

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

後藤仁志*・原田英治**・久保有希***・酒井哲郎****

本稿では、個別要素法型の粒子コードを基に、ヒューマンスケールの群衆間相互作用を加味して構築された群衆避難行動シミュレーターを用いて、小規模市街地住民の津波避難過程を対象とした検討を実施した。避難規則（避難ルートに関する申し合わせ）の有無が避難効率の向上に与える影響の検討と避難ルートが避難時間に及ぼす影響の検討を実施し、適切な避難規則の導入と避難ルートの増設が、避難時間の短縮に有効であることを示した。さらに、家屋倒壊による避難ルートの遮断がもたらす避難過程への影響についても検討した。

1. はじめに

スマトラ沖地震による津波災害の凄まじい映像は人々に津波防災の重要性を明確に認識させ、市民意識は急速な高まりを見せている。津波の直撃を受ける地域住民にとっては迅速な避難が生存のための必須要件であり、安全な避難路の確保が急務となっている。東南海・南海地震については和歌山県南部で地震発生から10～15分での津波到達が予想され、高台への迅速な避難のための避難階段の建設や避難タワーの計画など、市町村ごとの取り組みが進んでいる。限られた予算を有効に活用し、迅速に避難路の整備を行うには、土地利用や道路網形態など地域ごとの特性に配慮した避難計画に最適な避難ルートの選定が不可欠である。一方、災害時の切迫した避難と同様の状況を平時の訓練等で再現するのは不可能であり、計画した避難ルートの適切性を検討する手段は決め手なく状況にある。

そこで、本稿では、避難主体である人間行動の個性を考慮してヒューマンスケールで避難過程を解析することを目的とし、個別要素法を基礎とした群衆行動シミュレーターを構築して、800人規模の小市街からの背後の段丘上の広場への避難過程のシミュレーションを実施する。既往の避難行動のシミュレーションでは、この種のモデルは比較的少ないが、ヒューマンスケールのモデルとしては、個別要素法に基づく清野ら(1996)のモデル、磁場における電荷の運動とのアナロジーを想定した平井・樽井(1977)および岡崎(1979)のモデルがある。

本稿では、従来から著者らが漂砂力学の諸課題に適用してきた個別要素法型粒子コード(Gotoh and Sakai, 1997; 後藤ら, 2001)を基に開発された群衆避難行動シ

ミュレーター(後藤ら, 2004)を改良して、津波氾濫時の市街地内群衆避難を対象とした検討を実施する。

2. シミュレーションモデル

(1) 要素の運動方程式

現実の避難階段は3次元場であるが、避難階段部における運動負荷の増加に伴う要素の移動速度の低下を考慮し、個々人の身長などの体格差が群衆運動に及ぼす影響を除外すれば、群衆の昇段運動は平面2次元場で解析可能である。本稿では、後藤ら(2004)と同様に、計算は平面2次元場で実施する。

群衆を構成する要素(人間)の運動方程式は、並進および回転について

$$M_{hi} \frac{d\mathbf{u}_{hi}}{dt} = \mathbf{F}_{hint} + \mathbf{F}_{aw} \dots \dots \dots (1)$$

$$I_{hi} \frac{d\omega_{hi}}{dt} = T_{hi} \dots \dots \dots (2)$$

と記述する。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、 $\mathbf{F}_{aw}$:人間要素の自律歩行力(推進力)ベクトル、 $\mathbf{u}_h$:人間要素の移動速度ベクトル、 T_h :人間要素に作用するトルク、 ω_h :人間要素の回転速度であり、人間要素の質量 M_h および慣性モーメント I_h については、シリンダー形状を仮定して、

$$M_{hi} \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^2}{4}; I_{hi} \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^5}{32} \dots \dots \dots (3)$$

と与えた。ここに、 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、 d_h :人間要素径である。

人間要素径については、Fruin・長島(1974)による人体楕円の断面積と等価な断面積を有する円の直径 $d_h = 0.52 \text{ m}$ を用いた。なお、この要素径に対して、 $M_h = 60$ (体重60 kgの成年男子)を想定して逆算すると、 $\varepsilon_h = 0.178$ となる。

(2) 要素間作用力

通常の個別要素法では、要素が接触しない限り要素間

* 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻
** 正 会 員 工博 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科
*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
**** フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻

表-1 計算条件

ケース	ルート数	右	左	中央	ゾーン数	右(人)	左(人)	中央(人)	避難ルール	通行止
1	2	○	○	×	2	400	400	0	なし	なし
2	2	○	○	×	2	300	500	0	あり	なし
3	3	○	○	○	3	200	200	400	なし	なし
4	3	○	○	○	3	240	320	240	あり	なし
5	2	○	○	×	2	300	500	0	あり	あり

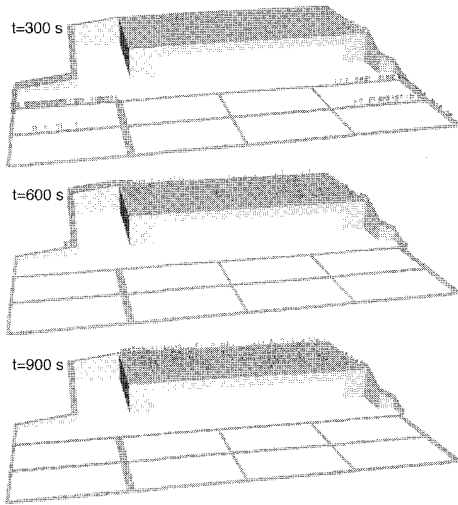


図-4 ケース1の瞬間像

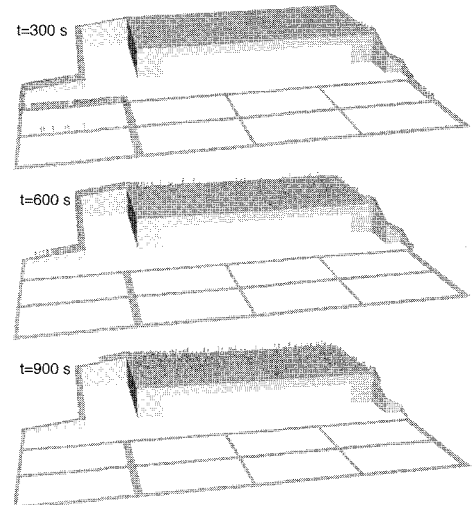


図-5 ケース2の瞬間像

完了時間がほぼ同一になるように各避難ルートを使用する人数配分が最適化されている条件を意味する。一方、避難ルール「なし」は初期位置と避難路入り口までの距離が最短になるように群衆が避難路を選択し避難する条件を意味する。

群衆は、初期値には一つの区画内に100人がランダムに配置され、計算開始と同時に各区画の中心位置から放射状に移動して区画周辺の道路に向かう設定とした。また、避難ルートを通して避難場所（高台）入り口に到達すると、進行方向の数密度が小さい方向を検索しつつ予めランダムに設定された避難場所の任意の地点へ向かう設定となっている。

個別要素法のモデル定数は、小関・渡部(1967)が7m幅員の道路で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概ね満足するように、 $k_{hn}=3.56 \times 10^3$ N/m, $k_{hs}=1.37 \times 10^3$ N/m, $c_{hn}=2.08 \times 10^4$ Ns/m, $c_{hs}=1.29 \times 10^4$ Ns/m, $\Delta t=2.0 \times 10^{-3}$ sと設定した。

(2) 2経路の群衆避難過程

本稿のシミュレーターを用いれば、任意地域における避難シミュレーションを実行することが可能であるが、ここでは、一般的な状況を想定し、特定地域を対象とは

しない。なお、計算に用いた階段モデルの標高差、勾配などは既設の避難階段の状況を参考にした。

図-4にケース1のシミュレーション結果の瞬間像を示す。ケース1では避難ルールがないので、右ゾーンの住民400人が右ルート、左ゾーンの住民400人が左ルートを使って高台へ避難こととなる。時刻 $t=300$ sの右ルートの瞬間像には階段での登坂荷が左ルートと比較して大きいにもかかわらず右ルートを通った先頭の数人が既に高台に到達して避難を完了している。しかしながら、時刻 $t=600$ sの瞬間像では左ルートを選択した群衆の最後尾は既に左ルートを登坂中であるが、右ルートを選択した群衆の一部は市街地に残留しており、ルート間の避難効率の差が現れている。時刻 $t=900$ sでは左ルートを使用した400人は避難が完了しているが、右ルート上では避難が継続し、800人全員の避難が完了する時間は1170秒であった。このケースでは、左ルートを選択した400人の避難が完了しても、右ルートを選択した400人の避難は完了しておらず、効果的な避難経路の選択がなされていない。そこで、左右避難ルートでの避難完了時間がほぼ同等となるように左右ルートを使用する人数配分を試行錯誤で決定したケース2（避難ルールあり）の

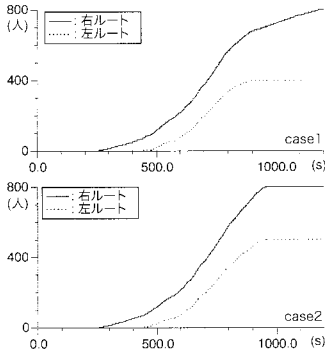


図-6 避難完了者数

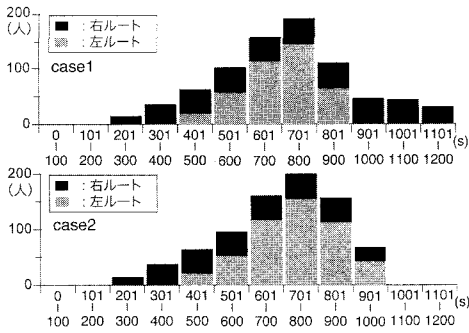


図-7 避難時間の頻度分布 (case 1, case 2)

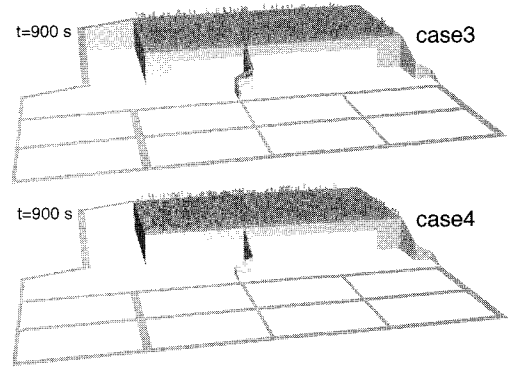


図-8 ケース3, 4の瞬間像

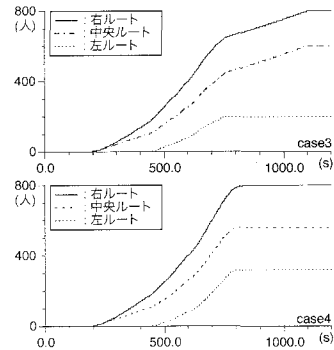


図-9 避難完了者数

瞬間像を図-5に示す。ケース1と同様、時刻 $t=300$ sの瞬間像では右ルートを選択した住民の何人かは高台に到達しているが、この時点での左ルートから高台へ避難を完了した住民はいない。時刻 $t=600$ sでは住民の大部分が左右いずれかの避難経路上に到達しており、時刻 $t=900$ sの瞬間像からは左右ルートを通じての避難がほぼ同時に完了しようとしている様子が確認できる。ケース2における避難完了時間は955秒であり、ケース1と比較して大幅に避難時間が短縮された。左右ルートから高台に避難した人数と避難時間の関係を図-6に示す。ケース1, 2ともに最初の避難完了者が生じる時間は右ルートでは260秒、左ルートでは450秒と同程度であるが、左右各ルートを400人が通るケース1では時刻 $t=880$ s付近で左ルートからの避難が完了し、その後右ルートからの避難が継続している。一方、ケース2では左右ルートともに時刻 $t=955$ s付近で避難が完了しており、効果的に左右避難経路が使用されていることが分かる。また、右ルートと比較して左ルートからの避難効率が高いことが避難完了者数の時間変化から理解できる。幅員の大きい既設道路で勾配も小さい左ルートでは登坂効率が向上するが、モデルでは左ルートの平衡歩行速度を右ルートの2倍に設定することでこの効果をモデル化している。

個々の要素の避難状況をより詳細に検討するために、

図-7にケース1, 2の避難時間の頻度分布を示す。ケース1では左ルートからの避難が右ルートと比較して早く完了するため901秒以降には右ルートのみが分布している。一方、ケース2では、左右ルートが同時刻帯に避難完了する。また、ケース1, 2ともに右ルートの頻度数には何れの避難時間帯にも顕著な格差は認められないが、左ルートでは避難完了時間帯による変化が大きいたことが分かる。つまり、幅員が狭い避難階段である右ルートは常に飽和状態となっていることがわかる。

(3) 3経路の群衆避難過程

避難時間短縮に関する改善策の一つとして避難経路の増設が考えられる。そこで、街区中央から高台へ向けて中央ルートを増設した3避難経路シミュレーション(ケース3, 4)を実施した。図-8に時刻 $t=900$ sにおける各ケースの瞬間像を示す。避難ルールなしのケース3では、中央ルートを使用する人数が左右ルートと比べて過多となってルート上に避難者が残存しており、増設した中央ルートが活かされていない結果となった。一方、避難ルールを導入したケース4では、人数配分が最適化されているので3つのルートが効果的に利用され、避難完了時間の短縮が実現されている。

図-9に各ルートの避難完了者数の累積値を示す。

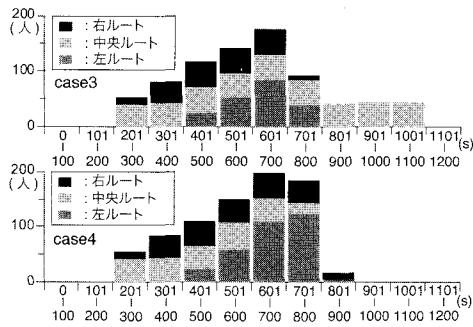


図-10 避難時間の頻度分布 (case 3, case 4)

ケース3、4ともに左右・中央ルートからの避難完了の開始時刻はほぼ同程度であるが、避難ルールのなしのケース3では、左右ルートからの避難が完了しても中央ルートからの避難が継続し、非効率な避難過程であることが分かる。一方、ケース4では左右・中央ルートの避難完了時刻が同程度であり、効果的に避難経路選択がされている。また、図-10の個々の人間要素の避難完了時間の頻度分布からも、同様の様子が示され、避難時間短縮には避難ルールが重要であることが再認識できる。

(4) 倒壊家屋による経路遮断時の群衆避難過程

地震時には津波だけでなく火災や建物倒壊によって避難経路が遮断される可能性がある。特に老朽化した建物は地震によって倒壊する危険性が高く、事前の防災対策を進める上でも建物の倒壊による通行障害が避難過程に及ぼす影響の検討は重要である。そこで、図-3に示された位置で建物倒壊が発生し避難経路が遮断された条件を想定したシミュレーション(ケース5)を実施し、倒壊建物がないケース2のシミュレーション結果と比較した。なお、倒壊建物に遭遇する人間要素の運動は、倒壊建物が視野外に入る、もしくは要素径の10倍の視野範囲に位置する人間要素の過半数が逆走する時、最短経路で倒壊建物を迂回して右ルートの避難階段へ向かうこととした。

図-11に避難完了者数の時系列および避難時間の頻度分布を示す。ケース2と比較して市街地右側の避難経路の遮断による影響によって、右ルートの避難完了時間の遅れ(1001~1100秒の分布)が確認できる。

4. おわりに

本稿では、著者らが開発した個別要素法型粒子コード

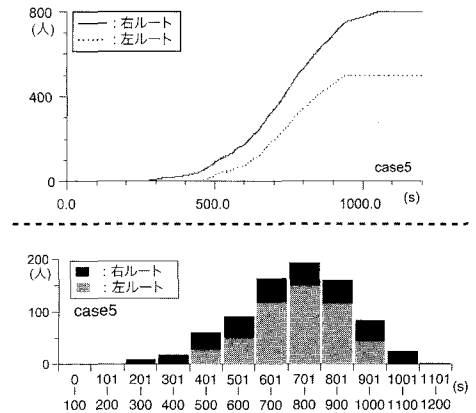


図-11 避難完了者数(上)、頻度分布(下)

による群衆避難行動のシミュレーターを小市街地規模の計算領域に適用し、津波による群衆避難過程を対象とした検討を実施した。

シミュレーションの結果、単なる避難経路の増設では大幅な避難時間短縮は見込めず、住民の効果的な避難には事前に避難ルールを設けることが重要であることが示された。今後、人間行動モデルのディテールを洗練すると同時に、3次元CGの自動生成などの計算結果のグラフィックスの改善についても検討したい。

参考文献

- 岡崎甚幸(1979): 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その1磁気モデルの応用による歩行モデル, 日本建築学会論文報告集, 第283号, pp. 111-117.
- 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一(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, No537/I-35, pp. 233-244.
- 小関憲章・渡部貞清(1967): 群集旅客流の交差, 日本建築学会論文報告集号外, p. 762.
- 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, 第691号/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.
- 平井一正, 梅井賢治(1977): パニック時の群衆の行動とそのシミュレーション, システムと制御, Vol. 21, No. 6, pp. 332-338.
- Fruin J.・長島正充(1974): 歩行者の空間, 鹿島出版社, 206p.
- Gotoh, H. and T. Sakai(1997): Numerical Simulation of Sheetflow as Granular Material, Jour. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg., ASCE, Vol.123, No.6, pp. 329-336.