

地下空間浸水時のアナウンスが 安全避難成功率に及ぼす影響について

EFFECT OF ANNOUNCEMENT ON SAFE EVACUATION FROM INUNDATED UNDERGROUND SPACE

川中 龍児^{1*}・石垣 泰輔²

Recently, underground inundations due to heavy rainfalls become a problem. For example, Tokyo, Fukuoka and Nagoya were damaged. The safe evacuation plan from the underground space is necessary to make in order to minimize flood damage. In this paper, flooding and evacuation behavior were simulated and safe evacuation plan was investigated. In evacuation behavior simulation, effect of inundation and condition for each the person were considered. The criterion for safe evacuation during underground inundation was considered by using the specific force per unit width. The results are useful to make an evacuation plan.

Key Words : *Underground inundation, Evacuation simulation, Specific force per unit width*

1. はじめに

近年，異常気象により短時間の局所的集中豪雨が頻発するようになった．それに加え，都市部においては都市化の進展により，雨水の浸透・遊水機能が低下している．このことから，計画規模を大幅に超えるような局所的集中豪雨が発生した場合に雨水が地表へ氾濫し大きな被害をもたらすようになった．このような都市部で発生する水害の中でも特に地上で氾濫した水が地下鉄や地下街などの空間へ浸水することが深刻な問題となっている．1999年には福岡市水害，2000年には東海豪雨災害時に名古屋市で地下鉄や地下空間が浸水し大きな被害をもたらした．

地下空間は地上よりも低位置であるため，地上に氾濫した水が集まりやすく，利用者が多く集まる場所が多いことから，被害を軽減するためにはハード面の対策だけでなくソフト面での対策が重要となる．このことから，2003年には特定都市河川浸水被害対策法で浸水想定区域内に不特定多数が利用する地下空間施設が存在する場合，水害時に利用者が迅速かつ円滑な避難の確保についての努力義務，2005年には水防法では地下街等の地下施設の避難確保計画策定の義務化などの対策が行われてきた．

このように，地下空間浸水時の避難計画策定は非常に重要な課題となっている．地下空間浸水時の避難計画の

策定を行う際に，地下空間にどのように浸水するかという浸水過程と浸水時に人が避難する際にどのような影響を受けるかという人の避難状況を予測し把握することが重要となる．

地下空間の浸水過程に関する研究については，井上らや戸田らが模型実験や浸水シミュレーションによって研究が進められてきた¹⁾²⁾．

地下空間浸水時の避難について石垣・戸田らは実物大の模型を用いた実験を行い，避難者の歩行速度が，水深，流速，年齢層，性別，歩行密集度によって，どのように変化するかについて，「単位幅比力」という指標を用いて評価を行っている³⁾⁴⁾⁵⁾．

地下空間浸水時の避難行動の予測については，関根らが人を個別に取り扱えるマルチエージェントモデルを用いた地下空間浸水時の避難行動シミュレーションモデルの研究が進められている⁶⁾⁷⁾．

以上のように，地下空間浸水に関して多くの有益な成果が得られている．今後はこれらの成果を用いて地下空間浸水時の危険性を評価することが重要となる．このような評価を行うことで，地下空間管理者は避難アナウンスのタイミングや浸水対策の効果を検討することが可能となるため，効率的な対策を検討するための情報として用いることができると考えられる．

本研究では，地下空間浸水時の危険性を評価するため

キーワード：地下空間浸水，避難シミュレーション，単位幅比力

¹学生会員 関西大学先端科学技術推進機構 非常勤研究員（〒564-0073 大阪府吹田市山手町 3-3-35）,E-mail:kawanaka.ryuji@gmail.com

²正会員 工博 関西大学環境都市工学部 教授（〒564-0073 大阪府吹田市山手町 3-3-35）

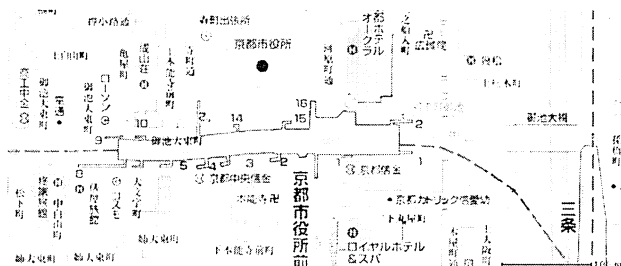


図-1 解析対象地

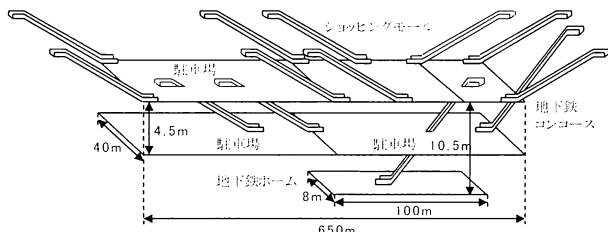


図-2 地下空間の構造

に、浸水時の避難行動シミュレーションを行った。この際に、避難時の歩行速度は浸水した水流や歩行者の密集度によって変化することが指摘されている。このことから、地下空間浸水時を想定した実物大模型を用いた避難体験実験の結果を定式化することで実物に近い歩行速度を再現しようと試みた。この結果を用いて地下空間浸水時の避難困難度評価手法を提案するとともに、早期の避難を促すために避難アナウンスを行った場合どの程度有効であるかについて評価を行った。

2. 解析方法の概要

(1) 地下空間浸水解析の概要

本研究では、図-1 に示す京都市御池地下街を対象として解析を行った。御池地下街は京都市の中心部の御池通の地下に位置し、東西に約 650m の範囲で広がっており、その東側には鴨川が北から南に向かって流れている。地下街は地下 3 層構造であり、地下 1 階東側はショッピングモールと地下鉄のコンコース、地下 3 階は地下鉄東西線のホームとなっており、それ以外は駐車場として利用されている。地下 3 階ホームは地下 1 階東側コンコースのみと接続しており、地下 1 階の西側は東側よりも床面が 1.5m 高くなっている。地下空間浸水を考える際に、どの階段からどれぐらいの流入があるかが重要となる。そこで、本研究では戸田ら³⁾によって行われた模型実験を実物大の値に換算した値を流入量させた。表-1 にその流入個所、流入開始時間、流入量を示す。ただし、本研究では、利用者の避難を考えることから、利用者が多数存在すると考えられる地下 1 階東側のショッピングモールおよび地下 3 階の地下鉄ホームのみを対象として解析を行った。図-3 は対象範囲の階段の位置を示した図

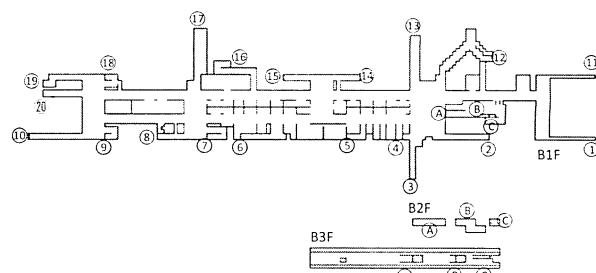


図-3 階段の位置と流入個所

表-1 流入個所ごとの流入時間と流入量

入り口番号	流入開始時間	流入量 (m³/s)
1	00分00秒	1.58
3	10分03秒	1.32
5	10分14秒	2.13
4	10分30秒	1.88
2	10分47秒	2.63
12	11分25秒	0.38
6	11分53秒	1.31
11	12分42秒	2.00
7	14分09秒	1.08

である。地上への出口につながる階段は計 19 ヶ所、地下 3 階から地下 1 階へつながる階段は A 階段、B 階段、C 階段の 3 ヶ所である。また、地下 1 階の西側の駐車場の床面が東側のショッピングモールよりも 1.5m 高くなっていることから、そこへの避難を行った場合にも避難完了と見なした。地下 1 階の西側駐車場への出入り口は図中の⑩の位置である。浸水解析モデルは、2 次元汎用解析モデルを適用した。対象範囲を一边が 2m の正方格子に分割し、各格子辺上で運動方程式、格子内で連続式を解くことで流速と水深を求めている。Manning の粗度係数は実験の値を実物大に換算した $n=0.0176$ 、計算差分時間は $\Delta t=0.01s$ として解析を行った。地下空間内の店舗についてはすべて開店しているものとした。浸水した水は地下 3 階のホームからのみ排水される。ただし、地下 3 階のホームには高さ 2.5m の落下防止用仕切りが存在するために、水深が 2.5m を超えるまでは排水されないものとした。

(2) 浸水を考慮した避難行動シミュレーションの概要

石垣・戸田らの研究では、地下空間浸水時の避難行動では、それぞれの利用者の性別、年齢、歩行密集度などが大きく関わりと指摘している^{3),4)}。このことから、地下空間浸水時の避難の安全性を考える際、これらのことを考慮することが必要となる。そこで、本研究では避難者の性別や年齢などの属性を個々に取り扱うことが可能なマルチエージェントモデルを用いた。基本的なモデルの考え方については、関根らの研究を参考に以下に示すようないくつかの修正を加えたものを適用した^{6),7)}。

表-2 単位幅比力の分類

		単位幅比力 (m^3/m)	
		自力避難困難	自力避難限界
男性	成人(20歳代)	0.125	0.250
	高齢者(65歳以上)	0.100	0.200
女性	成人(20歳代)	0.100	0.200
	高齢者(65歳以上)	0.050	0.160

a) 移動目標の設定

人が移動を行う際には、何らかの目標に向かって移動する。特に浸水時の避難においては、避難誘導灯、地上へ向かう階段、通路の曲がり角が目標となることが考えられる。そこで、本研究では浸水計算の格子を階段、通路、店舗、交差点のような属性を持った幾つかの領域に分割し、人はその領域と領域の境界を目指して避難を行うように設定した。また、この境界にさまざまな選択の条件を設けることで細かな移動先の選択が行えるようにした。1つめの条件として、領域の属性ごとに優先度を設け、優先度の高い領域と接続する境界を移動目標とした。これは、地上へ避難することを優先することから、出口が最も優先度が高く、次に上に向かう階段、通路とした。ただし、店舗については侵入できないように設定した。次の条件として、同じ優先度の境界が複数存在する場合には、最も近い境界を移動目標にするようにした。最後に、階段の領域については、浸水している階段を選択することは考えにくい。このことから、ある一定の水深がある場合にはその階段を選択しないように設定した。実物大の階段実験の際に行ったアンケート調査によると、階段の上部の水深が約0.1～0.2m程度で恐怖を感じる事が分かった³⁾。そこで、階段上部の水深が0.1m以上の場合にはその階段を選択しないように設定した。

b) 避難時の歩行速度

浸水時の避難行動における歩行速度は水深、流速、年齢、性別が影響を与えることが指摘されているため、これらの影響を石垣・戸田らによって行われた浸水時を想定した実物大模型を用いた避難体験実験の結果を定式化することで考慮した^{3) 4)}。なおここでは、女性や高齢者などのデータが少ないことから成人男性の歩行速度のみを以下のように定式化した。浸水時の歩行速度は、最大歩行速度に流れや水深による影響と歩行者の密集度による影響を乗じることで求められると仮定すると次式で表わされる。

$$v = Sp \cdot De \cdot v_{normal} \quad (1)$$

ここで、 v は歩行速度、 Sp は水深や流速などの影響による歩行速度の減少率、 De は歩行密集度による歩行速度の減少率、 v_{normal} は最大歩行速度を示している。

水深や流速の影響については自分の存在する格子の水深と流速から単位幅比力を求めその値より次式を用いて計算した。

$$Sp = 0.22 \cdot \exp(-125.3 \cdot M_0) - 0.71 \cdot M_0 + 0.78 \quad (2)$$

ここで M_0 は単位幅比力($M_0 = u^2 h / g + h^2 / 2$)を示している。

次に歩行密集度の影響については、進行方向に存在する人との距離により次式を用いて計算した。

$$De = \exp(L^{4.37} / 2.55) - 0.48 \quad (3)$$

ここで、 L は進行方向に存在する最も近い人との距離を示している。

以上の式を用いることで、様々な影響を考慮した歩行速度が計算される。

(3) 解析条件

避難者は成人男性のみとし、最も人が多く存在すると考えられる朝の通勤時間を想定して配置する人数を決定した。通勤時間の人数については「京都市交通白書」を参考にして算出した結果、混雑度は0.5人/ m^2 程度であることが分かった。また、人の配置については、階段を除く通路部のみとした。この混雑度になるように人をランダムに配置した結果、地下1階は2192人、地下3階は384人の計2576人となった。

人の通常歩行速度（非浸水時の歩行速度）は $v=1.4\text{m/s}$ として先に述べたように存在する格子内の浸水状況や近傍の人との距離によって変化させた。ただし、階段部の歩行速度について体験実験の結果より、通路部の約半分となる事が確認されていることから³⁾、階段部における歩行速度は、浸水の影響や避難時の密集度によって歩行速度を変化させた後に1/2を乗じて歩行速度とした。

避難開始の条件については、個人による判断と地下空間管理者からの避難アナウンスによる避難開始の2つの条件を設けた。個人の判断による避難開始は、自身の存在する格子水深が0.05m以上となった場合に避難行動を開始するようにした。これは既往の研究で行われたアンケート調査に基づいて決定した⁸⁾。避難アナウンスによる避難開始については、避難アナウンスが行われたと同時にすべての人がそれに従い避難を開始するようにした。

避難者は通常の避難状態、自力避難困難状態、自力避難限界状態のいずれかの状態となり、それぞれの状態は自身が存在する浸水解析の格子内の単位幅比力によって決定される。それぞれの状態の単位幅比力を表-2に示す。なお、避難困難状態では手すりや他人の補助が無いと歩行ができない状態であるため歩行速度を $v=0.0\text{m/s}$ としてその場で待機するようにした。また、人が地上への階段の上部へ到達するか、地下1階西側の駐車場へ避難した場合に避難完了と見なした。

歩行者の計算時間間隔は1.0sごとに行い、すべての人が避難を完了するか、避難困難状態となり動けなくなる

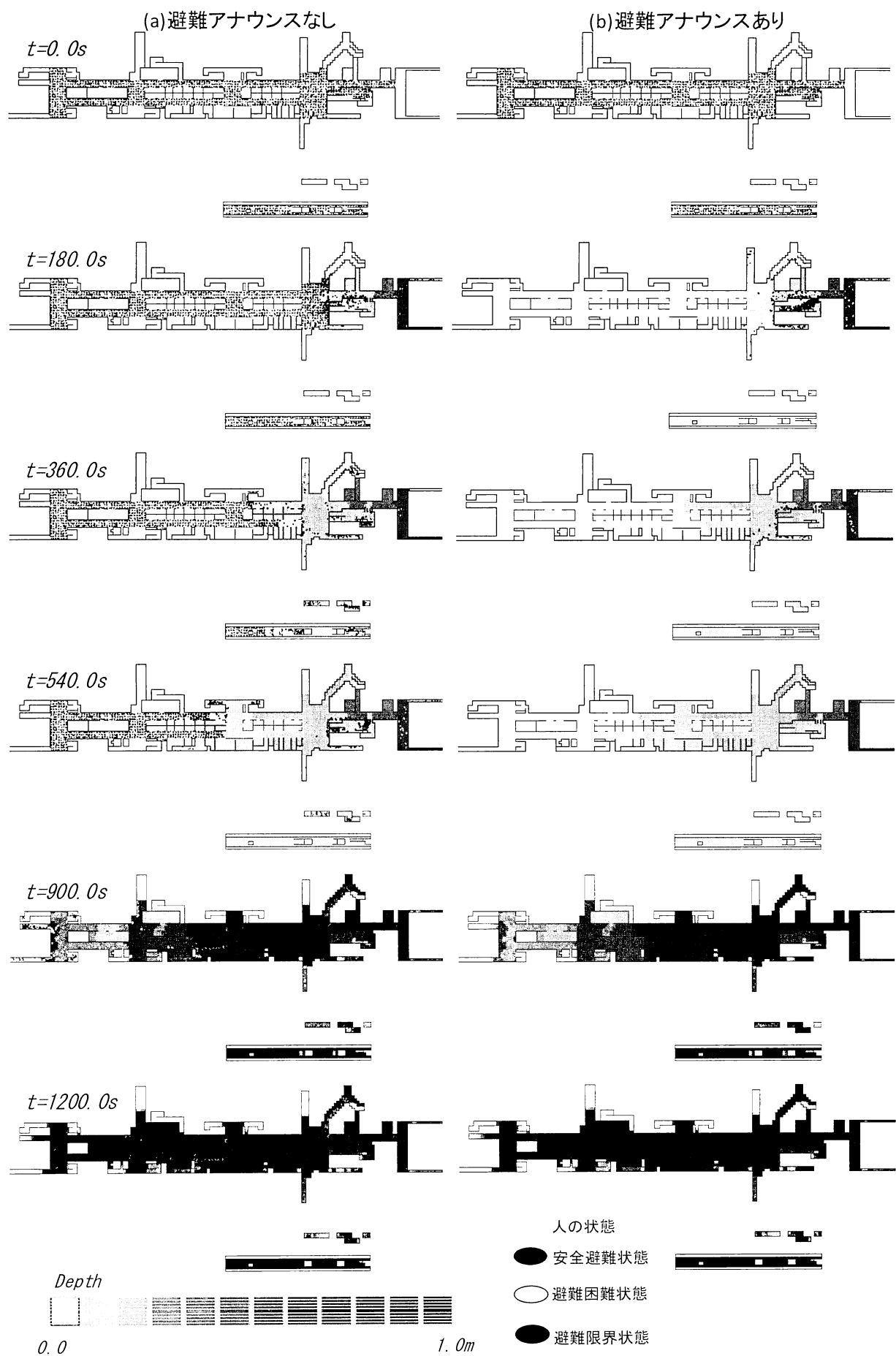


図-4 浸水深と避難の様子（右：アナウンスなし，左：アナウンスあり）

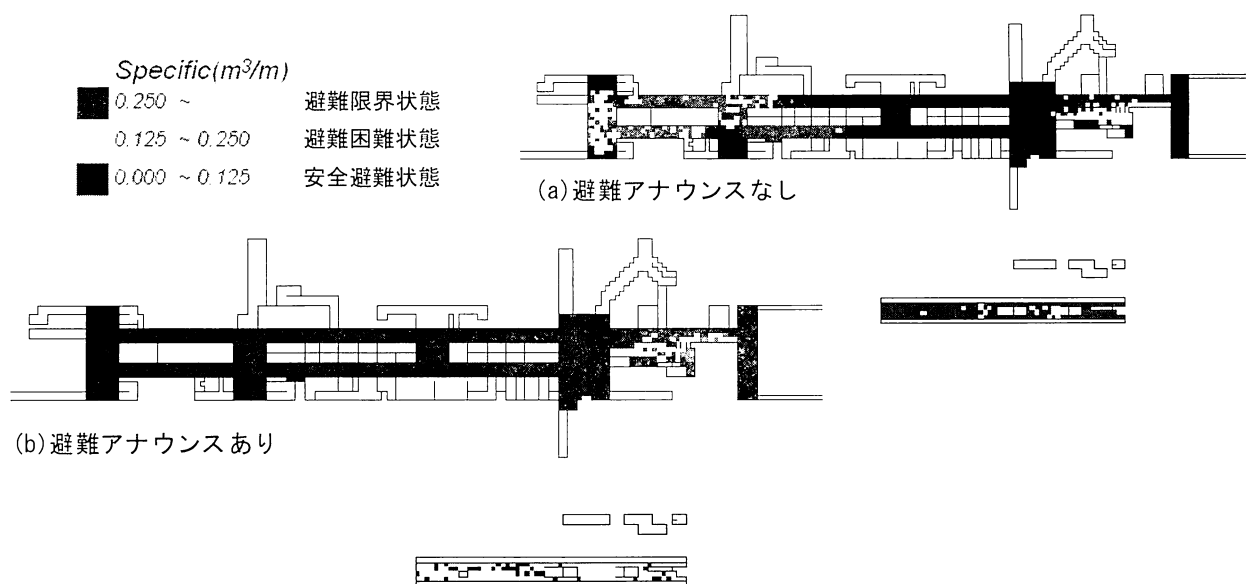


図-5 避難シミュレーション結果と単位幅比力を用いた避難困難度評価

まで計算を行った。また、避難者の避難する方向や避難する階段の選択などは避難に大きな影響を与えると考えられることから、ランダムに人の配置を変更して複数回の解析を行った。

3. 解析結果

図-4 は浸水深の時間変化と避難の様子を示している。図から浸水は東側の階段から始まり、時間が経過すると西側に向かって浸水し、14分ほどで地下空間全体が浸水することがわかる。また、地下3階が浸水し始めるのは、浸水開始から約3分後である。避難アナウンスを行わない場合の避難の状況について見ると、浸水開始から約1分後に東側改札付近の人から避難を開始している。しかし、最寄りの階段が浸水している階段であるため、移動してすぐに避難困難となる人が存在する。浸水開始から約4分後に地下3階に存在する人が浸水に気づき避難を開始し始める。浸水開始から約7分後には地下3階から避難を開始した人が地下1階にたどり着くが、地下1階の改札付近が混雑しているために渋滞が発生している。浸水開始から約10分後には東側の階段で新たに浸水が始まり、東側の水深が一気に上昇したため、避難困難になる人や浸水がある階段を避難中の人が避難困難もしくは避難限界となっている。浸水開始から11分後には避難限界となる人がいる一方で、西側には依然として浸水していないため避難を開始していない。すべての人が避難を開始するのは浸水開始から14分後であるが、この時点で通路のほとんどは水深が0.3m以上となり、避難するには非常に危険な状態となっている。

解析終了時に避難限界となって避難が失敗した人の位

置を見ると、階段付近や階段で避難限界となっている。この避難限界となる人が多い階段では流入がある階段であり、流入のある階段から避難を行っている場合や階段が混雑することで渋滞となることで待機している場合に避難限界となっている。このことから、避難誘導を行う際には多くの階段が浸水する南側の階段を避けるべきであることが分かった。一方、避難アナウンスを行った場合の避難状況を見ると約10分以内に避難が完了している。浸水に気づきにくかった地下1階の西側や地下3階も早期に避難を開始したことで避難が完了している。しかし、一斉に避難したことで階段付近や地下鉄の改札口付近で混雑が発生していることから転倒したり将棋倒しになるような2次的な被害が発生する可能性がある。

以上のように、浸水時に危険になる場所や避難の様子を把握することができた。また、避難アナウンスを行い、早期の避難を促すことで安全に避難な避難を行うことができることがわかった。しかしながら、このままではどこがどれぐらい危険であるか、または避難アナウンスを行うことでどこにどれぐらいの効果があつたかという定量的な評価が困難である。そこで、次にこれらの結果を用いて避難困難度を定量的に評価することを試みた。

4. 避難困難度評価

地下空間浸水時では、浸水による影響、避難開始の遅れによる影響、人の密集度による影響などによって、避難経路の安全性に大きな影響を与えることが考えられる。これらの影響を適切に評価し、危険な場所を事前に把握することが避難計画を策定する上で重要になる。ここでは、浸水シミュレーションの結果と避難シミュレーショ

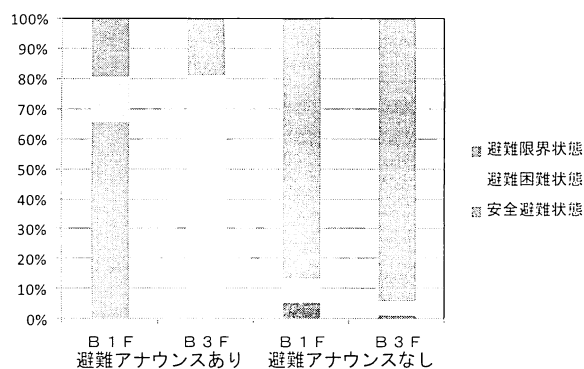


図-6 避難アナウンスによる避難指示の効果

の結果を用いて避難経路の安全性の評価手法とその適用を行った。提案する手法として、ある格子の避難困難度評価を行う場合に、その格子から避難を行うと避難行動中にどのような状態になるかについて単位幅比力を用いて評価することにした。ただし、通過する場所や逃げる方向によって人の状態が変化するため、複数回シミュレーションを行い、その結果を重ね合わせて最も危険な状態をその格子の避難困難度とした。図-5(a), (b)は先に述べた手法をもとに避難アナウンスを行わない場合の避難困難度評価を行った結果を示す。図-5(a)の避難アナウンスを行わない結果を見ると、避難シミュレーションの結果と同様に地下1階の西側と地下3階に危険となる場所が多く広がっていることが分かる。このように、提案した手法では危険な場所を的確に表現で可能である。次に避難アナウンスを行わない場合と行った場合について比較を行うと、避難アナウンスを行うことで避難中に避難限界となるような個所が大幅に減少している。地下1階の西側ではアナウンスによる避難指示によって、浸水前に避難が完了したことで安全に避難ができるようになっている。また、地下3階では避難中に危険な場所を通過するが避難が完了できるようになったことがわかる。しかし、避難アナウンスを行った場合に地下1階の改札口付近で避難困難になる場所が発生している。これは、避難誘導を行っていないことから、東側に避難する際に浸水する階段を用いて避難を行ったことに加え、一斉に避難を行ったことで改札口付近が混雑し避難時間が増加したためである。このことから、避難アナウンスのみでなく浸水する階段に向かわせないように避難誘導も合わせて行うことが重要となる。

図-6は図-5(a), (b)の結果をグラフで示した結果である。この図より、地下1階では避難アナウンスがない場合は安全に避難可能な場所は約60%であったのに対し、避難アナウンスを行った場合には90%以上まで増加している。地下3階については、避難アナウンスがない場合ではおよそ90%以上の場所で避難中に避難限界になって逃げ遅れる可能性があったのに対して、避難アナウンス

を行うことで避難困難状態にはなるが全域で逃げ遅れるような可能性はなくなっていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、地下空間浸水時の危険性を評価するために、地下空間浸水時の避難行動シミュレーションを行い、その結果を用いて浸水と人の避難行動を考慮した避難困難度評価を提案した。このように浸水のみの影響だけでなく人の行動も評価手法に加えることで、従来のものに比べより危険な場所を明確にすることができた。また、この評価手法を用いることで、避難指示のタイミングや浸水対策の効果を検討し、どの場所に有効に作用するかを検討することが可能となった。このような避難困難度評価の結果を用いることで、地下空間浸水時の迅速かつ効率的な避難が可能であると考えられる。

本研究では、成人男性を様な避難開始条件で避難させたが、本来は女性や高齢者などの災害時要援護者を考慮すべきである。今後は、適切な避難誘導と初期の混雑度の違いによって、どのタイミングで避難を開始させ、どこへ避難誘導すれば、すべての人が安全に避難することができるかについて検討を行いたい。

参考文献

- 1) 井上和也, 中川一, 戸田圭一, 溝田敏夫: 地下空間への反乱浸水の解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第2巻, 土木学会地下空間研究委員会, pp95-102, 1997.
- 2) 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回, pp.583-588, 2004.
- 3) 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, pp841-846, 2008.
- 4) 浅井良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 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, 水工学論文集, 第53巻, pp859-864, 2009.
- 5) 川中龍児, 佐藤敬典, 中畑佳城, 石垣泰輔: 地下空間浸水時に歩行密集度が避難経路の安全性に及ぼす影響について, 平成22年度土木学会関西支部年次学術講演概要集, pp11-34, 2010.
- 6) 関根正人: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水過程と避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第54巻, pp907-912, 2010.
- 7) 関根正人, 本山量啓: 地下空間浸水時の避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第50巻, pp583-588, 2006.
- 8) 川中龍児, 大西良純, 石垣泰輔, 島田広昭: 地下街利用者の水防意識に関するアンケート調査, 第25回日本自然災害学会学術講演会講演概要, 日本自然学会, 11-3-4, pp91-92, 2006.