指摘することもできようが、その場合、負の効果として低断層崖頂部では γ 線強度がバックグラウンドよりも相対的に低くなり負のピークが生じるはずである。また、(ii)の結果は平坦な地形面上で得られたものであり、このような地形効果で説明することはできない。以上のことから、これらの特徴は跡津川断層の存在と密接に関連した γ 線の過剰な放出に起因するという解釈が妥当であろう。特に(ii)の結果は堆積物の下に埋没した見えない断層の探査に対して同法が有効であることを明確に示している点で重要である。

本調査は1982年夏の跡津川断層発掘調査の際に行つたもので、野外調査ならびに議論に加わつて頂いた富山大学理学部中川渉、谷裕史、菊池美子、大阪市立大学理学部桐田克子の諸氏ならびに数多くの便宜をはかつて下さつた関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- CLEMENTS, W. E. and M. H. WILKENING, 1974, Atmospheric Pressure Effects on Rn Transport across the Earth-Air Interface, J. Geophys. Res., **79**, 5025-5029.
 西村 進, 1979, 地中空気のリドンの自動計測, Radioisotopes, **28**, 29-32.
 貞広太郎・見野和夫, 1980, 活断層における γ 線測定(I), 地震 **2**, **33**, 51-70.
 塩野清治, 1982, 標本・格子データ変換用サブルーチンPELTO, 情報地質, **7**, 81-88.

地 震 第 2 輯
 第 36 卷 (1983) 262-265 頁

埋込式ひずみ計による 見かけの体積ひ ずみ増幅率

国立防災科学技術センター

坂 田 正 治

(昭和 58 年 5 月 9 日受理)

Amplification Factors of Dilatation Detected
by Borehole Strainmeters

Shoji SAKATA

National Research Center
for Disaster Prevention

(Received May 9, 1983)

§1. はじめに

いわゆる埋込式体積ひずみ計は、その安定性、高分解能や製作・設置の簡便さのため、広く国内外において使用されている。国内では、気象庁は現在二十数本のひずみ計を関東・東海地方に展開し、地震予知のための観測を行つている。

ところでこの体積ひずみ計の原理は、ボーリング孔を利用して地中に埋設した円筒物体の容積変化を、容器からのシリコンオイルの流出入量の変化→ペローズの伸縮→差動トランスというプロセスで検出する。そしてその容積変化を円筒全体の容積で除したものが見かけの体積ひずみとして得られる。しかし、これは本来の体積ひずみ（ひずみ計を設置しなかつたとした場合の体積ひずみ量、あるいは現実的には、ひずみ計からその影響がなくなる程離れた場所でのひずみ量）とは異なっており、見かけのものは本来のものより大きくなる。すなわち増幅される。

このひずみ計による観測結果を利用するとき、単に観測値の時間変化の傾向の変化だけをみるのならば、そのままでもよいかも知れないが、他点との比較その他で定量的議論を行うためには、この増幅率を知っておく必要がある。

この原因は、基本的には地殻岩石中に孔をうがつこと自体にある。また、ひずみ計の円筒部を構成するのは金属であり、ひずみ計と岩石との隙間はモルタルで充てんされているので、これら物質と岩石との弾性定数の違いも影響をおよぼすことになる。

筆者はすでに、モルタルの弾性定数を仮定しつつ、この増幅率を計算し発表している [坂田 (1981b)]。このたび、3成分ひずみ計の設置に際し、モルタルの弾性定数の測定結果が得られた。このモルタルの調合比は、気象庁の埋込式ひずみ計設置用のものと同じであるので、この結果をもとに、増幅率を計算し、利用しやすいグラフにまとめた。

以下の計算において、問題はすべて二次元平面ひずみ問題として扱う。従つて、体積ひずみは面積ひずみと同じになる。また通常に従い、応力は引張りを正としている。

§2. 円孔の影響

Fig. 1 のように、弾性定数が E_3, ν_3 の無限弾性体中に、半径 a の円孔があるとす。この弾性体の無限遠に、主応力 S_1 および S_2 を与えたとき、円孔壁の半径方向の変位 u_n は、

$$u_n = (1 - \nu_3^2) a \{ (S_1 + S_2) + 2(S_1 - S_2) \cos 2\theta \} / E_3 \quad (1)$$

となる。この円孔の変形による見かけの面積ひずみ

Fig. 1. An open hole in an elastic body subjected to tensile stresses S_1 and S_2 at infinity.

Δ_n は、円孔の断面積変化のものと断面積に対する比であるから、

$$\Delta_n = \int_0^{2\pi} u_n a d\theta / \pi a^2 = 2(1 - \nu_3^2)(S_1 + S_2) / E_3 \quad (2)$$

として得られる。一方、無限遠においては一般に、主ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ と主応力 S_1, S_2, S_3 の間に

$$\left. \begin{aligned} E_3 \varepsilon_1 &= S_1 - \nu_3(S_2 + S_3), \\ E_3 \varepsilon_2 &= S_2 - \nu_3(S_3 + S_1), \\ E_3 \varepsilon_3 &= S_3 - \nu_3(S_1 + S_2), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

が成立する。平面ひずみ状態では $\varepsilon_3 = 0$ であることを考慮すると、無限遠での面積ひずみ (本来の面積ひずみ) Δ_∞ は、

$$\Delta_\infty = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = (1 - 2\nu_3)(1 + \nu_3)(S_1 + S_2) / E_3 \quad (4)$$

として得られる。従つて、円孔による面積ひずみ増幅率 h は、

$$h = \Delta_n / \Delta_\infty = 2(1 - \nu_3) / (1 - 2\nu_3) \quad (5)$$

となる。 $\nu_3 \approx 0.25 \sim 0.35$ とすると、 $h \approx 3 \sim 4$ となり、相当大きな量であることがわかる。

§3. 円筒物体およびモルタル層の影響

Fig. 2 のように、無限弾性体としての地殻 (E_3, ν_3) の中に半径 c の円孔があり、その内側の円筒

Fig. 2. A metal cylinder in the crust subjected to tensile stresses S_1 and S_2 at infinity; two bodies are connected by mortar grouting.

(内外半径: a, b ; 弾性定数: E_1, ν_1) との隙間は, 弾性定数が E_2, ν_2 のモルタルで充てんされているとする. このときの, 円筒内側表面の半径方向の変位は,

$$u(a) = (1 - \nu_3^2) a \{ (S_1 + S_2) f + 2(S_1 - S_2) g \cos 2\theta \} / E_3 \quad (6)$$

となる [坂田 (1981a)]. ここでは, f, g は無次元の係数であり, この三層モデルの3つの半径の比と物質の弾性定数により決まるものである. この場合, 円筒内壁の変位による見かけの面積ひずみ Δ は, (2) 式の u_n のかわりに (6) 式の $u(a)$ を用いることにより,

$$\Delta = 2(1 - \nu_3^2) (S_1 + S_2) f / E_3 = f \cdot \Delta_n \quad (7)$$

と得られる. これと (5) 式から最終の面積ひずみ増幅率 l が

$$l = \Delta / \Delta_\infty = f \cdot h \quad (8)$$

として得られる.

§4. f 値の計算方法

f の値の計算方法は, 筆者の論文 (1981a) 中にある二層モデルについての方法を, 単純に三層モデルに拡大すればよい.

f は軸対称変形に関するものなので, Fig. 2 の無限遠においては等方応力状態になっているものとして考えてよい. すなわち, $S_1 = S_2 = S$ である. このときの応力と変形は一般に,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= A/r^2 + 2B, \quad \sigma_\theta = -A/r^2 + 2B, \\ \tau_{r\theta} &= 0 \\ u &= \{ -(1 + \nu) A / r + 2B(1 - \nu - 2\nu^2) r \} / E, \\ v &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

であらわされる. 以下, A, B および E, ν に添字 1, 2 あるいは 3 をつけることにより, 考えている点が, 金属円筒部か, モルタル層か, あるいは岩盤部分にあるかを示すこととする.

まず, $r = a$ での応力条件から

$$A_1/a^2 + 2B_1 = 0 \quad (10)$$

が成立する. 次に, $r = b$ での σ_r および u の連続条件から, (9) を利用して

$$A_1/b^2 + 2B_1 = A_2/b^2 + 2B_2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \{ -(1 + \nu_1) A_1 / b + 2B_1(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2) b \} / E_1 \\ & = \{ -(1 + \nu_2) A_2 / b + 2B_2(1 - \nu_2 - 2\nu_2^2) b \} / E_2 \end{aligned}$$

が成立する. 同様に, $r = c$ での σ_r および u の連続条件から,

$$\left. \begin{aligned} A_2/c^2 + 2B_2 &= A_3/c^2 + 2B_3 \\ \{ -(1 + \nu_2) A_2 / c + 2B_2(1 - \nu_2 - 2\nu_2^2) c \} / E_2 \\ &= \{ -(1 + \nu_3) A_3 / c + 2B_3(1 - \nu_3 - 2\nu_3^2) c \} / E_3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

が成立する. 最後に $r \rightarrow \infty$ での応力条件を考えと,

$$\sigma_r = \sigma_\theta = S = 2B_3 \quad (13)$$

となり, B_3 の値が求められた. そこで, 5元連立1次方程式 (10), (11), (12) を解くことにより, A_1, B_1, A_2, B_2 および A_3, B_3 の値が求められる.

このようにして得た A_1, B_1 の値を (9) の u に代入し, $r = a$ とおけば, 円筒内壁の変位 $u(a)$ が求められる. 一方, 半径 a の裸孔の場合の半径方向の変位は, (1) を等方応力の場合に適用することにより, $S_1 = S_2 = S$ であるから,

$$u_n = 2(1 - \nu_3^2) a S / E_3 \quad (14)$$

と得られる. そこで $u(a)$ を u_n で割ることにより f の値が求められる.

§5. 実際の f 値の計算と考察

埋込式ひずみ計の場合, 3つの半径 a, b, c はそれぞれ 54, 57, 73 mm である. また円筒の材料ステンレス鋼の弾性定数は, $E_1 = 2 \times 10^6 \text{ kg f/cm}^2$, $\nu_1 =$

Fig. 3. Coefficient f versus E_3/E_1 .

0.30 である。また、茨城県八郷町に 3 成分ひずみ計を設置する際に、使用したモルタル (セメント 1: 水 0.55: 珪砂 0.50: ジブカル 0.07; 気象庁のひずみ計を埋設するのと同じ調合比) の弾性定数は、 $E_2 = (1.9 \sim 2.1) \times 10^5 \text{ kg f/cm}^2$ $\nu_2 = 0.35$ であった。

以上の値および周囲の岩盤のポアソン比 ν_3 を 0.35 として固定した場合の、岩盤のヤング率 E_3 と面積ひずみ増幅率 f の関係を Fig. 3 に示した。 E_2 のばらつきによる f の変動幅は、曲線の太さ以内におさまっている。また、 ν_2 や ν_3 が 0.05 程度変わっても、グラフに実質的な変動はない。従つて、このグラフ 1 枚で実用上十分な f の値を知ることができる。

E_3/E_1 が 0.05 より小さい場合については、図の曲線の左端点から原点までを直線で結ぶことにより、十分な近似値が得られるであろう。

地表近くの普通のよく固結した岩石は、 $E_3 = 1 \sim 5 \times 10^5 \text{ kg f/cm}^2$ であることが多い。Fig. 3 からみると f は大体 0.4~0.9 の範囲にある。先に §2. のべたように、 h が 3~4 であることを考えると、通常の岩石の l は概略 1~3 である。 E_3 の大きい岩盤の場合には、 l が 3 以上 4 近くにもなっていることがあり、この増幅効果は無視できぬ程のものである。

従つて計器設置にあつては、ボーリング孔内の P 波検層、密度検層を行い、採取コアに対する P 波 S 波速度測定や密度測定も行い、岩盤の弾性定数を正確に求めておくことは重要である。

文 献

- 坂田正治, 1981a, 新しく考案したポアホール式 3 成分ひずみ計, 国立防災科学技術センター研究報告 第 25 号, 95-126.
坂田正治, 1981b, 埋込式ひずみ計の体積ひずみ増幅率, 地震学会講演予稿集, 1981, No. 1, 172.

地 震 第 2 輯
第 36 卷 (1983) 265-267 頁

三軸圧縮試験における岩石の体積歪について

岡山大学理学部地学教室

瀬 谷 清

(昭和 58 年 6 月 17 日受理)

On Dilatant Volumetric Strain of Rock
in Triaxial Compression Test

Kiyoshi SEYA

Department of Sciences, Faculty of Science,
Okayama University

(Received June 17, 1983)

岩石は小さな差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3 > 0$) 下では体積歪 ($\epsilon_v < 0$) は差応力の増大と共にほぼ直線的に減少するが、差応力がやや大きくなると曲線の変化を示し、破壊強度に近づくにつれて ϵ_v は逆に増大するようになり、時によると正の ϵ_v を生ずることはよく知られている。このようなダイラタンシー現象については多くの研究がなされている [例えば, SCHOCK *et al.* (1973)].

しかし、実験において測定されるのは軸圧 ($\epsilon_1 < 0$) および供試中央部での半径歪 ($\epsilon_r > 0$) であり、体積歪 ϵ_v はこれらの歪を用いて、次式

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_r$$

によつて定義されるものである。体積歪としてこのような ϵ_v を使用するとき、封圧 ($\sigma_3 > 0$) が大きくなり、したがつて、 ϵ_r が大きくなり、更に軸圧 ($\sigma_1 > 0$) の上昇に伴つて非弾性歪が著しく大きくなつた場合に、この ϵ_v が如何なる意味をもつてくるかが問題になつてくる。

以下においては、問題の本質をみるために種々の簡略化を行なう。すなわち、円筒供試体の上下端は加圧板によつて完全に拘束されており、また、生じる変形は軸対称であり、中央部に対して上下対称でもある。なお、歪の二乗や積は無視できる程小さい