準定常流中における構造物周りの流体特性に関する水理実験

Hydraulic Experiment on Characteristic of Fluid for Structure Around in Quasi-steady Flow

小笠原敏記¹・三橋 寛²・堺 茂樹³

Toshinori OGASAWARA, Hiroshi MITSUHASHI and Shigeki SAKAI

We carried out hydraulic experiments satisfied quasi-steady flow of tsunami floods using circulating water open channel and investigated characteristics of the fluid for a model structure around in the flow. Especially, we aim to clarify the relationship of inundation depth, velocity and pressure between the front and the side of the structure. As a result, the inundation depth of the structural side decreases about 0.5 times than that of the front and the velocity increases by around 2 times. Furthermore, if the inundation depth is greater than 0.5 times of initial depth, the flow change from subcritical flow to supercritical flow and the pressure of the structural side is different by measurement locations. The relationship of the inundation depth and pressure between the front and the side of the structure are expressed as an exponential function.

1. 序論

津波は陸上に遡上した後、氾濫流として広範囲に渡って人的・物的被害を引き起こす。2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波災害では、映像を通してその脅威を目の当たりにし、津波の破壊力に対して強烈な印象を我々に残した。津波氾濫流は、先端部の衝撃的な段波波圧とその背後の準定常的な持続波圧の形態と考えられている。1960年のチリ津波以降、構造物前面に作用する段波波圧について、水理実験によってその評価式が提案されている(朝倉ら, 2000, 水谷・今村, 2000)。さらに、東日本大震災以降には、構造物の個数や形状を考慮した実験が行われ、津波波圧の評価式の更なる詳細な検討が行われている(有光ら, 2012, 榊山, 2012)。

一方、持続波圧に関しては、構造物前面および背面の簡易流速の推定法を提案した松富ら(2008)の水理模型実験がある。しかしながら、構造物側面に作用する流体力の評価や前面と側面の流体特性に関しては、余りよく知られていないのが現状と言える。

そこで本研究では、津波氾濫流の準定常部を満たした流れとして、循環式開水路を用いて準定常流を発生させ、その中に設置された模型構造物周りの流体特性を検討する。特に、その前面と側面の水位、流速および圧力の関係を明らかにする。更には、準定常流中の構造物前面および側面の流速の推定を図る。

2. 水理模型実験の概要

(1) 実験装置と方法

実験は、両側面と底面の一部がガラス張りの循環式開水路(計測区間:長さ10m, 高さ0.8m, 幅1.0m)を用いて実施する。開水路上流端より3mの位置に、幅1m, 高さ5cmのアクリルの台を設置し、その上にウレタン樹脂による一辺10cmの立方体の模型構造物を横断面中央の位置に固定して、その縮尺を1/100とする。初期水深 h_0 を5cmとすることにより、アクリルの天端を陸域と見なす。そして、ポンプのバルブを調整して、1.5cmから11cmまでの浸水深となるように循環流を発生させる。

水位計測には、図-1(a)に示すようにアクリル先端から1m前方の位置にサーボ式水位計(ケネック製)を設置し、入射水位 h_i を計測する。さらに、水位計を構造物前面および側面から約1cm離れた位置に設置し、底面流速計(ケネック製)を、その中心が各面から約3cm離れた位置に固定して、それぞれの浸水深およびアクリル天端

(a) 模型構造物、水位計および流速計の各位置

(b) 模型構造物の前面・側面の圧力計の位置

図-1 水理模型実験の概略

1 正会員	博(工)	岩手大学准教授	大学院工学研究科社会環境工学専攻
2 学生会員		岩手大学大学院社会環境工学専攻	
3 正会員	工博	岩手大学長	

表-1 構造物の有無における入射水位 h_i

構造物なし		構造物あり	
Run	h_i [cm]	Run	h_i [cm]
1	0.67	1	0.74
2	1.12	2	1.66
3	1.50	3	2.29
4	2.19	4	2.68
5	2.76	5	3.24
6	4.01	6	4.15
7	5.11	7	5.24
8	5.93	8	6.08
9	7.37	9	7.10
10	8.11	10	8.17
11	9.06	11	—
12	10.65	12	9.95
13	11.15	13	10.69

写真-1 模型構造物周りの準定常流の様子

上近傍の流速を計測する。さらに、構造物前面および側面に作用する圧力計測には、図-1 (b) に示すように構造物前面の中央の位置に底面 ($z=0\text{cm}$) から高さ1cm (底端部 $P_{\beta 1}$)、5cm (中央部 $P_{\beta 2}$)、9cm (上端部 $P_{\beta 3}$)、および構造物側面の高さ1cmの位置に前面 ($x=0\text{cm}$) から1cm (前端部 $P_{\alpha 1}$)、5cm (中央部 $P_{\alpha 2}$)、9cm (後端部 $P_{\alpha 3}$) の各3箇所に圧力計 (共和電業製) を模型内に埋め込むように設置する。各計測器のサンプリング周波数を100Hzと設定し、計測データはA/D変換器を通してパソコンにCSVファイルとして出力される。

(2) 実験条件

実験条件は、構造物のない場合とある場合とし、各浸水深に対して、計測時間30秒間として3~5回の繰り返し計測を行う。このとき、各計測器は全て同期させている。実験で得られたデータは、循環流のために時間的な変化が小さいことから、30秒間で平均した値を解析データとして用いる。

図-2 構造物なしにおける構造物前面の位置での水位 h の時間変化 図-3 構造物の有無における入射水位 h_i と構造物前面および側面の浸水深の関係(h_f : 前面, h_s : 側面)

表-1は、構造物の有無における入射水位 h_i を示す。なお、各水位の値は計測回数で求めた平均値であり、構造物ありのRun11は計測器の不具合による欠損である。構造物ありのRun12では、水塊のせり上がりによる作用で構造物上部が水をかぶり始め、Run13では、構造物を完全に越流している状態であった。

図-2は、構造物なしにおける構造物前面での水位の時間変化を示す。入射水位が小さい条件 (Run5) では、定常な流れであるが、入射水位が大きくなるに連れて、水位変化が大きくなり、定常性が弱まるようになる。実験は、循環流を発生させているが、水位の増大、つまり流速が速くなると、アクリルと水槽底面との段差の影響を受けるようになるため、水面の変動が大きくなると推測される。本実験では、特に入射水位が大きくなる条件の流れを準定常流と見なしている。写真-1は、模型構造物周りを流れる準定常流の様子を示す。構造物前面と側面の水位差が顕著に表れていることがわかる。

3. 実験結果および考察

ここでは、実験で得られたデータを基に構造物周りの各物理量に関する流体特性を検討する。最初に、構造物

図-4 構造物の有無における入射水位 h_i と構造物前面および側面の流速の関係(流れの進行方向を正とし、前面および側面の流速を u_f および u_s とする)

図-5 構造物の有無における側面の流速 u_s と浸水深 h_s の関係

の有無による浸水深や流速の比較を行う。次に、構造物前面および側面に作用する圧力を評価すると共に、前面と側面の各物理量の関係を明らかにする。最後に、構造物前面および側面における流速の推定を図る。

(1) 構造物の有無による浸水深および流速の比較

図-3は、構造物の有無における入射水位 h_i と構造物前面および側面の浸水深の関係を示す。構造物なしの場合、構造物前面の浸水深 h_f と側面の浸水深 h_s との間には、大きな差が見られず、計測位置に依らず一様な浸水深が維持される。しかし、入射水位が増加するに伴い、構造物前面の水位が若干低くなる。この原因として、上述したようにアクリルと水槽底面の段差の影響を受けているためと考えられる。一方、構造物ありの場合、前面と側面の浸水深の間には、入射水位が増加するに連れてその差が大きくなる。 h_f の値は、入射水位の増加に伴い単調比例増加となるが、 h_s の値は、入射水位の増加に伴い低下し、前面の h_f の値よりも0.5倍程度になることがわかる。

図-6 構造物前面および側面の浸水深比 h_s/h_f と無次元入射水位 h_i/h_0 の関係

図-4は、構造物の有無における入射水位 h_i と構造物前面および側面の流速の関係を示す。なお、流れの進行方向を正とする。構造物なしの場合、構造物前面の流速 u_f と側面の流速 u_s の間には、浸水深と同様に差異は見られず、浸水深の増加に伴い単調に増加する。一方、構造物ありの場合、構造物前面近傍では、構造物なしの全反射に近い値の流速になり、逆向きの流れが発生する。側面近傍の流速は、構造物なしと同様に浸水深の増加に伴い単調に増加するが、その値は構造物なしに比べて2倍程度大きくなることがわかる。そこで、構造物側面の流速 u_s と浸水深 h_s の関係を図-5に示す。なお、側面の流速はフルード数($F_r = u_s / \sqrt{gh_s}$)で表し、浸水深は初期水深 h_0 で無次元化したものである。また、図中の破線は $F_r=1$ を示す。構造物なしの場合、側面の流れはいずれも常流であるが、構造物ありの場合、浸水深が初期水深の0.5倍を超えると常流から射流へと遷移する。さらに、初期水深の0.7倍付近で急激に増加して最大のフルード数になることがわかる。

これらより、準定常流中に構造物が存在することによって、構造物側面の浸水深は、入射水位 h_i が8cmを超えるようになると、前面の約0.5倍に低下し、その流速は約2倍も速くなる。さらに、常流から射流に流れの状態が変化することから、入射水位がこの流れの変化に依存するものと推測される。

(2) 水位および圧力の構造物前面・側面の関係

図-6は、構造物前面および側面の浸水深の比 h_s/h_f と無次元入射水位 h_i/h_0 の関係を示す。浸水深比は、入射水位の増加に伴い低下するようになり、構造物を越流する入射水位($h_i/h_0=2.2$)で約5割低下する。これより、浸水深比は、入射水位に対して指数関数的に減少するような関係と見なして、無次元入射水位を用いた次のような近似式として表すことができる。

$$\frac{h_s}{h_f} = \exp\left(-0.4 \frac{h_i}{h_0}\right) \dots \dots \dots (1)$$

(a) 構造物前面

(b) 構造物側面

図-7 構造物前面および側面の圧力と入射水位 h_i の関係

なお、近似式の相関係数は0.85である。

図-7は、構造物前面および側面の圧力と入射水位 h_i の関係を示す。図-7(a)の実線は、各圧力計の位置($z=1\text{cm}$ および 5cm)を基準とした静水圧分布を表す。なお、前面上端部($z=9\text{cm}$)の圧力 $P_{\beta 3}$ は、構造物を越流するような入射水位の場合でさえも、ゼロに近い値であったので省略する。図-7(a)に示す構造物前面の底端部の圧力 $P_{\beta 1}$ および中央部の圧力 $P_{\beta 2}$ は、それぞれ入射水位と単調な比例関係にあり、静水圧に概ね一致する。一方、図-7(b)に示す側面の圧力は、入射水位が大きくなると、その位置によって異なる大きくなり、中央部(P_{s2})、後端部(P_{s3})、前端部(P_{s1})の順で大きくなる。中央部および後端部の圧力は、入射水位に依らず、いずれも正の値を示すが、前端部の圧力は入射水位が 6cm ($h_i/h_0=1.2$)を超

図-8 構造物前面および側面の圧力比 P_s/P_f と無次元入射水位 h_i/h_0 の関係

えるようになると負圧に転じる。この原因として、このときの流れは、図-5に示したように構造物前面では、常流の状態であるが、側面ではフルード数が最大の射流の状態に変化する。ゆえに、構造物前面から側面に水塊が回り込むとき、急激な流れの変化に伴う渦が引き起こされるため、側面前端部で負圧となり、それより背後は正圧となる。さらに、側面中央部では、渦の流れの作用によって、側面と平行な方向の力よりも垂直な方向の力が強くなるため、他の側面の位置に比べて大きな圧力になるものと推測される。なお、構造物前面の角で渦が発生していることを水槽底面のガラス面から目視により確認している。

図-8は、構造物側面の正の圧力 P_s と前面の圧力 P_f の比 P_s/P_f と無次元入射水位 h_i/h_0 の関係を示す。 P_s/P_f の値は、側面の位置に依らず、入射水位の増加に連れて徐々に減少するようになり、側面の圧力は、前面の圧力よりも小さくなる。特に、後端部の圧力比の減衰が大きく、その圧力は、入射水位の増加に伴い前面の圧力の約8割から2割にまで小さくなる。さらに、構造物側面の中央部での圧力は、前面の圧力よりも6~7割程度になり、前端部では4割を下回ることがわかる。この前端部での圧力比は、下限値と見なすことができ、無次元入射水位を変数とした指数関数の関係を適用して、次式のような近似式として表すことができる。

$$\frac{P_s}{P_f} = \exp\left(-2.38 \frac{h_i}{h_0}\right) \dots\dots\dots (2)$$

なお、近似式は図中の実線であり、その相関係数は0.86である。また、図中の破線は、上式の係数2.38を0.23と置き換えたときの式を表し、圧力比の上限値は、式(2)の係数を1/10倍として評価することができると考えられる。

以上より、水位および圧力の構造物前面と側面の関係は、いずれも無次元入射水位を用いた指数関数として表すことができるものと推察される。また、側面の圧力は、

図-9 構造物前面および側面の流速と浸水深の関係

位置によって異なることが明らかとなり、常流から射流へと流れの状態が変化することに依存するもの推測される。

(3) 構造物前面・側面における流速の推定

津波氾濫流の推定には、沿岸津波諸元を基に簡易的な推定法を提案した松富・飯塚 (1998) を参考にして、津波打ち上げ高 R を入射水位 h_i 、陸上氾濫流速 u および浸水深 h を構造物前面と側面の流速 u_f と u_s および浸水深 h_f と h_s のようにそれぞれ対応付けて、準定常流中の構造物前面および側面における各流速の推定を行う。

その結果を図-9に示す。図中の実線は、構造物前面および側面の各フルード数 F_r を係数 α として表した推定式であり、次式のように表される。

$$\frac{u_f}{\sqrt{gh_i}} \cong \alpha_f \sqrt{\frac{h_f}{h_i}}, \quad \frac{u_s}{\sqrt{gh_i}} \cong \alpha_s \sqrt{\frac{h_s}{h_i}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_f = \frac{u_f}{\sqrt{gh_f}}, \quad \alpha_s = \frac{u_s}{\sqrt{gh_s}}$$

これらより、氾濫流速や流体力が危険側となるようなそれぞれの係数 α は、構造物前面では $\alpha_f = 0.57$ (図-9 (a))、側面では $\alpha_s = 1.47$ となる (図-9 (b))。前面の値は、松富ら (2008) が示す危険側の係数 $\alpha=1.1$ と比較すると小さくなり、約0.5倍に相等する。しかし、側面の値は、若干

大きく見積もられることがわかる。この要因として、準定常流では、段波による氾濫流に比べて、構造物前面の流速は小さくなり、側面では常流から射流に流れが急激に変化することによって、流速が速くなるためと推測される。

4. 結論

循環式開水路を用いて実施した水理模型実験によって得られたデータを基に、準定常流中における構造物周りの水位、流速および圧力に関する流体特性を検討した。以下に主要な結論をまとめる。

- (1) 構造物側面の浸水深は前面の約0.5倍に低下し、その流速は約2倍も速くなることがわかった。
- (2) 構造物側面の浸水深が初期水深の0.5倍を超えると、常流から射流に流れの状態が変化することを明らかにした。
- (3) 水位および圧力の構造物前面と側面の関係は、無次元入射水位を用いた指数関数として表せることを提示した。
- (4) 構造物側面の圧力は、常流から射流に流れの状態が変化すると、側面の位置によって、その値に違いが生じ、前方部で負圧になることがわかった。
- (5) 準定常流中の構造物前面および側面の流速は、フルード数を用いた推定式で評価できる可能性を示唆した。

今後の課題として、津波氾濫流の重要な形態である衝撃的な段波波圧の実験を実施し、構造物前面と側面の各物理量の比較を行い、準定常的な持続波圧との違いを明確にする必要があるものと考えられる。

謝辞：本研究は、科研費（基盤（B））24360199、25282113および科研費（基盤（C））26350473の助成を受けた成果である。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則 (2000)：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 911-915。
- 有光 剛・大江一也・川崎浩司 (2012)：構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 68, No.2, I_776-I_780。
- 榊山 勉 (2012)：陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 68, No.2, I_771-I_775。
- 松富英夫・飯塚秀則 (1998)：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。
- 松富英夫・岡本憲助・佐藤和典 (2008)：浸水痕跡に基づく簡易氾濫流速推定法の基礎的検討，水工学論文集，第52巻，pp. 673-678。
- 水谷 将・今村文彦 (2000)：構造物に作用する段波波力の実験，海岸工学論文集，第47巻，pp. 946-950。