

大規模地下空洞掘削における情報化施工の適用例

Application of Observational Construction Method to Large Rock Cavern

手塚昌信*・大西有三**・袋井 肇***・瀬岡正彦****

Masanobu TEZUKA, Yuzo OHNISHI, Hajime FUKUROI, Tadahiko SEOKA

The excavation of underground powerhouse cavern was controlled by monitoring system of rock mass behavior and keyblock analysis program. The monitoring data were used to predict the stability of cavern with back analysis including the influence of discontinuity. And the unstable blocks in the excavated rock surface were identified and supported with keyblock theory, using the geometry of discontinuities obtained with geological observation in progress of excavation. The keyblock analysis was utilized for supplement to the initial support design based on the non-linear visco-elastic analysis. The excavation control program, which is able to adapt flexibly to the variation of geological condition and rock mass behavior, was developed and operated successfully in the jointed rock mass.

1 はじめに

近年、地下発電所や石油備蓄基地、LPG貯蔵プラントといったエネルギー関連施設の地下立地が盛んに進められている。それらの大容量化が進行すると同時に、今後地下原子力発電所や地下揚水発電所等の大規模地下空洞の需要が高まることが予想され、それに伴い岩盤地下空洞構築において技術的、経済的に compact な設計・施工が要求されてくるのは必然的である。本研究では、NATM の最大の特徴である「地山保持力の最大限の利用」と「計測のシステム化」の観点から、合理的な岩盤地下空洞の設計・施工法の構築を試み、揚水発電所増設工事現場においてそれを実行した。

本研究の特徴は、PS アンカーを必要最小限で配置するための設計方法の確立と、岩盤の不連続面の影響を考慮した情報化施工システムの構築にある。本稿前半部において、対象地下空洞の特性および本研究において採用した非線形粘弾性逐次掘削解析 (FEM) 結果に基づく PS アンカーの設計方法について述べ、続いて後半部において、その初期支保設計の正当性を確認または追加補強するための情報化施工システムの内容と実行結果について述べる。

なお今回構築した情報化施工システムは以下のような特色を有している。

- ① 傾向値管理に重点をおいた管理基準値の設定
- ② 2 系統の不連続面の滑り・はく離を考慮した逆解析の実施
- ③ 切羽毎の不連続面観察結果に基づくキーブロック解析のリアルタイム運用

* 正会員 関西電力(株)奥多々良木発電所増設工事建設所 所長

** 正会員 工博 京都大学工学部教授 土木システム工学専攻

*** 正会員 関西電力(株)土木建築室 水力開発課 副長

**** 正会員 関西電力(株)奥多々良木発電所増設工事建設所 第二工区

2 研究対象地下空洞の概要

本研究の対象地下空洞は、既設奥多々良木発電所地下空洞に約 120 m の離隔をもって増設が行われている、幅 25 m、高さ 47 m、長さ 130 m の弾頭型地下発電所空洞であり、地表から約 250 m の深部に位置している。周辺の地質は主として流紋岩から構成されており、最大幅 5 m 程度のひん岩の貫入が認められている。また岩級としては C_H 級～B 級の良好な岩盤 ($RQD=70\sim90\%$) であり、ひん岩の貫入面近傍や破碎帯、変質帯などの狭い範囲に C_M 級以下の岩盤が分布している。試掘横坑内で実施した平板載荷試験の結果から、B 級、 C_H 級流紋岩の変形係数はそれぞれ 24,000MPa、16,000MPa (平均値) となっており、試験方向による顕著な差異は認められていない。その他にブロックせん断試験、円錐孔底ひずみゲージ法による初期応力測定、室内岩石試験等を実施し、次項で述べる事前解析のための入力物性値を決定した。

3 初期支保設計法について (PS アンカーの設計)

3-1 事前解析の概要と結果

初期支保設計における補強対象領域を決定するために、実際の掘削ステップを考慮した非線形粘弾性逐次掘削解析 (2 次元 FEM) を実施した。空洞周辺のモデル化は解析領域全体を B 級または C_H 級岩盤の等方均質としたモデルと、空洞アーチ部に C_H 級、その他の領域は B 級岩盤となる計 3 ケースを実施した。変形係数 D の非線形性は $d\text{-min}$ 法を用いて評価し、変形係数およびポアソン比の設定はそれぞれ $D_{\min}=D_0/100$ 、 $\nu_{\max}=0.45$ とした。なお解析に用いる初期応力は、測定結果からの 2 次元主応力を自重解析により補正している。解析結果として、図 1-1 にせん断破壊領域と引張破壊領域の分布を示す。ゆるみ領域 ($\nu=0.45$) の範囲はこの破壊領域の分布形状とほぼ一致している。

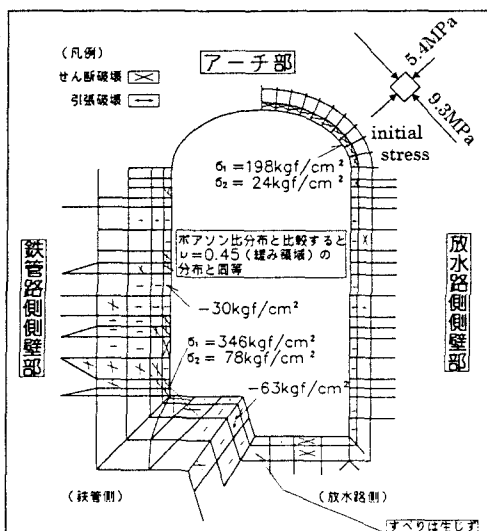


図 1-1 破壊領域の分布状態

3-2 支保対象領域の設定と初期支保設計

本研究において、支保対象領域は上述した破壊領域分布図から決定した。すなわちアーチ部 (放水路側) では連続してせん断破壊領域が生じる領域の岩盤自重を PS アンカーで支保し、側壁部 (鉄管路側) ではせん断破壊と引張破壊が連続して生じる領域のすべり力に対し、PS アンカー導入力および岩盤自重による摩擦抵抗により支保することとした。この手法によると鉄管路側アーチ部と放水路側側壁部は解析上支保が不要となる。わずかに発生している引張破壊領域はロックボルトと吹付で十分対応可能であると考え、これらの箇所には計測を目的とした PS アンカー (ロードセル設置) を、導入力約 10tf/本 (1 本/30m²) で打設した。図 1-2 に初期支保設計のレイアウトを示す。

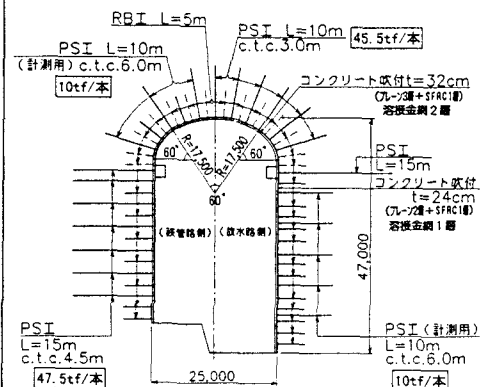


図 1-2 初期支保設計の標準断面

4 情報化施工のシステム構成

図2に今回設定した情報化施工システムのフローを示す。フローは日常管理とステップ管理に分けられる。日常管理は切羽毎の計測結果・地質観察結果およびキープブロック解析結果に基づいて異常の有無を判断するものであり、ステップ管理はアーチ部完成時および盤下げ各リフト毎に、逆解析結果に基づいた最終掘削時における安定性評価と、集約された不連続面データを用いたキープブロック解析を実施するものである。

岩盤挙動の計測は、主として地中変位計とPSアンカー軸力計により行った。特にPSアンカー軸力計については、空洞全体に面的に配置するために、従来のものより経済的で小型化した簡易型軸力計を今回開発した。

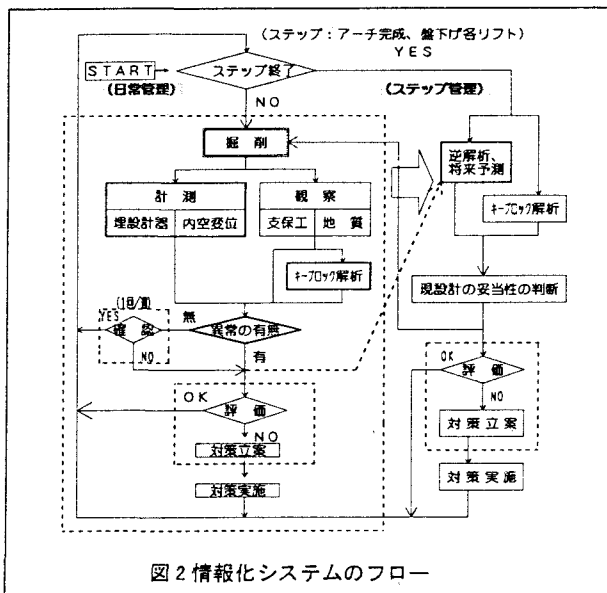


図2 情報化システムのフロー

5 掘削管理基準の設定と実行結果

5-1 掘削管理基準の設定

従来、管理基準の設定には最終掘削段階におけるFEM解析変位を用いたり、PSアンカーの降伏・引張強度を用いている場合が多く見られる。この考え方では、各ステップ毎の管理に適用できないばかりか、管理基準に到達した段階で、岩盤内部の破壊が大きく進行していることが懸念される。これらを考慮し本研究における掘削管理基準は以下のように設定した。表1に管理基準およびその対策を示す。

- ① 岩石の一軸圧縮試験から求められた限界ひずみ 0.36%を用いて、内空変位の管理値 72mm（変位量で36mm）を絶対値として設定し、変位速度に着目した「傾向値管理」を重点的に実施する。
- ② 「注意レベル」に応じて対策を行うという考え方ではなく、管理基準値を一つに設定し、段階的な対策（対策レベル）を実施する（変位が収束するまで対策レベル2の繰り返し）。
- ③ オーバーテンションしているPSアンカーについては、周辺に増打ちを実施した後、その荷重を緩める。その他に、ステップ管理で得られる最大せん断ひずみ分布を目安とし、事前解析結果における引張破壊・せん断破壊領域の分布と比較しながら設計変更の有無を判断する、という柔軟性を持たせることとした。

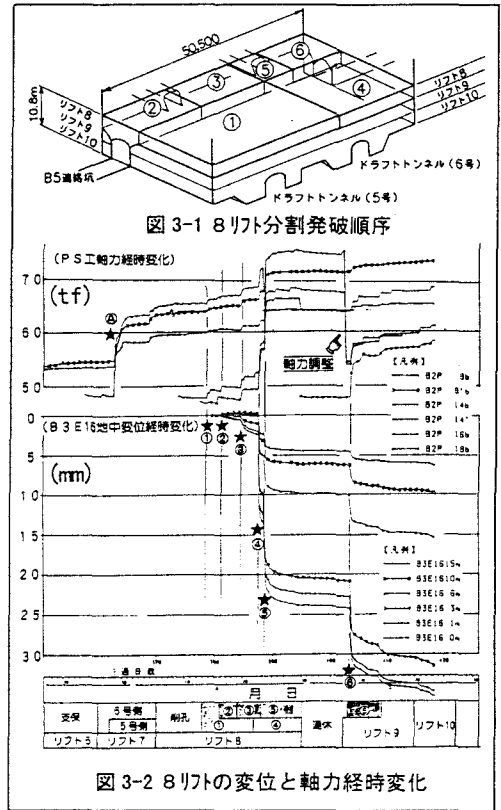
表1 掘削管理基準値（側壁部）

対策レベル	対象項目	管理基準	対策
0	地中変位・内空変位 (1回/日) (1回/週)	前日の変位速度を上回らないこと 絶対値が36mmを越えないこと	計測頻度の増加（掘削毎） RBIの追加打設
1	地中変位・内空変位 (掘削毎)	前日の変位速度を上回らないこと 絶対値が36mmを越えないこと	PS工の早期実施* (掘削を中断し、PSI打設)
2	地中変位・内空変位 (掘削毎)	前日の変位速度を上回らないこと 絶対値が36mmを越えないこと	PS工増し打ちおよび 既設PS工を緩める。
	PS工軸力 (掘削毎)	種限荷重 $98.7\text{tf} \times 0.65 = 64\text{tf}$	

（上回った場合）

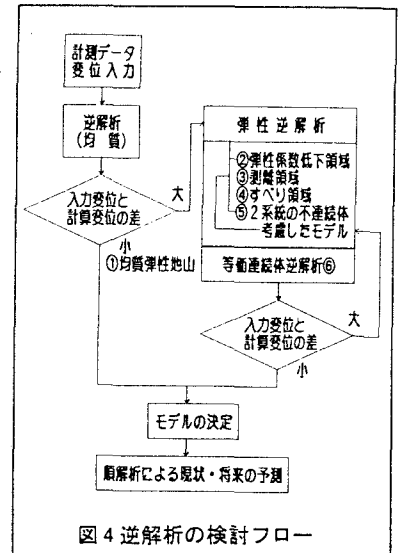
5-2 掘削管理基準の適用結果（岩盤挙動計測結果1）

掘削管理基準の適用結果として、盤下げ掘削時（8リフト）における鉄管路側壁部の岩盤挙動の対策結果を示す。この8リフト直下には発電所B5階連絡横坑が貫通しており、計画掘削長では土被りが極端に薄くなるため、かなりの応力集中が懸念された箇所である。よって図3-1に示すように分割発破を実施し、順次対策を実施しながら掘削を進めた。8リフトにおけるPSアンカー軸力計と地中変位計の計測結果を図3-2に示す。①～③の発破については、比較的地質が良好なこともあり変位は少ないが、破砕帯・変質帯（傾斜角約70°）の存在により地質が悪化している箇所の④～⑥の発破で、計24mmの変位が生じた。特に⑤ブロックの発破によりPSアンカーの軸力が18tf増加し、それまで見られていた地中変位計の伸びに比例した軸力以上の荷重が生じた。そのため管理基準に従い、最終ブロック⑥掘削前にPSアンカーの早期打設、および降伏強度に近づく予想されるPSアンカーの荷重調整を実施した。増打PSアンカーについては、⑤ブロックの掘削の際のPSアンカー軸力の増加量から容積換算で⑥ブロック掘削の際の軸力増加量を予測し、これと軸力の調整量（55tf/本まで除荷）を加えたものに相当する導入力を増打PSアンカーに負担させるように設計した。結果としてPSアンカーの打設密度は初期支保設計の2倍の密度（@9.0m²→@4.5m²）となり、変位が収束するとともに周辺岩盤は安定した状態となった。



6 滑り・はく離を考慮した逆解析モデルの適用について

直接逆解析法を用いる場合、岩盤の弾塑性体挙動や、滑りおよびはく離のような不連続体挙動を線形の連続体モデルとして表現する必要がある。いま直交異方性材料における応力-ひずみ関係式の中で異方性パラメータを変化させることにより滑り、はく離という2つの変形挙動を表現することができる¹⁾。すなわち連続体モデルで不連続面方向のせん断剛性を低下させることにより滑りを、また不連続面の法線方向の弾性係数を低下させることによりはく離を表現するものである。本研究においては事前段階から、従来の等方等質地山を仮定した逆解析では初期応力パラメータの精度に疑問が生じることが予測されたため、図4に示すように不安定領域を考慮した4つのモデルを計算機に組み込み臨機応変に対応することとした。特に物性低下領域内に2系統の不連続面が存在すると仮定したモデルが、計測変位と予測変位の整合が良く、周辺岩盤のひずみ状態も現実に近い結果となることがわかった。



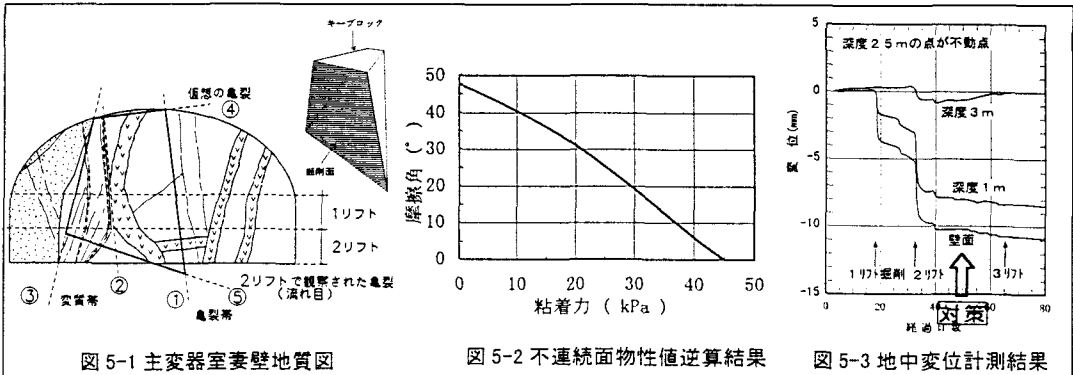
7 キーブロック解析の適用について

7-1 システムのリアルタイム運用

キーブロック理論は R.E.Goodman と G.H.Shi によって開発された不連続体モデルである。本研究においては、切羽毎の不連続面観察データによるトレースマップの作成、移動可能ブロックの検索、安定解析と対策工の決定に至るシステムを開発した。また管理基準の設定についても、不連続面の物性値 ($C=0.0\text{MPa}$ 、 $\phi=32.4^\circ$)、吹付コンクリートのせん断強度 ($\tau_c=0.45\text{MPa}$: 2 時間強度) 等を試験結果により決定し、サイトの特色を反映したものとなっている。これを現場に適用したところ、空洞アーチ部では 28 個の追加対策必要ブロックを抽出し、側壁部において 95 個の移動可能ブロックを検出した²⁾。

7-2 不連続面物性値の評価 (岩盤挙動計測結果 2)

岩盤挙動計測のうちブロックの滑りに起因していると考えられるものを対象に安定計算を実施し、不連続面の物性値を評価した例について述べる。図 5-1 に、主要変圧器室側妻壁の地質図を示す。2 リフト掘削終了後に流れ盤となる不連続面が確認されたため、2 リフト掘削直後にこの不連続面を含む想定ブロックが滑り始めたと仮定し、この際増加した P S アンカーの軸力を滑り抵抗力として物性値を逆算した。その結果を図 5-2 に示す。C の値は 44kPa 以下であり、 $C=0$ とすると $\phi=47.8^\circ$ となり、事前に実施した傾斜試験結果 (46.5°) とほぼ等しくなる。また $C=20\text{kPa}$ とすると $\phi=31.2^\circ$ となり、今回の設定値に近い値となる。したがって C は設計値よりも若干大きく 20kPa 程度であるとみなせば、設計値 $\phi=32.4^\circ$ は岩盤挙動に合致している。またこのブロックに対して、必要安全率を満たすために必要な P S アンカーの本数を算定し、3 リフト掘削に先行して打設した。その結果、図 5-3 に示すように地中変位の増加は収束しており、岩盤挙動モードの推定および対策工は有効であったと判断される。



8 あとがき

本研究では地下発電所掘削に際して、必要最小限の初期支保設計を不連続面を考慮した情報化施工により追加補強する合理的なシステムを構築し、有効に機能することを実証した。このシステムは地質状態の変化および岩盤挙動の傾向に柔軟かつ迅速に対応できる特徴を有している。システムを構成する事前解析、逆解析そしてキーブロック解析のいずれのサブルーチンも、地質調査および岩盤 (岩石) 試験結果にその精度を大きく依存しており、今後これらの適切な実施方法と評価法をシステム内に組み込む必要があると考える。

謝辞: 本研究を行うにあたり、奥多々良木発電所増設工事第 2 工区共同企業体の蓮井昭則博士、ならびにハザマ技術研究所の西村 毅氏には多大な協力と貴重な意見、指導を頂いた。心より感謝の意を表す。

(参考文献) 1) 櫻井春輔・谷河正也: 岩盤の不連続面を考慮した大規模地下空洞の変位計測結果の逆解析、土木学会論文集 第 403 号/VI-10、pp.75~84、1989.3.

2) 大西有三・手塚昌信・田中誠・西村毅: 地下空洞掘削時におけるキーブロック解析の適用について、第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集、1997.1.