

津波に対する避難訓練データを用いた
 避難行動予測モデルの妥当性の検証

Verification of Evacuation Model against Tsunami Based on Evacuation Training Data

掛川秀史¹・大山 巧²

Shuji KAKEGAWA and Takumi OHYAMA

The authors have developed the evacuation model against tsunami, which can handle the evacuation behavior in a district with several buildings. The main purpose of the paper is to verify the model based on evacuation training data. Evacuation behavior of 184 employees among three buildings in a company was recorded during evacuation training against tsunami. Also, the authors have simulated evacuation behavior during training under the same condition with training and compared the predicted results of the model with the ones which are obtained from training. The main indexes for evacuation behavior such as the predicted time to complete the evacuation are almost the same with the data in training and it was confirmed that the model could precisely predict evacuation behavior against tsunami.

1. はじめに

筆者らは、津波遡上時の街区レベルでの群集避難行動を予測し、避難場所の設定や避難誘導対策等の津波避難計画の立案に活用するため、個別の施設の配置や形状、空間構成を考慮した複数建物間の群集避難行動モデルを提案した(掛川・大山(2006))。しかし、津波発生時の避難行動に関する実測データは、これまでにほとんど公表されておらず、予測結果の妥当性を検証することが困難であった。避難行動予測の基礎的なデータとして必要となるのは、水平面や傾斜面での歩行速度、扉通過時の流動係数等が挙げられる。特に、津波に対する避難行動は、階段やスロープを上る必要があることに特徴がある。

本研究は、津波を想定した避難訓練時の避難行動を計測し、主に扉の通過や階段上昇時の避難に関する基礎的なデータを整備するとともに、筆者らが開発した避難行動予測モデルを用いて避難訓練の行動を再現し、予測結果の妥当性を検証することを目的とする。

2. 津波を想定した避難訓練での行動計測

(1) 対象施設と計測方法

主に 3 棟の建物からなる事業所を対象として行われた複数建物間での避難訓練の人の移動状況を計測した(図-1)。訓練参加者数は 184 名であった(表-1)。訓練参加者は、事業所内の従業員であり、参加者全員が歩行補助具などを利用せずに自力で移動可能な健常者であった。

訓練では、館内放送を利用して訓練開始を伝達した 1 分後に再度避難誘導放送を行い、事業所内の全員が一斉

に避難を開始することを原則としたが、屋外と建物 C の避難者の一部は、訓練開始放送と同時に避難を開始した。

最終避難場所は建物 A の 3 階(地盤面からの高さ 15 m)であり、建物 B、C の避難者は、各々の建物の避難口から一旦屋外に出た後、建物 A の避難口 A1、A2 から建物 A に入り、3 階の最終避難場所に避難を行った。建物 A の避難口 A1、A2(幅員 0.9 m)の前に到着した段階で、一時待機場所 A1、A2 で避難者は一旦待機し、各々の待機場所の代表者 1 名が、建物 A 内の避難経路の安全確認を行った後に建物内に避難することを原則とした(図-1)。建物 A では 3 階まで避難を行うために避

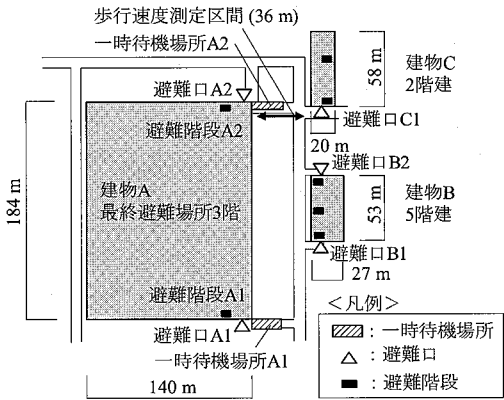


図-1 避難訓練対象事業所内の施設と避難者の配置

表-1 訓練参加者の初期配置

建 物	各階人数[人]				合計 [人]
	4 階	3 階	2 階	1 階	
建 物 A	1	8	0	11	20
建 物 B	0	39	49	16	104
建 物 C	-	-	32	5	37
敷地内 (屋外)	-	-	-	23	23
合 計					184

1 博(工) (株)大崎総合研究所 主席研究員
 2 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 流体解析グループ長

表-2 避難階段 A1, A2 の仕様

仕 様	
幅 員	1.2 m
高 さ	15 m
傾 斜 角	39.8 度
歩 行 距 離 *	段 床
	踊り場
	23.4 m
	11.6 m
	合計
	35.0 m

* 歩行距離は、段床、踊り場の中心線上の移動距離とし、段床部分は段鼻を結んだ斜めの移動距離とした。

表-3 避難行動の測定点

建物	階	位 置	測定項目
建物 A	3 階	避難階段 A1 出口	通過時間, 通過人数
		避難階段 A2 出口	通過時間, 通過人数
	1 階	避難階段 A1 入口	通過時間, 通過人数
		避難階段 A2 入口	通過時間, 通過人数
		避難口 A1	通過時間, 通過人数
		避難口 A2	通過時間, 通過人数
	屋外	一時待機場所 A1	到着時間, 待機人数
		一時待機場所 A2	到着時間, 待機人数 測定範囲歩行所要時間
建物 B	1 階	出口 B1	通過時間, 通過人数
		出口 B2	通過時間, 通過人数
建物 C	1 階	出口 C	通過時間, 通過人数

避難階段 A1, A2(幅員 1.2 m) の 2 箇所の階段が利用された。建物 A の避難階段 A1, A2 の仕様を表-2 に示す。

避難行動の計測は、事業所内の各建物から最終避難場所に至る避難経路上の主要な測定点 11 点(表-3)を選定し、ビデオカメラを用いて各々の測定点での避難者の通過人数、通過時間を記録した。屋外の一時待機場所 A2 の周辺では、建物 C から建物 A へ避難する人を対象として、ビデオ上で設定した測定区間(移動距離 36 m, 図-1 参照)の水平移動時間を計測し、歩行速度を算出した。

(2) 計 測 結 果

a) 避難所要時間

建物 A の階段 1 階入口, 3 階出口の通過人数(避難階段 A1, A2 の合計)の推移を図-2 に示す。敷地内の避難者が建物 A の最終避難場所に到達するまでの所要時間は、訓練開始放送後 565 s であった。図-2 では 50 名程度が訓練開始放送 60 s 後から階段 1 階入口を通過している。これらの避難者は、訓練開始放送と同時に避難を開始し、かつ建物 A の一時待機場所で待機することなく避難をしたことを示している。一時待機せずに直接建物 A に避難を行った避難者は、全員が避難階段 A2 を使用した。

b) 水平移動時の歩行速度

水平移動時の歩行速度の測定結果を図-3 に示す。歩行速度の測定対象者は、建物 C(一部屋外含む)から建物 A へ避難した避難者のうち、一時待機せずに避難を行った 25 名とした。水平移動時の避難者は、数名が列を成して移動しており、群衆歩行ではなく単独歩行に近い状態であった。平均歩行速度 V_m は 1.37 m/s, 標準偏

差 σ_m は 0.11 m/s であり、既往の健常者の単独歩行時の測定結果(例えば、紙野(1980))と概ね一致している。

c) 階段上昇時の歩行速度と群衆密度

建物 A の避難階段 A1, A2 において、1 階から 3 階まで上る際の平均歩行速度の分布を図-4 に示す。階段内の平均歩行速度は、表-2 の歩行距離(合計)と各避難者の歩行所要時間から算出した。

階段上昇時の平均歩行速度 V_L は 0.61 m/s, 標準偏差 σ_L は 0.07 m/s であった(図-4)。避難階段 A1, A2 を 1 階から 3 階まで上るのに要する時間の平均値は、各々 59 s, 58 s となる。階段上昇時は、移動する高低差が大きくなるほど歩行速度は低下する傾向があるが、今回の測定では移動する高さは 15 m で一般的な建物の 4 ~ 5

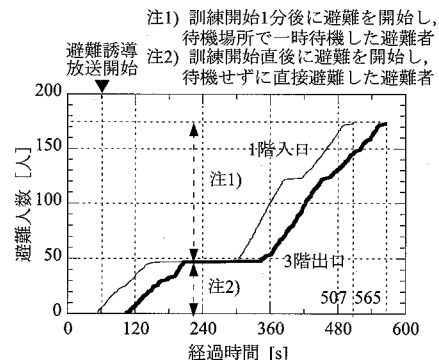


図-2 建物 A の階段 1 階入口, 3 階出口の通過人数の推移 (避難階段 A1, A2 の合計)

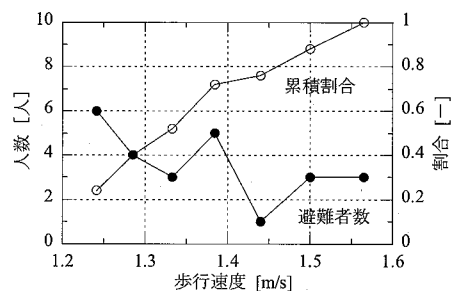


図-3 水平移動時の歩行速度の測定結果

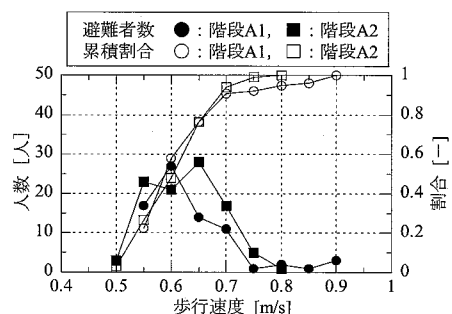


図-4 階段上昇時 (1 階から 3 階) の歩行速度の測定結果

階程度であるため、歩行速度の低下はあまり影響がないと考えられる。

階段内の人員密度の時間推移を図-5に示す。人員密度の最大値は、避難階段 A1 が 1.45 人/m^2 、避難階段 A2 が 1.03 人/m^2 となっている。階段下降時の人員密度の既往の分析結果 (Paul (1980)) によると、下降時の階段内の単位時間当たり通過人数は、人員密度が概ね 2 人/m^2 の時に最大となるといわれており、階段下降時と比較すると、階段内の人員密度は低くなる傾向がある。

d) 開口部での流動係数

建物 A の避難階段 A1 における通過人数の時間推移を図-6に示す。避難階段 A1 の避難経路上の単位時間当たりの通過人数 (図中の直線の傾き) は、1 階入口、1 階階段入口、3 階階段出口の順に低くなることから、避難者が階段を上るのに要する時間は、階段内の歩行の影響が最も大きいと考えられる。

避難階段 A1、A2 と避難口での平均流動係数 (単位時間当たり単位開口幅当たりの通過人数) の算出結果を表-4に示す。避難階段 A1 と比べて避難階段 A2 の方が平均流動係数は低くなっている。これは避難階段 A2 の

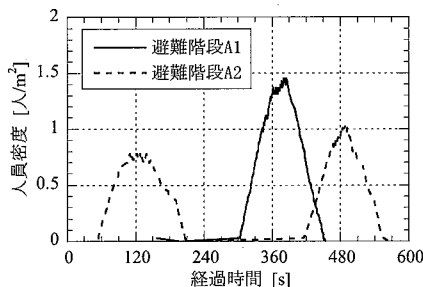


図-5 階段内人員密度の時間推移

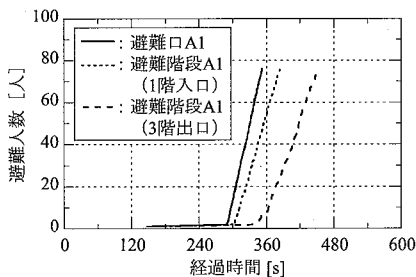


図-6 避難者数の推移 (建物 A: 避難階段 A1)

表-4 建物 A の避難口、避難階段における平均流動係数

	避難口 A1	避難階段 A1		避難口 A2	避難階段 A2	
		1 階入口	3 階出口		1 階入口	3 階出口
開口幅[m]	0.9	1.2	1.2	0.9	1.2	1.2
時間当たり通過人数[人/s]	1.21	0.91	0.68	0.92	0.64	0.52
平均流動係数[人/m/s]	1.34	0.76	0.57	1.03	0.54	0.43

1 階入口近傍に機材が置かれていたため、階段内への流入者数が一部制限されていたことが影響している。

3. 避難行動予測モデルによる予測結果の妥当性検証

(1) シミュレーションの条件

避難行動予測モデル (掛川・大山 (2006)) の妥当性を検証するため、訓練時に最終避難場所に向かう人の移動をシミュレーションによって再現した。

避難行動予測モデル (掛川・大山 (2006)) は、街区内的複数の建物間の個人単位の避難行動を予測する。エージェントベース言語の Repast を用い、空間モデル、避難者モデル、津波遡上モデルによってモデルを構築した。空間モデルは、計算対象とする建物内外の空間構成を、壁と扉で囲まれた閉空間の集合体としてモデル化し、空間の寸法、扉の位置・幅、障害物の寸法・位置、最終避難場所の位置等を条件として設定する。避難者モデルは、避難者個人の行動パラメータ (避難開始時間、移動時の歩行速度など) を管理し、避難者の移動目標設定、移動方向・位置決定を行う。津波遡上モデルは、津波遡上解析から得られた対象地域内の浸水深、流速の時系列データを管理し、避難者の被災の有無を判定する。

計算に際し、避難場所、避難開始時間、避難者の初期配置等の条件は、基本的に避難訓練と同じとした。ただし、避難訓練開始時点で屋外にいた避難者と建物 C の避難者の一部および建物 A の避難者は計算対象から除外し、表-5 のように避難対象者を設定した。この理由は、屋外と建物 C の避難者の一部は、避難訓練では館内放送を利用して訓練開始を伝達した 1 分後に再度避難誘導放送を行い、事業所内の全員が一斉に避難を開始することを原則としたものの、訓練開始放送と同時に避難を開始し、かつ建物 A に避難する前に一時待機場所で一旦待機することなく直接避難を行っていたためである。一方、建物 A の避難者は、避難訓練で大部分が避難階段 A1、A2 以外の階段を利用して避難していたため、計算対象から除外した。計算対象から除外したこれらの避難者 (計 60 人) は、図-2 において、先行して建物 A に避難を行っており、計算対象とする避難者の避難行動に影響を与えないため、避難行動予測モデルの計算結果と訓練の実測結果との比較には影響しないと考えられる。

避難行動の予測は、訓練開始の館内放送がされた時点 を時刻 0 とし、訓練開始放送 1 分後に、避難誘導放送に

表-5 シミュレーションにおける避難者の初期配置

建物	各階人数[人]				合 計 [人]	
	4 階	3 階	2 階	1 階		
建物 B	0	39	49	16	104	124
建物 C	-	-	20	0	20	

より表-5の計算対象とする避難者全員が一斉に避難を開始すると想定した。避難者の水平移動時の歩行速度は、避難訓練の実測結果から、 $1.37 \pm 0.22 \text{ m/s}$ ($V_m \pm 2\sigma_m$)とし、個人単位でランダムに変動させた。階段内の歩行速度は、掛川ら(2006)の方法を用いて、水平移動時の歩行速度と階段の傾斜角(表-2参照)に従って算出し、基準勾配35度に対して、 0.78 m/s と設定した(建設省(2000))。

建物B、Cの避難者は、避難訓練と同様、建物A内の避難経路の安全確認のため、一時待機場所に一定時間待機した後に、避難口A1、A2から建物Aに避難を再開させた。一時待機場所で待機する時間は、避難訓練の計測結果を用いることとし、最初の避難者が各待機場所に到着した時点から、一時待機場所A1は150s、一時待機場所A2は270sとした。

シミュレーションの計算ステップは0.2sとした。なお、計算上は、津波の伝播・遡上の影響は考慮していない。

(2) 計算結果と考察

a) 建物Bから屋外までの避難所要時間

建物Bの避難口B1、B2(開口幅、各1.6m)の避難者数の推移を図-7に示す。建物Bの1階出口での避難者の流出開始時間は、計算値の方が実測値よりも早く、避難所要時間も計算値(140s)の方が実測値(235s)よりも短くなっている。開口部の流動係数は、経過時間によらず一定で、実測値が0.30人/m/s、計算値が0.41人/m/sである。流動係数は、戸川ら(1955)による調査結果から、出口前に滞留が生じる程度の混雑時で、概ね1.5人/m/sといわれており、今回は出口前で滞留は生じていないと考えられるため、単位時間当たりのB1、B2出口への到達人数が、実測よりも計算結果の方が多かったと考えられる。

開口部の流動係数に違いが生じた理由は、今回の計測では訓練における建物B内部の避難行動を記録していないため正確には判断できないが、(1)建物B内にある3個所の避難階段の利用率が実測と計算で異なり、計算結果の方が各々の階段に避難者が均等に配分されていたこと、(2)実測では避難開始のタイミングが訓練開始1分後よりも遅かったこと等が原因として考えられる。

b) 避難者の避難経路選択

避難シミュレーションの出力例を図-8に示す。避難口B1、B2と一時待機場所との距離および位置関係のため、避難口B1を選択した避難者は避難階段A1を利用し、避難口B2を利用した避難者は避難階段A2を利用している。建物Aの各々の避難階段利用者の内訳を比較した結果を表-6に示す。各々の避難階段の利用者数は、計算値と実測値で9人の違いが生じている。建物Bは、建物内部に3カ所の階段を有し、中央の階段は、避難口B1、B2とほぼ等距離にある。避難行動予測モデルでは、距離の近

い避難口を優先的に選択するアルゴリズムとしているため、中央の階段を利用した避難者数が、避難口B1とB2のどちらの避難口を選択するかのばらつきが、避難階段の選択人数の結果に影響を与えていると考えられる。

c) 階段上昇時の通過所要時間と群集密度

避難階段A2の1階から3階までの通過所要時間の分布を図-9に、階段内の人員密度の推移を図-10に示す。

階段の通過所要時間の平均値は、実測値が57.9s、計算値が49.5sであり、計算値の方が実測値よりも所要時間が短い傾向がある。歩行速度に置き換えると、実測値0.60m/sに対して、計算値0.71m/sであり約0.1m/sの違いが生じている。これは、階段内の基準勾配に対して設定した歩行速度の基準値(0.78m/s)が、実測の結果よりも早かったことが原因と考えられる。一方、階段内の人員密度の最大値は、計算値は概ね1.25人/m²であり、避難階段A1、A2の実測値に近い値となっている。

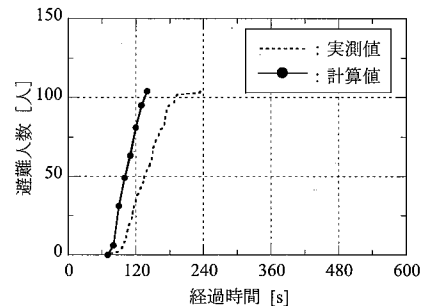


図-7 避難者数の計算値と実測値の比較
(建物B:避難口B1、B2の合計)

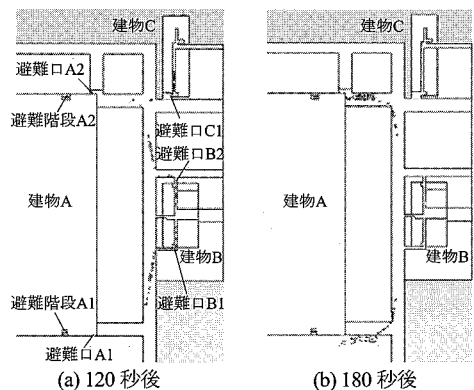


図-8 避難シミュレーションの出力例 (1階)

表-6 各避難階段を利用した避難者数の内訳

避難階段	避難開始時点の 避難者の位置	避難者数[人]	
		実測値	計算値
避難階段 A1	建物 B	74	65
	建物 C	30	39
避難階段 A2	建物 B	20	20
	合計	50	59

以上のことから、避難行動予測モデルは、基準となる歩行速度を適切に設定すれば、階段内の避難行動を概ね再現できると考えられる。

d) 最終避難場所への避難所要時間

建物 A の最終避難場所への到着人数（避難階段 A1, A2 の 3 階出口の通過人数）の計算値と実測値を比較した結果を図-11 に示す。計算値と比較を行うため、避難訓練の実測値は避難誘導放送に従い避難を開始し、待機場所で一時待機した避難者のみを対象とした値を用いた。

最終避難場所への到着人数の推移は、通過開始時間、終了時間、流動係数のいずれにおいても、計算値と実測値で概ね一致しており、計算値は実測値を精度よく再現できている。最終避難場所への到達時間は、階段 A1 で実測値 453 s に対し計算値 430 s、階段 A2 で実測値 565

s に対し計算値 580 s であり、計算値と実測値の誤差（-23 s, +15 s）は、階段 A1, A2 の経路の選択人数が計算値と実測値で異なることが最も影響していると考えられる。

e) 計算値と実測値の比較に基づく予測モデルの妥当性

複数建物間の避難性状を予測する際には、避難上のネックとなる開口部での流動係数や、階段内の上り下りに対する歩行速度や人員密度の評価が重要となる。上記 a) ~ d) の検討結果から、避難行動を予測する上で重要となる指標、すなわち開口部の流動係数、階段内の人員密度等に関して、計算値は実測値を精度良く再現できている。避難所要時間も計算値と実測値で概ね一致している。

以上の結果から、計算の前提条件となる避難開始時間や水平歩行速度等の条件を施設や避難者に応じて適切に設定すれば、掛川・大山(2006)の予測モデルは、複数建物間での避難行動を精度よく再現できると判断される。ただし、移動距離が長く、疲労により歩行速度が遅くなる場合等には、避難時間等の計算値の誤差は、今回の検討結果よりも大きくなる可能性があるため、街区規模等の適用可能範囲については、今後さらに検討が必要である。

4. ま と め

事業所における津波避難訓練時の避難行動を計測し、扉の通過や階段歩行の基礎的データ収集するとともに、筆者らが開発した避難行動予測モデルを用いて避難訓練の行動を再現し、計算値と訓練実測値の比較を行った。避難所要時間や開口部の流動係数等の避難行動予測の主要となる指標は、計算値と実測値で概ね一致しており、筆者らの開発した行動予測モデルの妥当性が検証された。

謝辞：避難シミュレーションの実施に当たっては、(株)デジタルネットワークの大脇厚博士にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 掛川秀史・大山巧(2006)：津波遡上時の街区レベルでの群集避難行動シミュレーション，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 1341-1345.
- 掛川秀史・海老原学・関沢愛・野竹宏彰・大脇厚(2006)：階段内歩行のモデル化による全館避難の検討，平成 18 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp. 482-485.
- 紙野桂人(1980)：人の動きと街のデザイン，彰国社，p. 128-132.
- 建設省(2000)：建設省告示第 1441 号，階避難安全検証法に関する算出方法等を定める件。
- 戸川喜久二(1955)：群集流の観測に基づく避難施設の研究，建築研究報告，No. 14.
- Paul, J. L.(1980)：Building Evacuation; Research Findings and Recommendations, Fires and Human Behaviour, pp. 251-275.

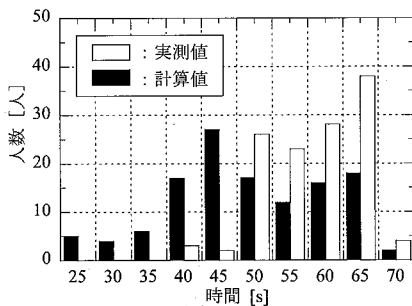


図-9 避難階段の通過所要時間の計算値と実測値の比較 (避難階段 A1, A2 の合計：1 階から 3 階)

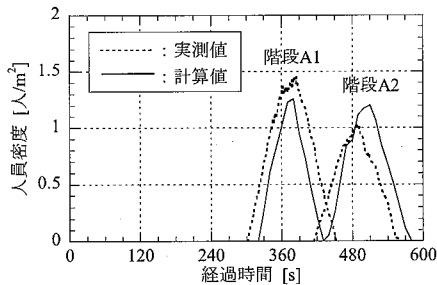


図-10 階段内の人員密度の計算値と実測値の比較

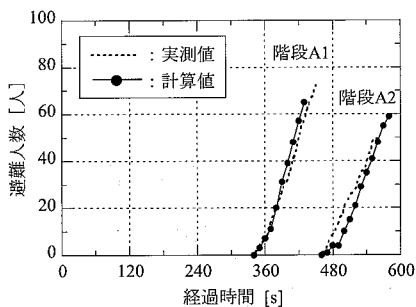


図-11 最終避難場所到着人数の計算値と実測値の比較 (建物 A：避難階段 3 階出口)