

津波氾濫流の構造物への流体力

FLUID FORCE ON A LARGE STRUCTURE DUE TO AN INUNDATED FLOW CAUSED BY A TSUNAMI

松富英夫¹・大向達也²・今井健太郎³

Hideo MATSUTOMI, Tatsuya OHMUKAI and Kentaro IMAI

¹正会員 秋田大学工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

²修(工) 青森市役所八重田浄化センター (〒030-0912 青森市八重田 1 丁目 1-1)

³学生員 修(工) 秋田大学大学院工学資源学研究科 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

Hydraulic experiments are carried out to clarify fundamental characteristics of fluid force on a large structure due to an inundated flow caused by a tsunami. Impulsive force at an early stage, and drag force, buoyancy and uplift pressure at a quasi-steady stage after the early stage are taken up as the fluid force. Dependency of drag coefficient on hydraulic quantities and opening ratio of structures is also examined.

Key Words: Tsunamis, inundated flow, fluid force, drag coefficient, experimental study

1. はじめに

津波による家屋などの構造物の被害想定が行われている。しかし、氾濫流先端部衝突時の衝撃力やその後の抗力、全揚圧力(浮力+揚圧力)はもとより¹⁾、構造物の大破、中破、小破といった破壊基準²⁾がよく判っておらず、信頼度の高い被害想定が行えない状況にある。

津波氾濫流の先端部衝突時の衝撃力に関しては、数は少ないが、研究が行われている(例えば、福井ら³⁾;松富^{4),5)};水谷・今村⁶⁾)。一方、先端部衝突後の抗力と全揚圧力に関しては、著者らの研究例⁷⁾がある程度である。

これらの状況に鑑み、本研究は既報⁷⁾とその後の追加実験により、津波氾濫流の先端部衝突時とその後の準定常的な部分の基礎的な流体力特性や抗力係数の水理量への依存性などについて再検討を行うものである。

2. 実験

津波は一樣水深部、それに続く一樣勾配斜面部を伝播した後、平坦な陸上部を氾濫するゲート急開流れ(段波)で模擬した。実験装置の概略を図-1に示す。貯水長 L_0 が5m、一樣水深部(水深 h_0)、一樣勾配斜面部(勾配 s)、

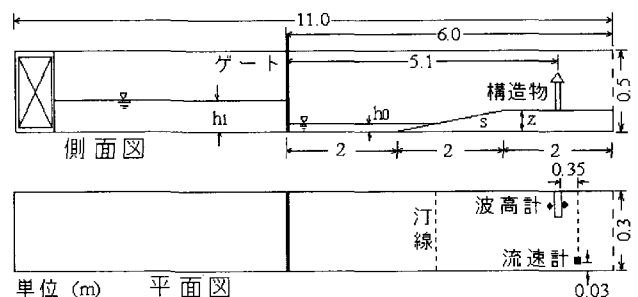


図-1 実験装置の概略

平坦な陸上部(地盤高 Z)が各々2mで、全長が11mの両面ガラス張り鋼製矩形水路である。水路下流端の壁は撤去してあり、氾濫流はそこを自由に透過できる。一樣勾配斜面部、平坦な陸上部と抗力・全揚圧力などの測定対象となる構造物模型は塩化ビニール樹脂製で、構造物模型は基礎的な検討のため平坦な陸上部のほぼ中央の水路側壁に密着させて1つのみ設けた。ただし、防浪ビルや家屋をも想定して、構造物間の開度 λ (定義は後述)を変化させた。構造物と氾濫流は氾濫方向を基準に左右対称と考え、それらの片半分で代表させた。構造物模型の諸元(高さ H 、半幅 W 、奥行 L など)を図-2に示す。

浸水深 h の測定は容量式波高計(計測技研製)、氾濫流速 u の評価は1点法に基づくプロペラ流速計(直径3

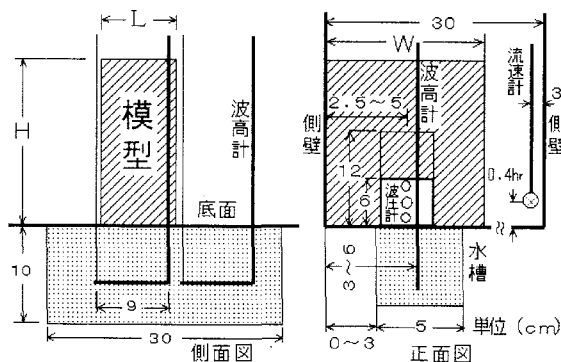


図-2 構造物模型 (斜線部) と計測機器の配置

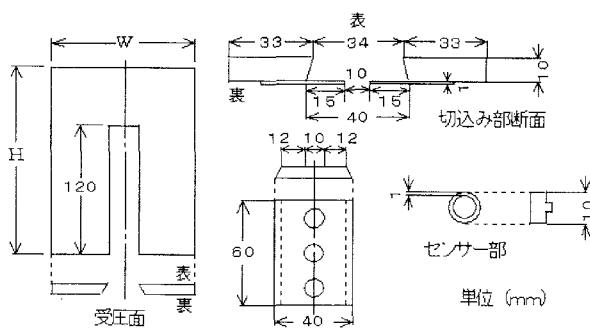


図-3 波圧計の設置方法

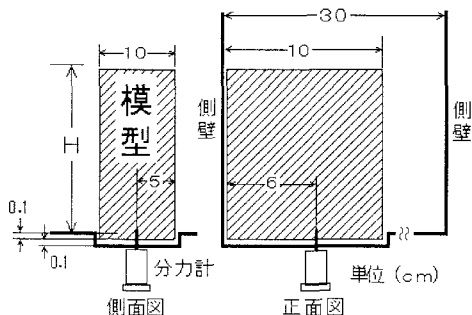


図-4 分力計の設置状況 ($\lambda=67\%$)

mm, 中村製作所製) による方法 (開度 $\lambda=75\%$ と 83%) と著者ら⁸⁾のベルヌーイの定理 (構造物の前・背面浸水深と流速係数の経験式) を用いる方法 ($\lambda=67\%$) の2通りで行った。計測機器の配置を図-1と2に示す。

抗力や全揚圧力評価のための鉛直方向圧力分布の測定は、2cm 間隔で3 台の波圧計を埋め込んだ小板⁹⁾を、構造物模型前面壁の切り込みを入れた部分で上下に移動させて行った。使用した波圧計 (ST 研究所製) は内径が8mm, 定格容量が 200gf/cm^2 である。切り込み部の残りの隙間は他の小板で塞いだ。圧力の測定範囲は底面上 $Z_0=1\sim6\text{cm}$ で、測定間隔は1cm である。図-3に波圧計の設置方法を示す。

抗力と全揚圧力に関しては、波圧計による評価結果の妥当性をチェックするため、実験ケースは限られるが、四分力計 (株) SSK 製) によるものとの比較・検討を行う。分力計の設置状況を図-4に示す。分力計は水路底

表-1 実験条件

構造物 (H×W×L) (cm)	17×10×10 17×10×5	17×7.5×10 17×7.5×5	17×5×10	
開度 λ (%)	67	75	83	
斜面勾配 s	1/67	1/40	1/26	1/18
地盤高 Z (cm)	3	5	7.7	11
一様部水深 h ₀ (cm)	1~3	1~5	1~7	1~10
貯留水深 h ₁ (cm)	11, 12	13, 14	15, 16	18, 19

面下に設けたアルミ蓋付きの箱の中に鉛直に据えた。分力計に取り付けた構造物模型と水路底面 (アルミ蓋) との間に1mm, 水路側壁 (ガラス板) との間に OHP シートの厚さ程度の隙間を設けた。勿論、構造物模型の設置場所は波圧計によるものと同じである。

実験ケースを表-1 にまとめて示す。開度 λ (%) の定義は $\lambda=100 \times (1 - \text{構造物模型幅} / \text{水路幅})$, 地盤高 Z は沖の水平底からの高さである。斜面勾配や地盤高などを変化させた理由は入射段波 (氾濫流) に変化を持たせるためである。各ケース 10 回ずつ実験を行った。縮尺は 1/200 を想定しており、本条件は周期 ($\approx 8L_0 / \sqrt{g h_0}$, g は重力加速度)⁸⁾が 7~9 分, 沖の水平底における入射段波波高水深比が 0.4~5.0 の波状や砕波段波津波に相当する。氾濫流のフルード数も 1.2~2.1 であり (後述), 現地調査に基づくものの範囲内にほぼ入っており⁸⁾, 实际的である。

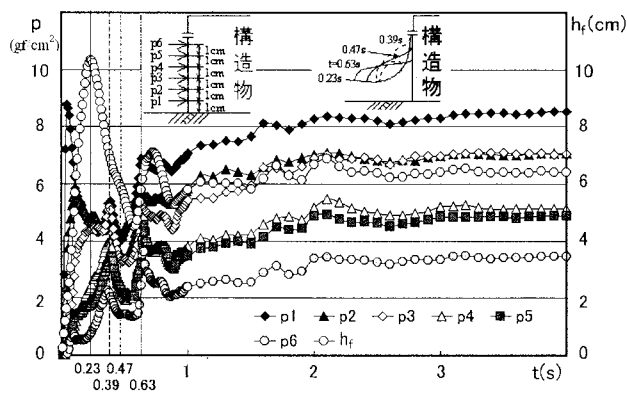
3. 実験結果とその考察

(1) 圧力と浸水深の経時変化

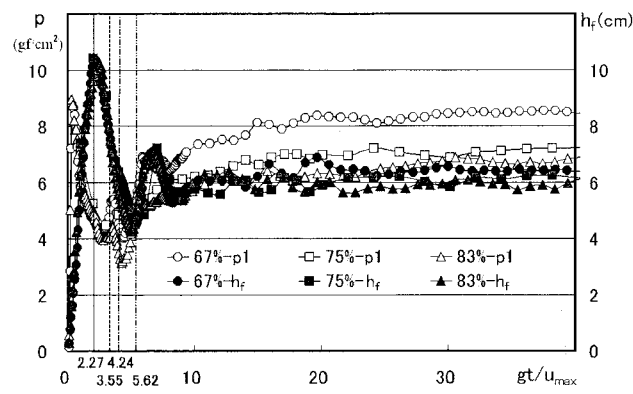
構造物前面各高さでの圧力 p と構造物前面浸水深 h_f の経時変化例を図-5(a)と(b)に示す。氾濫流先端衝突時を $t=0$ としており、実験値は10回の平均で、これらは以下の図でも同じである。図-5(a)は汀線到達までに波状段波となり、氾濫流先端部が分裂した場合、図-5(b)は汀線まで砕波段波のまま到達し、分裂しなかった場合で⁷⁾, 氾濫流先端部背後の準定常的な浸水深が同程度のものがある。 p の添数字は底面からの高さ Z_0 (cm 単位) を示す。

図-5(a)において、 $t=0.23\text{s}$ は前面浸水深が最大の時で、氾濫流先端衝突後に水塊が上方に投げ出される⁵⁾ことや先端部が分裂していることもあって、浸水深の割に圧力がかなり小さくなっている ((3) 参照)。 $t=0.39\text{s}$ は投げ出された水塊の先端が構造物に向かう流れの水面位まで落下した時で、圧力が若干大きくなっている。 $t=0.47\text{s}$ は投げ出された水塊が完全に落下して、流れを遮断するためか、圧力が小さくなっている。 $t=0.63\text{s}$ は遮断が終わり、再び流れが衝突するためか、氾濫流先端衝突時ほどではないが、圧力が大きくなっている。 $t=1\text{s}$ 以後の各高さの圧力と浸水深の経時変化の対応は非常によい。

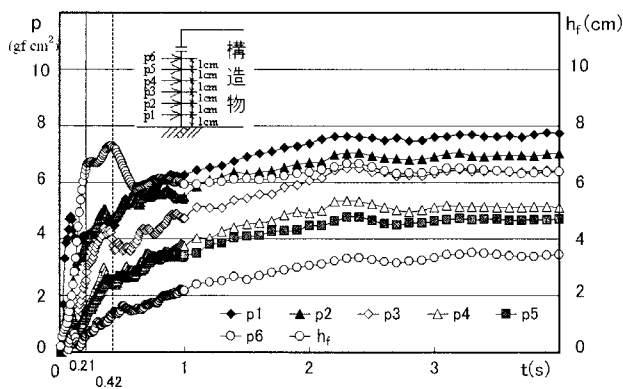
分裂しなかった場合は、 $t < 1\text{s}$ において分裂した場合ほど圧力変動が激しくない。分裂した場合に比べて、水塊



(a) 分裂した場合 ($h_0=9\text{cm}$, $h_1=19\text{cm}$)

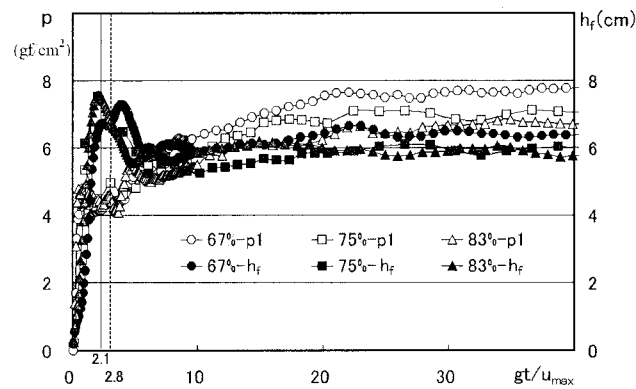


(a) 分裂した場合 ($h_0=9\text{cm}$, $h_1=19\text{cm}$)



(b) 分裂しなかった場合 ($h_0=3\text{cm}$, $h_1=19\text{cm}$)

図-5 圧力と前面浸水深の経時変化例 ($\lambda=67\%$, $s=1/18$)



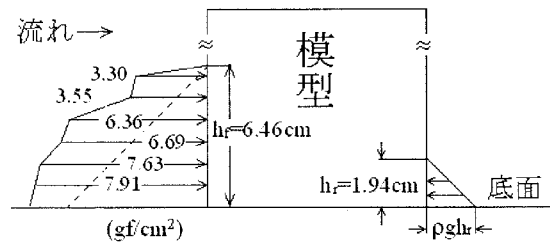
(b) 分裂しなかった場合 ($h_0=3\text{cm}$, $h_1=19\text{cm}$)

図-6 開度ごとの圧力と前面浸水深の経時変化の比較例 ($s=1/18$)

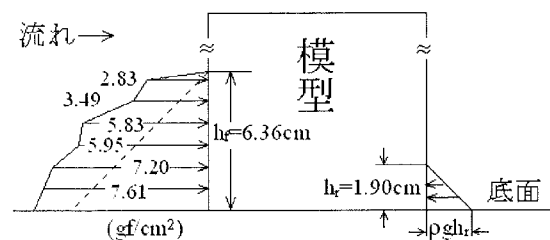
が上方に投げ出されないこともあり、浸水深極大時 ($t=0.21\text{s}$) の圧力減少も小さい。図-5(b)の $t=0.42\text{s}$ は図-5(a)の $t=0.47\text{s}$ に対応する。 $t=1\text{s}$ 以後の各高さの圧力と浸水深の経時変化の対応は、分裂した場合と同様、非常によい。

分裂した場合としなかった場合の両方とも、背後の準定常的な部分の圧力 p_6 は浸水深から推察して大半が動圧と考えられる。各高さ間の圧力差がほぼ等しいことから、この動圧は底面から水面までほぼ一様と判断される (図-7 参照)。さらに、大半の各高さの圧力は氾濫流先端部より背後の準定常的な部分で大きいことが判る。

図-6(a)と(b)に開度 λ ごとの $Z_0=1\text{cm}$ における圧力 p_1 と構造物前面浸水深の経時変化の比較例を示す。ただし、時間 t は各開度ごとの最大氾濫流速 $u_{\max}$ と重力加速度 g で無次元化している。図-6(a)は氾濫流先端部が分裂した場合、図-6(b)は分裂しなかった場合である。これらの図から、①浸水深が最大となる時、投げ出された水塊の先端が構造物に向かう流れの水面位まで落下する時、投げ出された水塊が完全に落下して流れを遮断する時、遮断が終わって再び流れが衝突する時の各無次元時間 ($gt/u_{\max}$) は開度にほとんど依存しないこと、②氾濫流先端衝突時の衝撃圧力は開度による差がほとんど認められないが、その後の各段階の圧力は開度が大きくなるにつれて小さくなることが判る。



(a) 分裂した場合 ($h_0=9\text{cm}$, $h_1=19\text{cm}$)



(b) 分裂しなかった場合 ($h_0=3\text{cm}$, $h_1=19\text{cm}$)

図-7 圧力分布例 ($\lambda=67\%$, $s=1/18$)

(2) 圧力分布

氾濫流先端部背後の準定常的な部分で、構造物前面の全圧力 (水深方向の積分値) が最大となる時の構造物前・

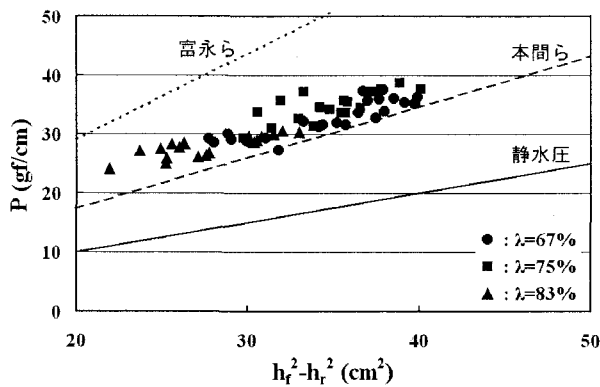


図-8 全圧力と構造物前・背面浸水深の2乗差の関係

背面に働く圧力の分布例を図-7(a)と(b)に示す。図中、 ρ は水の密度、 h_r は構造物背面の浸水深である。ただし、背面では圧力を測定しておらず、静水压分布を仮定している。本図は図-5(a)と(b)に示したケースのもので、前面圧力は静水压よりかなり大きいことが判る。

図-7と同じ定義時刻の単位幅あたりの全圧力 P (背面の全圧力を差し引いたもの) と構造物前・背面浸水深の2乗差の関係を図-8に示す。図には実線、破線、点線で各々次式の構造物前・背面ともに静水压分布を仮定した場合の全圧力、本間ら⁹⁾と富永ら¹⁰⁾の海域に設置された鉛直壁構造物に対する碎波後の波による全圧力を示す。

$$P = \frac{1}{2} \rho g (h_f^2 - h_r^2) \quad (1)$$

$$P = \frac{1.73}{2} \rho g (h_f^2 - h_r^2) \quad (2)$$

$$P = \frac{2.91}{2} \rho g (h_f^2 - h_r^2) \quad (3)$$

ただし、本間らと富永らの実際の全圧力式は式(2)と(3)において $h_r=0$ としたものである(文献5)における式(4)の係数 9.28 を 7.04 に訂正する)。

図-8によると、実験値と静水压分布を仮定した場合の値に顕著な差が認められる。福岡ら¹¹⁾は洪水氾濫流の模型実験で両者がほぼ一致することを報告している。一方、実験値は碎波後の波による本間らと富永らの全圧力値の間である。富永らは、本間らの全圧力式はやや小さめの値を与えると指摘している。また、林ら¹²⁾は津波水門に対する波力実験で、非碎波時の最大波力は最大浸水深時の静水压の1.5倍程度になることを示している。

以上から、洪水氾濫流と異なり、段波として押し寄せた津波の氾濫流による流体力は従来の碎波後の波による流体力と同様、静水压分布でないことが判断される。福岡らとの違いの主な理由としてフルード数の違いが考えられる。著者らの実験における平均フルード数は開度67%の場合が1.91、75%の場合が1.94、83%の場合が1.49であり(図-14参照)、福岡らに比べてかなり大きい。現地調査に基づく津波氾濫流のフルード数は0.7~2.0程度であり⁸⁾、著者らのフルード数は非実際的ではない。

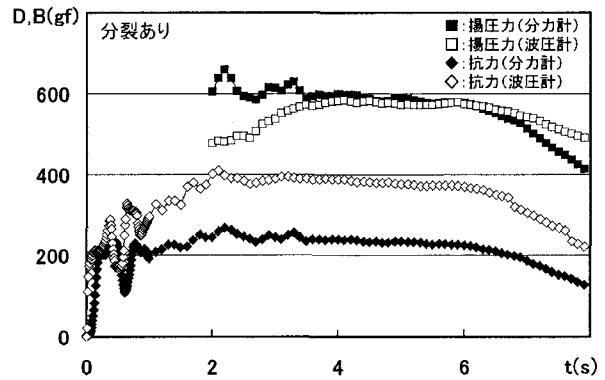


図-9 分力計と波圧計による抗力と全揚圧力の経時変化例

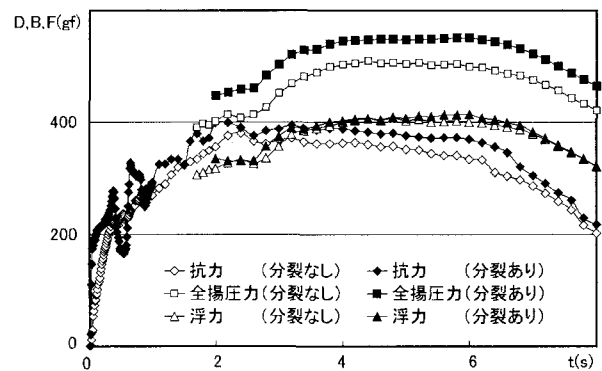


図-10 抗力、全揚圧力と浮力の経時変化例

(3) 抗力、全揚圧力と浮力

分力計と波圧計による抗力 D および全揚圧力 B の比較例を図-9に示す。氾濫流先端部が分裂した場合で、図-5(a)に示したケースのものである。ただし、波圧計による抗力は氾濫流横断方向に浸水深と圧力は変化しないと仮定し、全揚圧力は構造物前・背面間の底面圧力は直線分布すると仮定して評価している。図によると、準定常的部分での両者による全揚圧力の大きさはほぼ等しい。一方、分力計による抗力は波圧計によるものの6割強であるが、両者の時間波形は酷似している。前者は底面($Z_0=0$)での圧力と全揚圧力の考え方が妥当であることを示している。後者は、底面または壁面に接した二次元物体の抗力係数が二次元孤立物体の約6割¹⁴⁾であることを考えると、妥当な結果と言えよう。以上から、波圧計の結果と仮定に基づく以下の議論は有効と判断される。

波圧計による抗力、全揚圧力、構造物前・背面間の浸水深は直線分布すると仮定して評価した浮力 F の経時変化例を図-10に示す。氾濫流先端部が分裂した場合としなかった場合の両方を示しており、図-5(a)と(b)に示したケースのものである。図から、津波が緩勾配海岸などを波状や碎波段波として押し寄せる場合は、①流体力は氾濫流先端部より背後の準定常的部分の方が大きいこと^{4), 5)}、②氾濫流先端部背後の全揚圧力では浮力が主体的であることが判る。

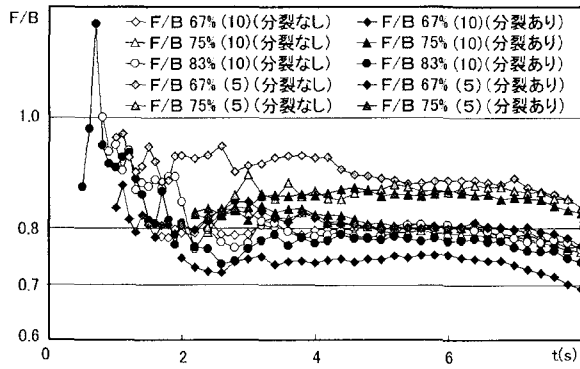


図-11 浮力と全揚圧力比の経時変化

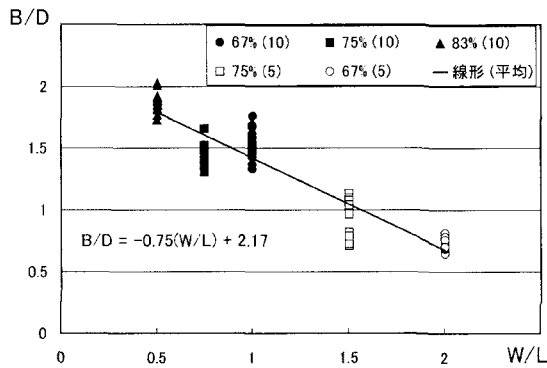


図-12 全揚圧力・抗力比と幅・奥行比の関係

図-11に開度ごとの浮力と全揚圧力比 (F/B) の経時変化を示す。氾濫流先端部が分裂した場合としない場合の両方を示してある。凡例の () 内の数値は構造物の奥行 L (cm 単位) で、これは以下の図でも同じである。図から、①氾濫流先端部が分裂する場合、氾濫流先端衝突後の短時間であるが、全揚圧力よりも浮力の方が大きい場合があること、②氾濫流先端部背後では全揚圧力の大部分 (約 7~9 割) が浮力で、その割合は時間が経過してもほとんど変化しないこと、などが判る。①は、図-5(a)の考察において言及したように、浸水深の割に圧力が小さいためである。

(4) 全揚圧力・抗力比への幅・奥行比の影響

全揚圧力・抗力比 (B/D) と構造物の幅・奥行比 (W/L) の関係を図-12に示す。全揚圧力・抗力比 (図-11から浮力・抗力比 (F/D) と言ってもよい) は、 W/L が大きくなるにつれて、ほぼ直線的に小さくなることが判る。この傾向は、例えば幅が一定で奥行が短くなる場合を想定すると、基本的に抗力は一定で全揚圧力または浮力は小さくなるので、妥当な結果である。

(5) 抗力係数の依存性

抗力係数 C_D のレイノルズ数 $Re (= uh_r/\nu)$ への依存性の検討例を図-13に示す。動粘性係数 ν は一律に $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ を採用している。本定義のレイノルズ数は構造物の影

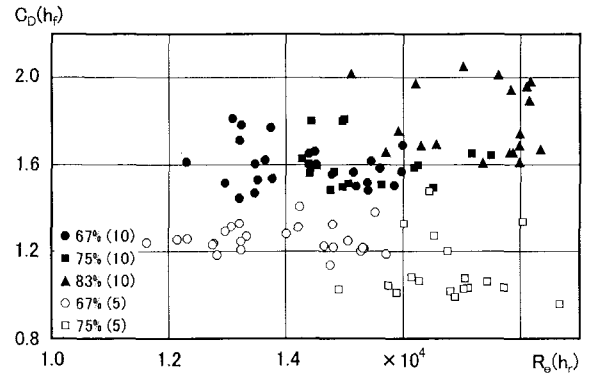


図-13 抗力係数のレイノルズ数への依存性

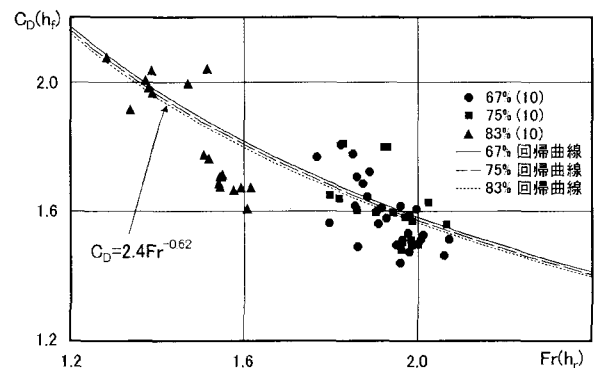


図-14 抗力係数のフルード数への依存性

響を受けていない場合のものと考えてよい。抗力係数の定義は次式である。

$$C_D = 2D/\rho u^2 A \quad (4)$$

ここで、抗力係数などは氾濫流先端部背後の準定常的な部分で、構造物前面の全圧力が最大となる時刻のものであり、投影面積 A の算定浸水深として構造物前面浸水深 h_f を採用している。図から、抗力係数は開度ごとにグループを形成し、レイノルズ数にほとんど依存しないことが判る。これはレイノルズ数の大きさ ($>1 \times 10^4$) から判断して妥当な結果と考えられる。

そこで、レイノルズ数を無視して、抗力係数のフルード数 $Fr (= u/\sqrt{gh_r})$ (値域は 1.2~2.1) と開度 λ (同 67~83%) への依存性を検討したところ、次の回帰式を得た。

$$C_D(h_f) = 3Fr^{-0.62} \lambda^{-0.05} \approx 2.4Fr^{-0.62} \quad (5)$$

$$C_D(h_r) = 13Fr^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (6)$$

ここで、本定義のフルード数も構造物の影響を受けていない場合のものと考えてよい。式(5)は投影面積を算定する際の浸水深として h_f 、式(6)は h_r を用いた場合のものである。式(5)と(6)から、①抗力係数のフルード数への依存性は投影面積算定の際の使用浸水深によって傾向が全く逆になること、②投影面積算定に h_f を用いた場合、抗力係数は開度にほとんど依存しないことが判る。②は h_f が開度 λ の 0.3 乗程度に依存する⁷⁾ことによる。

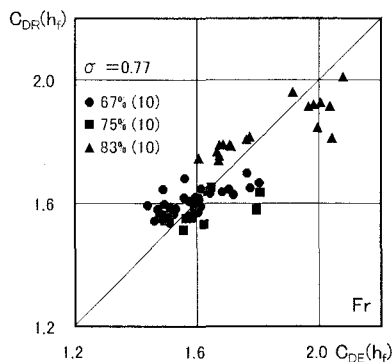


図-15 回帰値と実験値の比較

図-14 に抗力係数とフルード数の関係を示す。図中の曲線は開度をパラメータとして式(5)を示したものである。図から、これまでの抗力係数の定義との整合性、家屋¹³⁾や二次元孤立角柱¹⁴⁾に対する抗力係数値(約2)などを考慮すると、 h_f を採用した投影面積による抗力係数の評価が妥当と判断される。

図-15 に抗力係数の回帰値(添字 R)と実験値(添字 E)の比較を示す。回帰値は式(5)から求めている。図中の σ は標準偏差である。標準偏差が0.77 とやや大きいですが、式(5)は妥当な回帰式と判断される。

抗力係数は厳密にはレイノルズ数にも依存する。そこで、レイノルズ数($1.1 \sim 1.9 \times 10^4$)、フルード数と開度の3変数に対する回帰式の検討を行ったところ、次式を得た。

$$C_D(h_f) = 59 R_e^{-0.35} F_r^{-0.71} \lambda^{0.04} \quad (7)$$

$$\cong 70 R_e^{-0.35} F_r^{-0.71}$$

開度への依存性は式(5)と同じく非常に弱いですが、レイノルズ数へも依存するものとなった。しかし、回帰値の実験値に対する標準偏差は式(5)の方が小さかった。このことや図-13 から、本実験の範囲では、抗力係数の回帰式としてレイノルズ数を含ませない方がよいと判断される。

抗力係数の構造物の幅・奥行比(W/L)などへの依存性は今後の検討課題である。

4. おわりに

本研究の主な結論は次の通りである。

①氾濫流先端部衝突時の圧力 p の経時変化は動圧などの影響もあって複雑であるが、構造物前面浸水深 h_f の経時変化との対応は比較的よい。

②氾濫流先端部の分裂した部分は浸水深の割に圧力が小さく、背後の準定常的な部分での圧力の方が大きい。

③氾濫流先端部背後では全揚圧力 B の大部分(約7~9割)が浮力 F で、その割合は時間が経過してもほとんど変化しない。

④全揚圧力・抗力比(B/D)は構造物の幅・奥行比(W/L)が大きくなるにつれて、ほぼ直線的に小さくなる。

⑤抗力係数 C_D の回帰式はレイノルズ数を依存因子としない方が適合度がよかった。これは本実験のレイノルズ数が 1×10^4 より大きいためと考えられる。

⑥抗力係数のフルード数への依存性は投影面積評価の際の使用浸水深によって傾向が逆となり、前面浸水深を用いた場合は構造物の開度 λ にほとんど依存しない。

⑦抗力評価の際の投影面積は前面浸水深を採用して算定した方がよい。

謝辞：本実験を行うにあたり当時本学の大学院生 望月章宏君、金光紀代太君、富樫宏二君、卒業研究生 佐藤直己君、穂積拓哉君の助力を得た。平成15年度文部科学省振興調整費(代表：京都大学教授 河田恵昭)の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 松富英夫：沿岸域のあり方，海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会，pp. 22-25，1996。
- 2) 松富英夫，首藤伸夫：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，第41巻，pp. 246-250，1994。
- 3) 福井芳朗，白石英彦，中村 充，佐々木泰雄：津波の研究(II)，第9回海岸工学講演会講演集，pp. 50-54，1962。
- 4) 松富英夫：砕波段波衝突による衝撃波力について，土木学会論文集，No. 399/II-10，pp. 147-155，1988。
- 5) 松富英夫：砕波段波衝突時の圧力分布と全波力，海岸工学論文集，第38巻，pp. 626-630，1991。
- 6) 水谷 将，今村文彦：津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案，海岸工学論文集，第49巻，pp. 731-735，2002。
- 7) 松富英夫，大向達也：津波氾濫流の流体力に関する実験，海岸工学論文集，第46巻，pp. 336-340，1999。
- 8) 松富英夫，飯塚秀則：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 361-365，1998。
- 9) 本間 仁，堀川清司，長谷直樹：海岸堤防(護岸)に作用する波圧の分布について，第10回海岸工学講演会講演集，pp. 116-120，1963。
- 10) 富永正照，久津見生哲：海岸堤防に作用する砕波後の波圧，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 215-221，1971。
- 11) 福岡捷二，川島幹雄，横山 洋，水口雅教：家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究，水工学論文集，第41巻，pp. 693-698，1997。
- 12) 林 泰造，松富英夫：津波水門に加わる津波の波力に関する実験的研究，土木学会第32回年次講演会概要集，pp. 117-118，1977。
- 13) 例えば，高橋 保，中川 一，加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京都大学防災研究所年報，第28号，pp. 455-470，1985。
- 14) 椿東一郎：水理学II，森北出版，p. 272，1974。

(2003. 9. 30 受付)