# EXPERIMENT STUDY ON FLOATING MOTION OF CAR AND HYDRODYNAMIC FORCE IN FLOODED UNDERGROUND PARKING

岡本 隆明1\*・本庄 佑馬2・戸田 圭一3・石垣 泰輔4

Takaaki OKAMOTO<sup>1\*</sup>, Yuma HONJO<sup>2</sup>, Keiichi TODA<sup>3</sup>, Taisuke ISHIGAKI<sup>4</sup>

The rainfall events cause flash floods in urban area and the flooded cars bring about the human damages (as seen in Nagasaki in 1982). Therefore, it is very important to investigate the flood-flow charastistics and floating behavior of cars on flooded condition. In this study, three kinds of hydraulic model experiments were conducted using model car (Sedan type). First, we measured the flood-flow depth in underground parking model (1/64 scale). Then, we recorded the floating behavior of the flooded car. Finally, we measured the time series of the drag force exerted on the model cars (1/64 scale) in unsteady flow by using Force gage. The results revealed that the drag force increases rapidly during an early stage becase of the hydrostatic pressure difference of front and rear of car.

**Key Words :** flood in underground parking, unsteady flow, floating vehicle motion, hydraulic model experiment

## 1. はじめに

近年,局地的集中豪雨が増加し,都市部で内水氾濫が 頻発している.ひとたび地上が氾濫すると氾濫水は地下 空間に集中して浸入し,甚大な被害が生じると予測され る<sup>1)</sup>.そのため複雑な地下空間での氾濫流の挙動や車の 漂流危険域を把握することは防災上きわめて重要である が,定量的な検証は十分に進んでいない.本研究では車 模型を用いた地下駐車場浸水実験を行い,それらを明ら かにする.

地下空間への浸水過程については井上ら(2003)<sup>2</sup>は京都 市の地下街を対象とした模型実験を行い地下空間内部で の浸水過程について実験的に考察した.

氾濫時の車の漂流限界については押川ら(2011)<sup>3</sup>は車模 型を流れに対して90度の向きに固定し車に作用する抗力 を分力計によって計測した.得られた抗力係数をもとに, 実際の条件下での車の漂流限界を求めている.著者らの グループ(2015)やは水深・流速を変化させた水路実験から 直接車の漂流限界を求め、限界時における水平方向の力 の釣り合いから抗力係数を水深の関数として算出し、車 の重心位置の違いによる漂流形態の変化や回転挙動を考 慮して実際の条件下での車の漂流限界を求めた.

しかしながら,地下空間で複雑に変化する氾濫流によって車や人にどの程度の抗力が作用し,どのような場所 が漂流危険箇所であるかは明らかにされていない.そこ で本研究では車模型と地下駐車場模型を用いた浸水実験 を行った.梅田地下駐車場の氾濫解析結果をもとに流入 流量を決定し,地上からのアクセス道から通水した.ま ず高速カメラを用いて,氾濫流の流速・水深を計測した. 次に,地下駐車場内に車模型を設置して車の漂流挙動を 統計的に解析し,漂流危険箇所を評価した.また駐車車 両にかかる抗力の時系列データを計測し,漂流状態にい たるまでのメカニズムや柱などの地下構造物の影響につ いて考察した.

キーワード:地下駐車場浸水,非定常な流れ,車の漂流挙動,水理模型実験

<sup>1</sup>正会員 京都大学大学院工学研究科助教 Assitant professor, Graduate School of Engineering, KyotoUniversity (okamoto.takaaki.8x@kyoto-u.ac.jp) <sup>2</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科大学院生 Graduate student, Graduate School of Engineering, KyotoUniversity

<sup>3</sup>フェロー会員 京都大学大学院工学研究科.教授 Professor, Graduate School of Engineering, KyotoUniversity

4正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科教授 Professor, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

B1-2

	浸水流量 $Q(l/s)$	最大氾濫流水深H <sub>f</sub> (cm)	最大氾濫流流速U(cm/s)	駐車場構造	支柱
Case1	0.28	1.8	41.8	多層型	無し
Case 2	0.28	2.1	89.0	多層型	有り

表-1 地下駐車場浸水実験条件(1/64スケール)



図-1 地下駐車場模型(1/64)の浸水実験

図-2(a) 地下駐車場内での車(縮尺 1/64)にかかる抗力計測実験
(b) 抗力計測実験時の車模型の向き, (c) 抗力計測位置

#### 2. 実験装置

## (1) 地下駐車場模型を用いた浸水実験

図-1 は浸水実験を用いた地下駐車場模型(塩ビ製:実物の 1/64 スケール:93.75cm×62.5cm(実スケールに換算すると 60m×40m))を示す.図のように地下駐車場の入り口と地下2階への入り口には 1/10 スロープのアクセス道を設置した.本研究では多層構造の地下駐車場の地下1階だけを対象としている..x,yおよびzは,それぞれ流下方向,横断方向および鉛直方向である.H<sub>f</sub>は定常状態の氾濫流水深,kは車模型の高さである.流下方向の原点(x=0)は地上からのアクセス道の下流端位置,横断方向の原点(y=0)は地上からのアクセス道に接する壁,鉛直方向の原点(z=0)は地下1階の底面とした.

また地下駐車場に支柱がある場合とない場合に分けて 実験し、支柱の影響についても調べた.支柱は直径 1cm 長さ 8cm の円柱群を配置した.駐車場に停車している 車模型としてプラスチックミニカー(セダン型:縮尺 1/64長さ L=7.3cm,幅 b=2.7cm高さ k=2.3cm)を用いた.本 実験で用いた車模型はおもりをつけて補正を行い、実物 とのみかけの密度の比率が1となるようにした.梅田地 下駐車場の氾濫解析結果をもとに流入流量を決定し、一 定流量で通水した.本実験の流入流量(Q=0.281/s、実スケ ールに換算すると Q=10m<sup>3</sup>/s)は非常に微小な流量なので マイクロポンプを用いて流量設定している.

本研究のような多層型の地下駐車場では時間とともに 氾濫流水深が増加するが、地上からのアクセス道からの 流入量と地下2階へのアクセス道からの流出量が同じに なると氾濫流水深は変化しなくなる.定常状態に達した 時の氾濫流水深を*H*<sub>f</sub>とした.

氾濫流水深 *H<sub>f</sub>*の水平面分布についてはポイン トゲージを用いて計測した. **表-1** に地下駐車場浸 水実験の水理条件を示す.

# (2) 氾濫流水深が時間変化する流れ場での車に かかる抗力計測,漂流実験

地下駐車場内の氾濫時流れ場は時間的に変化 しており,瞬間的に増加した流体力が車の漂流 の重要なトリガーとなるケースも考えられる. 本研究では通水していない状態から一定流入流 量((Q=0.281/s)でアクセス道から氾濫水を流入させ, 氾濫流によって駐車場に停車している車(固定支 持していない)がどのように漂流するかをビデオカ メラでマーカー追跡して調べた.

図-2(a)のように通水していない状態から一定 流入流量で通水し,流下方向(x 方向)と横断方向 (y 方向)の抗力の時系列データ F<sub>x</sub>(t), F<sub>y</sub>(t)を計測し



図-3 地下駐車場内での氾濫流水深の水平面コンター

た.車模型は下流側で底面から 1mm 程度浮かし た状態で固定支持した.セダン型車にアームを 介してデジタルプッシュプルゲージ(分解能 1/1000N)に接続し,車の受ける流体力を 60 秒間 計測した.デジタルプッシュプルゲージはパソ コンに接続することで,車模型にかかる抗力の 時系列データ(サンプリングレート 10Hz)を得る ことができる.図-2(b)のように車の向きは氾濫 流に対して0度の向きと90度の向きとした.ま た,氾濫流を流すマイクロポンプのスイッチを 入れた瞬間を t=0 とした.図-2(c)に地下駐車場 内における抗力計測位置を示す.

### 3. 地下駐車場浸水時の氾濫流について

東海豪雨級の雨によって淀川が氾濫したときを想定し た梅田地下駐車場の氾濫解析結果をもとに流入流量を決 定している.本実験結果の座標,水深の値は実スケール に換算している.

図-3に定常状態に達したときの支柱有りケースと支柱 無しケースの氾濫流水深Hの水平面コンターを示す.地 上からのアクセス道近くの区域((A)とする)では 氾濫流水深は最大でH<sub>f</sub>=0.3-0.4m程度で小さい. したがって,この領域で浮力によって車が漂流 することはないと考えられる.

地上から氾濫流がぶつかる壁近傍の区域(それ ぞれ(B),(C)とする)は $H_f$ =0.9-1.2m程度となり, 氾濫流水深が大きくなっているのがみられる.



図-4 地上からのアクセス道流入部の氾濫流水深の流下方向 プロット図(支柱有り)



図-5 壁付近の領域での氾濫流水深の横断方向プロット図 (支柱有り)

これは氾濫流が壁にぶつかるためであると考えられる.地下駐車場の中央付近(D)では氾濫流があまり流れ込まないため,氾濫流水深  $H_f$ は区域(B,C)と比べると小さい.支柱有りケースではこの傾向が特に顕著である.しかし,氾濫流水深は $H_f$ =0.6mで,区域(A)と比べて少し大きい値を示し,この領域で浮力によって車が浮き上がる可能性は存在すると考えられる.

支柱無しケースと比較すると支柱有りケース では氾濫流水深 *H<sub>f</sub>* が全体的に少し大きくなって いる.これはアクセス道からの氾濫流が支柱に よって遮られ,地下駐車場中央付近の区域(D)に 入り込まないためと推測される.

図-4に定常状態に達したときの支柱有りケー スのアクセス道の下流側(y=0.6mの断面)の氾濫 流水深の流下方向プロット図 $H_f(x)$ を示す.図か ら水深が小さく高速流の影響を受ける領域(A)と 壁付近の水深が大きい低速領域(B)が明確にみら れる.すなわち,アクセス道の下流側の水深 $H_f$ はx=0~40mの領域においては $H_f=0.3-0.4m$ 程度で 流下方向にほぼ一定である.壁付近の領域 (x>40m)で $H_f$ が急激に上昇し, $H_f=0.9m$ 程度とな っている.流入部(A)と壁付近の領域(B)の境界 部では跳水がみられた.

図-5に定常状態に達したときの支柱有りケースの壁付近の領域(x=48mの断面)の氾濫流水深の 横断方向プロット*H*<sub>f</sub>(y)を示す.水深*H*<sub>f</sub>はy=0-



図-6(a) 地上からのアクセス道付近(A)に設置した車の漂流軌跡
(a-2) 氾濫流到達時に急激に増大する車抗力の模式図
(b) 壁付近(B)に設置した車の漂流軌跡

10mの領域で*H<sub>f</sub>*=1.0-1.2m程度の値をとる. y=10-25mの領域では水深は減少している.(C) 領域で氾濫流が再び壁にぶつかるため,水深が 増加しy>27mで*H<sub>f</sub>*=0.9m程度の値をとる.

## 4. 氾濫流水深の時間変化を考慮した水没車の漂 流挙動と車抗力の時系列変化

図-6(a)に支柱有りケースにおける地上からの アクセス道近くの区域(A)の水没車の漂流挙動を 示す. 図中には水没車の漂流挙動をマーカー追 跡した軌跡を併示している. 区域(A)における実 験では,氾濫流が車に到達した瞬間に車が漂流 し,漂流時の移動距離も大きいことが観察され た.これは,図-6(a-2)に示すように氾濫流が駐 車車両に到達した瞬間には車の下流側には氾濫 流が存在しないため,上流側と下流側の静水圧 差が大きくなったためだと考えられる.なお, 車の最大移流速度は約 2.7m/s で,これは同じ位 置の定常状態における流速のおよそ 40-50%に相 当する.

漂流した車は(A)区域と(B)区域の境界付近の 壁に衝突したのち、しばらくその場でゆっくり



図-6(c) 地下2階へのアクセス道付近に設置した車の漂流軌跡 (d) 地下駐車場内側領域に設置した車の漂流軌跡

と円状の軌道を描いて漂流し、(B,C)区域を経由 して地下 2 階へと流れ込んでいく動きを見せて いる.

図-6(b)には支柱有りケースにおける壁付近の 領域(B)の水没車の漂流挙動を示す.氾濫流が車 に到達した瞬間には漂流せず,水深が増加して 浮力によって車が浮かんだ後に漂流するのがみ られた.漂流し始めた車は氾濫流の向きに沿っ て,速やかに(B)区域から(C)区域へと流れ,地 下2階へのアクセス道に流れ込んでいく挙動が 観察された.

図-6(c)には支柱有りケースにおける地下2階 へのアクセス道の付近の(C)区域における水没車 の漂流挙動を示す.領域(B)と同様に浮力によっ て漂流するのがみられた.地下2階へのアクセ ス道に漂流した車が即座に流れ込んで落ちてい くのがみられた.

図-6(d)には支柱有りケースにおける地下駐車 場の中央付近(D)区域の水没車の漂流挙動を示す. 水深が増加した後に漂流し始めた車は,ほとん ど移動せず,ただその場で浮かんでいるといっ た動きしか見られなかった.これは(D)区域では 氾濫流速がほとんど存在しないためである.支 柱無しケースでも同様の漂流挙動がみられた.

図-7(a), (b)に支柱ありケースにおいて地上からのアクセス道近くの区域 A の代表点 (x=19.2m,図-2(c))の車に作用する抗力 F<sub>x</sub>(x 方



図-7(a) 地上からのアクセス道付近(A)に設置した車(0度の向き)抗力 時系列変化 (b) (A)に設置した車(90度の向き)抗力時系列変化

向)と *F<sub>y</sub>(y* 方向)の時系列データを示す.車はそ れぞれ *x* 軸に対して 0°の向き, 90°の向きに 設置している.値は *x* 方向の車の静止摩擦力 *S* で無次元化している.

図-7(a) (0°の向き)では  $F_x$ は t=8(s)で急激に 増加して  $F_x/S=3.0$ 程度になり,  $t=40\sim80(s)$ で少 し減少し, t>80(s)で一定値  $F_x/S=2.0$ となる. 抗 力が通水初期(t=8(s))に一時的に増大するのは氾 濫流が車と接触した瞬間は車の下流側に氾濫水 が存在しないため,水圧差によって抗力が増加 したと考えられる. 抗力値は t=8(s)で車の静止 摩擦力 S を超えているため,氾濫流到達時に車 は漂流すると考えられる. 区域(A)の氾濫流の横 断方向の流速値が小さいため,  $F_y$ はあまり大き な値をとっていない.

図-7(b)(90°の向き)でも同様の傾向がみら れるが,(A)区域の氾濫流の主流速が大きく車の 抗力の受ける面積が大きいため,0°の向きの ケースと比較して抗力値は2-3倍大きい.

図-7(c),(d)に支柱ありケースで氾濫流が衝 突する壁付近の区域 B の代表点(x=48m,図-2(c))の車に作用する抗力 F<sub>x</sub>と F<sub>y</sub>の時系列デー タを示す.図-7(c)(0°の向き)では t=15(s)で 車に抗力が作用し始めるが,F<sub>x</sub>はあまり大きな 値をとっていない.これは区域(B)において氾濫 流は反時計回りに流れ込むため,氾濫流の主流 速成分は小さいためである.F<sub>y</sub>(y方向)の抗力が 大きいため,(C)区域へと車は押し流されている. 図-7(d)(90°の向き)では氾濫流到達時には



 図-7(c)壁付近(B)に設置した車(0度)抗力の時系列変化,(d)
(B)に設置した車(90度)抗力の時系列変化,(e)地下2階への アクセス道付近(C)に設置した車(0度)抗力の時系列変化,(f)
(C)に設置した車(90度)抗力の時系列変化

車の下流側に氾濫水が存在しないため抗力値  $F_x$ は正になるが、水深が増加すると壁側の領域の水深が大きくなるため抗力値  $F_x$ は負値をとる.

図-7(e),(f)に支柱ありケースで地下2階への アクセス道付近の区域Cの代表点(x=48m,図-2(c))の車に作用する抗力FxとFyの時系列データ を示す.図-7(e)(0°の向き)ではt=25(s)で車 に抗力が作用し始めるが,Fxはあまり大きな値 をとっていない. 氾濫流は反時計回りに流れ込 むため, *F*yは増加しており

図-7(f)(90°の向き)では(C)区域の氾濫流の 横断流速が大きく車の抗力の受ける面積が小さ いため,抗力値は小さい.

## 5. 結論

本研究では地下駐車場模型と車模型を用いた浸水実験 を行った. 淀川外水氾濫時を想定した梅田地下駐車場の 氾濫解析結果をもとに流入流量を決定している. 浸水時 の氾濫水の挙動と水没車の漂流メカニズムについて調べ るために,3種類の模型実験(水深計測,車の漂流実験, 車抗力計測)を行った.得られた主な結論は以下のとお りである.

- 地上からのアクセス道の下流側では水深が小 さく高速流の影響を受ける領域(A)と壁付近 の低速領域(B)が明確にみられた. すなわち, アクセス道の下流側の水深 H<sub>f</sub>は x=0~40mの 領域においては H<sub>f</sub>=0.3-0.4m 程度で流下方向 にほぼ一定である. 氾濫流が壁にぶつかると 跳水が発生し,壁付近の領域(x>40m)で水深 が増加する(H<sub>f</sub>=0.9m 程度).
- 2) 壁付近の領域(B, C)では氾濫流水深が大きい ため、車が浮力によって浮かび低流速でも氾 濫流によって車が漂流することがわかった.
- 3) 駐車場内の漂流時の車をマーカー追跡実験から, 地上からのアクセス道付近の区域(A)では氾 濫流が駐車車両に到達した瞬間に車が漂流した.車の最大移流速度は約 2.7m/s で,これ は同じ位置の定常状態における流速のおよそ 40-50%に相当することがわかった.
- 4) 壁側の領域(B, C)では氾濫流到達時には車は漂流

しないが、時間とともに氾濫流水深が大きくなり、 浮力によって車が漂流し地下2階に流れ込むのがみ られた.地下駐車場の中央付近(D)区域では車 の漂流被害はほとんどみられない.地下駐車 場の漂流は氾濫流が壁側を伝うため駐車場の 外周領域に集中することがわかった.

5) 実際の氾濫流を想定して氾濫流水深が経時変化する 流れ場で水没車にかかる抗力を計測した.氾濫流の 車への到達時には車の前後の圧力差から車にかかる 抗力が瞬間的に増加することがわかった.このこと から氾濫流の流量が小さいケースでも氾濫流到達時 に車が漂流する可能性が示唆された.

謝辞:本研究は公益財団法人関西エネルギー・リサイク ル科学研究振興財団研究助成金(助成金番号2014R103, 都市水害時の氾濫水の挙動と水没車の漂流被害予測に関 する実験的研究,代表:岡本隆明)の研究助成の下で行 われた.ここに謝意を表する.

#### 参考文献

- 1) 高橋和雄,高橋裕: クルマ社会と水害 -長崎豪雨災害 は訴える-,九州大学出版会,1987.
- 井上和也,戸田圭一,川池健司,栗山健作,大八木 亮:地下空間への浸水過程について,京都大学防災 研究所年報,第46号B, pp.263-273,2002
- 7) 押川英夫,大島崇史,小松利光:冠水時の自動車通行の 危険性に関する研究,河川技術論文集第17巻,土木学会 水工学委員会河川部会,pp.461-466,2011
- 4) 大西隆弘・岡本隆明・戸田圭一・石垣泰輔:都市水 害時の地下駐車場への浸水と水没車の漂流挙動に関 する研究,地下空間シンポジウム論文・報告集,第 20巻,土木学会・地下空間研究委員会,pp.147-154, 2015