

— 硬岩中の大規模地下発電所空洞建設 —

1. はじめに

地下発電所空洞は一般トンネルと異なり、掘削に伴う応力解放とこれに伴う応力の再配分過程が断続的、かつ長期にわたること、また大断面であるため同一断面内で地質が必ずしも均質でなく、掘削が進むにつれて変化することが特徴として挙げられる。このため、空洞周辺岩盤の挙動を常時計測監視（計測点数：約 1,400）し、空洞の安定を評価するとともに空洞挙動を逐次予測し、設計・施工へ反映する「情報化設計施工」を採用し空洞の安定を図った。

2. 空洞挙動予測について

Figure 1 consists of two graphs. The left graph plots stress $\sigma_1 - \sigma_3$ (in Kgf/cm^2) against strain ϵ (in %). It shows four curves for different strain rates σ_3 : 150, 50, 100, and 5 Kgf/cm^2 . The curves show a peak followed by a plateau. The right graph is a schematic diagram of the stress-strain relationship. It shows a peak at C_p, ϕ_p and a residual strength at C_n, ϕ_n . The initial elastic modulus is E_0 and the negative elastic modulus is E_n . The peak shift is ϵ_p, ϵ_n .

三軸圧縮試験結果 ひずみ軟化特性のモデル化

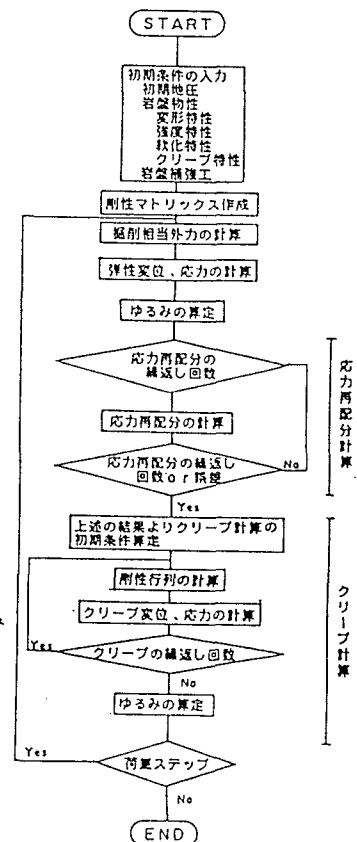


図-2 解析フロー

また、解析に用いた物性値及び支保仕様は表－１、図－３に示すとおりであり、特に支保工の考え方及び解析のモデル化は以下のとおりである。

2・1 吹付コンクリート

(a) 支保工の考え方：岩盤の変形に対し、シェル部材として抵抗し、曲げ・圧縮応力を受ける部材。

(b) 解析モデル

- ・要素モデル：平面要素
- ・岩盤との接合条件：掘削面との境界節点は法線・接線方向とも剛結。但し、次掘削ステップ以降は半径方向のみ剛結。

2・2 P S 工

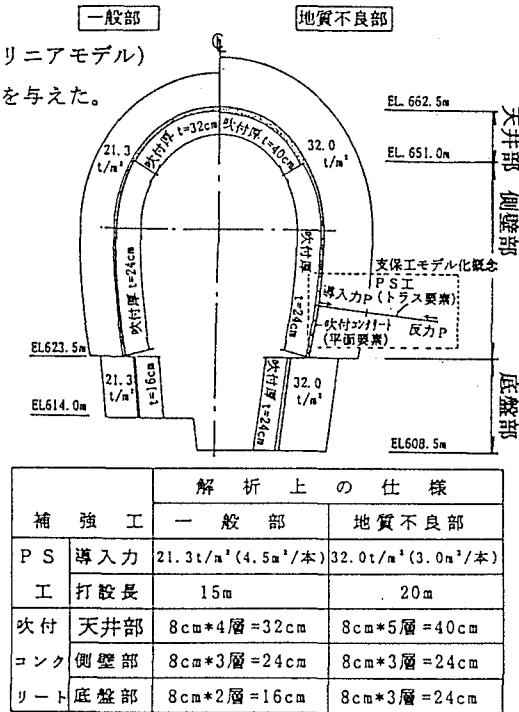
(a) 支保工の考え方：掘削による影響を受けない地山深部に定着部をとり、口元（壁面）から内圧としての荷重を与える。

(b) 解析モデル

- ・要素モデル：トラス要素
- ・伸び特性：材料の荷重～伸び特性を考慮（トリリニアモデル）
- ・導入力：初期導入力として両端節点に節点荷重を与えた。

表－１ 解析に用いた岩盤物性一覧

種 類	項 目	一般部	地質不良部
初期地圧 (計測値)	水平応力 σ_x (Kg f /cm 2)	113.0	
	鉛直応力 σ_y (Kg f /cm 2)	125.4	
	せん断応力 τ_{xy} (Kg f /cm 2)	3.3	
	最大主応力 σ_1 (Kg f /cm 2)	126.3	
	最小主応力 σ_2 (Kg f /cm 2)	112.2	
	鉛直からの傾き θ (°)	-14.0	
	側圧比 $K = \sigma_x / \sigma_y$	0.901	
	弾性係数 E_o (Kg f /cm 2)	100,000	50,000
岩 盤	E_n (Kg f /cm 2)	-120,000	-60,000
	ポアソン比 ν_o	0.25	
	単位体積重量 γ (gf/cm 3)	2.75	
	クリープ係数 α (%)	10	
	β (1/day)	30	
	破壊強度 C_p (Kg f /cm 2)	15	8
	ϕ_p (°)	58	55
	残留強度 C_R (Kg f /cm 2)	5	
	ϕ_R (°)	50	



図－３ 解析上の支保仕様

3. 予測解析と計測結果の比較

以下に、ひずみ軟化解析による予測値と空洞掘削時に得られた空洞及び周辺岩盤の挙動計測結果を比較する。比較にあたっては、当空洞で最大断面となった発電機室断面を代表とした。

3・1 岩盤内変位

掘削終了時における岩盤変位は図－４に示すとおりである。岩盤内変位の計測値は壁面から10m以深で予測値を下回るものの、壁面から10m以浅では急増し、結果として壁面変位は予測値相当となっている。他測線についても同様の分布形状を示すものが多いが、この原因については、地質調査の結果から壁面近傍の不連続面及びこれに伴う弱層部の影響によるものと推定している。また、掘削に伴う壁面変位の経時変化状況についても計測値は予測値とほぼ一致している。

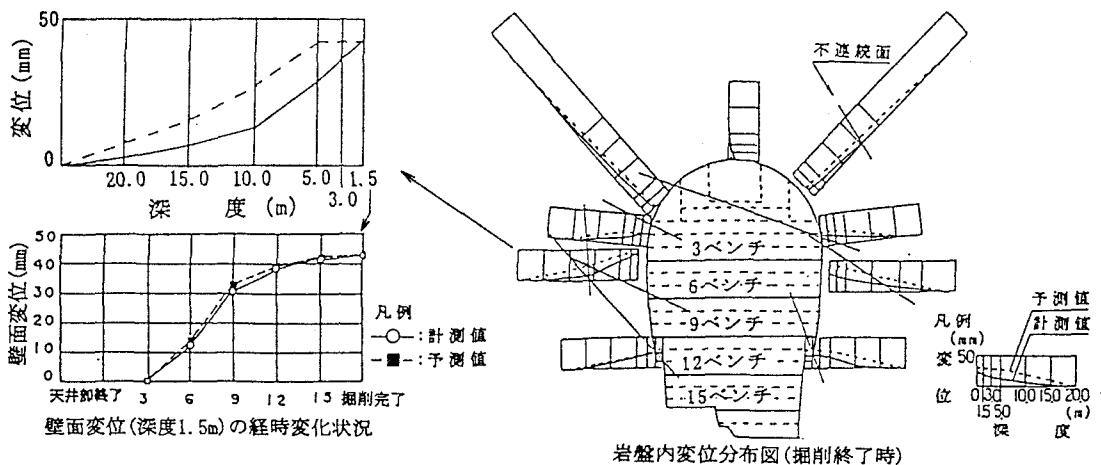


図-4 岩盤変位

3・2 岩盤内応力・ひずみ並びにAE計測結果

掘削に伴う周辺岩盤の応力・ひずみの変化を計測するため周辺トンネルより振動弦型地圧計、岩盤変位計を互いに近接して設置した。また、掘削に伴うゆるみ域の進展を物理現象としてとらえる目的で、AE測定を実施した。

以下に、代表例として、側壁中部 (EL. 638.5m) の計測結果について示す。(図-5)

(a) 計測結果

- ・壁面より2m付近における接線方向応力の掘削に伴う変化が深度5m、10mに比較して相対的に大きい。
- ・接線方向応力と掘削ステップとの関係では2m深度の場合、3ベンチ掘削時点で増加傾向となり、計測器設置レベル(5ベンチ)付近でピークを迎え、7ベンチ掘削時点ではほぼ初期状態まで低下し、その後、目立った変化は認められない。深度5m、10mにおける掘削に伴う増分応力のピークの発生時期は各々、8ベンチ、12ベンチ掘削時点となっているが、増分応力は2m付近に比較して極めて少ない。
- ・AEの発生は深度2m、5mの箇所が10m深度に比較して顕著である。

(b) 結果の評価

- ・掘削に伴う接線方向応力の変化は、壁面近傍ほど顕著であり、2m付近の値は、解析結果と良く一致している。
- ・接線方向応力は、計測器設置レベル掘削時に壁面近傍(2m)でピークが生じ、盤下げ掘削の進行に伴って、壁面から深部にピークが発生する位置が移っており、この傾向は解析結果と一致している。
- ・2m、5m付近における接線方向応力のピーク発生時期は、AEのピーク発生時期、並びに半径方向区間ひずみ(岩盤変位計により計測)が当地点の限界せん断ひずみ(軸ひずみ相当0.2%)に到達する時期とほぼ一致している。

以上を総合的に判断すると、

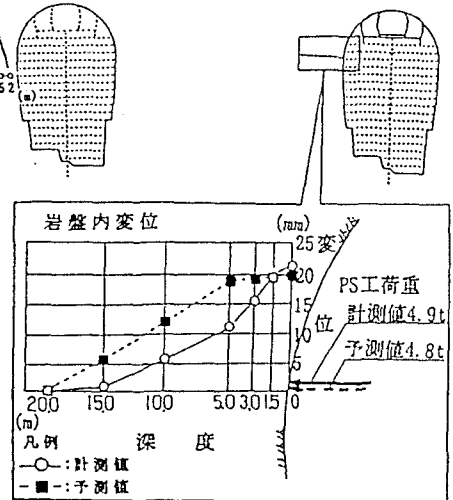
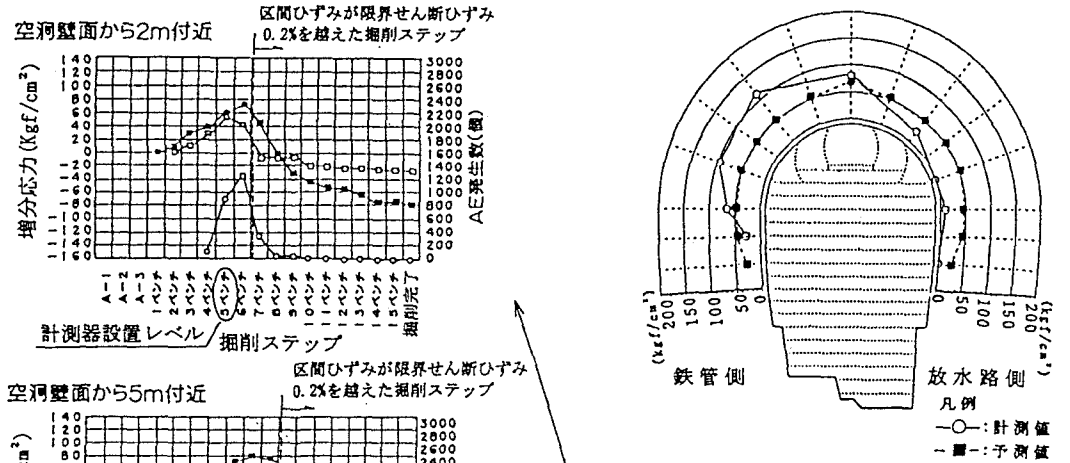
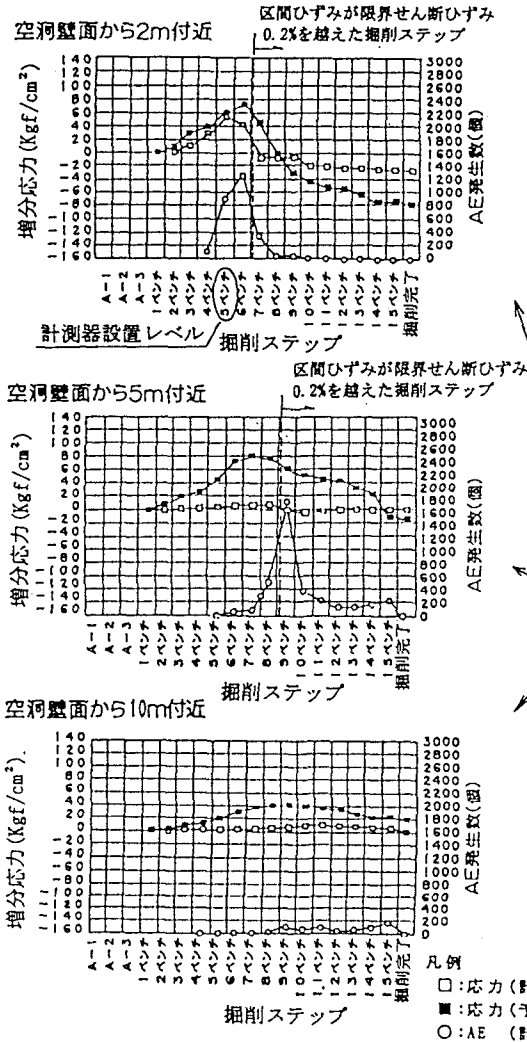
- ・壁面近傍では、掘削に伴う応力の集中、岩盤の破壊に伴う応力の再配分が生じており、半径方向区間ひずみの0.2%超過、AE発生数の急増は岩盤の健全部からゆるみ域への移行を示しているものと推定される。よって、ゆるみ域の範囲は6ベンチ掘削時に壁面から2m以上5m未満、掘削完了時に5m以上10m未満と推定され、解析結果(6ベンチ掘削時に5m、掘削完了時に10m)より若干小さめの範囲となっているが、ほぼ予測通りと判断している。

3・3 吹付コンクリート応力

掘削終了時における吹付コンクリート応力の断面内分布状況は図-6に示すとおりである。断面内の応力発生モードは計測値、予測値とも相対的に天井部で大きく、側壁部に向かって小さくなっており、両者は良く一致している。

3・4 PS工荷重

鉄管側側壁上部(EL. 646.0m)におけるPS工荷重と近接箇所の岩盤内変位状況について、計測値及び予測値を図-7に示す。PS工荷重、壁面変位とも計測値と予測値はほぼ一致している。



4. おわりに

葛野川地点においては、岩盤のひずみ軟化特性を考慮した予測解析により、岩盤内変位・応力、ゆるみ域、支保部材に発生する応力等を従来に比較し、精度良くシミュレートできた。特に、従来、空洞の安定性への寄与を十分に評価できなかった支保の効果をとり入れられるようになったことは、設計面において重要なポイントであると考えている。