

(11) 燃料地下貯蔵空洞の掘削時の安定解析とPS工法による空洞の補強

電力中央研究所 日比野 敏

1. はじめに

重油、原油やLPGなどの燃料を岩盤内に貯蔵する場合、多数の空洞を隣接して掘削することになる。そのサイトとしては輸送の関係上海岸近くを選ぶことが多く、岩盤は必ずしも堅固であるとは限らない。したがって、空洞の設計にさいしてはその大きさ・形状・隣接空洞との離間距離などの検討が重要となる。また、貯油時に空洞周辺岩盤に間隙圧が作用し空洞の安定性が低下することが考えられる。そこで、岩盤の非線型な変形特性を考慮した掘削解析手法¹⁾により離間距離について検討するとともに、空洞周辺のゆるみ領域のPS工法によるすべり安全率の一計算手法について報告する。

$\tau_r = 10 \text{ kg/cm}^2$ $k = 1.43$	$\tau_r = 10 \text{ kg/cm}^2$ $k = 0.7$	$\tau_r = 20 \text{ kg/cm}^2$ $k = 0.7$
---	--	--

2. 隣接空洞との離間距離

空洞の形状により力学的安定性は異なる。つまり以前報告²⁾したようにきのこ型空洞と卵型空洞を比較すると後者の方がその安全がすぐれている(図-1)。そこで空洞形状としては図-2に示すような形状とし、岩盤が必ずしも堅固でない場合も想定し幅1.5 m、高さ2.25 mの規模の空洞を掘削する場合について検討を行なうことにした。地山の被りは140 mと240 mの場合を想定した表-1の地圧、物性の場合について検討した。空洞の離間距離 D

は空洞の高さ H と幅 W の平均値を単位として $D = k(H + W)/2$, $k = \infty, 1, 0.5$ の3ケースについて検討した。トンネルなどでは幅が単位として扱われるが、高さ
と幅が異なる場合には上述のごとく高さも考慮に入れるのがよいと考えられる。地圧の側圧比は0.5

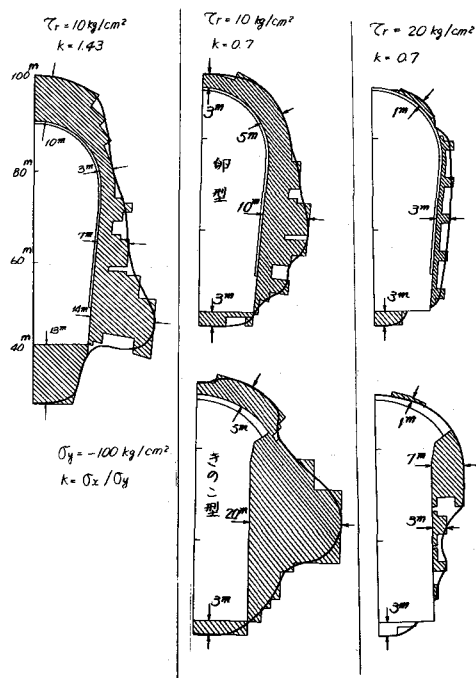
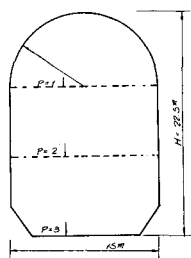


図-1 空洞の形状効果による
ゆるみ領域の相違

1.0, 1.5, 2.0の4種類である。図-2 空洞形状

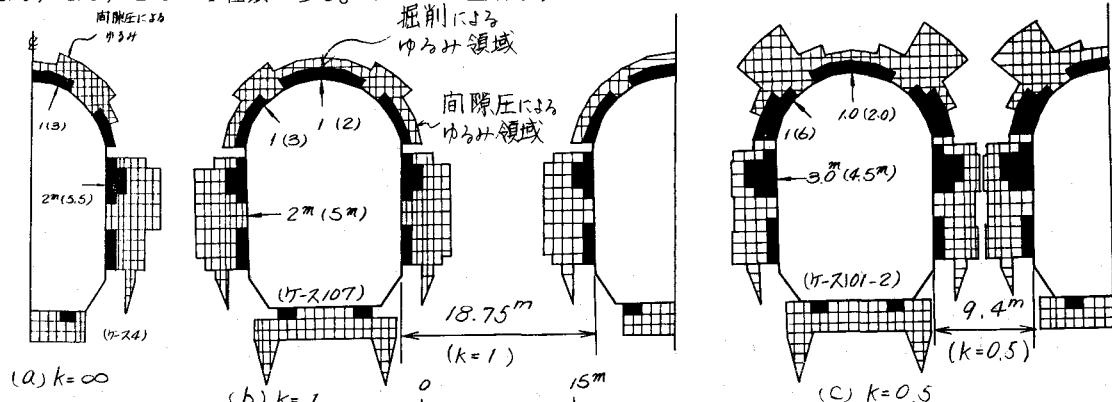


図-3 空洞離間距離とゆるみ領域の分布との関係 ($h=140\text{ m}$, 側圧比0.5の場合)

境界条件としては地圧が偏圧でないので単独空洞（離間距離 $k = \infty$ ）の場合，半断面について解析を行なうことにし，上下方向に 70 m ，水平方向に 35 m の領域を 237 個の四辺形の有限要素で表現し，空洞中心線上は上下方向のローラー条件とし他の境界は完全固定とした。また連設空洞の場合には上下方向に 90 m ，水平方向に $49\text{ m} \sim 68\text{ m}$ の領域を 948 個の四辺形の要素で表現し側面は上下方向のローラー条件，上・下面は固定とした。そして空洞は $3 \sim 6$ ステップで掘削したものとして解析を行なった。

解析手法および結果の詳細は別報³⁾にゆずり，主要な結果を以下に示す。なお，土被りが 240 m の場合は土被りが 140 m の場合より安定性がすぐれていたため，ここでは 140 m の場合を中心に述べる。

図-3にゆるみ領域の分布と空洞の離間距離との関係を示す。ここでゆるみ領域とは掘削により岩盤の強度，変形性が低下し施工にさいしては補強を要する領域である。掘削解析上ではポアソン比が 0.45 以上，変形性係数が初期値の約 $1/10$ 以下となった領域に対応する。 $k=1$ の場合には $k=\infty$ の場合とほぼ同じゆるみ領域でその最大深さは 2 m であるが， $k=0.5$ になるとゆるみ領域の深さは 3 m に増大し，隣接空洞の掘削による影響があることが判る。この原因としては，距離が短くなると側壁岩盤内の応力が一軸状態に近づき，破壊の包絡線により近づくからと考えられる（図-4）。

これらの結果より，離間距離として $k \geq 1$ ，つまり空洞の高さと幅の平均値以上とれば，空洞を隣接して掘削してもそのことによりゆるみ領域は増大しないことが判る。ただし，岩盤の力学的性質が違えば空洞の安定性も異なるし，漏油の問題に関しては別途検討が必要である。

3. 間隙圧の影響

空洞に貯油すると間隙圧が作用する。その大きさは燃料の貯蔵深さ・方法・種類等により異なるが，ここでは 7 kg/cm^2 が作用する場合について検討する。間隙圧 7 kg/cm^2 が空洞周壁の岩盤に作用し，岩盤内の有効応力が 7 kg/cm^2 低下するものとし，その結果ゆるみ領域がどの程度増加するかを求める。その結果の一例を図-3に示す。間隙圧の作用によりゆるみ領域の深さは 2 m より 5 m へと約 3 m 増大しており，その影響は大きい（図-5）。単独空洞で側圧比が違う場合の間隙圧の影響をみると（図-6），側圧比が 2 の場合には側壁のゆるみ領域が間隙圧により約 2 m 増大しているのに対し，側圧比が 0.5 の場合には 3.5 m の増加となっている。つまり側圧比が小さい場合の方が間隙圧の影響が大きい傾向を示している。この傾向は被りが 240 m の場合でも同じである。

掘削により生ずるゆるみ領域と間隙圧によるゆるみ領域を比較すると，側圧比が低い場合には後者のゆるみの方が大きい。このように間隙圧の影響が大きい原因は，周壁岩盤の強度が掘削によりすでに低下しているからと考えられる。したがって，施工にさいしてはロックボルト・PS工やグラウト等により壁面の安定

表-1 地圧と岩盤物性

初期地圧	水平応力成分 σ_{x0}	(kg/cm^2)	$(0.5 \sim 2) \sigma_{y0}$
	鉛直応力成分 σ_{y0}		3.36, 5.76*
	せん断応力成分 τ_{xy0}		0
	σ_{x0}/σ_{y0}		0.5, 1, 1.5, 2
岩盤の力学的性質	変形性係数 $D_0 (10^4 \text{ kg/cm}^2)$		4, 12*
	ポアソン比		0.32, 0.27*
	クリープ係数	α	1
		$\beta (1/\text{日})$	0.5
	せん断強度 $\tau_r (\text{kg/cm}^2)$		7.5, 13.5*
	σ_t/τ_r		0.14
包絡線指数	a		2
	k		2
	掘削ステップ数		3, 6

被り厚さ 140 m (*印は 240 m)

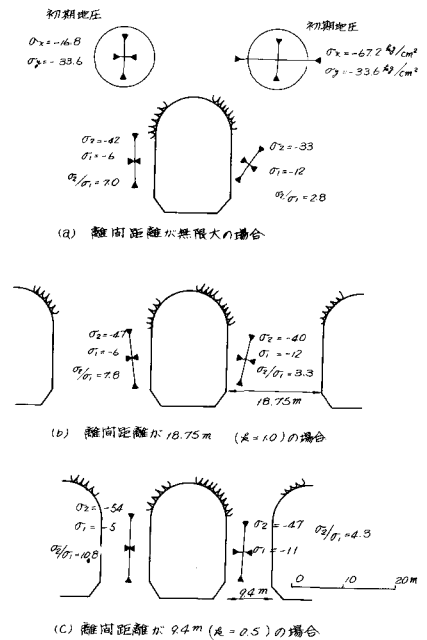


図-4 離間距離と岩盤内応力の関係

をはかる必要がある。

4. 空洞の掘削順序の影響

燃料貯蔵用空洞の場合、沢山の空洞が並設される。これらの空洞を掘る順序による岩盤の挙動の有無をつぎのケースについて検討した。つまり、空洞を同時に掘削する場合と、両側の空洞の掘削を先行させその後に中央の空洞を掘る場合の比較よりつぎの結果が得られた。

- (1) 岩盤内の応力：両ケースともほぼ同じであるが、同時掘削の場合の方が若干小さい。
- (2) 岩盤の変形：同時掘削の場合の方が交互に掘削する場合よりも少ない。

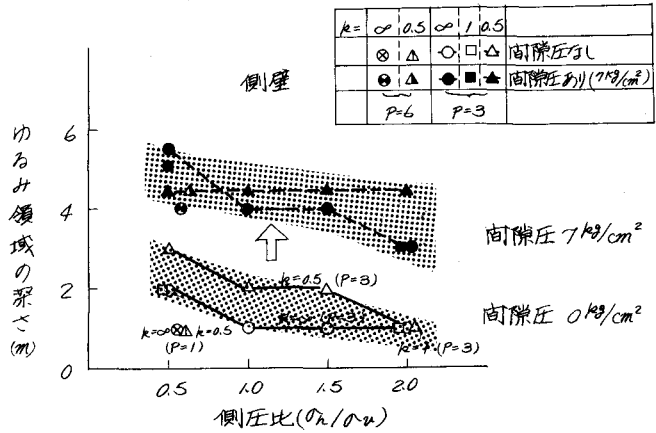


図-5 間隙圧がゆるみ領域の増大に及ぼす影響

- (3) ゆるみ領域：同時掘削の場合、側壁で3 mであるのに対し、交互掘削の場合は4.5 mと大きくなっている。したがってこれらの結果より、同時に掘削を進める方が交互に掘削を進めるよりも安定がよいと思われる。ただし、この結果は側圧比が0.5、離間距離9.375 m ($k=0.5$) の場合である。つまり鉛直地圧成分が水平成分に比べて大きい場合であり、隣接する空洞を掘ると次に掘る空洞側へ鉛直地圧が分担されていくためにゆるみ領域の増大することが考えられる。したがって側圧比、岩盤物性、離間距離などが異なる場合には上述の結果と異なってくることも考えられる。

5. 空洞配置標高の影響

岩盤の物性は地山被りが大きくなれば一般にはよくなり、空洞の安定にはプラスとなるが、一方地圧も大きくなり場合によっては安定が悪くなる。被り厚さを140 mと240 mの場合について検討した結果では

- (1) 岩盤内の応力：応力集中係数は被りによらずほぼ同じである。
- (2) 側壁の変形：被り140 mの場合に比べ被り240 mの場合の方が変形は小さい。前者では変形係数 D_0 が4万 kg/cm² であるのに対し、後者は3倍の12万 kg/cm² としているのに対し、地圧の比率は2倍以下となっていることによると思われる。
- (3) ゆるみ領域：両者ともほぼ同じである。ゆるみ領域に関係のあるせん断強度でみると、その比率が地

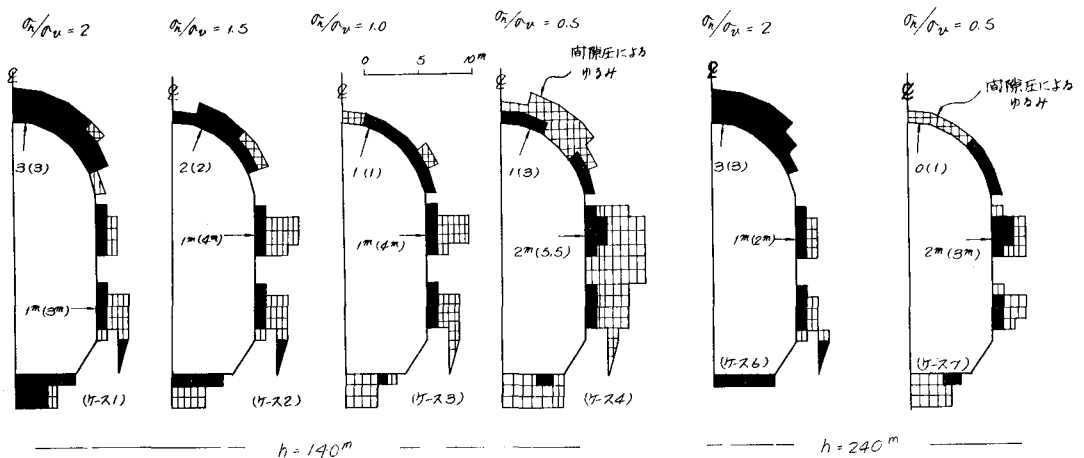


図-6 間隙圧によるゆるみ領域の増大と側圧比の関係

圧の比率とほぼ同じであるためにゆるみ領域もほぼ同じになったものと思われる。

したがって、今回想定した物性の場合では、空洞はより深い $h = 240\text{ m}$ の位置に設置した方が安定性がすぐれていることになる。

6. 補強によるすべり安全率

空洞周壁のゆるみ領域の補強にはロックボルト・P S 工や吹付工などが用いられる。これらの補強工による岩盤すべり安全率の評価にさいして、岩盤の強度や地圧分布などの考慮がこれまで十分でなかったように思われる。そこで、基本的には(a)ゆるみ領域における残留強度、(b)岩盤の応力分布、(c)ゆるみ領域の分布形状、(d)P S 工法等による緊張力および補強材料の強度、などが補強効果に関与していると考え、これらの項目を考慮したすべり安全率の試算式を先に提案した⁴⁾ (図-7)。つまり、

$$f_s = \frac{\sum(C_b + C_c) + \sum C_r + \sum l_i + \sum \sigma_i + P_i \sin \alpha_i \sin 2\bar{\theta}_i + 0.5 P_i \cos \alpha_i (1 + \cos 2\bar{\theta}_i)}{\sum(\tau_i + P_i \sin \alpha_i \cos 2\bar{\theta}_i - 0.5 P_i \cos \alpha_i \sin 2\bar{\theta}_i) l_i} l_i \tan \phi_r \quad (1)$$

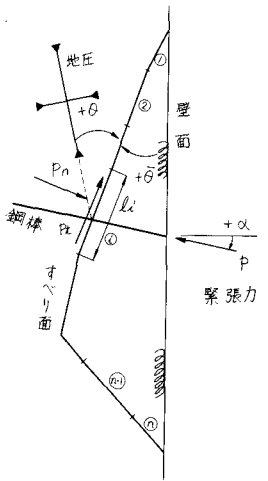


図-7 すべり面と緊張力導入方向

ここで f_s : すべり面のすべり安全率, l_i : すべり面の区分長さ, i : 区分番号, Σ : すべり面上についての和, σ , τ : 地圧のすべり面上の直応力とせん断応力, P : 単位面積当りのP S等による緊張力(負号), C_r : 岩盤の残留強度, ϕ_r : 内部摩擦角, C_b : P S工法等で用いた鋼棒などの抵抗, C_c : 吹付コンクリートによる抵抗要素, α : 緊張力の作用方向が壁面の法線となす角, $\bar{\theta}$: 壁面とすべり面とのなす角, である(図-7)。

(1)式で特徴的なことは、 α 、つまり緊張力の導入方向によってすべり面の安定性が異なることである。 $\alpha = 0$ 、つまり壁面の法線方向に緊張力を作用させるのがその効果としては最も望ましい。しかしながら充填方法などの関係で $\alpha \neq 0$ とする場合には、 α による安全率の違いを検討して α を決める必要がある。

具体的な検討例については当日紹介する。

7. まとめ

燃料地下貯蔵用空洞を並設して掘削する場合の空洞の力学的安定性を掘削解析手法により検討した。そして、(1)空洞間の離間距離としては空洞の高さと幅の平均値程度以上が必要である、(2)燃料貯蔵により岩盤に間隙圧が作用するとゆるみ領域が拡大される場合があることなどを示した。

8. 参考文献

- 1) 林, 日比野: 地下発電所の空洞掘削時の岩盤挙動解析, 地下構造物の設計と施工, 土木学会, 1976
- 2) 日比野: 大規模空洞の掘削時安定性と空洞の形状効果, 物理探査, 第31巻, 第4号, 1978
- 3) 日比野, 林, 北原: 水封式燃料地下貯蔵の技術開発に関する研究——並設空洞の離間距離と安定性との関係—— 電力中央研究所報告, ㉞379001, 1979
- 4) 日比野, 川崎: 岩盤のすべり安定補強に関する一考察, 土木学会第34回年次講演会, 第3部, P215, 1979

Stability Analysis of Multi-underground Storage Caverns for Fuels and Reinforcements

Satoshi HIBINO

Central Research Institute of
Electric Power Industry,
1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba-ken
Japan

Stability analysis on behaviour of rock masses around caverns for fuels was carried out using finite element method. The method of the analysis is able to take into consideration several factors such as characteristics of failure envelope, non-linear deformability of rock masses, and excavation stages etc..

A size of oil storage caverns would be rather small, because of not so good rock conditions in sites near seaside. The author, therefore, has set the size of 15m in breadth and 22.5m in height.

Through the simulation of excavation for multi-underground caverns, the following results were obtained;

(1) Distance between adjacent caverns

The adequate distance between caverns has been shown to be equal or more than an average value of a height and a breadth of caverns. If the distance would be smaller than that, sizes of relaxed zones would be enlarged due to effects of excavation for adjacent cavities.

(2) Pore pressure

Filling fuels into caverns produces pore pressure in rock masses around caverns, which causes sizes of relaxed zones grow large. The effect of pore pressure is very remarkable.

In the case of pore pressure of 7 kg/cm^2 , the depth of added relaxed zones was about 3m which was nearly equal to the depth of relaxed zones formed during excavation.

(3) Reinforcement

Reinforcement of rock bolts or pre-stressing bars increases safety factors for sliding in relaxed zones. The author presented one method of evaluating safety factor with the idea that the safety factor should depend on such factors as residual strength, stress distribution, shapes of relaxed zones, pre-stressing and strength of reinforcements, etc..