

京都大学工学部 学生会員 ○三輪 真揮
 京都大学防災研究所 正会員 米山 望
 京都大学防災研究所 正会員 戸田 圭一

1. はじめに

近年増加している予測が困難な集中豪雨の影響より、河川の氾濫や地下空間への浸水など水難事故が多発している。そこで、流水が人体にどのような力を及ぼすかを知ることで防災意識を向上させる必要がある。本研究では、流体挙動解析手法として米山ら^[1]のVOF法を用いた三次元数値解析手法を選択し、まず秋山らの水理模型実験にこれを適用し解析手法の検証を行う。次に人体を角柱で近似した模型をつくり、これに解析手法を適用し人体が受ける流体力を算出した。

2. 流体挙動解析手法の概要

用いた基礎方程式のうち、連続方程式、運動方程式および流体体積の移流方程式を示す。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1) \quad , \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'}) \quad (2) \quad , \quad \frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

ここで、 u_i : 流速の各方向成分、 ρ : 流体密度、 p : 圧力、 G_i : 単位質量あたり外力の各方向成分、 ν : 動粘性係数、 $\bar{\quad}$: レイノルズ平均量、 $'$: レイノルズ平均量からの変動量、 F : 流体充填率である。また、乱流の評価式には標準型 k-ε モデルを用いた。

これらの基礎方程式を直交座標系上で離散化して SIMPLE 法に基づいて解析を行った。(3)式の解析にはVOF法に従って、ドナ-アクセプタ法を用いた。

3. 流体挙動解析手法の検証

秋山ら^[2]は、非水没状態の角柱の抗力係数を求める実験をしており、この実験を解析で再現し解析手法の検証とする。実験模型を図1に示す。図1の角柱にかかる抗力を求め、以下の式を用いて抗力係数を逆算した。

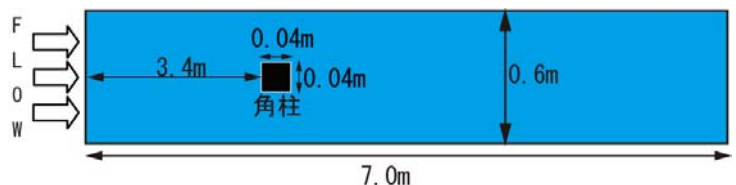


図1 実験模型平面図

$$D = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2$$

ここで、 D : 抗力 C_d : 抗力係数 A : 投影面積 v : 流速

計算時間刻み幅 $\Delta t = 2.0 \times 10^{-3}$ s, 連続式誤差許容最大値 $D_{max} = 1.0 \times 10^{-5}$, 水の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ m²/s、壁での流速境界条件をフリースリップとした。

抗力係数を実験値と解析値で比較した結果が図2である (B : 水路幅, d : 角柱幅であり今回は幅比 B/d=15 のケースを行った)。以上より実験をおおむね再現できたといえる。

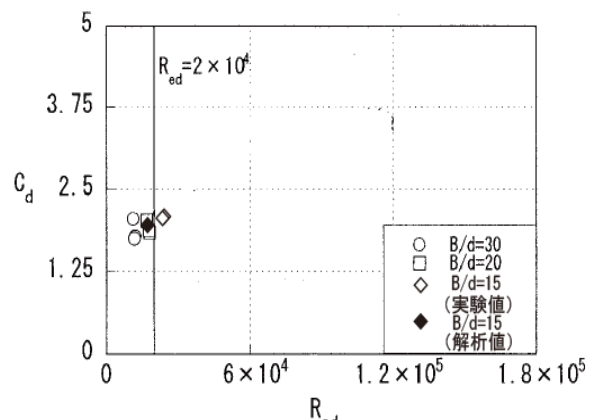


図2 結果の比較

4. 人体が受ける流体力の解析

まず、人体を図3に示すような角柱で表現した(ただし脚の縦幅は0.12m)。そして図4の水路中に設置した水路模型を作った。次に、この模型に対して単位幅流量を $q = 0.1 \sim 0.78(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ の間で変18 ケースを解析し、人体が下流方向に受ける流体力を算出した。計算時間刻み幅は流量により変化させ $\Delta t = 2.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{ s}$ の範囲とし、連続式誤差許容最大値 $D_{max} = 1.0 \times 10^{-5}$ 、水の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、物体境界条件をフリースリップとした。 $q = 0.78(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ のケースで人体にかかる圧力の分布を図5に示した。これより脚前面にかかる圧力は静水圧分布になることがわかる。また、脚にかかる力の作用点を求めたと地面から0.17mの位置となった。解析で得られた結果の一部を表1に記載した。また、以下の式で求められる単位幅比力も合わせて記載した。

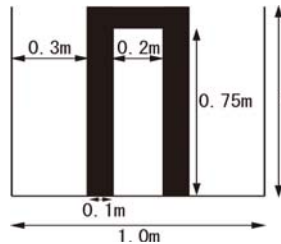


図3 人体正面図

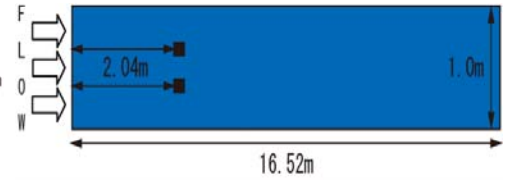


図4 水路模型平面図
化させ、 \pm

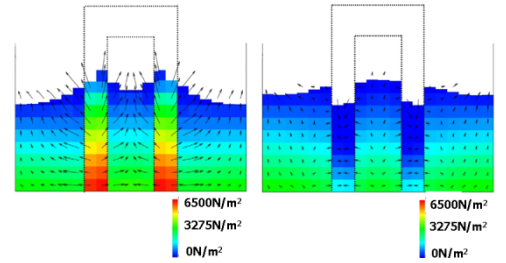


図5 圧力分布図(左:脚前面 右:脚後面)

流量($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	比力(m^3/m)	流体力(N)
0.1	0.018	19.08
0.2	0.043	46.24
0.3	0.074	74.67
0.4	0.103	71.79
0.5	0.141	155.09
0.6	0.179	201.8
0.7	0.228	323.2
0.78	0.261	356.72

表1 解析結果(流量, 比力は単位幅)

$$M = \frac{h^2}{2} + \frac{u^2 h}{g}$$

ここで、 M :単位幅比力(m^3/m) h :水深 u :流速
大西ら^[3]の研究によりこの値が0.125の時に成人男性の避難が困難であるとされている。この指標を用いると単位幅流量 $q = 0.5(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ を超えるとこの水路では避難が困難であると予想される。そして全ケースでの流量と流体力, 比力の相関関係を示したグラフが図6, 図7である。これより流量と流体力, さらに比力にも相関関係があることがわかる。これより、この水路においては、流量が決まれば人体が受ける力や比力を予測することができるといえる。

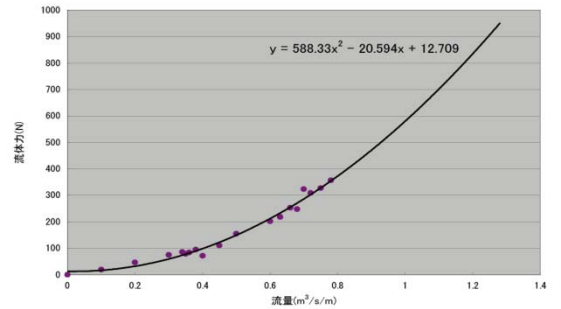


図6 流量 - 流体力関係図

5. おわりに

VOF法を用いた三次元数値解析手法により抗力係数を求める角柱実験がおおむね再現できた。また、人体を角柱で近似した模型にこの流体挙動解析手法を適用し人体が受ける流体力を解析したところ、この水路においては流量と流体力に相関関係があることがわかった。

今後は、人体の形状に丸みを持たすなど、より現実に近い形状で同様の解析を試みるとともに、人体を用いた実験を行って解析手法の詳細な検証を行う予定である。

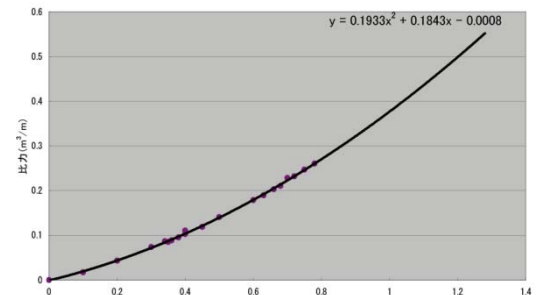


図7 流量 - 比力関係図

参考文献 [1] 米山 望・松山昌史・田中寛好: 1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集 No.705/II-59, pp.139-150, 2002.5 [2] 秋山壽一郎・重枝未玲・小林俊彦・大田和正: 定常自由表面流中の正角柱に働く流体力, 水工学論文集, 第46巻, pp.827-832, 2002. [3] 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一・島田広昭・川中龍児: 地下空間浸水時の避難困難度評価法に関する検討, 年次学術講演会講演概要集, 第62回, pp.435-436, 2007.