

文章编号:1001-8166(2005)01-0115-04

# 深部地下空间开发利用\*

## ——香山科学会议第 230 次学术讨论会侧记

社会发展、经济建设以及国家安全的新需求,使地下空间开发不断走向深部已成必然趋势。深部岩体由于其结构特点、变形特点、高应力状态的临界特点及其结构与介质的含能特点,所以其物理力学性状与浅部岩体相比具有显著的不同,因而使深部岩体在动载作用下往往具有特异动力反应现象。

我国科学家敏锐洞察这一科学与工程领域快速发展的动向,十分关注其可能对我国社会发展、经济建设以及国家安全诸方面带来的发展机会和挑战。在大量国内外实地考察和调研的基础上,已开展多方面的科研工作。

来自中国科学院、中国工程院以及全国各地的 40 位专家学者,于 2004 年 6 月,聚集香山,针对“深部地下空间开发中的基础研究关键技术问题”进行了跨学科的学术交流。与会者一致认为,这次会议极为重要,有利于岩石力学和工程界把握可能的发展机会,必将有力推动整个岩石力学学科向非传统非标准方向的全面深化。

第 230 次香山科学学术讨论会设置了深部地下战略防护工程中的岩石力学问题;深部岩体国家战略能源贮存与核废料地质处置工程中的岩石力学问题;其它复杂条件下深部地下工程中的岩石力学问题;深部岩层岩体构造和力学特性及其研究内容和途径 4 个会议中心议题。

钱七虎院士(中国人民解放军理工大学)、冯夏庭研究员(中国科学院武汉岩土力学研究所)、葛修润院士(中国科学院武汉岩土力学研究所)被聘请担任本次会议执行主席会议。

### 1 第四次浪潮——深部地下空间开发利用势在必然

钱七虎早在 1999 年发表的一篇文章中指出,近 30 年以来,坚硬岩石中和复杂地质条件下岩土层中掘进开挖技术有了长足的进步,岩石的坚硬已从对地下工程的不利因素转变为有利因素,它使得地下洞室的跨度可以增大,使得岩体能经受更高的掘进开挖速度。人类历史上经历了岩土工程发展的 3 次浪潮后,业已进入以保护自然生态环境、改善城市环境为核心的岩土工程发展的第四次浪潮。

1991 年“东京宣言”指出 21 世纪将是地下空间的世纪,“地下空间是造福子孙后代的重要空间”。开发城市地下空间,不仅提高土地利用效率,而且具有众多优点:节省土地资

源、缓解中心区高密度、人车立体分流,疏导交通、扩充基础设施容量、减少环境污染、保持城市景观、增加城市绿地、改善生态环境等。

确实,进入 20 世纪 90 年代以来,以激光导向技术和 GPS 定位技术为代表的地下勘察技术和地下掘进、衬砌的自动控制施工技术已在实际工程中得到了一定程度的应用,迅速加快着这一进程;同时,经济建设的快速发展,特别是冷战后地缘政治和战略格局的变化,使得传统意义上的地球生存空间(地面和浅地表)已经不能满足人类活动的需求,岩土工程的第四次建设浪潮已在更广范围、更大规模和更高水平上迅猛展开着。

我国科学家清醒看到,世界范围内深部地下空间建设正方兴未艾,向地球深部寻求发展和生存空间已经成为世界范围内岩土工程建设和开发的共同趋势;同时,鉴于世界地缘政治格局演变、经济全球化和我国能源瓶颈的挑战,他们更把注意力投向事关国家安全和社会发展的 3 个重大前沿领域:地下战略防护工程、核废料处置和石油战略储备。

钱七虎在主题评述报告中以下述简单数据点出地下空间开发不断走向深部的趋势和面临的严峻挑战:水电工程引水隧道的埋深,如锦屏电站,最大埋深 2 600 m,南水北调西线工程,输水隧道最大埋深 1 150 m;公路隧道,如穿越阿尔卑斯山勃朗峰圣各达隧道,埋深 2 500 m;核废料的深层地质处理深度已达数百米至千米;矿山工程深度已达 3~4 km;能源贮存工程深度超过 1 km;核心防护工程,如北美防空司令部达 700 m,有的将达 1 km,甚至更深。

冯夏庭在“深部地下空间开发及综合利用”主题评述报告中,大视角、多层面地介绍了深部地下空间的开发现状。指出,浅地表能源(石油、天然气、地热等)已呈逐渐枯竭的趋势,能源的开发活动急需向深部延伸,同时出于国家政治经济安全的考虑,战略能源的深部地下储存已经成世界各国共同关注的主题;为了缓解或从根本上解决人口增长对城市环境的压力和威胁,修建各种城市隧道、过江(和海底)隧道和地下构筑物在世界各国急剧增长;为满足交通运输的需要,大量深度超过千米的隧道已经或急需修建;西部大开发建设迫使必须面对水电地下工程在险峻高山峡谷、向深部发展的现实;核废料作为一种毒性大、半衰期长的污染性废物,进行地下深部处置是一条被世界各国广泛认可的途径。

\* 收稿日期:2004-10-10;修回日期:2004-12-02.

## 2 岩石力学和工程技术难题极具挑战

深部地下空间建设正方兴未艾,前景极具魅力。然而,严峻的是传统意义上的岩石力学研究同时面临着全新工程技术的挑战。

伴随深部岩体工程的响应发生的一系列具有新特征的科学现象:深部岩体工程响应的静力特征和深部岩体工程响应中的动力特征科学现象。这些特征科学现象无法全部用传统的连续介质力学理论圆满解释,已引起国际上岩石力学工程领域专家学者的极大关注,正在形成岩石力学新的分支——深部非线性岩体力学。

钱七虎在主题评述报告中深入讨论了“深部地下空间开发中的关键科学问题”。他指出,所有这些地下空间工程施工和设计,引发诸多与浅部完全不同的亟需解决共同的深部工程技术问题。

他对深部岩体的构造特点及其力学特性、分区破裂化现象、动力诱发的冲击岩压的机理和岩体中波动理论、岩体块系构造中的超低摩擦现象和冲击作用下岩体体系的准共振现象等研究现状进行了评述,并着重讨论了深部地下空间开发中的基础科学问题:岩体结构特性;围岩分区破裂化现象规律;静力诱发的岩爆和动力诱发的地震事件;深部巷道、洞室在发生分区破裂化现象下围岩变形、稳定性及其支护方法;慢速岩块“变位波”(爆炸诱发地震事件)对深部地下防护工程的冲击作用等。

冯夏庭在探讨深部地下空间开发中的关键科学问题时指出,深部地质环境的确定,深部高应力及其对岩体力学特征的影响,高温和低温对深部地下工程安全性的影响,高地震烈度和断裂带活动性对深部地下工程安全性的影响,深部地下空间开发对于人类居住环境的影响等,都是必须面对的富有挑战性的科学问题。

葛修润讨论了“深层岩石地应力测量中的科学问题”,强调开展岩层深部的地应力测量与研究,不仅是地球科学基础研究发展的需要,也是土木水利水电工程建设、油气田勘探开发、采矿业发展、科学钻探中地应力测井工作之需。

讨论中与会专家各抒己见,强调本次会议议题重要、紧迫、特殊,指出我国研究滞后于国际,滞后于工程实践。

深部岩体力学基础研究意义重大。专家认为,深部岩体力学基础研究意义非常重大,它有助于解决能源与矿产资源开采逐渐向深部发展所遇到的技术问题和理论问题;解决深埋地下的国防及大型民用设施建设中遇到的工程技术和岩体力学问题。不仅会使岩体力学本身获得较大发展,也会使许多相关学科得到发展,也有可能产生一些新的学科领域。

岩石力学要与地质结合。岩体的几何、结构和形成历史都很复杂。从工程尺度看深度超过 1 km,结构也愈大,与地层结构尺度接近,研究岩体力学应多说一些地质。结构是处于地质环境中,地质非常重要,力学要与地质结合,同时地下空间开发应与环境协调起来。

重视深部岩体裂缝的复杂性。地质体与其他工程材料

的区别很大,尤其是环境(水流、温度)因素的影响,质疑线性系统对深部问题和连续介质方法对不连续介质适用性。多场耦合中的问题十分复杂,但很多基本理论如本构关系仍未清楚,深部要研究基本性状。

## 3 深部地下战略防护工程攸关国家安危

战略防护工程是国家防御威慑力量的重要组成部分,一般指统帅部和战区司令部的作战指挥防护体系(亦称首脑工程)以及战略核武器的掩蔽工程等,是保证统帅部安全与指挥稳定最重要的屏障,是战略核力量的重要组成部分,其防护能力直接关系到战争的胜败和国家的安危。

众所周知,美国、俄罗斯等国家长期以来十分重视地下战略防护工程建设及防护技术研究。美国把战略防护工程的安全稳定提升到关系战争进程和结局的战略地位,俄罗斯也在不遗余力地完善其地下战略指挥中心。近年来核武器朝小型化、钻地化、精确化、实用化、常规化方向发展,战略防护工程面临前所未有的威胁。深地下防护工程的建设不仅要解决在复杂的地质环境中构筑问题,而且还要深入研究战时各种高强度打击下的生存能力问题。

解放军理工大学方秦研究员在评述报告中讨论了“深地下战略防护工程中的岩石力学问题”。他侧重分析讨论了深地下战略防护工程的科学问题,强调随着钻地核武器技术的发展和主要敌对国家核战略的变化,深地下战略防护工程已是目前国内外防护工程界一个重要的研究课题。

总参工程兵科研三所任辉启研究员在专题报告中侧重讨论了“深地下防护工程中的科学问题”,认为开展深地下防护工程建设面临的诸如深地下防护工程构筑、抗硬毁伤能力和抗软毁伤能力等基础科学研究,构建适应打赢未来高技术战争需求的防护工程体系,对于保障国家安全和增强国防实力和军队作战效能具有十分重要的战略意义。

讨论中,大家关注的问题有以下几方面:

深层概念的厘定。深层概念应该有个明确定义。不同专业对其理解可能不同,但明确它的特征,就可划分。有人提出围岩使岩石由脆性成为塑性时的深度可能是定义深度的一条可能途径。另有人认为确定为 1 km 以上比较合理。深部与浅部的区别,可体现在有“三高与时间效应”,即深部岩体处于地应力高、温度高、渗透压高以及较强的时间效应。

岩体不可视为均质体。普遍认为,连续介质理论不能完全适用。研究岩体力学只考虑岩块是不行的,一定要考虑不连续面,不能视为均质体。

关于深部地应力问题。专家指出,深层岩体具有很高地应力,达到塑性;深部地应力基本是静水压力。深度到一定程度,材料是否处流动状态,取决于不同岩石的性质。地应力通常不满足协调方程,工程中应注意平均意义的地应力。

重视多因素的相互作用。深部岩石力学性质要从水、气角度考虑,要重视水气作用。要注意矿山开采与岩石相互作用,因为岩体的天然属性是沉积与构造、裂隙与围岩应力的相互作用和协同问题。

## 4 国家战略能源贮存与核废料地质处置工程

深部岩体中国战略能源贮存与核废料地质处置工程作为深部地下空间利用的典型事例,引起与会专家学者的高度关注。

中国科学院武汉岩土力学研究所杨春和研究员在题为“深部岩体战略能源贮存与高放废物地质处置”的评述报告中,详细介绍了国内外在能源地下储备和高放废物深埋地质处置方面的研究现状,指出及早建立我国石油储备体系,可以减少经济代价,有利于我国在国际政治、经济角逐中处于主动地位;而如何有效、安全地、永久性储存高放核废料则是本世纪的世界性难题,也是我国较为紧迫的课题之一。他从我国实际地质状况出发,着重探讨了石油花岗岩储存库研究和层状盐岩体石油深部地下储存中关键岩石力学问题及相关关键技术问题,并根据我国甘肃北山候选场址研究实际情况,讨论了深部高放废物深埋地质处置方面急待解决的关键岩石力学问题。

中国石油勘探开发研究院李文阳研究员在题为“油气地下储备 机遇与挑战并存”的专题报告中,分析了目前国际上普遍采用的地下储气库类型(枯竭油气藏、含水层和盐穴)和开发利用现状,并重点探讨了中国油气地下储备亟待解决的主要关键技术。指出东部地区地下储气库的建设需要在小型的含复杂流体(油藏、油水层)的局部构造中寻找建库目标,或者以东部陆相成因的盐层中的盐穴建设油气地下储备库。

核工业地质研究院王驹研究员在题为“高水平放射性废物地质处置的重大科学问题”的专题报告中,详细介绍了各国高放废物地质处置在法规方面、处置方法、处置技术、选址工作、场址特性评价、工程屏障研究、地下实验室大规模实验、处置系统总性能评价方法和技术等方面的进展,侧重讨论了地质处置库场址深部地质环境的特点、演化和预测,多因素耦合条件下深部岩石、岩体行为、放射性核素化学行为,以及地质处置系统性能评价等重大科学问题,并提出关于建造地下研究实验室的建议。

南昌大学周文斌教授在专题报告中讨论了“高放废物深埋地质处置中多场耦合及核素迁移的基本问题”。他介绍了多场耦合与核素迁移问题研究概况,并着重探讨了多场耦合的机理、类型及高放废物深埋地质处置多场耦合与核素迁移的特点以及重要科学问题。他指出,核素迁移是在温度场、渗流场、应力场和化学场相互耦合的过程中发生的,是高放废物深埋地质处置安全与系统性能评价中的核心问题。

自由讨论中,与会者发表了一些重要见解:

核废料贮存和油气贮存十分重要,必须提到重要日程上,进行理论和实验研究,尽可能建立处置场附近的地下实验室。必须尽早建立大型地下实验室,采用非传统和非常规的研究思路和研究方法。地下实验室非做不可,现提出2020年才建太晚。

我国能源地下储备应优先考虑深部盐岩储备,重视深部

层状盐岩围岩变形规律及其与储存介质相互作用机理的研究。在盐穴中建腔是适于我国的现实方法,关键问题是有夹层的层状岩体条件下如何造腔,要走我们国家自己模式。

核废物地质处置有必要澄清一些认识:一是不要以为时间尚早,二是不要认为理论上复杂得不可逾越。国家层面上重视在国外为几点标志:总统亲自管,并有顾问;国外有专门立法;有专门机构研究与负责;有国家层面的研究计划。专家呼吁让高放废物地质处置在国家层面上获得支持。

## 5 其它复杂条件下深部地下工程

深部隧洞围岩和其它浅表岩体工程(浅部隧洞、坝基、边坡)的岩体相比,其本质的区别是岩体工作状态的不同,深部水电建设中的深部岩石力学问题同样面临科学技术挑战。

鉴于我国地质地理条件极为复杂,西部跨流域调水工程和引水发电工程具有超长、超埋深、超高海拔高度、超高地应力、超强地震烈度、超高水头的特点,这是水利水电工程主要难点所在。工程中地下深埋工程占有特别重要的地位,面临一系列挑战性的岩石力学与工程课题。

清华大学杨强教授以“超大规模水利水电工程中的深部岩石力学问题”为题,在评述报告中着重分析了深部围岩非线性力学特征、科学问题及关键技术问题:复杂地质地形条件下,深部岩体赋存环境及力学特性;工程扰动下深部围岩非线性力学特征及细观机制;深埋隧洞结构变形进程的大规模精细仿真与控制。

黄河勘测规划设计有限公司王学潮高级工程师在专题报告中讨论了“南水北调西线第一期工程的深埋长隧洞及其主要岩石力学问题”。指出西线工程以深埋长隧洞为主要输水形式,并深入分析了在隧洞的设计、施工和运行中可能会遇到一系列的岩石力学问题。

自由讨论中,与会者关注“软岩”问题。高地应力条件要产生碎裂与要产生变软,如何统一?有人认为,在工程中能呈显著塑性变形的岩石才称软岩。软岩分3类:天然软岩、硬岩变深后变软,本来硬受力后变软。具有大变形、高应力、难支护特点。

专家学者强调,西线工程应在勘探度施工等方面有创新和采用新技术,推动岩体力学发展。我国可专门针对西部工程自行设计生产IBM。呼吁重视深部岩体结构地质条件的综合勘探技术研究。数值模拟与现场试验不可偏废;岩石力学必须与工程地质水文地质相结合。

## 6 深部岩层岩体构造和力学特性及其研究内容和途径

解放军理工大学王明洋研究员在“深部岩体的构造和变形与破坏问题”评述报告中,根据深部岩体的块系构造特点、高地应力及含能特点和非协调变形的特点,围绕深部岩体工程响应发生的静、动特征科学现象,探讨了深部岩体的构造和变形与破坏需要研究的科学问题,指出应重视深部岩体的内禀特性、深部岩体中非破坏区的特性、深部岩体的超极限

变形特性、深部岩体中爆炸破坏区特性研究。强调这些特点需要采用新理论与新方法,以突破传统的连续介质力学的束缚,并以研究实例探讨了相关的主要科学问题。

北京建筑工程学院戚承志教授在“岩石的构造层次及力学性质和研究方法”专题报告中探讨了岩体变形与破坏以及岩体动力学问题,介绍了解决这些问题数学力学方法。

围绕深部岩层岩体构造和力学特性及其研究内容和途径议题,如何发展岩石力学?与会专家进行了激烈的讨论,发表了以下重要见解和理念:

岩体力学要和其它学科交叉,但到回到岩体力学本身。要花大力把岩石力学性质本构搞清。现行仅有几个简单的参数来描述整个复杂的岩体力学及工程系统是不现实的。力学体系问题要有严格的理论和相配套的试验手段和方法。要把注意力放在工程上。要发展自己的岩石力学试验系统。深部岩体结构的块体系如何确定值得探讨,深入研究能创新岩体力学。

## 7 肩负历史使命发展我国岩石力学和工程技术

与会专家学者围绕 4 个中心议题进行了充分的学术交流和自由讨论,又回到主题层面进一步梳理问题,厘清思路,很好地把握了该领域的科技发展态势。执行主席钱七虎和冯夏庭最后发言,进行了学术性小结。

与会者积极肯定会议取得的重要成果,并一致认为,要肩负历史使命,努力发展我国岩石力学和工程技术。

### 7.1 深部地下空间开发和深部岩石工程建设意义重大情势紧迫

与会专家学者深刻认识到,随着钻地核武器技术的发展和主要敌对国家核战略的变化,深地下战略防护工程建设已成为我国外防护工程界高度关切;及早建立我国石油储备体系,可以减少经济代价,有利于我国在国际政治、经济角逐中处于主动地位;而如何有效、安全地、永久性储存高放核废料则是本世纪的世界性难题,也是我国较为紧迫的课题之一;水资源短缺已成为制约我国国民经济发展的瓶颈,而相继出台的一系列规模宏大的调水工程中跨越流域分水岭的深埋长隧洞往往是工程成败的关键。

为了促进我国能源发展和深部防护工程建设,促进南水北调工程和西部水电开发,提供国家战略安全保障程度,有关深部地下空间开发和深部岩石工程建设的各界科学家肩负着重大历史使命。

### 7.2 直面深部地下空间开发对岩石力学与工程发展的重大挑战

会议一致认为,深部岩体具有独特的构造特性,赋存于复杂的地质环境,具有高地应力、高温、高渗透压等特点,这些构造与力学特性使得深部岩体中的工程响应具有一系列新的科学现象。因此深部地下空间的开发必将对岩石力学与工程发展提出前所未有的挑战。

我们必须从国家发展全局出发,立足于我国实际的地质条件和环境,在学术创新和科学实践中,努力揭示深部岩体特征科学现象,解决深部岩体工程有关的科学问题,保障深部地下空间的设计施工及运营期安全,走自己的路,发展深部岩石力学理论和工程技术。

### 7.3 关注深部地下空间开发需解决的关键基础科学和技术问题

(1) 深部岩体构造及力学特性的精细测量;深部岩体地应力有效测量方法与测量仪器设备的研制;建立深部地下试验场。

(2) 深部岩体分区破裂化机制、岩体层次构造理论、超低摩擦效应和准共振效应产生的机理、摆型波动力运动特性。

(3) 深部岩体工程围岩变形与破坏的量测、围岩支护理论;深部岩体在高围压和复杂应力状态下的力学与破坏特性,特别是峰值后应力下降段的力学特性以及岩体脆性-塑性转变。

(4) 深部岩体动力学理论的研究,岩块系、岩层系的振动理论,动力事件机理如诱发岩爆机理,地下爆炸诱发的岩体冲击、地震及其迁移的机理。

(5) 高地应力和岩体层次构造对钻地核爆炸产生的岩体中地冲击传播的影响;钻地核爆炸下岩体冲击对深部防护工程的影响及结构相互作用。

(6) 适合我国的高放废物处置的岩体力学分类;三维节理网络模拟的数学模型建立;岩体热-液-力-化学耦合理论;核素迁移数学模拟,特别是核素在裂隙网络中的迁移规律。

(7) 能源贮存方面,需研究岩体特别是层状盐岩体的渗透机理,及与应力场耦合下,石油污染迁移规律,盐岩地下储备库的洞型设计优化理论及稳定性评价。

(8) 水电方面,深部地下结构大规模数值仿真;深埋长隧洞大比尺物理模拟,IBM 超前地质探测预报,以及相关处理技术与设备研究,水库诱发地震的机理。

与会专家学者认为,深部地下空间开发和深部岩石工程是极富挑战性的科学技术前沿领域,攸关国家经济建设和战略安全,强烈呼吁高层规划决策部门对此领域研究给予重视,纳入国家“十一五”中长期科研规划以及近期有关重大项目,如“973”基础科学研究、国防 973 研究、国家自然科学基金重大或重点项目等。

(赵生才 供稿)