

大体积混凝土

水利水电科学研究院结构材料研究所

水利电力出版社

149562

TU528
1215

大体积混凝土

水利水电科学研究院结构材料研究所

水利电力出版社

内 容 简 介

本书综合论述了有关大体积混凝土的研究成果和实践经验。内容包括：混凝土原材料、混凝土配合比设计，新拌混凝土、硬化混凝土的力学变形性能，混凝土热物理性能，特种混凝土，碾压混凝土，混凝土温度控制与防止裂缝，混凝土耐久性。其重点是防止大体积混凝土出现裂缝和提高大体积混凝土的耐久性。本书对从事大体积混凝土的设计、施工、科研人员有实用价值。

大 体 积 混 凝 土

水利水电科学研究院结构材料研究所

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20印张 451千字

1990年1月第一版 1990年1月北京第一次印刷

印数0001—3370册

ISBN 7-120-00961-3/TV·315

定价13.30元

前 言

本书共十三章，主要论述了大体积混凝土的特性和工艺。内容包括：混凝土的组成材料，配合比设计，新拌混凝土，混凝土的强度、体积变形、弹性、塑性和徐变，混凝土的热物理性能，混凝土的耐久性，混凝土质量控制和检测，大体积混凝土裂缝的防止和处理，碾压混凝土和特种混凝土。

本书各章的编写人是：第一章——吕宏基；第二章、第十三章第一节~第八节——杨德福；第三章、第九章（第一节~第四节，第六~第七节）——关英俊；第四章、第十三章第九节——李金玉；第五章、第八章、第九章第五节、第十章、第十二章——姜福田；第六章、第七章——黄国兴、惠荣炎；第十一章——丁宝瑛。本书由原水利电力部科学技术情报研究所吕宏基审核。

编 者

1989年3月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 混凝土坝的发展	2
第三节 对大体积混凝土的研究	5
第二章 混凝土组成材料	11
第一节 水泥	11
第二节 混合材料	24
第三节 混凝土外加剂	38
第四节 骨料	51
第五节 混凝土拌和水和养护水	67
参考文献	69
第三章 混凝土配合比设计	70
第一节 配合比设计原则与基本资料	70
第二节 配合比设计方法	71
第三节 配合比设计算例	75
第四节 国内外主要大坝工程采用的混凝土配合比	80
参考文献	81
第四章 新拌混凝土	82
第一节 概述	82
第二节 新拌混凝土的工作性	82
第三节 新拌混凝土的凝结时间	93
第四节 新拌混凝土的含气量	95
参考文献	98
第五章 混凝土强度	99
第一节 混凝土抗压强度	99
第二节 混凝土轴向抗拉强度	108
第三节 混凝土弯曲抗拉强度	114
第四节 混凝土劈裂抗拉强度	117
第五节 混凝土多轴强度	121
参考文献	127
第六章 混凝土的体积变形	128
第一节 凝缩	128
第二节 自生体积变形	128

第三节	温度变形	130
第四节	干缩变形	130
第五节	湿胀	137
第六节	碳化收缩	138
参考文献		139
第七章	混凝土的弹性、塑性和徐变	140
第一节	混凝土的应力~应变关系	140
第二节	混凝土的弹性模量	141
第三节	混凝土徐变的基本概念及徐变机理	147
第四节	混凝土徐变的影响因素	150
第五节	常荷载作用下的徐变	158
第六节	徐变计算理论	161
第七节	徐变恢复	163
第八节	混凝土的应力松弛	165
参考文献		169
第八章	混凝土热物理性能	171
第一节	概述	171
第二节	混凝土导热系数	171
第三节	混凝土导温系数	174
第四节	混凝土比热	176
第五节	混凝土线膨胀系数	178
第六节	混凝土绝热温升	180
第七节	混凝土热物理性能的参考值	184
参考文献		185
第九章	混凝土的耐久性	186
第一节	概述	186
第二节	混凝土的抗冻融性	187
第三节	混凝土的抗渗性	194
第四节	环境水对混凝土的侵蚀	198
第五节	混凝土抗泥沙磨损和抗空蚀性能	207
第六节	混凝土碱-骨料反应	214
第七节	混凝土碳化与钢筋锈蚀	218
第十章	混凝土质量控制与检测	223
第一节	混凝土生产质量控制内容	223
第二节	混凝土质量控制中的数理统计理论	225
第三节	原材料的检测与控制	228
第四节	新拌混凝土质量检测与控制	232
第五节	现场混凝土生产质量评定与验收	236
第六节	混凝土质量实地检验	237
参考文献		243

第十一章 大体积混凝土裂缝的防止和处理	244
第一节 概述	244
第二节 混凝土的力学和热物理性能与防止裂缝	247
第三节 防止混凝土裂缝的结构措施	255
第四节 防止混凝土裂缝的施工措施	258
第五节 混凝土裂缝的修补	266
参考文献	269
第十二章 碾压混凝土	270
第一节 碾压混凝土筑坝技术的发展	270
第二节 碾压混凝土稠度及其影响因素	273
第三节 碾压混凝土配合比设计方法	278
第四节 硬化碾压混凝土的性能	281
参考文献	288
第十三章 特种混凝土	289
第一节 泵送混凝土	289
第二节 水下浇筑混凝土	292
第三节 高强度混凝土	293
第四节 膨胀混凝土	296
第五节 喷射混凝土	299
第六节 预填骨料混凝土	303
第七节 纤维混凝土	304
第八节 聚合物混凝土	305
第九节 防渗墙混凝土	307
参考文献	311

第一章 绪 论

第一节 概 述

大体积混凝土的定义,一般认为是体积很大的现场浇筑的混凝土,其尺度大到必须采取措施以对付水泥水化发出的热量及伴随发生的体积变化,尽量减少温度裂缝。直观一点讲,块体最小尺度大于2 m左右的混凝土,就可以认为是大体积混凝土。当然这不是一个绝对界限值。混凝土坝是典型的大体积混凝土。其他如闸、船坞、港口建筑、大型基础、核电站压力容器和安全壳等结构的混凝土,一般都可属于大体积混凝土。不同类型的大体积混凝土结构,由于所处的工作环境不同,对混凝土的要求也不完全相同,但各类大体积混凝土的共同要求是控制温度,减少裂缝。核电站压力容器和安全壳的混凝土,对防止出现裂缝的要求尤为严格。

大坝混凝土在静水和流动水作用的条件下工作,因此也称水工混凝土或大体积水工混凝土。对大坝混凝土的要求,除控制温度、防止裂缝外,还有耐久性的要求。大体积混凝土对强度的要求,一般是不高的,特别是对依靠混凝土的重量保持稳定的重力坝。但对坝体较薄的坝,如拱坝和支墩坝,混凝土的工作应力较高,也要求混凝土具有较高的抗压强度。对坝体某些部位的混凝土,如高速水流的过水面,容易产生空蚀破坏;含沙水流的过水面,容易受泥沙磨损,要求混凝土具有更高的抗压强度。在空蚀、磨损特别严重的部位,有时仅依靠提高混凝土抗压强度,还不能抵抗破坏作用,需要采用特种混凝土或专门的镶护材料。虽然大坝混凝土受到的压应力一般不高,但由于温度变化产生的拉应力却很高。而混凝土的抗拉强度只有抗压强度的1/10,甚至更小。这就是大体积混凝土防止出现裂缝的困难所在,即不能依靠提高抗压强度来防止开裂;何况提高抗压强度必需增加水泥用量,从而又增大了温度应力。

混凝土的耐久性的含义很广。总而言之,混凝土耐久性是抵抗大气和水的物理化学腐蚀、水流的冲蚀及其他作用引起的破坏的能力。耐久的混凝土当暴露在它工作的环境中时,能长期保持混凝土原来的形状和性能,使结构物正常运用。据国内外工程的调查,闸、坝在运用一段时间后,绝大多数都出现由于各种原因引起的不同程度的破坏。混凝土表面因混凝土不密实或存在各种缝隙(施工缝、冷缝、裂缝)而渗水形成的结白霜现象是经常出现的。在水位变动区的混凝土,因冻融循环或干湿循环的大气作用而造成的破坏是严重的。在过水部位,如溢洪道、泄水隧洞、消力设施的混凝土,几乎没有一个工程不发生空蚀或磨损。沿海地区的混凝土建筑物常因钢筋锈蚀而遭破坏。

第二节 混凝土坝的发展

一、国外混凝土坝的发展

国外现代的大体积混凝土坝的筑坝技术, 是本世纪30年代开始发展起来的。1900年前, 世界上建成的混凝土坝很少, 而且都是低坝, 且在施工中对混凝土没有任何控制。1887~1890年, 美国在加利福尼亚州建49m高的水晶泉 (Crystal Spring) 坝时, 第一次限制最大加水量。1900~1930年, 为灌溉、发电、供水等目的修建的混凝土坝日渐增多, 建了几座高100m左右的混凝土坝, 开始用坍落度测稠度, 塑制试件测定抗压强度。但对加水量仍无严格控制, 拌制的混凝土仍然很稀。那时, 阿勃拉姆斯 (Duff Abrams) 等在1916~1926年间已对拌和水量与强度的关系做了大量研究工作, 著名的水灰比定义则已发表多年。

1930年后, 工程师们开始注意大坝混凝土的裂缝问题。1933年, 美国开始建高221m的胡佛坝 (Hoover, 原名鲍尔德坝——Boulder), 对大体积混凝土进行了全面的研究。胡佛坝所采用的大体积混凝土技术, 很多至今仍在沿用。自建胡佛坝以来的半个世纪, 大体积混凝土技术又有了很大发展。其中主要的有: 在大体积混凝土中掺用混合材料、引气剂、减水剂; 提高混凝土耐久性; 采用更有效的温度控制措施; 采用不分纵缝的通仓浇筑法; 发展强力的平仓振捣设备; 发展碾压混凝土; 发展特种混凝土, 如钢纤维混凝土、聚合物浸渍混凝土等, 用在有特殊要求的部位, 或修补受破坏的混凝土。

据国际大坝委员会的登记, 至1982年, 全世界已建混凝土坝近6000座。其中低于60m的坝占86.1%, 高于100m的坝占3.5% (210座), 高于200m的坝19座, 见表1-1、1-2; 体积大于500万m³的坝有15座。

表 1-1 世界上已建成的混凝土坝统计 (至1982年)

坝 型	高15~30m	高30~60m	高60~100m	高100~150m	高150~200m	高>200m	合 计
重力坝	2222	1294	361	65	8	4	3954
拱 坝	775	428	204	83	24	14	1528
支墩坝	175	110	40	12			337
连拱坝	74	48	13			1	136
小 计	3246	1880	618	160	32	19	5955

世界上第一座高于100m的混凝土坝是美国1915年在爱达荷州建成的箭石坝 (Arrow Rock, 坝高107m)。第一座高于200m的混凝土坝是美国1936年建成的胡佛坝。

1965年, 意大利建造阿尔卑惹拉 (Alpe Gera) 重力坝时, 发展了一套与传统的胡佛坝采用的柱状浇筑法完全不同的施工法, 即全坝面不分纵缝与横缝, 连续浇筑。浇筑层厚70cm, 浇筑12h后, 用切缝机按15m间距切成横缝。上游面用钢板防渗。坝高175m, 体 积

表 1-2

国外已建成的高200米以上的混凝土坝

坝 名	国 家	河 流	坝 型	最大坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝体积 ($10^3 m^3$)	总库容 ($10^8 m^3$)	水电站装 机 容 量 (MW)	完成年份
大狄克逊	瑞 士	狄 克 逊	重 力 坝	285	695	5960	400	1300	1961
英 古 里	苏 联	英 古 里	双曲拱坝	272	680	3960	1100	1300	1980
瓦 依 昂	意 大 利	瓦 依 昂	双曲拱坝	262	190	350	170		1961
萨扬舒申斯克	苏 联	叶 尼 塞	重力拱坝	245	1066	9075	31300	6400	1980
莫 瓦 桑	瑞 士	巴格纳斯	双曲拱坝	237	530	2030	180		1957
契 尔 克	苏 联	苏 克 拉	双曲拱坝	233	333	1358	2780	1000	1978
巴 克 拉	印 度	萨特累季	重 力 坝	226	518	4130	9870	1050	1963
胡 佛	美 国	科罗拉多	重力拱坝	221	379	3360	36700	1345	1936
康 脱 拉	瑞 士	佛萨斯卡	双曲拱坝	220	380	660	86		1965
姆拉丁其	南斯拉夫	比 瓦	双曲拱坝	220	288	742	880		1976
德伏歇克	美 国	清水河北支	重 力 坝	210	1002	4931	4260	1060	1973
格 兰 峡	美 国	科罗拉多	重力拱坝	216	475	3747	33300	1141	1966
托克托古尔	苏 联	纳 伦	重 力 坝	215	293	3345	19500	1248	1978
马尼克第五	加 拿 大	马尼夸根	连 拱 坝	214	1314	2225	141900	1292	1968
台 兹	伊 朗	台 兹	双曲拱坝	213	212	459	3340		1962
卢 佐 纳	瑞 士	卢 佐 纳	双曲拱坝	208	530	1330	87		1963
阿尔门德拉	西 班 牙	托 梅 斯	双曲拱坝	202	567	2186	2650	810	1970
科尔布赖恩	奥 地 利	马 尔 他	双曲拱坝	200	626	1580	205		1977
卡 伦	伊 朗	卡 伦	双曲拱坝	200	380	1570	3005	1000	1975

180万 m^3 。经21个月完成。

70年代开始,日、美、英等国对碾压混凝土筑坝技术进行了研究。日本于1976年首先用碾压混凝土建造大川坝的围堰,随后又用此法建造了岛地川、玉川等坝。美国也用碾压混凝土建造了9座混凝土坝。至1987年,全世界碾压混凝土坝已有近20座,最高者达100m(日本玉川坝)。

二、我国混凝土坝的发展

我国建造大型混凝土坝是从50年代初治淮工程中开始的。1954年,在安徽省淠河上建成佛子岭连拱坝,坝高74.4m。1956年又在史河上建成高88m的梅山连拱坝。1960年建成的新安江坝是我国自己设计建造的第一座高100m以上的混凝土坝(高106m)。60年代以来,我国又建成高100m以上的混凝土坝11座(表1-3),施工中的有10座(表1-4)。据中国大坝委员会统计,至1987年,我国已建成各种型式的混凝土坝(高30m以上)113座(表1-5),已浇筑大坝混凝土7000余万 m^3 。我国还在设计更多的高坝,其中高于200m的混凝土坝有4座(表1-6)。

我国50年代初建的坝,规模虽不大,但在混凝土技术方面,借鉴国外经验,已重视配合比设计、采用节约水泥措施,并注意混凝土施工控制,保证了混凝土的质量。至50年代末,黄河上的三门峡坝施工期间,已采用现代施工机械,混凝土年浇筑量超过100万 m^3 。至80年代,长江上的葛洲坝施工期间,混凝土年浇筑量已达200万 m^3 。碾压混凝土筑坝技术已开始研究,并在工程中采用。

表 1-3

我国已建成的高于100m的混凝土坝

坝 名	河 流	所 在 省	坝 型	最大坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝体积 (10 ³ m ³)	总库容 (10 ⁸ m ³)	水电站 装机 (MW)	完成年份
乌江渡	乌 江	贵 州	重力拱坝	165	368	1932	2300	630	1982
白山	第二松花江	吉 林	重力拱坝	149.5	664	1630	6215	900	1984
刘家峡	黄 河	甘 肃	重力坝	147	204	760	610	1160	1969
湖南镇	乌溪江	浙 江	支墩坝	129	425	1150	2060	120	1979
云峰	鸭绿江	吉 林	宽缝重力坝	114	828	2740	3910	400/2	1965
风滩	西 水	湖 南	空腹重力拱坝	112.5	488	1075	1550	400	1978
潘家口	滦 河	河 北	宽缝重力坝	107.5	1040	2620	2930	420	1979
黄龙滩	堵 河	湖 北	重力坝	107	371	980	1180	150	1974
三门峡	黄 河	河 南	重力坝	106	713	1630	10310	250	1960
水丰	鸭绿江	辽 宁	重力坝	106	899	3400	14700	630/2	1941
新安江	新安江	浙 江	宽缝重力坝	105	465	1380	22000	662.5	1960
新丰江	新丰江	广 东	支墩坝	105	440	910	1390	29.2	1961
柘溪	资 水	湖 南	支墩坝	104	330	650	3570	447.5	1961

表 1-4

我国施工中的高于100m的混凝土坝

坝 名	河 流	所 在 省	坝 型	最大坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝体积 (10 ³ m ³)	总库容 (10 ⁸ m ³)	水电站 装机 (MW)	开工年份
龙羊峡	黄 河	青 海	重力坝	177	1223	3190	26800	1280	1977
东风	乌 江	贵 州	双曲拱坝	168	263	1090	970	510	1985
东江	东 水	湖 南	双曲拱坝	157	438	1460	9150	500	1978
宝珠寺	白龙江	四 川	重力坝	132	524	2400	2550	640	1985
漫湾	澜沧江	云 南	重力坝	126	449	2090	1010	1250	1986
故县	洛 河	河 南	重力坝	121	311	1560	1200	60	1978
安康	汉 江	陕 西	重力坝	120	540	3650	3200	800	1978
岩滩	红水河	广 西	重力坝	111	536	3200	3340	1100	1983
紧水滩	瓯 江	浙 江	双曲拱坝	102	355	830	1390	300	1980
水口	闽 江	福 建	重力坝	100	794	3220	2600	1400	1985

表 1-5

我国已建成高30m以上的混凝土闸、坝

坝 型	高30~70m	高70~100m	高>100m	合 计
重 力 坝	40	11	7	58
支 墩 坝	9	4	3	16
拱 坝	21	10	3	34
闸	4			4
轻 型 坝	1			1
小 计	75	25	13	113

表 1-6

我国设计中的高于200m的混凝土坝

坝 名	河 流	所 在 省	坝 型	最大坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝体积 (10^3m^3)	总库容 (10^8m^3)	水电站 装机 (MW)	设计阶段
拉西瓦	黄 河	青 海	双曲拱坝	250	509	3790	1060	3720	可行性研究
二 滩	雅 龙 江	四 川	双曲拱坝	240	763	6550	6180	3000	初步设计 已批准
苟皮滩	乌 江	贵 州	重力拱坝	235	794	6100	5930	2000	可行性研究
龙 滩	红 水 河	广 西	重力坝或 重力拱坝	216	792	$\frac{10400}{2700}$	27280	$\frac{4000}{5000}$	初步设计

第三节 对大体积混凝土的研究

一、对水泥和混合材料的研究

对大体积混凝土所用水泥的研究，主要是研究水泥中的主要矿物成分对水泥和混凝土性能的影响，从而调整这些矿物成分的比例，以满足大体积混凝土的要求。在本世纪30年代以前，对大体积混凝土所用水泥没有提出特殊的要求。美国于1932~1935年建造高99m的莫利斯 (Morris) 坝期间，第一次研制了低热水泥，限制水泥熟料的C,A和C,S的含量，以降低水化热。美国30年代建的胡佛坝、夏斯塔 (Shasta) 坝、底特律 (Detroit) 坝等工程都采用这种水泥。但这种水泥因C,S含量较低，因此早期强度低，且烧结较困难，成本较高，后来已很少被采用，而代之以C,S含量较高的中热水泥。中热水泥是当前国内外大体积混凝土使用最普遍的水泥。但在欧洲，较多采用的是掺有火山灰或矿渣的火山灰硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥。

在水泥中掺一定量的活性混合材料，不仅可以节省水泥，而且还可改善水泥的某些性能，减小水化热，因此很早就有研究。近年来由于能源紧张，还从节约能源的角度研究在水泥中掺混合材料。每吨水泥生产约需耗能7490MJ/T，约占水泥生产费用的42%。如在水泥中掺用工业废料，就可节约能源。

实际上，美国在1911~1915年建造高106m的箭石 (Arrow Rock) 坝所用的砂水泥就是一种掺混合材料的水泥。这种水泥是用55%熟料和45%花岗岩碎砂一起磨细而成。1938年建成的邦维尔 (Bonneville) 坝采用了用75%中热水泥与25%煅烧的火山灰一起磨细的火山灰水泥。1948~1953年建的饿马 (Hungry Horse) 坝第一次掺用电厂的粉煤灰作混合材料。美国工程兵团于1950~1966年已先后在50多座坝的混凝土中掺用粉煤灰。掺用粉煤灰的坝至今仍完好。

国外大体积混凝土中掺用过的混合材料种类很多，有浮石、灰质页岩、天然火山灰、蛋白石粉、凝灰岩和粉煤灰等。经半个世纪的实践，从60年代开始，研究工作已集中在对矿渣和粉煤灰的研究上。在50年代以后，一些国家相继研究制订对矿渣和粉煤灰的技术标准。曼兹 (Manz)、罗索 (Rossouw) 等人总结过11个国家的粉煤灰和矿渣的技术标准

(包括美国、苏联、英国、加拿大、印度、澳大利亚、奥地利、日本、南朝鲜、荷兰和土耳其)。

从70年代开始,北欧一些国家研究硅粉(硅工厂的副产品)作为混凝土混合材料,可拌制100MPa以上的高强度混凝土。在美国,硅粉混凝土已在大体积混凝土修补工程中试用。

水泥中的碱和骨料的反应是从1940年美国派克坝发生裂缝后开始研究的。除研究碱骨料反应机理和评定方法外,相当多的研究工作是寻求抑制碱骨料反应的措施。主要措施是限制水泥中的含碱量。掺粉煤灰或矿渣能有效地抑制碱骨料反应。此外,对锂化合物、磷酸盐、钡盐等的抑制作用也进行过研究,但研究报告较少,且到50年代,这类研究报告明显减少。但60年代后,因水泥的经济生产,水泥含碱量上升,一些国家又发现了这类反应的破坏现象。在此期间,除40年代发现的碱和无定形二氧化硅的反应以外,又发现了碱-碳酸盐反应和碱-硅酸盐反应。因此,碱骨料反应问题又引起了重视。

我国在50年代初期,对建坝用的水泥没有提出特殊要求。50年代末,三门峡大坝工程开工,我国研究和生产了大坝水泥和矿渣大坝水泥。此后,在丹江口、刘家峡、葛洲坝、白山等大坝工程中,也采用了这种水泥。在70年代,由长江水利水电科学研究院和浙江大学研制了一种以矿渣和少量水泥熟料为基础的低热微膨胀水泥。这种水泥的水化热低于大坝水泥,且具有微膨胀性能,有利于防止大体积混凝土发生裂缝。这种水泥已在几个工程中试用。

二、对降低大体积混凝土水泥用量的研究

对大体积混凝土的研究可以说是从降低水泥用量开始的。美国在30年代以前建的一些混凝土坝,对混凝土水泥用量有一条不成文的规定,就是内部混凝土用水泥 225kg/m^3 (每立方码用4包水泥),外部混凝土用水泥 338kg/m^3 (每立方码用6包水泥)。但发现混凝土坝体裂缝多。1940年建成的希瓦西(Hiwassee)坝,打破了这个规定,改用3包水泥(163kg/m^3)。该坝裂缝很少。由于采取了一系列降低水泥用量的措施,改进了混凝土施工工艺,使大坝混凝土的水泥用量逐步降低。一般讲,大坝内部混凝土的水泥用量已由30年代的 225kg/m^3 降到现在的胶凝材料总用量(包括混合材料) 160kg/m^3 左右。美国利贝(Libby)坝和约翰代(John Day)坝的水泥用量最低,内部混凝土胶凝材料用量只有 118kg/m^3 (其中水泥 88kg/m^3 ,粉煤灰 30kg/m^3);单位用水量只有 80kg/m^3 。碾压混凝土的水泥用量更低。我国从50年代大规模建坝开始就注意研究降低水泥用量的措施。1954年建成的佛子岭连拱坝和1956年建成的梅山连拱坝,外部混凝土水泥用量只有 155kg/m^3 ,内部混凝土水泥用量只有 $120\sim 123\text{kg/m}^3$ 。

国外在30年代以前和我国50年代建的混凝土坝,常采用在混凝土中埋块石的措施以降低水泥用量。但埋块石与混凝土机械化施工有干扰,且埋块石所节省的水泥,并不比采用现代技术所节省的水泥多。因此这项措施后来已很少被采用。现代的降低水泥用量措施有:加大骨料最大粒径,改善砂石骨料级配,掺外加剂(引气剂和减水剂),掺混合材料,降低混凝土流动度,采用干硬性的无坍落度混凝土和碾压混凝土,利用混凝土后期强

度等。

改善砂石骨料级配、加大骨料最大粒径的目的是减小孔隙率。富勒 (Füller)、保罗米 (Bolomy)、法乌雷 (Faury) 等研究工作者曾提出许多颗粒级配的理论公式。爱伦堡 (Ehrenburg) 根据魏毛斯 (Weymouth) 的颗粒干扰理论研究大体积混凝土的砂石骨料的理想级配。有些研究工作者主张采用连续级配, 有些研究工作者主张采用间断级配。实际试验表明, 达到最优密实度时的骨料级配并不是只有一种。在生产实践中正确选择骨料级配已不是一个纯理论问题, 而是要根据工地实际的骨料级配进行选择, 实质上是个经济问题。在混凝土坝工程中大多采用连续级配。在预填骨料混凝土 (压浆混凝土) 中, 大多采用间断级配。骨料最大粒径, 有少数工程曾采用 250mm, 现在一般大体积混凝土采用 150mm。奥地利对细骨料的级配进行了较多研究, 认为粒径 0.1~1mm 的颗粒含量对混凝土水泥用量和性能有较大影响。因此, 研究了砂的水力筛分, 调整砂的级配。

美国从 1937 年就开始研究在混凝土中有意地掺用引气剂 (或称加气剂), 使混凝土中产生许多微小气泡。掺用引气剂的主要效果并不在于降低水泥用量, 而在于改善混凝土的和易性 (或工作性), 提高混凝土硬化后的耐久性。

50 年代初, 各国开始研究减水剂 (或称塑化剂)。目前减水剂的专利已有数百种。1964 年日本首先研制高效减水剂。掺用各种减水剂都有降低水泥用量、改善混凝土的和易性、提高混凝土耐久性的效果。

大坝混凝土一般在浇筑完成较长时期后才受荷, 因此可以利用混凝土的后期强度, 进一步降低水泥用量。美国一般采用一年龄期的强度为设计强度。但从防止裂缝考虑, 要求混凝土早期具有一定的强度。因此, 较多国家主张采用 90 天龄期的强度。

早期建的混凝土坝, 混凝土坍落度很大, 达 10cm 以上。随着强力振捣设备的发展, 有可能采用坍落度较低甚至无坍落度的混凝土, 从而降低了水泥用量。

掺混合材料是降低水泥用量的重要措施。掺混合材料的混凝土的水灰比和配合比计算方法, 习惯上是将混合材料与水泥都作为胶凝材料, 水灰比为用水量与胶凝材料总量的比值。但是不同混合材料的活性不同, 如粉煤灰的活性比水泥低很多, 而硅粉的活性却比水泥高很多, 因此, 近年来对掺混合材料的混凝土的水灰比和配合比计算方法进行了不少研究。史密斯 (Smith) 首先提出要合理设计掺粉煤灰的混凝土的配合比。他假定每种粉煤灰有一个独特的有效系数 “ k ”。重量为 F 的粉煤灰相当于重量为 kF 的水泥。水灰比等于 $W/(C+kF)$ 。 W 为用水量, C 为水泥用量。对于粉煤灰, k 约为 0.20~0.25; 对于硅粉, k 约为 2~5。 k 值不仅随混合材料品种不同而不同, 而且也随掺量、养护条件、龄期的不同而不同。近年来, 英国邓肯大学的曼迪 (Munday) 等人提出将混合材料作为混凝土的第五种材料, 引入一个粉煤灰与水泥的比值 (F/C) 的概念。

三、对控制温度防止裂缝的研究

防止发生温度裂缝是对大体积混凝土的研究工作的重点。防止裂缝的措施, 按研究工作的顺序, 包括: ①采用水化热低的水泥; ②降低水泥用量; ③合理分缝分块; ④预埋水管, 通水冷却, 降低混凝土的最高温升; ⑤预冷混凝土, 降低混凝土的浇筑温度; ⑥表面

保护, 保温隔热; ⑦后冷混凝土, 即对已拌和的新拌混凝土加以冷却, 目的也是降低混凝土浇筑温度。其中, 前两项措施已在前面叙述, 最后一项措施的研究成果还不多。

早期建的混凝土坝, 浇筑块一般为错缝搭接。美国胡佛坝第一次采用柱状浇筑法, 即用纵缝和横缝将坝体分隔成许多柱状, 浇筑后再处理这些缝。后来国内外的高混凝土坝基本上都采用这种方法。胡佛坝的纵缝和横缝的间距较小。随着混凝土温度控制技术的发展, 接缝的间距已逐渐加大。至70年代, 美国建德伏歇克 (Dworshak) 坝时, 已可采用不分纵缝的通仓浇筑法, 浇筑块平面尺寸可达 $15 \times 152\text{m}$ 。浇筑块高度一般为 $1.5 \sim 2.3\text{m}$ 。靠近岩石基础的部位, 由于基础约束较强, 浇筑块更薄。加拿大在50年代曾采用高块浇筑法, 最高浇筑块达 19.5m 。我国1958年也曾在福建古田坝上进行高块浇筑的试验研究, 一次连续浇筑高 45m 。三门峡混凝土坝曾采用 6m 高的浇筑块。浇筑块太高, 模板安装和连续浇筑在技术上都很困难, 因此后来很少采用。

在混凝土浇筑块内埋水管, 通水冷却, 以降低混凝土温升的措施, 最早也是在胡佛坝上采用, 现已成为应用较广的一种温度控制措施。苏联在托克托古尔坝施工时, 曾采用薄层浇筑, 浇筑后在层面保持一薄层流水, 以降低已浇筑的混凝土的温升。

较有效的温度控制措施是预冷混凝土, 即降低新拌混凝土的浇筑温度。美国德伏歇克坝所以能采用不分纵缝的通仓浇筑法, 主要就是因为发展了混凝土预冷技术。较简单的掺冰拌和的降温措施, 在1941~1945年美国建诺福克 (Norfolk) 坝时已采用。效果较高的预冷骨料技术是60年代初开始研究的, 现已成为预冷混凝土的主要措施。现已能做到在任何气温条件下, 使混凝土在拌和机出口处的温度不超过 7.2°C 。

在我国陕西省安康工程曾试验研究将新拌混凝土在浇筑前先通过一个低温廊道, 用冷风使新拌混凝土降温, 称混凝土后冷法。试验测定, 在低温廊道内经12分钟, 混凝土温度可降低 14°C 左右。

70年代研究的混凝土表面保温措施, 是防止混凝土块体在气温变化幅度较大的季节发生裂缝的有效措施。最近10年内建的混凝土坝, 特别在气温日变化较大的地区的坝, 大都采用表面保温措施。

对每一座混凝土坝应采用哪几项温度控制措施, 应根据温度应力计算和技术经济分析, 才能确定。

为温度应力计算, 必须了解混凝土的热物理性能和力学变形性能, 包括混凝土比热、导热系数、导温系数、绝热温升、徐变、抗裂性、弹性变形和极限拉伸值等。对混凝土的这些性能, 国内外都做过大量研究。

混凝土的抗裂能力是一个综合指标, 目前还没有一个比较满意的表达方法。它既不能用抗拉强度表示, 又不能用极限拉伸值表示。抗拉强度高、极限拉伸值大的混凝土, 一般讲它的抗裂能力也较强。但要提高混凝土的抗拉强度和极限拉伸值, 必然要增加混凝土的水泥用量, 从而又加大了混凝土的温度应力。

根据水利水电科学研究院的研究成果, 增加混凝土中的灰浆含量, 可提高混凝土的极限拉伸值。纯水泥浆体的极限拉伸值基本上是个常数, 与水灰比、水泥品种无关, 与抗拉强度也无明显关系。随着骨料含量的增加, 极限拉伸值逐渐降低。因此适当提高水泥浆体

积可提高混凝土极限拉伸值。采用弹性模量低的骨料,可降低混凝土的弹性模量,从而提高混凝土的极限拉伸值。因此,在骨料料场容许选择的情况下,优先选用弹性模量较低的骨料,如石灰岩等,对防止裂缝也是有利的。且石灰岩的热膨胀系数最低,有利于减小温度应力。

四、对大体积混凝土耐久性的研究

混凝土的耐久性也是一个综合指标,目前也没有定量表达的方法。影响混凝土耐久性的因素很多,可以列出近200个。影响因素可归纳为原材料、配合比、施工工艺、混凝土的物理性能、建筑物的暴露条件(环境条件)和受荷状况等几个方面。混凝土耐久性包括抗渗性、抗冻融性、抗冲刷性、抗空蚀性、抗化学侵蚀性、碱骨料反应膨胀、钢筋锈蚀破坏等多种性能。

(一)对混凝土抗渗性的研究

混凝土是一种透水材料。它的渗透性与它的孔隙率、孔隙分布及孔隙连续性有关。捣固密实的混凝土,水灰比愈小、水化龄期愈长,则渗透性愈小。掺引气剂可降低混凝土的渗透性。一般讲,水灰比小于0.50的混凝土,它的渗透系数都可以达到 $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 的等级。

在海水中的混凝土,它的渗透性是决定混凝土耐久性的最重要的特性。渗透性高的混凝土,在海水中很易遭破坏。

(二)对混凝土抗冻性的研究

鲍威尔斯(Powers)等人从1933年开始就运用热力学原理和从混凝土孔隙结构对混凝土冻融破坏的机理进行研究。对混凝土冻融破坏的机理,曾提出过水压力假说、渗透压假说等。这些假说虽然不完全相同,但都认为混凝土冻融破坏是由于混凝土中的水分在降到负温的过程中在浆体中的迁移而引起的,而主要不是由于水分结冰膨胀引起的。而且都认为混凝土饱水程度愈高、冻结速度愈快、水分迁移距离愈长,混凝土愈易遭受冻融破坏。在混凝土中掺引气剂是提高混凝土抗冻融性的有效措施。其原因就是掺入的无数微小气泡缩短了水分在冻结过程中迁移的距离。水分迁移距离的临界长度一般认为是0.20mm。这就是根据混凝土气泡间距因素确定混凝土是否易受冻融破坏的依据。

用引气剂在混凝土形成的气泡不太稳定。因此,1977年索墨(H. Sommer)曾研究将直径为 $10 \sim 60 \mu\text{m}$ 的空心塑料微珠掺入混凝土中代替引入的气泡。结果证明可提高混凝土抗冻融性,但费用很高。1978年李特文(Litvan)提出的报告认为可用多孔的固体颗粒代替引气剂以提高混凝土的抗冻融性。

混凝土抗冻融破坏能力最终要看它在自然暴露条件下的状态。美国、日本等国都重视混凝土的暴露试验。美国陆军工程兵团于1936年就在缅因州东港(Eastport)附近的柯勃斯科克(Cobscook)湾中的特里特岛(Treatisland)上建立了一个混凝土暴露试验场。试件放在潮中位高程,在冬季,每天可受两次冻融循环。从1953~1979年的26年间,每年冻融循环次数为71~188次,平均每年133次。试件形状大小不同。代表大体积混凝土的试件为 $457 \times 457 \times 914 \text{mm}$ 的棱柱体。1980年有36个项目在该暴露试验场进行试验,包括预

应力混凝土、钢纤维混凝土、浸渍混凝土、碾压混凝土的研究。1953年工程兵团曾报告过室内快速冻融试验和野外暴露试验的对比结果。但因影响混凝土抗冻融性的因素很多，目前尚未看到有定量分析的研究报告。

(三) 对混凝土抗空蚀性的研究

国内外不少混凝土坝在通过高速水流的部位，表面经常发生空蚀现象。这是个水力学问题。因此防止混凝土发生空蚀，主要也应从水力学上解决。提高混凝土强度、采用钢纤维混凝土、浸渍混凝土等，虽然也能提高混凝土的抗空蚀能力，但不能从根本上解决问题。罗斯(Rouse)等人早在40年代就论述过对这个现象的研究结果。他提出用一个无量纲的空蚀指数评定空蚀现象。当空蚀指数大于临界空蚀指数，即可能发生空蚀。防止空蚀的有效措施是限制过流表面的不平整度和在水流中掺气。

室内试验和现场试验都表明，如果在靠近边界的水层中掺气，使边界层的水中的气水比(按体积计)达到8%左右，即使表面不平整，也不致发生空蚀破坏。但空气应均匀呈小气泡分布。自从美国黄尾坝泄洪洞采用掺气槽试验成功后，许多坝都采用了这种措施。我国在乌江渡、白山、龙羊峡、东江等混凝土坝工程中也都采用了掺气措施。为进行现场的空蚀试验，美国在俄勒冈州底特律坝上(坝高141m)利用水库造成的水头，建了一个空蚀试验槽。

(四) 对混凝土抗磨性的研究

混凝土磨损破坏与空蚀破坏是两种不同类型的破坏。磨损破坏的形式是表面比较光滑；而空蚀破坏的形式是出现大小不等的孔洞，边界不规则。有含沙水流流过的混凝土表面都会发生磨损。溢洪道底板、静水池、隧洞衬砌、冲沙道等部位的混凝土表面最易发生磨损。磨损程度决定于水中所含固体颗粒的大小、形状、硬度、含量，以及水流速度和混凝土质量。如采用消力池消能，在多数情况下，在消力池中会积聚石块，在紊流下加速磨损混凝土。美国利贝坝和德伏歇克坝的消力池的最大磨损深度达到2~3m。

采用抗磨材料和特种混凝土，如钢纤维混凝土、浸渍混凝土等，可延长建筑物使用寿命。我国曾研究用铸石作为抗磨材料，镶护在混凝土表面；对磨损严重的部位，曾研究用钢轨镶护。

美国陆军工程兵团设计了一种模拟水工建筑物受磨损的仪器。我国水利水电科学研究院也有模拟磨损的仪器。磨损试验结果证明，浸渍混凝土的抗磨损性较强，而钢纤维混凝土的抗磨性低于普通的高强度混凝土。