

库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展

赵兰浩,侯世超,毛 佳

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:对近年来库区滑坡涌浪涉及的边坡失稳、滑动、涌浪产生和传播这 4 个阶段研究中采用的数值模拟方法的研究进展和发展趋势进行了综述,重点归纳总结了边坡滑动过程以及涌浪产生过程的数值模拟方法的研究成果,指出滑坡涌浪从库区边坡失稳到涌浪传播是一个完整连续的过程,今后需要在目前各个阶段独立研究的基础上融合固体力学和流体力学两类学科中的相关研究方法,建立库区滑坡涌浪全程数值模拟方法,实现滑坡涌浪的全过程模拟。

关键词:滑坡涌浪;库区边坡;边坡失稳;涌浪传播;数值模拟;综述

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)02-0079-08

Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts//ZHAO Lanhao, HOU Shichao, MAO Jia(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: A review is conducted of advances and developing trends over recent years in numerical methods for simulation of landslides and surges in four stages, including slope instability, slope sliding, surge generation, and propagation, in reservoir districts. The achievements in numerical methods for simulation of slope sliding and surge generation are summarized. It is pointed out that landslides and surges should be considered an integrated continuous process from the slope instability to surge propagation stages, and, based on current research of each stage, the relevant research methods of solid and fluid mechanics should be combined in future research, so as to construct numerical models for the entire simulation process of landslides and surges in reservoir districts.

Key words: landslide and surge; reservoir slope; slope instability; surge propagation; numerical simulation; review

水利水电建设的长足发展大大促进了社会的发展,但也带来一系列地质环境问题。水库的修建不可避免地会改变库区岸坡原有的自然地质条件,改变库岸岩土边坡的物理性质,进而影响边坡的稳定^[1]。库水对库岸已存在的不稳定地质体和滑坡、崩塌体会产生浸润和托浮作用,再加上大型水电站在运行过程中会造成高达数十米的水位涨落带,水位涨落频度加大,会对库岸边坡的稳定产生不利影响。此外,强震频发区潜在的地震威胁会进一步加剧库岸发生滑坡失稳的可能性。与普通滑坡不同的是,库岸边坡失稳后除了滑坡本身带来的灾害之外,还会产生严重的次生灾害,如激起破坏力极强的涌浪,尤其是近坝区的滑坡涌浪可能会对大坝的安全带来严重威胁。

国内外不乏水库岸坡发生失稳破坏并产生涌浪灾害的案例,如 1961 年 3 月柘溪水库塘岩光滑坡,165 万 m³的滑坡体冲入库区后产生了高达 21 m 的涌

浪,造成重大损失;1963 年 10 月意大利瓦依昂水库滑坡,左岸约 2.7 亿 m³的巨大山体在很短的时间内全部滑入库内,产生了巨大的空气冲击波,激起超过 250 m 的巨浪,导致 2 000 余人死亡的重大悲剧^[2-3]。

在国内外相继发生了严重的库区滑坡涌浪灾害后,滑坡涌浪问题得到了学界的高度重视并结合具体灾害案例展开了深入研究。滑坡涌浪问题涉及边坡失稳、滑动、涌浪产生和传播等过程,由于影响滑坡涌浪整个过程的因素十分复杂,涉及固体力学和流体力学,研究的难度较大。目前国内外采用的研究方法主要有经验估算法、模型试验法和数值模拟方法。随着计算机技术的飞速发展,数值模拟方法成为研究滑坡涌浪问题的重要手段,该方法具有可以准确、全面分析滑坡涌浪灾害及计算结果可视化程度高的优点,得到了广泛的应用,也取得了丰富的研究成果。本文针对库区滑坡涌浪问题涉及的库区边坡失稳、滑动、涌浪产生和传播 4 个阶段研究中采

用的数值模拟方法和取得的研究成果作一综述。

1 库区边坡稳定模拟方法

边坡稳定问题一直是工程界广泛关注的核心问题,对该问题的研究已经有上百年的历史,研究方法较多,研究技术成熟,成果丰硕。研究方法主要有传统分析方法和数值方法,数值方法主要有有限元法、边界元法、离散元法等^[4],应用最为广泛的为有限元法,其中最具有代表性的是有限元强度折减法,该方法由 Zienkiewicz 等^[5]在 1975 年提出,并在边坡稳定分析中得到广泛应用^[6]。然而,对水库滑坡的研究则始于 20 世纪 60 年代,在国内外相继出现灾难性岸坡失稳滑动,并造成巨大损失之后才真正受到重视。与常规边坡稳定分析不同,库岸边坡稳定性与库水水位涨落变化以及水流侵蚀密切相关,尤其是在库水位迅速下降的条件下,坡体内孔隙水压力不能随库水位下降同步消散,降低了边坡的安全稳定系数,增大了滑坡体的变形,因此必须考虑坡体内孔隙水压力对边坡稳定的影响。

考虑渗流作用下将有限元方法与极限平衡理论相结合是被广泛采用的方法,即首先通过有限元方法进行非稳定渗流计算,得到自由面和浸润线,计算渗透力,然后将所得渗透力参与到库区边坡稳定平衡计算中,通过极限平衡计算进行边坡稳定性判定。程心恕等^[7]在其研究中将有限元法与毕肖普法相结合进行了库区边坡稳定性的分析;刘英泉等^[8]将有限元运用到非稳定渗流的计算中,然后运用极限平衡法进行库区边坡稳定性的分析。由于极限平衡理论经过大量研究与应用已经积累了很多经验,发展较为成熟,渗流有限元计算和极限平衡理论的结合可以较为准确地对库区边坡稳定性进行分析。但该方法并不能反映岩土体实际的应力与应变变化规律,且只针对单个边坡进行分析,计算工作量大。

随着计算机技术的发展,很多学者对渗流计算和边坡稳定分析均采用有限元法,即分别建立数值模型,先运用有限元法进行渗流计算,在得出渗透力后,将其施加在边坡上,采用有限元强度折减法进行边坡稳定性计算,计算效率得到提高。李湛等^[9]基于此进行了渗流作用下边坡稳定分析计算,合理考虑了渗流对边坡稳定性的影响,其采用面力法和体力法两种等效方法计算得到渗透力,并通过实例计算与极限平衡理论计算结果进行对比,表明该方法是合理的。Huang 等^[10]考虑非饱和渗流的作用进行渗流有限元计算并结合有限元强度折减法判断库区边坡稳定性,并与极限平衡法的计算结果进行了对比,得到了较好的结果。Wang 等^[11]运用有限元

强度折减法分析了非饱和土质边坡的稳定性,并通过案例对比证明了土壤基质吸力的存在可以提高非饱和土坡的稳定性。

目前,考虑渗流作用进行边坡稳定计算时主要有两种方法,一种是先运用有限元法进行渗流场计算,得到的渗流力施加于边坡上,然后再结合边坡稳定分析理论进行稳定性判定,这种方法将渗流场计算与边坡变形计算分离开,二者单独进行计算,目前大多数研究人员均采用这种方法;另一种方法是渗流计算与边坡稳定计算耦合起来进行分析,采用非饱和土固结理论结合有限元强度折减法进行分析判定,但目前研究刚起步,还有待深入。周桂云等^[12]在此方面做了有益的尝试,通过建立固液两相介质固结方程($u-p$ 模型)与有限元强度折减法结合,实现了渗流、变形及稳定的统一分析,形成了一套有限元方法。这种耦合分析方法是未来的发展趋势,但目前发展不够成熟,需要进一步深入研究。

地震情况下库区边坡稳定分析更为复杂,现有方法大多是对地震荷载进行简化后直接作用于边坡,过于简单粗糙。针对地震作用下边坡动力稳定分析问题,戴妙林等^[13]提出了降强法的分析思路,通过降低材料抗剪强度进行静力分析,以此为基础,施加地震荷载进行动力分析,取得了很好的效果,为解决该问题提供了借鉴。

目前在库区边坡稳定模拟研究方面成果显著,研究较为深入,但也存在一些不足:①有限元强度折减法的失稳判据方面依然存在争议,在与渗流计算相结合的分析中采用何种判据合适尚待进一步探讨;②渗流与变形的耦合分析研究仍不够深入,缺少统一的数值分析模型;③在地震作用影响下,边坡内部产生超孔隙水压力,其对边坡的稳定性影响很大,但目前尚未有其变化规律的数值模拟研究。

2 库区滑坡运动过程模拟方法

运用常规的固体力学有限元法可以进行边坡稳定性的评判,但进行边坡滑动过程的动态模拟则并不容易。因为边坡失稳后坡体实际上处于无限流动状态,常规的固体力学有限元法不能进行正确求解,不能得到既满足平衡方程又满足屈服准则的解。目前大量的工作集中在对滑坡体稳定性的评价上,即主要回答“滑不滑”的问题,而对于“如何滑”的问题则研究相对较少且不够深入。

根据滑坡体的物理形态,大致可以分为松散堆积体和大块岩质滑坡体两类,大部分库岸滑坡体都是松散堆积体,部分块状岩质滑坡体在滑动(特别是高速滑动)过程中经过摩擦、碰撞等一系列过程

会粉碎成小块滑体。因此,目前关于库区边坡失稳滑动的研究大多集中在松散堆积体和块状滑坡体的滑动动态过程模拟方面。

2.1 松散堆积体滑动过程模拟

在松散堆积体滑坡滑动过程的模拟方面,国际工程地质与环境协会(IAEG)滑坡委员会指出其滑动行为呈现“流体化”的特点,如碎屑流和泥流等。邢爱国等^[14]也指出,国内外几乎所有的高速滑坡在远程阶段均会呈现“流体化”的运动特征。许多学者基于此,用离散元、非连续变形方法(DDA)、颗粒流等非连续介质数值模拟方法对坡体滑动过程进行了数值模拟。

离散元对于模拟非连续介质问题具有很大的优势,其在一定程度上允许离散体互相分离,因此可以较好地符合松散堆积体的滑动特征。离散元法又包含块体离散元法和颗粒离散元法。块体离散元法主要适用于模拟节理化岩体滑坡的力学性质,对于破碎岩体模拟等有较好的适应性。Luo 等^[15-16]基于离散元理论运用离散元程序 UDEC 研究了地震作用下滑坡的失稳破坏机理和滑动过程,取得了较好的效果。对于高速冲刷式滑坡,在运动过程中会发生冲击碰撞,离散成块状堆积体,程谦恭等^[17]在研究该类滑坡时采用离散元法模拟了运动的全过程,揭示了冲刷式滑坡运动的动力学机理。颗粒离散元法中颗粒按照单元形态主要有二维圆盘和三维小球,主要用来模拟分析细观尺度上颗粒的分布以及运动,可以用来分析岩土介质的变形破坏。周健等^[18]采用颗粒流程序 PFC 进行了滑坡过程的数值模拟,探讨了边坡土性对破坏形式的影响;杨庆华等^[19]用二维颗粒流数值模拟程序,探讨了松散堆积体在地震诱发作用下的崩塌过程与规律;Salciarini 等^[20]也用颗粒离散元方法进行了相关的研究。

除了离散元方法,石根华教授^[21]提出的非连续变形方法(DDA)可以反映大变形和考虑时间变量,对于模拟滑坡滑动过程具有很大优势,已被引入到边坡滑动过程的模拟研究中^[22-24]。

虽然离散元和非连续变形方法在离散体的运动模拟方面具有很大的优势,但是其具有尺寸限制而且对介质材料力学性质的考虑不够,为此,冯春等^[25]提出了以颗粒接触为基础的无网格法(PCMM),探讨了边坡的失稳形式并模拟滑坡运动过程。此外,Hungr 等^[26]基于流变学理论,采用“似流体”的概念开发了动态滑坡过程的模拟程序 DAN 和 DAN3D。这均是在滑坡体滑动过程模拟方面有意义的尝试。

2.2 块体滑坡滑动过程模拟

在滑坡灾害中,不乏大块岩质块体滑坡,因此,块体滑坡的研究也得到了重视。相对松散堆积体,块状滑坡在滑动中会发生变形甚至破碎,块体之间也存在相互作用,但并没有太多可用的模型和理论,研究难度相对较大。

吴风元等^[27]通过建立动力条分法模型,对块体滑坡的运动过程进行了数值模拟,实例应用表明该方法在块体滑坡的运动模拟中具有良好的效果。钟登华等^[28]基于运动学基本原理编制程序计算库区滑坡失稳运动中的各项参数并结合仿真模拟软件实现了滑坡运动过程的可视化,同时考虑了库水对滑坡运动过程的影响。还有许多学者将 GIS 技术引入到滑坡运动过程的模拟中,为块体滑坡运动过程研究拓展了思路^[29-30]。

综合各方面的研究来看,目前在滑坡运动过程的描述与模拟方面取得了很大的进展,采用了近些年渐渐发展起来的新方法,成功地模拟了不同类型滑坡体的运动过程,但是研究中还存在一些缺陷:①库岸滑坡的运动分为水上运动和水下运动,具有启动、运动、停止等过程,但大部分研究只考虑了水上滑坡运动过程的数值模拟,对于滑坡进入到库水后的运动过程较少涉及,而该过程涉及滑坡体与库水的相互作用,会影响滑坡的后续运动过程,因此同样需要考虑;②在滑坡涌浪问题中,相关研究均只是模拟滑坡滑动过程,对于涌浪产生和传播的模拟则显得无能为力。

3 涌浪产生与传播模拟方法

涌浪是库区滑坡产生的重要次生灾害,其影响范围和破坏强度要远大于滑坡,因此,涌浪的研究是库岸滑坡灾害问题研究中特别重要的一环。涌浪主要有产生、传播等过程。涌浪产生的研究在相当长的时间内基本停留在经验公式的水平上,研究方法以模型试验、经验公式估算(如美国土木工程学会法、潘家铮法、水科院经验公式法等)及统计回归分析为主。大量的研究基本都是在估算出滑坡体入水前的滑速后运用经验公式计算初始涌浪的各要素,在此基础上用计算流体力学方法求解涌浪的传播过程,事实上这只是在已知初始条件和边界条件的情况下求解计算流体力学问题。究其原因就是涌浪与滑坡类型密切相关,目前为止并没有统一的模型去解决这个问题。涌浪传播属于纯粹的计算流体力学问题,经过大量的研究已经有较多的模型可以直接应用。

3.1 涌浪产生过程模拟

涌浪产生的研究涉及滑坡体、库水与空气之间的相互作用,存在不同介质在空间几何上的相互浸入,模拟难度大,需要建立合适的数值模型来反应三者之间的耦合作用。Biscarini^[31]运用计算流体力学(CFD)方法模拟了滑坡体入水产生涌浪的过程,模拟中采用了综合方法,滑动过程中将滑体看作刚体,滑体入水后将滑体看做流体材料。李稳哲等^[32]运用有限体积法建立计算模型,并运用流体计算软件 FLUENT 结合动网格技术和 VOF 法对不同的滑坡模型产生的涌浪高度与压力场进行了对比分析,探讨了涌浪产生的机理。徐文杰^[33-34]运用 CEL 方法就滑坡体形状、体积等 5 个方面的要素对涌浪产生的影响进行数值研究,并结合试验结果等对比验证了 CEL 方法在滑坡涌浪研究中的适用性;但其研究主要是针对单个块体滑坡,并没有考虑散体滑坡。

自由面的追踪是涌浪产生模拟方面的一个重要的研究课题,准确捕捉流体的自由表面才能真实模拟涌浪的产生过程,这对涌浪的模拟至关重要。目前 VOF 法、SPH 法、MAC 法、LEVEL SET 方法等均被应用在该问题的研究上,并且取得了很好的效果。

VOF 法对于处理自由边界问题具有强大的优势^[35],对大变形等具有良好的适应能力,同时需要的存储量小,是国内外研究中广泛采用的方法。SPH 法即光滑质点流体动力学法,是一种无网格法,其用光滑质点模拟连续的流体介质,适合模拟高速滑坡引起的大型涌浪。LEVEL SET 方法引入了标记函数 Φ ,并可通过引入多个标记函数推广到多相流,建立多相流 LEVEL SET 方法。该方法求解较为方便,较容易处理复杂的界面以及自由面剧烈变化的情况。

宋新远等^[36-37]基于 Navier-Stokes 方程,采用 VOF 法模拟了涌浪的产生过程,模拟结果与试验结果和实例观测结果吻合较好。Yuk 等^[38-39]采用 VOF 法对滑坡涌浪产生等过程进行了模拟,对自由面进行了有效追踪。Abadie 等^[40]将空气、水和滑坡体都统一用牛顿流体和 Navier-Stokes 方程描述,并结合 VOF 法进行了涌浪产生模拟,其采用黏性罚函数法使得流体数学模型可以近似模拟刚性滑坡体的运动,并指出空气对滑坡体的运动同样存在较为显著的影响,但 Abadie 等^[40]研究工作只限于刚性滑坡体。Liu 等^[41]利用 VOF 法以及 LES 模型研究了三维规则块体下滑造成的水体爬坡和回落现象。袁晶等^[42]基于浅水波方程,在已知滑坡体运动方式的前提下通过动网格技术,模拟了可变网格下滑坡涌浪的产生与传播,并与试验数据进行了比对,表明动网格技术可较精确地模拟涌浪产生过程;Grilli

等^[43]和 Watts 等^[44]的研究工作同属此类范畴。Qiu 等^[45-47]通过运用 SPH 方法模拟了涌浪产生的过程,对涌浪自由面的情况进行了研究,与实例比较表明 SPH 法能够准确追踪自由面;Ataie-Ashtiani 等^[48]提出了 I-SPH 法,并成功模拟了刚性滑坡和可变形滑坡入水产生涌浪的过程,模拟结果与试验结果吻合。基于 Navier-Stokes 方程模型,任坤杰等^[49]运用 MAC 法进行了涌浪在垂面的仿真模拟,追踪了自由面的运动过程,探讨了涌浪横向传播规律。赵兰浩等^[50-51]提出了基于分步有限元法的 LEVEL SET 数值模拟方法,该方法可以较好地解决三维流体大幅晃动问题,并根据此方法将库岸失稳、坡体滑动、首浪产生等过程统一起来进行模拟,具有重要的意义。

在将边坡失稳和涌浪产生联合模拟尝试方面,Bosa 等^[52]利用浅水方程对瓦依昂水库滑坡涌浪进行了数值模拟,但没有考虑边坡的滑动过程,仅是用移动边界代替边坡滑动的效果;Quecedo 等^[53-55]运用有限元法对快速土质流态边坡的滑动及入水产生涌浪的过程进行了数值模拟,但没有涉及大块岩质边坡失稳的情况。这些尝试对于推动滑坡涌浪全过程分析具有重要的意义,值得在此方面开展更加深入的研究。

3.2 涌浪传播模拟

涌浪传播模拟研究已有大量研究成果,且有很多数值模型可供直接使用。在研究方法上,因为经验公式做了较多理想化假定,对计算结果的精度有一定影响,数值计算相比经验公式能更准确地模拟涌浪的传播。国内一般集中在波浪在库区和山区河谷内传播规律的研究,国外的研究范围更广,在库区、河谷、水下滑坡以及海底滑坡等领域的传播模拟均有涉及,成果更加丰富。

涌浪传播数值模型主要有 Navier-Stokes 方程模型、Boussinesq 方程模型、基于浅水波方程的模型等。表 1 给出了各类模型的特点和适用范围。

表 1 涌浪传播数值模型特点及应用

模 型	特 点	应用范围
Navier-Stokes 方程模型	计算精度高,但模型求解复杂	目前大多应用在理论研究方面,实际应用较少
Boussinesq 方程模型	可以较好地模拟波浪的各种变形,对波高等模拟效果较好	只限于模拟浅水区的涌浪,对于深水区的滑坡涌浪模拟精度不高
基于浅水波方程的模型	对于模拟涌浪的传播过程效果较好,但较难得到解析解	浅水区的流体运动,应用范围较为广泛

徐波等^[56]基于 Navier-Stokes 方程模型,利用 FLOW3D 软件,采用 VOF 法模拟了三维宽广水域上涌浪的产生与传播,与试验结果比较表明,该数值模型能够较好地模拟涌浪产生与传播过程,但忽略了

滑块形式对涌浪的影响,模拟精度尚需提高。基于浅水方程, Bosa 等^[57]建立 2DH 数值模型模拟了 Vajont 水库滑坡引起的涌浪和漫顶后在峡谷里的传播情况,结果表明,大型滑坡引起的冲击波在广大的自然域里的传播二维模型可以获得合适的模拟结果,避免了复杂的三维建模。Ataie-Ashtiani 等^[58]基于二维四阶 Boussinesq 方程模型对 Maku 和 Shafa-Roud 库区的涌浪浪高、波浪爬高、最大浪高等要素进行了模拟研究,为进一步评估库区潜在滑坡引起的涌浪灾害提供了参考;Ataie-Ashtiani 等^[59]的研究也采用了类似方法。

此外,王世昌等^[60]通过二次开发 GEO-WAVE 软件,建立 FAST 系统研究了涌浪的传播与衰减规律,并建立了涌浪预警系统,具有很好的应用前景。Huang 等^[61]运用 GEOFLOW 模拟了涌浪的传播过程,对涌浪传播规律进行了探讨。姜治兵等^[62]采用求解 DIF 方程的方式建立滑坡涌浪数值模型,并通过新滩滑坡进行了验证;但是其假设滑坡体为固定形状的单一块体,忽略了大块岩体滑坡体的形状对涌浪产生的影响。Shen 等^[63]运用两方程 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟了椭圆余弦波的传播过程,其中用 VOF 法处理波浪自由面问题,模拟结果与试验结果吻合。Heidarzadeh 等^[64]采用 TUNAMI-N2 数值模型模拟了海底滑坡产生的海啸的传播;Ataie-Ashtiani 等^[65]通过 FUNWAVE 模型研究了涌浪传播的各要素,但通过经验公式计算确定模拟的初始条件,研究精度不够。

可见,近年来数值模拟方法在涌浪产生和传播方面的研究取得了较大的进展,但难点问题依然没有攻克。①在产生涌浪的滑坡体设置方面,大多数研究直接用高度简化的几何刚体代表滑坡体,避免了复杂的滑坡体建模,虽然有助于研究涌浪的产生和传播机理,但在实际应用方面精度是远远不够的;②松散堆积体滑坡引起的涌浪国内外的研究均较少涉及,但实际的滑坡灾害却以松散堆积体居多;③研究以二维模型居多,而二维模型在横向上对涌浪的产生与传播都有一定的限制。

4 研究展望

数值模拟方法是求解滑坡涌浪问题的强有力手段,目前针对滑坡涌浪各个过程的数值模拟研究已经取得了较大的进展,成果也相对丰富,但依然存在较多问题和难点,在目前的研究基础上尚需在以下方面开展进一步的研究:

a. 在库区边坡稳定计算方面,应进一步开展渗流场和边坡变形耦合计算研究,开展基于非饱和土固结理论的有限元计算研究。此外,针对目前地震

作用下库区边坡稳定分析的不足,需探讨合理的地震动输入方式,准确施加地震荷载。而在库区边坡超孔隙水压力的变化规律方面展开数值模拟研究势在必行。

b. 在滑坡滑动过程模拟研究方面,需要研究不同类型的边坡失稳滑动机理,寻找合适的本构关系来描述滑坡体的物理力学性质,探讨用流体控制方程模拟松散堆积体滑动过程的可行性。对于块体滑坡,应研究离散块体之间的运动接触问题,建立能够反映块体之间相互作用的运动模型来模拟块体滑坡的滑动问题。

c. 涌浪产生的研究涉及滑坡体、库水与空气三者之间强烈的流固耦合作用,计算极其复杂。在数值模拟方面,应在以下方面开展进一步的研究:①将滑坡体滑动过程末端与入水产生首浪的过程连贯考虑,建立反应三者之间耦合作用的数值模型;②加强松散堆积体滑坡产生涌浪的研究,根据松散堆积体“流体化”的特点探讨采用流体本构关系描述其运动过程,从而实现滑坡滑动和首浪产生二者之间的衔接;③探讨块体滑坡入水后的运动规律,不能简单地假设块体滑坡入水后停止运动,水下运动对涌浪产生的影响需要在计算中加以考虑。

d. 库区边坡发生失稳运动及涌浪产生与传播的过程,实际上可以视为岸坡失稳、坡体滑动、首浪产生和涌浪传播这连续的 4 个阶段,每一个阶段的准确描述都将对最后灾害预报的可信度产生较大影响,因此需要将坡体稳定和滑动、涌浪产生与传播全过程作为完整统一的过程进行分析研究,开展不同阶段数值模拟的衔接研究,探讨不同阶段数值模拟结果的数据传递方法,建立统一的数值模拟方法,实现滑坡涌浪的全程模拟,提高研究精度。

e. 应将地理信息方面的先进成果与库岸滑坡涌浪分析成果相结合,实现不同学科之间的交叉应用,拓展新的研究方法,实现精准快速建模和分析。

f. 开发并行计算程序,优化分析计算方法,使其能够在高性能计算机上运行,以适应大规模计算的需要。在二维分析的基础上实现三维滑坡涌浪的分析,并将研究成果推广到实际问题中,建立并完善库区滑坡涌浪灾害预警系统。

参考文献:

- [1] 廖方,石豫川,吉锋. 大渡河上游某水电站库区滑坡的危险性评价[J]. 防灾减灾工程学报,2006,26(3):337-342. (LIAO Fang, SHI Yuchuan, JI Feng. Hazard evaluation of landslides at the bank of reservoir of a hydropower station in the upstream of daduhe river[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering,

- 2006,26(3):337-342. (in Chinese))
- [2] HELLER V, HAGER W H. Wave types of landslide generated impulse waves[J]. Ocean Engineering,2011,38(4):630-640.
- [3] GENEVOIS R, GHIROTTI M. The 1963 Vaiont landslide [J]. Giornale di Geologia Applicata,2005,1(1):41-52.
- [4] 李忠社,彭立志,王登元. GIS 和数值模拟技术在边坡工程中的应用评述[J]. 地质灾害与环境保护,2013,24(3):81-86. (LI Zhongshe, PENG Lizhi, WANG Dengyuan. Review of the application of gis and numerical simulation technology in slope engineering[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2013,24(3):81-86. (in Chinese))
- [5] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique,1975,25(4):671-689.
- [6] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations,1992,32(1):59-70.
- [7] 程心恕,杨晓贞. 基于非稳定渗流有限元的坝坡稳定分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2002,30(3):362-366. (CHENG Xinshu, YANG Xiaozhen. Stability analysis of dam slope based on finite element method of non-stationary seepage[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition),2002,30(3):362-366. (in Chinese))
- [8] 刘英泉,王成言. 库水位骤降时坝坡稳定性分析研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(6):55-58. (LIU Yingquan, WANG Chengyan. Analysis on dam slope stability during rapid drawdown of reservoir water table[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2011,9(6):55-58. (in Chinese))
- [9] 李湛,栾茂田,刘占阁,等. 渗流作用下边坡稳定性分析的强度折减弹塑性有限元法[J]. 水利学报,2006,37(5):554-559. (LI Zhan, LUAN Maotian, LIU Zhange, et al. Elasto-plastic FEM for embankment stability analysis under the condition of seepage based on the technique of shear strength reduction [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(5):554-559. (in Chinese))
- [10] HUANG Maosong, JIA Cangqin. Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage [J]. Computers and Geotechnics,2009,36(1):93-101.
- [11] WANG Wencan, FENG Jun, WU Xiyong, et al. Study on the stability of unsaturated soil slope based on the finite element strength reduction method[M]. Basel, Switzerland :Springer International Publishing,2015:1117-1124.
- [12] 周桂云,李同春. 基于非饱和土固结理论的有限元强度折减法[J]. 岩土力学,2008,29(4):1133-1137. (ZHOU Guiyun, LI Tongchun. FEM strength reduction method based on consolidation theories of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(4):1133-1137. (in Chinese))
- [13] 戴妙林,李同春. 基于降强法数值计算的复杂岩质边坡动力稳定性安全评价分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):2749-2754. (DAI Miaolin, LI Tongchun. Analysis of dynamic stability safety evaluation for complex rock slopes by strength reduction numerical method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(Sup1):2749-2754. (in Chinese))
- [14] 邢爱国,殷跃平. 云南头寨滑坡全程流体动力学机理分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(4):481-485. (XING Aiguo, YIN Yueping. Whole course analysis of hydrokinetics mechanism of Touzhai Gully landslide [J]. Journal of Tongji University (Natural Sciences Edition),2009,37(4):481-485. (in Chinese))
- [15] LUO Gang, HU Xiewen, GU Chengzhuang, et al. Numerical simulations of kinetic formation mechanism of Tangjiashan landslide[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2012,4(2):149-159.
- [16] LIN Yundian, ZHU Dapeng, DENG Qinglu, et al. Collapse analysis of jointed rock slope based on UDEC software and practical seismic load[J]. Procedia Engineering,2012,31(4):441-446.
- [17] 程谦恭,胡厚田. 刷冲式高速岩质滑坡全程运动学数值模拟[J]. 西南交通大学学报,2000,35(1):18-22. (CHENG Qiangong, HU Houtian. Discrete element simulation of full-course kinematics of rocky high speed landslide[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2000,35(1):18-22. (in Chinese))
- [18] 周健,王家全,曾远,等. 土坡稳定分析的颗粒流模拟[J]. 岩土力学,2009,30(1):86-90. (ZHOU Jian, WANG Jiaquan, ZENG Yuan, et al. Simulation of slope stability analysis by particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(1):86-90. (in Chinese))
- [19] 杨庆华,姚令侃,杨明. 地震作用下松散堆积体崩塌的颗粒流数值模拟[J]. 西南交通大学学报,2009,44(4):580-584. (YANG Qinghua, YAO Lingkan, YANG Ming. Particle flow numerical simulation of landslip of loose slope under seismic loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2009,44(4):580-584. (in Chinese))
- [20] SALCIARINI D, TAMAGNINI C, CONVERSINI P. Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers[J]. Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C),2010,35(3):172-181.
- [21] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [22] WU J H, CHEN C H. Application of DDA to simulate characteristics of the Tsaoiling landslide [J]. Computers and Geotechnics,2011,38(5):741-750.
- [23] 邬爱清,丁秀丽,李会中,等. 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程[J]. 岩石力学与工程学

- 报,2006,25(7):1297-1303. (WU Aiqing, DING Xiuli, LI Huizhong, et al. Numerical simulation of startup and whole failure process of Qianjiangping landslide using discontinuous deformation analysis method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (7):1297-1303. (in Chinese))
- [24] 殷坤龙,姜清辉,汪洋. 新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2002, 21(7):959-962. (YIN Kunlong, JIANG Qinghui, WANG Yang. Numerical simulation on the movement process of Xintan landslide by DDA method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7):959-962. (in Chinese))
- [25] 冯春,李世海,李继锋. 观音岩滑坡潜在失稳模式及成灾规模数值模拟[J]. 地下空间与工程学报,2014, 10(5):1209-1216. (FENG Chun, LI Shihai, LI Jifeng. Analysis on potential failure mode and disaster range of Guanyinyan landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5):1209-1216. (in Chinese))
- [26] HUNGR O, MCDUGALL S. Two numerical models for landslide dynamic analysis [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(5):978-992.
- [27] 吴凤元,樊赞赞,梁力,等. 基于动力条分法的滑坡运动过程模拟分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(增刊1):7-12. (WU Fengyuan, FAN Yunyun, LIANG Li, et al. Simulation analysis of landslide motion process based on the dynamic slice method[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(Sup1):7-12. (in Chinese))
- [28] 钟登华,安娜,李明超. 库岸滑坡体失稳三维动态模拟与分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007, 26(2):360-367. (ZHONG Denghua, AN Na, LI Mingchao. 3D dynamic simulation and analysis of slope instability of reservoir banks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2):360-367. (in Chinese))
- [29] CHEN H, LEE C F. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes[J]. Geomorphology, 2003, 51(4):269-288.
- [30] 李先华,陈晓清,胡凯衡,等. GIS 支持下的滑坡运动过程数字仿真[J]. 岩石力学与工程学报,2001, 20(2):175-179. (LI Xianhua, CHEN Xiaoqing, HU Kaiheng, et al. Digital simulation model of landslide motion process under GIS support [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2):175-179. (in Chinese))
- [31] BISCARINI C. Computational fluid dynamics modelling of landslide generated water waves[J]. Landslides, 2010, 7(2):117-124.
- [32] 李稳哲,岳高伟,王辉,等. 高速滑坡涌浪动力学机理研究[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5):127-133. (LI Wenzhe, YUE Gaowei, WANG Hui, et al. Dynamic mechanism of high speed landslide surge[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5):127-133. (in Chinese))
- [33] 徐文杰. 滑坡涌浪影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4):491-507. (XU Wenjie. Numerical study on factors influencing reservoir surge by landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4):491-507. (in Chinese))
- [34] 徐文杰. 基于 CEL 算法的滑坡涌浪研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3):350-354. (XU Wenjie. CEL algorithm study of reservoir surge induced by landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3):350-354. (in Chinese))
- [35] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):201-225.
- [36] 宋新远,邢爱国,陈龙珠. 基于 FLUENT 的二维滑坡涌浪数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3):90-94. (SONG Xinyuan, XING Aiguo, CHEN Longzhu. Numerical simulation of two-dimensional water waves due to landslide based on FLUENT[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(3):90-94. (in Chinese))
- [37] 邱昕,邢爱国,王国章. 基于 FLUENT 数值模拟的滑坡涌浪分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3):26-31. (QIU Xin, XING Aiguo, WANG Guozhang. Numerical simulation analysis of water waves due to landslide based on FLUENT[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3):26-31. (in Chinese))
- [38] YUK D, YIM S C, LIU P L. Numerical modeling of submarine mass-movement generated waves using RANS model[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(7):927-935.
- [39] SERRANO-PACHECO A, MURILLO J, GARCÍA-NAVARRO P. A finite volume method for the simulation of the waves generated by landslides [J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(3):273-289.
- [40] ABADIE S, MORICHON D, GRILLI S, et al. Numerical simulation of waves generated by landslides using a multiple-fluid Navier-Stokes model [J]. Coastal Engineering, 2010, 57(9):779-794.
- [41] LIU L F, WU T R, RAICHLIN F, et al. Run-up and run-down generated by three-dimensional sliding masses[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 536:107-144.
- [42] 袁晶,张小峰,张为. 可变网格下的水库滑坡涌浪数值模拟研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(4):546-551. (YUAN Jing, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Wei. Horizontal 2D flow model with variable grid for simulating surges due to landslide in reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4):546-551. (in Chinese))
- [43] GRILLI S T, WATTS P. Tsunami generation by submarine mass failure (Part I): modeling, experimental validation, and sensitivity analysis [J]. Journal of Waterway Port

- Coastal & Ocean Engineering, 2005, 131(6): 283-297.
- [44] WATTS P, GRILLI S T, TAPPIN D R. Tsunami generation by submarine mass failure: II. predictive equations and case studies [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2005, 131(6): 298-310.
- [45] QIU Liuchao. Two-dimensional SPH simulations of landslide-generated water waves [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(5): 668-671.
- [46] 杜小甬, 吴卫, 龚凯, 等. 二维滑坡涌浪的 SPH 方法数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2006, 21(5): 579-586. (DU Xiaotao, WU Wei, GONG Kai, et al. Two dimensional SPH simulation of water waves generated by underwater landslide [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 2006, 21(5): 579-586. (in Chinese))
- [47] 廖吉伦, 陈景秋, 张永祥. 基于 SPH 方法的立面二维涌浪数值模拟 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43(8): 3244-3249. (MIAO Jilun, CHEN Jingqiu, ZHANG Yongxiang. Two-dimension numerical simulation of impulsive waves by SPH method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(8): 3244-3249. (in Chinese))
- [48] ATAIE-ASHTIANI B, SHOBEYRI G. Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible smoothed particle hydrodynamics [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2008, 56(2): 209-232.
- [49] 任坤杰, 金峰, 徐勤勤. 滑坡涌浪垂面二维数值模拟 [J]. 长江科学院院报, 2006, 23(2): 1-4. (REN Kunjie, JIN Feng, XU Qinqin. Vertical two-dimensional numerical simulation for landslide-generated waves [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(2): 1-4. (in Chinese))
- [50] ZHAO Lanhao, LI Tongchun, WANG Ling, et al. Fractional step FEM for calculation of 3D free surface problem using Level Set method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(6): 742-747.
- [51] 赵兰浩, 杨庆庆, 李同春. 地震作用下土质库岸边坡失稳运动及初始涌浪数值模拟方法 [J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 104-108. (ZHAO Lanhao, YANG Qingqing, LI Tongchun. Numerical simulation of landsliding and initial surges for soil banks of reservoir under earthquake action [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 104-108. (in Chinese))
- [52] BOSA S, PETTI M. Shallow water numerical model of the wave generated by the Vajont landslide [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(4): 406-418.
- [53] QUECEDO M, PASTOR M, HERREROS M I. Numerical modeling of impulse wave generated by fast landslides [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(12): 1633-1656.
- [54] QUECEDO M, PASTOR M, HERREROS M I, et al. Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the finite element method [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(12), 755-794.
- [55] PASTOR M, HERREROS I, MERODO J A F, et al. Modelling of fast catastrophic landslides and impulse waves induced by them in fjords, lakes and reservoirs [J]. Engineering Geology, 2009, 109(1): 124-134.
- [56] 徐波, 蒋昌波, 邓斌, 等. 三维滑坡涌浪的产生及其传播过程的数值研究 [J]. 交通科学与工程, 2011, 27(2): 39-45. (XU Bo, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Three-dimensional numerical simulations of water waves generated by landslides and its propagation process [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(2): 39-45. (in Chinese))
- [57] BOSA S, PETTI M. A numerical model of the wave that overtopped the Vajont Dam in 1963 [J]. Water Resources Management, 2013, 27(6): 1763-1779.
- [58] ATAIE-ASHTIANI B, YAVARI-RAMSHE S. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs [J]. Landslides, 2011, 8(4): 417-432.
- [59] ATAIE-ASHTIANI B, NAJAFI JILANI A. A higher-order Boussinesq-type model with moving bottom boundary: applications to submarine landslide tsunami waves [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2007, 53(6): 1019-1048.
- [60] 王世昌, 黄波林, 刘广宁, 等. 龚家方 4 号斜坡涌浪数值模拟分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 212-218. (WANG Shichang, HUANG Bolin, LIU Guangning, et al. Numerical simulation of tsunami due to slope failure at Gongjiafang on Three Gorges Reservoir [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 212-218. (in Chinese))
- [61] HUANG Bolin, YIN Yueping, LIU Guangning, et al. Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, Three Gorges Reservoir, on November 23, 2008 [J]. Landslides, 2012, 9(3): 395-405.
- [62] 姜治兵, 金峰, 盛君. 滑坡涌浪的数值模拟 [J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 1-3. (JIANG Zhibing, JIN Feng, SHENG Jun. Numerical simulations of water waves due to landslide [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(5): 1-3. (in Chinese))
- [63] SHEN Y M, NG C O, ZHENG Y H. Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation $k-\varepsilon$ turbulence modeling [J]. Ocean Engineering, 2004, 31(1): 87-95.
- [64] HEIDARZADEH M, PIROOZ M D, ZAKER N H, et al. Historical tsunami in the Makran Subduction Zone off the southern coasts of Iran and Pakistan and results of numerical modeling [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(8): 774-786.
- [65] ATAIE-ASHTIANI B, MALEK-MOHAMMADI S. Mapping impulsive waves due to sub-aerial landslides into a dam reservoir: a case study of Shafa-Roud Dam [J]. Dam Engineering, 2008, 18(3): 1-27.

(收稿日期: 2015-05-25 编辑: 熊水斌)