

応力解放法における初期地圧測定に影響を及ぼす

諸要因に関する解析的研究

Analytical study on some factors that may influence in-situ stress measurements by stress relief methods

佐藤彩秋*・新孝一**・伊藤洋***

Ayaki SATO, Kouichi SHIN, Hiroshi ITO

Rock stress is one of the indispensable parameters for the underground designing. Stress relief method is considered to be the most reliable method for rock stress measurement. In most practices of stress relief method, rock is supposed to be the homogeneous, isotropic and linear elastic body. But actually, rock's property varies from place to place, and it is anisotropic and inelastic. Such differences between the simplified theory and actual rock can cause serious error in rock stress measurement. In this report, the effects of inhomogeneity, anisotropy and inelasticity are investigated through numerical analysis.

Key Word: In-situ stress measurements, stress relief methods, inhomogeneity, anisotropy, inelasticity

1. 本研究の背景及び目的

地下空間の設計・施工にあたっては、岩盤内部に生じている自然の応力状態の把握が重要な要素の一つである。このような応力状態は「初期地圧」、あるいは「一次地圧」などと呼ばれている。これに対し、岩盤を掘削すると岩盤内の応力は変化する。この変化した後の応力あるいは変化した応力増分は「二次応力」あるいは「二次地圧」と呼ばれ初期地圧と区別されている。

初期地圧の測定は古くは鉱山などで行われ、種々の目的に合わせた多くの方法が提案されている。その中の一つである応力解放法は比較的古くから採用され、実施例も多く、現在でも初期地圧測定法の主流を占めている。応力解放法の測定原理は、コアを周辺岩盤から切離すことにより生じる弾性回復量を測定し、岩盤を等方均質な弾性体と仮定した上で、弾性理論に基づいて初期地圧を求める方法である。しかしながら、岩盤の持つ不連続性や不均質性、非弾性挙動などを考慮して地圧を評価することは非常に困難である。また近年、放射性廃棄物の地層処分、能動的地熱抽出、圧縮空気貯蔵など、地下空間を積極的に利用する計画とともに、その利用は大規模化、深部化し、かつ長期間供用される傾向があり、より精度の高い初期地圧測定の検討が求められている。そこで本報では応力解放法の信頼性向上を目的に、以下について解析的な検討を行った。第一に岩盤物性のばらつきや異方性が各測定方法の結果に与える影響や、校正試験の役割について検討し、第二に岩盤の非線形性が測定結果に与える影響や、測定方法の違いによる影響をとりまとめている。

* 正会員 日立造船(株)鉄構・建機事業本部橋梁設計部

** 正会員 (財)電力中央研究所 地圏環境部

*** 正会員 (財)電力中央研究所 地圏環境部

2. 岩盤物性のばらつき及び異方性が及ぼす影響に関する検討

上記のように応力解放法は岩盤を等方均質な弾性体であると仮定した上で、応力状態を測定する方法である。しかしながら、岩盤は等方均質な弾性体ではなく、物性の異なる鉱物によって複雑に構成される岩石によって成り立っている。そのため岩盤は物性値としてバラツキを有し、強度・変形に対する異方性を示す。従ってそれら岩盤の物性を正確に把握せず、等方均質な弾性体として岩盤を扱う従来の応力解放法を適用すると、測定結果と実際の初期地圧とは大きな違いを生じる可能性がある。

そこで岩盤物性が応力解放法に及ぼす影響を検討するにあたって、室内実験や原位置試験でこれらの影響を検討することは現実的に困難であるので、三次元の有限要素法を用いて解析的な検討を行った。

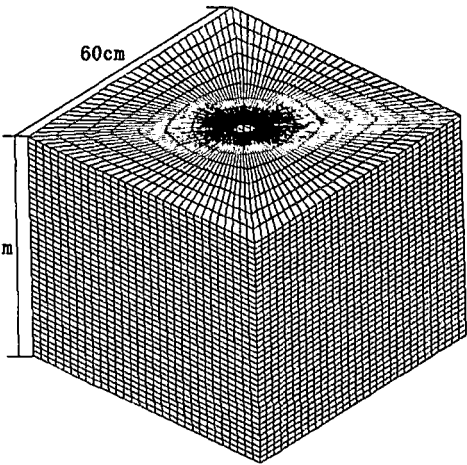
2.1. 解析モデルと解析条件

応力解放法ではまず評価上、無限遠方から応力を受けている岩盤に計器埋設用のボーリングを行い、適切な位置に複数の測定ゲージを取り付ける。そして、ひずみゲージを含む岩盤をオーバーコアリングすることによって生じる解放ひずみを測定し、これを応力に換算して初期地圧を求めている。コアが弾性領域にあるとすれば、オーバーコアリングによって生じる解放ひずみは、応力を受けていない状態でのコアに無限遠方から応力を載荷した際に生じるひずみと同等である。

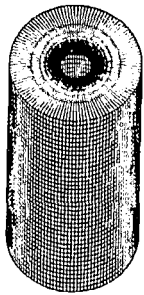
図－1 は節点数 108,240、要素数 100,800 からなる FEM モデルである。このモデルに上述の考え方にに基づき、無限遠方から生じる独立の六成分の応力を、直方体の表面に載荷させ、そのときに生じる円孔内の任意のひずみを測定し、このひずみを解放ひずみとして取り扱う。なお、較正試験を実施する場合は、図－1 のモデル内にある円筒コア（図－2）をそのまま較正試験に用いることから、実際に行われる手順に即して解析を行った。

一般に較正試験により得られたひずみ感度を各ひずみゲージに導入することにより、充填材の充填状況や岩石の異方性やバラツキの影響を測定結果に反映してくれると期待されている。岩盤物性値のバラツキを表現するため、本解析では表 1 に示す三種類の物性値を有する鉱物を各要素にばらつかせる。また異方性については、弾性特性に関して三つの直交する対称面が存在する直交異方性とし、用いる直交異方性は以下の弾性スティフネス（1）式として与えた。この異方性は x、y 方向の弾性定数が、z 方向のそれよりも倍ほど大きく、やや強い異方性を有している。 図－2 較正試験時のモデル

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.257 & 0.212 & 0.297 & 0 & 0 & 0 \\ & 1.135 & 0.272 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0.582 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0.159 & 0 & 0 \\ & sym & & & 0.134 & 0 \\ & & & & & 0.487 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots(1)$$



図－1 解析に用いた有限要素モデル

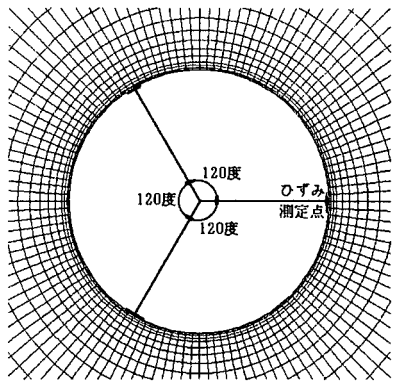


表－1 要素内の物性値

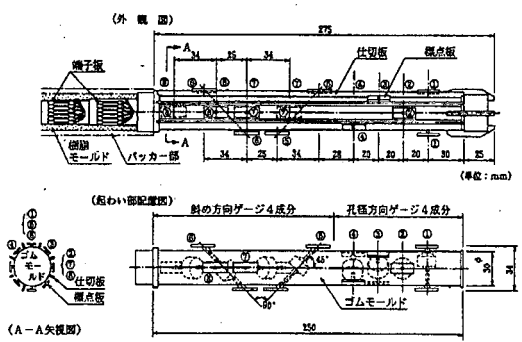
	E (GPa)	ν	割合 (%)
石英	95.5	0.0797	25
曹長石	70.25	0.2861	60
白雲母	88.1	0.2493	15

また物性のばらつきと異方性の検討では、次の 3 方法の解析について行った。

- ・ **孔壁ひずみ法** 小孔径のボーリング孔内にロゼットゲージを貼付した後、大孔径のボーリングにより応力解放して三次元的なひずみ変化を測定する方法である。図 3 は本解析に用いた孔壁ひずみ法の円孔とひずみ測定点との関係を示したものである。各ひずみ測定点で 6 成分のひずみ出力値から初期地圧を求めている。なお弾性係数は較正試験を行わないため、与えた物性値を平均化した値を用いて全てのひずみゲージで一定のものを用いている。
- ・ **孔径変化法** 図－4 に示す電中研式 8 成分ひずみゲージに対応した測定点での孔径の変化を測定し、初期地圧を求める方法である。解析に用いる弾性係数は全てのひずみゲージで一定とする。
- ・ **孔径変化法(較正実施)** 上記の孔径変化法において、較正試験を実施することによりひずみ感度を導入する。なお、解析に用いた主応力は、 $\sigma_1 = -40MPa$ 、 $\sigma_2 = -30MPa$ 、 $\sigma_3 = -20MPa$ である。



図－3 円孔とひずみ測定点との関係



図－4 電中研式 8 成分ひずみゲージ

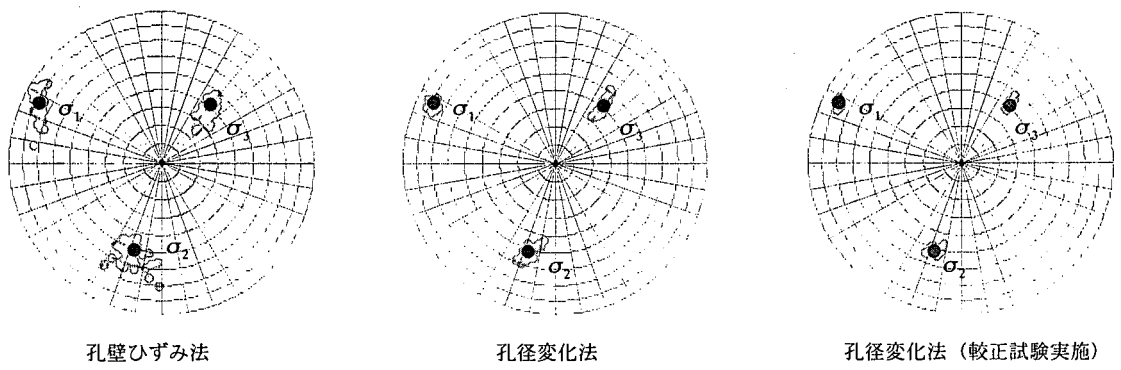
2.2. 物性のばらつき及び異方性の解析結果

表－2 及び図－5 は物性のばらつきにおいて主応力算出値とその主応力方向をシュミットネット上（上半球投影）に示したものである。なお各方法においての測定箇所は円孔周りの複数のランダムな位置で行っており、シュミットネット上では濃い点が実際に与えた応力を示している。

表－2 における平均を見た場合、どの値を見てもほぼ与えた応力と等しくなっている。これは、モデル内の鉱物の割合を考慮してヤング率とポアソン比を決定したため、与えた応力に平均が近づいたと考えられる。従って妥当な弾性定数を用いて、解析を行ったと言える。しかしながら、分散を見る限り測定手法によつての違いを見ることができる。

表－2 孔壁ひずみ法と孔径変化法の平均と分散

	孔壁ひずみ法		孔径変化法		孔径変化法（較正実施）	
	平均(MPa)	分散	平均(MPa)	分散	平均(MPa)	分散
σ_1	-39.62	3.85	-40.03	0.17	-40.43	0.13
σ_2	-30.39	2.65	-29.83	0.38	-30.35	0.10
σ_3	-19.77	2.55	-19.56	0.81	-20.07	0.33



図－5 シュミットネット上における主応力方向（物性のばらつき）

孔壁ひずみ法と孔径変化法を比べると、分散が孔径変化法のほうが小さく出ている。これは、孔壁ひずみ法がひずみサンプリング点での物性値の影響を大きく受けるのに対し、孔径変化法は「孔径の変化」という測定する長さを介したため、物性のばらつきの影響が平均化されたためだと考えられる。また較正試験実施の有無の影響は、分散に大きく現れている。孔径変化法において較正試験を行わなかった場合、較正試験実施時の分散値の 1.2~4.6 倍程度大きくなっている。これは較正試験が、各ひずみゲージでひずみ感度を測定し解析中に導入することによって、物性のばらつきによる影響を小さくしていると考えられる。

また図-5を見ると主応力値と同様に、孔壁ひずみ法の主応力方向は実際に与えた方向を中心にして大きくばらついている。これも、ひずみ測定点の局所的な物性値の影響を大きく受けたためだと考えられる。それに対し、孔径変化法は物性値の平均化のため、正しい方向を向いている。較正試験によっても、主応力方向も大きな改善がみられる。本解析ではほとんどの主応力方向において、較正試験が主応力方向のばらつきを半分程度に修正してくれる効果を示していた。

図-6、及び図-7は与えた異方性に対しての孔径変化法と孔径変化法（較正実施）の応力算定結果である。ここで図-6における横軸の角度とは、図-8に示すy軸回りの角度を表す。(1)式で示す異方性を表すマトリクスを、y軸回りに θ 度回転させた座標系(u、v、w)での応力-ひずみ関係を解析に導入し、異方性の座標変換を考慮した。本解析は角度 θ を11.25度ずつ変化させ、 θ を0度~90度の範囲で行った。孔径変化法の主応力値および主応力方向は、異方性岩盤を等方均質と仮定しているため、回転角 θ によって大きく変化し、ばらつきも現れる原因となったものと考えられる。各応力値においては10~20MPa程度の範囲で応力値が異なり、主応力方向においては経度で最大45度程度、緯度で最大30度程度のばらつきが見られ、方向自体も実際加えた応力の方向とはかなり異なるものである。それに対し、孔径変化法において較正試験を行った場合、 σ_1, σ_2 の応力値はほぼ加えた応力と等しくなっており、ばらつきの範囲も最大で4MPa程度である。また、全主応力方向において、較正試験を行わな

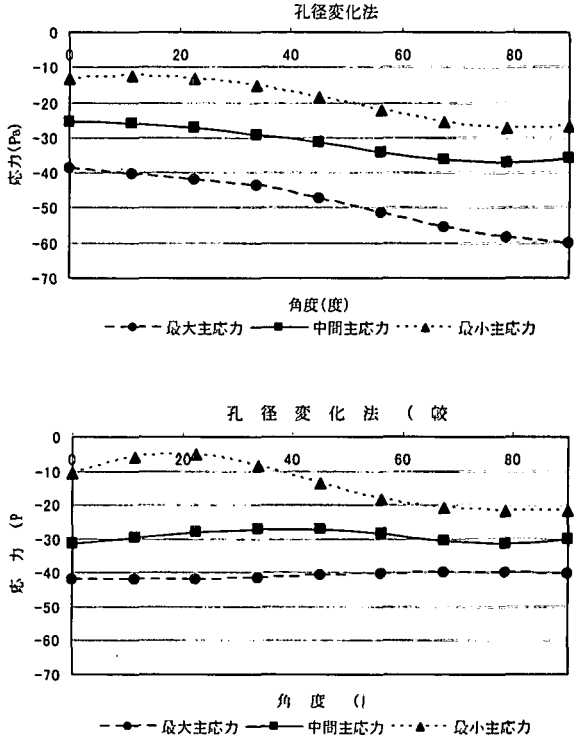


図-6 角度(度)と応力逆算値の関係

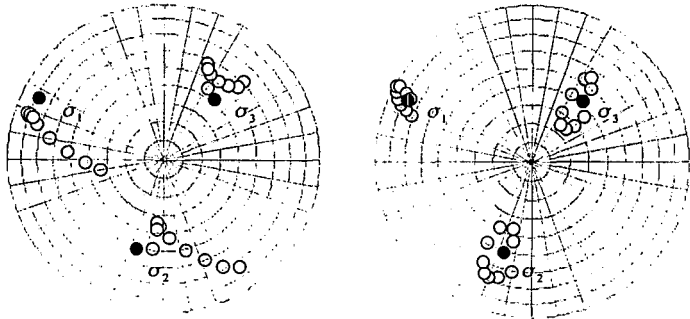


図-7 シュミットネット上における主応力方向(異方性)

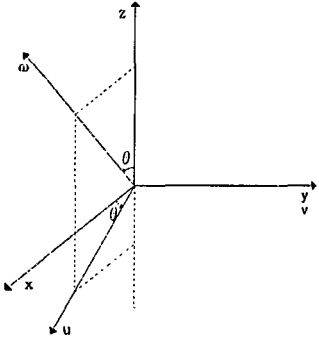


図-8 直交座標系の回転

った場合に比べ、実際に加えた荷重を中心にしてばらつきは小さくなっていることがわかる。しかし、最小主応力 σ_3 における応力値が回転角 θ によって変化している。図から 90 度付近では算定された応力は与えた応力とほぼ等しく一定である。本解析では応力の値と方向は変化させていないため、ひずみゲージ方向と異方性との関係（角度 θ ）が大きく関連しているならば、ひずみゲージの感度が方向によって異なることが考えられる。

3. 岩盤の非線形性に対する検討

弾性理論に基づく応力解放法において、応力集中等によりポアホールの周囲において部分的に圧縮降伏域や引張り破壊が発生するような初期応力場に応力解放法を適用すると、測定結果に大きな過ちを犯す可能性がある。そこで、FEM による弾完全塑性モデルを用いた解析的な検討を行った。

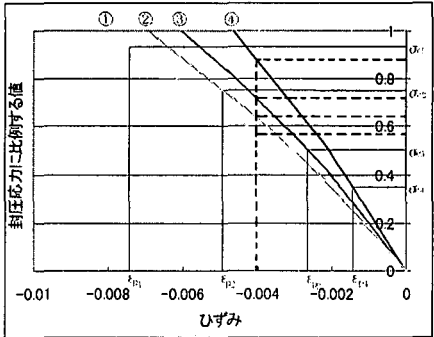
本解析で用いたモデルは、2.1 で示した有限要素モデルと寸法は同じであるが、節点数 13,104、要素数 11,520 とそれぞれ少ないモデルを用いた。構成モデルには弾・完全塑性体モデルを、降伏条件は Mohr-coulomb の式を用い、内部摩擦角 $\phi=45$ 度、粘着力 $c=2.0$ MPa、主応力は $\sigma_1=-14$ MPa、 $\sigma_2=-10$ MPa、 $\sigma_3=-7$ MPa に設定した。なお与える主応力を適当な座標変換を施し複数の解析を行った。なお本解析では、非線形を扱い残留ひずみの影響を考慮するため、載荷－除荷のサイクルにおける除荷時のひずみを測定し、解析上これを解放ひずみと見なした。なお、降伏に至る以前の弾性体としての弾性定数はヤング率 $E=5,000$ （MPa）、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。

本章で有限要素解析の対象とした応力解放法は以下に示す 4 方法である。

- ・ 孔壁ひずみ法 図－3 に示す測定点でのひずみを測定し、解析に用いる弾性定数は全てのひずみゲージで一定とし弾性時のヤング率 $E=5,000$ （MPa）、ポアソン比 $\nu=0.3$ を用いる。
- ・ 孔径変化法（較正試験なし） 円孔を考慮した孔径変化法であり、解析に用いる弾性定数は上記と同様 $E=5,000$ （MPa）、 $\nu=0.3$ とする。
- ・ 孔径変化法（較正試験実施） 上記の孔径変化法において、較正試験を実施することにより、各ひずみゲージでのヤング率を一定とせずに、ひずみ感度係数を導入する。
- ・ 孔径変化法（提案較正試験実施） 従来までの較正試験によるひずみ感度は、各ひずみにおいて得られた解放ひずみ ε_{pi} を押戻した三軸等方応力 σ_{ci} から求めている。図－9 は解析上の 1～4ch の各ひずみゲージの挙動を示したものであり、初めは弾性挙動を示すが徐々に非弾性挙動に移行している。そして解放ひずみ（実線で表示）が図に示される値であると仮定する。従来の解析であると、1ch は解放ひずみが大きいためひずみ感度係数に非線形の影響を多く含むことになる。しかし偏圧を受けている円孔の応力解放を考えた場合、解放ひずみが大きければ非線形の影響を強く受けるとは一概には言うことはできない。そこで、水平方向と斜め方向は感度が異なるため、それぞれ 4 方向の解放ひずみの平均をとり（点線で表示）、それに対応する三軸等方応力とでひずみ感度を求めた。

図－10 は各応力解放法によって算定された主応力方向をシュミットネット上に示している。また図－11 は、解析で算定された 3 主応力の平均値と応力の座標変換で用いた角度 θ との関係が表されており、図中にある太線は解析上与えた応力である。

今回の解析条件の範囲においては孔壁ひずみ法の場合、主応力値及び主応力方向、共に与えた応力とは相当異なる結果が得られた。解析上弾性時の弾性係数を用いており、主応力値は全体に大きく出る傾向が見られる。また主応力方向も経度で最大 40 度弱、緯度で 20 度程度の誤差が生じており、主応力値及びその方向は、較正試験を行わない孔径変化法と比べても正しくないものである。この原因として、塑性ひずみの影響が考えられる。孔壁ひずみ法は応力集中の影響を受ける円孔にひずみゲージを



図－9 較正試験の 1ch～4ch ひずみ挙動

貼付しそのひずみを測定するため、岩盤が降伏することによって生じる塑性ひずみの影響を強く受けたため、多くの誤差が生じるのであろう。

それに対し孔径変化法の場合、円孔周辺の塑性域の影響も受けるが、評価する孔径の変化量は弾性域を含めた円筒全体のひずみの影響を受け、平均化されたものとなる。そのため、塑性ひずみの影響を小さくできるのだと考えられる。従って孔径変化法（較正試験なし）の場合、弾性時の弾性係数を用いているため、主応力値が大きく出る傾向こそあるが、その差は僅かなものである。また主応力方向は、ほぼ与えた応力方向と等しい結果が得られた。また孔径変化法（較正試験実施）の場合、較正試験を行ったことにより主応力値が大きく出る傾向が抑えられることも確認できるが、全体に小さい主応力値が出ている。これに対し今回提案した較正試験では平均主応力は与えた応力に近づいていることが分かる。このことから、前述したような解放ひずみの大きさと、それに比例して非線形を評価していたことのアンバランスさを、若干なりとも解消できるのではないかと考える。

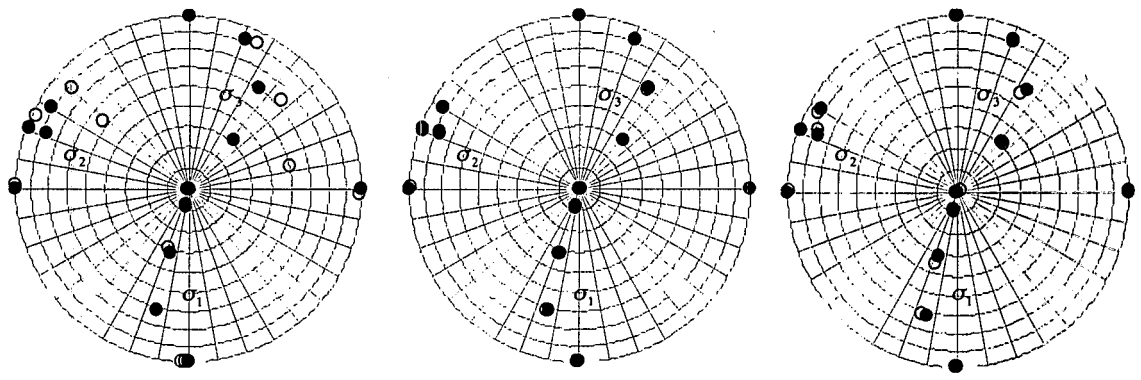


図-10 シュミットネット上に示した主応力方向

まとめ

・孔壁ひずみ法は、ひずみゲージの貼付箇所の物性値に測定結果が大きく左右され、円孔付近に降伏域は発生する際も塑性ひずみの影響を強く受ける。それに対して孔径変化法は、測定対象の「長さ」を介しているため、それらの影響が小さくなることを確認した。

・較正試験が、岩盤物性のばらつき、異方性、非線形の影響を補正する役割を確認した。しかし異方性では、期待したほどの成果は得られなかった。これは、電中研式ひずみゲージの方向による感度の差による問題か、それとも現在の較正試験では異方性の影響を考慮できないのか定かではない。前者の場合は、ひずみゲージ方向の検討が、後者の場合は異方性を考慮に入れた解析が求められる。

・円孔周辺に降伏域が発生する応力場での較正試験は、水平方向、斜め方向それぞれの解放ひずみの平均をとり、その平均値に対応する等方三軸応力とでひずみ感度係数を求めるほうが良い結果が得られた。これは解析例が少ないため、一つの提案として述べている。

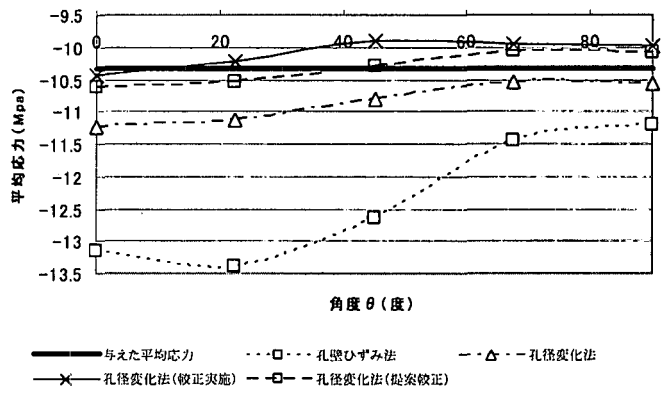


図-11 応力の座標変換（角度で表現）と算定応力値の関係

参考文献

金川忠他、(1986) オーバーコアリング法による3次元地圧計測法 電力中央研究所報告 研究報告：385033
 石島洋二他、(1970) 孔壁変形法による岩盤応力測定に関する理論的考察 日本鉱業会誌/86 993(70-12)