

棧橋床版に作用する揚圧力についての実験的研究*

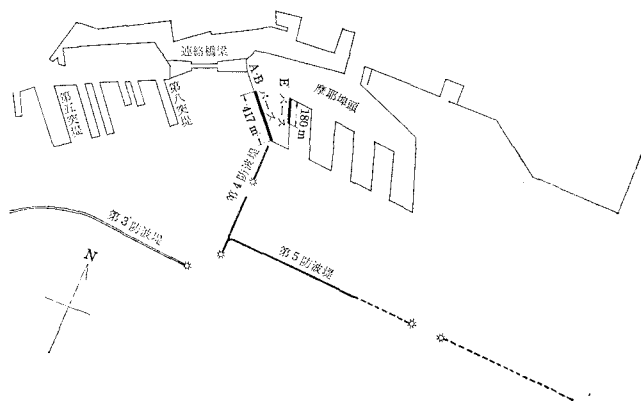
室 田 明**・古 土 井 光 昭***

1. ま え が き

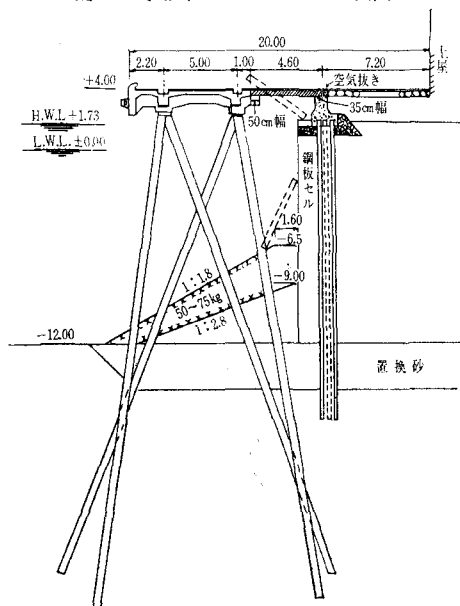
6420 台風による摩耶埠頭の損壊

昭和 39 年 9 月、西日本を襲った台風 20 号による高

図—1 神戸港摩耶埠頭平面図



図—2 摩耶埠頭 A, B バース断面図



潮と高波によって、当時神戸港第 4 防波堤の東に建設されていた摩耶埠頭(図—1 参照)の A, B バースおよび E バースのエプロンの一部をなす渡橋が被害を受けた。

A, B バースは図—1 に示すごとく、鋼管斜杭式棧橋と鋼板セル式土留壁で構成されており、この間に鉄筋コンクリート版の渡橋を渡し、エプロンとしている。台風 20 号によって、この渡橋が落下破損し、鋼板セル式岸壁には被害はなかった。この被害は過去に例をみない大きな港内波浪がその原因と考えられる。防波堤を越えた港内の波浪は 1.6 m, この時の波向は SSW と推定されるから A, B バースにおいて、埠頭前面水深 $h=10$ m, 周期 3~5 sec, 波長 20~40 m とすれば $h/H=6.2$, $H/L=0.08\sim0.04$ であるから埠頭前面の直立壁で重複波を生じていたと考えられる。したがって渡橋に作用した力は重複波による揚圧力と考えられる。この作用揚圧力をたまたま E バース渡橋の上に鋼管杭を積み重ねていたために被害をまねがれたという事実から推定揚圧力は $1\sim1.5$ t/m² である。A, B バースについては、これ以上の揚圧力が作用したと考えられる。

棧橋床版等に作用する揚圧力に関する既往の研究はわずかに孤立波を用いた増田の実験があるのみである。すなわち棧橋下面等の水平面に作用する波圧を直立壁に作用する波圧と同じく

$$P/w_0 = fc^2/2g$$

で表わされるとし、次元解析を用いて解析し、実験的に考察したものである。

ここに、 P : 動的圧力

w_0 : 水の単位重量

c : 波速

g : 重力の加速度

f : 動的圧力の定数 (2~4)

その結果は 図—3, 4, 5 から、 H : 波高, δ : 静水面から受圧計までの距離, l : 後壁から受圧計までの距離とすると

$$P/w_0 = fc^2/2g$$

$$f = 0.231 \left(\frac{l}{H} \right)^{-0.284} \left[\frac{H/\delta}{0.192 + 0.149(H/\delta) + 0.069(H/\delta)^2} \right]$$

* 土木学会第 21 回年次学術講演会において一部発表

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部

*** 正会員 工修 大阪大学工学部助手

図-3

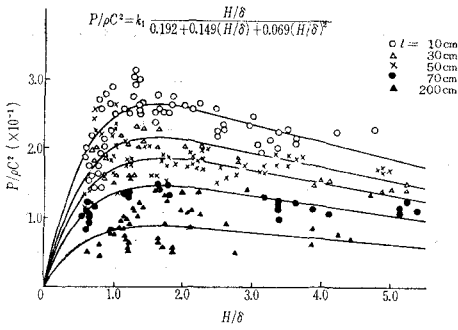


図-4

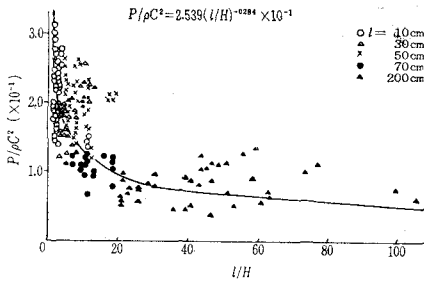
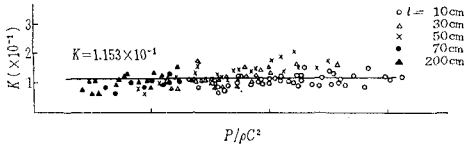


図-5



なお、最近、永井博士は揚圧力と air cushion の効果について興味ある研究をされ、運輸省港湾技研でも揚圧力の分布等についての研究が行なわれており、その成果が待たれる。

さて、前述したとき摩耶埠頭の損壊は決して稀有の災害でなく、条件が類似すれば他の港湾でも十分考慮すべき問題であるにもかかわらず、こうした類の揚圧力についてほとんど研究されていない。本研究は、直立壁から水平に張り出した床版に作用する揚圧力を模型実験により解明し、できうれば実用的な実験公式をうると意図したものである。ただし、実験公式の適用に当り、相似則あるいは模型の縮尺効果が問題となる。ここに扱う揚圧力に関しても後に示すごとく衝撃圧の型が現われ、このような過渡現象では厳密な相似則の成立はほとんど不可能であるが、第一近似として Froude 則の成立を認め、実験値を摩耶の推測揚圧力の値と比較し

大差がなければ、以上の手続きがほぼ妥当であるものとし、正確な相似則をうるための実験は今後の宿題とする。

模型において、直立壁前面水深が沖波波高にくらべ十分大きく完全重複波が発生する場合についてのみ実験を行なう。

床版に作用する波力については全波圧を計測し、波圧の分布は求めない。これはこの種の揚圧力について参照すべき既往の成果がほとんどなく、当初波圧の order estimation さえ不可能であり、まず全波圧を正確に測定することが課題であるからである。

2. 実験装置および方法

(1) 水槽および造波機 (図-6)

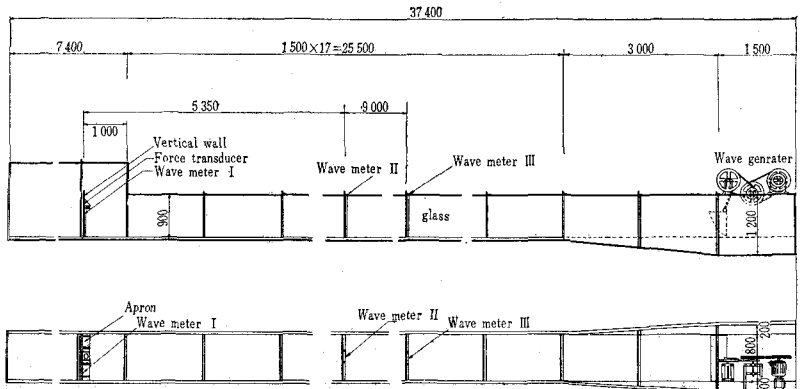
実験に用いた水槽は長さ 30 m、幅 0.8 m、深さ 0.6 m の片面ガラス張りの鋼製水槽である。一端に plunger type の造波装置を、他端に張り出し床版をもつ直立壁をもうけた。

(2) 波高計および波圧計

波高の測定には、電気抵抗式波高計を用いた。電極には、0.5 mm のステンレス鋼線を用い、受感要素の長さは 40 cm で全振幅 40 cm、1% の線形度をもたすものとした。

棧橋のエプロン等の水平面に作用する揚圧力を測定するために図-7に示すような波圧計を製作した。この波圧計で水平面に作用する全波圧を測定する。この場合波圧の空間的分布に関する情報は失なわれるが、波力の現象を大局的にとらえることができ実用面で有効な方法であると考えからである。今回製作した波圧計は従来のものと同じく、strain gauge で受圧面のたわみを測定するものであるが、水平床版にかかる揚圧力の全波力を求めるためには、適当な縮尺を考えると少なくとも 20×15 cm 程度の受圧面積を必要とするので、通常の圧力計で用いられているように、油で圧力を伝達し、ダイヤフラムによって圧力を測定することにした。下端は受

図-6 Wave tank (dimension mm)



圧板, 上端に strain gauge をはった受感部をとりつけ, 内部は油を注入密閉している。

受圧板: アルミニウム $3\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 200\text{ mm}$

ベローズ: 燐青銅 $\phi 75\text{ mm} \times 600\text{ mm}$

受感部: ステンレス板 $0.2\text{ mm} \times \phi 60\text{ mm}$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

ストレインゲージ: ダブルスパイラルの箔ゲージ

抵抗値 $120\ \Omega$, $\phi 25\text{ mm}$ KF-25 ϕ -C 5

最大測定圧力: 0.150 kg/cm^2

なお, ベローズの横方向のひずみをさけるため, 鉛直方向の移動のみを許すガイドをつけ, 波力が受感部に十分よく伝わるようにした。

ベローズをもつ計測器は低い固有振動数のため, 衝撃的な圧力の測定計器として適当でないといわれている。可及的振動数を上げるべくベローズ材料, 注入油圧等を設計したが念のため波圧計の振動系の固有振動数を調べ

図-7 Wave pressure gauge

- ① Diaphragm ($\phi 68\text{ mm}$) ② Guide
- ③ Bellows ④ Sensitive plate
- ⑤ Strain gauge (Foil type $\phi 20\text{ mm}$)

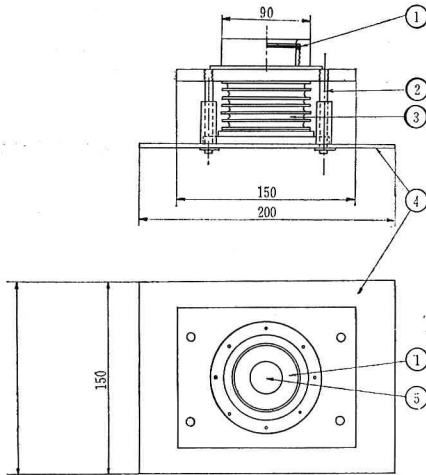


図-8 波圧計の固有振動数検定のための Oscillogram

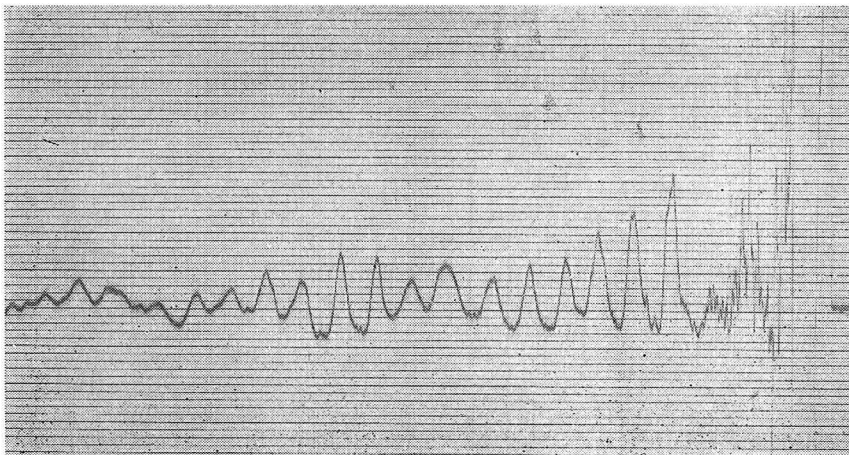
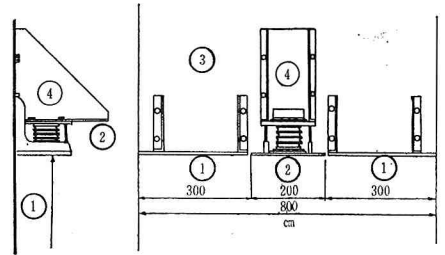


図-9 Model of aprons

- ① aprons ② wave pressure gauge
- ③ vertical wall ④ supporter of pressure gauge



るため impulse を与え振動性状を調べた。観測したオシログラフを 図-8 に示す。この波形から本計器について固有振動数: 100 cycle/sec が与えられた。後述するごとく shock pressure の作用時間は $0.1 \sim 0.2\text{ sec}$ であり波圧計の固有振動数より一桁大きいので十分とはいえないがまず適当な動特性をもっているといえる。

(3) 栈橋模型

水槽の一端に直立壁から張り出した水平床版をもつ栈橋模型を設置する(図-9 参照)。エプロンの高さは自由に変えうる。当初水槽を縦に二つに仕切り, おおのの部分で波の打上げ, および揚圧力を測定しようとしたが左右の反射率のちがいがから, 水槽内の横方向振動が促進されて不可であった。水槽幅いっぱいにエプロンをもうけ, その部に波圧計の受圧計を設置した。

(4) 実験波と実験方法

実験の範囲は, 相対水深 $h/L_0 = 0.128 \sim 0.236$

沖波の波形勾配 $H_0/L_0 = 0.015 \sim 0.063$

沖波の周期 $T_0 = 1.11 \sim 1.86\text{ sec}$, 波高 $H_0 = 5 \sim 13\text{ cm}$

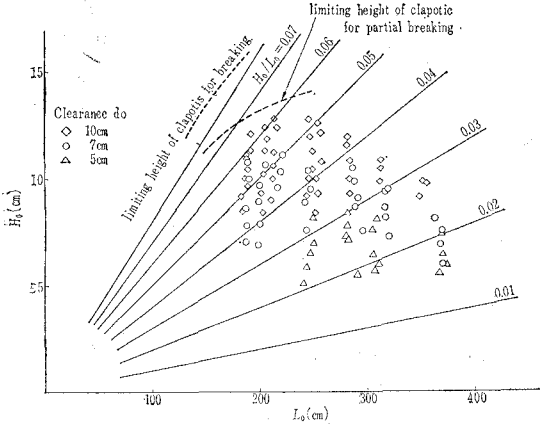
直立壁前面水深 $h_0 = 45 \sim 50\text{ cm}$ $h/H_0 \geq 3.0$

実験波の諸元は 図-10 に示す。沖波は直立壁前面で重複波を生じる。主として浅海波の重複波である。

波高計は 図-6 に示すごとく直立壁前面 1 cm , 5 m , 14 m の3カ所に設置した。直立壁前面, 床版下に設置

した波高計では, 直立壁前面の重複波の上昇速度および波高を測定した。直立壁にとりつけられた床版は, 静水面からの高さ (clearance d_0) を 5.7 および 10 cm の3種類に変え, そのおののについて, 図-10 に示す実験波を用いて波圧を測定した。

図-10 Model waves



3. 実験結果とその検討

(1) 波圧曲線と波形曲線

得られた観測資料の内、代表的な oscillogram を 図-11 に示す。図中に直立壁前面 1.0 cm の位置に設けた波高計による波形記録もみられるが、これによれば直立壁で生じた重複波が水平床版によって peak-cut されている様子と、波圧の出現の有様がよくわかる。すなわち、波面がエプロンに接触するとほとんど同時に急激な shock pressure があらわれ、0.05~0.1 sec で波圧の peak に達し、ほぼ同時間で 0 に復帰するような鋭い三角形型波圧曲線がみられる。静水面から水平床版までの鉛直距離 d_0 (clearance) が小さい場合、波圧曲線は三角形型とならず、鉛直壁に作用する砕波の波圧曲線のような腰掛け部分をもつ（その後続く不規則な鋸歯状曲線は波圧計の固有振動によるもので波圧とは関係がない）。したがって揚圧力の作用時間は 0.1~0.25 sec であり、普通直立壁に作用する砕波圧曲線のごとく、shock に続く momentum 風のいわゆる腰掛け部分がないのは注目すべき特性である。

規則的な入射波を送ったにもかかわらず、shock pressure は規則的には現われないが、大別してつぎの 3 形式に分類される（図-12 参照）。

Type a: ほぼ同じ大きさの shock が必ず一波ごとに

図-12 Classification of appearance of peak pressures

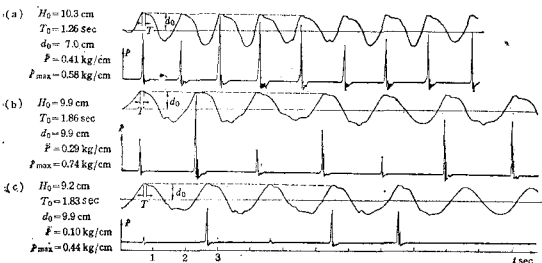
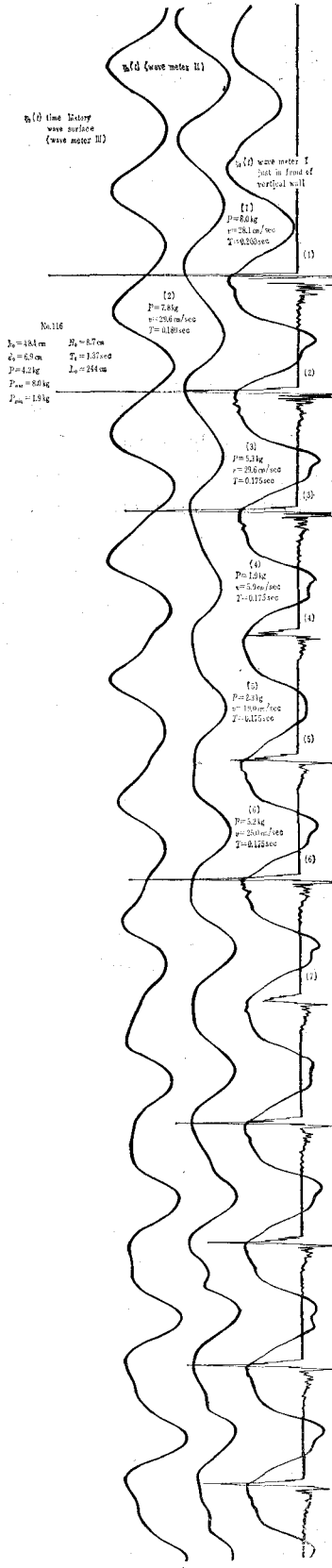


図-11 A example of oscillographic records



現われるもの。 H_u/d_0 が 1.2~1.3 をこえる場合

Type b: 大きな shock と小さな shock がかなり規則的に現われるもので、大きな shock pressure の値そのものも広範囲に変動しない。 H_u/d_0 が 1 をわずかにこす場合

Type c: 非常に不規則なもので大、小の shock の現われ方にほとんど規則性のないもの。 H_u/d_0 が 1 に近いかわずかに小さい場合。

ここに、 H_u は静水面から測った沖波の波頂までの高さ

(2) 衝撃的な揚圧力とその発生機構

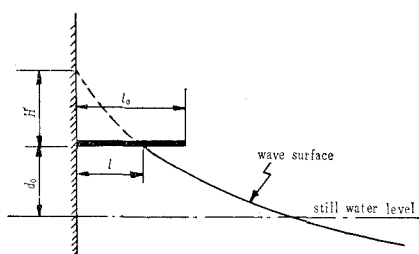
水平エプロンに揚圧力が作用する場合、波面がエプロンに接すると同時に shock が発生し、直後に衝突水部分はエプロンにそって沖側に走り落下する。up-lift, すなわち重力に抗して作用する圧力であるから、shock 後の momentum はエプロンに全く関係しないので直立壁での砕波のように腰掛け部分が現われなないのは当然であろう。ただ d_0 が小なる場合、 H_0 が大きいと腰掛風の波圧曲線部分が存在するのは up-lift の作用時間が長いためであり、砕波時における落下水束の momentum によるそれとは全く異なっている。

さて問題の shock であるが、今回の実験ではその発生機構を的確に説明しようとする観測(たとえば超高速撮影等)を行っていないので推測の域を出ないが、少なくともこのような大きな shock が発生するためには圧入空気塊の効果を除外しては、説明しえないと思われる。

揚圧力の規模を見積るためには、重複波面における鉛直方向の particle velocity に着目し、その kinetic energy が pressure に変換されるものと考えたが、この予測は正しくなかった。直立壁前面での波面上昇速度 v : をもって鉛直方向の particle velocity : w を代表せしめこれと peak pressure : P との相関を見たが一見して $P/w_0 \gg w^2/2g$ であると認められる。

揚圧力の発生が particle velocity の動圧そのものではないという別の論拠は次の事実にもよる。直立壁面での重複波高が最大に達した時の、エプロンに接する波面の長さを l とし(図-13 参照)、エプロンの張り出し長さを l_0 とすれば、すべての実験波について $l > l_0$ である。

図-13 Schematic Illustration of land H' .



もし、kinetic energy (or momentum) が pressure に変換されるのであれば、波面がエプロンに接触している間は pressure が現われねばならず、その作用時間は、 l_0/v (v : 波面上昇速度) の程度、概算 0.5~1 sec であって shock の作用時間よりはるかに長い。すなわち、揚圧力は波面がエプロンに接触した直後に発生することがこのことから証明されるのであって、このような圧力の現われ方を説明するには圧入空気塊の効果を除いて説明しえないと思われる。

(3) 実験値の整理

前節でのべたように、shock pressure の現われ方は決して規則的なものでなく、大きさも広い範囲に分散する。揚圧力が上述のように圧入空気塊との関連において発生するものであれば圧入空気量あるいはその圧潰といった偶発的要素を含むので、その結果として現われる揚圧力値が分散するのは当然である。

揚圧力に最も重要な影響をおよぼすのは、直立壁前面の重複波高(ただし、静水面から測った波頂までの高さ: H_u で表現する)と静水面から水平エプロンまでの鉛直距離: d_0 (clearance) である。一般に波形はトロコイド的であるから沖波波高 H_0 の入射波が直立壁で完全反射されるとした場合の H_u は

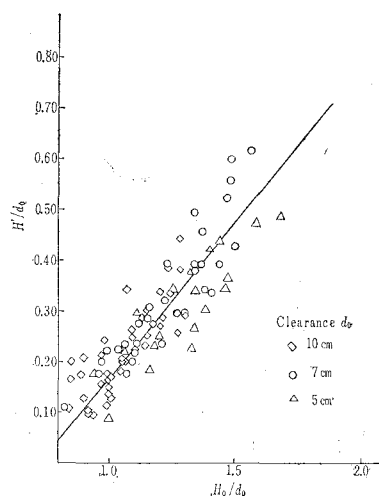
$$H_u = H_0(1 + \pi H_0/L_0 \cdot \coth 2\pi h_0/L_0)$$

ただし、 h_0 : 静水深、 L_0 : 沖波の波長

図-13のごとく水平エプロンで peak cut される部分の長さを H' とすれば、かりに水平版がないとした場合の壁面波高は図のごとく $(d_0 + H')$ と考えられる。 H' を波面上昇速度と波面がエプロンに接触している時間: T を用いて、 $H' \equiv v \cdot T/2$ と表わす。直立壁前面の波形記録から v を算出し、 H' を上式により求めた沖波波高 H_0 の関係を整理すれば図-14のごとくなる。

波圧について全波圧を計測したが、shock の作用面積

図-14 Relationship between H_0 and H' .



は不明であるので、波圧として、エプロンの単位幅当り（入射に直交する方向）の波圧合力をとることにする。

Type a, b, c について全部の shock の算術平均を $\bar{p}$ とし、おのおの場合に現われる shock pressure の最大値を $p_{\max}$ とする。

重複波圧の整理で慣用されている表現、すなわち、 $p/w_0(d_0+H')$ と H_u/d_0 の関係を見ると、clearance d_0 によりかなり明瞭な傾向がみとめられる。すなわち d_0 が大きいほど、縦距が大きい。 d_0 が 3 cm 以下では実験値の分散は非常に大きくなる。

物理的な意義は明確ではないが、揚圧力におよぼす d_0 の影響が大きいということと $p/w_0(d_0+H')$ を無次元化するという二つの理由から $\bar{p}/w_0 d_0(d_0+H')$ あるいは $\bar{p}_{\max}/w_0 d_0(d_0+H')$ と無次元化し H_u/d_0 との関係を示すと 図-15 および 16 になる。 $p_{\max}/w_0 d_0(d_0+H')$ の整理でなおかつ実験値の分散が大きいのは前述のごとく揚圧力の発生機構が transient phenomena である以上やむをえないだろう。

なお以上の整理において steepness: H_0/L_0 あるいは shallowness: h/L_0 等は H_u の計算過程で implicit に評価されている。

図-15

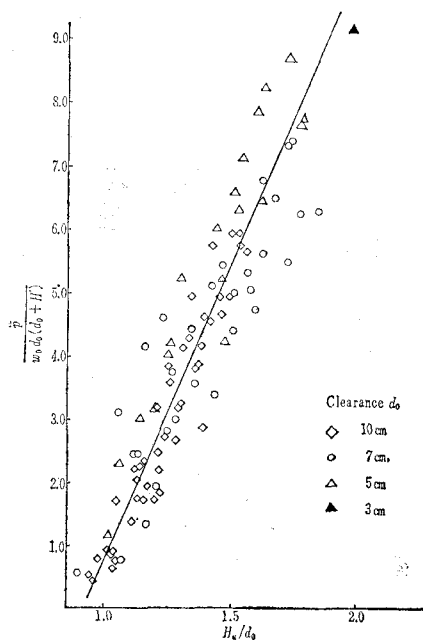
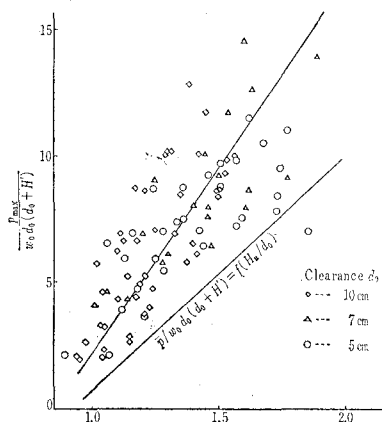


図-16 Relation of dimensionless maximum up lift force to H_u/d_0 .



ただし、 $\bar{p}$: 水平床版の単位幅当り揚圧力の平均値

$p_{\max}$: 同じく最大値

d_0 : 静水面と水平床版間の鉛直距離

H' : $0.62 H_0 - 0.45 d_0$ w_0 : 海水の単位重量

H_0 : 沖波波高 h_0 : 静水深

$$H_u = H_0 \left(1 + \pi \frac{H_0}{L_0} \coth \frac{2\pi h_0}{L_0} \right)$$

(2) 実験公式の現地推定値による検証

1. にものべたように shock 状の揚圧力について厳密に相似則をたてることはきわめて困難であり、上に提案した実験公式を実際に適用することの信憑性について若干の疑問が残る。しかしここではさしあたり実験公式から得られる値が order 的に、妥当かどうかという程度の check を 6420 号台風の際の摩耶埠頭における現地推定値によって行なうこととする。

模型および実物の諸量にそれぞれ添字 m および p ボールをつけ、第一近似として Froude 則がなりたつものとする。実験における静水深 h_m 、波高 H_{0m} は $h_m = 45 \sim 50$ cm, $H_{0m} = 5 \sim 15$ cm, 災害時の摩耶埠頭におけるそれらの値は $h_p = 10$ m, $H_{0p} = 1 \sim 3$ m と推定されるから模型実験の縮尺 S は、 $S = 1/20$ となる。E バースにおいて、

$$h_p = 10 \text{ m}, d_{0p} = 0.8 \text{ m}, H_{0p} = 1.1 \text{ m} \text{ とすれば}$$

$$\bar{p}/w_0 d_0(d_0+H') = 5.82$$

$$\text{したがって、} \bar{p} = 5.2 \text{ ton/m}, p_{\max} = 9.4 \text{ ton/m}$$

1. のべたごとく E バースにおける揚圧力の推定値は、単位面積当り $1 \sim 1.5$ ton/m², 単位幅当り $5.2 \sim 7.8$ ton/m であるから上で得られた実験公式による値と満足すべき一致を示す。

5. あとがき

本研究は運輸省第 3 港湾建設局の委託を受けて行なったものである。付記して関係各位に謝意を表する。

4. 実験公式

(1) 提案する実験公式

図-16 の実験値の整理によって、つぎの公式を提案する。

$$\frac{\bar{p}}{w_0(d_0+H')d_0} = 9.48 \frac{H_u}{d_0} - 8.74$$

$$p_{\max} = 1.8 \bar{p}$$