

文章编号: 1672-3031(2009)02-0112-08

# 堆石压实标准及结构分区对混凝土面板 堆石坝应力变形影响的研究综述

徐泽平

(中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

**摘要:** 在混凝土面板堆石坝的设计中, 坝体的变形是一项至关重要的控制因素。筑坝堆石材料的压实控制标准和坝体结构分区设计是混凝土面板堆石坝变形控制的重要措施。从堆石的压实标准看, 当堆石材料的填筑密度从一个相对较低的数值提高到较高的数值时, 坝体和面板的变形和应力分布将得到明显的改善。从坝体断面分区布置看, 次堆石区的变形将会对面板的应力和变形产生一定的影响, 对于高混凝土面板堆石坝, 这一影响尤其明显。在坝体的断面分区设计中, 变形特性相差很大的堆石填筑分区将有可能导致混凝土面板发生拉伸裂缝。本文通过对相关研究和数值模拟的综述提出: 提高堆石填筑压实标准, 改进坝体断面分区, 可以显著改善坝体和面板的应力变形性状, 从而提高大坝的整体安全特性。

**关键词:** 堆石的压实; 堆石分区; 应力变形; 混凝土面板堆石坝

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

## 1 研究背景

在混凝土面板堆石坝的设计施工中, 坝体的变形控制是一项最重要的考虑因素, 面板的应力、接缝的位移等, 无一不与此密切相关。因此, 在混凝土面板堆石坝中, 堆石体应达到尽可能高的变形模量, 以保证其在自重和水荷载作用下具有尽可能小的变形。堆石的变形模量主要取决于堆石母岩的性质、堆石的级配和施工压实的情况。欲使堆石体获得较高的变形模量, 就需要选用新鲜、坚硬、级配优良的堆石, 以一定的压实功能将其压实至较高的密度。

就坝体的断面设计而言, 堆石体分区的主要目的就是要控制坝体变形、保证坝体渗流稳定, 并在此基础上实现对材料的充分利用。混凝土面板堆石坝所承受的主要荷载是堆石体的自重和水荷载, 大坝的防渗主体是混凝土面板以及相应的接缝止水。为防止面板和接缝止水系统的破坏, 坝体堆石分区的原则应该是: 从坝体上游至下游, 堆石变形模量递减, 以保证水库蓄水后, 坝体的变形尽可能的小。与此相对应, 针对坝体从上游面至下游坡的不同分区, 材料的类型、级配、密度以及压实标准也应有所区别。

坝体堆石的不同分区、相应的不同压实标准, 将直接影响混凝土面板堆石坝的变形特性, 本文将主要通过数值分析研究, 对堆石压实标准和坝体结构分区对坝体的应力、变形特性的影响进行分析和论证。

## 2 堆石体的结构分区设计和压实标准

对于常规的混凝土面板堆石坝, 其堆石材料分区一般分成3个主要区域: 1区为防渗补强区, 位于面板底部周边缝附近; 2区为垫层区, 位于面板下游侧, 垫层料为人工级配料, 其中周边缝下常采用粒径更细的小区料(2A); 3区为堆石区, 其中3A为过渡区, 3B为主堆石区, 3C为次堆石区。3A、3B、3C料应满足变形模量递减和渗透性递增的原则。

收稿日期: 2009-04-10

作者简介: 徐泽平(1963-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土力学及高土石坝研究。E-mail: xuzp@iwahr.com

从堆石压实标准设计看,坝体堆石的碾压施工一般考虑以下几种填筑参数:堆石的铺层厚度、碾压遍数、加水量。堆石的铺层厚度越薄,越容易被压实,相应的施工成本也越高,填筑的强度也越低。堆石的碾压遍数越多,压实度越高,但通常碾压遍数达到一定程度后(6~8遍),压实度的增加趋于稳定。在碾压过程中加水,可以降低压实难度,并可减小竣工后的沉降,但对吸水率较低的坚硬岩石,加水效果不甚明显。除以上填筑参数外,堆石的级配和最大粒径对于压实的效果也有较大的影响:堆石的不均匀系数  $C_u$  越大,压实效果越好,但也越容易出现颗粒的分离;堆石粒径越大,压实越不容易。

近年来,随着混凝土面板堆石坝坝高的增加和施工技术的改进,坝体堆石在填筑施工时,越来越强调压实密度的提高(即变形模量的提高)。在施工机具的选择上,可以通过使用重型压实机具或采用新型压实机具来提高堆石的压实效果,如25t的自行式振动碾、20t牵引式振动碾、冲击压实碾等。

### 3 压实标准对坝体应力变形的影响

作为一种有着坚固颗粒的散粒体材料,堆石体在经过碾压后,一般都具有较高的密度和较小的孔隙比,其压缩性一般较低。从试验研究中可以发现,堆石的压缩模量与填筑的干容重密切相关,随着堆石干容重的增加,堆石体的压缩模量也急剧增加。而从堆石材料三轴试验数据的统计中也可以发现,堆石材料邓肯模型参数  $K$ (弹性模量数)和  $K_b$ (体积模量数)也是随堆石填筑密度的增加而增大。因此,在数值分析研究中,可以通过对比不同材料参数(对应不同的压实密度)情况下的坝体应力变形变化趋势,研究不同压实标准对坝体应力变形的影响。

本文的计算分析选取一个典型的分析模型,计算分析模型的基本特征参数为:坝高120m;坝体分区:面板、垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区;面板厚度50cm;垫层宽度2m;过渡区宽度3m;河床宽度48.0m;岸坡1:1;建基面:水平(高程0.0m);上游蓄水位110m。

计算分析中,主堆石的计算参数如表1所示(均取自灰岩堆石料,不同的干密度),次堆石参数统一按主堆石参数的80%选取。

表1 材料的邓肯-张模型(E-B)参数

材料名称	$\gamma$ ( $g/cm^3$ )	$K$	$K_{ur}$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\varphi$ ( $^\circ$ )	$\Delta\varphi$ ( $^\circ$ )
方案1	2.10	565	1130	0.50	0.814	146	0.28	47.6	5.6
方案2	2.19	1050	2100	0.43	0.870	620	0.24	53.0	9.0
方案3	2.23	1400	2800	0.59	0.925	630	0.56	59.7	15.1
方案4	2.28	1750	3500	0.43	0.768	1200	0.41	58.1	14.5

图1所示为不同计算方案情况下,坝体最大沉降的变化趋势,图2所示为面板最大法向位移的变化趋势。从图中可以看出,坝体填筑密度的变化,对于坝体和面板的变形有着直接的影响,坝体的变形随着填筑密度的提高而降低,当堆石填筑密度在较低的水平时,填筑密度的变化对坝体变形有着显著的作用,但当堆石填筑密度处于较高水平时,填筑密度增加所引起的对坝体变形减小的作用逐步减弱。当然,就堆石本身而言,其在一定压实功能下的密实度也是有一定的限制的,而当提高压实功能时,又要注意到堆石块体的破碎对堆石体特性的影响。

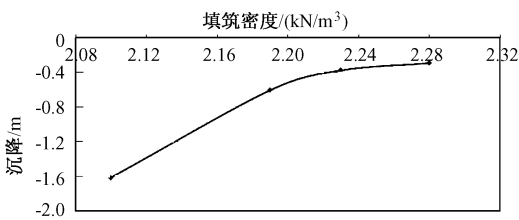


图1 不同填筑密度下坝体的最大沉降

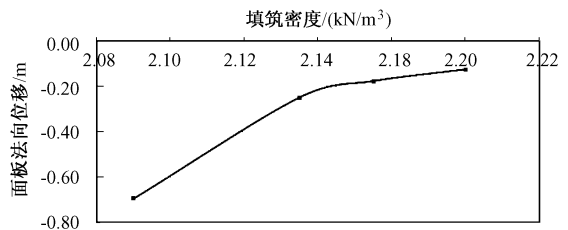


图2 不同填筑密度下面板的法向位移

从面板的最大法向位移看,其变化趋势与坝体位移的变化趋势基本一致,同样也是随堆石填筑密度

的增加而减小。

由于面板以其后面的堆石体为依托,因此,面板应力数值的大小与坝体的变形直接相关。图3给出了面板应力随填筑密度的变化趋势,从图中也可以看出,随着堆石体填筑密度的增加,面板的应力也随之减小。

在实际工程的计算分析中,洪家渡混凝土面板堆石坝(坝高179.50m)工程为了研究提高堆石压实密度后坝体的应力变形特性,采用了提高堆石密度指标后的三轴试验结果(参数如表3所示)进行了计算分析。与原计算参数(表2)相比,可以发现,堆石密度增加后,模型参数的数值有了较大提高,特别是弹性模量数和体积模量数。

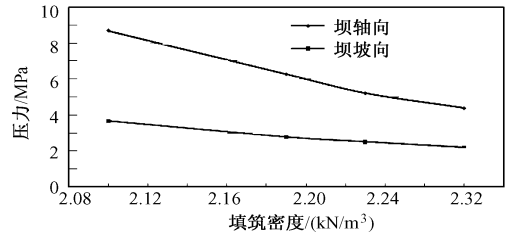


图3 不同填筑密度下面板应力的变化

表2 洪家渡混凝土面板坝材料基本参数(邓肯E-B模型)

材料名称	$\gamma / (g/cm^3)$	$K$	$K_{ur}$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\varphi_d / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$
垫层料	2.205	1100	2250	0.40	0.865	680	0.21	52	10
过渡料	2.190	1050	2150	0.43	0.867	620	0.24	53	9
主堆石	2.181	1000	2050	0.47	0.870	600	0.40	53	9
次堆石	2.120	850	1750	0.36	0.290	580	0.30	52	10

表3 洪家渡混凝土面板坝坝料补充试验参数(邓肯E-B模型)

坝料类型	$\gamma / (g/cm^3)$	$\varphi_d / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	$K$	$K_{ur}$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$
垫层料	2.25	60.1	16.2	1340	2680	0.59	0.882	605	0.18
过渡料	2.23	59.7	15.1	1400	2800	0.59	0.925	630	0.56
主堆石	2.22	57.0	13.1	1700	3400	0.55	0.929	560	0.47
次堆石	2.16	52.8	9.6	1250	2500	0.63	0.918	530	0.30

表4和表5分别为采用基本参数和采用提高填筑密度后的参数计算分析所得主要结果的汇总。从表中的计算数值可以看出,堆石的填筑密度提高后,坝体的总体应力、变形数值发生了明显的变化,坝体变形、面板法向位移以及坝体和面板的应力均有所减小。由此说明,通过改进碾压施工技术,提高填筑密度,可以显著改善坝体和面板的应力变形性状,从而提高了面板坝的整体安全性。

表4 坝体应力应变分析成果(方案1)

各部位应力与位移		计算工况	竣工期	蓄水期
坝体	最大垂直位移/cm		78.2	81.4
	最大水平位移/cm	上游	16.8	7.4
		下游	19.1	24.0
	主应力/MPa	$\sigma_1$	4.39	4.72
$\sigma_3$		1.35	1.62	
面板	最大挠度/cm		31.1	45.5
	顺坡向	压应力/MPa	11.17	8.17
		拉应力/MPa	0.00	0.93
	坝轴向	压应力/MPa	5.18	8.98
		拉应力/MPa	1.85	2.19

表5 坝体应力应变分析成果(方案2)

各部位应力与位移		计算工况	竣工期	蓄水期
坝体	最大垂直位移/cm		61.3	64.1
	最大水平位移/cm	上游	16.4	1.7
		下游	6.5	20.5
	主应力/MPa	$\sigma_1$	3.7	4.2
$\sigma_3$		1.0	1.2	
面板	最大挠度/cm		28.6	39.0
	顺坡向	压应力/MPa	7.90	8.40
		拉应力/MPa	0.01	1.10
	坝轴向	压应力/MPa	4.80	8.80
拉应力/MPa		1.50	2.10	

#### 4 次堆石区材料特性对面板应力变形的影响

在面板堆石坝断面分区设计中,坝体下游的次堆石区(3C区)是作为主堆石体的辅助支撑部分,起稳定边坡的作用。一般认为,这一部分的堆石材料材料特性和填筑标准较主堆石区可以适当降低,但数值计算分析的结果和工程实际的运行实践均表明,尽管在通常情况下次堆石区对坝体上游面的面板影响相对较小,但如果主、次堆石区的材料性质相差过大,次堆石区的变形也将会严重影响面板的应力、

变形形态,而且,对高面板堆石坝来说,由于坝高的增加,次堆石区的影响也会随之凸显。本文通过盘石头混凝土面板堆石坝的计算分析结果研究次堆石区材料特性对面板应力、变形的作用。

图4为盘石头混凝土面板堆石坝的坝体材料分区示意,坝体材料的计算参数如表6所示。

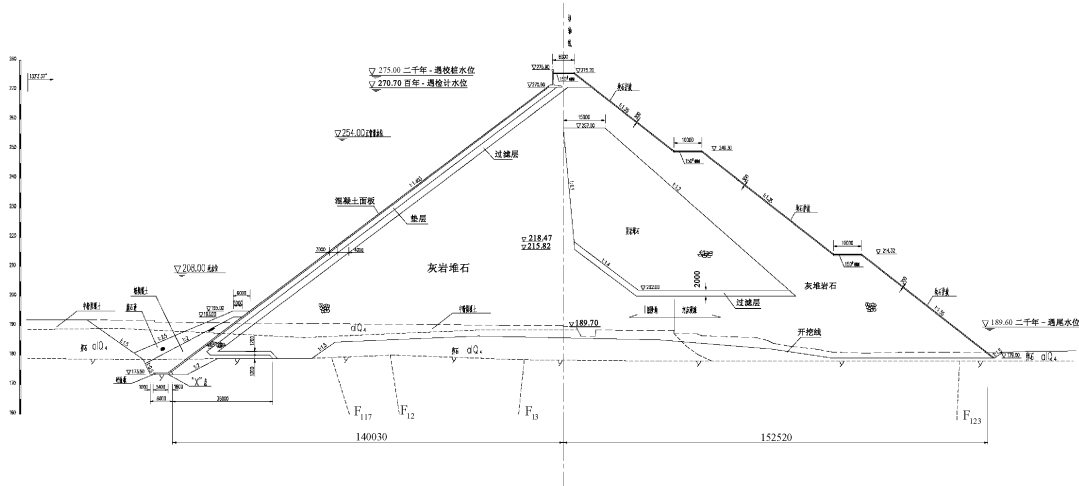


图4 盘石头混凝土面板堆石坝坝体分区

表6 盘石头混凝土面堆石板坝材料计算参数(邓肯E-B模型)

材料名称	$\gamma / (g\ cm^3)$	$K$	$K_{1r}$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$
垫层	2.15	1050	2100	0.44	0.871	465	0.13	52.8	11.7
过渡	2.15	755	1510	0.46	0.901	406	0.00	52.9	10.2
主堆石	2.10	1050	2100	0.27	0.886	590	0.25	54.2	12.4
次堆石	2.02	255	510	0.37	0.739	97	0.19	43.9	10.0

从表6的材料参数看,由于盘石头混凝土面板堆石坝次堆石区采用了软岩材料(泥岩、页岩),次堆石区的材料参数与主堆石区相差较大(弹性模量数仅为主堆石的1/4),因此在坝体横断面的变形上,坝体变形明显偏向坝体下游侧,最大沉降位于次堆石区范围中,坝体沿上下游方向的水平位移也基本上呈指向下游侧的变形趋势,而且坝体顶部指向下游的水平位移还相对较大。由此可以明显地看出下游次堆石区变形对上游坝体的牵制作用(图5、图6)。

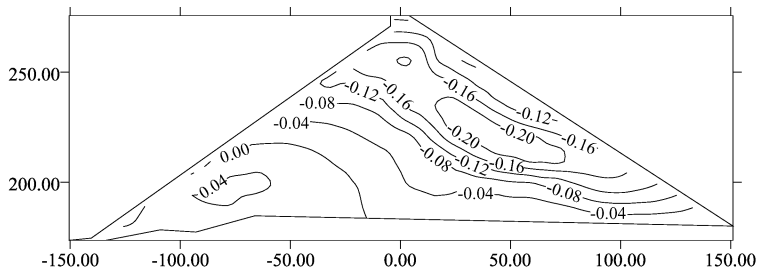


图5 坝体蓄水期水平位移(单位:m)

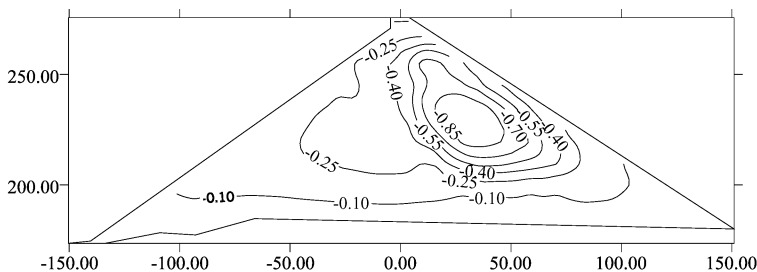


图6 坝体蓄水期竖直位移(单位:m)

从坝体的应力看,由于主、次堆石材料性质相差悬殊,坝体的大主应力分布在主、次堆石交界线处出现了明显的突变现象。从整个次堆石区到上部坝体的的上游面,坝体的应力水平明显大于坝体底部区域,表明从坝体顶部至次堆石区,坝体因次堆石区的较大变形而承受相对较大的剪应力(图7—9)。

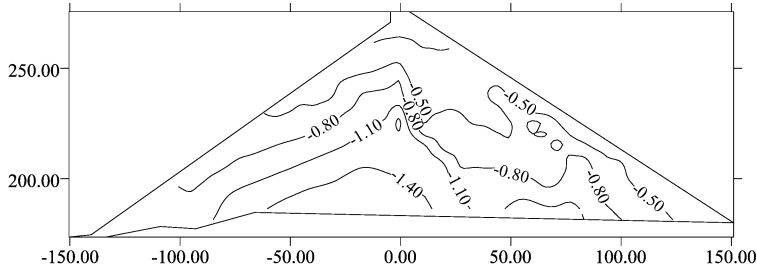


图7 坝体蓄水期大主应力(单位:MPa)

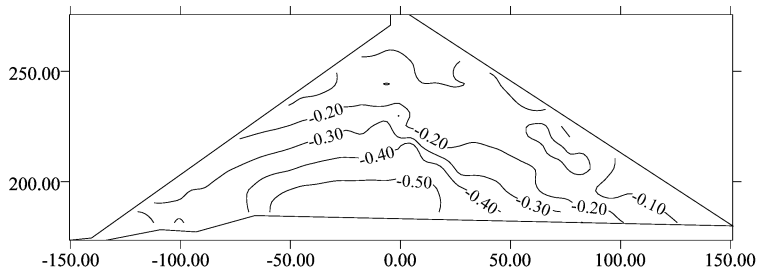


图8 坝体蓄水期小主应力(单位:MPa)

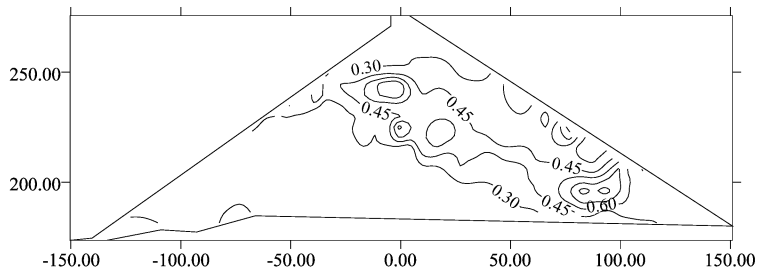


图9 坝体蓄水期应力水平(单位:MPa)

由于上述坝体的应力、变形趋势,面板的应力和变形也不可避免的会受到一定程度的影响。图10—11为蓄水期面板的应力分布。从图中可以看出,由于坝体在次堆石较大变形的影响下产生了“后仰”的变形趋势,因此整个面板沿坝坡方向基本上承受拉应力,拉应力区的范围明显大于常规情况下的面板堆石坝。不过由于盘石头面板坝坝高相对较低,河谷又较宽阔,因此面板的变形数值并不是很大,所以尽管面板的拉应力区范围较大,但拉应力数值并不大。

## 5 特殊垫层区对周边缝位移的影响

在混凝土面板堆石坝的断面分区设计中,垫层区(2区)底部面板周边缝下游侧通常会布置一个颗粒更细的分区,称为特殊垫层区(2A区),如图12所示。这一区域的材料性质对于周边缝的变形也会产生直接的影响。通常,在水荷载的作用下,面板相对于趾板将产生沿水荷载方向的沉降变形、沿坝坡方向的张开变形和沿趾板线方向的剪切变形,周边缝变形的量值主要取决于堆石的模量、坝高、水库水位、以及接缝沿趾板线的位置。当坝体填筑碾压压实时,周边缝的位移一般不会很大,例如,澳大利亚塔斯马尼亚建造的13座面板堆石坝中,除Crotty坝外,其余12座坝的周边缝位移观测值为最大张开位移20mm,最大沉降位移23mm。对于Crotty坝,其最大断面底部处的周边缝沉降变形达到了90mm<sup>[1]</sup>。究其原因,主要是由于周边缝底部的堆石材料未能进行很好的压实所致。由此可见2A区材料对于控制面

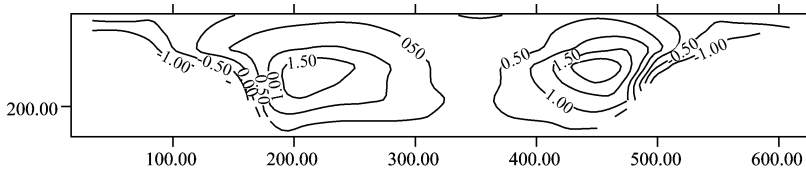


图 10 蓄水期面板坝轴向应力分布(单位:MPa)

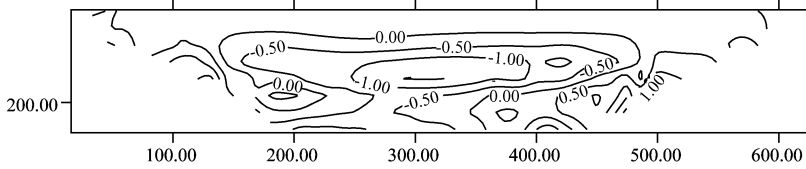


图 11 蓄水期面板坝坡向应力分布(单位:MPa)

板周边缝变形的重要性。

从计算分析上看,以洪家渡混凝土面板堆石坝为例,当采用表 2 所示的计算参数时,如不考虑特殊垫层区(2A 区),面板周边缝的位移分别为:沉降 27.6mm,剪切 11.0mm,张开 25.3mm。考虑特殊垫层区后(2A 区材料特性较普通垫层区提高 20%),面板周边缝的位移分别为:沉降 20.6mm,剪切 7.5mm,张开 12.0mm。

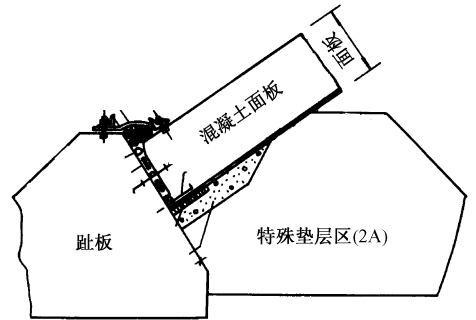


图 12 特殊垫层区示意

## 6 冲碾压实技术在面板堆石坝中的应用

从前面的分析、论述中可以看出,在坝址地形条件、坝高、筑坝材料基本确定的情况下,提高堆石的碾压实度是控制坝体变形、改善混凝土面板坝工作性状的重要手段。目前,在混凝土面板堆石坝的填筑施工中,主要采用的是振动碾压实技术,其碾压堆石的压实度一般在 80%~90% 左右。而在高速公路、机场跑道碾压施工中应用的冲碾压实技术具有压实功能大、施工速度快(约为振动压实的 3~5 倍)、压实效果好等一系列优点,是一项值得在混凝土面板坝堆石碾压施工中采用的新型施工技术<sup>[2]</sup>。

振动碾压是靠碾压机具的高频振动使土体处于运动状态,从而减少堆石颗粒间的阻力,在静重和压力波的共同作用下使堆石体得到压实。冲碾压实则是靠碾压机具的冲击力、振动压力波以及碾子的静重使堆石颗粒紧密压实,其碾压机具的主体为 3~6 等边多边形压实轮。从冲击压实技术与振动碾压技术的比较看:振动碾压为低幅/高频交替运动,其振动频率为 25~30Hz,振幅一般仅为 2mm。其激振力为其自重的 2~3 倍(约 300~500kN)。由于其影响范围相对较小,一般均需通过薄层(层厚一般为 0.4~1.6m)碾压 6~10 遍才能获得较好的压实效果。冲击压实为高幅/低频交替运动,碾压过程中将产生一系列高冲击、高振动的撞击力,其振幅高达 22cm,频率仅为 2Hz。研究表明,这样的大振幅振动将会带动更多的堆石颗粒参与振动,从而达到更大的影响范围。计算表明,冲击压实力会随压实机型号的不同在 2 000~4 000kN 之间变化,其有效压实深度为 1.5~2.5m,压实度可高达 90%~105%。

洪家渡混凝土面板堆石坝是目前国内面板堆石坝填筑施工中首次采用冲碾压实技术的工程,其冲碾碾压施工的范围主要位于坝体次堆石区。从前述的计算结果分析可以看出,对于较高的混凝土面板堆石坝,次堆石区的材料特性和压实标准对于面板的应力和位移均会产生较为明显的影响。为避免因次堆石区过大变形所造成的对面板的不利影响,设计中决定次堆石区采用与主堆石区相同的填筑参数并适当提高干密度标准。但是,当时大坝次堆石区填筑施工的实际情况是:按 1.6m 的铺层厚度振动碾压难于达到次堆石区设计干密度  $2.12g/cm^3$  的要求,为此只能将次堆石区填筑铺层厚度降为 1.2m,若要求次堆石区按主堆石区设计压实度要求,一方面坝体堆石的造价需增加较多,而且填筑层厚需进一步降低至 0.8m,这样将严重影响到填筑施工的工期。而如果在次堆石区施工中采用冲碾压实技术,按 1.6m

层厚,先用振动碾压 8 遍,要求达到干密度  $2.09\text{g}/\text{cm}^3$ ,再经冲击碾碾压后即可使次堆石区填筑密度达到主堆石料干密度  $2.18\text{g}/\text{cm}^3$  的要求,这样既减少了堆石造价,又保证了施工进度。

从洪家渡混凝土面板堆石坝工程实施冲击碾压施工的应用成果看,采用冲碾压实取得了较好的效果。表 7 所示为次堆石在经过 24 遍冲碾压实后的干密度检测结果,从表中可以看出,次堆石区大部分区域的干密度达到和超过了主堆石区的设计干密度指标。从现场检测的级配曲线线上也可以看出,次堆石区材料的颗粒级配基本都在主堆石料的级配包络线内,因此,采用次堆石开挖料经冲碾压实后可以基本满足主堆石料级配要求。

表 7 次堆石冲碾压实干密度检测值

检测时间(日/月)	15/01	23/01	30/01	10/02	12/02	16/02	01/03	11/03
干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.180	2.196	2.154	2.108	2.194	2.182	2.199	2.187

大坝基本竣工后的坝体和面板应力、变形的检测结果也表明,次堆石区的填筑密度提高后,坝体和面板的整体变形较小,面板的应力状态也基本处于合理的范围中。

## 7 结论

从混凝土面板堆石坝的工作特点看,面板和接缝止水是大坝防渗的主体,它们的工作性状与堆石体的变形有着密切的关系。合理的材料分区布置,以及适当的填筑压实标准控制,对于改善面板坝的工作性状、提高大坝的整体安全性将起到至关重要的作用。

面板坝的主要填筑材料——堆石是一种由较为坚硬的颗粒所组成的散粒体材料,经过适当碾压的堆石体,一般都具有较高的密实度和较小的孔隙比,因而具有较低的压缩性。而且,由于堆石材料不存在渗透固结问题,面板坝堆石体的大部分沉降变形在施工期即可完成。因此,坝体填筑施工的碾压控制就成为面板坝变形控制的一个重要问题。从坝体断面分区布置看,一个经济、合理的断面分区布置应使得坝体的材料从上游面到下游面满足变形模量递减和透水能力递增的原则。相应的,坝体堆石的填筑密度也可以从上游到下游逐步减小。但是应该指出的是,这种分区间变形模量和填筑密度的递减主要是考虑经济上的因素,就工程结构特性而言,分区间模量和密度不应相差过大。

资料研究表明:堆石坝的变形与坝高的二次方、材料压缩模量的一次方及河谷形状有关。因此,在坝址、坝高和填筑材料确定的情况下,提高填筑密度是改善坝体和面板应力、变形特性的重要途径。前述的计算分析研究表明,当堆石材料的填筑密度从一个相对较低的数值提高到较高的数值时,坝体和面板的变形有明显的改善,当堆石填筑密度提高到一定程度后,坝体和面板变形的减小趋势逐渐趋缓。

从坝体断面分区布置看,次堆石区的过大变形将会对面板的应力和变形产生一定的影响,对于高混凝土面板堆石坝,这一影响尤其明显。计算分析和工程实践均表明,在坝体的断面分区设计中,变形特性相差很大的堆石填筑分区将有可能导致混凝土面板发生拉伸裂缝。因此,以往的坝轴线下游堆石体材料特性对面板工作性状影响不大的概念不适用于高混凝土面板堆石坝。对于高面板堆石坝,为减少上、下游方向不均匀沉降,主、次堆石区的堆石料特性差异不宜过大,并应尽可能保持变形模量一致。对于高混凝土面板堆石坝,一般不宜采用软岩堆石料填筑次堆石区。当采用软岩堆石料或材料性质相对较弱的堆石作为次堆石区填筑坝料时,应特别注意:(1)不要将软岩料布置在高压应力区,以避免造成次堆石区较大压缩变形;(2)主堆石区与次堆石区的分界应采取相对保守的坡比,其坡度不应陡于 1:0.5;(3)高坝的次堆石区应布置在坝体下游相对较高的位置,其底部至少应保留一定厚度的低压缩性堆石体。同时,次堆石区的顶部也应与坝顶保留一定的距离。

研究表明,对于高面板堆石坝,为了提高次堆石区的压实密度、改进堆石碾压效果并提高施工工效,冲碾压实技术是一项值得尝试的新型施工技术(当然,其应用并不仅限于次堆石区的碾压)。洪家渡工程的实践表明,通过冲碾压实的次堆石区,其填筑干密度达到、甚至超过了主堆石区的压实标准,由此,坝体的整体应力变形性状得到较大的改善。

另外值得关注的是,对于面板周边缝的位移,对周边缝下游侧特殊垫层区(2A区)的处理是一项重要的控制措施之一。这一区域的材料应采用更为细致的级配控制,并通过平板振动碾将其碾压到坚实、致密的程度。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Sergio Giudici, Richard Herweynen, Peter Quinlan. HEC experience in concrete faced rockfill dams, past, present and future[M]. CFRD 2000, Proceedings of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dam, Sept. 18, 2000, Beijing.
- [ 2 ] 杨泽艳,文亚豪,罗光其,等. 面板堆石坝采用冲碾压实技术的研究和探讨[J]. 贵州水力发电,2003,17(1): 45 - 47.

### Summarization on studies of impacts of rockfill compaction and zoning on stress and deformation of CFRD

XU Ze-ping

(Dept. of Geotechnical Engineering, IWHR, Beijing 100048, China)

**Abstract** When designing a CFRD, the deformation of rockfill is the most important factor. The determination of rockfill compaction and section zoning is the key measure for deformation control of CFRD. For rockfill compaction, when the compaction density of rockfill increases, the deformation and stress of rockfill and concrete face slabs will be improved significantly. By means of well arrangement in rockfill zoning, the deformation of downstream rockfill would bring about certain impacts on the stress of face slabs, and the higher is the dam, the more is the impact. Rockfill zones with big difference of deformation properties would lead to occurrence of structure cracks in face slabs. Based on summarizing the related studies and numerical simulations, it can be concluded that the enhancement of standard of rockfill compaction and improvement of section zoning can greatly improve the stress and deformation properties of CFRD and thus to increase the overall safety level of the dam.

**Key words:** rockfill compaction; rockfill zoning; stress and deformation; CFRD

(责任编辑:李琳)