

5. 岩盤構造物の建設に伴う地圧現象と応力解析

5.1 岩盤構造物の建設に伴う地圧現象とは何か

空洞や斜面の掘削に伴って生じる現象の一つに地圧現象がある。地圧現象は初期地圧、すなわち空洞や斜面を掘削する前に岩盤内に平衡状態を保ちつつ存在する応力と、岩盤の力学的性質との兼ね合いによってもたらされる。掘削により、掘削部分はそれまで分担していた地圧を受け持たなくなるので、これを周囲岩盤が負担することになるが、掘削部に近い箇所ほど負担する量が増えるので、周囲の地圧が高まる。地圧の高まりが強度の限界に達する程度であれば、そこで破壊が発生する。このように空洞の掘削は応力の再配分をもたらすが、同時にひずみや変位も変化し、空洞周囲岩盤は空洞内へ押し出してくる。空洞周囲の岩盤が破壊する場合には、ダイラタンシーが発生するので、押し出し量は著しく増える。空洞壁面に接する不連続面が破壊すると、それに沿って分離した岩塊が空洞内へ押し出してくる現象も生じる。

空洞周辺岩盤の破壊の様相は、岩種によって異なる。岩盤が軟弱な場合には、ダイラタンシーが顕著で、これによって生じる著しい空洞の狭小化現象は、盤ぶくれと呼ばれる。この場合、空洞断面を維持するために人工的な支え、すなわち支保が必要になる。岩盤が硬く脆性的な挙動が卓越する場合、破壊は山鳴りと呼ばれる音や震動を伴う（光もわずかながら出るようである。地震の際にも発光現象が観察されることがあるという）。破壊が空洞壁面あるいはその近傍で起こると、破碎音の発生とともに空洞内に破碎物が飛び出してくる。この現象は山はねと呼ばれる。掘進トンネルでは、山はねが切羽（トンネルの施工作业を行う先端部）の手前で起こるので、作業員の怪我や作業機械の損傷を引き起こす。

深度が浅い地表近くでは、強度が相対的に小さい不連続面の挙動が卓越し、これに起因する破壊現象－岩盤の崩落現象など－が顕著となる。

以上の変形・破壊現象が地圧現象と呼ばれているものである。本章では、これらの地圧現象が起こる機構について考察する。また、空洞の維持状態を良くするための対策についても検討する。

なお、地圧現象は、普通、他の現象、例えば浸透流と連成しているので、これらの現象についても考慮しないと問題の解決にならないことが多い。

5.2 空洞や斜面掘削などに伴って生じる力学的変化の検討と応力解析

掘削により、それまで安定していた初期地圧状態が擾乱し、新たな応力状態に移行する。掘削により発生する変位や応力の詳細を明らかにする作業が「応力解析」である。応力解析には、大別して次の3つの方法がある。

(a)物理模型による方法（模型試験）

(b)解析的（数学的）方法

(c)コンピューターにより解析する方法（数値解析と呼ばれる）

(b)の解析的方法は厳密であるが、複雑な問題は解きにくい。(c)の数値解析は実用的な問題の解析に威力を発揮しており、応力解析の主流になっている。代表的な方法として、有限要素法や境界要素法がある。

(b), (c)の方法とも応力-ひずみの関係を式（構成方程式）で表し、与えられた境界条件の下で、応力・変位を求めるものである。仮定した構成方程式が実際の岩盤材料の挙動を正しく表していなければ、得られた解の信頼性はないので、解析結果の解釈には十分に注意する必要がある。

なお、(b), (c)の方法で得られた解はそれぞれ解析解、数値解と呼ばれる。

5.3 円形断面空洞の弾性応力解析と応力状態

無限の広がりを持ち均質・等方弾性体と仮定できる岩盤があり、そこでは次のような一様な初期応力状態になっているとする。主応力の一つ σ_v は鉛直を向き、残りの2つ σ_{h1} 、 σ_{h2} は水平面内にあり、坑道軸と主応力 σ_{h2} の向きは一致している(図5.1参照)。このような岩盤中に半径 a の円形断面を持つ素堀の水平坑道（トンネル）を施工するときに、空洞周囲に発生する応力や掘削に伴って誘起される変位やひずみは、Kirshによって明らかにされている。

本節ではこの解について説明するが、応力成分、変位成分とも極座標で表示し、応力の符号は圧縮を+、引張りを-、変位は座標の正の方向への動きを+、負への動きを-とする。

5.3.1 空洞周囲の応力分布に関する弾性解

Kirshによれば、空洞周囲岩盤内の応力状態と掘削に伴って生じる変位は以下のようになる。

$$\begin{aligned}\sigma_r &= (\sigma_{h1} + \sigma_v)(1 - q^2)/2 + (\sigma_{h1} - \sigma_v)(1 - 4q^2 + 3q^4)\cos 2\theta / 2 \\ \sigma_\theta &= (\sigma_{h1} + \sigma_v)(1 + q^2)/2 - (\sigma_{h1} - \sigma_v)(1 + 3q^4)\cos 2\theta / 2 \\ \tau_{r\theta} &= -(\sigma_{h1} - \sigma_v)(1 + 2q^2 - 3q^4)\sin 2\theta / 2\end{aligned}$$

$$\sigma_z = \sigma_{h2} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} u_r &= -aq[\sigma_{h1} + \sigma_v + (\sigma_{h1} - \sigma_v) \{2(1-2\nu) + q^2\} \cos 2\theta] / (4G) \\ u_\theta &= aq[(\sigma_{h1} - \sigma_v) \{2(1-2\nu) + q^2\} \sin 2\theta] / (4G) \end{aligned} \quad (5.2)$$

$q = a/r$ 、 θ = 水平軸から反時計廻りに測った角、
 ν : 岩盤のポアソン比、 G : 剛性率 ($=E/\{2(1+\nu)\}$)

空洞掘削前にあらかじめ岩盤中に変位計を埋設しておき、掘削に伴う変化を観察するものとする。(5.2)式の変位はこの測定量と対応している。

(5.1)、(5.2)式で表される応力と変位分布に関する解には、幾つかの一般的な特徴が認められるので、それらについて説明する。

5.3.2 境界条件

上記の解は次の条件を満たしている。

(1) $r = \infty$ における応力は次のようになる：

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (\sigma_{h1} + \sigma_v) / 2 + (\sigma_{h1} - \sigma_v) \cos 2\theta / 2 \\ \sigma_\theta &= (\sigma_{h1} + \sigma_v) / 2 - (\sigma_{h1} - \sigma_v) \cos 2\theta / 2 \\ \tau_{r\theta} &= -(\sigma_{h1} - \sigma_v) \sin 2\theta / 2 \end{aligned}$$

この応力を、(x, y) 系の直交座標で表示すると次のようになる。

$$\sigma_x = \sigma_{h1}, \quad \sigma_y = \sigma_v, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (5.3)$$

空洞から十分離れた所の応力は、初期地圧状態に一致していることがわかる。この条件は当然、満足していなければならない。

(2) $r = a$ ($q = 1$) のとき (空洞壁上)

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0 \quad (5.4)$$

となる。つまり空洞壁は力が作用していないという条件 (このような条件を満たす空洞の縁を自由縁という) を満たしている (ただし、空洞壁ではこれに平行な応力成分は一般に 0 ではなく、逆に大きいことに注意)。

(1), (2) を境界条件という。解が正解であるためには境界条件を満たしていなければならない。

5.3.3 応力分布

(5.1)式は、応力が位置 (いまの場合、 r と θ) によって異なることを示している。図5.2 は、 $\theta = 0$ における $\sigma_\theta - r$ の関係、つまり応力分布を示したものである。図から、応力分布に関して特徴が 2 つ認められる。

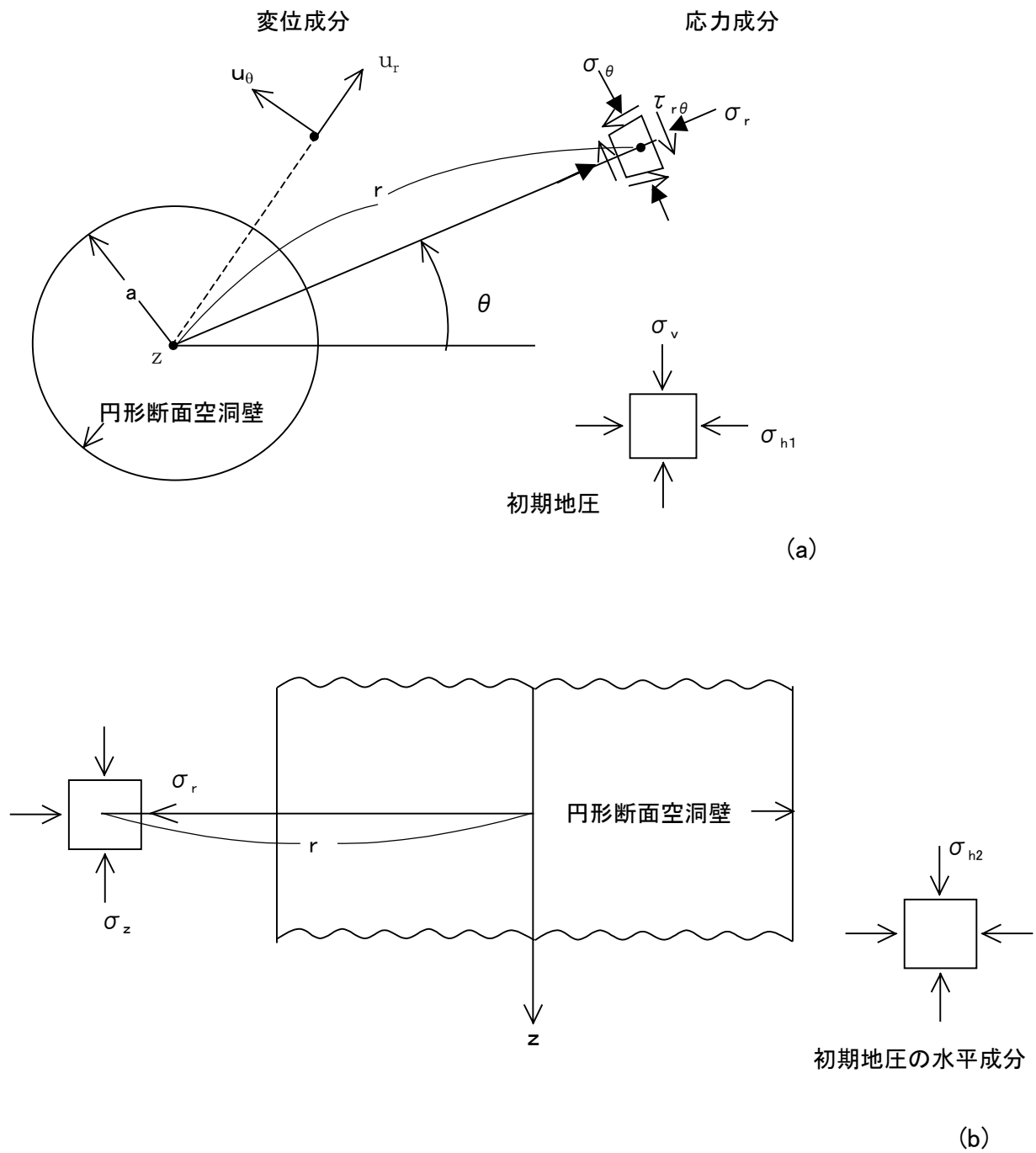


図5.1 半径の円形断面空洞周囲の応力状態（空洞軸と z 軸は一致）。

(a) z 軸に垂直な平面、(b) z 軸を含む水平面

(1) 縁に平行な応力成分 σ_{θ} は、空洞の縁では遠方（あるいは空洞開削前）の応力 σ_v の2.5倍あり、値が最も大きく、 r が大きくなるにつれて（孔から離れるにつれて）、次第に小さくなり遠方の応力状態に漸近している。縁から距離にして $5a$ （ a = 孔の半径）の位置では、 $\sigma_{\theta} = 1.05 \sigma_v$ となっており、初期地圧とほとんど差がない。空洞の存在が初期地圧の応力状態を乱す範囲はこの程度にしか過ぎず、空洞から離れるにつれて、乱れの程度は急激に小さくなる。

(2) 図5.3は、初期地圧に関して $\sigma_v = 2 \sigma_{h1}$ を仮定したとき、空洞壁上（ $q = 1$ ）の応力成分 σ_{θ} が θ とともに変化する様子を示したもので、①空洞壁上の値は激しく変化していること、② $\theta = 0, \pi$ で最大値を取り初期地圧の数倍あること、などがわかる。

5.3.4 変位分布

(5.2)式によると、変位は空洞壁で最も大きく、壁から離れるにしたがって次第に小さくなり、十分に離れた場所では、実質的に0になる。

$r=a$ における (u_r, u_{θ}) 、つまり掘削に伴って生じる空洞の変形を示したのが図5.4である。変形が卓越する向きと初期地圧が大きな方向とは一致していることがわかる。 $r=a$ において幾つかの方向の (u_r, u_{θ}) を計測し、(5.2)式を用いて逆解析的に初期応力を推定する方法がある。この方法の利点は、一片が数mの寸法を持った岩盤の挙動を計測対象とするので広域的な初期地圧応力を推定できることである。

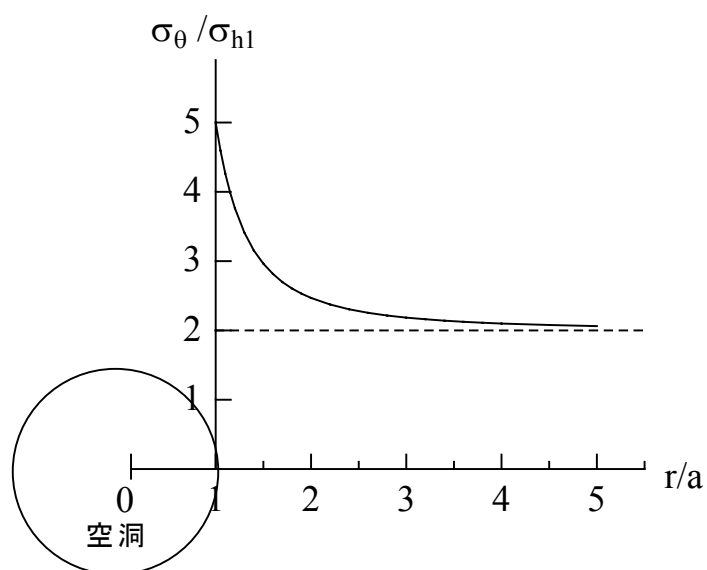


図5.2 円形断面空洞周囲の $\theta = 0$ 上の σ_θ の分布。初期地圧は $\sigma_v = 2\sigma_{h1}$ を仮定

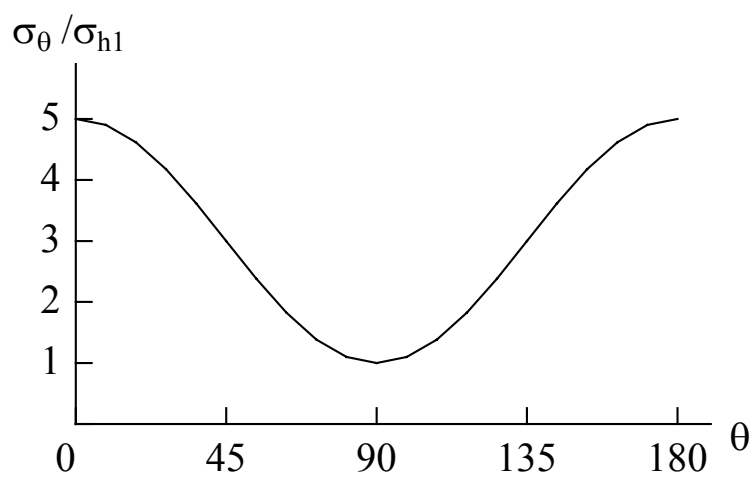


図5.3 円形断面空洞縁の σ_θ の分布。初期地圧は $\sigma_v = 2\sigma_{h1}$ を仮定

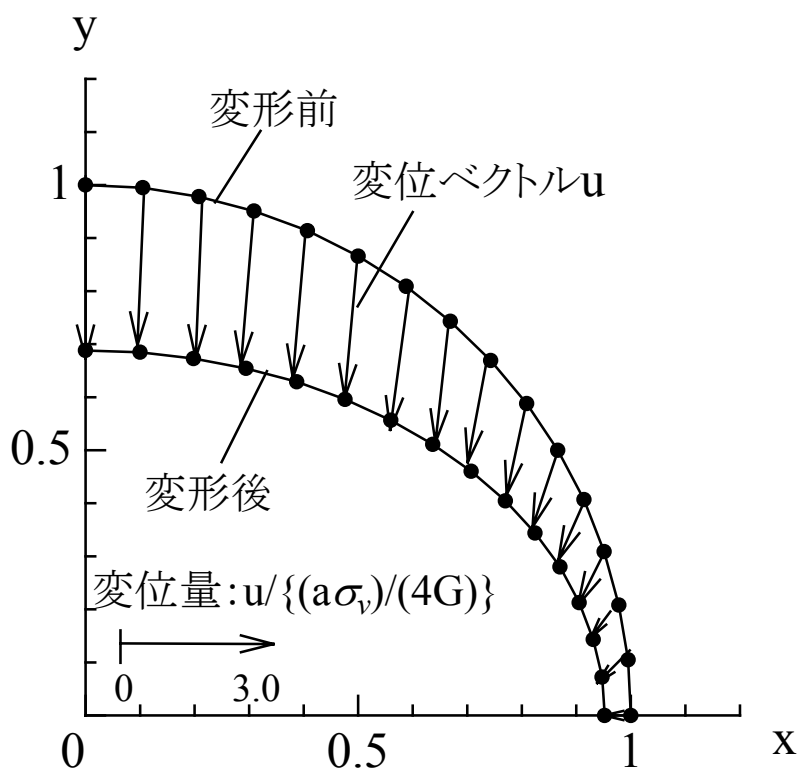


図5.4 円形断面空洞壁の変位。初期地圧は $\sigma_v = 2\sigma_{h1}$ を仮定

5.4 応力集中と安全率

5.3.3で空洞壁に平行な応力成分 σ_θ は、空洞に近づくにつれて大きくなることを説明した。この性質は応力集中と呼ばれる。応力集中および応力集中に関して定義される安全率は、工学的に重要な量なので、節を改めて説明する。

5.4.1 応力集中と応力集中源

応力集中は、基準の応力成分（通常は遠方の応力が選ばれる）に対する比として定義される。図5.2の例では、 $\theta = 0$ における応力集中は2.5である（ $\sigma_\theta / \sigma_v = 2.5$ ）。応力集中の起こる場所は、応力集中源と呼ばれる。5.3の場合には、応力集中源は空洞であるが、この他に、亀裂先端、切欠き先端など曲率半径の小さい境界（自由縁）が応力集中源になる。

応力集中に影響する因子は3つある：

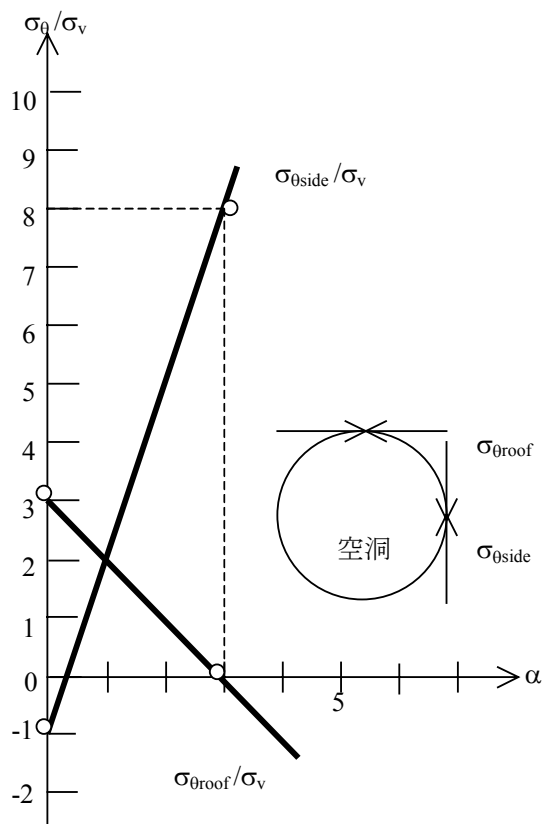


図5.5 円形断面空洞壁の側部と天井・床部の応力 σ_{θ} に及ぼす α の影響

①応力集中源の形状（5.4.4 参照）

②応力集中源における位置：図5.2の例では、図5.3からわかるように、 $\theta = 0, \pi$ 上の応力成分 σ_{θ} が最も大きい。

③初期地圧の比 α （側圧係数とも呼ばれる）

$$\alpha = \sigma_{h1} / \sigma_v \quad (5.5)$$

図5.5は、初期地圧の比 α が円形断面空洞に生じる応力集中の程度とそれが起きる場所に及ぼす影響を(5.1)式に基づいて評価した結果を示したもので、応力集中の程度は初期地圧の比 α が大きくなるにつれて増すことがわかる。この場合には、最小値（引張応力）の絶対値も増す。応力集中の程度は、 $\alpha = 1$ の場合に最小となり、空洞壁の至る所で2になる。

5.4.2 応力集中と破壊

応力集中が起こる孔や切欠きの境界（縁）では、縁に垂直な応力成分とせん断応力成

分は(5.3)式に示すように0であり、一軸状態になっている。空洞壁から離れるにつれて、接線方向の応力成分 σ_{θ} は次第に小さくなり、逆に空洞壁に垂直な成分 σ_r は次第に大きくなる。この応力分布の傾向は、空洞から離れるほど封圧効果が現れ破壊が起こりにくくなること、逆に空洞壁は破壊の危険が最も高く、一軸圧縮（または一軸引張）が起こりやすいことを示している。応力集中が最大になる箇所は、一般に破壊の初生箇所に一致するので、次の表現が可能である。

応力集中箇所＝最も破壊しやすい場所

応力集中源と応力集中の程度を知ることは工学的に重要であり、応力解析はしばしばこれらの情報の取得を目的に実施されるほどである。

応力集中が最大になる箇所の応力を σ_{max} 、一軸圧縮強度を σ_c とする。両者の比

$$SF = \sigma_c / \sigma_{max} \quad (5.6)$$

が大きいほど、破壊は起こりにくく、逆に値が1になると、応力集中箇所で圧縮破壊が起こる。SFを安全率（Safety Factor）という。値が1以下のときに起こる現象については5.5節を参照されたい。

岩盤の引張強度は圧縮強度よりも極端に小さいので、引張応力が発生しているか否かについても注目する必要がある。引張破壊に対する安全率は(5.5)式と同様に、次式のようになる。

$$SF = \sigma_t / \sigma_{tmax} \quad (5.6)$$

σ_t : 引張強度、 σ_{tmax} : 最大の引張応力

5.4.3 地山強度比

空洞の施工性と維持の容易さを判定する指標として、次式で定義される地山強度比がある。

$$\text{地山強度比} = \text{地山の一軸圧縮強度} / \text{かぶり圧} \quad (5.7)$$

かぶり圧 = $\rho g H$ 、 ρ : 密度、 g : 重力加速度

この値が小さい程、空洞周辺で破壊が起こりやすくなる。この意味で本指標は安全率に似ている。円形断面トンネルの場合、側圧係数 $\alpha=1$ の岩盤においては、この比が2になると、また側圧係数が $\alpha=0.0$ または 1.5 の岩盤においては、この比が3になると、空洞壁が破壊する。比がこれ以下になると比 k に逆比例して空洞周囲の破壊域（緩み域、塑性域）が広がる。

問題：側圧係数 α が2のとき、円形断面の空洞壁が破壊する地山強度比の最大値を求めなさい（空洞壁の応力集中は図5.5に示されている）。

地山強度比が5以上あれば空洞は容易に施工でき維持問題も起こらない。この値が2～3であれば、施工や維持の問題が起きる。2以下では空洞の掘削や維持に多大の困難を伴う。

5.4.4 空洞形状が応力集中の程度に及ぼす影響

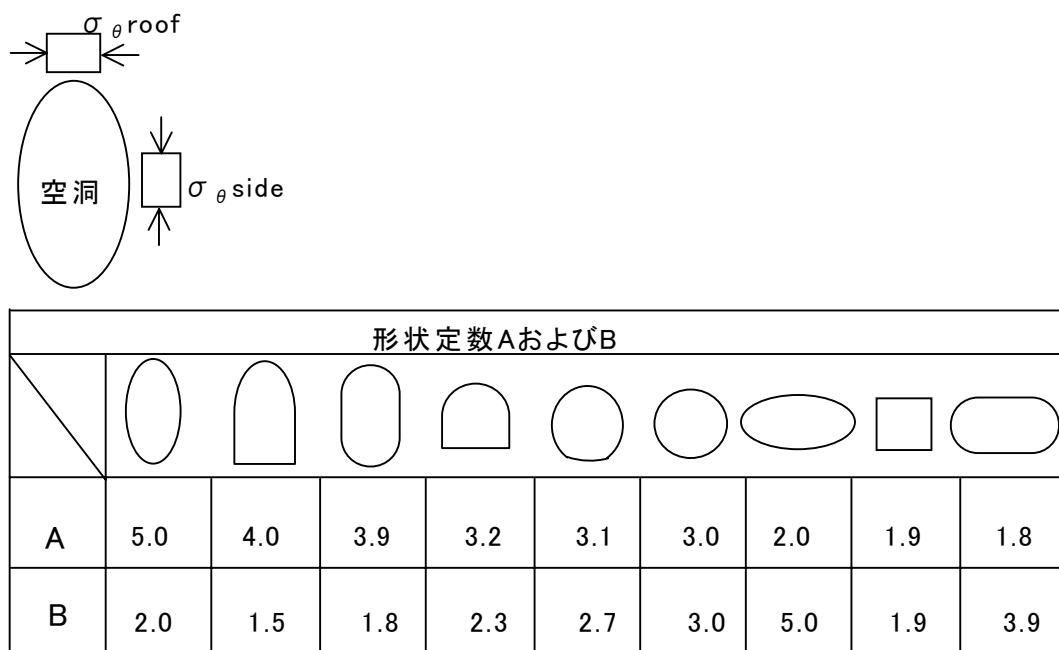


図5.6 空洞の形状定数

図5.6 は、水平空洞のいくつかの断面形状に対して、初期地圧をパラメータとして応力集中の程度を計算した結果を示したものである（計算は境界要素法を用いて実施した）。図5.2からも理解されるように、空洞断面形状が対称性を持つ場合、大抵は天井（および床）か（左右）側壁に最大の応力集中箇所が現れる。そこで、図5.6には、空洞天井の応力値 $\sigma_{\theta \text{ roof}}$ と空洞側壁の応力値 $\sigma_{\theta \text{ side}}$ のみが示されている。これらの場所の応力値と空洞形状および側圧係数 α は、次のようになっている。

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta \text{ roof}} &= (A\alpha - 1) \sigma_v \\ \sigma_{\theta \text{ side}} &= (B - \alpha) \sigma_v\end{aligned}\tag{5.8}$$

問題：初期地圧は次のようになっている： $\sigma_{h1}=-20$ (向きNS)、 $\sigma_{h2}=-40$ (向きWE)、 σ_v

=-30 MPa。このとき、円形断面水平坑道は北と西向きではどちらが有利か。

＊地圧制御の観点から空洞の長軸を水平面内の最大主応力方向に向けるのが有利である。

問題：(水平地圧)/(鉛直地圧)=2 のとき、断面が楕円形をした水平坑道に関して上下、左右に長い楕円空洞壁面の最大応力を求めなさい。これを基にどちらが有利か判断しなさい。

＊水平地圧の卓越する地域では、坑道の断面形状を横長にした方が縦長にするよりも維持が良いことがわかっている。これは、上記の計算結果から理解することができる。

問題：或る地域では初期地圧の水平応力成分は深度にかかわらず一定状態になっているとする：

$\sigma_{h1} = -5$ (向きNS)、 $\sigma_{h2} = -10$ (向きWE)、鉛直成分は深さHに比例し、
 $\sigma_v = -0.025H$ MPa (H : m) のようであるとする。一方、岩盤の強度特性は $c=10$ MPa、 $\phi=30^\circ$ で表されるところとする。

SN向きの水平坑道の場合、深度が幾らになったら坑道壁面が破壊するか。また、破壊箇所はどこか。どのような破壊のモード(様式)か。

問題：初期地圧が、 $\sigma_{h1} = \sigma_{h2} = \sigma_v = -0.025H$ MPa (H 深度 : m) のとき、一軸圧縮強度が σ_c の岩盤に作られる水平な円形断面空洞の壁面が破壊しだす深度を求めよ。このときの σ_c / σ_v は幾らか。

5.5 緩み域

安全率が1以下、あるいは地山強度比が2以下の場合には、破壊は空洞壁に留まらず、その奥にまで広がり、空洞の周囲に破壊域(緩み域、塑性域)が形成される。

破壊域内では岩盤にき裂が入り、その結果生じる体積膨張の一部は空洞内へ押し出て来るので、空洞の狭小化が起こる。天井や側壁上部に形成された破壊域内の岩盤は、容易に落下するので、支保が必要になる。床下に発達する緩みは、床面の傾斜や凹凸をもたらす、通路としての機能や運行の安全性を損ねる。また、必要な断面積の確保が困難になる。水に敏感な地層で、水の供給がある場合、床下の緩み域が異常に発達し、盤膨れと呼ばれる現象を招く。

破壊域が現れると、空洞周辺の応力状態も変わり、応力のピークはそれまでの空洞壁

から、より奥部の破壊域－弾性域の境界に移る。新たな破壊、つまり山鳴りはこの境界で発生するので、空洞には破壊の直接的な影響が現れなくなる（幌内炭鉱の1000mを越えた採炭切羽では、このような現象が生じた）。

破壊域の発生を考慮した解析は、弾塑性解析と呼ばれる。図5.7に、このような解析例が示されている。

5.6 地圧制御

岩盤構造物を建設するときに発生する現象の中で、破壊や過度の変形などの好ましくない現象を押さえるための種々の制御を地圧制御という。地圧制御には設計の段階で行うものと、建設（採掘）中に行うものがある。ここでは設計時に留意すべき諸点の中で、空洞の形状とトンネル坑口を崖に設ける場合に限定して述べる。

5.6.1 空洞の最適形状

空洞を地圧から守り良好な維持状態を保つために、空洞の断面は空洞周辺に発生する破壊域が最小になるような形状にすべきである。このために、次の2点に留意する。

- (1) 空洞軸の向きを自由に選べる場合には、空洞軸を初期地圧の水平面内における最大主応力の方向に向ける。
- (2) 空洞軸の向きを自由に選べない場合には、空洞壁の接線応力が、なるべく一定の大きさになるように空洞形状を決める。
- (3) 空洞断面は応力集中を招く角部のない滑らかな形状にする。応力集中部では塑性域が大きくなり、支保が余計に必要なになる。

(3)について3つの事例を以下に示す：

- a) 図5.7は地下発電所用の大空洞に採用されている2つの形状を示したものである。これをみると、卵型の方が空洞周囲に発達するゆるみ域の大きさが均一で、また小さいことがわかる。したがって、在来型のきのこ形よりも卵型の方がゆるみ域を抑制する観点から有利である。
- b) ナトム(NATM)工法においては、応力集中の減少効果を期待して、角のない曲線状のトンネル断面が採用されている（図5.8参照）。
- c) 鉛直地圧成分が水平地圧成分よりも大きな初期地圧状態にある岩盤中に馬蹄形断面のトンネルを建設すると、破壊域がトンネルの床下に拡がり、緩み域と弾性域の境界は全体的に縦長の楕円形状となる。空洞を取り巻く天然のアーチ（圧縮域）が形成されることによって、空洞の力学的な安定性がもたらされると解釈できる。

5.6.2 崖の近傍の地圧制御

崖の近傍にトンネルを建設する場合には、次の諸点に注意する。

- (1) 垂直な崖の背後にはしばしば引張応力が発生していたり、シーティングの形成があったりする。このような箇所では崩落が起こりやすいので、事前調査をして確認する必要がある。
- (2) 崖に平行なトンネル周囲は一軸応力に近い地圧応力状態になっている。この場合、トンネル天井に生じる引張応力に注意する必要がある。
- (3) 崖壁に斜行するトンネルでは、崖とトンネルで挟まれたピラー部の薄肉部に応力が集中するので、これについて考慮する必要がある。

問題：緩み域が水平空洞の上下に発達している場合と左右に発達している場合とではどちらが地圧制御上有利か。また、その理由を述べよ。

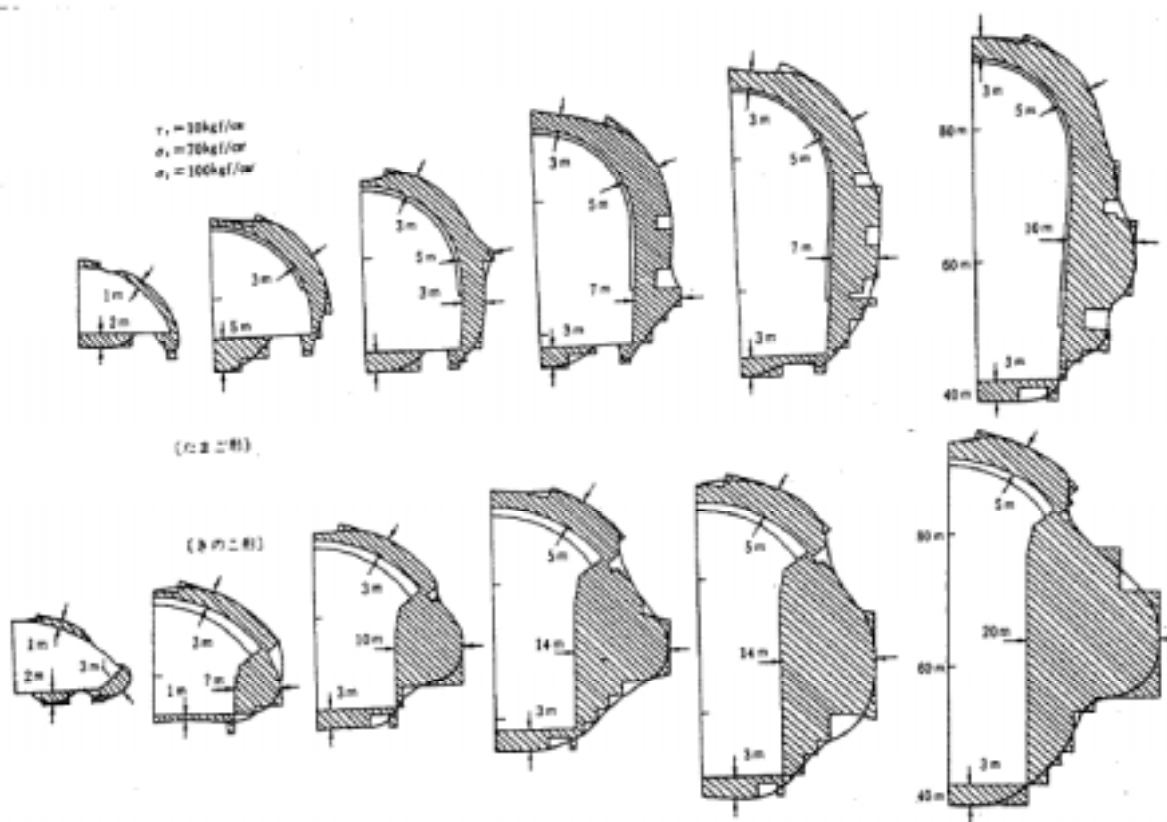


図5.7 地下揚水発電所の2種の空洞形状と周囲に発達する緩み域

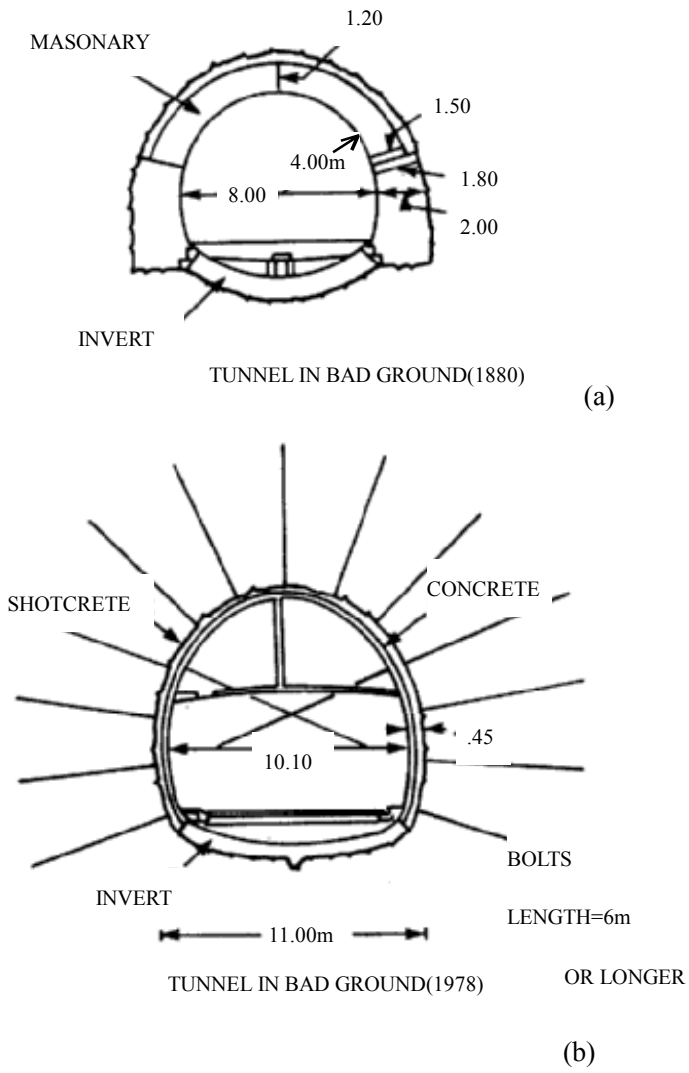


図5.8 トンネル形状。既往のタイプ（a）と最近のタイプ（b）