円錐孔底ボアホールゲージ法による初期地圧測定

京都大学工学部　○学生会員　神谷泰範　，正会員　小林昭一　，正会員　西村直志
関西電力技術研究所　正会員　吉川太　，打田靖夫

１．はじめに

地山の初期応力を推定するための手法の中で、応力解放法は最もよく用いられ、かつ信頼性の高い方法である。なかでも平面孔底にひずみゲージを接着した孔底ひずみゲージ法は、しばしば用いられてきた。しかしこの方法では、孔軸方向のひずみの感度をよくすることはできないので、３主応力を決定するために、通常直交する３方向での計測が行われていた。これには多大の労力及び経費を要するので、従来からそれに対する種々の改良が試みられてきた。

最近になって、孔底を平面とする代わりに半球面とした方法が提案され、計測が試みられた。それによると、１つのボアホールを用いて、十分感度のよい、バランスの取れた測定が行われることが報告されている。

本報告は、同様の考え方を円錐孔底に適用し、その特徴を検討したものである。

２．円錐孔底ひずみゲージを用いた応力測定法の原理

２．１　応力解放法の原理

孔底ひずみゲージを用いた応力測定法は、初期応力の存在する地山に窄孔し、その孔底周辺にひずみゲージを接着した後、大口径のオーバーコアリングを用いて地山初期応力を解放する際に生じるひずみを計測することによって、逆に地山応力を推定しようという方法である。

最初の窄孔では、孔底周辺に地山初期応力による応力の乱れ、従って、ひずみの乱れが生じている状態で、ひずみゲージを接着することになる。その状態ではひずみゲージにはひずみは当然生じていない。オーバーコアするとその乱れは解放されるので、それに伴う解放ひずみが生じることになる。従ってそのひずみが計測される。それは、地山（岩盤）が線形弾性体であれば、ちょうど初期応力によって生じたひずみの符号を変えたものに等しいことになる。このひずみ（解放ひずみの符号を変えたもの）を生じるような応力状態を計算すれば、それが初期応力状態である。

２．２　観測方程式

地山の初期応力（初期地圧）状態がマトリックスで次のように与えられているとする。

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}\} = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6\} \qquad (1)$$

ここに、応力σ_{ik} $(i,k=1,2,3)$は、直交直線座標系$(0;X_1,X_2,X_3)$（X_1軸方向を孔軸と一致するように選んだ）に関する成分である。

一方、オーバーコアリングによって解放されたボアホール孔の壁面上のひずみ$\{\varepsilon\}$は、次のように与えられる。

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \dots\dots\dots, \varepsilon_{N1}, \varepsilon_{N2}\} \qquad (2)$$

ここに、第一の添字Nは計測点（位置）を表し、第二の添字１，２はそれぞれ母線方向の成分及びそれに直交する成分を表している。

いま地山を等方な線形弾性体と仮定すると、初期応力とオーバーコアリングによって解放されたひずみの間には、

Hironori KAMIYA, Shoichi KOBAYASHI, Naoshi NISHIMURA, Futoshi YOSHIKAWA , Yasuo UCHIDA

$$\{\ \varepsilon\ \} = 1/E\ [\ A\ ]\ \{\ \sigma\ \} \tag{3}$$

という関係が成立する。ここに、E は弾性係数（ヤング率）であり、マトリックス[A]（ひずみマトリックスと呼ぶ）の成分 A_{ik}は、E=1 とした時に、応力σ_k=1 によって生じるひずみ成分ε_{ni} （n;1≦n≦N ,i=1,2）を意味している。なお、その値 A_{ik}は、ポアッソン比νの関数であることに注意されたい。このひずみマトリックス[A] は、積分方程式法によって精度良く求められている。

上式のように、係数マトリックス[A] が与えられたとすると、そのうちのいくつかの点に関する係数を選んで、初期応力を決定するための観測方程式を立てることは容易である。

例えば、６点以上の測定点で測定した解放ひずみ{ ε } を選んで、最小２乗法を用いると、

$$[\ A\ ]^T[\ A\ ]\ \{\ \sigma\ \} = E[\ A\ ]^T\{\ \varepsilon\ \} \tag{4}$$

と表されるので、それを生じるために必要な応力（初期応力）{ σ } は

$$\{\ \sigma\ \} = E[\ C\ ]\ \{\ \overline{\varepsilon}\ \} = E[\ D\ ]\ \{\ \varepsilon\ \} \tag{5}$$

で与えられる。ここに、

$$[\ C\ ] = \{\ [\ A\ ]^T[\ A\ ]\ \}^{-1},\{\ \overline{\varepsilon}\ \} = [\ A\ ]^T\{\ \varepsilon\ \},[\ D\ ] = [\ C\ ]\ [\ A\ ]^T \tag{6}$$

である。

応力を求めるための係数マトリックス[D]（応力マトリックスと呼ぶ）は、上式よりマトリックスの積として容易に計算される。

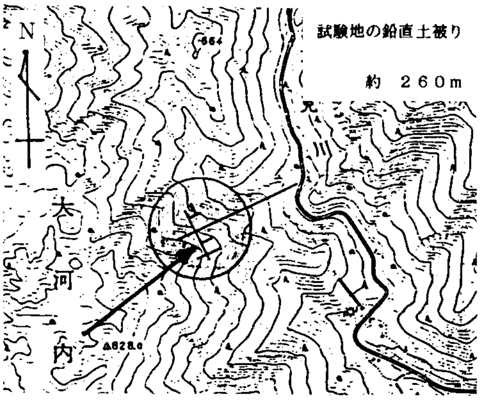
３．初期応力の推定

地山を線形弾性体と仮定すれば、弾性係数E 及びポアッソン比νが予め求められておけば、応力解放によって生じるボアホール壁面上のひずみを計測すれば、初期応力は式（5)によって容易に算定することができる。弾性係数及びポアッソン比は、コアーを用いて、前もって容易に測定することができるので、式(5)を適用することは容易である。

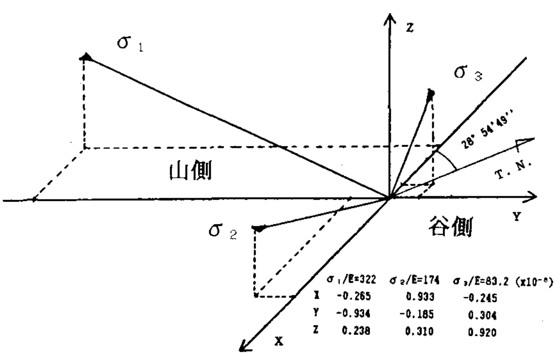
以上で述べた円錐孔底ボアホールゲージ法により、関西電力技術研究所が大河内水力発電所試掘横坑内（図－１中矢印で示す点）で試験を行った結果得られた解放ひずみと、積分方程式法によるシミュレーションにより算出されたひずみマトリックスを用いて初期応力（主応力）は、図－２のように推定された。

４．おわりに

上で得られた結果がどれほどの精度を持つか調べることは不可能であるが、試験地の地形から考えても、主応力の大きさ、主応力方向など納得のできる結果が得られたと思われる。 したがって、円錐孔底ボアホールゲージ法では、１つのボアホールを用いるだけで、地山の初期応力状態を決定することができ、実用上非常に有利であるという結論を得ることができた。



図－１



図－２