

第II部門

水中歩行実験による膝下歩行姿勢の検討とモデル化

京都大学工学部

学生員 ○三角 聡

京都大学工学研究科

正会員 原田 英治

京都大学工学研究科

正会員 後藤 仁志

1 はじめに

地下構造の水害に対する安全性を評価するため、地下浸水域における大規模な避難シミュレーションが必要とされている。著者らのグループは、2つの円柱で避難者の二足歩行を模擬し、DEM-MPS法により足要素と浸水域との相互作用を精緻に扱う数値モデルを開発してきた(例えば川崎ら¹⁾)。しかしながら、既往の二足歩行モデルでは歩行姿勢が考慮されておらず、人の歩行過程の再現性に課題があった。そこで本研究では、避難者の膝下の歩行姿勢を考慮した二足歩行モデルを開発する。さらに、開発した改良型二足歩行モデルを用いて数値シミュレーションを実施し、得られた結果から歩行者が受ける流体力を簡易的に評価する流体力関数を提案する。

2 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²⁾を用いた。群集行動の解析には各歩行者挙動の追跡・評価が可能な個別要素法(Distinct Element Method: DEM)型の歩行モデル¹⁾を用いた。流れ場から人間要素に働く流体力は後藤らの固液混相流解析手法であるDEM-MPS法(model3)²⁾を基礎に評価した。二足歩行モデルの概形は川崎らの既存モデル¹⁾と同様に表現し、その歩行動作は膝下の歩行姿勢をより精緻に再現するよう改良した。

3. 水中歩行姿勢を考慮した歩行動作

二足歩行モデルの歩行姿勢は図-1に示す4つのパラメータで制御される。ここに、 x_{heel} , z_{heel} : 踵の相対位置の進行方向・高さ方向成分, θ_{toe} , θ_{leg} : 爪先・脚円柱の角度である。水深10cm, 20cm, 30cm, 40cmの浸水条件下で水中歩行実験を実施し、映像解析から各パラメータの一周期の時系列データを得た。シミュレーションにおいて各時刻の各パラメータの値とその時間微分は次式に示すようにFourier級数展開で補間して与えた。

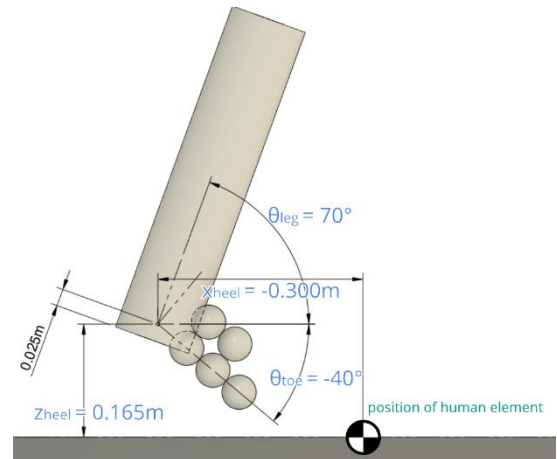


図-1 歩行姿勢を決定するパラメータ

$$\theta_w^{k+1} = \theta_w^k + c\Delta t ; c = 2\pi \frac{u}{L} \quad (1)$$

$$\hat{\theta}_w^k = \theta_w^k + \begin{cases} 0 & \text{if right leg} \\ \pi & \text{if left leg} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Psi^k = a_{\Psi 0} + \sum_{n=1} (a_{\Psi n} \cos n\hat{\theta}_w^k + b_{\Psi n} \sin n\hat{\theta}_w^k) \quad (3)$$

ここに、 t : 時刻, k : 計算ステップ, u : 人間要素の歩行速度, L : 実験から与える一周期の歩幅, θ_w : 歩行の位相, Ψ : 歩行姿勢を決定する各パラメータ, $a_{\Psi n}$, $b_{\Psi n}$: Ψ のFourier級数展開の n 次の係数である。爪先と脚円柱を表現する固体粒子の位置と速度は各パラメータとその時間微分を用いた回転行列・平行移動行列を連鎖的に作用させて決定した。

4. 流体力関数の提案

計算コストが大きい流体解析を省略して歩行速度 u と水深 h から簡易的に水中歩行の流体力を求める流体力関数を次式に提案する。この種の関数の提案は、大規模領域の浸水避難の大略的な予測に有効と考えられる。

$$F'_{li}(u', h') = a_1 + a_2 u' + a_3 h' + a_4 u'^2 + a_5 u' h' + a_6 h'^2 + a_7 u'^3 + a_8 u'^2 h' + a_9 u' h'^2 + a_{10} h'^3 \quad (4)$$

$$F'_{li} = \frac{F_{li}}{F_{li}^*} ; u' = \frac{u}{u^*} ; h' = \frac{h}{h^*} \quad (5)$$

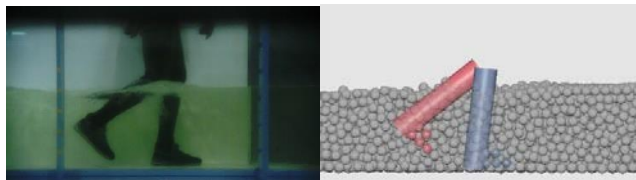


図-2 水深 40cm 歩行速度 0.714m/s の計算過程

表-1 流体力関数の各項の係数

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1.28×10^{-2}	-3.69×10^{-2}	-3.64×10^{-1}	-6.26×10^{-3}	1.04
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
2.79	1.44×10^{-2}	4.61×10^{-1}	-1.79	-6.79

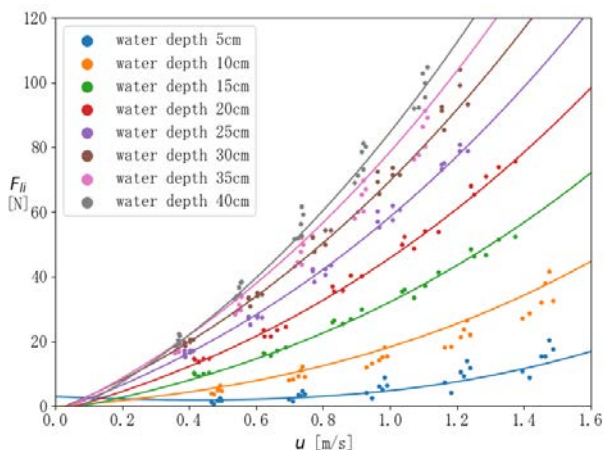


図-3 各水深における歩行速度と流体力の関係

ここに、 F_{ii} 、 F'_{ii} ：人間要素に作用する流体力とその無次元量、 u 、 u' ：人間要素の歩行速度とその無次元量、 h 、 h' ：水深とその無次元量、 a_i ：各項に関する係数($i=1 \sim 10$)である。歩行速度、水深、流体力それぞれに対してドライ条件下の歩行速度($u^* = 1.4m/s$)、被験者の身長($h^* = 174cm$)と重力($F_{ii}^* = 666N$)を定数として無次元化した。

係数 a_i を導くため、壁に囲まれた $12m \times 0.8m$ の領域に一人の人間要素を配置し、水深と歩行速度の条件を系統的に変えた 240 回の水中歩行シミュレーションを実施した。流体粒子の粒径は $5cm$ である。図-2 に水中歩行実験の写真および計算結果スナップショットを示す。実験写真と比較して良好な水中歩行過程が再現できているといえる。

各シミュレーションにおいて流体から二足歩行モデルに働く流体力の時間平均を評価し、重回帰分析により各係数を求めた(表 1)。流体力の分布とそれを表現する流体力関数を図-3 に示す。

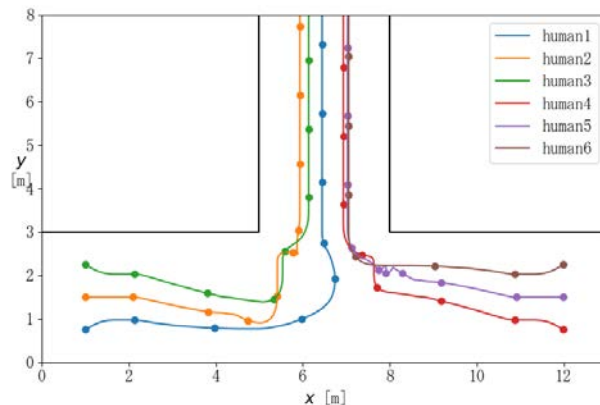


図-4 人間要素の経路(○：2秒間隔の位置)

5. 群集計算への応用例

合流路を対象に本研究の流体力関数を用いて群集避難シミュレーションを実施した。水深 $30cm$ の浸水条件下で対向する 6 人が合流し出口に向かう。図-4 に計算で得られた歩行者の軌跡を示す。本シミュレーションは流体力関数を用いたことにより、実時間 10 秒の計算が CPU 時間 8.3 秒で完了した。一方で、流体力を粒子法による流れ場の計算から求めて同様の群集避難シミュレーションを実施した結果 129,600 個の流体粒子を用いて実時間 10 秒の計算が CPU 時間 75 分 42 秒で完了した。約 500 倍の計算時間短縮を達成した。

6. おわりに

本稿では、膝下の歩行姿勢を考慮した改良型二足歩行モデルを提案した。開発したモデルを用いて水深と歩行速度の条件を系統的に変えた水中歩行シミュレーションのケーススタディを実施し、膝下部に作用する流体力を合理的に見積もるための流体力関数を提案し、群集計算への応用例を示した。今後は市街地の多様な地下空間構造と多人数の避難者で構成される条件下で本モデルの妥当性を検討したい。

参考文献

- 1) 川崎順二, 原田英治, 広瀬将真, 後藤仁志, 水口尚司: 歩行抵抗の数値流体力学的評価による津波浸水時の水中避難行動モデルの高度化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 75(2), pp. I_1387-I_1392, 2019.
- 2) 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.