

狭窄河谷混凝土面板堆石坝设计的新对策

李振纲

(新疆水利水电勘测设计研究院 乌鲁木齐 新疆 830000)

摘要: 本文建立了以高趾墙作为非受力结构的垂直防渗体, 在狭窄河谷混凝土面板堆石坝的设计中与趾板、面板共同构成坝体上游封闭的防渗体系的设计思路, 在此基础上, 通过对高趾墙进行三维动、静力有限元分析, 结果表明高趾墙在各种设计工况下均能满足设计要求, 作为一种新型的防渗结构, 高趾墙可作为面板坝在应对不利地形、地质问题时的一个新的对策。

关键词: 狭窄河谷、面板坝、高趾墙、垂直防渗

作者简介: 李振纲(1977-)男, 新疆乌鲁木齐人, 工程师, 主要从事水利水电工程设计工作。

1 引言

我国从1985年至今已建和在建了数百座混凝土面板坝。随着我国经济建设的迅速发展和西部大开发战略的实施, 还将兴建一大批混凝土面板坝, 但随着水能水资源开发的深入, 各条河流上建坝条件较优的坝址已基本上开发殆尽, 目前在建和待建的坝址大多均面临相对恶劣的自然条件, 这其中包括在高寒、高震区、深厚覆盖层和不利地形地质条件下建坝等多种难题。其中针对面板坝的不利地形条件一般有两种情况, 即窄深峡谷和不规则地形。

对不规则地形的坝址, 常用混凝土高趾墙改造地形使混凝土面板坝与高趾墙连接组成完整的防渗系统。美国面板坝专家谢拉德对高趾墙设计的论述为: “由于高趾墙近于重力坝的尺寸(上游面直立, 下游坡约为1:0.8), 故一瞥之下, 这种设计好象是稳定的。然而, 混凝土的重力与水压力之间的关系对于这种高趾墙是与重力坝完全不同的。因此, 必须设置大体积混凝土块体, 使作用在高趾墙上的水压力直接通过基岩, 不使堆石体提供任何维持稳定的力”。鉴于此观点, 国内外一些高趾墙的体形, 均为此类重力式或大体积混凝土贴坡式。表1列出了国内几座已建面板坝采用高趾墙设计的具体资料。

表1 国内几座已建面板坝高趾墙设计比较表

坝名	最大坝高	高趾墙最大高度	高趾墙上游坡比	高趾墙下游坡比	高趾墙设计原因
	(m)	(m)			
黑泉水库大坝	123.5	6	1:1	1:0.6	为避开 F_{120} 断层趾板线向下游移动40m, 为使面板与调整后的趾板衔接
		17	1:0	1:0.6	左坝肩地形陡峻, 且有 F_{81} 断层发育, 为减少趾板开挖工程量
		16.38	1:0	1:0.6	右坝肩发育一冲沟, 趾板需采用高趾墙跨过冲沟
三板溪水电站大坝	185.5	52.5	1:0	1:0.35	大坝左坝肩与开敞式溢洪道通过高趾墙相接, 高趾墙同时兼做溢洪道右闸墩

海甸峡水电站大坝	48.5	45.26	1:0	1:0.5	水电站采用闸坝结合型式，左岸坝肩通过高趾墙与泄洪闸相连
公伯峡水电站大坝	132.2	50	1:0	1:0.6	大坝的右坝肩紧临电站进水口引渠段，坝肩与引渠间是通过高趾墙连接

以上高趾墙的设计主要是针对坝址区的不规则地形，其设计理念是将高趾墙作为改造地形条件下的受力结构，用以连接地基与面板，以构成完整的防渗系统并承担运行期上游的水压力与竣工期下游坝体的土压力。

窄深峡谷地区主要问题为岸坡陡峻，趾板开挖量较大且坝与岸坡连接处易发生不均匀沉降，导致混凝土面板和止水结构破坏而漏水。针对以上情况我们仍可考虑采用高趾墙作为峡谷内的垂直防渗体，并通过连接板使其与趾板面板相连构成完整的防渗体系，其中高趾墙仅承担防渗作用，其本身不作为受力结构承担水压力与土压力，其作用力由墙身上、下游填筑的盖重料和坝壳料承担。

2 窄深峡谷地区高趾墙设计思路

窄深峡谷地区的高趾墙是坝基与趾板间的连接体，是竖向防渗结构，高趾墙底部直接伸入抗冲蚀性的地基内，在顶部通过连接板与趾板相连构成完整的基础防渗体系。本工程高趾墙的设计理念来源于强渗透性地基内的防渗墙：高趾墙底部及侧面均伸入新鲜基岩内，高趾墙下游为坝体填筑料，上游为堆石盖重和回填开完料，即可将高趾墙看作是开挖回填后的防渗墙。作为防渗结构防渗墙与高趾墙均只承担防渗作用，不作为受力结构承担水压力和坝体填筑料所产生的压力。防渗墙结构与高趾墙结构对比见表 2。

表 2 防渗墙与高趾墙结构特性对比表

对比项目	防渗墙	高趾墙
使用部位	不具防渗性的地基内	陡峭下切河槽段
结构作用	垂直防渗结构	垂直防渗结构
连接设计	伸入相对不透水层	伸入新鲜基岩内
顶部连接设计	通过连接板与趾板相连	通过连接板与趾板相连
上游支撑结构	原状地基土	堆石盖重和回填开完料
下游支撑结构	原状地基土	坝体填筑料
墙体结构	二级配 C20 素混凝土	三级配 C25 钢筋混凝土（钢筋仅作墙体表面限裂用）
施工方法	采用冲击钻机成槽法施工，钢导管浇筑混凝土。	开挖基槽，底部进行帷幕灌浆，浇筑高趾墙，填筑墙上游盖重及下游坝壳料
竣工期拉应力出现位置	墙下游面底部	墙下游面底部
蓄满期拉压力出现位置	墙上游面底部	墙上游面底部

从以上对比表中可以看出，防渗墙与本工程所采用的高趾墙结构型式类似，结构作用相同，与防渗墙相比，高趾墙是开挖后直接浇筑在基岩上的，相当于把基础明挖后浇筑回填的

全封闭厚防渗墙，其整体性和施工质量均明显优于防渗墙。

防渗墙的施工方法使其底部残留少量沉渣，故端部约束近似铰接，致使防渗墙拉应力较小，但底部沉渣部位的透水性较大。高趾墙直接浇注在基岩上，端部约束刚性，致使高趾墙拉应力较大，但仅分布在底部局部范围内，在这种情况下，即便发生局部微小裂缝，其整体性和防渗性能依然优于防渗墙。

因此，高趾墙的防渗性能及结构安全性是高于防渗墙的。

3 高趾墙设计实例

本文主要引用了新疆于田县吉音水利枢纽工程高趾墙的设计作为工程实例

3.1 工程概况

吉音水利枢纽工程位于新疆和田地区于田县境内的克里雅河干流上，坝址位于克里雅河支流乌什开布隆达里亚河与克里雅河干流吾格也克河交汇口上游约 830 米处，坝址以上控制流域面积 6375km²。该工程是克里雅河流域开发的控制性工程，是一项以灌溉、防洪为主，兼顾发电的综合性水利工程。吉音水利枢纽工程由拦河坝、表孔溢洪洞（导流洞改建，竖井水平涡旋流消能形式）、底孔泄洪、冲沙、放空洞、发电引水洞、地面厂房及电站尾水渠等组成。为 II 等工程。根坝址区 50 年超越概率 10%、5% 及 100 年超越概率 2% 的基岩水平向峰值加速度分别为 153.4gal、204.6gal、339.6gal。

3.2 混凝土面板堆石坝设计概述

挡水建筑物采用砼面板堆石坝，坝顶高程 2513.00m，坝顶宽度为 10m，坝长 489m，最大坝高 124.5m，上游坝坡 1:1.4，下游坝坡：高程 2513.00m~2478.00m 之间下游坝坡 1:1.4，高程 2478.00m 以下下游坝坡 1:1.3，最大断面下游平均坡度约为 1: 1.54。坝顶上游侧设置“L”形 C25 钢筋砼防浪墙，防浪墙顶高程 2514.20m，墙高 4.0m，墙顶高出坝面 1.2m。坝顶采用沥青砼路面，厚 5cm。坝顶路面向下游单向倾斜，坡度为 2%，拦河坝在下游坝坡设坡度为 8% 的“之”字形上坝公路。

混凝土面板堆石坝坝体填筑分区从上游至下游分为上游盖重区、上游铺盖区、砼面板、垫层区、特殊垫层区、过渡料区、堆石料区、次堆石料区。

3.2 高趾墙设计方案的拟定

本工程坝址区为不对称的“V”形河谷，河床为下切深河槽，水面宽 11m，左岸为高 35~50m 的基岩陡坡，天然坡度 60~80°，陡坡接宽阔的 III 级阶地，阶地面高程 2470~2530m，阶地面宽 300~500m；右岸天然坡度 45° 左右，坡面直至右岸山顶；河槽上开口宽度约为 70m，河槽宽高比为 2.0。本工程在下切河槽段如采用常规趾板布置方案则开挖量巨大，且

面板与岸坡连接处易发生不均匀沉降，因此考虑在该段采用高趾墙型式以改善上述问题。

高趾墙顶部高程 2429.10m，底部高程 2388.50m，墙高 40.60m，高趾墙的断面形式采用等腰梯形断面形式，顶宽 2.0m，最大墙高处底宽 4.0m，在趾墙顶部再通过连接板与趾板相连，具体布置详见图 1，图 2。

高趾墙基础位于强风化层底部相对坚硬的岩石上。高趾墙在施工期由于温度变化会引起趾墙产生水平温度发状裂缝，同时蓄水期趾墙由于受到两岸岩体的约束以及不适应堆石体的变形均会造成高趾墙的开裂，使高趾墙防渗性能受到损害，因此为减少以上裂缝产生的几率降低裂缝的开展宽度在高趾墙上下游侧均布设钢筋网，竖向配筋率 0.1%，水平向设分布钢筋。为保证高趾墙上下游在施工期及运行期受力相对均衡，在高趾墙上游填筑堆石盖重，盖重顶部高程与高趾墙同高，顶宽 15m，上游坡度 1:1.5；高趾墙下游为保证在运行期对趾墙提供良好的支撑，均匀传递水压力，防止高趾墙及趾墙顶部接缝因过大变形而破坏，避免高趾墙应力集中，基于以上考虑在高趾墙下游设置垫层料区和过渡料区，水平宽度分别为 6m 和 4m。

3.3 高趾墙结构的计算

由于高趾墙在施工期和运行期的受力较复杂，本工程采用三维动、静力有限元分析法对高趾墙在不同工况下的应力、应变情况，高趾墙与趾板、面板的连接形式以及周边缝的变形等问题进行计算分析，计算过程如下：

3.3.1 计算内容

(1) 三维静力有限元分析

分析高趾墙的应力与应变，研究混凝土面板和趾板与高趾墙之间的伸缩缝、周边缝和其它连接缝在竣工期、满蓄期的应力变形等情况；根据三维应力应变计算成果，分析本工程高趾墙设计在技术上的可行性。

(2) 三维动力有限元分析

高趾墙动力计算同时考虑水平向和竖向地震作用，计算高趾墙在地震工况下的动力反应，了解墙体地震反应加速度及放大倍数，计算高趾墙的动应力，计算高趾墙与趾板及面板间伸缩缝、周边缝及其它连接缝的动变形。

3.3.2 计算模型及计算方法

(1) 有限元模型

根据河床段高趾墙布置型式采用趾板通过一块连接板与高趾墙连接的方案建立大坝三维有限元模型，为了考虑上游回填开挖料和弃渣料的土压力作用，这部分区域也进行了三维

网格剖分。

面板、高趾墙、防渗墙、趾板、连接板、坝体堆石料、回填开挖料等采用六面体等参元和退化的四面体单元。在面板与垫层交界面，趾板与垫层交界面，以及高趾墙与垫层交界面等位置设置 8 节点空间 Goodman 单元，面板竖缝、面板周边缝和高趾墙施工缝采用 8 节点空间缝单元。坝体三维空间网格图、高趾墙网格图分别见图 3 和图 4。

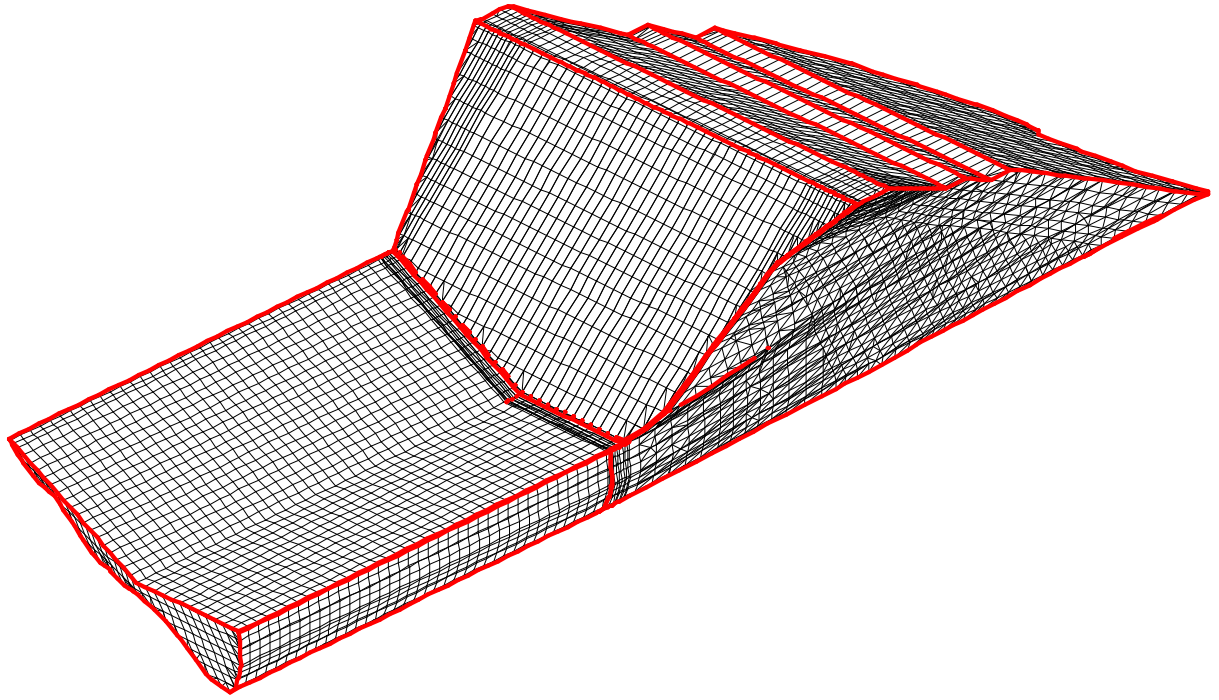


图3 坝体三维空间网格图（单元数：55643；节点数：35482）

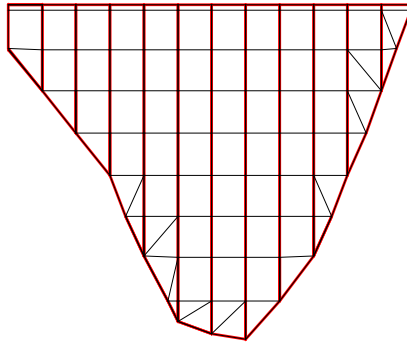


图4 高趾墙网格图

(2) 材料模型

静力计算时：堆石料采用非线性模型（邓肯 EB 模型）；在混凝土面板、趾板、高趾墙与垫层料之间设置无厚度古德曼（Goodman）接触面单元，接触面的本构关系采用邓肯和克拉夫提出的双曲线模型；混凝土面板之间的伸缩缝，混凝土面板与趾板、趾板与高趾墙间的周边缝有止水片等连接材料，为模拟缝中止水连接材料的力学作用，设置六面体连接单元；面板、高趾墙、防渗墙、趾板和连接板也采用线弹性材料。计算参数见表 3、表 4 和表 5。

表 3 邓肯 E-B 模型试验参数

试样名称	ρ (g/cm ³)	Φ_0 (°)	$\Delta\Phi$ (°)	K	n	R_f	K_b	M
堆石料	2.16	46.8	9.7	1197.5	0.47	0.79	790.1	-0.24
过渡料	2.16	46.8	7.6	1135.2	0.23	0.86	820.2	-0.23
垫层料	2.21	45.5	9.2	1318.1	0.27	0.76	766.7	-0.29

表4 接触面模型参数

材料	K_1	n	δ	R_f
面板和垫层之间接触面	4800	0.56	36.6	0.74

表5 线弹性模型参数

材料	ρ (g/cm ³)	E (MPa)	ν
面板、趾板	2.4	25500	0.167
高趾墙、防渗墙	2.4	25500	0.167

动力计算时：堆石料动力计算本构模型采用等效线性粘弹性模型；接触面单元的动力模型采用河海大学的试验结果；缝间连接材料及混凝土材料与静力材料参数相同。计算参数见表6、表4和表5

表6 动力特性试验模型参数

试样名称	K	n
堆石料	3150	0.505
过渡料	2502	0.592
垫层料	2550	0.594

(3) 计算方法

在静力计算时考虑坝体填筑和蓄水过程采用分荷载步叠加的方法，该方法可以有效模拟实际坝体填筑和蓄水过程中坝体土压力和水压力对高趾墙的作用。有限元模拟的荷载步共分为92级。蓄水共分20级，正常蓄水位2509.0m，表7汇总了大坝填筑和蓄水的荷载步，其中度汛从37~63步，之前连接板并未铺设此时采用土工膜或其它防渗措施，连接板的设置是在度汛完成之后，高趾墙在度汛水位水压力下充分变形后再通过连接板与趾板相连；面板分2期浇注，一期面板设置在第41步，完成于度汛水位到达前，二期面板设置在第72步；竣工期为第72步，满蓄期为第92步。

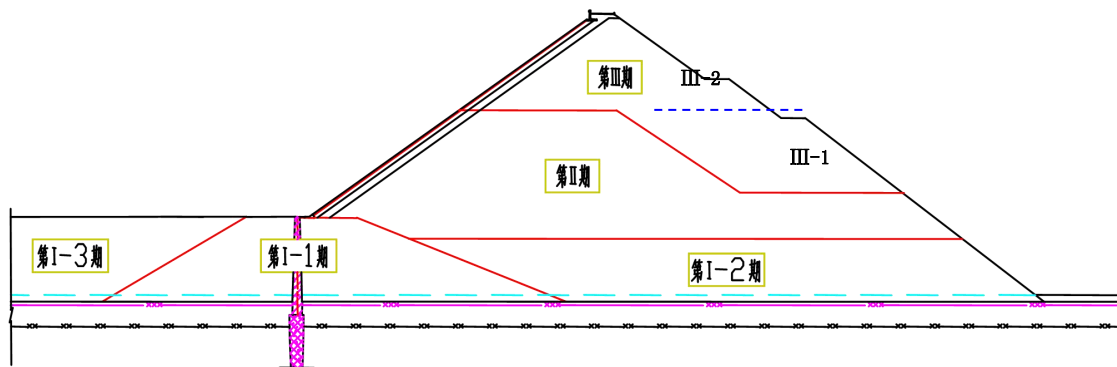


图5 大坝填筑分区图

表 7

大坝填筑和蓄水有限元模拟荷载步

施工阶段		高程 (m)	有限元荷载步	备注
大坝填筑	I-1	2429.1	1~25	
	I-2	2420.0	21~25	
	I-3	2429.1	19~25	
	II	2473.0	26~35	
	III-1	2473.0	36~42	
面板浇筑一期		2473.0	41	连接板未铺设, 连接板的铺设在度汛完成之后, 设置在第 64 步
度汛		2473.0	37~63	水位先升后降
大坝填筑	III-2	2513.0	64~71	
面板浇筑二期		2510.0	72	
蓄水		2509.0	73~92	

土石坝地震永久变形分析采用 Serff 和 Seed 等提出的应变势概念为基础建立的整体变形计算方法。

3.3.3 计算结果

高趾墙竣工期时, 在堆石体侧向压力作用下, 高趾墙向上游变形, 最大顺河向位移为 5.11cm, 竖向沉降和坝轴向位移均很小, 分别为为 0.35cm 和 0.19cm; 满蓄期, 由于水压力的作用, 高趾墙最大顺河向位移为 4.65cm (向下游), 竖向沉降有所增加, 为 0.53cm, 坝轴向位移变化不大, 为 0.23cm。

竣工期, 高趾墙最大压应力为 5.7MPa, 发生在上游侧的底部局部范围, 最大拉应力为 3.6MPa, 发生在下游侧的底部局部范围。

满蓄期, 高趾墙最大压应力为 9.5MPa, 发生在下游侧的底部局部范围, 最大拉应力为 5.7MPa, 发生在上游侧的底部局部范围。

满蓄期高趾墙和连接板之间连接缝沿缝走向剪切位移最大值为 0.26cm, 位于靠近右岸侧; 连接缝沿连接板法向剪切位移最大值为 1.80cm, 位于靠近河床的部位, 表明在水压力作用下连接板沉陷; 连接缝中部处于压缩状态, 压缩量很小, 两端处于张开状态, 最大值为 0.46cm, 发生在靠近右岸侧。

高趾墙在地震工况下动静叠加应力为: 最大压应力为 10.2MPa, 最大拉应力为 6.8MPa; 高趾墙和连接板之间的连接缝的静动叠加位移最大值分别为 0.33cm (沿缝走向剪切), 2.01cm (沿连接板法向剪切), 0.48cm (张开), 0.04cm (压缩)。

地震后, 高趾墙最大压应力为 9.3MPa, 最大拉应力为 5.6MPa; 高趾墙和连接板之间的连接缝位移最大值分别为 0.28cm (沿缝走向剪切), 2.32cm (沿连接板法向剪切), 0.55cm (张开)。

4 结论

(1) 在吸收和借鉴其他工程经验的基础上, 本文所提出的类比混凝土防渗墙的设计理念, 在窄深河谷段混凝土面板堆石坝采用高趾墙作为垂直防渗体并通过连接板与趾板连接构成封闭的防渗体系的设计思路是可行的。

(2) 通过对高趾墙进行三维动、静力有限元分析, 高趾墙在模拟了分步加荷的过程及地震过程后其应力和位移均在安全范围之内, 说明高趾墙本身的结构安全性是可以满足的。

(3) 高趾墙通过连接板与趾板相连, 即高趾墙与面板之间通过三道周边缝来吸收不均匀沉降的作用是显著的, 各条连接缝的相对位移均在止水材料可满足的范围之内, 说明高趾墙作为垂直防渗体与面板坝上游防渗体的结合是可靠的能满足坝体的抗渗要求。

参考文献:

- [1]SL228-2013.混凝土面板堆石坝设计规范[S].
- [2]SL274-2001.碾压式土石坝设计规范[S].
- [3]曹克明;汪易森;徐建军;等.混凝土面板堆石坝[M].北京:中国水利水电出版社, 2008
- [4]关志诚;.混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究[M].北京:中国水利水电出版社, 2005
- [5]大连理工大学水利学院工程抗震研究所.新疆吉音水利枢纽工程混凝土面板堆石坝筑坝材料实验和三维有限元静动力计算分析[R].乌鲁木齐:新疆水利水电勘测设计研究院, 2011
- [6]陆希;安盛勋;陈念水;等.公伯峡面板堆石坝右岸高趾墙设计[J].水力发电, 2004, 30(8): 38 -40.
- [7]司富安;林万胜;.青海省黑泉水库混凝土面板坝的工程地质问题与工程处理措施[J].工程地质学报, 2004, 12(2):167-170
- [8]沈凤生;.混凝土面板堆石坝设计与实践关键技术研究[J].水利规划与设计 2017,01:1-6+10
- [9] 中国水利水电科学研究院, 新疆吉音水利枢纽工程混凝土面板堆石坝应力变形计算分析研究[R].乌鲁木齐:新疆水利水电勘测设计研究院, 2016
- [10]李振纲;.吉音水利枢纽工程混凝土面板坝高趾墙设计[J].水力发电,2011,37(10):44-47
- [11]李振纲;.吉音水库混凝土面板堆石坝设计[J].水利水电技术,2016,47(03):21-22+26

[12]李振纲;. 吉音水利枢纽混凝土面板堆石坝变形控制研究 [J].水利规划与设计,2019,10:85-88

[13]郭娜;沈振中;姜媛媛;等.海甸峡面板堆石坝高趾墙性态计算研究[J].水电能源科学, 2005,23(2):83-85

[14]曾雪艳;三板溪水电站边挡墙兼高趾墙设[J].中南水力发电, 2005(4):10-12.