

棧橋に働く揚圧力に関する研究 (その1)

永井 莊七郎*・久保 直**・時川 和夫***

1. 緒 言

棧橋構造の岸壁は他の構造の岸壁に比較して、

- (1) 地震力により破壊されにくい
- (2) 軟弱地盤にも施工できる
- (3) 施工が比較的容易で、工費も比較的安い

などの優れた特長を持っているが、台風時などのように潮位が高く、波高および周期がやや大きい波が棧橋にあたると、棧橋奥部の土留護岸の前面の床版に相当大きな揚圧力が上向きに働かし、床版が破壊される。昭和 39 年 9 月および 40 年 9 月の台風時には、神戸港摩耶突堤の水深 10 m の鋼管杭棧橋および和歌山北港の住友金属工業の水深 6 m の鋼管杭棧橋は、土留護岸直前の床版が（1 部鋼管杭も）波の揚圧力のために持ち上げられて破壊され、いちじるしい災害を受けた。そのほか、名古屋港、四日市港などの諸港の棧橋においても台風時に波の揚圧力によって災害を受けている。

従来この揚圧力を減少させるため棧橋の床版に適当な空気抜き孔を開けることが推奨され、実施されて来た。しかしながら当研究室で行なった実験の結果によると、この空気孔が従来の考え方とは反対に揚圧力を増大することが明らかになった。ここにその実験の結果を記述する。

2. 棧橋の被害からの揚圧力の推定

(1) 和歌山北港の棧橋

同港の住友金属工業 K K の製品積出用の鋼管杭棧橋（水深 D.L. - 6.0 m）は昭和 39 年 9 月の 64-20 号台風および昭和 40 年 9 月の 65-23 号台風の際、揚圧力によって土留護岸直前の鉄筋コンクリート床版が持ち上げられて破壊され、また一部では直径 60 cm の鋼管杭が持ち上げられた。図-1 および 2 は 64-20 号台風による被災状況を示す。この棧橋には破壊された床版にほぼ 1 m² の空気抜き孔が設けられていた。

この棧橋の被害状況から被害時の揚圧力を推算するとつぎのごとくである。

- (a) 護岸直前の床版の破壊より推算すると、破壊さ

れた床版に働いた揚圧力は平均 7~10 t/m² である。

(b) 鋼管杭（直径 60 cm）が引抜かれた結果から推算すると平均してほぼ 7 t/m² である。

(c) 床版を護岸にアンカーした $\phi 25$ mm 鉄筋 3 本が切断された結果から推定すると平均 7 t/m² である。

(d) 1 m $\times$ 1 m の空気孔の鉄格子が持ち上げられてそのアンカーボルトが切断された結果から推定すると、ボルトの破壊強度を 1 000 kg/cm² にとると揚圧力は平均 11 t/m²、1 400 kg/cm² にとると平均はほぼ 16 t/m² になる。

図-1 和歌山北港 D.L. - 6.0 m 鋼管杭棧橋の被害状況
（昭和 39 年 9 月 20 号台風による）

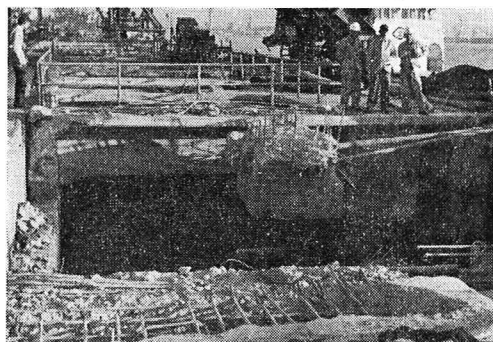
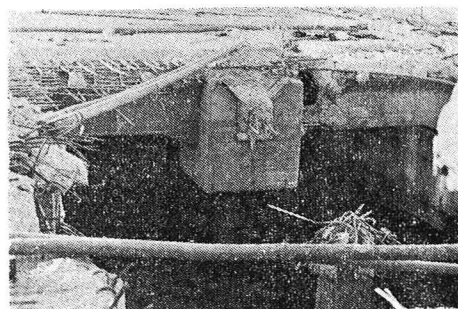


図-2 和歌山北港 D.L. - 6.0 m 鋼管杭棧橋の被害状況
（昭和 39 年 9 月 20 号台風による）



(2) 神戸港摩耶埠頭の棧橋

神戸港摩耶埠頭の第 1 突堤西側の水深 D.L. - 10 m の鋼管杭棧橋は昭和 39 年 9 月の 64-20 号台風のととき、土留護岸前面の鉄筋コンクリート床版（1 個 4.12 $\times$ 4.57 $\times$ 0.40 m）が 2 パース（約 550 m）にわたってほとんど全部破壊された。図-3 はその時の状況を示す。その後図-4 に示すような鉄格子を適当な間隔において、鉄筋

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大降市立大学助手 工学部土木工学科

コンクリート床版が取付けられたが、昭和 40 年 9 月の 65-23 号台風のとき再び 図-5 のように破壊された。

この栈橋では護岸直前の鉄筋 コンクリート スラブは両端が自由支承になっていたため、ほぼ 1t/m^2 の自重以上の揚圧力がスラブ全体に働けば持ち上げられることになるので、台風時に実際に働いたであろう揚圧力を推算することができなかった。

図-3 神戸港摩耶埠頭 D.L.-10 m 栈橋の被害状況
(64-20 号台風による)

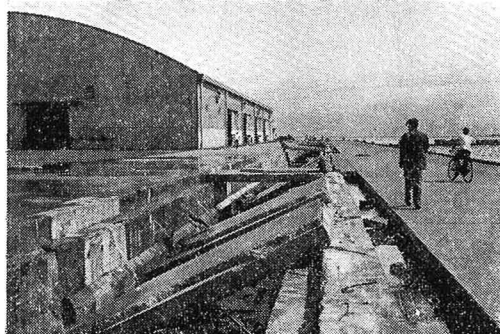


図-4 神戸港摩耶埠頭 D.L.-10 m 栈橋の被害状況
(64-20 号台風による)

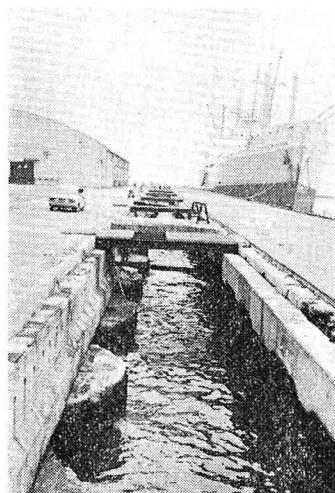
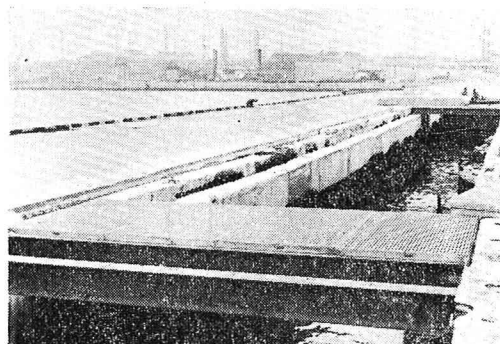


図-5 神戸港摩耶埠頭 D.L.-10 m 栈橋の被害状況
(65-23 号台風による)



3. 実験設備および実験方法

実験は初めは 図-6 に示すような、鋼管栈橋(水深 D.L.-12.0 m)の 1/20 縮尺(鉛直方向および水平方向とも)の模型を用いて、風洞づき波浪水槽において行ない、多くの実験を行なって検討を加えた。この実験における、栈橋の床版に働く揚圧力の強度、分布などが実際に災害を受けた栈橋から計算によって推定した結果に大体合致していることが明らかになり、また強い揚圧力が発生する原因およびその防止対策などもわかったので、同一構造の鋼管栈橋の 1/10 縮尺の模型を作り、大型波浪水槽(長さ 60 m、深さ 2.50 m、幅 10 m の内の 2 m の部分を鋼製の壁で仕切った)を用いて、先に行なった 1/20 縮尺の実験の中の主なものについて再び実験を行なった。図-7 は縮尺 1/20 の模型、図-8 (a),(b) は縮尺 1/10 の模型を示す。

床版に働く揚圧力は、昭和 28 年以來、当研究室で実験した防波堤に働く碎波の圧力および重複波の圧力の測定に使用して来た波圧計(直径 4 cm の円形で圧力によって円形蛇腹が伸縮するもの)を用いて測定した。揚圧力の平面的分布を測定するときには 6 個の波圧計を同時

図-6 (a) 栈橋の横断面図(実物の寸法)

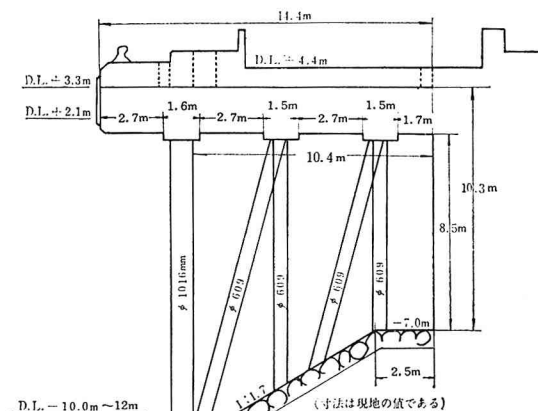


図-6 (b) 栈橋の平面図(実物の寸法)

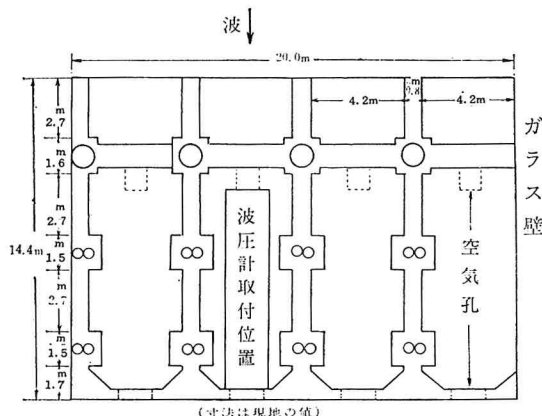


図-7 縮尺 1/20 模型栈橋の側面図

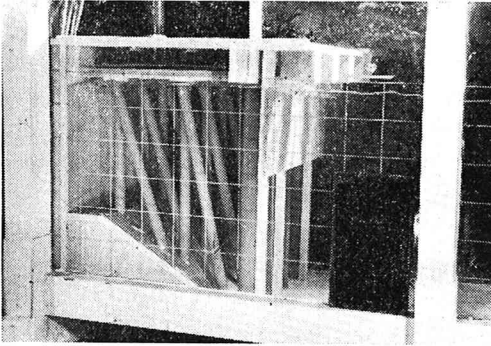


図-8 (a) 縮尺 1/10 模型栈橋の側面図

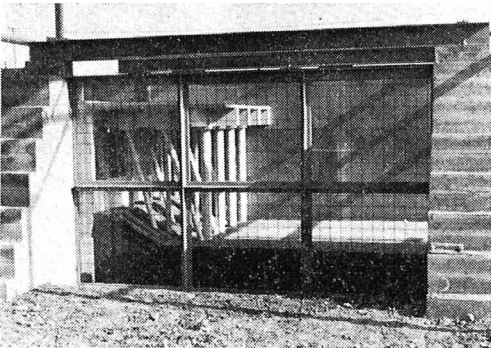
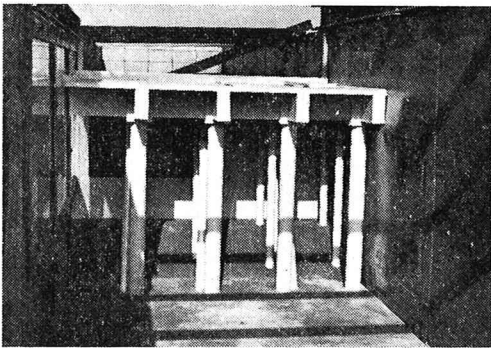


図-8 (b) 縮尺 1/10 模型栈橋の正面図



に使用した。また床版下部の空気の圧力を測定する場合は気密および水密性の円形の圧力計を用いた。

また揚圧力の測定は、床版に空気抜き孔を設けた場合、設けない場合および護岸とこれに直角な2本のはりとの間(栈橋の1 panelの部分)を完全に気密にした場合について行なった。

この実験に用いた栈橋の構造は和歌山北港において住友金属工業KKが現在施工中の栈橋にほぼ近く、したがって実験に用いた潮位および波浪も多くは同港における台風時および冬期風浪時の潮位および波浪を対称として採用した。

表-1 に示す実験において、風がない場合と風速 $V_p = 20 \text{ m/sec}$ の場合について、揚圧力におよぼす風の影

響を調べた。

表-1 実験に用いた潮位および波浪の特性

	潮 位	波の周期	波 高
台風時を対称とした場合	D.L.+2.10 m	$T_p = 8.10, 11 \sim 12 \text{ sec}$	$H_p = 2.0, 3.0 \text{ m}$
冬期風浪を対称とした場合	D.L.+2.10 m } D.L.+1.10 m }	$T_p = 5, 6, 8 \text{ sec}$	$H_p = 1.6, 2.0 \text{ m}$
参 考	D.L.+3.3 m	$T_p = 8, 10, 12 \text{ sec}$	$H_p = 2.0 \text{ m}$

つぎに揚圧力を軽減する方法として、最前列の鋼管杭に床版下部からある適当な深さまで鉛直板を取付けて、栈橋の下側に侵入する波のエネルギーを減少することを考えてその効果を調べた。

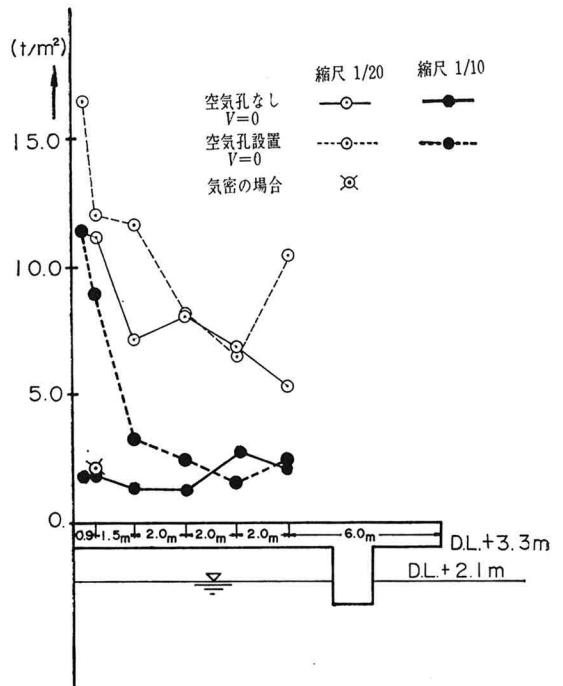
4. 実験結果

(1) 空気孔が揚圧力におよぼす影響(潮位が D.L.+2.10 m の場合)

6個の波圧計を図-9に示すように護岸壁から前方へ(現地では海側へ)0.4 m, 0.9 m, 2.4 m, 4.4 m, 6.4 m および 8.4 m の場所に取り付け、空気孔を設けない場合、および空気孔を設けた場合について、潮位 D.L.+2.1 m においてほぼ周期 $T_p \approx 11 \sim 12 \text{ sec}$, 10 sec, 8.0 sec, 6.0 sec, 波高 $H_p \approx 2.0 \text{ m}$ の波を起こして床版に働く揚圧力を測定した。その実験結果の中から $T_p \approx 11 \sim 12 \text{ sec}$, 8 sec および 6 sec の場合を示すと図-9, 10 および 11 のごとくである。まず縮尺 1/20 の実験について述べると、空気孔がない場合には、栈橋の奥部すなわち土留護岸の前面(0.4 m と 0.9 m の波圧計)にお

図-9

$T_p = 11 \sim 12 \text{ sec}$, $H_p = 2 \text{ m}$, $L_p = 105 \sim 126 \text{ m}$



いて揚圧力は急に増大し、図-9 および 10 においては $11 \sim 12 \text{ t/m}^2$ に達し、護岸から遠ざかるにつれて減少している。これらの図に示した揚圧力の強度は第8波から第10波までの3波による揚圧力の平均値である。一般に揚圧力の強度は第3波くらいまではかなり小さく、その後次第に増大して第8波くらいからはほぼ一定した値になる場合が多い。このことは護岸とその前方のりといにおける波の反射によっても、揚圧力が増大することを示している。またこの実験に用いた波圧計はすでに記したごとく、直径が4cmで、波圧計を取り付ける孔の直径は4.2cmであるから、波圧計の周囲にほぼ 1.29 cm^2 (現地に換算すると $1/20$ 縮尺では 0.0516 m^2 、 $1/10$ 縮尺では 0.0129 m^2 に相当) の空げきがあるわけで、実験中波が栈橋下部に侵入するたびに、その部分から非常に激しい勢いで空気と水が吹き出す。すなわち6個の波圧計の周囲にわずかではあるが、すでに空気孔ができていゝわけである。したがって後に述べるように完全に気密にした場合よりも、揚圧力ははるかに大きくなっている。護岸の直前と護岸から最も遠い波圧計の横に、直径4.2cmの円形の空気孔(その面積 $A_m = 13.85 \text{ cm}^2$ 、現地に換算すると $A_p = 0.554 \text{ m}^2$) をそれぞれ1個ずつ設けた場合には、図-9 および 10 で知られるように、空気孔を設けなかった場合に比して、全体的に揚圧力は増し、特に空気孔に近い部分では揚圧力はいちじるしく増加している。

つぎに縮尺 $1/10$ の実験について述べると、空気孔を設けなかった場合には、6個の波圧計に働く揚圧力は6個とも、縮尺 $1/20$ の実験におけるよりはるかに小さく、

図-9 および 10 の実験においてはほぼ $1.5 \sim 3.0 \text{ t/m}^2$ である。このように縮尺 $1/10$ の実験において揚圧力が非常に小さくなったのは、使用した6個の波圧計が $1/20$ 縮尺の実験に使用したものと同一のものであったので、波圧計の取付孔における空げきの面積が同一で、 $A_m = 1.29 \text{ cm}^2$ であるから、栈橋の床下面積に対する空げきの比率が、縮尺 $1/10$ の模型では縮尺 $1/20$ の模型の $1/4$ に減少し、したがって、いま空気が空げきから噴出する速度が両縮尺の実験においてはほぼ等しいと仮定すると、波の1周期間に噴出する空気量と水面と床版下面との間の空気量との比率は、縮尺 $1/10$ の実験においては縮尺 $1/20$ の実験の $1/5.7$ に減少するので、波圧計周囲の空げきからの空気の噴出は床下の空気量に大きな影響を与えず、床版下の水面の昇降を床版下の空気層の圧縮、伸長によって吸収できるので、床版下面におよぼす揚圧力を空気層によって緩衝し、平均化するからであると考えられる。

つぎに護岸直前に面積 $A_m = 5 \times 20 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$ (現地に換算すると $A_p = 1 \text{ m}^2$)、護岸から最も遠い波圧計の横にも $A_m = 10 \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$ の空気孔を設置すると、図-9 および 10 に見られるように、揚圧力は全面的に増大し、特に護岸前面においてははなはだしく増大し、 $T_p = 11 \text{ sec}$ の波(図-9)では 11.5 t/m^2 に、 $T_p = 8 \text{ sec}$ の波(図-10)ではほぼ 18 t/m^2 にも達する。このように空気孔の設置による揚圧力の増大が、縮尺 $1/20$ の実験におけるよりいちじるしいのは、すでに述べたように波圧計周囲の空げきの面積が縮尺 $1/10$ の実験においては縮尺 $1/20$ の実験の $1/4$ であるのに対して、空気孔の面積が約2倍になっているためである。

図-10

$T_p = 8 \text{ sec}$, $H_p = 2 \text{ m}$, $L_p = 74 \sim 80 \text{ m}$

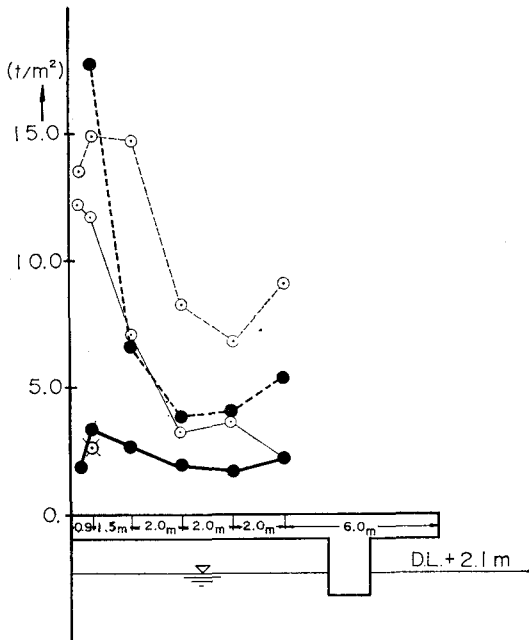
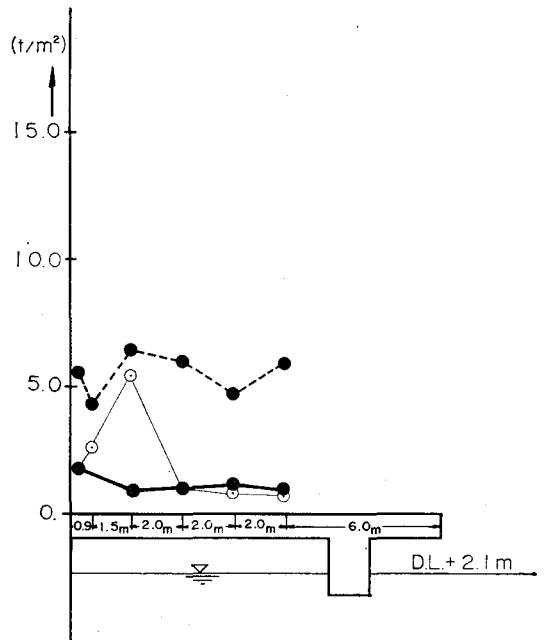


図-11

$T_p = 6 \text{ sec}$, $H_p = 2 \text{ m}$, $L_p = 49 \sim 50 \text{ m}$



波の周期 $T_p=6\text{ sec}$ の実験においては 図-11 に示すごとく、 $T_p \geq 8\text{ sec}$ の波における実験結果とはかなり異なった結果を示し、縮尺 1/20 および 1/10 の実験とも、空気孔がない場合は一般に揚圧力は小さく、多くの場合 $1 \sim 2\text{ t/m}^2$ で、時々 5 t/m^2 に達する場合がある程度で、実際の栈橋において床版を持ち上げるような揚圧力は働かない。周期 $T_p=5\text{ sec}$ 、 $H_p=2\text{ m}$ の波の実験においてもほぼ同様に、揚圧力は小さく栈橋に大きな被害を与えるようなことはないと考えられる。

今までの実験は6個の波圧計を同時に取り付けた場合であるが、護岸の直前に同一の波圧計を1個だけ取り付けた場合の実験結果(縮尺 1/20 の実験)について述べる。揚圧力の値はいずれも第8波から10波の平均値である。まず波圧計6個を取り付けた場合に護岸直前の揚圧力の値は、周期 $T_p=12\text{ sec}$ の波においては 図-9 に示したように、空気孔がない場合はほぼ 11 t/m^2 、空気孔を設けると約 16 t/m^2 に増大する。ところが波圧計1個だけ取り付けた場合には、空気孔がない場合は、約 7 t/m^2 で小さく、空気孔を設けた場合には約 17 t/m^2 に増大する。周期 $T_p=8\text{ sec}$ の波においては、6個の波圧計を取り付けた場合には、護岸直前の揚圧力は空気孔がない場合は約 12 t/m^2 、空気孔を設けた場合は、約 14 t/m^2 であるのに対して、波圧計が1個の場合には、

図-12 空気孔および波圧計周囲から空気と水が噴出している状況(縮尺 1/20 実験)
 $T_p=8.0\text{ sec}$, $H_p=2.0\text{ m}$, $V_p=0$

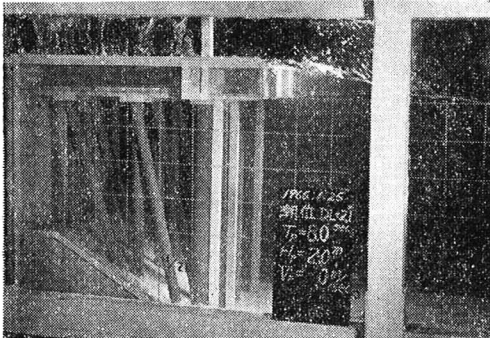
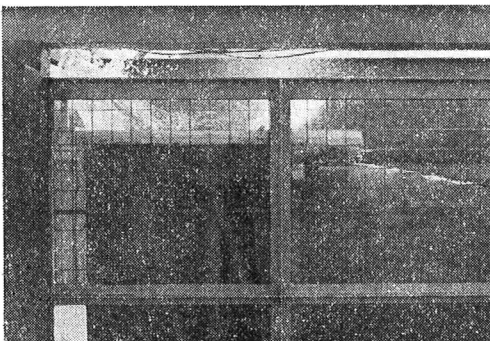


図-13 空気孔および波圧計周囲から空気と水が噴出している状況(縮尺 1/10 実験)
 $T_p=8.0\text{ sec}$, $H_p=2.0\text{ m}$, $V_p=0$



空気孔がない時、やはり約 7 t/m^2 で小さく、空気孔を設けると約 16 t/m^2 に増大する。図-12, 13 は空気孔および6個の波圧計の周囲から空気と水が噴出している状況を示す。以上の諸実験の結果から明らかなように、栈橋の床版に、床版(1スパンの)の面積(厳密には床版下面と水面との間の空気の容積が関係する)に対してある程度以上の面積の空気孔を設けると、その付近の揚圧力がいちじるしく増大することがわかる。

(2) 空気孔が揚圧力におよぼす影響(潮位が D.L. +3.3 m および D.L. +1.1 m の場合)

この空気の噴出孔の面積と床版(1スパン)の面積および床版下面と水面との間の容積と揚圧力の増大との関係、あるいは空気の噴出速度などの問題は次回に報告する予定であるが、ここに潮位を D.L. +3.3 m に上げた場合(和歌山北港ではこのような高潮位はない)および D.L. +1.1 m (和歌山北港における平均満潮位と平均低潮位のほぼ中間潮位)の場合の実験結果の概要を述べる。

縮尺 1/20 の実験

土留護岸直前に波圧計を1個だけ取り付けた場合の実験結果について述べる。その波圧計の横に空気孔(直径 4.2 cm の円形孔)を設置した場合には、すでに述べたように水位が D.L. +2.10 m のときは、周期 $T_p=12\text{ sec}$ 、波高 $H_p=2\text{ m}$ の波においては揚圧力は 17 t/m^2 であったが、潮位を床版下面の D.L. +3.3 m まで上げた場合には、揚圧力はやや減少して約 10 t/m^2 になった。 $T_p=8.0\text{ sec}$ 、 $H_p=2.0\text{ m}$ の波においては、水位が D.L. +2.10 m のときは約 16 t/m^2 であったが、+3.3 m の時は約 15 t/m^2 になった。水位を D.L. +1.10 m に下げた場合には $T_p=12\text{ sec}$ および 8 sec の波ともに、揚圧力は減少し、 $T_p=12\text{ sec}$ の波においてはほぼ約 9 t/m^2 、 $T_p=8\text{ sec}$ の波では約 2 t/m^2 に激減した。

縮尺 1/10 の実験

この実験では、6個の波圧計を同時に取り付け、護岸の直前と護岸から最も遠ざかった波圧計の横に空気孔(面積 $A_m=100\text{ cm}^2$)をそれぞれ1個ずつ設けた場合およびそれらの空気孔を塞いだ場合について、揚圧力を測定した。

水位を D.L. +3.30 m にした場合には、周期 $T_p=11\text{ sec}$ および 8 sec 、波高 $H_p=2\text{ m}$ の波ともに揚圧力はさらに減少し、前者ではほぼ $1.5 \sim 1.8\text{ t/m}^2$ に後者ではほぼ $1 \sim 1.5\text{ t/m}^2$ になった。空気孔を前後に設置した場合も、護岸前面において揚圧力が急に増大することではなく、 $T_p=11\text{ sec}$ の波ではほぼ $3.5 \sim 5\text{ t/m}^2$ 、 $T_p=8\text{ sec}$ の波でも $3.5 \sim 5.5\text{ t/m}^2$ 程度であった。 $T_p=6\text{ sec}$ 、 $H_p=2\text{ m}$ の波においてはさらに小さく、ほぼ $2 \sim 3.5\text{ t/m}^2$ であって、空気孔の設置による揚圧力の増加は平均して 1 t/m^2 に過ぎなかった。

水位が D.L.+1.1 m の場合には、空気孔がない時は $T_p=11$ sec の波では6個の波圧計ともほぼ 2.0 t/m^2 で一定、 $T_p=8$ sec の波では 1.5 t/m^2 ではば一定で小さく、空気孔を設置しても揚圧力は増大しない。

(3) 床版下部を完全に気密にした場合の揚圧力

いままでの実験結果より、床版あるいはその周囲より空気の流れがある程度以上になると、揚圧力がいちじるしく増大する、特に土留護岸の前面付近からの空気の流出が最も大きな影響を与えることが明らかになったが、この事実をさらに確認するために、床版下部を完全に気密にした場合における床版下部水面の状態および揚圧力を調べた。その結果、床版下部が完全に気密になった場合には、床版下の水面が上昇すると空気層は圧縮され、水面が下降すると空気層は膨張する。したがって水面が上昇した時に床版下面に揚圧力が働くが、空気層によって、護岸から護岸に平行な前面のほりまでの区間の強度が平均化されるので、いま侵入波高を H とすると、 $w_0 H$ ないし $1.2 w_0 H$ (w_0 は水の単位体積重量、海水では $w_0=1.03 \text{ t/m}^3$) である。気密で水密な圧力計で測定した揚圧力強度の例を 図-9 および 図-10 に星印で示す。完全な重複波においては直立壁前面の波高は、侵入波高を H で表わすと、静水面上 ($1.1 \sim 1.2$) H で、静水面下 ($0.9 \sim 0.8$) H である。したがって空気層で平均化された揚圧力は ($1 \sim 1.2$) $w_0 H$ になるわけである。以上の実験結果から

(1) 潮位が低く棧橋床版下面と潮位との差(床版の clearance) がほぼ侵入波高に等しいか、それ以上である場合には空気孔の有無にかかわらず、床版に働く揚圧力は小さく一般には災害を引き起こすようなことはない。

(2) 潮位が上昇して棧橋床版の clearance が侵入波高より小さくなった場合には、床版に大きな揚圧力が働く。特に護岸前面にある程度以上の面積の空気孔を設けた場合、あるいは床版または床版の周囲にある程度以上の空げきがある場合には、揚圧力は非常に増大する。その強度はほぼ $7 \sim 17 \text{ t/m}^2$ に達することがありうる。

(3) 潮位がさらに上昇し、床版下面に達した場合には空気孔がない場合には揚圧力は(2)の場合より一般に減少する。空気孔を設置した場合には、一般に揚圧力は増大するが、(2)の場合以上になることはない。

(4) 風が揚圧力におよぼす影響

風洞づき波浪水槽における縮尺 1/20 の実験において、風速 $V_p=20 \text{ m/sec}$ を起こして風の有無が揚圧力におよぼす影響を調べた結果、水位 D.L.+2.10 m のとき $T_p=12$ sec, $H_p=2.0 \text{ m}$ および $T_p=8$ sec, $H_p=2.0 \text{ m}$ の波ともにわずかに揚圧力が増す程度で大した影響は認められなかった(図-14, 15 参照)。

(5) 消波板が揚圧力におよぼす影響

棧橋の床版に働く揚圧力は、床版が十分に気密で、潮位が上昇したとき、土留護岸とこれに平行なはりとの間の空間から空気が噴出しなければ、揚圧力は平均して

図-14 風が揚圧力におよぼす影響

$T_p=12 \text{ sec}$, $H_p=2 \text{ m}$, $L_p=120 \text{ m}$

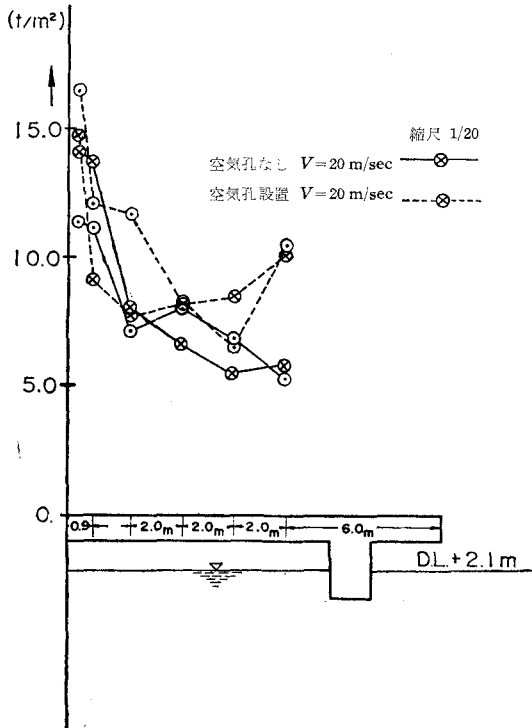
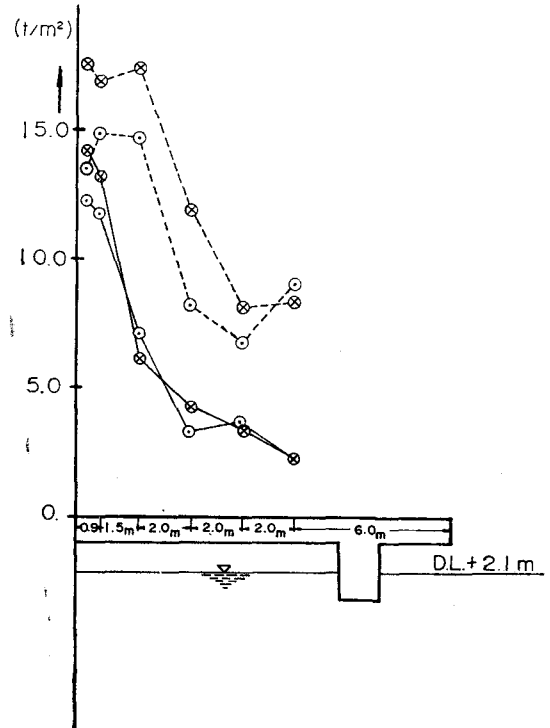


図-15 風が揚圧力におよぼす影響

$T_p=8 \text{ sec}$, $H_p=2 \text{ m}$, $L_p=80 \text{ m}$



(1.0~1.2) $w_0 H$ 程度である。したがって鉄筋コンクリート床版が揚圧力によって破壊されるようなことは一般には起こらない。しかし実際の栈橋においては、土留護岸と床版との間および床版の施工継手、その他の場所に空けきができるので、十分な気密を保つことは困難である。また波が栈橋に対してある角度を持って侵入した場合は一層気密を保つことは困難になる。それゆえ実際の栈橋において、揚圧力を軽減するためには、床版からの空気の流出を極力少なくする以外に、積極的に揚圧力を減少させる方法を講ずることが必要である。この対策として、施工が容易で、工費も安く、しかも効果が確実な方法として、栈橋の最前列の杭の前面に、栈橋下部に侵入する波のエネルギーを減少させる目的で直立板を設置することを考えた。この直立板を床版下面から水中深く挿入すればするほど栈橋下部へ侵入する波のエネルギーを多く阻止しうるのはもちろんであるが、経済的な観点から、床版が揚圧力によって持ち上げられないという条件において必要最小限の直立板の深さ（静水面以下）を求める必要がある。このような目的で行なった実験結果の一部をつぎに述べる。

実験に用いた潮位は D.L.+2.10 m である。いま波の周期 $T_p=12$ sec (縮尺 1/20 の実験) および $T_p=11$ sec (縮尺 1/10 の実験)、波高 $H_p=2$ m の波において、直立板（消波板）を静水面から D.L.-3.9 m まで設けた場合（この場合の消波板の高さは 6.0 m）における 6 個

の波圧計に働く揚圧力を示すと、図-16 のごとくである。縮尺 1/20 の実験においては、すでに述べたように、6 個の波圧計の周囲の間げきがある程度まで空気孔として作用して揚圧力を増しているの、空気孔がない場合についてのみ実験を行なったが、この実験結果を図-9 の中の空気孔がない場合の実験結果と比較すると、消波板の設置によって床版の揚圧力は全体的に減少しているが、特に護岸前面における強い揚圧力が減少し、ほぼ 11 t/m^2 であったのが、ほぼ $6 \sim 7.5 \text{ t/m}^2$ になり、揚圧力の合力の比は 67% に減少している。

縮尺 1/10 の実験では空気孔が設けられている場合について実験したが、図-16 でわかるように、消波板の設置によって揚圧力はいちじるしく減少し、空気孔がない場合とほぼ同じくらいになっている。

図-17 は $T_p=8$ sec, $H_p=2$ m の波についての実験結果であるが、図-10 と比較すればわかるように、縮尺 1/20 および 1/10 の実験ともに、消波板の効果はいちじるしく、前者においては、護岸直前の揚圧力はほぼ 12 t/m^2 からほぼ 6 t/m^2 に半減し、揚圧力の合力は 72% に減少している。また後者においては、護岸直前ではほぼ 18 t/m^2 から 3.5 t/m^2 に減少している。

$T_p=6$ sec, $H_p=2$ m の波においては、消波板がない場合でも揚圧力は $T_p \geq 8$ sec の波におけるより小さいが、消波板を設置すると、揚圧力はやはりいちじるしく減少し、かつ平均化する。

図-16 消波板を設置したときの揚圧力の分布
 $T_p=11 \sim 12$ sec, $H_p=2.0$ m, $L_p=105 \sim 126$ m

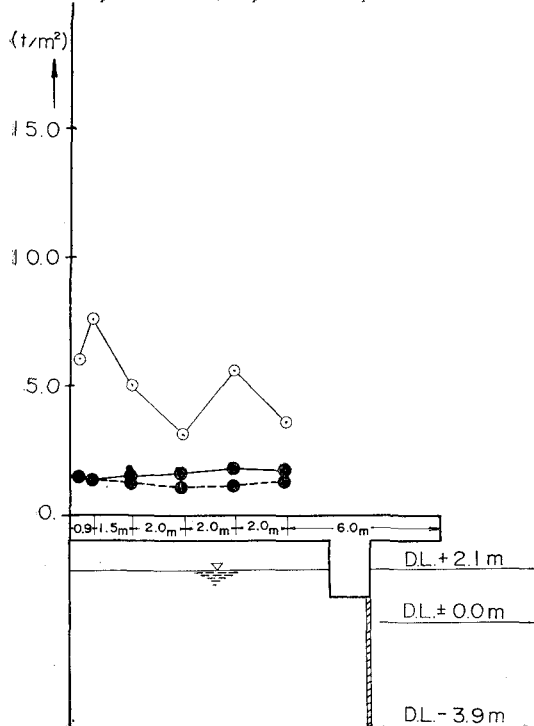


図-17 消波板を設置したときの揚圧力の分布
 $T_p=8$ sec, $H_p=2.0$ m, $L_p=74 \sim 80$ m

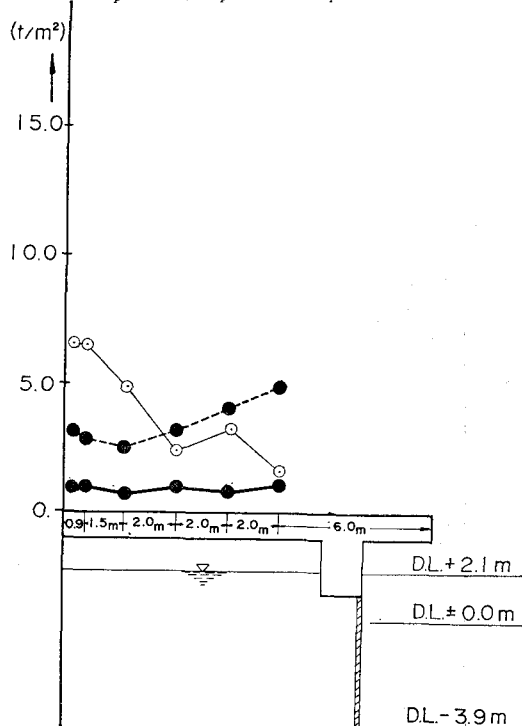


図-18 消波板を設置した場合の波の状況
(潮位 D.L.+3.3 m)
 $T_p=6$ sec, $H_p=2$ m, $L_p=49\sim50$ m



以上述べたように、栈橋の最前列の杭に、適当な深さまで消波板を設置すると、揚圧力の減少効果はいちじるしく、またこのような消波板は、たとえば鋼板で造れば、

図-19 消波板を設置しない場合の波の状況
(潮位 D.L.+3.3 m)
 $T_p=6$ sec, $H_p=2$ m, $L_p=49\sim50$ m



その施工は容易で、工費も非常に安い。図-18 および 19 は消波板を設置した場合としない場合との、栈橋における波の状況の相違を示す。