

地下空間の安定と地盤環境

九州大学工学部 正 会 員 江崎哲郎
 九州大学工学部 正 会 員 相川 明
 九州大学工学部 学生会員 堂園俊多
 ○ 九州大学工学部 学生会員 山浦 真

1. はじめに 現在首都圏を中心に、地表の過密・混在の解消、防災、交通等の都市機能や景観の向上、あるいは地下空間の種々の特性利用等を目指した大深度(深度約50~100m)の地下利用が注目をあびている。このようなジオフロント構想に沿って、地下空間の深部化、大規模化等が進められつつある現況に際し、空洞設計における安定性指標のあり方について今一度見直す必要があると思われる。例えば鉄道、道路トンネルの設計示方書によると、内空変位が約20~30mm程度で安定とされ、150mm程度を越えると不安定とされている。しかしこれらの安定性指標には、空洞の深度や寸法、地山の特性などの情報が欠けており、変位の計測方法もあいまいである。また、その他設計方法においても力学的根拠に乏しく、トンネル支保工の荷重、ロックボルトの設計など示方書の整備の遅れが痛感される。本研究では以上のような点を踏まえ、地下空洞周辺の応力、歪みの基本式に立ち帰り、今後の大規模化、大深度化、近接化の予想される地下利用開発に対応する空洞の安定性指標のあり方について基本的に検討したい。

2. 地下空洞の安定機構の問題点 基本的に地下空洞は支保のみならず、周辺の地盤によって支持されている。深部に至るほど周辺地山で支持される割合が顕著であり、支保のない状態でどの程度の空洞がどの程度の時間自立可能か、あるいはどの程度の内空変位を生じるといった問題が、空洞の安定性を図る上で基本となる。このような空洞安定理論が明確でないがために、支保設計や安定評価の面などで、根拠があいまい、もしくは不明確な点があるものと思われる。勿論、理論が明確でない理由には現場の特殊事情もある。周辺地盤の支持力に直接影響を及ぼす地盤強度は、自然に与えられるものであり、各箇所においてばらついており、なかには著しく弱い部分が存在して破壊の原因ともなる。そのうえ、このような地盤特性を正確に把握することは難しく、空洞周辺に加わる荷重も確定できない。また各種計測も障害が多い。しかしながら、このようなあいまいさもあるが、基本的には理論的検討は不可欠であろう。一方、これまでは単一空洞のみの建設を考えてきた傾向が強く、近接空洞についてはあまり検討されていない。今後の地下利用に対する空洞安定を考察する際には、建設物対象のみならず周辺の既設構造物や将来の新設構造物についても取り組む必要がある。このような点を踏まえ、以下では基本的に空洞周辺の地盤に注目し、空洞の安定性評価を試みる。

3. 単一地下空洞の安定度の検討 本稿では基礎的研究として、奥行きが十分あり平面ひずみ状態とみなせる単一の円形空洞について、その安定性を考えたい。空洞の安定性に寄与する要因としては、空洞の深さ、空洞の形状寸法、初期応力、地盤の単位体積重量、地盤強度、変形係数などが考えられる。最終的には、これらの値をパラメータとする安全評価の式もしくは指標を提示したいが、ここでは冒頭に述べたような主旨から、主なパラメータとして空洞の深さ H 、空洞の半径 a の2つを選び、状況に応じて水平土圧係数 k 、地盤の強度(ここでは粘着力 c)を含めた計4つを考慮する。なおポアソン比 $\nu=0.25$ 、単位体積重量 2.4t/m^3 、内部摩擦角 $\phi=32^\circ$ と固定する。このようなパラメータをもとに、空洞の安全率 β を算出する場合、主に次のような4通りの考え方があ

- (1) (地盤のせん断強度)と(地盤にはたらくせん断応力)との比
- (2) (地盤の引張強度)と(地盤にはたらく引張応力)との比
- (3) (地盤のひずみ能力)と(地盤に生じるひずみ)との比
- (4) 空洞の周辺および内空における変位

なお、(2)に関しては、単一円形空洞の平面ひずみ問題においては、ポアソン比 $\nu=0.25$ 、水平土圧係数 $1/3 \leq k \leq 3$ の範囲では、地盤のどの領域にも引張力が生じないため、ここで取り扱うのは不適当である。残る(1)(3)(4)のうち、本稿では(1)の「(地盤のせん断強度)と(地盤にはたらくせん断応力)との比を安全率 β とする場合」について検討したい。

まず、代表的な空洞を想定し、空洞の深さ $H=20, 50, 100(\text{m})$ 、空洞直径 $2a=5, 8, 11(\text{m})$ とする。空洞まわりの応力の式¹⁾を用いて、空洞周辺に生じるせん断応力について比較する。

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(1)$$

せん断応力の分布状況を見るため、 $k=1/3$, $H=20(\text{m})$, $2a=11(\text{m})$ に固定し、地盤の粘着力 c (kgf/cm^2) をパラメータとした空洞周辺における $\beta=1$ の等値線(塑性領域)図をFig.1に示す。この条件ではせん断応力の分布は斜めに広がる花弁状となる。この図から、地盤の強度特性 c が低下するにつれて塑性領域が急激に広がることが分かる。

次に、地盤の強度特性 $c=2.46(\text{kgf/cm}^2)$ に固定し、空洞の深さ $H=20, 50, 100(\text{m})$ 、空洞直径 $2a=5, 8, 11(\text{m})$ に対する $k=1$ の場合の塑性領域の変化をFig.2に示す。横軸に安全率 β 、縦軸にある安全率 β で囲まれる領域の断面積をとっている。 $\beta=1$ のときの縦軸が塑性領域の断面積を示す。 β の最小値(最も危険な箇所の安全率、図中の点 A, A', A'', B, C) をみると、深さ H に反比例して減少し、 a は関与しないことが分かる。一方、塑性領域の断面積で比較すると、 a の2乗の比で増加し、また $2a=5(\text{m})$ のとき $H=20, 50, 100(\text{m})$ に対し $20:51.7:98.3$ とほぼ比例して増加する。安全性指標として、(許容可能な塑性領域)と(周囲岩盤に生じた塑性領域)の断面積比を考えるならば、Fig.2に示す結果からみて、岩のせん断強度が大きい場合($\beta=1$ の線が左へ推移する場合)は、深度が与える影響が支配的であるが、岩のせん断強度が小さな場合($\beta=1$ の線が右へ推移する場合)は、空洞直径の与える影響が増してくると言える。

岩盤周辺における安全率 β の最小値のみから考えると、 $\beta_{\min}$ は深度 H に反比例する結果となり、空洞直径 $2a$ は関与しない。しかし、塑性領域の分布形態やそれによって生じる荷重が空洞支保として適した形態、強度に重要な意味をもつならば、空洞の規模や形状の効果も加味した安定指標がより望ましいものと思われる。

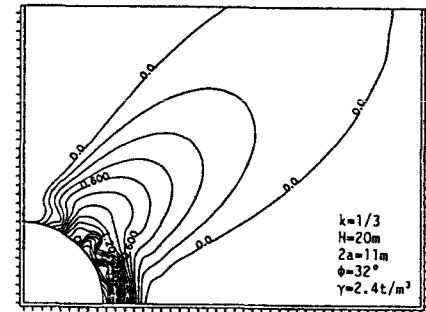


Fig.1 The plastic zones around a hole as a parameter of cohesion C (kg/cm^2)

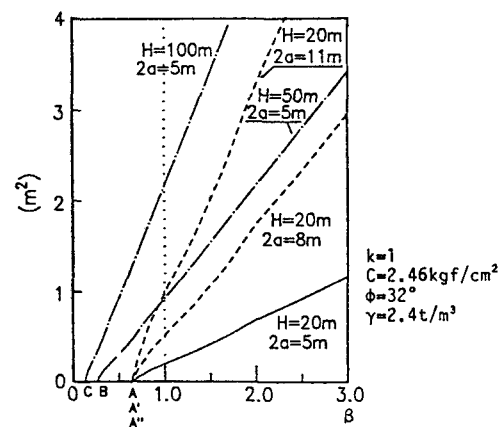


Fig.2 The relation between the safety ratio β and the area included within β

4. まとめ 本稿では、単一円形空洞の平面ひずみ問題を取り扱い、単純な条件で、せん断破壊と塑性領域の視点から空洞深度 H 、直径 $2a$ と安全率の関係を検討した。明確な安全性指標を提示するためには、今後様々なケースについて考察する必要がある。例えば、同様の平面ひずみ問題に限ってみても、空洞断面が楕円形になると曲率の特に大きな縁部に応力集中が生じ、 β が最小となる点が偏平率によって変化し、また塑性領域の形状も変化する。しかし、今回の検討から明らかのように、 H, a が大きくなれば基本的に安全性は低下するのであるから、実際問題として、例えば「 H, a がどの程度の場合、どのような空洞断面が望ましく、またその断面においてどの点でどの程度の内空変位であれば安全とみなして良い」というような形で、またそのための内空変位の計測法のあり方も含めた上での指標の確立が必要である。

(参考文献) 1) Timoshenko, S.: Theory of Elasticity, McGraw-Hill, New York (1934)