

雨竜発電所水圧鉄管の安全度調査とその更新について

北海道電力(株) 安 田 稔

1. ま え が き

水圧鉄管は、水力発電設備の中でその重要度においては他の設備に劣るものではなく事故発生時における被害の重大さを考えると重要な工作物であるといえるであろう。

水圧鉄管の耐用年数は建設当時の計算条件、材質、施工技術の良否、あるいは外的条件によって左右されるが、また保守の良否によるところも少なくない。昭和26年以前の溶接管は溶接技術が未熟な上、検査方法なども完全なものではなかったため溶接継手部に重大な欠陥を内蔵しているものが多い。また使用鋼材は昭和13年頃から昭和26年頃までは、いわゆる戦中戦後の鉄鋼統制時代にあたり、かなり粗悪な材質で製作され、規格外の不良品が混入している。従って、この期間に建設された水圧鉄管については特に注意しなければならない。

当社唯一の出力を有する雨竜発電所の水圧鉄管は昭和18年に溶接管として建設された。本発電所は、昭和32年末富士製鉄にホットストリップミルが設置されたため、当社唯一のAFC発電所として重大な任務を担って来た。ミルの急激な繰返し負荷変動に応じて周波数自動制御(AFC)を行なうので、水圧鉄管は大きな繰返し応力を受けることになった。

そこで昭和32年より現在まで実施した本水圧鉄管についての一連の非破壊検査の結果をもって安全性をチェックし、事故を未然に防止するよう努めていたが昭和38年8月全管について取替えおよび補修を行ない、保守運営の万全を計った。

以下、取替え以前に実施した諸調査を述べたあと、その鉄管の更新について概要を述べる。

2. 発 電 所 概 要

最大出力	51,000 kW	水圧鉄管
使用水量	44.2 m ³ /s	用材接合、軟鋼、溶接
有効落差	139.920 m	亘長 本管 250.000 m
		条管 341.523 m
静水頭	137.000 m	条数 上部1条、下部3条
圧力隧道	6765.5 m	内径 3.900~2.250~2.050~1.400 m
水車	堅軸フランシス	管厚 10~32 mm
通水年月	昭和18年10月	

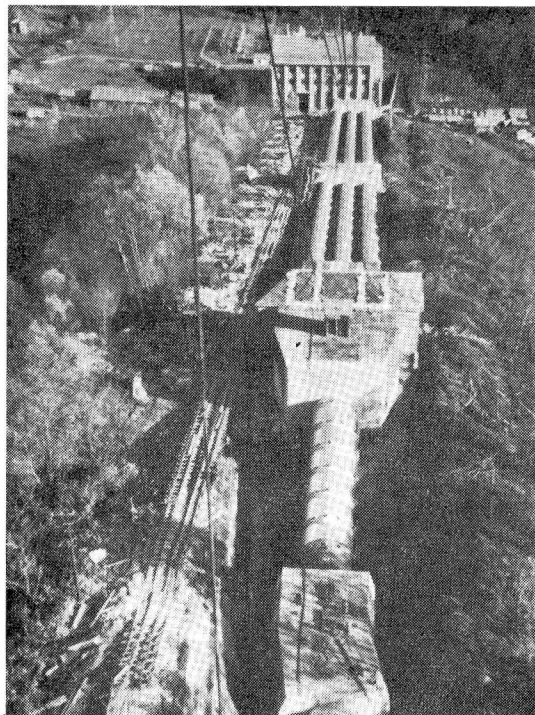


写真-1 サージタンク側より発電所を望む (更新後)

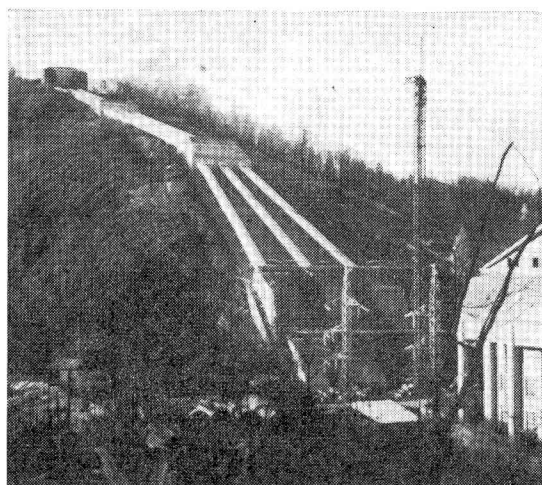


写真-2 発電所側より鉄管路を望む (更新後)

3. 安全度調査の概要

(1) 水圧鉄管の調査概要

1. で述べたような諸条件下において、昭和32年より逐次表-1のような調査試験を実施し、保守運営に万全を期した。

表—1 水圧鉄管の調査ならびに試験

調査年月	調査項目
昭和32年7月	(1) トレパニング・テスト (2) 応力測定 (3) 硬度測定
昭和35年9月	(1) 肉厚測定 (2) 応力測定 (3) 外観検査
昭和36年7月	(1) 切取材料試験 引張試験、曲げ試験、衝撃試験、化学分析試験、金属組織検査、硬度測定等 (2) X線検査 (3) 精密外観検査
昭和37年11月	(1) 疲労試験

(2) 外観検査と腐食量

鉄管の端曲げ不良が目立つ。鉄管外面は塗装がゆきとどき経年の割に腐食量は少ない。内部腐食は図-1に見る如く全般にわたり1~2mmの腐食がある。計算応力としては平均応力で1400 kg/cm²~2000 kg/cm²となっている。



図—1 モデリングのレプリカ

(3) 引張試験

試験片は水圧鉄管より500×500mmの大きさに切り取り、これより各種のテストピースを採取し、諸試験を行った。引張試験は表-2, 3に示す通りである。

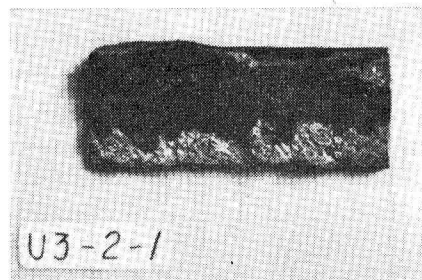
表—2 母材の引張、曲げ試験

試験片番号	板厚(mm)	降伏点(kg/mm ²)	引張強さ(kg/mm ²)	伸び(%)	曲げ試験
U 2-1-1	9.98	27.6	36.3	21	良好
U 2-1-2	10.40	38.8	54.9	13	ラミネーションあり
U 2-3-1	14.22	28.8	47.9	24	良好

試験片番号	板厚(mm)	降伏点(kg/mm ²)	引張強さ(kg/mm ²)	伸び(%)	曲げ試験
U 3-2-1	12.15	24.7	35.5	22	良好
U 3-3-2	14.36	30.9	45.0	21	ラミネーションあり
U 3-5-1	18.20	24.9	38.7	28	折損

表—3 溶接継手部の引張、曲げ試験

試験片番号	引張試験		曲げ試験	
	板厚(mm)	引張強さ(kg/mm ²)	曲げ半径(mm)	結果
U 2-1-1	10.10	38.5	15	67°でクラックが入る
U 2-3-1	14.01	34.9	18	25° "
U 3-1-1	10.08	40.6	15	33° "
U 3-2-1	12.15	23.2	18	39° "
U 3-6-1	21.80	41.3	30	22° "

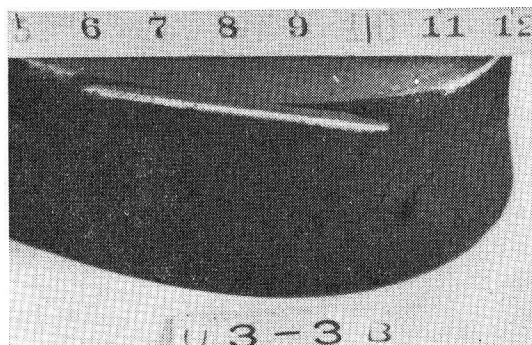


写真—3 溶接継手部の引張試験片の破断面
引張強さ (23.2 kg/mm²)

母材の引張試験によると数多くのラミネーションが見受けられ、良材とはいえない。写真-3に見られるように溶接部の破断面積の60~70%は溶込み不足などの欠陥を有する。

(4) 曲げ試験

母材の曲げは大体良好であるがラミネーションが認められ(写真-4)溶接継手部は表-3の通りわずかな曲げ角度でクラックが溶着金属部に入っている。



写真—4 ラミネーション

(5) シャルピー衝撃試験

衝撃試験片はVノッチシャルピー試験片とし、母材の結

表一4 母材の衝撃試験

試驗片	衝 擊 試 驗 溫 度						T_{rs} (°C)	T_{re} (°C)
	-30°C	0°C	30°C	50°C	80°C	100°C		
A	0.7	1.8	5.8	11.5	13.6	13.3	12	35
B	0.6	0.8	3.9	7.1	9.7	11.7	24	42
C	0.5	1.0	3.1	7.2	11.7	12.4	24	43
D	0.4	1.1	4.2	9.7	14.4	13.8	19	39

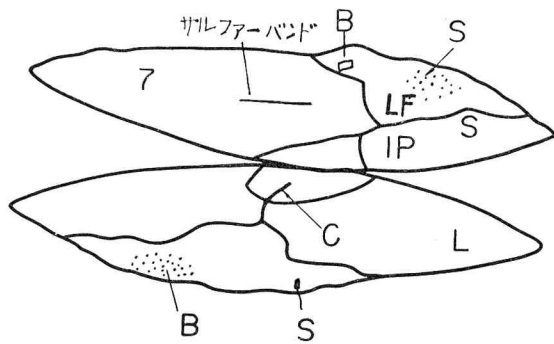
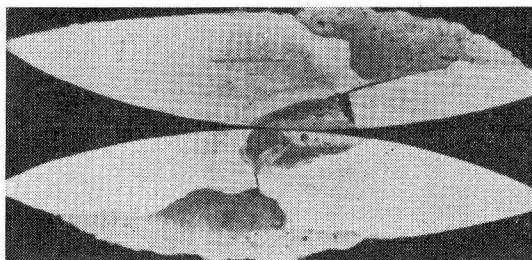
T_{rs} : 衝撃値が 15 ft-lb (2.6 kg-m/cm²) になる温度

T_{re} : 最大衝撃値の 1/2 になる衝撃値の温度

果は表-4に示す通りである。溶接部は溶接欠陥のため、その値は一定していない。母材の T_{rs} は 15.5°C 以上のものもあり脆性破壊の危険性の高いことが分った。

(6) トレパニング・テスト

溶接部は欠陥が著しく溶込み不足に連なってクラックが入っており見掛け上の効率は60%程度しか期待出来ない。



C: クラック LF: 融合不良 B: ブローホール

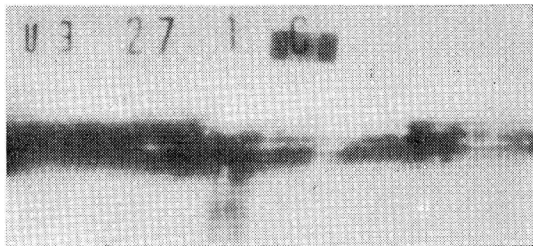
S: スラグ捲込み IP: 溶込み不良

写真—5 トレパニング・テスト

すなわち、(a) 開先突合わせ部は全部溶け込んでいない。(b) 開先部から離れた溶着金属の境界部も融合不足の部分が多い。(c) ブローホール、スラグは無数にあるが不溶着物の占める割合があまりにも大きい。(d) トレンパニング・テスト・ピースにもクラックが見られ、なかには開先部から裏面まで達しているものもあった。

(7) X線検査

溶接継手部のX線判定は溶込み不良，融合不良，ブローホール，スラグ捲込み，アンダーカットなどの欠陥が見ら



写真—6 X 線 写 真

れいいずれも 6 級以下である。(写真-6)

(8) 化学分析その他

化学分析の結果を表-5に示す。サルファープリントの結果によると P, S の偏折すなわちサルファーバンドが認められる。

表—5 化 学 成 分 表

試験片	C	Si	Mn	P	S	Cu	炭素当量
U 2-2	0.29	0.04	0.36	0.113	0.056	0.13	0.39
U 2-3	0.27	0.04	0.36	0.046	0.043	0.13	0.37
U 3-2	0.15	0.05	0.28	0.046	0.036	0.15	0.23
U 3-3	0.25	0.05	0.34	0.041	0.046	0.13	0.35

(9) 応用測定

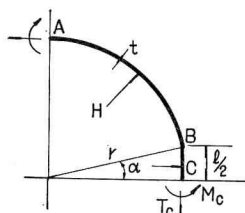
a. 静水頭時の応力

応力測定を行なった位置の静水頭は1号管68m、3号管56mであり、管胴部および溶接継手部の計算値と実測値を表-6に示す。

表—6 水圧鉄管の応力値 (単位: kg/cm^2)

種 別	管 胴 部		溶 接 継 手 部		
	計算値	測定値	計算値	測定値	端 曲 げ 不良長さ
1 号 管	589	195	1987	2036	22 cm
3 号 管	597	600	1422	1411	15 cm

管胴部は Hoop stress を示し、溶接継手部は Hoop stress の他に端曲げ不良により局部的に曲げモーメントが作用し、過大な応力が生じているのでこの増加応力を示している。図-2 に示すような扁平部分を有する 1/4 円環が左右上下で対称であるとして近似解を H : 静水頭, r : 鉄管半径, t わされる。



図一2 端曲げ不良部分

で対称であるとして近似解を求めている。 σ を増加応力,
 H : 静水頭, r : 鉄管半径, t : 管厚とすると, 次の式で表
 わされる。

$$\sigma = \frac{Hr}{t} \left\{ \frac{3}{4} \cdot \frac{t}{r} \left(\frac{l}{t} \right)^2 \left(1 - 0.2 \frac{l}{r} \right) \right\}$$

この端曲げ不良による増加応力はシームの中央部分で最大となり、シームから離れるにつれて次第に小さくなり、円環との結合部ではほとんど零となる。

b. AFC運転時の応力

動応力はミル稼動状態によって左右されるが、稼動している30分間についてオシロによって測定した。ミルの負荷変動により雨竜発電所の出力は変動し、水圧鉄管の応力にも変動を及ぼす。この出力変動値と変動応力値を統計処理し、その結果を図-3に示す。これより出力が ± 3400 kW変動するとき、鉄管の応力は ± 120 kg/cm²の変動を示している。

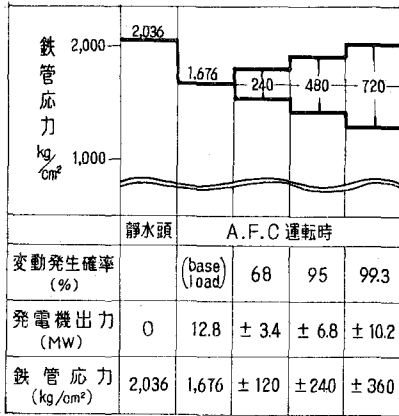


図-3 水圧鉄管の変動応力値

(10) 溶接継手部の疲労試験

a. 鋼の疲労

一般に金属は変動する応力を多数回(時には1千万回以上)作用せしめると破壊する。この現象を疲労または疲労破壊といい、応力振幅 S が静的破壊応力より低くてもまた弾性限以下であっても起る。ある応力振幅以下では無限の繰返しでも破壊しない。この応力振幅を耐久限度、疲労限度、または疲れ限度といい、この耐久限度を求める試験がいわゆる疲労試験である。この試験には繰返し

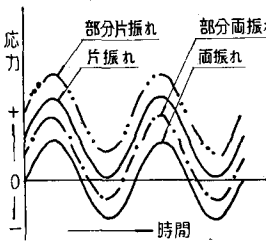


図-4 変動荷重

応力の種類によって引張および曲げ、圧縮、振り、衝撃などがある。この試験に当って、応力の与え方には図-4のような種類がある。雨竜の場合は部分片振れ引張疲労試験とした。

繰返し応力の最大値と最小値の和の1/2を平均応力、差の1/2を応力振幅という。応力振幅 S を縦軸にとり、横軸に試験片が破断するまでの繰返し回数 N をとって、 $S \sim N$ 曲線を表わす。鉄鋼に対して $S \sim \log N$ 曲線は図-5(a)に

示すように2つの直線で表わされ、その交点は 10^6 と 10^7 の間にあることが多い。しかし、一般に溶接継手の場合は横軸に平行な直線部が存在せず、むしろ徐々に低下する曲線とみなす方が適当と考えられる。従って溶接継手の $S \sim N$ 曲線は図-5(b)の如く $\log S \sim \log N$ をもって表わし、 N が 10^7 以上になる応力を耐久限度としている。

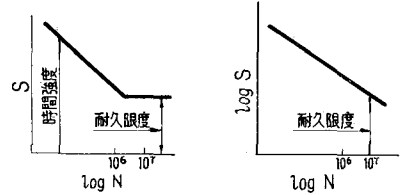


図-5 疲労曲線の表示

普通用いられている構造材料が繰返し応力を受けることにより疲労し、その強度を低下することは周知のとおりである。その概念は図-6

に示す。水路工作物においては応力が両振れの変動を示すことはなく大部分の場合片振れ変動応力範囲に属している。図-6により片振れの場合の強度低下率は1/2の範囲内にある。

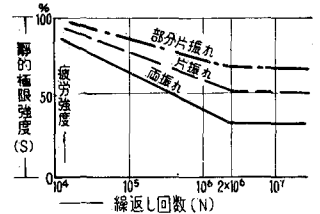


図-6 疲労強度説明図

b. 雨竜発電所水圧鉄管溶接継手部の疲労試験

(i) 溶接継手部に作用する応力

昭和18年建設当時の製作技術が未熟であったため、鉄管は真円ではなく図-2の如く溶接継手部付近は端曲げの過多による扁平部分が生じている。この端曲げ不良および溶接部の欠陥などの影響を受けて局部応力が発生していると考えられる。」

動的応力測定によれば溶接線付近に17 kg/mm²の平均応力が作用している。これにAFC運転に伴う変動応力が加算される訳であるが、この現象をそのまま実験室内において再現することは甚だ困難である。図-7(a)に示す如く動応力時のHoop stressは計算によると5 kg/mm²であり、端曲げ不良のため生ずる曲げ応力は(b')のように12 kg/mm²である。この合成応力は17 kg/mm²である。溶接部には多くの欠陥があるがその1つ溶込み不良部分を図-7(a)のようにだ円形と仮定して、有孔板の二次元弾性問題として取り扱う。引張応力の場合、だ円縁に作用する応力は直線縁の7.5倍にも達し、また曲げ応力の場合も同様に1.2倍の応力が作用している。これを合成すれば図-7(c)の通り、外面(直線縁)では17 kg/mm²であり、内部のだ円縁では50 kg/mm²と降伏点を上廻っている。しかし、

使用材料は軟鋼であるから変形し、力の分担としては平均化されるものと考えられる。

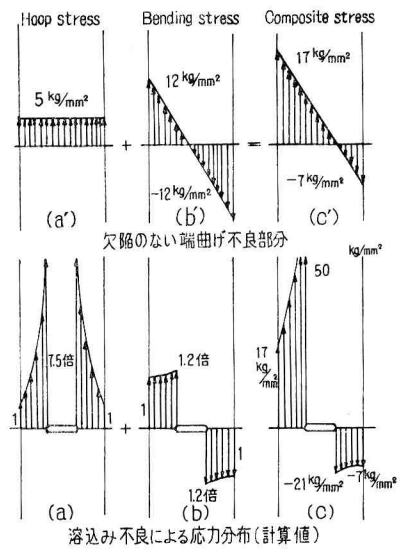


図-7 端曲げ不良部分の応力状態

実際の溶接部には複雑な力が作用しているのであるが、試験に際して変動応力をもっとも単純な引張り応力のみとし、且つ規則的な繰返し応力が作用するものとした。その平均応力は 17 kg/mm² と 12 kg/mm² とし、繰返し応力の振幅を ±2 kg/mm² ~ ±8 kg/mm² の範囲にとって試験を行った。

(ii) 疲労試験結果

疲労試験の結果は表-7 に示す通りである。これを log S ~ log N の形で図示したものが 図-8 である。尚、試験片のマクロ写真 (写真-7) ならびに疲労破断写真-8~9 に認められる如く、疲労試験後の破断面をよく調べてみると、溶込み不良やクラックが見られる。破断箇所は U 2-12 以外はすべて溶接継手部の中心部、すなわち溶接欠陥が多いところであった。U 2-12 は溶着部と熱影響部の境界部分からクラックが入り、母材部分に進行して破断している。境界部に切欠 (アンダーカットと思われる) が存在していた。これは他のものより大きな集中応力を受けたためと推定される。また破断面の片側は疲労破面であり、他方は脆性破面を呈している。本溶接継手は前述の如く継手として

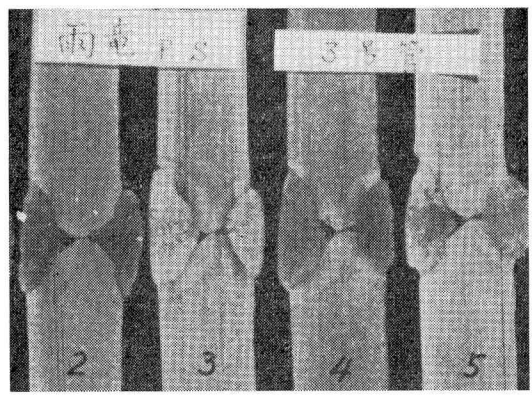


写真-7 疲労試験片マクロ組織

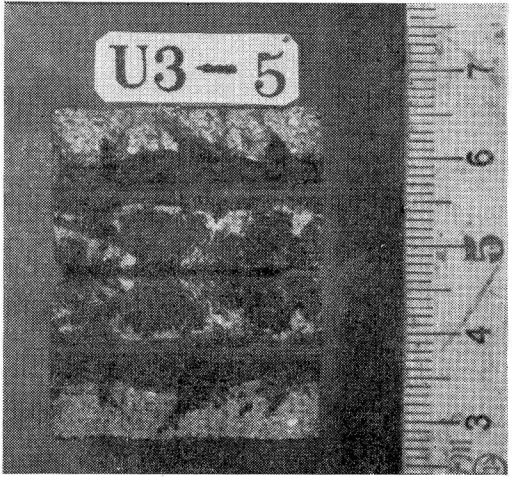


写真-9 U 3-5 疲労破断面

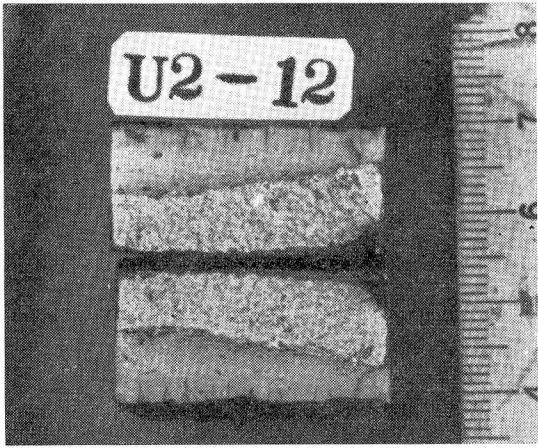


写真-8 U 2-12 疲労破断面

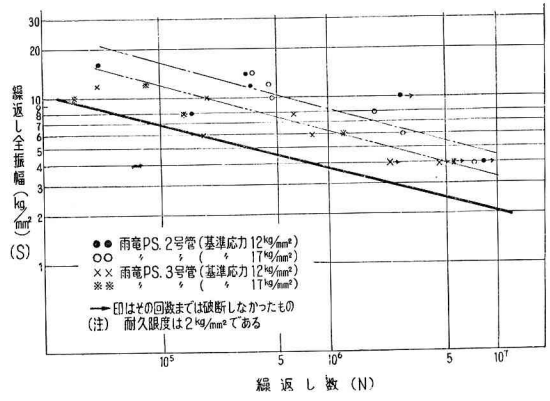


図-8 log S ~ log N 曲線 (試験そのままの状態)

表-7 雨竜発電所水圧鉄管溶接継手の疲労試験結果

試験片番 号	試験片寸法		断面積 mm ²	計画基礎 応力 kg/mm ²	試験荷重		試験応力		繰返し 振 幅 kg/mm ²	σ _{min} /mm ²	破 断 繰返し数	破断位置
	厚 さ mm	幅 mm			上限 ton	下限 ton	上限 kg/mm ²	下限 kg/mm ²				
U2-1	13.72	30.5	418.46	12±6	7.5	2.5	1.80	6.0	12.0	0.333	438,850	溶接継手中 心部
U2-2	13.70	31.0	424.7	12±4	6.8	3.4	16.0	8.0	8.0	0.50	157,240	〃
U2-3	13.92	30.7	427.34	12±2	6.0	4.3	14.0	10.0	4.0	0.714	8,537,550	破 断 せ ず
U2-4	13.86	31.0	429.66	12±5	7.6	3.1	17.0	7.0	10.0	0.411	2,800,000	〃
U2-5	14.10	30.5	430.05	12±7	8.2	2.2	19.0	5.0	14.0	0.263	327,530	溶接継手中 心部
U2-6	13.10	31.0	427.8	12±8	8.6	1.7	20.0	4.0	16.0	0.2	43,450	〃
U2-7	14.0	30.8	431.2	17±6	9.9	4.8	23.0	11.0	12.0	0.478	457,550	〃
U2-8	13.8	31.0	427.8	17±4	9.0	5.6	21.0	13.0	8.0	0.619	1,965,540	〃
U2-9	14.0	30.6	428.4	17±3	8.6	6.0	20.0	14.0	6.0	0.70	2,816,260	〃
U2-10	14.0	31.0	434.0	17±2	8.3	6.5	19.0	15.0	4.0	0.789	7,672,350	破 断 せ ず
U2-11	14.5	30.6	443.7	17±5	9.8	5.3	22.0	12.0	10.0	0.545	462,890	溶接継手中 心部
△U2-12	14.0	30.5	427.0	17±7	10.3	4.3	24.0	10.0	14.0	0.416	336,640	溶接熱影響部 より破断
U3-1	13.2	30.6	403.92	12±6	7.3	2.4	18.0	6.0	12.0	0.33	43,400	溶接継手中 心部
U3-2	13.4	31.0	415.4	12±3	6.2	3.7	15.0	9.0	6.0	0.61	819,950	〃
※U3-3	13.4	30.6	410.04	12±5	7.0	2.9	17.0	7.0	10.0	0.411	192,260	〃
U3-4	13.5	30.6	423.1	12±4	6.8	3.4	16.0	8.0	8.0	0.50	645,550	〃
※U3-5	13.3	30.8	409.64	12±3	6.1	3.7	15.0	9.0	6.0	0.60	188,800	〃
※U3-6	13.4	31.0	415.4	12±2	5.8	4.2	14.0	10.0	4.0	0.714	2,383,410	〃
※U3-7	13.5	31.2	421.2	12±2	5.9	4.2	14.0	10.0	4.0	0.714	4,675,760	〃
U3-8	13.5	30.6	423.1	17±4	8.9	5.5	21.0	13.0	8.0	0.619	142,530	〃
U3-9	13.0	30.8	400.4	17±3	8.0	5.6	20.0	14.0	6.0	0.70	1,222,810	〃
U3-10	13.5	31.0	418.5	17±5	9.2	5.0	22.0	12.0	10.0	0.545	31,700	〃
U3-11	13.2	31.0	409.2	17±2	7.8	6.1	19.0	15.0	4.0	0.789	5,738,360	破 断 せ ず
U3-12	13.2	31.0	409.2	17±6	9.4	4.5	23.0	11.0	12.0	0.478	83,170	溶接継手中 心部

注) ① 試験の方法は 12.17 kg/mm² を基準とした部分片振引張応力とした。

② 試験機の繰返し回転数はすべて 666 回/分した。

③ ※ 試験片の溶接継手部にクラックが入っていたもの。

④ △ 溶接継手の溶接熱影響部より破断したもの。

は最悪なものであるが一応繰返し全振巾をパラメーターにして疲労曲線を描くことが出来た。これによると疲労強度としてはかなり低い値であった。これは不溶着部分が多く溶接効率も 60% 前後のものがあ、また試験片中 4 本はクラックが深く進行しているものもあった。

図-8に見る如く我々は一般的な疲労強度を取り上げている訳ではなく、雨竜発電所の水圧鉄管の安全度を問題にしているのであるから疲労曲線は平均値ではなく最下限に引かなければならない。これによると耐久限度は 2 kg/mm² になる。すなわち平均応力 12, 17 kg/mm² で繰返し応力振幅は ±1 kg/mm² と云う低い値となっている。ミルの稼働を考えると、±1 kg/mm² 以上の変動応力は 1 回ごとに水圧鉄管の寿命を縮めているといわなければならない。

(11) 調査結果の総括

(a) 溶接継手は全線にわたって著しい溶込み不良などがあり、それにつらなって大きなクラックが存在している。これら数多くの欠陥が脆性破壊の始端となり得る箇所がいたる所に存在する。特にクラックは危険と考える。

(b) 母材は引張強さおよび伸びのバラツキが大きく、特に靱性を欠いているので万一「クラック」が進展し始めたならば、それを止める力はない。

(c) 静応力は溶接付近に 1400 kg/cm²~2000 kg/cm² の応力が作用している。動応力の平均応力は 1700 kg/cm² 程度である。いずれも母材の許容応力 970 kg/cm² (SSOO 相当材) を大きく上廻っている。更に AFC 運転時の動応力の場合、耐久限度は ±100 kg/cm² である。すなわち、±100 kg/cm² 以上の変動応力は 1 回ごとと寿命を刻んでいることになる。

以上、調査試験の成果を述べたが、要は日常のためまざる保守点検と相まって、科学的な調査を推進し、本水圧鉄管の実態を把握するとともに、保守に万全を計ることにあった。

4. 水圧鉄管改修工事

上記調査結果にもとづき、当初は全管取替えが考えられたが、発電所の長期停止と経費の増大から、コンクリート埋設部の鉄管は取替えず、溶接線のうち縦継手全体に鉄管の板厚とほぼ同様の当板を行ない、当板と鉄管とを隅肉溶接し、鉄管の旧溶接継手を補強する。またコンクリート埋設部(隧道鉄管、固定台埋設管、地下埋設管)以外の鉄管は全部取替えることになった。

鉄管の更新長は、鉄管全長 591.523 m のうち 278.300 m である。残置管については、現場において「モデルテスト」を行ない、工期の関係もあって当板を採用し、昭和 38 年 11 月末日竣工した。

参 考 文 献

- 横 堀 武 夫 材料強度学, 149 (昭34) 技報堂
山 田 良之助 材料試験法, 213 (昭34) 内田老鶴圃
日本鉄鋼協会 鋼材の性質と試験, 41. 97. 258. (昭34) 地人書館
熔 接 学 会 熔接便覧 702 (昭36) 丸善
発電水力協会 第 3 回発電水力講習会テキスト 11. 59. (昭36)
水圧鉄管調査要領委員会 水圧鉄管調査要領 (昭35)
北海道電力土木部 第 10 回土木技術研究発表会資料 73. (昭38)
電力中央研究所 雨竜発電所水圧鉄管調査報告書 (報告書番号: II 構 6210) (昭38)
北海道電力技術研究所 雨竜発電所水圧鉄管応力調査報告 (研究報告第48号) (昭36)
石川島播磨重工業技術研究所 雨竜発電所水圧鉄管溶接継手部の疲労試験報告 (昭37)
酒井鉄工所 雨竜発電所水圧鉄管切取調査工事報告 (昭36)
北海道電力土木部 雨竜発電所水圧鉄管安全度計算書 (昭35)