



坝工丛书

混凝土面板堆石坝

Concrete Face Rockfill Dam

曹克明 汪易森 徐建军 刘斯宏 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



混凝土面板堆石坝

曹克明 汪易森 徐建军 刘斯宏 著



内 容 提 要

混凝土面板堆石坝对地形和地质条件都有较强的适应能力,并且施工方便、投资省、工期短、运行安全、抗震性好,因而其作为坝型选择具有很大的优势。面板堆石坝的发展取得了很大的成功,截至2006年,全世界建成、在建、设计中的坝高50m以上的面板堆石坝共约390座,其中我国建成的约占40%。坝的高度也有发展,最高的到达了233m(我国的水布垭)。但是,许多已建的坝高大于150m高坝,发生了不同程度的面板破坏,并产生了达 $1.3\text{m}^3/\text{s}$ 的大漏水量。因此,大家认为面板堆石坝在坝高发展方面已达到了关键时期,以往设计准则的有些规定不再适用于这些超高坝。

本书分成绪论(面板堆石坝的发展)、面板堆石坝布置、坝体分区与筑坝材料、坝体变形分析、趾板、面板及接缝、坝的计算与分析、面板堆石坝的施工和安全监测等九章讨论面板堆石坝的设计、施工与运行。一般认为,面板堆石坝设计是经验设计,就是以实践为基础,“通过实践而发现真理,又通过实践而证实真理和发展真理”的设计方法。因此,我们在有关章节均选择有代表性的工程作为讨论根据,显然超高坝的设计还处于“通过实践而发现真理”的阶段,我们还收集了超高坝发生面板挤压破坏工程的实例和一些专家、学者的分析意见,本书作者也提出了自己的看法。我们相信,这些意见对改进超高坝的设计是有参考价值的。

本书可作为从事水利水电勘测、设计、施工、运行人员的工具书,也可供科研、教学等方面的科技人员及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板堆石坝/曹克明等著. —北京:中国水利水电出版社, 2008

(坝工丛书)

ISBN 978-7-5084-5924-0

I. 混… II. 曹… III. 混凝土面板堆石坝 IV. TV641.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第150661号

书 名	坝工丛书 混凝土面板堆石坝
作 者	曹克明 汪易森 徐建军 刘斯宏 著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266(总机)、68367658(营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 27.25印张 646千字
版 次	2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	75.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

言

2000年12月，在位于京郊南苑的龙爪树宾馆，紫坪铺水利水电工程初步设计审查会正在召开，设计大师曹克明作为面板坝审查特邀专家参加会议，汪易森则是水利部水利水电规划设计总院主审总工程师。由于紫坪铺面板堆石坝是当时继天生桥一级工程开工后国内坝高超过150m的又一座高坝，会上曹克明等就高面板堆石坝设计、施工应注意的问题作了重点发言。会议结束前的最后一个夜晚，曹克明和汪易森相聚在一起畅谈高面板堆石坝的发展和设计施工中应注意的问题，一边讨论一边拟写提纲，他们相约先写一篇《高混凝土面板堆石坝设计施工讨论》，并在此基础上利用他们在华东勘测设计研究院多年工作经验，完成《混凝土面板堆石坝》一书。这就是《水力发电》2001年10期上发表的由曹克明、汪易森等三人合写的《高混凝土面板堆石坝的设计与施工》一文的由来。在华东勘测设计研究院水工所所长徐建军高级工程师和河海大学刘斯宏教授的努力下，在紫坪铺大坝经受了2008年5月12日汶川大地震的数月之后终于得以完成本书的最初起因。

中国发展面板堆石坝较晚，但速度较快，目前已拥有数量最多的建成坝及高度最高的在建坝，也是拥有面板堆石坝设计和施工单位最多的国家。为指导面板堆石坝设计、施工的健康发展，前些年已陆续出版了不少由科研院所、高等院校研究人员、学者、教授主编的有关面板堆石坝方面的书籍。但本书是由设计人员自己根据多年工程设计经验编写的，四位作者均出身于华东勘测设计研究院，也都直接设计、监理了多座面板堆石坝。我们认为，作为面板堆石坝的优秀设计工程师，不但要知其然，而且要知其所以然，对于面板堆石坝这样一种引进坝型，应当了解它的产生、发展历史和在我国引进、消化、实践、提高的全过程。所以我们更多地从设计人员的角度去介绍、分析问题，并从设计角度提出解决问题的设计思路和方法。为此，本书对国外面板堆石坝的由来和最新技术发展、我国面板堆石坝的引进及发展、混凝土面板堆石坝与心墙堆石坝的比较、坝型选

择与泄洪建筑物布置、坝体分区与筑坝材料、趾板设计、面板设计、基础处理、面板坝计算与分析、施工与安全监测、事故与处理措施等均作了全面的技术介绍与总结分析。通过作者的亲身经历和实践，提出了高面板堆石坝设计、施工中应注意的若干问题。此外，书中精选了一些国内外公认的设计先进、施工优良的面板堆石坝实例，不但可读性强，而且相信会对设计、施工人员有较大的参考作用。

诚如一般所言，面板堆石坝是一种投资省、工期短、就地取材、施工方便、导流简易、适应性广的坝型，但由于用现代碾压技术施工的大、中型面板堆石坝历史还不长，因地震而严重损坏的例子未见记载，所以在强烈地震后面板堆石坝的性态及稳定性如何，是许多专家关心的一个重要问题。2008年发生在四川省汶川的“5.12”大地震对此作了最好的说明。岷江紫坪铺大坝最大坝高156m，距汶川“5.12”大地震震中映秀镇直线距离约12km左右，该工程在初设阶段经国家地震局鉴定，工程区地震基本烈度为7度，故挡水建筑物地震设计烈度为8度，其余永久建筑物地震设计烈度为7度。此次强震后经有关专家现场初步分析，大坝坝址处基岩加速度达0.5g以上。地震后经系统检查，坝顶栏杆部分倒塌、坝后坡上部干砌石护坡局部面层松动破坏、面板表面局部垂直缝有挤压破碎；Ⅱ～Ⅲ期面板施工缝产生错台；面板与垫层料之间发生局部脱空；坝顶4号防浪墙至25号防浪墙与人行道之间有拉开现象；5月17日测得坝顶最大震陷为74.4cm，最大震陷仍在设计预留震陷范围内。曹克明、汪易森两人由于参加初设审查和施工全过程的技术咨询，于2008年5月中下旬被邀请到达现场参加了水利部专家组，对大坝面板震后修补方案进行了审查，专家组经过认真检查讨论后结论是：“大坝整体稳定安全，坝体渗流量无明显增加，地震未发生影响大坝安全运行的重大损伤。”紫坪铺大坝经受强震考验的实践充分说明了用当地材料建成的面板堆石坝具有较大的柔性，能较好地适应地震时的变形。

库克先生(1992)强调面板堆石坝设计是经验设计，是以先例为依据、根据先例进行推断的设计。设计必须重视经验总结并及时根据施工、运行中发生的情况修改设计。但另一方面，随着超高面板堆石坝的建设，如何确定超高面板堆石坝更合理的本构关系并正确测定其参数，如何更精确地进行坝体在施工期和运行期的静动力及变形分析等众多专家关心的问题也正在继续研究中，并已取得初步成果。本书在充分总结面板堆石坝设计、施工、运行经验的基础上也对这些问题进行了初步的探索分析。

在本书的编写过程中得到华东勘测设计研究院张春生总工程师，吴关叶、姜忠见、陈振文、郑子祥副总工程师等的大力支持，并提供资料，在此深表感谢。

为使本书更具实用性，几位作者均极其认真严肃地投入编写整理工作，但由于作者本身水平有限，书中难免仍有不当之处，尚待同行批评指正。

曹克明 汪易森 徐建军 刘斯宏

2008年8月

混凝土面板堆石坝是堆石坝的一种型式。堆石坝是以堆石作为其结构主体，分心墙防渗及面层防渗。砾石性质与堆石相似，一般将心墙砾石坝划为土坝，混凝土面板砾石坝划为混凝土面板堆石坝。面层防渗堆石坝以混凝土面板坝为主，其他还有木料、浆砌块石、喷混凝土、沥青和钢面板等堆石坝。心墙堆石坝以土心墙堆石坝为主，其他还有混凝土、木料、钢板和沥青心墙等堆石坝。本书内容主要讨论混凝土面板堆石坝的设计与施工，当然混凝土面板砾石坝是属于混凝土面板堆石坝的坝型。

最早堆石坝，一般认为发生在加利福尼亚淘金热时期（18世纪60~70年代），在加利福尼亚东部内华达花岗岩块状山脉地区。那时矿工需要修建水库以积蓄融化雪水供淘金之需。可以利用的当地材料只有坚硬岩石、山麓堆积的岩块和茂密的森林，加上矿工熟知钻爆技术，于是产生了木面板防渗的框架填石堆石坝。灌溉公司和发电公司以后接管了这些坝，并用抛填堆石加高与木面板防渗。1910年前抛填堆石坝均采用木面板防渗，最大坝高达30m，坝坡采用1:0.5~1:1.0，其上下游坝面采用干砌石抵挡施工时抛填石的滚落。这些实例充分说明抛填堆石的内摩擦角远大于其天然休止角、低围压时具有很高的抗剪强度。由于施工机械的发展，为了节省费用及加快施工进度，1910年开始采用按堆石的天然休止角（相当于坡度1:1.3~1:1.4）修建抛填堆石坝，并采用混凝土面板防渗。

库克将面板堆石坝的发展分成三个时期，早期约为1850~1940年，过渡期1940~1970年，现代期1970年以后。我们在第一章将介绍各时期发展情况及其典型工程，面板坝的发展都是里程碑式地通过具体工程体现出来。

面板堆石坝由防渗面板、防渗接地结构、堆石坝体等三大部件组成。防渗面板是面板堆石坝的防渗部件。面板通过周边缝与防渗接地结构连接。面板是堆石坝体的防渗部件。防渗接地结构主要控制通过地基及两岸坝基的渗流，减小漏水量、使漏水得到安全排泄。堆石坝体则是面板的支撑结构，也是面板的基础，并且要安全排泄通过面板及其接缝的漏水。早期以混凝土面

板抛填堆石坝典型设计为特征，其三大部件的主要特征如下：

(1) 堆石坝体为抛填堆石，其层高 20~200 英尺 (6~60m)，其上游面面板垫层为机砌石；坝坡采用天然休止角，上游坝坡为 1:1.3，下游综合坝坡为 1:1.4。

(2) 防渗接地结构采用在坚硬岩石中开槽后回填混凝土的截水槽。

(3) 防渗面板采用方格式混凝土板，用可压缩缝格开；面板缝、周边缝止水均采用 U 型铜片单止水。

在 1940 年后，为满足生产发展的需要，开始修建高坝，混凝土面板因不适应抛填堆石的变形，产生了很大的漏水量，坝高超过 75m 的情况更为严重，75m 被认为早期式混凝土面板坝的极限高度，因此面板坝发展处于停顿状态。这一时期土心墙堆石坝得到了发展。心墙堆石坝坝型在 1933 年才开始出现。1956 年采用碾压堆石筑坝后，混凝土面板坝重新得以发展。此外，碾压堆石还可以利用较细的料与质量较差的岩石，因此土心墙堆石坝也改用碾压堆石，1965 年进入了碾压堆石时期。在过渡期，面板坝的其他设计特点也得到改进，1970 年完成了现代面板坝的设计特点，其典型实例为塞沙纳工程。现代面板堆石坝的设计主要特征为：

(1) 堆石坝体采用碾压堆石，并分区为含细料的半渗透性垫层料、过渡料区、主堆石和次堆石区。分区堆石渗透系数由上游向下游增加，压缩性由下游到上游减小。

(2) 防渗接地采用趾板和灌浆帷幕。

(3) 防渗面板采用滑模连续浇筑，垂直缝采用硬平缝，并采用底部 W 型铜止水。周边缝结构采用多道止水。

在过渡时期的里程碑式工程，我们将在第一章中介绍。

1970 年后在坝体分区设计、筑坝材料、趾板设计、周边缝设计等方面都有改进和发展。1980 年建成的 160m 高的阿里埃坝，被认为是新的里程碑、标志面板坝设计已经成熟。因此，以库克、谢腊德为代表的专家提出了堆石分区标准化的意见，规定了分区界线、材质要求、级配要求、填筑层厚、以至碾压参数（振动碾吨位、碾压遍数、加水量，如 10t 振动碾压 4 遍等）；并提出堆石施工质量以控制碾压参数为准，密度检查仅作为工程记录的原则性意见。我们将在第三章介绍他们的意见，同时介绍我国、澳大利亚、巴西在这方面的规定。此时期堆石分区是以面板挠度最小为定性原则，并要求堆石坝体对面板漏水起渗流控制作用，安全排泄、不引起堆石体附加沉降。谢腊德 (1985)^[57] 建议垫层料设计成面板坝的第二道防渗线，但其必要性未成为共识。

但是，许多沿用阿里埃坝经验的近期建成的超高坝，出现了面板挤压破

坏及面板结构性裂缝事件。因此，现在许多专家提出以阿里埃坝为代表的成熟技术只可以用于150m以下的高坝，并认为超高坝需具有新的设计准则。

库克(1992)仍强调面板堆石坝设计是经验设计，是以先例为依据、根据先例进行推断的设计。库克、谢腊德(1987)^[3]认为在与阿里埃坝相似的宽河谷中，利用阿里埃技术、以相同的堆石压缩模量(47.5MPa)修建300m高面板坝，根据面板挠度与坝高平方成正比、与堆石压缩模量成反比计算的关系，挠度将为阿里埃坝的 $(300/160)^2=3.5$ 倍，阿里埃坝蓄水后5年的面板挠度为75cm，300m高坝的将为260cm。他们相信，对于300m高坝，260cm面板挠度产生的较大漏水量，将不危及坝的安全。最重要的是采用更为保守的、较宽的、更均一的、不分离的、可靠低渗透性的垫层料。这样可以依靠垫层料，限制通过面板较大裂缝与其破坏了的止水的较大漏水量。在这里，垫层料作为面板坝第二道防渗线的必要性得到了充分的强调。

阿瓜密尔帕坝的专家们(1991)^[11]担心面板挤压破坏问题，他们认为阿里埃坝面板压应变为 665×10^{-6} ，187m高的坝采用阿里埃坝的技术、相同的堆石压缩模量，则由面板压应变与坝高平方成正比、与堆石压缩模量成反比关系计算，阿瓜密尔帕坝面板压应变将为 $665 \times 10^{-6} \times (187/160)^2 = 908 \times 10^{-6}$ 。他们认为 908×10^{-6} 压应变可能引起面板挤压破坏。因此，他们放弃了花岗岩堆石方案，采用了砾石方案。碾压砾石实测压缩模量为260MPa，安全地避免了面板挤压破坏。我们认为，避免面板挤压破坏的设计更为可取，但是认为在无砾石可以利用时，也可以利用硬岩堆石，同时采用较重的碾重、较多的遍数、较大的加水量等措施，提高堆石的压缩模量。

我们在阿瓜密尔帕坝的专家们基础上，补充了天生桥一级、利斯、默霍尔、巴拉格兰德、肯柏诺沃等坝资料。其中天生桥一级坝、默霍尔坝、巴拉格兰德坝、肯柏诺沃坝都产生不同程度的面板挤压破坏，因此它们的经验更显得宝贵。根据这些坝的经验，我们界定了面板挤压破坏的临界压应变值(900×10^{-6})、其相应的临界挠度，建立了河谷宽窄度与临界挠度的关系式。关系式表明临界挠度与河谷宽窄度有关，河谷较窄则其临界挠度较小。天生桥一级坝实例表明，面板挤压破坏可能在蓄满后3年才发生，因此为了避免面板挤压破坏，应规定稳定挠度小于临界挠度。此外，我们根据我国近期高坝采用较重振动碾、较多碾压遍数、较充分加水量的堆石施工经验，硬岩堆石可以得到接近18%的孔隙率与150MPa左右的压缩模量，因此认为通过提高堆石压缩模量避免超高坝面板的挤压破坏是现实的。根据这些经验，我们还建立了堆石压缩模量与其孔隙率关系曲线。这样就可以按坝高和河谷宽窄度规定堆石的

孔隙率，以避免面板挤压破坏。这些研究工作，将在第三章、第四章介绍。

我们的工作为阿瓜密尔帕坝专家工作的继续，都属于根据先例进行推断性质的。我们认为超高坝设计，堆石的施工应以达到规定的孔隙率为目的，堆石的分区应以达到规定挠度为原则。因此，我们认为超高坝设计最大特征可能是规定堆石的孔隙率。

此外，除规定主堆石孔隙率外，次堆石也要规定孔隙率，以避免上游堆石面产生拉伸变形；还要规定面板浇筑前的堆石的预沉降时间，以消除徐变带来的不利影响，如面板顶部的弯曲性结构裂缝、增加面板顶部挠度等。当然超高坝还需要规定更保守的垫层料级配，更强调垫层料作为第二道防渗线。

这些应该是超高坝设计的基本准则。至于许多专家提出的进一步改进堆石分区、改进垫层料护坡设计、改进垂直缝设计、改进面板配筋提高面板抗挤压能力等意见。这些意见将在第三章中讨论。我们相信通过工程的实践可以形成超高面板坝主要设计准则。

第四章主要介绍面板堆石坝的原形观测布置。其项目包括坝顶沉降过程曲线、堆石压缩模量、面板挠度、周边缝的三向位移、面板应力应变值、面板坝漏水量等。此外，我们介绍与原型观测成果相符合的计算面板挠度半经验公式，包括我们提出的面板长期稳定挠度的半经验计算公式。在本章我们还推荐采用面板综合渗透系数法计算面板坝漏水量的公式，并收集许多坝的面板综合渗透系数，其中包括我国的天生桥一级坝和白溪坝等，我们相信这是最好的估计面板坝漏水量的方法。

趾板设计将在第五章介绍。近年来趾板设计有很大发展，采用连续浇筑趾板，趾板分为外趾板和内趾板，趾板的地基则由弱风化岩石放宽到全风化岩石等。我们认为趾板设计已相当成熟。

第六章主要介绍面板及其接缝设计经验、规范要求等，其次介绍一些专家对超高坝这方面的改进意见。

坝的稳定分析、应力应变分析、渗流分析和抗震分析将在第七章中介绍，并结合2008年5月12日发生的汶川8级地震，介绍了紫坪铺面板坝震损情况，并根据紫坪铺实例，评价了目前抗震计算与设计。

面板坝的施工将在第八章中介绍。面板的安全监测将在第九章中介绍，其内容包括性状监测。

曹克明 汪易森 徐建军 刘斯宏

2008年8月

目 录

序言

前言

第一章 绪论	1
第一节 面板堆石坝发展过程	1
第二节 面板堆石坝发展里程碑	4
第三节 中国面板堆石坝的发展	11
第四节 面板堆石坝与土心墙堆石坝方案比较	13
第五节 面板堆石坝的主要属性	14
第二章 面板堆石坝布置	39
第一节 概述	39
第二节 坝址选择	40
第三节 坝轴线布置	42
第四节 坝基覆盖层处理	53
第五节 高趾墙布置	60
第六节 泄水建筑物布置	65
第七节 土石方平衡	93
第三章 坝体分区与筑坝材料	100
第一节 概述	100
第二节 坝坡	101
第三节 坝体分区	107
第四节 筑坝材料	160
第四章 坝体变形	176
第一节 概述	176
第二节 堆石坝体表面变形	177
第三节 堆石坝体变形观测工程实例	179
第四节 堆石坝体变形估算	232
第五章 趾板	243
第一节 概述	243
第二节 趾板布置	244

第三节	趾板稳定性分析	253
第四节	冲积层上的趾板	255
第五节	工程实例	256
第六章	面板及接缝	266
第一节	概述	266
第二节	防浪墙布置	268
第三节	面板布置	271
第四节	面板止水布置	277
第五节	面板配筋	291
第六节	面板混凝土	294
第七节	工程实例——考兰坝	300
第七章	坝的计算与分析	304
第一节	稳定分析	304
第二节	应力应变分析	308
第三节	渗流分析	324
第四节	抗震设计	337
第八章	面板堆石坝的施工	358
第一节	概述	358
第二节	导流与度汛	358
第三节	坝基开挖	362
第四节	坝体填筑	365
第五节	垫层料护坡	373
第六节	趾板施工	377
第七节	面板施工	380
第八节	堆石体反向排水	383
第九节	面板坝开挖及填筑施工规程	385
第九章	安全监测	394
第一节	概述	394
第二节	监测项目及布置	395
第三节	监测仪器选择、埋设与管理	399
第四节	安全监测实例	405
主要参考文献		413

第一章 绪 论

第一节 面板堆石坝发展过程^{[1][3][5]}

库克 (Cooke) 于 1992 年将面板堆石坝的发展分成三个时期: 早期 (1850~1940 年), 过渡期 (1940~1970 年), 现代期 (1970 年以后)。

一、早期 (1850~1940 年)

采用石料修坝可以追溯到更远的古代, 但与现代面板堆石坝一脉相承的, 是 19 世纪 50 年代在美国加州内华达花岗岩山脉开始的为淘金供水的堆石坝。那时矿工懂得爆破技术, 并且遍地都是可供利用的花岗岩, 当地缺乏土料, 但森林茂密, 于是堆石坝应运而生。

最初的堆石坝都是一些木框堆石坝, 其可以加陡坝坡、节省堆石方量, 其中美国 1856 年建成的英格兰 (English) 坝, 高 24m (79 英尺), 为早期高堆石坝, 上游坝坡 1:0.85, 下游坝坡 1:0.6, 在木框上游面设有木板防渗, 后来又加高 6.4m, 于 1883 年损坏。

1885 年后修了许多坝高低于 25m 的堆石坝。这些堆石坝往往采用木面板防渗, 而没有出现过土心墙堆石坝。初期的木面板堆石坝的坝坡是很陡的, 为了形成很陡的坡度, 在表面用手工砌成一薄层干砌石作为抛填石施工的挡护, 施工期起阻挡滚石作用, 建成后起护面作用, 如草地湖 (Meadow Lake, 1903) 坝。

大约从 1910 年开始, 由于施工机械的发展, 为了节省费用及加快施工进度, 才开始采用按堆石的天然休止角 (相当于坡度 1:1.3~1:1.4) 修建堆石坝, 并采用混凝土面板防渗。如 1916 年建成的 50m 高的草莓 (Strawberry) 坝, 上游坡为 1:1.2, 下游坡为 1:1.3。

第一座混凝土面板堆石坝是美国加州的察凡·派克 (Chatworth Park) 坝, 1895 年建成, 坝高 13m, 上游坝坡为 1:0.5, 下游坝坡为 1:1~1:1.25。到 1925 年, 美国建成 8 座坝高大于 100 英尺 (约 30m) 的混凝土面板堆石坝, 其他国家建成 4 座 (约在 1920 年后开始修建面板堆石坝)。

1925~1940 年期间, 世界上建成许多高度大于 70m 的高混凝土面板堆石坝, 如 1925 年建成的 84m 高的美国狄克斯河 (Dix River) 坝, 1931 年建成的 100m 高的美国盐泉 (Salt Springs) 坝, 1955 年建成的 112m 高的葡萄牙帕拉德拉 (Paradela) 坝。盐泉坝的建成为抛填式面板堆石坝的设计规格化打下了基础。抛填式面板堆石坝的典型设计如图 1-1 所示。

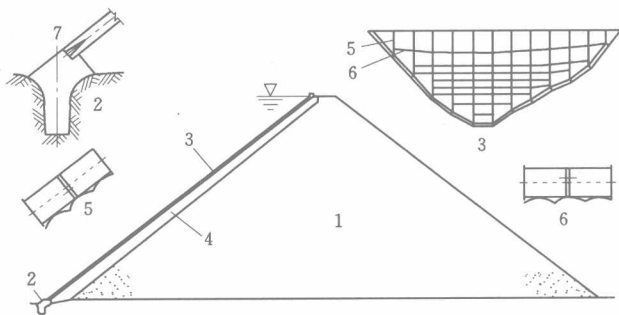


图 1-1 抛填式混凝土面板堆石坝典型设计
1—抛填堆石; 2—截水槽; 3—矩形混凝土面板; 4—机砌大块石
垫层; 5, 6—单铜片止水面板缝; 7—单铜片止水周边缝

抛填堆石的传统工艺要求厚层抛填,抛填层高往往达到 60~200 英尺(18~60m),为了避免抛填时岩石碎裂,要求岩石有很高的抗压强度。抛填堆石的结构是依靠岩块的尖角及边棱的支撑得到维持的,因此也要求岩块具有坚硬、耐久、完整与方块形状,具有与混凝土骨料相同的品质。抛填堆石在抛填时要求用 1~3 倍堆石体积的水通过水枪进行喷射,将碎料冲填到堆石的孔隙中去,以便形成大石块骨架,因此还规定碎料含量不超过 10%。很多坝址的石料不能满足此要求,这样抛填堆石在应用上就受到了限制,缺乏普遍性。抛填堆石这种施工工艺必然产生很大分离,大块石集中于底部。底部堆石具有最大的孔隙率(可以达到约 40%),其压缩性也最大,却需承受最大水压力。这种施工工艺扩大了抛填堆石对高坝适应性的矛盾。

抛填堆石坝都产生了很大的漏水量。1952 年建成的 75m 高的美国下比尔 1 号(Lower Bear No. 1)坝,面板未损坏,但需要进行小量的修理,漏水量为 110 L/s,与现代 75m 高的面板坝比较,其漏水量是属于不可接受的。同时建成的坝高 50m 的下比尔 2 号坝漏水量却很小,无需修理。当时一般超过 60m 高的坝都存在修理的麻烦。

尽管抛填式混凝土面板堆石坝有很大的漏水量,运行却始终安全的,但过量漏水的经济损失及麻烦的修理终成为抛填式面板堆石坝用于高坝建设的障碍。

这些实例表明,75m 的高坝已成为抛填式混凝土面板堆石坝的极限高度。更高的面板堆石坝的抛填堆石会产生过大变形,使混凝土面板产生结构性的开裂及损坏。

二、过渡期(1940~1970 年)

1940 年以前,在抛填式堆石坝时期,所有堆石坝都采用上游面防渗。1940 年后,由于生产的发展,需要建设更高的坝,可是抛填式面板堆石坝在坝高超过 75m 时都发生了大量漏水,因此认为 75m 以上高坝不能采用面板堆石坝,因而转向建设能适应抛填堆石变形的土心墙堆石坝。心墙堆石坝的土心墙与反滤料组成的防渗线能适应抛填堆石的变形,坝高超过 150m 也能采用抛填堆石建造,因此土心墙堆石坝逐渐成为主导坝,面板堆石坝的发展处于停顿状态。

到了 50 年代,有些坝的抛填堆石的抛填高度改为 3m;有些坝原设计采用抛填堆石,但施工后由于石料较细,改成碾压堆石。振动碾压的堆石的低压缩性在其实践过程中得到证明,碾压堆石不仅减小了堆石的压缩性,并且使质量较差的岩石也可用于筑坝,于是碾压堆石很快取代了抛填堆石。1966 年建成的 150m 高的美国新国库坝(New Exchequer)成为最后及最高的抛填式面板堆石坝。

三、现代期(1970 年以后)

1956 年采用碾压堆石后,减小了堆石的压缩性,使混凝土面板能够适应碾压堆石的变形,混凝土面板堆石坝重新得到快速发展。因碾压堆石可以利用较细的料与质量较差的岩石,因此土心墙堆石坝也开始采用碾压堆石,到 1965 年,碾压堆石完全取代了抛填堆石,进入了碾压堆石时期。1965 年后,面板堆石坝还对堆石分区、趾板及面板设计等进行了改进,到 1971 年 110m 高的塞沙纳(Cethana)坝建成,面板堆石坝的设计才得到完善,因此一般认为塞沙纳坝为第一座现代面板堆石坝。现代面板堆石坝的设计表现在:碾压堆石、趾板和基础灌浆的接地防渗、趾板到坝顶的整体面板、半透水性的垫层料、多道止水的

周边缝等五大标志性的设计特点。总之，到1965年完成了抛填堆石坝到碾压堆石坝的过渡，到1970年完成了老式面板堆石坝到现代面板堆石坝的过渡。现代碾压式面板堆石坝在发展过程中形成其典型设计，其特点如图1-2所示。

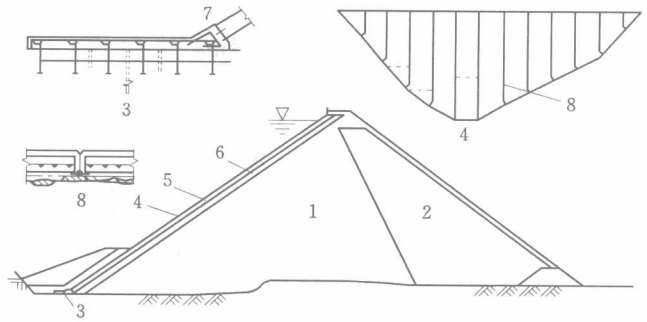


图 1-2 碾压式混凝土面板堆石坝典型设计
1, 2—碾压堆石; 3—趾板; 4—连续浇筑面板; 5—半透水性垫层区; 6—过渡料; 7—多道止水周边缝; 8—单止水面板缝

现代碾压堆石坝不仅大大地减小了漏水量，而且具有造价低、工期短的特点，在坝型比较中往往占有优势，因此得到了蓬勃发展。现在面板堆石坝已用于：

230m 高的大坝建设，大型水利水电工程，对漏水量有很严格要求的抽水蓄能电站上库，设坝身溢洪道的大坝，以及各种不利地形地质条件大坝的建设。

但是面板堆石坝的设计基本上基于经验，需要对其施工及运行中发生的问题进行不断的总结、改进，才能进一步前进。近期建成的 187m 高的阿瓜密尔帕坝（1993）、178m 高的天生桥一级坝（1999）、145m 高的默霍尔坝（2000）、185m 高的巴拉格兰德坝（2006）、202m 高肯柏诺沃坝（2006）均出现了以前没有发生过的问题。其中有些问题的性质，类似过去抛填堆石的坝高超过 75m 后所出现的问题，如面板损坏等情况。这些发生问题的共性，可以说明从塞沙纳坝到阿里埃坝所建立起来的堆石分区、“设计准则”不适应超高坝的情况。因此目前处于超高面板堆石坝设计发展的阶段，需要一段相当长的时期，才能建立起新的堆石分区、“设计准则”。面板堆石坝的设计是经验设计，是经验的外延设计，对更高的坝、更差的堆石、更窄的河谷，都需要根据经验的推断，提出新的推理与“设计准则”，进行设计。但是这些推理与“准则”的正确性，要经过长期运行验证。我们认为经验法的设计道路，是有风险的。对于超高坝出现的问题都需要认真总结。

堆石坝的历史发展情况如图 1-3 所示。

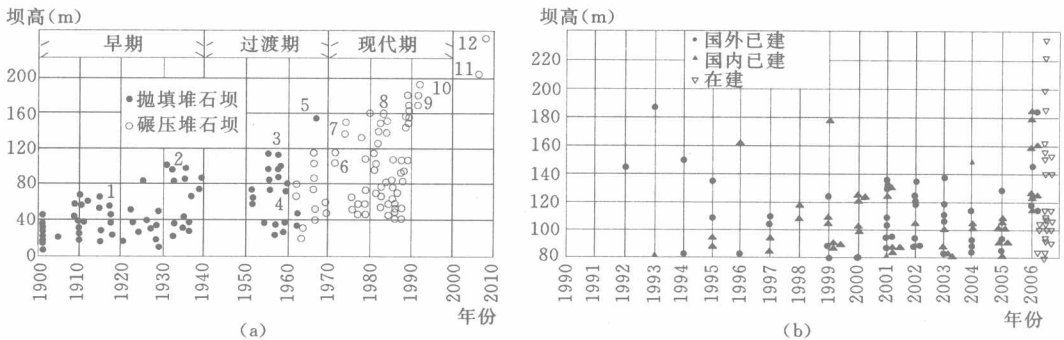


图 1-3 混凝土面板堆石坝统计

(a) 1900~1990 年; (b) 1991~2006 年

- 1—草莓坝; 2—盐泉坝; 3—帕拉德拉; 4—奎趣; 5—新国库; 6—塞沙纳; 7—安其卡亚;
8—阿里埃; 9—天生桥一级; 10—阿瓜密尔帕; 11—肯柏诺沃; 12—水布垭

第二节 面板堆石坝发展里程碑^{[1][4]}

由于混凝土面板堆石坝设计是凭经验的，因此工程先例在设计中起重要作用。对面板堆石坝设计起改进作用的典型工程如下。

1. 上比尔河 (Upper Bear River) 坝和草地湖 (Meadow Lake) 坝 (美国, 1900、1903) 这两座坝都是坝坡很陡的早期木面板堆石坝。

上比尔河坝坝高 23m，建于 1900 年，上、下游坝坡顶部 8m 为 1:0.5，底部 15m 为 1:0.75，其坡度比抛填堆石的天然休止角形成的 1:1.3 坡度陡得多。上游面采用人工干砌石 (由小型吊车辅助) 作为施工期的护面，以后留作木面板的垫层。1929 年扩大了溢洪道，并在坝下游采用抛填石加高，其下游坝坡为 1:1.3。1932 年完成加高 1.5m，增加了库容；1953 年将腐烂木面板更新为整体式的喷混凝土面板，喷混凝土面板底部厚 13cm，顶部厚 8cm，采用钢筋网配筋。

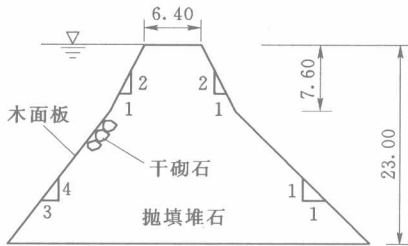


图 1-4 草地湖坝剖面图
(尺寸单位: m)

草地湖坝坝高 23m，1903 年建于美国加州。同样采用一层干砌石护面、垫层及较陡的坝坡。上游坝坡顶部 8m 为 1:0.5，底部为 1:0.75。下游坝坡顶部 8m 为 1:0.5，底部为 1:1，如图 1-4 所示。1930 年一场森林大火烧毁了木面板后，改为喷混凝土面板，厚 5~10cm，也不设接缝。喷混凝土面板发生过一条垂直裂缝，采用止水铜片进行了覆盖，其后裂缝的开展虽仍在发展，但未引起漏水，运行一直正常。

这些早期坝没有进行仪器监测，但是坝的性状仍得到了细致观测，其经验对于后来坝的设计是很有益的。这些工程实例可以充分说明堆石的内摩擦角比抛填堆石的休止角大得多，边坡稳定分析采用堆石的非线性强度是有必要的。

2. 巴克斯溪 (Bucks Creek) 坝 (美国, 1928)

巴克斯溪坝坝高 39m，是一座独特的坝，其钢筋混凝土面板是不分缝的，除发缝外一直未发现大的裂缝，并且不需要修理，漏水量很小。很遗憾的是，此工程的成功经验未得到重视与推广。

3. 盐泉 (Salt Springs) 坝 (美国, 1931)

盐泉坝坝高 100m，坝顶长 383m，上游坡 1:1.3，下游坡 1:1.4，于 1928 年开工，1931 年建成。其坝高记录保持 20 年之久，直到 1950 年葡萄牙 112m 高的帕拉德拉 (Paradela) 坝建成。盐泉坝为后来的许多高坝建立了先例，如帕拉德拉坝，美国 86m 高的惠尚 (Wishon) 坝、95m 高的考尔赖特 (Courtright) 坝等。其基本设计特点应用于全世界达 30 年之久，直到 1960 年。其内容包括：抛填堆石、干砌石垫层、面板的厚度及含钢率、面板接缝、截水槽等，其修改是很微小的。盐泉坝的经验提供的重要数据对于面板堆石坝及土心墙堆石坝都是有用的，如堆石体的位移、面板的运行状况、高抛填堆石体的沉降稳定、面板在水力梯度达 100 时的运行状况等。

盐泉坝的抛填堆石为花岗岩,由4个料场供应,其抗压强度为100~130MPa。单块重量最大25t,平均超过3t,通过侧卸(23m³)轨道车及尾卸(15m³)轨道车(由拖拉机牵引)分4层抛填:从上游坝趾层高80英尺(24.4m)、主填区高170英尺(51.8m)、次填区高75英尺(22.9m)、最后一层层高65英尺(19.8m),其中从右岸铲除顶部18英尺(5.5m)。堆石按进占法卸料,从坡顶沿天然安息角坡面滚下去。抛填石在其接缝处用低压水将细料冲去。面板垫层为4.6~7.62m厚的机砌石。

面板底部厚度0.9m,顶部厚0.3m,面板尺寸18m×18m。面板由可压缩缝隔开,缝宽2英寸(5.1cm),用沥青板充填,U形铜止水位于面板的中部。底部面板配两层钢筋网,1英寸(25.4mm)的钢筋,间距9英寸(23cm),坝顶处为单层钢筋网,间距13英寸(33cm)。

在水库蓄水前,距两岸3~10m范围内的面板就出现了裂缝,缝的间距约为15~60cm,宽度约为4mm。这些缝都进行了修凿及填膨胀性砂浆处理。河床部位8条垂直缝完全被闭拢,其中3条被压碎,这些缝都采用了3英寸(7.6cm)开度的开缝处理(填可压缩填料)。3800英尺(1158.2m)[正常蓄水位为3959.2英尺(1206.8m)]高程处水平缝在水位消落时多次损坏。

第一次蓄水为期2年,1933年蓄满,此时面板最大挠度发生在坝高0.4H处,为1.32m,是当时坝顶沉降量的2.7倍(坝顶沉降量为0.49m)。1933~1958年,在3740英尺(1140.0m)高程处挠度增加0.46m,坝顶沉降量增加0.61m。从1972年开始每隔5年测量一次沉降,1972年后沉降微弱。盐泉坝由于采用厚层抛填,其沉降量是比较小的(抛填式堆石坝抛填高度越大,密实度越高)。

量水堰测得的初期漏水量为0.85m³/s,并要求进行修理。

设计要求舍弃风化的软弱岩石,开挖料采用15cm的铁轨条筛筛除细料,并采用2~4倍体积水进行冲洗以使岩块得到良好接触。初期由于水泵容量不足,加水量仅达到堆石体积的1/4,等到完成1/2填筑量后,才添置较多水泵,但仍无水枪可以将成堆的细料冲走。认为底部由于用水量不足,因此沉降量相对较大。

面板沿垂直缝挤压损坏,在盐泉坝就发生了,不过发生在蓄水前。最近许多超高坝都在蓄水后产生,盐泉坝改造成可压缩性垂直缝的方法,被许多近期坝采用。

4. 哥格斯维尔(Cogswell)坝(美国,1934)

哥格斯维尔坝紧接盐泉坝施工,于1932年3月开工,1934年建成,坝高85m。抛填堆石为坚硬花岗岩。由于极度缺乏水源,初期没有加水。1933年底,当施工完成80%时,1933年12月31日~1934年1月1日发生了一场异常大雨,雨量达到382mm,产生了1.8m的顶部沉降,接着的徐变使沉降量达到4.1m。堆石体无仪器监测,其沉降量是由工程的收方高程测量得到的。在此次大雨后就有了足够的水源,使通过增加加水量减小建成后沉降量成为可能。这样保持大加水量达几个月,最后坝顶沉降量为5.3m。

5. 可郭提(Cogoti)坝(智利,1938)

可郭提坝坝高85m,是20世纪40~50年代智利修建的17座混凝土面板堆石坝中的一座。可郭提坝选择堆石坝坝型是为了抗震的需要。此外,该坝采用安山角砾岩抛填,上游坡采用1:1.4,其下游坡采用1:1.5,此坡度是抗震所需的。该坝筑坝材料采用砾石垫层料是有所进步的。1943年4月4日发生了强烈地震,坝体下沉了0.42m,但面板未