

原位置試験に基づく岩盤の3次元地質構造解析手法 — 孔内載荷試験を用いた低コストな原位置岩盤性状の把握 —

川久保 昌平^{*1}

岩盤構造物を建設するには数値解析等によりその安定性を評価するが、その際、調査結果に基づき原位置岩盤モデルを適切に構築することが肝要である。本研究は比較的簡易かつ低コストで実施可能な孔内載荷試験を異なる方向の複数ボアホールにおいて実施し、その結果から異方性を考慮した3次元岩盤モデルを構築する手法をまとめたものである。孔内載荷試験は等変位方式を用い、測定理論に異方性弾性理論を導入した。原位置岩盤は層理面を有し、弱い異方性を示す珪質泥岩である。本研究による3次元岩盤モデルは、ボーリングコアを用いた岩石試験による異方性解析及びボアホールテレビ孔壁画像解析の両結果と比較し、その妥当性を検証した。

キーワード：異方性岩盤、横等方性、孔内載荷試験、異方性弾性理論、3次元解析

1. はじめに

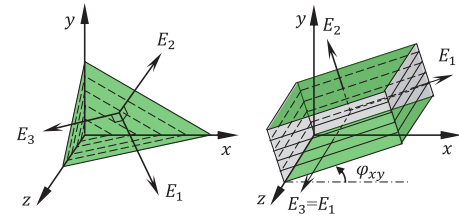
大型橋梁基礎、ダム基礎、地下発電所空洞、原子力発電所基礎等の岩盤構造物を安全に建設する際には、外荷重に対する構造物の安定性を評価するため、一般に数値解析等を実施する。その場合には、評価の精度を高めるため原位置岩盤を適切にモデル化することが必要である。しかし、岩盤は層理、片理及び節理を有し、変形特性に異方性を示すことが多い。そこで、本研究では等変位方式による孔内載荷試験の結果から異方性解析を行うことにより、異方性岩盤の3次元力学的な力学モデルを求める手法をまとめたものである。解析結果は、岩石試験による異方性解析結果及びボアホールテレビ（以下、BTV）孔壁画像解析結果と比較し、その妥当性を検証した。

2. 異方性弾性理論

2.1 基礎理論

岩盤の異方性解析をするにあたり、その基礎理論を述べる¹⁾。ここで対象とする岩盤は、弾性主軸（変形係数が最大・最小の方向）が互いに直交する異方性弾性体と仮定する。図-1(a)に示すモデルに対して、拡張されたHookeの法則は式(1)で表される¹⁾。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ & & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ & & & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ & & & & a_{55} & a_{56} \\ & & & & & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$



(a) 弾性主軸が任意傾斜 (b) 弾性主軸が面内傾斜

図-1 直交異方性弾性体の面内等方性モデル

ここに、 a_{ij} は弾性コンプライアンスで、変形係数（弾性係数、以下、変形係数）の逆数に相当する定数である。

図-1(b)のように弾性主軸が xy 平面でのみ傾斜する場合、 a_{ij} は式(2)のように21個から13個に縮退する。

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{\cos^4 \varphi_{xy}}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \frac{\sin^2 2\varphi_{xy}}{4} + \frac{\sin^4 \varphi_{xy}}{E_2} \\ a_{12} &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) \frac{\sin^2 2\varphi_{xy}}{4} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \\ a_{13} &= -\frac{\nu_{23}}{E_2} \sin^2 \varphi_{xy} - \frac{\nu_{13}}{E_1} \cos^2 \varphi_{xy} \\ a_{16} &= \left\{ \frac{\sin^2 \varphi_{xy}}{E_2} - \frac{\cos^2 \varphi_{xy}}{E_1} - \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \frac{\cos 2\varphi_{xy}}{2} \right\} \\ &\quad \times \sin 2\varphi_{xy} \\ a_{22} &= \frac{\sin^4 \varphi_{xy}}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \frac{\sin^2 2\varphi_{xy}}{4} + \frac{\cos^4 \varphi_{xy}}{E_2} \\ a_{23} &= -\frac{\nu_{23}}{E_2} \cos^2 \varphi_{xy} - \frac{\nu_{13}}{E_1} \sin^2 \varphi_{xy} \\ a_{26} &= \left\{ \frac{\cos^2 \varphi_{xy}}{E_2} - \frac{\sin^2 \varphi_{xy}}{E_1} - \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \frac{\cos 2\varphi_{xy}}{2} \right\} \\ &\quad \times \sin 2\varphi_{xy} \\ a_{33} &= \frac{1}{E_3}, \quad a_{36} = \left(\frac{\nu_{13}}{E_1} - \frac{\nu_{23}}{E_2} \right) \sin 2\varphi_{xy} \\ a_{44} &= \frac{\cos^2 \varphi_{xy}}{G_{23}} + \frac{\sin^2 \varphi_{xy}}{G_{13}} \\ a_{45} &= \left(\frac{1}{G_{23}} - \frac{1}{G_{13}} \right) \frac{\sin 2\varphi_{xy}}{2} \\ a_{55} &= \frac{\sin^2 \varphi_{xy}}{G_{23}} + \frac{\cos^2 \varphi_{xy}}{G_{13}} \\ a_{66} &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 2\varphi_{xy} + \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

*1 原子力・放射線研究部

E_1, E_2 及び E_3 は変形係数で φ_{xy} は弾性主軸の傾斜角である． ν_{ij} はポアソン比で互いに直交する i, j 方向の直ひずみ比 $|\varepsilon_i/\varepsilon_j|$ である． G_{ij} は ij 方向を含む平面のせん断剛性率である^{2), 3)}．式(2)で示す以外の a_{ij} は全て 0 となる．面内等方性では下添字の 3 は 1 と同じであり $E_1=E_3$ となる．式(1), (2) の a_{ij} は平面応力状態に対するもので，平面ひずみ状態の場合には， a_{ij} の代わりに式(3)の b_{ij} を用いる¹⁾．

$$b_{ij} = a_{ij} - \frac{a_{i3}a_{j3}}{a_{33}} \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (3)$$

本研究の 2 次元解析では，対象岩盤の性状を図-1(b)のように奥行方向（ z 軸方向）に一定とするため，平面ひずみ状態として扱う．

2.2 ボアホールジャッキ試験による 2 次元解析

等変位方式の孔内载荷試験をボアホールジャッキ試験 (JGS 3532-2012) と称する⁴⁾．当試験を用いて異方性岩盤の変形特性を求めるには，以下の式を用いる²⁾．

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta u} = \frac{1}{r} \cdot \Psi(\theta, E_1, E_2, \varphi_{xy}) \quad (4)$$

ここに， K : 地盤反力係数， $\Delta p, \Delta u$: 圧力及び変位の増分， r : ボアホール半径， Ψ : 2 次元異方性弾性理論より導かれる関数で， θ (载荷方向角)， E_1, E_2 及び φ_{xy} を引数とする²⁾．図-1(b)における未知パラメータは E_1, E_2, φ_{xy} で，ボアホールジャッキ試験で θ を変化させて 3 つ以上の K 値を取得すれば，これらが求められる²⁾．この解析では，図-2に示すようにボアホール軸を z 軸とし，これに直交する xy 面を解析対象面とする．

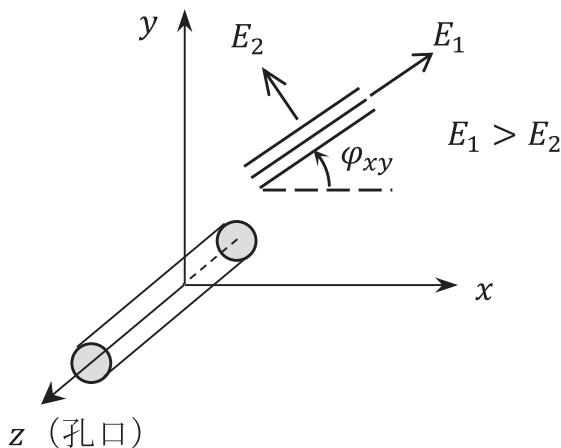


図-2 局所座標系及び異方性パラメータ

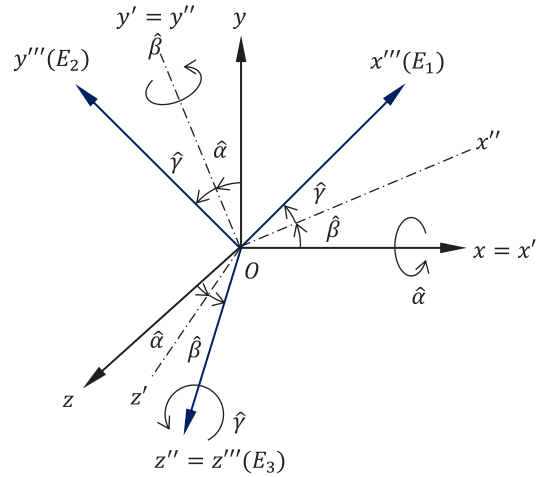


図-3 座標軸回転による座標変換

2.3 座標変換

実際の岩盤は図-1(a)のようであり，任意傾斜した弾性主軸及び主軸方向の変形係数を求めるには，弾性主軸と一致するように座標を変換する必要がある．その方法は以下の手順に従う（図-3）．

- ① x 軸周りに $\hat{\alpha}$ 回転する (x', y', z')
- ② y' 軸周りに $\hat{\beta}$ 回転する (x'', y'', z'')
- ③ z'' 軸周りに $\hat{\gamma}$ 回転する (x''', y''', z''')

座標軸回転は反時計周りを正とする．座標変換に伴い a_{ij} も変換される．旧座標系 (x, y, z) 及び新座標系 (x''', y''', z''') における弾性コンプライアンスを a_{ij}, a_{ij}''' とすると，これらの関係は次式(5)で表される¹⁾．

$$a_{ij}''' = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 q_{mi} q_{nj} a_{mn} \quad (i, j = 1 \sim 6) \quad (5)$$

ここに， q_{ij} は表-1で与えられる定数で， l_i, m_i, n_i は表-2に示す新旧座標間の方向余弦である．

2.4 3次元解析法

(1) 弾性主軸方向の解析

弾性主軸及びその方向の変形係数を 3 次元的に求めることは，図-1(a)及び式(1)における 21 個の a_{ij} を全て求めることに帰結する．それにはボアホールジャッキ試験を 2 方向以上のボアホールで k 回 ($k \geq 2$) 行い，式(4)より E_1, E_2, φ_{xy} を求める．次に図-1(b)に対応する $13k$ 個の $a_{ij}^{(k)}$ を式(2)により求め式(5)の右辺に代入すると，式(6)に示す $21 \times 13k$ の変換行列 $q_{ij}^{(k)}$ が生成され，これを解けば a_{ij} の最確値が得られる．

$$\begin{Bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{26} \\ a_{33} \\ a_{36} \\ \vdots \\ a_{55} \\ a_{66} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_{1,1}^{(1)} & q_{1,2}^{(1)} & q_{1,3}^{(1)} & \cdots & q_{1,13k-1}^{(1)} & q_{1,13k}^{(1)} \\ q_{2,1}^{(1)} & q_{2,2}^{(1)} & q_{2,3}^{(1)} & \cdots & q_{2,13k-1}^{(1)} & q_{2,13k}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ q_{i,1}^{(k)} & q_{i,2}^{(k)} & q_{i,3}^{(k)} & \cdots & q_{i,13k-1}^{(k)} & q_{i,13k}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ q_{20,1}^{(k)} & q_{20,2}^{(k)} & q_{20,3}^{(k)} & \cdots & q_{20,13k-1}^{(k)} & q_{20,13k}^{(k)} \\ q_{21,1}^{(k)} & q_{21,2}^{(k)} & q_{21,3}^{(k)} & \cdots & q_{21,13k-1}^{(k)} & q_{21,13k}^{(k)} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{11}^{(1)} \\ a_{12}^{(1)} \\ \vdots \\ a_{ij}^{(k)} \\ \vdots \\ a_{55}^{(k)} \\ a_{66}^{(k)} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

次に、図-4における見掛け傾斜角 $\varphi_{xy}, \varphi_{zx}$ を求める。
まず、 φ_{xy} は a_{ij} から式(7)により得られる¹⁾。

$$\varphi_{xy} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{a_{16} + a_{26}}{a_{22} - a_{11}} \right] \quad (7)$$

表-1 a_{ij} の変換式における q_{ij}

$\begin{smallmatrix} j \\ i \end{smallmatrix}$	1	2	3	4	5	6
1	l_1^2	l_2^2	l_3^2	$2l_2l_3$	$2l_3l_1$	$2l_1l_2$
2	m_1^2	m_2^2	m_3^2	$2m_2m_3$	$2m_3m_1$	$2m_1m_2$
3	n_1^2	n_2^2	n_3^2	$2n_2n_3$	$2n_3n_1$	$2n_1n_2$
4	m_1n_1	m_2n_2	m_3n_3	$m_2n_3 + m_3n_2$	$m_1n_3 + m_3n_1$	$m_1n_2 + m_2n_1$
5	n_1l_1	n_2l_2	n_3l_3	$n_2l_3 + n_3l_2$	$n_1l_3 + n_3l_1$	$n_1l_2 + n_2l_1$
6	l_1m_1	l_2m_2	l_3m_3	$l_2m_3 + l_3m_2$	$l_1m_3 + l_3m_1$	$l_1m_2 + l_2m_1$

表-2 (x, y, z) から (x''', y''', z''') への変換に伴う方向余弦

	x	y	z
x'''	$l_1: \cos \beta \cos \hat{\gamma}$	$m_1: \sin \hat{\alpha} \sin \beta \cos \hat{\gamma} + \cos \hat{\alpha} \sin \hat{\gamma}$	$n_1: -\cos \hat{\alpha} \sin \beta \cos \hat{\gamma} + \sin \hat{\alpha} \sin \hat{\gamma}$
y'''	$l_2: -\cos \beta \sin \hat{\gamma}$	$m_2: -\sin \hat{\alpha} \sin \beta \sin \hat{\gamma} + \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\gamma}$	$n_2: \cos \hat{\alpha} \sin \beta \sin \hat{\gamma} + \sin \hat{\alpha} \cos \hat{\gamma}$
z'''	$l_3: \sin \beta$	$m_3: -\sin \hat{\alpha} \cos \beta$	$n_3: \cos \hat{\alpha} \cos \beta$

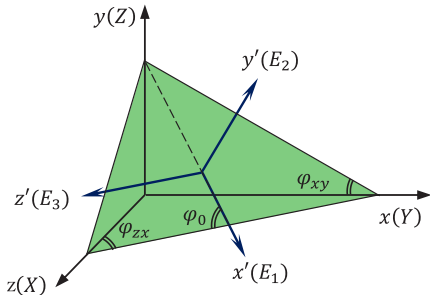


図-4 任意傾斜した弾性主軸直交面

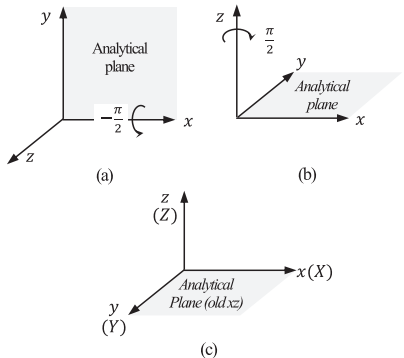


図-5 φ_{zx} を求めるための座標軸回転

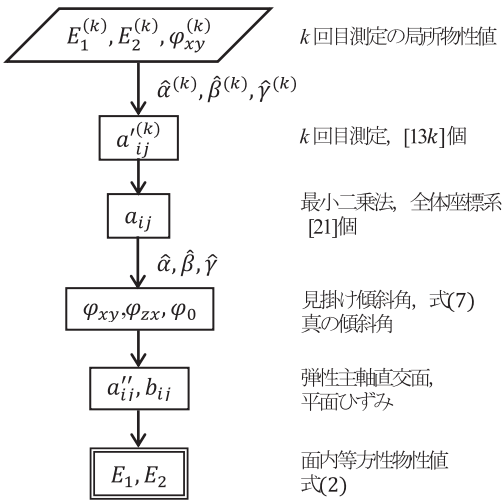


図-6 物性値解析フロー

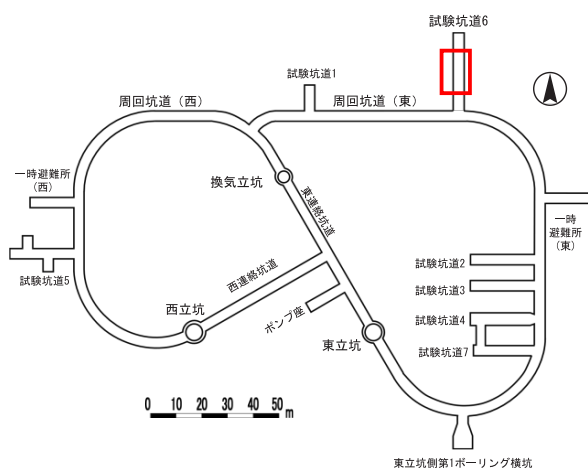
反時計回りを正とした座標軸回転を図-5(a) ~ (c)の順で行うと、 xy 面は旧 xz 面に投影される。この面における a_{ij} を求めれば、式(7)により φ_{zx} が得られる。
 $\varphi_{xy}, \varphi_{zx}$ が求められれば、3次元的な弾性主軸方向及び真の傾斜角 φ_0 が幾何学的に求められる。

(2) 弾性主軸方向の変形係数解析
弾性主軸方向の変形係数は、既述の方法により弾性主軸に一致するよう座標軸を改めて回転させ、再度弾性コンプライアンスを a_{ij}'' として求める。本解析は平面ひずみ状態であるから、式(3)により a_{ij}'' を b_{ij} に変換する。弾性主軸方向の変形係数 E_1, E_2 は、式(2)に $b_{ij}, \varphi_{xy}=0$ を代入すれば求められる。以上の解析の流れを図-6に示す。

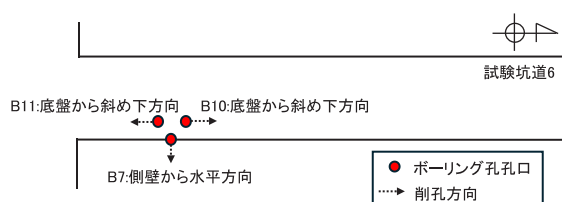
3. 原位置測定と異方性解析

3.1 測定概要

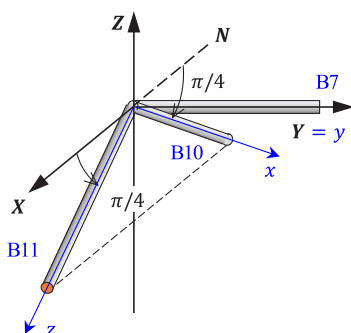
日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター地下350m調査坑道の北東部に位置する試験坑道6において、 ϕ 86mmで削孔された3本のボアホール(B7, B10及びB11)を用いてボアホールジャッキ試験を行った。これらの位置関係を図-7に示す。B7は坑道側壁から水平方向に削孔し、深度0.70~4.95mにおいて28点の測定を行った。同孔では深度3mまで掘削損傷領域(Excavation Damaged Zone; EDZ)の影響を受け物性値がばらつくことが懸念されたため、測定頻度を高めた。B10は坑道底盤から棲部に向けて下方45°で削孔し、斜深度1.35~7.15mにおいて27点の測定を行った。B11は坑道底盤から坑道交差部に向けて下方45°で削孔し、



(a) 350m 調査坑道における測定位置



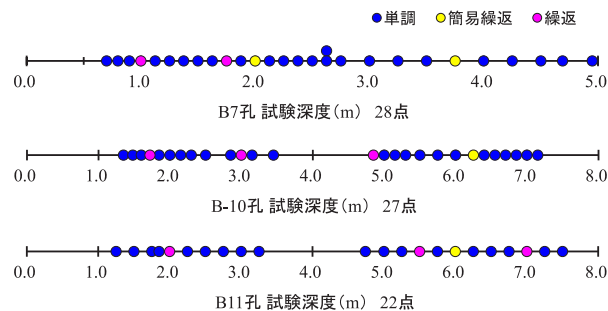
(b) 試験坑道 6 における位置平面図



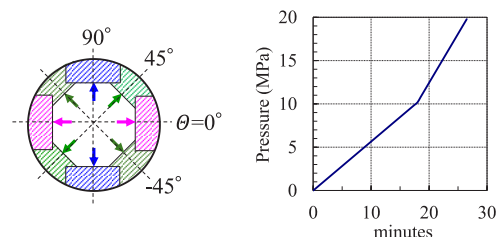
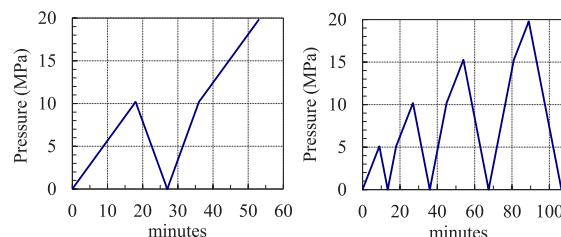
(c) ボアホール軸と座標系

図－7 測定位置

斜深度 1.25 ～ 7.50m において 22 点の測定を行った、
 図－8 に測定深度を示す。B10 及び B11 では EDZ 及びそれ
 より深の領域（新鮮岩盤）でそれぞれ代表的な物性値を
 把握するため、斜深度 4m 付近を境界として各領域にお
 いて同頻度で測定を行い、境界付近では測定を行わな
 かった。荷重パターンは単調荷重を基本とし、数回に 1
 回は亀裂の影響を除去した変形特性即ち弾性係数を求め
 るため簡易繰返し荷重または繰返し荷重を行った。最大
 荷重圧は 20MPa、荷重速度は新規荷重時で 0.6MPa/min と
 し、除荷時及び既荷重時の速度はその 2 倍とした。荷重
 方向は測定毎に約 45° 毎、時計方向に変化させて行った
 (図－9)。



図－8 測定深度・数量等


(a) 荷重方向 θ (b) 単調荷重


(b) 簡易繰返し荷重 (c) 繰返し荷重

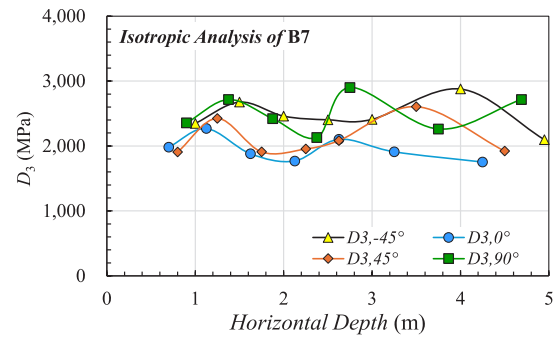
図－9 荷重方向・パターン

3.2 測定結果の等方性解析

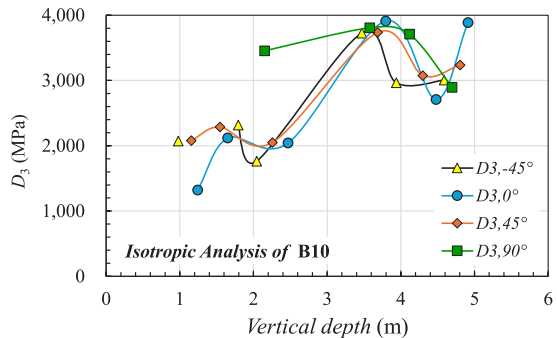
測定結果より、変形係数 D を式 (8) によって算定した⁴⁾。

$$D = r \cdot \phi(v, \beta) \cdot \frac{\Delta p}{\Delta u} \quad (8)$$

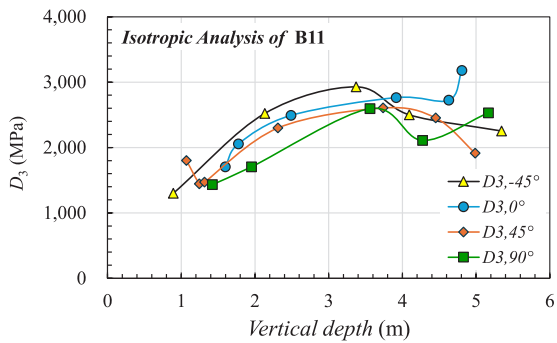
ここに、 ϕ は 2 次元等方性弾性理論から導かれる関数で、
 v : 岩盤ポアソン比、 β : 荷重板の荷重角を引数とする（本
 解析では $v=0.22$ 、 $\beta=20.7^\circ$ とした²⁾）。今回の測定では
 D を 3 ～ 5MPa、5 ～ 10MPa 及び 10 ～ 20MPa の圧力範囲で
 求め、それぞれ D_1, D_2 及び D_3 とした。その後、文献⁶⁾
 に示す方法より孔壁と荷重板が完全密着する最小荷重圧
 を求めたところ 8 ～ 10MPa であったことから、 D_3 を原位
 置岩盤の変形係数として採用した。図－10 は D_3 を測
 定孔別にまとめたもので、横軸は B7 では水平深度、B10
 及び B11 では斜め深度を鉛直深度に補正したものとし
 た。これらは孔軸に鉛直な面における結果で、坑道の縦
 断面となる B7 の図－10(a) では、 D_3 は $\theta=45^\circ \sim 90^\circ$ 方
 向で大きい傾向にあった。孔別では B7 で $D_3=2,000 \sim$
 $3,000\text{MPa}$ 程度であり、B10 及び B11 では深度依存性があ
 り約 2,000 ～ 4,000MPa となった。



(a) B7 における変形係数



(b) B10 における変形係数



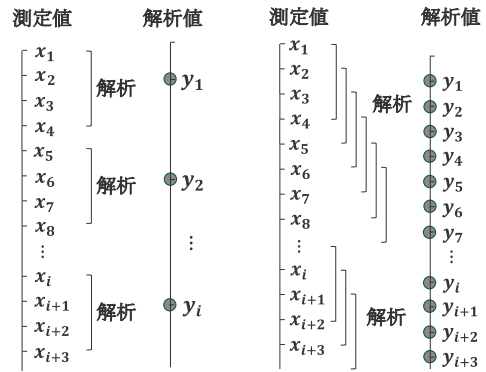
(c) B11 における変形係数

図-10 2次元等方性解析

3.3 2次元異方性解析

(1) 解析用データの組合せ

ボアホールジャッキ試験結果による異方性解析は、通常測定深度の近い4測定データを1組の入力値とする。解析値としての E_1, E_2, φ_{xy} は4測定データにつき各1つ得られる。例えば測定を0.25m間隔で行った場合、1m当たり1つの解析値が得られる。しかし、この方法では、得られるパラメータ数は岩盤物性の傾向を把握するには十分でない。そこで、本研究では測定データの組合せを1測定深度ずつずらしながら4組を選び、平均深度における解析値を得ていくことにした。この改良法を用いることで、得られる異方性パラメータ数は4倍に増加する(図-11)。



(a) 従来法 (b) 改良法

図-11 解析データの組合せ

(2) 解析結果

式(4)及び図-6の流れに従い、測定データ θ, K を入力値として E_1, E_2 及び φ_{xy} を求めた。図-12は孔軸鉛直面において、各孔の特徴を示す代表深度において、異方性パラメータ E_1, E_2 及び φ_{xy} を表示したものである。どの孔においても水平方向に最大の弾性主軸があり、弱い異方性が見られた。

図-13は前項による測定値の組合せを用いて異方性パラメータの連続的な解析を行い、それらを D_3 (黄色の○) とともに、青色の□、橙色の◇及び紫色の△で示したものである。等方性解析による D (D_3) はB7, B10及びB11ともばらつきが大きく、深度傾向を十分に把握できない。しかし、異方性解析結果により得られた E_1, E_2 は D よりもばらつきが抑制されている。したがって、これらの分布変化から物性変化の傾向が把握できる。図-13(a)(b)(c)に赤色で示した1点鎖線は、 E_1, E_2 及び φ_{xy} の変化から総合評価し、測定区間の岩盤をⅠ～Ⅳに区分した境界線である。なお、B10及びB11は3m付近での測定は未実施のため、Ⅲ、Ⅳの境界は仮設定とした。

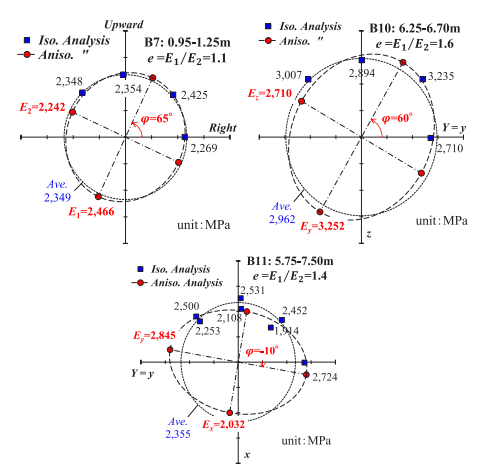
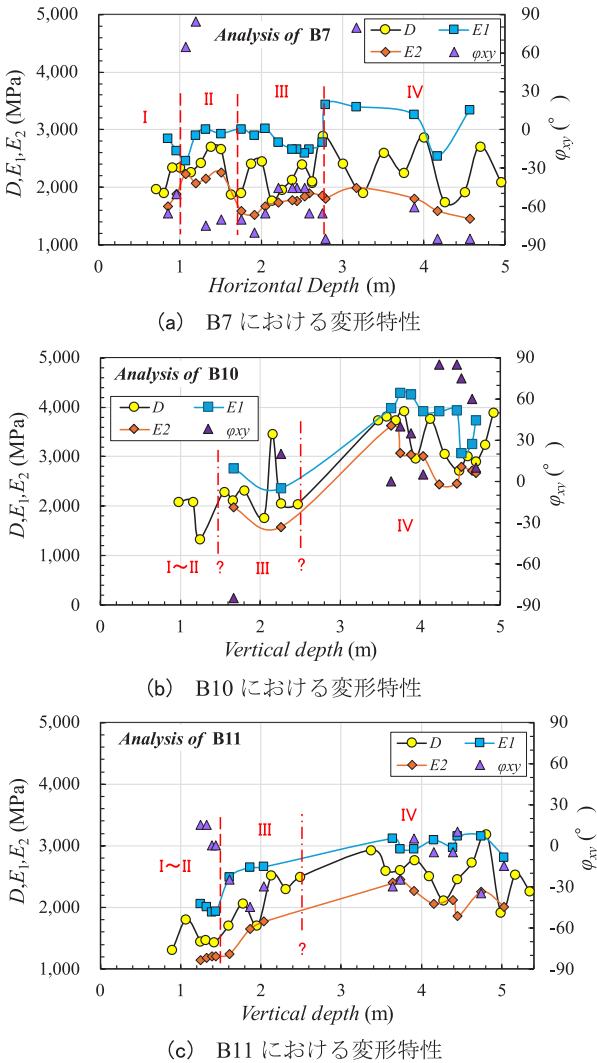


図-12 2次元異方性解析結果



図－13 測定結果による異方性解析結果

表－3 解析入力値 ($-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_{xy} \leq \frac{\pi}{2}$, $-\pi \leq \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma} \leq \pi$)

k	局所座標系物性値				座標軸回転角			孔 / 区分
	e	E ₁	E ₂	φ_{xy}	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	$\hat{\gamma}$	
1	1.5	2,715	1,810	-55°	-90°	0°	0°	B7/Ⅲ
2	1.7	3,022	1,778	-75°	-90°	0°	0°	B7/Ⅳ
3	1.3	4,221	3,247	40°	-135°	0°	90°	B10/Ⅳ
4	1.2	3,248	2,707	60°	-135°	0°	90°	B10/Ⅳ
5	1.3	3,114	2,396	-30°	-135°	0°	90°	B11/Ⅳ
6	1.4	2,845	2,032	-10°	-135°	0°	90°	B11/Ⅳ

表－4 B11 コアによる一軸圧縮試験結果

Case.	試料名	斜深度 (m)	方向	q _u (MPa)	ν	E ₅₀ (MPa)
1	1.27 x'	1.27	x' 軸	15.4	0.14	2,666
	1.35 y'	1.35	y' 軸	19.9	0.17	2,543
	1.45 z'	1.45	z 軸	13.7	0.32	2,427
2	5.07 x'	5.07	x' 軸	25.1	0.14	2,332
	5.15 y'	5.15	y' 軸	8.23	0.14	2,996
	5.25 z'	5.25	z 軸	18.7	0.41	2,208
3	7.07 x'	7.07	x' 軸	13.1	0.16	2,029
	7.15 y'	7.15	y' 軸	16.4	0.28	3,927
	7.25 z'	7.25	z 軸	17.7	0.30	2,364
	—	—	平均	16.5	0.23	2,610

3.4 3次元異方性解析

局所座標系 (x, y, z) 及び全体座標系 (X, Y, Z) を図－7(c) のように設定し、2.4 で示した方法により 3 次元解析を行った。表－3 は解析入力値で、EDZ の影響を極力避けるため、異方性パラメータは B10 及び B11 では区間Ⅳの値を採用した。B7 は区間Ⅲ以深で B10, B11 の区間Ⅳと同等と判断し、区間Ⅲ及びⅣの値を用いた。ポアソン比は $\nu_{12}=\nu_{13}$ として既往岩石試験結果を採用し、0.22 とした²⁾。その他のポアソン比は $\nu_{21}=\nu_{12} E_1/E_2$ とし¹⁾、2 平面におけるせん断剛性率には次の仮定式を用いた³⁾。

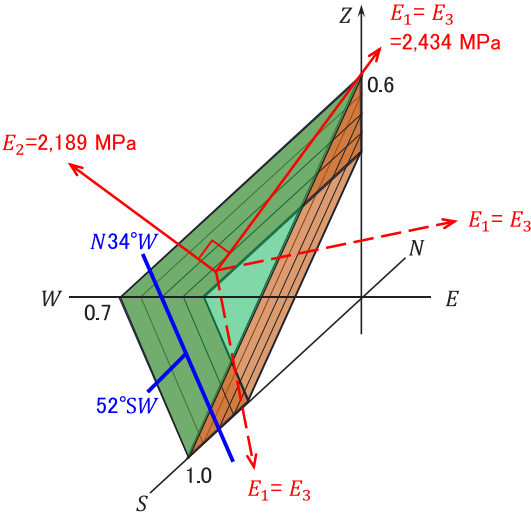
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{23}} = \frac{1 + 2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{E_2}, \quad G_{13} = \frac{E_1}{2(1 + \nu_{13})} \quad (9)$$

解析結果を図－14に示す。緑色で着色した面は最大の弾性主軸 E_1 方向を示す。 E_1 面の走向/傾斜は N34° W/52° SW で、変形係数は 2,434 MPa と得られた。面内等方性であるから、当然のことながら E_1 は面内であれば方向を問わない。 E_1 と直交方向は最小の弾性主軸 E_2 で変形係数は 2,189 MPa と得られ、異方性比 $e=E_1/E_2$ は 1.1 となった。

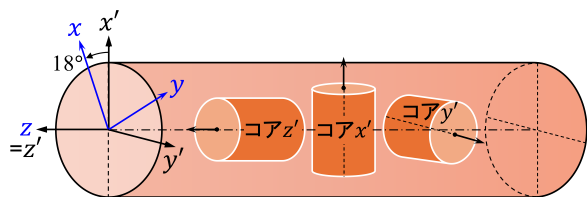
4. 岩石試験による異方性パラメータの解析

4.1 岩石試験結果

B11 のボーリングコアより φ30mm の供試体試料を採取し、一軸圧縮試験を行った。供試体はボーリングコアの深度 1.27 ～ 1.53m で確認された層理面 (N72° W/31° S) の傾斜が最大方向を x' 軸、それに直交する方向を y' 軸、コア軸方向を $z (=z')$ 軸として、これら 3 軸に沿う方向で採取した (図－15)。表－4 には、採取深度、方向、一軸圧縮強さ q_u 、ポアソン比 ν 及び弾性係数 E_{50} の一覧を示す。



図－14 弾性主軸の 3 次元解析結果



図－15 岩石試料採取方向と局所座標系

表－5 岩石試験による異方性解析結果

Case	平均 深度 (m)	走向 (°)	傾斜 (°)	e (E_1/E_2)	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)
1	1.38	N81W	51SW	1.32	2,976	2,244
2	5.16	N54W	60SW	1.11	2,834	2,553
3	7.15	N35W	32SW	0.89	2,760	3,088
	平均	N57W	56SW	1.11	2,966	2,519

4.2 岩石試験による異方性解析

供試体側面に3軸ロゼットゲージを貼付して一軸圧縮試験を行い、約5.0MPaの圧力レベルでの応力－ひずみ関係を求めた。3方向の供試体を1組として、文献⁷⁾に示す方法により異方性解析を行った。局所座標系 (x', y', z') は図－7に示す (x, y, z) に対し z 軸周りの時計方向に18°回転しているため、解析では $(x', y', z') \rightarrow (x, y, z) \rightarrow (X, Y, Z)$ の順に座標変換を行った。最終的に弾性主軸の方向は (X, Y, Z) に対して求めた。表－5に3組に対し得られた異方性パラメータを示す。走向傾斜は E_1 面を表す。

5. 考察

5.1 ボアホールジャッキ試験結果の検証

ボアホールジャッキ試験結果に基づく解析の妥当性を岩石試験による異方性解析結果との比較から検証した。B11の3.4～5.4m（鉛直深度）で実施した同試験による変形係数 D の平均値は2,546 MPaであった。これに対し、B11コアを用いた一軸圧縮試験では、 E_{50} の平均値は2,610 MPaと得られた（表－4）。後述のBTV孔壁画像解析では、B11の割れ目は1本しか確認されない新鮮岩盤に近い状態であった。このことから、 D が E_{50} に極めて近い結果となったことは十分に納得できる。

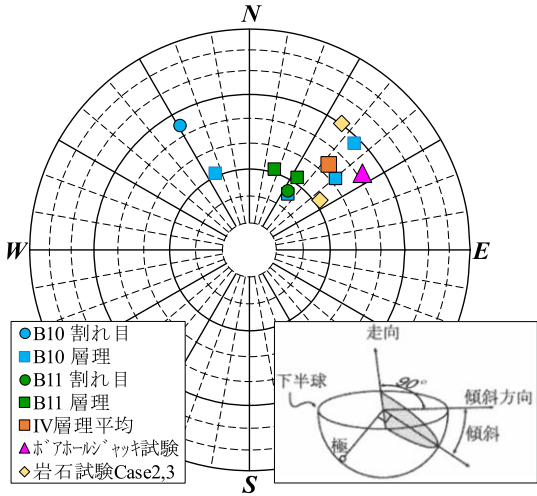
5.2 ボアホールジャッキ試験による2次元解析の検証

図－13に示すB11における e, E_1, E_2 の平均値は1.5, 2,659 MPa, 1,787 MPaとなった。一方、岩石試験結果（表－5）により解析された e, E_1, E_2 の平均値は1.1,

2,966 MPa及び2,519 MPaである。両者の違いには対象範囲及び試験数量の違いによる影響があると考えられる。

表－6 BTV孔壁画像解析結果一覧

測定孔	深度(m)	走向傾斜	区分
B10	1.17	N61E/54SE	割れ目
	2.86	N55W/25SW	層理・葉理
	4.06	N39W/42SW	層理・葉理
	4.38	N45W/57SW	層理・葉理
	6.80	N66E/31SE	層理・葉理
B11	1.96	N56W/26SW	割れ目
	3.17	N72W/31SW	層理・葉理
	4.79	N56W/32SW	層理・葉理



図－16 BTV画像解析結果他のシュミット下半球投影（極）

5.3 ボアホールジャッキ試験による3次元解析の検証

B10及びB11で実施したBTV孔壁画像観察で確認された割れ目及び層理の走向傾斜を表－6の一覧及び図－16に示す。なお、B7では観察可能な割れ目及び層理は、孔壁画像では確認できなかった。B10, B11の区間IVに相当する層理・葉理の走向傾斜は、平均ではN47W/44SWとなり、図－14とは走向で13°、傾斜で8°異なる。これは層理・葉理は様ではなく、多少褶曲していることが要因と考える。

また、表－5の岩石試験結果のうち、ボアホールジャッキ試験解析に用いたB10, B11の区間IVに相当するのはCase2, 3で、これらの走向傾斜はN32° -60° W/32° -60° SWである。同解析結果の走向はこれらの下限に近く、傾斜は中間的である。この差異は5.2節と同様、両試験の対象範囲及び試験数量の違いが影響していると推察する。また、稚内層珪質泥岩の岩石試験既往値²⁾では $e=1.2$ と得られており、本解析結果の1.1に近い。

6. 総括

6.1 成果

本研究ではボアホールジャッキ試験結果を用いた2次元及び3次元異方性解析結果を岩石試験による異方性解析とBTV孔壁画像解析と比較及び検証した。その結果、原位置試験と室内試験にける対象範囲及び試験数量の違い等を考慮すれば、本解析法は工学的に妥当な結果を与えるものであると結論付けられる。

これまで異方性弾性理論を原位置岩盤に適用した研究は、Amadeiらの初期応力研究に見ることができる⁸⁾が、その他の原位置試験に関する研究では見られない。孔内載荷試験は原位置岩盤の変形特性を把握する簡便な試験であり、多点において複数方向で測定を行うことから3次元的な地質構造が把握できる。本研究では、そのモデルに異方性を考慮した変形特性を物性値として与えることができた。

6.2 課題

今回のボアホールジャッキ試験は、坑道内でボーリングを行った上で実施したものである。このため測定深度は10m以内であり作業性は良好であった。今後、地層処分事業における概要調査等では地上からの大深度ボーリングを行い、深部岩盤の物性を精度良く把握する技術が求められる。その際には、本研究による測定手法は有効となるが、測定機器及び作業の自動化が大きな課題となる。

本研究の解析面においては、異方性パラメータとして E_1, E_2 及び φ_{xy} を解析対象とした。今後は ν_{ij}, G_{ij} も含めたパラメータを対象とするよう解析手法を高度化していくことも課題である。

参 考 文 献

- 1) Lekhnitskii, S.G. : *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, 430p, Mir Publishers, 1981.
- 2) 川久保昌平, 大野宏和, 松井裕哉, 富樫陽太, 谷和夫, 加藤猛士 : ボアホールジャッキ試験による異方性岩盤のヤング率解析法, 地盤工学ジャーナル Vol. 17, No. 3, pp. 393-400, 2022.
- 3) 川久保昌平, 加藤猛士, 大泉涼 : 異方性理論に基づく岩盤の三次元異方性パラメータ評価法, 第58回地盤工学研究発表会, [12-12-3-01], 2023.
- 4) 地盤工学会 : 地盤調査の方法と解説, 第8編 載荷試験, 第2章 孔内載荷試験, pp. 663-696, 丸善, 2013.
- 5) 平島健一, 浜野浩幹 : 測定用埋設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, 第406号/III-2, pp. 175-184, 1989.
- 6) 川久保昌平・大野宏和・松井裕哉・加藤猛士 : 孔壁と載荷板の曲率不一致を考慮したボアホールジャッキ試験による変形係数の評価方法, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 No. 44, pp. 254-259, 土木学会, 2021.
- 7) 中島永理, 佐藤礁, 富樫陽太, 畠山健, 船山稜真, 長田昌彦 : 一軸試験による岩石の面内等方弾性および異方性主軸の特定方法, 第51回岩盤力学シンポジウム, 2025(投稿中).
- 8) Amadei, B. : *Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements*, Springer-Verlag, 478p, 1983.

3D analysis method of rock mass structure based on in-situ test - Low-cost in-situ rock mass characterization using borehole jack test -

Shohei KAWAKUBO

When a cavity is constructed in the deep underground, its stability is properly examined by numerical analysis. Thus, it is necessary to develop an appropriate mechanical model of the in-situ rock mass based on the several surveys to achieve it. In this study, we conducted borehole jack tests in three boreholes with different directions. And we summarized the method using anisotropic theory to develop a 3D rock mass model that takes into account anisotropic mechanical property. The in-situ rock mass is a siliceous mudstone shows weak anisotropy due to bedding plane orientation. To verify this analytical method for 3D rock mass model, uniaxial compression tests to determine the anisotropy and BTV(borehole television) image observations were performed.
