



孔壁変位測定法 (CBDM) の 岩盤応力変化測定への適用に関する研究*

尾原 祐三¹ 吉永 徹² 秦 拓也³
片岡みなみ⁴ 横山 幸也⁵

Applicability of Cross-Sectional Borehole Deformation Method (CBDM) to Measure Rock Stress Changes through Laboratory and In-Situ Experiment

by Yuzo OBARA^{a*}, Toru YOSHINAGA^a, Takuya SHIN^b,
Minami KATAOKA^a and Tatsuya YOKOYAMA^c

- a. Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan
(*Corresponding author, E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp)
b. Chiikikagakukenyusyo Inc., Japan
c. Oyo corporation, Japan

The stress state around rock structures, such as underground opening and rock slope, is changed as their construction progresses and the time proceeds. The monitoring of the stress change is important to verify the design, control the construction and estimate the long term stability of rock structures.

In order to measure two dimensional stress changes in a plane perpendicular to a borehole axis, we developed the Cross-sectional Borehole Deformation Method (CBDM) and made clear the influence of factors on estimated stress change theoretically. In this paper, the applicability of CBDM to measure stress change in laboratory and in situ experiment. Firstly, the prototype instrument with a laser displacement sensor is described in detail. Secondly, the instrument is applied to estimate the stress change in a laboratory experiment. Then it is made clear that a non-linear least square method and a non-linear programming for optimization with the technique of golden section search is effective for estimating rock stress change. Finally, applying the CBDM to measure rock stress change within the immediate sidewall of underground opening under its construction, the stress changes for six months can be estimated successfully.

As a result, it is concluded that the CBDM is available for estimating rock stress change in two dimension.

KEY WORDS: Rock Stress Measurement, Stress Change, Cross-Sectional Borehole Deformation Method, Laboratory Experiment, In Situ Experiment

1. 緒 言

岩盤構造物の建設の進行に伴い周辺岩盤の応力は変化する。また、構造物完成後も時間の経過に伴って岩盤応力は変化する。このような応力変化のモニターは、構造物の設計の妥当性の検証や情報化施工、さらには構造物の長期安定性の評価のために重要である。

そこで著者らは、レーザ変位計をボアホール中に挿入し、これを回転して孔径変位を非接触で測定し、これを基に応力変化を2次元的に測定するための簡易な岩盤応力測定方法として孔壁変位測定法 (CBDM: Cross-sectional Borehole Deformation Method) を開

発し¹⁻³⁾、CBDMの基本原理解や測定結果に影響を及ぼす要因について理論的に分析した。なお、同様な機構の装置を用いて孔径を測定する方法を木口ら⁴⁾や川辺ら⁵⁾が開発しているが、木口らの方法は削孔後のボアホールに装置を固定し、一定時間の孔径のクリープ変位を測定した結果からボアホール軸に垂直な面内の主方向を求める方法であり、主応力の定量的な評価はなされていない。また、川辺らの方法では、孔径は測定されているが、ボアホール軸と測定器の軸のズレによる測定値の変化などについての検討がなされていない。

本論文では、開発したCBDMの岩盤応力変化測定への適用性について検討する。具体的には、まず、製作した孔壁変位測定装置の詳細を述べるとともに、それを用いて円孔を有する安山岩の平板供試体による室内試験を実施し、測定結果の処理方法の妥当性および測定精度について検討する。つぎに、掘削中の空洞近傍の原位置岩盤に作孔されたボアホールを利用して、岩盤空洞掘削時の応力変化の測定に本方法を適用した結果を示す。さらに、測定結果を分析し、本方法の岩盤応力変化測定への適用性について検討する。

*2011年9月2日受付 2011年12月15日受理

1. 正会員 熊本大学大学院自然科学研究科 教授
2. 熊本大学工学部 専門技術職員
3. 熊本大学大学院自然科学研究科 博士前期課程
(現(株)地域科学研究所)
4. 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 前期課程
5. 応用地質(株)

[著者連絡先] FAX: 096-342-3686

E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp

キーワード: 岩盤応力測定, 応力変化, 孔壁変位測定法 (CBDM), 室内試験, 原位置試験

2. 室内試験による適用性の検討

2・1 孔壁変位測定装置

CBDMは、応力変化測定法であるため、応力の絶対値を測定することができない¹⁾。したがって、応力の絶対値の変化は、まず初期応力を測定し、その後同じ地点でCBDMを用いて応力変化を測定し、それらの結果を重ね合わせることで評価することができる。CBDMはボアホールを用いるため、初期応力測定法としても、ボアホールを用い、かつ測定のためにボアホール周辺を破壊させない方法が望ましい。この方法としては、現在、国内で広く使われている円錐孔底ひずみ法 (CCBO)^{6,7)}があげられる。これらを考慮して、CBDMのための孔壁変位測定装置は、CCBOによって初期応力測定が行われた後のφ76mmのボアホールを利用することを想定して開発した。なお、CCBOにおいてストレインセルを孔底に張り付けた状態で孔底ひずみを測定し続けることができれば、応力変化を定量的に評価することができるが、これまでの実績では、ひずみゲージが腐食するなどの原因で測定期間は数カ月程度であった。本方法は、さらに長い期間の測定を想定している。

CBDMは、Fig. 1に示すように装置をボアホール内に挿入し、装置内の非接触型のレーザー変位計を回転させながら回転角θが

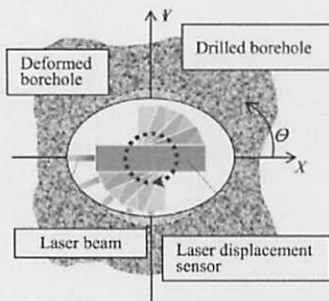


Fig. 1 Principle of measuring displacement of a borehole wall.

異なる数多くの点のボアホール壁面変位を測定し、そのデータを用いて岩盤応力変化を評価する方法である¹⁾。このために開発した孔壁変位測定装置を Fig. 2 に示す。測定装置本体は (a) に示すように円筒型であり、外管はアルミニウムで、φ70mm、長さ670mmである。これはφ76mmのボアホールに挿入可能である。装置先端部に②のステッピングモータを配置し、①のレーザー変位計と接続されている。ステッピングモータの最小回転角は0.1度で、レーザー変位計の測定精度は0.1μmである。変位計のレーザーはアクリル板で防水された③の測定窓を通過して孔壁に当たり、反射する。このようにレーザーはアクリル板を通過するので、測定距離は補正されている。この補正はボアホール内に孔内水がなく空気で満たされている場合を想定しているが、下向きボアホールに使用する際には、孔内水により水没する場合には水中での補正が必要となる。測定装置の孔口側の部分には空気圧で制御できる装置の固定用ピストン④が2か所配置されている。なお、孔内水の濁りが大きくその改善ができない場合や測定断面の孔壁が崩壊するなどの場合には当然測定は不可能である。

測定は、以下の手順で行う。まず、キャスター⑤を用いてロッドに繋がれた測定装置をボアホール内に挿入する。つぎに、エアコンプレッサを利用して空気圧を固定用ピストンに送り、装置を所定の場所に固定する。その後、レーザー変位計をステッピングモータによって回転させ、回転角θの異なる数多くの点のボアホール壁面変位を測定する。これらは (b) のコントロールボックス内のアンプユニットを介して (c) のPCにより制御される。また、測定データはコントロールボックスを介してPCに保存される。なお、PCのディスプレイに表示される画面の一例を (d) に示す。

2・2 室内試験の概要

室内試験にはφ76.4mmのボアホールを削孔した安山岩供試体を用いた。供試体寸法は400×400×47mmであり、ヤング率25GPa、ポアソン比0.2である。ボアホールは真円で削孔されたと仮定する。なお、ボアホールの中心を原点として、水平方向右

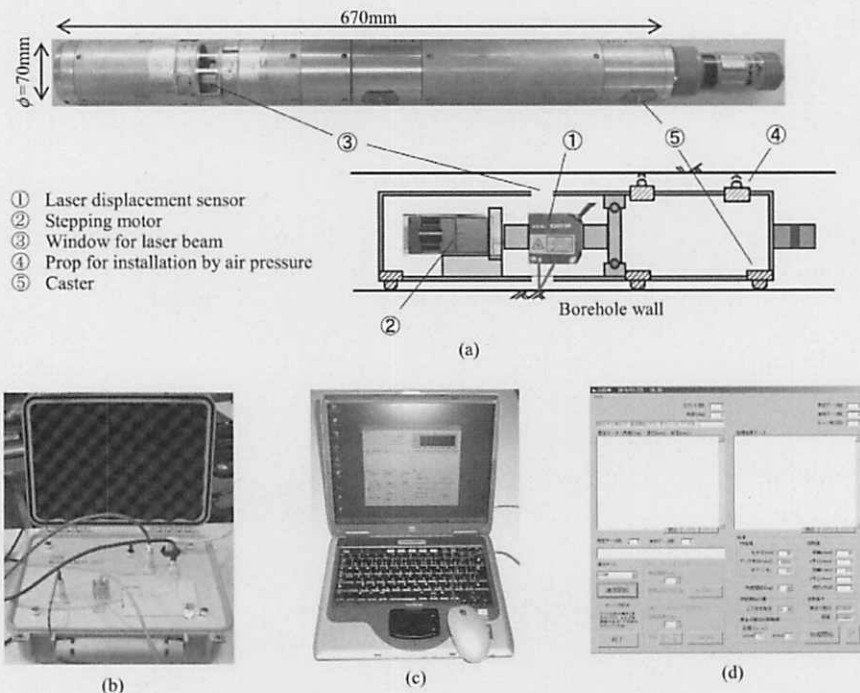


Fig. 2 Schematic view of prototype instrument and devices for control of instrument and collect of data; (a) prototype instrument, (b) control box, (c) PC and display, (d) example of display of program.

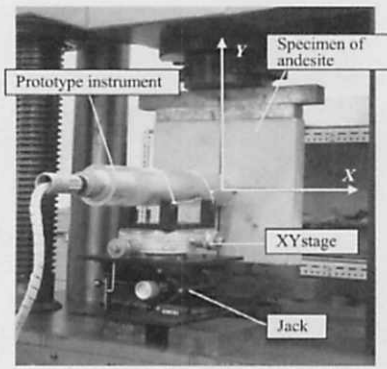


Fig. 3 Instrument installed in a borehole drilled into andesite plate set up in a material testing machine.

向きに X 座標, 鉛直方向上向きに Y 座標を設定した。

試験の様子を Fig. 3 に示す。供試体を材料試験機に設置し, 上下方向に荷重する。孔壁変位測定装置は架台におかれたアクリル円管内に固定し, ボアホール壁面の変位測定を行った。また, アクリル管の固定台の下部には, ジャッキと XY ステージ (1/100mm の精度) を設置している。これは装置の軸を移動させるために用いた。ジャッキにより Y 軸方向の調整を行い, XY ステージにより X 軸方向の微調整を行った。試験では, ボアホール軸と装置の軸がほぼ一致している場合をケース 1, ケース 1 に比較して装置の軸を X 軸方向に -0.2mm 移動した場合をケース 2 と呼ぶことにする。

荷重は, 鉛直方向応力 S_y を 3 および 5MPa 作用させた。このとき, 水平方向応力 S_x は 0MPa である。試験手順を以下に示す。

手順 1: 材料試験機により Y 軸方向に一定応力 $S_y=1\text{MPa}$ を与える。これは荷重盤と供試体との接触をなじませるためである。

手順 2: ジャッキと XY ステージを用いてボアホール孔と装置の軸をできる限り一致させる。

手順 3: Y 軸方向応力を $S_y=3\text{MPa}$ まで上昇させ一定に保った後, 測定を実施する。

手順 4: $S_y=3\text{MPa}$ を一定に保ったまま, XY ステージにより装置を X 軸方向に -0.2mm 移動させて測定を実施する。

手順 5: 装置を XY ステージにより X 軸方向に 0.2mm 移動させ, 元の位置に戻す

手順 6: 手順 3 に戻り, $S_y=5\text{MPa}$ を与えて同様に測定を実施する

なお, 測定は回転角 2 度間隔の 180 点で行い, 1 点につき 1000 回の測定の平均値をその点の測定値とした。1 回転の測定時間は約 6 分であった。

これら一連の実験は, 測定データを非線形最小二乗法と黄金分割法による非線形最適化法の併用¹⁾により補正したデータを用いる応力評価理論の適用性を検討するために実施した。

2・3 試験結果と考察

ケース 1 の測定結果を Fig. 4 に, ケース 2 の結果を Fig. 5 に示す。図の (a) は $S_y=3\text{MPa}$, (b) は 5MPa の結果であり, 横軸は回転角, 縦軸はボアホールの半径 38.2mm (直径 76.4mm) からの変位であり, 実線は補正データの楕円の方程式¹⁾で近似した曲線である。また, 得られた評価値を Table 1 から Table 4 に示す。

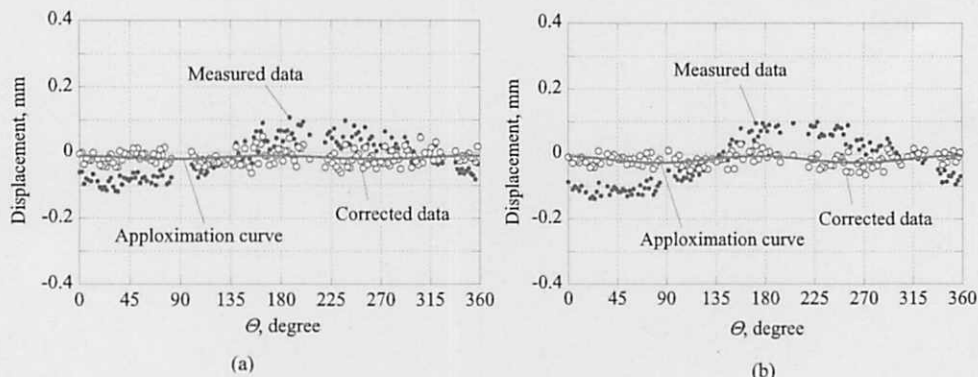


Fig. 4 Measured data, corrected data by non-linear least square method and non-linear programming for optimization with the technique of golden section search and approximated curve of displacement of borehole wall in Case 1; (a) $S_y=3\text{MPa}$ and $S_x=0\text{MPa}$, (b) $S_y=5\text{MPa}$ and $S_x=0\text{MPa}$.

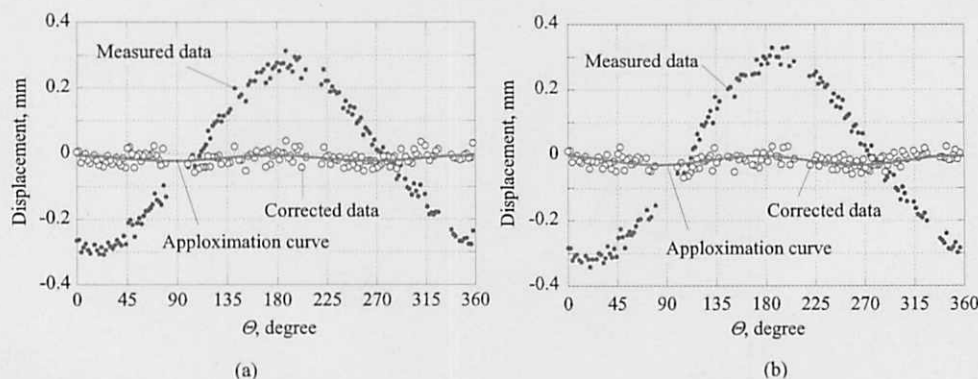


Fig. 5 Measured data, corrected data by non-linear least square method and non-linear programming for optimization with the technique of golden section search and approximated curve of displacement of borehole wall in Case 2; (a) $S_y=3\text{MPa}$ and $S_x=0\text{MPa}$, (b) $S_y=5\text{MPa}$ and $S_x=0\text{MPa}$.

Table 1 Estimated parameters of ellipse equation and temporary stresses under $S_y=3\text{MPa}$ in Case 1.

ΔX	ΔY	
-0.057	0.050	
a	c	
38.241	38.230	
b	d	
0.0004	-0.0007	
Unit: mm		
σ_x	σ_y	ϕ
4.10	5.84	-6.96
σ_x	σ_y	τ_{xy}
4.13	5.81	-0.21
Unit: stress in MPa, ϕ in degrees		

Table 3 Estimated parameters of ellipse equation and temporary stresses under $S_y=3\text{MPa}$ in Case 2.

ΔX	ΔY	
-0.269	0.056	
a	c	
38.244	37.927	
b	d	
0.0013	-0.0012	
Unit: mm		
σ_x	σ_y	ϕ
3.46	6.38	-8.06
σ_x	σ_y	τ_{xy}
3.52	6.32	-0.41
Unit: stress in MPa, ϕ in degrees		

なお、表中の ΔX および ΔY は、ボアホールに定められた座標系 (X, Y) におけるボアホール軸と装置の軸のずれ、 a, b, c, d は主方向を座標軸 (x, y) として測定値を近似した楕円の方程式 $\{(x-b)/a\}^2 + \{(y-d)/c\}^2 = 1$ の係数である。 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ は XY 座標系での応力、 σ_x, σ_y は主応力であり、 ϕ は X 軸から σ_x の方向までの角度である。なお、ここで得られる $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_x, \sigma_y$ はみかけの応力として評価されるものである¹⁾。

Fig. 4 のケース 1 に注目すると、ボアホールと装置の軸を一致するように調整したが、黒丸でプロットされている測定値は 2π の周期を有している。このように、室内試験において XY 方向の微調整を実施しても、両軸を一致させることは困難であることが判明した。したがって、測定値に対する補正の必要性は明らかである。そこで、非線形最小二乗法と黄金分割法による非線形最適化法を併用した方法によって評価した $S_y=3\text{MPa}$ における装置の軸のずれは $(\Delta X, \Delta Y) = (-0.057, 0.050)$ mm、 $S_y=5\text{MPa}$ でのずれは $(\Delta X, \Delta Y) = (-0.077, 0.065)$ mm となった。これらの値を用いて測定装置の軸をボアホール軸に補正した場合の測定値を白丸でプロットすると、両データともに π の周期を持つデータとなり、本方法にて完全に補正されていることがわかる。近似により得られた長軸、短軸、中心座標は Table 1 および 2 に示すように、 3MPa から 5MPa と応力の増大に伴い、長軸は 38.241mm から 38.243mm と長くなり、短軸は 38.230mm から 38.222mm と短くなっている。中心座標については、ほぼ $(0, 0)$ となっており、装置の軸がボアホール軸と完全に一致するように補正されている。このように、応力の増大に伴って発生するわずかな変位も十分に分析できることは明らかである。

本方法は応力変化を評価する方法であるので、 XY 座標系の応力成分の変化についてまとめると Table 5 の上表のようである。これらの値は Table 1 から 4 に示す見かけの応力の差を取って応力変化としている。応力変化 $\Delta\sigma_y$ は 1.81MPa となり、実際の応

Table 2 Estimated parameters of ellipse equation and temporary stresses under $S_y=5\text{MPa}$ in Case 1.

ΔX	ΔY	
-0.077	0.065	
a	c	
38.243	38.222	
b	d	
0.0001	0.0002	
Unit: mm		
σ_x	σ_y	ϕ
4.19	7.67	-6.52
σ_x	σ_y	τ_{xy}
4.24	7.62	-0.39
Unit: stress in MPa, ϕ in degrees		

Table 4 Estimated parameters of ellipse equation and temporary stresses under $S_y=5\text{MPa}$ in Case 2.

ΔX	ΔY	
-0.297	0.070	
a	c	
38.247	38.219	
b	d	
0.0029	-0.0046	
Unit: mm		
σ_x	σ_y	ϕ
3.38	8.10	-6.96
σ_x	σ_y	τ_{xy}
3.45	8.03	-0.57
Unit: stress in MPa, ϕ in degrees		

Table 5 Comparison applied stress change with estimated stress change in the case that S_y is changed from 3MPa to 5MPa .

Case 1	$\Delta\sigma_x$	$\Delta\sigma_y$	$\Delta\tau_{xy}$
Applied stress change	0	2	0
Estimated stress change	0.11	1.81	-0.18
Case 2	$\Delta\sigma_x$	$\Delta\sigma_y$	$\Delta\tau_{xy}$
Applied stress change	0	2	0
Estimated stress change	-0.07	1.71	-0.16

力変化と比べて -0.19MPa 、すなわち約 10% 程度の誤差が生じている。また、水平応力変化を与えていないにも拘わらず、 $\Delta\sigma_x$ と $\Delta\tau_{xy}$ には $0.1 \sim 0.2\text{MPa}$ の僅かな変化が評価されている。

つぎに、Fig. 5 のケース 2 の場合、ケース 1 に比較して測定データの振幅が大きくなり、 2π の周期となっている。このデータに本評価法を適用すると、Table 3 および 4 に示すように、 3MPa では装置の軸は $(\Delta X, \Delta Y) = (-0.269, 0.056)$ mm、 5MPa では $(\Delta X, \Delta Y) = (-0.297, 0.070)$ mm となり、試験条件である装置の軸を X 方向に -0.2mm 移動させた結果を反映している。また、補正することで測定データは π の周期で変化し、近似曲線とよい一致を示す。長軸、短軸、中心座標においては、ケース 1 と同様に応力の増大に伴い、長軸は 38.244mm から 38.247mm と長くなり、短軸は 37.927mm から 38.219mm と短くなっている。中心座標についても同様にほぼ $(0, 0)$ である。

両結果から応力変化についてまとめると Table 5 の下表のようである。これらの値は Table 1 から 4 に示す見かけの応力の差を取って応力変化としている。 $\Delta\sigma_y$ についてみると、 1.71MPa と評価されており、10 ~ 15% 程度の誤差が生じている。また、水平応力変化を与えていないにも拘わらず、 $\Delta\sigma_x$ と $\Delta\tau_{xy}$ には $0.07 \sim 0.16\text{MPa}$ の僅かな変化が評価されている。

両ケースの主方向についてみてみると、Table 1 から 4 の ϕ に示すように、ケース 1 の (a) では -6.96 度、(b) では -6.52 度、ケース 2 の (a) では -8.06 度、(b) では -6.96 度である。鉛直方向載荷にも拘わらず主方向が傾いており、評価された主方向は載荷軸の方向より全て時計回りに回転している。この結果は、用いた安山岩供試体にわずかな異方性が存在した可能性に加えて、測定された変位量が小さいため、測定誤差も含まれていたと考えられ、 $\Delta\sigma_x$ と $\Delta\tau_{xy}$ においても応力変化が評価されたと推測される。なお、今回の変位計測の回転角のピッチは 2 度であるため、必要に応じて測定点の数を増加させる、あるいは 1 点の測定スタック数を増加させるなど、測定誤差を小さくする工夫も重要である。

上記の結果より、ボアホールと装置の軸のずれに対しては精度良く評価することができたが、応力変化に 10 ~ 15% 程度の誤差が生じた。これは供試体の異方性、ヤング率の値、測定値のばらつきなどに起因して発生したと考えられる。

3. 原位置試験への適用

3.1 原位置試験の概要

測定が行われた神岡鉱山の平面図を Fig. 6 に示す。鉱山において図中の空洞が掘削された。空洞は幅 15m 、高さ 15m 、奥行き 21m でほぼ直方体である。また、周辺岩盤の地質は堅硬な飛騨片麻岩が主体であり、全般的には良好な岩が広く分布している。周辺岩盤には不連続面あるいは脆弱帯としての断層は存在しない。空洞土被りは約 900m である。

測定期間は約半年で、空洞掘削の適当な段階において応力変化

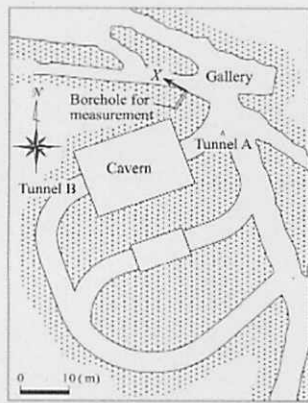


Fig.6 Location of borehole for measurement and cavern in the plan view of measurement site in Kamioka Mine.

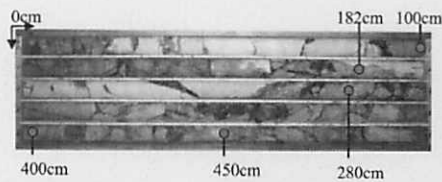


Fig.7 Core of borehole for measurement and measurement points.

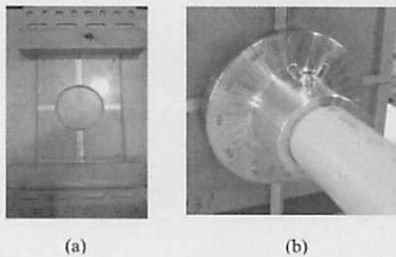


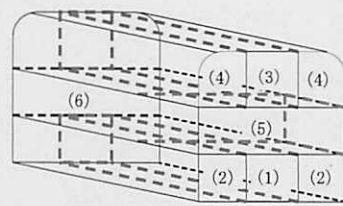
Fig.8 Tools for installation of instrument in situ; (a) datum plate for rotation, (b) flange fixed on the rod for determining the position on the direction.

を評価した。測定用ボアホールは、既設の坑道から掘削予定の空洞壁面までの距離が約7mの坑柱内にほぼ水平に削孔された。なお、解析に用いたヤング率は、採取したコアの1軸圧縮試験から得られたヤング率の約1/2の30GPaとし、ポアソン比は0.2と仮定した。測定したボアホール直径は75.7mmであり、以下では、半径37.85mmからの差を変位とした。また、座標系は鉛直上向きをY、孔口から孔底に向かって水平右側をXと定めた。

測定用ボアホールのボーリングコアをFig.7に示す。採取されたコアはき裂が多くみられる。また、0.2m～0.9m、1.9m～2.6m地点に明らかに異なる岩種が含まれている。そこで、CBDMによるボアホール壁面変位測定は、丸で示す5か所で行われたが、ここではコアの状態が比較的良好な孔口から4.0mの地点(空洞壁面隅部から3m地点)の結果を示す。なお、Fig.8のような基準盤と位置決め用のフランジを孔口に設置し、測定深度や条件が毎測定ごと同様になるようこれらを基準に孔壁変位測定装置を挿入して測定を行った。

空洞掘削の概念図をFig.9に示す。掘削は下段、上段、中段の順に行われた。まず、下段がトンネルAより(1)の部分掘削した後、拡幅された(2)。つぎに、トンネルBより上段の(3)の部分掘削した後、拡幅された(4)。最後に、上段から下段に発破

Tunnel B side



Stage I: Before excavation
 Stage II: Excavation of center of lower part
 Stage III: During excavation of lower part
 Stage IV: After excavation of lower part
 Stage V: Excavation of center of upper part
 Stage VI: After excavation of upper part
 Stage VII: During excavation of middle part
 Stage VIII: After excavation of middle part
 Stage IX: Three months after completion of excavation

Fig.9 Measurement stage for the excavation of the cavern: access tunnel A is linked to (1) of lower part and tunnel B is to (3) of upper part.

孔を穿ち、中段を払った(5)、(6)。測定は、これらの掘削段階、掘削前の段階Iおよび掘削完成後約3か月経過した段階IXにおいて合計9回行われた。

3・2 測定結果と考察

測定された変位データおよび最小二乗法と黄金分割法を併用して得られた評価結果を掘削段階IとVについてFig.10に示す。(a)が測定データ、(b)、(c)は評価結果であり、図中の実線が楕円の方程式を用いて近似した結果である。(a)の分布は 2π の周期を示しているが、最小二乗法と黄金分割法を併用して装置の軸とボアホール軸を一致させると、(b)のように変位分布が π の周期となり、その振幅は0.05mm程度であることがわかる。また、(c)のようにボアホール断面形状は楕円となっている。さらに、補正された変位は近似曲線とよい一致を示していることがわかる。これらの結果は、測定が高精度に行われたことを示している。

上記の結果から各掘削段階の応力を評価し、掘削前の段階Iとの差を取って応力変化を評価した。その結果をFig.11に示す。図は水平方向応力変化 $\Delta\sigma_X$ 、鉛直方向応力変化 $\Delta\sigma_Y$ およびせん断応力変化 $\Delta\tau_{XY}$ を示す。縦軸は応力変化、横軸は空洞の掘削段階である。変化は段階Iでの測定値を初期値として0となっている。各応力成分の変化はなめらかであることがわかる。 $\Delta\sigma_Y$ においては、段階IIまで応力変化がない。すなわち、下段中央部の掘削終了までは掘削の影響はほとんどない。しかし、拡幅が始まる段階IIIでは、その影響のため応力が増大し、拡幅が終了した段階IVにおいて増大している。掘削が上段に移り、上段の拡幅が始まる段階Vでは応力は大きな値を示し、その後、掘削が進行するとともに減少している。一方、 $\Delta\sigma_X$ においては、段階IIにおいてすでに増加が始まっているが、 $\Delta\sigma_Y$ と同様に、段階Vにおいて大きな値を示し、その後の段階では減少している。また、 $\Delta\tau_{XY}$ においては、各段階で測定された値は大きなばらつきもなく変化しており、掘削に伴って主方向は徐々に変化していることが推測される。

これらの結果は、空洞壁面から約3mの地点の結果であることから、掘削段階Vのところに、測定地点付近が降伏して緩み領域となることによって、応力は最大値を履歴し、その後減少したと推測される。

以上のように、長期的にボアホールの壁面変位を測定することで、空洞掘削に伴う応力変化が評価できることを示し、岩盤応力変化測定に対するCBDMの有効性を明らかにした。さらに詳細な検討を行おうとすると、数値解析を行いそれらの結果と比較検

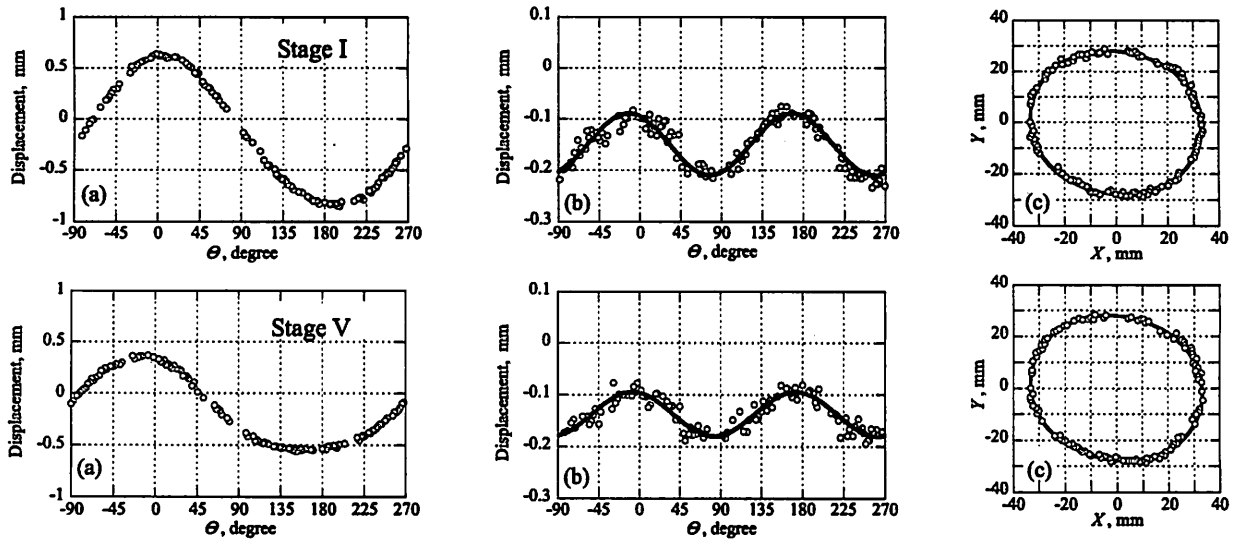


Fig.10 Measured and analyzed results: (a) measured data, (b) corrected data, (c) cross-sectional shape in the plane perpendicular to the borehole axis; upper figures represent the results of Stage I and lower figures are those of Stage V; solid lines in (b) and (c) are approximation; deformation in (c) is described, adding 50 times displacement to radius.

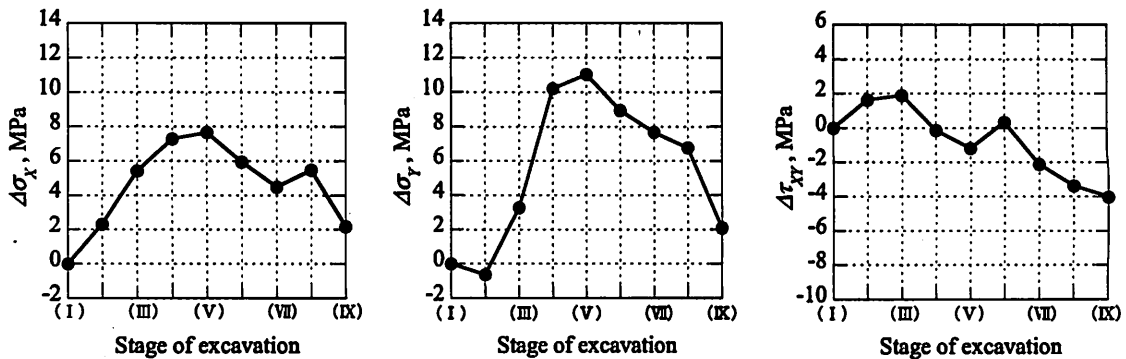


Fig.11 Changes of all components of stress in the X-Y coordinate system: X-axis is defined in the horizontal direction as shown in Fig.6 and Y-axis is defined vertically.

耐し、測定結果の妥当性を示すことが望まれる。

4. 結 言

本研究では、孔壁変位測定法 (CBDM) のために開発した孔壁変位測定装置を用いた室内試験および原位置試験を行い、それらの結果を分析するとともに、CBDM の岩盤応力変化測定への適用性について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 初期応力測定法と CBDM と併用することで岩盤応力変化の絶対値を評価できることを示し、初期応力測定法として円錐孔底ひずみ法 (CCBO) を推奨し、初期応力測定後のポアホールを利用する CBDM のための孔壁変位測定装置を開発した。
- 2) 円孔を有する安山岩の平板供試体を用いた室内試験を実施し、測定結果を用いた非線形最小二乗法と非線形最適化法の併用による岩盤応力評価法の妥当性を明らかにするとともに、供試体の異方性、ヤング率の値、測定値のばらつきなどを考慮する

ことにより十分な精度で応力変化を評価できると論じた。

- 3) 掘削中の空洞近傍の原位置岩盤に作孔されたポアホールを利用して、岩盤空洞掘削時の応力変化の測定に CBDM を適用し、長期間に亘る岩盤応力変化測定に対して有効であることを具体的に示した。

References

- 1) Y. Obara, T. Shin, T. Yoshinaga: Journal of MMIJ, 127 (2011), 20-25.
- 2) Y. Obara, T. Shin, T. Yoshinaga, K. Sugawara, S.S. Kang: Proc. of Int. Symp. on In-situ Rock Stress, Beijing, (2010), pp. 129-134.
- 3) Y. Obara, Y. Fukushima, T. Yoshinaga, T. Shin, M. Ujihara, S. Kimura, T. Yokoyama: Proc. of Int. Congr. on ISRM, Beijing, (2011), to be appeared.
- 4) T. Kiguchi, Y. Kurohara, T. Yokoyama: Proc. of MMIJ Fall Meeting Sapporo, (2009), pp. 309-312.
- 5) K. Kawabe, F. Sugimoto, T. Imai: Journal of MMIJ, 121 (2005), 378-386.
- 6) Y. Sugawara, Y. Obara: Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 36 (1999), 307-322.
- 7) Y. Obara, K. Sugawara: Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 40 (2003), 1187-1203.