

# 群集の圧力と密度に関する数値実験

川口寿裕<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

## 概要

群集事故が発生するような非常に高密度な状況に対して、人を使った実験を行うのは危険である。このような状況に対しては、計算機シミュレーションの利用が有効な手段である。本研究では、群集を高密度に詰め込んだときの群集密度と群集圧の関係について、粒子モデルを用いた数値実験を行う。特に本研究では弾性モデルの妥当性について検討する。人体の弾性を非線形バネモデルで与えることにより、群集詰め込みに関する既存の実験データを再現できることを示す。

## Numerical Experiment on Crowd Pressure and Crowd Density

Toshihiro Kawaguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Safety Management, Faculty of Safety Science, Kansai University

## Abstract

Physical experiments for a quite high-density crowded situation are dangerous. A Numerical simulation is a useful tool for such the situation. In the present study, a numerical experiment is performed to study the relation between the crowd pressure and the crowd density for the highly crowded situation. The inter-pedestrian forces are modeled with DEM (Discrete Element Method). Especially, the validity of the elasticity model in DEM is studied. It is shown that the non-linear spring model can reproduce the previously reported experimental data.

## 1 はじめに

2015年9月24日、イスラム教の大巡礼(ハッジ)で群集事故が発生し、700人以上の死者を出した。日本でも2001年7月21日に兵庫県明石市で開催された市民夏まつり花火大会において、歩道橋内で群集事故が発生し、11人が死亡した[1]。祭り、コンサート、スポーツ観戦など、不特定多数の人が集まり、興奮状態になる場所では、何らかのきっかけで群集事故に発展する可能性があることを考えておかねばならない。

明石市の事故では、歩道橋内の手すりの変形量から、手すりにかかった力は1mあたり最大158kgであり、このことから、群集には1mあたり約400kgの力がかかっていたと推定されている[1]。群集に作用する力を実測した例として、松下と和泉[2]が集団

で壁面を押したときの圧力を測定した研究がある。また、吉村[3]は28人の男子大学生を空間内に詰め込み、前面壁を移動させることで群集密度と壁面圧との関係を調べた。群集事故の危険性を把握するには、群集密度と群集圧の関係を理解することが重要であるが、安全性の観点から人を使った実験には限界がある。

そこで、本研究では数値シミュレーションを用いた数値実験により、群集密度と群集圧の関係を調べることを試みた。計算結果の妥当性を検証するため、吉村[3]の実験データとの比較を行った。

## 2 計算手法

### 2.1 離散要素法

離散要素法(DEM)[4]は相互作用を及ぼしながら移動する岩石の挙動を解析する目的で開発された

手法で、主に土木工学の分野で発展してきた[5]。後に、粉体工学[6]や粒子系混相流[7]にも適用されるようになった。

近年では歩行者流れへの適用も試みられている[8,9]。DEMでは複数の粒子同士が接触状態を保ちながら運動する状態を模擬できる。したがって、群集事故が発生するような高密度な群集の挙動を模擬するのに適した手法であると言える。

離散要素法では互いに接触した粒子同士の相互作用力をバネ、ダッシュポット、スライダで表現する(図1)。バネは弾性反発力を表し、ダッシュポットは非弾性衝突を表現するための粘性減衰力を意味する。スライダはすべり摩擦(動摩擦)を表す。

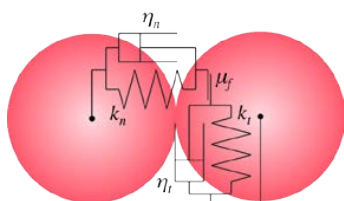


図1: 離散要素法の接触力モデル

## 2.2 粒子運動の計算

DEMによる接触力から、Newtonの運動方程式を数値積分することで粒子の運動を求めることができる。ただし、本研究では粒子の並進運動のみを考え、回転運動を無視した。これは、群集詰め込み時に人は自由に回転せず、むしろ正面を向いた姿勢を維持しようとすると考えられるからである。実際、吉村の実験においても、被験者はほぼ正面の前面壁の方を向いたままの姿勢を保ったままであった[3]。

## 3 数値実験

### 3.1 幾何学的条件

吉村[3]はコの字型の鉄筋コンクリート壁で囲まれた幅1.33 mの空間内に男子大学生28人を入れ、前面の可動壁を徐々に移動させることで被験者を加圧した。可動壁の位置を記録することで、空間の面積を求めることができ、さらにここから群集密度を計算することができる。また、前面および側面の壁にロードセルを設置し、作用する力を計測することにより、群集密度と群集圧の関係を実験的に求めた。

本研究では、吉村[3]の実験を参考に、図2に示すような幅1.3 m、奥行き5 mの領域内に28個の円

形粒子をランダムに配置し、前面の可動壁を移動させる数値実験を行った。群集密度は10人/m<sup>2</sup>から0.5人/m<sup>2</sup>刻みで14人/m<sup>2</sup>まで変化させた。可動壁を所定の位置まで移動させると、圧力は時間的に変動した後、一定値に落ち着く。このときの前面および側面の壁に作用する単位長さあたりの力を正面圧および側面圧として求めた。

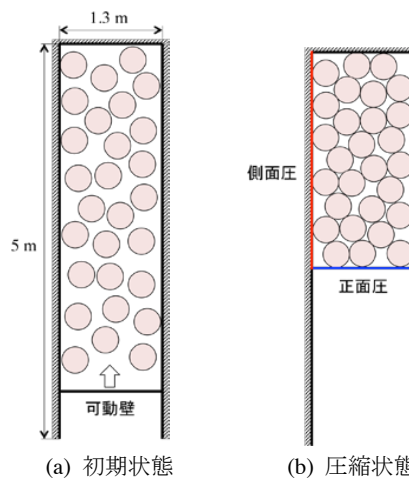


図2: 群集圧縮の数値実験概略

吉村[3]の実験では被験者として28人の男子大学生を使っている。標準的な成人男性は肩幅が50 cm、胸厚が20 cm程度であるので、これを長径50 cm、短径20 cmの楕円で近似し、これと同じ面積を持つ円で置き換えると、直径は32 cmとなる。そこで、本計算では円形粒子の直径を32 cmとした。

### 3.2 弾性モデル

Hertzの弾性理論[10]によると、均質な2次元円柱において、荷重と変形量は線形関係にある(図3(a))。このため、2次元DEMでは線形バネを用いた計算が一般的である。

しかし、人体は骨格、筋肉、脂肪などで構成されており、均質ではない。硬い骨格の周りに、比較的柔らかい筋肉や脂肪が存在することから、人体は変形量が小さいときには弾性が小さく、変形量が大きくなるにつれて弾性が大きく作用すると考えられる(図3(b))。この特性を表現するため、荷重 $f$ と変形量 $\delta$ の関係を次式のようなべき乗則で与えた。

$$f = k\delta^n \quad (1)$$

ここで、指数 $n \geq 1$ とする。 $n = 1$ は線形バネを表す。 $n$ は必ずしも整数である必要はないが、本計算では $n = 1 \sim 4$ の整数で与えた。

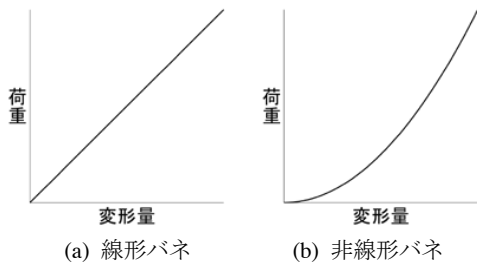


図 3: 弾性モデル

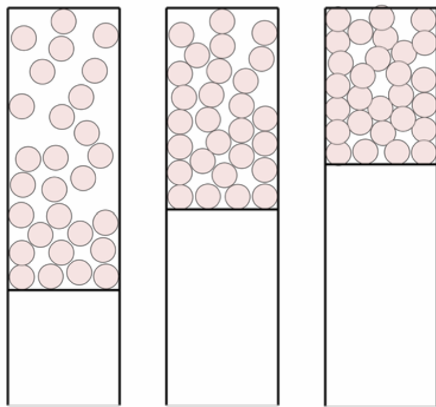
本計算では、正面圧および側面圧の値はバネ定数  $k$  の値に強く依存する。ここでは、高密度に圧縮した際の正面圧の値が吉村[3]の実験値と同程度になるように試行錯誤的に  $k$  を与えた。式(1)の指数  $n$  の各値に対するバネ定数  $k$  を表 1 に示す。法線方向と接線方向のバネ定数は同じ値とした。摩擦係数は  $0.3$  とし、反発係数は  $0.6$  とした。

指数 $n$	バネ定数 $k$
1	$1.0 \times 10^4$ N/m
2	$1.5 \times 10^5$ N/m <sup>2</sup>
3	$2.0 \times 10^6$ N/m <sup>3</sup>
4	$2.0 \times 10^7$ N/m <sup>4</sup>

表 1: バネ定数

### 3.3 計算結果

領域内に配置した 28 個の粒子が可動壁の移動によって圧密されていく様子のスナップショット例を図 4 に示す。可動壁が所定の位置まで移動した後、正面圧および側面圧は時間的に変動する。図 5 に正面圧の時間変動の例を示す。可動壁が移動し始



(a) 1 秒後 (b) 3 秒後 (c) 6 秒後

図 4: 圧縮過程のスナップショット例

めてから 10 秒程度以上経過すると、壁面圧はほぼ一定値に達することがわかる。本研究では、各群集密度に対して、粒子の初期配置を変更した計算を 10 回行い、その平均値として正面圧および側面圧を求めた。

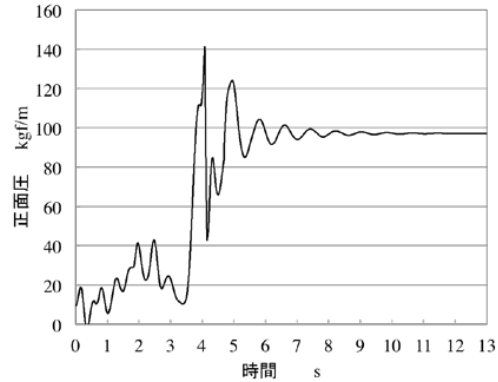


図 5: 正面圧の時間変動例

式(1)の指数  $n$  を 1 から 4 まで変化させ、上述の手続きにより正面圧および側面圧と群集密度の関係に関する数値実験を行った。結果を図 6 に示す。図 6 には吉村[3]の実験結果も示している。

吉村[3]の実験データを見ると、正面圧、側面圧ともに群集密度に対して非線形な変化となっていることがわかる。これに対して本計算では、 $n = 1$  に対しては、正面圧が群集密度の増加に伴ってほぼ線形に増加していることが確認できる(図 6(a))。指数  $n = 2, 3, 4$  に対しては吉村[3]の実験データと同様、両者が非線形の関係となっている。

3.2 節で述べたように、群集圧の数値はバネ定数の値に強く依存する。本研究では、群集圧の絶対値よりも、群集密度への依存性を評価することに主眼を置く。そこで、吉村[3]の実験および各指数  $n$  の値に対する正面圧を、群集密度が  $10$  人/m<sup>2</sup> および  $14$  人/m<sup>2</sup> のときの値で正規化したグラフを図 7 に示す。図 7 より、 $n = 3$  および  $4$  に対しては、本モデルによって吉村[3]の実験データを定性的に再現できていることが確認できる。

一方、図 6(b)を見ると、群集密度が高くなるにつれて、吉村[3]の実験よりも側面圧が小さくなっていることが確認できる。3.2 節で述べたように、本研究では高密度状態における正面圧が吉村[3]の実験データと近い値になるようにバネ定数を設定した。このようにすると、側面圧が過小評価されることがわか

った。この原因としては、人を円形粒子で表現したことが考えられる。実際には人は胸厚よりも肩幅の方が大きい。2.2節でも述べたように、吉村[3]の実験において、被験者は全員が前面の可動壁の方を向いたまま圧縮されていた。側面圧の予測精度を高めるには、本計算モデルを楕円形粒子などに改良する必要があると考えられる。

## 4 まとめ

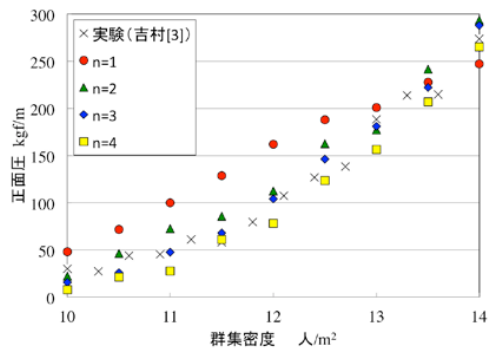
群集詰め込み時の群集圧力と群集密度の関係について、円形粒子を用いた離散要素法 (DEM) による数値実験を行った。非線形バネモデルを用いることで、正面圧については吉村[3]の実験結果を再現できることが確認された。一方、円形粒子モデルでは側面圧を過小評価することがわかった。

## 謝辞

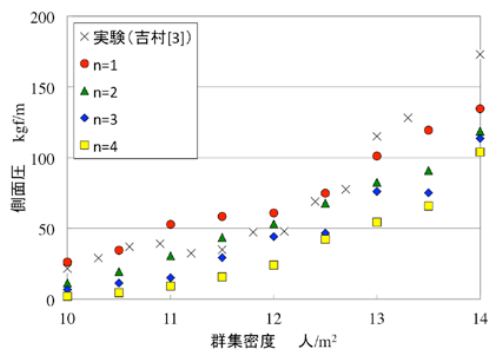
本研究は JSPS 科学研究費補助金基盤研究(C) (No.25350485)の支援を受けた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 明石市民夏まつり事故調査委員会, 第 32 回明石市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告書 (2002).
- [2] 松下清夫, 和泉正哲, 日本建築学会論文報告集 **57** (1957) 245.
- [3] 吉村英祐, 生産と技術, **59-3** (2007) 72.
- [4] P.A.Cundall, O.D.L.Strack, Geotechnique **29-1** (1979) 47.
- [5] 木山英郎, 藤村尚, 土木学会論文報告集 **333** (1983) 137.
- [6] 日高重助, 金星直彦, 三輪茂雄, 粉体工学会誌 **26-2** (1989) 77.
- [7] 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻裕, 日本機械学会論文集(B編) **58-551** (1992) 2119.
- [8] 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一, 土木学会論文集 **537** (1996) 233.
- [9] Y.Tsuji, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003 (2003) 27.
- [10] K.L.Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press (1985) 99.



(a) 正面圧



(b) 側面圧

図 6: 群集圧力と群集密度の関係

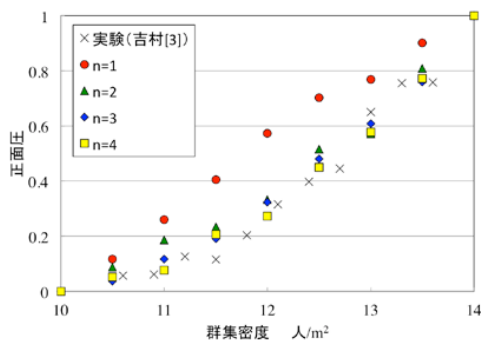


図 7: 正規化された群集圧力と群集密度の関係