

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非会員 関西大学大学院理工学研究科（〒564-8680 吹田市山手町3丁目3番35号）

*E-mail:k660857@kansai-u.ac.jp or ishigaki@ipcku.kansai-u.ac.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丁目3番35号）

³正会員 京都大学助教 防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

⁴正会員 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

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．自動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になるまでに脱出する必要があるか調べた．また，実験結果を用いた避難解析を行うことで，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検討した．避難の安全性を，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して検討した．実験結果より，セダントップ車での脱出限界水深が得られるとともに，避難解析からは水没車に閉じ込められた場合，避難開始の遅れが避難時の安全に大きく影響することが定量的に確認できた．

Key Words : *basement parking lots, submerged car, evacuation*

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．一時間雨量50mm以上の降雨の増加は，このような都市水害発生増加の可能性も孕んでいる．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一つである．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ヶ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．

本研究は，このような背景を踏まえて，実物大の自動車が水没した状況を再現できる実験装置を用い，どの程度までの水深なら水没した車から脱出できるのかを求めた実験結果を用い，構造格子モデルを用いて地下駐車場における浸水解析結果に基づいて，水没車から脱出し浸水した地下駐車場から避難できるのか，また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について検討した．

2. 水没車からの脱出限界水深に関する検討

水没車に閉じ込められた場合，脱出するためには一般的にドアを開けて車外に出る方法が考えられる．その時の水深によってはドアに水圧がかかっており，通常時にドアを開けるよりも大きな力が必要である．ここでは，変化する水深に対して水没車のドアを開けるためにはどれくらいの力が必要なのかということを，従来の研究¹⁾で得られた値を用いる．ここでは，それらの結果と計測したドアを押す力から脱出限界水深を検討した．

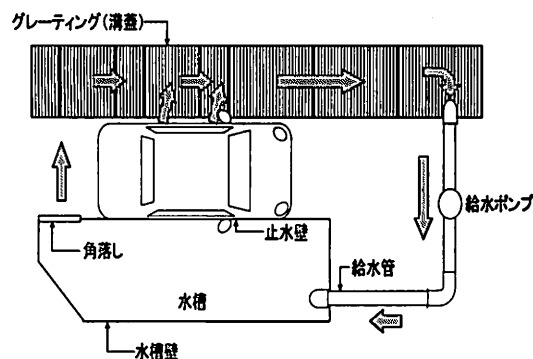


図-1 実物大自動車模型の概要

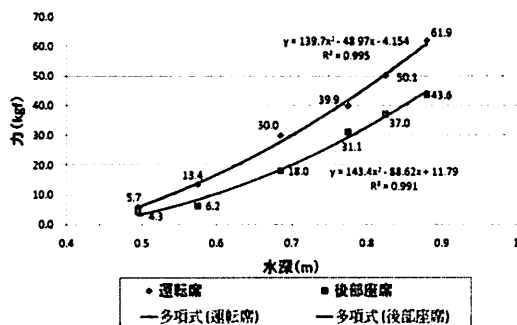


図-2 ドアを開けるために必要な力

(1) 実験方法

a) 水没車からの避難実験¹⁾

ドアを開けるのに必要な力の計測は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自動車模型を用いて行われた。装置の概要を図-1に示す。被験者は各水深において運転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が測定された。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。被験者のうち、男性が59名と、全体の9割以上を男性が占めている。水深条件は、0.495m, 0.575m, 0.685m, 0.775m, 0.825m, 0.880mとしている。

b) ドアを開けるのに必要な力の計測¹⁾

測定にはロードセルが用いられた。ロードセルからの出力電圧は10Hzで60s間計測され、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が求められた。

c) 体重とドアを押す力の関係を求める実験

ドアを開けるのに必要な力の計測では装置の関係から、自動車内に座ったときの右手側にあるドア（以後、運転席側のドア）からの脱出を対象としている。ドアを開けるのに必要な力と比較・検討を行うために、ここでは運転席側のドアを押す力を測定した。

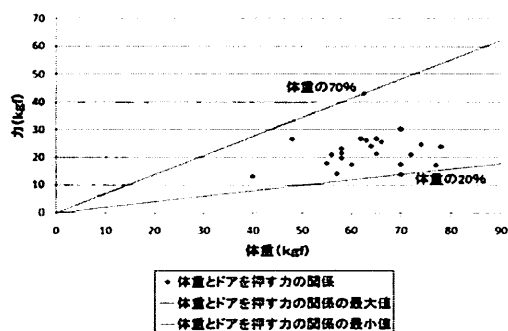


図-3 体重とドアを押す力の関係

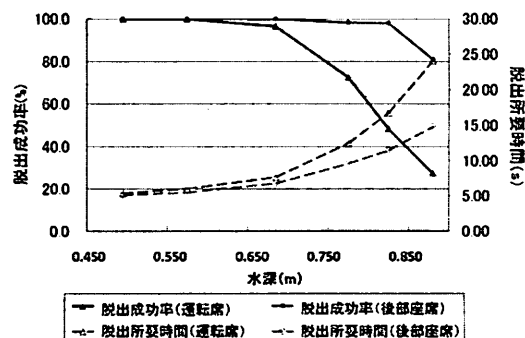


図-4 水没車からの脱出実験結果

(2) 実験結果

a) 水没車からの避難実験結果¹⁾

成人男性の脱出成功率と脱出所要時間との関係が図-2である。脱出成功率については、水深0.575mまでは、運転席と後部座席で、全ての被験者が脱出できたという結果になった。運転席は水深が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、運転席ほどの急激な変化はなく、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になっている。脱出所要時間については、運転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ことが示されている。一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。

b) ドアを開けるのに必要な力の計測¹⁾

水深とドアを開けるのに必要な力の関係を示したものが図-3である。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。運転席ドアを開けるのに必要な力に比べて後部座席を開けるのに必要な力は小さいということもわかった。

c) 体重とドアを押す力の関係を求める実験

本研究で得られた実験結果を図-4に示す。横軸に体重を、縦軸にドアを押す力をとったグラフに被験者のデータを記入したものである。体重とドアを押す力の関係を表すために、ドアを押す力を体重で割った値を用い、

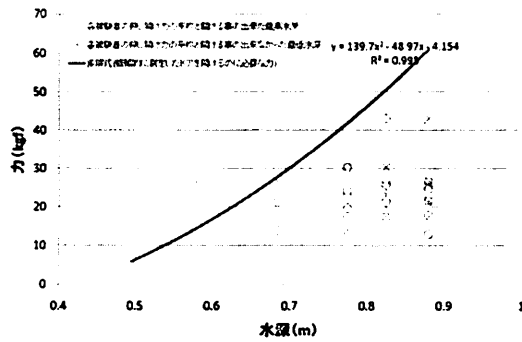


図-5 脱出限界を求める曲線

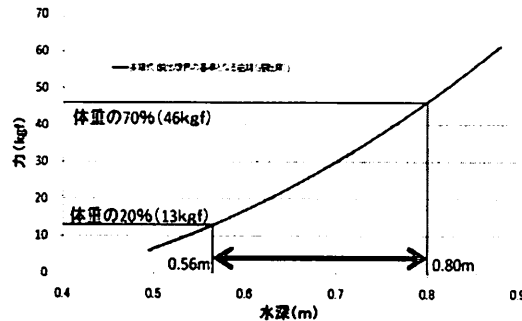


図-6 脱出限界水深

ドアを押す力が体重の何%に相当するのかを検討した。脱出限界を考えるうえで重要なのは平均値ではなく分布範囲を把握し、その安全側を基準とすることである。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といえる。

(4) 水没車からの脱出限界水深について

これらの実験結果から脱出限界水深を求めるための曲線を求めていく。図-5に、ドアを開けるのに必要な力の曲線と各被験者のドアを押す力と水没車からの脱出実験でのドアを開ける事の出来た最高水深(図中○印)と開ける事の出来なかった水深(図中×印)との関係を示す。×印はドアを開けるのに必要な力を示す曲線より上にはなく、下のみ分布していることがわかる。これはドアを開けるのに必要な力未達の力しか発揮できない場合にはドアを開けられない可能性があるということを示している。このことから、この曲線を用いて脱出限界を求めていく。脱出限界を求める過程を図-6に示す。ここで成人男性の体重は、平成20年度体力・運動能力調査を参考に65kgとした。すると0.56m～0.80mという水深の範囲を得ることができる。この範囲の両端の数値のうち安全側である0.56mを脱出限界水深とした。従来の研究¹⁾でも0.575mまでに避難すべきと述べられていることから脱出限界水深として適当だと言える。

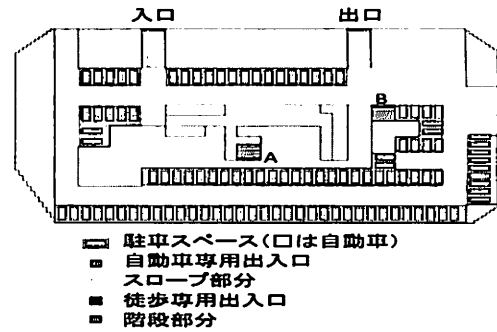


図-7 解析対象について

3. 地下駐車場における水没車からの避難

(1) 浸水解析

本研究の解析は浸水解析と避難者の移動行動計算を組み合わせることから成り立っており、避難者は浸水解析の格子上を最大8方向に進むことが可能である。なお、脱出については、移動開始時刻を変化させることで考慮するものとする。本研究における避難者は成人男性とし、駐車場内から避難をすることとした。

a) 浸水解析モデル

解析モデルとして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。構造格子モデルは格子形成が簡便なことから一般的に広く用いられる。なお、分割格子に当たっては一边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ら²⁾の手法を用いた。

<連続式>

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

<運動量式>

X方向

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

Y方向

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

各々の意味は、 h は水深、 t は時間、 g は重力加速度、 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

本研究では大阪梅田のある建物の地下駐車場を参考にした仮想地下駐車場を作成し解析を行った。形状は縦88m、横に122mの地下1層構造の地下駐車場である。駐車可能台数は107台であり、駐車スペース、自動車専用出入口や歩行者専用出入口を図-7に示す。地下駐車

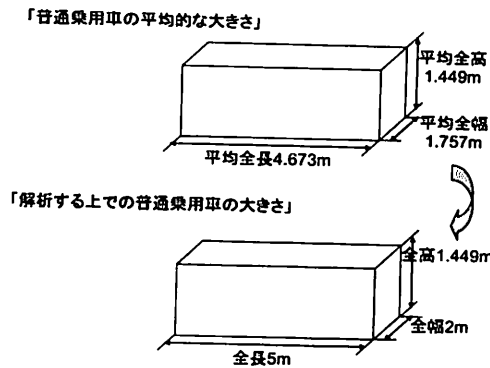


図-8 普通自動車の大きさ

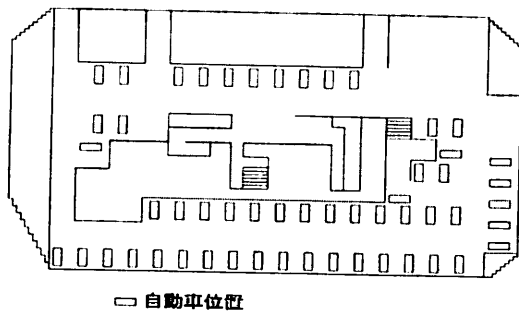


図-9 駐車率 50%の自動車配置

駐車場の直上階は地上 1 階である。

c) 流入条件

地下駐車場への水の流入は内水氾濫によるものとした。内水氾濫時の地上での水深上昇速度を $0.02\text{m}/\text{min}^2$ とし、流入箇所は地下駐車場の自動車専用出入口 2ヶ所として、氾濫水を流入させた。氾濫水の排水については行われないものとした。また、流入開始は時刻 0s から始め、解析の解析時間は 1800s とした。

d) 自動車の形状と配置について

自動車の形状については青柳ら³⁾の研究を参考に、普通自動車の平均的な大きさを用いた。しかし前述の通り、格子の大きさは一辺 1m の正方形格子を用いているため、普通自動車の幅および全長を整数にして解析を行った。普通自動車の平均的な大きさおよび解析する上での大きさを図-8に示す。次に自動車の配置について以下のように仮定した。通常、駐車場の駐車率 100% という状態は非常に珍しい。よって本研究では、地下駐車場の自動車駐車率について、日常的な駐車場の状態での解析結果を得るため、駐車率を 50% と仮定することとした。駐車可能台数は 107 台であるので、駐車率 50% の状態を 54 台の自動車が駐車していることとする。その 54 台の自動車を解析対象の駐車スペースに均等に配置した。解析対象に自動車を配置した状態を図-9に示す。一般的な自動車のマフラーは床面から約 0.30m 付近にあり、水深が 0.30m になった時にはマフラーがふさがれ、エンジンが停止するものとした。また、自動車は浸水による浮

表-1 シナリオ

シナリオ	内容
1	自動車に乗った時に、水深が 0.30m 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
2	自動車に乗り移動を始めたが、通路の途中で水深が 0.30m 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
3	自動車に乗り移動を始めたが、自動車出口付近で水深が 0.30m 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

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。

(2) 避難解析

a) 避難困難度の指標について

大西ら⁴⁾によると単位幅比力を用いることで、階段部と通路部の地下空間浸水時における避難の危険度が同時に評価できると示している。流速 (m/s) を u 、水深 (m) を h としたとき、単位幅比力 (m^3/m) は $u^2 h / g + h^2 / 2$ の式で表され、成人男性の場合、 $0.125 (\text{m}^3/\text{m})$ で自力避難が困難となり、 $0.250 (\text{m}^3/\text{m})$ を超えると避難困難になるとしており、本研究でもこの値を用いた。

b) 浸水時の歩行速度について

浸水時は非浸水時に比べ歩行速度が低下することは明らかである。本研究では従来の研究⁵⁾で得られた単位幅比力を用いた歩行速度の低減率を用いた。通路部の歩行速度減少率 (V/V_0) は、 $0.50\exp(-95M) - 0.45M + 0.50$ で表され、階段部の歩行速度減少率 (V/V_0) は、 $0.27\exp(-35M) - 0.15M + 0.73$ で表される。ここに、 V は、その単位幅比力時の歩行速度 (m/s)、 V_0 は非浸水時の歩行速度 (m/s)、 M 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た。また、歩行者専用出入口部分は階段状となっているため、階段部分の歩行速度減少率を適用した。

c) 避難状況の想定

水没車内からの脱出と駐車場外への移動を考えた。解析においても駐車場外への移動だけではなく、水没車からの脱出を含む避難の状況を想定しなければならない。そのような状況を想定した 3 つのシナリオを表-1について検討した。すべてのシナリオで 2 つの避難経路を考える。つまり 1 つのシナリオにつき歩行者専用出入口 A を目指す場合と歩行者専用出入口 B を目指す場合の 2 種類の避難を考えるため、すべてのシナリオでは 6 種類の避難経路について検討することになる。ここで、歩行者専用出入口 A へ向かう経路を a とし、歩行者専用出入口 B へ向かう経路を b とする。また、シナリオ 1 の避難で経路 a を通るものをケース 1a と呼ぶ。以下同様に、ケ

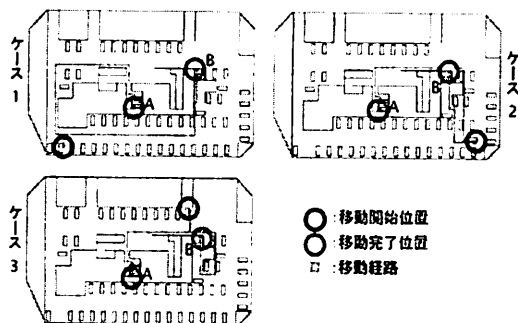


図-10 移動経路について

表-2 移動経路長

	ケース1		ケース2		ケース3	
	経路a	経路b	経路a	経路b	経路a	経路b
経路長	113m	113m	118m	51m	71m	73m

ース 1b, ケース 2a, ケース 2b, ケース 3a, ケース 3b という呼び方を用いる。

d) 避難者の配置と避難経路について

避難者を配置する場所は、3つのシナリオそれぞれで水没車の運転席外側とする。また、この位置を移動開始位置とし、移動開始位置から2つある歩行者専用出入口（階段の最上段）を移動完了位置とした。移動完了位置は避難完了位置と言い換えることもできる。移動経路は移動開始位置と移動完了位置の2点間を最短距離で結んだものとし、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。移動開始位置、移動完了位置、移動経路を図-10に示すように設定し、その移動経路長は表-2に示すとおりである。

e) 避難開始の遅れについて

表-1のシナリオにおいて避難開始の遅れは、徒歩での避難を決断するまでの時間を変化させることで決定した。徒歩での避難を決断するまでの時間というのは、エンジンがかからない、もしくはエンジンが停止した時刻から、エンジンをかけなおしたり、次の行動を考えたりした後、徒歩での避難を決断し水没車からの脱出を開始しようとする時刻までの時間とした。ここでは、その時間を避難開始の遅れと呼ぶ。避難開始の遅れは0s, 60s, 120s, 180s, 240s, 300s, 360sとした。

(3) 解析結果

a) 避難の成否

表-1に示した3つのシナリオから6種類の避難経路を考え、7つの避難開始時間の遅れ(0s, 60s, 120s, 180s, 240s, 300s, 360s)について解析を行った。合計42名の避難について解析で検討した。避難の成否を表-3に示す。全避難者42名中、避難困難状態になることなく避難することができたのは4名(図中○印)、避難困難

表-3 避難開始の遅れと避難の成否

	ケース1		ケース2		ケース3	
	経路a	経路b	経路a	経路b	経路a	経路b
0s	△(0.04)	○	△(0.03)	○	△(0.69)	△(0.33)
60s	△(0.43)	△(0.17)	△(0.43)	○	△(0.85)	△(0.85)
120s	△(0.65)	△(0.53)	△(0.60)	○	×	△(0.85)
180s	×	×	×	△(0.60)	×	×
240s	×	×	×	△(0.87)	×	×
300s	×	×	×	×	×	×
360s	×	×	×	×	×	×

○: 避難困難状態になることなく避難することができた
 △: 避難困難状態になったが避難することができた
 ()内の数値=(避難困難状態になっていた時間(s))/避難所要時間(s)
 ×: 避難不可能状態になり避難することができなかった

状態になったが避難することができたのは15名(図中△印)、避難不可能状態になり避難することができなかったのは23名(図中×印)であった。

避難困難状態になったが避難することができた避難に関しては、避難困難状態になっていた時間を避難所要時間で除したものを、表-3中の()内の数値で表している。この数値は、避難に要した時間のうち避難困難状態となっていた時間の割合を示しており、数値が大きくなるほど、その避難の危険度が増す。また、○印より△印、△印より×印の方が危険である。これらの結果より、全てのケースで避難開始の遅れが大きくなるほど避難は危険になっていくことがわかった。

避難開始の遅れが60sのとときすべてのケースで避難が可能であるという結果になった。ただし、ケース2b以外のケースでは避難困難状態になるため安全な避難はできないと言える。避難開始の遅れが120sでは、避難をした6名のうち避難困難状態になることなく避難ができたのは1名で、避難困難状態になったが避難することができたのは4名であり、1名は避難不可能状態になり避難できないという結果になった。避難開始の遅れが0sの場合でさえもケース1bとケース2b以外のケースでは避難困難状態になるという結果になった。これは、エンジンがかからない、もしくはエンジンが停止した(水深が0.30mになった)と同時に避難を開始したとしても安全な避難はできない場合があるということを示しており、自動車のエンジンがかからない、もしくはエンジンが停止した(水深が0.30mになった)時点では、すでに危険な状態であるということが言える。ただ万一、地下駐車場浸水時に、エンジンがかからない、もしくは自動車が停止したというような状況に陥った場合には、避難開始の遅れが60sになるまでに避難を始める必要がある。前述の(e)では水没車から脱出するためには240sになるまでに脱出する必要があると述べたが、地下駐車場から避難することを考えれば、もっと早い段階での避難開始が求められる。

d) 避難所要時間

次に避難開始の遅れと避難所要時間の関係を検討し

表-4 避難開始の遅れと避難所要時間

	ケース1		ケース2		ケース3	
	経路a	経路b	経路a	経路b	経路a	経路b
0s	176s	171s	182s	77s	121s	123s
60s	184s	179s	190s	80s	128s	130s
120s	195s	189s	202s	83s	-	142s
180s	-	-	-	87s	-	-
240s	-	-	-	93s	-	-
300s	-	-	-	-	-	-
360s	-	-	-	-	-	-

た結果を表-4に示す。避難所要時間とは脱出所要時間と移動所要時間の和である。ケースによって避難経路長が異なるため避難所要時間に違いがある。また、すべてのケースで避難開始が遅れるにつれて、避難所要時間が長くなっていくことがわかる。避難開始が遅れると避難所要時間が長くなるのは、流入は継続的に行われており、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時間が長くなることが関係していると考えられる。

4. おわりに

本研究では浸水深がどの高さまでなら水没車から脱出することができるのかを実験結果に基づいて検討した。そして、その結果を用いて仮想的な地下駐車場において水没車に閉じ込められたという事態を想定した避難解析を行い、避難開始が遅れた場合に地下駐車場から避難できるのか、また避難開始の遅れが避難にどのような影響を与えるのかを検討した。以下に本研究で得られた主な結果を示す。

(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%である。また、脱出限界水深は運転席ドアで水深0.56m、後部座席ドアで水深0.63mとなった。水没車からの脱出限界水深と考えた場合には水深0.56mであり、従来の研究⁴⁾水でも0.575mになるまでに避難すべきと述べられていることから脱出限界水深として適当であると言える。

(2) 避難解析で得られた結果

避難開始時間が0sのとき、自動車のエンジンがかからない、もしくはエンジンが停止すると同時に避難を開始

したとしても、すべてのケースで避難は可能であるが安全な避難はできない場合があるということが示された。避難開始の遅れが長くなるにつれて避難所要時間は長くなり、避難は危険になる。避難完了場所へ到達することだけを考えれば自動車が停止してから60s以内に避難する必要があると言える。また、避難経路が長くなればなるほど避難は危険になり、また流入の近くを通る避難経路は危険であることがわかった。本解析では流入口付近で停止した自動車からの避難が最も危険であるという結果になった。

(3) 今後の課題

今回実験および解析を行った結果、今回行った避難解析は成人男性を想定して行っている。しかし、実際には女性にも地下駐車場で水没する可能性はあるため、今後検討していく必要がある。また、実験および避難解析で用いた自動車は普通自動車タイプのため、ほかの車種に関しての検討も求められる。

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) 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年2月。
- 2) 武田誠・井上和也・上塚哲彦・村松貴義：高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件に関する検討，土木学会水工学論文集 第40巻，pp. 1089-1094，1996年2月。
- 3) 財団法人 日本建築防災協会：地下空間における浸水ガイドライン。
- 4) 青柳政樹・中畑佳城・石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之：アンダーパス浸水時の水没車からの避難に関する検討，地下空間シンポジウム論文・報告集 第15巻，pp. 125-132，2010年1月。
- 5) 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年2月。
- 6) 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，土木学会水工学論文集 第53巻，pp. 859-864，2009年2月。