

和知ダムのゲート事故について

矢野 勝 正

ON THE EVENT OF THE GATE DESTRUCTION OF THE WACHI-DAM

By *Katsumasa YANO*

Synopsis

Wachi-dam situates at the middle reach of the Yura-River in Kyoto Prefecture and was constructed by Kansai Electric Power Company from 1966 to 1967. The tainter gate of this dam was suddenly destroyed and flowed down stream, on the 2nd of July, 1967.

This paper describes on the reasons of this events on the point of technical investigation by the committee which is consisted of the several hydraulic and structural engineers and also researchers. It is showed that the main reason of the destruction is due to the buckling of the supporting arm member by the water pressure.

1. 緒 言

1-1 和知ダムの概要

和知水力発電所は Fig. 1 に示すように京都府の北部地区を流れる由良川の中流部に建設されたダム式水

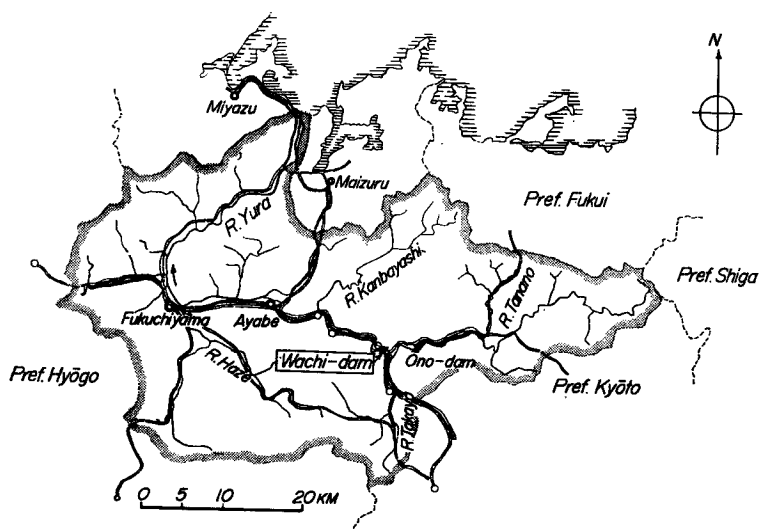


Fig. 1 Situation of Wachi Power Station in Yura-river.

力発電所で、昭和41年2月着工、昭和42年6月完工したばかりの発電所である。

その構造は Fig. 2 に示すように重力式越流型コンクリート造でダムの高さ 25.20 m で、この上に4門のテンターゲートが設けられている。このゲートは高さ 12.0 m、巾 9.0 m で1門当りの重量は約 37.5 ton である。

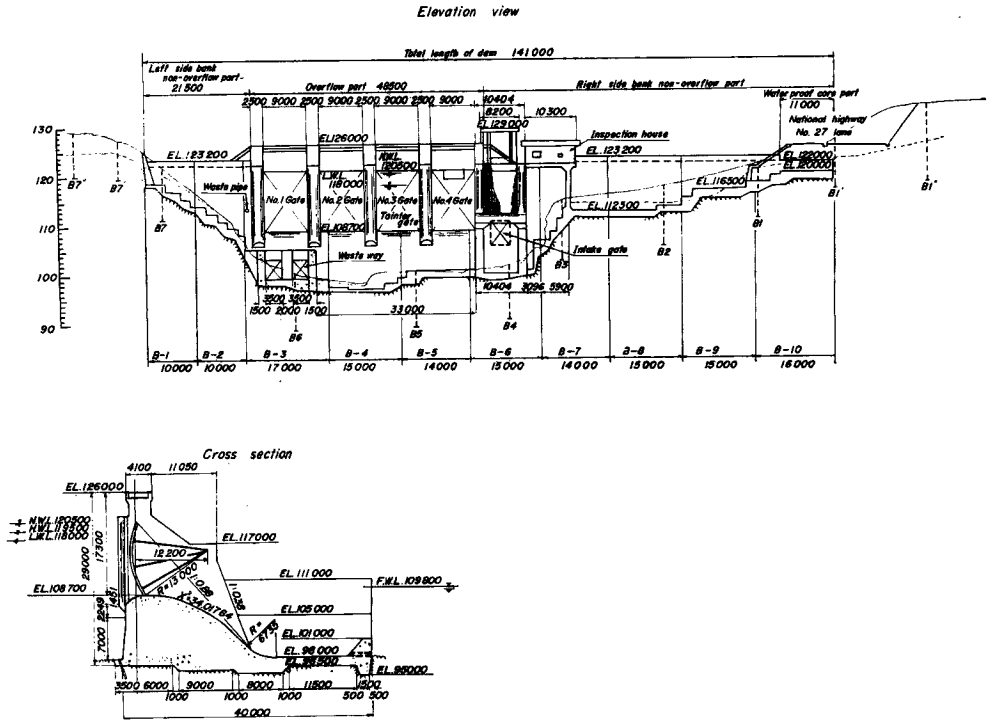


Fig. 2 The side view and cross section of the dam.

ダム地点の流域面積は 573.0 km² で貯水池の総容量 512.0万 m³、有効容量 129.0万 m³ であり、湛水面積は 56.0万 m² をもった比較的小規模のものである。使用水量は最大 35.0 m³/sec、総落差は 19.85 m、発電能力 5,700 KW、年間発生電力量は 2,950万 KWH である。事業費は約 10.0 億円、ダム躯体は森本組によって施行され、事故をおこしたテンター・ゲートは日立造船所によって施行された。

1-2 事故の発生

事故は昭和42年7月2日午前11時15分に突如としてテンター・ゲートが破壊流失したもので、流失したゲートは4門のうち第3水門で他は残存していた。この事故ゲートは流水によってダム下流約 130 m の下流に押流されて、スキン・プレートを上向きにしてかまぼこ状に河床に横たわっていた。事故前の貯水池は殆んど満水状態であったが、事故がおこると第3水門よりピーク放流流量 780 m³/sec の流量が放出されたため、下流は次第に水位が上昇して綾部市山家地先では 13.0 時に 4.88 m に達し平常時より約 3.0 m も増水した。綾部市では 13時30分頃、福知山市では 16時頃水位はピークに達し、何れも 1.0 m 位の水位上昇がみられたと云われている。

事故発生と同時にダム付近にある非常用警報サイレンが鳴らされ同時に警報車が 4 台くり出されたと言われている。田畑家屋の被害は殆んどなかったが釣に出ていて逃げおくれた人が 1 名死亡するという惨事をひきおこすにいたった。

和知ダムの上流約 6.0 km の地点に大野ダムという洪水調節を主目的とした貯水容量 2,132 万 m^3 の多目的ダムがあって、当日は 18.0 m^3/sec 程度の流入量であったが、この事故の連絡があったので直ちにゲートを閉じた。この事故は地震があったわけでもなく、洪水があったわけでもない。

事故の発生した 7 月 2 日 11 時 15 分前後の貯水池水位、流入流出曲線は Fig. 3 に示すように、事故発生時の流入流量は僅かに 20.0 m^3/sec 程度であった。ゲート操作は Fig. 3 に示すように 6 月 28, 29 日には 50 cm 位、第 3 水門の開度が保たれ、6 月 30 日、7 月 1 日には平均 10 cm 位である。事故発生の直前 3 時間許り 30 cm にあけられていた。このように 4 日半（約 1,000 時間）にもわたって半開状態にゲートが操作されたのが第 3 水門操作の特徴で他の第 1, 2, 4 水門は全閉状態にされていた。この第 3 水門のみが半開されて、10~20 m^3/sec の放流が行われていたのは下流への責任放流という必要からであったように言われている。

ゲートが欠壊して流出するにいたった事故直前には 3 名の関電社員が第 4 ゲート付近の貯水池に流れてきた流木を流す目的とダム下流の推砂を掃流する目的とで、第 4 号水門の操作をするべく、操作橋にいた。以下警察で聴きとった供述書を要約すると次のようである

『3号ゲートは 30 cm 開いており、毎秒 27 ton の水が放流されていました。私は操作橋の上から身をのりだすようにゲートの下部面と越流部を見ていました。Eさんが巻き下げのボタンを押したのか、ゲートは 1 分間に 30 cm 位の速度でおろていきました。1 分程するとゲートと越流部が接着したのか、今まで 27 ton の水が流れていたのが、次第に水量が少くなり、漏水程度になりました。（中略）漏水というのはダムのゲートが少しでもあいていると、その部分から吹き出すわけですが、そんな状態が全然なく、チョロチョロとにじみ出る程度のことを言うのです。（中略）それから再度下流の方をみていると私の真下のゲートが完全に閉まっているにもかかわらず、50 cm 位ずりおちるように下っていくみたいなきがしました。この瞬間私がのっていた橋梁がガタガタと揺れて巻揚機の方が突然くずれだし、手すりが抜け、上流側が少しあいたようになりました。そこでびっくりして逃げたのですが、その時は私ののっていた鉄板も浮きだし、はずれかけたので突差に手すりにつかみ、ぶらさがった次第です。』3名の供述書を読んでみてもお互いに余りむじゅんとするところはないが、何分にも突差の出来事なので、殆んど記憶もなく、アッというまの事件のようであった。第 3 ゲートが規則通り悠つくりと閉められたか、或は完全に閉められていたかについては供述書では本人の言を信じるほか、他の立証はないので、操作上のミスを探求することは無理である。

1-3 原因究明の経過

以上のようにわが国に過去において殆んど類例のない事故であるので、再びこうした事故のおこらないための原因を徹底的に究明する必要が生じた。このために監督官庁である建設、通産両省では事故原因究明のための和知ダムゲート事故技術調査委員会を組織するにいたった。筆者はその委員長に委嘱され、委員構成は建設省近畿地方建設局 2 名、通産省大阪通産局 1 名、建設省土木研究所 2 名、電力中央研究所 2 名、京大 4 名、名大 1 名合計 12 名の委員より組織された。

本委員は 7 月 4 日に組織され直ちに第 1 回の現場視察を行い、7 月 5 日に第 1 回委員会が開催され情況の報告を受け、また所要資料の提示が要望されるなど活潑な活動が開始された。爾来 11 月末迄に 9 回の会合がもたれ、いろいろの立場から論議が行われてきたが、概ね本年度末を目標に最終結論を出そうとしてい

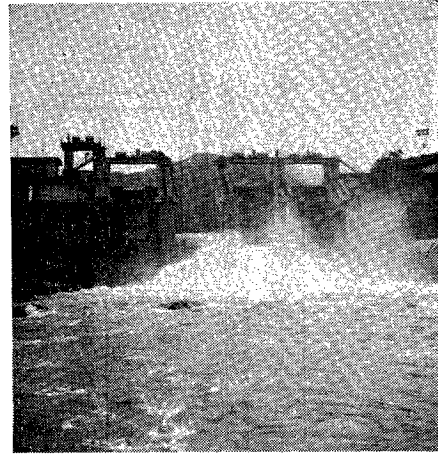


Photo. 1 General View of Wachi-dam after destruction of the gate.

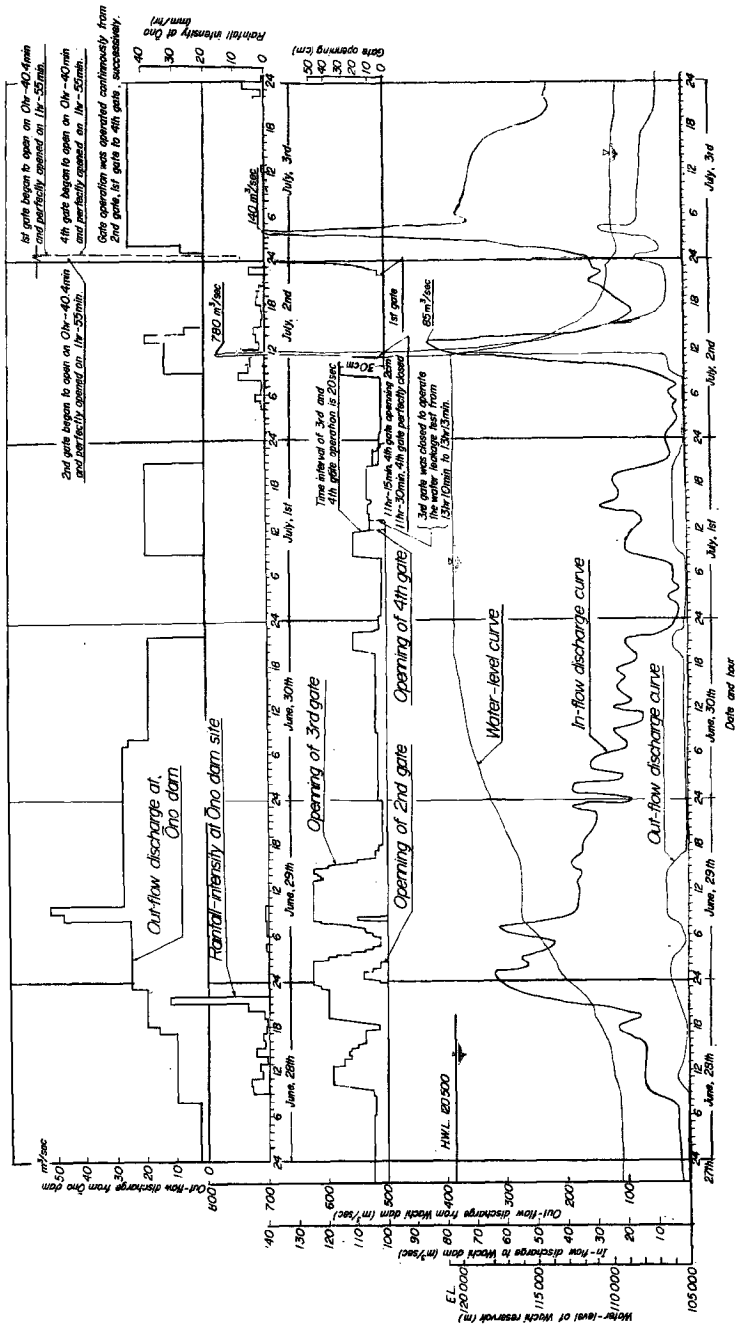


Fig. 3 Water level, inflow and out flow discharge, gate operation curve before and after event.

る。この間10月6日に中間報告を提出したので、本文もまた中間的の報告内容を記述する次第である。この間に7月31日に流下したゲートの引揚げられた破壊状況を視察して破壊原因の有力な手がかりを得ると同時に、8月18～20日にわたって和知ダム現場において静水圧テストを実施して、初期たわみや応力分布の計測を実施した。この他関西電力K. K. によって神通川の坂上水力発電所のテンター・ゲート試験や、日立造船所K. K. による和知ダム模型の水理実験が行われて原因究明の努力がなされた。

究明の重点は引揚げられた第3ゲートの破壊状況からみて脚柱の坐屈に注目が注がれたので、この方面の理論的計算が行われたことは当然であるが、もともと本委員会では設計、施行、材質、管理（操作）の4つの立場から広くその破壊原因を検討することにしていたので、夫々の事項について平行して調査を続行した。

1-4 わが国のテンター・ゲート

わが国には水力発電所は約1,500ヶ地点が開発されていて、このうちテンター・ゲートが使用されているのは約200ヶ地点位である。水門の数としては約1,000門という数多い数字を示している。これらのテンター・ゲートは今まで殆んど無事故で、その役割をはたしつつあるので今回のような事故は初めてと云ってよい。ただ宮崎県内の某地点のテンター・ゲートが坐掘をおこした事件が一度あったが、このときは流出するまでにはいたらなかったようである。

わが国の主要なテンター・ゲートの高さや巾及び重量を表示したのが **Table 1** でゲートの単位面積当りの重量を求めてみると平均 0.428 ton/m^2 であって和知ダムの 0.347 ton/m^2 は可成り小さい値を示している。軽量であるということは合理化された設計の場合には技術の進歩に労力がはらわれたことになる。原因を究明する立場にたつと一応注目してその軽量化の原因を十分考察する必要がある。またわが国の既設のテンター・ゲートを構造的にみると大体脚柱は2本の斜材で補強されているが、斜材を用いない場合には十分鋼結構造のラーメン型の設計が行われていて、和知ダムのように主脚柱が3本で斜材のない構造の設計は比較的少ないことにも注目する必要がある。

わが国の水門設計の基準書は昭和35年に水門鉄管協会で各方面の専門家を集めてつくられた「水門鉄管技術基準」というものがあって、概ねこの基準によって設計が行われている。この基準の設計について一般的设计条件として次の項目があげられている。

1. 種類・形状および大きさが設計場所、使用目的に適したものであること。
2. 予想される荷重に対して安全であること。
3. 十分な水密性をもたせるようにすること。
4. 開閉が容易であるとともに確実であること。
5. 耐久性が大であること。
6. 開閉に際して有害な振動を生じないこと。
7. 保守に便利であること。

これらの各項目についての具体的な基準は部分的には制定されているが、尚問題とされている点もないわけではなく、その再検討もこの機会に必要となってくるように思われる。

ダムの事故は堤体そのものが欠壊した例は外国にはかなりある。例えばフランスのマルパッセダムや米ロスアンゼルス市近くのポルトウインヒルズダムの欠壊があり、イタリーではダムは欠壊していないが貯水池周辺の地這りのため 1.5 億 m^3 の土砂が流入溢流して、2,000余人の人命が失われた事件がある。わが国に

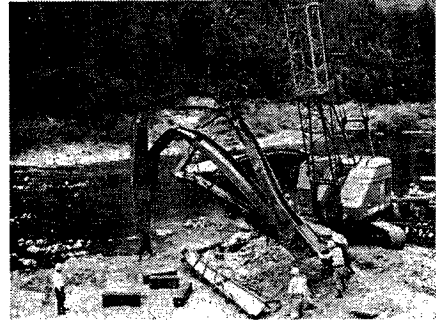


Photo. 2 View of the general feature of the buckling members of the gate.

Table 1 List of constructed tainter gate in Japan.

Name of Dam	Height of gate (m)	Width of gate (m)	weight per one gate (ton)	Weight per area (t/m ²)	Design Company
Takokura	8.50	12.50	39.2	0.368	Tahara Co
Sasadaira	10.70	9.00	38.2	0.397	"
Sikamori	12.00	10.00	47.4	0.397	"
Takasiba	14.37	9.40	64.8	0.480	"
Sizunai	9.30	10.80	40.5	0.403	Ishikawazima
Sizyūsida	13.12	9.00	46.0	0.390	Ind. Co.
Yuda	7.88	9.00	18.8	0.265	"
Okuizumi	12.30	9.00	45.0	0.407	"
Kasabori	9.50	10.00	32.6	0.343	"
Sin inotani	12.60	9.20	45.0	0.388	"
Zintsu, 1st	11.80	9.20	58.0	0.543	"
Kawamoto	10.30	12.00	43.9	0.355	"
Futakawa	10.89	11.90	55.8	0.431	"
Ōmori	8.55	9.20	25.0	0.318	"
Sonohara	8.06	7.50	19.5	0.323	"
Kawaguchi	11.80	9.00	70.2	0.661	Mitsubishi Ind. Co
Hatanagi, 2nd	11.50	8.80	66.3	0.655	"
Kitagawa	6.20	12.00	75.9	1.020	"
Ozegawa	12.80	8.00	75.9	0.741	"
Yellow tail	19.60	7.60	139.2	0.934	"
R. Ahgat	15.30	12.50	129.5	0.677	"
Ōyodo, 1st	15.96	11.50	108.0	0.588	Kurezōsen Co
Ōno	11.04	9.50	32.6	0.311	"
Yokoyama	13.11	8.60	47.5	0.421	"
Siroyama	16.60	10.00	84.0	0.506	"
Tsuruta	14.44	12.00	78.0	0.450	"
Simokubo	15.85	8.00	57.9	0.457	"
Iokigawa	9.30	11.00	33.0	0.323	Hitachizōsen Co
Yamaguchi	11.80	12.50	44.0	0.298	"
Takiyamagawa	6.80	8.50	17.8	0.308	"
Yomikaki, 2nd	13.00	10.00	51.5	0.396	"
Hirotsuse	8.32	15.00	43.5	0.348	"
Takinamigawa	7.50	6.50	13.9	0.285	"
Toyomi	11.20	9.09	51.3	0.504	"
Wachi	12.00	9.00	37.5	0.347	"
Qadirabed (N)	5.64	18.29	24.8	0.240	"
" (U)	7.01	18.29	35.8	0.279	"
Maralan (N)	4.27	18.29	17.5	0.224	"
" (U)	5.79	18.29	26.1	0.246	"
Sinnariwagawa	.128	10.00	33.2	0.409	"
			average	0.428	

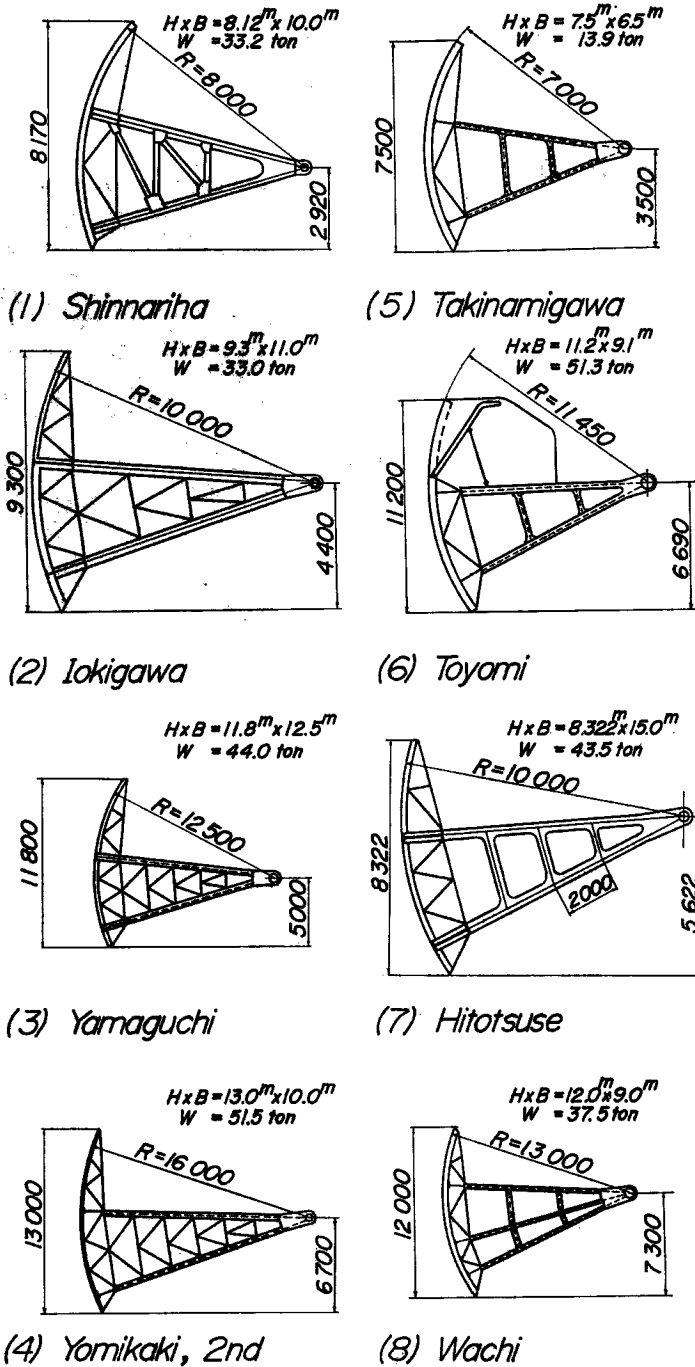


Fig. 4 Several kind of Structure of Tainter-gate in Japan.

も昭和16年に北海道幌内川のダムが欠壊して60人の死者をだした例等がある。しかし先にも記述したようにゲート事故をおこしたことは殆んどなく、ある程度ゲートの設計に自信がありすぎた盲点をつかれた感じがする。印度のパークラダムの水門が閉じられなくなって問題があったが、水門についてもこの度の事件は今後十分の設計管理面において細心の注意を必要とすることをあらためてよい教訓としてかみしめてみるのが肝要である。

2. 事故原因

2-1 検討事項

何故このような不測の事故が発生したかについては最初いろいろの推論がなされた。例えば橋梁とゲート捲揚機が落下してゲートを破壊したのではないかと、ゲートの partial opening に起因するゲートの振動による破壊とか、流木流水の動水圧による破壊とかの推論が行われた。

そこで本委員会は広い立場で設計、施行、材質及操作に欠かながなかったかという立場をとって原因を究明することにした。しかし **Photo. 2, 3** に示すように破壊流出したゲートが7月末にいたって、水中に没していた水門が引揚げられてその破壊の状況をつぶさに調査した結果、破壊の主原因は脚柱の坐屈にありとして、構造物の力学的検討を重点に絞ることにした。振動の問題については第3ゲートを操作していた3人の関電職員の言によると、ゲートを一応完全に閉じた瞬間に一大音響とともに流出したと言われているので推論の根拠がなく深く究明することが出来なかった。

施工にあたっての欠かんととしては、特にみあたらなかった。一応問題としては、ゲートが片吊りになっていなかったか、心出しに不整備の点はなかったか、ボルトが完全に締めつけられていなかったのではないかと、トラネオンピン受台側部くさびの挿入に欠かながなかったか、溶接に施工上の不備がなかったか等の諸点についての検討を行ったが、さしてきめてになる理由はみつけることは出来なかった。

材質については名大で物理的・化学的の諸検査を詳細に行った結果何れも欠点とみるべき点はなくこの点に関する限り問題はないものと判断された。ゲートの操作の適否については操作員の言を信じる限りにおいてはゲート操作規程に抵触するところはなく、確認は出来ないので振動問題で述べたように深く吟味出来ないのは残念であった。そこで引揚ゲートの破壊状態から原因究明を構造力学上の問題、特に坐屈問題に絞っての検討を行った。

2-2 ゲート流出の動態

約 12.0 m の静水圧をうけたテンター・ゲートが突如として欠壊流出した動態を確認することは目撃者も写真もない今日推定することは不可能に近い。しかし橋脚に残されたコンクリートの表面きざあとから推定したゲートがどのように破壊流出していったかを坐屈現象とかみあわせて推定したものが **Fig. 5** に示されたものである。皇委員は1/50の屈撓性の大きい材料（ボール紙）を用いてゲートの模型を作り、これに全水圧の作用点に外力を加えて、簡単な実験を試みてみた。

その結果想定図のようなパターンで脚柱が坐屈していった、ゲートが図のように流出していったことをほぼ推察するにいたった。

順をおってその挙動を推論していくと次のように考えられる。

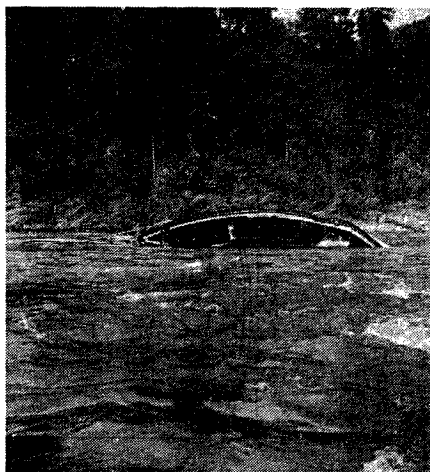


Photo. 3 View of the flashed gate and settled on the river bed, 130m down ward from the dam.

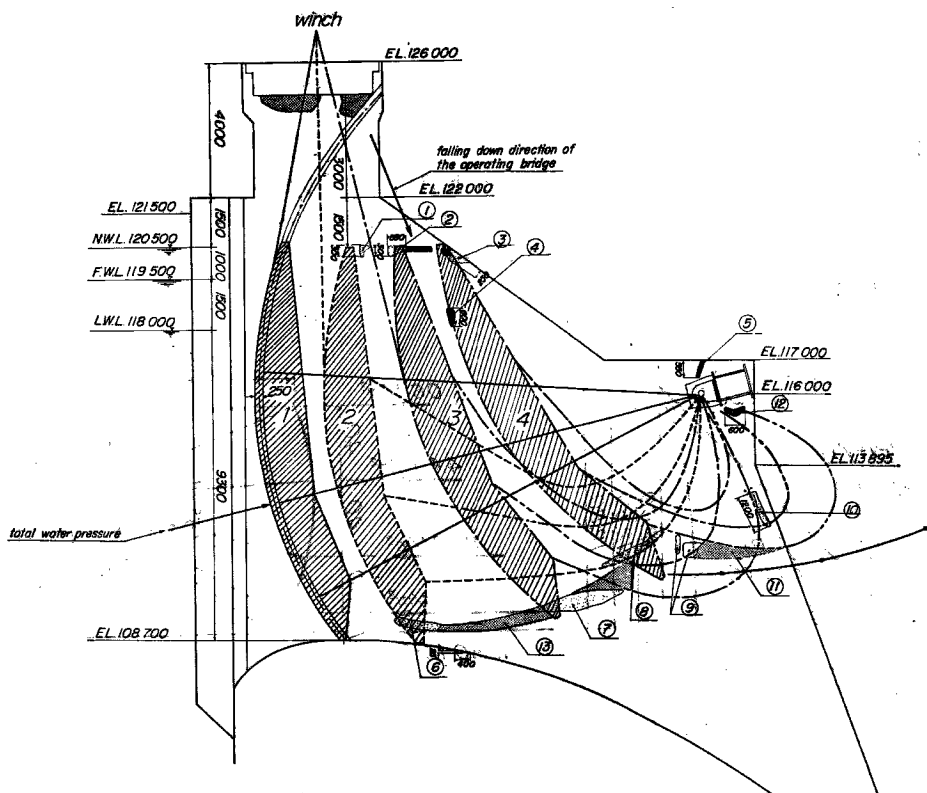


Fig. 5 Estimated flow out pattern of the gate at the dam crest.

- (i) 坐屈は殆んど同時に全脚柱におこつて3本とも殆んど同時に弯曲を始めた。
- (ii) ロープがあまり引張られていない初期の段階では操作橋もあまり変形していない。扉体頂部に近い側面が橋脚コンクリート表面を図に示すかすりきび①のようにけずりとられている。
- (iii) 次の瞬間にはロープにかなりの張力が作用し、操作橋が変形したものと考えられる。このときピン部にはかなりのねじりがおこつて上側のボルトには極めて大きな引張力が働いたと考えられる。かすりきび⑦は扉体下部側面による損傷で、かすりきび⑧及び⑩の位置から脚柱の坐屈状態が図のように推論される。
- (iv) 図の4の段階はトラニオン取付ボルトがちぎれとんで、操作橋が落下する瞬間の状態と推定される。

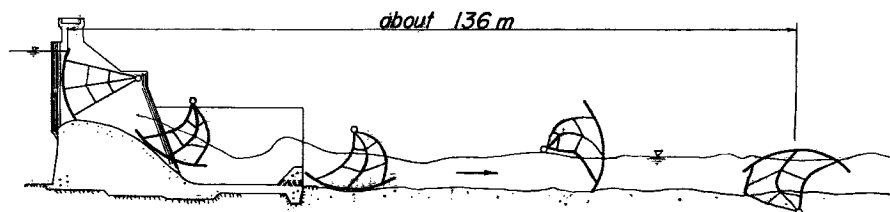


Fig. 6 Estimated flowing down pattern of the gate in the river.

(v) 流失後下流 130 m の河床に着地するまでの間にゲートは半回転してスキンプレートは上方に転位しかまぼこ型に河床上に定着したものと思われる。

以上あくまでもコンクリート表面に残されたききずあとと坐屈現象との想定によって推論したものに基づき確認はないが、大体の流出ゲートの挙動を説明することが出来るのではないかとと思われる。

2-3 荷重と部材作用力

このテント・ゲートに働く外力としては静水圧、地震力、ロープ引張力及自重や特殊な動水圧などが考えられる。それらを図示すると Fig. 7 で平常時水圧は設計水深を 12.6 m にとると、水平方向に $P_h=79.20 \text{ t/m}$ 、垂直方向に $P_v=20.26 \text{ t/m}$ で合成水圧は

$$P = \sqrt{P_h^2 + P_v^2} = 81.750 \text{ t/m}$$

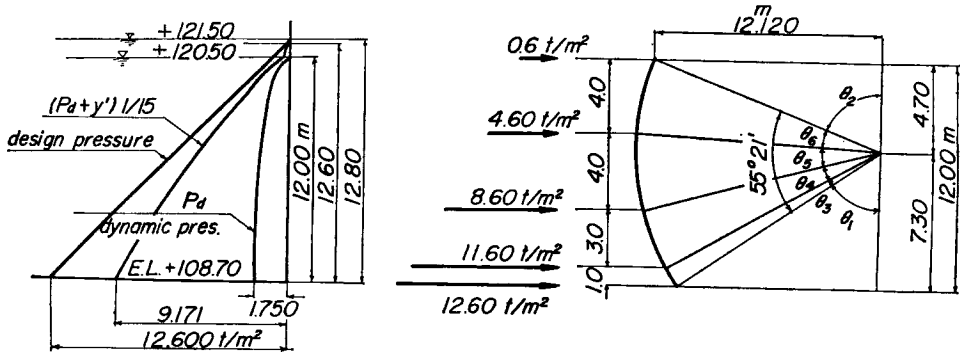


Fig. 7 External Force acting on this tainter gate.

したがって巾 9.0 m の水門 1 門当りの全水圧は $81.750 \text{ t/m} \times 9.0 \text{ m} = 736.0 \text{ ton}$ の力がかかることになる。この静水圧に対するゲート各部材に働く曲げモーメント、剪断力、軸力及び格点のたわみを計算したものが Table 2 であって曲げモーメント、剪断力は省略したが、ゲート構造を A) ヒンジ結合。B) 剛結合。C) 一部斜材添加。D) 全斜材添加 の場合についての上、中、下段の脚柱に働く軸力とトラニオン・ピン側ストラットの格点に働いたわみの計算値を示した。これによると構造系 A のヒンジ結合の場合に軸力もたわみも何れも最大、その他の構造系では、何れもその値は小さく且つ殆んど変化はないことが分る。しかし後に述べるが構造系 C, D のように斜材をいれるとその坐屈強度は格段に大きくなっていくことが分り、本問題

Table 2 Calculated values of thrust and deflection.

Kind of structure		Structure A	Str. B	Str. C	Str. D
Sketch of str.					
Thrust	upper arm	113ton	111ton	111ton	111ton
	middle arm	124	121	124	123
	lower arm	150	148	146	148
Deformation	upper arm	13.0mm	5.4mm	4.1mm	4.0mm
	middle arm	15.8	6.0	4.5	4.5
	lower arm	14.2	6.5	5.1	5.0

の key point になるが、そのことは後に述べることにする。

2-4 現場実験

12.0 m (実際には 11.8 m の水深) の静水圧が作用した場合の和知ダムのゲートに実際どのような応力かはたらいっているかを調べるために 8 月 9 日より準備に着手して、8 月 20 日に全計測作業を完了した。

計測したのは第 1 号ゲートに全水圧をかけてゲート各メンバーの応力分布状態、変位及振動特性であった。実験の方法は第 1 号ゲート前面に角落しをいれて、ゲートとの間の空間にポンプで水を吸入れ充満して Table 3 のような载荷条件で行った。

水圧のかけかたを Fig. 8 に示す。

Table 3 Cases of experiment and loading.

case	gate opening	loading	head	remark
1	perfectly close	half head	0.7h	stress distribution test
2	"	total head	1.00h	" (h=11.8m)
3	perfectly close and right side gate lifted.	"	"	"
4	perfectly close and left side gate lifted.	"	"	"
5	opening 8 m. m.	"	"	vibration test

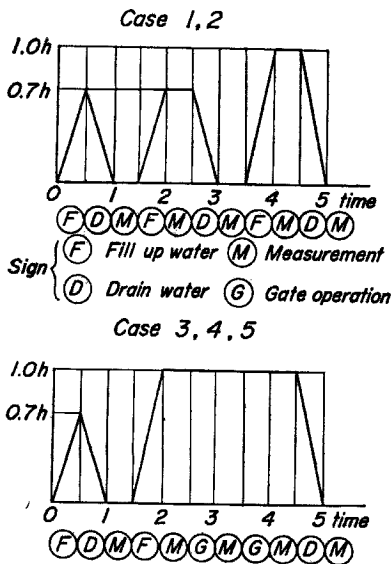


Fig. 8 Time change of loading diagram.

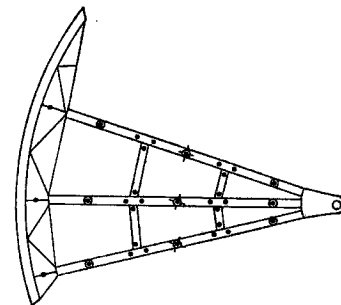


Fig. 9 Measurement points of stress distribution.

実験は温度の影響を考慮して深夜に行われた。応力の測定のために脚柱、ストラット、主桁にストレインゲージを設定して歪の測定が行われた。変位の測定はポテンシロ・メータ及スライド式変位計によって脚柱、ストラット、主桁の交点の変位が計測された。この他ボルトとロープの張力測定も行われた。

振動試験はゲートの開度を 8 mm に保って加速度計によってゲート本体、ロープ及び操作橋梁を一つの

系として固有振動数を計測した。

以下実験の結果を述べよう。

先づ応力分布であるが、これは Fig. 9 に示す測定点について歪を測定して応力を計算した結果をみると中段脚柱 ME, MF 下段脚柱 LE, LF において 1400 kg/cm^2 を超える応力がはたらいていることが分った。片吊りの場合 (15 mm 厚の木片をはさむ) にも同様なことが言えて、その最大値は 1464 kg/cm^2 という値を示すものもあった。ストラットに働く応力はどれも非常に小さく 50 kg/cm^2 前後であり、主桁には $200 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ の応力分布がみられた。

脚柱軸力を求めてみると Table 4 に示すように左右岸でことなっており、右岸脚の値が一般に大きい、その理由はよく分らない。脚柱における軸力の分布を Fig. 10 に示す。

Table 4 Thrust in arm, experimented.

position		full load normally	right side gate lifted	left side gate lifted	remark
left side	upper arm	74.7tonl	80.2ton	83.0ton	
	middle //	01.1	114.3	112.3	
	lower //	112.4	93.5	106.6	
right side	upper //	87.8	89.4	91.0	
	middle //	122.6	126.7	116.9	
	lower //	152.4	128.2	126.7	

Table 5 Deformation value at middle point of arm.

loading condition	case	water depth	measured state	left arm			right arm		
				upper	middle	lower	upper	middle	lower
full load normally	1	0.71h	water pres. 0→1/2	9.8 m.m	—	8.2	7.9	11.0	7.5
	2		1/2→0	8.9	—	8.3	7.9	10.7	7.0
	3	h	0→full	20.4	—	20.1	20.4	22.1	16.1
	4		full→0	20.6	—	22.3	20.6	21.8	14.2
right side gate lifted	5	"	0→full	22.4	23.8	21.0	20.4	22.6	20.1
	6		full→0	19.8	23.8	20.1	17.9	20.2	17.4
left side gate lifted	7	"	0→full	23.1	24.0	22.0	22.4	24.4	24.0
	8		full→0	19.2	23.0	17.8	17.8	19.8	17.6

次に曲げモーメントを求めてプロットしたものが Fig. 11 で主桁との取付けで $+4.0 \text{ ton}\cdot\text{m}$ 程度の正の曲げモーメントが働き、ピン部で $-2.0 \text{ ton}\cdot\text{m}$ の負のモーメントが働いていることが推定される。最大の曲げモーメントは上、中、下段何れの脚柱でも E, F で示されているピン側のストラット格点に生じ $-4.0 \text{ ton}\cdot\text{m}$ 程度である。

変位の測定は Fig. 12 に示す位置にて行われ、脚中央部のたわみは Table 5 に、トラニオンピンの位置のたわみは Table 6 に表示したように脚中央部では 20.0 mm という最大値を示している。ピン部では上下に 0.6 mm 、左前後に右岸側では 0.8 mm 左岸側では 0 に近い値を示していることが分った。

振動実験はゲートを完全に閉じておいてこれを 8.0 mm まで開けて、後再び完全に閉じるまでの 4 段階

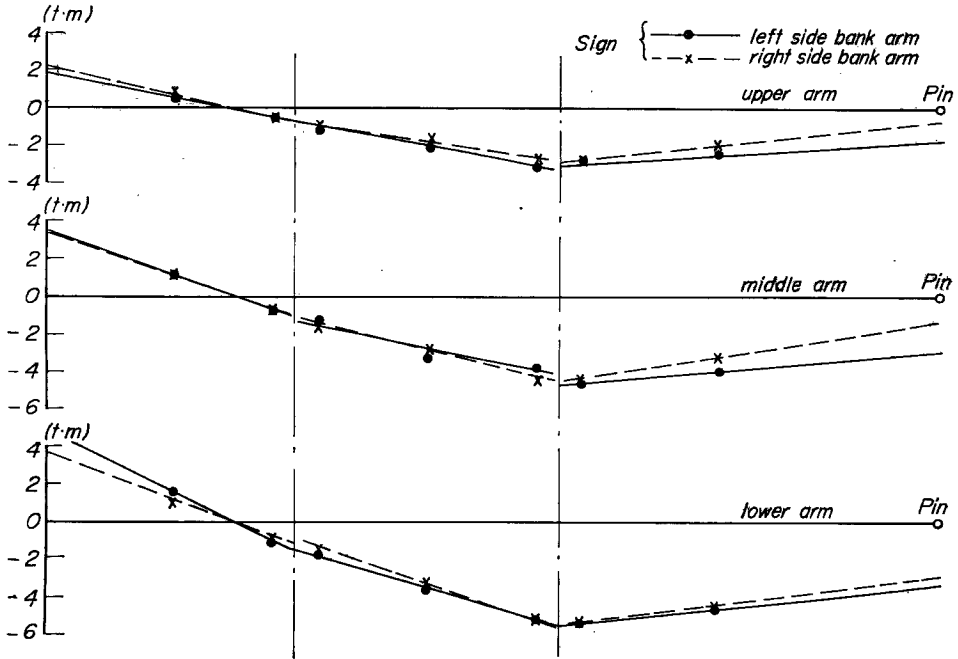


Fig. 10 Thrust Distribution in Arm.

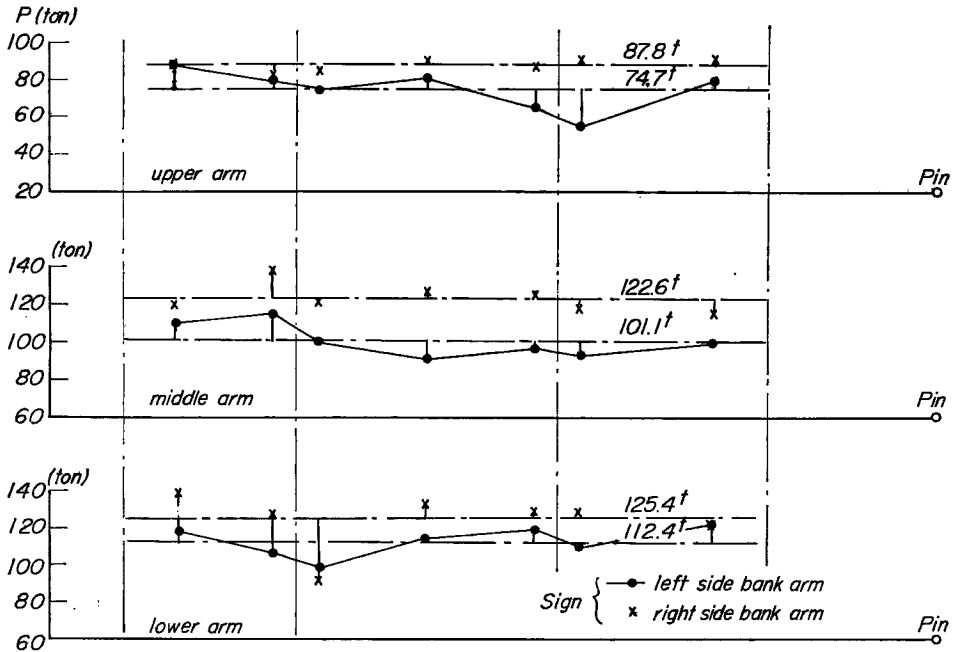


Fig. 11 Bending moment Distribution at full load.

について振動数を測定して Table 7 の結果をえたが十分の資料はとれなかったが、大体の数値として操作期間中を通じて 5.0~8.0 c/sec 程度の極めて小さい値の振動数を与えていることが分った。

軸力と曲げモーメントの計算値との対比を表示したものが Table 8 及び Table 9 である。軸力の計算値はトラニオン・ピンの摩擦、扉体の側面及底面の摩擦を考慮して求められておいて略その値は一致している。曲げモーメントについては計算値と実験値にはかなりの相違がある。

これは脚柱の初期たわみの影響がかなりきいていると考えられる。

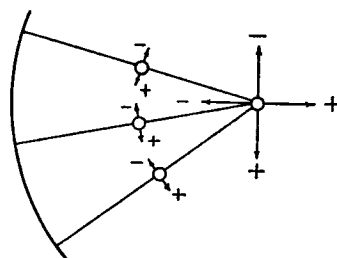


Fig. 12 Measurement Position of Displacement.

Table 6 Deformation value at tranion pin.

case	left arm		right arm	
	up and down ward	left and right direction	up and down ward	left and right direction
1	-3.9 m.m	-1.5	-0.8	-0.3
2	-0.2	+0.2	-0.3	+0.9
3	-0.5	-0.1	-0.3	+0.9
4	-0.7	0.0	-0.6	+0.8
5	-0.7	+0.4	-0.8	+1.1
6	-0.7	-0.4	-0.2	+0.6
7	0.0	-4.5	-0.8	+0.6
8	—	-1.3	-0.8	+1.9

Table 7 Vibration test of gate (frequency)

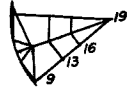
unit. c/s

measuring position	No. of exp.	opening	m. m opening		closing	perfectly closed	remark
left lower arm middle point up and down ward	No. 3 4 6	5.2 5.9	5.2 5.9 5.2 5.4 5.6	5.9 6.5	6.0 6.8	6.0 6.8 × ×	1. water level of No.3 and 4 exp. is full at the beginning of opening operation. Then water level is falling down and is half water depth at the beginning of closing operation. 2. × means that frequency can not be read due to high cycle vibration. 3. △ means the condition of scale out due to water level variation. 4. — means that frequency can not read by small vibration.
right lower arm middle point up and down ward	No. 3 4 6	5.2 × 7.0	5.0 8.0 × 4.8 5.0	8.0	7.0 8.3	7.0 8.3 × 7.5	
LD. 3	No. 3 4 6	6.8 —	6.3 10.5	—	—	— — —	
LD. 4	No. 3 4 6	5.3	5.2	△	△	△	
MD. 4	No. 3 4 6	5.3 5.5	4.8 5.2 5.2	△	△	△ 5.5 5.7	
	No. 3 4 6	5.4	5.0	5.0	6.2	6.2	

Table 8 Experimented and calculated value of thrust.

value	left arm			right arm		
	upper	middle	lower	upper	middle	lower
calculated	81.0	115.0	138.0	81.0	115.0	138.0
experimented	74.7	101.1	112.4	87.8	122.6	125.4

Table 9 Experimented and calculated value of bending moment in lower arm of left side bank.

value	panel pt 9	13	16	19	remark
calculated	-0.82	-0.11	1.14	3.27	
experimented	-4.49	1.45	5.50	3.24	
difference	-3.67	1.56	4.36	-0.03	

要するにこの現地における実物の実験は全水圧が働いた場合の脚柱，ストラット等の各部材に作用している応力とその大きさを知ることが出来，後に論議される脚柱に働く軸力と坐屈強度との関連についての一つの資料を与えるものである。

2-5 坐屈強度

Table 2 に脚柱に作用する軸力の値を表示した。これによると上段脚柱の作用軸力は 113.0 ton であり，以下中段は 124.0 ton，下段は 150.0 ton という値を示している。この軸力に対して，本設計の脚柱坐屈強度はどの位の値をもつものであるかは，この事故の原因を決める重要な鍵になってくるわけである。

両端ヒンジの単柱の坐屈強度は Euler 坐屈理論によると

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{3.14^2 \times 2.1 \times 10^6}{11.8^2} \times 4.610 = 68.6 \text{ ton}$$

坐屈長 l は両端ヒンジとして 11.8 m をとる。しかし本設計は 3 脚柱でストラットをもった系としての構造体であるから単柱の計算値を用いるわけにいかない。構造系として坐屈強度の計算方法にはたわみ角法（山田委員計算担当）と微分方程式による法（関西電力委員会白石委員計算担当）でそれぞれ行なったがその結果によると Table 10 に示したよに 93.5 ton 又は 93.7 ton で殆んど同じ値を示している。軸力が上段脚柱で静水圧によって 113.0 ton 作用するのに対して，この値は極めて危険であることが分る。今回のゲート事故の主たる原因はこの点にあるといっても過言ではあるまい。

Table 10 Buckling strength.

Euler's formula	Deflection method	Energy method
68.6 ton	93.5 ton	93.7 ton

しかし原因の大部分が坐屈強度の不足のみであったとは言いきれないのであって，構造上の他の欠陥，施工管理上の疑問点，などないわけではない。それらは後に総括的意見としてまとめることにする。

面外坐屈の強度計算を行った結果を Table 11 に示したが，この場合には問題はないことを物語っている。

初期撓みの影響を調べてみたのが Table 12 で最危険断面はトラニオン側ストラット取付部におこっているので上段脚柱の計算結果のみを参考に示す。

Table 11 Transverse buckling.

Member	Buckling strength
upper arm	2.882ton
middle arm	3.355
lower arm	3.612

Table 12 Effect due to initial deflection in upper arm.

Stress	Initial deflection			
	10 m. m	20 m. m	30 m. m	40 m. m
$N(t)$	-108.4	-109.2	-110.0	-110.6
$M(t, m)$	1.99	3.79	5.68	7.60
$\sigma_N(\text{kg/cm}^2)$	-764	-770	-775	-779
$\sigma_M(\text{ " })$	± 518	± 987	± 1.479	± 1.979
$\sigma_{N+M}(\text{ " })$	-1.282	-1.757	-2.257	-2.758

この表で分るように初期撓みによる影響は可成り重視すべきことが分る。又トランオンピンの摩擦による曲げモーメントの影響を計算してみると摩擦係数を0.2にとるとピンのまわりの摩擦モーメントは11.4 t·m になって、B点(ピンより1.5mはなれたガセットプレート端) C点(ピン側ストラット取付部) 及D点(ゲート、補剛トラス取付部)の曲げモーメントによる応力増は Table 13 に示す通りである。

Table 13 Stress increment due to friction moment at tranion pin.

Stress	Section		
	B	C	D
$M_f(t, m)$	-2.2	-1.0	+0.9
$\sigma_f(\text{kg/cm}^2)$	± 573	± 260	± 234

3. 結 語

3-1 総括的意見

現段階においては和知ダムゲート技術調査委員会は中間報告を提出したが、なお検討中で最終結論を提出する段階にはいたっていないので決定的な結論を述べることは出来ないが、中間報告の段階では概ね次のことが言える。材質の問題については材料強度を主とした機械的性質試験と、化学成分組織を主として調べた金属学的試験を行ったが何れも問題はなかったことが判明した。ゲート操作に関しては供述書に明記されたことを前提とすればこれまた一応問題はないように思われるが小開度放流に因る振動の問題やゲートの急激な閉じかたによっては発生する流水遮断に因る作用応力の増加、片吊りに因る作用応力の増加などが問題とされるが、明確な判断資料がないので論議することは出来ない。施行に関しては、ロープ調整の可否による片吊の問題やクサビの施工、溶接の適不適の問題などが問題とされたが決定的な原因とはなりえない。結局設計上の問題が最もクローズアップされて坐屈強度に重点が注れたことは上記の通りである。しかし残留応力、初期撓み、ピンの摩擦、小開度放流による振動などが脚柱の初期たわみを助長せしめる要因となったことが考えられ、こうした問題の科学的研究の必要を痛感させられた。主原因が坐屈強度の不足にあったこととすれば、全水門が破壊されることになる筈であるが、第3水門を除いた他の水門が残存した理由は、これらが何れも坐屈の限界にきていて現在既に危険な状態にあるものと解釈せざるをえない。第3水門のみが破壊した特殊な原因は究明することは困難であった。要するにこのゲートの部材が十分な強度もなく、系としての坐屈の安全性に欠けていた点に原因の主因があったものと思われる。

3-2 今後の処理

ダム・ゲートの歴史上殆んどなかった今回の事故にかんがみて多くの教訓を与えられたが、この機会に技

術上、行政上いろいろ反省させられる点があげられる。行政上の問題にはふれないが、次の3点は特に重視されるべき事項のように思われる。

1. 類似の他のゲートについては、その安全性を早急にチェックすること。
2. ゲートの設計について、設計の基準となるべき事項を再検討すること。
3. ゲートの操作にともなって作用する外力ならびにその動的な挙動についての研究を推進すること。

最後に残存している3つのゲートについては早急に充分の補強をすることが望まれる。全面改築とするか、補強するかの問題についてはいろいろ議論のあった点であるが、事故原因の主因が坐屈にあった点にかんがみて斜材を追加して構造系としての強度を増強すれば安全であるとの結論にいたった。また現設計のストラットをとった場合の坐屈強度は90.4 tonで余りきいていないから、脚柱ストラットとももっと補強する必要がある。

本文をまとめるにあたって委員会の委員各位の熱心な御尽力に謝するとともに、多くの資料、実験、計算の結果を利用させて戴いたことを併せて感謝するものである。