

# 水工混凝土

SHUI GONG HUNNINGTU

# 性能及检测

XINGNENG JI JIANCE

姜福田 著



黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书从水工混凝土的视野阐述了混凝土的性能和检测方法,是一部水工混凝土的专著。全书内容包括:绪论、水工混凝土原材料、新拌混凝土、硬化混凝土、特种混凝土、水工混凝土配合比设计、水工砂浆、水工混凝土质量检控导则、现场结构混凝土质量检测、大坝混凝土的强度溯源和全级配碾压混凝土,并附有综合思考题。

本书既有必要的理论阐述,也有实践经验的总结,可供从事水工混凝土研究、试验、质量检控和教学等工作人员阅读使用,也可作为水工混凝土工程类上岗培训人员的培训教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

水工混凝土性能及检测/姜福田著. —郑州:黄河水利出版社,2012.6

ISBN 978-7-5509-0271-8

I. ①水… II. ①姜… III. ①水工结构-混凝土结构-性能检测 IV. ①TV331

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第102074号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:17.75

字数:432千字

版次:2012年6月第1版

印数:1—2 500

印次:2012年6月第1次印刷

---

定价:49.00元

# 前 言

本书从水工混凝土的视野阐述了混凝土的性能和检测方法,是一部水工混凝土的专著。笔者曾参加《混凝土工程类从业资格培训教材》编写工作,并授课三年,本书吸收了教材培训大纲内容,对要求参加上岗培训的人员也是一本有益的教材。本书有以下特点:

(1)研究了大坝混凝土设计强度的特征和强度溯源。全级配大坝混凝土对研究大坝强度和耐久性的重要性。

(2)水工混凝土配合比设计提出了统计经验法,一个可直接探索最优配合比的方法,可节省大量试验时间和费用。

(3)介绍了水工碾压混凝土新检测技术和方法:①碾压混凝土压实度质量检测的核子密度计法和表面波法;②变态混凝土浆液设计、变态工艺和性能检测等关键技术,有利于提高碾压混凝土筑坝技术水平。

(4)系统地研究了水工混凝土质量检控方法,开创性地提出了水工混凝土质量检控导则。

(5)对水工混凝土结构设计指标提出了新的建议:①水工混凝土抗渗性设计指标用渗透系数代替抗渗等级;②水工混凝土抗冻等级设计指标采用以结构物使用年限为体系的冻融耐久性指数评定指标和方法。

本书在内容上既有必要的理论阐述,也有实践经验的总结,会对广大从事水工混凝土研究、试验、质量检控和教学等工作的专业人员具有较大的参考价值。

受作者水平所限,书中存在的不当之处,敬请读者指正。

作 者

2011年10月18日于北京

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 绪 论</b> .....	(1)
第一节 水工混凝土技术水平的发展 .....	(1)
第二节 工程质量检测(检验)的作用和依据 .....	(4)
<b>第二章 水工混凝土原材料</b> .....	(7)
第一节 水 泥 .....	(7)
第二节 矿物掺合料 .....	(13)
第三节 外加剂 .....	(27)
第四节 骨 料 .....	(33)
第五节 养护和拌和用水 .....	(43)
<b>第三章 新拌混凝土</b> .....	(45)
第一节 概 述 .....	(45)
第二节 混凝土拌和物的流动性 .....	(46)
第三节 混凝土拌和物的凝结时间 .....	(52)
第四节 混凝土拌和物的含气量 .....	(55)
第五节 混凝土拌和物的泌水率 .....	(57)
第六节 混凝土拌和物的拌和均匀性 .....	(57)
<b>第四章 硬化混凝土</b> .....	(58)
第一节 混凝土性能试验试件规格、成型方法和养护 .....	(58)
第二节 混凝土力学性能 .....	(60)
第三节 混凝土变形性能 .....	(70)
第四节 混凝土热性能 .....	(80)
第五节 混凝土抗裂性能 .....	(88)
第六节 混凝土的耐久性 .....	(90)
第七节 混凝土中钢筋锈蚀 .....	(109)
<b>第五章 特种混凝土</b> .....	(111)
第一节 泵送混凝土 .....	(111)
第二节 喷射混凝土 .....	(113)
第三节 自流平自密实混凝土 .....	(117)
第四节 水下不分散混凝土 .....	(122)
第五节 膨胀混凝土 .....	(128)
第六节 纤维混凝土 .....	(133)
第七节 变态混凝土(碾压混凝土变态) .....	(140)

<b>第六章 水工混凝土配合比设计</b> .....	(149)
第一节 设计要求、依据和基本资料 .....	(149)
第二节 配合比设计参数的确定及其计算方法 .....	(150)
第三节 碾压混凝土配合比选择示例(一)规范法 .....	(154)
第四节 碾压混凝土配合比选择示例(二)统计经验法 .....	(158)
<b>第七章 水工砂浆</b> .....	(166)
第一节 硅酸盐水泥砂浆 .....	(166)
第二节 聚合物水泥砂浆 .....	(172)
<b>第八章 水工混凝土质量检控导则</b> .....	(176)
第一节 目标、范围及体系 .....	(176)
第二节 原材料质量检验 .....	(177)
第三节 混凝土性能要求 .....	(180)
第四节 混凝土配合比检控 .....	(182)
第五节 混凝土生产质量检控 .....	(183)
第六节 碾压混凝土浇筑 .....	(186)
第七节 混凝土性能检验 .....	(187)
第八节 混凝土强度验收与评定 .....	(189)
<b>第九章 现场结构混凝土质量检测</b> .....	(195)
第一节 概 述 .....	(195)
第二节 结构混凝土强度检测 .....	(196)
第三节 结构混凝土裂缝深度检测 .....	(212)
第四节 结构混凝土内部不密实区和空洞检测 .....	(216)
第五节 结构混凝土中钢筋位置和锈蚀检测 .....	(220)
第六节 碾压混凝土现场质量检测 .....	(225)
<b>第十章 大坝混凝土的强度溯源和全级配碾压混凝土</b> .....	(240)
第一节 大坝混凝土设计强度的特征及其与国外的差异 .....	(240)
第二节 大坝混凝土强度溯源 .....	(245)
第三节 全级配碾压混凝土 .....	(247)
<b>综合思考题</b> .....	(263)
<b>参考文献</b> .....	(274)

# 第一章 绪 论

## 第一节 水工混凝土技术水平的发展

### 一、水工混凝土的特性

水工混凝土是指用于坝、闸和泄水建筑的混凝土,又称为大体积混凝土。混凝土最大骨料粒径采用 80 ~ 150 mm,但也不尽然,特殊部位也采用最大骨料粒径为 40 mm 的普通混凝土或特种混凝土。

现浇大体积混凝土的属性是:浇筑后混凝土因水泥水化升温,而又不易散失;因边界温度变化而产生温度应力,有导致混凝土开裂的潜在危害,应采取相适宜的防裂措施。

水工混凝土在静水和动水作用下工作,要求其具有以下特性:

(1)对混凝土强度等级(标号)要求一般不高,C10 ~ C30(R100 ~ R300),特别是依靠重力保持稳定的重力坝。但对拱坝和支墩坝,混凝土应力较高,所以要求混凝土具有较高的抗压强度和抗拉强度。

(2)为降低混凝土温升而引起的温度应力以防裂缝,要求混凝土具有较高的抗拉强度和极限拉伸值。

(3)对坝体某些部位的混凝土,高速水流过水面容易产生空蚀和泥沙磨损,要求混凝土强度等级(标号)不低于 C40(R400)。

(4)水工建筑物运行的耐久性要求混凝土能抵抗大气与水的物理和化学侵蚀:水位变动区混凝土的冻融破坏,高盐碱地区混凝土硫酸盐侵蚀破坏,钢筋混凝土水工结构的碳化和氯离子侵蚀而引起的钢筋锈蚀。

### 二、水工混凝土技术水平的发展

20 世纪 30 年代,美国着手建设坝高 211 m 的胡佛坝,对水工混凝土进行全面研究,形成了一套完整的水工混凝土材料配制体系和柱状法坝体浇筑技术,是创世纪的技术创新。自 1936 年胡佛坝建成半个多世纪,水工混凝土技术又有了很大发展,其中主要有:①在水工混凝土中掺用掺合料、引气剂和减水剂;②提高混凝土的耐久性;③采取更有效的温控措施;④采取不分纵缝的通仓浇筑法;⑤发展强力高频振动设备。

至 20 世纪 70 年代,国际上提出了混凝土坝快速施工讨论,一改过去坝体惯用的柱状法坝体浇筑技术,将土石坝施工大型机械水平摊铺和碾压技术引入混凝土坝施工,从而形成碾压混凝土筑坝技术,将混凝土坝的建设工期缩短一半,而建坝造价减少 1/5 ~ 1/4。

#### (一)水泥和掺合料

早期大体积混凝土所用水泥偏重于低热水泥。美国胡佛坝就专门研究了这种水泥。因其熟料中  $C_3A$  和  $C_3S$  矿物含量低,早期强度低,且烧结困难,故成本高,后来不再采用。国

外水工混凝土采用中热水泥居先。

我国 20 世纪 60 年代研制生产了大坝水泥和矿渣大坝水泥,曾用于刘家峡坝、葛洲坝和白山坝等工程。该种水泥目前已修订为《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥》(GB 200—2003)。据对 2000 年以后建设的坝高 100 m 以上的混凝土坝统计,我国水工混凝土所用水泥多为 42.5 普通硅酸盐水泥和 42.5 中热硅酸盐水泥,通用水泥中其他品种水泥很少采用。

水工混凝土掺入一定量的活性掺合料,不仅可以降低水化热温升,而且可改善水工混凝土的抗侵蚀性,因此很早就有研究。国外大体积混凝土掺用的掺合料种类很多,有浮石、灰质页岩、天然火山灰、凝灰岩等。20 世纪 60 年代集中到矿渣粉和粉煤灰的开发利用上。

虽然我国 20 世纪 60 年代已开始粉煤灰在水工混凝土的应用研究,并在三门峡坝、刘家峡坝中采用,但是大规模应用还是 20 世纪 80 年代与碾压混凝土在我国推广应用同步进行。目前,粉煤灰仍是水工混凝土的主要掺合料。在西电东输项目开发中,西南地区很多工程采用了矿渣粉、钢渣粉、磷渣粉作为水工混凝土掺合料。还有工程采用了石灰岩粉、凝灰岩粉与矿渣粉和磷渣粉复合掺合料。经验表明,这些新开发的掺合料与粉煤灰具有类同的填充效应、二次水化效应和改善和易性效应,只是程度上有所差异。

水泥中的碱和骨料的反应是 20 世纪 40 年代美国派克坝发现裂缝时开始发现的。在碱骨料反应的研究中,除已发现的碱和无定形二氧化硅的反应外,又发现了碱-碳酸盐反应和碱-硅酸盐反应。因此,碱骨料反应仍是水工混凝土值得重视的问题。除研究碱骨料反应机制和评定方法外,相当多的研究工作是寻求抑制碱骨料反应的措施。其主要措施是:①限制水泥中的碱含量( $<0.6\%$ );②掺加粉煤灰 30% 或矿渣粉 50% 能有效抑制碱骨料反应。

## (二)降低水工混凝土水泥用量的研究

水工混凝土是从研究降低水泥用量开始的。20 世纪 30 年代,混凝土坝的水泥用量有一条不成文的规定:内部混凝土水泥用量为  $223 \text{ kg/m}^3$  (每立方米用 4 包水泥,1 立方米 =  $0.7646 \text{ m}^3$ ),外部混凝土水泥用量为  $338 \text{ kg/m}^3$  (每立方米用 6 包水泥),但发现混凝土坝体裂缝较多。40 年代,打破了这个规定,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,使大坝混凝土水泥用量逐步降低,相应坝体裂缝也逐渐减少。至 70 年代,大坝内部混凝土水泥用量由  $225 \text{ kg/m}^3$  降到胶凝材料用量为  $160 \text{ kg/m}^3$  (包含 30% 粉煤灰)。80 年代,碾压混凝土筑坝技术得到很快推广,混凝土水泥用量进一步下降,内部碾压混凝土水泥用量已降到  $50 \text{ kg/m}^3$ ,总胶材用量为  $150 \text{ kg/m}^3$ 。这是目前可接受的最低水泥用量水平,在广西岩滩坝曾经采用过,但仍要执行严格的温控措施,否则仍会有裂缝发生。

## (三)控制温升、防止裂缝的措施

水工混凝土控制温升、防止裂缝的研究,首推美国 1936 年建成的胡佛坝,提出了三个创造性的理念:①第一次提出大坝混凝土柱状浇筑法,即用纵缝和横缝将坝体分隔成许多柱状,浇筑后再将这些缝灌浆处理;②夏季预冷混凝土,降低混凝土浇筑温度,减小温升;③在混凝土浇筑坝内埋设水管,通水冷却,以降低混凝土温升,一直沿用至今。

20 世纪 70 年代,我国研究混凝土表面保温防裂措施,是防止混凝土块体在气温变化较大季节发生裂缝的有效措施。近几年提出坝体表面全部保温防裂措施,但是如果有裂缝发生,如何检测出来也要有相应的技术保证。

总结防止大坝裂缝的技术措施有: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。

上述6项水工混凝土防裂措施可分为两类:一是水工混凝土材料本身,二是温控设计和防裂施工技术。对水工混凝土材料本身,除①和②两项外,混凝土极限拉伸值研究表明,相同稠度的纯水泥浆体的极限拉伸值基本是常数,随着骨料的加入和含量增加,混凝土极限拉伸值逐渐降低,所以水工混凝土的胶材用量规定一个限值是有必要的。采用弹性模量低的骨料如砂岩,混凝土的极限拉伸值增大,而弹性模量减小,增加混凝土的抗裂性。另外,采用热膨胀系数低的骨料如石灰岩,有利于减小温度应力。欲得无危害性裂缝的混凝土坝,这两类防裂措施必须认真执行。

#### (四) 水工混凝土的耐久性

水工混凝土的耐久性包括抗渗透性、抗冻融性、抗冲磨性、抗化学侵蚀性、碱骨料反应和钢筋锈蚀等。

##### 1. 抗渗透性

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,水胶比愈小、水化龄期愈长,则渗透性愈小。一般来讲,水工混凝土的渗透系数都可以达到 $1 \times 10^{-9}$  cm/s量级。

《水工混凝土试验规程》(SL 352—2006)中有两种测定水工混凝土抗渗透性的方法,即渗透系数测定法和抗渗等级逐级加压法。由于技术的进步,现代混凝土的抗渗透性比20世纪的混凝土的抗渗透性有显著的提高,其实有抗渗等级(W40)超出规范规定最大抗渗等级(W12)数倍,已失去检控水工混凝土抗渗透性质量的作用。为此,建议采用渗透系数表征水工混凝土的抗渗透性。

##### 2. 抗冻融性

早在20世纪30年代对混凝土冻融破坏机制的研究表明,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浆体迁移而引起的。混凝土的饱水程度愈高、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。混凝土掺加引气剂是提高混凝土抗冻融性的有效措施,原因是掺入的无数微小气泡缩短了水分在冻结过程中的迁移距离。研究表明,水分迁移距离的临界长度是0.20 mm(200 μm)。这就是根据实测混凝土气泡间隔系数判定混凝土是否发生冻融破坏的依据。美国混凝土学会(ACI)的判则是抗冻融混凝土的气泡间隔系数应小于200 μm,美国垦务局(USBR)的判则是气泡间隔系数不应超过250 μm。

水工混凝土抗冻融破坏能力的研究最终要落实到其在自然暴露条件下的损坏状态。美国、日本等国家都重视混凝土的暴露试验,但因影响混凝土抗冻融的因素比较复杂,至今未见定量分析的研究报告。混凝土抗冻融设计规范和评定方法中存在一个普遍性问题,即现有的评定方法和现场实际之间缺乏相关性。

我国混凝土抗冻融试验方法的行业标准多采用快冻法,试验仪器的参数也较相近,基本上是以美国材料与试验协会ASTM C666《混凝土抗快速冷冻和解冻特性的试验方法》标准为蓝本,但试验龄期和评定方法标准不尽相同。

我国《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)规定,对重要工程和大型工程采用混凝土抗冻耐久性指数评定指标,与美国ASTM C666标准相同,而水利水电行业标准《水工建筑物抗冰冻设计规范》(DL/T 5082—1998)采用抗冻等级评定标准。两个标准对



比,《水工建筑物抗冰冻设计规范》(DL/T 5082—1998)标准对水工混凝土抗冻融设计指标比《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)标准对普通混凝土抗冻融设计指标低许多。实际大坝混凝土冻融破坏调查也表明冻融破坏存在比较普遍,是否与此相关,提请注意。

### 3. 高速水流过水表面混凝土

高速水流过水表面混凝土发生破坏有两个原因:一是空蚀破坏,二是泥沙磨损。

空蚀是一个水力学问题。早在20世纪40年代就提出了空蚀现象的研究成果,采用一个无量纲的临界空蚀指数(初生空穴数)评定水流是否发生空蚀。当水流的空蚀指数大于临界空蚀指数时,即可能发生空蚀,过水建筑物控制水流的空蚀指数低于临界空蚀指数下运行。此外,要限制过水表面混凝土的不平整度和设置通气孔向水流中掺气,体积比达到8%,使水流不产生负压。70年代后,大多数坝的过水建筑物均采用掺气消除空蚀破坏措施,因此过水建筑物很少再发生空蚀破坏。

过水建筑物冲磨破坏与空蚀破坏是两种截然不同的破坏作用。冲磨破坏是指机械摩擦和冲击破坏,破坏的混凝土表面比较光滑、有擦痕。空蚀破坏的过水混凝土表面呈蜂窝状、不规则,破坏面积集中在负压区,严重者会将闸门槽、消力墩击穿。泥沙磨损破坏也会引起空蚀,导致空蚀破坏,其结果是严重的,在过水建筑物工程中曾经发生过。

过水建筑物不产生空穴水流,只过不含泥沙的清水水流,强度等级(标号)C40(R400)的混凝土可承受40 m/s的水流流速而不破坏。但是,对含沙水流的过水混凝土表面都会发生磨损,只是磨损破坏程度不同而已。

溢洪道底板、消力池、泄洪隧洞衬砌及冲沙道等部位的混凝土表面最易发生磨损。当磨损量过大时,都应采取修复措施,防止磨损表面因边界不平整度超限而导致空蚀破坏。修复措施应因水流挟带砂、石的粒径和含量不同而异,因水流的流速不同而异。对粒径较大、流速较低者,可以采用抗磨镶护材料;对流速较高者,可以采用特种混凝土,如钢纤维混凝土、浸渍混凝土、聚合物混凝土等,均可延长过水建筑物的使用寿命。

## 第二节 工程质量检测(检验)的作用和依据

### 一、工程质量检测的作用和意义

#### (一) 检测与检验

**检测:**对实体的一种或多种性能进行检查、度量、测量和试验的活动。检测的目的是希望了解检测对象某一性能或某些性能的状况。例如,对混凝土用砂进行细度模数检测,对混凝土粗骨料进行含泥量检测,对混凝土拌和物进行坍落度、含气量检测,对混凝土进行力学性能(如抗拉、抗剪强度)、变形性能(如极限拉伸变形、徐变)、热学性能(如绝热温升、比热容)、耐久性(如抗冻性、抗渗性)等检测。

**检验:**对实体的一种或多种性能进行的检查、度量、测量和试验,并将结果与规定要求进行比较,以确定每项特合格情况所进行的活动。也就是说,检验的目的是要求判定检测的对象是否合格。所检验对象的性能要有明确的规定,即指标要求,如在技术标准、规范或经批准的设计文件中具体的规定。对混凝土工程来说,混凝土质量的检验,除需要遵循《水工

混凝土试验规程》(SL 352—2006)规定的检测方法外,还需要将结果与《水工混凝土施工规范》(DL/T 5144—2001)中规定的有关指标进行对比,才能判定所检验的对象是否合格。因此,检验应包括以下内容:

- (1)确定检测对象的质量标准;
- (2)采用规定的方法对检测对象进行检测;
- (3)将检测结果与标准指标进行比较;
- (4)做出检测对象是否合格的判断。

## (二)工程质量检测(检验)的重要性

### 1. 检测是控制工程质量的重要技术保证

施工过程中在各个环节设定检测,是要保证各个环节的质量,将问题消灭在各个环节中,避免将不合格的产品传到下一个环节中,连带造成以后环节的质量问题。例如,在混凝土施工之前,要对工程进场的混凝土原材料进行品质检验,避免将不合格的原材料用于混凝土中。对混凝土拌和物的凝结时间、坍落度、含气量等性能进行检测,以保证符合施工要求和设计要求,避免混凝土浇筑时产生质量不合格问题。

### 2. 检测是工程质量监督和监理的重要手段

水利水电工程实行“政府监督、社会监理、施工企业自控”的质量监管体系。检测不仅是施工企业自己对施工过程的质量进行自我控制的手段,也是国家工程质量监督部门和监理单位对工程质量进行监控的主要手段。在施工过程中,施工单位按规范要求的取样频次进行自检,监督部门和监理单位在施工单位自检的基础上进行一定比例的抽检。监理工程师除对施工单位进行的原材料、施工过程的检验进行核查确认外,还可以以旁站的方式监督检查施工单位检验过程和结果的正确性与准确性。质量监督部门在需要时也抽样委托具有相应资质的检测机构进行复核性检验,作为确认工程质量的补充性依据。施工单位自检、监理和质量监督单位抽检也是工程合同管理的重要环节。

### 3. 检测结果是工程质量评定、验收和质量纠纷评判的依据

工程质量的评定、验收离不开检测数据。质量的认定必须以检测数据或具有系统的检测数据的统计结果为依据。混凝土的原材料品质是否符合规范要求,混凝土的强度、变形特性和耐久性是否符合设计要求,混凝土结构物的体形尺寸是否符合设计要求,都需要用检测数据证明。另外,国家计量法规定,经计量认证合格的检测机构,在其认定的检测项目参数范围内进行检测取得的数据和检测结果具有法律效力,在质量纠纷中作为评判的依据。

## 二、工程质量检测的依据

### (一)质量检测(检验)的依据

水利工程质量检测的依据是:

- (1)法律、法规、规章的规定;
- (2)国家标准、水利水电行业标准;
- (3)工程承包合同认定的其他标准和文件;
- (4)批准的设计文件、金属结构、机电设备安装等技术说明书;
- (5)其他特定要求。

## (二) 标准的使用

水工混凝土质量检测时,标准的使用一般遵循如下规则:

(1)当检测对象有水利部发布施行的行业标准时,应采用水利部发布的行业标准;当检测对象只有国务院其他部委发布施行的行业标准时,如检测水泥性能的标准,应采用该部委发布的行业标准;当检测对象没有行业标准只有国家标准时,应采用国家标准;当检测对象没有国家标准、行业标准时,可以视情况采用企业标准。水利工程一般不采用地方标准,只有地方标准的要求高于行业标准时,才采用地方标准。

(2)原则上检测机构无权决定对检测对象采用何种标准,采用标准的决定权在设计单位和检测委托的业主(建设、监督、监理、施工)单位。设计单位在设计和招标文件中已经明确了检测采用的标准,业主应按设计和招标文件规定采用的标准委托检测。检测机构应按合同要求采用检测标准,但检测机构应负有提醒责任,当发现委托方在合同中不确定采用标准或对指定采用的标准有疑问时,应当提醒确认,以免用错标准。采用的标准应在合同书中明确。

(3)在任何情况下,检测应使用现行有效的标准。除非委托人为某种特殊目的,明确要求采用某过期标准对检测对象进行检测,或对标准的某条款加以修改使用,这时,检测机构应负有提醒和明确责任的义务,在合同中特别说明该情况,并应明确告知委托人,所出具的检测报告按规定不能加盖计量认证 CMA 章。

## 第二章 水工混凝土原材料

### 第一节 水 泥

水泥是水利水电工程混凝土结构物的主要建筑材料。混凝土中常用的水泥是硅酸盐水泥,包括通用硅酸盐水泥和中热、低热硅酸盐水泥。通用硅酸盐水泥中使用最多的是普通硅酸盐水泥,中热、低热硅酸盐水泥中使用最多的是中热硅酸盐水泥。据统计,2000年以来修建的混凝土坝,主体工程大部采用42.5中热硅酸盐水泥,或42.5普通硅酸盐水泥。

对环境水有侵蚀的部位,根据侵蚀类型及程度常采用高抗硫酸盐水泥,或中抗硫酸盐水泥。当骨料有碱性反应时,常采取硅酸盐水泥掺加30%粉煤灰抑制措施。

#### 一、硅酸盐水泥熟料的化学成分及矿物组成

国家水泥标准规定的硅酸盐水泥的定义为:凡以适当成分的生料,烧至部分熔融,得到以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量的石膏,磨细制成的水硬性胶凝材料,称为硅酸盐水泥。

##### (一) 硅酸盐水泥的主要化学成分

硅酸盐水泥熟料的化学成分主要有氧化钙(CaO)、氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、氧化镁(MgO)等。它们在熟料中的含量范围大致如下:CaO为60%~67%、 $\text{SiO}_2$ 为19%~25%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为3%~7%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为2%~6%、MgO为1%~4%、 $\text{SO}_3$ 为1%~3%、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为0.5%~1.5%。

##### (二) 硅酸盐水泥的矿物组成

在高温下煅烧成的水泥熟料含有四种主要矿物,即硅酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ),简称 $\text{C}_3\text{S}$ ;硅酸二钙( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ),简称 $\text{C}_2\text{S}$ ;铝酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ),简称 $\text{C}_3\text{A}$ ;铁铝酸四钙( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ),简称 $\text{C}_4\text{AF}$ 。这几种矿物成分的性质各不相同,它们在熟料中的相对含量改变时,水泥的技术性能也就随之改变,它们的一般含量及主要特征如下:

(1) $\text{C}_3\text{S}$ ——含量40%~55%,它是水泥中产生早期强度的矿物, $\text{C}_3\text{S}$ 含量越高,水泥28d以前的强度也越高,水化速度比 $\text{C}_2\text{S}$ 快,28d可以水化70%左右,但比 $\text{C}_3\text{A}$ 慢。这种矿物的水化热比 $\text{C}_3\text{A}$ 低,较其他两种矿物高。

(2) $\text{C}_2\text{S}$ ——含量20%~30%,它是四种矿物成分中水化最慢的一种,28d水化只有11%左右,是水泥中产生后期强度的矿物。它对水泥强度发展的影响是:早期强度低,后期强度增长量显著提高,一年后强度还继续增长。它的抗蚀性好,水化热最小。

(3) $\text{C}_3\text{A}$ ——含量2.5%~15%,它的水化作用最快,发热量最高。强度发展虽很快但不高,体积收缩大,抗硫酸盐侵蚀性能差,因此有抗蚀性要求时 $\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$ 含量不超过22%。

(4) $\text{C}_4\text{AF}$ ——含量10%~19%,它的水化速度较快,仅次于 $\text{C}_3\text{A}$ 。水化热及强度均属中

等。含量多时对提高抗拉强度有利,抗冲磨强度高,脆性系数小。

除上述几种主要成分外,水泥中尚有以下几种少量成分:

(1) MgO——含量多时会使水泥安定性不良,发生膨胀性破坏。

(2) SO<sub>3</sub>——主要是煤中的硫及由掺入的石膏带来的。掺量合适时能调节水泥凝结时间,提高水泥性能,但过量时不仅会使水泥快硬,也会使水泥性能变差。因此,规定 SO<sub>3</sub> 含量不得超过 3.5%。

(3) 游离 CaO——为有害成分,当含量超过 2% 时,可能使水泥安定性不良。

(4) 碱分(K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O)——含量多时会与活性骨料作用引起碱骨料反应,使体积膨胀,导致混凝土产生裂缝。

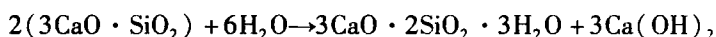
## 二、硅酸盐水泥的凝结和硬化

水泥加水拌和后,最初形成具有塑性的浆体,然后逐渐变稠并失去塑性,这一过程称为凝结。此后,强度逐渐增加而变成坚固的石状物体——水泥石,这一过程称为硬化。水泥凝结与硬化过程是一系列复杂的化学反应及物理化学反应过程。

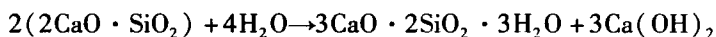
### (一) 凝结硬化的化学过程

水泥的凝结与硬化主要是由于水泥矿物的水化反应,水泥的水化反应比较复杂,一般认为水泥加水后,水泥矿物与水发生如下一些化学反应。

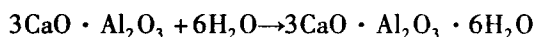
硅酸三钙与水作用反应较快,生成水化硅酸钙及氢氧化钙:



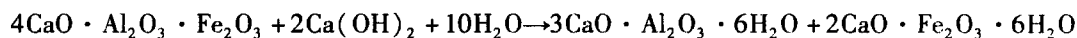
硅酸二钙与水作用反应最慢,生成水化硅酸钙及氢氧化钙:



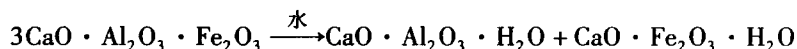
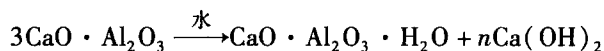
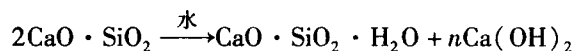
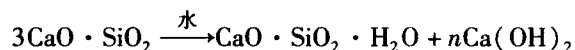
铝酸三钙与水作用反应极快,生成水化铝酸钙:



铁铝酸四钙与水及氢氧化钙作用反应也较快,生成水化铝酸钙和水化铁酸钙:



以上列出的反应式实际上是示意性的,并不是确切的化学反应式。因为矿物的水化反应生成物都是一些很复杂的体系。随着温度和熟料的矿物组成比的变化,水化物的类型和结晶程度都会发生变化。比较确切的反应式为:



反应式后面生成的水化物,表示组合不固定的水化物体系。

各种矿物的水化速度对水泥的水化速度有很大的影响,是决定性的因素。

C<sub>3</sub>S 最初反应较慢,但以后反应较快。C<sub>3</sub>A 则与 C<sub>3</sub>S 相反,开始时反应很快,以后反应较慢。C<sub>4</sub>AF 开始的反应速度也比 C<sub>3</sub>S 快,但以后变慢。C<sub>2</sub>S 的水化速度最慢,但在后期稳步增长。

## (二) 凝结硬化的物理过程

硅酸盐水泥的水化过程可分为四个阶段:初始反应期、诱导期、凝结期和硬化期。

当硅酸盐水泥与水混合时,立即产生一个快速反应,生成过饱和溶液,然后反应急剧减慢,这是由于在水泥颗粒周围生成了硫铝酸钙微晶膜或胶状膜。接着就是慢反应阶段,称为诱导期。诱导期終了后,由于渗透压的作用,使水泥颗粒表面的薄膜包裹层破裂,水泥颗粒得以继续水化,进入凝结期和硬化期。

水泥在凝结硬化过程中,发生水化反应的同时又发生着一系列物理化学变化。水泥加水后,化学反应起初是在颗粒表面上进行的。 $C_3S$  水解生成的  $Ca(OH)_2$  溶于水中,使水变成饱和的石灰溶液,使其他生成物不能再溶解于水中。它们就以细小分散状态的固体析出,微粒聚集形成凝胶。这种胶状物质有黏性,是水泥浆可塑性的来源,使水泥浆能够黏着在骨料上,并使拌和物产生和易性。随着化学反应的继续进行,水泥浆中的胶体颗粒逐渐增加,凝胶大量吸收周围的水分,而水泥颗粒的内核部分也从周围的凝胶包覆膜中吸收水分,继续进行水解和水化。随着水泥浆中的游离水分逐渐减小,凝胶体逐渐变稠。水泥浆也随之失去可塑性,开始凝结。

所形成的凝胶中有一部分能够再结晶,另一部分由于在水中的可溶性极小而长期保持胶体状态。氢氧化钙凝胶和水化铝酸钙凝胶是最先结晶的部分。它们的结晶和水化硅酸钙凝胶由于内部吸水而逐渐硬化。晶体逐渐成长,凝胶逐渐脱水硬化,未水化的水泥颗粒内核又继续水化,这些复杂交错的过程使水泥硬化能延续若干年之久。

水泥凝结硬化过程可以归纳为以下 4 个特点:

(1) 水泥的水化反应是由颗粒表面逐渐深入到内层的复杂的物理化学过程,这种作用起初进行较快,以后逐渐变慢。

(2) 硬化的水泥石是由晶体、胶体、未完全水化的水泥颗粒、游离水分及气孔等组成的不均质结构。

(3) 水泥石的强度随龄期而发展,一般在 28 d 内较快,以后变慢。

(4) 温度越高,凝结硬化速度越快。

## 三、水泥矿物组成对水泥性能的影响

### (一) 对强度的影响

硅酸盐水泥的强度受其熟料矿物组成影响较大。矿物组成不同的水泥,其水化强度的发展是不相同的。就水化物而言, $C_3S$  具有较高的强度,特别是较高的早期强度。 $C_2S$  的早期强度较低,但后期强度较高。 $C_3A$  和  $C_4AF$  的强度均在早期发挥,后期强度几乎没有发展,但  $C_4AF$  的强度大于  $C_3A$  的强度(见表 2-1)。

### (二) 对水化热的影响

水泥单矿物的水化热试验数值有较大的差别,但是其规律是一致的。不同熟料矿物的水化热和放热速度大致遵循下列顺序:

$$C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$$

硅酸盐水泥四种主要组成矿物的相对含量不同,其放热量和放热速度也不同。 $C_3A$  与  $C_3S$  含量较多的水泥,其放热量大,放热速度也快,对大体积混凝土防止开裂是不利的,见表 2-2。

表 2-1 水泥熟料单矿物的水化物强度

矿物名称	抗压强度 (MPa)				
	3 d	7 d	28 d	90 d	180 d
C <sub>3</sub> S	29.6	32.0	49.6	55.6	62.6
C <sub>2</sub> S	1.4	2.2	4.6	19.4	28.6
C <sub>3</sub> A	6.0	5.2	4.0	8.0	8.0
C <sub>4</sub> AF	15.4	16.8	18.6	16.6	19.6

表 2-2 水泥熟料矿物的水化热 (溶解热法)

矿物名称	水化热 (J/g)					
	3 d	7 d	28 d	90 d	180 d	完全水化
C <sub>3</sub> S	410	461	477	511	507	510
C <sub>2</sub> S	80	75	184	230	222	247
C <sub>3</sub> A	712	787	846	—	913	1 536
C <sub>4</sub> AF	121	180	201	197	306	427

### (三) 水泥熟料矿物的水化速度

不同水泥熟料矿物的结合水量和水化速度见表 2-3。

表 2-3 不同水泥熟料矿物的结合水量和水化速度

(%)

矿物名称	水化时间										结合水量	完全水化
	3 d		7 d		28 d		90 d		180 d			
	结合水量	水化程度	结合水量	水化程度	结合水量	水化程度	结合水量	水化程度	结合水量	水化程度		
C <sub>3</sub> S	4.9	36	6.2	46	9.2	69	12.5	93	12.9	94	13.4	100
C <sub>2</sub> S	0.1	7	1.1	11	1.1	11	2.9	29	2.9	30	9.9	100
C <sub>3</sub> A	20.2	82	19.9	83	20.6	84	22.3	91	22.8	93	24.4	100
C <sub>4</sub> AF	14.4	70	14.7	71	15.2	74	18.5	89	18.9	91	20.7	100

### (四) 对保水性的影响

水泥保水性不仅与水泥的原始分散度有关,而且与其矿物组成有关。C<sub>3</sub>A 保水性最强。

为获得密实度大和强度高的水泥石或混凝土,要求水泥浆体的流动性好,而需水量少;同时要求保水性好,泌水量少,而又具有比较密实的凝聚效果。但是流动性好与需水量少是矛盾的,保水性好与结构密实也是矛盾的。因此,需要采取一些工艺措施(如高频振动)或采用掺减水剂等方法来调整这些矛盾。



### (五)对收缩的影响

四种矿物对收缩的影响见表 2-4,表中  $C_3A$  的收缩率最大,比其他三种熟料矿物的收缩率高 3~5 倍。 $C_3S$ 、 $C_2S$  和  $C_4AF$  三种矿物的收缩率相差不大,因此水工建筑物混凝土应尽量降低  $C_3A$  含量。

表 2-4 四种矿物的收缩率

矿物名称	$C_3A$	$C_2S$	$C_3S$	$C_4AF$
收缩率(%)	0.002 24 ~ 0.002 44	0.000 75 ~ 0.000 83	0.000 75 ~ 0.000 83	0.000 38 ~ 0.000 60

## 四、水工混凝土常用的水泥品种和技术指标

### (一)水工混凝土常用的水泥品种

#### 1. 通用硅酸盐水泥

通用硅酸盐水泥的定义为:以硅酸盐水泥熟料和适量的石膏及规定的混合材料制成的水硬性胶凝材料。

通用硅酸盐水泥按混合材料的品种和掺量分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。

水工混凝土选用的水泥品种多是硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥。这两种水泥的组分和代号见表 2-5。

表 2-5 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的组分和代号

水泥品种	代号	组分(质量百分数,%)				
		熟料 + 石膏	粒化高炉矿渣	火山灰质混合材料	粉煤灰	石灰石
硅酸盐水泥	P · I	100	—	—	—	—
	P · II	≥95	≤5	—	—	—
		≥95	—	—	—	≤5
普通硅酸盐水泥	P · O	≥80 且 <95	>5 且 ≤20*			

注: \* 表示本组分材料为符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)标准 5.2.3 条的活性混合材料,其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)标准 5.2.4 条的非活性混合材料或不超过水泥质量 5% 且符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)标准 5.2.5 的窑灰代替。

#### 2. 中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥及低热矿渣硅酸盐水泥

水工混凝土常选用中热硅酸盐水泥。中热硅酸盐水泥以适当成分( $C_3S$  含量 ≤55%,  $C_3A$  含量 ≤6% 与  $f-CaO$  含量 ≤1.0%) 的硅酸盐水泥熟料加入适量石膏,磨细制成的具有中等水化热(3 d 小于等于 251 kJ/kg, 7 d 为小于等于 293 kJ/kg) 的水硬性胶凝材料,称为中热硅酸盐水泥,代号 P · MH, 强度等级为 42.5。

### (二)水工混凝土常用水泥的技术指标

水工混凝土常用水泥的技术指标见表 2-6。

表 2-6 硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥及中热硅酸盐水泥技术指标

水泥品种		硅酸盐水泥		普通硅酸盐水泥		中热硅酸盐水泥	
强度等级		42.5	52.5	42.5	52.5	42.5	
抗压强度 (MPa)	3 d	≥17.0	≥23.0	≥17.0	≥23.0	12.0	
	7 d	—	—	—	—	22.0	
	28 d	≥42.5	≥52.5	≥42.5	≥52.5	42.5	
抗折强度 (MPa)	3 d	≥3.5	≥4.0	≥3.5	≥4.0	3.0	
	7 d	—	—	—	—	4.5	
	28 d	≥6.5	≥7.0	≥6.5	≥7.0	6.5	
凝结时间 (min)	初凝	≥45		≥45		≥60	
	终凝	≤390		≤600		≤720	
细度(m <sup>2</sup> /kg)		比表面积≥300				比表面积≥250	
氧化镁(%)		≤5.0,压蒸合格允许放宽 6.0					
三氧化硫(%)		≤3.5					
安定性		用沸煮法检验必须合格					
氯离子(%)		≤1.3(素混凝土)或≤0.06(钢筋混凝土)				—	
碱含量(%)		≤0.6(若使用活性骨料)					
烧失量(%)	P·I	≤3.0	≤5.0			≤3.0	
	P·II	≤3.5					
不溶物(%)	P·I	≤0.75	—			—	
	P·II	≤1.5					
水化热(kJ/kg)	—		—			3 d	≤251
						7 d	≤293

### 五、水泥品质指标的检验方法

(1) 氧化钙(CaO)、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、氧化铁(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、氧化镁(MgO)、三氧化硫(SO<sub>3</sub>)、不溶物、烧失量、游离氧化钙(f-CaO)、氧化钠(Na<sub>2</sub>O)和氧化钾(K<sub>2</sub>O)按《水泥化学分析方法》(GB/T 176—2008)进行。

(2) 比表面积按《水泥比表面积测定方法(勃氏法)》(GB/T 8074—2008)进行。

(3) 凝结时间和安定性按《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2001)进行。

(4) 压蒸安定性按《水泥压蒸安定性试验方法》(GB/T 750—1992)进行。

(5) 氯离子按《水泥原料中氯的分析方法》(JC/T 420—2006)进行。

(6) 强度按水泥胶砂强度检验方法(GB/T 17671—1999)进行。