

# 異方性岩盤に建設される地下空洞の 力学的挙動と形状

長谷川

明\*

## Mechanical Behavior and the Shape of Underground Space constructed in anisotropic bedrock

Akira HASEGAWA

### Abstract

An underground space to store is studied on the shape and the mechanical behavior after excavation. The shape of underground space must be determined under the conditions to keep the functions, to be safe and to be economical. In the case of underground space for storing, it is required that the space has the maximum volume under some conditions. If we assume that the space has such form as a long straight tunnel which section is uniform along the longitudinal direction, the section area of the space is required to be maximized under some constraints, taking the purpose of the space into account. In this paper, taking just only mechanical conditions after the excavation into account, we study the desirable shape of underground space constructed in isotropic or anisotropic bedrock. Then, a fundamental investigation of the relationship between the shape and the mechanical behavior is described.

### 1. はじめに

地下空間の利用の目的は、原油等の貯蔵施設、地下鉄等の交通施設、発電所等のエネルギー施設、上下水道等の処理施設等の広範囲にわたっている。このように多岐にわたって地下空間が利用される理由には、その建設に優れた掘削技術と多額の建設費を必要とするにも関わらず、地上空間に比べ安全性が高いこと、地上構造物と共存できること、あるいは周辺景観への影響が少ないことなどがあげられる。図-1は日本で建設された石油備蓄のための地下空洞の断面である。本論はこのような貯蔵を目的として建設される地下空洞を取り上げ、この空洞の掘削後の力学的挙動が空洞の形状や岩盤の性質によってどのような影響を受けるのかを考察したもの

である。

このような地下空洞は、空洞を掘削することにより、周辺地盤に対して応力や変位などの力学的変化を与えるが、その影響はできるだけ少ないように建設することが安全のために期待されると考えられる。一方、貯蔵の目的を満足させるためには、地下空洞の容積をできるだけ大きくしたい要求があり、トンネルのようなかまぼこ形をした空洞の場合には、容積の拡大は断

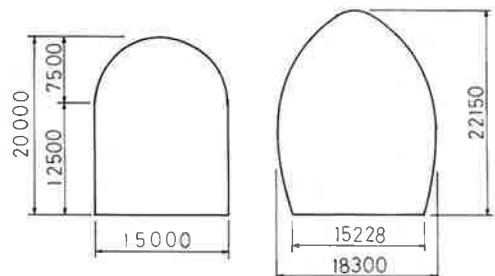


図-1 地下空洞の例（寸法はmm）

平成 5 年 10 月 15 日受理

\* 土木工学科助教授  
構造工学研究所（併任）

面積の拡大あるいは空洞の長さの増大を意味することとなる。したがって、容積の拡大を断面積を広げることによって行うものとする、貯蔵を目的とした地下空洞では応力や変位などの力学的な変化が少ない条件のもとで、断面積を最大化したいという問題が発生する。この問題を検討するためには空洞を掘削した後の空洞周辺の変位や応力の状況が、岩盤の性質と空洞の形とどのような関係にあるのかを調べておく必要がある。

本論は、このような見地から、貯蔵を目的とする地下空洞について、その空洞の形状と掘削後の力学的挙動の関係を異方性弾性岩盤について考察する。また、破壊条件に基づく周辺応力の評価方法を提案し、この評価に基づくときどのような形状が望ましいかを検討するものである。

なお、地下空洞の掘削に伴う力学的挙動の解析には、岩盤の節理、段階的な掘削等、多数の項目を考慮する必要があるが、本論では岩盤を単純化し、岩盤は弾性体であるものとして解析している。また、初期地圧は解析領域の自重および土被り圧によって発生しているものとして取り扱っている。

## 2. 解析手法

解析は有限要素法を用いて行った。初期地圧は解析領域の自重および土被り圧によって発生しているものとして取り扱うものとし、つぎのような2回の有限要素解析を行って掘削後の変位、応力を求めた。

- 1) 掘削開始前の状態で、解析領域の自重と領域上部の土被り圧による初期応力解析を行う
- 2) 掘削により空洞部分の応力が解放されるので、その影響を上記1)で求めた空洞周辺部分の応力を空洞周辺に逆方向に作用させ、周辺部応力が0となるようにし解析する。

こうして求められた変位は、自重による初期変位を除いた空洞を掘削することによって発生する変位であり、応力は初期の応力と空洞掘削によって変化した応力の合成応力が計算される。

なお、実際の空洞掘削は断面を数個に区分し掘削するが、この解析では簡単にするため1回で全断面が掘削されるものと考えている。

### 2.1 異方性の取扱い

直交異方性弾性地盤の平面ひずみ状態における応力とひずみの関係は、1) 地盤を層状とし、その面内では等方性を有すると考え、2) セン断弾性係数は方向に無関係であると仮定すれば<sup>1)</sup>

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [D_0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、

$$[D_0] = \frac{E_H}{(1+\nu_{HH})(n-n\nu_{HH}-2\nu_{HV}^2)} \times \begin{bmatrix} n-\nu_{HV}^2 & \nu_{HV}(1+\nu_{HH}) & 0 \\ \nu(1+\nu_{HH}) & 1-\nu_{HH}^2 & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$k = \frac{(1+\nu_{HH})(n-n\nu_{HH}-2\nu_{HV}^2)}{1+n+2\nu_{HV}}$$

また、

$E_H$ : 水平方向の弾性係数

$E_V$ : 鉛直方向の弾性係数

$n = E_H/E_V$

$\nu_{HH}$ : 水平ひずみに対する水平ひずみによるポアソン比

$\nu_{HV}$ : 鉛直ひずみに対する水平ひずみによるポアソン比

と表されている。

さらに、図-2のように弾性主軸が成層面と $\beta$ だけ傾いているときには、

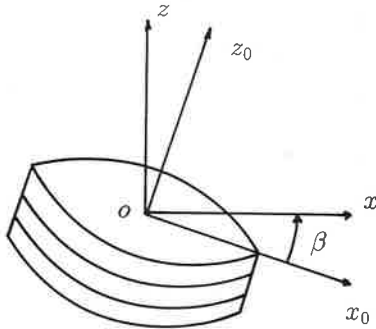


図-2 岩盤の層の傾き

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [T][D_0][T]^t \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_z \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2\sin \beta \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2\sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & -\sin \beta \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

であり,  $[T]^t$  は  $[T]$  の転置行列である。

このような応力ひずみ関係式を用いると, 岩盤の異方性は, 岩盤の傾き  $\beta$ , 水平方向の弾性係数  $E_H$  と鉛直方向の弾性係数  $E_V$  の比  $n = (E_H/E_V)$  およびポアソン比によって表現されることとなる。

## 2.2 計算モデル

図-3 は使用した計算モデルで, 空洞は地下 150 m を中心とする断面積 225 m<sup>2</sup> の 2 つの異なる偏平率の半楕円とした。空洞面積は常に一定で 2 つの偏平率  $b_1/a$ ,  $b_2/a$  を変えることによって様々な形状を発生できるものと考えた。これを, 図-4 にしめすように空洞をおよそ中心にして, 地表面から 250 m の深さまで, 水平方向は左右 100 m の領域を有限要素で分割した。節点数は 313 個で, 要素数は空洞部分を含め三角形要素 64 四角形要素 240 の合わせて 304 個である。周辺の境界条件は, 左右の側面は水平方向の拘束, 底面は鉛直方向の拘束地表面は自

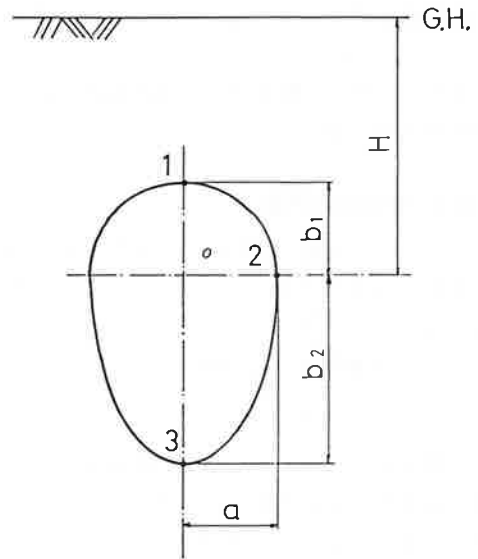


図-3 解析モデル

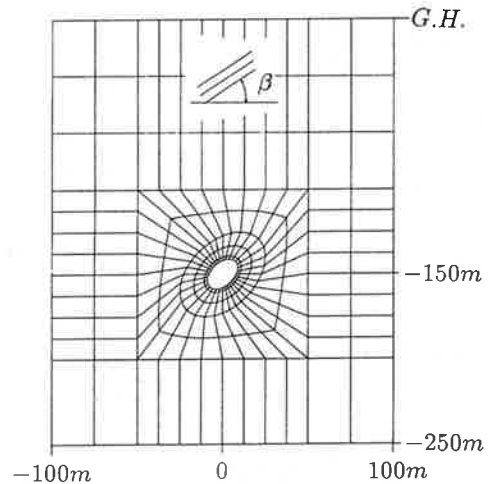


図-4 要素分割の例

由としている。

有限要素は空洞の偏平率と傾き  $\alpha$  に対応して自動的に分割できるよう, 本計算用に要素自動分割プログラムを開発して使用した。

岩盤は, 単位体積重量  $\gamma = 2.6 \text{ tf/m}^3$  と考え, 異方性解析に使われる弾性係数などは, 水平方向の弾性係数  $E_H = 1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ , 水平ひずみに対する水平ひずみによるポアソン比  $\nu_{HH} =$

0.3, 鉛直ひずみに対する水平ひずみによすポアソン比  $\nu_{HV}=0$  とした<sup>2)</sup>。

また、一軸せん断強さ  $S_s=400 \text{ kgf/cm}^2$ , 内部摩擦角  $\phi=40^\circ$  としている<sup>3)</sup>。

### 2.3 安全性の評価

ここでは、地盤内に掘削される空洞の周辺応力状態を評価するために図-5に示す破壊条件を仮定し、せん断応力が  $\tau$  が一軸せん断強さ  $S_s$ , 内部摩擦角  $\phi$  および直応力  $\sigma$  を使って、

$$\tau > S_s + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

と表現されるとき、つまり図の破壊線の上側領域で破壊するものと考えた。そこで、この破壊条件に従って危険性を示すパラメータとして、図-5の  $O'$  点からモールの応力円への接線が  $\sigma$  軸となす勾配、すなわち

$$\begin{aligned} \tan \phi' &= \frac{PQ}{O'P} \\ &= \frac{\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right|}{\sqrt{\left( S_s \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2}} \\ &= \frac{\left| \sigma_1 - \sigma_3 \right|}{2\sqrt{S_s^2 \cot^2 \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) S_s \cot \phi + \sigma_1 \sigma_3}} \quad (6) \end{aligned}$$

を求め、これを破壊線の勾配  $\tan \phi$  と比較することで、

$$S = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi} > 1 \quad (7)$$

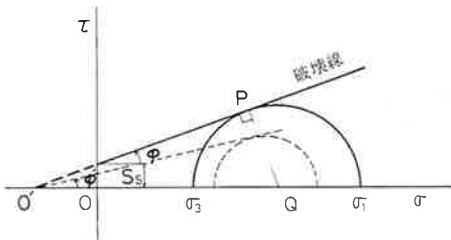


図-5 破壊条件の仮定  
 $S_s$ : 一軸せん断強さ,  $\phi$ : 内部摩擦角  
 $\sigma_1, \sigma_3$ : 主応力

の時破壊することとなるため、この左辺のパラメータ  $S$  を危険性を表現する数値と考え危険度と呼ぶこととし、これを使って空洞周囲の応力状態を評価することとした。ここで、 $\sigma_1, \sigma_3$  は主応力であり、中間主応力の影響は無視している。

## 3. 計算結果と考察

前章で述べた解析によって得られた結果とその考察について述べる。

### 3.1 変位

空洞掘削後の変位について述べる。空洞が円断面の場合の空洞周辺部の変位が、弾性係数比  $n$  によってどのように変化するかを図-6に示す。図は空洞周辺変位を拡大して描いているが、天端および底盤の鉛直変位が大きい値となっていることがわかる。これら2つの変位は  $n$  が大きい場合には小さな変位となっている。これに対し、側壁中央水平変位は逆に  $n$  が大きいと大きい値となっている。 $n$  が大きいとは、鉛直方向の弾性係数により水平方向の弾性係数が大きいことを意味し、水平方向への応力分散が大きいことを意味する。このため、掘削による応力解放による影響が水平方向に大きく現れることになる。これが、空洞掘削後の水平変位が  $n$  の増大とともに大きい値を与え、逆に鉛直変位が小さい値となる大きな理由と考えられる。

岩盤の層の傾き  $\beta$  による影響の一例を図-7に示す。岩盤の層の傾きが掘削後の空洞周辺変位に影響を与えているのがわかる。変位に与える岩盤の傾き  $\beta$  の影響を調べるため、図-8, 9および10を描いた。図にはそれぞれ  $n$  による変化も描いているが、 $n$  による変化にくらべ  $\beta$  による変化は小さい。

天端鉛直変位、底盤鉛直変位および側壁水平変位の、空洞形状と  $n$  による変化を調べたのが図-11, 12および13である。これらの計算は  $\beta=0$  で、空洞の主軸も傾いていないものとして

行った。 $n$ による変化は前述した通りで、いずれの場合も $n$ が大きいときは鉛直変位は小さく水平変位は大きくなること示されている。形の影響についてみると、図-11は等変位線が鉛直方向になっていることから、上半の楕円の扁平率の影響が大きく、楕円が鉛直方向に長いとき小さな変位となることがわかる。図-12では逆に等変位線が水平になっていることから下半分の楕円の扁平率の影響が大きく、楕円が縦長になっているほど変位は小さいことがわかる。さらに、図-13では2つの扁平率の影響を受け、水平方向に長い形の時変位は小さいことがわかる。したがって、扁平率が変化することは、これら3つの変位に対し異なる影響を与えることがわかる。

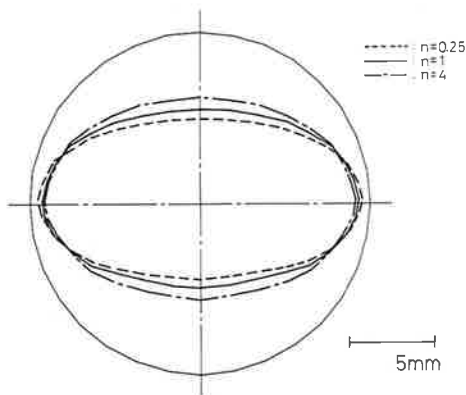


図-6 空洞周辺の変位 ( $a : b = 1 : 1, \beta = 0$ )

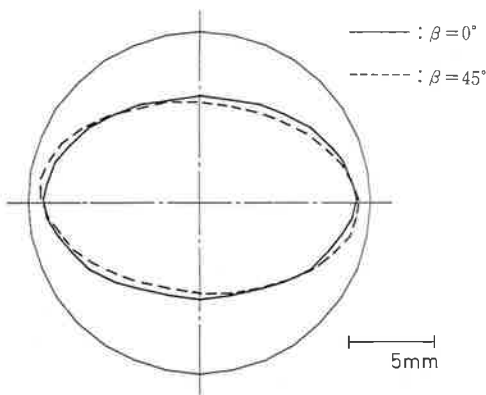


図-7 空洞周辺の変位 ( $a : b = 1 : 1, n = 1$ )

### 3.2 応力と危険度

図-14は円断面空洞の掘削後の空洞周辺要素の主応力を描いたものである。弾性係数比 $n$ が大きいときは応力が小さいことがわかる。また、図-15は形の違いによって主応力分布がどのように異なるかを示したものである。

この主応力を使って先に述べた危険度 $S$ を計算しその分布を描くと、図-16のように描かれる。色の濃い部分が危険度が高いことを意味している。ここでは一軸せん断強さ $S_s = 400 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ ととしている。ま

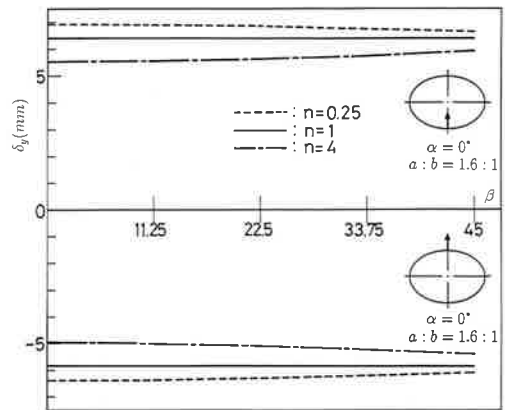


図-8 空洞周囲の変位 ( $n$ と $\beta$ による変化、円一楕円の天端部、底盤部鉛直変位)

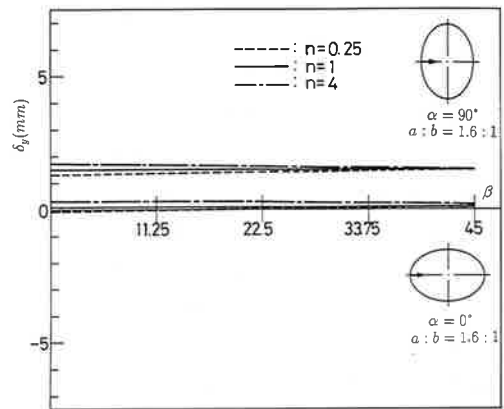


図-9 空洞周囲の変位 ( $n$ と $\beta$ による変化、側壁中心水平変位)

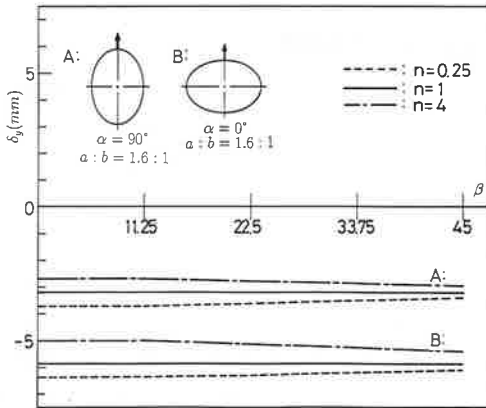


図-10 空洞周囲の変位( $n$ と $\beta$ による変化, 天端部鉛直変位)

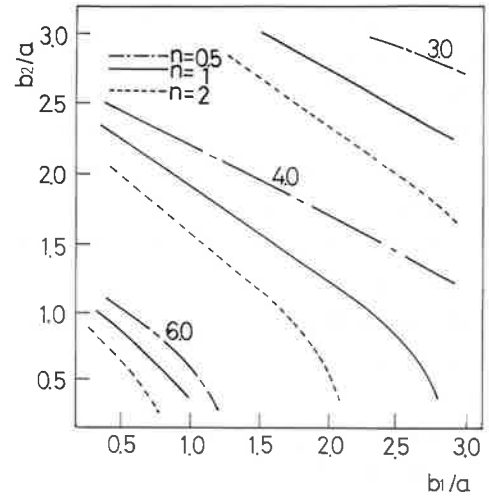


図-12 空洞周囲の変位(形状による変化, 底盤鉛直変位)

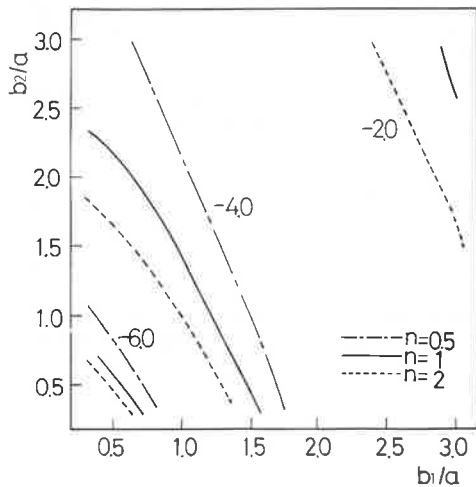


図-11 空洞周囲の変位(形状による変化, 天端鉛直変位)

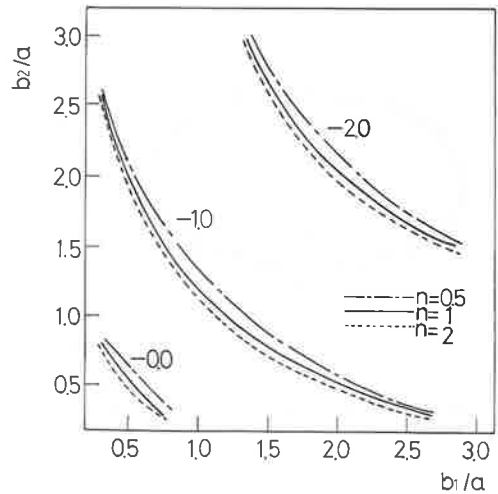


図-13 空洞周囲の変位(形状による変化, 側壁水平変位)

た, 図-17 は形による空洞周囲の危険度の分布の違いを表している。このような空洞周辺の危険度の平均値を表したのが図-18 である。この図によれば  $n$  が 1 より小さい場合には縦長の楕円とすることにより危険度の平均値が低下しているが,  $n$  が 1 より大きい場合には形による変化は少ないといえる。

図-19 は, 上下の半楕円の偏平率を変えて, 空洞周辺に現れる危険度の最大値をプロットしその等値線を描いたものである。この図によれば,

空洞周辺の危険度を最も少なくするためには,  $b_1/a = b_2/a \approx 0.6$  程度とすれば良いことが示されている。いくつかの  $n$  に対する計算から, この傾向は  $n$  によってあまり変化しないことが示されている。しかし, この結果は, 危険度をどのように評価することによって大きく異なることであるから今後さらに検討する必要があると考えている。



図-14 空洞周囲の主応力分布(円断面,  $\beta=0$ , 左から  $n=0.25, 1, 4$ )



図-15 空洞周囲の主応力分布 ( $a:b=1.6:1$ ,  $n=1$ ,  $\beta=0$ , 左から断面主軸の傾き  $\alpha$  が  $0, 45, 90^\circ$ )

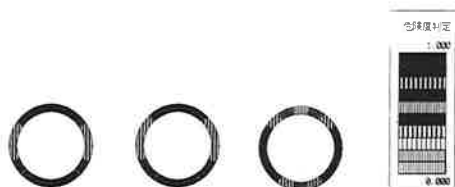


図-16 危険度分布図(円断面,  $\beta=0$ ,  $S_s=400 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\phi=40^\circ$ , 左から  $n=0.25, 1, 4$ )

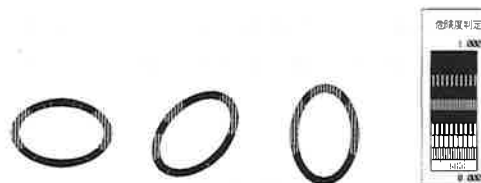


図-17 危険度分布図 ( $a:b=1.6:1$ ,  $n=1$ ,  $\beta=0$ ,  $S_s=400 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\phi=40^\circ$ , 左から断面主軸の傾き  $\alpha$  が  $0, 45, 90^\circ$ )

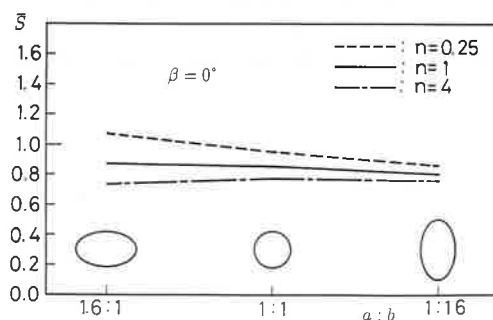


図-18 危険度の平均値 ( $\beta=0$ ,  $S_s=400 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\phi=40^\circ$ )

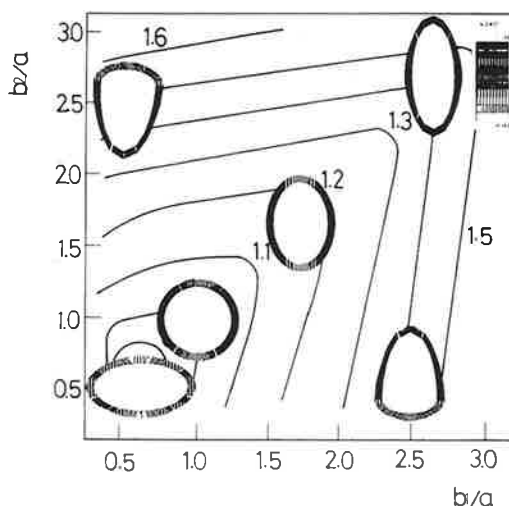


図-19 空洞形状と危険度の最大値 ( $\beta=0$ ,  $n=1$ ,  $S_s=400 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\phi=50^\circ$ )

#### 4. おわりに

本論は、岩盤タンクなどに利用される地下空洞の形状に注目し、その形状と、力学的な変化、ここでは変位あるいは応力から求められる要素の危険度との関係について考察することを目的に、岩盤を直交異方性弾性体とした時の、空洞形状と異方性パラメーターが掘削後の力学的挙動に与える影響を調べたものである。計算結果とその考察から、掘削後の力学的挙動に与える地下空洞の形と岩盤のもつ異方性の影響が理解できた。今後、これらの結果を踏まえ、空洞境界の安全性の指標を検討するとともに、地下空洞の形状最適化を異方性との関係で考察したいと考えている。扱った解析モデルが弾性体であること、岩盤内の節理等が考慮されていないこと、限られた範囲の形での検討であることなど

多くの課題を残している。とくに、掘削後の力学的挙動は、初期地圧によって大きな影響を受けるものと考えられるため初期地圧の検討の必要がある。今後は、これらの事項、さらに、調

査結果に基づいた物性値や施工方法にも考慮して地下空洞の形の検討をする必要があると考えている。

### 参 考 文 献

- 1) 川本肱万, 藤田益夫: 自由斜面の変形と応力状態について (その1. 等方性および異方性線形弾性斜面), 土と基礎, 16-8, pp. 37-46, 1968
- 2) 土木学会編: 土木技術者のための岩盤力学, pp. 276-280, 土木学会, 1975
- 3) I.W. Farmer: Engineering Properties of Rocks, pp. 55-69, SPON, 1968.
- 4) 関本道尚: 石油備蓄技術の現状と特色, 土木学会誌 1980 3, PP. 20-25, 1980
- 5) 佐藤邦明: 燃料岩盤地下備蓄の現状とその水封. 気密機能, 土木学会誌 1989. 9, pp. 48-54, 1985
- 6) 桜井俊男: 石油備蓄菊間実証プラントについて, 土と基礎, 29-1 (276), pp. 15-22, 1981
- 7) 高橋由己, 竹田一仁, 世一英俊: 地下発電所工事における掘削時の空洞側壁部の変形管理について, 土と基礎, 30-11 (298), pp. 41-47, 1982
- 8) 長谷川明: 地下空洞の掘削後の力学的挙動—空洞形状と岩盤の異方性の影響—, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1431-1437, 1993