

応力計記録にもとづく岩盤およびモルタルの弾性率評価について

東濃地震科学研究所 客員研究員 佐野 修

1. はじめに

東濃地震科学研究所で開発された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端部に加えた圧力で較正されているので、センサ出力電圧は応力に換算できる(例えば Ishii and Asai, 2015). しかし換算された応力は、岩盤、ボアホール、モルタルおよびステンレス管からなる不均質異種媒体の応力センサ内の応力である。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])による解説があるが、その解説内容を簡単にまとめると、一般論として、岩盤内のボアホールに応力計をモルタルで固定するシステムでは、個々の構成要素内の応力は不均質であり、たがいに等しくない。応力センサ内の応力値を観測値として、いわゆる地殻応力、すなわち岩盤に生じる応力を知るためには、ボアホールから十分遠く離れた遠方の応力場を未知数とした観測方程式を解く必要がある。解析原理はすでに報告済みのとおりである[佐野ほか, 2015, 2016, 2017, 2018].

応力計周辺の応力擾乱の影響から逃れる程度に遠方の岩盤内応力場がわれわれの知りたい応力場であり、観測方程式の解として与えられるが、観測方程式を構成する感度係数はすべての構成要素の弾性率の影響を受ける。ここで観測方程式の形式を示すと式(1)のとおりである。

$$S_n = C_{nij} \sigma_{ij} \quad (1)$$

ただし、 S_n は複数のセンサのうち、 n 番目のセンサでえられる観測結果、 σ_{ij} は遠方応力場であり、 C_{nij} は遠方応力場の各応力テンソル成分と出力 S_n の関係を示す感度係数である。遠方歪場を知りたい場合は式(1)の観測方程式の右辺の応力テンソルを歪テンソルにおきかえ、適切な感度係数に変更した観測方程式を解く。

新開発応力計は荷重検定と歪検定がなされており、応力値の出力が可能なので「応力計」と呼ばれるが、式(1)の左辺は応力値であろうと歪値であろうとかまわない。通常の応力解放法では歪変化が計測されるので左辺の観測値は歪値である。その場合、感度係数は弾性率の次元をもつが、応力計の場合は無次元である。これは応力計の利点のようにみえるが、感度係数 C_{nij} を知るためには、岩盤やモルタル等、全構成要素の弾性率を知る必要があるので、決定的な違いではない。本研究の目的は、応力計による観測結果のみから、モルタルや周辺岩盤の弾性率を決定し、感度係数を決定することにより、観測方程式を決定し、自己完結的に、遠方応力場が決定できることを示すことにある。

2. 数値計算

個々のセンサの荷重検定および歪検定結果にもとづき評価された等価剛性をもつセンサを岩盤内に掘削されたボアホールにモルタルで固定した状態をモデル化し、有限要素法に

よる数値計算を実施した(3D- σ を採用した).

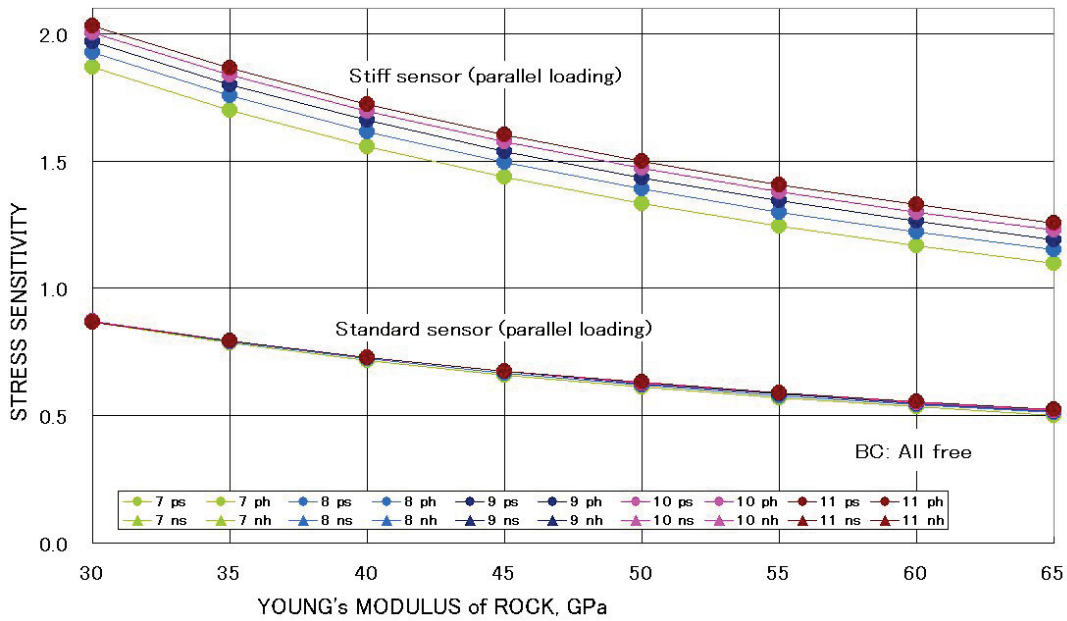


図1. 等価剛性が異なるセンサの感度特性とモルタルや周辺岩盤の弾性率の関係を数値計算モデルで求めた結果. 例えば, 岩盤のヤング率が 50 GPa の場合, 標準センサの感度係数はおおよそ 0.6 であるが, 等価剛性が高いセンサの感度は 1.3~1.5 である.

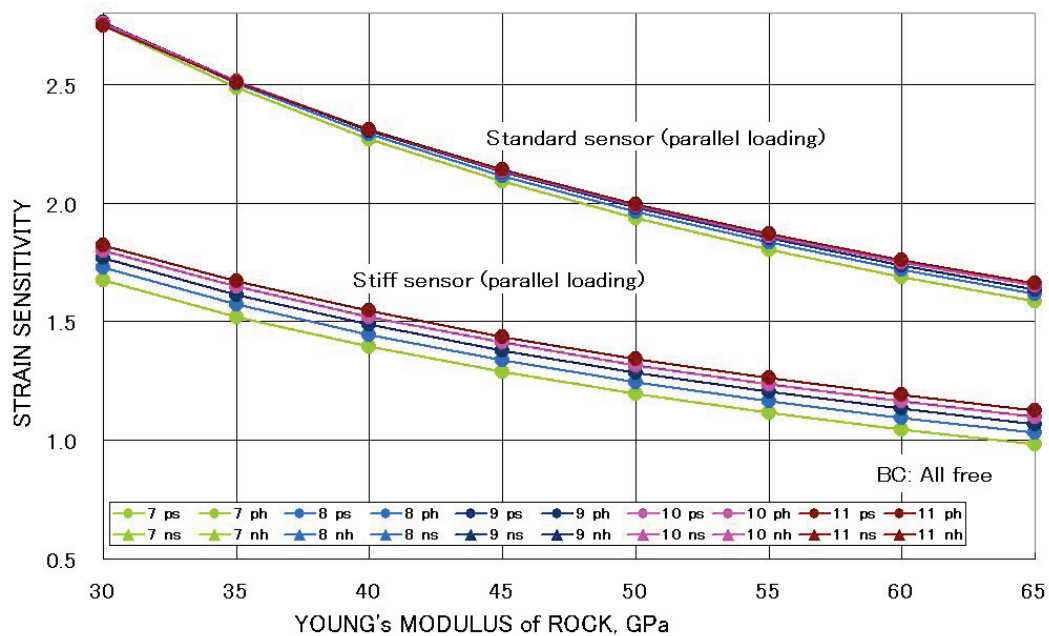


図2. 図1の同様であるが, 遠方のひずみ場に対するセンサひずみの感度特性と岩盤弾性率やモルタル弾性率の影響. 剛なセンサのほうがひずみが小さい.

岩盤内に掘削されたボアホール内に応力計をモルタルで固定した状態をモデル化し、三次元有限要素法をもちいて感度を計算した結果を図1に示す。岩盤のヤング率が高いほど感度が低下すること、モルタルの弾性率が高いほど感度が增加すること、センサの等価剛性が高いほど感度が高いことがわかる。例えば、岩盤のヤング率が 50 GPa の場合、標準センサの感度はほぼ 0.6 であるが、等価剛性が高いセンサの感度は 1.3~1.5 となっている。また、この図から直接読み取ることが難しいが、高剛性センサの感度と標準剛性センサの感度の比は一定ではなく、岩盤やモルタルの弾性率の影響を受ける。この性質があるので、剛性の異なるセンサによる並行観測結果をもちいて岩盤やモルタルの弾性率が評価可能となる。数値計算結果は、同様に、遠方ひずみ場とセンサに生じるひずみの感度比もえられる。図2はそのようなひずみ感度比と周辺岩盤やモルタルの弾性率の影響を示したもので、相対的に剛なセンサに生じるひずみが小さいことがわかる。

3. 並行観測結果と弾性率評価

瑞浪超深層縦坑 500m ステージ横坑から掘削したボアホール内 (STG500)、等価剛性がほぼ 4 倍異なる二つのセンサを同一方向に設置して実施した並行観測例を示すと、図3のとおりである。図中、Sh1 と Sh5 が同じ方向で等価剛性が異なる。予め数値計算で示されているとおり、相対的に剛なセンサに生じるひずみは小さいので、データベースには低感度センサと表示されているが、応力出力は大きい。高剛性センサに生じた応力と標準センサに生じた応力の比は、ほぼ 2.3 である。

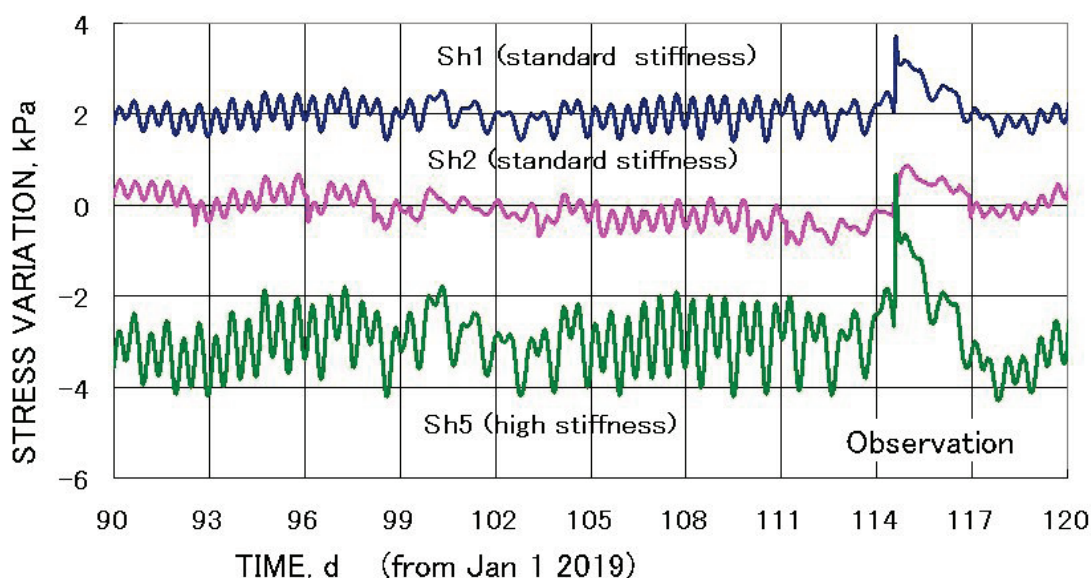


図3. 剛性が異なる二つのセンサを同一方向に設置した計測例(観測値)。図中、Sh1 と Sh5 が同一方向であり、Sh5 の剛性が Sh1 の剛性より約 4 倍大きい。

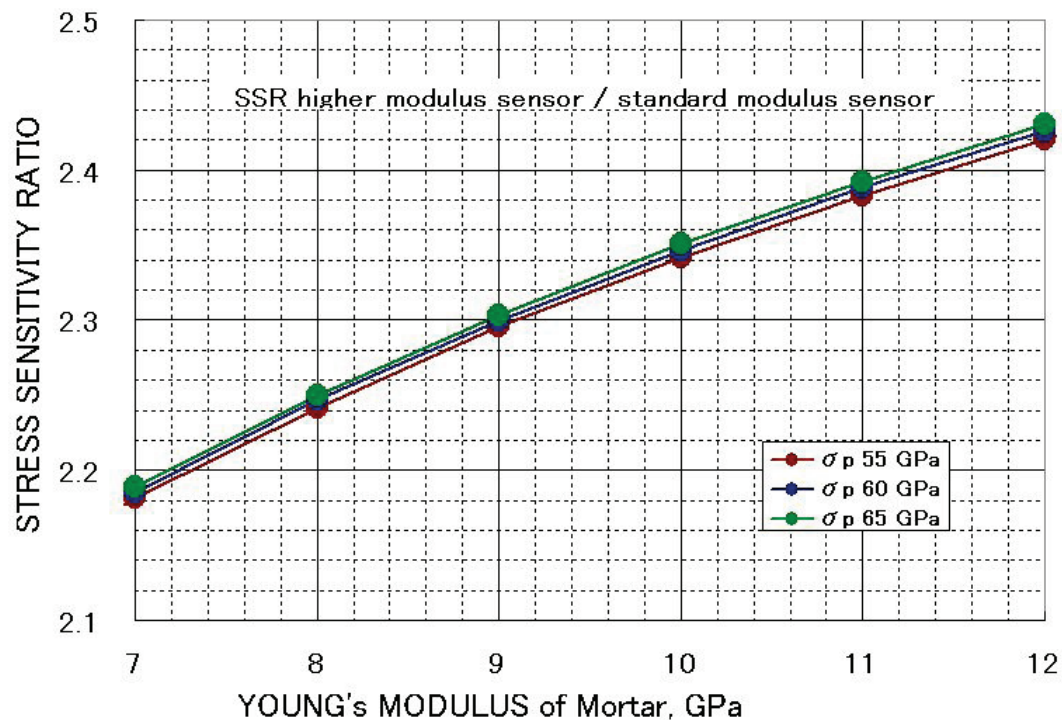


図 4. 数値計算でえられた高剛性センサ応力と標準センサ応力の比におよぼすモルタルのヤング率の影響. 図中, 岩盤のヤング率もパラメータとして示されているが, 相対的にモルタルの弾性率の影響が大きい.

高剛性センサ応力と標準センサ応力の比におよぼすモルタルのヤング率の影響を数値計算により求めた結果を図4に示す. 図中, 岩盤のヤング率もパラメータとして示されているが, 相対的にモルタルの弾性率の影響が大きいことがわかる. 図3に示された並行観測からえられた高剛性センサ応力と標準センサ応力の比, 2.3を与えるモルタルのヤング率は約9 GPaであることがわかる.

図4と同様の数値計算でえられた高剛性センサ応力と標準センサ応力の比におよぼす岩盤のヤング率の影響を示すと図5のとおりである. 図中, モルタルのヤング率もパラメータとして示されている. 図3に示された並行観測結果はモルタルのヤング率が9 GPa程度であることを示唆しているが, その条件下で感度比, 2.3, を与える岩盤のヤング率は 60 ± 5 GPaであることがわかる. この結果は室内試験でえられた値より大きい, 室内試験は空气中で実施されており, 深さ 500 m の花崗岩のヤング率は室内試験結果より大きいと想定されるので[Sano et al. 1992], 過去の封圧下の弾性率測定結果と調和的である.

4. まとめ

等価剛性が約4倍異なる二つのセンサを同一方向に配置した応力計による並行観測結果

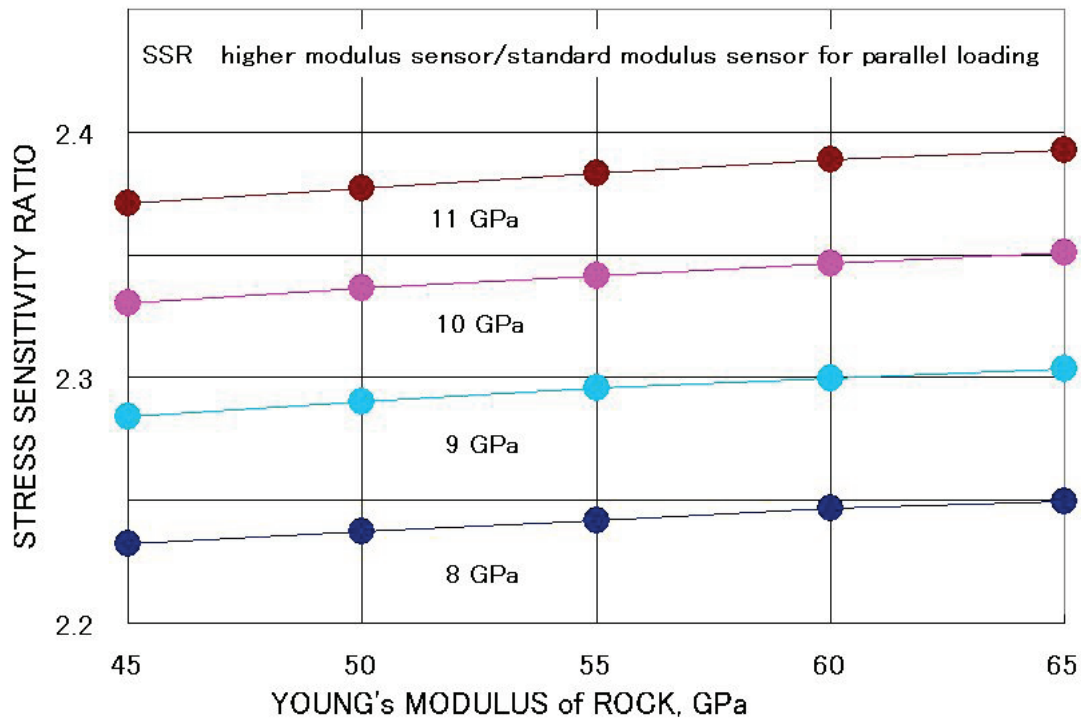


図5. 数値計算でえられた高剛性センサ応力と標準センサ応力の比におよぼす岩盤のヤング率の影響. モルタルのヤング率もパラメータ表示されている.

にもとづき、モルタルおよび周辺花崗岩岩盤の弾性率の評価を試みた。予め実施した数値解析結果をもとに、並行観測結果によりえられた高剛性センサ応力と標準センサ応力の比を与えるモルタルのヤング率として、約9 GPaが、花崗岩岩盤のヤング率として、約60 ± 5 GPaがえられた。モルタルのヤング率は室内試験とほぼ同じ結果であり、花崗岩についてはコアからえられた供試体をもちいた室内試験結果より大きめであるが、室内試験は封圧なしで実施されており、実際の岩盤には深さ500 mに相当する上載荷重の影響を考慮すれば妥当な結果と思われる。なお、本報告では標準センサの等価弾性率としてSTG200nで使用されているセンサの値を使用した。

謝辞 本研究で使用したデータは石井紘博士と浅井康広博士により開発されたボアホール応力計によりえられたものである。

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), Earth, Planets and Space, 2015, DOI 10.1186/s40623-015-0197-z.

- 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, Yozo Kudo, and Yoshiaki Mizuta, Experimental determination of elastic constants of Oshima granite, Barre granite and Chelmsford granite, J. Geophys. Res. Vol. 97, No. B3, pp. 3367-3379.
- 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.
- 佐野修, 大久保慎人, 浅井康広, 石井紘; 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—, 地殻活動研究委員会報告書(平成 26 年度), 2015, pp. 1-8
- 佐野修, 浅井康広, 石井紘; 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, 地殻活動研究委員会報告書(平成 27 年度), 2016, pp. 155-160
- 佐野修, 大久保慎人, 徳永朋祥, 愛知正温, 本田亮, 鶴岡弘, 浅井康広; 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について—固体地球潮汐との比較—, 地殻活動研究委員会報告書(平成 28 年度), 2017, pp. 27-32
- 佐野修; 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について—理論地震波形との比較—, 地殻活動研究委員会報告書(平成 29 年度), 2018, pp. 27-36