

群集詰め込み時の圧縮力分布

川口寿裕¹

¹ 関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

概要

高密度群集内に作用する大きな圧縮力は群集事故の発生原因となり得る。しかしその詳細についての知見はほとんど得られていない。本研究では、粒子モデルを用いた数値シミュレーションにより、群集詰め込み時の群集内圧縮力分布を求めた。粒子間接触力は離散要素法 (DEM : Discrete Element Method) でモデル化した。その結果、圧縮力は群集内で均一に分布するのではなく、前面壁から後面壁まで大きな圧縮力が繋がる force chain が局所的に形成されることを明らかにした。また、群集密度が同じでも圧縮力が小さくなる場合もあるが、このときには平均配位数が大きくなり、より密な充填状態となっていることを示した。

Distribution of Compression Force in Packed Crowd

Toshihiro Kawaguchi¹

¹ Department of Safety Management, Faculty of Safety Science, Kansai University

Abstract

Compression forces acting on a high-density crowd may cause a crowd accident. The detailed information on the distribution of the compression forces, however, is unknown. In the present study, a numerical simulation based on a particle model is applied to the packing of crowd. The inter-particle forces are modeled with DEM (Discrete Element Model). Force chains tend not to distribute uniformly in the crowd, but to locally form a line along the sidewalls. When the compression force is small for the same crowd density, particles are packed densely with a higher coordination number.

1 はじめに

2001年7月21日、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。この事故では歩道橋内の金属製の手すりが群集の圧力で変形しており、事故調査委員会はその変形量から歩道橋内の群集には1mあたり約400kgの力がかかっていたと推定している[1]。

松下と和泉[2]は集団で壁面を押し当てたときの圧力を測定し、圧力は群集密度に対して直線的に増加することを示した。この実験は1952年に国鉄日暮里駅構内の跨線橋壁面が群集の圧力で破損し、線路上に転落した利用客が電車にはねられ、8人が死亡した事故を意識して行われたものである。このため、明石市の事故とは状況が異なる。

吉村[3]は明石市の事故を受けて群集詰め込み実験を行った。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。その結果、両者の関係は非線形になることを示した。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。この目的には数値シミュレーションの利用が効果的である。

Tsuji[4]は明石市の事故において歩道橋内の群集の挙動を離散要素法 (DEM) [5]でモデル化し、挙動および作用力の解析を行った。その結果、歩道橋内の曲がり角付近で群集密度および群集圧が大きくなり、この部分が危険であることを示した。実際、明石市の事故では曲がり角付近で群集なだれが発生しており、Tsujiの計算結果は実際の事故の様子を定性的に再現できていると考えられる。

川口[6]は吉村[3]の実験と同条件の数値シミュレーションを行い、DEMの弾性モデルを非線形バネで表現することで、吉村の実験結果を再現できることを示した。

本研究では群集詰め込み時の群集圧について、より詳細に調べるため、DEM を用いた数値シミュレーション結果から個々の粒子に作用する力の分布を求めた。

2 計算手法

2.1 離散要素法

離散要素法(DEM) [5]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[7]。後に、粉体工学[8]や粒子系混相流[9]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[4,10]。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。

DEM 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。

本計算では法線方向および接線方向の接触力を次式で与えた。弾性力の変形量の 3 乗に比例する非線形バネモデルを適用した[6]。

$$\vec{f}_{C_n} = (-k_n \delta_n^3 - \eta_n \vec{V}_{ij} \cdot \vec{n}) \vec{n} \quad (1)$$

$$\vec{f}_{C_t} = \min[-k_t \delta_t - \eta_t \vec{V}_{ij}, -\mu_f |\vec{f}_{C_n}| \vec{t}] \quad (2)$$

ここで、 k はバネ定数、 δ は変形量、 η は粘性減衰係数を表し、添字 n, t はそれぞれ、法線方向、接線方向を意味する。 μ_f は摩擦係数、 V_{ij} は粒子 i と粒子 j の相対速度、 V_{sij} は粒子 i と粒子 j の接触点における接線方向相対表面速度である。 \vec{n} は法線方向単位ベクトル、 \vec{t} は接線方向単位ベクトルである。式(2)の記号 $\min[A,B]$ は A, B のうち絶対値の小さい方をとることを意味する。つまり、式(2)は変形量が小さい場合は静止摩擦を表現し、変形量が大きくなるとすべり始め、すべり摩擦(動摩擦)を表現する。

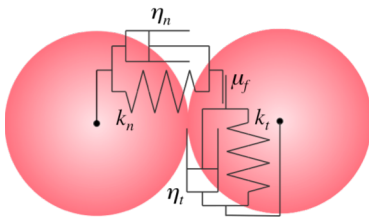


図 1: 離散要素法の接触力モデル

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ていた[3]。

3 数値シミュレーション

3.1 計算条件

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シミュレーションを行った。部屋の奥行き長さ h [m]は時間 t [s]の関数となる。本研究では以下の式で h を与えた。

$$h = \max[5 - 0.5t, h_c] \quad (3)$$

ここで、 $\max[A, B]$ は A, B のうち大きい方を取る関数である。 h_c は設定した群集密度 ρ_c [人/m²]となる h である。つまり、前面壁は 0.5 m/s の速度で移動し、部屋を狭めていくが、 h_c に達するとそれ以上は移動しない。部屋の幅が 1.3 m、人数が 28 人であることから、 ρ_c と h_c の関係は次式で与えられる。

$$\rho_c = \frac{28}{1.3h_c} \quad (4)$$

例えば、 $\rho_c = 14$ 人/m²に対しては $h_c = 1.54$ m となり、前面壁がこの位置に達するのに要する時間は式(3)から約 6.9 秒となる。前面壁がこの位置に達した後もしばらく群集内圧力は変動するが、約 5 秒程度経過すると

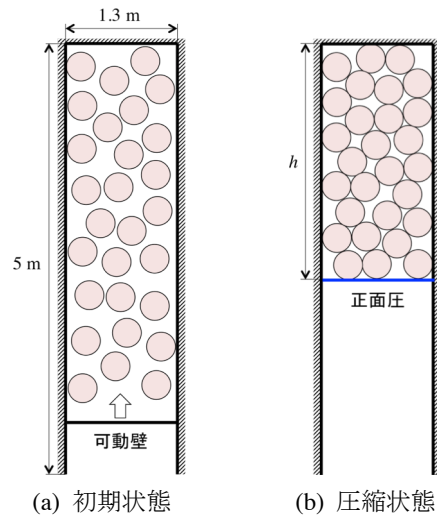


図 2: 群集圧縮の数値実験概略

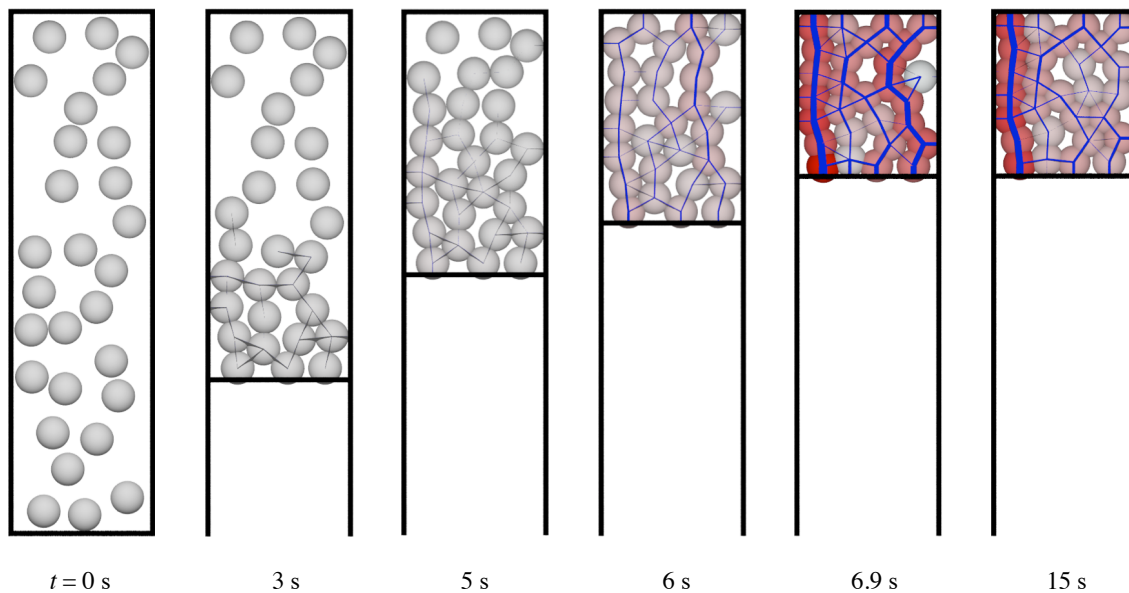


図 3: 圧縮課程の計算例 ($\rho_c = 14$ 人/m²)

ほぼ収束することが確認されている[6]。このため、本計算では前面壁移動開始後 15 秒間の計算を行った。

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 計算結果

群集密度 $\rho_c = 14$ 人/m² となるまで圧縮する過程の計算結果例を図 3 に示す。図 3 には接触ペア(粒子-粒子または粒子-壁面)間の圧縮力を示す force chain も青線で表示した。線の太さは圧縮力の大きさを表す。また、各粒子の赤色の濃さは周囲の粒子および壁面との間に作用する圧縮力の絶対値の和を表す。

3.1 節で述べたように、この場合は約 6.9 秒後に群集密度 $\rho_c = 14$ 人/m² となり、前面壁は最終位置に達している。図 3 より、その時点で左側壁に沿って大きな力が作用する force chain が確認できる。右側にもやや強い force chain が見られるが、時間の経過とともに粒子の再配置が起き、圧縮力が緩和されていった。左側壁に沿った強い force chain は 15 秒後もそのまま維持された。

最終状態における圧縮力分布は初期状態での粒子配置によって大きく変わる。群集密度 $\rho_c = 14$ 人/m² の場合の異なる初期状態に対する最終的な圧縮力分布を図 4 に示す。図 4(a)~(c)はいずれも最終的な正面圧が約 3700 N(約 290 kgf/m に対応)となったものである。ほとんどの場合、群集内の圧縮力は不均一に分布

し、図 4(a)~(c)のように強い force chain が一列形成されていた。強い force chain は基本的に左右いずれかの側壁に沿って形成されることが多く(図 4(a),(b))、側壁よりも内側で形成されること(図 3(c))は稀であった。これは、側壁によって粒子の移動が拘束され、粒子が側壁に沿って配列しやすいためである。

同じ $\rho_c = 14$ 人/m² に対しても図 4(d)のように圧縮力が比較的均一に分布し、また圧縮力の絶対値も全体的に小さくなることもある。図 4(d) の正面圧は 2017 N で

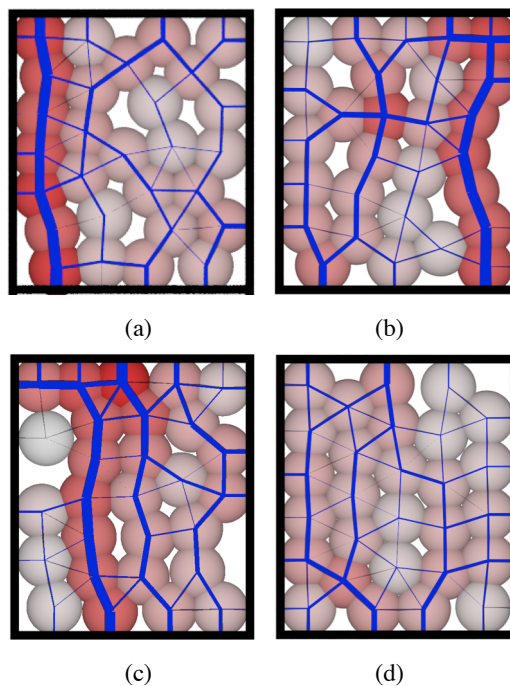


図 4: 圧縮力分布

あり、(a)～(c)の場合の 55%程度であった。図 4(a)および(d)における配位数のヒストグラムを図 5 に示す。図 4(d)の場合には(a)の場合に比べて配位数が大きく、多くの粒子(または壁面)と同時に接触していることがわかる。平均配位数は(a)が 4.07 であるのに対して、(d)は 4.79 であった。配位数が大きいうことは、無駄な空間が少ないことを意味する。つまり、図 4(d)の場合には(a)～(c)の場合に比べてより密に粒子が配置されたことで空間内配置がより均一になり、圧縮力もより均一になったものと考えられる。

明石市の事故において、事故調査委員会は歩道橋内の手すりの変形量から、群集には 1 m あたり約 400 kg の力が作用していたと推算し、さらに幅 1 m に人が 2 人並ぶと考えれば 1 人にかかる力は約 200 kg であるとしている[1]。この試算は群集内の圧縮力分布が均一であると考えたものであるが、図 4 の結果はそのような考えが適切でない可能性があることを示唆している。

図 4(a)の場合、正面圧は 3714 N であり、平均的には 1 m あたり 292 kg の力がかかっていることになる。しかし、前面壁に接している 4 つの粒子に作用している圧縮力は、左からそれぞれ、4525 N, 1347 N, 2019 N, 1515 N であり、最大と最小では 3 倍以上の違いがある。つまり、高密度群集内では単純に平均化して算出したものよりはるかに大きな力が特定の人々に作用する可能性が高く、群集事故の解析ではこのことを考慮に入れる必要があることを示唆している。

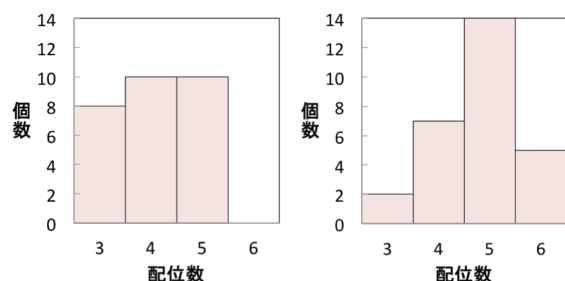


図 5: 配位数(左:図 4(a)、右:図 4(d))

4 まとめ

群集詰め込み時の群集内圧縮力分布について、離散要素法 (DEM) を用いて調べた。圧縮力は群集内で均一に分布するのではなく、側壁に沿って大きな力が連なる force chain が形成されることが多いことがわかった。また、詰め込み時の偏りを少なくし、平均配位数を大きくすることで群集内の圧縮力が小さくなることを明らかにした。

謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号: 16K01294) 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] Y.Tsuji, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003 (2003) 27.
- [5] P.A.Cundall, O.D.L.Strack, Geotechnique **29-1** (1979) 47.
- [6] 川口寿裕, 第 21 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集 (2015) 63.
- [7] 木山英郎, 藤村尚, 土木学会論文報告集 **333** (1983) 137.
- [8] 日高重助, 金星直彦, 三輪茂雄, 粉体工学会誌 **26-2** (1989) 77.
- [9] 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.
- [10] 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一, 土木学会論文集 **537** (1996) 233.