

群集事故を解析する - 明石歩道橋事故での群集圧力と群集密度の推定 -



研究ノート

吉村 英祐*

Analysis of crowd accident

- Estimation of crowd pressure and crowd density in the crowd accident in Akashi City -

Key Words : Crowd accident, Crowd density, Crowd pressure, Experiment of shoving packed subjects

1. はじめに

初詣、花火大会、競技大会などのイベントにおいては、高密度かつ大規模な群集が発生する。高密度群集による圧力は強大で、時には壁面や手すり等を破壊することがあり、それが群集事故を引き起こすきっかけとなりうる。

筆者は、大学院生時代の1979年5月に、NHK近畿本部（当時）のスタジオで、教育番組用として四面ガラスの公衆電話ボックス（ 0.7m^2 ）に男子10人（ $14.3\text{人}/\text{m}^2$ ）、女子11人（ $15.7\text{人}/\text{m}^2$ ）を詰め込む実験を手伝ったことがある。このときは、詰め込んだ人間の圧力でガラスが大きく外にはらんでいたが、今ならこのような実験は危なくてできないであろう。なお、詰め込み実験の先駆的かつほとんど唯一の事例としては、集団が前方垂直の壁面を押したときの圧力と 1m^2 あたりの人数と群集密度の関係を求めた松下清夫先生らの実験（文1）がある。

2. 明石歩道橋事故の概要

2001年7月21日の午後8時45～50分頃、明石市の大蔵海岸とJR朝霧駅をつなぐ歩道橋（明石市道）の南端付近で群集事故が発生し、死者11人（10歳未満9人、70歳以上2人）、負傷者247人を出す大惨事

となった。これは、明石市が主催する「第32回明石市民夏まつり花火大会」がほぼ終わり、帰路につくために大蔵海岸から歩道橋に上がって駅に向かう群集と、朝霧駅から会場に向かう群集（後ろから押されるがまま漸進せざるをえなかった）が歩道橋上の南端付近で衝突し、高密度状態で押し合ううちに転倒事故が発生したもので（図1）、戦後に発生した群集事故の死者数では、弥彦神社（新潟、1956年、死者124人）、二重橋（東京、1954年、死者16人）、フライヤージム（横浜、1960年、死者14人）に次ぐものである。事故直後の新聞報道でもあったように、高密度群集の圧力で大きく外側に曲がった手すりは、圧力のすさまじさを物語っていた（図2）。



図1 明石花火大会事故の発生現場（左が北）
（文2、p.134の図を転載）



図2 群集の圧力で曲がった手すり
（歩道橋東側南端）



* Hidemasa YOSHIMURA

1955年7月生

大阪大学大学院工学研究科博士前期課程
修了（1980年）

現在、大阪工業大学、工学部 建築学科
建築計画第1研究室、教授、博士（工学）、
建築計画学、建築安全計画

TEL : 06-6954-4223

FAX : 06-6957-2132

E-mail : yoshimura@archi.oit.ac.jp

3. 手すりにかかった圧力の推定

筆者は、事故発生から1週間後の2001年7月28日に初めて現場に行ったが、そこで手すりの曲がり具合から事故発生当時の群集密度が推定できることに気付く、現場の手すり材料の形状・寸法、取り付け間隔等を計測した。高密度群集による圧力を等分布荷重と仮定し、塑性変形部のステンレス平板の断面形状・寸法をもとに計算した結果、手すりを曲げるためには少なくとも130.8kgf/m (1.283kN/m) (注1)の力が必要と推定された。これを上述の松下先生の実験(以下、既往実験)の結果にあてはめると、群集密度は12人/m²前後となる。

しかし、既往実験は、群集自らが進行方向の壁を押しておこなったもので、事故発生当時の状況とは前提条件が異なること、および、事故現場での手すりの曲がり具合は主として群集が押される方向と垂直方向の圧力により生じたものであることから、既往実験の結果をもとに、歩道橋の手すりの曲がり具合から群集密度を推定することには限界があった。なお、筆者が神戸地検の依頼で作成した鑑定書(平成14年7月20日付)や、明石市民夏まつり事故調査委員会の事故調査報告書(文3)でも、既往実験の結果をもとに群集密度を推定しているが、これは他に参考となる論文がなかったためである。

4. 群集の詰め込み実験

群集事故発生当時の状況を再現するために、群集が一方向から押された場合の群集密度と壁面にかかる群集圧力の関係を調べる群集の詰め込み実験をおこなった(注2)。以下に、用語の定義を示す。

群集圧：単位長さ(1m)あたりに作用する力(kgf/mまたはkN/m)。

正面圧：群集に一方向から力を加えたときに、その方向に伝わる単位長さ(1m)あたりに作用する力(kgf/mまたはkN/m)。

側面圧：群集に一方向から力を加えたときに、その方向から横方向に伝わる単位長さ(1m)あたりに作用する力(kgf/mまたはkN/m)。

実験の概要は、以下の通りである。

コの字型の鉄筋コンクリート壁に囲まれた矩形の実

験領域(幅133cm)(図3)に28名(注3)の被験者を入れ、ピストンの役割を果たす圧縮壁(図4)で閉じ込める。圧縮壁の外部から、人力により被験者をゆっくり加圧する。押す方向と直角の正面壁と、正面壁に直角(加圧方向に平行)の左側側面壁(図5)の、計二面の裏の四隅に1個ずつロードセル(図6)を取り付け、それぞれにかかる力を個別に計測する。なお、三つの壁面の下部に4個のキャスターを取り付けることで、壁面と床面との間に生じる摩擦力を十分小さくしている。

ロードセルからの信号(10秒間に100個)は、テキストデータとしてパソコンに記録される。各壁面に設置した4個のロードセルによる測定値の合計を壁面の長さで除した値を、群集による正面壁および

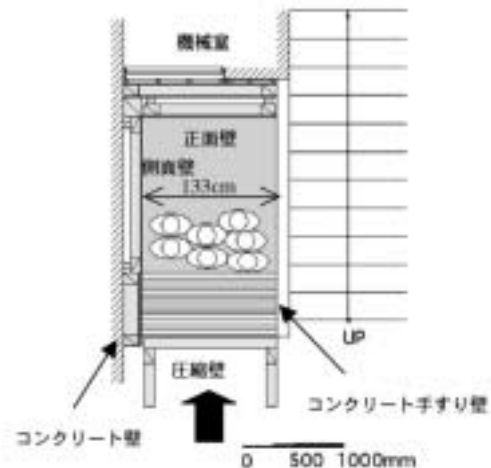


図3 実験場所の平面図



基部に4個のキャスターが付いている
図4 圧縮壁(h=150cm)



それぞれの四隅にロードセルを、基部にキャスターを取り付けている
図5 正面壁(中央)と側面壁(左側)



図6 ロードセル

側面壁の圧力とする．なお，すべての実験過程は，実験領域全体を真上からビデオ撮影することにより記録した．

被験者28名は全員，男子大学生である．実験に先立って，被験者各人の年齢，性別，身長，体重，胸部厚径，肩幅，服装及び履物を記録した．なお，被験者には外力に無理に抵抗しないよう，また限界まで苦しさを我慢しないよう事前に指示を徹底した．

実験領域の奥行き寸法が読みとれるよう，また圧縮壁を常に正面壁に平行に保つよう，実験領域の左右のコンクリート壁に5 cm間隔で水平に目盛りを刻んだ．左右の目盛りをガイドに，圧縮壁を正面壁と平行を保ちながら押して実験領域を徐々に狭めていき，5 cm狭めた段階で10秒間，ほぼ一定の圧力を加え続ける．その間に正面壁と側面壁にかかる圧力を計測し，計測が終わると慎重に圧力を解除する．次の試行では，前回よりさらに5 cm縮めて同様の計測を行う．この試行を詰め込み実験の限界まで繰り返した(図7)．



図7 28人を詰め込んだ状態で左から圧縮壁を押し込んでいるようす(真上から撮影)

5. 詰め込み実験の結果

5.1 群集密度と群集圧の関係

人力による加圧の限界，および被験者の安全上の理由から，詰め込みの限界は，詰め込み領域 2m^2 (約 $133\text{cm} \times 154\text{cm}$)までとした．すなわち，実験により再現した最高密度は $14\text{人}/\text{m}^2$ である．

図8に，群集密度と正面圧の関係を示す．これより，群集密度が $10\text{人}/\text{m}^2$ を超えると正面圧が指数的

に高くなることがわかる．この傾向は，側面圧においても同様である(図9)．

同じ群集密度の時の正面圧と側面圧を比較すると，側面圧の方が小さい値を示す．これは，正面圧が群集を押し力の方向と同じであるのに対し，側面圧は群集にかかる圧力の方向と直角であり，流体よりも粒体としての性質を強く示す群集においては，パスカルの原理が働かないためであろう．

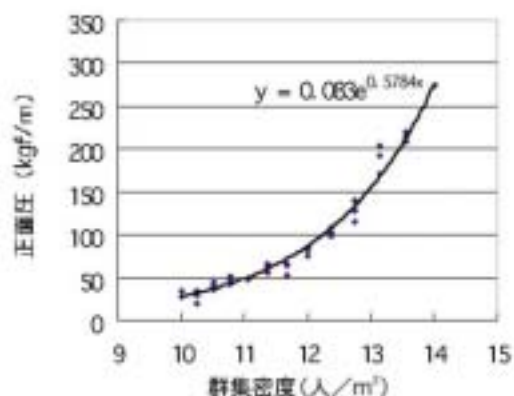


図8 群集密度と正面圧の関係

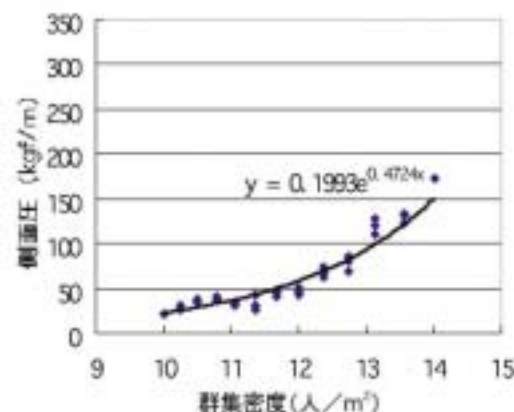


図9 群集密度と側面圧の関係

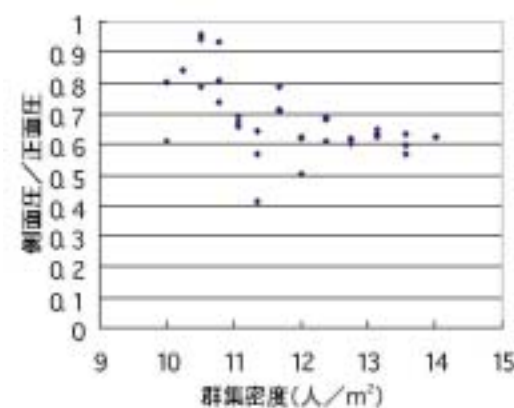


図10 正面圧と側面圧の比の関係

5.2 正面圧と側面圧の比の関係

図8と図9より, 群集密度と正面圧と側面圧の比を求めたのが図10である. 群集密度が12人/m²に達するまでは, 側面壁にかかる群集圧が不安定で, 正面圧と側面圧の比は一定しないが, 群集密度が12人/m²を超えると正面圧と側面圧の比がしだいに0.6に収束していくことがわかる.

5.3 群集密度と圧力の体感アンケート

詰め込み領域を5cm刻みで段階的に圧縮していく過程で, 群集密度がおよそ10, 11, 12, 13, 14人/m²のときに, 呼吸のしやすさと体にかかる圧力の体感と, 圧力による苦痛の程度をたずねるヒアリング調査を実施した. ヒアリングは, 加圧を解除した直後に, 表1, 表2に示す評価基準に基づいておこなった. その結果は, 群集密度が12人/m²では半数が身動きできなくなり, 14人/m²では28人中24人(85.7%)が「非常に苦痛」と回答している(図11). また, 「息苦しい」は12人/m²で8人(28.6%), 13人/m²で22人(78.6%)となり, 14人/m²では「呼吸困難」が28人中9人(32.1%)となっている(図12).

表1 圧力の体感評価基準

評価A	肩や肘に圧力を感じず手の上げ下げが可能
評価B	肩や肘に圧力を感じるが手の上げ下げは可能
評価C	多少の身動きは可能だが手の上げ下げは不可能
評価D	押されて身動きができない状態
評価E	押されて苦しい状態
評価F	非常に苦痛がある状態

表2 呼吸のしやすさの評価基準

評価イ	普通に呼吸することができる状態
評価ロ	息苦しい状態
評価ハ	息をすることが困難な状態

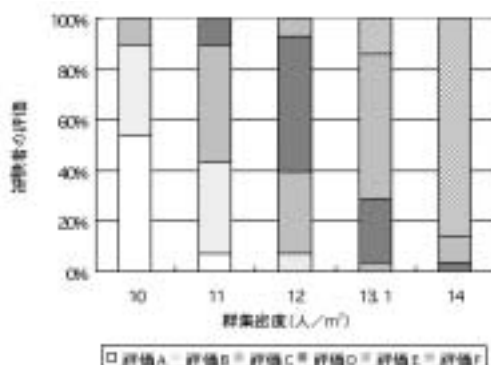


図11 群集密度と圧力の体感評価の関係

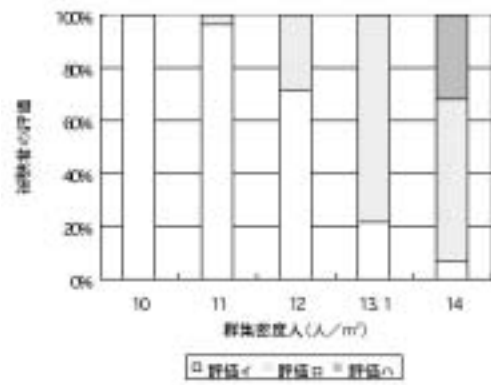


図12 群集密度と被験者の呼吸のしやすさの関係

5.4 群集密度と圧迫部位の関係

図13は, それぞれの群集密度の時に被験者に体のどの部分に圧力を感じたかを調査し, その人数割合を示したものである. 被験者は群集密度が高くなるにつれて, まず肩や腕や胸に圧力を感じはじめ, 続いて腹や腰に圧力を感じるようになる, さらには足にまで圧力を感じるようになる. 14人/m²では, 12人(42.9%)が足にまで圧力を感じている.

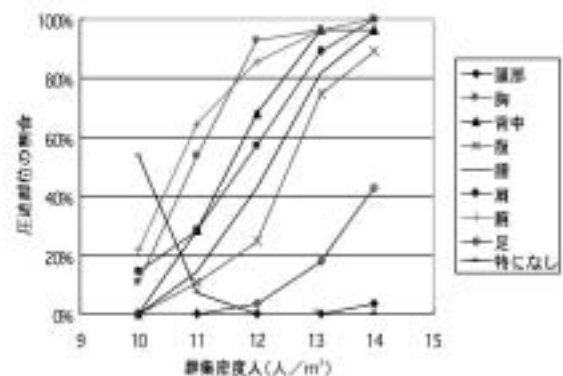


図13 群集密度と圧迫部位の関係

5.5 着膨れによる群集圧への影響

冬季の群集を想定して, 厚着の状態と同様の実験をおこなった(図14). 同じ群集密度における群集圧力を比較すると, 12人/m²以上では厚着実験のほうが100kgf/m (0.981kN/m) 以上大きくなり, いわゆる着膨れによる影響が顕著にみられた. 実際の群集は手荷物やリュックなどの携行品や子供の抱きかかえがあるのが普通であるため, 薄着の季節であってもこれらが群集圧に大きく影響を及ぼすことに注意しなければならない.

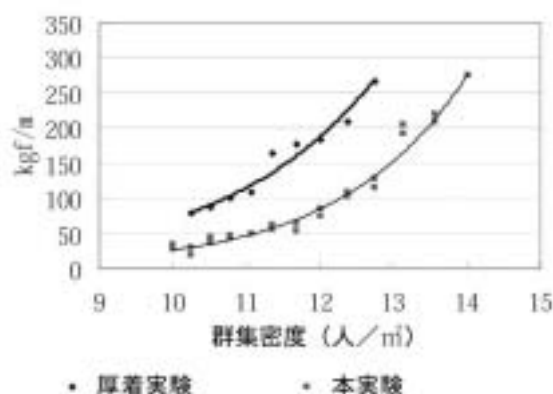


図14 群集密度と着膨れによる影響の関係

6. 鑑定書の作成のための計測・実験

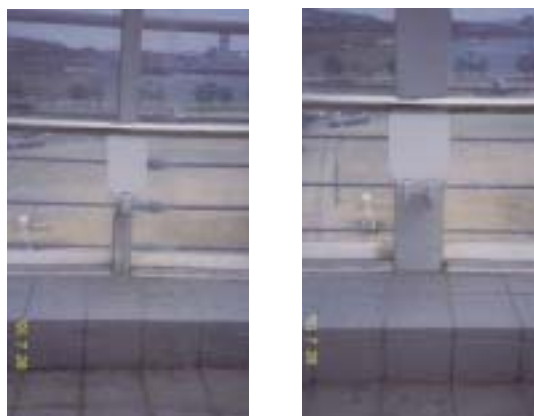
6.1 手すりの変形量の精密計測

神戸地検から依頼があった鑑定書作成の一環として、神戸地検立ち会いの下で2002年2月7日の14～17時の間、明石歩道橋を一時通行止めにしてもらい、事故発生現場の手すりの変形量（水平変位、鉛直変位、ブラケットの倒れ角等）をミリ単位で計測した。図15に計測結果の一部を示す。ステンレス製の支持板（板厚約6mm）は下端部の支持点付近で塑性変形を生じ、上端に溶接された手すりの最大水平変位量は東側で57mm、西側で93mm、最大鉛直変位は東側で22mm、西側で27mmであり、最大変位場所は、いずれも手すり南端から2.5m地点であったことから、このあたりがもっとも高密度であったと推定される。また、水平変位が見られた範囲は東側が手すり南端から5mまで、西側が11.3mまで、鉛直変

位は東側が10mまで、西側が13mまでであることから、全般に西側の群集密度が高く、かつ広範囲にわたったと推定されるが、これは現場の所見とよく一致する。

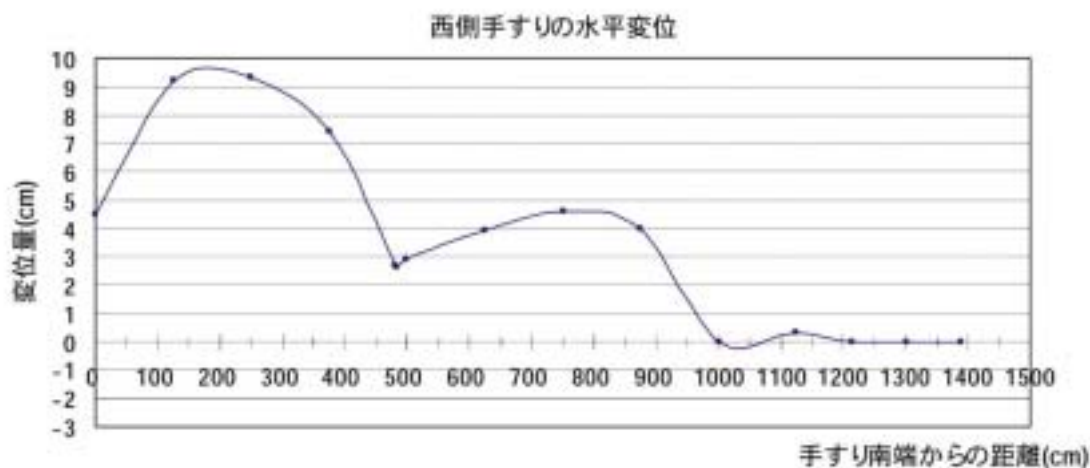
6.2 手すり部材の曲げ試験・引張試験

事故現場のステンレス製手すりパイプ（φ34mm）は、A-Type（幅95mm）とB-Type（幅125mm）のブラケットにより125cm間隔で交互に支持されている（図16）。現地での採寸および歩道橋竣工図をもとに、群集圧力で外側に曲がったブラケットおよびその支持部材と同材・同厚・同型の試験体を各3個制作し、曲げ試験と引張試験を行った。その結果、A-Typeの試験片に作用した曲げモーメントの3試験体の平均値は0.189kN・m、B-Typeの試験片では同0.323kN・mとなった。これより、A-Typeのブラ



A-Type（左）とB-Typeのステンレス製ブラケット（厚さ約6mm）が125cm間隔で交互に手すりパイプを支持している。

図16 手すりパイプを支える2種類のブラケット



変位を50倍に拡大。曲線は測定値をつないだスプライン曲線。500cmの不連続点は、手すりパイプの継ぎ目部分。

図15 西側手すりの水平変位

ケットに作用した荷重は1.16kN、B-Typeのブラケットに作用した荷重は2.01kNと推定された。

手すりパイプにかかった群集圧が局所的には等分布荷重と仮定し、さらにブラケットの荷重分担範囲がブラケットの支持作用荷重に比例すると仮定して計算した結果、手すりにかかった等分布荷重は少なくとも1.268kN/m (129kgf/m) と推定された。

7. 既往実験の結果との比較

今回の実験における群集圧は、全般に既往実験の結果よりも小さい値を示した(図17)。これは、実験の前提条件が異なることが一因と考えられる。すなわち、既往実験では被験者が一方向に一齐に押したときの正面圧を測定しているのに対し(注4)、今回の実験では、矩形の詰め込み領域に入れた群集を一方向から押し、そのときの正面圧と側面圧を同時に計測している。

明石の群集事故が起きる直前は、すでに群集流動がほとんど停止状態で、各人が押されるがまま、かつ体の向きがばらばらで、全員が一方向に一齐に押す状況にはなかったことが容易に推定できる。よって、今回の実験は既往の実験よりも、明石の群集事故に近い状況を再現していると考えられる。

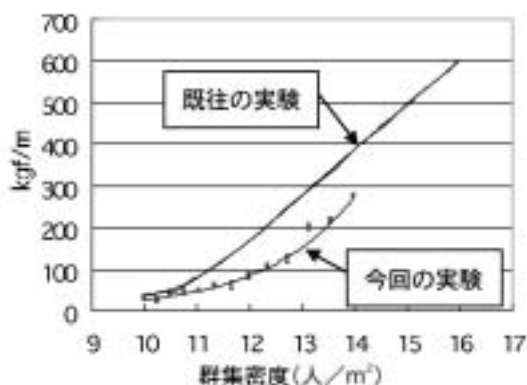


図17 既往の実験と今回の実験の結果比較

8. まとめ

人間の詰め込み実験により、群集密度と群集圧の関係を正面圧と側面圧に分けて定量的に明らかにした。また、明石歩道橋事故発生現場の手すりの曲がり状況と、手すりを支持するブラケットと同型同材

の試験体の曲げ実験等から、事故発生当時の群集圧力と群集密度を推定した。本研究が、群集事故の再発防止の一助となれば幸いである。

最後に、事故の犠牲となった方々に、改めて哀悼の意を表します。

謝 辞

曲げ試験・引張試験は、古川忠稔・名古屋大学助教授(当時大阪大学助手)にお願いしました。現場での変位量の測定は、林田大作・和歌山大学講師(当時大阪大学大学院生)に手伝っていただきました。また、詰め込み実験とそのデータ解析は末原隆司氏(奥村組, 当時大阪大学大学院生)の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

注

- 1) $1\text{N} = 1.019172 \times 10^{-1}\text{kgf}$ 。
- 2) 実験の実施は、朝日新聞(大阪版)2003年4月24日付朝刊で報道された。
- 3) 被験者数を28名としたのは、予備実験の結果、詰め込み可能な群集密度の限界が14人/m²程度と判断し、実験領域の面積から逆算したことによる。
- 4) 既往の実験(文1)は、その実施時期からみて、1952年6月18日に起きた日暮里駅事件(満員状態となった陸橋の突き当たりの壁がはずれ、十数名が下の線路に落下したところに電車が通りがかり、死者6名、重軽傷者7名を出した)を念頭に置いていたと考えられる。

参考文献

- 1) 松下清夫, 和泉正哲: 建築物に加わる外力及び荷重に関する資料, 日本建築学会論文報告集, 第57号, pp.245~248, 昭和32年7月
- 2) 日本建築学会編: 建築設計資料集成 - 人間, 丸善, 2003年1月
- 3) 明石市民夏まつり事故調査委員会: 第32回明石市市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告書, 平成14年1月