

山区河流型水库碎土石滑坡涌浪 三维数值模拟研究

赵 树 正， 田 宇 霖， 曹 山， 薛 宏 程

(重庆交通大学 河海学院,重庆 400016)

摘 要:采用 $RNG\kappa-\epsilon$ 紊流模型与 VOF 方法对散粒体滑坡涌浪进行数值模拟。通过与已有文献的试验结果对比分析,发现数值模拟得到的滑坡体水下初始堆积形态与试验结果吻合较好,且波幅计算精度较高。基于此,建立了某山区河流型水电工程库区的三维模型,模拟了碎土石滑坡涌浪在库区内的生成与传播过程,并分析了涌浪的波幅和波速特征。研究结果表明,通过数值模拟获得的涌浪波幅和传播速度等参数,可以为大坝安全评估和滑坡涌浪灾害影响范围预测提供一定的科学依据,还可为通航河流航行船舶的避险范围提供参考。

关键词:滑坡涌浪;碎土石滑坡;紊流模型;VOF 方法;数值模拟

中图分类号:P642.22 ;P343.3; TU521.2+5 **文献标识码:** A **文章编号:**1001-2184(2020)02-0015-05

Study on 3D Numerical Simulation of the Surge of Debris Landslide in River Type Reservoir in Mountainous Area

ZHAO Shuzheng, TIAN Yulin, CAO Shan, XUE Hongcheng

(College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400016)

Abstract: RNG $\kappa-\epsilon$ turbulence model and VOF method are used to simulate the surge of granular landslide. After the comparison and analysis of the test results with the existing literature, it is found that the underwater initial accumulation shape of the landslide obtained by the numerical simulation is in good agreement with the test results, and the wave amplitude calculation accuracy is high. Based on this, a 3D model of a river type reservoir of hydropower project in mountainous area is established to simulate the forming and propagation of debris landslide surge in the reservoir area, and the wave amplitude and velocity characteristics of the surge are analyzed. The results show that the parameters obtained by numerical simulation, such as surge amplitude and propagation speed, can provide a certain scientific basis for dam safety assessment and impact range prediction of landslide surge disaster, and also provide a reference of the risk avoidance range for navigation ships in navigable rivers.

Key words: landslide surge; debris landslide; turbulence model; VOF method; numerical simulation

0 引 言

随着国家长江经济带黄金水道的建设,沿江两岸已探明的滑坡就有千余处^[1],若有巨型滑坡体高速滑入水中,其形成的涌浪不仅会影响过往船舶的航行安全,还会对沿岸居民的生命财产安全造成严重威胁^[2],因此有效预测滑坡涌浪这类次生灾害的影响范围具有重要的科学意义。目前研究滑坡涌浪的方法主要有物理模型试验和数值模拟^[3],模型试验能够有效地观测到涌浪生成、传播和爬坡等过程,如岳书波等^[4]和 Heller 等^[5]通过物理模型试验,总结了二维水槽中涌浪的生

成形态和初始波幅经验公式;殷坤龙等^[6]根据实际三维物理模型试验,发现涌浪在三维空间的波幅远小于二维情况。但是物理模型存在缩尺效应显著、数据测量较难和试验成本较高等问题。因此,部分研究人员利用数值模拟方法对滑坡涌浪形态变化、传播过程开展模拟研究,如孔增增^[7]采用数值模拟等方法对 V 型河谷滑坡涌浪的最大波面高度以及涌浪的爬高进行模拟,优化了涌浪最大爬坡高度经验公式;Huang 等^[8]用非线性 Boussinesq 水波模型研究了三峡库区红岩子滑坡涌浪。研究结果表明涌浪传播过程受河谷地貌条件影响较大,滑坡对岸的城镇是受涌浪影响的主

收稿日期:2020-03-03

要区域。数值模拟方法作为一种新兴的研究手段,在解决地形复杂的水库和河道滑坡涌浪问题时具有明显优势。但是滑坡涌浪属于典型的流固耦合问题,滑坡体高速滑入水中还会卷入大量空气^[9,10],对计算区域网格划分要求较高,尤其是进行三维数值模拟难度较大。

本文利用 CFD 数值仿真技术,基于 RNG $\kappa-\epsilon$ 紊流模型与 VOF 方法,将碎土石滑坡体视为固体颗粒和液体的混合物,对已有模型试验研究成果进行数值模拟,发现数值模拟结果与模型试验吻合较好。在此基础上,模拟了某实际山区河流型水库中碎土石滑坡涌浪的生成和传播全过程,对涌浪的形态变化、波幅变化和传播速度进行了分析。研究结果可为实际工程中潜在的滑坡涌浪灾害预测提供科学依据。

1 数学模型

连续方程: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$ (1)

动量方程: $\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$ (2)

k 方程: $\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \alpha_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon$ (3)

ϵ 方程: $\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \alpha_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}}{k} \epsilon G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$ (4)

式中 ρ 和 μ 分别为体积分数平均的密度和分子粘性系数; p 为修正的压力; μ_t 为紊流粘性系数,其表达式为: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, 其中 C_μ 为经验常数, $C_\mu = 0.0845$; 常数 $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39$; $C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, 其中 $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$, $C_{1\epsilon} = 1.42$; 常数 $C_{2\epsilon} = 1.68$; G_k 为由平均速度梯度引起的紊动能

产生项,可由下式定义: $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 。

本文封闭连续方程(公式 1)和运动方程(公式 2)采用经典的 RNG $\kappa-\epsilon$ 紊流模型(公式 3 和公式 4),并利用有限差分法将控制方程离散为代数方程,从而进行数值求解。涌浪自由面的追踪采用 VOF 方法,该方法不考虑气体对于模型的影响,而只考虑纯液体单元的影响,即在一个计算网格内,所有流体相的体积分数之和为 1。另外,滑坡体用颗粒体来模拟,是固体颗粒和液体的混合物,这种混合物被视为不可压缩流体,其边界可以是自由表面。

2 数值模拟方法可靠性分析

根据已有模型试验研究成果建立滑坡涌浪计算模型,对散粒体滑坡入水产生涌浪的过程进行数值模拟,以验证数值模拟方法的可靠性。

2.1 计算模型及网格划分

在长 10 m,宽 0.60 m,高 1 m 的矩形水槽内开展了散粒体滑坡涌浪试验研究^[11]。该试验的滑坡体材料为沙石颗粒(72%的颗粒粒径为 0.01~2 mm,18%的颗粒粒径为 2~5 mm,10%的颗粒粒径为 5~15 mm),配比后的滑坡体密度为 2 100 kg/m³,滑坡体的入水速度通过特制的滑动装置来控制,各项参数如图 1 所示,其中 h 为水深, v_s 为滑坡体入水速度, l_s 为滑坡体长度, s 为滑坡体厚度, α 为入水角度^[11]。

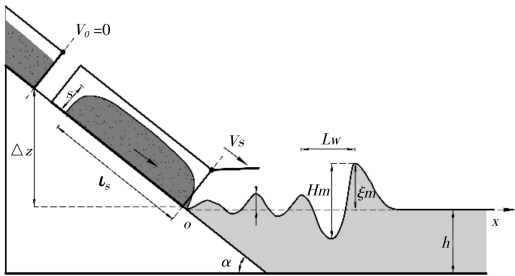


图 1 模型试验中各参数示意图

如图 2 所示,本算例的计算区域与上述模型试验一致,计算区域全部为四边形网格,网格间距为 20 mm,网格总数约 100 万;边界条件包括速度进口、压力出口和无滑移固壁边界;初始相为水、空气和滑坡体。现以试验^[11]中的一组试验参数值和数据作为数值模拟的依据,该组试验滑坡体下滑弗氏数 $F = 1.65$,滑坡体相对厚度 $S =$

0.23,水深 $h=0.3\text{ m}$,滑坡体下滑速度 $v_s=2.83\text{ m/s}$,滑坡体长度 $l_s=0.75\text{ m}$,入水角度 $\alpha=33^\circ$ 。

滑坡体的平均颗粒粒径 d 取 1.8 mm ,滑坡体紧密堆积体积分取 0.63 ,自然休止角取 34° 。

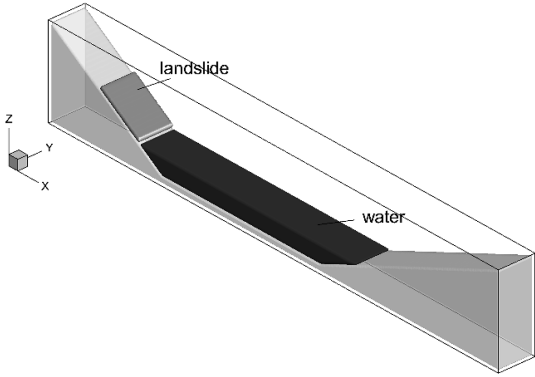


图 a 计算区域示意图

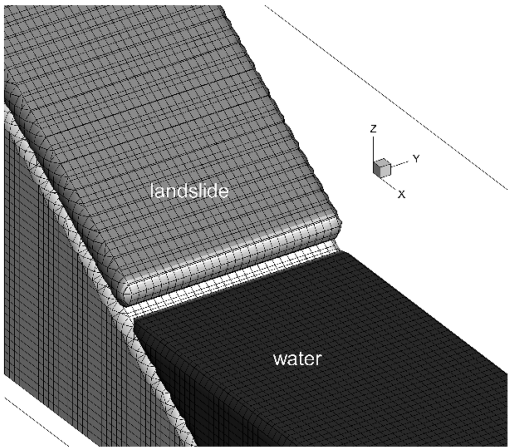


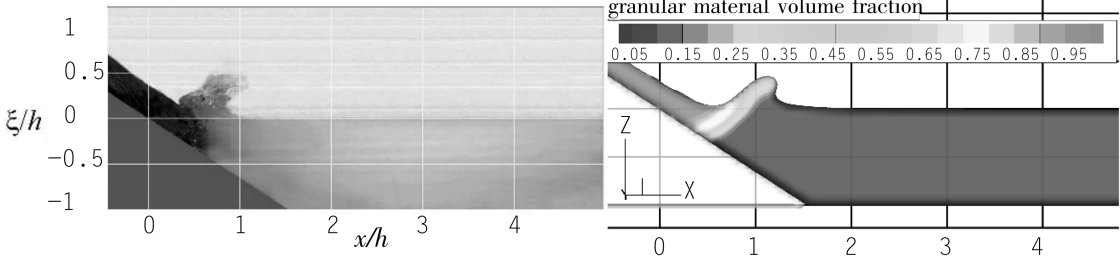
图 b 局部网格示意图

图 2 数值模拟计算区域及网格示意图

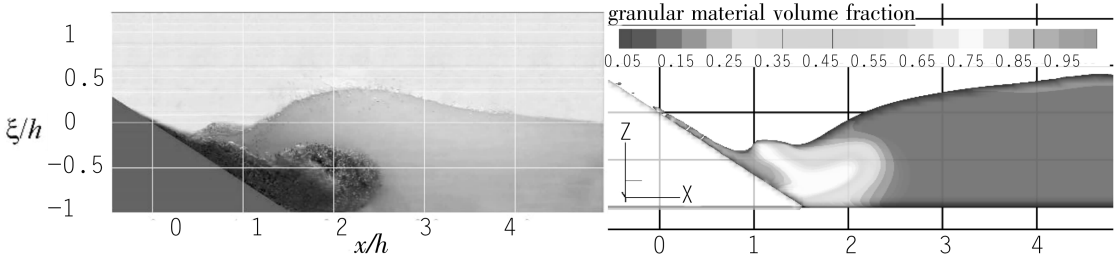
2.2 计算结果对比与分析

图 3(a)~3(c)左侧分别为模型试验在相对无量纲时间 $t^*=0.46$ 、 $t^*=2.52$ 和 $t^*=3.43$ 时的初始涌浪形态(以滑坡体与水面恰好接触的时刻为 $t^*=0$)。而图 3(a)~3(c)右侧分别选取了与试验^[11]时刻对应的三个数值模拟涌浪形态,从图 3(a) ($t^*=0.46$)可以看出数值模拟中的滑坡体冲击水面后,水体的运动趋势与试验得到的涌浪形态基本一致,但由于滑坡体冲击水面形成的薄水舌和溅起的水花属于强非线性水气二相流,在模拟这种水气间强烈混掺的情况时 VOF

法存在局限性,故未能模拟出溅射的水花部分;从图 3(b) ($t^*=2.52$)中可以看出当数值模拟的滑坡体完全滑入水中后,滑坡体的扩散形态与文献中的滑坡运动形态较为接近;由于 y 轴方向上数值模拟采用了对称边界条件,而文献中水槽两侧的钢化玻璃对涌浪传播起到了限制作用,所以从图 3(c) ($t^*=3.43$)中可以看到滑坡体堆积形态和最大波幅高度与模型试验相比基本吻合,但最大波幅出现的位置比试验传播的稍远。总体上看,数值模拟得到的滑坡体初始堆积形态与试验结果吻合较好,波幅计算精度能够满足要求。



(a) $t^*=0.46$



(b) $t^*=2.52$

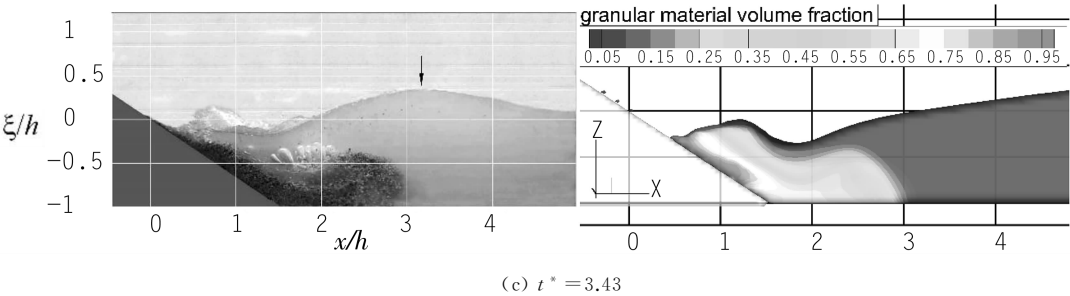


图 3 不同时刻下的涌浪形态对比^[11]

3 实际工程应用

某水电工程位于澜沧江一级支流的下游河段,是以发电为主的混合式开发水电站,属于典型的山区河流型水库。工程主要建筑物包括拦河大坝、泄水建筑物及引水发电建筑物等,水库总库容 3 403 万 m³,电站总装机容量 100 MW,为中等规模Ⅲ等水电工程。工程勘测阶段发现坝址上游左岸约 200 m 处有一古滑坡体(滑坡后缘高出正常蓄水位约 60 m),由于水库蓄水后可能会引起两岸山体地下水位抬升,导致岸坡岩土体强度降低,

从而诱发滑坡。故本文针对该水电工程库区蓄水后潜在的滑坡涌浪灾害开展了数值模拟研究。

图 4 分别给出了时刻为 1.5 s、3 s、4.5 s、7.5 s、10.5 s 和 13.5 s 时库区涌浪的波高变化过程(静止水面高程设置为 0)。当滑坡体滑入水中,在近场处形成近 30 m 高的初始涌浪($t=4.5$ s 时),随着涌浪向四周扩散传播,其沿滑坡体两侧河岸传播时呈现出明显的衰减趋势,但主波区波高仍可达十余米。当涌浪传播到对岸山体时,波幅衰减到十米内,但涌浪最大波峰离坝体较远。

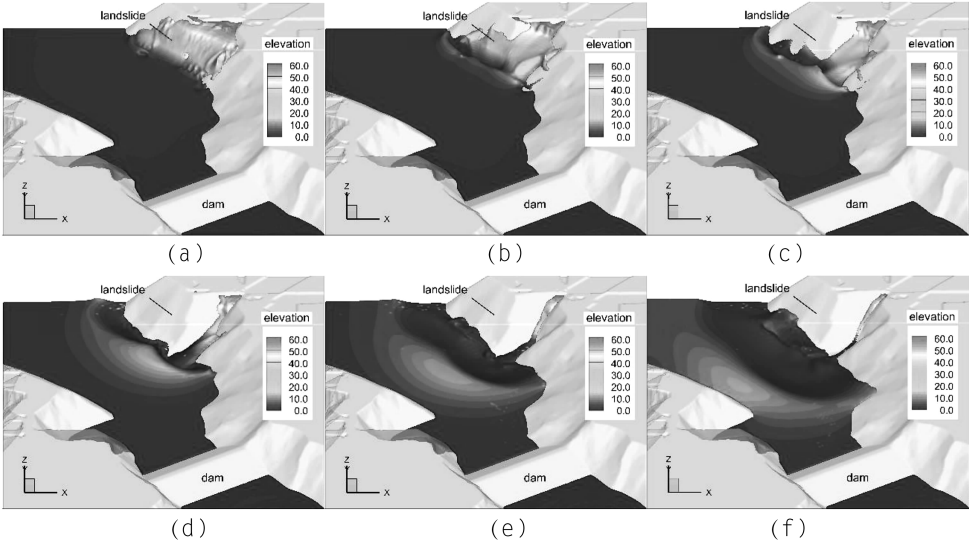


图 4 库区涌浪过程波高变化过程 (a) $t=1.5$ s; (b) $t=3$ s; (c) $t=4.5$ s; (d) $t=7.5$ s; (e) $t=10.5$ s; (f) $t=13.5$ s

图 5 给出了不同时刻下涌浪传播速度的变化过程。滑坡体在入水时具有较高的下滑速度,前缘入水时的速度可达 18 m/s,后缘在 7.5 s 后也基本滑入水中,入水时最大速度可达 24 m/s,具有较大的动能。初始涌浪形成后,其传播波速在库区可达 10~16 m/s,若有船舶经过,海事风险极大。

4 结 语

采用 RNG $\kappa-\epsilon$ 紊流模型与 VOF 方法对散粒体滑坡涌浪进行数值模拟。通过与已有文献的试验结果对比分析,发现数值模拟得到的滑坡体水下初始堆积形态与试验结果吻合较好,且波幅计算精度较高。基于此,建立了某山区河流型水电工程库区的三维模型,模拟了碎土石滑坡涌浪

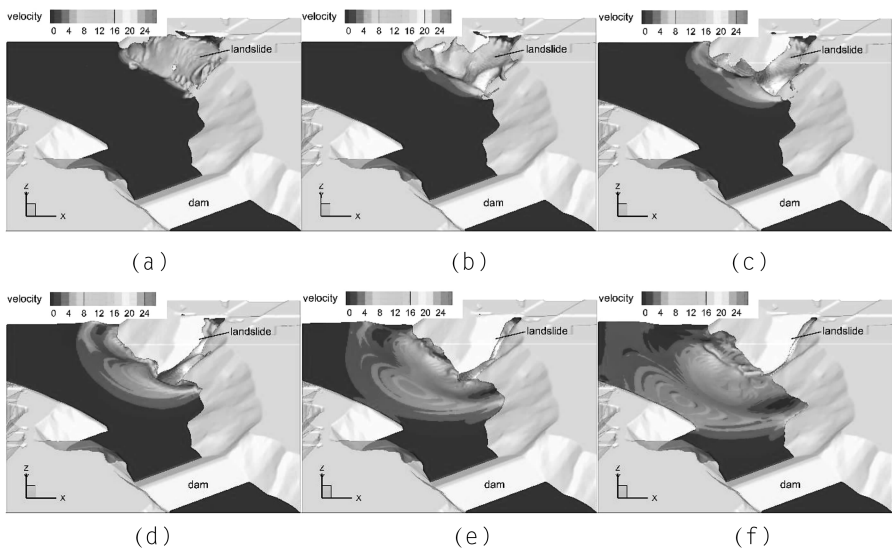


图 5 库区涌浪过程水面速度变化过程 (a) $t=1.5\text{ s}$; (b) $t=3\text{ s}$; (c) $t=4.5\text{ s}$;
(d) $t=7.5\text{ s}$; (e) $t=10.5\text{ s}$; (f) $t=13.5\text{ s}$

在库区内的生成与传播过程,并分析了涌浪的波幅和波速特征。研究表明,本文的数值模拟方法能够较好地模拟山区河流型水库内的碎土石滑坡涌浪生成与传播过程。通过数值模拟获得的涌浪波幅和传播速度等参数,可以为大坝安全评估和涌浪灾害影响范围预测提供依据,还可为通航河流航行船舶的避让范围提供参考。值得说明的是,将碎土石滑坡体视为固体颗粒和液体的混合物,在滑坡下滑的初始阶段能够较为真实地反映滑坡体在岸坡底部的堆积形态,但依然无法改变其流体的本质,在库区水面波动趋于稳定后,滑坡体会水平堆积于河道底部,但这并不影响前期涌浪生成和传播数据的采集。另外,VOF 方法在模拟强非线性水气二相流时具有局限性,滑坡体入水时产生的水舌飞溅较难模拟,在实际工程应用中可建立更加细致的三维模型和网格,尽可能确保滑坡体初始形态与实际情况吻合,从而进一步提高模拟计算精度。

参考文献:

[1] 聂世平,王志旭.长江流域滑坡分布与环境关系的探讨[J].水土保持通报,1987,7(6):29-31.
[2] 霍志涛,黄波林,王鲁琦,等.三峡库区三门洞滑坡潜在涌浪风险研究[J].灾害学,2019,34(4):107-112.
[3] 汪洋,刘继芝娴,张宇,殷坤龙,霍志涛.基于物理模拟试验的滑坡涌浪波幅预测研究综述[J].华南地质与矿产,2018,34(4):280-286.

[4] 岳书波,刁明军,王磊.滑坡涌浪的初始形态及其衰减规律的研究[J].水利学报,2016,47(6):816-824.
[5] Heller V, Hager W H. Wave types of landslide generated impulse waves[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(4): 630-640.
[6] 殷坤龙,刘艺梁,汪洋,姜治兵.三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J].地球科学:中国地质大学学报,2012,37(5):1067-1074.
[7] 孔增增.V型河谷滑坡冲击波最大坡面高度及爬高研究[D].湖南:长沙理工大学水利工程学院,2017:2-13.
[8] Huang B L, Yin Y P, Du C L. Risk management study on impulse waves generated by Hongyanzi landslide in Three Gorges Reservoir of China on June 24, 2015[J]. Landslides, 2016, 13(3): 603-616.
[9] 薛宏程,刁明军,岳书波,等.溢洪道出口斜切型挑坎挑射水舌三维数值模拟[J].水利学报,2013,(6):77-83.
[10] 刁明军,杨永全,王玉蓉,等.挑流消能水气二相流数值模拟[J].水利学报,2003,(9):77-82.
[11] Xue H C, Ma Q, Diao M J, Jiang L. Propagation characteristics of subaerial landslide-generated impulse waves[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019,19(1):203-230.

作者简介:

赵树正(2000-),男,甘肃兰州人,本科生,水利工程专业;
田宇霖(2000-),男,四川成都人,本科生,水利工程专业;
曹山(2000-),男,陕西西安人,本科生,水利工程专业;
薛宏程(1988-),男,新疆乌鲁木齐人,讲师,博士,硕士生导师,从事工程水力学与计算流体力学方面的研究。

(责任编辑:吴永红、卓政昌)