

II-20 沼原揚水発電所水圧鉄管の岩盤負担について

電源開発(株)設計室 正員 藤野浩一

1. まえがき

沼原揚水発電所は、栃木県北部那須岳西麓の台地に築造された沼原調整池(上池)と那珂川に設けられた多目的ダムの深山貯水池(下池)とを結ぶ純揚水式水力発電所で、昭和44年秋に着工し、昭和48年秋までに全3機の運開を見たものである。近年、揚水発電所はその経済性から大容量高落差化が要請されており、当発電所はその先驅をなすものとして、全面アスファルト表面シャ水工法による上池ダム、HT70を使用した水圧管路、世界最高の揚程を誇る可逆式ポンプ水車等の新技術を定着させることに成功した。

ここでは水圧管路の完成後の諸測定結果について述べるとともに、埋設鉄管の岩盤負担に関する若干の考察を加えるものとした。

水圧管路の概要は表-1および図-1に示すごとく地下埋設式であるため岩盤による内圧の一部負担が期待されるのであるが、設計時点では岩盤強度が不明であったこともあり、安全を見て内圧の100%を鉄管で負担するように設計された。水圧管路経過地域の地質は花崗閃緑岩であるが全般にシームが発達しており、特に中間水平部より上部では風化が進み地質不良区間となっていた。

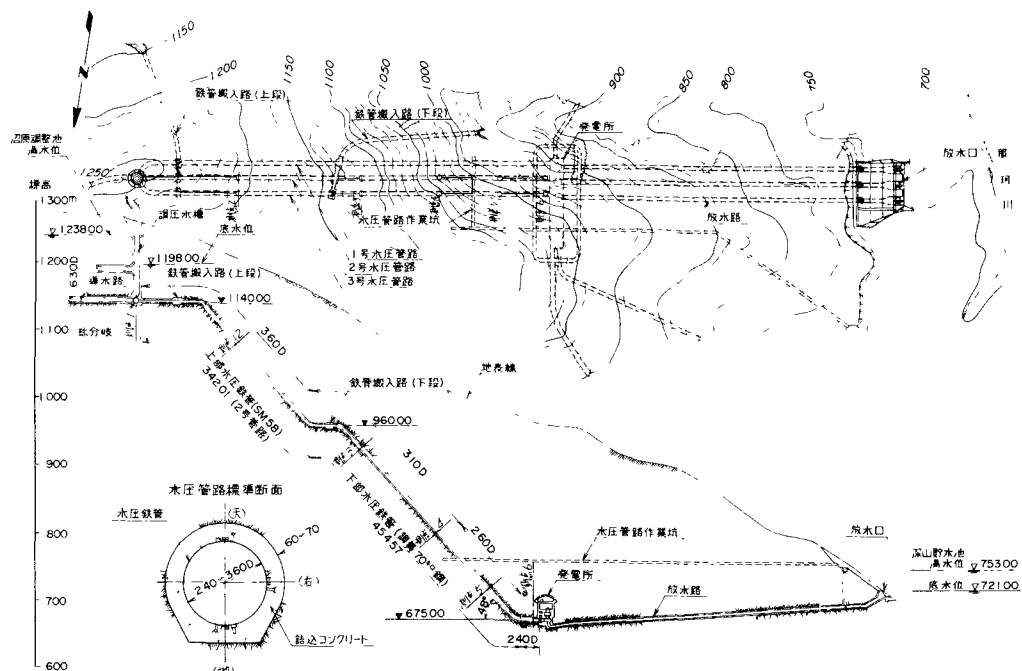


図-1 沼原水圧管路一般図

2. 測定結果

2.1 測定方法

測定方法はカールソン型埋設計器によるものとした。計器の種類、測定項目、測定範囲は表-2に示すとおりである。計器の配置は図-1に示すように1断面当り3ヶ所×3種類=9個とし、これを2,3号管路につきそれぞれ5断面に設置した。計器の取付は鉄管周辺のコンクリート打設直前に水圧鉄管外面に接着剤ではりつけ、リード線を近接の作業坑まで引出すようにした。

工事終了後、管内充水の速度に合せて0.5~10日の間隔で一般の静的測定を続けた。また同じ埋設計器を用いて動的測定を行なった。これは水車発電機の負荷シャ断試験時の水圧に

より生ずる水圧管路の動的挙動を動歪計を介してオシログラフに記録させるようにしたものである。

なお、表面歪計の測定結果は、計器の温度補正を行なった上で、鉄管の温度歪を補正し、 $E = 2,100,000 \text{ kg/cm}^2$ として歪を応力に変換して整理した。

2.2 静的測定結果

歪計による水圧鉄管応力測定結果の1例を図-2に示す。このうち2号測点2は地質の脆弱な支保工区間で、3号測点6は支保工区間ではあるが低圧グラウト施工区間である。また図中の100%応力とは、測定時の内圧による露出管としての鉄管応力である。

型 式	埋設式水圧管路	
延 長	約800m×3条	
内 径	3.60~2.40m	
最大設計内圧	700m	
最大使用水量	57.5%×3条	
管胴材板厚 ・ 材質 ・ 許容応力 仕上り重量	上部水圧鉄管	下部水圧鉄管
	13~29mm	22~34mm
	SM-58	HT-70
	2400 kg/cm ²	2900 kg/cm ²
	1880t	2830t

表-1 沼原水圧管路諸元

種 別	測 定 項 目	測 定 単 位	測 定 範 囲	最 小 読 取 値
表 面 歪 計	鉄管の円周方向歪	10 ⁻⁶	-500~+1400	6
境界継目計	鉄管とコンクリートの間隙	mm	-2~+2	0.012
間隙水圧計	鉄管外面の間隙水圧	kg/cm ²	0~16	0.08

表-2 カールソン型計器

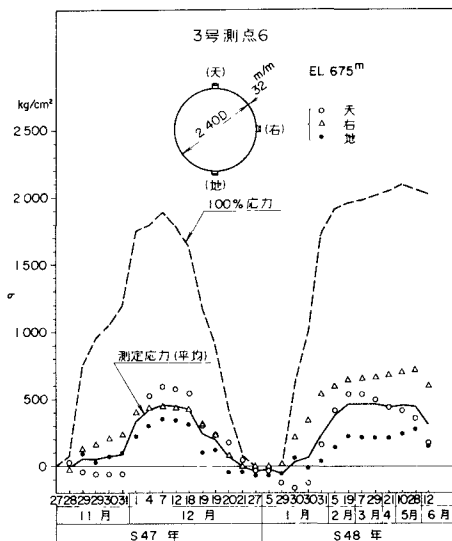
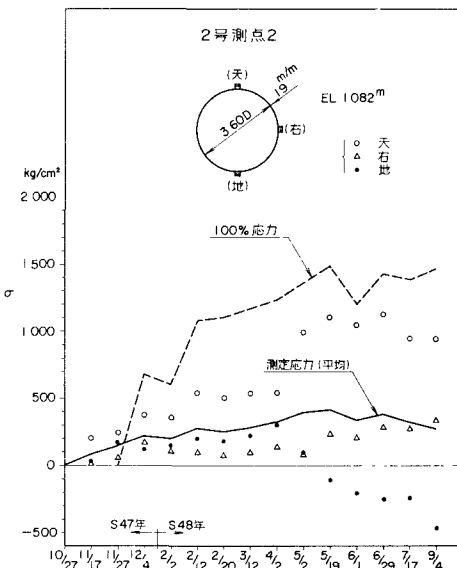


図-2 埋設計器による静的測定結果

これによれば内圧の70%程度が岩盤により負担されており、2・3の例外を除いて他の測点でも同様の結果となっている。この値は一般に考えられているものよりかなり高い。

但し、2号測点2の例に見られるように、同一断面内での測定位置による値のバラツキが大きい測点があり、この傾向は管径の割に板厚の薄い上部になるほど顕著である。これは鉄管が完全な円形を保って変形せず、局部的な曲げが発生しているためと考えられる。このため、一部では100%近い応力が他方では圧縮応力が生ずるという場合がある。この局部曲げによる付加応力は、今後岩盤負担を考慮して管壁厚を減らして行く上で、無視できない問題になると思われる。

また同時に測定した継目計および間隙水圧計の測定結果もほぼ内圧に対応して変化しており、その値は前者で0~1.0^{mm}、後者で0~3[%]程度であった。但し継目計の動きは露出管としての動きとは初めから一致せず、鉄管とコンクリートの初期間隙はほとんど0に近いことが分かった。

なお、以上の測定結果は、同種の水圧管路を持つ御母衣第2発電所（S.38年完成）および新豊根発電所（S.48年完成）における測定結果ともほぼ一致しており、内圧の岩盤負担率は前者で60~90%、後者で80~90%と報告されている。

2.3 動的測定結果

前期の静的測定は比較的長期間にわたって測定を続けるため、計器系全体の測定誤差が累加される恐れがある。これを避けるために、水撃圧付加時の短時間内の水圧変化を動的に測定したところ、図-3の例に示すような結果を得た。

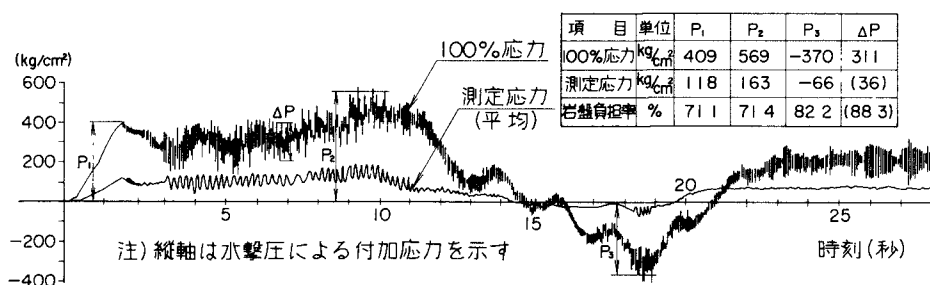


図-3 動的測定結果

これによれば、周期が5~20秒程度の比較的緩慢な水撃圧変化に対しては、鉄管は静的測定と同様70%程度の岩盤負担率で変化したが、20Hz程度の急速な変化（水圧脈動）に対しては応答が悪くなっている。これは測定系（殊にカールソン型計器）の応答性が悪いためか、実際に鉄管が応答しないためか、この測定からは判別し難い。

また、継目計、間隙水圧計ともに静的測定と同様に内圧に呼応して変化している。

3. 測定結果の考察

3.1 既往の理論

埋設鉄管の内圧による応力分担は構造系を鉄管、コンクリートおよび岩盤からなる多層円筒と考えて求められている。その仮定は次の通りである。

- (i) 鉄管、コンクリートおよび岩盤は弾性体（一部弾塑性体）である。
- (ii) 鉄管とコンクリートとの間に初期間隙が存在する。

(iii) コンクリートは円周方向引張応力に抗し得ない。

(iv) 岩盤は均質等方性である。

上記の仮定に従って、先に例示した測定の岩盤負担率を計算してみる。例えば水門鉄管技術基準第16条の式によれば、岩盤の弾性係数を $80,000 \text{ kg/cm}^2$ として、岩盤負担率は、

$$\lambda = 0.496 \quad (2 \text{号測点} 2) , \quad 0.339 \quad (3 \text{号測点} 6)$$

となる。これは前記の測定結果である $\lambda = 0.70$ と比較して非常に小さい。また同じ式を用いて、 $\lambda = 0.70$ となるような岩盤弾性係数を逆算すると、

$$E_R = 755,000 \text{ kg/cm}^2 \quad (2 \text{号測点} 2) , \quad 3,230,000 \text{ kg/cm}^2 \quad (3 \text{号測点} 6)$$

となり、岩盤が非常に大きな剛度を持っていないければならないことになる。

3.2 測定結果の考察

上記の仮定のうち (ii) については、鉄管とコンクリートの間に 20°C 程度の温度差があり、そのため鉄管が相対的に収縮して間隙を生ずると考えられている。(計算例では $0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$ の間隙となる。) しかしながら、相接する2者間にこのような温度差が生ずることは極く稀なケースと思われ、測定結果も間隙がほとんど0に近いことを示している。そこで温度差による影響を除いて再計算すると、

$$E_R = 100,000 \text{ kg/cm}^2 \quad (2 \text{号測点} 2) , \quad 331,000 \text{ kg/cm}^2 \quad (3 \text{号測点} 6)$$

となり、妥当と思われる値にかなり近くなる。

初期間隙を0とした時の鉄管板厚比と鉄管応力の関係を図-4に示す。これによれば岩盤の弾性係数が高くなると、板厚比に無関係に鉄管応力は一定となり、従って板厚を薄くする程岩盤負担率が高くなるという結果になる。

また既往の理論ではコンクリートおよび岩盤を均質等方性のものと仮定しているので、前記の局部応力の影響を考慮に入れることができない。

4. まとめ

以上述べた測定結果と若干の検討の結果、次のことが考えられる。

(i) 埋設鉄管の岩盤負担率は一般に考えられている値

よりかなり高く、静的ならびに動的な測定結果から70%程度であることが分った。当発電所以外の埋設水圧管路でも同様の結果が得られている。

(ii) 管径に比して板厚の薄い鉄管では、不均一な変形のために、曲げ応力が発生している。

(iii) 既往の理論が岩盤負担率を過小評価する原因のひとつに初期間隙があるが、測定の結果ほとんど0に近いことが分った。

(iv) 今後、岩盤の内圧負担を考慮して鉄管の板厚を減らす方向の設計を行うことが可能と思われる。しかしその際には、以上述べた問題のほかに岩盤試験の方法および外圧に対する問題などを解決する必要が生ずるものと考えられる。

(参考文献)

・H. LAUFFER ; Design and Control of Linings of Pressure Tunnels, 7th Congress on Large Dams 1961

・発電水力協会誌 No.125, No.127, その他

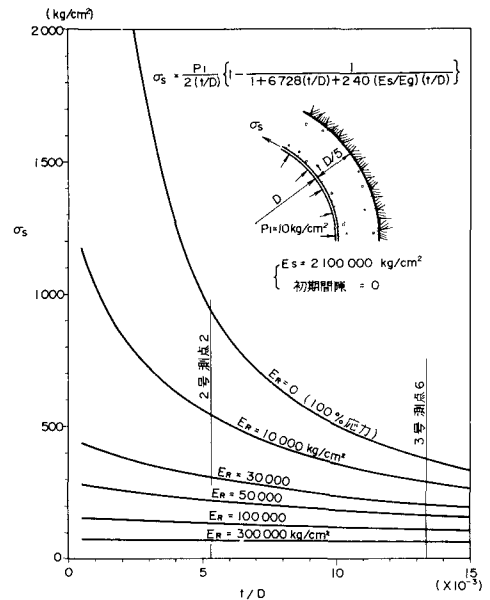


図-4 板厚比と鉄管応力の関係