

(37) 岩盤内空洞の力学的挙動への異方性と形状の影響

THE INFLUENCE OF ANISOTROPY AND SHAPE ON MECHANICAL BEHAVIOR OF UNDERGROUND SPACE

長谷川 明¹

By Akira HASEGAWA

An underground space to store constructed in anisotropic bedrock is studied on the shape and the mechanical behavior after excavation. The shape must be determined under the conditions to keep the functions, to be safe and to be economical. It is required that the space has the maximum volume under some conditions for storing. 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 anisotropic bedrock. A fundamental investigation of the influence of anisotropy and shape on the mechanical behavior after excavation is described.

Key Words: Shape optimization, Underground space, Anisotropy, Bedrock

1 はじめに

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、貯蔵を目的としている地下空洞の場合には、地下空洞の容積をできるだけ大きくしたい要求がある。トンネルのようなかまぼこ形をした空洞では、容積の拡大は断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。この点について著者はこれまで空洞掘削後の空洞周囲の変位を制約条件とし、等方弾性岩盤に建設される空洞断面積を最大化する空洞形状を求めることを試みている¹⁾。

本論は、このような考察を異方弾性岩盤内に建設される地下空洞について検討することを目的としている。ここでは、岩盤を直交異方性弾性岩盤と考え、直交する2方向の弾性係数比と岩盤の傾きを異方性を表現するパラメータと考える。一方、空洞の形状は形状寸法に関するパラメータを少なくするため、簡単に2つの半楕円で構成されているものとした。これらの条件の中で岩盤の異方性と空洞形状に関するそれぞれのパラメータ

¹工博 八戸工業大学工学部土木工学科 (〒031 八戸市妙字大開88-1)

が、空洞掘削後の空洞周辺の力学的挙動にどのような影響を与えるのか検討した。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したものである。

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)せん断弾性係数は方向に無関係であると仮定すれば²⁾、岩盤の傾き β 、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-1は使用した計算モデルで、空洞は地下150mを中心とする断面積225m²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-2に示すように空洞をおよそ中心にして、地表面から250mの深さまで、水平方向

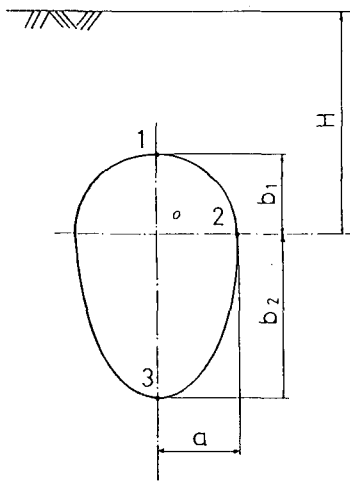


図-1 解析モデル

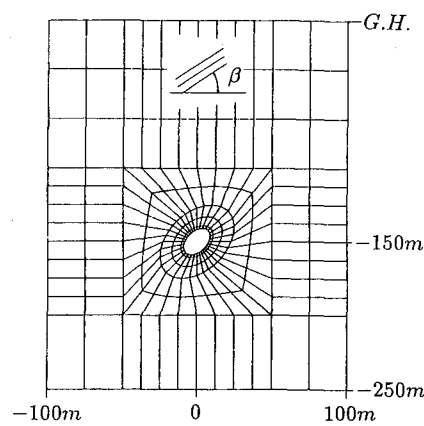


図-2 要素分割の例

は左右 100m 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、地表面は自由としている。有限要素は空洞の偏平率と傾き α に対応して自動的に分割できるよう、本計算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 $\gamma = 2.6 \text{ tf/m}^2$ 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るポアソン比 $\nu_{HV} = 0$ とした³⁾。また、一軸せん断強さ $S_s = 400 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 40, 50^\circ$ ⁴⁾としている。

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。

2.3 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-3 に示す破壊条件を仮定し、せん断応力 τ が一軸せん断強さ S_s 、内部摩擦角 ϕ および直応力 σ を使って、 $\tau > S_s + \sigma \tan \phi$ 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-3 の O' 点からモールの応力円への接線が σ 軸となす勾配、すなわち $\tan \phi' = \overline{PQ}/\overline{O'P}$ を求め、これを破壊線の勾配 $\tan \phi$ と比較することで、 $S = \tan \phi' / \tan \phi > 1$ の時破壊することとなるため、このパラメータ 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、 σ_1, σ_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

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-4 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。

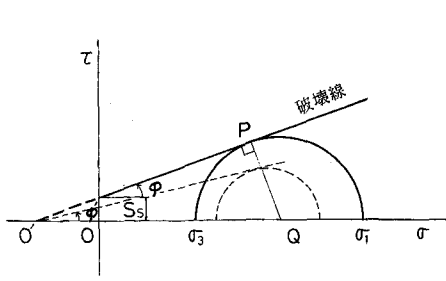


図-3 破壊条件の仮定

S_s : 一軸せん断強さ、 ϕ : 内部摩擦角
 σ_1, σ_3 : 主応力

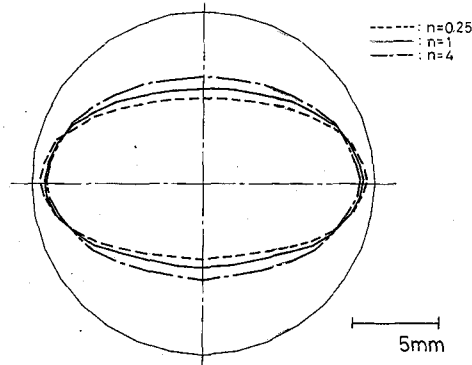


図-4 空洞周辺の変位 ($a : b = 1 : 1, \beta = 0$)

岩盤の層の傾き β による影響の一例を図-5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 β の影響を調べるため、図-6、7および8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 β 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-9、10および11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が示されている。形の影響についてみると、図-9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-10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-11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、扁平率を変化させることは、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。

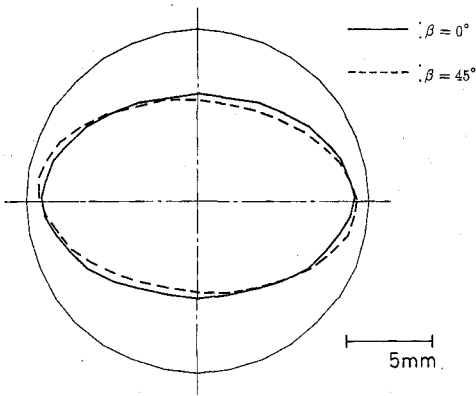


図-5 空洞周辺の変位 ($a:b = 1:1, n = 1$)

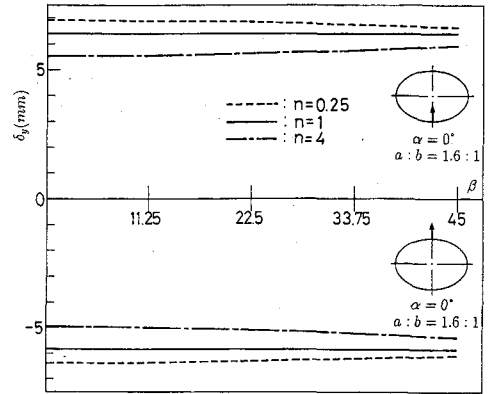


図-6 空洞周囲の変位
(n と β による変化、同一楕円の天端部、底盤部鉛直変位)

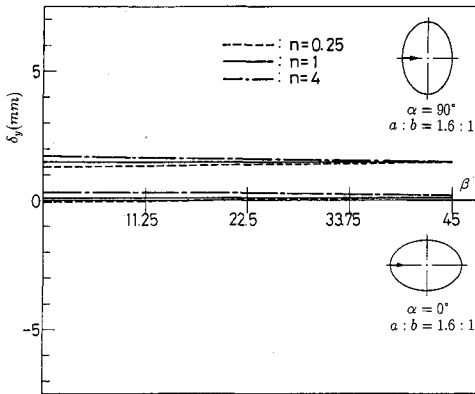


図-7 空洞周囲の変位
(n と β による変化、側壁中心水平変位)

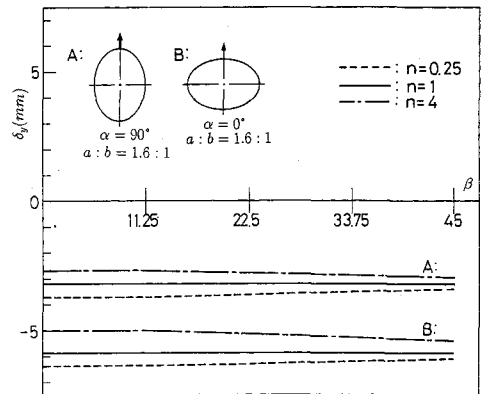


図-8 空洞周囲の変位
(n と β による変化、天端部鉛直変位)

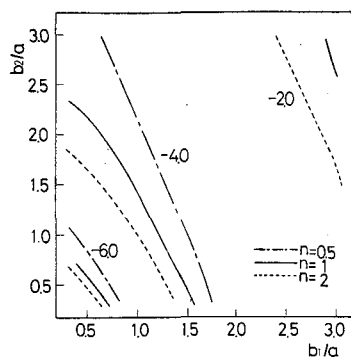


図-9 天端鉛直変位

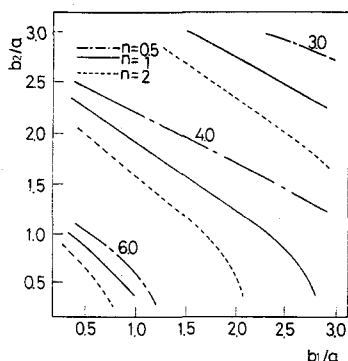


図-10 底端鉛直変位

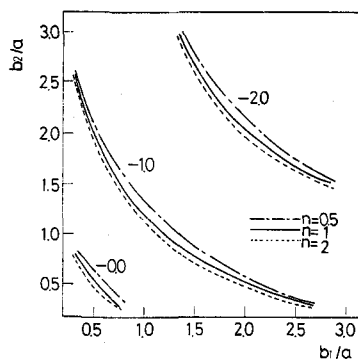


図-11 側壁水平変位

3.2 応力と危険度

図-12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-13は形の違うこと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さきに述べた危険度 S を計算しその分布を描くと、図-14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 $S_u = 400 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ としている。また、図-15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。このような空洞周囲の危険度の平均値を表したのが図-16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-17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等値線を描いたものである。この図によれば、空洞周囲の危険度を最も少なくするためには、 $b_1/a = b_2/a = 0.6$ 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。

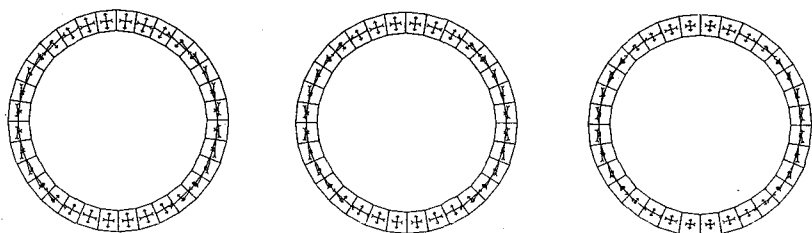


図-12 空洞周囲の主応力分布

円断面, $\beta = 0$, 左から $n = 0.25, 1, 4$

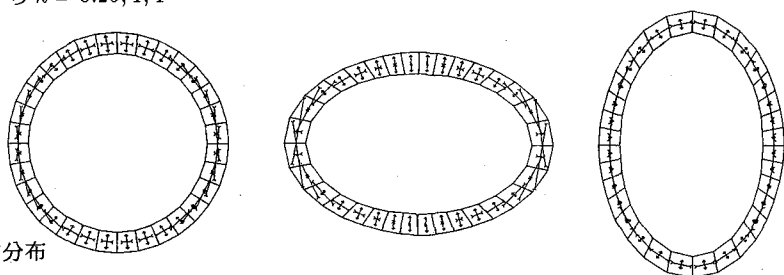


図-13 空洞周囲の主応力分布

$a : b = 1.6 : 1, n = 1, \beta = 0$, 左から断面主軸の傾き α が $0, 45, 90^\circ$

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 α が $0, 45, 90^\circ$)

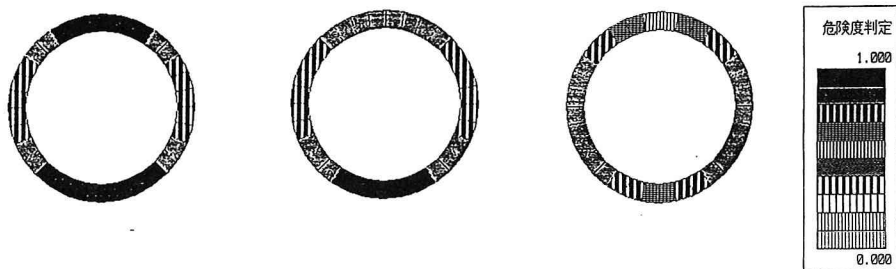


図-14 危険度分布図

円断面, $\beta = 0, S_s = 400 \text{ kgf/cm}^2, \phi = 40^\circ$, 左から $n = 0.25, 1, 4$

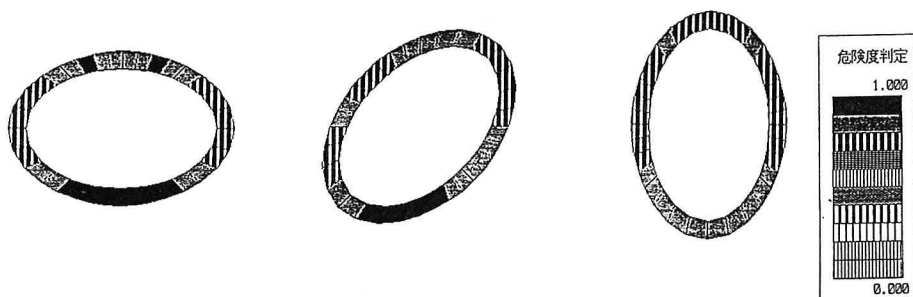


図-15 危険度分布図

$a : b = 1.6 : 1, n = 1, \beta = 0, S_s = 400 \text{ kgf/cm}^2, \phi = 40^\circ$

左から断面主軸の傾き α が $0, 45, 90^\circ$

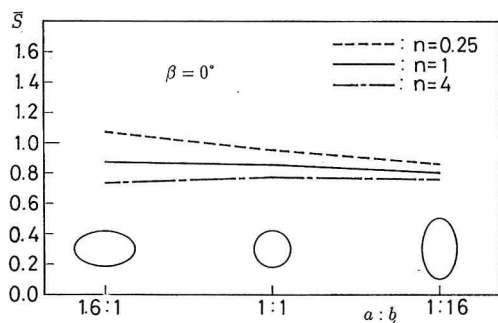


図-16 危険度の平均値

$\beta = 0, S_s = 400 \text{ kgf/cm}^2, \phi = 40^\circ$

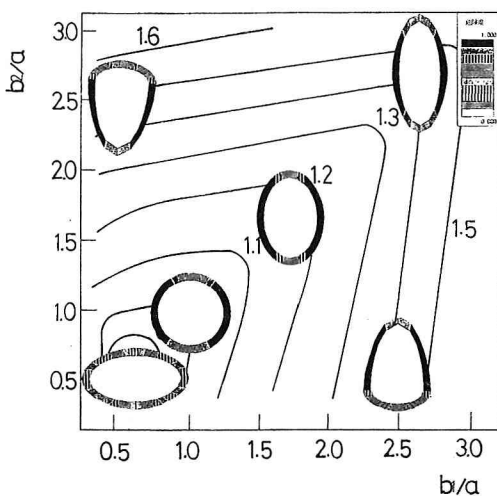


図-17 空洞形状と危険度の最大値

$\beta = 0, n = 1, S_s = 400 \text{ kgf/cm}^2, \phi = 50^\circ$

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基礎的な影響を理解できた。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共に、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、あるいはより具体的な物性値の適用や施工方法をも考慮すべき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。今後はこれらの検討事項をも含めた形状の最適化を考察したいと考えている。

参考文献

- 1) 長谷川明：変位制約を受ける地下空洞の形状最適化について，第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集,pp.257-262,1991
- 2) 川本眺万，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
- 3) 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
- 4) I.W.Farmer:Engineering Properties of Rocks, pp.55-69, SPON, 1968