初期地圧状態を評価しておく必要があるようである。

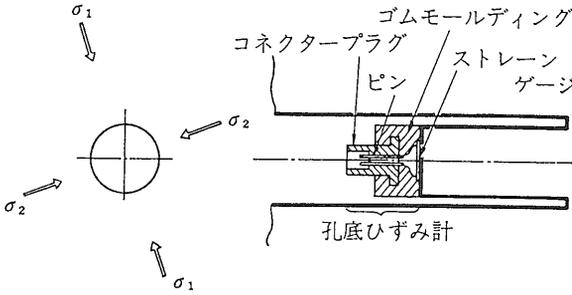
2. 地圧の計測法

岩盤内の初期地圧状態を計測する方法として、従来から多くの研究に基づく提案がなされており、それらの手法は以下のように大別される。

- (1) 応力解放による変形計測法
- (2) 水圧破砕などの岩石破壊法
- (3) 岩石コアの変形特性を利用した方法
- (4) AE のメカニズムを利用した方法

この中の応力解放法と岩石破壊法は原位置（現場）の計測法として既に実用に供されている。前者は、測定点の周りに作用している地圧をオーバーコアリング（計測孔井の周囲作孔）によって解放し、この応力解放の前後における変位やひずみの測定値から解放前の地圧を推定す

1) 工業技術院資源環境技術総合研究所
 (1991年10月, 公害資源研究所を改称)



第2図 CSIROの孔底ひずみ計による地圧計測

る。その手法の一つとして、米国鉱山局(USBM)の開発による第1図に示すポアホールゲージを用いた場合、応力解放に伴う計測孔井の直径変化を計測し、孔井に垂直な平面内の二次元応力状態を評価する(ISRM, 1987)。また、豪州連邦科学産業研究所(CSIRO)などの開発による第2図に示す孔底ひずみ計を用いた場合、同様にひずみの変化量から応力状態を導く(ISRM, 1987)。これらの方法では、計測孔井の周囲を作孔する間に変位やひずみを連続的に計測するため、限られた深度で用いられる場合が多く、また、岩盤の変形性を計測するためにコアを回収する必要がある。さらに、ひずみゲージを用いる場合、ゲージを直接岩石表面に接着するため、岩石表面に開口した微小き裂へ接着剤が浸透するなど、接着条件が計測精度に影響を及ぼす欠点がある。

一方、岩石破壊法のなかでは、主に水圧破壊法が実用化されており、岩盤内孔井の仕切られた区間に水を注入して圧力を加え、孔壁にき裂を生じさせた時の圧力やき裂の方向、さらに、き裂を進展させる際の圧力などから地圧を計算する。この方法は、精巧な装置を必要とせず、直接地下深部の圧力を測定できる利点を有しているものの、岩盤内への流体浸透の影響、き裂方向に及ぼす岩盤異方性の影響、計測圧力のばらつき、さらには、流体の種類や流量など測定における問題点が欠点としてあげられている(小杉ほか, 1987)。このように、実用計測法も多少の欠点を抱えており、確実な地圧計測手法が確立しているとは言えない。

応力解放法では、計測上、孔井に垂直な平面内の二次元的評価が中心であり、また、国内ではひずみゲージによる計測が多用されている。本来金属材料などの表面ひずみ計測を目的としたひずみゲージを岩石表面に用いた場合、岩石表面に存在する空隙や微小き裂への接着剤の浸透が避けられない場合が多い。接着条件を再現した較正が困難であり、引張せん断強度が 300kgf/cm^2 (一般的に岩石強度より大きい)にも及ぶ接着剤の影響を検証した例は少ない。さらに、岩石を均質体として扱うため、岩

石粒子の最大径に対して十分な計測長を有するひずみゲージを用いるのが望ましい。

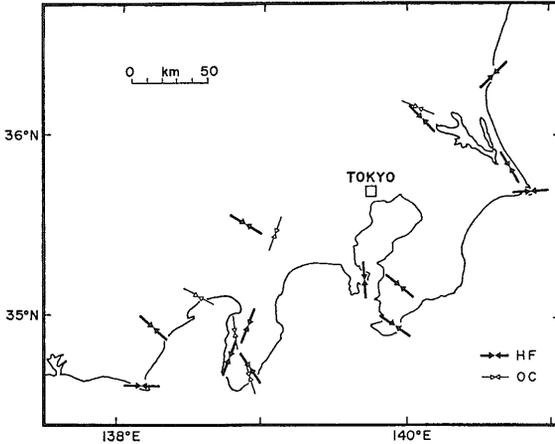
水圧破壊法においても、流体の圧力を直接計測するものの、岩盤内に浸透した流体圧や流体の粘性、孔井壁面に存在する微小き裂、さらに、岩盤の強度異方性などの影響があり、必ずしも計測した圧力が孔井周囲の地圧状態を反映しているとは言い切れない。破壊位置の岩盤条件を詳細に把握するのは難しく、これらの影響を検証する手だても少ない。

以上に述べた実用法の問題点を考慮すると、計測技術上の観点からは、同条件下で容易に較正試験ができる三次元計測法を採用し、さらに、岩石コアを用いた簡便な評価にも適用できる手法が望ましいと考えられる。

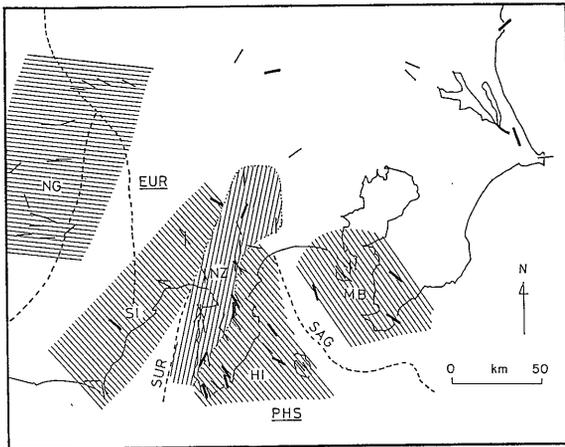
他方、昨今は、これらの原位置計測より手軽に岩石コアを用いて地圧を評価する手法も提案されている。例えば、岩石コアを地下から回収する際の微小き裂の挙動に着目し、このコアの室内加压における変形性やAE発生から主応力を評価する方法などが挙げられる。このような手法は、方位の明かなコアを取得できれば、比較的簡単な実験で評価でき、数多くの実験に基づく統計的な評価を容易にできる利点がある。しかし、微小き裂挙動や現象モデルの裏付けとなる明瞭なデータを取得するのが困難なために評価基準を一般化するには至らず、多方面の研究が進められている段階にある。また、岩石コアを地下深部の孔井から回収する際、孔井の掘削によってコア・ディスクング(円盤状にコアが破壊される現象)を引き起こす程の応力集中の影響を被る場合もあり、地圧計測に用いるコア試験片の取り扱いには十分に注意を払う必要がある。

3. 計測地圧の利用

先に述べたように、材料力学的な側面から、地圧は構造材料である岩盤内に加わる力の状態と考えられる。広範囲にわたる地殻を考えた場合、断層の滑りや地震などの地殻変動はこの地圧によって蓄積されたひずみが一気に解放された現象と見なされる。このような観点から、地震予知を目的として、数kmオーダーのマクロな地圧分布評価が行われている。この地圧計測も前述の手法と基本的に同じであり、深部に適用できる初期地圧評価として水圧破壊法が多く用いられている。計測結果の一例として、関東地域における水平方向の最大主応力は第3図のように表されている(Tsukahara and Ikeda, 1987)。ここで、HFは水圧破壊法による結果、OCは応力解放による結果を示す。このようにマクロな地圧分布の結果は地質構造と関連付けて評価されることが多く、例えば、



第3図 関東地域における水平方向の最大主応力方向
(Tsukahara and Ikeda, 1987)

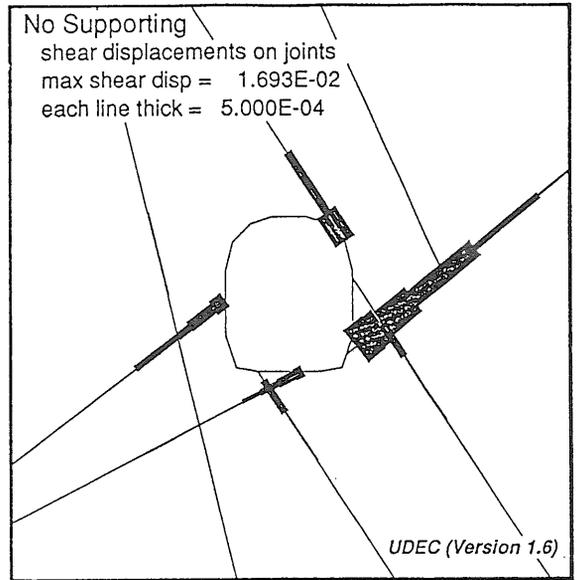


第4図 最大水平主応力方向と地殻構造との関係
(Tsukahara and Ikeda, 1987)

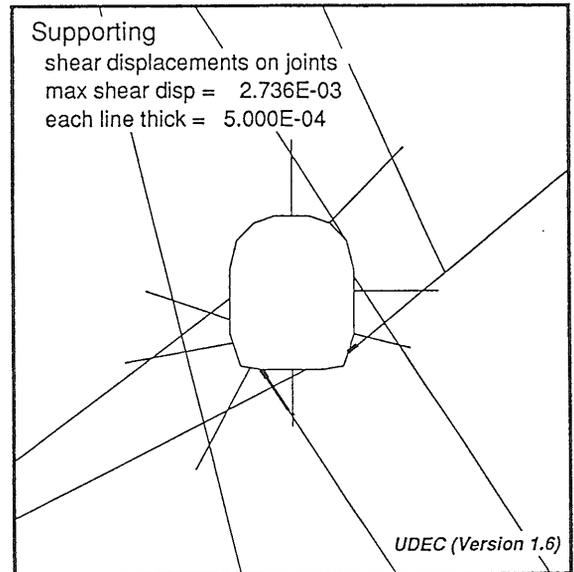
関東地域のプレートとの関係は第4図のように表されている。ここで、EURはユーラシア・プレート、PHSはフィリピン海プレートを示し、また、SURとSAGはそれぞれ駿河トラフと相模トラフを示している。このように地圧は地球物理的な観点からも評価されている。

一方、地下空間などの利用においては、相対的に局所地圧を評価することになる。つまり、数十mオーダーの地下空間などが対象となるため、地殻構造やプレートなどのマクロな関連よりは、むしろ局所的な地質構造などと関連付けられる。ここで計測した初期地圧状態は、地下空間などの開削に伴って再配分される応力状態、ジョイントなど不連続面の挙動、あるいは、周囲岩盤のクリープ(時間経過に依存する変形および破壊現象)挙動などを支配する因子として評価される。ある初期地圧状態下の岩

盤に地下空間を開削することによって、空洞周囲の岩盤に応力集中を引き起こし、何等かの変形を誘引する。例えば、不連続岩盤モデルの解析によると、第5図に示すような地下空間の開削に伴うジョイントのせん断変形が予測され、その大部分は空洞近傍に集中する。また、この空洞にロック・ボルトとグラウトによる支保を施工すると、第6図に示すようなジョイント変形の改善が期待



第5図 個別要素解析によるジョイントせん断挙動予測
(Kosugi, 1991)



第6図 支保を組み込んだ個別要素解析による挙動予測
(Kosugi, 1991)

される (Kosugi, 1991). 地圧は, このような解析的評価において構造材料である岩盤の変形や挙動を誘引する力と考えられ, その情報が直接予測解析の変形量に結び付く.

4. 新手法の概要

実用の地圧計測法は多少の問題点を抱えており, 一般的に基準化された手法の確立はまだ不十分と考えられている. 材料の立場から巨視的または微視的な岩盤の不均質性を考えると, 計測結果のバラツキは必然的に付随すると考えられるため, むしろ, 基本的な計測上の不明瞭さを排除することが地圧計測における信頼性向上の第一歩になりそうである. 例えば, 孔井の変形を変位計によって計測する応力解放法は, 計測条件の再現による較正や検証が容易であり, さらに, 回収した中空コアを用いて岩石の変形率を評価できる利点も備えているため, このような計測上の問題が比較的少ない実用法と考えられる. しかし, 岩石コアを用いた室内実験による地圧評価には不向きであり, 地圧の三次元的評価のためには, 同じ岩盤ブロック内で方向の異なる複数孔井における実験が必要になる.

このように計測上の問題が少なく, さらに, 三次元評価や岩石コアを用いた簡便な計測にも適用できる計測法の開発を目標として, 小孔井の球状底面における変位計測から地圧を三次元評価する手法を提案した. その詳細は, 米国特許「Method of Determining Three-dimensional Tectonic Stress」(Kosugi, 1989), 申請中の国内特許「球状孔底変位による地圧評価法」(小杉, 1987) および「三次元地圧評価法」(小杉, 1988) において紹介されている.

5. 新手法の特徴

この手法の特徴は, 球状孔底面において多軸方向の変位を計測するため, 周囲の地圧あるいは応力状態の変化に伴う変形を三次元的に評価できる点にある. 従って, 地圧状態も同様にこれらのデータを用いて三次元的に評価できる.

球状孔底上の変形は, 計測プローブ内にセットされた差動トランスデューサまたは光ファイバ変位センサによって計測する. 岩石の変形を岩石表面に垂直方向の変位として計測するため, 実用ゲージ法における計測上の問題点を解消し, 計測精度の向上を図ることができる. また, この手法はオーバー・コアリング応力解放法による原位置計測と岩石コアの加圧による室内計測に適用でき

る. このため, 同一の岩石に対して2回計測し, それぞれ解放応力と先行地圧を初期地圧として評価するため, これらの結果の比較に基づいて検証ができる利点も有する.

(1) 解放変位法

原位置における地圧計測では, オーバー・コアリングによる応力解放に誘引された変形を計測し, 球状孔底の変形と応力状態との関係を結び付けるマトリックスを介して応力テンソルを導くことになる. この応力状態がオーバー・コアリングによって解放された地圧に相当し, 計測孔井が十分深い場合には, この値が初期地圧状態を示すと考えられる. 計測点がトンネルや空洞に近い場合は, それらの開削によって応力状態が変わっており, 二次的地圧状態として評価されることになる.

(2) 差変形法

室内では, 孔井から回収した岩石コアに直径36mmの計測孔井を穿ち, 压力容器内でコア周囲に加圧した際の変形を計測する. この時の変形のメカニズムは次のように考えられる.

- ある地圧状態下の岩石をコアリングによって無付加状態にすることにより, 既存の微小き裂が開口する.
- このような微小き裂を有する岩石コアを再加圧することにより, 履歴を被った応力レベルまでは開口分に相当する閉塞による変形を示す.
- 履歴応力レベルを越える加圧によって, これらの微小き裂が近傍の微小破壊を伴う閉塞挙動を呈し, 異なった変形性を示す.

この仮定モデルは, A E (岩石の微小破壊音) のカイザー効果と同様のメカニズムを前提としている. このため, 応力履歴を被った変形と微小破壊を伴う変形を変形曲線上で分析し, その際の変位テンソルから先の方法と同様に応力テンソルを導くことになる. ここで評価した応力状態はコア回収前の地圧状態を表すと考えられ, 先行地圧として評価する.

6. 球状孔底の変形理論と解析

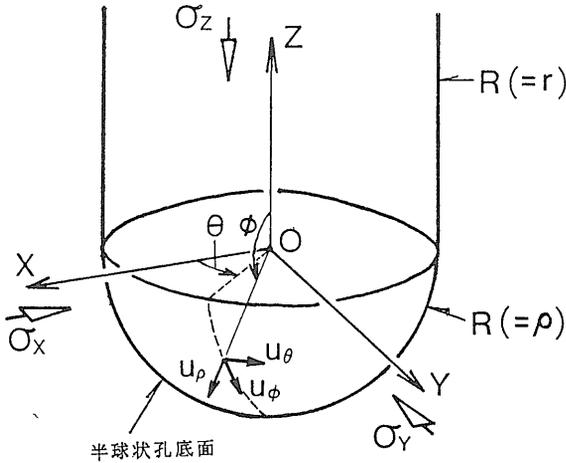
岩盤内の任意の点における応力テンソルは, 球状孔底を有する孔井を穿つ前の初期地圧状態と考えると, 孔井中心が z 軸の xyz 座標上で次式のように表される.

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\}^T \dots\dots\dots(1)$$

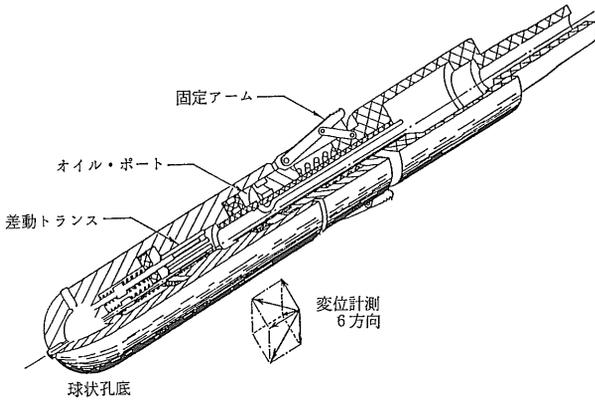
一方, 球状孔底の変形は, 第7図に示す $\rho\theta\phi$ 座標上の変位 u_ρ で表すと, 次式で示される.

$$u_\rho = (R/E) \cdot \{A_0 + A_2 \cos 2\theta, A_0 - A_2 \cos 2\theta, C_1, D_1 \sin \theta, D_1 \cos \theta, 2A_2 \sin 2\theta\} \cdot \{\sigma\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで, A_0, A_2, C_1, D_1 は変位係数, ϕ は頂角, E は岩



第7図 球状孔底の変位に係わる座標系



第9図 差動トランスを用いた変位計測プローブ

石のヤング率(変形率), R は半球状孔底面の半径である. 計測点の座標 (θ, ϕ) は計測装置の構造に依存して一義的に決まる. また, 岩盤を弾性体として扱う場合, 先の変位係数は数値解析あるいは実験における変位 u_ρ と応力テンソル $\{\sigma\}$ の関係から帰納的に求めることができる.

地圧計測実験で n 個の変位 (β) が計測された場合, そのデータは次式のように表される.

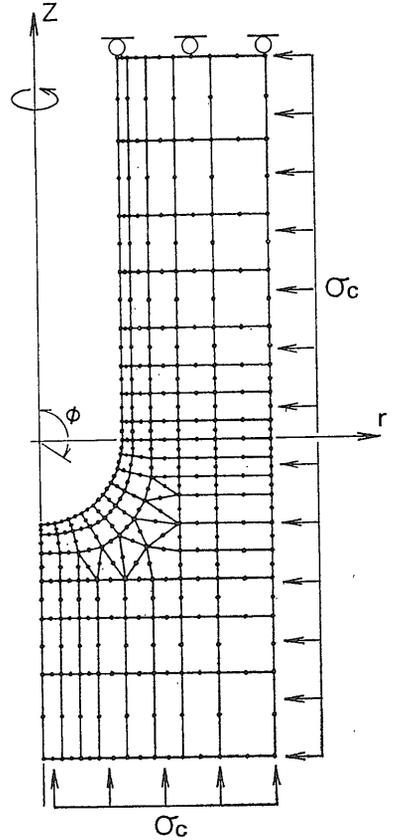
$$\{\beta\} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}^T \dots\dots\dots(3)$$

式(2)から, この計測変位テンソルと実験サイトの応力テンソルの関係は次式で表される.

$$\{A\} \cdot \{\sigma\} = (E/R) \cdot \{\beta\} \dots\dots\dots(4)$$

ここで, $\{A\}$ は n 個の計測方向 (θ, ϕ) と変位コンポーネントから求められる $n \times 6$ の行列であり, ボアソン比と計測点の座標の関数として表される.

ここでは, 球状孔底の変形を有限要素法によって計算し, その結果から変位係数の評価を試みた. 計算に用いたモデルの一例を第8図に示す. Z 軸は回転対称軸かつ



第8図 球状孔底変位の解析に用いた有限要素モデル

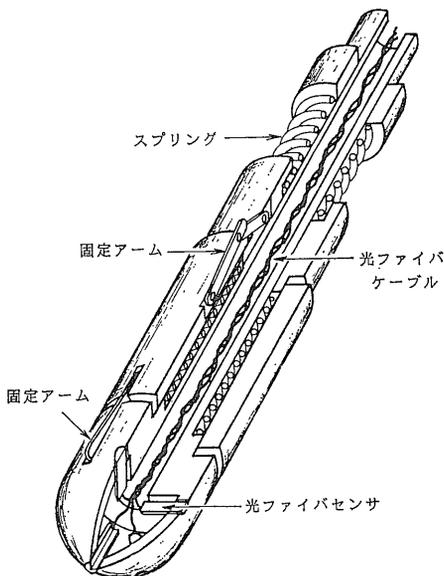
球状孔底を有する孔井の中心軸であり, 6節点または8節点のアイソパラメトリック要素を用いた. 変位の計算結果と応力状態の初期条件から式(2)に従って方程式が導かれ, その解として変位係数が各頂角について求まる. この変位係数から, 式(4)の変位相関行列は第1表のように得られる (Kosugi et al., 1990). 実験で計測した変位コンポーネント $\{\beta\}$ の結果を式(4)に導入した際の解として地圧テンソルが得られる.

7. 球状孔底の変位計測装置

本手法に用いる計測装置として, 原位置用の差動トランス式変位計測プローブと室内計測用プローブをそれぞれ開発する計画である. 前者のプローブ構造を第9図に示す. 孔井壁面の変形を鋼製の圧着端子を介して検出し, プローブ軸方向に配列した6個の差動トランスによって計測する. 球状孔底面上の異なる方向の変位をプローブ軸方向の変位に変換して検出するため, 機械的に若

第1表 球状孔底における変位関数の相関行列 {A}

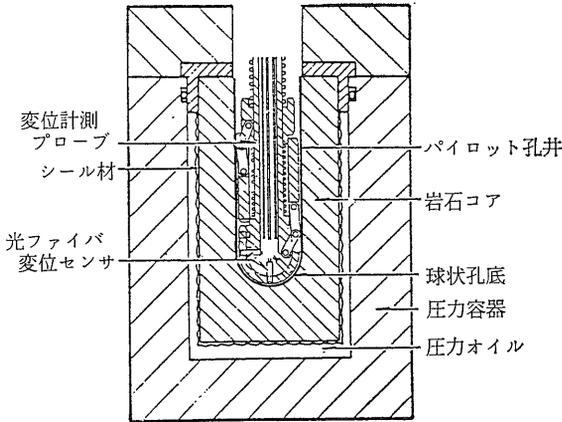
Poisson's ratio	i	j=1	2	3	4	5	6
0.1	1	2.4536	0.9100	-0.2045	0	0	0
	2	-0.6336	0.9100	-0.2045	0	0	0
	3	0.9100	-0.6336	-0.2045	0	0	3.0872
	4	0.9958	0.3105	0.7237	0	-2.2544	0
	5	0.3748	0.3105	0.7237	-2.2544	0	0
	6	-0.2437	-0.2437	1.7524	0	0	0
0.2	1	2.4319	0.8926	-0.2989	0	0	0
	2	-0.6467	0.8926	-0.2989	0	0	0
	3	0.8926	-0.6467	-0.2989	0	0	3.0786
	4	0.9492	0.2525	0.6863	0	-2.3913	0
	5	0.4442	0.2525	0.6863	-2.3913	0	0
	6	-0.3341	-0.3341	1.7676	0	0	0
0.3	1	2.3800	0.8717	-0.3876	0	0	0
	2	-0.6366	0.8717	-0.3876	0	0	0
	3	0.8717	-0.6366	-0.3876	0	0	3.0166
	4	0.8943	0.1961	0.6449	0	-2.5012	0
	5	0.5021	0.1961	0.6449	-2.5012	0	0
	6	-0.4165	-0.4165	1.7648	0	0	0
0.4	1	2.2955	0.8463	-0.4686	0	0	0
	2	-0.6029	0.8463	-0.4686	0	0	0
	3	0.8463	-0.6029	-0.4686	0	0	2.8984
	4	0.8250	0.1420	0.5980	0	-2.5873	0
	5	0.5410	0.1420	0.5980	-2.5873	0	0
	6	-0.4881	-0.4881	1.7388	0	0	0



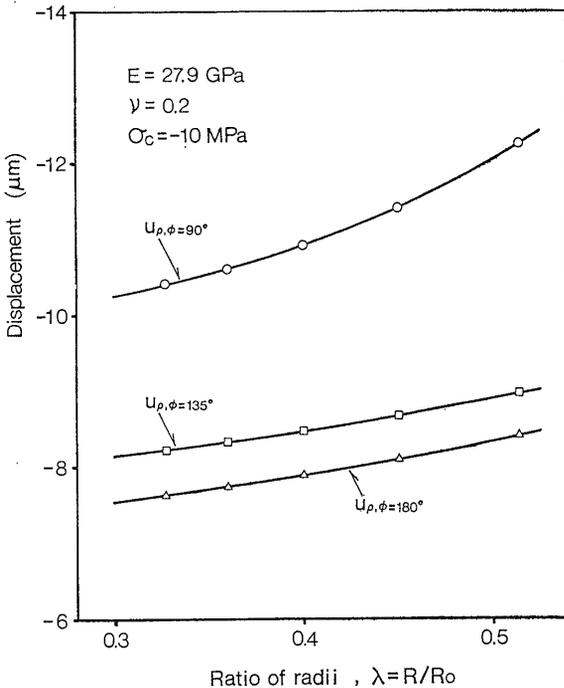
第10図 光ファイバ変位センサを用いた室内実験用の変位計測プローブ

干複雑な構造を有するが、鋼線のスライド曲率の改善によって計測上の問題は解決されている。さらに、簡単な装置によってトランスデューサ出力変位を校正できるため、精度が $\pm 0.5\mu\text{m}$ 程度で線形性の高い詳細な計測が可能となる利点を有する。

後者のプローブ構造を第10図に示す。回収コアを用いた室内実験では、乾燥した状態で計測するため、より簡単な変位センサを用いることができる。光ファイバ変位センサを用いたプローブは、先の差動トランス式プローブの機械的構造を省き、センサ取り付け部と固定アームから構成されている。このセンサを用いた場合、反射光の位相差から変位を導くため、孔井内の計測部分は白系の単一色にする必要がある。ただし、この影響については、簡単に室内計測において校正できるため、精度に関する計測上の問題は少ない。



第11図 岩石コアから先行地圧を評価する室内実験に用いる圧力容器



第12図 有限要素解析による岩石コアの外形寸法と球状孔底変位との関係

8. 岩石コアを用いた室内評価

原位置から回収した岩石コアによる室内実験は、第11図に示す圧力容器を用いて行う。岩石コアに球状孔底面を有するパイロット孔井を穿ち、周囲をシールして圧力容器内にセットする。圧力制御装置を用い、岩石コアの周囲を一定の昇圧速度で予測される先行地圧の2倍程度まで加圧し、昇圧に伴う球状孔底の変形を計測する。先

行地圧の影響が岩石レオロジー上でモデル化される現象に基づき、計測値としての圧力と変位の関係に対して変形性解析を行う。解析評価した三次元変位値の結果から、コアの形状・寸法の効果を補正して先行地圧テンソルを求め、三次元地圧状態を評価する。

まず最初に、室内実験に用いる岩石コアの形状寸法およびポアソン比が孔井の球状底面の変形に及ぼす影響について解析的に評価するため、有限要素法による弾性計算を行った。この解析の結果、一例として岩石コアの外径寸法と球状孔底変位との関係は第12図のように表される。ここで、 U_ρ は球状孔底上の変位、 ϕ はプローブ軸に対する変位計測方向の角度(頂角)、 R はパイロット孔井の直径(36mm)、 R_0 はコアの外径である。図中の曲線について回帰分析による相関式を導くと以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 U_{\rho, \phi=90^\circ} &= (R/E) \cdot \sigma_c (1.3133 + 1.5971\lambda - 4.2101\lambda^2 + 6.4412\lambda^3) \\
 U_{\rho, \phi=135^\circ} &= (R/E) \cdot \sigma_c (1.2045 + 0.0262\lambda + 0.4610\lambda^2 + 0.3528\lambda^3) \\
 U_{\rho, \phi=180^\circ} &= (R/E) \cdot \sigma_c (1.5487 - 0.8107\lambda + 2.7437\lambda^2 - 1.5712\lambda^3) \dots\dots\dots(6)
 \end{aligned}$$

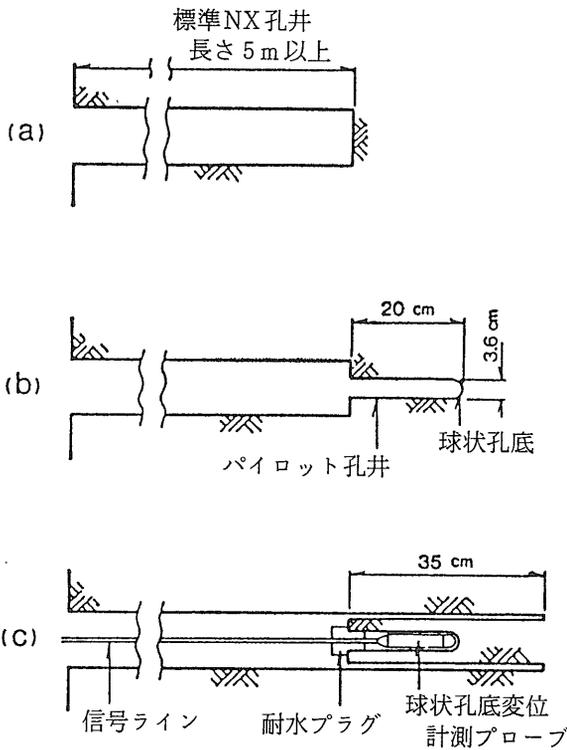
岩石コア実験における計測変位から先行地圧テンソルに対応する変位を計算する場合、上式を用いて補正してから変位コンポーネントの行列{β}を得ることになる。

9. 原位置における応力解放実験

原位置では、オーバー・コアリング応力解放法と組み合わせ、解放応力の計測実験を行っている。原位置での実験手順を第13図に示す。地下空間で地圧計測サイトを選定し、孔径76mm以上のNXビットを用いて先進孔井を壁面から長さ5m以上掘削する(a)。その孔底部中央に孔径36mmのパイロット孔井を穿ち、孔底部を球状に研磨する(b)。パイロット孔井内に計測プローブをセットし、オーバー・コアリングによる応力解放を行い、解放に伴う変形が安定するまで変位計測する(c)。さらに、パイロット孔井を有するコアを回収し、岩石の変形性評価と先の先行地圧評価の実験に用いる。パイロット孔井内では三次元的変形を球状孔底上で計測するため、これらの変位から解放分に相当する地圧を計算する。

岩石の変形に関する有限要素法解析評価の結果、オーバー・コアリングの掘進に伴う変位挙動は第14図に示すように得られる。この挙動に基づくと、球状孔井底部の前後20cm程度オーバー・コアリングすることにより、ほぼ安定した解放変位を評価できるものと考えられる。

原位置における実験例として、菊岡(愛媛)石油地下



第13図 原位置における応力解放実験手順

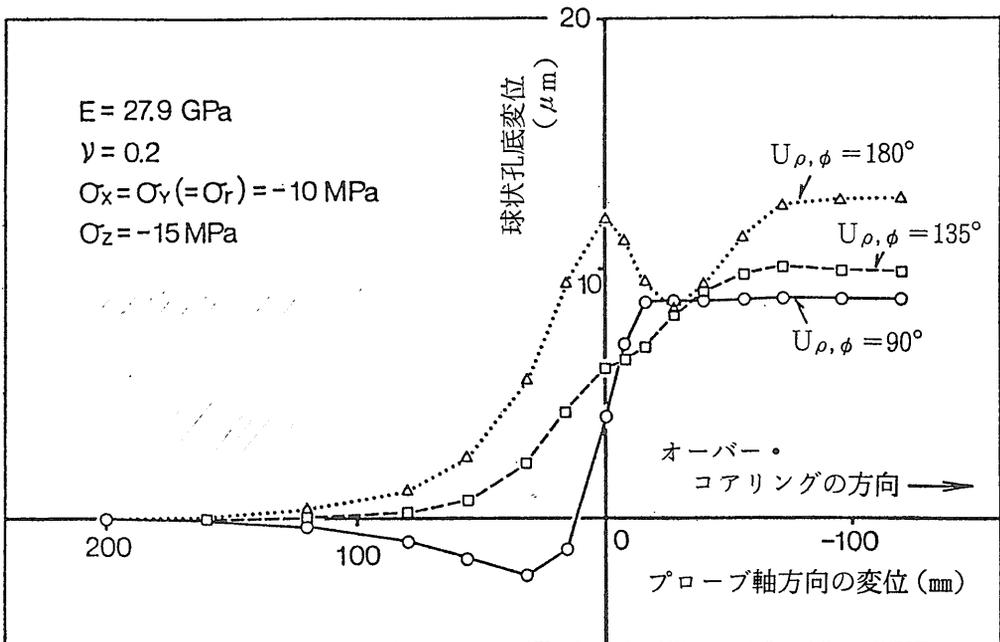
備蓄基地の建設現場に隣接する実験坑道における実験状況を写真1および2に示す。原位置では、信号ケーブルと圧力配管をドリリング、ロッドの中に通し、ボーリング機械のウォーター・スィベルによって回転部のシールを施してボーリング中に連続的な変位計測を行った。

なお、計測結果の詳細については、機会を改めて報告する予定である。

10. 研究開発の進め方

本手法は、官民連帯共同研究のテーマとして開発を進めている。当所の研究目標は、「大規模空洞開発における岩盤内の初期地圧あるいは空洞開削に伴う地圧変化の精密計測技術の開発と原位置計測システムの確立」であり、石油地下備蓄基地の施工企業である大成、清水、鹿島の各建設株式会社との共同研究を行っている。先に関連特許を紹介したように、本手法は国際的にも独創的な計測法であり、このアイデアに基づいて新たな地圧評価技術の確立を目指している。

昭和63年度から平成3年度までの予定で研究を遂行しており、計測装置の開発、地圧評価法の開発、室内検証実験、原位置計測実験を併行に進めている。昭和63年度には、原位置用地圧計測プローブを試作し、室内の較正実験によって機能の検証を行った。平成元年度には、前年度開発した地圧計測プローブを用い、久慈(岩手県)石



第14図 有限要素解析による球状孔底変位のオーバーコアリング掘進に伴う変化

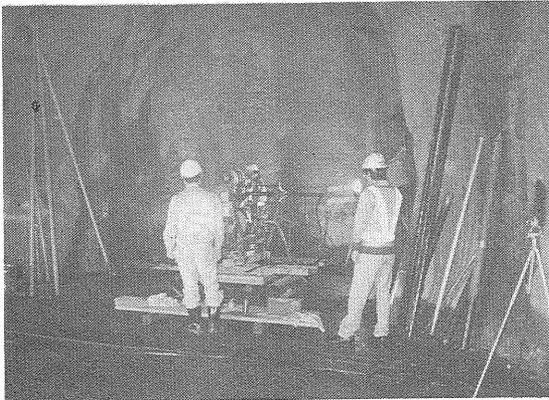


写真1 菊間石油地下備蓄基地の連絡坑道におけるオーバーコアリング実験の様子（平成3年3月）

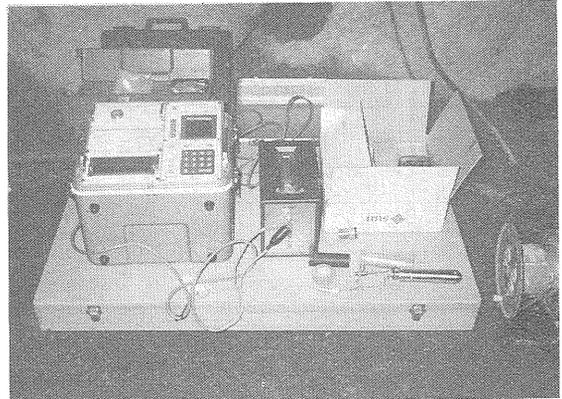


写真2 原位置実験の計測記録システム

油地下備蓄基地の建設現場坑道において原位置計測実験を試み、プローブの原位置適用上の問題点を抽出した。また、平成2年度は、前年度の課題に基づいてプローブを改良し、菊間（愛媛県）石油地下備蓄基地の建設現場坑道において原位置計測実験を行った。同時に、この方法によって地圧を評価する際の理論、解析上の研究を行い、計測値から地圧を評価する手法を明らかにした。

平成3年度は、本研究プロジェクトの最終年度でもあり、原位置用地圧計測プローブを完成させるとともに、新たに室内計測プローブを開発し、地圧計測システムの確立を図る計画である。

11. む す び

本手法は、計測精度の向上、三次元的変形計測、コアによる深部地圧評価への適用、同一コアによる原位置と室内計測による検証などの特徴を有する地圧計測法である。とりわけ、従来の実用法においてブラック・ボックスとなっていた計測精度上の問題点の解決を目指しており、このため、今後の岩盤を対象とした計測評価技術の向上に役立つものと期待される。

文 献

土木学会 (1983) : トンネルの地質調査と岩盤計測. 土木学会岩盤力学委員会編, 126-141.
 ISRM (1987) : Suggested method for rock stress determination using a USBM-type drill-hole deformation cell. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **24**, 63-68.

ISRM (1987) : Suggested method for rock stress determination using a CSIR or CSIRO-type cell with 9 or 12 strain gauges. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **24**, 68-73.

小杉昌幸 (1987) : 球状孔底変位による地圧評価法, 特許出願中, 昭62-257715.

小杉昌幸 (1988) : 三次元地圧評価法, 特許出願中, 昭63-86127.

Kosugi, M. (1989) : Method of determining three dimensional tectonic stress. U. S. A. Patent, No. 4813278 (Application No. 172081, 1988).

Kosugi, M. (1991) : New tunnelling method, NATM coupled with 3-D joint behaviour monitoring and UDEC rock support design. Demonstration by CRC. ITASCA Group, *Int. Conf. for Computer Methods and Advances in Geomechanics*.

小杉昌幸, 小林秀男, 速水博秀 (1987) : 異方性岩石における水圧破碎に関する実験的研究. 公害資源研究所報告, no. 43, 1-106.

Kosugi, M., Barton, N and Cox, R. (1990) : Displacement measurement technique on spherical borehole bottom for determination of complete tectonic stress. *Norges Geotekniske Institutt Report*, 548160-9.1, 1-27.

Tsukahara, H. and Ikeda, R. (1987) : Hydraulic fracturing stress measurements and in-situ stress field in the Kanto-Tokai area, Japan. *Tectonophysics*, **135**, 329-345.

KOSUGI Masayuki (1991) : New technique for evaluation of accurate tectonic stress.

<受付 : 1991年8月1日>