

大規模地下空洞掘削への 情報化設計施工技術の適用研究

工藤奎吾¹・小山俊博²・小松崎勇一³

¹正会員 工修 東京電力(株)葛野川水力建設所(〒409-0617 山梨県大月市猿橋町殿上195)

²正会員 東京電力(株)建設部土木・建築技術センター(〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

³正会員 東京電力(株)建設部(〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

大規模地下空洞の掘削に当たっては、調査・試験、解析・設計、施工・計測の各種要素技術が相互に関連付けられ、総合技術としての機能を発揮することが不可欠であるが、従来それぞれの要素技術のアンバランスから実際には必ずしも期待通りの機能を果たさず、個別の問題に直面する都度、技術的な解決を図ってきたのが実態である。

本論文は過去の地下発電所の掘削経験を基に、各種要素技術の開発経緯について言及すると共に、最近の葛野川地下発電所における調査から掘削完了までを含めた各種要素技術の高度化並びにこれらを総合技術として体系化した「情報化設計施工技術」の適用について報告するものである。

Key Words : excavation of underground power cavern, observational methods, fore-back analyses

1. はじめに

筆者らは今市地下発電所(高さ51m,幅34m,長さ160m,総掘削量20万 m^3)、塩原地下発電所(高さ52m,幅28m,長さ165m,総掘削量19万 m^3)、葛野川地下発電所(高さ54m,幅34m,長さ210m,総掘削量25万 m^3)の設計・施工に直接携わってきており、先行地点の反省と得られた知見を次地点に反映させるという形で情報化設計施工技術の高度化をソフト・ハード両面で図ってきた。ここでいう「情報化設計施工技術」とは大規模地下空洞の掘削を合理的に、しかも安全に実施するために必要となる調査・試験、解析・設計、施工・計測の各種要素技術を総合技術として体系化したものを示す。

上記の地下発電所空洞はレイアウト上、かつ高落差化のため、高地圧下の地下深部(300~500m)に設置されている。掘削断面は1300 m^2 を越す大断面であり、掘削は一般トンネルとは異なり頂部から底部に向けての逐次多段階掘削となり、掘削に伴う応力解放が約20ヶ月と長期にわたる。また、ダム等の一般の構造物の基礎と異なり、岩盤に対し力学的に解放側のメカニズムであることが問題を複雑化している点の特徴である。

従ってダム等では問題点とならない密着している節理群が掘削に伴う応力解放により、剥離やすべり

挙動をおこし、これが崩落や異常な過大変位を生じさせ、トラブルの原因となる事例を過去少なからず経験してきている。

このため調査・試験も例えば地質については顕著な断層や地質不良箇所の詳細調査をすることは基より、壁面の滑りや剥離を生じさせる可能性のある節理群まで調査精度を上げる必要があり、また岩盤物性・地圧についても従来から実施している岩盤ブロックによる変形試験、せん断試験やポアホールによる初期地圧測定その他、後述する模擬空洞掘削による応力解放時の変形・強度特性の事前把握や地圧のマクロ的照査が実空洞掘削時における挙動予測に有効かつ実務的な手段となる。

解析についても、応力・ひずみに関しては弾性、弾塑性、ひずみ軟化等、また強度に関してはモール・クーロン、フック・ブラウン¹⁾の破壊基準等、実岩盤掘削時の変位・応力・緩みを的確に反映出来るモデルをいかに選定するかが、その予測精度向上を図る上で重要な問題となる。最近ではFEMの数値解析技術^{2), 3), 4)}の向上により岩盤が連続体を保持している場合はかなりの精度で挙動をシミュレート出来るようになったが、前述した様に断層・節理等で一旦不連続面を形成した場合の挙動の予測に対しては実挙動を基にした逆解析が有効かつ現実的な手段になる等、一層の順解析・逆解析の精度向上が望

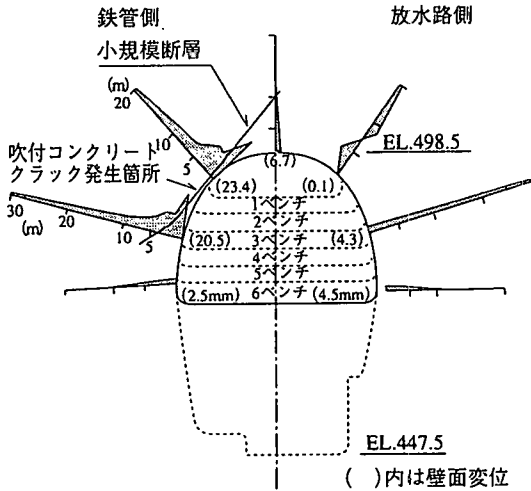


図-1 岩盤内変位分布及びクラック発生箇所

まれる。

本論文は空洞を安全に掘削するための調査・試験段階から掘削終了までの情報化設計施工技術について、葛野川地点で実際に適用した事例を基に紹介するとともに、今後の新規地点での掘削への適用に対し、あるべき姿を提案するものである。

2. 既設今市発電所、塩原発電所における情報化設計施工と得られた知見

今市・塩原発電所の情報化設計施工について概観すると共に、ここで得られた調査試験・解析・設計・施工上の知見並びに技術的課題を葛野川発電所に反映した。

(1) 両発電所の概要

今市地下発電所空洞は昭和55年～57年にかけて掘削された。空洞断面積は1430m²の規模を有し、地質は珪質砂岩・凝灰岩であり、いずれも一軸圧縮強度が平均80MPa、岩盤の弾性係数が9～18×10³MPaと堅硬な硬岩に属する。

当発電所は地山破りが約400mであり、初期地圧も10MPaと高かったことから、大規模地下空洞としては日本で初めて天井部にアーチコンクリートを有しないたまご型断面を採用した。当時一般的になりつつあったNATM工法の概念に基づき支保設計をしたこともあり、空洞周辺に約1000点の計測器を埋設し、本格的な情報化設計施工に初めて取り組んだ⁶⁾。

塩原地下発電所空洞は昭和63年～平成3年にかけて掘削された。空洞断面積は1310m²の規模を有し、地質は流紋岩・凝灰岩であり、岩石の一軸圧縮強度は約85MPaと堅硬であるが、岩盤の弾性係数は3～6

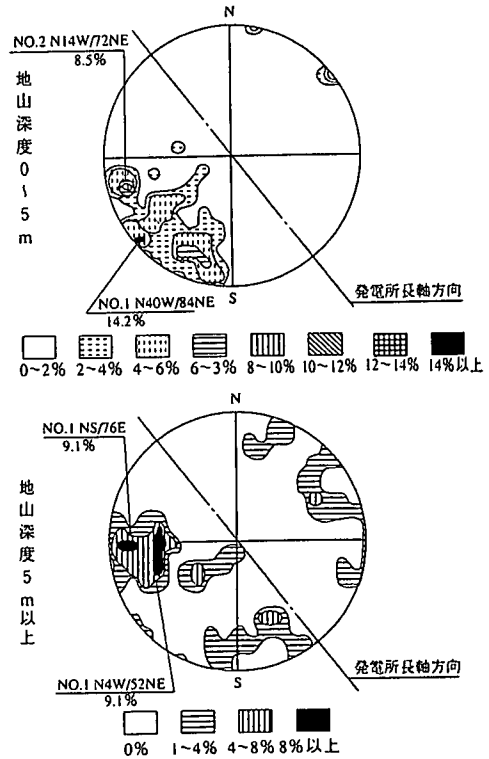


図-2 今市地下発電所 空洞ポアホール孔の深度別亀裂分布図

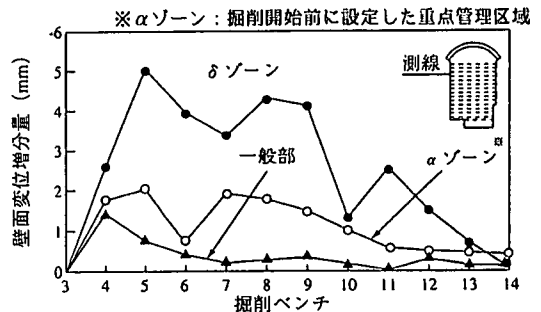


図-3 掘削ベンチ当たり壁面変位増分量(3ヶ所計測器)

×10³MPaで過去に経験した発電所の内では地質条件が一番劣った地点である。当発電所サイトは地下200mで初期地圧が5MPaと今市発電所より低かったこともあり、従来タイプの天井にアーチコンクリートを有するきのこ型断面形状を採用し、側壁部は今市と同様吹付コンクリート、ロックボルト、PSアンカーで支保する計画とした⁶⁾。

(2) 岩盤挙動の特徴

a) 今市発電所

掘削が空洞規模の1/2(頂部から25m、6・7ベンチ掘削中)まで進んだ時点で空洞天井肩部の壁面変位が急増し、吹付コンクリートにクラックが発生すると伴に一部PSアンカーのストランドに素線切れ

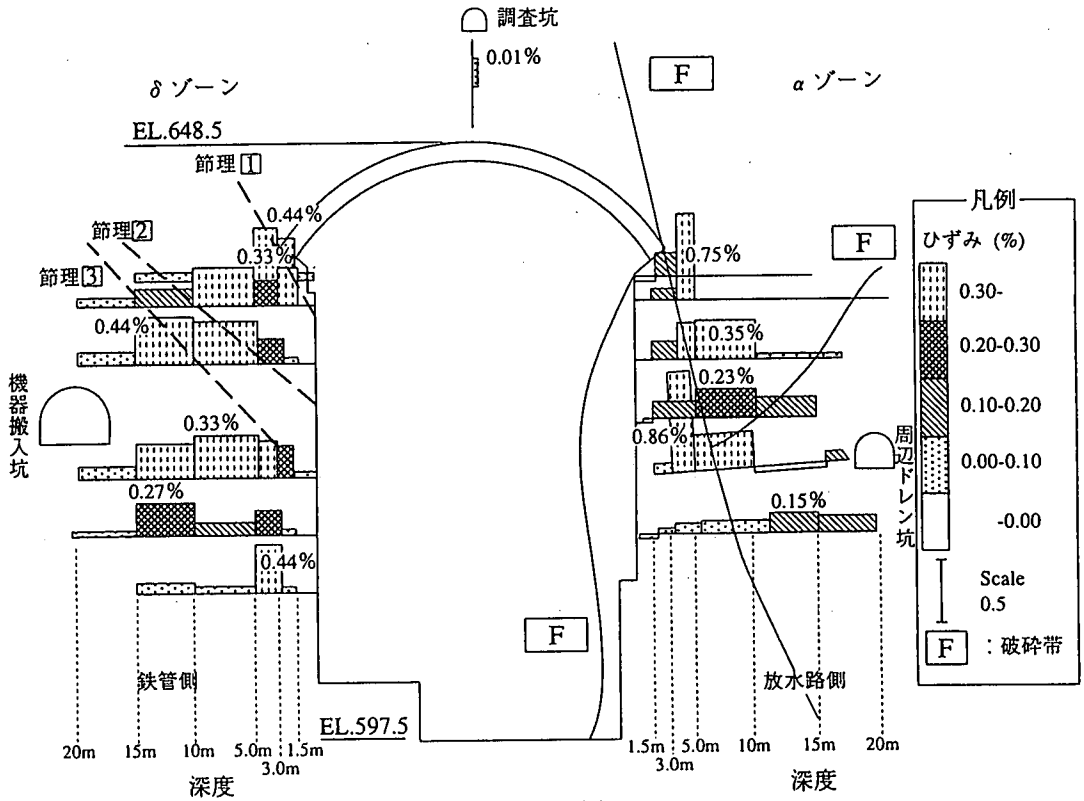


図-4 岩盤内区間ひずみ分布図

が生じた⁵⁾ (図-1)。

掘削を中断して現場において岩盤内応力測定(孔底法)や吹付コンクリート並びに背面岩盤のハツリ等各種調査試験を実施した結果、原因は空洞背面に空洞接線方向の走向の小規模断層と壁面との間がピラー状となり、他部と比較して掘削に伴う空洞接線方向応力が集中し、背面岩盤に壁面と平行で微小な新規亀裂を発生させ、空洞掘削が1/2まで進んだ時点で連続した分離面を形成したと推定された。このため、吹付コンクリートと背面岩盤に更に応力が集中し、剛性の高い吹付コンクリートがバックリングを起こしクラックが発生した。図-2に岩盤の深度別亀裂の密度分布を示す⁷⁾。岩盤深部では岩盤が本来有している亀裂の卓越方向と一致しているが、壁面近傍の0~5mにおいては空洞壁面と平行なN40°W走向の亀裂が顕著に卓越している。また空洞内から空洞壁面に直交して実施した地圧測定時のボーリングコアがディスクリング現象を呈していたことから壁面近傍では掘削に伴う空洞接線方向応力の集中により、新規な亀裂が発生したと判断された。

b) 塩原発電所

事前の地質調査結果により断層箇所は当初より重点管理区域に設定するとともに、他所と比較して支保工の増強を図った。その結果、掘削時も予測解析

通りの挙動を示した。

しかし、ここで紹介するdeltaゾーンの地質は掘削前あるいは掘削中も当該空洞の中では一番マッシュかつ新鮮・硬質なことから、当初予測では側壁上部の最終壁面変位量を15mmと想定していたが、結果的には当空洞最大の48mmの変位を記録し、かつ空洞下部の掘削の影響が長期にわたり空洞上部へ及んだ(図-3)。

この原因については当初特定できなかつたが、盤下げ掘削4ベンチ時点で掘削壁面に流れ目の連続した節理群が確認された。変位発生がこの節理と交差する箇所で行っていることから、この節理群が変位発生の主要因と判断した(図-4)。

これらの節理群は当発電所を構成する流紋岩の生成時における温度応力に起因する柱状節理であり、ボーリングコアでは節理面は密着しており薄い0.1mm程度のカルサイト脈の挟在により初めて認識できる程度である。しかし、変位が発生した節理は上記柱状節理がもつ卓越走向(30°NW, 60°NW, 60°SE)のうち、60°NW走向で空洞壁面に対して急傾斜の流れ目の面であり、掘削に伴う応力解放により連続した分離面を形成し、滑り挙動を示したものと考えられる。

以上、両発電所の掘削時挙動の一例を紹介したが、

表-1 葛野川地下発電所諸元

発電諸元	最大出力 (MW)	1,600
	使用水量 (m ³ /s)	280
	有効落差 (m)	714
空洞諸元	高さ (m)	54.0
	幅 (m)	34.0
	長さ (m)	210.0
	掘削量 (m ³)	250,800
	断面形状	たまご型
	断面積 (m ²)	1,510
	土被り (m)	500

いずれも掘削に伴う応力再配分過程での、今市では壁面近傍岩盤の新規亀裂の発生、塩原では既存の密着した節理の滑り等が原因で、当初予測しなかった現象により設計・施工の修正を余儀なくされた事例である。

(3)得られた知見と技術課題

- ① 地質については、両発電所とも顕著な断層や地質不良部の詳細調査を実施しているが、基本的には岩盤等級主体の評価である。塩原での経験から従来余り着目していなかった密着した節理群までの事前調査の必要性が示唆された。
- ② 掘削に伴う応力の再配分状況の把握の重要性を認識させられ、計測については従来のひずみ中心の計測に加えて孔底法、振動弦型地圧計、A E法、更には模擬空洞掘削等、岩盤内応力に着目した調査・試験技術の改善、開発への動機付けとなった。
- ③ 塩原発電所の空洞掘削時における節理群が空洞の壁面に出現する毎に変位が急増する不連続体的挙動の予測にあたっては、実測挙動に合わせて次ステップを逐次予測する逆解析手法（異方性、不均質を考慮）が実務的かつ有効な手段と認識させられた。更に3次元キープロック解析の精度向上並びに情報化設計施工システムへの組み込みによる処理の迅速化が要望された。
- ④ 岩盤の挙動計測データの取り込みは、今市発電所から既に事務所内でのリアルタイム処理としていたが、取り込んだデータの処理はソフト・ハード面の制約から不十分であった。そこでデータ取り込み、データ加工・処理、解析、設計修正までを迅速に処理できる一貫したシステムの構築が望まれた。

3. 葛野川地点の情報化設計施工

葛野川発電所の諸元は表-1に示すとおりである。

葛野川地下発電所空洞は平成6年～8年にかけて地下500mに掘削され、初期地圧も12MPaと今市地下発電所よりも高地圧であること並びに発電所サイトの地質は劈開等に起因する節理が発達した四万十層ということから、今市地下発電所で見られた応力集中による吹付コンクリートへのクラック発生や塩原地下発電所と同様な密着した節理の滑りや剥離挙動が事前に予測された。

このため、調査・設計・施工にあたっては先行地点の経験を踏まえ、大規模地下空洞掘削の最適化を目指し、節理群にまで着目した地質の詳細調査の実施、解放時における応力・変形特性の事前把握、予測並びに逆解析の精度向上、実測データに基づく分析・対応の迅速化等、情報化設計施工システムの高度化を図った。その概要ならびに地点特性は以下のとおりである。

(1)地質調査法と地質ゾーニング

発電所サイトの地質は、前述したとおり節理が著しく発達した四万十層ということから、掘削前から綿密な調査計画を立案し地質構造の解明に努めると共に、壁面の崩壊や滑りを生じさせる可能性のある亀裂については、断層は基より密着した節理群まで調査範囲を拡大した。

具体的には、空洞上部20mの位置に空洞長軸方向と平行に鉄管側と放水路側に調査坑（幅2.6m、高さ2.9m）を2本設置するとともに、この間に4本の連絡坑（空洞長軸直交方向）を配置し、断層（調査坑横断面内で連続し、肉眼でズレが確認できる亀裂）、節理（調査坑側壁の高さ1.2mの位置に設置した水平測線と交差する長さ50cm以上で肉眼でズレが確認できない亀裂）を全て把握し、走向・傾斜、節理の性状、介在物の有無等により分類パターン化した。

また、この調査坑から空洞に向けて埋設計測器の設置孔を兼ねた調査ボーリングにより、コアによる地質調査、孔壁を螺旋状にスキャンニングして得られた展開画像を分析する亀裂調査（BSS:Borehole Scanning System）を事前に実施した（空洞上部調査坑延長 3600m；事前ボーリング総延長 2200m）。

掘削時においても壁面近傍は大型ブレーカーを用いた千鳥抜き掘削を採用し、空洞壁面と平行方向の走向をもつ断層や節理群の調査精度向上を図った。

これらの調査結果を基に、空洞全域を地質不良部、一般部、キープロック形成部等にゾーニングし、それぞれのゾーンに対応して予測解析、支保工量の算定、計測器の配置を個別に検討し、設計・施工上、柔軟な対応を図った。

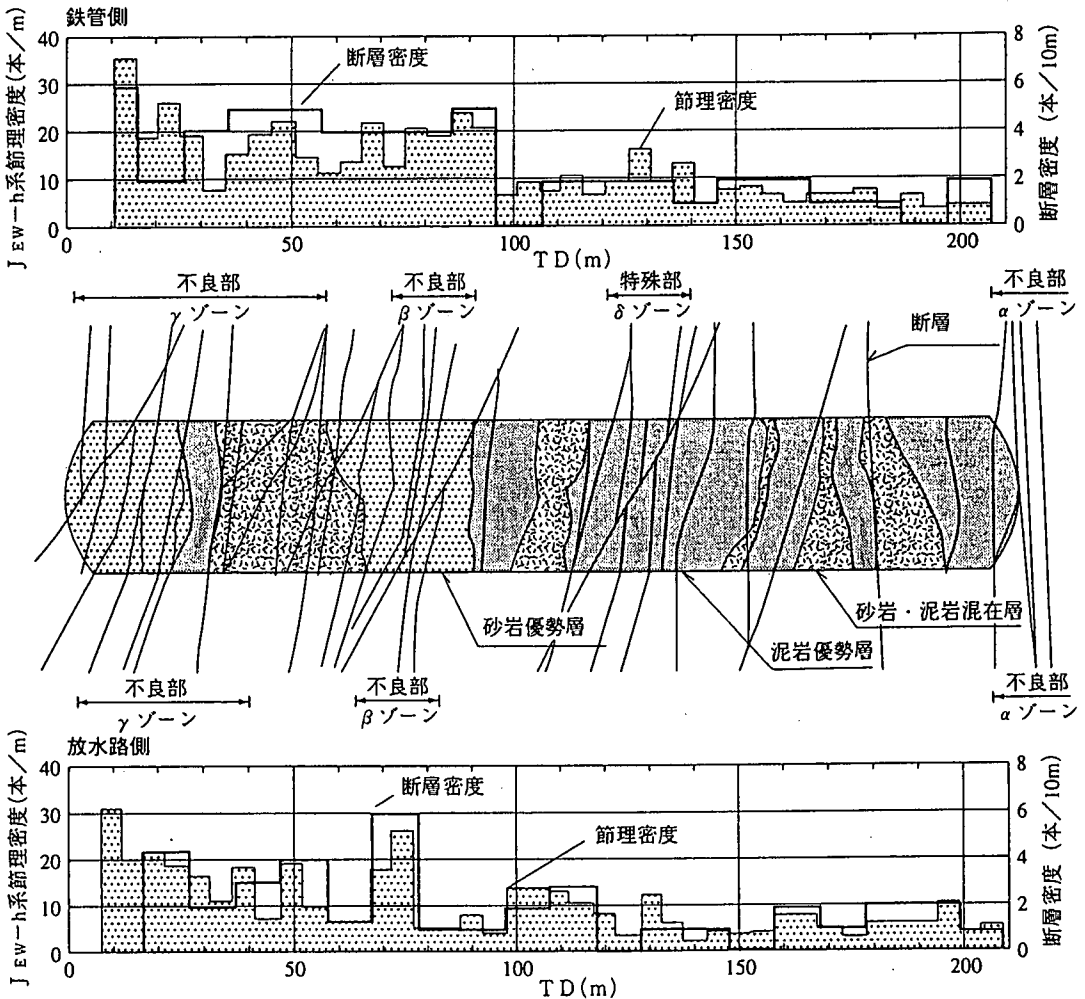
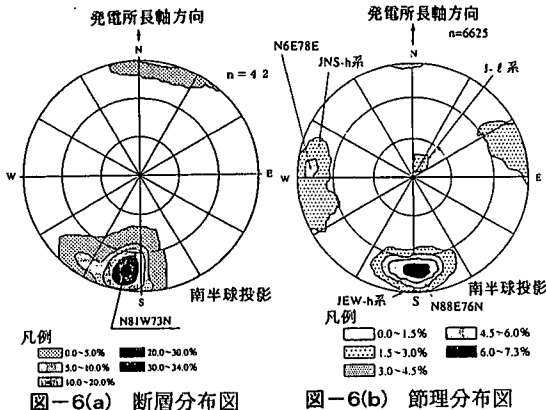


図-5 地質水平断面図 (E.L.636.0 m盤)



発電所地点の地質は、図-5に示すとおり砂岩・泥岩の互層を主体としており、地層の一般走向はほぼ東西方向、傾斜は北急傾斜の同斜構造を呈している。

断層について走向・傾斜を整理すると、図-6(a)に示すとおり、発電所長軸方向と直交する東西走向

北急傾斜のものが大半を占めている。

また、節理について走向・傾斜を整理すると、図-6(b)に示すとおり3つのパターンに分類され、①発電所長軸方向と直交する東西走向北急傾斜のもの(J_{EW-h}系節理)が87%、②発電所長軸方向とほぼ平行な南北走向急傾斜のもの(J_{NS-h}系節理)が9%、③発電所長軸方向とほぼ平行な南北走向東緩傾斜のもの(J-1系節理)が4%となる。特に節理の大半を占める①の節理群は当地点で大半を占める断層とほぼ同じ走向・傾斜であり、泥岩中に砂岩が薄層状に分布する箇所、しかも断層集中部では節理間隔が小さくなっており、弱層部を形成している。空洞の鉄管側と放水路側で節理の分布特性に有意な差はないが、J_{NS-h}系節理は東傾斜のものが多いため、鉄管側壁に対しては流れ目となっている。

(横断面)

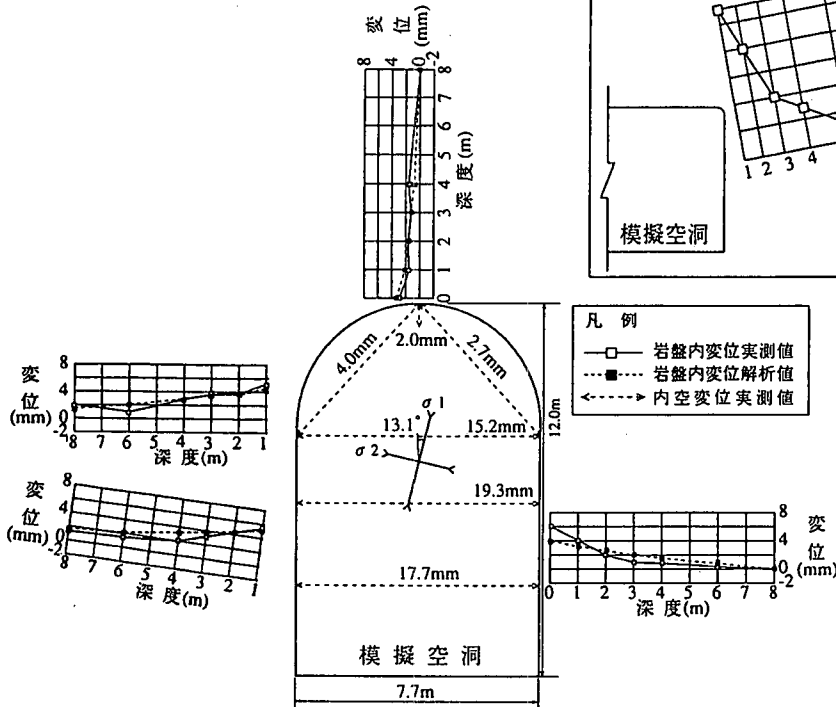


図-7 模擬空洞計測及び逆解析結果

表-2 岩石・岩盤の特性

試験結果			
変形係数	・平板荷重試験 (GPa)		
	除荷時接線弾性係数	載荷時接線弾性係数	変形係数
	平均 11.5	7.2	4.0
	(範囲) (5.0~22.5)	(2.5~15.0)	(1.0~11.1)
強度特性	地質一般部 除荷時接線弾性係数 平均 12.6 GPa		
	地質不良部 除荷時接線弾性係数 平均 7.7 GPa		
	・岩石試験		
	一軸圧縮試験 平均 105.8 MPa (35.3~245 MPa)		
	高圧三軸圧縮試験		
	ピーク強度	$\tau = 12.9 + \sigma \tan 57^\circ$ MPa	
	残留強度	$\tau = 2.8 + \sigma \tan 48^\circ$ MPa	
初期地圧	・岩盤せん断試験		
	地質一般部 (ピーク)	$\tau = 1.5 + \sigma \tan 59^\circ$ MPa	
	地質不良部 (ピーク)	$\tau = 0.8 + \sigma \tan 55^\circ$ MPa	
	残留強度	$\tau = 0.5 + \sigma \tan 50^\circ$ MPa	
	・初期地圧測定 (発電所空洞横断面表示)		
	土かぶり: 460m		
	$\sigma_1 = 12.6$ MPa		
	$\sigma_2 = 11.2$ MPa		
	θ (σ_1 作用方向の鉛直軸からの傾き) = 放水路側 $\sim 14^\circ$		

(2) 模擬空洞掘削(実空洞の1/5スケール)による解放時変形特性並びに初期地圧の照査

葛野川地点における岩石・岩盤特性並びに初期地圧は表-2に示すとおりである。当地点は節理が著しく発達(節理密度平均10本/m, 最大30本/m)しているため、調査坑内での岩盤試験においては節理の方向と変形特性・強度特性に着目して数多くデータを蓄積(ジャッキ試験29ヶ所, せん断試験12ヶ所)し分析したが、変形・強度ともに顕著な異方性は認められなかった。しかし、空洞に至るアプローチト

ンネルの掘削によると、その内空変位は、トンネル軸が節理と平行な場合は直交した場合に比べて3~5倍程度大きく、極端な変形の異方性を示した。

このため、実空洞掘削に先立ち掘削ブリの仮置き場を兼ねた1/5模擬空洞を掘削し、実測挙動の逆解析により、解放時における変形特性の掌握と初期地圧のマクロ的照査を実施した。模擬空洞は、実空洞とほぼ同じ地山被りの位置を選定するとともに、模擬空洞の長軸も断層、節理の卓越方向との交差角が実空洞と同様になるように設定した。また、模擬空洞掘削に先立ち模擬空洞に平行な計測坑を設置し、掘削による全変位の計測を行った。

計測結果は図-7に示すとおりであり、土被り圧相当を鉛直地圧と仮定した逆解析(桜井の逆定式化法¹⁾)の結果から空洞2次元断面で $\sigma_1 = 12.5$ MPa, $\sigma_2 = 9.0$ MPa, $\theta = 13.1^\circ$ の初期地圧と等価弾性係数 $E = 1.29 \times 10^4$ MPaが得られ、調査坑でボーリング孔を用いて事前に実施された応力解放法による初期地圧計測結果(表-2参照)とほぼ同等の結果が得られた。また、この卓越節理と平行な解析面内方向の等価弾性係数は、平板荷重試験の地質一般部の除荷時接線弾性係数 $E_v = 1.26 \times 10^4$ MPaとほぼ等しい値となった。但し、卓越節理面と直交する方向(解析面外方向)となる妻壁部で計測された変位とこの

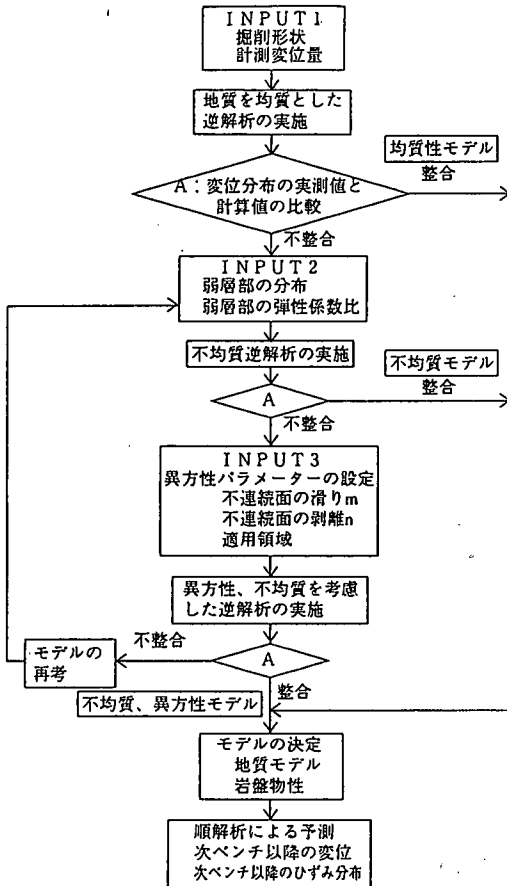


図-8 逆解析の検討フロー

方向の計測初期地圧から算定された等価弾性係数は、当初の予想通り顕著な異方性を示し、その値は解析断面内の等価弾性係数の1/4~1/7の値となった。

(3) 予測解析と支保設計

挙動予測並びに支保設計は前述の地質、岩盤物性値、初期地圧について得られた諸データを用い、葛野川で初めて実設計への適用となる岩盤のひずみ軟化特性を考慮したFEM数値解析²⁾により実施した。その際、岩盤の変形特性については、従来、平板載荷試験(載荷幅φ=30cm)によって得られる除荷時接線弾性係数をもとに設計値を決定していたが、試験結果は載荷面における節理の状況並びに地質の不均一性に影響を受けるため、より実空洞規模に近い模擬空洞の掘削時の変位をもとに逆解析によって求めた等価弾性係数が、局部的な要因に左右されず実空洞の挙動を正確に予測出来ると判断し、これを採用した。模擬空洞妻壁部で計測された変位をもとに算定された卓越節理面と直交する方向の等価弾性についても、実空洞妻壁部の変位予測並びに支保設計に採用した。

また、実掘削手順に併せて吹付コンクリート、P Sアンカーの支保効果を織り込むと共に、破壊基準についても岩盤試験結果に基づくモール・クーロンを基本としながら、一方最近外国で良く用いられているフック・ブラウンの基準でも照査し、変位・応力・緩みともほぼ同等の結果が得られることを確認した。具体的には事前に定めた地質ゾーニング毎に岩盤の弾性係数、支保工の内圧等をパラメトリックに変化させ、上記FEM数値解析を実施し、支保工の施工限界(例えばP Sアンカーの長さ、ピッチ、1本当たりの導入力)から定まる許容緩み領域、許容変位量から具体的な支保パターンを定めた。

更に、断層や節理によるキーブロック形成が特定出来る場合には、岩塊の落下、滑り、剥離に対して、箇所別に支保耐力の検証を行うと共に、掘削の進捗に伴い詳細な地質状況が明らかになる都度、ゾーニングの見直しを行った。また、FEM数値解析による当初予測値と実測値が大幅に異なるケースについては、地圧の大きさ・方向、断層・節理の滑りや剥離の影響を考慮できる桜井の逆解析⁹⁾により、その原因追究に努め、周辺岩盤の変形モードが均質、連続的な挙動から不均質、不連続的な挙動に移行したと判断される箇所に対しては、これらの結果を予測解析にフィードバックして、以降の盤下げ掘削の予測精度の向上を図った。不均質、不連続的な挙動が支配的と判断された箇所の挙動予測にあたっては、逐次、モデルの修正、パラメトリック・スタディ等が可能な逆解析が実務的にも非常に有効であったと考えている。桜井の逆解析を具体的に現場に適用した手順は図-8に示すとおりである。

(4) 計測管理

a) 計測管理方針

掘削時の計測管理は、空洞全域に設置した多段式岩盤変位計による変位(ひずみ)計測を主体とし、日々の空洞挙動を即座に把握し、これを設計・施工へ反映する日常管理と掘削の節目でひずみ・応力・緩み等相互に関連づけながら総合的に空洞の安定性を評価・分析し、支保パターンや管理基準の見直し等を行うステップ管理を組み合わせることを基本とした。日常管理、ステップ管理における各種計測項目並びに計測器配置の一例は図-9に示すとおりである。また計測管理フローは図-10に示すとおりであり、あらかじめ各種計測項目毎に前述した予測解析結果などから管理基準値を定め、支保工の増減を実施した。

b) 計測管理システム

計測管理システムの構築にあたっては、最近のコ

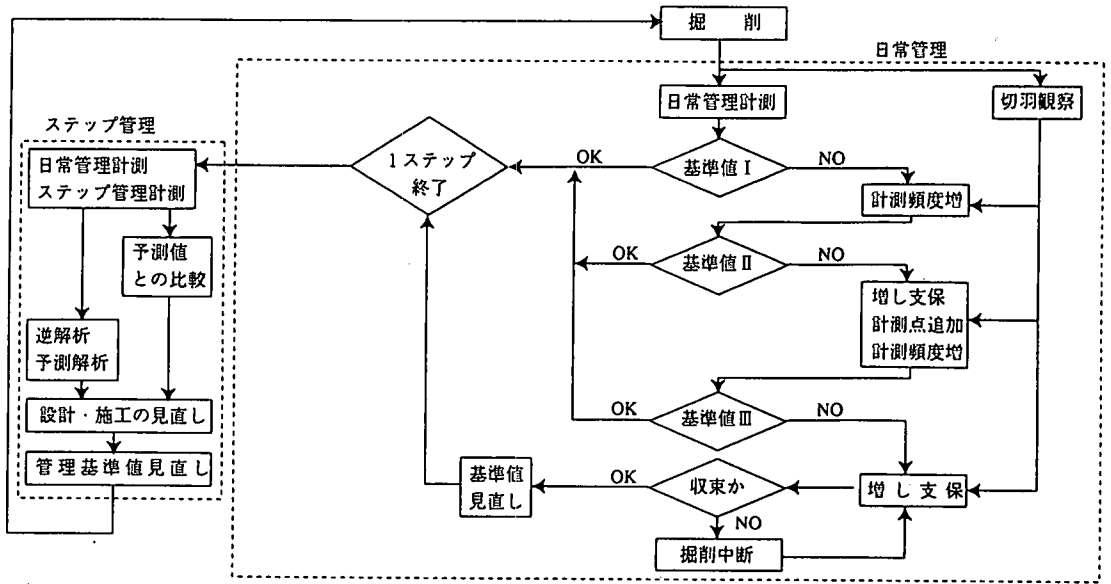


図-10 計測管理フロー

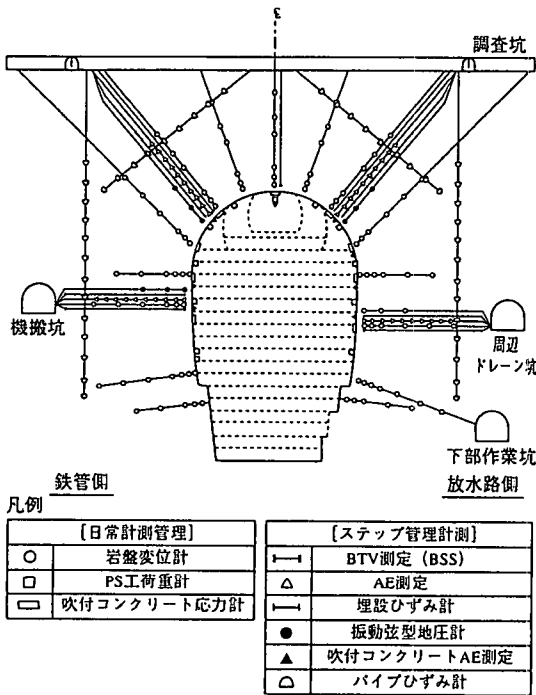


図-9 計測器配置図

(5) 全体挙動実績

掘削完了時点における空洞全体の挙動は図-11に示すとおりである。壁面変位をゾーニング別に比較すると、不良部が一般部に対して相対的に大きく、空洞中部 (EL.636.0m) においては一般部12~37mmに対して、不良部36~43mmとなっている。また、妻壁部において空洞内最大となる67mmの変位が発生している。これら不良部並びに妻壁部は、それぞれ当初から東西走向北急傾斜節理 (J_{ew-h}系) の密集、走向の影響により、相対的に大きな変位の発生が予想されたため、一般部に比較して支保を増強して設計しており、概ね予測値程度若しくは予測値以内の岩盤変位であった。

一方、当初一般部と推定していたF~G断面鉄管側については掘削途中段階 (1ベンチ掘削完了時) において、予測を越える変位が発生したため、地質の再評価結果をもとに、以後、重点管理区域 (特殊部δゾーン) として、管理を行った。以下に情報化設計施工の適用によるδゾーンへの対応実績について述べる。

コンピュータ技術を駆使し、データの取り込みから分析・対応策の決定までのプロセスを迅速化することを目指し、現場事務所での計測データのリアルタイム処理化を行った。

システム機能は表-3に示すとおりであり、当社先行地点のものに比較して、大幅な処理機能の充実と処理速度の向上を図った。

(6) 情報化設計施工の適用

a) δゾーンの挙動実績

鉄管側天井肩部において、天井部2次切掛け並びに1ベンチ掘削時に、掘削ステップ当たり当空洞最大となる壁面変位 (各8mm/ステップ) が発生した。この結果、3ベンチ掘削完了時の壁面変位は鉄管側21mm、放水路側4mmとなり、壁面から5m深度でも、それぞれ12mm、2mmと岩盤変位は顕著な非対称性を

(断面別逆解析結果)

断面	A	B	C	D	E	F	G	H	I
E (MPa)	14,300	20,600	22,900	16,900	27,400	31,600	31,300	19,400	36,800
σ_1 (MPa)	12.7	12.1	12.0	12.1	13.3	16.6	36.7	13.0	13.2
σ_2 (MPa)	11.8	11.8	10.9	6.1	8.0	7.2	8.2	1.9	8.4
側圧比	1.1	1.0	0.9	0.5	0.8	1.0	2.8	0.3	0.8
主応力図									

(G断面逆解析結果)

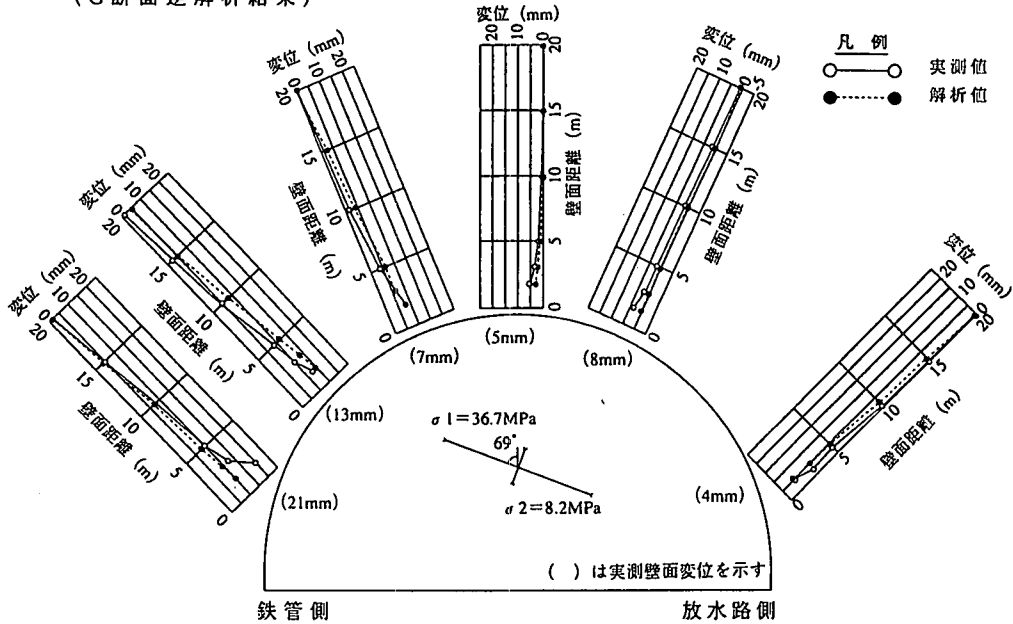


図-12 G断面及び各断面別逆解析結果

	初期地圧	掘削時地圧	逆解析結果
σ_1 (MPa)	12.3	12.1	36.7
σ_2 (MPa)	11.0	8.6	3.3
θ (°)	14	46	69
主応力図			

図-13 地圧測定結果

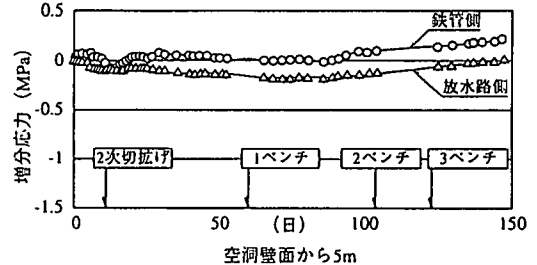
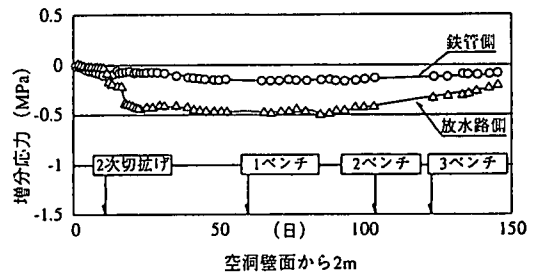


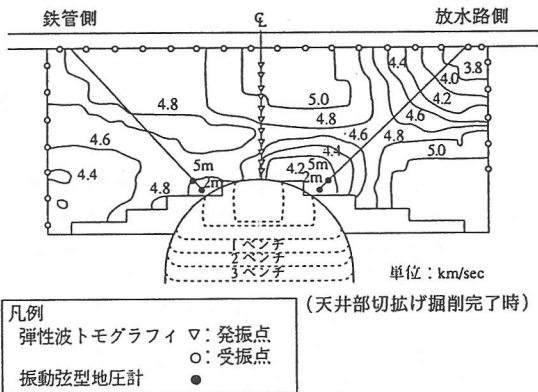
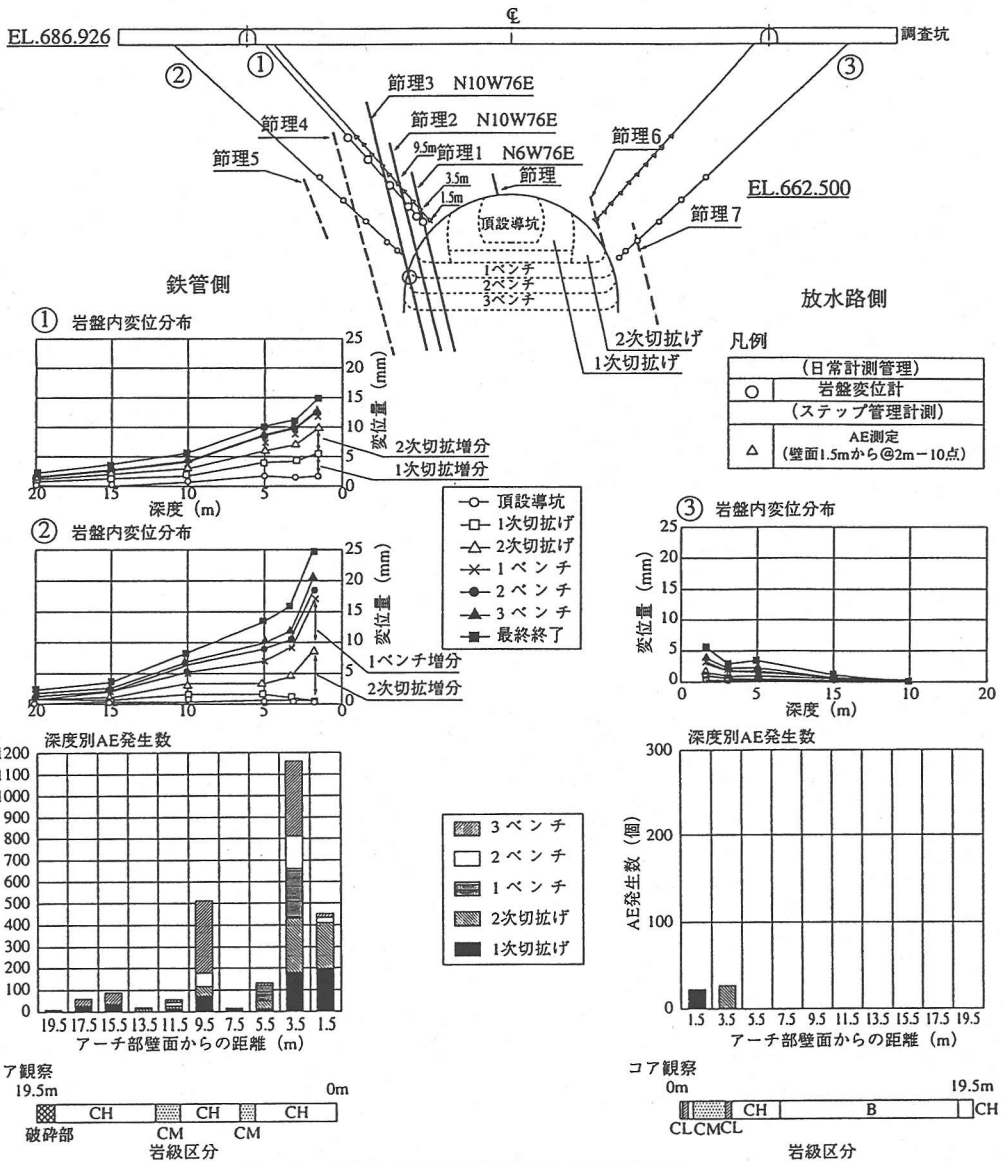
図-14 岩盤内応力変化状況図 (振動弦型地圧計測定結果)

以上から、変形の非対称性の原因は局所的な地圧の集中によるものではないと判断した。

② 仮説2：周辺岩盤を異方性・不均質と仮定した場合

調査坑、ボーリングコア（岩盤変位計設置孔他）並びに切羽における地質観察によると、当該箇所付近の地質は泥岩優勢部で、当空洞の中では、東西系の断層、節理の密度が相対的に少ない、均質でマッシュな岩盤で構成されており、当初は一般部と地質区分していた。また地質観察結果の他、弾性波トモグラフィ測定結果においても、鉄管側と放水路側で

地質分布に顕著な差は認められていない（図-15）。
但し、空洞長軸方向と平行な南北系のJ_{NS-h}系の



長い(最長6m)節理の存在が顕著である。他部においても J_{NS-h} 系節理は存在するが、当空洞で支配的な空洞長軸と直交する東西系の J_{EW-h} 系節理群で細かく切断されており、その節理長さも30cm以下が大半を占める。 J_{NS-h} 系節理は鉄管側では、側壁に対し、急傾斜の流れ目となっており、切羽観察結果によると長さ5m以上のものが、ほぼ2.5m間隔で確認されるとともに、その間では長さ3m程度のものが、50cm~1m間隔で確認された。節理面は平滑であり、擦痕はほとんど認められず、厚さ1mm程度のフィルム状のカルサイトが付着している。放水路側も J_{NS-h} 系節理の性状、分布は鉄管側と同様であ

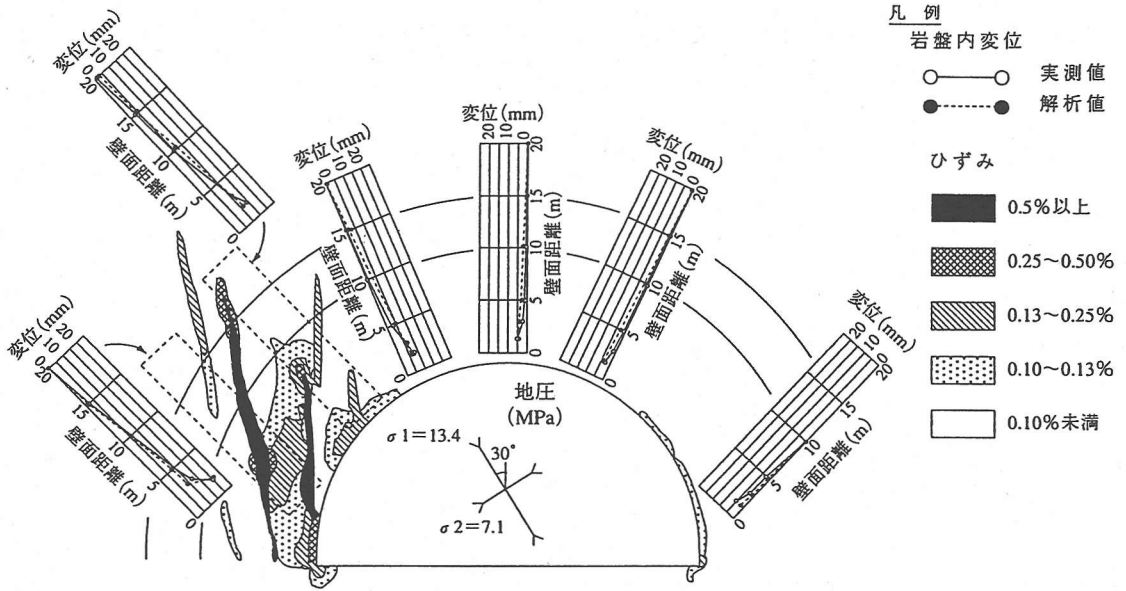


図-17 逆解析結果及びこれに基づく最大せん断ひずみ

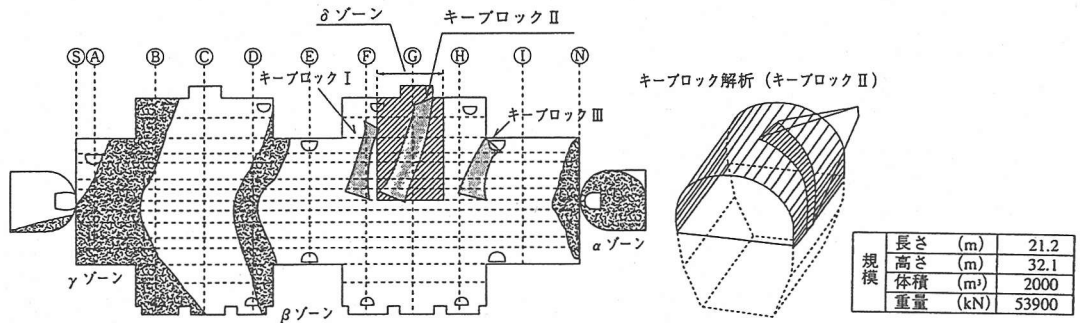


図-18 キーブロック抽出結果

不連続面挟在物	試験値	強度定数 (回帰)	相関係数	データ数
カルサイト無し	○ : $\tau_r = 0.3 + \sigma_n \tan 32^\circ$	0.87	16
カルサイト有り	◆	— : $\tau_r = 0.02 + \sigma_n \tan 35^\circ$	0.93	16

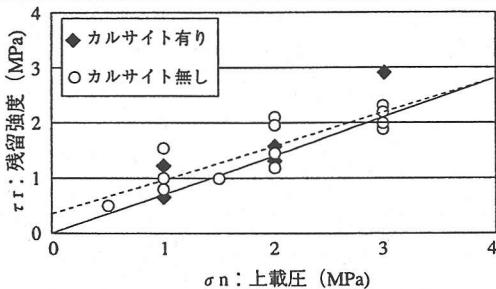


図-19 節理面の一面せん断試験結果

るが、掘削壁面に対し、さし目となっている。

岩盤変位計による岩盤内変位分布を図-16に示すが、変位が急増しているのは2次切掘げ及び1ベンチ掘削時であり、これは節理が空洞掘削により裾を払われた時期と一致している。

また、A E計測結果を併せて図-16に示すが、鉄

管側では、壁面から1.5m、3.5m、9.5mでA Eの発生が顕著であり、その箇所はJ_{NS}-h系節理と交差する箇所と一致している。A Eの発生原因は特定できないが、節理交差箇所と符合していることから、節理の微小な破壊或いは滑りの挙動を示しているものと推定された。

その後の盤下げ掘削においても、上記節理群が壁面に出現する度に変位が発生したことも考え併せると、変形の非対称性の原因は、空洞に対して流れ目となる東傾斜のJ_{NS}-h系節理群の滑り挙動によるものと判断された。これらの節理群を織り込み、節理の異方性、不均質性を考慮した逆解析⁹⁾を実施した結果は、図-17に示すとおりであり、第一主応力の方向が現場計測結果と若干異なるが、実測値をほぼシミュレートできた。

この密着した節理の空洞掘削に伴う滑り挙動は、前述した塩原地点と全く同じであるが、事前にこの現象を予測し、調査していたため、原因究明から対策実施まで、工事を中断することなく円滑に進める

PS工導入力 当初設計 0.18MPaの場合

滑動力		平常時	49800
		地震時	51000
FT (KN)			
抑 止 力	PS工	(KN)	14600
	吹付コンクリート耐力	(KN)	24600
	不連続面	平常時	33900
	セン断耐力 (KN)	地震時	29900
	合計	平常時	73100
FR (KN)		地震時	69100
安全率		平常時	1.46
		地震時	1.35
FS = FR/FT			



PS工導入力 0.25MPaの場合

滑動力		平常時	49800
		地震時	51000
FT (KN)			
抑 止 力	PS工	(KN)	23600
	吹付コンクリート耐力	(KN)	24600
	不連続面	平常時	33900
	セン断耐力 (KN)	地震時	29900
	合計	平常時	82100
FR (KN)		地震時	78100
安全率		平常時	1.65
		地震時	1.53
FS = FR/FT			

↓

キーブロック安全率 1.5を満足

図-20 キーブロック解析結果(2バツ掘削時)に基づく支保工の設計修正

ことができた。

b) キーブロックを考慮した支保工の見直し

断層または地質境界部と今回特定できた J_{Ns-h} 系の節理との組み合わせによって形成される可能性のあるキーブロックを検討した結果、当該箇所において図-18に示すキーブロックが抽出された。

このキーブロックの安定性検討を行うにあたり、一面せん断試験結果から節理面の強度を把握した。先にも述べたように節理面にはカルサイトが挟在する場合とない場合があり、それぞれの試験結果から図-19に示す強度定数が得られた。カルサイトが挟在する場合には粘着力 c が若干小さな値となるものの、工学的に優位な差はないと判断し、カルサイトが挟在する場合をキーブロックの安定性評価での強度特性とした。解析は3次元とし掘削ステップ毎に行い、抑止力には不連続面の滑り抵抗力並びにPSアンカー、吹付コンクリートを考慮した。解析結果は図-20に示すとおりであり、必要安全率を確保するために、PSアンカー導入力を当初設計0.18MPaに対し0.25MPaへ変更した。

(7)結論

葛野川地下発電所の掘削は、調査・設計・施工の綿密な連携のもとに、初めてトラブルなしに掘削を完了することが出来た。葛野川地点の情報化設計施工技術について特徴を挙げると以下の3点に集約される。

①地下発電所空洞建設に関する調査・試験法の確立

空洞の安定性検討に必要な情報は、地質モデル、岩盤特性、荷重条件に大別される。

空洞周辺領域のモデル化については、従来岩盤等級主体の評価であったものを、節理群まで含めた不連続面などの情報を加味して細分化した。そのため

地質形成過程の分析、評価に踏み込んだ詳細な地質調査を行い、サイトの地質モデルの構築を図った。

また岩盤特性については、従来の岩盤試験に加え、模擬空洞掘削による応力解放時の変形特性並びに地質構造に起因する変形異方性に対する、より詳細な情報を得ることにより設計、予測解析の精度向上を図った。

初期地圧あるいは解放応力を把握する方法として、埋設法、球面孔底法、円錐孔底法、水圧破砕法、ひずみ解放試験、振動弦型地圧測定法、さらに模擬空洞掘削時の変位に基づく逆解析による初期地圧の推定など、各種手法を調査段階、施工段階に適用し、荷重条件の推定精度の向上をはかるとともに、ひずみや緩みとの適合性について照査した。

以上のように、従来の調査、試験法に対し新しい手法を適用することで、空洞の安定性評価に必要な入力条件を得ることが可能となった。

②空洞の安定解析・支保設計法の提案と適用

空洞の安定解析において、従来は支保効果が十分に評価出来なかったため、安定解析は空洞挙動の予測にとどまり、支保設計は別途の手段でなされていた。そこで、先行地点において掘削に伴う岩盤内の応力変化をシミュレート出来ることが確認された岩盤のひずみ軟化モデルを考慮した解析手法を、基本設計の段階で発電所空洞に適用し、空洞の挙動予測や支保効果を評価する手段として実用化した。また、節理の開口等不連続体的挙動については、逆解析手法をその原因究明手段として活用するとともに、これに併せたキーブロック解析等を整備し、施工中の計測データに基づく岩盤物性並びに解析モデルの見直しによる支保の設計修正システムを確立した。

③地下発電所空洞の建設における情報化設計施工システムのうち計測管理システムの開発と適用

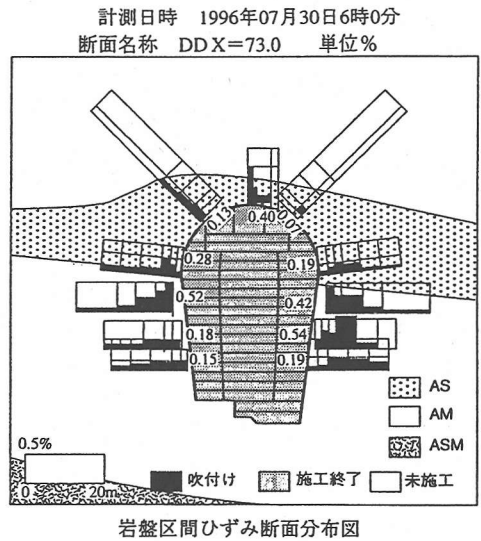
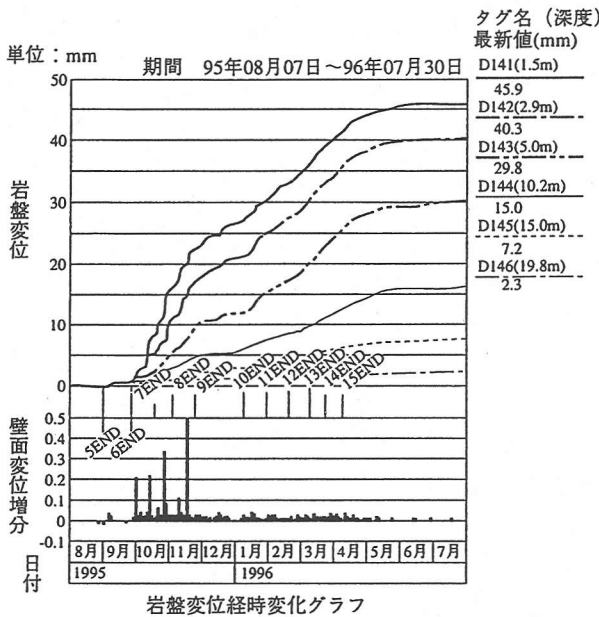


図-21 情報化設計施工システム出力例

最新の計測並びに情報処理技術を導入し、ひずみ・応力・緩みを総合的に判断でき、かつ相互の計測結果の適合性を照査できる計測システムの構築、並びに地質の変化・施工イベント等挙動に影響を及ぼす各種要因を取り込んだデータ処理・判断メニューの多様化およびリアルタイム処理化を図ることとした。情報化設計施工システムによる出力例を図-21に示す。

また、管理の上では日常管理とステップ（施工段階）管理の考え方を明らかにし、日々の管理を行いながら、各ステップ毎に広い視点で空洞の挙動を監視する体制を確立した。

4. おわりに

本論文は、大規模地下空洞建設技術の最適化という目標の基に、昭和55年に掘削を開始した今市地下発電所（掘削期間：昭和55年～昭和57年）から最近の葛野川地下発電所（掘削期間：平成6年～平成8年）の掘削完了までの約16年間の地下空洞掘削における調査・試験、解析・設計、施工・計測の各種要素技術の開発経緯について言及し、各種要素技術を総合技術として体系化した情報化設計施工技術の一連の考え方、工事への適用手順を確立したものである。

今後も掘削の対象となる箇所の地質・岩盤・地圧特性などにより、必要な要素技術の開発・改良が望

まれることは当然であるが、当面は断層や節理などの不連続面が剥離や滑りを生じる際の岩盤挙動解析技術の精度向上が最重点課題と考えられる。現在もマイクロメカニクスに基づく節理挙動を考慮した連続体モデルMBC解析³⁾ (Micromechanics-Based Continuum Model) や岩盤の変形挙動を基質部と不連続面の変形の和として表すEJCM解析⁴⁾ (Equivalent Jointed Compliance Model) などが試行されているが、今後はこれらばかりでなく不連続面の挙動を精度良く予測する手法について検討を続け、次期の大規模掘削に生かしていくつもりである。

謝辞：大規模地下空洞における情報化設計施工技術の構築にあたっては、今市、塩原、葛野川地点と終始一貫して御指導賜りました神戸大学教授桜井先生に深く感謝の意を捧げます。

参考文献

- 1) E.フック, E. T.ブラウン: 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, pp.98-137, 1985.
- 2) 工藤奎吾, 小山俊博, 鈴木康正: 大規模地下空洞支保設計への数値解析の適用について, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.37-49, 1998.3.
- 3) 吉田秀典, 堀井秀之: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.23-41, 1996.
- 4) 永井哲夫: ロックボルトにより補強された不連続性岩

- 盤の力学的挙動に関する研究，神戸大学博士論文，1992.1.
- 5) 御牧陽一，蔵持慈男，工藤奎吾：今市地下発電所の施工と空洞周辺の岩盤の挙動について，電力土木，No. 185，1983.
- 6) 前島俊雄，伊東雅幸：蛇尾川揚水発電所地下発電所空洞の設計と施工実績について，電力土木，No.232，pp.25-35，1991.
- 7) 御牧陽一：形状の異なる断面空洞の掘削挙動に関する研究，東京大学学位論文，1985.
- 8) 桜井春輔，武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法，土木学会論文報告集，No.337，pp.137-145，1983.
- 9) 桜井春輔，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，No.403/VI-10，pp.75-84，1989.

(1998.3.10受付)

STUDY FOR APPLICATION OF COMPUTERIZED CONSTRUCTION MANAGEMENT SYSTEM TECHNIQUE TO LARGE UNDERGROUND CAVERN EXCAVATION

Keigo KUDO ,Toshihiro KOYAMA and Yuichi KOMATSUZAKI

In excavating the large underground cavern, it is necessary that techniques of survey-test, analysis-design and construction-measurement, which are related each other, work as a total technique. But in fact these techniques do not always work as a system because of an unbalance of these techniques so far, so whenever we were faced with some problems, we actually tried to solve the technical problems individually.

This report describes the application of "computerized construction management system technique" that was systematized as a total technique using each technique that had been improved during the range from survey to cavern excavation completion of recent underground power plant at Kazunogawa.