

氏名（本籍）	じょう 城	あき 明	ひで 秀	（東京都）
学位の種類	博士（工学）			
学位記番号	甲第957号			
学位授与の日付	平成29年3月18日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
学位論文題目	建築物の避難経路における群集歩行性状に関する研究			

論文審査委員（主査）教授 大宮 喜文  
嘱託教授 関澤 愛 嘱託教授 池田 憲一  
教授 岩岡 竜夫 教授 伊藤 香織  
准教授 水野 雅之

## 論文内容の要旨

現在、日本では建築物の避難安全性評価手法として、主に新・建築防災計画指針（以下、指針法）および避難安全検証法（以下、検証法）が用いられている。これらの手法では、時間を評価軸とし「避難時間（在館者が避難を終了するまでに要する時間） $\leq$ 許容避難時間（火災からの煙等が避難上支障のある高さまで降下するのに要する時間）」となることを確認することが通例となっている。この避難時間の構成要素には開口部通過時間があり、在館者の人数、開口幅、流動係数で決定される。指針法は避難通路の面積が十分確保されていることを前提とし、流動係数は1.5人/m/sを採用している。一方、検証法は前方の混雑状況を考慮し、居室開口部に接続する廊下内に全避難者を収容できない場合、居室開口部の流動係数を減じ、この状況が避難開始から終了まで定常状態で継続すると想定し計算を行っている。しかし、実際の居室開口部の歩行性状は廊下の群集密度、歩行速度、開口幅及び居室開口部先に接続するボトルネックなどの影響を受け、流動量の経時的変化が生じると考えられる。

そこで本研究では、建築物の避難通路となる廊下や展示場等の大空間の開口部を想定した歩行空間を模擬した区画を用いた群集歩行実験を行い、避難通路における群集歩行性状を把握し、流動係数などの定量的知見の収集を行った。

まず、廊下を經由して避難する建築空間を模擬した実大避難実験を実施し、廊下に滞留が発生する状況の群集密度と居室および廊下の開口部における流動量の関係を明らかにする。さらに、群集歩行実験から得られた知見に基づき、群集歩行性状に影響する支配的因子を明確にし、廊下の混雑状況に鑑みた群集歩行性状予測モデルの構築を行う。

第 2 章では、建築空間の避難通路となる廊下や展示場等の大空間の開口部を想定した歩行空間を模擬し、開口幅や合流などの空間条件を変化させた群集歩行実験を実施し、流動係数と歩行速度および群集密度等との関係を把握し、群集歩行の基本性状を明らかにした。歩行空間を模擬した通路状の区画を設置し、形状、通路幅、開口幅を変化させ、被験者 96 人による群集歩行実験を行った。実験の様子は実験棟の天井部分に設置したビデオカメラを用い撮影した。被験者には 2 色のマーカーを貼った帽子を着用させ、これを目印に撮影したビデオ映像から画像解析を行い、被験者の歩行データを抽出した。実験結果より、開口部を有する直線通路では、通路部の流動係数は開口幅が狭くなると減少し、通路幅に対して開口幅の比率が大きくなると増加する傾向が明らかとなった。また、合流によって発生する群集滞留に起因し、合流前の流動係数は直線通路と比較して低い値を示す結果が得られた。さらに、合流のある通路では、合流前の通路部の流動係数は、合流幅が大きくなると減少し、合流後の通路部の流動係数は増加する傾向が確認された。そして、開口部の流動係数は、多方向からの歩行者の集結により開口前が高密度化し、2.5 人/m/s 以上の高い値を示すことが明らかとなった。

第 3 章では、建築物の居室および廊下の構成を模擬した区画を用い、群集密度と居室開口部の流動量の関係等を把握しながら、居室および廊下内の群集歩行性状を明らかにした。実験は、廊下に接続する開口部を有する複数の居室を設けた実験区画を用いた。廊下に接続した開口部を持つ居室からの流動量と廊下内の群集密度との関係を検討するため、居室および廊下内に 56 人の被験者を配置した。実験結果より、有効廊下面積が大きいほど、廊下が限界密度に達するまでの時間が遅くなり、居室開口部の流動量が低減するまでの時間は長くなることを明らかにした。また、廊下に滞留が発生するまで、居室開口部の流動量は最大値を示し、廊下の滞留が限界密度に達した場合、居室開口部の流動量は、廊下開口部の流動量に依存することを明らかにした。居室から廊下への開口部が 1 箇所の場合、居室と廊下の開口部の流動量は等しくなり、廊下の滞留により流動量が減衰する閾値は概ね 2.8 人/m<sup>2</sup> となることが分かった。これらの実験結果を踏まえ、避難通路における群集密度と流動量の関係を示し、群集歩

行性状のモデル化のための概念図を示した。

第 4 章では、前章までの群集歩行性状の概念図を参考とし、避難通路における群集流を時系列で捉え、ボトルネックによる廊下の混雑状況に鑑みた群集歩行性状予測モデルを提案した。本予測モデルでは、歩行速度、流動係数、群集密度を主な入力値とし、廊下を複数の空間に分割し、各分割空間内を移動する歩行者の流動量を逐次計算することで、廊下内の歩行者の滞在人数を算出し、廊下内の群集密度を予測可能にしている。また、実験から得られた最大歩行速度、最大流動係数、限界群集密度を入力値として用いた予測結果は、群集密度の増減に応じた流動量の変化など、実験結果と良好に一致することを確認した。

## 論文審査の結果の要旨

建築物の避難安全性能評価手法では、建築物からの避難時間を算出する際、避難通路中の開口部等の流動係数が肝要なパラメータとなる。現在、日本では、この流動係数の値として、1.5 人/m/s を標準値として採用し、建築物の実務設計を行うことが一般的である。しかし、この値は 1950 年代に実施された既往研究などから導出されており、群集流が通過する開口部先の滞留状況が詳細に示されていない。一方、近年の研究から流動係数は、開口部先の滞留状況の影響を受けることが指摘されている。すなわち、建築物の廊下などの避難通路に形成される群集の一方向流に対し、廊下に面する居室から開口部を介し合流する群集の開口部の流動係数は変動することが考えられる。そこで本論文は、居室から安全な場所に至るまでの一連の群集流に着目し、特に避難通路となる居室や廊下からの避難を想定した建築空間を模擬し、避難者人数、通路幅、開口部の幅、数、位置などの条件を変化させた群集歩行実験を行っている。群集歩行実験では、廊下の群集流の状況を変化させ、廊下の群集密度と居室や廊下の開口部を介した流動量の関係などを明らかにし、流動係数に関する考察を行っている。さらに群集歩行実験から得られた知見に基づき、群集歩行性状に影響する支配的因子を明確にし、簡易な群集歩行性状予測モデルを構築している。そして、構築したモデルを用いた計算結果は、実験結果と良好に一致することを確認し、本モデルが建築物の実務設計で使用できる実用性の高いことを明らかにしている。本論文は全 5 章で構成されている。

第 1 章では、1930 年代から 2000 年代に行われた既往の研究の結果から群集歩行時の流動係数に着目し、その課題を整理し本論文の研究の目的と成果の要約を示している。

第 2 章では、群集歩行の基本性状を把握するため、群集流の個々の歩行者のデータを記録するための画像解析技術を構築し、通路幅が十分に広い場合の開口部通過に関する実験、および、通路の途中に開口部を設けた一方向の群集流に関する実験を実施している。この実験から開口部幅と通路幅の割合に対する開口部の流動係数の変化を定量的に

明らかにしている。さらに、一方向の群集流に対して直交方向に群集を合流させた開口部先の空間を混雑させた状況下の開口部および通路部の流動に関する実験を実施し、開口部の流動係数と群集密度の関係を明らかにしている。

第3章では、居室および廊下内の群集歩行性状を把握するため、建築物の居室および廊下の構成を模擬した実大模型を用い、群集歩行実験を実施している。この実験から居室から廊下を経由して廊下の開口部を流出するまでの群集歩行性状を明らかにし、居室の開口部先の廊下が高い群集密度となることで、居室の開口部からの流動量は廊下の開口部の流動量に依存し、この流動係数は居室および廊下の開口部幅、廊下幅、および廊下の開口部の流動係数で整理できることを明らかにしている。さらに、群集歩行性状予測モデルを構築するために、廊下を経由する居室から廊下の開口部を通過するまでの廊下の群集密度と開口部の流動量の関係を模式図として提案している。

第4章では、廊下の混雑状況を踏まえた群集歩行性状の支配的因子を明らかにするため、簡易な群集歩行性状予測モデルの構築を行っている。第3章で得られた知見を基に、廊下を複数の空間に分割し、各分割空間内を移動する歩行者の流動量を逐次計算することで、廊下内の歩行者人数を算出し、廊下の群集密度を予測する群集歩行性状予測モデルを提案している。本予測モデルと実験結果を比較し、群集歩行性状の支配的因子は、最大流動係数、限界群集密度、最大歩行速度であることを示し、それらを入力パラメータとして用いることで、流動係数の時間変化の予測が可能であることを明らかにしている。

第5章では、第1章から第4章において得られた知見を整理するとともに、今後の展望について論述している。

以上のように、本論文では、建築物の避難通路の流動係数に関する有益な知見を示し、混雑状況を踏まえた群集歩行性状の支配的因子を明らかにし、建築物の避難通路における群集歩行性状の簡易な予測を可能としている。本論文の成果は、建築物の避難通路における群集歩行性状を把握する上で工学的な貢献度が極めて高いものであると確信する。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分価値あるものと認める。