

严寒、高震、深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述

邓铭江

(新疆维吾尔自治区水利厅, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:自20世纪90年代以来,新疆的水库建设已从平原水库转入山区水库建设,以混凝土面板砂砾石坝为主要的当地材料坝,得到了迅速发展。新疆于20世纪70年代末,开始引进混凝土面板坝筑坝技术,采用天然砂砾石填筑百米级高坝,是区别于一般面板堆石坝的主要特点。针对严寒地区、深覆盖层、高地震区等不良环境地质条件,全面总结基础上系统地建立了混凝土面板砂砾石坝筑坝关键技术体系,阐述了在抗震结构设计、坝体变形控制、坝体渗流控制等方面取得的创新突破,研究指出施工工艺的不断改进,大型机械压实功能的不断增强,为该坝型推广应用和安全性能提高,提供了重要的技术保障。对于提高混凝土面板砂砾石坝建设和运行管理水平具有重要意义。

关键词:混凝土面板坝;砂砾石;关键技术

中图分类号: TV632 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)06-0985-12

作者简介: 邓铭江(1960-),男,湖南耒阳人,博士,教授级高级工程师,主要从事水利工程建设管理和水资源规划研究工作。E-mail: xjdmj@163.com。

Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions

DENG Ming-jiang

(Xinjiang Water Resources Department, Urumqi 830000, China)

Abstract: Since the 1990s, Xinjiang's reservoir construction has changed from plain reservoirs to mountainous ones, and the concrete face sand gravel dam as the main dam by use of local materials has been rapidly developed. In the late 1970s, Xinjiang began to introduce the construction technology of concrete face rockfill dam and adopted the natural sand gravel to build dams with a height of over 100 meters, which are the main characteristics different from those of the common face rockfill dams. Aiming at hiemal zone, unfavorable environmental geology conditions such as deep overburden and high seismic zone, a key technical system for concrete face sand gravel dams is established and summarized. The innovative breakthroughs in the aspects of aseismatic structural design, deformation control and seepage control of dam body are achieved. This study indicates that the increasing improvement of construction technology and the continuous enhancement of compaction function of large machines provide important technical supports for the safety performance and popularizing application of this dam type. So it has great significance for improving the construction and operation level of concrete face sand gravel dams.

Key words: concrete face dam; sand gravel; key technology

1 混凝土面板坝国内外发展趋势

抛投式堆石混凝土面板坝是世界最早较多采用的一种坝型,从1895年美国建成莫拉坝至今,混凝土面板堆石坝的建设与发展已经历100多年。但当坝高超过100m时,由于坝体变形较大,面板裂缝严重,而一度转向黏土防渗土石坝。20世纪60年代后期,随着薄层碾压技术的发展,国际坝工界扬弃了传统的抛填式面板堆石坝,逐步发展了新型的碾压式混凝土面板堆石坝,自从1971年建成澳大利亚的Cethana混凝土面板堆石坝,将重型振动碾薄层碾压堆石、面板只

设竖缝不设水平缝等新技术应用于面板坝取得成功经验后,混凝土面板堆石坝获得复兴,并取得了迅猛发展^[1]。中国在1988年建成了第一座碾压式混凝土面板堆石坝——关门山水库大坝,坝高58.5m,1990年建成了西北口水库大坝,坝高95m。1999年建成的天生桥一级,坝高178m,仅次于墨西哥的阿瓜米尔巴坝,当时属世界第二高坝,但其水库库容、坝体体积、

基金项目:水利部2009年公益性行业科研专题经费资助项目(200901084)

收稿日期:2011-07-21

面板面积等都居世界第一。2009年建成的湖北水布

堰, 坝高233 m, 为目前世界第一高坝。在建设实践

表1 中国混凝土面板坝主要特性表

Table 1 Main characteristics of concrete face dams in China

序号	大坝名称	省别	建成年份	坝高/m	坝顶长/m	装机/(万 kW)	库容/(亿 m ³)
1	水布堰	湖北	2009	233	660	160	45.8
2	天生桥一级	贵州	1999	178	1104	120	102.6
3	三板溪	贵州	2007	185.5	423.3	100	40.95
4	洪家渡	贵州	2005	179	427.79	60	49.47
5	紫坪铺	四川	2006	158	663.77	76	11.12
6	吉林台一级	新疆	2006	157	445	46	25
7	乌鲁瓦提	新疆	2003	133	365	6	3.47
8	珊溪	浙江	2001	132.5	448	20	18.24
9	公伯峡	青海	2005	132.2	429	150	6.2
10	引子渡	贵州	2004	129.5	276	36	5.31
11	白溪	浙江	2001	124.4	398	1.8	1.684
12	泰安抽水蓄能	山东	2005	100.5	540.46	114.7	1.432

表2 新疆混凝土面板砂砾石堆石坝工程建设统计表

Table 2 Construction statistics of concrete face sand gravel dams in Xinjiang

序号	水库大坝	坝型	建成年份	河流	地点	坝高/m	坝长/m	总库容/(亿 m ³)	装机/(MW)
1	吉林台一级	堆石坝	2006	喀什河	尼勒克	157	445	25.3	460
2	吉勒布拉克	堆石坝	在建	哈巴河	哈巴河	146.3	467	2.32	140
3	乌鲁瓦提	砂砾石坝	2003	喀拉喀什河	和田县	138.0	365.0	3.47	60.0
4	肯斯瓦特	砂砾石坝	在建	玛纳斯河	玛纳斯县	129.4	475	1.88	100
5	吉音水库	堆石坝	在建	克里雅河	于田县	124.5	489	0.82	34
6	察汗乌苏	砂砾石坝	2007	开都河	巴州	110	352	1.25	309
7	斯木塔斯	砂砾石坝	在建	阿克牙孜河	昭苏县	106	141.23	1.449	110
8	柳树沟	堆石坝	在建	开都河	巴州	106	183.5	0.771	180
9	温泉水电站	堆石坝	在建	喀什河	尼勒克	102	306	2.066	135
10	中葛根	砂砾石坝	在建	中葛根河	奇台县	77.63	210.05	0.1365	—
11	下天吉	砂砾石坝	2006	精河	精河县	71.5	207	0.1438	—
12	榆树沟	堆石坝	2000	榆树沟河	哈密市	67.5	293.5	0.1072	—
13	白杨镇	砂砾石坝	在建	白杨河	额敏县	66.47	310	0.4463	5.4
14	哈拉布拉	堆石坝	2007	哈拉布拉河	裕民县	63.85	183	0.1436	—
15	喀浪古尔	砂砾石坝	2003	卡浪古尔河	塔城市	61.5	465.4	0.3900	5.8
16	小石峡	砂砾石坝	在建	库马拉克河	温宿县	61.3	821	0.69	110
17	四道沟	砂砾石坝	在建	四道沟	哈密市	55.56	250.5	0.057	—
18	煤窑沟	堆石坝	在建	煤窑沟河	吐鲁番市	44.8	3227	0.098	—
19	柯柯亚	砂砾石坝	1982	柯柯亚河	鄯善县	41.5	120	0.1051	—
20	哈巴河山口	砂砾石坝	1995	哈巴河	哈巴河县	40.5	550	0.5	25.2
21	木垒白杨河	砂砾石坝	1990	白杨河	木垒县	39	466	0.0478	—
22	伯依布谢	堆石坝	1996	伯依布谢河	裕民县	35.5	190.8	0.0620	—
23	莫德纳巴	堆石坝	2000	莫德纳巴河	托里县	30.57	125.7	0.038	—

中中国重视科研和开发, 筑坝技术取得了较大发展, 并形成和颁布了设计和施工的行业规范, 进一步指导工程实践。到2009年, 全球建成的坝高100 m以上的42座混凝土面板堆石坝中, 有12座在中国^[2-3], 见表1。

2 新疆混凝土面板坝发展趋势和主要技术需求

2.1 建设概况

新疆是国内率先引进面板坝的省区, 1981年在37.5 m的深覆盖层上建成第一座坝高41.5 m的柯柯亚水库, 2000年建成第一座坝高67.5 m的榆树沟坝面

溢流混凝土面板堆石坝, 1995年开工建设当时列全国第二高坝的乌鲁瓦提水库, 2006年建成的吉林台一级水电站坝高目前列全国第六, 同时也是全国首座9度设防的混凝土面板砂砾石坝。由于这种坝型具有就地取材、造价低、施工便捷等优点, 在新疆迅速得到了推广。30 a来, 共建成面板堆石坝23座, 其中坝高100 m以上的有9座(见表2), 在许多关键技术的研究与应用方面有新突破^[4-8]。若以“天然砂砾石填筑坝体”和“坝面溢流”而论, 新疆是名列前茅的。

新疆利用天然砂砾石填筑百米级高坝, 并针对严寒地区、高地震区、深覆盖层等不良环境地质条件, 系统地建立了修筑混凝土面板砂砾石坝的关键技术体

系, 在抗震结构设计、坝体变形控制、坝体渗流控制等方面不断创新突破, 使该坝型成为应用最为广泛的当地材料坝, 面对恶劣环境和诸多不良地质条件, 其筑坝技术在挑战—突破—再挑战—再突破中取得了长足的发展。当前, 在高地震区、深厚覆盖层地质条件下, 建设 200 m 以上的高混凝土砂砾石面板坝, 是摆在我们面前的又一次重大挑战。近期计划建设的阿尔塔什水利枢纽坝高 162.8 m, 河床覆盖层深达 103 m; 大石峡、玉龙喀什河、乔巴特水利枢纽坝高分别为 251 m、229.5 m、220 m, 其中大石峡、玉龙喀什河水利枢纽坝址区地震基本烈度为Ⅷ度, 大坝设防烈度为 9 度。

2.2 主要技术需求

(1) 坝体填筑材料问题

目前国内外已建成的混凝土面板坝, 坝体多是利用爆破料填筑, 由于堆石体孔隙率较大, 遇水软化, 颗粒棱角易破碎等缺陷, 造成施工期产生的主压缩变形和运行期产生的次压缩变形均较大。砂砾料比堆石料具有更高的压缩模量, 其填筑后的坝体沉陷量较小, 可大大改善坝体和面板的变形、应力状态, 这对于处在高地震烈度区的坝体安全尤为重要。新疆利用天然砂砾石填筑坝体, 成本低廉, 可有效降低工程造价, 是区别于一般面板堆石坝的主要特点。

(2) 高地震区坝体渗流控制及抗震结构设计

坝体渗流控制, 是面板坝建设的核心技术。在渗流控制方面, 由于坝料的工程特性不同, 砂砾料与爆破料的坝体结构设计思想截然不同。确保面板、趾板、变形伸缩缝和基础灌浆等防渗系统的设计和施工质量, 是混凝土面板砂砾石坝的第一道防渗线; 面板后的垫层料和过渡料, 是第二道防渗线; 在坝体中设置专门的排水系统或利用渗透系数较大的坝壳料, 实行自由排水, 降低坝体内的浸润线, 这对砂砾石坝料尤其重要, 有利于坝体的稳定。垫层料与过渡料之间、过渡料与主堆石料之间必须同时满足反滤过渡要求, 确保层间不产生渗透破坏。在抗震结构设计方面, 主要采用适度偏高的设计坝高、较为密实的填筑压实标准和较缓的坝体边坡。

(3) 高地震区坝体变形控制及坝料分区填筑技术

变形控制和渗流控制, 都是坝体抗震设计的重要内容, 可以说, 面板砂砾石坝的抗震结构设计是建立在坝体变形控制之上的。在变形控制方面, 根据天然砂砾料、爆破料、弃渣料等坝料的工程特性, 科学划分填筑分区, 制定严格的碾压标准, 主堆石区选用级配良好的天然砂砾石料填筑, 科学用料, 精心施工, 做好垫层区、排水区、次堆石区和下游坝脚弃渣盖重区的填筑压实, 最大限度地减小堆石体施工、运行以

及地震造成的变形, 保证面板和接缝止水防渗的可靠性, 确保面板坝的施工质量。

(4) 严寒、高震、高混凝土面板坝周边缝止水结构研究

严寒地区、高地震区、高坝等特殊条件下, 面板与趾板连接处的周边缝、面板划分条块的垂直缝、分期浇筑面板间的水平缝、面板与防浪墙地板间的水平缝以及垂直缝中的张性缝和压性缝等不同类型、不同部位的接缝止水结构的设计和止水材料的选择, 对提高可靠性、方便施工、适应一定的变形等十分重要, 也是面板坝防渗系统的关键环节。

(5) 深覆盖层面板堆石坝筑坝技术

在深厚覆盖层上修建面板坝, 由于覆盖层会产生较大的沉降值和不均匀沉降差, 防渗面板、周边缝以及基础防渗墙与趾板的连接也会因变形过大而导致开裂。20世纪80年代以前, 这是一个禁区, 国外规范明文规定混凝土面板堆石坝必须建造在基岩上。中国最早建在深覆盖层上的面板砂砾石坝是柯柯亚水库^[9], 覆盖层深 37.5 m, 2007 年建成的察汗乌苏水电站坝高 107.6 m, 坎基覆盖层最大深度为 46.7 m^[10]; 近期计划开工建设的阿尔塔什水利枢纽混凝土面板坝坝高 162.5 m, 覆盖层最深 100 m; 在叶尔羌河上游拟建的依扎克水电站坝高 162 m, 覆盖层最深 100 m。因此, 如何控制坝体和坝基变形, 确保防渗体系安全、可靠性, 是当前深厚覆盖层上建设混凝土面板砂砾石坝面临的主要挑战。

3 严寒、高震、深覆盖层混凝土面板坝筑坝关键技术

3.1 混凝土面板坝筑坝关键技术

(1) 坝体渗流控制关键技术研究

在渗流控制方面, 由于坝料的工程特性不同, 砂砾料与爆破料的坝体结构设计思想截然不同。利用天然砂砾石填筑坝体, 是新疆区别于一般面板堆石坝的主要特征。渗流控制是高地震区混凝土面板砂砾石坝坝体结构设计的关键, 总结提出的“一防、二限、三排、四滤”的设计准则, 是坝体结构设计与渗流控制的核心技术。一防是指必须确保面板、趾板、变形伸缩缝和基础灌浆等防渗系统的设计和施工质量, 这是混凝土面板坝防渗的第一道防线; 二限是指当面板和接缝一旦产生开裂, 垫层料和过渡料应具有限制进入坝体渗流量的作用, 这是大坝的第二道防渗线; 三排是指对进入坝体的渗水必须尽快排出, 降低坝体内的浸润线; 四滤是指各填筑区之间的过渡反滤关系必须同时得到满足, 确保坝体渗透稳定(参见图 1)。遵循这一设计准则, 2000 年和 2006 年先后建成当时全国

最高的混凝土面板砂砾石坝,即乌鲁瓦提水利枢纽(坝高133 m)和吉林台一级水电站(坝高157 m)^[11-15]。

在严寒地区修建面板堆石坝,垫层料的细料含量及其渗透系数一直是人们普遍关心的问题。国内寒冷地区早期建成的一些面板坝工程(如辽宁关门山坝),因顾虑冻胀问题而按采用排水的思路来设计垫层,垫层料采用较粗级配,减少5 mm粒径以下颗粒含量,控制渗透系数不小于 10^{-2} cm/s。但后期建成的面板坝,特别是在新疆等地修建的混凝土面板砂砾石坝(如乌鲁瓦提坝),则从加强渗流控制、保证垫层的渗透稳定性出发,更加强调垫层料的半透水性和垫层作为第二道防渗线的作用,要求垫层料为连续级配料,其最大粒径不超过80 mm,小于5 mm粒径含量控制在35%~50%,小于0.1 mm粒径含量不超过8%,渗透系数大多控制在 10^{-3} ~ 10^{-4} cm/s范围内。对于采用细粒含量较多、渗透系数较小的垫层,一些设计者顾虑的问题有两个:一是在发生库水位骤降时垫层中的水不易排出,将对面板产生浮托力,不利于面板的稳定;二是垫层中的积水在严寒地区的冬季容易发生冻胀,破坏面板。已有的工程实践表明:由于垫层较薄,又是倾斜布置在坝体中,位于其后的过渡层、主堆石料的渗透系数较垫层料大数十倍以上,故进入垫层的渗水在重力作用下,渗流基本上是垂直向下的,很容易排出,不会出现上述的危险。还有一些学者担心细粒含量较多会影响垫层的抗剪强度,其实,在采用连续级配砂砾石料且保证填筑标准的情况下,垫层可达到

较高的压实密度和抗剪强度,能够满足工程需要,这已被较多工程实践所证明。

(2) 坝体变形控制关键技术研究

在变形控制方面,根据砂砾料、爆破料、弃渣料等坝料的工程特性,科学划分填筑分区,研究提出的“主堆石区选用级配良好的天然砂砾石料填筑,科学用料,精心施工,做好垫层区、过渡料区、排水区、次堆石区和下游坝脚弃渣区的填筑压实,最大程度地减小坝体施工、运行以及地震造成的变形,有效防止混凝土面板开裂变形”的施工关键技术,有效解决了在深覆盖层、高地震区、严寒地区等不良工程地质条件下,建设高面板坝的诸多技术难题。研究表明:目前国内已建成的混凝土面板坝,坝体多是利用爆破石料填筑,由于堆石体存在孔隙率较大、遇水软化、颗粒棱角易破碎等缺陷,造成施工期产生的主压缩变形和运行期产生的次压缩变形均较大。天然砂砾料比堆石料具有更高的压缩模量,其填筑后的坝体沉陷量较小,可大大改善坝体和面板的变形、应力状态,这对于处在高地震烈度区的坝体安全尤为重要。乌鲁瓦提、吉林台一级大坝在坝体施工填筑中,各分区均采用较高的填筑标准,砂砾料压实后的相对密度均超过其原设计要求(参见表3),这样一来,解决面板开裂变形、大坝抗震安全等关键问题,也变得容易多了^[16-19]。

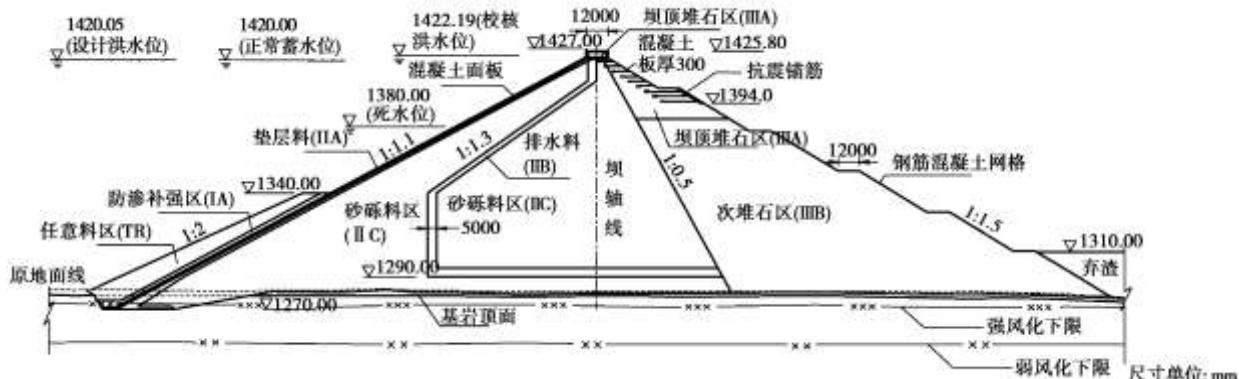


图1 吉林台一级水电站混凝土面板砂砾石坝典型剖面图

Fig. 1 Typical section of concrete face sand gravel dam of Jilintai No.1 Hydropower Station

表3 乌鲁瓦提、吉林台一级大坝分区填筑相对密度检测结果

Table 3 Test results of relative density for partition filling of Wuluwati Dam and Jilintai No.1 Dam

工程名称	项目	小区垫层料	垫层料	过渡料	砂砾石主堆石区
乌鲁瓦提 大坝	检测样本数	196	275	185	416
	平均值	0.96	0.938	0.939	0.93
	设计值	≥ 0.9	≥ 0.85	≥ 0.85	≥ 0.85
	合格率/%	100	100	100	100
吉林台一级 大坝	检测样本数	54	340		419
	平均值	0.914	0.902		0.891

设计值	≥ 0.85	≥ 0.85	≥ 0.85
合格率/%	100	100	100

截至 2009 年吉林台一级大坝坝体最大沉降量为 80 cm, 是设计控制最大沉降值 160 cm 的 50%, 目前大坝沉降已趋于稳定。乌鲁瓦提大坝施工期(截至 2000 年 5 月) 坝体最大沉降量为 38.4 cm, 比原设计控制最大沉降值 60 cm 降低 36%, 至 2008 年 3 月初高水位运行 7 a, 坝体最大沉降量为 44.9 cm, 表明坝体施工质量较好。所以, 从坝体变形控制和提高抗震安全性能的角度看, 砂砾石料是高混凝土面板坝的理想筑坝材料。

根据《混凝土面板堆石坝施工规范》要求, 坝料填筑时应加水碾压, 并规定砂砾石料加水量宜为填方量的 10%~20%。根据多项工程的现场碾压试验表明: 砂砾石料填筑加水碾压 6 遍, 与不加水碾压 8 遍, 可取得同样的效果。因此, 有的工程在暖季施工中实施了洒水碾压, 而有的工程考虑到加水碾压不仅会增加施工工序, 增加费用, 干扰现场布置, 加剧细颗粒含量较高的砂砾石料粗细颗粒的分离, 则直接实施干碾压实。

在严寒地区, 利用冬季进行坝体填筑施工, 往往可缩短工期, 其效益是明显的。但应注意处理好以下事项: ①清除料场表层冻土层, 在坝面现场发现冻块后, 应及时清除, 冻块掺合在坝料中很难碾碎, 无形中增大了坝料的粗颗粒含量, 冻块解冻后形成松散状, 失去骨架作用, 使填筑体空隙增大, 坝体产生不均衡沉降, 并且增加大坝沉降量。②尽可能使用干燥的砂砾料, 在进入冬季前对料场采取降低地下水等措施, 以减少坝料的含水率, 不宜在河床内或地下水位较高区域取用上坝料。③保证一次性碾压合格, 冬季填筑所用坝料, 均含有一定的水分, 受气温的影响, 在铺料碾压层面, 一般 2 d 冻深可达 40~60 cm, 为不影响压实效果, 适当减薄铺料厚度, 控制好铺料、推平与碾压时间, 紧密衔接各施工工序, 保证一次性碾压合格, 防止碾压不合格后, 因碾压面受冻, 无法进行补碾。④垫层区上游坡面固坡处理。目前固坡处理的方法有碾压砂浆、喷乳化沥青、喷混凝土或砂浆、挤压边墙等, 但在冻土层厚达 80~120 cm 的低温条件下, 垫层区上游坡面很容易被冻融破坏, 造成脱空和空鼓等现象, 清理整修和二次处理的难度较大。在吉林台一级施工采用喷改性阳离子乳化沥青及“三油三砂”的坡面保护结构取得了较好的效果, 具体施工方法: 在喷洒头遍乳化沥青后, 立即布撒一层砂料, 用斜坡碾静碾一遍, 将砂料压入垫层料, 形成较为粗糙的表面, 以利于后两遍沥青和砂料的黏结, 并在坡面保护

和垫层之间形成较好的嵌锁结构, 在混凝土面板浇筑前, 重新碾压后, 在其表面再做一道“一油一砂一碾”, 确保喷浆面坚实、平整, 以减少对面板的约束。

(3) 大坝抗震结构设计关键技术研究

在抗震结构设计方面, 充分利用砂砾料压缩模量较高、填筑坝体沉陷量较小的工程特性, 集成、改进并完善了“强压实、宽坝顶、缓坝坡、固顶部、压坝脚”等大坝抗震关键技术措施, 改善各种接缝特别是周边缝的应力状态, 提高坝体的抗震稳定性能(参见图 1) [20~24]。

3.2 周边缝“自愈型”止水结构及关键技术

根据高地震区、高坝和严寒地区的特殊要求, 吉林台一级电站采用了由“GBW—GB—重砂壤土”三层填料构成的周边缝“自愈型”止水结构(参见图 2), 其主要特点及关键技术为: ①在 550 cm² 的 GBW 遇水膨胀型嵌缝止水材料外围, 覆盖 550 cm² 的 GB 嵌缝止水材料, 作为止水结构的第一道自愈防线; ②外部覆盖的重砂壤土作为自愈填料, 是止水结构的第二道自愈防线, 以对任何可能的止水缺陷进行自愈修复; ③在周边缝铜止水鼻顶部设置 6 cm×10 cm 的 GB 填料, 其作用是作为第一道自愈止水 GBW 的堵头, 防止 GBW 的流失, 另外还可以对铜止水起保护作用; ④固定波形止水带的膨胀螺栓孔用聚合物丙乳砂浆回填, 以满足工程抗冻性的要求 [25~27]。这种止水结构, 在抗震性能、止水可靠性、自愈修复、方便施工、适应大变位等方面取到了创新突破, 已应用于在建的肯斯瓦特面板坝。

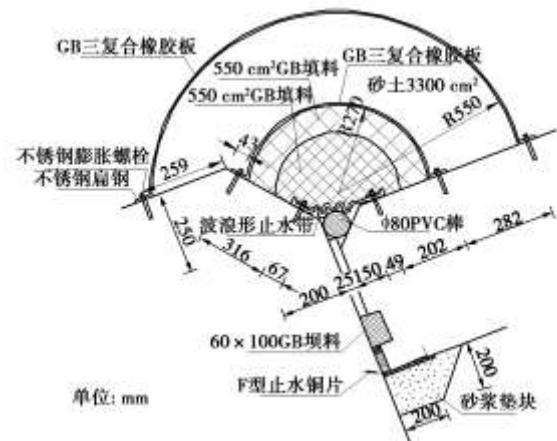


图 2 面板坝周边缝“自愈型”止水结构

Fig. 2 “Self-recovery type” waterstop structure for peripheral joints of concrete face dam

3.3 深厚覆盖层坝基防渗处理技术

国外在覆盖层上修筑的面板堆石坝比较有代表性的有智利的 Santa Juana 坝 (1995 年) 和 Puclaro 坝, 前者坝高 106 m, 覆盖层最大厚度 30 m; 后者坝高 83 m, 覆盖层最大厚度 113 m。近年来, 中国在覆盖层上修筑面板坝技术取得了较快的发展, 已建和即将兴建的工程已有 10 多座, 已建工程最大坝高超过 110 m。国内外建造在深厚覆盖层上的面板堆石坝建设情况见表 4^[28-43]。

(1) 槽孔混凝土防渗墙技术

覆盖层的物理力学特性对坝体和防渗墙应力变形性状的影响较大, 覆盖层的刚度与防渗墙混凝土的刚度越接近, 其变形协调性越好, 防渗墙的应力状态越好。覆盖层地基处理首先应通过勘探和室内外试验, 查研坝基覆盖层的分布情况、物理力学性质, 分析承载力、变形特性和渗透稳定性, 提供有限元计算参数, 为基础处理设计提供可靠依据。与帷幕灌浆、高压旋喷等覆盖层基础处理措施相比, 混凝土防渗墙适应各种地层的变形能力较强, 防渗性能好。目前国内混凝土防渗墙处理深度已达 150 m, 施工技术也比较成熟, 施工质量也可以得到保证, 已经成为覆盖层坝基处理

的重要手段。为了更好地适应各种地层的变形能力, 改善混凝土防渗墙的应力状态, 在保证耐久性的前提下, 研究采用低弹性模量的塑性混凝土, 是深覆盖层筑坝技术发展的一个重要研究方向。

新疆柯柯亚水库是中国最早建设在深覆盖层上的混凝土面板砂砾石坝, 该工程位于鄯善县柯柯亚河出山口处, 于 1978 年动工兴建, 最大坝高 41.5 m, 坝基为冲积砂砾层, 最大深度达 37.5 m。坝体填筑在覆盖层上, 坝基采用槽孔混凝土防渗墙。面板与防渗墙间用砂砾料填筑成圆弧形连接段, 其表面仍采用分离式混凝土板防渗, 形成拱形连接板, 以此吸收并调整面板与防渗墙之间的沉降差, 并采用柔性止水。坝体典型剖面参见图 3^[9]。

(2) 混凝土防渗墙与趾板连接结构

近几年在深覆盖层上修筑面板坝设计的趾板, 通常在防渗墙与趾板之间设置连接板, 以达到协调两个结构物变形, 减少坝体对防渗墙影响的效果。连接板之间及其与趾板、防渗墙的连接一般采用侧接方式。目前工程实践中重点关注的两个问题: 一是混凝土防渗墙和连接板结构及材料设计。高性能、低弹模混凝土

表 4 国内外建造在深厚覆盖层上的混凝土面板坝

Table 4 Worldwide concrete face rockfill dams with toeboard built on deep overburden

国别	工程名称	坝高/m	覆盖层厚度/m	覆盖层性质	建成年
中 国	察汗乌苏 (新疆)	107.6	47.6	砂砾石、含砾中粗砂	在建
	那兰 (云南)	108.70	24.3	砂砾石夹中、细砂	在建
	老渡口 (湖北)	95	30	卵砾石、砾砂、砂卵石	已建
	横山坝 (浙江)	70.2	72.26	铝红土、强风化基岩	已建
	汉坪嘴 (甘肃)	57	45.5	砂砾石	在建
	铜街子副坝 (四川)	48	73	砂砾石、粉细砂	已建
	柯柯亚 (新疆)	41.5	37.5	砂砾石	已建
	梅溪 (浙江)	40	30		已建
	梁辉 (浙江)	35.4	31.7	砂砾石	已建
	多诺 (四川)	112	34	含漂(块)碎砾石	拟建
国 外	大河 (广东)	50.8	37	砂砾石	已建
	斜卡 (四川)	108.2	100	粉土质砂、砂砾卵石	
	九甸峡 (甘肃)	133	56	碎石土层、砂砾卵石层	已建
	水布垭 (湖北)	233	21.7	砂卵砾石层	已建
	圣塔约那 (santa juana) 坝	106	30	砂砾石	已建
外	帕克拉罗 (puclar) 坝	83	113	砂砾石	已建
	Bou hanifia 坝	54	72	细砂层、微胶结	已建
	皮其皮克利复	50	30	砂砾石夹细砂	已建

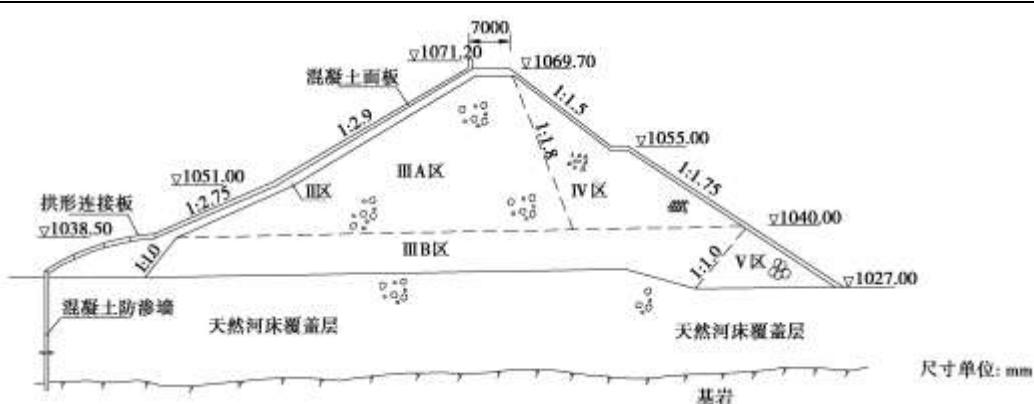


图3 柯柯亚水库混凝土面板砂砾石坝典型剖面图

Fig. 3 Typical section of concrete face sand gravel dam of Kekeya Reservoir

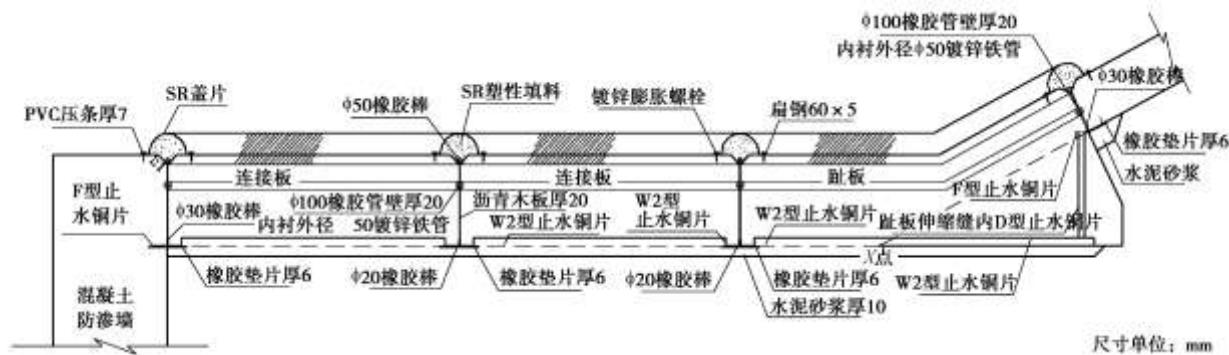


图4 察汗乌苏面板坝面板与混凝土防渗墙联接方式及缝止水结构示意图

Fig. 4 Structure of joint waterstop and linkage mode between concrete diaphragm wall and concrete face of Chahanwusu Dam

土材料研究,防渗墙、连接板、趾板、面板限裂配筋设计与措施等,是深覆盖层面板坝结构设计理论中亟待解决的问题。二是防渗墙、连接板、趾板之间的接缝止水构造。主要包括防渗墙、连接板、趾板、面板之间的变形特性研究,高性能接缝止水材料研究以及适应大变形的高性能止水材料及接缝结构研究等。

察汗乌苏水电站位于新疆开都河中游河段,工程于2004年开工建设,2007年首台机并网发电。坝址河床覆盖层最大深度约47.6 m,覆盖层以上最大坝高107.6 m。坝基采用槽孔混凝土防渗墙,河床部位趾板直接座落在覆盖层上,宽度为4 m,通过2块宽度为3 m的连接板与防渗墙相连,形成“4 m+3 m+3 m”布置形式(参见图4),连接板厚度均为0.8 m,接缝均采取柔性连接,以适应地基变形。缝宽20 mm,缝内设三道止水,缝顶设置塑性填料止水,缝中部设一道厚壁橡胶管止水,缝底部设一道W型(连接板与防渗墙连接用F型)铜片止水^[10]。

3.4 溢流混凝土面板坝技术

新疆早在1990年开始就开展了溢流混凝土面板堆石坝关键技术研究,并取得了一系列重要研究成果^[44]。继澳大利亚克罗蒂(Crotty)坝之后(参见表5),2002年建成中国了第一座溢流面板堆石坝—哈密榆树沟水库,简化枢纽布置,节省了工程投资,取得了良好的经济效益。

在溢流混凝土面板坝设计与施工中应特别注意以下关键技术:①选好筑坝材料,严格控制填筑密度,最大限度地控制溢洪道坝段的坝体绝对变形量;②溢洪道体型设计应力求缓变、平顺,不收缩,不扩散,以防止折冲水流的发生,并减小动水荷载(含拖曳力、脉动压力和冲击力等),使其自振频率远离高速水流脉动的基频,避免因共振导致结构失稳;③强化溢洪道

与堆石体锚固结构,以提高泄槽斜坡稳定性,加强系统的整体性;④根据水力模型实验,科学研究确定泄槽射流挑出长度,如果射流挑出过大,将会使空腔内压力过低或出现较大范围的负压对泄槽底板稳定不利;⑤坝体溢洪道的底板和边墙在结构上均应适当分段,并采用搭接-铰接连接,以防止坝体变形产生结构断裂;⑥作好出口段的消能,防止溯源破坏的发生。

3.5 高趾墙技术研究与应用

为了使围堰与坝体充分结合,降低工程造价,近年来,围绕斯木塔斯水电站和吉音水库开展了高趾墙技术研究与应用,目前这两座水库正在建设之中。斯木塔斯水电站位于阿克牙孜河中下游,最大坝高106 m,河床坝段采用混凝土趾墙垂直防渗,并与上游围堰相结合,趾墙最大高度31.5 m,墙顶宽3 m,底宽8 m。设计烈度为8度,坝体典型剖面参见图5。吉音水库位于和田地区克里雅河上,最大坝高124.5 m。河床段趾墙最大高度40.6 m,坝体典型剖面详见图6^[6]。

4 问题与讨论

(1) 关于在坝体内设置排水体问题。根据我国规程规范的要求和国内外使用砂砾石料修建混凝土面板堆石坝的经验,在坝轴线上游堆石区内设置竖向排水体,在坝体下部设置水平向排水体,降低坝体浸润线,对保护坝体渗流稳定是十分有利的^[45-47]。试验表明:当细粒 $d \leq 5$ mm含量大于35%时,压实后的堆石体渗透系数可达 10^{-3} cm/s,乌鲁瓦提坝壳料中的细粒含量仅为16%,碾压后的渗透系数仅能达到 $1.1 \times 10^{-2} \sim 6.2 \times 10^{-2}$ cm/s,坝壳料透水性较强。吉林台天然砂砾料中粒径 ≤ 5 mm的含量25.9%~20%,渗透系数 $1.7 \times 10^{-2} \sim 2.18 \times 10^{-2}$ cm/s。因此引发了在坝体内要不要设

置专门的排水系统的讨论，特别是大多数专家认为，没有必要设置竖向全断面排水体。近年来，在一些混

混凝土面板砂砾石坝设计中，大多取消了竖向排水体，但仍保留了水平排水体。

表 5 国内外已建和在建的溢流混凝土面板堆石坝统计表

Table 5 Statistics of worldwide rockfill dams with concrete facing overflow

工程特性	Crotty 坝	榆树沟坝	夹道子	桐柏下库	大城水库
坝高/m	80	67.5	50	70.6	42
溢洪道位置	坝体中部	坝体右岸	坝体中部	坝体中部	坝体中部
溢洪道泄槽净宽/m	12	22	132	27	8
溢洪道泄槽坡比	1:1.5	1:1.5	1:1.4	1:1.5	1:1.5
最大泄流流量/($m^3 s^{-1}$)	234	420	2727	496	200
最大单宽流量/($m^3 s^{-1} m^{-1}$)	19.5	21	20	19.08	25
最大工作水头/m	60	30	30	51.17	35
最大流速/($m s^{-1}$)	30	26	28.07	28	24
消能形式	挑流消能	挑流消能	挑流消能	挑流消能	挑流消能
建成年份	1993	2002	设计中	2006	2006

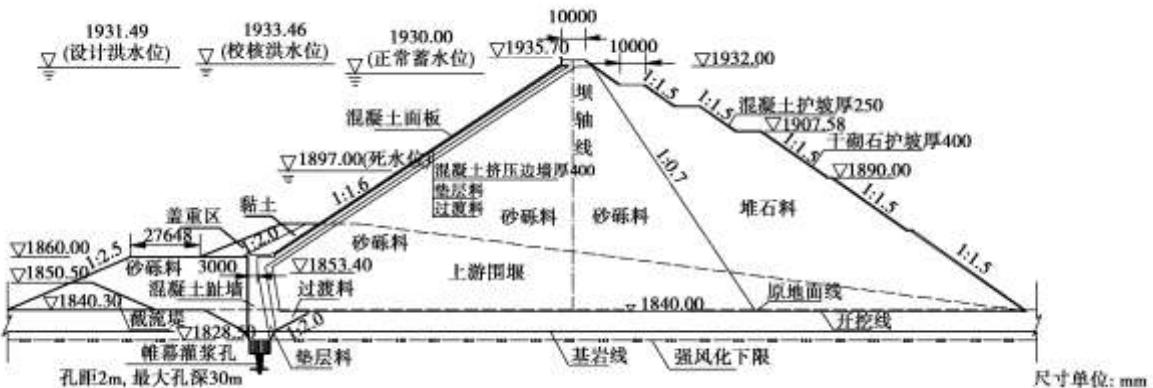


图 5 斯木塔斯水电站混凝土面板砂砾石坝典型剖面图

Fig. 5 Typical section of concrete face sand gravel dam of Simutasi Hydropower Station

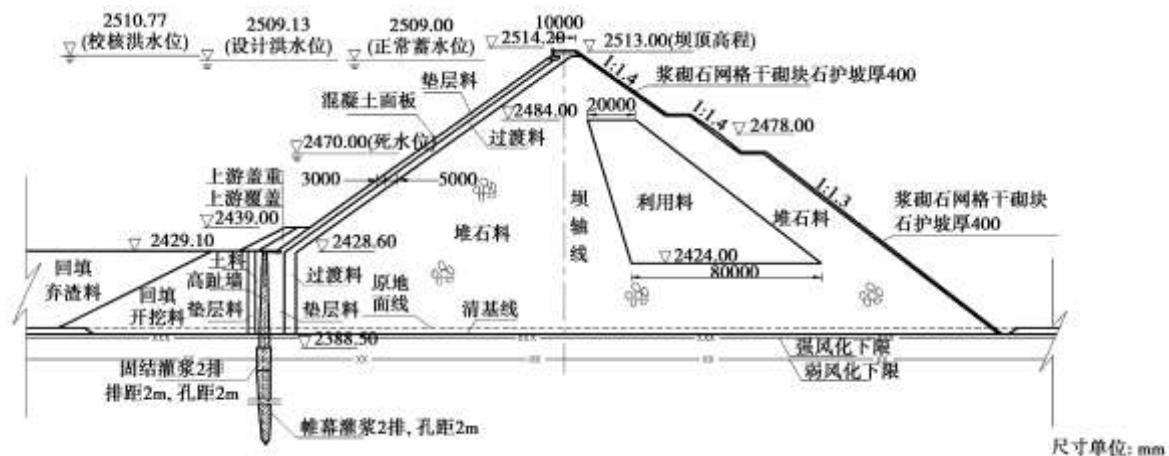


图 6 吉音水库混凝土面板堆石坝典型剖面图

Fig. 6 Typical section of concrete face rockfill dam of Jiayin Reservoir

(2) 关于砂砾石坝体填筑设计标准问题。根据规范要求, 地震设防烈度为 8 度时, 坝体砂砾石填筑标准为 $D_r \geq 0.85$ 。进入 21 世纪以来, 大吨位的碾压机械设备不断问世, 使得砂砾石填筑标准 $D_r \geq 0.9$ 已成为比较容易做到的事(见表 3)。只要严格按设计及施工规范要求, 采取施工参数和试坑检验“双控”的施工

质量控制方法，精心准备坝体各分区填筑料，铺料中不产生颗粒分离现象，无明显的层间界面，可较好地控制“垫层料—过渡料—坝体砂砾料”层间的反滤保护，渗透流向均以水平层间为主，保持自上游向下游渗透系数由小到大过渡的变化规律，即：垫层料为 $A \times 10^{-3} \sim A \times 10^{-4}$ cm/s；过渡料为 $A \times 10^{-3} \sim A \times 10^{-2}$ cm/s；

坝体砂砾料为 $A \times 10^{-2} \sim A \times 10^{-1}$ cm/s。许多专家学者认为：施工工艺的不断改进，特别是大型碾压机械压实功能的不断提高，为混凝土面板砂砾石坝提供了较大的安全储备。利用天然砂砾料压缩模量高的特点，合理提高其填筑标准，可减少坝体沉陷量，有效改善面板的应力应变状态，提高大坝抗震安全，这对于建设在高地震区、深覆盖层上坝体的安全尤为重要。

(3) 关于深覆盖层混凝土防渗墙结构设计及施工程序问题。目前，国内超过 100 m 深的混凝土防渗墙施工技术趋于成熟，已施工完成的西藏庞多水库防渗墙深度达 150 m，为国内之最。新疆近期拟建的阿尔塔什水利枢纽，混凝土面板砂砾石坝最大坝高 162.5 m，总库容 22.40 亿 m³，大坝设防烈度为 9 度，河床段覆盖层为第四系冲积砂卵砾石层，最大深度约 100 m，具有结构紧密、压缩性低、压缩模量较大及透水强的特点。设计中，坝基采用两道混凝土防渗墙，趾板布置在河床覆盖层上，防渗墙与趾板之间设置连接板，两道防渗墙相隔 5 m，形成“4 m+3 m+3 m+3 m+5 m”的布置形式^[6]。许多专家质疑设置两道混凝土防渗墙的必要性，并提出适度延长坝体填筑的施工周期，合理控制坝基和坝体沉降的建议：先填筑部分坝体再建造防渗墙，会改善防渗墙的应力变形性状；施工时应先施工趾板，待坝体填筑到一定高程，坝体和坝基变形基本稳定后，再施工防渗墙；水库临近蓄水前，浇注连接板，这样可以避免施工期产生的不均匀沉降，减少连接板和防渗墙之间的位移差。这些都是当前高地震区、深覆盖层、高混凝土面板坝建设中需要进一步探讨的关键技术问题。

(4) 采用砂砾石筑坝应注意的几个问题。与堆石料相比，砂砾石料具有更高的压缩模量、填筑的坝体沉降量小等优点，但砂砾石料也有其不足之处，需要在设计、施工中予以注意：①爆破堆石料是非冲蚀材料，可自由排水，一般不存在渗透稳定问题，而砂砾石中的细料可以冲蚀，有可能在渗透水流作用下产生渗透破坏。因此，进行渗流控制、防止渗透破坏是混凝土面板砂砾石坝应当重视的关键问题。②堆石是有棱角的材料，咬合力较大，而砂砾石是浑圆形的，易于滚动，在低应力条件下，砂砾石的强度小于堆石料，因此，需要比堆石料稍缓的坝坡，并需设置下游护坡。③砂砾石在施工过程中易产生粗、细颗粒分离的现象，粗细颗粒分离后形成的粗粒层往往会造成贯通坝体上下游的渗漏通道，导致砂砾石的实际抗渗比降大大降低，极易发生渗透破坏。因此，需在设计、施工中予以重视，并采取措施减免坝料分离造成的不利影响。

5 结语

新疆是率先引进混凝土面板坝的省区，利用天然砂砾石填筑百米级高坝，并针对严寒地区、高地震区、深覆盖层等不良环境地质条件，系统地建立了修筑混凝土面板砂砾石坝的关键技术体系，在抗震结构设计、坝体变形控制、坝体渗流控制等方面不断创新突破，使该坝型成为应用最为广泛的当地材料坝，面对恶劣环境和诸多不良地质条件，其筑坝技术在挑战—突破—再挑战—再突破中取得了长足的发展。当前，在地震设防烈度 9 度、覆盖层深度百米以下的地质条件下，建设 200 m 以上的高混凝土砂砾石面板坝，是摆在我面前的又一次重大挑战。目前及今后 10~20 年是新疆山区水库与大坝建设最多、最集中的时期，针对新疆特殊的气候条件、地质构造、筑坝条件，深入开展研究，借鉴和总结经验，努力在坝工设计、坝基处理、施工工艺和建筑材料等关键技术方面取得不断的进步和创新，对于提高大坝建设和运行管理的技术经济水平、安全可靠性能具有非常重要的促进作用。

参考文献：

- [1] 潘家铮, 何 璞. 中国大坝 50 年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.9. (PAN Jia-zheng, HE Jing. Large dams in China (a fifty year review) [M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 顾淦臣, 束一鸣, 沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (GU Gan-chen, SU Yi-ming, SHEN Chang-song. Experiences and innovations of earth-rockfill dam engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 王柏乐. 中国当代土石坝工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (WANG Bo-le. Modern earth-rockfill dams in China[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 邓铭江, 于海鸣, 李湘权, 等. 新疆大坝建设进展[J]. 水利水电技术, 2010, 41(7): 29~35. (DENG Ming-jiang, YU Hai-ming, LI Xiang-quan, et al. Dam construction progress in Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(7): 29~35. (in Chinese))
- [5] 邓铭江, 于海鸣, 李湘权. 新疆坝工技术进展[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1678~1687. (DENG Ming-jiang, YU Hai-ming, LI Xiang-quan. Advances of dam construction techniques in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1678~1687. (in Chinese))
- [6] 邓铭江, 于海鸣. 新疆坝工建设[M]. 北京: 中国水利水电

- 出版社, 2011. (DENG Ming-jiang, YU Hai-ming. Dam construction in Xinjiang[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011. (in Chinese))
- [7] 蒋国澄, 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板坝工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997. (JIANG Gou-cheng, FU Zhi-an, FENG Jia-ji. Concrete face rockfill dam project[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [8] 陈生水, 凤家骥, 袁 辉. 砂砾石面板坝关键技术研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 16 - 20. (CHEN Sheng-shui, FENG Jia-ji, YUAN Hui. Research on key techniques of facing sandy gravel dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 16 - 20. (in Chinese))
- [9] 凤家骥, 张国安. 柯柯亚面板坝的防渗设计与原型观测[J]. 水力发电, 1989, 15(3): 17 - 20. (FENG Jia-ji, ZHANG Gou-an. Seepage control design and prototype observation for Kekeya face rockfill dam[J]. Water Power, 1989, 15(3): 17 - 20. (in Chinese))
- [10] 韦春侠, 陈洪武, 王占巨. 察汗乌苏水电站混凝土面板砂砾石坝关键技术[J]. 葛洲坝集团科技, 2009, 90(2): 15 - 18. (WEI Chun-xia, CHEN Hong-wu, WANG Zhang-ju. Key technology of the CF sand and gravel rockfill dam of the Chahanwusu Hydropower Station[J]. Gezhouba group Science & Technology, 2009, 90(2): 15 - 18. (in Chinese))
- [11] 谢定松, 刘 杰, 魏迎奇. 高面板堆石坝渗流控制关键技术问题探讨[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10): 118 - 121, 125. (XIE Ding-song, LIU Jie, WEI Ying-qi. Key technology problems of seepage control for building high concrete face rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(10): 118 - 121, 125. (in Chinese))
- [12] 汪 洋, 曲 苓. 乌鲁瓦提砂砾石面板高坝渗流控制的设计[J]. 水利水电技术, 2000, 31(1): 66 - 70. (WANG Yang, QU Ling. Seepage control design for Wuluwati dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, 31(1): 66 - 70. (in Chinese))
- [13] 白建军, 王 钧. 乌鲁瓦提混凝土面板砂砾石堆石坝坝料填筑渗透性浅析[J]. 水利水电技术, 2003, 34(12): 36 - 39. (BAI Jian-jun, WANG Jun. Permeability analysis on embankment material of Wuluwati concrete face rockfill dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(12): 36 - 39. (in Chinese))
- [14] 曲 苓, 汪 洋, 余春海. 乌鲁瓦提混凝土面板堆石(砂砾石)坝体排水系统设计[J]. 新疆水利水电, 1994(2): 6 - 10. (QU Ling, WANG Yang, YU Chun-hai. Design of drainage for concrete face rock fill dam of Wuluwati Hydropower Station[J]. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower, 1994(2): 6 - 10. (in Chinese))
- [15] 彭卫军, 罗松涛. 吉林台一级水电站混凝土面板砂砾石堆石坝设计与施工[J]. 水力发电, 2006, 32(6): 23 - 25. (PENG Wei-jun, LUO Song-tao. The design and construction of the CF sand and gravel rockfill dam of the Jilintai-I hydropower station[J]. Water Power, 2006, 32(6): 23 - 25. (in Chinese))
- [16] 杨长征, 王 钧, 洪迎东, 等. 乌鲁瓦提水利枢纽工程混凝土面板砂砾石堆石坝坝体填筑施工技术[J]. 水利水电技术, 2003, 34(12): 9 - 13. (YANG Chang-zheng, WANG Jun, HONG Ying-dong. Construction technique of filling for Wuluwati concrete face rockfill dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(12): 9 - 13. (in Chinese))
- [17] 杨 昭, 席福来. 乌鲁瓦提水利枢纽工程混凝土面板堆石坝筑坝料工程特性研究[J]. 水利水电技术, 2003, 34(12): 31 - 33. (YANG Zhao, XI Fu-lai. Characteristics of embankment material of Wuluwati concrete face rockfill dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(12): 31 - 33. (in Chinese))
- [18] 彭汉军, 郭霞辉. 吉林台混凝土面板砂砾石堆石坝填筑中的质量监理[J]. 水力发电, 2006, 32(6): 34 - 39. (PENG Han-jun, GUO Xia-hun. Quality inspect of the filling of the Jilintai hydropower station slab and gravel rock-fill dam[J]. Water Power, 2006, 32(6): 34 - 39. (in Chinese))
- [19] 唐 懿. 吉林台一级水电站面板堆石坝混凝土面板施工[J]. 水力发电, 2006, 32(6): 40 - 43. (TANG Yi. Construction of concrete faced rock-fill dam of Jilintai hydropower station[J]. Water Power, 2006, 32(6): 40 - 43. (in Chinese))
- [20] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. (GU Gan-chen. Earthquake engineering for earthrock dams[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989. (in Chinese))
- [21] 汪 洋, 曲 苓. 乌鲁瓦提混凝土面板堆石(砂砾石)坝设计[J]. 新疆水利水电, 1995(1): 19 - 26. (WANG Yang, QU Ling. Design of concrete-face rock-fill dam in Wuluwati Hydropower Station[J]. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower, 1995(1): 19 - 26. (in Chinese))
- [22] 彭卫军, 范金勇. 吉林台一级水电站混凝土面板砂砾石堆石坝坝体抗震设计[J]. 水力发电, 2006, 32(6): 26 - 28. (PENG Wei-jun, FAN Jin-yong. The seismic design of the CF dam of Jilintai-I hydropower station[J]. Water Power, 2006, 32(6): 26 - 28. (in Chinese))

- [23] 大连理工大学. 吉林台混凝土面板砂砾一堆石坝坝材试验与三维有限元静动力分析[R]. 大连: 大连理工大学, 2001. (Dalian University of Technology. Jilintai concrete face rockfill dam material test and gravel a 3d finite element static and dynamic analysis[R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese))
- [24] 唐懿, 张开军. 高寒高震地区混凝土面板堆石坝工程的特点[J]. 水电站设计, 2006, 22(1): 10 - 13. (TANG Yi, ZHANG Kai-jun. Characteristics of concrete face rock-fill dam in high cold & seismic area[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2006, 22(1): 10 - 13. (in Chinese))
- [25] 郑远建. 吉林台一级水电站混凝土面板砂砾堆石坝面板止水施工工艺[J]. 水利水电技术, 2006, 37(6): 57 - 59. (ZHENG Yuan-jian. Construction technology of waterstop of the face slab of the concrete face rock-fill dam of Jilintai-I hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(6): 57 - 59. (in Chinese))
- [26] 贾金生, 郝巨涛, 陈肖雷. 混凝土面板坝止水带设计与柔性填料[J]. 水力发电, 2002, 28(4): 23 - 26. (JIA Jing-sheng, HAO Ju-tao, CHENG Xiao-lei. Design principles of watertight strip for high reinforced concrete face dam and the control indexes of flexible filling material performances[J]. Water Power, 2002, 28(4): 23 - 26. (in Chinese))
- [27] 鲁一晖, 郝巨涛, 赵波, 等. 吉林台电站混凝土面板坝周边缝自愈型止水结构[J]. 水力发电, 2005, 31(1): 42 - 54. (LU Yi-hui, HAO Ju-tao, ZHAO Bo, et al. Research on self-healing waterstop of perimeter joint of Jilintai-I CFRD[J]. Water Power, 2005, 31(1): 42 - 54. (in Chinese))
- [28] 钟根波. 梅溪水库混凝土防渗墙的设计与施工[J]. 浙江水利科技, 2000(5): 56 - 58. (ZHONG Geng-bo. Design and construction of concrete impervious wall for Meixi reservoir[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2000(5): 56 - 58. (in Chinese))
- [29] 李国英, 沈珠江, 赵魁芝. 梅溪水库面板堆石坝原型观测资料反馈分析及大坝变形预报模型[J]. 水利水运科学研究, 1999(4): 329 - 337. (LI Gou-ying, SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi. Back analysis of observation data of Meixi CFRD and study on prediction model for dam deformation[J]. Hydro-science and Engineering, 1999(4): 329 - 337. (in Chinese))
- [30] 朱孟业. 建造在深厚覆盖层上的梁辉水库面板堆石坝[J]. 浙江水利科技, 1997(3): 34 - 35. (ZHU Men-ye. Lianghui CFRD built on thick alluvium deposits[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 1997(3): 34 - 35. (in Chinese))
- [31] 孙志峰. 汉坪咀水电站坝基防渗墙施工综述[J]. 东北水利水电, 2004, 22(12): 230 - 235. (SUN Zhi-feng. Construction of dam foundation impervious wall in Hanpingzui hydropower station[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2004, 22(12): 230 - 235. (in Chinese))
- [32] 聂广明, 何雷霆. 汉坪嘴水电站大坝“5·12”地震后的应急检查概况[J]. 大坝与安全, 2008(3): 6-8, 14. (NIE Guang-ming, HE Lei-ting. Introduction on emergency inspection of Hanpingzui dam 5.12 earthquake[J]. Large Dam & Safety, 2008(3): 6-8, 14. (in Chinese))
- [33] 赵魁芝, 李国英, 米占宽. 汉坪咀混凝土面板堆石坝防渗体系设计方案优选[J]. 水利水运工程学报, 2004(2): 45 - 50. (ZHAO Kui-zhi, LI Guo-ying, MI Zhan-kuan. Design optimization for impervious system of Hanpingzui rockfill dam with concrete facing slab[J]. Hydro-science and Engineering, 2004(2): 45 - 50. (in Chinese))
- [34] 冯业林, 李云, 李娟, 等. 跖板置于覆盖层的那兰水电站面板砂砾石坝设计研究[J]. 水力发电, 2006, 32(11): 45 - 47. (FENG Ye-ling, LI Yun, LI Juan, et al. Concrete face gravelfill and rockfill dam of Nalan hydropower station on deep alluvium[J]. Water power, 2006, 32(11): 45 - 47. (in Chinese))
- [35] 刘娟, 马耀. 深厚覆盖层上高面板坝防渗体系设计研究[J]. 水力发电, 2009, 34(9): 81 - 83. (LIU Juan, MA Yao. Study on the design of seepage control system for high face rockfill dam on deep overburden layer[J]. Water Power, 2009, 34(9): 81 - 83. (in Chinese))
- [36] 吴利平. 九甸峡水利枢纽工程筑坝材料特性研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(3): 26 - 28. (WU Li-ping. Study on characteristic of material of Jiudianxia Water Project[J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2010, 46(3): 26 - 28. (in Chinese))
- [37] 刘娜. 土石坝三维非线性有限元分析及防渗墙应力状态研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007: 81 - 95. (LIU Na. Three-dimension nonlinear analysis of earth-rock dam and the stress character study of the diaphragm wall in dams[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007: 81 - 95. (in Chinese))
- [38] 孙大伟, 邓海峰, 田斌, 等. 大河水电站深覆盖层上面板堆石坝变形和应力性状分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 434 - 439. (SUN Da-wei, DENG Hai-feng, TIAN Bing, et al. Deformation and stress analysis of Dahe CFRD built on thick alluvium deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 434 - 439. (in Chinese))
- [39] 吴鹏举. 铜街子水电站面板坝三向测缝计资料分析[C]//

- 混凝土面板堆石坝国际研讨会论文集. 北京, 2000: 477 - 481. (WU Peng-ju. Material analysis of triaxial joint meter of Tongjiezi Dam[C]// International Conference Of Concrete Faced Rockfill Dam, Beijing, 2000: 477 - 481. (in Chinese))
- [40] 何志涛, 邓德生, 王兴然. 铜街子水电站面板堆石坝有限元计算[J]. 水电站设计, 1994, 10(3): 74 - 79. (HE Zhi-tao, DENG De-sheng, WANG Xing-ran. Finite Element Method for Tongjiezi dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1994, 10(3): 74 - 79. (in Chinese))
- [41] 吴何乔, 吴 波, 鲁芳芳. 双溪口水库低弹模混凝土防渗墙施工[J]. 浙江水利科技, 2008(1): 77 - 78, 81. (WU He-qiao, WU Bo, LU Fang-fang. The construction technology of low elastic modulus of concrete cutoff wall in Shuangxikou reservoir[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2008(1): 77 - 78, 81. (in Chinese))
- [42] 唐巨山, 丁邦满. 横山水库扩建工程混凝土面板堆石坝设计[J]. 水力发电, 2002, 28(7): 35 - 37. (TANG Ju-shan, DING Bang-man. Design of concrete face rockfill dam of the expansion project of Hengshan Reservoir[J]. Water Power, 2002, 28(7): 35 - 37. (in Chinese))
- [43] 王汝军, 梁 谦. 老渡口水电站面板堆石坝防渗墙施工[J]. 湖北水力发电, 2009(3): 49 - 52. (WANG Ru-jun, LIANG Qian. Construction of impervious wall in CFRD of Laodukou Hydropower Station[J]. Hubei Water Power, 2009(3): 49 - 52. (in Chinese))
- [44] 唐新军, 凤 炜, 凤家骥, 等. 榆树沟水库枢纽工程的设计特点与运行情况[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(2): 52 - 56. (TANG Xin-jun, FENG Wei, FENG Jia-ji, et al. Design character and circulation situation of Yushugou reservoir pivot project[J]. Journal of Xinjiang agricultural University, 2004, 27(2): 52 - 56. (in Chinese))
- [45] 刘 杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LIU Jie. Seepage control of earth-rock dams theoretical basis, engineering experiences and lessons[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [46] 刘 杰. 混凝土面板坝碎石垫层料最佳级配试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2001(4): 1 - 5. (LIU Jie. Experimental study of optimum gradation of crushed stone cushion for concrete-face rockfill dam[J]. Hydro-science and Engineering, 2001(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [47] SL228—98 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL228—98 Concrete face rockfill dam design standard[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))

科技期刊标准化、规范化出版点滴 1 ——摘要规范表达的一般原则

摘要是科技论文的重要组成部分。摘要是以提供文献内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地记叙文献重要内容的短文。摘要具有独立性和自明性, 能充分反映研究的创新点, 拥有与论文同等量的主要信息, 即不阅读全文就能获得必要的信息。

一般地, 摘要规范表达有以下几个方面原则:

(1) 摘要的篇幅应尽量简短。摘要中应排除本学科领域内已成为常识的内容, 研究背景信息的表达应尽可能简洁而概括, 切忌把应在前言中出现的篇幅较长的内容写入摘要, 而且不得有对论文正文进行补充和修改的内容, 一般也不要对论文内容进行评论, 尤其作者不要进行自我评价。

(2) 摘要的内容在正文中应该出现, 但不宜简单地重复题名信息。

(3) 摘要应达到结构严谨、表达简明和语意确切。摘要是一篇完整的短文, 其各部分要按逻辑顺序来安排, 句子间要上下连贯、互相呼应。摘要的每一语句都要表意明白, 无空泛、笼统、含混之词。

(4) 中文摘要多用第三人称来写, 建议采用“对……进

行了研究”、“报告了……现状”、“进行了……调查”等记述方法表明一次文献的性质和主题, 不必要“本文”、“作者”、“我们”、“笔者”、“本研究”、“本课题组”等做主语, 也不要出现“文中”、“这里”等状语。

(5) 摘要中要使用公知公用的规范的术语和符号。新术语或尚无合适汉语术语的词语, 可用原文或译出后加括号注明原文。摘要中的缩略语、简称、代号等, 除了相关专业读者能清楚理解的以外, 在首次出现时应先写出其全称。

(6) 除特别需要外, 摘要中一般不要使用数学式和化学结构式, 也不要出现插图、表格, 不要列举例证, 不要讲述详细的研究或工作过程。

(7) 摘要中一般不要出现引文, 但对于证实或者否定了他人已经出版的特别文献, 可以在摘要中加以引用, 涉及他人的研究成果时应尽量列出其姓名。

(8) 摘要中应正确使用语言文字和标点符号, 句子表达应力求简单, 要慎用长句, 句子成分要搭配, 还要正确使用量和单位。

(9) 除非在事实清楚的情况下, 摘要中不要出现言过其

实的不严谨的句子，如“本文涉及的研究工作是对过去……方面研究的补充（改进、发展、验证）”，“本文首次提出了……”，“经检索尚未发现与本文类似的研究”等。

（摘自梁福军《科技论文规范写作与编辑》