

三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究

林秉南*

(中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

[摘要] 在泥沙方面, 研究泥沙起动, 淤积物干容重的变化, 冲刷条件下的床面形态和减少引航道淤积的措施, 并尝试应用模糊数学和重正化群的概念对上述问题进行分析。针对通航建筑物, 研究了船闸水力学、大坝溢洪道泄水对通航的影响、小型船模和船闸运用模拟设备。对 180 m 高边坡, 针对开挖卸荷引起的岩体变形, 研究了粘、弹、塑性的影响, 不恒定渗流以至流变特性。对锚固也做了研究。在材料方面, 研究了超细水泥、补偿混凝土和高粉煤灰 HPC, 探讨了更耐久而抗裂的水泥。优化了多点监测系统, 以便有效而及时地测取资料并提高信息分析水平。编制了混凝土高坝仿真并层反馈计算的程序。

[关键词] 三峡水利枢纽, 泥沙, 船闸, 岩石力学, 高边坡, 水泥, 混凝土, 安全监控, 反馈设计

1 综述

三峡水利枢纽是治理长江的战略工程, 具有防洪、发电、航运等巨大的综合效益。无论是工程的总体还是某些单项工程, 其规模都是国内外罕见的, 其技术难度也是世界上少有的。“三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究”开展一年多来, 对水库泥沙、世界上最大的船闸及通航可靠性、库区及船闸开挖时的岩石高边坡稳定, 巨型工程的原材料, 以及现代化施工管理、安全监测及反馈设计等应用基础问题, 都进行了深入研究, 取得了一批阶段性成果。在 1995 年 9 月举行的年度评审检查交流会上, 各专题共提交论文及研究报告 100 余篇, 不仅在基础研究上取得了可喜的进展, 而且有相当一部分成果已作为建议提交三峡工程设计部门并被采纳。如清华大学周维垣教授负责的专题“开挖卸荷岩体高边坡的稳定变形机制及加固优化措施研究”, 为三峡工程提供了 16 种工况条件下的三维有限元计算成果和 10 种锚固布置方案; 长江科学院王德厚负责的“三峡工程安全监测系统结构及方案优化研究”, 为工程提供了安全监测的初步优化方案, 提出的 7 项重要建议中有 5 项已被工程设计部门采纳, 其中监测系统三级串联布设改为二级串联布设的建议为工程节约了大量资金。

2 主要研究内容及进展

2.1 泥沙问题研究

三峡水利枢纽库区和坝区泥沙淤积有历时长、淤积物粒径变化范围广、干容重变化大、水

* 中国科学院院士。

本文于 1996 年 5 月 31 日收到。

深变幅大等特点。在1995年度课题研究中，针对泥沙起动条件，对均匀沙和非均匀沙起动作了理论分析和试验，深入探讨了泥沙深水起动流速公式；在理论方面，引入了模糊数学分析并通过非均匀沙堆水下坍塌试验，证实可试用重正化群概念分析泥沙起动问题。对宽级配推移质提出了粗化细化程度的定量概念及其对泥沙输移影响的计算方法，对水库淤积干容重机理进行探讨并作了预备试验，进行了引客水、气帘、水帘、松动冲沙等引航道防淤冲淤措施试验。在水库下游河道演变规律及河势变化方面，开展了沙卵石河床粗化试验，冲刷过程中床面形态试验，非均匀沙挟沙力理论分析以及三峡水库下游河床形态分析。在三峡实体泥沙模型和数学模型相似律误差分析方面，对模型沙起动流速展开试验，建立了三维水动力学数学模型，开展了回流区和两江交汇区计算方法研究，对长系列年试验跳跃法应用数学模型进行了误差分析。图像分析法测流速也已成功地应用于模型试验。

2.2 通航建筑物应用基础研究

三峡左岸永久船闸共5级，总提升高度达113 m，各闸厢的平面有效尺寸为38 m×280 m，综合指标属世界之最，设计、施工和运行都异常复杂。本课题在三峡枢纽泄洪对通航条件的影响及改善措施的研究中，配合工程单项技术设计工作，在长江科学院1:100水工模型、1:150泥沙模型、1:40永久船闸整体模型和交通部天津水运工程研究所1:100水工模型中，对枢纽泄洪和船闸充水过程在上游引航道内产生的不恒定水流特性及其对船模航行的影响进行了试验研究，通过分析总结三峡工程的船模试验成果资料，研究了通航水流条件的船模航行判据问题。在三峡船闸输水系统和阀门水力学应用基础研究中，进行了高水头船闸反弧门水流流态和收缩系数的研究；针对三峡船闸阀门段两种廊道体型进行了水力特性综合比较研究，所推荐的底扩体型已被三峡工程设计所采用；完成了三峡船闸输水阀门动态优化及动力可靠度的分析；完成了阀顶缝隙水流特性研究；对船闸反向弧形阀门水力特性进行了试验研究等，提供了多篇研究论文和报告。在船闸运行仿真模拟及可靠性分析方面，对船闸运行过程仿真模拟方法、模拟器的总体设计、船舶操纵运动模拟以及针对葛洲坝船闸的运行可靠度分析等研究所取得的成果，为今后三峡多级船闸及引航道的航行条件研究打下了基础，提供了新的研究方法与手段。在自航小船模技术研究中，已研制了各种类型的三峡通航系列船模(1/100)，为下阶段船模操纵性能试验和研究提供了条件。还研制了小尺度船模自动试验系统，不仅可用于三峡通航试验研究，也可在我国内河通航研究中应用。

2.3 岩石高边坡问题的若干基础理论研究

三峡船闸轴线穿过丘陵地带，深开挖最大坡高180 m。大规模卸荷在非均质的岩体内引起复杂的应力、应变、破裂(包括时空效应)等一系列岩石力学现象以及相应的施工程序和加固措施等问题，需要深入研究。由同济大学等单位承担的脆弹粘性时空效应及对工程稳定的影响研究，已进行了部分软件研制及室内试验研究，并开始进行边坡脆弹粘性岩体三维时空效应、施工力学分析及程序研制工作。在三峡船闸高边坡失稳机理及极限分析方法研究中，采用塑性力学理论改进并完善边坡稳定的二维极限分析方法，其分析成果及计算方法已被设计单位采用；在建立三维极限分析方法方面，研究了裂隙网络饱和及非饱和非稳定渗流分析方法，为优化边坡排水设计提出初步建议。在三峡船闸高边坡锚固机理研究中，已完成长锚索仿真试验、群锚试验、雁形排列节理岩体和双轴下破坏机理试验，进行了群锚与岩体本构关系的研究，取得了高边坡稳定及加固方案的初步成果。在三峡船闸高边坡岩体分级和宏观力

学参数研究方面进行了数值分析与计算机模拟试验,研究了岩体宏观力学参数,对已有的三峡地区岩石力学大量试验资料进行了总结分析。通过岩体分级现场测试与室内试验,提出三峡高边坡节理岩体分级方法,并对高边坡岩体施工期性状监测的原则和布局进行了研究。在三峡船闸开挖卸荷岩体高边坡的稳定变形机制及加固优化措施的研究方面,对高边坡卸荷岩体的力学参数计算机模拟和卸荷稳定分析、高边坡施工爆破波分析模型与动力稳定性进行了研究,开发出三维离散元法程序,探讨了岩体卸荷非线性非连续变形机理,提出三峡船闸高边坡流变机制和用于应力锚固减小岩体流变机制,成果已在高边坡设计中采用。

2.4 三峡工程原材料的研究

三峡大坝为混凝土重力坝,坝顶长2 309.5 m,最大坝高175 m。枢纽工程总混凝土量达2 800万 m^3 之多,且工程的各部位对混凝土以及灌浆材料的性能有不同的要求。满足这些要求,节约原材料,保证这一跨世纪工程的安全和耐久,十分重要。本课题专门研究了各种特殊水泥和特殊混凝土,目标是研制出适用于灌浆的超细颗粒水泥和可用于配制补偿混凝土以及高粉煤灰掺量的高性能混凝土等。在大坝混凝土耐久性及其破坏机理(包括灌浆材料)研究中,已对有可能应用于三峡大坝的三个水泥厂的水泥进行了水化产物分析,得出了对耐久性有影响的重要因素,并对三种磨细设备进行比较,取得了初步成果。在微膨胀型中热和低热矿渣水泥及其机理的研究方面,提出了Mg在水泥熟料中的存在形态及其分布,阐明了水泥熟料中各矿物的Mg量之间的关系以及影响方镁石颗粒大小和分布的因素,还提出了钙矾石和MgO两种膨胀剂,改造中热和低热矿渣水泥为膨胀型水泥,以及改变水泥某些矿物组成以改善水泥的抗裂和耐久性。在抗冲磨高性能混凝土(HPC)及破坏机理研究中,对活性混合材和胶材用量,外加剂以及混凝土配合成分,进行初步的确定;对骨料,着重进行了铁矿石人工骨料的性能试验。在高掺粉煤灰混凝土的长期性能研究方面,研究了可能用于三峡大坝的不同品种水泥与不同粉煤灰掺量与强度的关系,研制了激发粉煤灰活性提高混凝土早期强度的外加剂,取得了一定成果。

2.5 主要水工建筑物安全监测与反馈设计

由于三峡工程规模宏大,在安全监测方面有特殊的要求。又由于观测项目多及难度大而需要对安全监测理论和方法进行新探索,以优化监测系统,使其能有效而及时地测取资料,提高信息分析水平,以便向有关方面及时反馈,保证大坝安全和提高工程质量。其次,三峡施工期长达十余年,在施工过程中会发现一些新情况,技术上也可能出现新进展,所以应及时利用现代计算技术,快速修改局部设计以适应新情况,使工程质量达到最优和最经济。

在监测系统总体结构优化方面,提出将监测系统三级串联布设改为二级布设;还提出了对监测系统仪器布置采用总线形的拓扑结构,这两项成果都已被三峡工程总公司采用。对变形监测的基本方法也提出了较多的优化建议。

在水工建筑安全监测高新技术及自动化监测系统方面,研究了用于裂缝和应力应变检测的光纤维传感器,地震CT技术中的射线追踪方法和共轭梯度成像算法及光学CT遥测垂线座标仪。另外,对应力应变和温度观测传感器作了检测和技术经济比较,提出三峡工程当前宜采用卡尔逊传感器的建议,该建议已被三峡工程总公司采用。还对已埋设的传感器的可靠性、稳定性以及监测自动化系统作了研究。

在水工建筑物安全监测信息分析的理论和方法方面,研究了多测点模型的构造和建模新

技术,包括数学滤波法等方法的应用。对多项目数据的综合分析,采用模糊聚类及多层次模糊决策与层次分析相结合的分析方法。针对监控指标的综合评判,研究大坝安全风险评估及事故树,并探讨拟定变形极限监控指标的方法。对监测量的时空分布模型,提出建立二维和三维时空分布模型的理论和方法,结合实例得出对大坝及基础整体安全的分析和评价模型。为了模拟三峡大坝及施工期变形全过程,提出特殊监控分析模型。结合大坝安全分析与评价,研究了应用李导数建立非线性矢量模型,已完成数学分析和程序编制工作,正在进行实际建模。对拟定监控指标的理论与方法,结合坝工理论和力学知识,已提出拟定变形的分级监控指标的理论和方法,完成了建模理论。

在水工建筑物施工期反馈设计理论、方法与软件方面,提出了混凝土高坝仿真计算并层算法与分区异步算法、不稳定温度场数值解的分区异步长解法、弹性徐变体有限元分区异步长解法等施工期反分析方法与理论。编制了混凝土高坝仿真并层算法的程序,并为三峡碾压混凝土重力坝计算了9个方案。

在开放式大型通用水工结构分析软件的研制方面,已完成系统的总体设计和部分细部设计,增设了开放式系统生成器,基本完成二维边坡弹塑性和离散元的程序编制和调试。完成了二维前后处理及二维图形等的开发和研制。

3 结语

本项目自1994年7月开始执行以来,历时将近两年。由于本项目所研究的对象本身就存在着不确定性和随机性(如泥沙与水流紊动,岩体性状,粉煤灰和骨料的特性等),而有关的一些相邻学科尚有待于进一步发展(如水流紊动力学,空化机理及尺度效应的研究都还不足以解决当前问题),准确的大规模原型观测资料不易取得,实际工程尺度远大于室内试验规模,应用基础研究更不允许对研究对象高度概化等,因而影响因素较多,研究难度较大。

在上一阶段研究中,已开始从相邻学科引入一些分析方法、测试及计算手段。如将模糊数学和重正化群概念试用于泥沙起动研究,将蒙特卡罗法应用于岩石节理资料的处理,建立大型数据库以储存大量实测资料,应用光纤用于岩体变形观测等。下一阶段将进行更具体而深入的研究,是攻坚的关键阶段。面对本项目课题的特点,笔者认为今后除应密切注视相邻学科的新发展外,更应加强观测资料的收集和分析,并进一步推广应用计算技术来处理大量的随机性资料;在研究方法方面,应尽可能遵循室内试验(包括模型试验)、数学模型和理论分析及原型观测和实际案例的类比分析相结合的途径。

APPLIED BASIC RESEARCH ON SOME KEY PROBLEMS OF THREE GORGES PROJECT

Lin Bingnan

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

Abstract In sedimentation, studies are progressing on such topics as the incipient threshold of sediment, consolidation of deposited sediment, bed forms under erosion conditions, and

various means to mitigate deposition in lock approaches. Attempt is being made to apply fuzzy mathematics and renormalization group in analysis.

Regarding navigational structures, in addition to hydraulics of locks, investigation is going on for possible adverse effects of spillway discharge on navigation and for the similarity of tow models. A facility to simulate the locking operation is being constructed for the monitoring of tows.

With respect to the 180m high rock slope, research is being carried out on the mechanics of deformation of rock mass because of unloading caused by excavation. These include the study of complicated problems involving plasticity, viscosity, unsteady percolation through seams and even rheology of rock mass. Anchorage is also studied.

Special cement and concrete are investigated, including ultra fine cement for grouting non-contracting concrete and HPC with high content of fly ash. Also being studied is the means to make the cement more durable and less liable to crack.

Systems of multipoint monitoring are optimized and the method of data analysis is upgraded in order to afford more effective and timely observation of the structure for rapid feedback to the authorities concerned. For prompt revision of design details to conform to any new conditions observed during the long process of construction, fast computer programs for structural analysis have been composed.

Key words Three Gorges Project, sediment, ship lock, rock mechanics, high rock slope, cement, concrete, safety monitoring, feedback design

· 信 息 ·

1996 年度国家杰出青年科学基金评审揭晓

由李鹏总理亲自批准从 1994 年开始设立的“国家杰出青年科学基金”至今已实施 3 年, 在国内外产生了很大的反响。1996 年度全国共有 324 名(博士 285 名, 占 88.0%: 其中国内培养的博士 191 名, 在国外获得博士学位的 94 名)青年学者申请这项基金, 经过各科学部组织的同行评议、专业评审组评审等严格的评审程序, 择优遴选出 97 名候选人。1996 年 10 月 20 日至 22 日在北京举行了“1996 年度国家杰出青年科学基金评审委员会会议”, 97 名候选人到会答辩。经过与会评委认真、细致的工作, 评出任佳刚等 84 人为 1996 年度国家杰出青年科学基金获得者。