浸水した大規模地下駐車場からの 避難に関する検討

高橋 祐樹¹・石垣 泰輔²・馬場 康之³・戸田 圭一⁴

¹正会員 中央コンサルタンツ株式会社 名古屋支店 水環境部 (〒451-0042 名古屋市西区那古野2-11-23)
E-mail: yuk-takahashi@chuoh-c.co.jp

²正会員 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)
E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

³正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 京都大学教授 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

近年、都市部において50mm/h以上の集中豪雨によって、地下空間に雨水が流れ込む場合がある。車が水没する地下空間は、アンダーパスだけでなく地下駐車場もあることから、本研究では、浸水した地下駐車場で車が水没した場合、水深が何mになるまでに車外へ脱出する必要があるかを調べた。また、構造格子モデルを用いた浸水解析、実験結果を用いた地下駐車場からの避難解析を併用することで、地下駐車場からの避難開始の遅れが避難の安全性にどのような影響を与えるのかを検討した。実験結果から、セダン車での脱出限界水深を得ることができ、解析結果から、水没車に閉じ込められた場合、避難開始の遅れが避難の安全性に大きく影響することや、駐車場の階層による危険度の違い、成人男性と高齢者女性による危険度の違いなどを定量的に確認できた。

Key Words : underground parking lot, submerged car, evacuation, experiment, flood simulation

1. はじめに

近年、地球規模の気候変動に伴う局所的な集中豪雨の増加が問題となっている。都市部では50mm/h以上の激しい集中豪雨によって、地下空間に雨水が流れ込む場合がある。実際に2008年8月27日には栃木県鹿沼市の東北自動車道下が冠水し、人が自動車に閉じ込められるという被害が生じた。50mm/h以上の降雨の増加は、このような都市水害発生が増加の可能性もはらんでいる。都市水害発生の要因は降雨だけではない。都市化というのも要因の1つである。日本の都市化の進展は経済成長に大きく貢献したと同時に、地表面を浸透能力の少ないアスファルトやコンクリートで覆っていった。そのため、降った雨は速やかに雨水排水施設に集まるようになり、その排水能力を超える激しい雨が降った場合、内水氾濫の被害が生じるようになった。特に都市部では限られた土地を有効利用するために地下構造物が多く存在する。例えば、大阪梅田には、広大な地下街が広がっており、また、地下駐車場というような施設を備えている。JR大阪駅の南側だけで、10箇所を超える地下駐車場があり、自動車の駐車可能台数としては2000台を超える。ひと

たび地上が氾濫すると氾濫水が浸入し甚大な被害が生じると考えられる。

そこで本研究では、浸水した地下駐車場で車が水没した場合、水深が何mになるまでに車外へ脱出する必要があるかを調べた。既報¹⁾では単層の地下駐車場における浸水状況と成人男性を対象とした避難に関する検討を、構造格子モデルを用いた浸水解析、実験結果を用いた地下駐車場からの避難解析を併用することで、水没車から脱出し、浸水した地下駐車場から地上へ避難できるのか、地下駐車場からの避難開始の遅れが地上までの避難の安全にどのような影響を与えるのかについて検討した。本論文では、既報での検討に加え、地下駐車場の階層による浸水危険性の違い、および成人男性のみならず高齢者女性の避難時危険性についても検討を加えるとともに、適切な情報がアナウンスされた場合の効果について考察を行っている。

2. 水没車を用いた脱出実験について

地下駐車場が浸水した場合、早期の避難が必要であるが、早期避難ができずに水没した車から避難する場合、

図-1 実験装置の概要図⁴⁾

写真-1 脱出実験の様子

図-2 成人男性の脱出成功率と脱出所要時間の結果⁴⁾

図-3 ドアを開けるのに必要な力の結果⁴⁾

- 1) 避難の必要性を認知する,
- 2) 車から脱出する,
- 3) 浸水したフロアおよび階段を通過して地上に避難する,

という行動パターンをとる. この一連の行動については, 避難の必要性を認知できるか, 水圧が作用したドアを開閉できるのか, 浸水したフロアおよび階段を安全に歩行できるのか避難の成功の条件となる. これまで, 著者らは浸水時の歩行避難^{2), 3)}, および水没した実車からの避難実験^{4), 5), 6)}を行ってきた. 本研究ではこれらの研究結果および追加実験の結果を用いており, 浸水した地下駐車場からの避難限界を判定するとともに, 脱出可能な条件下における浸水深ごとのドア開閉時間を算定している. これらの算定には, 既報の成果を利用しているため, ここでは, 実験およびその結果の概要を説明したのち, 3.の避難に関する検討との関係について述べる.

(1) 水没車からの脱出実験

a) 実験装置と実験方法

京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー内に設置されている実物大のセダン車模型を用いた. 実験装置の概要を図-1に示す. 車模型は, 床面に固定されており, 床面からドア下端まで0.31mとなっている. 水槽

内の水深は, 床面から最大1mまでの間を設定でき, 角落としの高さを変化させることで調節が可能であり, 角落としから越流した水はグレーティングの下を流れ, 給水ポンプにより再び水槽に循環する仕組みになっている. 常に水が循環されるので, ドア開閉時の水深条件の変動を最小限に抑えて, 可能な範囲で一定に近い条件下での実験が可能である.

被験者は, 各水深において運転座席ドアおよび後部座席ドアから脱出を行い, その成否およびドアを開けて車外へ脱出するまでの所要時間を測定した. 被験者は, 前後のドアにおいて一度脱出に失敗すると, 次の段階の水深に挑戦することはできないこととした. 水深条件は, 0.495m, 0.575m, 0.685m, 0.775m, 0.825m, 0.880mとした. 脱出実験の様子を写真-1に示す. 被験者のうち, 男性が59名と全体の9割以上を占めているので, 以下では成人男性の結果で考察する.

b) 実験結果

成人男性の脱出成功率と脱出所要時間との関係を図-2に示す. 脱出成功率は, 水深0.575mまでは, 運転座席と後部座席で, 全ての被験者が脱出できたという結果になった. しかし, 運転座席は水深が0.685mになると成功率が96.4%になり, それ以降, 成功率が急激に減少する. 後部座席では, 運転座席ほどの急激な変化はなく,

図-4 成人男性の体重とドアを押す力の結果⁴⁾

図-6 ドア下端から測った水深と全水圧

図-5 成人男性の脱出限界水深の算出方法

図-7 成人男性の脱出所要時間の算定式

水深が 0.825m で 90%以上の被験者が脱出でき、水深 0.880m でも 80%ほどの被験者が脱出できるという結果となった。脱出所要時間については、運転座席ドアと後部座席ドアの両方で、水深が上昇するにつれ脱出所要時間が長くなる結果となった。1つ前の水深と比べた所要時間の増加量は水深が深くなるごとに大きくなっている。

(2) ドアを開けるのに必要な力の計測実験

a) 実験方法

測定にはロードセルを用いた。ロードセルからの出力電圧は 10Hz で 60 秒間計測し、事前に検定された出力電圧と力の関係により変換している。この実験を始める前にロードセルに、0kgf、10kgf、20kgf、30kgf、40kgf、50kgf、60kgf の荷重をかけて出力電圧と力の関係を求めた。

b) 実験結果

水深とドアを開けるのに必要な力の関係を図-3 に示す。水深が深くなるにつれてドアを開けるのに必要な力が大きくなっていくことがわかる。運転座席ドアを開けるのに必要な力に比べ、水圧の作用する面積が少ない後部座席ドアを開けるのに必要な力の方が小さいということもわかった。

(3) 体重とドアを押す力の関係を求める実験

a) 実験方法

ドアを開けるのに必要な力と比較・検討を行うために、ここでは、ロードセルを用い、自動車内に座ったときの右手側にあるドアを押す力を計測した。

b) 実験結果

体重とドアを押す力の関係を図-4 に示す。縦軸にドアを押す力をとったグラフに被験者 34 名のデータを記入したものである。実験結果の分布から、成人男性は、体重の 20%~70%に当たるドアを押す力があることがわかった。

(4) 水没車からの脱出限界水深と脱出所要時間

脱出限界を求める過程を図-5 に示す。平成 20 年度体力・運動能力調査⁷⁾によると、成人男性の平均体重は 65kgf であると定義されている。実験結果より、成人男性には体重の 20%~70%に当たるドアを押す力があることがわかったので、成人男性のドアを押す力は 13kgf~46kgf と求められる。この値を、ドアを開けるのに必要な力の計測で求めた水深と力の関係の曲線に代入すると、0.56m~0.80m となり、安全側で見て、脱出限界水深 0.56m とした。またこの 0.56m と脱出実験で得ら

図-8 解析対象とした2層構造地下駐車場

れた脱出成功率の結果を比較しても、運転座席ドアおよび後部座席ドアの脱出成功率が100%を満たしていることから、0.56mは適当な値であると言える。よって、避難解析には0.56mを用いた。

脱出所要時間に関しては、ドアにかかる全水圧を用いて算出する。セダン車と既報の研究⁸⁾で行われたワンボックス車それぞれの運転席ドア及び後部座席ドアは、4つともドアの形状が異なる。そこで、それぞれのドア前の水深と全水圧の関係を求めた。各ドアのドア前の水深と全水圧の関係を図-6に示す。セダン車とワンボックス車それぞれの運転席ドア及び後部座席ドアからの脱出実験によって得られた水深ごとの脱出所要時間(成人男性40名)を全水圧に置き換えた。その結果を図-7に示す。各ドアの結果はほぼ同様な値、増加量であるので、それぞれのデータを1つのデータとし、そこから近似式を導き、その式から脱出所要時間を求めて避難解析に反映した。ドアに水圧がかかっていない場合の脱出所要時間は、実験結果より、平均値が約4秒であったので、近似式の切片を4秒と設定した。

3. 地下駐車場からの避難に関する検討

ここでは、脱出実験で得られた脱出限界水深と脱出所要時間を用いた避難解析を行い、水没車からの脱出を考慮した地下駐車場からの浸水時避難に関して検討する。

(1) 浸水解析

a) 浸水解析モデル

本研究では、計算対象領域を正方形の格子に分割して計算する構造格子モデルを用いた。分割格子は一辺1mの正方形格子を用いた。浸水解析の手法は、以下の浅水方程式を基礎式とした武田⁹⁾の研究の手法を用いた。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

運動量式

x方向

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (1b)$$

y方向

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (1c)$$

ここに、 h は水深、 u 、 v は x 、 y 方向の流速、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス($M=uh$ 、 $N=vh$)、 H は水位($H=h+z$ 、 z は地盤高)、 τ_{bx} 、 τ_{by} は水底面でのせん断応力成分の x 、 y 方向成分である。

b) 解析対象地

JR 大阪駅南側にある地下駐車場を選定し、仮想地下駐車場を作成した。その図を図-8に示す。形状は、縦88m、横122mの地下2層構造の地下駐車場である。地下1階、地下2階の駐車台数は105台、117台である。直上階は、地上1階である。自動車専用出入口は、1階が道路に繋がっており、歩行者専用出入口は、建物内部に繋がっている。粗度係数は、コンクリート構造なので、0.015と設定した。地盤高は、制限高さが1.9mの関係で、地下1階の地盤高を3mとし、地下2階の地盤高を0mと設定した。その際、地下1階と地下2階に通ずる階段についても考慮している。地上出入口は3箇所設けられており、左からA、B、Cと定義した。

c) 自動車の形状と配置

自動車の形状は、既報の研究⁸⁾を参考に、普通自動車の平均的な大きさを用い、全幅を2m、全長を5mとした。自動車の配置は、駐車率を50%と仮定した。よって、地下1階、地下2階合わせて111台の車が駐車しているものとした。

d) 流入条件

地下駐車場への流入は、内水氾濫を想定し、地上での水深上昇速度0.02m/minとし¹⁰⁾、段落ち式を用いて流量を算定している。地上から地下1階への流入箇所は、自動車専用出入口の2箇所とし、非常階段A、B、Cからは流入しないものとした。地下1階から地下2階へは、2箇所のスロープと非常階段A、B、Cから流れるもの

図-9 2層構造地下駐車場の浸水解析結果

とした。流入開始は、時刻 0 秒から始め、解析時間は、地下 1 階と地下 2 階の水深変化を得るため、3600 秒とした。

(2) 浸水解析結果

浸水解析結果を図-9に示す。対象地下駐車場の特徴として、自動車専用出入口の向かい側にスロープが設置されているので、地下1階に流入する水の大半が、地下2階へ流れる。すなわち、地下2階の水深上昇速度は、地下1階よりも大きくなる結果となった。

(3) 避難解析

a) 単位幅比力の指標

車から脱出し、浸水したフロアと階段を歩行避難する際の危険度の評価は表-1に示す大西ら²⁾およびAsai et al.³⁾の100名以上の体験者を対象とした研究で得られた単位幅比力の指標を用いた。単位幅比力は、単位重量当たりの運動量と水圧の和である。ここに、流速 (m/s) を u 、水深 (m) を h としたとき、単位幅比力 M_0 (m^3/m) は $u^2 h/g + h^2/2$ の式で表され、自力での安全な避難が困難になる避難困難と、避難行動がとれなくなる避難限界の値は、表-1に示すとおりである。

表-1 単位幅比力^{2), 3)}

被験者属性	単位幅比力	
	自力避難困難	自力避難限界
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

表-2 歩行速度の低下率³⁾

被験者属性	歩行速度の減少率の計算式	
	通路部	階段部
成人男性	$V/V_0 = 0.45 \exp(-120M_0) - 0.85M_0 + 0.55$	$V/V_0 = 0.15 \exp(-100M_0) - 0.80M_0 + 0.85$
高齢男性	$V/V_0 = 0.40 \exp(-120M_0) - 0.85M_0 + 0.60$	$V/V_0 = 0.10 \exp(-25M_0) - 0.80M_0 + 0.90$
成人女性	$V/V_0 = 0.60 \exp(-150M_0) - 0.50M_0 + 0.40$	$V/V_0 = 0.30 \exp(-60M_0) - 1.20M_0 + 0.70$
高齢女性	$V/V_0 = 0.55 \exp(-125M_0) - 0.45M_0 + 0.45$	$V/V_0 = 0.15 \exp(-25M_0) - 1.40M_0 + 0.70$

表-3 シナリオ

	浸水する地下駐車場に戻ってきた成人男性の利用者。水深が30cm未満だったので自動車での避難が可能だと考え自動車の位置まで移動し、その後...
シナリオ1	車に乗った時に、水深が30cmになり、エンジンがかからないため徒歩での避難を余儀なくされた。
シナリオ2	自動車に乗り移動を始めたが、通路の途中で水深が30cmになり、エンジンが停止したため徒歩での避難を余儀なくされた。

b) 浸水時の歩行速度

浸水の歩行速度の評価は、表-2に示すAsai et al.³⁾の研究で得られた単位幅比力を用いた歩行速度の低下率の計算式を用いた。ここに、 V は、その単位幅比力の歩行速度 (m/s)、 V_0 は非浸水時の歩行速度 (m/s)、 M_0 は単位幅比力 (m^3/m) である。通路部の歩行速度減少率は地下駐車場の平坦部分に適用し、歩行者専用出入口部分は階段状であるため、階段部分の歩行速度減少率を適用した。なお、成人男性 V_0 は、通路部1.4m/s、階段部0.7m/sとしている。

c) 避難状況の想定

避難状況の想定は、水没車内からの脱出と駐車場外への移動を想定した。解析においても駐車場外への移動だけでなく、水没車からの脱出を含む避難の状況を想定した。それを踏まえた 2つのシナリオを表-3に示す。なお、いずれのシナリオでも、地下駐車場で利用者が車に戻ってきた時には水深が30cm未満であったという共通の条件を前提としている。また、この30cmという水深では、車のマフラーが床面から約0.30m付近にあるため、その水深になった時にはマフラーが塞がれ、エンジンが停止するものとして設定した値であり、車は浸水による浮力を受けず、配置した位置から流されるなどの移動は考慮しないものとした。シナリオ1では、駐車位置で水深0.30mになり、車が動かなくなり、徒歩で避難を開始す

図-10 多層構造の各避難開始位置 (シナリオ1,2)

るとした。その避難開始位置は、地下1階では1-a～1-j、地下2階では1-a～1-kの計21箇所を選定した。シナリオ2では、駐車位置での水深が0.30m未満であったため自動車専用出入口付近まで自動車で移動し、そこで水深0.30mになり、徒歩での避難を開始するとした。その避難開始位置を2-aの1箇所を選定した。地上への避難は、水没車の運転座席から開始するものとした。シナリオ1、シナリオ2の各避難開始位置を図-10に示す。避難経路は、各避難開始位置と避難完了位置の2点間を、あらかじめ最短となる経路で結んだものとし、自動車専用出入口から駐車場外への移動は考えないこととした。避難完了位置は、各避難開始位置の最寄りの非常階段の最上段とした。避難開始の遅れは地下1階ではそれぞれ0, 60, 120, 180, 240, 300, 360秒と設定し、地下2階ではそれぞれ0, 60, 120, 150, 180, 240, 270, 300, 360秒とした。

(4) 避難解析結果

a) 避難の成否

以下の手順で、避難者を成人男性1名が、運転席ドアから脱出する場合について、避難の成否を判定した。

- 1) 避難開始時の水深からAに作用する全水圧 (図-6) を計算,
- 2) 全水圧からドア開扉可能性を判断,
- 3) 可能な場合、脱出所要時間 (図-7) を計算,
- 4) 表-2 を用いて浸水状況 (浸水深, 流速) を考慮した

表-4 成人男性の避難の成否 (多層構造)

避難開始 の遅れ(s)	地下1階										
	各避難位置からの避難の成否										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	2-a
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
120	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
180	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
240	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
300	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
360	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
避難開始 の遅れ(s)	地下2階										
	各避難位置からの避難の成否										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	1-k
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
120	△0.03	○	△0.36	○	△0.32	○	○	○	○	○	○
150	△0.47	○	△0.51	△0.24	△0.52	△0.25	△0.32	○	○	○	○
180	△0.70	○	△0.76	△0.39	△0.64	△0.69	△0.59	△0.07	△0.14	△0.30	○
240	△0.73	△0.46	×	△0.80	×	△0.73	△0.65	△0.23	△0.51	△0.57	△0.31
270	×	△0.66	×	×	×	△0.76	×	△0.24	△0.53	△0.58	△0.33
300	×	△0.71	×	×	×	×	×	△0.25	△0.53	△0.59	△0.33
360	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○:安全に避難できた

△:避難困難になったが避難できた ※数値は避難所要時間の中で避難困難になった時間の割合

×:避難不可能

表-5 成人男性の避難所要時間 (多層構造)

避難開始 の遅れ(s)	地下1階										
	各避難位置からの避難所要時間(s)										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	2-a
0	86	137	112	137	95	75	63	21	43	51	23
60	88	139	112	139	96	75	63	22	43	51	23
120	88	139	113	140	96	75	64	22	43	51	23
180	88	139	114	141	97	77	65	22	43	52	25
240	89	141	115	141	99	78	65	22	44	52	25
300	89	142	116	143	100	79	65	22	44	54	25
360	90	144	116	144	101	79	65	23	45	54	25
避難開始 の遅れ(s)	地下2階										
	各避難位置からの避難所要時間(s)										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	1-k
0	110	106	134	161	117	88	81	43	64	72	43
60	113	108	140	166	121	92	86	45	67	75	44
120	118	113	148	173	130	96	89	45	67	78	47
150	122	113	153	177	133	99	92	45	68	80	47
180	125	115	158	183	138	102	94	46	70	82	49
240	135	122	-	197	-	111	100	48	74	86	51
270	-	125	-	-	-	116	-	49	76	90	52
300	-	130	-	-	-	-	-	51	80	94	54
360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

歩行速度を用い、地上までの避難所要時間を算定、

- 5) なお、避難経路上で、表-1 に示した指標を超えた時点で避難不可能と判断する。

以上手順で避難の成否を判定した結果を表-4 に示す。○が安全に避難できた、△が避難困難になったが避難できた、×が避難不可能だったことを示している。△の数値は、避難困難状態になっていた時間を避難所要時間で除いたものであり、値が大きいほど危険度が増加する。全てのケースで避難開始の遅れが大きくなるほど、危険度は増加する結果となった。地下1階は、流入した水が地下1階の2箇所のスロープと3箇所の非常階段を通じ、地下2階に流れ込むため、浸水深が一定の高さとなった。よって、全てのケースで安全に避難できる結果となった。

地下2階は、避難開始の遅れが60秒までなら全てのケ

図-11 解析対象とした1層構造地下駐車場

図-13 1層構造地下駐車場の浸水解析結果

図-12 単層構造の各避難開始位置 (シナリオ 1,2)

ースで安全に避難できる結果となった。避難開始の遅れが120秒では、全てのケースで避難可能だが、地下2階のスロープ付近では避難困難状態となり、スロープ付近は安全な避難ができない結果となった。しかし、1-b、1-dの位置で安全避難できたのは、地下1階から流れ込んできた水が、1-bと1-dの位置にいち早く流れ込むことが浸水解析の結果から把握でき、水深が0.30mになる時間が早いと、避難開始時刻が他の位置に比べ早いことが原因である。脱出限界水深0.56mを考慮すると、270秒以降は、水深が0.56m以上なので、車から安全に脱出できないこともわかった。

b) 避難所要時間

避難所要時間を表-5に示す。避難所要時間は、脱出所要時間と移動所要時間の和である。全てのケースで避難経路長が違うため、避難所要時間に違いがみられた。全てのケースで避難開始が遅れるほど、避難所要時間が長くなる結果となった。これは、避難開始が遅れるほど水深が上昇し、脱出所要時間が長くなることと、単位幅比力が大きくなるため、歩行速度が下がり、移動所要時間が長くなることと関係している。

表-6 成人男性の避難の成否 (単層構造)

避難開始 の遅れ(s)	地下1階 各避難位置からの避難の成否										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	2-a
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
60	○	△0.11	△0.03	△0.12	△0.34	△0.02	○	○	○	○	○
120	△0.29	△0.47	△0.28	△0.49	△0.65	△0.42	△0.49	○	○	○	○
150	△0.64	△0.68	△0.43	△0.68	△0.68	△0.46	△0.50	○	△0.11	○	○
180	△0.86	×	×	×	×	△0.83	△0.82	△0.17	△0.50	○	○
240	×	×	×	×	×	×	×	△0.48	△0.74	△0.04	○
270	×	×	×	×	×	×	×	△0.48	△0.75	△0.34	○
300	×	×	×	×	×	×	×	△0.48	△0.75	△0.78	○
360	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○

○:安全に避難できた
△:避難困難になったが避難できた ※数値は避難所要時間の中で避難困難になった時間の割合
×:避難不可能

表-7 成人男性の避難所要時間 (単層構造)

避難開始 の遅れ(s)	地下1階 各避難位置からの避難所要時間(s)										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	2-a
0	89	138	117	144	101	79	66	23	44	52	28
60	93	145	122	151	105	82	68	23	45	53	28
120	98	154	130	161	111	86	72	24	47	54	29
150	101	161	136	168	116	89	74	24	47	54	29
180	106	-	-	-	-	94	77	24	48	55	29
240	-	-	-	-	-	-	-	25	51	57	30
270	-	-	-	-	-	-	-	27	54	59	31
300	-	-	-	-	-	-	-	29	58	60	31
360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32

(5) 地下駐車場の構造上による危険度の違い

ここでは、多層構造地下駐車場が単層構造地下駐車場である場合、どれ程の危険度に違いが出るのか検討する。

a) 多層構造と単層構造との違い

単層構造地下駐車場にする方法は、図-8に示した仮想地下駐車場の地下2階に繋がる3箇所の非常階段と、2箇所のスロープに壁を設け、浸水した水が地下2階に流れない構造とした。作成した仮想地下駐車場を図-11に示す。駐車率は、多層構造と同じ50%とし、地下1階に53台を配置した。浸水解析モデル、単位幅比力の指標、歩行速度の低下率の指標、避難状況の想定は、多層構造

図-14 高齢者女性の脱出所要時間

で行った方法と同じ方法で行った。よって、避難経路、避難開始の遅れは、多層構造の地下1階と同じとした。シナリオ1、シナリオ2の各避難開始位置を図-12に示す。

b) 浸水解析結果

浸水解析結果を図-13に示す。流入してきた水は、左右にわかれて広がり続ける結果となり、多層構造地下駐車場よりも水深上昇速度が速くなる結果となった。

c) 避難解析結果

(4)のa)で述べた手順で判断した避難の成否を表-6に示す。シナリオ1の全てのケースで避難開始遅れが360秒になると避難不可能になる結果となった。シナリオ2は、避難開始の遅れが360秒でも安全に避難できる結果となった。これは経路長が一番短いことと、シナリオ2の特徴である自動車専用出入口に最も近い位置なので、シナリオ1に比べて避難開始時刻が早いことが考えられる。避難所要時間を表-7に示す。全てのケースで避難開始が遅れると、避難所要時間が長くなる結果となった。

d) 多層構造と単層構造の危険度の比較

避難所要時間を比較すると、単層構造の方が避難するまでに多くの時間がかかり危険であることが言える。また、単層構造の地下1階と多層構造の地下2階を避難の成否で比較すると、多層構造は避難開始の遅れが60秒までなら安全避難できる結果となったが、単層構造は、避難開始の遅れが60秒でも避難困難状態になる位置があるので、単層構造の方が危険であると言える。単層構造の方が危険になる理由は、地下駐車場の規模すなわち床面積が考えられる。多層構造では、地下1階に浸水した水は、地下2階に流れ込むが、地下1階にも水は広がる。単層構造は地下1階に浸水した水は溜まっていくので、水深上昇速度が早いので、危険であると言える。

(6) 成人男性と高齢者女性の危険度の違い

ここでは、同じ対象地下駐車場で身体能力が低下している65歳以上の高齢者女性に着目し、成人男性と高齢者女性の危険度の違いについて検討する。

表-8 避難の成否の比較(多層構造)

被験者別	地下1階										
	各避難位置からの避難の成否										
成人男性	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
高齢女性	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

被験者別	地下2階										
	各避難位置からの避難の成否										
成人男性	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
高齢女性	△0.26	○	△0.44	△0.30	△0.41	△0.06	△0.03	○	○	○	○

○:安全に避難できた

△:避難困難になったが避難できた ※数値は避難所要時間の中で避難困難になった時間の割合

×:避難不可能

表-9 避難所要時間の比較(多層構造)

被験者別	地下1階										
	各避難位置からの避難所要時間(s)										
成人男性	86	137	112	137	95	75	63	21	43	51	23
高齢女性	155	248	201	251	172	134	110	35	75	90	38

被験者別	地下2階										
	各避難位置からの避難所要時間(s)										
成人男性	110	106	134	161	117	88	81	43	64	72	43
高齢女性	192	189	239	293	209	167	142	69	110	124	73

a) 成人男性と高齢者女性との違い

単位幅比力の指標は、表-1に示した高齢者女性の値を用い、浸水時の歩行速度は、表-2に示した高齢者女性の計算式で非浸水時歩行速度 V_0 を通路部 0.9m/s、階段部 0.45m/s として計算した。脱出所要時間は、図-14に示す可搬式ドア模型の結果から算定した値を用いた。

b) 避難解析結果

多層構造の避難の成否を表-8に示す。地下1階では、浸水深が一定の高さであったため、成人男性と高齢女性は、全ての避難開始位置、避難経路で避難困難状態になることはなかった。地下2階では、成人男性は全てのケースで安全に避難できる結果となったが、高齢女性は避難開始の遅れが0秒でも避難困難状態になるので、水没車に取り残されてからの避難自体が危険であると言える。多層構造の避難所要時間を表-9に示す。高齢女性は成人男性に比べ避難所要時間が長くなることがわかった。これは、単位幅比力が大きくなる際、成人男性に比べて歩行速度の減少率が大きいので、移動所要時間が長くなることが考えられる。

4. 安全避難に関する検討

これまでの結果より、高齢者女性は水没車に取り残されてから脱出し、地上へ避難を開始する状況自体が危険であることがわかり、水没車に取り残される前に、浸水の危険を察知し、早めの避難を開始しなければならない。そこで、地下駐車場内に避難アナウンスを流し、高齢者女性が安全に避難をするための検討を行った。

表-10 避難アナウンスを考慮した高齢者女性の避難の成否(多層構造)

地下1階											
アナウンス (s)	各避難位置からの避難の成否										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	2-a
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
300	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
600	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
900	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1200	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
地下2階											
アナウンス (s)	各避難位置からの避難の成否										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	1-k
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
300	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
600	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
900	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1200	×	×	×	×	×	×	△0.64	△0.27	△0.52	△0.56	△0.34

○: 安全に避難できた

△: 避難困難になったが避難できた ※数値は避難所要時間の中で避難困難になった時間の割合

×: 避難不可能

表-11 避難アナウンスを考慮した高齢者女性の避難の成否(単層構造)

地下1階											
アナウンス (s)	各避難位置からの避難の成否										
	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	1-f	1-g	1-h	1-i	1-j	2-a
0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
300	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
600	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
900	△0.06	△0.40	△0.29	△0.41	△0.32	△0.41	△0.05	○	○	○	○
1200	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○: 安全に避難できた

△: 避難困難になったが避難できた ※数値は避難所要時間の中で避難困難になった時間の割合

×: 避難不可能

a) 避難解析

避難状況の想定は、地下1階に水が流入してから0, 300, 600, 900, 1200秒で避難アナウンスを流し、その時点でシナリオ1, シナリオ2と同じ各位置から徒歩での避難を開始するものとした。

b) 避難解析結果

多層構造と単層構造の避難の成否を表-10, 表-11に示す。多層構造は、15分以内であれば安全に避難でき、単層構造は、10分以内であれば安全に避難できる結果となった。

5. おわりに

本研究では、浸水した地下駐車場からの避難について検討した。その結果、実験結果を用いた避難解析に基づき、浸水した地下駐車場から避難できるのか、避難開始の遅れが避難全体にどのような影響を与えるのか、階層による危度の違い、成人男性と高齢者女性による危険度の違いなどを定量的に検討することができた。得られた成果を簡潔にまとめると以下ようになる。

(1) 実験で得られた結果

成人男性のドアを押す力は、体重の20%~70%であり、脱出限界水深は、0.56mである。避難の成否を判定する

際に必要な水没した車からの脱出所要時間をドアに作用する全水圧から算定する式を提示した。本論文で用いた避難困難度指標、脱出所要時間、浸水時の歩行速度の低下率は、氾濫解析等で得られる浸水深と流速から算定可能であるため、避難計画の策定等の実務に適用可能である。また、内水氾濫や外水氾濫による浸水のみでなく、高潮や津波の水災害、あるいは水難事故に対する安全性についても適用可能である。

(2) 避難解析で得られた結果

地下1階より地下2階の方が危険になることが確認された。特に、地下2階で成人男性が水没車に閉じ込められた場合、避難開始の遅れが60秒になるまでに避難を開始する必要がある。また、多層構造と単層構造において、避難アナウンスを行えば、身体能力が低下している高齢者女性でも安全に徒歩で避難できることがわかり、避難アナウンスは有効な手段であることが確認された。

(3) 今後の課題

車は、流入してきた水によって浮いて流される状況を考慮する必要があるため、著者らのグループでは、現在車の漂流に関する研究を進めており、今後、その成果を考慮した検討を行う予定である。また、ここでは、避難を運転座席に取り残された1名を対象としているが、多人数での避難についても考慮する必要がある。

本研究で対象とした地下駐車場の浸水により、わが国では人命に係わるような被害は少ないが、2012年10月29日にニューヨークを襲ったハリケーン・サンディでは、高潮氾濫が市街地を浸水させ、地下駐車場に浸水してきた氾濫水により車や人が流されるという被害が発生し、人命が失われている。東京、名古屋、大阪といったわが国の大都市は、内水氾濫、外水氾濫、高潮氾濫、津波氾濫による浸水被害の発生が予測されており、ここで対象とした地下駐車場を含めた地下空間浸水時の避難に関する検討および対策の立案に、本研究の成果が役立つと考えている。

謝辞: 実験に協力して頂いた京都大学防災研究所の皆様、浸水解析等について指導して頂いた関西大学大学院工学研究科総合工学専攻の川中龍児氏、および本実験に参加していただいた方々に謝意の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋祐樹, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 浸水した大規模地下駐車場からの避難に関する検討, 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集, 第16巻, pp.141-146, 2011.
- 2) 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, 土木学会

- 水工学論文集, 第 52 巻, pp.841-846, 2008.
- 3) Asai, Y., Ishigaki, T., Baba, Y. and Toda, K.: Safety Analysis of Evacuation Routes Considering Elderly Persons During Underground Flooding, *Journal of Hydrosience and Hydraulics Engineering*, Vol.28, No.2, pp.15-21, 2010.
 - 4) 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一, 中川 一: 水没した自動車からの避難に関する実験的研究, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, pp.853-858, 2009.
 - 5) 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一: 水没した自動車からの避難の難しさ, 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B-2, pp.553-559, 2010.
 - 6) 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一, 中川 一: 実物大模型を用いた地下浸水時の避難困難度に関する実験的研究, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.67, No.1, pp.12-27, 2011.
 - 7) 文部科学省 平成 20 年度全国体力・運動能力, 運動習慣等調査結果について, 2009.
 - 8) 高橋祐樹, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 水没したスライド式ドア車からの避難に関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, II-25, 講演概要集, 2011.
 - 9) 武田 誠: 高潮の氾濫解析法とその都市域への応用に関する研究, 京都大学学位論文, 1996.
 - 10) 日本建築防災協会: 地下空間における浸水ガイドライン, G-8-G-10, 2002.
- (2012. 6. 13 受付)

EVACUATION FROM A LARGE-SCALE UNDERGROUND PARKING LOT DURING FLOODING IN URBAN AREA

Yuki TAKAHASHI, Taisuke ISHIGAKI, Yasuyuki BABA and Keiichi TODA

When the intensity of precipitation would exceed the design rainfall of drainage system in urban area, some part of flooded water intruded into underground spaces such as underground shopping mall or parking lot. In this paper, the danger of flooding in a large-scale underground parking lot and the safety of evacuation from there are discussed. Flood simulations were made by using a 2D shallow flow model in a model of multilayer underground parking lot. And assessment of safety evacuation was conducted with a criterion of escaping from a submerged real-size car. It is concluded that a short delay of evacuating from inundated place brings a lot of danger to the users stayed on the lower basement. And its danger level also depends on age and gender of person.