文章编号:1672-3031(2018)05-0457-09

混凝土面板堆石坝面板接缝止水技术的发展与展望

徐 耀,郝巨涛
(中国水利水电科学研究院 北京中水科海利工程技术有限公司,北京 100038)

摘要: 面板接缝止水是混凝土面板堆石坝发展进程中涉及的关键问题之一,对于混凝土面板堆石坝的安全至关重要。本文分析评述了国内外混凝土面板堆石坝面板接缝止水技术的发展,特别是近年来开发的表层止水机械一体化施工技术和涂覆型柔性盖板止水技术,可以有效解决传统止水技术存在的缺陷问题,显著提高了止水体系的安全性与可靠性。本文认为面板挤压破坏是高混凝土面板坝面板接缝止水必需应对的新问题,除采用软接缝措施减小面板压应变外,在潜在的挤压破坏区域设置加强防护涂层也是一种有效的办法,但根本措施还应从加强堆石体的变形协调以及坝体与面板之间变形同步协调控制、增强面板抗挤压破坏能力等方面着手。

关键词: 混凝土面板堆石坝;面板接缝止水;GB塑性填料;涂覆型柔性盖板止水
中图分类号: TV641.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.015

1 研究背景

1988年6月在美国旧金山召开的国际大坝委员会第16届大会总报告指出,沥青混凝土面板堆石坝、混凝土面板堆石坝或沥青混凝土心墙堆石坝是未来特高坝的适宜坝型[1]。但是,混凝土面板堆石坝筑坝技术向高坝的发展并不顺利,面板接缝止水是其发展进程中涉及的关键问题之一。

青海沟后混凝土面板砂砾石坝最大坝高71 m,正常蓄水位3278.00 m,1993年8月27日库水位3277.35 m时大坝溃决。水利部专题研究表明,坝体沉陷大,防浪墙底板与面板顶部的接缝止水破坏,使库水从坝体上部灌入,并从上部逸出,冲刷坝坡,致使大坝溃决[2]。湖南株树桥混凝土面板坝最大坝高78 m,1990年11月下闸蓄水,1992—1999年历经7年坝体漏水量由30 L/s增加至2500 L/s以上,面板塌陷断裂,缝中部橡胶止水带及缝底部铜止水发生撕裂、拉断,嵌缝材料失效,2000年水库放空大修。分析表明,株树桥面板垫层级配不良,过渡层不能起到反滤作用,基础防渗帷幕的截渗效果欠佳,使垫层承担了较大的作用水头而产生了渗透变形,加之坝体周边缝止水破坏,面板脱空范围过大,使面板破裂、折断,故导致大坝发生严重渗漏[3]。图1给出的是基于国内外已建67座面板坝渗漏监测数据建立的面板综合渗透系数的累积概率曲线[4]。图1中标出了株树桥面板坝初始及后期渗漏量对应面板综合渗透系数的位置,初始渗漏量30 L/s,面板综合渗透系数为2.93×10^{-6}cm/s,处于可接受区;后期渗漏量2500 L/s,面板综合渗透系数为2.44×10^{-4}cm/s,在所有67座面板坝中处于最大位置,止水失效与坝体渗透侵蚀互动明显。

上述面板坝工程实例表明,面板坝面板接缝止水失效导致的渗漏将侵蚀堆石坝体,对于沟后面板砂砾石坝可导致溃坝;对于坝体级配不良、反滤不好的株树桥面板堆石坝,随着时间推移,渗漏引发的渗透破坏可导致大坝发生严重渗漏和面板塌陷破坏,威胁大坝安全。由此可见,面板接缝止水对于面板堆石坝的安全至关重要。

收稿日期:2017-11-24
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404805);中国水科院科研专项(SM0145B632017;SM0145B952017)
作者简介:徐耀(1982-),男,江苏盐城人,博士,教授级高级工程师,主要从事混凝土面板坝、大坝安全评估与风险管理等研究。E-mail:xuyao@iwhr.com

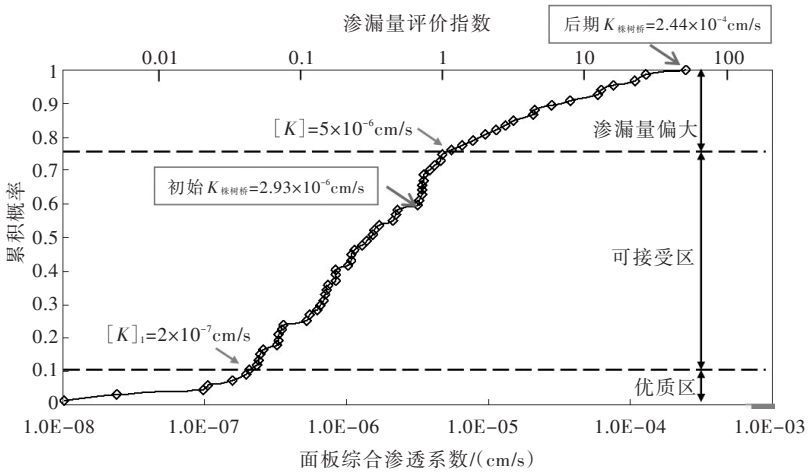


图1　面板综合渗透系数的累积概率曲线

2　200 m级高混凝土面板坝的接缝止水技术

混凝土结构接缝的止水效果取决于止水体对于作用水头和实际接缝位移的适应能力。早期混凝土面板坝的接缝止水技术是在混凝土坝接缝止水技术基础上发展起来的，而接缝止水问题之所以在混凝土面板坝中突出，是因为混凝土面板坝的面板接缝位移通常较大。澳大利亚110 m高的塞沙那(Cethana)面板坝和122 m高的利斯(Reece)面板坝都采用了常规的两道止水，包括中部止水带和底部铜或不锈钢止水，取得了较好的止水效果[5-6]。塞沙那面板坝周边缝最大位移为21.5 mm/12 mm/7.5 mm(沉陷/张开/剪切)，利斯面板坝周边缝最大位移为70 mm/9.8 mm(深陷/张开)[7]，说明如果设计、施工得当，采用常规的两道止水可以满足100 m级高面板坝的防渗安全要求。

哥伦比亚的安奇卡亚(Anchicaya)面板坝1974年建成，坝高140 m，周边缝止水仅采用了一道中部橡胶止水带，由于坝体局部变形较大，周边缝局部张开位移125 mm，沉降位移106 mm，剪切位移15 mm，导致出现1800 L/s的渗漏量，随后水库放空大修[8]。在此之后，面板坝倾向于采用多道止水。1976年开工修建的哥伦比亚的格里拉斯(Golillas)面板坝和巴西的阿里亚(Foz do Areia)面板坝均采用了三道止水。160 m高的阿里亚面板坝1980年建成蓄水，取得了较好的止水效果。125 m高的格里拉斯面板坝1978年建成，周边缝设置了三道止水，包括底部铜止水、中部PVC止水带、顶部用PVC薄膜覆盖的IGAS玛蹄脂塑性填料。该坝1982年蓄水后渗漏量达1080 L/s，其周边缝最大张开100 mm、沉陷56 mm。检查发现，PVC止水带沿中心管被剪破，且其周围混凝土振捣不密实；IGAS玛蹄脂并不总是流入接缝，且随着时间和低温失去了塑性[9]。

试验也证实了IGAS玛蹄脂并不能像预期的那样流动止水[10]，由于玛蹄脂较硬，在水压力下将出现孔洞或开裂，当水从其中流过时，没有任何自愈的趋势，玛蹄脂既不能堵漏，也不能防渗。上述试验结果对认识塑性填料的流动止水能力十分重要，为我国随后的GB塑性填料开发提供了有意义的借鉴。

面板坝工程修复实践表明，无黏性填料具有较好的自愈能力。例如，1967年美国新国库(New Exchequer)面板坝在水下抛填了近14 000 m³的含有斑脱土的砂砾土，使坝体渗漏由11 000 L/s降至280 L/s。1984年尼日利亚希罗罗(Shiroro)面板坝在水中抛填粉细砂，坝体渗漏量由1800 L/s降至100 L/s。据此，Pinto等[10]提出了无黏性填料止水概念，指出小量的粉细砂(渗透系数10^{-4}～10^{-3}cm/s)足以淤填张开的接缝，并控制渗漏量，其效果取决于缝下过渡区料在高渗透压力下的反滤能力。这种采用无黏性填料(粉煤灰或粉细砂)替代IGAS塑性填料的接缝止水方案在墨西哥的阿瓜密尔巴(Aguamilpa)面板坝和我国的天生桥一级面板坝中得到应用。高185.5 m的阿瓜密尔巴坝1993年建成，周边缝最大位移为18 mm/25 mm/5.5 mm(沉陷/张开/剪切)，初期渗漏量260 L/s，后期稳定在170 L/s。高178 m的天

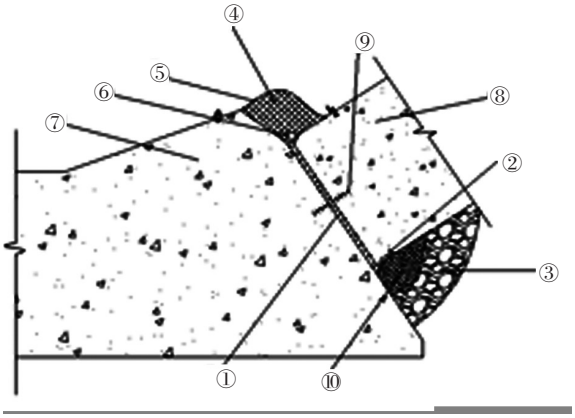
生桥一级面板坝1999年建成，周边缝最大位移为28 mm/21 mm/21 mm(沉陷/张开/剪切)，初期渗漏量150 L/s，后期稳定在70 L/s[7]。

以上工程实践表明，对于100～200 m高的混凝土面板坝接缝止水，成功和失败经验都有，工程界尚未完全掌握控制接缝止水效果的技术关键，对修建更高面板坝的接缝止水问题充满疑虑，对传统的止水带、铜止水没有充足信心。此外，IGAS玛蹄脂也被证明不具备在水压力下流入并淤堵接缝的能力，此外，无黏性填料止水的渗漏量也相对偏大，能否适应更高面板坝的运行尚属未知。

“九五”期间，围绕最大坝高233 m的水布垭面板堆石坝，开展了系列面板接缝止水研究，开发了可以满足水布垭面板坝应用要求的新型止水结构和GB塑性填料，建立了传统止水带和铜止水的量化设计方法，相关技术进展阐述如下。

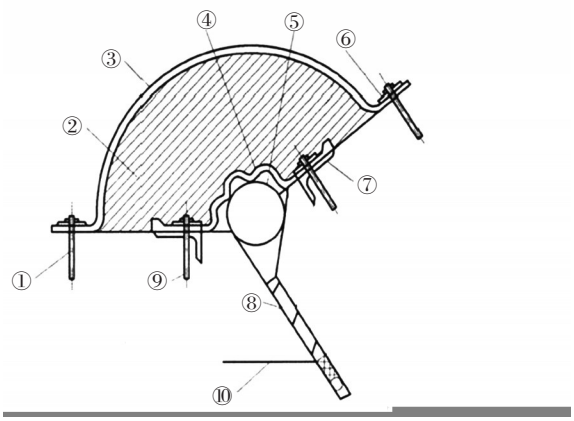
2.1　接缝止水结构　1980年建成的阿里亚面板坝的面板周边缝采用了表层IGAS玛蹄脂、中部PVC止水带、底部铜止水三道止水，见图2[10]。设置玛蹄脂止水是当下部两道止水在较大接缝位移下破损时，可以自愈接缝；接缝中采用不同材质和几何尺寸的PVC止水带和铜止水，是为了当其中一道止水破损时，尽可能减小破损的孔洞大小；沥青砂浆垫是作为底部铜止水的支撑，并防止玛蹄脂从接缝中流失；玛蹄脂下的氯丁橡胶管是当接缝张开时减小接缝的张开缝隙。另外，阿里亚坝水头超过112 m的周边缝表面又做了填土铺盖，以便在这些水深较大、接缝位移较大的部位增设一道止水屏障[10]。对于阿里亚坝的上述止水结构，Pinto等[10]进行了模型试验，发现PVC止水带在接缝张开25 mm时会破坏漏水；当裂缝漏水时，IGAS玛蹄脂也起不到自愈作用。

“九五”期间，在国内外前述工作基础上，对阿里亚坝的止水结构及其设计理念进行修改完善，提出了图3所示的新型止水结构[11]，其主要特点为：(1)每一道止水，包括塑性填料、止水带和铜止水，都能独立发挥止水作用，即在设计要求的水压力和接缝位移作用下不漏水；(2)鉴于工程施工中接缝中部止水带周围的混凝土不易做到密实，难以确保满足止水带的抗绕渗要求，且缝腔狭小，难以进行止水带的体型尺寸优化，新型止水结构中将中部止水带提至表层，并将其改为适应较大接缝位移的波形设计，在止水带下设置支撑橡胶棒或PVC棒，以确保止水带在设计要求的水压力和接缝位移作用下能够保持在表层，不被水压力挤入接缝而破裂；(3)塑性填料表面的防护盖板应具有较好的防老化性能，以对塑性填料提供持久防护，为此采用抗老化性能好的三元乙丙橡胶板作为塑性填料的防护盖板。



①垫缝木板；②铜止水；③特殊级配小区；④IGAS玛蹄脂；⑤PVC盖片；⑥氯丁橡胶管；⑦趾板；⑧面板；⑨PVC止水带；⑩沥青砂浆垫

图2　阿里亚面板坝周边缝止水结构



①膨胀螺栓；②GB塑性填料；③三元乙丙橡胶盖板；④波纹橡胶止水带；⑤橡胶棒；⑥扁钢；⑦角钢；⑧沥青木板；⑨固定螺栓；⑩铜止水片

图3　水布垭面板坝周边缝止水结构

2.2　塑性填料　如前所述，由于IGAS玛蹄脂在水压力下出现孔洞或开裂漏水，且当水从孔洞或裂口流过时，玛蹄脂没有任何自愈能力，阿里亚坝的塑性填料表层止水就不能发挥预期的止水作用。理

想的塑性填料应能够在压力水作用下，流入并淤满张开的接缝空腔，在流动过程中或者不被压力水击穿，或者一旦被压力水击穿则具备对击穿孔洞或裂缝的自愈能力，即所谓流动止水能力，且不能从接缝底部流失。为实现图3所示的止水结构，首先须开发出满足要求的塑性填料。为此，结合水布垭面板坝止水技术要求，开发了GB塑性填料，其流动止水性能用大模型试验论证。

在该模型试验中，GB塑性填料在没有表面盖板保护时，可以在压力水作用下流入并淤满宽5 cm、深110 cm的接缝，在流动过程中没有被水击穿，且在2.6 MPa水压力作用下，连续稳压24 h以上不漏水[12]。为了检验GB塑性填料是否会在缝底流失，在模拟实际的砂砾石料上铺设了5 cm厚的GB塑性填料，结果在2.8 MPa水压力下没有发现GB塑性填料被挤压进入砂砾石料。基于这些试验结果，GB塑性填料在水布垭面板坝以及马来西亚的巴贡等其他高面板坝中得到了成功的应用。为了在工程中便于开展质量检测，提出了流动止水长度及其试验方法，试验发现GB塑性填料的平均流动止水长度为150 mm，据此相应技术标准提出塑性填料的流动止水长度应不小于130 mm[13]。

2.3　铜止水和止水带　在面板坝接缝止水中，铜止水作为一道基本止水使用，铜止水的止水能力取决于其材质和形状尺寸。由于以往缺乏尺寸设计方法，铜止水尺寸均采用类比或经验的方法确定，不确定性很大，导致其常常不能发挥应有的止水作用。经过多年研究和实践，建立了一套确定铜止水尺寸的方法。由于铜止水对接缝剪切位移最为敏感，该方法首先根据设计的接缝剪切位移以及已有的铜止水几何大变形有限元结构分析成果，初选铜止水尺寸，然后对初选的铜止水按照设计要求的三向接缝位移进行模型试验检验[11,14]。

在图3的止水结构中，由于止水带被置于表层采用螺栓固定，且其底部设置了支撑橡胶棒(或PVC棒)，因此可以不考虑止水带被水压力压入接缝导致其破坏的问题，其设计也可大大简化。通常考虑波形止水带的波型及尺寸可以完全吸收三向接缝位移，不会导致止水带出现由接缝位移产生的应力即可。实践表明，按照这一方法设计的止水带，施工质量易于保证，止水作用可靠。

通过水布垭面板坝以及洪家渡、三板溪、紫坪铺和吉林台一级等多座高面板坝的工程实践，上述止水技术逐渐完善，取得了良好的工程效果(见表1)[7]。表1中，水布垭面板坝面板后期沿垂直缝发生了局部挤压破坏，渗漏量略有上升；三板溪面板坝面板沿一、二期施工缝发生了挤压破坏，可能对止水效果有影响；吉林台一级面板坝的渗漏量未扣除两岸绕渗部分，略微偏大。紫坪铺面板坝2008年汶川大地震之前的最大渗漏量51.2 L/s，相应库水位874 m；地震发生时库水位830 m，渗漏量10.4 L/s；震后在库水位830 m下，渗漏量增为19.1 L/s，周边缝最大位移为28.9 mm/27.3 mm/34.4 mm(沉陷/张开/剪切)，接近30 mm的设计沉陷和张开位移值，超过了30 mm的设计剪切位移值。紫坪铺的止水是成功的，并经受住了汶川特大地震的考验，表明接缝止水具有一定的超载能力。

表1　200m级面板坝周边缝止水及运行情况

坝名	坝高/m	坝顶长/m	顶止水	中止水	底止水	沉陷/mm	张开/mm	剪切/mm	渗漏量/(L/s)	完建年份
水布垭	233.0	675	GB填料	铜片	铜片	45.3	13.0	43.7	40	2006
巴贡	203.5	740	GB填料	无	铜片				170	2008
三板溪	185.5	424	GB填料	无	铜片	35.3	8.6	14.4	303	2006
洪家渡	179.5	427.8	GB填料	无	铜片	26.6	13.9	34.8	20~59	2004
吉林台一级	157.0	445	GB填料	无	铜片	35.1	11.9	3.5	200	2006
紫坪铺	156.0	635	GB填料	无	铜片	10.8 28.9*	15.2 27.3*	27.4 34.4*	51.2	2005

注：*为紫坪铺汶川地震后的数据。

3　近十年接缝止水技术的新进展

结合茨哈峡等300 m级特高面板坝建设，我国开展了相应的止水系统适应性研究。经试验论证，采用鼻高150 mm、鼻宽30 mm的铜止水可以承受80 mm的剪切位移作用不破坏，其最大平均剪切应

力为31.4 MPa，低于水布垭面板坝铜止水(鼻高105 mm、鼻宽30 mm)在50 mm的剪切位移作用下的39 MPa。GB塑性填料可以在接缝张开100 mm时流入并淤填深1.2 m的接缝，承受3.5 MPa水压力不漏水[15]。该结果可以满足300 m级特高面板坝研究中提出的接缝止水技术要求，即三向最大位移为80 ~ 100 mm/80 ~ 100 mm/60 ~ 80 mm(沉陷/张开/剪切)以及350 m的最大水头作用。

面板接缝止水技术的工艺性很强，前述各道止水因其各自特点，施工中确保质量的难易程度不尽相同。实践表明，各道止水中，波形止水带的安装质量较容易保证，塑性填料嵌填、表层盖板安装、铜止水安装及保护比较复杂，施工质量难以保证。针对止水技术的工艺敏感问题，“九五”期间就曾对铜止水的焊接和施工保护等进行过研究，并提出了应对方法。因此，需要在“九五”成果基础上对传统的施工工艺进行改进与完善，克服传统施工工艺的缺点，保障止水作用的有效发挥。自我国水布垭、马来西亚巴贡等200 m级高面板坝成功应用前述止水材料和技术以后，围绕上述问题，在止水工艺与技术方面取得了如下新进展。

3.1　表层止水机械一体化施工技术　表层塑性填料止水是面板坝自身发展中建立的一道特有止水，目前已成为面板坝面板接缝的一道基本止水。由于国内外对塑性填料止水发生渗漏后的自愈性尚缺乏充足论证，目前均要求其在水压力下能够流入接缝且不被水压力击穿，即具备满足工程要求的流动止水性能。因此，工程施工中一旦由于塑性填料填筑不密实形成先天漏水通道，而塑性填料又不具备对渗漏的自愈性，则塑性填料将丧失其止水作用。因此，确保塑性填料的嵌填密实十分重要。

此前国内外塑性填料均采用人工嵌填。由于塑性填料产品多为断面矩形的板或柱，且填料本身黏软并具有一定弹塑性，所以在大坝坡面上将其人工密实地嵌填入接缝V形槽有很大难度，当外界温度偏低导致填料硬度增大时，这一问题尤为突出。工程中常见有嵌填不密实的现象，通常密实度只能达到60 % ~ 80 %，相应内部孔洞缺陷明显(见图4)。填料嵌填不密实不仅导致数量不足，因内部存在空洞，将导致填料向接缝内挤压流动时不稳定，易发生流动中断甚至被水压力击穿。

2002年起，国内开始研发GB塑性填料专用挤出机，采用螺旋挤出成形，填料从满足设计断面要求的模口挤出，外形美观，内部密实，且通过螺旋挤压加热后，填料既黏又软，可以更好与混凝土面和表层盖板粘接(见图5)。相比于人工嵌填，挤出机嵌填不仅可连续一次成形挤出填料，而且可同步安装盖板，施工效率超过人工两倍以上。在施工温度方面，由于经挤出后的填料温度升高，更易于确保密实度和与混凝土面的粘接效果，一般0 ℃以上即可进行挤出施工[16]。结合工程实践，经过不断改进和完善，目前已形成一套成熟的接缝表层止水一体化施工技术[17]，有效保证了表层止水的施工质量和施工进度，大幅提高了面板接缝止水的安全性与可靠性。该技术已成功应用于温泉(坝高102 m)、肯斯瓦特(坝高129.4 m)、潘口(坝高114 m)、黔中(坝高162.7 m)和梨园(坝高155 m)等多座高面板坝工程，取得了良好的效果。



图4　人工嵌填的塑性填料



图5　机械挤出成形的塑性填料

3.2　涂覆型柔性盖板止水技术　表层橡胶防护盖板除可以给其下的塑性填料提供防老化屏障外(为此常选用抗老化较好的三元乙丙橡胶板)，还可以提高塑性填料的流动止水性能，其自身也可构成一道止水。试验表明，表面防护盖板可以将GB塑性填料的流动止水长度由175 mm提高到296 mm，增加了近70 %[7]。但是，所有这些效用都是以盖板与塑性填料、盖板与混凝土面之间的密封为前提的，

而盖板铺设施工工艺要求高，要做到完全密封困难很大。目前盖板均采用螺栓和扁钢压片固定在混凝土面上。由于混凝土面难以做到平整，螺栓之间的橡胶板与混凝土之间常有缝隙；在冰冻地区，螺栓还存在冰拔破坏或冰冻胀挤压松动的现象。此外，盖板之间的施工搭接、垂直缝与周边缝之间的T型连接，也难以做到完全密封。

针对橡胶盖板的这些缺陷，2010年起，我国开始研究采用SK单组分聚脲涂层代替橡胶盖板的新型柔性盖板止水技术[18]。与传统橡胶盖板的螺栓固定、现场拼接安装不同，涂覆型柔性盖板止水是将SK单组分聚脲刮涂在塑性填料和混凝土面上，固化后形成全封闭的柔性防渗涂层，与混凝土面粘接成一体，是一种能对面板接缝实行有效全封闭的柔性表层止水结构(见图6)。该新型止水克服了传统锚固型橡胶盖板存在的缺陷，既作为塑性填料的保护层，又是一道独立的止水层，显著提高了面板接缝止水的安全性与可靠性。经蒲石河抽蓄电站上库面板坝的应用检验，采用SK单组分聚脲涂刮成形的柔性盖板无老化及边缘脱开现象，且可有效防止冰冻破坏。高155 m的梨园面板坝是世界上首次大面积使用涂覆型柔性盖板止水的高面板坝(见图7)，2014年12月下闸蓄水，目前最大渗漏量仅20 L/s，防渗效果良好，大坝工作性状正常，成为国际同类工程新范例。

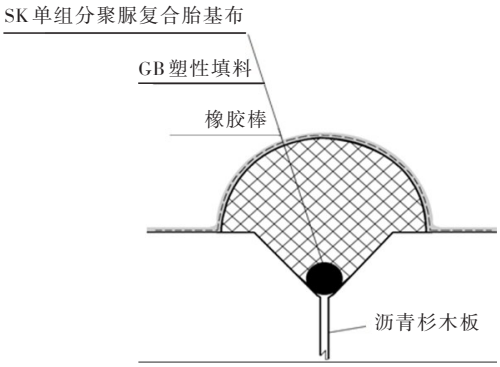


图6　涂覆型柔性盖板止水结构



图7　梨园大坝涂覆型柔性盖板止水结构

面板接缝止水工艺与技术对于确保接缝的止水效果至关重要。表层止水机械一体化施工技术替代传统的人工嵌填方法，不仅使填料自身断面规则、嵌填密实，而且确保填料与混凝土面及表层盖板粘接良好，显著提高了表层止水的安全性与可靠性。涂覆型柔性盖板止水技术采用现场涂刷成型盖板，克服了传统锚固型盖板止水的常见缺陷与不足，确保了SK单组分聚脲涂层与塑性填料以及混凝土面之间的有效全封闭，既可进一步提高塑性填料的流动止水效果，且柔性盖板自身也可成为一道可靠的止水。

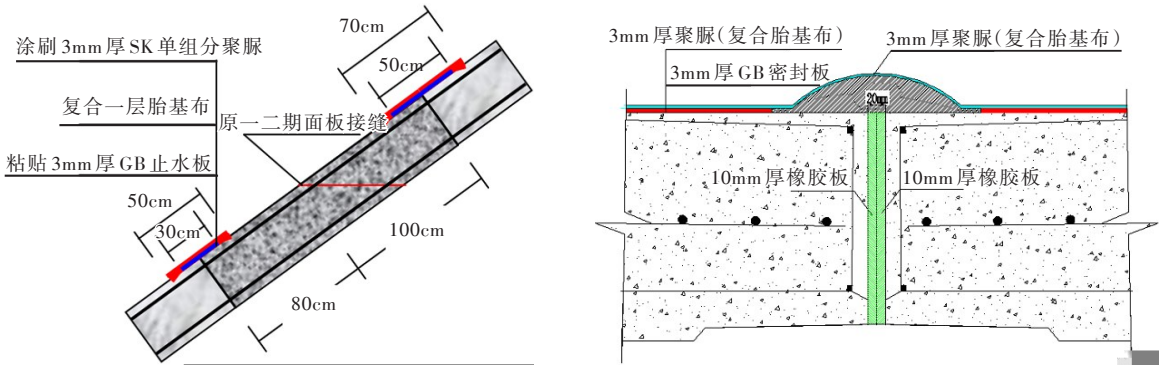
4　接缝止水新问题

2000年以后，一些200 m级高面板坝相继出现面板挤压破坏，包括我国的天生桥一级(坝高178 m)和水布垭(坝高233 m)[19]、巴西的Barra Grande(坝高185 m)和Campos Novos(坝高202 m)[20]等工程。高150 m以下的面板坝也出现了挤压破坏，如莱索托的Mohale(坝高145 m)以及我国的布西(坝高135.8 m)等工程[21]。这些面板坝面板挤压破坏部位不尽相同，最多的是位于面板垂直压性缝，也有水平施工缝，Campos Novos坝还在受压区面板非接缝部位发生了水平向、斜向挤压破坏。面板挤压破坏不仅直接破坏面板的整体性，而且可能造成表层接缝止水失效，导致渗漏量增大，是面板坝发展到200～300 m级高度带来的新问题。自此，接缝止水除了承受传统的水压力和接缝三向位移作用外，还需应对止水所依附的混凝土面板破坏带来的新问题。

为应对面板挤压破坏，除尽可能减小坝体沉陷、确定合理的坝体预沉降期、面板配筋中设置抗挤压箍筋等措施以外，在接缝止水方面目前主要是将压性缝设置成软接缝。天生桥一级面板坝在面板挤压破坏修补时，在接缝中设置20 mm厚的橡胶板；冰岛Karahnjukar面板坝将中央部位的10条

面板增厚 10 cm，并在接缝中设置 15 mm 厚的沥青纤维板；马来西亚 Bakun 面板坝设置 6 条软接缝，缝中设置 50 mm 厚的软木板；巴西 Campos Novos 面板坝在面板修补时将中央部位的 16 号 ~ 20 号面板的 4 条压性缝改造成软接缝，施工时沿压性缝切开 5cm 宽的接缝间隙，缝内用玛蹄脂回填，并衬有 12 mm 厚的软木板。

面板接缝部位发生挤压破坏时，很可能造成表层止水发生破坏并导致接缝漏水。为此，可以在潜在的面板挤压破坏区域设置防护涂层，当挤压破坏程度有限时，防护涂层可以保护挤压破坏区域的面板不渗漏。布西面板坝在进行面板挤压破坏修复时，就在水平施工缝新老混凝土交界区和垂直缝部位设置了面板防护涂层[22]。布西面板坝的水平施工缝防护涂层结构包括在混凝土面粘贴厚 3 mm、宽 30 ~ 50 cm 的 GB 止水板，在 GB 止水板上涂刷 3 mm 厚的 SK 单组分聚脲，涂覆范围超出 GB 止水板以外 10 cm；垂直缝部位防护涂层结构包括在接缝两侧各 200 cm 范围内铺设 3 mm 厚的 GB 止水板，在 GB 止水板和接缝止水盖板表面涂刷 3 mm 厚的 SK 单组分聚脲，涂覆范围超出 GB 止水板以外 20 cm（见图 8）。上述方案借鉴了小湾拱坝底部坝面的防护涂层结构，其中的 GB 止水板可以减缓混凝土面破坏对聚脲涂层的破坏作用。模型试验结果表明，小湾的防护涂层结构可以承受 300 m 水头和 8 mm 的裂缝张开不漏水[23]。当然，这种防护涂层结构本身只是一种被动防御措施，根本方法还是避免出现面板挤压破坏。应对面板挤压破坏的根本措施，还应加强堆石体的变形总量控制和变形协调控制，将面板和坝体作为一个整体进行分析，在设计上避免出现挤压破坏。另外，采取增厚面板、布设抗挤压箍筋等措施提高面板抗挤压破坏能力也很重要。



（a）水平施工缝部位　　（b）垂直缝部位

图 8　布西面板坝挤压破坏部位修复断面

5　结论与展望

面板接缝止水对于混凝土面板堆石坝的安全至关重要，本文分析评述了国内外混凝土面板堆石坝接缝止水技术的发展。主要结论如下：（1）采用常规的两道止水，包括中部止水带和底部铜或不锈钢止水，可以满足 100 m 级高面板坝的防渗安全要求。（2）针对 200 m 级高面板坝的建设需求，我国“九五”期间开发的新型止水结构，包括采用盖板防护的塑性填料、表层止水带、底部铜止水，取得了较好的工程效果，并为面板坝的进一步发展提供了技术支撑，经论证可以满足 300 m 级高面板坝的安全需要。（3）近十年来开发的塑性填料挤出机嵌填施工技术和涂覆型柔性盖板止水技术，可以有效克服传统止水技术施工工艺存在的缺陷和不足，提高面板接缝止水的安全性与可靠性，已在梨园等多座高面板坝上得到成功应用。（4）面板挤压破坏是高面板坝接缝止水必需应对的新问题，除采用软接缝措施减小面板压应变外，在潜在的挤压破坏区域设置防护涂层也是一种有效的防御办法，但根本措施还应从加强堆石体的变形协调以及坝体与面板之间变形同步协调控制、增强面板抗挤压破坏能力等方面着手。

面板坝接缝止水的未来发展主要体现在 3 个方面：（1）在塑性填料挤出机嵌填施工技术和涂覆型

柔性盖板止水技术基础上，持续改进易造成止水缺陷的传统止水施工方法，提高接缝止水的安全可靠性。对于中低面板坝，应研究止水结构的简化方法。(2)对于已发生面板缺陷、接缝渗漏面板的水下部位，研究改进现有水下缺陷检测技术和水下修补加固技术。(3)对于未来的300 m级特高面板坝，如我国的大石峡、茨哈峡、古水和拉哇等，应研究应对面板挤压破坏的接缝止水技术。例如，继续研究在面板坝潜在挤压破坏部位采用涂覆型复合盖板防护技术等。针对面板压性缝，有看法认为挤压破坏主要源于止水设置减小了接缝面板厚度、引起了压应力集中[24]，对此可以研究探讨取消挤压区面板接缝底部铜止水、增强表层止水的应对方法。

参　考　文　献：

[1] KRAMER R T . General Report Q61[C]//Proceedings of the Sixteenth Congress on Large Dams . Vol.2, R3, Q61, San Francisco, USA, 1988 .

[2] 杨得勇 . 沟后水库溃坝机理现场复核试验研究[J] . 水力发电, 2003, 29(3): 53-57 .

[3] 盛金保, 谢晓华, 李雷 . 株树桥水库大坝严重渗漏原因分析[J] . 水利水运工程学报, 2003(4): 25-30 .

[4] 贾金生, 郝巨涛, 徐耀 . 混凝土面板坝渗漏值的工程类比与评价方法[J] . 水力发电, 2011, 37(10): 28-30 .

[5] FITZPATRICK M, COLE B, KINSTLER F, et al . Design of Concrete Face Rockfill Dams[C]//Proc. Sym . Concrete Face Rockfill Dams, ASCE . Detroit, 1985 .

[6] LI S Y, PATERSON S J, KINSTLER F L . A Concrete Faced Rockfill Dam Constructed on a Deeply Weathered Foundation[C]//Proceedings of the Seventeenth Congress on Large Dams . Vol.3, Q66, R85, Vienna, Austria, 1991 .

[7] 贾金生, 郦能惠, 徐泽平, 等 . 高混凝土面板坝安全关键技术研究[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2014 .

[8] AMAYA F, MARULANDA A . Colombian Experience in the Design and Construction of Concrete Face Rockfill Dams[C]//Proceedings of the ICOLD 20th Consress . Beijing, 2000 .

[9] AMAYA F, MARULANDA A . Golillas Dam-Design, Construction and Performance[C]//Proc . Sym . Concrete Face Rockfill Dams, ASCE . Detroit, 1985 .

[10] PINTO N L S, MORI R T . A New Concept of A Perimeteric Joint for Concrete Face Rockfill Dams[C]//Proceedings of the Sixteenth Congress on Large Dams . Vol.2, R3, Q61, San Francisco, USA, 1988 .

[11] HAO Jutao, LU Yihui, JIA Jinsheng, et al . Adaptability of slab joint waterstops to very high CFRDs [J] . Hydropower & Dams . 2010, 17(1): 78-83 .

[12] 中国水利水电科学研究院 . 清江水布垭混凝土面板堆石坝新型止水结构与新型止水材料研究[R] . 北京: 中国水利水电科学研究院, 1998 .

[13] 水工建筑物塑性嵌缝密封材料技术标准: DL/T 949-2005[S] . 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2005 .

[14] 水工建筑物止水带技术规范: DL/T 5215-2005[S] . 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2005 .

[15] 中国水利水电科学研究院 . 300 m级高面板堆石坝防渗和止水系统适应性研究专题研究成果报告[R] . 北京: 中国水利水电科学研究院, 2009 .

[16] HAO J T, LU Y H, ZHANG F C, et al . Eetruding Technology of Plastic Filler on Slab Joint of CFRD[C]//Second International Symposium on Rockfill Dams . Rio de Janeiro, Brazil, 2011 .

[17] 邓正刚, 郝巨涛, 王爱玲, 等 . 混凝土面板堆石坝面板表层止水施工技术及发展[J] . 水力发电, 2016, 42(12): 65-68 .

[18] SUN Z H, XU Y, XIONG H H . Development of a new flexible waterstop structure for CFRD joints[J] . Hydropower & Dams, 2016, 23(2): 90-93 .

[19] 秦道先 . 水布垭大坝面板运行期质量检查和缺陷处理[C]//水库大坝新技术推广研讨会论文集 . 广州, 2014 .

[20] 郝巨涛, 杜振坤 . 高混凝土面板堆石坝面板接缝挤压破坏预防措施研究[J] . 水力发电, 2008, 34(6): 41-44 .

[21] 熊海华，徐耀，贾金生，等．高混凝土面板堆石坝面板挤压破坏分析[J]．水力发电，2015，41(1)：27-30．
[22] 中国水利水电科学研究院．布西大坝安全评估及处理措施研究报告[R]．北京：中国水利水电科学研究院，2012．
[23] 孙志恒．300 m级拱坝喷涂聚脲防渗仿真模型试验及应用[J]．水利水电科技进展，2009(29)：49-53．
[24] 曹克明，徐建军，曹希章．混凝土面板堆石坝设计经验法[C]//中国混凝土面板堆石坝30年．北京：中国水利水电出版社，2016．

Development and prospect of slab joint waterstop technology of CFRDs

XU Yao, HAO Jutao
(*China Institute of Water Resources and Hydropower Resources, Beijing IWHR-KHL Co., Ltd, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The slab joint waterstop is one of the key issues during the development of CFRDs, which is very important to the safety of CFRDs. In this paper, technical development of slab joint waterstop of CFRDs in the world has been reviewed and analysed, especially the integrated mechanical construction technology and the brush-coated flexible waterstop technology that have been developed in recent years. These two new technologies can effectively overcome the defects of the conventional waterstop and improve the safety and reliability of the whole waterstop system. It is pointed out that, the compressive spalling of concrete face is the new problem associated with slab joint waterstop of high CFRDs. In addition to the measures of soft vertical joint to reduce the compressive strain in the face, the protection coating over the potential compressive spalling area is also an effective method, but the essential measures still lies in the two aspects of controlling deformation compatibility of rockfill itself and also together with concrete face as well as improving concrete face resistance to the compressive spalling.
Keywords: CFRDs; slab joint waterstop; GB plastic filler; brush-coated flexible waterstop

(责任编辑：王冰伟)

(上接第456页)

Research progress of flood and drought disaster monitoring technology and application based on remote sensing

YANG Kun[1, 2, 3], HUANG Shifeng[1, 2, 3], XIN Jingfeng[1, 2, 3], MA Jianwei[1, 2, 3]
(1.*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *Remote Sensing Technology Application Center of the Ministry of Water Resources, Beijing* 100038, *China*
3. *Research Center of Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Flood and drought disaster monitoring is one of the earliest applications of remote sensing in water resources field. Since the 1980s, Remote Sensing Technology Application Center of the Ministry of Water Resources has begun to carry out remote sensing experiment of flood control, and researched on drought monitoring by remote sensing in the 1990s. After nearly 40 years of unremitting exploration, some problems have gradually been solved such as software, data, model and method. Subsequently application system has been established for flood and drought disaster monitoring by remote sensing, and remote sensing monitoring system has been preliminarily put into operation in flood and drought disaster. This paper reviews the technical research of flood and drought disaster monitoring in the Remote Sensing Technology Application Center, and prospects the comprehensive operation of flood and drought disaster monitoring by remote sensing.
Keywords: flood and drought disaster; remote sensing monitoring; research progress

(责任编辑：韩　昆)