

# 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

朱安龙<sup>1,2</sup>, 张胤<sup>3</sup>, 廖洁<sup>4</sup>, 张萍<sup>1</sup>, 徐小东<sup>1</sup>, 刘斯宏<sup>3</sup>, 姜忠见<sup>1,2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 国家能源水电工程技术研发中心抽水蓄能工程分中心, 浙江 杭州 311122;

3. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210006; 4. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为深入探索折线型高面板堆石坝的变形机理,针对某拟建水库大坝,采用有限元数值模型模拟了3个坝轴线布置方案的堆石体应力与应变、面板应力与变形及结构缝变形,分析了上述变化规律与坝轴线折角之间的非线性关系,初步探讨了大角度折线型面板堆石坝的坝体变形机理。结果表明,坝轴线转折点周边面板出现的拉应力会随着折角的增大而产生不同程度的增强;坝轴线转折处的地形条件及坝体对称性对坝体受力变形影响较大;结合地形地质条件,合理选择转折点和折角大小是折线型面板堆石坝设计的关键。

**关键词:**混凝土面板堆石坝;坝轴线;折线型;折角;应力;变形;有限单元法

中图分类号:TV641.4<sup>+</sup>3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)01-0048-08

**Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line**//ZHU Anlong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yin<sup>3</sup>, LIAO Jie<sup>4</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>, XU Xiaodong<sup>1</sup>, LIU Sihong<sup>3</sup>, JIANG Zhongjian<sup>1,2</sup>(1. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China; 2. Pumped Storage Engineering Branch of National Energy and Hydropower Engineering Technology Research and Development Center, Hangzhou 311122, China; 3. Nanjing Water Planning and Designing Institute, Co., Ltd., Nanjing 210006, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to further explore the deformation mechanism of high concrete face rock-fill dams with a broken line axis, a finite element numerical model was used to simulate the rockfill body stress and strain, the face slab stress and deformation as well as the structural joint deformation for a proposed reservoir dam with 3 dam axis layout plans. The nonlinear relationship between the above change rules and the dam axis angles was analyzed, and the deformation mechanism of the concrete face rockfill dam with large angle broken line axis was discussed. The results show that the tensile stress of the face slab around the turning point of the dam axis increases with the broken line angle. The topographic conditions and the symmetry of dam body at the turning point of dam axis have great influence on the stress and deformation of the dam body. Reasonable selection of the turning point and turning angle according to topographic and geological conditions is the key to design concrete face rockfill dams with broken line axis.

**Key words:** concrete face rockfill dam; dam axis; broken line; broken line angle; stress; deformation; finite element method

混凝土面板堆石坝作为重要的坝型之一,凭借其在地形地质条件方面优越的适应能力和在投资控制方面的经济优势,在我国水利水电行业得到了广泛应用<sup>[1]</sup>,尤其是随着西部大型水电工程、大型水利基础设施的建设,近年来在狭窄河谷<sup>[2-3]</sup>、深厚覆盖层<sup>[4-5]</sup>等复杂地形地质条件下面板堆石坝以及超高面板堆石坝<sup>[6-9]</sup>的建设和筑坝技术研究方面取得了较大的进展。在坝轴线布置方面,虽然还是以传统的直线型布置为原则,但近年来也出现了一些折线布置的混凝土

面板堆石坝,例如琅琊山抽水蓄能电站上水库大坝因为坝基地形条件及为满足电站运行对库容的要求采用了折线布置,王二河水库大坝建设过程中为了避开右岸断层和强溶蚀风化破碎带将右岸坝轴线向上游偏转了23.186°<sup>[10]</sup>,巴山水电站大坝为了避开左岸覆盖层的影响将左岸坝轴线向上游偏转了35°<sup>[11]</sup>。从近年国内抽水蓄能工程中所采用的坝型来看,折角相对较小、坝高规模不大的折线型混凝土面板堆石坝应用有所增多,除了已建成的琅琊山抽水蓄能电站,正

在建设的长龙山、沂蒙、衢江抽水蓄能电站以及正在开展前期研究的泰安二期抽水蓄能电站均采用(推荐采用)折线型面板堆石坝。相比常规水电站的水库,抽水蓄能电站的上下库坝址、坝线的选择余地一般较小,尤其是布置在沟源盆地的上水库,因此坝轴线的布置更易受到垭口(或冲沟)地形条件限制,折线型的布置方案对于充分利用地形条件和优化整体布置具有明显的优势。此外,抽水蓄能电站水库对库容要求相对较低(总库容一般在1000万 $m^3$ 左右),折点凸向下游的布置可以有效增大天然库容,降低工程投资,如衢江抽水蓄能电站上水库坝轴线转折布置相比直线布置坝高降低约10m,可节省投资近1亿元,经济效益非常显著<sup>[12]</sup>。因此折线型混凝土面板堆石坝除了在特殊地形地质条件下应用外,在抽水蓄能电站中具有推广价值。

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司结合巴山水电站折线型面板堆石坝对转折部位的连接结构进行了深入研究,提出了连接板结构形式<sup>[13]</sup>;李瑞青<sup>[14]</sup>对折角大小的影响进行了较为系统的研究,总结了坝体、面板变形与折角大小的相互关系;郦能惠等<sup>[15]</sup>从降低面板堆石坝两岸面板拉应力的角度出发,对折线型面板堆石坝进行了研究。但国内对于折线型面板堆石坝的研究总体偏少,缺乏对轴线转折布置后坝体和面板应力、变形机理层面的研究成果。本文采用有限元计算软件建立三维数值模型,通过某拟建电站水库大坝3种不同的坝轴线布置方案对大角度、折线型高面板堆石坝转折部位位置及角度影响进行系统分析,以期为该类型面板堆石坝的建设提供参考。

## 1 工程概况

某拟建电站装机容量为1200MW,总库容为1077万 $m^3$ ,为一等大(I)型工程。水库坝址区沟谷呈“V”形,两岸坡度 $15^\circ \sim 45^\circ$ ,谷底宽20~45m,沟底高程570~584m,正常蓄水位处河谷宽约390m。左岸山体单薄,山顶高程742m左右,在左坝头下游分布一长约400m、高程660m左右的单薄山脊;右岸山体较宽厚,山顶高程726m左右。坝址区弱风化基岩裸露,岩性为凝灰岩。

大坝采用混凝土面板堆石坝,上游坝坡坡比1:1.4,下游坝坡坡比1:1.3。坝体自上游向下游分成垫层区、过渡区、上游堆石区和下游堆石区,依据趾板建基面计算的最大坝高为116.5m。填筑材料为质量良好的凝灰岩,弱风化岩的饱和单轴抗压强度达到50MPa以上。拟定3条坝轴线布置方案进行对比分析,重点研究折角布置对大坝整体运行

性能的影响。

## 2 数值模型

### 2.1 坝轴线布置方案

结合坝址处的地形地质条件,坝轴线转折部位逐渐由左岸岸坡向河谷方向靠近,拟定3条坝轴线布置方案进行建模计算,其中方案1坝轴线和趾板转折部位均位于岸坡,其他两个方案坝轴线转折部位位于岸坡,趾板转折部位位于河谷。各方案基本参数见表1,相应坝轴线平面布置见图1。

表1 坝轴线布置参数

方案	折角/ ( $^\circ$ )	转折部位坝高/m		坝轴线长/m	
		轴线处	趾板处	左侧	右侧
方案1	30	90	99.5	194.0	389.0
方案2	45	76	116.5	267.5	304.5
方案3	60	91	116.5	311.5	242.5

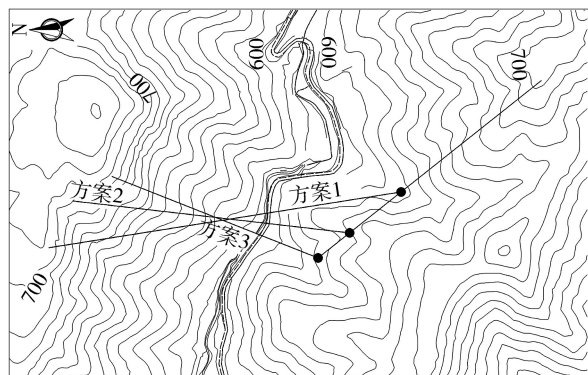


图1 各方案坝轴线平面布置(单位:m)

对3个布置方案建立三维数值模型进行面板的应力应变以及坝体整体稳定性分析。模型上下游边界超出坝体填筑边界,基础底边界截取至弱风化层下限,以消除边界对计算成果的影响,地基部分采用线弹性模型。计算模型网格如图2所示。

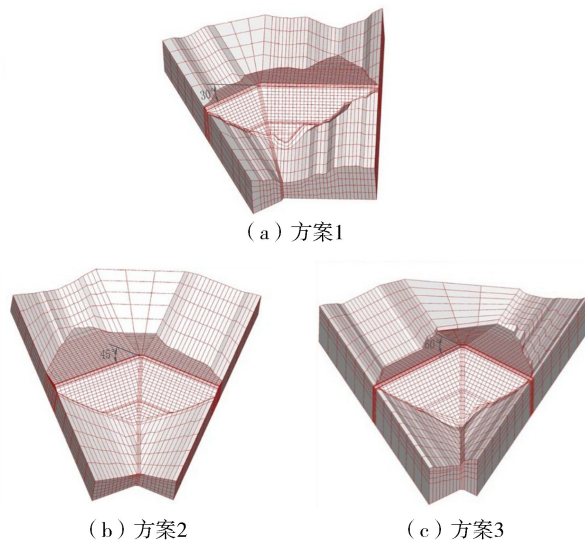


图2 各方案三维计算模型网格示意图

## 2.2 计算方法及参数

坝体材料采用 Duncan E-B 非线性弹性模型模拟,面板混凝土与垫层料采用无厚度 Goodman 接触面单元模拟,混凝土面板周边缝与垂直缝接缝材料采用缝单元模拟<sup>[16-19]</sup>。坝体填筑材料的 Duncan E-B 模型参数采用该工程坝料三轴试验成果(表 2)。面板、趾板、防浪墙的混凝土材料采用弹性模型模拟,物理及力学参数根据设计指标按规范取值,面板与垫层料间接接触面模型的计算参数参照天生桥一级面板坝接触面试验结果确定为: $K=4\ 800$ , $n=0.56$ ,破坏比  $R_f=0.74$ ,接触面摩擦角  $\delta=36.6^\circ$ 。坝基基岩为弱风化上部岩体,根据物理力学试验结果取用,具体参数为:密度  $\rho=2.45\text{ g/cm}^3$ ,弹性模量  $E=15\text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu=0.2$ ,饱和单轴抗压强度  $R_c=50\text{ MPa}$ 。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 坝体应力与变形分析

#### 3.1.1 河床坝段坝体应力与变形

方案 1、2、3 蓄水前大主应力极值分别为 1.6 MPa、1.85 MPa 和 2.27 MPa,小主应力极值分别为 0.64 MPa、0.78 MPa 和 0.78 MPa,均分布在河床部位的最大坝高处的建基面附近。蓄水后大、小主应力极值略有增大,分布位置略向上游移动。各方案应力分布特征、大小以及蓄水前后的变化规律一致。图 3 和图 4 分别为方案 2 蓄水前后大、小主应力分布(除特别说明外应力均以压为正,拉为负)。

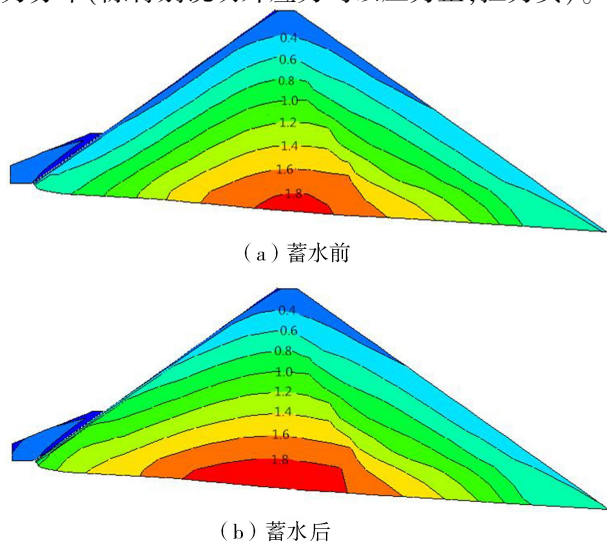


图 3 方案 2 蓄水前后坝体大主应力等值线(单位:MPa)

表 2 坝体填筑材料模型计算参数

坝体分区	筑坝材料	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$
垫层区	新鲜、微风化料	2.18	56.1	10.2	1134.8	0.33	0.61	877.9	0.23
过渡区	新鲜、微风化料	2.15	58.6	12.8	1417.3	0.24	0.61	1092.1	-0.01
主堆石区	微、弱风化石料	2.12	55.3	11.5	1050.9	0.26	0.62	597.7	0.11
下游堆石区	强、弱风化石料	2.06	51.2	9.8	678.7	0.29	0.61	315.7	0.21

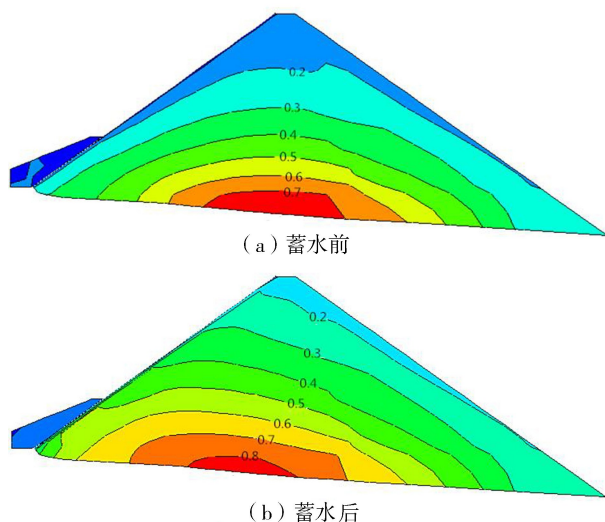


图 4 方案 2 蓄水前后坝体小主应力等值线(单位:MPa)

方案 1、2、3 蓄水前最大沉降依次为 59.18 cm、62.63 cm 和 74.04 cm,蓄水后分别增加至 59.94 cm、63.84 cm 和 75.85 cm,坝体沉降占坝高 0.51% ~ 0.64%,与国内同等规模的硬岩面板堆石坝沉降水平相当。最大沉降均分布在坝体填筑最深处约 1/2 坝高部位靠下游侧,蓄水后,受上游水荷载的作用,沉降值略有增大,分布区域略向上游偏移。蓄水前垂直坝轴线向位移基本以坝轴线为界,上游侧指向上游,最大值 15 ~ 20 cm,下游侧指向下游,最大值 28 ~ 38 cm,向下游位移均大于向上游位移。蓄水后,受上游水荷载作用,除上游坝脚局部区域外,垂直坝轴线向位移基本指向下游,最大位移达到 34 ~ 47 cm。各方案分布规律基本一致,图 5 和图 6 为方案 2 蓄水前后垂直坝轴线向位移和沉降变形及分布规律(垂直坝轴线向位移向下游为正,向上游为负)。

各方案蓄水前后的大主应力、小主应力、沉降、垂直坝轴线向位移极值见表 3。从表 3 可以看出,从方案 1 至方案 3,上述统计值均呈现逐渐增大的趋势。根据各方案坝轴线布置特点,随着折角的增大,转折点沿山脊不断向下游调整,右坝头向上游调整,主河床部位的坝轴线与河床走向的关系逐渐由斜交变为正交,两岸地形的约束条件有较大变化,符合两岸地形对坝体的拱效应作用规律<sup>[4,20-21]</sup>。因此不同方案坝基大小主应力极值以及位移随坝轴线折角的变化规律主要受不同方案坝基整体地形条件控制,符合面板堆石坝应力、变形的一般规律。



表3 坝体应力与变形极值

方案	大主应力/MPa		小主应力/MPa		沉降/cm		垂直坝轴线向位移/cm		
	蓄水前	蓄水后	蓄水前	蓄水后	蓄水前	蓄水后	蓄水前		蓄水后 (下游)
							上游	下游	
方案1	1.60	1.81	0.64	0.83	59.18	59.94	16.99	28.62	34.15
方案2	1.85	1.96	0.78	0.84	62.63	63.84	15.28	29.76	37.88
方案3	2.27	2.38	0.78	0.86	74.04	75.85	19.24	38.26	46.48

注:蓄水后垂直坝轴线向位移除上游坝脚局部区域外基本指向下游。

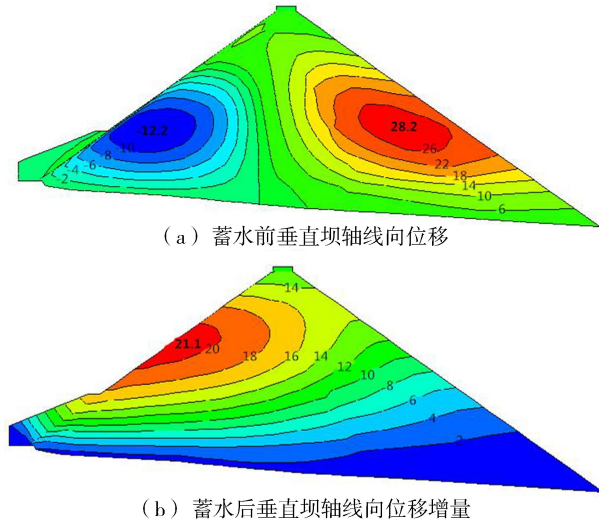


图5 方案2 坝体蓄水前垂直坝轴线向位移及蓄水后位移增量分布(单位:cm)

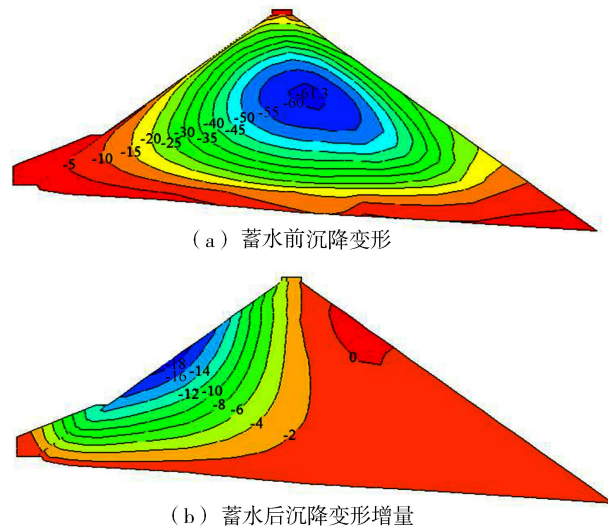


图6 方案2 坝体蓄水前沉降变形及蓄水后沉降变形增量分布(单位:cm)

### 3.1.2 坝体沿坝轴线向位移分布

受坝体施工期间沉降影响,两岸坝体向河床部位发生位移。以河床为界,方案1、2、3 右岸最大位移分别为6.34 cm、7.86 cm 和 10.89 cm,左岸分别为5.73 cm、5.74 cm 和 10.77 cm,最大值均位于岸坡坝段的中部。蓄水后右岸最大位移分别为5.45 cm、7.42 cm 和 12.31 cm,左岸分别为7.11 cm、10.11 cm 和 17.93 cm。蓄水后沿坝轴线向位移最大值的分布位置左右岸差异较大,右岸的位置基本保持不变,位

于岸坡坝段的中部,左岸的位置受转折影响显著,基本位于靠近转折处的中高程部位。蓄水前后沿坝轴线向位移分布如图7 和图8 所示(沿坝轴向位移以自右岸向左岸移动为正)。

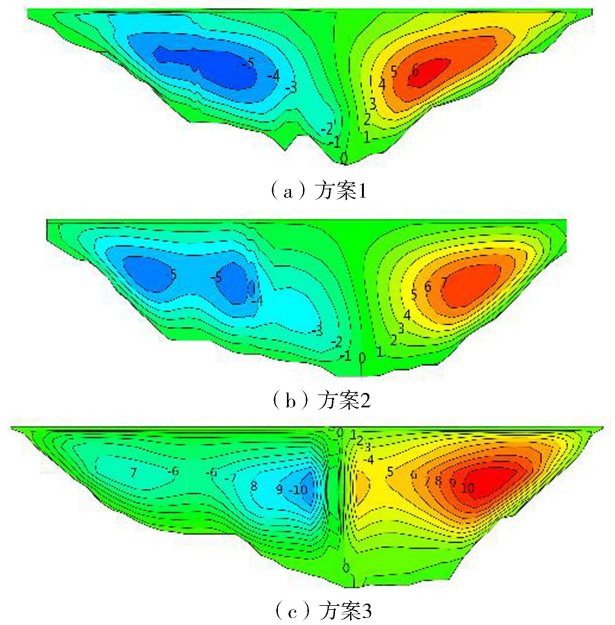


图7 坝体蓄水前沿坝轴线向位移分布(单位:cm)

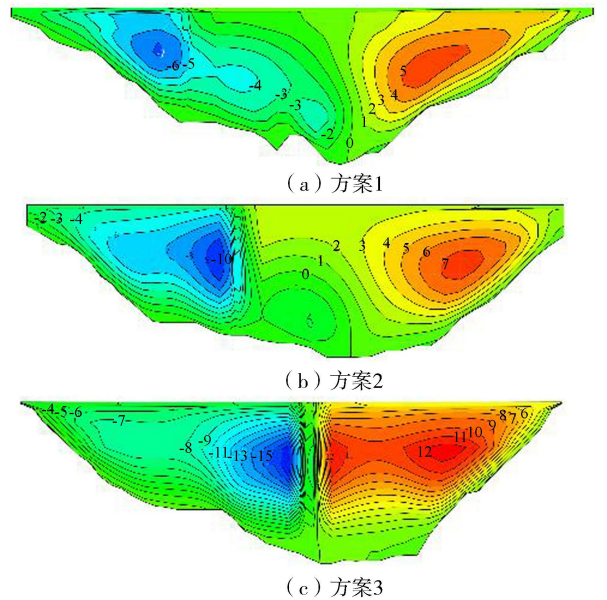


图8 坝体蓄水后沿坝轴线向位移分布(单位:cm)

从图7 和图8 可以看出,蓄水前虽然转折点附近等值线分布与两侧存在一定的差异,但整体以河

床为中心分布,与一般直线布置的面板堆石坝基本一致。蓄水后位移分布发生较大变化,转折点以左的坝体向河床方向的位移增幅较大,但转折点以右的坝体向河床方向的位移有所减小,甚至出现反向的位移。由蓄水前后的位移对比可以发现,蓄水后坝体存在向转折点偏移的趋势,折角越大,该趋势的程度和影响范围也越大。同时随着转折部位向河床处靠近,坝体两侧地形对称性越来越强,转折对两侧坝体变形的影响也逐渐对称。

### 3.2 面板应力与变形

#### 3.2.1 面板应力分布

各方案应力分布如图9和图10所示,对于坝轴线向应力,连接板左侧面板主体以受拉为主,其中在

周边缝以及连接板附近拉应力相对较大,最大值分布在左岸中部偏低高程的周边缝附近;随着折角的增大,拉应力最大值有增大趋势,同时在中部开始出现局部压应力区,并逐渐扩大,压应力值也逐渐增大;大部分面板压应力水平较低(0~0.5 MPa),但在靠近转折点的底部压应力相对较高,其中方案3最大,达到3.6 MPa。连接板右侧面板在靠近连接板、周边缝及右岸岸坡附近受拉,在河床部位的面板中部大部分区域及靠近转折点的底部局部处于受压状态;随着折角的增大,拉应力值逐渐增大,压应力分布区域逐渐减小。

#### 3.2.2 面板位移分布

图11和图12为面板水平位移与挠度分布。蓄

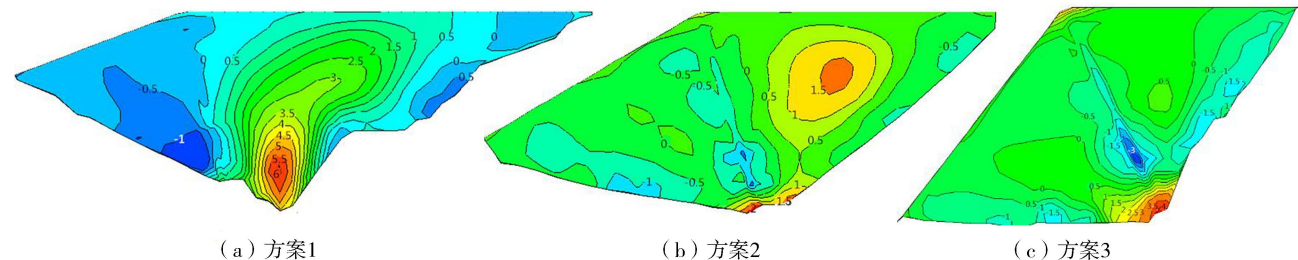


图9 面板沿坝轴线向应力分布(单位:MPa)

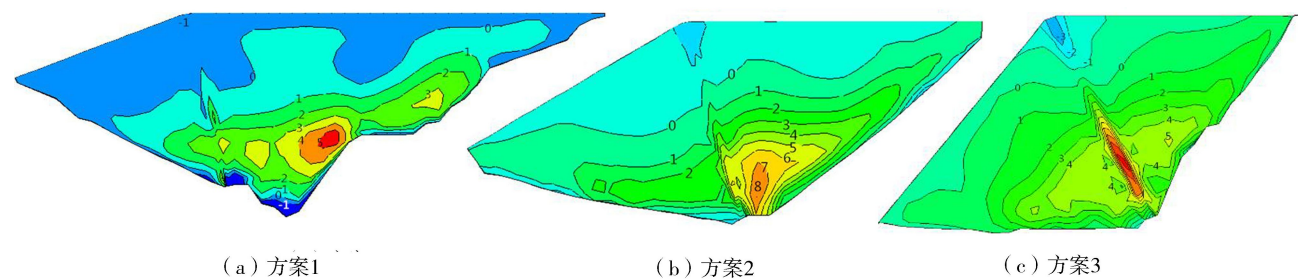


图10 面板顺坡向应力分布(单位:MPa)

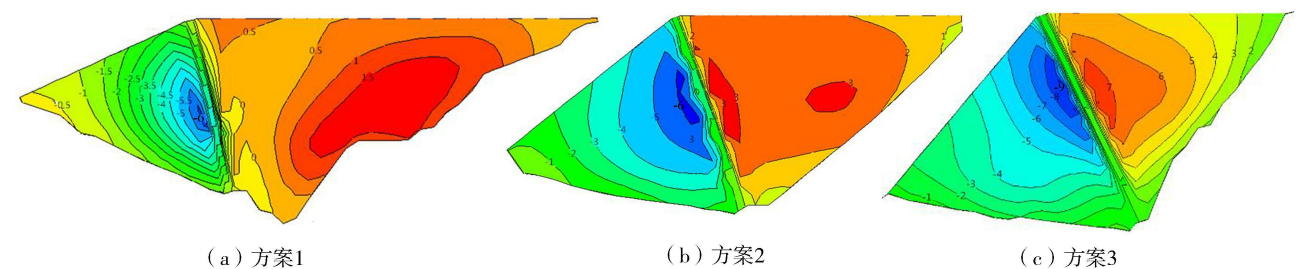


图11 面板沿坝轴向位移分布(单位:cm)

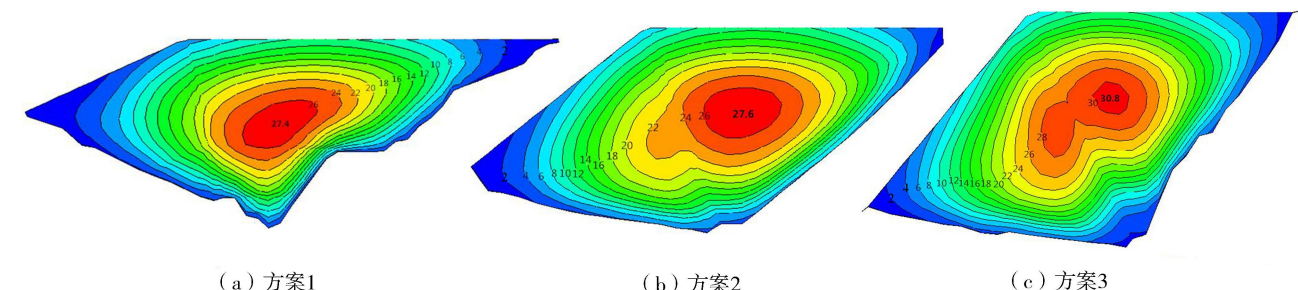


图12 面板挠度分布(单位:cm)



水后连接板左侧坝体沿坝轴线方向有从左至右(即向河床方案移动)的位移趋势,方案1、2、3最大值分别为6.2 cm、6.5 cm和10.2 cm,右侧坝体沿坝轴线方向有从右至左(即向河床方案移动)的位移趋势,最大值分别为2.1 cm、3.7 cm和8.7 cm。连接板受左右两侧面板约束,具有明显的位移不连续现象,各方案均表现为连接板整体往坝体右侧移动,但随着折角的增大,趋势有所减弱。各方案面板挠度最大值分布的高程基本接近,大约位于650 m高程附近的河床部位,最大值分别为27.3 cm、27.6 cm和30.8 cm。

综合各方案面板应力和位移的分布图以及面板轴向应力位移统计值(表4),随着折角的增大,转折部位逐渐向右侧河床部位靠近,整个大坝左侧部分的拉应力分布范围随连接板的移动逐渐扩大范围,而压应力的分布范围逐渐向右侧岸坡段缩小。除了靠近河床底部外,面板中上部位的压应力大小随着折角的增大而减小。两侧面板指向连接板位移的趋势随着折角的增大而增强,而且随着转折部位两侧坝体对称性增强,连接板两侧面板偏移的差异逐渐减小。

表4 面板应力、位移统计

方案	轴向拉应力/MPa		轴向压应力/MPa		轴向位移/cm	
	左岸面板	右岸面板	左岸面板	右岸面板	左岸面板	右岸面板
方案1	1.48	0.85		6.17	6.2	2.1
方案2	1.67	1.20	2.0	2.41	6.5	3.7
方案3	1.85	1.97	3.6	4.38	10.2	8.1

### 3.3 结构缝变形

根据结构缝的位置和变形特性,将结构缝分为面板垂直缝、趾板与面板的周边缝以及连接板两侧与面板的周边缝。其中面板的垂直缝分布主要与面板应力状态相关,不再赘述,以下重点分析趾板和连接板的周边缝变形规律。

#### 3.3.1 趾板周边缝变形及变化规律

表5为趾板周边缝变形最大值,面板与趾板之间周边缝的三向变形均以张拉变形为主,右岸张拉变形整体大于左岸,最大值分布在右岸1/3坝高附近。由表5还可以看出,随着折角的增大,右岸趾板结构缝变形总量逐渐减小。

表5 趾板周边缝变形最大值 mm

方案	张开变形		剪切变形		沉陷变形	
	最大值	出现部位	最大值	出现部位	最大值	出现部位
方案1	27.1	右岸坝高约1/3处	20.7	紧靠连接板的右侧	11.7	右岸坝高约1/2处
方案2	24.1	右岸坝高约1/3处	11.9	右岸靠近河谷部位	10.6	右岸坝高约1/2处
方案3	18.3	右岸坝高约1/3处	12.3	左右岸靠近河谷部位	10.9	左岸坝高约1/2处

周边缝的变形与趾板下游的堆石体填筑体型关

系以及两岸地形关系密切,与趾板下游填筑厚度、两岸坡度、水荷载呈正相关关系。综合3个方案的整体布置情况,方案1的右岸趾板“X”线的水平投影与地形等高线相交角度最小,垂直趾板方向趾板下游的地形陡降,填筑区厚度较大,因此在该部位周边缝变形最大;而方案3右岸趾板“X”线的水平投影与地形等高线基本处于正交,垂直趾板方向趾板下游的地形相对平缓,填筑区厚度较小,约束了该部位周边缝的变形。

#### 3.3.2 连接板两侧周边缝变形及变化规律

表6为连接板周边缝变形极值,连接板两侧的周边缝三向变形中拉压变形均表现为张拉,两侧的剪切变形基本沿面板指向河床底部,沉陷变形除方案1相对较大外,方案2和方案3较小,与对应的张拉和剪切变形相比基本可忽略。根据表6统计的张拉变形极值显示,三向变形中张拉变形与折角相关性较好,随着折角的增大,变形值显著增大,变形规律与其两侧面板应力分布规律基本一致。对于方案1除了张拉变形较小外,剪切和沉陷变形均是3个方案中最大的一个。综合分析坝体总体布置,方案1无论是坝轴线位置还是趾板位置,转折部位均位于岸坡部位,连接板两侧坝体体型差异悬殊,不均匀变形较大,因此导致结构缝变形复杂。

表6 连接板周边缝变形极值统计 mm

方案	张拉变形		剪切变形		沉陷变形	
	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸
方案1	5.8	4.5	11.2	6.7	5.5	5.8
方案2	8.9	8.9	2.5	5.0	0.9	1.0
方案3	13.7	13.1	5.6	7.4	1.8	2.1

## 4 折线型面板堆石坝变形机理浅析

面板应力、位移除了受水荷载直接作用影响外,更主要的是堆石体变形。蓄水后水压对坝体的作用表现为垂直方向和水平方向两组作用,竖向作用引起大坝沉降使岸坡坝段向河床方向发生位移,带动面板使面板在两岸存在受拉趋势,靠近河床部位存在受压趋势;水平方向作用使坝体向下游位移。对于直线布置的大坝,沿坝轴线各部位水平方向作用力的方向相同,大小过渡均匀,主要影响面板挠度的分布,对坝体和面板轴向变形几乎没有影响。但是对于坝轴线折向下游的面板堆石坝,转折点两侧坝体受力方向不一致,一侧坝体向下游的位移对另一侧坝体而言存在沿坝轴向的牵引拉伸作用。面板在转折部位坝体轴向变形的牵引带动下,产生水平方向的张拉应力,相应部位的结构缝产生张拉变形。由于坝体沉降同时会产生指向河床部位的轴向位

移,因此对于折线布置的混凝土面板堆石坝,坝体水平方向的位移和垂直方向的沉降对坝体轴向位移存在叠加作用,使得坝体和面板的应力与变形问题更加复杂。

对于本文的3个方案,坝轴线转折部位均位于左岸,水荷载垂直、水平分力的作用对转折点以左的坝体作用一致,均使坝体向河床方向移动,但是对转折点以右的坝体,水平位移引起的轴向拉伸与沉降引起的向河床方向位移作用正好相反。从各方案1/2坝高沿坝轴线位移的平切图(图13和图14)可以看出:坝体填筑后两岸的沉降方向均是以河谷为中心线,两侧近似对称分布,两岸坝体向中部位移;蓄水后位移增量明显指向转折点,且连接板左侧的位移增量明显大于右侧;随着转折点不断向河床部位移动(方案1至方案3),转折部位大坝规模不断增大,对称性增加,坝体位移逐渐增大,分布的对称性逐渐增强。

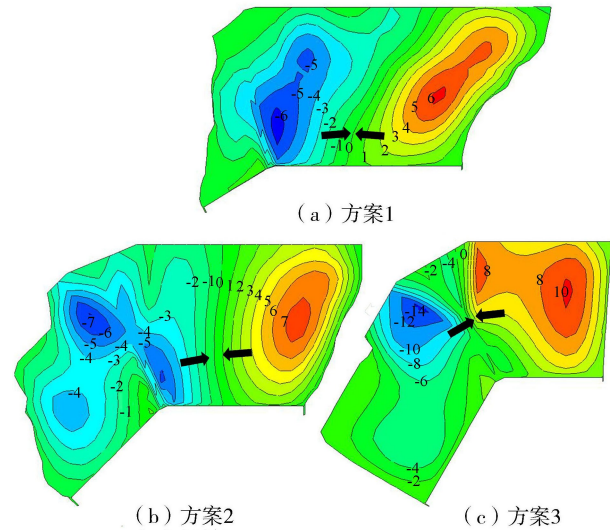


图13 蓄水前1/2坝高处轴向位移(单位:cm)

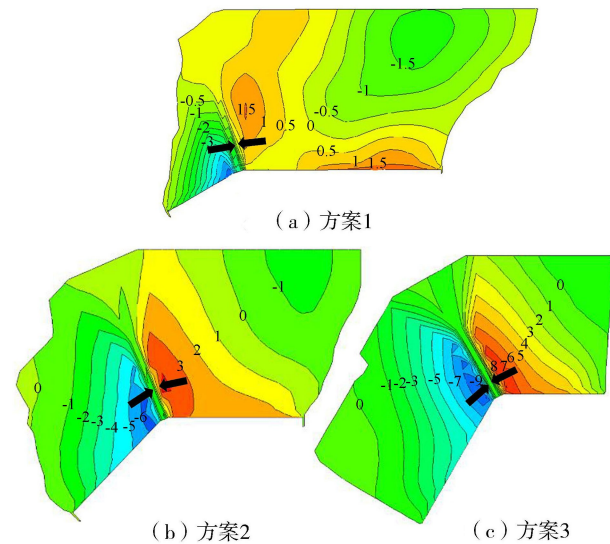


图14 蓄水后1/2坝高处轴向位移增量(单位:cm)

## 5 结 语

对于凸向下游的折线型混凝土面板堆石坝,折角具有牵引拉动作用,增加面板整体受拉趋势。由于各方案之间除了折角大小的差异外,还存在转折部位的坝基地形条件、坝高等差异,因此折角附近的应力、变形与折角之间的变化规律并非线性关系。

坝轴线转折的布置对大坝整体运行性能的影响不仅仅涉及折角,转折部位坝高和地形条件均是重要的影响因素。对于特定的工程,坝轴线转折往往意味着整体布置条件的改变,在进行坝轴线布置研究时除了考虑转折部位的运行性态外,还应综合考虑大坝的整体运行条件。方案2虽然折角并不是3个方案中最小的,折角部位的坝高规模也相对较大,但由于考虑两岸地形条件的不利影响,计算结果显示其综合运行条件相对较优。因此,在进行坝轴线布置时应充分利用坝轴线转折的灵活性,合理利用坝体变形的特性,优化整个坝体的布置条件。

基于折线型面板堆石坝坝体变形机理的研究表明,坝体转折后顺河床的水平位移引起的局部坝体轴向位移与垂直沉降产生的轴向位移存在叠加影响,充分利用二者的相互关系合理选择转折点和折角大小对于解决特殊条件下大坝不利变形和面板不利应力分布具有积极的意义。

## 参考文献:

- [1] 陈辉,刘东海,戚蓝.改进的堆石坝变形计算参数敏感性分析方法[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):406-412. (CHEN Hui, LIU Donghai, QI Lan. Improved sensitivity analysis method for calculating the deformation parameters of the rock-fill dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 406-412. (in Chinese))
- [2] 李国英,苗喆,米占宽.深厚覆盖层上高面板坝建基条件及防渗设计综述[J].水利水运工程学报,2014(4):1-6. (LI Guoying, MIAO Zhe, MI Zhankuan. A review of foundation condition and design scheme for seepage prevention system of high CFRD built on deep alluvium deposit[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 1-6. (in Chinese))
- [3] 熊成林,邓伟,姜龙.基于深厚覆盖层的面板堆石坝沉降变形规律分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(2):150-154. (XIONG Chenglin, DENG Wei, JIANG Long. Analysis on the settlement deformation law of face rockfill dam based on deep overburden[J]. Journal of China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2016, 14(2): 150-154. (in Chinese))

- [ 4 ] 徐泽平,邵宇,胡本雄,等. 狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水利水电技术,2005,36(5):30-33. (XU Zeping, SHAO Yu, HU Benxiong, et al. Study on stress and deformation properties of high concrete face rock-fill dam in narrow valley[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36 ( 5 ): 30-33. ( in Chinese ))
- [ 5 ] 汪洋,狭窄河谷混凝土面板堆石坝设计的一种创新与实践[J]. 水利水电技术,2012,43(9):39-42. (WANG Yang. An innovation and practice of design of concrete face rockfill dam in narrow valley[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43 ( 9 ): 39-42. ( in Chinese ))
- [ 6 ] 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 ))
- [ 7 ] 曹克明,徐建军. 超高面板坝面板临界挠度探讨和设计改进[J]. 水力发电,2008,34(11):98-102. (CAO Keming, XU Jianjun. Discussions on critical deflection of face slab and its design improvement for super-high CFRD [J]. Water Power, 2008, 34(11):98-102. ( in Chinese ))
- [ 8 ] CHEN Shengshui, FU Zhongzhi, WEI Kuangming, et al. Seismic responses of high concrete face rockfill dams; a case study [J]. Water Science and Engineering, 2016, 9 ( 3 ): 195-204.
- [ 9 ] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, DENG Zhao. A simplified physically-based breach model for a high concrete-faced rockfill dam; a case study [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(1):46-52.
- [ 10 ] 何蕴龙,罗健. 折线形面板堆石坝的变形与应力分析[J]. 红水河,2003,22(4):18-23. (HE Yunlong, LUO Jian. Analysis of deformation and stress of a piecewise CFRD[J]. Hongshui River, 2003, 22 ( 4 ): 18-23. ( in Chinese ))
- [ 11 ] 王登银,陈振文,汤暘,等. 巴山水电站高折线面板堆石坝运行性状研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(9):1483-1488. (WANG Dengyin, CHEN Zhenwen, TANG Yang, et al. Behaviors of high broken line concrete face rockfill dam of Bashan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9):1483-1488. ( in Chinese ))
- [ 12 ] 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司. 浙江衢江抽水蓄能电站可行性研究报告(第6篇):工程布置及建筑物[R]. 杭州:中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,2017.
- [ 13 ] 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司. 巴山电站折线面板坝专题研究报告[R]. 杭州:中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,2015.
- [ 14 ] 李瑞青. 折线型坝轴线及高陡河谷边坡对面板堆石坝应力和变形的影响[D]. 武汉:武汉大学,2004.
- [ 15 ] 邴能惠,孙大伟,陈铁林. 折线型面板堆石坝:改善面板应力状态[J]. 岩土工程学报,2006,28(1):63-67. (LI Nenghui, SUN Dawei, CHEN Tielin. Broken line type face slab rockfill dam for improving its stress state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1):63-67. ( in Chinese ))
- [ 16 ] 朱岳明,贺金仁,章恒全,等. 江坪河高面板堆石坝三维非线性结构有限元分析[J]. 水力发电,2003,29(1):28-32. (ZHU Yue ming, HE Jinren, ZHANG Hengquan, et al. 3D nonlinear finite element analysis of Jiangpinghe Concrete Face Rockfill Dam [J]. Water Power, 2003, 29 ( 1 ): 28-32. ( in Chinese ))
- [ 17 ] 朱晟,欧红光,殷彦高. 狭窄河谷地形对200m级高面板坝变形和应力的影响研究[J]. 水力发电学报,2005,24(4):73-77. (ZHU Sheng, OU Hongguang, YIN Yangao. Influence of narrow-valley formation on the mechanics property of the 200 m high CFRD. [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24 ( 4 ): 73-77. ( in Chinese ))
- [ 18 ] 胡再强,李宏儒,苏永江. 岗曲河混凝土面板堆石坝三维静力应力变形分析[J]. 岩土力学,2009(增刊2):312-317. (HU Zaiqiang, LI Hongru, SU Yongjiang. 3-D static stress and displacement analysis of Gangqu River Concrete Faced Rockfill Dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009 (Sup2):312-317. ( in Chinese ))
- [ 19 ] 丁遥,沈振中,李琛亮,等. 复杂地形对面板坝面板应力和变形的影响分析[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(1):33-35. (DING Yao, SHEN Zhenzhong, LI Chenliang, et al. Effect of complex topography on deformation and stress of face slab for a CFRD [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1):33-35 ( in Chinese ))
- [ 20 ] 孙超伟,柴军瑞,陈兴周,等. 苗家坝混凝土面板堆石坝三维应力变形分析[J]. 水利水电技术,2014,45(1):56-59. (SUN Chaowei, CHAI Junrui, CHEN Xingzhou, et al. 3-D stress-deformation analysis on Miaojiaaba Concrete Face Rockfill Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45 ( 1 ): 56-59. ( in Chinese ))
- [ 21 ] 狄文龙,屈楚杰,蒋宽鹏. 狭窄河谷高面板堆石坝拱效应计算分析[J]. 水利科技与经济,2016,22(6):7-12. (DI Wenlong, QU Chujie, JIANG Kuanpeng. Analysis of arch effect of high CFRD built in narrow valley [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(6):7-12. ( in Chinese ))

(收稿日期:2018-11-02 编辑:熊水斌)