

1 まえがき

揚水発電所のための地下空洞は、一般の水力発電所の地下空洞に比較して、空洞断面は大きくなる。また揚水発電所の性質上、上部池と下部池を必要とし、その中間に発電所を造るので、発電所の地点が、一般の水力発電所と比較して、限定されるため、地質条件を完全に満足する地点に、地下発電所を造ることが困難な場合が多くある。このような理由から、地下発電所の設計には、地下空洞の地質を十分調査するとともに、空洞堀削により生じるであろう地圧、および変形について、十分な検討をなし、空洞の形状、および周辺コンクリートライニングの決定をなさねばならない。さらにまた、空洞堀削工法も検討することが必要である。

空洞堀削による空洞周辺の地圧、および変形について、トンネル等の比較的小さなものについては多く調査され、また研究されてきているが、地下発電所のごとく、大きな空洞の堀削による変形については、Tumat2 城山、Boundary、Morrow Point等の地下発電所の結果が発表されているが、まだその調査数例が少ない。また空洞周辺の地圧、および変形は地質に関係が深いので、多くの発電所の資料を積み上げていく必要がある。

喜撰山揚水発電所は、地下約250mの地点に、幅25.6m 高さ51.0m 長さ60.4mの大空洞を堀削し、ここに出力233,000KW×2台のポンプ水車、および発電機を設置し、総出力466,000KWの発電を行なう計画である。

喜撰山発電所空洞の初期地山応力および変形の調査としては、堀削前に発電所の調査横抗を利用して、発電所地点の初期地山応力を測定し、また空洞堀削中には、発電所アーチ上部の調査横抗および発電所本体側壁よりロックディフオメーターを設置し、空洞堀削にともなう空洞周辺岩盤の変形を測定した。さらに発電所上流側半分の地質が軟岩のため、変形の大きかつた個所に設置した補強ストラットを利用して、変形の測定を実施した。以下に喜撰山発電所で実施した上記諸測定の結果を述べる。

2 発電所地点の地質および初期地山応力

発電所空洞附近の岩盤は、古生層の推積岩で、岩石の種類は、チャート、砂質粘板岩、および粘板岩であり、その走向は、おおむねN60°W 傾斜はS60°~80°で、発電所空洞中心軸とほぼ直交している。空洞の鉄管路側の大半と、ドラフト側の下流側半分を占めるチャートは、岩質きわめて堅硬である。ドラフト側の上流半分は、上部が砂質粘板岩より成り、下半分は粘板岩より構成され、EL50mより以下において、幅30cm位の断層が、妻壁よりドラフトトンネルの天井に走っている。砂質粘板岩は、かなりの堅岩であるが、粘板岩は細かい節理が多く、岩質も軟らかい。発電所のアーチおよび本体

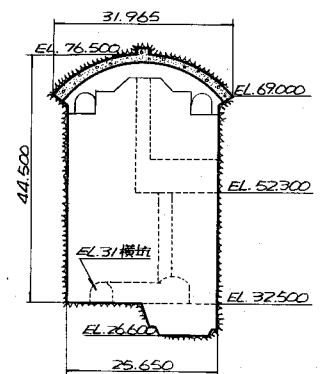


図-1 発電所空洞断面図

の堀削中もほとんど湧水はなく、チャート、砂質粘板岩および粘板岩ともよくまつた岩質であつた。

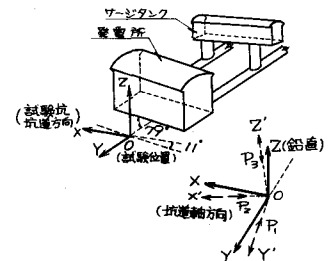
岩壁の弾性係数は、試堀横抗を利用して測定した静弾性係数で $2.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2 \sim 7.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、動弾性係数で $6.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度であり、鉛直と水平方向について特に顕著な異方向性は認められていない。空洞を開削したとき、空洞周辺の地圧および変形に密接に関係する初期地山応力の測定を空洞開削前に、発電所空洞アーチ上約 25m にある EL95m 横抗を利用して、比較的節理の少ない、砂質粘板岩の箇所で行なつた。

その結果、発電所附近の地山内部に作用している初期地圧の主応力は、 $P_1 = 6 \text{ kg/cm}^2$ 、 $P_2 = -18 \text{ kg/cm}^2$ 、 $P_3 = -25 \text{ kg/cm}^2$ 程度であり、その方向は鉛直軸より約 10° 程度傾いた方向より P_3 が作用し、発電所壁面と約 5° 傾いた方向より P_1 が作用している。(図-2)

3. 地下空洞の堀削にともなう空洞周辺地山の変形

a. 変形の測定方法

空洞の堀削にともなう空洞周辺の変形を測定するために、空洞アーチ部には堀削前に、アーチ上部の EL95m 横抗から発電所に向つて $\phi 66 \text{ mm}$ のボーリングを行ない、発電所アーチ堀削面から 1m、3m、5m 離れた岩盤内にアンカーをとり、アンカーよりピアノ線を横抗まで引出し、横抗とアンカー間の岩盤変形を測定している。(図-3)



	X	Y	Z
P_1 (圧)	$2^\circ \sim 8^\circ$	$92^\circ \sim 97^\circ$	$90^\circ \sim 94^\circ$
P_2 (引)	$80^\circ \sim 85^\circ$	$3^\circ \sim 8^\circ$	$87^\circ \sim 92^\circ$
P_3 (引)	$76^\circ \sim 82^\circ$	$82^\circ \sim 91^\circ$	$9^\circ \sim 13^\circ$

空洞本体については、本体の堀削が掘下がる前に、側壁をロックボルトで締めつけると同時に、クローラードリルで長さ 15m の孔をあけ、鉄筋を挿入し奥にアンカーをとり、側壁と鉄筋との間にカルソソ型の変位計を設置して、本体の盤下げによる側壁面と 15m 深さの、岩盤内点の相対変形を測定している。(図-3)

本体の盤下げ時、発電所上流半分のドラフト側側壁が、EL40.5m まで堀削したとき、側壁岩盤の変形を防止するために、EL52m と EL46m に、補強用のストラットを設置し、このストラットを利用して両側側壁間の岩盤変形の測定をしている。

b. 空洞アーチ部の変形

空洞アーチ部の変形測定点①～③部分の岩質は、硬い砂質粘板岩およびチャートよりなり、シーム、断層等はない。変形測定点④⑤のアーチ中央部の岩質は、チャートよりなり、かなりの堅岩である。変形測定点⑥⑦部分の岩質は、大部分粘板岩よりなり、アーチを斜によぎる 2 本の断層があり、岩質はクラッキーなものである。

空洞アーチ部の堀削は、アーチ上部を 13 ブロック (1 ブロック幅約 4m) に分け、各ブロックごとに抜堀りを行ない、抜堀りを終わるとすぐにアーチコンクリートを打設し、落盤を防止した。

図-4 は堀削の影響を調べるために、各ブロックの堀削によりおこるアーチ部の岩盤の変形と、抜堀ブロックとの関係をプロットしたものである。変形測定点①～③の部分の岩質は堅硬なもので、測定点⑥⑦は軟いものである。

堅岩部の堀削による変形は、直下のブロックを抜堀りしたときに約 1.5mm ～ 2.2mm の変形を生じ、直下

以外のブロックの堀削は、ほとんど影響を及ぼさない。

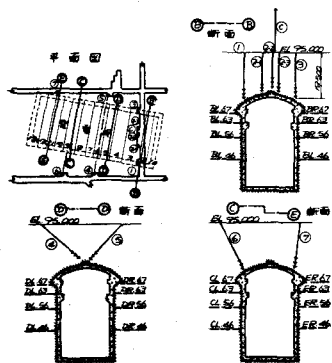


図-3 発電所測定配置図

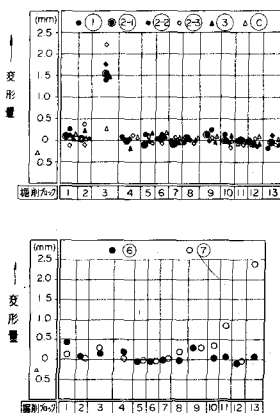


図-4 アーチ掘削ブロックと変形との関係

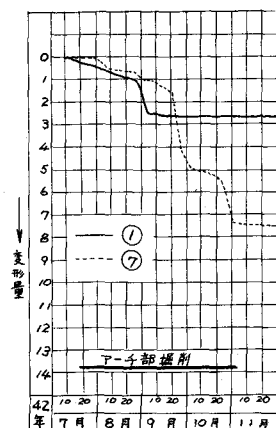


図-5 アーチ部掘削による変形

⑥⑦の岩盤の変形は、その直下以外の堀削による開口、および爆破の影響がかなりある。また、⑦の変形のように、地質の悪い場所では、空洞の堀削により変形が始まり、その後までかなり続く場合がある。⑦の変形測定点と同じブロックの、⑦の位置とは反対側の岩盤が、約7mm変形した後落盤が起り、その後変形はおちついた。(図-5)

各変形測定点の岩盤より1m、3m、5m離れた場所より、EL95m横抗間の相対変形の比較をするために、岩盤より1mの位置の変形を基準としてプロットしたものが、図-6である。この図より、堅岩の①～③地点では、堀削の変形が堀削面より3m以内で大きく、3m以上より上部は除々にゆるみ変形が生じている。岩盤の悪い⑥⑦の地点では堀削面より5m以内は、どの点も顕著な区別はつかず、5m以上奥の部分まで、かなりの変形があるものと考えられる。

次に、本体堀削にともなうアーチ部の変形について調べる。本体堀削を行なう前に、アーチ部のコンクリートと岩盤との間の空隙を、セメントグラウトを注入することにより一体となした。本体の堀削は1リフト3mの深さで堀削を進めた。堀削時に側壁の崩壊を防ぐために、岩盤をφ27mm長さ15m 10m 5mのロックボルトで約3本/m²の割で締めつけた。

本体の地質は、鉄管路側はほとんどチャートよりなる堅岩であり、変形測定点⑦の下の部分に、割れ目のある粘板岩が存在する。ドラフトトンネル側の上流側側壁の高さEL54m以上は、比較的よい砂質粘板岩よりなり、それより下部はシーム等を介在しており、比較的軟い岩質をなしている。

堀削にともなう生ずるアーチ部の変形は図-7のとおりである。この図より①の変形が、堀削の進むにつれて大きくなっており、④の変形が小さく、⑦は本体堀削当初はかなり大きかったが、だんだん小さくなってきている。この変形の状態は、側壁の地質状態とよく一致しており、地質の悪いところのアーチ部の変形が大きくなっており、堅硬な岩盤の部分の堀削時には、アーチ部の変形は生じていない。

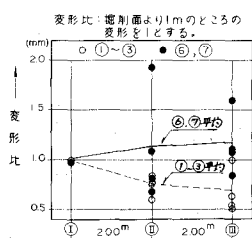


図-6

堀削面より1m 3m 5m
の変形比較図

アーチ部の変形は、側壁の地質と大いに関係し、側壁のはらみ出しのために、アーチ部の岩盤が沈下するものと考えられる。

○ 本体側壁部の変形

図-8は本体堀削にともなう、側壁と側壁面より15m岩盤内の間の相対変形を示したものである。図示した断面Bは、ドラフトトンネル側の岩盤が軟かい粘板岩で、水圧鉄管路側の岩盤は硬岩である。断面Eは、アーチ部が軟岩であるが、本体部分は堅岩であるような個所のところである。

側壁の相対的な変形は、B O D E断面の4ヶ所の両側壁について測定を行なっているが、ここにはB点、E点の軟岩と硬岩の部分の代表的ものをあげた。D断面の変形は、B断面の変形とほとんど同じであり、O断面の変形は、E断面の変形と似ている。上流半分のドラフト側側壁の岩盤は軟岩のため、EL40.5mまで堀削したところ、35mmの相対変形を生じ、堀削の終了後も、変形の収斂が悪くなつたので、これ以上堀削を進めると側壁の崩壊の恐れがあるため、一時堀削を中止し、EL52m EL46m の2ヶ所に補強用ストラットを渡し、側壁のはらみ出しをおさえるようにした後、再度堀削を開始した。その後の変形は7mm程度であり変形量も小さい。

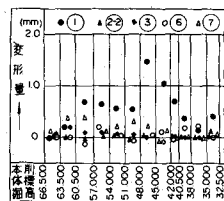


図-7 本体堀削によるアーチ部の変形

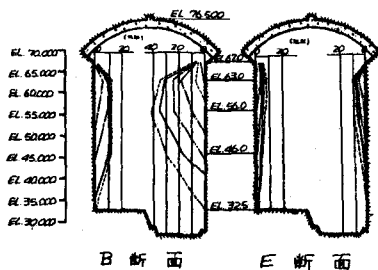


図-8 本体周壁部の変形

鉄管路側等の堅岩部については、最大変形10mm程度であり、堀削が深まるにつれて、堀削による上部地点の変形には、あまり影響をおよぼしていない。

4. あとがき

喜撰山発電所の地下空洞堀削に伴う変形について調査した結果、次のことがあきらかになつた。

- 空洞アーチ部堀削で、堅岩部は直下の堀削時のみ変形を生じ、その変形は堀削面上20m以上の部分まで影響を及ぼす。また軟岩部は直下の堀削時以外に他のブロックの堀削により、かなり変形を生じ、軟岩部のある一点の変形を測定することにより、他ブロックの落盤等が予知し得る。
- アーチ部の変形は空洞本体の地質によつて大いに左右されるものであり、発電所空洞のアーチ部ライニングコンクリートの設計には、本体の地質をも十分調査して決定する必要がある。
- 発電所本体の堀削による側壁の変形については、40mm程度までロックボルトで補強した岩盤であれば、崩壊する危険はないが、この程度の変形が生じてくると、わずかの堀削でも変形が起り、塑性的なものとなり、変形が収斂なくなる。この場合、内部に補強ストラットをすると、非常に有効である。なおストラット自体は小さな部材でも有効に働く。

以上、喜撰山発電所空洞の周辺の変位測定、および種々の調査結果より判明したことを記したが、今後、これらの結果をさらに詳しく解析し、地下発電所の設計、施工のために備えたいと考えている。

Deformation of Rock Mass around Machine Hall of Kisenyama Underground Power Plant

By Kiyohiro Yoshimura

The Kansai Electric Power Co., Ltd.

Kisenyama underground power plant which is now under construction has an installed capacity 466,000KW and is located on the Uji River in the suburbs of Kyoto. The underground power plant is an excavated cavity, 25.6 meters wide, 51.0 meters high, 60.4 meters long and about 250 meters below the ground surface.

The instruments were installed in the rock mass around the machine hall to measure the deformation of the rock surrounding the machine hall during and after excavation.

In this paper the instruments and the results which are performed at the site of Kisenyama underground power are described. The initial stress measurements which are conducted on the rock in the exploratory tunnel are also presented.