

DOI: 10.11779/CJGE2016S2044

镶嵌式面板堆石坝应力应变特性研究

沈 婷, 李国英

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 镶嵌式面板坝是解决高面板堆石坝安全性的一种新理念, 结合某 150 m 面板坝工程, 采用非线性平面有限元方法, 系统研究了新坝型与常规面板坝应力应变特性的差异, 并探讨了混凝土坝高度、顶面宽度和坡比对镶嵌式面板坝应力应变的影响。结果表明, 镶嵌式面板坝与常规面板坝在堆石体沉降、周边缝变位等方面并没有显著改变, 改变主要集中在堆石体上游向变形和面板的应力应变上, 镶嵌式面板坝对堆石体上游向变形有一定抑制作用, 由于缩短了面板长度, 对面板静态应力应变状况有所改善, 但对面板动态应力状况稍有不利。混凝土坝高度是控制性体型参数, 需综合考虑其对堆石坝体、面板和混凝土坝自身应力变形以及接缝变位的影响, 合理选择混凝土坝坝高。

关键词: 镶嵌式面板坝; 常规面板坝; 应力应变特性; 有限元

中图分类号: TV 641.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0266-06

作者简介: 沈 婷(1972-), 女, 高级工程师, 主要从事岩土工程数值分析方面的研究。E-mail: tshen@nhri.cn。

Stress-strain characteristics of embedded concrete face rockfill dam

SHEN Ting, LI Guo-ying

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The embedded CFRD is a new idea to solve the safety of high CFRD. Combining a 150 m-CFRD project, the nonlinear finite element method is used to study differences in stress-strain characteristics of the new type CFRD and conventional CFRD. The influences of height, top width and slope of concrete dam on the stress-strain characteristics of the CFRD are studied. The results show that the embedded CFRD and conventional CFRD have no significant change in dam settlement and displacement of peripheral joints. The upstream deformation of rockfill and the stress-strain behavior of the face slab have obvious change. The embedded CFRD has a certain inhibiting effect on the upstream deformation of the rockfill dam. Due to the shortening of the slab length, the static stress-strain condition of the face slab is improved, but the dynamic stress condition of the face slab has a slight disadvantage. The dam height is governing the shape parameter. Considering the influences of stress and displacement of rockfill dam, face slab and concrete dam, the height of concrete dam can be reasonably determined.

Key words: embedded CFRD; conventional CFRD; stress-strain characteristic; FEM

0 引言

面板坝适应地形地质条件强、经济优、安全可靠、施工方便, 在中国得到快速发展, 当前建坝水平已经达到 200 m 级, 已建成的最高面板坝为水布垭水电站面板坝, 最大坝高 233 m, 目前古水、马吉、大石峡、茨哈峡等几座 250~300 m 级面板坝正在设计研究之中。坝工界比较一致的观点是: 100 m 级面板坝技术成熟, 坝体实测变形与理论计算基本吻合, 安全可靠; 200m 级高面板坝技术渐趋成熟, 虽然已建 200 m 级面板坝出现了面板挤压破坏、面板裂缝、坝体变形和坝体渗漏量偏大的问题, 但通过采取适当工程措施后运行良好, 是安全的; 而 250~300 m 级面板坝, 由于 200 m 级面板坝出现的一些问题及理论研究相对滞

后, 对坝体安全性尚有一些怀疑^[1-6]。

为了应对上述问题, 提出了在大坝上游下部设置高混凝土坝而形成镶嵌式面板坝的研究思路, 以期有效改善面板应力状况, 为超高面板坝技术发展带来突破^[7]。本文依托某面板坝工程, 采用平面有限元方法, 分析镶嵌式面板坝这一坝型的应力变形静动力特性, 探讨不同体型镶嵌混凝土坝对面板堆石坝应力应变的影响, 对比研究镶嵌式面板坝与常规面板坝应力变形特性的差异。该工程镶嵌式面板坝标准设计剖面图见图 1, 坝高 150 m。工程区场地基岩 100 a 超越概率 2%, 1% 地震峰值加速度分别为 0.304g, 0.377g。

1 研究方案与计算参数

对镶嵌式面板坝, 选取混凝土坝高度、上下游坡比、顶宽等体型参数进行对比研究, 具体研究方案如表 1 所示。方案 1 即为常规面板坝, 方案 2~9 均为镶嵌式面板坝。

表 1 研究方案

Table 1 Research schemes

方案 编号	混凝土坝				趾板 长度/m
	高度/m	上游 坡比	下游 坡比	顶宽 /m	
1	0.8	—	—	—	8
2	40	1:0.2	1:0.7	10	8
3	50	1:0.2	1:0.7	10	8
4	60	1:0.2	1:0.7	10	8
5	70	1:0.2	1:0.7	10	8
6	60	1:0.2	1:0.7	9	8
7	60	1:0.2	1:0.7	8	8
8	60	1:0.1	1:0.8	10	8
9	60	1:0.3	1:0.6	10	8

堆石料本构模型采用南水双屈服面弹塑性模型, 计算参数见表 2。

表 2 筑坝材料南水双屈服面模型参数

Table 2 Parameters of NHRI's double yield surface model

坝料	ρ_d /(g cm ⁻³)	ϕ_0 (°)	$\Delta\phi$ (°)	K	n	R_f	c_d /%	n_d	R_d
垫层	2.25	54.8	8.7	1023	0.32	0.61	0.72	0.46	0.56
过渡层	2.17	56.2	10.9	1439	0.23	0.72	0.32	0.77	0.68
主堆石	2.15	56.6	11.3	1413	0.22	0.72	0.31	0.86	0.69
次堆石	2.15	52.2	10.6	571	0.26	0.62	0.99	0.50	0.57

2 混凝土坝高度对镶嵌式面板堆石坝应力变形的影响

相同混凝土坝顶部宽度和坡比、不同高度方案(方案 1~方案 5) 主要静力计算结果见表 3。表中, A 为施工期阶段, 坝体填筑和面板浇筑至防浪墙底高程 2717.500 m; B 为蓄水期阶段, 大坝完建, 水库蓄水至正常蓄水位 2715.00 m 高程。



图 1 镶嵌式面板堆石坝标准设计剖面图

Fig. 1 Standard design section of embedded CFRD

(1) 坝体变形

图 3 给出了堆石坝体沉降与水平位移极值随嵌入混凝土坝高度变化曲线。由图 2 可见, 在混凝土坝高度与面板坝高度比约为 0.3 时曲线出现拐点, 当混凝土坝高度低于 0.3 倍坝高时, 镶嵌混凝土坝对坝体变形影响相对较小, 当混凝土坝高度高于 0.3 倍坝高后, 镶嵌混凝土坝对坝体变形影响相对较大。与常规面板坝相比, 镶嵌式面板坝抑制了上游坝体的水平向位移, 且随着混凝土坝高度的增大, 上游向位移减小幅度越大, 镶嵌 40 m 以上高度混凝土坝的面板坝上游向变形减幅在 25% 以上, 而镶嵌式面板坝对堆石坝体的沉降影响相对不大, 镶嵌 40 m 以上高度混凝土坝面板坝沉降减幅在 11% 以内, 镶嵌式面板坝对下游向水平位移则影响甚微, 变幅在 5% 以内。

(2) 面板应力变形

图 3 为不同混凝土坝高度方案面板挠度与顺坡向应力沿高程分布曲线。图 4 为面板挠度与顺坡向压应力极值随混凝土坝高度变化曲线。随着面板垫座高度的增大, 混凝土面板长度有所缩短, 面板的挠曲变形和顺坡向压、拉应力均有所减小。采用镶嵌式面板坝型面板应力变形性状有所改善, 当混凝土坝高度高于 0.3 倍坝高后改善愈加明显。

(3) 混凝土坝应力变形

混凝土坝工作性态受双向控制, 施工期受大坝的填筑荷载, 向上游变形, 运行期受库水压力, 向下游变形。由表 3 可见, 随着混凝土坝高度的增大, 混凝土坝自身变形有所增大, 坝内主压应力有所增大, 主拉应力有所减小。图 5 给出了不同混凝土坝高度方案混凝土坝基底正应力沿长度分布。4 种方案混凝土坝基底均未出现拉应力, 虽在施工期下游坝面、运行期上游坝面出现受拉区, 但拉应力数值不大, 在其允许抗拉强度范围内, 宽度小于截面宽度的 0.07 倍。

(4) 接缝变形

相比于常规面板坝方案, 镶嵌面板坝方案面板周边缝变位较大, 且随着混凝土坝高度增大, 周边缝沉

表 3 不同混凝土坝高度方案主要静力计算结果

Table 3 Static results of different concrete dam height schemes

统计项目	常规面板坝	混凝土坝			
		$H=40\text{ m}$	$H=50\text{ m}$	$H=60\text{ m}$	$H=70\text{ m}$
A	沉降/cm	51.9	50.6	48.4	46.8
	上游向变形/cm	10.2	7.7	6.2	4.0
	下游向变形/cm	9.5	9.5	9.5	10.0
堆石坝	沉降/cm	56.2	55.1	53.1	51.3
	占坝高比例/%	0.375	0.367	0.354	0.342
	上游向变形/cm	6.5	3.4	2.0	1.9
B	下游向变形/cm	12.3	12.1	12.1	12.4
	顺河向变形/cm	—	-1.29	-1.46	-1.53
	主压应力/MPa	—	4.99	5.15	5.19
混凝土坝	主拉应力/MPa	—	0.93	0.80	0.59
	顺河向变形/cm	—	1.49	1.70	1.83
	主压应力/MPa	—	4.06	4.10	4.11
面板	主拉应力/MPa	—	0.54	0.47	0.35
	挠度/cm	19.7	18.4	17.2	15.7
	B 坡向压应力/MPa	8.89	5.96	5.85	5.23
周边缝	B 坡向拉应力/MPa	1.05	0.84	0.70	0.67
	B 沉陷/mm	12.0	29.9	25.8	22.9
	B 张开/mm	6.2	21.3	20.0	19.9

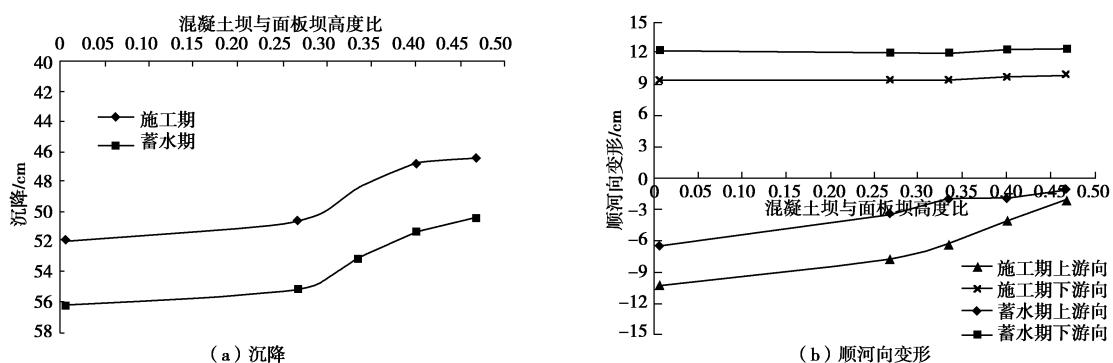


图 2 堆石坝坝体变形极值随混凝土坝高度变化曲线

Fig. 2 Curves of maximum dam deformation with height of concrete dam

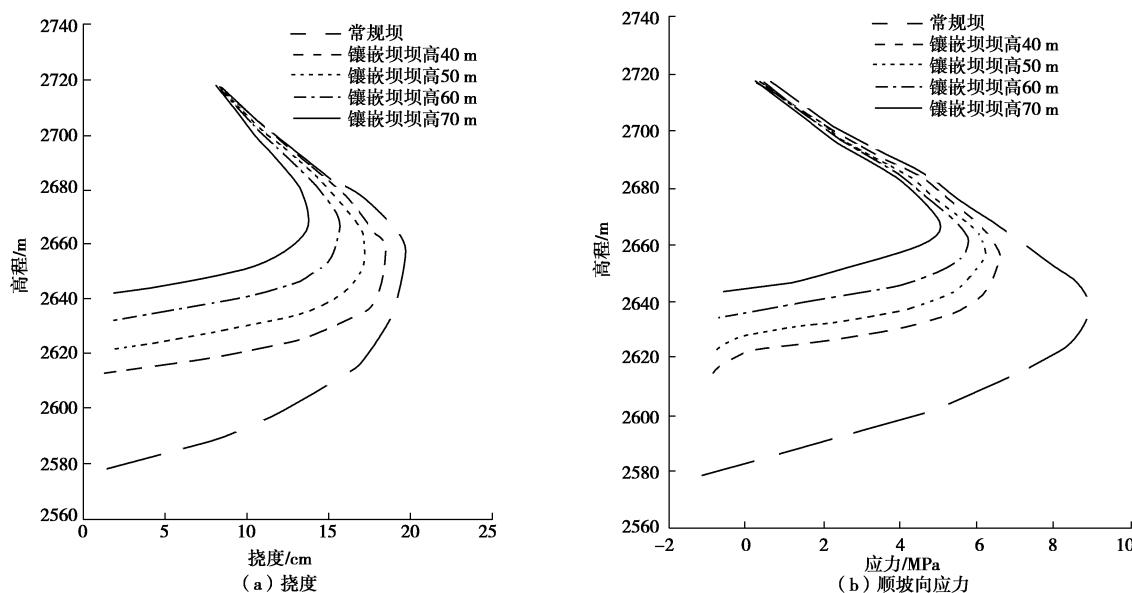


图 3 面板挠度与顺坡向应力沿高程分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of deflections and stresses along slope of face slab along height

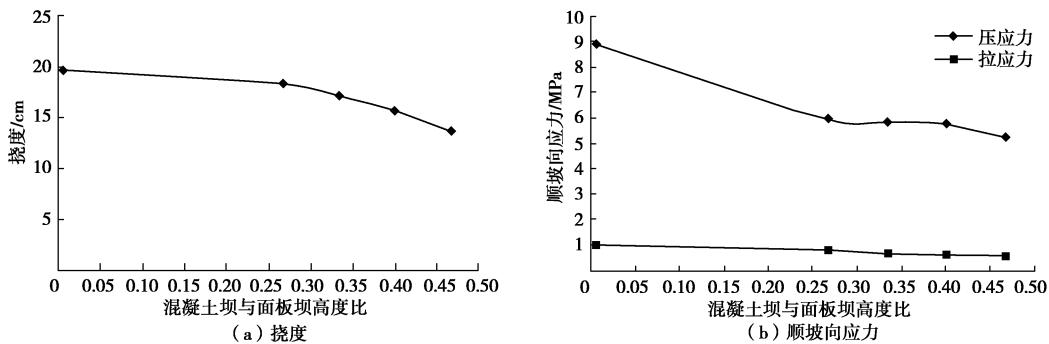


图 4 面板挠度与顺坡向应力极值随混凝土坝高度变化曲线

Fig. 4 Variation of maximum deflection and stress along slope of face slab with height of concrete dam

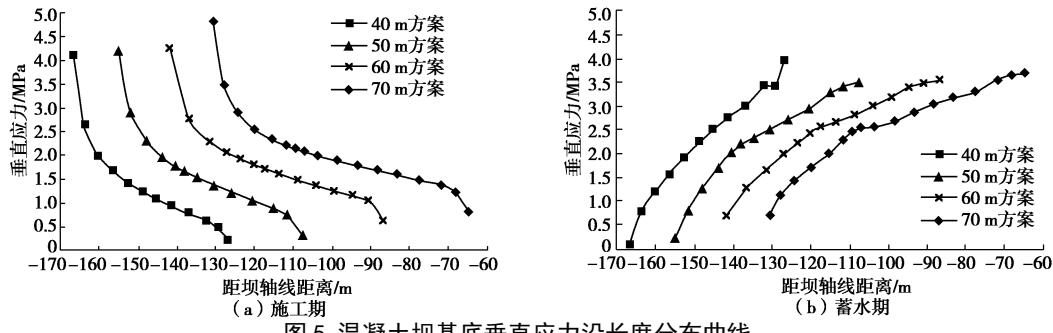


Fig. 5 Distribution curves of vertical stress along length of concrete dam base

陷和张开均有所减小, 总体上 40~70 m 高度方案周边缝变位差别不大。方案 2~5 均采取在板后留存 2 m 厚度堆石, 该措施对控制周边缝变位是有利的。

总的来看, 静力状态时, 依托工程 4 种混凝土坝高度镶嵌式面板坝应力变形特性均较好, 坝体沉降率介于 0.33%~0.37%, 该量值比常规面板坝小, 在同等坝高面板坝经验变形范围内, 面板和混凝土坝压、拉应力极值均低于其材料的允许值, 应力都满足要求, 周边缝变形低于 30 mm, 在止水的可承受范围之内。

3 混凝土坝高度对镶嵌式面板堆石坝动力特性的影响

表 4 给出了不同混凝土坝高度方案(方案 2~5)主要动力计算结果。随着混凝土坝高度的增大, 面板坝的动力反应加速度、地震残余变形略有增大; 而随着混凝土坝高度的增大, 混凝土坝自身动力反应愈加强烈, 面板的动应力也愈大。从静力情况来看, 混凝土坝高度越大, 防渗面板的应力变形性状越好, 而从动力情况来看, 混凝土坝高度越大, 地震引起的面板应力变形越大, 对面板的应力变形愈为不利, 需综合考虑静动力条件下混凝土坝高度影响。

依托工程 4 种高度方案动力结果总体差别不大, 坝体震陷约占坝高 0.28%~0.30%, 周边缝变位低于 33 mm, 在止水适应变形范围内, 面板和混凝土坝压应力在其材料的允许范围内, 拉应力大部分在允许范围内, 局部存在超标问题, 通过加强配筋可以解决该

问题。

综合静、动力计算成果来看, 依托工程采用镶嵌式面板堆石坝这一坝型技术上成立, 混凝土坝 4 种高度方案(坝高 40~70 m)均可行。

4 混凝土坝顶宽和坡比对镶嵌式面板堆石坝应力变形的影响

相同混凝土坝高度和坡比、不同顶宽方案(方案 5~7)主要静力计算结果见表 5。

混凝土坝顶面宽度在文中范围的变化对堆石坝体应力变形影响甚微。趾板长度相同情况下, 混凝土坝坝顶宽度越大, 即板后堆石留存厚度越大, 混凝土坝对面板底端的约束效应也相应增大。面板压、拉应力随坝顶宽度的增大而增大, 周边缝变位则随坝顶宽度的增大而减小。对于混凝土坝自身, 相同坡比时顶面宽度增大, 底面宽度也随之增大, 而混凝土坝自身受到的外部荷载几乎没有变化, 因此混凝土坝自身大小主应力随顶面宽度的增大而略有降低。

相同混凝土坝高度和顶宽, 不同坡比方案(方案 5, 8, 9)主要静力计算结果见表 6。

混凝土坝坡比在文中范围的变化对堆石坝体应力变形影响甚微, 对混凝土坝自身应力变形、面板应力变形和周边缝变形有一定程度的影响。混凝土坝下游坡越缓, 施工期受到土的水平侧压力越小, 受到土的垂直压力越大, 而混凝土坝上游坡越缓, 运行期受到

表 4 不同混凝土坝高度方案主要动力计算结果

Table 4 Dynamic results of different concrete dam height schemes

统计项目	混凝土坝			
	H=40 m	H=50 m	H=60 m	H=70 m
堆石坝顺河向加速度放大倍数	1.58	1.67	1.75	1.81
堆石坝垂直向加速度放大倍数	2.22	2.27	2.49	2.66
堆石坝顺河向永久变形/cm	37.10	37.40	37.90	38.50
堆石坝垂直向永久变形/cm	42.70	43.40	44.10	44.60
地震引起的面板挠度/cm	44.50	46.20	47.00	47.40
静动累加面板挠度/cm	53.00	54.50	55.20	55.20
面板动坡向压应力/MPa	3.88	4.19	4.40	4.69
面板动坡向拉应力/MPa	4.06	4.27	4.39	4.56
面板静动叠加坡向压应力/MPa	7.29	7.78	7.84	8.27
面板静动叠加坡向拉应力/MPa	2.81	3.42	3.03	2.04
混凝土坝静动叠加垂直向压应力/MPa	4.51	4.48	4.48	4.67
混凝土坝静动叠加垂直向拉应力/MPa	2.00	2.51	2.63	3.07
静动累加周边缝沉陷变位/mm	32.70	28.80	26.20	23.30
静动累加周边缝张开变位/mm	22.40	21.30	21.30	21.10

表 5 不同混凝土坝坝顶宽度方案主要静力计算结果

Table 5 Static results of different concrete dam top width and slope schemes

统计项目	顶宽 8 m		顶宽 9 m		顶宽 10 m	
	高度 60 m		高度 60 m		高度 60 m	
	上游 1 : 0.2		上游 1 : 0.2		上游 1 : 0.2	
	下游 1 : 0.7		下游 1 : 0.7		下游 1 : 0.7	
A	顺河向变形/cm	-1.73	-1.63	-1.53		
	主压应力/MPa	5.89	5.60	5.19		
	主拉应力/MPa	0.69	0.63	0.59		
混凝土坝	顺河向变形/cm	2.07	1.96	1.83		
	主压应力/MPa	4.19	4.16	4.11		
	主拉应力/MPa	0.68	0.51	0.35		
B	挠度/cm	15.7	15.7	15.7		
	坡向压应力/MPa	5.67	5.72	5.79		
	坡向拉应力/MPa	0.60	0.64	0.67		
周边缝	B	沉陷/mm	27.8	24.7	22.9	
	B	张开/mm	20.5	20.3	19.9	

表 6 不同混凝土坝坡比方案主要静力计算结果

Table 6 Static results of different concrete dam top width and slope schemes

统计项目	顶宽 10 m		顶宽 10 m		顶宽 10 m	
	高度 60 m		高度 60 m		高度 60 m	
	上游 1 : 0.2		上游 1 : 0.1		上游 1 : 0.3	
	下游 1 : 0.7		下游 1 : 0.8		下游 1 : 0.6	
A	顺河向变形/cm	-1.53	-1.70	-1.38		
	主压应力/MPa	5.19	5.95	4.6		
	主拉应力/MPa	0.59	0.64	0.48		
混凝土坝	顺河向变形/cm	1.83	2.0	1.71		
	主压应力/MPa	4.11	4.11	4.4		
	主拉应力/MPa	0.35	0.32	0.4		
B	挠度/cm	15.7	15.6	15.8		
	坡向压应力/MPa	5.79	5.93	5.69		
	坡向拉应力/MPa	0.67	0.72	0.65		
周边缝	B	沉陷/mm	22.9	21.7	23.2	
	B	张开/mm	19.9	21.7	18.1	

水的水平推力越大, 受到水的垂直压力越小, 因此需综合考虑上下游坡比影响。随着下游坡比的增大, 面板拉、压应力有所增大, 周边缝沉陷有所减小, 张开则有所增大。

综合面板与镶嵌混凝土坝的应力状态和周边缝变

形来看, 依托工程镶嵌混凝土坝采用上游坡比 1 : 0.2, 下游坡比 1 : 0.7, 顶宽 10 m 是合适的。

5 结 论

镶嵌式面板堆石坝是在面板堆石坝上游底部布置

混凝土镶嵌坝, 该结构型式导致其应力变形特性与常规面板堆石坝有所差异。

与常规面板坝相比, 镶嵌式面板堆石坝明显抑制了上游坝体的水平向位移, 对沉降略有降低作用, 且随着混凝土坝高度的增加, 上游向位移和沉降降幅越明显。

与常规面板坝相比, 镶嵌式面板堆石坝由于缩短了面板长度, 静力状态时面板的应力变形有所减小, 且随着混凝土坝坝高的增加, 减幅越大。采用镶嵌式面板堆石坝可以有效改善面板的静态应力变形性状。

与常规面板坝相比, 镶嵌式面板堆石坝面板周边缝变位相对较大, 但目前止水结构和材料完全可以承受该变形, 且也可采取适当增大混凝土坝顶面宽度, 即在板后留存一定厚度堆石, 坝内设置增模区等措施有效控制周边缝变位。

与常规面板坝相比, 镶嵌式面板坝堆石坝体的动力反应加速度、动位移和永久变形以及面板动应力、接缝动变位都有所增大, 且随着混凝土坝坝高的增加, 上述各动力特征值增幅越大。可见混凝土坝坝高增加, 对地震时面板应力状况较为不利。此外, 混凝土坝坝高增加, 还恶化了混凝土坝自身的稳定状况, 增大了工程造价。因此对于镶嵌式面板堆石坝, 需综合考虑混凝土坝坝高对自身、堆石坝体、面板应力变形以及接缝变位的影响, 选择混凝土坝坝高。

采用镶嵌式面板堆石坝, 混凝土坝顶宽和坡比虽对面板应力变形、周边缝变形等有一定影响, 但起控制性作用的体型参数是混凝土坝高度。当混凝土坝高度低于 0.3 倍面板坝高度时, 镶嵌式面板坝与常规面板坝应力变形性状差别较小, 当混凝土坝高度高于 0.3 倍面板坝高度时, 镶嵌式面板坝与常规面板坝应力变形性状差别相对较大。

对于本依托工程, 镶嵌式面板堆石坝这一坝型技术上成立, 从应力变形角度, 混凝土坝高度在 40~70 m 范围内均可行, 上、下游坡比分别采用 1:0.2, 1:0.7, 顶面宽度采用 10 m 合适。鉴于坝址底部 60 m 高度范围内河谷极其狭窄, 60 m 高度以上河谷较为开阔这种地形地质条件, 60 m 坎高以下镶嵌坝施工、工程量、投资等差别不大, 因此从深入研究该坝型的技术特点, 促进面板坝技术发展的角度, 依托工程镶嵌混凝土坝高度确定为 60 m。

镶嵌式面板堆石坝, 可减少底部狭窄河谷岸坡趾板开挖量、降低趾板岸坡高度, 缩短面板和接缝长度, 为 250 m 级超高面板堆石坝的发展提供了一种新的思

路, 有必要从科研、设计及施工等方面进行深入研究, 并结合实际工程, 使该坝型技术得到不断发展和完善。

参考文献:

- [1] 杨泽艳, 周建平. 我国高面板堆石坝的建议与技术展望[J]. 水力发电, 2007, 33(1): 64~68. (YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping. Construction and technique prospective on super-high concrete face rockfill dams in China[J]. Water Power, 2007, 33(1): 64~68. (in Chinese))
- [2] 徐泽平, 邓 刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1226~1234. (XU Ze-ping, DENG Gang. Development of high CFRD and key technologies for building super-high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1226~1234. (in Chinese))
- [3] 杨泽艳, 周建平, 蒋国澄, 等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电, 2011, 37(2): 18~23. (YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping, JIANG Guo-cheng, et al. Development of concrete faced rockfill dam in China[J]. Water Power, 2011, 37(2): 18~23. (in Chinese))
- [4] 杨泽艳, 周建平, 苏丽群, 等. 300 m 级高面板堆石坝适应性及对策研究综述[J]. 水力发电, 2012, 38(6): 25~29. (YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping, SU Li-qun, et al. Review on the research of adaptability and countermeasures of 300 m-level high CFRD[J]. Water Power, 2012, 38(6): 25~29. (in Chinese))
- [5] 孔宪京, 张 宇, 邹德高. 高面板堆石坝面板应力分布特性及其规律[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 631~639. (KONG Xian-jin, ZHANG Yu, ZOU De-gao. Study on the stress distribution characteristics of face-slab of high concrete-face rock-fill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 631~639. (in Chinese))
- [6] 贾金生, 郦能惠. 高混凝土面板坝安全关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (JIA Jin-sheng, LI Neng-hui. Research on key technology of high concrete face rockfill dam[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2014. (in Chinese))
- [7] 陆 希, 徐宏璐. 镶嵌组合坝混凝土坝体结构体型探讨[J]. 西北水电, 2014(6): 30~33. (LU Xi, XU Hong-lu. Discussion on the outline features of embedded concrete dam in composite dam[J]. Northwest Hydropower, 2014(6): 30~33. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)