

DOI: 10.11779/CJGE202206019

# 高面板坝全寿命周期变形控制方法及应用

湛正刚, 张合作\*, 程瑞林, 邱焕峰

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 高面板坝的变形对面板的安全运行有着特别重要的影响, 国内外已建的高面板坝工程中, 因坝体变形大导致防渗面板挤压破损, 坝体渗漏量大的实例较多, 不得不降低水库水位进行修复处理, 造成较大的经济损失乃至给大坝的长期运行留下安全隐患。通过发生挤压破损的实例分析, 发现变形控制缺乏系统性是发生面板挤压破损的主要因素, 为预防面板破损, 系统提出了“控制坝体总变形, 转化有害变形, 适应纵向变形”的坝体变形控制方法, 并在使用软硬岩混合料筑坝的董箐面板堆石坝中得到的应用, 取得了良好效果, 该工程运行至今达十余年, 未见面板有挤压破损迹象, 该方法对建设 200 m 以上乃至 300 m 级超高面板坝具有重要借鉴意义。

**关键词:** 高面板堆石坝; 坝体变形; 变形控制; 纵向变形; 面板破损; 董箐面板堆石坝

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)06-1141-07

**作者简介:** 湛正刚(1968—), 男, 正高级工程师, 国家一级注册结构工程师, 主要从事水利水电工程设计、研究和管理。E-mail: zhanzg\_gyy@powerchina.cn。

## Application of methods for life-cycle deformation control of high concrete-faced rockfill dams

ZHAN Zheng-gang, ZHANG He-zuo, CHENG Rui-lin, QIU Huan-feng

(PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The deformation of high concrete-faced rockfill dam (CFRD) has a particularly important influence on the safe operation of impermeable face. To deal with the crushing damage of the impermeable face and the large leakage of dam body, which occur in many constructed high CFRDs at home and abroad, the reservoirs have to lower the water level for maintenance, which has resulted in large economic losses and even safety hazards for long-term dam operation. Through analyzing the example of a high CFRD with crushing damage, it is found that the lack of systematic deformation control is the main factor for the crushing damage of the face. To prevent the damage of the impermeable face, a systematic method is proposed: "controlling the total deformation of the dam body, transforming harmful deformation, and adapting to vertical deformation". The method has achieved good results in Dongqing CFRD project, which uses mixed hard and soft rocks as dam materials. The project has been operating for more than ten years, and no signs of crushing damage have been detected in the impermeable face. The proposed method provides important reference experience for the design and construction of CFRDs of more than 200 m or even 300 m in height.

**Key words:** high concrete-faced rockfill dam; dam deformation; deformation control; vertical deformation; face damage; Dongqing concrete-faced rockfill dam

## 0 引言

20 世纪 70 年代国际上开始修建 150 m 级高面板坝, 至 20 世纪 90 年代下半叶, 该坝型高度开始突破 200 m, 进入 21 世纪以来, 国际上相继开工建设了一批 200 m 级的高面板坝, 在中国, 这一时期修建的面板坝在保证坝坡稳定、坝料渗透稳定的同时, 更加注重坝体变形控制, 并通过研究和工程实践取得了丰富的成果<sup>[1-2]</sup>。截止 2017 年底, 中国已建面板坝约 450 座, 中国面板坝建设技术处于世界领先水平<sup>[3]</sup>。

在面板坝发展的过程, 部分高坝发生了变形控制不当造成的坝体变形过大导致的坝体渗漏量增加, 如墨西哥的阿瓜密尔帕 (Aguamilpa)、巴西辛戈 (Xingo)、巴西坎波斯诺沃斯 (Campos Novos) 和中国的天生桥一级等高面板坝, 这些问题引起了国际坝

**基金项目:** 国家科技支撑计划 (2013BAB06B02); 贵州省高层次创新型人才项目 (黔科合平台人才[2018]5630)

**收稿日期:** 2021-06-10

\*通信作者 (E-mail: zhanghz\_gyy@powerchina.cn)

工专家的普遍重视,专家们对上述面板坝的运行资料分析后,认为以上高面板坝主要是因为坝体孔隙率偏大,上、下游堆石模量差别大,使得坝体不均匀变形大,以致施工期产生上游垫层坡面开裂;面板混凝土浇筑没有避开堆石变形的高峰期,坝体后期变形大,使得位于上游坡面的面板脱空、出现结构性裂缝和挤压破坏。在这些分析和研究的基础上,美国库克和巴西平托先生提出了加宽主堆石区以控制上下游堆石变形差<sup>[4]</sup>,中国的坝工专家提出了通过设置堆石预沉降、选用激振力较大的碾压设备、分期蓄水等方式以控制面板弯曲裂缝问题<sup>[5]</sup>,上述有关面板坝的设计、建设和运行经验,为21世纪后建设的面板堆石坝提供了有益的借鉴。此后修建的洪家渡坝(坝高179.5 m, 2005年建成)、三板溪坝(坝高186 m, 2006年建成)、水布垭坝(坝高233 m, 2007年建成)、董箐坝(坝高150 m, 2009年建成)、猴子岩坝(坝高223.5 m, 2017年建成)、江坪河坝(坝高219 m, 2019年建成)的沉降变形均较小,面板裂缝也减少,其主要经验包括控制上下游堆石模量差、扩大主堆石区范围、控制堆石上下游填筑差、设置堆石预沉降时间并控制预沉降速率、选用大功率碾压设备等措施<sup>[6-10]</sup>。但运行中仍有部分高坝出现了面板破损问题,如天生桥一级坝<sup>[11]</sup>、水布垭坝<sup>[12]</sup>、三板溪坝<sup>[13]</sup>。工程实践再次表明,目前对高面板坝的变形控制措施虽相对完善,但因各工程变形控制措施不够系统、控制指标不够严格导致坝体变形控制仍存在不足,尚不能解决因变形导致的面板破损问题,特别是很多高坝在设计、建设中仅重视总沉降变形控制,而忽视了建设期和运行期的变形控制,从而导致运行期变形大,同时没有意识到面板作为一种薄板结构难以调整并适应坝体过大的变形。因此,对高面板坝变形控制技术仍需要开展更深入的研究。

本文借鉴了已有高面板坝变形控制经验,从控制坝体总变形、加速建设期变形转化、设置吸收运行期纵向变形的面板分缝结构,系统性建立了高面板坝变形控制方法,量化了适应纵向变形的面板结构缝设置方法,并在实际工程中取得了较好的应用效果。

## 1 堆石坝变形特性分析

高面板坝工程实践表明,当坝高超过150 m,坝体变形将成为面板坝安全的主要制约因素之一,在坝坡抗滑稳定和坝体渗透稳定得到有效保障之后,重点在于解决好坝体变形控制。通过对已建工程室内(外)试验、数值分析(包括反演分析)和原型观测相结合的综合分析,初步揭示了200 m级高坝的堆石体和面板的应力变形分布规律与特点。研究表明,堆石体的

变形过程可分为瞬态变形和蠕变变形两个阶段,变形类型主要有整体变形、不均匀变形和梯度变形等;堆石体和面板的变形随着堆石填筑密度的提高而降低;坝体分区、河谷形状、地质条件、材料填筑密度和特性、填筑顺序、蓄水过程和面板浇筑时机等都对坝体和面板的应力变形特性有影响。同时,该坝型的主体结构为散粒体,蓄水后主要有3个方向的变形:①铅直方向变形的沉降位移;②顺水流方向变形的水平位移;③两岸坝体沿坝轴线向河谷中心的纵向位移。其中以竖向变形为最大。基于上述特性分析,可以确定坝体变形控制是通过筑坝材料选择以及坝体分区、填筑分期和蓄水过程优化等,以达到控制坝体总变形以及坝体堆石间、坝体与岸坡间变形梯度的目标,该方法贯穿于设计、建设及运行全阶段。

## 2 变形控制系统性方法

### 2.1 理论依据和问题的提出

在既定的筑坝材料、既定的施工工艺和既定的荷载条件下,可以认为,坝体全寿命周期的沉降变形是确定值。但加载快慢和加载方式对坝体施工到运行过程中(建设形成期)的任意时刻的变形影响是不同的,也即与蠕变时间密切相关。基于该理论,通过一定的措施可以实现填筑体全寿命周期中对防渗面板安全影响大的堆石体在建设期沉降变形尽量提前完成,避免因运行期堆石变形过大造成面板破损。同时,当大坝两岸沿着坝轴线发生位移变形时,面板间会产生挤压,当该位移值达到一定程度,混凝土面板内的应力超过混凝土的强度时,混凝土面板就会产生挤压破坏,所以应在面板挤压区域设置适当的可以吸收纵向变形的柔性结构。

### 2.2 技术目标和原理

#### (1) 技术目标

面板坝变形按照全生命周期可以分为设计、建设和运行3个阶段,见图1所示。

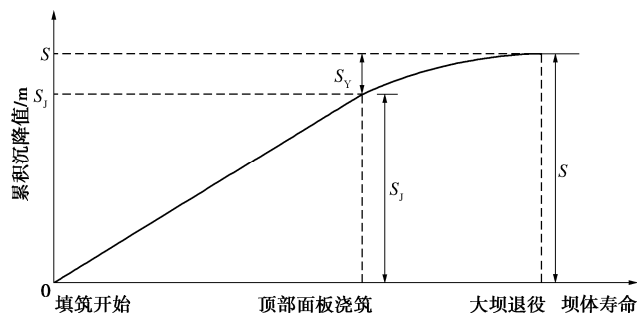


图1 填筑体全生命周期过程和沉降变形关系图

Fig. 1 Relationship between life cycle process and settlement deformation of fill

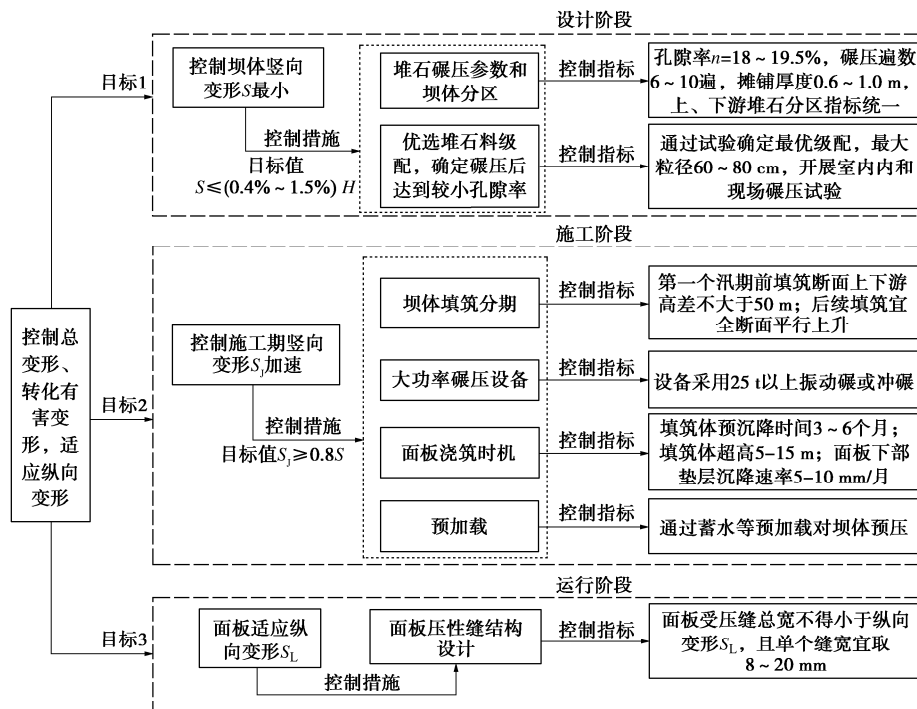


图2 高面板坝变形控制系统性方法技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap of systematic control method for deformation of high concrete-faced rockfill dam

为表述方便, 本文定义坝体总沉降变形为 $S$ , 建设期沉降变形为 $S_j$  (称为无害变形), 运行期沉降变形为 $S_Y$  (称为有害变形), 运行期坝体纵向变形为 $S_L$  (沿坝轴线向河谷中心变形)。在借鉴已建面板坝变形控制经验的基础上, 基于上述理论基础提出了“尽量控制坝体总沉降变形, 尽可能化有害变形为无害变形, 面板结构尽可能适应纵向变形”的坝体变形控制策略。高面板坝变形控制系统性方法的核心是“控制坝体总变形, 做好建设期变形转化措施, 设置适应纵向变形的面板压型缝结构”。总体控制目标是确保坝体总沉降变形 $S$ 小、建设期沉降变形 $S_j$ 转化率高、面板挤压垂直缝可以有效吸收运行期坝体纵向变形 $S_L$ 。见图2所示。

## (2) 面板挤压缝设计原理

主要原理是通过设计一定数量且有一定宽度的面板压性缝, 并在缝内嵌填柔性材料, 以适性混凝土面板之间的挤压变形, 使所有面板压性缝可压缩变形 $b_i$ 的宽度之和不小于运行期纵向变形 $S_L$ 。

其中, 面板压性缝缝宽可以表达为

$$b = b_0 + b_1, \quad (1)$$

式中,  $b$ 为压性缝设计宽度,  $b_0$ 为所嵌填柔性材料压缩后的宽度,  $b_1$ 为可压缩变形的宽度。

所有 $b_i$ 之和应满足:

$$\sum b_{li} \geq S_L, \quad (2)$$

式中,  $b_{li}$ 为第 $i$ 条面板压性缝的可压缩有效宽度,  $b_{li} = (1 - \lambda) b_i$ , 代入式(2), 经整理得

$$\sum b_i \geq \frac{S_L}{1 - \lambda}. \quad (3)$$

如果设计 $n$ 条等宽的压型垂直缝 $b$ , 则有

$$b \geq \frac{S_L}{n(1 - \lambda)}. \quad (4)$$

如果面板受压区长度为 $L$ , 受压区单块面板宽度为 $D$ , 则受压区面板数 $n = \frac{L}{D} + 1$ , 代入式(4)整理后可得单条受压缝宽度 $b$ 的确定应为

$$b \geq \frac{S_L D}{(1 - \lambda)(D + L)}, \quad (5)$$

式中,  $b$ 为压性缝设计宽度,  $S_L$ 为面板沿坝轴线的挤压变形值,  $D$ 为受压区单块混凝土面板宽度,  $L$ 为混凝土面板受压区长度,  $\lambda$ 为所嵌填柔性材料压缩系数。

应用式(2)~(5), 可以方便求出混凝土面板压性缝的设计宽度。需要指出的是, 混凝土压性缝宽度也不能过大, 过大的缝宽会引起中部面板约束减小, 导致周边缝的变形过大。

## 2.3 变形控制系统方法

为实现上述目标策略, 本文提出的高面板坝变形控制系统方法如下:

(1) 设计阶段, 在筑坝材料确定的情况下尽量控制坝体全寿命周期的坝体总沉降变形 $S$ , 以此作为大坝变形控制的第一目标, 主要是通过坝料及级配设计、坝体分区、碾压参数等, 将坝体总沉降变形 $S$ 控制在最大坝高的0.4%~1.5%倍。

(2) 施工阶段, 坝体施工期沉降变形 $S_j$ 作为变形

控制的第二目标,主要是通过填筑分期、坝体预沉降、缓慢蓄水加载等提高有害变形的转化率,采用冲碾压工艺加速有害变形的转化,要求施工期沉降变形 $S_t$ 转化率不小于80%。

(3)运行阶段,运行期的纵向变形会导致受压区面板间相互产生挤压,因此必须在受压区面板间通过合理的分缝吸收该部分变形,为此,提出了受压区面板结构应适应运行期纵向变形 $S_L$ 的目标。

3 技术应用及效果评价

本文提出的技术已成功应用在国内最早在堆石区全断面采用砂泥岩混合筑坝的董箐面板坝建设中,该坝堆石区泥岩含量占到混合料 30%。大坝在建设中系统性采用了本文提出的变形控制系统技术,工程自 2009 年蓄水以来,坝体各项指标运行正常,面板未发生结构性破坏,坝体渗漏量稳定在 20~30 L/s<sup>[14]</sup>。

3.1 设计阶段坝体总变形控制方法

(1)坝体分区

湛正刚等<sup>[15]</sup>研究了董箐面板坝砂泥岩混合料筑坝的坝体分区,提出了堆石区不分主、次堆石区,堆石碾压采用同一控制标准,即干密度不小于 2.192 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率不大于 19.41%,这样坝体形成了均质体,有利于坝体上下游均匀变形,可预防面板结构性裂缝的产生。

(2)室内和现场优选坝料级配

为了确定设计级配,以优选的试验级配图为初步判断标准,进行了爆破试验。在拟选的料场区通过多次试验调整,在适当的爆破参数条件下,基本可以达到参考级配要求。图 3 为董箐坝砂泥岩堆石料级配曲线对比分析。

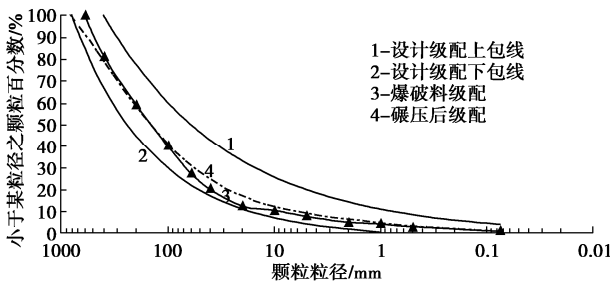


图 3 董箐砂泥岩堆石料代表性级配曲线

Fig. 3 Representative gradation curves of Dongqing sandstone rockfill materials

(3)碾压工艺和参数确定

按设计的级配、碾压工艺要求施工后,在振碾区检测 175 组,各项指标满足设计要求;在冲碾区检测 43 组,除个别组数有偏差外,其余均满足设计要求,

另外,由第三方检测了砂泥岩区 64 组,达到设计要求的 93.8%。基于上述研究,董箐坝设计碾压工艺及参数见表 1 所示。与同期同类工程堆石料设计孔隙率 20%左右相比较,孔隙率降低了 3%~4%,且现场碾压试验实测值均能满足要求,恰当的碾压工艺及参数为控制坝体总变形确立了良好的基础。

表 1 设计碾压工艺及参数表

Table 1 Design rolling process and parameter table

项目	层厚/cm	碾压遍数	加水率/%	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率/%
振动碾(26 t)	80	10	15	1~2	2.192	19.41
冲碾(25 t)	120	27	15	12~15	2.192	19.41

设计阶段开展了坝体应力变形三维有限元计算,静力分析计算表明,坝体竖向变形 1520 mm,占最大坝高的 1.01%,表明了设计阶段采取的控制技术较好的控制了坝体的总变形。

3.2 施工阶段提高有害变形转化率控制方法

(1)面板施工前堆石体预沉降,转化有害变形

董箐坝要求分期面板浇筑前面板下部坝体预沉降时间不少于 3~6 个月,月沉降量不大于 5~10 mm。其中一期面板从 2008 年 3 月 1 日—2008 年 5 月 9 日浇筑,浇筑面板从 349 m—415 m 高程,面板下部堆石体预沉降时间达 7 个月,此时月沉降量最大值为 8.1 mm;第二期从 2009 年 2 月 11 日—2009 年 5 月 23 日,浇筑二期面板至 477 m 高程,面板下部堆石体预沉降时间为 5 个月,此时月沉降量最大值为 8.6 mm;第三期从 2009 年 9 月 15 日—2009 年 11 月 10 日,浇筑三期面板至 491.2 m 高程,面板下部堆石体预沉降时间达 7 个月,此时月沉降量最大值为 7.5 mm。预沉降措施避开了堆石沉降高峰浇面板,有效促进了有害变形的转化。坝体填筑共分 VI 期,见图 4。

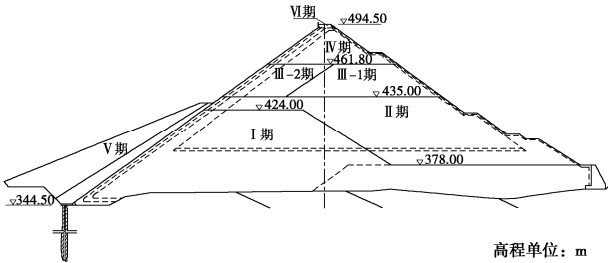


图 4 董箐大坝分期填筑图

Fig. 4 Filling of Dongqing Dam by stages

(2)冲碾压实施工加速坝体沉降

坝体 435 m 高程以上范围堆石体采用冲碾,铺料厚度 1.2 m,并加水 15%,采用冲击碾碾压 27 遍。冲碾压实后坝体变形情况见表 2。

表 2 冲碾压实后坝体变形情况表

Table 2 Deformation of dam body after impact compaction			
坝体最大断面 沉降仪高程/ m	时间段	沉降监测 值/mm	月沉量 /mm
378.0	2007.06.01—2008.08.019	815.0	58
	2008.08.19—2008.10.20	949.3	64
403.5	2007.06.16—2008.08.19	1037.7	74
	2008.08.19—2008.10.20	1320.0	137
425.0	2007.12.31—2008.08.19	1086.7	135
	2008.08.19—2008.10.20	1563.7	231

注：2008.08.19为冲碾前测值，2008.10.20为冲碾后测值。

冲碾压实后两个月，坝体月平均沉降量均比冲碾前明显提高，特别是已填高高程部分月平均沉降量提高了70%~85%，表明冲碾压实效果取得较好的加速沉降的效果，为二期和三期面板施工消除了较大的有害变形，缩短了预沉降时间。董箐坝施工期坝体累积沉降变形为1654.1 mm，占总变形量的79.6%。

(3) 控制蓄水过程转化有害变形

考虑到董箐坝填筑材料为软硬岩料，需要的蠕变时间较长，设计通过蓄水过程充分转化坝体有害变形。2008年12月填筑坝顶后，上游黏土及石渣盖重开始填筑，直到2009年8月蓄水，在此期间，削减了有害变形128.7 mm。蓄水至高程430 m以后，通过放空洞泄水控制蓄水速度，至2010年3月蓄到高程483 m，蓄水过程4个月，期间沉降变形增量160.4 mm。之后死水位以上，通过发电或放空洞泄水控制水库蓄水速度至正常蓄水位，使坝体变形平缓收敛，至2015年3月，月沉降率仅1 mm/月，累积最大沉降变形为2053.2 mm。见表3。

表 3 最大坝高断面蓄水过程变形分析

Table 3 Deformation analysis of maximum high dam section during water storage stage					
进度节点	上游水位/m	最大沉降/mm	沉降值 占总变形 比例/%	沉降差 /mm	沉降差占 总变形比 例/%
填筑至坝顶	368.0	1654.1	79.6		
下闸蓄水	372.0	1782.8	85.8	128.7	6.2
蓄至死水位	483.9	1943.2	93.5	160.4	7.7
截止点	485.4	2078.2	100.0	135.0	6.5

通过施工阶段的系列控制措施，有效提高了坝体有害变形的转化。从表3可以看出，董箐坝施工期累积沉降变形1654.1 mm，占总变形量的79.6%，同时通过蓄水前长约8个月的沉降周期，使6.2%的有害变形转化为无害变形，坝体总变形量的85.8%蓄水前已完成。通过蓄水过程的缓慢加载，又削减了坝体总变形量

7.7%的有害变形，最终的有害变形为135 mm，仅占总变形量6.5%。通过系列过程控制，实现了有害变形向无害变形的转化。

3.3 控制运行阶段面板结构适应纵向变形

设计根据坝体应力变形分析成果，坝体填筑到坝顶后纵向变形为 270 mm，正常运行后坝体纵向变形 356 mm，面板施工后坝体发生的纵向变形  $S_L$ ，即  $S_L$  为 86 mm。表 4 为董箐坝面板压性缝设计成果，其中压性缝总条数为 29 条，单个缝宽 8 mm，缝内嵌填闭孔泡沫板，压性缝总宽 232 mm，远大于面板施工后坝体的纵向变形  $S_L$ 。

表 4 面板压型结构缝设计

Table 4 Design of pressed structural seam in face					
面板受压 区长度/m	压性缝 间距/m	纵向变形 计算值/mm	缝宽 /mm	分缝 条数	压性缝总 宽/mm
420	15	86	8	29	232

注：计算时，压缩系数  $\lambda$  取 60%。

坝体建设期和运行后的纵向水平位移监测数据表明，二期面板施工前坝体纵向变形 284.5 mm，运行至 2015 年 3 月坝体纵向变形为 371.8 mm，两者之差为运行期坝体纵向变形值，为 87.3 mm，小于设计的可压缩变形有效宽度 92.8 mm。大坝运行至今，坝体变形已稳定，混凝土面板未发现挤压破坏迹象，表明控制面板结构适应坝体纵向变形的的方法，是行之有效的。

3.4 运行效果和同类工程对比

现有的高面板坝变形控制措施主要控制上下游堆石模量差、扩大主堆石区范围、控制坝体堆石上下游填筑差、设置堆石沉降时间并控制预沉降速率，同时量化了坝体最大沉降变形指标，虽然目前建设的高面板坝的总体变形控制量值基本维持了最大坝高的 0.7%~1.5%左右，但是并没有明确提出施工期需要完成的沉降变形控制指标，即有害变形转化率，所以部分工程在蓄水后发生了较大的坝体变形。表 5 中天生桥一级、洪家渡、三板溪、水布垭和董箐高面板坝蓄水后坝体累计沉降分别占最大坝高的 1.99%，0.76%，0.94%和 1.29%，蓄水前后坝体沉降变形占总沉降变形的比例分别为 23.2%，2.9%，18.3%，9.7%，8.2%，从中可以看出，天生桥一级坝和董箐坝的累计沉降变形最大，均超过了 1%，但董箐坝蓄水后沉降变化量值仅高于洪家渡坝，所以面板未发生挤压破坏，说明董箐坝、洪家渡坝在施工期提高坝体堆石料填筑密度有效减小了后期变形即有害变形。此外，董箐坝和水布垭坝蓄水后的沉降变化量相当，但水布垭坝面板发生了轻度挤压破坏，笔者认为主要是水布垭坝没有提出适应运行期纵向变形的面板压性缝结构设计，从

而导致因运行期纵向变形过大导致的面板破损。董箐坝在建设系统性应用了本文提出的成套控制技术，坝体运行各项指标均正常，董箐坝与同规模主要坝变形控制效果见表 5 所示。同时，对比分析了几座典型 200 m 级面板坝挤压垂直缝的设计情况，见表 6 所示。从表 6 可看出，洪家渡、巴贡面板坝采用了适应纵向变形的面板挤压垂直缝结构较好的规避了面板挤压破坏。

表 5 董箐坝与同类大坝运行效果对比

Table 5 Operation effect between Dongqing dam and similar dams

工程名称	最大坝高/m	沉降变形/cm		面板破损	坝体日常渗漏量/(L·s <sup>-1</sup> )
		蓄水前	蓄水后		
天生桥一级	178.0	272	354	严重	80~140
洪家渡	179.5	132	136	无	7~20
三板溪	185.5	143	175	较严重	63~131
水布垭	233.0	223	247	轻度	13~81 <sup>[16]</sup>
董箐	150.0	178	194	无	20~30 <sup>[14]</sup>

表 6 几座典型面板坝工程混凝土面板垂直挤压缝设计

Table 6 Design of vertical extrusion joint of concrete face in several typical concrete-faced rockfill dam projects

工程名称	面浇筑后坝体纵向水平位移/mm		缝宽/mm	分缝条数	挤压缝总宽/mm	缝面处理
	向左岸	向右岸				
天生桥一级	128	133	2	34	68	2 mm 沥青乳剂
三板溪	—	—	2	13	26	2 mm 沥青乳剂
水布垭	—	—	5	39	195	5 mm 高密度泡沫板
巴贡	—	—	6~12	18	216	*
洪家渡	13	17.5	8	19	152	8 mm 闭孔泡沫板

注：\*巴贡面板坝 16—34 块面板间的 18 条垂直缝按压性缝设计，其中 16—21 及 27—34 块缝宽均为 12 mm，缝内充填 12 mm 厚沥青杉木板，木板弹性模量大于 11000 MPa；第 21—第 27 块面板间共 6 条垂直缝，在 121 m 高程以上，缝的上部宽度均为 60 mm，缝内填充 60 mm Pulai 木板，缝的底部 200 mm 范围宽度仍为 12 mm，缝内填充 12 mm 厚沥青杉木板。

4 结 论

本文在分析了高面板坝运行状况和筑坝材料特性的基础上，依托工程研究，从设计、建设和运行阶段提出了“尽量控制坝体的总沉降变形值，尽可能化有害变形为无害变形，面板结构应适应运行期纵向变形”的系统性变形控制方法，使坝体变形控制贯穿于工程的全过程。通过 150 m 坝高的董箐面板坝应用，验证了该方法的有效性。主要得出 4 点结论。

(1) 设计阶段，应从坝料设计、坝体分区、碾压参数、碾压工艺等方面做好总变形控制，使坝体最大

沉降变形控制在 0.4%~1.5% 倍坝高以内。

(2) 施工阶段，应重点通过填筑分期、预沉降、分期蓄水等系列措施，加速坝体有害变形转化率，控制施工期变形转化不小于总变形的 80%，以减少运行期的有害变形量值。

(3) 运行阶段，通过优化受压区面板结构分缝设计，预留合理的面板分缝结构以吸收、适应坝体运行期纵向变形，避免相邻面板产生的挤压破坏。

(4) 文中提出的高面板坝变形控制系统性方法的基础是对坝体变形的预测精度，但目前对堆石料试验技术和坝体数值分析方法还滞后于工程实践，尚不能准确预测坝体变形，从而精准指导坝体分区和预留面板间分缝结构设计。未来还需要结合更多工程案例开展进一步研究。

参考文献：

[1] PAUULO T Cruz, BAYARDO Materon, MANOEL Freitas. Concrete Face Rockfill Dams[M]. Springer, 2010.

[2] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (LI Neng-hui. Recent Technology for High Concrete Face Rockfill Dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))

[3] 杨泽艳, 王富强, 吴毅瑾, 等. 中国堆石坝的新发展[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(6): 36 - 40, 45. (YANG Ze-yan, WANG Fu-qiang, WU Yi-jin, et al. New development of rockfill dam in China[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(6): 36 - 40, 45. (in Chinese))

[4] MARULANDA A, PINTO N L S. Recent experience on design, construction, and performance of CFRD dams[C]// International Conferences on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2008. Beijing.

[5] 马洪琪, 曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[J]. 中国工程科学, 2007, 9(11): 4 - 10. (MA Hong-qi, CAO Ke-ming. Key technical issues related to super-high concrete slab dam[J]. Engineering Sciences, 2007, 9(11): 4 - 10. (in Chinese))

[6] 杨泽艳, 蒋国澄. 洪家渡 200 m 级高面板堆石坝变形控制技术[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1241 - 1247. (YANG Ze-yan, JIANG Guo-cheng. Deformation control techniques for 200 m-high Hongjiadu Concrete Face Rockfill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1241 - 1247. (in Chinese))

[7] 湛正刚, 张合作. 面板堆石坝设计中变形控制技术 & 控制指标[J]. 电力勘测设计, 2012, 65(增刊 2): 74 - 78. (ZHAN Zheng-gang, ZHANG He-zuo. Deformation control

- technology and controlling index in design of CFRD by[J]. Elctric Power Survey Design, 2012, **65**(S2): 74 - 78. (in Chinese))
- [8] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. 水利学报, 2019, **50**(1): 62 - 74. (XU Ze-ping. Research progresses and key technologies of CFRD construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(1): 62 - 74. (in Chinese))
- [9] MA H Q, CHI F D. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams[J]. Engineering, 2016, **2**(3): 332 - 339.
- [10] 朱永国. 猴子岩水电站面板堆石坝堆石体变形控制措施[J]. 水力发电, 2018, **44**(11): 60 - 63. (ZHU Yong-guo. Control measures on rockfill deformation of the CFRD of houziyan hydropower station[J]. Water Power, 2018, **44**(11): 60 - 63. (in Chinese))
- [11] 周墨臻, 张丙印, 张宗亮, 等. 超高面板堆石坝面板挤压破坏机理及数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1426 - 1432. (ZHOU Mo-zhen, ZHANG Bing-yin, ZHANG Zong-liang, et al. Mechanisms and simulation methods for extrusion damage of concrete faces of high concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1426 - 1432. (in Chinese))
- [12] 罗亮, 陈烨, 仲洪滔. 土工膜在大坝面板挤压破坏临时处理工程中的应用[J]. 大坝与安全, 2013(2): 48 - 51. (LUO Liang, CHEN Ye, ZHONG Hong-tao. Application of geomembrane in temporary treatment of extrusion damage of dam face slab[J]. Dam & Safety, 2013(2): 48 - 51. (in Chinese))
- [13] 邓刚, 汪小刚, 温彦锋, 等. 混凝土面板坝面板变形模式与水平向挤压破损研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(4): 396 - 404. (DENG Gang, WANG Xiao-gang, WEN Yan-feng, et al. Study on conceptualization method of deformation pattern and horizontal breakage of face slab of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(4): 396 - 404. (in Chinese))
- [14] 湛正刚, 史鹏飞, 夏遵全. 软硬岩混合料填筑的董箐面板堆石坝运行状况分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, **3**(1): 32 - 38, 68. (ZHAN Zheng-gang, SHI Peng-fei, XIA Zun-quan. Operation condition analysis of dongqing concrete face rockfill dam filled with hard and soft rock mixture[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, **3**(1): 32 - 38, 68. (in Chinese))
- [15] 湛正刚, 慕洪友, 蔡大咏, 等. 董箐水电站面板堆石坝设计[J]. 贵州水力发电, 2009, **23**(5): 17 - 21. (ZHAN Zheng-gang, MU Hong-you, CAI Da-yong, et al. Design of face rockfill dam for dongqing hydropower station[J]. Guizhou Water Power, 2009, **23**(5): 17 - 21. (in Chinese))
- [16] 杨启贵, 徐琨, 贡建兵. 基于监测数据的水布垭面板堆石坝变形控制技术分析[J]. 水利水电快报, 2020, **41**(1): 1 - 6. (YANG Qi-gui, XU Kun, GONG Jian-bing. Analysis on deformation control technology of Shuibuya concrete face rockfill dam based on monitoring data[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2020, **41**(1): 1 - 6. (in Chinese))