

# ダブルフラクチャリング法による3次元応力場の決定

佐久間彰三\*・菊地慎二\*・中村哲也\*・  
水田義明\*\*

著者らは、応力測定の新しい方法であるダブルフラクチャリング法におけるボーリング孔軸に垂直な2次元面での応力測定理論等について報告した(土木学会論文集, 1989.6)。本論文は、この測定法を3次元応力場に拡張した場合における亀裂発生条件を理論式から求め、2次元応力場における算定結果と比較検討するとともに、方向の異なる数本のボーリング孔での人工亀裂に関する測定結果から直接探索法を用いた3次元応力場の逆解析による応力決定について報告する。

**Keywords:** double fracturing stress measurement, three dimensional stress determination, inclined fracture initiation, optimization method

## 1. はじめに

地盤内の応力の測定法については、現在まで多くの研究が行われているが、実用に供されている方法として応力解放法と水圧破碎法があげられる。筆者らは、比較的複雑な地盤にも適応でき、原位置で容易にかつ短時間で測定ができる新しい応力測定法の研究を行っている<sup>1)</sup>。この応力測定法は、水圧破碎法と同様にボーリング孔壁に流体圧を作用させることによってボーリング孔壁に引張亀裂を発生させ、このときの亀裂発生条件から地山応力を算定するものである。水圧破碎法では、ボーリング孔壁に直接流体圧を作用させるため、亀裂発生後流体は亀裂内に浸透し、亀裂は大きく伸展する。これに対して新しい応力測定法は、柔軟なウレタンチューブを介して、ボーリング孔壁に流体圧を作用させるため、亀裂内への流体の浸透が妨げられ、亀裂の急激な伸展は抑制される。したがって、亀裂発生後も流体圧は降下せず、さらに流体圧を増加させることができ、流体圧の増加に伴って最初の亀裂とは別な方向にもう1つの亀裂が発生するようになる。地山応力は、これらの2つの亀裂の発生時および再開時の載荷圧から算定される。このため、この新しい応力測定法を「ダブルフラクチャリング法」と呼ぶ。

ダブルフラクチャリング法は、直接的にはボーリング孔軸に垂直な平面内の地山応力を測定するものとして観測方程式が組み立てられている。すなわち、ボーリング孔壁の載荷によって最初に発生する亀裂(以後、1次亀裂という)の位置は、ボーリング孔軸に垂直な平面内での地山の最大主応力方向によって決まるものとしている。また、後で発生する亀裂(以後、2次亀裂という)や、2つの亀裂の発生時の載荷圧は2次元平面問題とし

て弾性理論で求められている<sup>1)</sup>。しかし、3次元応力場においてすべての主応力軸とボーリング孔軸とが傾斜する場合には1次亀裂の発生条件(発生時の載荷圧、発生位置)は、2次元応力場で決定されるものとは異なり、1次亀裂は、まず初期亀裂がボーリング孔軸と傾斜した方向に発生し、次にこれらの初期亀裂が孔軸方向に連結して形成されることが知られている<sup>2)</sup>。

この論文では、3次元応力場における1次亀裂発生条件を理論式より求め、2次元応力場における結果と比較し、地山応力算定に及ぼす影響について検討する。また、方向の異なる数本のボーリング孔での1次亀裂に関する測定値から直接探索法を用いた3次元応力場の逆解析法について報告する。

## 2. 応力測定理論の概要

ダブルフラクチャリング法による地山応力測定理論については、参考文献<sup>1)</sup>の中で詳細に記述しているので、ここではその概要について述べる。ボーリング孔軸に垂直な平面内において、最大主応力  $P_0$  と最小主応力  $Q_0$  が作用している状態の岩盤にボーリング孔が削孔され、ボーリング内側より載荷されているときのボーリング孔壁の接線応力は次式で表わせる。

$$\sigma_\theta = P_0 + Q_0 - 2(P_0 + Q_0) \cos 2\theta - P \dots \dots \dots (1)$$

$\sigma_\theta$ ; ボーリング孔壁の接線応力  
 $P_0$ ; 地山の最大主応力  
 $Q_0$ ; 地山の最小主応力  
 $P$ ; ボーリング孔内側からの載荷圧  
 $\theta$ ;  $P_0$  方向からの角度

載荷圧  $P=0$  の場合には、式(1)からわかるように接線応力は、 $\theta=0$  で最小値、 $\theta=\pi/2$  で最大値を持ち、次式のようになる。

$$\sigma_\theta(0) = 3Q_0 - P_0 \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_\theta(\pi/2) = 3P_0 - Q_0 \dots \dots \dots (3)$$

\*正会員 日本国土開発(株) エンジニアリング本部  
(〒107 港区赤坂4-9-9)

\*\*正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

このような応力状態から荷重圧を増加させると、接線応力は減少し、まず最初に  $\theta=0$  で引張強度に等しくなる。このとき  $\theta=0$  で引張亀裂が発生し、この影響を受けて接線応力分布は変化する。さらに荷重圧を増加させると、亀裂が伸展しながら接線応力分布はさらに変化して、 $\theta=\pi/2$  で再び接線応力が引張強度に等しくなり、この位置でも引張亀裂が発生する。 $\theta=0$  の位置で1次亀裂が発生するときの荷重圧  $P_1^f$  は式(4)から容易に求めることができる。一方、 $\theta=\pi/2$  の位置で亀裂が発生するときの荷重圧  $P_2^f$  は、1次亀裂長  $\lambda$  の影響を受け、式(5)のように表わせる。ただし、 $A$  は1次亀裂長が  $\lambda$  である場合に、荷重  $P$  の単位荷重によって  $\theta=\pi/2$  の位置に生ずる接線応力である。また、 $B$  および  $C$  はそれぞれ荷重  $Q_0$  および  $P_0$  の単位荷重によってその位置に生ずる接線応力である。

$$3Q_0 - P_0 - P_1^f = -T \dots\dots\dots (4)$$

$$A(\lambda) \cdot P_2^f + B(\lambda) \cdot Q_0 + C(\lambda) \cdot P_0 = -T \dots\dots\dots (5)$$

$A, B, C$  は1次亀裂長  $\lambda$  が分かれば決定することができ、引張強度  $T$  が既知であれば、式(4)、(5)から2つの亀裂の発生時の荷重圧を用いて、地山応力  $P_0, Q_0$  を決定することができる。また、最初の荷重によって亀裂を発生させ、 $T=0$  とした後再び荷重し、2つの亀裂が再開口するときの荷重圧  $P_1^f, P_2^f$  から次式を用いて地山応力を算定する場合は、式(4)、(5)の代わりに次式を用いる。

$$3Q_0 - P_0 - P_2^f = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$A(\lambda) \cdot P_1^f + B(\lambda) \cdot Q_0 + C(\lambda) \cdot P_0 = 0 \dots\dots\dots (7)$$

地山応力の最大、最小主応力の差があまり大きくなく、2次亀裂が1次亀裂とほぼ直交する方向に発生している場合には、2つの亀裂が直交するものとし、このときの荷重圧は1次亀裂長の影響がないものとして地山応力を算定しても誤差は少ないことが確認されている<sup>1)</sup>。すなわち、式(7)の各係数を  $A(\lambda)=-1, B(\lambda)=-1, C(\lambda)=3$  とした式(8)を式(7)の代わりに用いる。

$$3P_0 - Q_0 - P_2^f = 0 \dots\dots\dots (8)$$

### 3. 3次元応力場における1次亀裂発生条件

前述した2次元応力場における応力測定理論は、ボーリング孔軸方向に関する応力成分を無視し、またボーリング孔軸に垂直な平面内の応力が1次亀裂の発生位置や発生時の荷重圧を支配するものとして、観測方程式を組み立てている。しかし、主応力軸とボーリング孔軸が傾斜している場合には、ボーリング孔壁上の最大引張応力はボーリング孔軸と傾斜した方向に生じるので、1次亀裂発生の初期にはその最大引張応力の方向と直角の方向に多数の微小亀裂が発生し、最終的にこれらが孔軸方向に連結するものと思われる。したがって、厳密には発生する亀裂の位置や荷重圧は、ボーリング孔軸に垂直な平

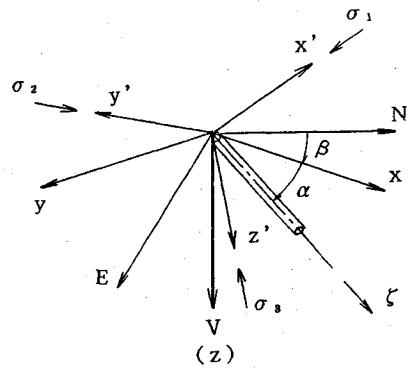


図-1 NEV座標系, xyz座標系および x'y'z'座標系(主応力)の間の関係

面内の応力のみで導かれたものと異なる。この章では、3次元応力状態が支配する1次亀裂発生条件を考え、ボーリング孔壁に発生する1次亀裂の位置や発生時の荷重圧を理論的に求め、ボーリング孔軸に垂直な平面内の応力状態から算定される結果と比較する。

#### (1) 1次亀裂発生に関する理論解析

図-1に示すように水平面に  $N, E$  軸をとり、 $V$  軸が鉛直下向きになるような基準座標系に原点を共有し、主応力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  に一致する方向に直交座標系  $x', y', z'$  軸をとる。すなわち、

$$\sigma_{x'} = \sigma_1, \sigma_{y'} = \sigma_2, \sigma_{z'} = \sigma_3 \dots\dots\dots (9)$$

ボーリング孔軸を水平面内に投影したものを  $x$  軸とし鉛直に  $z$  軸、 $x$  軸と  $z$  軸に垂直な方向に  $y$  軸 ( $y$  軸は水平) をとり、水平面とボーリング孔軸のなす角度を  $\alpha$ 、 $N$  軸から  $x$  軸までの角度を  $\beta$  とする。さらにボーリング孔軸を  $\zeta$  軸とし、直角座標系  $(x', y, \zeta)$  に対応する円柱座標系  $(r, \theta, \zeta)$  を設定する。 $x' y' z'$  座標系を  $x y z$  座標系に変換し、さらに  $r\theta\zeta$  座標系に変換し、式(9)の境界条件から応力集中係数を決定すると、一般的な3次元応力状態にある地盤中に削孔されたボーリング孔壁の応力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= 2\alpha_1 - 4\alpha_2 \cos 2\theta - 4\alpha_3 \sin 2\theta \\ \alpha_\zeta &= \beta_1 - 4\alpha_2 \nu \cos 2\theta \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} &= 0 \\ \tau_{r\zeta} &= 2\gamma_1 \cos \theta + 2\gamma_2 \sin \theta \\ \tau_{\theta\zeta} &= 0 \end{aligned}$$

ただし、 $\nu$  はポアソン比であり、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \gamma_1, \gamma_2$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1/2 \{ (l_1^2 \sin^2 \alpha + l_2^2 + l_3^2 \cos^2 \alpha - 2l_3 l_1 \sin \alpha \cos \alpha) \sigma_1 + (m_1^2 \sin^2 \alpha + m_2^2 + m_3^2 \cos^2 \alpha - 2m_3 m_1 \sin \alpha \cos \alpha) \sigma_2 + (n_1^2 \sin^2 \alpha + n_2^2 + n_3^2 \cos^2 \alpha - 2n_3 n_1 \sin \alpha \cos \alpha) \sigma_3 \} \\ \alpha_2 &= 1/2 \{ (-l_1^2 \sin \alpha + l_2^2 - l_3^2 \cos^2 \alpha + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 2l_3l_1 \sin\alpha \cos\alpha) \sigma_1 + (-m_1^2 \sin^2\alpha + m_2^2 \\
 & - m_3^2 \cos^2\alpha + 2m_3m_1 \sin\alpha \cos\alpha) \sigma_2 \\
 & + (-n_1^2 \sin^2\alpha + n_2^2 - n_3^2 \cos^2\alpha + 2n_3n_1 \\
 & \sin\alpha \cos\alpha) \sigma_3) \\
 \alpha_3 = & (l_2l_3 \cos\alpha - l_1l_2 \sin\alpha) \sigma_1 + (m_2m_3 \cos\alpha - \\
 & m_1m_2 \sin\alpha) \sigma_2 + (n_2n_3 \cos\alpha - n_1n_2 \sin\alpha) \sigma_3 \\
 \beta_1 = & (l_1^2 \cos^2\alpha + l_3^2 \sin^2\alpha + 2l_3l_1 \sin\alpha \cos\alpha) \sigma_1 \\
 & + (m_1^2 \cos^2\alpha + m_3^2 \sin^2\alpha + 2m_3m_1 \sin\alpha \cos\alpha) \sigma_2 \\
 & + (n_1^2 \cos^2\alpha + n_3^2 \sin^2\alpha + 2n_3n_1 \sin\alpha \cos\alpha) \sigma_3 \\
 \gamma_1 = & (-l_1^2 \sin\alpha \cos\alpha + l_3^2 \sin\alpha \cos\alpha + l_3l_1(\cos^2\alpha \\
 & - \sin^2\alpha)) \sigma_1 + (-m_1^2 \sin\alpha \cos\alpha + m_3^2 \sin\alpha \cos\alpha \\
 & + m_3m_1(\cos^2\alpha - \sin^2\alpha)) \sigma_2 + (-n_1^2 \sin\alpha \cos\alpha \\
 & + n_3^2 \sin\alpha \cos\alpha + n_3n_1(\cos^2\alpha - \sin^2\alpha)) \sigma_3 \\
 \gamma_2 = & (-l_2l_3 \sin\alpha - l_1l_2 \cos\alpha) \sigma_1 + (-m_2m_3 \sin\alpha \\
 & - m_1m_2 \cos\alpha) \sigma_2 + (-n_2n_3 \sin\alpha - n_1n_2 \cos\alpha) \sigma_3
 \end{aligned}$$

ここに  $l_i, m_i, n_i$  ( $i=1\sim 3$ ) は  $x', y', z'$  軸のそれぞれが  $x, y, z$  軸となす角の方向余弦である。ボーリング孔内から流体圧  $P$  を作用させると、ボーリング孔軸に垂直な平面内の接線応力  $\sigma_\theta$  は式 (11) のようになり、それが最小となる位置  $\theta_m$  は式 (12) から計算される。ボーリング孔軸に垂直な平面での応力測定理論では、この接線応力の最小値  $\sigma_m$  が地盤の引張強度  $T$  に等しくなる時の載荷圧  $P_b$  で 1 次亀裂が発生するものとしている。すなわち、このときの載荷圧  $P_b$  は式 (13) で表わされる。

$$\sigma_\theta = 2\alpha_1 - 4\alpha_3 \cos 2\theta - 4\alpha_3 \sin 2\theta - P \dots\dots\dots (11)$$

$$\theta_m = 1/2 \cdot \tan^{-1}(\alpha_3/\alpha_2) \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_m = & 2\alpha_1 - 4\alpha_2 \cos 2\theta_m - 4\alpha_3 \sin 2\theta_m - P_b \\
 = & -T \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

しかし、ボーリング孔壁上の最小応力  $\sigma_m'$  はボーリング孔軸に垂直な平面での接線応力ではなく、式 (10) に示すボーリング孔軸方向の応力  $\sigma_c$  とせん断応力  $\tau_{\theta c}$  および式 (11) の接線応力から式 (14) のように表わせる。したがって、実際にはボーリング孔壁への載荷によって、 $\sigma_m'$  の最小値  $\sigma_M$  が地盤の引張強度と等しくなった位置  $\theta_M$  に最初の亀裂が発生する。

$$\sigma_m' = 1/2 \{ \sigma_c + \sigma_\theta - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_c)^2 + 4\tau_{\theta c}^2} \} \dots\dots\dots (14)$$

また、最初に発生する亀裂はボーリング孔軸に沿ったものではなく、 $\sigma_M$  と垂直な方向に発生し、ボーリング孔軸に対する傾斜角  $\gamma_P$  は、 $\theta_M$  でのそれぞれの応力成分から式 (15) を用いて計算される。これらを模式的に描くと図-2 のようになる。

$$\gamma_P = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{\theta c}}{\sigma_\theta - \sigma_c} \right) \dots\dots\dots (15)$$

(2) 1 次亀裂発生条件の計算結果

前項の式 (11), (14) からわかるように、ボーリング孔軸に垂直な平面内の接線応力の最小値  $\sigma_m$  とボーリング孔壁でのあらゆる方向の接線応力の最小値  $\sigma_M$  とは明らかに異なる。したがって、 $\sigma_m$  と  $\sigma_M$  が引張強度と等し

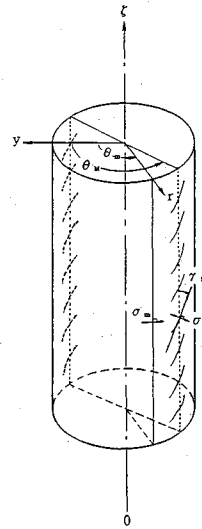


図-2 3次元応力場における1次初期亀裂の発生位置

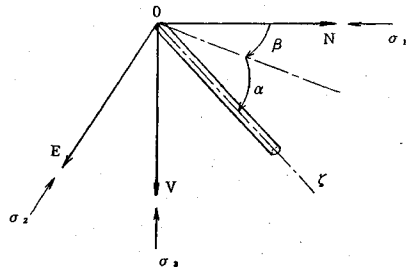


図-3 3次元応力状態

表-1 計算ケース

	$\sigma_1 = \sigma_N$	$\sigma_2 = \sigma_R$	$\sigma_3 = \sigma_V$	引張強度
$k-x1$	1.0	0.9	0.8	0.5
$k-x2$	1.0	0.9	0.8	1.0
$k-x3$	1.0	0.7	0.3	0.5
$k-x4$	1.0	0.7	0.3	1.0

くなるときの載荷圧  $P_b$  と  $P_B$  は異なったものとなる。また、 $\sigma_M$  となる位置  $\theta_M$  も  $\theta_m$  とは異なった位置となる。これらの違いには、主応力値、ボーリング方向、地盤の引張強度が関係する。ここでは、2種類の3次元応力場を設定し、任意の方向に削孔されたボーリング孔で得られる1次亀裂の発生位置や発生時の載荷圧を式 (14), (15) から求め、式 (12), (13) で求めた2次元応力場の結果と比較する。

主応力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  の方向は、図-3 に示すように  $N, E, V$  軸に一致させ、また引張強度については、表-1 に示すように、 $T=0.5, 1.0$  の2種類を考慮した4ケースについて計算した。

1 次亀裂発生時の2つの載荷圧  $P_B, P_b$  の差を無次元化  $[\Delta P_B/P_B = (P_b - P_B)/P_B]$  して1/4円グラフに表わして図-4 に示す。半径方向には水平面からボーリング

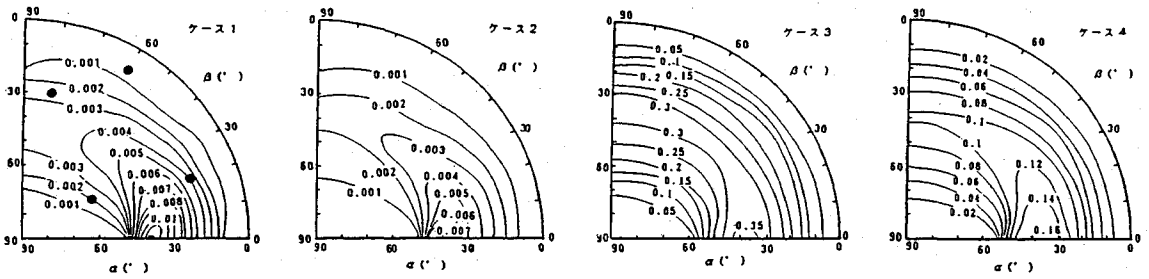


図-4 載荷圧の相違,  $(P_b - P_B)/P_B$

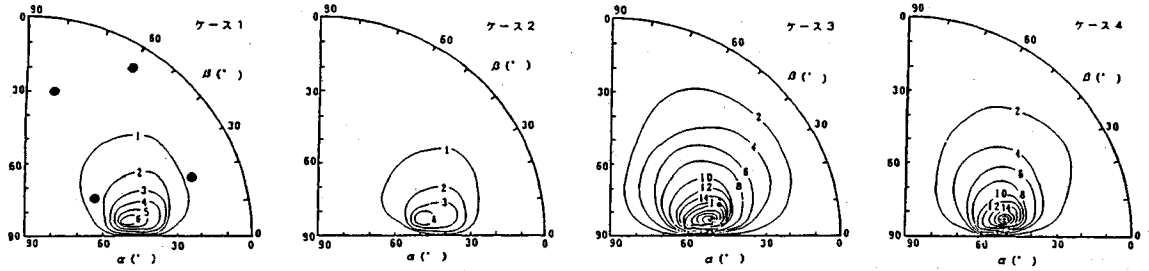


図-5 1次亀裂発生位置の相違,  $\theta_M - \theta_m$

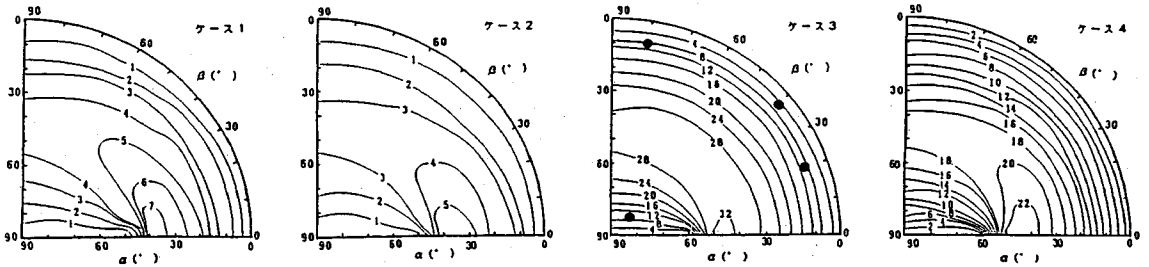


図-6 1次亀裂の傾斜角,  $\gamma_P$

孔軸までの角度  $\alpha$ , 接線方向にはボーリング孔軸を水平面に投影した軸と  $N$  軸のなす角度  $\beta$  を示す。

ケース3では主応力差が大きいため、載荷圧の違いが大きい。載荷圧の違いの最大値は、 $\alpha=40^\circ, \beta=0^\circ$  付近で発生し、約35%の違いとなる。ケース4ではケース3に比べて引張強度が大きいため、載荷圧の違いは少なくなり、上記と同じ位置で約16%の違いとなっている。

3次元応力場を考慮した場合の1次亀裂の発生位置  $\theta_M$  とボーリング孔軸に垂直な平面内における接線応力の最小の位置  $\theta_m$  にも相違が認められ、この差  $\Delta\theta = \theta_M - \theta_m$  を1/4円グラフにプロットしたものを図-5に示す。ケース1, 2では主応力差が小さく、 $\Delta\theta$  も小さい。ケース3, 4ではかなり大きな差となり、ケース3 ( $T=0.5$ ) では  $20^\circ$  以上の差がある所もある。

ボーリング孔軸に垂直な平面内での検討では、1次亀裂はボーリング孔軸に平行に発生するものと仮定している。一方、3次元応力場を考慮した場合、1次亀裂は、発生の初期にボーリング孔軸と傾いたものとなる。この

ときの傾斜角  $\gamma_P$  を1/4円グラフにプロットして図-6に示す。主応力差が小さい場合には傾斜角は小さく、図-6のケース1で最大  $7^\circ$  程度である。一方、主応力差が大きくなり、ケース3 ( $T=0.5$ ) では、最大  $32^\circ$  以上である。しかし、引張強度が大きくなると、同じ応力状態でも傾斜角は小さくなり、ケース4 ( $T=1.0$ ) では最大  $22^\circ$  程度である。傾斜角の分布は、 $\Delta P_B$  や  $\Delta\theta$  が大きい場合には傾斜角も大きくなる。

### (3) 1次亀裂発生前と発生後の孔壁の変位

無載荷の状態から1次亀裂が発生しない程度に載荷したときに、ボーリング孔壁に生ずる変位成分  $u_r, u_\theta, u_c$  および直径変化  $\Delta d$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$2Eu_r/d = -(1+2(1-\nu^2)\cos 2\theta)\sigma_r - (1-2(1-\nu^2)\cos 2\theta)\sigma_\theta + \nu\sigma_c + (1-\nu^2)\cos 2\theta \cdot \tau_{r\theta}$$

$$Eu_\theta/d = (\sigma_r - \sigma_\theta - 2\tau_{r\theta})(1-\nu^2)\sin 2\theta$$

$$2Eu_c/3d = -(\tau_{\theta c} - \tau_{cr})(1+\nu)\sin \theta$$

$$\Delta d = 2\sqrt{u_r^2 + u_\theta^2 + u_c^2}$$

もし、岩盤が完全な弾性体であると仮定すれば、オーバコアリングなどによってボーリング孔まわりの岩盤の応力を解放したときの変位と上記の変位とは絶対値が等しく符号が反対である。

1次亀裂が発生したあとの孔壁の変位分布は、応力解放を行わなくとも、通常の計測の過程で検出することができる。しかし、これらの変位は1次亀裂長 $\lambda$ に依存するので、それらの変位データから応力場を算定するには、数値解析から得られた種々のデータベースを逐一参照しなければならず、極めて複雑な逐次近似の手順が必要となる。

#### 4. 3次元応力場の決定法の研究

##### (1) 直接探索法を用いた3次元応力場の逆算

ダブルフラクチャリング法や水圧破壊法による応力測定で得られる1次亀裂発生時のデータは3次元応力場の影響を受け、ボーリング孔軸に垂直な2次元平面内の応力状態で決定される1次亀裂発生条件とは異なることは前章で述べた。したがって、これらの計測で得られるデータから地山応力を厳密に決定するためには、3次元応力場を想定した観測方程式を組み立てる必要がある。ここでは、1次亀裂発生時の測定データを用いてシプレックス法<sup>3)</sup>を用いた3次元応力場の決定方法について述べる。入力値としては方向の異なる数本のボーリング孔から得られる下記の①～⑤のデータを用いるものとする。ただし、NBは測点数である。また、データ⑥の追加についてはあとで述べる。

- ① ボーリング孔の方位、傾斜  $\alpha_j, \beta_j (j=1, NB)$
- ② 1次亀裂発生時の載荷圧  $P_{Bj}$
- ③ 1次亀裂発生位置  $\theta_{Mj}$
- ④ 1次初期亀裂の傾き  $\gamma_{Pj}$
- ⑤ 引張強度  $T_j$
- ⑥ 孔壁の変位

真の地山応力場での3主応力は図-3の座標系に関する6個の応力成分 ( $\sigma_N, \sigma_E, \sigma_V, \tau_{NE}, \tau_{EV}, \tau_{VN}$ ) で表わされる。したがって、シプレックスの初期値として、それぞれ異なる7組の応力状態を仮定し、それらの組の目的関数  $f$  が大きい組を規則的に変更しながらシプレックスを改変していくことによって真の値を探索する。このフローチャートを図-7に示す。まず最初に仮定した3次元応力場 ( $\sigma_{Ni}, \sigma_{Ei}, \sigma_{Vi}, \tau_{NEi}, \tau_{EVi}, \tau_{VNi}$ ) において各ボーリング孔毎 ( $j=1, NB$ ) の1次亀裂発生時の載荷圧  $P'_{Bj}$ 、亀裂の発生位置  $\theta'_{Mj}$ 、初期亀裂の傾き  $\gamma'_{Pj}$  を計算する。目的関数  $f$  は、測定値との誤差の2乗の和とし、載荷圧は土被り圧  $\gamma_i \cdot h$  で、角度は  $\pi/2$  で無次元化する。

$$f = \sum_{j=1}^{NB} \{ (P'_{Bj} - P_{Bj}) / \gamma_i \cdot h \}^2 + \sum_{j=1}^{NB} \{ (\theta'_{Mj} - \theta_{Mj}) / (\pi/2) \}^2$$

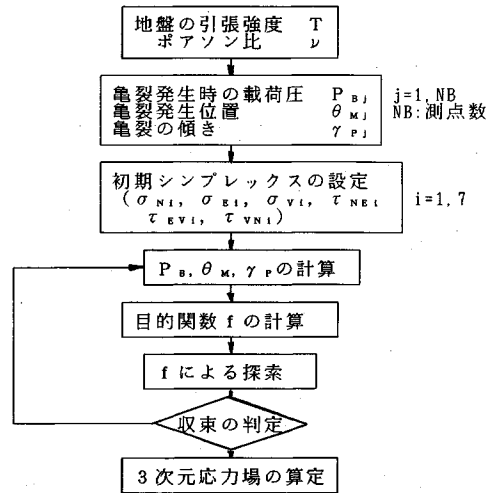


図-7 3次元応力場算定のためのフローチャート

$$+ \sum_{j=1}^{NB} \{ (\gamma'_{Pj} - \gamma_{Pj}) / (\pi/2) \}^2 \dots \dots \dots (16)$$

シプレックス法については今野ら<sup>3)</sup>によって述べられているので、以下にその概要を示す。 $f$ の最大値を与える点  $X^h$ 、2番目に大きな値を与える点  $X^b$ 、最小値を与える点  $X^l$ 、また  $X^h$  以外の点から生成される平均値  $X_0$  を用いて、次のような基本的な手続きを定義する。

- (1) 鏡映  $X^r$ :  $X_0$  と  $X^h$  から鏡映点  $X^r$  を作る。  
 $X^r = (1+a_1)X_0 - a_1 \cdot X^h \quad a_1 > 0$
- (2) 拡張  $X^e$ :  $X^r$  方向に拡張を行う。  
 $X^e = a_3 \cdot X^r + (1-a_3)X_0 \quad a_3 > 1$
- (3) 収縮  $X^c$ :  $X^h$  を  $X_0$  の方向に収縮させる。  
 $X^c = a_2 \cdot X^h + (1-a_2)X_0 \quad 0 < a_2 < 1$

ここでは、 $a_1=1, a_2=0.5, a_3=2$ の値を用いた。規定回数のシプレックス解析を行った後、 $f$ を最小にする応力成分を真に3次元応力場とし、それらを用いて各主応力の大きさとその方向を決定する。

##### (2) 3次元応力算定精度の検証

方向の異なる数本のボーリング孔で得られる1次亀裂の発生条件 (亀裂発生時の載荷圧  $P_{Bj}$ 、発生位置  $\theta_{Mj}$ 、亀裂の傾斜  $\gamma_{Pj}$ ) を利用した3次元応力場の決定方法の算定精度を検証するために3.(2)で求めた1次亀裂発生条件を入力データとして算定する。仮定した応力状態は、図-3に示すように、主応力軸がそれぞれ  $NEV$  軸に一致し、主応力値はケース3の  $\sigma_1=1.0, \sigma_2=0.7, \sigma_3=0.3$  の場合とした。使用するボーリングは4本で、ボーリング孔の方向を変えた3ケースについて算定し、そのときのボーリング孔の方向および入力データを表-2に示す。これらの入力データは計算により求められたかなり高精度のものとなっている。ケース1ではボーリング孔の方向がすべて座標軸の正の象限にあるような比較的ボーリング孔の方向に近い場合であり、ケース2はこの

表—2 応力場算定のための入力データ (計算値)

	ボーリング方向		亀裂発生時の 載荷圧 $P_B$ (Mpa)	亀裂発生位置 $\theta_M$ (°)	亀裂の傾斜 $\gamma_P$ (°)
	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)			
ケース 1	60.0	30.0	1.451	32.77	24.82
	30.0	80.0	0.548	1.45	25.06
	10.0	60.0	0.488	1.05	10.01
	20.0	20.0	0.739	2.50	19.71
ケース 2	60.0	30.0	1.451	32.77	24.82
	30.0	80.0	0.548	1.45	25.06
	10.0	60.0	0.488	1.05	10.01
	40.0	130.0	0.832	171.45	-28.78
ケース 3	50.0	10.0	1.443	15.23	31.10
	50.0	170.0	1.443	164.77	-31.10
	50.0	190.0	1.443	15.23	31.10
	50.0	350.0	1.443	164.77	-31.10

表—3 算定された3次元応力場

	仮定	主応力値 (MPa)		主応力の方向 $\alpha$ (°) $\beta$ (°)	
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
仮定	$\sigma_1$	1.0	0.0	0.0	0.0
	$\sigma_2$	0.7	0.0	90.0	90.0
	$\sigma_3$	0.3	90.0	90.0	90.0
ケース 1	$\sigma_1$	0.982	0.00	0.00	0.94
	$\sigma_2$	0.692	0.00	90.94	90.94
	$\sigma_3$	0.294	90.00	90.94	90.94
ケース 2	$\sigma_1$	0.974	0.00	0.58	0.58
	$\sigma_2$	0.691	0.00	90.58	90.58
	$\sigma_3$	0.292	90.00	90.58	90.58
ケース 3	$\sigma_1$	1.009	0.00	-0.60	-0.60
	$\sigma_2$	0.706	0.00	89.40	89.40
	$\sigma_3$	0.297	90.00	89.40	89.40

中の1本が他の象限にある場合であり、ケース3は2次元応力場での1次亀裂発生条件と大きな差 ( $\Delta P_B$ ,  $\Delta \theta$ ) を持つボーリング孔がそれぞれの象限に1本ずつある場合である。

従来、著者らが行ってきた簡易算定で求められた6つの応力成分の1成分だけをそれぞれ10%大きくしたものと計6組とすべての応力成分を10%小さくしたものと1組をシンプレックスの初期値とした。そして図—7の手順により、表—2の入力データを用いて3次元応力場を算定した結果が表—3に示されている。これを見ると、いずれのケースにおいても誤差は小さく、ケース2の最大主応力の誤差0.026が最も大きい。ところが、図—7の手順によれば、初期値をどのように設定するかによって算定される3次元応力場が多少異なることがわかった。例えば1つのせん断応力成分だけ初期値を50%程度大きくすると、ケース1では最大主応力で0.079、中間主応力で0.015、最小主応力で0.03の誤差を、ケース2ではそれぞれ0.035、0.02、0.016の誤差を生じる。しかし、この場合でも、ボーリング孔の方向が適当にばらついているケース3ではほとんど誤差はない(すべての主応力の誤差が0.002以下)。

一方、応力解放によって得られる変位データを導入すると、すなわち、①~⑥のデータを用いると、初期値が上記の場合でも、ケース1の最大主応力の誤差は0.023と小さくなる。

以上のことから、適当な方向にボーリング孔がばらついている場合には、各ボーリング孔から得られる2次元応力と亀裂位置のデータによる簡易計算でもほとんど誤差なく3次元応力場が算定できると思われる。

(3) 地山応力算定に及ぼす3次元応力場の影響

原位置の計測で測定される1次亀裂の発生条件は、3次元応力場を考慮して求められる1次亀裂発生時の載荷圧  $P_B$  や1次亀裂の発生位置  $\theta_M$  である。2. で記述した地山応力の簡易算定法では、ボーリング孔軸に垂直な平面内の接線応力の最小値から1次亀裂の発生時の載荷圧  $P_B$  を求め、その位置  $\theta_M$  で1次亀裂が発生するものとし

て地山応力を算定している。この簡易算定法の算定精度を検討するために、3次元応力場で求められる  $P_B$ ,  $\theta_M$  を  $P_B$ ,  $\theta_M$  とみなして地山応力を算定する。地山応力の算定法は、前述したものと同様にシンプレックス法を用いた。すなわち、図—7のフローにおいて3次元応力場で求められる1次亀裂発生時の載荷圧  $P_B$  と亀裂発生時位置  $\theta_M$  のかわりに、ボーリング孔軸に垂直な平面内の2次元応力場で求められる1次亀裂発生時の載荷圧  $P_B$  と亀裂発生位置  $\theta_M$  を用いる。また、この場合には  $\theta_M$  が引張強度に達して  $\theta$  面に亀裂が発生すると考えているから、亀裂に傾斜はない。すなわち初期亀裂の傾斜角  $\gamma_P$  は不要である。

入力データを表—4に示す。ケース1は主応力を  $\sigma_1=1.0$ ,  $\sigma_2=0.9$ ,  $\sigma_3=0.8$ , 引張強度を  $T=0.5$  とした場合(表—1のケース1に相当)の各ボーリング孔で求められる  $P_B$ ,  $\theta_M$  のデータ群である。図—4および図—5のケース1にボーリング方向が●印で示されているが、これからわかるように、いずれのボーリング孔も  $P_B$  や  $\theta_M$  との差が最も大きくなる方向には削孔されていないことになる。ケース2,3は、主応力差が大きい ( $\sigma_1=1.0$ ,  $\sigma_2=0.7$ ,  $\sigma_3=0.3$ ) 応力場を想定した場合で、ケース1と同じようにボーリング孔がNEV座標の正の方向にあるとしており、それぞれ  $T=0.5$ ,  $1.0$  である(表—1のケース3,4に相当)。ケース4は、ケース2と同じ条件で、 $\theta_M$  や  $\gamma_P$  が対称になるようなボーリング孔を選定した場合である。ケース5は、ケース2と同じ条件であるが、初期発生亀裂の傾斜角  $\gamma_P$  が10°以内のボーリング孔を選定した場合である(図—6のケース3にボーリング方向が●印で示されている)。

表—5にこれらの設定応力状態と  $P_B$ ,  $\theta_M$  を  $P_B$ ,  $\theta_M$  とみなした場合の応力算定結果を示す。ケース1では、主応力差が小さいため、誤差も非常に小さい。ケース2では、主応力の角度の誤差はそれほど大きくないが、主応力値は最大主応力で約0.25小さな値となっている。引張強度が大きいケース3では、誤差は小さくなり、ケース2の半分以下の誤差となる。ケース4では  $\theta_M$  と  $\theta_m$

表一4 各断面の2次元応力場から3次元応力場を算定するための入力データ

	ボーリング方向		引張強度 T (MPa)	亀裂発生時の 載荷圧 P <sub>a</sub> (P <sub>b</sub> として算入)	亀裂発生位置 θ <sub>M</sub> (θ <sub>m</sub> として算入)	初期亀裂の 傾斜 γ <sub>p</sub> (算入せず)
	α (°)	β (°)				
ケース1	60.0	30.0	0.5	2.202	45.87	3.3
	30.0	80.0				
	10.0	60.0				
	20.0	20.0				
ケース2	60.0	30.0	0.5	1.451	32.77	24.8
	30.0	80.0				
	10.0	60.0				
	20.0	20.0				
ケース3	60.0	30.0	1.0	2.013	36.97	15.0
	30.0	80.0				
	10.0	60.0				
	20.0	20.0				
ケース4	50.0	10.0	0.5	1.443	15.23	31.1
	50.0	170.0				
	50.0	190.0				
	50.0	350.0				
ケース5	10.0	20.0	0.5	0.681	1.06	10.6
	10.0	80.0				
	80.0	45.0				
	5.0	40.0				

の違いが逆方向になるようにボーリング孔を選定しているため、主応力の方向は設定したものと等しくなるが、主応力の大きさは、ケース2よりも大きな誤差を持つ。ケース5では、主応力差が大きな応力状態にもかかわらず、 $\Delta P_B$ や $\Delta \theta$ も小さいため、応力算定誤差は小さく、3%程度である。

このように主応力差が大きい場合には、任意に選定されたボーリング孔で得られる $P_B$ ,  $\theta_M$ を $P_b$ ,  $\theta_m$ とみなして地山応力を算定すると無視できない誤差を生じる。しかし、このような応力状態においても初期発生亀裂の傾斜角 $\gamma_p$ が小さい場合(図一6の数値が小さくなるような応力場、引張強度、ボーリング方向)には、応力算定誤差は小さい。一般に、主応力が大きく、引張強度が小さい場合に、ボーリング孔が図一3の $\alpha=45^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$ の方向に削孔されると、 $\gamma_p$ は大きくなる。

なお、ケース5では最小主応力方向の方位角 $\beta$ に見掛上大きな誤差がみられるが、これは傾斜角 $\alpha$ が $90^\circ$ に近いためであって、方向余弦としての誤差は小さい( $\alpha$ がほぼ $90^\circ$ であれば $\beta$ に大きな違いがあっても方向に大きな差はない)。

### 5. 3次元応力場の測定例

岐阜県神岡町の非鉄金属鉱山内にある陽子崩壊観測施設を大型化する計画に伴う初期応力測定調査が昭和62

表一5 各断面の2次元応力場から算定された3次元地山応力

		主応力値 (Mpa)	主応力方向		
			α (°)	β (°)	
ケース1	設定	$\sigma_1$	1.0	0.0	0.0
		$\sigma_2$	0.9	0.0	90.0
		$\sigma_3$	0.8	90.0	90.0
	算定	$\sigma_1$	0.989	0.00	-0.58
		$\sigma_2$	0.896	0.00	89.42
		$\sigma_3$	0.796	90.00	89.42
ケース2	設定	$\sigma_1$	1.0	0.0	0.0
		$\sigma_2$	0.7	0.0	90.0
		$\sigma_3$	0.3	90.0	90.0
	算定	$\sigma_1$	0.756	0.00	-2.11
		$\sigma_2$	0.594	0.00	87.89
		$\sigma_3$	0.207	90.00	87.89
ケース3	設定	$\sigma_1$	1.0	0.0	0.0
		$\sigma_2$	0.7	0.0	90.0
		$\sigma_3$	0.3	90.0	90.0
	算定	$\sigma_1$	0.903	2.59	1.76
		$\sigma_2$	0.662	3.64	91.93
		$\sigma_3$	0.269	85.53	236.39
ケース4	設定	$\sigma_1$	1.0	0.0	0.0
		$\sigma_2$	0.7	0.0	90.0
		$\sigma_3$	0.3	90.0	90.0
	算定	$\sigma_1$	0.681	0.00	-0.52
		$\sigma_2$	0.558	0.00	89.48
		$\sigma_3$	0.266	90.00	89.48
ケース5	設定	$\sigma_1$	1.0	0.0	0.0
		$\sigma_2$	0.7	0.0	90.0
		$\sigma_3$	0.3	90.0	90.0
	算定	$\sigma_1$	0.979	0.40	-1.22
		$\sigma_2$	0.686	-0.94	88.77
		$\sigma_3$	0.290	88.98	111.93

年10月に実施された<sup>4)</sup>。

用いられた応力測定法は、ダブルフラクチャリング法の他に、2種類の応力解放法(埋設法と球面孔底ひずみ法)、水圧破碎法およびAE法の5種類であった。これらの方法による応力測定は、測定結果の比較を容易にするため、ほぼ同じ位置で行われた。

測定場所は、池ノ山の中腹にある坑口から水平に8 km入った山頂のほぼ直下にあり、測定位置の土被り高さは観測施設の必要条件から図一8の断面図に示すように約1000 mである。地質は、角閃石・黒雲母片麻岩(一軸圧縮強度の平均157.9 MPa, 引張強度の平均9.91 MPa, 単位体積重量2.74 t/m<sup>3</sup>)からなり、亀裂の少ない堅硬な岩盤である。図一9にボーリングの配置を示す。

ダブルフラクチャリング法による測定では、3次元応力を求める目的で、直径104 mmの方向の異なる4本のボーリングを坑道内から20 m削孔し、測定した。そのときのボーリングの方向を表一6に示す。測定は各孔とも、5点(No.1孔のみ7点)実施したが、既存亀裂の影響などにより亀裂発生や開口時の載荷圧を明瞭に検出することができない場合や他の計測結果とは異なる方向に1次亀裂が発生する場合があります。得られた22点の載荷圧-孔径変化曲線から亀裂の開口を明確に確認できた

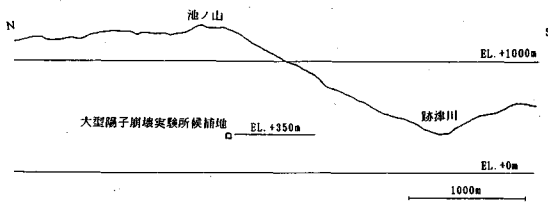


図-8 測定位置断面図

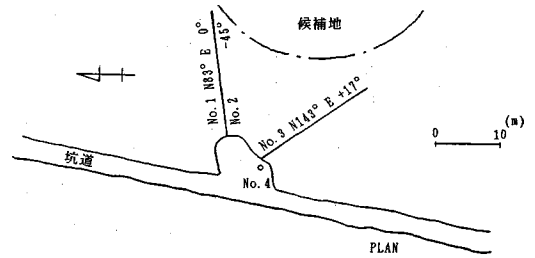


図-9 ボーリング孔配置図

表-6 ボーリングの方向

ボーリング孔の番号	ボーリングの方向	直径 (mm)	長さ (m)
No. 1	N 83° E 水平	104	20
No. 2	N 83° E -45° 下向き	104	20
No. 3	N 143° E +17° 上向き	104	20
No. 4	鉛直	104	20

表-7 最大・最小主応力の算定結果

測点の番号	ボーリング孔の番号	測定深度 (m)	亀裂再開口時の載荷圧			主応力	
			$P_1^*$ (MPa)	$P_2^*$ (MPa)	1次亀裂の開口長 $\lambda$	$P_0$ (MPa)	$Q_0$ (MPa)
①	No. 1	10.5	12.63	38.42	1.54	15.13	9.25
②	No. 1	16.5	14.14	44.63	1.54	17.47	10.54
③	No. 1	19.0	23.42	55.53	1.20	22.95	15.46
④	No. 2	16.5	27.63	41.42	0.57	18.48	15.37
⑤	No. 2	19.0	23.42	43.68	0.85	18.72	14.05
⑥	No. 3	15.5	26.74	43.68	0.66	18.82	15.19
⑦	No. 4	19.0	14.00	37.11	1.35	15.03	9.68

ものは7点のみであった。

それぞれのボーリング孔で得られた1次および2次亀裂の再開口時の載荷圧の測定結果を表-7に示す。この測定結果からボーリング孔軸に垂直な平面内の最大・最小主応力を求めて表-7に併せて示す。このときには、1次亀裂の開口長の影響を考慮し、式(6)、(7)を用いて地山応力を算定した。

1次亀裂の方向はプローブに装着した型取りチューブの結果から決定した。写真-1に代表的な型取りチューブの結果を示す。1次亀裂の方向は、鉛直ボーリングではN方向を0とし、その他のボーリング孔では孔軸を含む鉛直上向きを0とした。ボーリング孔底に向かって時計回りを正とした。1次亀裂の傾斜角は、ボーリング孔軸を0とし、ボーリング孔底に向かって時計回りを正として図-10に示すような型取りチューブの展開図から求めた。1次亀裂はボーリング孔壁のほぼ対称となる位置(180°の位置)に2つ検出されるので、いったんそれらを別々に求めたものを表-8に示す。これらの値から大まかに最大主応力の方向を決定し、それぞれの測点における2次元応力場を算定した結果が表-7に示されたものである。

次に各ボーリング孔で算定されたボーリング孔軸に垂直な平面での最大、最小主応力およびその角度を観測値として3次元応力場を算定する。3次元応力場としては図-3に示すNEV座標系の各応力成分( $\sigma_N, \sigma_E, \sigma_V, \tau_{NE}, \tau_{EV}, \tau_{VN}$ )を上記の測定値から最小二乗法を用いて算定する。このとき7点のデータのうち、用いるデータの組合せを変化させ、誤差が最小になる組合せ(①②

④⑤⑥⑦のデータを用いた場合)によって算定された3次元応力成分から最大、中間、最小主応力( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )と、その方向を算定して表-9に示す。

同じ場所で行われた他の応力測定法により求められた結果を表-10に示す。この表では、埋設法や球面孔底ひずみ法の応力解放法は、最大・最小主応力の差が大きく測定されているのに対し、水圧破碎法やダブルフラクチャリング法といった孔壁を破壊する方法は最大と最小主応力差が小さい(最大主応力は小さく、最小主応力は大きい)傾向にあるようである。主応力の方向は応力値に比べ大きな差はなく、どの方法も同様な傾向が見られる。ただし、球面孔底ひずみ法によるものは最小主応力の方向と中間主応力の方向とが、他の方法から得られるものと逆になっている。

表-9のダブルフラクチャリング法によって決定された3次元の主応力は、各ボーリング孔で得られた測定値からボーリング孔軸に垂直な平面内の最大・最小主応力を求め、これらの結果を組み合わせる算定したものである。しかし、3次元応力場の主応力軸とボーリング孔軸が異なる場合には、1次亀裂の発生条件はボーリング孔軸に垂直な2次元平面で決定される発生条件とは異なる。そこで、方向の異なる各ボーリング孔で得られた1次亀裂発生条件からシンプレックス法を用いて、直接3次元応力場を決定する。

この算定は、4.(1)の①~⑤を入力データとして行った。1次亀裂発生時の載荷圧 $P_B$ は、測定された載荷圧-孔径の変化曲線から求め、岩盤の引張強度 $T$ はこの載荷圧と1次亀裂の開口時の載荷圧 $P_E$ との差( $T=P_B$



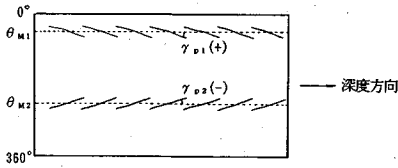
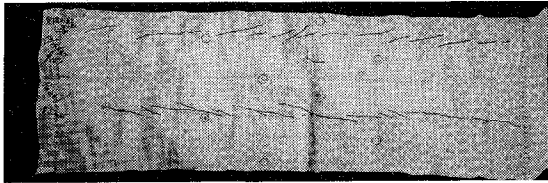
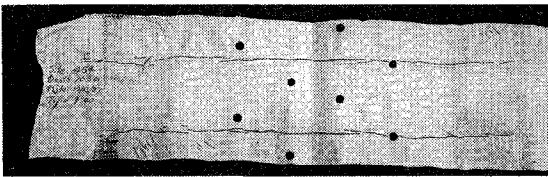


図-11 型取りチューブからの初期亀裂の傾きの読み取り



(a) 初期亀裂の傾斜が大きい場合



(b) 初期亀裂の傾斜がほとんどない場合

写真-1 型取りチューブに型取られた1次亀裂

表-8 実測された1次亀裂の位置と初期亀裂の方向

番号	方位傾斜	深度 (m)	$\theta_{M1}$ (°)	$\theta_{M2}$ (°)	$\gamma_{P1}$ (°)	$\gamma_{P2}$ (°)
No.1	N83° E	10.5	147	330	0	-45
	水平	16.5	153	310	38	(-)
		19.0	114	298	-10	-48
No.2	N83° E	16.5	173	350	0	0
	-45°	19.0	169	347	16	-11
No.3	N143° E	15.5	0	180	0	0
No.4	鉛直	19.0	-	-	-	-

- $P_E$ )として载荷曲線から決定する。また、1次亀裂の傾斜角 $\gamma_P$ は写真-1に示すような型どりチューブから読みとった。写真からもわかるように、亀裂の方向 $\gamma_P$ は一つ一つの亀裂について異なっており、亀裂の中央と端とで角度が違っているものもある。ただし、初期亀裂は型取りされた亀裂の中央部から発生したと考えられるので、それぞれの亀裂毎の中央部での傾斜角やその位置を決定し、それぞれの亀裂の $\gamma_P$ および $\theta_M$ とする。このようにして決定した $\gamma_P$ 、 $\theta_M$ のばらつきは物性の不均一性に起因しているものと思われるので、载荷全長 $l_1=65$  cmのうち载荷中心部の変位測定区間 $l_2=15$  cmのデータを平均して、測定位置での1次亀裂の傾斜角 $\gamma_P$ および発生位置 $\theta_M$ とした。写真-1(a)の下側の亀裂では一つ一つの亀裂を見ると、 $\gamma_P$ は±5°以内、また $\theta_M$ は±10°以内の測定誤差(ばらつき)となっている。

表-10に示されるこれらのデータは実測値であるか

表-9 5種類の方法による初期応力の測定結果

応力	球面孔底ひずみ法	埋設法	A E法 14°-効果	水圧破壊法	グアムワタチ ワタチ法
最大主応力 $\sigma_1$	36.7 N 25° E 52° S	29.1 N 22° E 54° S	29.0	19.6 N 32° E 43° S	18.3 N 30° E 52° S
中間主応力 $\sigma_2$	9.9 N234° E 34° N	13.9 N121° E 6° N		9.6 N155° E 31° N	13.3 N130° E 8° N
最小主応力 $\sigma_3$	2.4 N134° E 14° N	4.3 N215° E 35° N	4.9	4.8 N267° E 32° N	11.2 N226° E 37° N
鉛直応力成分	26.2	20.8		12.9	15.6

※ 上段 応力 (MPa)  
中段 応力の方向 (北から時計回り)  
下段 応力の傾斜 (水平からの傾き、方向は落とし側)

表-10 実測値から定められた直接算定のための入力データ

測点番号	1	2	3	4	5	6
$\alpha$ (°)	0.0	0.0	0.0	45.0	45.0	-17.0
$\beta$ (°)	83.0	83.0	83.0	83.0	83.0	143.0
T (MPa)	8.42	5.79	7.63	2.11	11.58	9.84
$P_0$ (MPa)	21.05	20.53	31.05	29.74	35.00	36.58
$\theta_M$ (°)	217.0	217.0	217.0	233.0	233.0	85.3
$\gamma_P$ (°)	-21.0	-21.0	-21.0	0.0	0.0	0.0

図-1の $\alpha$ は俯角であるので表-8の傾斜とは符号が逆である。引張強度Tは破壊圧と再開口圧との差から求められた。

表-11 応力算定結果の比較

主応力	2次元応力場から算定		厳密な直接算定	
	大きさ (MPa)	方向	大きさ (MPa)	方向
最大主応力 $\sigma_1$	18.3	N 30° E 52° S	19.8	N146° E 31° S
中間主応力 $\sigma_2$	13.3	N130° E 8° N	15.8	N 78° E 33° S
最小主応力 $\sigma_3$	11.2	N226° E 37° N	11.4	N 23° E 41° N

ら、3次元応力場の直接算定に供された表-2のデータや簡易算定に供された表-4のデータに比べてその精度は低い。したがって、これらの実測値を入力データとして算定を行えばある程度の誤差を伴うと考えられる。今回の測定例では表-10に示されているように、採用されたデータが得られているのは、3方向のボーリング孔だけであり、これは3次元解析に必要なぎりぎりの数である。このような場合、仮に5°以下の読み取り誤差があっても算定誤差は大きくなる場合があり得る。したがって、3次元解析を導入した厳密な算定を行うためには、ボーリング孔の方向も含めて、数多くのデータを取る必要があると思われる。

シンプレックス法を用いて3次元応力場を直接逆算した結果を2次元応力場から算定した結果と比較して表-11に示す。主応力値は3次元解析により算定した方が

3主応力とも若干大きな値を示している。また、最大主応力と中間主応力の方向は互いにかなり異なったものとなっている。

## 6. 結 言

2次元応力場における検討では、式(6)と式(8)の簡易算定方法は有効なものとなるが、3次元応力場を考慮した場合には1次亀裂発生条件がボーリング孔軸に垂直な平面内の2次元応力場で求められるものと異なる。すなわち1次亀裂発生時の載荷圧や発生位置は2次元応力場で求められるものと相違し、それらの相違は工学的に無視できない場合がある。このとき1次亀裂の初期亀裂はボーリング孔軸と大きく傾斜して発生するため、このような場合には3次元応力場としての取扱いが必要となる。ただし、初期発生亀裂の傾斜が大きい場合には、2次元応力場としての取扱いで地山応力算定精度は十分なものと考えられる。また、数本のボーリング孔を利用した3次元応力の決定においてボーリング孔の方向が適当にばらついている場合には、2次元応力場としてボーリング孔毎に算定された応力から3次元応力を算定しても、算定されるべき応力場がとくに異常なものでない限り、誤差は小さいものと判断される。

以上のように実際の測定作業においては上式の簡易式を用いて原位置で迅速に地山応力を決定するが、前述し

たような複雑な要素を含んだデータが得られた場合には再度厳密な解析を行って地山応力を決定すべきである。

しかしながら、応力データ(強度、亀裂方向も含む)だけを入力データとして逆解析する限り応力算定の精度には限界がある。なお、変位データ(応力解放による直径変化や1次亀裂発生後の直径分布の変化)を取り込めば算定精度は上がるが、オーバーコアリングまたは非常に複雑な逆解析手順の導入を必要とすることは、原位置で容易にかつ短時間で測定できるというダブルフラクチャリング法の利点を害することになり、変位データの導入はあまり実用的でない。

## 参 考 文 献

- 1) 佐久間彰三ほか：ダブルフラクチャリング法による地山応力の測定，土木学会論文集，No. 406，Ⅲ-11，pp. 87～96，1989. 6.
- 2) Kuriyagawa, M. et al. : Application of hydraulic fracturing to three dimensional in-situ stress measurements, 2nd Workshop on Hydraulic Fracturing stress measurement, pp.307～340, 1988.
- 3) 今野浩ほか：非線形計画法，日科技連出版社，1978. 3
- 4) 田中達吉ほか：神岡鉱山における電中研式初期地圧測定結果，第21回岩盤力学シンポジウム論文集，1989. 2.

(1991. 2. 23 受付)

## DETERMINATION OF THREE DIMENSIONAL IN-SITU STRESS BY DOUBLE FRACTURING METHOD

Shozo SAKUMA, Shinji KIKUCHI, Tetsuya NAKAMURA and Yoshiaki MIZUTA

It is well known that borehole pressurization generally produces a longitudinal fracture even in a borehole drilled not parallel to any far field principal stress direction. In such case, however, angular position of the fracture may be formed from crack initiation inclined to the borehole axis, whose direction is perpendicular to the maximum tensile stress on the borehole boundary. Hence, the authors have developed a strict back calculation system for three dimensional stress, determination, using a method for unconstrained optimization, and they carried out back calculations in order to examine reliability of the conventional routine calculation. They also applied it to reappraisal of the past stress measurement by double fracturing method, which was carried out with four other methods of stress measurement at the formation in abnormal stress state. It is suggested from the examinations that strict calculation should be introduced only when the fracture impression shows that inclination of fracture initiation is significantly large.