

大規模地下空間における浸水時の 避難行動の検討

STUDY ON EVACUATION FROM INUNDATED UNDERGROUND SPACE

吉川 雅志¹・石垣 泰輔²・川中 龍児³

Masashi YOSHIKAWA¹, Taisuke ISHIGAKI², Ryuzi KAWANAKA³

Torrential rainfalls have been observed frequently in recent years and these rainfalls caused inundations in urban and rural areas. Intensity of such rainfalls were sometimes excess over the design rainfall of drainage systems and rain was running over the road. In these floods, some portion of rainwater intruded into underground spaces and the users faced the danger of underground flooding. 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 congestion factor were considered. The criterion for safe evacuation during underground inundation was considered by using the specific force per unit width. The result are useful to make an evacuation plan.

Key Words :underground space, evacuation , congestion factor,specific force per unit width

1. はじめに

近年，気候変動の影響と考えられる集中豪雨の発生回数が増加している．最近 10 年間の平均では時間降雨 50 mmを超える降雨は 1 年間に 200 回以上である．

一方で，都市部の地表面はコンクリートやアスファルトによって被覆され，保水・遊水機能が低下している．雨水排除は下水道施設に依存しているが，その雨水排水能力は一般的に時間雨量 50 mm前後の雨にしか対応しておらず，この雨量を超える降雨が発生すると内水氾濫が生じる恐れがある．その氾濫水の一部は地下空間へと流入し，地下街・地下鉄などの都市機能を大きく麻痺させる．過去の都市水害においては，地下空間への浸水被害，施設物品の被害のみでなく，地下空間からの避難が遅れ，人命が失われたという事例もある．

従来からこのような問題を解決するため，地下空間の浸水解析や避難に関する検討が行われている．戸田ら¹⁾は京都市御池地下街を対象とし，実物大の 1/30 の模型を用いて実験を行っている．また，タンクモデルによる

数値解析を行い，地下街からの避難を考える際に通路部と階段部の避難の危険性をともに考慮することが重要であることを指摘している．また，関根ら²⁾は新宿駅周辺を対象に下水道網を対象とした雨水の排水計算を行い，内水氾濫シミュレーションを行っている．解析モデルとして地表面における内水氾濫モデル，下水道網による雨水流出モデル，地下街の浸水モデルを用いており，解析の結果，浸水被害の恐れのある区域と規模を予測している．

一方，避難に関して，石垣ら³⁾は実物大の階段模型とを用いて，避難に関する実験を行っている．実物大階段模型を用いた実験では，上流端水深を変化させ，被験者の昇降時間を計測している．上流端での水深の上昇に伴い避難が困難になることが分かり，成人女性では 0.2m, 成人男性は 0.3m以上になると避難の所要時間は大幅に増加する．また，避難困難度指標として単位幅運動量(u^2h)のみを用いていたが，大西ら⁴⁾の研究では運動量と水深の大きさを表現できる単位幅比力($u^2h/g+h^2/2$)を新たな指標として提案している．また，関根ら⁵⁾は新宿駅周

キーワード：大規模地下空間，避難行動，混雑度，単位幅比力

¹学生会員 関西大学大学院 Kansai university graduate school (E-mail:dm.yosikawa@gmail.com)

²正会員 関西大学環境都市工学部 教授 Kansai university department of Environmental and Urban Engineering Professor

³正会員 関西大学社会安全学部 研究員 Kansai university Social safe department Rsercher

辺を対象に浸水時の避難行動解析を行い、利用者が本能に任せて単純に避難した場合と、標識を設けるとともに管理者を要所に配置する避難誘導を行った場合とで解析結果を比較し、二次災害の危険性の高い最も混雑する階段への利用者の集中が誘導により回避できることを示している。また、避難指示のアナウンスを流すと、むしろ危険側の影響を与えることもあわせて確認している。

以上のように従来の研究において、都市型水害については模型実験とともに数値解析が行われ、近年では下水道網を考慮した内水氾濫シミュレーションも行われている。避難行動解析については、避難行動だけでなく避難アナウンスなどの効果についても併せて検討されている。

しかし、従来の研究では混雑する状況下での人の避難について詳細な検討が行われておらず、本研究では、大規模地下空間を対象とし、混雑度を変化させた5ケースで地下空間浸水時の避難解析を行い、避難状況を比較するとともに、単位幅比力を用いて避難困難度の検討を行い、安全な避難計画の策定の際に考慮すべき事項を明らかにすることを目的とした。

2. 解析方法の概要

(1) 地下空間浸水解析の概要

本研究で対象としたのは実在する大規模地下空間である。この大規模地下空間は約1km四方に広がる日本で有数の地下街で、隣接する駅が7つあり、百貨店、ビルなどが存在する。出入口として129ヶ所を考慮し、2m幅の出入口は49ヶ所、4m幅の出入口は80ヶ所である。地下

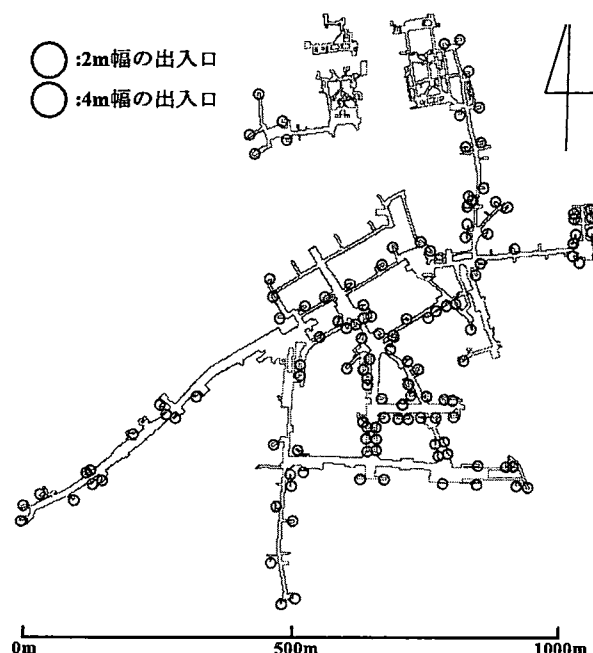


図-1 地下街の出入口

街の出入口を図-1に示す。本研究では大規模地下街の流入条件として、InfoWorks CSを用い、実降雨(2008年岡崎豪雨、最大1時間雨量146.5mm、総雨量447.5mm)を用いた解析を行い、出入口地点の流入量を求め、それを大規模地下空間の流入条件とした。InfoWorks CSとはWallingford Software社より開発された下水道網を考慮した地上部の氾濫解析が可能な解析ソフトである。InfoWorks CSを用いて解析を行った結果、雨水が流入する出入口は45ヶ所であった。浸水解析の対象は大規模地下街の通路部分と地下鉄・店舗・ビルを対象とした。またメッシュのサイズは2mの正方格子である。出入口の幅は流入の際に重要であり、2m、4mの幅で考慮している。

大規模地下街における浸水解析を行う上での計算モデルとして、本研究では2次元浅水方程式を基礎式とする構造格子モデルを用いた。

(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^{1), 3)}の研究では、地下空間浸水時の避難行動は、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ると指摘している。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。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³⁾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。

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。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。一つ目の条件として、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、地上に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、店舗とした。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。実物大の階段実験の際に行ったアンケート調査⁶⁾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ということが分かった。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

これらの影響を石垣・戸田ら^{1), 3)}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。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⁷⁾で表される。

$$v = S_p \cdot D_e \cdot v_{normal} \quad (1)$$

ここで、 v は歩行速度、 S_p は水深や流速などの影響による歩行速度の減少率、 D_e 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⁷⁾を用いて計算した。

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

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⁷⁾を用いて計算した。

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

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

浸水解析は、浸水の広がり方を考慮するために大規模地下空間全体で行ったが、避難行動解析は混雑度の影響が顕著に表れると予測される狭い通路の多い1ブロックのみで行った。図2の図中の円内に対象ブロックを示す。安全避難を考えた場合に、全ての人が安全に避難できることが前提であるから、避難者は全員、自力での避難が困難となるのが最も早い高齢女性のみとし、配置人数は混雑度が0.125人/m²となるように配置した1029人、混雑度が0.250人/m²となるように配置した2055人、混雑度が0.500人/m²となるように配置した4110人、混雑度が0.750人/m²となるように配置した6165人、混雑度が1.00人/m²となるように配置した8364人の5ケースで解析を行った。

高齢者の通常歩行速度（非浸水時の歩行速度）を $v=0.8\text{m/s}$ 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⁹⁾より、通路部の約半分となることが確認されていることから、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、大西ら⁴⁾のアンケート調査

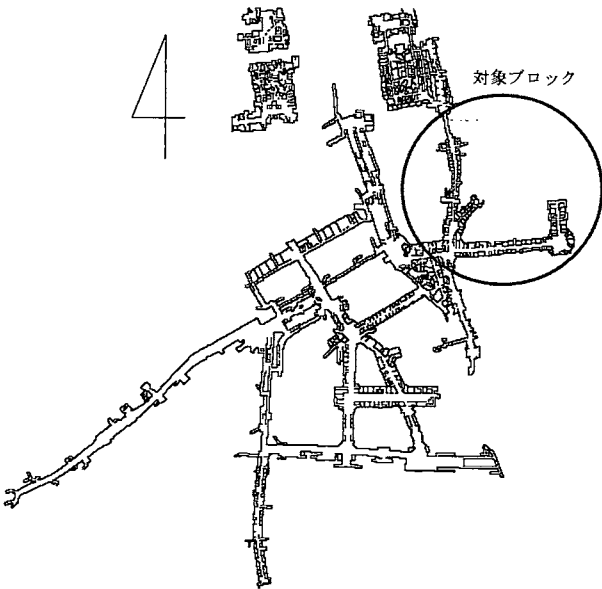


図-2 避難行動解析対象区域

表-1 避難困難度指標

	避難困難状態	避難限界状態
成人男性	0.125	0.250
高齢男性	0.100	0.200
成人女性	0.100	0.200
高齢女性	0.080	0.160

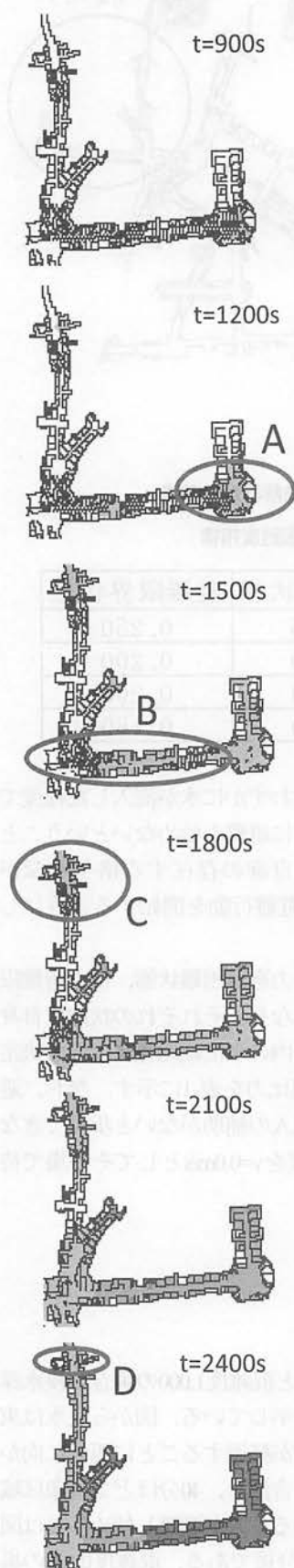
の結果から、過半数の人はわずかに水が流入した程度では、浸水に気づいてもすぐに避難を始めないということが指摘されているため、自身の存在する格子水深が0.02m以上となった場合に避難行動を開始するようにした。

避難者は通常の状態、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。それぞれの単位幅比力を表-1に示す。なお、避難困難状態では手すりや他人の補助がないと歩行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。

3. 解析結果

図-3は混雑度0.125の場合と混雑度1.000の場合の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、時間が経過するごとに西側に向かって浸水し、北側の浸水と合流し、40分ほどで対象区域全体が浸水することが分かる。人が避難し始めるのは図中の円Aに示すように約20分後である。混雑度0.125の場合の避難の状況を見てみると、図中の円Bに示すように狭い通路でも混雑ことなく最寄りの階段に向かって速や

(a)混雑度0.125



(b)混雑度1.000

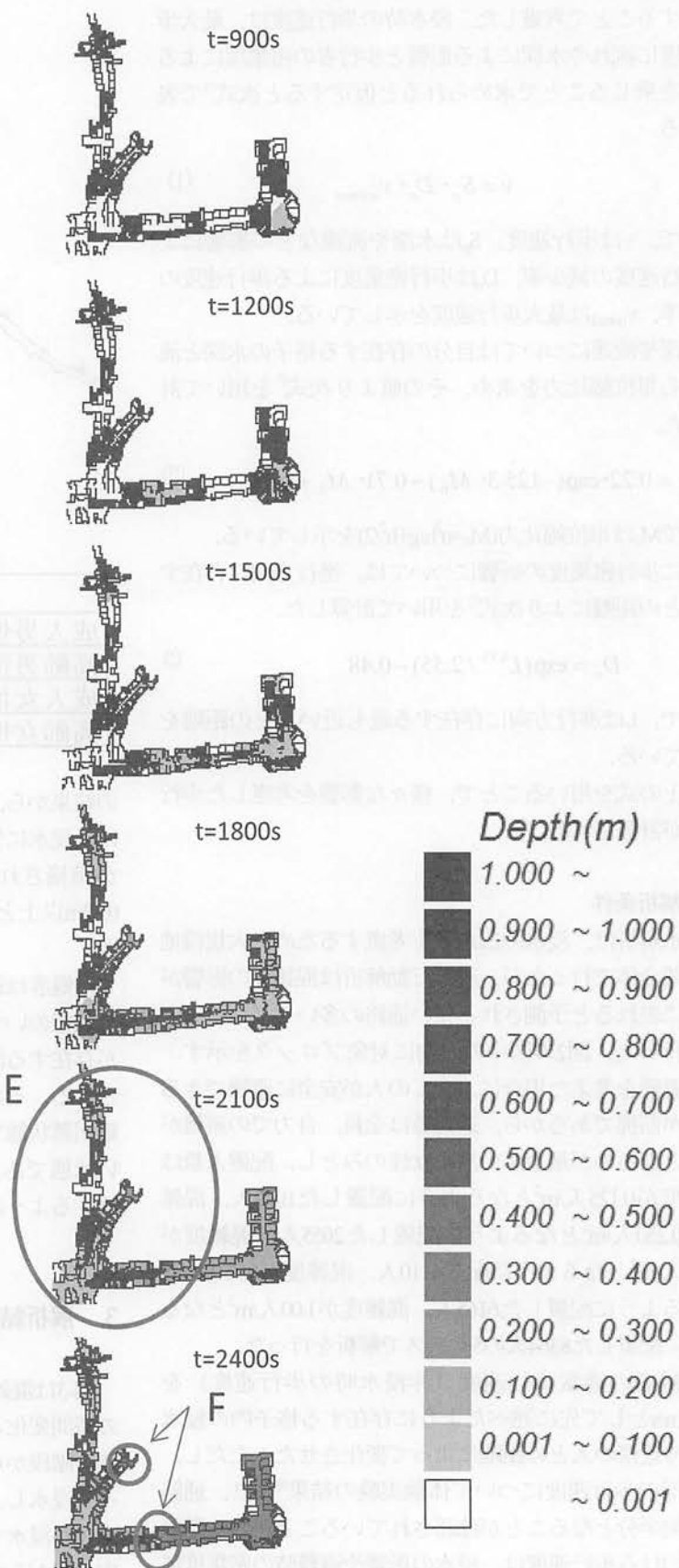


図-3 浸水深と避難の様子 (左 : 混雑度 0.125, 右 : 混雑度 1.000)

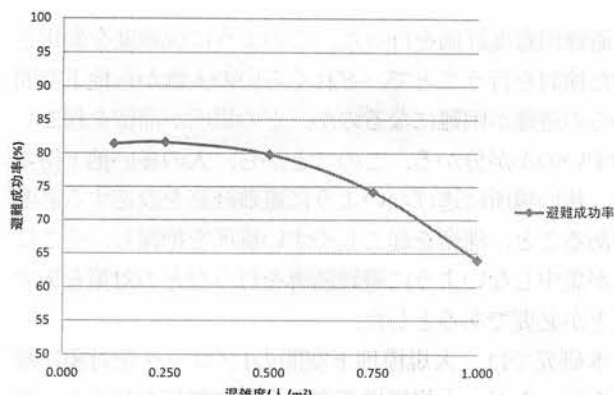


図-4 混雑度の違いによる避難成功率の変化

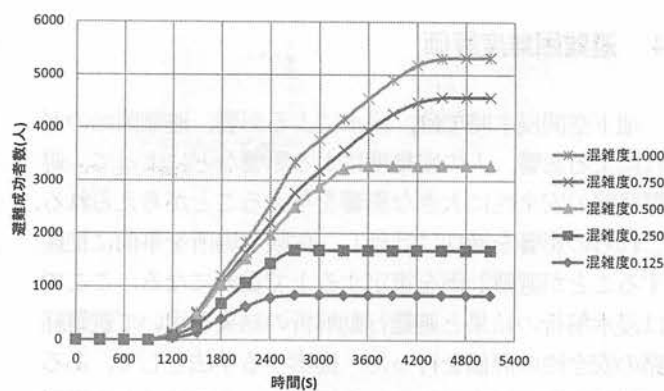


図-5 避難成功者数の経時変化

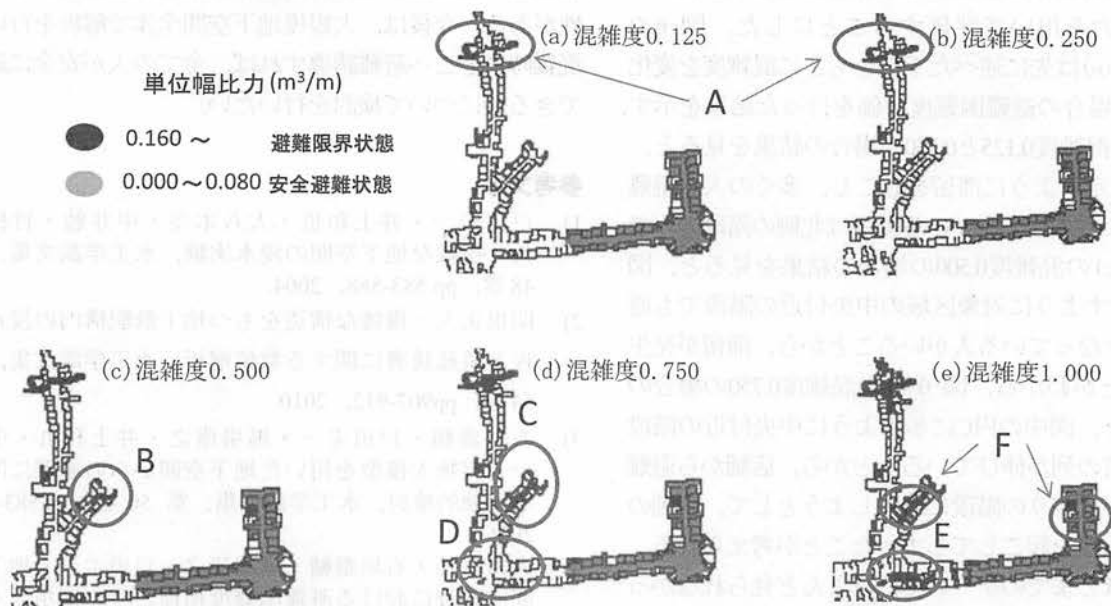


図-6 避難行動解析結果と単位幅比を用いた避難困難度評価

かに避難している。しかし、図中の円Cに示すように約30分後から北側の階段付近に存在する人が避難を始めているが、図中の円Dに示すように北側の階段が混雑しているために滞留が発生している。一方、混雑度1.000の場合の避難の状況を見ると、狭い通路や階段付近で混雑してしまい、図中の円Eに示すように混雑度が低い場合ではほとんどの人が避難を完了させている35分後にも、多くの人が避難出来ていない。中央付近の階段や南側の階段は流入のある階段であるため、図中の円Fに示す場所で、40分後には避難限界状態となっている人がでてきている。また、混雑度が0.125のケースでは北側の階段のみで滞留が発生しているが、混雑度を増加させていくと他の狭い場所でも滞留が発生している。このような状況では避難者は冷静な判断を失っていることが予測されるので、こういった混雑した場所では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ことが予測される。

図-4は混雑度の違いによる1時間35分後の避難成功率の変化を示している。混雑度が0.125～0.500の場合、避

難成功率は約80%となっているが、混雑度が0.500を超えると避難成功率は下がり始め、混雑度が1.000になると全体の約40%の人が避難に失敗したという結果になっている。このことから混雑度が0.500を超える地下空間からの避難は急激に困難度が増すことがわかる。図-5は避難成功者数の経時変化を示している。混雑度が0.125の場合と0.250の場合では約40分後、0.500の場合では約1時間後、0.750と1.000の場合では約1時間20分後から避難成功者数の増加が横ばいになっている。このことから、各混雑度での出口で滞留が発生した時間がわかる。しかしながら、このままではどこがどのくらい危険であるか、または混雑度の違いによる変化がどこにどれくらい表れているの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。ここでは浸水解析の結果と避難行動解析の結果を用いて避難経路の安全性の評価を行った。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のかについて単位幅比力を用いて評価することにした。図-6の(a)(b)(c)(d)(e)は先に述べた手法をもとに混雑度を変化させた5つの場合の避難困難度評価を行った結果を示す。図-6(a)(b)の混雑度0.125と0.250の場合の結果を見ると、図中の円Aに示すように滞留を起し、多くの人が避難限界状態になってしまっている場所は北側の階段のみである。図-6(c)の混雑度0.500の場合の結果を見ると、図中の円Bに示すように対象区域の中央付近の階段でも避難限界状態となっている人がいることから、滞留が発生していることがわかる。図-6(d)の混雑度0.750の場合の結果を見ると、図中の円Cに示すように中央付近の階段の周辺で滞留の列が伸びていることから、店舗から避難してきた人が最寄りの階段に避難しようとして、店舗の入口付近で渋滞を起してしまったことが考えられる。さらに、先ほどまでのケースではほとんど見られなかったが、図中の円Dに示すように出口付近で滞留が起っていることが原因で避難に失敗したのではなく、渋滞を起していない通路で避難している最中に避難限界状態になってしまっている人がいることがわかる。図-6(e)の混雑度1.000の場合の結果を見ると、図中の円Eに示すように南側の階段付近でない通常の通路で滞留が発生し、大勢の人が避難限界状態となっていることが分かる。さらに、図中の円Fに示す位置に店舗の内部で避難限界状態となっている人がいることから、店舗の入口が滞留していたことが原因で、店舗内に浸水するまでに避難することができなかったことが考えられる。

以上のことから、混雑度が大きくなっていくと、滞留が発生する場所が増えていき、それに伴って避難に失敗する人が増加していくことがわかる。

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、混雑度を変化させて地下空間浸水時の避難行動解析を行い、その結果を用いて浸水状況と避難行動を考慮し

た避難困難度評価を行った。このように混雑度を変化させた検討を行うことで、どれくらいの人数から地下空間からの避難が困難になるのか、どの場所が滞留を起しやすいつのかが分かる。このことから、人の多い地下街では、狭い場所に逃げないように避難経路を設定する必要があること。滞留を起しやすいつ場所を把握し、そこに人が集中しないように避難誘導を行うなどの対策を施すことが必要であるとした。

本研究では、大規模地下空間の1ブロックを対象に解析を行ったが、大規模地下空間全体で解析を行うと、避難経路の選択肢が増え、新たな問題点が指摘される可能性がある。今後は、大規模地下空間全体で解析を行い、混雑時にどこへ避難誘導すれば、全ての人が安全に避難できるかについて検討を行いたい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) 関根正人・大野龍馬：複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導，水工学論文集，第55巻，ppS_961-S966，2011.
- 6) 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：地下空間浸水時の避難困難度と利用者の水防意識について，水工学論文集，第51巻，pp.559-564，2007.
- 7) 川中龍児・石垣泰輔：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：地下空間シンポジウム論文・報告集，第17巻，pp163-168,2012
- 8) 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会，II-34，2010.
- 9) 川中龍児・石垣泰輔：地下空間浸水時の避難困難度指標を用いた避難行動解析，土木学会65回年次学術講演会，pp25-26，2010.