

津波氾濫流による抗力の評価におけるフルード数と抗力係数*

中央大学研究開発機構 松富 英夫

1. はじめに

陸上に遡上した津波の先端部背後の入射氾濫流（準定常流）による建築物等の構造物への津波荷重は抗力として評価される¹⁾。抗力の評価には抗力係数 C_D が必要であるが、抗力係数の入射フルード数 F_r への依存性や値などがよく判っていない。

本研究は孤立した直方体建築物等を対象に抗力係数の入射フルード数への依存性や値とともに実津波の入射フルード数の値域を既存の諸結果の検討を通して考察する。

2. 入射氾濫水深と建築物等の背面浸水深の関係

津波の入射氾濫流（非定常流）が建築物等に衝突し過ぎる過程において、氾濫流のエネルギー損失域は大きく二域に分けられよう。一つは建築物等の前面側での反射段波や跳水形成などによるエネルギー損失で、もう一つは建築物等の前面から下流側でのものである。

前者でのエネルギー損失（局所的に増加の場合もある）は次式で評価されよう²⁾。

$$\frac{h_f}{h_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{v_f}{v_i} \right)^2 + \zeta_i \right\} \frac{v_i^2}{gh_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{v_f}{v_i} \right)^2 + \zeta_i \right\} F_r^2 \quad (1)$$

ここで、 h_f は建築物等の前面における最大浸水深（氾濫流衝突初期の上方へのスプラッシュによるものは除く）、 h_i と v_i は津波の最大入射氾濫水深とそのときの氾濫流速、 v_f は建築物等の前面における流速、 ζ_i は建築物等の前面側における広義のエネルギー損失係数、 g は重力加速度である。建築物等の前面側に開口部がない場合は $v_f=0$ である。

後者でのエネルギー損失は次式で評価されよう³⁾。

$$C_v^2 = \frac{1}{1 + \zeta} \cong \frac{v_i^2}{2g(h_f - h_r)} \quad (2)$$

ここで、 C_v は流速係数、 ζ は建築物等の前・背面間でのエネルギー損失係数、 h_r は建築物等の背面における最大浸水深（現地調査）または建築物等の前面における最大浸水深時の背面浸水深（水理実験）である。

ζ_i 、 ζ や C_v は水理量ばかりでなく、建築物等の大きさ、形状や建築物等に対する入射氾濫流の流向、流れの非定常性等にも依存するため^{3), 4)}、今後多くの経験を積んで定めていく必要がある。

式(1)と(2)から入射氾濫水深 h_i と建築物等の背面浸水深 h_r の関係として次式が得られる。

$$h_r \cong h_i \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\zeta - \frac{v_f^2}{v_i^2} - \zeta_i \right) F_r^2 \right\} \quad (3)$$

* Froude number and drag coefficient in the evaluation of drag force due to a tsunami inundation flow by Hideo MATSUTOMI

ここで、 $F_r = v_i / \sqrt{gh_i}$ で、 $\zeta \leq \zeta_i + v_f^2 / v_i^2 + 2 / F_r^2$ が満たされる必要がある。式(3)は以下で利用される。

3. 先端部背後の入射氾濫流による抗力の抗力係数

津波氾濫流先端部の定義は曖昧である。波力や波圧の時間波形から定義される場合は氾濫流衝突初期の衝撃的な時間波形（認められない場合もある）が治まるまでと考えればよからう⁵⁾。この曖昧さが氾濫流先端部背後の最大波力の同定に混乱を来す可能性がある。

津波の入射氾濫流による抗力の評価法には二つの視点があろう。一つは主に既往津波を対象とする視点で、建築物等の構造物の影響を受けた水理量で抗力を評価する方法である。もう一つは主に想定津波などの将来津波を対象とする視点で、建築物等の構造物の影響を受けていない入射氾濫流の水理量で抗力を評価する方法である。もちろん、どちらの視点の方法であっても、対象津波が同一の諸元・条件下であれば、評価結果は同じでなければならない。

(1) 既報の非定常流実験式からの検討

松富ら⁶⁾は、既往津波を対象とする視点から、非定常流による水理実験に基づいて抗力式における投影面積 A の評価に直方体建築物等の背面浸水深 h_r を用いた場合の抗力係数 C_{Dr} の評価実験式（建築物等に開口部がない $v_f=0$ の場合の回帰式）として次式を提示している。

$$C_{Dr} \cong 13 F_r^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (4)$$

ここで、 F_r は代表流速として入射氾濫流速 v_i を想定し、代表水深として背面浸水深 h_r を用いた場合のフルード数、 λ (%) は入射氾濫流横断方向の建築物模型間の開度（ $=100 \times (1 - \text{建築物模型幅} / \text{実験水路幅})$ ）である。投影面積 A の評価に h_r を用いた場合の抗力係数 C_{Dr} は開度 λ へ有意に依存することが特徴である。

式(3)を用いて式(4)を書き換えれば次式を得る。

$$C_{Dr} \cong 13 \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1 - (\zeta - \zeta_i) F_r^2 / 2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (5)$$

式(5)の F_r は代表水深として最大入射氾濫水深 h_i を用いた場合のものとなっている。

式(5)を入射氾濫流の諸元で評価された抗力係数 C_{Dir} へ書き換えるには式(5)に h_r / h_i を掛ければよく、その場合の抗力係数評価式として次式を得る。

$$C_{Dir} \cong 13 \left(1 - \frac{1}{2} (\zeta - \zeta_i) F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1 - (\zeta - \zeta_i) F_r^2 / 2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (6)$$

式(4)は直方体建築物模型を実験水路の底面と片側壁の両方に密着させた水理実験で得られたものである。したがって、氾濫流中に孤立して建つ直方体建築物模型に対する抗力係数とするには、過去の実験的知見⁶⁾や文献的知見⁷⁾から推して、式(6)に0.6程度を掛ければよいと判断される。その場合の抗力係数評価式として次式を得る。

$$C_{Dir} \cong 7.8 \left(1 - \frac{1}{2} (\zeta - \zeta_i) F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1 - (\zeta - \zeta_i) F_r^2 / 2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{-0.29} \quad (7)$$

開度 λ が100%の場合は完全に孤立した直方体建築物等におけるものとなる。ただし、式(4)は λ の範囲が67~83%の水理実験で得られたものであることに注意を要する⁶⁾。

今、実際にはあり得ないが、定常な一様水深の入射汜濫流が水平床上の孤立した直方体建築物等に衝突し、建築物等の前面側において汜濫流のエネルギーの損失や局所的な増加が一切ない場合を想定しよう。この場合は広義のエネルギー損失係数 $\zeta_i=0$ で、実際の入射汜濫流に比べて大きめの h_i や v_i を想定していることになる。また、建築物等の前面から下流の流れでは建築物等にとって実際に起こり得る最悪な場合（大きな入射汜濫流速，すなわち大きな抗力）を想定して、エネルギー損失係数 $\zeta=0.235$ （流速係数 $C_v=0.9^3, 4)$ に相当)を採用しよう。これらの想定の場合、式(7)は次式となる。

$$C_{Dir} \cong 7.8(1-0.1175F_r^2) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-0.1175F_r^2\}}} \right)^{0.56} \lambda^{0.29} \quad (8)$$

また、実津波における入射フルード数 F_r の値域は $0.9 \times (0.7 \sim 2)^8 = 0.63 \sim 1.8$ 程度となる。

松富ら⁶⁾は投影面積 A の評価に前面浸水深 h_f を用いた場合の抗力係数 C_{Df} の評価実験式(回帰式)として次式も提示している。

$$C_{Df} \cong 2.4F_r^{-0.62} \quad (9)$$

投影面積 A の評価に h_f を用いた場合の抗力係数 C_{Df} は開度 λ へ有意に依存しないことが特徴である。

式(9)に対して投影面積の評価に h_r を用いた場合と同様な議論を展開すれば、順に次式群を得る。

$$C_{Df} \cong 2.4 \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-(\zeta-\zeta_i)F_r^2/2\}}} \right)^{-0.62} \quad (10)$$

$$C_{Df} \cong 2.4 \left(1 + \frac{1}{2}(1+\zeta_i)F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-(\zeta-\zeta_i)F_r^2/2\}}} \right)^{-0.62} \quad (11)$$

$$C_{Df} \cong 1.44 \left(1 + \frac{1}{2}(1+\zeta_i)F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-(\zeta-\zeta_i)F_r^2/2\}}} \right)^{-0.62} \quad (12)$$

ここで、 C_{Dir} は入射汜濫流の諸元で評価された抗力係数で、式(11)は式(3)でなく、式(1)を用いて導かれている。

$\zeta_i=0$ ， $\zeta=0.235$ とした場合、式(12)は次式となる。

$$C_{Df} \cong 1.44 \left(1 + \frac{1}{2}F_r^2 \right) \left(\frac{F_r}{\sqrt{\{1-0.1175F_r^2\}}} \right)^{-0.62} \quad (13)$$

式(8)と(13)が孤立した直方体建築物等に直角に汜濫流が入射する場合の抗力係数評価実験式で、両式の計算例を図-1に示す。実線部分が水理実験（評価実験式）の範囲（適用範

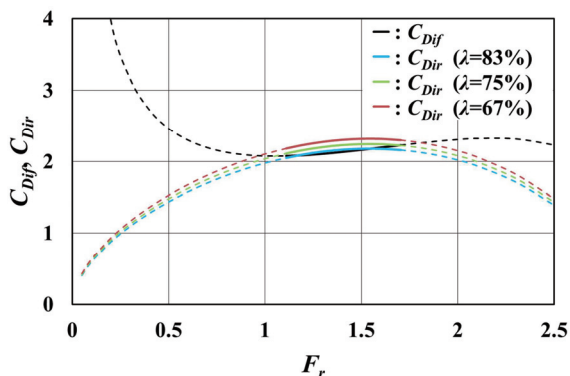


図-1 松富ら⁶⁾の抗力係数評価実験式(8)と(13)の入射フルード数 F_r への依存性（実線の範囲は水理実験の範囲）

図)である。図によれば、両式から評価された抗力係数値はほぼ同じである。ほぼ同じことに式(6)と(11)への0.6掛けといった掛け数値が関係しないこと、 ζ の値を変化させれば式(8)と(13)から評価される抗力係数値の差が拡大することから、 $\zeta_i=0$ と $\zeta=0.235$ の組み合わせは本水理実験値に対してほぼ妥当な一組み合わせであることを示している。

図-1によれば、松富ら⁶⁾の水理実験範囲内 ($v_i/\sqrt{gh_r}=1.2\sim 2.1$ 。これを $\zeta_i=0$ 、 $\zeta=0.235$ として書き換えれば $v_i/\sqrt{gh_i}=1.1\sim 1.7$)における抗力係数値は2.1~2.3である。この値は自然河川を利用した定常流による水理実験で得られた桑村⁹⁾の射流領域 ($v_i/\sqrt{gh_i}=1.0\sim 1.8$)における水理実験値 1.2 ± 0.2 に比べて1.8倍強とかなり大きい。参考までに松富らの抗力係数値を桑村のものとも一致させるには式(6)と(11)へ0.6掛けでなく、0.33掛けにする必要がある。1.8倍強という大きな違いの理由として汜濫流（非定常流）と定常流における水深係数 h_f/h_i や波力機構の違いが考えられる。一般に水深係数は汜濫流におけるものの方が大きい¹⁰⁾。したがって、入射汜濫水深 h_i が同じ場合、汜濫流における前面浸水深 h_f の方が大きく、波力も大きいことになる。波力機構の違い例であるが、水平床上的汜濫流では汜濫流先端部が建築物等の前面鉛直壁へ衝突した後に鉛直方向へ投げ出され、投げ出された水塊が後続の汜濫流へ落下着水したときに最大波力が発生する 경우가多々ある^{11), 12)}。このときに汜濫流が建築物等の背面に達（影響）していない場合もある。

桑村⁹⁾は定常流による抗力の大きさは建築物等への背面全静水圧を差し引いた全静水圧の0.6~0.8倍と指摘している。一方、松富ら⁶⁾の水理実験における抗力の大きさ（汜濫流による最大波力に占める造波抵抗力の割合は不明）は全静水圧の2倍程度である。したがって、松富らの抗力は桑村のもの平均的に2.9倍弱である。抗力係数比が1.8強、抗力比が2.9弱という両比の違いは $\zeta_i=0$ と想定したことにより松富らの水理実験における入射汜濫流による流入運動量 $h_i v_i^2$ が、換言して、式(1)から理解されるように入射汜濫流の h_i と v_i が過大評価（既述）されることが一因していると考えられる。

(2) 既報の定常流実験値からの検討

松富ら¹³⁾は胸壁模型を越流した定常流による孤立した直方体建築物模型への波力を含む

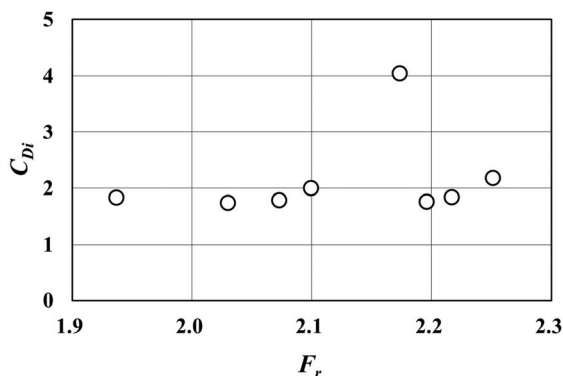


図-2 松富ら¹³⁾の定常流実験値に基づく抗力係数 C_{Di} の入射フルード数 F_r への依存性

水理実験値を提示している。その実験値に基づいた抗力係数 C_{Di} を図-2に示す。入射フルード数 F_r の値域が弱跳水形成の狭い範囲に限られているが、抗力係数値は前面浸水深と波力が最も小さい条件下のデータを除いて2前後（1.7～2.2）である。この値は図-1に示したもののより少し小さい程度である。松富ら^{10), 13)}はこれらの実験値と氾濫流によるものとの比較も行っており、波力は氾濫流によるものの方が大きい、両者の差はそれほど大きくない。したがって、抗力係数の差もそれほど大きくないと推定され、図-1と2の平均的な抗力係数間の差の傾向と整合する。

(3) その他の検討

松富ら¹⁴⁾は水平床上の孤立した直方体建築物に対して定常な一様水深の入射氾濫流、静水圧、無摩擦を想定し、抗力係数が2以上であることや入射フルード数 F_r にほとんど依存しないことを理論的に考察している。

池谷ら¹⁵⁾は水平床上の孤立した直方体建築物模型に対して非定常流による水理実験を実施し、最大波力に対する抗力係数は射流域において2程度で、ほぼ一定であることを提示している。

(4) 現状での判断

以上の諸検討から、水平床上の孤立した直方体建築物等への津波先端部背後の準定常的な入射氾濫流による抗力の抗力係数は定常流の場合⁹⁾と同様に射流域ではほぼ一定で、現状の知見ではその値としてこれまでと同じ2.1程度¹⁾の採用が推奨される。

4. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- 1) 津波の入射氾濫水深 h_i と水平床上の孤立した直方体建築物等の背面浸水深 h_r の関係式(3)を提示した。
- 2) 水平床上の孤立した直方体建築物等への津波先端部背後の準定常的な入射氾濫流による抗力の抗力係数は定常流の場合⁹⁾と同様に射流域ではほぼ一定で、その値として現状の知見ではこれまでと同じ2.1程度¹⁾の採用が推奨される。

謝辞：本研究の遂行にあたり科学研究費（基盤研究(C)，20K05041，代表：松富英夫）の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，pp.563-592，2015.
- 2) 松富英夫，決得元基，齋藤雅大：開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.326-330，2013.
- 3) 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.
- 4) 松富英夫，岡本憲助，佐藤和典：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.673-678，2008.
- 5) 有川太郎：津波の事典，朝倉書店，pp.162-163，2007.
- 6) 松富英夫，大向達也，今井健太郎：津波氾濫流の構造物への流体力，水工学論文集，第48巻，pp.559-564，2004.
- 7) 椿東一郎：水理学II，森北出版，p.272，1974.
- 8) Matsutomi, H. and K. Okamoto: Inundation flow velocity of tsunami on land, Island Arc, Vol.19, Issue-3, pp.443-457, 2010.
- 9) 桑村 仁：氾濫流に建つ直方体構造物の抗力と揚圧力，日本建築学会建築系論文集，Vol.81，No.720，pp.219-227，2016.
- 10) 松富英夫，小泉拓也，照井裕介，加藤広之，岩瀬浩之：定常と非常実験の違いが胸壁越流後の津波の氾濫流やRC造建築物への波力に及ぼす影響，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74，No.5，pp.1225-1230，2018.
- 11) 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.
- 12) 水谷夏樹，梅田尋慈，池本将大：構造物に衝突し打ち上がった水塊の落水によって生じる波力特性について，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.73，No.2，pp.919-924，2017.
- 13) 松富英夫，小泉拓也，加藤広之，岩瀬浩之：胸壁越流後の津波氾濫流とそのRC造建築物への波力，日本地震工学会・大会－2017梗概集，P-14，2017.
- 14) 松富英夫，有川太郎，嶋津 朋，決得元基：開口部を有するRC造建築物の前面浸水深，広義のエネルギー損失係数と移動・転倒条件，第14回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2651-2660，2014.
- 15) 池谷 毅，末長清也，福山貴子，秋山義信，鈴木紀雄，舘野公一：反射特性を考慮した陸上構造物に作用する津波波力の評価法，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.71，No.2，pp.985-990，2015.