

地下空間浸水時の高齢者避難に関する検討 STUDY ON EVACUATIONS OF AGED PERSONS DURING UNDERGROUND FLOODING

中畑 佳城¹・浅井 良純²・石垣 泰輔³・島田 広昭⁴
Yoshiki NAKAHATA・Yoshizumi ASAI・Taisuke ISHIGAKI・Hiroaki SHIMADA

The underground is an important space that supports function of the city, such as the subway, the shopping mall and the basement parking. On the other hand, the new type disaster called urban flood menaces the spaces. In the last decade, urban floods attacked Tokyo, Nagoya and Fukuoka. When the underground inundation occurs, people must evacuate to the ground as soon as possible. But, when such an inundation situation happens, aged persons can not evacuate quickly to the ground. In this paper, the method of safety assessment for the aged persons is discussed on the experimental results and flood simulation data in the underground space. As a criterion of the safety evacuation, the specific force per unit width is used in this study. From the result of experiments, it is difficult to implement safety evacuation when the specific force per unit width is over 0.100m^2 for the aged person.

Key Words : underground flood, evacuation, aged person, experiment through actual experience, evaluation of safety

1. はじめに

日本の都市の多くは、河川河口付近の沖積平野上に立地し、多くの水害を経験してきた。そして、経済の発展に伴い、堤防のようなハード面による対策がされ始めると水害の回数は減少していった。しかし、近年、異常気象による集中豪雨が増え、計画水位を超えた雨水は都市に大きな被害を与えている。

日本の人口は約1億2千万人おり、その多くが都市部で生活している。都市化の進展は地表面をコンクリートやアスファルト等で被覆し、雨水は地下に浸透しにくくなっており、短時間に多量の雨水が流出し、ピーク流出量が増大している。また、都市への人口集中は都市部での地下利用を促進してきた。今日、都市ではライフラインのほとんどが地下に設けられていることから明らかなように、地下空間は都市を支える重要な空間となっている。一方、地下空間の構造上、水害に対する脆弱性も近年顕在化してきている。過去10年では、福岡(1999, 2003)、東京(1999)、名古屋(2000)などの大都市の地下において浸水被害が起こり、犠牲者も出ている。都市型水害と呼ばれるこれらの水害は地下空間施設が多く存在する中で、今後も発生する可能性があると考えられる。

近年、わが国は高齢社会となり、高齢化率は2005年には20%を超え5人に1人が高齢者という状況にある。高齢者の人口はまだ増加傾向にあり、災害時に被害にあう割合も増加すると予測される。また、地下街を利用する高齢者もいるため、都市水害にまきこまれる可能性もある。地下空間における浸水被害の防止・軽減には、浸水対策の実施や地下施設における浸水時の危険性を理解しておくことが不可欠である。

本研究では、これまでの研究では不十分であった地下空間浸水時の高齢者の避難に関する定量化な評価をするために高齢者体験セットを用いて実物大の階段模型および通路模型で避難体験実験を行った。そして、その結果から成人と高齢者の避難困難度を比較し、実在する地下空間上で安全な避難が行えるかどうかを評価・検討した。

キーワード：地下浸水、避難、高齢者、実験、安全度評価

¹ 学生員 関西大学大学院工学研究科ソーシャルデザイン専攻

² 学生員 関西大学大学院工学研究科ソーシャルデザイン専攻

³ 正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 教授

⁴ 正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 准教授

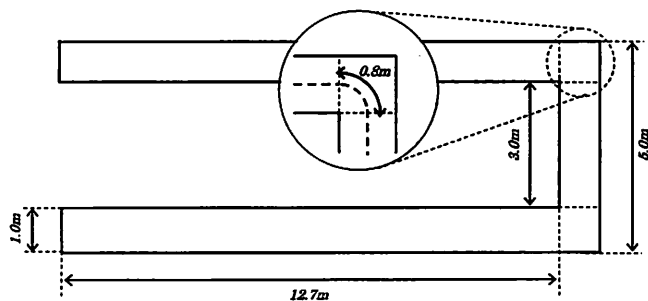


図-1 実物大通路模型

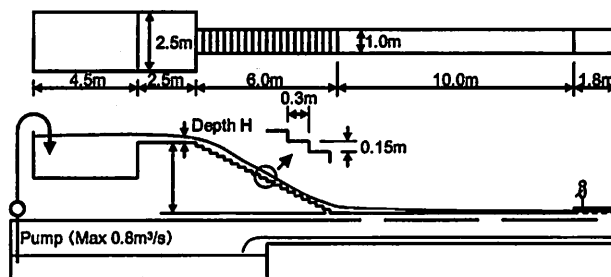


図-2 実物大階段模型

表-1 実物大水理模型実験被験者数

(上段：通路模型実験，下段：階段模型実験)

(単位：人)

水深：h	0cm	20cm	30cm	40cm	50cm
スニーカー	42	28	28	28	42
胴長	41	-	-	-	41
高齢者体験セット	28	28	28	28	28
地上水深：H	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
スニーカー	87	88	87	88	87
胴長	93	91	92	93	93
高齢者体験セット	32	32	32	32	32

2. 避難体験実験の概要

(1) 実物大通路模型を用いた避難体験実験

本研究で使用した水理模型は、関西大学千里山キャンパスに設置された実物大の通路模型である。この水理模型は、浸水した地下通路の避難について検討することを目的としている。模型の長辺は 13.7m、短辺は 5.0m、となっており、幅は 1.0m で側面の高さは 65cm となっている。通路の中心を歩行すると、距離は 30m となる。図-1 に概要を示す。実験での水深条件については、非浸水状態の 0cm と浸水状態の 20cm、30cm、40cm、50cm の 5 ケースとし、浸水時についてはさらに流速 0cm/s、流速 50cm/s と条件を変えて避難時間を測定した。服装はスニーカー（負荷：小）、胴長（負荷：大）、高齢者体験セットで行った。被験者数を表-1 に示す。

(2) 実物大階段模型を用いた避難体験実験

本研究で使用した水理模型は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置された実物大の階段模型である。これは地下空間浸水時における地下街出入口、および付随する通路からの避難を想定したものであり、踏み板長さ 0.3m、蹴上げ高さ 0.15m で合計 20 段からなる階段部と、階段の最下部分より連結する 10m の直線状の通路部で構成されている。なお、階段・通路部の水路幅はともに 1m である。図-2 に概要を示す。実験では、階段部最上段より流入する氾濫水の水深（地上水深）を 0～40cm の範囲で変化させ、避難時間を測定した。服装はスニーカー、胴長、高齢者体験セットで行った。被験者数を表-1 に示す。



写真-1 高齢者体験キット

(3) 高齢者体験セットについて

高齢者体験セットとは重りや拘束具を装着しすることによって高齢者の筋力を体験できるものである。本研究で装着した機器は、膝部拘束具、おもり（両手首：500g、両足首：1kg）、背中プロテクターである。膝部拘束具は膝部の動きを制限し、背中プロテクターは背中と腰を曲げた状態にする。実際に装着した状態を写真-1 に示す。

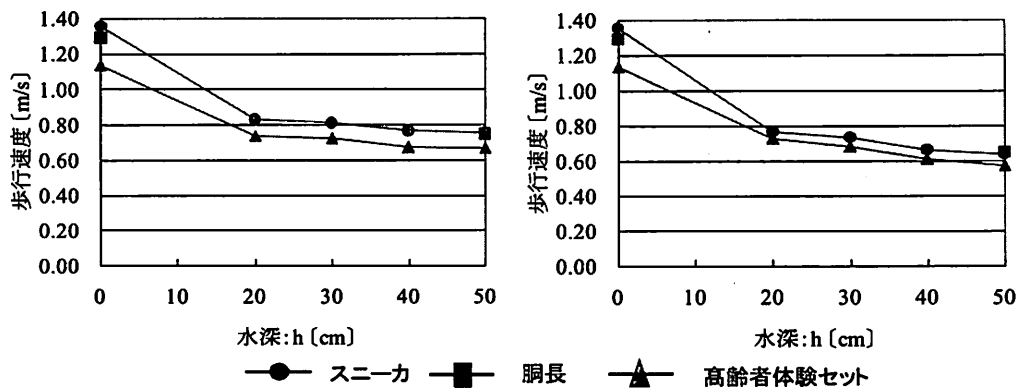


図-3 実物大通路模型実験の結果

3. 避難体験実験の結果

(1) 実物大通路模型実験の結果

図-3 に男性通路部の避難速度の結果を示す。まず、水深による影響を観察すると、非浸水状態と $h=20\text{cm}$ では歩行速度が 60%程度まで低下しており、水深による大きな負荷を受けていることが分かる。一方、 $h=20\text{cm}$ 以上の条件においては、水深の上昇に伴う歩行速度の減少幅は小さくなっている。これは「スニーカー」, 「高齢者」条件においても同様の傾向を示している。このように、水深の上昇速度に比べて歩行速度に急激な変化が見られない理由として、浮力が関係していることが考えられる。なお、非浸水時の歩行速度に関しては、「スニーカー」条件において約 1.4m/s, 「高齢者」条件において約 1.2m/s となっている。図-4 は各年齢における歩行速度を示したものである¹⁾。図中の「普通」曲線を用いて判断すると、高齢者体験セット着用時における歩行速度は約 70 歳の歩行速度を示していることから、高齢者体験セットを装着することにより、おおよそ 70 歳の避難行動が再現できると言える。

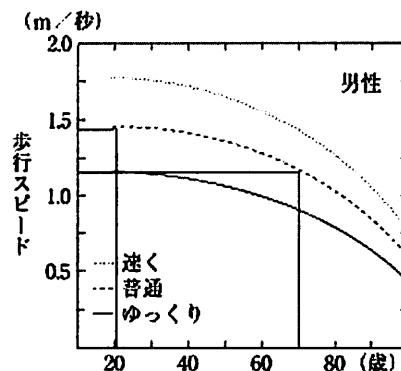


図-4 年代別の歩行速度

(2) 実物大階段模型実験の結果

図-5 に男性階段部の避難速度の結果を示す。図-5 によると、階段部における被験者の歩行速度は地上水深の大きさに関わらず半分程度であることが分かる。高齢者体験セット着用時に着目してみると、地上水深の変化に伴う歩行速度の低減は「スニーカー」, 「胴長」の条件ほど見られない。しかし、いずれの地上水深においても 3 条件の中で最も歩行速度が小さいため、高齢者が避難時に危険な状態に陥る可能性が高いと考えられる。また、表-2 によると、地上水深 40cm で手摺りの使用者が多く見られる。旧来の基準で設置された階段には手摺りが未設置であるものが存在しており、こうした階段を用いて避難行動を行うと、表-2 に示す人数が避難不可能となることが予想される。

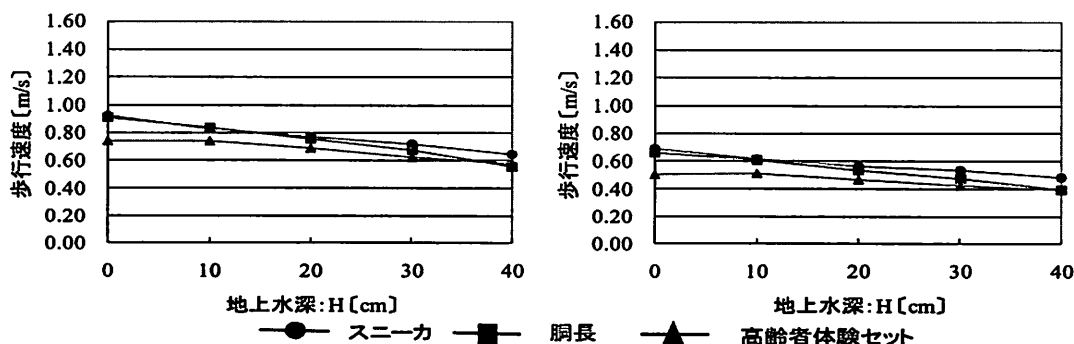


図-5 実物大階段模型実験の結果

表-2 手摺りの使用率

(単位：％)

地上水深：H	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
スニーカー	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4
胴長	0.0	1.1	0.0	3.2	22.6
高齢者体験セット	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(3) 避難困難度の検討

評価法は大西ら²⁾が用いた単位重量あたりの運動量と水圧の和である単位幅比力で検討を行った。計算式は次の通りである。

$$M_0 = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (1)$$

ここに、 u は流速 (m/s)， h は水深 (m)， g は重力加速度 (m/s²) である。この評価法を用いることで、通路部と階段部の2つの避難経路において同時に評価できる。

2つの実験結果から単位幅比力による高齢者の避難困難度について検討を行った。図-6 は実物大階段模型実験の結果を単位幅比力で表したものである。大西ら²⁾によると成人男性の場合、単位幅比力が 0.125(m²)で安全な避難が困難になるとしている。本研究では、安全な避難が困難となる状況を超え、完全に避難行動が不可能になると考えられる「避難限界」の評価を行った。避難体験の実験結果を用いると、男性では地上水深が 40cm において手摺り使用者が大幅に増加している。

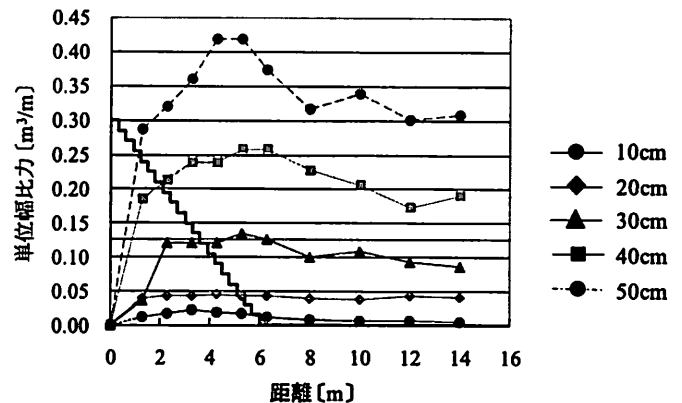


図-6 実験条件別の単位幅比力

(参照：表-2) そのため、図-6 において地上水深 40cm に相当する単位幅比力：0.250 m²を「避難限界」指標として扱うこととした。高齢者の避難困難度指標に関しては、加齢に伴う体力低下が避難困難度に影響すると考えた。高齢者体験セットによる避難実験や図-4 によると、70 歳の歩行速度は男性の場合、20 代の約 80%であることが分かる。本研究では、「歩行速度」を体力の状態を示す代表的な値として扱い、高齢者の避難困難度は 20 代の 80%程度に低下すると考えた。その結果、高齢男性における「避難困難」指標が単位幅比力：0.100(m²)、「避難限界」指標が 0.200(m²)となった。

4. 地下空間の氾濫計算について

(1) 計算対象地域

本研究では氾濫計算の対象地域として京都市中京区御池地下街を設定した。御池地下街は図-7 に示す御池通りの地下に位置しており、東端付近の地上には南北方向に鴨川が流れている。地下街の構造は図-8 に示す。なお、地下 3 階は地下鉄のホームであり、天井高は 2.7m であるが、利用客の線路内転落防止のため、高さ 2.4m の直立壁が設置されている。

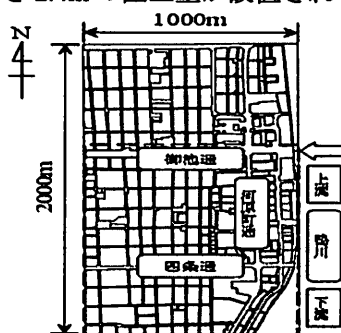


図-7 計算対象地域

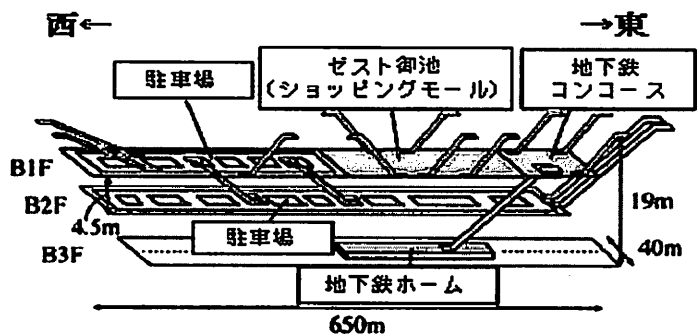


図-8 御池地下街構造図

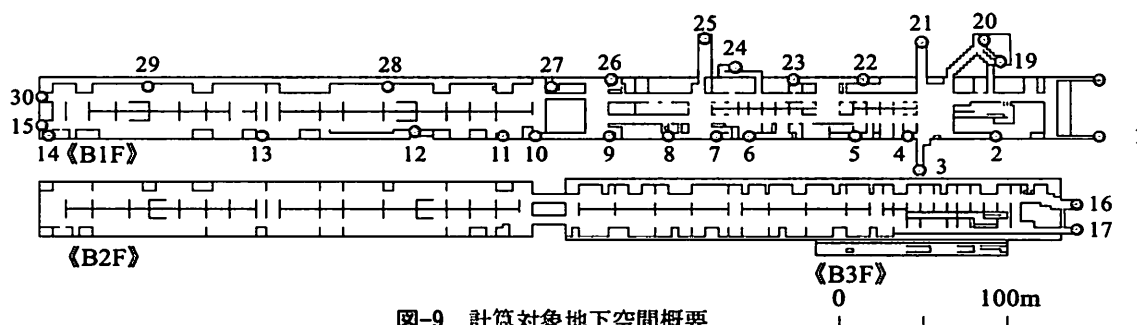


図-9 計算対象地下空間概要

(2) 計算モデル概要及び計算条件

本研究ではデカルト系座標モデルを用いて氾濫計算を行っている。本モデルによる氾濫計算においては、以下の浅水方程式を基礎式とした武田ら³⁾の手法を用いている。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

<運動量式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (4)$$

ここに、 h は水深、 t は時間、 g は重力加速度、 u 、 v は x 、 y 方向の流速、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス（ $M = uh$ 、 $N = vh$ ）、 H は水位、 τ_{bx} 、 τ_{by} は水底面でのせん断応力の x 、 y 方向成分である。

格子分割に当たっては、一辺 2m の正方格子を用いており、計算対象地下空間の概要を図-9 に示す。なお、地上に繋がる階段は数字の 1 から 30 の部分である。流入量に関しては京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置された縮尺 1/100 の京都市街地模型による水理模型実験⁴⁾より決定されており、鴨川に架かる御池大橋付近から 100m³/s の水が越水し、市街地や地下空間の流入が想定されている。本研究では実験の結果を Froude の相似則により原型量へ換算した表-3 に示す値を用いている。このとき地下街への浸水開始時刻を 0 秒としている。

表-3 流入量

出入口番号	流入開始時刻	流入流量 [m ³ /s]	地上水深 [m]
1	00分00秒	1.58	0.60
15+16	06分18秒	14.08	1.02
3	10分03秒	1.32	0.33
5	10分14秒	2.13	0.46
4	10分30秒	1.88	0.42
2	10分47秒	2.63	0.53
18+19	11分25秒	0.38	0.15
6	11分53秒	1.31	0.33
17	12分42秒	2.00	0.70
7	14分09秒	1.08	0.29
9	23分06秒	1.10	0.30
10	24分01秒	0.54	0.18
8	24分28秒	0.94	0.27
11	27分08秒	0.67	0.21
合計		31.63	

(3) 洪水氾濫計算結果

図-10 は浸水開始から 5 分後、10 分後、20 分後の計算での氾濫水の拡がりや単位幅比力の計算結果を示したものである。ここでは男性高齢者の困難度を基準とし 0-0.100m²、0.100-0.200m²、0.200m²以上の 3 つに分類した。

5. 避難経路の安全性の検討

(1) 計算モデル概要及び計算条件

本検討モデルは洪水氾濫計算と人の避難行動計算を組み合わせることにより構築されている。避難者は氾濫計算によって得られた単位幅比力に応じて歩行速度を変化させ、個人属性に相応する避難困難度を判断し、避難行動を行うものとする。通路部における非浸水状態の歩行速度は実験結果を基に成人男性：1.4m/s、高齢男性：1.2m/s とした。浸水時の歩行速度の変化については実験の結果を用いている。なお、計算にはこれを歩行速度の減少率： V として扱い、グラフを図-11 に示し、計算式を以下に示す。

$$\text{男性 成人 階段部 } V = 0.15 \exp(-100M_0) - 0.80M_0 + 0.85 \quad (5)$$

$$\text{通路部 } V = 0.45 \exp(-120M_0) - 0.85M_0 + 0.55 \quad (6)$$

$$\text{高齢者 階段部 } V = 0.10 \exp(-25M_0) - 0.80M_0 + 0.90 \quad (7)$$

$$\text{通路部 } V = 0.40 \exp(-120M_0) - 0.85M_0 + 0.60 \quad (8)$$

ここに、 M_0 は単位幅比力である。

避難経路においては隣接する格子と避難者が位置している格子を結ぶ線上に設定される。なお、避難経路は予め設定しておいた経路を通るものとし、避難時の状況に応じて避難経路を変更することはない。避難開始地点と避難経路を図-12に示す。そして、それぞれのケースで避難者を高齢男性と成人男性を設定し、計算を行った。

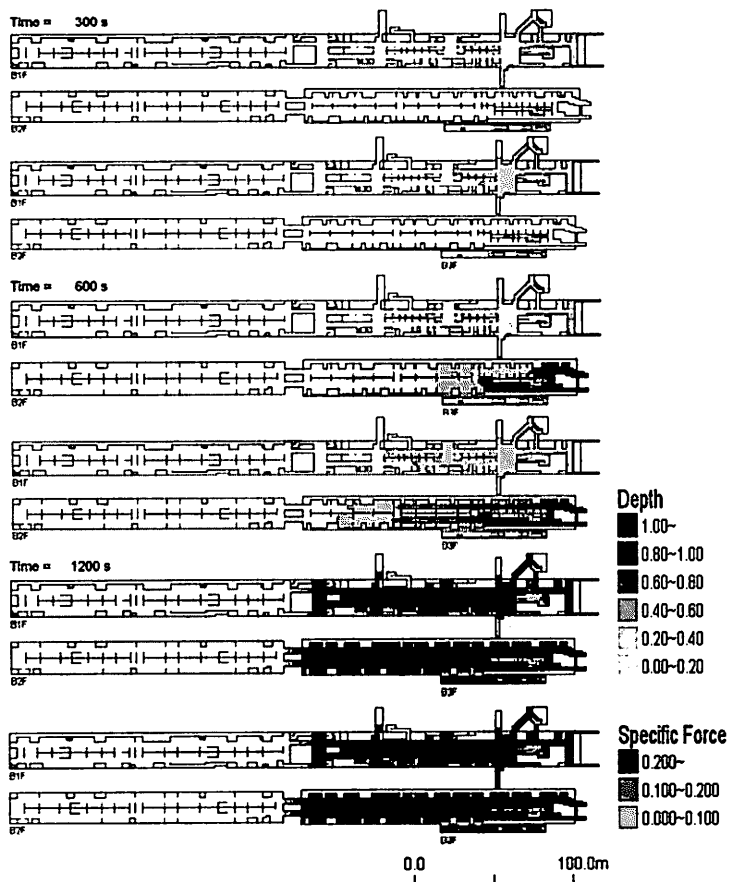


図-10 氾濫解析結果

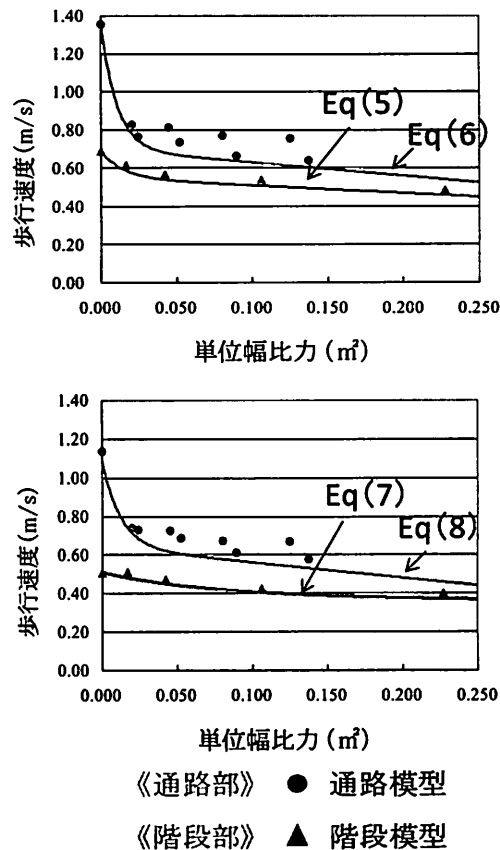


図-11 歩行速度の減少率
(上段：成人男性，下段：高齢男性)

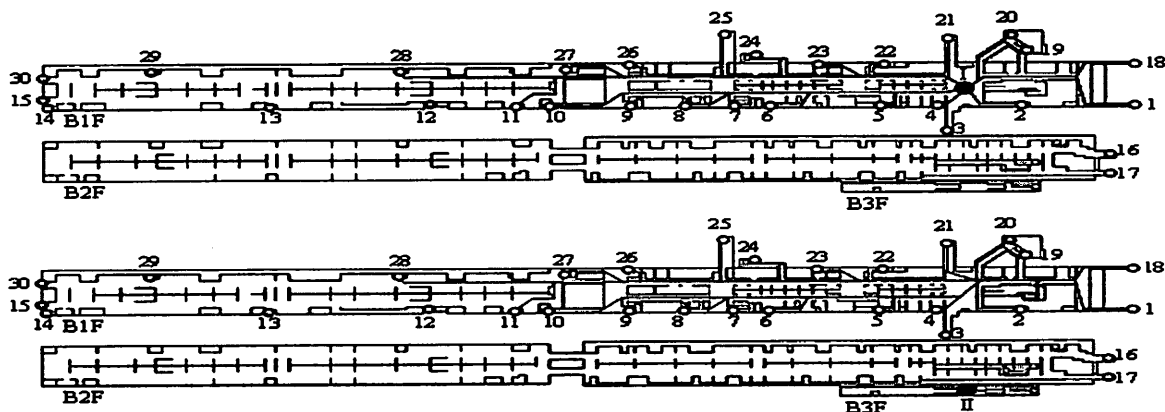


図-12 避難経路図

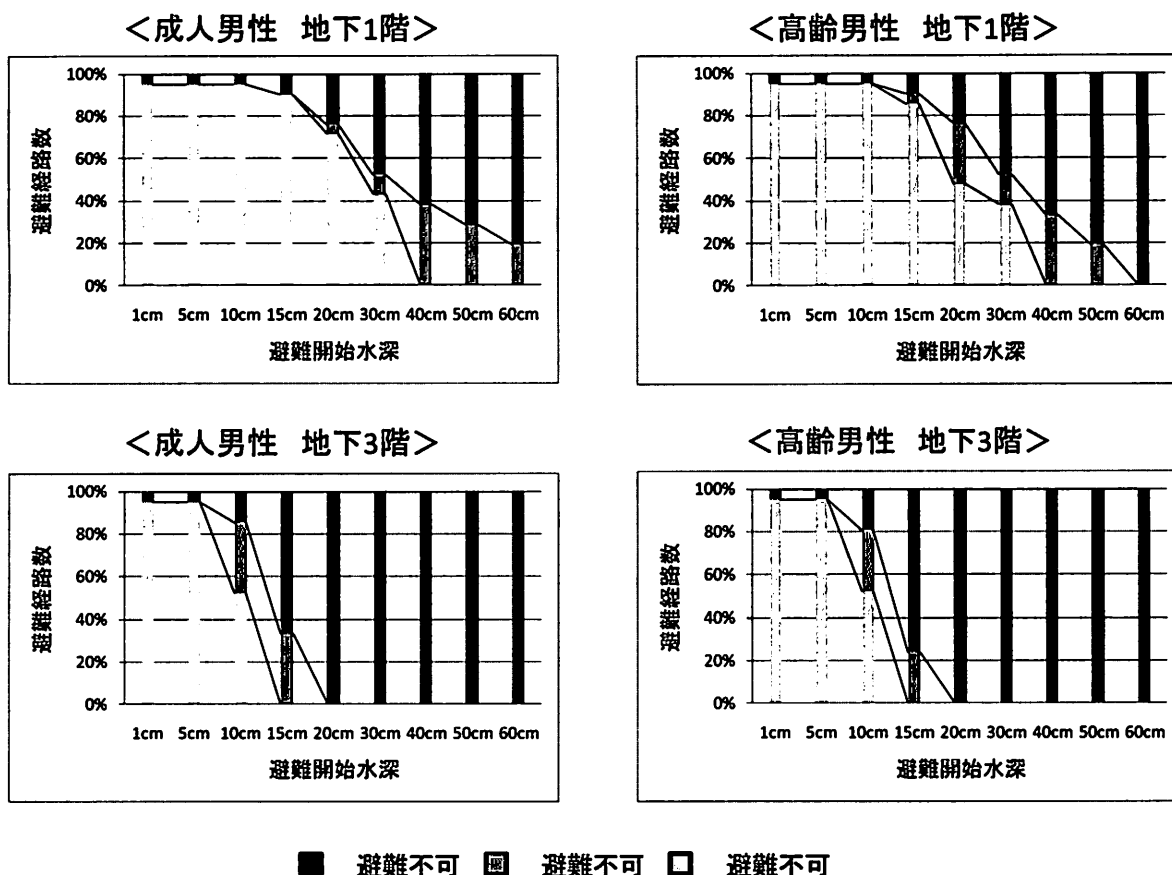


図-13 避難経路の安全性検討結果

(2) 計算結果

図-13 は地下1階からと地下3階からの避難経路の安全性を検討した結果である。なお、「安全避難」は避難開始から完了に至るまで、終始安全に避難行動ができた場合を示し、「避難困難」は安全な避難行動はできない状態ではあるが、避難完了地点まで辿り着いた場合を示す。また、「避難不可能」は途中で手摺り等の補助がなければ避難行動ができなくなった場合を示している。

解析結果において1箇所のみ、どの避難開始水深からの避難においても「避難不可能」になってしまう箇所が存在した。その箇所は最も東側の階段で流入量が他の階段より著しく多い階段である。このことから、避難開始が速やかにできたとしても、避難経路の設定次第では重大な事態を招くことも予想される。低水深からの避難という点では、地下1階からの避難において「成人」と「高齢者」に大きな差は見られなかった。しかし、地下3階においては避難開始水深が5cmを超えた辺りから大きな差が見られる。この結果から高齢者の避難開始水深は5cm未満で、かつ地上からの浸水の少ない階段からの避難が安全であることが考えられる。

6. 安全な避難についての検討

今回の解析結果においては、足元の水深が5cm未満が望ましいという結果が得られた。しかし、実際の避難は地上に到達して避難完了というわけではない。地上に到達し、高い建物や安全な避難所に到達して初めて避難完了と言える。このことも考慮すると、より早い段階で適切な避難指示・避難誘導が必須であると考えられる。また、ソフト面の対策のみではなく、止水板等によるハード面の浸水対策も加えて行うことによって、より安全な避難が可能になるのではないかと考えられる。

7. おわりに

本研究ではまず、実物大模型を用いた避難体験実験により地下空間浸水時の高齢者の避難困難度を定量的に評価した。次に、実在する大規模地下空間において、実験から得られた避難困難度指標の氾濫計算および

避難経路の安全性検討（シミュレーション）への適用を試みた。さらに、安全な避難について検討を行い、適切な避難計画の策定に向けた提言を行った。

謝辞：最後に、施設を利用するにあたってご協力頂いた京都大学防災研究所の方々をはじめ、避難体験実験およびデータの計測・集計にご協力頂いた方々、終始研究について助言を頂いた関西大学大学院工学研究科総合工学専攻 川中龍児氏に厚く御礼を申し上げます。なお、本研究の一部は、平成 19 年度京都大学防災研究所萌芽的共同研究において、研究課題「生体計測技術による地下空間浸水時の災害時要援護者避難に関する研究」として研究費を受けたものの成果として公表するものである。

参考文献

- 1) 三浦文夫：図説 高齢者白書 2005 年度版，社会福祉法人 全国社会福祉協議会，2006。
- 2) 大西良純，川中龍児，石垣泰輔，馬場康之，戸田圭一，島田広昭：地下空間浸水時の避難困難度評価法に関する検討，pp.435-436，第 62 回年次学術講演会講演概要集，2007。
- 3) 武田誠，井上和也，上塚哲彦，松村貴義：高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件に関する検討，pp.1089-1094，水工学論文集，第 40 巻，1996。
- 4) 石垣泰輔，中川一，馬場康之，技術室氾濫模型実験グループ：地下空間を含む都市洪水氾濫に関する水理模型実験，pp.527-544，京都大学防災研究所年報，第 47 号 B，2004。