

高坝——水电站工程建设中的关键科学技术问题

张楚汉

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 水电资源的开发不可避免地要修建巨型水电站工程包括巨型高坝, 而这些巨型水电站往往具有水头高、流量大、地震烈度高及地形地质条件复杂的特点。目前中国正在规划、设计和建设的水电站中, 高坝的工程技术指标已有多项超过了世界水平, 所以必将遇到和涉及前人未曾处理过的难题。为此, 本文从高坝地基稳定的岩土力学方面、高坝的结构强度方面、高坝地震动力学与抗震方面、高坝水力学与流体力学方面、高坝混凝土材料等方面提出了必须加强基础理论研究的若干科技前沿问题, 并提出了几点展望。

关键词: 水利工程基础科学; 水电站工程建设; 高坝关键科学技术; 基础理论研究内容

中图分类号: TV1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-0133(2005)02-0001-04

0 前言

水电资源的开发离不开将要修建众多的水电站工程, 包括巨型高坝。目前中国在建或将要修建的大型水电站, 除举世无双的三峡外, 还有长江上游的向家坝、溪洛渡、白鹤滩, 澜沧江上的小湾、糯扎渡, 雅砻江上的锦屏一级、二级, 乌江上的构皮滩, 红水河上的龙滩, 黄河上游的拉西瓦等, 其工程规模与技术难度均为世界水平甚至超世界水平。这些工程都采用新的筑坝技术优先发展双曲拱坝、碾压混凝土坝与面板堆石坝等坝型, 且其坝高也将成为当今世界的最高纪录。因此, 中国的高坝工程建设与筑坝技术在 21 世纪将面临新的机遇与挑战, 也将在现代高坝科学技术理论与应用方面登上新的高峰。

以上工程的主要特点是:

(1) 坝高库大。如小湾、溪洛渡、锦屏水电站, 坝高都达 300 m 级高度, 库容为百亿 m^3 以上;

(2) 泄洪流量大。如溪洛渡水电站, 设计洪水达 $43\,700\text{ m}^3/\text{s}$, 最大坝高 278 m, 泄洪功率达近 100 000 MW, 居世界首位, 泄洪能量集中, 消能难度大;

(3) 多数坝址处于强震区, 地震强度高。如小湾水电站 (按 6000 年概率设计) 地震强度为 0.308 g, 溪洛渡水电站为 0.321 g, 故强震对高坝的影响研究亟待进行;

(4) 地质条件复杂, 地基处理难度大;

(5) 地下厂房装机容量大。如溪洛渡水电站为 12 600 MW, 小湾水电站为 4 200 MW, 均存在大跨度地下厂房设计、施工及围岩稳定 (地应力高) 等问题。

总之, 中国的高坝建设在科学技术上将是世界水平的, 工程的建成将在理论与实践经验方面对世界的坝工建设作出新的贡献, 同时也必将推动诸多学科特别是现代力学的发展。

1 高坝建设的前沿科技问题

如前所述, 中国正在规划、设计的水电工程中, 多项工程技术指标已超过了世界水平, 必将遇到前人未曾处理过的技术难题。这些技术难题的核心, 是要求对水流的运动规律以及建筑物与地基的力学行为进行深入认识。

为了切实解决这些工程中的重大技术难题, 必须加强基础理论研究, 如现代力学 (包括固体弹性与塑性力学、流体力学与湍流理论、岩土力学、损伤断裂力学与流变学、随机波动力学、材料细观与微观力学、实验力学中高新技术的应用), 以及求解现代力学问题的各项新的数值模拟的计算机方法等, 这些研究均与现代高坝工程建设有密不可分的关系。

随着现代科学技术的发展, 人们对自然现象的认识越来越深入, 研究手段也越来越丰富, 学科之间的渗透与综合已不断扩展和深化: a 在力学研究中一些过去常用的近似简化或假定, 如物质的连续均匀各向同性与材料本构方程的线弹性假设现在已发展为非连续非均匀各向异性介质的非线性假设; b 由宏观强度指标发展为建立微细观破损机理与宏观指标关系的研究; c 由确定性分析发展

收稿日期: 2004-12-10

作者简介: 张楚汉 (1933-), 男, 广东省梅州市人, 教授, 中国科学院院士, 从事水利水电工程高坝结构与抗震的教学与研究工作。

为随机的、统计学上的模糊的分析方法；d 单一介质模型发展为多相介质耦合模型；e 由研究传统小变形响应发展为大变形破坏模型；并由此建立了一批新概念、新理论，使现代力学的知识体系发生了很大的变化，涌现出了一系列新兴学科。

中国在高坝水电站工程实践方面目前处于世界前沿，在近 20 年来的科技攻关中已有若干研究领域取得了令人瞩目的进展。如高坝的温度与应力仿真、高坝抗震与坝基稳定、高速水流消能及地下洞室围岩变形稳定等；但在涉及的基础领域研究方面、现行设计分析理论模型与方法，以及现代高坝的新技术新坝型等，则多是国外首先提出来的。中国无论在理论研究还是在实验研究方面，与国际先进水平仍有较大的差距。

由于发达国家水能资源已得到充分开发，故世界上高坝水电站的建设将主要集中在发展中国家，如中国、印度、巴西等国。在未来的 15~20 年内，中国将建成当今世界上最高的双曲拱坝（小湾 292 m，锦屏 305 m）、最高的面板堆石坝（水布垭 233 m）和最高的碾压混凝土重力坝之一（龙滩 216 m）。

21 世纪上半叶，中国高坝水电站建设的实践将对水工结构工程学科领域的研究提出新的挑战。

2 高坝建设的主要研究方向与内容

中国高坝水电站的建设涉及的科技问题众多，本文仅列出以下若干重点研究的方面。

2.1 高坝的力学性能与结构强度稳定理论与方法

近半个世纪以来，高坝的结构强度稳定理论方法已经历了刚体力学—材料力学—弹性与弹塑性力学的发展阶段，如：混凝土重力坝由材料力学重力法发展为弹性力学法；拱坝由结构力学的试荷载法发展为弹性力学的各类数值方法；土石坝稳定则由瑞典圆弧法到有限元法。但这些发展都经历了漫长的过程，且许多现行方法迄今仍停留在半经验、半理论阶段。

现代计算力学与计算技术的发展为高坝力学性能与结构强度稳定分析提供了良好的基础。在结构—地基耦联系统整体稳定性研究、混凝土坝施工过程仿真和高坝断裂力学等方面，都是今后的重点研究方向，具体研究内容有：

(1) 高混凝土坝的地基应力、变形、稳定分析理论与方法；

(2) 高土石坝的地基应力、变形、稳定分析理论与方法；

(3) 高坝施工、运行全过程仿真与原型观测验证；

(4) 高混凝土坝坝踵断裂、奇异性及网格敏感性能量准则；

(5) 混凝土坝损伤、破坏力学；

(6) 高混凝土坝温度应力与温度控制；

(7) 高土石坝的渗流稳定；

(8) 高坝优化理论与方法；

(9) 混凝土坝随机力学模型与可靠度理论。

2.2 高坝地基稳定的岩土力学问题

高坝由于水荷载作用，致使地基变形失稳导致破损或溃坝的实例在世界上已有多起，如法国玛尔巴塞拱坝因坝基滑动导致溃坝及意大利瓦依昂拱坝因库岸滑坡导致涌浪等，究其主要原因均源于坝基或两岸地质条件所致。因此，影响高坝安全的最主要的因素之一就是高坝地基的稳定问题。

高坝坝基稳定的判据，目前在多数工程设计中仍沿用刚体极限平衡理论，但有限元法的开始应用已使坝肩岩体稳定研究进入了弹塑性、蠕变、损伤断裂力学的领域（连续介质力学）或离散元、DDA（Discontinuous Deformation Analysis）大变形分析（非连续介质力学）阶段。然而地基岩体受节理裂缝切割，实际上为连续—非连续耦合介质，其体系是黏弹塑性和接触非线性的，且由于蓄水与渗流改变了界面的荷载条件，其受力破坏特征是由小变形到大变形的破坏过程，因此它与现代力学中诸多领域均有紧密的联系。有关这方面的前沿科学问题有：

(1) 岩、土的弹塑性力学模型，动、静力强度与流变特性；

(2) 岩、土渗流场与应力场耦合模型、渗流场网络模型；

(3) 节理岩体连续—非连续介质力学与高坝地基稳定的大变形理论；

(4) 岩体损伤、断裂与地基非线性破坏理论与分析方法如分岔，局部化宏细观耦合模型；

(5) 岩土工程数值计算与分析方法；

(6) 岩、土细观力学。

2.3 高坝地震动力学与抗震

混凝土高坝的地震动力反应与抗震分析目前仍沿用线弹性介质理论，地震荷载以截断边界的无量量地基作均匀同步输入，但坝基与坝体的动力稳定分析各自独立、互不耦联。虽然近年来各类数值方法（有限元，边界元，无限元等）的应用有了长足的进步，但问题仍局限于连续介质小变形范畴。对高土石坝来说，等效非线性、弹塑性模型目前已有应用，但由于对土石材料的动力本构关系缺乏深入了解，所以对高坝的地震弹塑性反应与残余变形的研究仍停留在工程近似水平上。

高坝诱发水库地震是建坝所引发的环境问题,目前世界上已有66座高坝发生过这类现象,但迄今对其地质力学机理仍缺乏深入研究。

高坝的震害包括坝体严重裂缝(新丰江大坝1962年发生、Koyna大坝1967年发生)、断层错动引起坝体断裂(台湾石冈坝1999年发生)、强震引起横缝拉开(Pacoima 1971年发生),以及土石坝地震液化滑坡(San Fernando 1971年发生、密云1976年发生)等。有关这方面的研究课题有:

- (1) 水库诱发地震的机理与预测;
- (2) 高坝地震荷载的设防标准与风险分析;
- (3) 高坝结构地震响应及坝体的动态损伤、断裂;
- (4) 高坝、水库、地基与淤沙线性、非线性动力相互作用;
- (5) 地震随机理论在高坝振动中的应用;
- (6) 震源与震波传播机制与拱坝峡谷地震荷载自由场空间分布;
- (7) 高拱坝与坝肩的动力稳定破坏机制与分析模型;
- (8) 高坝振动控制理论与抗震技术;
- (9) 土石坝的动力反应、地震永久变形与沙土地基液化;
- (10) 堆石坝面板的防渗体止水、过渡层的抗震构造;
- (11) 高坝强震观测网;
- (12) 高坝非线性与多相介质相互作用的模型试验技术。

2.4 高坝混凝土材料

对300 m级高坝来说,作用在坝体和地基的库水与地震推力达千万t级水平,坝体的最大静动拉应力达5~6 MPa以上,已超过了一般混凝土的强度,故研究新的混凝土材料及其特性是首要迫切的任务。其次,混凝土在多轴应力状态、在高水压饱和状态及在静动荷载联合作用下的强度与本构关系,也是高坝混凝土的工作特点,但目前国内外在这方面的研究工作做得很少。混凝土在强震应变速率下的强度高于静态强度,但这一特性与初始静力状态与应变历史有关,试验已表明这种动、静强度差异涉及不同水平的损伤积累过程,因此研究不同初始静力场和加载应力历史对动态强度的影响是一个关键的课题。此外,水工特种混凝土、高强混凝土,以及掺不同掺合料、减水剂、加气剂等附加剂的研究也具有工程意义。有关这方面的研究课题有:

- (1) 全级配混凝土的强度—本构关系与断裂

韧度;

- (2) 混凝土多轴应力的强度与断裂特性;
- (3) 在高压饱和水作用下的水工混凝土的强度特性;
- (4) 水工大体积混凝土力学性能的数值模拟方法;
- (5) 水工混凝土在恶劣环境(高寒、海水环境等)下的性能;
- (6) 水工混凝土老化以及水工结构的病害诊断与评价;
- (7) 水工混凝土的蠕变特性;
- (8) 荷载速率、历史对混凝土强度与韧度的影响;
- (9) 纤维混凝土、氧化镁混凝土、硅粉混凝土等特种混凝土研究;
- (10) 水工混凝土的各项附加剂与掺合料研究及水工混凝土的改性。

2.5 高坝水力学与流体力学问题

高坝水电站工程具有高水头、大流量和窄河谷等特点,泄洪时高速水流能量集中,消能难度大。以溪洛渡水电站为例,其大坝坝高278 m,泄洪量达 $43\,700\text{ m}^3/\text{s}$,泄洪功率近100 000 MW,流速大于50 m/s,这不仅带来消能、冲刷问题及空化空蚀问题,而且还有掺气雾化对岩坡稳定影响的问题和流激振动等问题。这些问题在学科上属于紊动水流与两相流问题,涉及高速水流、气流与边壁、结构、岩体的动力相互作用,但迄今已有的计算方法多属简化计算模型,主要还是依靠模型试验、原型运行观测等手段来取得一定的经验公式。尽管近几十年来在紊流力学、计算水力学与流体力学方面取得了长足的进展,但在高坝泄流、高速水流与消能的计算数值模拟方面仍处于半试验半理论阶段。鉴于该问题与地形、地质、结构形态及过流边界条件密切相关的复杂性,所以研究工作仍需大力深入开展。有关这方面的若干前沿课题有:

- (1) 高速水流紊动、冲击荷载特性;节理岩体的冲刷机理、抗冲强度与各类消能工防护型式的消能效果;
- (2) 自由射流、明槽紊流、管道紊流的结构特性;高速水流脉动、掺气、扩散消能、空化、空蚀等主要现象的物理机制与数值模型;
- (3) 高速水流脉动的频谱和时空相关特性与高坝、闸门等水工结构物的耦联振动;
- (4) 高速射流水/气混掺特性,水气两相流运动规律;射流碰撞、掺气与雾化的物理与数值模拟;
- (5) 流速大于50 m/s时水流空化的形成、生

长与溃灭, 以及初生空化数、空蚀影响因子与减蚀措施 (不平整度控制与通气措施等);

(6) 涌浪冲击波和毁坝水力学;

(7) 冰、水流对水工建筑物的影响。

2.6 高坝新坝型——碾压混凝土坝与面板堆石坝

由于现代筑坝技术的发展, 近 20 年来碾压混凝土坝与面板堆石坝等新型坝得到了迅速发展。

目前世界上已建造的碾压混凝土坝有 232 座, 最大坝高为 190 m (Miel Na 1 坝); 在建的碾压混凝土重力坝高度已达 200 m 以上 (Ta Sang 坝 217 m、龙滩 216 m)、碾压混凝土拱坝高度已达 120 m 以上 (沙牌 132 m)。目前世界上高度大于 100 m 以上的面板堆石坝总数约 20 座, 最高的达 233 m (中国水布垭)。碾压混凝土坝主要特点是施工简便、快速、工期短, 水泥用量少、造价经济; 而面板堆石坝的特点是抗渗透冲刷的安全性能好、施工简便、造价低, 且施工受环境干扰少、可省工期。目前这 2 种坝型均在向更高、更省、更快的方向发展, 但也带来一系列的科研与工程技术问题。

2.6.1 碾压混凝土坝的科研与工程技术问题

(1) 碾压混凝土坝的施工过程仿真、温度环境与裂缝控制;

(2) 碾压混凝土坝层面的抗剪强度特性与抗滑稳定;

(3) 碾压混凝土坝的渗流场与防渗措施;

(4) 碾压混凝土坝的抗震稳定性;

(5) 新的掺合材料配比、施工工艺与方法研究 (如斜层碾压法);

(6) 碾压混凝土拱坝的结构型式与抗裂措施。

2.6.2 面板堆石坝的科研与工程技术问题

(1) 堆石的强度与本构关系;

(2) 面板堆石坝的强度、变形与稳定性;

(3) 面板堆石坝的三维抗震模型、横河向地

震反应与地震永久变形;

(4) 面板、过渡层与堆石的非线性接触本构关系;

(5) 深覆盖层上的面板堆石坝。

3 展望

(1) 中国西部地区水电开发和南水北调工程将涉及兴建众多的 300 m 级高坝, 这些高坝建设多具有坝高库大、地形地质条件复杂、地震烈度高、泄洪流量大及装机规模大等特点 (难点), 需要水电科技人员进一步采用更好的安全分析的数值模型和试验技术来解决上述问题。这些工程建设不仅将推动中国西部大开发的进程, 为中国全面实现小康社会作出贡献, 也必将推动中国高坝水电科技的发展, 使其达到国际先进乃至领先水平。

(2) 中国在高坝水电站建设中必须十分重视生态环境问题。由于高坝大库所带来的对自然条件的干扰是多方面的, 如移民、水库与河道泥沙冲淤、水库诱发地震、两岸浸没、库岸滑坡、水库水质污染、水生物与动植物生态环境的变化等, 因此, 在高坝建设中应当十分重视生态环境的评估, 并采取工程与社会措施将其对环境的影响减至最小, 努力做到人与自然相互依存、相互作用、和谐相处。

(3) 本文就高坝水电站建设在科技层面上所提出的若干关键研究课题, 都需要采取理论—试验—原型监测相结合的技术研究路线, 即: 在理论研究方面, 需要发展非线性、非均匀、多相耦合的静动力学模型; 在岩土、混凝土材料的物理力学特性研究方面, 则要重视原体测量、模型试验等多种手段, 以取得符合实际的参数, 正确地评估高坝的安全性态。因此, 在高坝水电建设的科学前沿研究中, 理论—试验—原型观测是相互依存、相互促进的 3 个环节, 缺一不可。

High Dam-Key Science & Technology Problem in Hydropower Station Construction

ZHANG Cu-han

(School of civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract: The development of water resources inevitably need built large-scale hydropower stations including huge high dams. Those huge hydropower stations often have some features such as high head, large flow, high seismic intensity as well as complicated geological and topographic conditions. Some indexes of engineering technology of

(下转第 8 页)

抽水成本), 装机发电日平均利用小时为 5 h, 按全部投资财务内部收益率 6.76% 测算的上网电价基本在 0.25 元 /kW · h 以下, 与当前平均上网电价相当; 其中以大树子、构皮滩抽水蓄能电站的 0.24 元 /kW · h 为最小。

(2) 按同时计容量和电量价格分析。按一般抽水蓄能电站的评价方法, 容量价格为 958 元 /kW, 电量价格为 0.37 元 /kW · h, 通过全部投资财务现金流量计算, 格榜、甲党贡、坪上、构皮滩、大树子等 5 个站址方案所得税后的全部投资财务内部收益率在 15% 左右, 远大于财务内部基准收益率 (8%), 财务指标较优。

7 结语

(1) 贵州省水力资源居全国第 6 位, 但资源总量少, 待 2012 年左右乌江大型水电站开发完毕, 水电在电网中的比例将迅速减少, 电网有抽水蓄能电站的市场空间, 电价体制改革也将有利于抽水蓄

能电站的建设; 近期可充分吸收乌江上的水电站及其他电站多余电能转换成高质电能, 并对电网的调峰、调频、调相及备用等均可起到突出作用。

(2) 据贵州省乌江流域及负荷中心范围内抽水蓄能电站的普查结果, 贵州省具有建设抽水蓄能电站的条件且蕴藏量丰富, 其中规划的 15 座抽水蓄能电站就可装机 1 625 万 kW, 近期推荐的 5 个抽水蓄能电站可装机 720 万 kW, 有利于提高整个乌江的水电站经济效益, 从而实现“流域、梯级、滚动、综合”发展, 并可满足贵州省一定时间的负荷要求。

(3) 规划的 15 个抽水蓄能电站的单位投资在 2 500 ~ 4 586 元 /kW, 建设工期均在 6 年以内, 建设速度快, 有适应电力市场竞争能力, 经济指标较好。

(4) 推荐大树子、构皮滩、坪上、甲党贡及格榜等 5 个抽水蓄能电站为近期研究工程, 其单位投资在 2 500 ~ 2 800 元 /kW, 工程投资较少, 并可与常规水电站进行综合、滚动开发。

Development Research Of Pumped Storage-Assistance Power Supply Of Wujiang Hydropower

FAN Guo-fu

(Guiyang Investigation Design & Research Institute of China Hydropower, Guiyang, Guizhou, 550002, China)

Abstract: Water-power resources of Guizhou Province rank the 6th in China, but the amount is small. The large-scale hydropower stations on the Wujiang River have been built up to 2012, the rate of hydropower capacity in Guizhou network will be rapidly fall at that time. Pumped storage stations have not only market but also the construction conditions in Guizhou Province. In recent years, some pumped storage stations located in the basin of the Wujiang River or near the load center could be planned to build as assistance power supply of hydropower development of Wujiang Basin, in order to absorb the surplus electricity energy from the built hydropower stations on the Wujiang River or others, and change it to high quality one, promote cascade rolling and comprehensive development of Wujiang Basin.

Key words: primary energy, development research of pumped storage, assistance power supply of Wujiang hydropower

(上接第 4 页)

high dam have exceeded the world levels in many hydropower stations planned, designed and built in China. Some difficult problems, therefore, that have not been treated before must be met and involved. In the article the author presents some science and technology problems on the forward position which must be researched in basic theory from different respects such as rock-soil mechanics involved foundation stability of high dam, structure intensity of high dam, earthquake resistant and seismic dynamics of high dam, flow mechanics and hydromechanics of high dam, concrete materials of high dam and etc. The writer also raises several prospects.

Key words: basic science of hydraulic engineering, construction of hydropower project, high dam, key science and technology, research content of basic theory