

洪水中汽车稳定性的理论分析及试验研究

肖宣炜 夏军强 舒彩文 陈一明

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着全球气候条件的变化和城市化进程的不断加快,由暴雨引起的城市洪水频繁发生。停在路面上的汽车在洪水中容易被冲走,并有可能对周边行人和基础设施等造成严重损害。因此有必要对洪水中汽车的稳定性进行理论分析与模型试验研究。本文首先分析了洪水中部分淹没状态下汽车的受力情况,采用基于泥沙起动理论推导出洪水中汽车的起动流速公式;然后选用两款模型小车(大小两种比尺)在遵循相似理论条件下,在水槽中进行了一系列的汽车起动试验;采用大比尺模型小车的试验结果率定公式中的两个关键参数,并用公式计算出原型车辆在不同水深下的起动流速。最后采用小比尺模型小车的试验结果,根据比尺关系计算出原型汽车的起动流速,与公式计算值符合较好。研究结果表明:来流水深越大,部分淹没下汽车的起动流速越小;在相同来流水深条件下,当水流流向正对于侧面时比正对于头部时汽车更容易起动。

关键词: 洪水中汽车; 车辆稳定性; 起动流速; 理论分析; 试验研究

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 0468-155X(2013)01-0053-07

引言

近年来,随着全球气候条件的变化和城市化进程的不断加快,由暴雨引起的城市洪水频繁发生。停在路面上或正在行驶的汽车,在洪水的作用下很容易失去稳定。失稳的车辆有可能造成不同程度的灾害,如直接威胁乘客和行人的生命安全;冲撞桥墩、电线杆等建筑物;堵塞桥洞、涵洞,影响过流能力;冲入河道、海港,增加溃堤风险等^[1]。因此洪水中失稳的汽车可能会对周边行人或基础设施造成直接或间接的危害。当前我国汽车保有量不断增加,而由局部强降雨引起的城市洪水经常发生,因此有必要对洪水中汽车的稳定性问题进行研究,所得研究成果可为城市防洪减灾、城市规划等提供科学依据。

目前国内外关于洪水中汽车稳定性的研究比较多,通常用起动流速的大小来判断汽车在洪水中的稳定性。洪水中车辆稳定性的研究方法主要有三类:①物理模型试验研究, Bonham 等^[2]、Gordon 等^[3]分别在 20 世纪 60、70 年代开展了洪水中车辆稳定性的模型试验研究。Bonham 等^[2]研究了水流冲击汽车侧面时的起动条件,并取汽车轮子与地面的摩擦系数为 0.30; Gordon 等^[3]研究了来流方向与汽车长度方向平行时的起动流速,并考虑了三种不同车况下的起动条件,即前轮锁住、后轮锁住及前后轮都锁住。②纯理论分析研究,主要以 Keller 等^[4]的成果为代表。Keller 等^[4]提出了汽车起动时水深和相应流速的关系。③理论分析与水槽模型试验相结合的研究,主要是近年来 Xia 等^[5]及 Shu 等^[6]的成果。这些成果借鉴了河流动力学中泥沙起动公式的推导方法,分析了完全与部分淹没状态下汽车的受力特点,结合滑动平衡的起动条件,导出了洪水中汽车的起动流速公式,并用模型小车的水槽试验数据确定公式中的相关参数。最近 Shand 等^[1]指出由于现有汽车在外形、密封性、底盘高度、重量等方面已经发

收稿日期: 2012-05-23

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20120141110011); 国家自然科学基金面上项目(51079103)

作者简介: 肖宣炜(1988-)男,福建三明人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 夏军强。E-mail: xiajq@whu.edu.cn

生了本质的改变,导致过去的研究成果已经不再适用于判别当前汽车在洪水中的稳定性。

综上所述,已有关于洪水中汽车稳定性的研究成果,一般侧重于国外常见车型的稳定性分析,而且通常仅考虑来流方向与汽车长度方向平行时的汽车稳定性。因此需要根据国内常见车型的情况,进一步完善已有的洪水中车辆稳定性的研究。本文首先分析了洪水中部分淹没状态下汽车的受力情况,采用基于泥沙起动的理论推导出洪水中汽车的起动流速公式。然后选择当前在国内较具代表性的两款模型小车(大小两种比尺),在模型水槽中开展一系列的汽车起动试验,并采用大比尺模型的试验资料率定公式中的相关参数,用小比尺模型的试验资料验证公式。最后估算了原型车辆在不同水深下的起动流速。

1 失稳机理分析

洪水中的汽车存在着三种可能的失稳形式:滑动、翻滚及漂浮^[1]。一般情况下,在洪水上涨过程中,如果汽车密封性能较好,水流不会很快涌入汽车内部。当汽车受到的浮力大于其重力时,汽车将漂浮。漂浮通常发生在低流速、大水深的情况下,此时浮力起主导作用。当洪水没有涌入汽车内部时,汽车开始漂浮时的临界水深称为漂浮水深。漂浮水深的大小取决于汽车车型、密封性、自重及载重等。一般小型家用车的漂浮水深为0.4~0.6m(如Honda Accord),四驱越野车的漂浮水深相对较大,一般为0.6~0.8m(如Audi Q7)。当来流水深小于漂浮水深,且汽车所受的拖曳力大于摩擦力时,汽车将沿地面向前滑行。停放在路面上的汽车,在洪水冲击下发生滑动,一般出现在流速相对较大、水深相对较小的情况下,此时拖曳力起主导作用。汽车在洪水作用下能否滑动,取决于水流强度、汽车质量、轮胎与路面间的摩擦阻力等情况。一般情况下来流水深越小,拖曳力的作用面积就越小,而汽车被冲走所需的起动流速就越大。此外,汽车能否滑动还与其停放方向与来流方向的夹角大小有关。当洪水直接冲击汽车的侧面时,汽车容易滑动。BC Hydro^[7]认为汽车在洪水中还存在一种可能的失稳形式——翻滚。事实上,翻滚现象一般发生在汽车已经漂浮或者滑动后遇到不平坦路面的情况下,其发生几率相对较小。故滑动作为汽车在洪水中较为常见的失稳形式,本文对其展开了研究。

2 受力分析及公式推导

2.1 受力分析

假设汽车停在路面上时四个车轮均锁住,则洪水中的汽车,在水平方向主要承受水流拖曳力 F_D 和地面摩擦力 F_R ;在垂直方向上承受自身重力 G_C 、浮力 F_B 以及地面的支持力 F_N 。因洪水中的汽车处于部分淹没状态,故不存在顶部流速,可忽略水流上举力。洪水中汽车的稳定性取决于这五个力,将重力与浮力的合力称为有效重力 F_C 。假设来流方向正对于汽车头部,则其受力分析如图1所示。

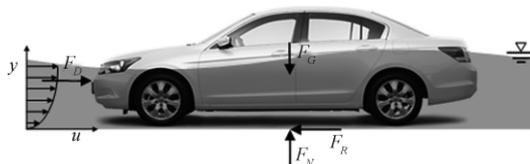


图1 部分淹没状态下汽车的受力示意图

Fig.1 Forces acting on a partially submerged vehicle

(1) 拖曳力 F_D

当洪水流经汽车时,汽车受到沿水平方向的拖曳力 F_D 作用^[8],其表达式如下

$$F_D = A_d C_d \gamma_f u_b^2 / 2g \quad (1)$$

式中 u_b 是实际作用在汽车上的有效近底流速; C_d 是拖曳力系数; A_d 是汽车迎水面垂直于来流方向的投影面积, $A_d = \alpha_d (b_c \cdot h_f)$, α_d 是面积系数, b_c 是汽车迎水面宽度, h_f 是水深。许多研究者认为, C_d 受物体的形状、有限水体中相对位置及雷诺数的影响。但对具有尖角的物体,在雷诺数 $Re > 2.0 \times 10^4$ 时,

C_d 不受雷诺数 Re 影响^[8-10]。一般城市洪水的雷诺数 Re 变化范围在 $10^4 < Re < 10^6$, 因此可认为洪水中汽车的拖曳力系数 C_d 与雷诺数 Re 无关。则可认为模型小车和原型车的拖曳力系数 C_d 是一致。

(2) 有效重力 F_G

有效重力 F_G 为汽车重力与浮力的合力, 则其表达式为 $F_G = G_C - F_B$ 。假设汽车的长度及高度分别为 l_c 、 h_c , 则汽车的体积 $V_c = \alpha_c(l_c \cdot b_c \cdot h_c)$, 系数 α_c 是与汽车外形相关的体积系数, 则 $G_C = \gamma_c V_c = \alpha_c l_c b_c h_c \gamma_c$ 、 $F_B = \gamma_f V_f = \alpha_f l_c b_c h_f \gamma_f$ 。式中 γ_c 为汽车容重; 系数 α_f 为与汽车底面面积相关的系数; γ_f 是水的容重。当汽车漂浮时存在 $F_G = G_C - F_B = 0$ 。假设汽车漂浮水深 $h_f = h_k$, 可得 $\alpha_c l_c b_c h_c \gamma_c = \alpha_f l_c b_c h_k \gamma_f$ 。令 $R_f = \alpha_f / \alpha_c$, 则得

$$F_G = \alpha_c l_c b_c (h_c \gamma_c - R_f h_f \gamma_f) \quad (2)$$

(3) 摩擦力 F_R

当洪水中停放的汽车四个轮子均锁住时, 摩擦力是通过作用在车轮与地面的接触面上阻碍车辆滑动。为了简化分析, 认为摩擦力的合力作用在汽车的重心位置, 则 $F_R = \mu F_N$ 。式中 μ 为摩擦系数, 与地面粗糙程度、轮胎大小、磨损程度及承受的重量等有关。正常状态下地面支持力的大小等于有效重力, 即 $F_N = F_G$ 。因此可得摩擦力表达式为

$$F_R = \mu \alpha_c l_c b_c (h_c \gamma_c - R_f h_f \gamma_f) \quad (3)$$

当汽车漂浮时, F_N 等于零。此时, 汽车不受地面摩擦力影响。

2.2 起动流速公式推导

当处于部分淹没状态下的汽车开始滑动时, 临界滑动状态下水平方向合力等于零, 即 $F_D = F_R$ 。将式(1)、(3)代入该等式中, 经变形可得

$$u_b = \sqrt{\frac{\mu \alpha_c}{\alpha_d C_d}} \cdot \sqrt{2gl_c \left(\frac{h_c \rho_c}{h_f \rho_f} - R_f \right)} \quad (4)$$

由于作用于汽车的有效近底流速不易确定, 为了简便, 一般可用垂线平均流速代替, 利用 Karman 和 Prandtl^[11] 提出的指数型流速分布公式可得 $u = (1 + \beta) (y/h)^\beta U$ 。假设取 $y = \alpha_b h_c$ 处的流速作为近底代表流速, 则 $u_b = (1 + \beta) (\alpha_b h_c / h_f)^\beta U$, 将上式代入式(4)可得

$$U_c = \alpha \cdot \left(\frac{h_f}{h_c} \right)^\beta \cdot \sqrt{2gl_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot \frac{h_c}{h_f} - R_f \right)} \quad (5)$$

式中 $\alpha = \sqrt{\mu \alpha_c / (\alpha_d C_d)} / [(1 + \beta) \alpha_b^\beta]$, 系数 α 和 β 取决于汽车外形、型号、摩擦系数和拖曳力系数等相关参数, 其具体值将由水槽试验结果率定。

上式即为来流流向正对汽车头部时的起动流速公式。当汽车与水流流向成 90° 角时(即来流流向正对汽车侧面)的起动流速公式也可用该式表示, 只需将式(5)中的 l_c 替换成汽车宽度 b_c 。

3 水槽试验

3.1 试验简介

为确定上述公式中的参数 α 和 β , 作者在武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开展了一系列汽车起动的试验。试验所用的水槽长 60m, 宽 1.2m, 高 1.0m, 水槽底部近似水平。结合国内汽车不同的用途、外形、重量等特征, 试验选择了比较有代表性的两款模型小车(图2): Honda Accord (小型家用车) 及 Audi Q7 (越野车)。对各款模型小车, 分别选用了大小两种几何比尺: 1:14 及 1:24。两款车在不同比尺下的详细参数如表 1 所示。在两款模型小车中, Honda Accord 相对小而轻, 而 Audi Q7 相对大而重。为防止试验中水流进入模型车, 模型车内部空间填满轻质泡沫塑料。为了满足原型与模型车的摩擦系数相似, 水槽底部铺成水泥面, 试验测得模型车在水泥地面上的摩擦系数范围分别为 0.51~0.78(干)和 0.39~0.68(湿), 均在参考值 0.50~0.85(干)和 0.25~0.75(湿)范围之内^[12, 13]。

试验过程中为了保持模型小车的四个车轮均为锁住状态, 每个车轮均用胶水粘住。对模型小车进行分组试验, 1#组为 1:14 的大比尺模型小车, 2#组为 1:24 的小比尺模型小车。



图2 试验中选用的车型

Fig. 2 Two model vehicles used in flume experiments

表1 不同比尺汽车的相关参数
Table 1 Specifications of model and prototype vehicles

组别	比尺	汽车型号	长/m	宽/m	高/m	空车重量/kg
无	原型 1:1	Honda Accord	4.945	1.845	1.480	1.631
		Audi Q7	5.089	1.983	1.737	2.345
1# (大比尺)	1:14	Honda Accord	0.353	0.134	0.107	0.597
		Audi Q7	0.365	0.140	0.123	0.855
2# (小比尺)	1:24	Honda Accord	0.205	0.078	0.062	0.126
		Audi Q7	0.213	0.082	0.070	0.166

已有研究表明,当洪水中的汽车处于部分淹没状态下,水深一般不超过引擎盖的位置,当洪水的来流方向正对汽车头部时(180°)与正对汽车尾部时(0°)的迎流面面积相差不多,因而其起动条件相近^[5]。故在本次试验中,模型小车仅按90°和180°两种角度放置于水槽中,以分别表示垂直于水流流向和平行于水流流向两种不同状态,如图3所示。试验过程中,控制闸门开度,以调整水深和流速,观察模型小车状态。一旦起动,记录下即时的水深和相应流速,每组数据均读三次取其平均值,以减少误差。将1#组模型车的试验数据用以率定起动流速公式中 α 和 β 两个未知参数,2#组模型车的试验数据用以验证计算公式。

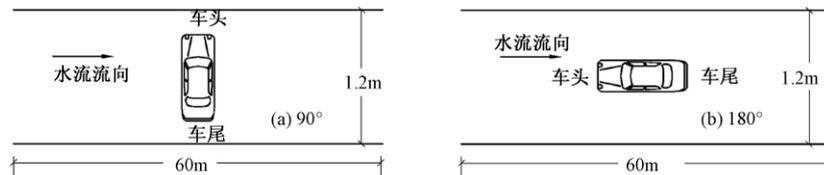


图3 试验中模型车与水流流向的相对位置

Fig. 3 Two layouts of model vehicle in flume

3.2 模型设计

为了模拟真实的物理过程,试验中水槽底部铺上水泥面,与实际路面条件相仿,满足边界条件相似要求。根据相似理论^[13],在严格遵循几何相似、运动相似和动力相似条件下,可认为模型与原型水流流态相似。试验中所采用的两款模型小车均有1:14和1:24两种比尺。以比尺为1:24的模型小车为例,模型小车与原型车在尺寸和外形上满足严格的几何相似条件,则其长度比尺、宽度比尺、高度比尺均等于24,即 $\lambda_L = \lambda_W = \lambda_H = 24$ 。根据运动相似准则,得流速比尺 $\lambda_U = \lambda_L^{1/2} = 4.899$ 。试验中,水槽底部采用水泥沙浆粉面,即模型中水泥路面的粗糙程度略小于实际路面,而模型汽车轮胎的粗糙度也小于原型车辆,故模型试验中可以满足阻力相似,且可保证模型小车与地面的摩擦系数与原型值接近。

原型车与模型小车的动力比尺为 λ_F ,根据动力相似准则,得 $\lambda_F = \lambda_L^3$ 。模型小车经填充后,其密度与原型小车相近,则可得 $\lambda_{F_G} = \lambda_{F_B} = \lambda_F$ 。许多研究者认为,当雷诺数相对较大时,则拖曳力系数 C_d 不受雷诺数 Re 影响^[8-10],故可认为模型小车与原型车拖曳力系数 C_d 是一致的。因此可得拖曳力比尺 $\lambda_{F_D} = \lambda_F$ 。由于原型车与模型小车满足摩擦系数相似,则摩擦力比尺 $\lambda_{F_R} = \lambda_F$ 。

3.3 试验结果分析

图4中分别绘出了平底条件下两款大比尺模型小车在不同水深下的起动流速。从图中可以看出:(1)两款模型小车的起动规律基本一致,两种方位角下模型小车的起动流速都随水深增大而减小,这是因为当水深增大时,迎流作用面积增大导致拖曳力增大,而有效重力 F_G 变小,则抵抗滑动的摩擦力 F_R 变小;(2)同一款模型小车,当水流流向正对于侧面比正对于头部时汽车更容易起动,其原因在于当汽

车按 90°角停放时水流拖曳力的作用面积较大; (3) 相同方位角停放时, 模型小车质量越小越容易起动, 原因在于质量越小, 有效重力 F_G 就越小, 则抵抗滑动的摩擦力 F_R 就越小。以上实验结果所得规律与所推导的起动流速公式曲线的变化规律相符, 说明公式 (5) 在形式上是合理的。

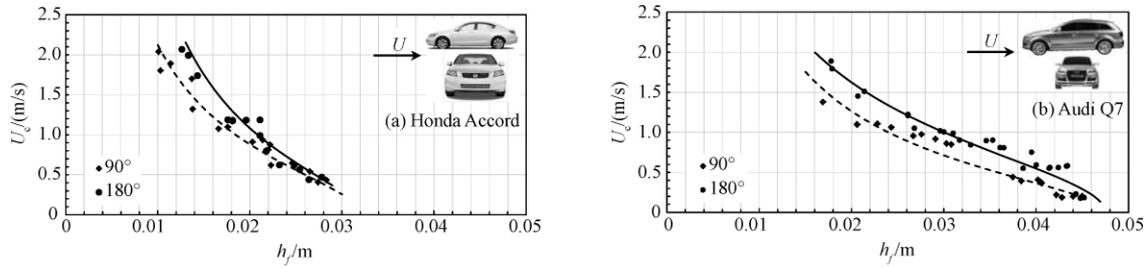


图 4 水平底坡下大比尺模型小车起动时水深与相应流速的关系

Fig. 4 Relationship between water depth and incipient velocity for partially submerged vehicles

3.4 参数率定及公式验证

(1) 参数率定

将上述所得的起动流速表达式 (5) 做简单变换, 运用最小二乘法结合 1#组模型小车的试验数据率定出 α 和 β 值, 两款汽车在不同停放位置时的 α 和 β 值如表 2 所示。从表中可以看出, α 值随车型与停放角度的不同存在明显差别, 说明其值不仅与汽车外形、密封性、重量等参数有关, 还与停放角度有关。当其他汽车的车型与本文研究车型相似且停放角度一致时, 率定的 α 值理论上也适用于这些车型。 β 均为负值, 说明了起动流速随着水深的减小而增大。当来流水深减小时, 汽车迎水面的淹没面积变小, 导致需要更大的流速才能使汽车产生滑动。

表 2 采用大比尺模型小车试验数据率定出的 α 和 β 值

Table 2 Parameters in Eq. (5) calibrated by experimental data on large-scale model vehicles

汽车型号	汽车与水流流向成 90°角		汽车与水流流向成 180°角	
	α	β	α	β
Honda Accord	0.501	-0.332	0.225	-0.571
Audi Q7	0.460	-0.355	0.546	-0.135

(2) 公式验证

根据相似理论^[13] 在严格遵循几何相似、运动相似和动力相似的前提下, 不同比例模型的试验数据可相互换算, 即

$$h_{fp} = h_{fm} \times \lambda_L; U_{cp} = U_{cm} \times \sqrt{\lambda_L} \quad (6)$$

式中 h_{fm} 、 U_{cm} 和 h_{fp} 、 U_{cp} 分别为模型小车和原型车起动时相对应的水深和流速, λ_L 为长度比尺。

运用公式 (6) 将小比尺模型 (2#组) 试验数据换算成原型值, 并将其绘制于图 5 中。同时在图 5 中绘制出由起动流速公式 (5) 计算出的原型车起动流速曲线。从图中可以看出, 换算后 2#组试验数据点分布在公式曲线附近, 分布规律与曲线基本吻合。由于起动流速公式中参数 α 和 β 是由 1#组模型小车的试验数据率定的, 这说明该公式及其参数也适用于不同比例的模型小车。另外按原型车水深与起动流速曲线的变化过程分析, 可以确定图 5 中 Honda Accord 和 Audi Q7 的漂浮水深分别为 0.42 ~ 0.48m 和 0.66 ~ 0.70m, 这与模型小车实测漂浮水深换算成原型值的结果 0.45m 和 0.67m 相近。由此可见, 通过大比尺模型小车试验结果率定出的 α 、 β 值对不同比例的模型小车和原型车都适用。因此可以采用公式 (5) 计算原型车辆在不同来流水深下的起动流速。

根据图 5 可以得出原型汽车在洪水中的起动条件遵循如下规律: (1) 质量越小的车, 越容易起动, 即相同水深条件下 Honda Accord 比 Audi Q7 容易起动; (2) 同一款车, 当来流方向正对汽车侧面时比正对汽车头部时更容易起动; (3) 不论如何停放, 同一款车的起动流速随水深增大而减小; (4) 同一款车, 当水深较小时, 曲线较陡, 随着水深增加, 曲线趋于平缓。例如, 当水深为 0.3m 时, Honda Accord 与水

流流向成 180°角时和 90°角时的起动流速值分别为 3.1m/s 和 2.9m/s ,Audi Q7 与水流流向成 180°角时和 90°角时的起动流速值分别为 5.7m/s 和 4.4m/s; 当水深为 0.4m 时 ,Honda Accord 与水流流向成 180°角时和 90°角时的起动流速值相差不大 ,接近 1.3m/s ,而 Audi Q7 与水流流向成 180°角时和 90°角时的起动流速值分别为 4.0m/s 和 3.0m/s。

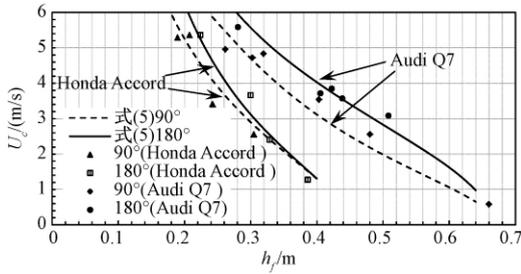


图 5 起动流速公式的验证

Fig.5 Validation of proposed formula using experimental data on small-scale model vehicles

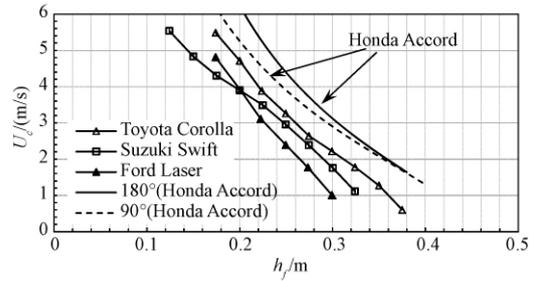


图 6 本文成果与前人研究成果对比

Fig.6 Comparison between current and previous results

3.5 与前人研究成果对比

Keller 和 Mitsch^[4]在 1993 年对洪水中汽车稳定性开展了理论研究 ,其所研究车型为当时较为典型的三款小型家用车: Suzuki Swift、Ford Laser 和 Toyota Corolla。本文所选用的 Honda Accord 为当前国内较为典型的小型家用车 ,将其成果与 Keller 和 Mitsch 的研究成果进行对比 ,结果如图 6 所示。从图中可以看出 ,各款车型在洪水中的稳定性存在着显著差异。在相同来流水深下 ,Honda Accord 的起动流速明显大于 Keller 和 Mitsch 当时所研究的三款汽车。原因在于洪水中汽车的稳定性受其外形、密封性、底盘高度、重量等参数影响 ,这些参数在各款车型之间存在差别 ,尤其是现有汽车与 20 年前的汽车在这些方面的差别非常明显。因此过去的研究成果已经不再适用于判别当前汽车在洪水中的稳定性 ,本文的研究成果有助于改进这些判别标准。

4 结论

随着城市化进程不断加大以及全球气候条件不断改变 ,城市洪水频繁发生。相关研究表明 ,一旦汽车在洪水中失去稳定 ,就很可能造成严重的后果 ,例如堵塞桥洞导致桥梁垮塌、冲击建筑物以及行人等。本文对洪水中汽车的稳定性开展了研究 ,推导出了汽车在部分淹没状态下的起动流速公式 ,并选用两款模型小车(大小两种比尺)在水槽中进行了一系列汽车起动试验 ,得到如下结论:

(1) 通过分析处于部分淹没状态下汽车的受力情况 ,并基于泥沙起动的理论推导出了洪水中汽车的起动流速公式。

(2) 利用大比尺模型小车的试验资料率定出起动流速公式中两个参数 ,接着运用该公式计算原型车在不同水深下的起动流速 ,并利用小比尺模型小车的试验资料对计算结果进行验证。验证结果表明 ,起动流速公式结构及两个参数取值合理 ,可用于原型车起动流速计算。

(3) 试验及计算结果还表明:质量较大的汽车稳定性较好 ,即相同来流水深下 ,Audi Q7 比 Honda Accord 的起动流速大;当水流流向正对于侧面比正对于头部时汽车更容易起动。

参考文献:

[1] Shand T. D. ,Cox R. J. ,Blacka M. J. , et al. . Appropriate safety criteria for vehicles: Literature review (Stage 2) [R]. Report Number P10/S2/020 , Australian Rainfall and Runoff (AR&R) , Manly Vale Australia , 2011.
 [2] Bonham A. J. ,Hattersley R. T. . Low level causeways [R]. Technical Report No. 100 , University of New South Wales , 58

Water Research Laboratory , 1967.

- [3] Gordon A. D. , Stone P. B. . Car stability on road floodways [R]. Technical Report 73/12 , University of New South Wales , Water Research Laboratory , 1973.
- [4] Keller R. J. , Mitsch B. . Safety aspects of design roadways as floodways [R]. Research Report No. 69 , Urban Water Research Association of Australia , Melbourne , 1993.
- [5] Xia J. Q. , Teo F. Y. , Lin B. L. , et al. . Formula of incipient velocity for flooded vehicles [J]. Natural Hazards , 2011 , 58(1) : 1 – 14.
- [6] Shu C. W , Xia J. Q. , Falconer R. A. , et al. . Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters [J]. Journal of Hydraulic Research , 2011 , 49(6) : 709 – 717.
- [7] BC Hydro. BC Hydro life safety model formal description [R]. Report E299 , BC Hydro , British Columbia , 2005.
- [8] Evett J. B. , Liu C. . Fundamentals of fluid mechanics [M]. New York: McGraw Hill , 1987: 381 – 390.
- [9] 庞启秀. 水流作用下块体受力试验分析 [D]. 南京: 河海大学 , 2005.
- [10] Devarakonda R. , Humphey J. A. C. . Experiment study of turbulent flow in the near wakes of single and tandem prisms [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow. 1996 , 17(3) : 219 – 227.
- [11] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社 , 1988.
- [12] Gerard M. . Tyre-road friction estimation using slip-based observers [D]. Department of Automatic Control , Lund University , Sweden , 2006.
- [13] 谢鉴衡. 河流模拟 [M]. 北京: 中国水利水电出版社 , 1990.

Theoretical analysis and experimental study of stability of flooded vehicles

XIAO Xuan-wei , XIA Jun-qiang , SHU Cai-wen , CHEN Yi-ming

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science , Wuhan University , Wuhan 430072 , China)

Abstract: With the changes of global climate and continuous urban expansion , the occurrence probability of flash floods in urban areas has increased in recent years. Vehicles parking on the roads are susceptible to become instable during flood events. Once a vehicle is under instability , it might cause injuries to passengers and pedestrians or damage to buildings and infrastructure. Therefore , it is necessary to conduct a study of theoretical analysis and flume experiments on the stability of flooded vehicles. In the study , all forces acting on a partially submerged vehicle are analyzed , and a formula of incipient velocity for flooded vehicles is derived based on the theory of incipient motion of sediment. A series of flume experiments for the incipient motion of vehicles were therefore conducted using two types of scaled model vehicles , with two scales for each type. The experimental data obtained for the larger-scale model vehicles are used to determine two parameters in the derived formula and the corresponding incipient velocities under various incoming water depths are computed using the formula for the prototype of these two vehicles. Finally , the prediction accuracy of this formula is validated using the experimental data obtained for the smaller-scale model vehicles. The results indicate that: (i) for a certain vehicle , the greater incoming water depth , the smaller incipient velocity for a partially submerged vehicle; and (ii) for a certain incoming water depth , vehicles parking vertical to the flow direction are easier to slip than those parking parallel to the flow direction.

Key words: flooded vehicle; vehicle stability; incipient velocity; theoretical analysis; experimental study