

高齢者を含めた地下空間浸水時における 避難経路の安全性に関する検討

SAFETY ANALYSIS OF EVACUATION ROUTES CONSIDERING AGED PERSONS DURING UNDERGROUND FLOODING

浅井良純¹・石垣泰輔²・馬場康之³・戸田圭一⁴
Yoshizumi ASAI, Taisuke ISHIGAKI, Yasuyuki BABA and Keiichi TODA

¹学生員 関西大学大学院 工学研究科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²正会員 工博 関西大学教授 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

³正会員 工博 京都大学助教 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁴正会員 Ph. D. 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

In recent years, heavy rainfalls attacked urban areas in Japan, and caused the underground inundations. People should evacuate from the underground spaces as soon as possible, when the inundations occur. To make a plan of evacuation in the situation, it is necessary to determine the evacuation criteria for safe evacuation to all people including aged persons. In this paper, the evacuation criteria considering the difference of gender and age were obtained by using the real size model tests of evacuation. And, the safety analysis of evacuation routes during floods with the specific force per unit width has been performed for the underground spaces. It was shown that the evacuation route may be in a serious situation in certain cases.

Key Words : urban flood, specific force, real size model tests of evacuation, evacuation simulation

1. はじめに

現在我が国では、都市域における人口・資産の一極集中が顕在化しており、過密化した都市域では限られた土地を有効に活用するため、建築構造物の高層化だけでなく地下空間への広がりも見せている。地下街や地下鉄といった地下施設は、有効な土地利用という観点からだけでなく、降雨の影響を受けない快適な空間としても多くの人に利用されている。

しかし、都市化の進展は地表面の舗装等から保水・排水機能の低下を引き起こしており、近年では時間雨量が100mmを超える豪雨も珍しくはなくなっていることから、激しい降雨が都市部で発生すると、地盤の低い地下空間が浸水する恐れがある。そして、氾濫水が地下空間へ流入した場合、地下街・地下鉄等の都市機能に大きな影響を与えることになる。

また、同時に我が国は高齢化が進んでおり、2005年には高齢化率が20%を超え5人に1人が高齢者という状況にあり、不特定多数の利用者が混在する公共の施設におい

ても、高齢者の利用増加が予想される。

1999年6月に福岡市、同年8月には新宿区で発生した豪雨の際に、水没した地下室に閉じ込められた人が避難できず不幸にも亡くなっており、こうした被害を防ぐためにも地下空間浸水時における被害の抑止には、迅速かつ安全な避難行動が不可欠である。また、これを遂行するには適切な避難計画を策定する必要があり、それは災害時要援護者である「高齢者」も含めた全員が安全に避難できるようなものでなければならない。

従来、地下空間浸水時の危険性や避難に関する研究は模型実験¹⁾や数値計算による避難シミュレーション^{2) 3)}等を通して評価・検討が行われてきた。しかし、既往の研究は成人のみを対象としたものや、水流の影響や避難困難度を考慮に入れたものではない。そこで本報では地下から地上への避難について、実物大模型を用いた避難体験実験を行い、高齢者を含めた避難困難度の定量的な評価および避難困難度指標の確立を試みた。さらに、実験結果および避難困難度指標を数値計算に適用することによって避難シミュレーションの構築を試み、避難経路の安全性について検討した。

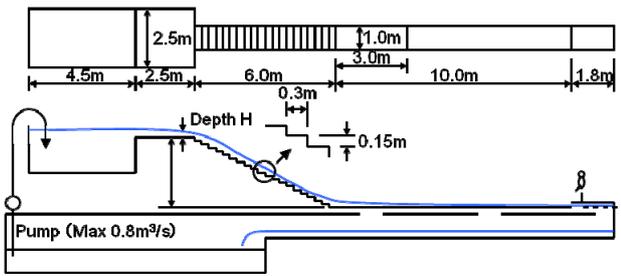


図-1 実物大階段模型

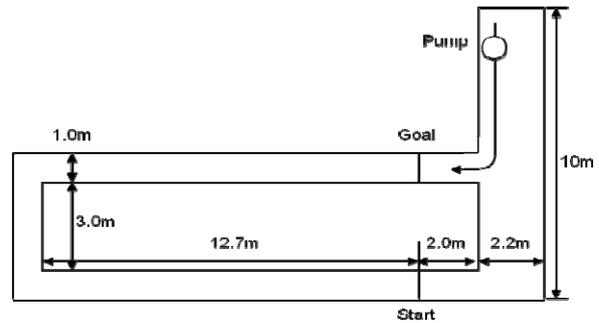


図-2 実物大通路模型

2. 高齢者を含めた避難困難度評価

(1) 実験概要

本研究では高齢者を含めた地下空間浸水時の避難困難度を定量的に評価するため、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階段模型と関西大学環境都市工学部に設置された実物大通路模型を用いた避難体験実験を実施した。実験に用いた階段模型は図-1に、通路模型は図-2に示す装置である。

階段模型の装置は高水槽、地上部分を想定した2.5m四方の平坦部、踏み板長さ0.3m、蹴上げ高さ0.15mで20段から成る階段部、地下通路を想定した10mの通路部より構成されている。なお、水路幅は階段・通路部共に1mであり、両側面には手摺りが設置されている。実験は地下空間への浸水を想定して行われているため、階段最上段の水深（高水槽より越流する水深）を地上水深： H とし、安全避難の目安として条件設定を行っている。これを $H=0\sim 50\text{cm}$ の範囲で10cmごとに変化させ、流速・水深の測定および避難体験実験を実施した。ただし、被験者の安全を確保するため、避難体験実験については $H=40\text{cm}$ までとした。避難開始から階段1段目に足が着地するまでを通路部の歩行時間とし、それと同時に階段部最上段に足が着地するまでを階段部の歩行時間として計測している。また、本模型を用いた避難体験実験は過去にも行われており、避難困難度の評価・検討が行われている⁴⁾。

実験条件は、既往の実験内容⁴⁾では被験者が成人（20代）のみであり、流れによる負荷の小さい「スニーカー」と大きい「胴長」であったのに対し、本研究では「高齢者」を条件として付加した。本条件は、災害被災者のうち、要援護者である高齢者が占める割合が増加しているため設定した。ただし、実際に高齢者が被験者となると安全面において問題があるため、高齢者体験セットを装着した条件を設定した。高齢者体験セットとは、「加齢に伴う身体の変化が生み出す日常生活における不自由さを体験するもの」とされており、本条件では写真-1に示すように膝部拘束部、背中プロテクター、おもり（両手首：各500g、両足首：各1kg）の体験具を着用して実施した。なお、危険であると感じた場合を除いて手摺りを使用しないことを指示している。



写真-1 高齢者体験セット

通路模型の計測部は、3辺の直線部と2箇所の屈曲部から成る30mの長さとしており、水路幅は1m、側面の高さは0.65mである。また、通路模型ではポンプを用いて水を一方向に循環することが可能であり、ポンプ吐き出し口は計測部最下端より約2m先の水路床付近に設けられ、ポンプ制御装置に与える周波数を調節することで流量（流速）の設定を行っている。本模型を用いた成人を対象とした避難体験実験は過去に行われており、避難困難度の評価・検討が行われている⁵⁾。

本実験では、非浸水状態（0cm）および浸水状態として20、30、40、50cmの水深条件を設定している。さらに、各水深において流速0cm/sおよび50cm/sの条件を設定し、流れの有無による歩行速度への影響を検討した。また、負荷条件として実物大階段模型による避難体験実験と同様に、既往の実験内容に「高齢者」の負荷条件を追加して行っている。ただし、「胴長」条件に関しては非浸水状態および $h=50\text{cm}$ （流速0cm/sおよび50cm/s）の3条件においてのみ実験を行っている。実験は全長30mの経路を通り、避難完了までに要した時間を計測している。避難時間の計測は、被験者が避難開始地点を通過した瞬間を避難開始とし、避難完了地点を通過した瞬間を避難完了としている。

なお、本実験では階段や通路の形状、勾配、照明及び粗度等は検討しておらず、単独歩行による避難について検討したものである。また、実験条件、被験者数及び手摺り使用率について表-1に示す。

(2) 実験結果

a) 避難速度による検討

図-3に男性の歩行速度の結果を示す。凡例の「階段」

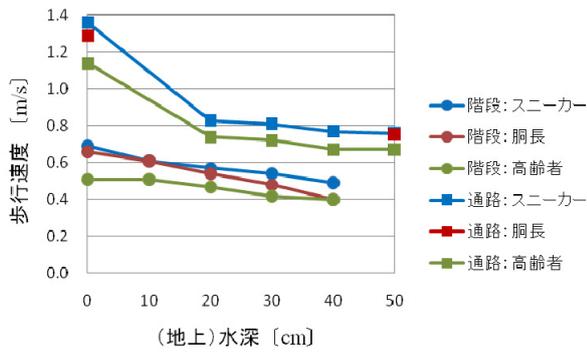


図-3 負荷条件別歩行速度 (男性)

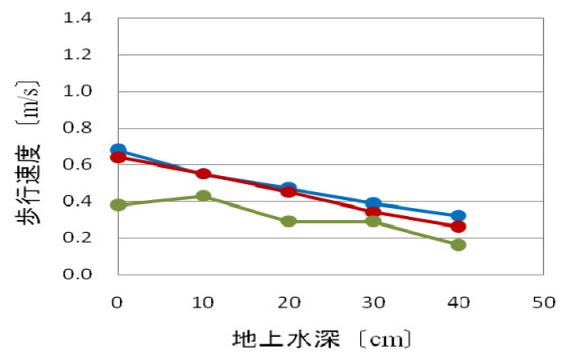


図-4 負荷条件別歩行速度 (女性)

表-1 実験条件及び手摺り使用状況

男性	地上水深H/水深h (cm)	0/0	10/20	20/30	30/40	40/50
スニーカー		87(0)/42	88(0)/28	87(0)/28	88(0)/28	87(3.4)/42
胴長		93(0)/41	91(1.1)/-	92(0)/-	93(3.2)/-	93(22.6)/41
高齢者体験セット		32(0)/28	32(0)/28	32(0)/28	32(0)/28	32(0)/28
女性	地上水深H/水深h (cm)	0/0	10/20	20/30	30/40	40/50
スニーカー		23(0)/7	22(9.1)/3	23(13)/3	23(39.1)/3	23(78.3)/7
胴長		18(0)/9	15(0)/-	18(0)/-	18(27.8)/-	17(76.5)/9
高齢者体験セット		4(0)/3	4(0)/3	4(0)/3	4(0)/3	2(100)/3

は階段実験の階段部の結果を示し、「通路」は通路実験の結果を示したものである。階段実験では同一の地上水深に対する歩行速度は、大きいほうから「スニーカー」、「胴長」、「高齢者」の順となっており、各種負荷が避難行動に影響を与えていることがわかる。また、同一の地上水深では「高齢者」の歩行速度は「スニーカー」の約80%の大きさになっており、「胴長」は地上水深が大きいほど歩行速度の低下率が大きくなっている。通路実験における水深による影響を見ると、非浸水状態と水深20cmでは歩行速度が約60%まで低下しており、水深(水圧)による大きな負荷を受けていることが分かる。水深20cm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」のいずれにおいても同様の傾向を示している。また、「高齢者」の歩行速度は「スニーカー」に比べて、非浸水状態で約20%減少しており、浸水状態では約10%減少している。

図-4に女性の歩行速度の結果を示す(凡例は図-3と共通)。通路実験については被験者が少なかったため本報では議論しておらず、以下は階段実験についての考察である。男性と同じように女性の結果においてもほぼ一直線に歩行速度が減少していることが分かる。女性のH=20cmにおける歩行速度減少率は、男性の「安全避難」の目安とされているH=30cm¹⁾における歩行速度減少率よりも小さい値を示している。また、表-1の括弧内に示すように手摺りの使用率は「胴長」条件において、H=30cmで急激に多くなったことから、本報においてはH=20-30cmを女性の「安全避難」の限界の目安として提示する。

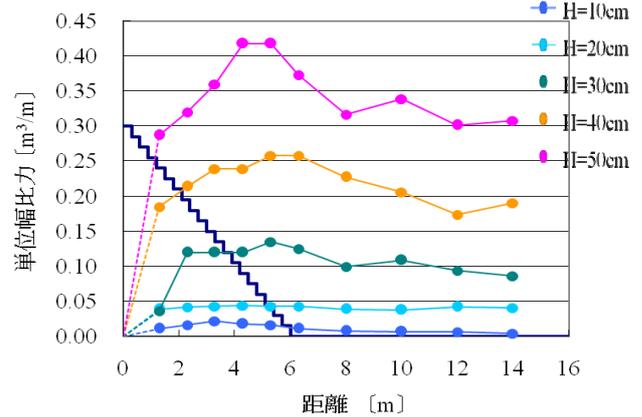


図-5 実物大階段模型による単位幅比力

b) 単位幅比力による検討

避難困難度を評価する指標として、単位幅運動量と単位幅比力が提唱されているが、既往の研究において単位幅運動量は通路部では避難困難度評価を適切に表現できないと考えられているため⁴⁾、本報でも単位幅比力で評価を行う。単位幅比力(以下、比力と記す): $u^2h/g+h^2/2$ は単位体積重量当たりの運動量と水圧の和である。ここに、uは流速(m/s)、hは水深(m)、gは重力加速度9.8(m/s²)である。

既往の研究では比力=0.125m³/mが「安全避難」の限界とされ⁵⁾、これは避難体験実験における成人(20代)の結果に基づいている。そこで、性別・年齢による避難困難度指標の違いを検討した。

図-5は階段実験における比力を示したものである。女性に関しては、先にH=20-30cmで安全な避難が不可能になるとの見解を論じている。これを図-5に適用することで、避難困難度指標として比力=0.100m³/mを得ることができる。

さらに安全な避難が困難となる状況を超え、避難行動が難しくなる「避難困難」についての検討を以下に示す。男性ではH=40cmにおいて手摺り使用率が大幅に増加している(表-1)。特に、「胴長」条件では20%以上の被験者が手摺りを使っており、これらの人は手摺りが未設置の階段からは避難ができない可能性がある。そのため、図-5においてH=40cmに相当する単位幅比力=0.250m³/mを

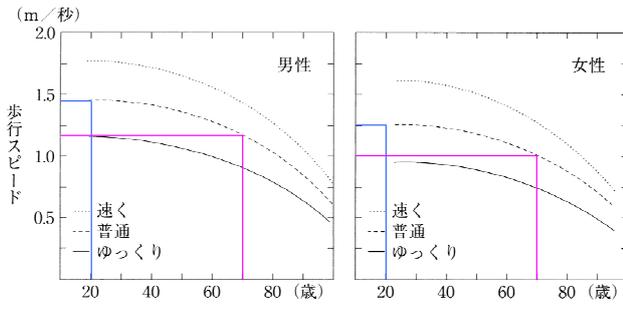


図-6 年代別の歩行速度 (2005年度高齢者白書より)

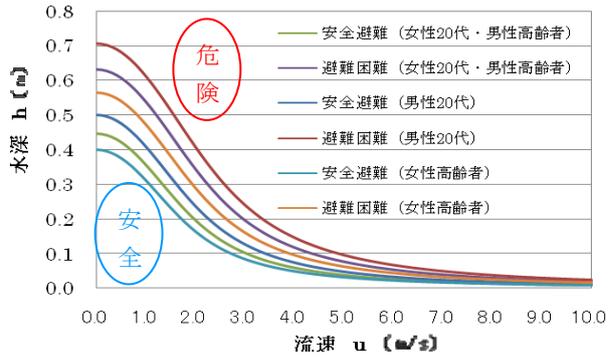


図-7 単位幅比力における水深と流速の関係

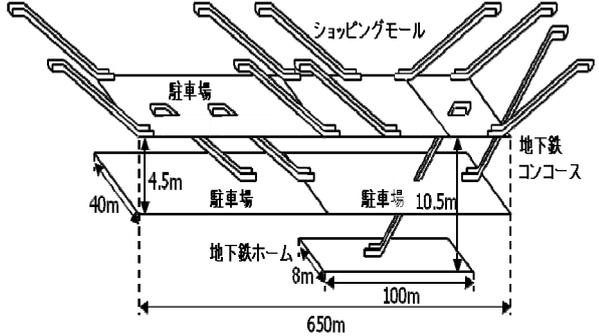


図-8 御池地下街構造

「避難困難」指標とすることとした。男性の「安全避難」指標の値の80%が女性の「安全避難」指標に相当することから、女性の「避難困難」指標においても同様の考えに基づき、比力=0.200m³/mが目安になると推測した。

高齢者の避難困難度指標に関しては、加齢に伴う運動能力の低下が避難困難度に影響すると考えた。通路部の歩行速度に関しては、男性の「スニーカー」条件において約1.4m/s、女性と同条件において約1.3m/sとなっており、高齢者体験セット着用時には男性で約1.2m/s、女性で約0.9m/sとなっている(図-3、図-4)。図-6は各年齢における歩行速度を示したものである。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男女とも約70歳の歩行速度を示しており、本研究で使用了高齢者体験セットではおよそ70歳の歩行速度が再現されていると言える。なお、ここで記す「高齢者」とは避難体験実験により再現した70歳程度の年齢を想定している。高齢者体験セットによる避難実験や図-6によると、70歳の歩行速度は男女とも20代の約80%であることが分かる。本研究では、「歩行速度」を運動能力の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「安全避難」指標が比力=0.100m³/m、「避難困難」指標が0.200m³/mと提示でき、高齢女性における「安全避難」指標は比力=0.080m³/m、「避難困難」指標は0.160m³/mであることが提示できる。図-7は本報において提案した「安全避難」および「避難困難」の指標を、水深と流速から表したものである。これによると、性別・年齢により安全に避難できる領域が大きく異なることが分かる。

3. 高齢者を含めた避難経路の安全性の検討

(1) 計算対象地域

既往の成果⁴⁾により、氾濫計算に比力を用いることで各地点における避難困難度を明示することが可能となった。そこで、本報では氾濫計算を基に避難経路に重点を置いた避難シミュレーションを構築することで、避難経路の安全性について検討を行った。

計算の対象地域は京都市中京区御池地下街とした。御池地下街は御池通りの地下に位置し、図-8に示すような地下3層構造となっている。

地上と地下1階を結ぶ通路は歩行者専用階段およびエスカレータが24箇所、車両用出入り口が3箇所存在する。また、地上と地下2階を結ぶ通路は東側の車両用出入り口が2箇所、地下1階と地下2階を結ぶ通路は西側に2箇所の車両用スロープが存在する。地下3階の地下鉄ホームへは地下1階コンコースからのみの接続となっている。

(2) 計算条件

本研究で用いた計算手法は、構造格子モデルを用いた氾濫計算と、避難経路の避難困難度に関する計算を組み合わせるにより構築されている。

構造格子モデルは対象領域を正方格子に区切り解析を進める手法であり、本研究では格子分割に当たり、一辺2mの正方格子を用いた。本報では、京都市市街地を対象として行われた水理実験結果⁶⁾を基に、御池地下街に流入する流量を設定しており、鴨川に架かる御池大橋付近から100m³/sの水が越水する状況が想定されたものである。鴨川より溢れ出た氾濫水は京都市市街地に広がるとともに、その約3割もの流量が地下空間へ流入するとされている。

避難経路に関する計算は、予め設定した経路上の格子内を人が移動するという想定で行っている。避難経路は隣接する(斜め方向も含む)格子と避難者の位置する格子の図心を結ぶ線上に設定される。なお、避難者は各格子における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および避難限界を判断する。

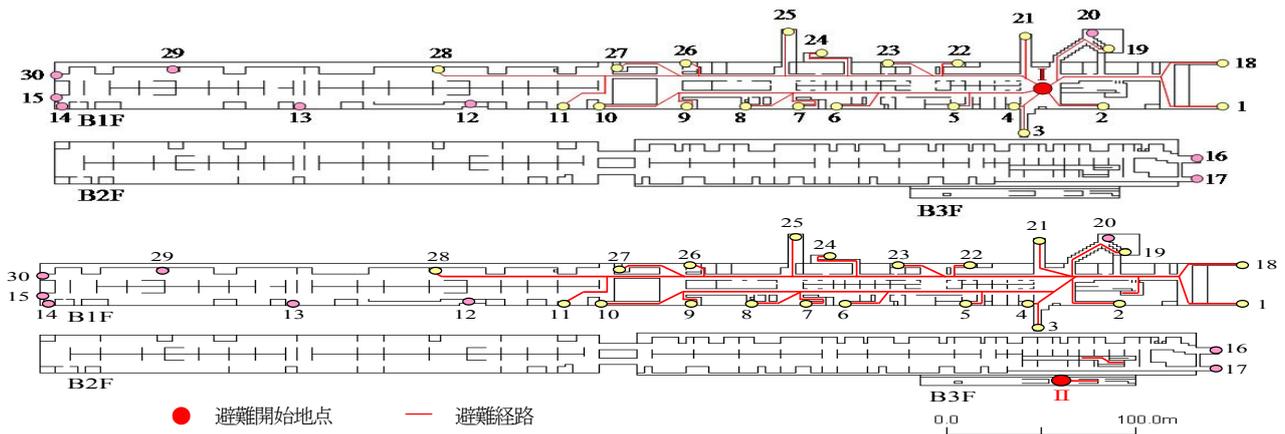


図-9 避難経路と避難開始地点

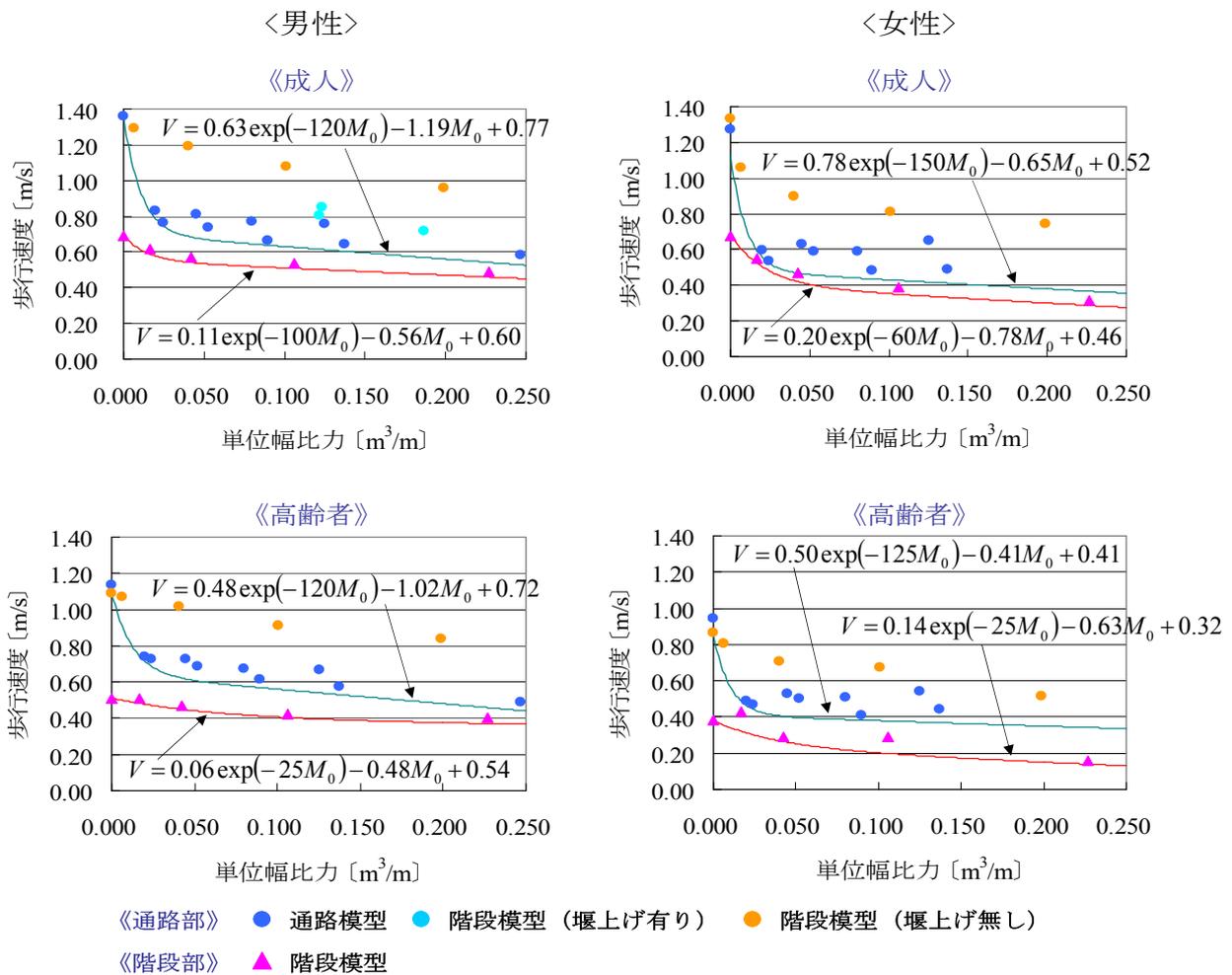


図-10 単位幅比力-歩行速度関係

汎濫水の流れは人の移動に対して全て対面するものとして計算している。また、図-9に示すように本計算モデルでは予め避難経路を設定しておく必要があり、本報では各21通りを設定した。避難経路については避難時の状態に合わせて適宜変更することはない。また、任意の格子内において「避難困難」を超えた場合、避難が不可能になったと判断し、その位置で停止させた。

避難体験実験からも明らかであるように、浸水発生時

における避難行動は流況による影響を大きく受ける。これは流速や水深など様々な条件に左右されることが考えられるが、本報では避難困難度指標として提案した単位幅比力が歩行速度に影響をきたすと考えた。避難体験実験より得られた歩行速度と単位幅比力の関係を図-10に示す。ただし、図中の曲線は実験値を安全側（下限）に包絡する線を描いている。これによると、歩行速度は比力が小さい領域で急激に低下し、以後は緩やかな減少傾

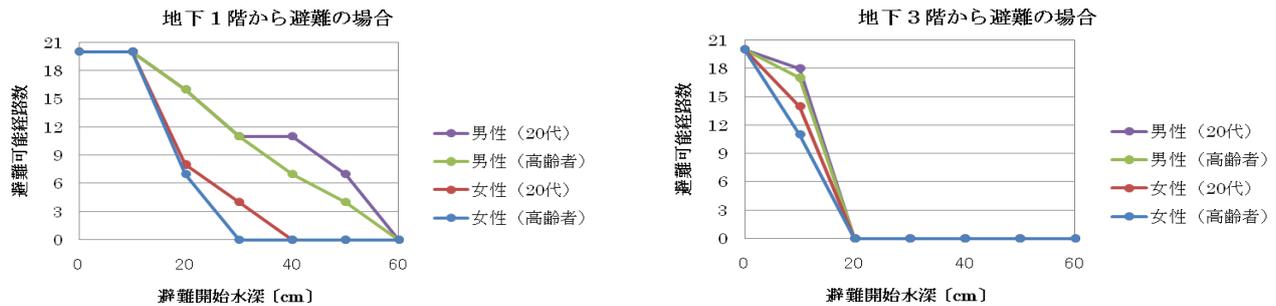


図-11 避難可能経路数の変化

向を示している。これを水中歩行時の歩行速度 (V) として捉えており、計算式は図中に示したものである。ここで、 M_0 は単位幅比力である。

(3) 計算結果

図-11は避難開始水深の違いによる避難経路の安全性を性別・年齢別に示したものである。地下1階から避難する場合は、避難開始水深が10cmまでは避難可能経路数は変わらないが、それ以降は個人属性により大きく変わっているのが分かる。地下3階から避難する場合には、避難開始水深が10cmで個人属性により避難可能経路数が変わってきており、20cmでは避難が不可能となっている。また、避難開始水深が0cmの場合でも、既に避難が不可能となる経路が存在する。これは、流入開始が最も早い出入り口（図-9、1番出入り口）へと繋がる経路であり、流入量は地上水深に換算すると60cmの高さになっている。従って、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。

4. おわりに

本研究では、実物大模型を用いた避難体験実験により、地下空間浸水時の避難困難度を定量的に評価した。また、避難実験を通して明らかとなった避難困難度指標の避難シミュレーションへの適用を試みた。本研究で得られた成果を以下に簡潔に示す。

- 1) 成人男性が安全な避難の限界となる「安全避難」指標は単位幅比力 $=0.125\text{m}^3/\text{m}$ であり、高齢者男性の同指標として単位幅比力 $=0.100\text{m}^3/\text{m}$ が提示できる。また、女性の指標に関しては、成人で単位幅比力 $=0.100\text{m}^3/\text{m}$ 、高齢者で同 $0.080\text{m}^3/\text{m}$ 程度となる。なお、避難行動が完全に不可能となる「避難困難」指標に関しては、先に示した個人属性の順に単位幅比力 $=0.250\text{m}^3/\text{m}$ 、 $0.200\text{m}^3/\text{m}$ 、 $0.200\text{m}^3/\text{m}$ 、 $0.160\text{m}^3/\text{m}$ である。
- 2) 避難体験実験により得られた歩行速度への影響を数値計算へ適用することにより、より実現性の高いシミュレーションが可能である。なお、これは浸水状況下における歩行速度への影響が単位幅比力によって決

定される。また、これを基に「避難経路」に重点を置いた避難シミュレーションを構築することで、避難経路の安全性についても検討することが可能である。

本報では高齢者を含む地下空間浸水時における避難困難度評価を行った。その結果、性別・年齢による避難困難度指標を提案することができた。また、避難シミュレーションを構築することで、避難経路の安全性について検討することができた。しかし、幼児や肢体障害者等の他の要援護者については今後検討する必要がある。

最後に、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に感謝の意を表します。同時に、本研究を行うにあたり、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーより実験施設を提供して頂いた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，水工学論文集，第50巻，pp. 583-588, 2006.
- 2) 原田英治・後藤仁志・酒井哲郎・久保有希：地下街浸水時の群衆避難の個体ベースシミュレーション，水工学論文集，第50巻，pp. 589-594, 2006.
- 3) 関根正人・本山量啓・中村淳：浸水時の地下空間からの避難行動に関する数値シミュレーション，水工学論文集，第51巻，pp. 547-552, 2007.
- 4) 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用，水工学論文集，第52巻，pp. 841-846, 2008.
- 5) 浅井良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一・大西良純：浸水体験実験による高齢者の地下空間浸水時避難困難度の検討，年次学術講演会講演概要集，第63回，pp. 41-42, 2008.
- 6) 石垣泰輔・中川一・馬場康之・技術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，京都大学防災研究所年報，第47号B，pp. 527-544, 2004.

(2008. 9. 30 受付)