

# 寒冷地区面板坝混凝土材料 性能试验研究与应用

HANLENG DIQU MIANBANBA HUNNINGTU CAILIAO  
XINGNENG SHIYAN YANJIU YU YINGYONG

李清富 王 兵 何鲜峰 著  
王建设 张秋宇 孙卫江



黄河水利出版社

# 寒冷地区面板坝混凝土材料 性能试验研究与应用

李清富 王 兵 何鲜峰 著  
王建设 张秋宇 孙卫江

黄河水利出版社  
· 郑 州 ·

## 内 容 提 要

本书采用正交试验分析法,通过大量试验研究了水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率及粗骨料级配变化等对面板混凝土材料工作性能、基本力学性能、收缩性能和热物理参数试验的影响规律,并对不同因素的影响程度进行了分析比较。同时,结合我国西部寒冷地区某水库大坝的建设,提出了面板坝施工期裂缝控制的针对性措施,对不同类型的裂缝给出了相应的处理建议。

本书可供从事建筑材料和水利工程建设行业的工程技术人员以及研究人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

寒冷地区面板坝混凝土材料性能试验研究与应用/李清富等著. —郑州:黄河水利出版社,2017. 11  
ISBN 978 - 7 - 5509 - 1912 - 9

I. ①寒… II. ①李… III. ①混凝土面板坝 - 水工材料 - 性能试验 IV. ①TV431 ②TV649

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 300926 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

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:hhsllcbs@126.com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9.5

字数:220 千字

版次:2017 年 11 月第 1 版

印次:2017 年 11 月第 1 次印刷

定价:30.00 元

## 前 言

面板堆石坝最早起源于 100 多年前的美国,最初的兴建是为了解决西部淘金人的取水问题,属于拦河坝的一种。截至 2011 年,在世界各地近百个国家中,已建和拟建的混凝土面板堆石坝已有 600 多座,其中我国已建、在建和拟建的混凝土面板堆石坝约 300 座,占世界堆石坝总数的一半左右,可以说混凝土面板堆石坝在我国水利大坝建设中有着举足轻重的地位。目前,寒冷地区的混凝土面板堆石坝数量也在不断增加,世界范围内寒冷地区的混凝土面板堆石坝最多的国家是美国,如处于极端最低气温为  $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件的恐怖湖(Terror Lake)一坝、新芳草地坝、考尔赖特坝、维松坝、卡宾溪坝等。我国在严寒和寒冷地区建成的面板坝已超过 20 座,其中有 5 座所在地区的极端最低气温低于  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,多座坝的极端气温低于  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分析国内外混凝土面板堆石坝面板施工中存在的问题可以发现,施工期面板开裂是工程质量控制的难点之一,特别是高寒地区,混凝土面板坝的施工更易受到气候的影响,因此温度的剧烈变化和大面积混凝土施工对面板施工期裂缝控制提出了更高的要求。实践表明,混凝土面板堆石坝在寒冷地区的运行是安全的,混凝土面板堆石坝在暖季的施工也是便捷、可靠、经济的。但是,在寒冷地区,尤其是在高寒地区修建混凝土面板堆石坝,如何在寒冷气候条件下面板连续、快速、安全施工等问题,一直未能得到很好的解决,这严重限制了面板坝在新疆等寒冷地区的建设和使用。

本书针对寒冷地区混凝土面板堆石坝施工期面板开裂问题,采用当地天然河砂、卵石,以及当地生产的水泥、粉煤灰、矿渣、减水剂及引气剂等为原材料配制混凝土,开展了面板混凝土材料性能试验与应用研究。全书共分 9 章,主要内容包括:分析了 C30 面板混凝土的制备原理,并采用假设表观密度法确定了混凝土的基准配合比,选取了四种水胶比、四种粉煤灰掺量、四种矿渣掺量、四种砂率以及四种粗骨料级配,按正交试验设计表确定了试验配合比;进行了混凝土拌和物坍落度试验,得出了水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率及粗骨料级配变化对混凝土拌和物工作性能的影响规律,并对不同因素的影响程度进行了分析比较;以 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、45 d 为龄期,进行了混凝土基本力学性能试验,得出了水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率及粗骨料级配变化对混凝土基本力学性能的影响规律,并对不同因素的影响程度进行了分析比较;以 3 d、7 d、14 d、28 d 为龄期,进行了混凝土干燥收缩试验,得出了水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率及粗骨料级配变化对混凝土干缩的影响规律,并对不同因素的影响程度进行了分析比较;进行了混凝土塑性收缩试验和混凝土热物理参数比热的测定试验,得出了水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率及粗骨料级配变化对混凝土塑性收缩以及混凝土热物理参数比热的影响规律,并对不同因素的影响程度进行了分析比较;在分析寒冷地区面板坝施工期混凝土开裂原因的基础上,提出了裂缝控制的措施,并针对不同类型的裂缝给出了相应的处理建议;结合某水库大坝的观测数据,从降低温度应力和防止混凝土开裂的角度,提出了在混凝土施工阶段应该采用的施工方法,进一步提高混凝土面板坝抗裂的能力等。

本书在编写过程中得到了伊犁哈萨克自治州水利局、郑州大学、伊犁哈萨克自治州水利电力勘察设计研究院、华北水利水电大学和新疆生产建设兵团水利水电工程集团有限公司等单位的大力支持和帮助,还有许多同志参与了本书研究内容的调研、试验、数据整理和工程应用工作。另外,本书编写过程中还引用了大量的文献资料。在此,谨向为本书完成提供支持和帮助的单位、参考文献的原作者及所有参与人员表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中尚有许多不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2017年7月

# 目 录

## 前 言

1 绪 论 .....	(1)
1.1 研究意义 .....	(1)
1.2 国内外研究现状与分析 .....	(2)
1.3 本书研究的主要内容 .....	(7)
2 面板混凝土的制备 .....	(8)
2.1 面板混凝土的原材料 .....	(8)
2.2 配合比设计 .....	(11)
2.3 成型工艺和养护条件 .....	(14)
2.4 本章小结 .....	(15)
3 面板混凝土的工作性能评价 .....	(16)
3.1 引 言 .....	(16)
3.2 坍落度试验 .....	(16)
3.3 影响面板混凝土工作性能的因素分析 .....	(18)
3.4 本章小结 .....	(20)
4 面板混凝土基本力学性能试验研究 .....	(21)
4.1 引 言 .....	(21)
4.2 面板混凝土立方体抗压强度试验 .....	(21)
4.3 面板混凝土立方体劈裂抗拉强度试验 .....	(31)
4.4 面板混凝土抗折强度试验研究 .....	(40)
4.5 面板混凝土轴心抗压强度与弹性模量试验 .....	(49)
4.6 本章小结 .....	(65)
5 面板混凝土干缩与塑性收缩试验研究 .....	(67)
5.1 引 言 .....	(67)
5.2 面板混凝土干缩试验 .....	(68)
5.3 面板混凝土塑性收缩试验 .....	(76)
5.4 本章小结 .....	(81)
6 面板混凝土热学性能试验研究 .....	(83)
6.1 引 言 .....	(83)
6.2 面板混凝土比热试验 .....	(83)
6.3 本章小结 .....	(88)
7 面板混凝土施工期裂缝控制与处治对策 .....	(89)
7.1 引 言 .....	(89)

---

7.2	面板混凝土施工期裂缝的类型 .....	(90)
7.3	面板混凝土施工期裂缝产生的原因 .....	(90)
7.4	裂缝控制对策 .....	(92)
7.5	裂缝处治对策 .....	(94)
7.6	本章小结 .....	(95)
8	工程应用研究 .....	(96)
8.1	工程概况 .....	(96)
8.2	大坝填筑施工 .....	(97)
8.3	试验数据与分析 .....	(104)
8.4	本章小结 .....	(141)
9	结论与展望 .....	(142)
9.1	结 论 .....	(142)
9.2	展 望 .....	(143)
	参考文献 .....	(144)

# 1 绪 论

## 1.1 研究意义

面板堆石坝最早起源于 100 多年前的美国,最初的兴建是为了解决西部淘金人的取水问题,属于拦河坝的一种。截至 2011 年,在世界各地近百个国家中,已建和拟建的混凝土面板堆石坝已有 600 多座,其中我国的面板堆石坝占世界总数的一半左右(见图 1-1)。可以说,混凝土面板堆石坝在我国水利大坝建设中有着举足轻重的地位。混凝土面板堆石坝以堆石体为支承结构,并以其上游表面设置的混凝土面板作为防渗结构<sup>[1]</sup>,具有较好的适应地形和地质条件的能力,而且面板堆石坝取材便利,可以从施工当地选材,减小了材料运输成本问题。同时,坝体有着施工工艺简单、工期可控性强、利于尽早投入使用等优点。混凝土面板堆石坝坝体抗震性好,可以减少地震带来的危害。截至 2011 年底,我国已建、在建和拟建的混凝土面板堆石坝约 300 座。目前,寒冷地区的混凝土面板堆石坝数量也在不断增加。世界范围内寒冷地区的混凝土面板堆石坝最多的国家是美国,如处于极端最低气温为  $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件的恐怖湖(Terror Lake)一坝、新芳草地坝、考尔赖特坝、维松坝、卡宾溪坝等。我国在严寒和寒冷地区建成的面板坝已超过 20 座,其中有 5 座所在地区的极端最低气温低于  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,多座坝的极端气温低于  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而,分析国内外混凝土面板堆石坝面板施工中存在的问题可以发现,施工期面板开裂是工程质量控制的难点之一,特别是高寒地区,混凝土面板坝的施工更易受到气候的影响,因此温度的剧烈变化和大面积混凝土施工对面板施工期裂缝控制提出了更高的要求。实践表明,混凝土面板堆石坝在寒冷地区的运行是安全的,混凝土面板堆石坝在暖季的施工也是便捷、可靠、经济的。但是,对于寒冷地区,尤其是高寒地区修建混凝土面板堆石坝,如何在寒冷气候条件下面板连续、快速、安全施工等问题,一直未能得到很好的解决,这严重限制了面板坝在新疆等寒冷地区的建设和使用。

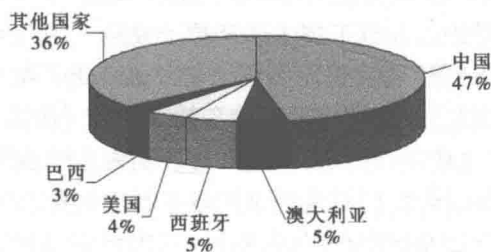


图 1-1 国际面板堆石坝的分布

综上所述,针对高寒地区混凝土面板堆石坝施工期面板开裂问题,通过开展系列材料试验,研究不同掺和料、外加剂等对面板混凝土力学性能、收缩性能和热学性能的影响规律,优化选择适合寒冷地区面板混凝土的掺和料、外加剂及配比,对于控制施工期面板混凝土的裂缝具有重要的科学意义和应用价值。

## 1.2 国内外研究现状与分析

### 1.2.1 国外混凝土面板坝的发展

库克(J. B. Cooke)<sup>[2,3]</sup>认为,国外混凝土面板堆石坝的发展可以分为四个阶段,分别是20世纪30年代之前的早期阶段、20世纪30~60年代的过渡阶段、1970年以后的现代阶段以及2000年以后的突破发展阶段。

(1)早期阶段。这一阶段的面板坝建设主要以厚层抛填的施工工艺为主,高压水充实为辅,也有一部分采用干砌法。这一时期坝体的优点是材料选取严格,抵抗剪应力的能力突出,不过边坡一般为1:0.6~1:1.2,坡度较大;缺点是坝体密实度不足,容易出现表面裂缝及渗漏的问题。这一阶段的代表性建筑物是美国在1930年建成的Salt Spring坝。此坝高100 m,使用后出现了严重的泄漏问题。此阶段的技术特点主要是:坝体密实度较低,容易产生变形,高坝表面容易出现裂缝,降低面板坝的使用寿命。

(2)过渡阶段。此阶段混凝土面板堆石坝的发展处于相对停滞阶段,主要是因为Salt Spring坝的渗漏使人们对堆石坝的安全性产生质疑。这一时期修建的少数高面板堆石坝,如葡萄牙的Paradela坝(采用抛填式填筑)和美国的New Exchequer坝(部分引入薄层碾压技术),都因坝体变形较大、渗漏较严重而需大量修补。这一阶段的技术特点主要表现为:面板堆石坝的修建工程相对停滞,施工技术仍停留在早期的抛填形式,少量坝高100~150 m的高坝的坝体变形仍无法得到控制,存在严重的渗漏问题。美国土木工程师协会发表了一本堆石坝学术会议的论文集,在C. M. Roberts<sup>[4]</sup>的讨论文章中,指出引入振动碾进行薄层碾压堆石的施工方法,可以提高堆石密实度,减小变形。

(3)现代阶段。1970~2000年被称为混凝土面板堆石坝发展的现代阶段。这一阶段的堆石坝建设引入了薄层碾压技术,解决了由于堆石抛填产生的大量变形的问题,使得坝体密实度得到了提高。这一技术的引入解开了桎梏面板坝发展的枷锁,将坝体的建设推向了新的高度。从1971年澳大利亚的Cethana坝的建成到1983年巴西Salvajina坝的施工建设,面板堆石坝的设计理念和施工技术逐渐趋于成熟。20世纪80年代,现代面板堆石坝技术被引入我国,并得到迅速发展。墨西哥的Aguamilpa坝和我国的天生桥一级坝是这一阶段的典型成功工程。它们的建设经验和教训为后一阶段面板坝的发展提供了条件。这一阶段的技术特点主要为:除保留早期和过渡期面板堆石坝的基本特征外,在坝体建设阶段全面引入振动碾压技术,同时采用级配堆石料进行薄层振动碾压,以此得到密实而变形较小的坝体;使用半透水级配垫层、薄型趾板;形成多道和多功能的接缝止水结构及采用可以适应较大接缝变形的材料;坝体分区、筑坝材料的填筑标准,面板、趾板的设计及施工技术,接缝止水的结构及材料等都已基本定型。这一阶段碾压堆石坝坝体的密实

度较高,以中硬岩为例,堆石孔隙率为 22% ~ 24%。坝高在 150 m 以下的面板堆石坝运行良好,坝高超过 150 m 后,坝体变形较大。这一阶段混凝土面板堆石坝虽尚不能脱离经验坝型的范畴,但由于高坝增多,技术要求较高,因而开展系统的科学试验和研究工作,逐步趋向于经验判断与科学试验、理论分析相结合的阶段<sup>[5]</sup>。

(4)突破发展阶段。2000 年以后,面板坝的建设多以 200 m 的超高坝为主,且在研究 300 m 的坝体建设方面取得突破。这一阶段建成的面板坝有我国的洪家渡坝、三板溪坝和水布垭坝,巴西的 Barra Grande 坝和 Campos Novos 坝,冰岛的 Karahnjukar 坝,马来西亚的 Bakun 坝等。这一阶段的技术特点主要表现为:根据超高坝的自身特性,采用更先进的碾压设备来增加坝体自身的密实度,减小出现裂缝和渗透的可能性。坝体建设时尽量考虑不同分区之间的变形量,防止出现不均匀的变形,影响坝体建设质量。对大坝施工投入使用后的后期维修养护给予应有的重视,采用数值模拟和模型试验等方法对面板坝裂缝的防治进行了深入的研究,提高了理论分析和设计计算在大坝建设及后期观察维护中的地位。

### 1.2.2 国外混凝土开裂的研究现状

混凝土早期开裂的问题在国外研究得比较早,早在 20 世纪 30 年代北美地区一座坝体的施工过程中,人们就已经开始认识到大体积水工混凝土会由于水泥水化放热而出现升温的现象,并在之后的降温过程中由于体积收缩受约束而出现开裂的问题。国际上不少研究机构,如英国 C&CA、美国 ACI224 委员会、欧洲 CEB/CEB - FIP 等,都是专门从事混凝土裂缝研究的著名机构,并取得了丰硕的研究成果。

欧洲国家进行的联合科研项目 Improved Production of Advanced Concrete Structures (IPACS) (1997 ~ 2001) 进行了高性能混凝土从水泥水化、体积变形、早期力学性质到现场实测等方面的研究,并提出了一套用于设计和施工阶段控制早期混凝土裂缝的专家系统。

P. K. Barrett 等在 90 年代时就已利用温度应力分析软件分析温度对裂缝的影响<sup>[6]</sup>。韩国学者 Moon Do Young 等通过建立板壳有限元模型对箱梁在预应力张拉过程中底板开裂的问题进行研究,结果表明张拉预应力筋会使底板的应力和变形过大,导致底板出现裂缝。底板裂缝产生的影响因素中预应力束的锚固位置和底板的厚度大于施工顺序的影响<sup>[7]</sup>。美国的 Yongda Fu 和 John T. Dewolf 对使用中的一曲线连续箱梁桥进行了研究,通过有限元分析与调查结果相校正,表明温度是裂缝产生的主要原因<sup>[8]</sup>。

Zienkiewicz 等<sup>[9]</sup>根据指数函数可提取公因子的特性,陆续推导并发展了当徐变系数或者徐变度为指数函数表达时等步长的显式递推公式、可变步长的隐式递推公式等,这种增量形式的递推公式不再需要记录大量的应力历史,提高了计算效率。Yue<sup>[10]</sup>通过试验研究与理论分析,提出了在应力递减情况下采用双方程表达式的方法,采用专门的徐变恢复函数来考虑徐变恢复的效应,提高了分时步叠加计算中递减应力时的计算精度。

Igarashi<sup>[11]</sup>等对低水胶比的普通混凝土和掺硅灰混凝土的早期受拉徐变进行了研究,以水胶比为 0.25 和 0.33 为例,通过两种水胶比的对比试验可知,在水胶比相同的情况下,当时间相同时,普通混凝土的早期受拉徐变要大于掺硅灰混凝土的早期受拉徐变。Altoubat<sup>[12]</sup>等研究了普通混凝土(NC)与高性能混凝土(HPC)的早期受拉徐变,结果表明

水胶比的变化会对混凝土徐变产生重要的影响,且随着混凝土水胶比的增加,徐变逐渐增大。

新加坡的 H. R. Lu<sup>[13]</sup>认为,可以基于拉应变能力来估计混凝土开裂,这比基于抗拉强度更简便。他在研究中发现,混凝土的抗压强度与拉应变能力并不完全等同,影响混凝土抗拉强度的因素(配合比、养护条件等)并不影响其拉应变能力。

Omar Chaallal 等<sup>[14]</sup>对体积为 0.16 m<sup>3</sup>的混凝土块内部的干燥收缩应变进行了为期 3 年的量测,并将试验测得值与 ACI、CEB 的公式计算值进行了比较,结果表明,CEB 公式的计算值与试验值符合较好,计算结果较为精确。

M. Sarigaphuti<sup>[15]</sup>等对纤维增强混凝土的收缩开裂与耐久性进行了试验研究。研究表明,在混凝土中掺入纤维后可以减小混凝土的收缩,提高混凝土的抗裂性,有效地降低裂缝宽度。

Powers<sup>[16]</sup>和 Feldman 和 Sereda<sup>[17]</sup>都认为毛细管应力机制并不十分重要,而关于表面自由能的变化问题,Powers<sup>[16]</sup>通过研究认为:在相对湿度从 0 ~ 100% 的整个范围内,表面能的变化只能解释 20% 的湿胀现象。岩崎训明的研究表明<sup>[18]</sup>,当混凝土内部的相对湿度(35% ~ 85%)逐渐增大时,混凝土内部的毛细管张力作用逐渐减小,混凝土收缩值不断降低;当相对湿度在 35% 以下时,如果按照上面的理论分析,混凝土应该出现膨胀的现象,但实际上混凝土的收缩量在原来的基础上继续增大,这说明当相对湿度小于 35% 时,毛细管理论不能对收缩进行合理的解释,这种现象应该由其他机制来解释。

Hansen 和 Boegh<sup>[19]</sup>对再生混凝土和普通混凝土的干缩率进行了研究,认为再生骨料表面的孔隙特征和吸水特性等性质与天然骨料存在很大差异,再生骨料含有一部分老水泥石砂浆,进而导致中低强度的再生混凝土的干缩率比普通混凝土大得多。

Elie El Hindy<sup>[20]</sup>等对预拌高性能混凝土的干燥收缩展开了试验研究,试验研究了不同养护时间对混凝土干缩的影响,结果发现混凝土的干缩量随着养护时间的延长而不断增大。同时,他们对应用 ACI209 公式(使用普通混凝土)来预测高性能混凝土干燥收缩的准确性进行了研究,认为如果在 ACI209 公式中引入新的参数,则公式仍可用于高性能混凝土的干燥收缩预测。

Tazawa<sup>[21]</sup>等研究了水灰比、矿物掺和料等原材料对混凝土自由收缩的影响规律,发现混凝土的自由收缩量会随着水灰比的增大而下降,且一些掺和料的加入可以对抑制混凝土的自生收缩起到积极的作用。

O. kayali 等<sup>[22]</sup>在纤维增强轻质混凝土中分别掺入了两种不同的纤维(聚丙烯纤维和钢纤维),并对其抗压强度、抗拉强度以及干缩进行了测定。从试验结果发现,无论掺入哪种纤维,都没有对混凝土的抗压强度产生太大影响,但对抗拉强度起到了积极的作用。同时,掺加不同纤维的干缩量有明显区别——掺加聚丙烯纤维的混凝土干缩值没有明显降低,但是掺加钢纤维的混凝土干缩量有明显降低。

M. Mulheron<sup>[23]</sup>等研究了风速等因素以及不同掺和料对高强混凝土塑性收缩的影响。研究表明,随着时间的推移,这些因素对塑性收缩的影响会出现不同程度的改变。不过硅粉和风速总会对混凝土的塑性收缩产生重要影响。因而为了有效地控制工程中的塑性裂缝,应在混凝土中掺入适量的硅粉,并保证浇筑后 1 d 内结构表面处于湿润的环境中。

Pietro Lura 等<sup>[24]</sup>研究了养护温度和水泥类型对混凝土自收缩等方面的影响。研究发现,随着养护温度的升高,混凝土的自收缩不会有过大的增长,但是加快了收缩的速度;当温度不变时,普通水泥的早期收缩量会小于矿渣水泥的早期收缩量。

国外对于混凝土裂缝行为特征的描述、裂缝产生的机制及对混凝土结构中裂缝的准确模拟等的研究已有很长的历史。但由于尚未完全认识混凝土裂缝发展变化机制,使得混凝土裂缝研究仍是当前研究的热点之一。1989年,RJLEM 创建了“避免混凝土早期热裂缝”技术委员会,用来交流抗裂方面的经验和观点,以提交现状报告为宗旨,并对相关的试验方法提出意见。日本和法国开发出在现场测定约束应力的新方法,并发现实验室与现场的试验结果和计算结果的比较,是该领域进一步发展的来源。近年来,高强混凝土已被证明是对早期开裂非常敏感的材料,这不仅是水化热的结果,由于自干燥作用产生的自收缩和硫酸盐相的化学反应,可能也是重要起因。

目前,在混凝土面板堆石坝的建设过程中,对面板混凝土的温控防裂只采取了有限措施,如在混凝土浇筑时加冰、掺粉煤灰、加减水剂、加缓凝剂和微膨胀剂等。但这仍远远不够,大面积薄板混凝土的温控应从设计、材料选择等基础工作做起,再加上适当的施工措施,如此才能达到避免非荷载裂缝的目的。

### 1.2.3 国内混凝土面板坝的发展

迄今为止,现代筑坝技术已经引入我国近 30 年之久,混凝土面板堆石坝几乎遍布我国各地。经过这些年的不断努力,终于形成了我国独特的筑坝技术。这一发展过程分别为引进消化阶段、自主创新阶段和突破发展阶段。

(1)1985~1990 年为我国面板堆石坝技术的引进消化阶段。这一阶段开工建设的面板堆石坝约 14 座,西北口面板坝是这一阶段的里程碑工程。这一阶段的技术特点是:筑坝技术虽起步较晚,但起点较高;坝体建设已有无轨滑模、碾压砂浆固坡等少量技术开发和创新;最大坝高不超过 100 m;开始起草设计导则,向规范化建设迈出第一步;但是人们对面板堆石坝的特性认识不足,同时面板混凝土裂缝较多。

(2)1991~2000 年为自主创新阶段。这一阶段开工建设的面板堆石坝有 70 余座,建成 40 多座。天生桥一级面板堆石坝是我国第一座 200 m 级高的面板堆石坝,也是这一阶段的里程碑工程。这一阶段的技术特点是:建成了多座高 100 m 及以上的高坝,100 m 级高坝的筑坝技术日益成熟;自主创新了面板堆石坝设计与施工成套技术,并开始向 200 m 级高坝发展;面板混凝土温度和干缩性裂缝得到较好控制;编制和发布了多种设计和施工规范;坝体变形控制尚缺乏经验,面板产生结构性裂缝的工程还比较多。

(3)2000~2010 年为突破发展阶段。这一阶段开工建设的面板堆石坝超过 120 座,建成的超过 110 座,其中,150 m 以上的高坝有 6 座。代表性工程包括修建于非对称狭窄河谷上的洪家渡坝和水布垭坝。水布垭坝是这一阶段的里程碑工程。这一阶段的技术特点是:最大坝高突破 200 m,深厚覆盖层上建坝高度突破 100 m;150 m 级高坝筑坝技术日益成熟;面板堆石坝设计和施工规范开始新一轮修订。

#### 1.2.4 国内混凝土开裂的研究现状

我国关于混凝土收缩开裂的研究工作较国外相比起步较晚,在 20 世纪 50~60 年代的钢筋混凝土结构设计计算中,我国主要还是参考国外的文献、资料和数据,同时工程设计中的很多现实问题还不能够得到解决。

20 世纪 50 年代,中国水利水电科学研究院等单位对大体积混凝土的温度效应、温度控制进行了深入的研究<sup>[25]</sup>,丁宝瑛等<sup>[26]</sup>通过研究认为混凝土中是否掺加粉煤灰会对混凝土拉伸徐变系数和受压徐变系数之间的比较产生影响。当掺加粉煤灰时,二者存在较大的差别;反之,可以近似地认为二者相等;在 20 世纪 80 年代,随着超长大跨结构的出现,工程师和相关科研人员开始研究框架结构的温度应力问题,其中刘开国<sup>[27]</sup>教授的“ $\Delta$  方程法及其微分解”和王铁梦<sup>[28]</sup>教授的“分跨综合法”是较具有推广应用性的两种方法。1998 年,游宝坤等<sup>[29]</sup>通过研究补偿收缩混凝土最先提出了钢筋混凝土 UEA 无缝设计施工的方法。2000 年,顾渭建<sup>[30]</sup>总结出了包括设计措施、施工措施在内的超长混凝土结构的裂缝控制综合技术方法。高政国等<sup>[31]</sup>针对非指数函数表达的徐变计算中要存储应力历史的问题,提出了“等效应力”的概念,并推导采用了等效应力的增量和全量的递增公式,他们所提出的概念和思想仍值得参考借鉴。2001 年,冯健等<sup>[32]</sup>结合南京国际展览中心工程,对超长混凝土结构的设计、温度应力的有限元分析以及裂缝控制的施工措施等进行了深入的探讨,并对混凝土收缩进行了长期的观测。2006 年,张玉明等<sup>[33]</sup>结合南京奥体中心大平台裂缝控制的设计及研究,建议对超长混凝土结构的裂缝控制应结合混凝土的材料性能及实际施工过程来实现动态设计。王德法等<sup>[34]</sup>对轴拉混凝土徐变变形规律进行了周期一个月的试验研究,认为应该分为应力水平低于长期强度和应力水平高于长期强度两种情况来区别考虑受拉混凝土徐变问题。浙江大学的陈军毅<sup>[35]</sup>、张平<sup>[36]</sup>等主要运用有限元软件研究了超长混凝土结构在温度场下的计算理论。王铁梦<sup>[37]</sup>教授对民用与工业建筑中大体积混凝土的裂缝控制进行了研究,系统分析了建筑物的裂缝发展变化规律,提出了有效的裂缝控制设计和施工措施,在结合材料、施工、设计、环境及地基条件下,提出了“抗”与“防”相结合的设计原则,结合工程实践提出了伸缩缝间距及裂缝控制计算公式,这些研究成果在实际工程中得到了广泛的应用,取得了显著的效果。21 世纪初,许多院校和科研单位对超长结构中的温度效应进行了大量的理论研究和工程实践。同济大学的崔帅<sup>[38]</sup>、李明<sup>[39]</sup>等结合试验和有限元分析,对超长混凝土结构中温度作用的产生机制和计算方法进行了研究。清华大学的李飞<sup>[40]</sup>研究了大掺量粉煤灰混凝土早期约束应力发展规律及早期黏弹性行为,研究表明粉煤灰的掺入可以有效降低混凝土内部温度的变化,降低温度应力。混凝土中同时掺入膨胀剂和粉煤灰时可以在结构内部形成预压应力,有效提高混凝土早期抵抗开裂的能力。2010 年,陈平友、肖克根等<sup>[41]</sup>在成都双流国际机场 T2 航站楼 496 m × 140 m 的结构设计中采用了超长混凝土框架结构体系,结合施工后浇带的布置,在梁中施加后张有黏结预应力来控制由温度和混凝土收缩引起的裂缝。

上述研究表明,混凝土开裂问题已经引起业界专家和学者的广泛关注,但当前的裂缝控制措施和手段仍相对单一。此外,针对寒冷地区混凝土面板的抗裂研究很少。因此,面

对寒冷地区混凝土面板堆石坝不断增多的现象,本书的研究将具有更重要的理论和实用意义。

### 1.3 本书研究的主要内容

(1)分析 C30 混凝土的制备原理,并采用假定表观密度法确定了混凝土的配合比。

(2)通过坍落度试验,分析水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率以及粗骨料级配变化对混凝土工作性能的影响,并对不同因素的影响程度进行分析。

(3)以 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、45 d 为龄期,通过混凝土抗压强度、劈拉强度、抗折强度、轴压强度以及弹性模量试验,研究水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率以及粗骨料级配变化对混凝土基本力学性能的影响规律,并对不同因素的影响程度进行分析。

(4)以 3 d、7 d、14 d、28 d 为龄期,通过混凝土干缩试验,研究水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率以及粗骨料级配变化对混凝土干缩的影响规律,并对不同因素的影响程度进行分析。

(5)通过塑性收缩试验,研究水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率以及粗骨料级配变化对混凝土塑性收缩的影响规律,并对不同因素的影响程度进行分析。

(6)通过热物理参数试验,研究水胶比、粉煤灰掺量、矿渣掺量、砂率以及粗骨料级配变化对混凝土热物理参数的影响规律,并对不同因素的影响程度进行分析。

(7)结合试验数据,分析施工期混凝土面板出现裂缝的原因,并从原材料的选择和施工工艺方面对施工期混凝土面板的裂缝控制提出建议。

## 2 面板混凝土的制备

### 2.1 面板混凝土的原材料

试验所用的原材料有水泥、粉煤灰、矿渣、细骨料、粗骨料、高效减水剂、水以及引气剂等。各种原材料组分检验情况如下。

#### 2.1.1 水泥

水泥是一种粉末状材料,当它与水混合后,在常温下经物理、化学作用,能由可塑性浆体逐渐凝结硬化成坚硬的石状体。硅酸盐水泥是以水泥熟料(硅酸钙为主要成分)、适当的石膏及规定的混合材料制成的水硬性材料<sup>[42]</sup>。本试验采用特克斯鑫疆水泥有限责任公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥。各项性能指标根据《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)<sup>[43]</sup>进行测试,结果见表2-1。

表2-1 水泥各项指标

项目	抗折强度 (MPa)		抗压强度 (MPa)		凝结时间 (min)		细度 (%)	安定性
	3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝	80 μm 筛余	
标准值	≥3.5	≥6.5	≥17	≥42.5	≥45	≤60	≤10	合格
检测值	4.7	8.0	23.9	47.6	146	211	3.0	合格

#### 2.1.2 粉煤灰

粉煤灰是火力发电厂的煤粉燃烧后排放出来的废料,属于火山灰质混合材料,表面光滑,颜色呈灰色或暗灰色。粉煤灰的掺入可以提高混凝土的密度和强度,改善和易性,节约水泥,降低水化热,改善混凝土抵抗化学侵蚀的能力<sup>[42]</sup>。本试验采用新疆天山电力玛纳斯发电分公司生产的I级粉煤灰。各项性能指标根据《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2005)<sup>[44]</sup>进行测试,结果见表2-2。

#### 2.1.3 矿渣

矿渣是冶炼生铁的副产品<sup>[45]</sup>。矿渣经干燥磨细而形成的微粉,可作为混凝土的外掺料。矿渣微粉不仅可以等量取代水泥,而且可以使混凝土的多项性能获得显著改善,如降低水泥水化热、提高耐腐蚀性、抑制碱—骨料反应和大幅度提高长期强度等<sup>[42]</sup>。本试验采用矿渣粉的各项性能指标根据《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T

18046—2008)<sup>[46]</sup>进行测试,结果见表 2-3。

表 2-2  $\zeta$ a 级粉煤灰品质检测结果

序号	测试内容	I 级	测试结果
1	细度(%) (0.045 mm 方孔筛余)	$\leq 12.0$	9.22
2	需水量比(%)	$\leq 95$	91
3	烧失量(%)	$\leq 5.0$	5.0
4	含水量(%)	$\leq 1.0$	0.5
5	SO <sub>3</sub> 含量(%)	$\leq 3.0$	1.22
6	密度(g/cm <sup>3</sup> )	—	2.252

表 2-3 矿渣品质检测结果

序号	测试内容	标准值	测试结果
1	比表面积(m <sup>2</sup> /kg)	$\geq 300$	463
2	氯离子含量(%)	$\leq 0.06$	0.024 2
3	烧失量(%)	$\leq 3.0$	1.236
4	含水量(%)	$\leq 1.0$	0.3
5	SO <sub>3</sub> 含量(%)	$\leq 4.0$	0.29
6	密度(g/cm <sup>3</sup> )	$\geq 2.8$	2.88
7	流动性(%)	$\leq 95$	95

#### 2.1.4 细骨料

混凝土中的细骨料一般采用河砂、海砂和人工砂等,其中河砂品质最好。本试验采用天然河砂,按照《建设用砂》(GB/T 14684—2011)<sup>[47]</sup>进行河砂的质量检测,其结果见表 2-4,细度模数为 2.8,其筛分曲线见图 2-1。

表 2-4 细骨料物理性能

项目	表观密度 (g/cm <sup>3</sup> )	堆积密度 (g/cm <sup>3</sup> )	表干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	SO <sub>3</sub> 含量 (%)	轻物质含量 (%)
检测值	2.626	1.651	2.614	0.009	0.2
标准值	$\geq 2.5$	$\geq 1.4$	—	$\leq 0.5$	$\leq 1.0$
项目	云母含量 (%)	含泥量 (%)	坚固性 (按质量损失计,%)	有机物含量	泥块含量 (%)
检测值	0.3	0.2	4	合格	0
标准值	$\leq 1.0$	$\leq 1.0$	$\leq 8$	合格	0

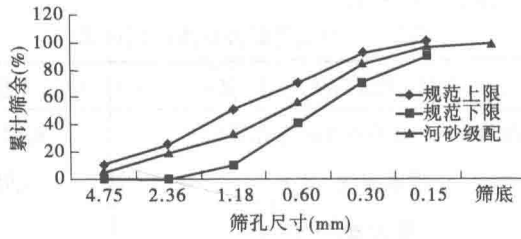


图 2-1 细骨料筛分曲线

### 2.1.5 粗骨料

本试验所用的粗骨料为两种不同级配的卵石,小石子与大石子的级配比例分别是 30% : 70%、40% : 60%、50% : 50%、60% : 40%,其空隙率分别为 0.317 8、0.327 3、0.320 5、0.317 2。本试验所用的粗骨料为两种不同级配的卵石,最大粒径分别为 20 mm 和 40 mm,筛分结果见图 2-2。粗骨料性能检验指标按照《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)<sup>[48]</sup>进行,结果见表 2-5。

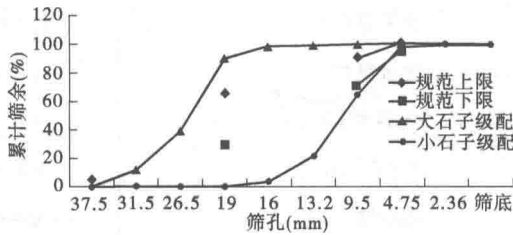


图 2-2 粗骨料(级配比例 30% : 70%)筛分曲线

表 2-5 粗骨料物理性能

粒径 (mm)	表观密度 (g/cm <sup>3</sup> )	表干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含泥量 (%)	泥块含量 (%)	压碎值 (%)	坚固性 (%)
5 ~ 20	2.725	2.719	0.1	0	7.3	4
20 ~ 40	2.683	2.671	0.4	0	7.5	4
标准值	≥2.6	—	≤0.5	0	≤12	≤5
粒径 (mm)	堆积密度 (g/cm <sup>3</sup> )	毛体积密度 (g/cm <sup>3</sup> )	有机物	针、片状颗粒含量 (%)	含水率 (%)	吸水率 (%)
5 ~ 20	1.598	2.712	合格	3.6	0.1	0.27
20 ~ 40	1.568	2.664	合格	2.4	0.1	0.26
标准值	—	—	合格	≤5	—	≤1.0