

# 新開発応力計と岩盤のカップリングおよび感度について

## — 遠方応力評価にむけて —

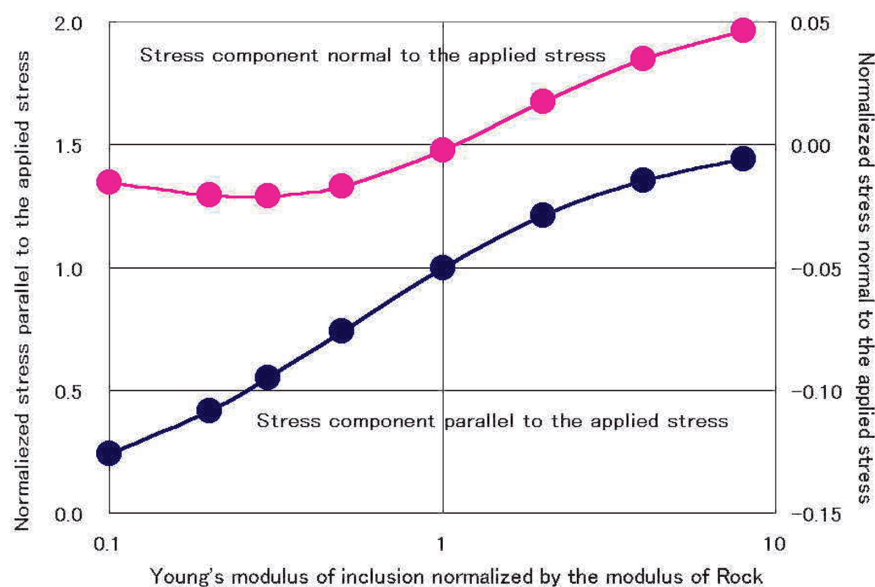
佐野 修・大久保慎人・浅井康広・石井 紘 (東濃地震科学研究所)

### 1. はじめに

東濃地震科学研究所で新たに開発された応力計はステンレス管と応力計センサー部が切り離されているため、ステンレス管の変形の影響を直接受けることはなく、測定結果の信頼性が飛躍的に向上すると期待されている(例えば川崎ほか [2014]; Ishii and Asai [2015]). 応力計センサー部は岩盤(実際にはモルタル)と接触するセンサー端部に加えた圧力で校正されているので、センサー出力は応力に換算可能である。しかし、その出力は応力計設置にともなうボアホール掘削とモルタルで周囲を充填したステンレス管からなる力学的インクルージョンの影響から逃れた遠方の応力変化ではない。地球科学者や岩盤工学研究者が知りたい応力変化、すなわち後者の遠方応力変化を知るためには、上記、力学的インクルージョン問題を解き、センサー出力と遠方応力の関係を知る必要がある。本報告では、岩盤内部に掘削されたボアホール内に新開発応力計をモルタルで固定した状態をモデル化し、三次元有限要素法解析により、観測量すなわち応力センサーで測られた応力変化から遠方応力場の変化を求める手法を解説する。

### 2. 基本原理

弾性媒体内に周辺と異なる媒体が存在する場合、内部の応力場は周辺と異なる。一例として、円形媒体が存在する場合、すなわち円形インクルージョン問題は二次元(円)および三



次元(球あるいは回転楕円体)とも弾性解が存在するが、本研究で採用する有限要素法で計算した結果を図1に示す。二次元問題として、円形インクルージョンのヤング率  $E_1$  と周辺媒体のヤング率  $E_0$  の比、 $E_1/E_0$  をパラメータとすることで、媒体中心部

図1. 円形インクルージョン中心部の主応力。

の主応力，すなわち外力と平行な方向の応力  $\sigma_{\parallel}$  および垂直な方向の応力  $\sigma_{\perp}$  が外力で正規化して示されている．外力に平行な周辺媒体端面を自由端面とした場合なので， $E_1/E_0 = 1$  の場合は  $\sigma_{\parallel}$  が 1 となり， $\sigma_{\perp}$  が 0 となることは言うまでもない． $E_1/E_0 > 1$  の場合，媒体内の  $\sigma_{\parallel}$  は遠方応力より大きくなり， $E_1/E_0 < 1$  の場合， $\sigma_{\parallel}$  は遠方応力より小さくなる．さらに， $E_1$  の減少にともない  $\sigma_{\parallel}$  は無限小に収斂する．外力に垂直な方向の応力  $\sigma_{\perp}$  は， $E_1/E_0 > 1$  の場合に外力と同極性の応力が， $E_1/E_0 < 1$  の場合に逆極性の応力が発生する．ボアホール応力計の力学的インクルージョンは，ステンレス管から切り離された応力センサー部，ステンレス管およびモルタルからなっており，弾性解析解が存在しないので，三次元有限要素法等による数値解析を用いる．

ボアホールを利用した地殻応力測定については多数の文献(例えば佐野[2005]; Sano et al. [2005])があるが，ここで少し詳しく述べる．一般に，ボアホールの擾乱を受けない状態の遠方応力場は東西南北鉛直座標系の応力成分を未知数とすることが多いが，一般化して  $\sigma_{ij}$  と表すこととする．ボアホール内に応力計を設置した場合，異なる複数の方向を向いた応力センサーが存在する．ここで，ボアホールに垂直な面内，個々のセンサーの軸方向および垂直な方向を座標軸としたローカル座標系の応力成分を  $\sigma'_{ij}$  とすると，二階のテンソルの座標回転，すなわち

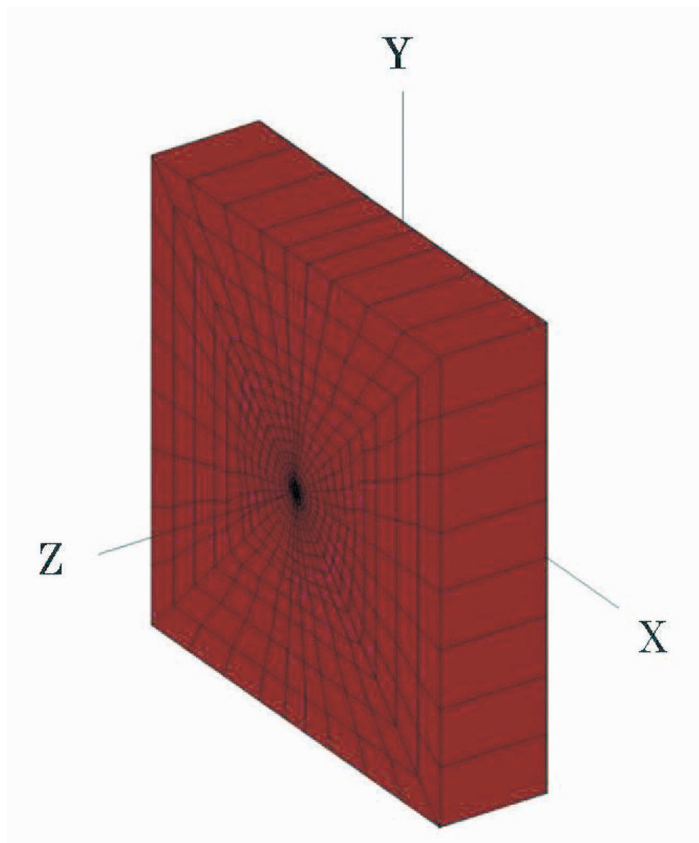


図 2．三次元有限要素法数値解析モデル．中央部，Z 軸方向にボアホールがある．

$$\sigma'_{ij} = a_{ik} a_{jl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

により， $\sigma'_{ij}$  はグローバル座標系の応力成分で表される．ただし  $a_{ij}$  は新旧座標系に関する方向余弦である．一般に，応力センサーの設置方向は既知であり，式(1)の方向余弦は応力計設置時に定まっている．したがって応力センサーにおよぼす  $\sigma'_{ij}$  の影響，すなわち感度係数を知ることができれば，式(1)を用いて  $\sigma_{ij}$  に関する応力センサーの感度係数が求められる．ここで複数のセンサーのうち，例えば p 番目のセンサーの  $\sigma_{ij}$  に対する応答，すなわち感度係数を  $c_{pij}$  とすると，観測量すなわちセンサー出力  $S_p$  と  $\sigma_{ij}$  の関係

は

$$S_p = c_{pij} \sigma_{ij} \quad (2)$$

と表すことができるので，三次元

の場合、未知数の数、すなわち6つ以上、二次元の場合で3つ以上の観測量があれば、連立一次方程式あるいは最小自乗法により、 $\sigma_{ij}$ を求めることができる。繰り返しになるが、ボアホール設置型応力計の観測値からグローバル座標系に関する応力成分を求める問題は、任意の応力センサーのローカル座標系に関する応力成分の感度係数を求める問題に帰着される。

### 3. 三次元有限要素法解析

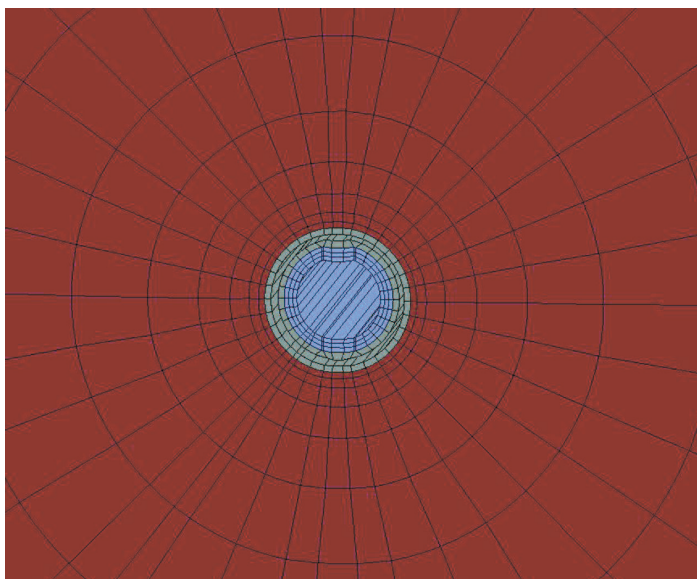


図3. 数値解析モデルの一端面の拡大. 茶色が岩盤, 灰色がモルタル, 青色がステンレス管.

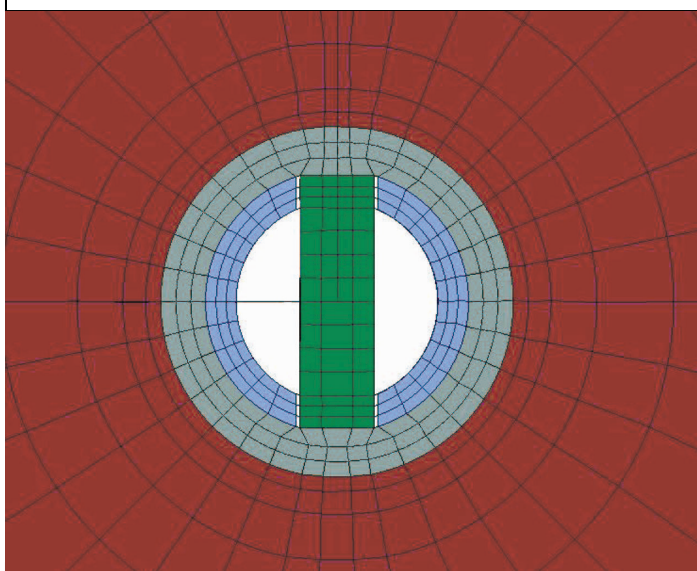


図4. 対称面断面図. 緑色が応力センサー部分. センサーは灰色で示されたモルタルと結合しているが, ステンレス管とは空気層で切断されている.

図2に示すように、岩盤から4 m × 4 m × 3.2 mの直方体を切り出したモデルを作成した。図中Z軸に平行に直径122 mmのボアホールが存在する。この問題はいくつかの対称面を持つが、そのなかで応力センサーの中心軸を含む、Z軸に垂直な面に関する対称問題としてモデル化した。図には分割線も示されているが、用いた三次元有限要素法解析プログラム(3D-σ: 地層科学研究所)の最適化により、さらに約4~6分割されているので、分割量は十分と考えられる。

応力計が存在しない端面(図2の左側端面)の拡大図を図3に示す。図中、茶色が岩盤、灰色がモルタル、青色がボアホール機器筐体に見立てたステンレス管である。図3の反対側、すなわち対称面側の拡大図を図4に示す。図中、緑色が応力センサーである。応力センサーは両端面でモルタルと結合しているが、ステンレス管との境界は空気層で分離されている。実際のセンサーの構造は図4に示されたような単純な形状ではないが、応力センサ

一で計測される応力はボアホール壁面間で力学的に抵抗することによって生じるので、実際のセンサーの較正時に加えた圧力と変形の関係にもとづき、センサーモデル端面に較正時と同じ圧力を加えた場合に同じ変形が生じるようなスティフネスをモデルに与えることにより単純構造モデルに置き換えた。

解析は応力センサー軸に平行な方向の応力  $\sigma_y$ 、垂直な方向の応力  $\sigma_x$ 、およびせん断応力  $\sigma_{xy}$  について、それぞれ端面に 1MPa 作用した場合について個別に実施した。一軸応力载荷の場合、载荷面に垂直でボアホール軸に平行な二つの端面について、一端面のみ面に垂直な変位を拘束した場合(変位自由)および両端面を拘束した場合(変位拘束)について行った。

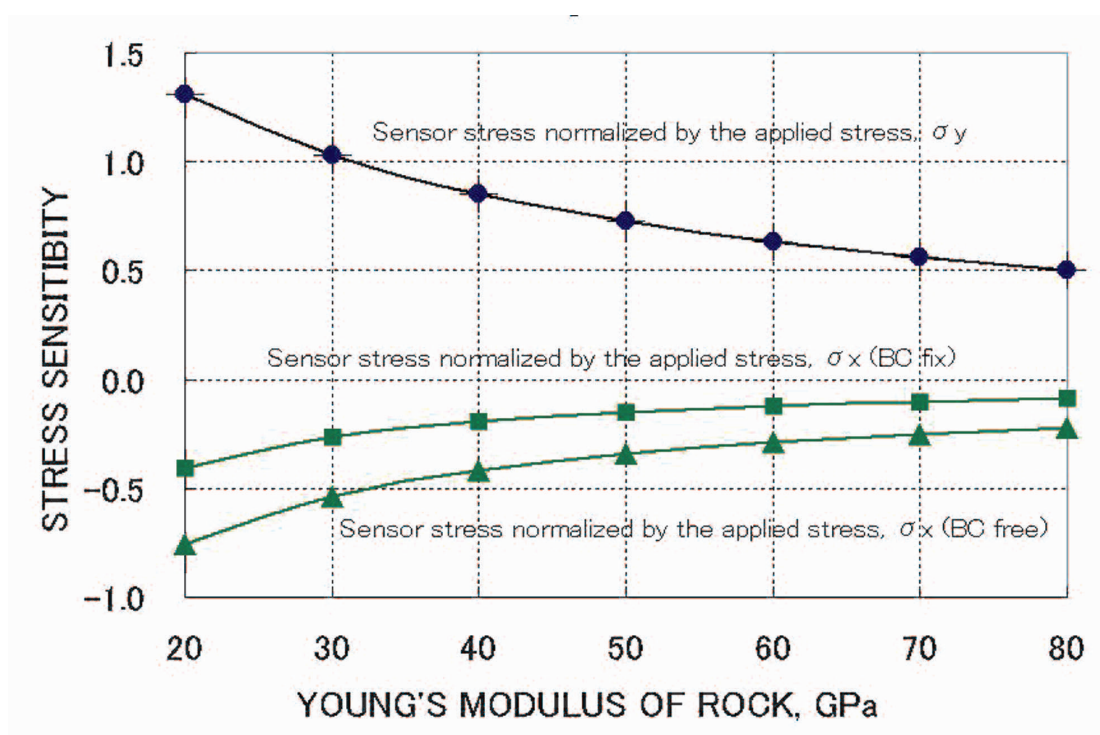


図5. 三次元有限要素法による解析結果. 応力センサー軸に平行な外力によりセンサー部に生じる応力は、周辺岩盤のヤング率の増加にともない低下する。また、センサー軸に垂直な外力により生じる応力は、解析に用いた境界条件により違いがあるが、外力と逆極性で、周辺岩盤のヤング率の増加にともない低下する。

三次元有限要素法解析によりえられた結果を図5に示す。応力センサー軸と平行な方向に力が加わった場合( $\sigma_y$ )に生じる応力センサー部の応力は、岩盤のヤング率が 30GPa の場合に、ほぼ同じ値となるが、岩盤のヤング率が 30GPa 以下の場合には遠方応力より大きく、岩盤のヤング率が 30GPa 以上では、ヤング率が大きいほど応力センサーに生じる応力が小さくなり、岩盤のヤング率が 80GPa の場合には応力センサーの感度は 0.5 まで低下することがわかる。図中、二つの異なる端面拘束条件の結果が示されているが、ほぼ重なってお

り、端面拘束条件の違いはほとんど影響していないこともわかる。一方、外力が応力センサー軸と垂直な $\sigma_x$ の場合には、端面拘束条件により結果が異なる。いずれの結果も応力の極性は逆極性であり、岩盤のヤング率が小さいほど値が大きくなっていることもわかる。なお、せん断応力 $\sigma_{xy}$ の結果は図に示されていないが、いずれの場合もゼロだからである。これは応力センサー内部が無応力状態であることを意味しているわけではない。センサー内部の任意位置と中心に関する点对称位置に生じる応力の大きさが等しく逆極性のため、全体としてはキャンセルされるからである。参考までに、三次元モデルの対称面側、すな

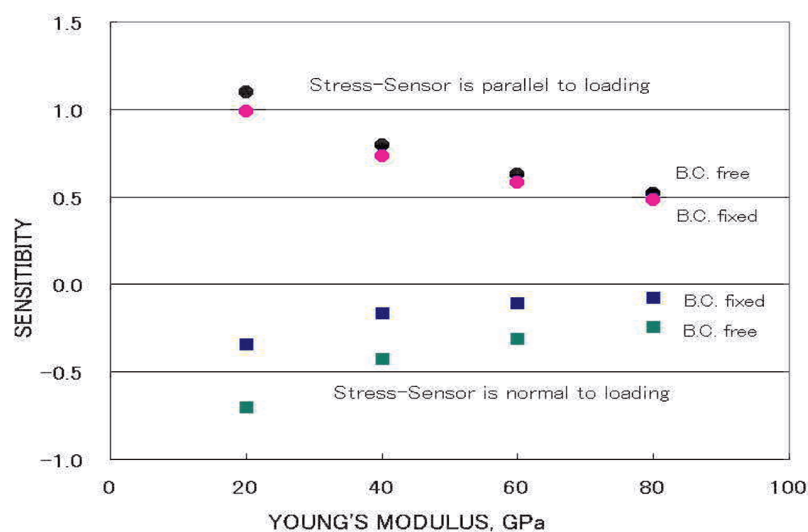


図6. 二次元解析結果. 周辺岩盤の弾性率がおおむね 50GPa 以上ならば、二次元解析結果と三次元解析結果の差異は小さい。

わち図4で示された面内を二次元モデル化した二次元有限要素法による解析結果を図6に示す。本解析で用いた条件下では、岩盤のヤング率が十分大きいならば、二次元解析結果と三次元解析結果には大きな差異が認められない。これは条件によっては二次元解析でも十分であることを示唆している。

ここでえられた結果を式(2)に代入し、観測量を含む連立方程式を解けばボアホールの擾乱を逃れた遠方応力場の変化を求めることが可能となるが、そのためには岩盤の弾性率が既知でなければならない。応力センサーに生じる応力値はボアホール壁面で応力センサーが力学的に抵抗することにより生じる。その大きさはセンサー部のスティフネスと岩盤とのカップリングの関数となる。そこでスティフネスの異なる数種の応力センサーを同時に計測することにより、岩盤とのカップリング状態も求めるという構想がありうる。このような着想のもと、通常のセンサー部よりスティフネスが4倍大きい場合と1/4の場合について、センサー部に生じる応力値と通常のセンサーに生じる応力値の比を求めた結果を図7に示す。図中、スティフネスが4倍のセンサーによりえられた結果、あるいはスティフネスが1/4のセンサーでえられた結果と通常のセンサーでえられた結果の比が、例えば、それぞれ2.24あるいは0.43であれば、岩盤の弾性率が50GPaであることが読み取れる。この結果は、異なるスティフネスをもった応力センサーを同時に採用することにより、他の手法を介在することなく、自己完結的に新開発の応力計のみから岩盤とのカップリング評価を含めた遠方岩盤応力変化を求めることが可能であることを示している。

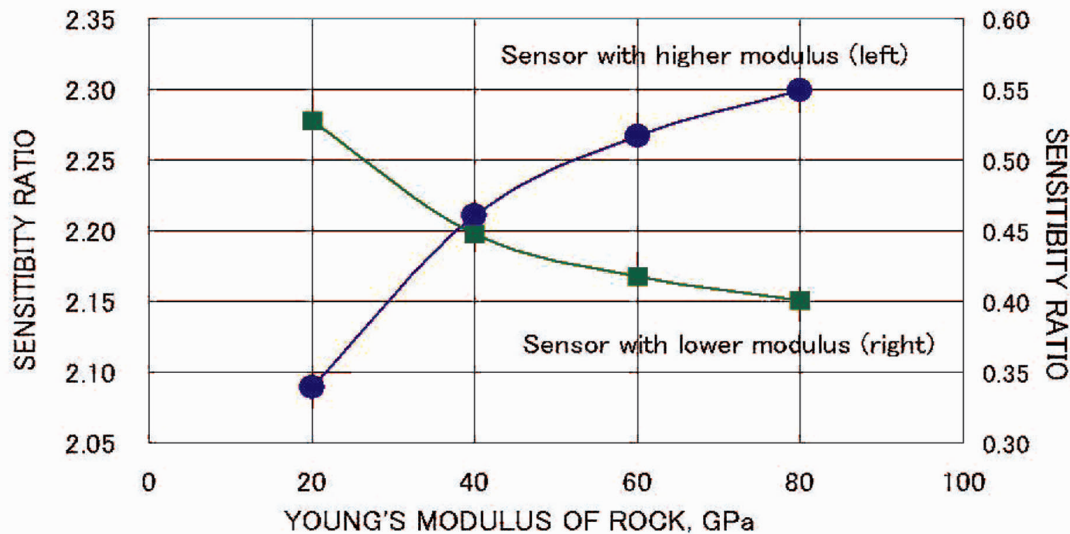


図7. 周辺岩盤の弾性率が異なると、応力センサーと岩盤のカップリング状態が異なり、応力センサーに生じる応力も異なる。一方で、異なるスティフネスをもった応力センサーによる同時計測があれば、岩盤の弾性率も含めたカップリング状態を特定することが可能である。図中、スティフネスが4倍のセンサー や 1/4 のセンサーによる観測が通常のセンサーと並行観測され、それらの値が、例えば、それぞれ2.24あるいは0.43であれば、岩盤の弾性率が50GPaであることが読み取れる。したがって応力計のみの計測から自己完結的に遠方応力場を決めることができる。

#### 4. まとめ

ボアホール設置型応力計の観測値からボアホールの影響を受けない位置の遠方応力変化を求める問題は、異種媒体を含む媒体と異種媒体内部の応力の関係を求めるインクルージョン問題である。そこで岩盤内部のボアホールに応力計をモルタルで埋設した状態をモデル化し、センサー部で観測される応力変化と遠方応力の関係を岩盤の弾性率をパラメータとして三次元有限要素法をもちいて解析した。その結果、岩盤の弾性率が大きくなるほど応力センサーで観測される値が小さくなることがわかった。また、剛性の異なる応力センサーを同時に設置することにより、岩盤の弾性率を決定することが可能であり、応力計の観測結果のみから自己完結的に感度特性と遠方応力変化が決定できることがわかった。

#### 参考文献

Ishii, Hiroshi, and Yasuhiro Asai, Development of a borehole stress meter for studying earthquake predictions and rock mechanics, and stress seismograms of the 2011 Tohoku earthquake (M9.0), EPS, 2015 (in press)

川崎一朗, 石井 紘, 浅井康広, 西村卓也, 2011年  $M_w$ 9.1 東北地震に伴った  $M_w$ 8.4 スーパーサブイベント, 地震2, Vol. 67, pp. 87-98, 2014.

佐野 修, 地殻応力計測手法と岩石力学, 地学雑誌, Vol. 114, No. 6, pp. 1003-1021, 2005

Sano, Osam, Hisao Ito, Atsuo Hirata, Yoshiaki Mizuta, Review of methods of measuring stress and its variations, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 80, pp. 87-103, 2005.