

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2021.05.024

欢迎按以下格式引用:张小波,姚池,武立功,等.尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学方案探索[J].高等建筑教育,2021,30(5):177-185.

尾矿库溃坝虚拟仿真 实验教学方案探索

张小波^{1,2},姚池^{1,2},武立功¹,杨建华^{1,2},蒋水华^{1,2}

(1. 南昌大学 建筑工程学院,江西 南昌 330031;2. 江西省尾矿库工程安全重点实验室,江西 南昌 330031)

摘要:由于尾矿库溃坝规模大、破坏性强,在实践教学中开展物理模型实验困难较大。虚拟仿真实验教学作为一种创新型教学模式,在教育教学中得到了很好的应用并已取得良好的效果。以南昌大学尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学体系为基础,提出“一平台、二定位、三层次、四模块”的虚拟仿真实验教学方案,阐明尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学方案及其特色,总结了虚拟仿真教学方案在实施过程中存在的两个主要问题,并提出了相应解决对策。

关键词:尾矿库溃坝;实验教学;虚拟仿真

中图分类号:G642

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2021)05-0177-08

尾矿库是用来堆存尾矿的特殊工业建筑,是金属矿山三大控制性工程之一,尾矿库能否安全稳定运行,对于矿山生产管理有着至关重要的影响^[1]。尾矿库溃决后往往会导致重大灾害,造成严重的生命财产损失。作为一种特殊的水工建筑物,尾矿库的工程安全已成为矿山工程和水利工程研究的一个重要方向,但长期以来并没有得到足够的重视。在现有的尾矿库实验教学中,教学方式传统、实验方法落后、实验效率低等问题日益突出,加之尾矿库溃坝规模大,难以通过物理模型实验进行演示,因此,无法向学生直观展示尾矿库溃坝灾害的严重性。随着计算机和信息技术的发展,基于虚拟仿真技术的实验教学方案已被部分高校的本科教学所采用,也为尾矿库工程安全的实验教学提供了新思路。

开展虚拟仿真实验教学是推进现代信息技术融入实验教学项目、拓展实验教学内容广度和深度、延伸实验教学时间和空间、提升实验教学质量和水平的重要举措^[2]。虚拟仿真作为一种新兴技术已经在水利工程和土木工程的相关实践教学环节中到了应用^[3-4]。在尾矿库溃坝实验教学模式

修回日期:2020-06-13

基金项目:江西省高等学校教学改革研究课题(JXJQ-17-1-13;JXJG-17-1-50);南昌大学学位与研究生教育教学改革课题(NCUYJSJG-2021-021)

作者简介:张小波(1989—),男,南昌大学建筑工程学院讲师,博士,主要从事岩土工程研究,(E-mail)rock_zhangxb@126.com;(通信作者)杨建华(1987—),男,南昌大学建筑工程学院副教授,博士,主要从事水工结构工程研究,(E-mail)yangjianhua86@ncu.edu.cn。

改革中,应积极借鉴现有的虚拟仿真应用实例,基于虚拟仿真技术构建尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学体系,创新实验教学方式,提高实验教学效果,进而增强学生对科研实验的兴趣,提高创新探索能力,实现高校创新型人才培养的目标。南昌大学现有江西省尾矿库工程安全重点实验室,该实验室是国内首个尾矿库安全领域的省级科研平台,通过与南昌大学建筑工程学院的水利工程虚拟仿真中心结合,笔者所在团队开展了与尾矿库工程相关的虚拟仿真本科教学方案探索。

一、虚拟仿真应用于尾矿库实验教学的必要性

尾矿是由选矿厂排放的尾矿矿浆经自然脱水后所形成的固体矿业废料,是固体工业废料的主要组成部分。尾矿库通过筑坝拦截谷口或围地构成,用以贮存尾矿。在现有的尾矿库中,安全投入不足,尾矿库安全基础薄弱,监察、设计、施工中“先天不足”的问题普遍存在。尾矿库溃坝造成的重大灾害时有发生。例如:2018年9月8日,山西省襄汾县新塔矿区980平硐尾矿库发生特别重大溃坝事故,泄砂波及下游500米左右的范围,造成了277人死亡和近1亿元人民币的直接经济损失。2019年1月25日,巴西米纳斯吉拉斯州一铁尾矿坝决堤,溃坝后冲毁矿区办公设施和附近居民社区,造成165人死亡、160人失踪,被冲毁区域宽度约150米且绵延数公里。

在实际溃坝事故的分析中,大多只关注尾矿库溃决后的破坏形态,而对尾矿库溃决过程的特点和规律缺乏直观认识。以巴西铁尾矿库溃坝为例,现有的资料仅能显示溃坝后泥沙流的影响范围和危害程度,而对于铁尾矿库溃决时坝体的溃决形态变化、溃决时泥沙流的演进过程及溃坝的原因则难以考究。尾矿库工程地质条件和周边地理环境对尾矿库溃坝的影响很大,因此准确掌握尾矿库周边的地形地貌条件,明确尾矿库周边的居民点以及重大财产分布是进行尾矿库溃坝分析的前提。然而,尾矿库的地理位置一般较偏远,多位于山区沟谷,其库区往往存在扬沙、坡面失稳等众多安全隐患,难以在尾矿库区现场开展实验教学。由于室内实验室场地有限且开展尾矿库溃坝的实验成本高,因此利用物理模型进行本科教学演示不太现实。可见,传统的实验教学方式很难满足尾矿库溃坝实验教学的全面开展。

虚拟仿真实验教学技术由于其智能、便捷和高体验性已经在教育教学中广泛使用,多所高校也已经开始将虚拟仿真实验教学体系在土木工程和水利工程等工科中应用,并且取得了良好的教学效果^[5-9]。传统的模型试验和实践教学方式已经难以满足尾矿库溃坝相关的教学需求,在我国尾矿库众多,质量良莠不齐的现状下,创新教学研究方式,紧跟时代步伐,将虚拟仿真技术应用于尾矿库溃坝的实验教学中,形成一套创新、高效、实用、准确的虚拟仿真实验教学方案成为时下的迫切需求。

二、虚拟仿真实验教学方案的建立

为克服传统方式下尾矿库溃坝实验教学的不足,缓解教学模式落后和创新人才培养之间的矛盾,南昌大学水利工程虚拟仿真中心联合江西省尾矿库工程安全重点实验室提出“顶层设计、以虚促实、开放共享”的建设理念,以江西省尾矿库工程安全重点实验室为基础,结合实验室现有设备资源,搭设尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学平台。图1给出了“一平台、二定位、三层次、四模块”的虚拟仿真实验教学方案。

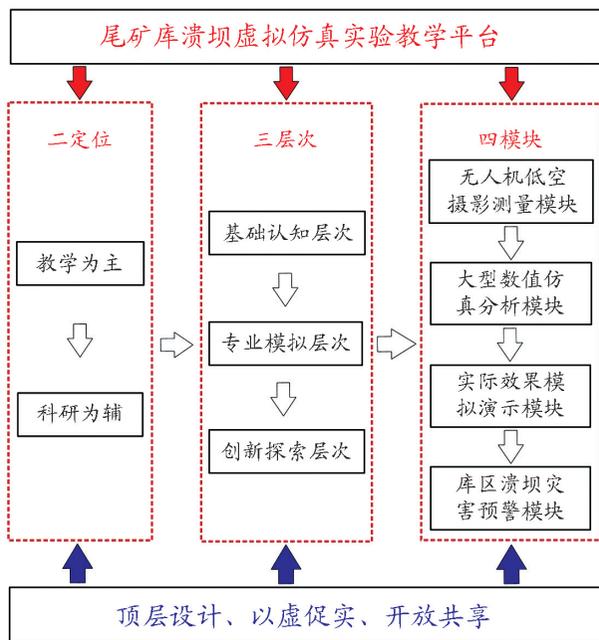


图1 尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学方案

(一) 一平台

“一平台”是指依托江西省尾矿库工程安全重点实验室和南昌大学水利工程虚拟仿真中心建立的尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学平台。

(二) 二定位

“二定位”是指尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学平台既可以实现以教学为主的知识导向型输入功能,又可以实现以研究为辅的能力培养型输出功能。一方面可以通过虚拟仿真实验教学,向学生展示尾矿库溃坝过程、破坏形态、影响范围等直观的仿真效果,让学生获取有关尾矿库溃坝的基础知识;另一方面还可以让学生自己设计不同的虚拟仿真方案,使用对比分析等方法考察尾矿库溃坝的发生机制,并尝试性地提出灾害预警对策,培养学生的实践创新能力并开发其研究性思维。

(三) 三层次

“三层次”是指将尾矿库虚拟仿真实验教学划分为基础认知层次、专业模拟层次和创新探索层次。基础认知层次指尾矿库运行及溃坝相关的基础知识学习和基础实验操作,通过虚拟仿真技术,建立尾矿库的虚拟仿真三维模型。学生可通过电脑终端随时查看尾矿库结构、地理环境和地形条件等信息,获得沉浸式的学习体验。通过虚拟实验室进行溃坝基础实验,让学生获得基本实验技能,突破传统课堂学习和实验的限制。专业模拟层次指以工程实例为依托,对尾矿库溃坝事故的原因、过程、后果等进行模拟再现,进而对溃坝的原因进行探究,并对溃坝泥砂流的影响范围进行预测。在此基础上总结工程经验,实现尾矿库的溃前灾害预测以及溃后灾害影响分析。创新探索层次指利用现有的实验设备和实验经验,设计创新型科研实验课题,例如对发生溃坝的可能机理开展探索性试验,尝试提出溃坝防灾的具体措施和方案。通过三个层次的尾矿库溃坝虚拟仿真训练,逐步提高学生的学习兴趣 and 科研能力。

(四) 四模块

“四模块”包括无人机低空摄影测量模块、大型数值仿真分析模块、实际效果模拟演示模块、库

区溃坝灾害预警模块。这四个模块实现了尾矿库溃坝的建模、分析和教学研究的全过程虚拟仿真,是尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学平台的基本组成部分。

1. 无人机低空摄影测量模块

获取尾矿库库区的地形地貌信息是建立尾矿库溃坝虚拟仿真实验的基础,只有基于实景信息的仿真模型进行教学演示才能达到实验教学的目的。无人机航空摄影测量因其具有成本低、周期短、效率高等优点,为地理信息的获取、环境监测、应急指挥等提供了一条新的技术途径,具有广阔的发展和前景^[10]。无人机航空摄影测量以摄取得到的地表照片为基础,根据几何特征和物理特征进行量测和分析,从而确定地面上物体的形状、大小、空间位置及相互关系。无人机低空摄影测量工作可分为外业(数据获取)及内业(数据处理)两大流程。外业的主要任务是通过无人机携带专业航测相机获取航测影像,使用无人机的定位系统与地面控制站组成的实时差分系统获取影像的 POS 数据,最后通过传统测量模式获取控制点数据。内业的主要任务是通过对外业获取的航测数据进行处理,获取所需要的航测 4D 产品,使用 APS 系列软件获取相片的像素单元,以单位像片组成的一束光线作为一个平差单元,以中心投影的共线方程作为平差的基础方程,通过各光线束在空间的旋转和平移,使模型之间的公共光线实现最佳交会,从而确定地面所有点的空间位置信息,最后根据需求通过处理输出 DOM(数字正射影像图)、DEM(数字高程模型)、DSM(数字表面模型)、DLG(数字线画图)^[11]。采用 Context-Capture Center 进行数据处理可获取航测地区的三维实景模型,图 2 为无人机航测获得的江西省铅山县永平尾矿库的三维实景模型。由图可知,实景模型可真实反映尾矿库周边的地形、地貌及建(构)筑物等地理环境信息。通过在电脑上实时查看和分析三维实景模型,学生可以准确把握尾矿库整体情况及地理环境,加深对工程现场的认识和理解,打破传统学习的时间和空间限制,同时也可以避免现场实践的潜在危险。



图 2 基于无人机航测的尾矿库三维实景模型

2. 大型数值仿真分析模块

为了实现尾矿库溃坝的全过程演示,需建立合理的数值仿真模型来模拟溃坝后库区水和尾砂等介质的运动形态。尾矿砂有别于普通流体,在矿砂的模拟分析中涉及弹性力学、流体力学、流体动力学、岩土力学以及砂粒和水之间的多物理场耦合等相关知识。正确分析尾砂粒子之间错综复杂的力学关系尤为困难,当库区面积较大,尾砂量巨大的情况下更是难上加难。传统的实验设备和实验方式很难实现真实状态下砂流行为的再现。基于有限元、有限差分、光滑粒子流体等原理的大

型岩土水利计算软件如 Ansys、Fluent、Flow-3D、Mike、PFC 等组成了强大的数值计算分析模块,将无人机测量得到的数据进行整理分析并建立计算网格,再利用计算机集群进行计算加速。以江西省永平尾矿库的虚拟仿真模拟为例,将航测得到的数据进行整理,并导入 Civil-3D 软件中进行三维建模,然后将模型导入基于有限差分法的 Flow-3D 软件进行网格划分、边界条件设置以及计算时长和时间步距的设置,利用 Flow-3D 进行模拟计算可以得到砂流的流速、压强以及任意时刻坝体的溃败特征。此外,还可将模型导入其他的计算程序进行计算,将计算结果进行对比,实现了溃坝过程仿真中的多角度分析、多方法比较、多理论验证,力求数值仿真分析过程的快速和高效。

3. 实际效果模拟演示模块

尾矿库溃坝后的大致过程如下:尾矿坝发生漫顶后,溃坝水流开始冲刷下游坝体,泥沙被不断的夹带和冲刷;坝体坡面下游形成初始冲槽,在水流的持续冲刷下,坝体表面的冲槽逐渐加深变宽;随着溃口流量的加大和流速的加快,冲槽逐渐向坝体上游推进,冲槽边坡出现失稳坍塌,坝体随之溃败^[12-13]。在数值仿真基础上,运用 3DS-Max、Flow-3D 以及 RealFlow 等软件进行实例建模,并对溃坝砂流进行动态演示。以溃坝过程中坝体的破坏形态,溃坝砂流的流动特征及对下游的淹没区域为对象进行仿真再现。如图 3 为发生漫顶溃坝时溃坝水流对坝体的侵蚀过程,在软件中输入相应的坝体物理参数及边界条件进行仿真可以直观地观察冲槽的形成和发展过程。学生只需要根据实际的工程背景,改变坝体尺寸、材料的参数及流体的相关性质,即可进行坝体溃败过程的模拟仿真。运用 Arcgis 等软件,导入之前无人机测绘得到的数据并进行三维建模,可以完整呈现库区周边的地理环境及库区的地形特征(如图 4 所示)。在此基础上,软件可实现下泄尾砂量和尾砂覆盖面积的计算,为尾矿库溃决后灾害影响范围的精确测量和控制提供方便。同时,流体的流速、压力、深度、流量等信息也可以方便读取(如图 5 所示)。相比传统的物理实验,虚拟仿真技术在条件设置、流量控制、结果读取、数据处理等方面为教学和科研提供了便利,也极大地激发了学生的学习和科研兴趣。

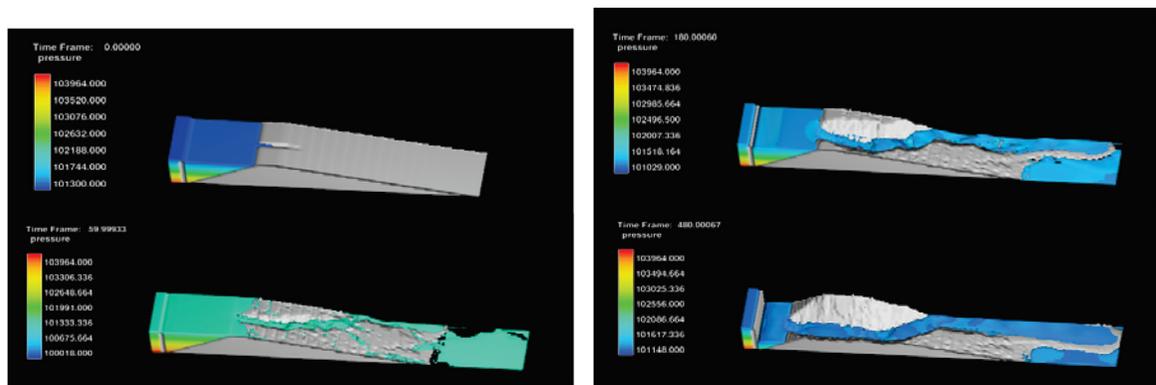


图 3 尾矿库漫顶溃坝过程模拟

4. 库区溃坝灾害预警模块

辨识并获取尾矿库溃坝前兆信息,实现对溃坝险情的早期预警,是确保尾矿库安全运行的关键,也是当前溃坝灾害领域的热点关注问题,因此库区溃坝灾害预警是尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学中的重要环节。

首先,通过尾矿库溃坝全过程的虚拟仿真再现,让学生对坝体溃决的动态演化和最终结果有了初步的认识。然后,结合库区工程地质条件、周边地形地貌特征,以及坝体和尾砂的物理力学性质

等影响因素进行分析,指导学生考察溃坝的发生原因,并根据影响程度对不同因素进行分类分级,初步建立溃坝灾害诱因的模块化分析方法。最后,指导学生通过系统分析各类因素在不同水平下对溃坝路径及灾害演化过程的影响,建立溃坝预警指标体系,并尝试性地提出尾矿库溃坝的综合预警方法。在这一实验教学过程中,通过指导学生分析尾矿库溃坝灾害的诱因及其影响水平,培养学生利用专业知识分析具体问题的能力,通过建立尾矿库灾害预警模块,提升学生的实践创新能力。

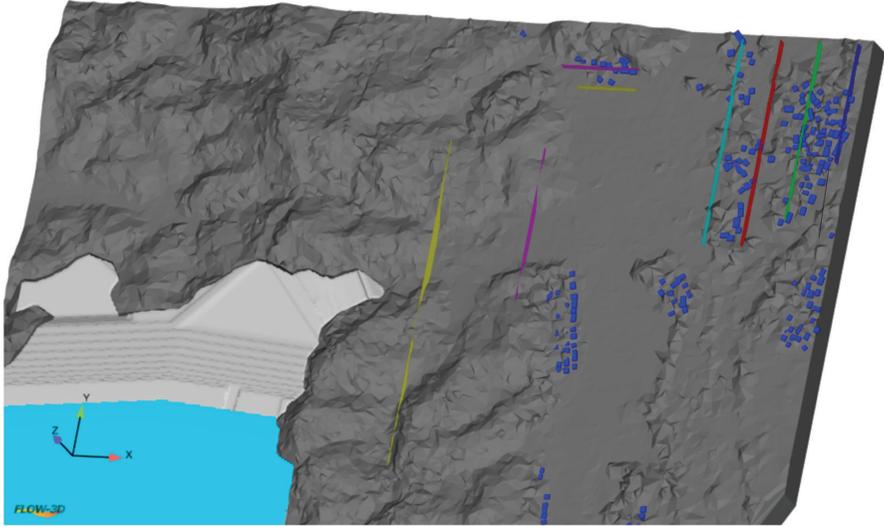


图4 尾矿库库区三维模型

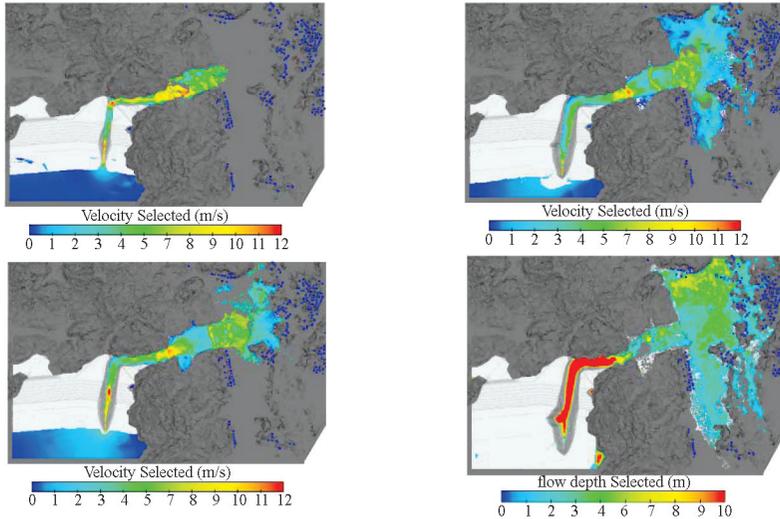


图5 尾矿库溃坝砂流影响范围模拟

三、虚拟仿真实验教学体系建立的目标

(一) 构建多层次教学培养方案,培养学生的科研热情及创新能力

依照学校“培养新时代创新型水利人才”的培养目标,立足实际工程项目,从基础性认知到创新型探索,以循序渐进的教学研究方式从知识导向过渡到科研训练,逐步培养学生的科研兴趣及热情。将科研探索建立在实际工程上,将虚拟仿真技术应用于实际工程中,将研究成果应用于指导生产实践。人才培养立足社会实际需求,从获取专业知识到培养创新能力,再到指导生产实践,实现

人才培养中产学研的相互融合和相互促进,为创新型人才的培养提供平台和有效方案。

(二) 创新校企合作模式,创建创新型尾矿库虚拟仿真平台

在当前尾矿库安全隐患突出的情况下,学校加强与安监部门、设计单位、生产单位和高水平信息技术公司合作,以实现信息交流、人才交流和技术交流。通过选派学生到生产单位实习,一方面可以及时获取尾矿库的最新资料,及时更新和优化虚拟仿真实验的教学素材;另一方面还可以带动尾矿库生产单位的校企合作,实现科研成果和技术的及时转化,推动虚拟仿真实验教学平台向先进化、专业化和多维化发展。

四、尾矿库溃坝虚拟仿真实际应用存在的困难及解决策略

(一) 仿真设备成本高,维护费用高

无人机航测系统包括无人机、RTK、相机以及 APS 等后处理软件,每一部分的设备造价都很昂贵。除了设备的购置外,在日常使用中的维护费用也是一笔不小的开支。设备长期使用导致的损坏和老化大大影响航测精度和准确性,为保证教学研究效果不受影响,必须及时维修和更换;因此,主管部门应加大相关经费投入,以维持虚拟仿真实验教学的正常运转。同时,通过开展校企合作模式,可将虚拟仿真实验教学成果提供给生产单位以便指导尾矿库安全运营和管理,作为回报,生产单位可为虚拟仿真实验室设备更换和维修、日常运行和管理提供必要的经费支持。

(二) 技术及设备更新较快

随着设备及技术的不断迭代更新,新型科技产品和技术手段的出现也推动着实验教学的发展。高仿真、多感知、高自主性的 VR(Virtual Reality) 技术已经开始应用于安全工程教学^[14],立体化感知型课堂设计大大提高了教学效果。基于 AI(Artificial Intelligence) 技术的计算机辅助教学系统开始应用于学生个性化自适应学习方法培养,真正做到因材施教,帮助学生建立更适合个体特征的学习环境和训练策略,极大地提高了教育教学的“智能化”水平^[15]。更多的新技术还在不断涌现,及时创新教学模式和实验方式是虚拟仿真实验教学体系建设的难点,也是尾矿库溃坝实验教学体系长远规划和持续发展的必经之路;因此,应及时将前沿科技与尾矿库溃坝实验教学相结合,及时更新和完善教学方案,以进一步提升学生的学习兴趣,提高实验教学的效果。

五、结语

实验教学方式的改革对提高尾矿库溃坝教学研究水平至关重要。南昌大学尾矿库溃坝虚拟仿真实验教学方案的提出与实践为学生提供了自主实验学习平台,帮助学生学以致用,培养了学生的工程实践能力和创新意识,有效解决了学校创新型人才培养与实验资源不足之间的矛盾,为虚拟仿真技术与工程学科教学的结合提供了新思路。为此,学院将继续加大虚拟仿真实验体系的投入,加快虚拟仿真实验教学技术操作管理人员的培训,不断更新技术和设备,最大化地发挥虚拟仿真实验教学的优势,全面提高学校教学育人和科学研究水平。

参考文献:

[1] 魏作安,尹光志,沈楼燕,等. 探讨尾矿库设计领域中存在的问题[J]. 中国矿业, 2003, 12(3): 60-61;65.

[2] 中华人民共和国教育部. 教育部关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作的通知[EB/OL]. (2012-10-01)

[2014-12-19].

- [3] 杨建华, 姚池, 刘成林, 等. 水利工程虚拟仿真实实践教学探索[J]. 高等建筑教育, 2017, 26(5):134-137.
- [4] 庞瑞, 王璐, 陈桂香, 等. 土木建筑虚拟仿真实验教学中心建设与实践[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(6):107-115.
- [5] 郭恒宁, 贺志启, 刘艳, 等. 土木工程实验教学的虚拟仿真平台设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(3):143-145.
- [6] 赵志强, 刘洪涛, 马念杰. 虚拟仿真技术在地下工程教学中的应用[J]. 教育教学论坛, 2016(26):183-185.
- [7] 王淑婧, 贺行洋, 邹铭权, 等. 土建类虚拟仿真实验教学资源持续建设与实践[J]. 高等建筑教育, 2018, 27(5):159-165.
- [8] 陈铁, 李咸善, 汪长林, 等. 水电运行虚拟仿真实验教学系统的研究与实践[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(6):123-126.
- [9] 邓斌, 胡旭跃, 江诗群, 等. 水利工程虚拟仿真实验教学中心的建设与实践探究[J]. 教育现代化, 2018, 5(13):150-151.
- [10] 王峰. 无人机航空摄影测量在地形图测绘中的应用探讨[J]. 资源信息与工程, 2016, 31(3):121-123.
- [11] 陈凤. 基于无人机影像空中三角测量的研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2012.
- [12] 陈生水, 徐光明, 钟启明, 等. 土石坝溃坝离心模型试验系统研制及应用[J]. 水利学报, 2012, 43(2):241-245.
- [13] 姚尧. 金山店铁矿尾矿坝稳定性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.
- [14] 王起全, 张以波, 杨鑫刚. 虚拟现实技术在安全工程教学中的应用研究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(2):103-107.
- [15] 金艳. “互联网+”智能化实验教学辅助系统在教学管理中的研究与应用[J]. 中国新通信, 2018, 20(10):201.

Method research of experimental teaching on tailings reservoir dam break based on virtual simulation

ZHANG Xiaobo^{1,2}, YAO Chi^{1,2}, WU Ligong¹, YANG Jianhua^{1,2}, JIANG Shuihua^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China; 2. Key Laboratory of Tailings Reservoir Engineering Safety of Jiangxi Province, Nanchang 330031, P. R. China)

Abstract: Due to the large-scale and large destructive nature of tailings pond dam break, it is difficult to carry out physical model experiment in practical teaching. As an innovative teaching method, experimental teaching based on virtual simulation has been well applied in many fields of teaching and has achieved good results. Based on the virtual simulation system of the tailings dam break laboratory at Nanchang University, this paper proposes a virtual-simulation-based experiment teaching plan of “one platform, two orientations, three levels and four modules”. The specific program and its characteristics of virtual simulation experiment teaching on tailings dam break are introduced. Two main problems in the experimental teaching based on virtual simulation are summarized and corresponding solution countermeasures are put forward.

Key words: tailings reservoir dam break; experimental teaching; virtual simulation

(责任编辑 梁远华)