

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	屋外鉄骨避難階段の振動特性 その2 歩行振動数の把握
Title(English)	Dynamic Characteristics of an External Steel Emergency Staircase Part 2: Evaluation of walking frequency
著者(和文)	李ミンフェイ, 佐藤大樹, 高野智樹, 張云浩, 鎌野隆貴, 陳引力
Authors(English)	LI Minhui, SATO Daiki, TAKANO Tomoki, ZHANG Yunhao, KAMANO Ryuki, CHEN Yinli
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, 1, , pp. 385-388
Citation(English)	, 1, , pp. 385-388
発行日 / Pub. date	2026, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

屋外鉄骨避難階段の振動特性

その2 歩行振動数の把握

構造—振動		正会員 ○ 李 ミンフエイ ^{*1}	正会員 佐藤 大樹 ^{*2}
		// 高野 智樹 ^{*3}	// Zhang Yunhao ^{*4}
鉄骨避難階段	振動計測	// 鎌野隆貴 ^{*3}	// 陳 引力 ^{*5}
	防災訓練		

1. はじめに

屋外鉄骨避難階段は、建物の外部に設置されることから、利用者にとって目に触れやすい構造である。また、避難時には多くの人と同時に利用するため、階段の振動は安全性だけでなく利用者の心理的な安心感にも影響する可能性がある。特に、部材を軽量化して細く設計した場合には、歩行によって生じる振動が増大することが懸念される。このような背景から、屋外鉄骨階段における歩行振動の特性を把握し、避難者がどの程度不安を感じるかを評価することが重要である。既往研究では、屋内階段における歩行振動の計測が報告されている¹⁾⁴⁾。しかし、屋外鉄骨避難階段において、防災訓練中の歩行振動数と避難者の感覚を同時に評価した研究は検討例が少ない。そこで本研究では、東京科学大学百年記念館⁵⁾の屋外鉄骨避難階段における、防災訓練参加者61名の歩行振動数を計測し、その特徴を評価することを目的とする。

2. 振動数の評価方法

2.1 振動数評価方法の概要

本報では、東京科学大学百年記念館屋外避難階段を対象として、下降時における避難者の歩行挙動を把握することを目的とし、4台のカメラを用いた映像計測を実施した。対象とした東京科学大学百年記念館屋外鉄骨避難階段は複数層にわたって連続する構成を有しており、下降時には上層階からの避難者と中間階からの避難者が合流する歩行環境を形成する。このような条件下における歩行挙動を適切に把握するため、本報では、避難階段全体を俯瞰的に捉えることと、各階ごとの歩行動作を詳細に記録することの両立を重視した計測手法を採用した。

図1に示すように、本報では計4台のカメラを設置した。このうち、カメラ1およびカメラ2は、避難階段全体の構成および避難者の移動経路を把握することを目的として配置した。これらのカメラは、階段全体を広範囲に撮影可能な位置に設置されており、避難者がどの階から

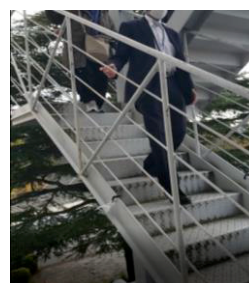
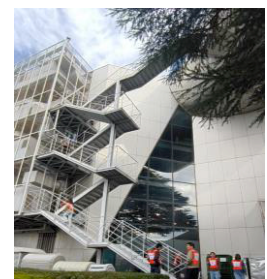
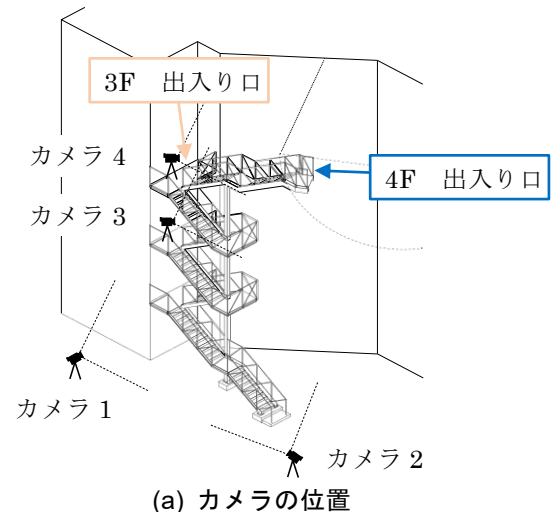


図1 防災訓練のカメラ設置

下降を開始し、どの時点で他階の避難者と合流するかを時系列的に確認できる構成となっている。一方、カメラ3とカメラ4は、各階段区間における歩行動作の詳細な分析を目的として設置した。具体的には、3階の踊り場、および4階の踊り場といった代表的な下降区間を対象とし、避難者の足運びや歩行リズムが明確に確認できる画角を確保した。これらのカメラ配置により、避難者の全体的な移動状況と局所的な歩行特性の双方を同時に把握することが可能となっている。

2.2 振動数の評価手法

撮影された映像データは、避難者の階段を降りる動作が明瞭に確認できるフレームを用いて評価を行った。歩行振動数の算出にあたっては、主に各避難者の足の接地動作に着目し、一定区間における歩行周期を映像上で計測する方法を採用した。

歩行動作が比較的安定している区間については、カメラ1の映像を用いて詳細な計算を行い、階段の踊り場付近や合流部など、歩行リズムが変化しやすい区間については、必要に応じてカメラ3およびカメラ4の映像を参照した。なお、避難者同士の重なりや手すり等による遮蔽により歩行動作の判別が困難な場合には、複数カメラの映像を相互に比較することで判定精度の向上を図った。

具体的な手順としては、動画を再生しながら、各避難者が階段を一段下りた瞬間を確認し、そのタイミングに合わせ、「一歩分の下降動作」に対応する経過時間を記録する。以降、同一避難者について、歩行が継続している区間において一歩ごとにラップ操作を繰り返し、連続した歩行データを取得した。各ラップ間の経過時間から歩行振動数を計算する。なお、本報では、踊り場付近における歩行動作についても解析対象に含めている。踊り場では、進行方向の変化や一時的な歩行調整が生じるため、歩行周期の判別精度が他の区間と比較して低下する可能性がある。しかしながら、踊り場区間を解析対象から除外した場合、どの時点でデータを切り分け、どこから再度解析を開始するか判断が困難となり、かえって主観的な操作が増加するおそれがある。

3. 振動数の結果

本報では、避難階段における下降歩行時の歩行振動数に着目し、出発階の違い、下降順序および性別が歩行特性に及ぼす影響について分析を行った。図2には避難者が1階まで降りた時前の避難者との間隔時間を示している。なお、図2横軸のNo.は避難者が地上に降りた順番で付けている番号である。平均的避難者間の間隔はおおよそ1.2sの歩行距離である。ただし、最初の避難者とNo.5, 8, 59, 61などの避難者は前の避難者がいない、あるいは前方の避難者が一定の時間降りた後にまた降り始めることによって、時間間隔が大きくなっている。

図3(a),(b)に示す箱ひげ図は、3階から下降を開始した避難者群（白色箱ひげ図）と、最上階である4階から下降を開始した避難者群（緑色箱ひげ図）について、個人ごとの歩行振動数分布を示したものである。各箱ひげ図において、実線枠は男性、破線枠は女性を表している。横軸は実際の下降順序に基づく避難者番号であり、4階からの避難者が先行して下降し、その後、3階からの避難者が階段流に合流する実験条件となっている。縦軸は歩行振動数[Hz]であり、各避難者の歩行中に得られたデータの分布特性を示している。

図3(a)の3階から避難した避難者群の結果（白色箱ひげ図）を見ると、歩行振動数は概ね1.5~3.0Hzの範囲に集中しており、個人差は存在するものの、全体として比較的安定した分布を示していることが確認できる。多くの避難者において四分位範囲は大きくなく、階段を降りる歩行リズムが一定に保たれていることが示唆される。性別による差異に着目すると、男性（実線枠）と女性（破線枠）の中央値は一部で差が見られるものの、全体として明確な傾向の分離は認められない。すなわち、3階からの下降という同一条件下においては、性別よりも個人の歩行特性や当該時点の行動状態が歩行振動数に与える影響の方が支配的であると考えられる。また、一部の避難者において外れ値が確認されるが、これらは一時的な歩幅調整や速度変化によるものと考えられ、群全体の傾向を代表するものではない。

図3(b)の4階から下降を開始した避難者群（緑色箱ひげ図）では、3階避難者とは異なる特徴が見られる。初期段階においては、歩行振動数の中央値が比較的高く、2.0~3.5Hz程度に分布する避難者が多い。これは、避難開始直後には前方の拘束が少なく、各避難者が比較的自由的な歩行リズムを維持しているためと考えられる。時間が経過して、3階からの避難者が合流する段階以降では、歩行振動数の中央値が徐々に低下し、分布範囲も狭まる傾向が確認できる。この傾向は屋内階段を調査した文献³⁾でも指摘されており、階段内の歩行密度の増加や前方避難者の影響により、歩行リズムが周囲に同調していくことを反映している。性別による比較においては、4階から降りた避難者においても、男性と女性の間に一貫した差異は認められなかった。個々の避難者レベルではばらつきが存在するものの、性別が歩行振動数を支配的に決定しているとは言い難い。

4. 考察

3階および4階の避難者の結果を総合的に比較すると、歩行振動数に対して最も大きな影響を与えている要因は、出発階および下降順序、すなわち階段内における歩行環境の拘束条件であることが示唆される。特に、上層階からの下降者と中間階からの下降者が同一の階段

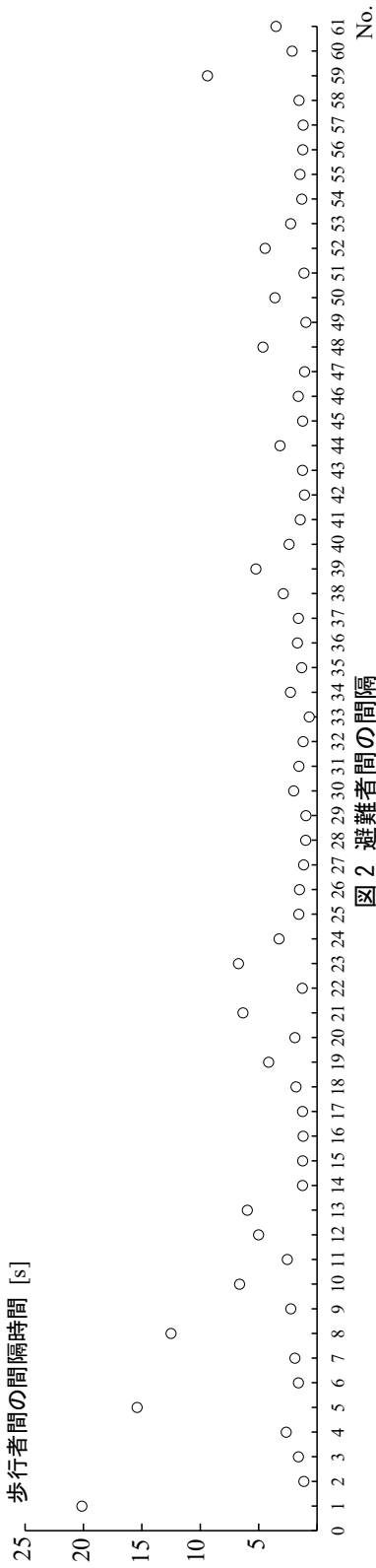


図2 避難者間の間隔

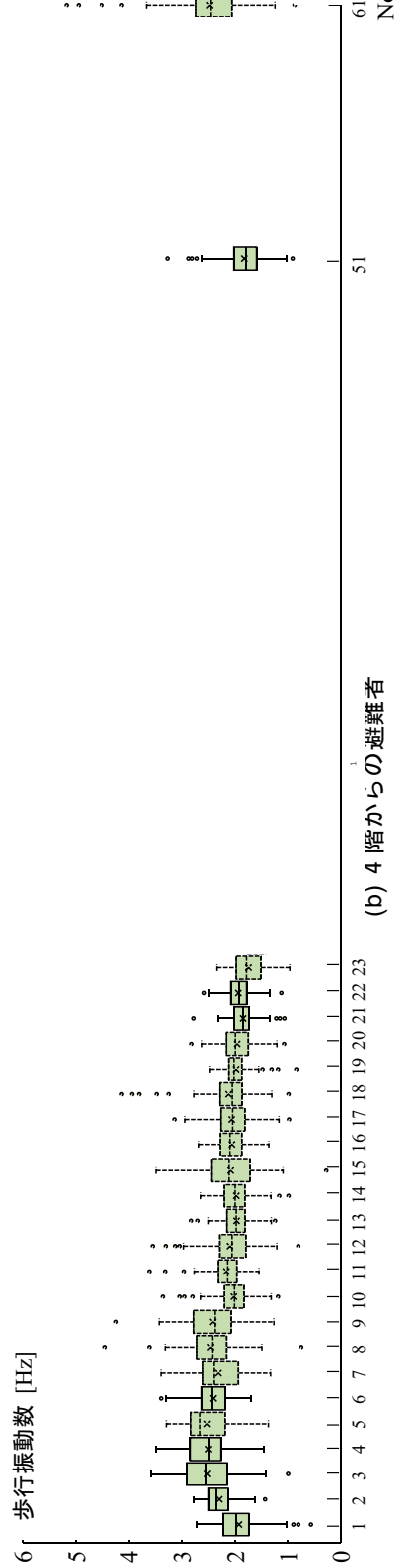
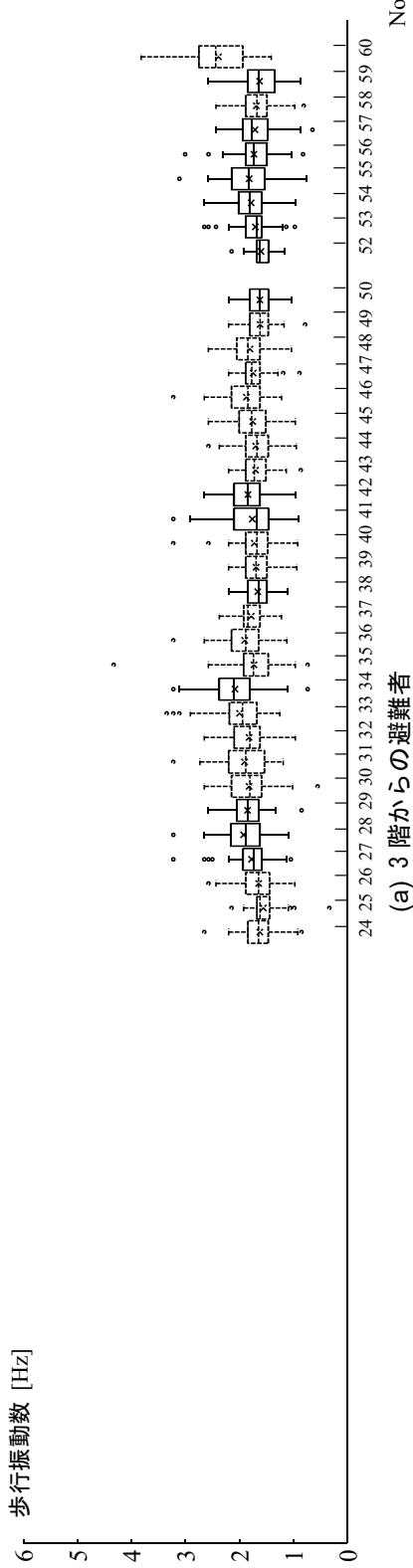


図3 避難者の歩行振動数分布

空間内で合流するという条件は、個々の歩行挙動に顕著な影響を及ぼすと考えられる。

4階からの避難者は、避難の初期段階において比較的高い歩行振動数を示しており、これは前方に歩行者が存在しない、あるいは歩行密度が低い状態において、各避難者が自身の歩行リズムを維持しやすい環境にあったためと解釈できる。特に、図2によって避難初期において避難者間の時間間隔が比較的大きく、前方との距離が確保された状態で歩行していることが分かる。この時間間隔の大きさは、各避難者が自身の歩行リズムを維持しやすい環境にあったことを示しており、前述した下降初期における高い歩行振動数の結果と整合的である。一方で、下降が進行し3階からの避難者が合流する段階では、避難者間の時間間隔が次第に縮小し、分布のばらつきも小さくなる傾向が認められる。これは、階段内の歩行密度が増加し、避難者が前方の歩行者に追従する形で歩行速度や歩行リズムを調整している状況を反映していると考えられる。これによって、下降が進行し3階避難者との合流が生じた後には、4階避難者の歩行振動数が3階避難者の分布範囲に近づく傾向が確認された。この結果は、歩行者が周囲の流れに同調し、前後の歩行者との距離や速度に応じて歩行リズムを調整していることを示唆している。

このような傾向から、避難階段における歩行挙動は、個人固有の身体特性や歩行習慣よりも、周囲の歩行者との相互作用および空間的制約条件によって支配される側面が大きいと考えられる。特に合流部付近では、無意識的な速度調整や歩幅の変化が生じやすく、その結果として歩行振動数が一定の範囲に収束することになっている。また、本歩行振動数の評価から、合流後において極端に高い歩行振動数や大きなばらつきは確認されなかった。これによって、本実験条件下の避難階段において、歩行の流れが比較的安定した状態で形成されていたことを示している。すなわち、合流が生じた場合であっても、歩行者間の相互調整により、急激な加速や停止といった不安定な挙動が抑制されていたと考えられる。一方で、本結果は特定の避難者構成および防災訓練条件下で得られたものであり、混雑度や避難者属性が異なる場合には、異なる挙動が生じる可能性も否定できない。したがって、合流条件が歩行振動数に及ぼす影響については、今後、より多様な条件下での検討が必要である。

5. まとめと今後の課題

本報では、東京科学大学百年記念館屋外鉄骨避難階段を対象として、防災訓練時における避難者の下降歩行挙動に着目し、歩行振動数の特性について実験的に検討を行った。特に、出発階の異なる避難者が同一階段内で合流する条件下における歩行挙動の変化を明らかにすることを目的とした。実験では、防災訓練時に撮影された映像データを用い、一步ごとの歩行周期を算出し、被験者ごとの歩行振動数を整理した。これらのデータを基に、出発階および下降順序の違いが歩行振動数に及ぼす影響について分析を行った。その結果、3階および4階から下降した避難者の間で、歩行振動数の分布に差異が確認され、特に4階避難者は下降初期に高い歩行振動数を示す一方、合流後には3階避難者の分布範囲に近づく傾向が認められた。このことから、避難階段における歩行振動数は、個人特性よりも歩行環境や前後の歩行者との相互作用によって調整されることが示唆された。一方で、本報は特定条件下での検討に限られており、今後は避難者数や歩行条件の拡充、他の歩行指標との併用による解析が今後の課題である。

参考文献

- 1) 高橋 賢司, 榎田 裕, 北嶋 裕: 階段設計における振動解析と振動性能評価: その2 歩行振動と評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) 1995.8
- 2) 大佛 俊泰, 吉行 菜津美, 田頭 まき, 沖 拓弥, 伊山 潤, 福島 佳浩: 赤外線人感センサを用いた階段室内歩行者数の推定, 日本建築学会計画系論文集 2022.9
- 3) 浦川 奈実, 福田 眞太郎, 小山 雄平, 西谷 伸介, 横山 裕: 住宅階段を対象とした昇降振動の評価方法に関する基礎的検討 その1 歩行振動の評価方法の適用性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) 2025.9
- 4) 藤井 皓介, 水野 雅之, 佐野 友紀: 階段合流時における流入順序および歩行状態が異なる群集の流動性状把握実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 2024.8
- 5) 奥山 信一: 空間の詩人 篠原一男 2025.6

*1 東京科学大学 博士学生

*2 東京科学大学 准教授・博士(工学)

*3 東京科学大学 大学院生

*4 東京科学大学 研究員・博士(学術)

*5 東京科学大学 助教・博士(学術)

Doctoral Student, Institute of Science Tokyo. *1

Associate Professor, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng. *2

Graduate Student Institute of Science Tokyo. *3

Researcher, Institute of Science Tokyo, Ph.D. *4

Assistant Professor, Institute of Science Tokyo, Ph.D. *5