

大規模な地下空洞の掘削時の挙動解析・実測と今後の設計について

電力中央研究所 日比野 敏, 林 正夫, 本島 睦

1 掘削解析の特長 大規模な地下空洞掘削にさいして、空洞周辺岩盤の力学的安定性の事前の検討が工事の保安・管理上極めて重要である。そこで筆者らは掘削解析手法を約10年前に開発し、各地の地下空洞掘削に際して空洞の力学的安定性について検討し、さらにそれらの計算結果と実測結果との比較(表-2)を行ないその有用性を確認してきた。⁹⁾ この手法で考慮している岩盤力学上の事項としては、(1)地圧の解放と発破による緩み(2)応力変化に伴う岩盤の非線型・粘性変形特性、(3)岩盤の破壊特性と残留強度、(4)空洞形状と工程、(5)あと荷の現象などを挙げる事ができる。そして、空洞形状・配置、掘削工程・掘削工法、PC鋼棒などによるゆるみ領域の補強設計など、より合理的な掘削方法の検討をこの解析手法により行なうことができる。PC鋼棒などによる補強設計法は最近のNA T M (New Austrian Tunneling Method)と結果的には同様な考えとなっているように思う。

筆者らの提案する手法以前における日本の地下発電所空洞の形状は、空洞上部にアーチコンクリートを打設してから本体を掘削する形式のいわゆる「きのこ型」の空洞が多かった。これは主として次の理由によるものと思われる。つまり(1)空洞に作用する荷重はTerzaghi 流にアーチ上部のゆるみが主であると考えていたこと、(2)保安面としては本体掘削時に落石・天盤崩壊に対し安全であることなどが挙げられる。しかしながら、掘削解析手法によりきのこ型空洞の力学的安定性を検討してみると、(1)空洞に作用する荷重は主として地圧解放に伴う側壁の空洞内部へ向う変形に起因しており、空洞上部のゆるみによる荷重は比率的にはその影響が少ない、(2)アーチコンクリートを設置する設計では、そのアバットメントでの切り込みが大きくなり、かえって側壁岩盤を乱す原因となっていることが判った。以前にも報告³⁾したが、空洞形状としては流線型の「卵型または馬てい型」の方が「きのこ型」の空洞よりも力学的安定性がすぐれている。今後空洞設計において考慮することが望ましいと思われるのでそれらについて報告する。

2 掘削解析手法のフローと既往の検討経過

掘削解析手法の詳細はすでに報告^{1), 2)}した。ここでは解析で用いる条件や結果の概略を述べる。与える条件(表-1)は岩盤の力学的性質(初期弾性係数、異方的な変形・強度特性(図-1)、軟岩と硬岩による非線型な変形・破壊の包絡線の特性的差(図-2)、残留強度、クリープ係数、ポアソン比など)、初期地圧、地質条件(岩盤分類、断層破砕帯など)、空洞形状、掘削工程、ロックボルトの補強などがデータとなる。そして掘削時の地圧の解放に伴う掘削相当外力による岩盤やライニングの応力・変形および「あと荷」

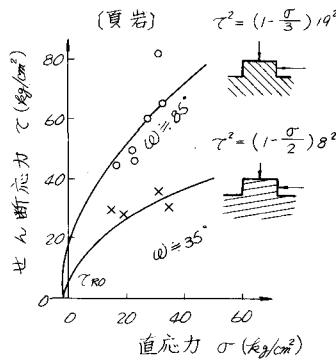
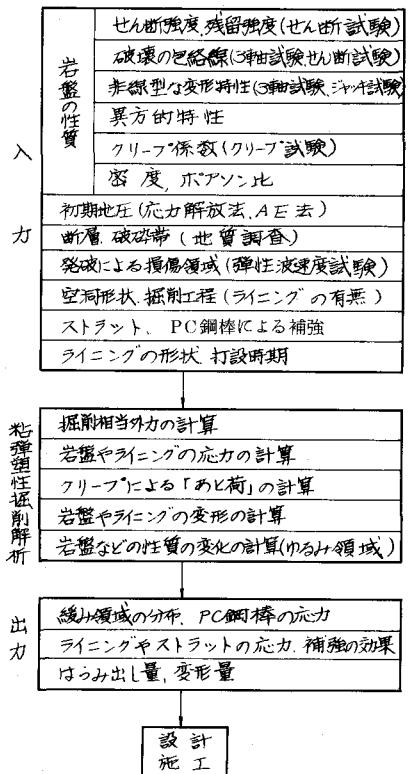


図-1 破壊強度の異方性

表-1 掘削解析のフローチャート



を粘弾塑性解析により求める。結果としてはゆるみ領域、側壁のはらみ出し量、ライニングやストラットなどの応力が得られ、工事に直結した補強設計・施工が行なわれる(図-3)。

これまでに掘削された地下発電所空洞のうち、筆者らが掘削解析などを通して関与してきた例を挙げると表-2のようである。岩盤力学上の特徴事項を挙げると次のようである。(1)局所的な破砕帯部ではらみ出し防止用ストラット(喜撰山), (2)ロックストラットの施工(奥多々良木, 新高瀬, 奥吉野), (3)双設空洞の離間距離の検討(新高瀬), (4)3次元初期地圧測定結果に基づく空洞軸の設計変更(新高瀬), (5)岩盤等級区分によるPC鋼棒の配置設計(南原), (6)せん断強度の異方性測定とゆるみ解析(奥吉野), (7)弱層部の側壁補強の鉄筋コンクリート帯の施工(大平, 南原)などが挙げられる。これらの事項はいずれも空洞の建設・施工にさいして、その地点固有の問題を解決しより合理的な掘削を進めるのに重要な事項であり、その検討にさいしては掘削解析手法が一助を果してきた。これらの空洞形状は、しかしながら、すべていわゆる「きのこ型」であり、今後さらに空洞掘削をより合理的なものにするためには、その形状を「卵型または馬てい型」などに転換していくことが今後重要と思われる。

3 空洞形状による力学的安定性の検討と今後の設計

天盤にアーチコンクリートを打設しその後本体を掘り下がるきのこ型空洞と、アーチコンクリートは打設しないで吹付コンクリート後に掘り下がり空洞形状を流線型にする卵型空洞(図-4)についてそれらの力学的安定性の比較検討を行なう。地圧は鉛直と水平より作用しているものとし、対称性を考慮して半断面について解析を行なう。地圧や岩盤の力学的性質などを同一条件にし形状効果を検討する。境界条件としては空洞中心線上は上下方向に可動のローラー条件とし、他の境界面は固定とする。有限要素は四角形(三角形

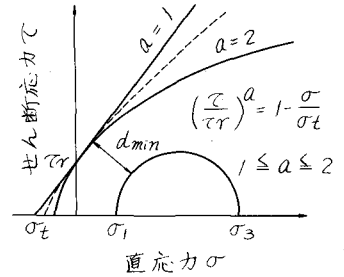


図-2 軟岩~硬岩の破壊強度特性

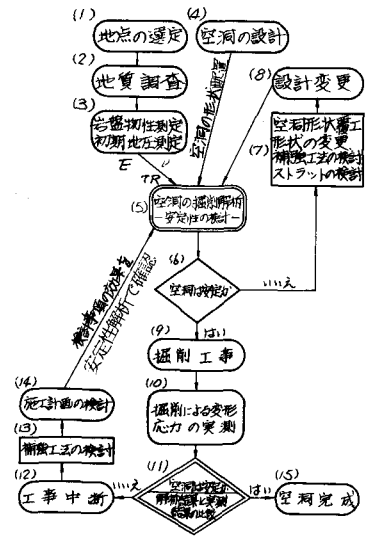


図-3 掘削解析による安定性の検討と掘削工事との関係

表-2 既往の地下発電所空洞の形状, 岩盤物性, 実測値と計算値など

地点名	岩盤の種類	空洞形状(m)			空洞上部の地圧(MPa)		岩盤の力学的性質				アーチコンクリート係数		岩盤の変形係数		ゆるみ領域(m)		特記事項					
		高さ	幅	長さ	σ_x 水平	σ_y 鉛直	α	β (1/日)	クラーフ	ખાંટખેટ	天盤	側壁	天盤	側壁	天盤	側壁						
喜撰山 (1969)	粘板岩 砂岩 チャート	49.6	25.6	60.4	13	40	0	6	15	0.16	0.64	(23)	27	(37)	(大)	(大)	3	(5)	5	(11)	破砕帯の粘弾塑性変形の解析と実測値の照合。ストラットの効果の解析と施工。	
								6	30	0.16	0.64	42	(16)	(6)	(11)	(2)	(7)	(6)	果の解析と施工。			
								12	30	0.16	0.64	(21)	29	(4)	3	(6)	11	(3)		5		(6)
								12.1	30.5	0.16, 0.9	0.64, 1	(12)	(2)	12	(14)	41	(19)	5	(16)	5		(12)
新冠 (1971)	輝緑 凝灰岩	44.6	19.6	52	34	45	7	24	25	0.16	0.64	(47)	(39)		(3)	(2)	(8)	側壁PC鋼棒定着用の周辺ト・ネルの設置。				
								24.4	25.10	0.16, 2	0.64	(135)	(120)		(15)	(3)	(7)					
奥多々良木 (1973)	凝灰岩 粘板岩	49	25	127	59	66	44	10, 7.5	50, 40	0.05, 0.01	0.20, 0.20	45~109 (85~142)	33~99 (46~113)	0.3~0.8 (0.3~0.5)	11~13 (11)	(2)	(7)	側壁PC鋼棒定着用の周辺ト・ネルの設置。				
								10	10	0.17	0.9	(9~17)	(9~27)		4~6 (4~7)	(4)	(9)					
大平 (1975)	砂岩 粘板岩	45	23	83	58	80	16	10	10	0.17	0.9	13~15 (6)	10~12 (8~22)	1~5 (0~4)	3~7 (2)	(3)	(3)	ストラットの設置。岩盤劣化試験。双設空洞の離間距離の効果の評価と設計への適用。3次元地圧の測定結果に基づく空洞軸の設計変更。掘削による弾性変位速度変化の測定。異方性解析。物理系による異方性の異方性変形特性の解析。せん断強度の異方性測定。ロックストラットの設置。				
								30	25	0.17	0.9	80~150 (20~30)	50~100 (15~20)	20 (18)	19~20 (12~31)	(13)	(15)					
新高瀬 (1975)	花崗岩	56	28	166	20	60	22	14	7	32	7	1	0.7	80~150 (15~20)	50~100 (15~20)	20 (18)	19~20 (12~31)	(13)	(15)			
								13	7	20	7	20~70 (20~60)	15~16 (14)	(3)	(12~15)							
奥吉野 (1976)	頁岩	42	20	160	67	70	23	13	6.5	20	7	0.3	1	20~70 (20~60)	15~16 (14)	(3)	(12~15)	物理系による異方性の異方性変形特性の解析。せん断強度の異方性測定。ロックストラットの設置。				
								13	6.5	20	7	20~70 (20~60)	15~16 (14)	(3)	(12~15)							

1) 初期地圧の実測値を基準とした値, 2) 初期地圧相当応力レベルでの除荷時接線弾性係数, 3) 層深角は2次元物線の破壊包絡線により考慮する, 4) ()内は計算値, ()外は実測値, 5) 2点間の相対変位, α, β : は10~30m, 6) 静的なポアソン比が0.45以上の領域, 7) 異方性

が2箇)とし、卵型空洞の場合435箇、きのこ型空洞の場合418箇で表現した。全空洞を6ステップで合計500日を要して掘削する場合について検討した。

空洞掘削完了時の応力分布(図-4)は、きのこ型空洞の場合にはアーチコンクリート打設のために岩盤に大きな「切り欠け部」を掘削するので、卵型空洞の場合に比して1.4倍程度のより大きな応力集中が生じているのが特徴である。この切り欠け部はゆるみ領域や岩盤の変形にも大きな影響を与える。たとえば、第2の掘削段階(図-5)でみると、きのこ型空洞の場合アーチコンクリートのアバットメント下部のA部の岩盤が主となって側壁の掘削相当外力を負担するが、前述の切り欠け部のために構造的に弱くなっているためより広い範囲にゆるみ領域(図中の点線で囲んだ範囲)が発生する。一方、卵型空洞の場合には切り欠け部がないためより広い範囲の岩盤で掘削相当外力を負担するのでゆるみ領域の発生が比較的少ない。この結果は以後の掘削にも影響し、最終的には卵型空洞のゆるみ領域(図-6)は側壁で10mであるのに対し、きのこ型の場合には2倍の20mとなっている。

また岩盤の変形もきのこ型空洞の場合には図-5のA部がゆるむので変形し易く、空洞掘削終了時では卵型空洞の場合の1.5倍もの変形となっている(図-7)。

卵型空洞の方がきのこ型空洞よりも力学的安定性が高くれていることを示したが、いま一つ特徴的なことは、岩盤の力学的性質が比較的悪い場合に卵型空洞の有利性がより効果的に現われることである。たとえばゆるみ領域(図-6)でみると、岩盤のせん断強度 τ_r が 20 kg/cm^2 の場合両空洞の側壁のゆるみ領域の差は約4mであるが、岩盤が比較的弱い $\tau_r=10 \text{ kg/cm}^2$ の場合における差は約10mと大きくなり、卵型空洞の有利性がより大きくなっている。

次に工事の点からみると、卵型空洞の場合天盤部の安定を確保するために各掘削段階直後に吹付コンクリート(スチールファイバーコンクリートと構造金網の併用など)

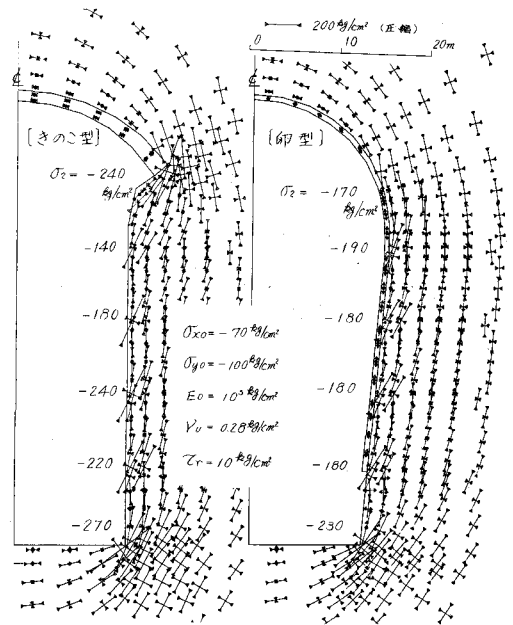


図-4 岩盤内の応力分布

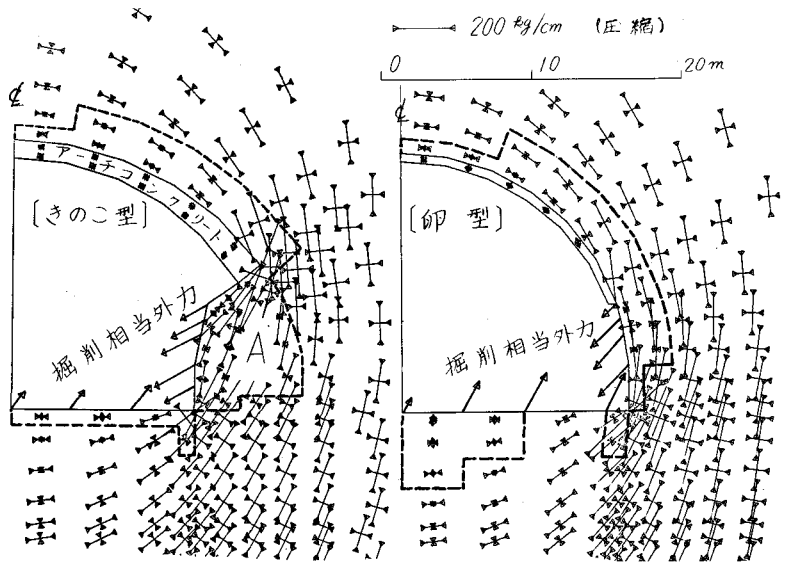


図-5 掘削相当外力の作用とゆるみ領域の発生

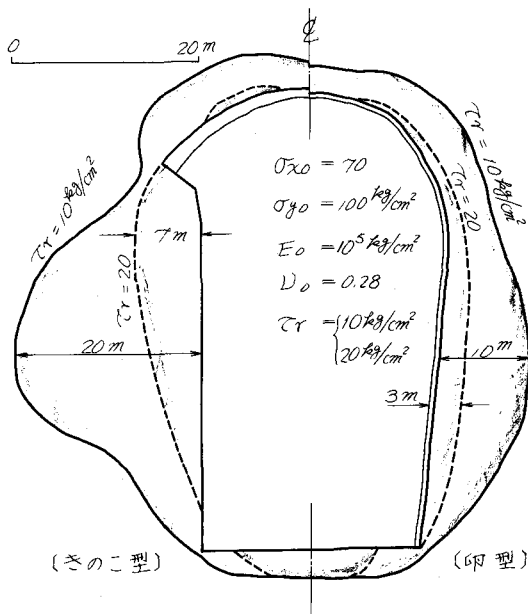


図-6 空洞形状によるゆるみ領域の違い

により岩盤表面を一体化させ、さらに、ゆるんだ岩盤をロックボルトとPC鋼棒等により堅岩部に縫いつけ工事の安全をはかる必要がある(図-8)。側壁の補強は従来と同様である。なお、詳細な設計に際しては(1)節理による滑り安定、(2)ロックボルト、PC鋼棒の効果、(3)吹付コンクリートの特性・効果、(4)掘削工法(ブリスプリット・スムーズブラスタング)、などについてさらに十分な検討を行なう。

4 まとめ きのこ型空洞と卵型空洞を比較検討し、卵型空洞の方が力学的安定性がすぐれていることおよび岩盤が悪いほど卵型空洞の有利性が発揮されることを指摘した。またきのこ型空洞の場合にはアーチコンクリート部分の掘削が岩盤に切り欠け部を作り、かえってゆるみ領域などを増大させており力学上好ましくない。従来のきのこ型空洞では掘削が困難な岩盤でも、卵型形状にすることにより掘削可能となることも考えられ、原子力地下立地・石油の地下備蓄など将来の地下利用の可能性を広げることができると思われる。

最後に、掘削計算に際し建設企画コンサルタントの川崎逸男氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

5 参考文献 1) 林, 日比野: 地下の開削に伴う地盤内の緩み領域の逐次的発達過程の解析法, 第2回岩の力学国内シンポジウム, 1967。または電力中央研究所報告 67095など。2) 林, 日比野: 地下発電所の大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, 1977。または電力中央研究所報告 68123, 671532, 673526, 674520, 67375502, 67375519, 67375533, 67376022など 3) 林, 日比野, 金川: 地下の掘削における初期地圧, 偏圧などに関する二, 三の問題点, 第7回岩盤力学に関するシンポジウム, 1972

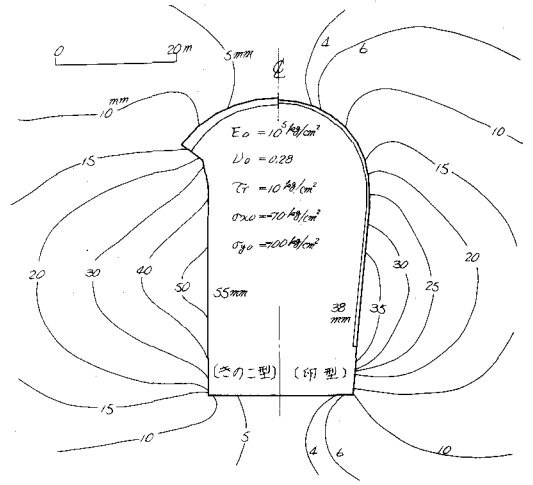


図-7 空洞形状による岩盤水平変位の違い

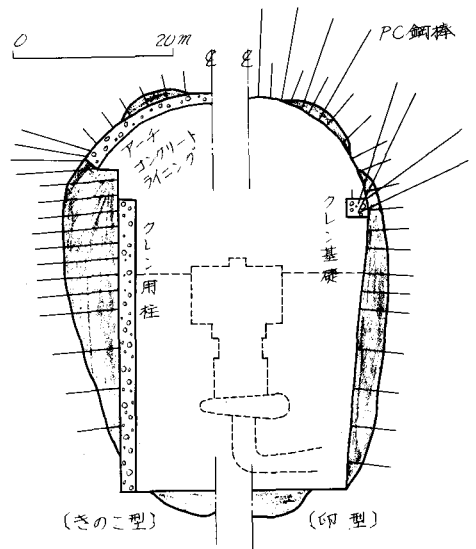


図-8 空洞形状による補強方法の違い

Dependence of the Behaviour of Rock Masses on the Shape of a Cavity during Underground Excavation

Satoshi HIBINO
Masao HAYASHI
Mutsumi MOTOJIMA

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

Synopsis

The size of a cavity for an underground power station is about 50 m in height, 25 m in breadth and 150 m in depth. In order to excavate such a large cavity safely, measurement in situ during excavation is indispensable, and it is desirable to predict the behaviour of rock masses around a cavity during excavation.

The authors have been developing one method of numerical analysis for excavation for these ten years. Compared with the actual observation of rock masses, the pattern of behaviour forecasted using this technique has been proved to be reliable.

Among the many factors which affect the behaviour of rock masses during excavation, the shape of a cavity has not been so fully considered. The authors, therefore, have examined the effects by our numerical analysis method and have obtained the following results:

- 1) The shape of a cavity has great influence on the behaviour of rock masses during excavation.
- 2) "Mushroom type cavity" - we tentatively named the cavity thus which has an arch concrete lining - is inferior to "Egg type cavity" which has not the lining.
- 3) The sizes of the "relaxed zones" of a mushroom type cavity are, in our examined cases, two times those of an egg type cavity.
- 4) The excavation for the part of an arch concrete lining results to forming notches on rock walls. The walls with notches do not well bear loads due to excavation, which is the cause of the inferiority mentioned above.