

棧橋床版に作用する揚圧力特性に及ぼす 空気層の効果に関する研究

EFFECTS OF ENTRAPPED AIR ON UPLIFT PRESSURE ACTING ON PLATFORM OF WHARF

榎木 亨*・後野正雄**

By Toru SAWARAGI and Masao NOCHINO

Uplift pressures on a platform of wharf stiffed by ribs are investigated in a wave tank. It is found that the uplift pressure depends greatly on the three following factors : the water impact on the platform, the compression of air entrapped in the compartment separated by ribs beneath the platform, and the leakage of the compressed air. By taking the three factors into account, a numerical model for predicting the uplift pressure is proposed. The predicted uplift pressure represents fairly well the measured pressure.

Keywords : uplift, platform of wharf, entrapped air

1. ま え が き

(1) 従来研究の動向

一般にわが国では棧橋は港内の静穏な海域に設置されることが多く、棧橋上部工に働く波による揚圧力を考慮することが少なかった。このため『港湾の施設の技術上の基準・同解説』¹⁾においても波による揚圧力は外力としては記載されているものの算定法については明確にはされていない。したがって波の作用を考慮しなければならない場合には、過去の研究成果を参考にして設計されていることが多い。

これらの揚圧力に関してはすでにいくつかの研究^{2)~4)}が発表されているが、この揚圧力の論議において昔より設置されている空気抜きの効果、すなわち揚圧力の作用する床版と波表面の間に存在する空気層の効果は、まだ十分解明されたとはいいがたく、またこの空気圧縮の効果は力学的にもきわめて興味深い問題といえよう。この空気層の効果については永井ら²⁾の二次元の実験的研究があり、これによると床版を気密にして空気を棧橋下に閉じ込めたとき揚圧力が最小となると結論づけている。

しかしながら現地においては二次元実験とは異なり、空気は側方に漏出し完全に気密状態にできないという反論もあり、先の結論は十分納得させ得るものではない。

一方合田⁵⁾、谷本ら⁶⁾は付加質量の概念あるいは Wagner の提案したくさび状物体の静水面への落下の際のポテンシャルの解を用いた理論的な展開を行い、谷本は波面と床版によってはさみ込まれる空気の影響を論じている。

さらに中村^{9),9)}らは空気圧縮による揚圧力の減少効果を実験的に論じ、また谷本¹⁰⁾、高橋¹¹⁾らは直立消波ケーソンの上部床版に作用する揚圧力を取り上げ空気の漏れの効果論じている。

(2) 既往の研究の問題点と本研究の目的

先に述べたように既往の研究は実験的研究、理論的研究ともに行われているが、波面と床版の間に閉じ込められる空気層の効果という面から問題点と考えられる点を列挙してみよう。

- a. 実験装置の二次元的性
- b. リブの存在の有無
- c. 空気に関する相似則

まず a. の実験装置の二次元的性の問題とは、多くの実験において二次元水槽の幅全面に床版を設け床版の側面から空気の逃げがないような仮定が行われていることで

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
(〒565 吹田市山田丘 2-1)

** 正会員 大阪大学助手 工学部土木工学科 (同上)

あり、先に述べたように現地の状況と異なる点である。

b. のリブの存在の有無についてはリブを設けた実験およびリブを設けずに平床版として取り扱われている2種類がある。ここでリブとは栈橋の杭と床版を結ぶ桁のことであり、現実の施工例をみると、床版と水面とのクリアランスの寸法からみてリブの大きさは決して無視できる大きさではないことに気付く。さらに後述するようにリブ間隔と波長との相対的な大きさにより、リブ内に空気が閉じ込められることが十分考えられるので、空気層の効果を論じるうえでこのリブの効果は無視できない。

c. の空気の相似則の問題とは空気に対する Mach の相似則と流体に対する Froude の相似則を実験的に両立させることが非常に困難なことであり、実験結果をいかに補正して現地換算するかということである。

本研究は上記3項目に対して、まず現地栈橋に対応するリブ付栈橋をモデルとして実験的に波面と床版間の閉じ込め空気層の効果を明らかにし、揚圧力の発生機構を明らかにするとともに、リブブロック（リブと床版で囲まれた空間）内の空気の圧縮・漏出を考慮した揚圧力算定のための数値計算モデルを提案しようとするものである。

なお、本研究の場合、従来の実験結果が堀川ら⁷⁾の研究を除いて、栈橋長と波長の比 l/L が小さい場合（最大 $l/L < 0.38$ ）を取り上げているのに対し、 $l/L = 0.37$ および $l/L = 0.74$ と比較的長い栈橋長を対象としている。これは栈橋下面の波が栈橋背後の護岸によって重複波を構成したとき $l/L > 0.5$ において重複波の腹の部分が栈橋内に入り得る場合をも考慮したもので、これにより揚圧力の波圧分布が空間的、時間的に変化することが予想される。さらに既往の研究と同様にリブのない平床版モデルについても実験を行っている。

2. 揚圧力の基本的特性と空気閉じ込め効果

(1) 実験装置

実験に使用した水槽は大阪大学工学部内の長さ 26.6 m、幅 1.5 m、高さ 1.8 m の造波水槽であり、実験にあたっては、水槽内を一部隔壁板によって 1 m 幅、0.5 m 幅の2つの水路に仕切り、前者に栈橋モデルを設置し、後者は入射波計測用とした。

図-1 は本実験で用いたリブ付床版模型を示したもので、幅 80 cm の2枚の床版から構成されており、現地栈橋を 1/20 に縮尺したもので、図-2 のように水底にはマウンドが設けてある。なお本実験においては栈橋側方の空気の逃げを考慮したモデルを三次元モデルとし、水槽側壁と床版との間に 10 cm の間隔を両側に設けてある。この両側に間隙のない場合を二次元モデルと称す

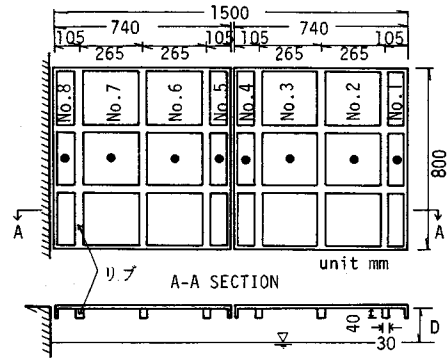


図-1 栈橋床版模型

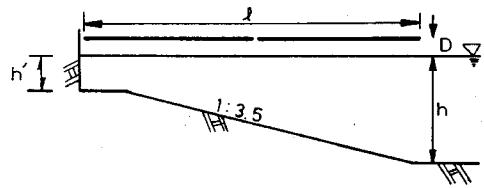


図-2 床版の配置と水底形状

る。また図-1 に示すように2枚の床版間ならびに床版と背後の鉛直壁との間に目地を入れた場合と入れない場合のモデルを考え、この目地間隔は 1 cm で目地入りの場合はそこから空気の漏出があるようになっている。この目地間隔は、現地栈橋をモデルに幾何学的縮尺により定めた。したがって床版モデルは三次元目地入り、二次元目地入り、二次元目地なしの3種類があり、さらにリブのない平床版モデルについても実験を行っている。また実験は規則波、不規則波のいずれも行っているが、解析との対応上規則波による実験結果のみを論じている。

図-1 中の黒丸は波圧計の設置位置を示し、波圧計番号を併記してある。これらの波圧計は No. 4, No. 5 の受感部面積が 28.3 mm² であり、その他の波圧計のそれは 15.9 mm² であって、その固有振動数は空中で 4 kHz であり、衝撃的な波圧も十分精度よく測定できる。

(2) 実験条件および測定値の処理

実験に用いた規則波の入射波の波形勾配 H/L は 0.025, 0.050, 0.075 の3種類、栈橋長波長比 l/L は 0.37, 0.74 の2種類、クリアランス（静水面と床版下面との距離）波高比 D/H は 0~2.0 の間を数種類変化させた。また本実験においては水深 h を変えて D を変化させているが、 h の変化は小さく、 l/L が一定の条件においては比水深 h/L は一定とみなすことができる。なお本論文で用いる波高、波長はすべて栈橋先端部の一様水深部における値である。

計測される揚圧力は衝撃的な性質を有しており、一波ごとに計測値が変動するのが普通である。本研究では造

波板よりの再反射波の影響のない範囲で実験を繰り返すを行い、一波ごとの最大圧力の30波にわたる平均値を求め、この平均波圧について議論する。

(3) 揚圧力の時系列特性

まず目地からの空気の漏出が考えられる三次元目地入り、二次元目地入りモデルにおいては $D/H > 0.5$ 程度以上の領域においては揚圧力は衝撃的な時系列を示す場合が多い。特に測点 No. 8 では常に強大な波圧を示す。また $l/L = 0.74$ の場合には No. 4, No. 5 の測点においてもこの種の衝撃波圧を示す。

図-3は $l/L = 0.37$ の場合の衝撃揚圧力の一例を示したもので、(A) は徐々に立ち上がり後急激に低下した場合であり、(B) はピークを中心とした対称的な立ち上がりおよび低下を示している。(C) は立ち上がりも激しくまた振幅の大きな固有振動が現われており、このタイプは谷本らが示した Wagner 型の時間変化を示していると考えられる。

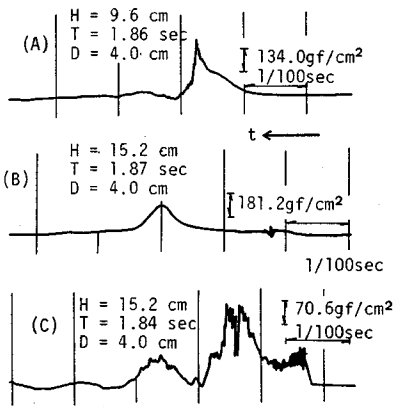


図-3 D/H が大きい場合の衝撃波圧の時系列

このように特徴ある衝撃揚圧力においての種々のタイプが見出されるが、何が原因で揚圧力が発生するのか明確ではなく、この時系列からその発生機構を論議するのは難しい。

一方 D/H が小さい領域 ($D/H < 0.4$) においては、いずれのモデルにおいても、揚圧力の時系列は図-4に示すように D/H が大きい場合とは異なった様相を示す。

すなわち揚圧力の時間波形は入射波の時間波形と同じ周期で変動しており、この波形からみる限りにおいては

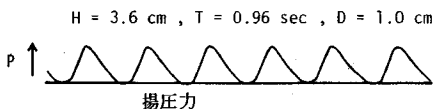


図-4 D/H が小さい場合の揚圧力の時系列

閉じ込められる空気の圧縮に密接な関係があると想定される。特にこの圧力波形はリブで囲まれたリブブロック内の波圧計において計測されることから、リブブロック内の空気、リブブロック (栈橋)、および波の相互干渉とにより生じているものと思われる。

図-5は $l/L = 0.74$ で目地からの空気漏出がない二次元目地なしの場合における揚圧力の時系列であって、測点 No. 4 および No. 5 の付近に重複波の腹が生じそれより岸側に空気が閉じ込められて No. 6, No. 7, No. 8 の測点に非衝撃的な圧力波形が現われている。この時系列は二次元目地なしの場合に観測され、特に $l/L = 0.74, D/H > 0.5$ の場合に顕著に現われるが、リブの有無とは関係がない。これは実験装置を作成する場合に目地を入れるかどうかは注意すべきことを示しており、次節でさらに詳しく考察する。

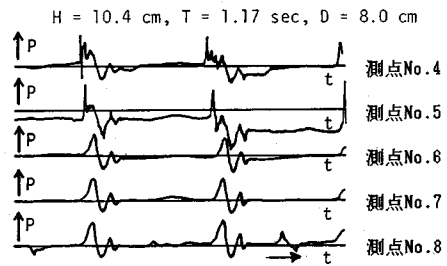


図-5 二次元目地なし ($l/L = 0.74$) の揚圧力の時系列

(4) 波圧の空間分布と空気の閉じ込め効果

図-6 および図-7は30波平均の揚圧力の場所的变化を示したもので、図中 X は護岸からの距離を、 W_0 は水の単位体積重量、 P は揚圧力を表わす。両図とも栈橋の護岸への取り付け部測点 No. 8 で強大な波圧強度を示している。また栈橋長の大きい $l/L = 0.74$ の場合には重複波の腹の位置に当たる測点 No. 4, No. 5 においても大きな波圧強度が生じているが、その他の測点ではこれらの強大な波圧に比べてその値は著しく小さい。このことから床版の揚圧力の設計において空間的に平均した波圧強度を用いることには問題があらう。

次に空気閉じ込めの効果を図中の二次元モデル、三次元モデルおよび目地の有無の各実験条件から考察してみよう。目地入りの場合、二次元モデルと三次元モデルの圧力分布および無次元波圧の値はほとんど変わらないのに対し、二次元モデルにおいて目地の有無によってその分布形および無次元波圧の値は大きく異なり、最大波圧を示す $X/L = 0$ 近傍では、目地なしの場合に目地入りの場合に比して約 $1/2$ 程度の圧力の値を示している。図-7の $X/L = 0.15 \sim 0.25$ の波面が床版に衝突しない領域についてみると、目地入りの場合揚圧力は作用しない

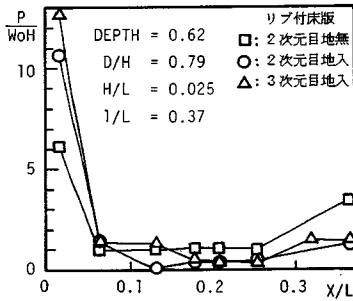


図-6 揚圧力の空間分布 ($l/L=0.37$)

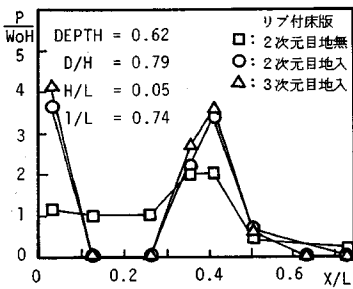


図-7 揚圧力の空間分布 ($l/L=0.74$)

が目地なしの場合には圧力が生じている。これらのことから、空気閉じ込め効果について以下のように結論づけられる。

a. 棧橋に空気漏出の孔（たとえば目地）があれば、三次元モデルも二次元モデルも大差ない結果が得られる。すなわち二次元モデルにおいて設けた目地から空気は容易に漏出し、圧力は空気の圧縮効果を示さない。

b. 二次元目地なしの場合は空気の圧縮効果が明瞭に現われ、特に棧橋長の長い場合には目地の有無によって圧力分布の異なることが予想される。したがって、十分空気の漏出が想定される場合の現地条件を考えると、模型での目地の有無について十分注意を払う必要がある。

なお $X/L=0$ に近い測点 No. 8 の圧力強度は、 $l/L=0.37$ の場合、 $l/L=0.74$ の場合の値に比して約 3 倍程度大きい値を示しているが、これは $l/L=0.74$ の場合重複波の腹の位置 ($X/L=0.4\sim 0.5$) で波面が床版に衝突するため測点 No. 8 での波高が減殺される結果と考えられる。なお本節に示した特性もリブの有無には関係がない。

(5) クリアランスの変化に伴う揚圧力の変化およびリブの影響

図-8 はクリアランスの変化に伴う空間的波圧分布の最大揚圧力の変化を各波形勾配別に示したものである。この図からわかるように同じ l/L の場合においても最大の波圧強度を示す D/H は同じでなく、 D/H が小さくて波がよく当たると考えられる場合が必ずしも最大波

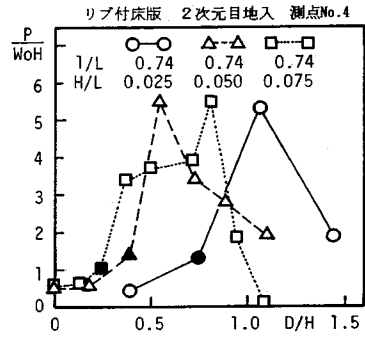


図-8 D/H の変化に伴う揚圧力変化

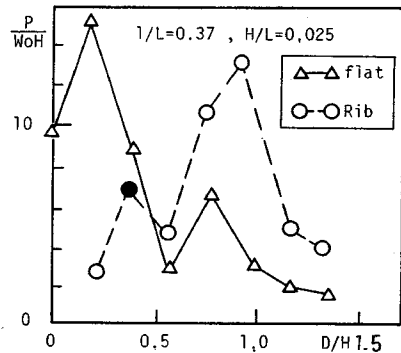


図-9 揚圧力に及ぼすリブの効果

圧強度を示すものではないということである。なお図中実験値で黒く塗りつぶした値はリブの下端が静水面と一致している場合であり、それより D/H が小さい場合は前述のリブ、空気、波の相互干渉効果により波圧が減少している。またこの最大波圧強度を示すクリアランスは波形勾配の差異によって少しずつ異なっているが、これについての系統的な傾向は見出せなかった。

図-9 は従来揚圧力実験に用いられてきた平床版モデルとリブ付モデルの揚圧力特性を比較したものであって、平床版の場合のクリアランスが小さい場合、すなわち海面が高潮等によって上昇したときに最大波圧強度を示すのに対し、リブ付モデルの場合には $D/H=1.0$ 付近で最大波圧強度を示し、リブの存在を無視することはできないことがわかる。

このようにリブの存在はリブで囲まれる領域の空気圧縮の効果もさることながら、リブ自体による入射波自体の変形なども考えられたので、以下にリブの効果を中心に揚圧力の特性をモデル同定して考察を進める。

3. リブブロックに作用する揚圧力の発生機構

(1) Wagner 型波圧と Bagnold 型波圧

本章では前章の結果をもとに二次元目地入りの棧橋最奥部のリブブロック (No. 8) に働く衝撃的揚圧力を対

象にして揚圧力の発生機構を明らかにしていく。そしてリブブロック内に閉じ込められた空気の高圧縮およびその漏出とともに水面の運動ならびに変形をも考慮して開発した数値計算モデルを示す。

従来の研究を参照すると、リブブロックに作用する揚圧力としては水面が直接床版に衝突する Wagner 型の波圧 \bar{P}_w とリブブロック内に空気が閉じ込められ圧縮されて生じる Bagnold 型の圧力 \bar{P}_B の両者が予想される。

まず後者の Bagnold 型の圧力は一般に次式で与えられる¹²⁾。

$$B_g = \frac{\rho_w K v^2}{P_0 d} = \frac{2}{\gamma - 1} \left(\frac{\bar{P}_B}{P_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} + 2 \left(\frac{\bar{P}_B}{P_0} \right)^{-\frac{1}{\gamma - 1}} - \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \dots \dots \dots (1)$$

ここに P_0 : 大気圧, ρ_w : 水の密度, v : 空気を閉じ込めたときの水面の速度, K : 水の付加質量厚さ, d : 閉じ込められた直後の空気室の高さ, γ : 空気の比熱比 (断熱圧縮の場合 1.4 の値をとる), B_g : Bagnold 数¹⁰⁾ で, 空気の密度を ρ_a とすると式 (1) は

$$B_g = \left(\frac{v}{\sqrt{\gamma P_0 / \rho_a}} \right)^2 \cdot \gamma \cdot \frac{\rho_w}{\rho_a} \cdot \frac{K}{d} \dots \dots \dots (2)$$

と変形できる。右辺の () 内は代表速度と音速の比を表わした Mach 数であり, このことから Bagnold 数は Mach 数に従うパラメーターであることがわかる。この空気圧縮による圧力はリブブロック内で一様で場所的には変化しないと考えてよい。また空気が閉じ込められている範囲内においては圧力の時間変化はほぼ正弦的な振動を示す。

一方 Wagner 型の波圧は静水面に落下するくさび状物体に作用する波圧を示したもので次のように与えられる¹³⁾。

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2} \rho_w \bar{v}^2 \left(\frac{\pi^2}{4} \cos^2 \beta + 1 \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここに \bar{v} は物体の落下速度, β は物体と水面のなす角度である。谷本ら⁶⁾は \bar{v} を水面の上昇速度, β を水面の傾きとみなして式 (3) を水平床版に作用する波圧の算定に応用している。この出力はピークの現われる時刻が場所的に異なり, 水面が接すると同時にピーク値を示し, その後急激に減少する。そしてそのピーク値は β にも強く影響される。また, 式 (3) はポテンシャル論により与えられたものであり, Froude の相似則に従う。

以上述べた Bagnold 型の圧力と Wagner 型の波圧はともに衝撃的な性質を有するものであるが, 支配される相似則やその特性が大きく異なる。栈橋床版に関する水理実験においては圧力のピークが生じる床版に水面が接しているか否かを調べることで両者の圧力を識別することができる。

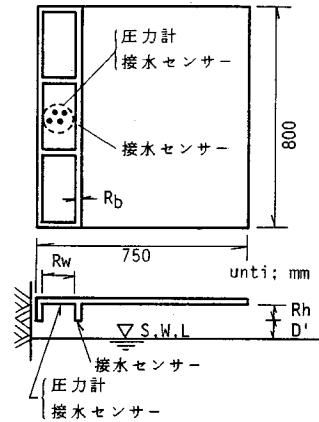


図-10 発生機構に関する実験装置

(2) 実験装置と実験方法

実験水槽は 2. (1) に述べたものと同様であるが床版模型は図-10 に示すように一枚の床版とし, リブブロックは栈橋最奥部のみに設け, $l/L=0.37$ の 1 種類とした。これは前章の結果より最大波圧強度の現われる条件を対象としたものである。波圧強度はリブの高さ R_h , 間隔 R_w によっても変化すると考え, $R_h=2, 4, 6$ cm, $R_w=4, 8, 12$ cm の計 9 種類のリブブロックを用いた。なおリブの厚さ R_b は 2 cm である。リブブロック内には最大 4 個の波圧計を設置することが可能であり, いずれの R_w に対しても常にリブブロック中央での波圧が計測できるようにした。波圧計の真横および沖側リブ下端中央部には, 水面の接触した瞬間を知ることのできる接水センサー¹⁴⁾を設置した。このセンサーは波面と接触すると電気的パルスが発生するようになっているが, 波面上の気泡が接触した場合にも反応する。したがって波面上の気泡が存在する場合にはパルスが発生したから必ずしも波面がセンサーに接触したとは断定できないが, 先に述べた Wagner 型, Bagnold 型波圧の識別には有用である。

本実験は 1 枚の床版による二次元目地入り (根つけ部) の状態のみを用いており, 水深は 56 cm の一定とし, 床版の設置高さを変化させてクリアランスを変えることとし, $D/H=0.4 \sim 1.8$ の範囲で実験を行っている。またリブ下端と静水面との距離 D' も 2~6 cm の範囲で変化させている。このような方法により前章で示した強大な波圧強度を示す領域に焦点を合わせた実験を行うことができた。なお後述する解析値との対応を容易にするために, 水底は一樣でありマウンドは設けていない。入射波は $H/L=0.025, 0.037, 0.050$ の 3 種類とし, 比水深は 0.28 の 1 種類に限定した。

(3) 揚圧力の発生機構別分類

実験で得られた波圧の時系列を接水センサーによる水

面の接触するタイミングによって分類すると図-11に示す2つのタイプに分けることができる。この図は無次元波圧強度の時系列を示したもので横軸 t/T は沖側リップ下端中央部に水面が接した時刻(図中 R による矢印)よりの経過時間 t を入射波の周期で無次元化してある。波圧計は岸側より $P_1 \sim P_4$ とし、各波圧計に水面が接した時刻を $S_1 \sim S_4$ で示してある。

まずタイプ-I (図-11(A)) はいずれの波圧も時刻 R の直後にピークが発生し、ピークが現われた後に波圧計に水面が接している ($S_1 \sim S_4$)。このことからタイプ-Iの波圧のピーク値はリップブロック内に閉じ込められた空気の圧縮による力、すなわち Bagnold 型の圧力であると判断できる。このタイプ-Iに属する時系列においては床版に水面が接しない ($S_1 \sim S_4$ が現われない) 場合にも上述のような波圧の発生がみられた。

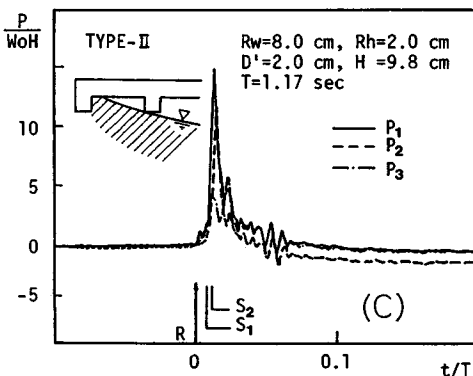
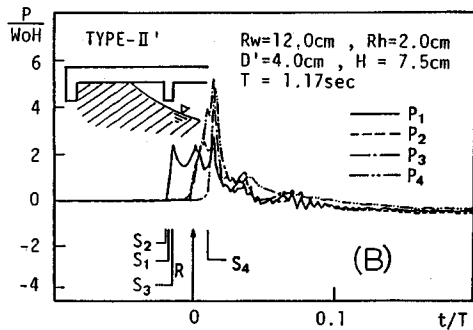
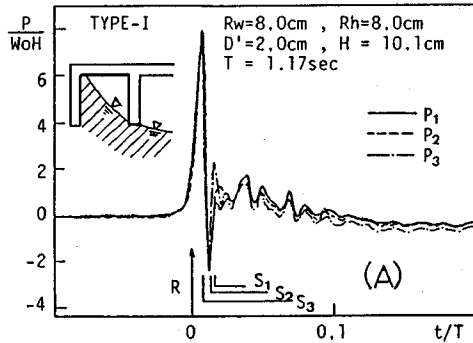


図-11 揚圧力の発生機構別分類

タイプ-II (図-11(B)) は波圧計に水面が接した直後 ($S_1 \sim S_4$ の発生時刻直後) から波圧が作用し、ピークが現われている。しかしこの波圧の時系列は測定位置 ($P_1 \sim P_4$) によって異なっている。これらのことよりタイプ-IIは水面の接触によって生じる Wagner 型の波圧であると考えられる。この状態におけるリップブロック内の水面形状は重複波の波面の最大勾配よりきわめて急峻となることが視察の結果認められた。

一方図-11(C) においては空気の閉じ込めの直後(時刻 R) より波圧が発生しているが、その時系列は測定位置により異なっている。特に P_1, P_2 の波圧は水面の接触直後 (S_1, S_2) より急激に大きくなるのに対し、 P_3 の波圧は水面が接触する時刻 S_3 が現われぬままに発生している。このように P_1, P_2 は Wagner 型の圧力と考えられるが、 P_3 は空気圧縮による力と考えられる。しかしこの型では P_1, P_2 の Wagner 型の圧力が卓越していることから、この型の圧力もタイプ-IIとして取り扱うこととする。

次にリップブロック内の空気の幾何学的な体積変化について考えてみよう。時刻 R においてリップブロック内に空気が閉じ込められ、その後空気が漏出することなく水面が傾きその一部が床版に接した場合(時刻 S_1) を考える(図-11(A) 参照)。このとき空気の体積は時刻 R の体積の $1/2$ 以下になるはずである。したがって空気の圧力の増加量 ($P - P_0$) は P_0 以上になる。いま波高を 10 cm とすると $P_0 \sim 1033$ gf/cm² であることから、この圧力の増加量は $100 W_oH$ 程度となる。この値は本実験で得られた値(最大で $15 W_oH$ 程度)よりはるかに大きく、これは空気が漏出しないとの仮定に問題があるものと思われる。実験においても沖側リップ下端より水中へ向かって気泡の放出が観測されており、揚圧力の特徴を詳細に検討するためには空気の漏出を考慮した解析が必要であろう。

(4) 揚圧力の数値計算モデル

前節の結果よりリップブロックに作用する揚圧力は Bagnold 型、Wagner 型が混在して発生するものであり、Wagner 型が卓越する場合においてもリップブロック内の空気の圧縮、漏出等の影響のあることがわかった。したがって実験結果を Froude 則のみで現地換算することには問題が残る。そこで本節では空気の圧縮、漏出に加えて Wagner 型の波圧をも考慮し得る揚圧力算定のための数値計算手法を提案し水理実験結果を現地換算する場合の手がかりを求めようとした。

リップブロック内に作用する揚圧力を求めるためには、リップブロック内部の水面の運動、空気の圧縮の状態、沖側リップ下端よりの空気の漏出の状態を知る必要がある。著者らはこれらを以下のようにモデル化した。

a. 水面の運動

本研究では、リップブロック内の水の運動に伴う空気の圧力変化を考慮していることから、リップブロック内の空気はある種の柔軟な構造物と同様のものと仮定し、この影響を表わすものとして、空気と一体となって運動する水塊を想定して、図-12に示すように微小幅の水柱群で表わす。以下この水塊を空気室付加質量水とよぶ。この水柱群は鉛直上下方向のみに運動するものとし、リップブロック内の水面の運動をこの水柱群の運動で表わす。単位幅の水柱の運動は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dt} \left\{ \rho_w K(y) \frac{d}{dt} x(t, y) \right\} = P_a(t) - F(t, y) \dots\dots\dots (4)$$

ここに x : 床版下面より下向きに測った水面位置, y : リップブロックの岸側を原点とし、沖向きに測った水平座標, $K(y)$: 水柱の高さ, P_a : リップブロック内の空気の絶対圧力である。また F は水柱に働く流体力であり、この力は棧橋床版がない場合の波面からリップブロック内の水面位置まで水柱を押し込んだ場合に作用する静水圧に等しい。したがって F は次式のように与えられる。

$$F(t, y) = P_0 + \rho_w g \{ \eta(t, y) - (R_h + D' - x(t, y)) \} \dots\dots\dots (5)$$

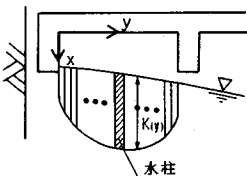


図-12 付加質量水柱群

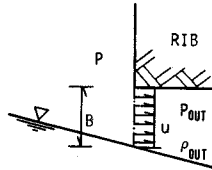


図-13 空気の漏出

ここで η は棧橋床版がない場合の波面の水位である。この流体力 F は棧橋床版がない場合の波面からリップブロック内の水面位置まで水柱を押し込んだ場合に作用する浮力に等しい。付加質量水柱の長さ K は後に詳述する。

b. 空気の圧縮

対象とする現象は十分短い時間に生じるものであることから空気は断熱変化に従って圧縮・膨張する。また前節で示したタイプ-Iの時系列よりリップブロック内の空気圧力は一様であると仮定した。以上のことより空気の漏出がない場合には前述の式(1)が成立するが、漏出がある場合には漏出した空気量 $Q(t)$ を考慮しなければならない。任意の時刻 t におけるリップブロック内部の空気体積 $V(t)$ に対する見掛けの初期体積 $V(0) - Q(t)/\rho_a(0)$ を考え、 $V(t)$ と見掛けの初期体積に関しては断熱圧縮過程が成立するものとする。漏出がある場合には次式が成立する。

$$\frac{P_a(t)}{P_0} = \left(\frac{V(0) - Q(t)/\rho_a(0)}{V(t)} \right)^\gamma = \left(\frac{\rho_a(t)}{\rho_a(0)} \right)^\gamma \dots\dots\dots (6)$$

ただし $\rho_a(t)$ はリップブロック内の空気の密度である。上式の $V(t)$ は $x(t, y)$ を $[0, R_w]$ の区間にわたって積分することにより求められる。

c. 空気の漏出

実験時の観測結果より、空気の漏出は沖側リップブロックのみ生じるものとする。いま図-13に示すように沖側リップブロック近傍の水面がリップブロックより下にある場合においてリップブロックと水面との距離を漏出口幅 B とし、漏出の速度 u は漏出口全体に一樣であるとする。そして u は十分短い時間内では等エントロピー定常流れに従うものとみなす。漏出口から十分離れたリップブロック内部の空気の速度は十分小さく無視できるので等エントロピー定常流れのベルヌーイ式¹⁵⁾より漏出速度は

$$u(t) = \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{P_a(t)}{\rho_a(t)} - \frac{P_{out}(t)}{\rho_{out}(t)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (7)$$

で求められる。ここに P_{out} , ρ_{out} はそれぞれ漏出口近傍の空気の圧力および密度である。ここで P_{out} は流体力と同様棧橋床版がない場合の漏出口近傍の静水圧に等しいと仮定し、次式で与えた。

$$P_{out}(t) = \begin{cases} P_0 + \rho_w g (\eta(t, R_w) - D') & ; \text{for } \eta(t, R_w) > D' \\ P_0 & ; \text{for } \eta(t, R_w) \leq D' \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

また ρ_{out} は

$$\frac{\rho_{out}(t)}{\rho_a(0)} = \left(\frac{P_{out}(t)}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \dots\dots\dots (9)$$

より求められる。以上のことより漏出空気量 $Q(t)$ は

$$Q(t) = \int_0^t \rho_{out}(t) \cdot u(t) \cdot B(t) \cdot dt \dots\dots\dots (10)$$

で求められる。

d. 付加質量の決定

本数値計算モデルでは、リップブロック内の水塊の運動に伴う空気の圧縮によって生じる空気室部付加質量を考え、さらにこの空気室部付加質量のリップ近傍の値を補正するために端部付加質量をも考慮する。空気室部付加質量は従来 Bagnold 数において用いられている付加質量厚さと類似したものであるが、本計算モデルでは半円形の y 軸方向分布をもつ付加質量を考え、この空気室部付加質量による水柱の長さ $K_w(y)$ を次式のように与える。

$$K_w(y) = S_c \sqrt{y(R_w - y)} \dots\dots\dots (11)$$

ここに S_c は補正係数である。

この式(11)による定義ではリップブロック端部で $K_w(y) = 0$ となり、式(4)の運動方程式そのものが意味をもたなくなる。そこで、この端部の空気室部付加質量の値を補正すると同時に、従来 Bagnold 型の圧力を

算定するときは無視されていたリップの厚さ R_b の影響をも取り入れようとしたのが端部付加質量である。また沖側リップ下端での空気の漏出口幅はこの端部付加質量の値に大きく影響されることから空気の漏出過程を支配する重要な要素の1つと考えられる。この端部付加質量厚さ K_e は R_b/R_w の関数であるとし、

$$K_e = f(R_b/R_w) \cdot R_b \dots\dots\dots (12)$$

とおく。そして関数 $f(R_b/R_w)$ は R_b/R_w の極限の状態より次のように定めた。すなわち、 $R_b/R_w \rightarrow \infty$ の場合は幅 $2R_b$ の板あるいはリップが単体で設置されている場合に等しい。この場合は半径 R_b の半円形の付加質量分布となり、リップブロック近傍での付加質量厚さ K_e は R_b になると考えられる。次に $R_b/R_w \rightarrow 0$ の場合は R_w に比べて R_b が無視できることから理想的な Bagnold 型モデルに一致するであろう。この場合の端部付加質量厚さ K_e は従来 Bagnold 数によく用いられている $\pi/8 \cdot R_w$ に等しいと仮定する。以上のことを満足する関数として本研究では次のような式を用いている。

$$f(R_b/R_w) = \frac{\pi}{8} \left(\frac{R_w}{R_b} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{R_b/R_w}{R_b/R_w + a} \right) + 1 \dots\dots (13)$$

ここに a は実験により決定される定数である。本モデルで用いる付加質量水柱の長さ $K(y)$ は空気室部付加質量と端部付加質量から次のように与えることとした。

$$K(y) = \max \{ K_w(y), K_e \} \dots\dots\dots (14)$$

(5) 計算手法と圧力の評価

式(4)の常微分方程式を式(5)~(14)を用い、適当な初期条件のもとで数値的に解くことにより漏出を考慮したリップブロック内部の水面の位置、形状および内部の空気の圧力が求められる。数値計算手法としては4次のルンゲ・クッタ法を用い、 y 軸方向には32分割とし、時間ステップは10万分の1秒を用いた。 y 軸方向には4~100分割の種々の分割数での計算を行い、計算結果が分割数に依存しない範囲の分割数を選んだ。またこの計算では数値的不安定が生じやすく、この数値的不安定をなくすために時間ステップが非常に短くなっている。初期条件としてはリップブロック岸側端部に波面が接した瞬間をとり、水面の位置 $\eta(t, y)$ および上昇速度 $dx(t, y)/dt$ は合田¹⁶⁾により導かれた有限振幅の部分重複波理論(第3次近似解)による波形から求めた。このとき鉛直壁の反射率としては実験結果を参照して0.85を用いている。

図-14は計算で得られた空気圧力 $P_a - P_0$ の時系列の一例である。Bagnold が提案した圧力式では正弦的時間変化を示し、圧力の作用開始直後に圧力の増加率が最大となり、水面の最も上昇したときにピーク値を示す。しかし図-14では圧力が緩やかに上昇し始め、図-11(A)に示したタイプ-Iとよく似た圧力変化を示してい

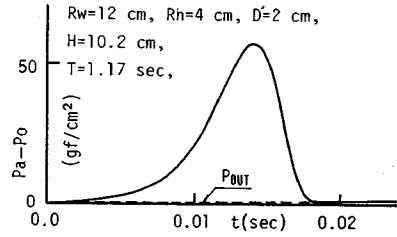


図-14 空気圧の時系列の一例

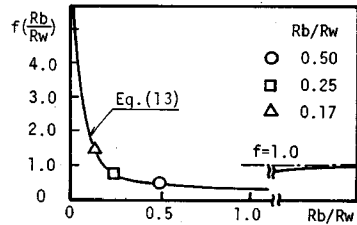


図-15 $f(R_b/R_w)$ の形状と a の決定 ($a=6.5$)

る。また本研究では空気の漏出を考慮していることから圧力がピーク値を示した後も漏出口近傍を除いて水面は上向き速度を有している場合がほとんどである。ピーク値を示した圧力は急激に減少し、漏出口近傍の圧力 P_{out} を中心に微小な振動を続ける。この振動は沖側リップ近傍の水面の上下動、すなわち沖側リップ下端での漏出口の開閉によって生じるものであり、図-11(A)に現われているピーク後の微小な圧力振動を定性的に説明し得るものと思われるが、定量的には振動周期、振幅ともに異なった値を示した。

空気圧がピーク値を示した後、水面が上昇を続け床版下面に接した場合にはWagner型の圧力が生じるものとして式(3)により圧力を算定した。ここで \bar{v}, β は谷本らと同様、水面の上昇速度、水面の傾きとして与えた。この圧力と空気圧のピーク値を比べ、空気圧の方が大きい場合にはタイプ-Iの波圧が生じたものと考え、逆の場合にはタイプ-IIの波圧が生じたものと判断した。そして水面が床版に接する以前に下降し始める場合には空気圧のピーク値をもってタイプ-Iの波圧とした。

(6) S_c および a の決定

上述の数値計算において S_c および a を適当に変化させて種々の計算を行った結果、本モデルによる計算において水面が床版に接するか否かについては S_c の変化の方が a の変化より強い影響があり、圧力の絶対値については a が支配的な要素になることがわかった。これは S_c の値が計算の初期において付加質量水全体の運動量を決定する要素となっており、これによって水面の最終上昇量が強く影響されること、および a の値、すなわち端部付加質量の値が空気の漏出量に強い影響を与

え、空気圧を決定する大きな要素となっているためと考えられる。そこで、圧力の絶対値と発生機構の分類に着目し、実験結果と計算結果を比較したところ $S_c=2.0$ が最も適当であるとの結論を得た。次に図-15 に示すように R_b/R_w の値の異なる3ケースの実験結果を任意に選び、計算結果が実験結果と一致するような $f(R_b/R_w)$ の値を求め、これらの値から式(13)中の定数 a を逆計算すると平均値として $a=6.5$ 、これらの値の物理的な意味については不明であるが、以後の計算はすべて $S_c=2.0$ 、 $a=6.5$ を用いることとする。

(7) 実験値との比較

図-16 は計算結果と実験結果の比較を示したものであり計算値、実験値ともにリブブロック中央位置での結果のみを用いている。計算で求めた圧力の絶対値は実験結果の1/2~2倍程度の範囲にあり、そのばらつきは絶対値の大きさにかかわらずほぼ一定である。また図中の黒塗りは計算で定めた揚圧力の発生機構のタイプと実験で求めたタイプが一致しなかったケース(No Good)を、白抜きは一致したケース(Good)を示している。対象としている現象が衝撃的で複雑な機構を有するものであること、用いている数値計算手法が大胆な仮定と単純なモデルの組合せによるものであることを考え合わせれば、図-16より、ここで提案した数値計算手法が実際現象をかなり表現しているものと考えられる。もちろん、より精度のよい解を得るために本モデルの中で用いている種々の仮定の妥当性の検証、現地スケールの実験・実測との比較検討が必要なことはいうまでもない。

4. あとがき

栈橋床版に作用する揚圧力に関する種々の実験を行いリブ付栈橋床版に作用する揚圧力の空間分布特性、 D/H による揚圧力変化、平床版に作用する揚圧力との差異などを明らかにするとともに、揚圧力の発生機構が Bagnold 型と Wagner 型の両者の機構が複合され、さらに空気の漏出も考慮すべき要因の1つであることを明

らかにした。そしてこれらの実験事実に基づいて簡単な物理モデルを組み合わせた数値計算手法を提案し揚圧力の定量的評価を試み、実験結果によってその妥当性を検証した。

最後に実験、解析の両面にわたって吉村文章氏、高久雅喜氏(当時大学院生)の甚大なるご協力を得るとともに大阪大学出口助教授から種々貴重なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1972. 3.
- 2) 永井莊七郎・久保直・時川和夫: 栈橋に働く揚圧力に関する研究(その1), 第13回海岸工学講演会講演集, pp.112~119, 1966.
- 3) 伊藤喜行・竹田英章: 栈橋に作用する揚圧力, 港湾技術研究所報告, 第6巻4号, pp.37~63, 1967.
- 4) 室田明・古土井光昭: 栈橋床版に作用する揚圧力についての実験的研究, 第13回海岸工学講演会講演集, pp.120~125, 1966.
- 5) 合田良実: 1967年度水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会水理委員会, 1967.
- 6) 谷本勝利・高橋重雄・和泉田芳和: 水平床版に働く揚圧力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第17巻2号, pp.3~47, 1978.
- 7) 堀川清司・中尾忠彦・矢高昭弘: 栈橋に働く揚圧力についての実験的研究, 第14回海岸工学講演会講演集, pp.148~153, 1967.
- 8) 中村孝幸・川本浩二・藤田昌夫: 栈橋に作用する衝撃揚圧力の減勢法に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.342~346, 1983.
- 9) 中村孝幸: エアークッション効果を利用した栈橋揚圧力の減勢法とそのモデル則に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.599~603, 1985.
- 10) 谷本勝利・高橋重雄・村上努: 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力, 港湾技術研究所報告, 第19巻1号, pp.3~31, 1980.
- 11) 高橋重雄・谷本勝利・宮永清一: 遊水室に上床版のある直立消波ケーソンの現地波圧観測, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.522~526, 1984.
- 12) Bagnold, R. A.: Interim Report on Wave Pressure Research, Jour. of Institute of Civil Engineers, Vol. 12, pp.201~226, 1939.
- 13) Wagner, H.: Über Stob- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Band 12, pp.193~215, 1932.
- 14) 合田良実・原中祐一: 衝撃波圧に関する一実験, 港湾技術研究所資料, No. 32, pp.1~18, 1967.
- 15) たとえば, リーブマン, ロシュコ: 気体力学, 吉岡書店, pp.14~16, 1954.
- 16) 合田良実・阿部淑輝: 有限振幅波の部分反射に伴う見掛けの反射率について, 港湾技術研究所報告, 第7巻3号, pp.3~58, 1980. (1986. 6. 12・受付)

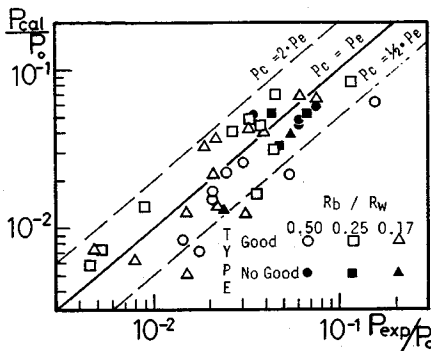


図-16 計算値と実験値の比較