

# 黄河三峡库区滑坡诱发的涌浪预测方法

胡 炜, 张茂省, 朱立峰, 孙萍萍, 程秀娟, 贾 俊

HU Wei, ZHANG Mao-sheng, ZHU Li-feng, SUN Ping-ping, CHENG Xiu-juan, JIA Jun

国土资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR/Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China

**摘要:**黄河三峡库区的涌浪灾害风险不容忽视,经验公式是宜优先考虑的涌浪快捷评价方法。对黄河三峡焦家崖头 2012 年 2 月 7 日的黄土滑坡和涌浪进行调查,分析了黄土滑坡及涌浪的特征。采用 9 种涌浪经典计算公式,计算了涌浪的初始浪高、对岸爬高等特征参数。与调查结果对比表明,采用美国土木工程师协会推荐法、水科院算法、Huber and Hager 模型和潘家铮算法获取的焦家崖头黄土滑坡诱发的涌浪特征参数均接近实际,其确定的校正系数分别为 2.14、1.92、0.6 和 0.66,对比考虑安全性和经济性后推荐采用潘家铮算法预测黄河三峡的涌浪。

**关键词:**黄土;滑坡;涌浪;灌溉;黑方台

中图分类号:P642.13<sup>+</sup>1:P642.22 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2013)06-0861-07

**Hu W, Zhang M S, Zhu L F, Sun P P, Cheng X J, Jia J. Research on prediction methods of tsunamis induced by landslides in the Three Gorges Reservoir area of the Yellow River. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(6):861-866**

**Abstract:** The risks of tsunamis in the Three Gorges Reservoir area of the Yellow River cannot be overlooked. Empirical equations are efficient evaluation methods which should be considered as a priority. Field survey was carried out on the loess landslide and tsunami which occurred in Jiaojiayatou in the Three Gorges Reservoir area of the Yellow River on February 7th, 2012. Then features of the loess landslide and tsunami were analyzed. Nine classical equations for landslide-triggered tsunamis were adopted to calculate characteristic parameters of the tsunami, including initial surge height and run-up height on the opposite bank. Compared with field survey results, characteristic parameters of the tsunami derived by empirical equations, including ASCE recommended method, method of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Huber and Hager model and Panjiazheng method, are close to those of the real model. The verification coefficients are 2.14, 1.92, 0.6 and 0.66 respectively. After comprehensive comparisons of safety and economical efficiency, Panjiazheng method is recommended to predict similar hazards in the Three Gorges Reservoir area of the Yellow River.

**Key words:** loess; landslide; tsunami; irrigation; Heifangtai

滑坡诱发的涌浪是滑坡灾害链的重要组成部分,很多涌浪造成的灾害甚至比滑坡灾害本身要严重得多,其中最著名的当属意大利 Vajont 水库滑坡诱发的涌浪<sup>[1]</sup>。因此,只有合理评估涌浪风险才能准确地评估地质灾害风险,避免不必要的损失。

涌浪评估有多种方法,概括起来可分为解析法、数值模拟法、物理模拟法、原型资料校正法及经验公式法五大类。其中,解析法理论严谨,但计算繁琐且

适用性差。数值模拟法可以快速地计算涌浪的特征参数,但迄今商业化的软件很少,不便应用。物理模拟法主要指基于相似原理的室内模型试验,试验结论的参考价值高,但花费昂贵。数值模拟和室内模型试验均存在参数取值和模型边界确定等难点,且受缩尺效应的制约,模拟结论与实际会有所出入。因此,张倬元等<sup>[2]</sup>提出利用原型观测资料来校正计算公式,从而预测同类型的滑坡涌浪的观点。经验公式

收稿日期:2013-03-25;修订日期:2013-05-05

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212011014024)、国家科技支撑计划课题(编号:2012BAK10B02)

作者简介:胡炜(1985-),男,硕士,研究实习员,从事水工环地质调查与研究。E-mail:whwhuhw@hotmail.com

法是在对一类问题进行理论和试验研究的基础上总结出的,带有一定普遍意义的数学表达。与其余 4 种方法相比,经验公式法简单实用,是宜优先考虑的一种快捷评价方法。

黄河三峡库区建成于 20 世纪 60 年代,此后库区产生了一系列的环境地质问题,其中包括滑坡诱发的涌浪灾害,最具代表性的就是甘肃八盘峡库区焦家崖头的滑坡和涌浪。自 20 世纪 80 年代以来,焦家崖头发生了 10 余次高位剪出的高速黄土滑坡,滑坡不仅发生频次高,且多次冲入黄河八盘峡库区激起涌浪,时常威胁库区的安全运营和沿岸人民的生命财产安全。

本文以发生在 2012 年 2 月 7 日的焦家崖头滑坡和涌浪为研究对象,通过及时的灾后应急调查,获取了难得的原型数据,分析了滑坡和涌浪的特征。选择 9 个涌浪计算公式来计算焦家崖头涌浪的特征参数,并与实测值进行对比,优选经验公式,获取校正系数,为今后类似灾害的预测预报工作提供服务。

### 1 滑坡及涌浪特征

甘肃永靖县黑方台是在黄河四级阶地上堆积的黄土塬,其地层由新至老分别为上更新统风积黄土(Q<sub>3</sub>)、中更新统冲积粉质粘土和砂砾石(Q<sub>2</sub>)、白垩系河口群砂泥岩互层(K<sub>1</sub>hk),如图 1 所示。焦家崖头位于黑台南缘最陡坡段处,斜坡高约 130m,坡体总体呈上凹下陡(图 2),上部黄土段坡

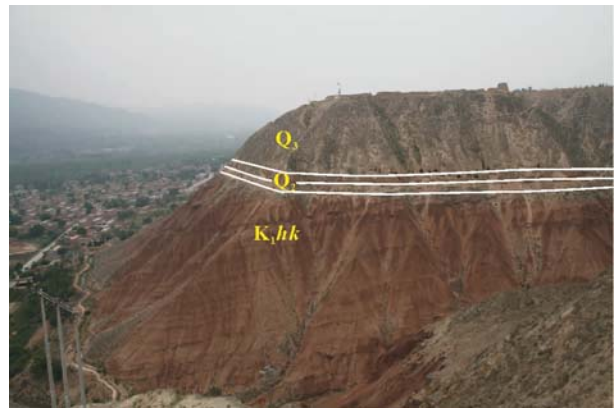


图 1 黑方台地区典型地层(地层代号见正文)  
Fig. 1 Typical stratigraphy of Heifangtai

度约 32°,下部基岩段坡度约 43°。坡脚为盐兰公路,宽仅 10m 左右,公路外侧为黄河八盘峡库区,宽 200m,深 20m。该段斜坡发生过多多次高位滑动,其中编号为 JH13 的滑坡于 2012 年 2 月 7 日下午 16:30 左右发生滑动,滑坡体长 120m,宽 100m,平均厚度 10m,体积约 12×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,滑向 105°,滑坡后壁圈椅状形态明显,周界清晰(图版 I-A)。滑动后,滑床上残存滑体很少,滑体多解体为散体粉状,堆积体下部土体呈现流塑状态,表明土体强度锐减,产生高速滑坡。

滑体到达坡脚后,体积约 1×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> 的少量滑体堆积于坡脚盐兰公路处,而体积约 11×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> 的大部分滑体携卷路过的 2 辆车冲入库区,激起涌浪。据实

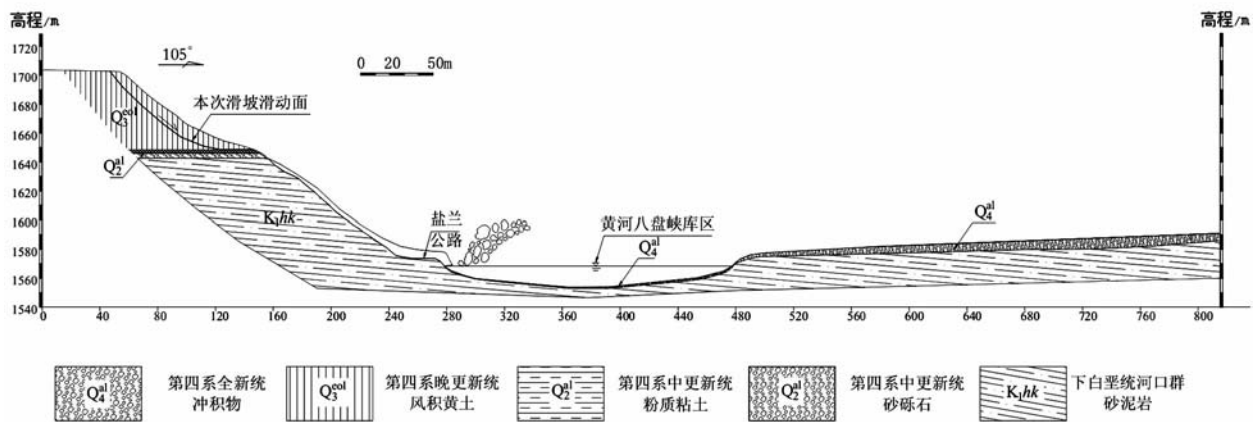


图 2 2012 年 2 月 7 日焦家崖头及黄河对岸剖面示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the cross section of Jiaojiaayatou and the opposite bank of the Yellow River

地调查,涌浪将库岸碗口粗的树木连根拔起,掀翻岸边单间房屋的铁皮顶盖(图版 I -B),在库区对岸果园的最大爬高达 6m(图版 I -C)。涌浪沿着对岸地势低洼的池塘上行,将池塘中平均厚度达 30cm 的冰层击碎(图版 I -D),可见影响范围直至距离河岸达 270m 远处(图 3)。

## 2 涌浪预测方法

### 2.1 涌浪影响因素分析

许多因素影响滑坡涌浪的特征<sup>[3-4]</sup>,可概括为滑坡因素、水文因素和地形因素 3 个方面。滑坡因素指滑坡的长、宽、厚等规模特征,滑体的物质组成及形态,滑坡与水体的相对位置关系,滑坡的运动模式和轨迹特点等,主要影响涌浪的强度和形态。水文因素指涌浪产生水域的水深、水面宽度、水流速度等,主要影响涌浪的传播衰减规律及形态。地形因素指岸坡坡角、走向、近岸地形等。

### 2.2 涌浪计算模型选取

滑坡入水速度是涌浪计算的前提参数之一。滑坡入水速度的计算主要有潘家铮法、美国土木工程师协会推荐法、变分法,以及基于 Sassa 三维滑坡运动模型的数值模拟法,这些算法均基于能量守恒定律,但考虑了不同的假设条件<sup>[5]</sup>。王家鼎等<sup>[6]</sup>的研究表明,焦家崖头滑坡高位剪出后以平抛运动方式坠入黄河与公路交界处。因此,若确定了滑坡剪出口的速度,则根据平抛运动公式可计算滑坡入水速度。

黄波林<sup>[7]</sup>系统总结了涌浪的计算方法,本次选择其中 9 个常用的涌浪模型进行计算,每个模型的要点总结如表 1 所示。模型中的通用参数符号如表 2 所示。

### 2.3 模型参数确定

本次滑坡和涌浪计算所需参数汇总如表 3 所示,其中剪出口速度引自文献[5]。

图版 I Plate I



A.2012 年 2 月 7 日焦家崖头滑坡全貌;B.涌浪侵袭后的库区对岸;C.涌浪对岸最大爬高;D.涌浪击碎的冰层

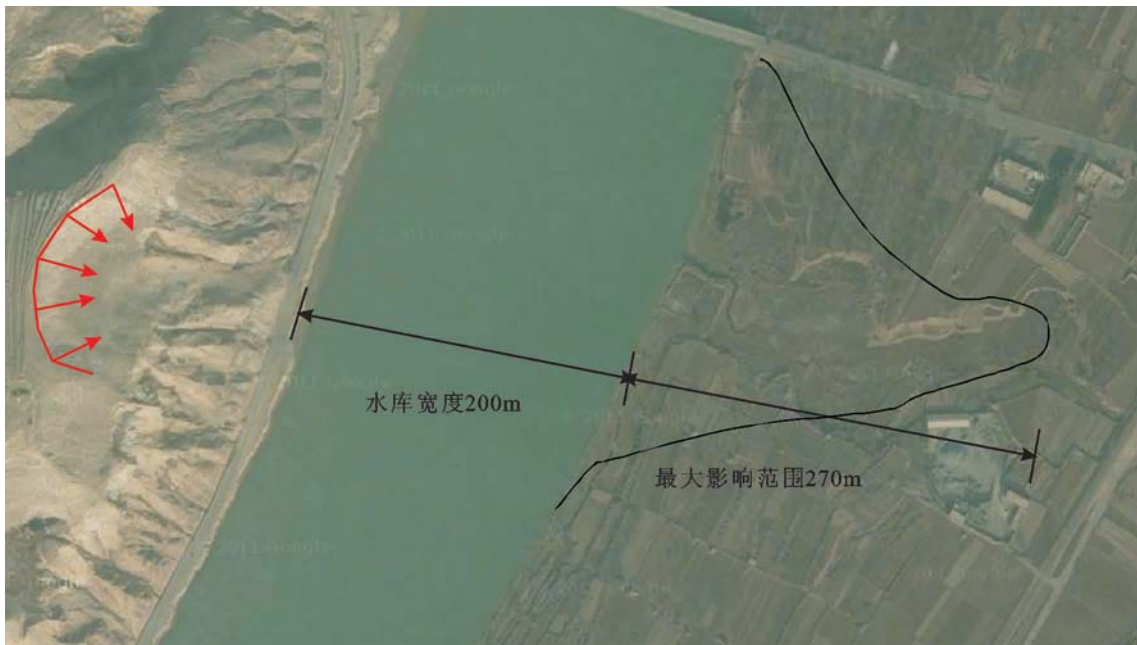


图3 涌浪影响范围

Fig. 3 Area affected by the tsunami

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 滑坡入水速度计算

采用下列式子<sup>[6]</sup>计算滑坡平抛运动的时间( $t$ )、水平距离( $S$ )、滑坡在剪出口的速度( $V_1$ )和入水速度( $V_2$ ),如表4所示。

$$t = \frac{V_1 \cdot \sin\theta + \sqrt{V_1^2 \cdot \sin^2\theta + 2gH}}{g} \quad (1)$$

$$S = V_1 \cdot \cos\theta \cdot t \quad (2)$$

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - 2g \sin\theta V_1 t + g^2 t^2} \quad (3)$$

由表4可见,剪出口到黄河与公路交界处的水平距离与变分法计算得到的滑体水平运动距离十分接近,而潘家铮算法的上下限跨度太大,美国土木工程师协会推荐法和数值模拟法相应的距离均偏小,滑体平抛触地点在坡脚,不足以诱发巨大的涌浪。综合上述解法,确定变分法的计算结果与实际接近,滑体入水点处于公路和黄河的交界点,入水速度为40.32m/s。

#### 3.2 涌浪计算

采用9种经验模型计算得到的焦家崖头滑坡涌

浪特征参数如表5所示。同时根据调查结果,选取对岸爬高作为校正点,求取各种方法的原型校正系数。

表5表明,各种方法求得的涌浪高度差别巨大。将滑坡入水点正对岸爬高作为对比点,调查所得高度为6m,上述结果中,Chow模型、Noda模型、Slingerland等模型、Synolakis模型,以及Hall等模型计算所得滑坡入水点浪高和对岸爬高均太大,与实际情况差别较大。美国土木工程师协会推荐法、水科院算法、Huber等模型法和潘家铮算法则与调查结果很接近,其校正系数分别为2.14、1.92、0.6和0.66。

#### 3.3 计算结果讨论

上述不同模型计算结果的差异明显,原因在于有不同的假设条件。由于将涌浪对岸爬高作为校正点,Noda模型和Slingerland等模型并未提供对岸爬高公式,因此仅对其它模型进行讨论。

Chow模型的涌浪对岸爬高公式为:

$$h = \frac{V_2^2}{2g}$$

表明Chow模型完全基于动能势能转化关系,一方面假设波浪在水面运移中没有能量损失,另一

表 1 常用的涌浪经验模型汇总  
Table 1 Frequently used empirical models for tsunami calculation

算 法	计 算 公 式 及 要 点
美国土木工程师协会 推荐法 <sup>[2]</sup>	据 $V^* = \frac{V_2}{\sqrt{gH_w}}$ 和 $\frac{H_s}{H_w}$ 查图, 确定波浪分区和 $\frac{h_{(0,t)\max}}{H_s}$ , 确定入水点最大波高 $h_{(0,t)\max}$ ; 由 $W_w$ 和 $H_w$ 计算 $X^* = \frac{W_w}{H_w}$ , 查图求取离入水点不同距离的浪高 $h_{(x)}\max$
潘家铮算法 <sup>[8]</sup>	据 $\frac{V}{\sqrt{gH_w}}$ 查图求取 $\frac{\zeta_0}{H_w}$ , 确定初始浪高 $\zeta_0$ ; 据 $c = \sqrt{gh} \sqrt{1 + 1.5\zeta_0/h + 0.5\zeta_0^2/h^2}$ 求取波浪传播速度, 确定传播时间; 据 $\zeta_{\max} = \frac{2\zeta_0}{\pi} (1+k) \sum_{n=1,3,5,\dots}^n \left[ k^{2(n-1)} \ln \left\{ \frac{l}{(2n-1)B} + \sqrt{1 + \left( \frac{l}{(2n-1)B} \right)^2} \right\} \right]$ 计算对岸最高涌浪
水科院算法 <sup>[9]</sup>	据 $\eta_{\max} = k \frac{u^{1.85}}{2g} V^{0.5}$ 计算入水点最大涌浪高度。 $k$ 为综合影响系数; $u$ 为入水速度 (m/s); 据 $\eta = k_1 \frac{u^n}{2g} V^{0.5}$ 计算距滑坡入水点 $x$ 处的涌浪高度, $k_1$ 为与 $x$ 有关的系数;
Huber 等模型 <sup>[10]</sup>	据 $H_{\max} = 0.88 \sin \alpha (\rho_s/\rho)^{0.25} (V/W)^{0.5} (H_w/x)^{0.25}$ 计算最大波高, $\rho$ 为水的密度, $x$ 为滑动距离 (m)
Noda 模型 <sup>[11]</sup>	据 $\eta = \frac{V_2}{\sqrt{gH_w}} H_s$ 计算入水点涌浪高度
R.L.Slingerl 等模型 <sup>[12]</sup>	据 $\log(\eta_{\max}/d) = a + b \log(0.5(L \cdot H_s \cdot W/H_w^3)(\rho_s/\rho)(V_2^2/g \cdot H_s))$ 计算入水点浪高, 其中 $a$ 和 $b$ 均为经验系数
Synolakis 模型 <sup>[13]</sup>	据 $R/H_w = 2.831(\cot \beta)^{0.5} \cdot (H/H_w)^{2.5}$ 计算对岸涌浪爬高, $R$ 为对岸涌浪爬高
Hall 等模型 <sup>[14]</sup>	据 $R/H_w = 3.1(H/H_w)^{1.5}$ 计算对岸爬高
Chow 模型 <sup>[5]</sup>	据 $h = \frac{V_2^2}{2g}$ 计算对岸爬高

注:  $V^*$ —无因次量;  $H_w$ —水深;  $W_w$ —水面宽度;  $\eta$ —滑坡入水点涌浪高度;  $\zeta_0$ —初始浪高;  $\zeta_{\max}$ —对岸最高涌浪高度

方面假设波浪触岸后的水体动能全部立即转化为势能, 水体立即停止。根据调查资料, 波浪爬高后还继续向外扩展了 270m, 具有很大的动能, 因此, 计算所得的对岸爬高误差巨大, 对于涌浪对岸爬高的计算是不合适的。

Synolakis 模型和 Hall 等模型的对岸涌浪爬高公式分别为

$$h/H_w = 2.831(\cot \beta)^{0.5} \cdot (H_b/H_w)^{2.5} \tag{4}$$

$$h/H_w = 3.1(H_b/H_w)^{1.5} \tag{5}$$

式中  $H_b$  为波高。由于 2 个模型基于各自的模型试验得出的经验系数, 与焦家崖头的滑坡及涌浪要素相差较大, 两者得出了过高的爬高值。

相较而言, 美国土木工程师协会推荐法、水科

表2 常用涌浪经验模型的通用参数符号  
Table 2 Parameter symbols for frequently used empirical models for tsunami calculation

滑体体积 $V/\times 10^4\text{m}^3$	滑体质心落差 $H/\text{m}$
长 $L/\text{m}$	滑面加权平均倾角 $\alpha/^\circ$
宽 $W/\text{m}$	水深 $H_w/\text{m}$
厚 $H_s/\text{m}$	水面宽度 $W_w/\text{m}$
滑体密度 $\rho_s/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	对岸坡角 $\beta/^\circ$

表3 涌浪计算参数  
Table 3 Parameters for tsunami calculation

	潘家铮算法	14.9~28
剪出口速度 $V_1$ $/\text{ms}^{-1}$	美国土木工程师协会推荐法	14.9
	变分法	18.04
	数值模拟	16.1
	平抛运动质心距水面落差 $H/\text{m}$	80
滑体在剪出口处的切线倾角 $\theta/^\circ$		0
滑体长度 $L/\text{m}$		120
滑体宽度 $W/\text{m}$		100
滑体平均厚度 $H_s/\text{m}$		10
滑体体积 $V/\times 10^4\text{m}^3$		12
滑体密度 $\rho_s/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		1.8
水深 $H_w/\text{m}$		20
水面宽度 $W_w/\text{m}$		200
滑面加权平均倾角 $\alpha/^\circ$		25.7
对岸坡角 $\beta/^\circ$		35
水科院算法入水点浪高综合影响系数 $k$		0.12
水科院算法距入水点 X 处的浪高系数 $k_1$		0.1
Slingerland 等模型系数 $a$		-1.25
Slingerland 等模型系数 $b$		0.71

院算法、Huber 等模型和潘家铮算法计算所得对岸爬高值与实际较接近,反映了焦家崖头滑坡及涌浪与这些经验算法的假设条件相适宜,也证实了这些算法的广泛适用性。为使今后采用公式法预测库区的涌浪既有一定的安全度,又不过高估计涌浪风险,推荐采用潘家铮算法计算。

#### 4 结论

(1)将潘家铮算法、美国土木工程师协会推荐法、变分法、数值模拟 4 种方法的计算结果与实际地形对

表4 滑体平抛运动运动学参数对比  
Table 4 Comparisons of kinematic parameters for horizontal parabolic motion of the sliding mass

	$t/\text{s}$	$S/\text{m}$	$V_2/\text{ms}^{-1}$
潘家铮算法	4.04	60.20~113.12	42.30~48.49
美国土木工程师协会推荐法	4.04	60.21	42.31
变分法	4.04	72.89	40.32
数值模拟	4.04	65.05	42.75

表5 各种算法涌浪特征参数汇总  
Table 5 Characteristic parameters of the tsunami calculated by all models

算 法	滑坡入水点 涌浪高度/m	对岸爬 高/m	实测对岸 爬高/m	校正 系数
美国土木工程师协会推荐法	10	2.8		2.14
水科院算法	19.8	3.13		1.92
Chow 模型	—	82.94		0.07
Noda 模型	28.8	—		—
Slingerland 等模型	163.32	—	6	—
Huber 等模型	12.28	10		0.60
Synolakis 模型	—	36.76		0.16
Hall 等模型	—	35.37		0.17
潘家铮算法	20	9.06		0.66

比,可得变分法求得的剪出口速度,据此计算滑坡入水速度较为合理,相应入水速度为 40.32m/s。

(2)9 种涌浪经验模型计算结果表明,美国土木工程师协会推荐法、水科院算法、Huber 等模型法,以及潘家铮算法计算结果较为合理,相应的校正系数分别为 2.14、1.92、0.6 和 0.66。综合考虑安全性和经济性后,推荐采用潘家铮算法作为今后同类型涌浪预测的计算方法。

(3)黄河三峡库区地质灾害防治中往往忽略了涌浪可能导致的灾害。在今后该地区的防灾减灾工作中,需将涌浪纳入到整个地质灾害链中开展风险评估工作。

致谢:本文撰写过程中得到伍法权、戴福初、裴向军等教授的大力指导,深表感谢。

## 参考文献

- [1]Muller L. The rock slide in the Vajont Valley[J]. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1964, 2: 148-212.
- [2]张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.
- [3]刘世凯.长江西陵峡新滩滑坡涌浪高度衰减因素初探[J]. *水利水电技术*,1987,(9):11-14.
- [4]Carl B Harbitz, Finn Lovholt, Geir Pedersen, et al. Mechanisms of tsunami generation by submarine landslides: a short review[J]. *Norwegian Journal of Geology*, 2006, 86: 255-264.
- [5]胡炜,张茂省,朱立峰,等.黑方台灌溉渗透诱发黄土滑坡的运动学模拟研究[J]. *工程地质学报*,2012,20(2):183-188.
- [6]王家鼎,肖树芳,张倬元,等.灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理[J]. *工程地质学报*,2001,9(3):241-246.
- [7]黄波林,陈小婷,殷跃平,等.滑坡崩塌涌浪计算方法研究[J]. *工程地质学报*,2012,20(6):909-915.
- [8]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.
- [9]黄种为,董兴林.水库库岸滑坡激起涌浪的试验研究[M]. *水利水电科学研究院研究论文第 13 集(水力学)*.北京:水利出版社,1983:157-170.
- [10]Huber A, Hager W H. Forecasting impulse waves in reservoirs[C]// *Dixneuvième Congress des Grands Barrages C*, Florence, Italy, Commission International des Grands Barrages, Paris, 31:993-1005.
- [11]Noda E. Water waves generated by landslides[J]. *Journal of the Waterways, Harbors, and Coastal Eng. Div. ASCE*, 1970, 96(4), 835-855.
- [12]Slingerland R L, Voight B. Occurrences, properties, and predictive models of landslide-generated water waves[C]// *Rockslides Avalanches*, B Voight., Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam, the Netherlands, 1980, 2: 317-397.
- [13]Synolakis C E. The runup of solitary waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 185: 523-545.
- [14]Hall J V, Watts J W. Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes[J]. *Tech. Memo. 33*, Beach Erosion Board, Office of the Chief of Engineers, U.S. Army Corps of Engineers.1953.
- ①黄波林,刘广宁,陈小婷,等.三峡库区高陡岸坡成灾机理研究续作评估报告.武汉:中国地质调查局武汉地质调查中心,2010.