

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—その2

佐野 修・浅井康広・石井 紘

1. はじめに

ボアホール設置型応力計はモルタルを介して岩盤と接触するセンサー端部に加えた圧力で較正されているので、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、ボアホールを含む岩盤、モルタルおよびステンレス管からなる力学的インクルージョンによる応力擾乱の影響を受ける。地球科学者や岩盤工学研究者が知りたい応力変化を知るためには、計測された応力変化と遠方応力場の関係を知る必要がある。第一報では、センサー軸がボアホール軸に垂直な状態（以後、水平センサーと呼ぶ）をモデル化し、三次元有限要素法解析により外力変化とセンサー出力の関係を求めた。その結果、応力センサーの感度特性は岩盤の弾性率の影響を受けること、および異なる等価弾性率のセンサーを用いた並行観測により、岩盤の弾性率も決めることができるので、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の観測結果から遠方の応力変化を決めることが可能であることを示した。本報告では、センサー軸がボアホール軸に平行な状態（以後、鉛直センサーと呼ぶ）を追加するとともに、モルタルの弾性率が所定の値と異なった場合についても検討を加えた。

2. 基本原理

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])があり、第一報でも解説したが、再度概説する。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・鉛直方向を軸とした観測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 σ_{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、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センサー座標系の応力成分を σ'_{ij} とすると、二階のテンソルの座標回転、すなわち

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

により、 σ'_{ij} は観測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 σ'_{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 σ_{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 σ_{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 σ_{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、 σ_{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観測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センサー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結果とその考察

第一報と同様に、岩盤から一辺約 4 m の立方体を切り出したモデルを作成した。第一報と異なり、本報告では対称問題とせず、中心部にセンサーが存在するフルモデルを採用した。応力変化率が大きい領域を細かく分割しただけでなく、解析に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)の最適化機能を利用し再分割した。実際のセンサー部は拡大装置等、複雑な構造であるが、応力センサー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のみ生じるので、センサー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もつ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、垂直な方向の応力、およびせん断応力について、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。境界条件として、力を加えた面以外のすべての面について、端面に垂直な変位を拘束した場合(変位拘束)および変位を許した場合(変位自由)について行った。

水平センサーについて、三次元有限要素解析によりえられた結果を図 1 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。一方、外力が応力センサー軸と垂直な場合に生じる応力の極性は逆極性であり、センサー軸に平行な载荷と同様に、岩盤のヤング率が小さいほど値が大きい。なお、せん断応力载荷の結果は図に示されていないが、いずれの場合も無限小だからである。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対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。

鉛直センサーについてえられた結果を図 2 に示す。感度特性が周辺岩盤の弾性率の影響を受けることは水平センサーと同様であるが、感度は水平センサーのほぼ 1/2 程度である。これは鉛直センサーの等価スティフネスが水平センサーの等価スティフネスのほぼ 1/2 程度であることに起因すると考えられる。また、鉛直センサーの場合、センサー軸に垂直な外力によりセンサーに生じる応力の極性が境界条件により異なる。水平センサーと同様に、せん断応力载荷により生じる応力は無限小となる。

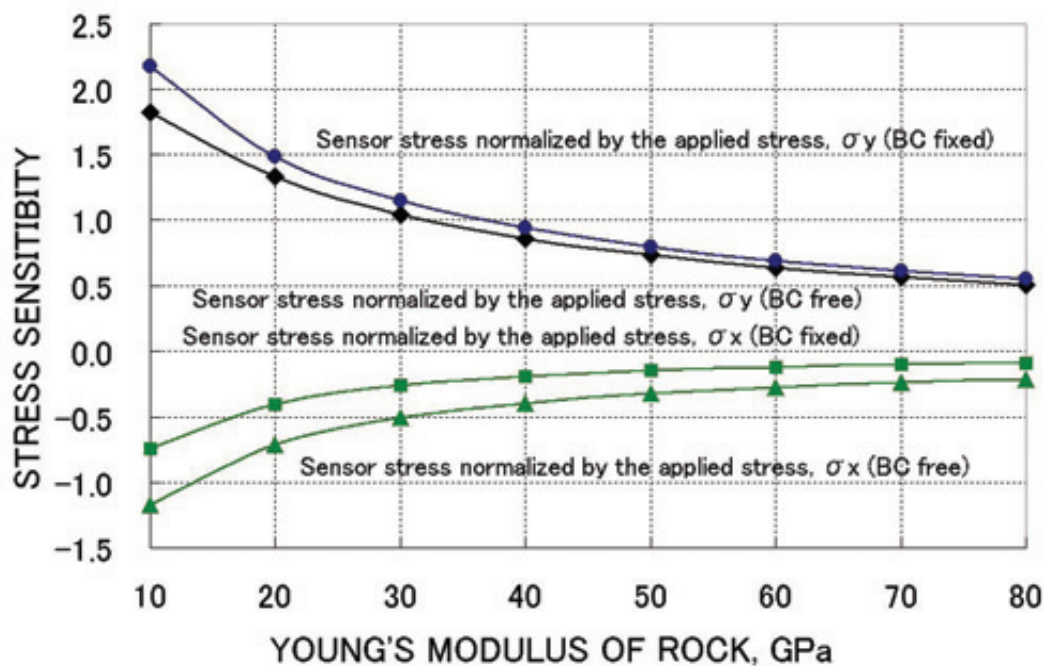


図1. センサー軸に平行な境界応力および垂直な境界応力により生じる水平センサー中央部の応力. 岩盤の弾性率が大きいほどセンサー部に生じる応力(感度)が小さい.

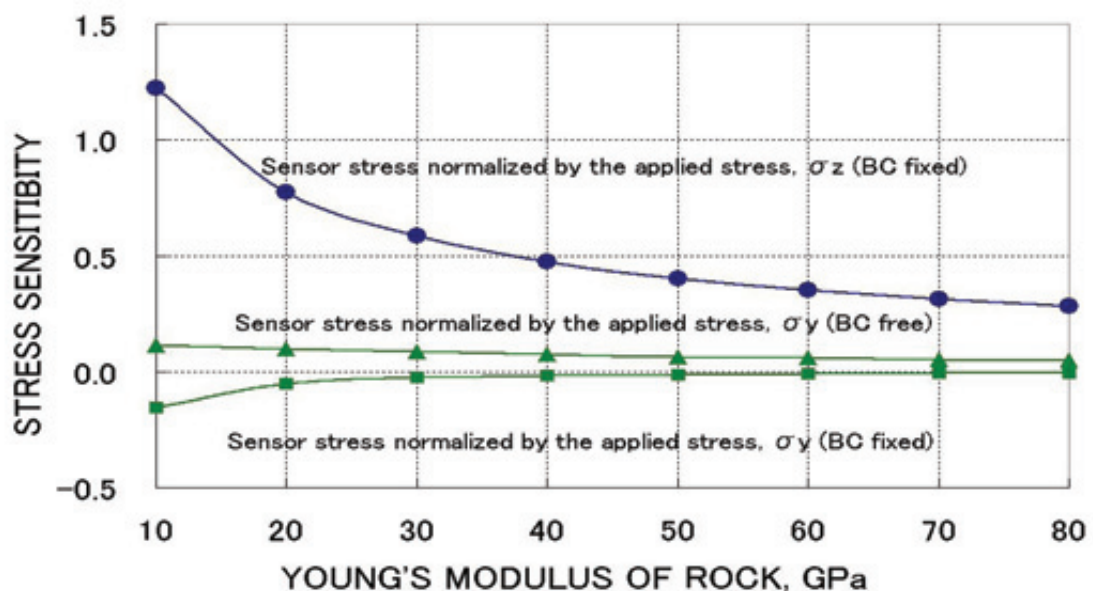


図2. センサー軸に平行な境界応力および垂直な境界応力により生じる垂直センサー中央部の応力. 水平センサーと同様に, 岩盤の弾性率が大きいほどセンサー部に生じる応力(感度)が小さい. また, センサー軸に垂直な境界応力の影響は相対的に小さい.

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（剛センサー）と1/4の場合（柔センサー）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3に示す。図中、モルタルの弾性率の影響も示されているが、例えば、モルタルの弾性率が15 GPaの場合、剛センサーによりえられた結果と通常のセンサーでえられた結果の比が2.2であれば、岩盤の弾性率が40GPa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唆している。

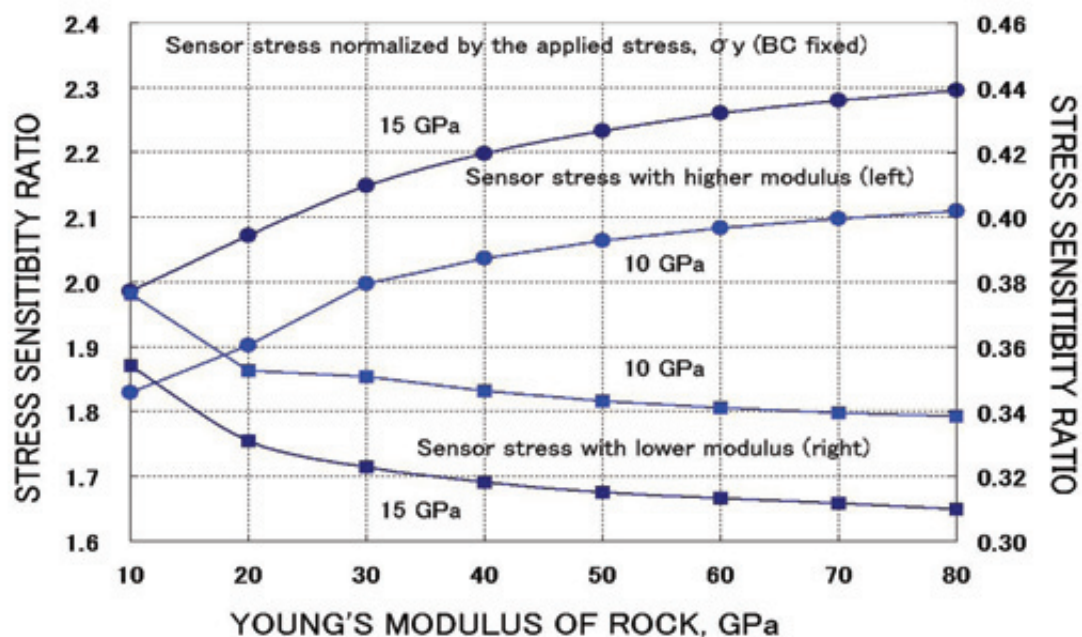


図3. 等価スティフネスが標準センサーの4倍、あるいは1/4のセンサーでえられる感度特性と標準センサーの感度特性の比。図中に示されたパラメータ、10 GPa および15GPa はモルタルの弾性率である。

モルタルの配合は施工時に決まるので問題ないと思われるが、ボアホール内の何らかの擾乱によりモルタルの弾性率が所定の値と異なる場合、センサーの感度特性がこれまでに示された結果と異なることを図3は示している。ここで剛センサーの出力と柔センサーの

出力の比をとり、モルタルの弾性率をパラメータとして示すと図4のとおりである。図中、剛センサーと柔センサーの比におよぼすモルタルの弾性率の影響は岩盤の弾性率の影響より大きいことがわかる。例えば、岩盤の弾性率が 20 GPa 以上が想定可能で、かつ、この比が7前後であれば、モルタルの弾性率が 15 GPa、6前後であればモルタルの弾性率が 10 GPa であることが推定可能である。すなわち、標準センサーだけでなく、剛センサーおよび柔センサーによる並行観測結果があれば、モルタルの弾性率のチェックも含め、岩盤の弾性率および遠方応力の変化が推定可能なことがわかる。

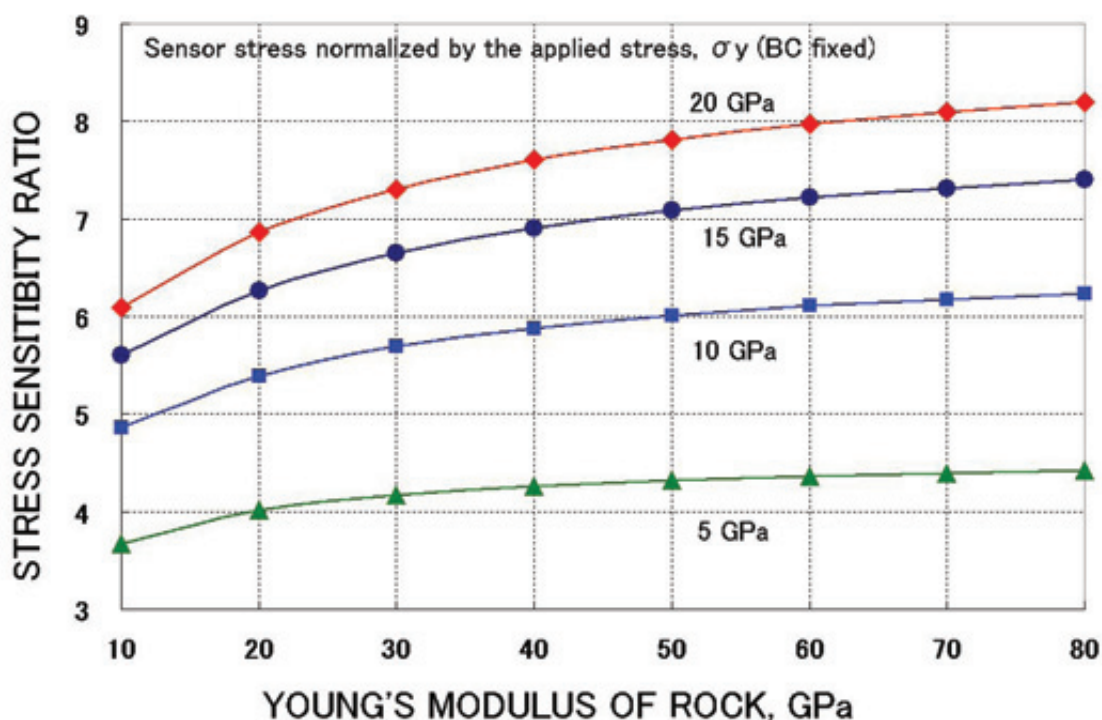


図4. 標準センサーより等価スティフネスが大きい剛センサーの出力と等価スティフネスが小さい柔センサーの出力の比と岩盤の弾性率の関係。図中に示されたパラメータはモルタルの弾性率である。

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。そこでボアホール軸に垂直な方向を計測する目的で設置される水平応力計およびボアホール軸に平行な方向を計測する目的で設置される垂直応力計を岩盤内部のボアホールに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およびモルタル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，モルタルの弾性率および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

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.