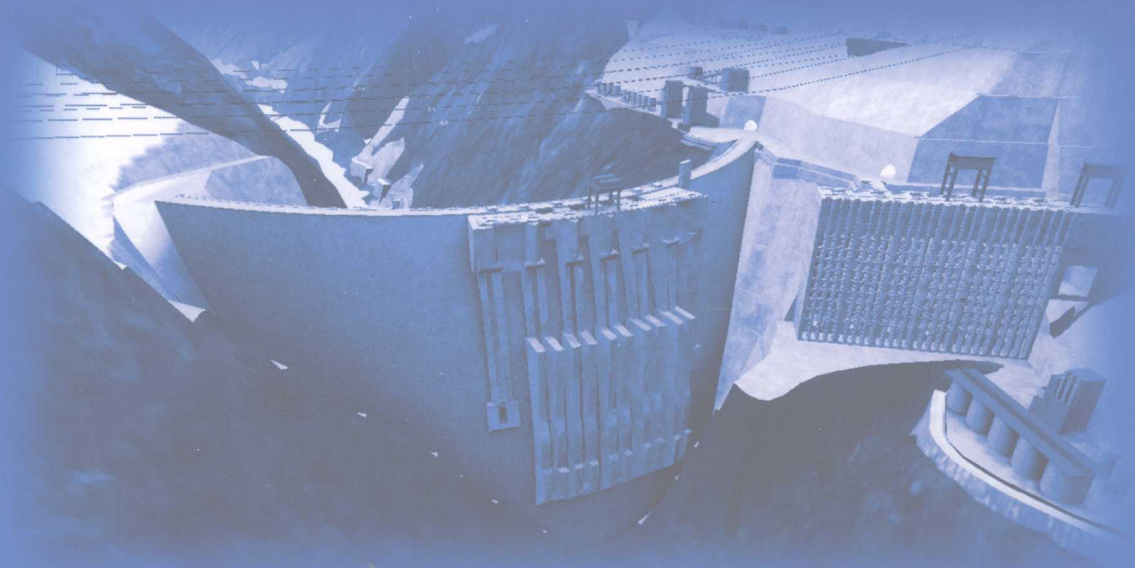


Construction Simulation and Real-Time Control
for High Concrete Dam

高混凝土坝 施工仿真与实时控制

© 钟登华 练继亮 吴康新 任炳昱 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

- 国家杰出青年科学基金 (50525927)
- 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司
雅砻江水电开发联合研究基金 (50539120)
- “十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2008BAB29B05)

资助

高混凝土坝 施工仿真与实时控制

© 钟登华 练继亮 吴康新 任炳昱 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书较系统地介绍了高混凝土坝施工仿真与实时控制的理论方法及其工程应用实践。全书共分 15 章：第 1 章简要介绍了国内外高混凝土坝的建设概况以及系统仿真技术在高混凝土坝施工中的应用现状与发展；第 2 章探讨了高混凝土坝建设中高强度连续施工面临的关键技术问题；第 3 章总结了现代仿真技术在理论与方法上的发展；第 4 章详细介绍了高混凝土坝施工仿真的基本理论与方法；第 5 章阐述了高混凝土坝施工仿真建模方法与实现；第 6 章阐述了高混凝土坝施工仿真中参数的设计与分析；第 7 章结合具体应用实例，介绍了高混凝土坝施工仿真多目标决策理论与方法；第 8 章阐述了高混凝土坝施工进度实时控制理论与方法；第 9 章阐述了高混凝土坝施工智能仿真与优化理论方法；第 10 章介绍了真实施工场景下高混凝土坝施工交互式仿真与实时控制的实现方法与控制过程；第 11 章介绍了研制开发的高混凝土坝施工仿真与实时控制软件系统；第 12~15 章分别介绍了上述理论方法在 4 个具体水利水电工程中的实际应用。

本书可供水利水电工程设计人员、技术人员、管理人员和广大水利工作者阅读，也可供高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

高混凝土坝施工仿真与实时控制/钟登华等著. —北京：
中国水利水电出版社，2008

ISBN 978-7-5084-6152-6

I. 高… II. 钟… III. ①高坝：混凝土坝—工程施工—
计算机仿真②高坝：混凝土坝—工程施工—实时控制
IV. TV642.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 200268 号

书 名	高混凝土坝施工仿真与实时控制
作 者	钟登华 练继亮 吴康新 任炳昱 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 21.75 印张 516 千字
版 次	2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

混凝土坝是水利水电建设中几种主要的坝型之一，随着我国筑坝技术的提高，混凝土坝也逐渐向高大型发展。近几年来一批 300m 级的高混凝土拱坝相继开工建设，如 305m 高的锦屏一级拱坝、292m 高的小湾拱坝、278m 高的溪洛渡拱坝等。这些高混凝土坝的建设表明我国的筑坝技术进入了一个新的阶段。

高混凝土坝施工在水利水电工程建设中占有重要地位，其施工质量和施工速度直接影响到工程的安全和建设工期。由于高混凝土坝施工过程受自然环境、结构形式、工艺要求、组织方式以及浇筑机械与建筑材料等诸多因素的影响，使得施工计划安排、进度控制和资源优化配置十分复杂；同时，高混凝土坝施工时间跨度大、高峰期浇筑强度高，在动态施工过程中还要考虑导流、度汛、坝体挡水及蓄水发电等阶段性目标要求，给施工组织、计划安排及进度控制带来相当大的困难和潜在的风险。在实际水利水电工程中，为追求提前发电效益，又往往要求加快大坝施工进度，尽量缩短施工工期。因此，势必带来高混凝土坝的高强度连续施工等工程科学问题，并给高混凝土坝施工优化设计和动态实时控制提出了更高的要求。因此，有必要采取科学的理论方法和先进的技术手段，综合考虑影响大坝工程施工进程的各方面因素，合理安排坝块浇筑顺序，对多个大坝浇筑方案和机械组合方案进行快速的比选和优化，以便及时有效地辅助大坝施工管理和决策。

在高混凝土坝设计与施工中，需要面对以下四个关键问题：如何优化复杂约束条件下的施工方案，如何优化配置大型机械设备，如何动态调整与控制施工进度，如何有效地分析与控制施工质量。施工仿真技术使我们能够在计算机上实现对高混凝土坝施工的动态过程进行仿真试验，分析施工过程中可能存在的各种问题，预测不同施工方案下高混凝土坝施工进程的各项定量指标，对制定合理的高混凝土坝施工进度计划提供科学可靠的决策依据。施工仿真技术为分析高混凝土坝的高强度连续施工问题提供了技术支持，在工程的设计和施工阶段应用施工仿真技术具有重要的工程应用价值。高混凝土坝施工仿真与实时控制研究是一项备受关注的研究工作。近几年来，以作者为代表的课题组对高混凝土坝施工仿真与实时控制开展了大量的理论方法与应用研究工作，取得了许多创新的研究成果，在我国的高混凝土坝施工设计与工程建设中发挥了重要

的作用。本书是在这些研究成果的基础上撰写而成的。

本书较为系统地介绍了高混凝土坝施工仿真与实时控制的理论方法及其工程应用实践。全书共分15章：第1章简要介绍了国内外高混凝土坝的建设概况以及系统仿真技术在高混凝土坝施工中的应用现状与发展；第2章探讨了高混凝土坝建设中高强度连续施工面临的关键技术问题；第3章总结了现代仿真技术在理论与方法上的发展；第4章对高混凝土坝施工仿真的基本理论与方法进行了详细介绍；第5章阐述了高混凝土坝施工仿真建模方法与实现，主要包括仿真模型分析、数学建模、程序设计、模型实现、有效性评价几个步骤；第6章对高混凝土坝施工仿真中参数的设计与分析进行了研究；第7章结合具体应用实例，介绍了高混凝土坝施工仿真多目标决策理论与方法，包括多方案评价理论、模糊综合评判以及供料机械配置方案的综合优化；第8章阐述了高混凝土坝施工进度实时控制理论与方法；第9章阐述了高混凝土坝施工智能仿真与优化理论方法；第10章介绍了真实施工场景下高混凝土坝施工交互式仿真与实时控制的实现方法与控制过程；第11章介绍了作者研制开发的高混凝土坝施工仿真与实时控制软件系统，对它的结构、主要功能和实现流程进行了较为详细的说明；第12~15章分别介绍了上述理论方法在四个具体水利水电工程中的实际应用。

本书主要由钟登华、练继亮、吴康新和任炳昱撰写，刘东海、宋洋、李明超、李景茹、佟大威、鲁文妍、王双起、吴斌平等也为本书付出了辛勤的劳动。本书的撰写和出版得到了曹楚生院士、朱光熙教授、孙锡衡教授的鼓励和指导，得到了二滩水电开发有限公司、黄河上游水电开发有限公司、中国长江三峡工程开发总公司、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、北京勘测设计研究院、中国水利水电第八工程局等单位的帮助和支持，特此致谢！此外，在本书的撰写过程中，引用了部分文献资料，并已将主要参考文献附在书末，在此谨向有关作者致谢。

由于理论技术发展的阶段性和局限性，以及作者的学识与水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2008年10月1日于天津大学

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 国内外高混凝土坝建设概况	1
1.2 高混凝土坝施工特征分析	4
1.3 高混凝土坝施工仿真研究的发展	5
第 2 章 高混凝土坝高强度连续施工面临的关键技术问题	9
2.1 高混凝土坝施工组织与进度控制	9
2.2 高混凝土坝施工方案与施工设备	12
2.3 高混凝土坝施工设备资源配置分析	17
2.4 高强度连续施工技术及工艺	21
2.5 高强度连续施工面临的主要问题	23
第 3 章 现代仿真技术的发展	25
3.1 系统仿真概论	25
3.2 系统仿真的发展与现状	29
3.3 离散系统仿真方法	31
第 4 章 高混凝土坝施工仿真的基本理论与方法	40
4.1 不同阶段高混凝土坝施工仿真研究的目的	40
4.2 高混凝土坝施工系统分解与机理描述	41
4.3 高混凝土坝施工系统的仿真策略	43
4.4 高混凝土坝施工仿真系统的仿真时钟推进方法	46
4.5 高混凝土坝施工仿真流程	57
第 5 章 高混凝土坝施工仿真建模方法与实现	59
5.1 高混凝土坝施工仿真建模过程描述	59
5.2 高混凝土坝施工仿真模型分析	60
5.3 高混凝土坝施工仿真的数学建模	65
5.4 高混凝土坝施工仿真模型的程序设计	77
5.5 高混凝土坝施工仿真模型的实现	82
5.6 高混凝土坝施工仿真模型的有效性评价	89
第 6 章 高混凝土坝施工仿真参数设计与分析	96
6.1 模型参数的分类	96
6.2 模型参数的确定方法	96

6.3	模型参数的分类设计	101
6.4	模型参数的敏感性分析	109
第 7 章	高混凝土坝施工仿真多目标决策理论与方法	113
7.1	高混凝土坝施工仿真多方案评价理论与方法	113
7.2	基于随机影响的仿真结果模糊综合评判	123
7.3	供料机械配置方案综合优化方法	128
第 8 章	高混凝土坝施工进度实时控制理论与方法	136
8.1	施工进度分析方法	136
8.2	基于实时仿真的高混凝土坝施工进度预测与分析	138
8.3	高混凝土坝施工进度实时控制流程	141
8.4	高混凝土坝施工进度不确定性分析	142
8.5	高混凝土坝施工进度监控预警模型研究	147
8.6	高混凝土坝施工进度动态调整与控制	148
第 9 章	高混凝土坝施工智能仿真与优化理论方法	157
9.1	基于知识的高混凝土坝施工仿真分析	157
9.2	基于多 Agent 的高混凝土坝施工仿真建模分析	164
9.3	高混凝土坝施工过程仿真多 Agent 实现方法	168
9.4	基于模糊规则的高混凝土坝随机跳仓排序研究	171
9.5	面向施工现场的 Agent 学习与自适应控制分析	176
9.6	人机交互界面 Agent 的功能与实现	178
9.7	实例分析	179
第 10 章	真实施工场景下高混凝土坝施工交互式仿真与实时控制	182
10.1	基于 GIS 的施工过程可视化仿真技术	182
10.2	真实施工场景下的交互式仿真与实时控制	188
10.3	交互式仿真与实时控制系统的软硬件技术	189
10.4	高混凝土坝施工仿真场景建模方法与实现	193
10.5	高混凝土坝施工交互式仿真与实时控制过程	198
第 11 章	高混凝土坝施工仿真与实时控制系统的研制与开发	207
11.1	系统需求分析	207
11.2	系统体系结构设计	208
11.3	系统模块划分与功能	212
11.4	三维环境下 DSim_PDC 系统的研制与开发	215
第 12 章	工程实例 I	225
12.1	工程概况	225
12.2	施工控制性进度分析	226
12.3	施工仿真参数的选取	228
12.4	施工多方案仿真计算	231

12.5	施工措施分析与综合建议	250
第 13 章	工程实例 II	253
13.1	工程概况	253
13.2	施工仿真计算与成果分析	255
13.3	施工进度优化分析	264
13.4	施工过程三维动态可视化分析	269
第 14 章	工程实例 III	272
14.1	工程概况	272
14.2	施工仿真参数的选取	276
14.3	施工进度计划与形象面貌	280
14.4	施工仿真计算与成果分析	284
14.5	施工过程三维动态可视化分析	301
第 15 章	工程实例 IV	304
15.1	工程概况	304
15.2	施工仿真参数的选取	304
15.3	施工仿真计算与成果分析	309
15.4	高混凝土坝施工实时控制系统	314
参考文献		331
结束语		338

第 1 章 概 述

在我国的水利水电工程建设中，混凝土坝是主要的坝型之一。根据设计规范（2003 年），低混凝土坝的高度为 50m 以下，中混凝土坝的高度为 50~100m，100m 以上的为高混凝土坝。自新中国成立以来，我国在诸多水利水电工程尤其是大型水利水电工程建设中采用了混凝土筑坝技术，修建了多座不同类型、装机百万千瓦以上和混凝土工程量超过百万立方米的水电站。目前已建和在建的大坝中，高混凝土坝占据了较大的比重，例如已建和在建的有二滩（240m）、三门峡（106m）、乌江渡（165m）、东江（157m）、龙羊峡（178m）、漫湾（132m）、李家峡（165m）、三峡（181m）、锦屏一级（305m）、拉西瓦（250m）、溪洛渡（278m）、向家坝（162m）、小湾（292m）、景洪（108m）和金安桥（160m）等。随着这一大批世界级水平高混凝土坝的顺利建成，我国高混凝土坝的设计、科研、施工管理水平也进入了世界先进行列。

1.1 国内外高混凝土坝建设概况

1.1.1 国外高混凝土坝建设概况

20 世纪 60 年代初，瑞士建成了世界上最高的混凝土坝，即位于瑞士罗讷河左岸的狄克斯河谷中的大狄克逊（Grand Dixence）重力坝，坝高 285m；1936 年美国建成的胡佛坝为重力拱坝，坝高 221.4m，坝体混凝土方量为 249 万 m^3 ，胡佛坝的建成，在混凝土建坝史上是一座重要的里程碑。当时，在最大坝高、坝底最大宽度、机组尺寸、钢板焊接尺寸和总量、人工混凝土冷却系统、混凝土施工速度和规模以及枢纽工程其他一些方面，都是史无前例的。因此，在设计 and 施工过程中进行了一系列试验和研究，所获成果极大地保证了工程结构、施工、管理和运行等各方面的安全、经济 and 高效。特别是胡佛坝使用的柱状浇筑法被称为混凝土的传统施工方法，被世界上许多国家采用。目前国外已建的工程量最大的高混凝土坝为位于巴西和巴拉圭交界的伊泰普坝，混凝土总量达到了 1230 万 m^3 。国外发达国家的大坝混凝土施工，一般施工准备充分，计划周密；采用大型机械配套化施工，将平仓振捣工艺视为大坝混凝土施工中的重要环节；并且重视每个环节的规范化施工。进入 20 世纪 80 年代后，国外在建大型水电站逐渐减少，规模也较小，主要集中在委内瑞拉、印度、阿根廷等第三世界国家。据统计，国外 100m 以上高坝共计 712 座，其中高混凝土坝约占一半。世界上高于 200m 的高混凝土坝约 32 座，部分高坝见表 1-1 所示。

1.1.2 国内高混凝土坝建设概况

我国从 20 世纪 50 年代开工兴建了一批 100m 级的高混凝土坝，代表性的工程有新安江、柘溪、三门峡等，随后葛洲坝、乌江渡、龙羊峡、凤滩、东江、隔河岩等一批大型工程相继兴建。在混凝土施工技术方面，20 世纪 50 年代、60 年代许多工作都存在“三边”



表 1-1

国外部分 200m 以上的高混凝土坝工程概况

名 称	国 家	坝 型	最大坝高 (m)	坝顶长 (m)	大坝体积 (万 m ³)	装机容量 (万 kW)	总库容 (亿 m ³)	建成 年份
胡佛	美国	重力拱坝	221.4	379	248.5	208	348.5	1936
莫瓦桑	瑞士	双曲拱坝	250.5	520	211	38.4	1.8	1958
大狄克逊	瑞士	重力坝	285	695	589	170	4	1962
迪兹	伊朗	薄壳拱坝	203	212	46	128	33.4	1962
巴克拉	印度	重力坝	226	518	413	135.4	96.2	1963
卢佐内	瑞士	双曲拱坝	208	530	133	41.8	0.88	1963
阿尔瓦罗 奥布雷贡	墨西哥	重力坝	260	88			0.13	1964 1980 加高
格兰峡	美国	重力拱坝	216.4	475.5	374.7	132	333	1966
阿耳门德拉	西班牙	拱坝	202	567	218.8	81	24.49	1970
德沃歇克	美国	重力坝	219	1002	493	106	42.8	1973
奇尔克伊	格鲁吉亚	双曲拱坝	232.5	333	136	100	278	1977
托克托古尔	吉尔吉斯斯坦	重力坝	215	292.5	335	120	195	1978
英古里	格鲁吉亚	双曲拱坝	271.5	728	396	164	11.1	1982
埃尔卡洪	洪都拉斯	双曲拱坝	234	382	150	30	57	1985
萨扬舒申斯克	俄罗斯	重力拱坝	245	1066	908	640	313	1989
马尼克 (V)	加拿大	连拱坝	214	1314	225.5 (一期)	237.2	1418.5	1989
胡顿	格鲁吉亚	双曲拱坝	200.5	545	148	210	3.7	1991
卡伦 (I)	伊朗	双曲拱坝	200	380	119	200	31.4	1993
吉绍	印度	重力坝	236	680	950	3	18.1	1995
拉克瓦	印度	重力坝	204	454	287	30	5.8	1996
伯克	土耳其	双曲拱坝	201	270	74.5	51.45	4.27	1996
卡伦 (III)	伊朗	双曲拱坝	205	388	115	300	27.5	2001
德里内尔	土耳其	双曲拱坝	247	720	350	67	16.69	2004
卡伦 (IV)	伊朗	重力拱坝	222	574.5	240	100	21.9	2006

现象,多采用半机械化工作,施工不能成配套,效率较低。进入 20 世纪 70 年代以后,我国积极吸收国外先进技术,一批新设备、新技术、新工艺、新材料广泛在工程上使用,施工生产水平逐步提高。

进入 20 世纪 90 年代以后,中国水利水电建设继续高速发展,有五强溪、李家峡、二滩等代表性工程,其中二滩拱坝(高 240m)的投入运行,为特高拱坝的建设积累了经验。世纪之交三峡工程的开工建设标志着我国高混凝土坝建设又迈上了一个新台阶。

跨入 21 世纪之后,一批 300m 级的混凝土高拱坝相继开工建设,如 305m 高的锦屏一级拱坝、292m 高的小湾拱坝、278m 高的溪洛渡拱坝等。与此同时,碾压混凝土高坝的



建设也在蓬勃发展,如192m高的龙滩、195.5m高的光照、160m高的金安桥等。我国部分已建和在建高混凝土坝工程概况如表1-2所示。

表 1-2 我国部分已建和在建混凝土坝工程概况

名 称	所在省份	河 流	坝 型	坝高 (m)	坝顶长 (m)	大坝体积 (万 m ³)	装机容量 (万 kW)	总库容 (亿 m ³)	建成 年份
三门峡	河南	黄河	重力坝	106	713	163	25	103.1	1960
新安江	浙江	新安江	宽缝重力坝	105	463	138	66.2	220	1960
柘溪	湖南	资水	单支墩大头坝	104	330	66	44.7	35.7	1962
刘家峡	甘肃	黄河	重力坝	147	204	76	122.5	61.2	1969
黄龙滩	湖北	堵河	重力坝	107	371	98	15	11.8	1974
凤滩	湖南	酉水	空腹重力坝	112.5	488	108	40	17.2	1978
湖南镇	浙江	乌溪江	梯形支墩坝	129	425	135	17	20.1	1980
潘家口	河北	滦河	宽缝重力坝	107.5	1024	262	36	29.3	1985
乌江渡	贵州	乌江	拱形重力坝	165	368	193	63	23	1982
东江	湖南	耒水	双曲拱坝	157	438	95	50	81.2	1988
白山	吉林	第二松花江	重力拱坝	149.5	664	163	150	65.1	1989
紧水滩	浙江	瓯江大溪	双曲拱坝	102	350.6	53	30	13.9	1991
龙羊峡	青海	黄河	重力拱坝	178	396	154	128	265	1993
安康	陕西	双江	重力坝	128	485	260	80	25.8	1993
东风	贵州	乌江	双曲拱坝	162	259.4	42.6	51	10.3	1994
水口	福建	闽江	重力坝	101	783	180	140	29.7	1995
隔河岩	湖北	清江	重力斜拱坝	151	653	232	120	36.5	1995
漫湾	云南	澜沧江	重力坝	132	418	240	125	9.2	1995
岩滩	广西	红水河	重力坝	110	525	320	121	33.5	1995
宝珠寺	四川	白龙江	重力坝	132	524	232	70	27.6	1997
李家峡	青海	黄河	双曲拱坝	165	458	234	200	16.5	1997
二滩	四川	雅砻江	双曲拱坝	240	769.4	390	330	58	1999
三峡	湖北	长江	重力坝	181	2309.5	1600	1820	614.5	2006
景洪	云南	澜沧江	碾压混凝土 重力坝	108	704.5	360	175	11.39	2008
拉西瓦	青海	黄河	双曲拱坝	250	475	258	420	10.79	在建
小湾	云南	澜沧江	双曲拱坝	292	960	881	420	150	在建
溪洛渡	四川	长江	双曲拱坝	278	698.09	665	1260	126.7	在建
龙滩	广西	红水河	碾压混凝土 重力坝	192	736	1532	1420	162	在建
金安桥	云南	金沙江	碾压混凝土 重力坝	160	640	366	240	9.13	在建
向家坝	四川	金沙江	重力坝	162	909.26	800	600	51.63	在建
锦屏一级	四川	雅砻江	双曲拱坝	305	552.23	478.3	360	77.6	在建



1.2 高混凝土坝施工特征分析

在高混凝土坝施工过程中,除了进行大量的坝体混凝土浇筑外,还要同步进行固结灌浆、接缝灌浆、帷幕灌浆和排水施工等一系列工序作业,彼此间协调活动是保证均匀快速上升的关键。大坝的浇筑上升,受到其本身的结构型式、工艺技术、组织方式及混凝土供应、浇筑设备能力和效率的影响与制约,以及施工过程中不确定性的自然条件、地质状况等因素的影响,高混凝土坝的施工特征可以归纳为以下几个方面:

(1) 混凝土浇筑方量大。高混凝土坝的浇筑方量通常都有几百万(如锦屏一级高拱坝为 478.3 万 m^3),甚至上千万方(如三峡混凝土重力坝为 1600 万 m^3),大体积混凝土浇筑需要动态地做好原材料的开采、加工、运输和储备工作。

(2) 施工工期长。从基础混凝土开始浇筑到工程基本建成蓄水一般需要经历 3~5 年或更长时间才能完成。

(3) 施工高峰期混凝土浇筑强度大。坝体混凝土浇筑过程,由于受地质、地形、气候以及坝体浇筑位置等影响,在不同施工阶段,坝体的混凝土浇筑强度不同,高峰期的混凝土浇筑强度往往是平均值的两倍左右(三峡大坝最大浇筑强度超过 55 万 $\text{m}^3/\text{月}$),因此,需要加大并保证高峰期的混凝土供应和机械浇筑能力,才能满足高强度的混凝土浇筑要求。国内、外一些著名混凝土坝的浇筑强度如表 1-3 所示。

表 1-3 国内外一些著名混凝土坝浇筑强度

名 称	坝 型	坝 高 (m)	混凝土总量 (万 m^3)	最高年强度 (万 m^3)	最高月强度 (万 m^3)	最高日强度 (万 m^3)
三峡	重力坝	181	2800	548	55.35	2.2
葛洲坝	闸坝	53.8	1042	203	25	1.88
二滩	双曲拱坝	240	433.5	221.66	24.5	1.334
刘家峡	重力坝	147	320	57	10	0.62
三门峡	重力坝	106	210	103.8	12.2	0.79
伊泰普	支墩坝	196	1230	304	34.8	1.39
大古力	重力坝	168	809	270	37.8	1.57
古比雪夫	闸坝	45	734	313	38.9	1.9
德沃歇克	重力坝	219	512	221	18.4	1.08
克拉斯诺雅尔克	重力坝	124	580	136	15.6	0.74
格兰峡	重力坝	216	422	157	15.8	0.635
胡佛	重力坝	221.4	336	120	19.8	0.75

(4) 混凝土施工季节性强。在高混凝土坝浇筑施工过程中,坝体需要承担挡水和排水任务,特别是在汛期,还要承担重要的泄洪任务,由于汛 come 来流往往不可确知,给进度安排和孔洞数量设计及布置带来相当大的困难,因此,做好可靠的预测及合理的进度安排是非常重要的,尤其是要加强施工期的进度控制,确保节点目标的顺利实现。

(5) 施工干扰大。作业空间狭小、工序错综复杂,在施工过程中相互影响和制约。因



此要做好有效的施工组织安排,当参建单位多时,更要加强彼此间的作业协调活动,以确保实现坝体整体均匀、快速上升的目的。

(6) 影响因素众多。地质、地形、气候、机械、供料、温度控制、淡水处理以及坝块的浇筑规则和控制条件等众多因素都将影响坝体混凝土的浇筑及其上升速度,需要综合考虑各因素对坝体混凝土浇筑施工的影响。

(7) 施工质量和施工安全要求高。高混凝土坝的工程质量不仅关系工程技术和经济问题,还是一个政治社会问题,关系着国家百年大计,必须严格按照高标准、高质量的要求,做好施工组织管理和施工控制,避免工程质量事故,建立工程质量管理、安全施工责任制,实现高质量安全施工的目标。

1.3 高混凝土坝施工仿真研究的发展

1.3.1 高混凝土坝施工仿真研究的必要性

高混凝土坝通常位于地质条件复杂的高山峡谷地区,地形陡峻、河谷深切、地应力高,且空间资源有限,不利于施工场地的布置和交通运输,因此高混凝土坝的施工进程和施工质量往往直接影响着工程的建设工期和安危。然而,高混凝土坝施工是一个非常复杂的随机动态过程,是一个半结构化问题,难以通过构建简单的数学解析模型来分析研究,传统的方法凭经验用类比的手段按月升高若干浇筑层和混凝土浇筑强度等指标来控制施工进度,这种方法不仅耗时、费力,而且缺乏系统的定量计算分析,在论证施工各阶段的筑坝进度以及各坝段升高过程是否能满足大坝施工各方面的要求时总感觉论据不足。因此,有必要采取科学的理论方法和先进的技术手段,综合考虑影响高混凝土坝施工进度的各方面因素,合理安排坝块浇筑顺序,对多个高混凝土坝施工方案和机械配置进行快速的比选和优化。通过系统仿真技术来分析研究这类问题具有相当的优越性。

随着计算机和系统仿真技术的迅速发展,尤其是系统仿真技术在复杂系统运行中的推广应用,使我们有可能在计算机上实现对高混凝土坝施工动态过程的仿真试验,预测不同施工方案下高混凝土坝施工进程的各项定量指标,这将为制定合理的高混凝土坝施工进度计划提供科学的可靠的决策依据。施工仿真能够适应大数据量的复杂仿真,易于通过参数变更和方案修改来进行动态过程研究,通过仿真减轻了技术人员的计算强度,缩短了施工方案的制定时间,提高了施工方案和机械配套方案定量指标的精度,对工程方案的设计与优化起到一定的指导作用。施工仿真技术在我国的两滩、三峡、东风、水口、龙滩、天生桥、大柳树、桃林口、小湾、拉西瓦、糯扎渡等工程中先后进行了应用研究,渐渐成为大型水电工程建设必不可少的辅助决策手段。

高混凝土坝在施工过程中存在很强的随机性和不确定性,当前的高混凝土坝施工仿真研究主要针对高混凝土坝施工的设计阶段,而对施工过程应用的研究比较少,如何使施工仿真研究成果为高混凝土坝建设管理服务,高混凝土坝施工仿真与实时控制研究显得尤为重要。结合高混凝土坝施工的关键技术问题,研究面向施工现场的高混凝土坝施工仿真与实时控制,实时采集工程数据,通过仿真提供信息数据,为大坝施工管理服务,并提出高混凝土坝高强度连续施工的措施和建议,配合建设期的施工设计与建设管理工作,减少损



失, 节省投资, 社会效益和经济效益十分显著。

高混凝土坝施工仿真的研究, 有利于解决当前复杂约束条件下高混凝土坝在工程设计和建设管理中存在的一些工程科学问题。我国水利水电工程建设正处于高峰期, 有很多在建或待建的大型高混凝土坝工程, 由于这些工程的复杂性, 以及不确定性、经验性强和半结构化等特征, 开展复杂约束条件下高混凝土坝施工仿真与实时控制的理论方法与应用研究, 具有重要的理论意义和现实意义。

1.3.2 高混凝土坝施工仿真研究发展与现状

在国外, 将计算机仿真技术应用于混凝土工程施工过程始于 20 世纪 70 年代初。1973 年第 11 届国际大坝会议上, Jurencha 和 Widmann 结合混凝土重力坝施工提出了混凝土浇筑过程模拟, 并应用于奥地利施立格 (Schlegeis) 坝的建设中。Halpin 将计算机模拟与网络计划技术结合起来, 对建筑工程混凝土运输进行模拟, 并逐渐发展形成了仿真系统软件 CYCLONE。Hajjar 和 AbouRizk 提出了施工仿真统一建模理论方法。Kamat 和 Martinez 通过记录仿真过程中每个实体各时段的动作状态, 实现了施工运输过程的三维动态可视化。美国 MIT、Stanford、Purdue 等大学, 加拿大 Albert 大学, 以及日本、新加坡等多所大学和科研机构开展了有关施工过程的仿真实论方法与应用研究。最近, 针对复杂施工过程的随机性、不确定性和经验性强等特征, 加拿大 Albert 大学 Mohamed 和 AbouRizk 结合智能方法提出了施工过程智能仿真建模的思路。由于目前国外在建和拟建的高混凝土坝较少, 有关施工过程动态仿真的研究主要集中在土木建筑和公路工程设计与管理中, 有关水利水电工程高混凝土坝施工仿真方面的研究成果还很少。

我国在 20 世纪 80 年代, 天津大学与成都勘测设计研究院密切合作, 对二滩水电站双曲拱坝混凝土分块柱状浇筑采用计算机模拟, 通过对多方案的模拟计算检验, 计算成果符合一般施工规律。此后施工仿真在水利水电工程高混凝土坝施工组织研究中得到了较为广泛的应用, 如三峡、龙滩、小湾、拉西瓦、锦屏一级、溪洛渡、向家坝等水利水电工程都采用了施工仿真来辅助混凝土大坝施工设计, 为施工机械设备的合理配套和施工进度合理安排提供了可靠的定量分析依据, 为合理安排施工顺序、优化施工方案和工期论证提供了技术支持, 节省了投资, 带来了显著的经济效益和社会效益。天津大学、武汉大学、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、北京勘测设计研究院和华东勘测设计研究院等单位在这方面都取得了相关的研究成果。

近年来, 国内主要的研究成果反映在混凝土大坝施工仿真的建模方法与可视化等方面, 天津大学钟登华提出了基于 GIS 的混凝土坝施工三维动态可视化仿真方法, 系统地论述了基于 GIS 的工程施工三维动态可视化仿真实论与方法, 为实现仿真过程的可视化开辟了新的途径; 申明亮提出了基于 OpenGL 的混凝土坝施工三维动态图形仿真; 翁永红将仿真结果与其他软件如 office 系列、进度软件 (如 P3)、图形处理软件的数据共享, 并且其接口将仿真形象进度与传统进度方式控制性进度联结起来; 钟登华和冯志军对大型水利工程施工交通运输系统进行了仿真与可视化研究, 以可视化动画实时展现了场内施工交通运输过程; 练继亮在其博士论文中研究了可视化技术辅助仿真模型的 V&V 评价方法, 将可视化技术引入到仿真模型有效性研究中; 周科志以 3DS MAX 和 Director 8.0 为



工具,分析了施工仿真中可视化技术应用的制作流程;练继亮研究了模型参数的分类及其确定方法,并进行了模型参数的敏感性区间分析;巫世晶探讨了 GPSS 仿真语言在缆机浇筑混凝土系统中的应用;杨学红通过应用赋时 Petri 网的基本理论对施工系统进行仿真建模,分析了大坝混凝土的施工过程;喻宏昌分析了影响混凝土浇筑系统的因素之间的关系,建立了浇筑系统的 SD 模型,并对该系统进行了仿真;李喆研究了基于充裕度规则的坝体浇筑机械布置仿真;丁世来和胡志根提出了浇筑块排序方法优劣的评价指标,采用熵权与决策者的主观权重相结合的方法,建立了不同排序方法的评价模型。

为了将施工仿真技术应用于高混凝土坝施工现场的建设管理,确保工程进度按计划顺利实施,钟登华在高混凝土坝施工仿真的基础上结合实时控制的方法,提出了基于实时仿真的高混凝土坝施工进度预测与分析方法,建立了高混凝土坝实际可行的进度控制流程,给出了高混凝土坝施工进度动态调整与控制的实现方法,以适应高混凝土坝施工过程中存在的随机性与不确定性,并结合具体工程实例进行了应用,为大坝的现场施工与管理提供了技术支持。

纵观国内外在高混凝土坝施工仿真理论与实践方面的发展现状,施工仿真技术为高混凝土坝的施工组织设计带来了新的手段,它缩短了施工方案的制定时间,提高了施工方案和机械配套方案定量指标的精度,对工程方案的设计与优化起到一定的指导作用,并在我国的二滩、三峡等工程中先后进行了应用研究,成为大型水利建设必不可少的辅助决策手段。但是我们认为高混凝土坝施工仿真还存在以下值得提高的两个方面:

(1) 在理论方法上,需要进一步在仿真建模与模型可信度分析、仿真参数的选取与分析、仿真结果的数理统计、仿真的过程与成果表达等方面进行深入研究,提高高混凝土坝施工仿真的理论水平。

1) 在仿真理论方法上,需要形成一套得到学术界和工程界共同认同的仿真实论方法,用以指导实际工程的仿真建模活动。仿真模型必须具有相当的友好及适应性,以便于用户操作和应用;同时仿真模型又必须具备足够的可信度,以便于为决策者服务,这就需要在仿真模型的可信度评价和仿真成果的表达与解释上作深入的研究。

2) 仿真建模缺乏灵活性,传统的仿真建模方法难以建立通用性强的仿真模型,针对不同的工程需要开发不同的仿真模型,重复工作量大,系统难以扩展和维护。

3) 高混凝土坝施工过程经验性强,需要大量的专家经验知识,仿真系统的建模过程复杂,需要懂得仿真理论技术,还要有专业的工程知识,难以被工程人员理解掌握,限制了施工仿真技术成为高混凝土坝施工管理的有效手段。

4) 仿真参数是仿真系统的重要组成部分,也是模型试验方案设计的数据基础,高混凝土坝施工仿真参数来源复杂、影响因素众多,长期以来缺乏相应的理论方法作为指导,严重地影响模型参数的有效性,迫切需要建立一套能够用于指导模型参数设计的理论方法,以提高模型参数的有效性。

5) 一次的仿真计算结果仅是对仿真系统总体的一次抽样,并不能说明高混凝土坝的施工系统特性,为使仿真结果有意义,必须使用适当的统计分析方法来设计仿真实验和分析仿真结果,这样的结论才具有一般性。而在理论方法上,对于施工仿真概率统计基础的研究还不够。

6) 系统的仿真过程和成果表达不够直观, 仿真过程交互性不强, 不易于被工程技术人员所接受。工程人员面对繁琐的系统操作界面和复杂的仿真结果数据, 往往不知从何下手, 因而系统不能得到很好的利用。

(2) 在工程实践上, 要将施工仿真技术应用于高混凝土坝的建设管理中, 从而为高混凝土坝施工提供有效的技术支持, 这需要多方面的共同努力, 其中包括业主单位、设计单位、监理单位、施工单位以及科研单位等的努力。

1) 对业主单位, 首先需要树立科学的施工管理观念, 重视施工仿真技术对于指导实际工程施工的重要性, 以确保工程质量、进度和投资得到有效控制, 其次需要建立有效的管理机构 and 责任制, 实施施工进度的全过程管理监控, 切实保证高混凝土坝施工仿真的有效实施。

2) 对科研单位, 需要深入研究高混凝土坝施工仿真与实时控制的理论方法, 提高施工仿真结果的可信度, 进一步开发和完善高混凝土坝施工仿真系统, 降低系统操作难度, 提高系统建模与使用的灵活性, 改进仿真过程和仿真结果表达的直观性, 使得仿真系统易于被工程人员所接受和使用。

3) 对设计监理单位, 作为施工仿真技术实践应用的一个重要环节, 设计单位比科研单位更了解工程实践, 而比建设单位更了解施工仿真技术, 由于工程可研阶段的应用, 设计单位对于施工仿真技术较为熟悉, 对于施工仿真技术的优点和不足也有着较为清楚的认识。因此, 需要设计监理单位辅助完善仿真系统的工程实践性, 并有效地推动施工仿真技术在施工现场的应用。

4) 对施工单位, 需要配合科研单位做好系统需求分析, 提出实际施工进度管理与控制的不足, 并积极推动仿真系统的应用推广, 切实地将高混凝土坝施工仿真技术作为一种有效的施工辅助手段, 通过系统采集并管理实际工程数据, 进行进度预测和分析, 依此调整施工措施, 安排月进度计划, 提交业主审核。对于施工仿真系统实际应用中存在的不足, 应该及时反馈, 以便得到有效完善, 使得仿真系统在工程的施工全过程中起到有效的指导作用。

第2章 高混凝土坝高强度连续施工 面临的关键技术问题

高混凝土坝施工在水利水电工程建设中占有重要地位,其施工质量和施工速度直接影响到工程的安全和建设工期。由于高混凝土坝施工过程受自然环境、结构形式、工艺技术、组织方式、浇筑机械与建筑材料等诸多因素的影响,使得计划安排、进度控制和资源优化配置十分复杂;同时,高混凝土坝施工时间跨度大、高峰期浇筑强度高,在浇筑施工过程中还要考虑导流、度汛、坝体挡水及蓄水发电等阶段性目标要求,给施工组织、计划安排及进度控制带来相当大的困难和潜在风险。在实际水利水电工程中,为追求提前发电效益,又往往要求加快大坝施工进度,缩短施工工期。因此势必带来高强度混凝土浇筑与大坝连续施工等工程科学问题,并给高混凝土坝施工优化设计和动态实时控制提出了更高的要求。

2.1 高混凝土坝施工组织与进度控制

水利水电工程施工的特点表现在以下几个方面:第一,水利水电工程施工受水文、气象、地形、地质等限制,并且众多的随机因素都可能会对施工造成影响;第二,大型水利水电工程施工工程量巨大,工期长,必须采用配套大容量的施工设备,高度机械化施工,同时采用现代施工技术和科学的施工管理方法,因此需要花费大量的资金、材料和劳动力等资源;第三,多数水利水电工程位于深山峡谷中,施工场地狭窄,道路拥挤,给工程的快速施工带来一定的影响;第四,工程施工具有很强的季节性,须充分利用枯水期施工,要求有一定的施工强度和温度控制措施。因此,水利水电工程施工组织设计工作就显得尤为重要。

工程项目进度控制是指在项目目标实施的过程中,为使工程建设的实际进度与计划进度要求相一致,使工程项目按照预定的时间完成及交付使用而开展的控制活动。在工程建设过程中,实际进度往往不能按计划进度实现。由于高混凝土坝施工具有庞大、复杂、周期长、相关单位多等特点,使工程施工进度无论在主观或客观上都受到诸多因素的制约,导致实际进度与计划进度之间常常存在一定的偏差,有时候甚至会出现相当程度的滞后。

进行高混凝土坝施工组织和进度控制,在于严格遵守基本建设程序和施工技术要求,科学安排施工顺序,合理配置资源,充分利用机械设备,力求连续、均衡地施工,提高设备的利用率,在确保工程质量和施工安全的前提下,加快施工速度,实现连续快速施工,严格控制施工进度,按期完成工程项目。

2.1.1 影响施工进度的主要因素

高混凝土坝施工是一个复杂的系统,其施工过程将受到系统内、外环境诸多要素的影