

孔壁ひずみ法を利用した 連続三次元応力測定システムの開発

板本 昌治^{1*}・桑原 和道²・丹野 剛男²・中山 芳樹³・水田 義明⁴

¹正会員 株式会社3D地科学研究所 東京事業所 技術部 (〒107-0052 東京都港区赤坂九丁目6-41)

²株式会社3D地科学研究所 東京事業所 技術部 (〒107-0052 東京都港区赤坂九丁目6-41)

³正会員 工博 株式会社3D地科学研究所 東京事業所 技術部
(〒107-0052 東京都港区赤坂九丁目6-41)

⁴正会員 崇城大学 工学部環境建設工学科 教授 (〒860-0082 熊本県熊本市池田四丁目22-1)

*E-mail: itamoto@3d-geosci.jp

岩盤応力測定法である応力解放法のうち、孔壁ひずみ法¹⁾を利用し1回の測定で複数点の応力状態を三次元的かつ連続的に得るシステムを開発した。このシステムは原位置における多点での測定結果を得ることによる精度向上や1回の測定で複数点の結果が得られる経済的効果が期待できる。このシステムを原位置での計測に適用するにあたり、有限要素法(FEM)による数値解析および二軸載荷試験装置を用いた室内実験を行い、ひずみゲージの貼付け治具および貼付け方法の適用性と測定精度に関する検証を行った。実験の結果、このシステムの原位置における適用が十分可能であることが判明した。

Key Words : rock stress, three dimensional stress state, serial stress measurement, over-coring, FEM analysis, biaxial loading test

1. はじめに

我が国では地下発電所、放射性廃棄物の地下処分施設および天然ガスや石油の地下備蓄基地など地下空洞を積極的に利用する機会が近年増加している。このような地下空洞を安全かつ経済的に設計・施工するうえで計画地点での初期地圧を把握することは重要である。また、最近ではより経済的で効率的な支保工や覆工の新たな工法技術を開発するため、あるいは保守管理といった目的で施工後の空洞周辺の二次地圧や覆工自体に作用する応力を測定することもある。この様な初期地圧や二次地圧を計測する方法としては多くの研究者により様々な方法が提案されている。原位置試験に着目すると現在我が国で主に使用されている方法として電中研式埋設ひずみ法および円錐孔底ひずみ法などの応力解放法や水圧破砕法が挙げられる。これらの手法は一回の測定で1点における二次元あるいは三次元応力状態が結果として得られることは周知のことである。筆者らは応力解放法の一手法である孔壁ひずみ法を利用し、一回の測定で複数点の測定を行い連続的な三次元応力状態を把握できるシステムを考案した。この論文では計測システムの原位置適用に先がけ、FEMによる数値解析および二軸載荷試験装置を用いた室内実験を行い、測定精度の検証とゲージ設置治具の原位置での適用性について検討を行った。

2. 孔壁ひずみ法の原理

孔壁ひずみ法は1960年代から用いられている応力測定法で応力解放法の一つである。この方法はパイロットボーリングの孔壁面における解放ひずみをオーバーコアリング法により測定し、弾性論によって応力値を計算するものである。しかしながら、孔壁面にひずみゲージを貼付けること自体が比較的困難で、様々な貼付け手法が考案されている²⁾が現在ではあまり用いられていない方法である。そこで筆者らはパッカー方式により簡便にゲージを貼付ける装置を開発した。また、貼付け断面を複数断面にすることにより一度の測定で複数個所の三次元応力状態を測定する方法を考案した。

図-1は孔壁ひずみ法における座標と孔壁面に貼付けるゲージ配置を示したものである。用いるゲージはロゼットゲージで、この時測定されるひずみは孔軸と平行な方向のひずみ ϵ_z 、これに直交する孔壁の円周方向のひずみ ϵ_θ およびこれらの方向と45度をなす方向のひずみ ϵ_{45} である。この様なロゼットゲージを孔壁の同一円周上に3個配置し解放ひずみを測定することによって、原位置の三次元応力状態を計算することができる。今回、ロゼットゲージは120°間隔で配置した。また、ゲージ貼付断面を複数箇所とすれば、一度の測定で複数箇所の三次元応力状態を知ることが出来る。

これらのひずみと直交座標における応力はボーリング孔半径を a 、ゲージ長を l とし $\omega = l/a$ とおきマトリックス表示すると式(1)で表される。

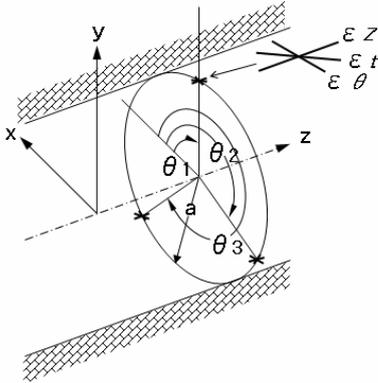


図-1 孔壁ひずみ法における座標とゲージ配置

$$\begin{bmatrix} \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \epsilon_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2\sin\omega}{\omega} \cos 2\theta \\ -\frac{2\nu \sin\omega}{\omega} \cos 2\theta \\ (1-\nu)\left(\frac{\sin(\omega/\sqrt{2})}{\omega/\sqrt{2}} - \frac{\sin\omega}{\omega}\right) \cos 2\theta \\ 1 + \frac{2\sin\omega}{\omega} \cos 2\theta \\ \frac{2\nu \sin\omega}{\omega} \cos 2\theta \\ (1-\nu)\left(\frac{\sin\omega}{\omega} - \frac{\sin(\omega/\sqrt{2})}{\omega/\sqrt{2}}\right) \cos 2\theta \\ -\frac{4\sin\omega}{\omega} \sin 2\theta \\ -\frac{4\nu \sin\omega}{\omega} \sin 2\theta \\ 2(1-\nu)\left(\frac{\sin(\omega/\sqrt{2})}{\omega/\sqrt{2}} - \frac{\sin\omega}{\omega}\right) \sin 2\theta \\ 0 \\ 0 \\ 2\frac{\sin(\omega/\sqrt{2})}{\omega/\sqrt{2}} \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)の3×6行列を単純に $[A]$ とおき簡略化すると

$$\{\epsilon\} = [A] \cdot \{\sigma\} \quad (2)$$

と表される。式(2)を正規化するためには行列 $[A]$ の転置行列 $[A]^T$ を左側から乗じ

$$[A]^T \{\epsilon\} = [A]^T [A] \cdot \{\sigma\} \quad (3)$$

とすればよい。従って、求める応力について整理す

ると

$$\{\sigma\} = ([A]^T [A])^{-1} \cdot [A]^T \{\epsilon\} \quad (4)$$

となる。

3. 数値解析

(1) ゲージ長と算出応力値との関係

第2章における式(1)はゲージ長を考慮した式となっている。今回、実験ではボーリング孔45mmに対して、用いたひずみゲージの長さは6mmである。ゲージ長を考慮して算出した応力値と考慮しないで算出した応力値とではどの程度の誤差が発生するかを確認した。なお、ゲージ長を考慮しない場合の計算は式(1)における $\sin\omega/\omega$ および $\sin(\omega/\sqrt{2})/(\omega/\sqrt{2})$ を1として計算すればよい。応力値の比較計算には二軸載荷試験で得られたひずみの値を用いた。ゲージ長は6mmと10mmで検討した。応力はゲージ長を考慮した時の値を1とし、考慮しないで計算された値を比で示した。

計算の結果、ゲージ長6mmではゲージ長を考慮した応力値に対し、考慮しない応力値では最大1%程度の誤差が発生し、ゲージ長10mmの場合では最大3%程度の誤差が発生することが判明した。計算結果を表-1に示した。

表-1 ゲージ長を考慮した計算としない計算による応力値の比 (ボーリング径45mm)

ゲージ長	6mm		10mm		
	考慮	考慮しない	考慮	考慮しない	
6 応力 成分 の 比	σ_x	1.000	1.000	1.000	1.001
	σ_y	1.000	1.000	1.000	0.999
	σ_z	1.000	1.000	1.000	1.000
	τ_{xy}	1.000	0.987	1.000	0.967
	τ_{yz}	1.000	0.993	1.000	0.981
	τ_{zx}	1.000	0.991	1.000	0.976

(2) 二軸載荷試験のひずみ挙動の検討

実験に先立って実験値の妥当性を検証するため、二軸載荷試験装置によりモルタル供試体を載荷した時に、径45mm孔の孔壁面に発生するひずみと応力について数値解析を行った。解析モデルは外径300mm、内径45mmおよび長さ320mmの円筒回転体として扱った。モデルの物性値はモルタル供試体のものを用い以下の値とした。

ヤング率：28GPa、ポアソン比：0.225

載荷条件はモデルの長さ320mmに対し端から300mmまでの区間を載荷範囲とした。これは実験を実施した際の供試体に作用させた載荷範囲と同様である。数値解析の結果は表-2および図-2にまとめた。表-2はモデルに載荷した時の径45mm孔の孔壁面に発生するひずみの量を深度50mm、150mmおよび250mmについて算出したものである。この深度は実

験で測定した深度と同様である。また、図-2は供試体のほぼ中心部にあたる深度150mmでの載荷圧とひずみの関係を示したグラフである。

表-2 単位応力に対して径45mm孔壁面に発生したひずみのFEM解析値 (E=28GPa, $\nu=0.225$)

深度 (mm)	ひずみ(μ)		
	ϵ_{zFEM}	$\epsilon_{\theta FEM}$	ϵ_{tFEM}
50	17	-65	-24
150	18	-65	-23
250	14	-56	-21

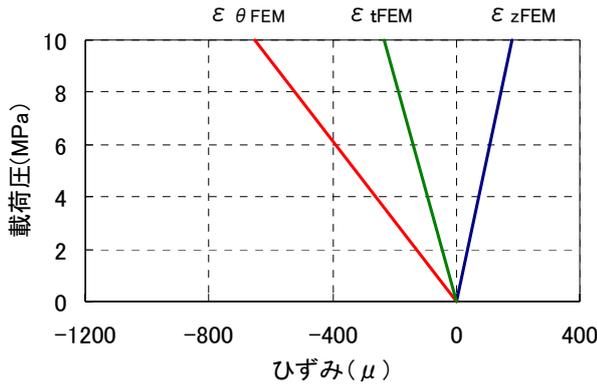


図-2 FEM解析による載荷圧とひずみの相関 (深度150mmの場合, E=28GPa, $\nu=0.225$)

FEM解析で得られたひずみを用いて各測定深度で発生する応力を式(1)を用いて算出した。表-3は載荷圧が1MPaで作用した時の各測定点で発生する応力値を示したものである。深度50mmおよび深度150mmでは載荷圧の約90%が孔軸に直交する断面上の応力 σ_{xFEM} , σ_{yFEM} として作用し、深度250mmにおけるそれは載荷圧の約80%となった。また、孔軸方向の応力 σ_{zFEM} では載荷圧の3~10%の引張応力が発生すると解析された。

表-3 各測定点における載荷圧とFEM解析ひずみから求めた応力値との比較

深度 (mm)	載荷圧 (MPa)	FEM解析ひずみによる応力値(MPa)	
		$\sigma_{xFEM}, \sigma_{yFEM}$	σ_{zFEM}
50	1.00	0.91	-0.05
150		0.90	-0.10
250		0.78	-0.03

(E=28GPa, $\nu=0.25$)

(3) オーバーコアリング時のひずみ挙動の検討

原位置での計測に先立ってオーバーコアリング時におけるパイロット孔壁面のひずみ挙動をFEM解析により求めた。

モデルは径110mmのボーリングを1m程度行い孔

底面から径45mmのパイロット孔を600mm掘削したと仮定したものを回転体モデルとして解析を行った。また、モデル外縁部は測定点の解析値に影響しないよう110mmボーリング径の10倍程度とした。モデルの物性値は

ヤング率：10GPa, ポアソン比：0.25

とした。また、モデル外周に作用する応力を1MPaとした。この時に、径45mmのパイロット孔を径110mmでオーバーコアリングした。開始深度を0mmとし深度800mmまで掘削した時のひずみ変化を掘進深度100mmごとに解析を行った。図-3にFEM解析モデルを示す。

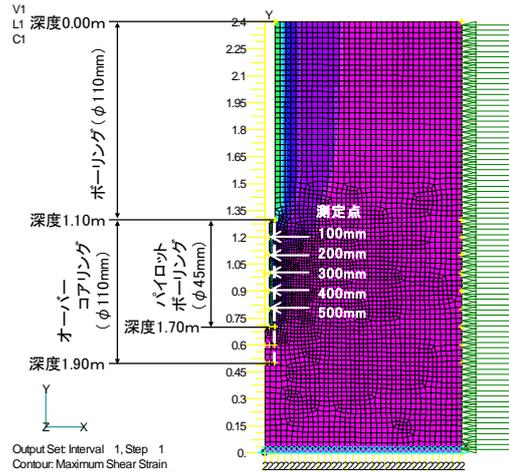


図-3 オーバーコアリング時のひずみ挙動検討のためのFEM解析モデル

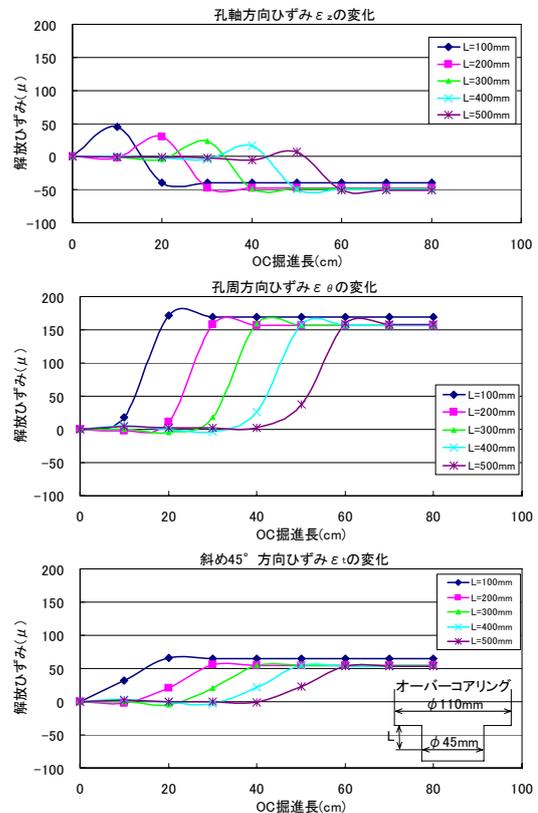


図-4 FEM解析によるオーバーコアリング時のひずみ挙動 (E=10GPa, $\nu=0.25$)

FEM解析の結果を図-4に示した。オーバーコアリング開始深度から深度100mm, 200mm, 300mm, 400mmおよび500mmの測定点における径45mmパイロット孔の孔壁ひずみ変化を掘削深度でまとめたものである。測定点の深度やひずみ方向により若干の差異はあるが、深度200mm以深での各測定点による解放ひずみの解析値はほぼ同程度の値に収束する。一方、深度100mmでの解放ひずみは10~15 μ 程度大きな値となった。この違いは径110mmボーリング孔に伴う応力集中の影響によるものと考えられ、このひずみを用いて応力値を算出した場合、応力集中の影響を受けない箇所との値に比べ10%程度大きな値となる。また、深度200mmの箇所では1%未満となる。従って、原位置計測でこの影響を取り除くためには、径110mmボーリングの孔底面からボーリング径程度の深度より深い位置に測定点を設定する必要がある。

4. 室内実験

(1) 実験方法

300mm×300mm×高さ320mmのモルタルブロックを作成しブロックの中心を通る長手方向に径45mmのパイロット孔を穿ち供試体とした。

新たに開発した多段式ひずみゲージ貼付パッカー（以下多段貼付パッカー）を用いボーリング孔壁面の深度50mm, 150mmおよび250mmの位置につき3枚のロゼットゲージを貼付けた。

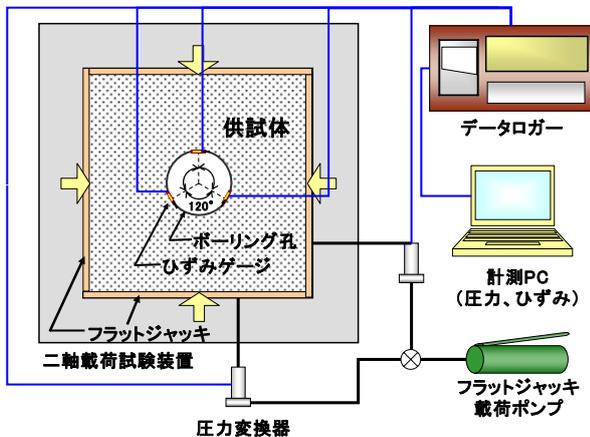


図-5 二軸載荷試験測定システム

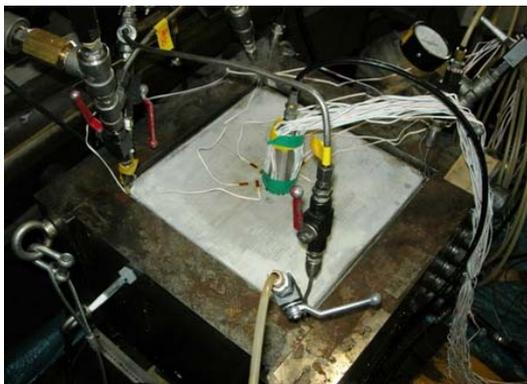


写真-1 二軸載荷試験装置と供試体

モルタル供試体は二軸載荷試験装置に設置し300mm正方のフラットジャッキにより載荷した。フラットジャッキによる載荷範囲は供試体上面から300mmとした。載荷条件は等圧状態とし、載荷速度は0.5MPa/minで載荷圧は最大10MPaとした。

この時、ボーリング孔壁面に貼付けたひずみゲージの挙動をデータロガーで測定した。図-5に二軸載荷試験における測定システムを示した。写真-1は二軸載荷試験装置にセットされたモルタル供試体の孔内に多段貼付パッカーを挿入しひずみゲージを貼付けている状況を示したものである。

(2) ゲージ貼付け

ひずみゲージは多段貼付パッカーを用い、孔口からの深度50mm, 150mmおよび250mmの位置につき3枚のロゼットゲージをそれぞれ120°間隔で貼付けた。貼付け直前にシアノアクリレート系接着剤をゲージ表面に塗布し、供試体の45mmパイロット孔へ挿入してパッカーを加圧膨張させ孔壁に貼付けた。なお、多段貼付パッカーはパイロット孔への挿入時にひずみゲージおよび接着剤が孔壁に接触しないよう、センタライザーを装着している。また、予めボーリング孔と同径の亚克力管内で膨張させ1MPa程度で孔壁に接触することを確認した。そこでゲージの貼付けに際しては多段貼付パッカーの加圧を2MPa程度とした。パッカーゴムによる圧力損失を考慮するとゲージ押し付け圧は1MPa程度である。

写真-2は多段貼付パッカーにひずみゲージを装着した状況である。また、図-6は多段貼付パッカーを用いてひずみゲージを孔内に貼付ける状況を模式的に示した図である。図に示すようにゲージ貼付けに際してはデータロガーにより圧力とひずみの監視を行った。



写真-2 多段貼付パッカーとひずみゲージ

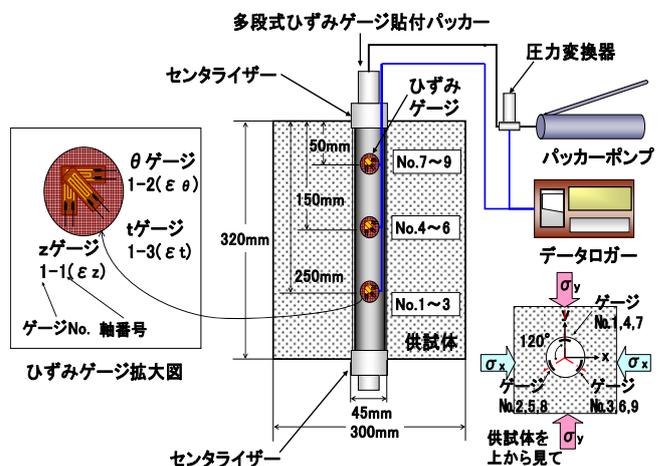


図-6 多段貼付パッカーの概要とゲージ貼付け模式図

(3) 実験結果

二軸荷試験による実験で得られた応力-ひずみ曲線を図-7に示した。この図は測定深度毎に上段の深度50mm、中段深度150mmおよび下段の深度250mmの三断面で同時に得られた測定データをまとめたものである。試験の結果、荷重10MPaで孔軸方向のひずみ ε_z は142 μ から255 μ の引張、円周方向のひずみ ε_θ は525 μ から727 μ の圧縮、孔軸から45°のひずみ ε_t は150 μ から344 μ の圧縮を示した。ただし、計測したひずみのうち深度150mmの θ 方向の6-2ゲージのみは他のゲージとやや異なる挙動を示した。

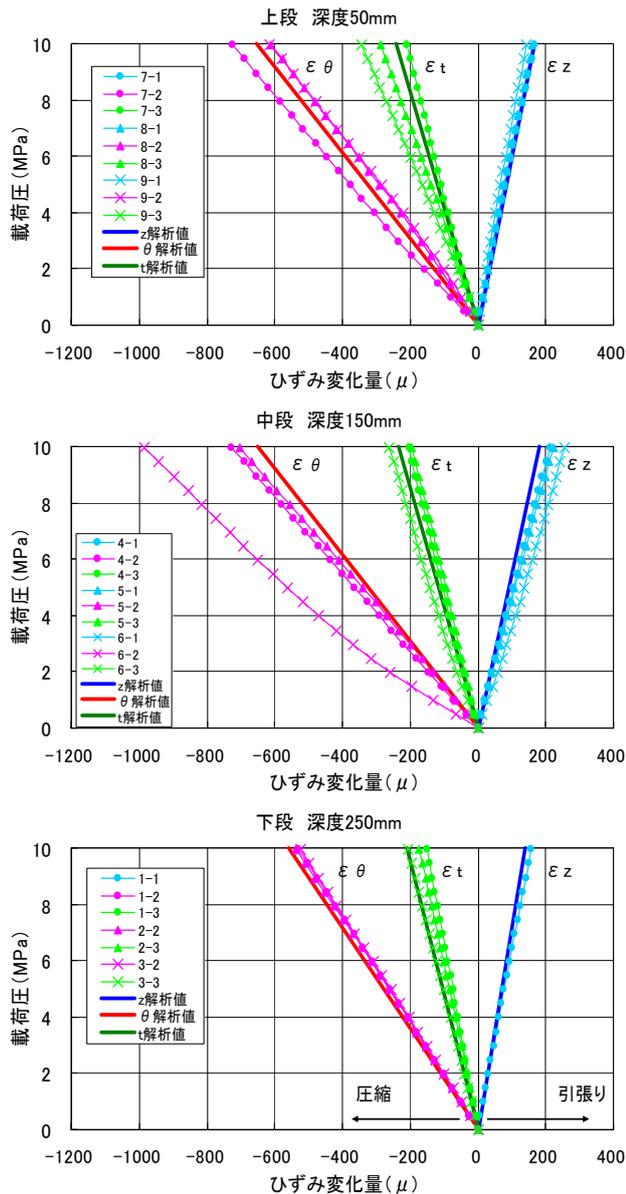


図-7 二軸荷試験で同時に得られた三断面の応力-ひずみ曲線

なお、第2章で述べたFEM解析で得られた二軸荷試験時のひずみ挙動を太い実線で測定データと併記した。この解析ひずみと測定ひずみを比較すると両者は良く一致しているといえる。また、下段の深

度250mmのひずみは測定値、解析値とも若干上段中段のひずみより小さな値を示しているが解析値と良く一致している。これは供試体下部の20mmの未荷重部による影響を反映した結果を示したものと考える。

(4) 応力値の計算とFEM解析結果との比較

フラットジャッキによる荷重の1MPaから10MPaの範囲で1MPaごとに得られたひずみデータを用いて応力値を算出した。算出に用いたモルタル供試体の物性値は

ヤング率：28GPa、ポアソン比：0.225

とした。

算出した応力値 σ_x と σ_y についてFEM解析による応力値 σ_{hFEM} との比較を行った。図-8は縦軸に測定で得られた応力値 σ_x と σ_y を横軸にFEM解析によって得られた応力値 σ_{hFEM} を取り相関を調べたものである。深度50mmと深度150mmでは解析値に比べ測定値の方が大きな値となり、 σ_x と σ_y に差異が生じた。一方、深度250mmでは解析値に比べ測定値が小さくなったが σ_x と σ_y とはほぼ一致する結果となった。この原因としてはパイロット孔内の壁面の仕上がり状態が不良であることによるゲージの接着力の低下などが考えられる。

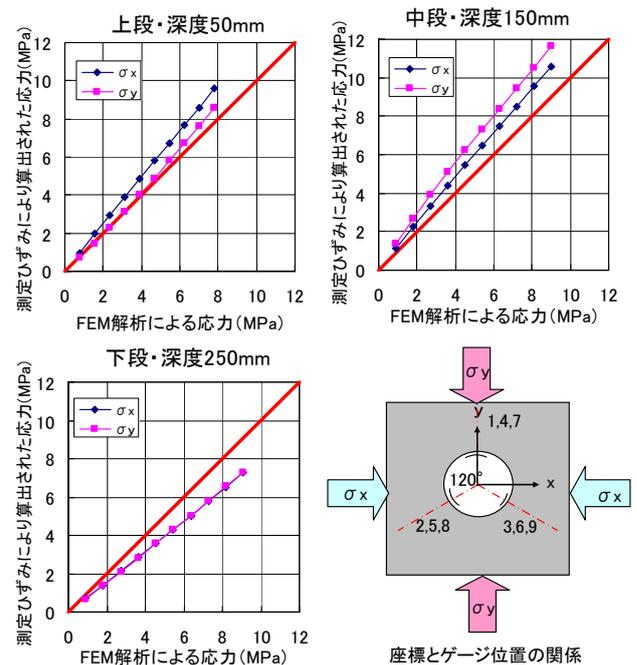


図-8 測定ひずみにより算出した応力とFEM解析によるひずみから算出した応力との相関

5. まとめ

孔壁ひずみ法を利用してゲージ貼付け断面を複数にすることにより、1回の測定で連続的に応力を測定するシステムを考案した。この計測システムを原位置計測に適用するため室内実験と数値解析を行い測定精度の検証および原位置計測での適用性の検討

を行った。

ゲージ長を考慮して計算した応力値と考慮しないで計算した応力値の関係を検討したところ、パイロットボーリング径45mmでゲージ長6mmの場合、ゲージ長を考慮しないで計算した応力値は考慮した値に比べ最大で1%程度の誤差が生じ、ゲージ長10mmの場合は最大3%程度の誤差が発生すると判明した。

円筒回転体モデルのFEM解析により二軸載荷試験時のひずみの計算を行い応力値の算出をおこなった。その結果、二軸載荷試験装置の載荷圧に対し、各測定点では孔軸に直交する断面上の応力が80~90%となり、ボーリング孔軸方向では載荷圧の3~10%の引張応力が発生することが明らかとなった。

径110mmでオーバーコアリングをした場合のひずみ挙動をFEMで解析した。その結果、110mm孔の応力集中が測定値に影響することが分かった。また、この影響を低減するためにはパイロット孔のゲージ貼付け位置を、110mm孔の孔底面から深度100mm以深とすることにより応力値での誤差が10%未満となる。なお、孔底面からの深度200mmでは誤差が1%未満となる。

300mm×300mm×高さ320mmのモルタル供試体を作成し二軸載荷試験を実施した。ひずみゲージを複数断面で貼り付けるために開発した多段貼付けパッカーを用いパイロット孔の深度50mm, 150mmおよび250mmにひずみゲージを貼付けた。一回の測定で3断面のひずみ計測を行い、連続した三次元応力の解析を行うことができた。得られた3断面の応力-ひずみ曲線はFEM解析によるひずみ挙動と良く一致した。また、測定したひずみから得られた応力値も調和的な結果を示した。

6. 今後の課題

新たに開発した3断面ひずみゲージ多段貼付けパッカーによる9枚のロゼットゲージの貼付けで、9×3=27個のゲージのうち2個のゲージが断線し、1個のゲージが不良となった。この原因として、パイロット孔の孔壁面の仕上げが悪く、ゲージの貼付け状態があまり良くなかったことと貼付け圧がやや高かった事が想定される。従って、ゲージ貼付け壁面の仕上げ精度の向上と適正貼付け圧の検討が必要と思われる。また、ひずみゲージ貼付け治具の改良と接着剤の選定あるいは開発を行って貼付け技術の改良を進めることが必要である。

現在のところ、このシステムはゲージ貼付けにシアノアクリレート系接着剤を使用するため、孔壁面が乾燥した状態でかつ硬岩やコンクリートなどの接着剤が浸透しない緻密な材質であること、測定範囲に亀裂などの不連続面が分布しないことが適用条件となっている。また、最大測定深度は数十mと考えている。今後は、水没した深い深度での計測や軟岩を対象とした計測などへの適用範囲の拡大を検討し、原位置測定システムとしての確立をめざす。

参考文献

- 1) Y. Hiramatu and Y. Oka: Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts, from measured strains or deformations *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 5, pp. 337-353, 1968.
- 2) E. R. Leeman: 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. 31-56, 1968.

DEVELOPMENT OF SERIAL MEASUREMENT SYSTEM FOR THREE-DIMENSIONAL STRESS DETERMINATION BY OVER-CORING THE STRAINS ON BOREHOLE WALL

Masaharu ITAMOTO, Kazumichi KUWABARA, Takeo TANNO,
Yoshiki NAKAYAMA and Yoshiaki MIZUTA

In order to determine the three-dimensional stress state in serial order, the authors developed the serial measurement system for three-dimensional stress determination by over-coring the strains on the borehole wall. The serial stress measurements give the value of the stresses with high accuracy and bring the regional stress variations. In this paper, the authors describe the studies through FEM analysis on the effect of over-coring diameter, the influence of strain gauge length and the behavior of strain on the borehole wall, induced by biaxial external loading. We developed the multi-strain gauge mounted packer and examined it by measuring the strains on the borehole wall through biaxial loading test. The Laboratory tests showed its applicability to practical use.