

岩石力学

理论与工程实践

Y S L X L L Y G C S J

刘汉东 路新景 霍润科 主编



黄河水利
出版社

岩石力学理论与工程实践

刘汉东 路新景 霍润科 主编



黄河水利出版社

内 容 提 要

第四届全国青年岩石力学与工程学术研讨会 1997 年 8 月在郑州召开。本书是这次会议的论文集,共收入论文 75 篇。这些论文包括岩石力学基本理论与试验研究、新技术与新方法、岩石力学与工程实践和软岩地基处理技术等 4 个方面的内容。本书基本反映了我国青年岩石力学工作者近两年来在岩石力学理论与实践方面的研究成果。

本书可供从事岩石力学与工程及其相关学科的科研、设计、施工的科技工作者及大专院校师生参考。

岩石力学理论与工程实践 刘汉东 路新景 霍润科 主编

责任编辑:许立新

责任校对:王才香

责任印制:徐海珍

出版发行:黄河水利出版社

地 址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层

邮 编:450003

印 刷:黄河水利委员会印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

版 别:1997 年 6 月 第 1 版

印 次:1997 年 6 月郑州第 1 次印刷

印 张:26.75 插页:1

印 数:1-1000

字 数:621 千字

ISBN7-80621-022-9/TV.21

定价:65.00 元

顾问委员会

孙 钧 院士 王思敬 院士 刘宝琛 院士 张 清 教授
傅冰骏 教授 严克强 教授 张镜剑 教授 赵中极 教授
李华晔 教授 王梦恕 院士 周鸿钧 教授 董遵德 教授

组织委员会

主 席:刘汉东
委 员:李永盛 黄宏伟 宁 宇 郭树高 梅志荣 曹 洪
路新景 霍润科 张 勇 王宝成 袁兆华 郭雪莽
解 伟 刘大安 王广国 王建峰 金丰年 肖勤学
贾金禄 朱明温 李志远 高辉巧 王 旭 颜廷松
徐长义 姜 彤 王玲玲

论文审查委员会

张镜剑 赵中极 李华晔 刘汉东 李永盛 黄宏伟 路新景
霍润科 张 勇 解 伟

传统乃基础
来来指方向
发展须继承
继承为发展
青唯出於蓝
青定胜于蓝

王思敬

一九九七年七月

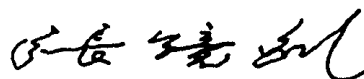
王思敬教授为中国工程院院士、中国岩石力学与工程学会副理事长

序

岩石力学与工程涉及多种学科,发展很快,我国在岩石力学领域就工程技术规模与学术水平而言,已进入了国际先进行列。在水利、煤炭、采矿、交通、能源和国防等诸多国民经济领域内,岩石力学日益显其重要性。《岩石力学理论与工程实践》是此次会议推出的一批青年科技工作者的科技论文,包括岩石力学基本理论与试验研究、岩石力学新技术与新方法、岩石力学与工程实践及软岩地基处理。不少论文接触到岩石力学的前沿课题并取得了优异的成绩。青年人朝气蓬勃,思想敏锐,在各方面是创造性进展的有力推动者。青出于蓝而胜于蓝。这又一次生动地说明我们的事业后继有人,在我国已形成了一支颇具实力的青年岩石力学科技队伍!

岩石力学是建立在工程实践之上的学科。当前世界科技的进步必然带来岩石力学的快速发展。将高科技引入岩石力学是我们的重要任务。近年来,青年人接受了许多新学科、新技术,使岩石力学在工程实践中有了新的进展。本次会议的论文就反映了水电、石油、煤炭、采矿、交通、能源和国防等诸多方面的新成果。我们承认,在岩石力学的某些领域与国际先进水平相比还有一定的差距,这就要求青年科技工作者要积极向国内外先进技术学习,进行广泛的交流,不断提高。

三十功名尘与土,八千里路云和月。青年朋友们,愿你们积极投身到工程实践及科学研究的大潮中去,推进岩石力学的发展和发展的任务已历史地落在了你们的身上,任重道远。为祖国昌盛、学科发展奋斗拚搏,勇往直前!



1997年6月

前 言

改革开放以来,在我国经济及科学技术飞速发展的同时,青年科技工作者已逐渐成为一支强大的骨干力量。近年相继召开的各类学科青年学术会议和活动,极大地活跃了学术研究的气氛,学术水平日渐提高。目前,我国在水利水电、煤炭、石油、采矿、交通、能源和国防等诸多方面的岩石力学与工程技术和学术水平已达到国际先进水平,为我国岩石力学与工程学会的青年工作者提供了施展才华的大舞台。

《岩石力学理论与工程实践》是中国岩石力学与工程学会青年工作委员会主办的第四届全国青年岩石力学与工程学术研讨会的论文集,包括岩石力学基本理论与试验研究、岩石力学新技术与新方法、岩石力学与工程实践及软岩地基处理。本次会议的论文集反映了水利水电、石油、煤炭、采矿、交通、能源和国防等诸多方面的新成果,是从近 90 篇提交的论文中经评审委员会专家评审的 75 篇论文,多为国家自然科学基金、国家重点科技攻关等项目的成果总结或研究报告的一部分,不少论文接触到岩石力学的前沿课题并取得了优异的成绩,具有较高的学术水平和参考价值。

中国工程院院士、中国岩石力学与工程学会副理事长王思敬教授为本书题词,河南省岩石力学与工程学会理事长张镜剑教授特为本书写序。在论文编辑过程中,得到了张镜剑、傅冰骏、李华晔、赵中极等专家的具体指导,在此一并表示感谢。

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会对给予本届会议支持和赞助的华北水利水电学院、同济大学、黄委会设计院科学研究所等单位表示衷心的感谢。

岩石力学是建立在工程实践基础之上的学科。当前世界科技的进步必然带来岩石力学的快速发展,将高科技引入岩石力学是我们的重要任务。我国在岩石力学的某些领域与国际先进水平相比还有一定的差距,这就要求我们青年科技工作者要积极向国内外先进技术学习,进行广泛的交流,不断提高。青年朋友们,让我们积极投身到工程实践及科学研究的洪流中去,为祖国昌盛、学科发展,贡献青春与才华!

中国岩石力学与工程学会青年工作委员会
1997年6月

目 录

岩石力学基本理论与试验研究

论 JRC	夏才初(1)
岩石力学数值分析进展与思考	王芝银 李云鹏(7)
论岩体力学的基本概念	薛守义(14)
岩体节理刚度系数的现场声波测试	韩烜等(20)
应变破坏判据的试验研究	沈明荣(25)
岩石三点弯曲试验研究	金丰年 浦奎英(31)
兰尖铁矿岩体结构面的分维分析及强度特性研究	李 林(36)
小浪底水库岩体蠕变试验	王宝成等(41)
小浪底水库围岩径向变形试验	刘长庚 孙民伟(49)
小浪底水利枢纽岩体地应力测试	宋智香 冯 英(55)
预应力锚索锚固洞室洞壁位移特征试验研究	顾金才等(60)
凝灰岩在加热状态下的变形破坏机理	石振明等(68)
小浪底水库 T_1^* 、 T_1^* 粘土岩特性分析	冯 英(77)
静力触探确定地基承载力公式的探讨	张俊哲(82)

岩石力学新技术与新方法

地震波在节理岩体中传播的半解析频域解的理想模型	支国华 孙 钧(86)
地震条件下岩体边坡的稳定性研究	薛守义(91)
混凝土衬砌隧洞在内水压力作用下的渗流、应力应变分析	曹 洪(98)
岩土工程智能结构初探	肖勤学等(105)
ICT的原理、检测方法及其在岩石力学研究中的应用	肖勤学等(112)
混凝土高拱坝复杂岩基与坝体相互作用的可靠度分析	解 伟(115)
弹塑性位移反分析的可靠性研究	吕爱钟 李术才(127)
岩体单元屈服的可靠度判据	刘东升 郑颖人(132)
改进的灰色最优归类理论模型在工程地质多指标评判中的应用	姜 彤等(139)
模型实验结果的模糊评估方法	雷胜友 惠会清(144)
隧道衬砌抗裂检算的概率统计法	冯卫星等(150)
岩体抗剪强度的灰色关联分析	霍润科(154)
宝泉抽水蓄能电站岩石样本力学参数的确定	黄志全等(157)
岩体中高承载力复合圆形结构抗爆特性研究	田志敏等(163)
预处理方法和区域分裂法在欧拉方程计算中的应用	曾晓清 吴雄华(170)

深孔三维地应力数据采集及处理系统·····	张 飞 赵亚军(176)
深埋地下洞室有限元网格自动划分的新方法·····	吕爱钟(179)
综采放顶煤覆岩导水裂缝带探测·····	施龙青等(182)
利用块体理论确定隧洞最大关键块体区域·····	戚 蓝 张兴强(186)
基于粘塑性法的围岩—支护系统稳定性分析·····	贺 军等(190)
应用松动圈理论改善巷道支护·····	曾庆宽(199)
肥城煤田地质构造与矿井底板突水·····	施龙青等(204)
燃爆式油井尾管悬挂器的研制·····	韩来聚 徐济银(209)
岩土工程学科多媒体辅助教学网(GE-NET网)中岩石力学试验数据库的开发与应 用·····	张 雷等(212)
物理场对水泥石及水泥浆性能的影响·····	徐济银等(218)

岩石力学与工程实践

三峡工程永久船闸高边坡岩体 RMR 分类及其应用·····	李建林 哈秋聆(222)
三峡工程永久船闸岩石陡高边坡体型比较·····	张永兴(231)
可靠度设计法在小浪底工程边坡设计中的应用·····	李效泉等(238)
后石电厂岩质边坡稳定性分析·····	李 中(242)
小山水电站岩质高边坡稳定性研究·····	刘汉东 李志全(250)
五强溪水电站左岸船闸边坡变形规律探讨·····	尚彦军等(256)
清江水布垭坝址库首区古滑坡稳定性研究·····	王建锋等(262)
天生桥二级电站厂房高边坡稳定性的探讨·····	刘泽钧(275)
五强溪水电站左岸岩坡失稳地质灾害的诱发因素模拟计算分析 ·····	孙文怀 胡建兰(283)
西龙池抽水蓄能电站羊老蹄上水库软弱夹层工程地质预测·····	刘文元(287)
南京俞山滑坡整治工程·····	李朝甫 李文峰(292)
自贡市区滑坡的基本特征·····	李广俊(297)
鱼潭水电站地下厂房施工开挖程序的模拟分析·····	全宗国(299)
万家寨引黄工程南干线输水隧洞若干岩土力学问题·····	徐长义(303)
监控量测技术在西园隧洞破碎段施工中的应用·····	张民庆等(307)
金川二矿区西部深部岩体结构的不确定性推理处理·····	王永才(311)
金川矿山井巷设计原则的探讨·····	包四根 张 彩(317)
BMP 反分析系统在富尔江引水隧洞施工中的应用·····	陈希富等(322)
平煤集团七矿煤层底板和断层带水压裂试验及抗水压性研究·····	胡殿奎 葛中华(328)
灵关河电站第三系泥质岩石工程地质特性的研究·····	向 彬(336)
黄河北干流岩体变形特征初探·····	徐杰瑞(340)
岩溶洞穴与水库环境·····	胡世起(343)
营口市发电厂厂区稳定性研究·····	冯 明等(347)

软岩地基处理

基坑围护混凝土支撑的设计理论与工程实践	李永盛(352)
灌浆技术发展动态及GIN灌浆理论探讨	彭春雷(366)
水泥土搅拌桩挡土墙位移计算及基坑空间效应考虑	熊祚森 黄宏伟(372)
时间序列预报法在某工程地基处理中的应用	黄宏伟等(380)
高喷技术在凯旋门大厦基础外围防渗中的应用	刘建华(386)
Akima插值在地基沉降计算中的应用	张尚根 褚福权(389)
对软岩及受采动影响巷道的支护研究	王思鹏(392)
聚类分析法在土质分类中的应用	李 哲(396)
对重型动力触探试验杆长修正问题的探讨	石长青等(401)
土工布在膨胀岩(土)路基工程中的应用	薛 琪(405)
软土地区碎石桩作用机理及影响地基加固效果的因素	朱明温 刘汉东(408)
土钉墙有限单元分析	王广国等(412)

论 JRC *

夏才初
(同济大学)

一、JRC 与节理表面形态参数的关系

Barton 的节理剪切强度经验公式已被人们广泛采用,其公式为^[1]:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}[\varphi_r + JRC \lg(\frac{JCS}{\sigma_n})] \quad (1)$$

式中: τ 为节理面峰值剪切强度; φ_r 为节理面残余摩擦角; JRC 为节理面粗糙度系数(Joint Roughness Coefficient); JCS 为节理岩壁单轴抗压强度; σ_n 为作用于节理面上的法向应力。

该节理剪切强度公式不仅考虑了节理表面粗糙度对节理剪切强度的影响,而且还明确指出粗糙度对节理剪切强度的影响与法向应力有关。Barton 公式中最重要也是最难准确确定的参数是 JRC 。确定 JRC 的最好方法当然是进行节理的直剪试验,但由于直剪试验费时费钱,为此 Barton 提出了三种估计节理面 JRC 的方法,即倾斜试验、推拉试验和标准轮廓线比较法。标准轮廓线比较法虽对各种粗糙度的节理面都适用,但对于 JRC 在 0 ~ 8.0 范围内的节理面,用倾斜试验更精确,对于 JRC 在 8.0 ~ 12.0 范围内的节理面,用推拉试验更精确,而 JRC 大于 12.0 的节理面只能用标准轮廓线比较法。

JRC 的实质是描述节理面表面形态(即粗糙度)对节理剪切强度影响的系数;它与节理面表面形态有关,但从 Barton 对 JRC 的定义及其确定方法看,它并不仅仅与节理面表面形态有关,不是完全能由节理面表面形态的几何特征来确定的纯粹的表面形态特征参数。节理面的表面形态参数是节理面表面形态起伏变化的数据,它是按某种数学理论计算的特征参数。如对规则锯齿状节理按几何形状确定的起伏角 i ;按数理统计方法计算的均方根高度 Z_1 (RMS),均方根坡度 Z_2 ;按随机过程理论计算的标准自相关函数 $\rho(\tau)$,结构函数 $SF(Z)$;按分形理论计算的分形维数 D_f 等等。由于标准轮廓线比较法可以推断出 JRC 与节理表面形态参数间存在着的某种定量关系,因而直边法、平均坡角法和伸长率法等定量估算 JRC 的方法应运而生。Tse 最先将 Barton 的十条标准轮廓线数值化并计算出它们的一组表面形态特征参数^[2],经回归分析发现 JRC 与 Z_2 和 SF 的相关性最强,并有如下回归公式:

$$\left. \begin{aligned} JRC &= 32.2 + 32.47 \lg Z_2 \\ JRC &= 37.28 + 16.58 \lg SF \\ JRC &= 4.41 + 64.46 Z_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助项目。

Lee 将分形理论运用于节理表面形态特征的研究中^[3], 计算了节理面轮廓线的分形维数, 并建立了分形维数与 JRC 间如下定量关系:

$$JRC = -0.87804 + 37.7844\left(\frac{D-1}{0.015}\right) - 16.9304\left(\frac{D-1}{0.015}\right)^2 \quad (3)$$

黄润秋根据频谱分析原理^[4], 认为节理的轮廓线可看成是许多不同波长和不同振幅的正弦波和余弦波的叠加, 并对 Barton 十条标准轮廓线进行周期拟合分析, 得到了一套与之对应的标准谱线及其表达式。黄润秋认为新谱线的“最大振幅”就反映了节理面的粗糙程度, 并根据最大振幅大小对 Barton 十条轮廓线进行重新排序。以上研究都限于节理表面形态单个参数与 JRC 的关系, 而徐放明等运用模糊综合评判方法, 选择均方根高度 Z_1 、均方根坡度 i 、峰顶平均半径与均方根高度的比值 β/Z_1 三个表面形态参数对 Barton 十条标准轮廓线进行模糊综合评判分级, 得到模糊综合评判指标 I 与 JRC 的关系为:

$$JRC = -2.469 + 2.646I \quad r = 0.9367 \quad (4)$$

可见, 近几年来国内外学者对 Barton 十条标准轮廓线及 JRC 的定量研究已做了大量的工作。在这些研究论文中, 几乎已将 Barton 公式及 Barton 十条标准轮廓线奉为经典, 把确定节理面的 JRC 作为研究节理表面形态特征及其对节理面剪切强度性质影响的最终目的。有些学者甚至误认为 JRC 就是节理表面形态特征参数。事实上, Barton 十条标准轮廓线并不标准, Barton 公式及 JRC 对于描述节理的剪切强度及粗糙度对节理剪切强度的影响也有其局限性。

二、Barton 节理剪切强度公式的局限性

天然岩石节理的表面形态由两大部分组成——粗糙度和起伏度, 粗糙度由节理表面上随机不规则的微凸体组成, 而起伏度则由节理表面上大的趋势性起伏组成。工程地质学中将粗糙度按粗糙程度分成粗糙的、平滑的和镜面的三级, 而起伏度则按几何形态分成平直的、台阶状、锯齿状和波浪状四类, 并根据节理面起伏度的类别和粗糙度的级别来预估节理面的抗剪强度参数。天然岩石节理的表面形态是这三级粗糙度和四类起伏度的不同组合, 复杂的岩石节理的表面形态则往往是不同频率和不同幅值的多个起伏度和粗糙度的叠加。当起伏度有有限多个时, 则可用频谱分析方法来研究节理表面的形态特征。当起伏度有无限多个且这些起伏度的幅值与频率有某种特定关系(如各种频率的起伏度的功率谱密度相同)时, 则节理的表面形态是一种分形, 只有在这种情况下才能用分形维数来描述节理表面的形态特征。当节理表面没有起伏度时, 则节理表面上只有随机起伏的粗糙度, 也只有在这种情况下才能用概率统计方法和平稳随机过程的方法来研究节理表面的形态特征。天然岩石节理的表面形态在大多数情况下包含有一至两个频率的起伏度和粗糙度, 因此, 我们根据节理表面形态特征的三种情况分析 Barton 节理剪切强度公式的适用性。

(一) 纯粗糙度节理和分形面节理的情况

分形表面含有无数不同频率和不同幅值的起伏度, 但没有一个频率的起伏度是显著的, 因而也可看成是纯粗糙度表面的一个特例。在纯粗糙度表面中包含着众多的不同幅值和频率的微凸体, 在法向应力小时, 频率高、幅值小的微凸体对爬坡角起主要作用, 爬坡

角较大;随着法向应力的增大,由于频率高、幅值小的微凸体很快会被剪坏,所以频率较低、幅值较高的微凸体对爬坡角将渐渐并最终起主要作用,因而爬坡角度小,反映在节理剪切强度曲线上,随着法向应力的增大,强度曲线向下弯曲。Barton 节理剪切强度公式正是能反映这种节理的表面形态特征对节理剪切强度的影响是随法向应力增大而变化的过程,即随法向应力的增大表面上的微凸体被累进破坏的过程。

(二)纯起伏度节理的情况

起伏度往往幅值大、频率小。在工程岩体一般处于中低法向应力范围的情况下,除强风化的岩石节理外,起伏度在剪切过程中一般不会被剪坏,也不会有累进破坏。因此,起伏度对节理剪切过程中爬坡效应的作用与法向应力无关,也即爬坡角是一个常数,其值即为起伏角。因而,在此种情况下,Barton 剪切强度公式是不合适的,而如下的 Patton 节理剪切强度公式才较适合于这种情况:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi_r + i) \quad (5)$$

式中: i 为起伏角或爬坡角;其他符号含义同公式(1)。

(三)同时含有起伏度和粗糙度的节理情况

当节理的表面形态中明显地同时含有起伏度和粗糙度时,则起伏度对爬坡角的效应与法向应力无关,遵循 Patton 公式。而粗糙度对爬坡角的效应与法向应力有关,遵循 Barton 公式,在这种情况下节理剪切强度公式可写为^[5]

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi_r + i_w + JRC_r \log \frac{JCS}{\sigma_n}) \quad (6)$$

式中: i_w 为节理表面形态中起伏度分量的起伏角; JRC_r 为节理表面形态中粗糙度分量的 JRC 。

由此可见,Barton 节理剪切强度公式只适用于节理表面形态为随机粗糙度和分形的情况,对纯起伏度节理及含起伏度粗糙节理则不很合适。但由于起伏度的起伏角比粗糙度的均方根坡角往往小得多,在中低应力情况下,起伏度的起伏角可被 JRC 的估计误差所掩盖。这也是当 $JRC < 12$ 时,用倾斜法和推拉试验能较精确地估计节理的 JRC 值并能较合理地运用 Barton 节理剪切强度公式的主要原因之一。

三、Barton 十条标准轮廓线及 JRC 的局限性

Barton 标准轮廓线是在节理表面上测试三条轮廓线时,选择其中的一条作为典型节理试样的标准轮廓线。由于节理表面不是各向同性的,同一试件的三条轮廓线的形态特征会有很大的差别,因而 JRC 值也有差别。另一方面,用标准轮廓线对比法估算节理的 JRC 时,对试件也测量三条轮廓线,这三条轮廓线之间的形态特征相差也会比较大,因此选择其中的一条作为有代表性的对比轮廓线就带有主观随意性,这两个选择过程中所引起的误差将是双倍的。

Barton 提出了三种估计节理面 JRC 的方法,并给出了适用范围,对用倾斜法和推拉法预计 JRC 的精度作了估计,而对标准轮廓线对比法,Barton 并没有给出预计的实例和精度分析。即使是用倾斜法和推拉法预计 JRC 的方法,Barton 对精度估计的方法也是值得商讨的。Barton 指出对 57 个节理试样用倾斜法预计的摩擦角的平均误差是 -0.2° ,对 45 个

节理试样用推拉法预计的摩擦角的平均误差是 $+1.3^\circ$ (见表 1), 但根据预计的摩擦角的范围看, 两者的变化范围都比较大。根据误差理论, 随机误差有正有负, 试样越多, 平均误差越小。表 1 中 57 个试样的平均误差明显小于 45 个试样的平均误差, 因而平均误差并不能表征预计结果的离散性或精度, 在数据处理和误差理论中也不采用平均误差的概念。另一方面, 被预计的 102 个节理试样的 JRC 各不相同, 其真值也是变量, 因而估计值与真值是两个随机变量的关系问题, 而 Barton 采用单个随机变量的数据处理方法, 这也是不对的。

表 1 倾斜法和推拉法预计摩擦角的范围和误差 [单位: ($^\circ$)]

JRC	试验方法	摩擦角范围	平均	绝对误差范围	平均误差	试样数
< 8.0	倾斜法	31.5 ~ 47.4	40.5	- 3.0 ~ 3.5	- 0.2	57
8.0 ~ 12.0	推拉法	44.6 ~ 57.7	50.9	- 3.4 ~ 4.1	1.3	45
< 12.0	两者	31.5 ~ 57.5	45.1	- 0.9 ~ 1.4	0.2	102

我们也可以根据 Barton 的试验结果来估计用倾斜法和推拉法预计节理 JRC 的精度。为了研究节理 JRC 的尺寸效应问题, Barton 从一块尺寸为 $40\text{cm} \times 45\text{cm}$ 的节理试样上锯下 $4.9\text{cm} \times 9.8\text{cm}$ 的 18 块小节理试样, 先用倾斜试验或推拉试验估计它们的 JRC 值, 再用剪切盒试验确定 JRC 值进行验证, 结果见表 2。应该说, 这 18 个试样面积相同、岩性相同、岩壁风化程度相同、成因相同, 所不同的只是节理表面形态。也就是说, 对于节理剪切强度公式而言, 所不同的参数只是 JRC 。如果对由倾斜试验或推拉试验得到的 JRC 值与剪切盒试验得到的 JRC 值分别进行回归分析, 它们的相关系数很小。因而假设由倾斜试验或推拉试验估计的 JRC 值与剪切盒试验得到的 JRC 值相等, 并计算其残差均方根 (见表 2)。根据对计算结果的分析可知, 用倾斜试验估计 JRC 值的误差范围在 $-1.401 \sim 1.401$ 的概率为 68%, 用推拉试验估计 JRC 值的误差范围在 $-1.075 \sim 1.075$ 的概率为 68%, 由此可见, 由倾斜试验和推拉试验预计的 JRC 值的误差是较大的, 超过一级范围 ($JRC = 2$) 的概率大于 32%。

此外, 将 Barton 的十条标准轮廓线分别按 JRC 、节理表面形态特征参数中的 Z_1 、 Z_2 、 D_f 、轮廓线最大振幅 M_a 及模糊综合评判指标 I 进行排序 (见表 3)。从表 3 中结果可知: 按 D_f 的排序与 JRC 的完全一致。如上所述, JRC 适用于没有明显起伏度的随机粗糙表面, 而分形表面也是没有明显起伏度的表面, 只是分形表面中的各种微凸体的频率和幅值间有一种特定的关系, 即自相似性, 因而按 D_f 与 JRC 排序的一致性是预料之中的。另外, 前四条轮廓线按不同的表面形态参数排序基本一致, 因为前四条轮廓线的起伏度不很显著, 相对较小的起伏度按随机粗糙度处理并不影响表面形态参数的性质。而且, 天然节理表面上的微凸体总是振幅小, 其坡度也就缓, 按最大振幅 M_a 、均方根高度 Z_1 及均方根坡度 Z_2 的排序基本一致。而模糊综合评判指标 I 综合考虑了节理表面的高度形态参数和纹理形态参数, 因而, 在起伏度很小时, 按 I 的排序与其他表面形态参数的排序也基本一

致。但是从第五条标准轮廓线起,除了按分维数 D_f 排序的以外,按其他参数排序时,大部分轮廓线与按 JRC 排序的不一致。说明当节理面明显含有起伏度时,用这些表面形态参数来估计节理面的 JRC 也是不太合理的。

表2 倾斜法和推拉法预计 JRC 的精度分析

级别	节理号	混凝土试验法所得 JRC 值			JRC 绝对误差
		剪切盒法	倾斜法	推拉法	
4~6	1	7.6	5.5		-2.1
	2	6.6	5.9		-0.7
	3	7.2	5.9		-1.3
	4	7.5	5.8		-1.7
6~8	5	7.1	6.8		-0.3
	6	7.7	7.2		-0.5
					$\sigma = 1.401$
8~10	7	8.1		8.9	0.8
	8	10.2		9.8	-0.4
	9	10.7		9.9	-0.6
	10	9.6		9.9	0.3
	11	9.1		10.0	0.9
	12	9.8		10.0	0.0
10~12	13	8.6		10.1	1.5
	14	9.1		10.5	1.4
	15	9.3		10.6	0.9
	16	9.4		10.7	1.3
	17	9.3		10.8	1.5
	18	9.5		10.8	1.3
					$\sigma = 1.075$

表3 按各种形态参数对 Barton 十条标准轮廓线的排序

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	出处
JRC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	[1]
D_f	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	[3]
M_a	2	1	3	4	5	9	7	8	6	10	[4]
Z_1	1	2	4	3	6	9	8	10	7	5	[2]
Z_2	1	2	3	5	4	7	6	9	8	10	[2]
I	1	2	3	4	5	8	6	10	7	9	徐放明*

* 徐放明,岩石节理表面形态、粗糙度及力学性研究,中南工业大学硕士学位论文,1989年。

节理面的表面形态对节理力学和物理性质的影响还有接触闭合变形、渗流性质和传导性等。有些学者也尝试用 JRC 值来描述节理表面形态对节理面的这些力学和物理性

质的影响,事实上,节理面的这些力学和物理性质与节理两个面的接触状态密切相关。除了节理两个表面的形态都是随机粗糙度的节理外,用表征粗糙度对节理剪切强度影响的参数 JRC 来描述表面形态对节理的这些力学和物理性质的影响也是不太合适的。

四、讨论和结语

总之,节理表面形态千差万别,现有的节理剪切强度公式都有其适用范围,也就有其局限性,Barton 公式也不例外。因而,Barton 公式中用来反映粗糙度对节理剪切强度影响的节理粗糙度系数 JRC 的适用范围也受 Barton 公式适用范围的限制。例如对规则锯齿状节理试图测试或估算其 JRC 值其实是不可能的,当然试图计算其分维数也是可笑的。因为规则锯齿状节理的轮廓线是欧几里德平面上确定的一维折线,而且 JRC 甚至还不是纯粹的表面形态特征参数,因此把 Barton 十条轮廓线奉为经典反复研究带有一定的片面性。

节理表面的形态类型不同,变形性质(剪切和闭合等)也就不同,表面形态对它的影响的机理也是不同的。孙广忠曾对几种规则几何形态的节理^[6],从研究其力学机理出发,引入节理表面形态参数来反映节理表面形态特征对其力学性质的影响,这种区分表面形态的不同类型来进行分析研究的方法应该说是较为可行的,只是表面形态的类型应包含得更广泛些,应包括规则的和不规则的,以及有各种类型的起伏度和粗糙度。在表面形态类型的划分上,不能停留在定性划分阶段,而应在对表面形态进行定量测试的基础上,用定量的方法进行划分。

对节理表面形态特征的定量测试和分析已渐渐成为研究岩石节理力学及其他物理性质的基本手段之一。纯粹从节理表面几何形态确定的节理表面形态参数,便于为节理表面形态对其各种物理力学性质影响的研究结果进行比较和建立联系,同时还可以分别研究节理两个面的形态特征及不同接触状态下的组合形态特征对节理力学和其它物理性质的影响。

参 考 文 献

- [1] N. Barton, Review of A New Shear Strength Criterion for Rock Joints, *Engineering Geology*, 1973, No. 7, 287-332
- [2] Tse R, Estimating Joint Roughness Coefficients, *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1979, 16: 303-307
- [3] Lee Y. H., et al, The Fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles, *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1990, 27, 453-464
- [4] 黄润秋. 结构面起伏度的定量研究. *水文地质工程地质*. 1993, 20(3), 36 ~ 39
- [5] 夏才初, 孙宗顺, 潘长良. 含波纹度节理的形貌和剪切性质研究. 见: 中国岩石力学与工程学会第三次大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1994, 34 ~ 42
- [6] 孙广忠. 岩体力学基础. 北京: 科学出版社, 1983

岩石力学数值分析进展与思考

王芝银

(中国科学院工程地质力学开放研究实验室)

李云鹏

(西安矿业学院)

摘要 本文讨论了岩石力学数值分析的近代进展和今后发展的几点思考,指出数值分析模式的建立除了应遵循理性力学基本原理外,还必须密切结合工程的实际情况,加深对岩石力学内涵的理解与认识,改进数值模拟手段,重视较为通用的工程岩石力学集成化、智能化、实用化和可视化程度高的数值分析模式及应用软件的研究。

关键词 进展与思考 岩石力学 数值分析

岩石力学数值分析是对岩土工程活动和自然环境变化过程中岩体及其加固结构的力学行为及工程活动对周围环境的影响进行数值模拟的一种手段。半个世纪以来,岩石力学界的许多学者,为了解决岩石力学问题,花费了巨大精力,取得了世人瞩目的成果,成功地解决了不少工程实际问题,极大地丰富了岩石力学的理论与内涵。早在 60 年代,以 Zienkiewicz、Goodman、Brown 等为代表首先将有限元法引入岩土力学的研究中。70 年代,国内一些具有远见的岩石力学研究者(如葛修润、刘怀恒、殷有泉、张有天等)开始了岩石力学数值方法及其计算机软件的开发研究,在这方面做出了开创性的贡献,促进了我国岩石力学数值分析方法及工程应用的发展。随着计算机技术和相关学科新理论、新方法的不断出现,岩石力学数值方法也得到了充实和迅速发展,从有限元到边界元、离散元、不连续变形分析法以及近期出现的流形方法,各显其长。与此同时发展的模式识别、反分析法及软件开发等都有长足的进展。纵观岩石力学数值分析方法的发展,研究者不仅视岩石为一般材料,更重要的是视之为地质结构体,利用各种数学和力学手段,努力去解决工程中的岩石力学问题。由于岩体结构及工程因素的复杂性,岩石力学的工程问题无法用解析方法简单地求解。因此,数值分析方法就成为解决岩石力学与工程问题的有效工具。

一、综合数值模拟及建模

(一)基于连续岩体力学的数值分析

岩石力学数值分析的综合建模一直是人们研究的重要课题。在数值分析方法被引入岩石力学之初,Zienkiewicz(1968 年)就提出了用于考虑岩体不抗拉特性和横观各向同性的不抗拉材料和层状材料的数值分析方法,Goodman(1968 年)则提出了用于模拟岩体位移间断面特性的节理单元,使得以连续介质力学为基础,考虑岩体不抗拉、横观各向同性以及节理特性的弹性、弹塑性、粘弹塑性数值分析方法在 70 年代就已有有了很大的发展。进入 80 年代后,数值分析的应用研究突飞猛进,尤其是基于最小总势能变分原理的有限元