

氾濫時の車の漂流に関する模型実験

戸田圭一・石垣泰輔⁽¹⁾・尾崎平⁽¹⁾・高垣裕彦⁽²⁾・西田知洋⁽³⁾

(1) 関西大学環境都市工学部

(2) 独立行政法人 鉄道・運輸機構

(3) 京都大学大学院工学研究科

要 旨

1982年の長崎大水害時のように、大規模な洪水氾濫時には車が流され、被害を助長させる。本報では、直線水路に縮尺1/10のセダン型車模型ならびに縮尺1/18のミニバン型車模型を設置し、水理条件を種々変化させて、模型が漂流する限界となる条件を実験的に見出した。その後、漂流限界を超えた条件での車模型の漂流速度を計測した。実験での漂流限界状態での水平方向の力の釣り合いから、車に作用する流体力の抗力係数を水深の関数として求め、その係数をもとに実際の事象での車の漂流限界を求めた。その結果、流れ場の流速が2m/s、かつ、水深が0.5mを超えると車が漂流しだす危険が高まることが明らかとなった。この結果を、過去に実施した京都市域での外水氾濫解析結果に適用したところ、車の漂流の危険箇所が見出された。また実験より、いったん車が漂流しだすと、漂流速度は流れ場の平均流速の60-70%程度になることも明らかとなった。

キーワード：都市水害、半水没車、漂流限界、水理実験、抗力係数、車の漂流速度

1. はじめに

1982年の長崎大水害時のように、大規模な洪水氾濫時には車が流され、水難事故を含めて被害が甚大なものとなる(高橋・高橋, 1987)。激しい気候変動の下、極端な降雨事象が増大しており、神戸や長崎といった急傾斜地を含む斜面都市では、今後、洪水氾濫時の車に関係する被害の発生に十分注意を払っておかなければならない。

都市域での洪水氾濫時に、どの程度の流れの状態ですべて車が流され始めるか、またその後、どのような漂流速度で流されるかは防災上、大変重要な情報であり、本報は車模型を用いた水理実験をもとにそれらを明らかにしようとするものである。

車の漂流限界については、いくつかの先行研究がなされている。押川ら(2011)は、縮尺1/24の2種類の車模型(小型自動車とSUV車)を水路に固定して通水し、流れに直角な方向の車模型に作用する流体力を三分力計によって計測し、水深ごとの抗力係数、揚力係数を算出している。そして得られた係数をもとに、実際の条件下での車の漂流限界を、路面の静

止摩擦係数、車の空隙率、乗車人員による重量補正を考慮したうえで水平方向の車に作用する力の釣り合いから求めている。

一方、Shu et al. (2011)は、急激な洪水氾濫流で車が流される事象を念頭におき、3種類の車模型(小型自動車、小型トラック、ワンボックスカー、いずれも縮尺1/18)を用いて水路で通水実験を実施し、流れと平行に設置された車が流され始める限界を求めた後に、若干の補正を含めてその値をフルードの相似則から実物値に換算して車の漂流限界を求めている。ただしShuらはフラッシュフラッドで急に車が流される事態を想定しており、車の空隙への氾濫水の浸入は考慮していない。

先行研究を踏まえ、ここでは、Shuらと押川らの手法を双方取り入れた形で車の漂流限界を求める。すなわち、Shuらと同様に車模型(縮尺1/10のセダン型小型自動車と縮尺1/18のミニバン(救急車))を設置して水理実験を行い、水深、流速を変化させた実験から直接、車模型の漂流限界を求める。そして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する。その後、実験で得ら

れた抗力係数をもとに、押川らの方法に従い、実際の状況下での車の漂流限界を氾濫流の水深、流速の関数として表現する。なお、車の設置方向は基本的に流れ方向とする。そして得られた漂流限界指標の従来の氾濫解析結果への適用を図る。さらに、漂流限界を超えた際の車模型の漂流速度を求めて実物値に換算し、氾濫流の流速との関係について整理する。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、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た、幅1mの階段水路の下流3mの水平部と、それに続く、側面ブロック積みの延長部で、長さの合計10mの水平水路である（Fig. 1参照）。

この水路の中央部分にPhoto 1に示す実物の1/10のセダンの車模型、Photo 2に示す実物の1/18のミニバンの車模型を設置し、流水実験を行った。セダン模型の車種はスバルインプレッサ、ミニバンは救急車タイプのニッサンエルグランドである。セダン模型は重さ1,215.5g、長さ0.47m、幅0.20m、高さ0.15mであり、ミニバン模型は重さ384.2g、長さ0.26m、幅0.10m、高さ0.12mである。なお模型の重さについては、実物との関係を分かりやすくするために、おもりをつけて補正を行い、実物との見かけの密度の比率が1となるようにした。ミニバンは補正の必要がなかったが、セダン模型の重さは1,350gに調整した。

実験の手順について述べる。まず、水路に整流板、車模型、ビデオカメラを設置し、カメラの映りをよくするために斜め前方から照明を当て、明るさの調節を行った。ビデオカメラは、模型の上方から流れ方向に沿って3台設置し、また模型前方にも1台設置した。さらに車模型の斜め前方からも1台の水中カメラで撮影を行った（Photo 3参照）。

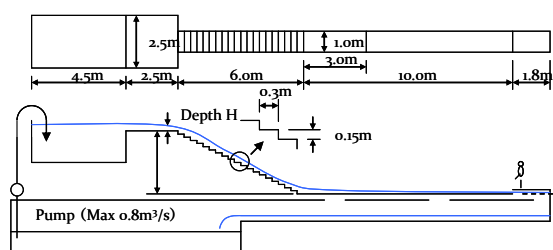


Fig. 1 Experimental set-up



(a) front view

(b) side view

Photo 1 Sedan typed model car (scale: 1/10)



(a) front view

(b) side view

Photo 2 Minivan typed model car (scale: 1/18)

車模型を水路の中心線上に設置した後、模型が流されない程度の流量を設定して水を流し始め、流されないことを確認すると流量を増やし、同じことを繰り返して漂流限界状態を見出した。その後、漂流限界を超えた流量を通水し、車が流れ始めると水路床に書かれた目盛（模型の設置箇所から下流側に1m、2m、3mの地点）を模型が通過する時間を、ストップウォッチを用いて測定するとともにビデオ撮影を行い、漂流速度を求めた。実験での車の様子を

Table 1 Experiment cases

Case	existence of hand brake	direction (degree)	existence of flash board	incipient motion condition (The value in parenthesis means the real scale value.)			
				sedan (scale: 1/10)		minivan (scale: 1/18)	
				flow velocity (m/s)	water depth (m)	flow velocity (m/s)	water depth (m)
A	Yes	0	No	0.63 (2.00)	0.041 (0.41)	0.55 (2.35)	0.035 (0.63)
B-1	No	0	No	0.50 (1.57)	0.030 (0.30)	0.41 (1.74)	0.024 (0.43)
B-2	No	90	No	0.63 (2.00)	0.041 (0.41)	0.51 (2.16)	0.032 (0.57)
B-3	No	45	No	0.57 (1.80)	0.036 (0.36)	0.52 (2.19)	0.032 (0.57)
A'	Yes	0	Yes	0.38 (1.20)	0.069 (0.69)	0.37 (1.57)	0.067 (1.21)
B-1'	No	0	Yes	0.33 (1.05)	0.051 (0.51)	0.29 (1.24)	0.039 (0.70)



Photo 3 Experiment by use of video camera



Photo 4 Floating model car in the experiment

Photo 4に示す。

実験は、(a)サイドブレーキの有無、(b)車の向き、(c)下流端の堰の有無、の3つの条件を変化させて実施した。(a)のサイドブレーキは模型のタイヤをゴムテープで固定することで表現した。(b)の車の向きは水の流れ方向に対して 0° 、 45° 、 90° の3パターンで実験を行った。(c)は下流端に堰を設け、水深を上げることで流速と水深の関係を変化させた。実験では堰の有無に対してあらかじめ水路の水深と流量の関係を求めておき、計測した流量をもとに水深を得た後、水深と流量から流速（断面平均流速）を算出した。これらのケースと漂流限界値をTable 1に示す。表には、フルードの相似則に従い、実物値に換算した値もあわせて示す。車の幅を代表長として求めたレイノルズ数 Re は $2.9 \times 10^4 \sim 12.6 \times 10^4$ の範囲にあり、これはShuらの実験と同程度である。

3. 漂流限界を求める際の抗力係数の算出

漂流限界については、実験での車模型にかかる水平方向の力の釣り合いから車に作用する流体力の抗力係数を車模型の種類、車模型の向きごとに水深の関数として求め、その係数をもとに実際の車の漂流限界を求めることを試みる。なお、車の方向は流れと 0° 、 90° の角度のものを取りあげる。

実験において車模型に作用する力は、Fig. 2のようになっている。このうち、水路床と水平な方向に関して、限界状態では流体力 F と摩擦力 S の間で以下の釣り合い式が成立する。

$$F = S = \mu (Mg - Fb - L) \quad (1)$$

ここに、 μ ：模型の静止摩擦係数、 M ：模型の質量、 g ：重力加速度、 Fb ：模型に作用する浮力、 L ：模型

Table 2 Coefficient of static friction

car type	direction (degree)	existence of hand brake	coefficient of static friction
sedan	0	No	0.073
	0	Yes	0.26
	90	No	0.565
minivan	0	No	0.1
	0	Yes	0.42
	90	No	0.65

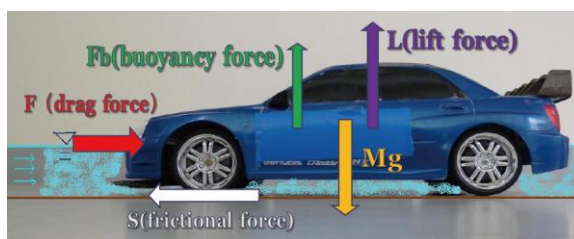


Fig. 2 Force exerted on the partially submerged car

に作用する揚力である。 Fb は

$$Fb = \rho g V \quad (2)$$

と表わされる。ここに ρ ：水の密度、 V ：水中に水没している車模型の正味の体積である。また流体力 F は、抗力係数 Cd を用いて、

$$F = 0.5 \rho Cd U^2 Ax \quad (3)$$

と表現される。ここに U ：流速、 Ax ：流れに直角な方向の、車が水没している投影面積である。

(1)-(3)式より Cd を算定するにあたり、とくに考慮すべきものは、 μ と V である。 μ は、濡れたコンクリート面にばねばかりをつけた車模型を設置して、ばねばかりをゆっくり引き、模型が動き出すときの張力を読み取るという実験を別途行ってその値を求めた。各条件での μ の値をTable 2に示す。 V については、車模型の内部構造から空隙を調べ、Fig. 3に示すような、 V と水深 h （高さ）との関係を求めた。また揚力 L については、今回の実験方法ではそれを求めることができず、また押川らの結果をみても揚力係数は抗力係数よりも1オーダー小さな値を示していることから、ここでは、 L は考えないこととした。

このようにして2種類の車模型の抗力係数を算出した結果をFig. 4に示す。横軸に h/k (k は車模型の全高)、縦軸に抗力係数をとっている。図には参考として、押川らの Re の最も大きいケースでの抗力係数も

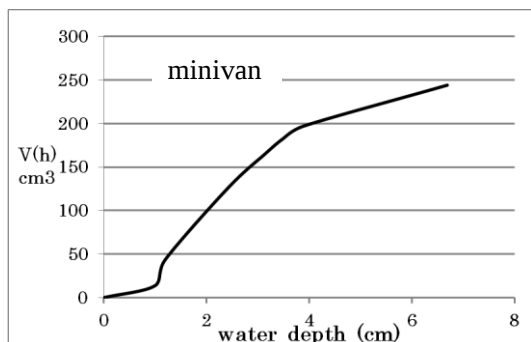
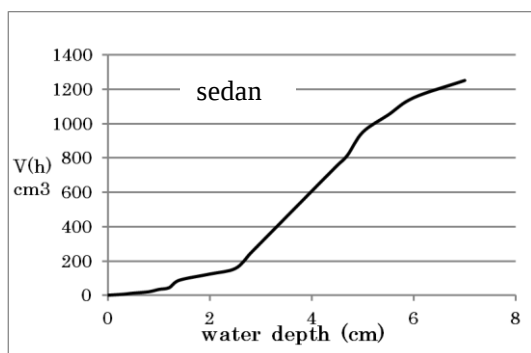


Fig. 3 Relation between net volume of model car and water depth

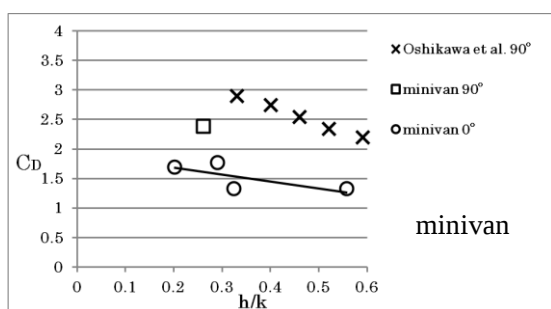
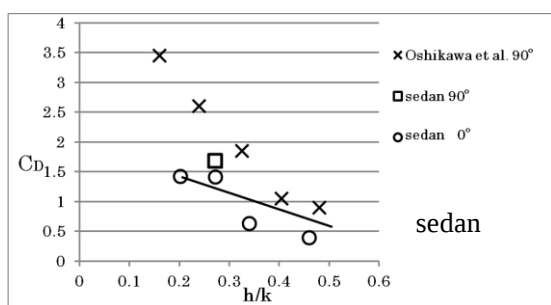


Fig. 4 Relation between drag coefficient and relative water depth

あわせて示している。今回、流れと 90° の方向の実験は、1ケースだけであるが、押川らの結果と比較するとほぼ同様かやや下回る値となっている。流れ方向の抗力係数は、両車種とも 90° のものを下回る結果となっているが、流れに対する形状抵抗を考えれば妥当な結果と言えよう。なお、セダン型の抗力係

数は、 h/k が増えると値がかなり小さくなる。これは車模型が浮力の影響でかなり移動しやすくなったためと推察される。次章で、流れ方向に対する車の漂流限界の実現象への適用を考える際に、図に示すような、実験結果を線形近似した関係式を用いる。ただしセダン型の適用範囲は、車の浮遊状況を考慮して $h/k < 0.5$ とする。

4. 漂流限界の実現象への適用

4.1 適用にあたっての留意点

実際の車について、流れ方向に設置された車の漂流限界を求めるには、前章で得られた抗力係数をもとに、(1)-(3)式から限界状態での水深と流速の関係を求めることができるが、ここで留意すべき点がある。

一つには、実物の車の静止摩擦係数 μ の評価である。この値は模型値と同じとは必ずしも言えず、過去の調査事例などに基づいて、その値を推定せざるを得ない。

二つ目は、車の空隙による正味の浮力の評価である。Fig. 5に示すように水が車のエンジン部などの内部に入ると、その部分の浮力が減少することとなる。車模型では模型を精査してこの空隙部分を算出したが、模型は実物の車の空隙まで正しく再現しておらず、模型での空隙値を実物に適用できない。Shuらは、大きな流速で車が流されることを想定し、車の空隙による浮力減少を考慮していないが、例えば、車の質量を $1,000\text{kg}$ とし、車のドアのノブより下の車の形を直方体とみなし、その底面積を仮に 8m^2 とすれば、水に浸かる部分の高さが 0.125m で車の重量と浮力が釣りあうこととなる。この高さは小さすぎると考えられ、車の内部に、ある程度水が入り込むと考えるのが妥当であろう。そこで、ここでは押川らの考えに従い、車の空隙率 p (水没している車に水が入り込む空隙部分の体積 V_p /水没している車の見かけの体積 V_0)を導入し、 V を以下の式で表現する。

$$V = (1-p) V_0 \quad (4)$$

p は明らかに水深(高さ)の関数であるが、ここでは簡単のために一定値として取り扱う。

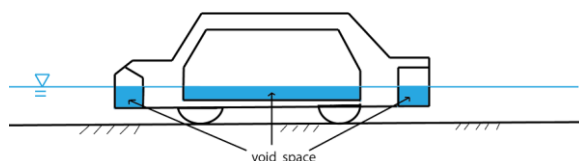


Fig. 5 void space of a car

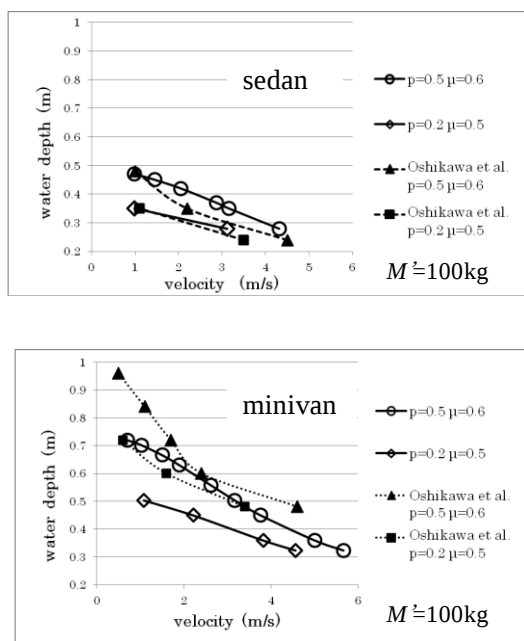


Fig. 6 Diagram of critical incipient motion (Oshikawa et al.'s condition)

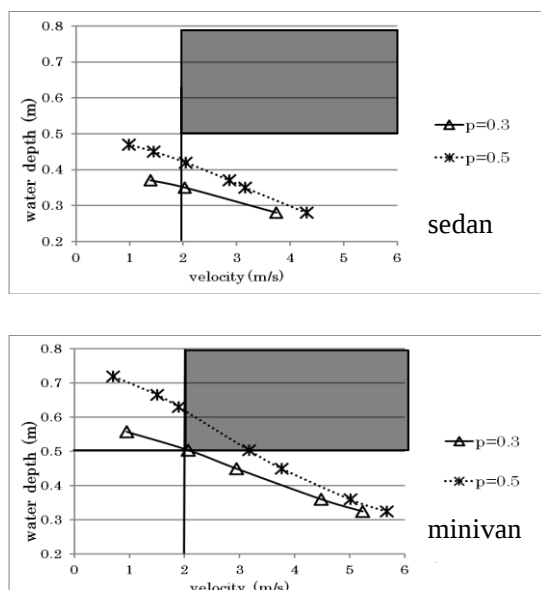


Fig. 7 Diagram of critical incipient motion ($\mu=0.6, p=0.3, 0.5, M'=100\text{kg}$)

三つ目は、乗客や荷物などの積載による、重量の増加である。この点も押川らにならい、追加質量を M' として(1)式の車の質量 M に M' を加えて評価する。

4.2 漂流限界判読図の作成

上記の点を考慮して、横軸に流速、縦軸に水深をとり、氾濫時の実物車の漂流限界状態を判読できる図を作成した。今回の実験で得られた抗力係数をもとに漂流限界を算出している。なお車が漂流しやすい条件として、車が流れと平行に設置されている場

合を対象としている。

Fig. 6は、押川らが求めた判読図と同じ μ, p, M' の条件で、漂流限界を算出した結果である。参考までに押川らの結果もあわせて示している。なお、押川らは、流れに直角な方向に設置された車しか扱っておらず、また車の種類も今回とは異なるので単純な比較はできないが、セダン型の場合には、押川らの結果とほぼ同程度の値となっている。ミニバン型(救急車)は、押川らの値を下回る値となっている。この場合は、車の設置方向の違いによる影響が大きいようである。得られた限界曲線の流速、水深の関係を見る限り、ある程度現実的な範囲にあるので、概ね妥当ではないかと判断される。

μ, p, M' のパラメータを変化させて感度分析的な検討を行うと、押川らの結果と同様、これらのパラメータの値が増加するにつれて漂流限界を示す曲線は右上に移動する、すなわち漂流しにくくなる。またその変化は、とくに p の変化に対して敏感である。またミニバン型は、セダン型の小型車よりも漂流しづらい。

$\mu=0.6, p=0.3, 0.5, M'=100\text{kg}$ の条件での危険判読図が、Fig. 7である。図より、 $U > 2.0\text{m/s}$ 、かつ $h > 0.5\text{m}$ の範囲では車が漂流しだす危険性が高くなる。とくに、セダン型の車では明らかに漂流すると考えられる。これは、 $p=0$ を仮定しているShuらの小型自動車、小型トラックの漂流限界の結果とも一致している。また流れの方向は異なるものの、押川らの小型自動車の結果も同様の結果を示している。

4.3 氾濫解析結果への適用

得られた漂流限界判読図を、大都市域での外水氾濫解析結果に適用し、氾濫した道路上で車が漂流するような現象が起こる可能性があるかどうかを検討してみる。

尾崎ら(2010)は、京都市内で御池大橋地点から鴨川が最大 $100\text{m}^3/\text{s}$ 溢れるという外水氾濫を想定したときの市内道路での氾濫流の様子を、氾濫解析により調べている。Fig. 8に示す解析対象区域は、南北方向におよそ $1/200$ の勾配を有している。今回、氾濫水の流速ならびに水深の分布を再整理した。その結果、Fig. 9に示すように、対象領域の多くの道路で、流速 U が 1.0m/s を超える箇所が現れた。 U が 2.0m/s を超える区間も含まれている。このうち、Fig. 10の黒く塗られた箇所は、 $U > 2.0\text{m/s}$ 、かつ $h > 0.5\text{m}$ の氾濫流が発生する、車の漂流によって明らかに危険と考えられる箇所である。市内の東西方向の幹線道路である御池通の溢水地点近傍、そして南北に走る幹線道路の河原町通の広い区間が該当する。

なお、Fig. 7の判読図よりわかるとおり、ここで示

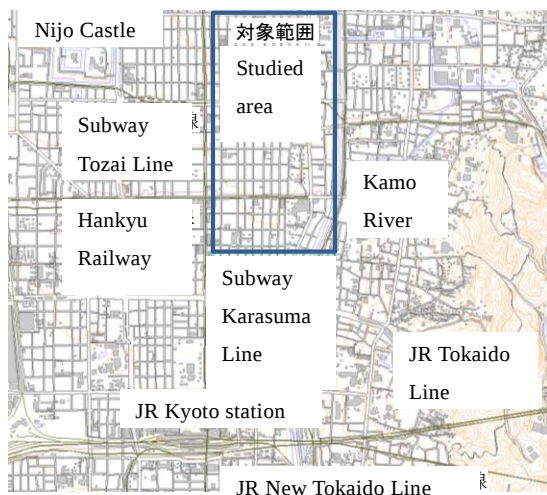


Fig. 8 Studied area of Kyoto City



Fig. 9 Distribution of maximum flow velocity

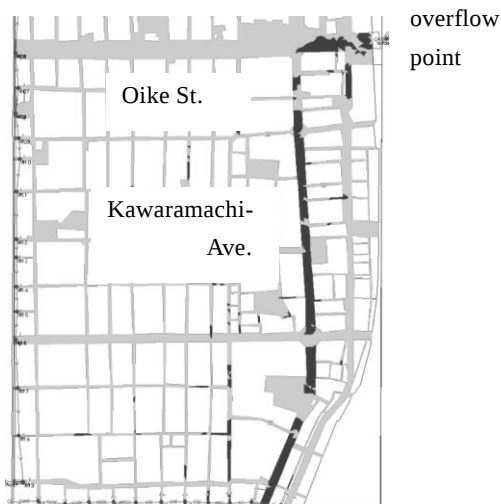


Fig. 10 Inundation flow area of $U > 2.0 \text{ m/s}$ and $h > 0.5 \text{ m}$

した流速、水深の組み合わせの条件以外でも車の漂流限界を超える場合があることから、さらに広い範囲で車が漂流する可能性があることに注意が必要である。また、このような氾濫で車が漂流した後、漂流車が衝突して重なり合うような危険性も十分、予想される。

5. いったん漂流したあとの車の漂流速度

Fig. 11にセダン型、ミニバン型それぞれの車模型の漂流実験結果を示す。横軸に流れ場の平均流速を、縦軸に車の漂流速度を、それぞれ実物換算した値で示している。

両者ともに、堰が設置されて水深が大きいケース（A', B-1'）では、車は小さな平均流速で漂流し始める。また、サイドブレーキがあるケース（A, A'）では、堰の有無にかかわらず、漂流し始めのときは漂流速度は小さい傾向にあるものの、流れ場の平均流速が大きくなるにつれて、サイドブレーキのない場合（B-1, B-1'）との差はほとんどなくなる。

セダン型では、最初の車の方向の影響はさほどみられないが、ミニバン型では 90° （B-2）、 45° （B-3）のときの漂流速度が 0° （B-1）のときより大きくなっており、方向によるばらつきが見られる。セダン型の車の漂流速度は、流れ場の流速が大きくなるにつれて、概ね、その60～70%程度になる。

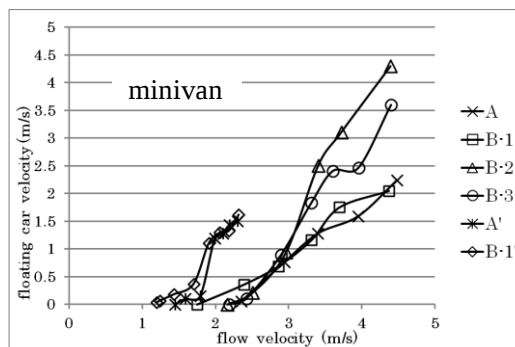
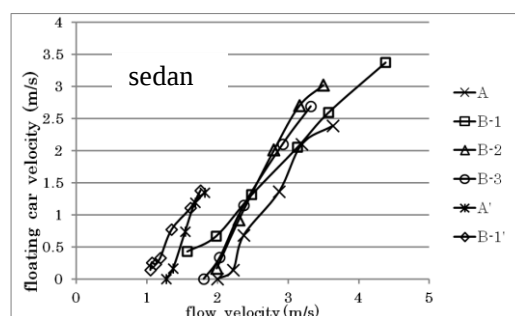


Fig. 11 Relation between flood flow velocity and floating car velocity

6. おわりに

車模型が漂流する限界となる条件を実験的に見出した。その後、漂流限界を超えた条件での車模型の漂流速度を計測した。車に作用する流体力の抗力係数を、水深の関数として求め、その係数をもとに実事象での車の漂流限界を求めた。得られた主な知見は以下のとおりである。

(1) 流れに直角な方向の車の抗力係数については、押川らの結果とほぼ同様か、やや下回る値が得られた。また流れに平行な方向の抗力係数は直角方向のそれを下回る値となった。

(2) 得られた抗力係数をもとに実物に換算した漂流限界判読図を作成すると、氾濫流の流速が2m/sを超え、かつ水深が0.5mを超えるとセダン型の小型自動車漂流する危険な状態になることが明らかとなった。また判読図の結果を、過去に実施した京都市域での氾濫解析結果に適用したところ、車の漂流に関する危険箇所が見出された。

(3) 漂流実験より、セダン型の車の漂流速度は、流れ場の流速が大きくなるにつれて、その60～70%程度になる。

謝 辞

実験で協力いただいた京都大学防災研究所技術室の吉田義則氏、(株)上田メカニックスの谷美智成氏、ならびに関西大学環境都市工学部環境防災水工学研究室の学生達に心から謝意を表します。

参考文献

- 尾崎平・森兼政行・石垣泰輔・戸田圭一 (2010) : 市街地外水氾濫解析への分布型解析モデルの適用性 - 模型実験と数値解析結果の比較 -, 下水道協会誌, Vol.47, No.575, pp.93-102.
- 押川英夫・大島崇史・小松利光 (2011) : 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.
- 高橋和雄・高橋裕 (1987) : クルマ社会と水害 ー長崎豪雨災害は訴えるー, 九州大学出版会.
- Shu, C., Xia, J., Falconer, R.A. and Lin, B. (2011): Incipient velocity for partially submerged vehicles in flood waters, Journal of Hydraulic Research, Vol.49, No.6, pp.709-717.

(論文受理日 : 2012年6月4日)

Hydraulic Model Study on Floating Car in Flooding

Keiichi TODA, Taisuke ISHIGAKI⁽¹⁾, Taira OZAKI⁽¹⁾, Yasuhiko TAKAGAKI⁽²⁾
and Tomohiro NISHIDA⁽³⁾

(1) Faculty of Environment and Urban Engineering, Kansai University

(2) Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency

(3) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

In urban flooding, cars are floated and flushed away, which may cause heavy damage on cars and buildings or lose driver's life. In Nagasaki flood in 1982, many people died by car related accidents. It is very important to study car behaviors in flooding. Here, we studied the critical incipient floating condition and the subsequent floating condition experimentally, using the 1/10 and 1/18 scale model cars. We also obtained the drag coefficient of partially submerged cars in the flooding flow. On the base of experimental results, we could draw the diagram of critical incipient floating condition of real car by flow velocity and water depth. According to the diagram, sedan typed cars are likely to be floated if the flow velocity exceeds 2m/s and the water depth exceeds 0.5m.

Keywords: urban flooding, partially submerged car, incipient motion, hydraulic experiment, drag force, floating car velocity