

土石坝力学参数反演技术研究进展与展望

袁俊平¹,邱豪磊¹,胡有方¹,朱俊高¹,何 宁²

(1. 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;
2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所,江苏 南京 210024)

摘要:系统梳理了影响力学参数反演结果的三项基本要素(待反演参数、反演方法和实测数据),并从4个方面系统总结了近年来土石坝力学参数反演技术的研究进展:①发展了智能反演算法;②针对多材料、多模型的参数反演问题,发展了“参数解耦”方法;③发展了影响反演结果可靠性的测点布置优化方法,以及消除观测误差、补充虚拟测值等测值预处理方法;④反演结果唯一性可通过相关性分析和试算验证等方式进行评判,反演结果的唯一性与工程特性、反演分析的基本要素相关。随着土石坝工程规模的扩大以及坝料、坝型的创新,需进一步发展实时动态反演技术和适用于新材料坝、新坝型的反演技术。

关键词:土石坝;力学参数;反演技术;智能算法;研究进展

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)03-0001-10

Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams//YUAN Junping¹, QIU Haolei¹, HU Youfang¹, ZHU Jungao¹, HE Ning² (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Three basic essentials, which affect the inversion results of mechanical parameters, were systematically summarized for earth-rockfill dams, including inversed parameters, inversion methods and measured data. Recent research progress on inversion technology were also reviewed in four aspects, which can be summarized as follows. ① Intelligent back analysis algorithms were developed. ② Multi-parameter decoupling methods were put forward for multi-material and multi-model inversion problems. ③ Optimization methods for measuring points arrangement were developed, as well as the pre-treatment methods for measured data, including observation error treatment and virtual measurement supplement. ④ The uniqueness of inversion results can be evaluated by correlation analysis and trial simulation, which is closely related to the engineering characteristics and essentials of parameter inversion. Along with the expansion of earth-rockfill dam's scale and the innovation of material and structure, it is necessary to develop new real-time inversion techniques and suitable inversion method for the dams with new materials or structure.

Key words: earth-rockfill dam; mechanical parameters; inversion technique; intelligent algorithm; research progress

土石坝具有适应性强、工程量小、施工方便及安全性好等优点,是水利工程建设中最常用的坝型,也是最有发展前景的坝型之一。随着筑坝经验的累积和筑坝理论及技术的提高,土石坝的坝高已达到300 m量级^[1]。由于地质条件复杂,受洪水、地震等自然灾害的影响,历史上,国内外曾均出现过土石坝破坏甚至溃决的事故,如美国的Teton心墙坝溃坝,我国板桥、石漫滩漫顶以及青海沟后面板坝溃坝等。为了保证土石坝的建设和运行安全,需进行变形和稳定等方面的计算分析,而获取可靠的坝体力学参

数是进行准确计算分析的前期和基础。对于已经建成运行的土石坝,由于设计、施工等复杂原因,坝体材料参数实际值往往与设计值相差很大;而且,由于筑坝材料和坝基覆盖层等具有明显的非线性和弹塑性特性,受设备、成本等方面的制约,以及试验环境和测试人员操作等因素的影响,采用室内试验、原位试验、经验类比法等传统方法难以准确获取材料参数。大量工程实践表明,利用坝体位移等原位监测结果进行反演,是较为准确确定材料参数的途径^[2]。

岩土工程参数反演分析研究最早可追溯到

20 世纪70 年代^[3],反演分析时通常依据现场监测到的位移、应变、应力、荷载等物理信息量,利用这些量和坝体及覆盖层材料的物理力学参数的对应关系,推算坝体及覆盖层的物理力学参数。这些量中位移数据较容易获取,且精确度相对较高,因此在现有反演分析中,位移反演分析应用最为广泛^[4]。岩土工程位移反演的研究大体经历了 3 个发展阶段:①20 世纪 70—80 年代为萌发阶段,主要聚焦岩体弹性反演理论和计算方法;②20 世纪 80—90 年代为发展阶段,主要关注材料本构模型和现场实测数据的处理;③20 世纪 90 年代至今为推广应用阶段,同时也涌现了许多智能反演方法。相应地,土石坝的位移反演技术也随之发展,其趋势大体表现为:①反演方法由解析法向数值法、确定性向不确定性反分析、非智能向智能优化算法发展^[4];②待反演材料由线弹性体向非线性(黏弹性、弹塑性)体拓展,多参数反演技术以及动力反演技术得到发展;③反演分析工况由单一筑坝过程向复杂荷载工况发展,并逐步覆盖坝体建设运行的全寿命周期。

为了更好地服务于土石坝工程施工优化和工程安全,本文梳理了土石坝力学参数反演的基本要素,系统总结了近年来相关反演技术的研究进展,并展望了反演技术的发展趋势。

1 土石坝力学参数反演的基本要素

土石坝力学参数反演的基本流程是:首先确定合适的材料本构模型和待反演参数,然后根据试验结果并结合工程经验,确定待反演参数的取值范围;再利用合适的反演方法,结合实测数据得到参数反演值;最终评价反演结果的合理性(图 1)。其中,影响参数反演结果的基本要素主要有待反演参数、反演方法以及实测数据。

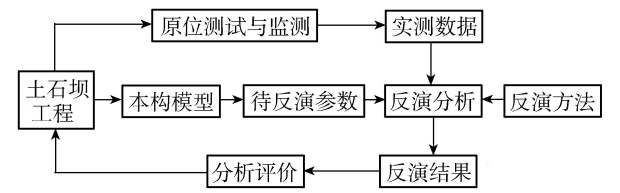


图 1 参数反演的基本流程

1.1 待反演参数

为确保反演结果的唯一性和准确性,应尽量减少待反演参数的数量^[5]。待反演参数一般选取为不确定性较大或对坝体应力变形性状影响较大的独立参数,后者一般通过参数敏感性分析来确定。参数敏感性分析方法主要有两种:一种是仅考虑单因子变化对结果影响的局部敏感性分析,通常用敏感性指标 SI 评价^[6];另一种是考虑多因子综合影响的

全局敏感性分析,常用方法有 Morris 法^[7]、正交试验设计法、回归分析法^[6]、Sobol 指数法^[8]、傅里叶振幅检验法^[9]等。当缺乏敏感性分析条件时,待反演参数可参照表 1(表中相关符号含义参见相关文献)选取,对于 UH 模型等较新的本构模型^[10],其模型参数反演的相关研究尚少见报道。

表 1 土石坝材料常用本构模型的待反演参数

本构模型类型及名称		待反演参数	相关文献
静力瞬变模型	邓肯 EB 模型	K, n, K_b, m	[2, 11]
		K, φ_0, K_b, R_f	[12]
	清华 KG 模型	H, K_v	[13]
动力模型	基于等价(黏)弹性模型的等效线性分析法	K, n	[14]
流变模型	沈珠江三参数模型	α, d, b	[15]
	南科院七参数模型	α, d, b m_c, n_c, d	[16] [2]
	长科院九参数模型	$c, \eta, c_\alpha, c_\beta, \lambda_v$	[17]
湿化模型	沈珠江湿化模型及改进方法	C_w, D_w, n_w a_w, b_w, c_w	[18] [16]
	永久变形模型		
永久变形模型	沈珠江永久变形模型及改进模型	c_1, c_2, c_4, c_5	[19]

1.2 反演方法

土石坝的反演分析多属确定性反演,由于正反分析法可以用相对简单的算法、较好地反演筑坝材料的复杂非线性特性,因而最为常用。土石坝力学参数正反分析法的基本流程大体可以分为两步:①本构模型、待反演参数及取值范围的确定。②待反演参数的正反分析优化:构建符合实际工况的正分析模型,取拟定的参数初值进行正分析;评估正分析计算结果和实测数据之间的误差,选用合适的算法迭代优化,使误差减小;待误差达到预定标准后,输出待反演参数的最终结果。

1.3 实测数据

用于土石坝反演的实测数据主要有两类:一类是现场试验的测试数据,另一类是土石坝施工和运行阶段的原位监测数据。

用于参数反演的现场试验数据主要是旁压试验和载荷试验的荷载-变形曲线。一般也采用正反分析方法。这种反演方式的优点是试验条件可控,分析工况较简单;但受岩土体性质复杂性和空间变异性等影响,所得反演参数的代表性可能有一定限制。

原位监测数据反映了坝体和覆盖层等在实际工况条件下的力学响应,因此基于原位监测数据的土石坝参数反分析更为有效和常用。用于力学参数反演的原位监测数据主要是竖向和水平向位移量,可分为绝对位移量和相对位移量。相比于采用绝对位移量,采用相对位移量进行参数反演具有以下优势:①采用不同时刻间的相对位移可反演不同类型的模型参数。如:坝体填筑施工时的力学响应主要与材

料的静力本构模型参数有关,而蓄水时坝体的力学响应很大程度上取决于材料的浸水湿化特性,坝体长期运行时的力学响应则主要反映了材料的流变特性。因此,反演前往往需对变形监测数据作适当处理,如计算相对位移量,或进行多元回归统计,或将变形总量分解为不同工况下的变形分量,再用于反演不同类型的模型参数^[20]。②施工对监测设备安的限制和干扰以及监测设备安装后均需要一定稳定时间,监测所得绝对位移量往往存在一定误差;而采用不同位置间的相对位移可减小这种误差,有利于提高反演分析结果的准确性^[21]。

2 近年来的研究进展

近年来围绕土石坝力学参数反演问题开展了大量研究,主要为反演技术的改进、多参数反演技术、测点优化布置和测值预处理、反演结果多解性和唯一性问题这4个方面。

2.1 反演技术的改进

为克服传统正反分析法不能并行计算、对于非线性多峰优化问题的求解效率不高等不足^[11],智能优化算法和机器学习算法(或称代理模型)被引入岩土工程反分析,形成了智能反演方法(表2、表3)。与传统的参数优化方法相比,智能优化算法减少了对初值选择的依赖,克服了优化结果容易陷入局部极值的缺点,且容易实现并行计算;机器学习算法可对大型复杂非线性系统进行模拟和替代,具有不依赖于求解问题的种类、算法简单易实现、求解速度快等优点,可在正反分析过程中替代复杂的有限元正演计算,也可直接建立物理响应和待反演参数之间的对应关系^[19]。

智能反演方法可分为智能正反分析法和智能逆反分析法。智能正反分析法以正反分析法为框架,根据具体实现方式又可分为两类:机器学习完全替代数值计算的智能正反分析法和机器学习不完全替

表 2 几种常见的智能优化算法

算法	优化策略	优点	不足	改进策略	
				针对算法本身的改进	通用的改进策略
进化类算法 (如:遗传算法、免疫遗传算法等)	基于遗传编码选择、交叉、变异等遗传操作的“优胜劣汰”策略	无需目标函数的梯度信息;基于概率的灵活搜索方式,变异有助于全局搜索;并行搜索方式	局部搜索能力较差;算法搜索容易“早熟”(解的多样性不足)	改进遗传算子 ^[2] 、采用其他局部搜索策略 ^[22] 等;改进编码方式 ^[23] 等	全局最优搜索策略:小生境技术 ^[24] ;多种群搜索 ^[15] ;目标函数操作法 ^[25] ;混合算法 ^[26] 等
群智能算法 (如粒子群算法)	基于“速度一位移”模型的群体协作竞争策略	无需目标函数的梯度信息;更新策略简单,仅基于自身历史最佳位置和群体最佳位置进行更新;并行搜索方式	收敛性不佳,存在搜索停滞现象;易陷入局部最优	改进惯性权重 ^[27] ,改进局部搜索策略 ^[28] 等;引入变异操作 ^[29] ,改进学习策略 ^[30] 等	
模拟退火算法	基于 Metropolis 算法的邻域搜索策略	无需目标函数的梯度信息;以一定概率接受较劣解,有助于全局搜索	恒温搜索时未采用并行策略,搜索效率不高;邻域搜索方式,可能陷入局部最优	采用多解并行搜索策略;采用自适应的温度调节策略等 ^[31] ;重升温操作,多次搜索策略;增大解的扰动范围 ^[32] 等	
禁忌搜索算法	基于“禁忌准则”和“特赦准则”的邻域搜索策略(解决连续优化问题时禁忌一个范围)	无需目标函数的梯度信息;“禁忌表”具有记忆功能,有助于全局搜索;更新时的候选解有预先比选	未采用并行搜索策略,搜索效率不高;邻域搜索方式,解的多样性不足,可能陷入局部最优	采用并行搜索策略等 ^[33] ;增大解的扰动范围等;采用动态“禁忌表” ^[34]	

表 3 几种常见的机器学习算法

算法	优化策略	优点	不足	改进策略	
				针对算法本身的改进	通用的改进策略
神经网络 (如 BP 网络, RBF 网络等)	优化网络权值和偏置,使得目标函数最小化	可灵活调整网络结构,且适用性广;强大的非线性回归能力,可以以任意精度逼近任意函数;网络参数容易训练	较难确定最优的网络结构;需大量的训练样本,同时需兼顾训练精度和泛化能力,防止“过拟合”;网络参数训练时可能陷入局部最优	改进误差函数、激发函数,改进标准梯度下降法 ^[35] ,采用自适应学习率算法 ^[36] 等	采用智能优化算法等全局优化算法进行训练 ^[2,16] 等
支持向量机	寻找“最优超平面”,使全部样本到“最优超平面”的偏差最小	理论较完备;引入“核函数”解决非线性回归问题	数据集大时核方法计算量也变大,比较适合处理小样本问题	采用新型核函数 ^[37] ;引入最小二乘系统 ^[38] ;采用在线训练算法 ^[39] 等	

代数值计算的智能正反分析法。其中,前者更为常用,其主要流程可分为4步:①本构模型、待反演参数及取值范围的确定。②机器学习算法训练样本和测试样本的构建:在材料参数取值范围内,利用正交试验设计、均匀设计或随机生成等方法来设计不同的材料参数取值组合,并将其代入有限元计算,进而生成由材料参数和力学响应值组成的计算样本,再按一定比例将其分为训练样本和测试样本^[2,15,17]。③机器学习算法的训练和测试:由训练样本训练算法内置参数,用测试样本测试算法的泛化能力,迭代训练和测试,直到误差符合预定要求。④待反演参数的正反分析优化:确定待反演参数初值后,利用机器学习算法计算力学响应,将计算结果与实测数据代入目标函数,采用智能优化算法进行参数优化,最终确定反演参数。这一方法在步骤②和③中会花费一定的计算工作量,但在参数优化时无需再反复调用有限元程序,因而可提高整体计算效率。

机器学习不完全替代数值计算的智能正反分析法较为少见,其主要步骤是:先用智能优化算法和数值计算进行正反分析,当智能优化算法进行局部搜索时,把接近局部搜索区域的历史计算样本作为训练数据来训练机器学习算法,再用训练好的机器学习算法代替数值计算进行参数反演^[40-41]。这种方法的特点是仅在智能优化的部分过程中(如耗时的局部搜索时)调用机器学习算法所建立的回归关系,优点是不需要人为预先构建计算样本,且机器学习算法模拟的局部关系针对性较强;但相对较小的计算样本量可能会降低机器学习算法的回归精度,而且前期的数值计算也会增加反演整体耗时。

智能逆反分析法的具体流程也可分为4步:①本构模型、待反演参数及取值范围的确定;②机器学习算法训练样本和测试样本的构建;③机器学习算法的训练和测试;④待反演参数的逆反分析优化。这种方法也需要在步骤②和③中花费一定的计算工作量,来建立以实测参数为输入、力学参数为输出的对应关系(与智能正反分析法中建立的对应关系相反),但后期可利用该映射关系直接输出力学参数的取值,省去了迭代优化过程。

2.2 多参数反演方法

土石坝力学参数反演时常会面临多参数反演问题,即对多种材料或材料的多个参数进行反演。常用的方法主要有联合反演法和参数解耦法。联合反演法是根据实测数据一次性反演出所有待反演参数值的方法^[15,17]。这种方法综合考虑了待反演参数与力学响应之间的复杂对应关系,在反演过程中可考虑待反演参数的“时效性”(即参数随工况和历时

而变化)。参数解耦法则假定待反演参数值不具有“时效性”,一般根据工程特性(材料分区、填筑过程以及测点位置等)和材料变形机制(瞬变、蠕变和湿化等),对不同参数进行分步(分期)反演^[16,42]。随待反演参数数量增加,联合反演法的计算量迅速增加,而参数解耦后的计算代价将大大降低,因此近年来参数解耦法较为常见。

采用参数解耦法求解多材料和多模型的参数反演问题时,一般需采用不同的参数解耦方式。进行多材料反演时,可将施工运行过程分成若干步,每步仅反演该时段内对坝体变形影响最大的材料参数,而其他材料参数则取先前的反演结果或试验值,由此依次得到各材料参数的反演结果^[16]。进行多模型反演时,一般根据模型参数的类型,选择坝体施工运行不同时间段的观测数据分别进行反演。如:由填筑期的变形测值反演瞬变模型参数,根据施工间歇期或稳定运行期的变形量来反演流变参数,用蓄水期的变形量来反演湿化参数等^[16,18],并认为反演得到的模型参数不具“时效性”。反演瞬变模型参数和流变模型参数时,参数解耦法的反演思路又可分为两种:①先根据填筑期变形量反演瞬变模型参数,再由瞬变模型参数和填筑期总变形量计算出流变量,进而完成流变参数的反演^[20];②先由施工后期的变形增量反演流变参数,再由流变模型参数以及总变形测值计算出施工期变形量,进而完成瞬变模型参数的反演^[42]。采用参数解耦法反演湿化参数时,一般先由瞬变模型参数和流变参数的反演结果,计算出水压力引起的变形量,再从蓄水期的相对变形量测值中分离出湿化变形量,从而完成湿化参数反演^[18]。

2.3 测点优化布置和测值预处理

2.3.1 测点优化布置

测点布置对反演结果的唯一性和精度都有很大的影响。针对测点优化布置的研究主要聚焦测点数目和测点位置^[43]。

为确保得到良好的反演结果,测点数目一般要求不少于待反演参数的数目,然而测点数目是否越多越好还未形成统一的认识^[43]。马春辉等^[44]曾提出一种优化测点数目的方法:分析反演模型计算误差和反演测点数目之间的关系,选择计算误差突变处的测点数目临界值作为合适的测点数目。

测点位置的选择则应遵循“大值原则”,“敏感性原则”和“最小方差原则”等。其中,“大值原则”以优先选择测值较大的测点为原则,以测值的绝对值为评价指标,对于同一量测误差水平而言,测值的绝对值越大,量测误差所占的比重就越小,测值可信

度越高^[45]。“敏感性原则”以优先选择对待反演参数变化较敏感的测点为原则,以参数敏感度为评价指标,认为参数敏感度越大的测点有利于获得稳定的反演值^[46]。“最小方差原则”以优先选择参数估计误差方差最小的测点为原则,以 Fisher 信息矩阵 $J^T J$ 的逆矩阵 D 为评价指标(其中 J 是灵敏度矩阵);根据优化准则的不同,该原则可进一步细分为“ D -最优设计”(D 的行列式最小化)、“ A -最优设计”(D 的迹最小化)和“ E -最优设计”(D 的最大特征值最小化)等^[47]。另外,宋志宇^[48]基于“大值原则”和“敏感度原则”提出了一种“监测点位置优选度”的概念和计算方法,可直观评价不同位置布置监测点的适用程度。

需要指出的是,反演结果的可靠性很大程度上依赖于可靠的监测结果,因此发展可靠有效的监测技术是当前研究关注的热点^[49]。

2.3.2 测值预处理

由于仪器和监测条件等原因,土石坝监测数据中不可避免地存在误差(包括系统误差、偶然误差和粗大误差(或称粗差))。为确保反演的准确性,需对测值原始数据进行预处理,减小系统误差和偶然误差、消除粗差。

其中,系统误差通常是仪器误差、方法误差等原因产生的,可能是一个大小和方向始终不变的定值(称为定值系统误差),或按某一特定规律变化的变值(称为变值系统误差)。定值系统误差可采用仪器对比、 F 检验和 t 检验等方法识别,变值系统误差可从残余误差的累进性和周期性两方面识别^[50]。识别确定系统误差后,可采用引入修正项的方式进行修正^[51],或采用对称测量和半周期测量等方式加以消除。偶然误差由外界环境条件等不稳定因素产生,往往符合正态分布规律且均值为零,可采用多次测量取平均的方法互相抵偿,或采用小波变换^[52]等技术提取和处理该误差。粗差是由外界条件的突变、监测仪器的偶然失效等意外事件产生的,也具有和偶然误差类似的偶然性和单独性,但其值比偶然误差更大。常用的粗差识别方法有:PauTa 准则(3σ 准则)、Grubbs 准则、Dixon 准则、Chauvenet 准则、信息熵法^[53]等;若在某监测数据中识别出粗差,需要将该测值剔除。

需要指出的是,当监测数据存在明显异常时,需要对异常数据进行综合分析评判。因为该异常可能是由粗差导致的(“不正常的”异常值),也可能是被监测对象本身所表现出的异常力学性态(“正常的”异常值)。其中,“正常的”异常值反映了被监测对象的异常响应,其分布具有连续性和累进性^[54]。黄

红女等^[54]提出了一种未确知滤波法用以区分这两种异常情况。若异常监测数据被识别为“不正常的”异常值,则应将其剔除;而对于“正常的”异常值,需对其作进一步核实,再决定是否保留。

此外,往往还需采用插值法对缺失的监测数据进行适当补充,以便获取较好的反演结果^[55]。

2.4 反演结果多解性和唯一性

由于岩土材料力学性质复杂,待反演参数和目标函数之间通常为复杂的隐式非线性关系,因此,对反演结果唯一性的论证往往比较困难,该问题也是岩土工程反演研究中最不充分的理论问题之一^[43]。

反演结果唯一性可通过相关性分析进行评判。若在量测范围内,所有待求参数的灵敏系数是线性无关的,则可以根据量测值同时唯一地辨识出所有的参数;反之,则不能同时唯一地辨识出所有参数^[56]。如果待反演参数之间存在相关性,也无法唯一地辨识出所有参数^[57]。反演结果唯一性的另一种评判方式是进行试算验证,即利用反演结果的正演误差、与估算值间的相对误差和保证率来评价解答的有效性^[58-59]。

反演结果的唯一性与工程特性(结构形态、施工过程、受荷形式、边界条件、初始状态等)、反演分析的基本要素等相关。研究表明,随着已知参数数量的增多、结构形状的复杂化以及测点布置的优化,参数的可辨识性均将提升^[43,46,60]。另外,适当增加监测量的种类、采用正反分析方法和正则化方法也有利于获得更稳定的解^[61]。但采用不同智能反演法对反演结果的影响还有待进一步验证。

3 土石坝力学参数反演的发展趋势展望

近年来,土石坝工程的发展主要呈现出两大特点:①坝体高度和规模越来越大。拟建和在建土石坝的坝高逐渐向 300m 级发展,例如:双江口砾石土心墙堆石坝坝高 314m、如美砾石土心墙堆石坝坝高 315 m 等,预计未来 15 年,中国特高坝的建设任务仍将超过全球总数的 50%^[62]。随着我国高坝大库建设向西部偏远地区推进,还将面临复杂地质条件、极端气候作用以及流域系统风险等一系列挑战^[62]。②新材料坝和新坝型不断发展。其中,新材料坝主要有堆石混凝土坝^[63]、胶凝砂砾石坝^[64]、超贫胶结材料坝^[65]以及利用天然堰塞体修建的堰塞坝^[66]等。近年来发展的新坝型主要有:适用于深厚覆盖层的高土质心墙堆石坝新型结构体系^[67]、均质土坝和混凝土防渗墙独立施工的混凝土防渗心墙坝型^[68],以及由堰塞体和人工填筑坝料相结合的堰塞坝型^[69]等。

土石坝工程的发展对服务于设计优化和施工运行安全的参数反演研究提出了新的要求,尤其是在土石坝力学参数的实时动态反演技术和适用于新材料坝、新坝型的反演方法等方面,有待进一步开展深入研究。

3.1 力学参数实时动态反演

由于对特高土石坝变形破坏机理的认识仍不充分,土石坝工程设计、建设和运行中仍会面临大坝变形(尤其是蓄水湿化变形和长期变形)难以准确预测、坝体运行时出现开裂和挤压破坏等情况^[1]。为确保高土石坝建设安全,有必要发展实时精细化反演技术,来反馈和评估材料长期演化和洪水、地震等重大自然灾害下的坝体的工作性状。

现有的土石坝力学参数反演多针对施工期或运行期的单一工况展开,反演结果是相对“静态”的,尚无法较好地对土石坝整个生命周期进行全过程、实时动态反演。

在边坡工程和地下工程领域,已有学者基于实时数值仿真模型和神经网络方法建立了边坡开挖期和地下洞室施工期动态反馈优化设计方法^[5]。其主要思路是将动态反演问题分为若干个静态反演子问题,用智能正反分析法按时序分期反演。这种方法对土石坝工程施工期的动态反演技术研究具有一定借鉴意义。但在施工期不同阶段应采用怎样的策略对反演结果进行继承、调整和修正,以及在长期运行期,如何利用不断更新和累积的监测数据进行反演、并提升反演预测精度,还有待进一步研究。

3.2 新材料坝和新坝型的力学参数反演技术

新材料坝和新坝型在材料性质、坝体结构、受力特性和施工方式等方面不同于传统土石坝,需要针对性地围绕新材料力学特性及其本构模型、待反演参数和测点数据的选择、受力特性及影响因素等开展相关研究。

目前,新材料坝和新坝型的力学参数反演主要受到以下两方面的限制:①对新型材料坝的坝料力学性质研究不足。以胶凝砂砾石坝为例,胶凝砂砾料具有较明显的塑性变形特征,适用的弹塑性本构模型仍有待研究^[70-71]。再如,堰塞坝的坝体材料往往具有匀一性差、密实度低、防渗性差等特点,针对堰塞料的空间变异性、受力变形(特别是湿化变形和长期变形)等特性的研究还少见报道。②对新坝型受力变形特性的研究不充分。以堰塞体和人工填筑坝料相结合的堰塞坝型为例,对堰塞体进行整治时,需根据堰塞体的复杂形态特征“量体裁衣”,采取打设防渗墙、铺设土工膜、在上部或侧面新建坝等施工方式,因此堰塞坝的受力变形也会表现出与传

统土石坝不同的特点,需要开展针对性研究。近年来,针对新材料坝的材料性质和新坝型的受力变形特性,已有一些相关成果^[72-74],但在反演分析时如何较好地反映坝体材料、几何形态、结构型式和施工方式等方面的影响,还有待开展深入研究。

4 结论与展望

a. 影响参数反演结果的基本要素包括待反演参数、实测数据和反演方法。待反演参数常用敏感性分析法确定;实测数据一般为原位监测数据,常取相对位移量;为满足筑坝材料的复杂非线性反演要求,一般采用正反分析法。

b. 智能反演算法已发展为参数反演的主流方法。在智能正反分析方法中,智能优化算法代替了传统优化算法,机器学习算法代替了正分析的数值计算;而在智能逆反分析中,由机器学习算法建立起了实测参数和待反演参数之间的映射关系。

c. 土石坝力学参数反演研究由最简单的弹性模型向非线性模型发展,并逐步考虑了粗粒料的蠕变和湿化特性,以及动力特性和永久变形,同时发展了多参数联合反演和解耦反演方法。

d. 测点优化布置和测值预处理对反演结果有很大影响。一般要求测点数目不少于待反演参数的数目;测点位置可由“大值原则”,“敏感性原则”,“最小方差原则”和“监测点位置优选度”等方法优选;必须减小测值数据的系统误差和偶然误差,并消除粗差;当监测数据存在明显异常时,需考察被监测对象本身是否出现异常;当测值较少时,可通过插值法补充“虚拟测值”。

e. 反演结果的唯一性可通过相关性分析和试算验证等方式进行评判,现有研究表明反演结果的唯一性与工程特性、反演分析的基本要素均相关。

f. 在土石坝工程施工和长期运行期,如何利用不断更新和累积的监测数据进行反演、提升反演预测精度,以及对新材料坝和新坝型进行反演分析时,如何较好地反映坝体材料、几何形态、结构型式和施工方式等方面的影响,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 203-222. (WANG Xiaogang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 203-222. (in Chinese))
- [2] ZHOU Wei, LI Shaolin, MA Gang, et al. Parameters inversion of high central core rockfill dams based on a novel genetic algorithm[J]. Science China Technological

- Sciences, 2016, 59(5):783-794.
- [3] KAVANAGH K T, CLOUGH R W. Finite element applications in the characterization of elastic solids[J]. International Journal of Solids and Structures, 1971, 7(1):11-23.
- [4] 宋春晖. 地铁车站深基坑土体参数动态反演分析及变形预测[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011.
- [5] 向天兵. 大型地下厂房洞室群施工期动态反馈优化设计方法研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院武汉岩土力学研究所, 2010.
- [6] HAMBY D M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 1994, 32(2): 135-154.
- [7] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2):161-174.
- [8] SOBOL I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models [J]. Mathematical Modelling and Computational Experiments, 1993, 1(4):407-414.
- [9] CUKIER R I, FORTUIN C M, SHULER K E, et al. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients: I. theory [J]. The Journal of Chemical Physics, 1973,59:3873-3878.
- [10] 朱俊高, 赵晓龙, 何顺宾, 等. UH 模型对粗颗粒土适用性验证及土石坝工程应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(12):3873-3881. (ZHU Jungao, ZHAO Xiaolong, HE Shunbin, et al. Applicability verification of UH model on coarse-grained soil and its application in earth rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12):3873-3881. (in Chinese))
- [11] 张丙印, 袁会娜, 李全明. 基于神经网络和演化算法的土石坝位移反演分析[J]. 岩土力学, 2005,26(4): 547-552. (ZHANG Bingyin, YUAN Huina, LI Quanming. Displacement back analysis of embankment dam based on neural network and evolutionary algorithm [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(4):547-552. (in Chinese))
- [12] SUN Pengming, BAO Tengfei, GU Chongshi, et al. Parameter sensitivity and inversion analysis of a concrete faced rock-fill dam based on HS-BPNN algorithm[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(9): 1442.
- [13] 苏安安. 水布垭面板堆石坝土体参数的位移反演分析 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [14] 刘振平, 迟世春, 任宪勇. 基于土石坝动力特性的坝料动力参数反演[J]. 岩土力学, 2014,35(9):2594-2601. (LIU Zhenping, CHI Shichun, REN Xianyong. Back analysis of dynamic parameters of dam materials based on earth-rockfill dam dynamic characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(9):2594-2601. (in Chinese))
- [15] 迟世春, 朱叶. 面板堆石坝瞬时变形和流变变形参数的联合反演[J]. 水利学报, 2016, 47(1):18-27. (CHI Shichun, ZHU Ye. Back-analysis of instantaneous and rheological deformation parameters for concrete faced rockfill dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1):18-27. (in Chinese))
- [16] WU Yongkang, YUAN Huina, ZHANG Bingyin, et al. Displacement-based back-analysis of the model parameters of the Nuozhadu high earth-rockfill dam [J]. The Scientific World Journal, 2014,2014:1-10.
- [17] 马刚, 常晓林, 周伟, 等. 高堆石坝瞬变-流变参数三维全过程联合反演方法及变形预测[J]. 岩土力学, 2012, 33(6):1889-1895. (MA Gang, CHANG Xiaolin, ZHOU Wei, et al. Integrated inversion of instantaneous and rheological parameters and deformation prediction of high rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6):1889-1895. (in Chinese))
- [18] 何敏, 李宁, 张西前, 等. 黑河黏土心墙土石坝分期位移反分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1):259-264. (HE Min, LI Ning, ZHANG Xiqian, et al. Back analysis of displacements of Heihe clay core rockfill dam at different stages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1):259-264. (in Chinese))
- [19] 汪旭, 康飞, 李俊杰. 土石坝地震永久变形参数反演方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1):279-286. (WANG Xu, KANG Fei, LI Junjie. Back analysis of earthquake-induced permanent deformation parameters of earth-rock dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(1):279-286. (in Chinese))
- [20] 程壮, 陈星, 董艳华, 等. 基于 BP 神经网络的堆石坝参数二次反演与变形预测[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(8):112-117. (CHENG Zhuang, CHEN Xing, DONG Yanhua, et al. Two-step back analysis of parameters and deformation prediction for rock-fill dams based on BP neural network[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(8):112-117. (in Chinese))
- [21] 贾超, 郭志川. 相对位移反分析的 DFP 优化方法及其工程应用[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(4):206-209. (JIA Chao, GUO Zhichuan. DFP method of inverse analysis based on relative displacement and its engineering application [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2009, 23(4):206-209. (in Chinese))
- [22] HEDAR A R, FUKUSHIMA M. Minimizing multimodal functions by simplex coding genetic algorithm [J]. Optimization Methods and Software, 2003, 18(3):265-282.
- [23] NAGAO T. Homogeneous coding for genetic algorithm based parameter optimization[C] //Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Press, 1996:426-430.
- [24] MAHFOUD S W. Niching methods for genetic algorithms

- [M]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1995.
- [25] PARSOPOULOS K E, VRAHATIS M N. On the computation of all global minimizers through particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):211-224.
- [26] 张社荣, 何辉. 改进的遗传算法在堆石体参数反演中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(2):16-20. (ZHANG Sherong, HE Hui. Application of improved genetic algorithm to back analyzing parameters of rockfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2):16-20. (in Chinese))
- [27] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1):58-73.
- [28] 李占超, 侯会静. 基于改进粒子群优化算法的施工期拱坝结构性态反演分析[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4):24-28. (LI Zhanchao, HOU Huijing. Inverse analysis of structural behaviors of arch dams during construction period based on improved particle swarm optimization [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4):24-28. (in Chinese))
- [29] JIA Yufeng, CHI Shichun. Back-analysis of soil parameters of the Malutang II concrete face rockfill dam using parallel mutation particle swarm optimization[J]. Computers & Geotechnics, 2015, 65:87-96.
- [30] LIANG J J, QIN A K, SUGANTHAN P N, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3):281-295.
- [31] 黎阳, 李新宇, 牟健慧. 基于改进模拟退火算法的大规模置换流水车间调度[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(2):366-375. (LI Yang, LI Xinyu, MOU Jianhui. Large-scale permutation flowshop scheduling method based on improved simulated annealing algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(2):366-375. (in Chinese))
- [32] 陈华根, 吴健生, 王家林, 等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6):802-805. (CHEN Huagen, WU Jiansheng, WANG Jialin, et al. Mechanism study of simulated annealing algorithm [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(6):802-805. (in Chinese))
- [33] BORTFELDT A, GEHRING H, MACK D. A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem[J]. Parallel Computing, 2003, 29(5):641-662.
- [34] 葛金辉. 有时间窗的车辆路径问题及改进禁忌搜索算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2011(1):105-111. (GE Jinhui. Vehicle routing problem with time windows and improved tabu search algorithm[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2011(1):105-111. (in Chinese))
- [35] 刘曙光, 郑崇勋, 刘明远. 前馈神经网络中的反向传播算法及其改进:进展与展望[J]. 计算机科学, 1996(1):76-79. (LIU Shuguang, ZHENG Chongxun, LIU Mingyuan. Back propagation algorithm and its improvement in feedforward neural networks: progress and prospect[J]. Computer Science, 1996(1):76-79. (in Chinese))
- [36] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[C] //Proceedings of the 3rd International Conference for Learning Representations. Ithaca: arXiv, 2014.
- [37] ZHANG Li, ZHOU Weida, JIAO Licheng. Wavelet support vector machine [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B: Cybernetics, 2004, 34(1):34.
- [38] SUYKENS J A K, VANDEWALLE J. Least squares support vector machine classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3):293-300.
- [39] CAUWENBERGHS G, POGGIO T. Incremental and decremental support vector machine learning [C] //Proceedings of the 13th Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2001:409-415.
- [40] 张研, 苏国韶, 燕柳斌. 隧洞围岩损失位移估计的智能优化反分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5):1383-1390. (ZHANG Yan, SU Guoshao, YAN Liubin. An intelligent optimization method of back analysis for loss displacement of surrounding rocks of tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5):1383-1390. (in Chinese))
- [41] 黄伟, 刘华. 基于粒子群优化-高斯过程回归的智能岩土体参数快速反演方法[J]. 土工基础, 2016, 30(2):196-200. (HUANG Wei, LIU Hua. An inversion method using PSO and GPR for the rapid determination of the geotechnical parameters [J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(2):196-200. (in Chinese))
- [42] 李少林, 王朝晴, 周伟, 等. 高心墙堆石坝瞬变-流变参数解耦反分析方法及变形预测[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9):86-91. (LI Shaolin, WANG Zhaoqing, ZHOU Wei, et al. Decoupling inversion of instantaneous and rheological parameters and deformation prediction of high core-wall rockfill dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(9):86-91. (in Chinese))
- [43] 张志增. 横观各向同性岩体位移反分析的理论与应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [44] 马春辉, 杨杰, 程琳, 等. 基于量子遗传算法与多输出混合核相关向量机的堆石坝材料参数自适应反演研究

- [J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2397-2406. (MA Chunhui, YANG Jie, CHENG Lin, et al. Adaptive inversion analysis of material parameters of rock-fill dam based on QGA-MMRVM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6):2397-2406. (in Chinese))
- [45] 吕爱钟, 蒋斌松. 岩石力学反问题的几个基本问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊1):1921-1926. (LYU Aizhong, JIANG Binsong. Some fundamental points for inverse problem of rock mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (Sup1): 1921-1926. (in Chinese))
- [46] 王少伟, 徐丛, 苏怀智. 锦屏一级拱坝黏弹性工作性态反演分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(5): 62-69. (WANG Shaowei, XU Cong, SU Huaizhi. Back analysis of viscoelastic working behavior for Jinping-I Arch Dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5): 62-69. (in Chinese))
- [47] HAFTKA R T, SCOTT E P, CRUZ J R. Optimization and experiments: a survey[J]. Applied Mechanics Reviews, 1998, 51(7):435-448.
- [48] 宋志宇. 基于智能计算的大坝安全监测方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [49] 何宁, 王国利, 何斌, 等. 高面板堆石坝内部水平位移新型监测技术研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2):24-29. (HE Ning, WANG Guoli, HE Bin, et al. New technology for inner horizontal displacement monitoring in high concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup2): 24-29. (in Chinese))
- [50] 郇能惠, 徐竹青. 土石坝安全监测信息管理系统开发[J]. 水利水电技术, 2004, 35(4): 78-81. (LI Nenghui, XU Zhuqing. Development of information management system for the safety monitoring of earth-rockfill dams [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(4):78-81. (in Chinese))
- [51] 谭志伟, 冯燕明. 高面板堆石坝沉降监测性态研究[C]//高面板堆石坝安全性研究及软岩筑坝技术进展论文集. 北京:中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会, 2014:8-15.
- [52] 吴兆福, 高飞, 陶庭叶. 小波变换后的噪声信息在大坝变形监测精度评定中的应用[J]. 地球科学进展, 2008, 23(6):590-594. (WU Zhaofu, GAO Fei, TAO Tingye. Application of noise information based on wavelet transformation in evaluating precision of dam deformation monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(6):590-594. (in Chinese))
- [53] 史玉峰, 靳奉祥, 王健. 基于信息熵的测量数据粗差识别法[J]. 测绘通报, 2002(2):9-10. (SHI Yufeng, JIN Fengxiang, WANG Jian. Information entropy based gross error discrimination method for surveying data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2002(2):9-10. (in Chinese))
- [54] 黄红女, 华锡生, 宋小刚. 土石坝监测数据的未确知滤波[J]. 长江科学院院报, 2006(3): 32-35. (HUANG Hongnu, HUA Xisheng, SONG Xiaogang. Unascertained filtering method for monitoring data of earth rock-fill dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006(3):32-35. (in Chinese))
- [55] 田明俊, 周晶. 土石坝土体参数反演的一种新方法[J]. 土木工程学报, 2005(8): 118-122. (TIAN Mingjun, ZHOU Jing. An inverse analysis of embankment dam parameters by using a virtual displacement method [J]. China Civil Engineering Journal, 2005(8):118-122. (in Chinese))
- [56] BECK J V, ARNOLD K J. Parameter estimation in engineering and science [J]. International Statistical Review, 1977, 73(363):501-506.
- [57] 王建, 岑威钧, 张煜. 邓肯-张模型参数反演的不唯一性[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1054-1057. (WANG Jian, CEN Weijun, ZHANG Yu. Non-uniqueness of back-analyzed parameters of Duncan-Chang model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7):1054-1057. (in Chinese))
- [58] 肖磊, 黄耀英, 万智勇. RCC坝力学参数反演不唯一性概率统计分析方法探讨[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(7): 41-47. (XIAO Lei, HUANG Yaoying, WAN Zhiyong. A probability statistical analysis method for nonuniqueness of mechanical parameters inversion of roller compacted concrete dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(7): 41-47. (in Chinese))
- [59] 李至悦. 散体围岩力学参数位移反分析优化研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [60] 吕爱钟. 巷道围岩参数及地应力可辨识性的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1988(2): 155-164. (LYU Aizhong. Discussion of identifiability for parameters of the surrounding rock of a tunnel and in situ stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988(2):155-164. (in Chinese))
- [61] 刘迎曦, 李守巨, 李正国, 等. 岩体渗透系数反演的数值方法及其适用性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000(4):375-378. (LIU Yingxi, LI Shouju, LI Zhengguo, et al. Numerical methods and posedness of the inverse analysis for seepage problem [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2000(4):375-378. (in Chinese))
- [62] 周建平, 杜效鹄, 周兴波, 等. 世界高坝研究及其未来发展势[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 1-14. (ZHOU Jianping, DU Xiaohu, ZHOU Xingbo, et al. Research on high dams and developing trends [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2): 1-14. (in Chinese))
- [63] 金峰, 安雪晖, 石建军, 等. 堆石混凝土及堆石混凝土

- 大坝[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 78-83. (JIN Feng, AN Xuehui, SHI Jianjun, et al. Study on rock-fill concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 78-83. (in Chinese))
- [64] RAPHEAL J M. The optimum gravity dam, rapid construction of concrete dams [M]. New York: ASCE, 1970.
- [65] 张镜剑, 孙明权. 一种新坝型: 超贫胶结材料坝[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 32-34. (ZHANG Jingjian, SUN Mingquan. Review of study on over lean cemented material dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 32-34. (in Chinese))
- [66] 罗辉, 邓创, 赵高文. 2008—2017 年中国典型滑坡堰塞坝(湖)灾害事件统计与初步分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 17-24. (LUO Hui, DENG Chuang, ZHAO Gaowen. Statistics and preliminary analysis for typical landslide dams in China in past decade [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 17-24. (in Chinese))
- [67] 徐晗, 饶锡保, 潘家军, 等. 高土质心墙堆石坝新型坝体结构形式研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 61-64. (XU Han, RAO Xibao, PAN Jiajun, et al. New structure of high rockfill dam with earth core [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(1): 61-64. (in Chinese))
- [68] 郝学军, 李杰. 一种新的坝型: 混凝土防渗墙心墙坝 [C] // 2013 水利水电地基与基础工程技术: 中国水利学会地基与基础工程专业委员会第 12 次全国学术会议论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 6.
- [69] FOSTER D, BOLE D, DEERE T. Rio Grande Dam-seepage reduction design and construction [C] // Proceedings of the ASCE Rocky Mountain Geo-Conference. Reston: ASCE Geotechnical Practice Publication, 2014: 31-58.
- [70] 蔡新, 杨杰, 郭兴文. 胶凝砂砾石坝研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 431-441. (CAI Xin, YANG Jie, GUO Xingwen. Review of cement sand and gravel dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(5): 431-441.
- [71] 魏匡民, 陈生水, 李国英, 等. 胶凝粗粒料的弹塑性模型与应用研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 797-805. (WEI Kuangmin, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Elastoplastic model for cemented coarse-grained materials and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 797-805. (in Chinese))
- [72] XU Wenjie, XU Qiang, WANG Yujie. The mechanism of high-speed motion and damming of the Tangjiashan landslide [J]. Engineering Geology, 2013, 157: 8-20.
- [73] 赵元弘. 小南海水库地震堰塞坝体防渗处理[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 39-44. (ZHAO Yuanhong. Seepage control of the earthquake-induced barrier bar of Xiaonanhai Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 39-44. (in Chinese))
- [74] 王伟, 殷殷, 潘洪武, 等. 基于接触力学的堰塞坝防渗墙应力变形分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(12): 94-101. (WANG Wei, YIN Yin, PAN Hongwu, et al. Stress-deformation analysis of diaphragm wall in landslide dam based on contact mechanics [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(12): 94-101. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-11-01 编辑: 郑孝宇)

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号: 28-244, CN 32-1439/TV, ISSN 1006-7647, 双月刊, A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办, 是中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和 RCCSE 核心期刊。曾先后被评为中国高校百佳科技期刊、中国高校优秀科技期刊、全国水利系统优秀期刊、华东地区优秀期刊和江苏省优秀期刊。主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文, 主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、专题综述、水管理、国外动态等, 适合水科学、水工程、水资源、水环境领域的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行, 邮发代号: 28-244, 2021 年每期定价 15 元, 全年 6 期共计 90 元。可在全国各地邮局订阅, 也可直接向编辑部订阅。

编辑部地址: 南京市西康路 1 号 河海大学《水利水电科技进展》编辑部

邮政编码: 210098 电话/传真: 025-83786335

网址: <http://jour.hhu.edu.cn>

E-mail: jz@hhu.edu.cn 或 jz1981@vip.163.com

微信公众号: “水利水电科技进展”或“slsdkjjz”

