

都市施設の安全性評価を目的とした群衆挙動の解析的研究

Numerical Study on Behavior of Crowd of People for Evaluation of Safety and Security of Urban Facilities

杉 本 太 一*・目 黒 公 郎**

Taichi SUGIMOTO and Kimiro MEGURO

1. は じ め に

都市施設や都市空間の安全性は、従来は構造物自体の強度を中心に議論されることが多かった。しかし、不特定多数の利用者が存在する空間では、施設の強度に加えて、利用者の避難安全性の観点からの議論が重要になる。ところが、多くの都市施設では商業的な制約条件により、安全に対する明確な根拠なしに設計が行われている事も多い。この背景には、上記のような問題を定量的に議論するための手法が確立されていないことも理由として挙げられる。

ところで近年、都市の避難安全性確保の重要性がクローズアップされる事故が相次いで発生している。中でも2001年の明石市民夏祭り事故では、人間相互の圧迫により多数の死者・重軽傷者が発生した。この例のように、多くの人々が出口に向かって殺到するような状況下では、互いが押し合ったりする人間相互の力学的関係が、群衆の避難行動を支配する要因の中で相対的に大きなウェイトを占めると考えられる。また、このような群集行動は、地下街や地下駅に代表されるような都市施設における火災や大地震時においても発生する可能性があるため、これら群衆挙動のメカニズムを予め検討しておくことが重要である。

そこで本研究では、上記のような一人一人の人間行動の把握が可能で、かつ人間同士にかかる力を定量的に評価できる楕円形要素を用いた拡張個別要素法 (EDEM)¹⁾ による群集行動解析モデルを構築し、事故が発生した歩道橋と日常的に混雑が生じている都内在来線を対象空間としてシミュレーションを行い、都市空間の安全性評価、そして安全対策に生かすための考察を行った。

2. 解析モデルの構築

2.1 楕円形要素を用いた拡張個別要素法

往來のDEMを用いた人間行動の研究では、解析空間に存在する避難者を上方(または下方)から見た2次元問題として考え、接触判定の簡便化のために避難者を円形要素

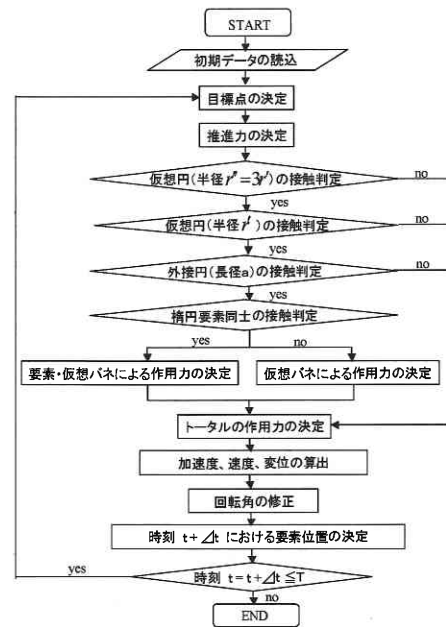


図1 EDEMによる計算手順

として扱っている²⁾。しかし、実際の人間の断面形状は楕円形に近く、特に混み合った状況下での避難行動では、形状の影響が大きくなる。そこで本研究では、要素形状を楕円形としてモデル化し、実際に近い人間行動の解析を行う。

DEMの計算手順は要素間の接触判定を行いながら、個々の要素の運動方程式を前進差分で解きながら追跡していくものである。図1は本研究におけるDEMによる計算手順である。楕円要素の接触判定は数理的に実係数4次方程式の実数根の存在を判定することに帰着する³⁾。しかしこの手法は、接触判定に多くの時間を要するので、計算時間が著しく長くなる。そこで本研究では、図1に示す4段階の接触判定を用いることで大幅なCPU時間の短縮を図っている。

2.2 拡張個別要素法の人間行動への適用

2.2.1 仮想バネの導入

本研究では、「人間相互が物理的に接触する前に接触を

*セコム情報システム株式会社 (中央大学大学院理工学系研究科)

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

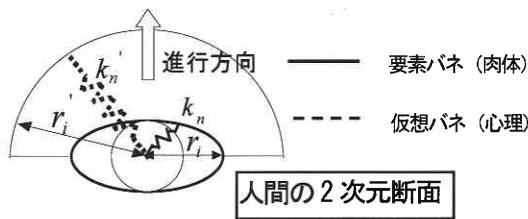


図2 要素バネと仮想バネの配置

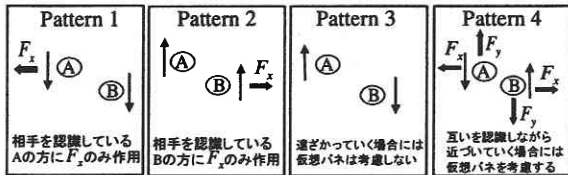


図3 仮想バネの作用する条件

避けようとする心理が働く」ことを表現するためのバネ(仮想バネ)を導入した。この心理的距離を仮想半径と定義すると、各要素は物理的な接触を示す要素半径に対応した要素バネと仮想半径に対応する仮想バネを有することになる。この関係を示したものが図2である。なお、本研究では密度-仮想半径式を導入し⁴⁾、仮想半径を密度の関数とすることで、歩行者周囲の密度上昇に伴い近隣の歩行者のみに注意を払って歩行することを考慮した。

また、従来の仮想バネの概念では、要素の移動する方向に依存せずに仮想バネが作用することになり、非現実的な運動をしてしまう。そこで本研究では、図3に示すような2つの要素の位置と移動する関係(パターン)の中で、仮想バネによる力(F_x, F_y)が作用すると考えられるものにより、仮想バネを考慮した。

2.2.2 回転角と直進性の考慮

「歩行や走行時に、人間は進行方向に対して肩軸を直角にしようとする」という行動特性を表現するために回転角の補正を行う。すなわち、図4(a)に示すように、対象となる要素の回転角と逆向きのモーメントMを与える。Mは回転角 θ が図4(a)のx軸に達するまでの時間を設定することにより決定した。更に、x軸に速やかに減衰するために、Mと逆向きに減衰力(臨界減衰力)を与えた。

次に、「人間は外力が作用しない限り直進しようとする」という行動特性を表現するために、本研究では要素バネと仮想バネが共に作用しない場合、要素が直進するために接線方向の速度の減衰補正を行う。すなわち、図4(b)に示すような要素の接線方向の向きと逆向きの力を速度の大きさに応じて与える。ここで図4(b)の v_0 は仮想半径を半径としたエリアから抜け出した直後の要素の速度であり、 k は v_0/k が漸近線Lと点Aとの距離となることを考慮し、シミュレーションの結果から試行錯誤的に決定した値である。これにより、要素が外力を受けない場合、接線方向の

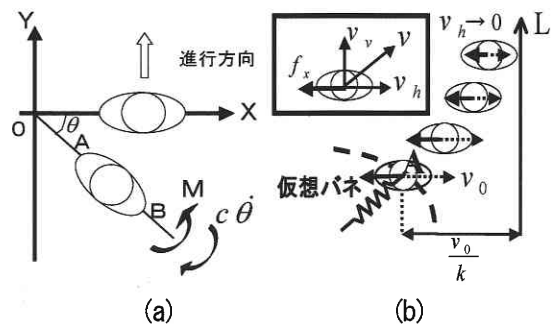


図4 回転角と直進性の考慮

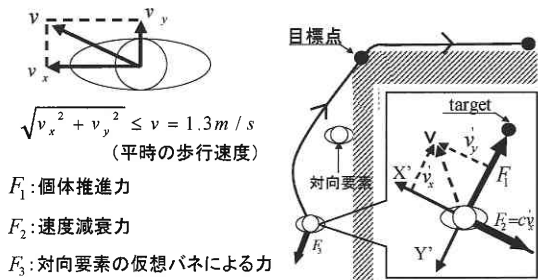


図5 目標点の設定による効果

速度減衰力により接線方向の速度を補正し、人間が直進する行動特性を取り入れることができる。

2.2.3 目標点に応じた個体推進力の設定

個体推進力とは、要素を目的地に向かわせるための力であり、本研究ではこの力の大きさを過去の実験結果²⁾で得られた55.1Nとして採用した。各要素は歩行速度が一定($v=1.30\text{ m/s}$)になるまでこの個体推進力を受けることになる。個体推進力の方向に関しては、従来は二次関数を仮定するモデルや等速円運動を仮定した向心力を与えるモデルが提案されている。しかし、空間の形状に応じた二次関数のパラメータを決定することが比較的複雑であることに加え、速度をコントロールするために空間を様々な領域に分割する必要があった。そこで本研究では対象空間内の各個体にそれぞれ最短距離となる目標点を設定し、その目標点の方向に個体推進力を与えることにした。その際、目標点までの移動中に障害物や他の要素の影響を受けて最短経路から逸れた場合には、2.2.2で説明した接線方向の速度減衰力により軌道修正を図る。この関係を示したものが図5である。

3. シミュレーション結果

構築した解析モデルを用いて、明石市民夏祭り事故が発生した朝霧歩道橋を対象空間とした群衆歩行解析及び、日常的に混雑が生じている都内在来線を対象空間とした地震時の満員電車内の乗客の挙動解析を行った。図6に対象空間と初期配置を示す。

3.1 歩道橋上の群集歩行解析

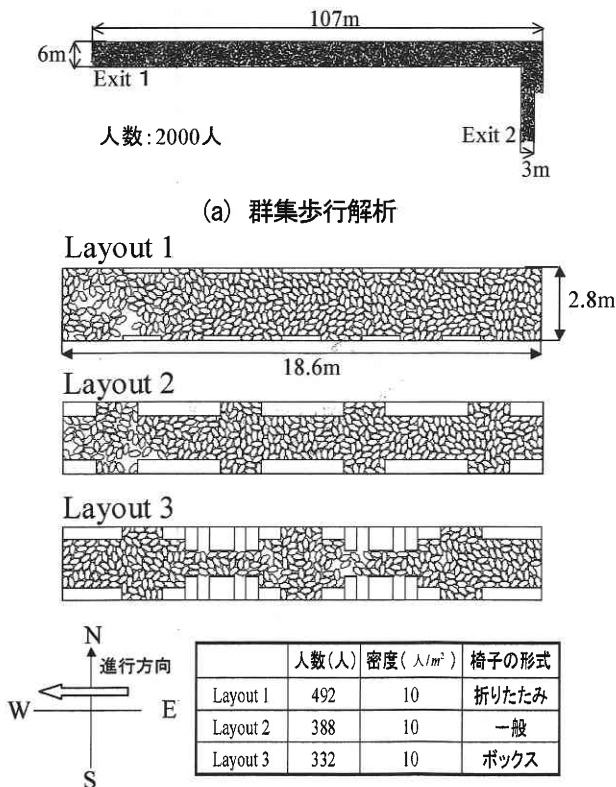
明石市民夏祭り事故では、歩行者への適確な交通整理対策が執られない状況で無制限に群集を両方向から流出させたことが、事故を発生させた主な原因のひとつとして考えられている。そこで本研究では、一方向に流出する場合と二方向に流出する場合の二通りの解析を行い、流出方向規制による効果を考察する。図7は解析結果を示したものである。二方向流出では、対向流があるために空間の各所で滞留が起り、一方向流出と比較すると、スムーズに目的地に移動できていないことがわかる。図8は各ケースについて歩行者に作用した最大圧迫力の分布を示している。case2では、対向流が無くなるために要素相互の衝突が減少し、群衆に対する圧迫力が低減されている。

以上により、群集の流出方向を規制することで、歩行者に作用する圧迫力を大きく軽減できることが確認できた。

3.2 地震時の満員電車内の乗客の挙動解析

1995年の兵庫県南部地震では列車の脱線、軌道変状などの大きな鉄道被害を受けた。ただし、地震発生時刻が早朝だった関係で、幸いにも鉄道利用者に死亡者はでていない。しかし地震の発生時刻が通勤ラッシュ時であった場合、鉄道被害による人的被害は甚大なものになったと考えられる。本研究では、通勤ラッシュ時に地震が発生し、70km/hで走行する列車が急ブレーキをかけた時の状況を想定し、

図6(b)に示すような座席レイアウトの異なる満員電車車両内の乗客の挙動解析を行い、座席レイアウトの違いが人的被害に与える影響について検討した。図9は各車両の解析結果を示したものである。Layout 1では車両前方に移動する乗客の流れに抵抗するものがないのに対して、Layout 2では群集の流れに対して何人かの乗客が垂直方向(NS方向)にアーチを形成して、その他の乗客の流れに抵抗している。同様に、Layout 3ではボックスシート付近で形成されるアーチにより乗客の流れが分断されている。そのため、乗客の分断効果が顕著に現れるLayout 3, Layout 2, Layout 1の順で乗客一人一人に作用する圧迫力が低くなっていることがわかる。図10は各車両において、乗客に作用した圧迫力の時間的変化を比較したものである。



(b) 満員電車解析
図6 対象空間と初期配置

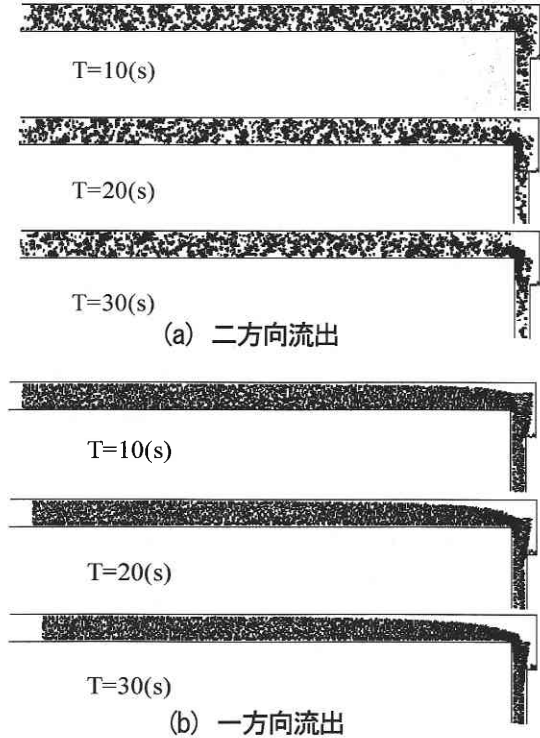


図7 流出方向規制による影響

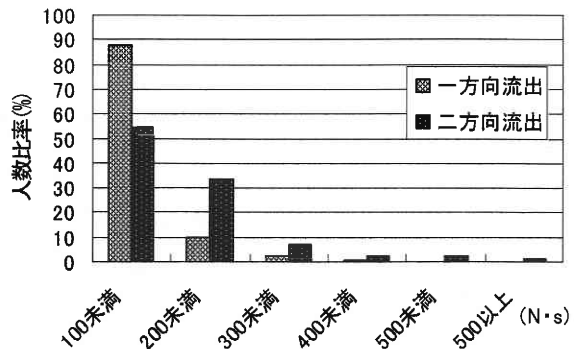


図8 最大圧迫力分布

研究速報

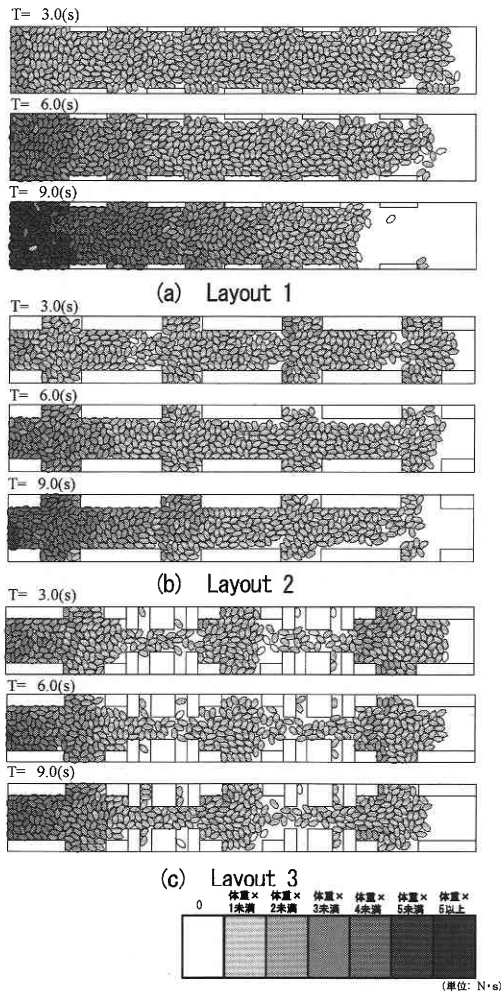


図9 座席レイアウトによる影響

Layout 1, 2と Layout 3では車両内部の構造が変化するため、乗客に作用する圧迫力の時間的な変化も大きく異なっている。Layout 1, 2では乗客が車両前方に集中する12秒後から16秒後に大きな圧迫力を受ける乗客数が最も多くなることがわかる。しかし、Layout 2はLayout 1よりも強い圧迫力が作用している時間が明らかに短い。これは、先述した乗客で形成されたアーチ効果によるものと考えられる。Layout 3では、乗客が均等に分断されているために、グラフにピークが無く、他のLayoutと比較して全体的に乗客の受ける圧迫力が低いことがわかる。以上より、乗客の流れを分断するような効果を発揮できるように座席や吊り革をレイアウトすれば、地震時の満員電車内の人的被害を大幅に軽減できることが確認された。

4. ま と め

本研究では、楕円形個別要素法を用いて次のような人間行動特性を表現できる群衆行動解析モデルを構築した。

- ①人間相互が物理的に接触する前に接触を避けようとする行動

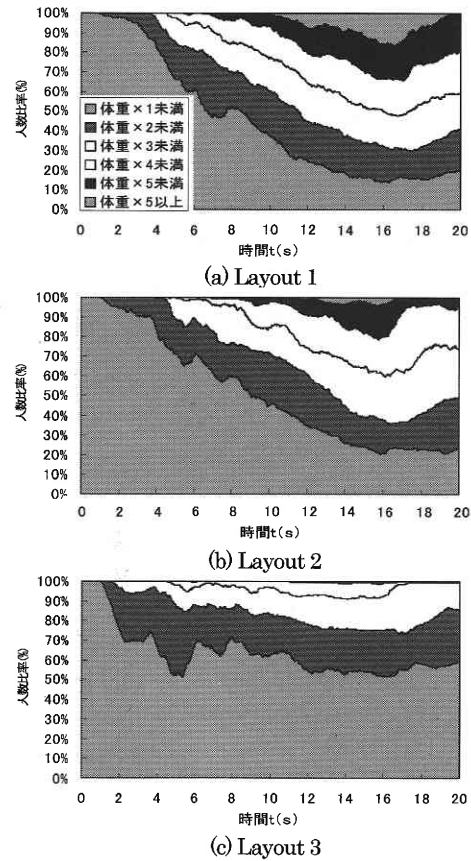


図10 圧迫力の時間的な変化

- ②歩行/走行時に人間が進行方向に対して肩軸を直角にしようとする行動
- ③人間は外力を受けない限り直進しようとする行動
- ④歩行時に人間は壁との接触を避けようとする行動
- ⑤人間は最短経路を選択しながら目的地に向かおうとする行動

更に、構築したモデルを用いて歩道橋と都内在来線を対象空間としたシミュレーションを行い、力学的観点から都市空間の安全性評価、そして安全対策に生かすための考察を行った。

(2004年4月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 目黒公郎：個別要素法による動的破壊解析に関する研究，東京大学博士論文，1991.
- 2) 清野純史ら：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，No. 537，pp. 233-244，1996.
- 3) 松島亘志：離散楕円要素法による粒状体構造の動的破壊過程の検討，東京大学修士論文，1992.
- 4) 大佛俊泰ら：心理的ストレス概念に基づく歩行行動のモデル化，日本建築学会計画系論文集，No. 573，pp. 41-48，2003.