

陈剑平. 2022. 三维网络结构岩体力学架构与展望[J]. 工程地质学报, 30(1): 21-36. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0728

Chen Jianping. 2022. Framework and expectation of three dimensional network structural rock mechanics [J]. Journal of Engineering Geology, 30(1): 21-36. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0728

三维网络结构岩体力学架构与展望^{*}

陈剑平

(吉林大学, 建设工程学院, 长春 130026, 中国)

摘要 三维网络结构岩体力学是岩体力学的一个分支。根据笔者 20 余年对裂隙岩体研究的心得, 阐述了三维网络结构岩体力学的主要特点、研究对象, 基本架构、主要研究内容与未来的展望。将岩体结构控制论归结为材料强度控制、结构类型控制、渗流通道控制和几何边界控制 4 个方面。技术层面的主要内容包括三维 *RQD* 估算、岩体表征单元估算技术、结构块体搜索技术、定向投影岩体结构面三维连通率估算技术以及岩体三维渗径搜索技术等。理论层面主要由球面投影理论、概率统计理论、随机动力学、几何拓扑理论、块体理论、非线性系统理论和裂隙岩体多尺度等效结构模型等构成。强调足量的随机不连续面地质信息的原位统计取样是三维网络结构岩体力学的基础, 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术是三维网络结构岩体力学的核心技术。

关键词 三维网络结构岩体力学; 网络模拟技术; 随机不连续面; 概率统计; 非线性现代算法

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **doi:** 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0728

FRAMEWORK AND EXPECTATION OF THREE DIMENSIONAL NETWORK STRUCTURAL ROCK MECHANICS

CHEN Jianping

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract A framework of three-dimensional network structural rock mechanics has been proposed by author recently. It is a new branch of rock mechanics. Main characteristics of research object, basic framework, main research content and future prospectation are explained according to author's research experience on fractured rock mass for more than 20 years. It is concluded that rock mass structure control theory consists of four aspects; material strength control, structure type control, seepage path control and geometric boundary control. The main technical contents include three-dimensional *RQD* estimation, rock mass representative elements estimation technology, structure block search technology, directional projection rock mass discontinuity three-dimensional connectivity estimation technology and rock mass three-dimensional seepage path search technology. The theory is mainly composed of spherical projection theory, probability and statistics theory, stochastics dynamics, geometric topology theory, block theory, nonlinear system theory and multiscale equivalent structure model of fractured rock mass. A large amount of geological data of discontinuities in the sampling window of rock mass investigation is statistically emphasized as a foundation. Rock mass random discontinuities based three dimensional network numerical

* 第五届谷德振讲座特邀报告

收稿日期: 2021-11-04; 修回日期: 2021-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金(资助号: 41941017, U1702241).

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41941017, U1702241).

作者简介: 陈剑平(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质力学方面的科研与教学工作. E-mail: chenjp@jlu.edu.cn

modelling technique is the kernel of the three-dimensional network structural rock mechanics.

Key words Three-Dimensional Network Structural Rock Mechanics (3DNSRM); Network modelling technique; Random discontinuities; Probability and statistics theory; Nonlinear modern mathematical algorithm

0 引言

完整、均质而又坚硬的岩体是重大基础设施的首选,但岩体作为自然地质体的一部分,通常经历了漫长自然地质历史的进程,近两亿年来板块构造运动的内动力地质持续作用造就了岩体中复杂的地应力条件,伴随着地表外动力地质的夷平面化作用,浅表层的岩体遭受了广泛的卸荷回弹,使得原本就不均匀的地质材料内部产生了不同尺度的结构面,即对应于内动力作用的原生结构面和伴随外动力作用的次生结构面,造就了自然界形态各异的岩体结构类型,图 1 展示了工程地质工作者所熟悉的几种岩体结构类型。

岩体结构类型划分对岩体变形与破坏成因机制的认知具有十分重要的意义,而最早重视地质结构面对岩体性质影响的可追溯到距今 100 年前的 Josef Stini。前国际岩石力学与工程学会主席 (Muller et al., 1979) 这样评价岩石力学先驱 Josef Stini,“1920 年 Josef Stini 在奥地利维也纳技术大学讲授‘技术地质 (Technical Geology)’ 并且创立了地质与工程杂志 (*Journal Geologie und Bauwesen*), 该杂志是 20 世纪 70 年代岩石力学杂志 (*Journal Rock Mechanics*) 的前身,同时指出 Stini 是最早强调地质

结构面对岩体工程性质影响的科学家”。

20 世纪 60 年代以来相继产生了瓦依昂大坝与马尔帕斯大坝失事的事件,研究表明大坝的失事与近坝库岸以及坝肩岩体内发育的地质结构面有着密切的关系。在这一时期,涌现出了一些代表性的成果,如 Deere (1964) 提出 RQD 概念以来,在岩石工程中应用广泛,被称之为传统的 RQD。Bieniawski (1976, 1989) 提出了工程岩体地质力学分类又叫岩体质量级别 (RMR) 分类系统,该分类中引用的 6 个指标分别是单轴抗压强度、岩石质量指标 (RQD)、结构面间距、结构面状态、结构面产状和地下水条件,可知 RMR 岩体分类系统中除了单轴抗压强度之外,地下水条件也能间接地反映了结构面的特征,其余 4 个指标都是结构面的参数。挪威学者 Barton et al. (1974, 1980) 提出的隧道围岩质量指标 Q 分类系统,也采用了 6 个指标,分别是岩石质量指标 (RQD)、结构面组数 (J_n)、节理粗糙度系数 (J_r)、节理蚀变系数 (J_a)、节理水折减系数 (J_w)、应力折减系数 (SRF),在这个分类系统中除了应力折减系数 (SRF) 之外,其余 5 个指标都直接采用了结构面参数。Barton et al. (1974) 还就他的 Q 分类系统公式的参数项进行了分析,指出 RQD/J_n 反映了岩体的结构特性; J_r/J_a 反映了节理壁的强度或节理壁的粗糙度和摩擦特性,也反映了裂隙岩体结构块体之



图 1 岩体结构类型

Fig. 1 Type of rock mass structure

a. 完整结构体; b. 块状结构体; c. 碎裂块状结构体; d. 碎裂-嵌镶结构体; e. 层状碎裂-散体结构体

间的抗剪强度; J_w/SRF 则反映了岩体中地应力影响。这两个岩体分类系统很好地总结了结构面对工程岩体物理力学性质的影响, 并且在国际上得到了广泛的认同。20 世纪 80 年代以来国内的一些关于岩体质量评价的规范、标准中也将结构面的发育程度作为岩体质量评价的标准, 如 GSI、BQ 等指标的应用(韩振华等, 2019), 也说明了国内岩体工作者对结构面的重视。

自 20 世纪 70 年代以来科学家对岩体结构面的研究进入了一个重要的节点, 英国帝国理工大学 Priest et al.(1983b) 在早期关于岩体结构面几何特性大量研究的基础上, 提出了结构面二维网络模拟技术, 标志着国际上岩体结构面网络模拟技术的开始。在同一时期的中国, 留英学者井兰如(1986) 在第一届全国岩石力学数值计算及模拟试验讨论会上发表了岩体结构面随机网络及其在离散单元法、渗流计算以及块体分析理论中的应用; 潘别桐等(1989) 在岩石力学新进展中提出了岩体结构概率模型和应用, 标志着基于概率统计理论的结构面二维网络模拟技术在岩石力学中应用的开始。Kulatilake et al.(1993) 提出了岩体结构面三维网络数值模拟及其有效性验证, 标志着基于概率统计的结构面三维网络模拟技术在岩体力学中应用的开始。伍法权(1993) 出版了统计岩体力学原理专著。陈剑平等(1995, 2001a, 2006) 论述了随机不连续面三维网络数值模拟的原理、基本技术以及基于少量数据的非扰动岩体三维裂隙网络模拟技术, 表明基于概率统计理论的岩体结构面三维网络模拟技术一直在不断地进步, 为三维网络结构岩体力学的形成奠定了基础。三维网络结构岩体力学是在岩体结构控制论的基础上发展起来的, 不仅重视单个结构面对岩体力学行为的影响, 也注重三维空间结构面网络整体对岩体力学行为的综合影响, 正在不断完善的结构面三维网络模拟技术, 使得三维网络结构岩体力学成为可能, 本文仅提出基本框架。

1 地质结构面及其不连续面特征

1.1 地质结构面的多尺度特征

地质结构面的特征包括结构面产出状态、优势分组、尺度、间距、起伏度、粗糙度、张开度、充填物、含水性以及结构面的风化程度等。本文无意介绍上述各项特征, 仅是简要说明地质结构面的多尺度特征。

地质结构面是存在于岩体中有限规模的面状结构, 可以在地表及地下工程的人工露头或天然露头上观察与统计它们。地质结构面既可是地球内动力地质作用的产物(原生结构面), 如不整合面、整合面、层面、层理、断层、节理、劈理、片理、面理、片麻理等, 也可是地球表生地质(包括人类地质营力) 作用的产物(表生结构面), 如自然与人工作用产生的卸荷裂隙, 爆破震动等产生的震动裂隙等。

从地质范畴看, 各不同尺度的地质体中都发育地质结构面, 从全球的角度来看, 发育于大洋深部的洋中脊就是具全球规模的断裂带, 图 2 显示了发育在大西洋的洋中脊从南至北曲折地贯穿整个大西洋, 其长度可达 2×10^4 km。一些板块俯冲碰撞带的构造缝合线长度也可达数千千米, 一些区域的断裂带可达数百千米以上, 长度数百至数千米的断层已经在很大程度上影响了工程岩体的外部边界条件, 数米至数百米乃至规模更小的结构面与工程岩体的稳定性关系更为密切, 且这些规模较小的结构面如节理、裂隙等通常具随机分布的特征。



图 2 大西洋中贯穿大洋的洋中脊

Fig. 2 The mid-ocean ridge of the Atlantic Ocean

图 3 是吉林蛟河备选核电场址发育的角闪黑云花岗岩体, 图 3a 是发育随机结构面的花岗岩体天然露头, 图 3b 是天然露头局部岩块, 可见矿物结晶颗粒粗大, 晶粒直径接近 1 cm, 图 3c 是该岩块局部薄片岩矿鉴定的影像, 表明主要由尺寸小于 2 mm 的片状黑云母、长柱状角闪石、半自形粒状石英、半自形板柱状碱性长石和半自形板柱状斜长石构成了角闪黑云花岗岩, 其中片状长柱状矿物发育一至两组尺度更小的解理, 一些半自形晶体可见卡氏双晶和聚片双晶等, 这表明在眼睛难以观察的尺度上仍存在着解理这样细观尺度上的地质结构面。此外, 矿物晶体是由原子或离子在空间按某种规则占据质点的晶格重复构成的。其内部还存在着晶面或晶格缺陷等微观尺度的结构面, 如从石盐内部结构中取出来的 Cl^- 离子和 Na^+ 离子堆积而成的立方小块体, 其

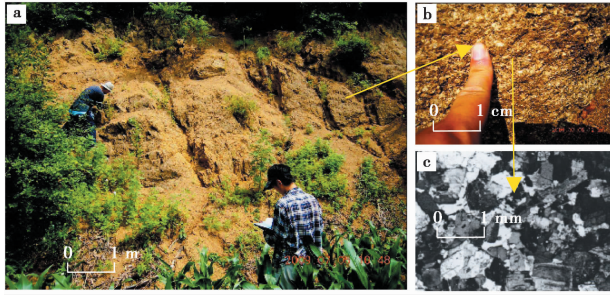


图3 吉林蛟河核电站备选场址角闪黑云花岗岩体

Fig. 3 Rockmass of hornblende biotite granite at the alternative site of Jiaohe nuclear power plant, Jilin Province

中 Cl^- 离子和 Na^+ 离子沿立方体小块的棱方向仅以 0.5628nm 的间隔排列,这就构成了微观层面纳米级的结构面了。

岩体的基本属性由两部分构成,即岩块与地质结构面,岩体的定义虽然简单,但随着研究的深入,逐渐得出了岩块尺度具有相对性的认识,即在较大尺度范畴上的岩块,对于某个较小尺度范畴而言就具备了岩体的特征,这与力学领域里已成共识的岩石本身就是一种损伤材料的认识是一致的,对地质体造成的损伤既可是宏观断层、节理,细观解理,也可在微观晶面等各尺度空间。

1.2 结构面的不连续性特征

断层、节理、裂隙等面状结构地质上统称之为结构面,但在力学的层面则称为不连续面(Discontinuities)。图4是在不考虑重力场的无重均匀连续介质条件下,同样大小的3个长方体模型

在3个相互垂直的方向上同时施加同量级的主压应力。图4a是不考虑结构面时,应力云图是均一的,应力矢量图表明每一个单元受到了与边界加载的主应力相同的应力,取与长轴方向平行应力为最大主应力,其最大主应力呈水平展布并无偏转,由此可知在不考虑结构面的情况下,模型内各单元的受力是相同的,即在连续介质模型中应力是处处连续的。图4b是模型中增加了一个结构面,从模型的应力云图可以看到在结构面附近云图发生了变化,即在结构面附近应力发生了分异,有沿结构面应力集中的现象,从相应的应力矢量图与最大主应力图也可以看出不仅在结构面附近,且在一定范围内应力均发生了偏转,即模型受结构面的影响使其在结构面及其附近的应力与位移均出现了不连续的现象。图4c是考虑了一组共轭结构面的影响,可见结构面及其附近,应力分异、集中以及偏转的现象更为显著,应力与位移不连续的现象更为突出。这一数值模拟的结果表明结构面的存在导致了原本连续分布的应力与位移出现了不连续。结构面是导致不连续的根本原因,因此将各类结构面统称为不连续面是再恰当不过的了。

2 岩体结构控制的本质

岩体结构控制论在当今的工程地质界已耳熟能详,这是中外科学家共同努力的结果,是由大量岩体工程实例总结出来的,最早的可以追溯到1884年始于法国主导并于1908年由美国接管的巴拿马运河

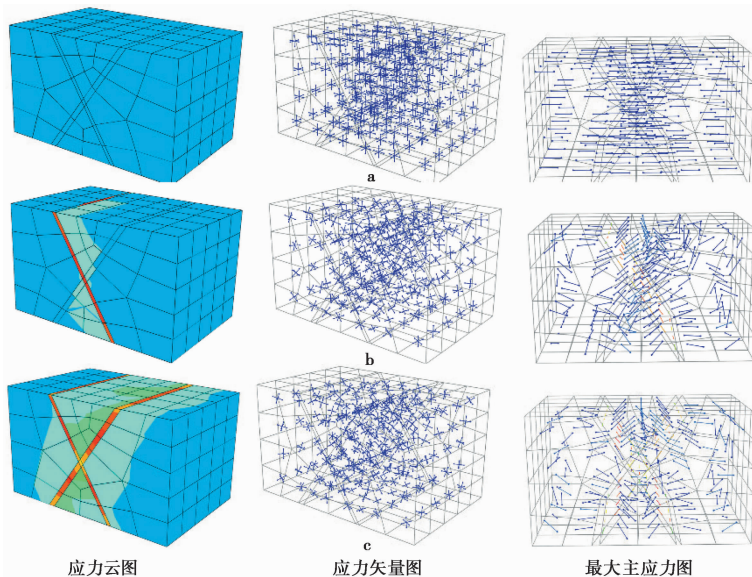


图4 无重介质条件下考虑结构面与否的应力场规律对比

Fig. 4 Comparison stress field patterns with or without structural plane under no-gravitational condition

工程,从 1910~1964 年半个多世纪的历程中运河两岸发生了 60 个滑坡,后来美国工程师(Lutton et al., 1979)将这些滑坡的成因归结为结构面影响。此外,国外还有前面提到的著名瓦昂大坝与马尔帕斯大坝失事等事件。在国内 20 世纪 50 年代以来国家的重大工程如葛洲坝水电站、金川铜镍矿、大亚湾核电站、二滩水电站、三峡工程等相继开始勘察设计与建设,以中国科学院谷德振院士领衔的研究团队倡导创立了岩体工程地质力学(谷德振, 1979),率先提出了岩体结构的全新概念,结构面和结构体是构成岩体结构的两个基本单元,鲜明而深刻地提出了岩体结构制约岩体物理力学性状、岩体变形破坏机制、控制岩体稳定性的著名论断,得到了广泛的认同。随后在中国科学院孙广忠、王思敬、孙玉科、伍法权等人的相继努力之下,岩体结构控制论得以传承,相关认识也日益精深。

笔者将岩体结构控制论概括为如图 5 所示的 4 个支撑要素,以下分别叙述。



图 5 岩体结构控制论基本构成

Fig. 5 Basic composition of cybernetics of rock mass structure

2.1 材料强度控制

材料强度控制是岩体结构控制论最朴素的认识,结构面之所以能成为岩体变形与破坏的控制因素,根本原因在于结构面的抗剪强度显著低于岩块的抗剪强度(赵海军等, 2019),结构面的抗拉强度更低甚至为 0。图 6 是珠海横琴花岗岩边坡顶部,以卸荷作用为主,裂隙显著张开,岩体应力松弛,质量显著降低的现象,这种岩体亦被称为应力松弛岩体,该类岩体无论是抗拉强度还是抵抗变形的能力都极低。另外结构面的强度由于受到起伏度、粗糙度、隙宽、充填物、含水状况、结构面风化程度等因素的影响,总体上结构面的抗剪强度低于岩石的抗剪强度,但结构面的抗剪强度的取值,仍然是一个严峻的挑战。

2.2 结构类型控制

岩体结构类型是分析与评价岩体变形-破坏的基础,结构类型不仅控制了岩体最终的破坏模式,还



图 6 裂隙显著张开的岩体

Fig. 6 Rock mass with significantly open fissures



图 7 斜坡局部与整体破坏

Fig. 7 Partial and whole failure of slope

控制了岩体变形过程的力学行为(杨强等, 2020)。总体来看,可将岩体的变形与破坏分为局部和整体两大类型,受结构类型的影响,图 7a 是金沙江上游茂顶河段岸坡路堑受 3 组随机结构面控制发育了大小不等的局部掉块现象;图 7b 是金沙江上游奔子栏河段右岸受两组大型结构面控制的楔状体破坏,由于斜坡高达 400 m 以上,长大结构面贯穿了斜坡,导致了斜坡整体失稳。

结构类型的控制还可以体现在斜坡结构类型方面,由结构体与临空面可组合形成顺向结构斜坡、逆向结构斜坡、横向结构斜坡以及斜向结构斜坡等。不同结构类型的斜坡是岩体变形-演化-致灾的地质背景,只有搞清楚岩体结构类型,才能合理地构建工程地质力学概念模型,进行合理的成因机制分析,得到可信的地质定性认识,进而指导地质力学模型的构建,使岩体稳定性的分析-评价-验证在正确的轨道上运行。

2.3 渗流通道控制

地下水对岩土体稳定性影响十分显著,主要体现在水对岩体的软化作用使岩体的强度弱化,特别是水对结构面充填物的软化作用尤为突出。此外,水的浮托力和孔隙水压力都将减少岩体内部的有效应力,再者动水压力等的作用都将对岩体的稳定性不利。双重介质是裂隙岩体导水的特点,即孔隙导水与裂隙导水。在孔隙介质中流动的水称之为孔隙渗流,其流速一般都十分缓慢,渗透系数通常仅是 $10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的量级。在裂隙介质中流动的水称之为裂隙流(孙琪皓等, 2019),其流速远高于孔隙渗流,当裂隙达到一定宽度后通常能以集中流的方式富集水流,如图8所示的是白鹤滩水电站勘探平硐顶部沿花岗岩裂隙渗出的集中水流,这也正是基岩山区地下水源地是以基岩裂隙水为主的根本原因。由此可知,岩体中地下水受控于岩体中的裂隙,在三维空间呈不规则网格状的裂隙网络控制了裂隙渗流的通道,致使岩体的渗透路径十分复杂。查明基岩裂隙水的渗流通道,不仅能为地下水的规模开采提供指导,还能为岩体稳定性的评价找到根源。



图8 花岗岩体中的裂隙水流

Fig. 8 Fissure flow in granitic rockmass

2.4 几何边界控制

模型分析是科学研究重要的方法之一,但模型模拟结果的合理性与可靠性至关重要,长期的模型分析经验积累有如下的基本共识。可靠性高的模型必须具备两个基本要素:一是模型中各不同材料物理力学参数的可靠。由于地质材料是伴随地球内外动力地质建造与改造而形成多尺度空间损伤材料,其强度具有显著的不确定性,因此,材料物理力学参数的可靠性是模型高可靠性的关键要素之一。其次是模型边界条件的合理,由于边界条件涉及多方面的内容,以下分别阐述。

构建合理的地质力学模型并非易事,因为地质力学模型主要由应力边界条件,地下水边界条件以及几何边界条件3个方面构成,这3个方面也就是地质力学模型的初始(边界)条件。建模经验表明,所谓合理就是使地质力学模型的初始(边界)条件尽最大可能地反映研究对象的真实情况。若边界条件不合理,则模型研究就成了没有科学意义的数字儿戏了。

本节旨在讨论几何边界条件,其他两者仅简要阐述,关于应力边界条件:主要涉及内力与外力,内力主要指地应力场,即构造应力场与自重应力场,外力则主要指人工构筑物等对模型施加的外力。对于高地应力地区,如何将构造应力场与自重应力场正确地施加到模型上,并使模型整体处于力系平衡状态,这是建成合理地质力学模型关键的一步,因为如果模型受力不平衡,就得不到可收敛的解;关于地下水边界条件:正确的地下水边界能够反映常态以及各主要工况条件下地下水条件对模型的影响;模型的几何边界条件是本节讨论的主体,论述如下:

对于均匀连续介质的模型而言,其几何边界主要就是模型的规模即边界形态。但对于裂隙岩体而言,每一裂隙都具有不连续特性,属于非连续介质范畴。因此,受裂隙控制岩体,在考虑几何边界条件时,除了模型的规模,材料的几何边界之外,还要考虑模型内部的几何边界条件,即模型中主要节理、裂隙的空间格局。为此,对于裂隙岩体而言,在三维网络结构岩体力学中的几何边界条件要考虑3方面的内容:①模型的规模及边界形态,②模型中不同材料的边界,③模型中不连续面的空间格架。对于几何边界条件①、②,在过往的地质力学模型中都已经考虑到了。对于几何边界条件③可称之为内部几何边界条件。

内部几何边界条件主要考虑岩体双重介质中的裂隙介质,忽略了孔隙介质的影响,重视裂隙介质就是抓住了问题的本质。仅依据地质调查的方法只能获得露头表面的结构面特征,无法获得岩体内部结构面的展布特征。目前能获得岩体内部结构面展布规律的就是基于概率统计理论的随机结构面三维网络数值模拟技术,图9所示的是岩体随机不连续面三维网络模型,图9中显示了3组优势不连续面,且每一组不连续面中的每一个不连续面的空间产出状态、尺寸规模以及空间密度都是不同的,但又有自己的规律可循。特别需要说明的是每一个不连续面的尺寸都是有限的,这与传统的将随机不连续面认为

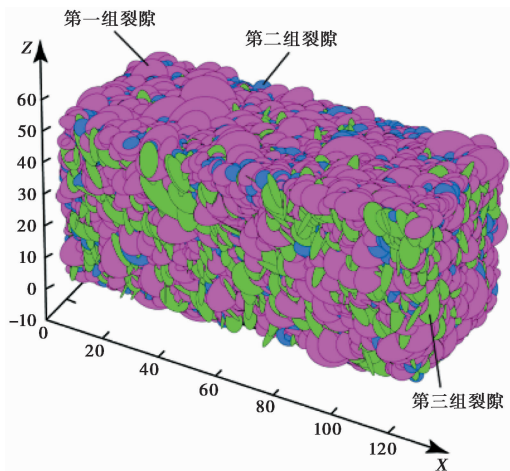


图9 岩体随机不连续面三维网络模型

Fig. 9 Three dimensional network model of random discontinuity in rock mass

无限延展面的假定是不同的。由于岩体随机不连续面三维模拟技术涉及的内容较多,恕本文不介绍该技术。

岩体随机不连续面三维网络模型能够很好地诠释工程地质界关于岩体结构控制论的精髓,特别是关于岩体结构控制论中的内部几何边界控制起到重要的支撑。基于随机理论的结构面三维网络数值模拟技术,通过概率统计分析、纠偏、预测推断、检验等过程与方法,根据二维露头上有限的不连续面信息获得三维空间的不连续面信息,从而可以更好的认识随机不连续面在三维空间几何特性及组合特征,为裂隙岩体在临空面条件下的变形演化乃至灾变过程预测提供了良好的途径。岩体工程的不确定性是20世纪末科学家热衷讨论的问题,Glaser et al. (2000)总结了美国岩石力学与工程协会在加州召开的关于岩石力学现状与未来走向的讨论,其核心问题是岩石力学中的不确定性与尺度效应,并认为不确定性与尺度效应将成为岩石力学的新方向。在岩体结构控制论核心思想指导之下,自20世纪90年代以来笔者将随机理论以及非确定(非线性)性理论应用于随机不连续面三维网络数值模拟技术。将其与实际岩体工程问题相结合,并将之总结为三维网络结构岩体力学。

3 三维网络结构岩体力学基本架构

研究物质机械运动规律的科学即为力学,研究岩石(体)变形、破坏的科学称之为岩石(体)力学,它是力学的一个分支。以岩体结构控制论为指导,

以岩体随机不连续面为基础,服务于地质力学模型内外边界条件的构建,研究受结构面控制(单体或块体)系统的变形规律与灾变机理,是工程地质领域重要的研究方向,本文称之为三维网络结构岩体力学,是岩体力学的分支。如前所述国内外有许多学者在这方面做出过卓越的贡献。虽然,目前三维网络结构岩体力学尚不够成熟,但为了能够更好地总结相关的研究成果,吸引更多的学者关注并参与该方向的研究,笔者尝试着总结出了三维网络结构岩体力学的基本架构。

图10是三维网络结构岩体力学的基本架构,可以看出这个架构主要由地质学、力学和随机不连续面三维网络模拟技术3个方面构成,其中:地质学是这个架构中最重要基础,以下分别叙述:

3.1 地质范畴

在三维网络结构岩体力学架构中地质学范畴主要是两个方面的内容,第1个主要内容是岩质露头上展露的原生结构面与次生结构面,原生结构面主要包含地层的整合面、不整合面、断层、层面、层理、面理、片理、片麻理以及节理等,在细观层面则可能涉及微细裂缝等,在微观层面可能涉及矿物解理、晶面等;表生结构面主要指近地表岩体的自然卸荷裂隙、人工卸荷裂隙、爆破卸荷裂隙等。在地质范畴认识结构面基本特征十分重要,岩体的变形与破坏机理的答案可能就隐藏在结构面的基本特征之中。

地质范畴的第2个主要内容是结构面的现场采样技术,在上述的各类结构面中最为复杂的就是随机节理、裂隙信息的获取。就工程岩体而言,断层等大型结构面数量较少,采用钻探、物探等技术就能有效地获取必要的信息。但对于规模较小且呈随机分布的结构面,只能采用传统的测线法或测窗法来统计露头上每一条结构面如下的信息:迹长、产状、间距(密度)、张开宽度、充填物矿物成分、充填物粒度成分、裂隙壁风化程度、起伏度、粗糙度、构造蚀变性以及含水性等。人工现场统计的方法仍是最常用的方法,也是迄今为止可靠性最高的方法,也称之为接触式测量。Priest et al. (1981)提出了采用测线法估计不连续面的迹长与间距。Kulatilake et al. (1984a)提出了矩形取样窗估算随机不连续面迹长的方法。Mauldon (1998)提出了采用凸多边形取样窗估算随机不连续面迹长均值。但这种接触式的测量对露头较高大且陡峭的情况下就难奏效了。一种非接触式的方法,即基于数字相机的近景数字

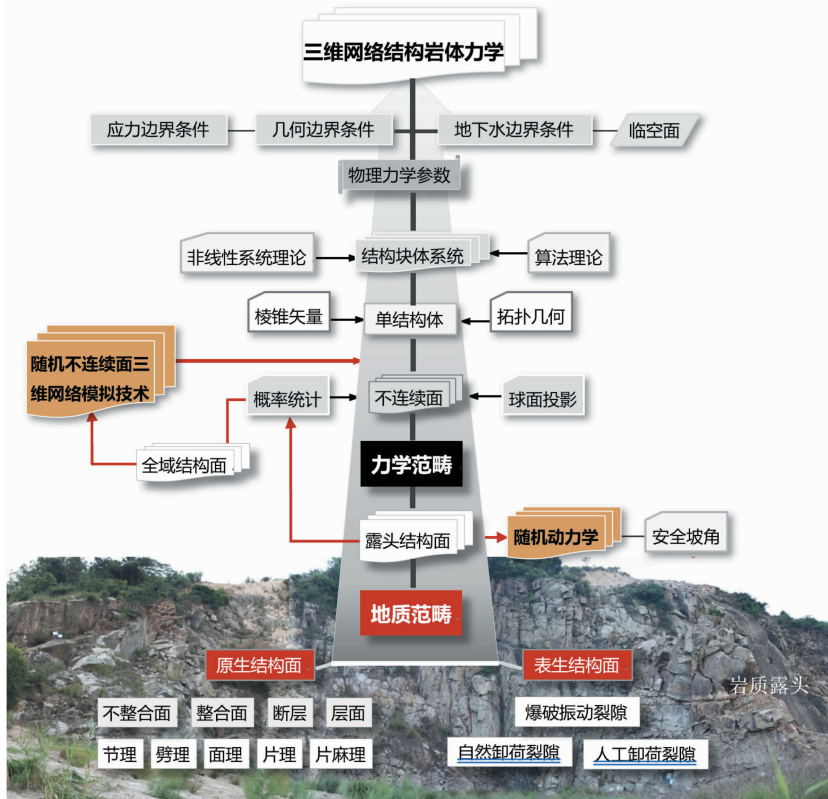


图 10 三维网络结构岩体力学基本架构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of basic framework of three dimensional network structural rock mechanics

摄影测量法(王凤艳, 2006)以及三维激光扫描仪方法,能够获得较大规模露头上的结构面信息。但对于超高陡露头上的结构面采用近景数字摄影测量法也难奏效,将在 3.3 节简要说明无人机航摄的方法。

3.2 学力范畴

如前述的图 4,当连续介质中存在结构面时,在结构面附近的应力与位移都不连续,因此在力学范畴内把岩体中的各类结构面统称为不连续面(Discontinuities),由于岩体中含随机不连续面,致使连续介质力学理论解析裂隙岩体的变形与破坏规律十分勉强。

破解裂隙岩体变形与失稳致灾机理是三维网络结构岩体力学的核心,其指导思想是岩体结构控制论,即岩体的变形与破坏受控于相对较弱不连续面,其破坏模式如前述图 7 的局部与整体破坏,或更复杂的组合式破坏。如图 11 是金沙江上游支斯山河段于 20 世纪 60 年代发生的一次崩滑堵江残余的后壁与滑面,现场可见后缘近直立的不规则拉裂面,滑动面呈不规则的波状起伏,起伏高度可达 $2\text{ m} \pm$,总体上呈略向上凸起总体倾向金沙江的龟壳状滑动面,每一个起伏的波状体由至少 3 组不规则的结构



图 11 受多组结构面控制的堵江滑坡残余滑面特征
Fig. 11 Characteristics of residual slip surface of landslide dam controlled by multiple structural planes

面组合而成,这是一个受结构面控制的巨型复杂结构体变形失稳致灾的典型实例,尤其是略凸起的龟壳状滑动面与常见的滑动面并不一致,这种非常规现象只有岩体结构控制论才能合理解释。

图 12 是张晶(2014)关于马吉水电站坝肩岩体的三维结构分析结果,在坝肩勘探平洞内随机不连续面现场调查的基础上,应用随机不连续面三维网络数值模拟技术生成结构面三维网络模型之可视化块体系统。由于随机结构面尺寸的有限性,岩体内

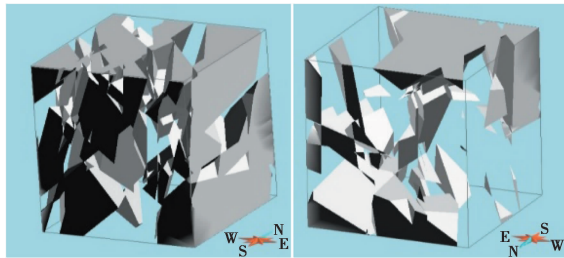


图 12 马吉坝址岩体结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of rock mass structure of Maji dam site



图 13 某交通线路怒江特大桥超高陡复杂斜坡

Fig. 13 Super high steep complex slope of Nujiang bridge on Sichuan Tibet Railway

形成的结构体单体有简单的四面体也有复杂的多面体,更有似断非连(岩桥)的复杂结构体,由这些本就复杂的结构单体集合形成了结构块体系统,这就大大地增加了结构块体系统的复杂度。2.4 节中关于几何边界控制的论述中,提及的内部几何边界复杂性正是由此而来,从这个意义上看复杂结构块体系统的变形与致灾机理探索,有必要寻求非连续介质理论的突破,三维网络结构岩体力学的研究正是朝着这个方向探索的尝试。

3.3 技术层面

三维网络结构岩体力学涉及技术层面的内容较多,除了 3.1 节中提及的地质结构面现场取样技术(接触式)与近景数字摄影测量或三维激光扫描取样技术(非接触式)能解决较大露头的结构面信息采集之外,对于超高陡斜坡则必将面临拟取样露头规模大且抵不近,看不见,摸不着,测不到的复杂且苛刻条件,图 13 是正在建设中的某交通线路怒江特大桥超高陡斜坡,相对高差达 1000 m 以上,且坡面凹凸显著,涉及的范围较大。即便近景数字摄影测量或三维激光扫描技术也不能奏效。无人机摄影测量就成了最好的选择,但无人机摄影测量 4D 产品(数字线划地图 DLG、数字栅格地图 DRG、数字调和地图 DEM、数字正射影像地图 DOM)的主要目的是地形地物的空间定位,其分辨率一般是 $15\text{ cm}\pm$ 。而岩体三维网络结构岩体力学的主要研究对象是岩体结构面信息的取样,包括结构面产状、迹长、隙宽、起伏度、间距、充填物、粗糙度等信息,要求的分辨率是毫米级的。因此,航摄 4D 产品不能满足要求,为此建议采用无人机贴近摄影测量技术,分辨率可达毫米级,贴近摄影测量技术虽然还在探索中,但已有实践证明该技术是有效的,由于篇幅限制,这里不介绍贴近摄影测量技术。

不连续面取样技术是三维网络结构岩体力学的

基础,将此基础打牢了才有以下各技术的施展空间,诸如随机不连续面三维网络数值模拟技术、三维 RQD 估算技术,岩体表征单元估算技术、结构块体搜索技术、定向投影岩体结构面三维连通率估算技术,岩体三维渗径搜索技术等,由于篇幅有限以下简要介绍各技术。

(1)随机不连续面三维网络模拟技术:该方法的特点是在扎实足量的地质结构面现场采样的基础上,以概率统计理论为基础,进行以下 7 个方面的数值模拟。

①岩体结构统计均质区划分:最早将概率统计方法进行岩体结构统计均质区划分的是 Miller (1983)采用了列联表与下半球施密特投影产状极点相结合的方法进行了单参量的岩体结构统计均质区划分,Kulatilake (1990)对 Miller (1983)的方法进行改进与应用,Song et al. (2015)综合考虑了多参数岩体结构统计均质区的划分。岩体结构统计均质区划分虽然取得了成果,但仍值得深入探索。

②结构面优势组划分:最早采用概率统计方法进行随机结构面的优势分组的是 Shanley et al. (1975, 1976),笔者将此方法简称为球径寻优法,经验表明该法可满足工程的要求。基于非线性系统理论的现代算法如 Xu et al. (2013)应用基于多尺度优化算法的模糊 C 均值分组,取得了良好的效果,结构面优势组数划分之后,各优势组特征的表达通常采用产状极点图,陈剑平等 (2005b)建议采用满足右手法则的结构面走向玫瑰与极点同时表达的方式。

③结构面迹长均值估算:结构面迹长均值是反映结构面优势组尺寸分布的最重要参数,由于取样窗口获得的迹长存在取样偏差,称之为观测迹长需要进行校正以获得理论迹长均值。Prest et al.

(1981)推荐采用测线法来估算不连续面的迹长概率均值; Kulatilake et al. (1984a)建议采用矩形取样窗口法估算不连续面迹长概率均值; Mauldon (1998)分别就凸多边形取样窗口估算不连续面迹长概率均值给出了具体方法; Zhang et al. (2016)在矩形窗口上布置多测法估算结构面的迹长取得了更为稳定而可靠的解。

④结构面圆盘直径均值估算:结构面空间形态与尺寸是一个至今尚未得到确切认识的课题,通过大量现场调查一般认为结构面形态在其走向与倾向方向的尺寸相当,数学上将其简化为圆盘、菱形、椭圆形或矩形等。由于通过窗口观察的二维迹长获取三维空间圆盘的直径是一个推断的过程,目前这方面的研究还很不成熟。相关的研究有 Kulatilake et al. (1986)建议数值积分法来推断二维迹线到三维空间中的直径均值估值;张奇(2015)就矩形窗口测线法直接估算不连续面三维圆盘直径均值取得了良好的效果。

⑤结构面间距估算:结构面间距虽然可以实测,但至今还没有统一规则,这里的结构面间距是特指各优势组的结构面间距,可采用陈剑平(2001a)在窗口内布置放射性沿线的方法来处理。但由此得到的间距还仅仅是观测值, Terzaghi (1965), Priest et al. (1976, 1983a)分别就结构面间距测量误差以及间距测量方法进行了研究。

⑥结构面密度估算:各组结构面在单位体积内发育的数量,即为结构面密度,由于结构面间距的采样是在露头上进行的,存在取样偏差,只有当结构面优势组的法向方向与测线方向一致时,获得的间距才是真实的,为了完成间距测量偏差的校正, Karzulovic et al. (1985)用法线方向的测线频率校正法来解决此问题; Massanobu (1982)则用张量法来表达结构面的体积密度; Kulatilake et al. (1984a)明确地给出了窗口取样偏差及改进的方法。结构面密度的表达目前还是一个值得深入探索的内容。

⑦蒙特卡洛模拟:通过上述各步骤的纠偏模拟之后,可以获得各优势组结构面直径的概率密度函数,空间概率密度,以及产状分布特征的各项基本参数,最后运用蒙特卡洛模拟技术来生成经得起检验的三维网络数值模型。

上述的随机不连续面三维网络模拟技术起到了地质范畴与三维网络结构岩体力学之间桥梁的作用,即在随机不连续面三维网络模拟技术的基础上,应用下述各技术,获取相关的岩体结构参数。

(2)三维 RQD 估算:自 Deere D. U. 提出 RQD 概念并被广泛应用于岩石工程以来,逐渐认识到由钻孔获取的传统 RQD 存在取样偏差,原因就在于钻孔一般都是铅直获取岩芯的,当结构面与钻孔方向呈不同角度相交时,在同一岩体中可获得不同的 RQD 值。此外,传统的 RQD 还规定了阈值为 10 cm,而这与 Heok et al. (1980)建议的图 14 关于岩体结构相对性的概念是相悖的。从这个角度考虑,在随机不连续面三维网络数值模型里布置不同方向的测线(打钻孔)既无需大量花费又容易实现,并且还可改变阈值来获取不同阈值条件下的 RQD 值,王国欣等(2002), Zhang et al. (2012)就是在三维网络数值模型的基础上进行了相关的研究。

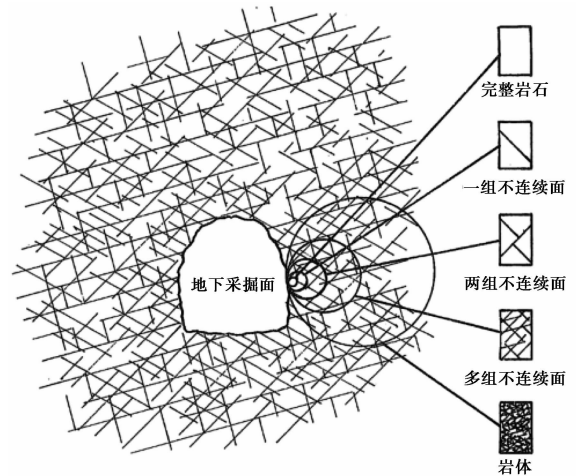


图 14 从完整至强裂隙化岩体的过度

(引自 Heok et al. (1980))

Fig. 14 Transition from intact to strongly fractured rockmass

(cite from Heok et al. (1980))

(3)岩体表征单元估算技术: Hill (1963)首次提出了岩体表征单元(RVE)的概念,指出样本 RVE 尺寸的分布与分散性是由特定结构特征的平均值综合反映的,样本应当包含足够数量结构特征的模量之整体的表现特征并与摩擦、位移相互独立,宏观上该值是均质的。此后,不同领域内的学者广泛开展了相关的研究, Pinto et al. (1993)通过现场测试获取 RVE 尺寸,但这种试验十分困难而且费用昂贵。采用数值模拟的方法就可避免现场试验所带来的困难与费用,通过三维网络数值模型来获取 RVE 是一种有效的办法,谭春等(2012), Zhang et al. (2013)在三维网络模型基础上分别采用灰色系统,随机数学方法成功地获取 RVE。

(4)结构块体搜索技术:裂隙岩体局部稳定性评价最具代表性的研究是始于 20 世纪 70 年代由石

根华(1977)提出的全空间赤平极射投影法,后来发展成为块体理论。基于岩体随机不连续面三维网络模拟技术的岩体局部稳定性评价,并不排除块体理论的应用。三维网络结构岩体力学评价块体稳定性与块体理论之区别主要表现在以下几个方面:三维网络模拟技术获得的结构面三维网络模型与实际岩体具有概率意义上的统计相似性;其次模型中每一个结构面尺寸都是有限的,与块体理论以及赤平极射投影中结构面无限延展的假定不同;再者,块体理论通常是将优势分组结构面的产状平均矢量进行投影分析,或者是对现场获取的有限结构面进行分析,这种方法通常应用于工程的施工阶段最有效,而基于三维网络模拟技术的岩体局部稳定性评价,既从工程的勘察到施工各阶段均可使用。且基于三维网络结构岩体力学的结构块体搜索技术要求在各统计均质区内进行,由此可见结构块体搜索技术要求的基本条件相对苛刻一些。卢波等(2002, 2004)在三维网络模拟的基础上对复杂结构岩体的局部块体稳定性搜索与评价的相关研究是将块体理论应用于三维网络结构岩体力学的实例。

(5) 定向投影岩体结构面三维连通率估算技术:裂隙岩体整体稳定性是诸如大型水利水电工程、某交通线路等重大工程备受关注的问题,对于具有贯通性滑面的岩质斜坡,滑面就是岩质斜坡整体稳定性的控制面。而在发育随机结构面的岩体中,并无确定的贯通性滑面,但裂隙岩体可能沿多组结构面组合成相对较弱的断续面,并最终沿此较弱的断续弱面贯穿岩桥形成统一的不规则的滑面,如前述图 11 所示龟壳状滑面而产生破坏,这就涉及定向投影岩体结构面三维连通率估算的问题。需要说明的是,这里的三维连通率与水文地质学中导水连通率的概念不同,水文地质学主要考虑水量与水质,并不考虑岩体稳定的问题。岩体力学最为关注岩体稳定性问题,而结构型岩体的失稳受控于结构面,结构面是有优势方向的,因此三维连通率强调定向性,以期获得结构面连通性最高、岩桥最短、最易失稳的方向,这可通过定向投影岩体结构面三维连通率这个参数来表达,这个参数在三维网络数值模拟的基础上是容易实现的。陈剑平等(2003, 2005a, 2006)就此作了探索性的研究,尽管这一研究难度大,但这是一个值得进一步探索的课题。

(6) 岩体三维渗径搜索技术:岩体力学中一个重要方向是岩体水力学,在基岩裂隙中传导的水会引起裂隙壁压力变化,在特定条件下隙壁压力的变

化可能成为影响岩体稳定的要素之一。查明基岩裂隙水渗流途径是解决水文地质学与岩体水力学相关问题的基础。由于三维渗径搜索涉及随机分布的结构面,因此采用现场勘探的手段往往无效。但在三维网络结构面数值模型的基础上应用现代数学的方法来搜索裂隙岩体三维渗径是可实现的。赵红亮等(2005)就是根据三维网络模型中有限尺寸圆盘在空间相交与连通情况进行渗径搜索的探索。笔者相信这仅是此方面研究的开始,如果能在裂隙渗径搜索的基础上进一步探索渗径各部位的水压力,进而探索渗径上裂隙的变形与破裂扩展机制等相关研究,将对岩体水力学的研究起到有力的推动作用。

3.4 理论层面

三维网络结构岩体力学的指导思想是岩体结构控制论,考虑到随机结构面及其空间组合的复杂性,在理论层面上除了传统的地质、力学、数学之外,三维网络结构岩体力学在理论上涉及的理论知识体系较为复杂,主要涉及如下几个方面的理论应用与探索:

(1) 球面投影理论:结构面空间产出状态及其由结构面组合成结构块体特征的表达需用球面投影理论,如施密特投影和赤平极射投影理论,孙玉科等(1980)出版的赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用是国内首次将赤平极射投影理论较为系统地引入到工程地质岩体稳定性评价之中,赤平极射投影采用的是等角度投影理论,而施密特投影则是等面积投影理论,这两种球面投影理论对三维网络结构岩体力学都是有意义的。

(2) 概率统计理论:正如前面提到的随机不连续面三维网络数值模拟技术是将地质的信息与力学连接起来的桥梁,由于地质结构面在尺寸、形态、产出状态、表面特征,空间组合等各方面均呈随机性,加之结构面与采样露头之间的关系,在现场结构面取样过程中无论是迹长、产状以及间距等都存在不同程度偏差。而纠正这些偏差较为恰当的就是概率统计理论,在 3.3 节的随机不连续面三维网络模拟技术 7 个方面的内容均基于概率统计理论。

(3) 随机动力学:动力学是研究物体的运动变化与其所受力之间的关系(朱仁明等, 2020),是理论力学最重要的组成部分(静力学、运动学、动力学)。工程动力地质学主要研究地壳浅表层地质体的变形、破坏与重力场之间的关系,对结构型岩体而言,仍然归结到由随机结构面构成的结构块体在重

力场作用下的变形与破坏规律。传统岩体动力学主要基于空间几何或赤平极射投影理论针对有限数量结构面的研究。随机动力学则是研究岩质露头上任意结构面与临空面以及露头上所有结构面的组合,可能形成单面或楔状控制的结构块体在重力场作用下的变形与破坏动力特征。当露头结构面数量较多时导致赤平极射投影基圆上的投影大圆数量多、杂乱繁杂,读图十分困难,传统的动力学分析无法实施。随机动力学理论则是在现场大量结构面地质调查统计获得岩质斜坡稳定坡角的定性认识的基础上,综合空间几何与赤平极射投影技术,通过计算机编程计算出岩质斜坡可能的安全坡角,进而采用贝叶斯理论最终评估得出岩质斜坡的安全坡角(Zhou et al., 2017; Li et al., 2021),将随机动力学理论运用于非贯通性结构面岩质边坡的安全性评价研究,已有成功的工程实例。

(4)几何拓扑理论:拓扑学是继欧基里德几何、解析几何、微分几何、射影几何等之后的一种新的几何,几何拓扑学仍然是研究图形(或形状)的科学,是研究图形在连续变形下的不变的整体性质(Prigogine et al., 1968)。由于随机结构面与临空面构成的几何块体,即可能有楔状体(四面体)这样简单的多面体,也可形成复杂的多面体,采用几何拓扑理论将更有助于对空间复杂多面体问题的表述与解答。

(5)块体理论:自石根华(1977)发表了基于赤平投影的岩体稳定分析方法和块体理论导论以来,奠定了块体理论的基础,该理论对单结构块体的稳定性评价十分有效,尤其是块体理论中引入了棱锥概念。块体是有形有体的空间体,而棱锥抛弃块体的体积概念,仅保存其形状特性,将块体转换为棱锥更便于进行数学分析,从而建立了块体理论的有限性定理和可动性定理,使得单结构块体稳定性分析简便直观。虽然,块体理论是对结构面无限延伸条件下建立的,但对于已经建立了结构面三维网络模型情况下,块体理论对三维网络结构岩体力学仍然是一个重要的基本理论。

(6)非线性系统理论:对3.2节中图12的结构块体系统是由单结构块体或含岩桥的复杂结构块体复合而成的,由于系统内部含贯通以及非贯通的不连续面,根据1.2节图4可知此类复杂系统的变形与破坏特征是非连续、非线性以及不确定的。对此类复杂系统需采用非线性系统理论才能有效。石根华(1997)提出的数值流形元法与非连续变形分析

就是力图采用非连续理论求解复杂系统变形与破坏特性的尝试。陈剑平(2001b)就曾经将岩土体视为开放的非线性复杂系统问题进行了专门讨论,普里高津于1968年创立的《耗散结构论》(Prigogine, 1968),德国物理学家赫尔曼·哈肯教授于1983年创立的《协同理论》(Haken, 1983),法国数学家雷内·托姆教授于1989年创立的《突变理论》(René, 1989)并称为科学新三论,非线性系统理论主要孕育于数学、物理化学关于系统相变的研究,将这些理论应用于岩体结构块体系统的变形与破坏的理论探索是一个值得深入的课题。此外一些现代算法理论如粗糙集、可拓学、遗传算法、支持向量机、深度学习、分形几何以及图论中的广度优先或深度优先搜索算法等理论都将对非线性系统的描述与求解起着重要的作用。

(7)裂隙岩体多尺度等效结构模型:若将3DEC、DDA、DEM等方法用于裂隙岩体的变形特征与稳定性评价,可将结构面三维网络结构模型作为内部几何边界条件,构建合理的地质力学模型。由于三维网络结构模型涉及大量的随机结构面,如果将所有的随机结构面都表达到地质力学模型中,就目前的理论与技术手段来看仍有困难。如前述图12所示,复杂结构岩体中各单元顶点的求解与表达,特别是含岩桥的复杂结构块体内部以及块体之间几何关系之判断即便借助几何拓扑学也仍是严峻的挑战。为此,若能构建裂隙岩体多尺度等效结构模型,进而采用熟悉的商用软件,如Ansys有限元,FLAC^{3D}有限差分软件,可能使复杂系统问题得到较好的近似解。将裂隙介质与连续介质融合的较好途径就是考虑裂隙介质的尺度效应,这是因为裂隙介质的复杂性是因为其存在着尺度效应的问题,如果能够使模型中各单元都消除尺度效应的影响,就可以建立几何上的等效结构模型,这是一个在理论上十分有意义的研究方向。三维网络模拟技术的扩展研究中已经为此提供了良好的基础,如谭春等(2012),Zhang et al.(2013)提供的岩体表征单元RVE,就可以从几何的角度解决尺度效应的问题,当然还可引入其他的辅助参数来完善表征单元RVE的评价与表达,使尺度效应问题得到合理的解决。此外要建立一个合理的等效结构模型,还需要对材料力学性质的等效性进行相应的研究,如RMR岩体分类就给出了等效岩体抗剪强度参数,这是一个很好的启示,如果能够较好地解决裂隙岩体的尺度效应与物理力学参数的等效性,就可以构建一个从

非连续裂隙岩体到连续介质力学之间的桥梁,从而可以采用连续介质力学理论解决非连续介质力学的问题,显然这是一个很有价值的新探索。

4 三维网络结构岩体力学主要内容及展望

岩体结构控制论是三维网络结构岩体力学的灵魂,凡变形与破坏受控于岩体结构面的岩体稳定性问题都是三维网络结构岩体力学研究的对象。

4.1 主要内容

图 15 简略地展示了三维网络结构岩体力学的主要研究内容,可以看出随机不连续面三维网络模拟技术是三维网络结构岩体力学的核心技术,也是衔接地质学与力学的桥梁,作为一项专门的技术,随机不连续面三维网络模拟在其生成模型的过程中就自动提供了工程岩体评价所需要的各项结构面基本参数,如岩体结构统计均质区划分;每个均质区内随机结构面的优势分组,各优势分组结构面产状的平均矢量;各优势分组结构面尺寸信息中概率平差后的二维迹长均值、三维圆盘直径均值以及相应的概率密度函数;各组结构面的间距均值,以及相应的体积密度。这些参数都是岩体工程必要的裂隙参数,同时为 3.3 节技术层面涉及的各项参数估算提供了基础。

有了上述岩体结构的基本参数,根据图 15 中

随机不连续面三维网络模拟技术图框下方的示意就可以进一步获取不同阈值、任意方向的岩体质量指标 RQD 值,还可获得估算评价岩体裂隙化程度的两个重要参数,即 P_{21} 和 P_{32} ,它们分别表征了二维平面中裂隙总长度占单位面积的比值与三维空间中裂隙总面积占单位体积之比值。这个物理意义上十分简洁的参数,但由于岩体中裂隙的随机特征,实际获取这两个参数是很困难的,特别是 P_{32} 在现场是无法获得的,但通过三维网络模型,由于在三维网络模型中定义了每一个圆盘的尺寸,以及相应的空间定位,就使得 P_{32} 计算变得轻松自如。进而可方便地估算岩体表征单元。综合上述各参数,可以有效地表征岩体的裂隙化程度以及评价岩体的质量。

根据图 15 的右侧框图的信息,可在随机不连续面三维网络模拟技术的基础上进行岩体局部稳定性评价的结构块体搜索,也可进行岩体整体稳定性评价的定向投影岩体结构面三维连通率估算,以及岩体水力学相关的岩体三维渗径搜索。

根据图 15 的左侧框图的信息,可以将随机不连续面三维网络模型作为商用软件 3DEC、DDA 的内部边界条件叠加到地质力学模型中,构建合理的非连续介质地质力学模型,使之更符合实际。

图 15 右下角基于随机动力学获取安全坡角的内容,无需在随机不连续面三维网络模型的基础上即可实施,考虑到安全坡角是受控于结构面的命题,所以将其列在这里。

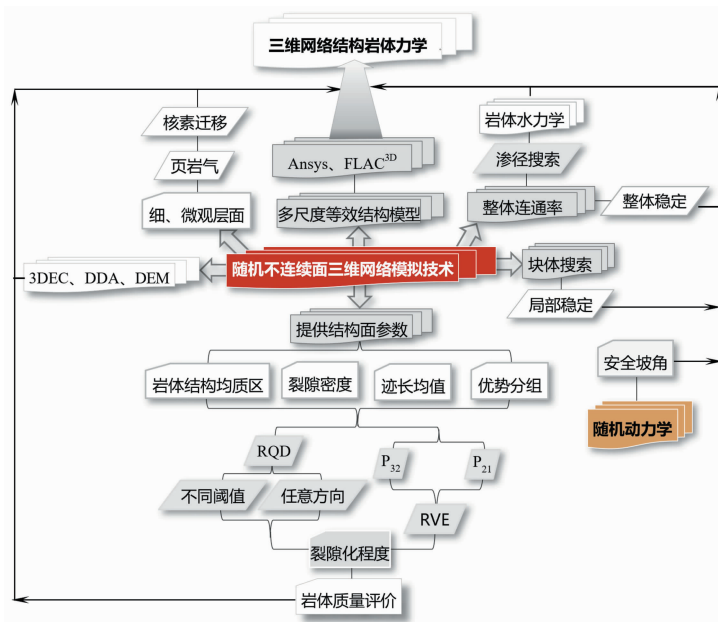


图 15 三维网络结构岩体力学研究内容

Fig. 15 Research content of three-dimensional network structural rock mechanics

4.2 建议拓展的内容

根据图 15 左上角及中上部的信息,可看到三维网络结构岩体力学未来的发展方向,即在随机不连续面三维网络模型的基础上构建多尺度等效结构模型,并将其叠加到商用有限元或有限差分软件中,构建合理的连续介地质力学模型,从而得到非连续介质-裂隙岩体的近似解。另外,在框图的左上角,可在细、微观层面展开核素迁移以及页岩气相关的研究。

三维网络结构岩体力学从技术层面到理论层面涉及内容繁杂,尽管笔者一直尝试通过软件平台的方式使一些复杂技术的问题智能化,但由于随机结构面空间展布的随机性与复杂性,智能识别与智能测量的瓶颈仍然存在,希望有更多的研究者投入到三维网络结构岩体力学的智能化研究之中。

上述阐述了三维网络结构岩体力学主要研究内容,可看出三维网络结构岩体力学的根本特点是两个基点,第 1 基点是地质基础,即以岩体中随机展布的不连续面及其组合规律为基点;第 2 个基点是理论基础,即采用概率统计与非线性系统理论作为基点。随机不连续面三维网络数值模拟技术在三维网络结构岩体力学中起到了承上启下的关键性作用。因此,三维网络结构岩体力学的主要优点是能够全方位地评价岩体质量,并对岩体水力学以及岩体稳定生评价方面有良好的预测功能。就目前情况来看,虽然有条件搭建三维网络结构岩体力学的框架,但随机不连续面三维网络数值模拟技术还是一个值得持续改进与完善的关键核心技术。

5 结 论

自 1999 年笔者获得国家自然科学基金面上项目“三维网络结构岩体力学模型研究”资助以来的 20 余年间笔者带领研究团队一直致力于岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术及其相关问题的探索研究,深感结构型裂隙岩体的物理力学性质及其变形破坏机理研究仅采用常规的理论与方法往往难以奏效,因为结构型裂隙岩体事实上是一个开放的非线性复杂巨系统,其复杂与非线性之本源就是岩体中发育的随机不连续面,这与 20 世纪 70 年代谷德振先生提出的岩体结构控制论是吻合的,将岩体结构控制论作为三维网络结构岩体力学的灵魂,体现了工程地质学的传承与发展。

本文提出的三维网络结构岩体力学是研究团队 20 余年来一系列探索性研究的总结,建议了三维网络结构岩体力学的基本架构与主要研究内容,简述了三维网络结构岩体力学相关的技术、方法与理论。本文旨在抛砖引玉,希望有更多的学者对岩体结构控制论感兴趣。

参 考 文 献

- Barton N R, Lien R, Lunde J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. *Rock Mechanics*, 6(4): 189-239.
- Barton N, Løset F, Lien R, et al. 1980. Application of the Q-system in design decisions[C]//*Subsurface space*, 2: 553-561.
- Bieniawski Z T. 1976. Rock mass classification in rock engineering[C]//*Exploration for Rock Engineering, Proceeding of the Symposium*: 97-106.
- Bieniawski Z T. 1989. *Engineering rock mass classifications*[M]. New York: Wiley.
- Chen J P, Lu B, Gu X M. 2005a. Determining three-dimensional connectivity of rock mass discontinuity by projection[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(15): 2617-2621.
- Chen J P, Shi B F, Wang Q. 2005b. Study on the dominant orientations of random fractures of fracture rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(2): 241-245.
- Chen J P, Lu B, Wang L K, et al. 2003. Automatic search for complex unstable rock block and the judgment of instability mode-based on 3D network simulation of random fractures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(7): 1126-1131.
- Chen J P, Lu B, Gu X M, et al. 2006. Numerical simulation study on 3D comprehensive shear strength of fractured rockmass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(23): 1463-1468.
- Chen J P, Xiao S F, Wang Q, et al. 1996. *Computer simulation principle of three-dimensional network of random discontinuities*[M]. Changchun: Northeast Normal University Press.
- Chen J P. 2001a. 3-D net work numerical modeling technique for random discontinuities of rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 23(4): 397-402.
- Chen J P. 2001b. Towards understanding of dissipative structure deformation process of rock and soil mass[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 31(3): 288-293.
- Deere D U. 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes[J]. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1): 17-22.
- Glaser S D, Doolin D M. 2000. New directions in rock mechanics—report on a forum sponsored by the American Rock Mechanics Association[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4): 683-698.
- Goodman R E, Shi G H. 1985. *Block theory and its application to rock engineering*[M]. New Jersey: Prentice-hall INC.
- Gu D Z. 1979. *Fundamentals of rock engineering geomechanics*[M]. Beijing: Science Press.

- Haken H. 1983. Synergetics: An introduction[M]. 3rd ed. Springer.
- Han X D, Chen J P, Wang Q, et al. 2016. A 3D fracture network model for the undisturbed rock mass at the Songta Dam Site based on small samples[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49: 611-619.
- Han Z H, Zhang L Q, Yuan G X. 2019. Rock mass quality assessment of borehole NRG01 in Bayannuorigong Alxa based on BQ system[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(6): 1208-1215.
- Hill R. 1963. Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11: 357-372.
- Hoek E, Brown E T. 1980. *Underground excavations in rock*[M]. London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- Jiang Z H. 1979. *Introduction to topology*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press.
- Jing L R. 1986. Random discontinuity network and its applications in Discrete Element Method, Seepage Computation and Block Theory[C]//Proceeding of Symposium of 1st National Rock Mechanics Numerical Computation and Simulation forum: 38-42.
- Karzulovic A, Goodman R E. 1985. Determination of principal joint frequencies[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 22(6): 471-473.
- Kulatilake P H S W, Wathugala D N, Stephansson O. 1993. Joint network modelling with a validation exercise in stripa mine, Sweden[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(5): 503-526.
- Kulatilake P H S W, Wu T H. 1984a. Estimation of mean trace length of discontinuities[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17(4): 215-232.
- Kulatilake P H S W, Wu T H. 1984b. Sampling bias on orientation of discontinuities[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17: 243-253.
- Kulatilake P H S W, Wu Tien H. 1986. Relation between discontinuity size and trace length [C]//Proceedings-Symposium on Rock Mechanics: 130-133.
- Kulatilake P H S W. 1990. Analysis of structural homogeneity of rock mass[J]. *International Journal of Engineering Geology*, 29(4): 195-211.
- Li Y C, Chen J P, Zhou F J, et al. 2021. Stability evaluation of rock slope based on discrete fracture network and discrete element model: A case study for the right bank of Yigong Zangbu Bridge[J]. *Acta Geotechnica*, 8.
- Lu B, Chen J P, Shi B F, et al. 2004. Application of genetic algorithm to evaluate 3D persistence of jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(20): 3470-3474.
- Lu B, Chen J P, Wang L K, et al. 2002. Automatic seeking for complex finite rock block and judgment of its spatial geometrical shape based on 3D network modeling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(8): 1232-1238.
- Lutton R J. 1969. Fractures and failure mechanics in loess and applications to rock mechanics [R]. US Waterways Experiment Station-Research Report S-69-1.
- Massanobu Oda. 1982. Fabric Tensor for discontinuous geological Material[J]. *Soil and Foundations*, 22(4): 96-108.
- Mauldon M. 1998. Estimating mean fracture trace length and density from observation in convex windows[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31(4): 201-216.
- Miller S M. 1983. A statistical method to evaluate homogeneity of structural populations[J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(2): 317-328.
- Muller J, Josef S. 1979. Contributions to engineering geology and slope movement investigations[C]//Rockslides and Avalanches, Part 2: 95-109.
- Pan B T, Jing L R. 1989. Computer simulation methods and applications of statistical models of rockmass structure[C]//Advanced Rock Mechanics: 55-80.
- Pinto A, Da C H. 1993. *Scale effects in rock mechanics*[M]. Rotterdam: Balkema A A, Publishers.
- Priest S D, Hudson J A. 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline survey[J], *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract*, 18(3): 183-197
- Priest S D, Hudson J A. 1983a. Discontinuity frequency in rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(2): 73-89.
- Priest S D, Samaniego A. 1983b. A model for the analysis of discontinuity characteristics in two dimensions [C] // Proceeding of Fifth International Congress on Rock Mechanics: 199-207.
- Priest S D, Hudson J A. 1976. Discontinuity spacings in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13(5): 135-148.
- Prigogine I, Lefever R. 1968. Symmetry breaking instabilities in dissipative systems. II [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 48(4): 1695.
- Shanley R J, Mahtab M A. 1975. Fractan: A computer code for analysis of clusters defined on the unit hemisphere[J]. *Informational Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(8): 107.
- René T. 1989. *Structural stability and morphogenesis: An outline of a general theory of models*[M]. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Shanley R J, Mahtab M A. 1976. Delineation and analysis of clusters in orientation data[J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 8: 9-23.
- Shi G H, Pei J M. 1997. *Translator, Numerical manifold method and discontinuous deformation analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press.
- Shi G H. 1977. Stereographic projection method for rock mass stability analysis[J]. *Science China*, 3: 260-270.
- Song S Y, Wang Q, Chen J P, et al. 2015. Demarcation of homogeneous structural domains within a rock mass based on joint orientation and trace length[J]. *Journal of Structural Geology*, 80: 16-24.
- Sun Q H, Ma F S, Zhao H J, et al. 2019. Deformation and failure of surrounding rock considering weakening of mechanical parameters under seepage-damage-stress coupling[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(5): 955-965.
- Sun Y K, Gu X. 1980. *Application of stereographic projection in rock engineering geomechanics*[M]. Beijing: Science Press.
- Tan C, Chen J P, Que J S, et al. 2012. Analysis of representative elementary volume for rock mass based on 3D fracture numerical

- network model and grey system theory[J]. Shuli Xuebao, 43(6): 709-716.
- Terzaghi R D. 1965. Sources of error in joint surveys[J]. Géotechnique, 15(4): 287-304.
- Wang F Y. 2006. Engineering application of rapid acquiring rock mass fractures information with digital close range photogrammetry[D]. Changchun: Jilin University.
- Wang G X, Xiao S F, Chen J P. 2002. Study on application of 3D network of discontinuities to RQD[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21(12): 1761-1764.
- Wu F Q. 1993. Principles of statistical rock mechanics[M]. Beijing: China University of Geosciences Press.
- Xu L M, Chen J P, Wang Q, et al. 2013. Fuzzy c-means cluster analysis based on mutative scale chaos optimization algorithm for the grouping of discontinuity sets[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(1): 189-198.
- Yang Q, Wang S G, Li C Y, et al. 2020. Internal driving force of deformation and failure of rock mass structure-unbalanced force[J]. Journal of Engineering Geology, 28(2): 202-210.
- Zhang J. 2014. Three dimensional structure analysis for rock masses at right abutment in maji high arch dam[D]. Changchun: Jilin University.
- Zhang L, Einstein H H. 1998. Estimating the mean trace length of rock discontinuities[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 31(4): 217-235.
- Zhang Q, Chen J P, Yuan X Q, et al. 2013. Analysis of RVE size based on three-dimensional fracture numerical network modeling and stochastic mathematics[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 46: 31-40.
- Zhang Q, Wang Q, Chen J P. 2016. Estimation of mean trace length by setting scanlines in rectangular sampling window[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 84: 74-79.
- Zhang Q. 2015. Probabilistic estimation of discontinuity size in rock mass and study of application for three dimensional network model-Takin dam abutment rock mass in songta hydroelectric station as an example[D]. Changchun: Jilin University.
- Zhang W, Wang Q, Chen J P. 2012. Determination of the optimal threshold and length measurements for RQD calculations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 51: 1-12.
- Zhao H J, Dwayne T, Guo J, et al. 2019. Numerical study on fracture propagation and interaction using continuous discontinuous failure method[J]. Journal of Engineering Geology, 27(5): 933-945.
- Zhao H L, Chen J P. 2005. Searching for seepage path of 3D network in fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(4): 622-627.
- Zhou X, Chen J P, Chen Y, et al. 2017. Bayesian-based probabilistic kinematic analysis of discontinuity controlled rock slope instabilities[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76(4): 1249-1262.
- Zhu R M. 2000. Dynamics[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press.
- 陈剑平, 卢波, 谷宪民, 等. 2006. 节理岩体三维综合抗剪强度数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 25(23): 1463-1468.
- 陈剑平, 卢波, 谷宪民. 2005a. 用投影法求算岩体结构面三维连通率[J]. 岩石力学与工程学报, 24(15): 2617-2621.
- 陈剑平, 石丙飞, 王清. 2005b. 工程岩体随机结构面优势方向的表示法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 24(2): 241-245.
- 陈剑平, 卢波, 王良奎, 等. 2003. 复杂不稳定块体的自动搜索及其失稳方式的判断-基于随机不连续面三维网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 22(7): 1126-1131.
- 陈剑平, 肖树芳, 王清, 等. 1995. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理[M]. 长春: 东北师范大学出版社.
- 陈剑平. 2001a. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 23(4): 397-402.
- 陈剑平. 2001b. 岩土体变形的耗散结构认识[J]. 长春科技大学学报, 31(3): 288-293.
- 谷德振. 1979. 岩体工程地质学基础[M]. 北京: 科学出版社.
- 韩振华, 张路青, 袁广祥. 2019. 基于 BQ 系统的阿拉善巴彦诺日公 NRG01 号钻孔岩体质量评价[J]. 工程地质学报, 27(6): 1208-1215.
- 江泽涵. 1979. 拓扑学引论[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- 井兰如. 1986. 岩体结构面随机网络及其在离散单元法, 在渗流计算以及块体分析理论中的应用[C]//第一届全国岩石力学数值计算及模拟试验讨论会论文集: 38-42
- 卢波, 陈剑平, 石丙飞, 等. 2004. 用遗传算法求解节理岩体三维连通率[J]. 岩石力学与工程学报, 23(20): 3470-3474.
- 卢波, 陈剑平, 王良奎, 等. 2002. 基于三维网络模拟基础的复杂有限块体的自动搜索及其空间几何形态判定[J]. 岩石力学与工程学报 21(8): 1232-1238.
- 潘别桐, 井兰如. 1989. 岩体结构概率模型和应用[C]//岩石力学新进展: 55-80
- 石根华, 著. 裴觉民, 译. 1997. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 北京: 清华大学出版社.
- 石根华. 1977. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学, 3: 260-270.
- 孙琪皓, 马凤山, 赵海军, 等. 2019. 基于渗流-损伤-应力耦合作用下考虑力学参数弱化的巷道围岩变形破坏分析[J]. 工程地质学报, 27(5): 955-965.
- 孙玉科, 古迅. 1980. 赤平极射投影在岩体工程地质学中的应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 谭春, 陈剑平, 阎金声, 等. 2012. 基于三维裂隙网络模拟和灰色理论的岩体表征单元体研究[J]. 水利学报, 43(6): 709-716.
- 王凤艳. 2006. 数字近景摄影测量快速获取岩体裂隙信息的工程应用[D]. 长春: 吉林大学.
- 王国欣, 肖树芳, 陈剑平. 2002. 不连续面三维网络在 RQD 中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 21(12): 1761-1764.
- 伍法权. 1993. 统计岩体力学原理[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 杨强, 王守光, 李超毅, 等. 2020. 岩体结构变形破坏的内在驱动力-不平衡力[J]. 工程地质学报, 28(2): 202-210.
- 张晶. 2014. 马吉高拱坝右岸坝肩岩体三维结构分析[D]. 长春: 吉林大学.
- 张奇. 2015. 岩体随机结构面尺寸概率估算及三维网络模型应用研究——以松塔水电站坝肩岩体为例[D]. 长春: 吉林大学.
- 赵海军, Dwayne T, 郭捷, 等. 2019. 基于连续-非连续方法的裂隙破坏与相互作用研究[J]. 工程地质学报, 27(5): 933-945.
- 赵红亮, 陈剑平. 2005. 裂隙岩体三维网络流的渗透路径搜索[J]. 岩石力学与工程学报, 24(4): 622-627.
- 朱仁明. 2000. 动力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社.