

(78) 応力解放法による初期応力測定のための 各種解析理論の比較

日本国土開発(株) 正員 菊地 慎二
山梨大学工学部 正員 平嶋 健一
山梨大学工学部学生 ○澤田 正雄

Comparison of Various Analytical Theories for Initial Stress Measurement due to Stress-Relief Method

Shinji KIKUCHI, JDC Corporation
Ken-ichi HIRASHIMA, Yamanashi University
Masao SAWADA, Student, Yamanashi Univ.

Abstract

There are many published papers which relate to theoretical analyses of technique for measurement of three-dimensional rock stresses.

This paper gives reexaminations on the fundamental formula of those papers including to recently published Wu and Li's paper(1990).

既発表論文とそれらの概要

地山の初期応力を決定するための手法として幾つかのものが提案されている。例えば、よく知られているように〔1〕フラットジャッキを用いる方法、〔2〕水圧破碎法による方法、〔3〕孔径変形ゲージによる方法、〔4〕CSIRまたはCSIROのひずみゲージによる方法、それに最近注目されている〔5〕AE法による方法などが列举できる。

これらの手法に関し、ISRMでは1987年に岩の応力決定のための推奨法として一つの指針を提案している。また、Dunnicliff(1988)は最近それらの手法の特徴について整理した著書を発行し、さらに、第22回岩盤力学シンポジウム(1990)のパネルディスカッションにおいて、木山、金川、水田、田中らは各種手法の整理と位置付けを行っている。

ここでは上記手法の内、主としてボアホールを利用して応力解放法による地山初期応力を決定する手法に着目し、その解析理論について検討を加えることを目的とする。

現在までに提案されている応力解放法による3次元応力状態に対する解析理論のうち、代表的なものを列举すると次のようである。

まず、等方性岩盤に対するものとして、Edwards(1951), Hiramatsu & Oka(1962), Fairhurst(1964), Leeman(1968), Rocha & Silverio(1969, 1974), Oka & Bain(1970), 石島・小出・鈴木(1970), Worotnicki & Wolton(1976), Duncan Fama(1979), Duncan Fama & Pender(1980), Pariseau(1987), 平嶋・菊地ら(1990, 1991), 異方性岩盤に対するものとしては、Hirashima & Koga(1977), Amadei(1983), 平嶋・浜野(1987, 1988)などがある。(なお、この他に、Door Stopper方式を用いる手法のものがあるが、ここでは省略する。)

以下、これらの研究者による成果を簡単に概観すると次のようになる〔菊地ら(1991)参照〕。

まず、Leeman(1968)の用いた手法は3軸ロゼットゲージをパイロットホール内の孔壁表面に直接貼付接着するものであることから、孔壁表面が乾燥しているような場合には良好な結果が得られるが、湿っているような場合には實際上ゲージが正確に作動しないという欠陥があった。なお、彼の導出した理論式の方は完全接着を前提とした場合の厳密な式を提示したものとなっていた。

Rocha and Silverio(1969)はエポキシ樹脂性のsolid probeを埋設し、それをパイロットホールに貼付接着後、オーバーコアリングするもので、ゲージの水密性に優れているとともに、十分大きいオーバーコアリングを実施すれば、solid probe内のひずみ、応力は一定値となることから安定した計測が可能となるものである。彼らの提示した理論解のうち、面内ひずみ ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} および ϵ_z については正しい結果を与えているが、面外せん断ひずみ γ_{xz} 、 γ_{yz} については近似解であって厳密には正しくないものであった。

続いて、Rochaら(1974)は彼らの先の論文(1969)で示したsolid probeを現場に適用した際にオーバーコアリングした試料に数多くがひび割れを起こしたことを克服するため、新たに薄肉の円筒状epoxy cylinder内にひずみゲージを埋設する手法を開発した。この手法を受けて、Worotnicki and Waiton(1976)はこの方式のゲージの試作ならびにゲージとパイロットホール壁面間に層厚が生じることによる修正理論計算のために、Leemanの解に補正を加える、いわゆるK-factorsを導入する考えを示した。

Duncan Fama(1979)はオーバーコアリング径の影響を検討するために、solid probeを対象として面内に静水圧力(i.e. $\sigma_x = \sigma_y = -p$.)および σ_z が作用する軸対称応力状態の場合を設定し、オーバーコアリング孔径比 $e = R_t / R$ 、および岩盤とsolid probeのせん断弾性係数比 G_2 / G_1 を変化させてinclusion内外の応力変化を定量的に解析した。

Duncan Fama and Pender(1980)は上述した研究結果を総括する形で、ひずみゲージをボアホール壁面に直接貼付する場合およびhollow epoxy probe内にひずみゲージを埋設し、それをボアホールに装着する場合についての理論式と具体的な数値例を示し、いくつかの考察を行った。

Pariseau(1987)はDuncan Famaらの結果を含めて従来までの研究者によって示されていた面外せん断応力(i.e. τ_{xz} および τ_{yz})の作用下でのオーバーコアリングによって生じるボアホール軸方向変位 u_z の理論計算式に間違いがあることを指摘した。これは、かつて石島ら(1970)によって、指摘されていた事項と同一のもので基本的にはボアホール軸の剛体回転分を含めたことが従来までの結果と相違するものであった。いずれが正しいかの根拠として石島らはEdwards(1951)の三次元厳密解の特殊化によって、彼らの結果の正しいことを検証した。Pariseauの方は、有限要素法によるいくつかの数値解析によって、そのことの正当性の確認を行っている。このことについては本論文中で検討を行う。なお、Parisea(1987)および石島ら(1970)の結果は平面ひずみ状態として考える場合には正しいが、応力解放にともなうボアホール軸(z軸)方向の直応力 σ_z の配慮に問題を残している。他方、Duncan Famaら(1980)は上述のように u_z の取扱いに問題なしとしない結果となっている。さらに上述のすべての研究者に共通して指摘できることは一般的な初期応力場に対し、オーバーコアリング径の測定値に及ぼす影響について考慮がなされていない点である。

著者らは、以上の問題点を解決するとともにオーバーコアリング径の大きさが測定値に及ぼす影響を定量的に考慮することが可能な論文(1990, 1991)を発表した。

これに対し、等方性岩盤に限定した論文が、最近、Wu & Li(1990)により発表された。そこではDuncan Fama & Pender(1980)の論文までの理論を前提とした検討を行い、彼らなりの修正理論を提案しているが、Duncan Famaらによる討議(1991)における指摘のように、誤りが認められる。すなわち、Wu & Liではボアホール軸方向の直応力 σ_z を過小評価するものとなっている。詳細については講演当日に発表する。

参考文献：

- Amadei,B(1983), "Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements", Springer, 478pp.
- Duncan Fama, ME(1979), "Analysis of a solid inclusion in situ stress measuring device", Proc. 4th Congr. Soc. Rock Mech., Montreux, pp. 113~120.
- Duncan Fama, ME and Pender, MJ(1980), "Analysis of the hollow inclusion technique for measuring in situ rock stress", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 17, pp. 137~146.
- Duncan Fama, ME, Walton, RJ and Worotnicki, G(1991), "Discussion of paper by Wu, Z and Li, S(1990)", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 28, pp. 231~232.
- Dunnicliff, J(1988), "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", Wiley-Interscience, pp. 185~198.
- Edwards, RH(1951), "Stress concentrations around spheroidal inclusions and cavities", J. Appl. Mech., pp. 19~30.
- Fairhurst, C(1964), "Measurement of in situ rock stresses, with particular reference to hydraulic fracturing", Felsmekanik and Ingenieurgeologie, Vol. II, pp. 129~147.
- Hiramatsu, Y and Oka, Y(1962), "Stress around a shaft or level excavated in ground with a three dimensional stress state", Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ., Vol. 24, pp. 56~76.
- Hirashima, K and Koga, A(1977), "Determination of stresses in anisotropic elastic medium unaffected by boreholes from measured strains or deformations", Proc. Symp. Field Measurements in Rock Mech., Zurich, pp. 173~182.
- 平嶋・浜野(1987), "異方性弾性地山内の応力測定理論に関する二、三の考察", 土木学会論文集, No. 382/Ⅲ-7, pp. 141~147.
- 平嶋・浜野(1989), "測定用の円柱状埋没物による異方性弾性地山の初期(変動)応力の解析理論", 土木学会論文集, No. 406/Ⅲ-11, pp. 175~184.
- 平嶋・佐久間・菊地・松田(1990), "円柱状埋設型計測装置を用いた地山応力測定結果に及ぼす接着層、すべりおよびオーバーコアリング径の影響の理論解析", 土木学会論文集, No. 424/Ⅲ-14, pp. 207~216.
- 石島・小出・鈴木(1970), "孔壁変形法による岩盤応力測定に関する理論的考察, 日本鉱業会誌", Vol. 86, pp. 901~906.
- ISRM Commission(1986), "Suggested methods for rock stress determination", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, pp. 53~73.
- 菊地・佐久間・平嶋・松田(1991), "三次元地山応力測定のための中空埋設型計測装置の理論解析", 土木学会論文集, No. 430/Ⅲ-15, pp. 143~152.
- Leeman, ER and Hayes, DJ(1966), "A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole", Proc. 1st Int. Congr. Rock Mech., Lisbon, Vol. 2, pp. 17~24.
- Leeman, ER(1968), "The determination of complete state of stress in rock in a single borehole-Laboratory and underground measurements", Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 5, pp. 31~56.
- Oka, Y and Bain, I(1970), "A means of determining the complete state of stress in a single borehole", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 7, pp. 503~515.
- Pariseau, WG(1987), "An alternative solution for the in situ stress state inferred from borehole stress relief data", Proc. Int. Congr. Rock Mech., Vol. 2, pp. 1201~1205.
- Roche, M and Silverio, A(1968), "A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses", Geotechnique, Vol. 19, pp. 116~132.

- Rocha,M, Silverio,A, Pedro,JO and Delgado,JS(1974), "A new development of the LNEC stress tensor gauge" ,Proc. 3rd Congr. ISRM, Denver,Vol. I ,pp.464~467.
- Worotnicki,G and Walton,RJ(1976), "Triaxial 'Hollow Inclusion' gauges for the determination of rock stress in situ" ,Proc. ISRM Symp. on Investigation of Stress in Rock and Advances in Stress Measuremnt" ,Sydney,pp.1~8.
- Wu,Z and Li,S(1990), "The generalized plane strain prablem and its application in three-dimensional stress measurement" ,Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.,Vol.27,pp. 43~49.