防潮堤改修に伴う津波来襲時の砂浜からの群集避難プロセスの改善評価

Discrete Crowd Model for Evaluating Access to Hinterland across Seawall in Refuge from Tsunami Flood

後藤仁志¹・原田英治²・高橋秀文³・山口一哉⁴・丸山由太⁵・高橋和秀⁶・森 貴之⁶

Hitoshi GOTOH, Eiji HARADA, Hidefumi TAKAHASHI, Kazuya YAMAGUCHI,
Yuta MARUYAMA, Kazuhide TAKAHASHI and Takayuki MORI

Evaluation of an efficiency of crowd refuge is one of the indispensable factors for a planning of seawall improvement. We performed a crowd refuge simulation by tsunami at Omaehama beach, Nishinomiya city by using the crowd refuge simulator based on a lagrangian model. Effects on a crowd refuge process by improving an access route to the beach across the seawall have been investigated by comparing the present- and the planned-layout of the stairway and the slope across the seawall.

1. はじめに

防潮堤によって市街地と隔絶された状態で存在する砂浜を親水空間として活用するには、アクセス改善が不可欠であるが、それによって砂浜の利用者が増加することが見込まれるので、津波来襲時の砂浜利用者の安全な退去に関しても検討が必要である。

津波氾濫による浸水エリアを示すハザードマップの開示など、避難啓発の試みは、多くの自治体によって行われているが、階段やスロープ等の避難施設のレイアウトが災害時の群衆避難行動に及ぼす影響の定量的評価に関しては必ずしも充分とは言えない現状にある。現状の施設における避難時間測定には、避難訓練が参考になる(切迫状態のパニック避難と訓練は必ずしも対応しないが)。しかし、改修後の施設は現存しないので、避難訓練の実施は不可能であり、改修の効果を定量的に評価することは容易ではない。この問題の解決には、仮想現実としての群衆避難行動を個々人の行動の相互作用をも考慮して追跡できるラグランジュ型モデルに基づく数値シミュレーション以外に有効なツールは無い。

ラグランジュ型の群衆避難行動モデルとして個別要素法が挙げられるが、著者らは、従来から著者らが流砂・漂砂力学の諸課題に対して適用してきた個別要素法型の粒子コード(Gotoh・Sakai, 1997; 後藤ら, 2001)をベースに、群衆行動を良好に再現できるように改良した群衆

行動シミュレータを構築してきた。また、津波避難段階での群衆の昇段過程(後藤ら, 2004)や津波来襲による高台への群衆避難過程(後藤ら, 2005)等を通じて、開発した群衆行動シミュレータの避難計画に対する有用性を示してきた。

本研究では、これまで有用性が確認されてきている群衆行動シミュレータを用いて、都市域の実在海浜を対象に津波来襲時の群衆避難シミュレーションを実施し、海浜へのアクセスルートの改修が、群衆避難プロセスに及ぼす影響を検証した。そして、避難時間短縮効果が改修案にあることを確認するとともに、避難者視点での避難状況のCGを作成し、その活用法についても検討する。

2. 群衆避難シミュレータの概要

個々の人間の運動は、並進および回転の運動方程式：

$$\dot{\mathbf{u}}_h = (\mathbf{F}_{hint} + \mathbf{F}_{aw})/M_{hi} ; M_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^2}{4} \quad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_h = \mathbf{T}_{hint}/I_{hi} ; I_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^4}{32} \quad (2)$$

で記述される。ここに、 $\mathbf{F}_{hint}$ ：要素間(人間/人間および人間/壁)の作用力ベクトル、 $\mathbf{F}_{aw}$ ：人間要素の歩行力(推進力)ベクトル、 $\mathbf{u}_h$ ：人間要素の移動速度ベクトル、 M_h ：人間要素(シリンダー形状を想定)の質量、 σ_h ：人間要素の比重(=0.98)、 ε_h ：シリンダーの体積と人間の実質体積の差を表す係数(=0.24)、 d_{hi} ：人間要素径(=0.379m)、 ω_h ：人間要素の回転速度、 $\mathbf{T}_{hint}$ ：要素間のトルク(人間/人間および人間/壁)、 I_{hi} ：人間要素の慣性モーメントである。なお、式中の「 $\cdot$ 」は時間微分を示す。

要素間作用ベクトルおよびトルクについては個別要素法の標準的な取り扱いに従って記述し、要素間作用力の発現領域は、視野範囲(人間要素の正面から $\pm \pi/3$)お

1 正 会 員 博(工) 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻

2 正 会 員 博(工) 豊田工業高等専門学校准教授 環境都市工学科

3 兵庫県尼崎港管理事務所 所長

4 兵庫県尼崎港管理事務所 課長補佐

5 修(工) 日本アイ・ビー・エム株式会社

6 学生会員 京都大学大学院修士課程都市環境工学専攻

写真-1 中央階段の現地の様子

図-1 対象計算領域と初期避難者配置

および人間相互の心理的平衡距離（ $=0.976\text{m}$ ；清野ら（1996）による実測値）を考慮して設定されている。また、要素間作用力の発現領域内の要素間には、法線および接線方向に弾性スプリングおよび粘性ダッシュポットを配置して、人間/人間および人間/壁要素間の作用力を算定する。また、各個体は、存在位置に応じて与えられる避難方向に沿って運動し、個々の移動速度には、視界内の群衆密度に応じて平衡値を設定し、平衡歩行速度に到達するまでは等加速度運動するとして、個体を追跡する。なお、この避難行動シミュレータは、小関・渡部（1967）が実施した群衆歩行観測から得た群衆密度と歩行速度の関係を良好に再現することが示されている（後藤ら，2004）。

3. 防潮堤改修に伴う群衆避難の改善評価

(1) 計算条件と改修計画の内容

対象海岸は、兵庫県西宮市の御前浜である。御前浜は

表-1 年齢・性別・最大歩行速度の内訳(上：平常時，下：イベント時)

イベント時			
年齢・性別構成	人数（人）	比率（％）	歩行速度（m/s）
10～39 歳男性	279	34.7	1.45
10～39 歳女性	273	33.9	1.23
40～69 歳男性	60	7.5	1.19
40～69 歳女性	49	6.1	1.04
70 歳以上男性	21	2.6	0.99
70 歳以上女性	33	4.1	0.89
小児（5～9 歳）	90	11.2	1.06
計	805	100.0	—

西宮砲台南側からの眺め
裏に東階段1がある

西宮砲台南西側からの眺め
微かに東階段2が見える

写真-2 東階段1および東階段2の眺め

背後の市街地と直立型防潮堤で隔てられ、防潮堤の数ヶ所に浜へのアクセスを担う階段が設けられているが、この階段の一つを全面改修して、スロープと緩傾斜の階段を併設するアクセス改善が検討されている。なお、改修が検討されている現地の中央階段を写真-1に示す。

シミュレーションは、現地の入込み者数調査に基づき、最大規模に相当する800人規模の利用者が存在する状況での津波来襲を対象とした。避難発令後に一斉避難を開始し、砂浜から防潮堤裏側の道路に達した時点で避難完了とするが、個々の人間要素は浜から離れる方向にそのまま道路を進む。先にも述べたように、改修前後の避難過程の検討には個人行動レベルからの避難状況把握が不可欠であるため、個々の人間要素の避難行動を詳細に追跡することができる個別要素法型の群衆行動シミュレータを用いる。

図-1に対象計算領域および現地入込み者調査に基づく避難者の初期配置（図中の[・]）を示す。避難者の内訳（年齢・性別・最大歩行速度）を表-1に示す。避難開始時に海中に位置する避難者に関しては、水深に応じて歩行できずに泳いで避難する領域と歩行可能な領域に分けて避難速度を切り替えた。陸域での最大歩行速度に対して前者は25％，後者については西畑ら（2005）の実験を参考に50％の避難速度として、水深による影響を考慮した。なお、西畑らによると、歩行できる部分の避難速度は水深と避難者の身長比によって変化し、水深が浅くなるに連れて速くなるが、ここでは簡単のため一定値と

図-2 改修前後の周辺状況と避難方向(左:改修前, 右:改修後)

図-3 避難過程のスナップショット(上:改修前, 下:改修後)

した。

砂浜から防潮堤裏側までの経路は、西スロープ、中央階段、東階段1、東階段2の4つであり、避難者は初期位置から最も近い経路を選択することとする。また、東階段1は多くの避難者には砲台の死角となるため、砲台周辺の人のみが利用することとし、東階段2は砂浜から眺めた場合、見落とされやすい位置に存在するため使用しないとした。写真-2は現地写真であるが、砲台の南から東階段1を直接見ることはできない。また、東階段2については、非常に目に付きにくい場所にある上に、階段前に雑草が繁茂してアクセスの障害となっている。避難過程に影響の大きい中央階段付近の標準避難方向を改修前後について比較して図-2に示す。

(2) 防潮堤改修前後の避難過程の比較

図-3に避難過程の全体図をスナップショットを用いて示す。中央階段の改修によって登り口が西側の階段と東

側のスロープに離れた影響で、群衆の避難経路が変化していることが時刻 $t=60$ s および時刻 $t=120$ s から明瞭に確認できる。また、時刻 $t=120$ s および時刻 $t=180$ s の砂浜に残っている避難者の減少から、改修後は改修前と比較して中央階段を利用した避難過程が速やかになる様子が見て取れ、中央階段の改修の効果が窺える。なお、西スロープを使用して避難する西側付近の計算領域については、改修の効果は不明瞭で、改修前後の避難過程の様子に顕著な変化は確認されない。

図-4に中央階段付近に注目したスナップショットを示す。時刻 $t=30$ s では、避難者が階段やスロープの登り口に集まり始める状況が示されており、この時刻では改修前後ともに顕著な混雑は無い。時刻 $t=60$ s では、登り口付近への集まる避難者数の増加が確認される。また、改修前の階段登り口付近の群衆の停滞状況から局所的に大きな混雑が示され、上り下り階段とも密集状態での移

図-4 中央階段付近の避難過程のスナップショット(上:改修前,下:改修後の西階段側および東スロープ側)

図-5 累積避難完了者数の時系列

図-6 中央階段部の累積避難完了者数の時系列

動となっている様子が窺える。一方、改修後の西側階段および東側スロープでは、避難者数の増加は認められるものの、西側階段での避難者の過密化した避難状況は示されない。また、避難者の増加が顕著な東側スロープでも渋滞は無く、概ね一様に群衆が列を成して避難している過程が確認できる。改修後の中央階段では西側の中央階段と東側のスロープの2つの避難経路に群衆が分散し、改修前と比較して混雑が緩和されたため、改修前の階段で示されたような渋滞は発生せず、改修前の避難過程と比較して円滑な避難が可能になったと考えられる。なお、このような傾向は、時刻 $t=120$ s 以降のスナップショットからも理解できる。

図-5に津波警報発令による避難開始からの累積避難完了者数の時系列を示す。全体の避難完了時間について見ると、改修後も20秒程度の短縮であり顕著な改修効果は確認されないが、5分後の避難完了者の割合に目を向けると改修前の80%に対して改修後がほぼ100%と、中央階段改修の避難率向上に対する効果が確認できる。なお、改修後の時刻 $t=300$ s 以降の時間は、初期に海中に居た避難者が西スロープを使用して避難する過程を示しており、中央階段改修の効果が直接影響を及ぼす範囲でないことを付記しておく。改修前後の効果を浮き彫りにするために、中央階段を利用する避難者の観点から累積避難完了者数の時系列を図-6に示す。改修前後の中央階段部の利用者数は498人と同じであるが、避難完了時間に約200秒の大幅な短縮が示され、避難時間短縮に対する改修効果が明瞭に確認される。また、改修前の時系列が概ね一定勾配で推移していることから、改修前の避難階段は処理能力が限界に近い飽和状態であることが読み取れ、現状の中央階段では、これ以上の避難効率の向上は困難であることが分かる。

(3) 避難者視点からの避難状況

避難行動シミュレータから得られた数値データをCGを用いて加工すると、実際の避難状況がイメージし易くなるため、避難計画の有効な情報源になると考えられる。改修後に中央階段の東側スロープを利用して避難する避難者を抽出して、避難者視点で見たCGの代表例を図-7に示す。なお、真上からのスナップショットに示した矢印方向が避難経路である。このような周辺施設や樹木等の対象領域の詳細および人間の挙動を具体的に表現したCGによる仮想現実空間は、平面図上に群衆行動を点集合として表現したプロット図と比較して、圧倒的に避難

図-7 東側スロープを利用して避難する避難者視点からの眺め

状況のイメージがし易くなることが分かる。また、圧迫感や開放感といった避難施設の空間配置が視野を通して避難者の心理に与える影響の検討にも活用できる可能性があるため、この種のCGを用いたアニメーションは避難施設の設計だけでなく避難状況の模擬体験ツールとして、避難学習にも役立つと考えられる。

4. おわりに

本研究では、個別要素法型の群衆行動シミュレータを用いて、実在する海岸を対象に防潮堤改修前後の群衆避難行動過程のシミュレーションを実施し、改修後の計画で避難時間短縮が見込まれることを確認した。また、避難者視点での避難状況をCGを用いて示し、その活用法の可能性を検討した。

現在の群衆行動シミュレータは、2次元モデルによって人間行動を表現する擬似3次元的な取り扱いから群衆の空間的な避難行動を表現している。そのため、人間/人間および人間/壁要素間の接触は同一平面上で判定され、個々の避難者要素の転倒に関するモーメントは表現されていない。狭小空間における群衆の過密状況では、群衆の将棋倒しといった転倒現象が群衆避難行動を考える上で重要なポイントになる。今後、3次元モデルの開

発を進めて、現行の2次元モデルによる群衆シミュレータによって超過密状況になると予測された空間に対しては、別途に3次元モデルを適用し、より詳細な避難計画の提示が可能になるような展開も考えたい。

参考文献

- 小関憲章・渡部貞清 (1967) : 群衆旅客流の交差, 日本建築学会論文報告集号外, p. 762.
- 清野純史・三浦房紀・龍本浩一 (1996) : 被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について, 土木学会論文集, 第537/I-35, pp. 233-244.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2001) : 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程, 土木学会論文集, No.691/II-57, pp. 133-142.
- 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎 (2004) : 個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の避難シミュレーション, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1261-1265.
- 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎 (2005) : 津波氾濫時の市街地内群衆避難の個体ベースシミュレーション, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1251-1255.
- 西畑 剛・森屋陽一・田村 保・龍本浩一・三浦房紀 (2005) : 津波浸水時の避難条件に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1256-1260.
- Gotoh, H. and T. Sakai (1997) : Numerical Simulation of Sheetflow as Granular Material, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, Vol.123, No. 6, pp. 329-336.