

技術展望

岩盤中に設ける大規模空洞の技術的変遷と将来展望

STATE-OF-THE ART AND FUTURE TRENDS OF ROCK CAVERN OPENING TECHNIQUES

御 牧 陽 一*

By Youichi MIMAKI

1. ま え が き

地下空洞の利用に関して、近年原子力施設、原油ほかの備蓄施設などの地下立地への要請が高まっており、岩盤中の大規模空洞の建設技術の一層の発展が期待されている。

岩盤中に設ける大規模空洞としては、昭和40年代に始まる大容量の揚水式発電所の建設を主体とし、これに係わる各種の技術進歩もこれら地下発電所の建設の歴史と軌を一にしているものと考えられる。

わが国で最初につくられた地下発電所は昭和30年につくられた須田貝発電所であり、以降各地で数多くの地下発電所がつくられている。

近年、水力電源開発の主流が従来の自流式から需要の

ピーク負荷を分担する大容量揚水式に移行し、水車・発電機がスケールメリットを求めて大型化してきたため、空洞規模が飛躍的に増大している(図-1)。

また、これまで建設された地下発電所地点の地質は、生成年代も古く、堅硬緻密な良質岩盤を対象とし地質条件についての問題は比較的少なかったが、近年は立地点の涸渇化に伴って必ずしも良好とは言えない地質条件下にも大規模空洞を建設する必要性も増加している。

これらの空洞は断面積で1400~1500m²の規模を有し、新高瀬川発電所の断面積1430m²は国内外における既設発電所では最大級のものである。空洞の断面形状は力学的にはきのこ型より卵型が有利であることは論をまたないが、重要構造物を収納する大規模空洞の天井部はアーチコンクリートで覆工しておくという発想から、

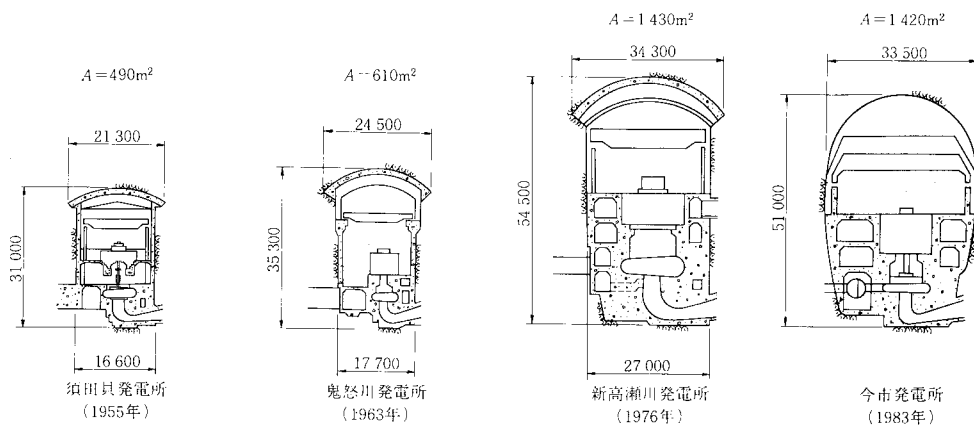


図-1 地下発電所空洞断面の変遷

* 正会員 東京電力(株)今市水力総建設所長 (〒321-24) 栃木県今市市大桑町131-1

従来、わが国ではほとんどがきのこ型断面を採用してきた。近年の施工機械、計測管理技術の急速な発展を背景に最近竣工した今市発電所はわが国で初めて大型の卵型断面（幅33.5m、高さ51.0m、断面積1420m²）を採用し、このような断面が力学的にも極めて有利であることが実証された。

本論では、主として上記の2地点の地下発電所を例にとり、岩盤内大規模空洞の調査、設計、施工技術の変遷をたどるとともに、将来への課題について概観してみたい^{1)~3)}。

2. 調査・試験について

調査・試験は一般の山岳トンネル工事の場合と本質的に異なるものではないが、大規模空洞の場合、設計に先立ち岩盤の工学的性質、特に地圧、岩盤の変形・強度特性をより定量的に把握することが求められる。

岩盤は一般に節理、層理などの不連続面を有し、不連続面を有しない要素としての岩石の物性とマスとしての岩盤の物性は大きく異なるのが普通である。また、岩盤としての変形性、強度特性は、その岩盤がおかれている応力状態によっても異なる。そこでこれらの不連続面の影響や、物性の応力依存性に着目した原位置での岩盤試験により、対象とする岩盤の特性を評価することが重要となる。

岩盤試験は、原位置で岩盤そのものの特性を決定するための試験であり、岩盤を構成する要素としての均質な岩石試験片を対象とする室内試験とは異なり、試験結果には試験位置の地質構造、岩質、節理やシームなどの不連続面、異方性、風化度など非常に複雑な個々の特性が総合されて表現される。これらの諸特性がどのように試験結果に反映されているかを分析することは非常に重要であり、試験値と実構造物の挙動を対比しながら試験結果の持つ意味合いを明確にして行くという経験の蓄積が今後とも重要であると思われる。このように岩盤試験の重要性は、構造物の重要性や設計条件の厳しさとともにますます高くなり、より厳密に岩盤特性を把握することが要請されている。

問題は岩盤の特性が構造物の大きさ、およびそれが設けられる外的条件との関係で評価しなければ意味を持たないということである。たとえば空洞の規模が大きくなれば、岩盤の強度や変形性（弾性係数）は見かけ上小さく現われることが知られており、極端に言えば設計に用いる岩盤の物性値は実物大の岩盤試験を行わない限り正確には評価できないことになる。このようなことは不可能であり、限られた範囲での試験結果から構造物全体の安定性を検討するに足る物性値の評価という作業が重視されるゆえんがここにある。

いまひとつ重要なことは、岩盤試験の結果から設定した岩盤の物性値を用いて設計解析を行っても、岩盤の持つ不連続性、非均質性のゆえに実際の構造物の挙動を完全に予測することは現状において困難なことである。したがってこのような予測計算における不確かさを補い、所期の目的にあう空洞を安全に建設するためには、施行中に行う観測により地盤のパラメーター、構造物の実挙動を常に再評価しながら施工を進めるといふ、いわゆるObservational Methodを強力に進めることが、極めて重要であると考えられる。

一般に岩盤試験の手法に関して、岩盤の変形特性にかかわる試験法としては、平板載荷試験（ジャッキ試験）が、強度特性にかかわる試験としてはせん断試験が主体となる。

岩盤変形試験は、ダムの基礎岩盤の変形特性を調べる目的で黒部ダムにおいて本格的に実施されて以来現在までに広く普及し、その実施例も数多い。平板載荷試験による岩盤の変形性は、半無限地盤に対する一軸圧縮的な載荷に対する変形係数が得られるが、空洞周辺の岩盤の

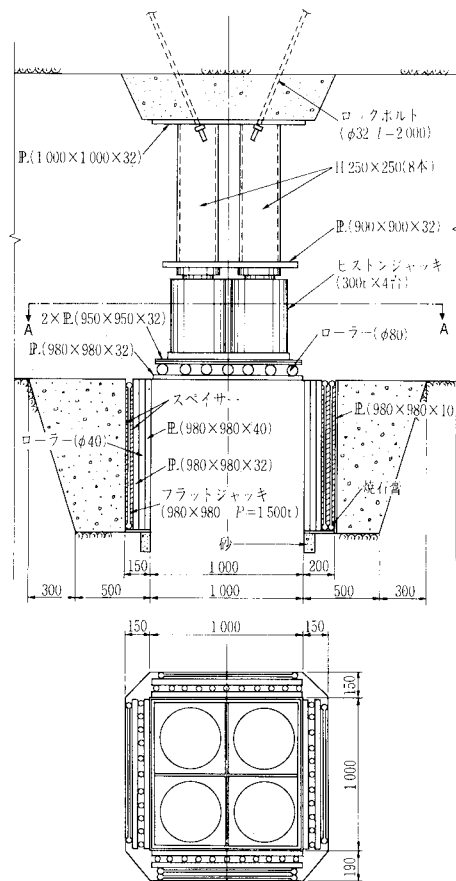


図-2 岩盤三軸試験法

変形挙動は掘削に伴う応力再配分により生じる2次地圧に規定され、一軸的な载荷に対する変形特性だけでは説明できない。したがって岩盤中に設けられる空洞を対象とした変形試験では、掘削に伴う応力解放過程を考慮し、応力レベルに応じた変形特性や、破壊過程ならびに破壊後の変形特性など、一般の構造物基礎を対象とする試験とは異なる特性を把握することが必要となる。

以上の観点から三軸応力状態で、かつある程度の不連続面を含んだ岩盤の変形性を調べるため、新高瀬川発電所において実施した岩盤三軸試験の例を図-2に示す。高瀬川地点の地質は主として中生代ジュラ紀における堅硬な花崗閃緑岩である。

試験は試験調査坑内に100 cm×100 cm×100 cmの立方体の供試体を切り出し、3方向からさまざまな荷重を載荷・除荷することにより変形性を調査している。試験結果の一例を図-3に示したが、異方载荷に伴う弾性係数の異方性が顕著に現われている。さらに図-4は、荷重レベルの違いによる载荷時の弾性係数 (E_i) と除荷時の弾性係数 (E_d) の比率を示したものであるが、荷重レベルによってこの比率が変化する様相が現われてい

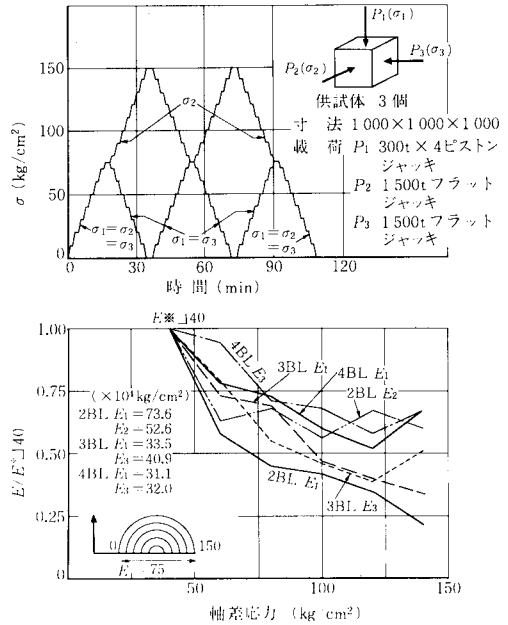


図-3 岩盤三軸試験結果

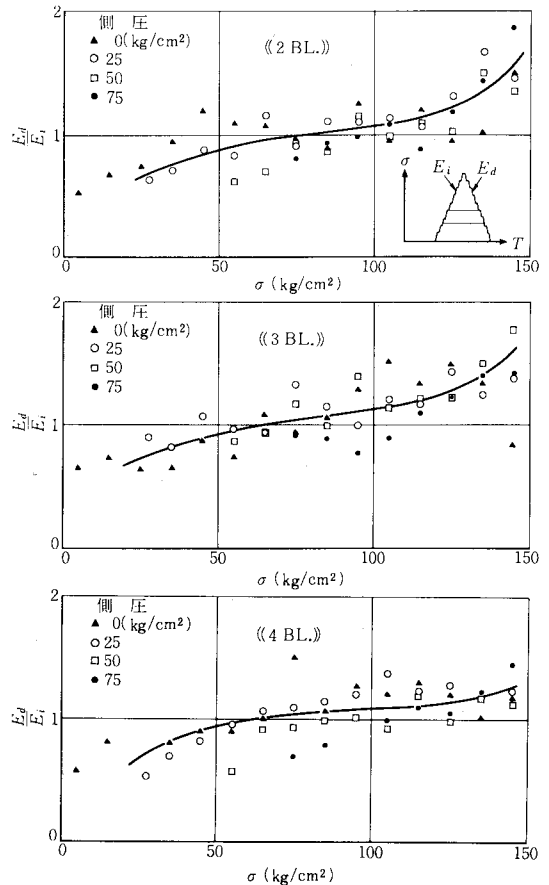
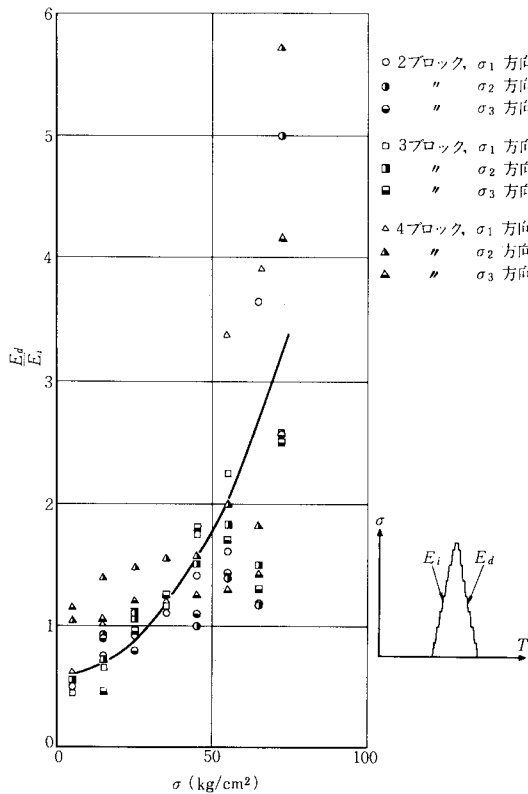


図-4 弾性係数の応力依存性

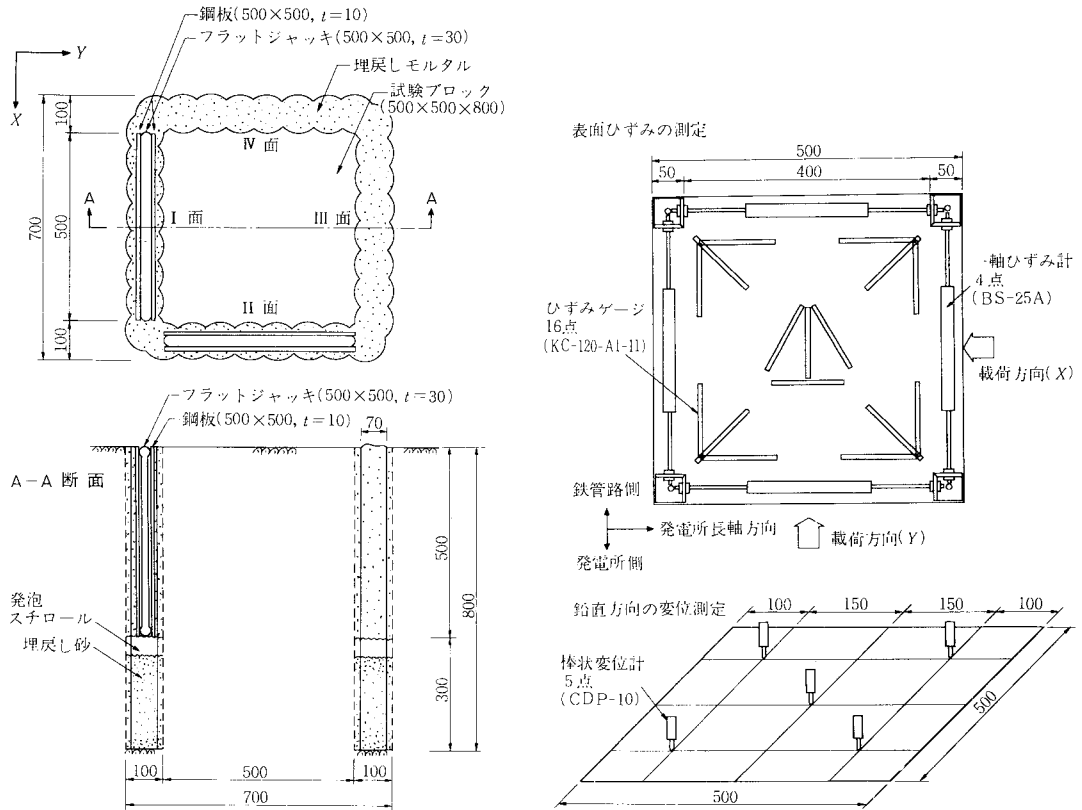


図-5 ひずみ解放試験方法

る。また、三軸試験ブロックの切り出しに先立ち100 cm×100 cmの正方形載荷板による単軸載荷試験を行っているが、直径30 cmの載荷板によるジャッキ試験の結果と比較してみると弾性係数は1.5～2.0倍という値を示している。

このように、岩盤の変形特性ひとつについても、試験の方法によりかなり異なった結果を示すため、試験方法の決定および試験結果の評価にあたっては、実際の構造物がどのような条件下で掘削されて行くかを良く考慮して行わねばならない。

次に、岩盤の性状として、岩盤試験の結果ではごく普通の性状を示しても、実際に掘削を行うと、その岩質により特異な挙動を示す例について述べたい。空洞掘削時において最も注目するものは空洞壁面のはらみ出し変形であり、これらは岩盤の性状や、掘削の方法により支配されるという問題があることである。今市地下発電所の地質は、古生代および中生代の珪質砂岩、角礫岩、砂岩・粘板岩の互層という3種類の岩種が混在しており、岩石試験ならびに岩盤試験の結果では3つの岩種とも大きな変形特性の差異がなかったにもかかわらず、実際の空洞掘削時に角礫岩がきわめて特徴的な変形挙動を示した。

空洞挙動の解析では角礫岩背面に残留地山応力が存在したための異常変位または断層破壊帯の存在による変位の増大と考えていた。図-5に示す方法で3岩種それぞれについて50 cm×50 cm×80 cmのブロックを切り出し、この切り出し時の応力解放に伴う表面ひずみを測定した。この結果の一例は図-6に示すとおりであり、切り出しの進展に伴って応力集中による圧縮ひずみの増大から、応力解放によって一挙に伸びひずみが増加していく様相がよくとらえられている。試験の結果は角礫岩が他の2倍程度大きな解放ひずみ量を示した。実際の空洞掘削時には壁面近傍での応力解放とそれに伴う既存クラックの開口や新規のフラクチャーの形成、その結果としての壁面のはらみ出しという現象が起こっていることがうかがえる。

以上のように岩盤の変形性に関しては、ダム基礎岩盤のように上載荷重に対する岩盤の変形能を調べることに端を発したジャッキ試験法だけでなく、空洞の掘削時の応力状態を取り入れ特に応力解放時の変形性に注目した試験がより有用であり、また必要であることが認識されたが、今後は岩盤の長期変形特性や、動的な荷重に対する変形特性をいかに評価するかが問題となろう。

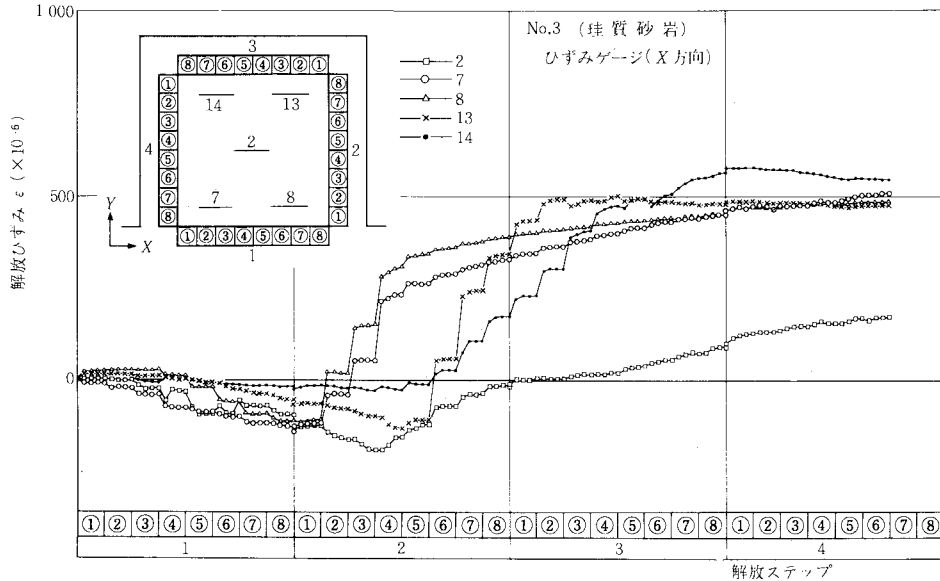


図-6 ひずみ解放試験結果 (今市発電所)

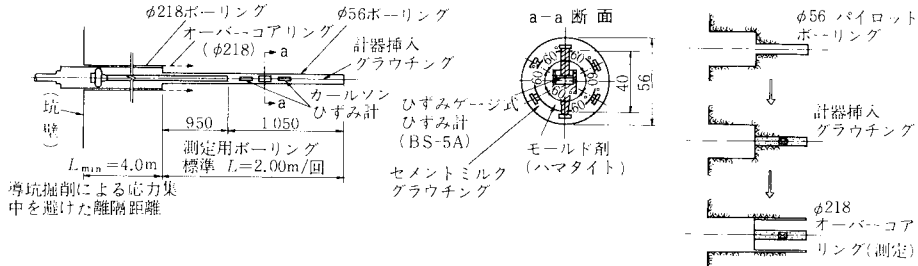


図-7 初期地圧測定法

次に変形特性とならんで重要な岩盤の物性である強度について述べたい。空洞を掘削して出現する壁面近傍の岩盤の強度特性は後述する安定解析において、ゆるみ領域を表現する上での重要なパラメーターであるとともに、補強工の検討に際しても最も基本的な要因となるものである。特に岩盤は破壊後も一定の残留強度を有している、不連続面を含む岩盤の強度は、岩石供試体の強度を上限とし、残留強度を下限とする範囲内で、空洞の周辺では掘削の進展とゆるみ域の形成に伴って強度特性が逐次変化して行くものと考えられる。不連続面を含む岩盤の破壊機構については説明すべき問題が多く残されているが、最近ではそのひとつとして剛性の高い三軸試験機を用いて破壊後の残留強度を含む完全な応力-ひずみ曲線を得る試験を行い、とくにゆるみ領域での強度低下を考慮した安定解析も行われている。

岩盤の特性とならんで重要なものに、空洞を設ける地

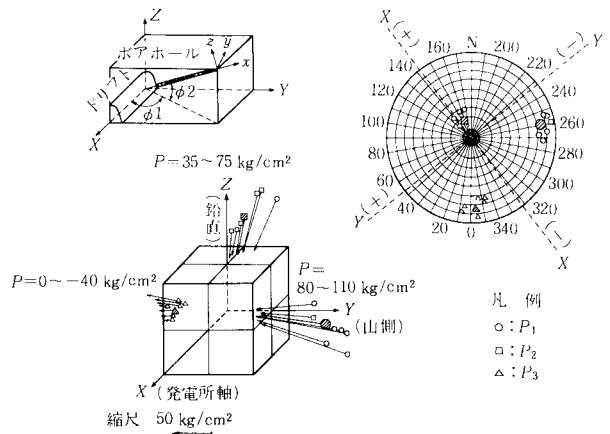
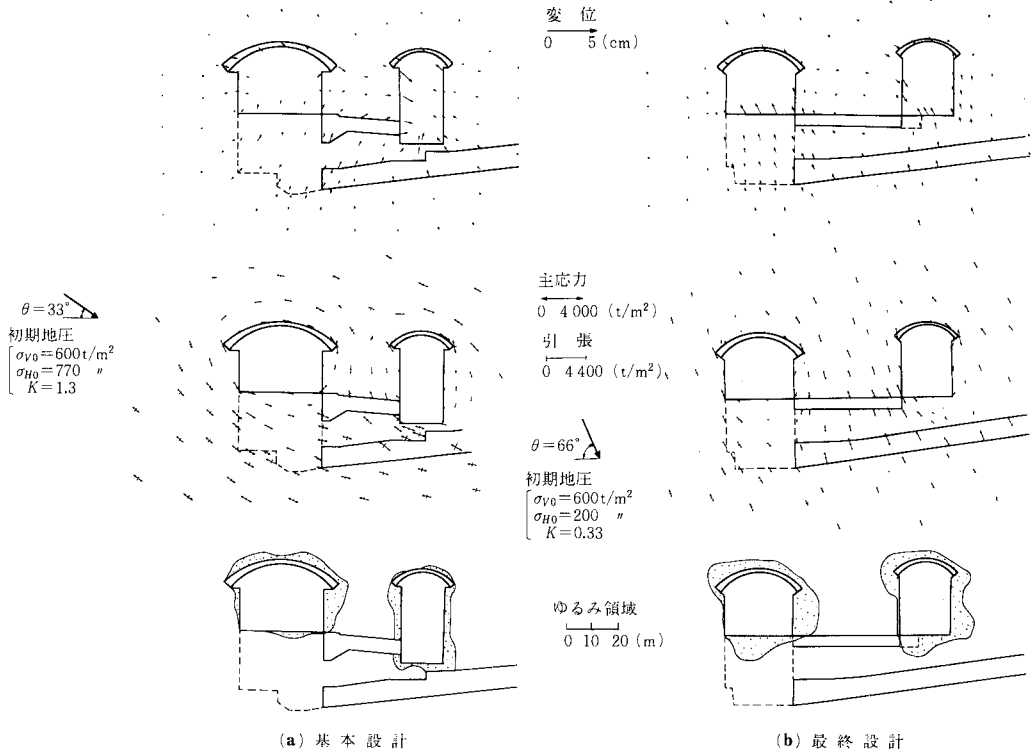


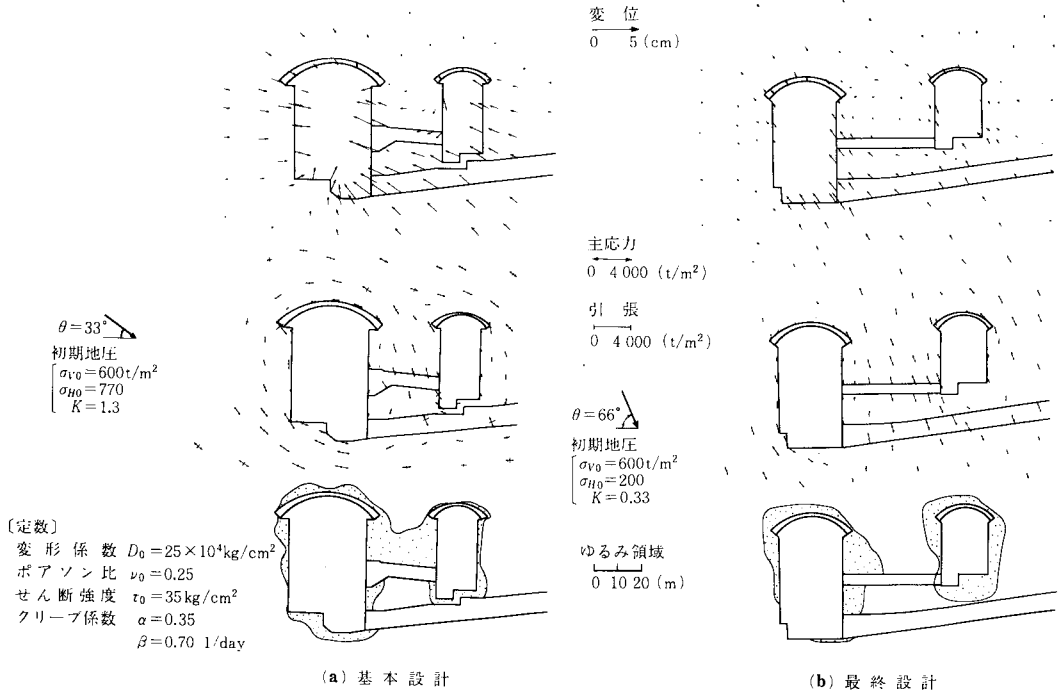
図-8 初期地圧測定結果 (新高瀬川発電所)

点での初期地圧がある。初期地圧の大きさや方向は空洞の変形挙動やその安定性に大きく影響を及ぼすので、設計にあたっては事前に地圧状態を知っておかねばなら

本体中間部掘削完了時における掘削(P-2)解析結果



本体掘削完了時における掘削(P-3)解析結果



[定数]
変形係数 $D_0 = 25 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
ポアソン比 $\nu_0 = 0.25$
せん断強度 $\tau_0 = 35 \text{ kg/cm}^2$
クリープ係数 $\alpha = 0.35$
 $\beta = 0.70 \text{ 1/day}$

図-9 掘削解析結果 (新高瀬川発電所)

い。

空洞掘削前の地山に存在する応力（初期地圧）は、自重による応力の他に、地形、断層などの不連続面を含む地質構造、地殻変動による残留応力などが互いに作用し一般にはかなり複雑である。

鉛直方向地圧を σ_v 、水平方向地圧を σ_H とすると従来は側圧比 (σ_H/σ_v) が、0.3~0.5 程度といわれてきたが、近年に至り岩盤の応力を測定する技術が開発され、測定例が蓄積されてくるに従い、それらの結果を総合すると鉛直方向地圧はほぼ地山被りに相当する値を示すが、地殻表層部 500 m 程度までの水平方向地圧は鉛直方向より大きいという事例が多く見られる。これは最近のプレートテクトニクス説などをみれば納得できるものである。新高瀬川計画を検討中の昭和 45 年前後においては地圧測定の実施例も少なく、空洞の断面・平面配置などについて初期地圧の実測を行って設計した例は少なかった。

初期地圧の実測法にはフラットジッキを用いる応力補償法、ボアホールを利用した応力解放法ならびに水圧・破砕法などがある。新高瀬川地点ではこれら各種の方法による実測を試みたが、孔径変化法による測定が最も合理的と考えられた。この方法は図-7 に示すように、調査坑掘削による応力集中の影響を避けた地山内にパイロットボーリング ($\phi 56 \text{ mm}$) を行い、この中に孔径方

向 3 成分および坑軸方向 1 成分のひずみ計をセットし、セメントミルクによりグラウトして周辺岩盤と一体化したのち、オーバーコアリング ($\phi 218 \text{ mm}$) を行いながら解放ひずみを測定し、次にこの解放ひずみをゼロにするように圧力を加えて、この圧力を初期地圧とする。このようにして求めた初期地圧の大きさと方向は、図-8 に示すように、第 1 (最大) 主応力が地形的に尾根沿いの方向で水平に対し 10 度下向きであり、第 2 (中間) 主応力は山の傾斜にそってほぼ鉛直方向に土被りに相当する値を示し、第 3 (最小) 主応力は地表面と直交する方向となった。第 1 主応力と第 2 主応力の比は、側圧比 (σ_H/σ_v) に相当するもので、高瀬地点ではその値は 2 に近いことが判明した。

このように実測された地圧状態を用いて掘削時の安定解析を行って、当初設計の断面規模および配置を修正した例が図-9, 10 に示す高瀬川の例であり、現実に掘削中の空洞の変形挙動からみても妥当な判断であったと考えられ、設計段階における地圧状態の把握が重要であることが認識された。地圧測定技術については調査の初期段階で地圧状態を知るために、ボーリングコアを用いた AE 法による地圧の推定や、ボーリング孔を利用し地下深部の地圧を測定する水圧破砕法などの実用化研究が進められており、掘削中の空洞周辺応力の実測による計測管理技術とともに今後検討が必要な課題であろう。

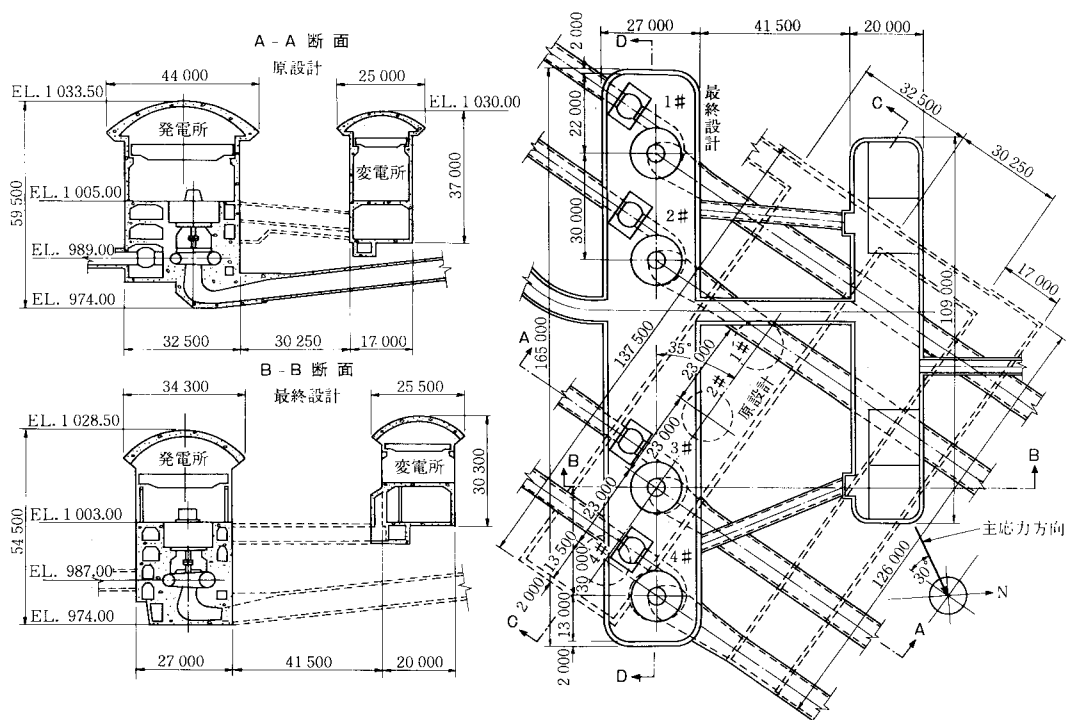


図-10 空洞配置の修正例（新高瀬川発電所）

3. 解析ならびに設計について

トンネルの設計に関しては古くから地圧論をはじめ、支保工・覆工に作用する荷重を算定し、いかに支保設計を行うかについてさまざまな研究がなされてきた。

地圧論については、Heim (1878)⁴⁾は地下深部の岩盤は上載荷重による応力が作用し、側方拘束により岩石は破壊しないが互いに押し合って体積が小さくなっていることを指摘した。この考えをもとに Trompeter (1899)⁵⁾は空洞の掘削により壁面近傍の岩盤は空洞内に向って膨張するとともに、周辺の応力は消滅し免圧帯が形成されるが、支保工にはこの膨張による圧力が作用すると論じた。この考えは空洞内部への岩盤の膨張量も、支保工に作用する荷重も、地下深いほど大きくなることになり、いくぶん経験とは合わない点がある。そこで Willmann (1911)⁶⁾や Kommerell (1912)⁷⁾は空洞を掘削すると岩盤は膨張し、その自重や地圧などの作用により亀裂が生じたり、壁面での剝離が生じたりしてゆるみ、この部分の重量が支保工に作用すると考えた。

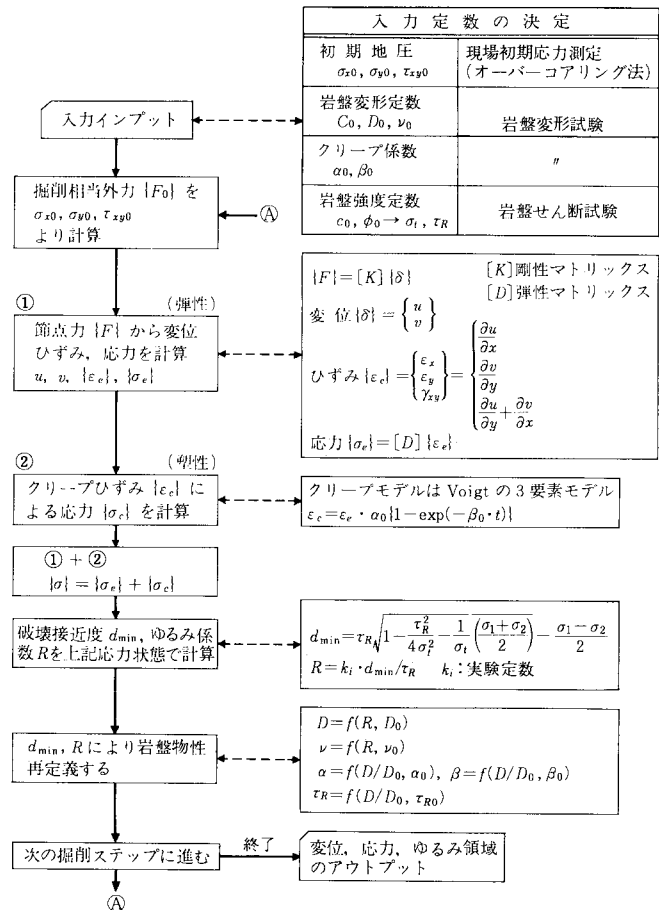
Dinsdale (1936)⁸⁾は圧力ドームという概念で空洞を囲む免圧帯の外側には空洞掘削による強い圧力の作用しているゾーンが存在することを指摘している。

これらの議論を受けてトンネル周辺の応力状態に関し Schmidt (1926)⁹⁾が弾性論に基づいて円孔を有する無限板に応力が作用した場合の厳密解を誘導したのにはじまり、Fenner (1938)¹⁰⁾、Talobre (1957)¹¹⁾、Kastner (1961)¹²⁾ら多くの理論的な解析および実際の問題への適用といった研究が続けられてきた。

このように弾性論あるいは弾塑性論に基づく研究とは別に土質力学の知識をとり入れて、支保に作用する土圧を定め覆工の設計を行う経験的な方法論についても Terzaghi, Protodyakono らに代表される考え方も広く用いられてきた。これらの延長線上に Rabcewicz (1964¹³⁾、1965¹⁴⁾、1969¹⁵⁾により、いわゆる NATM の名でよばれるトンネルの設計・施工法の概念がとりまとめられ今日に至っていることは周知のとおりである。一方、トンネル周辺の応力状態を定め、空洞の安定性、補強の方法などを評価する方法として 1970 年代から広く普及してきた方法に FEM をはじめとする数値解析手法がある。この方法はさまざまな空洞形状、岩盤の不均質性や異方

性、空洞の三次元的な挙動、掘削段階に対応した逐次挙動などをとらえることができるという大きな利点のゆえに岩盤内大空洞の解析手法として極めて活発な研究が進められている。地下発電所の設計に関して FEM を本格的に適用した例は国内において林・日比野 (1968)¹⁶⁾による方法に端を発し、今日まで多くの地点でこの手法が用いられてきている。図—11 にはこの手法の解析手順を示す。

新高瀬川地点において実施した解析結果の一例は前述のごとく図—9 に示すとおりであり、空洞の形状、併設空洞の離間距離の違いにより空洞周辺のゆるみ領域の分布の差異が顕著に認められる。当地点における原設計は図—10 の A 断面に示す形状・配置であり、実測による初期地圧を入力した解析では空洞の壁面変位も大きく、発電機室、主変室の間でゆるみ領域がかきなり合って相互に干渉しあう形となっている。そこで図の B 断面に示すように 3 号主機を中心に 35° 回転することによって断面と離間距離、平面的な配置（初期応力方向に対する



図—11 FEMによる安定解析法

空洞軸の偏角)を変更することにより、空洞壁面の変位やゆるみ領域の大きさがかなり小さく抑えられることが図-9に示すように明らかとなった。

次に今市発電所では、従来のきのこ形断面に代り卵形断面を採用し、きのこ形と卵形の形状の違いによる安定性を検討したが、その結果の一例が図-12に示すものである。図から明らかなように、卵形断面では空洞周辺の応力再配分の過程が極めてスムーズに行われることや、応力集中の発生が少ないことから、壁面の変形も小さく、ゆるみ領域もきのこ形に比べ1/2~1/3に抑えられている。以上のようにFEMによる掘削解析手法は、空洞形状、配置、変形量、ゆるみ領域の大きさとそれに伴う要補強範囲の決定などに有効な手法であるといえる。なお今後の課題としては、岩盤の不連続性に起因する挙動を表現し得る解析手法の実用化が望まれる。

次に設計上問題になるのは、覆工および補強工の設計である。特に重要なことは、ゆるみの進展や壁面の変形をどの程度まで許容するかというある規準のもとに、経済性を考慮して補強工(ロックボルト、PS工)のピッチ、長さ、導入力や覆工コンクリート、吹付けコンクリートの厚さなどの仕様を合理的に定め、空洞の安定性を確保

することである。

今市発電所における、支保・覆工の設計は、周辺岩盤をできるだけ有効に利用するNATMの考え方のもとに、PS工、ロックボルト、吹付けコンクリートにより

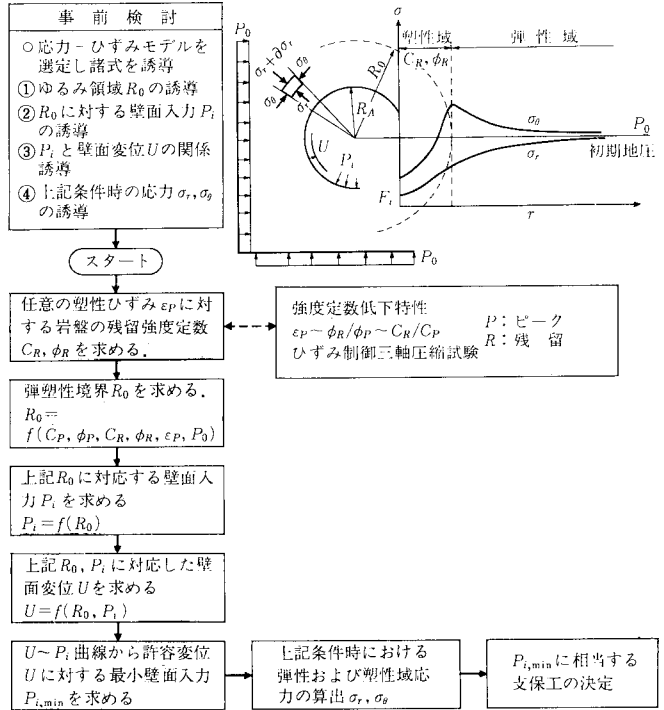


図-13 弾塑性論による支保工設計フロー

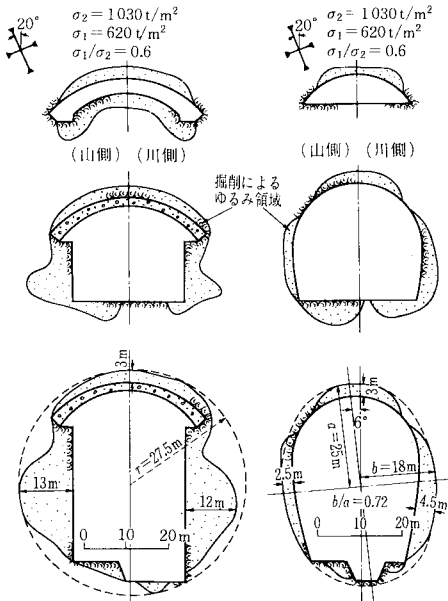
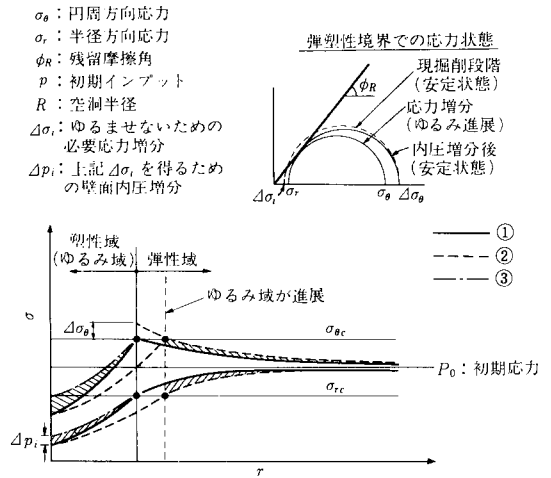


図-12 空洞形状の違いによるゆるみ領域の差



- ① 現掘削段階における応力場
- ② 盤下げに伴う弾性域の応力増加 ($\Delta\sigma_\theta$) により、塑性域(ゆるみ域)が進展したときの応力場
- ③ 空洞壁面でのロックボルトのインプットにより内圧 (Δp_i) が増加したときの応力場(弾性域の残留強度が増す)

図-14 内圧導入による補強設計

空洞の安定をはかることにした。

すなわち、支保・覆工の設計は、FEMによる粘弾塑性解析、岡・Kastnerらの方法による弾塑性理論解析に加えて、アーチ部岩盤のゆるみによる崩落や、側壁部のすべりに対する安定計算などの局所的な安定性の検討を組み合わせを行っている。ただしこれらの計算では岩盤の持つ不均質性や、掘削に伴う節理などの挙動の影響を適確に反映させることは困難であるため、後述する空洞掘削中の計測と、それに基づく設計・施工法の見直しにより、支保量を適宜増減させるといった進め方が必要となる。

弾塑性論に基づく支保の設計フローを図-13に示した。この方法による支保導入力決定の考え方は次のと

おりである。自然状態で応力の均衡を保っている地山内に空洞が掘削されると、空洞周辺の応力分布が変化し、空洞内空への壁面の変位や周辺での応力集中により塑性化した領域が形成される。良好な岩盤内に空洞が設けられる場合は支保工が施工されなくても空洞の安定性がただちに損なわれることはないが、最終的な平衡状態に達するまでに壁面近傍での小規模な崩落や、塑性化領域の岩盤深部への進展といった現象が繰り返し生じることになる。空洞の安定確保のためにはこの不安定な領域に適切な支保ないし覆工を実施し、必要内圧を壁面に加えることによって、塑性化した領域の拡大を防止することが必要となる(図-14)。塑性領域の発達過程に支保工ないし覆工が施工されると、そこに空洞壁面の変位に応じ

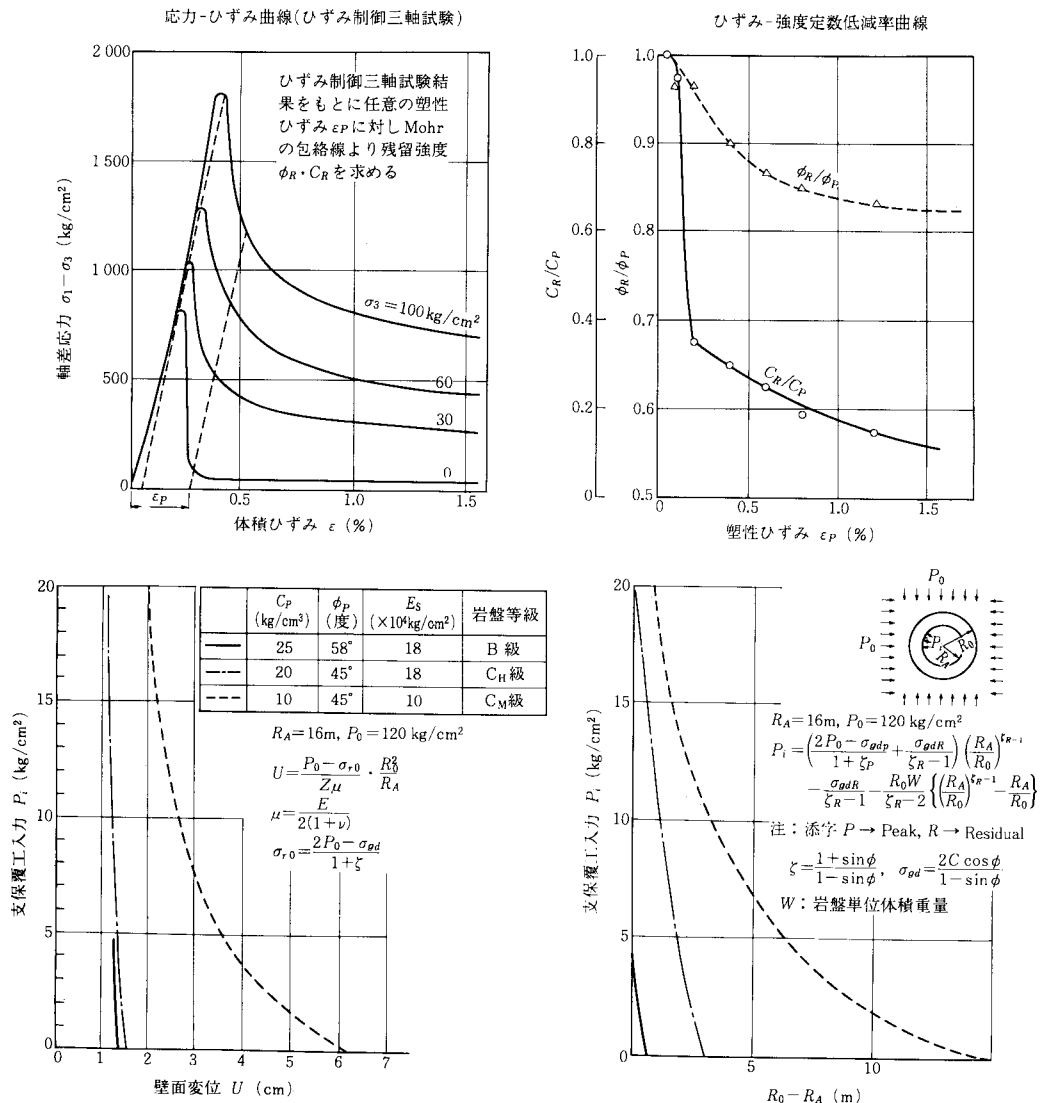


図-15 弾塑性論による支保工設計計算例

表-1 地下発電所空洞のロックアンカー仕様の例（今市発電所）

	長さ (m)	仕 様		引 張 強 度 (P_u)		降 伏 強 度 (P_y)		設計緊張荷重	配置および施工数			
				応 力 度 (kg/mm^2)	荷 重 (t)	応 力 度 (kg/mm^2)	荷 重 (t)		ア ー チ		側 壁	
									種 類	径および本数 (mm)	パターン	施工数 (本)
P S 工	15	19本より	$\phi 17.8 \times 4$ 本	190	39.5	160	33.6	$0.7 P_y \times \text{本数}$ $24 \text{ t}/\text{本} \times 4 \text{ 本} = 96 \text{ t}$	etc 4.0 m $\times 2.0 \text{ m}$	800	etc 4.0 m $\times 2.5 \text{ m}$	980
	10	19本より	$\phi 17.8 \times 4$ 本	190	39.5	160	33.6	$0.7 P_y \times \text{本数}$ $24 \text{ t}/\text{本} \times 4 \text{ 本} = 96 \text{ t}$	—	—	etc 4.0 m $\times 2.5 \text{ m}$	330
R B 工	5	$\phi 29$		60	21.1	40	17.6	5 t	etc 2.0 m $\times 1.0 \text{ m}$	2 670	etc 2.0 m $\times 1.25 \text{ m}$	4 350

た受動圧が発生し、岩盤にはこの反力と支保工の緊張による導入力が加えられるが、この必要導入力については塑性領域での岩盤の応力-ひずみ関係を用いて(図-15)、以下に示す関係式を導くことにより算定できる。

すなわち、

- 岩盤の強度定数 C_p, ϕ_p
- 初期地圧 p_0
- 掘削半径 R_A

とすれば、

ひずみ制御三軸圧縮試験等によって求められる残留強度定数 C_R, ϕ_R を用いて弾塑性境界 R_0 は式(1)のように求められる。

$$R_0 = R_A \left[\frac{2 \{ p_0 (\xi_R - 1) + \sigma_{GR} \}}{(\xi_R + 1) \{ p_0 (\xi_R - 1) + \sigma_{GR} \}} \right]^{\frac{1}{\xi_R - 1}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$$\xi_R = \frac{1 + \sin \phi_R}{1 - \sin \phi_R}$$

$$\sigma_{GR} = \frac{2 C_R \cos \phi_R}{1 - \sin \phi_R}$$

また、壁面内圧 p_i は式(2)によって求められる。

$$p_i = \left(\frac{2 p_0 - \sigma_{GR}}{1 + \xi_p} + \frac{\sigma_{GR}}{\xi_R - 1} \right) \left(\frac{R_A}{R_0} \right)^{\xi_R - 1} - \frac{\sigma_{GR}}{\xi_R - 1}$$

$$- \frac{R_0 W}{\xi_R - 2} \left[\left(\frac{R_A}{R_0} \right)^{\xi_R - 1} - \frac{R_A}{R_0} \right] \dots \dots \dots (2)$$

W：岩盤の単位体積重量

以上のようにして定めた今市発電所におけるPS工、ロックボルト工の設計仕様を参考のため表-1に示す。

4. 施工法について

地下発電所空洞の施工は基本的に一般の山岳トンネルの施工法と異なるところはないが、初期には空洞全体をコンクリートで覆工したり、施工機械も能率が低かったりしたため、建設に要する工期も空洞規模に比し長期間を要するなど施工面での困難も見受けられた。逆に空洞規模が現在のものと比べ比較的小さかったため、施工途中での予期しない変状に対し補修工事を行ったり、ロッ

クストラットを残置したりするなど対策を講ずることがある意味では容易に行えた。しかしながら前述のごとくここ10数年来の空洞の大規模化や建設の高効率化に対する要請に応じるためには設計思想の確立とそれに 대응する施工法・施工機械の開発が不可欠の条件となってきた。

ここでは主として今市発電所の施工例を中心に大規模空洞の施工法の現状について述べることにする。

まず、施工計画の立案に際しては今市地点では次のような基本方針を策定している。

- ① 空洞壁面は不必要な岩盤の損傷を避けるため削孔方向は水平としスムーズプラスティング工法を採用するなど壁面をできるだけ円滑に仕上げること。
- ② 仕上げ壁面掘削後、ただちにコンクリート吹付け、ロックボルトを施工し、壁面の拘束を迅速に行うとともに、できる限り早期にPS工を挿入し壁面入力を与える。
- ③ 上記を円滑かつ迅速に行うため、施工機械はできる限り大型かつ自動化された高効率のものを採用する。
- ④ 岩盤挙動の計測結果を迅速に施工にフィードバックするため計測と施工の一貫した管理体制を整える。

一般に空洞の掘削手順は大別するとアーチ部の掘削と本体の盤下げに分けられ、盤下げ掘削は基本的にはベンチ掘削であり掘削方式はおのずから決まってくるが、アーチ部の掘削は側壁導坑方式と中央導坑方式に分けられる(図-16)。

天井アーチ部の掘削については天井アーチに沿って2~3か所の先進導坑を設け、これをリング状に連結させて切掛けを行う方法が従来一般的であったが、今市のように大断面の卵形空洞においては、掘削に伴う応力の再配分をスムーズに行わせるために、小規模の先進導坑を掘削することによって地山の応力分布を乱すことは適切ではないとの判断から大断面による中央導坑掘削方式が採用されている。

本体部の掘削は断面中央部のベンチカットと、側壁部の仕上げ掘削に分け、中央のベンチカットを先行させることにより空洞壁面の岩盤への発破エネルギーによる損

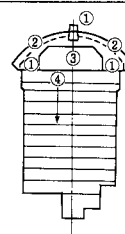
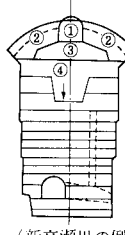
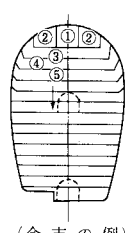
掘削方式		摘要	
側壁導坑方式	アーチの両端付近に2本の導坑を設け、これよりリング状に切り広げる方式で天井アーチコンクリート打設のため頂設導坑が併用される。 支柱による支保が容易であり、地質条件に対する適用性が広く、古くから用いられている方法である。	須田 貝 奥 只 見 黒部川第四 城 山 新 豊 根 沼 原 奥 多々良木 馬瀬川第1	 <p>(馬瀬川第1の例)</p>
中央導坑方式	アーチ中央に大断面の導坑を設け、これより両側に切り広げる方式で、作業性からリング断面を大きくとり支保工はロックボルトとコンクリート吹付けが主体となる。掘削機械の大型化や、大型スライドセントルによるコンクリート打設などが可能となり機械化による施工能率の向上が図られる。 最近良質な岩盤について適用されている方式であるが掘削過程の応力再配分がスムーズであり、支保技術の向上に伴い適用範囲が拡大されるものと考えられる。 * 最近、この方式に側壁導坑を併用し、側壁アバット部のコンクリート補強壁を設け、盤下げ掘削に備えるとともに、ライニングセントルのレール基礎を確保する例もある。	新高瀬川 * 玉 原 * 保 野 川 * 本 川	 <p>(新高瀬川の例)</p>
		Waldeck II 今 市	 <p>(今市の例)</p>

図-16 地下発電所空洞の掘削法

傷を防ぐとともに、周辺はできるだけ円滑に仕上げるべくスムーズブラスティングを行っている。なお、掘削ずりの搬出は、本体中央部にずり搬出斜路を設けることにより、アーチ部作業坑をはじめとする周辺のトンネルを順次搬出路として使用するほか本体部に複数本の立坑を設け、これから下部のずり搬出坑へ連結し効率的なずり処理を行っている。本体の総掘削量は約20万m³で、最盛期で最大24000m³/月の実績を示し、実掘削期間は約22か月である。

支保・覆工について今市地点での最大の特徴は、空洞アーチ部にライニングコンクリートを打設せず、上向きPS工を施工したことである。PS工のアンカーヘッド部の構造は、プレキャストコンクリートによるアンカーブロック方式が一般的であるが、ブロック重量が大きく施工性に若干難点があるため、天井部の上向きPS工の施工性を考慮して、図-17に示すようにブロッキングパイプを用いたアンカープレート方式を採用した。なお、この方式は特に天井アーチ部での施工性に優れるが、吹付けコンクリートと壁面岩盤との縫合性の確保という

点で改良の余地が残されている。

掘削壁面の覆工は吹付けコンクリートにより実施し、1層あたり厚さ8cmで4層の吹付けを行っている。吹付けコンクリートは掘削による新壁面出現後ただちに第1層の吹付けを施工し支保効果を期待するとともに、順次2層目、3層目を実施し、最表層には曲げじん性にすぐれたスチールファイバー混入の補強吹付けコンクリートを施工している。

このような卵形空洞の施工に際し開発した施工機械の主要なものは以下のとおりである。

掘削用の削孔機械については、従来から削岩工の技能に削孔精度を大きく依存しているが、熟練工の不足さらには高齢化に伴い現実的には熟練度あるいは作業環境に影響されることなく均一で精度の高い削孔を行う必要が生じている。

卵形空洞の場合、壁面沿いに再配分応力をスムーズに伝達させることによって内側へのはらみ出しを最小限にとどめ早期に安定化をはかることが特に重要な課題である。この要

請にこたえるため全自動油圧クローラジャンボが開発されロボット化がはかられた。すなわち、2ブームクローラジャンボに小型コンピューターを搭載し、本体を基準位置にセットした後、自動削孔装置を起動することにより、あらかじめ記憶させた削孔パターンに従って全自動で削孔を行うものである。

PS工の削孔機械については、大孔径(100mm)で長さ15mの上向き削孔を能率的に安全かつ経済的に実施する必要があるため、油圧クローラドリルにロッドの継足し回収を自動的に実施できるロードチェンジャおよびロッドクランプを装備し、地上でワンマンコントロールが可能な装置が開発された。なお、今市地点で実施した上向き長尺孔は約900本である。このほか、PS工ケーブルの自動挿入機械、コンクリートの吹付けロボット機などが新たに開発された施工機械である。

以上のように、大断面空洞の掘削施工について今市地点で開発された施工法、施工機械が、今後の空洞掘削技術にとりいれられていくことが期待される。

次に将来さらに重要視されて行くと考えられる施工上の問題としては、作業環境の整備が挙げられる。まず第

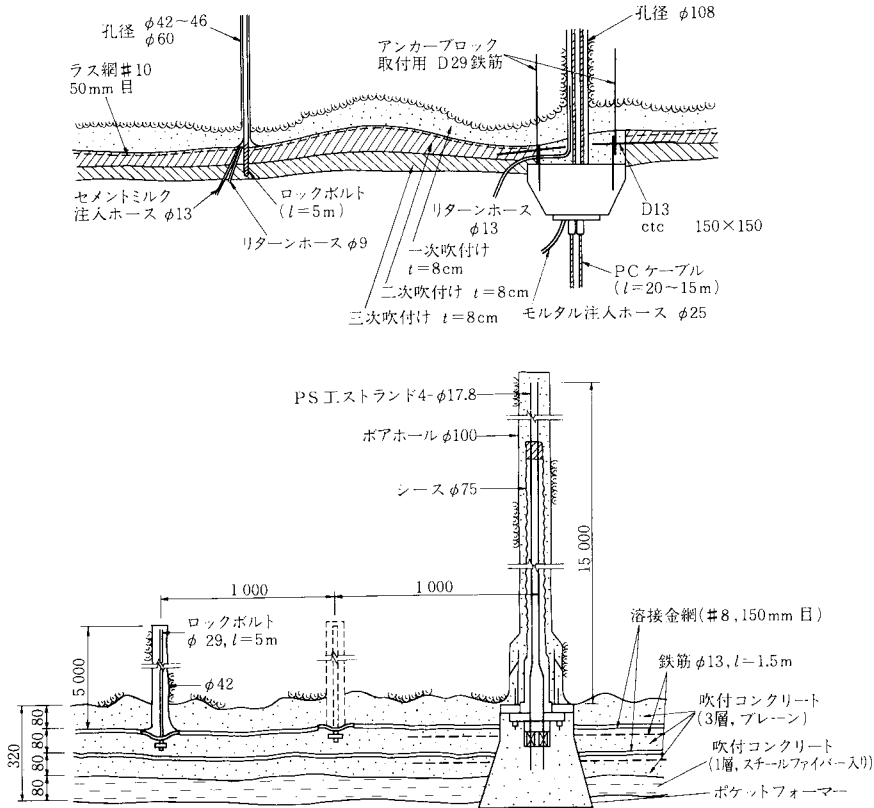


図-17 PS工アンカーヘッド部の構造

一にトンネル工事の換気は良好な作業環境を確保するために不可欠の要素であり、特に地下空洞の場合一般のトンネル工事と異なり坑内で稼働する重機車輛も多く、また、工事の進捗に伴って関連トンネルとの連結条件も逐次変化していくのでその都度換気計画は複雑なものとなる。換気法として一般的な方法は風管換気法であり単一のトンネルの場合はこれによるが、地下発電所のように多数の空洞が輻輳する場合は、坑道自体を風管として利用する風道換気法を採用したほうが効率的かつ経済的である。今市地点では発電所空洞と搬入路トンネル、関連トンネルが三次元的に交差するトンネル群であるため、工事の進捗に応じた風量ならびに換気ルートを電算シミュレーションにより決定している。

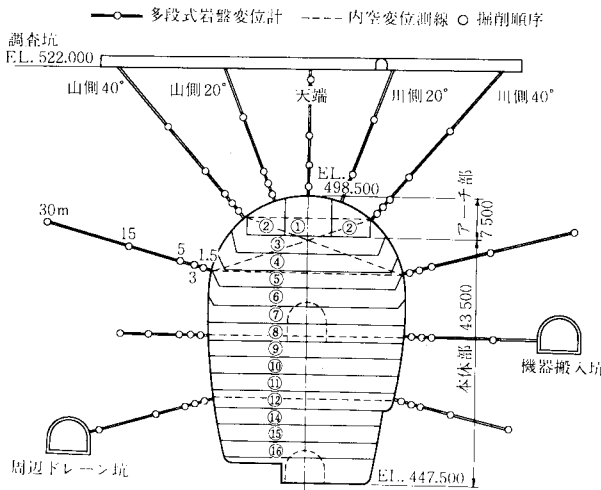
また、地下空洞掘削時の騒音は削孔機械および積みなど重機車輛が多数稼働し、さらに空洞内での反響も加わって大きな騒音レベルを示す。作業環境を良好に保つためには、騒音の発生源を抑えるとともに作業員に適切な保護具を使用させることが必要となる。最近では削岩機械の油圧化などに伴い騒音源の改良が著しい。

5. 空洞掘削時の挙動について

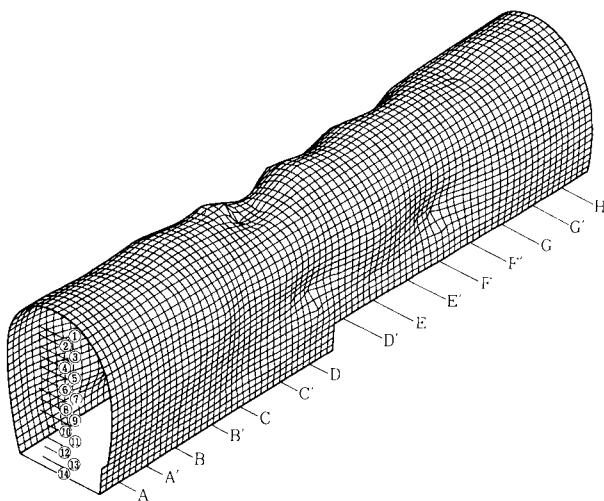
岩盤の挙動解析や支保・覆工の設計計算は前述のとおりあくまでも試験箇所における物性ならびに計算上の仮定に基づいており、岩盤の不均一性を考えると掘削中ならびに完成後の空洞の安定確保には計測による綿密な岩盤挙動の観測管理が不可欠である。

主たる計測項目は、周辺岩盤の変位、空洞の内空変位、PS工の緊張力などであり、図-18は今市発電所での計測項目と計器の配置例である。計測結果は迅速に処理され、安全管理や設計、施工法の見直しに反映することが肝要である。今市地点では岩盤変位を中心に900点に及ぶ計器を配置し計測データはコンピューターにより処理し日常管理を実施しているほか、図-19に示すように空洞全体の变形挙動を即座に認識できるように変形量を拡大した図化を行っている。このほかボアホールテレビによるジョイント開口の目視確認、弾性波速度や透水係数の変化による周辺岩盤の挙動変化測定などが行われ多面的に空洞の安定性をチェックしながら施工を進めている。挙動の計測結果とその評価および施工上の対処についての実例を述べると次のようである。

計測項目	使用計器	測線数ほか
周辺岩盤の変位測定	多段式岩盤変位計 l=20~30m(4.5段) l=5m(3段)	7断面(B~H) 49測線 " 31測線
内空相対変位測定	コンバージェンスメジャー	8断面(A~H) 6測線/断面
内空絶対変位測定	セオドライト	8断面(A~H) 9点/断面
PS工の張力測定	センターホール形ロードセル (30tおよび120t)	200個, 1個/8~10本
湧水圧, 湧水量測定	間隙水圧計	調査ボーリング孔使用, 5孔 390m
透水性および亀裂状況の変化測定	透水試験器 ポアホールTVセット	C断面主体, 7孔 延長187m
弾性波速度測定		C断面, 4測線, 93m
吹付コンクリートの応力測定	鉄筋計, 温度計	C, F断面, 22点
岩盤内応力変化測定	埋設ひずみ計	C断面, 6点



図一18 計測項目および計器配置例(今市発電所)

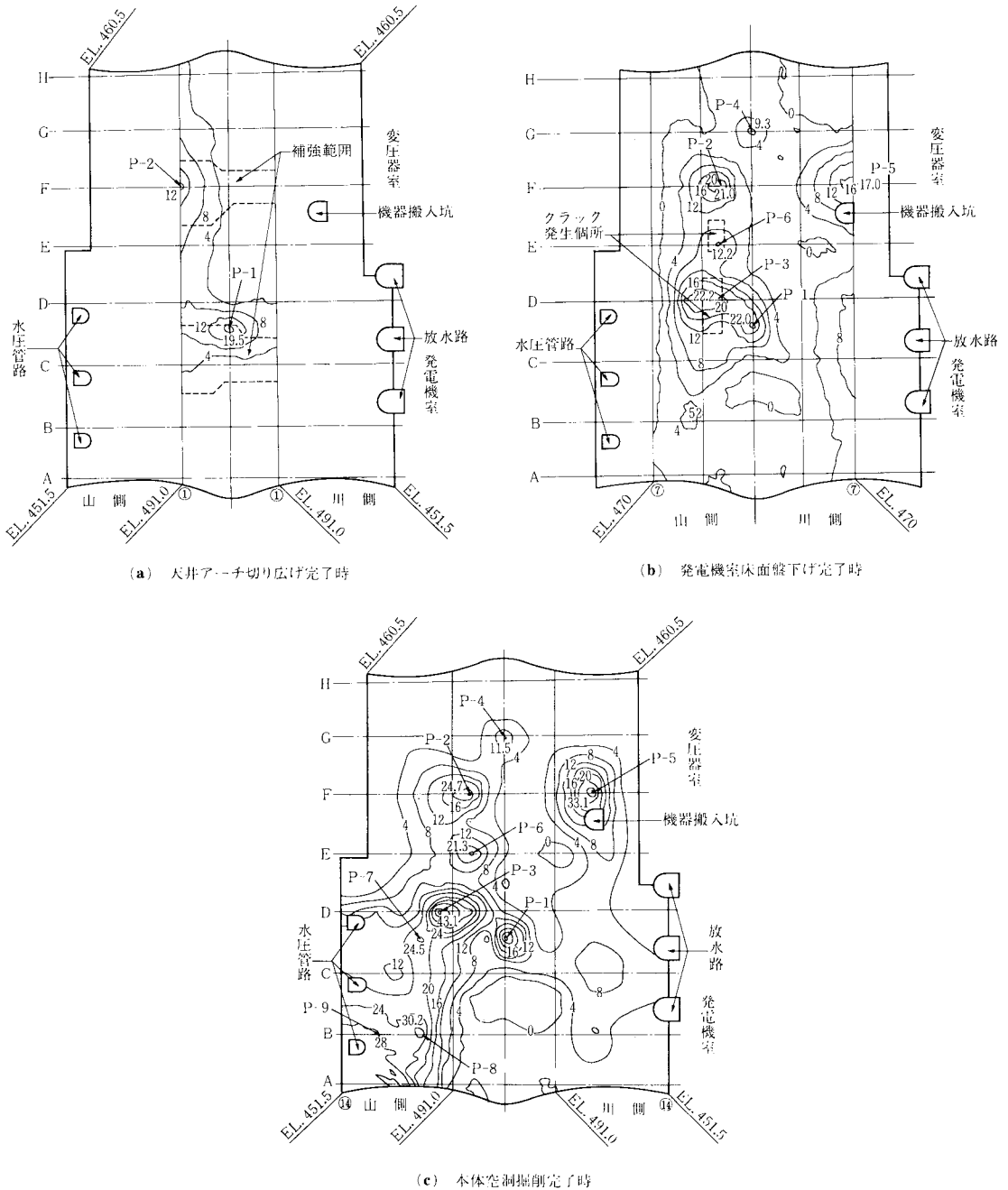


注：変位は空洞寸法に対し5倍に拡大して表示

図一19 空洞壁面変位の立体表示

図一20は空洞壁面の变形挙動を掘削段階ごとに展開したものである。図一20(a)は天井アーチ切上げ完了時のもので、C'断面天端付近で16mm、F断面アーチ山側肩部で12mmと他の場所に比べ大きな変位が認められた。C'断面については珪質砂岩と角礫岩の地質境界部における局所的な変形の影響、F断面では砂岩・粘板岩の互層部の影響が現われたものと判断された。そこでCおよびF断面付近に幅12mから25mにわたりPS工ならびにロックボルト工とも標準パターンを50%増しにした支保増強を行い、その後の盤下げに対するアーチ部の安定確保を図った。次に図一20(b)は空洞高さのほぼ中間に当たる発電機床面付近まで盤下げが進行した時点のもので、D断面山側のアーチ部から側壁上部にかけて20mmをこえる変位が発生し、PS工アンカーブロックに設置したロードセルにも急激な荷重増加がみられ吹付けコンクリート表面にクラックが発生した。これらの現象については現地での調査・試験や解析・実験などにより原因を究明し応力再配分過程における壁面近傍の局所的損傷であるとの結論を得たのでロックボルト工、PS工を新規に打ち増し、吹付けコンクリートと岩盤を縫合させる補修工事を行うことで処理したが、以降の盤下げによっても変位増加はみられず、最終的には安定収束した(図一20(c))。掘削終了時までの空洞全体の壁面挙動は、珪質砂岩、角礫岩、砂岩・粘板岩が複雑に混在する空洞山側側壁で最大43mm、平均して15mm程度の変位がみられたのに対し、珪質砂岩がほぼ均一に分布する川側側壁では、一部F断面の地質不良部で32mmという変位を示したほかは平均して6mm程度と山側に比べて変位量は1/2~1/3であった。天井アーチ部では局所的に大きな変位を示した場所のみみられたが全体としての変位量は5mm程度であった。

このような実測結果に基づき、掘削終了後に岩盤パラメーターの逆解析による見直し、初期地圧、地山の不均質性、異方性、空洞の形状効果など変形挙動に影響する要因についてパラメトリックな解析を実施し、さらに前述のFEMによる掘削解析を最終的に実施して空洞掘削時における挙動の裏付けを行った。この結果設計段階における解析に際し、解析モデル、入力物性値の設定など実務上必要なテクニックについての知見を得たが、これらは今後の空洞設計に



図—20 空洞掘削に伴う壁面の変形（今市発電所）

さいし有用なものと考えている。しかしながら主として節理挙動に基づく局所的な変形については事前の解析で正確に予測することは極めて困難であり、今後は解析手法として岩盤の不連続性に起因する掘削時挙動のシミュレーションをいかに行うかという課題とともに、より強力な Observational Method の確立が期待される。

6. 岩盤空洞の建設に関する今後の課題について

岩盤内空洞あるいはもっと広い意味での地下空間は、その耐震性、遮蔽性、環境保全性などのゆえに、今後さらに活発な利用が期待されている。例えば電力エネルギー

ギーを始めとするエネルギー生産施設としての利用形態としては、さらに大容量の揚水式地下発電所、原子力発電所の地下立地、高圧空気貯蔵発電システムなどがあり、貯蔵関連施設としては原油、液化石油ガス、高レベル放射性廃棄物、熱水など各種の利用形態が考えられている。

これらは一部実用化に至っているものも、計画あるいは概念としての段階のものもあるが、実現に必要な技術的背景は、かなりの部分において整備されてきているように思われる。これまでわが国固有の地質条件下の制約のもとでの技術的な限界がみられ、本質的にはこの状況は現在、将来ともに大きく変わることはないが、今まで述べてきたように、トンネル工事ならびにここ10数年間の地下発電所建設の経験を経て、調査技術、設計、解析法や施工技術の進歩は著しいものがあり、さらに広範な地下利用開発の選択が可能な段階に至るものと考えられる。

大規模空洞掘削技術にとって重要なことは、空洞挙動についてのマクロな状態での正しい把握であり、これをあやまると計画段階を含めてプロジェクトの進行全般に大きな影響を及ぼすことになる。したがって個々の要素技術あるいは調査・試験結果、掘削中の挙動など個別の情報を正しく評価し、全体としての形を組立てながら評価して行くという姿勢が大切なことであると思われる。これに関して大型の高速コンピューターが普及し、複雑な数値計算が多用されるようになってくると、計算の結果としての数字情報に気をとられ、前提となる仮定が忘れられたり、構造物全体が示す挙動を正しく解釈することが副次的なものと考えられたりする傾向がときに見られるが、むしろ定性的と思われる情報を正當に評価する努力がより一層必要となるように思われる。たとえば近年に至り定着した観のある NATM も岩盤力学理論から生まれた工法ではなく、あくまで経験から生まれた工法を、理論的に裏づけ、より普遍的な適用が図られつつあると考えるべきで、とくに地盤工学の分野では経験的事実の中から本質を引き出す努力を忘れてはならない。

岩盤内空洞の建設にかかわる技術のなかで、将来への課題あるいは展望について思いつくものを二、三挙げてみたい。

まず、調査・試験技術については、計画段階で岩盤の物性をはじめ設計に必要なより精度の高い情報を得る技術の開発が望まれる。これは試掘坑内あるいは実際の工事開始後の調査・試験以前の段階で、たとえばボーリング孔を利用した調査試験、岩盤を構成する要素としての岩石の物性から、該当する岩盤の物性を評価する手法など、現在もさまざまな面から研究されているがより一層の努力が必要であろう。これとともに、従来は比較的均一良好な岩盤を対象としていたものが、例えば第四紀層なども

調査の対象に含まれてくると、おのずから採用すべき調査法も異なってくるであろう。したがって対象とする地質に適した調査・試験システムの体系化が必要となる。

いまひとつ重要なことは、岩盤内の地下水の挙動に対する調査技術の開発である。空洞の目的によっては地下水挙動の評価が最優先されるケースがある。これは岩盤の透水性というものをいかにして測定するか、地下水の流動形態をマクロにとらえるにはどんな調査が適切か、空洞の掘削により地下水の賦存状態や浸透挙動がどのように変化するかについて、解析・予測手法とともに今後の大きな問題のひとつであると思われる。さらには岩盤材料の長期的な性状の変化、地震時の空洞の挙動の評価に必要な岩盤内入力地震波、岩盤の動的物性についても一段と研究が進められて行くであろう。

次に解析、設計技術については、当面の課題として前述のごとく不連続面の挙動シミュレーションに関するものと、補強工の設計、補強効果の事前評価に関する解析手法の開発が挙げられる。とくに前者については数値解析法上のさまざまな提案が数多く出されており、最近の最も活発な研究対象のひとつであることは周知の通りである。

施工法、施工機械に関しては、空洞掘削の高効率化と円滑な壁面仕上げによる周辺岩盤の損傷抑止は、補強工の軽減と相まって経済性の面からも重要な課題であり、高圧ウォータージェット、TBM などをはじめとする無発破掘削工法への期待が大きい。さらに、将来にわたる労働力不足に対処し、地下という特殊環境下での安全確保、施工品質の向上などを達成するため建設機械のロボット化は今後ともいっそう進められるであろう。ロボット化の対象となるのは現在のところ削孔機械、ロックボルトの挿入、自動火薬装填機などが話題となっている。これらを開発することは安全の確保にとっても大きく寄与することになるであろう。

最後に計測および計測管理技術については、計器そのものの改良を始め計測データの処理システムなどオートメーション化は急速に進んでおり、これと並行して整備、開発が要求されるのは、計測計画をいかに測定対象に合わせて最適化するか、計測管理の基本となる管理基準をいかに合理的に定めるか、といったソフト面での技術整備が望まれる。以上、主として地下発電所の建設事例に基づき、岩盤内空洞の建設技術の変遷を辿ってみた。岩盤を対象とする建設工事はその対象の複雑さゆえに、ドラスティックな変化、進歩は期待できないが、施工経験を常にフィードバックさせながら社会のニーズに応えていくことが肝要であろう。

本論をまとめるにあたり鹿島建設・青木、東京電力・工藤、松尾の各氏に多くの労力をわずらわしたことを記

し、ここに深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 御牧陽一：大規模地下発電所の設計と施工，地下構造物の設計と施工，土木学会，pp.115～152，1976年
- 2) 御牧陽一ほか：新高瀬川地下発電所の調査，設計および掘削時の挙動，ケースヒストリー，土質工学会編
- 3) 御牧陽一：今市発電所の設計，電力土木，No.173 昭和56年7月
- 4) Heim, A. : Mechanismus der Gebirgsbildung, Bd. 2. 157, 1878.
- 5) Trompeter : Die Expansivkraft im Gestein als Hauptursache der Bewegung des den Bergbau umgebenden Gesteins, 1899.
- 6) Willmann, V. : Über einige Gebirgsdruckerscheinungen in ihren Beziehungen zum Tunnelbau, 1911.
- 7) Kommerell, O. : Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk, 1912.
- 8) Dinsdale, J. R. : Ground Pressure and Pressure Profiles around Mining Excavations - I. Colliery Engineering, Vol.12 (No.142), 1936/Vol.13 (No.143), 1936.
- 9) Schmidt, J. : Statische Probleme des Tunnel - und Druckstollenbaues, Berlin, 1926.
- 10) Fenner, R. : Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes, Glückauf, No.32, 74, 681, 1938.
- 11) Talobre, J. : La mécanique des Roches, 1957.
- 12) Kastner, H. : Statik des Tunnel - und Stollenbaues. 1961.
- 13) Rabcewicz, L. V. : The New Austrian Tunneling Method, WATER Power, pp.453～515, Nov. 1964.
- 14) Rabcewicz, L. V. : The New Austrian Tunneling Method, WATER Power, pp.19～24. Jan. 1965.
- 15) Rabcewicz, L. V. : Stability of Tunnels under Rock Load, Water Power, pp.225～273, Jun. 1969/pp.297～302, Aug. 1969.
- 16) 林 正夫・日比野 敏：地下の開削による周辺地盤のゆるみの進展に関する解析，電力中央研究所技術研究所報告，No.67095，1968.

(1984.11.1・受付)