

子倫倫倫倫

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

第 6 卷 4 号

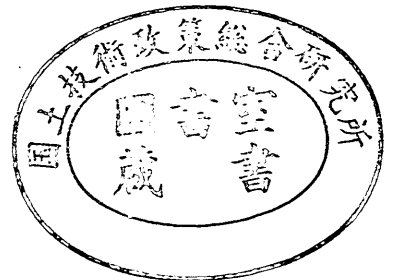
Vol. 6 No. 4

(通 卷 第 41 号)

異形ブロックの波力減殺効果に関する研究……………森平倫生・柿崎秀作・菊谷徹
栈橋に作用する波の揚圧力……………伊藤喜行・竹田英章

1967年4月

運輸省港湾技術研究所



総 目 次

異形ブロックの波力減殺効果に関する研究	森平倫生・柿崎秀作・菊谷徹……	3
栈橋に作用する波の揚圧力	伊藤喜行・竹田英章……………	37

棧橋に作用する波の揚圧力

目 次

概 要	37
1. まえがき	37
2. 揚圧力の衝撃的性格	39
3. 棧橋模型と海象条件	46
3.1 棧橋モデル	46
3.2 海象条件	46
4. 渡版の安定重量	49
4.1 渡版の安定重量	49
4.2 空気抜きあるいは水抜きの影響	50
4.3 渡版の安定重量と揚圧力	53
5. 棧橋上部工に対する揚圧力	54
5.1 揚圧力の大きさと分布	54
5.2 マウンドの影響	55
5.3 桁の影響	55
5.4 渡版の有無による変化	56
5.5 空気抜きの影響	58
5.6 棧橋上部工に生ずる応力と等価静荷重	58
6. デタッチドピアーに対する揚圧力	63
7. 揚圧力の対策に関する考察	64
7.1 棧橋の強度	64
7.2 棧橋の構造および配置	65
7.3 土留護岸の反射率を軽減する方法	65
8. あとがき	68
9. 附 記	68

Uplift on Pier Deck due to Wave Motion

Yoshiyuki Ito*

Hideaki Takeda**

Synopsis

Wharves or piers of open construction are sometimes acted by upward force due to wave motion under the deck. The characteristics and magnitude of such wave force were experimentally studied with a reduced model.

The intensity of uplift depends on various factors, such as incident wave height, wave period, tide level, size and shape of superstructures, etc. As a rule, the uplift increases with wave height and decreases with the clearance between deck and still water level. Fairly long wave has more dangerous effect than short period wave. Some experimental formulas were presented to estimate the design load.

This wave force is a kind of shock pressure with very short duration, caused by an impact of water surface against deck slabs or girders. The mode of escape of enclosed air or water mass has a certain effect on the pressure intensity. The phase difference between each local pressure also affects the average intensity over a relatively wide area.

The stability of structural members should be examined considering their response to impulsive force. In the model experiment, the local pressure intensity was measured by pressure cells and the average intensity was evaluated from the strain in model deck slabs, taking into account the similarity in vibration characteristics. Usual slabs or girders in the prototype have fairly high natural frequency and the effective average pressure for design purpose attains to $4 \sim 8 \text{ t/m}^2$, for example, under violent waves and high tide. In case of structural members which resist the uplift with their own gravity, the net weight of $1.5 \sim 3 \text{ t/m}^2$ or so is enough for practically stable state.

The experimental results in this report will serve the structural design and the layout of wharves, piers and other berthing facilities.

*Chief of Breakwater Laboratory, Hydraulics Division

**Research Engineer, Breakwater Laboratory, Hydraulics Division

棧橋に作用する波の揚圧力

伊 藤 喜 行*
竹 田 英 章**

概 要

棧橋下面に作用する波の揚圧力と、それに対する渡版および棧橋上部工の安定性について実験的研究を行なった。実験結果によると揚圧力は上昇する水面の衝突に基づく衝撃力であって、その性質や大きさは海象条件（波高・周期・潮位）および構造条件（棧橋の形状・寸法、水や空気の逃げ方）によって異なる。一般的には波高・潮位・周期と共に増大し、また水塊の逃げ場があれば減少するが、空気孔程度ではかえって増大する傾向がある。揚圧力は衝撃的圧力であるため、それによる挙動は渡版のように自重をもって対抗するものと、床版などのように部材の強度をもって抵抗するものと異なる扱いが必要であり、前者に対しては落下および振動限界に対応する安定重量を、後者に対しては等価静荷重をそれぞれ実験公式として提示した。また、横棧橋のほか、デタッチドピアに対する通過波の揚圧力、土留護岸に孔あきケーソンを用いたときの効果の有無についても検討した。

1. ま え が き

この報告は、棧橋の下面に叩きつける波の揚圧力に関する実験結果をとりまとめたものである。

標準的な横棧橋の場合、揚圧力は棧橋上部工と渡版との両方に作用する。棧橋上部工に作用する揚圧力は、床版や桁の強度、杭頭結合部の強度、杭の引抜きなどに関係し、また渡版に作用する揚圧力はその安定に関係を有している。

渡版（あるいは接続版）は棧橋本体と土留護岸との間に渡された単桁であって、従来その目的の一つは揚圧力に対する安全弁であるとされていた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。すなわち、揚圧力は棧橋下面に閉じ込められた空気や水に起因するものであると考えられていたから、それを逃がすために孔をあけて空気抜きとしたり、あるいは渡版が上に押し

れて外れることによって圧力を緩衝し、棧橋本体に被害が及ばないようにしていたわけである。渡版の目的としてはこの他に、陸岸と棧橋本体との間の不等沈下に対処する、あるいは棧橋上部工の自重を軽減するために一部を陸岸に受けもたせる、などが挙げられる。

揚圧力に対する安全弁としての役割が渡版に含まれているとするならば、渡版が揚圧力によって落下することはその目的を十分果していることになる。したがって、渡版の落下防止を考えるのは、渡版の機能を自ら捨てることになってしまう。

もちろん、渡版が落下する現象に安全弁としての機能が本当にあるのかどうかは、あらためて検討を要する問題である。すなわち、渡版が落下しても棧橋本体に作用する揚圧力があまり減少しなければその効果は少ない。仮に効果があったとしても、棧橋本体を保護するために

- 1) 天竺良吉：臨海工事における最近の諸問題，海岸工学研究発表会論文集，昭和29年11月
- 2) 黒田静夫：台風による港湾災害の特性とその対策，災害とその対策，昭和31年8月
- 3) 黒田静夫・石綿知治：防災工学
- 4) 比田正・新妻幸雄：港湾施工法（下）

*水工部 防波堤研究室長

**水工部 防波堤研究室

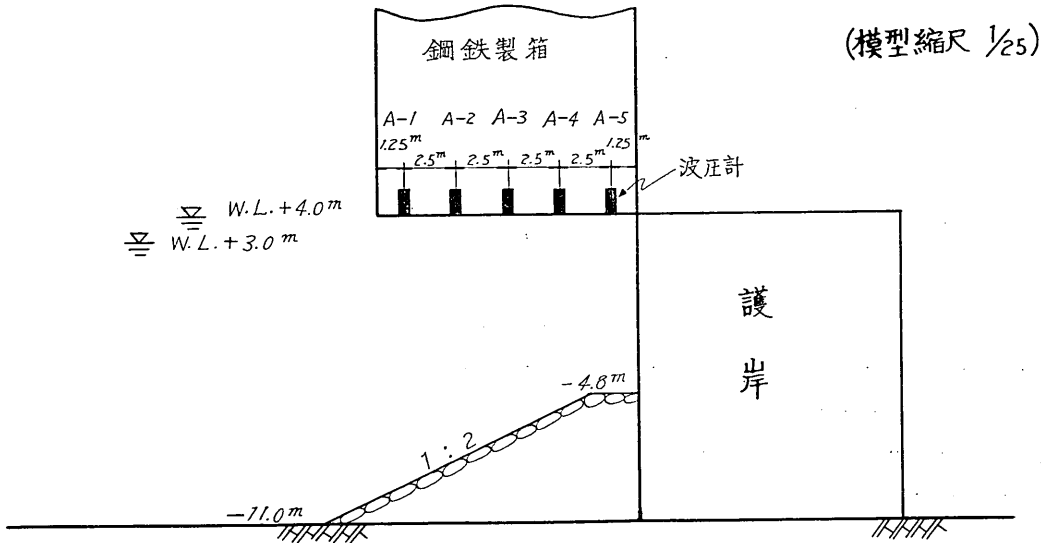
は、揚圧力が適当な大きさに達した段階において渡版がちょうど落下してくれなくてはならないが、そのような微妙な挙動を果して期待できるかどうかは疑問である。また、普通に設計された棧橋本体が、渡版が落下しなくても、通常想定される程度の揚圧力に対して十分な強度を有するものであるならば、渡版は落下しない方がいい。

従来、安全弁を意図した渡版のスパンは1~2mであ

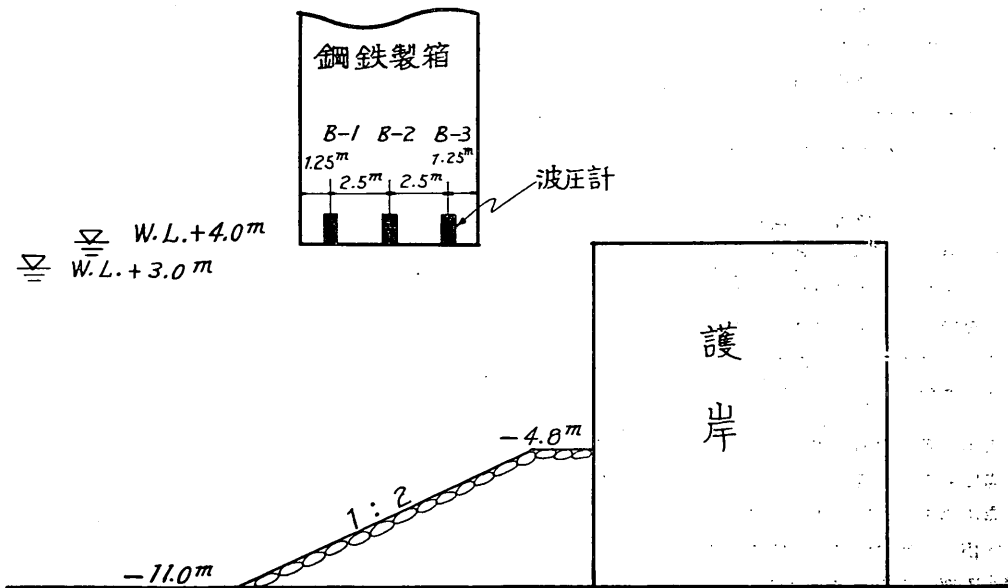
ったが、最近の渡版はスパン数mに達する例が多く、揚圧力に対する安全弁以外の機能が主たる目的とされているようである。そうになると揚圧力に対する観点もまた異なるものとなり、上述のような問題点よりも、むしろ揚圧力への対処の方法が主要な検討項目となる。

こうした事柄を背景にすると、棧橋に作用する波の揚圧力に関して検討すべき事項は

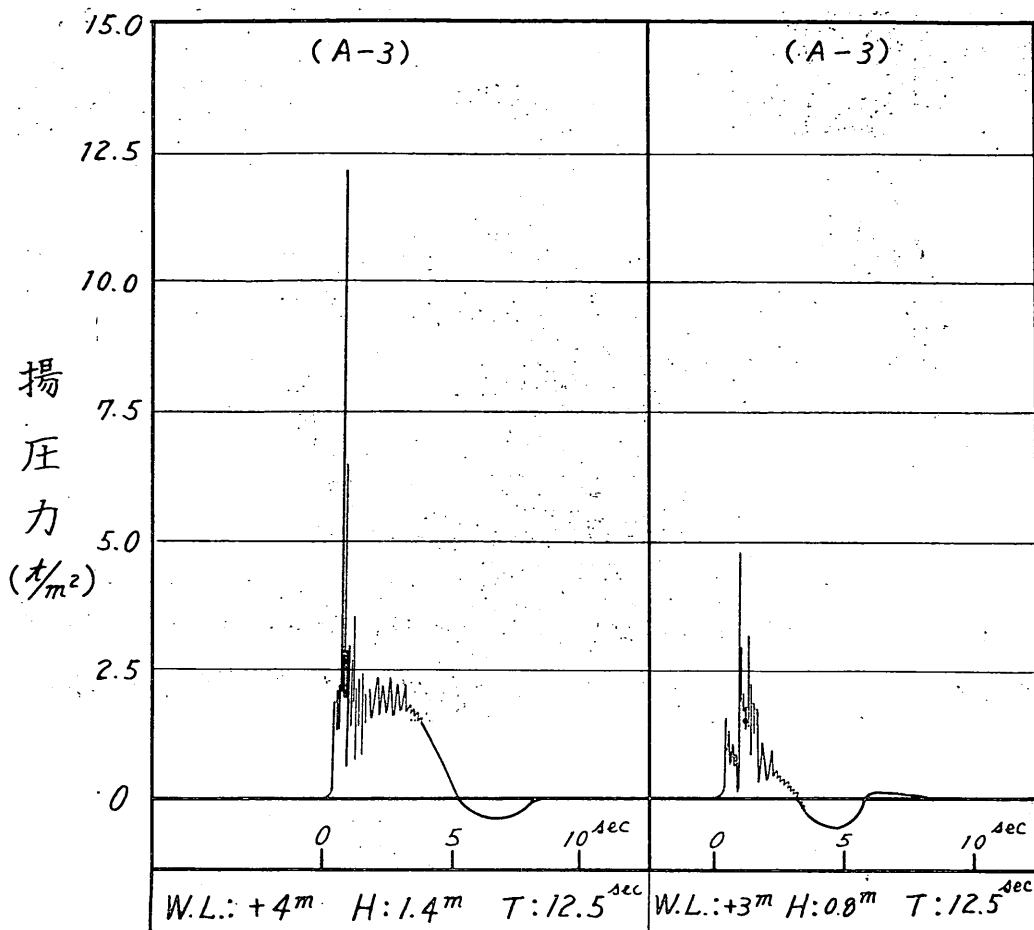
(1) 棧橋上部工および渡版に作用する揚圧力の大きさは



図・2-1a 揚圧力測定装置 (揚圧力分布の測定)



図・2-1b 揚圧力の測定 (渡版のないとき)



図・2-2 棧橋下面に作用する揚圧力一記録例

どの程度か

(2)渡版が落下した場合、棧橋本体に作用する揚圧力は何の程度減少するか

(3)渡版あるいは床版に孔をあけるなどの方法は有効か

(4)どのようにして揚圧力に対処するか

に示される。本報告では、横棧橋およびデタッチドピラーの場合について、これらの問題点に関する模型実験結果を述べる。

2. 揚圧力の衝撃的性格

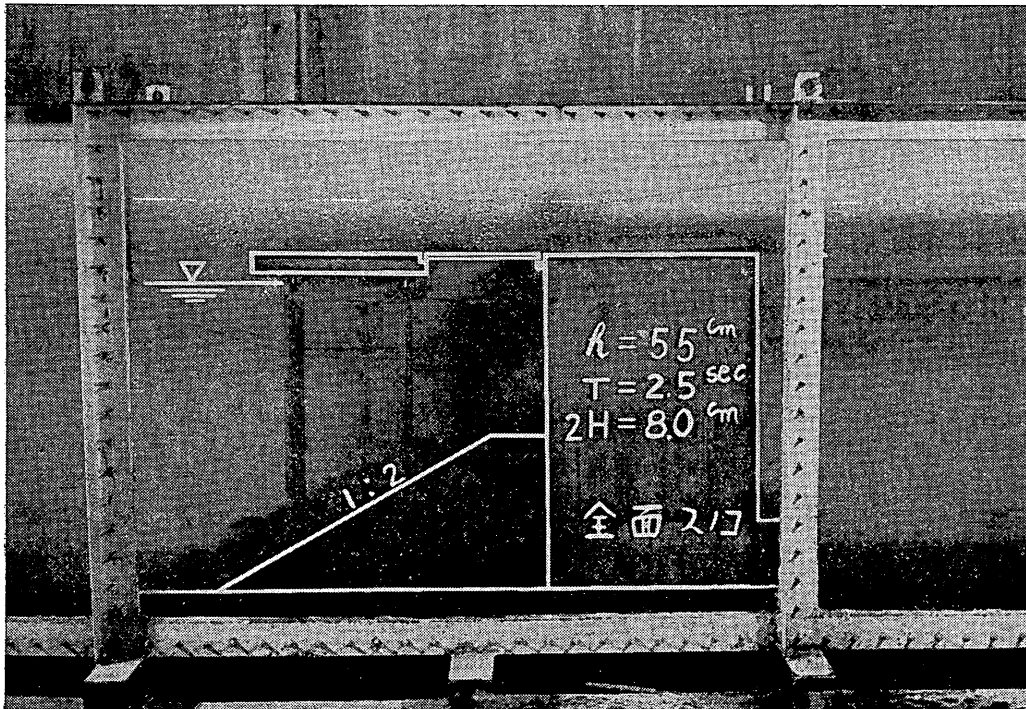
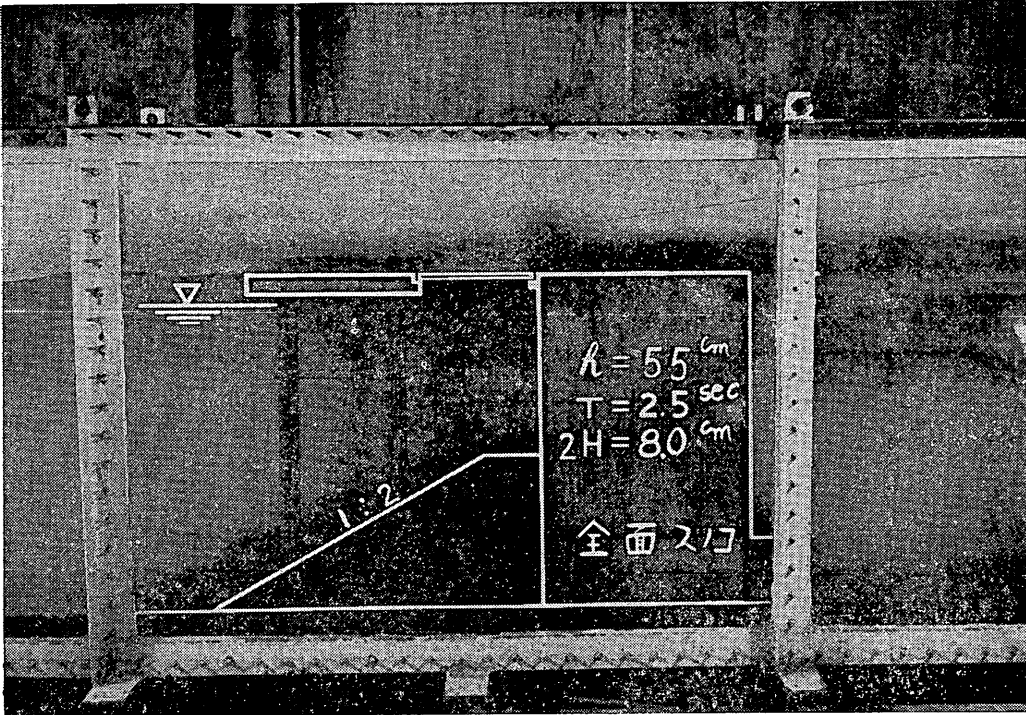
模型実験結果の詳細は次章以下で述べることにして、本章では、若干の実験的事実を引用しながら、揚圧力の特徴について概観する。表題にもあるとおり、揚圧力の衝撃的性格についての考察がその中心である。

圧力計を使用して図・2-1のような実験装置を作り、揚圧力を測定すると、図・2-2のような記録が得られる。直立壁に作用する砕波の圧力と同様に極めて衝撃的

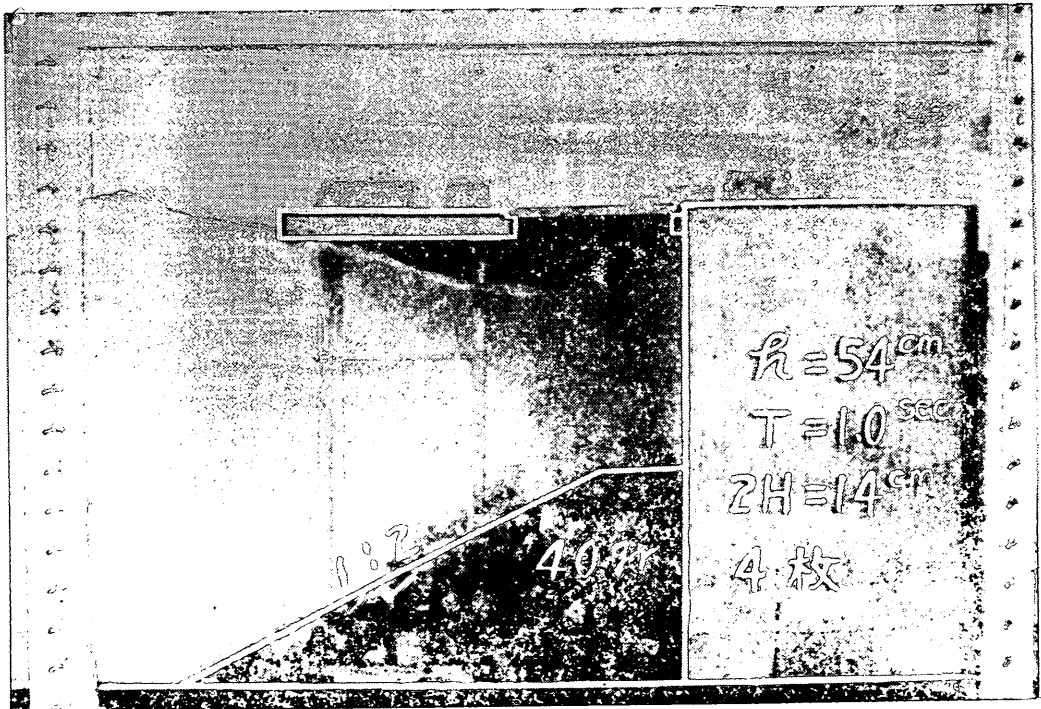
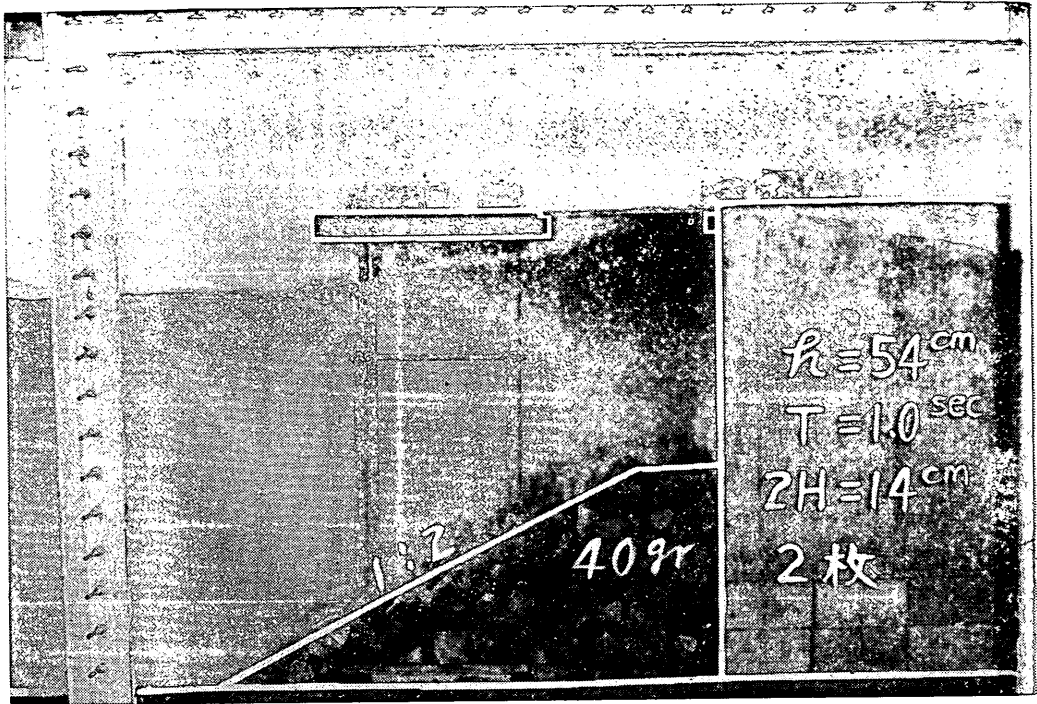
である。この衝撃圧は、上昇する水面が棧橋下面に衝突するために生ずるものである。したがって、閉じ込められた空気や水の逃げ方によって衝撃圧の様相がかなり異なる。

まず、揚圧力が水の逃げ方によって変ることが、波の周期の影響において顕著に現われる。写真・2-1は、周期12秒および5秒（模型縮尺 $1/25$ ）のときの、棧橋下方の水面形をそれぞれ示すものである。この写真からわかるように、周期12秒の場合は波長が棧橋の幅に比べて大きいので、上昇する水面は棧橋全体にほぼ同時に衝突し、しかも水の逃げ場がないので揚圧力は大きい。これに反して、周期5秒のときは波長が極めて短いため、重複波の腹の部分の波頂が、土留護岸寄りで渡版下面の一部にあたるだけであり、沖側の空間に水の逃げ場が存在するので揚圧力は小さくなる。

また、図・2-1 bのように渡版部分を除いて揚圧力を測定し、渡版の有無の影響を求めると例えば図・2-3

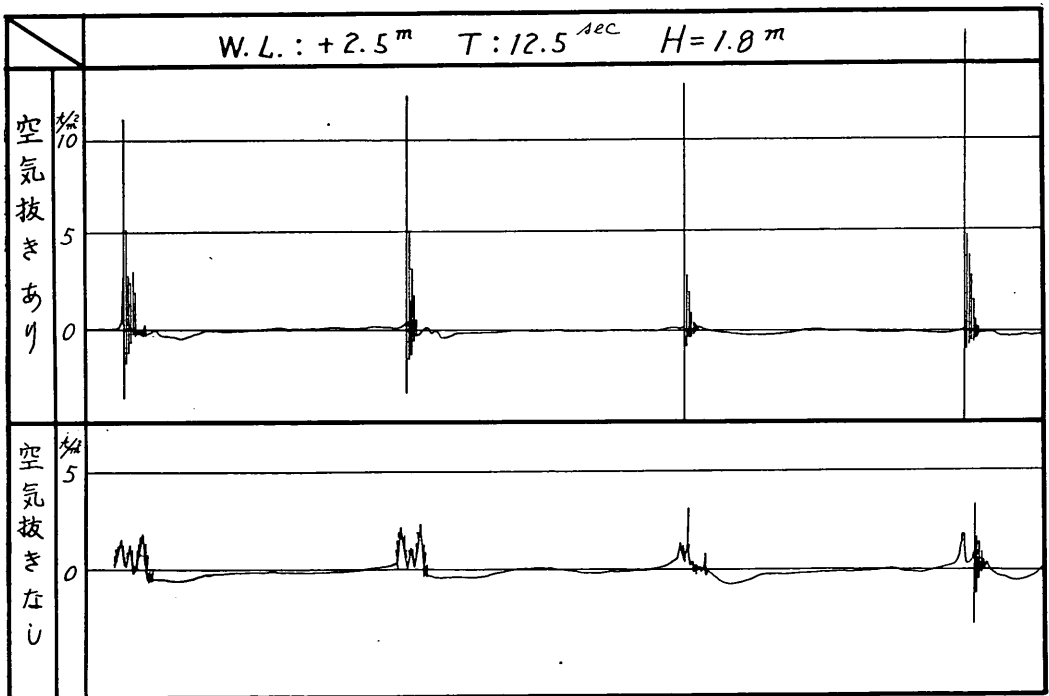
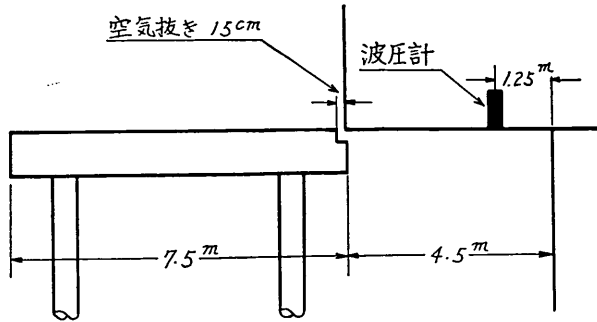


写真・2-1 a 栈橋下の水面形 (周期: 12秒, 波高: 1 m, 潮位: +3 m)



写真・2-1b 栈橋下の水面形（周期：5秒，波高：1.8m，潮位：+2.5m）

(模型縮尺 1/25)



図・2-4 空気抜きの揚圧力に及ぼす影響一記録例

その取り扱いとは静的荷重と全く異なり、動的な考察が必要となる。しかも、渡版のように自重によって対抗するものと、棧橋上部工のように部材の強度をもって抵抗しようとするものでも取り扱いが異なる。

図・2-5のような渡版を考えると、自重 W の渡版に下方から P なる揚圧力が作用する場合、 $P > W$ ならば渡版は持ち上げられる。いま、最も単純にモデルとして、揚圧力 P が τ 時間だけ一定に作用するものと仮定すると、渡版の上昇距離 x は次のとおりである。

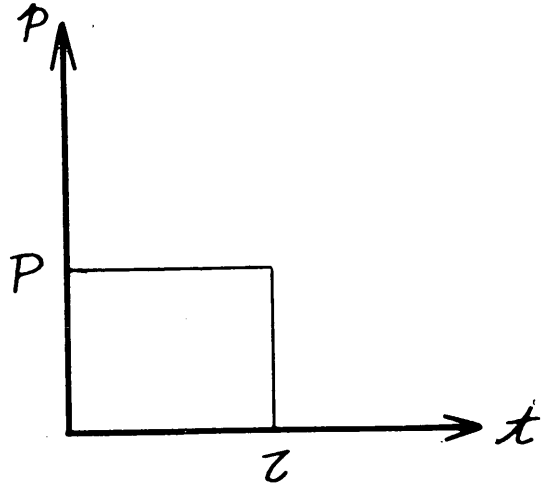
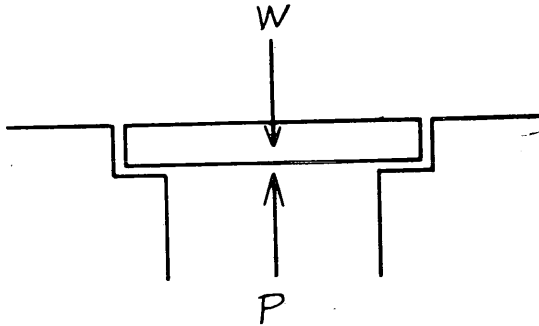
$$x = \frac{gP(P-W)}{2W^2} \tau^2 \quad (2-1)$$

すなわち、揚圧力の大きさ P のほかに、その作用時間が大きく影響する。図・2-6は渡版の自重の相違による上昇距離の変化を測定したもので、 P や τ を適当に仮定すると上式から計算した傾向とよく一致している。

$P > W$ である限り渡版はある程度移動するから、微動だにさせないためには、自重を揚圧力のピークより大きくする必要がある。しかし、作用時間が短かければ、ある程度の移動はあっても再び元の位置へ戻り得る。その許容限度は、たとえば渡版が支承から外れない限度、すなわち版厚程度であるが、実際には一様な揚圧力が作用して渡版は水平のまま運動するわけではなく、回転や水平

移動もあり得るから、許容限度はもっと小さくする必要
がある。

第4章における渡版の安定重量の実験においては、渡
版の自重を変化させて落下限界と振動限界とを見出し
た。揚圧力が一定であるとき、渡版の自重が非常に大き

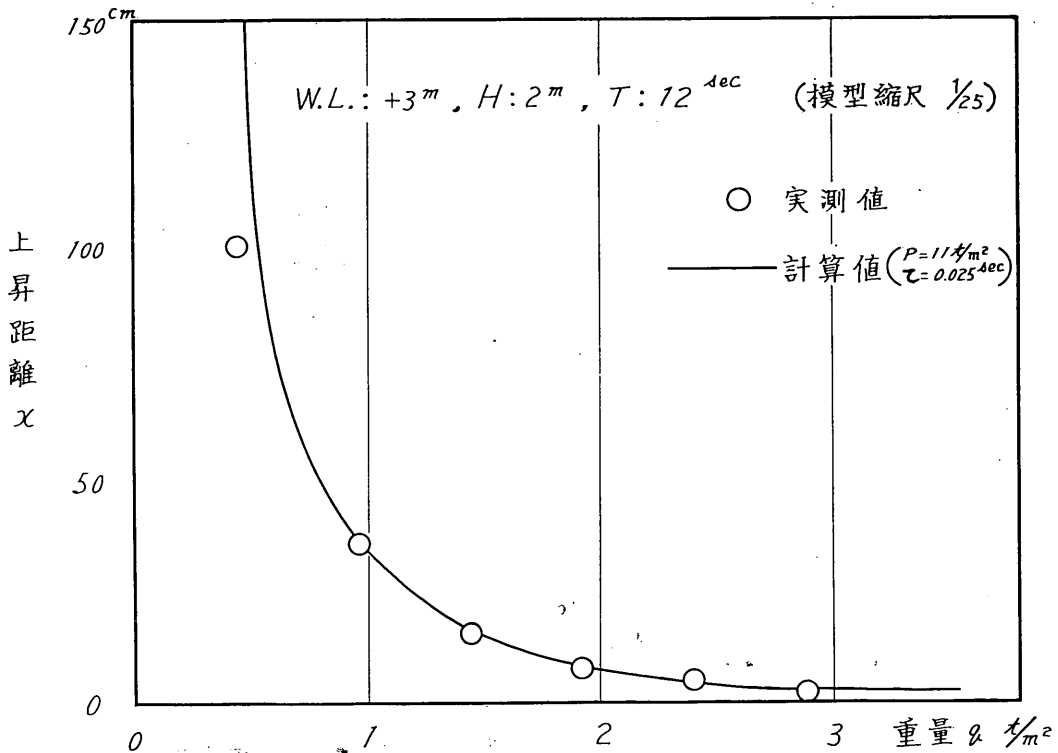


図・2-5 渡版のモデル

ければ全く安定である。自重がそれほど大きくなけれ
ば、落下はしないが振動を生ずる。そのような限界が振
動限界重量である。自重が更に小さければ、渡版は持ち
上げられて直ちに落下する。これが落下限界重量であ
る。振動限界は原理的には揚圧力の大きさと一致する筈

であるが、実験においては目で見たり指で触れたりして
検出した程度であるから、恐らく真の揚圧力よりはやや
小さいであろう。以上のことを考慮して、本報告では安
定限界重量と揚圧力とを区別して論じているのである。

衝撃圧によって部材に生ずる応力を問題にするときに

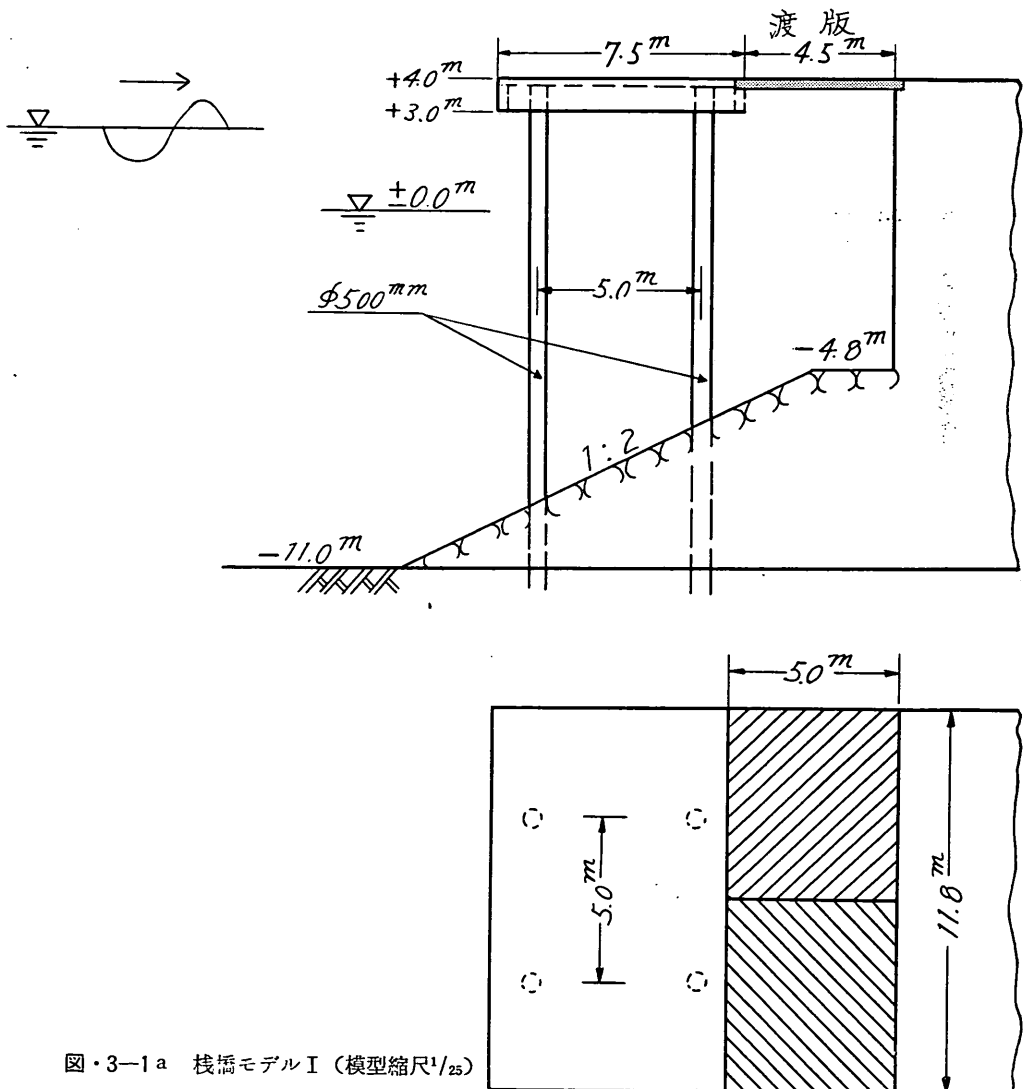


図・2-6 渡版の自重と上昇距離

は、その応答特性が重要な因子となる⁵⁾。例えば、辺長4m、厚さ40cmの四辺固定床版の固有振動周期は0.01秒の程度である。これが衝撃的揚圧力の作用を受けるときの応答係数がいくらであるかは、厳密には揚圧力の波形や作用時間が求められない限りわからない。しかし、模型における固有周期を実物に相似にとることができれば、そこで測定された歪記録のピークは、実際にも歪のピークとして生じ得るものである。したがってこの歪に対応する静荷重によって、静的計算から応力を求めることができる。後章で応力測定から逆算した等価静荷重とはこのような意味のものである。また、波圧計で得られた揚圧力の値も、正確には揚圧力そのものではなく、計器の

応答を加味したものであることはいうまでもない。図・2-1の測定に使用した波圧計の固有周期は0.001秒、また、応力測定に用いた模型床版の固有周期は0.003秒程度であり、縮尺 $1/16 \sim 1/25$ として現地に換算すると0.01秒内外となるから、上記の値にほぼ対応しており、応答特性に関する相似性は大体満足されている。

また、衝撃圧がある受圧面積内で位相差をもって作用する場合には、局部的な大きさと全体の合力とではかなり異なる場合が生じ得る。したがって、揚圧力を受ける部材の安定性について論ずるにあたっては、その受圧面積の大小をも併せ考える必要がある。



図・3-1 a 棧橋モデル I (模型縮尺 $1/25$)

5) 伊藤喜行ほか：防波堤の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告第5巻14号，1966年9月

3. 栈橋模型と海象条件

3.1 栈橋モデル

実験に使用した栈橋のモデルは以下のとおりである。

モデルⅠ：水深の比較的大きい横栈橋。

縮尺 $1/25$ (図・3-1)

モデルⅡ：水深の比較的小さい横栈橋。

縮尺 $1/16$ (図・3-2 a)

モデルⅢ：陸岸から離れた栈橋。

縮尺 $1/16$ (図・3-2 b)

上記のとおり、長さの縮尺は $1/25$ あるいは $1/16$ としてあ

り、本報告中の諸量の大部分は現地の値に換算して記述してあるが、任意の縮尺で対応させることはもちろん可能である。

3.2 海象条件

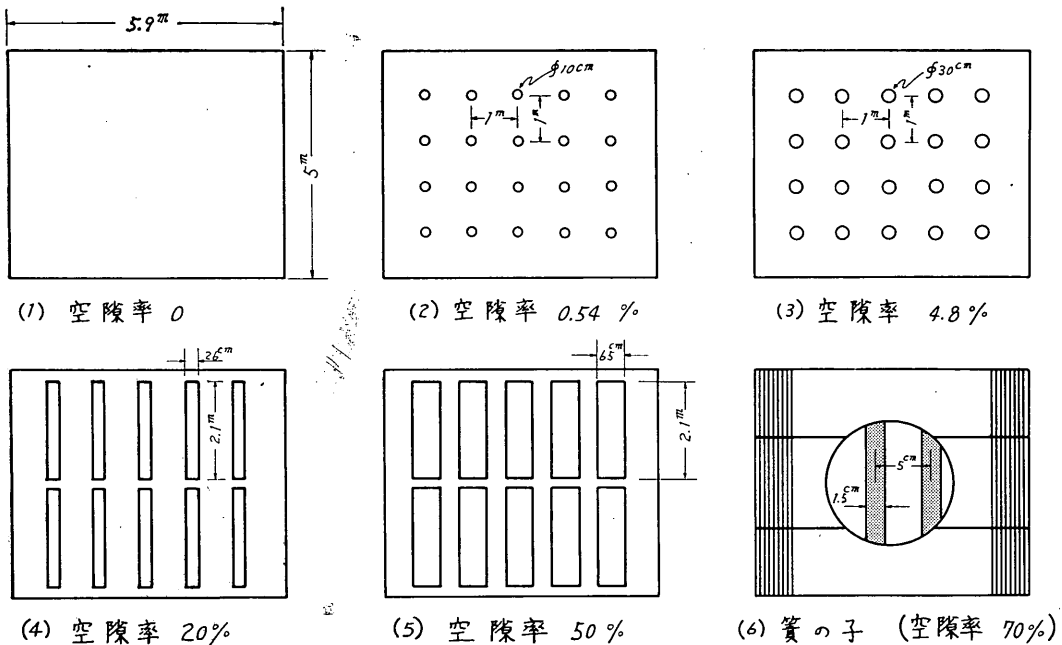
波高：最大2 m程度。

周期：12秒および5秒。

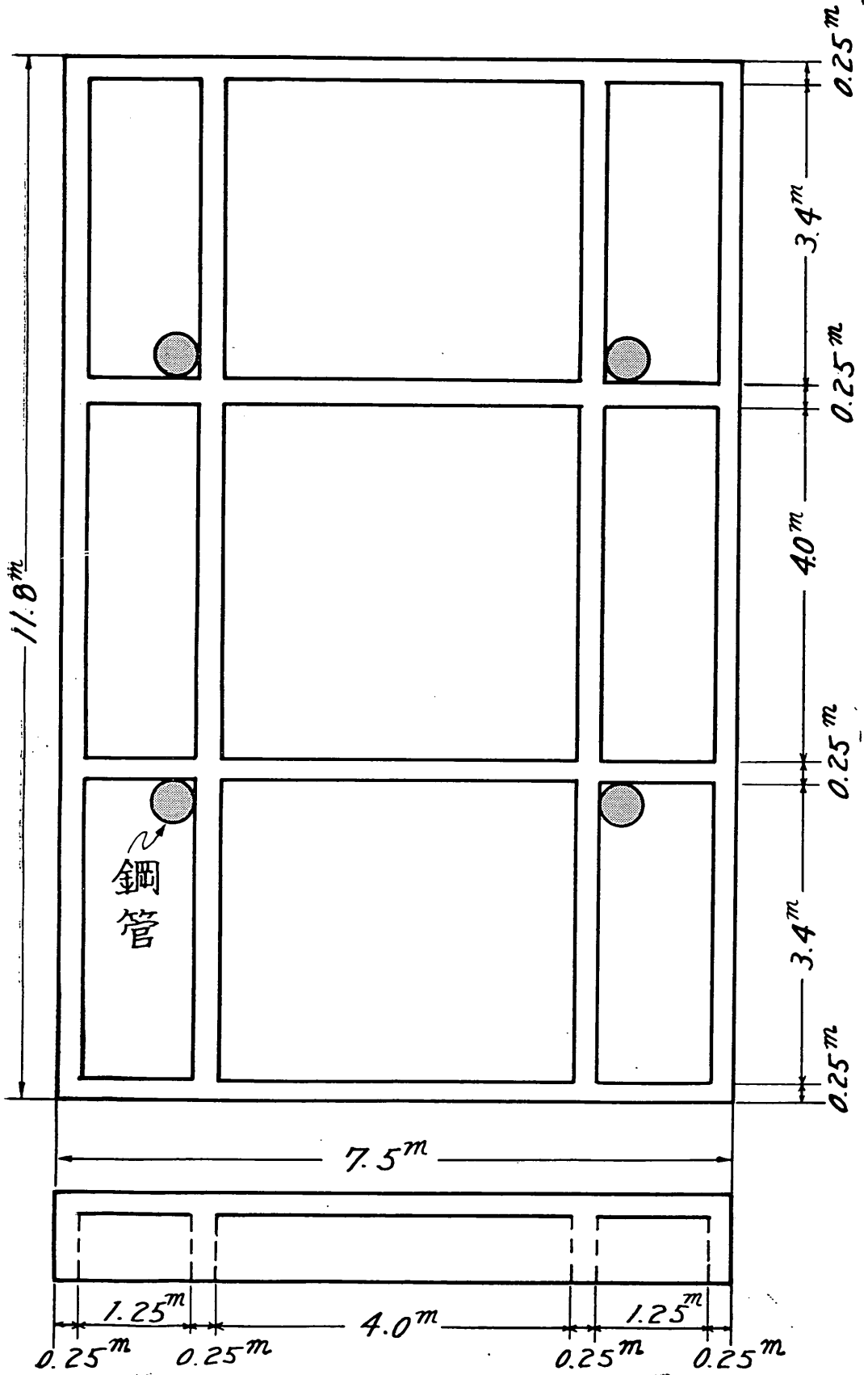
波向：栈橋法線に直角。

潮位：最高地盤高程度。

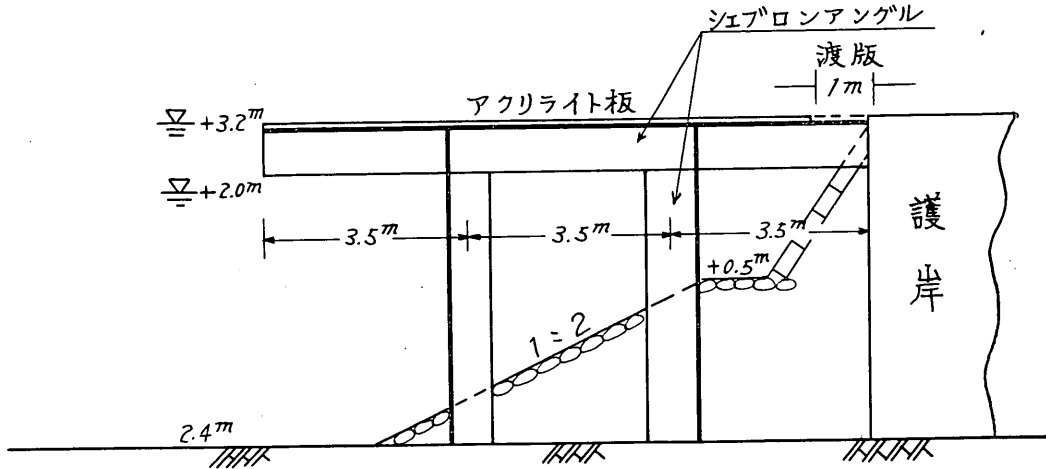
なお、実験に用いた波は一定周期・一定波高の規則波であるから、波高 H は現地不規則波中の最大波高 H_{max} に対応するものと考えなければならない。



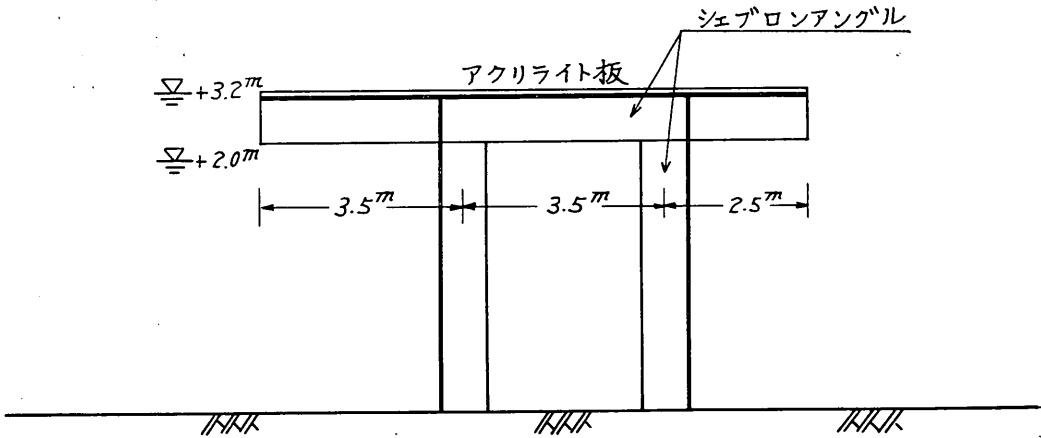
図・3-1b 渡版の種類



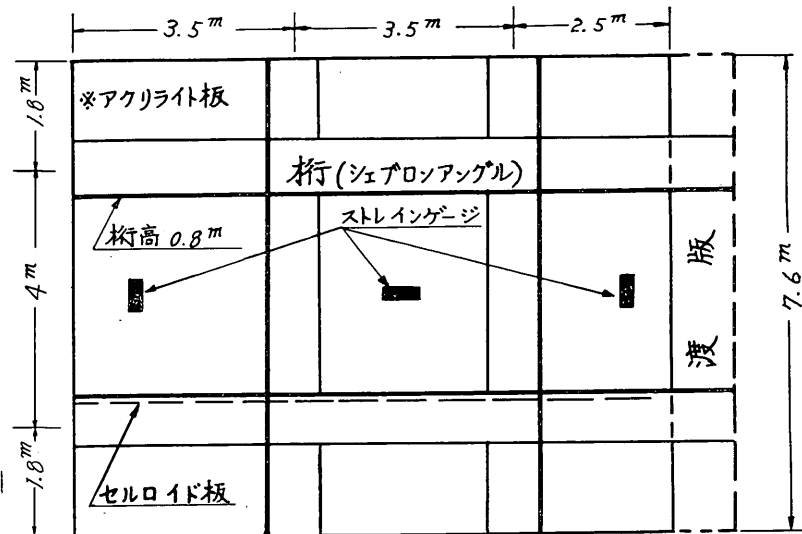
図・3-1c 桁 の 配 置



図・3-2a モデル II (模型縮尺 $1/16$)



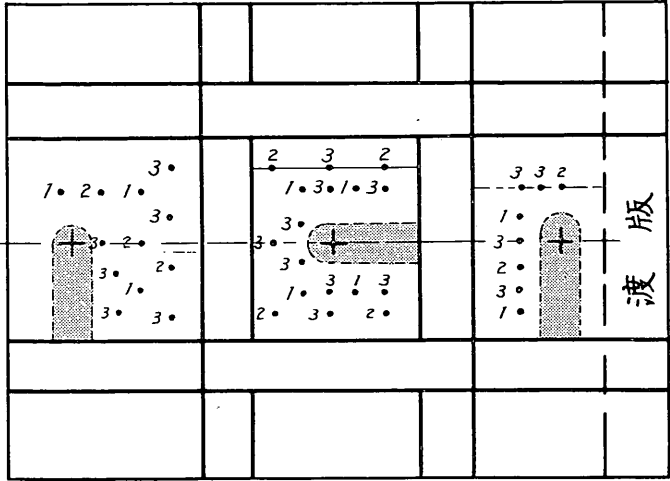
図・3-2b モデル III (模型縮尺 $1/16$)



図・3-3a モデル II, III の桁の配置

空気抜き孔の種類

ケース	孔の配置	孔の径	空隙率
A	なし	0 ^{cm}	0 [%]
B	1	4	0.03 5 0.04
C	1	8	0.12 5 0.18
D	1	11	0.22 5 0.34
E	1+2	11	0.45 5 0.69
F	1+2+3	11	0.89 5 1.46



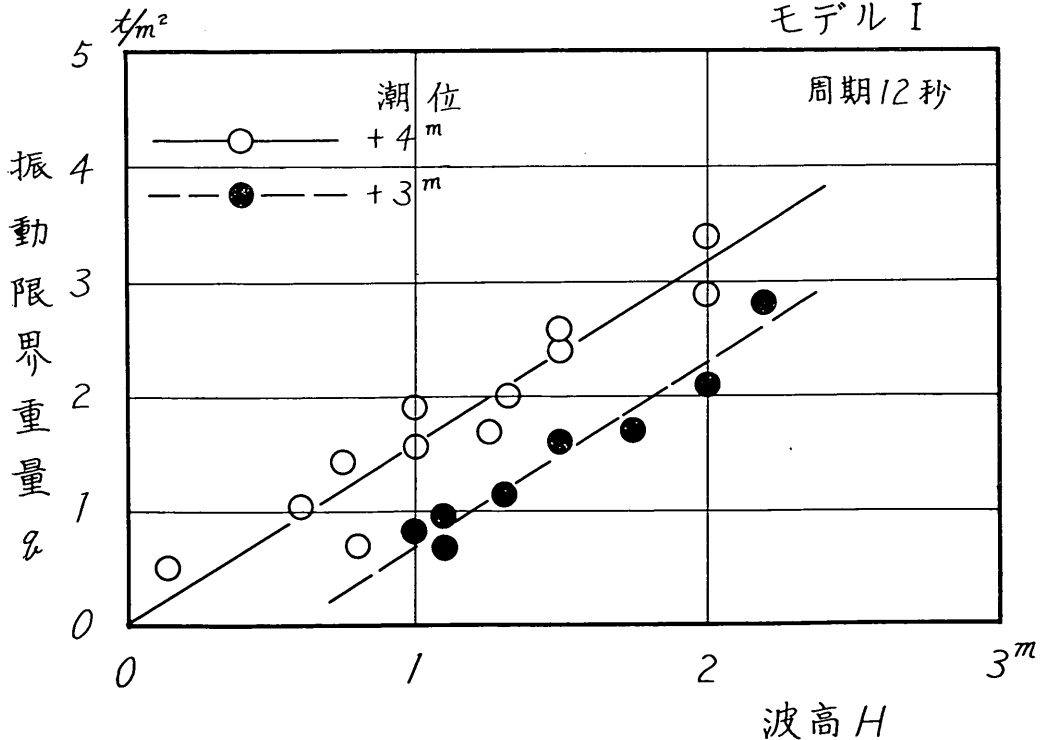
図・3-3b 床版の空気孔の配置 (モデルII. III)

4. 渡版の安定重量

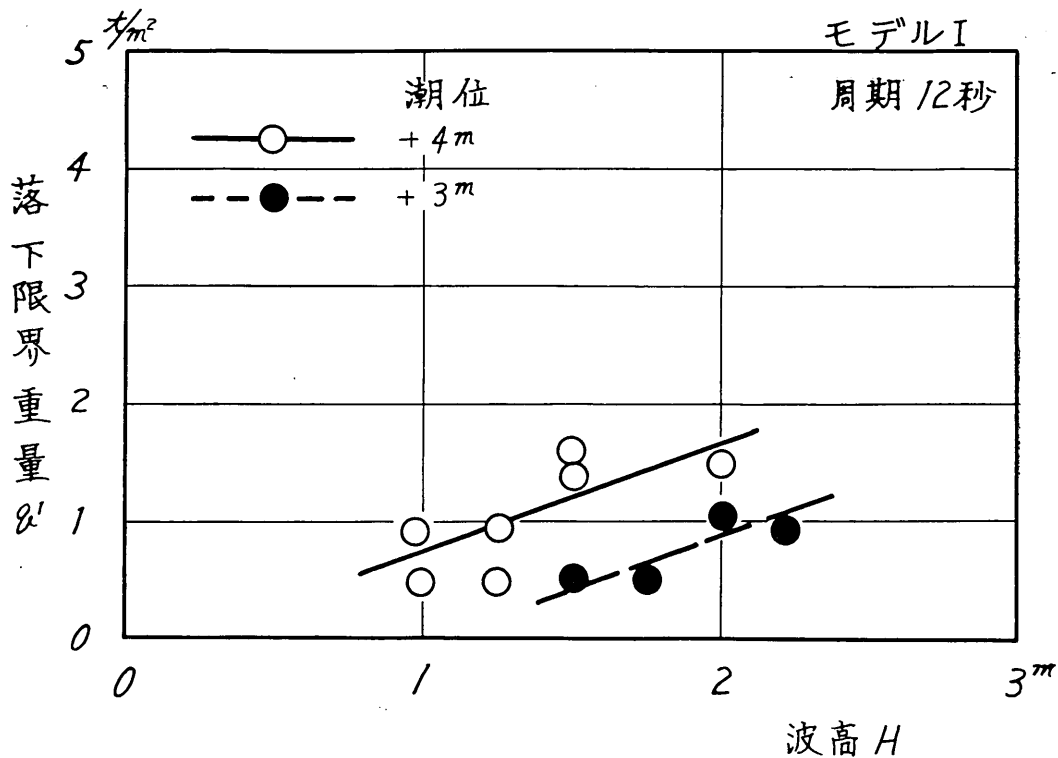
4.1 渡版の安定重量

図・3-1の棧橋モデルにおける渡版の安定重量と波高との関係を図・4-1に示す。ただし、周期は12秒、潮

位は+3mと+4mとである。この図は、渡版が極めて僅かがたつく程度の振動限界重量と、直ちに落下してしまう落下限界重量とを示したものであり、落下限界は振動限界の $1/2 \sim 1/3$ である。これらの安定重量は、波高の大きいほど、また潮位の高いほど大きい値を必要とする。



図・4-1a 渡版の安定重量(振動限界)



図・4-1b 渡版の安定重量(落下限界)

周期の影響についてはすでに若干触れたが、周期5秒のときの安定重量は周期12秒にくらべて約 $1/2$ であった。揚圧力は水面が棧橋下面に衝突するときの力であるから、水面の上昇速度によって異なる筈である。水面の上昇速度は、波高が同じであれば周期の長い方が小さいのに、実験では周期の長い方が大きい安定重量を示しているのは、一つには水面と渡版との接触面積の大小によるものである。すなわち、棧橋下面と接するときの水面の曲率に基づくもので、波長が短ければ水面は必ずしも渡版全体に接しない。またもう一つは、すでに述べたとおり水の逃げ方によるもので、これも当然水面の曲率に関係している。

周期が更に増加すると、恐らく水面形よりも上昇速度が効いて来て、揚圧力は再び減少するであろう。潮汐のような極めて長周期の水位変動の場合には、水面が水平に棧橋下面に接しても、上昇速度が小さいために水塊の逃げる余裕があり、揚圧力としては静的な浮力程度に過ぎないと想像される。いかなる周期が最大の揚圧力を与えるかは、棧橋の幅と波長の比などで定まる筈であるが、今回はそこまで詳しい実験は行っていない。図・4-1の場合には波長約120mで、棧橋幅12mとの比は

10、渡版幅4.5mとの比は約30である。

前述のように、安定重量は波高と共に増大し、潮位上のクリアランスと共に減少する。単位面積あたりの振動限界重量について、この関係は次式のように表わされる。

$$q = w(1.6H - 0.9R) \quad (4-1)$$

q : 単位面積あたりの振動限界重量

w : 水の単位重量

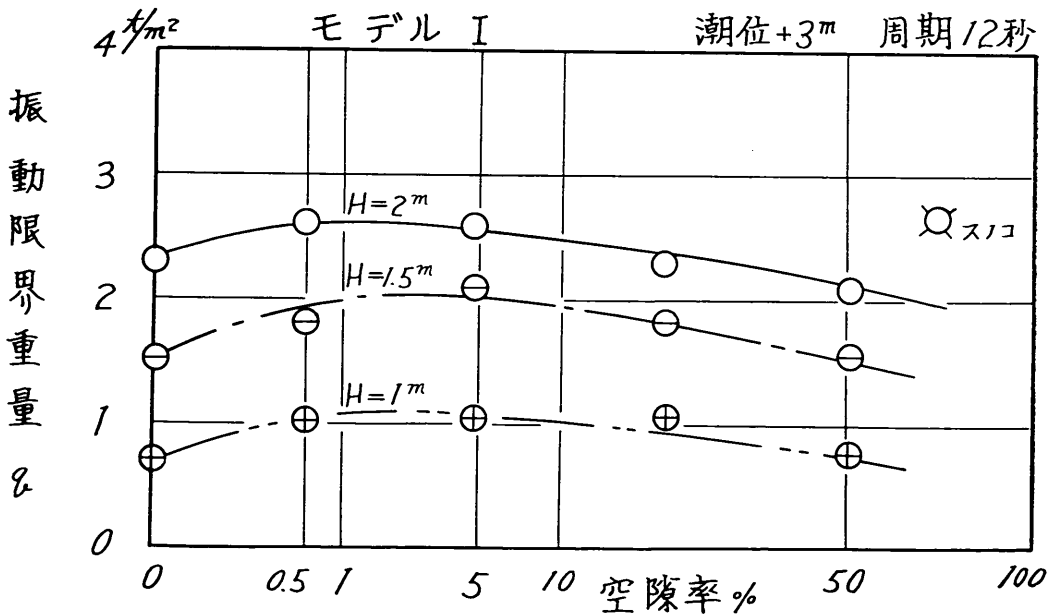
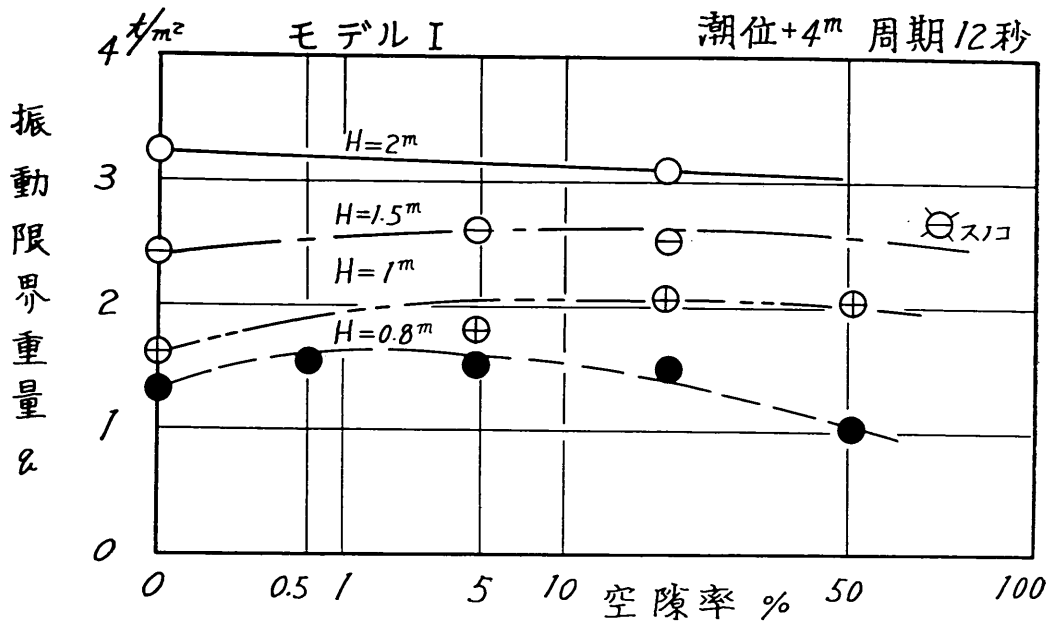
H : 入射波高

R : 潮位から渡版下面までの高さ

いま、 $H = 1.5\text{m}$ 、 $R = 0.5\text{m}$ とすると $q = 2\text{t/m}^2$ となり、従来いわれていたような $1 \sim 2\text{t/m}^2$ の揚圧力¹²⁾もこれと大体一致している。通常用いられている渡版は、厚さ20~30cmの鉄筋コンクリート版であるから自重は 0.6t/m^2 内外で、上記の振動限界重量 2t/m^2 の $1/3$ 程度であり、落下限界が振動限界の $1/2 \sim 1/3$ であることを考えれば、ときには落下するもの当然である。

4.2 空気抜きあるいは水抜きの影響

図・3-1bに示すように、渡版に種々の大きさの孔あるいは間隙を設けてその安定重量を求めると、図・4-2の傾向が得られる。



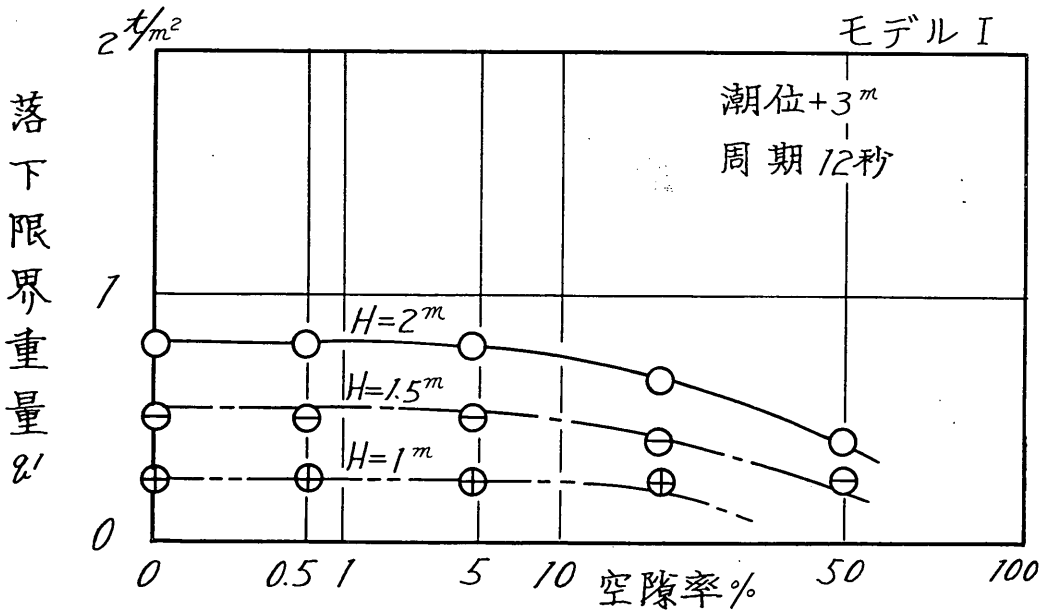
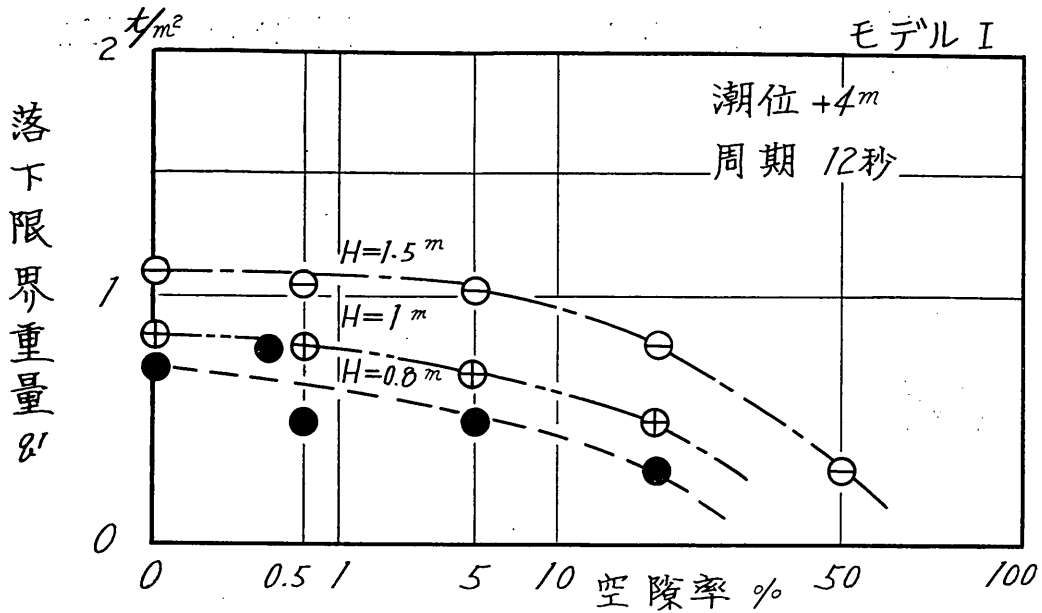
図・4-2a 渡版安定重量に及ぼす空気抜きの影響 (振動限界)

渡版の振動限界重量は、孔をあけないときにくらべて、空隙率が比較的小さいときには孔から空気が抜けやすくなって水面が勢いよく渡版にぶつかるのでやや増大している。一方、空隙率が小さいときにはほとんど変化せず、空隙率がかなり大きいときには減少している。

なお、これらの安定重量は、渡版の空隙部分を除いた

実質部分の単位面積あたりの重量を意味する。

空気の逃げ方が揚圧力に及ぼす影響は、第2章で述べたように極めて著しい場合がある。これに反して図・4-2の示す安定重量にはそれほど顕著な影響が現われていない。この解釈の一つとして、揚圧力の衝撃的性格を用いることができる。すなわち、空気抜きによって揚圧

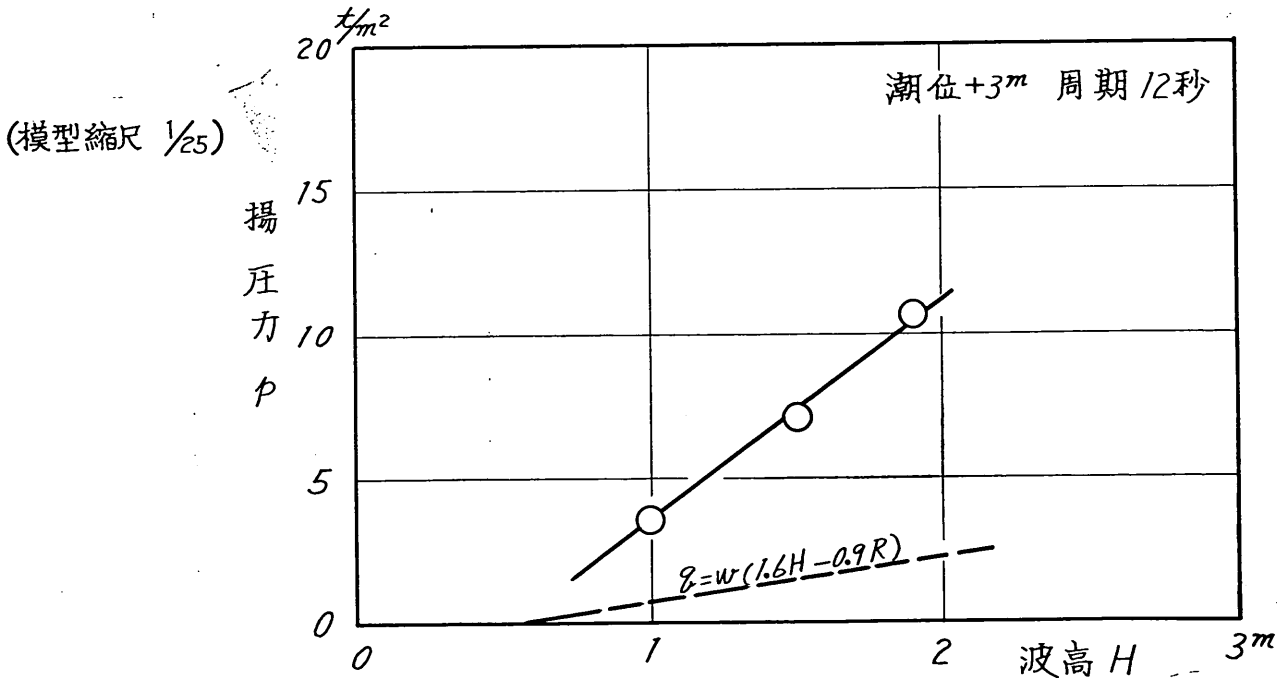
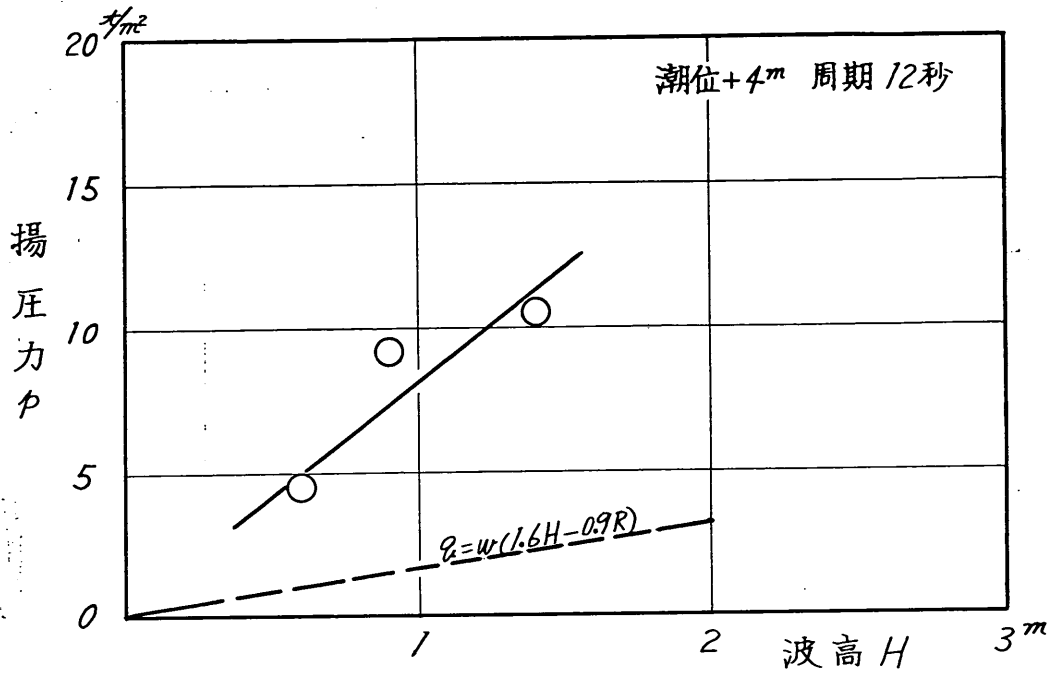


図・4-2b 渡版安定重量に及ぼす空気抜きの影響(落下限界)

力の衝撃性が増大すると、ピークは確かに大きくなるけれども、同時に作用時間が減少するから、渡版の移動量にはそれほどの変化を生じない、とする見方である。

一般に空隙率の変化による振動限界重量の増減は小さいから、空気抜きなどの実質的な効果は受圧面積の減少という形で現われる。つまり、単位面積あたりの安定重

量が一定であれば、ある面積全体の重量は、孔をあければ軽くできるということである。したがって、 $2t/m^2$ なり $3t/m^2$ なりの自重の渡版では棧橋にかかる反力が大き過ぎるというのであれば、孔を沢山あけて全重量を減らしてこれを軽減することができる。そして、この場合コンクリートでは1m内外の厚さを要するので不都合で



図・4-3 渡版に作用する揚圧力

あれば、密度の大きい鋼材を用いた管の子のようなものにすればよい。鋼材であれば、実質部分 $2 \sim 3 \text{ t/m}^2$ に対して厚さは30cm内外ですむ。しかも、落下限界重量は空隙率の大きいとき明らかに減少しているから、安全性

もまた増大しているわけである。

4.3 渡版の安定重量と揚圧力

先に述べたように、揚圧力のピークよりも渡版の重量が大きければ渡版は振動しないが、重量が小さくて多少

動揺しても、それが實際上極めて微小であれば必ずしも識別できない。また、渡版全体に作用する揚圧力と局部的な揚圧力との間には、位相差による影響もある。

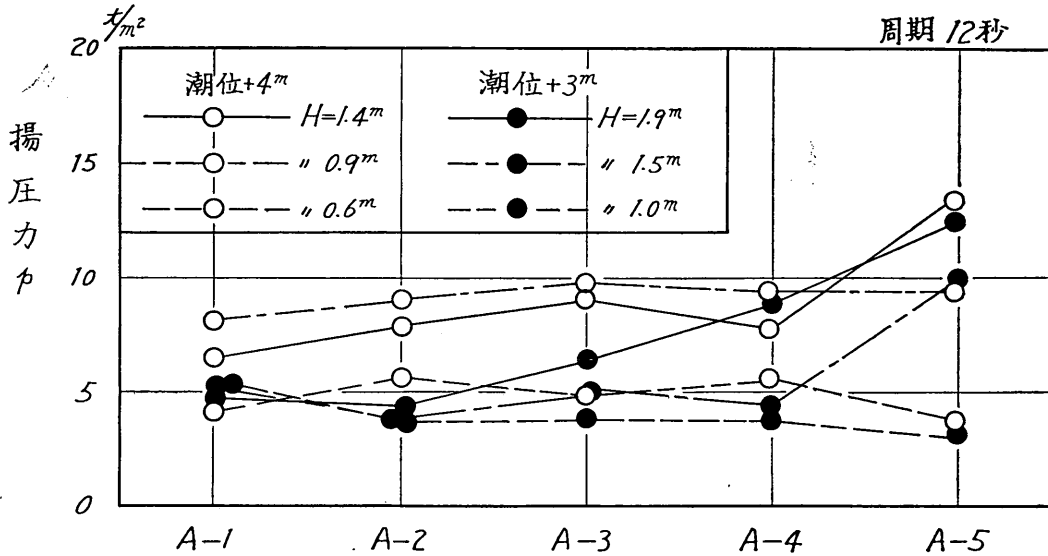
図・4-3は、図・2-1 aにおける渡版部分に作用する揚圧力のピークの平均値と渡版の振動限界重量とを比較したもので、後者は前者の約 $\frac{1}{5}$ である。したがっ

て、落下限界重量は揚圧力のピークの $\frac{1}{10}$ 程度以下ということになる。

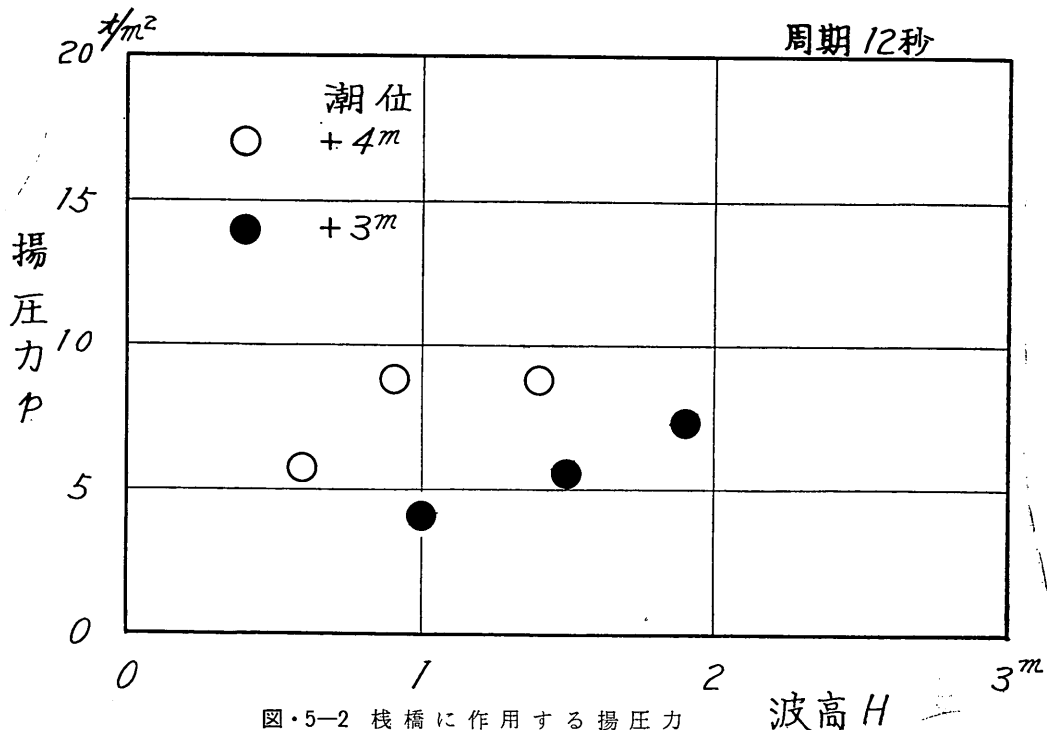
5. 栈橋上部工に対する揚圧力

5.1 揚圧力の大きさと分布

図・5-1は、図・2-1 aにおける揚圧力の分布を



図・5-1 揚 圧 力 分 布



図・5-2 栈橋に作用する揚圧力

波高 H

示すもので、概略的には波高の小さいとき一様に分布しており、波高が大きくなると陸岸に近い部分で揚圧力が大きくなっている。

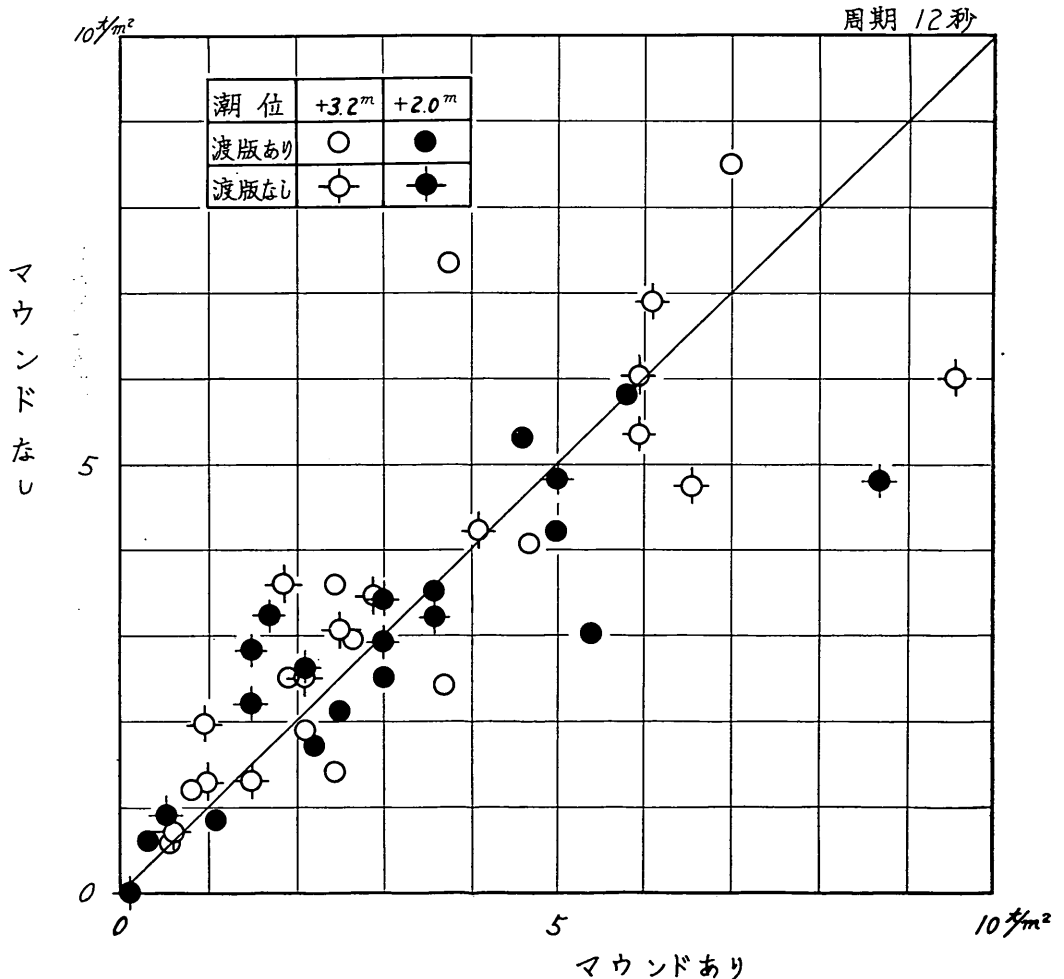
また図・5-2は、揚圧力の平均値を波高・潮位に対して示したものである。両図からわかるように、栈橋下面の局部（直径50cm程度の範囲）に作用する揚圧力は5~15t/m²程度に達し得る。

5.2 マウンドの影響

モデルI（図・3-1 a）においては、土留護岸基部の高さは-4.8mであり、これに潮位が加わると水深は来襲波高に比してかなり大きいから、マウンドの存在が

波の様相、ひいては揚圧力に及ぼす影響は全く考えられない。

また、モデルII（図・3-2 a）のようにマウンドが比較的高い場合でも、波がマウンド上で砕けたり著しく遡上したりする様子はなかった。実際にマウンドを全く除去して応力測定を行ない、マウンドのある場合と比較すると図・5-3のようになる。この実験結果からもマウンドの影響は認められない。したがって、極端に高い斜面上での極めて局部的な揚圧力を対象としない限り、マウンド斜面の影響を考慮する必要はない。



図・5-3 マウンドの影響（等価静荷重の比較）

5.3 桁の影響

栈橋上部工の下面にある縦横の桁は、揚圧力の大きさに何らかの影響を与える筈である。

その一つは、上昇する水面と床版との間に閉じ込めら

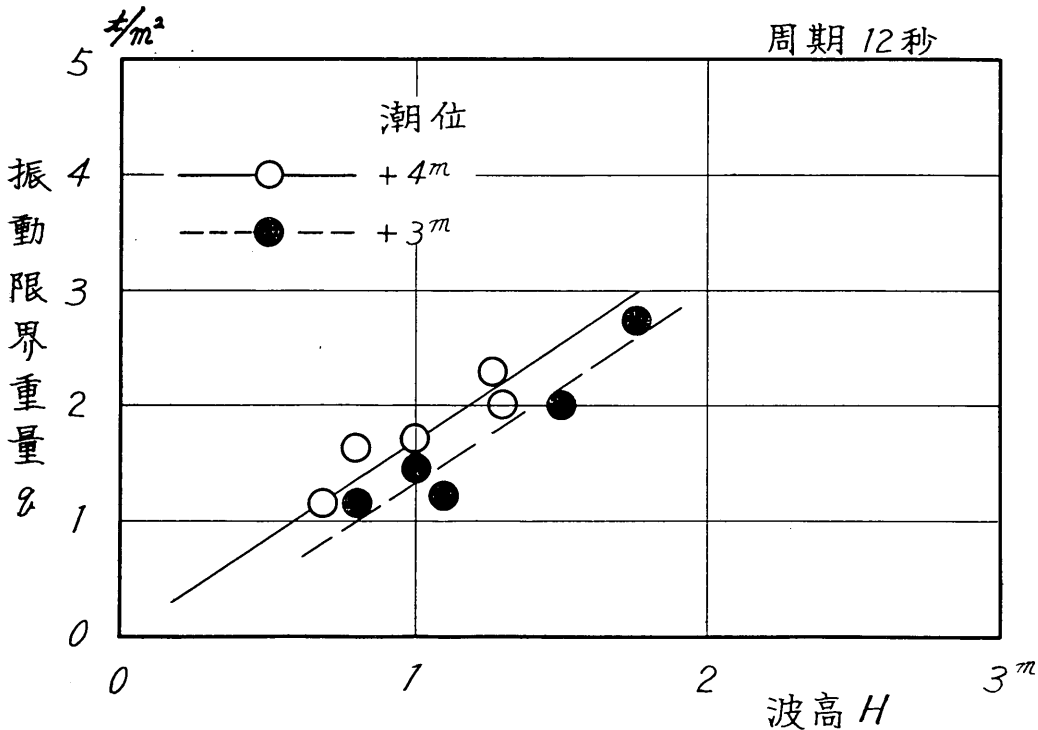
れた空気が横方向へ逃げることを阻止し、衝撃性を緩和する効果である。しかし、空気だけでなく水の逃げ場をも失なわせるから、この面からは揚圧力をむしろ増大せしめる恐れもある。

その二は、桁の下面は当然床版の下面よりも低いから、棧橋上部工全体に作用する揚圧力は、桁のないとき床版下面に作用するものより当然大きい。

結局これらの総合的な効果としては、実験によると、潮位が低ければ桁が無いときはあるときよりも棧橋上部工全体にかかる揚圧力は小さいが、潮位が高いと両者に大差はなかった。つまり、潮位が低いと水面は先ず桁の下面に達するが床版には必ずしも達しない。したがって、桁が無ければ揚圧力は全く作用しないのに、桁があ

るとある程度の揚圧力がかかる。これは純粋な桁の影響とはいえないが、實際上これを分離して論ずることはできない。潮位がやや増すとやはり桁のある方が揚圧力は大きい、更に揚圧力の大きな場合、すなわち我々が本当に揚圧力を考慮しなければならないときには、桁の有無の影響は小さい。したがって実用上からは、特に桁の影響を考慮する必要は少ない。

棧橋上部工が全体としてその自重のみで揚圧力に対抗するような型式は実際にはあり得ないけれども、実験で



図・5-4 棧橋上部工の安定重量

渡版と同様にして振動限界重量を求めたのが図・5-4である。(4-1)式と同様な表現をすると

$$q = w(1.7H - 0.4R) \quad (5-1)$$

となる。ここでRは、潮位から床版下面までのクリアランスである。この実験に使用した桁の配置・寸法は図3-1cにすでに示した。渡版の振動限界重量を示す(4-1)式と比較すると、波高にかかる係数はほぼ等しいが、クリアランスにかかる係数が半分になっており、上述の潮位の高低による桁の有無の影響が表わされている。

5.4 渡版の有無による変化

さて次に、渡版が落下すれば果して棧橋本体に対する安全弁となり得るかどうかを調べてみよう。

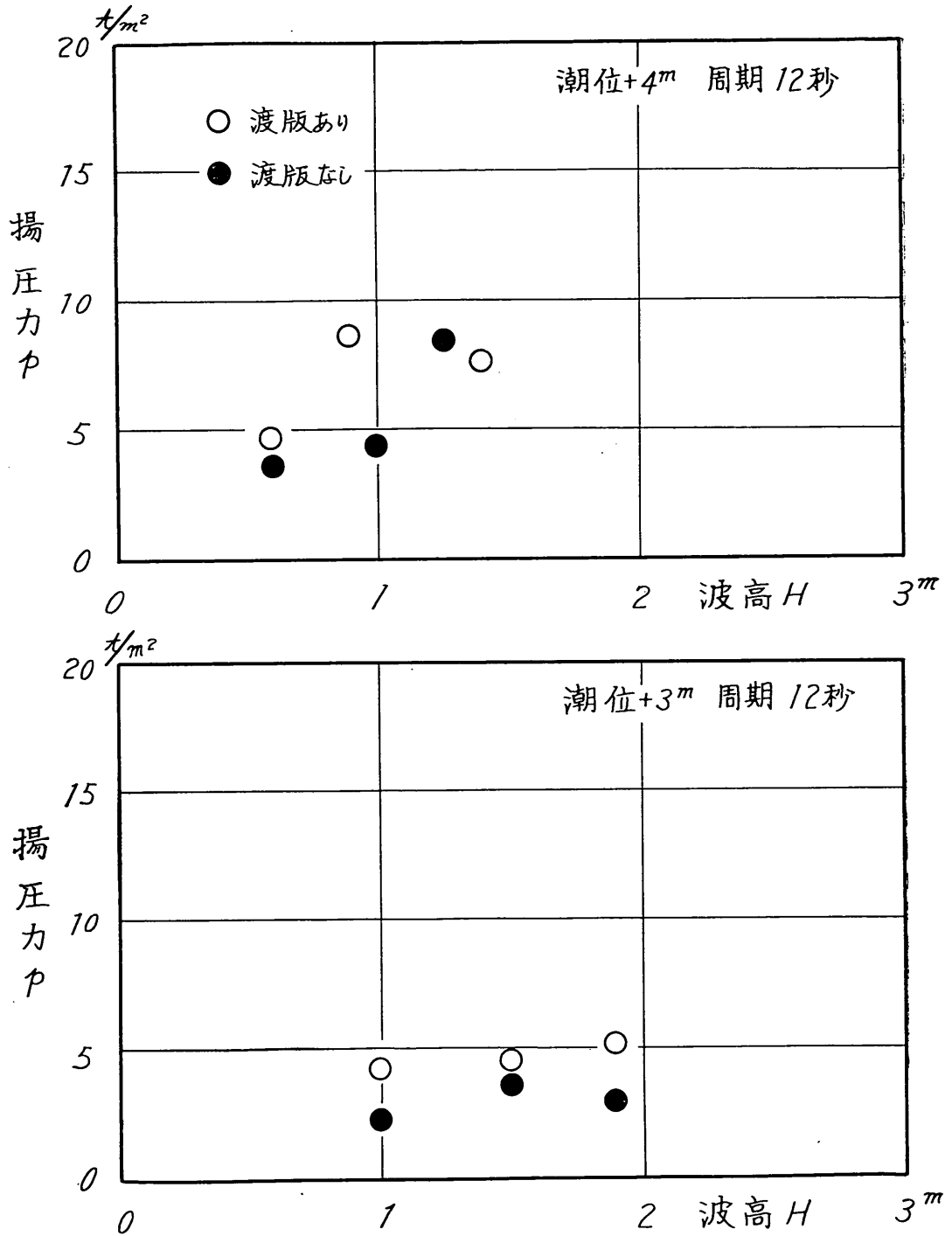
図・2-1 aおよびbにおいて、渡版部分の有無によ

る棧橋上部工部分の平均揚圧力の変化を示したものが図・5-5である。

また、図・5-6は渡版の空隙率と棧橋上部工の振動限界重量との関係を、モデルIについて求めたものである。

図・2-3に示した記録例によると、局所的な揚圧力は渡版がなければ半分程度に減少する場合があり、この傾向は図・5-5においても認められるところであるが、図・5-6によればそれ程顕著な影響はない。

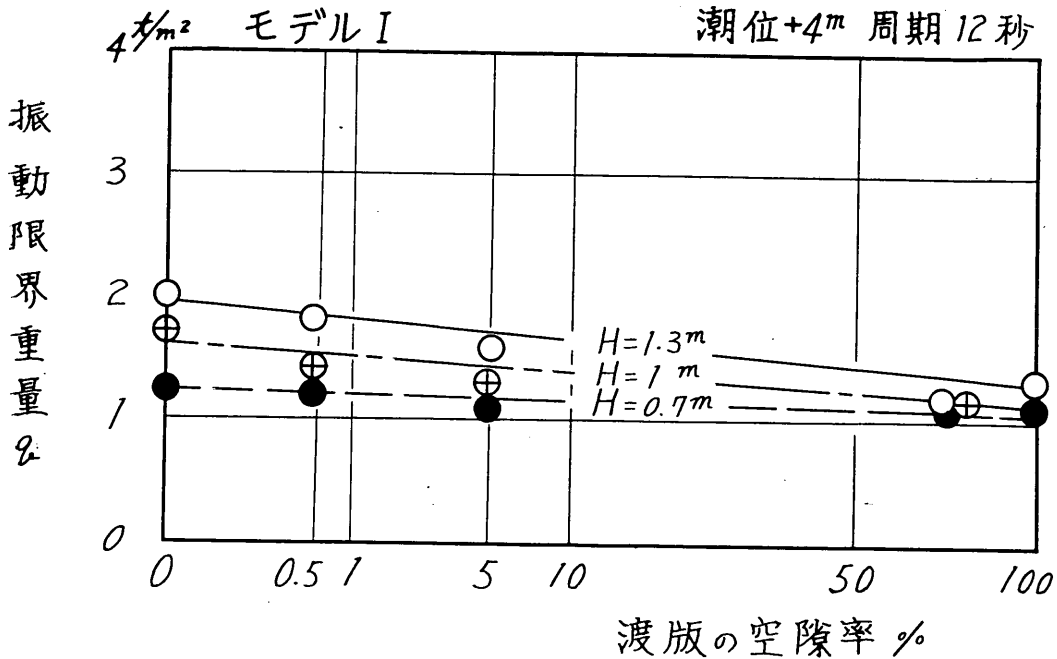
更に、第5章第6節で述べる応力測定の結果を見ると、モデルIIの場合、一般的には渡版があってもなくても等価静荷重はあまり変化がなく、その他、渡版がある方が大きい場合もあれば逆に小さいこともある。



図・5-5 渡版の有無が棧橋の揚圧力に及ぼす影響

結局、渡版を落下させて安全弁とする考え方は、結果的にはそうなる場合もたまたまあるとしても常にそれを期待できるとは限らないし、安全弁となるためには適当

な時期に落下してくれなくてはならない。あまり落下しやすいと、常時のちょっとした波でも落下して荷役作業に支障があり、あまり落下が遅いと棧橋本体を危険にさ



図・5-6 渡版の空隙率と栈橋上部工安定重量との関係

らすことにもなるから、設計時にこれを考慮することは無理である。しかも、かえって揚圧力が増すことさえあるのであるから、渡版を安全弁と考えることは妥当でない。

5.5 空気抜きの影響

第4章第2節では、渡版における空気抜きまたは水抜きと渡版自身の安定重量との関係を求めた。また、前節では渡版の空隙率が栈橋上部工に作用する揚圧力にかなる影響を有するかについて述べた。残る問題は、床版に空気抜きを設けた場合の床版自身に対する影響であるが、これについては次節における応力測定結果によって述べる。

5.6 栈橋上部工に生ずる応力と等価静荷重

等価静荷重なる語は、すでに述べたとおりモデルⅡにおけるアクリル樹脂製の模型床版にストレインゲージを貼付し、揚圧力によって生ずる歪を測定して、これを等分布の静荷重に換算したものである。床版は桁に固定されているが、前縁および後縁には桁をとおしていないので、陸側と沖側の床版は三辺固定版、中央の床版は四辺固定版として算定した。このように、版の全面積に等分布する静荷重に相当するものであるから、揚圧力強度の局所的な相違、位相のずれ、衝撃圧に対する応答性のすべてが含まれており、波圧計による測定値とは必ずしも一致しない。このとき幾何学的相似性は栈橋モデルにつ

いて満足されるし、応答性に関しても、第2章で述べたとおり相似性はほぼ満たされている。

実験結果によると、各要因と等価静荷重との関係は次のとおりである。ただ、ケースによって測定値のばらつきがかなり大きいので、必ずしも一般的傾向と合致しない場合もある。

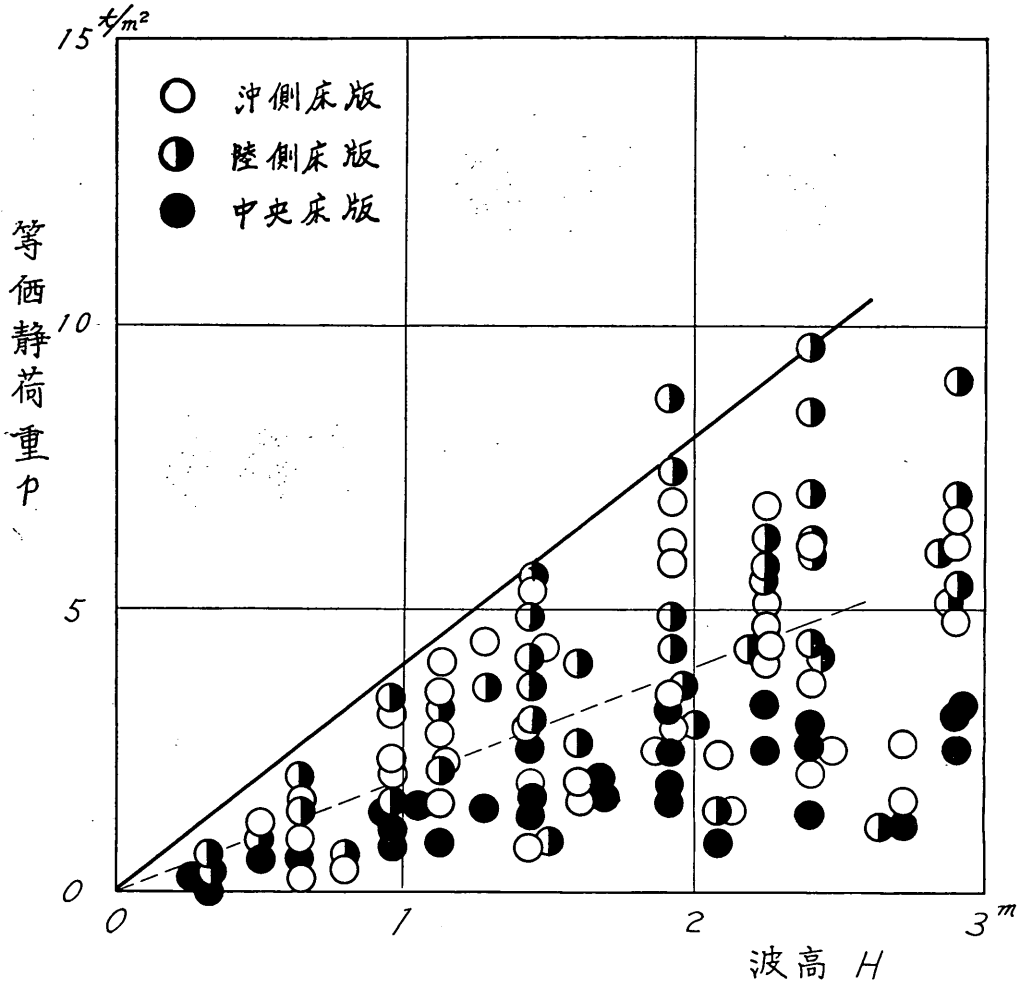
- (1)波高の影響：一般には波高と共に直線的に増大する。
- (2)周期の影響： $T=12\text{sec}$ と $T=5\text{sec}$ とを比較すると、潮位 +0.2m の場合には前者が3～4倍大きい、潮位 +3.2m の場合には1～1.5倍程度しか大きくない。
- (3)潮位の影響：潮位が高い方が1～2 t/m² 程度大きい場合が多いが、逆に半分位になる場合もあって、他の因子の影響も区々なので断定し難い。
- (4)位置の影響：沖側と陸側とは同程度、中央はその半分程度の場合が多い。
- (5)マウンドの影響：ほとんどない(図・5-3)。
- (6)渡版の影響：渡版の有無はほとんど影響しない場合が多いが、渡版が落下して60～70%に減少する場合や、逆に1.5～1.8倍に増加する場合もあり、他の因子との関係

は断定し難い。

(7)空気抜きの影響：空隙率0と1%程度とを比較すると、沖側では空気抜きを設けることによって約半分に減少するが、陸側では60~100%、中央では100~180%で、

かえて増大する場合がある。

以上のように、各因子の影響を明確にできない場合が多い上に、実験に用いたモデルで再現しなかった因子が実際には関係してきて値が変動する恐れもあるので、図・5-7にはあらゆる実験データを一括し、単に波高と



図・5-7 床版に対する等価静荷重と波高の関係

等価静荷重との関係としてのみ示した。

この図における上限値から、等価静荷重と波高との関係は次式で表わされる。

$$p = 4wH \quad (5-1)$$

p : 等価静荷重

w : 水の単位重量

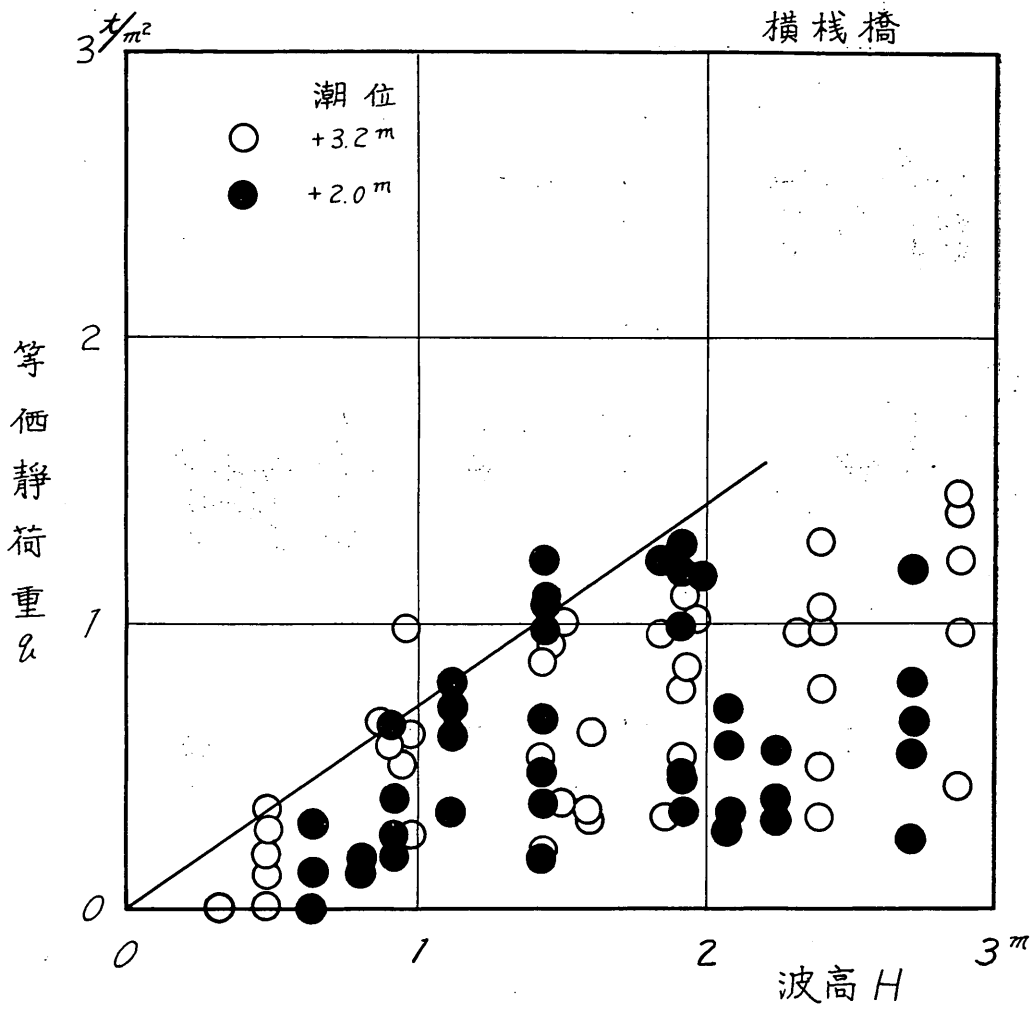
H : 入射波高

この値を、図・4-3あるいは図・5-2における $R=0$ の場合と比較すると約 $1/2$ となっており、局部的揚圧力と全体的等価静荷重との差が顕著に認められる。

なお、棧橋床版は下方からの揚圧力ばかりでなく、越波による上方からの荷重の影響をも受ける。測定結果からこのときの等価静荷重を求めると図・5-8のようになる。この図の上限値は、(5-1)式と比較すると $1/6$ 程度にしか過ぎない。

次に参考として、等価静荷重が床版の固有周期や受圧面積の大きさ、あるいは下面の構造などでどのように変化するかを実験的に見てみよう。

図・5-9のように陸側から張り出したカンティレバーの場合、固有周期は同図 a において 0.023 秒 (縮尺 $1/25$ と



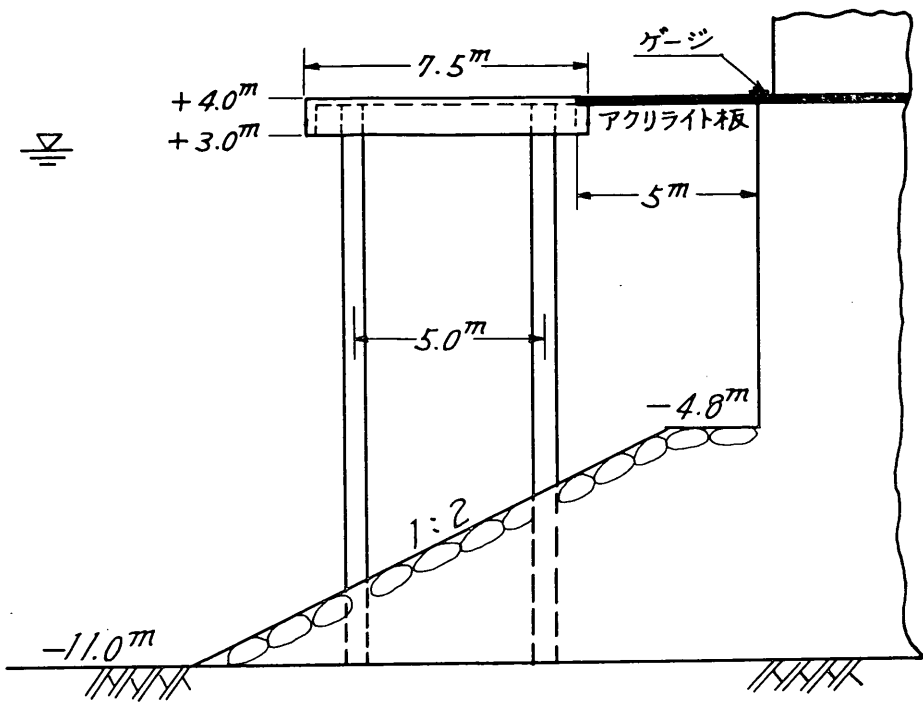
図・5-8 床版上の波による応力

すると現地で12秒), 同図bでは0.057秒(同じく0.29秒)であってかなり長い。後者による歪の記録例を図・5-10に示す。固有周期0.001秒, 受圧面の径2cm(共に模型値)の波圧計による記録例(図・2-2)と比較すると, 衝撃性がかなり減少していることがわかる。

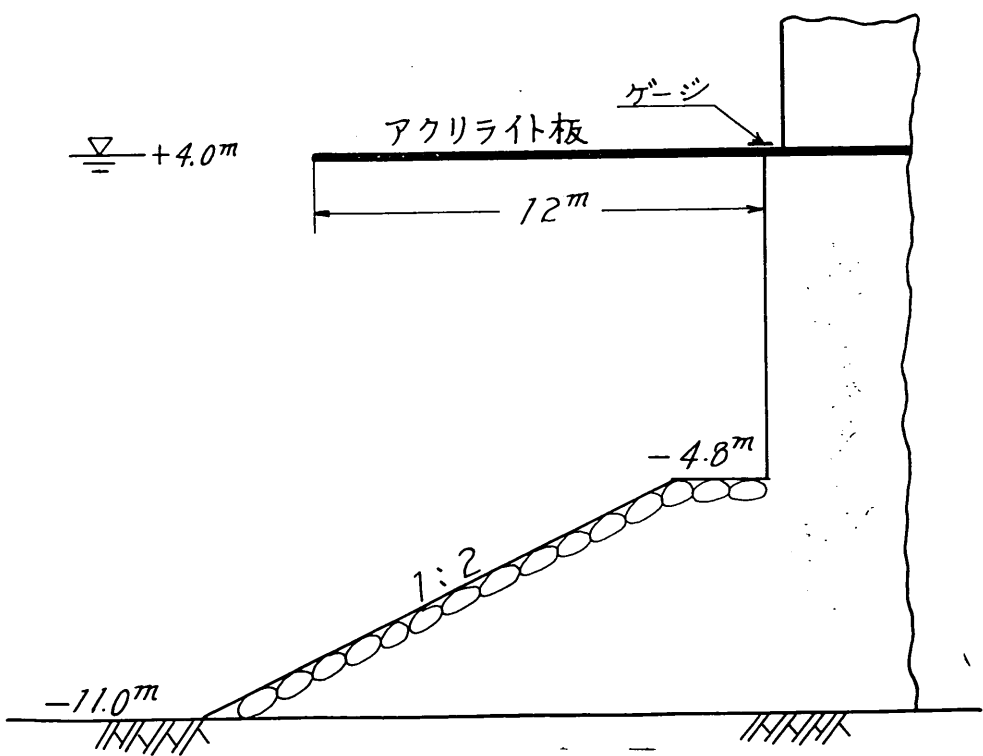
図・5-11はこれらカンティレバーに対する等価静荷重を算出したもので, (5-1)式と比較すると更に $\frac{1}{2}$ あるいはそれ以下の値となっている。

等価静荷重は, このように各種の条件に応じて大幅に変り得るものであるが, 実物の棧橋における版や桁の固有周期は0.01秒のオーダーであるから, 固有周期の長い

ことによる応答性の低下をあまり期待することはできない。したがって, 揚圧力に対して部材の強度を検討する場合の等価静荷重としては, 受圧面積が小さければ波圧計で測定した図・4-3あるいは図・5-2程度の値, 受圧面積が大きければ床版の曲げ歪から逆算した図・5-7あるいは(5-1)式程度の値を用いるべきである。すなわち, 波高1m内外, 周期十数秒, クリアランス0の状態であれば, 直径50cm程度の局部的には $10t/m^2$, 床版程度の大きさに対しては $4t/m^2$ なる値が一応の目安となる。



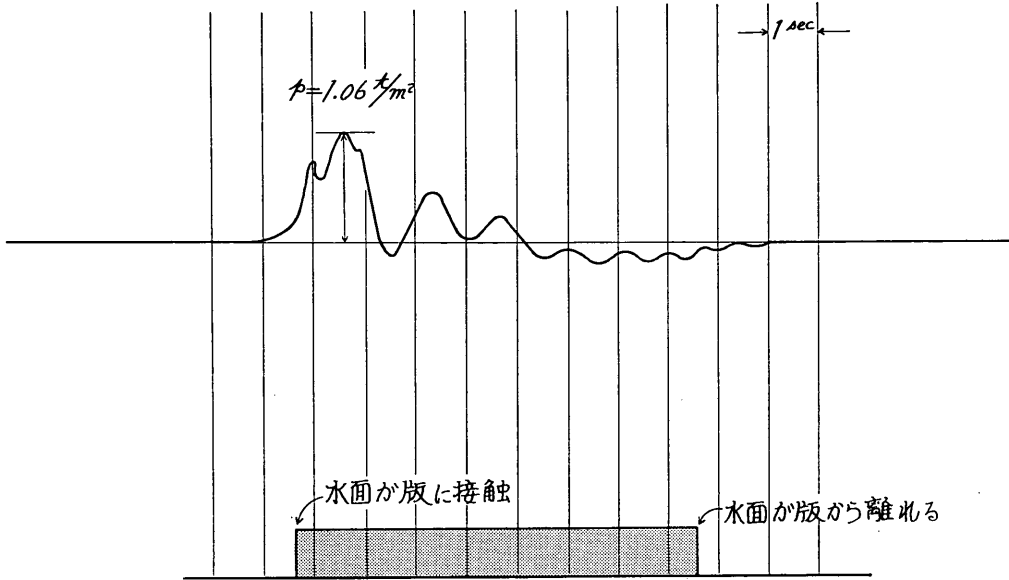
(a) 渡版部分



(b) 栈橋全体

図・5-9 揚圧力によってカンティレバーに生ずる応力測定実験装置 (模型縮尺 $1/25$)

潮位 +3m $T=12.5 \text{ sec}$ $H=1.6 \text{ m}$



図・5-10 揚圧力によってカンティレバーに生ずる応力の記録例

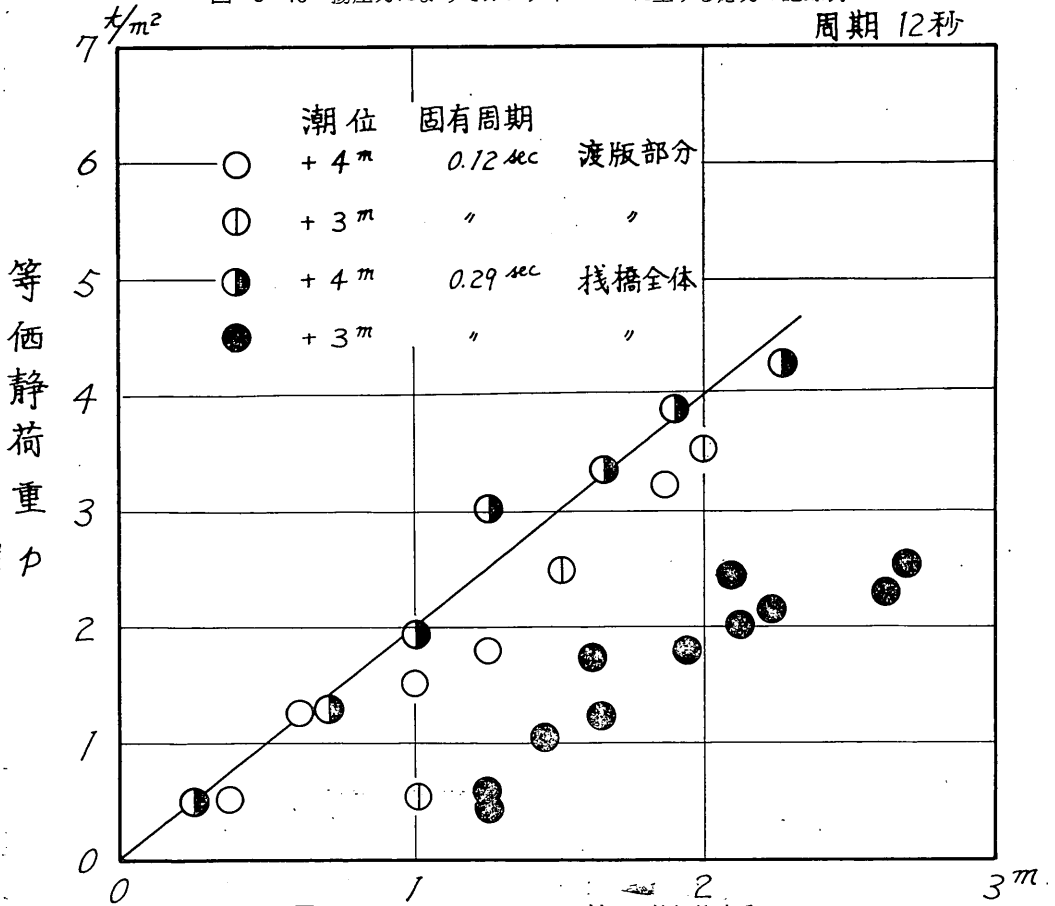


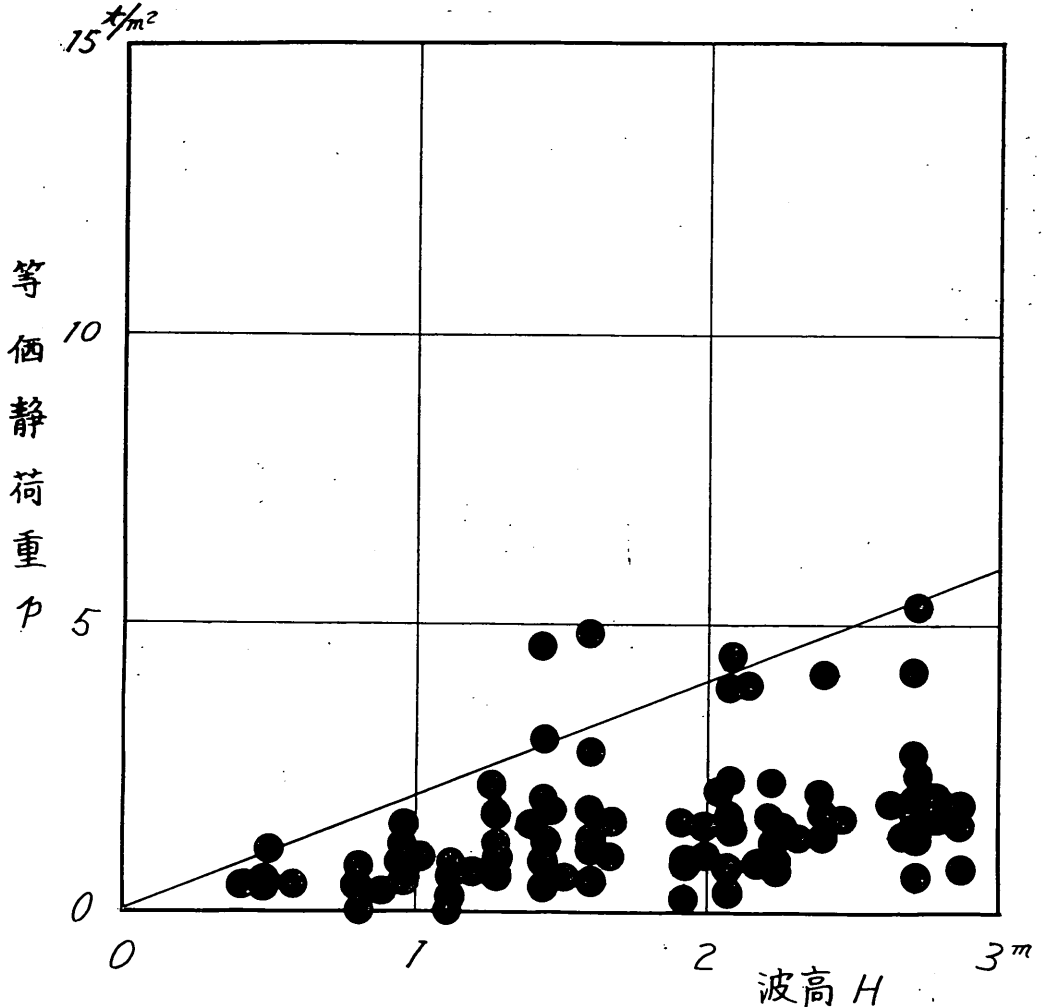
図-5-11 カンティレバーに対する等価静荷重

6. デタッチドピアーに対する揚圧力

横棧橋とデタッチドピアーとの相違は、土留護岸からの反射波の影響がどの程度及ぶかである。完全反射の場合に、もしデタッチドピアーと土留護岸との距離が $1/2$ 波長、1波長といった値であれば、ちょうど重複波の腹の部分に位置することになるから、原理的には横棧橋と全く同じである。もちろん、僅かの位置の変化が微妙に影響する恐れはある。土留護岸からの反射波が全く影響

しない場合には、床版と波面との相対的な位置関係と同時に、重複波と進行波との波高の差が揚圧力の変化として現われる。本章で扱うのは、こうした進行波が棧橋床版に及ぼす揚圧力である。これはデタッチドピアーばかりでなく、縦棧橋の法線と直角方向から波が通過する場合の状況にも対応するものである。

モデルⅢ(図・3-2d)について算出した等価静荷重を、図・5-7と同様にあらゆるデータを一括して波高との関係で示すと図・6-1のようなになる。この場合



図・6-1 デタッチドピアーに対する等価静荷重

の上限值は次式で表わされ、横棧橋に対する(5-1)式と比較して $1/2$ に減少している。

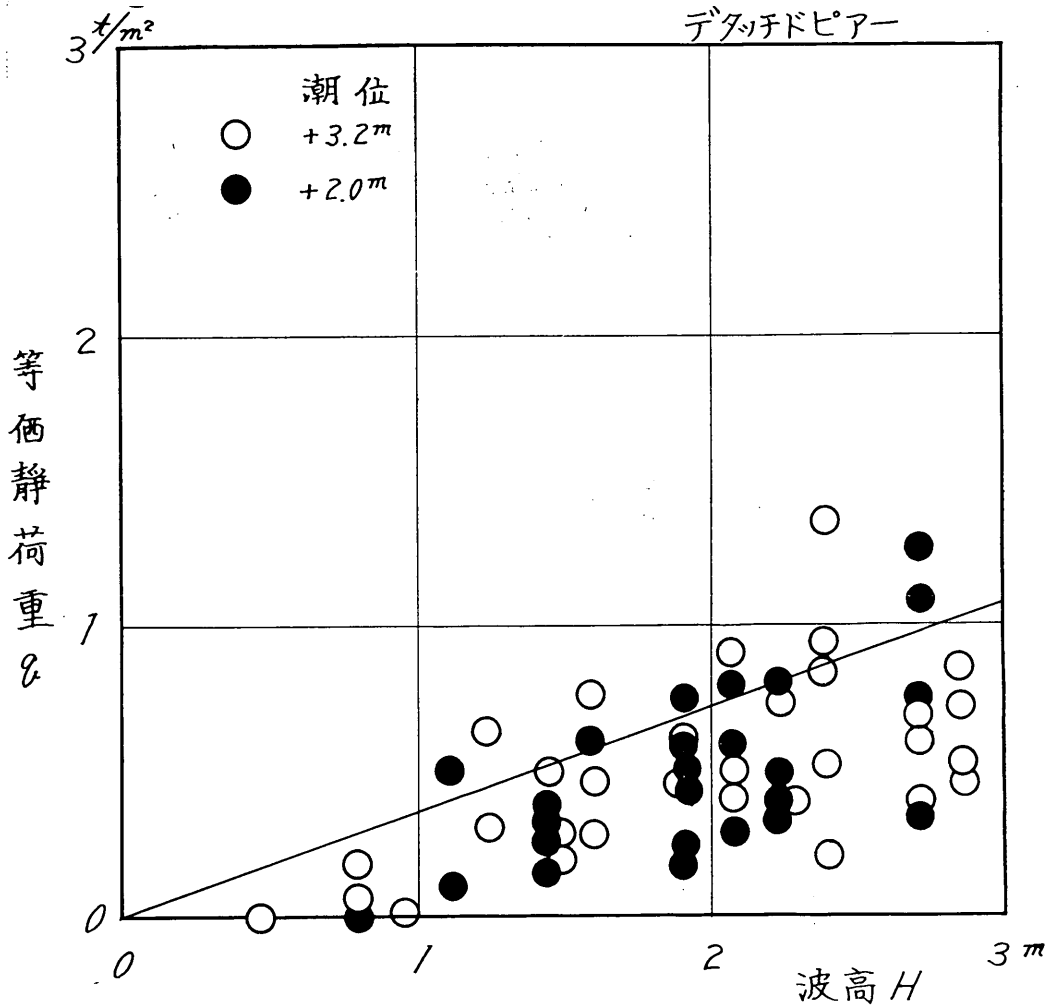
$$p = 2wH \quad (6-1)$$

p : 等価静荷重
 w : 水の単価重量

H : 入射波高

反射波の作用する可能性のあるときには、当然(5-1)式程度の値を考えなければならない。

また越波による上からの荷重は図・6-2のとおりで、これも横棧橋の場合と比較して大略 $1/2$ の値を示して



図・6-2 床版上の波による応力

いる。

7. 揚圧力の対策に関する考察

7.1 棧橋の強度

いままで述べて来た実験結果によれば、外的条件や構造による相違はあるが、波高1m程度の来襲波を対象とするとき、渡版の安定重量としては $1.5t/m^2$ 内外、棧橋上部工の強度の検算に用いる等価静荷重としては $4t/m^2$ 内外の揚圧力を考える必要がある。来襲波高が2mであればもちろんこの2倍程度となる。

厚さ20~30cmの通常の鉄筋コンクリート渡版では全く不十分であることはすでに述べた。それでは、通常の棧橋上部工はどの程度の揚圧力にまで耐えられるであろうか。下からの揚圧力を考慮しないで上載荷重その他から決定された部材の場合でも、結果的には揚圧力に対して

もかなりの強度を有する筈である。渡版が落下しても棧橋本体は無事であったような事例によって、この事は十分認められる。床版や桁の破壊した例もあるが、多少なりとも揚圧力の可能性を考慮した配筋法などがとられていれば、下からの荷重に対する強度が急激に増加していたかも知れない。

単純に考えれば、 $1\sim 3t/m^2$ の上載荷重を対象として設計された部材は、若干の補強を施せば、揚圧力が極端に大きくない限りそう簡単に破壊はしないであろう。また、棧橋上部工は普通 $1.7t/m^2$ の自重を有するから、これを差引けば杭頭結合部の強度や杭の引抜き抵抗もかなりあるものと想像できる。

こうした強度は実際の棧橋について計算すれば把握できる筈である。ただ具体的な計算に際しては、各床版に同時に揚圧力が作用するものとするか、若干の位相差

を見込んで減少させてもよいかといった点や、杭頭結合部や杭の引き抜き抵抗を衝撃力に対してどう取扱うかなど、この実験では直接検討しなかった問題はなお残されており、適宜仮定せざるを得ない。また、揚圧力を対象として設計するとき、材料の許容応力度をいくらにとればよいかも重要な点である。

さて渡版に関しては、棧橋構造としての本来の要請からそれが必要であり、かつ揚圧力を受けても落下しないことを望むならば、十分な安定重量をもたせなければならない。そして全重量を軽減するためには、空隙の大きい鋼製簧の子などを使用するのが適当であろう。ただ、渡版の安定重量を(4-1)式などから推定する場合、設計対象とする波高や潮位の与え方によって値は当然異なるものとなる。そして、想定以上の来襲波や潮位上昇の下で不安定となることは避けられない。もっとも(4-1)式は振動限界重量であるから、落下限界に対しては2~3倍の余裕はある、しかし、渡版は一旦支承から外れればほとんど落下する以外ないような粘りの少ないものであるし、偶発的な要素も併せ考えれば、渡版を絶対に落下しないものとして扱うことはできない。落下する場合のあり得ることをも念頭におく必要がある。

渡版を必要としない構造の場合には、陸側へ桁を張出す型式となる。この桁が片持梁として揚圧力に抵抗するためには、桁の断面を補強するか、スパンを短くするか、土留護岸と強固に結合するか、などの方策をとらなければならない。この場合、本来は渡版を必要となくとも、張出し部を短くして渡版と併用する方が桁を直接補強するよりも得策であるならばもちろんそうすべきである。

7.2 棧橋の構造および配置

来襲波高が非常に大きく、前述の程度の対策をもってしては揚圧力に抗しきれないような場合には、問題はもはや棧橋構造の局部的な強度や安定性にとどまらず、けい船施設としての構造様式の問題、あるいは防波堤をも含めた諸施設の配置の問題にまで拡張される。すなわち、揚圧力に対する安全性を増すことによって棧橋構造としての利点が失われるようでは困る。また、防波堤がその機能の一環として港内諸施設の保全を荷う限り、波浪に対して脆弱な棧橋は十分被覆しなければならない筈であり、防波堤で遮蔽されない位置に棧橋を設けるのは適当でない。

もし、防波堤で遮蔽されない地点にどうしても棧橋構造を採用しなければならない場合には、考えられる最大の揚圧力に耐えるよう頑丈な構造とするか、多少は破壊することもあり得ることを予期して計画するか、あるいは台風来襲直前に渡版を撤去するなどして被害を防ぐか、などの考慮を拂うべきであろう。

更に積極的な方法として、揚圧力に対しても抵抗の大きい巧みな構造様式を開発できれば最善である。ただこの場合、他の観点から見た棧橋構造の利点が失われたり、安定上新たな問題点を提起してその解決に苦しむようなものであってはならない。

7.3 土留護岸の反射率を軽減する方法

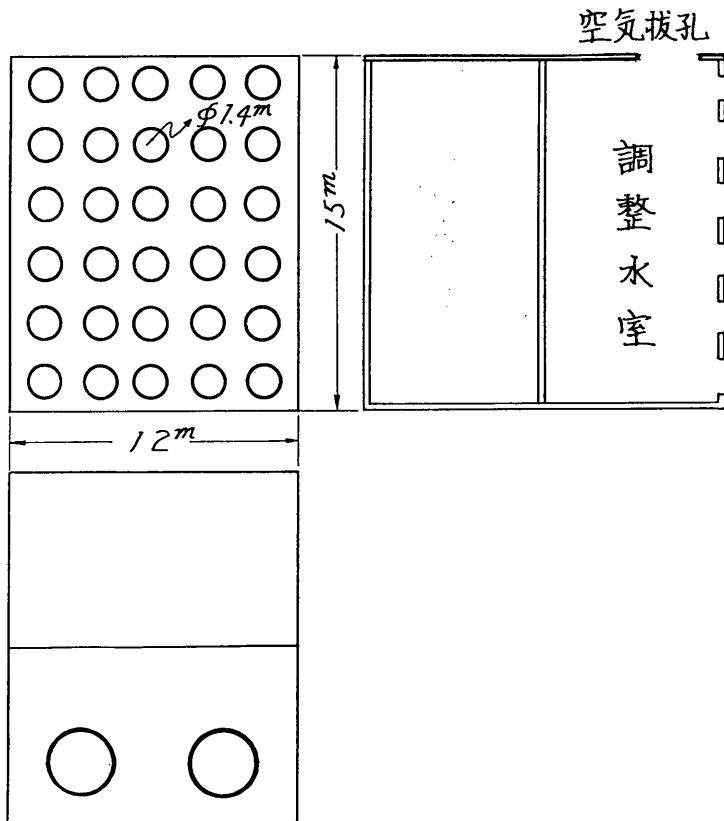
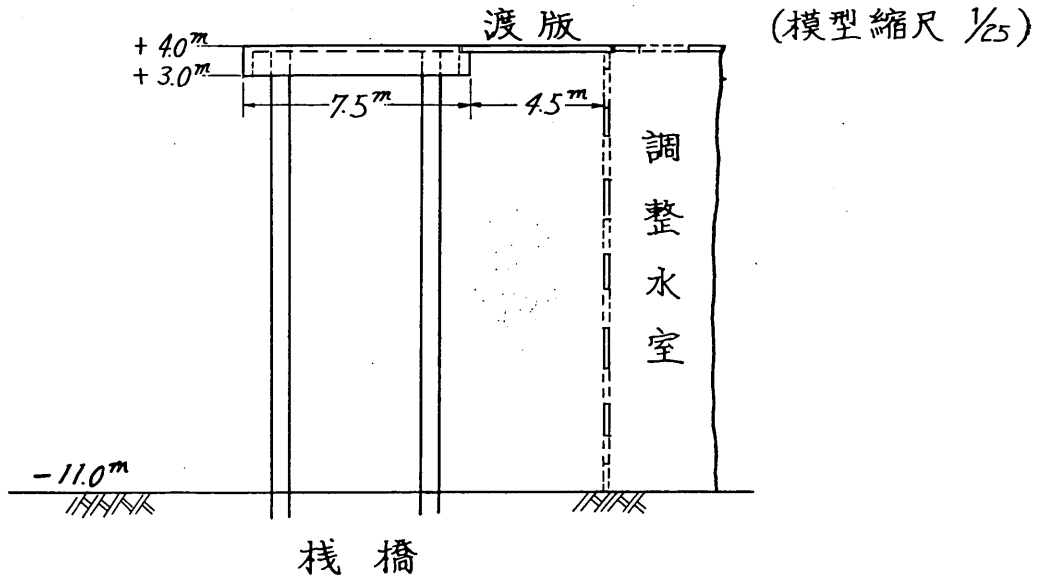
前節で触れた積極的揚圧力対策の一つとして、土留護岸に孔あきケーソンを用いる方法を考え、簡単な実験的検討を試みた。結果は予期に反して思わしくなかったが、参考として以下に紹介する。

防波堤の壁面に孔などをあけて波力を軽減しようとする試みが、カナダやスイスで最近行なわれている⁶⁾⁷⁾。これらにおける波力の減少が、孔あき堤体による反射率の低下に依存しているものとする、揚圧力に対しても応用できるかも知れない。すなわち、土留護岸に孔あきケーソンを用いるなどして反射率が減少すれば、棧橋下方での波高も減少するから、揚圧力の軽減に何らかの寄与をする筈である。この場合、土留護岸の構造はL型壁などよりも複雑となるが、揚圧力対策以外の効果も期待できる。つまり、けい船岸からの反射波が激減すれば、港内静穏度の確保に対してまことに好都合である。

問題は果して反射波が減少するか否かにある。また、仮に壁面から離れた位置では反射波が減少したとしても、壁面の直前、すなわち渡版や棧橋上部工の下方で新たな擾乱を生ずるようなものであったのでは有効でない。これらを検討する目的で、図・7-1のような孔あきケーソンを用いた実験を行なった。この孔の大きさや配置などは、カナダのコモー港におけるものにならって大体相似にしたものである。これは模型実験を経て決定されたものであるから、条件が著しく異なる限り、最良の結果をもたらす筈である。

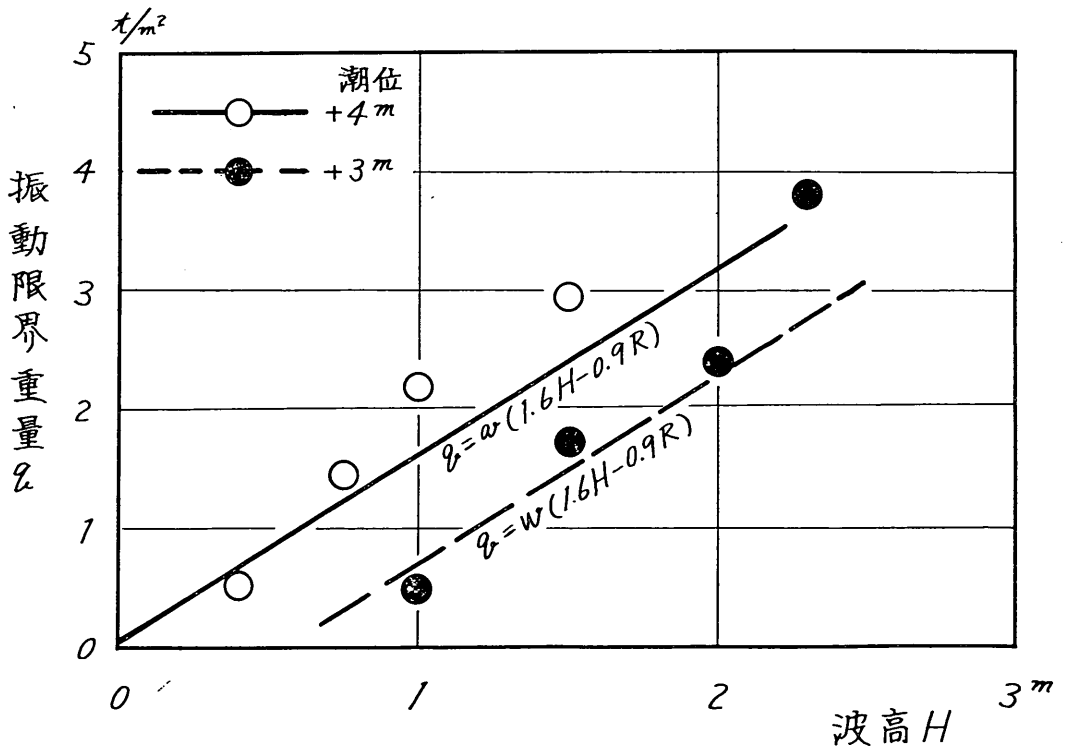
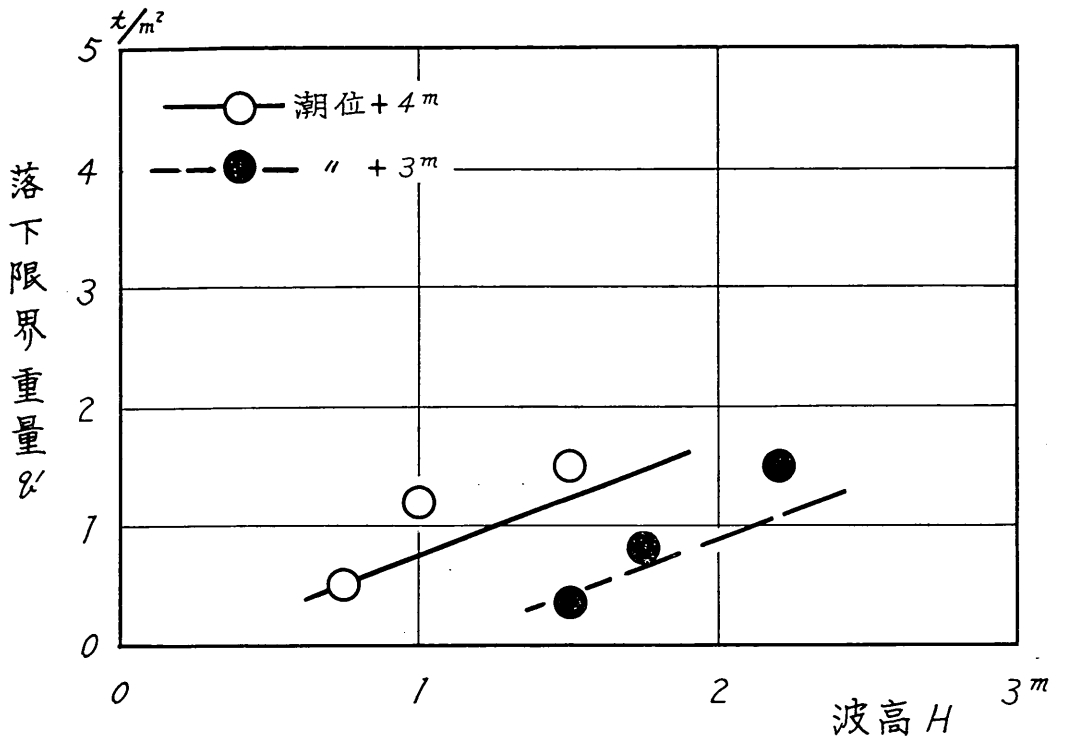
ところが我々の実験では、反射波に対する効果は極めて小さく、したがって揚圧力の変化もほとんど認められなかった。これは、壁体内部の水位が外部の水位に非常に良く追従していたためであり、原実験に見られるよう

- 6) "The Breakwater Quay at the Bay of Comeau—a New Type of Wall" Cote, G. I. and Simard G. R. Dock & Harbour Authority Vol. XLIV No.522 pp. 372~376, April (1964)
- 7) "Construction d'une Digue en Elements Préfabriques. Nouveau Systeme de Brise-Lames pour la Protection des Cotes et la Construction de Quais ou de Ports" Daniel Baroni. S II-1 pp.211~228 P.I.A.N.C. (1965)

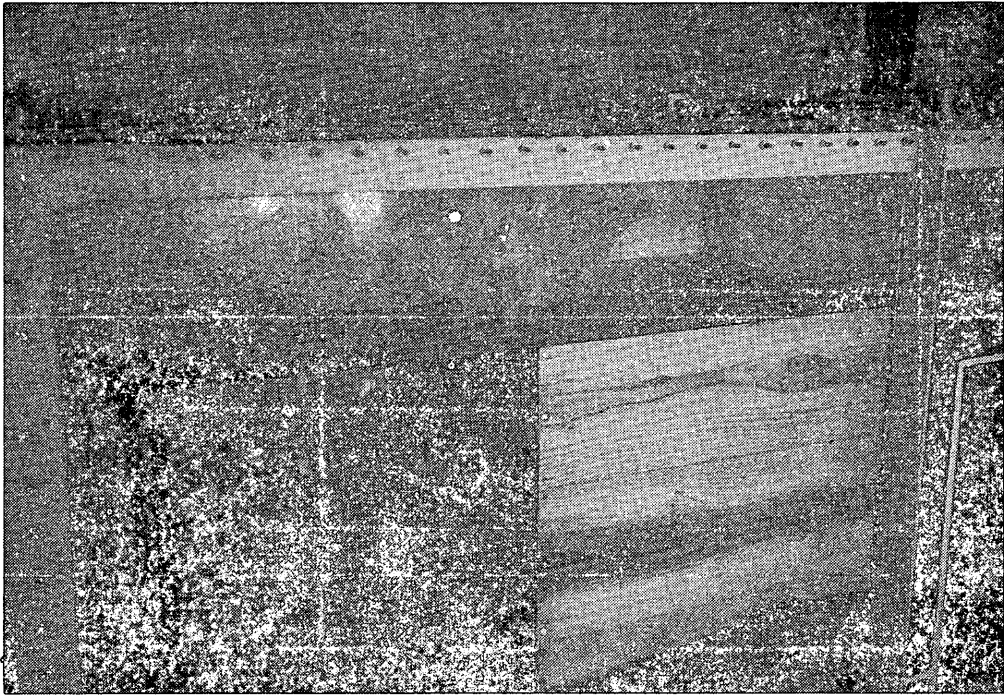


護岸ケーソン詳細

図・7-1 孔あき護岸の実験装置



図・7-2 孔あき護岸形式の棧橋における渡版の安定重量



写真・7-1 孔あき護岸の実験

な状況とかなり異なる。こうした相違が何に起因しているのかは明らかでない。このほか、ケーソン内の水位上昇が著しいため、ケーソンの蓋に揚圧力が作用する。実験では蓋に大きな水抜き孔を設けておいたが、そこから多量の水が噴出していた。孔あきケーソンが、その形状寸法に応じたある特定の条件の下で有効であったとしても、僅かな条件の変動によってその効果を失う恐れがあるとすると、揚圧力対策としては実用に供し難い。

ほかに巧みなアイデアがあれば今後模型実験によって検討を加えたい。

8. あとがき

- (1) 揚圧力は上昇する水面に基づく衝撃力である。
- (2) 渡版が落下しても棧橋本体に対する安全弁の効果を常に期待することはできない。

- (3) 小規模の空気抜きでは効果がない。
- (4) 渡版が安定であるためには波高1～2mとして1.5～3t/m²程度の実質重量を要する。このためには鋼製の簀の子などが有効である。
- (5) 棧橋上部工の強度の検算には4～8t/m²程度の揚圧力（等価静荷重）を考える必要がある。
- (6) 最終的な揚圧力対策は、港内諸施設の配置ならびにけい船岸としての構造様式の観点から考えなければならない。

9. 附 記

この実験には、著者らのほか藤島睦、北谷高雄、守屋義一（いずれも港研水工部）が参加した。

（昭和42年3月29日受付）