

基于分流比的复杂分汊河道滑坡涌浪远场传播计算方法

徐卫亚^{1,2}, 秦创创^{1,2}, 张贵科³, 邓韶辉³, 胡业凡^{1,2}, 张海龙³

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要:基于分汊河道的分流比理论,综合斜条分法和水阻力影响等经典滑速分析方法,提出一种适用于复杂分汊河道的涌浪远场传播计算方法。以雅砻江两河口水电站磨古倾倒滑坡体为例,考虑磨古倾倒滑坡体至两河口水电站坝前河道分汊的实际工况,应用所提出的方法分析两河口库区磨古倾倒滑坡体涌浪产生和传播特征,得到了二期蓄水位2785 m 工况下2种典型滑坡滑动模式涌浪的初始浪高、坝前浪高及大坝爬高。结果表明:滑坡沿折断带滑动时滑坡涌浪至大坝浪高为9.32 m;沿强弱倾倒分界面滑动时滑坡涌浪至大坝浪高为14.73 m。

关键词:分汊河道;分流比;涌浪传播;大坝浪高;磨古倾倒滑坡体

中图分类号:TU44 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0020-05

Calculation method for far-field propagation of landslide surge based on flow diversion ratio of a bifurcated river//XU Weiya^{1,2}, QIN Chuangchuang^{1,2}, ZHANG Guike³, DENG Shaohui³, HU Yefan^{1,2}, ZHANG Hailong³ (1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yalong River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: Based on the theory of flow diversion ratio in bifurcated rivers, integrating the classical slice velocity analysis methods such as the inclined slice method and the influence of water resistance, a calculation method for the far-field surge propagation in a bifurcated river was proposed. Taking the Mogu toppling landslide of the Lianghekou hydropower station in the Yalong River as an example, considering the working condition of the Mogu toppling landslide to the bifurcated river in front of the dam of the Lianghekou hydropower station, the generation and propagation characteristics of the toppling landslide surge were analyzed by the proposed method. The initial surge height, dam front surge height and dam climbing height of two typical landslide sliding modes were obtained under the condition of the second phase storage water level of 2785 m. The results show that the surge height of landslide surge is 9.32 m in front of the dam when the landslide slips along the fracture zone. When sliding along the strong and weak toppling interface, the surge height of the landslide surge is 14.73 m in front of the dam.

Key words: bifurcated river; flow diversion ratio; surge propagation; surge height of dam; Mogu toppling landslide

库岸滑坡失稳高速入水会产生巨大的冲击力,引起滑坡涌浪灾害链,因此研究库岸滑坡失稳后滑速及涌浪传播特征具有重要工程意义。西南地区高坝大库众多,涉水滑坡总量巨大,库区河道复杂、汊流稠密,准确分析预测库岸滑坡涌浪灾害链是一个关键工程问题^[1]。

滑坡涌浪的研究目前主要分为经验公式法、模型试验法和数值模拟法。数值模拟法涌浪结果直观但需要较为详细的地质资料^[2-3]。经验公式法分析

滑坡涌浪概念清晰、计算方便、应用广泛、工程认可度高。Noda^[4]基于线性化重力表面波理论,将滑坡入水模式简化为水平入水和竖直入水来计算涌浪的大小,并给出了初始浪高和各影响因素的关系图;潘家铮^[5]基于Noda的研究,在河道为平行陡壁的简单条件下考虑了波浪的反射与叠加,给出了涌浪计算的经典潘家铮算法;中国水利水电科学研究院参考了几个著名滑坡的涌浪试验资料和原型观测成果建立了滑坡涌浪的水科院经验算法;Slingerland

等^[6]认为滑坡失稳引起的最大涌浪高度的主要影响因素是滑坡体动能,给出了计算初始浪高的经验公式;黄锦林等^[7]采用3种常用涌浪经验算法预测了乐昌峡鹅公带滑坡涌浪高度,同时建立物理模型进行验证,结果表明潘家铮算法与模型试验结果更接近;殷坤龙等^[8-12]考虑滑坡运动的真实过程和水阻力对滑坡的实际影响,结合库岸滑坡水上及水下运动过程中的受力特征,运用动量定理及滑坡动力学等分析了初始浪高和远场传播浪高,对滑坡涌浪的产生、传播和衰减进行了系统的研究。上述方法从不同模型和假设出发分析了滑坡涌浪的产生和传播特征,但实际库区河道分汊众多,分汊口对涌浪远场传播特征往往影响巨大,而上述研究暂无有效考虑分汊河道涌浪传播的实际情况,因此研究分汊河道涌浪计算方法具有重要意义。

根据分汊河道分流比理论,综合前人关于滑速斜条分法和水阻力的研究,本文提出适用于复杂分汊河道的涌浪远场传播计算方法,并结合实例验证了该计算方法的适用性。

1 复杂分汊河道的涌浪分析方法

我国西南水利工程库岸滑坡所在河道往往复杂多变、分汊众多,水科院法、潘家铮法在解决复杂河道滑坡涌浪远场传播时往往假定涌浪只沿主河道传播,忽略了实际分汊河道的分流情况,因此涌浪的计算结果往往偏于保守。据此引入分汊河道的分流比理论,考虑涌浪远场传播时分汊口分流特征,提出了一种适用于复杂分汊河道的涌浪计算方法。

1.1 分汊河道分流比

分流比是计算分汊河道流量特征的一个重要参数,在解析解方面目前主要有等含量沙法和动量平衡法,其中后者误差较小、应用广泛。动量平衡法由童朝锋等^[13]提出,该理论将河道分汊口处的两分流水体视为满足动量守恒条件,根据动量守恒原理可得

$$Q_1 u_1 \sin \theta_1 = Q_2 u_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为左汊和右汊河道流量; u_1 、 u_2 分别为左汊和右汊河道流速; θ_1 、 θ_2 分别为左汊和右汊河道偏转角度。

将 $Q=Au$ (A 为过水断面面积)代入式(1)可得

$$\frac{Q_1^2}{A_1} \sin \theta_1 = \frac{Q_2^2}{A_2} \sin \theta_2 \quad (2)$$

令 $Q_1=n_1 Q_0$ 、 $Q_2=(1-n_1) Q_0$ (Q_0 为汊口分流前河道流量, n_1 为左汊河道分流比),代入式(2),在假定河道平均深度相差不大的前提下,根据河相关系相似原理,可得左汊河道分流比为

$$n_1 = \frac{\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1/2} \left(\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}\right)^{1/2}}{1 + \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1/2} \left(\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}\right)^{1/2}} \quad (3)$$

式中 B_1 、 B_2 分别为左汊和右汊河道宽度。

由式(3)可知,河道分流比主要受河道分汊角度和过水面积(河宽)影响,过水面积越大,对应的分流比越大;分汊角度越大,分流比则越小。

1.2 滑速计算的斜条分法

实际工程中常采用条分法计算滑坡的速度,该方法沿着水平方面和竖直方向对条块进行受力分析,认为水平加速度和竖直加速度成一定的比例关系,计算时忽略了滑块间的剪力作用。近年来,不少学者对潘家铮的条分法进行了修正,汪洋等^[8]将受力和平衡方程的建立修正为沿垂直滑带方向和平行滑带方向,修正的条分法更加符合滑坡实际运动状态。条块加速度为

$$a_{ix} = \left[\sum_{i=1}^k (U_i \sin \theta_i - c_i l_i \cos \theta_i) - \sum_{i=1}^k K_i (m_i g - U_i \cos \theta_i - c_i l_i \sin \theta_i) \right] / \sum_{i=1}^k m_i (1 - K_i \tan \theta_i) \quad (4)$$

其中

$$K_i = \frac{\tan \varphi_i \cos \theta_i - \sin \theta_i}{\tan \varphi_i \sin \theta_i + \cos \theta_i}$$

式中: a_{ix} 为条块水平加速度; U_i 为条块地面受到的平均静水压力; θ_i 为条块所处滑面与水平面倾角; m_i 为单个条块的质量; φ_i 为滑带动内摩擦角; c_i 为滑带动黏聚力; l_i 为滑体与滑面接触长度。

基于计算出的各条块加速度,根据加速度公式计算滑体在滑动距离 ΔL 后的水平向滑速:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2a_x \Delta L} \quad (5)$$

式中: a_x 为水平向加速度; v_0 为上一条块滑动速度。

在滑坡大规模运动过程中,认为滑坡水阻力主要是滑坡条块水下运动克服表面摩擦力做功:

$$R = \frac{1}{2} c_w \rho_f v_1^2 S \quad (6)$$

式中: c_w 为黏滞阻力系数; ρ_f 为浮密度,滑体的密度与水体密度之差; v_1 为水下运动条块的速度; S 为水下运动条块的迎水面积。

1.3 分汊河道涌浪分析方法

滑坡涌浪产生后沿河道传播,传至分汊口时发生分流,传统的潘家铮法无法解决分汊河道分流问题,将涌浪视作仅沿主河道传播。本文结合分流比理论,提出了一种适用于复杂分汊河道涌浪远场传播的计算方法:①根据式(3)计算每个分汊口左、右支汊的分流比;②根据滑坡及河道特征计算初始浪

高和传播浪高,当涌浪传播至分汉口时,赋予沿各支汉分流的权重系数,同时选择涌浪传播主汉流的浪高作为新河段的初始浪高,反复迭代计算直至传播到坝前。

1.3.1 初始浪高

岸坡发生水平运动、竖直运动时激起的初始浪高^[5]分别为

ξ₀/h = 1.17 v₂/√gh (7)

ξ₀/h = f(v₂/√gh) (8)

式中:h为当量水深,V形河谷一般取最大水深的1/2;v₂为滑体入水速度;

1.3.2 远场传播浪高计算

a. 距离滑坡x距离的大坝处的最大涌浪公式见文献[5]。当涌浪传至分汉口处,将主汉分流比乘上传播浪高,分汉口分流后传播浪高为

ηp = nξp (9)

式中:n为主汉分流比;ξp为分流前传播浪高。

b. 涌浪在大坝处的爬升高度为

Rp = [(√(π/(2βp)) - 1) cosγ + 1] η (10)

式中:η为坝前涌浪高度;γ为爬坡方位角;βp为大坝坡脚。

2 实例验证

2.1 工程概况

两河口水电站位于四川省甘孜藏族自治州雅江县境内,是雅砻江干流中游河段的龙头水库,库区有雅砻江干流与左岸一级支流鲜水河、庆大河。磨古倾倒滑坡体位于鲜水河左岸,距坝约3 km,分布高程约2650~3120 m,自上游向下游分为1、2、3区(图1),顺河宽约1500 m。倾倒体所在的左岸岸坡发育1~4号冲沟,地形完整性较差,由于河谷深切,坡表岩层因重力作用普遍发生倾倒弯曲,表部岩层倾角明显变缓,甚至有岩层折断现象。现有勘探揭示,岩层倾倒变形水平深度最深达97 m,变形体前缘局部已产生垮塌,局部已产生滑动。

磨古倾倒滑坡体规模巨大,总方量约为



图1 磨古倾倒滑坡体全貌

3300万m³,若出现失稳滑动,将造成滑坡涌浪灾害链,威胁大坝施工期及运行期工程安全及环境安全,研究磨古倾倒滑坡体不同滑动模式下的滑坡涌浪对两河口大坝的安全性具有重要意义。

2.2 滑动模式及参数确定

2.2.1 滑动模式的确定

根据磨古倾倒滑坡体工程地质现状,确定滑动模式如图2所示,磨古倾倒滑坡体分为沿折断带滑动、沿强弱倾倒体分界面滑动2种滑动模式,以两河口库区二期蓄水位2785 m为特征计算水位。

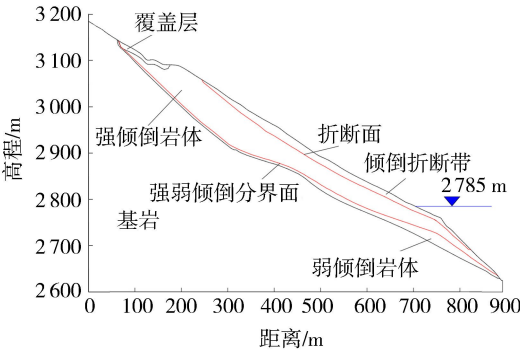


图2 磨古倾倒滑坡体变形破坏模式

2.2.2 主要计算参数的选择

滑坡运动时滑带强度参数的取值往往对滑速和涌浪结果产生决定性影响。采用静止状态下的滑动带残余抗剪强度参数计算得到的速度与滑程往往与实际情况相差甚远,多数学者认为滑坡滑动时滑带的抗剪强度参数要小于静止状态下的抗剪强度参数。如Togo等^[14]通过高速环剪试验发现,在试样剪切位移较小时会出现峰值摩擦系数,但随着剪切位移的增大摩擦系数逐渐衰减至残余值。Campbell等^[15]认为表观摩擦系数随滑动速度的增大而增大,摩擦阻力的减小也能使滑坡能够滑得更远。

基于雅砻江两河口磨古倾倒滑坡体滑带土试验结果及极限状态反演成果,确定滑带土的强度参数,即折断带内聚力为40 kPa,内摩擦角为25.5°,强弱倾倒体分界面内聚力为50 kPa,内摩擦角为31.0°,以此为基础进行动强度参数折减,折减系数参考小湾荒田滑坡滑动时内摩擦角(21.5°)、新滩滑坡滑动时内摩擦角(15.5°),同时基于Scheidegger^[16]统计33个滑坡得到的超大型滑坡滑道上的平均摩擦系数随滑坡体积的函数关系,计算得到了磨古倾倒滑坡体的滑带参考内摩擦角取值为17.2°,综上确定了滑带动强度参数的折减系数为60%,滑动时黏聚力忽略不计,即天然状态沿折断带滑动时滑带内摩擦角为15.3°,沿强弱倾倒体分界面滑动时滑带内摩擦角为18.6°。

对磨古倾倒滑坡体2种滑动模式进行条分、条

分块数为 64;滑带土天然容重为 24.0 kN/m³;饱和容重为 25.0 kN/m³;滑坡体滑带长度为 808 m;沿折断带滑动滑体平均厚度为 15.04 m,滑带平均倾角为 31.7°;水下运动黏滞阻力系数为 0.18;河道反射系数取 0.9;大坝坡脚为 26.6°;河道当量水深为 84.1 m;滑坡距第一个分汉口 1.5 km,距第二个分汉口 3.0 km。

2.3 滑速计算

磨古倾倒滑坡体岩土体的连续性较好且滑带倾角较小,计算滑速时假定滑出滑床上的滑体仍与其后的滑体一同滑动,计算结果如图 3 所示。

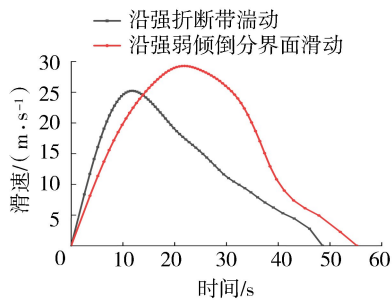


图 3 磨古倾倒滑坡体滑速变化曲线

磨古倾倒滑坡体经历滑坡启动、加速下滑至最大滑速、逐渐减速至静止 3 个过程。如图 3 所示,磨古倾倒滑坡体沿折断带滑动滑速在 12 s 左右到达峰值,为 25.23 m/s;沿强弱倾倒体分界面滑动滑速在 22 s 左右到达峰值,为 29.28 m/s,后者滑速到达峰值较前者更晚,且数值更大。分析认为沿强弱倾倒体分界面滑动的失稳方量较大,滑动面也更长,因此峰值速度呈现延迟和偏大特征。

2.4 涌浪传播分析

2.4.1 计算分流比

两河口库区雅砻江河道支流众多,磨古倾倒滑坡体位于鲜水河左岸,如图 4 所示,下游约 1.5 km 处与雅砻江主汉合流后,于坝前与庆大河交汇,河道的分汉对涌浪远场传播影响较大。采用提出的复杂分汉河道的涌浪方法进行涌浪远场计算。磨古倾倒滑坡体失稳后,引起的涌浪在经过第一个分汉口处根据鲜水河分流特征进行分流,继续沿主汉进行传

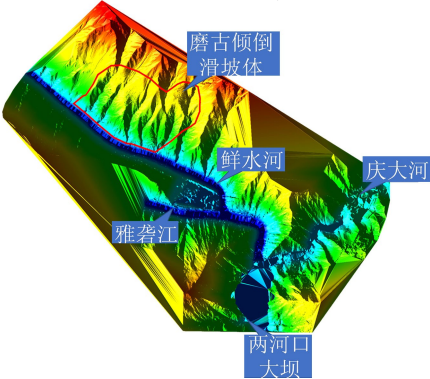


图 4 两河口库区三维可视化模型

播,约 1.5 km 后在庆大河分汉口完成第二次分流,随后在坝体上方爬坡。

根据两河口水电站二期蓄水位工况 2 785 m 及库区河道分流情况计算分流比,假定沿顺河向左侧为左汉,右侧为右汉。认为第一次鲜水河和雅砻江分流左汉为主汉,认为第二次雅砻江和庆大河分流右汉为主汉,根据式(3)计算两次分流的主汉分流比见表 1。

表 1 两河口库区分汉河道分流比

计算参数	主汉宽度/m	主汉偏转角/(°)	主汉分流比
第一次分流	437	80	0.534
第二次分流	622	102	0.895

2.4.2 涌浪沿程传播计算

选取两河口水电站二期蓄水工况,基于本文提出的复杂分汉河道的涌浪分析方法,计算了磨古倾倒滑坡体涌浪的产生和传播特征。

如图 5 所示,磨古倾倒滑坡体失稳滑动产生的涌浪沿鲜水河-雅砻江传播,其中沿强弱倾倒分界面滑动失稳方量更大,传播浪高更大,2 种滑动模式下在鲜水河和雅砻江第一次分汉口处涌浪高度发生急剧衰减。传播至坝前约 3 km 时,在第二次雅砻江和庆大河分汉口处则衰减不明显,分析原因为主汉雅砻江河道分流比较大,涌浪主要沿雅砻江传播,而庆大河分流作用不明显。

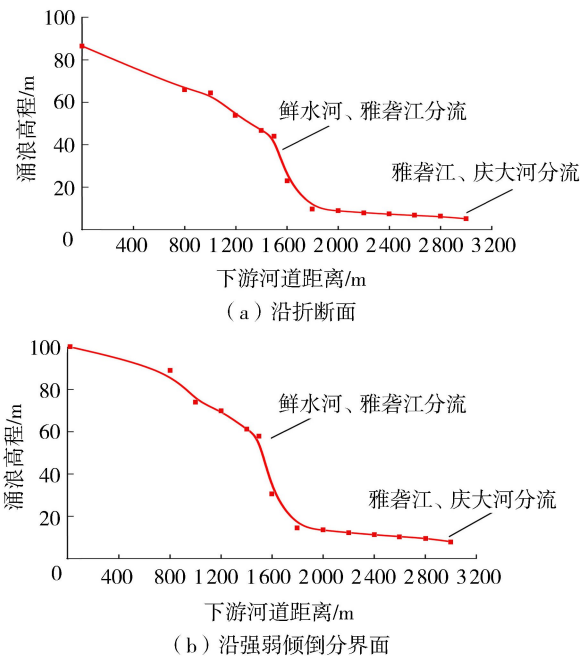


图 5 滑动沿程传播浪

2 种滑动模式的涌浪特征计算结果见表 2,磨古倾倒滑坡体沿强弱倾倒体分界面滑动的涌浪较大,坝前浪高为 8.01 m,在两河口大坝上的爬高达到了 14.73 m。

表2 磨古倾倒滑坡体涌浪计算结果

滑动形式	初始浪高/m	坝前浪高/m	大坝浪高/m
沿下部含砾粉土层滑动	86.49	5.07	9.32
沿强弱倾倒体分界面滑动	100.36	8.01	14.73

3 结 论

- a. 在分汊河道分流比的基础上,综合滑速斜条分法和水下阻力的影响,建立了适用于复杂分汊河道的滑坡涌浪计算方法,并结合雅砻江两河口磨古倾倒滑坡体的分析实例,验证了该方法的适用性。
- b. 磨古倾倒滑坡体经历滑坡启动、加速下滑至最大滑速、逐渐减速至静止 3 个过程,滑坡沿折断带滑动时滑速为 25.23 m/s;沿强弱倾倒体分界面滑动时滑速为 29.28 m/s,呈现高速滑动的特征。
- c. 雅砻江两河口水电站磨古倾倒滑坡体涌浪远场传播时,共经历两次分流过程,其中第一次鲜水河分汊传播浪高急剧衰减,第二次庆大河分汊口衰减作用不明显,滑坡沿折断带滑动时滑坡涌浪至大坝浪高为 9.32 m;沿强弱倾倒分界面滑动时滑坡涌浪至大坝浪高为 14.73 m。

参考文献:

[1] YAN Long, XU Weiya, WANG Huanling, et al. Drainage controls on the Donglingxing Landslide (China) induced by rainfall and fluctuation in reservoir water levels [J]. Landslide, 2019, 16:1583-1593.

[2] 司鹏飞,田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (6) : 28-32. (SI Pengfei, TIAN Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6) : 28-32. (in Chinese))

[3] 赵兰浩,侯世超,毛佳. 库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (2) : 79-86. (ZHAO Lanhao, HOU Shichao, MAO Jia. Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2) : 79-86. (in Chinese))

[4] NODA E. Water waves generated by landslides [J]. Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 1970, 96(WW4) : 835-855.

[5] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.

[6] SLINGERLAND R, VOIGHT B . Evaluating hazard of landslide-induced water waves [J]. Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, 1982, 108 (4) : 504-512.

[7] 黄锦林,张婷,李嘉琳. 库岸滑坡涌浪经验估算方法对

比分析[J]. 岩土力学, 2014, 35 (增刊 1) : 133-140. (HUANG Jinlin, ZHANG Ting, LI Jialin. Comparative analysis of empirical estimate methods of reservoir bank landslide surge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (Sup1) : 133-140. (in Chinese))

[8] 汪洋,刘波,汪为. 滑坡速度计算的改进条分法[J]. 安全与环境工程, 2004 (3) : 68-70. (WANG Yang, LIU Bo, WANG Wei. Improved slice method for landslide speed calculation [J]. Safety and Environmental Engineering, 2004(3) : 68-70. (in Chinese))

[9] 代云霞,殷坤龙,汪洋. 滑坡速度计算及涌浪预测方法探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29 (增刊 1) : 407-411. (DAI Yunxia, YIN Kunlong, WANG Yang. Discussion on method of landslide velocity calculation and surge prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (Sup1) : 407-411. (in Chinese))

[10] 汪洋. 水库库岸滑坡速度及其涌浪灾害研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2005.

[11] 汪洋,殷坤龙. 水库库岸滑坡的运动过程分析及初始涌浪计算 [J]. 地球科学, 2003 (5) : 579-582. (WANG Yang, YIN Kunlong. Analysis of movement process of landslide in reservoir and calculation of its initial surge height [J]. Earth Science, 2003 (5) : 579-582. (in Chinese))

[12] 汪洋,殷坤龙,刘艺梁,等. 考虑水阻力的涉水滑坡运动速度计算模型研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20 (6) : 903-908. (WANG Yang, YIN Kunlong, LIU Yiliang, et al. Model test speed model of fording landslide taking intoaccount water resistance [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6) : 903-908. (in Chinese))

[13] 童朝锋,严以新,孟艳秋,等. 分汊河道分流比估算方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (6) : 7-9. (TONG Chaofeng, YAN Yixin, MENG Yanqiu, et al. Methods for evaluating flow diversion ratio of bifurcated rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6) : 7-9. (in Chinese))

[14] TOGO T, SHIMAMOTO T, MA S, et al. High-velocity frictional behavior of Longmenshan fault gouge from Hongkou outcrop and its implications for dynamic weakening of fault during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Earthquake Science, 2011, 24(3) : 267-281.

[15] CAMPBELL C S, CLEARY P W, HOPKINS M. Large-scale landslide simulations: Global deformation, velocities and basal friction [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B5) : 8267-8283.

[16] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. Reck Mech, 1973, 5: 231-236.

(收稿日期: 2021 - 08 - 19 编辑: 刘晓艳)