

# 円錐孔底ひずみ法における コアディスクング現象に関する基礎的研究\*

尾原 祐三<sup>1</sup> 姜 聲 承<sup>2</sup>  
石 黒 幸 文<sup>3</sup> 菅 原 勝 彦<sup>4</sup>

## Core Disking Phenomenon on the Compact Conical-ended Borehole Overcoring (CCBO) Technique

by Yuzo OBARA<sup>a</sup>, Seong-Seung KANG<sup>b</sup>, Yukifumi ISHIGURO<sup>c</sup>  
and Katsuhiko SUGAWARA<sup>a</sup>

a. Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan

b. Institute of Lowland Technology, Saga University

c. Chubu Electric Power Co. Inc.

Core disking is sometimes observed in high stress region where rock stress measurements are performed by the Compact Conical-ended Borehole Overcoring (CCBO) Technique, which is one of the stress relief methods. When the tensile stress induced on the borehole bottom surface becomes larger than the tensile strength of the rock, a failure from the borehole bottom surface will be initiated. Therefore, if the stress changes on the borehole bottom surface can be analyzed during overcoring, the rock stress prior to boring may be estimated.

In this paper, assuming that the tensile stress on a borehole bottom surface induced due to overcoring is one of factors of generating core disking, the mechanism of the core disking in the CCBO is discussed as well as the location of failure initiation and the type of failure. Firstly, the characteristics of core disking in the CCBO is shown. Secondly, simulating the overcoring of the CCBO under three dimensional initial stress state in which the axis of a principal stress coincides with that of a borehole, the failure initiated on the borehole bottom surface during the overcoring is discussed, based on the results calculated by a semi-analytical boundary element process for axisymmetric elasticity with arbitrary boundary conditions. From the results, the criterion of core disking is suggested and the applicable limitation of the CCBO is made clear. Furthermore, the X-ray CT method is applied to the recovered core with core disking, and then the state of failure within the core is visualized. Finally, it is discussed that the rock stress prior to boring is estimated by the suggested criterion of the core disking, comparing the neighboring rock stress measurement and tensile strength obtained from cores.

**KEY WORDS** : CCBO Technique, Core Disking, Rock Stress, Criterion of Fracture Initiation, Boundary Element Method, X-ray CT

### 1. 緒 言

地下深部でのボーリングの際、通常の連続コアが得られず、コアが一定の厚さの円盤状に割れるコアディスクング現象が観測されることがある。この現象が起こる原因の1つとして、作用している岩盤応力に対応してコアの表面やその内部に発生する引張応力が考えられ、これまでに数多くの解析的、実験的研究がなされてきている<sup>1)-10)</sup>。

この中で、Song & Haimson<sup>9)</sup>は、純3軸応力状態の花崗岩の立方体供試体にボーリングを作孔して発生させたコアディスクングのディスク形状および厚さを分析し、作用している最大主応力の大きさや作用方向の推定が可能であるとしている。また、菅原ら<sup>2)</sup>は

ボーリング孔を有する立方体供試体に2軸的な応力を作用させる実験からコアディスクングを起こす岩盤応力状態を表す式を提案している。

一方、解析的研究としては、コア長がボーリング径に対して十分長く、主応力の1つがボーリング軸と一致していない一般的な岩盤応力が作用している場合を取り扱った松木らの研究<sup>6)-8)</sup>があり、コアディスクングはコア内部に生じる引張応力が原因で発生するとしてその発生条件を示すとともに、主応力がボーリング軸からかなり傾いている場合にもコアディスクングが発生する可能性のあることを指摘している。また、ディスクの形状と岩盤応力の関係を明らかにし、十分長いディスクが得られる場合のコアディスクングによる岩盤応力推定法を提案している。さらに、小口径のパイロット孔の周りに大口径のオーバコアリングを行うときのホローコアディスクングに関して、尾原ら<sup>10)</sup>はオーバコアリングが進行するときのボーリング孔の壁面の応力変化を解析し、岩盤応力がホローコアディスクングの破壊開始、破壊開始位置、破壊形態およびディスク厚さに及ぼす影響について検討している。

円錐孔底ひずみ法<sup>11)-14)</sup>は岩盤応力測定法の1つであり、簡易

\* 2000年12月27日受付 2001年3月15日受理 資源・素材学会平成12年度春季大会(2000年3月)において一部発表

1. 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科

2. 正会員 博士(学術) 佐賀大学講師 低平地防災研究センター

3. 中部電力(株) 土木建築部 係長

4. 正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科

[著者連絡先] TEL & FAX 096-342-3686

E-mail : obara@gpo.kumamoto-u.ac.jp

キーワード : 円錐孔底ひずみ法, コアディスクング, 岩盤応力, 破壊開始条件, 境界要素法, X線CT

かつ高精度という利点を有するため、初期応力および二次応力測定のために我が国で広く使用されるようになってきている。しかし、円錐孔底ひずみ法は応力解放法を採用しており、高い岩盤応力下に掘削された坑道あるいはトンネル周辺岩盤の二次応力を測定する場合にコアディスキング現象が観測されることがある。このような場合、応力測定が不可能になったり、あるいはひずみデータが得られたとしても測定の信頼性が低下すると考えられる。

そこで、本研究では、円錐孔底面からの破壊開始に注目し、オーバコアリングが進行する場合に発生する孔底応力を分析した。さらに、得られた結果をもとにコアディスキングに対する円錐孔底ひずみ法の適用限界を明らかにするとともに、コアディスキングが観測された場合のデータ処理法について論じる。

具体的には、岩盤応力の1つの主方向と測定用のボーリング孔軸が一致する場合を対象に、オーバコアリングが開始されて孔底の位置に達するまでの短い区間において孔底に発生する応力を境界要素法を用いて解析するとともに、円錐孔底ひずみ法におけるコアディスキングの開始条件を検討し、コアディスキングの発生メカニズムについて論じる。さらに、ディスキングコアの X 線 CT 画像を利用し、解析結果の妥当性について検討する。なお、本研究では、測定されるひずみに影響を与えると考えられる孔底壁面における破壊開始だけに着目し、コア内部への破壊進展については考慮していない。

## 2. 解析モデルと解析方法

地下に掘削されたトンネルや坑道から円錐孔底ひずみ法を用いて応力測定を行う場合、測定のためのボーリング孔は壁面にほぼ垂直に作孔される。一方、トンネル壁面近くの応力成分のうち壁面に垂直な応力成分は主応力の1つとなり、他の2つの主応力に比較して小さいと考えられる。このとき、ボーリング孔の作孔方向と主方向の1つがほぼ一致すると考えられる。そこで、岩盤を線形弾性体と仮定し、それに作用している3次元岩盤応力の1つの主方向とボーリング孔軸が一致する場合を対象に、Fig.1に示すような円錐孔底モデルを考える。オーバコアリングが行われる前の孔底先端に原点をとり、直角座標系  $(x, y, z)$  および円柱座標系  $(r, \theta, z)$  を定める。半径  $R=38\text{ mm}$  のボーリング孔底は、先端に半径  $14\text{ mm}$  の球面を持つ頂角  $60$  度の円錐形である。オーバコアリングは外半径  $38\text{ mm}$ 、厚さ  $3\text{ mm}$  であり、 $z$  の正から負の方向に進行し、原点とオーバコアリング先端との距離を  $L$  とする。以下では、 $L$  をオーバコアリングの進行と呼ぶことにする。

円錐孔底モデルは軸対称であり、応力状態は非軸対称なので、

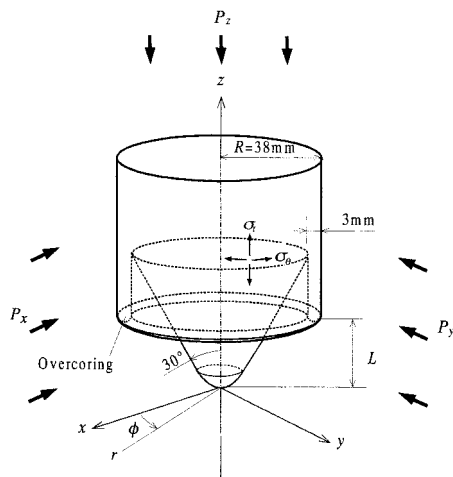


Fig.1 CCBO overcoring numerical model.

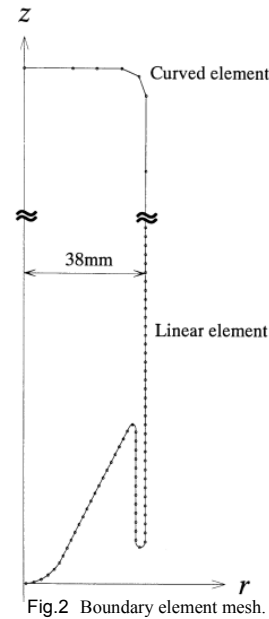


Fig.2 Boundary element mesh.

解析には回転体非軸対称荷重問題としての境界要素法<sup>15)</sup>を用いた。解析モデルを例示すると Fig.2 のようであり、長さ  $2\text{ m}$  のボーリング孔の壁面の半分をモデル化している。壁面に示された黒丸が境界要素の節点であり、直線部分に線形要素、曲線部分に2次要素を配しており、孔底付近における要素長は約  $0.5\text{ mm}$  である。また、解析モデルは、 $L=-30, -20, -15, -10, -5, 0, 10, 20, 30, 50\text{ mm}$ 、( $L=L/R=-0.789, -0.526, -0.395, -0.263, -0.132, 0.0, 0.263, 0.526, 0.789, 1.316$ ) の10のケースを用意してオーバコアリングの進行を考慮した。解析における境界条件は、ボーリング軸に垂直な面内に作用する主応力  $P_x, P_y$  およびボーリング軸方向から作用する主応力  $P_z$  である。なお、以下に示す解析結果はポアソン比が  $0.25$  の場合のものである。

3. で述べる壁面応力係数の解析では、まず、境界要素法解析で得られた各節点の変位を用いて、モデルを回転軸を中心に回転し、回転方向  $5$  度おきの断面における孔底面上に配置した仮想節点の変位を求める。つぎに、それらの節点で三角形を構成し、三角形を平面応力状態のひずみ一定の有限要素と見なして要素の応力を求める。最後に、仮想節点を含む要素の応力の面積平均を求め、それを仮想節点の応力とした。以下では、この応力を壁面応力と呼ぶことにし、このうち Fig.1 に示すように、ディスキングの原因と考えられる回転軸を含む面内に発生する応力を接線方向応力  $\sigma_t$ 、縦割れ破壊の原因と考えられる回転軸に垂直な面内に発生する応力を回転方向応力  $\sigma_\theta$  と呼び、以下ではそれらに注目して分析を行う。

## 3. 壁面応力係数

3次元地山応力の主応力がそれぞれ単独に作用する場合について、ボーリング孔の壁面に発生する  $\sigma_t$  および  $\sigma_\theta$  を解析し、壁面応力係数を求めた。

ボーリング孔軸は岩盤応力の1つの主方向と一致しているため、 $x, y$  および  $z$  軸方向に  $P_x, P_y$  および  $P_z$  の主応力がそれぞれ単独に作用している場合を考え、接線方向の壁面応力係数を  $k_{tx}, k_{ty}$  および  $k_{tz}$ 、また、回転方向の壁面応力係数を  $k_{\theta x}, k_{\theta y}$  および  $k_{\theta z}$  とし、

$$k_{tx} = \frac{\sigma_t}{P_x}, k_{ty} = \frac{\sigma_t}{P_y}, k_{tz} = \frac{\sigma_t}{P_z}$$

$$k_{\theta x} = \frac{\sigma_\theta}{P_x}, k_{\theta y} = \frac{\sigma_\theta}{P_y}, k_{\theta z} = \frac{\sigma_\theta}{P_z} \dots \dots \dots (1)$$

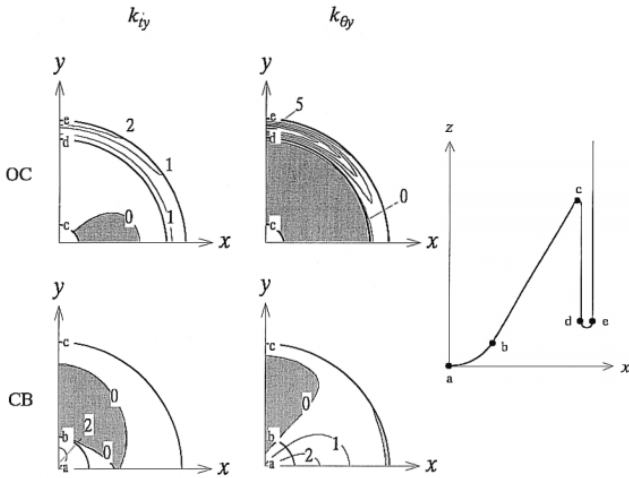


Fig.3 Contour of the surface stress intensity coefficients  $k_{ty}$  and  $k_{\theta y}$  on the borehole bottom surface in the case of  $L = -15$  mm.

とした。なお、問題としている円錐孔底モデルは軸対称なので、 $k_{ty}$  および  $k_{\theta y}$  を  $q$  方向に  $90$  度回転すると  $k_{tx}$  および  $k_{\theta x}$  が求まる。以下では、 $P_y$  のみの主応力が単独に作用している場合について検討する。

一例として、 $L = -15$  mm のモデルの  $k_{ty}$  および  $k_{\theta y}$  の分布を等高線で示すと、Fig.3 のようである。分布は  $x$  および  $y$  軸に対称となるので図はボーリング壁面を円弧状に展開したその  $1/4$  を描いている。図中の太線の円に付している  $a \sim e$  は付図に示す符号の位置に対応し、壁面応力係数  $k$  が負の領域に薄墨をつけている。また、左図が  $k_{ty}$  の分布、右図が  $k_{\theta y}$  の分布である。両図の上段および下段は、それぞれオーバコアリング壁面および円錐孔底面の展開図であり、以下、オーバコアリングを OC、円錐孔底を CB と呼ぶことにする。

いま、圧縮応力  $P_y$  が単独に作用しているとする、 $k_{ty}$  においては、 $xz$  断面において内側の OC 壁面 (cd) に引張応力がわずかに発生している。また、 $yz$  断面の OC 先端 (de) には圧縮応力が見られる。一方、CB 壁面においては、 $xz$  断面の引張応力はわずかな領域に発生しているが、 $yz$  断面では広範囲に引張応力が生じている。つぎに、 $k_{\theta y}$  について見ると、 $xz$  断面および  $yz$  断面の OC 壁面 (cd) 全面には引張応力が発生し、 $yz$  断面において OC 先端 (de) に大きな圧縮応力の集中が発生している。一方、 $xz$  断面において CB 壁面には圧縮応力が、 $yz$  断面の CB 壁面には引張応力が分布している。

$L$  が異なる他のモデルの場合も、 $xz$  断面および  $yz$  断面に対称に応力が分布しており、両断面内において応力が最大値あるいは最小値を示す点が存在していた。また、 $P_z$  が作用している場合の壁面応力係数は等高線が同心円状に描かれる。したがって、コアディスクングの破壊開始条件を考える場合、 $xz$  断面および  $yz$  断面のみ検討すればよいことになる。

$L = -15$  mm のモデルについて、 $yz$  および  $xz$  断面の壁面応力係数  $k_{ty}$  の分布を示すと Fig.4 のようである。壁面の空洞側と岩盤側に描かれた曲線が壁面応力係数  $k_{ty}$  の分布を示しており、壁面上の点の壁面応力係数を、壁面を零、モデルの空洞側を負、岩盤側を正として示している。 $yz$  断面では、OC 先端と CB 先端に圧縮応力の集中がみられ、OC 内側壁面および CB 部分の壁面には、引張応力が分布している。

つぎに、回転方向の壁面応力係数  $k_{\theta y}$  を示すと Fig.5 のようである。 $yz$  断面において、OC 先端から内側壁面にかけて圧縮応力が

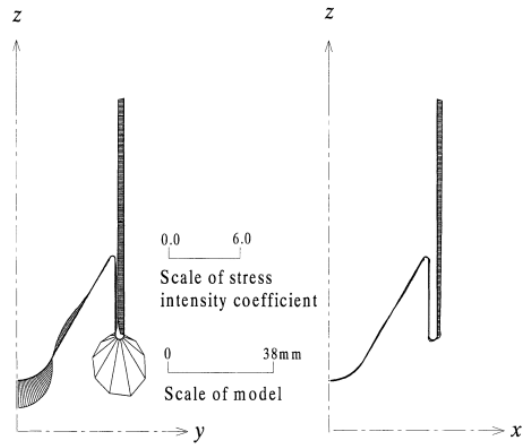


Fig.4 Distribution of the surface stress intensity coefficient  $k_{ty}$  on the  $yz$  and  $xz$  cross sections in the case of  $L = -15$  mm.

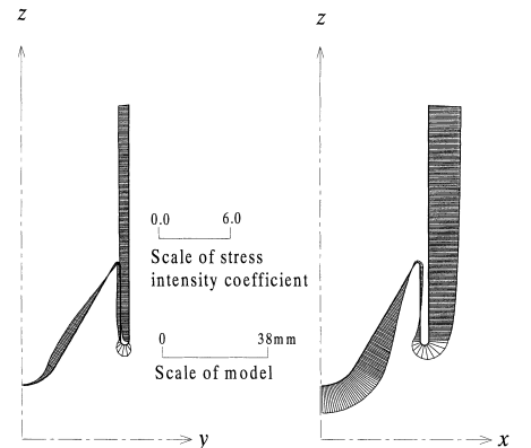


Fig.5 Distribution of the surface stress intensity coefficient  $k_{\theta y}$  on the  $yz$  and  $xz$  cross sections in the case of  $L = -15$  mm.

発生している。CB 部分の広範囲には引張応力が発生している。なお、 $k_{tx}$  および  $k_{\theta x}$  は  $k_{ty}$  および  $k_{\theta y}$  を  $90$  度回転することによって得られる。

$z$  軸方向から圧縮応力  $P_z$  が単独に作用しているとし、接線方向の壁面応力係数  $k_{tz}$ 、回転方向の壁面応力係数  $k_{\theta z}$  として示すと Fig.6 のようである。 $k_{tz}$  は OC 先端の内側に大きな引張応力が集中している。また、CB 部分には圧縮応力が広く分布し、先端には引張応力が発生している。 $k_{\theta z}$  においては、OC 先端から CB 先端に至るまで引張応力が発生している。

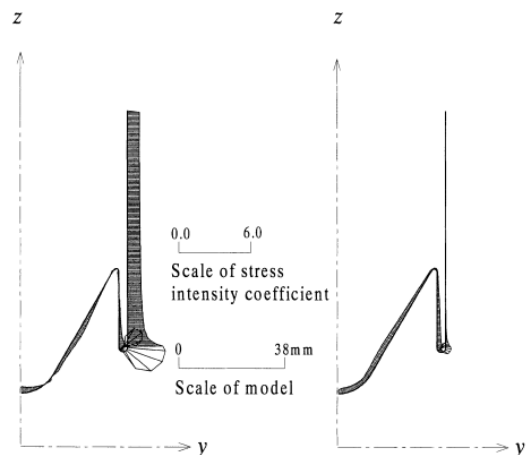


Fig.6 Distribution of the surface stress intensity coefficient  $k_{tz}$  and  $k_{\theta z}$  in the case of  $L = -15$  mm.

4. 破壊開始条件

岩盤の引張強度を  $S_i$  ( $S_i \geq 0$ ) とし、ボーリング軸に垂直な面内の2つの主応力  $P_x, P_y$  およびボーリング軸方向の主応力  $P_z$  が複合的に作用している3次元岩盤応力下において、壁面に発生する接線方向応力  $\sigma_t$  および回転方向応力  $\sigma_\theta$  は、 $S_i$  が正規化した応力、

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{S_i}, \bar{\sigma}_\theta = \frac{\sigma_\theta}{S_i}, \bar{P}_x = \frac{P_x}{S_i}, \bar{P}_y = \frac{P_y}{S_i}, \bar{P}_z = \frac{P_z}{S_i} \dots\dots\dots (2)$$

および壁面応力係数を用いて

$$\bar{\sigma}_t = k_{tx} \bar{P}_x + k_{ty} \bar{P}_y + k_{tz} \bar{P}_z \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = k_{\theta x} \bar{P}_x + k_{\theta y} \bar{P}_y + k_{\theta z} \bar{P}_z \dots\dots\dots (4)$$

と表される。

壁面応力が岩盤の引張強度に達したとき壁面から破壊が開始し、コアディスクングあるいは縦割れ破壊が発生すると考えられる。したがって、破壊開始条件は、

$$\bar{\sigma}_t = -1 \text{ あるいは } \bar{\sigma}_q = -1 \dots\dots\dots (5)$$

と書ける<sup>16)</sup>。

$L = -15 \text{ mm}$  のとき、 $\bar{P}_z = 0.0$  とした場合の破壊開始条件を例示すると Fig.7 のようである。図の横軸は  $\bar{P}_x$ 、縦軸は  $\bar{P}_y$  であり、圧縮応力を正としている。また、実線が破壊開始条件である。これらの破壊開始条件は、OC 壁面および CB 壁面におけるすべての点において発生する応力を式 (3) および (4) を用いて計算し、それらが式 (5) を満足するときの  $\bar{P}_x$  および  $\bar{P}_y$  を求めたものである。図中の添字 OC および CB は OC 壁面および CB 壁面のいずれかの点の応力が式 (5) を満足し、その点から破壊が発生することを表す。このとき、 $\bar{\sigma}_t^{CB}$  は岩盤の最大応力の方向に垂直な面内で発生し、一方、 $\bar{\sigma}_t^{OC}$  は最大応力を含む面内で発生している。それぞれの壁面での破壊開始条件の最も内側に岩盤応力が存在する場合、すなわ

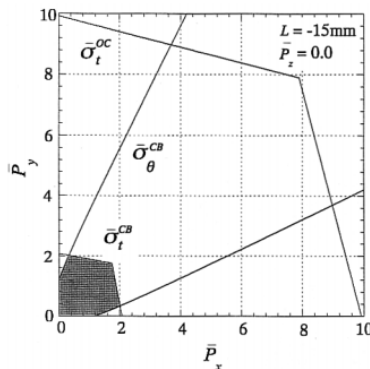


Fig.7 Criterion of the fracture initiation in the case of  $L = -15 \text{ mm}$  and  $\bar{P}_z = 0.0$ .

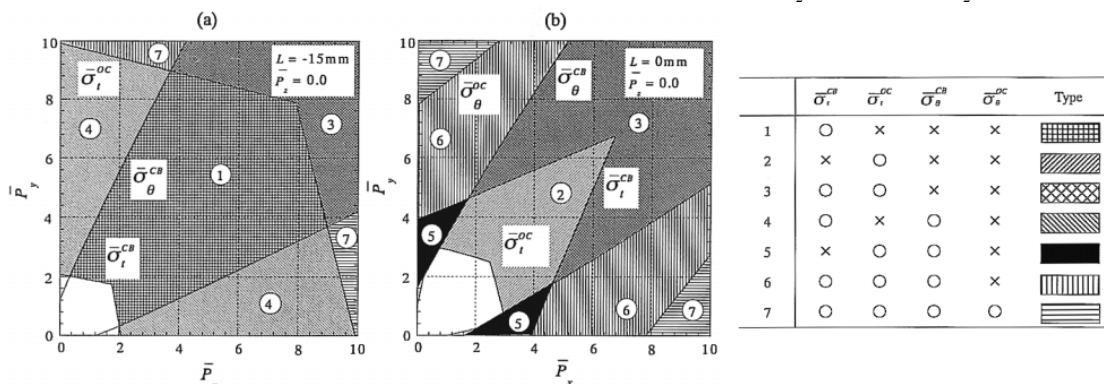


Fig.8 The appearances and locations of the criterion of the fracture initiation according to the advance of overcoring in the case of (a)  $\bar{P}_z = 0.0$  and  $L = -15 \text{ mm}$ , (b)  $\bar{P}_z = 0.0$  and  $L = 0 \text{ mm}$ .

ち、網掛け領域内に応力状態が存在するときには、 $\bar{\sigma}_t > -1$  または  $\bar{\sigma}_q > -1$  であり、孔底での破壊は発生しない。一方、その外側に応力状態がある場合には、 $\bar{\sigma}_t < -1$  または  $\bar{\sigma}_q < -1$  となっており、破壊が発生することになる。このような分析により孔底での破壊開始条件を検討することが可能である。

これまで求めた破壊開始条件をもとに、コアディスクングおよび縦割れ破壊の3次元応力依存性について検討する。Fig.8に岩盤応力による破壊開始条件を領域別に示した。左図が  $\bar{P}_z = 0.0$  の場合に OC が  $L = -15 \text{ mm}$  まで進行したときの破壊開始条件であり、同様に  $L = 0 \text{ mm}$  まで進行したときの破壊開始条件を示したものが右図である。図はき裂が発生しない領域を白抜きにし、破壊形態およびその発生場所によって区分している。この区分を付表にまとめた。コアディスクング発生条件やその発生場所が岩盤応力によって限定されることが読み取れる。例えば、縦割れき裂が発生する場合は  $\bar{P}_y / \bar{P}_x \geq 2$  である。

Fig.8において、 $L = -15 \text{ mm}$  の場合、最も内側にはCB側からのディスクングの破壊開始条件であり、区域1の広い領域においてCB側からディスクングのき裂が発生することになる。一方、 $L = 0 \text{ mm}$  までOCが進行するとその領域は消滅する。このように、き裂の形態や発生場所が把握できれば作用していた岩盤応力の存在領域を特定することが可能であると考えられる。

これまで  $\bar{P}_z = 0.0$  を示したが、 $\bar{P}_z$  がわずかに存在すると  $\bar{\sigma}_t^{CB}$  による破壊開始条件は原点から離れる方向に移動して、破壊しない領域が大きくなる。一方、 $\bar{\sigma}_t^{OC}$  による破壊開始条件は原点に近づく方向に移動して破壊しない領域が狭くなり、 $\bar{\sigma}_t^{CB}$  とほぼ同じ形状を有するようになることが解析によって確かめられた。そこで、縦割れ破壊を考慮せずにコアディスクングに対してOCに伴う破壊開始条件を  $\bar{\sigma}_t^{OC}$  を用いて以下に検討する。

いま、 $\bar{P}_z = 0.5$  の場合の  $\bar{\sigma}_t^{OC}$  の破壊開始条件を Fig.9 に示す。 $\bar{\sigma}_t^{OC}$  はOC先端から5mm上部の壁面に発生し、 $\bar{\sigma}_t^{OC}$  は最大主応力が作用している面内に発生していることに注意された。図は  $\bar{P}_y = \bar{P}_x$  に対称であるので  $\bar{P}_y \geq \bar{P}_x$  についてのみ描いている。また、網かけ地域は縦割れ破壊の区域である。 $L$  が変化してもディスクングに対する破壊開始条件の直線の傾きはほぼ同様である。また、 $\bar{P}_z$  を変化させても同様な図を描くことができるので、 $L$  の異なるモデルにおけるコアディスクングの破壊開始条件  $f$  は  $\bar{P}_x, \bar{P}_y$  および  $\bar{P}_z$  を用いてつぎのように近似することができる。

$$f = \bar{P}_y + \alpha \bar{P}_x + \beta \bar{P}_z - \gamma, \bar{P}_y \geq \bar{P}_x \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\alpha$  および  $\beta$  はポアソン比の関数である。 $\bar{P}_z = 0.5$  の場合のポアソン比との  $\alpha$  および  $\beta$  の関係を示すと Fig.10 のようである。ポアソン比の増加とともに  $\alpha$  および  $\beta$  は単調増加している。 $\gamma$  は  $L$ 、ポアソン比および  $\bar{P}_z$  の関数である。 $\bar{P}_z = 0.5$  の場合、OCの進

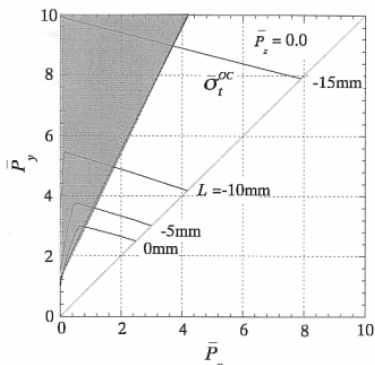


Fig.9 Criterion of the fracture initiation on the surface of OC for the induced stress  $\sigma_t^{OC}$  in the case of  $\bar{P}_y \geq \bar{P}_z \geq 0$ .

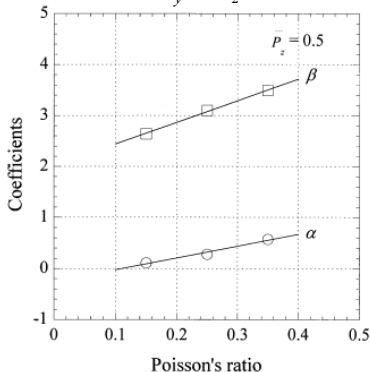


Fig.10 Relationship between constants  $\alpha, \beta$  and Poisson's ratio.

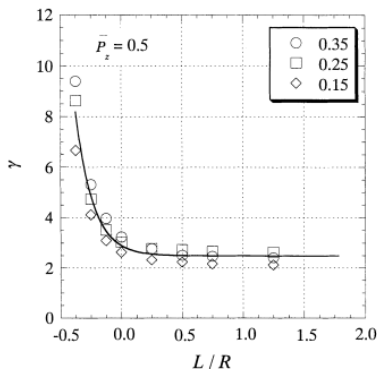


Fig.11 Relationship between  $L/R$  and  $k$ .

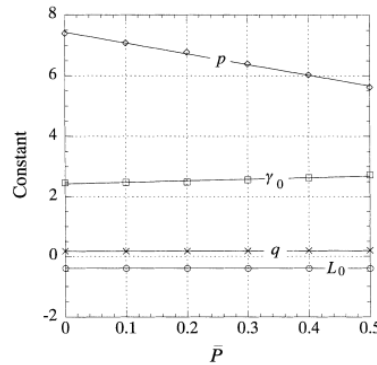


Fig.12 Relationship between constants  $\gamma_0, p, q, L_0$  and  $\bar{P}_z$ .

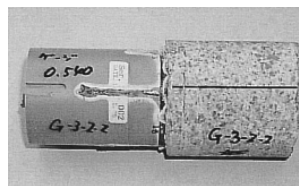


Fig.13 Photograph of a recovered core specimen with core diskung

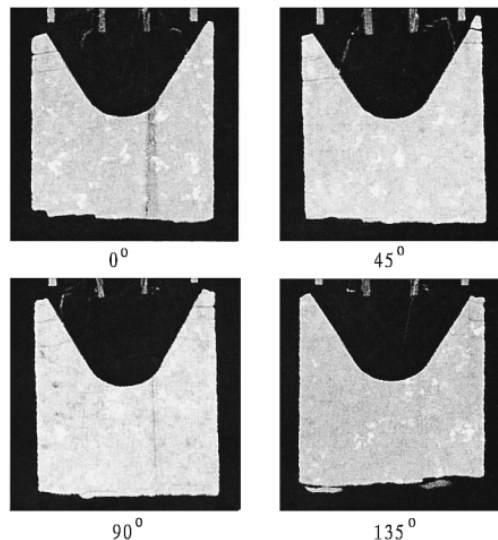


Fig.14 Images taken by X-ray CT scanner.

行を正規化した  $L (=L/R)$  と  $\gamma$  との関係を図.11 に示す。図はポアソン比を変化させた結果も併せて描いている。ポアソン比による差はほとんどみられず、1本の曲線で描くことができる。この近似曲線は  $L$  が進行すると  $\gamma$  の値は減少し、 $L \geq 0.5$  ではほぼ一定の値に収束している。この関係はつぎのように近似することができる。

$$\gamma(\bar{L}) = \gamma_0 + p \exp\{-q(\bar{L} - \bar{L}_0)\} \quad (7)$$

ここで、 $\gamma_0, p, q$  および  $\bar{L}_0$  は定数であり、 $\bar{P}_z$  の関数であり、 $\bar{P}_z = 0.5$  場合、 $\gamma_0 = 2.496, p = 5.686, q = 0.175, \bar{L}_0 = -0.4$  である。 $\bar{P}_z$  が異なる場合  $\gamma_0, q$  および  $\bar{L}_0$  は  $\bar{P}_z$  に対してほとんど変化しないが、 $\gamma_0$  および  $p$  は線形に変化している。これらの係数を  $\bar{P}_z$  に対して示すと Fig.12 のようである。

$L \geq 0.5$  のときの収束値は通常のコアディスクングの破壊開始条件を示している。 $\bar{P}_z = 0.0$  のときのコアディスクングの条件式を菅原ら<sup>2)</sup> および本郷と松木ら<sup>6)-8)</sup> が提案しているので、本研究での条件式と比較するとつぎのようである。

$$\begin{aligned} \bar{P}_y + \bar{P}_x &= 8.0 \quad (\text{菅原ら}) \\ \bar{P}_y + \bar{P}_x &= 9.93 \quad (\text{本郷・松木ら}) \\ \bar{P}_y + 0.28\bar{P}_x &= 2.48 \quad (\text{本論文}) \end{aligned}$$

上の条件式はコア内部の引張応力によりコアディスクングが発生し、完全にコアが切り離される条件であり、さらに、コアリングが  $L/R = 4$  のときの条件である。一方、本研究での条件式はコアリングによって生じた表面の破壊開始条件であるため、コアが完全に切り離されることは考慮していない。したがって、定数が他の提案式と比較して小さいことは妥当であると考えられる。

5. X線CTによる孔底のき裂分析と考察

4. に述べたように破壊形態およびその発生位置は岩盤応力状態に依存している。このため、回収コアからコアディスクングの破

壊形態や発生位置を評価することができれば、作用していた岩盤応力状態を推定することも可能であると考えられる。回収コアはモールドゲージが貼付されており、それを切断して観察するには多くの労力が必要となる。したがって、非破壊的に観察することが望ましい。

この問題を解決するために X 線 CT によって回収コア内の破壊の観察を試みた。Fig.13 に示すコアディスクングが発生した回収コアに対し、X 線 CT スキャナーを用いてコア軸に沿ってひずみ測定点を含む4つの縦断面の断層撮影を行った。得られた X 線 CT 画像の一例を図.14 に示す。画像の中央の白い部分が円錐孔底を有する岩石であり、周囲の黒い部分は空気であり、密度の高い部分を白、低い部分を黒で示している。画像上部にある4つの白い線はモールドゲージの塩ビパイプである。岩石部分にみられる黒い線が発生したき裂を表している。上部の両端には CB 壁面にほぼ垂直に発生したき裂をみることができる。き裂は自由面に垂直に発生すると考えられるのでこれらのき裂は CB 壁面から発生したと考えられる。それより下方のき裂は OC 壁面にほぼ垂直に発生しており、上から2番目のき裂の開口は OC 壁面側で広く、CB 壁面側で狭い、したがって、このき裂は OC 側から CB 側へ進展したと考えられる。このように上部のき裂の発生と下部のそれとは異なっていることは明らかである。

そこで、上から2番目の OC 壁面から発生したき裂に注目すると、その発生位置は円錐孔底先端から約 20 mm であった。解析によると OC 先端から約 5 mm の OC 壁面で引張応力の最大値が発生することが確かめられているので、このき裂は OC が -15 mm 付近を通過するときに発生したと考えられる。いま、 $\bar{P}_z = 0.0$  ポアソン比 0.25 と仮定すると、2番目のき裂の破壊開始条件は、式(6)および(7)を用いて、

$$\bar{P}_y + 0.28\bar{P}_x = 8.745 \quad (8)$$

と書ける。すなわち、Fig.15 における  $L = -15\text{mm}$  の実線  $\alpha$  で表さ

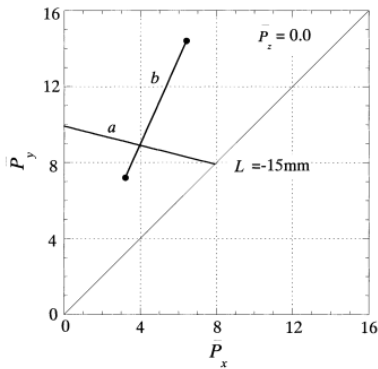


Fig.15 Estimation of rock stress prior to boring, based on the analysis of fracture by means of X-ray CT and the rock stress measured at neighboring location.

れる。

さて、コアディスキングが発生した位置から 0.5 ~ 1.0 m 奥部の岩盤応力測定結果は、ボーリング軸に垂直な面内の最大主応力は 72 MPa、最小主応力は 32 MPa であった<sup>17)</sup>。また、圧裂試験および直接引張試験で得られた岩石の引張強度  $S_t$  は 5 ~ 10 MPa であった<sup>18)</sup>。これらを考慮すると、 $\bar{P}_y$  は 7.2 ~ 14.4、 $\bar{P}_x$  は 3.2 ~ 6.4 となる。これらが存在する範囲を Fig.15 に示すと図の実線 *b* となる。このように、上記 2 つの実線の交線付近、すなわち、近傍で測定された岩盤応力をコアから得られた引張強度で正規化した最大および最小主応力は実線 *a* の近くに位置しており、近傍で測定された岩盤応力とコアディスキングの破壊開始条件式とに矛盾がないことがわかる。また、コアディスキングが発生した位置における岩盤応力が近傍の岩盤応力と等しいと仮定すると、その地点の引張強度は約 8 MPa と推定され、近傍ではディスキングが発生していないことを考慮すると、近傍における引張強度はそれより大きかったと考えられる。反対に、測定地点における引張強度が等しいとすると、コアディスキングが発生した位置における岩盤応力は近傍のそれに比較して大きかったと推察される。したがって、式 (6) および (7) で表現されるコアディスキングの破壊開始条件は妥当であると考えられる。

本論文では、コアディスキングの非破壊検出法として X 線 CT スキャナーを用いたが、上記のようにき裂の発生位置の評価に有効であることが確かめられた。また、X 線 CT 画像を用いると円錐孔底に貼付されたひずみゲージの位置にき裂が発生しているか

否かの判断も可能である。もし、回収コアにディスキングを示すようなき裂が存在する場合にはそのひずみ測定データを棄却する前に X 線 CT 画像によりひずみゲージの貼付位置のき裂の有無を調査し、き裂が確認できない場合は測定ひずみデータを岩盤応力の算定に採用することは可能であると考えられる。この問題については、今後詳しく検討する予定である。

## 6. 結 言

本研究では、円錐孔底ひずみ法におけるコアディスキングの発生条件を明らかにするために、回転体非軸対象荷重問題に対する境界要素法を用いて、オーバコアリングを行う場合のボアホール壁面の応力状態を解析した。次に、三次元岩盤応力下にオーバコアリングが進行する際のボアホール壁面の応力状態を解析し、孔底壁面からの破壊開始条件を提案した。また、コアディスキングの破壊形態とき裂発生位置について論じるとともに、コアディスキングが発生したコアに X 線 CT 法を適用し、その結果から推定された破壊開始条件と近傍での岩盤応力測定結果とを比較し、式 (6) および (7) で表現される破壊開始条件の妥当性を示した。

## 引 用 文 献

- 1) Jeager, J.C. and Cook, N.G.W. : J. Geophys. Res., Vol. 68, p. 1759-1765, (1963)
- 2) 菅原勝彦・亀岡美友・斉藤敏明・岡 行俊・平松良雄 : 日本鉱業会誌, Vol. 94, p. 797-803, (1978)
- 3) Natau, O., Borm, G. and Rockel, Th. : Rock at Great Depth, Maury and Fournaintraux (eds), Balkema, Rotterdam, Vol. 3, p. 1487-1490, (1990)
- 4) Dyke, C.G. : Rock at Great Depth, Maury and Fournaintraux (eds), Balkema, Rotterdam, Vol. 2, p. 1057-1064, (1990)
- 5) Haimson, B.C. : Rock Stress, Sugawara and Obara (eds), Balkema, Rotterdam, p. 35-42, (1997)
- 6) Matuki, K., Hongo, K. and Sakaguchi, K. : Rock Stress, Sugawara and Obara (eds), Balkema, Rotterdam, p. 343-348, (1997)
- 7) 本郷 公・松木浩二・坂口清敏 : 資源と素材, Vol. 113, p. 155-161, (1997)
- 8) 松木浩二・本郷 公・坂口清敏 : 資源と素材, Vol. 113, p. 317-324, (1997)
- 9) Song, I. & Haimson, B.C. : Proc. of 37th US Rock Mech Symp., p. 1173-1180, (1999)
- 10) 尾原祐三・姜聲承・瀬口貴光・佐藤 晃 : 資源と素材, Vol. 114, p. 875-880, (1997)
- 11) 坂口清敏・尾原祐三・中山智晴・菅原勝彦 : 資源と素材, Vol. 108, p. 455-460, (1992)
- 12) 尾原祐三・張鉉國・村上邦博・菅原勝彦 : 資源と素材, Vol. 111, p. 919-924, (1995)
- 13) 尾原祐三・今井啓太・中村直昭・菅原勝彦 : 資源と素材 : Vol. 113, p. 825-831, (1997)
- 14) Sugawara, K. and Obara, Y. : Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol. 36, No. 3, p. 307-322, (1999)
- 15) Mayr, M., Drexler, W. and Kuhn, G. : Int. J. Solids & Struct. Vol. 16, p. 863-871, (1980)
- 16) Kang, S.S., Ph.D. thesis, Chap.4 (2000)
- 17) 石黒幸文・上田 稔・西村 均・菅原勝彦 : 第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会 (2000)
- 18) 石黒幸文・上田 稔・西村 均・佐藤正俊 : 第 33 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会 (2000)