

夏军强, 古安川, 舒彩文, 等. 洪水中人体稳定性条件的理论分析及试验研究[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 4-11. [Xia Junqiang, Gu Anchuan, Shu Caiwen, et al. Criterion of Human Stability in Floodwaters Based on Theoretical and Experimental Studies[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 4-11.]

# 洪水中人体稳定性条件的理论分析及试验研究<sup>\*</sup>

夏军强, 古安川, 舒彩文, 果鹏

(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:** 由暴雨引起的山洪灾害、城市洪涝灾害在我国频繁发生, 造成严重人员伤亡。因此研究洪水作用下的人体稳定性条件, 能为洪泛区规划、城市防洪标准制定提供科学参考。以往提出的人体稳定性条件, 通常忽略人体所受浮力作用并假定来流沿水深均匀分布, 因此有必要进一步开展洪水中人体稳定性条件的理论分析及试验研究。该文首先分析了洪水中人体的受力特点, 根据人体结构特点计算不同水深下人体所受的浮力, 同时结合河流动力学中泥沙起动的理论, 推导出洪水中人体发生滑移及跌倒失稳时的起动流速公式; 然后采用一小比尺的人体模型开展一系列的水槽试验, 得到不同失稳及水深条件下人体的起动流速, 用于率定公式中的相关参数, 同时采用模型比尺关系及率定后的计算公式分别估算人体原型在不同水深下的失稳条件; 最后采用已有真实人体的水槽试验结果重新率定人体滑移及跌倒失稳时的参数, 结合人体模型的试验成果, 给出了儿童及成人在不同来流条件下的失稳区间。基于真实人体试验的率定结果因考虑了人体在洪水中能逐渐调整站姿适应来流的过程, 故结果偏于危险, 而本文模型试验的率定结果偏于安全。

**关键词:** 洪水; 人体稳定性; 起动流速; 滑移失稳; 跌倒失稳; 理论分析; 水槽试验

**中图分类号:** X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2014)02-0004-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.002

我国特殊的地理气候条件, 决定了降水量年内时空分布不均、年际变幅很大。据不完全统计, 自公元前 206 年至 1949 年的 2 155 年中, 我国共发生较大洪水灾害 1 092 次, 约平均每两年发生一次水灾。受全球气候变暖影响, 近年来极端天气气候事件发生增多。在我国由暴雨引起的山洪灾害、城市洪涝灾害频繁发生, 人员伤亡严重。因洪涝灾害直接死亡的人数, 在 1950-1990 年间, 年均约 5 500 人; 在 1991-1999 年间, 年均约 3 940 人。自 2000 年后, 因洪灾直接死亡人数下降到年均约 1 610 人, 但 2010 年因山洪、泥石流等灾害共造成 2 800 多人死亡<sup>[1]</sup>。2012 年 7 月北京发生特大暴雨洪水, 2d 内造成近 80 人死亡<sup>[2-3]</sup>。洪水作用下的人体很容易失去稳定, 行人被洪水冲走后极有可能导致直接死亡。随着当前人口的迅猛增长, 人类活动范围的不断扩张, 以及极端天气事件的增多, 加大了人们承受洪水灾害的风险。因此有必要对洪水作用下的人体稳定性条件进行研究, 所得研究成果可为洪泛区规划、城市防洪标准制定等提供科学依据。

在受洪水影响的地区, 洪水作用下人体的稳定程度不仅与其身高与体重有关, 而且还随来流条件(水深与流速)而变化。因此在洪水风险分析中, 需要准确估算出洪泛区内各处行人在水流作用下的稳定程度。目前已有的洪水作用下人体稳定性标准, 主要通过某一水深下人体失稳时的起动流速来反映, 既有基于真实人体试验的研究成果, 又有基于一定力学理论分析的经验公式<sup>[4-5]</sup>。

洪水中人体稳定性的试验研究成果, 包括 Foster 等<sup>[6]</sup>、Abt 等<sup>[7]</sup>、Takahashi 等<sup>[8]</sup>、Karvonen 等<sup>[9]</sup>及 Jonkman 等<sup>[10]</sup>的研究。Foster 等<sup>[6]</sup>较早早在 6m 长的水槽中, 以 6 个年龄在 9~13 岁的男孩作为试验对象, 测试他们在水流作用下的稳定性。由于试验中判断人体失稳是以这些测试对象从心理上感觉不安全为标准, 故试验结果仅具有一般的研究意义, 不能得出洪水中人体稳定性的定量评价标准。Abt 等<sup>[7]</sup>在 61 m 长的水槽中, 采用 20 个成年人及 1 个人体模型为研究对象, 建立了水流作用下人体发生跌倒失稳的临界条件。Karvonen 等<sup>[9]</sup>在一个船模水池中的移动平台上, 测试了 7

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-10-29

修回日期: 2013-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379156, 51309180); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401038)

作者简介: 夏军强(1974-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士, 主要从事河流动力学方面的研究. E-mail: xiajq@whu.edu.cn

个年龄在 17~60 岁的成年人在水中身穿救生衣时的人体稳定性,并根据试验结果建立了失稳时来流单宽流量与人体身高及体重之积成正比的关系。英国洪灾研究中心在当地一天然渠道中,测试了一专业特技人员在洪水中滑移失稳的临界条件<sup>[10]</sup>。这些真实人体试验因受测试对象生理及心理因素的影响,加上试验条件不同,故试验结果的分散程度较大,但基本能表现出人体失稳时来流单宽流量与其身高及体重之积成较为松散的成正比关系。

基于一定理论分析的经验公式主要为 Defra 与 EA<sup>[4]</sup>、Keller 等<sup>[11]</sup>、Lind 等<sup>[12]</sup>的研究成果为代表。英国 Defra 与 EA<sup>[4]</sup>两部门采用来流水深及流速大小与洪水中挟带漂浮物的大小来简单估算洪水中人体的危险程度,并根据计算结果将危险等级划分为 4 个区。这种计算方法认为人体在洪水中的稳定性仅与来流条件有关,与人体身高及体重等特征无关,显然该方法仅适用于洪水风险的初步分析。Keller 等<sup>[11]</sup>将人体概化为质量与体积等值的一垂直圆柱体,并基于滑移及跌倒失稳时的力学平衡原理,从理论上直接导出相应的起动流速公式。该公式在推导中假定来流沿水深均匀分布,取水流拖曳力系数为 1.2,鞋底与地面之间的摩擦系数为 0.3。Lind 等<sup>[12]</sup>将洪水中的人体分别概化为圆柱体、立方体与复合圆柱体,分别建立人体跌倒失稳时临界单宽流量的计算公式,并用 Abt 等<sup>[7]</sup>及 Karvonen 等<sup>[9]</sup>真实人体失稳试验资料对各公式的计算精度进行了评价。这些基于一定力学理论分析的经验公式,在推导过程中通常对人体结构做了较大的简化,不能精确计算不同水深下人体所受的浮力,而且一般也假定来流沿水深均匀分布。故以往经验公式不能较为准确地计算出洪水作用下人体的稳定程度。

上述分析表明,在现有洪水作用下人体稳定性的研究成果中,基于真实人体的试验结果一般受测试对象生理及心理因素的影响较大,而基于力学理论分析的公式推导中往往对人体结构及来流条件做了过多简化或假设。因此有必要进一步开展洪水中人体稳定性条件的理论分析及试验研究。本文首先分析洪水中人体的受力特点,采用基于人体工程学的的数据计算不同水深下人体所受的浮力,结合河流动力学中泥沙起动的理论,推导出基于滑移及跌倒失稳时洪水中人体的起动流速公式;然后开展一小比尺人体模型的水槽试验,得到不同条件下人体的起动流速,并运用这些试验资料率定公式中的相关参数;最后采用模型比

尺关系及率定后的计算公式分别估算人体原型在不同水深下的起动流速,并用洪水中真实人体的水槽试验数据进一步验证了公式的可靠性。

## 1 受力分析及公式推导

已有研究结果表明,洪水中人体的失稳方式主要有两种:滑移与跌倒<sup>[5]</sup>。当来流水深较小但流速较大时,如作用人体腿部的水流拖曳力大于人体鞋底与地面的摩擦力时,就有可能发生滑移失稳,如图 1a 所示;当来流水深较大但流速较小时,如水流拖曳力形成的倾倒地矩大于人体有效重力形成的抵抗力矩时,则有可能发生跌倒失稳,如图 1b 所示。Jonkman 等<sup>[10]</sup>认为还存在另外一种可能的失稳方式—漂浮,即当水深达到了一定高度时,人体在浮力作用下会完全漂浮起来。通常情况下人体密度略大于水体的密度,因此漂浮发生几率相对较小,故本文仅研究洪水作用下人体的滑移及跌倒两种失稳机理。

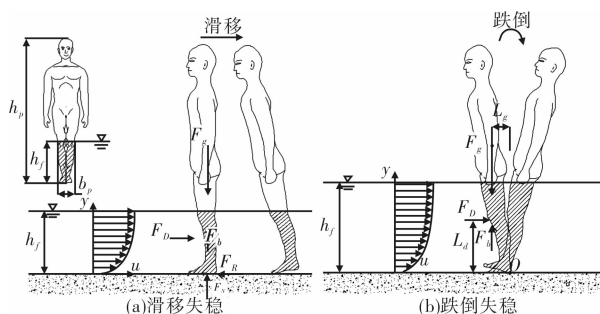


图 1 洪水作用下的人体受力示意图

### 1.1 受力分析

总的来说,洪水中人体的稳定性计算,可以借鉴河流动力学中泥沙起动的分析方法<sup>[13-14]</sup>。假设洪水中的人体面朝来流方向,则人体在水平方向上主要承受水流拖曳力  $F_D$  和地面摩擦力  $F_R$  作用;在垂直方向上承受自身重力  $F_g$ 、浮力  $F_B$  以及地面的支持力  $F_N$  作用。由于人体结构的不规则性,故计算其浮力时需要考虑人体各部位的尺寸及相应体积。各力详细计算公式如下所述。

#### (1) 人体浮力 $F_B$

正常人体的各部分(小腿、大腿、躯干等)尺寸之间存在一定的比例关系,通常用身高( $h_p$ )或身体总体积( $v_p$ )作为计算身体各部分数值的基本参数<sup>[15-17]</sup>。如我国成年人足底至膝盖的高度一般为  $0.261h_p \sim 0.265h_p$ ,下半身(小腿与大腿)的体积一般为  $0.266v_p$ 。因此根据这些人体结构特征参数,可以建立不同来流水深( $h_f$ )与人体所受浮力( $F_B$ )的

经验关系,一般可用二次曲线表示即能得到较高精度,即  $F_B = g\rho_f V_b$ , 且  $V_b/\nu_p = a_1 x^2 + b_1 x$ , 式中:  $g$  为重力加速度;  $\rho_f$  为水体密度;  $x$  为来流水深与人体身高之比, 即  $x = h_f/h_p$ ; 系数  $a_1$ 、 $b_1$  可由人体特征参数率定, 且满足  $a_1 + b_1 = 1$ 。根据中国人的平均身体特征参数, 可率定出  $a_1 = 0.633$ 、 $b_1 = 0.367$ 。统计资料表明, 人体体积( $\nu_p$ ) 与体重( $m_p$ ) 之间也存在一定线性关系<sup>[17]</sup>, 一般可表示为  $\nu_p = a_2 m_p + b_2$ , 通常情况下可取  $a_2 = 1.015 \times 10^{-3}$ 、 $b_2 = -4.937 \times 10^{-3}$ 。因此当来流水深为  $h_f$  时, 人体所受的浮力最终可表示为人体身高  $h_p$  及体重  $m_p$  的函数, 即:

$$F_B = g\rho_f(a_1 x^2 + b_1 x)(a_2 m_p + b_2)。 \quad (1)$$

#### (2) 拖曳力 $F_D$

当洪水流经人体时, 人体受到沿水平方向的拖曳力作用,  $F_D$  的表达式如下:

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

式中:  $u_b$  是实际作用在人体上的有效近底流速;  $C_d$  是拖曳力系数;  $\gamma_f$  是水的容重;  $A_d$  是人体迎水面垂直于来流方向的投影面积, 且  $A_d = a_d(b_p h_f)$ ,  $a_d$  是迎水面面积系数,  $b_p$  是人体迎水面的平均宽度。已有研究表明,  $C_d$  取值受物体形状、有限水体中相对位置及雷诺数等影响<sup>[18]</sup>。但对具有尖角的物体, 在雷诺数  $R_e > 2.0 \times 10^4$  时,  $C_d$  值不受雷诺数  $R_e$  影响。一般洪水中的雷诺数变化范围在  $10^4 < R_e < 10^6$ , 故可认为洪水中人体的拖曳力系数  $C_d$  与雷诺数  $R_e$  无关。因此可以确定人体模型和原型拖曳力系数  $C_d$  是一致的。Keller 等<sup>[11]</sup>、Lind 等<sup>[12]</sup> 及 Jonkman 等<sup>[10]</sup> 在分析洪水中人体稳定性时取  $C_d$  为常数, 且在 1.1 ~ 2.0 之间变化。

#### (3) 有效重力 $F_G$

当人体站立在洪水中时, 如假定浮力作用位置与人体重心一致, 故可将重力与浮力的合力称为有效重力  $F_G$ , 其表达式为  $F_G = F_g - F_B$ , 人体重力  $F_g = gm_p$ 。利用上述考虑人体结构特性的浮力计算公式, 则有效重力可表示为:

$$F_G = gm_p - F_B = g[m_p - \rho_f(a_1 x^2 + b_1 x)(a_2 m_p + b_2)]。 \quad (3)$$

#### (4) 摩擦力 $F_R$

摩擦力作用在鞋底与路面的接触面上, 其表达式为  $F_R = \mu F_N$ 。式中:  $F_N$  为地面对人体的支持力, 一般情况下等于洪水中人体的有效重力, 即  $F_N = F_G$ ;  $\mu$  为摩擦系数, 与地面粗糙程度、鞋底形状及磨损程度等有关。Jonkman 等<sup>[10]</sup>、Keller 等<sup>[11]</sup> 在分析洪水中人体的稳定性时, 分别取  $\mu = 0.3$  及  $\mu = 0.4$ 。根据 Takahashi<sup>[8]</sup> 的试验研究, 不同粗糙程度的地面与不

同类型的鞋底之间的摩擦系数在 0.2 ~ 1.5 之间变化。故摩擦系数的取值, 必须根据地面粗糙程度与鞋底特性估算。已知摩擦系数及地面支持力, 则可以得到地面与鞋底的摩擦力为:

$$F_R = \mu F_N = \mu \cdot g[m_p - \rho_f(a_1 x^2 + b_1 x)(a_2 m_p + b_2)]。 \quad (4)$$

### 1.2 公式推导

由上述分析可知, 随来流条件不同, 洪水中的 人体一般存在两种失稳条件, 即滑移失稳与跌倒失稳。滑移失稳的临界条件为水流拖曳力等于摩擦力, 而跌倒失稳的临界条件为水流拖曳力形成的倾 倒力矩等于人体有效重力形成的抵抗力矩。

#### (1) 滑移失稳

如图 1a 所示, 滑移失稳时的临界条件可写成  $F_D = F_R$ , 则有:

$$C_d(a_d \cdot b_p h_f) \rho_f \frac{u_b^2}{2} = \mu g[m_p - \rho_f(a_1 x^2 + b_1 x)(a_2 m_p + b_2)]。 \quad (5)$$

故近底流速可写成:

$$u_b^2 = \frac{2\mu g}{\rho_f C_d(a_d b_p h_f)}[m_p - \rho_f(a_1 x^2 + b_1 x)(a_2 m_p + b_2)]。 \quad (6)$$

由于作用在人体上的有效近底流速在实际中 不易确定, 为运用方便, 一般可用垂线平均流速代 替。如采用指数型流速分布公式, 则可写成如下 形式:

$$u = (1 + \beta) U(y/h_f)^\beta。 \quad (7)$$

式中:  $U$  为垂线平均流速;  $u$  为距地面  $y$  处的流速;  $\beta$  为某一指数, 对明渠水流通通常为  $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{6}$ 。当来流在 人体周围产生绕流等复杂水流结构时,  $\beta$  值一般偏 离上述取值。假设以距地面  $a_b h_p$  处的流速作为作用 于人体上的代表流速, 则可得:

$$u_b = (1 + \beta) U(a_b h_p/h_f)^\beta。 \quad (8)$$

式中  $a_b$  为某一系数。已有人体结构数据统计表明, 人体平均宽度亦与其身高相关, 即存在

$$b_p = a_p \cdot h_p。 \quad (9)$$

式中  $a_p$  为人体结构相关的系数。将这两式代入式 (6), 则可得滑移失稳时  $U_c$  的表达式为:

$$U_c = \alpha \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_p h_f} - (a_1 \frac{h_f}{h_p} + b_1) \frac{(a_2 m_p + b_2)}{h_p^2}}。 \quad (10)$$

式中综合参数  $\alpha = \sqrt{2\mu g/(C_d a_d a_p)}/[(1 + \beta)(a_b)^\beta]$ 。 $\alpha$ 、 $\beta$  取值主要人体外形特征、摩擦系数及 拖曳力系数等因素有关, 可由下面人体模型失稳的 水槽试验结果率定。

#### (2) 跌倒失稳

如图 1b 所示, 当洪水中的 人体面对来流方向

时, 跌倒失稳的临界条件是以脚后跟  $O$  点为中心的合力矩为 0, 即

$$F_D \cdot L_d - F_G \cdot L_g = 0. \quad (11)$$

式中: 拖曳力的作用力臂为  $L_d$ , 令  $L_d = a_h h_f$ ,  $a_h$  为拖曳力作用中心距地面高度的修正系数; 重力的作用力臂为  $L_g$ , 令  $L_g = a_g h_p$ ,  $a_g$  为人体重心距脚尖或脚跟距离的修正系数。将这些表达式代入跌倒失稳时的临界条件, 可得:

$$[C_d(a_d a_p h_p h_f) \rho_f \frac{u_b^2}{2}](a_h h_f) - (a_g h_p) g[m_p - \rho_f(a_1 x^2 + b_1 x)(a_2 m_p + b_2)] = 0. \quad (12)$$

化简上式可得跌倒失稳时近底流速的表达式为:

$$u_b = \sqrt{\frac{2ga_g}{C_d a_d a_p a_h}} \cdot \sqrt{\frac{1}{h_f h_f} \left[ \frac{m_p}{\rho_f} - (a_1 x^2 + b_1 x)(a_2 m_p + b_2) \right]}. \quad (13)$$

同样采用指数流速公式中的垂线平均流速代替  $u_b$ , 则可得跌倒失稳时起动流速的表达式为:

$$U_c = \alpha \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_f^2} - \left( \frac{a_1}{h_p^2} + \frac{b_1}{h_f h_p} \right) (a_2 m_p + b_2)}. \quad (14)$$

式中综合参数  $\alpha = \sqrt{2ga_g / [C_d a_d a_p a_h a_b^2] (1 + \beta)^2}$ 。参数  $\alpha$  与  $\beta$  取值同样可以根据下面人体模型的水槽试验结果率定。

## 2 水槽试验及参数率定

### 2.1 模型设计及试验简介

根据水力学模型的相似理论, 在严格遵循几何相似、运动相似和动力相似条件下, 可认为模型与原型的水流条件相似<sup>[18-19]</sup>。本次研究中综合考虑水槽试验条件、备选模型尺寸等因素, 将人体模型设计成正态模型。试验采用的人体模型高度及质量分别为 30 cm、0.334 kg, 且原型在尺寸和外形上均能满足严格的几何相似条件, 即  $\lambda_L = 5.54$ 。根据运动相似准则, 可得流速比尺  $\lambda_U = \lambda_L^{1/2} = 2.35$ 。原型与模型的动力比尺为  $\lambda_F$ , 根据动力相似准则, 存在  $\lambda_F = \lambda_L^3$ 。因人体模型密度与原型相近, 则有  $\lambda_{F_G} = \lambda_{F_B} = \lambda_F$ 。已有研究表明, 当雷诺数相对较大时, 则拖曳力系数  $C_d$  不受雷诺数  $R_e$  影响, 故可认为在水槽中人体模型的  $C_d$  值与实际洪水作用于人体的拖曳力系数相等, 因此拖曳力比尺  $\lambda_{F_D} = \lambda_{F_G}$ 。为满足原型与模型的摩擦系数相似, 将水槽底部铺成水泥面, 实测得到淹没状态下鞋底与水泥地面的摩擦系数

约为 0.5, 该值与其他研究者的试验结果相近<sup>[8]</sup>。由于原型与模型满足摩擦系数相似, 则摩擦力比尺  $\lambda_{F_R} = \lambda_F$ 。

为了率定式(10)及式(14)中的参数, 作者在武汉大学泥沙与防洪实验室的一水槽中开展了水流作用下人体稳定性的试验研究。该水槽长 60 m, 宽 1.2 m, 高 1.0 m, 水槽底部近似水平。试验过程中使人体模型保持站立姿势, 并分别以面对及背对来流方向进行分组试验, 如图 2 所示。试验中通过控制闸门开度调节水深和流速, 同时观察人体模型的状态; 一旦失稳, 记录下该时刻水深及相应流速, 并注明失稳方式(滑移或跌倒)。应当指出: 与以往真实人体试验不同<sup>[7,9]</sup>, 在洪水作用下的人体模型不存在对水流有一个逐渐适应调整站姿的过程, 因此所得试验结果往往偏于安全; 此外与以往的刚性人体模型试验也有所不同<sup>[7]</sup>, 在本次试验中发现人体模型两腿间能过流, 故在相同的来流条件下其所受的水流拖曳力偏小, 更容易在水流作用下保持稳定。



图 2 试验中的人体模型

### 2.2 试验结果分析

图 3 中给出了人体模型在滑移及跌倒失稳条件下来流水深与起动流速的试验数据。从图中可以看出: ① 人体模型在面对或背对来流方向时所得试验数据相近, 因此面对或背对水流方向下的人体起动规律类似, 故在后面分析中不再考虑两者的区别; ② 因试验条件所限, 滑移失稳的实测数据偏少(8 组), 但跌倒失稳的实测数据相对较多(46 组)。滑移失稳多发生在来流水深较浅但流速较大的情况下(图 3a), 而跌倒失稳一般发生在来流水深较大但流速较小的条件下(图 3b); ③ 不论发生哪种失稳方式, 人体模型的起动流速均随来流水深增加而减小, 这主要由两方面原因引起。一方面当来流水深增加时, 迎流面积增大导致水流作用于人体的拖曳

力增加;另一方面大水深时浮力增加使得有效重力变小,则导致抵抗滑移的摩擦力或抵抗倾倒的力矩减小。

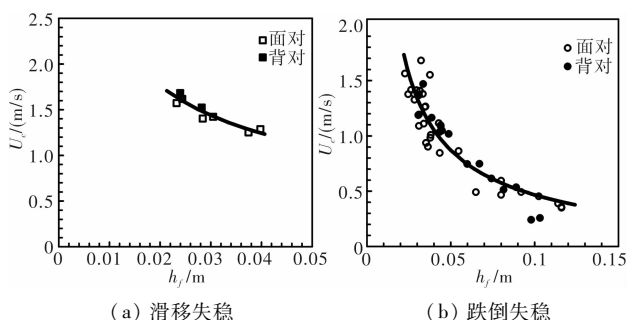


图3 水槽中人体模型启动时来流水深与相应流速关系

### 2.3 参数率定

由式(10)及式(14)可知,该公式结构相对较复杂,故可采用SPSS软件结合试验数据率定出参数 $\alpha$ 及 $\beta$ 值,具体率定结果如表1所示。从表1中可以看出,两种失稳方式下率定曲线的相关系数超过0.8,说明公式的拟合效果较好。前面公式推导过程表明,参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 的率定结果与测试人体的体型、鞋底与地面摩擦系数及拖曳力系数等有关。因本次试验遵循模型相似率,故试验结果能用比尺关系换算成人体原型在实际洪水中失稳时的启动流速。

表1 参数率定结果

公式	参数率定		相关系数	失稳方式	试验数据
	$\alpha$	$\beta$			
式(10)	7.975	0.018	0.883	滑移	8
式(14)	3.472	0.188	0.853	跌倒	46

公式中人体特征参数: $a_1 = 0.633, b_1 = 0.367$ ;  
 $a_2 = 1.015 \times 10^{-3}, b_2 = -4.937 \times 10^{-3}$ 。

由模型相似理论可知,在严格遵循几何相似、运动相似和动力相似条件下,模型和原型失稳时的水深与流速存在如下关系,即

$$h_{fp} = h_{fm} \times \lambda_L, U_{cp} = U_{cm} \times \sqrt{\lambda_L} \quad (15)$$

式中: $h_{fm}$ 、 $U_{cm}$ 和 $h_{fp}$ 、 $U_{cp}$ 分别为人体模型和真实人体在洪水中启动时相对应的水深和流速; $\lambda_L$ 为长度比尺。运用公式(15)可将上述试验数据换算成原型条件下的水深及启动流速,如图4a中散点所示。将相应于试验模型的真实人体参数(身高1.7 m及体重56.7 kg)代入式(10)及式(14),可得不同水深下人体失稳时启动流速的计算值,如图4a中实线所示。

从图4a中可以看出,采用比尺关系换算后的试验点据分布在计算曲线附近,分布规律与曲线吻合较好,说明式(10)及式(14)能用于预测人体原型在洪水中失稳时的启动流速。图4b给出了Abt等<sup>[7]</sup>(1989)所用一刚性混凝土人体模型的试验数

据与公式(14)的计算结果。该人体模型由三个混凝土制的长方体(内填充泡沫)组成,身高1.52 m,体重为53.4 kg。与本文试验用的人体模型不同,该混凝土人体下部已近似为一长方体,不存在两腿间过流的现象,故模型所受的水流拖曳力偏大。因此采用式(14)计算时取 $\alpha = 1.88$ ,得到不同水深下刚性人体模型的启动流速(图4b中实线),与模型试验值符合较好。应当指出,本次试验中人体模型不会对来流条件作出相应的生理及心理反应,因此采用表1中率定参数计算洪水中真实人体失稳时的启动流速一般会偏小,即计算结果偏于安全。

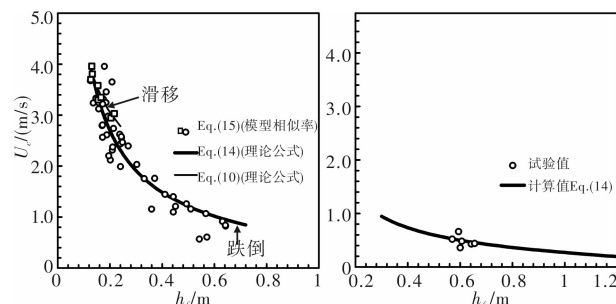


图4 模型相似率及理论公式计算的启动流速对比

## 3 与已有真实人体试验结果比较

已有洪水作用下真实人体失稳的水槽试验结果,主要以Abt等<sup>[7]</sup>及Karvonen等<sup>[9]</sup>研究成果为代表。因试验条件、测试对象等方面的差异,这些试验结果差别很大。总体而言,这些试验数据大部分为跌倒失稳时的临界条件,且Karvonen等<sup>[9]</sup>的试验结果比Abt等<sup>[7]</sup>偏小30%左右。因此如需要考虑洪水中真实人体对来流的调整适应过程,则需要用真实人体试验数据来重新率定公式(10)及(14)中的参数。已有试验结果表明,洪水中人体发生滑移失稳时多在水深小、流速大的区域,但这类试验数据相对较少。本文假定在已有真实人体失稳试验中,当来流水深低于人体膝盖高度时,认为发生滑移失稳的可能性比较大,这部分数据可用于率定真实人体发生滑移失稳时的参数,而其他数据则用于率定跌倒失稳时的参数。

### 3.1 与不同研究者试验结果的单独比较

Abt等<sup>[7]</sup>在开展洪水作用下人体稳定性的试验研究中,采用的20名真人测试对象(18名男性及2名女性)所穿衣服及鞋类似,他们年龄在19~54岁之间,体重在40.9~91.4 kg之间;水槽底坡分0.5及1.5%两种情况,分别进行25及46组有效试验;为比较不同粗糙程度的地面对人体稳定性的影响,



试验中槽底分别采用混凝土、草皮、沙砾石、钢铁四种材料,但因试验中大部分水深都大于 1.0 m,故人体失稳以跌倒为主,不同槽底材料对试验结果影响不大<sup>[12]</sup>。各类测试对象失稳时的水深范围为 0.49 ~ 1.20 m,流速范围为 0.36 ~ 3.05 m/s。该试验中允许各测试对象逐渐在小流量下适应来流条件,积累在水中站立或行走的经验,然后以 5% 的幅度较缓慢地增加流量,直至测试对象在水槽中不能保持站立或行走姿势为止。因此该试验结果受测试对象差异及积累水中站立经验的能力等影响较大,故数据较为分散。因 Abt 等<sup>[7]</sup> 试验中测试对象在水槽中有一个逐渐适应水流调整站姿的过程,与本次试验中人体模型的结果相比,在相同来流水深下,真实人体失稳所需的起动流速要比本次人体模型试验结果大得多。Abt 等<sup>[7]</sup> 根据其试验结果,建立了人体失稳时来流单宽流量与其身高及体重之间的经验关系,其相关系数( $R^2$ ) 仅为 0.48;Jonkman 等<sup>[9]</sup> 在建立人体跌倒失稳计算公式中不考虑人体浮力作用及来流沿水深不均匀分布的影响,同样采用 Abt 等<sup>[7]</sup> 的数据率定,但实测与计算值的相关程度仅为 0.34。如单独采用 Abt 等<sup>[7]</sup> 的试验数据率定跌倒失稳时的参数(如图 5a 所示),则式(14)中  $\alpha$  及  $\beta$  分别为 8.855 及 0.473,相应相关系数为 0.561。因此在人体跌倒失稳的计算公式中,考虑人体所受浮力及来流沿水深不均匀分布的影响是必要的。

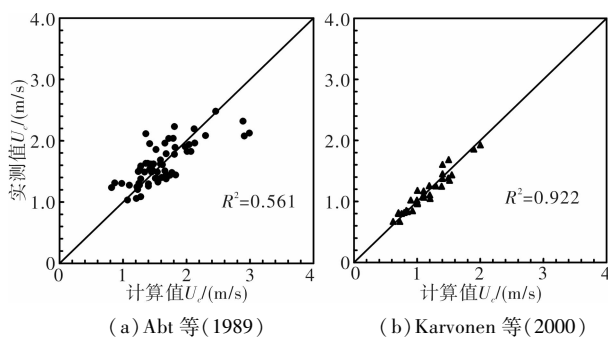


图5 跌倒失稳时式(14)真实人体试验数据的率定结果

Karvonen 等<sup>[9]</sup> 试验中所用测试人体均穿救生衣,身高在 1.60 ~ 1.95 m 之间,体重在 48 ~ 100 kg 之间。各类测试对象失稳时的水深范围为 0.30 ~ 1.10 m,流速范围为 0.60 ~ 2.71 m/s。因测试人体所穿救生衣内进入空气,不仅增大了人体在水中的浮力,而且增加了相应的迎流面积,故人体失稳时所需的起动流相对速小。如单独采用 Karvonen 等<sup>[9]</sup> 的试验数据率定跌倒失稳时式(14)的参数(如图 5b 所示),则率定的  $\alpha$  及  $\beta$  分别为 4.825 及 0.160,相应实测与计算值的相关系数( $R^2$ ) 为 0.922,同样高

于 Jonkman 等<sup>[10]</sup> 的率定结果( $R^2 = 0.75$ )。

### 3.2 与所有真实人体失稳试验结果的比较

本文收集 Foster 与 Cox<sup>[6]</sup>、Karvonen 等<sup>[9]</sup>、Yee<sup>[20]</sup>、Jonkman 等<sup>[10]</sup> 研究者发生滑落失稳时的 22 组试验资料,用于率定式(10)中的参数  $\alpha$  与  $\beta$ ,率定结果如表 2 所示。因试验组数相对较少,且试验条件及失稳判别标准各不相同,故计算值与实测值偏离较大,如图 6a 所示。对于跌倒失稳,采用 Abt 等<sup>[7]</sup> 及 Karvonen 等<sup>[9]</sup> 所有试验数据,率定式(14)中的参数  $\alpha$  与  $\beta$ ,结果如表 2 及图 6b 所示。如前所述,与 Abt 等<sup>[7]</sup> 试验结果相比,Karvonen 等<sup>[9]</sup> 试验结果系统偏小,故计算值与试验值符合程度不高。应当指出,影响真实人体在洪水作用下的稳定性因素有多个方面,不仅包括人的生理及心理条件(身高、体重、着装、身体健康状况等)、受淹区的环境条件(地面粗糙度、能见度等),而且还与来流条件(水深与流速)密切相关。因此尽管表 2 中参数率定结果的相关系数不高,但总体上反映了真实人体在各类试验条件下失稳时的临界条件,故表中参数能用于预测实际洪水中真实人体的稳定程度,但因考虑了洪水中人体能逐渐调整站姿适应来流的过程,故计算结果相对偏于危险。

表2 参数率定结果(真实人体试验)

公式	参数率定		相关系数	失稳方式	试验数据
	$\alpha$	$\beta$			
式(10)	10.253	0.139	0.512	滑落	22
式(14)	7.867	0.462	0.465	跌倒	94

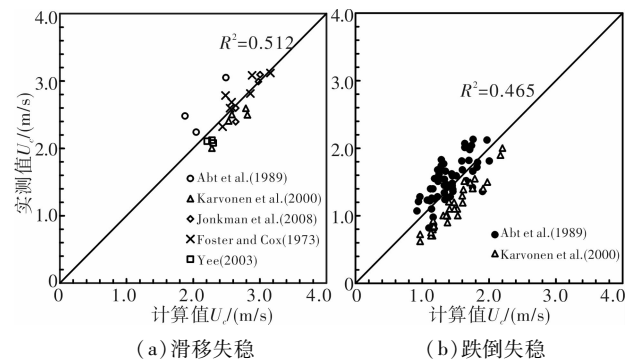


图6 不同失稳方式下真实人体试验数据的率定结果

### 4.3 推荐的曲线

上述分析表明,在相同来流条件下,人体模型与真实人体在水槽中失稳条件相差较大;因人体模型不存在对来流进行逐渐调整站姿的过程,故试验结果偏于安全,而真实人体能对来流过程作出站姿调整,故试验结果偏于危险。因此本文根据中国人的平均身体特征,综合考虑上述两种条件,给出了儿童及成人在不同水深条件下的失

稳区间,如图7所示。因滑移失稳多出现在水深较浅及流速较大的区域,在实际洪水中发生这种失稳方式的概率较小,故图7仅给出儿童及成人发生跌倒失稳的区间。

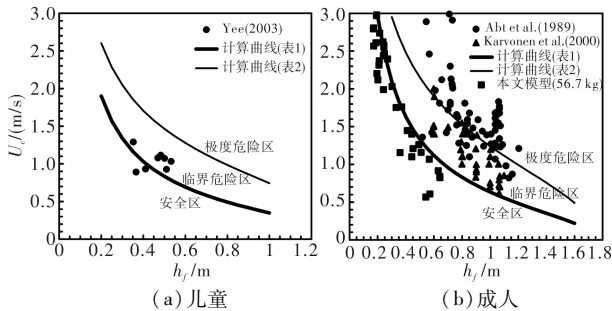


图7 不同来流条件下儿童与成人的失稳区间

图7a中儿童年龄为7岁,相应身高与体重分别为1.26 m、25.5 kg;图7b为25~29岁之间的中国成年男性代表,相应身高与体重分别为1.71 m、68.7 kg。图7中粗实线、细实线分别表示采用表1及表2参数给出的计算曲线;细实线上方区域为极度危险区;粗、细实线之间的区域为临界危险区;而实线以下区域为安全区。因此可以根据来流条件,采用图7中的曲线,判断洪水作用下真实人体的安全程度。

## 4 结论

受全球气候变暖影响,近年来极端天气气候事件发生增多,在我国因山洪灾害、城市洪涝灾害频繁发生,人员伤亡严重。已有研究表明,洪水中作用下的行人很容易失去稳定,被洪水冲走后极有可能导致直接死亡。本文对洪水作用下人体的稳定性开展了研究,推导出了洪水中人体失稳时的起动流速公式,并采用一人体模型在水槽中进行了一系列的起动试验,得到如下结论。

(1)分析了洪水中人体的受力特点,指出当水深较浅但流速较大时,人体失稳方式以滑移为主,其临界条件为水流作用于人体的拖曳力等于鞋底与地面之间的摩擦力,而当水深较大但流速较小时,人体失稳方式以跌倒为主,其临界条件为水流拖曳力形成的倾倒地矩等于人体有效重力形成的抵抗力矩。同时结合河流动力学中泥沙起动的理论,导出了人体滑移与跌倒两种失稳方式下的起动流速公式;

(2)利用一小比尺的人体模型,在水槽中开展了洪水作用下人体稳定性的试验,得到了不同水深下人体的起动流速,采用这些数据率定出公式

中的两个关键参数。同时结合模型的比尺关系及已有刚性人体模型试验数据对该公式进行了验证。

(3)采用已有真实人体失稳的水槽试验资料进一步率定了人体滑移及跌倒失稳计算公式中的参数,结合本文人体模型水槽试验的率定成果,给出了儿童与成人在不同来流条件下的失稳区间。采用真实人体试验的率定结果因考虑了洪水中测试人体能逐渐调整站姿适应来流的过程,故与采用本文人体模型的率定结果相比,其计算值偏于危险。

## 参考文献:

- [1] 国家防汛抗旱总指挥部. 中国水旱灾害公报[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2010: 43.
- [2] 肖湘. 暴雨来袭—专家解析我国暴雨致灾根源[J]. 中国减灾, 2012 (8): 14-15.
- [3] 王建民. 北京暴雨灾害的管理反思[J]. 人民论坛, 2012 (16): 54-55.
- [4] Defra and Environment Agency(EA). Flood and Coastal Defence R&D Programme, R&D outputs: Flood Risks to People (Phase 2) [R]. Defra Report, 2006: 91.
- [5] Cox RJ, Shand TD, Blacka MJ. Appropriate safety criteria for people[R] (Report Number: P10/S1/006). Australian Rainfall and Runoff, 2010: 31.
- [6] Foster DN, Cox RJ. Stability of children on roads used as floodways[R]. Australia: Water Research Laboratory, 1973: 12.
- [7] Abt SR, Wittler RJ, Taylor A, et al. Human stability in a high flood hazard[J]. Water Resources Bulletin, 1989, 25 (4): 881-890.
- [8] Takahashi S, Endoh K and Muro ZI. Experimental study on people's safety against overtopping waves on breakwaters [J]. Report on the Port and Harbour Institute, 1992, 34 (4): 4-31.
- [9] Karvonen RA, Hepojoki HK, Huhta HK and Louhio A. The use of physical models in dam-break analysis[R]. RESCDAM Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, 2000: 57.
- [10] Jonkman SN and Penning-Rowsell E. Human Instability in flood flows [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(5): 1208-1218.
- [11] Keller RJ, Mitsch B. Safety aspects of design roadways as floodways[R]. Research Report No. 69, Urban Water Research Association of Australia, 1993: 51.
- [12] Lind ND, Hartford D, Assaf H. Hydrodynamic models of human instability in a flood [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(1): 89-96.
- [13] Xia JQ, Teo FY, Lin B L, et al. Formula of incipient velocity for flooded vehicles [J]. Natural Hazards, 2011, 58(1): 1-14.
- [14] 舒彩文, 夏军强, 林斌良, 等. 洪水作用下汽车的起动流速研究[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 28-33.
- [15] Drillis R, Contini R, Bluestein M. body segment parameters [J].

- Artificial Limbs, 1964, 8(1): 44–66. (2nd ed.) [M]. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford UK, 2004: 650.
- [16] Sandroy J, Collison HA. Determination of human body volume from height and weight [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1966, 21(1): 167–172. [19] Zhang RJ, Xie JH. *Sedimentation research in China* [M]. Beijing: China Water and Power Press, 1993: 260.
- [17] 郭青山, 汪元辉. 人机工程学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1995: 177. [20] Yee, M. *Human stability in floodways* [D]. Australia: University of New South Wales, 2003.
- [18] Chanson H. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*

## Criterion of Human Stability in Floodwaters Based on Theoretical and Experimental Studies

Xia Junqiang, Gu Anchuan, Shu Caiwen and Guo Peng

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

**Abstract:** Flash floods and urban floods due to heavy rain occurred frequently in China, causing considerable loss of life. The investigation of criterion of human stability in floodwaters can provide scientific reference to floodplain area planning and urban flood control standards. However, existing criteria of human stability usually neglect the effects of body buoyance and non-uniform velocity profile of incoming flow. Therefore, it is necessary to conduct the research into an appropriate criterion of human stability in floodwaters, using theoretical and experimental studies. In the current study, different forces acting on a human subject have been analyzed, with the corresponding expressions for these forces being presented, and with the formulae of incipient velocity being derived respectively based on two different instability mechanisms. More than 50 runs of flume experiments were then conducted to obtain the conditions of water depth and corresponding velocity at human instability, under two instability mechanisms of toppling and sliding, using a vivid scaled model human body. The experimental data from these studies were then used to determine two parameters in the derived formula for each instability mechanism, and the incipient velocities under different incoming depths for the prototype of human body were estimated using the scale ratios and the calibrated formulae. Finally, the derived formulae at the modes of sliding and toppling were re-calibrated in details by the experimental data using real human subjects. Toppling stability thresholds for children and adults have been proposed in this study, based on the calibrated results obtained using the different sets of experimental data. The stability thresholds calibrated for the real human subjects tend to be more dangerous, as compared with the stability thresholds using the model human body, because the former accounts for the ability of the test subject to adjust to the standing posture according to the inflow conditions and to redirect the orientation of the body to best suit the direction of the flow.

**Key words:** floodwater; human stability; incipient velocity; sliding instability; toppling instability; theoretical analysis; flume experiment