

## 学科发展

智能岩石力学的发展<sup>\*</sup>

冯夏庭

(武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

**摘要** 智能岩石力学是为突破“数据有限”和“变形破坏机理理解不清”的“瓶颈”而提出的一个新的交叉学科分支,在岩石力学专家系统、非线性动力学模型、参数反演、本构模型识别、开挖过程全局优化、集成智能分析等研究方面已取得重要进展。指出多场耦合智能模型、多尺度模型、精细仿真、Internet 模型、遥控试验系统、综合集成系统等研究是下一步的发展方向。变革思维方式,加强原始创新和破坏性创新,建立智能岩石力学分析平台是本学科发展的关键对策。

**关键词** 智能岩石力学,进展,趋势



## 1 引言

岩石力学研究的对象是非均质、非连续、各向异性的岩石(体),其力学行为大多具有高度的不确定性与非线性,并受到地质构造、地应力、水、温度、压力、开挖施工乃至水化学腐蚀的影响。目前主要采用的是以连续

介质力学为基础的确定性研究方法,在特定的假设条件下求解。这种一对一的映射研究方法,使得岩石力学模型越来越复杂(例如,弹性、弹塑性、弹粘塑性、各向异性弹粘塑性、流变损伤断裂力学、各向异性流变损伤断裂力学模型等),要确定的力学参数越来越多(有的模型需要确定几十个力学参数),支持模型所需的信息呈指数增长<sup>[1]</sup>。然而,“数据有限”和“变形破坏机理理解不清”是这种确定性分

析方法的“瓶颈”<sup>[2]</sup>。由于真实材料的理论体系尚未建立,许多岩石力学问题的数学力学描述要么不存在,要么是弱的或不完整的,目前还没有一个被广泛接受的普适性概念模型。因此,“沿用弹塑粘性理论等为基础的确定性求解方法,并未得到恰如人意的效果”,“在将来,不敢断言这种方法是否会对这样一类问题的研究有新的突破,但至少在今天还不可能将这类问题的研究提高到一个新的高度”,“谋求新的、更为综合的手段来解决问题,是亟待研究的当务之急”<sup>[2]</sup>。

为了突破“数据有限”和“变形破坏机理理解不清”的“瓶颈”,我们另辟蹊径,提出了智能岩石力学的研究方法。它是自学习、非线性动态处理、演化识别、分布式表达等非一对一的映射研究方法以及多方法的综合集成研究模式,是建立节理岩体真实特征的新型分析理论和方法,是涉及人工智能、非线性科学、系统科学、力学、地学与工程科学的交叉综合研究方法。这种方法可从积累的实例中学习挖掘出有用的知识,非线性动态处理可使认识通过

\* 收稿日期:2002 年 6 月 20 日

不断的实践来接近实际,演化识别可以在事先无法假定问题精确关系的情况下找到合理的模型,分布式表达使得寻找和表达多对多的非线性映射关系成为可能。

## 2 研究现状

智能岩石力学的提出最早受人工智能专家系统解决经验问题的优越性的影响,岩石分类专家系统的建立极大地推动了基于经验知识推理方法的应用,一些岩石力学问题的神经网络模型的出现又展示了自学习、非线性动态处理与分布式表达方法的强大生命力。这些研究启发作者进行了深入的思考,并开展了卓有成效的研究工作。因此,智能岩石力学的学术思想雏形最早出现在文献[3],文献[4]将智能岩石力学的学术思想介绍给国际同行。应国际岩石力学学会前主席 Sakurai S. 教授的特别邀请,作者在该学会会刊 *News Journal of IRSM* 上发表了有关智能岩石力学研究的评述文章<sup>[5]</sup>,就该学科的发展提出了几点思考。20 世纪 90 年代以来的国际岩石力学学会大会以及各大洲的岩石力学大会都将其列为重要研究领域进行研讨。一些大型研究计划,如我国国家自然科学基金及一些西方国家的研究计划等,也都将其列为重点课题予以支持,从而使智能岩石力学的学术思想不断深化,新的模型和方法不断涌现,研究队伍不断壮大,一些确定性分析方法无法解决的问题也得到了很好的解决。现在,该学术思想已渗透到岩石力学与工程的许多方面,取得了一系列重要进展,《智能岩石力学导论》一书对智能岩石力学的理论和方法进行了阶段性的系统总结<sup>[6]</sup>。

这些进展包括:建立了适用于围岩分类、隧道(巷道)支护设计、边坡破坏模式识别与安全性估计、采场稳定性估计的专家系统,提出了基于范例推理(case based reasoning)的边坡稳定性评价方法。提出的可以考虑对负属性的一种新的数据挖掘方法,能从硐室围岩稳定性的实例数据中挖掘出知识,并将得到的关联规则输入到专家系统,进行不确定性推理,对地下硐室围岩的稳定性进行合理的判别。

发现边坡、隧道、巷道的位移时间序列、岩石破

裂过程的声发射事件序列和煤矿顶板来压序列等构成的非线性动力学系统,都可以用  $X_{n+p+1} = NN(n, h_1, h_2, 1)(X_{1+p}, X_{2+p}, \dots, X_{n+p})$  进行合理的描述。其中  $X_{n+p+1}$  为当前时刻的信息,  $(X_{1+p}, X_{2+p}, \dots, X_{n+p})$  为其先前  $n$  个时刻的信息。用该模型对三峡工程永久船闸高边坡的变形进行了准确的估计。

鉴于许多复杂条件下岩石本构模型的结构很难事前准确地给定,提出了基于神经网络学习和分布式表达的识别新方法:

$$NN: R^n \rightarrow R^m$$

$$\Delta \sigma_j = NN(\Delta \varepsilon_j, \sigma_{j-1}, \varepsilon_{j-1}, \dots, \sigma_{j-k}, \varepsilon_{j-k})$$

以及基于遗传规划-数值分析-遗传算法耦合识别的新方法。并用该方法得到了砂岩、硅藻软岩本构模型和边坡安全分析模型。

为解决岩石力学参数反演的多参数组合带来的解的不惟一性问题,提出了基于神经网络-数值分析-遗传算法的全局优化反演新方法和基于支持向量机-数值分析-遗传算法的全局优化反演新方法。应用该方法成功地反演了三峡工程永久船闸区的弱风化区、完整的微新花岗岩区以及由于施工扰动而在坡体内形成的卸荷变形区和损伤松动区的弹性模量及两个地应力回归公式中的常数项。

大型硐室群、采场的开挖,实际上是一个能量积聚、转移和耗散的过程,不同开挖顺序会使能量的耗散不同,直接导致工程最终的稳定性状态不同。因此,需要对开挖、加固的顺序等进行优化。针对这一问题,提出了动态规划方法、进化有限元方法和并行进化神经网络有限元方法。前者寻找的是开挖顺序的分级优化,即从几种可能的开挖步中选择一个最好的作为下一步开挖,逐级择优。用该方法对拉西瓦、广蓄、十三陵蓄能、小浪底、三峡等电站的洞群稳定和施工顺序做了优化分析。后两种方法是寻找整个开挖过程(路径)的优化,即从可能的开挖路径中选择最佳的开挖路径。用该方法对水布垭水利枢纽地下厂房的软岩置换顺序进行了优化。

还将多种分析方法进行综合集成,建立了一些综合集成智能分析模型和系统。例如,作者在国家“八五”攻关项目的支持下完成的边坡稳定性综合

集成智能分析系统,作者与南非科学院采矿研究所和金山大学联合建立的南非深部金矿的岩爆风险估计专家系统等。这些新型分析方法的提出和应用已经显示出智能岩石力学在解决复杂岩石力学问题中的强大生命力。

### 3 未来发展趋势

鉴于强地震、高温、高压、强渗透压、化学腐蚀及其耦合对岩石力学问题的影响越来越复杂,智能岩石力学的发展,是要提出能高效地分析与识别这些极复杂环境下岩石力学行为的具有智能特征的数值方法、全耦合的智能模型和智能数值方法(如智能温度-水力-力学-化学耦合模型和分析方法),以及具有极强智能特征的非一对一映射的分析方法、多种方法的综合集成系统和模型、研究岩石损伤局部化过程的大规模精细仿真方法、多尺度岩石破坏过程的信息分形自相似性以及由小尺度信息预测大尺度信息的分形重构方法。基于 Internet 的方法可能是未来将要发展的一种方法。这里要研究的是全球范围内 Internet 的分布式信息获取、动态及时处理方法,基于 Internet 的分布式计算模型等。建立全球范围科学家进行有效合作研究的 Internet 模型和遥控实验系统,开发虚拟实验设备,使得异地的科研人员能像本实验室人员一样,可以实时地观察整个实验过程并得到结果。

### 4 社会需求与发展对策

西部大开发等相关战略的实施,使大规模的岩石工程建设以前所未有的速度展开,这给岩石力学研究提出了许多新的挑战。例如,深部岩体中储存核废料需要考虑 1 万年安全的温度、水力、力学与化学效应及其耦合问题;设计中的溪落渡水电站的主厂房规模为  $75 \times 30 \times 300\text{m}$ ,远远超出了现行规范的研究范围;矿床开采深度的增加使得高应力问题越来越突出;南水北调西线工程将要遇到强地震、活动断裂、高应力、冻土等问题。另外,深部岩体中国国家战略能源储存要遇到反复注采循环过程中硐腔围岩的渗透性与稳定性问题;我国驻南斯拉夫大使馆被炸、“911”事件使得建立地下安全防御工程显

得更为迫切等等。这些日益复杂的岩石力学问题不仅涉及到国家战略工程的安全,也涉及到国家重大基础设施的安全,迫切需要大力开展智能岩石力学研究。

另一方面,工程灾害的频繁发生造成了惨重的人员伤亡,使得工程维护的费用大大增加。例如,全国每年因滑坡灾害造成的损失在 10 亿元以上,铁路沿线平均每年因滑坡造成的经济损失近亿元,整修投资费 6 600 万元,因泥石流每年所用的修复费和整建工程费达 7 000 余万元。崩塌、滑坡和泥石流灾害使全国有近千座水电站及数百座水库受到严重威胁,仅云南省就已毁坏水电站 360 座、水库 50 座。密云土坝在 1976 年唐山地震时,下游面液化造成大滑坡,被迫放空水库进行维修。河南板桥混凝土闸及土坝水库,1975 年由于遭强暴雨洪水漫顶溃坝,造成 20 多万人伤亡,驻马店地区良田破坏达数万亩。2000 年 6 月 6 日四川省古蔺县发生崩塌、滑坡、泥石流,出现规模大小不等的灾害点几百处,古蔺县南部的 20 多个乡镇、208 个村、39 047 户、16 万人受灾,41 人死亡、5 人失踪、58 人重伤,据估算,灾害造成直接经济损失 1.82 亿元。2001 年 5 月 1 日晚发生在重庆市武隆县的滑坡性地质灾害,造成 79 人死亡。四川省、重庆市共有 80 余个县城、上千个小乡镇、30 万间房屋受到上体滑坡灾害的威胁。三峡库区蓄水后,将产生 1 000 多个滑坡体,2003 年前国家将投资 40 亿元进行治理。这表明了大力开展智能岩石力学研究,提高重大工程灾害预测预报与控制水平的迫切性。

面对上述两点,我们再也不能只重视工程建设的投入,而不重视前期研究的投入;再也不能仅习惯于根据规范或经验进行工程设计,而不重视前期的科学研究。因为许多工程建设遇到的问题已远远超出了现行的规范和经验范围。西方国家在这方面的投入和超大研究计划的实施给了我们很好的启示。例如,美国、日本、英国、法国、德国、西班牙、瑞典、芬兰、加拿大与欧盟联合资助了温度-压力-水力耦合的国际合作项目 DELOVALEX,年研究经费 0.81 亿瑞典克郎,研究时间为 1992—2005 年。因此,对于工程灾害频发的我国更应大力开展智能岩石力学等相关的创新研究,打破惯性思维,增加

经费的投入,重视原始创新和破坏性创新研究方法的培植,争取在温度-压力-水力-化学腐蚀过程的耦合分析方法、基于 Internet 的分布式计算方法、非线性本构模型和参数的识别方法、工程节理岩体稳定性的大规模精细仿真算法、确定性与不确定性分析方法的综合集成等方面获得突破,提出更多快速可靠的智能分析、预测、预报与控制方法,建立智能岩石力学分析平台,以确保国家战略工程和基础设施建设的安全以及人民生命财产的安全,并保持我国在该领域的国际领先地位。

### 主要参考文献

- 1 Stephansson O, Hudson J A, Tsang C-F. Decovalex II Project Task 4—Satte of Science statement on coupled T-H-M issues related to performance assessment, Draft 1, Decovalex Project. Stockholm, Sweden: 1996.
- 2 Detournay E J, Pearson R P, Thiercelin M. Modeling rock mechanical processes in petroleum exploration and production. News Journal of ISRM, 1993, 2(1): 17–20.
- 3 冯夏庭,林韵梅. 岩石力学与工程专家系统(专著). 沈阳: 辽宁省科技出版社, 1993.
- 4 XiaTing Feng, Katsuyama, Wang Yongjia, Lin Yunmei. A new direction—Intelligent Rock Mechanics and Rock Engineering. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34 (1): 135–141.
- 5 XiaTing Feng, Yongjia Wang. Some Thoughts Concerning the Development of Intelligent Rock Mechanics. News Journal of ISRM, 2000, 6(2): 14–17.
- 6 冯夏庭. 智能岩石力学导论(专著). 北京: 科学出版社, 2000.

### Development of Intelligent Rock Mechanics

Feng Xiating

( Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, 430071 Wuhan)

As a new direction, intelligent rock mechanics is proposed to overcome the “bottle-neck” problem resulted from “data-limited” and “difficult understanding of mechanism”. New developments such as expert system, nonlinear dynamic modeling, back analysis of parameters, recognition of constitutive model, global optimum of excavation process, and integrated intelligent modeling are discussed. The further study will focus on intelligent T-H-M-C coupling modeling, multi-scale modeling, fine simulation, Internet-based modeling, remote-control testing model, and comprehensive integrated modeling, etc. Innovation of thinking mode and disruptive innovation are advance strategies to develop intelligent rock mechanics.

**冯夏庭** 武汉岩土力学研究所副所长(主持工作),研究员,博士生导师。1982年毕业于东北大学,1992年1月获博士学位。中国科学院“百人计划”入选者,现任中国岩石力学与工程学会数值模拟专业委员会副主任委员,曾任南非金山大学客座教授、日本资源环境综合研究所客座研究员、日本 ITIT 特别研究员等职。主要从事智能岩石力学研究,主持了中日政府国际合作项目“岩石破裂、地震预测动态网络研究”、国家自然科学基金等课题近 20 项。曾应邀在 6 个全国性大会和国际会议上作大会报告。以第一获奖人获省、部级自然科学奖一、二等奖各 1 项,出版专译著 4 部,发表 SCI 收录论文 14 篇, EI 收录 30 余篇、ISTP 收录近 20 篇。