

I-74

鋼材の腐食・孔食が強度特性に与える影響に関する研究

北海道電力(株) 正員 氏家 禎男

北海道電力(株) 正員 神藤 謙一

1. まえがき

北海道電力(株)は、道内に24箇所の発電用ダムを有しており、うち洪水吐ゲートを有するダムは15箇所に及ぶ。なかでも、十勝川水系十勝川中流に位置する岩松ダムは、昭和17年に完成し現在も年間3カ月以上の放流を行なっている。岩松ダムゲート(図-1参照)は、経年劣化および腐食等による老朽化が著しく、昭和42年から計6回にわたる安全度調査をもとに、当社『ゲート維持管理マニュアル』、(財)電力中央研究所『鋼構造物診断マニュアル』による改修要否判定の結果、平成7年度より取替工事を行なうこととした。なお、取替工事は非洪水期間(11月～3月)のみ実施し、平成10年度末までに全ゲート(7門)の取替を完了する予定である。

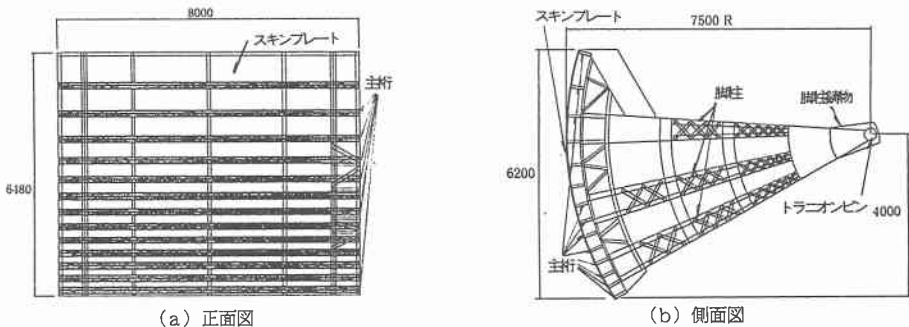


図-1 岩松ダムゲート外観

当社は、水力発電所土木工作物のうち、特に重要度の高いダム・導水路・水圧鉄管・ゲートについて前述のとおり『維持管理マニュアル』を制定し、定期的な点検・調査結果に基づく応力算定等の定量的評価をもとに維持管理を行なっているが、ダムゲート等は取替に至った事例が少ないため腐食・孔食の著しい部材の応力評価、取替判定基準等に課題が残されている。

本研究は、取替工事により発生した既設ゲートの各部材を利用して腐食・孔食が鋼材の強度特性に与える影響を把握するとともに、『ゲート維持管理マニュアル』の見直しを行うための基礎資料とするものである。

本報は、外観調査、材料試験ならびに強度試験結果を通しこれまでに得られた知見について述べるものであり、図-2に全体の流れを示す。

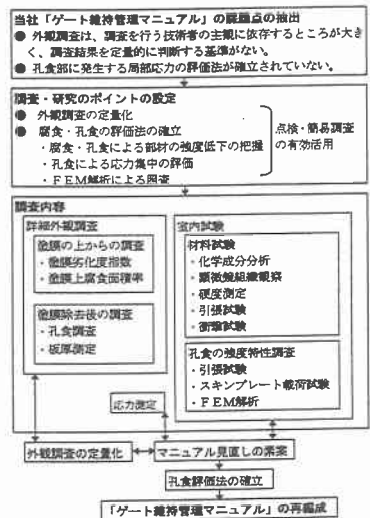


図-2 調査・研究フロー

Study on Quality of Strength about Corrosion on Steel

by Kennichi KANDO and Tadao UJIE

2. 外観調査

外観調査は、主桁、脚柱およびスキンプレートについて、ゲート1門当たり320箇所において実施した。外観調査項目は表-1に示すとおりであり、塗膜の上からは塗膜劣化度指数と腐食面積率（一定範囲における腐食発生部分の面積率）を、塗膜除去後には腐食面積率と最大孔食深さを調査した。調査範囲は、スキンプレートなどの鋼板では1箇所当たり20cm×20cmの範囲とし、脚柱などの型钢については1箇所当たり延長30cmとした。

調査結果から、以下のことが確認された。

①主桁およびスキンプレート部では、溜り水や放流水の飛散の影響を強く受ける扉体下部ほど塗膜の劣化度が大きく、塗膜の上から明確に孔食が認識できるほど、腐食が激しい。

②主桁と脚柱の接合部では、メンテナンスが困難なため、扉体中央部分に比べ、各調査項目とも大きな値を示しており、塗膜の劣化・腐食とも進行している。

③スキンプレート背面における塗膜劣化度指数、腐食面積率および最大孔食深さを、上・中・下段ごとに整理した結果を図-3に示す。塗膜の上から判定した塗膜劣化度指数は、上・中・下段でそれほど大きな差が生じなかったが、塗膜除去後に実施した腐食面積率と最大孔食深さについては、下段ほど腐食が著しかった。これは、腐食の発生時期と再塗装時期にバラツキがあるためと考えられ、塗膜劣化度指数が小さくても腐食が進行している箇所が多く見られた。

表-1 外観調査項目

調査項目	単位	調査内容
塗膜劣化度指数		『水門鉄管塗装状態設計の合理的手法の開発：東電調技小委：平成3年12月』を参照
塗膜上腐食面積率	(%)	塗膜の上から20cm×20cmの範囲で目視により平面的な腐食度合いを評価した。
腐食面積率	(%)	塗膜除去後に20cm×20cmの範囲で目視により平面的な腐食度合いを評価した。
最大孔食深さ	(mm)	塗膜除去後に20cm×20cmの範囲でデプスゲージにより最大孔食深さを測定した。

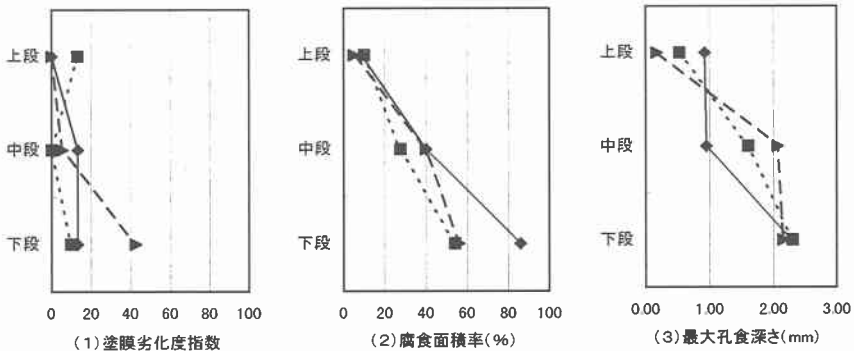


図-3 スキンプレート背面における塗膜劣化度指数、腐食面積率、最大孔食

④塗膜の除去前後の腐食面積率については、孔食深さが1.0mm未満では、塗膜の上から腐食状態を把握することが困難であったが、孔食の深さが1.0mm以上の腐食箇所については、図-4に示すとおり、弱い相関があった。このことから、日常の点検や外観調査で腐食を判断する場合、深さが1.0mm以上の孔食発生箇所であれば、塗膜の上から腐食の程度を概ね把握することが可能であると言える。

⑤引張試験の試験片を用いて、重量法による平均

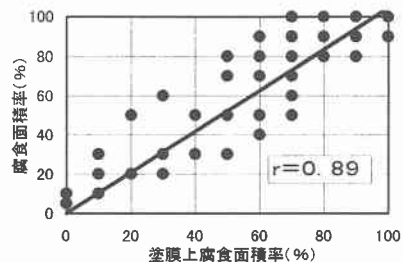
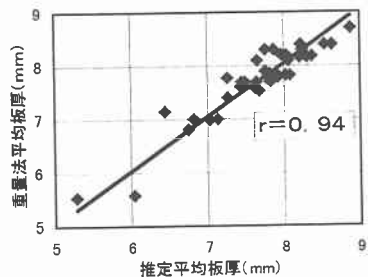


図-4 塗膜の除去前後の腐食面積率

板厚と、最大孔食深さから推定した平均板厚
 $(t_{ave} = \text{最大板厚} - 2/3 \times \text{腐食面積率} \times \text{最大孔食深さ})$ との関係を図一5に示す。

図から相関係数は $r = 0.94$ となり両者には強い相関があり、フィールドにおいてその部材の腐食状態を的確に把握すれば重量法による平均板厚を推定することが可能と思われる。



図一5 平均板厚の推定

3. 材料試験

岩松ダムゲートは昭和17年に建設された構造物であり、当時の時代背景から鑑み、化学成分において不純物が多く含まれている可能性が考えられた。そのため、主桁、スキンプレート、トラニオンピン、脚柱鋳物（脚柱の集合部分でトラニオンピンとの連結部）において化学成分分析試験を実施した。表一2に化学成分分析結果を、図一6～8には、主桁およびスキンプレートの炭素、リン、硫黄の含有量を示す。

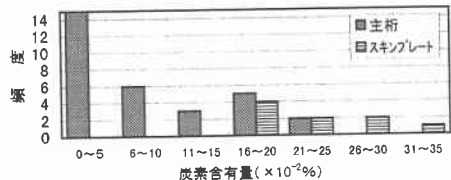
表一2 化学成分分析結果

		化学成分 (wt %)				
部材	測定値	C	Si	Mn	P	S
主桁	平均	0.093	0.010	0.349	0.045	0.041
	最大	0.220	0.010	0.470	0.090	0.053
	最小	0.040	0.010	0.130	0.011	0.021
	標準偏差	0.063	—	0.072	0.018	0.016
スキンプレート	平均	0.227	0.010	0.300	0.028	0.050
	最大	0.330	0.010	0.350	0.042	0.057
	最小	0.170	0.010	0.230	0.010	0.026
	標準偏差	0.060	—	0.037	0.012	0.009
現在のSS400規格		—	—	—	≤0.050	≤0.050
当時のSS400規格		—	—	—	≤0.070	≤0.070
トラニオンピン	平均	0.240	0.280	0.620	0.042	0.045
脚柱鋳物	平均	0.190	0.140	0.770	0.050	0.050
S25C (JIS規格)		0.22~0.28	0.15~0.35	0.30~0.60	≤0.030	≤0.035
SC410 (JIS規格)		≤0.301	—	—	≤0.040	≤0.040

以下は、各部材ごとの材料特性を述べる。

(1) 主桁

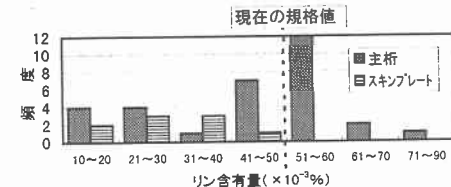
炭素の含有量が0.1%以下の供試体が半数以上を占めている。また、リンの含有量は約50%、硫黄の含有量は約20%とそれぞれ現在の規格値を上回っている。



図一6 主桁・スキンプレートの炭素含有量

(2) スキンプレート

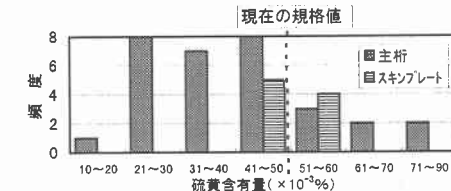
炭素の含有量は0.16%以上であり主桁に比べ多い傾向にある。リンの含有量は現在の規格値を満足しているが、硫黄の含有量は約50%が現在の規格値を上回っている。



図一7 主桁・スキンプレートのリン含有量

(3) トラニオンピン

炭素、ケイ素の含有量は現在の規格値を満足しているが、マンガン、リン、硫黄の含有量は現在の規格値を満足していない。



図一8 主桁・スキンプレートの硫黄含有量

(4) 脚柱鋳物

炭素の含有量は現在の規格値を満足しているが、リン、硫黄の含有量は現在の規格値を満足していない。以上の結果、各成分ともばらつきがあり現在の規格を満たしていないものも一部みられるが全体的には現設計上支障のないものと判断される。

4. 強度試験

(1) 各部材の強度特性

主桁、スキンプレート、トラニオンピン、脚柱鋳物（脚柱の集合部分でトラニオンピンとの連結部）の強度特性を把握するため腐食のない材料を選定し、各部材の引張試験と衝撃試験を実施した。試験結果は、表

一3に示すとおりである。引張試験結果は、各部材とも現在の規格値を満足している。また、衝撃試験結果では、トラニオンピンと脚柱鋳物の15ft-1b遷移温度が高く、現在のゲートの使用温度を考慮するとトラニオンピンと脚柱鋳物については、硬いがやや脆い材料であることが判明した。

表一3 各部材の強度試験結果

部位		引張試験					室内試験			衝撃試験		
部材	供試体 No	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	降伏比 (%)		比重	弾性係数	断面比	15ft-1b遷移 温度 (°C)	上部剛吸収 エネルギー (kg-m)	0°Cにおける吸収 エネルギー (kg-m)
主桁	1A	280	386	11.3	73		7.856	209	0.35	3	6.2	1.85
主桁	2A	306	417	10.0	73							
主桁	3A	301	413	12.9	73							
主桁	4A	311	423	—	74							
スキャンプレート	TA1	283	463	26.7	61		7.865	212	0.31	-9	4.8	2.65
スキャンプレート	TA2	287	449	22.3	64							
スキャンプレート	TA3	282	446	23.2	63							
SS400(JIS規格)	245以上	400~510	17以上	—	—					—	—	—
脚柱鋳物	Y2	265	453	17.8	58		7.835	205	0.30	55	10.3	0.7
脚柱鋳物	Y3	246	453	23.6	54							
脚柱鋳物	Y4	238	447	17.0	53							
SC410(JIS規格)	205以上	410以上	21以上	—	—					—	—	—
トラニオンピン	Z1	229	487	31.8	47		7.833	209	0.30	30	4.9	0.65
トラニオンピン	Z2	234	482	32.4	49							
トラニオンピン	Z3	238	492	31.4	48							
S25C(JIS規格)	265以上	440以上	27以上	—	—					—	—	—

(2) 引張試験

鋼材の腐食・孔食が強度特性に与える影響を把握するため、主桁から腐食が顕著に現れている11試験片を採取し引張試験を実施した。なお、試験片の板厚は重量法による平均板厚を採用した。

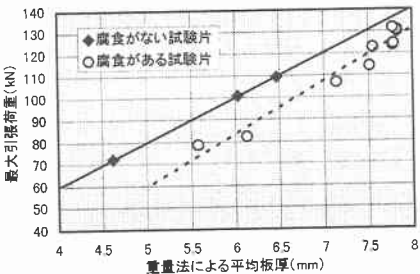
重量法による平均板厚(t)と最大引張荷重(f)との関係は図一9に示すとおりであり、腐食のある試験片は腐食のない試験片に対し、すべての試験片において最大引張荷重を下回り、板厚が厚くなるほどその差は小さくなる。

腐食割合と最大引張強さの比(σ_t/σ_0)を図一10に示す。なお、腐食割合は腐食の度合いを定量的に評価する指標として、外観調査結果をもとに下式のとおりに定義した。

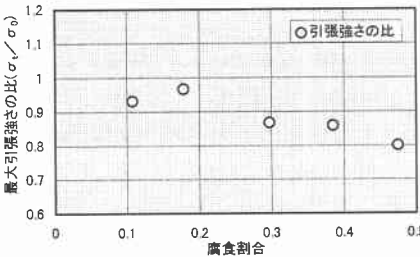
腐食割合 = (最大孔食深さ) × (腐食面積率) / (重量法による平均板厚)

腐食割合と σ_t/σ_0 の関係では、腐食割合が0.2以下の場合-10%の範囲内にあるが0.3を超すとその比がさらに小さくなる。

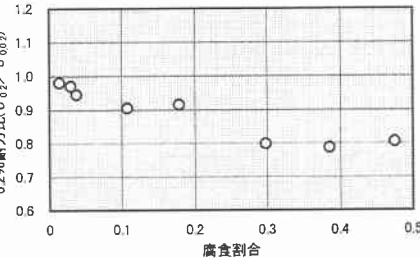
また、水門鉄管技術基準によると、「許容応力度の基準は降伏点(または0.2%耐力)による」とされていることから、腐食割合と腐食がある試験片の0.2%耐力($\sigma_{0.2}$)と腐食がない試験片の0.2%耐力($\sigma_{0.2}$)の比(以下、0.2%耐力比という)の関係を図一11に示す。その結果、0.2%耐力比は、腐食割合が0.2を境に傾向は違うものの、腐食のない試験片に比べ相対的に約20%程度0.2%耐力比が低下する傾向が見られる。



図一9 平均板厚と引張荷重の関係



図一10 腐食割合と σ_t/σ_0 の関係



図一11 腐食割合と0.2%耐力比の関係

今回は、試験片の中央部分について整理したものであるが、中央部分以外でも大きな応力が認められており、必ずしも孔食が大きい箇所で応力集中係数が小さいとは言えない。また、試験片のたわみ等の影響により試験時の拘束条件に差異が生じたこともあり、今後は、FEMによる逆解析等により、今回の試験結果と合わせ試験片全体の応力状態について検討を行なう必要がある。

5. あとがき

本調査により得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- ①岩松ダムゲートに使用されていた鋼材の一部に、リンおよび硫黄の含有量が現行基準を満足していない鋼材があり、引張試験、衝撃試験結果から硬いが脆い材料であることが判明した。
- ②深さ1.0mm以上の孔食であれば、塗膜上から腐食の程度を概ね把握可能である。
- ③腐食・孔食の程度は環境条件により大きく異なっている。特にメンテナンスが困難で湿潤状態にある下段の主桁・脚柱接合部において塗膜の劣化、腐食の発生が著しい。
- ④腐食を有する試験片の0.2%耐力は、腐食がない試験片の0.2%耐力に対し、20%程度の応力低下が認められた。腐食がある部材では、取替基準応力に20%程度の余裕を見込み判定することが望ましい。

今回の調査は、腐食・孔食を有する鋼材の強度特性に着目し実施した。しかしながら、引張試験では、腐食・孔食の状態に応じた試験片の数が不十分であり、スキンプレート載荷試験においても、試験装置との兼ね合いから弾性領域内の試験となり、塑性領域における腐食・孔食による応力の偏在の破壊に対する影響について、検討を行うことができなかった。

今後、さらにこれらの課題解決に向けた検討を進め、腐食・孔食が鋼材の強度に与える影響をより明確に解明してゆきたい。

最後に本報告をまとめるに当たりご指導、ご協力をいただいた室蘭工業大学岸助教授ならびに関係各位に感謝の位を表します。

【参考文献】

- 1) 沼崎吉次：昭和20年以前の水圧鉄管の強度・材質について、電力土木 No. 156 1978年9月
- 2) 奥田徹、沼崎吉次、青木敬雄：水路構造物の劣化と対策、電力土木 No. 153 1978年3月
- 3) 中澤一：金属材料マニュアル、日本規格協会
- 4) 村田雅人：構造材料の損傷と破壊、日刊工業新聞社
- 5) 東地域電源調整会議：水門鉄管塗装工事設計の合理的手法の開発、平成3年12月
- 6) (財)電力中央研究所：電力中央研究所報告 水力鋼構造物の寿命予測手法の開発、昭和62年6月
- 7) 北海道電力株式会社：ゲート維持管理マニュアル、平成2年

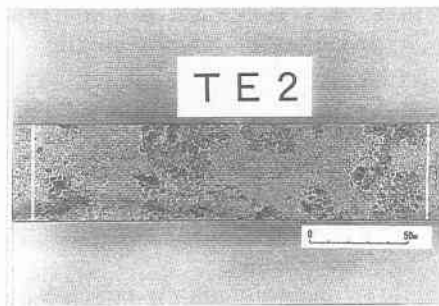


写真-1 破断前の供試体状況

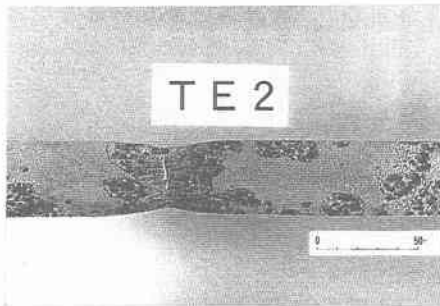


写真-2 破断後の供試体状況

以上の結果、岩松ダムゲートのように腐食がある程度進行した部材の評価にあたっては、腐食のない部材に対し引張強さおよび0.2%耐力比とも低下すること確認された。このことから腐食割合が0.3以上の場合取替基準応力に20%程度余裕を見込んで判定することが望ましいと考えられる。

(3) スキンプレート載荷試験

腐食・孔食による局部応力の発生状況を把握するため孔食の発生程度の異なる4種類の鋼板を使用し、水圧による載荷試験を実施した。

試験片は表-4に示すとおりスキンプレートから採取した4種類の鋼板を、500mm×150mmに加工し、30mm間隔のグリッド上にひずみゲージを貼付し応力測定を行なった。水圧は、水密性を確認するために、水圧 $P=0\sim0.4$ MPaまでの載荷を2回繰返し、その後、0.1 MPaごとに0.4 MPaまで加圧し、0.1 MPaごとに減圧した。

試験結果から、図-12に示すフローに従い応力集中係数(α)を算出した。 α の算出にあたっては、長軸方向の支持条件の影響を考慮し、試験片中央部の測定応力を使用した。

表-4 試験片の種類

供試体No.	供試体の特徴		平均板厚 (mm)
	載荷面	被載荷面	
X-1	腐食なし	腐食なし	9.2
X-2	腐食あり	腐食あり(孔食小)	8.9
X-3	腐食あり	腐食あり(孔食大)	7.9
X-4	腐食あり	腐食なし	7.6

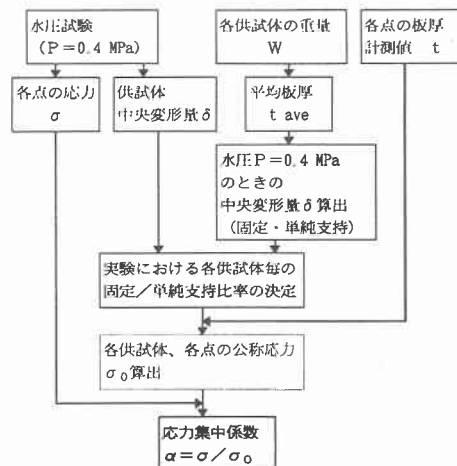


図-12 応力集中係数の算出フロー

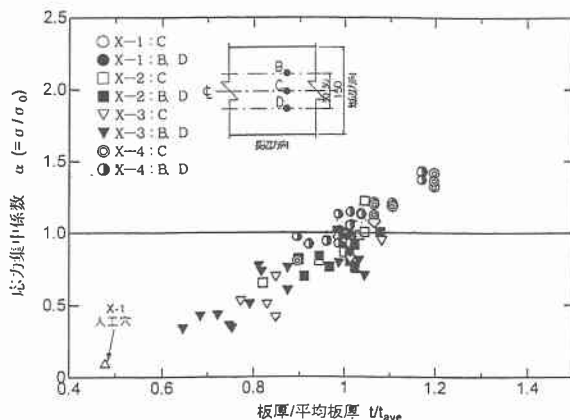


図-13 板厚と応力集中係数の関係

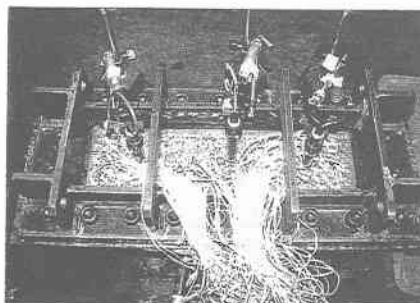


写真-3 載荷試験装置外観