

地下空間浸水時における 避難困難度指標とその適用

CRITERION AND ITS APPLICATION FOR SAFETY EVACUATION DURING UNDERGROUND FLOODING

大西良純¹・石垣泰輔²・馬場康之³・戸田圭一⁴
Yoshizumi ONISHI, Taisuke ISHIGAKI, Yasuyuki BABA, Keiichi TODA

¹学生員 関西大学大学院生 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 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

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)

Risks of urban flood have been increasing in recent years. Heavy rainfalls that attacked Tokyo, Nagoya and Fukuoka caused the underground inundations. When the underground inundation occurs, people must evacuate to the ground as soon as possible. Therefore, it is necessary to evaluate when and where it becomes difficult for users to evacuate during the inundation. The difficulty of evacuation in stairs has been evaluated with momentum per unit width. However, this criterion can not be applied to a corridor. In this paper, specific force per unit width is introduced as a new criterion to evaluate safety evacuation in both cases. It is difficult to implement safety evacuation when the specific force per unit width is over 0.125m^2 .

Key Words : urban flood, underground space, evacuation, momentum, specific force

1. はじめに

我が国における都市部の土地利用は、限られた場所を有効に活用するため、高層住宅や高層ビルなどに見られるように縦方向へと広がりを見せている。こうした縦方向への広がりには「高層化」という概念だけでなく、「地下空間の開発」という形にも現れている。2001年4月には「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が施行されており、都市部における地下空間利用はさらに拡大される方向にある。地下街や地下鉄などの地下施設は、有効な土地利用という観点からだけでなく、空調設備の整った快適な空間、商業施設の並んだ便利な空間、車の往来がない安全な空間として、毎日多くの人に利用されている。

都市化の進展は有用な地下空間の形成を促した一方で、都市の保水・遊水機能を低下させた。域内の雨水排除は下水設備に依存するようになり、その排水能力を超える降雨になると地上に水が氾濫するようになった。また、近年では地球規模での気候変動に伴い、局地的な集中豪雨の発生回数が増加しており、時間雨量が100mmを超える豪雨も珍しくはなくなってきた。こうした激しい降雨

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。

1999年6月、九州北部で断続的に激しい雨が降り、御笠川が氾濫するなど福岡市内で甚大な被害が発生した。2000年9月には愛知・岐阜・三重県などの東海地方を中心に集中豪雨が襲い、各地で床上・床下浸水や土砂災害などの被害をもたらした。これらの降雨の際、福岡市や名古屋市などの市街地では地下空間に氾濫水が流入し、地下鉄が不通になるなど都市機能を麻痺させた。福岡市では2003年に再び豪雨に見舞われ、博多駅周辺ではやはり地下浸水の被害が発生した。1999年6月に福岡市、同年8月に新宿区で発生した豪雨では、水没した地下室に閉じ込められた人が避難できずに亡くなっている。

こうした地下空間浸水時の危険性や避難に関する研究は、模型実験や数値計算による避難シミュレーションなどを通して評価・検討が行われてきた¹⁾。しかし、既往の成果は地上への連絡路となる階段部、または平坦部における水中歩行の危険性がそれぞれに評価されていた。本報では地下から地上への一連の避難について、その避難困難度を同一の指標を用いて評価することを目的として新たな指標を作成し、その適用を試みた。

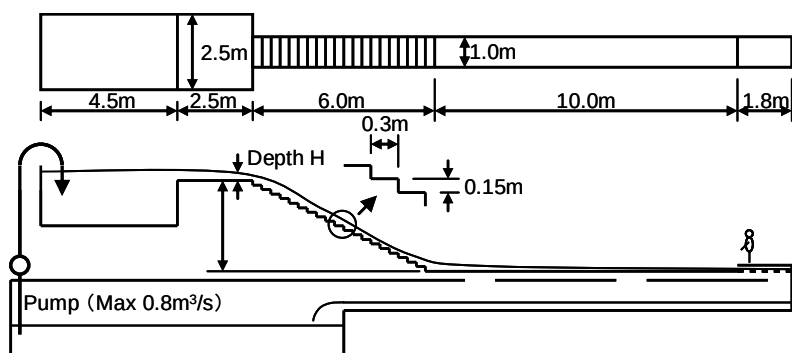


図-1 実物大階段模型



写真-1 避難体験実験の様子

2. 実物大模型実験による避難困難度評価

(1) 実験概要

本研究では地下空間浸水時の避難困難度を定量的に評価するため、実物大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図-1に示す装置である。この装置は高水槽、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である。避難体験実験の様子を写真-1に示す。

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 として条件設定を行っている。これを $H=0\sim50\text{cm}$ 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、避難実験については $H=40\text{cm}$ までとした。なお、通路部最下流端には高さ調節可能な堰が設置されており、堰高を変更することで通路部の水深を変化させることが可能となっている。本模型を用いた避難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¹⁾。ただし、当時の実験模型は通路部が5mであったこと、堰が設置されていなかったことなど、階段部における避難に主眼を置いたものとなっている（2006年に模型の改修工事が行われている）。なお、堰上げ無し条件下における種々の実験結果は既報¹⁾に記した通りである。

(2) 既往の研究成果

石垣ら¹⁾によると、被験者の歩行速度の変化や歩行時の様子、手すりの使用状況（原則として、危険であると感じたとき以外は使用しない）、実験後に行われた被験者対象のアンケートなどから、 $H=30\text{cm}$ を超えると避難が困難になるとの結論が導かれている。また、単位幅運動量： u^2h を用いて、これが $1.2\text{m}^3/\text{s}^2$ を超えると安全な避難ができなくなるとの指標も提案されている。なお、この評価指標の詳しい検討内容に関しては後述する。



写真-2 堰上げ無し（左），堰上げ有り（右）（ $H=20\text{cm}$ ）

表-1 堰上げ条件下における諸量

地上水深	堰高	通路水深	流速	歩行速度
20cm	なし	5.3cm	2.64m/s	1.14m/s
	30cm	48.8cm	0.30m/s	0.65m/s
30cm	なし	7.6cm	3.54m/s	1.04m/s
	20cm	43.2cm	0.80m/s	0.78m/s
	30cm	57.0cm	0.64m/s	0.71m/s

(3) 実験条件

本報では既往の実験内容¹⁾に、堰上げによる湛水状態などの条件を付加し、通路部にも視点を置いた避難体験実験を実施した。本条件は密閉された地下空間に水が流入すると、排水されずに水深が増大することを想定している。新たに追加した条件は $H=20\text{cm}$ で堰高20cm、 $H=30\text{cm}$ で堰高20cmおよび30cmの計3種類である。被験者は男性51名、女性6名であり、胴長を着用し模型からの避難完了までに要した時間を計測した。なお、被験者は20代が中心となっている。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。

通路部における流速はピトー管を用いて計測し、水深はスケールを用いて目視により計測した。堰の有無によりその影響が階段部まで達することはなかったため、階段部の流速および水深については既往の成果¹⁾を用いた。

(4) 実験結果

a) 避難時間による比較

まず、堰上げ条件下における通路部の流速および水深、避難実験より得られた通路部における被験者の平均歩行

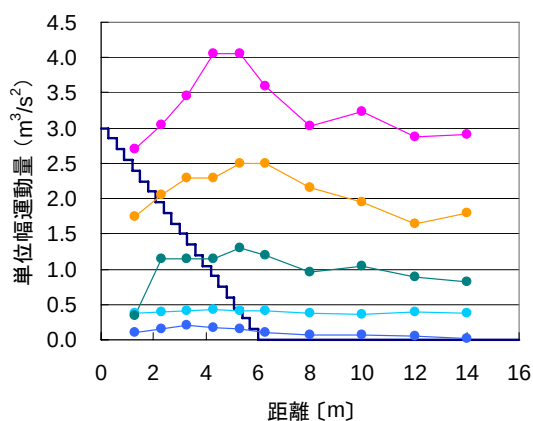


図-2 単位幅運動量による比較（堰無し）

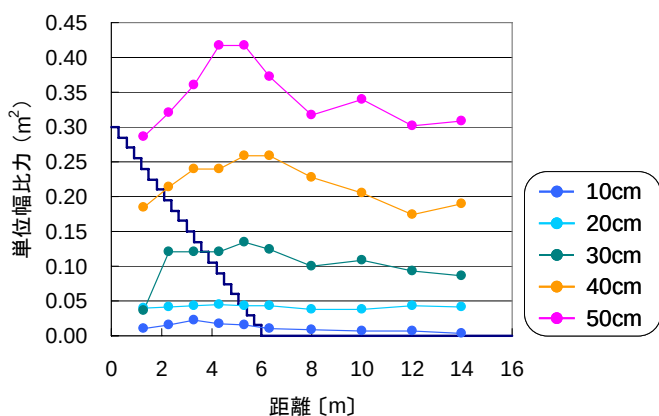


図-4 単位幅比力による比較（堰無し）

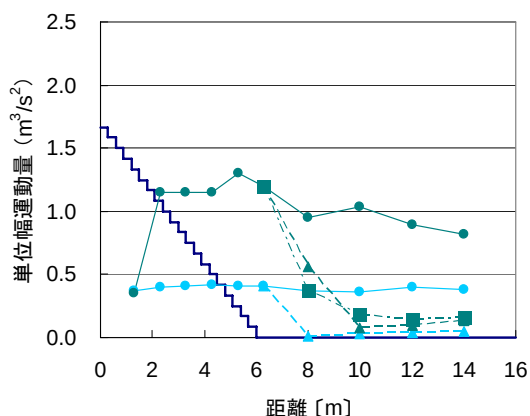


図-3 単位幅運動量による比較（堰有り）

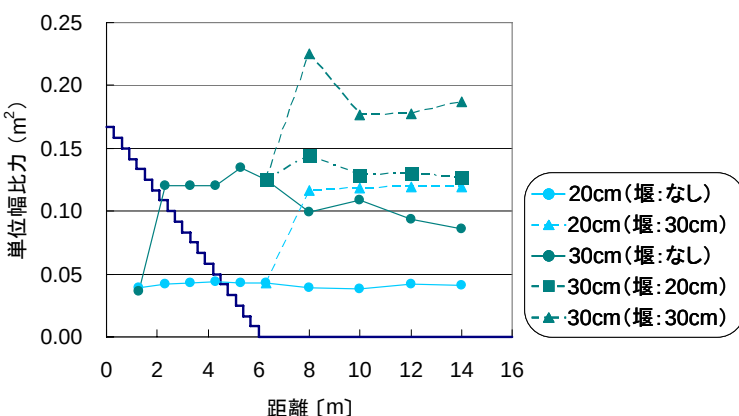


図-5 単位幅比力による比較（堰有り）

速度を表-1に示す。また、堰の有無による通路部の様子を写真-2に示す。これによると、堰上げ無し条件下では通路部の水深が小さく、流速が大きな値を示している。一方、堰を設けた場合には通路部の水深が大きくなり流速は低下した。H=20cmの場合、堰上げ無し条件下では1.14m/sであった歩行速度が、20cmの堰を設けることでほぼ半分の0.65m/sになっている。また、H=30cmの場合、堰上げ無し条件下では1.04m/sであった歩行速度は、堰高20cmの時には0.78m/s、堰高30cmの時には0.71m/sとなっている。このような歩行速度の低下が見られることから、通路部の水深が高い堰上げ条件下では、歩行が困難になっていると考えられる。また、被験者の感想からも、水深の上昇により足に大きな負荷を感じていることが明らかとなった。

b) 単位幅運動量による検討

図-2は階段模型に水を流下させた時の単位幅運動量（以下、単に運動量と記す）： u^2h （ただし、 u ：流速、 h ：水深）を地上水深ごとに示したものである（凡例は図-4と共通）。図の横軸には階段最上段からの水平距離、縦軸には単位幅運動量を示している。これによると、地上水深が大きいほど模型全体を通して運動量が大きくなっている。また、地上水深が大きくなるに従って、その増加の程度も大きくなっている。先に記したように、

既往の研究¹⁾から「H=30cmで安全な避難の限界」とする結論が得られているため、図-2においてこの地上水深で生じる $u^2h=1.2\text{m}^3/\text{s}^2$ が安全な避難限界の指標として提案されている。

次に、堰上げ条件下での運動量の様子を図-3に示す（凡例は図-5と共通）。これによると、同一の地上水深に対する運動量は堰上げ時に小さくなっており、避難困難度は低下していると言える。しかし、表-1に見られるように、堰上げの影響により歩行速度が減少していることから、運動量ではこれを適切に評価できていないことは明らかである。地上水深がどちらの場合も、堪水状態における運動量は避難困難の指標とされた $u^2h=1.2\text{m}^3/\text{s}^2$ を大きく下回っており、危険性が過小に評価されていると言える。

以上に示した通り、運動量を用いた避難困難度評価は通路部においてその困難度を適切に表現できないという問題点を抱えていることが明らかとなった。その理由として、運動量は主に流速の大きさに依存していることが挙げられる。堰上げ無し条件下では階段部・通路部共に高速流が生じるため、運動量を同一の指標として用いることができた。一方、堰上げ条件下では通路部の水深上昇に従い流速が低下したため、避難困難度を適切に表現することができなかったと考えられる。

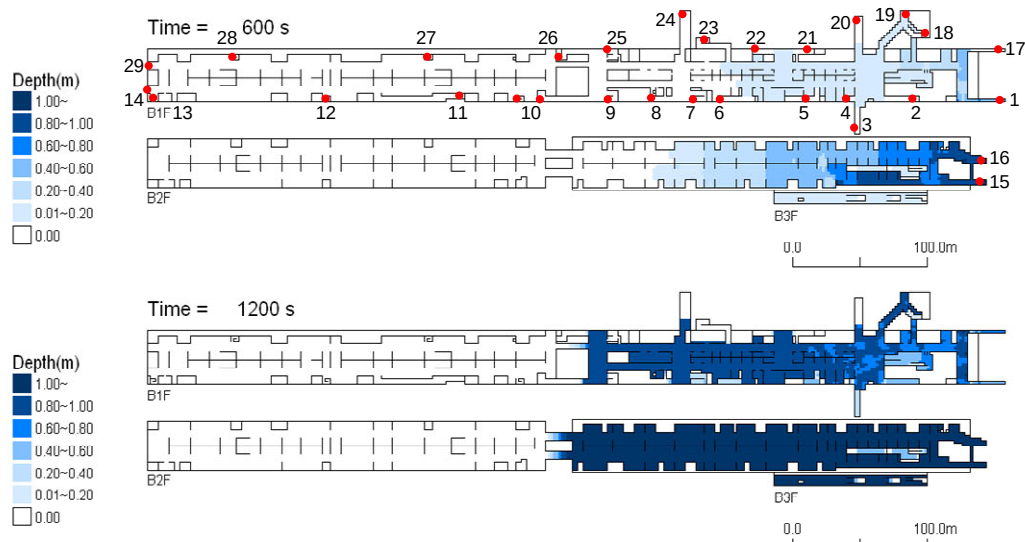


図-6 浸水深による評価

表-2 流入条件

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	

c) 単位幅比力による検討

堰上げ時には水深が大きく上昇するため、流速よりも水深（水圧）の影響が無視できなくなり、運動量では適切な評価ができなかった。そこで、運動量に加えて水深の大きさも表現できる単位幅比力（以下、比力と記す）： $u^2h/g+h^2/2$ （ただし、 g ：重力加速度）を用いて再評価を行った。

図-4は図-2と同じ要領で、階段模型全体における比力を示したものである。これによると、値の大きさこそ異なるものの、グラフの形状自体は図-2とほぼ相違ない。ここでも、「 $H=30\text{cm}$ が安全避難の限界」であるとのことから、 $u^2h/g+h^2/2=0.125\text{m}^2$ を避難困難度の指標として見ることができる。また、堰上げ条件での比力を図-5に示す。これによると、 $H=20\text{cm}$ では堰上げ時の方が比力は大きくなっており、避難が困難であるとの評価が現れた。 $H=30\text{cm}$ においても、堰高が大きくなるに従って、比力の増大と歩行速度の減少が見られ、避難困難度の大小が適切に表現できていると言える。

従来、須賀ら²⁾は水害発生時の避難を想定し、大型水路を用いた水中歩行に関する研究を行っている。それによると水中歩行時における計画避難最低歩行速度は 0.40m/s 程度であるとの結論が導かれている。本研究では「安全避難」の限界を基準としたため、これよりも大きな歩行速度で比力が 0.125m^2 を超えている。

以上より、比力を用いた避難困難度指標の妥当性を示すことができた。

3. 氾濫計算における避難困難度指標の適用

(1) 氾濫計算による検討

一般的に洪水氾濫計算ではハザードマップなどにも見

られるように、浸水深の分布によって氾濫時の危険性を想定することが多い。しかし、先に記したように避難という観点から考えた場合には、浸水深分布とは異なる危険度評価が表れると考えられる。そこで、本報では地下空間における浸水時を想定し、浸水深分布、単位幅運動量および単位幅比力を用いてその結果を比較・検討する。

(2) 計算対象地域

本研究では正方格子を用いた氾濫計算モデルにより、洪水氾濫計算を行った。このモデルは対象地域を正方格子に区切ることにより計算を行う手法であり、座標を規則的に入力することができるため、氾濫計算の中でも広く一般的に用いられている方法である（図-6参照、図中の数字は出入口番号）。

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、地下3層構造となっている。地下1階は東側（図中、右側半分）が

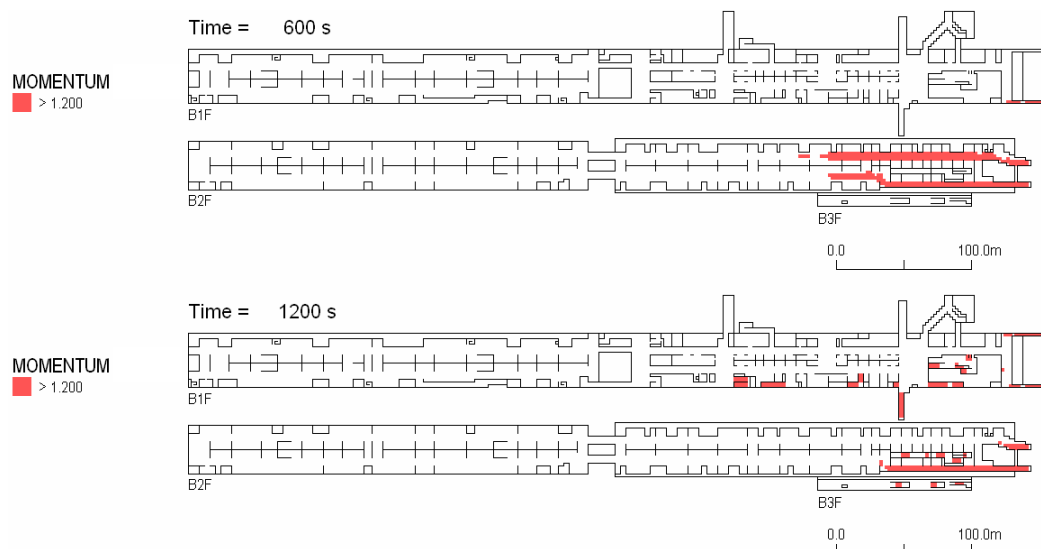


図-7 単位幅運動量による評価

ショッピングモール、地下1階西側と地下2階は駐車場となっている。また、両階とも東西約650m、南北約40m、天井高は3.5mであり、東側半分は西側よりも底面が1.5m低くなっている。地下3階は東西約100m、南北約8mの長方形で、京都市営地下鉄のホームとなっている。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。この壁は列車発着時のみ扉が開く構造であり、列車のいない時間は壁と天井の小さな開口部以外は密閉に近い状態となっている。

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。

本報では氾濫計算の精度を確認するため、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縮尺1/30の御池地下街模型による実験結果³⁾と比較した。

(3) 計算条件

本報では、京都市市街地を対象として行われた縮尺1/100模型を用いた水理実験結果⁴⁾を基に、御池地下街に流入する流量を決定した。表-2は流入条件を示しているが、これはフルードの相似則により原型量に換算したものを記載している。また、流入開始時刻は1番出入口からの流入が開始した時刻を0秒としている。

(4) 計算結果

a) 浸水深による評価

図-6は流入開始10、20分後の浸水深を示したものである（上段が流入開始10分後、下段が20分後）。これによると、流入開始から10分後には地下1階の東側約半分と

地下2階の東側約2/3の範囲で浸水している。流入量の多い地下2階では水深が40cmを超える範囲も見られ、避難体験実験においては堰上げ条件時の水深に相当するものとなっている。また、地下3階でも20cm程度の浸水が見られる。流入開始20分後には地下1、2階の浸水域は地盤の低い東側全面に広がっており、地下3階も含めて広い範囲で80cm以上の水深となっている。

b) 単位幅運動量による評価

次に、単位幅当たりの運動量を用いて氾濫の様子を示す。図-7は図-6と同様に流入開始後10、20分後の運動量の分布を示したものである。「 u^2h が $1.2\text{m}^3/\text{s}^2$ を超えると避難が困難」がこれまでの指標であったが、10分後には地下2階東側の通路部でこの基準を上回る値が算出されている。20分後には氾濫水の流入する階段付近では $u^2h > 1.2\text{m}^3/\text{s}^2$ となり、その危険度を適切に評価できていると考えられる。しかし、通路部においては10分後の値よりも小さくなっている場所が存在する。これは水が溜まることによって、流速が大きく低下したことが原因であると考えられる。なお、計算時間をさらに延長すると、水深のある程度上昇した場所では運動量が徐々に低下する傾向が見られた。また、水深が80cmを超えるような状況（図-6）が安全であるとは到底考えられず、運動量を安全避難の指標として用いるのは適切でないと言える。

c) 単位幅比力による評価

3つ目の評価方法として、避難体験実験の避難困難度評価と同様に単位幅当たりの比力を算出した。それにより表現したものを図-8（記載方法は図-6、7に準じる）に示す。なお、先に示した基準の他に、堰上げ条件下での避難実験において最大約 0.200m^2 を超える比力を示したため、数値計算においてもその領域に分類して表示した。これによると10分後には地下2階東側で比力が 0.125m^2 を超える領域が見られる。20分後には地下1、2階東側全域

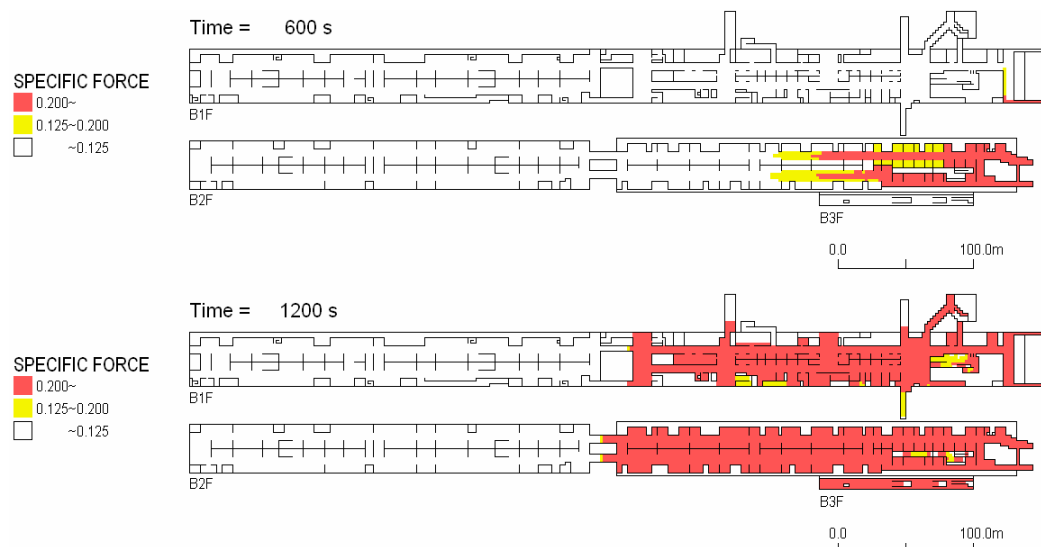


図-8 単位幅比力による評価

と地下3階で基準を超えており、避難が困難であるとの状況が示された。

亀井⁵⁾によると、洪水時において平坦部の水深が成人男性で70cm以上、成人女性で50cm以上になると歩行が困難になるとされている。また、図-6において水深がそれぞれの値を超える領域では、図-8においても比力が0.125 m^2 を超えており、歩行が困難であるとの状況を示した。また、図-6においては階段部での水深が低くなっており、その危険度を判断するのは困難であったが、比力を用いることで階段部も避難が困難であるとの評価が表れた。これにより通路部および階段部の避難困難度を同一の指標で評価することができたとと言える。

以上のことから、地下空間浸水時の避難困難度を評価するためには、運動量を用いるよりも比力により検討を行う方が適切であると考えられる。

4. おわりに

本報では地下空間浸水時の避難困難度評価指標に関して、従来の問題点を改善するため、新たな指標として単位幅比力を導入し、改めて検討を行った。本研究で得られた成果を以下に簡潔に示す。

- 1) 単位幅運動量を用いた評価指標 ($u^2h=1.2m^3/s^2$) は流速に依存した値が得られるため、水深が大きい湛水状態の避難困難度を適切に評価することができない。
- 2) 単位幅比力を用いることで、地下空間浸水時の通路および階段における避難困難度を同一の指標で評価することが可能である。また、その時の単位幅比力は $u^2h/g+h^2/2=0.125m^2$ である。
- 3) 比力を用いた評価指標を氾濫計算などにも適用することで、各地点における避難困難度の大小を明示す

ることができる。

本報では地下空間浸水時における危険性を、「避難行動」に着眼点を置いて検討を行った。その結果、地下空間浸水時の避難困難度評価には比力の適用が望ましいということが明らかとなった。また、比力を用いることで危険箇所を容易に把握できること、より現実性の高い避難シミュレーションが可能であることなどのメリットも考えられる。こうした成果を用いて、避難活動に携わる側（地下街管理者など）が避難計画を作成することが可能である。ただし、避難計画は災害時要援護者など避難がより困難になると予想される人に対して基準を合わせる必要がある。その中に含まれる高齢者の避難困難度に関しては、現在も研究を行っているところである。

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。

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) 須賀堯三・上阪恒雄・白井勝二・高木茂知・浜口憲一郎・陳志軒：避難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，第38巻，pp. 829-832，1994。
- 3) 戸田圭一・井上和也・大八木亮・中井勉・竹村典久：複雑な地下空間の浸水実験，水工学論文集，第48巻，pp. 583-588，2004。
- 4) 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。
- 5) 亀井勇：台風に対して，天災人災 住まいの文化誌，ミサワホーム総合研究所，1984。

(2007. 9. 30 受付)