

第II部門 水流階段避難シミュレーションによる流体力に関する検討

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○内貴 啓太  
 京都大学大学院工学研究科 学生員 三角 聡  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 原田 英治  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

地下空間における浸水被害の対策には、浸水状況を想定した避難シミュレーションの実施による流体力評価などの安全性の検討が必要である。数値シミュレーションにおける歩行姿勢、歩行者モデルで採用する歩行者形状の取り扱い、流体力評価に影響するため、重要な検討項目として挙げられる。本研究では、歩行者モデルの脚形状の違いが水流階段における避難者への流体力の影響について計算力学的な観点から検討した。

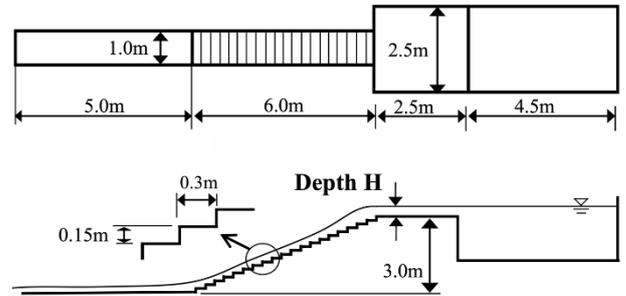


図-1 シミュレーションの計算領域

2. 数値解析手法

2.1 流体解析手法

流れ場の解析には、標準 MPS 法に高精度化手法を加えた MPS-HS-HL-ECS-GC-DS 法<sup>1)</sup>を用いた。

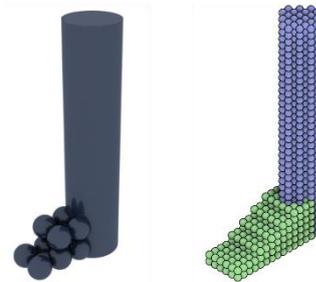


図-2 model 1 (左), model 2 (右)

2.2 群集行動シミュレータ

歩行者の挙動には個別要素法 (Distinct Element Method : DEM) 型の歩行モデルを用いた。流れ場から人間要素にはたらく流体力の評価には、後藤ら<sup>1)</sup>の固液混相流解析手法である質量・運動量保存型の DEM-MPS 法(Model3)を適用した。本研究で用いる二足歩行モデルの計算には、著者らのグループで開発された人の歩行姿勢を考慮したモデル<sup>2)</sup>を用いた。

3. 片脚固定時の流体力

水流階段上に脚モデルを固定したシミュレーションを実施し、片脚に作用する流体力を既往実験結果と比較した。図-1 に示す計算領域は石垣らの実験<sup>3)</sup>をもとに与えた。流体粒子には直径 0.05m の MPS 粒子を用いて計算し、脚要素には図-2 に示す爪先部が低解像度の脚モデル (model 1) と高解像度脚モデル (model 2) を計測対象とした (図-2)。計測条件は、

表-1 model 1 (上) と model 2 (下) の補正值

補正值 $\beta$		水深 $H$ [m]			
		0.1	0.2	0.3	0.4
model 1					
段数位置 [段目]	1	2.39	1.87	2.52	2.35
	10	39.21	2.45	2.60	2.41
	17	1.54	1.83	2.34	1.91

補正值 $\beta$		水深 $H$ [m]			
		0.1	0.2	0.3	0.4
model 2					
段数位置 [段目]	1	1.65	1.53	2.12	1.98
	10	32.40	2.14	2.22	2.06
	17	1.50	1.63	2.13	1.63

脚モデルを固定する段数 : 1,10,17段目の三段階と、各段に対する水深 :  $H = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$  の 4 ケースに設定した。表-1 にシミュレーションの計算値を既

往の実験値で除すことで求めた値  $\beta (= F_{li\_sim}/F_{li\_exp})$  を示す。なおシミュレーション上の流体力は、脚モデルに設けた支点まわりの流体力モーメントを支点から踝位置までの距離で除して踝位置への集中荷重として換算した値とした（第4章も同様）。表-1 から model 2 は model 1 と比較して全ケースで  $\beta$  が1に近づいたことがわかる。これは、爪先部幾何形状の解像度の向上により実験結果に対して再現性が向上したと考えられる。

#### 4. 登段中の流体力

水流階段の登段シミュレーションを実施し、登段中の脚モデルに作用する流体力について検討した。脚モデルは第3章で効果が確認された model 2 を採用した。

計算領域は第3章と同様である。また、水深は  $H = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{m}$  の4ケースに設定した。モデルに与える歩行速度は、馬場ら<sup>4)</sup>による浸水階段避難の実験の計測結果から推定した。

一例として、水深  $H = 0.3\text{m} \cdot 10 \sim 13$  段目区間の登段1サイクル ( $t = 6.6 \sim 8.0\text{s}$ ) のケースに注目する。脚の各 DEM 粒子に作用する流体力の大きさを表すカラーコンターと、同時刻における脚モデルと流体粒子の挙動を示すスナップショットを0.2s間隔で図-3に示す。脚を水流中から引き抜く動作と脚を再び水流に入れる動作で流体力が大きく作用している。一方で、脚が水流から完全に離れた状態と左脚から右脚への重心移動の状態では流体力が小さい値を示すことが図-3 からわかる。脚の挙動と流体力の分布から、水流に抗う動作において、大きな移動距離を示す脚モデル端部付近の爪先構成要素には、流速との相対速度が顕在化するため、他の構成要素と比較して、強い流体力を示すものと考えられる。また、アニメーションにして確認すると、流体力のカラーコンター分布には強い変動が確認され、階段上を流れる流体の水面の状況が複雑であることがうかがえるが、シミュレーション結果の妥当性の検討には、水理実験による計測データが必要である。

#### 5. おわりに

本研究では、地下空間での浸水被害に備えた適切

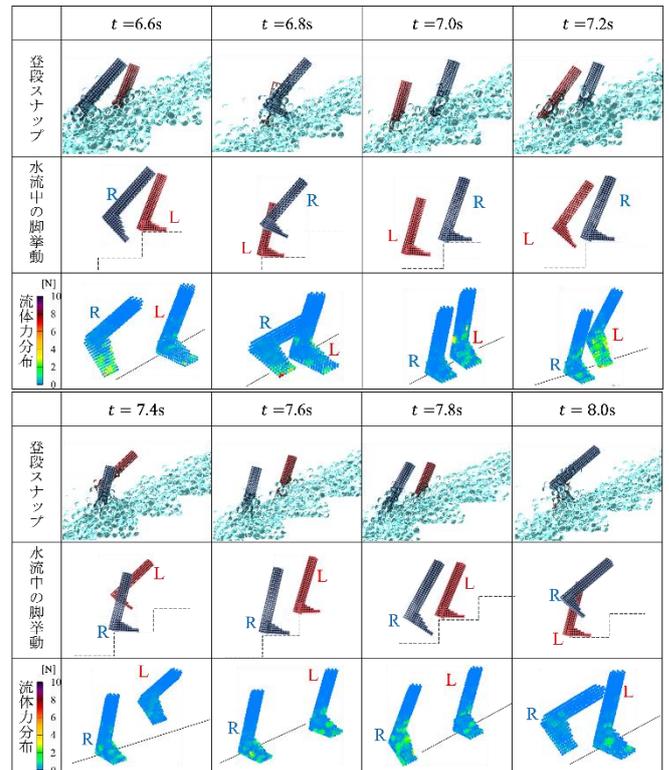


図-3 流体力の分布図とスナップショット

な避難計画策定に向けた群集避難シミュレータの開発の取り組みの一つとして、水流階段登段中の避難者への流体力について検討した。今後は、より正確な流体力評価のため、脚モデルの幾何学的形状のさらなる改善だけでなく流体粒子の解像度の向上も検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 後藤仁志：粒子法—連続体・混相流・粒状体のための計算科学—，森北出版，289p，2018。
- 2) 三角聡：水中歩行姿勢を考慮した二足歩行モデルの開発，京都大学工学部地球工学科土木工学コース卒業論文，2022
- 3) 石垣泰輔，戸田圭一，馬場康之，井上和也，中川一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，水工学論文集，Vol.50，pp.583-588，2006。
- 4) 馬場康之，石垣泰輔，戸田圭一，中川一：実物大模型を用いた地下浸水時の避難困難度に関する実験的研究，土木学会論文集 F2(地下空間研究)，Vol.67，No.1，pp.12-27，2011。