

実測結果から見たテンターゲートの静的構造特性について

ON STATICAL STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF TANTER GATES OBTAINED FROM FIELD MEASUREMENTS

中村秀治*・沼崎吉次**・小林精一***・加藤 治****
By Hideharu NAKAMURA, Yoshitsugu NUMAZAKI,
Seiichi KOBAYASHI and Osamu KATO

1. ま え が き

テンターゲートは古くからダムクレストゲートとして用いられてきた。初期のものに比較して、材料、溶接などの製作技術と計算技術の向上により薄肉軽量化の傾向をたどってきたが、昭和 42 年に起きた和知ダムゲートの崩壊事故^{1),2)}はその傾向に対する警鐘となった。その後、在来の同種のゲートについて安全性の見直しが行われ、数多くのゲートについて満水閉塞状態での静応力測定および小開度放流状態での振動測定が行われた。本報告では、それらのうち著者ら自身が測定したか、あるいは後日結果のみを知り得た全国合計 14 か所のテンターゲートについて静的構造特性を考察し、報告することを主目的としている。なお、テンターゲートは昭和 43 年の水門鉄管技術基準改訂版³⁾よりラジアルゲート(radial gate)とよばれているが、引用文献などとの混乱を避けるため本報告では“テンターゲート”の用語を用いている。

テンターゲートの安全性を考えると、小開度放流状態で誘起される自励振動^{4),5)}、流体力⁶⁾、動水圧、ゲート構成部材の疲労などは重要であるが、大部分の構成部材が圧縮力を受けるテンターゲートにおいて、座屈に対する検討は最も重要であり⁷⁾、特に脚柱の耐荷力不足が重大事故につながることは和知ダム事故原因調査報告書¹⁾の指摘するところである。そこで、静水圧作用下の応力測定結果に基づき、次の事項、

- ① 脚柱に作用する軸力、曲げモーメントにより生じ

る応力とその許容応力に対する比率

- ② 主桁に生じる応力

- ③ スキンプレートに生じる応力

を中心に、製作年代の古いゲートもかなり含まれているので、設計基準、製作技術などの推移を考慮しながらテンターゲートの静的構造特性を考察し、報告する。

テンターゲートの設計は、基本的には水門鉄管技術基準³⁾に準拠し、脚柱・主桁とスキンプレートおよび縦桁(図-1)を切り離した慣用的な設計計算法が一般に用いられ、水門扉設計参考例⁸⁾に従っているが、曲率を有するスキンプレートとそれを補剛する縦桁の剛性は脚柱・主桁の応力分布、変位形状に大きく影響していることが考えられる。そこで、設計計算値、実測値および長方形シェル要素⁹⁾、3次元はり要素を用いた有限要素解を比較し、慣用的計算法の合理性の有無を検討する。

また、水圧鉄管、ゲートのような水路構造物では腐食による経年変化^{10),11)}が問題になるが、環境に大きく支配されかつ長年月にわたる測定が必要となり、定量的把握は難しい。ここでは、4つのゲートについて行った測定結果^{12),13)}と水圧鉄管に関するデータ¹¹⁾等を示し著者らの考え方を述べることにする。

2. 実測されたテンターゲートの概要と実測結果

(1) ゲートの概要

実測された 14 か所のゲートを A, B, C, ..., M (和知), N ゲートと仮に名づけることにする。これらは日本各地に分散しており、製作年代も昭和 4 年から昭和 53 年までの長期間に分布している。テンターゲートがわが国で製作され始めたのは昭和初期と考えられ、耐用年数約 40 年を経て新規のゲートに取り替えられつつあるが、

* 正会員 工修 電力中央研究所土木技術研究所材料構造研究室

** 電力中央研究所土木技術研究所構造部

*** 正会員 電力中央研究所土木技術研究所材料構造研究室

**** 正会員 電力中央研究所土木技術研究所材料構造研究室

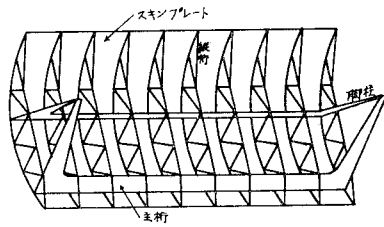


図-1 下流側より見たテンターゲート略図

この間に製作技術，設計法等で多くの点について推移があったように思われる。それらを列挙すると，

- ① 扉体の脚柱が門型からπ型へ。
- ② 脚柱間の中間支持材がトラス形式からラーメン形式へ。そして和知以後トラス形式へ¹⁰⁾。
- ③ スキャンプレート背後の縦桁がトラス方式から縦連続補助桁，あるいは横連続補助桁方式へ。
- ④ 接合方法がリベットから溶接へ。
- ⑤ リップが木材取付け型からシャープエッジへ（自励振動防止のため）。
- ⑥ トラニオンピンがピア埋設型から露出型へ。
- ⑦ 巻上方式が前面巻上げから背面巻上げへ。
- ⑧ 製鋼技術の進歩を反映して，許容応力値が徐々に大きくなる方向へ（表-4）。
- ⑨ スキャンプレートの計算式が Bach から Timoshenko³⁾ へ。
- ⑩ 特に脚柱において，平常時水圧のみでなく種々の設計荷重が考慮される方向へ。

などであろう。これらの推移が昭和何年頃を境にするかは必ずしも明確でなく，表-1 に示した 14 か所のゲートが各時代を代表するというわけでもないが，実際に使用されているゲートの実体を知る意味で表-1 には各ゲートの

- ① 設計，製作年代。
- ② 使用した鋼材料。

- ③ 扉体寸法（有効径間，有効高さ，スキャンプレート曲率半径など）。
- ④ 設計水深。
- ⑤ その他。

を表示した。なお，鋼材料は明確な記録が少なく，非破壊的な硬度試験の結果¹¹⁾から推定したものが多い。構造物用鋼材に SS の記号が用いられ始めたのは昭和 13 年以後であり，それ以前のゲートに SS 39, SS 41 と記述したのは，39 キロ鋼，41 キロ鋼相当の意味である。また，G, H ゲートの作られた昭和 14, 17 年に SS 39 は規格として存在しないため，G, H については戦時規格の SS 00 が使われたと思われる¹²⁾が明確な根拠はない。

表-2 は各ゲートの脚柱について

- ① 脚柱の形態（脚長，構造，本数，補剛形式，補剛箇所数，断面形状）。
- ② 上，下段脚柱中央部（トラニオンピンと主桁のほぼ中間位置）の断面定数（ x, y 軸はそれぞれ水平，鉛直方向， I, S, r はそれぞれ断面 2 次モーメント，断面係数，断面 2 次半径）。

を示した。これらは実測結果を考察する際に用いる。

表-6 には，各ゲートの主桁の純径間と，水門鉄管技術基準に定めるたわみ制限値（径間の 1/800）を示し，表-7 にはスキャンプレート板厚を示した。板厚が上下 2 段に書かれているのは，ゲートの上部と下部でスキャンプレート板厚が異なる場合である。

(2) 実測結果

実測は，ゲート前面に仮ゲートを設け，ゲート前面の水を完全に除去した状態で計器の 0 調整を行った後，充水して満水状態における応力と変位を測定する手順で行っている。測定時の満水位が必ずしも設計満水位と一致していないことは表-1 に示したとおりであり，水位のかなり低い場合も存在した。また地震時動水圧などの荷

表-1 実測ゲートの諸元

ゲート名	製作年代 (昭和)	使用材料 (SS)	扉体寸法 (m)				門数	設計水深 (m)		測定時の水深 (m)
			純径間	有効高さ	扉体半径	有効高さ 扉体半径		常時	地震時	
A	4	39	11.4	10.3	12.8	0.80	19	10.00	—	10.00
B	4	39	7.6	6.2	7.5	0.83	12	6.06	6.88	6.06
C	7	39	6.6	5.6	5.2	1.08	4	5.24	5.96	5.55
D	7	39	10.9	6.2	6.5	0.95	8	5.93	6.23	5.53
E	11	41	9.1	7.6	10.0	0.76	3	7.98	8.29	7.57
F	13	41	6.1	9.1	12.1	0.75	4	9.67	10.06	9.10
G	14	39	10.0	4.2	5.8	0.72	2	4.76	—	4.24
H	17	39	8.5	9.6	9.0	1.07	12	9.27	9.57	9.06
I	17	41	8.0	6.2	7.5	0.83	7	6.20	—	6.00
J	17	41	8.9	8.0	10.5	0.76	14	8.00	—	7.78
K	34	41	10.8	8.5	10.0	0.85	2	8.80	9.20	8.20
L	38	41	8.0	8.3	9.0	0.92	2	8.80	9.00	8.00
M	42	41	9.0	12.0	13.0	0.92	4	12.60	12.80	12.00
N	53	41	9.1	10.3	11.4	0.90	19	10.30	11.00	10.25

表-2 実測ゲートの脚柱の形態と断面定数

ゲート名	脚柱の形態			上段脚柱中央の断面定数						下段脚柱中央の断面定数										
	脚長 (cm)	構造	本数	補脚形式	補脚数	断面形状	断面積 (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	S_x (cm ³)	S_y (cm ³)	r_x (cm)	r_y (cm)	断面積 (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	S_x (cm ³)	S_y (cm ³)	r_x (cm)	r_y (cm)
A	1017	門型	4	ラーメン	2	[]	83.3	75 729	75 729	2 284.4	2 284.4	30.16	30.16	109.7	99 334	99 334	2 996.5	2 996.5	30.09	30.09
B	650	門型	2	トラス	3	トラス	105.6	1 483	43 338	59.3	1 733.5	3.75	20.26	117.3	1 740	46 963	69.6	1 958.5	3.85	20.43
C	436	門型	2	トラス	3	トラス	97.2	1 721	52 589	66.2	2 022.7	4.21	23.26	97.2	1 721	52 589	66.2	2 022.7	4.21	23.26
D	550	門型	2	トラス	3	トラス	136.8	1 496	123 972	39.4	3 262.4	3.31	30.10	158.0	1 968	149 673	51.8	3 938.8	3.53	30.78
E	850	門型	2	トラス	3	トラス	151.2	2 001	88 283	66.7	2 942.8	3.64	24.16	191.0	4 017	106 183	133.9	3 539.4	4.59	23.58
F	1092	門型	2	トラス	4	トラス	140.3	2 959	67 097	106.6	2 417.9	4.59	21.87	185.6	4 119	87 926	148.4	3 168.5	4.71	21.77
G	500	門型	2	トラス	4	[]	46.9	1 711	59 320	45.0	1 561.1	6.04	35.56	46.9	1 711	59 320	45.0	1 561.1	6.04	35.56
H	740	門型	2	トラス	3	トラス	205.4	4 018	163 848	111.6	4 551.3	4.42	28.24	205.4	4 018	163 848	111.6	4 551.3	4.42	28.24
I	600	門型	3	ラーメン	2	[]	76.0	7 807	23 105	390.4	1 155.3	10.14	17.44	76.0	7 807	23 105	390.4	1 155.3	10.14	17.44
J	950	門型	3	ラーメン	2	[]	97.2	100 828	100 828	2 880.8	2 880.8	32.20	32.20	97.2	100 828	100 828	2 880.8	2 880.8	32.20	32.20
K	850	π型	2	トラス	2	トラス	95.6	3 127	29 634	148.9	1 411.1	5.72	17.60	95.6	3 127	29 634	148.9	1 411.1	5.72	17.60
L	777	π型	2	トラス	2	トラス	117.7	1 559	89 739	44.5	2 564.0	3.64	27.60	117.7	1 559	89 739	44.5	2 564.0	3.64	27.60
M	1170	π型	3	ラーメン	2	トラス	141.9	4 611	77 397	167.7	2 814.4	5.70	23.35	171.0	9 004	95 364	327.4	3 467.8	7.26	23.62
N	990	π型	2	トラス	3	トラス	267.1	19 233	225 450	534.3	6 262.5	8.49	29.05	267.1	19 233	225 450	534.3	6 262.5	8.49	29.05

重が付加されていないことは当然である。したがって、以上のような静水圧のみの条件下における実測結果であることを明言しておくことにしたい。

表-3 は脚柱に生じた軸方向応力値を示したものである。右岸側、左岸側の上段、中段、下段脚柱に対しては軸力により生じた応力 σ_N 、および x 軸（脚柱の中心軸方向と直交する水平軸）、 y 軸（脚柱の中心軸方向、および x 軸に直交する上向き軸）まわりの曲げにより生じた縁応力 σ_{Mx} 、 σ_{My} を測点 1, 2, 3 についてそれぞれ表示した。測点の位置は記事の欄に記したとおりである。Jゲートについては、他のゲートと同じ形式で表示し得るデータが得られなかったため除外している。 σ_{Mx} および σ_{My} の符号は、それぞれ下側およびピア側いたわみ、曲げの生じたときを負としている。

表-6 は主桁に生じた軸方向応力値をまとめたものであり、上段、下段主桁の右岸側断面、中央断面、左岸側断面について測定値を表示している。右岸側および左岸側断面の位置はゲートによりさまざまであり、応力的にも中央断面におけるより小さく重要と思われないので、特に位置を記すことはしない。応力値は上下2行で書かれているが、上は上流側スキンプレート近傍での値であり、下は下流側の縁応力である。

表-7 はスキンプレートに生じた水平方向、上下方向応力値 (σ_x , σ_y) を示している。位置は測定満水位からの水深で表わし、右岸側、中央断面付近、左岸側についての値を表示した。右岸および左岸側の位置は、主桁と同様の理由により特に記さない。

その他、トラス形式の縦桁、脚柱間の中間支持材などに生じた応力値も測定されているが、ほとんど脚柱、主桁より小さな値であり、ゲートおのおので配置、形式、寸法などが大幅に異なり、かつ、2次材で重要性が低いことから、ここには記さないことにした。

変位についても実測値は存在するが、各ゲートで測定位置、方向に統一性がなく、また、現行の設計法が応力評価中心であり、変位についてはたわみ制限が設けられているのみなので、次章で D ゲートについて示す以外はここでは除外した。なお、表-3, 6, 7 中の空欄は実測値の得られていないことを示している。

3. 実測結果に対する考察

テンターゲートの設計で考えられる主要な荷重は静水圧と地震時動水圧であるが、地震時動水圧は静水圧に比べて小さく、考慮に入れるときは許容応力の割増しが認められている。静水圧に対する測定は最も重要であり、その値を通常時の許容応力に対して比較検討する意味は十分あるが、その際、測定時の水深が問題になる。設計

満水位の採り方は各時代、発注主により異なり、ゲート有効高さ以上に設計満水位を定めた時代もあったようである。しかし大体ゲート有効高さ近傍の水位で設計されており、測定時の水位がそれに近ければ設計条件と同等とみなし許容応力（表-4）との関連で議論するのも支障ないと思われる。表-1 から明らかとなっており、Dゲートで有効高さに 70 cm 低い水位で測定している以外、大部分 20~30 cm 以内の相違に収まっている。以下、脚柱、主桁、スキンプレートに分けて考察する。

(1) 脚 柱

表-3 より、軸力によって生じる応力 σ_N は 200~800 kg/cm² の広範囲に分布していることが認められる。Aゲート（設計がフィート、インチで行われており、製作会社も明確でない）が平均 700 kg/cm² 前後である以外、戦前に製作されたゲートは一般に σ_N が小さく、200~500 kg/cm² である。戦後の L, Mゲートは 600~800 kg/cm² になっているが、Nゲートはまた 300~500 kg/cm² 程度に戻っている。戦後の薄肉化の傾向と、和知事故以後の傾向、また、鋼材使用量を節減するよりは製作工程を少なくする最近の傾向などの一端がここにも表われているように思われる。測点 1, 2, 3 で大幅に値が異なっているのは、変断面で断面積が変化しているためである。同一ゲートでは上段よりは下段脚柱の σ_N の方が大きい傾向にあるが、あてはまらない場合も多い。

曲げモーメントにより生じる縁応力 σ_{Mx} 、 σ_{My} は多様である。 σ_{Mx} については測定値が少なく、明確なことはいえないが、A（脚柱間補剛形式がラーメン）、B（トラス）、I（ラーメン）、M（ラーメン）、N（トラス）について見れば、大体 100 kg/cm² 以下であり（M（和知）の 400~500 kg/cm² は例外）、ラーメン形式の方が若干 σ_{Mx} は大きいようである。 σ_{My} は当然、脚柱構造が門型（A~J）と π 型（K~N）で異なり、門型の方が大きく、Iゲートのように 300 kg/cm² 台もあるが多くは 200 kg/cm² 以下である。 π 型では 100 kg/cm² 以下が多い。

水門鉄管技術基準⁹⁾、鋼道路橋設計示方書¹⁰⁾に従い、曲げと軸方向圧縮力を受ける脚柱の応力値を許容応力の立場で検討すると表-5 のようになる。脚柱の中央付近の断面で検討するものとし、 r_x , r_y は表-2 の値を用いている。部材の長さ l_x , l_y のうち、 l_x は脚柱間補剛材がラーメンの場合は脚長、トラスの場合は節点間距離とし、 l_y は脚長とした¹⁰⁾。 σ_{cax} , σ_{cay} はそれぞれ x 軸、 y 軸まわりの断面2次半径を用いた許容軸方向圧縮応力度である。軸力と曲げモーメントを受けるので次式、

$$\left\{ \sigma_N + \frac{\sigma_{Mx}\sigma_{cax}}{\rho_x} \right\} \leq \sigma_{cax}$$

表 4 許容応力の変遷

	昭和 34 年以前		昭和 35 年制定水門鉄管技術基準		昭和 43 年制定水門鉄管技術基準		昭和 48 年制定水門鉄管技術基準					
	S S 00, S S 34, S S 39, S S 41		S S 41, S V 34, S C 46		S S 41, S M 41, S M 50		S S 41, S M 41, S M 50					
	相当	相当	常時使用状態にある場合	常時使用状態にない場合	常時使用状態にある場合	常時使用状態にない場合	常時使用状態にある場合	常時使用状態にない場合				
軸方向応力 ① 引張応力 (軸断面上につき)	850	860	975	1 025	1 150	1 300	1 200	1 600	1 200	1 600	1 350	1 800
圧縮応力 (軸断面上につき)												
② 引張縁応力 (総断面上につき)												
③ 圧縮縁応力 (総断面上につき)												
④ せん断応力 板 (軸断面上につき)												
⑤ 工場リベット 現場リベット 仕上げボルト ピ アンカーボルト												

常時使用状態にある場合

常時使用状態にない場合

昭和 34 年以前

昭和 35 年制定水門鉄管技術基準

昭和 43 年制定水門鉄管技術基準

昭和 48 年制定水門鉄管技術基準

常時使用状態にある場合
(ない場合は下記の 15% 増し
とすることができ)

常時使用状態にない場合

S S 00, S S 34, S S 39, S S 41

S S 41, S V 34, S C 46

S S 41, S M 41, S M 50

厚さ ≤ 40 mm > 40

S S 41, S V 34, S C 46

相当

S S 41, S M 41, S M 50

S S 41, S M 41, S M 50

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

850

860

975

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

975

1 025

1 025

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 060

1 150

1 150

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 060

1 150

1 150

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 110

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

0 < l/r ≤ 90

0 < l/r ≤ 110

1 100

1 200

1 200

表-5 脚柱の測定結果と許容応力の比較

ゲート名	上 段 脚 柱								
	σ_N	σ_{Mx}	σ_{My}	$\frac{L_x}{r_x}$	$\frac{L_y}{r_y}$	σ_{cax}	σ_{cay}	$\left(\frac{\sigma_N + \frac{\sigma_{Mx}\sigma_{cax}}{p_x}}{\sigma_{cax}}\right)$	$\left(\frac{\sigma_N + \frac{\sigma_{My}\sigma_{cay}}{p_y}}{\sigma_{cay}}\right)$
A	-339	-39	-24	33.7	33.7	1010	1010	0.37	0.36
B	-296	-15	-196	36.3	32.1	1002	1015	0.31	0.48
C	-428	—	-56	23.6	18.7	1035	1045	—	0.46
D	-234	—	-193	33.2	17.9	1012	1046	—	0.41
E	-185	—	-71	54.9	31.5	927	1016	—	0.25
F	-321	—	-84	43.6	49.9	976	950	—	0.42
G	—	—	—	15.4	14.1	1050	1051	—	—
H	-373	—	-106	36.2	26.2	1002	1030	—	0.46
I	-381	-72	-103	59.2	34.4	906	1008	0.49	0.48
J	—	—	—	29.5	29.5	1022	1022	—	—
K	-462	—	—	43.7	48.3	976	957	—	—
L	-720	—	-95	58.2	26.6	911	1029	—	0.79
M	-592	-416	-26	205.3	50.1	151	980	4.30	0.63
N	-501	-85	-5	23.6	34.1	1073	1044	0.54	0.48

ゲート名	下 段 脚 柱								
	σ_N	σ_{Mx}	σ_{My}	$\frac{L_x}{r_x}$	$\frac{L_y}{r_y}$	σ_{cax}	σ_{cay}	$\left(\frac{\sigma_N + \frac{\sigma_{Mx}\sigma_{cax}}{p_x}}{\sigma_{cax}}\right)$	$\sigma_N + \left(\frac{\sigma_{My}\sigma_{cay}}{p_y}\right)$
A	-702	-39	-64	33.8	33.8	1010	1010	0.73	0.76
B	-306	-20	-165	35.3	31.8	1005	1016	0.32	0.46
C	-507	—	-124	23.6	18.7	1035	1045	—	0.60
D	-397	—	—	31.2	17.5	1017	1047	—	—
E	-287	—	-48	43.6	32.2	976	1014	—	0.33
F	-423	—	-69	42.5	50.2	981	949	—	0.51
G	—	—	—	15.4	14.1	1050	1051	—	—
H	-313	—	-69	36.2	26.2	1002	1030	—	0.37
I	-541	-168	-194	59.2	34.4	906	1008	0.76	0.72
J	—	—	—	29.5	29.5	1022	1022	—	—
K	-407	—	—	43.7	48.3	976	957	—	—
L	-707	—	-58	58.2	26.6	911	1029	—	0.74
M	-726	-523	-8	161.2	49.5	244	982	3.45	0.75
N	-681	-98	-10	23.6	34.1	1073	1044	0.72	0.66

表-6 主桁の測定結果

ゲート名	脚柱間の径間 (純径間) (cm)	水門鉄管技術 基準によるた わみ制限 (cm)	上段主桁に生じた応力値 (kg/cm ²)			下段主桁に生じた応力値 (kg/cm ²)			主桁の中立 軸から縁ま での距離 (cm)	応力値から推定される 主桁のたわみ量 (cm)		
			右 岸	中 央	左 岸	右 岸	中 央	左 岸		上 段 主 桁	下 段 主 桁	
			A	756	0.945	—	—	—		-158 242	-189 315	-126 242
B	643	0.804	-26 118	-74 317	-40 104	-44 142	-153 354	-36 126	45	0.144	0.161	
C	558	0.698	-83 -60	-90 217	-40 90	-129 -40	163 196	-237 -107	43	0.033	0.071	
D	955	1.194	—	118	260	120	99	370	82	60	0.196	0.279
E	775	0.969	-84 210	-126 210	-105 21	-84 231	-205 294	-126 84	75	0.083	0.117	
F	491	0.614	-144 231	-189 357	—	-105 294	-189 357	-105 231	60	0.071	0.071	
G	848	1.060	82 118	-11 208	78 116	46 128	-57 300	44 149	60	0.124	0.178	
H	697	0.871	-63 -21	-168 357	-84 -21	-21 -21	-168 294	-63 -21	80	0.108	0.089	
I	720	0.900	—	—	—	—	—	—	55	—	—	
J	762	0.953	—	—	—	62	410	85	50	—	0.236	
K	728	0.910	—	—	—	63 -11	-116 263	11 53	75	—	0.092	
L	488	0.610	—	-105 189	-42 210	—	-278 242	0 284	61	0.064	0.082	
M	495	0.619	—	-103	417	-140	-61	577	-118	50	0.101	0.140
N	658	0.822	—	—	-157 529	—	—	-191 609	—	75	0.144	0.150

$$\sigma_N + \frac{\sigma_{My}\sigma_{cay}}{\rho_y} \leq \sigma_{cay}$$

ただし、設計基準の推移を（表-4）考えて、 $l/r \leq 110$ に対して、

A～L ゲート：

$$\sigma_{cax} = 1060 - 0.044(l_x/r_x)^2$$

$$\sigma_{cay} = 1060 - 0.044(l_y/r_y)^2$$

$$\rho_x = \rho_y = 1060$$

M, N ゲート：

$$\sigma_{cax} = 1100 - 0.048(l_x/r_x)^2$$

$$\sigma_{cay} = 1100 - 0.048(l_y/r_y)^2$$

$$\rho_x = \rho_y = 1100$$

を使うことになるが、表-5 には比率 $(\sigma_N + \sigma_{Mx}\sigma_{cax}/\rho_x)/\sigma_{cax}$ 、 $(\sigma_N + \sigma_{My}\sigma_{cay}/\rho_y)/\sigma_{cay}$ で示した。

x 軸まわりについて見たとき、M ゲート（和知）は例外的に許容応力値以上の値が生じているが、他のゲートでは実測値と座屈を考慮した許容応力値の比が 0.31～0.79 の間にあり、相当余裕のある様子が認められる。y 軸まわりについても、全部のゲートについてかなり余裕をもった設計の行われていることが理解できる。なお、ここでも同一ゲートでは下段脚柱の方が厳しい状態にある傾向が見られる。

（2） 主 桁

主桁は主として曲げを受ける部材であって、脚柱のように座屈が問題になることは少ない。水門鉄管技術基準では許容応力の他にたわみ制限（径間の 1/800）が設けられている。

表-6 では、応力の測定値を上流側（圧縮）縁応力、下流側（引張）縁応力に分けて 2 段に書いているが、絶対値にかなりの相違がある。圧縮側が小さいのは接合されたスキンプレートの剛性が高く、主桁と一体になって挙動することによるものと考えられる。より大きい引張縁応力で見ても古いゲートで 350 kg/cm² 程度以下、新しいゲートで 600 kg/cm² 前後が見られる程度で、脚柱に比べてさらに余裕ある状態にあるといえる。これが設計の基本的な考え方によるものか、設計計算法自体によるものかは次章で検討することにする。

たわみ制限については、主桁の変位を測定していないため、等分布荷重を受ける単純支持ばりとして引張縁応力から中央断面のたわみ量を推定し、表-6 に示

した。測定値のない A, I ゲート以外、どのゲートも制限値の 1/5 以下で十分基準を満足していると思われる。

（3） スキンプレート

スキンプレート板厚は 9 mm 程度が多い。スキンプレートの挙動を板曲げとしてとらえ、Bach, Timoshenko の式で計算している。設計計算値は許容応力値に近いはずであるが、表-7 に示したとおり実測値はかなり小さく、たかだか 450 kg/cm² というのが実状である。スキンプレートの測定では 2 軸ゲージを用い直交する 2 方向の応力値を求めているが、同一水深でも右岸側、中央付近、左岸側でまったく異なる値になっており、応力分布の傾向にも一貫性が見られず、個々のゲートによりかなり異なる応力分布をしている。このことはスキンプレートの応力が縦桁、主桁、脚柱の形状、剛性により大きく左右されることを想像させ、単に水深と矩形板としての辺長のみで設計することに疑問を感じさせる。

スキンプレートの前面（水側）にゲージを取り付けて測定した例がなく、断定的にはいえないが、曲面構造の特長を発揮し大部分面内力で外荷重に対抗していることも考えられる。

表-7 スキンプレートの測定結果

ゲート名	スキンプレートの板厚 (mm)	応力測定位置の水深 (m)	応力測定値 (kg/cm ²)		
			右岸側	中央付近	左岸側
A	12.7	7.13	(80, 239)		
B	9.5	4.01	(56, -2)	(164, 74)	
		4.31	(301, 53)	(410, 200)	
		5.66	(477, 205)	(448, 310)	
C	8.0	5.00	(-41, -33)		
D	9.0	2.79		(-143, 111)	
		3.88	(-45, 72)	(-163, 73)	(-75, 30)
		5.13	(-38, 50)	(-144, -27)	(-89, -94)
E	9.0	5.33	(175, 304)	(140, 189)	(216, 442)
F	9.0	6.48	(414, 334)		
G	6.0	1.92	(8, -164)	(217, 141)	(-167, -296)
H	9.0				
I	9.0	1.95	(115,)	(5,)	
		3.12	(120,)	(-40, -110)	
		4.80	(215,)	(-165, -10)	
J	8.0 10.0	6.04			
K	9.0				
L	9.0	1.37		(182, 165)	
		3.38		(451, 621)	
		5.28		(-180, -10)	
		6.85		(-80, 616)	
M	9.0				
N	9.0 12.0	3.58		(-357, -106)	
		8.62		(-370, -227)	

() 内の数値は、(σ_x, σ_y)、ただし、σ_x：水平方向応力、σ_y：垂直方向応力

4. 設計計算法の合理性について

テンターゲートの設計には、主桁・脚柱とスキンプレートおよび縦桁を切り離した慣用的な計算法が現在なお用いられている。主部材である主桁・脚柱は2次元のラーメン構造として計算し、縦桁は2次元トラスとして影響範囲内の水圧の作用下で計算、スキンプレートは縦桁間に張られた板として Bach あるいは Timoshenko の式²⁾で計算している。他の補剛部材は経験的に配置されることが多いように思われるが、脚柱間の中間支持材については座屈の立場からのチェックがなされている。

電子計算機の性能向上とそれに伴って計算手法の発達した今日、テンターゲートをシェル・フレーム複合構造物として3次元的に解析するのに何らの困難もない。しかし、現実には慣用的計算法が用いられ、40年以上も使用され耐用年数を過ぎたゲートの取り替えにあたっては、水門扉設計参考例⁸⁾に従い、大体以前と同じ断面寸法の設計が行われている。しかも、橋梁などと比較して余分な荷重の見積りがないこと、薄肉構造で大部分圧縮材であること、製作誤差の影響が激しいことなど考えたとき、慣用的方法が極めて適切な方法に思われてくるのである。

ここでは D ゲートを例に取り、慣用的計算法、3次元シェル・フレーム構造としての有限要素法、実測による値を比較検討¹⁷⁾し、慣用的計算結果の特長および合理性の有無について考察する。

(1) D ゲートの諸寸法、諸定数および外力

ゲートの諸寸法は図-2 に示すとおりである。スキンプレート板厚は板厚測定結果から 9 mm、トラス組みは 65×65×6、50×50×6 などのアングル材が用いられている。主桁・脚柱は門型のラーメン構造で、断面形は H 型である。鋼材は 39 キロ鋼程度のもので用いられてお

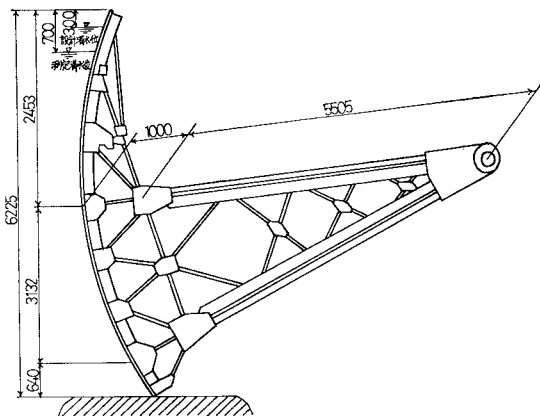


図-2 D ゲートの側面図

り、ヤング率 $E=2.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とする。

荷重は静水圧、自重のみを考慮する。設計満水位は頂部から -30 cm であるが、測定上の都合で測定満水位は頂部から -70 cm であった。したがって、実測値および有限要素法による値は測定満水位に対する結果であり、設計計算値も他との比較のため測定満水位に換算し直してある。ゲートに作用する全静水圧は設計満水位で 190 t、測定満水位で 165 t である。地震時動水圧などは除外している。

(2) 計算結果と測定結果の比較

慣用的設計計算法は応力評価が中心であり、変位量の評価とその設計への反映は明確には行われていない。以下に示す計算結果と測定結果の比較でも、変位についての計算結果は3次元有限要素法によるものだけである。

図-3 は有限要素法によるゲート左半分の主桁・脚柱の変位を図示したものである。図中、矢印①, ②, ③, ④の位置で測定結果との比較を行っている。同様に、図-4, 5 はスキンプレートおよび縦桁(トラス組)の変位を示し、矢印の位置で測定結果と比較している。

図-6 は有限要素法による主桁・脚柱の応力値を図示した。図中、矢印①, …, ⑦の位置で測定結果および慣用的計算法による計算結果と比較している。同様に、図-7 ではスキンプレートに生じる応力値を比較してい

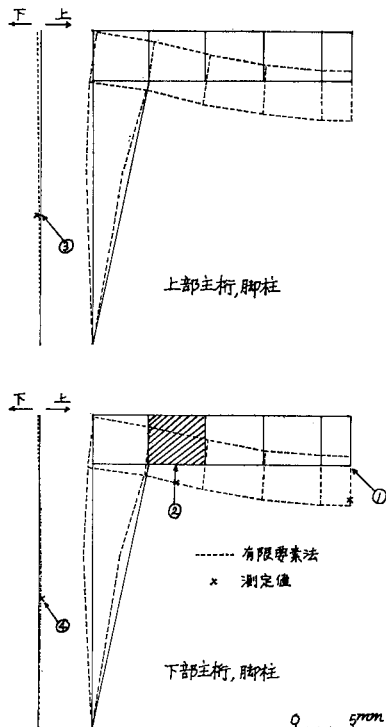


図-3 主桁、脚柱の変位

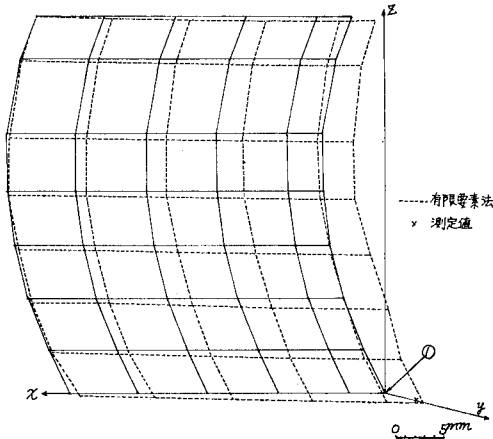


図-4 スキンプレートの変位

る。ここで、慣用的計算法としては製作年代を考慮し、Bach の式を採用している。図-8 は、有限要素法による縦桁（トラス組）の軸力、および応力値を示したものである。測定結果、および慣用的計算法による計算結果は、表-8 に示すとおりであり、表中の番号 ①, …, ⑪, ①', …, ⑪' は図-8 中の矢印の番号に対応している。

(3) 考 察

D ゲート1門だけを代表として取り上げ、計算値と測定値を比較したにすぎないので、具体的数値の検討は行わず、定性的な考察のみを行うことにする。

有限要素法による値と測定値は主要部材においては、変位、応力いずれにおいてもよく一致しているといえる。したがって、測定値に相当の信頼を寄せられると同時に、有限要素法によってテンターゲート各構成部材の状態をかなりよく把握できることがいえるであろう。

慣用的計算法によってテンターゲート各部を応力計算した場合、主桁、脚柱では安全側の評価になっている。

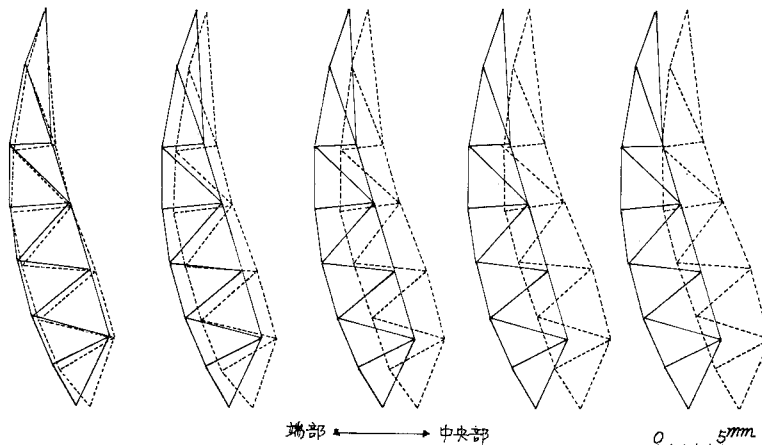


図-5 縦桁（トラス組）の変位

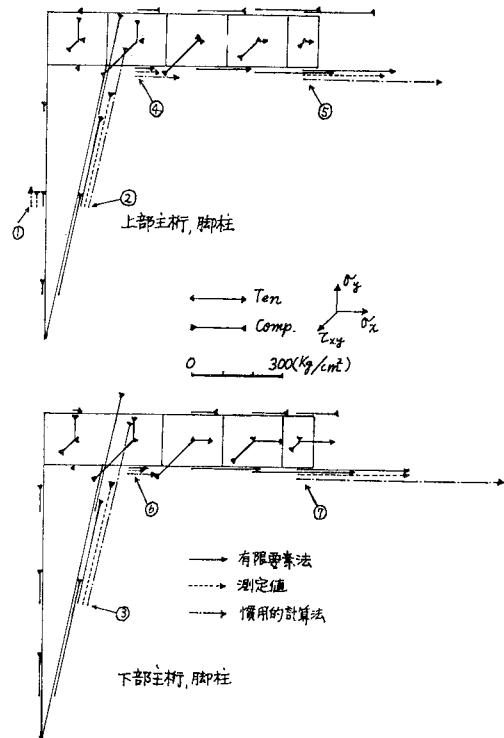


図-6 主桁、脚柱の応力

主桁では下流側の引張縁応力のみで比較しているが、実測値は設計計算値の 60% 程度であり、脚柱でも実測値、有限要素値は設計計算値より小さく、門型脚柱の面内曲げモーメントを設計では過大に評価していることが指摘できる。主桁、脚柱をラーメンとして解くとき、スキンプレート、縦桁という 2 次部材の剛性を主桁の剛性に何らかの方法で加え込むことにより、設計計算値と実測値の接近が図られるであろう。一方、スキンプレートにおいては、実測値と計算値がまったくかけ離れている。

この第一の理由として、スキンプレートが曲面板であって水圧を板として面外曲げで受けるのではなく、シェルとして面内応力で受けていること、主桁に作用する曲げモーメントの一部を分担して担っていること等があげられる。縦桁（トラス組）については、2 次部材でもともと不確定要素が多いうえに腐食の進行していることも考慮すれば、慣用的設計計算法によってかなりよく実状を把握できるといえるが、特に安全側の評価を与えているというようなことはない。

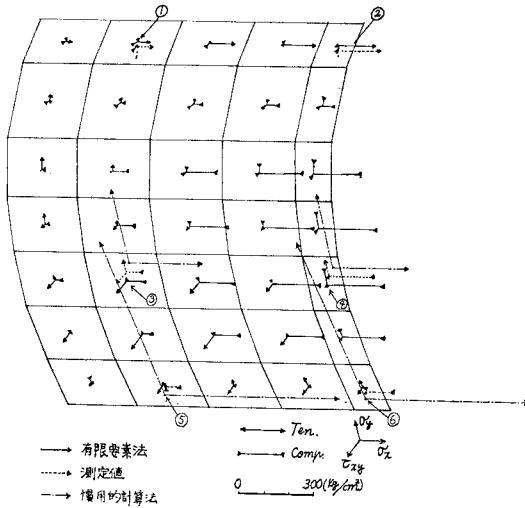


図-7 スキンプレート背面（下流面）の応力

設計段階において、詳細な3次元有限要素解析を行うために、多大の労力を費すことを考えれば、主要部材において安全側の評価を与える慣用的計算法は有用である（ただし、π型の場合、脚柱に対しては危険側ではないが、安全側にいつも評価するとは断定できない）。テンターゲートが薄肉構造物で、ほとんどの部材が圧縮力を受け、片吊りによって振れやすく、荷重に余分な見積りの少ない点を考えれば、安全側評価は大きな利点といえる。しかし板曲げを基本に考えたスキンプレートの板厚計算法は適切とはいえない。9mm前後の板厚は必要としても、腐食、シェルとしての座屈、施工上の問題、ゲートの安全性維持のための重量確保、その他の理由によって板厚決定を行うのが適当であろう。

5. テンターゲートの経年変化について

実測された合計14か所のゲートの静的構造特性、慣用的計算法の特長などは以上のとおりであるが、ゲートのような水路構造物で無視し得ない。また定量的に把握することの困難な事項に腐食の問題がある。

ゲート、水圧鉄管では特に不都合が生じない限り、40年以上、ほとんど手を入れずに使用される。塗装については昭和45年以来、水門鉄管塗替指針⁽⁸⁾が発行され、合理的な塗装管理が行われているが、腐食の進行は水質、保守・管理状態によ

表-8 測定および慣用的計算による縦桁（トラス組）の軸力と応力値

	慣用的計算法による値		
	測定値 応力 (kg/cm ²)	軸力 (kg)	応力 (kg/cm ²)
①	-17	-29	-2
②	-42	-240	-16
③	-223	-2 584	-229
④	-141	-272	-18
⑤	-288	-4 355	-289
⑥	80	805	53
⑦	-57	259	23
⑧	-147	-266	-24
⑨	168	998	66
⑩	-137	-4 701	-309
⑪	-53	-3 605	-239
①'	8	-30	-4
②'	-19	-245	-32
③'	-84	-2 634	-233
④'	-29	-277	-37
⑤'	-204	-4 440	-295
⑥'	153	821	109
⑦'	13	264	47
⑧'	-32	-271	-48
⑨'	155	1 017	135
⑩'	-27	-4 793	-630
⑪'	6	-3 675	-488

て大きく異なる。

テンターゲートで腐食の激しい箇所は、主桁・脚柱の上面および下部戸当り直上のスキンプレート下流面、それに側面戸当り付近である。これらはいずれも溜り水またはしぶきによる腐食であり、主桁・脚柱のウェブに水抜き穴が設けられている場合でも、枯葉やごみ、泥によってまったく用をなしていないことによって、古いゲートを外観調査するとき、このような傾向が顕著に見られ、最近のごみの種類（ビニール、発泡スチロールなど）はこの状態をさらに助長しているように思われる。写真-1、2はDゲートの腐食状態を示している。

そこで、14ゲートのうち4ゲート（A、B、D、H）に

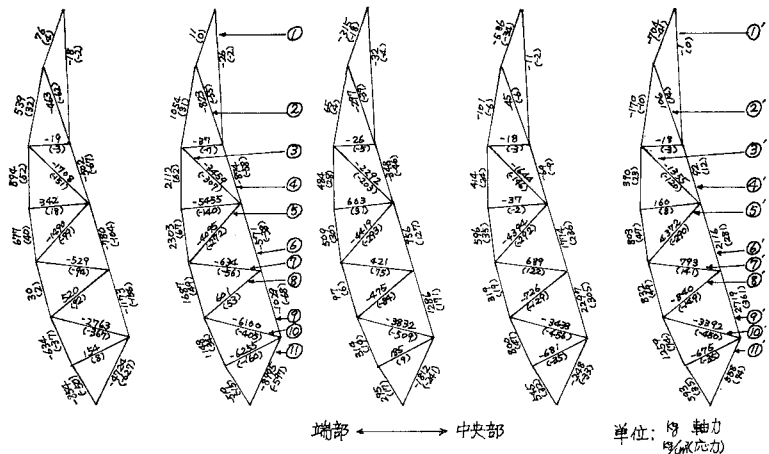


図-8 縦桁（トラス組み）の軸力と応力

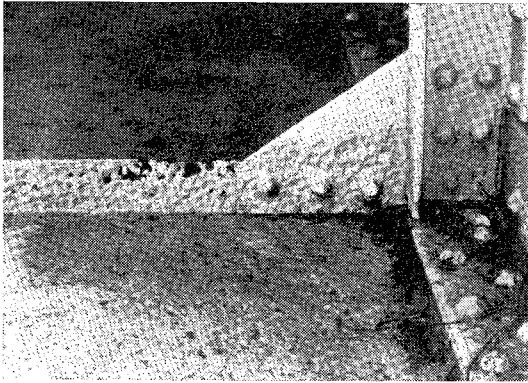


写真-1 D ゲート上部主桁上面の腐食

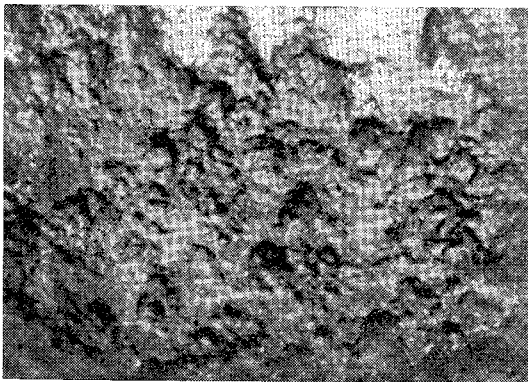


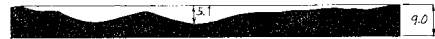
写真-2 スキンプレート前面（水側）の腐食

ついて、応力測定と同時に板厚測定を行った。板厚測定は一般に超音波パルス反射式の厚み計を用いて行いが、測定器の性能上、測定面をある程度グラインダーを使用して平滑に仕上げなければ測定不可能に陥ったり、測定精度が低下する。測定面にあてるプローブ（探触子）は接触面積を有するので、かなり平均的な板厚を測定することになる。したがって、局所的な小さな孔食や板両面の腐食が著しいときはモデリングコンパウンドによる型取り（図-9）、あるいはデブスゲージを用いてじかに孔食の深さを測ることになる。

表-9 は、以上の方法によって測定した結果を示したものである。各ゲートとも数十点の測定を行い、腐食の最も激しかった箇所の数値のみを取り上げた。設計板厚に対する最大減厚比とは、超音波パルス反射式厚み計で測定した最大腐食板厚を設計板厚で除したものであり、設計板厚に対する最大孔食比とは、モデリングコンパウンドで型取りして測った最大孔食板厚を設計板厚で除したものである。製作当時の板厚が設計板厚に完全に一致していたか、あるいは設計板厚より若干厚い板が使用されていたかは今日することができない。一致していたものと仮定して表-9 考察すれば次のことがいえる。

① 4ゲート（A, B, D, H）のいずれも測定当時です

スキンプレート下段部



上段主桁



スキンプレート 上流面



図-9 D ゲートの腐食状態（モデリングコンパウンドによる）

表-9 ゲート腐食の測定結果

ゲート名	構成部材	設計板厚に対する最大減厚比 (%)	設計板厚に対する最大孔食比 (%)	経過年数 (年)	1年当りの設計板厚に対する最大減厚比 (%)
A	スキンプレート	13.7	27.0	47	0.29
	脚柱(フランジ)	8.4	---		0.18
B	スキンプレート	11.6	41.6	46	0.25
	主桁(ウェブ)	5.1	43.0		0.11
	脚柱(ウェブ)	9.4	50.0		0.20
D	スキンプレート	29.9	56.7	41	0.73
	主桁(ウェブ)	8.8	31.3		0.21
	脚柱(ウェブ)	27.5	33.3		0.67
H	主桁(ウェブ)	12.7	25.0	35	0.36
	脚柱(ウェブ)	14.4	33.3		0.41

で 35 年以上経った古いものである。スキンプレート、主桁（ウェブ）、脚柱（ウェブ）ともに大体 9~10 mm 程度の板厚であったとして考察すると、スキンプレートの下部戸当り付近は最も腐食の激しい箇所であり、超音波パルス式の測定で 0.023~0.073 mm/年 に達している。

② 主要部材である脚柱・主桁の腐食はじかにゲートの安全性低下につながる。スキンプレートほどではないにしても、腐食の進行が見られるので溜り水排除などは積極的に考えられるべきである。

③ 超音波パルス反射式による平均的腐食測定値と孔食測定値の間には相当の開きがあり、Bゲートの主桁では孔食が8倍以上の深さにも達している。孔食は局部的であり応力的には平均的腐食量の方が問題になるが、スキンプレートでは止水効果の点で問題になる。

同じ水路構造物である発電用水圧鉄管について、著者の1人が行った測定結果(重量法)、したがって孔食ではなく平均的腐食を表-9、図-10 に示した。これらの製作年代は明治、大正、昭和(28年まで)に幅広く分布し、測定実施時期(昭和30年~49年)ですでに9~61

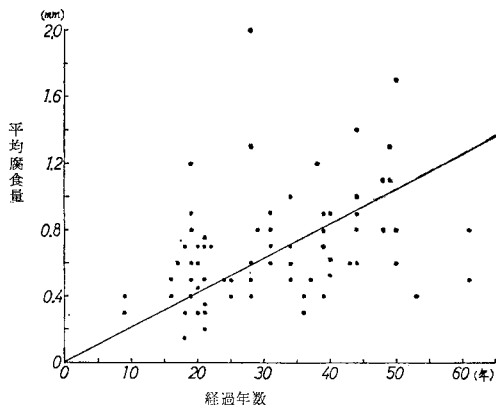


図-10 水圧鉄管の経過年数と平均腐食量

表-10 水圧鉄管における平均腐食量の平均値、標準偏差、95%信頼限界

平均値 (mm/年)	標準偏差 (mm/年)	全水圧鉄管の平均値の 95%信頼限界 (mm/年)	予測値の 95% 信頼限界	
			40 年 (mm)	60 年 (mm)
0.021	0.0011	0.021±0.0021	0.14~1.5	0.55~1.9

年を経過したものである。なお、強酸性の水質および流砂量の多い地点の鉄管は含んでいない。水圧鉄管の腐食は全体的に一樣に進行し、平均的に見て0.021 mm/年となっている。

テンターゲートの腐食が特定箇所集中し、その量が水圧鉄管よりはるかに多いことはすでに見たとおりである。水門鉄管塗替指針制定以後の腐食の実態は、今後の検討により明らかになるものと思われる。

6. 結 論

以上、テンターゲートの静的実測結果を中心にその構造特性を検討し、応力状態の実状を明らかにするとともに、従来から用いられている設計計算値と測定値および立体的な有限要素計算値との対比を行った。また、経年変化についても若干の考察を行った。

得られた主な結果を要約すると次のとおりである。

(1) 測定されたテンターゲートには昭和初期のものからごく最近製作されたものまで幅広く含まれており、設計法の推移の一端を知ることができる。静水圧によりゲート各部に生じた応力は、

脚柱	戦 前	$\left\{ \begin{array}{l} \text{(軸力による平均応力: } \sigma_N) 200 \sim 500 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{(曲げモーメントによる縁応力: } \sigma_{M_y}) \\ \text{大体 } 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ 以下} \end{array} \right.$
	戦 後	

ごく最近 $\left\{ \begin{array}{l} \text{(軸力による平均応力: } \sigma_N) 300 \sim 500 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{(曲げモーメントによる縁応力: } \sigma_{M_y}) \\ \text{大体 } 100 \text{ kg/cm}^2 \text{ 以下} \end{array} \right.$
 σ_{M_x} は多様であるが、大体 200 kg/cm^2 以下

主桁	戦 前 (中央断面下流側縁応力)	200~300 kg/cm ² 程度
	戦 後 (中央断面下流側縁応力)	200~600 kg/cm ²

スキンプレートは多様であるが、たかだか 450 kg/cm^2 以下の場合がほとんどである。脚柱における実測値と座屈を考慮した許容応力値の比は、例外的なものを除いて0.31~0.79の間にあり、ある程度余裕のある設計がなされている様子が認められる。

(2) 従来用いられている設計計算法によれば、主桁、脚柱とスキンプレート、縦桁が別個に計算されているが、スキンプレート、縦桁の下流側への曲げに対する剛性は大きく、主桁・脚柱の応力分布に対する影響は大きい。設計計算値は、脚柱・主桁の応力値に対し安全側の評価を与える。スキンプレートについては、実測値は、設計計算値 (Bach, Timoshenko の式) よりはるかに小さく、まったく実情に即していない。スキンプレートは曲率をもっているため、シェルとして面内剛性で水圧に対抗し、板曲げの影響はわずかなことによるものであろう。スキンプレートの板厚は、板曲げ理論によるよりは他の根拠に基づいて決められるのが適当と思われる。

(3) 経年変化は水質、保守・管理状態によって大きく異なるが、溜り水の箇所 (主桁・脚柱の上面および下部戸当り直上のスキンプレート下流面) に激しい。板厚減少量は実測ゲートについては、最も激しい箇所では、 $0.023 \sim 0.073 \text{ mm/年}$ 程度 (超音波パルス反射式測定による平均的腐食量) であり、水圧鉄管より局所的にかなり速く進行している。

謝 辞: 本報告をまとめるにあたり、資料を提供していただいた電力会社各位、ならびにテンターゲート設計の推移などについてご教示をいただいた三菱重工業 桜井好文氏、石川島播磨重工業 堀岡征二、松浦征二両氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 和知ダムゲート事故技術調査委員会: 和知ダムゲート事故原因調査報告, 昭和43年3月。
- 2) 川村幸司・中野俊次: 和知ダムゲートの事故原因調査報告の概要, 土木技術資料 10-9。
- 3) 水門鉄管協会: 水門鉄管技術基準, 昭和35年, 43年, 48年。
- 4) 今市憲作・石井徳章: 表面波の発生と連成したテンターゲート系の自励振動, 日本機械学会論文集, 1976.12。今市憲作・石井徳章: テンターゲートにおける自励振動, 水門鉄管, No. 113, 1978。
- 5) Petrikat, K.: Vibration Tests on Wires and Bottom Gates, Water Power, Feb., 1958。

- 6) 名合宏之：シェル構造ゲートに作用する流体力特性に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 267，1977. 11.
- 7) 白石成人：テンターゲート脚柱部の弾性座屈に関する 2, 3 の基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 169，1969.9.
- 8) 水門鉄管協会：水門扉設計参考例，昭和 48 年.
- 9) Zienkiewicz, O.C. and G.S.Holister：Stress Analysis (Chapter 8), J. Weleg, 1965.
- 10) 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，昭和 53 年 3 月.
- 11) 沼崎吉次：既設水圧鉄管の腐食・強度に関する調査，電力土木，No. 151，昭和 52 年 11 月.
- 12) 沼崎吉次・小林精一・中村秀治：T ダムラジアルゲートの安全度調査報告，電力中央研究所技術第二研究所報告，依頼報告 72571，昭和 48 年 2 月.
- 13) 小林精一・沼崎吉次・高野 博：K 発電所ダムラジアルゲートの安全度調査報告，電力中央研究所技術第二研究所報告，依頼報告 74542，昭和 50 年 4 月.
- 14) 水圧鉄管調査要領委員会：水圧鉄管調査要領，pp. 49～52，昭和 35 年 9 月.
- 15) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，昭和 31 年，39 年，48 年.
- 16) 柴田 功：クレストテンターゲート脚柱の設計について，水門鉄管，No. 85，1974.
- 17) 中村秀治・沼崎吉次・小林精一：シェル，フレーム複合構造物の応力解析，電力中央研究所技術第二研究所報告，依頼報告 72574，昭和 48 年 3 月.
- 18) 電気事業連合会：水門鉄管塗替指針，昭和 45 年.
(1979.9.7・受付)
-