

埋設法地圧測定の異常な解放ひずみ曲線 の分類とその原因

横山幸也¹・石田毅²・金川忠³・田中達吉¹・水田義明⁴

¹ 正会員 応用地質株式会社 コアラボ (〒330-0038 大宮市宮原町1-66-2)

² 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2557)

³ 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1166 我孫子市我孫子1646)

⁴ 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2557)

筆者らは応力解放法の1種である埋設法により数多くの現場で地圧測定を行ってきているが、オーバーコアリング時に得られる解放ひずみ曲線に異常と思われる傾向がしばしば認められる。この異常値の原因究明は、埋設法に限らず応力解放法による他の地圧測定法においても測定精度と信頼性の向上に有用と思われる。そこで、過去筆者らが実施した267例の解放ひずみ曲線を4種類のパターンに分類し、その特徴の原因を各パターン毎に検討した。その結果、異常値として棄却すべきデータは4パターンのうち2パターンであり、そのひとつはひずみ計周辺のコアの割れ目や充填材がボーリング孔の孔壁に十分付着していないことにより生じること、他のひとつはオーバーコアリング時の冷却水によるコアの温度変化によることがわかった。現在では、これらの異常値が生じる原因は除去されている。

Key Words : stress measurement, stress relief curves, over-coring, hollow inclusion gauge, rock mass

1. はじめに

初期地圧、地山応力、あるいは1次地圧とよばれる空洞掘削前の地山の応力状態や2次地圧とよばれる空洞掘削後の岩盤の応力状態を把握することは、空洞の設計や空洞の安定性を評価するうえで重要である。たとえば初期地圧の測定結果は、地下空洞の応力変形解析を行う場合、最も重要な入力条件のひとつであり、また2次地圧を正確に測定すれば周辺岩盤の応力集中の程度を直接把握することができる。

初期地圧や2次地圧の測定については古くから多くの研究がなされている^{1), 2), 3), 4)}。地圧測定法の分類は文献により異なるが、測定原理に基づいて、応力解放法、応力補償法、岩盤の破碎を利用する方法、岩石の特性と応力の相関を利用する方法の4種類に分類されることが多い。これらのうち、応力解放法は測定原理が明解であり測定実績も多い。筆者らは埋設法、すなわち、埋設型ひずみ計を用いた応力解放法^{5), 6), 7), 8), 9)}により、多くの地点で測定を行ってきており、これらの測定結果は地下発電所空洞をはじめとする多くの地下空洞の設計や空洞の安定性評価に利用されてきている。また最近では、この

ひずみ計を用いて空洞掘削に伴う岩盤内のひずみ変化をボーリング孔の孔内で測定し、初期地圧から2次地圧への変化過程を測定することにより岩盤挙動を評価する試みもなされている^{10), 11)}。

これらの初期地圧、2次地圧および初期地圧から2次地圧への変化過程の測定に際して、異常なひずみ量やひずみ変化が測定されることもまれではなく、その原因を明らかにすることは測定精度と信頼性の向上をはかるうえで重要である。しかし、これら異常値の原因究明は容易でないため、必ずしも十分な研究が行われていない。

そこで本研究では、理論解析結果との対比が可能な解放ひずみ曲線に着目し、その異常値の分類と原因究明を行った。解放ひずみ曲線とは、応力解放法のオーバーコアリングの掘進深度を横軸に、解放ひずみの大きさを縦軸にとって、測定値をプロットした曲線であり、ここでは筆者らの行った埋設法による測定データを対象とした。

この検討の結果、異常値をもたらす原因とそれによって生じる異常値の傾向がある程度明らかにすることができたので報告する。

なお以下では、初期地圧測定と2次地圧測定の両者を総称して単に地圧測定とよぶことにする。

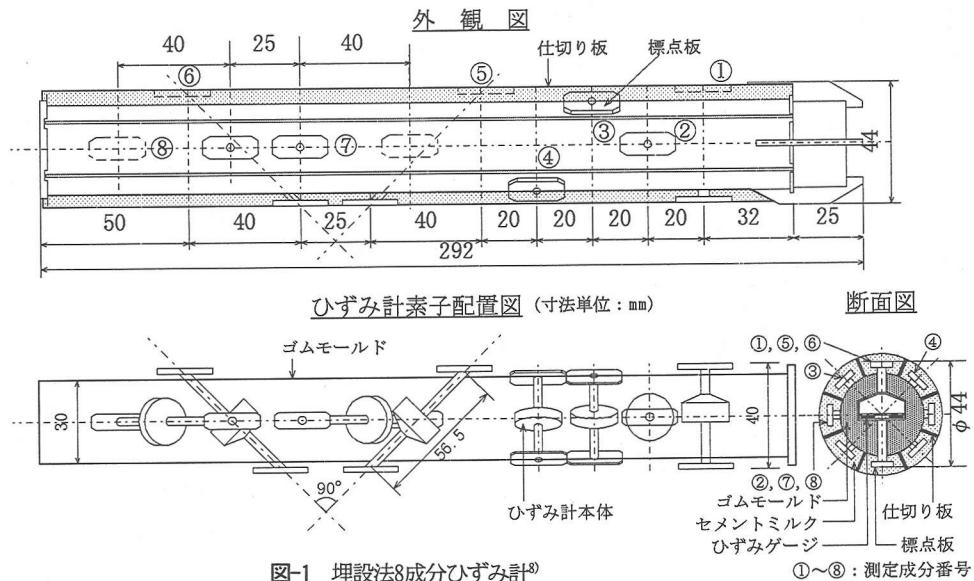


図-1 埋設法8成分ひずみ計³⁾

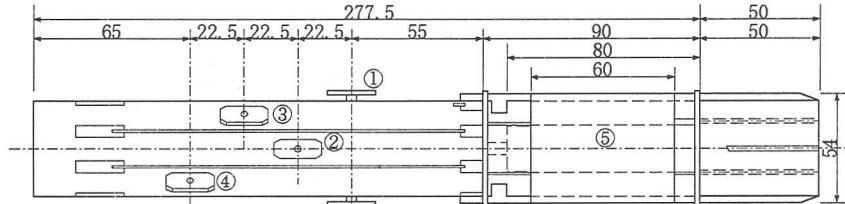


図-2 埋設法5成分ひずみ計

2. 埋設法による地圧測定の手順と解放ひずみ曲線の理論解

(1) 埋設法で使用するひずみ計と地圧測定の手順

埋設法では図-1および写真-1に示す8成分ひずみ計をボーリング孔内にセメントミルクを用いて埋設して設置する^{7), 8)}。この種の孔内埋設型のひずみ計は、周辺岩盤の剛性に対して無視できない大きさの剛性を有する、いわゆる「硬いひずみ計」と、剛性が小さく無視できる、いわゆる「軟らかいひずみ計」の2種類に分類される。この8成分ひずみ計は、hollow inclusion gaugeとよばれる、剛性を無視できる「軟らかいひずみ計」である。また、このひずみ計は、孔径方向4成分、斜め方向4成分からなり、各成分毎に2つずつの標点を有し、この標点間の平均ひずみを測定する。セメントミルクはひずみ計のゴムモールドとボーリング孔の孔壁との間に充填され、標点を岩盤といっしょに変位させる接着剤の役割を担っている。しかし、このセメントミルクがひずみ計と孔壁の間でリング状（3次元的には円筒状）に固化すると、リングと

して一定の剛性を有し、ひずみ計の挙動を阻害するおそれがある。そこで、図中に示す仕切板をゴムモールドの外側につけてセメントミルクを分断し、リングが形成されないよう工夫している。

この8成分ひずみ計が開発される以前は、孔径方向4成分、孔軸方向1成分の5成分ひずみ計（図-2）が用いられていた^{5), 6)}。この5成分ひずみ計を使用して応力テンソルの独立な6成分を決定するためには、互いに異なる少なくとも2方向以上のボーリング孔で解放ひずみを測定する必要があった。図-1の8成分ひずみ計は、1本のボーリング孔で応力の6成分を決定できるよう、従来の5成分ひずみ計の孔軸方向1成分を斜め方向4成分に改良したものである。本論文では、測定データの蓄積の多いこの従来の5成分ひずみ計で測定した解放ひずみも検討の対象としており、後に述べる孔軸方向成分のことである。なお、主な検討の対象は5成分ひずみ計と8成分ひずみ計に共通する孔径方向4成分の測定結果であり、この点で検討結果は両者に区別なく適用可能である。

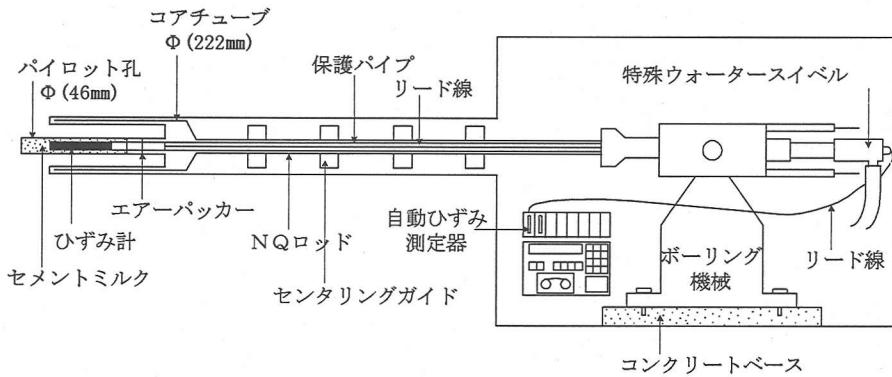


図-3 埋設法による解放ひずみの測定

埋設法による地圧測定の手順は、従来の論文^{5, 6, 7, 8, 9}で詳しく説明されているが、簡単に説明すると、つぎの通りである。

- 地圧を測定する点まで、大口径のカットボーリング（Ø222mm）を行う。
- その孔底からパイロット孔（Ø46mm）を60～80cm削孔する。
- パイロット孔中に8成分または5成分のひずみ計を挿入し、セメントミルクを充填する。
- セメントミルクが固化するまで約1週間の養生を行う。
- 大口径ボーリング孔の先端から、パイロット孔と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、埋設されたひずみ計を含む岩盤が、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-3）。
- ひずみ計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測定成分の感度を較正するための三軸感度試験を行なう（図-4）。
- 各測定成分の解放ひずみと感度係数から、地圧の応力6成分を求める。

(2) 解放ひずみ曲線の理論解

図-5は、金川らが軸対称モデルを用いて有限要素法により求めた、解放ひずみ曲線の弾性解⁸である。地圧条件は9.8MPaの静水圧の応力場とし、ヤング率は岩盤部、充填材のセメントペースト部、ひずみ計のゴムモールド部をそれぞれ9.8GPa、4.9GPa、1.0GPa、ボアソン比はそれぞれ0.25、0.25、0.35としている。オーバーコアリングのモデル化は、掘進による切り欠きの部分の要素を順次削除していく、生じた自由境界面に掘削相当外力を作用させることにより行った。縦軸は測定ひずみに対応し、それぞれのひずみ計の長さの平均ひずみを測定用ボーリング孔がない場合のひずみで除して正規化している。横軸はオーバーコアリングの掘進（1-1')に対応し、1

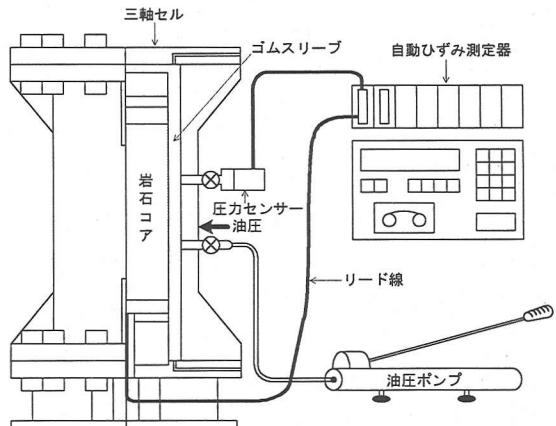


図-4 三軸感度試験の概要図

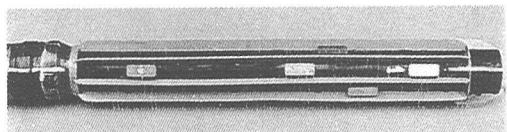


写真-1 埋設法8成分ひずみ計の外観写真

は掘進長、1'はひずみ計の位置を示す。実際の測定値と比較して考えれば、セメントペーストやゴムモールドの物性値は測定毎に変化せず一定であるから、解放ひずみの大きさは地圧の大きさと岩盤のヤング率の大きさにだけに依存する。この意味で、図-5の解放ひずみ曲線は、静水圧下での一般的な解放ひずみ曲線を表わしている。

この図より、オーバーコアリングの掘進とともになうひずみの変化は、ひずみ計成分の方向毎に特徴を有することがわかる。孔径方向についてみると、掘進がひずみ計位置に近づくと一旦ひずみが圧縮側に変化し、ひずみ計位置近傍で大きく引張り側に増加した後に若干減少して一定となる。孔軸方向は、掘進がひずみ計位置に近づく

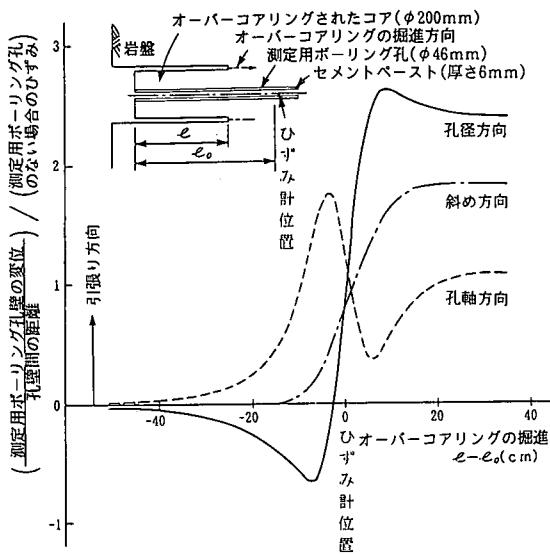


図-5 オーバーコアリングに伴う各方向の測定成分のひずみ変化(軸対称モデルによるFEM解析結果)^⑥

と徐々に引張り側に増加し、ひずみ計位置近傍で減少した後再び増加して一定となる。斜め方向は、ひずみ計位置近傍で引張り側に増加を始め、ひずみ計位置通過後に一定となる。いずれの場合も、オーバーコアリングの掘進深度がひずみ計の位置を通過し、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。

また、この解放ひずみの値を比較すると、静水圧状態の地圧を解放したにもかかわらず、孔軸方向が最も小さく、斜め方向、孔径方向の順に大きくなっている。しかも、孔軸方向のひずみは、測定用ボーリング孔がない場合の岩石のひずみ値に近い。このことは、孔軸方向のひずみが測定用ボーリング孔の応力集中の影響をほとんど受けないのに対し、孔径方向のひずみはその影響を強く受けていることを示している。このように、測定用ボーリング孔内に埋設された各ゲージは、測定用ボーリング孔の応力集中の影響を受け、同じ外圧に対しても方向によってひずみ量が大きく異なる、すなわち、ひずみ感度係数が大きく異なることがわかる。

3. 実測された解放ひずみ曲線の分類と偏圧の影響の検討

(1) 解放ひずみ曲線のパターン分類

筆者らがこれまでに実施してきた埋設法による測定では、上記のような典型的な解放ひずみ曲線以外に、さまざまな形状の曲線が得られている。埋設法に限らず応力解放法による他の地圧測定法においても、どの値を解放

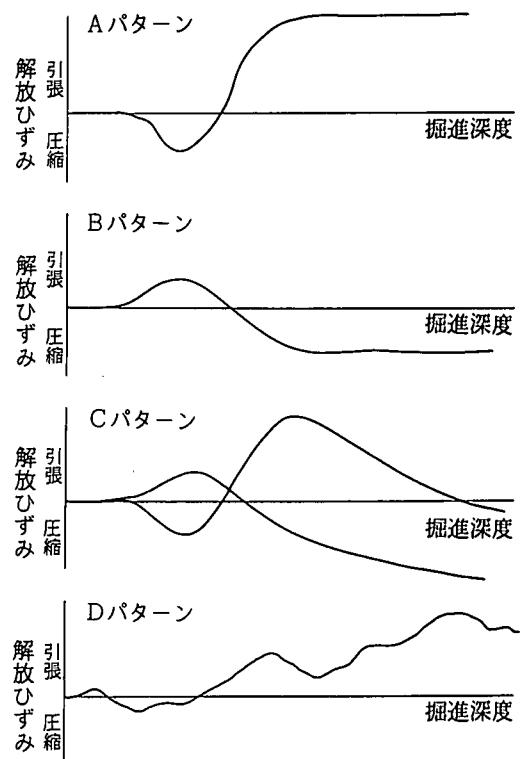


図-6 解放ひずみ曲線(孔径方向)のパターン

ひずみの大きさとして読み取るか、また測定値が信頼できないとして棄却する際に、図-5に示したような理論的な解放ひずみ曲線の形状との類似性を判断基準に用いることが多い。しかし、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い、この点に研究の余地が残されている。

これまでに筆者らが実施した埋設法による測定で得られた267例の解放ひずみ曲線を4種類のパターンに分類すると、つぎのようになる(図-6)。

Aパターン：一旦圧縮側に変化し、その後大きく引張り側に転じて安定するもの[174例(65%)]

Bパターン：一旦引張り側に変化し、その後圧縮側に転じて安定するもの[60例(22%)]

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[22例(8%)]

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[11例(4%)]

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。

a) 岩盤の非静水圧（偏圧）的な応力状態

b) ひずみ計の埋設が不完全な状態

c) その他の要因

このうち、b), c)は本研究の対象とする異常値の原因であるが、a)の偏圧によりAパターンからずれる解放ひずみ曲線は異常値ではない。そこで、まずこの影響を、次に示すような数値解析により検討した。

(2) 岩盤の非静水圧（偏圧）的な応力状態による影響

岩盤の応力状態が静水圧的な圧縮応力場のときには、すでに図-5に示したように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いときには、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、ポアソン比に対応した弾性変形により解放ひずみが圧縮ひずみになる場合がある。このような偏圧による解放ひずみ曲線の形状の変化を、孔径方向のみについて有限要素法による弾性解析で検討した。

解析には図-7に示す軸対称モデルを用い、岩盤とひずみ計埋設部のヤング率をそれぞれ9.8GPaと2.0GPa、ポアソン比はいずれも0.3とした。図-5の数値解析に用いた金川ら⁸⁾のモデルでは、充填材のセメント・ペースト部とゴムモールド部を区別し、異なるヤング率を与えてモデル化しているが、ここでは区別せず、両者の中間的な单一のヤング率を有するひずみ計埋設部としてモデル化している。岩盤のヤング率は金川らのモデルと同じであり、解放ひずみ曲線の形状の特徴を検討するうえで、この程度の差異は問題ないと思われる。オーバーコアリングの掘進は、図-5と同様のモデル化をしており、図-8に示した(1-1₀)も図-5と同じ関係を示す。ただし、ここでのひずみ計埋設位置1₀は、図-5での値より短い20cmとした。図-5での結果から、この値が小さすぎると応力解放に伴う初期のひずみ変化を正確にトレースできなくなる。しかし、ひずみ計埋設位置1₀がここで設定した20cmであれば、最終的なひずみ変化の絶対値がやや小さくなるものの、ここで着目しているひずみの挙動にはほとんど影響しないものと考えられる。

解析における地圧条件としては、孔径方向応力 σ_r と孔軸方向応力 σ_z との比 σ_r/σ_z をパラメータとして用い、 σ_r/σ_z が0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0の場合について解析を行った。いうまでもなく、 $\sigma_r/\sigma_z=1$ が図-5に示した金川らの解析結果⁸⁾の地圧条件に対応する。解析結果を図-8に示す。このときの解放ひずみは、 $\sigma_r/\sigma_z=1.0$ のときを10として正規化して示した。

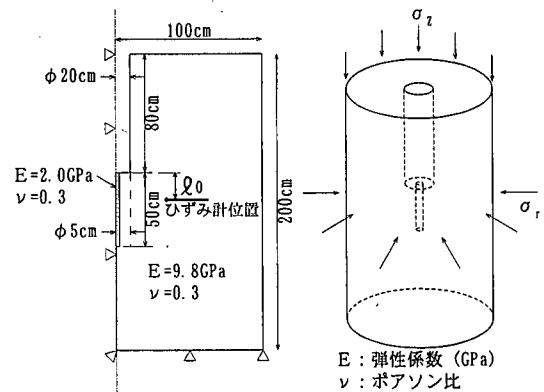


図-7 軸対称FEM解析モデル

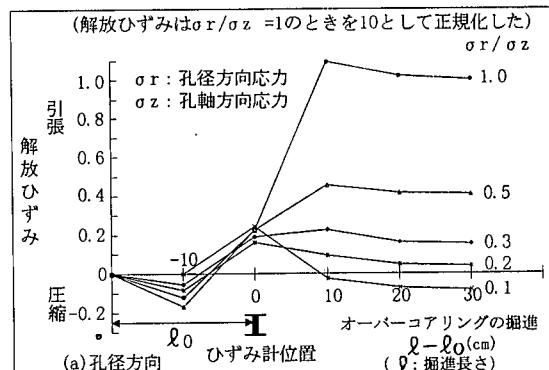


図-8 軸対称FEM解析結果（孔径方向の解放ひずみ）

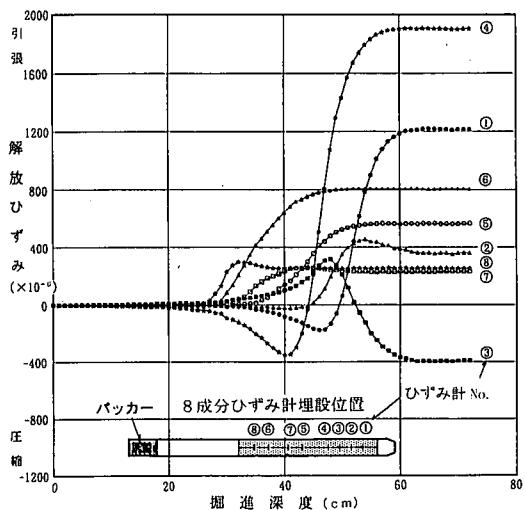


図-9 偏圧的な応力状態下における解放ひずみの測定例

図-8の解放ひずみは、パラメータ σ_r/σ_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、一度引張り側に変化した後、圧縮側に転じるBパターンとなっている。このように、全体が圧縮

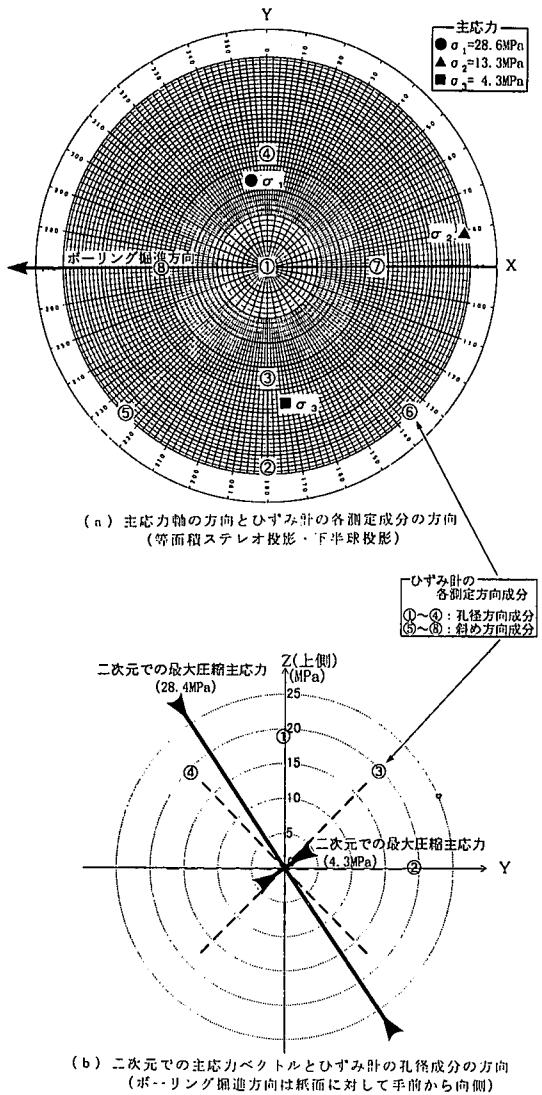


図-10 偏圧的な応力状態の主応力の方向と8成分ひずみ計の各測定成分の方向との関係

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よそ10倍の大きさになると、ポアソン比に対応した弾性変形により解放ひずみが圧縮ひずみになることがわかる。

以上のことから、偏圧を受けている岩盤中の測定では、図-6のBパターンを示す解放ひずみ曲線や圧縮ひずみの解放ひずみ量は、棄却すべき異常値ではなく、採用すべき正しい測定値であることがわかる。

図-9に、典型的なBパターンの解放ひずみ曲線のみられる測定例を示す。Bパターンがみられる解放ひずみ曲線は、図-9の③で示されたデータである。この測定例は、図-1で示した8成分ひずみ計を用いたもので、孔径方向の解放ひずみ曲線が①～④、孔軸に45°方向（斜め方向）

の解放ひずみ曲線が⑤～⑧で表現されている。

孔径方向①、②、④では、掘進深度がひずみ計の埋設位置の手前で一旦圧縮側に変化し、その後引張り側に転じた後に一定値となっている。斜め方向⑤～⑧では、掘進深度がひずみ計の埋設位置の手前から一方的に引張り側に変化し、その後一定値となっている。これらの解放ひずみの挙動は、図-5で示したFEM解析結果と同様の傾向を示している。孔径方向③では、掘進深度がひずみ計の埋設位置付近で一旦引張り側のピークがみられ、その後圧縮側に変化した後に一定値となっている。この解放ひずみの挙動は、図-8で示した解放ひずみ曲線のうち $\sigma_1/\sigma_3=0.1$ の場合、すなわち孔軸方向に比べ孔径方向の地圧成分が極端に小さいときにみられる現象である。

この測定により得られた初期地圧は、ボーリング孔を基準とした座標系で示すと、図-10に示す応力状態となる。この地点で得られた応力状態は極めて偏圧的で、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の比が $\sigma_1/\sigma_3=28.6 \text{ MPa}/4.3 \text{ MPa}=6.7$ となっている。また、測定に用いた8成分ひずみ計の孔径方向成分のうち、その解放ひずみ曲線がBパターンを示す③の方向が最小主応力方向とほぼ一致している。この測定例からもBパターンを示す解放ひずみ曲線は極端な偏圧下における測定値と判断される。

4. 異常な解放ひずみ曲線とその原因

ここまで検討で、AパターンとBパターンは岩盤内の応力状態を反映した正常な解放ひずみ曲線であることがわかった。そこで次に、CパターンやDパターンについて検討し、これらがひずみ計の埋設状態や測定環境を原因とする棄却すべき異常値であることを明らかにする。まず異常な解放ひずみ曲線が得られた3つの例について、順に詳しく述べることにする。

(1) 割れ目のある礫岩でみられる異常値

筆者らの埋設法における経験では、礫岩や凝灰角礫岩など礫を含む不均質な岩盤においても、礫の大きさがパイロット孔の直径（Φ46mm）より小さい場合には、均質等方な岩盤を仮定して理論的に求めた図-5や図-8のような解放ひずみ曲線が得られる場合が多い。しかし、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、理論的に予想されている曲線とは大きく傾向の異なる解放ひずみ曲線が得られることがしばしば経験される。

図-11は、中生代の礫岩の地点において得られた孔径方向成分の解放ひずみ曲線である。この地点の礫岩の礫径はパイロット孔の直径よりも大きく、上述のような異常値を生じやすい不均質な岩盤に該当するものである。この例では、オーバーコアリングによって回収されたコア

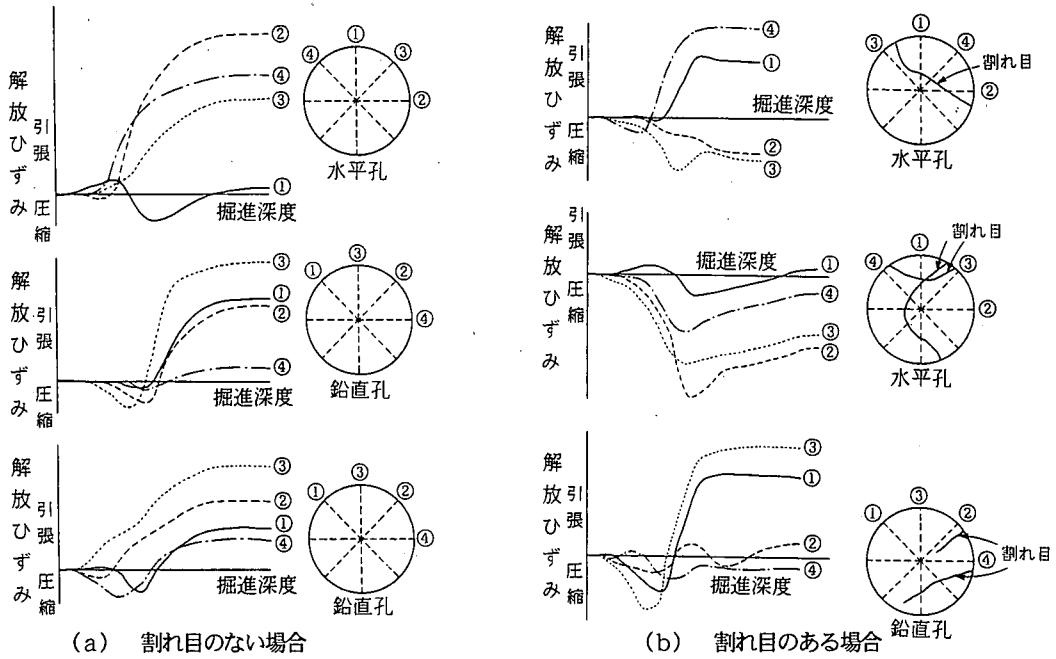


図-11 割れ目の影響を受けた解放ひずみ曲線の例（中生代礫岩）

に、分離面が生じていないときには、図-11(a)に示すように、すべてAパターンの解放ひずみ曲線が得られた。一方、回収されたコアに、肉眼で判別できる程度の割れ目（礫とマトリックスの分離面も含む）が見られるときには、図-11(b)の上段の②と③、中段の②、③および④、下段の②と④のように、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た。このような割れ目は、応力解放の際に、礫とマトリックスの剛性の差によって生じたのではないかと思われる。図-11(b)のAパターン以外の不安定な形の解放ひずみ曲線は、このような割れ目を原因として生じることがあり、その場合には異常値として棄却する必要がある。

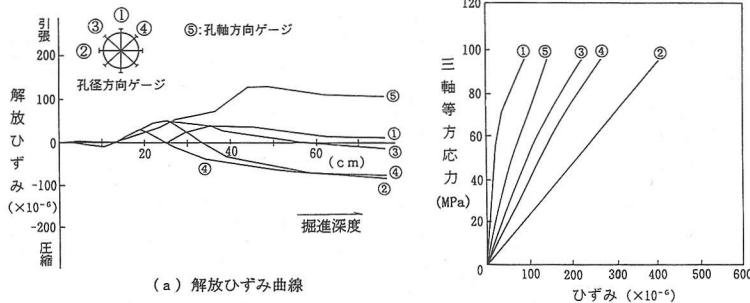
(2) ひずみ計の埋設不良による異常値

埋設法では、すでに述べたように、地圧測定用の8成分または5成分のひずみ計をセメントミルクで埋設する。埋設の際には、セメントミルクにアルミ粉を添加しセメントミルクの固化時の収縮を防ぐとともに、セメントミルクがひずみ計とボーリング孔の孔壁の間に密に充填されるよう十分な流動性を有するように注意して配合している。また充填材はセメントを用いているため、ある程度の剛性を有している。この充填材が固化した後は、剛なリングなどを形成せずひずみ計と岩盤を付着させるためにのみ働くように、ひずみ計のゴムモールドの外側に仕切板を設けるなどの工夫をしている。このような対策や工夫を施しても、なおかつひずみ計の埋設不良が生じることがある。

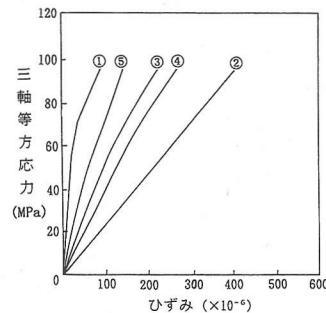
オーバーコアリング時には、ひずみ計が埋設されている部分の岩盤が地圧から解放され、岩石コア全体が弾性的に変形する。そのとき、充填材がパイロット孔の孔壁およびひずみ計にしっかりと付着していないければ、ひずみ計は岩石コアの変形に追随できない。また、充填材の付着力が弱い場合には、岩石コアが膨張する際に、充填材と孔壁、あるいは充填材とひずみ計との間が、計測途中で分離してしまう恐れがある。

さきに述べたように、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）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、測定成分の方向別に分類すると、上下方向8例、斜め方向2例、水平方向1例で、明らかに上下方向の測定成分が多い。この理由は、水平のボーリング孔にひずみ計を埋設した場合、セメントミルクの固化時にボーリング孔内の上部に空隙ができ付着不良が生じやすいため、もともと充填材がこの部分で孔壁と分離していたかオーバーコアリング時に剥離したことによると推定される。

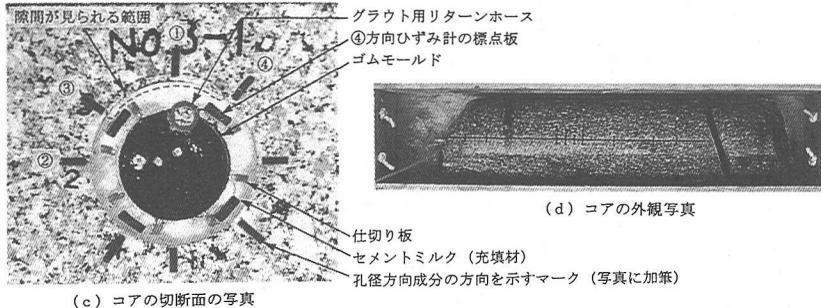
花崗岩での水平のボーリング孔における計測によって得られた5成分の解放ひずみ曲線、回収されたコアに対する三軸感度試験の結果、コアの切断面写真およびコアの外観写真を、それぞれ図-12の(a), (b), (c)および(d)に示す。図中、①～④は孔径方向成分、⑤は孔軸方向成分である。



(a) 解放ひずみ曲線



(b) 三軸感度試験結果



(c) コアの切断面の写真

(d) コアの外観写真

図-12 ひずみ計の埋設不良による影響と思われる測定例

図-12(c)の切断面をみると、充填材と孔壁との境界の上部にすき間が生じている。実際のコアの切断面の観察結果によると、このすき間は測定成分①を中心とする③～④の方向を横断する形で存在している。(a)の解放ひずみ曲線をみると、測定成分①と③は一旦引張り側に変化した後圧縮側に反転し、②と④は動き始めから圧縮側に変化しているが、いずれも動きが不安定である。また、三軸感度試験の結果においては、応力に対するひずみは、測定成分①、③、④、②の順に大きくなっている。①、③および④は直線性も悪い。なお、測定成分⑤は孔軸方向であるので、ここでは考察の対象から除外している。

このように、解放ひずみの挙動が不安定となった主な要因としては、充填材と孔壁との付着が不完全なため、岩石コアの孔壁に生じたひずみが埋設されたひずみ計で正しく測定されなかつたことによるものと推測される。従って、解放ひずみがDパターンを示す場合には、埋設状態が不良である可能性が強く、異常値として棄却すべきと思われる。

(3) コアの温度変化による異常値

a) 実測例

図-13(a)に示す解放ひずみ曲線は、図-12と同様に花崗岩での水平ボーリング孔に埋設した5成分ひずみ計で得られたものである。孔軸方向の解放ひずみ曲線①～④

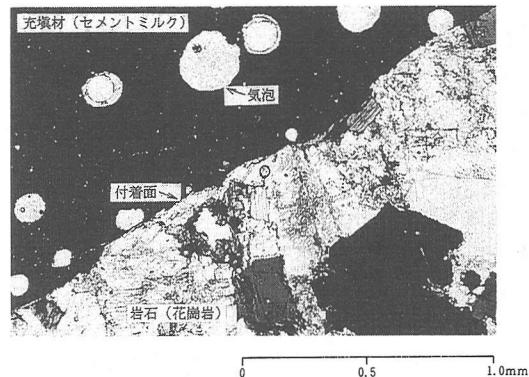


写真-2 岩石と充填材の付着面の顕微鏡写真

の形状をみると、いずれの測定成分も引張り側に変化した後に圧縮側へ少しづつ変化し、オーバーコアリングが終了するまで引張りひずみの減少もしくは圧縮ひずみの増大傾向が継続し、一定値に達する傾向はみられず、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、孔軸方向の⑤を含めすべての測定成分について直線性を示し、また、孔軸方向

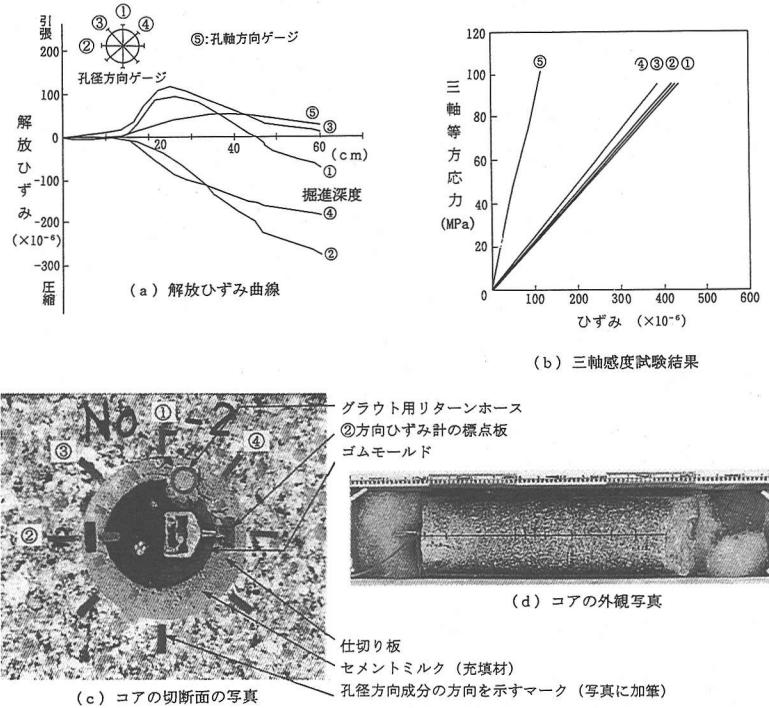


図-13 コアの温度変化による影響と思われる測定例（その1）

成分①～④の感度はほとんど同一であり、ひずみ計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。なお、写真の上部の充填材が円孔状に抜けて見えるところは、セメントミルクの収縮を防止すること目的に添加したアルミニ粉によって気泡が生じた部分である。

このようにこの例では、付着状態は良好で、しかもひずみ計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パターンではなく、Cパターンを示している。

図-14にもう一つCパターンの解放ひずみ曲線の例を示す。この例では、孔径方向成分①、③および④の解放ひずみは、大きな引張りひずみを示した後、その大きさが減少している。また、孔径方向成分②は常に圧縮ひずみを示しているが、その変化の傾向は①、③および④と類似している。これら孔径方向の各測定成分の引張りひずみの減少もしくは圧縮ひずみの増大傾向は、図-13 (a) の解放ひずみ曲線の例によく似ていて、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、図-14の矢印の箇所では、ボーリングマシンのスピ

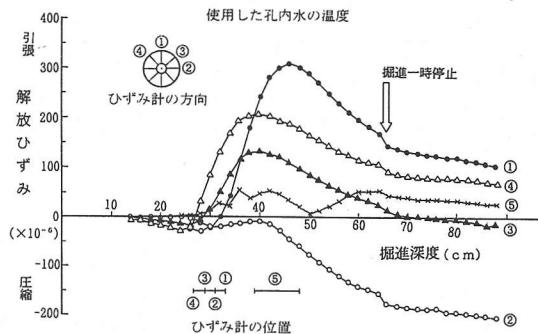


図-14 コアの温度変化による影響と思われる測定例（その2）

ドルのストロークをリセットするため、約5分間掘進を一時停止しているにもかかわらず、この間に各測定成分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、一軸圧縮強度200MPa程度の極めて硬質な花崗岩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、掘進を一時停止してもなお変位を続いている原因として、岩石のクリープ変形を想定することは困難である。

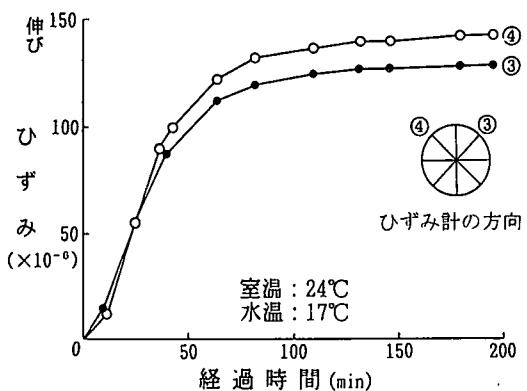


図-15 回収したコアを水温17°Cの水槽に
浸したときのひずみ変化

図-13(a)および図-14に示すような解放ひずみ曲線の形態が生じる他の原因としては、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）によるひずみの変動が考えられるが、測定系の電気的不稳定性については、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。

b) 室内実験

現場から回収され三軸感度試験に供された後のコア（ひずみ計の埋設されたコア）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-15は、室温（24°C）で放置しておいた回収コアを、水温が17°Cの水槽に浸し、経過時間とひずみとの関係を示したものである。図-15の結果は、温度の低下に伴い伸びひずみが増大すること、また逆にいえば、温度の上昇に伴い圧縮ひずみが増大することを示している。

この実験結果より、図-13(a)および図-14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、横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温度の方が高かったことが考えられる。

以上のような検討および実験結果を踏え、実際の測定時および測定後において、温度変化にともなうひずみの挙動についてチェックを行った。図-16は解放ひずみ測定時に温度変化を測定した例である。このときは、先に示した例とは逆に冬場の測定であったことから、横坑内の岩盤温度より低温の却水を用いている。用いたひずみ計

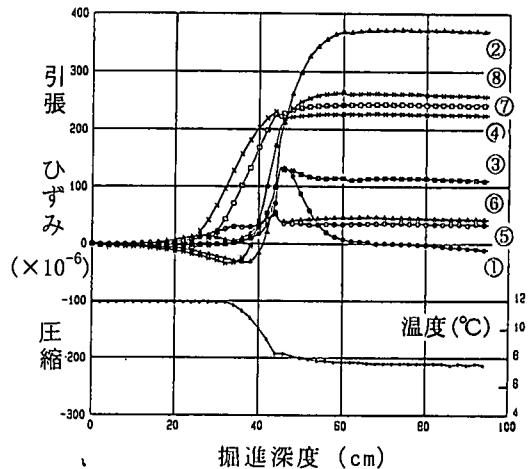


図-16 解放ひずみ測定時に温度変化を測定した例

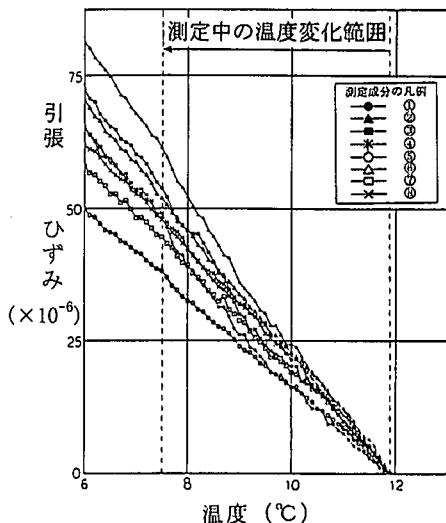


図-17 回収されたコアに温度変化を与えたときの各測定成分のひずみ変化

は8成分ひずみ計で、サーミスタ温度計をひずみ計のゴムモールドの表面に装着したものを新たに製作した。但し、測定時の温度変化は約12.0°Cから7.5°Cまで低温側に変化しているが、最も温度変化の大きい区間が解放ひずみの変化の大きい区間に対応しているため、解放ひずみ曲線に顕著な温度変化の影響は認められない。

図-17は、図-16で示した測定で回収したコアを水槽に浸し、解放ひずみ測定時と同じ範囲での温度変化を与えた時の各測定成分のひずみ変化を計測した実験結果である。実験結果によると、温度とひずみとの関係はほぼ直線的であり、温度1°C当りのひずみ変化率は-8.9～-14.2 × 10^-6/°C（ひずみは圧縮が負）の値が得られた。

今回の実験で、このような解放ひずみ測定時の温度変

化は、得られる解放ひずみの絶対値に無視できない影響を与えることが確認された。埋設されているひずみ計は、単体では温度補償型の素子が用いられているが、パイロット孔内に充填材で固定されたひずみ計は、周囲の岩石やセメントミルクの他にひずみ計の素子を組み込んだゴムモールドなど熱膨張率の異なる材料で構成されている(図-1)。

このような構造を有する埋設されたひずみ計に温度上昇を与えると、以下の理由によりみかけ上の圧縮ひずみが生じるものと考えられる。

a) 岩石コアとセメントは、ほぼ同心円上に膨張している(内径が大きくなる)。

b) ゴムの線膨張率は岩石やセメントの線膨張率より1桁大きいため、ゴムは相対的に内側(図-1の上下方向)に押し込まれる。

c) ひずみ計の受感部は図-1の断面図に示したように、孔径方向と垂直をなすダイアフラムの平面上に貼付されたひずみゲージで構成されており、ゴムの内側への変形により見かけ上圧縮ひずみが発生する。

従ってCパターンを示す解放ひずみ曲線は、解放ひずみ測定時に温度変化を計測し、温度変化が顕著な場合は測定値を補正する等の検討を行うことにより、正常な測定値として取り扱うことができる。

5. 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までもない。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、反映していない棄却すべき異常な測定値を区別しなければならない。本論文では解放ひずみ曲線に着目し、筆者らの測定経験に基づいて、まずその形状をA、B、C、Dの4つのパターンに分類し、棄却すべき測定値とその原因について考察した。得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 応力解放後において、ひずみが一定値に収敛しているAパターンおよびBパターンは、測定の目的としている岩盤内の地圧状態をほぼ正確に反映しているとみるとができる。
- 2) このうちBパターンは、最終的な解放ひずみが圧縮ひずみを示す場合があり、異常な測定値と見誤りやすい。そこで数値解析により、ひずみの測定方向の直応力に対して、それに直交する方向の直応力が大きい偏圧的な地圧状態の場合には、ポアソン比に対応した弾性変形の解放により、このような傾向が十分生じうることを明らかにした。
- 3) 応力解放後において、ひずみが一定の値に収敛せず、

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可能性が大きいことがわかった。回収コアの温度～ひずみの関係を較正することによって、この種の異常値は補正することにより正常値として取り扱いうる。

- 4) 終始、解放ひずみが安定しないDパターンは、ひずみ計の周辺に存在する割れ目が存在する場合や、埋設状態が悪く充填材が孔壁に付着していない場合に生じる傾向があり、棄却すべきデータといえる。
- 5) 以上のことから、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計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が重要といえる。

参考文献

- 1) Amadei, B. and Stephansson, O.: Rock Stress and Its Measurement, Chapman & Hall, 1997.
- 2) Sugawara, K. and Obara, Y. (ed.): Proceedings of International Symposium on Rock Stress, Balkema, 1997.
- 3) 土木学会岩盤力学委員会試験・計測小委員会:初期地圧測定法の現状と課題, 土木学会, 1992.
- 4) 亀岡美友:ボアホール底面上の応力の解放による岩盤応力測定に関する研究, 京都大学工学部学位請求論文, 1978.
- 5) 金川忠, 林正夫, 北原義浩:軟質岩盤における初期地圧の測定法の開発と泥質岩盤への適用, 電力中央研究所報告・研究報告, No. 377003, 1978.
- 6) 金川忠, 林正夫, 北原義浩:地圧の計測法と応用, 電力土木, 第163号, pp. 31-42, 1979.
- 7) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: In situ stress measurements in the Japanese Islands: Over-coring results from a multi-element gauge used at 23 sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 23, pp. 29-39, 1986.
- 8) 金川忠, 日比野敏, 石田毅: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成分ひずみひずみ計の開発——, 電力中央研究所報告・研究報告, No. 385033, 1986.
- 9) 石田毅, 金川忠:地盤応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響, 地震2, 第40巻, pp. 329-339, 1987.
- 10) 石田毅, 金川忠, 矢田篤, 田仲正弘:空洞掘削時の応力再配分に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案, 土木学会論文集, 第457号/III-21, pp. 41-50, 1992.
- 11) 打田靖夫, 吉田次男, 平川芳明, 石田毅:微小な鉛直ひずみの測定による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動の検討, 土木学会論文集, 第554号/III-37, pp. 19-30, 1996.

(1999.5.7 受付)

CLASSIFICATION AND DISCUSSION ON CAUSES OF ABNORMAL STRESS RELIEF

CURVES IN OVER-CORING STRESS MEASUREMENTS

USING A HOLLOW INCLUSION GAUGE

Tatsuya YOKOYAMA, Tsuyoshi ISHIDA, Tadashi KANAGAWA, Tatsukichi TANAKA
and Yoshiaki MIZUTA

In order to discuss causes of abnormal stress relief curves obtained in over-coring stress measurements, the authors classified 267 stress relief curves into four patterns. Consequently, the authors found that two of the four patterns reflect stress condition and should be used for stress determination, while the other two do not. One of the two abnormal stress relief patterns was most likely caused by existence of cracks in rock or improper gauge setting condition. The other one was found to be caused by temperature change due to cooling water in coring, when difference in temperature between the water and rock exists.