

三峡工程中的若干力学问题*

哈秋舫

中国长江三峡工程开发总公司, 宜昌 (邮政编码443002)

提要 简要介绍了三峡水利枢纽工程概况, 工程建设中主要技术难点, 以及几个主要工程力学问题, 包括流体力学、固体力学、二相流及爆破力学等问题。

结合三峡工程侧重叙述岩石(体)力学应考虑的新问题。大型岩土工程是庞大的复杂系统, 岩石力学涉及众多学科。建议应用系统工程的理论和方法研究岩石(体)力学, 使其在国民经济中发挥更大作用。在岩石(体)力学研究中还需针对不同的目标、任务考虑各种非线性问题。因此, 岩石(体)力学应与工程问题更紧密地结合。

关键词 三峡工程; 岩石(体)力学; 系统工程

1 引言

长江是我国第一大河, 全长6300公里, 居世界第三。

三峡工程是开发长江的骨干工程, 位于长江著名三峡之一西陵峡的中部, 在葛洲坝水利枢纽上游40公里处, 下距入海口约1800公里, 上距西南重镇重庆约660公里。

长江全流域面积约180万平方公里, 为全国国土面积的19%。三峡大坝控制上游流域面积约100万平方公里, 为全流域的55%。坝址多年平均径流量为4500亿立方米, 为长江入海水量的47%, 约为全国年径流量的17%。

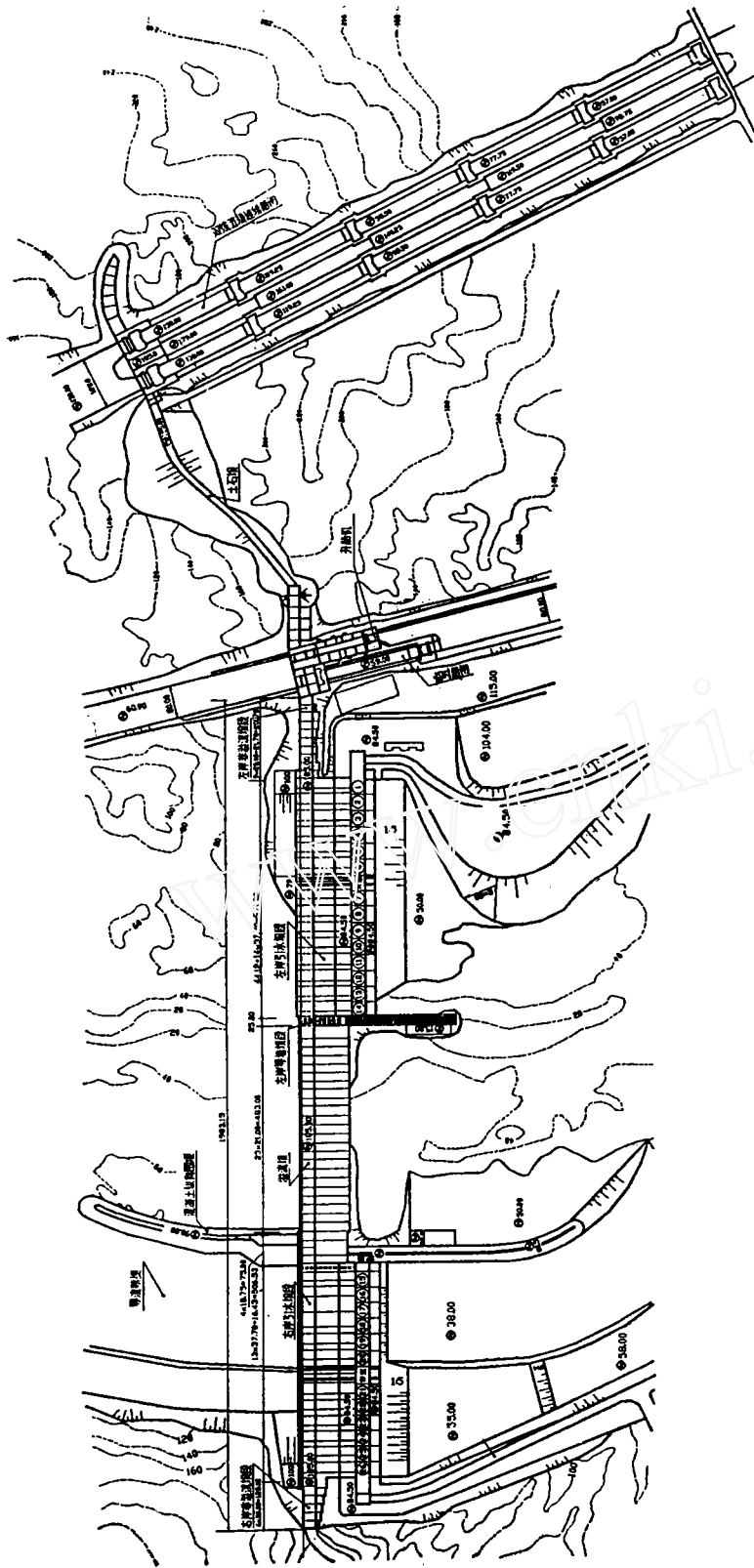
三峡工程控制流域面积大, 地理位置优越, 位于我国经济比较发达的地区。开发三峡工程对全面治理长江, 开发长江水利资源, 对我国四化建设大业均具有十分巨大的意义, 对我国经济沿长江经济带发展会有深远的影响。

三峡工程由挡水、泄洪建筑物, 发电厂房和通航建筑物三大部分组成。

(1) 挡水、泄洪建筑物为混凝土实体重力坝, 大坝最大高度为175米(坝顶海拔高程为185米, 建基面最低高程为10米)。大坝全长约2335米, 中部为泄洪坝段, 两侧为厂房坝段。

(2) 左右两岸大坝下游设置坝后式水电站厂房, 分别安装机组14台和12台, 单机容量为70万千瓦, 总装机容量为1820万千瓦, 年发电量为846.8亿千瓦·小时, 是当今世界上

* 以本文作者在“力学与三峡工程”学术研讨会(1994年6月于宜昌)上的特邀报告为基础撰写而成。



三峡水利枢纽工程平面布置图

已建成的最大水电站巴西伊泰普水电站装机容量（1260万千瓦）的1.44倍，是我国已建最大水电站葛洲坝水电站装机容量（271.5万千瓦）的6.7倍。

电站将以500千伏交、直流高压向华中、华东和川东送电。

（3）通航建筑物布置在左岸，由双线连续五级永久船闸和垂直升船机组成。双线五级连续船闸设在左岸山体内部，距升船机约1000米，总提升高度为113米，每级船闸的闸室有效尺寸为280米×35米×5米（长×宽×闸坎上水深）。每级闸室尺寸与葛洲坝大船闸相匹配，可通过万吨级船队（9×1000吨、9×1500吨或6×2000吨驳船）。垂直升船机布置在大坝左端，为一级钢丝绳卷扬全平衡式结构。承船厢有效尺寸为120米×18米×3.5米（长×宽×厢内水深），与葛洲坝小船闸相匹配，可通过3000吨级客轮，最大提升高度亦为113米，可作为客轮和易燃物品快速通道。

通航建筑物的远景通航能力，单向为5000万吨/年，约为现有川江通航能力的10倍。施工期临时通航另设有一线一级临时船闸，闸室尺寸为240米×24米×4米，结合施工导流明渠，通航能力可达1550万吨/年，可满足施工期通航需要。

三峡大坝建成后，将形成三峡水库，正常高水位175米高程时，总库容约393亿立方米，汛期库水位降至145米高程运行。在145米—175米高程之间，三峡水库有221.5亿立方米的防洪库容，长江中游荆江河段的防洪标准，可由10年一遇提高到百年一遇。

水库回水可改善川江航道里程570—650公里，万吨级船队可直达重庆，其保证率约50%，而现川江仅可通航3000吨级船队。

水库淹没耕地38.8万亩，淹没区人口迁移84.4万人。

三峡工程主体工程量很大，其中石方明挖超过1.0亿立方米；地下洞挖约150万立方米；混凝土约2700万立方米；钢筋约35万吨；钢材约28万吨；土石方填筑约3000万立方米。

三峡工程施工难度很高。主要是长江洪水峰高量大，施工期20年一遇洪水设计为7.23万立方米每秒。坝区最大水深约60米，施工期又有通航要求，施工期导流难度很大。

由于三峡工程主体工程量浩大，因此年施工强度很高，石方开挖工程年施工强度超过2000万立方米，是巴西伊泰普工程的2倍；三峡工程混凝土工程年施工强度将达到460万立方米，为巴西伊泰普工程的1.55倍。两座高达90米的二期土石围堰，在60米深的水下施工，工程量近1200万立方米，包括9.6万平方米的混凝土防渗墙，需在一年内建成。永久船闸深切陡高边坡高达170米，属世界罕见。垂直升船机更无先例。直径为9.85米、重约500吨水轮机转轮，容量70万千瓦，也属世界一流水平。

三峡工程建设影响深远。它规模巨大，涉及面宽，难度极高，需要全国各方协作。从事三峡工程建设的工作人员，要谦虚谨慎，听取各方面的意见，不断学习和提高自身的工作水平，才能适应工程建设的需要。

三峡工程建设就其具体专业内容来讲，包括土建工程建设以及机电设备购置和安装工程等内容。

三峡工程中，机电设备和金属结构费用占工程建设总费用比重很大，约为30%左右。但是，其设备均由工厂设计和制造，现场安装工作量不大，其安装费用约占设备费的10%。土建工程费用包括临时工程在内，约占全工程费用45%，比重大，而且是在工地现场逐项具体实施。可见三峡工程建设中工作量最大的是土建工程，这是工程建设的主体，应予特别

的重视。

土建工程建设实质上是工程材料和力学的结合，因此三峡工程建设中，处处充满力学问题。力学是一门古老的而又不断创新的重要科学，也是工程技术的基础，力学在我国现今经济建设的主战场中，包括在三峡工程的建设中，必定要发挥其极为重要的作用。

三峡工程建设中的力学问题，涉及流体力学、固体力学、两相流、爆破力学和其它力学问题，现简述于下。

2 流体力学问题

2.1 高速水流问题

三峡工程建设难度很大。首先是长江洪水峰高量大，枢纽设计洪水为12万立方米每秒，7天洪量约600亿立方米，15天洪量约1100亿立方米。施工期设计施工导流流量为7.23万—7.9万立方米每秒。这些数据均超过巴西伊泰普工程的2倍多，虽然我国葛洲坝工程设计和施工洪水标准与此相同，但是葛洲坝工程为低水头建筑物，从流体力学的观点出发仍有本质上的区别。

为宣泄洪水，泄洪坝段在90米高程设有7×9米深孔23个（水头约80米），在158米高程设有8米宽表孔22个。下游为挑流消能。总泄洪能力为9.3万立方米每秒。泄洪闸门水头高，流速超过30米/秒。深孔设计是为了泄放洪水，同时也是为了排放泥沙。因此这些深孔有高速水流空蚀问题，还有泥沙磨损因素。为施工导流需要，在56.5米高程设有6×8米导流底孔。这部分底孔，在初期135米高程发电时，仍需运用3年。此时，上述底孔的工作水头也近75米。虽然它们是临时建筑物，亦需按照永久工程标准设计。因为它们的高程低，二期围堰拆除时，不可能清理得十分干净。这些底孔的磨损问题可能比较严重，需要十分认真地研究和处理。

2.2 航道水力学和不稳定流问题

流体力学中还有一个航道水力学问题。在通航建筑物水力学问题中，对于充、泄水建筑物而言为高速水力学；对于航道而言则为低速水力学。在水力学模型中，由于缩尺比例，试验流速很小，船模中雷诺数影响很大。因此低流速测量、水深、船模动力模拟均有很多难点。

不稳定流对于通航建筑物更为重要，因为通航要求水力学条件很高，不稳定流对低流速的影响十分明显。例如坝前回水区和闸后泄水对航道的影响等问题都是应该研究的对象。

2.3 环境水力学问题

长江沿岸的工矿企业和城镇的污水排放，在长江常态水流中得到氧化和净化。三峡水库形成后，流速减慢，污染加剧，这是一个带有社会性的、影响面比较大的问题。对此环境水力学问题应予以重视，建议开拓一个专门的学科对其进行研究。现代的水力学和水文学的任务，应该从初期的防洪，中期的供水发展到当今的提高对水质的科学管理水平。这门学科对于三峡水库十分重要。

3 固体力学问题

固体力学涉及工程结构各个方面，就其难点而言，可能土力学和岩石力学最为复杂。

3.1 土力学方面

三峡工程分三期施工，因此有三期土石围堰。一期围堰最大堰高42米，长2500米，土石

方填筑约 430 万立方米；二期围堰水深约 60 米，最大高度近 90 米，土石方填筑约 1200 万立方米；三期上下游低围堰亦为土石围堰，高约 30 米，土石方填筑约 300 万立方米。一、二期围堰均用混凝土防渗墙作防渗体。二期围堰要求在汛期可能形成 20 亿立方米的库容，下游有重镇宜昌市和葛洲坝水利枢纽，因此，对这些临时建筑物提出安全性要求是十分重要的。一、二期围堰基础有部分新淤粉细砂层。土石围堰填筑方法均用风化砂向水中抛填。上述填料参数难以模拟和确切选择；风化砂刚度小，而混凝土防渗墙弹性模量高，这样的不耦合体计算分析工作也十分困难。虽然已做过大量的科研工作，如填料本构关系的研究，离心机试验等，但是对于如此重要的工程，仍需深入研究。特别是粉细砂的固结、流砂和震动液化问题更需十分小心谨慎。

3.2 岩石力学方面

三峡工程主体石方开挖工程量约 1 亿立方米，工程量巨大，并多高陡边坡，如永久船闸高边坡最高约 170 米，临时船闸边坡高约 120 米。这些边坡均为深切高边坡，地质构造及初始应力有一定的量值，在开挖中这部分应力得以充分的释放。由此，边坡将形成二次应力场和渗流场。在应力释放过程中边坡的应变状态使人十分忧虑。岩石边坡为地质体，具有多种不确定的力学因素：如地应力、岩体参数、地下水等，而永久船闸有船队通过，有大量人群活动，有钢闸门等重要金属结构。因而不同于矿山边坡，要求上部不应有大的卸荷裂隙，下部不得有小的长期变形（流变）。这是一个难度很高的重大技术课题。

现在许多学者对此进行研究，包括引用金属中损伤力学原理等方法。损伤力学在金属中应用，其成果并不十分精确，对于岩体力学，相距可能更远，其研究成果，将如何在工程中具体使用？是一个值得商榷的问题。现在工程已进入实施阶段，许多软件应适合硬件的要求。

岩石（体）本身是一种建筑材料，但是一般岩体均被地质构造节理切割成不均质、各向异性岩体。因此，在这类十分复杂的岩体中，建设各类岩体工程，必须适应当地具体的岩体条件，充分利用该岩体自身的承载能力，并通过各种有效的手段，使这类不均质体成为较完整的岩体结构。这是岩石力学与岩体工程的基本任务。

由于现代施工技术的进步，电子计算机的广泛应用以及先进试验测试仪器的不断发展，使人们对这类极其复杂岩体的研究、分析和具体工程处理能够顺利进行。当然，为了完成岩体工程任务，必须善于充分利用这些先进的手段。

岩体工程研究涉及多专业，如地质学、力学、试验技术和工程学等。应该强调指出，最主要的是应十分深入研究它们之间的关系，使之融为一体。单学科的研究是必要的基础条件，但是还需要有充分条件——这就是将众多的单学科有机地结合起来。只有在必要条件和充分条件均已具备的条件下，岩体工程和岩石力学研究，才能落到实处。鉴于上述岩体工程和岩石力学问题涉及的专业面非常宽，各专业之间的跨度又比较大，因此在岩石力学的研究中应运用系统工程的原理和方法，运用系统论、控制论和信息论的基本原理，可能是岩石力学今后的发展方向。

据上所述，可以建立岩体工程和岩石力学研究的基本原则：

①充分认识岩体性态，包括地质勘测、地应力测试、岩体力学参数试验、分析计算和模拟试验等手段。这是一项基础性的工作。

②尽力保护岩体的完整性。为了充分利用岩体自身的承载能力，在勘测设计、施工和管理全过程中，应尽量避免对岩体产生不必要的损伤和过多的破坏。

③有效而适时地支护岩体，使之成为结构体。岩体多节理、断裂构造等地质结构面，一般岩体均需进行必要的支护和加固，使多节理岩体成为适合工程要求的结构体。

④全过程的监测岩体应力应变状态。鉴于岩体规模巨大，即使对于岩体力学造诣很深，工程经验十分丰富的专家，对于岩体的认识和处理都不可能十分精确，因此，必须进行全过程的监测，以补充以往工作的不足，并逐步调整，逐步完善。

上述是岩石力学工作的基本原则。这4项工作原则，较(奥)缪勒教授对新奥法(NATM)解释的22条原则有更明确的目标和逻辑性。

新奥法22条原则中，第一条是说明应该充分利用岩体的自身承载能力，是总任务。其次有10条是具体说明如何保护岩体；有8条是具体支护岩体、使之成完整结构；有1条是对岩体进行分类——认识岩体；另外2条是监测岩体变形。新奥法22条原则中，90%的条款是说明如何保护和支护岩体，说明了新奥法的工作重点。

新奥法22条原则以保护岩体和支护岩体为主，对认识岩体的说明不多。从这个侧面看，似有不足。与此相反，我国岩石力学当前的研究方向（包括大部分国外文献所反映的情况）主要是在岩石试验、本构关系和数学软件等方面。当然，这些研究能更好地认识岩石的力学特性，有助于对岩体保护和岩体支护的研究。但是单纯的岩石“力学”的研究，不能替代对保护岩体和支护岩体的研究。因为全过程地保护岩体和适时而有效地支护岩体，将使岩体的力学条件得到根本的改善，这是我们工程的总目标。因此，应从岩体工程的总体出发，将认识岩体、保护岩体、支护岩体和监测岩体四方面的研究融为一体，不应有所偏废。

可见，在岩石力学的研究中，应用系统工程的原则和方法，是何等的重要。岩体工程可用下式全面表示其工作内容、逻辑关系和责任单位：

$$\text{岩体工程} = \{\text{条件}\} \{\text{逻辑}\} \{\text{责任}\}$$

$$\text{即} \quad \text{岩体工程} = \left\{ \begin{array}{l} \text{地质学} \\ \text{试验} \\ \text{力学} \\ \text{工程学} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{认识岩体} \\ \text{保护岩体} \\ \text{支护岩体} \\ \text{监测岩体} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{勘测} \\ \text{设计} \\ \text{施工} \\ \text{管理} \end{array} \right\}$$

据此，我们研究了三峡船闸高边坡的岩石力学问题，研究了岩体力学参数，地应力取值，尤其是经济边坡和地下工程方案。在上述原则的指导下，正在对岩体宏观参数、保护岩体方法和岩体合理支护等方面进行系统的研究。

三峡工程为大型岩体工程，必须运用上述系统工程的原则和方法，岩石力学方能全面应用到岩体工程中，可望能解决三峡重大岩体工程问题。

4 长江泥沙二相流问题

长江含沙量每立方米仅1.2公斤，较黄河低很多。由于长江水量很大，因而长江输沙总量也很大，年输沙量达5.2亿吨。设计采用“蓄清排浑”的运行方式，以排除泥沙，保证水库寿命。这是三峡工程建设中需要妥善解决的重大技术问题。

具体研究内容包括：建库后上游库区的淤积；蓄水初期下游河段的冲刷；坝区冲淤措

施,以保证坝区建筑物安全运行;还有沿江码头和防汛大堤的冲淤问题。

两相流理论,包括试验技术,在国际上我们可能处在较先进地位,但是也应该清醒的看到,它们并不十分成熟。例如,上游自然来沙条件预测、下游河床条件全面调查等还十分困难,各工作对象的要求,如河道、码头等项目要求不一。因此二相流研究难度很大,应予不断的深入研究。

5 爆破动力学问题

三峡工程有大量的石方开挖工程,爆破工作量很大。三峡工程爆破工作,要求对岩石边坡不产生过多的损伤和破坏。特别是高边坡工程中,还有大量的地下工程。地下工程的爆破,对岩石高边坡将产生不利的影晌,应予十分的重视。例如岩体中的4、5级结构面,本身的连通率不高,长度较短(仅几米),在不利的爆破情况下,4、5级结构面可能得以发展,使连通率提高,岩体参数将不断降低,而导致过大的变位和破坏。这是应避免的。

破碎力学,在三峡工程混凝土砂、石骨料生产过程中,也会遇到一些新问题。三峡工程混凝土大部分采用花岗岩人工砂、石骨料,需要用块石破碎,因此应研究适合花岗岩破碎的最优施工设备、工艺和力学机制。在破碎过程中,希望花岗岩块石充分破碎,而不只是“损伤”,如果有大量带有“损伤的块石骨料”浇到坝体混凝土内,则会降低混凝土的抗拉强度,对混凝土大坝工程十分不利,应予防止。

结语:前几年,模糊数学灰色理论等研究论文较多,这些学科的发展是适应一些不确定性科研课题而发展的。在三峡工程中,也遇到许多不确定性力学问题,但是我们希望有确定性的解,这是一个很大的难题。现在的力学已经从经典的线性问题的研究,发展到非线性问题的研究。对于一个特定的具体工程非线性反映在其不同因素相互影响所导致的本构关系中。所以离开了具体的客观条件,不可能解决非线性力学问题。因此现在的力学具有更强烈的实践性。深信力学在三峡工程建设中不但发挥其基础科学的作用,而且对于处理重大工程技术问题具有良好的发展前景。

SOME PROBLEMS OF ENGINEERING MECHANICS IN THREE GORGES PROJECT

Ha Qiu-ling

China Three Gorges Project Development Corporation, Yichang (443002)

Abstract This paper gives a brief account of the Three Gorges key water control project, the main technical difficulties in construction, as well as some important problems of engineering mechanics, including fluid mechanics, solid mechanics, two-phase flow and explosion mechanics etc.

New problems of rock (rock masses) mechanics concerned with the Three Gorges Project are reviewed here. Geotechnical engineering in a large-scale is a huge and complicated system and rock (rock masses) mechanics is related with a variety of disciplines. It is suggested that the theories and methods of system engineering should be used in the study of rock (rock masses) mechanics, considering its important role in the national economy. It is also necessary to consider various non-linear problems for different objects and tasks in the study of rock (rock masses) mechanics. Therefore, the study of rock (rock masses) mechanics should be carried out hand in hand with that of engineering problems.

Keywords *Three Gorges Project; rock (rock masses) mechanics; system engineering*