

# 地盤の異方弾性係数の実用的な測定解析法 —中空円筒試料を用いて—

新 孝一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 電力中央研究所 地圏環境部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

地盤・岩盤には無視できないほど異方性のあることが少なくない。そこで地下構造物の合理的設計やHLW地下処分施設設計のための高度な調査のために、実用的に異方性を測定するための方法を開発した。この方法では、大型の中空円筒試料を一つ用いて載荷試験を行なうことにより、原位置試験に近い寸法で、地盤の直交異方性を3次元で評価する。この方法の開発のために、新たに中空円筒の弾性解の簡易なものを構築し、また異方性パラメータ数の合理的な削減方法を理論と既往データの両面から考案して、逆解析により異方性を求めるようにした。また、その逆解析が安定であることを示した。

*Key Words* : rock, orthotropic anisotropy, hollow cylinder, HLW deposition hole, back analysis

## 1. はじめに

### [地盤異方性の事例]

地盤や岩盤には、cmオーダーの小寸法からより大きな構造物寸法、さらには岩体、地殻の寸法レベルまで異方性が存在し、しかもその程度が顕著であることが少なくない。異方性は地盤の組織構造と場合によっては応力にも由来し、強度、変形性、縦波や横波の弾性波速度、透水性などに観察される。

供試体の寸法レベルでは、堆積に起因した鉱物粒子配列や火成岩中のマイクロクラックの配向などにより、方向によって弾性係数に2倍程度あるいはそれ以上の差があることも稀ではない<sup>1)</sup>。

トンネルや地下空洞などの構造物寸法レベルでは、岩盤の節理面が特定方向に集中するような場合や層状をなす地層に大きな異方性が見られる。例えば、中部地方の砂岩泥岩の水平互層岩盤での水平方向と鉛直方向との平板載荷試験では、水平方向の弾性係数が鉛直方向の約1.5倍大きい結果が得られている<sup>2)</sup>、ポルトガルのダムサイトでは方向によって最大と最小で3倍ほどの弾性係数の異方性が報告されている<sup>3)</sup>。

地殻の寸法では、地震波の分析から地殻の異方性が検出された地域は南極を含む全世界に及んでいる。これらは主にS波の偏波で確認され、その速度差は2%弱程度から10%程と報告されている。地殻より下部のマントルについても、南極以外の全大陸で

少なくとも深度300kmまでの異方性が確認され、テクトニックな作用との関連から議論されている<sup>4)</sup>。わが国の観測の一例では、兵庫県で偏波したS波の速度差が深度6~8kmで11%に達している<sup>5)</sup>。

### [異方性評価の必要性]

異方性の材料を等方性と仮定すると場合によって大きな誤差の生じることは、例えば円孔問題などにおいて指摘されている<sup>6),7)</sup>。そのため、従来から、地盤・岩盤の工学問題における異方性の重要性が指摘されている<sup>8)</sup>が、実務において原位置試験の寸法レベルで異方性を測定することはあまり行なわれていない。この一つの理由は、求めるべきパラメータが多くて試験が煩雑であったり、寸法の小さい複数の試料を用いる方法ではばらつきのために精度が低下したりすることなどのために、実用的な異方性の測定方法のないことが挙げられる。また、従来はトンネルや地下空洞の解析においては2次元解析が主であったので、異方性評価も簡易なもので足り、3次元での異方性を必要としなかったことも挙げられる。

しかしながら、計算機能力の向上に伴い地下施設のより合理的な設計検討のために3次元解析が実務でも求められつつある。3次元解析を行なうためには異方性も3次元で正確に測定する必要がある。

また、高レベル放射性廃棄物の地下処分施設をつくること、社会的緊急の課題のひとつであるが、地下処分施設では空洞の維持という従来の地下施設

に求められる機能だけでなく、核種移行に対するバリア機能が求められる。このような地下処分施設的设计では、従来の地下空洞の場合以上に詳細に岩盤の調査を行なうことが必要である。特に、金属製の容器に格納された高レベル廃棄物を挿入する処分孔周囲の岩盤特性は、核種の移行を遅延させるためのベントナイトなどの緩衝材との力学作用に影響するので、詳細な調査が必要と考えられる。先に述べたように、岩には無視できないほどの異方性のあることは珍しくないので、処分孔評価のための岩盤特性調査の基礎的項目の一つとしてその異方性を把握することが必要である。

#### [開発方法の目標]

異方性は地盤のさまざまな寸法規模で見られるが、処分孔まわりの特性評価のためにはそれに近い寸法で評価する必要がある。あまりに小さい数cmほどの試料寸法での試験や、数10m規模になる孔間弾性波速度試験等では寸法が適切でなく、平板載荷などの原位置岩盤試験程度の寸法規模で評価すべきである。ある程度の大きさを持つ試料を用いることによって、小さい試料に生じがちな試料採取に伴う乱れを小さく抑えることもできる。

また、原位置岩盤試験に携われれば経験する通り、岩盤の物性は地質的には同じ区分をされていてもなお場所によってかなり変化していることも多い。異方性の測定では、求めるパラメータが多いので複数の試料を用いて一式の異方性を求めざるをえない場合も多いと考えられるが、正確な異方性評価を行なうためには一つの試料で測定できることが重要である。

その他に、処分孔周りの岩盤の力学特性を評価する観点からは、実荷重レベルでの異方性を求めたいので、弾性波速度試験でなく載荷試験が望ましい。また、載荷にあたっては偏心や不均等載荷を避けるためには、剛板載荷でなく液圧載荷が望ましい。

最後に、この開発方法は、簡便な面内等方性ではなく、より現実的な3次元の直交異方性として地盤を評価できる方法としたい。さらに異方軸方向が未知であってもそれを含めて評価できる方法としたい。

本報告では、上述の目標のもとに実用的な地盤・岩盤の異方性の測定手法を開発することを目的とし、そのために構築した方法論を述べる。

## 2. 異方性の測定・解析法開発の方針

### (1) 試験の方式

異方性の測定方法は原理的には様々なものを考え

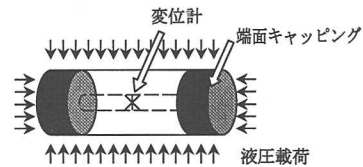


図-1 中空円筒試験の概念

ることができる。例えば、多数の方向にコア試料を採取して弾性波速度試験を行って求める方法<sup>9)</sup>、多数方向のコアの一軸ないし三軸の載荷試験を行なって求める方法、原位置で多数の方向で平板載荷試験などを行なう方法、などが挙げられる。岡・平島(1993)<sup>10)</sup>は、2次元の直交異方性を平板載荷試験や水室試験で求めるための理論検討を示している。

本検討では、前節で開発方法の目標として示した通り、比較的大きい寸法の試料を用いて、1個の試料から一式の異方性を、液圧載荷試験によって、評価するために中空円筒試料を用いることを考えた。この概念を図-1に示す。中空円筒試料の内孔に変位計などの計器を設置して周囲からの載荷による応答を測定することにより異方性を評価したい。この載荷の際には、円筒の両端面にキャッピングを施して、円筒全体をジャケットで被覆して液圧載荷することにする。

本論文で検討する異方性測定の方法論としては以上が基本前提となる。その他、載荷荷重レベルと試料寸法については次のように考える。載荷荷重レベルとしては平板載荷試験などの場合と同様の考え方、すなわち岩盤に作用する応力レベル程度までを段階的に載荷することなどが考えられる。試料寸法としては、直径20cm、長さ100cm程度の中空コアを用いた計測は地圧測定などで実績があり問題ないだろう。装置の開発によってより大きな試料での試験が可能と考えられる。

### (2) 解析方法

このような載荷試験時の変形を測定して異方性を求めるためには、①まず異方性と載荷圧を与えて理論変形量を求める順解析を実現し、②次に順解析の繰返し計算による逆解析を定式化して、変形量から異方性を求めるようにすることが考えられる。

この際に合わせて実現すべきことは、③異方性のパラメータ数の削減、④逆解析が安定であることの確認、である。

異方性の測定において求めるべきパラメータの数が多くても、実務における異方性評価の障害になっている。パラメータ数を合理的に削減することが

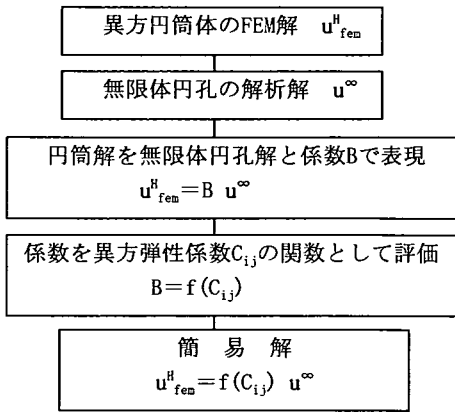


図-2 円筒の弾性解を得た手順

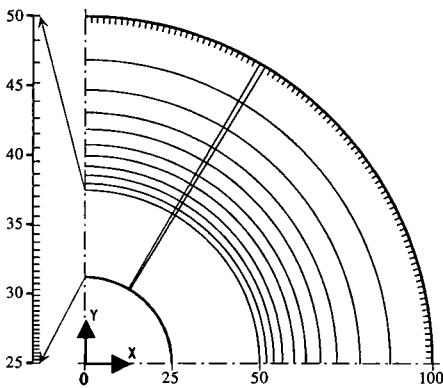


図-3 FEM メッシュの分割(横断面 1/4)

表-1 設定した異方性ケースの弾性係数パラメータ (直交異方性 17 ケース, 面内等方 2 ケース, 三斜異方 1 ケース)

	$C_{11}$	$C_{22}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$	$C_{77}$	$C_{88}$	$C_{99}$	$C_{10}$	$C_{11}$	縦弾性比	横弾性比
直交 1	1.201	0.985	0.770	0.233	0.283	0.334	0.238	0.302	0.387	1.559	1.438		
直交 2	1.348	1.348	1.348	0.233	0.283	0.334	0.577	0.577	0.577	1.000	1.436		
直交 3	1.138	0.777	0.562	0.185	0.249	0.300	0.087	0.195	0.259	2.022	1.819		
直交 4	1.348	1.348	1.348	0.185	0.249	0.300	0.577	0.577	0.577	1.000	1.819		
直交 5	1.322	1.288	1.250	0.359	0.368	0.376	0.520	0.531	0.542	1.057	1.047		
直交 6	1.348	1.348	1.348	0.359	0.368	0.376	0.577	0.577	0.577	1.000	1.047		
直交 7	1.017	0.853	0.889	0.248	0.317	0.386	0.058	0.076	0.091	1.475	1.556		
直交 8	1.023	1.023	1.023	0.248	0.317	0.388	0.114	0.114	0.114	1.000	1.556		
直交 9	1.014	0.741	0.578	0.156	0.221	0.340	0.034	0.061	0.078	1.756	2.178		
直交 10	1.022	1.023	1.023	0.156	0.221	0.340	0.114	0.114	0.114	1.000	2.178		
直交 11	1.022	0.994	0.987	0.420	0.432	0.443	0.104	0.107	0.110	1.056	1.055		
直交 12	1.023	1.023	1.023	0.420	0.432	0.443	0.114	0.114	0.114	1.000	1.055		
直交 13	1.320	0.977	0.854	0.229	0.271	0.314	0.194	0.331	0.469	2.081	1.375		
直交 14	2.143	2.143	2.143	0.229	0.271	0.314	1.429	1.429	1.429	1.000	1.375		
直交 15	2.143	2.143	2.143	0.171	0.243	0.288	1.429	1.429	1.429	1.000	1.667		
直交 16	2.008	1.949	1.891	0.338	0.343	0.350	1.223	1.246	1.269	1.050	1.043		
直交 17	2.143	2.143	2.143	0.338	0.343	0.350	1.429	1.429	1.429	1.000	1.043		
面内 1	1.217	1.217	0.643	0.249	0.249	0.385	0.275	0.275	0.448	1.894	1.542		
面内 2	1.510	1.510	1.179	0.303	0.303	0.509	0.465	0.465	0.491	1.280	1.681		

三斜	$[C_{ij}] =$	$\begin{bmatrix} 1.201 & 0.387 & 0.302 & -0.085 & 0.000 & 0.000 \\ 0.387 & 0.927 & 0.298 & -0.108 & 0.000 & 0.000 \\ 0.302 & 0.298 & 0.712 & -0.108 & 0.000 & 0.000 \\ -0.085 & -0.108 & -0.108 & 0.251 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.283 & -0.051 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & -0.051 & 0.334 \end{bmatrix}$
----	--------------	--

できればその意義は大きいので、検討を加える。  
また、一般に逆解析で得られる解は、必ずしも正解とは限らず複数の偽解を持つこともある。ここで

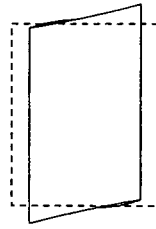


図-4 外周面荷重による中空円筒の外形変形状例 (側面から見た形状, 点線は荷重前)

開発する異方性の逆解析が、基本的に安定に正解を与えるかどうかを確認しておくことも重要である。

次節以降においては上述した, A.異方性体からなる円筒の内孔変形の解, B.直交異方性のパラメータの合理的な削減, C.逆解析の定式化と収束安定性の確認, の検討を行なう。

### 3. 円筒の内孔変形の解

#### (1) 解を得るための基本方針

褶曲などのない地盤の異方性は、直交座標に沿っている。このような異方体から任意方向に採取した円筒試料の外周面とキャッピングした両端面に荷重した場合、孔の変形の解を順解析できる必要がある。このような問題の理論解析解が見当たらなかったため、ここでの目的のために使用できる簡易な解を構築することにした。なお、FEM などの数値解析を行なえば解を求めることは容易であるが、多数の繰り返し計算を要する逆解析に FEM を組み込むことは非現実的と考えた。そのため、簡易な解を開発することにしたわけである。

この解を得る手順のフローを図-2 に示す。まず、異方軸の傾きも考慮して多数の異方性を設定し、円筒の三次元 FEM 解析を行う。理論解析解の得られている異方無限体中の円孔解も合わせて求め、円筒解を異方性無限体円孔解と係数の積で表現する。円筒形状(内・外径比)を固定すればこの係数は異方弾性係数の関数であるので、その適切な具体形を回帰モデルの検討により定める。

#### (2) FEM 解析

##### a) 要素モデルと離散化誤差

ここで検討する円筒の内径と外径の比は 1/4 とすることにした。なおこの内・外径比は、従来用いられている埋設型応力解放地圧測定のパラメータでも採用されている。

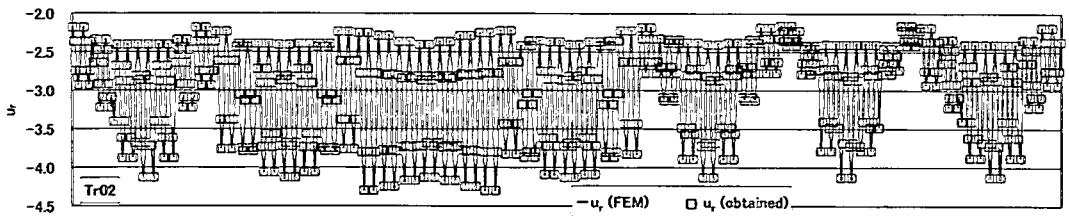


図-5 簡易解と FEM 解の  $u_r$  の比較例 横軸：表-1 の三斜異方性を座標変換して得られる 588 ケース

表-2 複数の等方弾性体の層構造によるマクロな面内等方弾性係数 (Salamon, 1968)<sup>12)</sup>

$$\begin{aligned}
 1/E &= \sum_j \{\Phi_j E_j / (1 - \nu_j^2)\} / \left\{ \sum_j \{\Phi_j E_j / (1 + \nu_j)\} \sum_j \{\Phi_j E_j / (1 - \nu_j)\} \right\} \\
 1/E &= \sum_j \{1/E - 2\nu_j^2 E_j / (E_j(1 - \nu_j))\} + 2 \left\{ \sum_j \Phi_j E_j \nu_j / E_j (1 - \nu_j) \right\}^2 \\
 &\quad / \left\{ \sum_j \Phi_j E_j / (1 - \nu_j) \right\} \\
 \nu/E &= \sum_j \{\Phi_j E_j \nu_j / (1 - \nu_j^2)\} / \left\{ \sum_j \{\Phi_j E_j / (1 + \nu_j)\} \sum_j \{\Phi_j E_j / (1 - \nu_j)\} \right\} \\
 \nu'/E &= \sum_j \{\Phi_j E_j \nu_j' / E (1 - \nu_j)\} / \sum_j \{\Phi_j E_j / (1 - \nu_j)\} \\
 1/G &= 1 / \sum_j \Phi_j G_j, \quad 1/G = \sum_j \Phi_j / G_j
 \end{aligned}$$

表-3 パラメータ削減検討のための異方性設定方法

- case①: 二層構造
- case②: 三層構造
- case③: 一方向に配向した円盤亀裂構造
- case④: 平面内で法線がランダムに配向した円盤亀裂
- case⑤: 錐面内で放射状に配向した円盤亀裂
- case⑥: 直交3方向に配向した円盤亀裂

解析には汎用コード ABAQUS を用いた。解が孔軸方向  $z$  には変化しない一般化二次元問題として、3次元解析を行うために円筒外半径の 2.5 倍の高さを設定し、その中央部で結果を評価するようにした。横断面 1/4 のメッシュ分割図を図-3 に示す。半径方向の要素分割は円孔周りの応力分布特性を考慮して決めている。全要素数は 144,000 である。このモデルによる内孔壁の解の精度を等方円筒の理論解と比較し、変位について 0.02% 以下の精度を確認した。すなわち、この要素モデルによる離散化誤差は十分に小さい。

#### b) 異方性の設定

円筒の弾性応答を FEM で解析する際の異方性として、直交異方性 17 ケースを基本として設定した。そのパラメータを表-1 に示す。ここで  $G_{ij}$  は弾性係数マトリクスの成分であり、 $\{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{12}\}^T = [G_{ij}] \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{23}, \gamma_{31}, \gamma_{12}\}^T$  である。これら 17 ケースの基本異方性を座標変換して各ケースで 588 (49×12) ケース、合計 9996 (17×588) ケースの異方性を設定し、それに対する FEM

解を得た。ただし、円筒問題のため  $z$  軸回転の座標変換は節約できるので実際に FEM を実行したケース数は 833 (17×49 ケース) である。

なお上記の直交異方性は、次のようにして設定した。等方均質な弾性体中に円板状の微小なクラックが特定方向に配向して均質に分布する場合のマクロな弾性係数を、Hudson<sup>11)</sup> に従って求めることができる。直交 3 方向にマイクロクラックが配向するとして、各方向のクラック密度、中空型かせん断型か、基質のポアソン比、などを変えて表-1 に示す 17 ケースのマクロな異方性を設定した。なお、クラック密度は、体積  $V$ 、クラック半径  $c_p$ 、クラック個数  $N$  として  $N c_p^3 / V$  で表される。また、中空型のマイクロクラックはクラック面間に相互作用力が働かないのに対し、せん断型では直応力のみが働く。

こうして得られた異方性の程度は、異方軸に沿った縦剛性の軸間比が最大 2.08、せん断剛性では最大 2.18 である。

また後述する解の検証のために、より一般の異方性である三斜異方性と面内等方性も設定して FEM 解析を行なっている。

#### c) 外力条件および解析結果の評価

FEM での外力条件は、円筒側面だけの単位大きさの圧力荷重とした。上下端面から作用する軸方向の一定応力に対する解は FEM 解析せずに得られる。このようにすることにより、必要があれば側面荷重と軸方向荷重を独立に扱うことができる。

図-4 に周圧荷重したときの側方から見た変形形状の例を示す。両端面が互いに平行して波打っている様子が見られる。

FEM の解析結果は、内孔の変位として  $x$  軸上の点  $(r_0, 0, 0)$  の  $r$  方向変位を孔半径で規準化した  $u_r^H$  と  $z$  方向変位を孔半径で規準化した  $u_z^H$  とを評価する。さらに、 $z$  方向のひずみ成分  $\varepsilon_z^H$  を評価する。なお、点  $(r_0, 0, 0)$  を  $x$  軸から任意の  $\theta$  だけ  $z$  軸回りに回転した点の解は、逆回りに  $\theta$  だけ異方性物体を回転して  $(r_0, 0, 0)$  点での解を用いることができる。すなわち、与えられた  $G_{ij}$  に対して点  $(r_0, 0, 0)$  の変位とひ

ずみを評価できれば内孔壁面上の任意点の評価が可能である。なお、 $u_r^H$ ,  $u_z^H$ ,  $\varepsilon_z^H$ があれば孔の中心線を通るように設置したあらゆる方向の変位計に対応する解を得ることができる。

### (3) 関数形の探索

直交異方性 9996 ケースの FEM 解について、評価点  $(r_\theta, 0, 0)$  の  $r$  方向と  $z$  方向の規準化変位  $u_r^H$ ,  $u_z^H$  および  $z$  方向ひずみ  $\varepsilon_z^H$  をそれぞれ、同じ異方性の無限体円孔解と対照させ比をとる。無限体円孔問題での無限遠方応力は、円筒側面に対する単位の圧力载荷に対応させて  $\sigma_x = \sigma_y = 1$ ,  $\sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$  とし、評価点  $(r_\theta, 0, 0)$  での規準化変位  $u_r^\infty$ ,  $u_z^\infty$  と  $z$  方向ひずみ  $\varepsilon_z^\infty$  を Amadei<sup>6)</sup> に従って求める。

$$\begin{aligned} u_r^H &= B_r u_r^\infty \\ u_z^H &= B_z u_z^\infty \\ \varepsilon_z^H &= B_{ez} \varepsilon_z^\infty \end{aligned} \quad (1)$$

係数  $B_r$ ,  $B_z$ ,  $B_{ez}$  は円筒の内/外径比を固定しているので異方性弾性係数  $C_{ij}$  のみの関数である。そこで回帰モデル式をいくつか設定し、回帰性能のよいモデル式を選択することにした。

$$\begin{aligned} B_r &= f_{nr}(C_{ij}) \\ B_z &= f_{nz}(C_{ij}) \\ B_{ez} &= f_{nez}(C_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

なお、回帰分析には設定した直交異方の場合の全 9996 ケースを用いた。いくつかの回帰モデルを設定して比較した中で、最も推定精度の高い回帰モデルは次に示す形のもの(231 変数モデル)であった。

$$\begin{aligned} B_r &= \sum_{l=1}^6 \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^6 [b^r_{ijkl} a_{ij} a_{kl}] / a_{33}^2 \\ B_z &= \sum_{l=1}^6 \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^6 [b^z_{ijkl} a_{ij} a_{kl}] / a_{33}^2 \\ B_{ez} &= \sum_{l=1}^6 \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^6 [b^{ez}_{ijkl} a_{ij} a_{kl}] / a_{33}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} i &\leq j, k \leq l, i \leq k \\ i &= k \text{ のときには } j \leq l \end{aligned}$$

$a_{ij}$  はコンプライアンスマトリクス ( $[C_{ij}]$  の逆数) の成分であり、 $b^r_{ijkl}$ ,  $b^z_{ijkl}$ ,  $b^{ez}_{ijkl}$  は回帰分析で定まる係数である。この回帰モデルは全 9996 ケースの

回帰データに対し  $u_r$  の推定誤差の最大値が 0.8% と小さい良好な回帰予測式となっており、こうして得られた簡易解(1)式は入力した異方性に対して誤差の少ない良好な変位解を与えていることがわかる。

### (4) 解の検証

前項で得た簡易解を検証するために、回帰分析に用いない異方性ケースとして、異方軸の直交しない一般の異方性である三斜異方性と、面内等方性を設定した。三斜異方性はマイクロクラックを非直交方向に配向させることにより Hudson<sup>11)</sup> にしたがって設定した。また、面内等方性を単一方向に配向したマイクロクラック体や積層体を用いて設定した。なお、積層体のマクロな弾性係数は Salamon<sup>12)</sup> による式(表-2)を用いた。ここで、 $\Phi_j$  は  $j$  番目の層の層厚比であり、 $E, \nu, G$  が面内に関する弾性係数、 $E', \nu', G'$  が面外に関する弾性係数である。

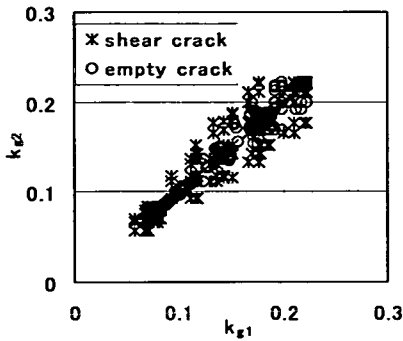
これら解の検証のために設定した面内等方と三斜の異方性のパラメータを表-1 に示している。

こうして得られた三斜異方性一種類と面内等方性二種類を座標回転させて得られる各 588(49×12) ケース、合計 1764(588×3) ケースの異方性に対して、FEM 解と簡易解とを比較した。なお座標回転は  $x, y$  軸に関して 49 ケースさらに  $z$  軸に関して 12 ケースで合計 588(49×12) ケースとなっている。三斜異方の場合の  $u_r$  の比較結果の一例を図-5 に示す。横軸を 588 の座標回転のケースとし、縦軸が評価点  $(r_\theta, 0, 0)$  での規準化変位  $u_r$  である。FEM 解と簡易解とを比較するために、FEM 解を実線で示し簡易解を□印で示す。この比較から簡易解と FEM 解がよく一致していることがわかる。なお、 $u_r$  だけでなく  $u_\theta, \varepsilon_z$  についても、また面内等方性の二種類についても、簡易解は FEM 解とよく一致していた。

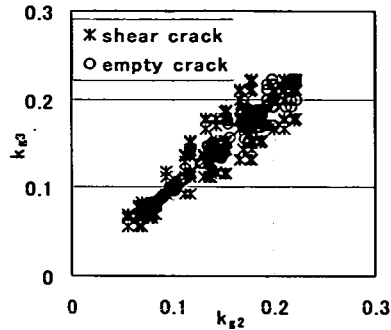
ちなみにこの簡易解で等方体の円筒の内孔変位を求めたところ、厚肉円筒弾性理論解と比較して誤差 0.6% ほどの精度であった。

### (5) まとめ

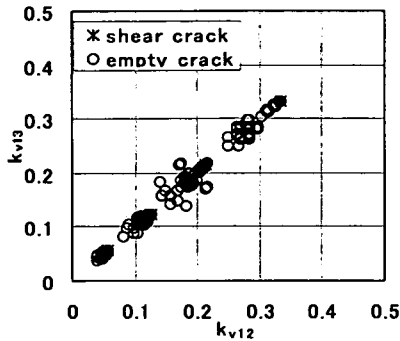
回帰分析の結果ならびに前項(4)の検証結果から、得られた簡易解は設定した異方性の程度、すなわち異方軸間の剛性比が 2 倍程度以内において、直交異方より一般の三斜異方の場合も含めて、良好に変位解を与えていることがわかった。すなわち、任意の異方性を持つ中空円筒試料を側圧载荷したときの内孔の変形の解が、逆解析にも容易に用いられる形で得られた。



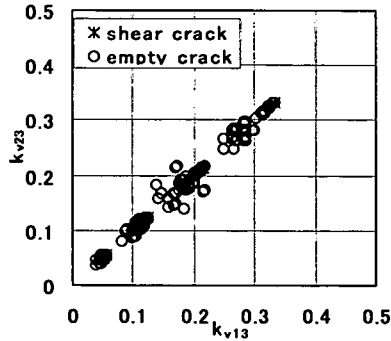
(a)  $k_{g1}$  と  $k_{g2}$  の関係



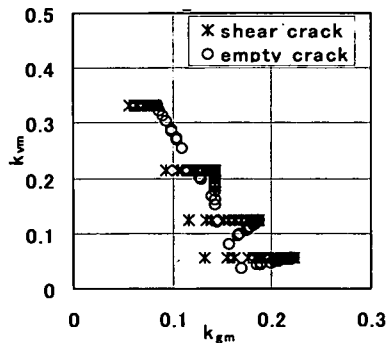
(b)  $k_{g2}$  と  $k_{g3}$  の関係



(c)  $k_{v12}$  と  $k_{v13}$  の関係



(d)  $k_{v13}$  と  $k_{v23}$  の関係



(e)  $k_{gm}$  と  $k_{vm}$  の関係

図-6 マイクロクラック体の弾性係数相互の関係  
(case⑥：マイクロクラックが3方向に配向)

表-4 直交異方マイクロクラック体設定のパラメータ

	クラック密度	クラックタイプ	$\nu$
第一クラック系	0, 0.001, 0.01, 0.04	中空クラック せん断クラック	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
第二クラック系	0, 0.001, 0.01, 0.04		
第三クラック系	0, 0.001, 0.01, 0.04		

異方軸間の縦剛性比  
異方軸間のせん断剛性比

1.48  
1.34

#### 4. 異方性弾性係数の数の合理的な削減

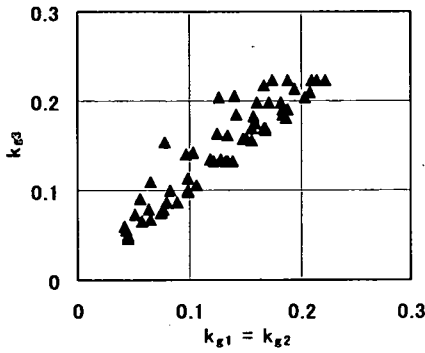
##### (1) 検討の方針

地盤の挙動を正しく把握するために応力とひずみの関係を等方性でなく異方性として表記しようとする、途端に必要なパラメータの数が増えてしまう。例えば、対称性の観点から簡単な面内等方の場合でも、5個の独立弾性係数を決定しなければならない。面内等方より現実的な直交異方では9つの係数を決める必要がある。さらに、異方軸の方向が未知の場

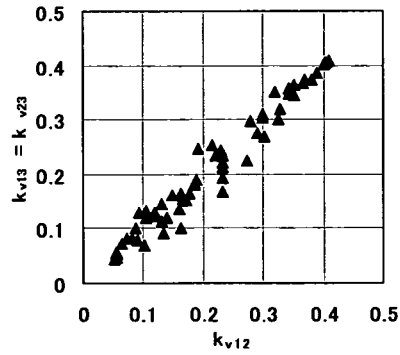
合には、その自由度3つも決定しなければならない。

このような多くの未知数を測定することの困難さや煩雑さがひとつの要因となつて、地盤・岩盤の工学問題の実務において、異方性の評価が避けられがちになっていると言える。または異方性を評価する場合でも、パラメータ数を低減するために過度の制約を課さざるを得ないことも生じる。例えば、直交異方性が認められても面内等方で妥協するなどのこともありうる。

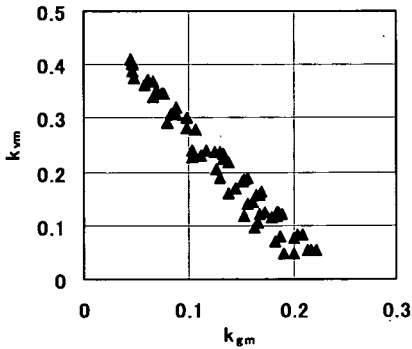
そこで、ここでは地盤の異方性をできるだけ少な



(a)  $k_{g1}$ と $k_{g3}$ の関係



(b)  $k_{v12}$ と $k_{v13}$ の関係



(c)  $k_{gm}$ と $k_{vm}$ の関係

図-7 二層体の弾性係数相互の関係

表-5 二層体設定のパラメータ

	$E_i$	$\nu_i$	層厚比 $\phi_i$
第一層	10	0.1, 0.275, 0.45	0.2, 0.5, 0.8
第二層	10, 20, 40	0.1, 0.275, 0.45	(1- $\phi$ )

異方軸間の縦剛性比の最大値 1.79  
 異方軸間のせん断剛性比の最大値 1.87

い未知数でしかもできるだけ忠実に表現することを目的に検討を行なう。

そもそも面内等方性の異方パラメータ数が5つ、直交異方性では9つ、ということは対称性から数理的に導かれるが、現実の地盤・岩盤は粒子の集合体、互層体、クラック体等の構造的な特徴があり、それに起因したある程度の制約が生じることも考えられる。

そこで、理論解の得られている積層体ならびに微小円盤状亀裂(マイクロクラック)が配向する場合について数値計算を行なって弾性係数相互間の規則性を検討する。検討のために設定した異方性設定の方法のケースを表-3に示す。弾性係数間になんらかの規則性が見出されれば、それに基づいてパラメータの数を削減することができることになる。また、見出される規則性を実測事例とも比較して検証する。

なおパラメータ数削減の検討は、直交異方性までを考慮することとし、9つの独立弾性係数 $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{55}$ ,  $C_{66}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{31}$ を、 $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ と便宜上定める $k_{g1}$ ,  $k_{g2}$ ,  $k_{g3}$ ,  $k_{v12}$ ,  $k_{v23}$ ,  $k_{v13}$ で整理し

検討する。

$$\begin{aligned}
 k_{g1} &\equiv C_{44}/(C_{22}+C_{33}), & k_{g2} &\equiv C_{55}/(C_{33}+C_{11}) \\
 k_{g3} &\equiv C_{66}/(C_{11}+C_{22}) \\
 k_{v12} &\equiv C_{12}/(C_{11}+C_{22}), & k_{v13} &\equiv C_{13}/(C_{11}+C_{33}) \\
 k_{v23} &\equiv C_{23}/(C_{22}+C_{33})
 \end{aligned} \tag{4}$$

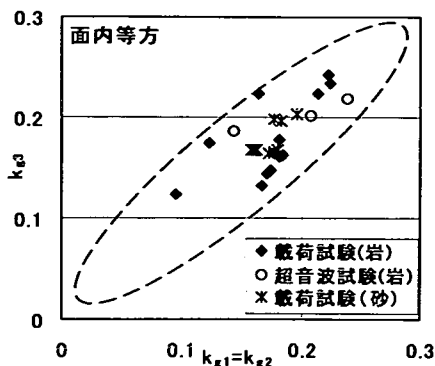
また、

$$\begin{aligned}
 k_{gm} &\equiv (k_{g1} + k_{g2} + k_{g3})/3 \\
 k_{vm} &\equiv (k_{v12} + k_{v23} + k_{v13})/3
 \end{aligned} \tag{5}$$

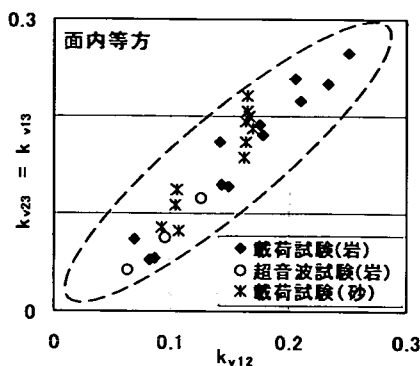
とする。

## (2) マイクロクラック体の異方性

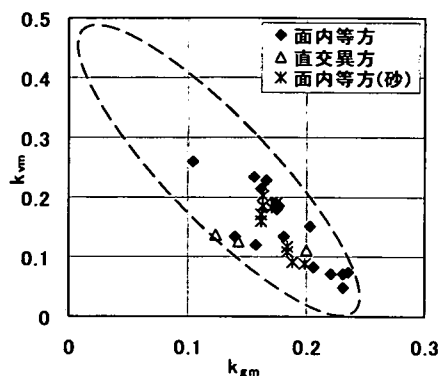
等方均質な弾性体中にマイクロクラックが配向する場合のマクロな異方性を前述の通り Hudson<sup>11)</sup>に従って求めることができる。ここで設定したマイクロクラック配向のケースは表-3に示すように、③マイクロクラックが単一方向に配向するもの、④クラック法線が平面内でランダムに分布するもの、⑤前ケースにおいて各法線を面外に一定角度だけ傾け



(a)  $k_{g1}$  と  $k_{g2}$  の関係



(b)  $k_{v12}$  と  $k_{v23}$  の関係



(c)  $k_{gm}$  と  $k_{vm}$  の関係

表-7 パラメータ数を削減した直交異方性弾性係数マトリクス

$C_{11}$	$k_v(C_{11}+C_{22})$	$k_v(C_{11}+C_{33})$	0	0	0
	$C_{22}$	$k_v(C_{22}+C_{33})$	0	0	0
		$C_{33}$	0	0	0
			$k_g(C_{22}+C_{33})$	0	0
Sym.			$k_g(C_{33}+C_{11})$	0	
				$k_g(C_{11}+C_{22})$	

たもの、⑥直交3方向に配向したもの、⑦前記の③と⑤の組み合わせ、の5種類である。

一例として、マイクロクラックが直交3方向に配向する直交異方性の場合の、クラック密度、クラックタイプ(中空型とせん断型)、基質のポアソン比の組み合わせを表-4に示す。このすべての組み合わせで得られるマクロな異方性の縦剛性比の最大値は約1.5、せん断剛性比では1.4である。図-6にはこの場合の、 $k_{g1}$ 、 $k_{g2}$ 、 $k_{g3}$ 、 $k_{v12}$ 、 $k_{v23}$ 、 $k_{v13}$ の関係を記す。これより、およそ、

$$k_{g1} \doteq k_{g2} \doteq k_{g3} \doteq k_{gm}$$

図-8 実測による岩石と砂の弾性係数相互関係

表-6 図-8掲載の岩石・砂

reference	rock	
(13)	Dolomite	TR
(13)	Dolomitic limestone	TR
(13)	Limestone	TR
(13)	Shaly limestone	TR
(13)	Fossiliferous limestone	TR
(13)	Limestone	TR
(13)	Black shale	TR
(13)	Shale	TR
(8)	Loveland sandstone I	TR
(8)	Loveland sandstone I	TR
(8)	Loveland sandstone II	TR
(8)	Loveland sandstone II	TR
(8)	Loveland sandstone I	TR
(1)	Andesite (Sanjome)	TR
(1)	Granite (fine grained)	TR
(14)	Tuff (Ogino)	TR
(14)	Granite (Oshima)	OR
(15)	Shale (Queenstone)	TR
(16)	Slate	OR
sand		
(18)	Ticino sand	TR
(*)	Kenia sand	TR

TR : transversely anisotropy  
OR : orthotropic anisotropy  
(\*) : personal letter

$$k_{v12} \doteq k_{v23} \doteq k_{v13} \doteq k_{vm}$$

$$k_{vm} \doteq 1/2 - 2 k_{gm} \quad (6)$$

が成立していることがわかる。

このような関係は他のタイプのマイクロクラック体でも成立していた。

### (3) 積層体の異方性

弾性係数の異なる弾性体が異なる層厚で互層をなす時のマクロな異方性は、前述のSalamonに従って求められる。2層の繰返し、3層の繰返しについて発現するさまざまな異方性を求めて、 $k_{g1}$ 、 $k_{g2}$ 、



$k_{g3}$ ,  $k_{v12}$ ,  $k_{v23}$ ,  $k_{v13}$  の関係を観察した. 表-5 には一例として二層体の各層のヤング率, ポアソン比, 層厚比の組み合わせを示す. このすべての組み合わせで得られる異方性の縦剛性比の最大値は約 1.8, せん断剛性比では 1.9 となっている. 図-7 にこうして得られた異方性の  $k_{g1}$ ,  $k_{g2}$ ,  $k_{g3}$ ,  $k_{v12}$ ,  $k_{v23}$ ,  $k_{v13}$  の関係を示す. これより, マイクロクラック体で成立した式(6)が二層体でも成立していることがわかる. このような関係は三層体の場合にも成立していた.

#### (4) 実測された異方性

既往の文献<sup>1), 8), 13)-18)</sup>から, 岩石や砂の異方性を面内等方性, ないし直交異方性として求めているデータを前と同じように整理して図-8に示す. またこれらの試料名を文献番号とともに表-6に示す. 異方性の実測例は面内等方性として求めているものが大多数であるので, 同図上左と上右には, 面内等方の場合について, 岩の載荷試験, 岩の超音波試験, 砂の載荷試験ごとにプロットしており, 同図下には, 直交異方として求めたものも含めてプロットしている. この図からわかる通り, マイクロクラック体と積層体の異方性の理論的検討からわかった弾性係数相互の関係性すなわち式(6)が, 実データでも成立している.

#### (5) まとめ

異方性のパラメータ数を合理的に削減することを直交異方性までを対象にして検討した. 地盤・岩盤の異方性の要因は層構造や不連続面の配向が主要なものであると考えて, まず理論的に, 積層体およびマイクロクラック体のマクロな異方性を検討した. その結果, 直交異方性の独立パラメータ 9 つの弾性係数間にはある一定の関係性が認められ, 地盤・岩盤工学における実務において近似的に用いる 4 つのパラメータが抽出された.

その観点から既往の岩や砂について異方性を実測した事例を調べたところ, 理論的に推定されたことが実データでも成立していることがわかった.

結論として, 地盤・岩盤の直交異方性を実務的に取り扱う場合, 独立な弾性係数として  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$  と  $k_g$  の 4 つと, 異方軸方向に関する自由度を考えれば良い. すなわち異方軸に沿った座標系において弾性係数が表-7で表されることになる. なお,

$$\begin{aligned} k_g &= (k_{g1} + k_{g2} + k_{g3}) / 3 \\ k_v &= 1/2 - 2 k_g \end{aligned} \quad (7)$$

である.

## 5. 中空円筒の載荷による異方性逆解析

### (1) 試験・計測の方法

逆解析の前提となる試験と計測の方法は以下の通りとする.

試験は, 被測定材料の中空円筒試料の内孔に変位計を設置して, 両端面をキャッピングし, 全体を被覆して液圧にて載荷を行なう. 中空円筒試料の内径と外径の比は 1/4 とする. これは 3. 節で求めた孔変形解を適用するための制約である. 孔内に設置する変位計の方向と数は必ずしも固定する必要はないが, 求める未知数の数より多くする必要がある. 直交異方の軸方向も未知の場合には未知数が  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $k_g$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  の 7 つになるので, 8 つの測定で逆解析が安定かどうかを確認することにした. また, 設置の方向は図-9 に模式的に示すように設定した.

### (2) 逆解析の定式化

式(1)の異方性円筒解は円筒の外周面のみに載荷した場合のものである. 上述の試験条件では円筒の軸方向には, 載荷面積補正をして側面の 16/15 倍の圧力が作用することになる. 軸方向圧力に対する円筒の弾性応答は簡単に求めることができるので, それを加えて試験条件に対応した単位静水圧載荷による規準化変位  $U_r^H$ ,  $U_z^H$  とひずみ  $E_z^H$  の計算式をつくる.

$$\begin{aligned} U_r^H &= u_r^H + u_r^{ax} \\ U_z^H &= u_z^H + u_z^{ax} \\ E_z^H &= \varepsilon_z^H + \varepsilon_z^{ax} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで,  $u_r^{ax}$ ,  $u_z^{ax}$ ,  $\varepsilon_z^{ax}$  は, 16/15 の大きさの軸方向載荷による r 方向および z 方向の規準化変位と z 方向ひずみである.

式(8)は, 異方性が与えられたとき試験条件に対する弾性応答の順解析を可能にする. そしてこの式を用いることにより, 孔内に中心軸を通るように設置した任意方向の変位計に対応する変位解を容易に求めることができる. すなわち, 孔半径で規準化した i 番目の変位計の変位  $U_i$  は, 4. 節で検討したパラメータ数を削減した直交異方性のパラメータ  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $k_g$  と, 異方軸方向に関する自由度変数  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  を用いて求めることができる.

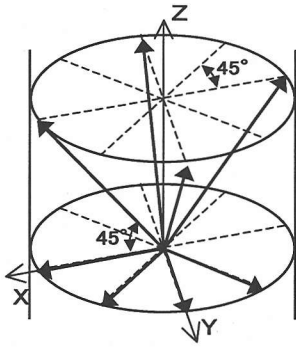


図-9 孔内変位測定方向模式図

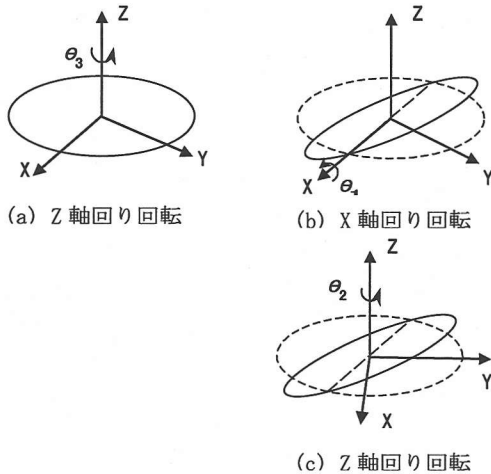


図-10 異方軸の回転の設定  
(a. b. c. の順)

$$U_i = f_i(C_{11}, C_{22}, C_{33}, k_g, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (9)$$

そこで未知数  $C_{11}, C_{22}, C_{33}, k_g, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  の数7個以上の計測点があれば、非線形最小自乗法の手法にてこれら未知数を求めることになる。

なお、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  の定義は様々にとることができるが、以下の具体的検討では次のように扱っている。 $\theta_1$  は一つの異方面が  $x-y$  面となす傾斜角、 $\theta_2$  はその傾斜方位を  $-y$  から  $-x$  向きに測った角、 $\theta_3$  はその異方面法線を軸にした右回り回転角である。図-10 には、異方軸を座標軸に合わせた状態からこの  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  の向きに合わせる座標変換手順を示す。

### (3) 逆解析における収束の安定性の確認

非線形最小自乗法の手法により定式化される逆解析では、一般に必ずしも真の解が得られるとは限らない。また、繰り返し収束計算の途中にて偽解に停

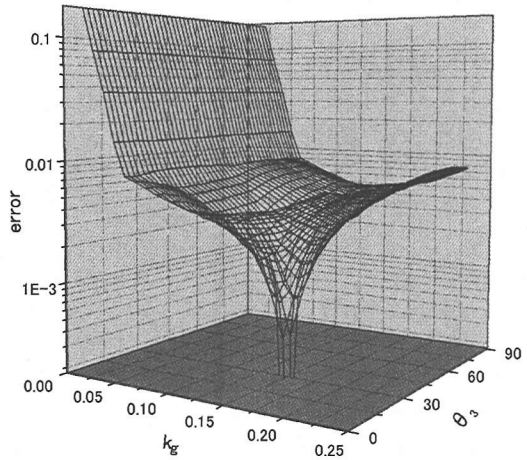


図-11 逆解析の収束特性例  
(残差自乗和の  $k_g - \theta_3$  上の分布)

表-8 逆解析のための設定パラメータ

$C_{11}$	20	$\theta_1$	30°
$C_{22}$	17	$\theta_2$	30°
$C_{33}$	10	$\theta_3$	30°
$k_g$	0.15		

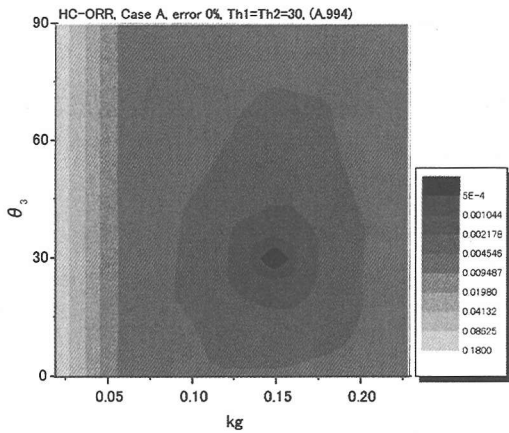
  

7.416	7.013	5.871	-0.646	-0.558	-1.025
7.0125	17.646	5.917	-1.616	-0.223	-1.025
5.871	5.917	11.938	-1.616	-0.558	-0.41
-0.646	-1.616	-1.616	4.438	-0.308	-0.167
-0.558	-0.223	-0.558	-0.308	4.403	-0.485
-1.025	-1.025	-0.41	-0.167	-0.485	5.259

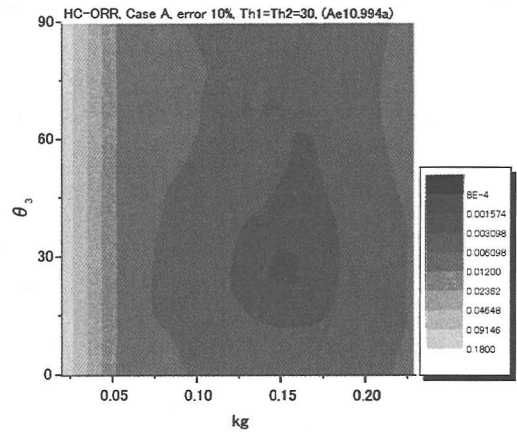
留してしまうこともある。そこで、本報告で扱っている異方性の測定・解析方法において、異方性を求めるための逆解析の収束特性が基本的に良好なものかどうかを確認しておきたい。

ここで逆解析シミュレーションのために設定する異方性を表-8 に示す。これは縦剛性比  $C_{11}/C_{33}$  が2となっており、異方性の主軸に3回の回転変換を施している。このような異方性体から、 $z$  方向に中空円筒試料を採取するものとする。孔内に図-9 に模式的に示す方向に設置する8つの変位計に対応する規準化変位を式(9)を用いて求めておく。これを入力値として、逆解析により異方性を求めようとするわけである。

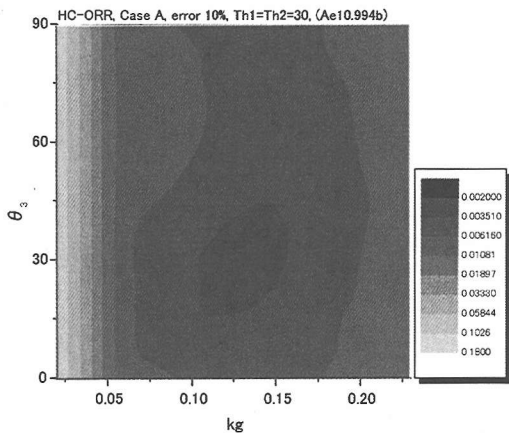
式(9)に関する逆解析の収束性を視覚的に確認するために次のような検討を行なった。まず、変数  $k_g$  と  $\theta_3$  とを様々な値に固定して、残りの未知数に対して逆解析を定式化し計算した。そして、逆解析収束値における残差自乗和を  $k_g$  と  $\theta_3$  の二次元平面上



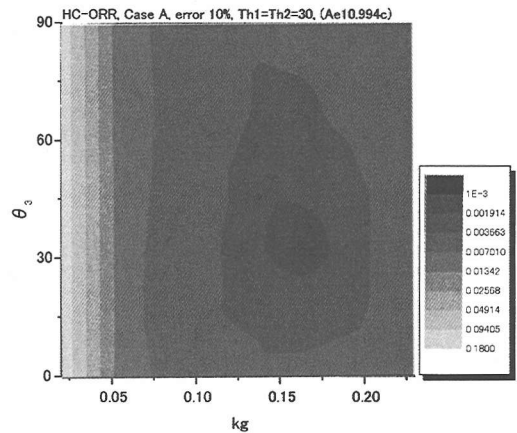
(a) 測定誤差 0



(b) 測定誤差 10%の例 その1



(c) 測定誤差 10%の例 その2



(d) 測定誤差 10%の例 その3

図-12 測定誤差が0の場合(a)と10%の場合(b), (c), (d)の逆解析収束特性例 (残差自乗和の分布)

で観察することにした。この結果を3次元鳥瞰図にして図-11に示す。この図から、 $k_g$ と $\theta_3$ が正解値の時には残差が0であり、正解の異方性に収束していることがわかる。また、 $k_g$ と $\theta_3$ の正解値が未知であってもこれを逆解析に未知数として組み込めば正解以外に停留することなく安定して正解に収束すること、がわかる。

ここでは、収束安定性を視覚的に確認するために $k_g$ と $\theta_3$ の2つに絞って示したが、他の変数に関しても安定に正解に収束することが確認できた。

上の収束安定性の検討は表-8に設定した異方性についてのものである。逆解析解の得られない特異なケースが存在する可能性は否定できないが、基本的には安定して異方性を逆解析できることが示されたと考える。

地盤・岩盤には目視によって1つの異方向が観察されることが少なくない。このときには直交異方軸の方向に関する未知数3つのうち2つを固定するこ

とができる。すると逆解析の未知数は合計5つになるので収束の安定性がより向上することになる。

#### (4) 測定誤差に対する安定性

前項では逆解析に入力する孔内変形量として、正解として設定した異方性から理論的に計算される値をそのまま用いた。しかし、実際の測定においては測定誤差が避けられない。また、実際に測定されるべき真の異方性は、シミュレーションの正解として仮定した異方性すなわち前節で提案した未知数4個の直交異方性とは厳密には異なるであろう。このようなことに起因して逆解析が不安定になることがないかどうかを次のようにして検討した。すなわち、設定した異方性から理論的に計算される変形量に、幅を様々に変えた誤差を加えて測定値とした。

図-12左上には測定誤差がない場合の残差自乗和の分布を、 $k_g$ - $\theta_3$ 平面上に等高線で表示した。さらに、理論変形量にその10%幅の一様分布の乱数を誤

差として加えて3つのケースを設定しその解析結果を示した。正解の異方性パラメータは前項の検討と同じであり、 $k_g$ と $\theta_3$ はそれぞれ0.15、 $30^\circ$ である。測定誤差がない場合には、図-12(a)の通り $k_g$ と $\theta_3$ の正解位置で逆解析誤差が0となっており、設定した正解の異方性に収束することがわかる。同図で測定誤差が10%ある他の3つの結果を見ると、逆解析で収束する $k_g$ と $\theta_3$ の位置は正解からややずれるものの、概ね正解付近に安定して収束することがわかる。正解とのずれは $k_g$ が0.025以内、 $\theta_3$ が $5^\circ$ 程度となっている。

すなわち10%程度の測定誤差があっても、本開発手法により地盤の異方性を安定に逆解析することができる。また、測定誤差のために得られる異方性が正解からある程度外れてくるのはやむを得ないが、誤差により偽解に収束してしまうというようなことはなく、妥当な解に収束することがわかる。

#### (5) まとめ

中空円筒試料を静水圧载荷したときの内孔の変形から、試料材料の直交異方性を安定に求められることがわかった。その計算には逆解析を用いるが、測定値に10%程度までの誤差がある場合も含めて偽解に収束することはないことを確認できた。

## 6. おわりに

重要な地下構造物の構築のための調査において、従来から地盤の変形特性を調べるために平板载荷試験が行われている。今後求められていくより合理的な設計やより高度な地盤評価のために、そのような原位置試験に近い寸法で、地盤の異方性を簡易にしかも信頼性をもって測定するための方法を開発した。その方法の特徴は次の通りである。

- (1) 中空円筒試料の载荷試験により実荷重レベルでの異方性を測定できる。
- (2) 载荷は流体による静水圧载荷であるため偏心などのおそれがなく試験も容易である。
- (3) 载荷試験としては大型の数10cm~1m程度の寸法であり試料の乱れが少ない。
- (4) 一試料で一セットの異方性を測定できるので効率がよく、かつ、場所による物性変化に影響されずに測定点の異方性を正確に求められる。
- (5) 面内等方でなくより現実的な3次元の直交異方性として求められる。その際に異方軸が未知であってもよい。

この測定・解析方法の開発の概要を述べるとともに、測定データに若干の誤差があっても安定して解析できる実用的な方法であることを示した。

今後は、この方法に適切な測定計器の開発を進めるとともに、地盤のより高度な工学的評価のための一手段として適用していきたい。

#### 参考文献

- 1) 新孝一, 金川忠: 高精度な弾性波測定手法の開発と岩石異方性の測定, 電力中央研究所報告, U90022, 1990.
- 2) 中部電力: 浜岡原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書(5号炉増設), 1997.
- 3) Pinto, J.L.: "The transversely isotropic body and its application to the study of the deformability of the schistous rocks", a research officer thesis, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa Portugal, 1969.
- 4) Vinnik, L.P., Makeyeva, L.I., Milev, A. and Usenko, A.Yu.: Global Patterns of Azimuthal Anisotropy and Deformations in the Continental Mantle., *Geophys J Int*, Vol.111, No.3, pp.433-447, 1992.
- 5) Nakamura, M., Ando, M., Kusunose, K. and Sato, T.: Depth - dependent crustal anisotropy at midwestern Honshu, Japan., *Geophys Res Lett*, Vol.23, No.23 pp.3417 - 3420 1996.
- 6) Amadei, B.: Rock anisotropy and the theory of stress measurements. *Lecture Notes in Engineering*, Edited by C A Brebbia and S A Orszag 2, Springer-Verlag, 1983.
- 7) Ohkami, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: A boundary element method for identifying orthotropic material parameters. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, Vol.15, No.9, pp.609-625, 1991.
- 8) Amadei, B.: Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr.* 33(3), 293-325, 1996.
- 9) 佐野修, 石田一成, 平野亨, 工藤洋三: 縦波速度を用いた岩盤の異方性弾性率決定法に関する考察, 土木学会論文集, No.589/III-42, 21-30, 1998.
- 10) 岡千裕, 平島健一: ジャッキ試験および水室試験による異方性岩盤物性の決定方法に関する研究, 土木学会論文集, No.469/III-23, 83-91, 1993.
- 11) Hudson, J.A.: Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophys J R astr Soc.* 64, 133-150, 1981.
- 12) Salamon, M.D.G.: Elastic moduli of a stratified rock mass. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr.* 5, 519-527, 1968.
- 13) Lo, K.Y. and Hori, M.: Deformation and strength properties of some rocks in southern Ontario, *Can. Geotech. J.* 16,

108-120, 1979.

- 14) 河嶋智,佐野修,水田義明,荻野正二: 異方性岩石の弾性率決定について, 日本鉱業会春季大会 2101, 1987.
- 15) Hefny,A.M. and K.Y. Lo: Analytical solutions for stresses and displacements around tunnels driven in cross-anisotropic rocks. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 23, 161-177, 1999.
- 16) Homand,F., Morel,E., Heyry,J. -P., Cuxac,P. and Hammade,E.: Characterization of the moduli of elasticity of an anisotropic rock using dynamic and static methods: *Int J*

*Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr.* 30(5), 527-535, 1993.

- 17) Aleksandrov,K.S. and G.T. Prodayvoda: The study of elastic symmetry and anisotropy of elastic body waves in gneiss. *Geophys. J. Int.* 119, 715-728, 1994.
- 18) Bellotti,R. , M.Jamiolkowski, D.C.F.Lo Presti and D.A. O'Neill : Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand, *Geotechnique*, Vol.46, No.1, p.115-131, 1996.

(2002. 3. 4 受付)

## A PRACTICAL METHOD OF MEASUREMENT OF ANISOTROPY OF ROCK USING A HOLLOW CYLINDER

Koichi SHIN

Rock is often considerably anisotropic. But it may be said that there has been no practical method of measuring it in the scale matching the insitu tests. The features of the newly developed method are that, 1) it requires only one hollow cylinder specimen to obtain a set of orthotropic anisotropy, 2) it does not require the directions of anisotropic axes to be known beforehand. To develop this new method, a simple and accurate solution of elastic deformation of the hole of an anisotropic hollow cylinder has been newly established. Further, an effective way of reducing the number of independent parameters for orthotropic anisotropy has been established through theories and measured data. Then it is shown that the anisotropy can be back-analysed stably using the deformation of the hollow cylinder.