

ホローコアディスキングの破壊開始条件 に関する解析的研究*

尾原祐三¹ 姜聲佐² 濑口貴光³ 承晃⁴

A Criterion of Hollow Core Disking Initiation

by Yuzo OBARA¹, Seong Seung KANG², Takamitsu SEGUCHI² and Akira SATO¹

1. Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kurokami, Kumamoto 860-8555

2. Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

Most of the overcoring method for rock stress measurements use a large diameter drilling, what is called the overcoring, to relieve the stress around a pilot hole in which a transducer is installed. When the overcoring is advanced into hard rock subjected to high rock stress, a phenomenon of a core disk is sometimes observed. As the recovered cores which have a constant thickness have a center hole like a doughnut, this core disk is called a hollow core disk.

In this paper, simulating the overcoring under three dimensional initial stress state in which the axis of a principal stress coincides with that of a borehole, the hollow core disk initiated during the overcoring is discussed, based on the results calculated by a semi-analytical boundary element process for axisymmetric elasticity with arbitrary boundary conditions.

Firstly, the surface stress intensity coefficients in the tangential and rotational directions of the borehole are analyzed under the conditions in which each principal stress of initial stress is subjected independently. It is clarified that the coefficients is not changed beyond the advance of the overcoring more than the radius of the borehole. Secondly, using the surface stress intensity coefficients, the surface stresses of the borehole are analyzed under three dimensional initial stress state, then the fracture criterion which represents the fracture initiation due to the tensile stress induced by the overcoring is formulated as a function of the advance of the overcoring. Finally, analyzing the surface stress of the borehole induced by the overcoring, it is made clear that the location of the fracture initiation, the type of the fracture and the thickness of disk are dependent upon initial stress state.

KEY WORDS: Hollow Core Disking, Criterion of Fracture Initiation, Initial Stress, Tensile Stress, Disk Thickness, Boundary Element Method

1. 緒言

大きな地山応力が作用している地下深部の岩盤にボーリングを行うと、通常の連続コアが得られないで、コアが一定の厚さの円盤に割れるコアディスキング現象が観測されることがある。この現象の発生は、ボーリングの際に作用している地山応力に対応してコアの表面や内部に発生する引張応力が原因と考えられ、これまでに解析的、実験的研究がなされてきている¹⁾⁻⁵⁾。この中で、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地山応力が作用している場合を

取り扱った松木らの研究⁶⁾⁻⁸⁾によると、コアディスキ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キングが発生する可能性のあることを指摘している。また、ディスクの形状と地山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キングによる地山応力推定法を提案している。

上記のようなコアディスキングの他に、大口径のオーバコアリングを用いた応力解放法による岩盤応力測定においてコアディスキングが観測されることがある。すなわち、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、コアが一定厚さのドーナツ状ディスクに割れる現象である。この現象を前述した通常のコアディスキングと区別するためにホローコアディスキングと呼ぶことにする。この現象もオーバコアリングの際にコア表面や内部に発生する引張応力が原因と考えられるが、これに対する研究は菅原らによる実験的研究²⁾があるだけで、十分に検討されているとはいい難い。

* 1998年7月6日受付 9月11日受理

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. 学生会員 熊本大学大学院博士課程 自然科学研究科
3. 学生会員 熊本大学大学院修士課程 自然科学研究科

4. 正会員 博(工) 熊本大学助手 工学部環境システム工学科
〔著者連絡先〕 TEL & FAX 096-342-3686 (熊本大・環境システム)
E-mail: obara@gpo.kumamoto-u.ac.jp

キーワード: ホローコアディスキング、破壊開始条件、地山応力、引張応力、ディスク厚さ、境界要素法

そこで、本研究では、地山応力の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、小口径パイロット孔周りに大口径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、ホローコアディスキングの破壊開始条件について検討する。また、通常のコアディスキングに対するこれまでの研究では、ボーリング径に対して十分な長さを持つコアディスキングに対して検討されてきたが、ここではオーバコアリングの進行によって発生するホローコアディスキングのディスク厚さがボーリング孔の半径以下の場合について検討するとともに、地山応力が破壊開始位置、破壊形態およびディスク厚さに及ぼす影響について論じる。

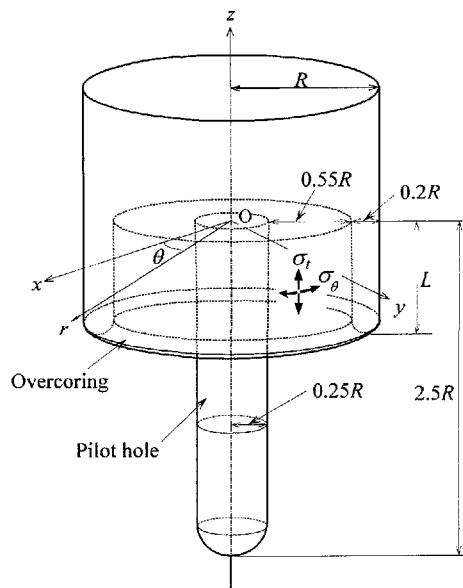


Fig. 1 Double boring model and surface stresses of a borehole.

2. 解析モデルと解析方法

これまでの研究によると、通常のコアディスキングの発生は、孔底の表面に発生する引張応力のみならず、コア芯部においてボーリング軸方向に発生する引張応力が原因で、それにはほぼ垂直な方向に破壊すると考えられている。本研究では、コアの芯部にパイロット孔が作孔されている場合に観測されるホローコアディスキングを対象としているため、コア中心部付近で発生する破壊はパイロット孔壁面の引張応力によって分析することにする。以下では、ホローコアディスキングは、オーバコアリング途中でパイロット孔を含めたボーリング孔底の壁面に発生する引張応力に起因すると仮定して検討を行う。また、地山応力が1軸的であるときに発生すると考えられているコアを縦に二分するような破壊、いわゆる縦割れ破壊の発生についても検討する。ただし、本研究では、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。

まず、岩盤を線形弾性体と仮定し、それに作用している3次元地山応力の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に示すような二重ボーリングモデルを考える。オーバコアリングが行われる前の孔底中心に原点をとり、直角座標系(x, y, z)および円柱座標系(r, θ, z)を定める。二重ボーリングモデルは、半径 R のボーリング孔の中心に直径 $0.25R$ 、深さ $2.5R$ のパイロット孔を有し、外半径 R 、肉厚 $0.2R$ のオーバコアリングが $-z$ 方向に深さ L まで行われる。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。

二重ボーリングモデルは軸対称であり、応力状態は非軸対称なので、解析には回転体非軸対称荷重問題としての境界要素法を用いた⁹⁾。解析モデルを例示するとFig. 2のようであり、長さ $52.5R$ のボーリング孔の壁面の半分をモデル化している。壁面上に示された黒丸が境界要素の節点であり、孔底付近には要素長約 $0.0125R$ の線形要素および2次要素を配している。また、解析モデルは、 $\bar{L} = L/R = 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1.0, 1.125, 1.25$ の9つを用意してオーバコアリングの進行を考慮し

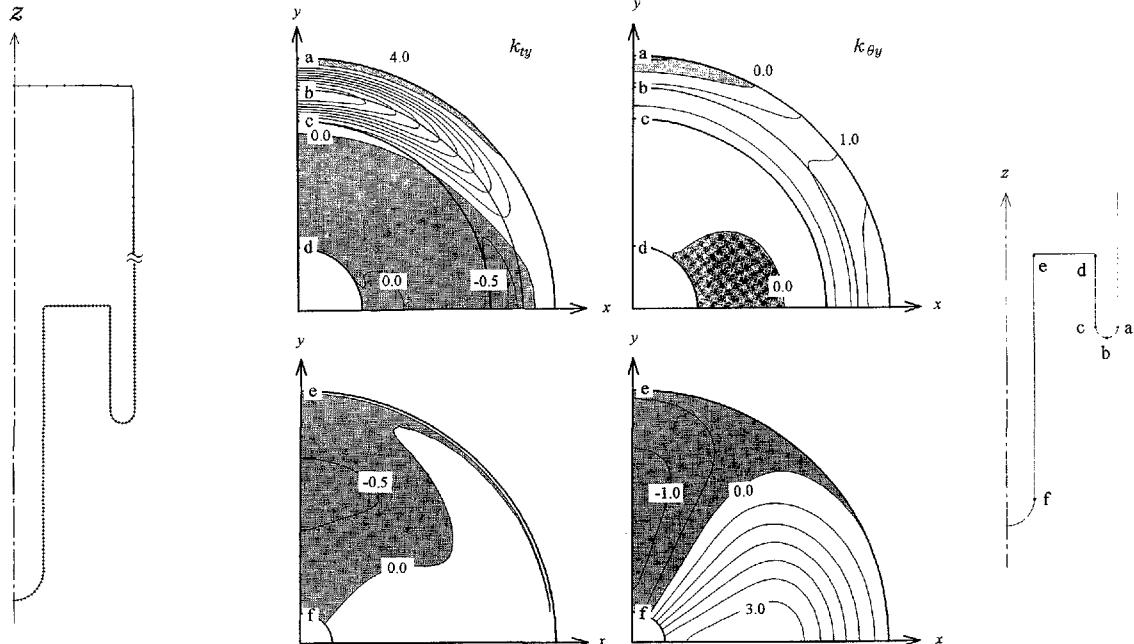


Fig. 2 Boundary element mesh.

Fig. 3 Contour of the surface stress intensity coefficients k_{ty} and $k_{\theta y}$ on the borehole bottom surface in the case of $\bar{L} = 0.75$.

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_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、解析に用いたポアソン比は 0.2 とした。

3. で述べる壁面応力係数の解析では、境界要素法解析で得られた各節点の変位を用いて、孔底面上に円周方向 5 度おきに配置した仮想節点の変位を求め、それらで構成される三角形を平面応力状態の有限要素と見なしして要素の応力を求め、さらに仮想節点を含む要素の応力の面積平均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、このうちホローコアディスキングの原因と考えられる接線方向応力 σ_t および縦割れ破壊の原因と考えられる回転方向応力 σ_θ に着目して分析を行う。

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 σ_t および σ_θ を解析し、壁面応力係数を求めた。

ボーリング孔軸は地山応力の 1 つの主方向と一致しているので、 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、

$$\begin{aligned} k_{tx} &= \frac{\sigma_t}{P_x}, \quad k_{ty} = \frac{\sigma_t}{P_y}, \quad k_{tz} = \frac{\sigma_t}{P_z} \\ k_{\theta x} &= \frac{\sigma_\theta}{P_x}, \quad k_{\theta y} = \frac{\sigma_\theta}{P_y}, \quad k_{\theta z} = \frac{\sigma_\theta}{P_z} \end{aligned} \quad \dots \quad (1)$$

と定義する。壁面応力係数は、正ならば与えた応力と同符号を持つ応力が壁面に発生し、負ならば与えた応力と異符号を持つ応力が発生することを意味している。なお、問題としている二重ボーリングモデルは軸対称なので、 k_{ty} および $k_{\theta y}$ を θ 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、 $P_y > P_x$ の場合について検討する。

一例として、 $\bar{L} = 0.75$ 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。図はボーリング壁面を円弧状に展開した図の 1/4 を描いており、図中の太線の円に付いている a ~ f は付図に示す同符号の位置に対応し、 k が負の領域に薄墨をつけてある。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の図は、それぞれオーバコアリングの壁面およびパイロット孔の壁面の展開図であり、以下、オーバコ

アリングを OC、パイロット孔を PH と呼ぶことにする。

k_{ty} についてみると、載荷方向に垂直な面、すなわち、xz 断面において OC 先端の内側に負の応力がわずかに発生している。また、yz 断面の OC 先端には大きな正の応力の集中がみられる。一方、PH 壁面の xz 断面に正の応力が、yz 断面に負の応力が発生している。つぎに、 $k_{\theta y}$ についてみると、yz 断面において OC 先端に正の応力が、PH 壁面には負の応力が発生している。一方、xz 断面では正の応力が分布している。これらの結果は \bar{L} が異なる他のモデルにおいても同様であった。いずれの場合も、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る。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、コアディスキ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。

同様なモデルにおいて、xz 断面およびyz 断面における k_{ty} および $k_{\theta y}$ の分布を示すと、Fig. 4 および Fig. 5 のようである。左図が xz 断面、右図がyz 断面である。壁面の空洞側と岩盤側に描かれた曲線が壁面応力係数を示しており、壁面を零としてモデルの空洞側に負、岩盤側に正の値を描いている。 k_{ty} に注目すると、yz 断面では OC 先端に 4.4 の正の応力集中が見られる。また、PH 壁面には負の応力が発生しており、その最大を示す位置は OC 先端より深くなっている。一方、 $k_{\theta y}$ について見ると、yz 面においては、PH 面および OC 面外側に負の応力が発生している。つぎに、 k_{tx} および $k_{\theta z}$ の分布を示すと Fig. 6 のようである。左図が k_{tx} 、右図が $k_{\theta z}$ を表す。これらは軸対称分布を示すので、yz 面を代表面としてこれらの分布を描いている。 k_{tx} では OC 先端の内側に負の応力の集中が見られ、PH 壁面には正の応力が分布している。また、 $k_{\theta z}$ においては、OC 先端の内側と PH 壁面に負の分布が見られる。

さて、OC が進行するとき、孔底の応力変化に最も影響を与える地山応力成分はボーリング軸に垂直な面内の成分であると考えられるので、 P_y のみが作用しているときの壁面応力係数の変化について検討した。 \bar{L} が異なる場合の Fig. 4 および 5 と同様な分析によると、OC 先端の応力集中は大きく、その変化は少ない。このため、OC 壁面での壁面応力係数の分布は、OC の進行にかかわらずほぼ相似形となる。一方、PH 壁面での応力は OC 壁面のそれに比較して OC の進行の影響を受けやすいと考えられる。

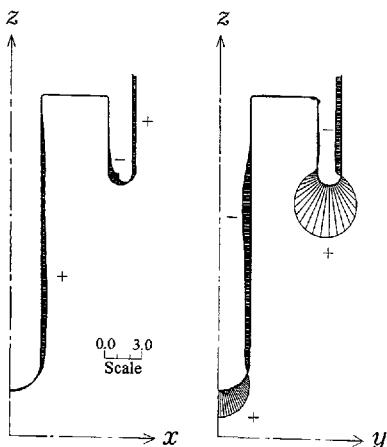


Fig. 4 Distribution of the surface stress intensity coefficient k_{ty} on the xz and yz cross sections in the case of $L = 0.75$.

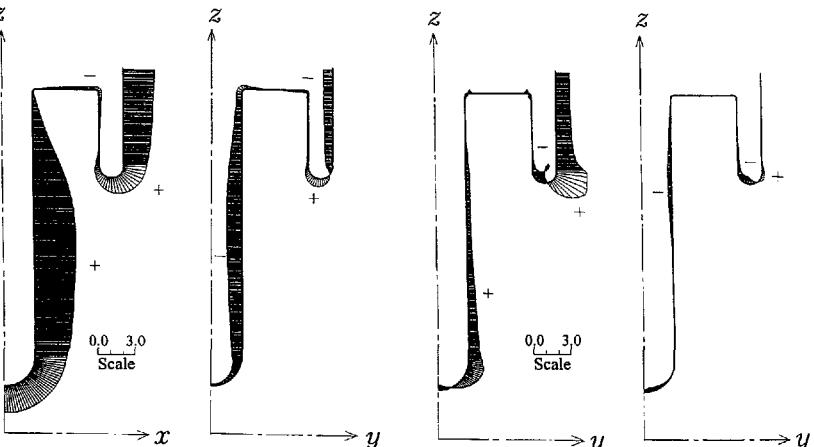


Fig. 5 Distribution of the surface stress intensity coefficient $k_{\theta y}$ on the xz and yz cross sections in the case of $L = 0.75$.

Fig. 6 Distribution of the surface stress intensity coefficient k_{tx} and $k_{\theta z}$ on the yz cross section in the case of $L = 0.75$.

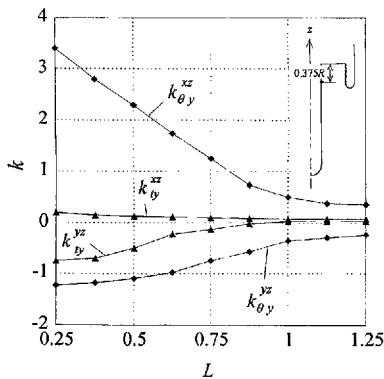


Fig. 7 Change in the surface stress intensity coefficients at the point on the surface of the pilot hole at the advance of the overcoring.

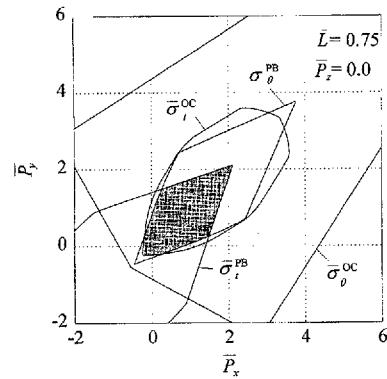


Fig. 8 Criterion of the fracture initiation in the case of $\bar{L} = 0.75$ and $\bar{P}_z = 0.0$.

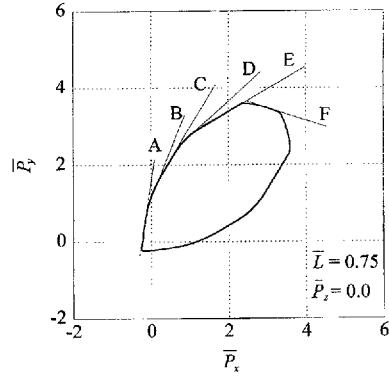


Fig. 9 An approximation of the criterion by means of the fracture functions at representative points on the borehole bottom surface.

そこで、OC が 0.25 ~ 1.25 と進行するとき PH 壁面の口元から $-z$ 方向へ $0.375 R$ の距離にある点の壁面応力係数の変化に注目した。この結果を示すと Fig. 7 のようである。図中の上添字 yz および xz は、 yz および xz 断面における壁面応力係数を表す。壁面応力係数は \bar{L} が 1.0 を超えるとその変化小さくなり、 $\bar{L} = 1.25$ ではある値に収束していると見なすことができる。以下では、 $\bar{L} < 1.0$ のモデルを用いて検討を進める。

4. 3 次元地山応力下のホローコアディスキングの破壊開始条件

岩盤の引張強度を S_t ($S_t \geq 0$) 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 次元地山応力下において、壁面に発生する接線方向応力 σ_t および回転方向応力 σ_θ は、 S_t で正規化した応力

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

および壁面応力係数を用いて

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

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

と表される。

壁面応力が岩盤の引張強度に達したとき破壊が開始し、ホローコアディスキ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、

$$\bar{\sigma}_t = -1 \text{ あるいは } \bar{\sigma}_\theta = -1 \quad (5)$$

と書ける。

$\bar{L} = 0.75$ 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. 8 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、孔底壁面、すなわち OC 壁面および PH 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 PH はオーバコアリング壁面およびパイロット孔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したことを表す。それぞれの壁面での破壊開始条件の最も内側（図中の網掛け領域）に地山応力が存在する場合には孔底での破壊は発生しない。一方、その外側に地山応力がある場合に破壊が生じることになる。

さて、孔底壁面におけるすべての点での応力によって求めた Fig. 8 のそれぞれの実線は、孔底壁面上の数点の破壊開始条件で

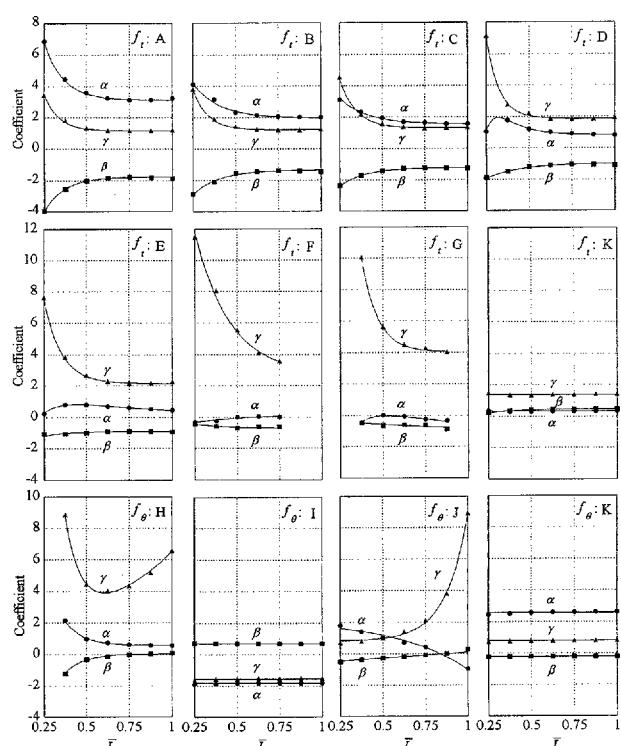


Fig. 10 Change in the coefficients α , β , γ of the fracture function at representative points on the borehole bottom surface at the advance of the overcoring.

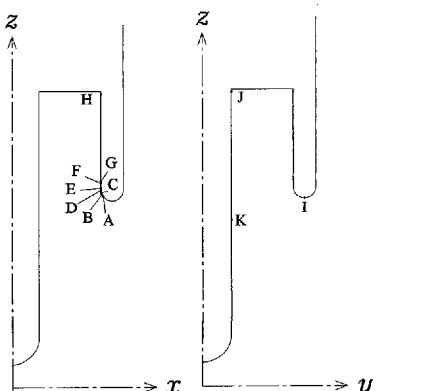


Fig. 11 Representative points on the borehole bottom surface on the xx and yz cross sections.

近似することができる。例えば Fig. 9 に示すように、 σ_t^{OC} は Fig. 11 に示す xz 平面の OC 壁面の A ~ F 点において求めた破壊開始条件により近似される。そこで、

$$\alpha = -\frac{k_{tx}}{k_{ty}}, \beta = -\frac{k_{tz}}{k_{ty}}, \gamma = -\frac{1}{k_{ty}}$$

とおき、式(3)および(5)を用いると、A～F点における σ_t に対する破壊開始条件を表す破壊閾値 f_t は、

と表すことができる。また、同じ点における σ_θ に関しても同様に、

を得る。ここで、 α 、 β および γ は $\bar{L} = L/R$ の関数である。

\bar{L} が異なる場合の A ~ F 点における破壊関数の係数を求める
と Fig. 10 のようである。図中のプロットは、Fig. 11 に示すよ
うな孔底の A ~ K の各点における α , β , γ の解析値であり、
実線はそれらを指數関数で近似したものである。また、最下段の
図は $f_\theta(\bar{L})$ に関するものであり、上 2 段のそれは $f_t(\bar{L})$ に関する
ものである。なお、 $\bar{L} = 0.25$ あるいは 1.0 においてデータがプロッ
トされていないものは、その点での破壊関数は存在しないことを
示している。これらの関数を用いるとホローカアディスキングあ
るいは縦割れ破壊の破壊開始を検討することができる。

以上要するに、孔底壁面における破壊開始条件は、孔底壁面上の特定の点の破壊開始条件を用いて近似できることを示すとともに、それらの点における破壊関数は式(6)および(7)により表現できることを明らかにした。

5. オーバコアリングの進行効果

OC が進行する際に孔底で履歴する引張応力を分析した。一例として、ボーリング軸に垂直な面内の地山応力が静水圧的に作用し、ボーリング軸方向から作用する地山応力 \bar{P}_z が変化するとき、孔底の代表点を履歴する破壊関数 $f(\bar{L})$ の値を示すと Fig. 12 のようである。図中にアルファベットで示した代表点の位置は Fig. 11 に示す。図の横軸は \bar{L} であり、図中の実線は $f_i(\bar{L})$ 、破線が $f_\theta(\bar{L})$ に関する破壊関数を示す。また、破壊開始条件は $f(\bar{L}) = 0$

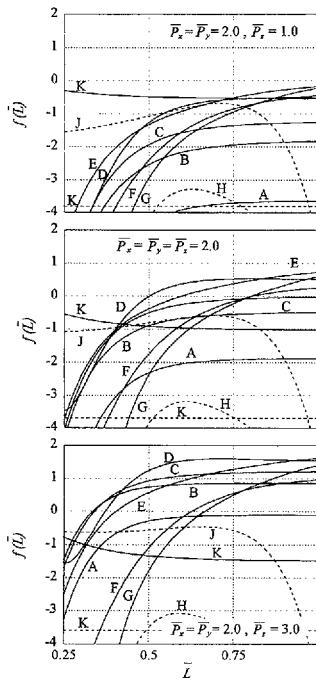


Fig.12

Change in the values of the fracture function at the representative points on the borehole bottom surface at the advance of the overcoring.

であり、 $f(\bar{L}) < 0$ の場合破壊は発生しない。

\overline{P}_z が増加するとともに $f(\overline{L})$ が増大している。また、OC の進行がわずかなとき、PH 壁面の K 点で破壊開始条件近くの応力が発生するが、OC がさらに進行すると OC 先端部の引張応力が増加している。 $\overline{P}_z = 0$ のとき、それらの応力状態は $f(\overline{L}) = 0$ を超過することはない。したがって、OC 途中で破壊は発生しない。しかし、 \overline{P}_z が増加すると OC 先端部に発生する引張応力が破壊開始条件を満足し、 $\overline{P}_z = 2.0$ の場合 $\overline{L} = 0.5$ のとき D 点から、 $\overline{P}_z = 3.0$ の場合 $\overline{L} = 0.33$ のとき B 点から破壊が開始し、ボーリング軸にはほぼ垂直な破壊が発生すると考えられる。

一旦ボーリング軸に垂直な破壊が発生すると孔底の応力状態はOCが行われる前の初期状態なる。この状態でさらにOCが進行すると、前の破壊発生位置から同様の \bar{L} のとき再びボーリング軸に垂直に破壊が発生すると考えられる。OCの進行とともに繰り返し発生するこのような破壊が、一定厚さ w のディスクを持つホローコアディスキングの原因であると考えられる。したがって、Fig.12の例におけるディスク厚さ $\bar{w} = w/R$ は、 $\bar{P}_z = 2.0$ の場合0.5、 $\bar{P}_z = 3.0$ の場合0.33となり、ボーリング軸に垂直な面内の地山応力が静水圧状態のとき \bar{P}_z が大きくなると、破壊開始位置はOC先端に近づくとともに、ディスク厚さは小さくなる。

6. 破壊形態とディスク厚さに関する考察

5. 述べたように、OC の進行に伴って孔底で履歴する引張応力を分析することによって破壊開始位置、破壊形態およびディスク厚さを分析することが可能である。

$\bar{P}_z = 0.0, 1.0, 2.0$ の場合、OC が $\bar{L} = 0.25$ から 1.0 へ進行するとき、OC 壁面および PH 壁面の発生場所と接線方向応力および回転方向応力の発生応力による破壊開始条件を横軸に \bar{P}_z 、縦軸に \bar{P}_y をとって示すと Fig. 13 のようである。図中の実線および破線は OC 壁面および PH 壁面に発生する接線方向応力によるものであり、一点鎖線は PH 壁面に発生する回転方向応力によるものである。また、図中の数値は \bar{L} を表す。ただし、PH 壁面で発生する応力の破壊発生条件は $\bar{L} = 0.25$ のときのみのそれを描いている。これは OC が進行しても、破線で示される条件は内側に僅かに移動するだけで、また、一点鎖線で示されるそれは地山応力が大きいときに僅かに内側に移動するだけではほとんど変化が見られないためである。

$P_z = 1.0$ の場合、破壊形態は地山応力に依存し、破壊が発生しない領域Vを除いて4つの領域に区分できる。すなわち、領域I～IVである。まず、領域Iは $w < 0.25$ のディスクを持つホローコアディスキングと縦割れ破壊が同時に発生する領域であり、その発生位置によってさらに細分され、OC壁面より発生する領域が I_2 、PH壁面より発生する領域が I_3 、どちらかの面で発生す

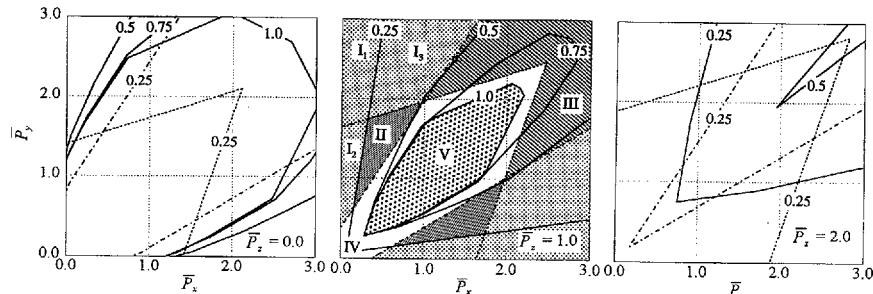


Fig.13 Criterion of the fracture initiation at the advance of the overcoring and the region of initial stress divided by means of type of the fracture : numerals in the figure represent \bar{L}

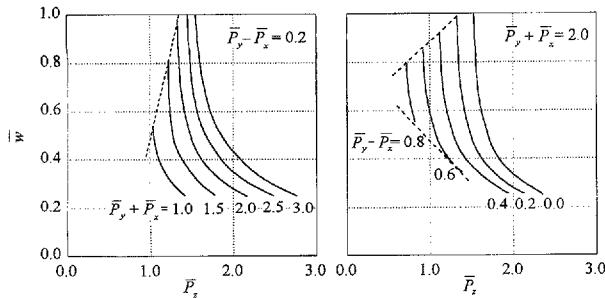


Fig.14 Disk thickness dependent upon initial stress in the region IV.

る領域が I_1 となる。なお、縦割れ破壊の発生位置はすべてPH壁面からである。つぎに、地山応力が領域 II に存在する場合、ホローコアディスキングを伴わず縦割れ破壊のみが発生するか、あるいは縦割れ破壊と領域で観測される w に比較して厚めのディスクを持つホローコアディスキングが同時に発生する。このように地山応力が1軸的な状態のときに観測される縦割れ破壊は一律ではなく、それに伴って発生するホローコアディスキングのディスク厚さが異なっている。したがって、回収したコアの詳細な分析によって地山応力の存在する領域を特定できる可能性があると考えられる。つぎに、領域 III はOCの早い段階でPH壁面からのホローコアディスキングが発生する領域であり、薄いディスクが観測されると考えられる。最後に、領域 IV に地山応力が存在する場合、ホローコアディスキングはすべてOC壁面から開始するが、破壊開始条件が L によって異なるために地山応力に依存してディスク厚さが変化する。したがって、ディスク厚さによってある程度地山応力を推定することも可能であると考えられる。

$P_z = 0.0$ の場合、実線で示されるOC壁面の接線方向応力による破壊開始条件は広がり、領域 I_1 、 I_2 および IV が消滅している。また、破壊の発生しない領域 V が大きくなり、破線で示されるPH壁面での破壊開始条件で切られている。したがって、コアディスキングが発生した場合、それはすべてPH壁面から開始した薄いディスクが観測される。一方、 $P_z = 2.0$ の場合、領域 V が消滅するとともに破線で示されるPH壁面の接線方向応力による破壊開始条件が広がり、領域 IV が大きくなっていることがわかる。

最後に、地山応力が領域 IV に存在する場合、5. で述べた方法によりディスク厚さを解析した。その結果の一例を示すとFig. 14のようである。左図はボーリング軸に垂直な面内の差応力が一定の場合を、右図は面内の平均応力が一定の場合を示している。両図の横軸はボーリング軸方向の主応力 \bar{P}_z であり、縦軸はディスク厚さ w である。また、図中の破線は領域 IV の境界を示しており、実線がディスク厚さを表す。なお、 $w < 0.25$ に解析値がないのは、 $L < 0.25$ の解析を実施していないためである。

面内の差応力が一定の場合、 w は \bar{P}_z に対して反比例し、 \bar{P}_z が増加するとともに w は減少する。また、減少の程度は面内の平均応力によってあまり変化せず、平均応力が大きくなると発生するディスク厚さの範囲は大きくなる。 \bar{P}_z が一定の場合、面内の平均応力が大きいほど厚いディスクが観測されることになる。一方、面内の平均応力が一定の場合も w は \bar{P}_z に対して反比例しており、面内の差応力が小さいと観測されるディスク厚さの範囲は広くなる。また、 \bar{P}_z が一定の場合、面内の差応力が小さいほどディスクは厚くなると予想される。

このように、地山応力によって破壊発生場所および破壊形態が異なり、発生するディスク厚さは、ボーリング軸方向の応力とともに、それに垂直な面内の平均応力および差応力に関係していることが明らかとなった。しかし、地山応力が存在する領域の特定には、破壊発生位置、破壊形態およびディスク厚さの情報だけでは不充分であり、これららの他に通常のコアディスキングで観測される鞍型破壊面のような破壊面形状などの情報を考慮する必要があると考えられる。破壊面形状の地山応力依存性の解明のためににはコア内の亀裂の進展を考慮した数値解析が不可欠と考えられるが、これは今後の課題である。

7. 結 言

本研究は、大きな地山応力が作用している岩盤に作孔された小口径パイロット孔周囲に大口径オーバコアリングが行われるときに観測されるホローコアディスキングについて検討したものである。

まず、二重ボーリングモデルを用いて境界要素法解析を実施し、孔底壁面に発生する引張応力の分析のための壁面応力係数を求めた。この結果、壁面応力係数の最大値および最小値を示す場所は、ボーリング軸に垂直な面内の主方向を含む断面に存在することを明らかにするとともに、オーバコアリングがボーリング径以上進行すると壁面応力係数はほとんど変化しないことを示した。つぎに、3次元地山応力下における孔底壁面に発生する接線方向応力および回転方向応力に関する破壊開始条件を求め、それらは孔底の数個の代表点の破壊開始条件で近似できることを示した。また、それらをオーバコアリング進行の関数として定式化した。つぎに、破壊開始条件を用いて、オーバコアリングの進行に伴う破壊開始位置、破壊形態およびディスク厚さについて分析した。この結果、地山応力によってそれらが異なることを明らかにするとともに、破壊開始条件を満たす地山応力の存在領域を4つに区分した。また、ディスク厚さは、ボーリング軸方向の応力の増加とともに薄くなること、ボーリング軸に垂直な面内の平均応力および差応力に関係していることなどを明らかにした。最後に、地山応力の特定には、破壊発生位置、破壊形態およびディスク厚さの情報の他に、通常のコアディスキングで観測される鞍型破壊面のような破壊面形状などの情報を考慮する必要があると論じた。

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・斎藤敏明・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) Mayr, M., Drexler, W. and Kuhn, G. : Int. J. Solids and Struct. Vol. 16, p. 863–871, (1980)