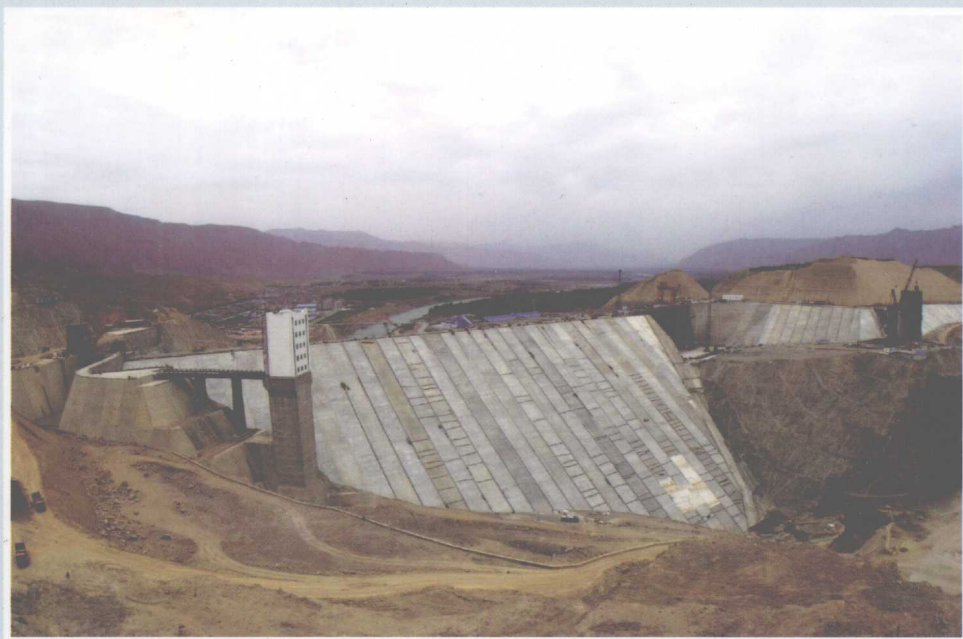


王瑞骏 著

混凝土面板的温度应力与 干缩应力及其渗流特性

TEMPERATURE STRESS AND SHRINKAGE STRESS
AS WELL AS SEEPAGE CHARACTERISTICS OF
CONCRETE FACE SLAB



西安地图出版社

混凝土面板的温度应力 与干缩应力及其渗流特性

王瑞骏 著

西安地图出版社

Temperature Stress and Shrinkage Stress as Well as Seepage Characteristics of Concrete Face Slab

By Wang Ruijun

Xi'an Cartographic Publishing House

图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板的温度应力与干缩应力及其渗流特性:英文/王瑞骏著. —西安:西安地图出版社,2007.6

ISBN 978 - 7 - 80748 - 098 - 3

I. 混… II. 王… III. 混凝土面板堆石坝—应力—研究—英文 IV. TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 087340 号

混凝土面板的温度应力与干缩应力及其渗流特性

王瑞骏 著

西安地图出版社出版发行

(西安市友谊东路 334 号 邮政编号 710054)

新华书店经销 宝鸡市昊阳印刷有限公司印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.75 印张 225 千字

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

印数:0001 - 1000

ISBN 978 - 7 - 80748 - 098 - 3

定价:28.00 元

内 容 提 要

本书是一部系统论述混凝土面板温度应力与干缩应力及其渗流特性的计算模型与分析方法的专著。全书共分 10 章:介绍了混凝土面板裂缝的成因及其影响因素;讨论了确定混凝土面板温控及湿控防裂标准的原则和方法;论述了面板与垫层之间接触面的导热与导湿模型、温度应力与干缩应力的计算模型;探讨了进行混凝土面板温度场与湿度场分析的数学模型和物理模型、温度应力与干缩应力分析的力学模型及有限元方法;论述了面板接缝及面板裂缝的渗流计算模型、密集裂缝型面板渗流计算的等效连续介质模型以及面板堆石坝的渗流计算模型和计算工况;然后,结合工程实例,系统介绍了关于混凝土面板温度应力与干缩应力以及混凝土面板堆石坝渗流的有限元分析成果。

本书可供从事坝工结构分析及坝工设计等工作的科技人员参考使用,也可作为相关学科研究生的教学参考书。

西安出版集团

ABSTRACT

This book generally discusses the calculation model and analysis method on the temperature stress and shrinkage stress as well as seepage characteristics of concrete face slab. The book contains 10 chapters, it introduces the causes and affect factors of the crack of concrete face slab; the book discusses on the confirmation of principle and method on crack-proof criterion for concrete face slab by temperature control and humidity control; meanwhile, the book studies the model of thermal conductivity and humidity conductivity of interface between slab and cushion layer, the calculation model of temperature stress and shrinkage stress as well; and in the book, the mathematical model and physical model for analyzing temperature field and humidity field of concrete face slab along with the mechanical model and FEM method in analyzing temperature stress and shrinkage stress of concrete face slab are both researched; the book also investigates the seepage calculation model for crack and joints of concrete face slab as far as the equivalent quasi-continuum model for seepage calculation of intensive crack face slab; then, combing the construction examples, the book generally illustrates FEM simulation analysis on temperature stress and shrinkage stress of concrete face slab as well as the seepage of CFRD.

The book can be used for the references for engineers and technicians who engage the analysis on dam structure and design, the book also can be used for references of teaching for the relevant postgraduates.

前 言

现代混凝土面板堆石坝的发展趋势是坝越建越高、工程规模越来越大。由于施工水平的提高,混凝土面板的施工逐渐向采用滑模连续浇筑、取消水平缝或将水平缝按施工缝处理的方向发展。因此,混凝土面板的防裂问题就成为决定混凝土面板堆石坝安全性的一个关键技术难题。工程实践经验表明,面板裂缝尤其是贯穿性裂缝的产生主要是由温度应力和干缩应力引起的。在面板产生裂缝及其接缝止水发生破坏的情况下,混凝土面板堆石坝的渗透破坏问题也将十分突出。但目前国内外对于混凝土面板堆石坝面板温度应力、干缩应力及其渗流特性问题的研究还未引起足够的重视,或者研究的深度还十分有限。

有鉴于此,上述问题引起了笔者很大的关注,并促使笔者产生了潜心研究的浓厚兴趣。在攻读博士学位及多年的科研工作中,通过广泛收集和查阅相关资料,笔者对上述问题进行了扎实深入地研究,获得了一批有价值的研究成果。本着抛砖引玉、相互交流与学习的目的,笔者愿通过本书将相关的研究成果奉献给读者。

本书共分10章。第1章系统介绍了混凝土面板堆石坝若干前沿性问题及其研究现状,提出了本书的研究内容及研究意义。第2章结合两座已建成的混凝土面板堆石坝工程,对混凝土面板裂缝的成因及其影响因素进行了系统分析,提出了混凝土面板温度应力与干缩应力分析的若干关键问题。第3章在对混凝土面板温度变形及干缩变形特性进行全面分析的基础上,对混凝土面板的温控及湿控防裂标准问题进行了研究和探讨,提出了确定混凝土面板温控及湿控防裂标准的原则和方法。第4章在对前人提出的一般外荷载作用下接触摩擦单元理论的有效性、合理性及适用性进行分析的基础上,研究建立了面板与垫层之间接触面的导热与导湿模型,并对相关的数值解法进行了分析和探讨。第5章进一步研究建立了面板与垫层之间接触面的温度应力与干缩应力的计算模型,并对接触计算模型实施中相关问题的处理方法进行了讨论。第6章在前人建立的混凝土温度场及温度应力、湿度场及干缩应力分析的数学模型的基础上,研究建立了混凝土温度干缩应力分析的数学模型;通过对混凝土面板的结构特点及施工特点的分析,研究建立了混凝土面板温度场与湿度场分析的物理模型、混凝土面板温度应力与干缩应力分析的力学模型,并对模型实施中的若干问题提出了相应的解决方法。第7章基于等宽缝隙水流运动规律,结合混凝土面板堆石坝的渗流机理,研究建立了面板接缝及面板裂缝的渗流计算模型、密集裂缝型面板渗流计算的等效准连续介质模型,并对混凝土面板堆石坝的渗流计算模型及计算工况等问题进行了分析,提出了相应的解决方案。第8、9、10章,以上述计算模型和分析方法的应用与验证为宗旨,结合一座已建成的混凝土面板堆石坝工程,分别进行了混凝土面板温度应力与干缩应力的有限元仿真分析、混凝土面板堆石坝应力变形的三维有限元仿真分析及混凝土面板堆石坝的渗流有限元分析,获得

了混凝土面板温度应力、干缩应力及温度干缩应力的变化与分布规律以及混凝土面板堆石坝的渗流规律,并通过与相关的工程实测资料的对比,对上述计算模型和分析方法的合理性与准确性进行了验证。

本书研究方法及其成果的创新点包括:(1)根据混凝土面板的温度变形及干缩变形特性,研究提出了制定混凝土面板温控及湿控防裂标准的原则和方法。(2)建立了面板与垫层之间接触面导热与导湿的数学模型。(3)建立了面板与垫层之间接触面温度应力与干缩应力的计算模型。(4)研究形成了一套较为系统地进行混凝土面板温度应力与干缩应力分析的有限元方法。(5)建立了混凝土面板堆石坝的渗流计算模型。

本书所建立或提出的上述计算模型及分析方法,为混凝土面板堆石坝面板温度应力、干缩应力及温度干缩应力的分析以及混凝土面板堆石坝的渗流分析奠定了必要的理论基础,结合工程实例所获得的分析成果对于类似工程具有重要的参考和应用价值。

本书研究成果的获得,首先得益于前人的研究工作。前人关于相关问题的研究思路、研究方法及研究成果,是本书相关内容研究工作必不可少的基础。

在本书相关内容的研究工作中,笔者得到了西安理工大学陈尧隆教授的精心指导和热情帮助,陈尧隆教授严谨的治学态度对笔者有极大的影响,是他的言传身教及关于水工结构前沿问题精湛的学术思想激发和引导笔者潜心进行本书相关内容的研究。在此,谨向陈尧隆教授表示衷心的感谢!

在本书相关内容的研究工作中,笔者还曾请教或得到过西安理工大学以下老师的指导:谢定义教授、李宁教授、李守义教授、柴军瑞教授、叶林副教授等,在此向他们一并表示衷心的感谢!

本书相关内容的研究是结合“公伯峡水电站面板堆石坝面板温度应力及干缩应力仿真分析和防裂措施研究”课题进行的。该课题得到了黄河上游水电开发有限责任公司建设公司领导 and 专家谢小平总经理、洪镛总工程师及于森副总经理等的大力支持和帮助,该公司综合办的金荣芳同志还给笔者提供了本书的封面及封底照片,在此笔者向他们深表谢意!

本书第9章的工程实例分析工作,是在笔者指导下由笔者的硕士研究生李章浩同学具体实施完成的。另外,笔者的硕士研究生王党在、吕海东、陆丽及李炎隆等同学,还协助笔者完成了本书中部分算例及工程实例的分析计算工作。在此,笔者也向他们表示诚挚的谢意!

最后,笔者还要特别感谢我的家人们在笔者多年的研究工作中所给予的理解和支持!

另外,毛腊梅副编审对本书提出过很好的建议,并对文字进行了加工,笔者在此表示谢意。

应该指出的是,混凝土面板的温度应力与干缩应力及其渗流特性问题,是一个影响因素错综复杂、涉及面广的问题,其中所包含的许多理论和实际应用问题尚需作进一步的研究和完善。由于多种原因,本书难免存在不足之处,笔者愿与读者共同探讨。

王瑞骏

2007年4月于西安

目 录

前言	(1)
1 绪论	(1)
1.1 混凝土面板堆石坝筑坝技术发展概况	(1)
1.2 混凝土面板堆石坝筑坝技术研究综述	(2)
1.3 混凝土面板温度应力与干缩应力研究综述	(3)
1.4 混凝土面板渗流特性研究综述	(6)
1.5 本书的研究内容及意义	(6)
2 混凝土面板裂缝的成因及其影响因素	(9)
2.1 混凝土面板裂缝的实例分析	(9)
2.2 混凝土面板裂缝的成因及其影响因素	(13)
2.3 混凝土面板温度应力与干缩应力分析的关键问题	(17)
2.4 小结	(18)
3 混凝土面板的温控及湿控防裂标准	(19)
3.1 混凝土面板的温度变形特性	(19)
3.2 混凝土面板的干缩变形特性	(23)
3.3 混凝土面板的温控及湿控防裂标准问题	(27)
3.4 小结	(29)
4 面板与垫层之间接触面的导热与导湿模型	(31)
4.1 面板与垫层之间接触面的有限元模拟方式	(31)
4.2 外荷载作用下的接触摩擦单元理论	(34)
4.3 接触摩擦单元的导热与导湿模型	(38)
4.4 接触摩擦单元节点温度及湿度的数值解法	(43)
4.5 算例	(43)
4.6 小结	(46)
5 面板与垫层之间接触面温度应力与干缩应力的计算模型	(47)
5.1 接触摩擦单元温度应力的计算模型	(47)
5.2 接触摩擦单元干缩应力的计算模型	(48)
5.3 温度应力与干缩应力接触计算模型的实施	(49)
5.4 算例	(51)
5.5 小结	(53)
6 混凝土面板温度应力与干缩应力的分析方法	(54)
6.1 混凝土面板温度应力与干缩应力分析的传统方法	(54)

6.2	分析方法问题的提出	(57)
6.3	混凝土温度场及温度应力分析的数学模型	(57)
6.4	混凝土湿度场及干缩应力分析的数学模型	(62)
6.5	混凝土温度干缩应力分析的数学模型	(63)
6.6	混凝土面板的结构特点及施工特点	(64)
6.7	混凝土面板温度场与湿度场分析的物理模型	(64)
6.8	混凝土面板温度应力与干缩应力分析的力学模型	(65)
6.9	模型实施中的若干问题	(66)
6.10	小结	(68)
7	混凝土面板的渗流计算模型	(69)
7.1	混凝土面板堆石坝的渗流机理	(69)
7.2	面板接缝的渗流计算模型	(69)
7.3	面板裂缝的渗流计算模型	(74)
7.4	密集裂缝型面板的渗流计算模型	(77)
7.5	面板堆石坝的渗流计算模型	(83)
7.6	面板堆石坝的渗流计算工况	(83)
7.7	小结	(84)
8	混凝土面板温度应力与干缩应力的有限元仿真分析	(85)
8.1	公伯峡混凝土面板堆石坝工程概况	(85)
8.2	混凝土面板温度应力分析	(88)
8.3	混凝土面板干缩应力分析	(107)
8.4	混凝土面板温度干缩应力分析	(115)
9	混凝土面板堆石坝应力变形三维有限元仿真分析	(119)
9.1	不考虑面板变温荷载的分析	(119)
9.2	考虑面板变温荷载的分析	(128)
9.3	结论	(131)
10	混凝土面板堆石坝渗流有限元分析	(132)
10.1	计算模型及计算参数	(132)
10.2	计算工况	(133)
10.3	计算结果分析	(133)
10.4	与观测结果的对比	(135)
10.5	结论	(136)
	参考文献	(137)

Contents

Preface	(1)
1 Introduction	(1)
1.1 An outline on the Construction Technology of Concrete Face Rock - Fill Dam (CFRD)	(1)
1.2 General Introduction to the Study on the Construction Technology of CFRD	(2)
1.3 Present Study on Temperature Stress and Shrinkage Stress of Concrete Face Slab	(3)
1.4 Present Study on Seepage Characteristics of Concrete Face Slab	(6)
1.5 Study Content and meanings	(6)
2 Causes and Affect Factors of the Crack of Concrete Face Slab	(9)
2.1 Example Analysis on Crack of Concrete Face Slab	(9)
2.2 Causes and Affect Factors of the Crack of Concrete Face Slab	(13)
2.3 Key Problems in Analysis on Temperature Stress and Shrinkage Stress of Concrete Face Slab	(17)
2.4 Conclusion	(18)
3 Crack-Resistant Criterion for Temperature and Humidity Control of Concrete Face Slab	(19)
3.1 Temperature Deforming Characteristics of Concrete Face Slab	(19)
3.2 Shrinkage Deforming Characteristics of Concrete Face Slab	(23)
3.3 Crack-Resistant Criterion for Temperature Control and Humidity Control of Concrete Face Slab	(27)
3.4 Conclusion	(29)
4 Model of Thermal Conductivity and Humidity Conductivity of Interface between Slab and Cushion Layer	(31)
4.1 FEM Simulation Method for Interface between Slabs and Cushion Layer ...	(31)
4.2 Contact-Friction Element Principle under General External Loads	(34)
4.3 Models of Thermal Conductivity and Humidity Conductivity of Contact-Friction Element	(38)
4.4 Numerical Method for Temperature and Humidity of Contact-Friction Element node	(43)
4.5 Examples	(43)

4.6	Conclusion	(46)
5	Calculation Model of Temperature Stress and Shrinkage Stress of Interface between Slab and Cushion Layer	(47)
5.1	Calculation Model of Temperature Stress of Contact-Friction Element	(47)
5.2	Calculation Model of Shrinkage Stress of Contact-Friction Element	(48)
5.3	Calculation Model Implementation of Interface of Temperature Stress and Shrinkage Stress	(49)
5.4	Examples	(51)
5.5	Conclusion	(53)
6	Analysis Method on Temperature Stress and Shrinkage Stress of Concrete Face Slab	(54)
6.1	Traditional Method for Analysis on Temperature Stress and Shrinkage Stress of Concrete Face Slab	(54)
6.2	Questions for Analysis Method	(57)
6.3	Mathematical Model for Concrete Temperature Field and Temperature Stress Analysis	(57)
6.4	Mathematical Model for Concrete Humidity Field and Shrinkage Stress Analysis	(62)
6.5	Mathematical Model for Concrete Temperature Shrinkage Stress Analysis	(63)
6.6	Characteristics of Structure and Construction of Concrete face Slab	(64)
6.7	Physical Model for Temperature Field and Humidity field Analysis of Concrete Face Slab	(64)
6.8	Mechanical Model for Temperature Stress and Shrinkage Stress Analysis of Concrete Face Slab	(65)
6.9	Some Questions on Implementation of Model	(66)
6.10	Conclusion	(68)
7	Calculation Model of Seepage of Concrete Face Slab	(69)
7.1	Seepage Mechanism of CFRD	(69)
7.2	Seepage Calculation Model for Joints of Face Slab	(69)
7.3	Seepage Calculation Model for Crack of Face Slab	(74)
7.4	Seepage Calculation Model for Face Slab with Intensive Crack	(77)
7.5	Seepage Calculation Model for CFRD	(83)
7.6	Operating Condition for Seepage Calculation of CFRD	(83)
7.7	Conclusion	(84)
8	FEM Simulation Analysis on Temperature Stress and Shrinkage Stress of Concrete Face Slab	(85)
8.1	Introduction to the Construction of Gongboxia CFRD	(85)
8.2	Analysis on Temperature Stress of Concrete Face Slab	(88)

目 录

8.3	Analysis on Shrinkage Stress of Concrete Face Slab	(107)
8.4	Analysis on Temperature Shrinkage Stress of Concrete Face Slab	(115)
9	3D FEM Simulation Analysis on Stress and Deformation of Concrete Face Slab	(119)
9.1	Analysis of No Considering Temperature Load of Concrete Face Slab	(119)
9.2	Analysis of Considering Temperature Load of Concrete Face Slab	(128)
9.3	Conclusion	(131)
10	FEM Analysis on Seepage of CFRD	(132)
10.1	Calculation Model and Parameter	(132)
10.2	Calculation Operating Case	(133)
10.3	Analysis on Calculation Results	(133)
10.4	Comparison with Observation Results	(135)
10.5	Conclusion	(136)
	On References	(137)

1 绪论

1.1 混凝土面板堆石坝筑坝技术发展概况

现代混凝土面板堆石坝筑坝技术诞生于20世纪60年代,是现代坝工建设领域取得的一项具有重大意义的技术成就。与传统堆石坝相比,混凝土面板堆石坝具有安全性好、工程量小、施工方便、导流简化及工期短等优点。现已成为许多工程的首选坝型^[1-3]。

面板堆石坝的发展历史大致可分为:早期抛填堆石阶段、过渡阶段和以堆石薄层碾压为特征的现代混凝土面板堆石坝阶段。早期的面板堆石坝出现在美国西部,如1869年建成的高12.5 m的Chatowarth坝,1895年建成的高54 m的Morena坝,1925年建成的高84 m的Dix River坝,1931年建成的高100 m的Salt Spring坝等^[1-3]。这些坝的出现与当时的采矿和淘金业有关,坝体采用抛填堆石、辅以高压水冲实的简单施工工艺,最初采用木板防渗,后来逐渐为混凝土面板取代,以承受更高的水压力。采用抛填堆石,堆石体密实性较差,沉降和水平变位较大。正是这一原因,采用抛填方法施工的堆石坝仅适用于坝高较低的工程。随着坝高增高,堆石体沉降变形随之增大,混凝土面板难以承受较大的变形,将会产生严重开裂,从而导致大量漏水。如美国Salt Spring坝坝高100 m,是当时世界上最高的堆石坝,蓄水后面板即发生严重开裂和渗漏,致使该工程多年不能正常运用。由于上述问题的出现,人们对混凝土面板堆石坝的安全性产生了怀疑,以致在这之后的较长时期内,这种坝型的发展几乎处于停滞状态。进入20世纪60年代,大型土石方施工机械,尤其是大型振动碾的出现,为堆石坝筑坝技术的发展注入了新的活力。著名土力学家太沙基在1960年提出采用碾压堆石修筑面板坝的构想。他认为,碾压堆石变形很小,可以改善面板堆石坝混凝土面板的工作状况,因而可以建更高的面板坝,堆石体也可以使用较软弱的岩石。太沙基的这些论述对于混凝土面板堆石坝的再次兴起了重要的作用。从此,面板堆石坝堆石体的填筑施工,均采用薄层碾压的施工方法。至1965年,基本完成了由抛填堆石向碾压堆石的过渡^[4-6],面板堆石坝进入以堆石薄层碾压为特征的现代混凝土面板堆石坝发展阶段。由于具有如上所述的技术和经济上的优越性,在此后的数十年里,混凝土面板堆石坝这种新坝型在全世界范围内得到了广泛的应用,相应的设计理论和施工技术也得到了不断的发展和完善,从而使其成为一种颇具竞争力的坝型。

我国是于20世纪80年代初期开始从国外引进混凝土面板堆石坝筑坝技术的。1985年,我国开始建设第一座混凝土面板堆石坝——湖北西北口大坝(坝高95 m)。1988年,

辽宁关门山混凝土面板堆石坝(坝高 58.5 m)建成挡水。到 2003 年底,已建和在建的混凝土面板堆石坝已达 80 余座,其中坝高在 100 m 以上的有 12 座。运行中的天生桥一级坝高 178 m、浙江珊溪坝高 130 m、广东高塘坝高 110 m;正在建设中的贵州乌江洪家渡坝高 182.3 m、公伯峡坝高 139 m、湖北清江水布垭坝高 233 m;计划建设的混凝土面板堆石坝更多,其中坝高在 100m 以上的有 20 余座^[7]。

随着混凝土面板堆石坝筑坝技术的发展,混凝土面板堆石坝越建越高、工程规模越来越大已成为现代面板堆石坝发展的基本趋势^[1,4-9]。

现代高面板堆石坝的主要特点为:薄层碾压堆石、滑模浇筑面板混凝土、薄型趾板及级配垫层料。其中,随着坝高的增大,混凝土面板浇筑改用滑模施工、取消水平缝或将水平缝按施工缝处理,面板由垂直缝分割成为若干长条板块,其顺坡向的长度尺寸远大于其宽度和厚度尺寸,这是现代高堆石坝面板设计与施工的一个突出特点。

1.2 混凝土面板堆石坝筑坝技术研究综述

多年来,国内外关于混凝土面板堆石坝筑坝技术研究的重点主要集中在以下几个领域:

(1)关于堆石体本构模型的研究。关于堆石体本构模型理论的研究工作,在国外已有 30 多年的历史,在我国也已有近 20 年的历史。先后提出了数以百计的堆石体本构关系的数学模型,但真正能够用于工程实际、为工程界所接受的却很少。目前我国在面板堆石坝的计算分析中,经常采用的有邓肯(Duncan)等人的 E-B 模型、沈珠江双屈服面弹性模型及各种形式的 K-G 模型^[1,10]。

(2)关于堆石料参数的研究。其中包括堆石料试验方法的研究,原型观测基础上的堆石料材料参数反馈分析等。在这方面,国内外均取得了不少有价值的且已被众多实际工程所采用的研究成果^{[11][12]}。

(3)关于面板堆石坝应力变形计算方法及其性态的研究。关于面板坝应力变形的有限元计算方法,不少学者进行了大量富有成效的研究和探讨,提出了迭代法、增量法及迭代增量法等计算方法。目前,一般认为中点增量法具有适应性强、精度高等优点,是进行面板堆石坝应力变形计算的较为适宜的计算方法。关于面板坝应力变形性态的研究,主要是结合各工程大坝的具体布置设计、施工方案及材料试验成果等基础资料,基于上述本构模型和计算方法,进行二维或三维有限元应力变形仿真计算,以获得各工况下面板及堆石体的位移和应力^{[2][10][11][13-35]}。由于这些研究成果所揭示的面板坝应力变形性态均是针对各具体工程的,尽管可以反映一些一般规律,但还不能直接推广应用到其他工程^[13-14]。

(4)关于面板堆石坝动力变形特性的研究。其中包括面板堆石坝坝体动力分析模型研究、动力残余变形研究、动力破坏性态研究及抗震设计方法和抗震工程措施研究等。关于面板坝的动力分析方法,目前国内外较常采用的是“等价线性分析法”^[1-8]。

(5)关于面板堆石坝新结构形式及断面优化设计方法的研究。近年来,国内外尤其

是国内不少学者进行了面板坝采用改型断面及断面优化设计方法等方面的探索性研究,均取得了一些初步的研究成果,但尚未达到实际应用的程度。

(6)关于面板堆石坝施工新技术的研究。包括堆石碾压机械的研究、面板分期及一次性滑模浇筑施工方法的研究及用挤压式边墙取代斜坡碾压垫层的技术研究等,这些研究成果的取得,大大改善了面板坝的施工条件和施工质量,提高了面板坝的施工技术水平^[15]。

(7)其他有关方面的研究。包括面板坝的渗流分析方法研究、边坡稳定分析方法研究等。由于面板坝结构形式的特殊性,是否有必要以及如何进行上述内容的研究分析,目前在国内外尚有不同的观点^[1]。

纵观上述研究领域及其成果,不难发现,目前国内外关于面板堆石坝筑坝技术的研究还存在一些不足或问题:

(1)面板堆石坝发展的一个基本趋势是坝越建越高,但随着面板坝坝高的增大,却意味着混凝土面板沿坝坡方向长度越大,相应的面板厚度就越大,这样面板在施工期和运行期的温度应力及干缩应力就将显著增大。国内关于面板堆石坝面板裂缝成因的不少研究成果表明,不同于早期的抛填堆石坝,现代混凝土面板堆石坝由于采用级配料经振动碾碾压筑坝,坝体密实度加大,沉降显著减小,很少发生因坝体沉降而使面板产生断裂裂缝的情况。然而,面板是浇筑在垫层斜坡上的薄板,厚度小,结构暴露面大,对环境温度及湿度的变化影响较敏感。特别是气温骤降及混凝土干缩将使面板内产生拉应变,再加上混凝土施工质量的不均匀性,有可能引起面板裂缝^{[1][2][16]}。因此,混凝土面板的裂缝尤其是贯穿性裂缝的产生主要是由温度应力和干缩应力引起的。但目前国内外对于高堆石坝混凝土面板温度应力及干缩应力问题的研究还未引起足够的重视,或者研究的深度还十分有限。

(2)在目前关于面板堆石坝的研究成果中,对于面板与垫层之间接触面的模拟等问题的研究还不够深入,尤其缺乏关于面板与垫层之间接触面的导热与导湿模型、温度应力与干缩应力的计算模型等方面的研究成果。

(3)混凝土面板堆石坝由混凝土面板、垫层、过渡层及堆石体组成,其渗透性差异很大。但目前关于面板堆石坝渗流特性的研究主要是针对坝体填筑材料(垫层、过渡层及堆石体)进行的,极少涉及包括混凝土面板及其接缝系统在内的面板堆石坝整体渗流特性及其计算模型的研究。

1.3 混凝土面板温度应力与干缩应力研究综述

如上所述,混凝土面板堆石坝面板的裂缝尤其是贯穿性裂缝的产生主要是由温度应力和干缩应力引起的。尤其对高面板堆石坝,在面板长度及厚度相应增大的情况下,各种环境温、湿度条件下面板温度应力及干缩应力对面板裂缝的作用将更为突出。但目前国内外对于混凝土面板温度应力及干缩应力问题的研究还未产生足够的重视,或者研究的深度还十分有限。

1.3.1 面板温度应力研究

目前,国内外关于高堆石坝面板温度应力问题的研究还处在初步的探索阶段。其主要特征是:缺乏关于面板温度应力问题的系统研究,而将侧重点放在面板温度应力计算方法及其结果的分析上。从已报道的文献资料来看,目前关于面板温度应力的计算方法主要有:弹性基础梁法、不考虑接触面影响的有限元法及考虑接触面影响的有限元法等。

弹性基础梁法假定面板在温度变形条件下,其全截面为均匀受力状态,将面板视作固定于基础垫层上的一弹性混凝土梁,在此基础上推导、建立了面板顺坝坡向最大温度应力的计算公式^[26~28]。按此方法,文献[26]~[28]对混凝土面板温度应力的产生机理、影响因素及面板裂缝问题进行了分析。显然,基于弹性基础梁法进行上述问题的定性分析是基本可行的,但若用此方法进行面板温度应力的定量计算,却存在明显的不足:(1)弹性基础梁法将面板与垫层之间的关系简化为“弹性约束”关系,忽视了面板与垫层之间存在一具有不连续、非线性变形特性的接触面,这无疑夸大了垫层对面板的约束作用;(2)弹性基础梁法忽视了面板混凝土温度、弹性模量 E 及徐变度等参数随混凝土龄期变化而变化的因素,将这些参数取为定值或常数,那么由此计算得到的“最大温度应力”的合理性和真实性就值得怀疑;(3)在此方法关于面板顺坝坡向最大温度应力的计算公式中,忽略了梯度变温及非线性变温的影响而只考虑均匀变温的作用。显然,对于环境温度变化剧烈从而导致面板梯度变温及非线性变温较大的情况,这样做就未必合理。

不考虑接触面影响的有限元法^[22],是基于整个坝体温度场的计算结果进行面板温度应力的有限元计算,但将面板与垫层之间的接触面按弹性约束处理,即不计接触面非线性变形特性对面板温度应力的影响。如上所述,将面板与垫层之间的关系按“弹性约束”关系处理,就力学模型而言夸大了垫层对面板的约束作用,与面板的实际温度变形特征差距较大,因此其计算方法的合理性以及计算结果的准确性仍无法令人满意。

针对上述问题,文献[113]提出一种接触面按摩擦约束处理的面板温度应力计算的有限元法,即考虑接触面影响的有限元法。其力学模型为:将面板与垫层之间的接触视作点—面接触,以摩尔—库仑准则为依据,按照剪切力的大小,将点、面之间的接触状态分为锁定(固定)接触和摩擦接触两种,当点、面处于锁定接触状态时,在面的法向和切向用刚性较大的弹簧锁定,当二者处于摩擦接触状态时,则在法向加弹簧,在切向加摩擦力。根据上述两种接触状态,文献[113]采用嵌接处罚法建立了点—面接触部位的附加刚度和附加摩擦力荷载矩阵。显然,上述力学模型在较大程度上考虑到了面板与垫层之间接触面的不连续、非线性的变形特性,比不考虑接触面影响的有限元法有了较大的进步。但仍存在明显的不足:(1)将面板与垫层之间的接触状态按锁定(固定)及摩擦两种状态来概括,未反映出二者可能出现的自由(脱开)未接触状态。(2)该方法仅给出了面板温度应力计算的接触面力学模型,未给出与此相应的接触面导热模型。

1.3.2 面板干缩应力研究

与面板温度应力问题研究情况类似,目前关于高堆石坝面板湿度场及干缩应力问题的研究也很不成熟,其研究深度甚至远不如关于面板温度应力问题的研究深度。从十分