

階層構造物における動力学モデルに基づいた避難行動実験

九州大学大学院 学生会員○井上 裕章 正会員 善 功企
正会員 陳 光斉 正会員 笠間 清伸

1. 目的

災害時の人間避難行動は、人の行動力のほか、心理要素や環境要素など多くの要素の影響で非常に複雑な現象であり、これまでの研究においても多くの避難行動モデルが提案されている。その一方で、避難行動は3つの物理量（時間、速度、距離）間の関係で表され、動力学の観点からアプローチすることができる。

本研究の目的は、避難時の人間行動を動力学的に捉え、より現実的にシミュレーションできるシステムの開発をするために、避難行動を対象とした各種走行実験を行い、人間避難行動特性を明らかにすることである。

2. 内容

2-1. 動力学モデル

平常環境で人間が全力前進する場合、速度の変化パターンは図-1(a)のように、加速期・全速期・減速期とに分けられる。避難時を想定し減速期を除くと、人間固有の能動力 $F (=mG_0)$ と速度に比例する抵抗係数 $k (=mk_0)$ の導入によって、式(1)のような動力学微分方程式で表現することができる。

$$\frac{d^2 \vec{u}}{dt^2} + k_0 \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{G}_0 \quad (1)$$

初期条件、 $t=0: v=0$ の下で式(1)を解くと、

$$v = \frac{G_0}{k_0} (1 - \exp(-k_0 t)) \quad (2)$$

また、境界条件、 $t \rightarrow \infty: v = v_{\max}$ の下で式(2)を解くと、

$$v_{\max} = G_0 / k_0 \quad (3)$$

ここで、 G_0 : 全力走行時加速度(m/s²) k_0 : 抵抗係数(1/s)

一方、避難環境における走行速度の変化は、経路中にある障害や周囲の環境、心理的变化の影響等により図-1(b)のような複雑な曲線になる。この速度変化を表す影響要因を避難環境における抵抗関数 $f(K_n)$ を用いて、式(4)に示す微分方程式に導入することにより、避難行動を動力学的にモデル化できる。

$$\frac{d^2 \vec{u}}{dt^2} + k_0 \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{G}_0 + \sum_n \vec{f}_n(t) = f(K_n) \cdot \vec{G}_0 \quad (4)$$

ここで、 $K_n (=v/v_{\max})$: 各避難環境における影響係数であり、 K_n の値が大きいほど $v_{\max}$ に近い走行が可能であることを意味する。

2-2. 実験概要

個人の G_0 と k_0 、および階段や曲がるときの抵抗関数を明らかにするために、以下の実験を行った。

- i) 個人実験：個人の能動力実験として、20代男性による50m 全力走行実験を行った。また、階層構造物からの避難を想定し、領域による影響係数 K_1 を求めるため、階段昇降実験($\theta=29^\circ$ と $\theta=34^\circ$ の2種類)、コーナー実験、廊下走行後階段昇降実験($\theta=29^\circ$)、踊り場(180° 回転)実験を行った。
- ii) 集団実験：密度などの群集による影響係数 K_2 を求めるため、4階 RC 階層構造物において、10～20代学生による廊下走行実験(30人集団)、階段昇降実験(20人・50人・100人集団)を行った。

キーワード 避難行動, 動力学モデル

連絡先 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院防災地盤工学研究室 TEL 092-642-4399

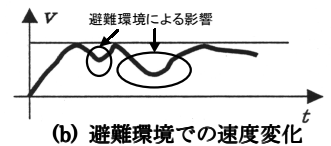
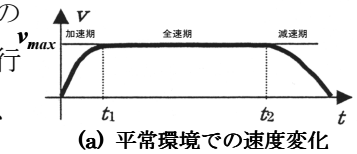


図-1. 速度の変化パターン

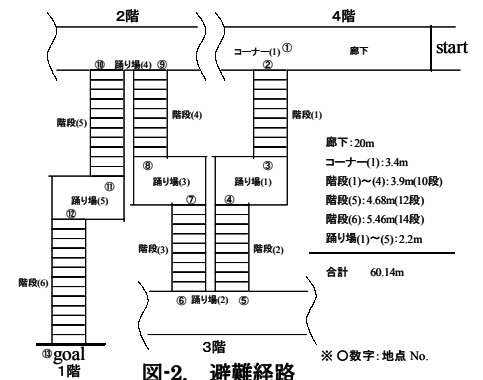


図-2. 避難経路

iii)避難実験：図-2 に示した 4 階 RC 階層構造物を実験対象とし、集団避難実験を行った。また、個人実験で得られたデータを参考に、避難者 1 人を代表して、周囲の避難者の影響がない状態を仮定して、避難実験の動力学シミュレーションを行った。

2-3.実験結果および考察

i)個人実験：50m 走行実験では、実験者 1 人ひとりに対して 0.5 秒毎の位置から算出した速度をプロットし、式(2)により回帰して各個人の G_0, k_0 を求め、実験者全員の重み付き平均 $\bar{G}_0, \bar{k}_0$ を算出した。平均した 50m 全力走行結果を図-3 に示す。 $\bar{G}_0=8.78$ ($\sigma_{G_0}=0.929$), $\bar{k}_0=1.14$ ($\sigma_{k_0}=0.153$) より式(3)を用いると、この場合、実験者の平均 $v_{\max}$ は $v_{\max}=7.69$ (m/s)となる。

階段実験では、加速後一定速度となった時の速度 v を全員について平均し、影響係数を求めた。また、コーナー実験と廊下走行後階段昇降実験では、それぞれの領域において、減速開始から加速開始までの速度変化を平均して影響係数を求めた。個人実験で得た各避難環境における領域による影響係数 K_1 を表-1 に示す。屋内一般階段では上り・下り共に平常環境における $v_{\max}$ の約 40%、角度がある非常階段では $v_{\max}$ の約 26%、コーナーでは $v_{\max}$ の約 48%、廊下と階段の間の踊り場では、上りが $v_{\max}$ の約 47%で下りが $v_{\max}$ の約 38%、階段と階段の間の踊り場では $v_{\max}$ の約 22%の平均速度となる。階段が含まれる領域では、上りの方が平均速度が速い傾向にあり、下りでは心理的恐怖感の影響が関係すると考えられる。

ii)集団実験：集団廊下実験と集団階段実験で得た密度 ρ と影響係数 K_2 の関係を図-4 に示す。どちらも密度が増加するにつれ K_2 は減少し、その関係はほぼ線形であった。階段では集団人数による平均速度に差はあるが、密度による影響は上り・下り共にほぼ同じような関係があった。

iii)避難実験：式(4)に表-1 の影響係数 K_1 を代入し、動力学モデルを用いた理論値と実験値を比較した結果を図-5 に示す。ここでは、個人実験で得た領域進入速度を考慮した加速期・減速期を含めて計算を行った。その結果、理論値が実験値より 0.92 秒早くなり、この差は主に後半の階段領域で出た。その原因として、階段領域で用いた K_1 は、1 区間の階段における影響係数であるのに対して、実際の避難では、距離が長くなったことで遅くなったと考えられる。

3. 結論

- 1)平常環境における全力走行を加速度 G_0 と抵抗係数 k_0 を用いることで、動力学的に表すことができた。また、各避難環境における速度は、平常環境での全力走行速度に対して、階段では 40%程度、コーナーでは 48%程度、階段と階段の間の踊り場では 22%程度の速度となった。
- 2)廊下・階段共に、群集走行において密度が増加するにつれて速度は減少し、線形関係があった。
- 3)個人実験から得た各避難環境における影響係数を微分方程式に導入し、この解を理論値として避難実験の実験値との比較を行った結果、理論値と実験値がほぼ一致した。よって、動力学モデルを用いて人間避難行動をシミュレーションすることが可能といえる。

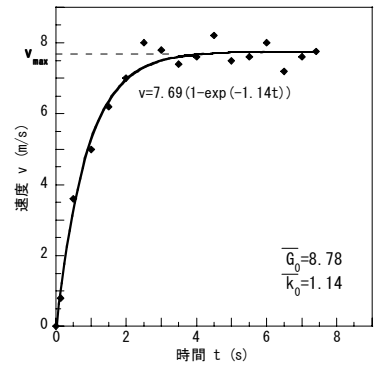


図-3. 50m 全力走行回帰線

表-1. 領域による影響係数 K_1

領域	$K_1 (=v/v_{\max})$
一般階段($\theta=29^\circ$) (上り)	0.410
" (下り)	0.393
非常階段($\theta=34^\circ$) (上り)	0.281
" (下り)	0.241
コーナー	0.484
廊下～階段の踊り場 (上り)	0.469
" (下り)	0.383
階段～階段の踊り場 (上り)	0.220
" (下り)	0.229

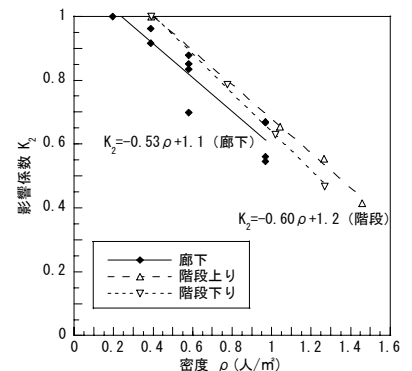


図-4. 廊下・階段における密度- K_2 関係

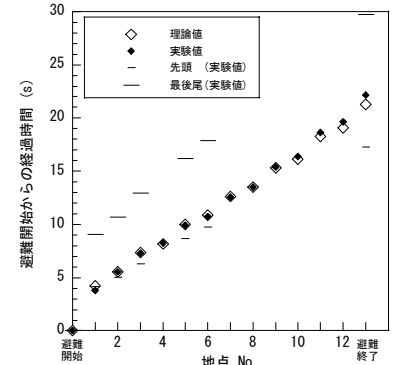


図-5. 理論値と実験値の比較

《参考文献》 1)陳光齊・善功企・笠間清伸・高松賢一：波浪による海底地盤砂粒子挙動の数値シミュレーション、土木学会海岸工学論文集、第 48 巻, pp476-480, 2001