

ペンストックの腐蝕度と強度の問題

新三菱重工業KK
神戸造船所研究部*

栄 幸 雄

1. はし が き

水力発電所 Penstock においても最近溶接鋼管が大部分を占めるようになってきたが、大径管の圧力容器である上、相当苛酷な腐蝕条件下にあり、しかも負荷変動にともなう水衝撃作用をこうむるので、一種の腐蝕疲労的破壊を生ずる場合もあるので、水圧鉄管の設計・施工および防蝕上の諸点に慎重な考慮を払う必要がある。

本稿では水圧鉄管の腐蝕について一般的事項を概説し、ついで筆者が経験した一、二の調査事例に基づいて素材の腐蝕率とこれが水圧鉄管強度に及ぼす影響について記述し、あわせて腐蝕疲労試験の結果等を紹介したいと考える。

2. 水圧鉄管の腐蝕の様相

2-1 内面の腐蝕

ペンストック内面の腐蝕は、形態的には①さび瘤および pitting (点蝕) ②全面腐蝕 ③摩耗 ④疲労亀裂に別れるが、簡単な事例と共に原因別に略述すると下記のようなである。

(1) さび瘤および点蝕

水圧鉄管および送水管等の内部に見られる特異な現象で、写真1に見るような瘤状さびが密生し、そのさびを除去した跡は点蝕となっているのが一般である。この成因については鉄バクテリアによるものともされるが、他方電気化学的に酸素濃淡電池生成による点蝕と考えられる面も多い。写真2はさび瘤下の点蝕の顕微鏡組織の一例である。

(2) 全面腐蝕

全体的に肉厚減りを生ずる腐蝕で水中の溶存酸素、水温、水質 (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_2 , etc.) に左右されるところが多い。

(3) 流速によるエロージョン

(4) 砂摩耗 (Sand Erosion)

土砂混入分の多い場合、前記の流速とも相俟って摩耗によるエロージョンを生ずる。ペンストックの底部は多

かれ少なかれこの現象を呈しており屢々底部のみが恰かも研摩されたようになっていたり、肉厚減り最大である。

(5) 腐蝕疲労

負荷変動による水衝撃の繰返し応力をうけ腐蝕疲労を生ずることがあり、水圧鉄管の耐久上重要な問題となっている。

(6) その他鉄管材質に起因する腐蝕、加工組立時の残留応力による腐蝕なども考慮する必要がある。

2-2 外部腐蝕

管外面の腐蝕を分類すると次のようになる。

(1) スエッティングと大気曝露による乾湿交番腐蝕
いわゆる“汗をかく”と称しているが、鉄管内部の流

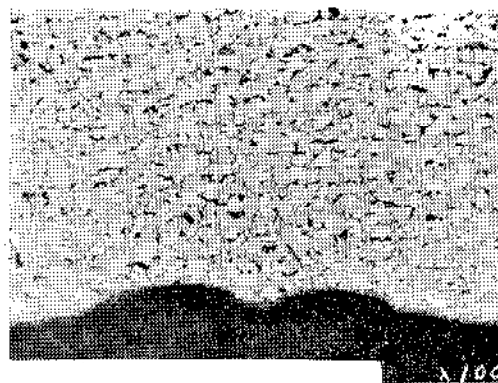
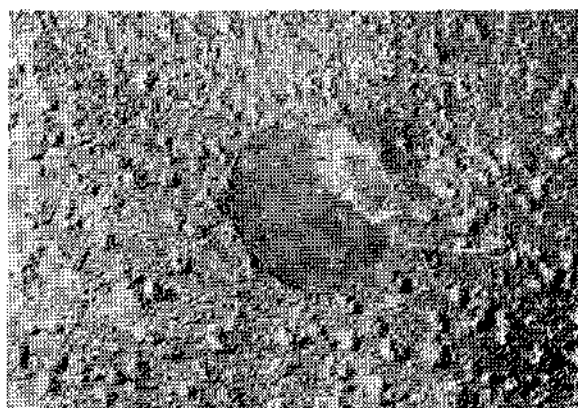


写真1 水圧鉄管内面のさび瘤

(注) 中央の黒い円部は肉厚測定時にさび落しを行った処。

写真2 さび瘤の下点蝕

*神戸市兵庫区和田岬三の三

水温度と外気との温度差により管表面に凝滴を結び、次いで太陽直射により乾燥する等の乾湿交番作用により腐蝕が加速される。またこの現象は外面の防腐塗膜に著しい悪影響を与え、塗膜のふくれ、亀裂、劣化の原因となる。

(2) 塩 分

海岸に近い場所では塩分を含有する大気により甚しく腐蝕度が大きくなり、とくに点蝕の誘因となる。

(3) 工場排ガス、塵灰、降雨

工場地帯、精鉱精練所に隣接した処では、工場排ガス、塵灰類中の腐蝕成分により思わぬ腐蝕をうける他、降雨すらも酸性（一例では PH 4.5）を呈しているなどのこともある。

写真3、4は某水圧鉄管外面の腐蝕状況の例である。

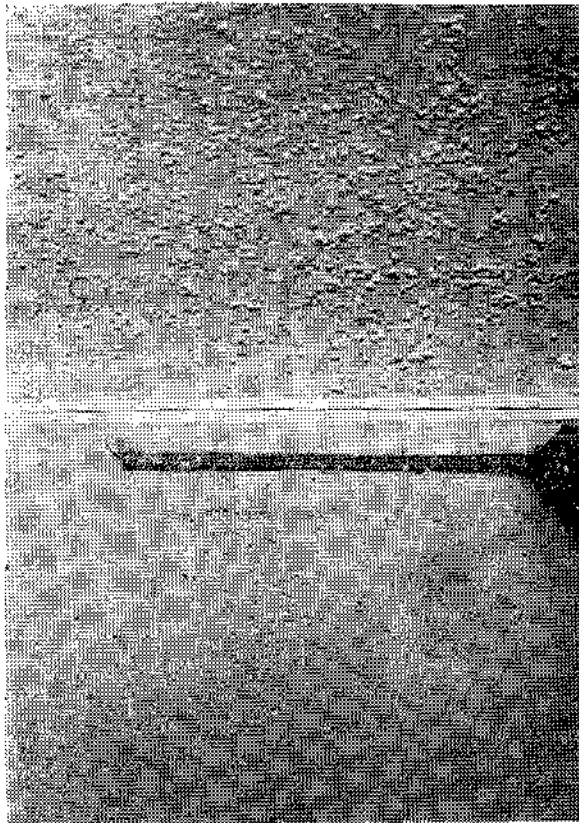
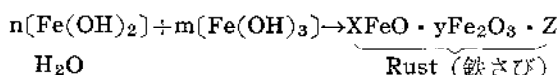
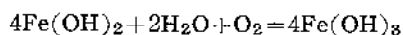
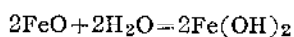
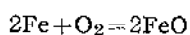


写真3 水圧鉄管外面の孔蝕

写真4 同材料偏析部に生じた層状腐蝕

2-3 水圧鉄管に生ずるさびの性状

一般に鉄さびは下式の様な反応で酸化第一鉄および酸化第二鉄より成る Rust を構成する。



上記の x, y, z の比率は鋼材のおかれる環境によつて

異なるもので第1表に各種の鉄鋼材のさび組成、第2表に筆者が調査した二、三の水圧鉄管におけるさび組成の分析例を示したが一般には Fe_2O_3 が大部分で FeO は5～10%の場合が多い。

第1表 種々の鉄鋼材における鉄さびの組成

	X	y	z
鑄鉄管	3 FeO	10 Fe_2O_3	8 H_2O
橋梁	1	17	20
鋼管	2	6	5
水槽鋼板	1	5	10
SO_2 鋼装ポンベ	1	37	2
大気中の鉄さび	1	15	—
蒸気罐水管	1	10	13

第2表 水圧鉄管さび組成の分析例 (%)

	Ig. Loss	FeO	Fe_2O_3	SiO_2 (砂利)	SO_4	錆組成
水圧鉄管 A	8.5	11.0	72.0	5.2		$\text{FeO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
" B	13.0	7.0	61.1	9.1	3.3	$\text{FeO} \cdot 9\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
" C	22.3	5.4	64.3	4.2	5.5	$\text{FeO} \cdot 12\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

3. 腐蝕状況の実際

これらのさまざまな因子による水圧鉄管の腐蝕度の評価は、超音波厚み計、電気抵抗法などによる板厚測定を主とし、これに石膏型どり、表面どり、表面転写法などによる点蝕分布の解析をも加えて出来得る限りの確な現存肉厚を求めることを第一主点とし、更に要すれば Strain Gage 法により各条件下での応力測定を行ない強度上の見地からの評価を加えるのが一般である。

第3表に電力中央研究所で過去10余年に亘り各地の水圧鉄管について肉厚測定を実施された結果を中心とし、これに当所で実地に調査した事例を加えて腐蝕度の概括を試みだが、平均腐蝕量のみで見れば年間0.01～0.02 mmが一般で肉厚減りでは比較的問題が少ないようであるが、前述したようにペンストックと特異性として点蝕などの局部腐蝕が顕著であるので最大腐蝕量（ここでは平均腐蝕量+3σの値をとつた）の値で見ると年間0.1 mm近くに達し、これらの局部腐蝕箇所での応力集中効果をも考え併せると孔蝕の測定評価は耐久度の判定上重要な要素と考えられる。

尚同表で示した各数値のもとである個々の測定値を整理の上、平均腐蝕量、標準偏差、頻度曲線等を求めて見たところ、いずれの水圧鉄管においても測定数の少ない一、二の場合を除いて一応正規分布を示し、3σ管理限

第 3 表 各 水 圧 鉄 管 の 腐 蝕 度

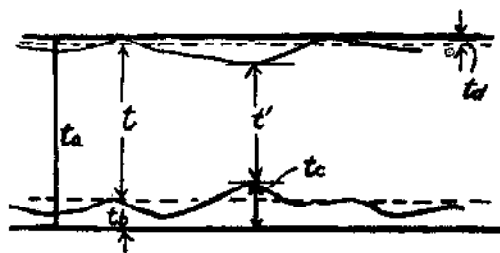
発電所名	経 年	管数	測定値数	平 均 腐蝕量	標準偏差	3 σ 腐蝕量	最大腐蝕 量(平均 +3 σ)	測定法	備 考
※TT	38年	1	208	0.767	0.587	1.761	2.528	超音波	
TS	26	1	81	0.138	0.607	1.821	1.959	"	強度問題なし
SJ	32	4	107	0.634	0.564	1.692	2.326	"	要 修 理
UJ	—	6	185	0.646	0.448	1.344	1.990	"	"
NG	50	3	38	1.18	0.376	1.128	2.308	"	" 応力許容範囲にあり
OS	29	1	64	0.278	0.371	1.113	1.391	"	強度問題なし
KS	29	2	51	0.233	0.365	1.095	1.328	"	"
TN	23	1	19	0	0.358	1.074	1.074	"	" 原厚より大なる測定 値多いため0となる
KN No.1	28	1	95	0.735	0.811	2.433	3.168	磁 気	修 理 施 行
" No.2	"	1	89	0.119	0.686	2.058	2.177	"	要 修 理
" No.3	"	1	91	0.202	0.791	2.373	2.575	"	"
OK	30	1	3					超音波	殆んど測定不能
※NF-2	16	4	52	0.42	0.651	1.953	2.37	"	強度上は問題なし

〔注〕 ※印…当所測定値

他は 電力中央研究所調査結果により整理したもの。

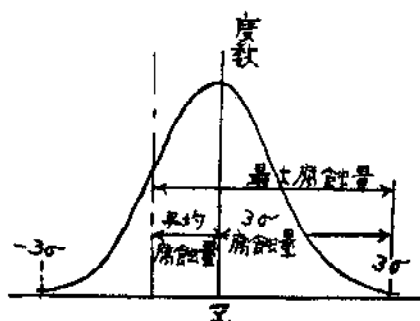
界を外れる確率は僅か0.27%以下であつたので、同表において局部最大腐蝕量を $\bar{x} + 3\sigma$ と設定した次第である。この値は実際に局部孔蝕の深さを個々に測定して見た値とも良く一致している。

即ち超音波厚み計等を用いて肉厚を測定する場合は、第1図に示すように比較的表面凹凸の少ない箇所(t)

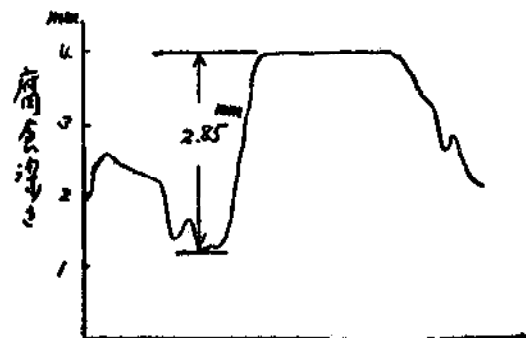


第1図 腐蝕度と測定値の関係

(注) ta……原 厚 tb……平均腐蝕量
tc……局部腐蝕量 td……表面腐蝕量
t ……平均肉厚 t'……最小肉厚



第2図 肉厚測定値の分布と最大腐蝕量の設定



第3図 石膏型による水圧鉄管内面腐蝕

の肉厚しか測れないので(表面凹凸1.5mm以上では共振波が求められない)局部的に大きい腐蝕量を示す箇所の推定値として $\bar{x} + 3\sigma$ の値を採用したものである。第2図は上記の関係を示す。また石膏型で転写したこの種局部腐蝕部の凹凸波形の一例を第3図に掲げた。

なお、この腐蝕度の評価に際し常に問題となるのは原厚の設定であつて、鋼板の性質上板厚許容誤差もあり原厚が区々である憾みがあり、一応設計原厚を目安として考えざるを得ないが時として全く矛盾した結果を示す場合もあり、測定値を設計原厚に当てはめると却つて肉厚増を来してくる結果ともなり得るので、このような場合は適切な原厚を仮定する必要もある。

もつとも望ましいのは建設当初に予め測定点を設定して鉄管各部の板厚を測定しておき、爾後の経年変化測定時の基準値とすることであるが、実際問題としてはこの

第4表 調査水圧鉄管の要目

条 数	4 条
総 延 長	第1条, 第4条……各 354.485m 第2条, 第3条……各 348.144m
最 大 静 水 頭	85.563m
標 準 水 頭	77.187m
設 計 水 圧	10.034kg/cm ²
鋼 管 径	3,500 × ~3,200~3,050~2,900~2,300m (外側鋼管内径で示す)
肉 厚	9~10~12~14~16~19mm
接 合	鋸 接
最 大 使 用 水 量	75.0m ³ /sec
平 均 通 水 量	60~65m ³ /sec
平 均 流 速	2.3m/sec
建 設	昭和16年(当所納入)
使 用 期 間	昭和17~33年 約16ヶ年

種の計画的な計測はなかなか行なわれ難い状況である。

以上が水圧鉄管の実腐蝕度の概要であるが、次に筆者が某発電所の水圧鉄管について最近実測を行ない、管の3箇所より材料試験用の Panel を切りとり 静的強度の変化、腐蝕疲労度等を測定し、腐蝕が材料強度に及ぼす影響について調査した結果を報告する。

4. 調査水圧鉄管の要目と腐蝕度の概要

調査水圧鉄管(前掲第3表の NF-2)の要目は第4表に示すようで発電出力 47,000kw の発電所用 ペンストックで建設後16年を経過している。肉厚測定は超音波厚み計で52点につき測定したがこれらの測定値より求めた腐蝕度は下記のようにあつた。

平均腐蝕量	0.42mm
標準偏差	0.651
3 σ 腐蝕量	1.953
最大腐蝕量	2.37

この他に石膏転写等により孔蝕深さ、分布を調べたが一例として No. 8 Ring (水圧鉄管下端より8番目の Ring) では Pitting 深さ…1.9mm, pit の占める面積…全体の40%であり、孔蝕深さ 1.9mm に平均腐蝕量 0.42mm を加算すると上記と $x+3\sigma$ の最大腐蝕量の値とよく一致した値となつた。その他の Ring についてもほぼ同様の傾向であつた。

5. 実管よりの採取試料と試験項目

実管より材料試験用パネルを切りとるに当り、各パネル共管の円周方向(即ち板の圧延方向)に350mm, 軸方向に300mmの寸法で採取し、爾後の材料試験もすべて円周方向に Test Piece を採つて実施することとした。採取リングは下部水平部(板厚16mm)より比較的腐蝕甚しい管より1ヶ所(A材とする)、比較的健全なリングより1ヶ所(B材)とし、ついで板厚9mmの上部水平部のリングより1ヶ所(C材)の計3ヶ所とし、これらの切取部はそれぞれ当板補修を施した。

採取試料の調査項目は下記のようなのである

(1) 材質調査一般

マクロ組織, サルファプリント, 顕微鏡組織, 化学分析等を行つた。これらの結果については特記すべき事項はないので省略する。

(2) 静的強度の変化

引張及び曲げ試験を、表面仕上した場合と腐蝕凹凸(孔蝕を含む)のある粗面のままとの両方の状態について行ない、腐蝕切欠の影響を検討した。写真5は採取パネルのうち比較的腐蝕の大であつたパネル(16mm厚)よりの試料採取要領

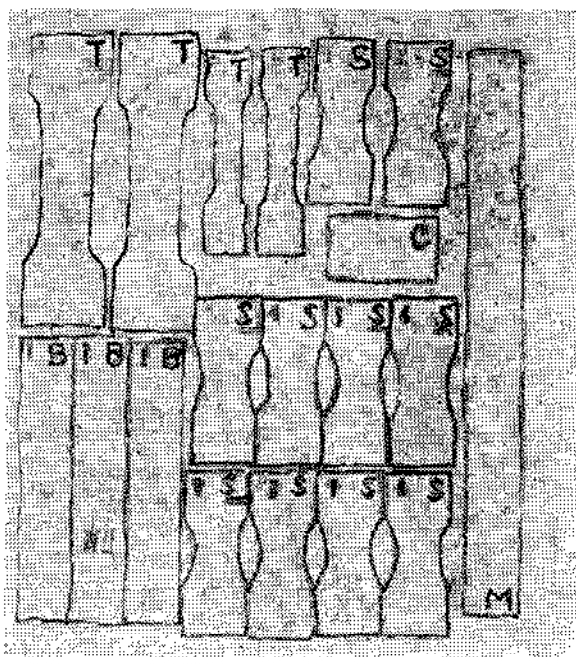


写真5 採取パネルよりの試験片採取要領〔A材〕

(注) T: 引張試験所(4ヶ) B: 曲げ試験片(3ヶ) S: シェンク曲げ疲労試験片(10ヶ) C: 腐蝕試験用 M: マクロ及びサルファプリント用

を示す。

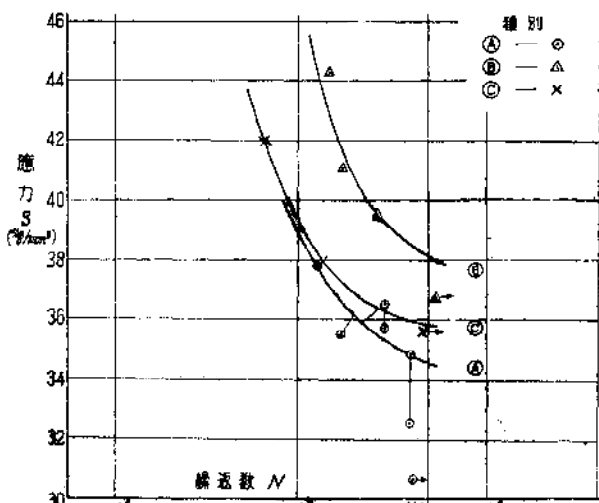
(3) 腐蝕疲労試験（シェンク式曲げ疲労）

腐蝕孔のある粗面のまま、及び表面仕上のものについて水道水中での腐蝕疲労試験を行ない疲労強度の低下率を検討した。

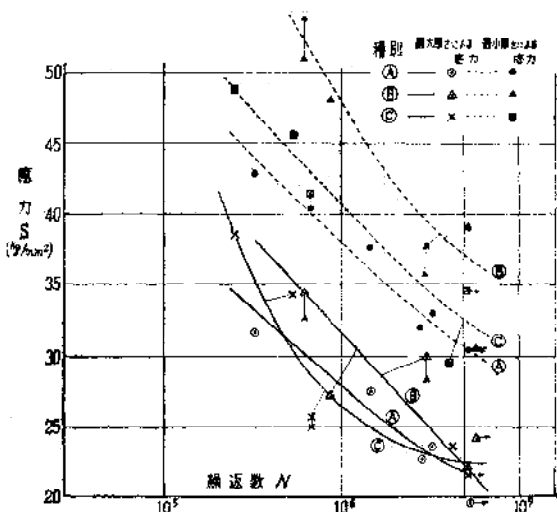
6. 試験結果

6-1 静的強度の変化

詳細データは紙面の都合上割愛するが、引張試験の結果では腐蝕粗面のままの Test Piece では絞り率が若干低下したのがあった他は、引張強さ、降伏点、伸びとも表面仕上せるものと大差はなく、とくに腐蝕孔底部での肉厚を piece の厚さとして計算すると全く差がなく、この程度の腐蝕ではとくに腐蝕による脆化層、Crack の如きものは認められず腐蝕孔の深さだけ断面減少を来すことによる影響のみと考えて良いことが判った。曲げ試験においても1本のみが内側曲げで Hair Crack を発生し



第 4 図



第 5 図

たが180度曲げ、曲げ半径1.5tこれは材質的にも伸少なく硬い材料であり、他はすべて異常のない点から、一概に内面腐蝕の影響であるとは断定出来なかった。

6-2 腐蝕疲労強度

シェンク式曲げ疲労試験機(3,600r.p.m.)により繰返数 5×10^6 まで行なせた結果は第4図、第5図のようで、第5図中破線で示したように腐蝕孔底での最小厚さで考えた場合は仕上時と比してごく僅か低い疲労強度を示し、かつ夫々の管の順位は仕上時と同じであつた。処が腐蝕

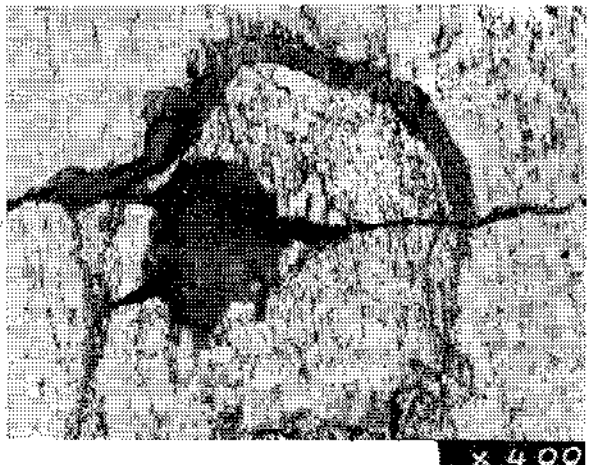


写真6 腐蝕疲労亀裂の一例
シェンク式曲げ腐蝕疲労、繰返数：200万回後の状況 (no etch)
(以下14頁に続く)

(33頁より)

孔を含め最大肉厚で考えた場合はA, B, C 3管共殆んど同一の値に接近した低い値を示し、腐蝕切欠の影響を示している。

なお、この種構造物の腐蝕疲労度の検査法として管内面の Hair Crack の有無を調査する方法が挙げられているが、これに対する裏づけとして本試験における Test Piece の腐蝕疲労度と Hair Crack の発生進展について各繰返数で追跡した結果を紹介すると、材質により Hair Crack 発生を見る繰返数には相違があるが、いずれも孔蝕底に Crack の発生を見、繰返数の増大と共に進展してゆくのが見られた。写真6はその一例を示す。

問題は上記のような Hair Crack の発生時期と腐蝕疲労限との関係であるが、この点についてはわれわれの実験では試料数も少なく断定的なことは擧めなかつたが、東大生産技術研究所北川氏の研究によると、腐蝕疲労寿命の20%以内の比較的初期に Hair Crack の発生があるようである。

7. 腐食量と計算強度

以上、水圧鉄管のような腐蝕形態では静的強度に与える影響は少なく孔蝕底での板厚で考えただけの強度低下を来すと見做して良いようであるが、腐蝕疲労のような繰返応力に対しては若干切欠効果を表わすことが認められた。

上記の事実を考慮に入れて本水圧鉄管の強度計算を行なうと下記のようなようである。

原 厚	ta	16mm
平均腐蝕量	tb	0.42mm
局部最大腐蝕量	tc	2.37mm

平均厚 $t = ta - tb$ 15.58mm

局部最小厚 $t' = ta - tc$ 13.63mm

より下式で応力計算を行なつた。

平均応力 $\sigma = \frac{ZD}{2qt}$ (kg/cm²)

局部最大応力 $\sigma' = \sigma' \times \frac{3}{1+2t'/t}$ (kg/cm²)

但し Z = 最大水頭 = 静水頭 + 水衝圧 = 95.2m

D = 内径 = 2900mm

q = 鈑接効率 = 85%

これより

原厚 (16mm) に対する平均応力 $\sigma = 1015 \text{ kg/cm}^2$

平均板厚に対する " $\sigma = 1042$ "

局部最小厚に対する " $\sigma' = 1137$ "

となり、一般に水圧鉄管の許容応力にとられて 1200 kg/cm² 以下の値となり、該ペンストックに関しては最大腐蝕箇所を考えても一応強度上の差し当たつての不安はないということがいえる。

8. むすび

以上各節に亘つて水圧鉄管の腐蝕の概況について述べると共に、筆者の調査した管について腐蝕と強度との関係について種々の角度から検討した結果を報告した。

上述したようにこの種の腐蝕にあつては、内面、外面それぞれ複雑な腐蝕因子が作用し、かつ使用条件、水質その他によつて著しく腐蝕度を異にするので、これが耐久度の検討に当つては肉厚測定を初めとする多角的な調査を必要とするもので、この点実体の材料試験による筆者の拙い調査結果が何らかの参考となれば幸甚と存する次第である。