

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

DIFFICULTY OF EVACUATION DURING UNDERGROUND INUNDATION AND OPINIONS OF USERS ON URBAN FLOOD

大西良純¹・石垣泰輔²・馬場康之³・戸田圭一³
Yoshizumi ONISHI, Taisuke ISHIGAKI, Yasuyuki BABA, 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丁目3番35号)

²正会員 関西大学工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3丁目3番35号)

³正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The risk of urban flood has been increasing in recent years. Heavy rainfalls that attacked Tokyo, Nagoya and Fukuoka caused the underground inundation. Urgent evacuation from underground spaces is the most important for users when the flood flow intrudes there. However, there are various difficulties which make users more difficult to evacuate. In this paper, the difficulty of evacuation from underground spaces is evaluated with the results obtained by using real size model tests of door and staircase. And opinions of users on urban floods are clarified by the questionnaire research.

Key Words : *urban flood, underground space, evacuation, real size model test, questionnaire research*

1. はじめに

近年、都市部における土地利用は、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建設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」という形で現れるようになった。2001年4月には、都市部における地下空間利用を促すために、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が施行されている。地下街・地下鉄・地下通路など地下施設は、有効な土地利用という観点だけでなく、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、こうした地下空間の形成をもたらした反面、地表がコンクリートやアスファルトによって被覆される状況を作り出した。その結果、雨水の地中浸透能力が低下し、都市の排水能力を超える雨が降ると、氾濫した水が地上に溢れ、地盤の低い地下空間などに流入する危険性が増加した。また、短時間に激しい降雨が年々多く観測されるようになっており、地下浸水被害の発生危険度は確実に高まっていると言える。

近年では、1999年6月に九州北部で断続的に激しい雨が降り続いたことにより、福岡市で地上に氾濫した水が地下空間へ流入した。2000年9月には東海地方を集中豪雨が襲い、各地で土砂災害や床上・床下浸水の被害が発生した。この雨により、名古屋市では地下街・地下鉄などの地下空間に水が流入し、都市機能が麻痺する事態に陥った。1999年6月に福岡市、同年8月に新宿区で発生した集中豪雨では、水没した地下室に閉じ込められた人が亡くなっている。福岡市ではその4年後に再び豪雨に見舞われ、博多駅周辺では地下浸水などの被害が発生した。

地下浸水時における避難に関して、その困難度を定量的に評価することは、これまであまり行われてこなかった。しかし、実際の状況下では「避難」という点が最重要であり、地下空間にいかなる潜在的危険性が存在するのかを把握しておくことは極めて重要である。そこで、地下空間浸水時を想定し、実物大の階段・ドア模型を用いた避難体験実験により、既報^{1), 2)}の検討内容に種々の条件を加えその困難度について検討した。また、災害時にはハード面の防災対策が、被害の大きさに影響を与えるが、加えて個人の防災意識の大きさが、被害の規模を左右する因子の一つであると考えられる。そこで、アンケートによる調査を実施し、地下空間利用者が有する水防意識について検討を行った。

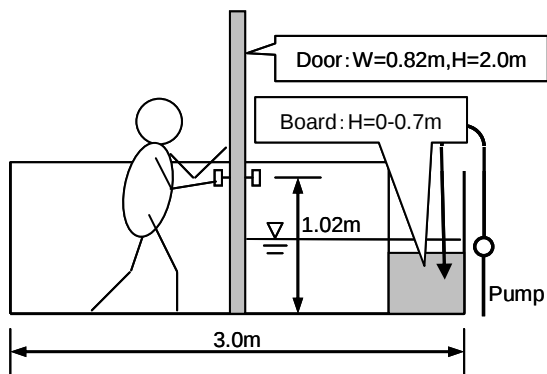


図-1 実物大ドア模型

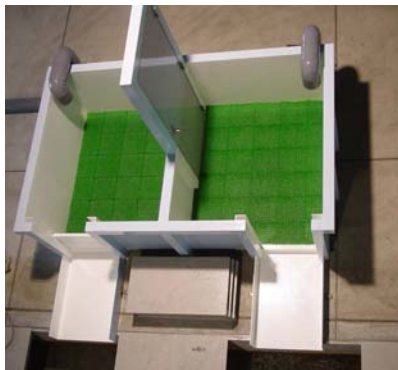


写真-1 実物大ドア模型

2. 実物大模型を用いた避難体験実験

2.1 実験概要

地下浸水時の避難について考えるとき、地下街・地下鉄などの大規模な地下空間では、流入する水が、特に地上への連絡路となる階段部において避難に影響を及ぼすことが考えられる。加えて、地下室などの小規模な地下空間においては、火災発生時を考慮して、室内から押し開ける向きにドアが取り付けられている。そのため、浸水時にはドアを閉める方向に水圧が作用するため、ここでも避難が困難になると考えられる。そこで、この階段とドアに着目し、地下空間浸水時における避難困難度を明示するために、実物大模型を用いた避難体験実験を実施した。なお、実験は2004年^{1), 2)}と2005年³⁾に、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの装置を用いて行った。

2.2 ドア実験結果

ドア実験に用いた模型の概要について示す。図-1および写真-1のように模型の構造は、2つの水槽とその間に設置された幅0.82m、高さ2.0mの鋼製ドアから成っており、低水槽からポンプを用いて水を汲み上げ、いずれか一方の水槽に水を溜めることにより、ドア前面の水深を設定できる。その水深は、水槽の一部に設置した角落としの高さを変えることにより調節が可能である。なお、

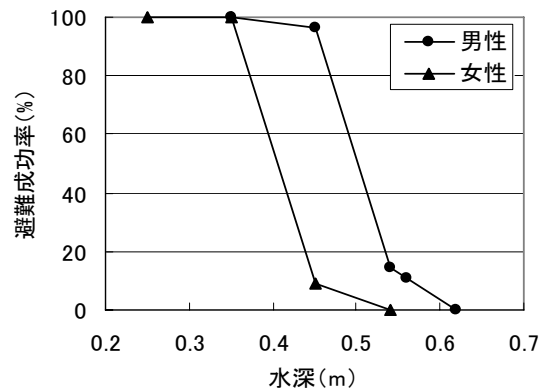


図-2 避難成功率

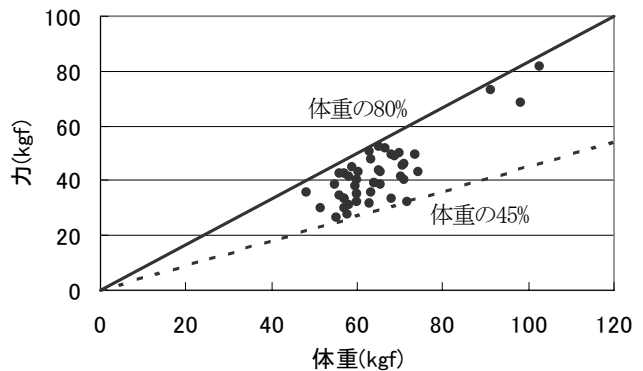


図-3 体重-押し開け力関係

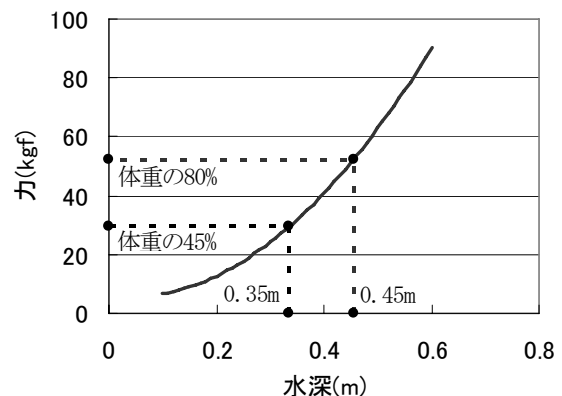


図-4 ジャッキによる押し開け力測定

角落としを越流した水は低水槽に戻るようになっている。

この模型を用いて避難可能なドア前面水深について検討するために、男性47名および女性12名に対して避難体験実験を行った。設定された水深においてドアを押し開けることができた人を「避難成功」とみなすと、図-2に示す結果が得られた。これによると、男性で水深0.45m、女性で0.35mの設定では、ほぼ全員が避難に成功しているが、共に0.1m水深が上昇した条件では成功者が激減していることが分かる。これより、男性で0.45～0.55m、女性で0.35～0.45mの間に避難限界となる水深が現れると推測できる。しかし、この実験では水深を細かく設定して行っていないため、これ以上の精度で限界値を求めることは困難である。

そこで、避難限界をより定量的に評価するために、個

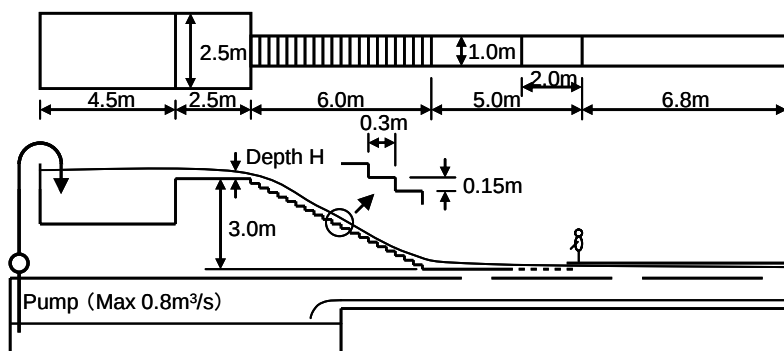


図-5 実物大階段模型



写真-2 実物大階段模型

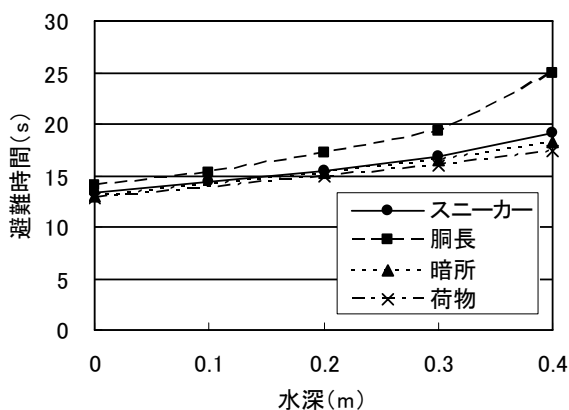


図-6 避難時間（男性）

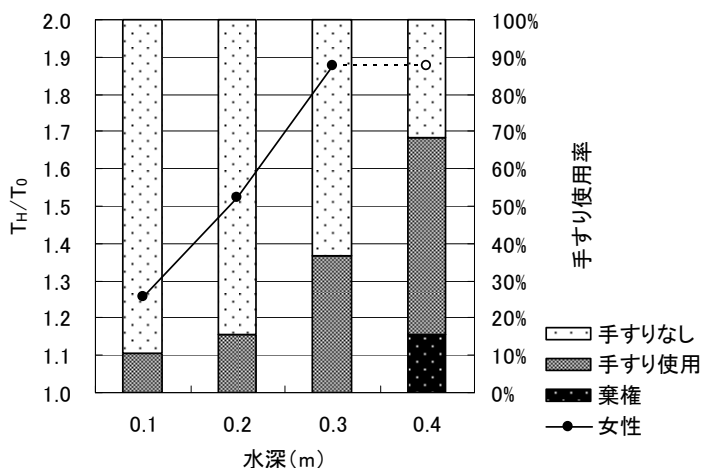


図-7 スニーカーによる避難結果（女性）

人が立った姿勢で発揮できる力とジャッキによってドアを押し開けるのに必要な力を、それぞれロードセルによって計測した。図-3は男性の押し開け力と体重の関係を示したものである。各自の発揮できる力に個人差はあるものの、全体として体重の45～80%の間で力を出せることが分かる。また、図-4に示した曲線はジャッキを用いてドアを開けるのに要した力とドア前面水深の関係である。これを用いると、平均的な体重65kgfの成人男性では、体重の45～80%の力で0.35～0.45mの水深までドアを開けることが可能であると言える。同様に体重50kgfの成人女性については体重の40～70%の力が発揮でき、0.30～0.40mの水深までドアを押し開けることが可能である。これは、避難体験実験から推測される限界値よりも低い水深である。このような結果となったのは、被験者の力の入れ方やドアを押す手の位置などによって、ジャッキで計測されたものより小さな力でドアを開けることができたものと考えられる。

しかし、被験者全員の避難と安全側の値を避難限界として捕らえることを前提とすると、ドア前面の水深が男性で0.35m、女性で0.30m以内に避難しなければ、地下室などからの自力避難は非常に困難になると言える。

2.3 階段実験結果

実験装置は図-5および写真-2に示すような、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5mの直線（直線部の下流2mはグレーチング）および6.8mの水路で構成されている。なお、階段部および直線部の通路幅は1mである。高水槽から平坦部を通り階段を流下した水は、4箇所の排水溝より低水槽に戻り、4台のポンプにて最大0.8m³/sの水が高水槽に循環される。実験では、高水槽の平坦部での水深を地上水深として条件設定を行った。

本実験のデータは成人の男性66名および女性25名の避難体験実験を基に得られたものである。実験はスニーカーを履いた状態を最も負荷のない条件とし、これから付加的な条件として胴長着用、照明なし（暗所）、荷物という条件を設定した。胴長は靴＋長ズボンという最も抵抗の大きな状態、照明なしは停電状態を想定したもので、照明や採光を無くし、ぼんやりと階段の形状が把握できる程度の明るさとした。なお、荷物は3kgのおもりを片手に持った状態とした。水深の設定は、水を流さない地上水深0mの状態から、地上水深を0.4mまで0.1mずつ上昇させて行っている（ただし、照明なし、荷物の条件については水深0.1mの設定では実験を行っていない）。また、被験者に対しては、危険であると感じたとき以外には、基本的に手すりを使用しないよう指示をして、先に述べた4つの条件下で実験を行った。

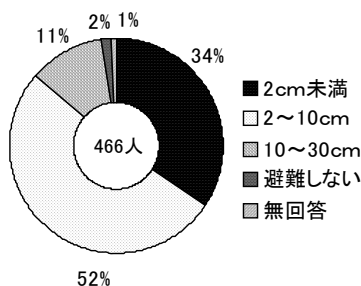


図-8 避難を開始する水深

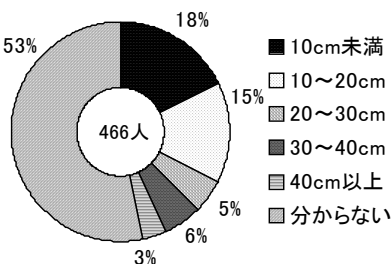


図-9 階段を利用した避難の限界

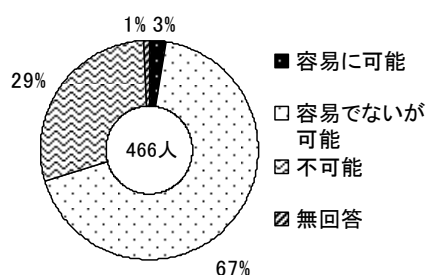


図-10 停電状態での避難

以上の条件の下で行われた避難体験実験の結果を紹介する。まず、直線部と階段部を含めた避難時間を図-6に示す。男性では、胴長着用時に最も時間を要しており、特に水深が0.3～0.4mになるとグラフの傾きが急になっている。このとき、直線部を通り、階段を昇り切るまで、水が流れていない場合の2倍近い時間を要している。女性の場合でも、特に胴長着用時において水深が0.3mを境に避難時間が大きく増大するといった傾向が見られた。以上の結果より、地上水深0.3mが階段を使った安全避難限界の目安であると考えられる。今回の避難実験では、実際に起こり得る様々な付加的な条件が避難行動にどの程度影響を与えるのかを比較したが、胴長着用を除く他の3条件では各水深による避難時間に大きな違いは見られなかった。これより、地下浸水時の避難困難度にも最も影響を与えるのは服装の違いにあると考えられる。2005年7月に、梅田地下街出入口において利用者の年齢層、履物、服装、手荷物の量を非参与観測法により、男女それぞれ約200名の服装を調査したところ、男性では革靴に長ズボンという組み合わせが約60%と多く、女性については履物がハイヒールという人が多く見られた。また、男女とも荷物を持って歩いている人が多く見られた。実験では各付加的条件の影響を比較するために1つの条件で階段を昇ってもらったが、実際にはこれらの条件が複数重なった事態になることも考えられる。

図-7には、女性のスニーカー条件における各水深の避難時間を流水なしの避難時間で無次元化した T_H/T_0 と、手すりの使用率を示したものである。 T_H/T_0 の値を見ると、水深0.3mと0.4mでほとんど差はないが、手すり使用者は水深0.3mで40%近く、水深0.4mでは半数を超えている。さらに、この水深では約15%が最後まで避難できずに、途中で棄権するなど、最も負荷の少ない状態でも避難が困難だったことが分かる。そのため、 T_H/T_0 の値のみでこの実験を評価することは適切ではないと言える。こうした状況も考慮すると、成人の男女の場合、地上水深0.3mが階段を利用した避難の限界であるとみなすことが妥当であると考えられる。

しかし、地下空間を利用する人の中には、高齢者や若年者も当然含まれる。十分な人数を対象とした実験は行っていないが、安全性を考慮して最も負荷のないスニーカー条件の下で小学生11名（水深0.2mのみ）、中学

生3名（水深0.3mのみ）に実験に協力して頂いた。その結果、それぞれの水深における避難時間が成人男性の2倍近くになり、災害弱者がこうした災害に巻き込まれた場合、その避難限界水深は0.3mよりも低く、また、避難困難度が極めて高くなると考えられる。

3. 地下空間利用者の水防意識調査

3.1 調査概要

本調査は、地下空間利用者が地下浸水に関してどのような意識を有しているのか明らかにするため、アンケートによる調査を行った。アンケートの配布は、知人を介して配布した個別配布と、JR大阪駅南側（曽根崎警察署西側および新阪急ビル東側付近）で通行人へ配布した街頭配布によるものである。街頭配布場所の選定理由としては、周辺の地下に大規模な地下街・地下鉄が広がっており、これら地下施設を利用する可能性が高いと考えたためである。しかし、街頭配布のみでは回答者の年齢層が仕事を持つ20代から50代に偏ることが予想されたため、個別配布も実施することで、年齢層を均等に分布させることとした。アンケートの配布に関しては個別・街頭配布ともに350枚ずつ行い、個別配布で284枚（回収率81.1%）、街頭配布で182枚（同52.0%）、計466枚（同66.6%）の回収であった。また、地下空間における水害対策の現状を把握するため、地下街・地下鉄管理者（以下、A地下街、B地下鉄と記す）に聴き取り調査に協力して頂いた。

3.2 調査結果

a) 地下浸水の危険性に対する意識

災害発生時には、安全な場所への早急な避難が鉄則であることは言うに及ばない。図-8は地下空間に水が流入した際、避難を開始する地下水深について示したものである。それによると、地下水深が「2cm未満」で避難すると答えた人が34%、「2～10cm」が52%であった。つまり「2cm未満」と回答した人を除く過半数の人は、わずかに水が流入したくらいでは、浸水に気付いてもすぐに避難を始めないということが分かる。建築基準法施行令128条によると、「地下街の各構えの居室の各部分から地

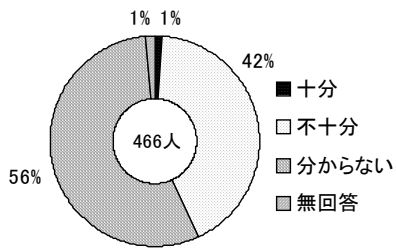


図-11 空間の水害対策

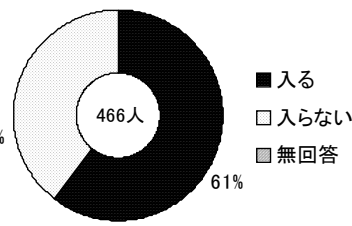


図-12 大雨時の地下利用

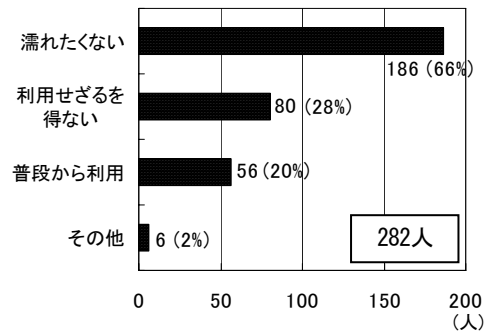


図-13 地下利用する理由（複数回答）

下道への出入口の一に至る歩行距離は、30m以下でなければならない」となっており、利用者は避難通路まで最大で30m離れている可能性が生じる。この場合、その時に利用しているエリアと地上連絡階段・通路部とは水深が大きく異なっている可能性がある。そのため、避難が遅れた場合、危険な状態に陥ることが予想される。こうした事態を防ぐために、利用者の早期避難を促すための避難誘導などを地下空間管理者が適切に行う必要があると考えられる。

b) 地下空間からの避難に関する意識

地下から避難するには階段を昇る必要があるが、地上の水深がどの程度まで階段を利用して避難可能であると思うか、との質問に対する結果を図-9に示した。それによると、半数以上が「分からない」と回答しており、地上水深に対する階段部の様子がイメージできない人が多いことが分かる。この項目においては自由記述式で回答してもらったが、0cmや1cmなどの極端に低い水深から最大で100cmという回答があるなど、その意識には人によって大きな相違が見られる。なお、先に示した実物大模型を用いた避難体験実験の結果を参考にすると、避難限界として記した地上水深30cmを超える回答は、およそ1割の人であった。

また、地下施設の電気設備は原則として地下空間に設置することが決められている。管理者としても地下出入口部分に限らず、電気関連の設備室には止水板を設置するなどの対策を行っているが、地下空間に水が流入すれば停電になる危険性もある。こうした停電状態における避難に関する意識を図-10に示した。大半の人は停電時には避難が「容易ではない」や「不可能」などと考えており、避難が困難になると感じている人が多いことが分かる。避難実験ではこの停電を想定した暗所条件を設定したが、特別大きな負荷として影響は現れていない。しかし、実験模型が単調な直線の上りであること、その他の付加的条件（服装、荷物など）が複合して加わっていないなど、決して停電下の避難に支障がないとはいえないと考えられる。

c) 地下空間の水害対策に対する意識

聴き取り調査によると、激しい降雨が予想された時の基本的な対応として、A地下街・B地下鉄とも気象情報の

収集に努め、場合によっては職員を待機させるなどの対応を行っている。水の流入に対しては止水板を組み立て、土嚢を補助的に用いて止水板の隙間から漏れる水を防ぐことになっている。ただし、B地下鉄では線路開口部においても水が流入する可能性があることから、こうした開口部にも防水扉を設置しているが、主要駅を除くと職員の数に限りがあるため、現実的にはそこまで手が回らない可能性があるなどの課題も挙げられている。A地下街では時間雨量が100mmと150mmの降雨を想定した浸水シミュレーションを基に、浸水危険の高い出入口から順次対応を行うことが決められている。また、災害発生時には管理下の店舗従業員が防災要員となることから、これら従業員も含めて防災教育の徹底や防災訓練への参加を義務付けている。利用者の避難は地下浸水が始めるまでに行うことになっているが、企業の営業活動にも影響を与えるため、その判断のタイミングが非常に悩ましい、とのことであった。また、地下空間は管轄外の地下街・地下鉄などとも繋がっている。そのため、共同の協議会を設けて災害時には協力して避難活動に当たるように申し合わせを行っている。

以上が地下空間における水害対策であるが、図-11は利用者が地下空間の水害対策をどのように感じているかを示したものである。その結果、「十分である」と感じている人はわずかであり、利用者の目からすると地下空間の水害対策は十分でないと感じていることが伺える。このような結果になった理由として、過去に地下浸水による被害事例があり、現状の対策だけでは不十分であると考えている、または、地下空間における水害対策の現状を知らない、などということが考えられる。

図-12は、「大雨の時に地下空間に入るか」との質問に対する結果を示したものである。「入る」と回答した人は全体の61%であり、管理者の施す対策が十分ではないと感じる人が多い、との結果とは相反するものとなった。また、大雨のときに地下空間に入ると回答した282人にその理由を尋ねたところ、図-13に示す結果となった（複数回答）。この中で最も多かった理由が「雨に濡れたくない」の66%であり、降雨が激しくなるほど、すなわち地下浸水の危険性が高まるほど、多くの利用者はより地下空間に入ろうとする傾向があることが分かる³⁾。

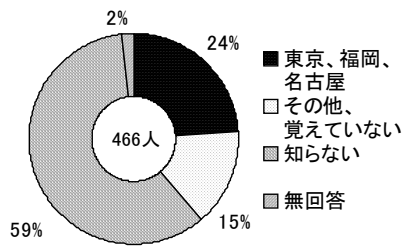


図-14 地下浸水被害の認知度

d) 都市型水害の認知度

図-14は過去に発生した地下浸水事例について知っているかを尋ねた結果である。ここでは「知っている」と回答した人について、より具体的に地名を挙げて頂いた。その結果、「知っている」と回答したのは39%であったが、実際に地下浸水被害のあった東京、名古屋、福岡のいずれかを挙げるのができたのは24%にとどまった。「知っている」と回答した人のうち、具体的な地名までは「覚えていない」とした人や地下浸水被害の出いていない水災害を挙げた人が15%であった。

図-15は図-14の質問において、具体的な地名まで正確に挙げるができなかった人を「知らない」として扱い、年代別による認知度を比較したものである。これによると10代が5%、20代が7%、30代が17%などとなっており、若年層の認知度が低い傾向にあることが分かる。しかし、どの世代においても認知度は過半数に達していないことから、地下空間浸水時の危険性についての周知をより一層深めることが重要であると考えられる。

4. おわりに

以上が避難体験実験および意識調査を通して得られた結果であるが、それらを簡潔にまとめると以下のようになる。

- 1) 地下浸水時にドア前面の水深が男性で0.35m、女性で0.30mを超えると、自力避難ができなくなる危険性が高い。
- 2) 水が階段を通して流入する場合、地上水深が0.3mで避難が困難となる。また、避難時に最も影響を及ぼすのは服装の違いによるものである。
- 3) 利用者は地下空間の水害対策が十分であるとは考えていない反面、激しい豪雨の際には雨に濡れない地下空間へ入ろうとする傾向にある。
- 4) 過去に発生した地下浸水を伴う都市型水害に関して認知している人は全世代のおよそ4分の1であり、若年層ほどその割合は低い傾向にある。

本論では避難体験実験を行い、地下浸水時の避難限界を評価した。しかし、現実の浸水発生時には今回行った

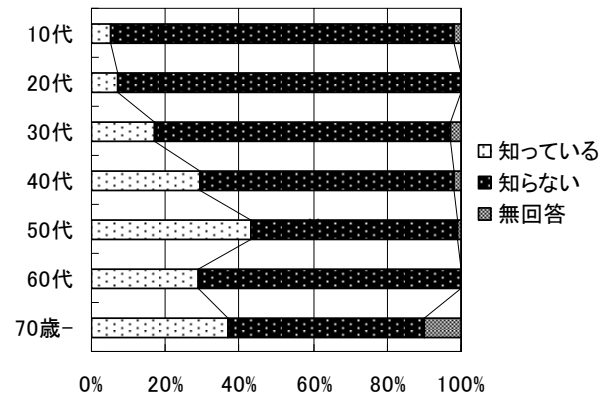


図-15 年代別の地下浸水被害の認知度

実験以上の悪条件の中での避難になる可能性が十分にある。また、利用者を対象に行った意識調査の結果、激しい降雨時に地下空間に入ったり、少しの浸水では避難を開始しないなど、地下浸水に対する危険意識が乏しいことが明らかとなった。始めに述べたように、これまでの地下空間の災害対策は火災に対して重点が置かれていた。しかし、2005年5月に水防法が改正され、水害発生時の「地下施設における避難確保計画の作成」が地下空間管理者に義務付けられた。従って、今後は各管理者とも水害対策を進めていくものと考えられるが、災害時の危険は利用者が自ら回避するように努めなければならない。そうした意味でも、まずは地下空間浸水時の危険性について、利用者・管理者が共に適切な知識を得るための手立てを講じる必要があると考えられる。

最後に、避難体験実験・水防意識調査・聴き取り調査にご協力頂いた方々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・吉田義則・多河英雄：実物大階段およびドア模型を用いた地下空間からの避難に関する水理実験，京都大学防災研究所年報，第48号B，pp. 639-646，2005。
- 2) 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。
- 3) Ishigaki, T., Baba, Y., Toda, K., Nakagawa, H. and Shimada, H. : Difficulty of evacuation from underground space in urban flood, Proc. of the 7th International Conference on Hydroinformatics, vol. 1, pp. 614-620, 2006.

(2006. 9. 30受付)