

水布垭面板堆石坝一期面板裂缝成因分析及处理

宋文晶¹ 王云清² 孙役² 李亮²

(1. 清华大学水利水电工程系,北京,100084; 2. 清江水布垭工程建设公司,湖北宜昌,443000)

摘要:水布垭面板堆石坝高 233m,为目前世界同类坝型最高。大坝于 2003 年 1 月开始填筑。混凝土面板分三期施工,第一期面板于 2005 年 1 月至 3 月浇筑,同年下半年面板发现裂缝,绝大多数为表面水平裂缝。监测数据分析和有限元计算结果均表明,上游坡面的变形弱化了面板的支承条件,是导致面板发生结构性裂缝的原因。文章对一期面板裂缝的处理工艺作了介绍,并针对后期面板的防裂措施提出,足够的堆石体预留沉降时间和 20m 以上的堆石体超高有利于控制面板结构裂缝。

关键词:面板堆石坝,水布垭,混凝土面板,成因分析,裂缝处理

工程概况

水布垭水利枢纽位于湖北清江中游河段巴东县境内,是清江梯级开发的龙头枢纽,水库总库容 45.8 亿 m³,系多年调节水库,装机容量 1840MW,工程开发的主要任务是发电、防洪并兼顾其他,为一等大(1)型水利水电工程,主体建筑物有:钢筋混凝土面板堆石坝、河岸式溢洪道、地下式电站和放空洞等。水布垭混凝土面板堆石坝是目前世界上已建和在建的最高的面板坝,最大坝高 233m,坝顶高程 409m,坝轴线长 660m,坝顶宽度 12m,大坝上游坝坡 1:1.4,下游平均坝坡 1:1.4,总填筑工程量 1564 万 m³,主要堆石料采用茅口组灰岩和栖霞组硬岩。

水布垭面板坝钢筋混凝土面板坝底高程 177m,顶部高程 405m,最大坡长 392.16m,面板总面积 13.84 万 m²,面板厚度在 30~110cm 之间按直线变化,满足 $t=0.3+0.0035H$ 关系(H 为距坝顶高程),设计混凝土方量为 81,429m³。混凝土面板分三期进行施工,高程 278m 以下为第一期,278m~340m 高程之间为二期,340m~405m 之间为三期面板。

第一期面板共计 19 块,除 R13 块宽度为 8m 外,其余宽度均为 16m。一期面板最大斜长为 173.77m,底部厚度 110cm,顶部厚度 74.5cm,面板面积约 31,500m²,面板混凝土方量约 28,600m³。一期面板设计钢筋总量约 2000t,采用Φ25、Φ28mm 两种 II 级螺纹钢,钢筋间距均为 16cm,除 223.4m 高程以下纵向钢筋为Φ28mm 外,其余均为Φ25mm。河床段 L1、L2、R1、R2 四块面板布置单层双向钢筋,其余面板均布置双层双向钢筋。

表 1 水布垭一期面板混凝土性能指标

强度等级	级配	抗渗等级	抗冻等级	极限拉伸值 ($\times 10^{-6}$)	自身体积变形 ($\times 10^{-6}$)(90d)	P (%)	σ (MPa)
C30	二	W12	F100	≥ 100	≥ 20	≥ 95	4.5

施工进展

水布垭面板堆石坝大坝填筑分六期施工。2003 年 2~5 月为一期填筑,坝面上游面达到 200m 高程,中间和下游区达到 208m 高程,填筑方量约 90 万 m³。2003 年 10 月至 2004 年 5 月为二期填筑,上游区达到 288m 高程,中间达到 250m 高程,下游区达到 235m 高程,填筑方量约 400 万 m³。三

期填筑为 2004 年 7~12 月,上游区为 288m 高程,中间为 308~315m 高程,下游区达到 320m 高程,填筑量约 400 万 m^3 。2005 年 1 月开始大坝四期填筑,因 1~3 月进行一期面板施工,此间上游区仍为 288m 高程,到 2006 年 3 月完成四期填筑,大坝上游区达到 364m 高程,下游区达到 375m 高程。大坝五期填筑为 2006 年 4~9 月,坝体全断面达到 405m 高程;405~409m 高程为六期填筑,计划 2008 年初施工。

一期面板混凝土于 2005 年 1~3 月施工,此时大坝上游区填筑至 288m 高程,坝体沉降约 6 个月。施工平台布置在 288m 平台,平台宽约 40m 长约 350m。2005 年 1 月 6 日开始第一块面板 L1 浇筑,至 3 月 27 日完成最后一块面板 R2 浇筑,历时 81 天,平均日浇筑强度约 $350m^3$,高峰日浇筑强度约 $800m^3$ 。在一期面板浇筑期间,同时进行主堆石区、次堆石区和下游堆石区的填筑,2005 年 3 月底一期面板施工完成后立即开始进行上游面各区堆石料填筑施工。

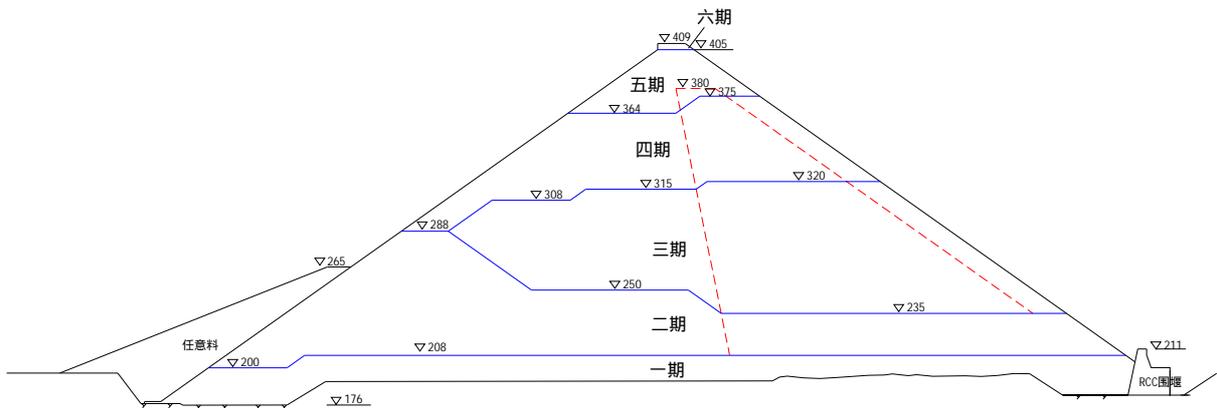


图 1 水布垭面板堆石坝填筑分期

监测情况

2005 年 6 月 30 日前检查面板发现 7 条裂缝,均沿水平方向开展,缝宽均小于 0.3mm,最长的 16.7m。9 月 26 日检查面板出现多条裂缝,至 06 年 2 月,发现裂缝 255 条,大部分裂缝集中在 260m~269m 高程之间,分布在左右岸大部分面板范围,多数横穿整个面板;少数裂缝分布在 235m~245m 高程之间 R2~R8 块范围(见图 2)。其中缝宽 $\delta < 0.1mm$ 的 I 类裂缝有 195 条,表面缝宽 $0.1mm \leq \delta < 0.3mm$,缝深 $h \leq 30cm$ 的 II 类裂缝有 54 条,表面缝宽 $\delta \geq 0.3mm$,或缝深 $h > 30cm$ 的 III 类裂缝有 6 条。

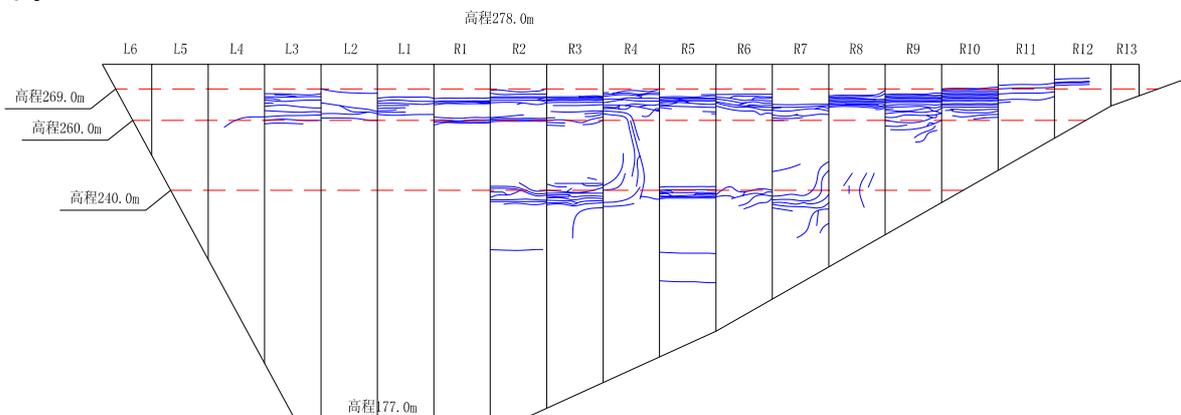


图 2 水布垭面板堆石坝一期面板裂缝分布图

根据一期面板顶部埋设的面板脱空计监测成果，面板与挤压边墙之间几乎无变化，面板与挤压边墙变形保持一致。一期面板顶部埋设 6 个外观变形监测点，2005 年 9 月的变形监测结果见表 2 所示。从表中可以看出，面板顶部均表现为沉降变形，最大沉降为 8.1cm，中间部位面板变形大于两侧面板。

表 2 一期面板顶部变形监测成果 (cm)

监测时间	L3 块		L1 块		R1 块		R4 块		R6 块		R8 块	
	X 方向	Z 方向	X 方向	Z 方向								
05 年 9 月	0.2	2.8	-1.5	5.8	-1.8	7.2	-2.6	8.1	-1.9	6.5	-14.1	4.0

注：X 方向为上下位移，指向下游为正；Z 方向为沉降变形，向下为正。

一期面板的形体测量结果见图 3，“变形前”曲线为 2005 年 4 月面板浇筑施工完成后的测量结果，“变形后”曲线为 2005 年 10 月的第二次测量结果。由于未设固定监测点，图中曲线仅能观察两次测量的相对关系，可以看出，在 2005 年 4~10 月期间，面板形体表现为向上游凸出变形，最大凸出变形约 13cm，顶部则表现为沉降变形。

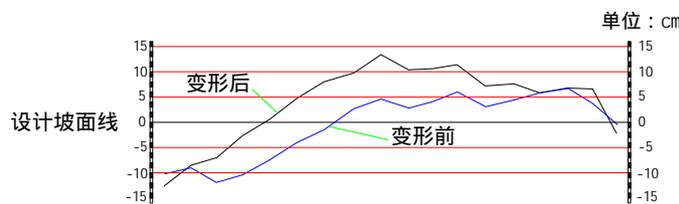


图 3 一期面板形体监测图

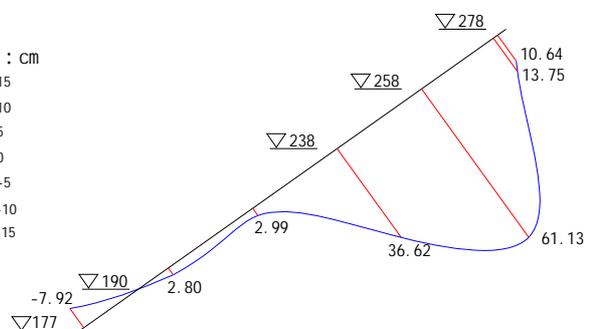


图 4 一期面板 R2 块顺坡向钢筋应力 (以拉为正, MPa)

一期面板的钢筋应力监测采用差动式钢筋计，钢筋计布置在面板表层。2005 年 9 月 20 日实测得到的 R2 块的顺坡向钢筋应力分布见图 4。可见，面板在 190m 高程以上表层纵向钢筋均处于受拉状态，而且在 238m 高程和 258m 高程拉应力分别达到了 36.6MPa 和 61.1MPa，出现异常，说明该部位的面板混凝土可能已经被拉坏，与实际观测发现的这些高程附近面板表层出现裂缝的现象一致。

成因分析

混凝土面板的裂缝主要分为非结构性的表面裂缝和结构性裂缝两种。混凝土干缩和温度应力是造成面板非结构性裂缝的主要因素。混凝土表面因干缩和温度而造成的开裂多发生在早期，且多呈龟裂状、乱向无序，一般表现为表面裂缝，很少贯穿裂缝。但是水布垭面板坝的面板混凝土选择在 1~3 月的低温季节浇筑，避免和减少了温度裂缝的产生，而且在混凝土中掺入聚丙烯腈纤维，可有效防止早期裂缝的发展。

从水布垭一期面板裂缝的分布及发展过程来看，裂缝于面板浇筑半年以后才陆续大规模发生，而且分布范围集中在 260~269m 高程之间的大部分面板，和 235m~245m 高程之间 R2~R8 块范围内，且绝大部分均呈水平向开裂，规律性较强。因此认为，面板下卧堆石体的变形可能是导致面板产生结构性裂缝的原因。

采用有限元方法，分析 2005 年 4 月一期面板浇筑以后第四期堆石体填筑对其影响。有限元网格

见图 5。本构模型采用清华非线性 K-G 模型，主要堆石坝料参数采用设计阶段对坝料进行常规三轴剪切试验数据回归得到的清华 K-G 模型参数，见表 3。

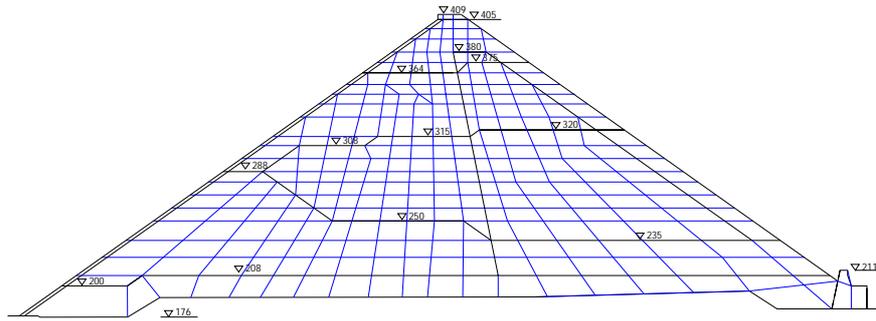


图 5 水布垭面板坝最大横剖面有限元计算网格

表 3 各区坝料的清华 K-G 模型参数

坝料	ρ_d (g/cm ³)	ϕ	$\Delta\phi$	K_v	H	m	G_s	B	s	d
垫层料	2.18	55.7	2.17	520	0.75	0.33	2400	1.33	0.3	0.42
主堆石 IIIB	2.16	54.7	10.4	450	0.73	0.32	1800	1.20	0.58	0.52
次堆石 IIIC	2.16	51.3	10.4	322	0.635	0.20	505	1.02	0.90	0.90

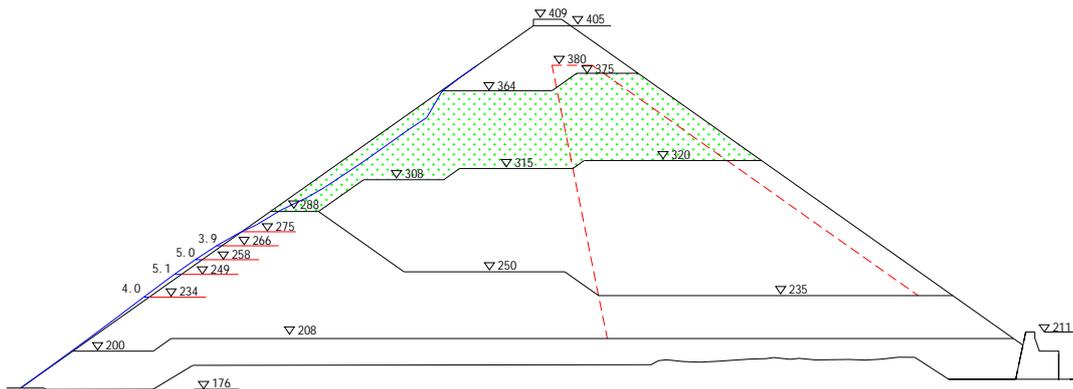


图 6 第四期填筑产生的上游堆石坡面增量变形 (cm)

第四期坝体填筑在上游堆石体坡面上产生的增量变形见图 6 所示。因为缺乏填筑堆石体的实际变形参数，因此只能从规律上进行分析。从计算结果可以看出，阴影部分坝体的填筑使 275m 高程以下的垫层坡面产生凸向上游的变形，在 250m 高程坡面的变形达到 5.1cm，在 250~260m 高程之间坡面的变形稳定在 5cm，260m 高程以上坡面的外凸变形迅速减小。

垫层坡面向外凸出变形，对面板产生向外的支承力，在面板自重力的共同作用下，导致面板的内层受压，而外层受拉，这与钢筋计测得的拉应力一致。而且 250m 高程以下和 260m 高程以上的坡面范围内，变形梯度较大，对面板的支承力的变化梯度也相应较大，面板的支承条件较差，易发生裂缝；而在 250~260m 高程之间，垫层坡面的形体保持平顺稳定，此范围对面板的支承力也保持稳定，因此面板的形态也保持在稳定状态，反而很少发生裂缝。

综上所述，从裂缝分布及面板观测资料分析，以及数值分析成果，可以得出，一期面板 265m、240m 高程附近发生裂缝，是由于坝体迎水面（挤压边墙）变形造成面板支承条件变化，从而引起面板变形而造成的结构性裂缝。

处理措施

(1) 一期面板的裂缝修补措施

表面缝宽 $\delta < 0.1\text{mm}$ 的 I 类裂缝(浅层裂缝):对裂缝表面进行打磨、清洗后,骑缝涂刷 SG305-C₁ 液体橡胶,全部涂刷 PSI-200 水泥基液。

表面缝宽 $0.1\text{mm} \leq \delta < 0.3\text{mm}$, 缝深 $h \leq 30\text{cm}$ 的 II 类裂缝:对裂缝进行凿 V 型槽、钻孔埋管、清洗吹干、预缩砂浆嵌缝、骑缝灌浆后,表面用 PSI-tape 裂缝快速修补带封闭处理。

表面缝宽 $\delta \geq 0.3\text{mm}$, 或缝深 $h > 30\text{cm}$ 的 III 类裂缝:修补方法同 II 类裂缝。

在采取上述措施处理裂缝完成以后,裂缝修补带的表面涂刷一层 PSI-108 水泥基液,对于所有裂缝所在的面板混凝土区域,涂刷一层帕斯卡渗透结晶型涂料。

(2) 二期面板防裂建议措施

一期面板因所在高程低,堆石体的坡面变形相对较小,随着堆石填筑体的方量增大,后期堆石体坡面会发生较大的变形,对后期面板的变形产生不利的影晌。为防止后面的二、三期面板产生危险的结构性裂缝,总结一期面板的经验,主要提出两方面的预防措施:

坝体填筑超高:从水布垭一期面板裂缝的分布情况来看,大部分裂缝分布在上部距面板顶部约 9~18m 高差范围内,一期面板的顶部堆石体超高只有 10m。业内专家认为,面板坝分期填筑的堆石体顶部 20m 范围内,坡面变形较为明显,而在 20m 以下变形会迅速减小。因此,建议后期面板的下卧堆石体填筑超高应在 20m 以上,以减小堆石体坡面变形对面板的不利影响。

坝体沉降时间:业内通常认为面板浇筑时间应距堆石体填筑时间三个月以上。水布垭一期面板在浇筑期间,距离上游坡面 40m 范围以外的堆石区填筑并无停止,这也是造成面板下卧堆石区变形继续发展的原因。因此在后期面板浇筑前,应扩大上游预留堆石区域的范围,并尽量延长预留沉降时间。

结 语

水布垭面板坝于 2005 年第一季度进行了一期面板混凝土浇筑,于同年 9 月发现面板出现规律性较强三水平表层裂缝。经过监测资料分析和数值计算分析,认为上游堆石体坡面的变形是导致面板产生上述结构性裂缝的主要原因。同时,为了预防后期面板产生结构性裂缝,总结一期面板的经验,提出:后期面板的下卧堆石填筑体的超高保持在 20m 以上,并尽量扩大上游预留堆石区域的范围和延长预留沉降时间,三个月以上为好,半年更佳。

高面板堆石坝的建设周期较长,分期填筑、多个汛期渡汛是必须的和难以避免的。另一方面,大规模堆石体的变形更为显著,面板发生结构性裂缝成为一个高坝的重要课题。如何从施工工艺、施工次序、工程材料方面预防和减少裂缝的产生,是业界的热点课题,作为我国第一座 200m 以上的面板堆石坝,水布垭面板坝的实践经验无疑将对我国面板坝的继续发展和提高产生积极重要的影响。

参 考 文 献

- [1] 蒋国澄,赵增凯. 中国混凝土面板堆石坝 20 年回顾[A]. 见:蒋国澄主编. 中国混凝土面板堆石坝 20 年[C].北京:中国水利水电出版社,2005.3~18

- [2] 孙役,李昌彩,高莲士. 水布垭面板堆石坝填筑方式研究[A]. 见: 蒋国澄主编. 中国混凝土面板堆石坝 20 年[C]. 北京:中国水利水电出版社,2005.521~527
- [3] 朱永国,任林军,辛剑军. 水布垭面板堆石坝堆石填筑施工质量控制[A]. 见: 蒋国澄主编. 中国混凝土面板堆石坝 20 年[C].北京:中国水利水电出版社,2005.269~275
- [4] 王云清,李昌彩,李亮. 水布垭面板堆石坝面板混凝土防裂措施[A]. 见: 蒋国澄主编. 中国混凝土面板堆石坝 20 年[C].北京:中国水利水电出版社,2005.262~268
- [5] 孙役,燕乔,王云清. 面板堆石坝面板开裂机理探讨与防止措施研究[A]. 见: 蒋国澄主编. 中国混凝土面板堆石坝 20 年[C].北京:中国水利水电出版社,2005.528~531
- [6] 高莲士,汪召华,宋文晶. 非线性解耦 K-G 模型在高面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水利学报, 2001,(10):1~7
- [7] 高莲士,宋文晶,汪召华. 高面板堆石坝变形控制的若干问题[J]. 水利学报, 2002,(5):5~11