

HUNNINGTU MIANBAN DUISHIBA YINGLI BIANXING  
SHUZHJ JISUAN FANGFA JI YINGYONG YANJIU

# 混凝土面板堆石坝应力变形 数值计算方法及应用研究

李炎隆 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HUNNINGTU MIANBAN DUISHIBA YINGLI BIANXING  
SHUZHJ JISUAN FANGFA JI YINGYONG YANJIU

# 混凝土面板堆石坝应力变形 数值计算方法及应用研究

李炎隆 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书总结了作者在面板堆石坝方面所做的一些研究成果,阐述了面板堆石坝应力变形分析的方法及原理,分析了混凝土面板堆石坝在长期变形、循环荷载、温度荷载作用下的应力变形规律,探讨了混凝土面板的开裂机理及裂缝扩展过程,研究了堆石料计算模型参数对坝体变形的敏感性。本书既有原理的阐述,也有方法的分析,还有具体的工程应用实例,可供从事水利水电工程设计、施工、科研等工程技术人员参考,也可以作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板堆石坝应力变形数值计算方法及应用研究/李炎隆著. —北京:中国电力出版社,2017.1  
ISBN 978-7-5198-0055-0

I. ①混… II. ①李… III. ①混凝土面板坝-堆石坝-应力-变形-数值计算-研究 IV. ①TV641.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第280042号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王晓蕾 联系电话:010—63412610

责任印制:蔺义舟 责任校对:太兴华

北京天宇星印刷厂印刷·各地新华书店经售

2017年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·11.25印张·263千字

定价:58.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

— 版权专有 翻印必究

# 前 言

我国未来重点的水电开发项目主要集中在西南部峡谷地区，交通运输条件复杂，筑坝材料获取不便。混凝土面板堆石坝不仅能够采用软岩、特硬岩和沙砾石作为坝体填筑材料，还可以充分利用枢纽中各种建筑物的开挖料来填筑坝体，并且能适应不良的气候、地形、地质条件，具有良好的安全性和经济性，因此，规划及批建中的许多大坝将混凝土面板堆石坝作为首选坝型。

混凝土面板堆石坝的应力变形特性是关系到坝体安全和运行状态的重要因素。我国面板堆石坝工程实践中就有不少因忽视应力变形而产生严重工程问题的案例：沟后面板沙砾石坝的垮坝、株树桥面板堆石坝面板的塌陷以及天生桥面板堆石坝的面板出现大量结构性裂缝等。近年来，随着面板堆石坝应力变形分析的理论 and 电子计算机的进一步发展，利用计算机强大的计算功能结合有限单元法的优势，是当今混凝土面板堆石坝应力变形数值仿真计算的主要技术手段。随着筑坝技术的发展，面板堆石坝的坝高在不断增加，坝址地形地质条件也日益复杂，正确预测坝体在各种工况条件下的应力变形特性，确保面板和坝体的安全稳定，已成为面板堆石坝设计中的关键问题。

本书总结了作者在面板堆石坝数值计算方面所做的一些研究成果，阐述了面板堆石坝应力变形分析的方法及原理，并分析探讨了混凝土面板堆石坝在长期变形、循环荷载、温度荷载及面板开裂作用下的应力变形规律。同时，对混凝土面板的开裂机理及裂缝扩展过程进行了探讨。希望本书能够抛砖引玉，对国内同行的教学、科研和设计起到借鉴和帮助的作用。

在作者的学术研究过程中，得到了李守义教授、王瑞骏教授的指导；西安理工大学的杨杰教授、柴军瑞教授、张晓飞副教授、司政副教授、许增光副教授等提了宝贵的建议；研究生张再望、涂幸、徐娇、丁占峰、王璟、张敬华、孙宇涛、曹智昶和卜鹏等为本书做了许多具体工作。在此，对他们的指导与帮助表示衷心感谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金（51309190，51579207）、中国博士后科学基金（2014M552470）、陕西省博士后科研项目资助资金、流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金（IWHR-SKL-201415）、水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金（2014SGG03）、水工结构安全与仿真陕西省重点科技创新团队（2013KCT-15）的支持，一并表示衷心的感谢。

在本书的撰写过程中，查阅了大量学术著作和文献资料，参考和借鉴了许多专家学者的研究成果和学术观点，在此，向他们表示最诚挚的感谢。

由于作者水平和经验所限，书中难免存在不足之处，敬请同行和读者批评指正。

编者

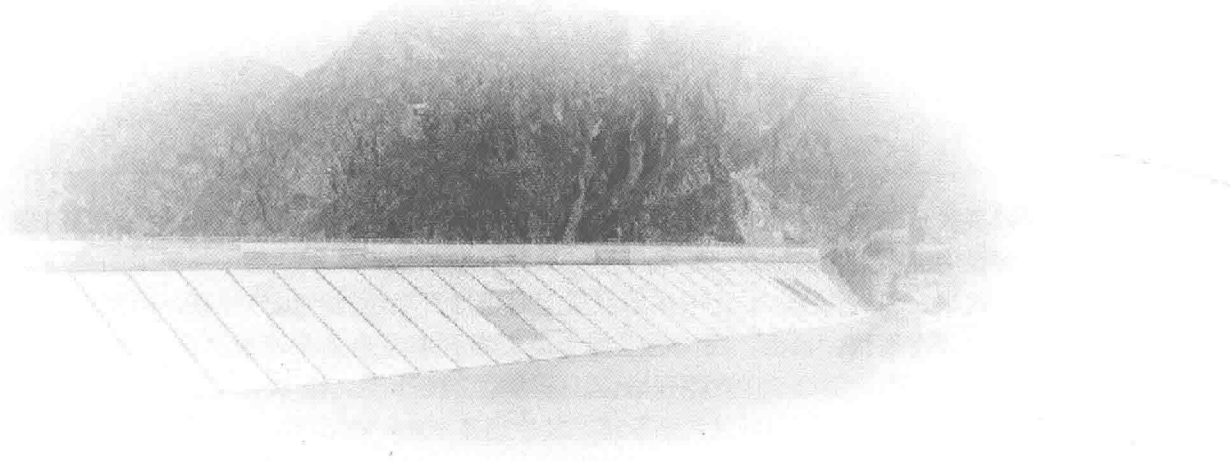
2016年10月于西安

# 目 录

## 前言

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 1 概论 .....                         | 1   |
| 1.1 混凝土面板堆石坝的发展 .....              | 1   |
| 1.2 混凝土面板堆石坝研究进展 .....             | 2   |
| 1.3 本书的主要内容 .....                  | 6   |
| 2 混凝土面板堆石坝应力变形分析方法 .....           | 9   |
| 2.1 现代混凝土面板堆石坝的特点 .....            | 9   |
| 2.2 混凝土面板堆石坝应力变形有限元数值计算方法 .....    | 15  |
| 2.3 堆石体材料本构模型 .....                | 17  |
| 2.4 混凝土面板与垫层之间的接触面模拟 .....         | 21  |
| 2.5 施工及蓄水过程模拟 .....                | 24  |
| 2.6 本章小结 .....                     | 26  |
| 3 考虑堆石体流变和湿化变形的面板坝长期变形特性研究 .....   | 27  |
| 3.1 概述 .....                       | 27  |
| 3.2 堆石体流变变形数值计算方法 .....            | 28  |
| 3.3 堆石体湿化变形数值计算方法 .....            | 33  |
| 3.4 工程实例分析 .....                   | 34  |
| 3.5 本章小结 .....                     | 64  |
| 4 考虑库水位循环升降的面板堆石坝应力变形特性 .....      | 65  |
| 4.1 概述 .....                       | 65  |
| 4.2 库水位升降引起堆石体变形的基本原理 .....        | 65  |
| 4.3 水位循环升降的过程 .....                | 69  |
| 4.4 工程实例分析 .....                   | 69  |
| 4.5 本章小结 .....                     | 90  |
| 5 面板开裂情况下混凝土面板堆石坝渗流场与应力场耦合分析 ..... | 91  |
| 5.1 概述 .....                       | 91  |
| 5.2 混凝土面板裂缝等效渗透系数的计算模型 .....       | 91  |
| 5.3 渗流场与应力场的耦合分析原理 .....           | 92  |
| 5.4 混凝土面板堆石坝渗流场与应力场耦合方程 .....      | 95  |
| 5.5 面板堆石坝渗流场与应力场耦合分析的步骤 .....      | 97  |
| 5.6 工程实例分析 .....                   | 97  |
| 5.7 本章小结 .....                     | 102 |

|      |                                |     |
|------|--------------------------------|-----|
| 6    | 混凝土面板堆石坝温度应力有限元仿真分析 .....      | 103 |
| 6.1  | 概述 .....                       | 103 |
| 6.2  | 混凝土水化热温升变化规律及热传导理论 .....       | 104 |
| 6.3  | 混凝土面板温度应力分析的弹性基础梁法 .....       | 106 |
| 6.4  | 混凝土面板温度应力分析的有限元法 .....         | 107 |
| 6.5  | 混凝土面板的温度徐变应力 .....             | 113 |
| 6.6  | 工程实例分析 .....                   | 116 |
| 6.7  | 本章小结 .....                     | 128 |
| 7    | 考虑温度荷载作用的混凝土面板应力变形特性研究 .....   | 129 |
| 7.1  | 概述 .....                       | 129 |
| 7.2  | 混凝土面板结构特征 .....                | 129 |
| 7.3  | 考虑温度荷载作用的混凝土面板应力变形工程实例分析 ..... | 132 |
| 7.4  | 计算结果分析 .....                   | 133 |
| 7.5  | 计算结果与观测结果的对比分析 .....           | 136 |
| 7.6  | 本章小结 .....                     | 137 |
| 8    | 混凝土面板开裂机理及裂缝扩展过程研究 .....       | 138 |
| 8.1  | 概述 .....                       | 138 |
| 8.2  | 混凝土面板初始微裂缝的形成机理 .....          | 138 |
| 8.3  | 基于断裂力学的混凝土面板开裂分析模型 .....       | 140 |
| 8.4  | 混凝土面板裂缝扩展过程数值计算方法 .....        | 146 |
| 8.5  | 工程实例分析 .....                   | 152 |
| 8.6  | 本章小结 .....                     | 155 |
| 9    | 堆石体邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究 .....  | 156 |
| 9.1  | 概述 .....                       | 156 |
| 9.2  | 堆石体材料本构模型参数敏感性分析的方法 .....      | 157 |
| 9.3  | 工程实例分析 .....                   | 160 |
| 9.4  | 本章小结 .....                     | 164 |
| 10   | 总结与展望 .....                    | 165 |
| 10.1 | 研究内容与主要研究结论 .....              | 165 |
| 10.2 | 展望 .....                       | 166 |
|      | 参考文献 .....                     | 167 |



# 1 概 论

## 1.1 混凝土面板堆石坝的发展

混凝土面板堆石坝是采用堆石分层碾压填筑成坝体,在上游面布置混凝土面板作为防渗体的一种土石坝<sup>[1]</sup>。混凝土面板堆石坝具有安全性高、造价较低、适用性强、施工方便等优点,因此,在实际工程中得到了广泛应用和发展。

美国的莫拉坝是世界上第一座面板堆石坝,坝高 54m,修建于 1895 年,距今已有 100 多年的历史。著名的混凝土面板堆石坝工程专家库克<sup>[2,3]</sup>认为,混凝土面板堆石坝的发展主要经历了三个阶段,分别为:1850—1940 年的早期抛填堆石阶段、1940—1965 年的抛填堆石向碾压堆石过渡阶段以及 1965 年以后的以堆石薄层碾压为特征的现代阶段<sup>[4]</sup>。早期抛填堆石阶段:1850—1900 年正值美国的淘金热,在美国的加利福尼亚州由于淘金的需要修建蓄水库,最初的面板堆石坝是用抛填块石作为坝体,表面覆盖木板作为防渗面板,直到 18 世纪末,随着筑坝技术的进步,才开始修建混凝土面板堆石坝。1931 年建成的美国 Salt Springs 坝(高 100m)及 1955 年建成的葡萄牙 Paradela 坝(高 112m),混凝土面板难以适应堆石体较大的变形,水库蓄水后,面板出现严重的开裂和大量的漏水,因此,这一坝型的发展在 20 世纪 40—50 年代处于停滞状态。过渡阶段:1960 年美国土木工程师协会发表了美国一次堆石坝学术会议的论文集,在 C. M. Roberts 的讨论文章<sup>[5]</sup>中,介绍了最早采用薄层碾压堆石坝的工程实例即 1958 年完成的 Quoich 坝。土力学家太沙基提出,堆石体经过碾压后,变形就会很小,混凝土面板的应力变形状况就会大大改善,也就可以修建更高的面板堆石坝。同时,施工机械的发展,尤其是大型振动碾的发明,为混凝土面板堆石坝的再次兴起起到了推进作用。从此,堆石体的填筑施工均采用薄层碾压堆石代替抛填堆石<sup>[6-9]</sup>。以堆石薄层碾压为特征的现代混凝土面板堆石坝阶段:1965 年以后,由于堆石体采用分层填筑碾压的施工方法,使得密实度和变形模量大大提高,因此坝体的变形也大为减小。1971 年建成的澳大利亚 Cethena 坝(高 110m),奠定了现代混凝土面板堆石坝的技术基础。此后,在学者、专家及工程技术人员的共同努力下,混凝土面板堆石坝在世界范围内得到了迅速发展,筑坝技术也越来越成熟。从目前已建的工程看,大多数混凝土面板堆石坝运行状况良好,有的工程还成为坝工史上的经典力作。

我国以现代技术修建混凝土面板堆石坝始于 20 世纪 80 年代初期<sup>[1]</sup>。1985 年,我国第一座开工建设的混凝土面板堆石坝是坝高为 95m 的湖北西北口大坝,第一座完工的是辽宁关门山水库大坝,坝高为 58.5m。中国的混凝土面板堆石坝建设与国外相比,虽然起步较晚,但起点高,发展快。目前,我国的混凝土面板堆石坝无论是在建坝高度、建坝数量,还是在筑坝技术方面,都处于世界领先地位。据不完全统计<sup>[10]</sup>,至 2011 年底中国已建成、在建和拟建的混凝土面板堆石坝已达 305 座,其中坝高 100m 或超过 100m 的高混凝土面板堆石坝有 94 座,高坝中已建成 48 座,在建 20 座,拟建 26 座。我国已建的清江水布垭面板坝,是目前世界上最高的混凝土面板堆石坝,坝高为 233.2m。

面板堆石坝能够在国内外迅速发展,不仅仅是靠其自身在技术和经济上的优势,与其他坝型相比较,混凝土面板堆石坝还具有以下几个方面的特点<sup>[11]</sup>:面板坝具有良好的抗滑稳定性,坝体堆石位于面板下游,水荷载作用于面板,整个堆石体重量及面板上部水重均在抵抗因水荷载作用引起的水平推力;堆石体碾压密实后抗剪强度比较高,而且堆石体透水性强,几乎不受渗透压力的影响;垫层和过渡层具有半透水性和反滤作用,施工期在没有面板保护的情况下,可以直接挡水或过水,大大简化了施工导流和度汛的工程设施,有利于加快施工进度,降低临时工程的费用;混凝土面板坝不但可以修建于一般气候地区,还可以修建于高气温地带或严寒地区,并且适应于各种各样的河谷形态。正是由于上述的诸多优点,混凝土面板堆石坝在国内外获得了广泛的推广和发展,同时设计理论和计算方法的研究对混凝土面板堆石坝技术的进一步发展也起到了积极的促进作用。并且,近年来出现了基于面板堆石坝而衍生出来的新坝型,如拟建的黄河上游羊曲水电站,采用堆石坝和重力坝相结合的镶嵌混凝土面板堆石坝进行设计。自密实混凝土材料<sup>[12]</sup>在水利枢纽工程中的推广应用,也给混凝土面板堆石坝提供了新的发展思路。

## 1.2 混凝土面板堆石坝研究进展

我国 80% 以上的水能资源分布在西部地区,针对西部地区的复杂地质地形环境,修建高混凝土面板堆石坝无疑是一种必然的趋势<sup>[13]</sup>。对于高混凝土面板堆石坝而言,国内外学者主要在堆石体的应力应变特性、混凝土面板应力变形特性和开裂机理、高混凝土面板坝的数值仿真以及大坝的设计优化等方向开展研究。

### 1.2.1 混凝土面板堆石坝的应力变形特性研究进展

混凝土面板堆石坝应力变形数值分析的研究主要集中在堆石料、面板与垫层接触面、接缝(周边缝、垂直缝)等关键因素本构模型的建立,以及施工、运行过程的仿真模拟方面。

堆石体的变形特性主要表现在四个方面<sup>[14,15]</sup>:①压硬性,堆石体的变形模量随着围压的增加而增加;②非线性,堆石体的应力应变本构关系呈现典型的材料非线性特性;③应力引起的各向异性,不同方向应力差异引起变形刚度不同;④剪缩性,堆石体受荷时,颗粒会产生破碎和滑移,引起体积收缩。国内外许多学者致力于坝体材料的数学、力学模型研究,目前,面板堆石坝应力变形数值分析中堆石料采用的本构模型主要有清华 K-G 模

型、剑桥模型、“南水”双屈服面模型、邓肯-张  $E-B$  本构模型及邓肯-张  $E-\mu$  本构模型等。堆石体的本构模型可以分为弹塑性模型和非线性模型两大类,弹塑性模型以“南水”双屈服面模型为代表,非线性模型以邓肯-张  $E-B$  模型和邓肯-张  $E-\mu$  模型为代表。其中邓肯-张  $E-B$  本构模型能反应堆石体的主要变形特性,而且参数测定简单,应用方便,在实际工程中应用较为广泛。然而邓肯-张  $E-B$  本构模型只能反应堆石料的非线性和压硬性,不能考虑堆石体的剪缩性,因此计算所得的水平位移比实际值偏大<sup>[16]</sup>。

随着混凝土面板堆石坝越建越高、工程规模越来越大,堆石体的长期变形问题日益突出<sup>[17]</sup>。面板坝堆石体长期变形对大坝的整体防渗系统(混凝土面板、趾板、周边缝)有着不可忽视的影响,如果堆石体的变形过大,会使面板产生裂缝,从而影响其防渗性能,甚至危及坝体的稳定<sup>[18]</sup>。混凝土面板堆石坝的长期变形主要表现为堆石体的流变变形和湿化变形。沈凤生等<sup>[19]</sup>在国内较早开展了堆石坝的流变数值分析,以天生桥面板坝为对象计算了流变变形。国内最早的流变试验是1991年沈珠江等人在应力控制式三轴仪上进行的堆石流变试验<sup>[20]</sup>。经过研究,沈珠江等<sup>[21]</sup>提出了堆石体的三参数指数流变本构模型,三参数指数型流变本构模型通过拟合流变试验曲线而得到,具有一定的实际物理意义,且模型简单,易于进行数值分析。随后的大多数不同工程堆石料的试验成果整理方法以及数值分析<sup>[22-25]</sup>,在最终流变量的计算方面,都参照了沈珠江等<sup>[20]</sup>的研究成果或是在其基础上进行的。近年来,周伟等<sup>[26,27]</sup>采用一种能模拟高围压条件的堆石料幂函数流变本构模型,对水布垭面板堆石坝进行了考虑堆石料流变特性的应力-应变仿真分析,建立了针对高面板堆石坝流变的预测模型。赵魁芝等<sup>[28]</sup>基于面板堆石坝在梅溪水库覆盖层上的变形观测数据,采用双屈服面弹塑性模型,用三维有限元法分析研究坝体、坝基、混凝土面板、防渗墙和趾板应力及变形的分布规律,并对坝体堆石料模型计算参数及流变模型参数进行反演分析。刘萌成等<sup>[29]</sup>采用考虑非线性强度的改进双屈服面流变模型描述堆石料长期力学性能,进行了面板坝有限元仿真分析,获得了坝体和面板在填筑期、蓄水期与运行期的应力与变形规律。

湿化变形是指土石料由天然风干状态浸水至饱和时,因被水润滑和颗粒中矿物浸水软化,骨架中颗粒相互滑移、破碎和重新排列而引起的变形<sup>[30]</sup>,堆石料的湿化变形也是影响面板堆石坝安全的重要因素之一<sup>[31]</sup>。李全明等<sup>[32]</sup>以公伯峡混凝土面板堆石坝堆石料的三轴湿化试验和压缩湿化试验成果为依据,将围压作为考虑因素,改进了沈珠江  $Cw-Dw$  湿化模型,并对湿化的模型参数进行了敏感性分析。王富强等<sup>[33]</sup>对积石峡面板堆石坝的开挖料进行了湿化试验,发现湿化体应变不仅与当前的围压有关,还与当前的应力水平有关,并对沈珠江<sup>[34]</sup>提出的湿化模型进行改进,采用该模型进行了积石峡面板堆石坝湿化变形三维有限元分析,研究了坝料湿化变形对大坝应力变形的影响规律。李炎隆等<sup>[35]</sup>基于改进的湿化变形计算模型,采用邓肯-张的  $E-B$  模型模拟大坝的堆石体,进行了接缝止水失效情况下堆石体湿化变形对混凝土面板应力和变形的影响研究;王刚等<sup>[36]</sup>对软岩料填筑的面板坝的湿化变形进行了模拟研究,二者的研究都表明对坝体先期进行浸水,使主要的湿化变形在面板浇筑前发生,可以改善面板的应力变形状态,对面板坝的设计和施工提出了改进的新方向。黄耀英<sup>[37]</sup>针对湿化变形的长期作用而采用了时变计算,采用 Prandtl-Reuss 流动法则推导了湿化剪切应变分量,然后叠加湿化体积应变分量得三维湿化应变分量;通过分析三维湿化应变分量和单轴应力状态下的湿化应变的关系,然后通过类比于堆石料流变变形计算

公式,推导了湿化变形时变计算公式。

堆石体的渗流是导致面板坝产生湿化变形的主要原因之一。然而,许多学者认为混凝土面板堆石坝不会发生渗透破坏<sup>[38]</sup>,对面板坝的渗流分析研究不够重视,混凝土面板堆石坝的渗流分析对于工程的设计、运行及管理具有重要的意义<sup>[39]</sup>。

伦吉·卡希纳得通过对工程实例渗漏观测数据的分析,利用面板的结构尺寸、面板的坡率及水深与面板裂缝渗漏量的关系,获得了半经验性的化引表面渗透系数,即表面渗透性法<sup>[1,39]</sup>,该方法将面板作为各向同性的均质体,且面板裂缝中的渗流符合达西定律。表面渗透性法忽略了垫层、过渡层等面板基础的渗流,只能估算面板裂缝及接缝的渗漏量,不能确定渗透坡降、渗流速度等其他要素,更不能用于整个大坝的渗流仿真计算。张嘎、张建民等通过对混凝土面板堆石坝渗流形态的分析<sup>[40]</sup>,假定裂缝渗流为层流、面板缝隙为等宽缝隙,基于达西渗流定律进行了面板出现裂缝工况下堆石坝的渗流有限元计算,该方法没有考虑面板裂缝宽度沿厚度方向变化的特性及裂缝面的粗糙度,因此计算结果也不尽如人意。现有的混凝土面板堆石坝渗流分析的计算模型都不成熟,仍需要进行更深入的研究,尤其是面板开裂情况下堆石坝的渗流机理研究。从目前面板坝渗流分析的研究进展来看,陈军强等<sup>[41]</sup>以白龙江某混凝土面板堆石坝工程为例,针对面板垂直缝出现止水失效时的工程特点,建立了两级拟三维有限元数值计算模型并进行了有限元数值计算,归纳分析了渗流浸润面、等势面和水力坡降等与失效缝尺寸特征的关系,研究了失效缝附近的渗流场的分布情况。陈守开等<sup>[42]</sup>采用改进节点虚流量法求解无压稳定渗流场,并引入无厚度的裂缝模型对破坏的垂直缝渗流行为进行模拟,得到了面板堆石坝裂缝渗流问题的有限元分析方法。李守义、李炎隆等<sup>[43]</sup>以多孔岩土介质渗透系数与体积应变之间的数学表达式为基础,研究建立了混凝土面板堆石坝应力场与渗流场耦合分析的数学模型。王瑞骏、李炎隆等<sup>[44-46]</sup>基于等宽缝隙稳定流的运动规律,推导建立了混凝土面板裂缝的等效渗透系数计算模型,研究混凝土面板开裂情况下堆石坝在应力场与渗流场耦合作用下的工作性态,为混凝土面板堆石坝的设计与施工提供参考。

### 1.2.2 混凝土面板的应力变形及开裂研究进展

混凝土面板是以堆石体为支撑结构,它承担着向下游堆石体传递水压力及大坝防渗的重任<sup>[47]</sup>,对大坝的安全与工程的运行起着决定性的作用。从空间结构看,面板的长度较长,宽度较小,而厚度相对来说很小,是一块长条形的薄板,因此,受环境温度的影响较大,尤其是高坝及处于高寒地区的混凝土面板堆石坝<sup>[48,49]</sup>,在气温骤变条件下,面板内将产生拉应变,再加上坝体的沉降及其他不确定性因素,面板很容易出现裂缝。从国内外修建的面板堆石坝看,面板开裂的情况比较普遍,个别的坝还相当严重<sup>[50-53]</sup>。国内外的大量研究表明:混凝土面板的温度应力、外界荷载以及堆石体变形是面板开裂的主要影响因素。

混凝土面板的开裂问题,实质上是面板中的破坏力与抵抗力之间的较量<sup>[54]</sup>。破坏力主要指的是由外因及内因引起的面板应力,抵抗力则指的是面板混凝土的强度。面板应力主要受混凝土的力学性能、面板的自重、外部荷载以及坝高、河谷形状等因素的影响。混凝土力学特性及荷载对面板开裂的影响主要体现在以下几个方面。

(1) 混凝土材料内部物理化学作用引起的面板应力。混凝土中的碱骨料反应、钢筋锈

蚀、混凝土的徐变以及混凝土遭受冻融循环等因素引起的面板应力。

(2) 混凝土面板的温度应力、干缩应力。面板的温度、湿度变化会引起结构变形,面板不能自由变形,则会产生应力。面板的温度、干缩应力主要受环境气温条件、面板的保温保湿条件、极限拉伸及线膨胀系数等影响。

(3) 水荷载及自重荷载引起的结构应力。施工期,面板的挠度变形主要由自重引起,因此,其值较小。运行期,面板挠度变形的主要影响因素为库水压力,水压力越大,混凝土面板挠度相应越大。同时,坝高、混凝土面板的结构尺寸、堆石的材料特性及河谷形状对面板的应力变形也有影响。

(4) 作用于面板上的库水结冰荷载、地震作用等也会引起面板的开裂破坏。

(5) 施工过程及质量。工程实践表明<sup>[55]</sup>,面板混凝土的施工质量与养护,坝体材料分区、填筑次序与压实质量,水库蓄水与泄水过程,垫层坡面的保护方式等是影响面板开裂的因素。

此外,在周边缝位置,如果面板相对于趾板的变形(张开及剪切变形)过大会破坏止水结构,也会引起面板的开裂。周边缝的变形主要受水荷载、面板变形、坝体变形、趾板的几何形状以及河谷坝肩的形状等因素的影响。

混凝土面板堆石坝的坝体是分层碾压填筑的,在自重及碾压力的作用下,堆石体会产生竖直和水平位移,浇筑在垫层上的面板变形如果不能适应坝体的变形,就会出现垫层料脱空,此时,面板失去了坝体的支撑作用,在水压力的作用下,其应力变形特性会发生变化,主要表现为:脱空部位的面板被压向垫层料,在水压力及垫层反力的作用下,内部产生较大的应力,当应力超过混凝土的强度则会产生裂缝,发生开裂破坏。

综上所述,混凝土面板发生裂缝的原因主要是堆石体变形和面板的温度应力两个方面。由温度变化引起的混凝土收缩,加之基础约束将导致面板出现大量密集的有规律的水平裂缝。由坝体的不均匀变形引起的拉应力,将导致面板出现较大的裂缝,甚至出现断裂。

混凝土面板堆石坝面板温度应力的计算方法主要有解析计算法(简化条件下)和有限元数值计算法<sup>[56]</sup>,相比较而言,有限元法可以考虑混凝土的水化热温升、徐变、弹性模量、自生体积变形等参数随龄期的变化,考虑气温、水温、自重、水压、寒潮等诸多因素的影响,计算结果更为准确可靠。

温度应力的有限元数值计算方法分为不考虑接触面影响的有限元法和考虑接触面影响的有限元法。不考虑接触面影响的有限元法,是将面板与垫层之间的接触面按弹性约束处理,不考虑接触面非线性变形特性对面板温度应力的影响,在混凝土面板堆石坝温度场的计算结果上,计算面板的温度应力。面板与垫层之间的关系按“弹性约束”处理,夸大了垫层对面板的约束作用,因此计算结果不够准确。考虑接触面影响的有限元法,是将面板与垫层之间的接触面按摩擦约束处理<sup>[52]</sup>,假定面板与垫层之间为点一面接触,在法向面板与垫层之间用弹簧连接,切向则为摩擦接触。张新国等<sup>[57]</sup>根据摩尔-库仑准则,采用嵌接处罚法建立了面板与垫层之间接触面的附加刚度和附加摩擦力荷载矩阵,模拟了接触面锁定和摩擦两种接触状态。王瑞骏等<sup>[58]</sup>基于一般外荷载作用下的接触摩擦单元理论,在系统分析面板与垫层之间接触面的接触摩擦特性的基础上,研究建立了温度场与温度应力的接触摩擦单元计算模型<sup>[59]</sup>,该模型按三种可能的接触状态(固定、滑动及自由)考虑了接触面

的接触摩擦特性对面板温度场及温度应力的影响,并且通过实际数据的对比验证了其合理性。目前在面板温度应力研究方向上,王瑞骏、李炎隆等<sup>[60,61]</sup>结合已建的公伯峡水电站混凝土面板堆石坝,考虑影响面板温度场及温度应力的各项因素,实时模拟面板的施工过程,对施工期面板的温度场和温度应力进行了研究;并且还针对施工期日温差及发生寒潮等气温骤降情况,进行了气温骤降条件下面板温度场及温度应力的全过程仿真分析。李炎隆等<sup>[62]</sup>以公伯峡混凝土面板堆石坝为实例,基于接触摩擦单元理论,采用接触单元模拟混凝土面板与垫层之间的接触面,建立混凝土面板与垫层之间接触面的数值计算模型,考虑温度荷载作用,研究面板堆石坝面板的应力变形特性。

基于断裂损伤力学的混凝土面板开裂是面板坝的热点研究方向,关于混凝土开裂的研究主要集中在大体积混凝土结构、碾压混凝土拱坝、混凝土重力坝方面,而对于混凝土面板断裂方面的研究较少。混凝土面板对环境温度的变化较敏感,再加上堆石体变形的影响,混凝土面板很容易出现裂缝。因此,基于断裂力学进行混凝土面板裂缝萌生、扩展、贯通,直到产生宏断裂坏机理的研究,对于面板坝的建设及安全运行具有重要意义。

### 1.2.3 混凝土面板堆石坝的参数反演分析

在混凝土面板坝的数值模拟研究中,材料本构模型参数不仅对优化设计有着不可忽视的影响,而且其参数取值的合理与否,也是面板堆石坝坝体变形控制和大坝整体设计安全的关键。为了更好地确定各项参数对材料本构模型的影响,有必要对混凝土面板坝的各项参数进行反演分析。

参数反演的基本思想是利用大现的原型监测资料,建立优化模型,再应用数学优化的理论进行求解,从而反算出坝体材料参数。正反分析法就是把反演计算坝体材料参数的问题转化为一个目标函数的寻优问题,直接利用正分析的过程,通过迭代计算,逐次修正未知参数的设置,直到获得最优值。常规的方法有单纯形法、鲍威尔法、法和罚函数法等,这些方法的优点是使用范围广,可用于线性及各类非线性问题的反分析计算;缺点就是收敛速度较慢,解的稳定性差,有可能只能得到局部极小值,特别是待定参数的数目比较多时,不能保证搜索到全局最优解。遗传算法、进化算法、人工智能和模糊集理论等是近年来新兴的通用优化方法,这些智能算法求解复杂问题的性能更优于传统优化算法,现在已经成为工程问题优化求解中最有效的手段之一。

李炎隆等<sup>[63]</sup>基于正交试验法,以混凝土面板堆石坝为例,进行了邓肯-张  $E-B$  模型参数对坝体竖向位移、上下游水平位移的敏感性分析。岑威钧等<sup>[64]</sup>结合某抽水蓄能电站混凝土面板堆石坝,运用三维非线性有限单元法对其进行了坝体施工和库水蓄降的仿真模拟计算,并预测了各时期坝体和防渗体系的变形和应力。孟亚运等<sup>[65]</sup>采用正交试验法,以某混凝土面板堆石坝为例,进行七参数流变模型参数对于坝体最大竖向位移和面板最大挠度影响的敏感性分析,为面板堆石坝七参数流变模型参数的选取提供了参考。

## 1.3 本书的主要内容

本书共分为 10 章。第 1 章为概论;第 2 章为混凝土面板堆石坝应力变形分析方法;第

3 章为考虑堆石体流变和湿化变形的面板坝长期变形特性研究;第 4 章为考虑库水位循环升降的面板堆石坝应力变形特性;第 5 章为面板开裂情况下混凝土面板堆石坝渗流场与应力场耦合分析;第 6 章为混凝土面板堆石坝温度应力有限元仿真分析;第 7 章为考虑温度荷载作用的混凝土面板应力变形特性研究;第 8 章为混凝土面板开裂机理及裂缝扩展过程研究;第 9 章为堆石体邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究;第 10 章为总结与展望。

第 1 章 概论简要介绍了混凝土面板堆石坝的发展进程,总结了现代混凝土面板堆石坝研究进展和发展方向。提出了对于高混凝土面板堆石坝乃至 300m 级超高混凝土面板坝的应力应变特性研究的必要性。

第 2 章 混凝土面板堆石坝应力变形分析方法中,阐述了现代面板堆石坝的特点、坝体材料分区、筑坝材料特性等。重点介绍了混凝土面板堆石坝应力变形有限元计算中材料本构关系、非线性有限元计算的基本原理及接触面本构关系。并对本构模型中的两种接触单元(无厚度 Goodman 接触单元及 Desai 薄层单元)进行了对比,比较了这两种接触单元的优缺点。最后对混凝土面板堆石坝有限元模拟中施工过程和蓄水过程进行了说明。

第 3 章 考虑堆石体流变和湿化变形的面板坝长期变形特性研究中,以玛尔挡面板堆石坝为实例,主要分析阐述了堆石体长期变形对坝体最大坝高剖面和纵剖面的应力和位移以其对面板的应力场和位移场的影响。提出了在高混凝土面板堆石坝的设计和结构分析中,对堆石体的长期变形分析的必要性。强调了在设计施工中需要为坝体的长期变形预留一定的沉降量,以保障大坝的安全。

第 4 章 考虑库水位循环升降的面板堆石坝应力变形特性分析中,对堆石坝在实际运行中库水位升降变化对堆石体所产生的循环加荷载效应进行了说明。以公伯峡面板坝为实例进行有限元模拟,对比分析了计入湿化变形影响的库水位循环升降和不计入湿化变形影响库水位循环升降情况下坝体及面板的应力变形规律,得出堆石体长期变形对坝体及面板应力变形的影响。

第 5 章 面板开裂情况下混凝土面板堆石坝渗流场与应力场耦合分析中,针对混凝土面板的开裂情况,研究分析了面板堆石坝在应力场和渗流场耦合作用下的工作性态。从岩土多孔介质的渗透系数随体积应变变化的函数关系式出发,推导建立了混凝土面板堆石坝渗流场与应力场耦合分析的有限元计算模型,提出并说明了混凝土面板堆石坝渗流场与应力场耦合的方法与步骤。提出了基于推导建立的渗流场与应力场的耦合分析计算模型。以公伯峡面板堆石坝为例,采用推导的渗流场与应力场的耦合分析计算模型,对其渗流场与应力场的耦合分析,表明当混凝土面板发生开裂时,不能忽视渗流场与应力场的耦合作用。

第 6 章 混凝土面板堆石坝温度应力有限元仿真分析中,从热传导理论出发,分析说明了混凝土面板堆石坝面板温度场、温度应力的有限元计算原理。采用已建的公伯峡面板堆石坝为例,进行了混凝土面板的温度场温度应力有限元计算,根据公伯峡面板坝的施工进度安排,对施工期、运行期及面板浇筑完成后出现寒潮三种工况的计算结果做出分析。最后通过面板温度计算结果与观测结果的对比,验证本章计算结果的合理性与准确性。

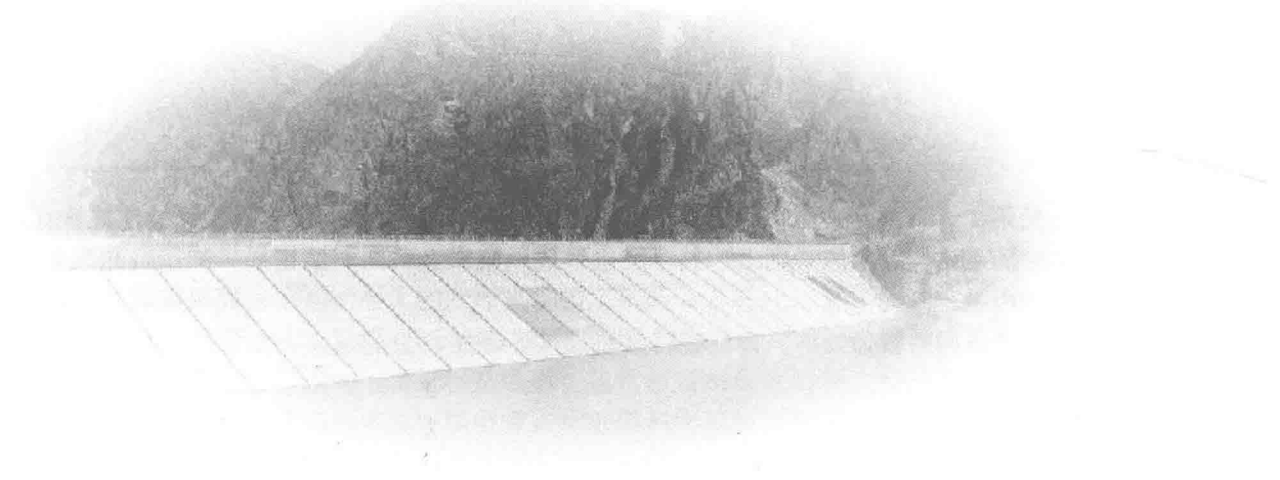
第 7 章 考虑温度荷载作用的混凝土面板应力变形特性研究中,分别阐述了高面板堆石坝的主要结构特征,混凝土面板堆石坝应力变形有限元计算中材料本构关系、非线性有限元计算的基本原理,以及面板与垫层之间的接触单元算法。以公伯峡面板堆石坝为例,

对坝施工、蓄水、运行的不同时段,分别模拟计算了大坝在荷载为坝体自重、水压力时的应力分布,以及叠加了混凝土温度荷载后的综合应力分布经与实测结果对比分析,验证了面板温度应力的变形特性。

第8章 混凝土面板开裂机理及裂纹扩展过程研究中,分别阐述了基于断裂力学原理对混凝土面板裂缝破坏过程的研究、混凝土面板初始微裂缝的形成机理、应力强度因子的有限元计算方法。提出了基于应力强度因子线性拟合求解法混凝土面板裂缝断裂力学分析模型。以公伯峡面板堆石坝为例,选其混凝土面板为研究对象,通过考虑面板堆石坝的湿化变形和库水位循环升降变化引起的坝体长期变形,具体分析了混凝土面板裂缝扩展过程。

第9章 堆石体邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究中,对材料参数敏感性研究的必要性进行了说明;阐述了常用的材料敏感性分析方法。提出了以正交实验法为核心的参数敏感性分析法。并用于邓肯-张 E-B 模型参数对坝体竖向位移、上下游水平位移的敏感性分析,为面板堆坝本构模型参数的选取提供参考。

第10章 总结与展望中,对本书中主要研究内容和成果进行了总结,并对混凝土面板堆石坝未来的发展方向提出了参考意见。



## 2 混凝土面板堆石坝应力变形分析方法

### 2.1 现代混凝土面板堆石坝的特点

#### 2.1.1 概述

现代混凝土面板堆石坝的主要特点：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等。

(1) 薄层碾压堆石。以薄层碾压堆石替代厚层抛填堆石，坝体密实可使变形减小，且筑坝材料有了多方面的选择。薄层（厚度小于 2m）碾压的堆石，可达到较高密实度，孔隙率一般都在 25% 以下，有的可小于 20%。不同条件下的变形模量为 30~130MPa，堆石体的总沉降主要在施工期完成，竣工后及蓄水期的沉降在总沉降的 0.5% 以下，相比抛填堆石坝，运行更为安全可靠。采用薄层碾压堆石的方法，堆石料的使用有了很大的余地和广阔的范围，使得砂砾石料使用日益广泛，在分层压实以后，其强度可与堆石相当，而压缩模量远高于堆石，也成为面板坝良好的筑坝材料选择之一。

(2) 滑模浇筑面板混凝土。混凝土面板的浇筑改用滑模施工，使纵、横缝分割成块状的浇筑块改变为竖向缝分割的条块。传统的混凝土面板是分成方块后人工立模浇筑，接缝内设可压缩填料，面板下的垫层是用人工砌筑的块石层；现代混凝土面板是竖向分为条块，用滑模快速浇筑，条块间的接缝除周边缝以外，都不设可压缩填料，而设各种类型止水，条块间保持硬性接触，以免接缝中因填料的变形使周边缝变形加大。

(3) 薄型趾板。现代的薄型趾板被视为地基防渗结构和坝体防渗面板的连接部件，而不是一种受力结构，可不考虑面板的下滑力、水压力、堆石压力等作用下的稳定性。因此结构大为简化，不设嵌固入地基内的齿槽，也不设支撑面板的底座，只用厚度与面板相当或略厚的薄板起防渗作用，并兼作灌浆盖板。薄型趾板的设计常用允许水力梯度及地基的渗透稳定性作为参考准则。趾板渗径除其本身宽度外，可采用连接板形式，或用喷混凝土的方式向上下游延伸，以此加长渗径，减小水力梯度，也可在趾板下游岩基面有可能发生渗流冲蚀部位铺设反滤料防止渗透破坏。

(4) 级配垫层料。现代常用的细级配垫层料，其功能从单一的对面板起支撑和平整作

用,到起到第二道防渗作用,并能起到反滤作用,这种演变也是现代面板坝的标志之一。垫层厚度在满足结构要求的基础上,其厚度也形成随施工方法而定的格局。如用自卸汽车卸料和推土机平土时,一般不小于 $2.5\sim 3\text{m}$ 。在实践中发展了分区使用不同级配材料,以满足功能要求,同时较为经济。如设置特殊垫层区,碾压得更为密实,对渗透水中的泥沙起到反滤作用。

### 2.1.2 坝体分区设计特点

堆石体是维持面板坝稳定的主体结构,它体积大、用料多、施工周期长。做好坝体材料分区在保证安全的前提下,尽可能地缩短建设周期,降低工程造价。堆石体的材料以充分使用枢纽附近的各种材料为准则,进行选用。进行堆石体剖面设计时,应充分根据枢纽附近的各种材料的工程性质、时空分布以及各种材料可能对面板坝正常工作产生的影响,将其合理地应用到坝体剖面不同的部位上去,因材设计。堆石体的变形将直接影响到混凝土面板等防渗结构的工作可靠性,因此,应以控制坝体的变形为指导思想,保证防渗结构与堆石体变形的协调性。

坝体材料分区必须满足在施工期浇筑面板前,能拦洪挡水度汛;在运行期力求坝体变形最小;一旦面板开裂或接缝止水破坏,不致发生大量渗漏。各区堆石料应满足抗剪强度、压缩性、渗透性和耐久性的要求,为此,坝体材料分区的原则应满足<sup>[66]</sup>以下几个方面。

(1) 坝体中的坝料之间应满足水力过渡的要求。

(2) 坝体上游应具有低压缩性。满足坝体各部位的变形协调,尽量减少(尤其是坝轴线上游)变形量,减小面板和止水系统遭到破坏的可能性。

(3) 充分合理利用枢纽的开挖料,分区尽可能简单,以达到经济的目的。

由于承载后坝体内各部位的应力和变形状态各异,工作环境也有所不同,故宜分区选择材料和填筑参数,以达到充分利用近坝廉价材料和方便施工的目的。

堆石体一般可分为四区:Ⅰ区为上游铺盖;Ⅱ区为垫层和过渡层;Ⅲ区为主次堆石区;Ⅳ区为下游护脚和护坡。其中,Ⅲ区是堆石坝的主体,根据其工作条件通常将其分为主堆石Ⅲ<sub>A</sub>、次堆石Ⅲ<sub>B</sub>(Ⅲ<sub>B</sub>或Ⅲ<sub>C</sub>)等亚区。对于高度不大的坝,也可不设Ⅰ区。对各区的材料和填筑要求,以Ⅱ区和Ⅲ<sub>A</sub>区为最高和较高,其他各区可略低。堆石坝体各区的位置、作用及要求见表2-1<sup>[67]</sup>。

表 2-1 堆石坝体各区的位置、作用及要求

| 名称    | 位置         | 作用                          | 要求                                                        |
|-------|------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 垫层区   | 面板下方       | 平整面板,避免应力集中;减少水荷载引起的变形;辅助防渗 | 粒径不能太大,最大粒径为 $80\sim 100\text{mm}$ ,有较多细料;级配良好;低压缩性和高抗剪强度 |
| 过渡区   | 垫层区和主堆石区之间 | 保护垫层并起过渡作用                  | 级配连续,最大粒径不大于 $300\text{mm}$ ;低压缩性和高抗剪强度,自由排水性能            |
| 主堆石区  | 坝体上游       | 是承受水荷载的主要支撑体                | 细料不能太多;低压缩性、高抗剪强度、较好的透水性和耐久性。常用硬岩堆石料或砂砾料                  |
| 下游堆石区 | 坝体下游       | 与主堆石区共同保持坝体稳定,其变形对面板影响较小    | 可用软岩堆石料                                                   |

从已建工程看,对Ⅲ区 A、B、C 的划分则多种多样,值得探索的问题是:在保证大坝工作可靠的前提下,如何合理扩大Ⅲ<sub>B</sub>和Ⅲ<sub>C</sub>,以充分利用枢纽开挖石碴和近坝软差岩料,尽可能降低工程造价和缩短工期?因此,坝体材料分区设计,主要是通过技术可行和经济合理的全面权衡,研究Ⅲ区 A、B、C 的区划和几何形状,以做到总体较优。

混凝土面板堆石坝的主体材料是堆石,包括硬岩料和软岩料,按照堆石的定义,它不包括砂砾料,但近代的许多面板坝也常采用砂砾料来填筑大坝主体,所以可将以砂砾料为主体材料的面板坝也包括在混凝土面板堆石坝范畴内。

用硬岩堆石料填筑的坝体可按照图 2-1 进行分区<sup>[68]</sup>。设计中可结合枢纽建筑物开挖石料和近坝区可用料源,增加坝体其他分区。一般情况下,坝高 150m 以上的高坝,主堆石区与次堆石区的分界面宜倾向下游。

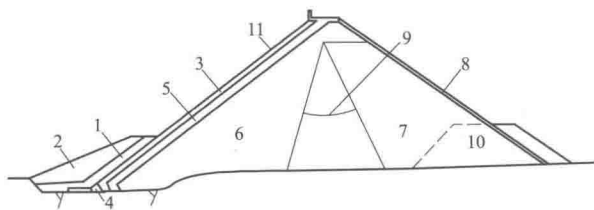


图 2-1 硬岩堆石坝体主要分区

- 1(1A)—上游铺盖区; 2(1B)—盖重区; 3(2A)—垫层区; 4(2B)—特殊垫层区;  
5(3A)—过渡区; 6(3B)—主堆石区; 7(3C)—下游堆石区; 8(3D)—下游护坡;  
9—可变动的主堆石区与下游堆石区界面,角度依坝料特性及坝高而定;  
10(3E)—抛石区(或滤水坝趾区); 11(F)—混凝土面板

用砂砾石填筑的坝体可参照图 2-2 进行分区<sup>[68]</sup>,并可根据需要增减分区。对渗透性不满足自由排水要求的砂砾石、软岩坝体,应在坝体上游区内设置排水区,竖向排水区可与过渡区结合,并与坝底水平排水区连接,将可能的渗水排至坝外,以保证下游区坝体的干燥。必要时可设置下游坝趾大块石棱体,以起到反滤排水的作用。

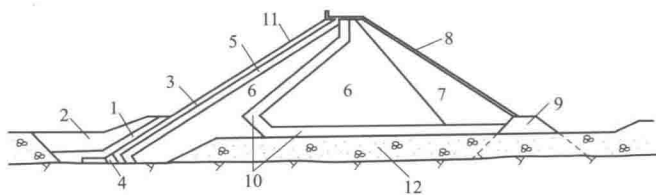


图 2-2 砂砾石坝体主要分区

- 1(1A)—上游铺盖区; 2(1B)—盖重区; 3(2A)—垫层区; 4(2B)—特殊垫层区; 5(3A)—过渡区;  
6(3B)—主堆石(砂砾石)区; 7(3C)—下游堆石(砂砾石)区; 8(3D)—下游护坡; 9(3E)—滤水坝趾区;  
10(3F)—排水区; 11(F)—混凝土面板; 12—坝基冲积层

### 2.1.3 筑坝材料的一般要求

在实际工程中,面板堆石坝所采用的筑坝材料类型十分广泛,堆石材料的分类可以划分为硬岩、中硬岩和软岩三类。筑坝材料应按有关规程进行室内物理力学性质试验。1、2