

円弧型防潮水門に作用する波圧に関する実験

岩 垣 雄 一*・井 上 雅 夫**・吉 川 昌 宏***

1. 緒 言

大阪府は防潮対策の一つとして、安治川、尻無川および木津川の三河川の中流部に円弧型の防潮水門を建設することになり、現在、下部工の施工が行なわれている¹⁾。従来、このような円弧型の水門はオランダのレック (Lek) 河にその例を見るだけであり、しかも大阪府が現在建設中のものは高潮とそれともなう波浪の影響を考慮しなければならないという点では、初めての試みであるといえる。しかも、この水門に作用する各種の外力のうちで、波圧によるものが非常に重要な要素であると予想されるので、この構造物に働く波圧の特性を十分理解し、それを設計に利用しなければならない。

最近、わが国では波圧の研究がさかに行なわれているが、多くの場合、防波堤などに作用する波圧がほとんどであって、この水門のような円弧型の直立構造物に作用する波圧については、まだ明らかにされていない。

このようなことから、著者らは円弧型水門の単純化したものを対象として、それに作用する波圧についての研究を行なった。この論文は、1/20 の模型縮尺で行なった実験結果を示したもので、ここでは、まず、波圧分布と関連の深い水門前面の水位変動の実験結果と、それについての若干の考察を述べ、波圧については、主として最大波圧の水平および鉛直分布について述べる。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験は、長さ 20 m、幅 3 m、深さ 0.7 m の鉄筋コンクリート製の水槽で行なった。図-1 は実験水槽の概略図である。この水槽の一端には、プランジャー型の造波機がある。この造波機は、とくにプランジャー部分が左右に分割されており、相互に位相を 180° ずらして動かし、片側だけ動かすことによって、切れ波を発生させることができるようになっている。発生波の周期は $0.4 \sim 2.4$ sec、最大波高は約 15 cm である。

造波機から 17.6 m の位置に、図-2 に示す円弧型防潮水門の模型を取りつけた。この模型は、半径 171 cm、

図-1 実験水槽概略図

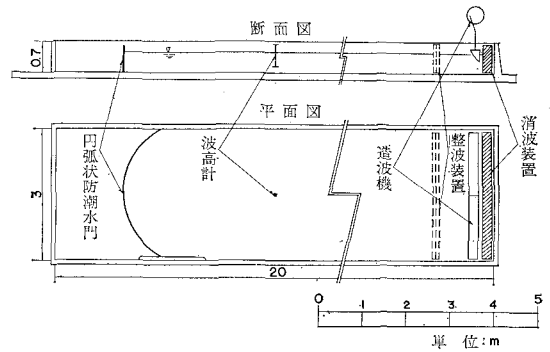
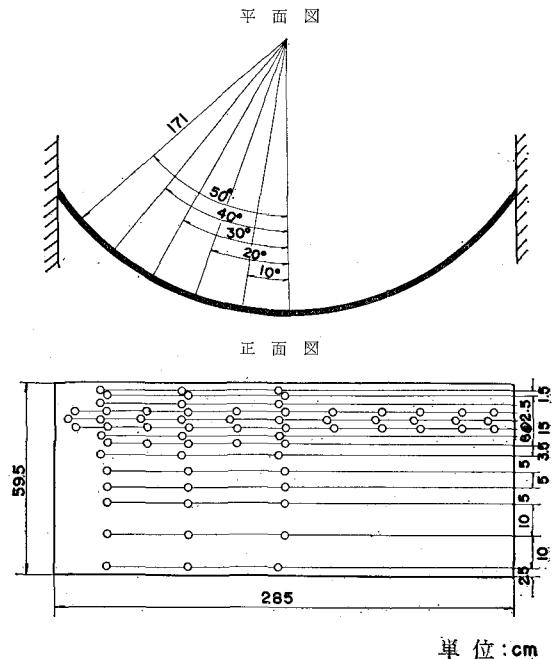


図-2 円弧状防潮水門の模型



中心角 114° の円弧で、幅 285 cm、高さ 59.5 cm、厚さ 6 mm のアルミニウム製であって、水門中心から水平方向に 10° ごと 50° まで、それぞれ水深方向に 3 点あるいは 14 点、波圧計を取りつけるための小孔があげてある。

波圧の測定には、東洋測器製の L.P.U.-0.3 型圧力計 (最大測定圧力: 300 gr/cm^2 , 固有振動数: 500 c/s , 受圧

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 京都大学助手 防災研究所

*** 正会員 工修 運輸省港湾局

面直径:11 mm)を用い、ひずみ増幅器を通じて直記式オシログラフに記録させた。波高の測定は、造波機から10 mの位置に電気抵抗線式波高計をおき、自動平衡型の記録計に記録させた。さらに、水門前面の水位変動を測定するため、16 mm 撮影機を用い、1 sec 当り8コマあるいは16コマの撮影を行なった。

(2) 実験方法

実験は模型縮尺 1/20 とし、Froude の相似律にしたがうことにした²⁾。表-1 は波の特性と水深に対する模型と実物との関係を示したものである。

表-1 模型と実物との関係

(a) 波の特性

周 期 T (sec)		波 高 H (cm)	
模 型	実 物	模 型	実 物
1.0	4.5	2	40
1.2	5.3	5	100
1.4	6.3	10	200
1.6	7.2	12	240

(b) 水 深

模 型 水 深 (cm)	実 物 水 位 (O.P. m)
59.5	+7.40 (水門天端高)
50	+5.50
45	+4.50
40	+3.50
22.5	± 0
0	-4.50 (地盤高)

実験における水深は、一様波の場合 40 cm, 45 cm および 50 cm としたが、切れ波の場合は 50 cm のみを対象とし、実験波の周期は 1.0 sec, 1.2 sec, 1.4 sec および 1.6 sec で、波高は 2~12 cm の範囲について行なった。

実験は一様波を対象とした場合、造波機始動後の 4~5 波の記録は捨て、波高が比較的一様となるつぎの 3~4 波の波高を採用し、波圧についても、その波に対応した記録を実験値として用いた。また、切れ波の場合には、前述したように、造波機の左右のプランジャーの位相をずらして実験を行なった。

3. 円弧型防潮水門前面の水位変動

円弧型防潮水門の前では、普通、直立壁前面で発生するような重複波とは非常に異なった水位の変動が見られる。すなわち、水門前面の水位変動の振幅が場所的に変化し、ある場所ではほとんど振動しないが、他の場所では、入射波の数倍にも増幅されて振動する。こうした水門前面の局所的な水位変動が波圧分布に関連すると考えられる。円弧状の境界面をもつ水域における波の挙動については、これまで、円形湖の水位変動の問題、あるいは、円形および扇形港の副振動の問題として取扱われてきた。しかし、この防潮水門のような場合について

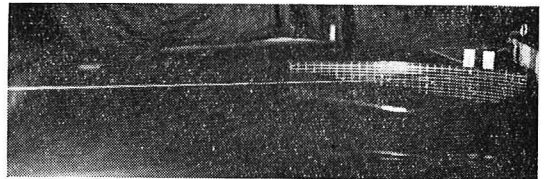
は、まだ何の手がかりも得られていない。こうしたことから、ここでは、まず入射波と水門前面の水位変動との関係を明らかにするため、一様な波と切れ波とを対象とした実験を行ない、その結果について述べるとともに、こうした水位変動の機構について若干の考察を行なうことにする。

(1) 水門前面の水位変動の模様

写真-1 および 2 は、一様波で水深が 45 cm の場合の水門前面の水位変動の模様を示したものである。写真-1 は入射波の周期が 1.0 sec, 2 は 1.6 sec の場合で、それぞれ (a) は水門中心部に波の峯がきたとき、(b) は谷がきたときの写真である。このように、一様波の場合には、水門中心で水位変動の振幅が大きく、その両側には水位変動のほとんどないところが存在していることがわかる。一方、写真-3 および 4 は、造波機の左右のプランジャーの位相を 180° ずらして発生させた切れ波のときの水門前面の状況であり、写真-3 は入射波の周期が 1.0 sec, 4 は 1.6 sec で水深はいずれも 50 cm である。また、(a) と (b) とは半周期ずらして撮影したものである。このように、切れ波の場合には、一様波

写真-1 水門前面の波の状況 (一様波, 周期 1.0 sec の場合)

(a)



(b)

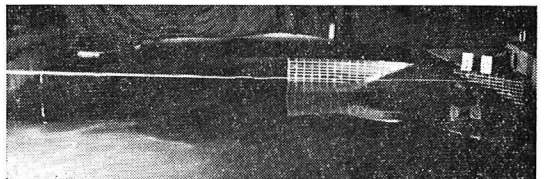
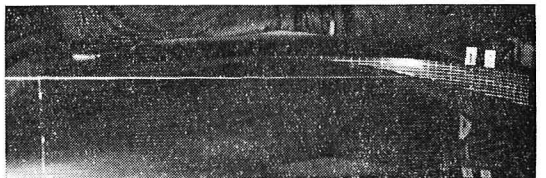


写真-2 水門前面の波の状況 (一様波, 周期 1.6 sec の場合)

(a)



(b)

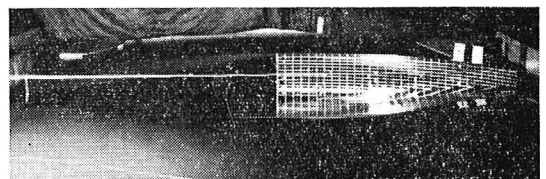
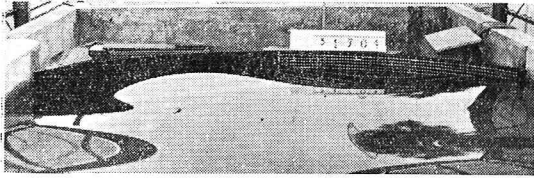


写真-3 水門前面の波の状況 (切れ波, 周期 1.0 sec の場合)

(a)



(b)

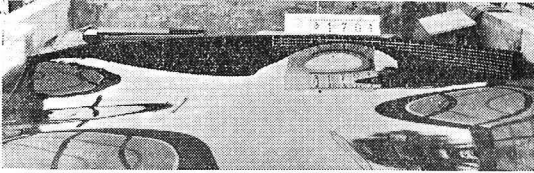
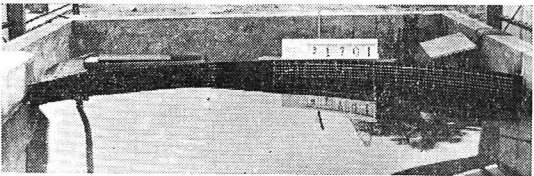
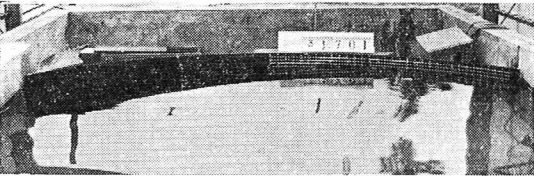


写真-4 水門前面の波の状況 (切れ波, 周期 1.6 sec の場合)

(a)



(b)



の場合とはまったく逆になり、水門中心部での水位変動はほとんどなく、その両側に水位変動の大きいところが

存在していることがわかる。

このように、円弧型防潮水門の前面の水位変動は、入射波と反射波とを重ね合わせた、いわゆる重複波とはかなり現象が異なり、その取扱い方においても、三次元的に考えなければならないことを示している。

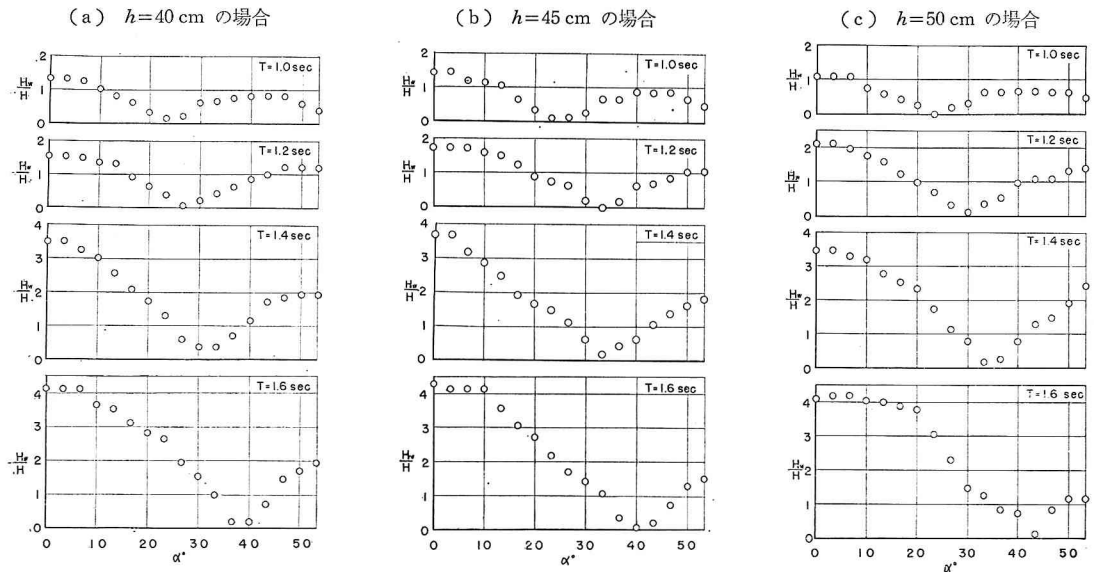
(2) 入射波と水門前面の水位変動との関係

(a) 一様波の場合 ここでは、水門前面の水位変動を 16 mm 撮影機で撮影し、その結果と入射波との関係について述べる。

図-3 (a), (b) および (c) は、水深がそれぞれ 40 cm, 45 cm および 50 cm の場合の水門前面の波高分布を示したものであり、この図の縦軸は、水門前面の波高 H_w と入射波高 H との比、横軸は、水門に沿って水門中心からの角度 α である。この図から、水門前面の波高比 H_w/H は、いずれの場合も水門中心 ($\alpha=0^\circ$) で最大になり、あるところでは、波高比がほとんど 0 になることがわかる。この水位変動のほとんどない位置は入射波の周期に関係し、周期が 1.0 sec, 1.2 sec, 1.4 sec および 1.6 sec の場合、それぞれ $\alpha=23^\circ\sim 27^\circ$, $\alpha=27^\circ\sim 33^\circ$, $\alpha=30^\circ\sim 37^\circ$ および $\alpha=37^\circ\sim 43^\circ$ であり、周期が長い波ほど、水門の端の方に水位変動の節ができることがわかる。波高比 H_w/H の大きさは、水門中心部で周期が 1.0 sec の場合 1.1~1.5 であるのに対し、1.6 sec の場合 4.1~4.3 であり、周期が長くなるほど、水門中心部での波高比が大きくなるがわかる。

図-4 は、この波高比の最大のもの $(H_w/H)_{\max}$ と波長との関係を調べたものである。横軸は波長と水門の曲率半径 R との比 L/R であり、パラメーターは水深 h と R との比 h/R である。いまの場合、全実験を通じ

図-3 水門前面の波高比の場所的变化 (一様波の場合)



て R が一定であるから、波長が長くなると、したがって周期が長くなると、最大波高比もかなり急激に大きくなることを示している。

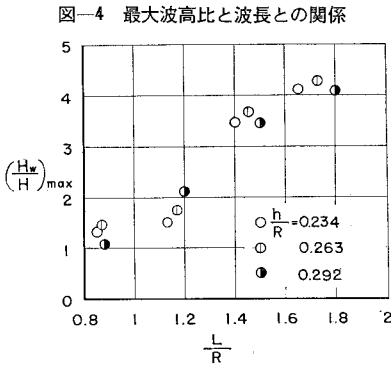


図-5 水位変動の節になる位置と波長との関係

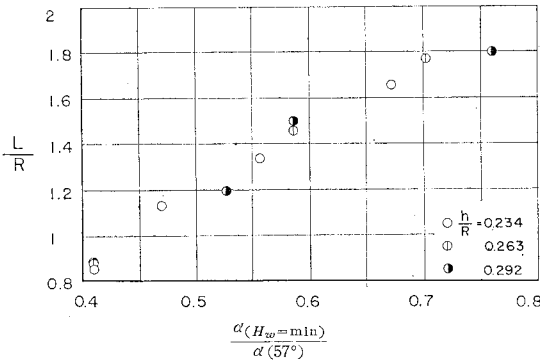
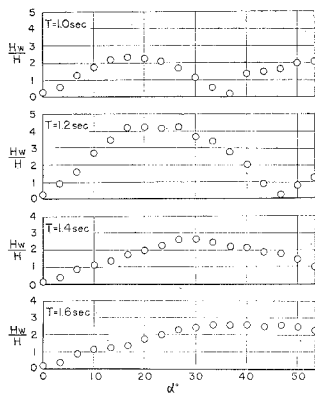


図-5は水位変動の節になる位置と波長との関係を示したものである。縦軸には、前述の L/R 、横軸には H_w が極小値をとるとき α の値 $\alpha(H_w=\min)$ と水門中心から側壁までの角度 ($\alpha=57^\circ$) との比をとって、 h/R をパラメーターとした。この図から、水位変動の節になる位置は、水深には関係なく、もっぱら波長に關係し、波長が長くなると、水門の端の方に移動することがわかる。

(b) 切れ波の場合 図-6は、切れ波の場合の水門前面の波高分布を示したもので、一様波の場合の図-3(c)に対応する。この図から、切れ波の場合には、いずれの周期についても、水門中心部で水位変動がほとんどなく、 α の増加とともに波高比も増加することがわかる。しかし、この増加の仕方も入射波の周期によって異

図-6 水門前面の波高比の場所的变化(切れ波の場合)



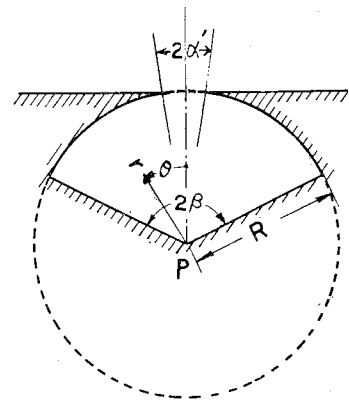
なり、周期が1.0 secや1.2 secの場合には $\alpha=20^\circ$ で極大値をとったあと、ふたたび極小値があらわれるのに対し、周期が1.4 secや1.6 secの場合には、 $\alpha=30^\circ \sim 35^\circ$ で最も大きい水位の変動がみられる。また、切れ波の場合には、実験結果が少ないため、波高比の大きさなどについてはこれ以上の考察は行なわなかった。

以上、ここでは、一様波と切れ波について水門前面の水位変動と入射波との関係について述べたが、この水位変動の仕方は、入射波の周期と密接に關係することがわかった。こうしたことから、実際の設計に際しては、後述の波圧分布とも考え合わせて、慎重に設計波の周期の決定にあたらなければならない。

(3) 水門前面の水位変動の機構に関する考察

従来、こうした円弧状境界面をもつ水域の波の挙動については、小さな港口をもつ場合の円形港の強制振動を取り扱った McNow³⁾、フーリエ変換を用いて各種の形状の港の副振動の問題を解いた合田⁴⁾の研究などがある。しかし、この水門のような場合について、その結果をそのまま適用できるような理論解は得られていない。ここでは合田による扇形港の副振動の解が、どの程度までこうした水門前面の水位変動に適用できるかを検討してみる。

図-7 扇形港(合田⁴⁾より)



合田は図-7に示す扇形港を考え、港内の副振動の水位変化 η_h をつぎのように導いた。

$$\eta_h(r, \theta) = ce^{i(\sigma t + \omega)} \left\{ \frac{\alpha'}{\beta} \frac{J_0(kr)}{J_0'(kR)} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{J_p(kr)}{J_p'(kR)} \sin \frac{n\pi\alpha'}{\beta} \cos \frac{n\pi\theta}{\beta} \right\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $p=n\pi/\beta$ 、 $\sigma=2\pi/T$ (T は波の周期)、 $k=2\pi/L$ (L は波長)、 J_p は p 次のベッセル関数である。また、 c は水粒子の速度を示す未知定数、 ω は港口振動流と港外完全重複波との位相差であり、次式のような。

$$c = \frac{a}{\sqrt{\psi_1^2 + (\psi_2 + \alpha' K/\beta)^2}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\omega = \tan^{-1} \frac{\psi_1}{\psi_2 + \alpha' K / \beta} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ψ_1 , ψ_2 および K はそれぞれ

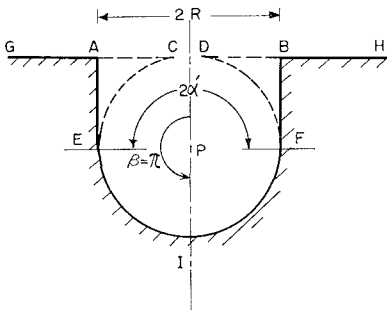
$$\psi_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{kd} \frac{\sin^2 \alpha'}{\alpha'^2 \sqrt{(kd)^2 - \alpha'^2}} d\alpha' \dots\dots\dots (4)$$

$$\psi_2 = \frac{2}{\pi} \int_{kd}^{\infty} \frac{\sin^2 \alpha'}{\alpha'^2 \sqrt{\alpha'^2 - (kd)^2}} d\alpha' \dots\dots\dots (5)$$

$$K = \frac{J_0(kR)}{J_0'(kR)} + 2 \left(\frac{\beta}{\alpha' \pi} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n(kR)}{J_n'(kR)} \times \left(\frac{\sin n\pi\alpha'/\beta}{n} \right)^2 \dots\dots\dots (6)$$

である。ここに、 a は重複波の振幅、 b は港口の半幅である。

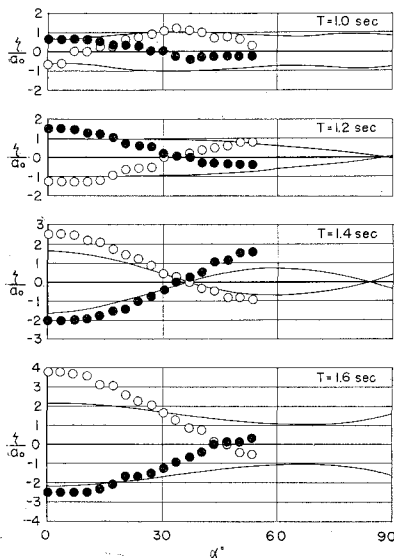
図—8 記号の説明



いま、式(1)では β の値に何の制限もないから $\beta = \pi$ とおき、 α' が小さいという条件を無視して $\alpha' = \pi/2$ まで港口幅を広くした図—8の場合を考える。この場合、式(1)は次式のようになる。

$$\eta_h(r, \theta) = ce^{i(\omega t + \omega)} \left\{ \frac{J_0(kr)}{2J_0'(kR)} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{J_n(kr)}{J_n'(kR)} \sin \frac{n\pi}{2} \cos n\theta \right\} \dots\dots (7)$$

図—9 水門前面に沿う水位変動のモード



図—9 は、一様波で波高が 6.2~6.9 cm 程度、水深が 45 cm の場合の水門前面に沿う水位変動のモードを示したものである。この図は、縦軸に静水面からの水位 η と港口 (図—8 の CD の中点) での水位変動の振幅 a_0 との比を、横軸に水門中心からの角度 α をとったもので、図中の白丸と黒丸とは、位相が半周期ずれた実験結果である。また、図中の曲線は式(7)で、 $r=R$ とし、 $\pi/2 \leq \theta < \pi$ の範囲で計算した値 η_h と a_0 との比であり、次式で計算される。

$$\frac{\eta_h}{a_0} = \frac{\frac{J_0(kR)}{2J_0'(kR)} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{J_n(kR)}{J_n'(kR)} \sin \frac{n\pi}{2} \cos n\theta}{\frac{J_0(kR)}{2J_0'(kR)} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{J_n(kR)}{J_n'(kR)} \sin \frac{n\pi}{2}} \dots\dots\dots (8)$$

この図によると、実験値は周期 1.4 sec の場合以外は理論値にあわず、とくに、周期が 1.0 sec や 1.6 sec の場合には、理論では節が現れないのに、実験でははっきりと現われている。このほか、さきの場合と水理条件は同じで、水門中心と円の曲率中心 (図—8 の I と P) を結ぶ線上の水位変動のモードや曲率中心と水槽側壁 (図—8 の E と P) を結ぶ線上の水位変動のモードについて、理論と実験結果を比較したが、やはり周期が 1.4 sec 以外は実験値と理論とは合わない。すなわち、合田による扇形港の理論をこの円弧型の水門に適用しても、そのままではこの現象を説明できないことがわかった。その理由としては、つぎのことが考えられる。(1) 理論では、港口幅が十分に小さく、したがって、港口全幅にわたって、港口に法線方向の水粒子速度の水平成分が一様であるとしたのに対し、実験では、港口幅が実験水槽の幅に等しく、水粒子速度の成分が一様であるとは考えられない。(2) 理論では、港外の海岸線が入射波の進行方向に無限にのびているが、実験では海岸線が存在せず、完全重複波が生じていない。(3) 水門の円弧が、中心角 114° の開きしかないが、理論では半円である。

今後こうした点を考慮して港内の水位変動の分布関数を求められれば、こうした現象を適確に説明することができよう。

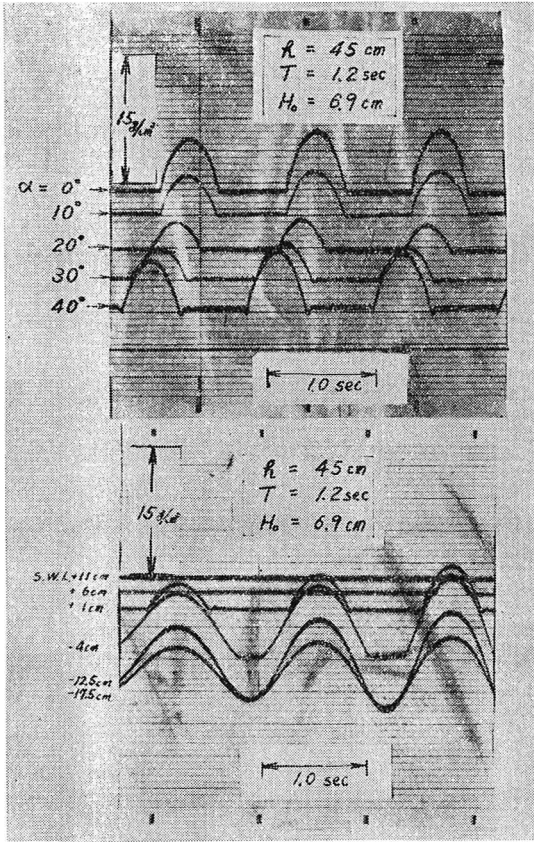
4. 円弧型防潮水門に作用する波圧

3. においては、水門前面の波が、入射波と反射波とを単に重ね合わせたものでなく、入射波の周期によってその様子が非常に異なる一種の副振動であることを明らかにした。ここでは、そのような場合における波圧の測定を行ない、主として最大波圧の水平および鉛直分布について述べる。

(1) 圧力波形

写真—5 は、一様波の波圧の測定記録の一例を示したもので、上のは静水面上 1 cm のところに水平方向に波圧計を設置した場合であって、水門の端の方から波

写真-5 圧力波形の一例



圧を感じ始め、順次中央に移動していく時間のずれがよくわかる。下のものは、 $\alpha=0^\circ$ の位置に鉛直方向に波圧計を設置したときの記録であり、静水面近くの波圧計は、上の写真のように圧力波形の下方が切れたようになるのに対して、いつも水中にあるものは、水面波形と同様な波形を描き、実験の範囲内では、2倍周期数成分はほとんどの場合現われなかった。

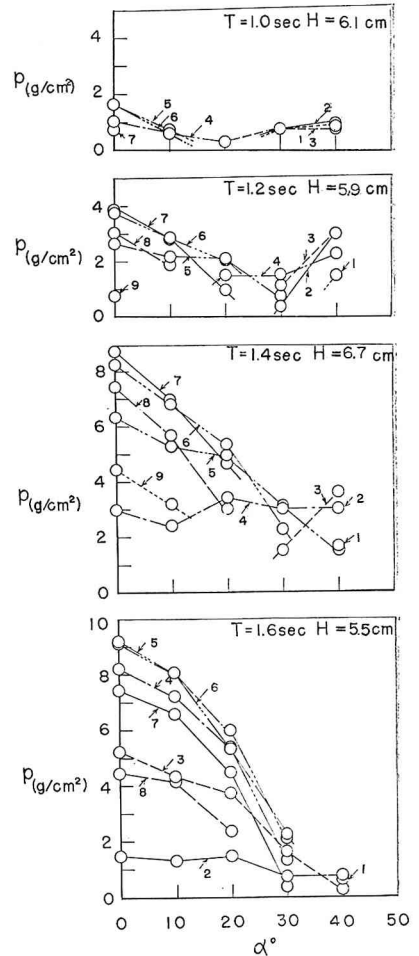
(2) 同時波圧の水平方向の分布

図-10は、一様波で水深が40cmの場合の静水面上1cmにおける同時波圧の水平方向の分布を示したものである。図中の数字は、 $\alpha=40^\circ$ の位置の波圧計が波圧を感じてからの経過時間(0.1secごと)を示したもので、5の線は0.5sec後の波圧分布をあらわしている。これらの図によると、当然のことではあるが、周期が1.0secおよび1.2secの短い波については、 $\alpha=40^\circ$ の位置の波圧計が波圧を感じてから0.4~0.5sec後に水門全体に波圧を感じ、0.5~0.7sec後に水門中心で最大波圧が生じているのに対し、1.4secおよび1.6secの波は、0.2~0.4sec後に水門全体にわたって波圧を感じ、0.5~0.7sec後に水門中心で最大波圧が生じていることがわかる。

(3) 最大波圧の水平方向の分布

(a) 一様波の場合 図-11は静水面上1cmにお

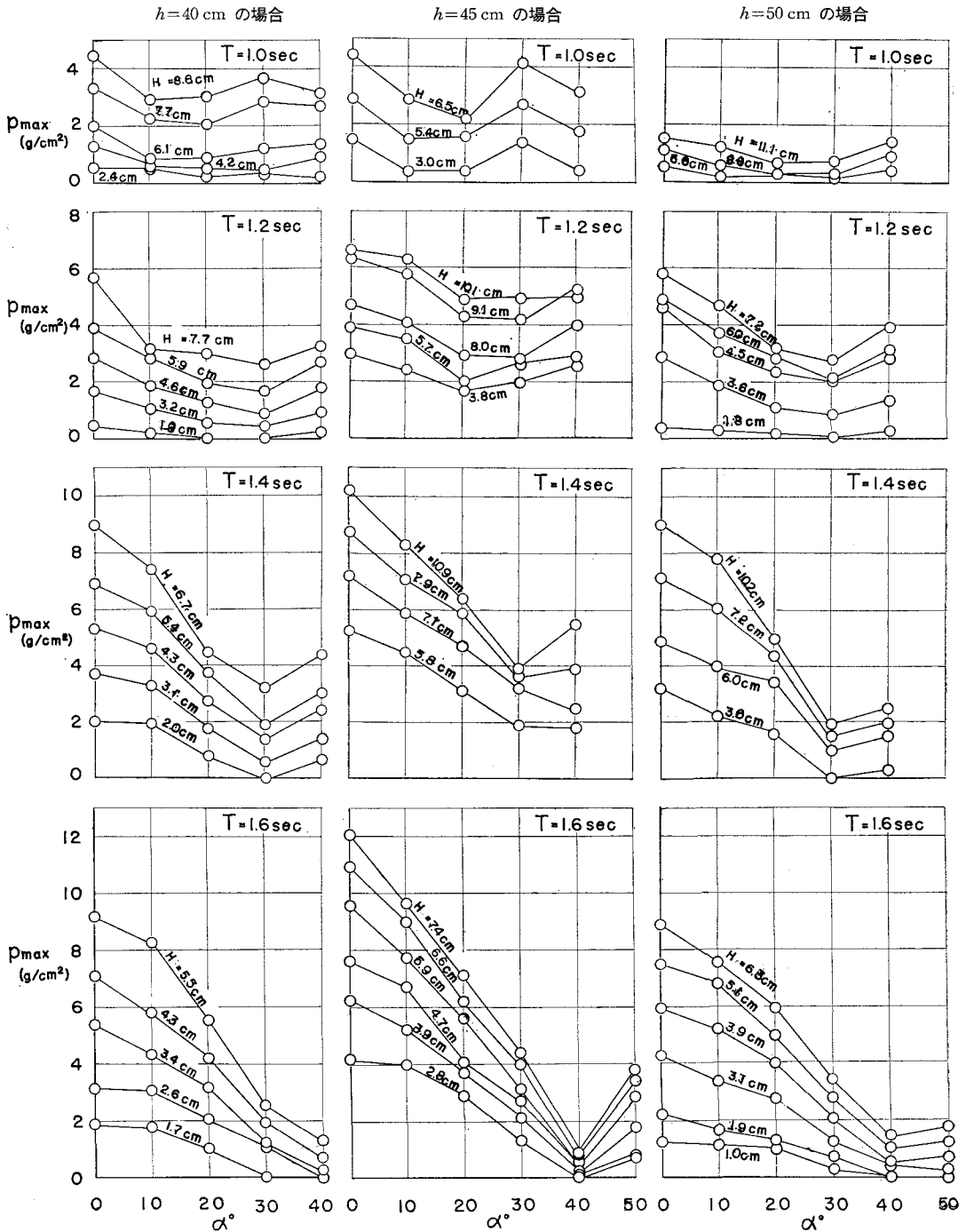
図-10 同時波圧の水平分布



ける最大波圧強度 $p_{\max}$ の水平方向の分布を入射波高をパラメーターとして示したものである。この図から、 $p_{\max}$ の値は $\alpha=0^\circ$ で最大で、 α が増加すると減少し、 α のある値で極小値をとり、ふたたび増大する傾向をもっていることがわかる。この $p_{\max}$ が極小値をとるときの α の値は、入射波の周期に関係し、周期が1.0sec、1.2sec、1.4sec および 1.6sec のときは、それぞれ 20° 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 30° および 40° 付近であり、周期が長いほど、 α の値も大きいことがわかる。波高が増加すれば、 $p_{\max}$ の値も増加するが、波圧分布の形状はあまり変化しない。このように最大波圧の水平分布が周期によって顕著に異なり、その特性が3.で述べた水位変動の特性に依存している。すなわち、水位変動の振幅の大きいところでは波圧も大きく、逆に振幅の小さいところでは波圧も小さくなり、結局、このような曲面に作用する波圧の問題を解決するためには、曲面前面の水位変動の機構を明らかにしなければならない。

(b) 切れ波の場合 図-12は、前述した切れ波の場合の静水面上1cmにおける水平方向の分布を示した

図-11 最大波圧の水平分布 (一様波の場合)



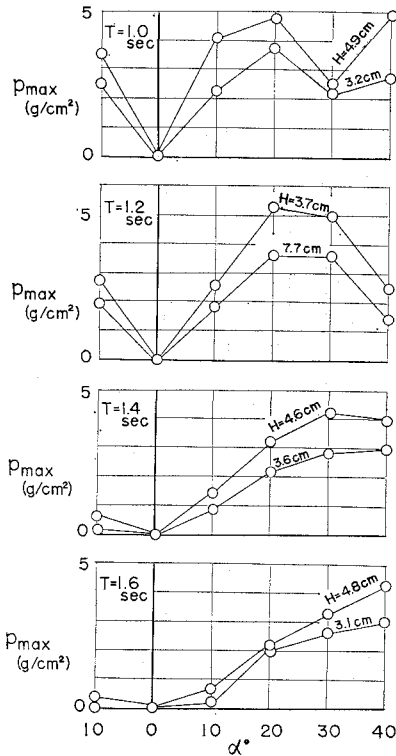
ものである。切れ波の場合の波圧分布は一様波の場合と異なり、 $p_{\max}$ は水門中心部で最小で、ほとんど 0 であり、 α の増加とともに増加し、周期が 1.0 sec および 1.2 sec の場合には、 $\alpha = 20^\circ$ 付近で極大値になり、その後減少する。この傾向は切れ波の水位変動の実験結果を

示した図-6 の傾向と一致しており、切れ波の場合についても、その波圧分布の特性が水位変動の特性にほとんど依存することがわかった。

(4) 最大波圧の鉛直方向の分布

(a) 一様波の場合 図-13 は、水深が 50 cm の

図一12 最大波圧の水平分布(切れ波の場合)



場合の最大波圧の鉛直分布を示したものである。この図には、波の峯がきたときの最大波圧強度のほかに、谷がきたときの負の最大波圧強度も示してある。図中の実線、一点鎖線および破線はそれぞれ微小振幅波理論⁵⁾、Saintflou の簡略公式⁶⁾ および岸による2次近似式⁷⁾ から計算で求めた鉛直分布であり、○印は合田による4次近似式の図表⁸⁾ から計算した値である。いま、これらの式の適用に際して問題になるのは、波高としてどこの波高を採用するかである。ここでは前述したように水門前面の水位変動が波圧に関係することがわかったので、水門前面の半波高 $H_w/2$ を用いて計算した。これらの図から、一般に実験による波圧分布は計算で求めたものとよく似ており、曲面での波圧の鉛直分布も、波高のとり方によっては、便宜的ではあるが、従来の直立壁での波圧式によっても計算が可能ながわかる。また、実験の範囲内では、各理論間には大差がなく、実験値も比較的良好一致している。

(b) 切れ波の場合

図一14は水深が 50 cm の場合の最大波圧の鉛直分布を示したものである。図中には、図一13と同様各理論式による分布も示してある。この場合も、波高として水門前面の半波高を用いた。これらの図によると、実験値の散乱はかなりあるが、結果は一樣波の場合と同様であり、切れ波の場合についても、

図一13 最大波圧の鉛直分布(一樣波の場合)

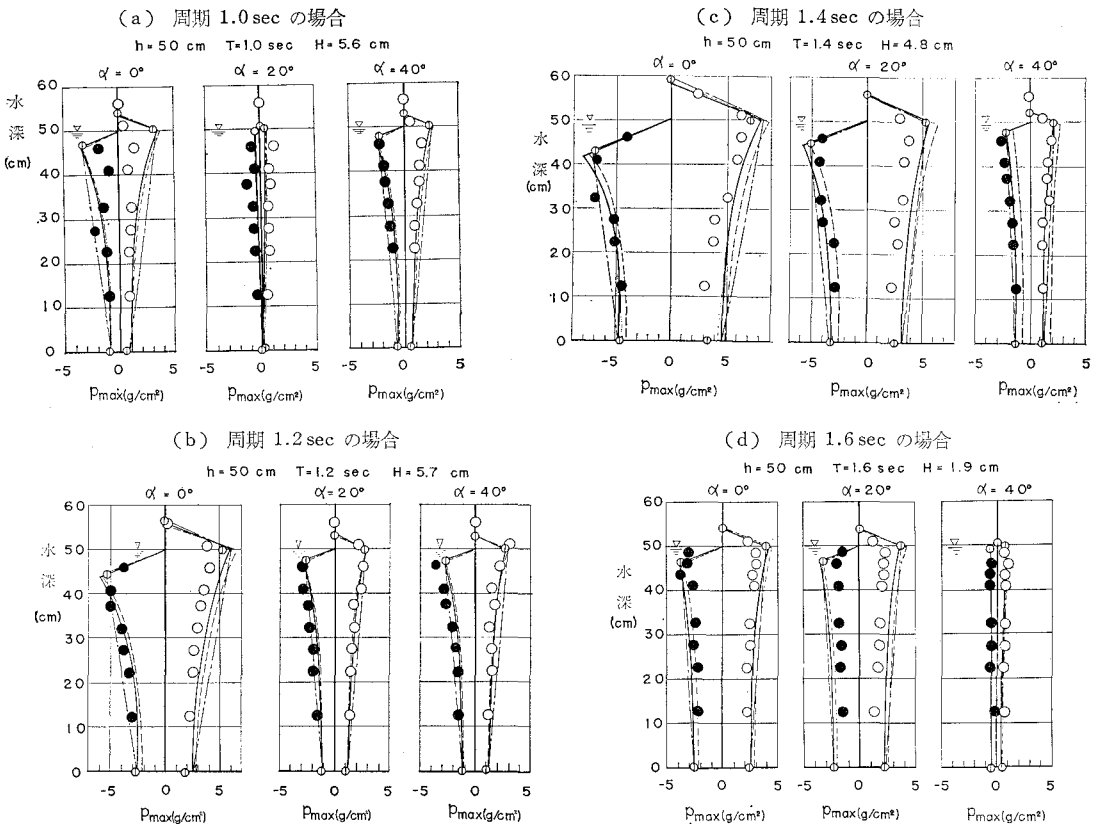
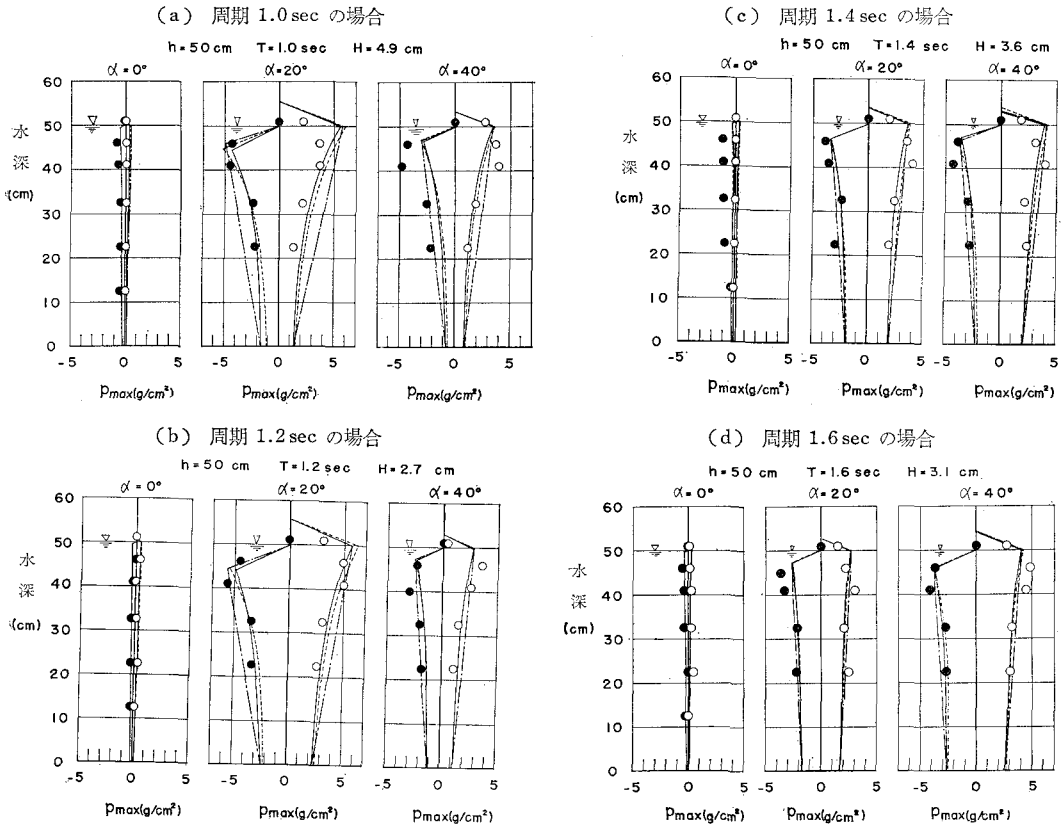


図-14 最大波圧の鉛直分布 (切れ波の場合)



前面の水位変動がわかれば、従来の重複波の波圧式を用いて、鉛直分布を求めることができよう。

5. 結 語

この論文では、円弧型防潮水門に作用する波圧について行なった実験の結果について述べた。ここでは、まず、こうした曲面構造物に作用する波圧を知るには、その前面の水位変動を明らかにしなければならないという立場から、水門前面の波の状況を詳細に調べ、その結果と入射波との関係を明らかにした。しかし、この水位変動の機構については、十分な説明が行なえなかった。波圧については、主として最大波圧についての考察を行ない、こうした水門の波圧分布も、波高として水門前面での半波高を用いることによって、従来の重複波圧式が実験値とかなりよく一致することがわかった。

今後は、水門前面の水位変動の機構の解明と、水門の補剛材など詳細構造を考慮したときの揚圧力の問題などについて研究を進めていきたい。

最後に、本研究は大阪府土木部高潮課の委託によるものであることを記し、多大の援助を感謝するとともに、

実験に助力していただいた海岸研究室の諸氏に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 松本 正：淀川河口部の高潮について，土木学会誌，52巻6号，昭 42.6，pp. 61～64.
- 2) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について，海岸工学の最近の進歩，土木学会関西支部，昭 36.3，pp. 21～42.
- 3) McNown, J.S.: Waves and Seiche in Idealized Ports, U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Circular 521, 1952, pp. 153～164.
- 4) 合田良実：長方形および扇形の港の副振動について——フーリエ変換を用いた解法——，第 10 回海岸工学講演会講演集，昭 38.10，pp. 53～58.
- 5) 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 40.11，pp. 92～98.
- 6) 土木学会編：水理公式集，昭和 38 年増補改訂版，昭 38.8，p. 505.
- 7) 岸 力：海岸堤防に関する研究(2)——有限振幅浅水重複波——，建設省土木研究所報告，第 90 号の 3，昭 30，pp. 27～54.
- 8) 合田良実・柿崎秀作：有限振幅波およびその波圧に関する研究，運輸省港湾技術研究所報告，第 5 巻，10 号，昭 41.9，pp. 1～50.