

(15) 実測結果による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動の検討

(財)電力中央研究所 正会員 日比野 敏
同 上 ○本島 陸

1. はじめに

過去10数年にわたり、全国各地に揚水発電所が建設され、地下発電所用の大規模な地下空洞の掘削が行われた。筆者らは、有限要素法を用いた掘削解析手法を開発し、各地点の空洞の安定性の予測を行い、空洞の補強設計に役立てて来た。空洞の掘削の際には、各種の計測が行われたが、得られた実

表1 揚水発電所地下空洞一覧

地点 NO.	空洞の岩盤 岩種	空洞規模(m)			初期地圧 (kg/cm ²)			岩盤物性 (kg/cm ²)	
		高さ	幅	長さ	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$E(\times 10^4)$	ν
1	流紋岩、石英斑岩、輝綠岩	49.2	24.9	133.4	200	(100)	(50)	5-10	40-50
2	砂岩、粘板岩	45.6	22.0	82.8	280	(95)	—	10-30	10-25
3	粗粒花崗岩	47.7	25.5	85.6	180	66	57	3-9	5-15
4	頁岩、砂岩	41.9	20.1	157.8	200	64	68	13-20	8-21
5	花崗閃緑岩、斑状細粒閃緑岩	54.5	27.0	165.0	250	20	60	14-25	14-35
6	輝岩、流紋岩、凝灰岩、輝岩	49.4	26.6	116.3	270	72	56	16-20	24-30
7	花崗岩	48.5	23.2	102.7	340	76	110	10	15
8	凝灰片岩	47.4	26.3	96.0	270	55	72	9	8-12
9	流紋岩	47.6	26.0	96.5	160	40	30	7	10
10	輝綠岩、凝灰岩	43.3	21.0	57.5	260	73	60	2	3-7.5
11	花崗岩、砂岩	45.7	23.5	155.5	400	189	128	67	15-20

測結果は、予測計算の結果とは必ずしもよい一致を示してはいない。そこで、表1の各地点で得られた実測結果を比較検討し、空洞掘削時の岩盤挙動を支配する要因についての考察を行った。

2. 空洞周辺における計測

空洞の掘削に先立ち、調査横坑において地山の初期地圧の計測およびジャッキ試験、岩盤せん断試験が行われる。表1には各地点の空洞周辺岩盤の岩種、空洞規模、現場計測によって得られた初期地圧と岩盤の物性値を示した。

図1は掘削時の岩盤挙動を把握するために、空洞周辺に設置された計測器の配置例である。

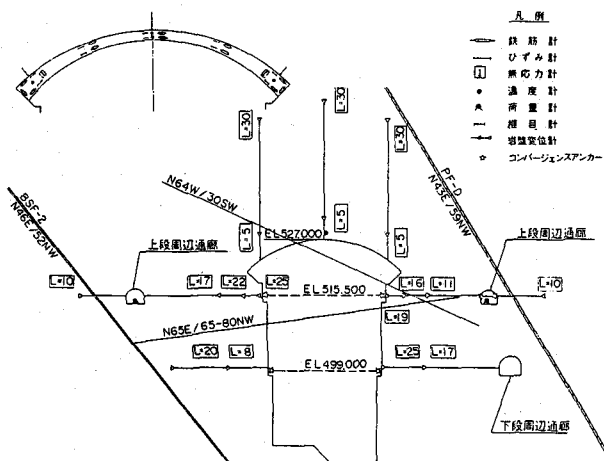


図1 空洞周辺計測器の配置例

3. 実測結果の比較・検討

図2は、空洞アーチのコンクリートライニングに埋設された鉄筋計の計測値から換算したコンクリート応力の経時変化の1例である。空洞掘削の工程は、アーチ導坑が掘削された後、空洞中央あるいは妻壁側からアーチの切掛け掘削とコンクリートの打設が行われ、コアの抜き掘りが行われた後に、3~4mのリフトで本体の盤下げ掘削が行われるのが標準のパターンであ

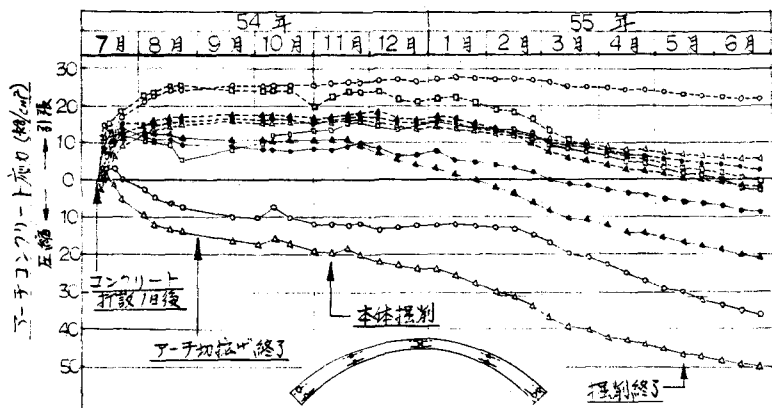


図2 アーチコンクリート応力の経時変化

る。アーチのコンクリート応力の変化は、打設時の発熱が冷却する過程の引張応力の発生と掘削に伴う圧縮応力の発生を示している。各地点の実測結果を比較する場合、計測の条件が一致していることが必要である。アーチコンクリート内の鉄筋計あるいはコンクリートひずみ計は、各地点とも図1とほぼ同じ位置に設置されており、空洞本体の盤下げが開始される時期には温度応力は収束している。従って、これらの計測値から得られた空洞本体盤下げに伴って発生したコンクリート応力は、ほぼ同一条件で計測された値である。図3に各地点の実測値を示した。本体盤下げによって発生するアーチコンクリートの圧縮応力は、各地点の平均値でみれば、 10 kg/cm^2 から 100 kg/cm^2 で地点によって非常に大きな差がある。各地点を空洞周辺の岩盤の成因により、堆積岩地点、変成岩地点、火成岩地点に分類してみると、火成岩地点のコンクリート応力が大きく、堆積岩地点の2～3倍であることがわかる。

図4は、空洞側壁上部に設置された岩盤変位計の計測値あるいは、内空スパンの計測によって求めた内空スパンの縮小量とアーチコンクリート応力の関係を示したものである。両者の間には、明らかな相関関係が認められる。従って、アーチコンクリート応力は、空洞側壁岩盤の水平方向の変位によって発生したものであることがわかる。空洞の側壁岩盤の水平方向の変位は、弾性論の見地によれば、岩盤の弾性係数と空洞側壁に直交する地圧成分の大きさに従うものである。図5は、ジャッキ試験の結果による岩盤の弾性係数と初期地圧の計測値から求めた空洞側壁に作用する地圧の水平成分による σ_x/E とアーチコンクリート応力の関係である。同図の計算結果は、 σ_x と E は入力値とし、計算によって得られたコンクリート応力の平均値をプロットしたものである。コンクリート応力の計算値は、

$(\sigma_x/E)^2$ に比例する傾向がみられる。また、堆積岩地点と火成岩地点の σ_x/E に差がないため、コンクリート応力の計算値には、岩種による差はみとめられない。これに対し、コンクリート応力の実測値と σ_x/E の間の相関は計算結果のように明らかではない。堆積岩地点の実測値は計算値に近い値であるが、火成岩地点の実測値は計算値よりも大きい

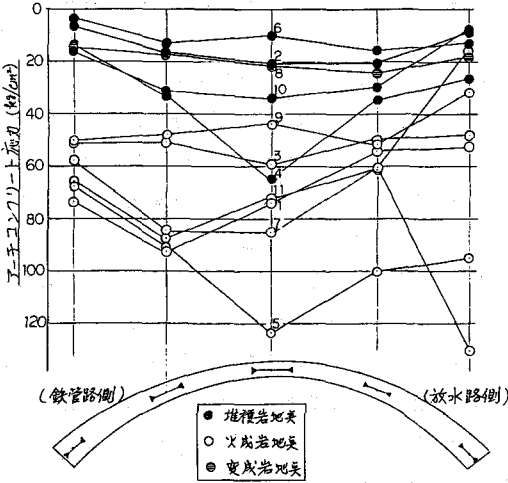


図3 本体掘削によるアーチコンクリート応力

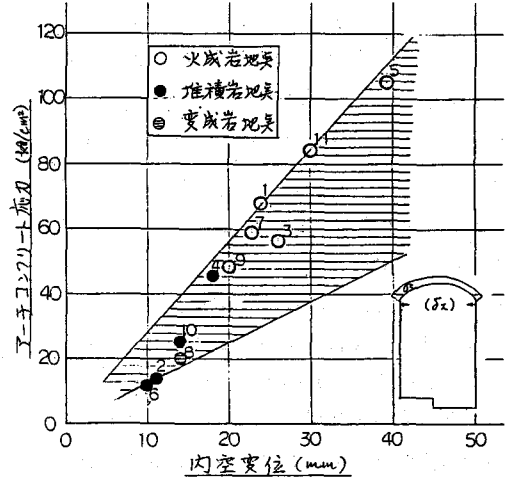


図4 アーチコンクリート応力と内空変位

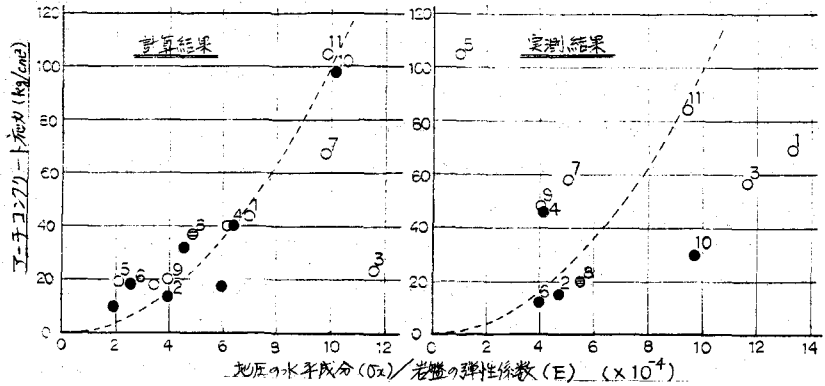


図5 地圧および岩盤の弾性係数とアーチコンクリート応力の関係

地点が多い。

図6は空洞の長さ L とアーチコンクリート応力の関係である。両者の間には相関があり、空洞の奥行きが長い場合には側壁岩盤の変位が大きいがわかる。また、火成岩地点の方が空洞の長さの影響が大きい。

図7は空洞の長さが約100mの火成岩の⑦地点と堆積岩と同様にアーチコンクリート応力の小さい変成岩の⑧地点のアーチコンクリート応力の経時変化の比較である。両地点の掘削工程はほぼ一致している。⑧地点においては単調な増加を示しているのに対し、⑦地点では初期の変化が少いが、下半部の掘削時に応力が急増している。

図8は同じ両地点の空洞側壁岩盤に設置された、多段式岩盤変位計によって得られた、岩盤内の変位の分布である。⑦地点の空洞中央部の変位が大きく、空洞壁面からの深さが12mより内部の変位が相対的に大きいことがわかる。

図9は空洞のアーチ上部岩盤の鉛直変位である。アーチ上部の岩盤変位計が上部調査坑あるいは、アーチ導坑から上向きに設置されたものによる。計測された鉛直変位は、その殆んどがアーチの切上げ時に発生したものであり、本体盤下げ時には発生しない。アーチ壁面の沈下量は、アーチの近傍に軟弱な岩盤が存在した地点を除けば、10～15mmであり、火成岩地点と堆積岩地点の差はない。

4. 実測結果と計算結果の比較

図5によって比較したアーチコンクリート応力の実測結果と計算結果は総合的にみれば量的に一致している。また、アーチコンクリート応力は、側壁岩盤の変位に従うことでも一致している。しかしながら、各地点毎にみると、実測結果と計算結果の差が大きい地点がある。さらに詳細に比較すると、計測値の経時変化あるいは岩盤内の変位分布には各地点に共通した実測と計算の差がみられる。

図9のアーチ上部岩盤の鉛直変位の実測結果と計算結果を比較すると、計算による変位は空洞壁面から離れた岩盤内部から発生しているのに対し、実測による変位は壁面から10m以内に発生しており、この間の変位量は計算量より大きい。10m以上離れた区間の変位は殆んど零である。このことは、実際の岩盤の変位においては、弾性的なひずみによる変位は小さく、岩盤のゆるみによって生ずる変位の占める割合が大きいことを示していると考えられる。図10と図11は、側壁岩盤における水平変位の経時変化と岩盤内分布の実測結果と計算結果であ

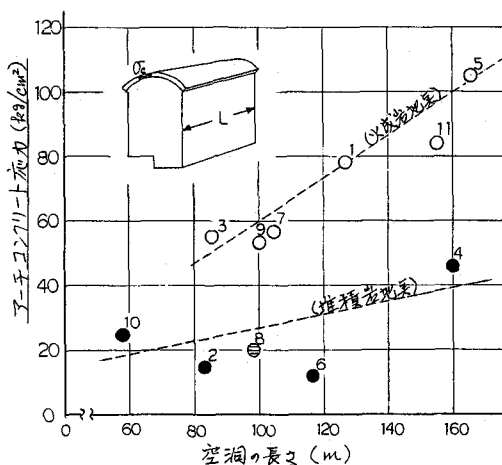


図6 空洞の長さ L とアーチコンクリート応力

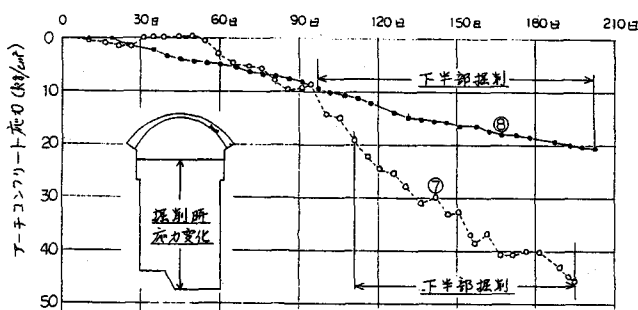


図7 アーチコンクリート応力の経時変化の比較

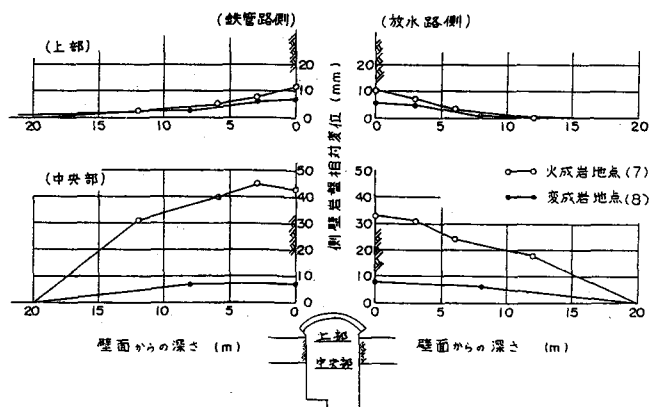


図8 空洞側壁岩盤変位の比較

る。実測結果は火成岩の⑦地点のものである。経時変化を比較すると、計算による変位は計測位置の掘削時の変位が大きくその後の変化が少ないのに対し、実測変位は計測位置の下部の掘削時にも増加している。岩盤内分布を比較すると、空洞上部においては、計算結果は岩盤内部の変位が相対的に大きく、壁面近傍では圧縮変位を示しているのに対し、実測変位は逆に内部で小さく壁面近傍の変位が大きい。しかし空洞中央においては、岩盤内部の実測変位が大きい。⑦地点は、空洞側壁にほぼ平行な卓越節理面があるため上記の差が顕著な例である。各地点においても同様の差がみられるが、壁面から20~30mの区間の変位量でみると実測値と計算値はほぼ一致する地点が多い。

5. 考 察

既設の揚水発電所11ヶ地点の地下空洞掘削時の実測結果により、岩盤内の大規模空洞掘削時の岩盤挙動の検討を行った。

空洞のアーチコンクリートライニングに掘削中に発生する圧縮応力は、空洞周辺岩盤が火成岩の地点では大きく、変成岩・堆積岩の地点では小さい。

上記の差は、空洞側壁岩盤の水平変位によるものであり、側壁岩盤の水平変位は、初期地圧やジャッキ試験による弾性係数よりも、岩種と空洞の長さに従っている。

岩盤の変位は、計算結果と比較してみると岩盤の弾性的なひずみによる変位は小さく、岩盤のゆるみによる変位が大きい。

以上の結果からつぎの考察がされる。即ち、岩盤内の空洞掘削時の変位は、岩盤内の割れ目の発生と開口など岩盤のゆるみによるものであり、火成岩は、潜在節理等を含み岩盤内に割れ目が生じやすく、その割れ目の開口による変位が特に大きいものと考えられる。また、割れ目の発生範囲、割れ目の開口量は、掘削によって形成される自由な壁面の大きさに従って増大するものと考えられる。従って、岩盤の掘削時の安定性の評価あるいは補強設計に当っては周辺岩盤の節理・シーム・断層の性状の把握と解析

においては岩盤の不連続性に基ずく、除荷時の変形特性を考慮することが必要と考えられる。

(参考文献)

電力中央研究所 研究報告：№377012、№380046、№381010、№381533 等

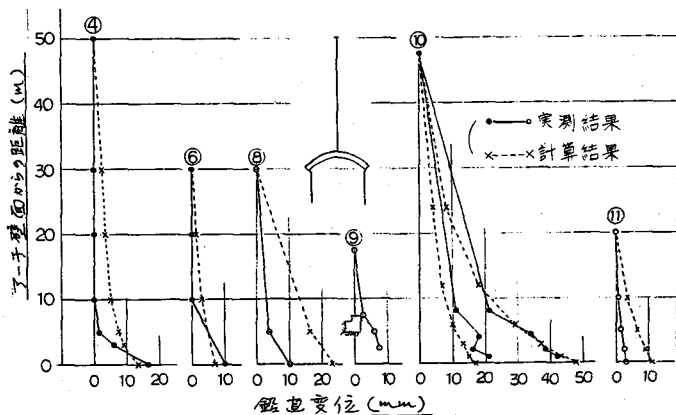


図9 アーチ上部岩盤の鉛直変位

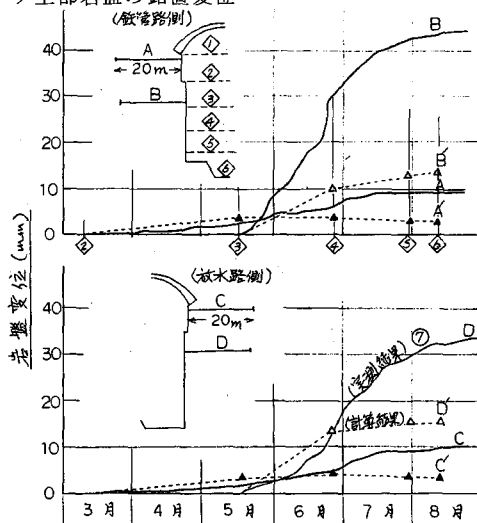


図10 側壁岩盤の変位の経時変化の比較

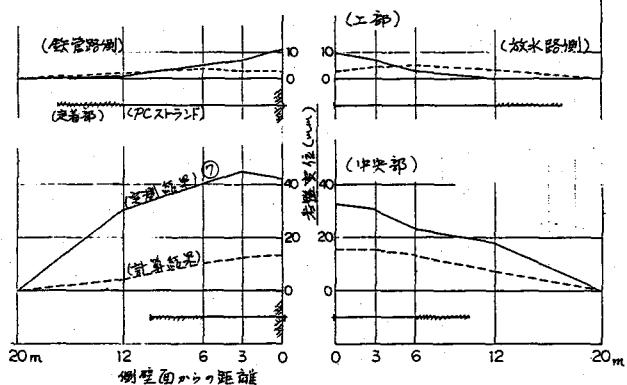


図11 側壁岩盤変位分布の比較

(15) Behaviour of Rock Mass around Large Caverns
during Excavation Works

by Mutsumi Motozima
Satoshi Hibino

Central Research Institute
of Electric Power Industry

This paper describes the mechanical feature of rock behaviour during excavation, obtained from the results of measurements at many sites of pump storage power station.

By the comparison of the measured values of stress in arch concrete lining of each cavern, and observation of the difference on the time history and distribution of displacements between measurement and calculation, The followings were disclosed:

- (1) The values of stress in arch concrete lining varied with the kinds of rock mass; ratio between the values in sedimentary rock and igneous rock is about 1 : 2 ~ 1 : 3.
- (2) Stress in arch lining is mainly caused by the displacements of rock mass neighboring side walls of the cavern.
- (3) Actual displacement of rock mass is caused by strain of rock and joint opening, and the latter is larger than the former.
- (4) Joint opening depend on extent of surface of the cavern wall.