

孔径変化法による初期応力測定装置の性能試験

池田 奈央 村山 秀幸
荒井 靖仁

概 要

山岳トンネルでは、特殊な設計条件の場合や、施工中あるいは供用後に変状が発生した場合、FEMなどの数値解析を用いた設計・検討がなされている。その際、トンネル周辺岩盤の応力状態が解析結果に大きく影響することから、トンネル周辺岩盤の初期応力測定を行うことが望ましいが、実際に測定した事例は少ない。本報告では、筆者らが開発中の初期応力測定装置の精度検証のために、岩石ブロックを用いた載荷試験を行った。測定値と理論解を比較した結果、定量的な評価の面で課題が残ったが、再現性がある測定が行えており、定性的には理論解とよく一致した。また、今回の試験条件において結果に影響を与える因子を検討した結果、周方向変位の角度による対称性を正しく取得することが最も重要であることが分かった。

PERFORMANCE EVALUATION TEST OF INITIAL STRESS MEASUREMENT BASED ON BOREHOLE DEFORMATION METHOD

Abstract

Numerical analysis such as the finite element method (FEM) has frequently been applied to design tunnels under special design conditions or when deformation occurs. Since the initial stress state of rock mass around the tunnel greatly affects the analysis results, it is desirable to measure the initial stress around the tunnel. However, there are a limited number of application examples of measuring initial stress for tunnel engineering projects. In this paper, the authors conducted a series of loading tests using a sandstone block to verify the accuracy of the initial stress measurement device based on the borehole deformation method. It was ensured that good reproducibility of the developed stress measurement device can be achieved. Then, a comparison of the measured stress components against the applied stress indicated that the measurements show qualitatively good performance, although there remain some issues to be improved in terms of quantitative performance. To aim for better performance, a theoretical solution was utilized to elucidate the most significant factor that influences the evaluated stress components. The results showed that the most significant factor for better quantitative performance is to achieve the correct symmetry of the measured circumferential displacement with respect to the angle associated with the borehole wall.

キーワード：トンネル、初期応力測定、孔径変化法

§1. はじめに

山岳トンネルでは、特殊な設計条件の場合や、施工中あるいは供用後に変状が発生した場合、有限要素法 (Finite Element Method、以下 FEM) などの数値解析を用いた設計・検討がなされている。これらの解析を行う際、トンネル周辺岩盤に作用している初期応力情報が必要であり、この条件の違いが解析結果に大きく影響することが知られている。トンネル周辺岩盤の初期応力を決定する方法として、一般的には地形効果を考慮した自重解析や、側圧係数をパラメータとした応力状態の推定などが挙げられるが、トンネル掘削以前あるいは施工中にトンネル周辺で実測された初期応力値を取得する方法が最も確からしいと考えられる。

岩盤初期応力測定は主に資源分野での利用が多く、地盤工学会試験基準 (JGS) として複数の初期応力測定手法が規定されている。しかしながら、土木分野においてトンネル周辺岩盤の初期応力を測定した事例は少ない。以上の背景から、筆者らは山岳トンネルの合理的な設計を目的として、現場での初期応力測定法 (主に孔径変化法¹⁾) と数値解析に関する研究²⁾を進めている。初期応力測定法には孔径変化法のほかにも円錐孔底ひずみ法や水圧破碎法などがあるが、孔径変化法の利点として初期応力測定装置の繰り返し使用が可能なこと、短時間で連続して測定可能なこと、多少湧水があっても測定可能なことが挙げられる。このことから、筆者らは初期応力測定法の中でも特に孔径変化法に注目している。Ghimire et al.¹⁾で提唱されている従来の方法では、理論解をベースとして応力値を評価している。しかし、理論解では、孔径変化法の現場適用における孔の幾何学効果を適切に考慮できないこと、また、近年 FEM 解析の精度が向上していることから、筆者らは FEM 解析による孔径変化法の詳細な幾何学効果を考慮した数値解をベースとした応力評価法の導

入を検討している。

本報告では、開発中の初期応力測定装置の精度検証のために実施した岩石ブロックを用いた載荷試験結果、およびその精度検証結果について報告する。

§2. 孔径変化法による岩盤初期応力測定

2.1 孔径変化法の原理

孔径変化法は、初期応力測定法の中でも応力解放法的一种である。測定原理を図 1 に示す。まず、対象岩盤にボーリング孔を掘削する (図 1 (a))。続いてテーパ部を掘削 (図 1 (b)) し、テーパ部の先端に図 1 (a) の孔より小さい直径の測定孔を掘削する (図 1 (c))。続いて、初期応力測定装置を測定孔内に設置する (図 1 (d))。この状態で、図 1 (e) のように、測定孔の外側を同心円状に削孔し、測定孔を周囲の岩盤から切り離す (オーバーコアリング) ことによる応力解放で生じた岩盤変位を初期応力測定装置により測定する (図 1 (f))。この際、岩盤を等方の線形弾性体と仮定し、測定変位を孔径変化法の幾何学を反映した変位-応力ひずみ関係を用いて応力を評価する。

2.2 初期応力測定装置

筆者らが開発中の初期応力測定装置 (図 2 (a)) は、前述した孔径変化法に基づいて設計されており、円孔に挿入した状態で孔が変形した際の各 ch における変位を測定する。図 2 (b) に示す ch 1~4 は孔壁周方向の変位を測定するための周方向センサ、ch 5~8 は孔壁軸長方向の変位を測定するための軸方向センサである。周方向センサは板バネで構成されており、向かい合う板バネを一組として、各々の相対変位から孔壁周方向の変位を測定する。軸方向センサは装置前方の固定部と、装置後方の可動部の相対変位から孔壁軸方向の変位を測定する。本装置の全長は 355 mm であり、軸方向センサの固定部と可動部の距離は $l=170$ mm で

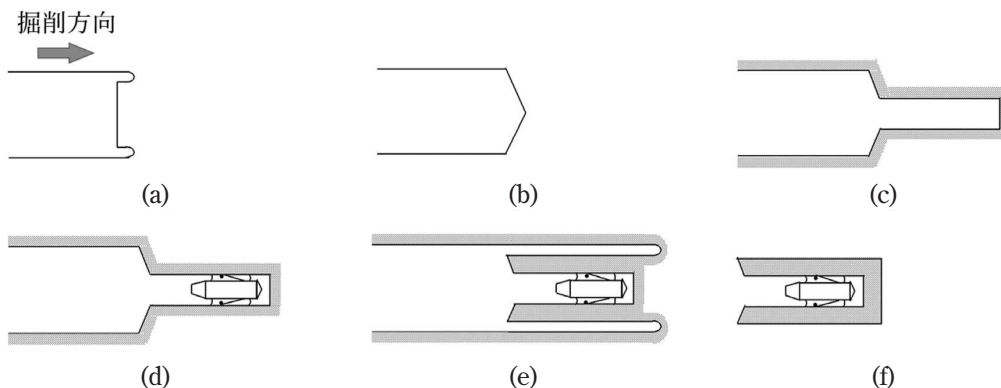


図 1 孔径変化法の概念図

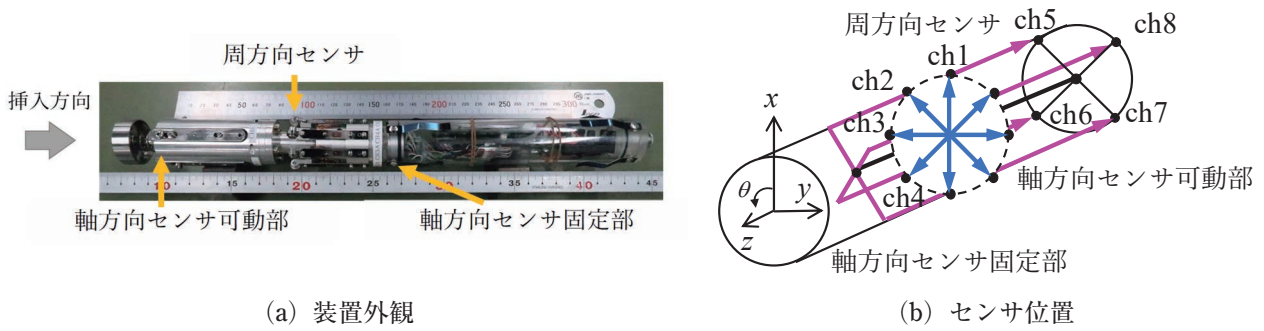


図2 初期応力測定装置

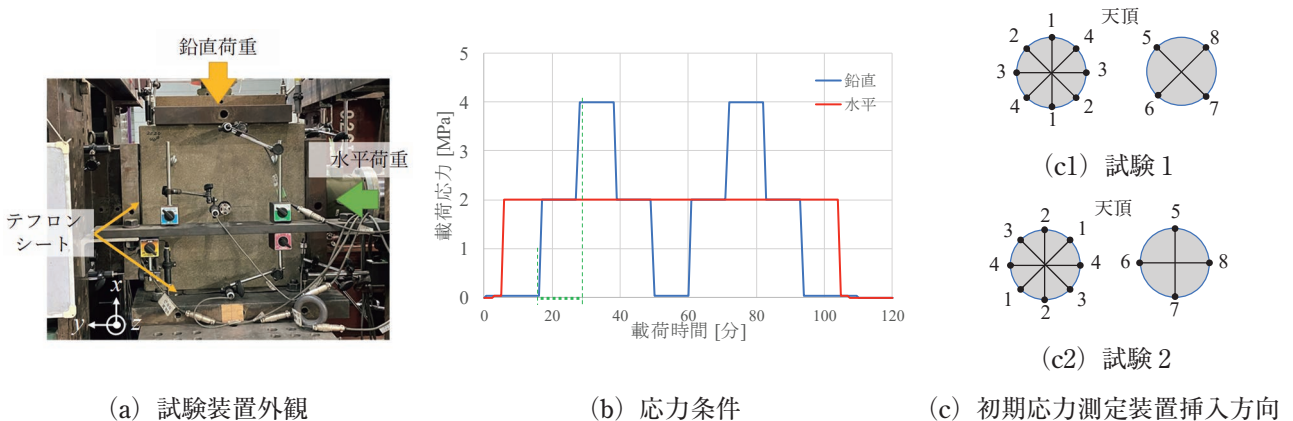


図3 試験装置と試験条件

ある。また、本装置は、初期応力測定時のボーリング孔の直径を 86 mm、測定孔の直径を 40 mm と想定して設計されている。

§3. 岩石ブロック載荷試験

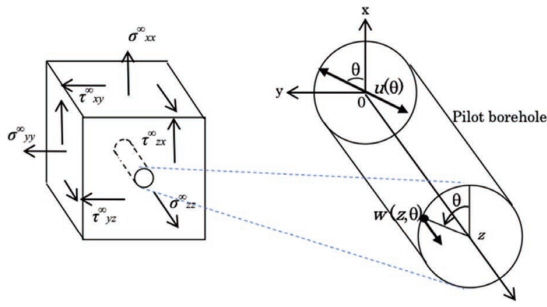
3.1 試験方法

Ghimire et al.¹⁾ を参考に、初期応力測定装置から推定される応力値の精度検証を目的とした試験を実施した。図 3 (a) に示すように、岩石供試体は寸法 500×500×500 mm の来待砂岩ブロックとし、供試体中央には直径 $d=40$ mm の貫通円孔を設けた。供試体の円孔に初期応力測定装置を挿入した状態で、供試体の $+x$ 面および $-y$ 面に対して垂直に荷重を与え、この際に生じる孔壁変位を初期応力測定装置により測定した。なお、供試体 $-x$ 面および $+y$ 面には、摩擦低減のためのテフロンシートを挿入し、面に垂直な方向のみを拘束した。また、 $\pm z$ 面は非拘束とした。応力条件を図 3 (b) に示す。具体的には、水平応力 σ_{yy} 、垂直応力 σ_{xx} の順に 0.04 MPa ずつ載荷し、供試体を固定した。その後、水平応力 σ_{yy} を 2.0 MPa まで載荷し応力を保った状態で、鉛直応力 σ_{xx} を 0.04 MPa、2.0 MPa、4.0 MPa の三段階でサイクリックに増減させた。この時、

各応力状態の保持時間は10分として、載荷・除荷速度は 2.0 MPa/分とした。応力制御には油圧ジャッキを使用した。初期応力測定装置によって測定される結果の再現性を確認するために、ch 1 を天頂とする試験 1 と、装置を右回りに45°回転させ、ch 2 と ch 5 を天頂とする試験 2 の 2 ケースを、それぞれ 2 回ずつ合計 4 回行った (図 3 (c))。

§4. Fairhurst の理論解

応力推定結果の分析に先立ち、先述したブロック載荷試験における幾何学効果について確認した。そのために、FEM から得られる結果と、孔径変化法のベースとなっている Fairhurst³⁾ により導出された理論解との比較を行った。なお、Fairhurst による理論解は、『無限の大きさを持つ等方の線形弾性体に、無限遠方から所定の応力を作用させ、そこに無限の長さの直径 d の円孔を導入することにより生じる変位』を対象とした理論解 (図 4、以下、Fairhurst の理論解) である。Fairhurst の理論解は、ヤング率を E 、ポアソン比を ν として、式 (2a) および式 (2b) で表される。



(a) 無限岩盤（等方線形弾性体）に作用する遠方応力 (b) 孔壁上の各点における周方向変位 $u(\theta)$ 、および軸方向変位 $w(\theta, z)$

図4 遠方応力および孔壁上の各点における周方向変位 $u(\theta)$ 、および軸方向変位 $w(\theta, z)$ （文献³⁾より引用）

$$u(\theta) = (d/E) \left[\left\{ (1-\nu^2)(1+2\cos 2\theta) + \nu^2 \right\} \sigma_{xx}^{\infty} + \left\{ (1-\nu^2)(1-2\cos 2\theta) + \nu^2 \right\} \sigma_{yy}^{\infty} + 4(1-\nu^2)\sin 2\theta \sigma_{xy}^{\infty} - \nu \sigma_{zz}^{\infty} \right] \quad (2a)$$

$$w(\theta, z) = \left(\frac{z}{E} \right) \left[\sigma_{zz}^{\infty} - \nu(\sigma_{xx}^{\infty} + \sigma_{yy}^{\infty}) \right] + (2d/E)(1+\nu)(\sigma_{xz}^{\infty} \cos \theta + \sigma_{yz}^{\infty} \sin \theta) \quad (2b)$$

ただし、式(2a) σ_{xy}^{∞} 項の係数について、Fairhurst³⁾の参考文献中（Chapter 3 式(3.2)）に誤植が含まれていたため訂正した。

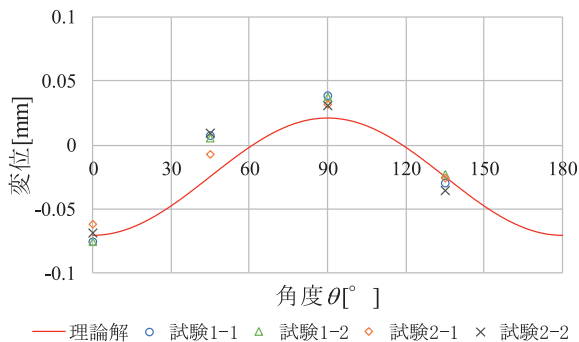
Fairhurstの理論解と、本実験を模した三次元FEM解析解との間に有意な差がないことを確認した。そのため、以降では、Fairhurstの理論解を用いて検証を行うことにした。なお、図1に示すようなテーパーを伴う原位置岩盤の場合は、幾何学効果は無視できないことが予備検討からわかっており、理論解を用いた検討は、本稿で実施したブロック載荷試験でのみ適用可能である。

§5. 初期応力測定装置の精度検証結果

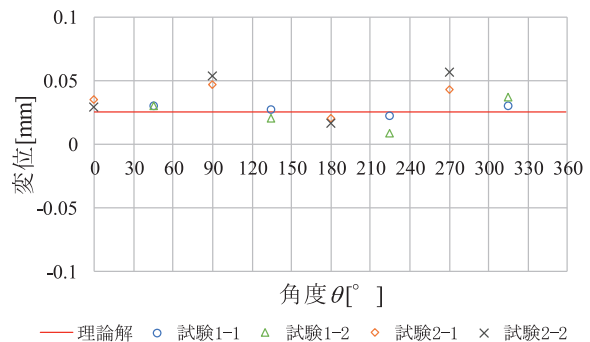
図5に、各試験ケースにおける、初期応力測定装置から得られた各chの変位測定値を点で示す。また、図5には、Fairhurstの理論解から計算した孔壁変位を赤線で示している。測定値と理論値の計算に用いた砂岩ブロックの弾性定数は、ヤング率 $E=6.5$ GPa、ポアソン比 $\nu=0.25$ とした。なお、これらの弾性定数は測定値と理論値の誤差が最も小さくなるようにパラメトリックスタディを行い決定された値であり、先述した一軸圧縮試験から得られた弾性定数の下限程度の値である。変位は、図3(b)の緑破線で示す時刻の応力変化に注目して算出している。この範囲での応力の変化量は垂直応力のみで、 $\Delta\sigma_{xx}^{\infty}=3.96$ MPaである。

図5における測定値の結果より、同一の試験ケースで測定値のばらつきが少なく、再現性のある測定ができていくことがわかる。また、各角度の変位の正負や相対的な大きさが測定値と理論解でほぼ一致しており、定性的には妥当な結果が得られていると言える。一方、今回の載荷条件の様に直応力 ($\Delta\sigma_{xx}^{\infty}$) のみを与えた場合には、 $\theta=45^\circ, 135^\circ$ の周方向変位が理論的には同値になることが期待されるが、測定値は同値となっていない。同様に、理論的には全ての角度で同値になることが期待される軸方向変位についても、各角度の測定値にばらつきがみられ、同一の試験ケースにおける変位の最大差は0.04 mm程度となっている。これらのことより、測定値は定性的には理論解と一致するものの、定量的には差異がある結果となっている。

次に、試験1-1の変位測定値を応力値に変換して測定値と理論値を比較する。比較結果を表1に示す。理論的には、今回の試験条件の場合、 $\Delta\sigma_{xx}^{\infty}=3.96$ MPa、その他の応力成分は0.0 MPaとなることが期待される。測定変位から推定した応力値は、 $\Delta\sigma_{xx}^{\infty}$ が最も大きな値



(a) 周方向



(b) 軸方向

図5 理論解と測定値の比較（伸長が正）

となって卓越する点では理論値と良い対応を示す。一方で、 $\Delta\sigma_{yy}^\infty$ で 1.0 MPa 以上、 $\Delta\sigma_{zz}^\infty$ 、 $\Delta\sigma_{xy}^\infty$ で 0.5 MPa 以上の引張応力が生じる結果となっており、理論値との乖離も見られる。その他の応力成分については比較的 0.0 MPa に近い値となっている。応力換算値の傾向は、他の試験ケースでも同様である。

§6. 考察

今回の条件において測定値と理論値の差異に最も影響する応力成分を同定するために、表1で示す作用応力成分が、Fairhurstの理論解において、どのように寄

与しているかを評価する。そのために、表1に示した応力値（測定値）について、Fairhurstの理論解に、(a) $\Delta\sigma_{xx}^\infty$ のみ、(b) $\Delta\sigma_{xx}^\infty + \Delta\sigma_{yy}^\infty$ 、(c) $\Delta\sigma_{xx}^\infty + \Delta\sigma_{yy}^\infty + \Delta\sigma_{zz}^\infty$ 、(d) $\Delta\sigma_{xx}^\infty + \Delta\sigma_{yy}^\infty + \Delta\sigma_{zz}^\infty + \Delta\sigma_{xy}^\infty$ 、(e) $\Delta\sigma_{xx}^\infty + \Delta\sigma_{yy}^\infty + \Delta\sigma_{zz}^\infty + \Delta\sigma_{xy}^\infty + \Delta\sigma_{yz}^\infty$ 、および (f) $\Delta\sigma_{xx}^\infty + \Delta\sigma_{yy}^\infty + \Delta\sigma_{zz}^\infty + \Delta\sigma_{xy}^\infty + \Delta\sigma_{yz}^\infty + \Delta\sigma_{zx}^\infty$ を代入した場合を考える。図6に各応力値を代入した理論解を赤線、試験1-1の測定値を点で示す。なお、角度を横軸、変位を縦軸とする。

図6(a) から、理論値の周方向変位は測定値に対して振幅が小さい。これは $\Delta\sigma_{xx}^\infty = 3.60$ MPa が、理想値 3.96 MPa よりも小さいためである。この段階で、軸

表1 孔径変位から算出した载荷応力値（圧縮が正）

	$\Delta\sigma_{xx}^\infty$	$\Delta\sigma_{yy}^\infty$	$\Delta\sigma_{zz}^\infty$	$\Delta\sigma_{xy}^\infty$	$\Delta\sigma_{yz}^\infty$	$\Delta\sigma_{zx}^\infty$
測定値 [MPa]	3.60	-1.347	-0.501	-0.799	0.0112	0.222
理論値 [MPa]	3.96	0	0	0	0	0

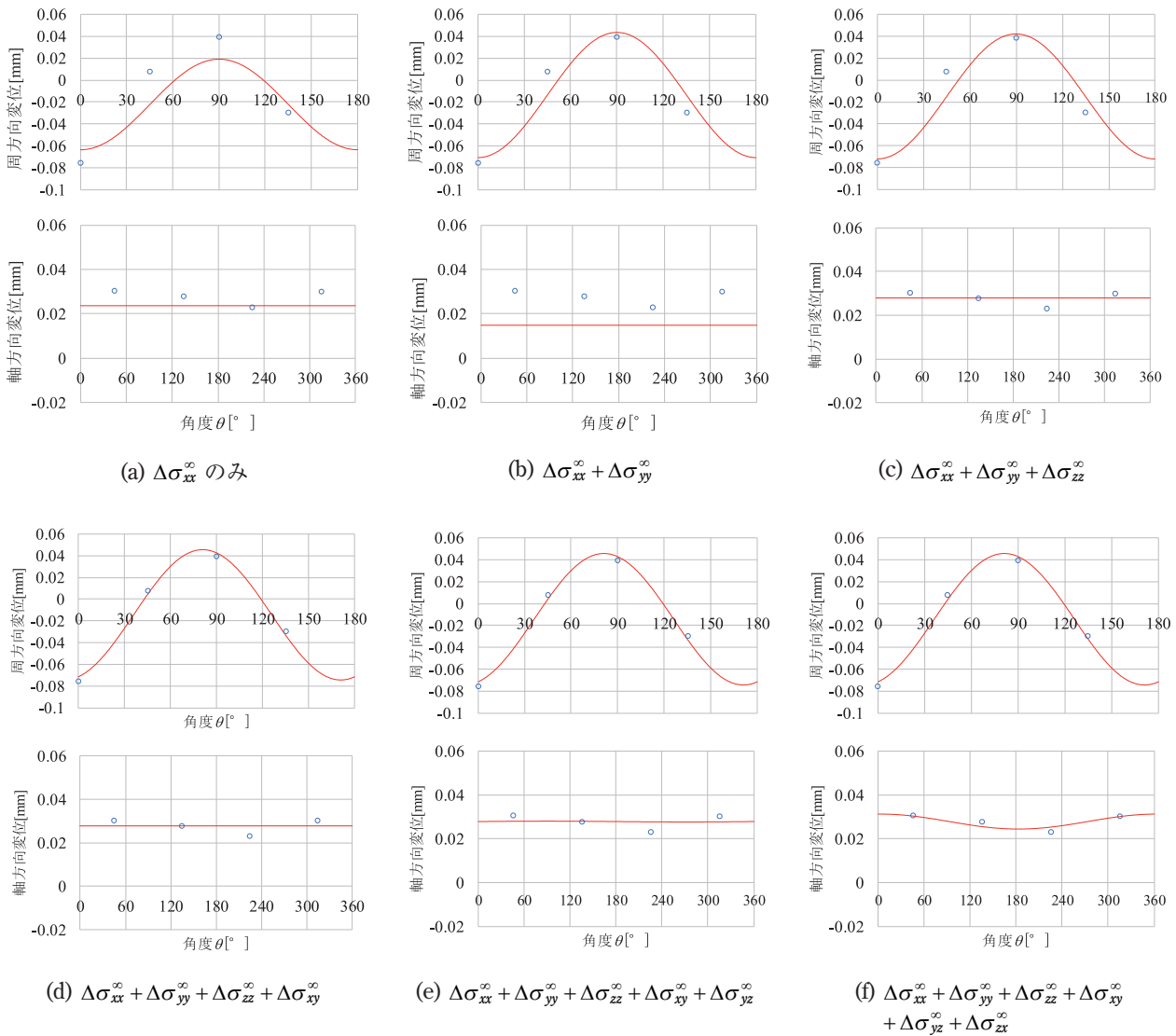


図6 式(2a)、(2b)の各係数を Fairhurst 解に代入した場合の影響評価（伸長为正）

方向変位は全 ch の測定値の間を通る。図 6 (b) から、 $\Delta\sigma_{yy}^{\infty} = -1.347$ MP (引張応力) が加わった場合、周方向変位の振幅を大きくして、周方向変位の理論値を測定値に近づける効果が発現する。その一方で、軸方向変位は全体的に 0 近づいてしまう。 $\Delta\sigma_{zz}^{\infty} = -0.501$ MPa (引張応力) が加わった場合 (図 6 (c)) の周方向変位は、図 6 (b) とほとんど変わらない。これは、式 (2a) における $\Delta\sigma_{zz}^{\infty}$ の項の係数がポアソン比 ν であり、 $(1-\nu^2)$ の係数を持つ他の項よりも相対的に小さいためと考えられる。他方で、軸方向変位は、図 6 (b) で 0 に近づいた理論解が全体的に測定値に近づいている。 $\Delta\sigma_{xy}^{\infty} = -0.799$ MPa (引張応力) が加わった図 6 (d) の周方向変位では、図 6 (a)~(c) とは異なり、 $\sin 2\theta$ の周期性効果の影響が現れている。これが横軸に対する調整機能を有し、理論解を測定値に近づけている。つまり、 x - y 方向の二軸載荷での周方向変位において理論値から大きく乖離するデータがある場合、この $\sin 2\theta$ の項目が調整役となり、その乖離データに理論解の曲線を近づける効果を持つといえる。式 (2b) には $\Delta\sigma_{xy}^{\infty}$ の項がないため、図 6 (d) の軸方向変位は図 6 (c) と同一である。同様に、式 (2a) には $\Delta\sigma_{yz}^{\infty}$ や $\Delta\sigma_{zx}^{\infty}$ の項がないため、図 6 (e)、(f) の周方向変位は図 6 (d) と同一である。図 6 (e) より、理論解の軸方向変位は $\Delta\sigma_{yz}^{\infty} = 0.0112$ MPa の影響で極僅かに周期性がみられる。図 6 (f) より、 $\Delta\sigma_{zx}^{\infty} = 0.222$ MPa は $\Delta\sigma_{yz}^{\infty} = 0.0112$ MPa よりも寄与分が高く、軸方向変位に明確な周期性が表れている。

以上の結果から、周方向変位については $\Delta\sigma_{xx}^{\infty}$ と $\Delta\sigma_{yy}^{\infty}$ と $\Delta\sigma_{xy}^{\infty}$ が理論解曲線を測定値に近づける上で、主たる寄与因子であることがわかる。また、軸方向変位については、測定値にばらつきはあるものの、その程度は小さいため周期性の項の影響は現れずらく、 $\Delta\sigma_{xx}^{\infty}$ と $\Delta\sigma_{yy}^{\infty}$ と $\Delta\sigma_{zz}^{\infty}$ が理論解曲線を測定値に近づける上での主たる寄与因子であることがわかる。

今回の岩石ブロック載荷試験では、 x 方向のみ応力を増加させている。そのため、理論的には、周方向変位は $\theta=90^\circ$ を頂点として左右対称になることが期待される。しかし、図 5 および図 6 の測定変位では、同値になることが期待される $\theta=45^\circ$ と $\theta=135^\circ$ の値が一致しておらず、変位が左右対称になっていない。このため、理論解は、 $\Delta\sigma_{xx}^{\infty}$ だけでは測定結果を十分に表現しきれず、周方向ひずみの振幅を高くできる引張方向の $\Delta\sigma_{yy}^{\infty}$ と、周方向ひずみのグラフを左右に移動させることで対称性の欠如を補う $\Delta\sigma_{xy}^{\infty}$ が寄与する必要があるといえる。つまり、今回の載荷試験において、一軸的な荷重増加を実現できているという前提ならば、

$\theta=45^\circ$ と $\theta=135^\circ$ の結果が対称となっていないことが、測定値と理論値の乖離に最も影響した因子であると考えられる。軸方向変位は、 $\Delta\sigma_{yz}^{\infty} = \Delta\sigma_{zx}^{\infty} = 0$ となれば周期性が表れないため、測定値にばらつきがあることが課題であるといえる。しかし、 $\Delta\sigma_{yz}^{\infty}$ や $\Delta\sigma_{zx}^{\infty}$ の評価値は小さいことから、軸方向変位が理論値との乖離に与える影響は周方向より小さいと考えられる。ただし、今回行ったブロック載荷試験では、用いた岩石ブロックの異方性や劣化、重力の影響、載荷部と岩石部の接触の影響など多種多様な影響により、想定している応力場が供試体に作用していない可能性がある。そのため、初期応力測定装置の改善のみならず、試験条件の精査、検討も必要と考えられる。

§7. おわりに

本報告では、筆者らが開発中の初期応力測定装置の精度検証を目的として、岩石ブロックを用いた載荷試験と再現解析、理論解との比較を行った。上記の検討の結果、開発中の初期応力測定装置により、再現性のある測定ができており、測定値の正負や大小関係について合理的な結果が得られていた。一方、定量的な応力値評価には課題が残った。その原因としては、理論的には載荷軸から左右対称に周方向変位が生じることが期待されることに対して、測定値は対象ではない結果となっていたことが一因であると考えられる。測定値の非対称性を改善するために、今後はセンサの精度向上や、ブロック試験時の応力状態の精査が必要と考えている。

謝辞：本報告は北海道大学工学部との共同研究の成果であり、孔径変化法のノウハウ、数値解析、理論解等に関して、児玉淳一先生、福田大祐先生など多数の方々にご教授、ご尽力を頂いている。ここに関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) Ghimile, H. N., Ishijima, Y., Sugawara, T., and Nakama, S.: Development of stress measuring system by over-coring method suitable for soft rocks, 資源と素材, Vol.120, pp.32-38, 2004.
- 2) 村山秀幸、新井智之、児玉淳一、菅原隆之、岡崎健治、山崎秀策、釣賀雅人：変状トンネルにおける初期応力測定の利用に関する考察、令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会、VI -550、2019.9
- 3) Fairhurst, C.: In-situ stress determination - an appraisal of its significance in rock mechanics. ISRM International Symposium, 1986, pp.3-17, ISRM-IS-1986-001.

ひとこと

初期応力測定をフジタ施工現場で使用できるように、今後も研究を進めていきたい。



池田 奈央