

# 棧橋に働く揚圧力に関する実験的研究

堀 川 清 司\*・中 尾 忠 彦\*\*・矢 島 昭 弘\*\*\*

## 1. 緒 論

棧橋に作用する揚圧力によって、棧橋が破壊する災害が続く、しかもその本質が未だ十分に究明されるに至っていない。われわれはこの問題に関連し、基礎的な実験によって揚圧力の発生機構を解明しようとするのと同時に、その減殺をはかる対策についても模型実験を行なってその効果を調べた。

今回行なった実験は大別してつぎの3種類である。

(1) 横棧橋を単純化した形の模型を用い、波および棧橋の条件をいろいろに変化させて、それぞれの揚圧力におよぼす影響を調べた。

(2) 揚圧力を減殺し、さらには泊地を静穏にするために反射率を軽減することを目的として、消波ブロックや網目渡版を用いた場合の効果を調べた。

(3) 先の実験(1)の条件から背後の直立壁を除き、床版のみを設けて実験を行なった。

以下順次に実験の内容とその結果を説明し、最後に比較、考察を行なう。

## 2. 横棧橋模型についての実験

### (1) 実験方法

実験装置は、図-1に示すように、長さ18m、幅0.68m、高さ0.60mの二次元造波水槽に棧橋模型を設置し、フラッター式造波機により波を起こした。用いた波圧計は、鋼製ひずみリングに受圧板を取り付けたものであり、模型に装着してその固有振動数を測定した結果、約250 cpsであった。揚圧力測定位置は棧橋部の後端、すなわち実際には棧橋部の動揺などに対処して渡版となっ

図-1 実験(1)の装置の概要

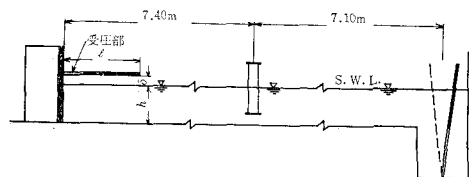


表-1 棧橋高さと水深の組合せ

| 棧橋高 (cm) | 水深 (クリアランス) (cm)       |
|----------|------------------------|
| 36       | 32 (4), 34 (2)         |
| 39       | 34 (5), 36 (3), 38 (1) |
| 42       | 36 (6), 38 (4), 40 (2) |

ている部分であり、しかも被害も最も多く集中し、揚圧力が大きいと考えられる部分である。

後述の実験(2)、(3)においても同様であるが、受圧板の変位を極力小さくし、また変位を無視している。波圧現象の水と構造物との相互作用という本質よりすれば、このように模型をできるだけ固定することは、特に不安定領域で実際の現象に反すると思われる。しかしながら構造的な相似まで求めることは困難であり、構造物がほとんど動かない極限的な値を知ることも有意義であろう。

棧橋の水底からの高さを36, 39, 42 cmの3段階に変え、それに応じて表-1のように、水深を3段階にとった。棧橋の直立壁から先端までの突出幅  $l$  は40, 57, 95 cmとした。波の変数として、周期  $T$  を0.8, 1.0, 1.4, 2.0 secの4段階、水深  $h$  は静水面と床版下面とのクリアランス  $\delta$  に応じて、表-1のように3段階に変化させた。ただし上記の組合せから若干のケースは省略した。

実験結果から、以上の各変数の効果を以下に考察する。

### (2) 水深および棧橋高さの影響

これらは単独で扱うよりもその差、つまり静水面と床版下面とのクリアランス  $\delta$  として考慮するのが妥当である。クリアランスが同じで水深、したがって棧橋高の異なる場合についての実験結果を図-2に示すが、水深の大きな方が大きな揚圧力をおよぼす傾向がある。しかし各種の無次元化によってこの関係が不明瞭になってしまう。したがってこの実験の範囲では水深は他の要素に比して影響が小さいと考えられ、以下の考察では無視する。

### (3) クリアランスの影響

クリアランスも波高との関係によってその効果が異なることは図-3から認められる。すなわち同じ波高であってもクリアランスが小さくなれば揚圧力が増加する。しかしクリアランスが極端に小さくなった時には必ずしも増加せず、波圧の極大値の存在が推察されるが、はっきりとつきとめるまでに至らなかった。

\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部

\*\* 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科

\*\*\* 正会員 東京大学研究員

図-2 揚圧力におよぼす水深の影響

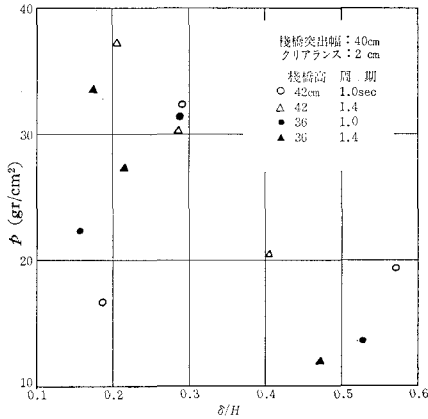
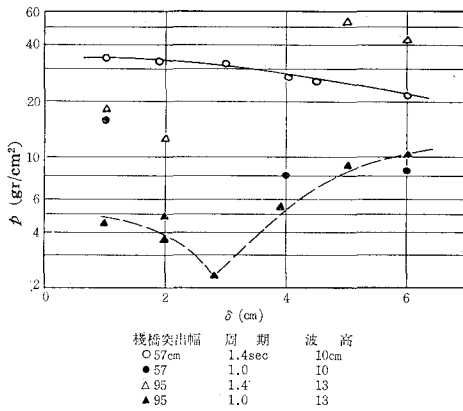


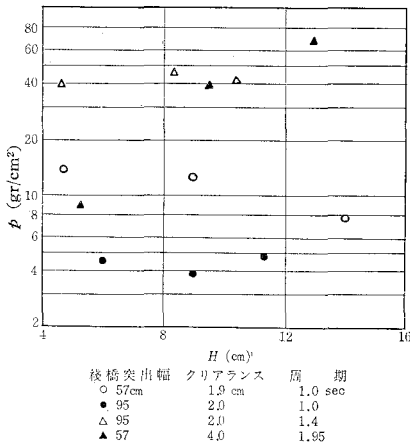
図-3 クリアランスと揚圧力との関係



#### (4) 波高の影響

前項(3)のようにクリアランス $\delta$ と波高 $H$ との比,  $\delta/H$ として取り扱う。波高として何をとりかが問題であるが, ここでは便宜上造波機によって起こされた進行波の第3波目から約10波の平均を入射波高として整理した。この他たとえば栈橋直前に生ずる重複波の波高を

図-4 波高と揚圧力との関係



採用することも考えられる。図-4には揚圧力の強さと波高との関係を示すが, 周期1.0secと1.4sec以上の系列を比較する時傾向が相反するようである。これは実際の現象が異なるためであると解釈される。すなわち, 揚圧力の測定位置を固定しているため, 詳細にはわからないが, 観察によれば,  $\delta/H$ および栈橋突出幅・波長比 $l/L$ の条件の差異によって, 揚圧力の強度やその分布が変わってくるようである。これは栈橋下での波の変形がそれぞれの条件によって異なってくるからである。

#### (5) 周期の影響

周期の影響は顕著である。図-5からわかるようにクリアランスおよび波高が同じ場合, 揚圧力はほとんど周期のみによって決まる。ただし周期1.4secと2.0secとでは差がなく, また測定値がないためにこの間でどのように推移しているのかわからない。この実験の栈橋突出幅では, 周期1.4sec以上では栈橋下の乱れが少ないので, 後述する合田の試論のような取り扱いが可能になると考えられるので, その方面からも検討をしたい。周期の変化とともに波長, 波速, 波形勾配等が必然的に変化するわけで, どのような形で影響しているのか分離することは現在のところ困難である。図-6によれば,

図-5 周期と揚圧力との関係

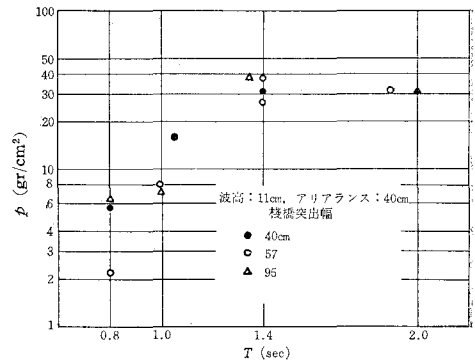
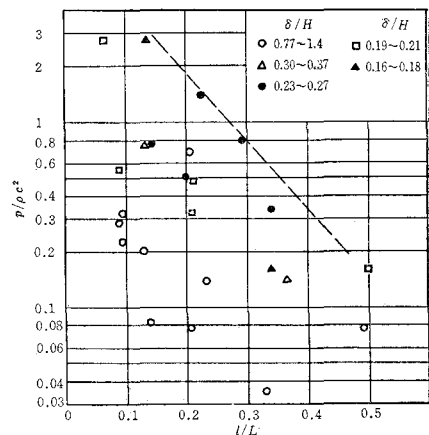


図-6  $l/L$ と $p/\rho c^2$ との関係



$\delta/H$  が等しい場合には  $l/L$  の増加につれて無次元化された揚圧力の強度  $p/\rho c^2$  は減少し、同じ  $l/L$  に対しては  $\delta/H$  がほぼ 0.25 で  $p/\rho c^2$  は最大になるようである。ここに  $\rho$  は水の密度、 $c$  は進行波の波速である。しかしながらバラツキがかなり大きいために関数形を定めるまでには至っていない。また 図-6 の整理法によって完全に周期の影響を表現し得たかについてもなお疑問は残る。

### (6) 棧橋突出幅の影響

棧橋突出幅  $l$  は波長との比、 $l/L$  として影響してゐる。 $l/L$  が 0.4~0.5 より大きい時には、波頂が棧橋前方にまず接触するようになり、棧橋奥での揚圧力の測定値は著しく小さくなる。

### (7) 合田の試論について

合田<sup>1),2)</sup> は衝撃圧力の発生機構を考察し、衝撃圧力は平面に近い水表面が、構造物に接触する時に、表面付近の水の有する運動量が急速に変化し、この運動量変化が構造物に対しては衝撃力として作用するのであるとしている。この考え方を碎波圧力とともに棧橋揚圧力の場合にも適用している。

$l/L$  が 0.4~0.5 より小さい場合、すなわち棧橋突出幅に比して波長が長い場合には背後の直立壁により重複波を生じ、壁前面より  $1/2$  波長の所に生ずる重複波の腹が棧橋先端部に接触しない。この時の状態は合田の設けた仮定に近くなり、合田の考え方によって説明することが可能と思われる。この実験で得られた値と、合田の導いた式とを比較すると\*、 $\delta/H$  の小さい範囲では実験値の方が理論値よりも小さくでている。これは波高の大きい時には微小振幅波という仮定が成立しなくなるからであろう。理論の精密化を計る必要はあるにしても、 $l/L$  の小さい場合の説明として、観察からもこの取扱い方は妥当なものと思われる。

## 3. マウンドおよび綱目渡版を用いた実験

### (1) 目的と装置

直立式岸壁よりの反射率が 0.8~0.9 になると、時に港内の静穏を害することになると考えられるが、横棧橋式岸壁にした場合にどの程度の反射率になるものであろうか。また棧橋下に捨石、消波ブロック等による消波工を設けた場合、その揚圧力、反射率の軽減にどの程度効果を期待しうるのであろうか。さらには渡版を鉄格子にする例を考えて綱目状にした場合に揚圧力はどの位になるであろうか。以上のような諸問題を検討することにした。

用いた水槽は長さ 25 m、幅 0.60 m、高さ 0.90 m の二次元造波水槽で、フラップ式造波機により波を起こした。圧力計は実験 1) と同じものである。図-7 (a)、(b) に実験装置の概要および捨石・消波ブロックの断

図-7 (a) 実験 (2) の装置の概要

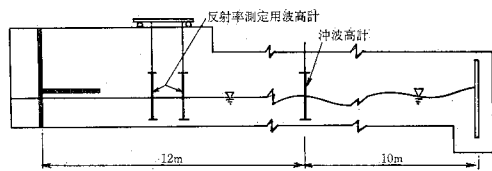
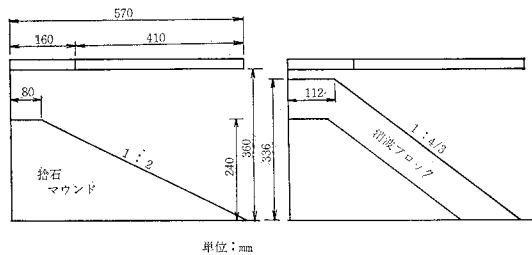


図-7 (b) マウンドの断面



面を示す。

棧橋形状は図に示した寸法に一定し、波の条件として水深 30, 32, 34 cm, 周期 1.0, 1.4 sec, 波高 4, 6, 8, 10, 12 cm を組み合わせた。まず反射率について述べ、後に揚圧力の軽減効果を調べる。

### (2) 反射率

反射率は台車上の波高計を動かし Healy の方法によ

図-8 (a) クリアランス 6 cm の場合の反射率

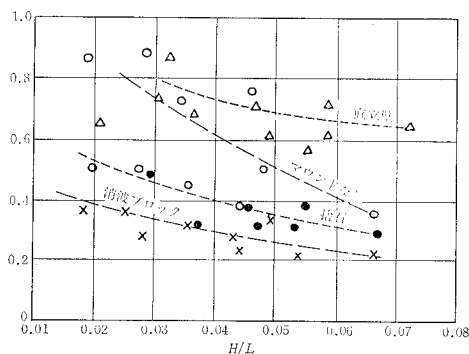
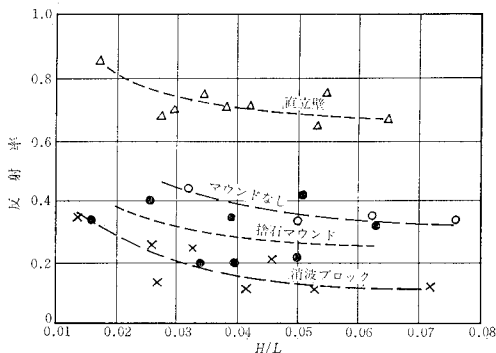


図-8 (b) クリアランス 2 cm の場合の反射率



△ 直立壁      ○ マウンドなし  
× 消波ブロックマウンド      ● 捨石マウンド

\* 参考文献 2) 図-34 参照。

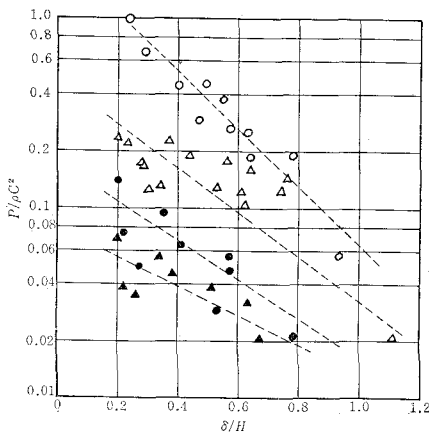
って測定した。図-8 (a), (b) にクリアランス 6 cm および 2 cm の場合の結果を示す。クリアランス 6 cm の場合には、波高の低い場合(図上では波形勾配が小さい点としてあらわされている)には、棧橋の存在が影響しないため、直立壁と差がなく、捨石、消波ブロックの効果のみがあらわれている。波高が大きく、すなわち波形勾配が大きくなると反射率が減少する。たとえばマウンドのない場合、波形勾配 0.066 で反射率は 36% となっているが、同時に行なった、越波を許さない直立壁の反射率と比較すると、約 1/2 になっている。しかし波形勾配が大きい時、消波工を設けた場合でも、必ずしもその反射率軽減効果は大きくない。つまり静水面上のマウンド先端高さが押えられているのでその効果が相対的に小さくなるためと考えられる。

クリアランス 2 cm の場合には、全体的に反射率が小さくなって、直立壁の時とはっきり差があらわれる。次節 4. で述べるように、床版自体が波を乱し、エネルギーを減殺する作用を有するためである。

### (3) 揚 圧 力

捨石、消波ブロックのマウンドは水の運動を乱し、エネルギーを消費するものであるから、揚圧力の減少効果が期待されるが、それを量的に把握する必要がある。図-9 に無次元化した揚圧力強度  $P/\rho C^2$  を  $\delta/H$  に対しプロットした結果を示す。空げきのない、マウンドも置かない場合に比較すると、消波ブロックのマウンドを設けた場合揚圧力は 1/6 に、さらに渡版部分を網目にした場合には 1/10 に減少した。よってその効果が確かめられたが、これらの対策を施した場合の水理特性についてはさらに検討しなければならない。模型の縮尺を 1/25 として現地の状況に換算してみよう。現象は Froude の相似則にしたがうとされ、衝撃圧力を生ずる場合にも、合田の試論によれば Froude 則を適用してもよいことにな

図-9 マウンド、網目渡版の効果  
( $T=1.4 \text{ sec}$ )



○ 空敷なし、マウンドなし △ 網目あり、マウンドなし  
 ● 空敷なし、マウンドあり ▲ 網目あり、マウンドあり

表-2 現地への換算 (縮尺 1/25)

周期 1.4 sec (現地 7.0 sec), クリアランス 4 cm (現地 1 m)

| 番<br>号 | 種<br>別              | 波 高         |            | 揚 圧 力                        |                            |      |
|--------|---------------------|-------------|------------|------------------------------|----------------------------|------|
|        |                     | 実 験<br>(cm) | 現 地<br>(m) | 実 験<br>(gr/cm <sup>2</sup> ) | 現 地<br>(t/m <sup>2</sup> ) |      |
| 1      | コン<br>クリ<br>ット<br>版 | 直 立 壁       | 8.8        | 2.20                         | 13.9                       | 3.50 |
| 2      |                     | 捨 石         | 8.1        | 2.02                         | 12.7                       | 3.18 |
| 3      |                     | ブロック        | 9.0        | 2.25                         | 8.80                       | 2.20 |
| 4      | 網目渡版                | 直 立 壁       | 7.9        | 1.98                         | 1.41                       | 0.35 |
| 5      |                     | 捨 石         | 7.8        | 1.94                         | 1.31                       | 0.33 |
| 6      |                     | ブロック        | 8.4        | 2.10                         | 1.04                       | 0.26 |

る。代表的な例をとると表-2 のようになる。現地に換算した揚圧力の値は他の研究<sup>3), 4)</sup> に対比しても、ほぼ妥当な値となっている。衝撃的な波圧のピークを測定することは現象自体のパラツキも加わって困難であり、何波かの平均値を比較しても正しく一致するとは限らない。

一般の設計のように、渡版部分の鉄筋コンクリート版を用いるとし、コンクリートの比重を 2.4、版の厚さ 50 cm として、その 1 m<sup>2</sup> あたりの自重を求めると

$$1 \times 1 \times 0.5 \times 2.4 = 1.2 (\text{t}/\text{m}^2)$$

となる。波の条件にもよるが、消波工を用いたとしても自重だけで揚圧力に対抗することはできない。

網目渡版ではコンクリート床版よりも軽くなり、市販のグレー特床版では 0.2 t/m<sup>2</sup> 程度になる。その効果によって揚圧力が減少するとしてもやはり自重だけでは不安定になり、結局 アンカー ボルトで固定しなければならない。しかしこの床版が飛ばされても、近くに構造物や施設がないなど、何ら支障をきたさない場合には、比較的簡単に復旧することができるから渡版を固定しないでおくことも考えられよう。もちろん被害を生ぜしめる波浪の発生確率にもよるであろう。また網目渡版にした場合に、平常時でも波しぶきが上り荷役に支障をきたす可能性も考えられるので、今後の調査、研究が必要であろう。

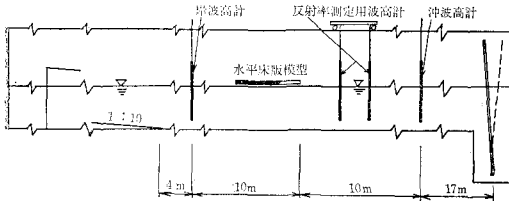
## 4. 水平床版のみの実験

### (1) 実験装置とその方法

この構造は実験 (1) から直立壁を取り去ったものである。この形式について実験するのは、まず直立壁の存在が揚圧力の問題をどのように複雑に、あるいは単純にしているかを知るのを目的としており、棧橋揚圧力の問題を解くための一つの基礎的階梯と見なすことができる。このような構造物は海中に単独で存在する場合も考えられるから、それに対する一つの模型実験とも見なせよう。

用いた水槽は長さ 50 m、幅 0.6 m、高さ 0.9 m の二次元造波水槽で、図-10 に示すように模型を設置した。水槽末端には 1/10 勾配の斜面を設けて消波装置としたが、水槽の有効長を若干短かくするけれども、反射率 10% 以下の良好な消波装置となった。床版模型は木材の厚

図一10 実験 (3) の装置の概要



板を鋼アングルで補強したもので水槽の縁に固定した。

圧力計は実験 (1), (2) と同じものであり、これに 11.0×16.0 cm の受圧板を取り付けて用いた。揚圧力測定位置は図のごとく、床版の前縁部であることが、上の二つの実験とは逆になっている。直立壁による反射があり得ず、しかも一般の栈橋と異なって渡版なるものを特に対象としないこと、および前縁部に最も強い波力が作用すると考えられたからである。後述のごとくこの予測は妥当と思われ、周期の短い場合には栈橋の後部には水面が触れることがないほどであった。

実験条件は、波高、周期、クリアランス、栈橋幅の 4 個の変数を単独に 2~5 段階変化させた 4 系列の実験を行なった。水深は実験 (1) の結果から、この場合にもあまり影響しないものとして変化させなかった。

(2) F. John の方法

J.J. Stoker<sup>9)</sup>はこの問題に似た水面に平板を固定して微小振幅長波をあてた時の F. John の解を紹介している。平板の幅が波長と同程度、水粒子速度は鉛直方向に一定という仮定のもとに、速度ポテンシャルを求める方法である。解析的に解くためとはいえ、実際的でない条件を付しており、今回の実験はもちろんこの条件を満足していない。

結果として実験とはほとんど一致する点がない。透過率で 2.3 倍、反射率で 1.9 倍、いずれも計算値の方が実験値より大きい。衝撃波圧の発生もこの理論では出てこない。

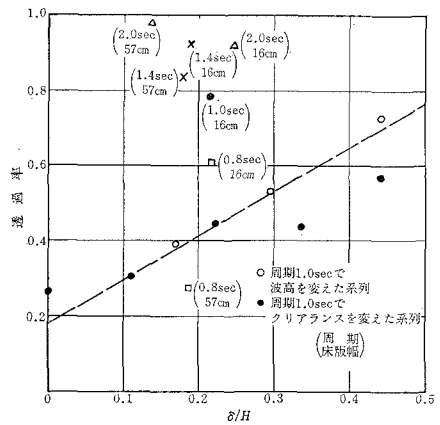
はじめクリアランスを 0 にしておいても、有限な振幅の波をあてると、床版と水面とが離れるようになり、自由表面をもつに至るのであり、簡単な境界条件の設定による理論的取扱いは現象を解くことが不可能といえよう

(3) 波の変形

波力の問題を構造物と水との相互作用と見る立場よりすれば、構造物に波が当たった時のその波の変形と、その時の波力とは本来分けて考えることはできない。しかし便宜上二つに分けて考察する。

この床版を水に浮くようなものにすれば、いわゆる浮防波堤に近くなる。よって床版を固定した構造物においても波をある程度阻止する性質があるものと考えられる。床版の岸側で測った波高と入射波高との比を透過率とし、クリアランス・波高比  $\delta/H$  に対して整理したのが 図一11 である。

図一11  $\delta/H$  と透過率との関係

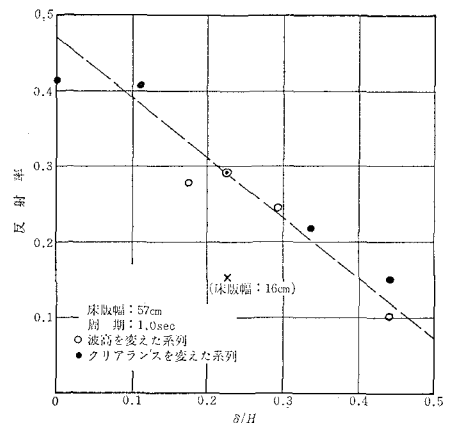


図によれば周期と栈橋幅を 1.0 sec, 57 cm に限ると、 $\delta/H$  が大きくなるにつれて透過率が大きくなり、その間に一次的関係が成立する。 $\delta/H$  が小とは波高が相対的に大きいということであり、この時透過率が小さくなることは一応望ましい性質といえる。しかし周期を長くするか、あるいは床版幅を小さくすると透過率が非常に大きくなり、結局波を阻止する役目を果たさなくなる。床版幅の波長に対する比の大小がここでも重要な役割を果たすことがわかる。

周期 1.0 sec の時、 $\delta/H$  と反射率との関係を示したのが 図一12 である。図にはクリアランスを変化させた系列と、波高を変化させた系列とを区別してプロットしてあるが、床版幅と波長の比が同じ場合には、 $\delta/H$  と無次元化することにより明瞭に直線関係が認められる (相関係数  $-0.97$ )。クリアランスに比して波高の大きい時に反射率が大きくなることは予想しうることであるが、この実験の範囲においてクリアランスの変化と波高の変化とは、 $\delta/H$  として同等になり、しかもこれと反射率との間に直線関係が見出されたわけである。

反射率を  $C_r$ 、透過率を  $C_t$  とすると  $(1-C_r)^2=C_t^2$

図一12  $\delta/H$  と反射率との関係



はエネルギー損失の割合をあらわすと考えてよい。周期 1.0 sec, 床版幅 57 cm の場合にこの値はほぼ 0.60 になる。この値が大きい場合には床版下での水の動きが乱れているのが観察された。Stoker の紹介している理論ではエネルギー損失は無いと仮定しているのであって実際の条件とはかなり異なっている。

### (3) 揚 圧 力

反射率と揚圧力との関係を 図-13 に示した。周期, および床版幅を一定にすると反射率の小さい間はほぼ反射率に比例して揚圧力は増大する。しかしさらに反射率が大きくなると, ある極大点が存在するようである。先に述べた,  $\delta/H$  と反射率との直線関係を考慮すると  $\delta/H$  と揚圧力との間にも一次的な関係が存在することが予想される。これを 図-14 に示した。ここでは  $p/\rho c^2$  という形で揚圧力を無次元化しているが, かなり点が散乱するという難点はあるとしても, 一応直線的な, しかしながら  $\delta/H$  の小さい範囲で直線からはずれるという傾向が読み取れる。

図-13 反射率と揚圧力との関係

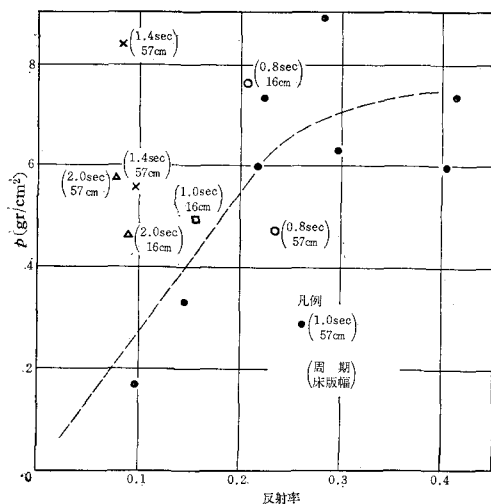
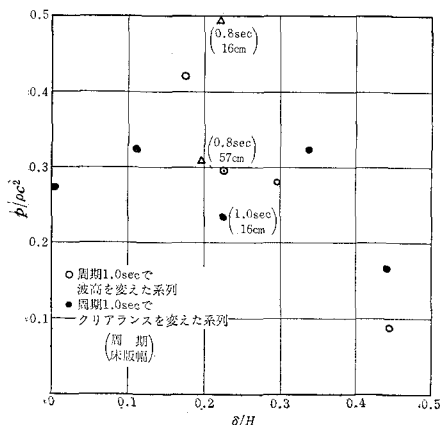


図-14  $\delta/H$  と  $p/\rho c^2$  との関係



揚圧力に影響する因子として, 波高に劣らず周期, 棧橋幅が重要であることは 図-11, 12 から明らかであるが, 未だ解析は十分には進んでいない。

## 5. 各実験の比較

実験 (3) と実験 (1), (2) とを比較する時, 最も大きな相違はつぎのとおりである。実験 (3) では直立壁を取り除いたために重複波としてではなく, 進行波として床版に当たることである。しかし前節でも述べたように, 特に  $l/L$  が大で  $\delta/H$  の小さい時にエネルギー減衰も大きい, 反射率もまたかなり大きい。そのため床版の前面では部分重複波が生じ, 床版の後半部には水面が全然触れないという現象が起こってくる。これは実験 (1) で  $l/L$  が大きく,  $\delta/H$  が小さい時に棧橋の奥では揚圧力がほとんど生じなくなる事実に対応している。つまり床版の存在が重要であって直立壁の存在の意味は小さいことになる。実験 (3) によって測定された揚圧力強度は周期 1.0 sec で 7 gr/cm² から最大 9 gr/cm² に近い値が得られている。模型縮尺を 1/25 として換算すると 1.8 ~ 2.2 t/m² くらいの揚圧力強度となり, 必ずしも無視することはできない値であることがわかる。

実験 (3) で  $l/L$  の小さい時には, エネルギー損失が小さく, 透過率の大きいことから, 床版の影響は小さいことがわかり, 直立壁により重複波を生じて, クリアランスの条件によっては棧橋奥で強大な揚圧力を発生するという事実が理解される。

## 6. 結 論

- 1) 棧橋に加わる揚圧力は, 床版の存在による波の複雑な変形にともなって, その強度および分布が変化する。時には棧橋の先端付近で無視し得ない値に達することもある。
- 2) 波の変形には, 棧橋突出幅・波長比  $l/L$  およびクリアランス・波高比  $\delta/H$  が特に大きく影響する。
- 3) 捨石マウンド, 消波ブロックにより揚圧力および反射率を減少させることができる。また渡版をグレートにすることも有効ではあるが, それらのみでは必ずしも完全に揚圧力の問題が解決されたとはいえない。

### 参 考 文 献

- 1) 合田良実: 衝撃波力に関する試験, 第 22 回土木学会年次学術講演概要, 1967.
- 2) 合田良実: 構造物に働く波力, 第 4 回 水工学夏季研修会講義集, 1967.
- 3) 室田 明・古土井光昭: 棧橋床版に作用する揚圧力についての実験的研究, 災害科学研究所報告第 5 巻, 1966. および第 13 回海岸工学講演会講演集, 1966.
- 4) 永井莊七郎・久保 直・時川和夫: 棧橋に働く揚圧力に関する研究 (その I), 第 13 回海岸工学講演会講演集, 1966.
- 5) Stoker, J.J.: Water Waves, 1957, pp. 431~436.
- 6) 大分県新産業都市建設局, 東京大学工学部 土木工学科 港湾研究室: 大分臨海工業地帯水理模型実験報告書, IV-1, 住吉泊地の棧橋式岸壁の実験, 1967.