改良円錐孔底法による地山応力測定†

小林 昭 一* 高 橋 徹**
吉 川 太*** 吉 田 次 男****

Initial Rock Stress Measurement by Use of an Improved Conical-End Borehole Method

by

Shoichi KOBAYASHI *, Tohru TAKAHASHI **, Tohru YOSHIKAWA *** and Tsuguo YOSHIDA ****

The present paper describes an improved Conical-End Borehole Method (ImCEBM) and its field application to initial rock stress measurement. The ImCEBM is an improved version of the Conical-End Borehole Method (CEBM). The improvements are made such ways as 1) an inspection borehole is bored ahead of the conical-end borehole, 2) the same-diameter overcoring as that of the borehole is done. By use of the Fast Multipole Boundary Element Method (FMBEM), simulation of the overcoring was made and strains induced by overcoring are obtained. Using the strains, the conversion matrix from measured strains to initial rock stresses was determined. Field measurements were successfully carried out at a site of sandy shale and of fine-grained sandstone, respectively. Initial compressive principal stresses are, for example, 36, 12 and 7MPa, respectively directed in N100°E and horizontal, N10°E and 60°declined from the vertical, and N160°W and 30°declined from the vertical.

Key words: Initial rock stress, Improved conical-end borehole method, FMBEM simulation, Field measurement

1 はじめに

地下構造物を合理的に設計するためには、前もって地山の初期応力状態を把握しておくことが必須である。従来から、幾多の初期応力測定法が提案され、試みられてきたが、^{1), 2)}なかでもボアホールを利用した応力解放法は信頼性の高い方法として認められている。^{1), 2)}そのような応力解放法の一つとして、円錐孔底ひずみゲージ法(CEBM: ボーリング孔底を円錐状に仕上げ、円錐面にひずみゲージをセットしたプラグを接着した後、ボアホール全体をオーバーコアすることにより生じた開放ひずみから、一孔のみを用いて地山の初期応力状態を推定する方法)が提案され、³⁾現位置試験によりその有効性が確認された。^{4), 5)}その後、さらに円錐孔底の先方に探査細孔を穿ち、ボアホール周辺の岩の状態を把握するアイデアが提案された。⁶⁾なお、円錐孔底法に関しては、文献⁷⁾も参照されたい。

この論文は、CEBM法をさらに改良した効率的な方法(改良円錐孔底法(ImCEBM)と呼ぶことにする)を提案し、その有効性を現位置試験によって確認した結果を述べたものである。

改良はつぎのようである。

- (1) 円錐孔底の先端に岩盤状態を探査するための細孔(探査細孔)を穿った。
- (2) 応力解放のためのオーバーコアリングをボアホール径と同径で行った(同径オーバーコアリング)。
- (3) オーバーコアリング中に解放ひずみの計測を可能とした。

この論文の前半では、簡単に改良円錐孔底法とその測定原理を述べ、オーバーコアリングによる応力解放過程を高速多重境界要素法(FMBEM)を用いてシミュレーション解析した結果を述べ、それに基づいて、オーバーコアリングに伴う解放ひずみから地山初期応力を求めるための行列(変換行列)を定めた。

後半では、ある地下発電所の調査坑で実施した現位置初期応力測定とその結果について述べた。

なお、この論文は文献^{8), 9)}のシミュレーション解析法の記述を削除して前半を整理・短縮し、後半の現位置試験の部分を拡充したものである。

2 応力解放法による初期応力の推定

いま、初期応力状態が未知な岩盤にボアホールを掘削し、孔底を円錐状に仕上げ、その表面の適切な位置にひずみゲージを接着したとする。この状態ではひずみはゼロである。この円錐孔底周辺をオーバーコアする。それによる応力解放に伴って円錐孔底面上にひずみが誘起される。岩盤を等方・線形弾性的であると仮定すると、誘起されるひずみ(解放ひずみ)は初期応力に比例する。したがって、オーバーコアリングのある過程(深度)で解放ひずみを計測すれば、それをもとに初期応力を求めることができる。オーバーコアリング過程での解放ひずみはその深度に伴って変化するが、円錐孔底周辺の初期応力が完全に解放された(円錐孔底から十分に長くオーバーコアした)状態では、ひずみは一定値に落ち着くことになる。一般に、応力開放が完了した状態での解放ひずみの値は大きいので、それを用いて地山初期応力を推

† 原稿受理 平成 14 年 8 月 6 日 Received Aug. 6, 2002

* 正 会 員 福井工業大学地球環境工学科 〒910-8505 福井市学園, Dept. of Global Environ. Eng., Fukui Univ. of Tech., Gakuen, Fukui, 910-8505

** 理化学研究所情報基盤研究部 〒350-0198 和光市広沢, Advanced Computing Center, RIKEN, Hirosawa, Wako, 350-0198

*** 正 会 員 ニュージェック(株) 〒542-0082 大阪市中央区島之内, NEWJEC Co., Tyuoh-ku, Osaka, 542-0082

**** 関西電力(株)総合技術研究所 〒661-0035 尼崎市若王子, Tech. Res. Inst., Kansai Power Electric Co., Nyakuohji, Amagasaki, 661-0035

定するのが普通である。

いま、岩盤が初期応力状態

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}\} \quad (1)$$

にあるとする。ここに、 σ_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$) は直交デカルト座標系 ($O-x_1x_2x_3$) (x_1 -軸はボアホール中心軸に一致し、奥の方向を向く) の応力成分を表す (Fig. 1 参照)。

一方、オーバーコアリングによって円錐孔底表面上にはひずみ

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \sigma_{33}, \dots, \varepsilon_{N1}, \varepsilon_{N2}\} \quad (2)$$

が誘起される。ここに、最初の下添え字は円錐表面上の測定位置 (点) を、つぎの下添え字 1 および 2 は、それぞれ円錐面の母線およびそれに直交する方向を意味している。

岩盤は等方線形弾性体と仮定しているのので、次式が成り立つ。

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{E}[A]\{\sigma\} \quad (3)$$

ここに、 E はヤング率であり、係数行列はひずみ行列 ($2N \times 6$) と呼ばれる。

行列 $[A]$ が与えられておれば、計測した解放ひずみからそれを誘起した応力 (地山初期応力) を求めるための観測方程式を誘導することは容易である。

6 個以上のひずみ計測値を用い、最小二乗法を適用すると、式 (3) より

$$[A]^T[A]\{\sigma\} = E[A]^T\{\varepsilon\} \quad (4)$$

を得、したがって、応力はつぎのように求められる。

$$\{\sigma\} = E[D]\{\varepsilon\} \quad (5)$$

ここに、

$$[D] = ([A]^T[A])^{-1}[A]^T \quad (6)$$

である。これは計測した解放ひずみから初期応力を求めるための変換行列 ($6 \times 2N$) である。

計測した解放ひずみから地山初期応力を求めるためには、この変換行列を求めること、したがって、ひずみ行列 $[A]$ を求めることが鍵となる。それには、高速多重極境界要素法 (FMBEM) が有効である。

3 オーバーコアリングのシミュレーション

このシミュレーションの主目的は、オーバーコアリングの進行に伴って円錐面上に誘起されるひずみを求めることである。

オーバーコアリング過程では円錐状の表面を円柱表面 (その高さがオーバーコアリングの進行につれて次第に高くなる) で囲んだ形が形成されるので、シミュレーション解析ではその形状を正確にモデル化することが必要である。また、シミュレーション結果のうち後に利用するデータは円錐表面のひずみだけであるので、それを正確に求めることができる方法が望まれる。このような目的には、境界要素法 (BEM) が適している。特に、大規模計算には高速多重極法 (FMM) を併用した方法、高速多重極境界要素法 (FMBEM) が極めて有利に適用できる。

シミュレーション解析は、つぎの 3 次元等方線形弾性体の支配方程式 (Navier 式)

$$\mu \Delta u_i + (\lambda + \mu) \partial_{ik} u_k = 0 \quad (7)$$

を与えられた境界条件のもとで解くことである。ここに、

u_i は変位の x_i -方向成分、 λ, μ は Lamé' 定数、 ∂_i は x_i による偏微分を意味している。

境界条件としては、一様な単位応力が無限遠から作用しており、またボーリング孔表面、円錐表面、探查孔表面およびオーバーコアリングによって生じた表面には表面力が作用しない (自由表面) とした。

上の境界値問題に対する積分方程式はつぎのように与えられる。

$$\frac{1}{2} u_i(x) = u_i^\infty(x) - v.p. \int_S T_{ij}(x-y) u_j(y) dS_y \quad (8)$$

ここに、 S は上述の表面の総和、 $v.p.$ は Cauchy の主値積分である。 $T_{ij}(x-y)$ は基本解から導かれる表面力テンソル、 $u_i^\infty(x)$ は無限遠から作用している単位応力によって生じた変位成分であり、つぎのように与えられる。

$$u_i^\infty(x) = \frac{1}{E} \left\{ (1+\nu) \sigma_{ij}^\infty - \nu \delta_{ij} \sigma_{kk}^\infty \right\} x_j \quad (9)$$

ここに、 ν は Poisson 比である。

この積分方程式を解いて、無限遠から作用する 6 個の独立な応力成分 ($\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$) (Fig. 1 参照) によって生じる 6 組の変位成分 (u_1, u_2, u_3) (Fig. 1 参照) が求められる。それをもとに所要のひずみを算定する。

積分方程式の解法としては、高速多重極境界要素法が適用される。この方法は非常に強力であり、この種の問題には最適である。なお、高速多重極法の詳細については、文献^{10)~13)}を参照されたい。

高速多重極境界要素法によるシミュレーション解析では、簡単のために、弾性係数 $E = 1$ 、Poisson 比 $\nu = 1/4$ の等方線形弾性体が無限遠より単位の一様な応力を受けている状態を想定し、初期状態として、ボーリング孔が掘られ、円錐孔底が形成されて、その前方に探查細孔が仕上げられているものとする。解析では、ひずみゲージを貼付することを想定して選んだ円錐表面上の点のひずみ成分が、オーバーコアリングの進行に伴ってどのように変化するかを調べることにした。なお、解析の詳細については文献¹⁴⁾にゆずり、ここではその結果のみを示す。

初期状態での解析モデルと境界要素分割を Fig. 1 に示す。このモデルの幾何形状は、後に現位置試験で用いたものと同じである。初期状態でのモデルの自由度 (DOF) は 13824 であった。現位置試験では開放ひずみは、Fig. 2 に示すように、円錐表面上の 6 点で、円錐の母線方向とそれと直交する方向の合計 12 成分を計測することとしているので、シミュレーション解析でも対応したひずみ変化を調べることにした。なお、改良円錐孔底法を現位置で適用する場合には、ボアホールの長さは 20 ~ 30m であるが、オーバーコアリングによって生じたひずみが影響を受ける範囲は円錐孔底周辺に限られるので、解析モデルでは孔底から後方約 500mm の範囲を考慮した。

Fig. 1. ImCEBM model and its surface elements.

Fig. 2. Strain measuring positions.

シミュレーション解析は、オーバーコアリング深度 $L = 0, 7.3, 14.6, \dots, 73\text{mm}$ の各ステージについて行った。その際の円錐孔底周辺とオーバーコアリング孔表面の要素分割状態を Fig. 3 に示した。最終ステージでのモデルの自由度は 48384 であった。

Fig. 4 (a) および (b) は、無限遠から単位の (初期) 応力 σ_{11}^{∞} および σ_{22}^{∞} がそれぞれ作用している場合について、オーバーコアリングの進行に伴ってひずみ成分が変化する状況を示したものである。他の応力条件に対しても類似の結果が得られる。このようにして求めたひずみからひずみ行列 $[A]$ が得られる。それより式 (6) の変換行列 $[D]$ が求められる。その例を付録に示した。

なお、シミュレーション結果から判断して、応力解放によって誘起されたひずみはオーバーコアリング深度がボアホール径のほぼ 70% の深さに達するとほとんど収束しているようである。このことから、ボアホール径程度の長さ (深度) にオーバーコアすれば、初期応力を推定するには十分であろう。

4 現位置測定と結果

改良円錐孔底法の適用性を確認するために、ある地下発電所の調査坑内で現位置試験を実施した。試験場所は被り約 520m の 2 地点であり、岩質はそれぞれ砂質頁岩および細粒砂岩であった。

現位置試験では、特に、1) 探査細孔を用いた岩盤状態の探査が測定位置選定にどのような役割を果たすか、および 2) ボアホールと同径のオーバーコアリングはどのように有効であるかを調べることに留意した。

現位置試験の手順はつぎのようである。

Fig. 3. Elements at typical overcoring stages.

(a) Due to stress $\sigma_{11}^{\infty} = 1$ (b) Due to stress $\sigma_{22}^{\infty} = 1$

Fig. 4. Induced strains by overcoring.

- (1) 測定箇所にはボーリング孔を掘削する。
- (2) ボアホールカメラで岩の健全度を確認して、大略の測定箇所を選定する。
- (3) 円錐孔底を整形する。
- (4) 探査細孔を穿つ。
- (5) ビデオイメージスコープを用いて探査細孔内の岩の状態を詳細に観察する。特に、オーバーコアされる範囲約 10cm 深さにわたってシームなどの弱面が存在しないことを確認する。
- (6) その結果に基づいて計測位置を確定する。
- (7) 整形した円錐孔底に、12 成分のひずみゲージを埋設したひずみプラグ (Fig. 5 および 6 参照) をエポキシ樹脂で接着する。
- (8) ひずみプラグ接着後 24 時間を経てオーバーコアリングを開始する。
- (9) オーバーコアリングの進行過程で、応力解放に伴って誘起される解放ひずみを断続的にいくつかのステージで計測記録する。

これらの基本的な手順は、従来の応力解放法とほぼ同じである。^{4), 5)} もちろん、探査孔を観察した結果、測定点として不適格と判定された場合には、円錐孔底を前進させて改めて整形し、上の手順により計測位置を確定した。

なお、ここで用いたひずみプラグは、既に Fig. 2 にも示したように、円錐面の母線中央に 60° 間隔の 6 点に母線およびそれと垂直な方向に 2 成分、合計 12 成分のひずみゲージを埋設したものである (Fig. 5 および 6 参照)。ひずみプラグの接着に際しては、ひずみゲージが所

Fig. 9. Principal directions of initial stresses expressed in southern hemisphere.

例する (式 (5) 参照) ので, 測定地点のボーリングコアを用いて弾性係数を正確に求めることが必要である。

5 おわりに

この論文では, 改良円錐孔底法の概要とその適用性を現位置試験で確認した結果について述べた。現位置試験により, 3つの改良, すなわち 1) 円錐孔底の先端に穿った探査細孔と, 2) ボーリング孔と同径のオーバーコアリング, および 3) オーバーコアリング中での解法ひずみ計測の有効性が示された。

また, 多重境界要素法は複雑な形状の大容量のシミュレーション解析にも極めて有効であることも判明した。このシミュレーション解析によって, 計測のための重要な予備知識が得られ, また計算結果をもとに計測した解放ひずみから初期応力を求めるための変換行列を得ている。なお, この変換行列は, ここで示したモデルと幾何学的に相似な形状の等方線形弾性体に対しては, Poisson 比が同じであれば, 形の大小に拘わらず, もちろんそのまま適用できる。

なお, ここでは改良円錐孔底法を地山初期応力の推定に利用したが, この方法は掘削に伴う応力変化の測定など⁵⁾にも適用できることは言うまでもない。

さらに付け加えれば, 異方性弾性体に関しても, シミュレーション解析は可能であり, 変換行列を求めることもできるので, 異方性岩に関しても (初期) 応力を推定することも可能であろう。また, エポキシ樹脂系の接着剤は水中でも硬化するので, ひずみプラグを水中で接着することも可能であろう。

改良点はまだ残されているであろうが, 結論として, 改良円錐孔底法は高精度で, 廉価, 簡便でかつ省力化した方法であると言えよう。多くの適用を期待したい。

現位置試験に際しては, 鎌山隆氏 (関電興業株) のご協力を得た。深く謝意を表したい。

参考文献

- 1) 土木学会, “初期地圧測定法の現状と課題”, 特に 2 および 6 章 (1992) 土木学会。
- 2) B. Amadei and O. Stephansson, “Rock Stress and Its Measurement”, Chaps. 3 and 5 (1997) Chapman & Hall, London.
- 3) S. Kobayashi, N. Nishimura and K. Matsumoto, “Field Measurements in Geomechanics” (ed. S. Sakurai), p.1079 (1988) Balkema.
- 4) 小林昭一, 西村直志, 吉川 太, 打田靖夫, 土木学会第 22 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 426 (1990)。
- 5) S. Kobayashi, T. Yoshikawa, T. Harada and Y. Uchita, “Proc. of 7th Intern. Congress on Rock Mechanics” (ed. W. Wittke), p.545 (1991) Balkema.
- 6) 小林昭一, 細田直文, 土木学会第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 336 (1992)。
- 7) Y. Obara and K. Sugawara, “Rock Stress” (eds. Y. Obara & K. Sugawara), p.77 (1997) Balkema.
- 8) S. Kobayashi, T. Takahashi, T. Yoshikawa and T. Yoshida, “Rock Mechanics –a Challenge for Society” (eds. P. Särkkä & P. Eloranta), p.109 (2001) Balkema.
- 9) 小林昭一, 高橋 徹, 吉川 太, 吉田次男, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 (CD 版) A16 (2002)。
- 10) 小林昭一編著, “波動解析と境界要素法”, 6 章 (2000) 京大出版会。
- 11) N. Nishimura, Appl. Mech. Rev., **55**, 299 (2002)。
- 12) N. Nishimura, K. Yoshida and S. Kobayashi, Eng. Anal. Boundary Elem., **23**, 97 (1999)。
- 13) Y. Saad and M. H. Schultz, SIAM J. Sci. Stat. Compt., **7**, 856 (1986)。
- 14) 高橋 徹, 小林昭一, 西村直志, 境界要素法論文集, **15**, 105 (1998)。
- 15) 吉川 太, 吉田次男, 鎌山 隆, 電力土木, No.285, 70 (2000)。

付 録

Matrix [D] ($n = 1/4$)

a) Overcored length at $L = 36.5$ [mm].

-1.799	-0.023	-1.807	-0.058	-1.801	-0.062
-0.147	-0.198	-0.198	-0.025	-0.198	-0.025
-0.216	0.038	-0.166	-0.143	-0.166	-0.143
-0.002	0.000	-0.542	-0.122	-0.543	-0.122
0.000	0.000	0.058	-0.205	-0.059	0.205
0.628	0.142	0.314	0.070	-0.310	-0.070
-1.800	-0.047	-1.812	-0.015	-1.820	-0.012
-0.147	-0.201	-0.199	-0.020	-0.200	-0.020
-0.216	0.036	-0.167	-0.138	-0.167	-0.138
-0.001	0.000	0.540	0.122	0.540	0.122
0.000	0.000	0.058	-0.205	-0.059	0.205
-0.623	-0.141	-0.309	-0.070	0.315	0.070

b) Overcored length at $L = 73$ [mm].

-0.622	-0.020	-0.625	-0.023	-0.624	-0.024
-0.094	-0.165	-0.121	-0.031	-0.121	-0.031
-0.129	0.015	-0.104	-0.121	-0.104	-0.121
-0.001	0.000	-0.540	-0.093	-0.541	-0.093
0.000	0.000	0.030	-0.156	-0.030	0.156
0.624	0.108	0.312	0.053	-0.311	-0.053
-0.522	-0.022	-0.626	-0.019	-0.626	-0.018
-0.094	-0.166	-0.121	-0.030	-0.121	-0.030
-0.129	0.015	-0.104	-0.120	-0.104	-0.120
-0.001	0.000	0.539	0.093	0.540	0.093
0.000	0.000	0.030	-0.156	-0.030	0.156
-0.623	-0.108	-0.310	-0.053	0.312	0.053