

多連設空洞の構造安定問題についての予察

A preliminary study on structural stability of multi tunnels

新 孝一 *

Koichi SHIN

For underground storage or disposal purposes, the major design concept is to array many tunnels parallelly. If the horizontal extent of the multi tunnels is much larger than the depth, we may need to consider a failure mode which does not exist in conventional tunnels. In such multi tunnels, the overburden weight is supported by the rock pillars between tunnels. The whole pillars would collapse and subsidence of the surface would occur if the rock strength is not enough to support the overburden weight.

On the standpoint that the safety factor against this failure mode should be directly assessed in the design of such facilities, some examples of preliminary evaluation are shown. According to the result, such facilities in soft rock conceptually designed so far have been found to be mechanically severe.

Key Words: multi tunnels, HLW disposal, structural stability, room and pillar, safety factor

1 はじめに

地下空洞は交通手段としてのトンネル、水路、地下発電所空洞、石油備蓄空洞などとして利用されてきた。現在では、社会活動のためのエネルギー供給のかんりの部分を担う原子力発電に伴う放射性廃棄物を安全に隔離するためにも、地下の利用が検討されている。交通用途でなく各種物資の貯蔵や廃棄物の処分の用途では多数のトンネル型空洞を設置することが考えられる(図-1)。そのような多数のトンネルを並べて設置しようとする場合に必要と考えられる力学的な検討事項を提示する。そして予備的に行なったごく簡略な評価例を示す。

2 多連設空洞と従来空洞の概念の比較

地下深部に設置される従来型の空洞と、ここで扱う多連設空洞の概念をまず明確にする。

地下深部に設置される従来型の空洞は、必ずしも単設に限らず2ないしいくつかの数のトンネル空洞が近接して設置される場合も含む。そして、設置領域の寸法に比べて十分に設置深度が大きいものである。だから、力学的な設計において地表を境界条件

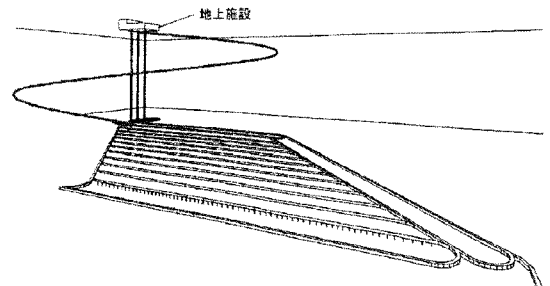


図-1 多数のトンネル空洞の配置概念例¹⁾

* 正会員 (財)電力中央研究所 地圏環境部

とする必要のない空洞である。このような地下深部の従来型空洞においては、空洞より十分離れた仮想境界から初期地圧が作用するモデルで空洞の力学挙動を評価することができる。

一方、高レベル放射性廃棄物(HLW)の地下処分などのための地下施設において、平面的にかなり広い領域に亘ってトンネル群を配置する概念がある。例えば、核燃料サイクル機構が日本における HLW の地下処分の実現性について検討した通称 2000 年レポート¹⁾では、一例として長さおよそ 940m、直径およそ 5m のトンネル多数を平面領域 940m×930m に建設して 1 パネルとし、複数パネルを配置する概念を示している。硬岩の場合の設置深度はおよそ 1000m、軟岩の場合はおよそ 500m と例示されている。いずれの場合でも深度に比べて施設の平面的広がりが無視できないものになっている。このように、地下深部に設置される従来空洞とは異なる配置上の特徴を持つものを多連設空洞と呼ぶことにする。

ここでは、さらに両者の区別を明確にするために次の 2 つの理想的な配置を考える。地下深部に設置される従来空洞とは、理想的には無限体中に有限個が配置される空洞施設である(図-2 (a))。また、多連設空洞とは半無限体中の有限深度に水平方向に無限の広がりをもって配置される空洞群である(図-2 (b))。現実の空洞施設はこの両者の中間になるわけであるが、どちらに近いかにによって力学的に異なる扱いの必要になることが考えられる。

3 多連設空洞の構造安定問題

岩盤空洞施設の設計においては、まず空洞周辺岩盤の安定性が検討される。地下深部に設置される従来空洞の場合には、それは地圧の作用している無限体中に空洞を掘削する問題として検討することができる。空洞周辺岩盤には応力集中が生じ、場合によってはその応力状態によって岩が破壊するなど非線形化した領域が空洞周辺に形成される。ここではそのような領域を緩み領域と呼ぶことにする。

地下深部に設置される従来空洞にもさまざまな施設があり、その具体的な安定評価と設計方法は異なる。しかし、基本的な考え方はいずれの場合でも、空洞周辺に形成される緩み領域が空洞内部に崩落したり押し出したりしないように適切な支保を設計することである。

一方、多連設空洞の場合には上述のような局所的な緩み領域の形成とは別の地盤全体の構造安定問題が生じる。これは次のようなものである。図-2 (b)のように、深度 Z に幅 D の空洞が幅 L の岩を隔てて水平方向に多数連設されるとする。この地盤では幅 L の岩柱の群がその上の地盤の重量を支えることになるが、もし岩盤の強度が不足して支えきれなければ、全空洞群が崩壊し地表が沈下することになる。地盤の重量を支える幅 L の岩柱に対する载荷の条件は変位ではなく荷重であるから、破壊が生じるならそれは瞬時の現象となり得る。これは地下深部に設置される従来空洞の設計で考慮する空洞周辺の緩み現象とは異なり、安定上より重大な破壊モードである。このような地盤全体が構造的に破壊するか否かの問題をここでは構造安定問題と呼ぶことにする。

緩み現象は一種の破壊現象といえることができるが、空洞周辺の局部に留まるものであり工学的重要性は相対的に言えば低い。掘削をすればある程度の緩みは避けられないし、どれだけの緩みが生じたら地盤構造として絶対的にクリティカルなのかの限界値はない(PS 工などの支保はその強度が限界値となるがこれは別問題である)。

これに対して構造安定問題では、支える岩盤の強度(耐荷力)と上部地盤の重量の大小関係からクリティカ

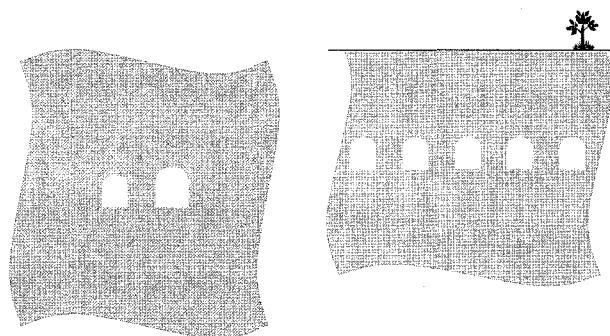


図-2 (a)左：深部に設置される従来型空洞
(b)右：多連設空洞

ルな限界状態が存在する。これは、安全余裕度を適切に設定し適切な設計により回避しなければならない問題である。

4 類似施設の設計の検討例

まずここで、類似施設として2ないし3連設の地下空洞、石油地下備蓄空洞、2000年レポートによるHLW地下処分空洞、また、鉱山(ルーム・アンド・ピラー法)についてその空洞間の距離などについてどのような検討が行なわれているかをレビューする。

4.1 連設の地下空洞

地下発電所などでは、発電機を収納する空洞の他に隣接して変圧器その他の機器を収納する空洞を設置することがあり、連設に関する安定性の検討が行なわれる。また、日本での建設事例はないが、原子力発電所の地下立地について、いくつかの成立性検討事例²⁾³⁾⁸⁾がある。その一例によれば図-3に示すような2連設(双設)、3連設の場合について

連設空洞の掘削時・地震時安定性検討における諸元

物性		
静的変形係数	GPa	10
ポアソン比		0.25
密度	g/cm ³	2.56
せん断強度	MPa	0.4
引張強度	MPa	0.2
破壊包絡線指数		1.5
緩み定数		3
* 動的変形係数 = $3E_0$, 減衰定数 5%		
* 発破損傷領域 1m ~ 3m を考慮		
入力地震動		
388~400gal (解放基盤面での最大加速度)		

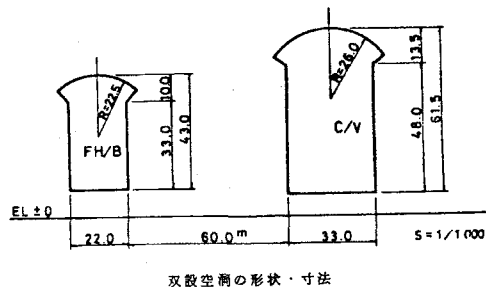


図-3 2連設(双設)空洞の成立性検討例(原子力地下立地)

掘削時および地震時の空洞周辺の緩み領域を解析で検討している。その解析では、緩みを岩盤の粘弾塑性を考慮して解析評価し、局所安全率が1以下の領域の広がり程度を空洞安定性評価の目安としている。

その評価結果は次のように示されている。掘削時における局所安全率1以下の領域は壁面からせいぜい2~4mの範囲であり、ロックボルト等で補強することにより対処できる。また、寸法の異なる空洞の連設では連設の影響は大きい空洞より小さい空洞に現れる。地震時においては、原子炉空洞(C/V)周辺では局所安全率1以下の領域は少し広がる程度であるがタービン空洞(FH/B)でアーチ部に壁面から10m程度まで広がる。これはロックアンカーで十分に対処可能である、と評価されている。

4.2 石油地下備蓄空洞

岩盤タンク技術指針(H13)⁴⁾に空洞の離隔距離の設定について次のように記されている。「岩盤タンク間及び岩盤タンクとその他の地下構造物との離隔距離は、相互の空洞の安定性を確保する点から、空洞の緩み域を考慮して決めるものとする。」その考え方は、掘削に伴う発破や地圧変化によって塑性化し緩み域が発生するが、それが隣接する空洞と相互に力学的影響を及ぼさないだけの距離を確保する、というものである。

確保すべき離隔距離Lを、久慈、菊間、串木野基地の事例として次式で示している。

$$L = (B_1 + H_1 + B_2 + H_2) / 4 + R_1 + R_2$$

ここで、 B_i, H_i は空洞iの内壁面の最大幅と最大高さ($i=1,2$)、 R_i は空洞iの周辺岩盤の緩み域の幅である。

また同指針に、支保設計については、「岩盤タンクの坑壁において崩落等が生じないように、適切な支保を配置する」と記されている。その考え方は次のようなものである。メンテナンスフリーの観点から適切な支保

としてロックアンカーでなく吹付コンクリートとロックボルトを採用する。ロックボルトの作用効果として縫い付け効果を認め、緩み領域を縫い付けて崩落・滑りを防ぐために必要な長さや数量のロックボルトを導入する。なお、天端では崩落、側壁においては緩み領域内の滑りを考慮する。

4.3 HLW 地下処分空洞

JNCによる2000年レポート⁴⁾では、力学的安定性の観点から必要となる空洞離隔距離を数値計算によって求めている。安定性の評価を、支保工については応力度、岩盤については局所安全率と最大せん断ひずみを併用して行なった。その判定のために、支保工(鉄筋コンクリート覆工)の許容応力度は安全尤度を3程度として14MPaと設定した。また岩盤の局所安全率は1.5以下の領域が対策工で改良できる範囲内であり双設空洞間に局所安全率1.5以上の健全な岩が確保されていることを条件とした。岩盤の最大せん断ひずみについては、双設空洞距離を小さくしてもその分布状況が大きく変化しないことを条件とした。なお、解析には弾塑性モデルとクーロン型の直線破壊規準を用いている。

このような検討により、硬岩と軟岩の2ケースに対して力学的安定性を確保するために最低必要な空洞離隔距離を求めている。表-1に2ケースの主な諸元と必要な離隔距離を示す(縦置方式)。硬岩の場合には壁から壁の離隔距離が空洞幅Dの1倍、軟岩の場合には1.6倍が力学的に必要と例示されている。

なお、硬岩の場合には支保効果を無視して解析し、軟岩では支保工厚50cmを設定している。

4.4 鉱山・炭鉱

鉱山や炭鉱での採掘方法は鉱床や炭層の分布形状によってさまざまであるが、水平～緩傾斜の層状の場合、1つの主要な方法としてルーム・アンド・ピラー(図-4)がある。これは柱房式採掘法あるいは残柱式採掘法、地並払採掘法とも呼ばれ、鉱石の一部を採掘しないでピラー(鉱柱)として掘り残し、このピラーによって天盤を支持しながら鉱石を採取する無支保採鉱法の一つである⁵⁾。ルーム・アンド・ピラー法におけるピラー設計には、安全率を用いる方法が世界的にみて多く用いられてきている⁶⁾。すなわち、ピラーに作用する荷重に対するピラー強度の比を安全率とし、その値としては条件にもよるが通常1.5～2.1が推奨されている⁶⁾。

この安全率を求めるには、ピラー荷重とピラー強度を知る必要がある。ピラー荷重については、坑道の配置・広がりに応じて影響範囲を考慮し適切に定める必要があるが、本報告では多連設空洞の極限的理想モデルとして水平方向に無限に広がるものを取り扱うので詳細は省略する。ピラー強度(σ_p)は、鉱柱の幅(B)、長さ(L)、高さ(H)に依存し、その推定式が実験的あるいは理論的に検討されてきている。ここでは例としてBieniawski⁷⁾のものを示す。

$$\sigma_p / \sigma_r = 0.64 + 0.3(B/H) \quad B/H > 1, \quad B > 1.5m, \quad \sigma_r: \text{原位置での岩盤(炭層)の強度}$$

なお、ルーム・アンド・ピラーでは鉱柱の安定性だけでなく、天端の崩落に対する安全性についても別途検討が行なわれると思われるがここでは省略する。

表-1 JNC¹⁾による空洞離隔の力学的検討結果

		硬岩	軟岩
一軸強度	MPa	115	15
設置深度	m	1000	500
密度	Mgm ⁻³	2.67	2.2
側圧係数	-	1.0	1.07
力学安定に必要な最低の離隔距離	-	1.0D	1.6D

* 離隔距離：隣り合う空洞の壁から壁の距離

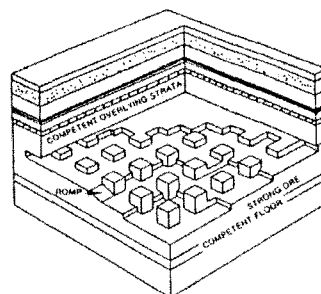


図-4 ルーム・アンド・ピラー法⁵⁾

4.5 まとめ

以上の、(1)地下発電所等の地下空洞、(2)石油備蓄空洞、(3)HLW処分空洞、(4)鉱山(ルーム・アンド・ピラー)での安定性に関する考え方を簡単にまとめると次のように言える。(1)～(3)では、空洞間や空洞周辺にどの程度の緩み領域が発生するかを検討し、それが過度でないかどうかで安定性を判断している。(4)のルーム・アンド・ピラーでは、鉱柱の強度とそれに作用する上載荷重を安全率で評価している。

5 多連設空洞における構造安定性の簡易な評価例

3節で述べたように多連設空洞には、深部に設置される従来空洞には存在しない構造安定問題があるので、その安定性を安全率のような指標で直接評価する必要があると考えられる。これは例えて言えば、滑るか否かの構造安定問題を有する斜面においてその滑り安全率を評価することに対応する。

ここでは、4つの仮想的な多連設空洞仕様(表-2)を定めて構造安定性を安全率で評価してみることを試みる。構造安定性の安全率を、耐荷力と作用荷重の比で定める。作用荷重は多連設空洞上部の地盤の自重であり、水平に無限に広がる多連設空洞の場合には次式で表される。

$$1 \text{ スパン}(L+D) \text{ の作用荷重} = \text{比重} \times \text{深度} \times (L+D) \quad (\text{単位長の奥行きあたり})$$

耐荷力は空洞間の岩盤および覆工支保が耐えられる荷重である。耐荷力の評価法として試みに次の3つを用いる。

①覆工支保を考慮せず、岩盤の一軸強度 σ_r で耐荷力を評価する。これは4.4節で述べた鉱山のルーム・アンド・ピラーにおいて行なわれる安全率と基本的に同じである。寸法を図-5①のようにとる。

$$1 \text{ スパン}(L+D) \text{ の耐荷力} = \sigma_r \times L \quad (\text{単位長の奥行きあたり})$$

②覆工が図-5②に示すように矩形であると仮定し、垂直部分の覆工の圧縮強度 σ_c を耐荷力に算入する。

$$1 \text{ スパン}(L+D) \text{ の耐荷力} = \sigma_r \times (L-2t) + \sigma_c \times 2t \quad (\text{単位長の奥行きあたり})$$

③覆工が図-5③に示すように円形であると仮定し、覆工の圧縮強度が耐えられるだけの、覆工外周の仮想的な最大静水圧力が、岩盤に拘束圧として作用すると考える。岩盤の内部摩擦角を 30° として岩盤の耐荷力を評価する。

後2者②,③は必ずしも覆工の効果を評価する適切な方法として提示するものではなく、大胆な仮定のもとに簡易な方法で覆工による耐荷力の向上を算入した例である。特に評価法③は覆工に実際以上の過度な効果の期待をする可能性がある。

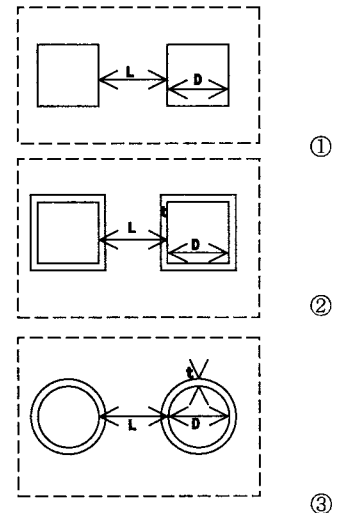


図-5 覆工の耐荷力向上効果をモデル化するための概念図

4つの仮想的な多連設空洞の仕様を表-2に示す。ここで、ケースA,BはそれぞれJNC2000年レポート

で例示された硬岩用と軟岩用の仕様を参考に設定した。ケース C,D は全く仮想的に設定した仕様である。

表－２の下部には、それぞれの空洞仕様に①～③の安全率評価法を適用した結果を示している。岩盤強度が 115MPa と大きく、無覆工、離隔 1D のケース A では設置深度が 1000m でも安全率 2.2 程度を確保している。強度が 15MPa で離隔 1.6D のケース B では、覆工の効果を簡易に算入しても安全率 1 前後になっている。岩盤強度が鉛直地圧より小さいケース C では、覆工による岩盤拘束圧上昇に伴う強度増加の効果を仮定(③)した通りに期待できたとしてもまだ安全率は 1 前後である。深度が小さいケース D では、覆工の効果を期待できれば安全率向上幅が大きい。

6 まとめ

例えば放射性廃棄物地下処分で検討されているような多連設空洞と、深部に少数が設置される従来型の空洞には構造的に力学的な差異がある。そのため多連設空洞では従来型空洞にない地盤全体の破壊モードがあるので、それに対する安全性(安全率)を直接に評価すべきであるとの立場にたって、ごく簡単な方法で予備的に評価例を示した。その結果によると軟岩の場合には厳しい結果となるので、より慎重な設計を行なう必要があると考える。

謝辞

動燃事業団委託により資源素材学会で開発された採鉱法に関するエキスパートシステムを、東京大学新領域創成科学研究科環境学専攻の教授 大久保先生に使わせていただいたことを記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 核燃料サイクル機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊2「地層処分の工学技術」1999
- 2) (社)原子力工学試験センター(1990): 平成元年度高耐震構造立地技術確証試験 地下立地方式に関する調査報告書
- 3) (社)土木学会(1993): 原子力発電所の立地多様化技術 第3編 地下立地技術, 1993年3月
- 4) 岩盤タンク技術指針: 石油公団, 2001年3月
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団委託研究, 資源・素材学会 採鉱法設計支援システムの開発委員会: 採鉱法選定 B 案エキスパートシステム, 1998
- 6) W Pytel: Rock mass-mine workings interaction model for Polish copper mine conditions, Int J Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(2003), 497-526
- 7) Bieniawski ZT: Strata control in minera engineering. A.A. Balkema: Rotterdam, 1987
- 8) 日比野,他: 原子力発電所地下立地方式のケーススタディによる成立性評価, 電力中央研究所報告 U17, 1991

表－２ 構造安定性を試算した仮想的 4 ケース

		多連設空洞ケース			
		A	B	C	D
深度	m	1000	500	300	100
鉛直地圧	MPa	26	11	6	2
一軸強度	MPa	115	15	3.1	2.8
離隔	—	1D	1.6D	1.5D	1.5D
空洞幅	m	5	5	5.3	17
覆工厚	m	0	0.5	0.15	0.5
覆工強度	MPa	0	14	54	36
安全率①		2.21	0.84	0.31	0.84
安全率②		2.21	0.83	0.50	1.23
安全率③		2.21	1.05	1.11	2.49