

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.25

突发地质灾害应急数值模拟浅析

李俊峰¹, 张小趁², 刘红岩¹, 褚宏亮³, 倪天翔³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 华北科技学院, 北京 101601;
3. 中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急技术指导中心) 北京 100081)

摘要:突发地质灾害事件应急响应具有社会聚焦性和时间紧迫性,处置决策离不开科学高效的技术支撑,数值模拟技术具有成本低、效率高、且能够方便考虑多种不同工况等优势。而目前对突发地质灾害应急数值模拟技术的研究尚未开展,同时常规数值模拟囿于技术条件等原因,对应急地质灾害技术的支撑实践效果十分有限。为此以滑坡灾害为例,在临滑稳定性研判、变形失稳机理分析和滑动过程推演等数值模拟应用现状分析的基础上,通过与常规数值模拟的技术条件比较,初步提出应急数值模拟技术发展的关键问题。以期有助于应急决策辅助应用。

关键词:地质灾害;数值模拟;情景;应急响应;滑坡

中图分类号: TU4; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0154-08

Numerical simulation technology analysis of geological disaster emergency

LI Junfeng¹, ZHANG Xiaochen², LIU Hongyan¹, CHU Hongliang³, NI Tianxiang³

(1. College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. North China Institute of Science and technology, Beijing 101601, China;
3. China Institute for Geo-Environmental Monitoring (Geological Disaster Emergency
Technical Guidance Center of MLR), Beijing 100081, China)

Abstract: The emergency response of geological disaster emergency has the characters of social focus and time urgency. As we all know, disposal decision depends on scientific and efficient technical support, and numerical simulation technology has low cost, high efficiency, and the advantages of the convenient to consider a variety of different conditions and so on. Literature study suggested that the numerical simulation technology analysis of geological disaster emergency is still insufficient, because of the shortage technical condition, the conventional numerical simulation can not support the practice efficiently. In this paper, landslide has been discussed in three aspects such as the sliding stability analysis, the analysis of deformation and instability mechanism and the sliding process deduction. Through the comparison with the conventional numerical simulation technology, the development of emergency numerical simulation technology are put forward preliminarily. At last, wish the study will be helpful for emergency decision aid application.

Keywords: geological disaster; numerical simulation; scenario; emergency response; landslide

0 引言

突发地质灾害应急是一种跨阶段、高要求、大集成、

快反应和求实效的非常规防灾减灾行动^[1~2]。数值模拟具有低成本、高效率且能够方便考虑多种工况等优点,在气象、水资源与环境、社会公共安全等其他突发性

收稿日期: 2016-02-29; 修订日期: 2015-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(41162009); 国土资源部公益性行业科研专项: 突发地质灾害应急响应支撑关键技术研究(201211055); 中国地质大学(北京)基本科研业务费专项资金(2-9-2014-019)

第一作者: 李俊峰(1991-),男,江西上饶人,硕士研究生,主要从事工程地质、岩土工程方面的科研工作。E-mail: yookelee@163.com

通讯作者: 刘红岩(1975-),男,河南扶沟人,教授,主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: lhyan1204@126.com

件应急领域得到广泛应用,其决策辅助功能突出。毛军等^[3]依托数值模拟与仿真技术对地铁火灾应急的烟气流动规律与控制 and 人员的疏散进行分析,并将结果应用于应急预案编制;谢俊举等^[4]对洪水演进过程快速模拟,实现对地震溃坝应急事件的快速评估;黄娟等^[5]开展天津市突发事故下大气污染物扩散应急数值模拟,分析污染物扩散路径和影响范围的动态变化过程;韩素芹等^[6]结合黄海绿藻多源实测和监测数据对其漂移轨迹进行了应急数值模拟,提供绿藻漂移轨迹研判与应对决策依据;李天琪等^[7]基于 GIS 平台对爆炸灾害危害范围进行应急数值模拟,辅助险情快速研判;马小雪等^[8]开展突发水污染事件应急调水数值模拟,定量的揭示了排水流量为污染物迁移主要控制因素。

在突发地质灾害应急领域,却鲜有文章讨论应急数值模拟的应用。结合实际现场应急处置经验可知,数值模拟在现场应急处置过程中的应用还不多,在理论上也不够完善,并没有形成一种范式的程序化方法,此外数值模拟作为应急辅助工具还存在诸多问题。与常规数值模拟相比,二者功能基本相同,或是对灾害体稳定性的判断,或是对灾害体变形机理分析,或是对灾害体失稳破坏全过程的反演和预测。多数应急情况下仍然沿用常规数值模拟思路,但其缺乏应急情境适应性,具体表现在原型分析、情景建模、模拟对象和参数获取等诸多方面。究其原因,首先是突发地质灾害应急防治理论研究依然缺乏;其次是数值模拟在应急决策辅助应用还没有受到足够的重视。

本文以滑坡为例,从技术需求、技术现状和关键问题等三个方面讨论突发地质灾害应急数值模拟相关内容,仅供应急科技工作者商榷。

1 应急数值模拟技术需求

突发地质灾害应急响应启动之后,灾情应急侧重灾害成因分析与减灾行动,险情应急侧重预测预警与应急处置的防灾方法选择^[1]。张小趁等提出以时间为主线的应急过程模式^[9],数值模拟有助于解决灾害体稳定性、情景演变和后果分析、处置方案调整、灾害范围划定、应急治理工程方案和措施有效性评估等应急难点问题。应急数值模拟对灾情的反演和险情的预测有助于对灾情或险情的正确评估和风险的防范,有助于加深对灾害体变形失稳机理的理解,有助于地质灾害成因和成灾过程分析,辅助应急决策。突发地质灾害应急防治领域,“情景-应对”模式^[10]有助于动态掌握和处置灾情或险情,数值模拟能不受现场条件

限制,方便的考虑各种可能工况,满足应急情境下情景多变的现实要求。灾、险情应急过程中,应急避险对于防灾减灾成效和降低损失具有直接重要意义,然而目前成功避险案例不多,且多基于群测群防等传统方法^[11],具有偶然性和随机性特点,且群测群防应急避险多适用于应急响应启动之前,而数值模拟在情景推演和灾害范围划定方面具有独特优势,它的应用必将有助于科学减灾和现场应急决策。

2 应急数值模拟技术现状

在地质灾害理论研究和防治工程实践中,已经积累大量数值模拟成果。尽管尚缺乏专门研究,但是通过常规数值模拟应用、尤其是解决单一问题的实践,可以探索应急应用的数值模拟技术现状。以滑坡为例,集中在临滑稳定性研判、变形失稳机理分析和滑动过程推演等三个方面进行分析。

2.1 滑体稳定性研判

突发地质灾害应急数值模拟过程中,滑坡险情滑体稳定性判定或灾情坡体二次滑动可能性判定是面临的首要问题。目前滑坡稳定性分析主要包括两种途径:传统的极限平衡法和数值极限分析法^[12]。极限平衡法多用于工程设计和可行性分析;数值极限法则被广泛运用,具有一定的可靠性,且无需事先假定滑移面、便于进行内力分析和考虑支挡结构的耦合作用,具有传统方法不可比拟的优势。

数值模拟可以方便的考虑现场可能的各种工况,有助于应急情境对险情或灾情处置的快速分析决策,张雪东等^[13]针对天然状态和蓄水两种工况,利用有限差分软件 FLAC^{3D} 对呷爬库岸滑坡进行稳定性分析,结果表明天然状态下坡体整体稳定,而蓄水后滑体稳定条件变差,存在滑坡可能。应急处置现场实践提出对滑坡稳定性判定及发展过程的直观化、可视化要求,毕小勇等^[11]利用通用有限元程序 Midas-GTS (SRM) 分析某边坡稳定性,求出稳定性系数,不仅能以云图的形式直观反映失稳边坡滑动面的位置,还能以动画的形式反映滑动面的形成、发展和贯通情况。应急情境下,没有足够的时间对影响稳定性的参数类型和取值进行敏感性分析,所以高效准确的应急数值模拟必然以常规数值模拟研究为基础,蔡跃等^[15]利用离散元软件 UDEC 模拟了边坡反倾层弯曲倾倒破坏型式,讨论影响边坡稳定性的各项因素,结合现场坡体滑移过程,确定合适的分析参数,结果表明岩体边坡的稳定性受岩层间力学参数、厚度、产状以及人工边坡倾角的影响。

应急监测不仅有助于动态了解灾害体所处状态,结合数值模拟还为滑坡的成功防治提供新思路,成永刚等^[16]通过加强坡体关键点的监测,利用 Geoslope 软件动态分析了某公路边坡在全断面开挖后无工程防护过程中坡体的稳定性状况,充分利用了数值模拟内力分析和应急监测信息反馈的优势,为滑坡应急治理的“动态设计,信息化施工”提供依据。

2.2 变形失稳机理分析

为确保人民群众生命财产的安全,突发地质灾害险情或灾情应急处置应遵循先稳后治的原则。在应急状态下,只有在关键时机、关键部位采取应急监测或工程措施,才能化被动为主动、提升防灾减灾效果。数值模拟能直观反映滑坡的变形及塑性区的形成及贯通乃至最后的破坏过程,可以方便的获取各种工况下滑坡内力变化和分布图,对于理解灾害机理和确立工程防治重点具有辅助作用。

岩土体本构模型是模型准确性的关键要素,关系到应急数值模拟的效率,曹琰波等^[17]运用离散元程序 UDEC,根据概念模型确立三种材料参数(滑体,滑床,结构面),分别考虑滑坡失稳前后岩土体材料性质的差异性,滑前均应用塑性本构模型和 M-C 屈服准则,失稳后将滑体设为刚性本构模型,模拟了滑坡从变形累积到破坏滑动的全过程。岩土体物理力学参数是直接决定滑体变形失稳的另一关键因素,传统方法通常采取均一化赋值,是对真实情况的高度概括,吴韩等^[18]则考虑实际滑坡岩土体强度参数空间分布的非均一性,区别以往采用统一强度参数赋值而采取数值模型差异化赋值,结果表明两种赋值方式模拟结果存在一定的差异,尤其是拉裂隙和剪胀区的位置,说明精细化数值模型的材料属性能更好反映研究对象的力学响应。参数敏感性分析有助于应急状态下快速选取关键参数及其取值,提高数值建模高效性和准确性,葛云峰等^[19]为研究武隆鸡尾山滑坡的滑动面节理参数对变形特征影响的显著性,利用离散元软件 3DEC 进行数值模拟试验,将监测点位移量作为试验指标,结果显示,(1)滑动面切向刚度 JKS 和内摩擦角 φ 对水平和竖向位移具有显著性影响,而滑动面法向刚度 JKN 和黏聚力 c 对滑体的位移影响有限;(2)滑动面节理力学参数对稳定性影响作用主次顺序为 $JKS > \varphi > JKN > c$ (水平位移); $JKS > \varphi > c > JKN$ (竖向位移)。掌握灾害体发展演化的阶段性特征对于应急至关重要,数值模拟能很好的模拟滑体变形阶段变化过程,文建军等^[20]运用有限元软件建立了三维有限元数值模型,模

拟了滑体在加载过程中,随着滑体的变形及拉裂,滑坡体的应力有从上部集中到整体分散的规律,当加载到一定程度时,滑体与滑床在顶端出现拉裂,进而沿着接触面迅速分离,滑坡的变形也从滑体的局部变形转变到滑体的整体失稳。数值模拟能动态反映诱发因素对灾害体变形的影响,确定灾害体变形失稳与诱发因素强度的对应关系,曹琰波等^[17]采用离散元软件 UDEC 模拟了唐家山滑坡在地震和坡体自重的作用下,坡顶首先形成应力集中,滑体沿中后部的软弱面产生蠕变变形,随着持续的地震动力输入,应力不断向中前部的锁固段集中,使得变形沿接触面(滑动带)不断向坡脚方向扩展,引起锁固段的渐近性破坏,最终从坡脚剪出,破裂面贯通而形成滑带,模拟结果有利于理解滑坡启动发生机制。应急治理是应急处置的关键一环,数值模拟能有效模拟各种治理工况,为选取最优应急工程措施提供参考,殷跃平等^[21]运用了有限差分软件 FLAC^{3D} 分析了未切坡开挖、切坡开挖、前缘堆载压脚和施加预应力锚固工程 4 种工况下的滑坡变形破坏特征,结合滑体土石混合体结构特征确立了应急堆载、变形控制后施用预应力锚索的应急治理措施。

2.3 滑动过程推演

在突发性地质灾害灾情或险情的分析评价和应急处理时,最为棘手的问题不是如何计算滑坡的稳定系数,而是如何反演或预测滑体滑动距离、速度和破坏范围^[22]。国内外学者通过利用已有或自定义模型结合数值分析程序对灾害运动过程进行了大量研究。目前应用比较多、效果比较好的两类方法包括流固耦合的方法和离散元方法。对应于灾情和险情,应急数值模拟能确定二次灾害可能性,快速判断滑坡的稳定性,明确关键诱发因素,验证和修正概念模型,滑坡滑距、发生时间和危害范围的预测等对于突发性地质灾害应急处置都具有重要意义。

通过稳定性分析并拟合应急调查和监测所得到的灾害体变形特征,确立反映灾害体实际的数值模型,应急数值模拟能辅助成因分析和成灾过程反演或预测,邹爱清等^[23]利用 DDA 反演了千将坪滑坡的启动条件和滑动全过程,分析表明滑坡启动原因是降雨及库水位上升导致滑体关键滑面力学参数降低,判断滑坡类型为推移式滑坡,得到的滑坡最大滑移速度和坡体上部最大滑动错距与实际调查相符,且模拟得出滑坡滑动持续时间约 40s。划定灾害区范围、确定滑动型式直接关系应急避险方案的选择,段钊等^[24]利用离散元软件 2D-Block 模拟了人工切坡诱发的大黄公路 1 号滑坡开挖前、后两

个阶段,通过对滑坡及跟踪点运动过程、速度和加速度变化的分析,判断该滑坡目前处于蠕滑阶段、稳定性差,滑坡型式属于以水平方向运动为主的牵引式滑坡,滑坡的运动过程可分为低速蠕滑、高速滑移、减速滑动和自稳调整 4 个阶段,并预测滑坡失稳最大威胁距离 41.3 m,堆积体体积 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。此外,在滑体滑动过程及堆积方面,国内外学者从不同角度进行了大量参数敏感性分析研究,有助于应急状态下关键参数的选择和取值,毕钰璋等^[25]采用 2D 离散元对地震碎屑流滑坡全过程进行了模拟,揭示了不同摩擦系数情况下滑坡特性,对其滑移范围和滑移规律进行了分析和讨论;Katz O 等^[26]利用二维离散元程序 RICEBAL 研究单体滑坡尺寸和堆积体形状(l/l , l -斜坡厚度, l -斜坡体长度)控制因素,指出滑坡尺寸受材料峰值强度和斜坡初始角控制,堆积体形状受材料残余摩擦角和斜坡初始角控制;Zhang X 等^[27]利用 PFEM(粒子有限元)模拟了发生在中国南部的一个滑坡过程,结果显示滑动面的几何形态对于滑体的运动有重要影响,滑面与滑体的摩擦角对堆积体形状有重要影响,而滑体材料密度不论是对于滑动过程还是堆积体轮廓均没有影响;Cascini L 等^[28]运用一个准 3D 耦合 SPH 模型反演了意大利南部的一个降雨诱发滑坡,指出滑床夹带率和侵蚀区范围影响滑坡流通过程、滑坡速度和堆积物高度;杜娟等^[29]利用有限体积法,考虑滑体下表面侵蚀作用和摩擦阻力的变化,建立滑坡-碎屑流运动过程三维计算模型,对比未考虑滑体下表面侵蚀作用的计算结果,发现侵蚀作用对于滑体运动物质总体积和滑距有重要影响。随着空间观测技术和成像质量的不断发展,GIS 技术在突发地质灾害应急处置中越来越受到重视,Chen H 等^[30]利用拉格朗日有限单元法(LFEM)建立的准三维模型反演了 1993 年

香港大屿山滑坡滑动过程,指出该模型在与 GIS 结合应用于多山地区初步确立灾害区域的前景。堆积区的范围和堆积体深度方向岩土体分布预测直接关系到应急避险和应急搜救的有效性,Pirulli M 等^[31]认为多物质运动岩体的数值模型建立难点在于岩体运动过程中复杂运动行为的模拟,文中利用 RASH3D 反演了方量基本一致而滑动路径区域地貌差别很大的两个岩质滑坡,并指出理想的模拟结果不仅要求模拟堆积区域结果与实际滑坡区域界线一致,而且要求堆积体深度方向的岩体分布也要求一致。

3 应急数值模拟关键问题

3.1 基本技术条件

文献研究对数值模拟在地质灾害领域的应用的分析表明,对于灾害体的应急数值模拟和常规状态下的数值模拟在研究内容上具有一致性,即灾害体稳定性分析、变形机理分析和破坏全过程分析三大方面。在应急响应启动之后,应急调查可以快速获取地质环境因素和灾害体信息,为应急数值模拟提供基础数据,以便确立几何模型和物理力学参数和建立初步的数值模型。与此同时,动态应急监测有助于验证数值模型的正确性和修正参数取值,有助于把握灾害体关键部位。在应急治理过程中,数值模拟能很好地考虑支护结构与地质体的共同变形作用,可以动态的反映处置措施的有效性,较符合实际,具有传统强度稳定性设计不具备的优势。然而常规数值模拟并没有面对突发地质灾害灾情或险情的应急情境,所以在实际应用中二者又有一定的差异,如表 1 从研究目的、研究对象、工况分析等 8 个方面分析比较了应急数值模拟和常规数值模拟技术条件的不同之处。

表 1 数值模拟应急与常规技术条件比较

Table 1 Comparison of emergency and conventional condition in numerical simulation

对比内容	应急数值模拟	常规数值模拟
研究目的	突发地质灾害应急处置救援,防灾减灾	科学研究
研究对象	突发地质灾害,灾情和险情两种情况	常规地质灾害
工况分析	具体可能的几种固定工况	通常会考虑多种可能工况,对比分析
监测数据	需现场进行应急监测,由于突发地质灾害的随机性和不确定性,基本没有既有监测数据	研究对象一般已进行或可进行较精确的监测,可以根据需要安排监测内容
物理力学参数获取	通常无试验数据,只能通过现场快速量测、已有附近工程资料、经验值和专家意见确定参数取值	可通过室内外试验,如钻探、平硐、现场原位测试等手段获取较精确取值
几何模型构建	现场即时获取,如照片、3S 技术(GPS、RS、GIS)、目测画示意图等手段,且以 2D 为主	可以通过后期加工获取较为准确的几何模型,且 3D 模拟更能反映实际
本构模型	必须选用已有常规和较为成熟的本构模型,在尽可能准确的描述岩土体性质的基础上,要求参数少且易获取	无特殊要求,根据分析目的,选用逼近真实状况的本构模型,一般不考虑参数获取难易程度,若没有合适的本构模型,则推导和修正现有模型,但通常具有特异性
时间要求	在保证一定的可靠度的情况下,越快越好	没有时间要求,以研究目的为导向

3.2 关键技术方法

应急决策需要快速研判滑坡稳定性、推演可能的滑动过程,模拟的结果不一定十分精确,但是必须是可靠的,这是安全法则所决定的。对比突发地质灾害应急防治或响应技术流程^[1,9],数值模拟介入应急处置越早越好,在应急调查阶段建立基础数值模型,以便为以后各阶段及时校正和提供技术支持。应急数值模拟包括确定概念模型和数值模型、确定边界条件(位移边界条件和构造应力边界条件)、确定材料参数、选取本构模型、计算及后处理等步骤。

实际灾害应急处置过程中,应急数值模拟具有难度大、要求高和时间紧的特点,并没有得到很好的应用,应用难包括但不限于以下几方面原因:首先,地质体本身具有复杂性和差异性,不存在普适的数值分析软件或本构模型;其次,数值分析人员在软件应用过程中具有较大主观性,降低了模拟结果的可信度;最后,数值模拟长期以来未过多考虑时间因素,导致常规建模计算方法耗时较长,不满足应急抢险要求。

3.2.1 原型分析建模

建立合理、准确的数值模型是应急数值模拟的重点和难点问题,直接关系到数值计算的速度和准确性。地质模型是在灾害体现场调查和分析基础之上,结合应急现场专家实践经验对灾害体的理性认识,是数值模型建立的基础和修正的根据。地质体自身的复杂性、技术条件的局限性和应急的紧迫性都要求简化数值模型,例如曹琰波等^[17]基于分析目的和便于计算对滑坡岩体该化为强风化岩、弱风化岩和结构面三种类型。几何模型的概化通常基于滑体二维主滑剖面,然而目前在确定坡顶后缘长度、坡脚前缘长度和模型高度取值方面研究较少,大多根据经验取值,有待进一步讨论。计算范围的确定直接关系到边界条件的选取,通常情况下以设置位移边界条件居多,很少考虑构造应力边界,二维模型大多规定左、右和底部边界单向约束,三维模型前后左右和底部单向约束,特殊工况如地震一般设置底部粘滞边界。针对突发地质灾害应急情景模式,分类建立应急数值模拟模型数据库将有助于快速分析建模,例如依据滑坡体组成即土质、土石混合体和岩质三类进行典型滑坡灾害案例建模分析和总结,在数值模型建立、数值方法选择和参数敏感性分析等方面建立具备参考性的数据库,以便应急处置过程中直接调用,减少现场建模时间;同时,为便宜数值模型建立的规范化,探索半自动化和自动化应急数值建模,最终目标是实现参数输入、模型输出的应急现场快

速建模方式;最后要重视与概念模型对比分析,拟合应急监测结果和已有灾害体变形。

3.2.2 数值方法选择

数值软件种类繁多、各有利弊,面对险情或灾情研究重点的不同^[11],应急模拟应考虑实际情况和分析目的选用合适的数值软件。有限元能处理非线性问题却不适于模拟非连续大变形问题,但在稳定性判断和考察灾害体内力分布情况很有优势;快速拉格朗日方法不仅在处理非线性大变形问题方面有一定优势,而且其在多工况分析及支护型式效果分析方面应用广泛;离散元法适合模拟天然岩土体非均质、不连续和大变形的特点,尤其在灾害体过程推演优势明显,碎裂岩体、堆积体滑坡和土质滑坡滑动过程尤其适用,但存在局部块体失稳可能导致整个计算过程失败的缺陷和计算耗时的不足。

3.2.3 参数选取与结果表达

数值模型参数类型和取值是应急数值模拟技术的关键问题,模型材料参数包括岩土体物理力学参数和结构面(包括节理面、岩层面和滑动面)两类。基于连续介质的数值方法参数类型直接与岩土体本构模型直接相关,离散元方法分为宏观力学参数和细观参数两类,例如颗粒流方法中细观参数取值需要通过拟合数值试验和实际试样试验应力-应变曲线得到,是关系模拟结果的重要因素。灾害应急过程中,没有大量室内试验或现场大型原位试验数据,所以经验取值和工程类比是应急数值模拟的主要参数取值来源。

数值模拟结果输出按分析目的不同,内力和机制分析包括应力云图、位移云图、剪切应变云图和塑性区云图等,灾害体运动过程模拟包括,运动距离、速度和时间乃至堆积体范围等。实际灾害应急处置是多学科、多领域、多部门和多层次的综合性防灾减灾活动,要重视将模拟结果以图片和动画的形式输出,使非专业人士或普通民众亦能了解和掌握险情或灾情的动态。

4 结语

面临突发险情或灾情,应急数值模拟需适应紧迫性、实践性、可操作性和可靠性的要求。常规数值模拟虽然可以提供了大量可用的实例和素材,但由于参数种类繁多、取值不一以及非基于时间和应急的建模模式等诸多问题,表现为应急工况适应性不足,时间性和目的是区分二者的显著特点,只有深刻把握相互的联系才能更好地运用数值模拟手段辅助应急决策。应

急调查和应急监测为应急数值模拟提供基础数据,建立符合概念模型的数值模型,通过拟合现有变形和监测数据修正数值模型,在此基础上进行稳定性分析、变形机制分析和滑动过程推演,辅助灾害范围划定、成因分析、成灾过程和应急避险与防治。

致谢:感谢国土资源部地质灾害应急技术指导中心陈红旗教授在准备和撰写过程中给与的指导。感谢中国地质环境监测研究院刘传正教授在地质模型方面的指导、成都理工大学许强教授在监测预警方面的指导。在此,衷心感谢!

参考文献:

- [1] 刘传正,陈红旗,韩冰,等. 重大地质灾害应急响应技术支撑体系研究[J]. 地质通报,2010, 29(1): 147-156.
LIU Chuansheng, CHEN Hongqi, HAN Bing, et al. Technical support system of emergency response for serious geo-hazards[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(1): 147-156.
- [2] 陈红旗,徐永强,庄茂国,等. 地质灾害应急支撑体系建设基本问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4): 108-111.
Chen Hongqi, XU Yongqiang, Zhuang Maoguo, et al. Study on the construction of geological disaster emergency support system[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4): 108-111.
- [3] 毛军,郝艳红,吕华,等. 数值模拟与仿真在地铁火灾防灾减灾中的应用[J]. 北京交通大学学报:自然科学版,2008,32(4):52-57.
MAO Jun, XI Yanhong, LV Hua, et al. Applications of the numerical simulation for disaster prevention and mitigation of subway fire[J]. Journal of Beijing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2008, 32(4): 52-57.
- [4] 谢俊举,李亚琦. 基于洪水演进数值模拟的溃坝危害性快速评估[J]. 灾害学,2011,26(2):31-34.
XIE Junju, LI Yaqi. Rapid evaluation of dam-break hazard based on numerical simulation of flood-routing[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(2): 31-34.
- [5] 黄娟,吴玲娟,高松,等. 黄海绿潮应急漂移数值模拟[J]. 海洋预报,2011, 28(1): 25-32.
HUANG Juan, WU Lingjuan, GAO Song, et al. Emergency numerical simulation of the yellow green tide[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(1): 25-32.
- [6] 韩素芹,蔡旭晖,李培彦,等. 天津市突发事故条件下大气污染的应急模拟[J]. 中国环境科学,2009, 29(9): 919-923.
HAN Suqin, CAI Xuhui, LI Peiyan, et al. Numerical simulation of emergency response to atmospheric pollution accident in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2009, 29(9): 919-223.
- [7] 李天祺,赵振东,余世舟. 基于GIS的爆炸灾害数值模拟与应急损失评估[J]. 灾害学,2010, 25(3): 96-99.
LI Tianqi, ZHAO Zhendong, YU Shizhou. Study on relative people vulnerability of city emergencies[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(3): 96-99.
- [8] 马小雪,杨军,毛媛媛,等. 平原河网区突发性水污染事件应急调水数值模拟分析[J]. 中国农村水利水电,2015(4): 47-50.
MA Xiaoxue, YANG Jun, MAO Yuanyuan, et al. A numerical simulation and analysis of emergency water transfer for sudden water pollution accident in the Plain River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(4): 47-50.
- [9] 张小趁,陈红旗. 突发地质灾害应急技术:过程模式[J]. 灾害学,2015, 30(4): 149-155.
ZHANG Xiaochen, CHEN Hongqi. Geological disaster emergency technology: process model [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 149-155.
- [10] 张小趁,陈红旗. 基于情景应对模式的突发地质灾害应急防治探讨[J]. 人民长江, 2015, 46(23): 29-33.
ZHANG Xiaochen, CHEN Hongqi. Study on emergent prevention of sudden geological disaster based on scenario-response model [J]. Yangtze River. 2015, 46(23): 29-33.
- [11] 庄茂国,商冉,徐维盈. 地质灾害应急避险案例浅析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015(4): 94-98.
ZHUANG Maoguo, SHANG Ran, XU Weiyang. Case analysis of geological disaster emergency hedge [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015(4): 94-98.
- [12] 郑颖人. 岩土数值极限分析方法的发展与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2012, 31(07): 1297-1316.
ZHENG Yingren. Development and application of numerical limit analysis for geotechnical materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1279-1316.

- [13] 张雪东,陈剑平,黄润秋,等. 用 FLAC-3D 分析呷爬滑坡的变形特征[J]. 岩土力学,2005, 26(1): 131-134.
ZHANG Xuedong, CHEN Jianping, HUANG Runqiu, et al. A study of deformation features of gapa landslide using FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 131-135.
- [14] 毕小勇,闫天俊,鲁杰. Midas-GTS(SRM)在边坡二维稳定性分析中的运用[J]. 自然灾害学报,2015, 24(1): 170-176.
BI Xiaoyong, YAN Tianjun, LU Jie. Application of Midas-GTS(SRM) to 2D stability analysis of slope [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 170-176.
- [15] 蔡跃,三谷泰浩,江崎哲郎. 反倾层状岩体边坡稳定性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008, 27(12): 2517-2522.
CAI Yue, MITANI Yasuhiro, ESAKI Tetsuro. Numerical analysis of stability for an anti-dip stratified rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2517-2522.
- [16] 成永刚. 顺层滑坡数值模拟与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008, 27(S2): 3746-3752.
CHENG Yonggang. Numerical simulation and monitoring analysis of bedding landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008, 27(S2): 3746-3752.
- [17] 曹琰波,戴福初,许冲,等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2011, 30(S1): 2878-2887.
CAO Yanbo, DAI Fuchu, XU Chong, et al. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2878-2887.
- [18] 吴韩,简文星,肖迪,等. 岩土体力学参数空间分布下的滑坡稳定性数值计算方法[J]. 工程地质学报,2015, 23(1): 135-139.
WU Han, JIAN Wenxing, XIAO Di, et al. Numerical model method for slope stability under variable distribution of strength parameters [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 135-139.
- [19] 葛云峰,唐辉明,熊承仁,等. 滑动面力学参数对滑坡稳定性影响研究—以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报,2014, 33(S2): 3873-3884.
GE Yunfeng, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Effect of sliding plane mechanical parameters on landslide stability—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3873-3884.
- [20] 文建军,王雷. 某黄土滑坡破坏机理数值研究[J]. 路基工程,2015, 179(2): 184-186.
WEN Jianjun, WANG Lei. Numerical study on failure mechanism of a loess landslide [J]. Subgrade Engineering, 2015, 179(2): 184-186.
- [21] 殷跃平,李廷强,唐军. 四川省丹巴县城滑坡失稳及应急加固研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008, 27(5): 971-978.
YIN Yueping, LI Tingqiang, TANG Jun. Landslide reactivation and emergency stabilization on DANBA county town in Sichuan province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 971-978.
- [22] 杨海清,蓝一凡,曾西源,等. 滑体失稳后运动过程三维弹簧变形块分析模型[J]. 岩石力学与工程学报,2015, 34(3): 528-536.
YANG Haiqing, LAN Yifan, ZENG Youyuan, et al. A three-dimensional model with spring-deformable-blocks for post-failure motion of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 528-536.
- [23] 邹爱清,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.
- [24] 段钊,唐皓,党琪,等. 边坡开挖诱发滑坡离散元模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014, 34(5): 49-55.
DUAN Zhao, TANG Gao, DANG Qi, et al. Discrete element simulation of landslide induced by slope excavation [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(5): 49-55.
- [25] 毕钰璋,付跃升,何思明,等. 牛眠沟地震滑坡碎屑化全过程离散元模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015, 26(3): 17-25.
Bi Yuzhang, Fu Yuesheng, He Siming, et al. Simulation of the whole process of Niumiangou creek

- rock avalanche triggered by the earthquake using a distinct element method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 17-25.
- [26] Katz O, Morgan J K, Aharonov E, et al. Controls on the size and geometry of landslides: Insights from discrete element numerical simulations [J]. Geomorphology, 2014, 220(3): 104-113.
- [27] Zhang X, Krabbenhoft K, Sheng D, et al. Numerical simulation of a flow-like landslide using the particle finite element method[J]. Computational Mechanics, 2015, 55(1): 167-177.
- [28] Cascini L, Cuomo S, Pastor M, et al. SPH run-out modelling of channelised landslides of the flow type [J]. Geomorphology, 2014, 214(2): 502-513.
- [29] 杜娟,殷坤龙,王佳佳. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 480-488.
- DU Juan, YIN Kunlong, WANG Jiajia. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 480-488.
- [30] Chen H, Lee C F. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes [J]. Geomorphology, 2003, 51(4): 269-288.
- [31] Pirulli M, Mangeney A. Results of Back-Analysis of the Propagation of Rock Avalanches as a Function of the Assumed Rheology [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2008, 41(1): 59-84.

(上接第153页)

- [12] 季洋,格构护坡在城市道路中的应用[J]. 企业技术开发, 2013, 32(15): 140-141.
- JI Yang. The application of lattice structure slope protection in urban road [J]. Enterprise Technology Development, 2013, 32(15): 140-141.
- [13] 许文年,叶建军,周明涛. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10): 50-52.
- XU Wennian, YE Jianjun, ZHOU Mingtao. Several problems discussion of vegetation concrete slope protection technology [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2004, 35(10): 50-52.
- [14] 李绍才,孙海龙. 中国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J]. 资源科学, 2004, 26(S): 61-65.
- LI Shaocai, SUN Hailong. Rock slope vegetation protection technology status and development trend in china[J]. Resource Science, 2004, 26(S): 61-65.
- [15] 李辉,李永红,康金栓,等. 陕西省韩城市西山灰岩群采区矿山地质环境问题及恢复治理探讨[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 139-143.
- LI Hui, LI Yonghong, KANG Jinshuan, et al. Discussion in geological environment problem and restoration of Xishan limestone group mining area in Shaanxi Hancheng City[J]. Disaster Science, 2014, 29(3): 139-143.
- [16] 李亚平,陈友媛,董滨,等. 滨州北互通立交区边坡绿化自动滴灌系统的设计研究[J]. 给水排水, 2010, 36(S): 420-423.
- LI Yaping, CHEN Youai, DONG Bin, et al. Automatic drip irrigation system design on slope green in interchange area in North Binzhou [J]. Water Supply and Drainage, 2010, 36(S): 420-423.