

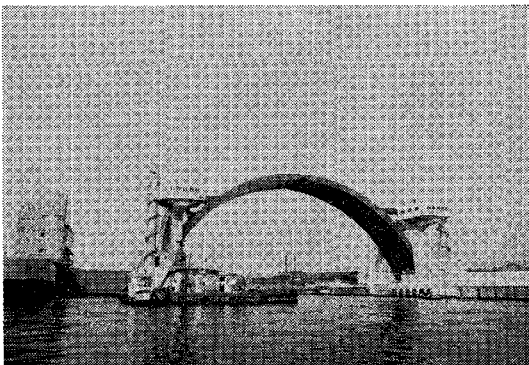
# アーチ形水門の設計

那 智 俊 雄\*

## 1. ま え が き

大阪高潮対策事業として河川の中下流部に防潮水門を設けて高潮を防ぐ、いわゆる“防潮水門方式”による計画を実施してきた。昭和45年11月、大阪市内河川の木津川、尻無川の中流部にアーチ形ゲートをもつ大形防潮水門が竣工し、さきに完成した同形式の安治川水門と合わせて、高潮防御に力を発揮できることとなった。アーチ形ゲートは、オランダのレック河で流量調節用の水門として開発されているが、わが国ではもちろん初めてのものであり、アーチ形採用にあたっては、経済的、技術的な面から総合的に検討し、特に地震、強風、軟弱地盤など、日本のきびしい自然条件のもとで構造的に可能かどうか慎重な審議を行なったうえ、採用に踏切ったものである。わが国で初めてのアーチ形ゲートとはいえ、鉄鋼構造物としては橋梁などで同様構造の実例は、数多く見受けられる。しかし、水門構造物がもつ“動く”という機能をスムーズに発揮させるために、その設計、施工にあたっては、特に意を払う必要があった。以下に、アーチ形ゲート設計にあたって行なわれた動的な検討お

写真-1 完成したアーチ形水門  
(木津川水門)



\* 正会員 大阪府土木部高潮課長

よび設計上の二、三の問題について報告する。

## 2. 基本設計

### (1) 設計条件

本水門の設計条件は、3河川の現況調査、水理計算、模型実験の結果などをもとに表-1のように設定された。

表-1 おもな設計条件

|    |  |
|----|--|
| 水位 | 高潮時 外水位 O.P.+5.70m, 内水位 O.P.+1.50m<br>逆水圧時 外水位 O.P.+2.00m, 内水位 O.P.+3.50m                  |
| 波  | 波高 2.2m<br>波長 36.0m<br>周期 4.8sec   |
| 地震 | 水平震度 0.25<br>鉛直震度 0.10   |
| 風  | ゲート開閉操作時 120 kg/m <sup>2</sup> (風速 35 m/sec)<br>その他のとき 300 kg/m <sup>2</sup> (風速 55 m/sec) |

### (2) スパン割り

洪水の疎通、船舶の安全航行という点からは河川全幅を1門で建設することが望ましいが、水門開放時における不測の故障、高潮来襲直前における船舶の水門内への緊急避難、高潮来襲時までの内水放流を考慮して、副水門をもつ非対称2スパン形式を採用することとした。なお、副水門にはスイング形のゲートを採用している。

### (3) ゲート形式

ゲート形式の選定にあたっては、あらかじめ多くの水門構造について比較設計を行なったが、最終的には、従来より実例の多いローラーゲートとアーチ形ゲートにしぼって検討し、結局、次の諸点においてアーチ形ゲートがすぐれていると判断された。

① 左右の水門基礎の相対変位に対する構造上、操作上の順応度がよい。

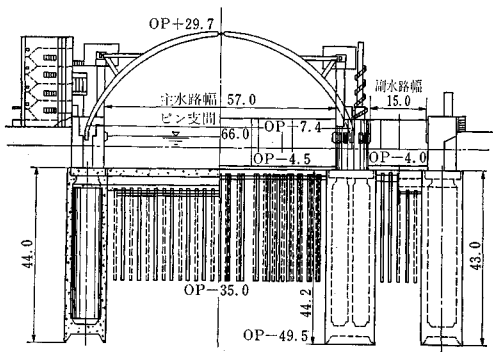
- ② ゲートの重心位置が低く、耐震安定性がよい。
- ③ 強風受圧面積と耐風安定性がよい。
- ④ 船舶航行に対するクリアランスが大きい。
- ⑤ ゲート重量（経済性）が小さい。
- ⑥ 美観がよい。

#### (4) アーチ形ゲートの基本構造

##### a) アーチ中心角

120°, 150°, 180° の3種類についてクリアランス、耐震・耐風安定性、水平スラスト、波圧に対する安定性、鋼重などから検討した結果、水平スラストの比較的少ない150°に決定された。

図一1 アーチ形水門構造図  
(安治川水門, 単位 m)



##### b) 主荷重に対する部材の使い方 (圧縮材または引張材)

ゲートが鋼製であることから、危険な座屈破壊を回避するため、引張材として使用している。この場合、アーチゲートは上流部に向かって凸になるので、高潮時に漂流物がゲートに激突するのを防ぐ緩衝装置（河川を横断してチェーンを張る）の設置が容易となる。

##### c) アーチクラウンのヒンジの有無

軟弱地盤に起因して発生しやすい左右岸の相対変位を吸収できるようにアーチクラウンにヒンジを設け、3ヒンジアーチに近い効果をねらった。

### 3. 動力学的な検討

従来の水門設計が静的な検討にとどまっていたのに対し、本水門の場合、アーチ形式というわが国では例のないゲート形式をとっていること、防災上の重要構造物であることなどを考慮して、ゲートの振動特性を動的に解明し、特に外荷重として支配的である波、地震、風に対しては模型実験を実施し、ゲートの安全性を確認することにした。

#### (1) 耐風安定性

一般に、波圧は防潮水門にとって主荷重のひとつであり、その特性は水門設計に大きく影響する。特に本水門の場合、円弧形アーチという面構造に対する波圧であるため、特有の性格をもつものと推察され、模型実験を含む重点的な検討が行なわれた。この検討によって明らかにされたおもな点は以下のものである。

① アーチゲートに沿う波圧の水平分布は、入射波によってひき起こされるアーチゲート前面の水位変動の大きさに依存している(図-2, 3)。

② アーチゲート前面の水位変動は、平板ゲートのように一様ではなく、入射波の周期、位相差の有無(一様波または切れ波)に応じて特有の分布をもつ。

③ 一様波の場合、入射波の波長が短くなるほど波圧の分布が一様になるが、波長34.2mを極値として、さらに波長が短くなればふたたび一様でなくなる(図-4)。

④ 波圧強度の鉛直分布は、微小振幅式<sup>1)</sup>、Sainflouの簡略式<sup>2)</sup>などの理論式を用い、ゲート前面の水位変動の振幅を波高として計算したものと、よく似ている(図-5)。

図-2 水位変動分布

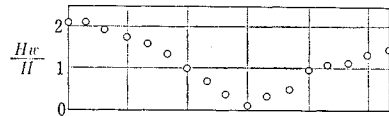
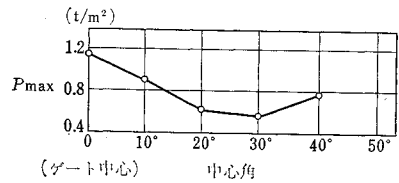


図-3 波圧分布



$H_w$ : ゲート前面の波高  
 $H$ : 入射波の波高  
 $P_{max}$ : 最大波圧

図-4 最大波高比と波長の関係  
(一様波の場合)

(ここに  
 $H_w$ : ゲート前面の波高,  $H$ : 入射波高,  $h$ : 水深,  
 $R$ : 円弧アーチ半径 (34.2m: 一定))

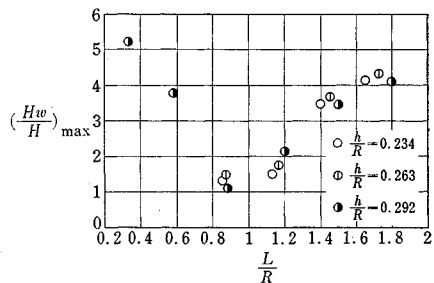
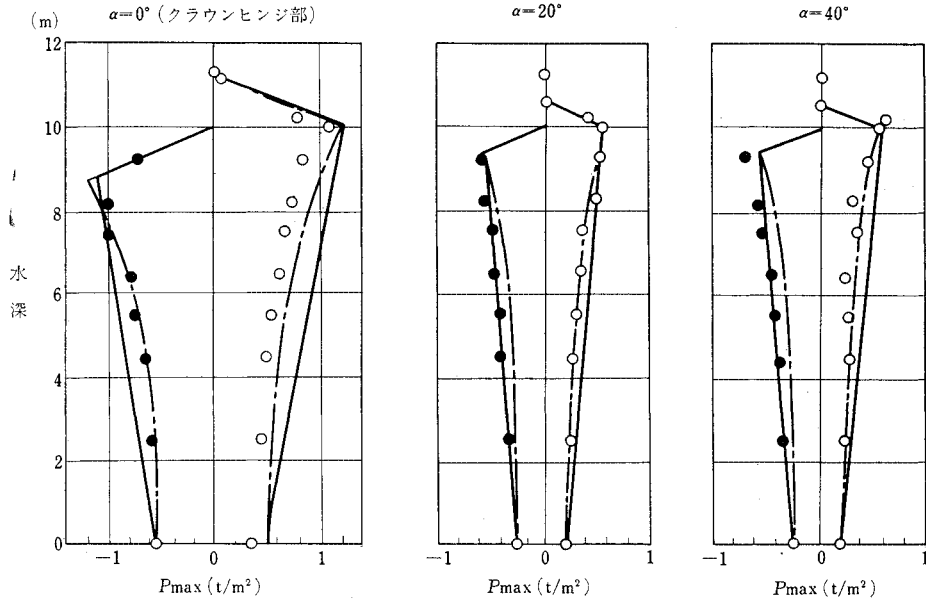


図-5 波圧強度の鉛直分布



凡例

$\alpha$  : 中心角

—— Sainflou式による

● : 波の谷がきたときの負の波圧強度

--- 微小振幅波式による

写真-2 波圧実験 (切れ波)

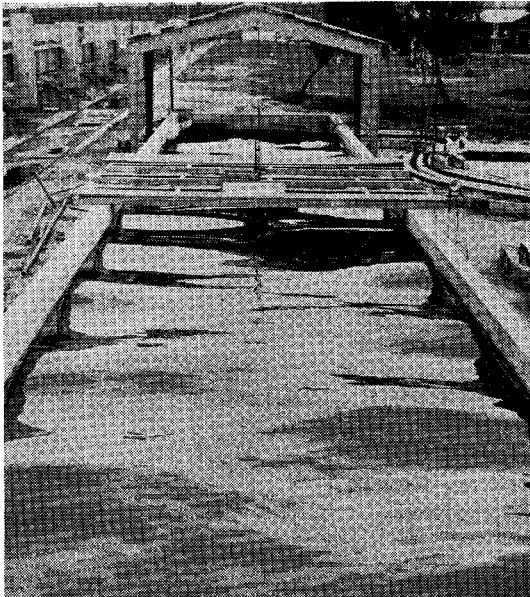
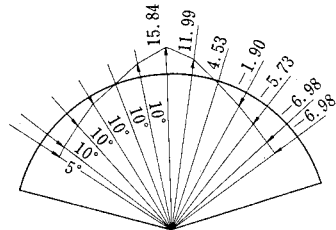
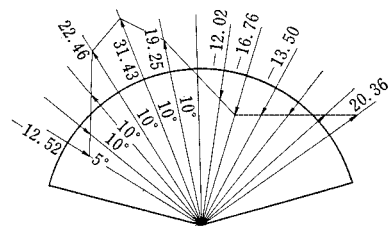


図-6 設計波の波圧分布 (単位  $t \cdot m$ )

(1) 一様波



(2) 切れ波



以上の結果をふまえ、実際の設計にあたっては、次のような点に特に留意した。

㊦ 設計波の周期が波圧の大きさおよび分布に大きく影響することから、周期決定を特に入念に行なった。

㊧ 入射波として、水路全幅にわたって一様に進行す

る波(一様波)のほかに、水路中心線を対称軸として左右で位相にずれのある波(切れ波)も波圧計算の対象とした(写真-2)。

㊨ 波圧計算にあたっては、設計条件で述べた波( $T=4.8$  sec,  $H=2.2$  m,  $L=36.0$  m)に基づいて Sainflou の簡略式によりアーチゲートに沿う波圧を算出し、さ

らに風波であることを考慮して、広井公式による碎波圧を加算した(図-6)。

以上のように、耐波安定性の検討においては、模型実験によって一挙にゲートの安定性を結論づけるのではなく、設計荷重としての波圧の正確な把握を目的とした。

## (2) 耐震安定性

アーチ形水門の建設された安治川、木津川、尻無川の各地点は、かなりの軟弱地盤地帯であり、スパン66m、ライズ25mをもつアーチゲートの地震に対する安全性は、設計上の重要問題であった。設計計算上は、震度法( $K_h=0.25$ ,  $K_v=0.10$ )によることとしたが、本ゲートが鋼製であり、固有周期も大きく、たわみやすいと推察されることから、ゲートの耐震性について動的な検討が加えられた。設計計算で想定された断面を対象に、理論解析のほか、1/15、1/50模型による実験的研究も行なわれ、おもに次の諸点が明らかにされた。

① アーチゲートの面内振動の固有周期、振動モードは理論計算および模型実験の結果から、表-2、図-7のように得られた。固有周期は比較的大きく、振動モー

表-2 ゲートの固有周期 (sec)

| 区 分   | 計算結果  | 1/50模型による実験結果 |
|-------|-------|---------------|
| 逆対称1次 | 0.592 | 0.562         |
| 対称1次  | 0.309 | 0.298         |

ドから、逆対象1次、対称1次の低次振動では、かなりたわみやすいと予想された。

② 水門建設地点の地盤の常時微動を測定した結果では、パワースペクトルの卓越周期は0.4~0.8secであった。そこで、ゲートの地震応答計算の入力地震波としては、卓越周期がこれに近く水平震度が0.2程度であることを基準に選択した結果、Taft, 1952(最大水平加速度:188gal, マグニチュード:7.7)とOlympia, 1949

(最大水平加速度:195gal, マグニチュード:7.1)の強震記録を採用した。また、下部のケーソン基礎と上部のゲートが面外方向にヒンジ結合であり、かつ固有周期が両者で大きく異なっていると考えられることから上下部で別個の応答計算を行なうこととし、ゲートへの入力波として、下部工頂部の応答波を用いた

図-7 振動モード

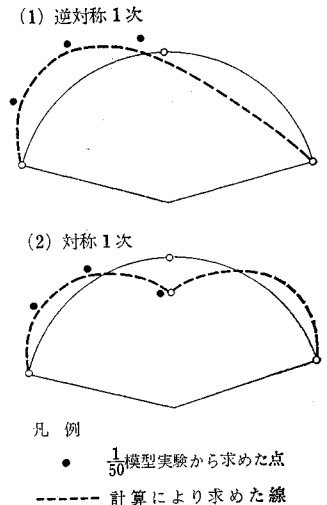
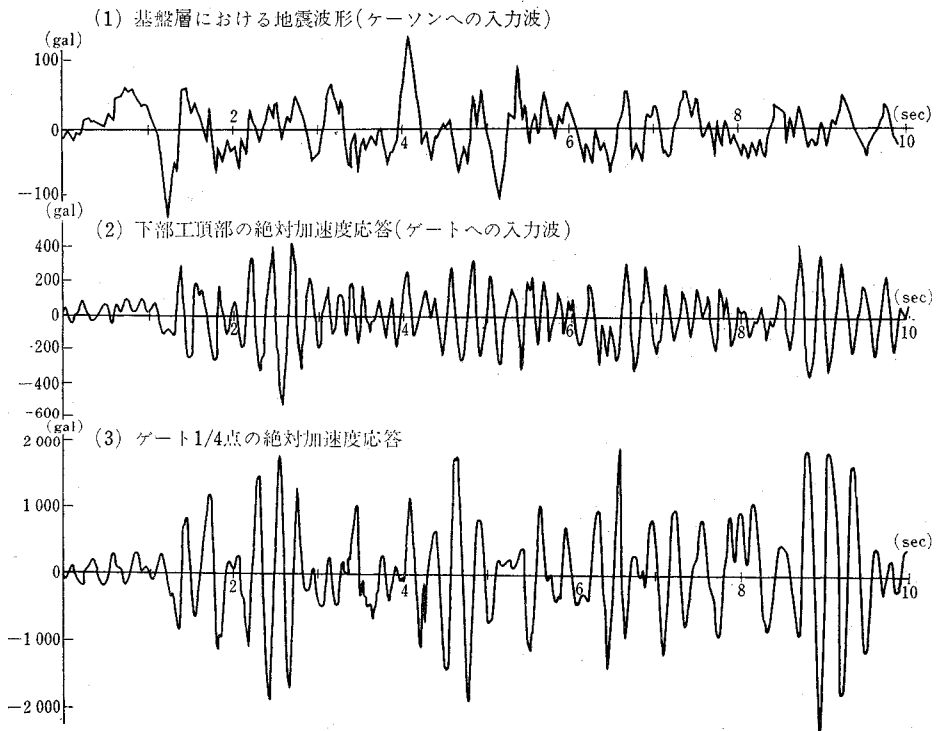


図-8 入力波と応答波 (Taft, 尻無川水門)



(図-8)。

③ ケーソンの応答計算では、基礎の模型実験から減衰定数を10%と推定し、Taft, Olympiaの両地震記録を重複反射理論<sup>3)</sup>によって基盤層における地震波形に変換したのもを用いた。応答波にはケーソンの固有周期0.25 secに近い周期をもつ波が多く、周期化される傾向がみられた(図-8)。

減衰定数の地震応答波形に及ぼす影響は大きく、本ゲートの場合、模型実験の結果から1~3%と推定された。

また、ゲート1/4点の地震応答最大曲げ応力は、1000 kg/cm<sup>2</sup>程度であり、支点反力は水平方向で、震度法による静的計算値の約1.5倍となった。

④ 開状態のゲートは偏心支持され、転倒に対してワイヤーロープで引張る形で支持されている(図-9)。この状態での地震による面外ロッキング振動を計算した結果、ワイヤーロープ圧縮側の変位がかなり大きく(最大12 cm)、引張側へは衝撃的な力が作用し、ワイヤーロープの最大張力は121 tとなった。このほかに、面内ねじれ振動、面外ねじれ振動を概略検討したが、ゲート断面がボックス構造であることから、大した値にならないことが確認された。

以上のように、得られた研究成果から次のような点が指摘された。

⑧ 本ゲートは、耐震的におおむね安定であろうと推察される。

⑨ 地震時に支点に作用する反力に対して、支承構造を耐震的な面からも慎重に設計、施工しなければならない。

⑩ アーチ面外に対しては、ワイヤーロープ圧縮側への揺れの大きいことが懸念されるので、適当なストッパーを設ける必要がある。

### (3) 耐風安定性

構造物が長大化、高層化すれば、その合理的な設計のためには、耐風安定性が重要な要素となってくる。本アーチゲートの場合、従来、よく耐風安定性を研究されてきている吊橋と比較して、かなり剛性は大きいとはいえ、なおかなりのスパンをもち、また、ゲートが曲率をもっていることから、特有の耐風性状を示すものと推定された。それだけに、その解明には困難が予想されたが、

図-9 ゲート側面略図

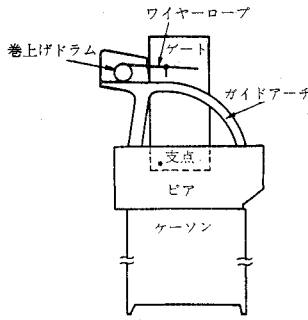
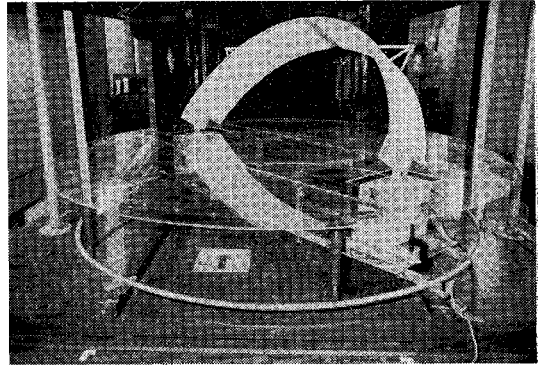


写真-3 風洞実験  
(定常空気力の測定)



理論解析および風洞実験を行ない、アーチゲートの空気力学的特性について、定常空気力、非定常空気力(動的挙動)の両面から検討した。

#### a) 定常空気力

アーチ構造物の場合、曲率をもっているために吊橋のような直線構造物と異なり、直角方向の風速のみを対象とするだけでは不十分であり、また、空気力についても3分力(揚力、抗力、ピッチングモーメント)だけでなく、横力、ヨーイングモーメント、ローリングモーメントを含めた6分力が問題となる。このため、全径間模型による風洞実験を行ない、さまざまな水平角度、迎角の場合の6分力を測定した。それらの最大値を示すと表-3のようであり、正面からの風よりも斜めからの風のときに大きな値を示している。

#### b) 非定常空気力

非定常空気力による不安定振動には各種の現象があげられるが、従来の研究で、特に平板に対するフラッター限界風速については理論解析されている。これに反してアーチ構造物の場合、3次元的な応答を解析する必要があり、非常に難解である。当初、開断面のゲートも検討していたが、この場合の動的耐風応答を、理論的、実験的に

図-10 6分力の方向

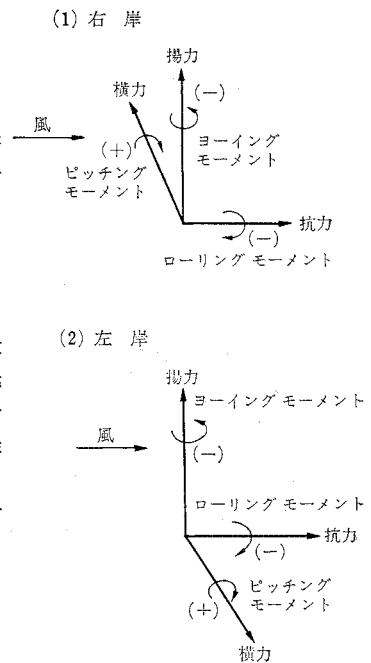


表-3 6 分力の最大値  
(風速 50 m/sec の場合)

| 6 分力           | 空気力の<br>大きさ | 左岸また<br>は右岸 | 水 平 角<br>(時計まわり<br>正) | 迎 角<br>(時計まわり<br>正) |
|----------------|-------------|-------------|-----------------------|---------------------|
| 揚 力            | 89 t        | 右           | 30°                   | 10°                 |
| 抗 力            | 67 t        | 左           | 20°                   | 15°                 |
| ビッチング<br>モーメント | 771 t・m     | 右           | -30°                  | 25°                 |
| 横 力            | -100 t      | 左           | 20°                   | 30°                 |
| ローリング<br>モーメント | -555 t・m    | 右           | 10°                   | 10°                 |

研究した結果、ねじれ座屈に関する限界風速がもっとも低い値となり、フラッター限界風速は、これより高いものとなっていた。その後、ゲートの断面形状を閉断面と決定したことにより、ねじれ剛性が著しく向上し、また空気力特性も基本的に改善され、ねじれ座屈に対する安全度は高くなった。また、ねじれ振動が自励現象を起こす限界風速については、模型実験の結果をもとに試算し、70 m/sec 程度であろうという目安がつけられた。

以上の検討の結果、定常空気力による支点反力が静的設計計算の反力の値に入っていることを確認し、動的安定性に関しては、上で述べたもののほか、アーチゲートの変形応答が連成した場合の挙動、周辺建築物の影響などの検討も残されているが、上で検討した不安定現象の範囲では、アーチ形ゲートの耐風安定性は確保されているだろうという結論を得た。

#### 4. 設計上の問題点

模型実験による動的検討と並行して、アーチ形水門の実施設計が進められていた。基本設計で決定された諸元にそって詳細な設計計算、検討が行なわれたが、ここでは、アーチゲートの設計上、特に問題となった二、三の点を述べることにする。

##### (1) 断面設計の考え方

断面設計に対する支配荷重の組合せは、静水圧+波圧

である。このうち静水圧に対しては、アーチゲートが3ヒンジで完全な円弧だとすると、断面力としては曲げモーメントは発生せず、軸力のみである。実際のゲートの軸線は完全な円弧ではないが、ほぼ円弧に近いので、静水圧には軸力で抵抗するものと考えられる。一方、波圧は不等分布荷重であり、軸力、曲げモーメント、せん断力を生じ、特に切れ波波圧に対する曲げモーメントが大きく、本ゲートの場合、2600 t・m に及んだ。

このため、断面をボックス形状として、曲げ剛性を強化することとした(図-11)。

##### a) 応力計算の考え方

静水圧および波圧による断面力は、アーチ全体としての桁作用によって受け持たれる。このほか、さらに考えねばならないことは、動的に作用する波圧に対し、局部的にスキンプレートが耐えねばならないことである。したがって、ゲートに発生する応力としてはアーチ全体としての桁作用による応力と、波圧によってスキンプレートおよび、これを支持する補助部材に生ずる応力とを合成したものを考えねばならない。この場合、両者を単純に加算すれば、きわめて大きな断面を必要とする。ところが、デッキプレートをもつ桁あるいはボックスガーダーの局部応力は、計算上大きくても桁の耐荷力は他形式の桁に比べて非常に高いことが経験上知られている。そこで、次式<sup>4)</sup>により局部応力を低減して合成応力を求めた。

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 / f$$

ここに

$\sigma$  : 全応力

$\sigma_1$  : ゲート全体としての桁作用によるスキンプレートに生ずる応力

$\sigma_2$  : 局部応力

$f$  : Reduction factor (=2.35)

$$f = P_e / P_c$$

$P_e$  : 実験による許容荷重

$P_c$  : 計算による許容荷重

図-11 ゲート標準断面図  
(単位 mm)

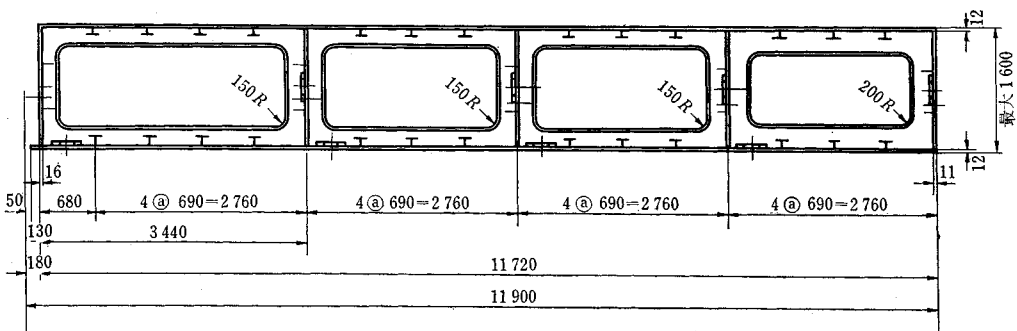
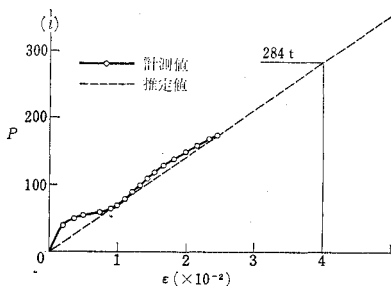


図-12 荷重-ひずみ曲線



b) ゲートの部分破壊試験

上述の Reduction factor  $f=2.35$  は橋梁の場合の値であり、本ゲートの場合、補助部材の間隔が大きく、この値をそのまま採用してよいか問題が残る。これを確認するため実物の部分模型を製作し、載荷試験を行なって Reduction factor を確認するとともに、ゲートの弾性挙動についても検討を行なった。この結果、荷重-ひずみ曲線は 図-12 のようになり、補助桁にクラックの発生する荷重は 284 t と推定された。これにより Reduction factor を計算すると 2.37 となり、当初想定した 2.35 が、ほぼ妥当であることが実証された。

(2) アーチ断面力の計算

a) 端部の固定度

アーチ ゲートの 支承部は 図-13 のようになっており、アーチ面内では必ずしもヒンジとはいえない。一方、12 m に及ぶゲート幅に対し、ゲートを支えるボスの直径は 1.25 m にすぎず、完全固定ともいえない。端部の固定度については、実験的、理論的に検討を行なったが、これを定量的につかむことは困難となり、3 ヒンジ アーチ、1 ヒンジ アーチ両形式の場合を計算し、大きい方の断面力で各部の強度を検討することとした。

b) アーチ軸線の変更と断面力

アーチ ゲートの断面力計算は変形法によったが、この場合、軸線の取り方で断面力の大きさに大きな差が出た。

図-13 支承部概略図

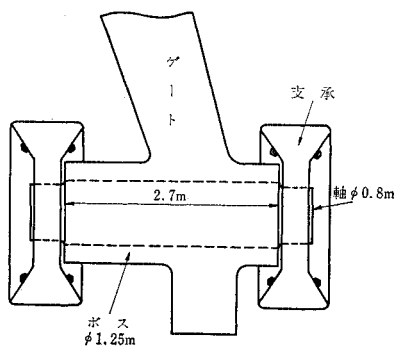
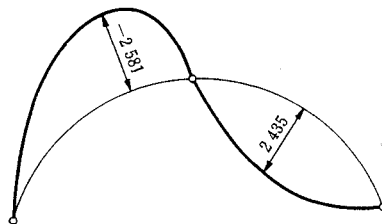


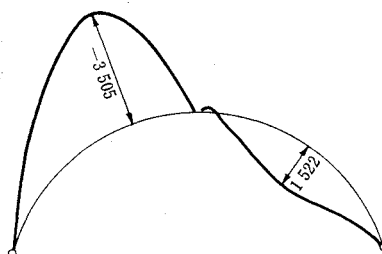
図-14 曲げモーメント図の比較

(荷重; 静水圧+切れ波, 単位 t·m)

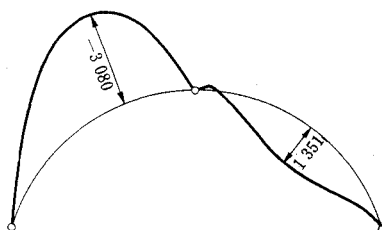
(1) 軸線: 円弧



(2) 軸線: 重心連結線  
(クラウン・ヒンジ突出)



(3) 軸線: 同上  
(有限変位法)



当初の設計では、クラウン ヒンジの位置がゲート重心を結んだ線より約 50 cm 外側へ突出していたが、この場合の曲げモーメントは、軸線が円弧であるときより、かなり大きかった(図-14)。このため、クラウン ヒンジの位置を重心軸を結んだ線に合わせるよう設計変更を行なった。また、有限変位法による繰返し計算を行なった結果では、曲げモーメントは、初期値の約 85% に減少した(図-14)。

c) ゲート端部の剛性

支承部が完全なヒンジ構造とはいえないので、ゲートの端部には拘束モーメントが作用すると考えられる。ゲートの全断面が有効で、かつ完全に固定支持されると考えた場合の拘束モーメントは、1720 t·m に及んだ。

このモーメントに対するゲート端部の応力計算の結果では、ボスマわりの応力集中を考慮するとかなりきびしいものとなった。このため、端部の桁高を落し、曲げ剛性を減らして、拘束モーメントを減少させることを考えた。桁高は小さくするほど拘束モーメントは少なくなるが、ゲート端部の溶接施工性を損なわない範囲というこ

図-15 端部桁高の低減と曲げモーメント  
(荷重：静水圧+切れ波，単位 t・m)

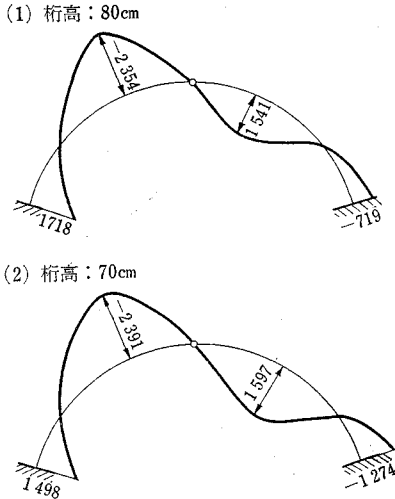
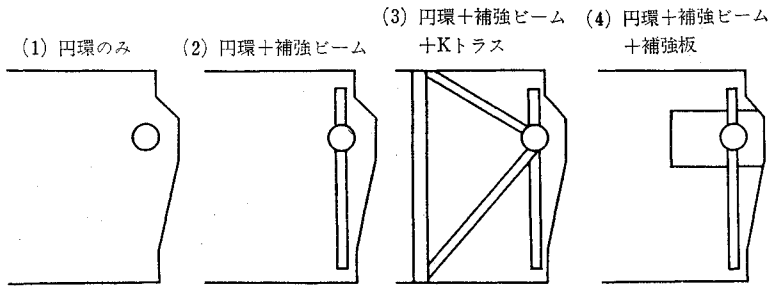


図-16 端部補剛形式



とから、当初設計の桁高 80 cm を 70 cm とし、拘束モーメントを 1500 t・m まで減少させた(図-15)。

d) 端部の応力集中

本ゲートは回転機能をもつ必要があるため、両端支承部はピン構造とし、ピンを中心にゲートが回転する機構とした。したがって、ゲート本体の回転部にはピンを通す円孔が必要となる。また、ゲートに作用する力はすべてこの回転支承部で支持される構造であると同時に、外力として、波、風、地震など動的荷重も考慮しなければならない。これらのことから、ゲート端部の応力集中が大きな問題となった。この応力集中を緩和するための有効な補剛形式を求めることを目的として、光弾性実験による検討を行なった。応力集中を緩和する補剛形式として、図-16 のように 4 種類を想定して実験を行なった結果、応力集中率、応力勾配の面から考えると(4)の形式がもっとも有効であると推察された。ただ、この形式で考慮すべき点として

- ① Shape factor (=縁端距離/ピン径)の値が小さく、これによる応力集中率が大きい。
- ② 補強板接合部の応力勾配が大きい。

の 2 点が指摘された。この結果から、実際のゲート設計では、(4)の形式を採用するとともに、縁端距離をできるだけ大きくし、補強板接合部のテーパをゆるやかにした。

5. あとがき

以上、述べてきたように、構造諸元が決定してからの設計上の主眼は“アーチ形ゲートがわが国のきびしい自然条件のもとで、その水門機能を発揮できるかどうか”の検討におかれてきた。ほかに施工上の問題として

- ① 必要な支持力を得るために、軟弱地盤に対処して O.P.-50 m に及ぶ深層ケーソンを沈設しなくてはならない。
- ② 建設地点が港湾荷役活動の盛んなところであり、船舶が航行可能な航路幅を確保しながら、狭小な場所で施工しなければならない。

③ 台風期、出水期などの気象条件を考慮しながら、安全確実に施工し、かつ早期に水門を完成しなければならない。など、多くの問題点をかかえていた。これらについては別の機会に報告したい。なお今後に残された課題として、水門機能を十分発揮させるためのメンテナンスの問題がある。

本水門の建設にあたって、京都大学の石原教授を中心とする、大阪府高潮対策技術研究会のご指導をいただいた。委員各位に厚くお礼申し上げる次第であります。

文 献

- 1) 永井莊七郎：浅海波 および深海波の重複波の圧力式，第 12 回海岸工学講演会講演集，昭和 40 年 11 月，pp. 92~98.
- 2) 土木学会編：水理公式集，昭和 38 年改定版，昭和 38 年，pp. 505
- 3) 金井清ほか：Comparative Studies of Earthquake Motions on the Ground and Underground II，東京地震研究所，Vol. 44，1966. 3，pp. 609~643
- 4) AISC：Design Manual for Orthotropic Steel plate Deck Bridges，pp. 144
- 5) ほかに、大阪府が委託した調査研究の報告書のうち次のものを参考にした。
  - a) 円弧型防潮水門に作用する波圧についての調査研究報告書
  - b) 円弧型防潮水門の耐震安定に関する調査研究報告書
  - c) 円弧型防潮水門の耐風安定に関する調査研究報告書
  - d) 円弧型防潮水門の支承部補剛構造についての調査研究報告書
  - e) アーチ型防潮水門扉体(部分)破壊試験報告書

(1970.10.19・受付)