

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.08.034

基于实时更新数值模型的高陡边坡 动态仿真分析方法及应用

王 超, 张社荣, 张峰华, 杜成波

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 在水电工程中, 河谷两遍的工程边坡具有尺度大、高而陡的特点。同时这些边坡服务年限长, 稳定性要求高。对于耦合考虑施工进度和工程安全的动态分析还较少涉及。由于地质参数、边坡结构和开挖支护的实时变化, 对边坡工程安全的实时评价已成为制约水利水电工程建设安全的关键技术问题。考虑边坡施工过程中开挖进度的调整、新地质信息的揭露、支护方案的修改及计算参数的修正等信息实时变化的客观实际, 重点针对目前较少涉及的施工期高边坡工程安全的实时分析和控制问题, 提出了基于数值模拟技术的边坡实时安全仿真方法; 基于数据库技术和 ABAQUS 二次开发技术实现施工进度信息、地质信息及支护信息到数值计算模型的动态映射, 开发了边坡安全实时分析系统, 最终实现了与施工进度相适应的边坡安全状态实时仿真分析和预测。

关 键 词: 边坡工程; 实时更新数值模型; 动态映射方法; 边坡系统开发

中图分类号: P 642.2; TU 413.6, 457

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2016) 08—2383—08

A dynamic simulation analysis method of high-steep slopes based on real-time numerical model and its applications

WANG Chao, ZHANG She-rong, ZHANG Feng-hua, DU Cheng-bo

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In hydropower engineering, engineering slopes on both river sides have characteristics of large scale, high and steep geometry, long service life and high stabilization requirement. Due to real-time changes of geological parameters, slope structure and excavation support, real-time evaluation of slope safety is a key technical issue in hydropower projects. A real-time simulation method based on numerical method is developed by considering the change of excavation progress during slope construction process, the new geological information disclosure, the modification of supporting plans and the correction of numerical parameters. This procedure focuses on real-time analysis and control of the safety of high-steep slopes, which is seldom reported in the previous studies. Based on database technology and secondary development of ABAQUS software, the information of dynamic mapping the construction schedule, geology and support is implemented into the numerical model. Finally, a real-time analysis and control system for slope safety is developed to realize the simulation and forecast of the real-time slope safety status.

Keywords: slope engineering; real-time numerical model; dynamic mapping method; slope system development

1 引 言

库坝安全是水电工程成败的关键, 高陡边坡的实时安全已成为制约水利水电工程建设与运行安全的关键技术问题^[1]。水电工程边坡的运行环境复杂, 施工过程中开挖进度的变化、新地质信息的揭露、支护方案的修改及计算参数的修正等变化信息等, 都可能导致边坡稳定性恶化。因此, 大型水利水电

工程高陡边坡性能不仅仅取决于工程设计, 更与施工质量、运行控制等密切相关, 因此, 大型水利水电工程高陡边坡安全控制问题是一个贯穿于工程设计、施工、运行全过程的全生命周期问题^[2]。

边坡破坏失稳是一个涉及内部岩土组分和外部环境变化影响等因素的复杂过程, 目前尚未形成完善的理论体系^[3]。虽然目前边坡稳定性评价方法有多种^[4-8], 如刚体极限平衡法、有限元法、离散元法、

收稿日期: 2014-09-24

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划青年项目 (No. 15JCQNJC08000); 国家自然科学基金青年项目 (No. 51509182); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (No. 51321065)。

This work was supported by the Tianjin Youth Research Program of the Application Foundation and Advanced Technology (15JCQNJC08000), the Youth Scholars of Natural Science Foundation of China (51509182) and the Innovative Research Group Program of National Natural Science Foundation of China (51321065).

第一作者简介: 王超, 1986 年生, 男, 博士, 讲师, 主要从事水工结构安全评价技术方面的研究工作。E-mail: tjdam@126.com

通讯作者: 张社荣, 1960 年生, 男, 博士, 教授, 主要从事水电工程安全技术方面的研究工作。E-mail: tjuzsr@126.com

模糊数学方法、属性识别理论方法、突变理论方法等,但这些方法的研究对象,多集中于某一特定设计阶段、特定状态下典型工况的边坡问题,对施工期边坡动态变化过程中的实时安全性分析方法的研究还较少涉及。

目前工程人员在边坡施工过程中所面临的一个重大现实问题,是边坡结构内部状态和其所处的外部环境是不断变化的,比如施工期边坡开挖、新地质的揭露、支护方案的变化以及各种不同的荷载条件。一旦原始的边坡数值模型不再适用,就需要重新建立符合新情况的分析模型,而重新建立分析模型往往不具有时效性,甚至影响工程进度。如何有效分析评价动态变化条件下的边坡安全性,便成为工程建设中的关键技术问题。

本文针对目前较少涉及的施工期高边坡工程动态安全的实时分析和控制问题,将边坡实时的状态信息和荷载环境信息映射到边坡计算模型中,建立了动态更新数值计算模型,提出了基于数值模拟技术的边坡实时安全仿真方法;然后结合相应的数值分析方法和计算机技术,耦合考虑施工进度和工程安全的动态变化,开发了边坡安全实时分析系统,实现施工过程中边坡数值仿真分析的实时化。

2 边坡动态仿真数值分析方法

2.1 总体思路

边坡实时数值仿真分析是要实现实时快速地对

边坡当前安全状态进行仿真分析。边坡在施工和运行过程中,边坡的状态和其所处的环境是不断变化的,因此,就必须根据边坡实时状态信息建立边坡实时的计算模型。

其关键问题之一就是边坡计算模型的实时更新,而改变边坡的数值计算模型就会涉及对计算模型重新进行网格划分,对一个大型电站复杂边坡模型来说,进行自动剖分有很大难度。因此,本文提出在边坡初始数值模型上进行实时状态信息映射的方法实现边坡数值计算模型的更新。

边坡数值计算模型一般都包括大量的单元,在进行开挖进度、地质、支护等信息到数值计算模型的映射时,需要做大量的搜索工作来找到映射单元。为此,本文采用 SQL 数据库搜索引擎快速找到边坡信息改变区域在计算模型中对应的单元,采用 C#.Net 和 Python 语言的混合编程技术对 ABAQUS 数值计算软件进行二次开发,自动读取单元的搜索结果,并对其力学参数进行相应修改,实现边坡数值计算模型随实际状态信息的实时更新。基于更新后的数值模型,依据位移反分析理论进行边坡岩体力学参数实时反演;然后调用 ABAQUS 进行仿真计算,基于有限元强度折减法实时计算边坡在当前及后续施工状态下的强度储备安全系数,分析边坡当前及下一施工步的安全状态。边坡动态仿真数值分析方法的总体思路框架如图 1 所示。

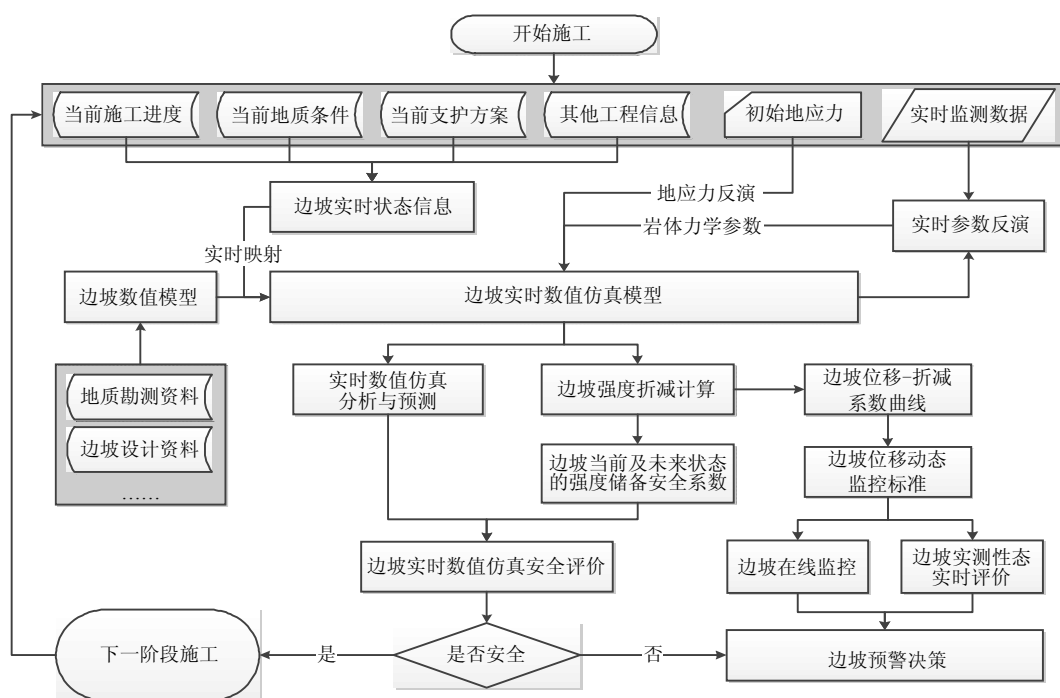


图 1 动态仿真数值分析方法的总体思路框架

Fig.1 Real-time numerical simulation analysis framework for high-steep rock slopes

2.2 边坡动态数值模型的建立

(1) 动态数值仿真模型的建立

按照本文采用的实时数值分析思路, 边坡实时数值仿真是基于原始状态下的数值模型来实现的。因此, 首先需要根据前期的勘察资料建立边坡原始状态的数值模型。为了建立动态数值仿真全过程分析模型, 满足后续边坡施工中实时仿真的需要, 模型建立过程需对边坡模型进行分区处理, 主要需考虑地质、开挖和支护等情况对模型的分区影响。主要体现在:

地质分区。根据提供的地质资料, 考虑风化、卸荷和断层分区, 建立实际的地质分区模型。

开挖分区。根据初始的边坡开挖设计, 按照边坡开挖分层信息对开挖体进行分区。

支护分区。支护分区有两种情况: 一是对于等效支护, 按照支护等效范围进行分区, 然后再按照单元工程对支护等效区域进一步分区; 二是对于实体支护, 直接按照单元工程对支护模型进行分组。

监测点的考虑。对于设计监测点, 应尽量使其与模型中的节点位置重合, 对于施工中增加的监测

点, 可根据测点的位置信息与计算模型中距离最近的模型节点对应。以方便进行监测值和计算值的比较和位移反演。

(2) 边坡动态数值仿真模型的入库

在施工过程中, 动态数值模型是通过边坡实时状态的映射实现的。这一过程需借助 SQL 数据库搜索引擎搜索映射单元, 再通过 ABAQUS 二次开发对相应单元进行属性改变而实现。因此, 将预先建立的边坡实时数值计算模型数据 (包括几何信息、材料信息、单元组信息) 上传到数据库中, 是实现动态数值模型实时更新的数据基础。

2.3 边坡实时状态到数值模型的更新映射

边坡实时状态主要是指施工进度、支护修改和地质情况更新等信息, 而边坡状态信息的映射则包括空间、时间和材料三部分信息的映射。空间信息是指映射的位置信息, 以映射后得到的单元集合来体现; 时间信息是指在按照施工步进行数值仿真计算时, 使映射信息生效的时间 (以数值计算中的荷载步体现); 材料信息即为材料的计算参数。本文中边坡实时状态信息映射的步骤如图 2 所示。

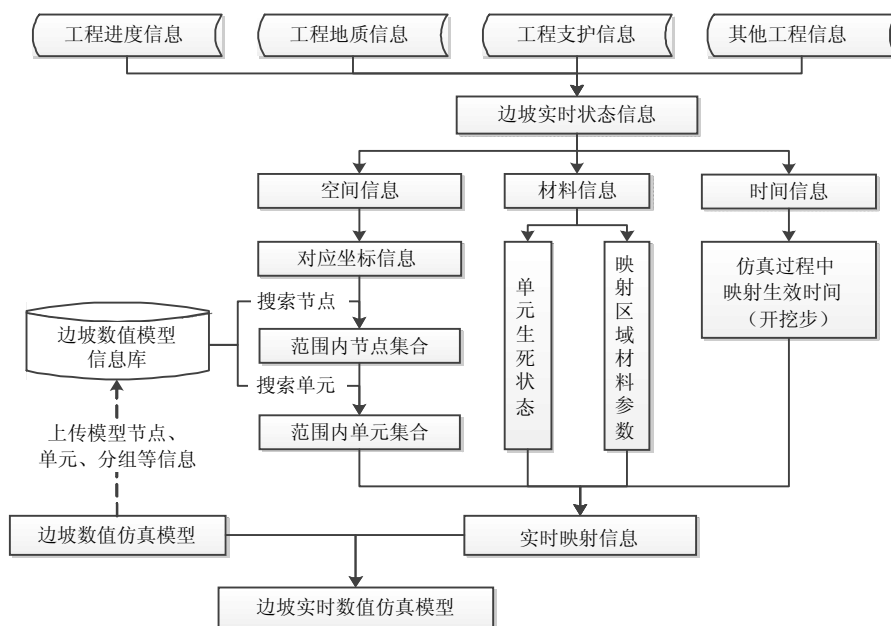


图 2 边坡实时状态信息的映射处理方法

Fig.2 General mapping method of real-time state information for slopes

2.3.1 施工进度映射方法

边坡工程一般自上而下分层进行施工, 这里划分每层开挖为一个开挖单元 (单元工程)。边坡施工进度映射主要包括开挖进度和支护进度两部分内容的映射, 这两种信息的映射都是依托于划分的单元工程实现的, 通过对各个单元工程的开挖支护状态

分别进行映射, 实现边坡整体开挖支护进度的映射。

(1) 开挖进度的映射

边坡开挖进度映射即为各个单元工程开挖进度的映射, 实现方法如图 3 所示。对于已经开挖、正在开挖的单元工程的判断, 是根据施工现场实时的施工进度信息进行的。

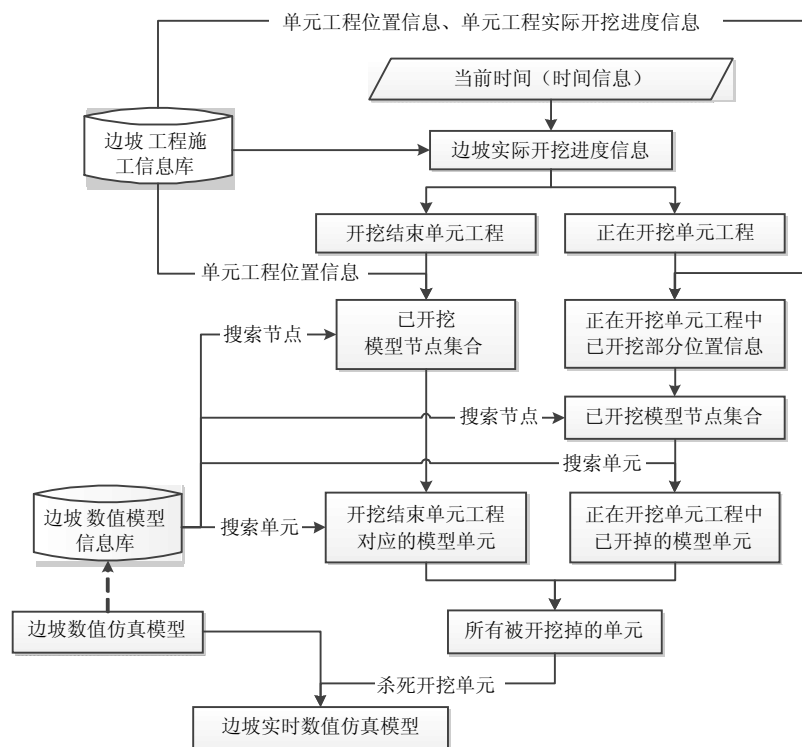


图3 边坡开挖进度的映射方法

Fig.3 Mapping method for the progress of slope excavation

已开挖结束的单元工程搜索。已经开挖结束的单元工程是指当前日期大于单元工程的实际开挖结束日期的单元工程，依次对各个开挖结束的单元工程按照其位置信息（高程和桩号范围），从边坡数值计算模型的所有开挖体单元中搜索出属于本单元工程的模型单元，将其对应的模型单元编号存入到已开挖模型单元集合中。

正在开挖的单元工程的搜索。正在开挖的单元工程是指当前日期小于单元工程的实际开挖结束日期且大于单元工程的实际开挖开始日期的单元工程，依次对各个正在开挖的单元工程进行搜索，搜索出属于本单元工程的模型单元，并将模型单元编号存入已开挖模型单元集合中。

开挖掉的单元映射到数值模型。根据已开挖模型单元集合中的单元编号索引到数值模型中的单元，在数值分析中，采用生死单元法，杀死开挖掉的单元。

(2) 支护进度的映射

支护进度的映射方法与开挖进度的映射方法很相似，但需对以下3处进行调整：①在搜索支护结束和正在支护单元工程时，应采用单元工程实际支护开始和结束日期进行判断；②在搜索单元工程对应的支护模型单元时，需要按照单元工程对应的支护范围信息，在边坡数值计算模型的所有支护等效

单元和实体支护模型单元中搜索已完成支护区域对应的单元，得到单元集合；③在将单元集合映射到数值计算模型时，在数值计算中应采用场变量实现支护单元材料属性的修改。

2.3.2 工程地质信息更新映射方法

受不同设计阶段勘察工作深度的限制和实际工程情况制约，设计过程中几乎不可能清晰掌握整个边坡的地质情况。在施工过程中会不断揭露新的地质情况，如果揭露的地质情况对工程安全产生了重要影响，原始的边坡数值模型不再适用。此时只有将新的地质信息在数值计算模型中予以考虑，才能准确模拟边坡的安全状态。而重新建立数值分析模型费时、费力，且不具有时效性，甚至影响工程进度。

地质更新信息映射就是对施工中新揭露的地质（即新地质）信息映射到数值计算模型中。本文采用的处理方法如下：①根据施工中新地质的位置信息编制程序，从计算模型中搜索新地质区域范围内的所有模型节点，例如，对于二维计算断面，将新地质区域用多边形区域框出，按照多边形各个边界的直线方程搜索多边形所包围的模型节点，进而找到对应的模型单元，组成新地质映射单元集合；②根据节点信息找到模型单元组成新地质映射单元集合；③对单元集合重新赋予新地质材料参数。

2.3.3 支护修改映射方法

在边坡施工中，当前设计支护不能保证边坡稳定时，一般采用加强支护的方法进行处理。本文在模型更新处理过程中，编制程序对数值分析程序进行二次开发，在数值模型中实现支护单元的任意添加和修改，以进行实际施工过程中的增加支护的模拟。

2.4 边坡开挖过程中实时反演

实时参数反演是针对边坡结构内部岩土材料参数在施工过程中不断变化的实际情况而进行的工作。

边坡一般采用自上而下分层开挖，岩土体的各种力学响应（变形、松弛深度等）是随着地质条件和开挖支护施工过程而不断变化的。比如当某层开挖揭示的地质条件有较大变化时，出露不良地质构造或岩性变差，这时开挖后岩体的变形和松弛深度将超出预计值，又如由于爆破质量差、施工进度快而支护滞后时，岩体的劣化也将比预计情况严重，如果仍然采用前期开挖的参数反演结果进行计算、评价及设计，就不能很好把握岩体的力学行为。因此，就需要根据施工过程进行岩体力学参数的实时反演。

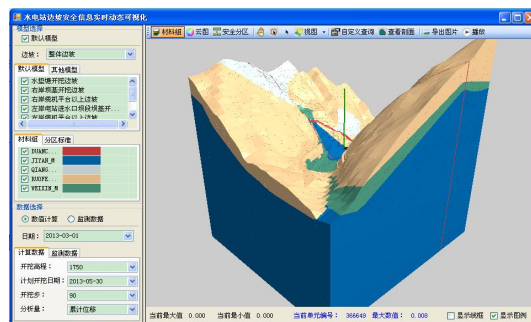
边坡岩体力学参数实时反演，采用遗传算法—神经网络智能位移反分析方法^[9]实现对边坡开挖或运行过程中的岩体力学参数进行实时反演。由于位移反分析方法较为成熟，本文不再赘述。

3 边坡实时数值仿真系统开发

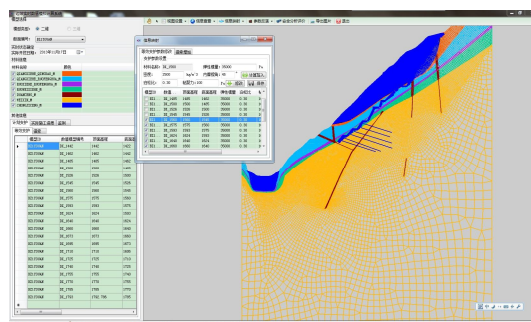
为了实现边坡实时数值仿真分析，按照本文提出的上述方法，基于 ABAQUS 有限元分析软件和 Microsoft SQL Server 数据库软件，采用 C#和 Python 编程语言开发了边坡实时数值仿真系统。主要包括边坡实时状态映射、参数反演、边坡安全性实时评价及预测和边坡变形动态监控标准分析 4 个模块。

其中，边坡实时状态映射是实时仿真的核心部分，是体现实时性的关键。系统中主要考虑的映射内容包括施工进度、地质更新及支护修改等，系统中以两种方式实现：一是施工进度信息映射。由于施工进度主要体现在边坡数值仿真过程的各个开挖步中，施工进度的映射是在后台计算中实现的。二是地质更新信息、支护修改信息等的映射。对于二维计算断面，系统中基于 OpenGL 图形绘制技术，实现以人机交互式操作的方式确定映射位置；对于三维数值计算模型系统依托于 CAD 软件，实现 CAD 中的模型更改位置到数值计算模型的映射。

其余模块均按照前述边坡动态仿真数值分析方法进行程序实现，不再赘述。数据库中用于地质、支护等信息映射的边坡三维整体和二维断面模型可视化界面如图 4 所示。需要说明的是，系统中三维模型可以实现任意剖切，图 4(b)中的二维断面便是通过图 4(a)三维模型剖切而来。这样可以方便工程人员在施工过程中，对任意所关注的断面进行监控分析。



(a) 可用于信息更新的三维整体边坡模型



(b) 可用于信息更新的二维断面模型

图 4 边坡地质更新及支护修改映射的可视化程序实现
Fig.4 Mapping method for geological information updating and support information change

4 边坡动态数值仿真分析的应用

以某水电站施工期右岸缆机边坡为例，利用本文所开发系统中的实时数值仿真功能对边坡开挖支护过程进行实时仿真评价，对边坡的后续施工提供决策建议。

4.1 工程概况

(1) 边坡地质条件

某水电站右岸缆机边坡最大高度约为 178 m，水平范围约为 265 m；自然坡度为 $40^\circ \sim 55^\circ$ ，局部为陡崖，基岩裸露；岩层横河展布，倾向下游，倾角 $70^\circ \sim 85^\circ$ ；岩性为变质火山角砾岩、变质火山细砾岩夹变质凝灰岩，变质火山细砾岩岩体完整，多为块状结构，部分次块状，变质凝灰岩夹层劈理

化明显,多呈薄层状,弱风化岩体 RQD 值为 50%~70%,微风化岩体 RQD 值平均为 70%~80%。边坡范围内有 2[#] 倾倒松弛岩体分布,其宽度为 70~150 m,水平厚度为 20~70 m,方量约为 $120 \times 10^4 \sim 150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(2) 边坡监测布置情况

右岸缆机边坡共设计有 32 个表面变形监测点,11 套多点位移计,30 台锚索测力计。截止 2013 年 04 月 20 日,1 755 m 高程以上已投入监测的仪器有表面变形监测点 19 个,多点位移计 6 套,锚索测力计 20 台。详细布置情况如图 5 所示(图中测点编号省略了 LJ-RBP)。

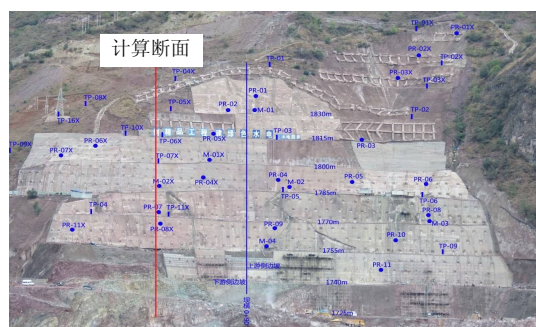


图 5 某工程右岸缆机边坡监测点位布置示意图
Fig.5 Layout diagram of monitoring points at the right cable machine platform

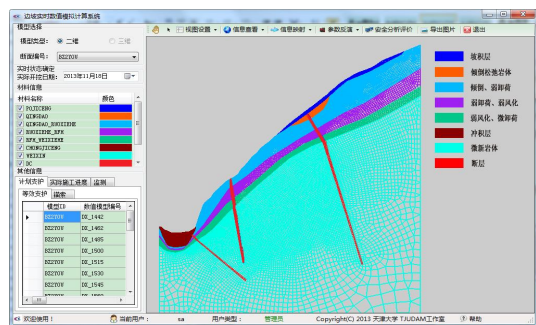


图 6 计算断面
Fig.6 A profile of numerical model

(3) 边坡施工中遇到的问题

根据右岸缆机边坡的监测数据分析,边坡高程 1 770 m 以上部位下游侧边坡变形过大,并且呈持续增长态势。截止 2013 年 4 月 20 日,1 740~1 770 m 高程下游侧边坡最大表面位移量约为 187.4 mm (TP-07X 测点),最大时段平均表面位移速率约为 4.8 mm/d (TP-07X 测点),均为红色等级;最大锚索荷载占设计荷载的 1.31 倍 (PR-08X 测点),最大锚索荷载速率约 10.2 kN/d (PR-08X 测点),处于黄色等级;深部位移 4 月初以来呈一定增长状态,孔

口位移速率约 0.93 mm/d。从现场巡视来看,1 830 m 高程及其以上部位边坡开裂、网格梁被拉裂、松土层局部出现塌方现象较为突出,表明雨水的渗入对边坡已产生一定影响。

结果表明:近一个月以来,右岸缆机下游侧边坡变形持续增加。这种新情况的发生就对原始的开挖支护方案提出了质疑,适应新情况的施工支护方案亟待提出。

4.2 基于实时更新数值模型的边坡动态仿真分析

(1) 计算断面的选择

根据检测中心对监测数据的分析结果,需在边坡下游侧 TP-07X 测点所在位置选择典型的断面为计算断面,计算断面的位置已在图 5 中进行标识。图 6 为计算断面的数值分析模型及其各单元分区,图中不同颜色表示不同的地质信息和支护信息的单元集合。

(2) 边坡当前实时状态信息映射

按照本文提出的动态数值模型的建立和更新方法,根据边坡的实际情况,考虑映射的信息为:映射边坡开挖和支护进度信息;映射已增加的支护,主要指针对边坡出现的问题已增加的支护措施;映射已损坏的支护,降低损坏支护的力学参数;映射待反演的岩层区域,同样采用映射地质信息的方式实现,如图 6 所示。

(3) 边坡岩体力学参数的反演和更新

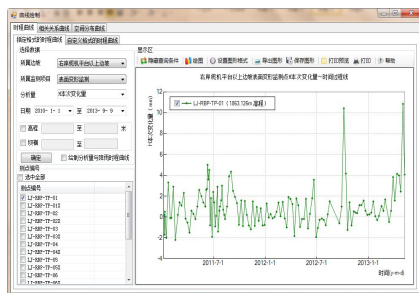
由于工程实际中边坡高程 1 830 m 及其以上部位边坡开裂、网格梁被拉裂、松土层局部出现塌方现象较为突出,加之雨水渗入,边坡表层“倾倒、弱卸荷”区域的岩土物理力学参数必然已经发生变化,且对边坡安全性评价有重要影响,需要重新评定其力学参数。

根据计算断面附近区域监测点的监测数据对待反演岩层区域的弹性模量、内摩擦角和黏聚力进行反演,系统实现过程界面如图 7 所示。反演结果为:待反演倾倒、弱卸荷区域弹性模量为 5 GPa,内摩擦角为 31° ,黏聚力为 0.32 MPa。

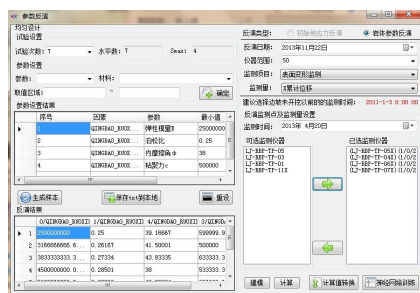
(4) 边坡支护方案确定

根据映射得到的最新边坡数值计算模型和参数反演结果,对施工方拟定的后续开挖支护处理方案及各种优化对比方案进行了实时仿真计算和对比,表 1 给出了其中 4 个典型处理方案的分析结果,依据计算结果并综合考虑经济和施工难易程度等多方面因素,最终确定了方案②为推荐方案进行后续边坡的开挖支护工作。本文系统的实时数值仿真过程界面如图 8 所示。图中分析量是指累计综合位移量;

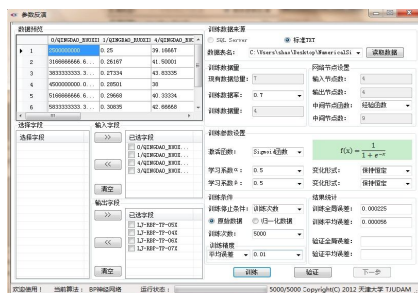
实际应用时可将累计位移量与分区预警阈值比较进行安全分区。



(a) 计算断面典型监测点的监测数据



(b) 参数反演设置



(c) 训练神经网络

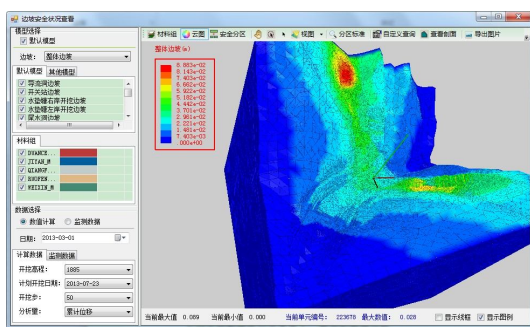
图 7 参数反演分析过程程序实现

Fig.7 Inversion analysis for mechanics parameters

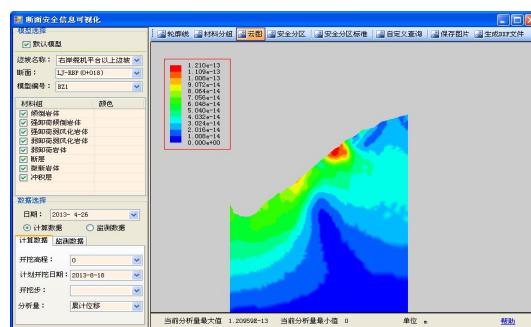
表 1 计算方案及仿真分析结果

Table1 Numerical schemes and results

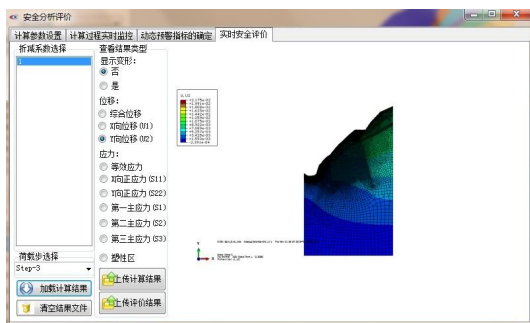
编号	初拟的开挖支护方案	分析结果
方案①	边坡开挖至高程 1 725 m, 实际支护至高程 1 755 m (按照原支护方案)	右岸缆机平台下游侧边坡高程 1 740~1 785 m 的变形在 140~160 mm 的范围内, 最大变形为 159.35 mm, 安全系数 (采用有限元强度折减法计算, 下同) 为 1.19, 边坡处于不稳定的状态。
方案②	边坡开挖至高程 1 725 m, 实际支护至高程 1 725 m, 在原方案的基础上, 高程 1 740~1 755 m 新增 1 800 kN 级锚索, $L=50$ m, 间排距 5 m×5 m	右岸缆机平台下游侧边坡高程 1 740~1 785 m 的变形在 100~120 mm 的范围内, 最大变形为 116.24 mm, 安全系数为 1.26, 边坡处于安全稳定的状态。
方案③	边坡开挖至高程 1 725 m, 实际支护至高程 1 725 m, 在原方案的基础上, 高程 1 740~1 755 m 新增 1 000 kN 级锚索, $L=40$ m, 间排距 5 m×5 m	右岸缆机平台下游侧边坡高程 1 740~1 785 m 的变形在 110~130 mm 的范围内, 最大变形为 126.46 mm, 安全系数为 1.14, 边坡处于不稳定的状态。
方案④	边坡开挖至高程 1 725 m, 实际支护至高程 1 725 m, 在原方案的基础上, 高程 1740~1755m 新增 1 800 kN 级锚索, $L=50$ m, 间排距 4 m×4 m	右岸缆机平台下游侧边坡高程 1 740~1 785 m 的变形在 70~90 mm 的范围内, 最大变形为 88.21 mm, 安全系数为 1.33, 边坡处于安全稳定的状态。



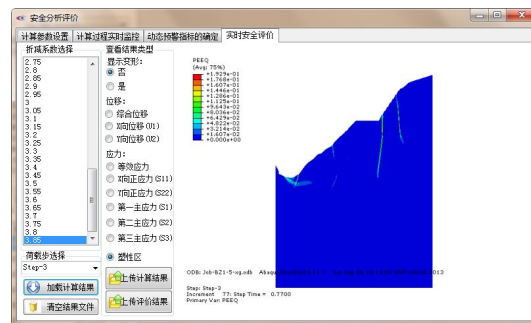
(a) 开挖施工前边坡整体位移云图



(b) 开挖施工前边坡典型二维断面位移云图



(c) 开挖后边坡位移分布情况



(d) 开挖后边坡塑性区分布情况

图 8 基于本文系统的实时数值仿真实现

Fig.8 Numerical process and results of the real-time numerical simulation system

本文系统结合相应的数值分析方法和计算机技术,耦合考虑了施工进度和工程安全的动态变化,实现了施工过程中边坡数值仿真分析的实时化,为突发新情况下的边坡施工支护处理方案的制定提供了及时的决策建议。利用实时更新数值模型,使得原本需重新建模分析的工作量大大减少,保证了现场的施工进度。

5 结 论

考虑边坡施工过程中开挖进度的调整、新地质信息的揭露、支护方案的修改及计算参数的修正等信息实时变化的客观实际,提出了基于实时更新数值模型的边坡动态仿真分析方法并完成了相应信息化系统平台的开发工作。本文工作一定程度上克服了人工重新建模不具时效性甚至影响工程进度的问题,有效分析评价了动态施工进度和施工安全耦合条件下的边坡安全性,为大型水利水电工程高陡边坡全生命周期安全控制问题的解决提供了数字化和信息化的解决思路和参考。在实际工程中取得了良好的应用效果。

(1) 实时更新数值模型的建立以及工程信息的实时状态进入数值模型的映射方法是实现施工进度和工程安全的全过程耦合实时分析的关键问题。

(2) 采用混合编程技术和数值计算软件二次开发技术,成功解决了数值模型单元信息的更新问题,提出了施工进度、支护信息和地质更新信息的动态映射方法,实现了边坡数值计算模型随实际状态信息的实时更新。同时,将实时数值计算模型数据(包括几何信息、材料信息、单元组信息)上传到数据库中,是实现动态数值模型实时更新的数据基础。

(3) 工程实例的分析表明,本文所开发的边坡实时数值仿真系统具有良好的实时辅助分析功能,耦合考虑了施工进度和工程安全的动态变化,实现了施工过程中边坡数值仿真分析的实时化,为后续施工提供了及时的决策建议,保证了施工进度。

参 考 文 献

- [1] 宋胜武, 冯学敏, 向柏宇, 等. 西南水电高陡岩石边坡工程关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 1—22.
SONG Sheng-wu, FENG Xue-min, XIANG Bo-yu, et al. Research on key technologies for high and steep rock slope of hydropower engineering in southwest China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 1—22.
- [2] 周创兵. 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1081—1093.
ZHOU Chuang-bing. A prospect of researches on life-cycle safety control on high-steep rock slopes in hydropower engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(6): 1081—1093.
- [3] 夏元友, 李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1087—1091.
XIA Yuan-you, LI Mei. Evaluation method research of slope stability and its developing trend[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 1087—1091.
- [4] 赵志峰, 徐卫亚. 基于突变理论的边坡安全稳定性综合评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 2707—2712.
ZHAO Zhi-feng, XU Wei-ya. Comprehensive assessment of slope safety and stability based on catastrophe theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2707—2712.
- [5] 徐卫亚, 蒋中明, 石安池. 基于模糊集理论的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 409—413.
XU Wei-ya, JIANG Zhong-ming, SHI An-chi. Slope stability analysis using fuzzy sets theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(4): 409—413.
- [6] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于AHP的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 2627—2632.
HUANG Jian-wen, LI Jian-lin, ZHOU Yi-hong. Application of fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2627—2632.
- [7] 林孝松, 陈洪凯, 许江, 等. 山区公路高切坡岩土安全评价分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3): 66—71.
LIN Xiao-song, CHEN Hong-kai, XU Jiang, et al. Safety evaluation of high-cutting slope along highway in mountainous area[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2009, 31(3): 66—71.
- [8] 赵文, 贺玉龙. 基于范例推理结构型岩体边坡稳定性评价[J]. 铁道工程学报, 2008, 118(7): 5—9.
ZHAO Wen, HE Yu-long. Case-based reasoning approach to stability evaluation of structured rock slope[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2008, 118(7): 5—9.
- [9] 彭军龙, 张学民, 阳军生, 等. 地铁深基坑支护的遗传神经网络位移反分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2118—2123.
PENG Jun-long, ZHANG Xue-min, YANG Jun-sheng, et al. Displacement back analysis of deep foundation pit for metro based on genetic algorithm and neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2118—2123.