

# 埋設法による初期地圧測定の信頼性向上のための検討

横山幸也・田中達吉・船戸明雄

## Study for Reliability Improvement of Initial Stress Measurement by Inclusion Method

Tatsuya YOKOYAMA, Tatsukichi TANAKA and Akio FUNATO

### Abstract

The authors have carried out initial stress measurements by the over-coring method using embedding gauges. In this method, after an 8-element gauge is embedded in a pilot hole with cement milk, its surrounding is over-cored. And then, we can calculate an initial stress from strain changes (released strains) during over-coring. However, released strains are very subtle to measure, and released strain curves show various shapes. Classification of the released strain curve patterns we have obtained up to now is as follows (Fig.5).

- A. Line heading for the compression side once, then, turning to the tension side steeply and becoming stable.
- B. Line heading for the tension side once, then, turning to the compression side steeply and becoming stable.
- C. Line whose end does not become stable but continues to head for the tension side or the compression side gradually.
- D. Line changing steeply from the beginning of over-coring and not becoming stable to the end.

Among them, pattern A is a typical pattern often observed in a compressive stress field. Pattern B sometimes appears on a strain in the minimum principal stress direction when a principal stress ratio is large even in a compressive stress field. It is shown by FEM analysis that this doesn't always indicate a tensile stress field. These two patterns correctly reflect rock mass behaviours by a stress release.

Pattern C is influenced by temperature change. It is possible to modify this influence by calibrating the relation between temperature and strain of a embedded gauge. However, it is important not to change the temperature during over-coring.

Pattern D seems to be influenced by cracks or insufficiency of grouting and should be abandoned. It is necessary for a gauge to be confirmly embedded in a pilot hole without influence from cracks. For that purpose, authors observed on adhesive boundaries of recovered cores and carried out swelling tests of grout mixtures, grouting tests and cohesive strength tests between some rocks and grout mixtures. And authors can get for the best mixture.

The most special technique in the analysis of inclusion method is an adoption of the

coefficient between stress and strain by tri-axial testing. Owing to it, authors could cancel a heterogeneity of a material and analyze data by supposing a homogenous elastic material. The reliability of this idea has been verified by comparison with laboratory testing results using a poly-axial testing apparatus and obtained results by analyzing same data assuming that released strains indicate released borehole deformations.

1 まえがき

地圧は、岩石や岩盤の強度、変形性などの物性と直接的な関係はないが、原位置の岩盤の状態特性を示す力学的条件の1つである。たとえば、土木工学の分野において、地下空洞開削時の応力変形解析を行う場合、初期地圧の設定は必要であり、特に弾塑性モデルによって空洞の安定性を評価する場合には、初期地圧は極めて重要な要素となる。また、地球科学の分野においては、地下の応力場を知ることは、現在の広域的な地殻応力場を推定する上で極めて重要である。特に、地殻の応力変化を継続的に把握することは、地震予知ならびに防災対策の上からも重要となる。

岩盤が等方均質な完全弾性体であると仮定し、かつ、初期地圧が岩盤の自重によってのみ生成するとした場合には、数値計算によってその大きさと方向とを求めるこ

とができる。土木工学における初期地圧の設定は、この方法で行われる場合が多い。しかし、近年、初期地圧の測定例が増え、水平方向に最大圧縮応力があると報告されることも多く見られるようになり、地殻応力の影響が浅いところにまで及んでいることが推定される。したがって、地下構造物の厳密な設計を行うためには、初期地圧を測定することによって、対象とする地山全域の応力状態を把握することが重要となってくる。

地圧を測定する方法は、古くから多くの研究者によって考案され、実施されてきたが、これらを測定原理に基づいて分類すると、

- ・応力補償法
  - ・応力解放法
  - ・岩盤の破碎を利用する方法
  - ・岩石の特性と応力との相関を利用する方法
- の4つに分けることができる。

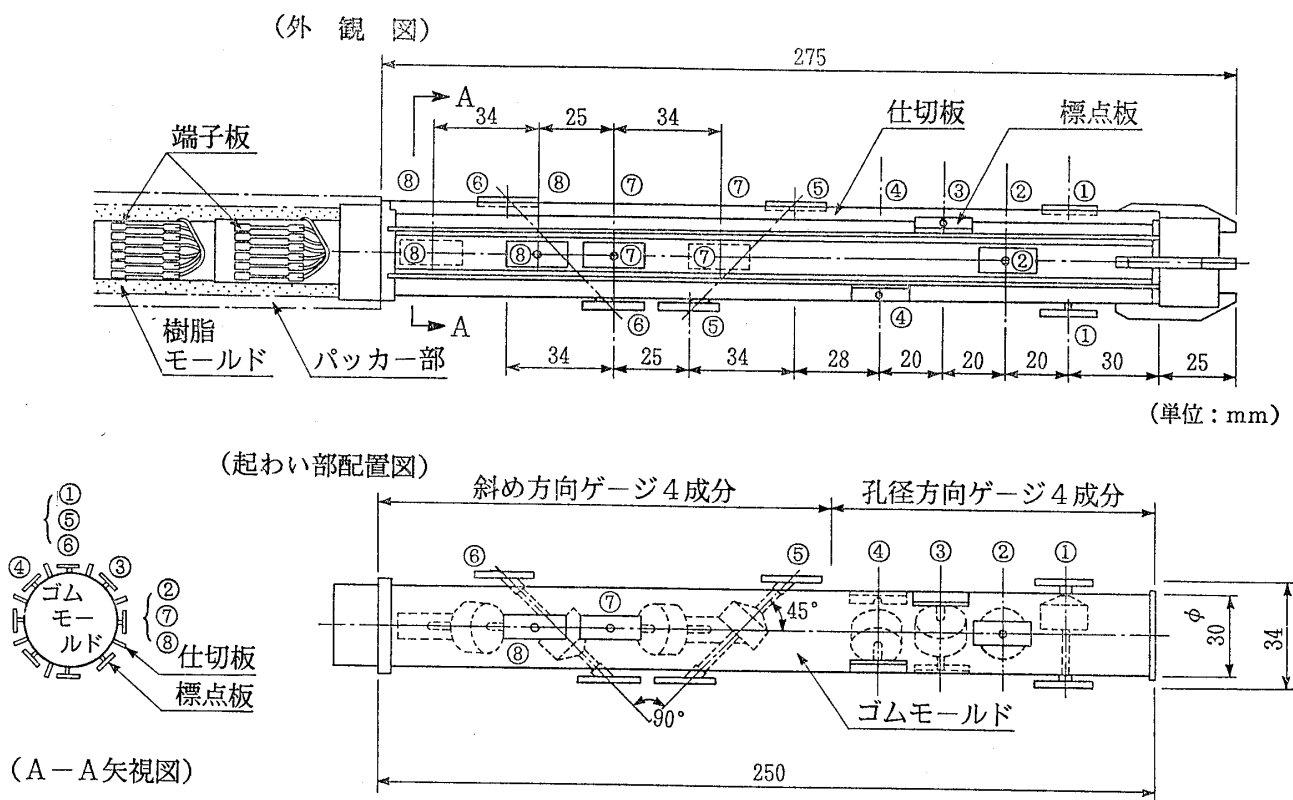


図-1 埋設法8成分ゲージ (金川ら, 1986)

Fig.1 8-element gauge for inclusion method (after Kanagawa et al., 1986)

各種の手法の中で、精度や測定限界などについて十分に検討され、かつ、測定結果の信頼性が高いといわれる実用的な手法は、未だ少ないといってよい。その理由としては、地圧測定法の多くが岩盤力学の理論的な考え方に立脚しているとはいえ、岩盤の持つ不連続性や不均質性をも考慮して地圧を評価することがはなはだ困難であることが挙げられる。

筆者らは、埋設型ひずみゲージを使用して、その周辺をオーバーコアリングする方法（以下埋設法と呼ぶ）による初期地圧測定を数多く実施してきた。この方法は、金川ら（1975）によって提唱されたもので、応力解放法の一つである。これまでに行ってきた個々の測定業務の中で、常に、測定法ならびに解析法に検討を加えながら、結果の解析ならびに解釈を実施してきた。

この報文は、測定結果に対する信頼性を向上させることを目的として、これまでに筆者らが行ってきた異常値

に対する要因分析や、測定方法ならびに解析方法についての検討結果をとりまとめたものである。

## 2 埋設法による測定の手順

埋設法による地圧測定の手順は、つぎの通りである。

- (1) 地圧を測定する点まで、大口径のカットボーリング（ $\phi 222\text{mm}$ ）を行う。
- (2) その孔底からパイロット孔（ $\phi 46\text{mm}$ ）を60～80cm削孔する。
- (3) パイロット孔中に8成分のひずみゲージ（図-1および写真-1参照）を挿入し、セメントミルクを充填する。
- (4) セメントミルクが固化するまで約1週間の養生を行う。
- (5) 大口径ボーリング孔の先端から、パイロット孔と

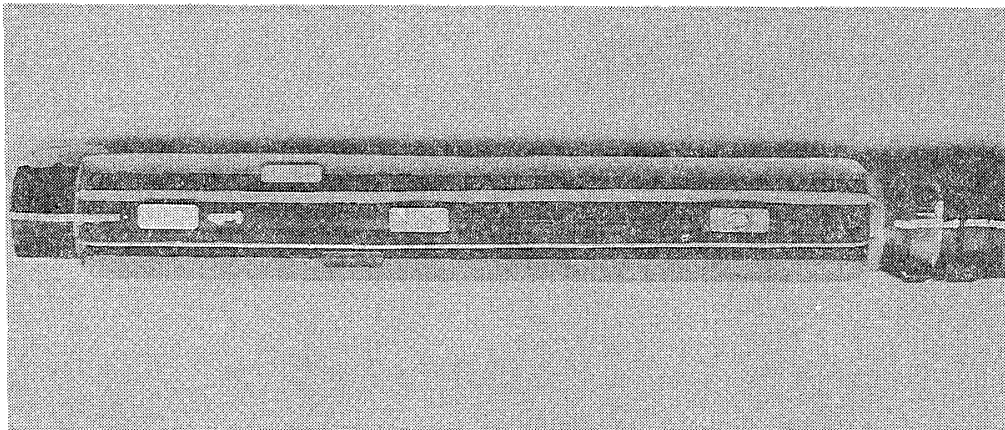


写真-1 埋設法8成分ゲージの外観写真  
Photo 1 8-element gauge for inclusion method

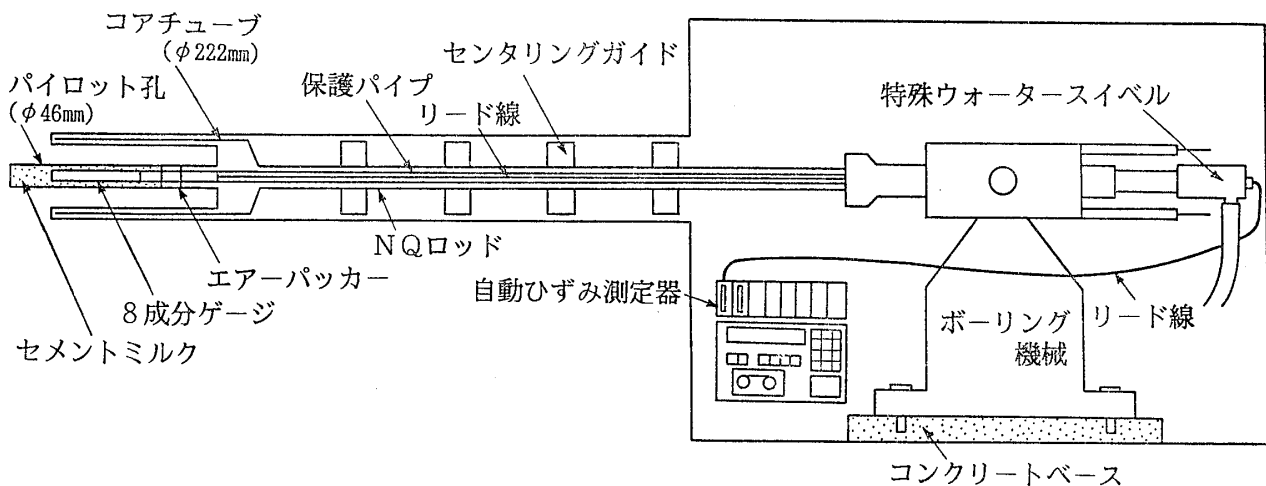


図-2 埋設法による測定概要図  
Fig.2 Illustration of in-situ measurement by inclusion method

同心円状に大口径ボーリング（オーバーコアリング）を行い、埋設されたひずみゲージを含む岩盤が、その周辺の岩盤から切り離されたときに生じるひずみ変化（解放ひずみ）を測定する（図-2参照）。

- (6) ひずみゲージが埋設されているコアを回収し、三軸セル内に入れて、コアに封圧を作用させ、各ひずみゲージの感度を較正するための三軸感度試験を行う（図-3参照）。
- (7) 各ひずみゲージの解放ひずみと感度係数から、地圧を求める。

実際のデータにはさまざまな異常が見られることがあるので、通常は、測定を数回行って、データのばらつきや再現性をチェックする。

### 3 解放ひずみについての検討

オーバーコアリング時に得られる解放ひずみ曲線（掘進深度に応じてひずみをプロットした曲線）はさまざま

な形状を示しているが、この形状は、それぞれのひずみゲージによって得られたデータの良否を判断するための最も大きな要素になっている。一般的には、地下の岩盤

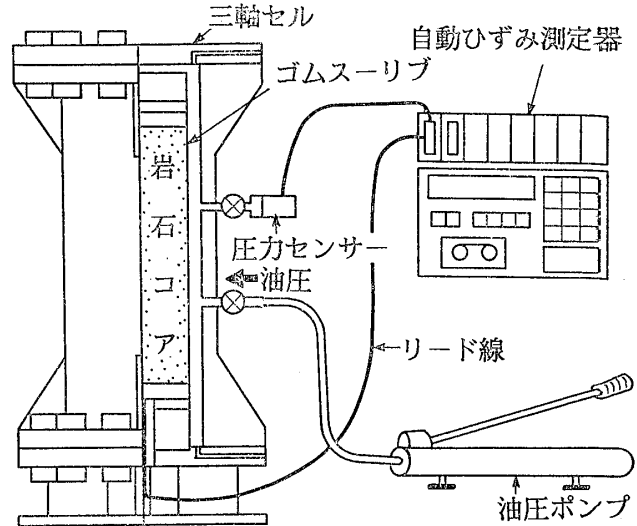


図-3 三軸感度試験の概要図

Fig.3 Illustration of laboratory tri-axial test

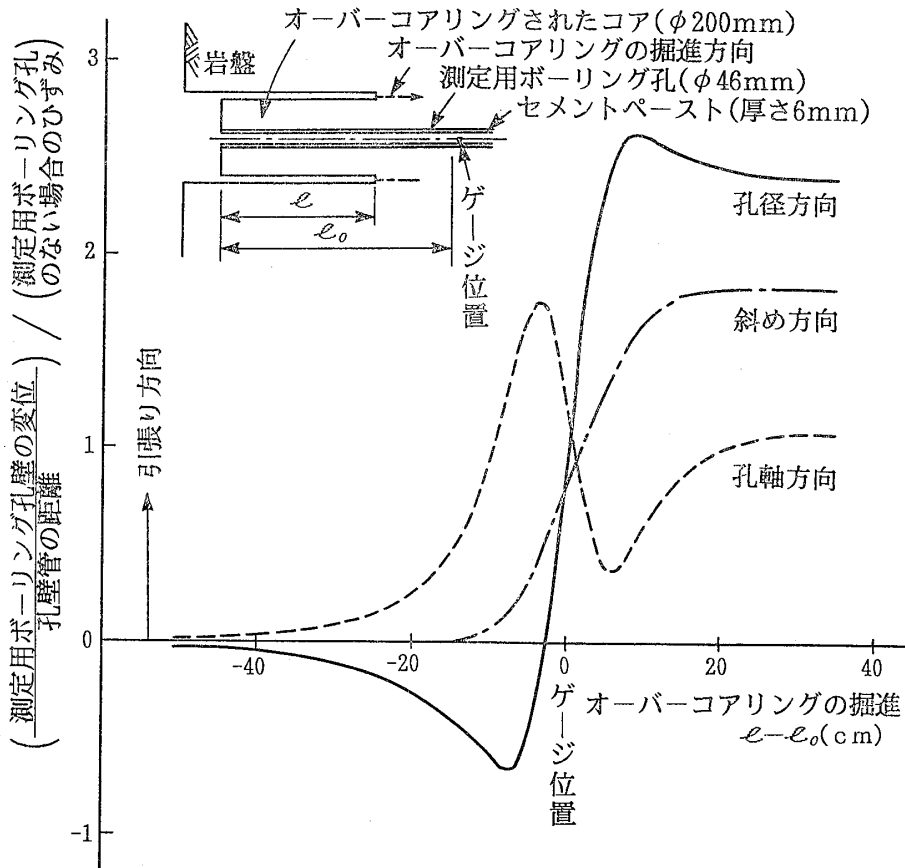


図-4 オーバーコアリング中の各方向ひずみ変化  
(回転体モデルによる FEM 解析結果) (金川ら, 1986)

Fig.4 Strain change of each gauge direction with over-coring advance  
(result by FEM) (after Kanagawa et al., 1986)

内では圧縮応力状態となっているため、オーバーコアリングによって、埋設されたひずみゲージを含む岩盤を周辺の岩盤から切り離すとき、図-4に示すような特徴的な解放ひずみ曲線が得られる。このような曲線において、オーバーコアリングの掘進深度がひずみゲージの位置を通過し、ひずみの値が安定したところで示される値を解放ひずみの値としている。

筆者らがこれまでに実施してきた埋設法による測定データの中には、上記のような典型的な解放ひずみ曲線以外に、いろいろな形をしたものがある。埋設法に限ったことではないが、応力解放法による地圧測定においては、測定結果の精度に最も大きく影響を及ぼす要因の1つに、この解放ひずみの読みとり値あるいは読みとり値の採用不採用の判断基準の良否がある。これらの判断基準は必ずしも理論的あるいは実験的に明確にされているわけではなく、測定者の経験あるいは主観にゆだねられることが多く、最終的な解析結果の客観性を曖昧にしていることは否めない。

### 3・1 解放ひずみ曲線のパターン

これまでに筆者らが実施した埋設法によるオーバーコアリング測定において得られた解放ひずみ曲線のパターンを分類すると、つぎのようになる(図-5)。

- Aパターン：一旦圧縮側に变化し、その後大きく引張り側に転じて安定するもの………65% (174例)
- Bパターン：一旦引張り側に变化し、その後圧縮側に転じて安定するもの………22% (60例)
- Cパターン：最初は、AパターンあるいはBパターンのような変化を示しているが、最終的に、安定した値を示すことなく、徐々に圧縮方向への変化が継続するもの………8% (22例)
- Dパターン：オーバーコアリング開始時より大きく変動し最後まで安定しないもの………4% (11例)

上記の4つのパターンのうち、理論的に想定される解放ひずみ曲線の型はAパターンであり、この典型的なAパターン以外のパターンが発生する要因としては、つぎのようなものが考えられる。

- (1) 岩盤の応力状態
- (2) ひずみゲージの埋設状態
- (3) 測定環境

### 3・2 解放ひずみ曲線の形態に影響を及ぼす要因

#### 3・2・1 岩盤の応力状態

岩盤の応力状態が等方的な圧縮応力場のときには、各成分の解放ひずみは、最終的には引張りひずみとなる。し

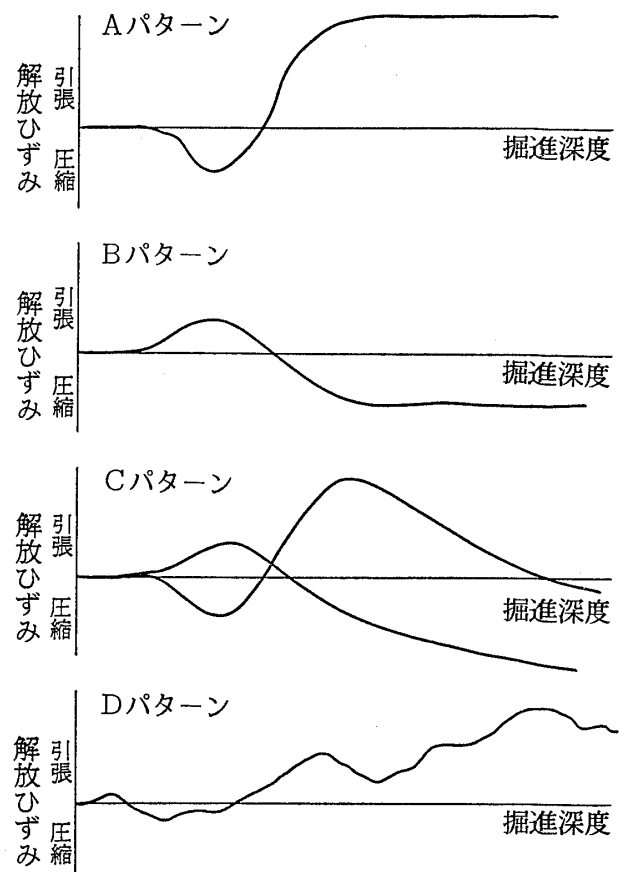


図-5 解放ひずみ曲線のパターン

Fig.5 Various patterns of released strain curves

かし圧縮応力場であっても、最大圧縮主応力と最小圧縮主応力との比が大ききときには、解放ひずみの値は、測定される方向によって大きく異なり、場合によっては圧縮ひずみになる可能性がある。

また、岩盤が不均質であること、岩盤内部に潜在的割れ目が存在することなどのために、オーバーコアリング時に亀裂が生じ、局部的に複雑な応力状態となり、解放ひずみが不安定な挙動を示すことがある。

#### 3・2・1・1 主応力比の影響

主応力比の値による解放ひずみの変化について、FEM解析によって検討した。

解析条件としては、図-6に示すように、軸対称の等方均質弾性体の円筒を考え、

岩盤の弾性係数 :  $E_R = 1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

ひずみゲージ埋設部の弾性係数

:  $E_G = 2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$

ポアソン比 :  $\nu = 0.3$  (両者とも)

と仮定した。

解析における初期条件としては、孔径方向応力  $\sigma_r$  と孔軸方向応力  $\sigma_z$  との比  $\sigma_r/\sigma_z$  をパラメータとして用い、孔径方向ひずみに関しては、 $\sigma_r/\sigma_z$  が 0.1, 0.2, 0.3,

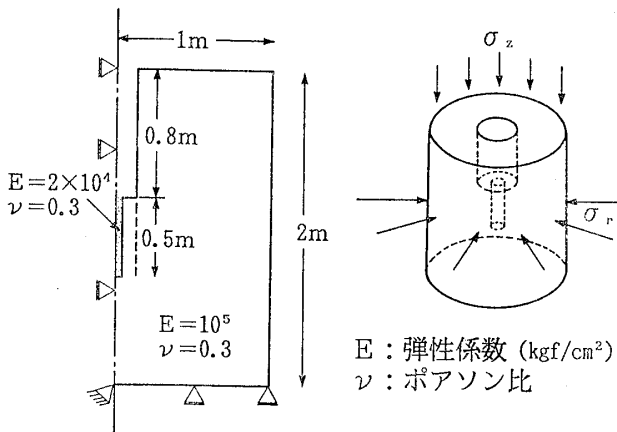


図-6 軸対称 FEM 解析モデル  
Fig.6 Axi-symmetric FEM model

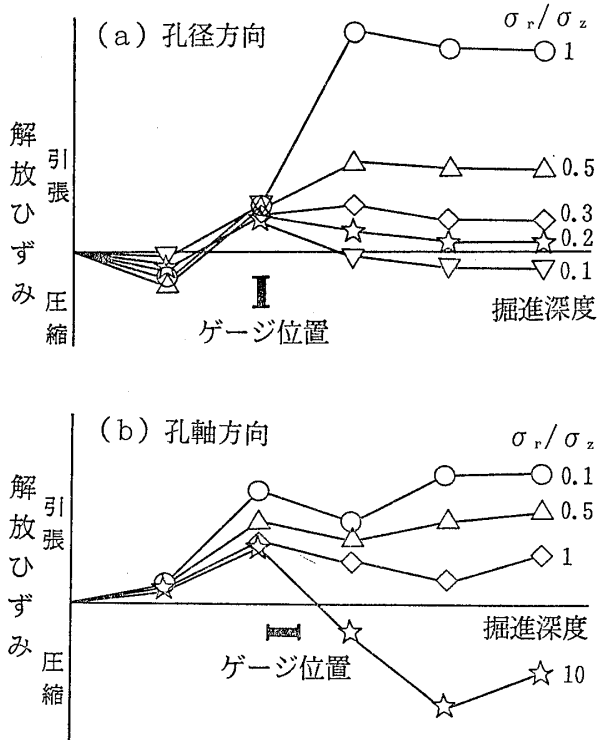


図-7 軸対称 FEM 解析結果  
Fig.7 Results from axi-symmetric FEM analysis

0.5, 1 の場合について、孔軸方向ひずみに関しては、 $\sigma_r/\sigma_z$  が 0.1, 0.5, 1, 10 の場合について、掘進深度と解析ひずみとの関係を求めた。これらの解析結果は図-7 に示す通りである。

図-7(a)の孔径方向ひずみは、パラメータ  $\sigma_r/\sigma_z$  が 0.2, 0.3, 0.5, 1 の場合には、前述の A パターンを示しているが、0.1 の場合には、一度引張側に变化した後、圧縮側に転じる B パターンとなっている。また、図-7(b)の孔軸方向ひずみは、 $\sigma_r/\sigma_z$  が 0.1, 0.5, 1 の場合には、A パターンを示すが、10 の場合には B パターンを示

している。

以上のように、全体が圧縮応力場であっても、ひずみを測定している方向の圧縮応力に対して、それに直交する方向の圧縮主応力がおおよそ10倍程度の大きさになると、解放ひずみが圧縮ひずみになることがある。

### 3・2・1・2 不均質性や不連続性の影響

礫岩や凝灰角礫岩においては、応力状態が巨視的（礫径を無視できる範囲）に一様であっても、礫とマトリックスの剛性に差があれば、局所的には応力は一様ではない。埋設法によって地圧を計測するとき、礫の大きさがパイロット孔の直径（ $\phi 46\text{mm}$ ）より小さい場合には、得られる解放ひずみは、経験的には、おおむねその箇所の平均的な応力状態を反映していると考えられている。これに対して、礫の大きさがパイロット孔の直径よりも大きいときには、測定する点によっては、得られる解放ひずみの再現性がよくないことがしばしば経験されている。

図-8は、中生代の礫岩の地点において得られた解放ひずみ曲線である。この地点の礫岩は、上記のような不均質な岩盤に該当するものである。オーバーコアリングによって回収されたコアに、分離面が生じていないときには、図-8(a)に示すように、Aパターンの解放ひずみ曲線が得られている。一方、回収されたコアに、肉眼で判別できる程度の割れ目（礫とマトリックスとの間の分離面も含む）が見られるときには、図-8(b)に示すように、Aパターン以外の不安定な形の解放ひずみ曲線が得られる。この原因としては、礫とマトリックスの剛性の差によって生じた応力集中が考えられる。

### 3・2・2 ひずみゲージの埋設状態

埋設法においては、ひずみゲージの各成分が独立して測定されることが重要な条件である。そのために、ひずみゲージには各成分を分離する仕切板が取り付けられている。また、充填材がひずみゲージと岩盤を付着させるためにのみ働くように、充填材の剛性は可能なかぎり小さくなるように配慮されている。充填材の固化に伴う膨張・収縮、埋設時のワーカビリティおよび固化後の岩盤との付着強度が適切であることが必要である。

オーバーコアリング時には、ひずみゲージが埋設されている部分の岩盤が地圧から解放され、岩石コア全体が弾性的に変形する。そのとき、充填材がパイロット孔の孔壁およびひずみゲージにしっかりと付着していなければ、ひずみゲージは岩石コアの変形に追従できない。また、充填材の付着力が弱い場合には、岩石コアが膨張する際に、充填材と孔壁（あるいはひずみゲージ）との間が、計測途中で分離してしまう恐れがある。

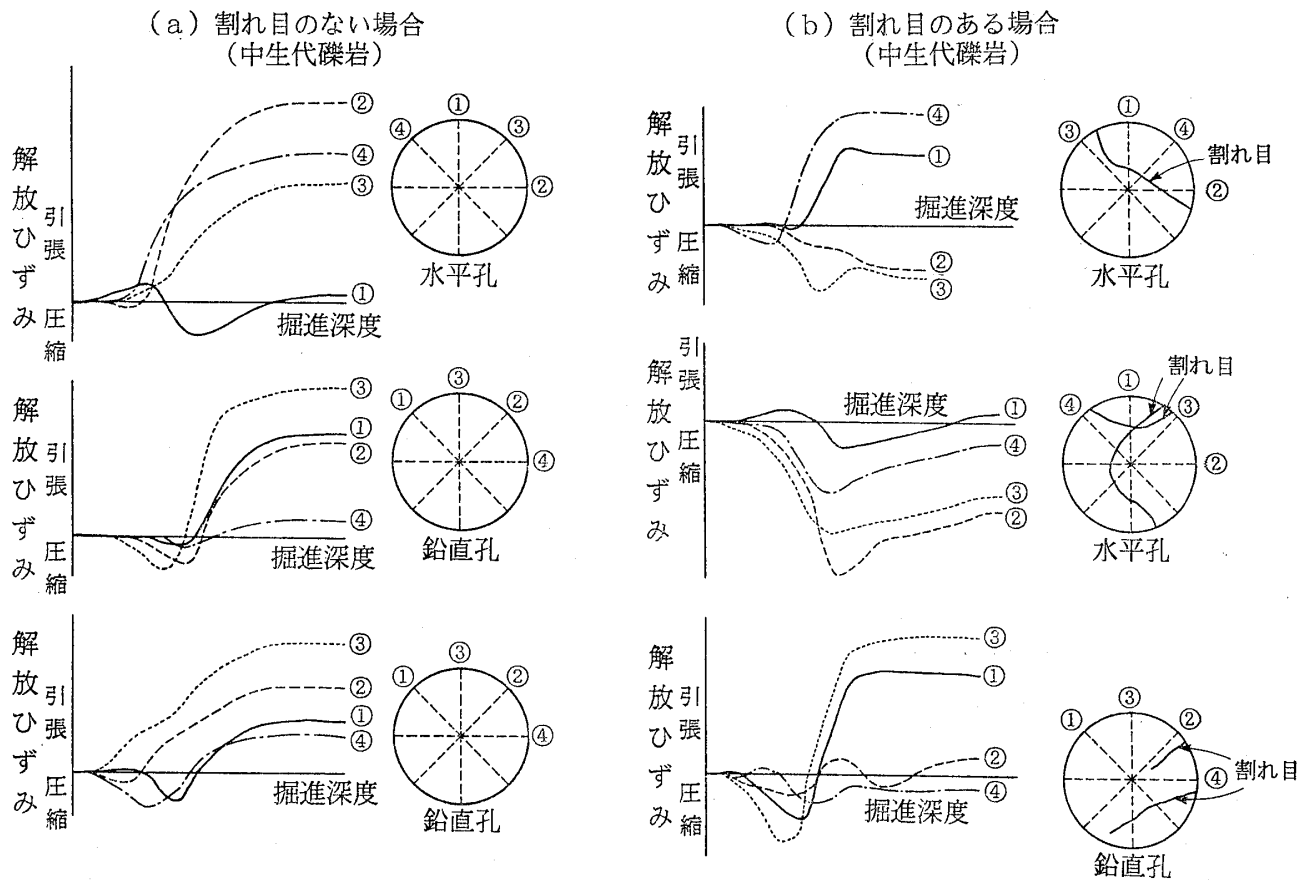


図-8 割れ目と解放ひずみ  
Fig.8 Influence of cracks on released strain

3・2・2・1 充填材と孔壁との付着状態

(1) ひずみゲージの方向による差異

さきに筆者らが示したように、解放ひずみ曲線のパターンが、Dパターン（オーバークアリング開始時より大きく変動し、最後まで安定しないもの）を示したものは11例で、全体（267例）の4%と、その数は極めて少なかったが、これらは、すべて水平のボーリング孔における計測に際して得られたもので、ひずみゲージの方向別に分類すると以下ようになる。

- ・上下方向 8例
- ・斜め方向 2例
- ・水平方向 1例

この結果をみると、明らかに上下方向のひずみゲージが多い。この理由は、水平のボーリング孔にひずみゲージを埋設した場合、付着不良が生じやすいところは上部であり、もともと充填材が孔壁と分離していたかオーバークアリング時に剝離したことによると推定される。

(2) 回収コア切断面の観察

水平のボーリング孔における計測によって得られた解放ひずみ曲線、回収されたコアに対する三軸感度試験の

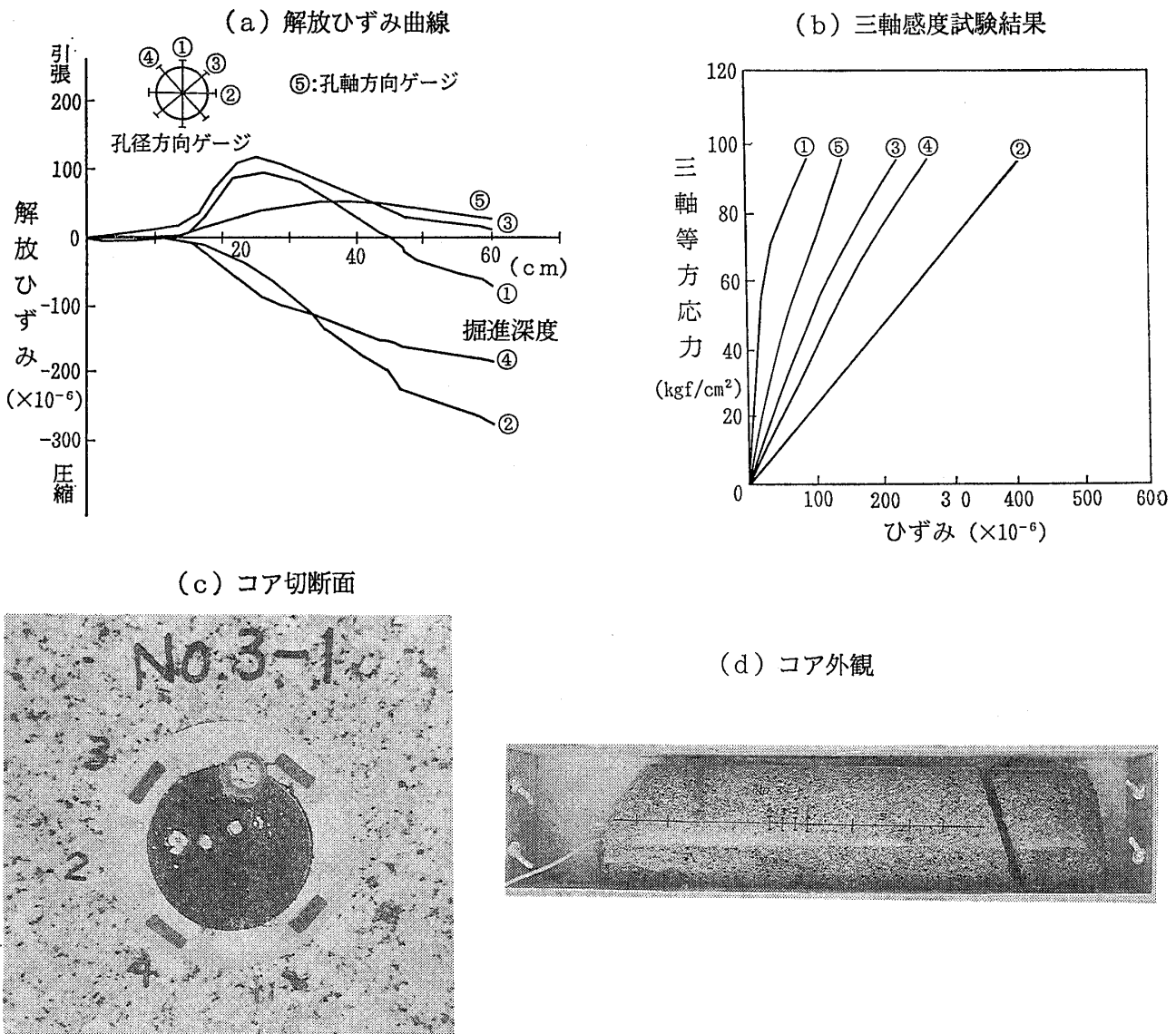
結果、コアの切断面写真およびコアの外観写真を、それぞれ図-9の(a), (b), (c)および(d)に示す。

切断面をみると、充填材と孔壁との境界の上部にすき間が生じている。このすき間はひずみゲージ①と③の中間の方向に対応している。このコアに関して現場で計測された解放ひずみ曲線をみると、ひずみゲージ①と③については、他のゲージに比べると、ほとんど変動していないことがわかる。また、三軸感度試験の結果においても、応力に対するひずみは、ひずみゲージ①、③、④、②の順に大きくなっており、直線性も悪い（ひずみゲージ⑤は孔軸方向であるので除外）。

上記のような計測結果からみると、充填材と孔壁との付着不良が解放ひずみに影響を与え、真の解放ひずみを表していないと判断される。

3・2・2・2 充填材の強度試験および膨張試験

一般に、充填材として用いられているセメントミルクは、固化するときに乾燥収縮する性質がある。セメントミルクを用いて、ボーリング孔内にひずみゲージを固定させるとき、この性質は、孔壁とセメントミルクとの付着力を低下させるという悪い影響を及ぼす。したがっ



図—9 測定結果およびコアの写真(1)

Fig.9 Results from strain measurement and photos of recovered core (1)

て、従来からセメントミルクの収縮を防ぐことを目的として、アルミ粉を添加している。

しかし、アルミ粉をセメントミルクに添加すると気泡が生じ、セメントミルクを不均質にする可能性もあり、アルミ粉をセメントミルクに添加することには、その性質上、一長一短がある。

そこで、従来から使用しているセメント、ポゾリス、アルミ粉による配合材、およびアルミ粉の代わりにデンカ CSA を用いた配合材によって供試体を作製し、強度試験および膨張試験を実施した。

強度試験に使用した12個の供試体の配合は、表—1に示す通りで、試験の結果を表—2に示す。この結果によれば、試料10の一軸圧縮強度(400kgf/cm<sup>2</sup>)は、他の試料の値に比べて小さい値を示している。試料10を除いた11

個の試料の値は460~530kgf/cm<sup>2</sup>で、平均するとおよそ500kgf/cm<sup>2</sup>となる。試料10の配合と試料3の配合を比べると、水の0.43が0.40と少なくなっているだけであり、強度が400kgf/cm<sup>2</sup>から520kgf/cm<sup>2</sup>へと増加している。

つぎに、試料11は、試料3の配合に比べると、早強セメントを8/9とし、デンカ CSA を1/9加えたものであり、この試料の強度は530kgf/cm<sup>2</sup>で、試料3の強度とほとんど同じになっている。

また、試料7と試料8を比較すると、早強セメントとデンカ CSA の比を、5 : 1と8 : 1としたものであって、デンカ CSA の量が異なっているが、強度の値は、同じ値(480kgf/cm<sup>2</sup>)を示している。

要するに、早強セメントの代わりに、この試験に示した程度の割合のデンカ CSA を使用しても、充填材とし



表一1 強度試験のための充填材配合表

Table 1 Types of grout mixture for laboratory testing

番号	早強セメント	水	デンカ CSA	ポゾリス	アルミ粉
1	1	0.43	0	0	0.00003
2	1	0.40	0	0	0
3	1	0.40	0	0.0025	0
4	5/6	0.40	1/6	0	0
5	5/6	0.40	1/6	0.0025	0
6	5/6	0.35	1/6	0.0025	0
7	5/6	0.43	1/6	0.0025	0
8	8/9	0.43	1/9	0.0025	0
9	8/9	0.43	1/9	0	0
10	1	0.43	0	0.0025	0
11	8/9	0.40	1/9	0.0025	0
12	8/9	0.35	1/9	0.0025	0

(注) 数字は重量比を表す

表一2 充填材の強度試験結果

Table 2 Mechanical properties of grout mixtures

番号	単位体積重量 (gf/cm <sup>3</sup> )	一軸圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	1.89	460	74,300
2	1.95	490	88,200
3	1.97	520	122,000
4	1.98	530	97,500
5	1.91	460	73,000
6	2.01	500	113,000
7	1.90	480	83,200
8	1.92	480	92,900
9	1.94	500	94,600
10	1.91	400	81,800
11	1.96	530	117,000
12	2.01	480	99,100

ての一軸圧縮強度はほとんど影響を受けないことがわかった。

上記の強度試験の結果を参考にして、表一3に示すように、アルミ粉の添加量を変えた3種の材料およびデンカ CSA の添加量を変えた2種の材料を作製し、これらの配合材についての膨張試験を実施した。膨張試験結果を図一10および図一11に示す。

膨張材としてアルミ粉を用いた材料については、試験開始後約1時間で膨張のピークが現れ、その後は収縮に変化し、試験開始から約10時間ほど経過したところで収縮が終了している。この性状はアルミ粉の混合比にはおおむね関係がないようである。しかしながら、アルミ粉が0.00003の場合には、試験開始後2時間ほど経ったときから、元の長さよりも短くなり、膨張材としての役目を果たさない結果となっている。

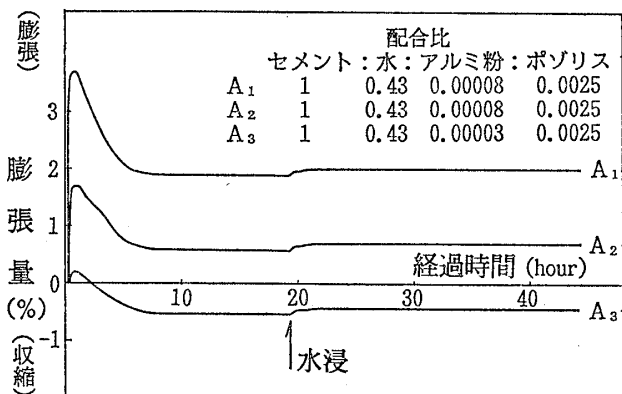
つぎに、膨張材としてデンカ CSA を用いた材料については、試験開始後から一様に膨張が起こり、デンカ CSA が1/6のとき約8日、1/9のときは約6日間膨張が継続し、その後は一定値になっている。

以上のように、アルミ粉の場合は、最終的には膨張した状態で一定値に収斂する(試料A1およびA2)とはいえ、ピークを有するような膨張過程を示していることは、付着力に低下をきたす懸念を持たざるを得ない。これに対して、単調に膨張を続けるデンカ CSA の方が、膨張材としては適しているといえる。また、デンカ

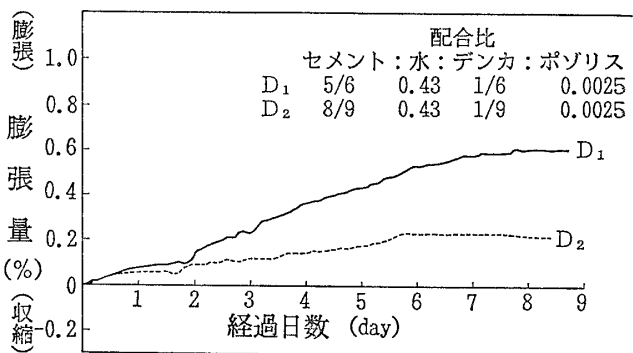
表一3 膨張試験のための充填材配合表  
Table 3 Types of grout mixture for swelling test

番号	早強セメント	水	アルミ粉	デンカ CSA	ポゾリス
A 1	1	0.43	0.00008	0	0.0025
A 2	1	0.43	0.00005	0	0.0025
A 3	1	0.43	0.00003	0	0.0025
D 1	5/6	0.43	0	1/6	0.0025
D 2	8/9	0.43	0	1/9	0.0025

(注)数字は重量比を表す



図一10 アルミ粉を添加した充填材の膨張試験結果  
Fig.10 Results from swelling test of grout mixture with aluminum powder



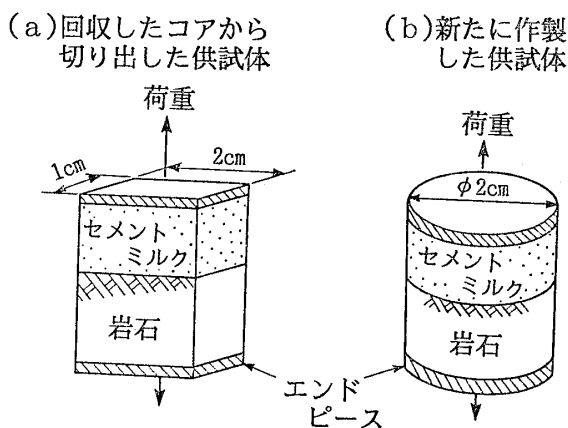
図一11 デンカ CSA を添加した充填材の膨張試験結果  
Fig.11 Results from swelling test of grout mixture with Denka CSA

CSA は、アルミ粉のように気泡の発生によって膨張するものではなく、セメント系の針状結晶の成長によって膨張を促進するもので、セメントミルクの均質化という面からも有利である。

3・2・2・3 充填材のワーカビリティ

充填材の配合とワーカビリティの関係を知るために、現地における実際のパイロット孔と同じ内径を持つ透明なアクリルパイプに、ひずみゲージを挿入し、室内において充填実験を行った。この実験においては、セメントとデンカ CSA の比は、8/9:1/9、セメントとポゾリスの比は 1:0.0025 と一定にし、水とセメントの比のみを変化させた。

この実験においては、ひずみゲージを挿入したアクリルパイプの一端から、パイプ内に十分にセメントミルクが行き渡るようにし、他の端のリターンホースによってセメントミルクを戻して、循環さすようになっている。このような実験の結果、セメントミルクの循環が1時間近く可能であったのは、水:セメントの値が0.43以上の



図一12 付着強度試験に用いた供試体の模式図  
Fig.12 Illustration of specimens for cohesive strength test

ときであった。このときのフロー値は15秒程度である。なお、セメントミルクの粘性は温度と密接に関係しており、現場においては必ずフロー試験を実施して配合を決定する必要がある。

3・2・2・4 充填材の付着強度試験

付着強度試験に用いた供試体としては、図一12(a)に示

表-4 充填材の付着強度試験結果

Table 4 Cohesive strength of grout mixtures

種 別	供試体番号	セメントミルクの配合				付着強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
		水	早セメント	ポゾリス No. 5 L	アルミ粉	
オーバーコアリングで採取したコアから切り出した供試体	1	0.45	1	0.0025	0.00005	7.3
	2	0.45	1	0.0025	0.00005	7.3
	3	0.45	1	0.0025	0.00005	1.1
	4	0.41	1	0.0025	0.00005	0.9
新たに作成した供試体	5	0.40	1	0.0025	0.00005	3.3
	6	0.40	1	0.0025	0.00005	2.8
	7	0.45	1	0.0025	0.00005	2.7
	8	0.50	1	0.0025	0.00005	1.7
	9	0.40	1	0.0025	0	3.4
	10	0.40	1	0	0	1.2

(注) 供試体番号5~10の付着強度は、3供試体の平均値

すように、充填材と岩石との付着面の寸法が、1 cm × 2 cm の4個の供試体を、三軸感度試験を終了したコアから切り出した。また、6種類の配合の異なるセメントミルクを使用した直径 2 cm の円筒形の供試体 (図-12(b) 参照) を作製した。なお、この円筒形供試体については、1種類につき3個の供試体を作製し、その平均値を求めた。これらの供試体の充填材の配合および付着強度試験の結果は、表-4 に示す通りである。

この試験結果によれば、セメントミルクの配合と付着強度との間には明瞭な関係はないようで、現場から採取したコアから作製した供試体では、配合が同じであっても強度はおよそ 1kgf/cm<sup>2</sup> と 7kgf/cm<sup>2</sup> を示しており、一方、室内で作製した供試体では、配合が違っても、系統的な強度の違いは見られず、同じような値を示している。

通常オーバーコアリングの際に得られる解放ひずみの値は、引張り側でたかだか  $1000 \times 10^{-6}$  である。実際のひずみゲージが  $1000 \times 10^{-6}$  の引張りひずみを示すときの引張り力を測定すると、図-13 に示すように、ゲージの標点板の面積あたりの力に換算して、0.3kgf/cm<sup>2</sup> 以下である。したがって、表-3 に示したいずれの供試体の付着強度よりもゲージのバネとして作用する力の方が小さいので、このひずみゲージの反力によって、岩石と充填材の付着面が剥離することはないとしても差支えはないものと思われる。

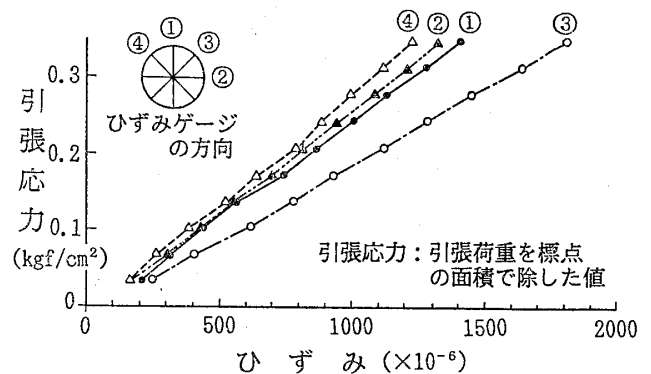


図-13 ひずみゲージの引張り力とひずみとの関係  
Fig.13 Relation between tensile force and strain of gauge

### 3・2・3 測定環境

図-14 に示す解放ひずみ曲線は、花崗岩中の水平ボーリング孔から得られたものである。孔径方向の解放ひずみ曲線①~④の形状をみると、引張り側に変化した後に圧縮側へ変わる場合 (①と③) と、単調に圧縮側に変化する場合 (②と④) とがあるが、いずれの場合も、オーバーコアリングが終了するまで圧縮側への変化が継続し、一定値に達する傾向は見られず、Cパターンを示している。

一方、この箇所の回収コアの三軸感度試験の応力~ひずみ曲線は、同図に示すように、すべてのゲージについ

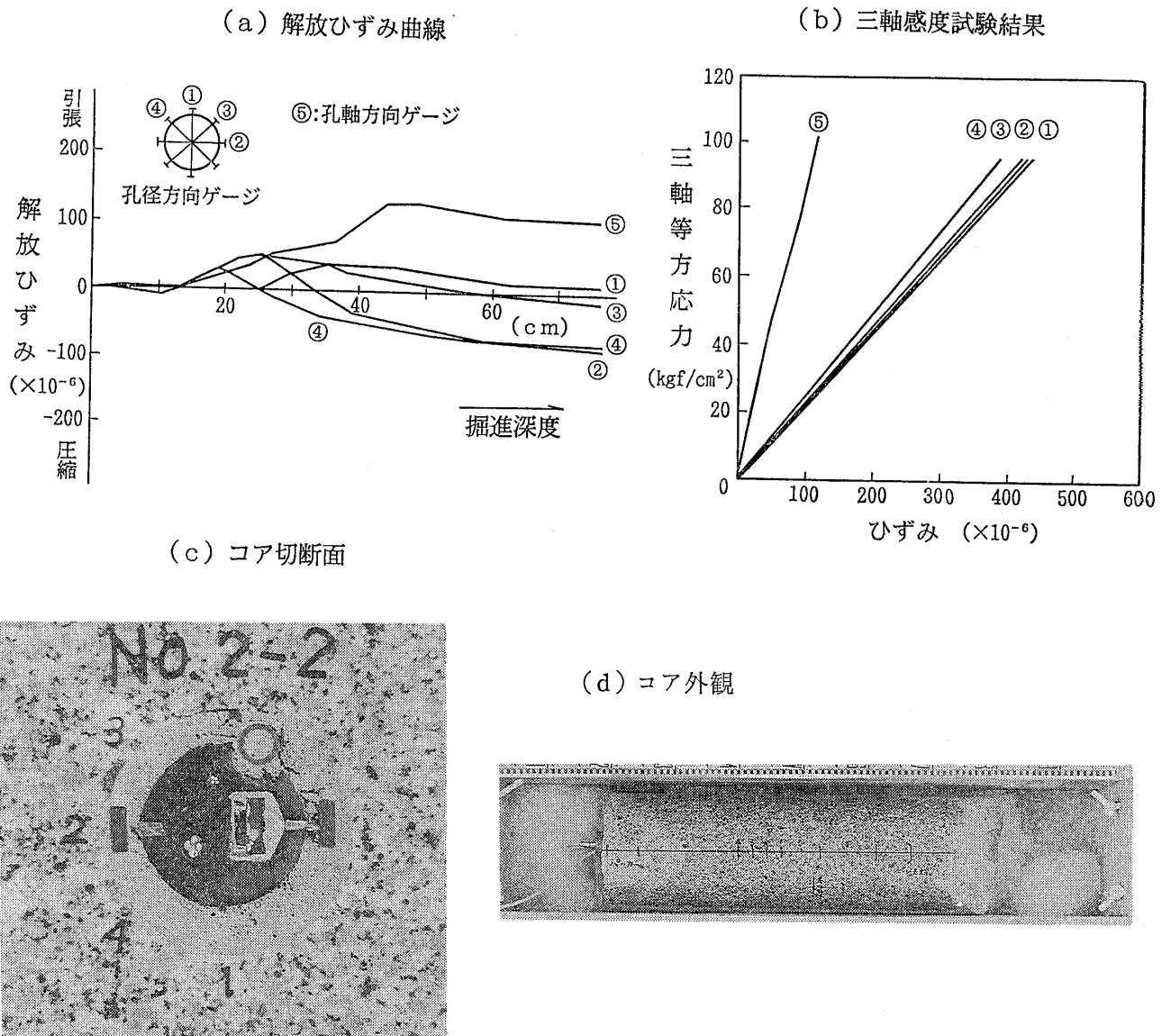


図-14 測定結果およびコアの写真(2)  
 Fig.14 Results from strain measurement and photos of recovered core (2)

て直線を示し、また、孔径方向のひずみゲージ①～④の感度はほとんど同一であり、ひずみゲージとしては極めて良好な状態にあることを示している。

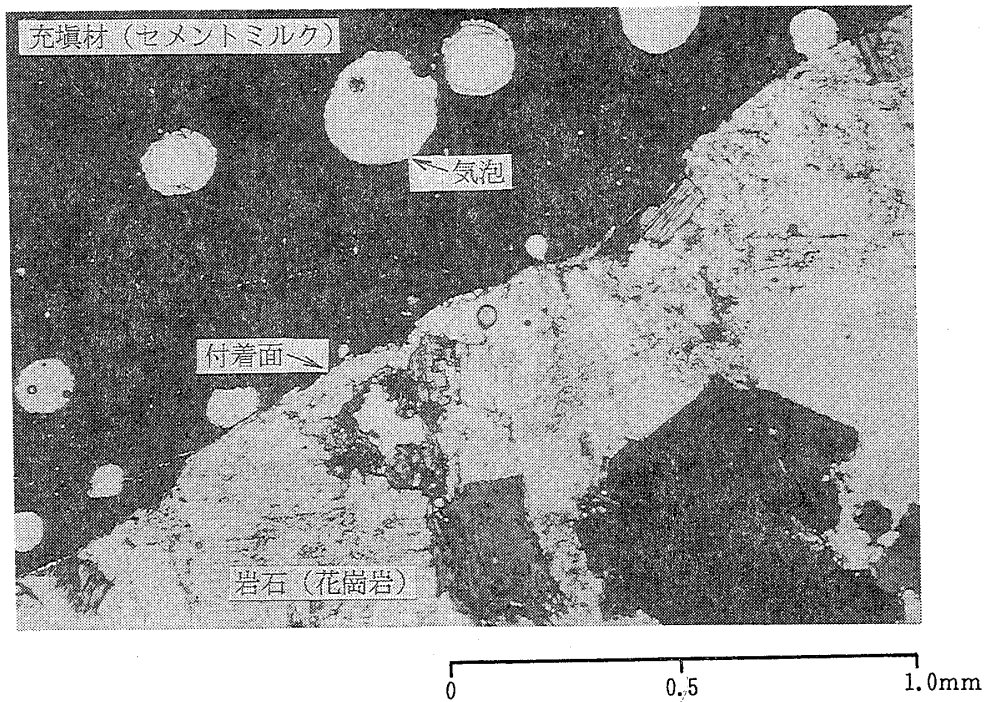
そこで、回収したコアの岩石と充填材との境界部分から薄片を作製し、付着面の状況を偏光顕微鏡で観察した。この顕微鏡写真を写真-2に示す。この観察結果によると、充填材と岩石はよく付着している(写真の上部の充填材が円孔状に抜けて見えるところは、アルミ粉によって気泡が生じた部分である)。

この例は、付着状態は良好で、しかもひずみゲージ自体も正常に動作していたと考えられるにもかかわらず、解放ひずみ曲線がAパターンを示していない。

図-15に示す解放ひずみ曲線において、孔径方向の解

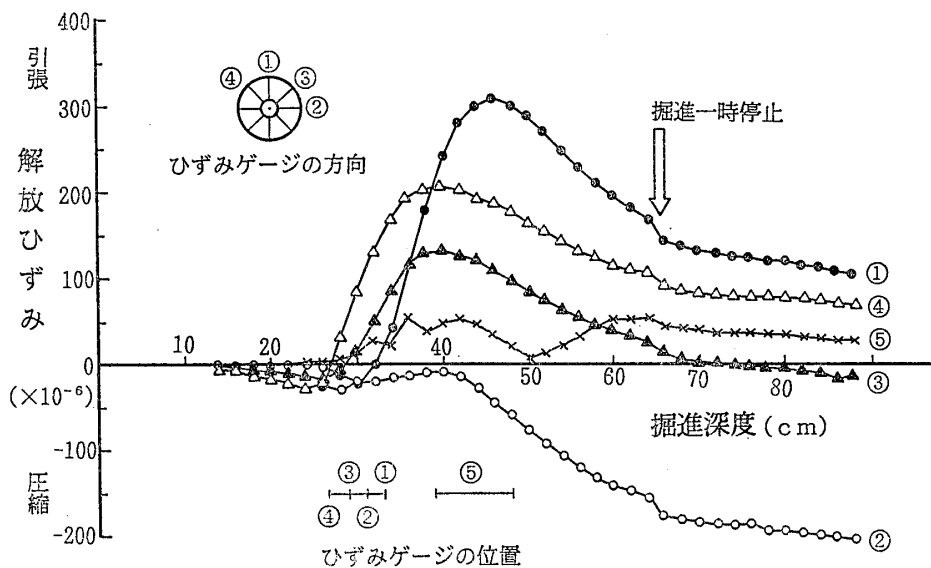
放ひずみは、引張側に大きく変化してから圧縮側に転じている。また、孔径方向の各ひずみゲージの圧縮側へのひずみの変化の傾向はよく似ていて、同じような勾配で変化し、しかも、一定値への収斂を示していない。また、同図の矢印の箇所では、掘進を一時停止しているにもかかわらず、各ひずみゲージとも一様に圧縮側に変化している。

この解放ひずみ曲線は、極めて硬質な花崗岩(一軸圧縮強度2000kgf/cm<sup>2</sup>以上)の岩盤において得られたものであり、回収されたコアには、割れ目などの分離面も見られない。このような岩盤において、掘進を中止してもなお、変位を続けている原因として、岩石のクリープ変形を想定することは困難である。



写真一2 付着面の顕微鏡写真 (クロスニコル)

Photo 2 Thin section photomicrographs of cohesive boundary (crossed nicols)



図一15 解放ひずみの測定例(1)

Fig. 15 Example of released strain curves (1)

図一14および図一15に示すような解放ひずみ曲線の形態が生じるその他の原因としては、測定系における電気的不安定、あるいは孔内の温度変化（実際には、オーバーコアリング時の冷却水による温度変化）によるひずみ計の感度変化が考えられるが、測定系の電気的不安定性については、測定前後のチェックによって安定性の確認がなされている。このようなことから、このひずみ変動は孔内の温度変化に原因があるものと考え、検討を進め

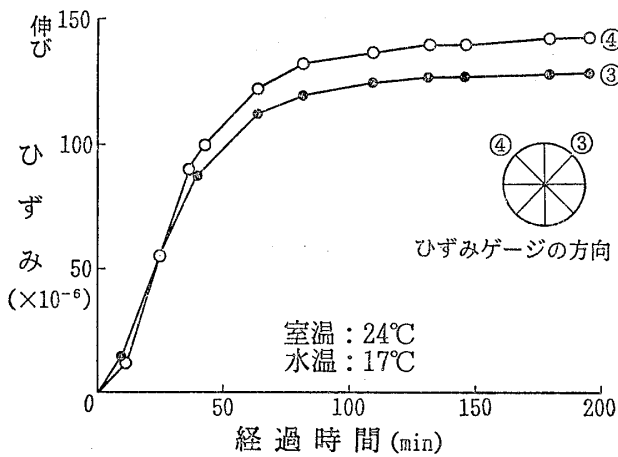
ることとした。

三軸感度試験終了後の回収コア（ひずみゲージの埋設されたコア）を用いて、コアの温度とひずみとの関係を求める実験を行った。図一16は、室温（24℃）で放置しておいた回収コアを、水温が17℃の水槽に浸し、経過時間とひずみとの関係を表したものである。これによると、ひずみがほぼ安定するのは、水浸後約2時間経過したときであることがわかる。

図一17は、水温とひずみの関係をプロットしたものである。この場合、それぞれの水温において、平衡に達したときのひずみを示している。この実験においては、ひずみゲージ本体のみと、三軸感度試験用の回収コアに收容されたままのひずみゲージとの2種類のゲージを使用した。

ひずみゲージ本体のみの場合は、温度が高くなるとひずみは大きくなり、一方、回収コアの場合は、温度が高くなるとひずみが小さくなっている。ちなみに、前者の変化率は  $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、後者では約  $-20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  である。

このように、ひずみゲージ本体のみの場合と回収コア



図一16 回収したコアを水浸した時のひずみ変化  
Fig.16 Relation between strains of embedded gauge and elapsed time after immersing

の場合とで、温度の変化に対するひずみゲージの動作が相違する原因は、以下のように考えられる。

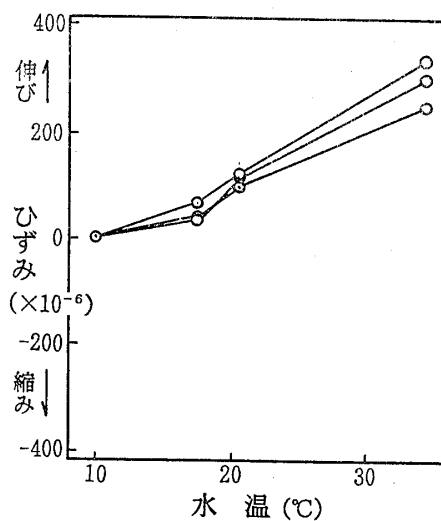
- ① ひずみゲージ本体のみの場合は、温度が上昇すると、個々のひずみゲージを固定しているゴムモールドなどの部分が膨張し、両側の標点板を外側に押し出すために、ひずみが伸び側に変化する。
- ② 回収コアの場合は、両側の標点板と周囲の岩石とは充填材で固定されているため、ゴムモールドなどの膨張が相対的に縮み側のひずみとして現れる。

以上の実験結果より図一14および図一15に示したような解放ひずみ曲線がCパターンを示すことは、孔内の温度上昇（オーバーコアリング時の冷却水による温度の上昇）に起因するものと判断した。なお、このときのボーリングに用いた冷却水は、構坑内から坑外に流出したたまり水で、夏場の測定であったことから、横坑内の岩盤温度より冷却水の方が高かったことが考えられる。

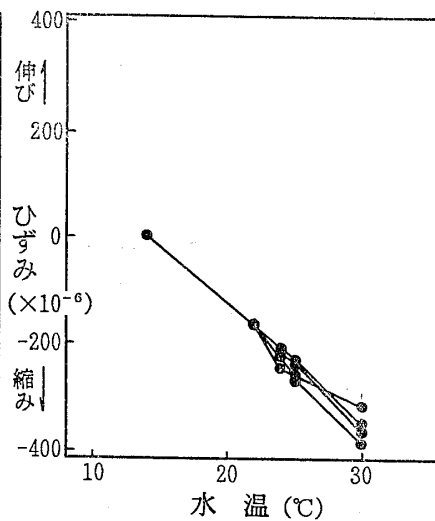
3・2・4 まとめ

オーバーコアリング時に得られる解放ひずみ曲線のさまざまな形態は、それぞれに何らかの物理的原因によるものであることはいうをまたない。応力解放法の測定原理が等方均質な弾性論に基づいている以上、岩盤の弾性的な挙動を反映している測定値と反映していない測定値とを区別しなければならない。ここに、解放ひずみの挙動を左右する要因について、岩盤の応力状態、ひずみゲージの埋設状態および測定環境（温度変化）の三つの観点から考察してきた。この結果を整理し、測定上の対策について示すと、表一5のようになる。

(a) ひずみゲージ本体のみ



(b) 回収コアに埋設されたひずみゲージ



図一17 ひずみゲージのひずみと水温との関係

Fig.17 Relation between strains of embedded gauge and temperature of water

表—5 要因分析および対策

Table 5 Causes of abnormal released strain and countermeasures in over-coring

要 因		解析・実験・検討	検討結果とその評価	測定上の対策
岩盤の応力状態	主応力比大	・ FEMによる軸対称弾性解析	・ 大きな偏圧下では解放ひずみが圧縮ひずみを示す。 ・ 応力が完全に解放されれば解放ひずみは安定する。	・ 特になし（解放ひずみの再現性のチェックは重要、ひずみゲージの各方向で弾性論に基づいたひずみ不変量のチェックも重要）。
	局所的な地圧の擾乱	・ 回収されたコアの割れ目の有無と解放ひずみの関係を分析	・ 回収されたコアに割れ目がある場合は、いずれかのひずみゲージが不安定となる。	・ ひずみゲージの埋設位置に割れ目のないことを確認する。
ひずみゲージの埋設状態	充填材と孔壁との付着不良	・ ひずみゲージの方向による差異 ・ 回収されたコアの切断面の観察 ・ 付着面の顕微鏡による観察	・ 水平孔における測定では、充填材の上部に空隙が生じやすく、上下方向の解放ひずみの信頼性が低い場合がある。 ・ 肉眼観察で充填材がよく付着していると思われるものは微視的にもよく付着している。	・ 特になし。
	充填材の硬化・収縮、ワーカビリティ、付着強度不足	・ 充填材の膨張実験 ・ 充填材のグラウト実験 ・ 充填材の付着強度実験	・ 充填材の硬化中わずかでも単調に膨張する材料が適していると思われる。 ・ 膨張性混和剤を用いたときのワーカビリティは良好。 ・ 充填剤が一旦孔壁に付着すれば応力解放による引張り力によって剝離することはないと思われる。	・ 充填材の膨張性混和剤は、アルミ粉にかえてデンカCSAを用いる（配合比は、水：早強セメント：デンカCSA：ポソリス=0.43～0.45：0.9：0.1：0.0025）。 ・ 水・セメント比は現場のフロー試験によって決める。
測定環境	温度変化測定器、ひずみゲージの絶縁不良	・ ひずみゲージの温度特性実験 ・ 測定器、ひずみゲージの安定性のチェック	・ 埋設されたひずみゲージは温度変化によって $15\sim 20\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 変化する。解放ひずみが全体的に同じような傾向をもって圧縮側へ変化し、一定値を示さないような場合は、温度変化に原因があるものと思われる。 ・ 測定器、ひずみゲージの安定性は良好。	・ ボーリングの冷却水には、ボーリング孔内温度と同じ温度の水を使用する。 ・ ひずみゲージに温度計を装着し、オーバーコアリング時に水の温度の監視を行う。無視できないほどの温度変化が生じたときには、回収したコアについて温度校正試験を行う。

また、上記の結果に基づいて、図—5に示した解放ひずみの4つのパターンを見ると、つぎのように考えることができる。

- ① 応力解放後において、ひずみが一定値に収斂しているAパターンおよびBパターンは、応力解放に伴って生じる岩盤の挙動をほぼ正確に反映していると思われることができる。
- ② 応力解放後において、ひずみが一定の値に収斂せず、圧縮側に継続して変化するCパターンは、オーバーコアリング時の冷却水による温度変化の影響によるものであることが考えられ、回収コアの温度～ひずみの関係を較正することによって、補正することができる。
- ③ 終始、解放ひずみが安定しないDパターンは、ひずみゲージの周辺に存在する割れ目の影響か、充填

材が孔壁に付着していないことによる影響かは判断できないが、棄却すべきデータである。

したがって、測定上の対策としては、割れ目の影響のない箇所にひずみゲージを着実に埋設することと、オーバーコアリング時に温度変化を生じさせないことに帰結する。

#### 4 データ解析法についての検討

##### 4・1 埋設法の解析方法について

図—18は解放ひずみ曲線の一例である。これらの曲線によって示されるひずみの変化状態は、ひずみゲージの方向によってその傾向が異なっている。すなわち、ボーリング孔軸に対して直角方向（孔径方向）のひずみゲージ（図の①、②、③、④）では、ビット先端がゲージの

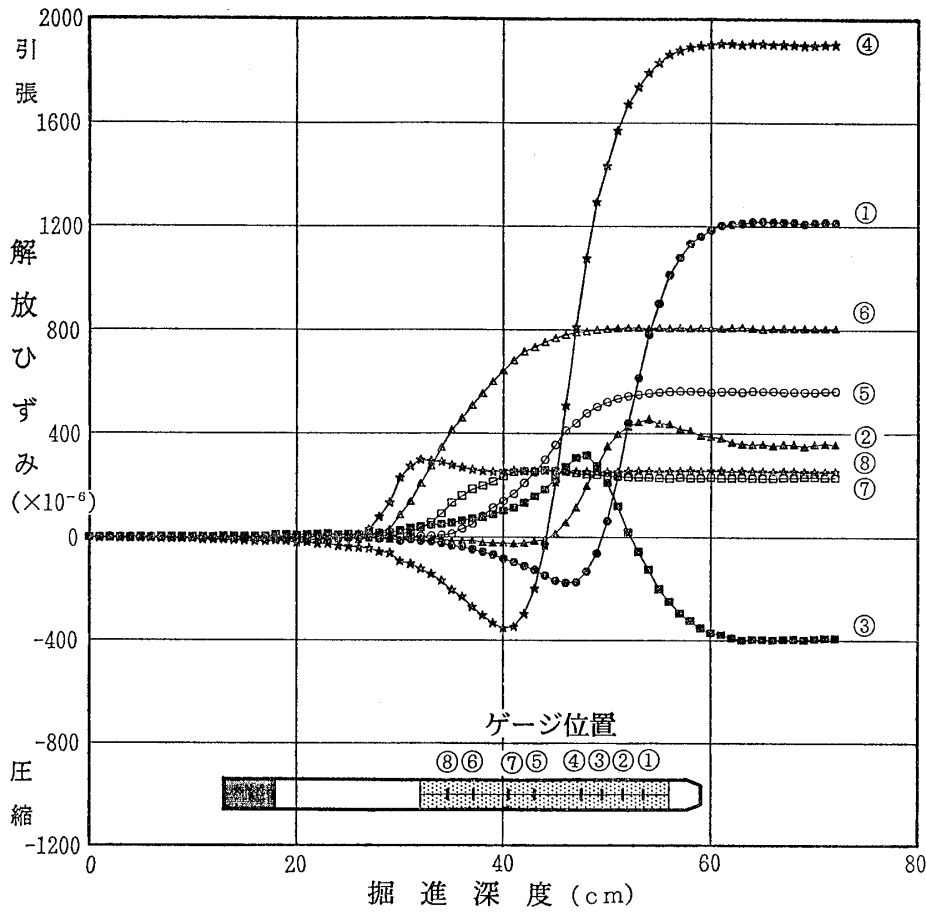


図-18 解放ひずみの測定例(2)  
Fig.18 Example of released strain curves (2)

位置より 20cm ほど手前に達したときに、ひずみ変化が始まり、ゲージ位置近傍に達したときに極値を示し、その後、圧縮側あるいは引張側に大きく変化して一定値を示すようになる。一方、孔軸に対して 45° 方向 (斜め方向) のひずみゲージ (図の ⑤, ⑥, ⑦, ⑧) では、ビット先端がひずみゲージの位置より 7~8 cm 手前に達したときに、ひずみ変化が始まり、ひずみゲージの位置を 7~8 cm 通過したところからは一定値となっている。

各ゲージの解放ひずみ ( $\epsilon_{pi}$ ) は、これらの一定値を読みとり、校正係数を乗じて求める。この解放ひずみにひずみゲージの標点長さを乗ずれば、孔径の変化量を示すことになる。

なお、このデータは、3章で述べた検討を経た上で得られたもので、データの質としては、現在の技術で最良のものであるといえる。金川ら (1986) による FEM 解析結果と極めて良く一致している。

さきに述べたように、埋設型ひずみゲージは多成分のひずみゲージをゴムでモールドしたもので、全体としての剛性は小さい。また、仕切り板によって充填材を分離することによって、円周方向の剛性が小さくなるように

してある。しかしながら、岩石の弾性係数、充填材やゴムモールドの影響などによって、各ひずみゲージのみかけの感度が異なるので、これを校正するために三軸感度試験を行っている。

図-19は、図-18に示した解放ひずみのデータが得られたときの回収コアについて行った三軸感度試験の結果である。孔径方向のひずみゲージと斜め方向のひずみゲージとでは、応力~ひずみ関係に違いがあるが、同じ方向のものではその差は小さい。この図から感度係数  $E_i$  をつぎのように定義する。

$$E_i = (1 - 2\nu) \frac{\sigma_{ci}}{\epsilon_{pi}} \tag{1}$$

ここに、式(1)はつぎに示す一般化したフックの法則の応力成分を等しいとしたときに得られる式である。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \} \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x) \} \end{aligned} \tag{2}$$



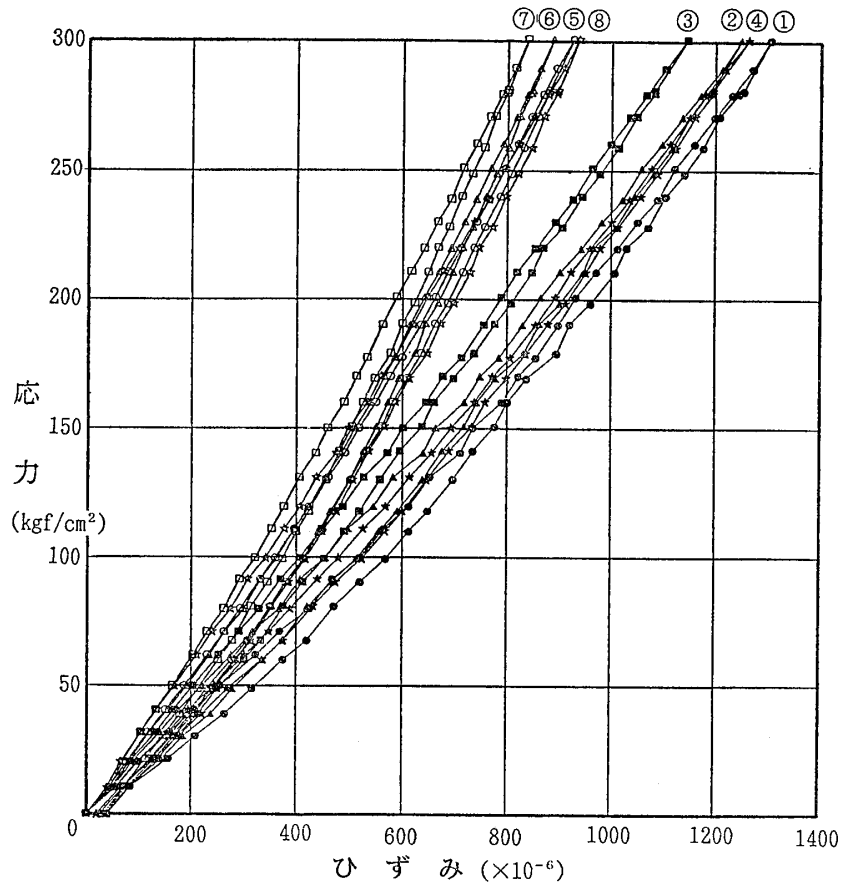


図-19 三軸感度試験による三軸等方応力と埋設ゲージのひずみ変化  
 Fig. 19 Relation between confining pressure and strains of embedded gauge by tri-axial test

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \}$$

また、式(1)において、 $\epsilon_{pi}$ は解放ひずみ、 $\sigma_{ci}$ は感度試験においてひずみが、 $\epsilon_{pi}$ となったときの等方応力である。 $\nu$ はポアソン比で、通常は0.25の値を使用している。

感度係数  $E_i$  はひずみゲージによって異なるので、解析を進めるにあたっては、解放ひずみを等価な値に換算しなければならない。そこで、弾性係数が  $E_0$ 、ポアソン比が  $\nu$  という物性をもつ等方均質な弾性体を仮定し、この弾性体が受けていた応力が解放されたときに物体内に生じるひずみを  $\epsilon_i$  とする。この  $\epsilon_i$  を‘みかけひずみ’と呼んでいる。実際の供試体(回収コア)は、中空の岩

表-6 みかけひずみ一覧表  
 Table 6 Lists of released strains and apparent strains

ゲージ番号	解放ひずみ $\epsilon_{pi}$ ( $\times 10^{-6}$ )	等方応力 $\sigma_{ci}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	感度係数 $E_i$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	みかけひずみ $\epsilon_i$ ( $\times 10^{-6}$ )
1	1214	274.70	$0.113 \times 10^6$	1374
2	360	78.29	0.109	391
3	-390	-95.54	0.122	-478
4	1904	473.00	0.124	2365
5	564	165.06	0.146	825
6	806	265.99	0.165	1330
7	232	71.08	0.153	355
8	252	73.65	0.146	368

石にひずみゲージが埋設されているものであるが、ここではこれを中実な弾性体とみなし、次式によって $\epsilon_i$ を求めている。

$$\epsilon_i = \frac{E_1}{E_0} \epsilon_{P_i} \quad (3)$$

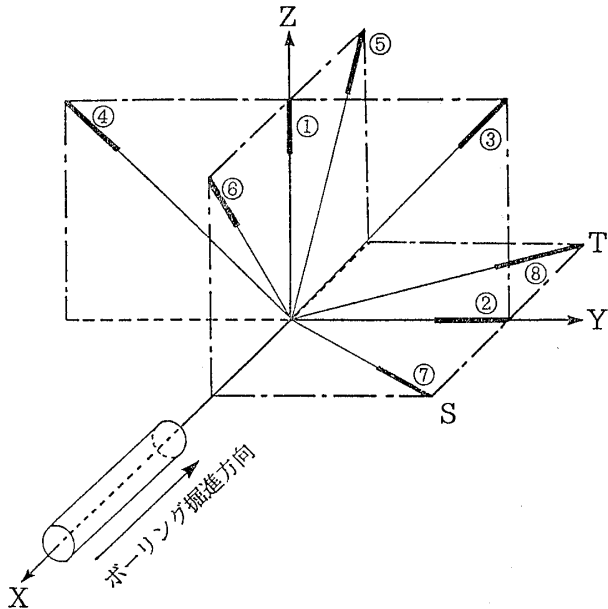


図-20 座標系とゲージの測定方向  
Fig.20 Basic coordinates and measuring direction of a gauge

ここに  $E_0$  は、後述する応力解析の際に消去されるので任意の値を用いればよいのであるが、通常は、計算時に桁落ち誤差が生じないように、感度係数に近い値を設定している。このようにして求めたみかけひずみ  $\epsilon_i$  は、岩石の弾性係数の異方性や微細なクラックが解放ひずみに与える影響、さらには、場所によって充填材の硬化程度が異なることなどをキャンセルし、みかけ上、等方均質な弾性体内のひずみ値として評価できるものである。

図-18に示す解放ひずみから求められたみかけひずみを表-6に示す。

図-20は、直交座標系において、ボーリング孔軸を1つの座標軸とし、それぞれのひずみゲージの方向を示したものである。

図-21は、図-20に示すそれぞれの平面(X-Z面, Y-Z面, X-Y面, S-Z面, T-Z面)内のみかけひずみの分布を示したものである。同図において、ひずみ分布を最小自乗法あるいはひずみの不変量から検討して、ばらつきを評価する。

図-20に示した基準座標系における各ひずみの成分の

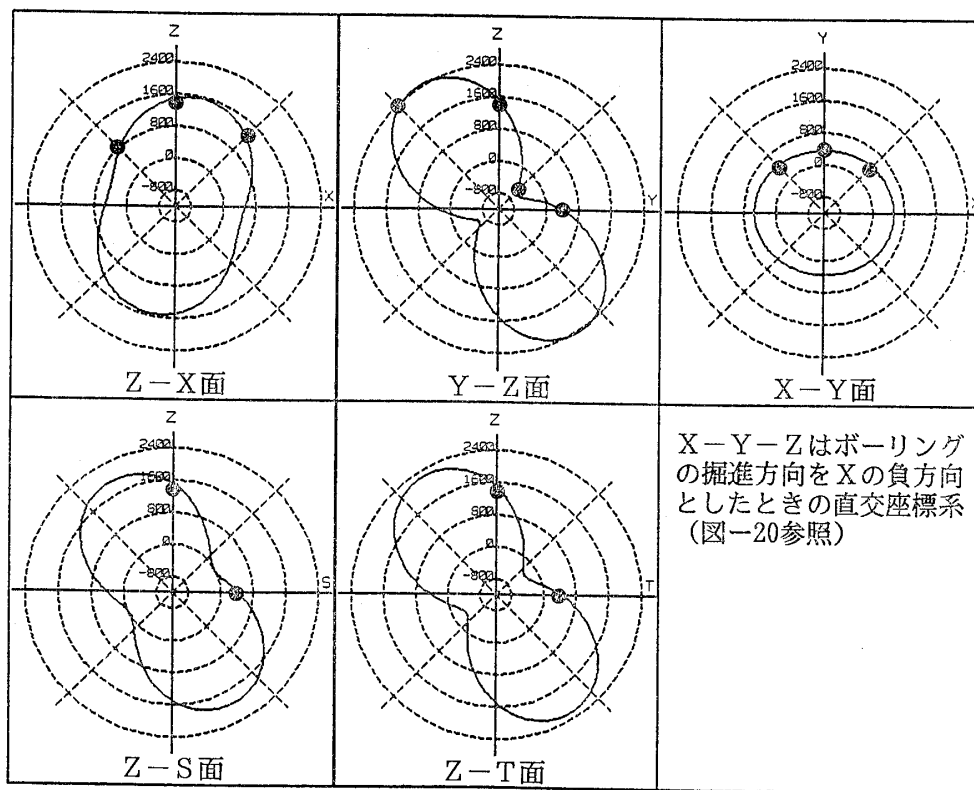


図-21 みかけひずみの面内分布と最小自乗法で求めたひずみ分布との比較  
Fig.21 Comparison of apparent strains and theoretical strain distribution computed by least square method

方向余弦を  $(l_i, m_i, n_i)$  とすると、ひずみと応力の関係は、つぎのように表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_i = & \frac{1}{E_0} [\{l_i^2 - \nu(1 - l_i^2)\} \sigma_x \\ & + \{m_i^2 - \nu(1 - m_i^2)\} \sigma_y \\ & + \{n_i^2 - \nu(1 - n_i^2)\} \sigma_z \\ & + 2(1 + \nu) l_i m_i \tau_{xy} \\ & + 2(1 + \nu) m_i n_i \tau_{yz} \\ & + 2(1 + \nu) n_i l_i \tau_{zx}] \end{aligned} \quad (4)$$

観測方程式は、

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\sigma^*\} \quad (5)$$

となる。ここに、 $\{\varepsilon\}$  はみかけひずみ、 $\{\sigma^*\}$  は6 応力成分で、 $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T$  である。

[B] は式(4)における各係数のマトリックスである。

初期地圧は式(5)より

$$\{\sigma^*\} = ([B]^T [B])^{-1} [B]^T \{\varepsilon\} \quad (6)$$

の形で与えられる。ここに、Tは転置行列を、 $-1$ は逆行列を示す。測定データは8個あるので、8連の方程式を最小自乗法を用いて解く。図-18および図-19に示したデータによる初期地圧の解析結果を図-22に示す。

#### 4・2 金川らによる解析法の検証実験

前項で述べたように、埋設法の解析においては、三軸感度試験から求められる各ゲージの感度係数を用いて、材料の異方性や不均質性をキャンセルしたみかけひずみを求め、これを用いて、岩盤を等方均質な弾性体とみなした場合に受けた応力に換算している。弾性体におきかえる段階で‘みなし’という概念が入るために、弾性論にしたがって本解析法を追跡することはできない。この

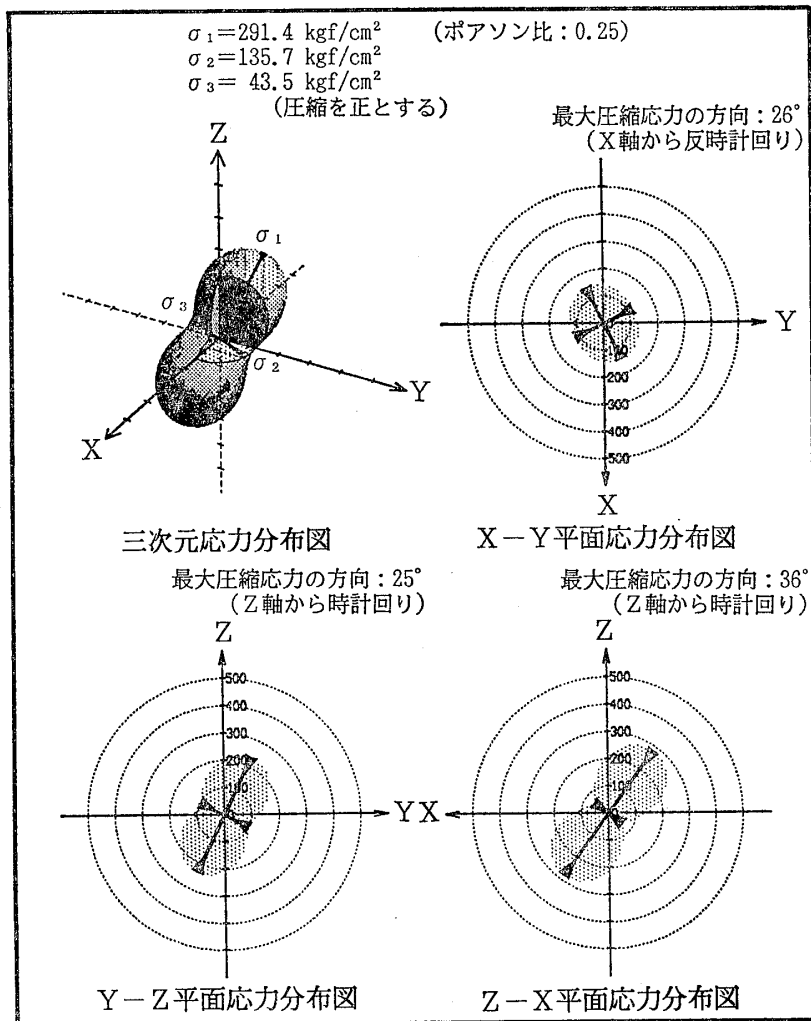


図-22 埋設法による初期地圧測定結果

Fig.22 Results from initial stress measurement by inclusion method

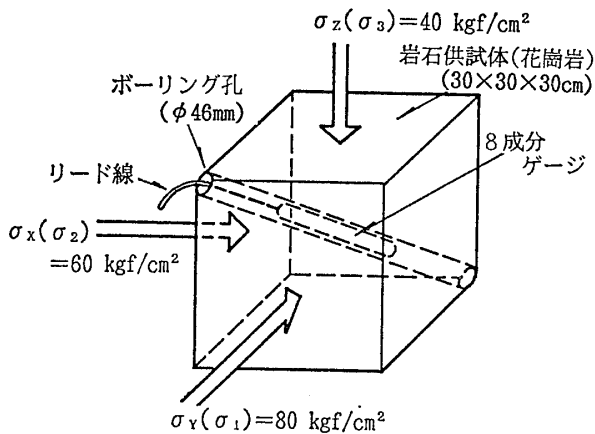


図-23 埋設法の室内実験概要図 (金川ら, 1986)  
Fig.23 Illustration of stress relief experiment in the laboratory (Kanagawa et al., 1986)

‘みなし’操作の妥当性について、金川ら(1986)は以下のような実験によって検討している。

図-23に示すように、30cm×30cm×30cmの大きさの岩石供試体のひとつの頂点から、供試体の中心を通る小孔をあけ、そこにひずみゲージを埋設する。この供試体に対して、三主応力試験機によって三方向からそれぞれ80kgf/cm<sup>2</sup>、60kgf/cm<sup>2</sup>および40kgf/cm<sup>2</sup>の荷重を加え、これらの三方向の荷重を一定の割合で除くときのひずみを測定する。つぎに、三方向から等圧の荷重を同時に加え、このときのひずみと応力の関係を求める。前者は応力解放過程に対応し、後者は三軸感度試験に対応する。これらのデータを埋設法の解析手順に従って解析すると、図-24(a)に示すような結果が得られており、当初与えた三方向の主応力が精度良く求められていることがわかる。

#### 4・3 埋設法による解析と孔径変化法による解析との比較

埋設法においては、ひずみゲージの剛性が小さく、中空という条件下でオーバーコリングされているものと考え、測定される解放ひずみは、孔径の変化量を示すことは、さきに述べた通りである。一方、孔径の変化に関しては、岡ら(1968)によって、孔径変化法(図-25参照)としての解析方法が示されている。

この方法を埋設法における解析方法と比べると、埋設法によって得られる解放ひずみをそのまま使用し、岩石の弾性係数とポアソン比を設定すれば、孔径変化法による解析が可能となる。

##### 4・3・1 金川らの実験結果を用いた比較

図-24(b)は、さきに述べた金川らの実験データ(図-23参照)を用いて、孔径変化法によって解析した結果で

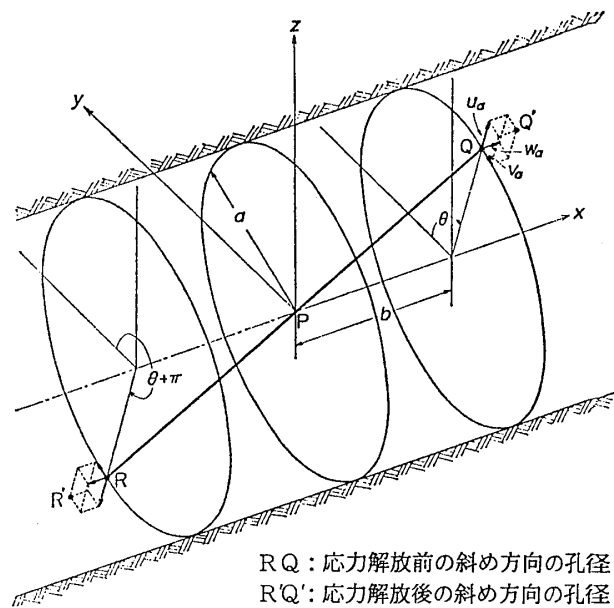


図-25 孔径変化法の概要図 (岡ら, 1968)

Fig.25 Illustration of borehole deformation method (Oka et al., 1968)

ある。解析の際に、弾性係数を変えながら計算を行い、最大主応力が実験に用いた80kgf/cm<sup>2</sup>となるように弾性係数を決定した。ポアソン比は、埋設法の場合と同じ0.25とした。なお、孔径ひずみとしては、計測された解放ひずみを等圧載荷試験によって補正したみかけひずみの値を使用した。

両解析法によって得られた主応力の大きさとその方向を比較して示すと、図-24のようになる。主応力の大きさについてみると、 $\sigma_1$ および $\sigma_2$ については、両者ともほとんど同じ値を示しており、 $\sigma_3$ については、孔径変化法の方がやや小さめではあるが、その差はそれほど大きくない。しかし、主応力の方向は、埋設法の解析においてはほぼ載荷方向に一致しているが、孔径変化法においては10°~14°程度ずれている。

図-26は金川らの実験における応力解析試験のデータであり、図-27は同実験の等圧載荷試験のデータである。これらの図をみると、ひずみゲージ④のデータは、他のゲージのものに比べて直線性に欠けている。これは、ゲージ端子付近の岩石に微小なクラックがあり、その挙動の影響が現れたものと考えられる。このようなデータが得られた場合、埋設法においては、三軸感度試験を行うことによって解放ひずみの値を補正することが可能であるが、孔径変化法においては、上記のような場合に補正を行うことができず、図-26のデータをそのまま用いて解析することになり、誤差が生じることになる。

##### 4・3・2 実測結果を用いた比較

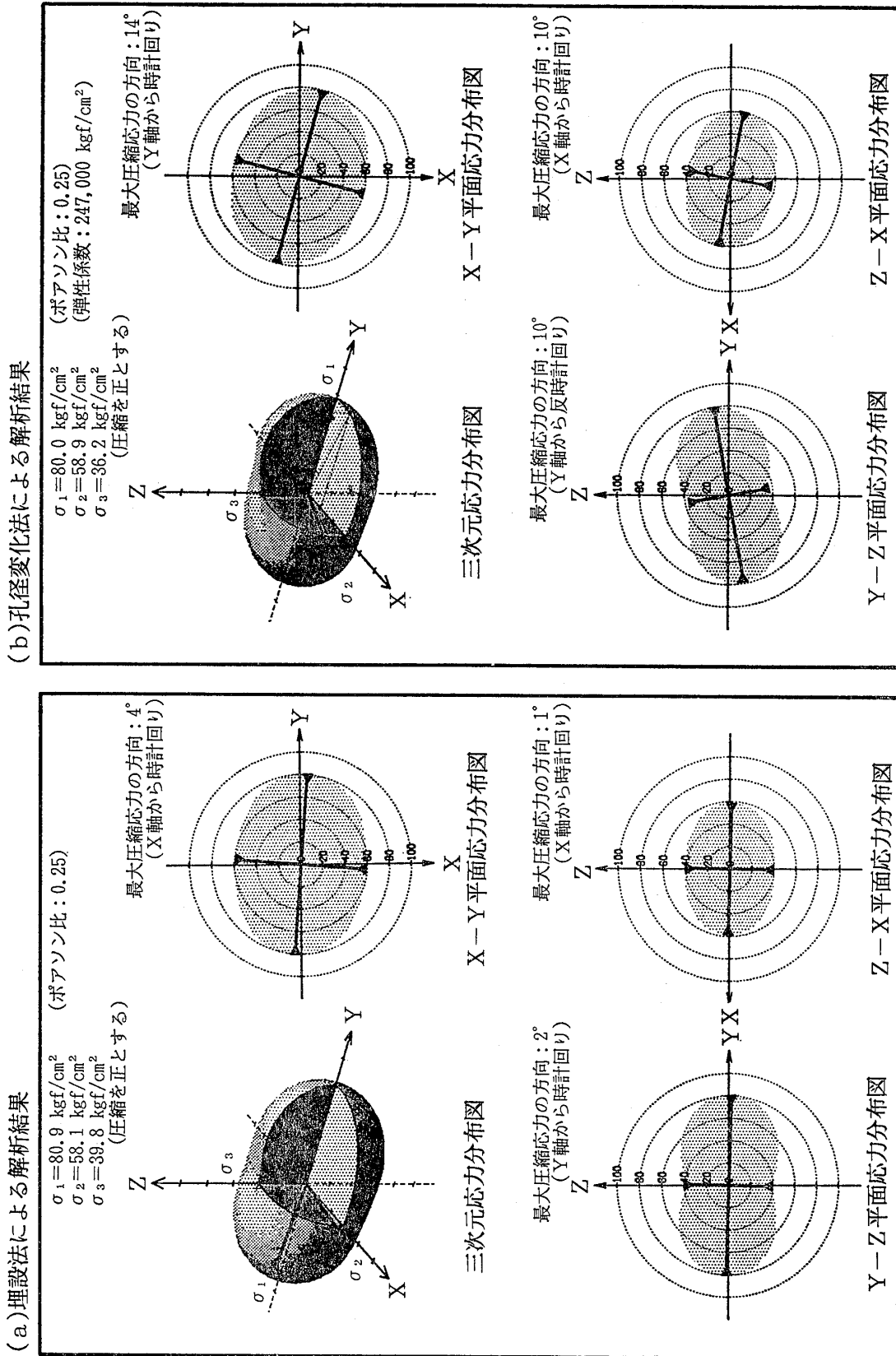


図-24 室内実験の埋設法および孔径変化法による解析結果  
 Fig. 24 Results from stress relief experiment by inclusion method and borehole deformation method

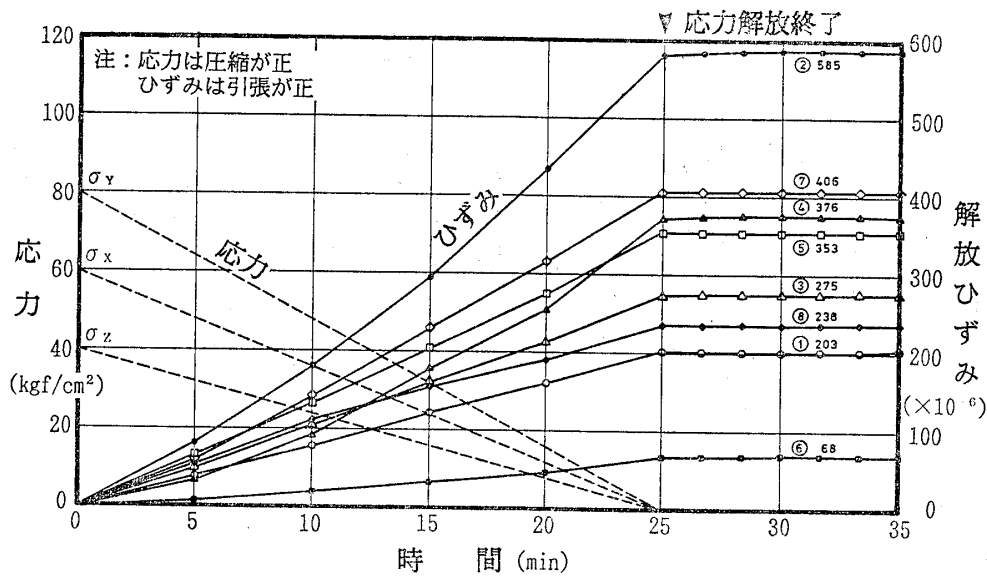


図-26 応力解放試験結果 (金川ら, 1986)

Fig.26 Result from laboratory stress relief experiment (Kanagawa et al., 1986)

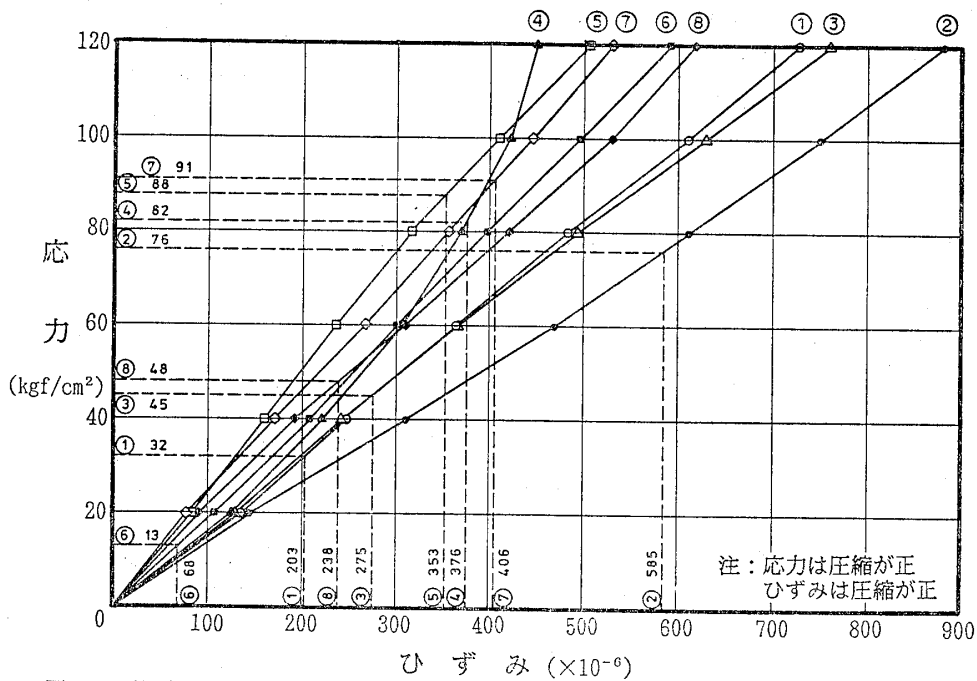


図-27 等圧載荷試験結果 (金川ら, 1986)

Fig.27 Result from laboratory tri-axial loading experiment (Kanagawa et al., 1986)

さきに示した図-18および図-19は、それぞれ、地下1000mの鉱山内で実施した埋設法によって得られた解放ひずみ曲線および三軸感度試験の結果である。このデータを用いて孔径変化法による解析を行った。ここに、弾性係数を岩石供試体の一軸圧縮試験の除荷時の応力～ひずみ関係から  $0.5 \times 10^8 \text{ kgf/cm}^2$  とし、ポアソン比は埋設法の解析の場合と同じ0.25とした。

解析結果は図-28に示す通りである。これを図-22に示す埋設法による解析結果と比較すると、主応力の方向

は3つともほとんど同じ値を示している。一方、主応力の大きさは、埋設法に対する孔径変化法の比で比較すると、 $\sigma_1$  が1.31倍、 $\sigma_2$  が1.36倍、 $\sigma_3$  が1.19倍となり、 $\sigma_1$  と  $\sigma_2$  はほとんど等しい値を示し、 $\sigma_3$  はやや小さめではあるが、かなりよく一致しているといえる。

孔径変化法によって求められる応力の大きさは、弾性係数に正比例の関係にあり、弾性係数の値をいくつに設定するかは非常に重要である。通常は一軸圧縮試験の応力～ひずみ関係から求めているが、岩石物性のばらつき

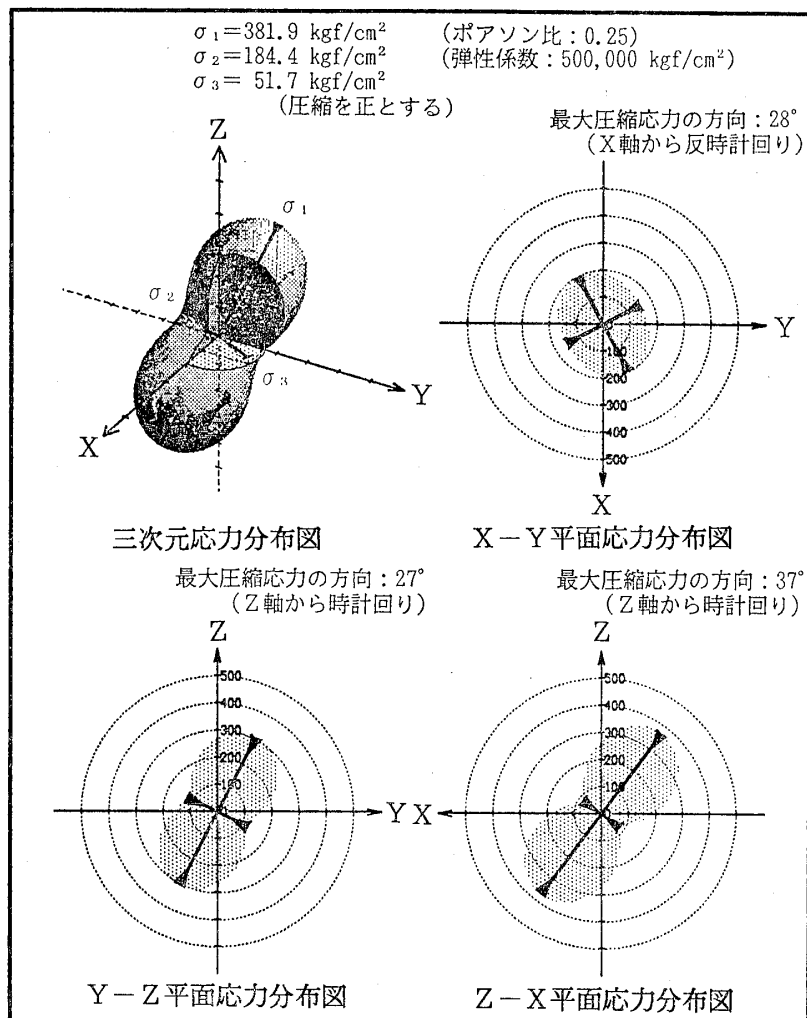


図-28 孔径変化法による初期地圧測定結果(図-18に示した解放ひずみの値を使用)  
 Fig.28 Results from initial stress measurement by borehole deformation  
 method (using the released strain values in fig.18)

を考えると、オーバーコアリングによる岩石コアを用いて、直接的に二軸試験あるいは三軸試験を行って弾性係数の値を設定することが望ましい。

この場合は、そこまでの検討は行っていないが、主応力の比がおおむね一致しているということで、埋設法と孔径変化法の両解析法の結果がよく整合したものと評価できる。

以上の例により、埋設法の解析過程にある‘みなし’操作は、別の弾性解をもった孔径変化法の解析結果と比較するとき、実用的で、かつ精度の良い結果をもたらすものであるということが出来る。

## 5 まとめ

筆者らがこれまでに実施してきた数多くの埋設法の測定データについて、まず解放ひずみ曲線のパターン分類

を行い、それぞれのパターンが発生する要因について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 応力解放後ひずみが一定値に収斂しているパターン(AパターンおよびBパターン)は、岩盤の弾性的な変形をほぼ正確に反映している。
2. 圧縮応力場であっても、ひずみの測定方向の主応力に対するそれに直交する方向の主応力との比が大きい場合には、解放ひずみが圧縮を示す場合がある。
3. 応力解放後もひずみが圧縮側に変化を続け、一定値に収斂しないパターンは、温度変化の影響によるものと考えられる。
4. 解放ひずみが安定しないパターンは、割れ目の存在による影響か、充填材の付着不良によるものであり、データとしては棄却すべきである。

埋設法においては、三軸感度試験による感度係数を導入することによって、材料の異方性や不均質性を補正し

て、等方均質な弾性体とみなして解析をおこなっている。この‘みなし’操作については、三主応力試験機を用いた室内実験および孔径変化法における解析法による解析結果から、その妥当性を検証した。その結果、埋設法は、上記の事項に留意することによって、精度良く地圧を求めることができ、十分実用的であることが確認できた。

## 6 あとがき

上記において、解放ひずみ曲線が、応力解放後もひずみが圧縮側に変化を続け、一定値に収斂しないCパターンの発生が、温度変化の影響によるものと考えたが、今後計測を続ける中で、温度以外の影響による場合がでてくるかも知れない。しかしながら、埋設法は開発されてから15年を経過し、これまでに、多くの技術者によって幾多の改良が加えられ、現在では信頼性の高い初期地圧測定法としてほぼ確立されていると考えている。この方

## 付記 地圧測定法の種類と特徴

筆者らは、本文で述べたような検討を行いながら、長年にわたって埋設法によって初期地圧の測定を実施してきたが、初期地圧の測定に関しては、多くの研究者によって、埋設法以外にも、種々な方法が提案されており、それぞれ特徴をもっている。参考までに、それらの方法の概要を述べる。

### 1. 応力補償法

応力補償法は、岩盤の表面に隙間を設け、その隙間に圧力を加えて隙間による影響を打ち消し、その時の圧力から岩盤応力を求めようとするものである。この方法の一般的なものは、フラットジャッキ法と呼ばれるもので、Mayer et al. (1951), Tincelin (1951) などによって開発され、その後、Rocha et al. (1969), Bernede (1974) などによって改良され実施されている。

また、Talobre(1957)は、ボーリング孔内で円筒型ジャッキを利用した応力補償法(シリンダージャッキ法)を試みている。

これらの方法では、地圧を求めるために岩盤の弾性係数を知る必要がなく、経済性、迅速性の面において優れている。しかし、ジャッキ面に作用している直応力しか測定できず、精度を期待することも無理である。応力補償法は、地圧測定法としては最も古く、歴史的にも重要な方法であるが、現在ではほとんど用いられていない。

### 2. 応力解放法

応力解放法は、地圧を受けている岩盤の一部分を周囲

法は、他の初期地圧測定法に比べて、精度的には有利であるとはいえず、経済性では必ずしも有利であるとはいえない。また適用深度についても、現在のところ数十mが限度であり、これらの事項は今後の課題として検討する必要がある。

## 参 考 文 献

- 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, pp. 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 研究報告: 385033
- 岡行俊, 平松良雄(1968): ひずみまたは変形測定値からの岩盤内応力の決定 日本鉱業会誌 Vol. 84, No. 957, pp. 7~14.

の岩盤から切り離したとき、地圧の解放によって岩盤に生じる変形から地圧を求める方法である。地圧を解放させる作業は、通常ボーリングを用い、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いうこともある。

応力解放法は古くから研究されており、初期地圧測定法としては、現在までに最も実績の多い手法である。この手法の大きな特徴は、弾性論を基礎として、岩石の応力~ひずみ関係から地圧を算定するところにある。観測方程式が明解で三次元の初期地圧を容易に求めることができることである。しかしながら、岩盤が割れ目や不均質性などによって非弾性的挙動を示すときには、正確な地圧を算定することができない。また、現在の測定技術による測定可能な深度は、通常50m以内である。

現在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って分類すると、

- (1) 壁面ひずみ法(岩盤表面での応力解放法)
- (2) 孔壁ひずみ法
- (3) 孔底ひずみ法
- (4) 孔径変化法
- (5) 埋設法

の5つの方法に分けられる。

なお、上記以外にも、ガラス応力法, castinclusion法, stiffinclusion法, アンダーコアリング法などが提案されているが、現在ではほとんど用いられていない。



### (1) 壁面ひずみ法

壁面ひずみ法は応力解放法の中では最も古くから行われているもので、Olsen(1957), Emery(1960), 平松ら(1963), Obert et al (1967) によって提案されている。

この方法は、岩盤の表面の応力を解放させることによって生じるひずみを測定し、岩盤表面の3個の独立な応力成分を決定するものである。応力解放は、カッターやボーリングを用いてスリットを作ることによってなされる。解放ひずみの測定には種々の変位計やひずみゲージが用いられるが、光弾性皮膜の利用も試みられている。

この方法の特徴は、特殊な測定器具を用いる必要がなく、横坑の壁面や岩盤斜面あるいはコンクリート構造物表面で容易に測定を行うことができることにある。しかし、岩盤の表面付近は、概してゆるみが生じていることが多いために、得られる測定値の信頼性が低いことや、岩盤全体の初期地圧の評価が困難なことが、この方法の短所として挙げられる。

### (2) 孔壁ひずみ法

孔壁ひずみ法は、Leeman (1968) によって提案され、岡ら (1968) によって孔壁のひずみと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、小口径ボーリング孔の孔壁の一断面内の3箇所にはロゼットゲージを貼付し、大口径ボーリングによって応力を解放したときの解放ひずみから、弾性論に基づき6個の独立な応力成分を決定するものである。

この方法は、ボーリング孔壁にひずみゲージを貼付することが難しいために、実施された例は少なかったが、最近、Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization of Australia によって開発されたCSIRO HI (Hollow Inclusion) Cell を用いた測定例が、Pine et al. (1983) によって報告されている。また、Amadei (1985, 1983) もCSIRO HI Cell による異方性岩盤の応力解析法を提案している。

この方法の特徴は、1つのボーリング孔によって三次元の初期地圧を決定することができること、ならびに理論解によって観測方程式が明確に示されていることである。わが国における適用例はまだ少ないが、今後は少しずつ測定例が増えていくものと思われる。

### (3) 孔底ひずみ法

孔底ひずみ法は、Mohr (1953) によって初めて提案され、その後、Olsen (1957), Slobod (1958), 岡ら (1968), Leeman (1969), Gray et al. (1969) によって改良が行われた。

この方法は、小口径ボーリングの孔底面を研磨し、底面上にロゼットゲージを貼付し、大口径ボーリングによ

って応力解放を行い、そのときの解放ひずみを測定し、弾性論に基づいて3個の独立な応力成分を決定するものである。

その後、Oka et al. (1979) は孔底に貼付した8素子ゲージを用いて、1つのボーリング孔のみで6個の独立な応力成分を決定できる方法を開発し、菅原ら (1985) 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面孔底ひずみ法を開発し、最近に至り、小林ら(1990) および坂口ら (1991) は、それぞれ、ゲージ貼付用の小口径ボーリング孔と同一口径でオーバーコアリングできる円錐孔底ひずみ法を提案している。

これらの孔底ひずみ法の特徴としては、短い大口径ボーリングの掘進で測定できること、孔壁ひずみ法と同様に、1つのボーリング孔によって三次元の初期地圧を決定できること、および数値解析解により観測方程式が得られていることが挙げられる。特に、球面孔底ひずみ法や円錐孔底ひずみ法では、孔底ひずみ法の弱点であったボーリング孔軸方向の応力成分も精度良く求めることができることから、今後はより実用的な方法として使用されるものと思われる。

### (4) 孔径変化法

孔径変化法は、多くの研究者によって研究されており、Leeman (1959, 1960) 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型を開発し、Obert et al. (1962) は、USBM (アメリカ鉱山局) 型を開発した。

この方法は、小口径ボーリング孔の直径をオーバーコアリング前後で測定し、その変化量から弾性論に基づいて3個の独立な応力成分を決定するものである。

直径変化を精度よく測定する方法としては、さまざまな方法が提案されており、CSIR-I型ではひずみゲージを貼ったリングを用い、CSIR-II型では作動トランスを用い、また、USBM型ではカンチレバーを使用している。このほかにも、Sibek(1960)はポテンショメータを、Suzuki (1969) はエアマイクロメータを、Niwa et al. (1969) は光弾性ゲージを用いたものを開発している。

この方法の特徴としては、応力解放前後におけるボーリング孔の直径を直接測定しており、理論的に明解なこと、および測定作業が比較的簡単であることが挙げられる。しかし、この方法では、原理的に1本のボーリング孔においては、孔軸に直交する二次元平面内での応力解析しかできない。したがって、三次元の初期地圧を決定するためには、少なくとも3本のボーリング孔が必要であることが次点として挙げられる。

### (5) 埋設法

埋設法は、金川ら(1975)によって開発された。測定方法については本文中に述べた通りである。測定に用いる多成分型のひずみゲージは、開発当初は二次元応力解析用の5成分型であったが、その後、金川ら(1986)は三次元応力解析が可能な8成分型に改良した。

この方法の特徴は、三軸感度試験によって、測定された解放ひずみの値を補正することにより、その精度の高さは室内実験によって実証されている(金川ら, 1986)。充填材の養生に5日程度を要するため、測定に費やす時間の面では不利であるが、ひずみゲージ設置に対して孔内水によって悪影響を及ぼすこともなく、安定した測定結果が得られる利点がある。

この方法は、わが国において、多くの実績をもっており(Kanagawa et al., 1986)、今後、初期地圧測定法としては、1つの標準的試験法になるものと思われる。

### 3. 岩盤の破碎を利用する方法

岩盤を引張り破壊させるためには、破壊面の法線方向に対し、初期応力と岩盤の引張り強度を加えたもの以上の応力を作用させればよい。この原理に基づいて、ボーリング孔内を水圧などで加圧し、孔壁を引張り破壊させて、初期応力を求める方法が考案されている。水圧破碎法はその代表的なものである。

水圧破碎法は、もともと、枯渇した油井を刺激して、石油を取り出す目的のため、1948年頃から始められた方法である。後に、Scheidegger(1962)は、この方法を利用して地圧を測定することの可能性を示唆した。その後、Kehle(1964)、Fairhurst(1964)、Haimson(1978)などの多くの研究者による研究開発が行われ、かつ実施されている。

この方法においては、ボーリング孔軸方向が一つの主応力方向であると仮定しているため、二次元平面での応力状態しか決定できない。また、孔壁の亀裂を観測しなければならないという難点がある。しかし、測定深度に関して、原理的には制限されないことは、これまでに述べてきた他の方法にくらべるとき、大きな利点であるといえる。

Serata et al.(1986)および菅原ら(1987)は、ウレタン製のチューブを介して油圧によってボーリング孔壁を加圧、破壊し、地圧を求める方法を提案している。また、De la Cruz(1978)はボアホールジャッキによって孔壁を破壊する同様な考え方を示している。

その他、コアディスクングやボアホールブレイクアウトなどの現象を利用して地圧を推定する方法もあるが、これらは、そのような現象が起こらなければ地圧は算定できず、一般的ではない。

### 4. 岩石の特性と応力との相関を利用する方法

これまでに述べたものは、いずれも原位置における測定法である。それに対し近年、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、いろいろと提案されている。室内試験は、原位置の測定に比べて比較的容易であり、供試体さえ採取できれば、適用深度に制限がない点は、大きな特徴である。

#### (1) AE法

AE法は、応力履歴のある材料を再載荷したとき、先行応力以下の応力では、AEの発生が少ないという現象であるカイザー効果を利用して初期地圧を推定する方法で、金川ら(1975, 1977)によって提案された。

この方法では、地山から採取した供試体に一軸圧縮応力を加え、AEの発生数が急増する応力を初期地圧とみなしている。いろいろな方向に供試体を切り出して試験することで、三次元応力を求めることができる。AE発生の急増点は、必ずしも明瞭ではなく、初期地圧の読み取りに個人差が入るのは避けられないが、最近では、つぎに述べる変形率変化法を併用することによって、精度の向上を計る試みがなされている。

#### (2) 変形率変化法

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(1983)によって提案された。この方法では、AE法と同様に、一軸圧縮応力を繰返し加え、各繰返し時の同じ応力レベルにおけるひずみの差を応力の関係でプロットし、その変曲点を初期地圧とするものである。

#### (3) DSA法

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的評価法として開発されたものである。その後、Strickland et al.(1980)によって応力測定に応用され、現在に至るまで、多くの研究者によって研究が進められている。この方法は、封圧下におかれた岩石供試体の応力～ひずみ関係の非線形性を利用するもので、変形率変化法と類似している。原理的には、1個の供試体から3次元応力を推定することができるが、基本仮定や解析理論について検討の余地があるとされている(松木, 1989)。

#### (4) 音弾性法

この方法は、新ら(1990)によって提案された方法で、岩石供試体の一軸圧縮載荷時の弾性波の伝播速度を計測し、軸応力の変化に伴う弾性波速度の変化率の変化から先行応力を見いだそうとするものである。この方法では、特に弾性波の速度変化を精度よく測定する必要があるため、パルス波ではなく、連続した正弦波を用いている。

付表 —— 初期地圧の測定方法

原理	名称	方法	文献
応力補償	フラットジャッキ法	・岩盤壁面にスリットを掘り、その中にジャッキを挿入して、スリット周辺の変位を元の値（ゼロ状態）にもどす圧力をジャッキに加える。	Mayer et al.(1951) Tincelin(1951) Rocha et al.(1969) Bernede(1974)
	シリンダージャッキ法	・大口径ボアホールの孔底に削孔した小口径のボアホールに円筒形のジャッキを挿入し、大口径ボアホールの孔底近くの変位を元にもどす圧力をジャッキに加える。	Talobre(1957)
応力解放	壁面ひずみ法	・岩盤表面をスリットの削孔あるいはコアリングによって応力を解放し、そのときの岩盤のひずみをエクステンソメータ、ロゼットゲージ、光弾性皮膜などを用いて測定する。	Olsen(1957) Emery(1960) 平松ら(1963) Obert et al.(1967)
	孔壁ひずみ法	・孔壁にひずみゲージを貼ったボーリング孔をオーバーコアリングし、そのときのひずみを測定する。	Leeman(1968) 平松ら(1968) Pine et al.(1983) Amadei(1985,1986)
	孔底ひずみ法	・孔底にロゼットゲージ、8素子ゲージ、半球形16素子ゲージ、円錐形12~16素子ゲージを貼ってオーバーコアリングし、そのときのひずみを測定する。	Mohr(1956) Olsen(1957) Slobodov(1958) 平松ら(1968) Gray et al.(1969) Leeman(1969) Oka et al.(1979) 菅原ら(1985) 小林ら(1990) 坂口ら(1991)
	孔径変化法	・中央のボーリング孔に径方向変位測定ゲージを設置してオーバーコアリングし、孔径変位を測定する。	Leeman(1959,1960) Sibek(1960) Obert et al.(1962) Suzuki(1969) Niwa et al.(1969)
	埋設法	・8成分ひずみ計を埋設しオーバーコアリングする。回収したコアの3軸感度試験により応力を測定する。	金川ら(1975,1986)
その他	その他	・ガラス応力法：偏光鏡の付属した“硬い”光弾性測定器のまわりをオーバーコアリングする。 ・castinclusion法：“硬い”測定器に応力を凍結し、オーバーコアリングする。凍結された応力は実験室で測定する。 ・stiffinclusion法：装備を施した“硬い”測定器のまわりをオーバーコアリングする。 ・アンダーコアリング法：岩盤表面に貼ったロゼットゲージ配列の中心部に孔をあける。 ・borehole deeping法ボーリング孔を掘削しながら、孔壁の変位を連続的に計測する。 ・ひずみゲージを内包した“軟らかい”測定器のまわりをオーバーコアリングする。 ・やわらかい光弾性測定器のまわりをオーバーコアリングする。 ・地中から取り出した岩石の表面のひずみの時間依存性を測定する。	Roberts et al.(1964)  Riley et al.(1977)  Hast(1958) Nichols et al.(1968) Hooker et al.(1974)  De la Cruz et al.(1970) Rocha(1974)  Riley et al.(1977)  Voight(1968)

付表 ——— 初期地圧の測定方法(つづき)

原 理	名 称	方 法	文 献
岩 盤 の 破 砕	水圧破碎法	・ボーリング孔内に水圧を加え、発生したき裂の方向と水圧の変化を測定する。	Scheidegger(1962) Kehle(1964) Fairhurst(1964) Haimson(1978)
	ダブルフラク チューブ法 スリーブフラク チューブ法	・ボーリング孔内にチューブを介して圧力を加え、岩盤の破壊に至る変形を測定する。	Serata(1986) 菅原ら(1987)
	ジャッキ破碎法	・ボアホールジャッキでボーリング孔を破碎して、そのときの岩盤の変形を測定する。	De la Cruz(1978)
	そ の 他	・コアディスクキング現象が起こるかどうかを観察する。	Obert et al.(1965) 菅原ら(1978)
岩応 石力 のと 特の 性相 と関	A E 法	・岩石の载荷に伴い発生するAEの測定(Kaiser効果の利用)	金川ら(1975,1977)
	変形率変化法	・岩石の繰返し载荷時のひずみを測定する。	山本ら(1983)
	DSA法	・立方体の岩石に独立6成分以上のひずみゲージを貼り、封圧の変化に伴う各成分のひずみを測定する。	Simmons et al.(1974) Siegfried et al. (1978) Strickland et al. (1980) 松木(1989)
	音弾性法	・岩石の载荷時の弾性波速度変化率の測定	新ら(1990)

## 地圧測定法に関する文献

- Amadei, B. (1985): Applicability of the theory of hollow inclusions for overcoring stress measurements in rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.18, pp.107~130.
- Amadei, B. (1986): Analysis of data obtained with the CSIRO Cell in anisotropic rock masses, CSIRO Technical Report, 141.
- Bernede, J. (1974): New developments in the flat jack test (in French), Proc. 3rd Cong. ISR M, Denver, Vol.2A, pp.433~438.
- De la Cruz, R.V. and Goodman, R.E. (1970): Theoretical basis of the borehole deepening method of absolute stress measurement, Proc. 11th Symp. on Rock Mechanics, AIME, pp. 353~376.
- De la Cruz, R. V. (1978): Modified borehole jack method for elastic property determination in rocks, *Rock Mechanics*, Vol.10, No.4, pp.

227~234.

- Emery, C. L. (1960): The strain in rocks in relation to mine openings, *The Mining Engineer*, Paper No.3834, pp.54~59.
- Fairhurst, C. (1964): Measurement of in situ rock stresses with particular reference to hydraulic fracturing, *Rock Mechanics and Engineering Geol.*, Vol.2.
- Gray, W. M. and Barron, K. (1969): Stress determination from strain relief measurements on the ends of boreholes, *Int. Sym. on the Determination of Stresses in Rock Masses*, Lisbon, No.5, pp.183~199.
- Haimson, B.C. (1978): The hydrofracturing stress measurement technique method and recent field results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.167~178.
- Hast, N. (1958): The Measurement of rock pressure in mines, *Sveriges Geol. Undersokning Arsbok*, Vol.52, No.3.

- 平松良雄, 岡行俊(1963): 応力解放法による岩盤内の応力測定に関する研究 日本鉱業会誌 79巻 906号 pp.1016~1022
- Hooker, V. E., Aggson, J. R., Bickel, D. L. and Duvall, W. (1974): Improvement in the three component borehole deformation gauge and overcoring technique, U.S.B.M. Rep. Inv. 7894; with Appendix by Duvall on the undercoring method.
- 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 pp.46~49.
- 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号, pp.63~75.
- 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 No.385033.
- Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y. (1986): In situ stress measurements in the Japanese Islands: overcoring results from a multi-element gauge used at 23 sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, pp.29~39.
- Kehle, R. O. (1964): The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing, J. Geophys. Res., Vol. 69, No.2, pp.259~274.
- 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 pp.279~284.
- Leeman, E. R. (1959): The measurement of changes in rock stress due to mining, Mine Quarry Eng., Vol.25, No.7, pp.300~304.
- Leeman, E. R. (1960): Measurement of stress in abutments at depth, Int. Strata Control Conf., Paris, Paper D. 5, pp.295~311.
- 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, pp.337~353.
- Leeman, E. R. (1969): The CSIR "Doorstopper" and triaxial rock stress measuring instruments, Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lisbon, No. 28, pp. 578~616.
- 松木浩二(1989): DSA による地殻応力計測 資源・素材学会 地殻応力計測ワークショップ資料集 pp.92~104.
- Mayer, A., Habib, P. and Marchand, R. (1951): Underground rock pressure testing, Int. Conf. Rock Pressure Support at the Working Face, Liege, pp.217~221.
- Mohr, H. F. (1956): Measurement of rock pressure, Mine and Quarry Eng., pp.178~189.
- Nichols, Jr. T. C., Abel, Jr. J. F. and Lee, F. T. (1968): A solid inclusion borehole probe to determine three dimensional stress changes at a point of a rock mass, U.S.G.S. Bulletin 1258C, pp.C1~C28.
- Niwa, Y., Kobayashi, S and Hirashima, K. (1969): Some consideration for measurements of stress in rock masses by the use of a photoelastic gage, Memo. Fac. of Eng., Kyoto Univ., Vol.31, pp.217~230.
- Obert, L., Merrill, R.H. and Morgan, T. A. (1962): Borehole deformation gauge for determining the stress in mine rock, U.S. Bureau of Mines, R. I. 5978.
- Obert, L. and Stephenson, D.E. (1965): Stress conditions under which core discing occurs, Trans. Soc. Min. Eng., Vol.232, pp.227~234.
- Obert, L. and Duvall, W. I. (1967): Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, pp.409~459.
- 岡行俊, 平松良雄(1968): ひずみまたは変形測定値からの岩盤内応力の決定 日本鉱業会誌 84巻 957号 pp.7~14.
- 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, pp.68~70.
- Olsen, O. J. (1957): Measurements of residual stress by the strain relief method, Qtly. Colorado School of Mines, Vol.52, pp.183~204.

- 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, pp. 51~62.
- Riley, P. B., Goodman, R. E. and Nolting, R. M. (1977): Stress measurement by overcoring cast photoelastic inclusions, Proc. 18th Symp. on Rock Mech., Paper 4C4.
- Roberts, A., Hawkes, I., Williams, F. T. and Dhir, R. K. (1964): A laboratory study of the photoelastic stressmeter, Int. J. Rock Mech. Sci., Vol. 1, pp. 441~457.
- Rocha, M., Lopes, J. B. and Silva, J. N. (1969): A new technique for applying the method of the flat jack in the determination of stresses inside rock masses, Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lisbon, No. 19, pp. 431~450.
- Rocha, M., Silverio, A., Pedro, J. and Delgado, J. (1974): A new development of the LNEC stress tensor gauge, Proc. 3rd Cong. ISRM, Denver, Vol. 2A, pp. 464~467.
- 坂口清敏, 広川隆男, 尾原祐三, 菅原勝彦(1991): 円錐孔底ひずみ法による岩盤応力測定(その1)——理論測定精度の分析——資源・素材学会 平成元年度春季大会 研究・業績発表講演会講演要旨集 pp. 13~14.
- Scheidegger, A. E. (1962): Stress in the earth crust as determined from hydraulic fracturing data, Geologie und Bauwesen, Vol. 27.
- Serata, S. and Kikuchi, S. (1986): A diametral deformation method for in-situ stress and rock property measurement, Int. J. Mining and Geological Eng., Vol. 4, pp. 15~38.
- 新孝一, 金川忠(1990): 地圧測定のためのカイザー効果に関する検討——A E 法, D R 法および音弾性法を用いて——第22回岩盤力学シンポジウム pp. 431~435.
- Sibek, V. (1960): Contribution to Paper D. 5, Int. Strata Control Conf., Paris, pp. 311~312.
- Siegfried, R. W. and Simmons, G. (1978): Characterization of oriented cracks with differential strain analysis, J. Geophys. Res. 83 (83), pp. 1269~1278.
- 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 (29), pp. 4383~4385.
- Slobodov, M. A. (1958): Test application of the load-relief method for investigation of stresses in deep rock, Ugal, Vol. 7, pp. 30~35.
- Strickland, F. G. and Ren, N. K. (1980): Use of differential strain curve analysis in predicting in-situ stress state for deep wells, Proc. 21st U. S. Symp. on Rock Mech., Rolla, Missouri.
- 菅原勝彦, 亀岡美友, 斉藤敏明, 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, pp. 797~803.
- 菅原勝彦, 尾原祐三, 岡村宏, 王遺南(1985): 球面孔底ひずみ測定による3次元岩盤応力の決定 日本鉱業会誌 101巻 1167号, pp. 277~282.
- 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 pp. 181~186.
- Suzuki, K. (1969): Theory and practice of rock-stress measurement by borehole deformation method, Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lisbon, No. 4, pp. 173~182.
- Talobre, J. (1957): 岩盤力学 進藤一夫訳 森北出版 pp. 49~68.
- Tincelin, E. (1951): Research on rock pressure in the iron-mine of Lorraine (France), Int. Conf. Rock Pressure Support at the Working Face, Liege, pp. 158~175.
- Voight, B. (1968): Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a bore-hole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill holes, Rock Mech. and Eng. Geol., Vol. 6, pp. 201~215.
- 山本清彦, 桑原保人, 平澤朋郎(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 No. 1, pp. 245.