

软岩填筑高面板堆石坝分区及材料设计

赵大洲¹,赵宇瑶²,王新奇¹

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003;
2. 华中科技大学土木与水利工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:通过分析软岩不同利用方案及分区形式对高面板堆石坝力学性状的影响,获取了坝体应力和变形的变化规律。高面板堆石坝下游次堆石区中软岩含量及堆石区几何特征、主堆石体分区形式均影响面板堆石坝的力学性状。提高坝体下游堆石区的强度及刚度,可以提高各堆石区之间的协调变形能力、降低面板变形及应力。提高位于坝轴线处的堆石体承载力,可以有效降低坝体变形及面板应力。为控制高面板堆石坝的坝体变形及应力,坝轴线处坝体下部堆石区宜填筑承载力高的堆石体,下游堆石区中软岩比例不宜超过30%。

关键词:混凝土面板堆石坝;软岩;材料分区;应力;变形

中图分类号:TV641 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0073-06

Design of dam zoning and construction materials for a high concrete-faced rock-fill dam with soft rock//ZHAO Dazhou¹, ZHAO Yuyao², WANG Xinqi¹(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By analyzing the effects of different utilization schemes of soft rock and dam zoning forms on the mechanical properties of a high concrete-faced rock-fill dam (CFRD), the characteristics about the stress and deformation of the dam were obtained. The proportion of soft rock in the downstream rock-fill zone, the geometric characteristics of the downstream rock-fill zone and the zoning form of the main rock-fill body can affect the mechanical properties of the high CFRD. With the increase of strength and stiffness of the secondary rock-fill zone in the downstream dam body, the deformation coordination between the primary rock-fill zone and the secondary rock-fill zone becomes better, and the deformation and stress of the concrete face slab are reduced. The dam deformation and face slab stress can be effectively reduced by improving the bearing capacity of the rock-fill body located at the dam axis. To control the deformation and stress of the high CFRD, the rock-fill zone at the lower part of dam body near the dam axis should be filled with the rocks of high bearing capacity, and the proportion of soft rock in the downstream rock-fill zone should not exceed 30%.

Key words: CFRD; soft rock; material zoning; stress; deformation

利用软岩构筑面板堆石坝,既节省投资,又利于环境保护。国外于20世纪60年代开始利用软岩构筑面板堆石坝,如1967年建成的美国卡宾溪坝(坝高76m)。国内在这方面起步较晚,在20世纪90年代以后,结合大壩、天生桥一级、盘石头、董箐等面板坝工程的建设^[1-3],对软岩的力学特性及软岩料筑坝技术开展了较为系统的研究^[4-5]。国内已建利用软岩构筑的面板堆石坝中,坝高150m以上的有天生桥一级坝(坝高178m)和董箐坝(坝高150m)两座。工程实践及研究结果表明,软岩特殊的工程力学特性对面板堆石坝,特别是对高面板堆石坝的力学性状影响较大^[6-8],对此认识不足极易导致以面板为主

的防渗结构受到破坏。王占军等^[9]通过分析软岩料的级配、强度变形、渗透、流变等工程力学特性,提出利用软岩料构筑面板堆石坝时应注意的问题。郇能惠等^[10-11]总结了墨西哥Aguamilpa坝、马来西亚Bakun坝以及国内的天生桥坝等几座利用软岩构筑的高面板堆石坝的成功经验与教训,认为高混凝土面板堆石坝除了满足土石坝通常要求的抗滑稳定安全和渗流稳定安全外,还必须满足变形安全的要求,其中堆石坝体各区的变形协调、堆石坝体变形与面板变形的同步协调是变形安全的核心。

坝体分区及材料设计是面板堆石坝设计的重要内容之一,坝体形状、分区形式及各分区填筑材料特

性等都会对坝体各区的变形协调、坝体稳定产生影响^[12-15]。已有工程经验表明,当坝高超过 150 m 后,坝体变形将成为面板堆石坝安全的主要制约因素之一^[16],坝体分区及材料设计对于利用软岩填筑的高面板堆石坝的变形控制至关重要。目前,国内外已建利用软岩构筑的坝高 150 m 以上的面板堆石坝还不多,取得的工程建设经验有限^[10,17]。对于此类高面板堆石坝,在软岩料利用方式、设计方法等方面仍有待深入研究。本文通过对软岩填筑的高面板堆石坝分区及材料设计研究,旨在获取不同比例软岩用量及分区形式对坝体应力及变形的影响规律,探讨利用软岩填筑高面板堆石坝合理的分区形式及材料组成,以期为高面板堆石坝的建设提供参考。

1 研究方案

本文以某坝高为 192.0 m 的面板堆石坝为例开展研究。该坝上游坝坡 1 : 1.4,坝体材料分区自上游至下游依次为石渣盖重和粉土铺盖、混凝土面板、垫层区(2B 区)、过渡层区(3A 区)、上游主堆石区(3B- I 区及 3B- II 区)、下游次堆石区(3C 区)、排水区(3D 区)、块石护坡等,主堆、下游堆石区在靠近坝轴线 162.0 m 坝高处以 1 : 0.25 的坡比衔接。大坝施工过程如图 1 所示,坝体材料分 6 期填筑,面板分 3 期分别于二期、四期、六期坝体材料填筑完成后浇筑,一期面板施工完成后蓄水至 103.0 m 高程,二期面板施工完成后蓄水至 170.0 m 高程,工程竣工后蓄水至正常蓄水位 220.0 m 高程。

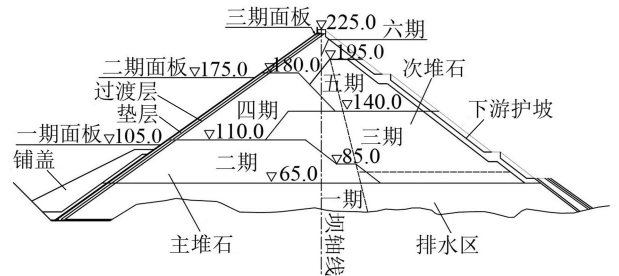


图 1 坝体填筑过程示意图(单位:m)

该混凝土面板堆石坝设计采用微风化-新鲜砂岩、中等风化砂岩以及微风化-新鲜页岩填筑,其中页岩表现出明显的各向异性,微风化-新鲜页岩饱和单轴抗压强度为 8.6 ~ 19.24 MPa,属较软岩~软岩。

本文重点研究坝体分区形式、次堆石区材料组合以及下游坝体坡比等变化对高面板堆石坝力学性状的影响。其中,研究的坝体分区形式包括 3 种(图 2):①形式 1,坝体主堆石区,仅包括 3B- I 区;②形式 2,坝体主堆石区分为 3B- I 区和 3B- II 区,3B- II 区位于坝轴线处坝体中下部;③形式 3,坝体主堆石区分为 3B- I 区和 3B- II 区,3B- II 区位于坝

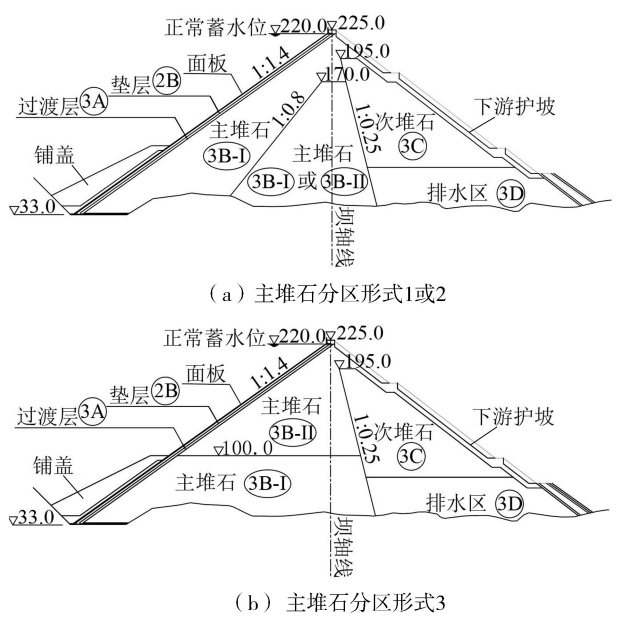


图 2 坝体材料分区(单位:m)

体中上部,且形式 3 与形式 2 中 3B- II 区堆石料体积相等。对于下游堆石材料,研究了 2 组软岩、硬岩组合形式:①组合 1,堆石料中微风化-新鲜砂岩、中等风化砂岩、微风化-新鲜页岩体积分别占组合料体积的 35%、35% 和 30%;②组合 2,堆石料中微风化-新鲜砂岩、中等风化砂岩、微风化-新鲜页岩体积分别占组合料体积的 25%、25% 和 50%。下游马道间坝坡坡比包括 1 : 1.3 和 1 : 1.5。

通过对上述变化因素的组合,形成 9 组方案,各方案主要特征指标见表 1。

表 1 研究方案特征指标

方案编号	主堆石区形式	次堆石 3C 区材料	下游坡比
1	形式 1(无 3B- II 区)	组合 1	1 : 1.3
2	形式 1(无 3B- II 区)	组合 2	1 : 1.3
3	形式 1(无 3B- II 区)	组合 2	1 : 1.5
4	形式 2(3B- II 区在中下部)	组合 1	1 : 1.3
5	形式 2(3B- II 区在中下部)	组合 2	1 : 1.3
6	形式 2(3B- II 区在中下部)	组合 2	1 : 1.5
7	形式 3(3B- II 区在中上部)	组合 1	1 : 1.3
8	形式 3(3B- II 区在中上部)	组合 2	1 : 1.3
9	形式 3(3B- II 区在中上部)	组合 2	1 : 1.5

2 研究方法

2.1 数值模型

选取典型断面,通过建立数值模型,计算分析各方案坝体力学性状,模型中坝体堆石采用实体单元、Duncan E-B 非线性弹性模型模拟,混凝土结构采用线弹性模型模拟。考虑混凝土与堆石体存在明显的材料刚度变化以及防渗体中存在连接缝,在混凝土面板与坝体堆石之间、趾板与垫层之间、面板间以及面板与趾板间均设置了接触面单元以反映各材料间

的接触特性。

模型网格如图 3 所示,共 1081 个单元、1588 个节点,在模型侧向、底部施加法向约束。计算时,通

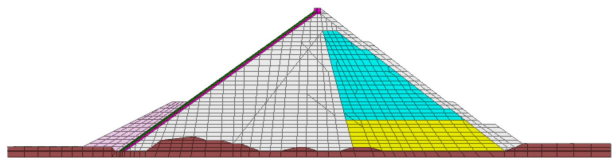


图 3 计算模型网格

表 2 坝体各分区材料及模型参数

坝体分区	堆石料岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\varphi_0/$ ($^\circ$)	$\Delta\varphi/$ ($^\circ$)	K	n	R_f	K_b	m
垫层区 2B	微风化-新鲜砂岩	2220	51.6	8.7	1075	0.34	0.64	770	0.23
过渡层区 3A	微风化-新鲜砂岩	2190	52.9	10.0	1230	0.30	0.66	725	0.09
主堆石 3B-I 区	微风化-新鲜砂岩 95%、 微风化-新鲜页岩 5%	2140	51.9	9.9	970	0.30	0.66	550	0.14
主堆石 3B-II 区	微风化-新鲜砂岩 45%、中等风化砂岩 45%、 微风化-新鲜页岩 10%	2050	49.8	8.8	765	0.31	0.66	330	0.24
下游次堆石 3C 区(组合 1)	微风化-新鲜砂岩 35%、中等风化砂岩 35%、 微风化-新鲜页岩 30%	2110	48.0	8.0	680	0.30	0.66	285	0.26
下游次堆石 3C 区(组合 2)	微风化-新鲜砂岩 25%、中等风化砂岩 25%、 微风化-新鲜页岩 50%	2130	47.0	7.6	580	0.30	0.66	215	0.28
排水区 3D	微风化-新鲜砂岩	2140	51.4	9.6	1040	0.29	0.63	595	0.19

注: φ_0 为一个大气压下的摩擦角; $\Delta\varphi$ 为围压增加 10 倍时摩擦角的减小量; R_f 为破坏比; K 、 n 、 K_b 、 m 为材料试验常数。

表 3 接触面参数

坝体部位	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	R'_f	k_1	n'
面板与挤压边墙	31.5	1.5	0.84	20000	1.15
趾板与垫层	41.0	0.0	1.00	140000	1.20

注: φ 为接触面摩擦角; c 为接触面黏聚力; R'_f 、 k_1 、 n' 为模型参数,由接触面试验获取。

3 结果与分析

3.1 计算结果

3.1.1 坝体变形

计算所得各方案运行期面板坝应力及变形极值列于表 4,各方案坝体最大沉降位于 2/5~3/5 坝高处。计算结果中,竖直位移取向下为正,水平位移取向下游为正,面板应力取压应力为正。

表 4 运行期面板坝变形及应力极值

方案 编号	堆石体		面板		
	沉降量/m	水平 位移/m	挠度/m	顺坡压 应力/MPa	顺坡拉 应力/MPa
1	1.70	0.73	0.73	9.05	-2.10
2	2.03	0.84	0.77	6.82	-3.13
3	2.07	0.78	0.73	8.62	-2.36
4	2.03	0.83	0.83	10.66	-3.23
5	2.23	0.94	0.87	9.01	-4.49
6	2.26	0.91	0.84	10.31	-3.65
7	1.79	0.79	0.84	10.87	-2.26
8	2.08	0.88	0.88	8.81	-3.31
9	2.11	0.82	0.84	11.23	-2.61

由表 4 可知,坝体材料分区形式相同情况下,随着下游坡比的增大,坝体的水平位移减小、沉降量略

过逐次激活坝体各单元模拟坝体施工过程,并根据蓄水安排,在面板表面施加水压力。

2.2 计算参数

根据试验结果确定的该面板堆石坝各分区材料 Duncan E-B 模型参数见表 2。面板及趾板混凝土强度等级均为 C30。

采用 Clough-Duncan 模型^[18]模拟面板与挤压边墙间、趾板与垫层间的剪切特性,模型参数见表 3。

有增加;下游次堆石体相同情况下,无主堆石 3B-II 区时坝体变形最小,3B-II 区位于坝体中下部时坝体变形最大。图 4 给出了最大沉降高程处沿河流方向坝体沉降变化情况。由图可见,方案 4 和方案 7 坝体最大沉降位于大坝轴线附近主堆石 3B-II 区内,其他各方案坝体最大沉降均位于下游堆石 3C 区内,且主、次堆石料模量比越大,坝体最大沉降位置越靠近下游。增加下游堆石 3C 区中的软岩含量,坝体沉降变形随之增大,此时减小下游坝体坡比尽管可以增加坝体的稳定性,降低坝体顺河流方向的变形,但不能降低堆石体的沉降变形。与主堆石 3B-II 区设置于坝体中下部的方案相比,3B-II 区设置于坝体中上部的方案,在不降低软岩料利用量的同时可有效控制坝体变形。对比 3 种 3B-II 区布置方案可知,降低坝体中部特别是坝轴线处坝体下部堆石料中软岩等强度较低岩石的比例将有效降低坝体沉降及水平变形量。

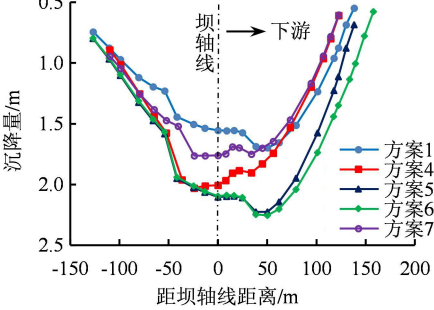


图 4 不同方案最大沉降高程处坝体沉降对比

图5给出了最大沉降高程处坝体变形梯度沿河流方向的变化情况。由图5可知,下游次堆石体相同情况下,主堆石3B-II区位于坝体中上部时,坝体变形梯度变化相对较小,3B-II区位于坝体中下部时,坝体变形梯度变化相对较大。坝体变形梯度变化随下游3C区中软岩含量增加而增大。表明将主堆石3B-II区设置于坝体中上部,或降低下游次堆石3C区软岩含量,均有利于提高坝体各区协调变形能力。

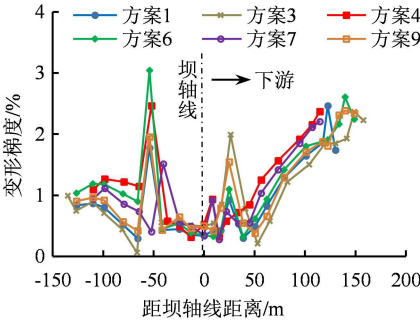


图5 不同方案最大沉降高程处坝体变形梯度对比

根据各方案坝体堆石体变形结果,为控制坝体沉降、提高各堆石区间协调变形能力,次堆石3C区宜采用堆石中软岩含量较低方案。坝体中下部特别是坝轴线处坝体下部不宜采用强度较低的堆石料。

3.1.2 面板变形与应力

由表4可知,下游次堆石体相同情况下,无主堆石3B-II区时面板挠度及拉应力最小,3B-II区位于坝体中下部时面板拉应力最大,主堆石3B-II区位于坝体中上部与无3B-II区两方案面板顺坡拉应力相近。主堆石3B-II区相同情况下,面板顺坡拉应力随下游堆石料中软岩含量增加而增大,随着下游坡比的降低而减小。

各方案面板挠度随高程变化情况见图6。由图可见,各方案最大挠度位于二期面板顶部或略低于二期面板顶部处,表明面板变形与大坝施工及蓄水过程密切相关。下游次堆石体相同情况下,3B-II区位于坝体中下部与位于坝体中上部时二者面板挠度变形相近,与无3B-II区方案对比可知,提高3B-II

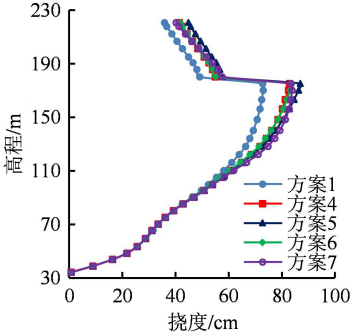


图6 不同方案面板挠度对比

区堆石中高强度岩石比例可降低面板变形。主堆石3B-II区相同情况下,面板挠度将随下游堆石3C区中软岩占比的提高而增大,减缓大坝下游坡度可以降低面板挠曲变形。

根据各方案面板应力及变形计算结果,增加次堆石3C区堆石中软岩比例至50%将导致面板拉应力的增大,需要同时放缓下游坡度、增大坝体的水平刚度,才能使面板的拉应力与坡比为1:1.3、软岩占比30%的方案相近。为控制面板变形、降低面板顺坡向拉应力,同时提高软岩利用量,宜将强度相对低的主堆石3B-II区布置于坝体中上部。二期面板浇筑及蓄水高程对面板的变形及应力影响较大,除目前采取的调整坝体分区形式及材料特性措施外,还宜通过优化施工填筑方案或调整蓄水方案来改善面板的力学性状。

3.2 坝体分区及材料设计中的软岩利用问题

利用软岩构筑面板堆石坝可以减少工程弃渣量,节省工程投资,降低工程对生态环境的影响,在国内外均有成功先例,表5列出了部分坝高100m以上利用软岩构筑的已建面板堆石坝工程,其中马来西亚Bakun面板堆石坝坝高达203.5m^[19]。这些已建高坝上游坝坡多采用1:1.4坡比,下游坡比为1:1.25~1:1.6,软岩料多填筑于下游堆石区,实测的坝体沉降率(沉降量占坝高的百分比)为0.68%~1.99%。本文9组方案计算所得坝体沉降率为0.89%~1.16%,与已建工程相近。表5中几座采用软岩、硬岩掺用填筑的面板坝,软岩含量在10%~40%。

表5中所列坝高180m左右的墨西哥Aguamilpa面板坝和国内的天生桥面板坝均为20世纪90年代建造,因在软岩特性、坝体材料分区、填筑标准及顺序等因素对高面板堆石坝力学性状影响方面认识的不足,导致蓄水后面板出现严重开裂^[10,20-21]。工程经验及计算分析研究成果表明,坝体变形是坝高超过150m的面板堆石坝安全的主要制约因素之一。本文计算结果显示,次堆石区材料力学性能的变化将影响面板的变形及应力,表明对于高面板堆石坝,蓄水后下游堆石体将参与承担面板传递来的水荷载,提高坝体下游堆石体的强度及刚度,无疑将对控制面板变形及应力、保证防渗体安全有益。软岩料具有强度低、流变特性明显等特征,用于高面板堆石坝将导致坝体施工期变形增加、竣工后持续产生后期变形,对坝体和防渗系统应力及变形特性将产生不利的影响。朱晟^[22]认为对于高面板堆石坝,蓄水后下游堆石体将参与承担由面板传递来的水荷载,宜慎设软岩堆石区。杨启贵等^[23]

表 5 已建利用软岩构筑的坝高 100 m 以上面板堆石坝工程

坝名	国家	坝高/m	大坝坡比		软岩岩性	至运行初期实测坝体沉降		软岩所在区域
			上游	下游		沉降量/cm	沉降率/%	
天生桥一级	中国	178	1 : 1.4	1 : 1.25	砂泥岩、灰泥岩	354	1.99	下游次堆石区
鱼跳	中国	106	1 : 1.4	1 : 1.4	泥质粉砂岩、泥岩(软硬掺用)			下游次堆石区
盘石头	中国	102.2	1 : 1.4	1 : 1.35	风化页岩	105	1.03	下游次堆石区
卡基娃	中国	171	1 : 1.4	1 : 1.4 ~ 1 : 1.5	板岩(与砂岩软硬掺用,板岩占比≤30%,且其中千枚化板岩占比≤50%)	117	0.68	下游次堆石区
金家坝	中国	101.3	1 : 1.4	1 : 1.4	粉砂质页岩、泥质粉砂岩	>70.4	0.70	下游次堆石区
Salvajina	哥伦比亚	148	1 : 1.5	1 : 1.3 ~ 1 : 1.4	半风化砂岩、粉砂岩			下游次堆石区
Agumilpa	墨西哥	186	1 : 1.5	1 : 1.4	风化熔结凝灰岩	>170	>0.91	下游次堆石区
Bakun	马来西亚	203.5	1 : 1.4	1 : 1.3	页岩(软硬掺用,页岩占10%~30%)	259.6	1.28	下游次堆石区
董箐	中国	150	1 : 1.4	1 : 1.4	砂泥岩(软硬掺用,泥岩占30%)	186	1.24	坝主体
茄子山	中国	106.1	1 : 1.4	1 : 1.4 ~ 1 : 1.6	强风化花岗岩(软硬掺用,主、次堆石区中软岩占比分别为20%、40%)			坝主体
Cirata	印度尼西亚	125	1 : 1.5	1 : 1.5	凝灰角砾岩、灿砾凝灰岩			坝主体

对高面板堆石坝变形控制方法研究后认为,主次堆石区分界限宜倾向坝轴线下游,主次堆石材料的变形模量不宜相差过大。基于本文计算分析结果以及已建工程实践与研究成果,对于高面板堆石坝,特别是坝高超过 150 m 时,次堆石区中软岩比例不宜超过 30%。

坝体主堆石区中设置强度及变形模量略低的主堆石 3B-Ⅱ区,降低了主、次堆石变形模量的差异,对降低工程投资、提高主堆石区与次堆石区的协调变形有利,但将增大坝体整体的变形。本文计算结果显示,与 3B-Ⅱ区布置于坝体中下部方案相比,3B-Ⅱ区布置于坝体中上部将有益于控制坝体变形及面板应力,这种布置方式与表 5 中所列马来西亚 Bakun 面板堆石坝相近。在大坝轴线处,堆石体自重压力通常最大,因此在该处特别是其下部填筑强度及变形模量高的堆石体,将有效控制坝体变形,特别是沉降变形,基于此,坝体轴线下部区域应慎填强度较低的堆石料。

4 结 语

对高面板堆石坝软岩含量及分区形式分析显示:增加下游堆石区中的软岩含量,坝体及面板变形随之增大,面板拉应力亦随之增大;减缓下游坝坡可降低坝体顺河流方向变形、面板的变形及拉应力,但不能降低堆石体的沉降变形;为控制坝体变形、提高各堆石区间协调变形能力,高面板堆石坝下游堆石区中软岩所占比例不宜超过 30%,坝体轴线下部区域应慎填强度较低的堆石料。

采用典型断面进行计算分析难以全面研究坝体分区与软岩料利用对面板堆石坝安全性状的影响,即难以全面研究坝体分区及软岩料填筑坝体与面板变形同步协调、特别是对于面板的坝轴向变形和应力

性状的影响,因此对此类高面板堆石坝工程应力变形特性还应通过三维力学模型分析做进一步研究。

参考文献:

[1] 孔青. 盘石头水库混凝土面板堆石坝次堆石区坝料设计[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(1):50-54. (KONG Qing. Selection of materials for 3C zone of the Panshitou concrete faced rockfill dam [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2005,3(1):50-54. (in Chinese))

[2] 王东生,王芳. 大坳面板堆石坝坝体沉陷及水平位移观测资料分析[J]. 贵州水力发电,2008,22(1):76-79. (WANG Dongsheng, WANG Fang. Analysis on observation data of body settlement and horizontal displacement of Da' ao face rockfill dam [J]. Guizhou Water Power,2008,22(1):76-79. (in Chinese))

[3] 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. (ZHAN Zhenggang, SHI Pengfei, XIA Zunquan. 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. (in Chinese))

[4] 付军,周小文. 面板坝软岩料的工程特性[J]. 长江科学院院报,2008,25(4):67-72. (FU Jun,ZHOU Xiaowen. Engineering properties of soft rock materials used in concrete face dams[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2008,25(4):67-72. (in Chinese))

[5] 蒋涛,付军,周小文. 软岩筑面板堆石坝技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[6] 许仲生. 天生桥一级水电站面板坝坝体变形特征[J]. 水力发电,2000(3):18-21. (XU Zhongsheng. The deformation features of the dam body of concrete facing rockfill dam of Tianshengqiao First-cascade Hydropower Station[J]. Water Power,2000(3):18-21. (in Chinese))

- [7] 曾程,沈贵华,王秋杰,等.利用各向异性软岩筑高混凝土面板堆石坝关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):2655-2661. (ZENG Zeng, SHEN Guihua, WANG Qiujie, et al. Study of key technologies of using anisotropic soft rock to build high concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 2655-2661. (in Chinese))
- [8] 贾飞,王瑞骏,贾伟,等.软岩料填筑面板堆石坝的流变和湿化效应研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):212-219. (JIA Fei, WANG Ruijun, JIA Wei, et al. Study on rheological and humidification effect of rockfill dam filled with soft rock[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3): 212-219. (in Chinese))
- [9] 王占军,陈生水,傅中志.利用软岩构筑面板堆石坝应重视的几个问题[J].水利水电科技进展,2014,34(4):66-69. (WANG Zhanjun, CHEN Shengshui, FU Zhongzhi. Some important aspects of construction of concrete-faced rock-fill dam with soft rocks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 66-69. (in Chinese))
- [10] 郇能惠.高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J].岩土工程学报,2007,29(8):1143-1150. (LI Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1143-1150. (in Chinese))
- [11] 郇能惠,王君利,米占宽,等.高混凝土面板堆石坝变形安全内涵及其工程应用[J].岩土工程学报,2012,34(2):193-201. (LI Nenghui, WANG Junli, MI Zhankuan, et al. Connotation of deformation safety of high concrete face rockfill dams and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 193-201. (in Chinese))
- [12] 刘倬昀,辛全才,张帆.土石坝坝料分区优化研究[J].水力发电,2014,40(12):35-37. (LIU Zhuoyun, XIN Quancai, ZHANG Fan. Research on optimization of dam material zoning of embankment dam[J]. Water Power, 2014, 40(12): 35-37. (in Chinese))
- [13] 朱安龙,张胤,廖洁,等.大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J].水利水电科技进展,2020,40(1):48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 48-55. (in Chinese))
- [14] 王樱峻,赵琳,雷显阳.某抽水蓄能电站高面板堆石坝坝体分区优化[J].水利水电科技进展,2021,41(5):47-52. (WANG Yingjun, ZHAO Lin, LEI Xianyang. Dam zoning optimization for a high concrete face rockfill dam of a pumped storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 47-52. (in Chinese))
- [15] 王建军,李卓,方艺翔,等.狭窄河谷高面板堆石坝变形控制与结构安全[J].水利水电科技进展,2022,42(4):67-73. (WANG Jianjun, LI Zhuo, FANG Yixiang, et al. Deformation control and structure safety of high concrete faced rockfill dams in a narrow valley[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 67-73. (in Chinese))
- [16] 杨泽艳,蒋国澄.洪家渡200m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 Zeyan, JIANG Guocheng. 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))
- [17] 曹克明,徐建军.超高面板堆石坝设计原则探讨[J].水力发电,2012,38(1):22-26. (CAO Keming, XU Jianjun. Design principles of very-high concrete face rockfill dam[J]. Water Power, 2012, 38(1): 22-26. (in Chinese))
- [18] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(12): 1657-1673.
- [19] 王君利,范建朋.马来西亚巴贡水电站面板堆石坝设计综述[J].西北水电,2010,29(6):15-19. (WANG Junli, FAN Jianpeng. Design overview of Bakun CFRD[J]. Northwest Hydropower, 2010, 29(6): 15-19. (in Chinese))
- [20] 冯业林,张宗亮.天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝[M]//中国当代土石坝工程.北京:中国水利水电出版社,2004:154-168.
- [21] MACEDO G G, CASTRO J A, MONTANEZ L C. Behavior of Aguamilpa Dam [C]//The 20th ICOLD Congress and Beijing 2000 Symposium on Concrete Face Rockfill Dams. Beijing, 2000.
- [22] 朱晟.水布垭面板堆石坝施工与运行性状反演研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊2):3689-3695. (ZHU Sheng. Back analysis on construction and operation properties of Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup2): 3689-3695. (in Chinese))
- [23] 杨启贵,常晓林,周创兵,等.水布垭超高面板堆石坝变形控制方法研究[J].岩土力学,2010,31(增刊2):247-253. (YANG Qigui, CHANG Xiaolin, ZHOU Chuangbing, et al. Study of dam deformation control method for Shuibuya high concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup2): 247-253. (in Chinese))

(收稿日期:2021-11-12 编辑:俞云利)