

水力発電所鉄鋼構造物の安全度調査について

小 林 晃*

○弥勒院輝明*

1. ま え が き

水力発電所鉄鋼構造物を大別すると、水圧鉄管、水門扉などがあり、これらの構造物は常にある水圧をもった状態にあって重大な公害につながる場合もある。当社ではこれらについて安全度調査を進めているのでその概要について述べる。

2. 鉄鋼構造物の現状

2-1. 水圧鉄管

当社54水力発電所中、水圧鉄管を有する発電所は48であり、そのうち鉚接鉄管型式をとり入れているものは約半数近い24カ所である。

従来行なわれてきた水圧鉄管の取替工事は主に初期溶接管に限られており、その更新基準は水圧鉄管調査要領に基づき補修計画を立てている。

表一1 当社建設年代別水圧鉄管継手の種類

	鉚接	鉚接 及 溶接	溶接	摘 要
明 治	1			定山溪
大 正	13			みす舞、徹別、大野川、志比内、津別、一の沢、忠別川、湧別川、磯谷川第一、蘇牛、愛別、見市、下津別
昭和～9	4	1		安足間、磯谷川第2、上川、上飽別、相沼内
昭和20～26	2	3	2	濁川、岩松、秋の川、香深、雨竜揚水、江御、久保内
27年以降			22	仁宇布川、然別第1、然別第2、上岩松第2、層雲峡、上岩松第1、飽別、岩知志、岩清水、右左府、奥新冠、春別、真敷別、雨竜、比羅夫、虻田、藻岩、静内、昆布、洞爺、金山、七飯
計	20	4	24	計48カ所

上表中改良鉄管については改良後の年代ならびに継手型式とした。

表一2 当社水圧鉄管調査件数

項目	年度	26	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
予 備 調 査	管測	2	3		2	3	8	8	5		1	8	3	7
	厚定	2					3	4			2	2	2	7
精 密 検 査	硬測				2	2	7	7	5			8	3	7
	度定						3	4			1	3	2	7
精 密 検 査	外測				1	2	1	8	5		3	9	3	7
	観定						2	4			1	3	2	7
精 密 検 査	応測								1			4		
	力定											1	2	
精 密 検 査	X Ray										1	1		1
											1	1		1
精 密 検 査	材試				1		1	1			1	1		1
	料験	1					3	1			1		1	
精 密 検 査	化分						1	1			1	1		1
	学析							1			1		1	
精 密 検 査	そ の 他				1		1	1			1	1		
					1		3	3			1		1	

鉚接鉄管については、明治、大正年代の老朽鉄管も多いが、継手部などの脆性破壊に対する危険性が少ないことなどから、主として母材の腐食を更新基準としている。

しかし、現在の調査方式では、管胴部の腐食の測定方法、孔食の多様性による応力分布状況および継手部の材料試験などに問題があり、容易に実体をは握するまでには至っていない。

2-2. 水 門 扉

水門扉は水路構造物に不可欠なものであり、その使用目的に応じて数多くの型式が採用されている。

当社におけるこれらの水門扉は大正初期から今日にいたるまで、発電所の建設とともに存在しており、従来は水圧鉄管などに比べ水圧および規模が小さいこと、継手が鉚接であるため事故例が殆んどないことから、鋼製門扉については、いままで改良された事例は余りなかった。

*

しかし、門扉設計の経済性を重視するあまり、従来経験的な要素が加味されて剛性を低くとり過ぎたための事故が昨年我国で発生し注目を浴びた。

そして従来あまりかえり見られなかった水門扉の設計および調査について監督官庁から、この機に、一連の実態調査を行なうよう通達が発せられた。

水門扉の調査方法は後で述べるような各種方法で実施したが、当社で対象とした門扉については問題となる個所が

表一3 当社建設年代別水門扉の種類

	鋼 製 ケ ー ト					計	木 製 ゲ ー ト
	ス ル ス ゲ ー ト	ロ ー ラ ゲ ー ト	ラ ー ジ ル ゲ ー ト	ソ の 他 穿 透 版 他 決	他 タ ク ソ ロ ー ラ ゲ ー ト		
明 治	—	—	—	—	—	—	
大 正	18	11	6	—	6	41	
昭和1～9	13	2	—	—	—	15	
昭和10～26	79	36	7	—	19	141	
昭和27～43	101	132	10	—	3	246	
合 計	211	181	23	—	28	443	301

表—4 原因別事故件数

原因別	水災発生	伸縮継手	継手	マンホール	管 胴	管 路	バルブ	破裂圧潰	計
事故件数	23	16	19	4	14	22	1	26	125
%	19	13	15	3	11	18	1	20	100

表—5 破裂あるいは圧潰溶接鉄管の竣工年代別表

昭和10年 以前	昭和 11~15年	昭和 16~20年	不 明	計
1	6	2	1	10

表一6 同上原因別事故件数表

主な原因	材料および施工不良 (溶接不良)			機器の動作不良		
	破 裂	破 裂 〇 び 圧 潰	圧 潰	破 裂	破 裂 〇 び 圧 潰	圧 潰
件 数	6	1	0	0	1	2

表一7 機器操作関係の事故件数

主因原因	排水弁、空気弁の不良、凍結を含む	主弁不良	誤操作	計
件数	4	1	2	7

3-2. 水圧鉄管調査要領

昭和34年に“水圧鉄管保守要領”昭和35年に“水圧鉄管調査要領”，更に昭和40年度には“水路工作物管理調査要領”などが制定され，また昭和43年度には，最近の設計計算法の精度の向上，製作技術の向上，溶接技術の向上に

殆んどなく、比較的簡単な補修を1カ所について実施したのみであった。

3. 水圧鉄管の調査

3-1. 水圧鉄管の事故

我国の水力発電所水圧鉄管の事故の種類および原因について通産省統計によると表4~7のとおりである。

水圧鉄管の事故は母材および継手部の不良によるもので、これによる事故は破裂事故となっている。

また、機器操作関係の事故としては、空気弁、排水弁などの動作不良によるものがあり、これらは圧潰事故あるいはこれに伴う破裂となっている。

当社における鉄管事故はE発電所溶接鉄管の破壊事故1件である。

E 発電所鉄管破壊事故は昭和 20 年 2 月鉄管竣工にともなう官庁検査の際全負荷遮断時に破裂したもので、原因は材料の不良、および極寒時に施工した悪条件が重なって起きた。すなわち溶接部の欠陥を起点として低温脆性によって破断したものと考えられる。

ともなつて“水門鉄管基準”が改訂されており、これらは水圧鉄管および管路の点検、保守、調査等に広く活用されてきている。

3-3. 肉厚測定

鋼構造物の腐食状況は、その設置状態、環境および気象条件等により非常に異なっている。

管板厚の測定は水圧鉄管の応力を確かめる主も基礎的な手段であり、この測定に関してはほぼ年間10発電所、個々には5年に1回の割合で実施してきている。

管厚測定には種々の方法があるが一般的に (1)超音波板厚測定器による方法、(2)モデリングによる方法、(3)ボーリングによる方法、(4)テストピースによる方法、等がある。(1)の方法は鉄管の通水のままでしかも取扱が容易であるため、最も広く採用されているが、腐食、磨耗の著しい状態の場合は測定不可能である。従って、1次調査として、(1)の方法を採り、精密調査として(2)~(4)の方法を採ってきているが、これらは破壊調査であるため断水及び経費の面で難点があり、非破壊調査での精度が望まれていた。最近、この要求に比較的合った反射波を利用する超音波板厚測定器が開発されている。

従来の超音波肉厚測定器は可視式と可聴式とがあり、両者の原理はいずれも共振波によるものであり、接触子の最

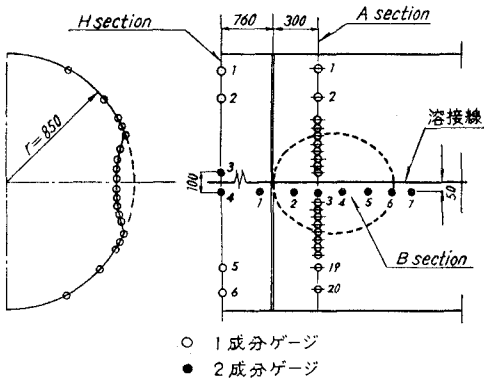
小径は 10 m/m であって、それ以内の孔食の点在している部分に対しては現状と異なった値を示すか、あるいは測定不可能である。

反射波利用の厚さ計は孔食径として 2~3 m/m 程度まで判読良好であり、測定時間も従来の約半分程度の削減が可能である。

3-4. 応力測定

応力測定は年間 2~3 発電所について実施してきており、従来は継手部を問題としたものが多かったが、昭和 43 年度には 2 発電所について管胴部の変形を発見したので、直ちにこの部分の応力測定を実施した。

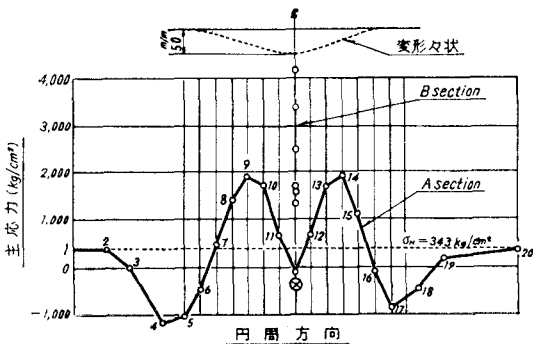
S 発電所の水圧鉄管は昭和 28 年に据付けられた溶接管で円周方向の現場継手は目板リベット継手である。定期鉄管調査の際、上部鉄管管胴に径 500 m/m、深さ 50 m/m に及ぶ局部変形カ所を 2 カ所発見した。これは損傷の形状からみて落石によるものであることが推定された。



第 1 図 変形部測定カ所配置

測定点は、最大変形部を中心に第 1 図に示すように円周方向と管軸方向の 2 本の測線と、変形の影響の受けない位置に測線を 1 本設け、合計 37 点 47 成分の配置とした。測定は通常行なわれている方法、すなわち、鉄管内充水、満水、排水、空虚を 3 回繰返して測定した。

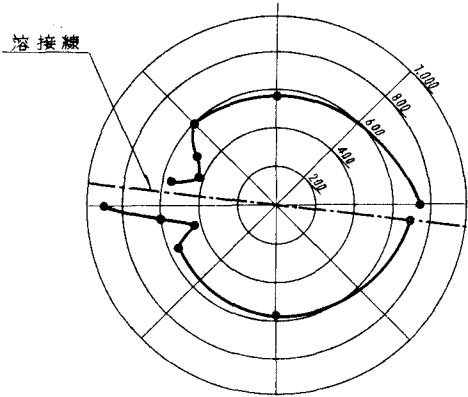
測定結果、最大応力値は円周方向測線では、1,900 kg/cm²



第 2 図 変形部応力分布図

管軸方向測線では 4,200 kg/cm² の値であり、いずれも凹みの中心と端部との中間に sin カーブの上限として表われている (第 2 図)。

測定実施以前の応力計算で一応破壊応力に近い値を示すことは予め想定されたが、上記結果からも、事故防止上、このまま放置できないとの結論を得、直ちに、この変形部カ所の取替えを行なった。



第 3 図 IPS 鉄管応力分布 (単位: kg/cm²)

I 発電所水圧鉄管は昭和 5 年製の鋸接及び溶接管であり、単位管は約 6 m、単位管ごとの継手はフランジ継手となっている。昭和 20 年以前の溶接管は材質及び溶接とも信頼性に乏しいことから、昭和 34 年の調査に基づき、円周方向継手をガウジングによる再溶接を翌年実施したが、一部分のフランジ付近に溶接歪が見受けられたのでこの部分の応力測定を実施した。

測定結果、いずれも許容応力値以下であり、さしあたり問題とする値は得られなかったが、さらに来年度は、残留応力の検討として切断試験を実施する予定である。

3-5. 水圧破壊試験について

保守に要求されている水圧鉄管の破壊試験の目的は供試管体を水圧により破壊し、その破壊時の強度並びに破壊に至るまでの加圧過程における変形および強度を調査することにある。すなわち、

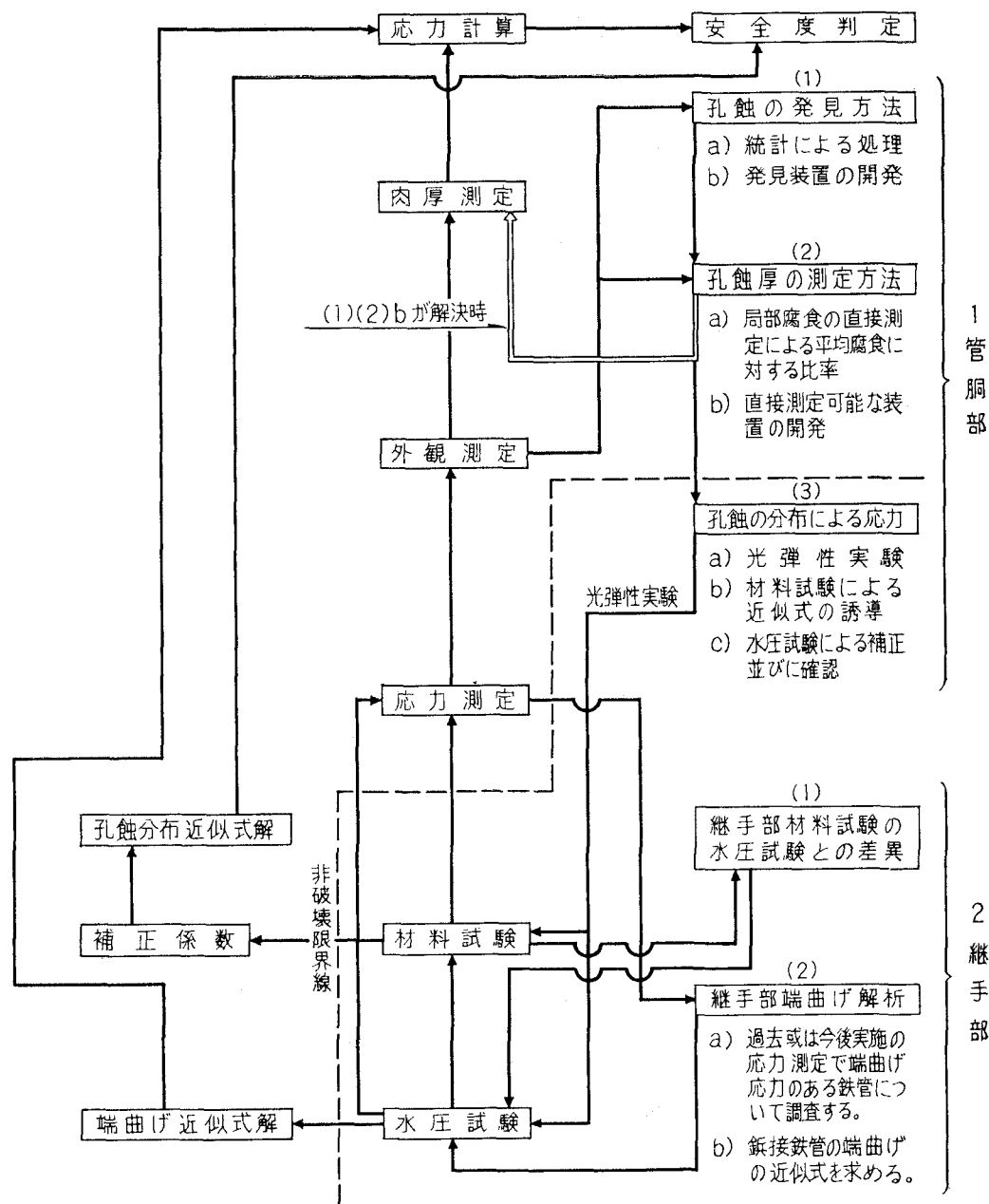
- (1) 現場における応力測定結果と破壊試験結果とを比較し、鉄管の保守管理上要求される静的応力の想定資料とする。
- (2) 各種の調査、特に材料試験と破壊の結果について比較し考察を加える。

破壊試験の際の諸測定は外部変形の状況を定量的に求めるもので、直接変形量が確認される。従って解析的な検討を経ないでも管体の挙動を直ちに察知することができ、異常の早期発見に役立ち、また外部変形から管体内の歪や応力の推定と関連づけを行なって保守管理上の資料を得ることにある。

補正事項

試験及測定事項

検討事項



第4図 鋸接鉄管調査概要図(案)

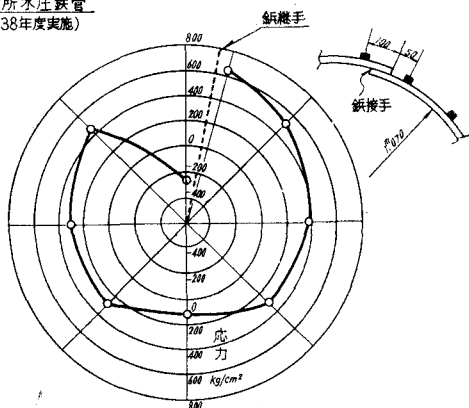
当社で水圧破壊試験を実施した発電所はU、A、の2カ所であり、いずれも溶接鉄管である。

U発電所鉄管は昭和18年製であり、昭和32年からはストリップミルによる短周期変動負荷により、常時くり返し応力が発生するので、昭和32～38年に互って各種材料試験を実施した。昭和35年には応力測定を実施し、動応

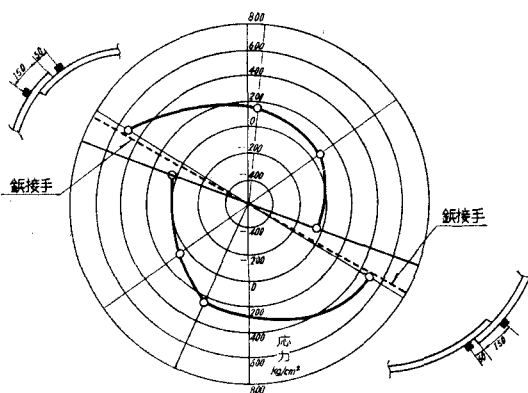
力分布についての解析を基に溶接継手の疲労試験が行なわれた。以上の結果、材質及び溶接部が不良で応力値が過大であることが判明、直ちにこれら諸測定の絶対値確認を目的として水圧試験を実施した。

A発電所鉄管は昭和14年製のものであり、材質及び運転方式ともU発電所と同様であり、昭和39年に水圧試験

工発電所水圧鉄管
(昭和38年度実施)



H発電所水圧鉄管
(昭和39年度実施)



第5図 銲接鉄管ラップ継手の応力集中

を実施した。

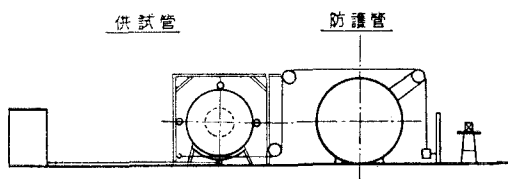
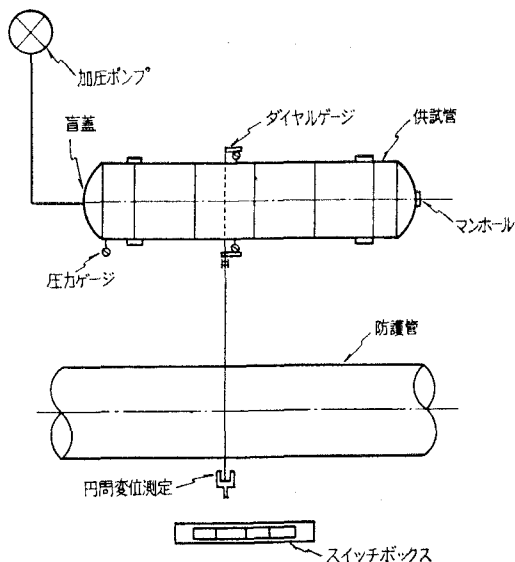
以上, U, A の鉄管破壊試験の結果を総合すれば,

- 1) 管の歪と内圧の関係は管胴部, 溶接付近と別れているがそれぞれほぼ一致した値であり, バラツキが小さいのであるが, U, A とも, バラツキは大きい。このバラツキは鉄管の真円度, 管厚の不均一等の変形によるものと考えられる。
- 2) 鉄管の材質の相違があるにもかかわらず, 一本の供試管についてすべて $\lambda = \epsilon E$ とすることに問題がある。
- 3) 歪の平均値は計算値とほぼ一致する。
- 4) 歪～内圧の関係は内圧が大きくない間では直線変化をしており, 弾性体であるといってよい。また, U と A 管の相関関係は認められなかった。しかしおのおのの破壊試験と非破壊試験とは相関が認められる。

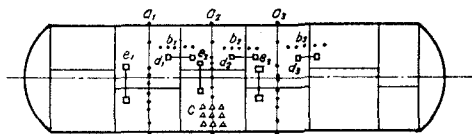
以上を参考に U 鉄管は一部当板補強工事を直ちに行ない。A 鉄管はほぼ同時期に全管の更新を実施した。

3-6. 銲接鉄管の調査

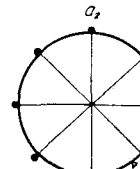
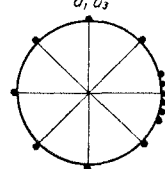
現在, 銲接鉄管の問題点として次の事項が考えられる。



測定器取付図



a 円周方向ゲージ



オシログラフに記入

- b 軸方向ゲージ
- c 最小板厚部
- d ボンチ (伸び測定)
- e 円周方向変位測定点

ゲージ数67点

第6図 銲接鉄管破壊試験装置

- (1) 管胴部について
 - a. 孔食の発見方法
 - b. 孔食の測定方法
 - c. 孔食の分布と強度との関係

- (2) 継手部について
 - a. 継手部の引張試験と水圧破壊試験との関連
 - b. 銲接鉄管のラップ継手付近の応力集中

一般に鋼構造物の腐食は種々の原因はあろうが、発見困難な箇所程著しいという傾向を持っており、腐食カ所の選定は測定以前の問題として重要な事項である。従来これらは経験的なものとして取扱われてきたが、今後改修時に具体的調査を実施し個々の地点について統計処理を行なう必要性があるものと考えてる。

孔食の測定方法については 3-3. である程度解決されるが、両面孔食のような場合にはなお問題が残る。

孔食の分布と強度との関係については、実験室内において同一の厚さの鋼板に孔食の大きさ、深さ、分布量など、単純化したものを数ケースに分け、これを破断させて分類別に荷重状況の調査を実施する計画である。

また、銲接鉄管のラップ継手付近の応力集中については、材料試験及応力測定などでも明らかなように銲接のラ

ップにより生ずる引張と圧縮の応力集中の解明である。
この応力集中は、以前実施した銲接鉄管の応力測定から 1.5～2 倍程度と推定される。

銲接鉄管継手部の引張試験と水圧破壊試験との関連については、継手の問題として銲孔が干渉になっているために、材料試験片の切断方法いかんによっては種々の値となり、結果そのものの値の取扱いが困難である。

従って、他の腐食や継手の問題をも含め、材料試験の欠陥を修正する目的で銲接鉄管の水圧破壊試験を行なうこととした。(第 4～第 5 図)

銲接鉄管の破壊試験は、銲からの漏水のため、加圧不可能となった例があるので、供試管内部にゴム筒挿入方式とした。なお、試験は昭和 43 年 12 月に行ない、目下結果について検討中である。(第 6 図)

4. 水門扉の調査

4-2. 水門扉の調査事項

当社では、水門扉の機能確保及び事故の未然防止ならびに改修の概括的な資料とするために下表のような外観調査を実施している。

表一8 外 観 調 査 概 要 表

調 査 対 称		点 検 調 査 事 項	測 定 用 具
扉 体	扉 体 全 体 扉 板 脚 柱 主 桁 脚 柱 鎖、溶 接 部 他	不整、たわみ、ねじれ、腐食、摩 耗、劣化、破損、き裂、切損、発 錆、ゆるみ、その他	レベル、スチールテープ、ピアノ線、 ノギス、コンベックス、手持振動計、 カラーチェック、超音波厚さ計、デ ブスマイクロメーター、シッケネス ゲージ、定規、ワイヤーブラシ、サ ンドペーパー、テストハンマー、温 度計
水 密 部 戸 当 り		損傷、摩耗、腐食、不整、漏水、その他	
び支 固承 定部 お よ	ロ ー ラ ー 軸 ロ ー ラ ー 軸 ピ ン 類 軸 受 メ タ ル	給油状態、温度上昇、異常音位置 の正確さ、その他	
	ピン受アンカレッジ他	ゆるみ、き裂、腐食、その他	
捲 上 機	電 動 機 捲 上 機 操 作 機 械 盤	指示状況	

次に上記の資料を基に、さらに具体調査として、下記の調査を実施する必要がある。

- (1) 非破壊試験—肉厚測定、応力振動、変形の測定、応力測定
 - (2) 破壊試験—材質、厚さ、継手効率、応力測定 (破壊)
- 非破壊試験については現在まで、超音波探傷による肉厚測定及び応力測定などを実施して来ているが、破壊試験については、必要性の問題で、現在まで実施した例がない。

4-3. 応力測定

水力発電用のゲートとして、ラジアルゲートは古くからダム越流ゲートとして広く用いられてきた。然るに最近、

脚柱え曲げを伝達しない位置に、脚取付を選ぶという経済的にも有利な設計が採用されてきている。

且つ計算では従来どおとの平面構造をいくつかに分割しており、従って脚柱の剛性も従来より小さな値となっている。しかし従来の場合、立体的な変形挙動については経験的に処理されていたことに問題があり、この解析の徹底的追求は昨年の W ダムラジアルゲートの破壊にあたって試みられた。

当社のダムに使用しているラジアルゲートは 6 地点あり、昨年の事故に関連して、そのうち、年代的中期の S 発電所ダムゲート 1 門、さらに本年度は I ダムゲート 1 門に

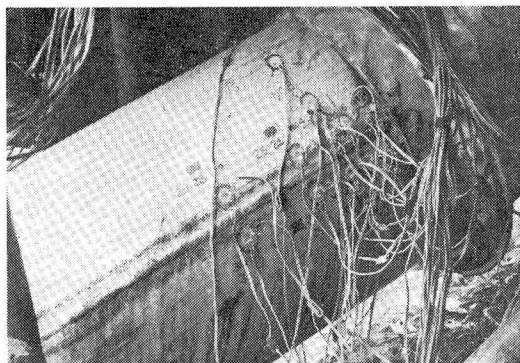


写真-1 S 発電所変形部応力測定
ゲージ位置状況



写真-2 ラジアルゲート脚部肉厚
測定状況

ついて応力測定を実施した。

S ダムラジアルゲートは昭和38年に据付けられたもので、全体として平面門型の2アーム型式であり、脚柱自体は曲げを受ける構造となっているため、剛性は極めて大きい。

測定作業としては、ゲートの無水圧状態でゲージを貼り、段階的の水位に応じ、ゲート開放および閉塞の状態で静的歪測定を、ゲート捲揚中の状態で、動歪および加速度の測定を実施した。

試験結果、静的試験では次のとおり。

- (1) 胴体各部の応力はおおむねHWL (ゲート閉鎖時) で最大の値を示し、いずれも許容応力を下廻っている。
- (2) ゲート開放時の応力が小さい。これは静水圧の減少もさることながら浮力の減少による影響が大きいと思われる。
- (3) 応力の最大値は脚部で許容応力に近い値を示してお

り、これにつぎスキンプレート及び斜材、縦材となっている。

○ 動的試験

- (1) 電磁オシログラフの観測によるとゲート操作時の動応力は操作開始直後に発生し0.6 sec 後には消滅する。
- (2) ゲート引揚中の動応力はいずれも 0.5 kg/cm^2 (全振幅) 以下で非常に小さく、ゲート始動時と、ゲート開放時に主桁、アーム部に 4 kg/cm^2 (全振幅) 程度の応力変動があった。

○ 加速度計による振動測定

- (1) ゲートの振動の加速度は引揚操作時に最も大きく、ついで始動時、開放時の順である。
- (2) 加速度はゲート始動時、引揚時、開放時のいずれの場合も、アーム中間と主桁中間で上下方向のものが他に比較して大きい、最大値でも 150 cm/sec^2 程度である。

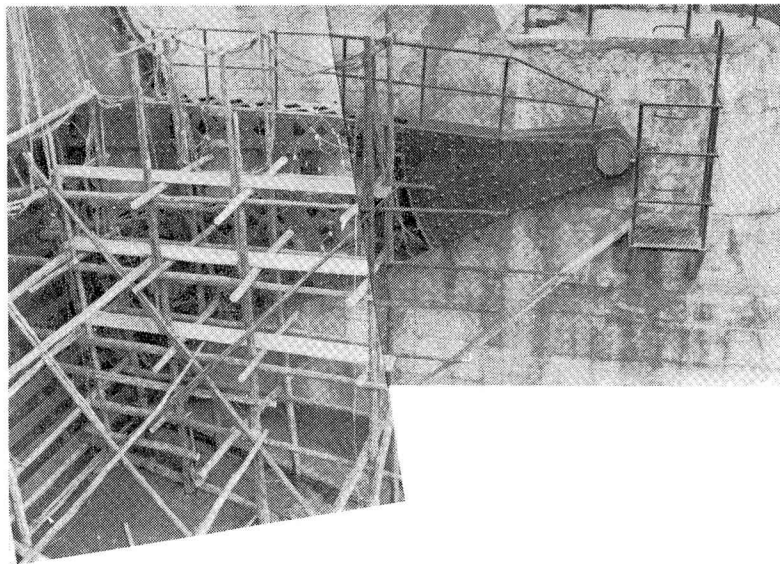
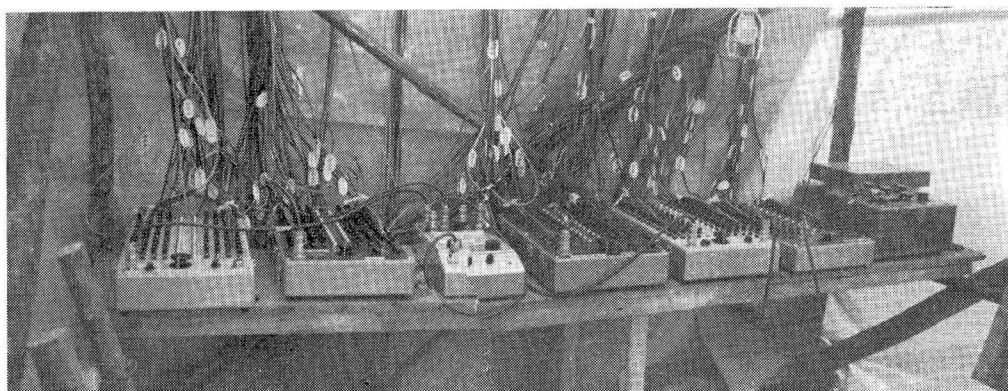


写真-4 ラジアルゲート応力測定状況



写真—4 ラジアルゲート応力測定結線状況

(3) 振幅は満水面が若干大きいが $\pm 3 \times 10^{-4}$ m/m 以下で非常に小さな値である。

以上のようにゲート各部の動応力は 4 kg/cm^2 ($\pm 2 \text{ kg/cm}^2$) 程度以下であり、静的応力に比較して問題にならず、振動測定の結果も非常に小さいので、疲労による脆性破壊は考えられない。

従って殆んど静応力から安全度が判定され、ゲート各部は安全であるという結論に達した。

なお、本年11月下旬には昭和17年に建設のI発電所ラジアルゲート7門のうち、使用頻度の多い中央門扉1門について、脚柱及び主桁を対象とした静的応力測定を実施し

ており、現在詳細データを取纏中である。

なお、結論としてはS発電所ゲート同様許容応力値以内で安全であると思われる。

5. 安全度の判定

以上のように鋼構造物の安全度調査については、外観、管厚及び硬度測定などの予備調査を行ない、応力的に問題となる事項についてはさらに応力測定、X-ray、切取、材料試験、化学、精密外観等の精密調査を実施して安全性の判定を計っている。

ここに最も基礎的な判定の例を次に述べる。

- | | | | |
|---------|---|------|----------------------|
| 1) 肉厚測定 | a. 平均応力が許容応力の1.3倍を超えたとき
b. 局部応力が許容応力の1.8倍を超えたとき
c. 応力計算に関係なく残存厚が2m/m以下のとき | } 取替 | |
| 2) 衝撃値 | Vノッチシャルピー 0°Cの値が 3.5 kg/cm^2 以下で $T \leq 15$ における温度が 15.5°C 以下のとき | | } 更に精密調査を行ない改修を決定する。 |
| 3) 継手不良 | a. 継手効率が50%以下のとき
b. 曲げ試験成績が著しく不良のとき | | |
| 4) 総合 | 1. 溶接の場合
再溶接、当板、取替
2. リベットの場合
鉋打直し、取替、更に精密調査を決定する。 | | |
- 4) 総合—以上の資料を基に総合判定を行なう。

なお、改修の決定に当っては、安全性の結果と相まって、経年、発電設備自体の重要度、投入経費、事故の場合の被害の程度など互に錯綜した問題があり、一概には決め難いものであるが、当社で従来実施してきた方法は、各発電所別、項目別の序列、あるいは点数を与えることにより比重配分的に順位付けを行ない年次計画に計上しているのが実情である。

6. あとがき

最近、測定技術の進歩と測定計器の開発によって、水力

発電所鋼構造物の調査精度は向上してきており、問題とされている事項も逐次解決されてきているが、調査方法自体の検討についても、さらに開発すべき余地がかなり残されている。

しかし万一破壊した場合、大事故につながる可能性の大きい水力発電設備の鋼構造物の維持は日常のたゆまざる点検が段階的調査へ導く最も重要な役割を占めているということを、痛感する次第であります。