

新疆坝工技术进展

邓铭江¹, 于海鸣², 李湘权¹

(1. 新疆水利厅, 新疆 乌鲁木齐 830000, 2. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 新疆有大小河流 570 余条, 97% 的河川径流形成于山区。因此, 山区水库大坝建设是开发水能资源、实现水资源合理配置与有效调控的重要措施。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, 筑坝材料也在当地材料坝的基础上不断改进, 碾压混凝土坝、混凝土面板砂砾石堆石坝、沥青混凝土心墙堆石坝、土工膜防渗堆石坝等坝型不断涌现。结合新疆坝工建设, 系统地总结了坝工技术特点和取得的主要技术创新成果, 研究认为: 以黏土心墙堆石坝为基础坝型, 以混凝土面板砂砾石堆石坝和沥青混凝土心墙堆石坝为主要发展方向, 在高寒地区、高地震区、深厚覆盖层等特殊环境和各种不良地质条件下的筑坝技术, 是新疆坝工建设的显著特点。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取得不断进步和创新, 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。

关键词: 新疆; 大坝建设; 技术特点; 发展趋势

中图分类号: TV632 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2010)11 - 1678 - 10

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

Advances of dam construction techniques in Xinjiang

DENG Ming-jiang¹, YU Hai-ming², LI Xiang-quan¹

(1. Xinjiang Water Resources Department Urumqi 830000, China; 2. Xinjiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China)

Abstract: There are over 570 rivers in Xinjiang and 97% of them originate from mountains. Dam construction in mountainous area is an effective measure to control and regulate rational allocation of water resources. Since the 1990s, the dam construction in Xinjiang has shifted from the plain area to the mountainous one, and dam materials are also improved on the basis of local materials. There appear roller compaction concrete dams, concrete faced sandy gravel and rock dams, asphalt concrete core rock-fill dams, rock-fill dams by anti-seepage geomembrane and so on. The characteristics of dam construction techniques in Xinjiang are summarized. The main inventions and innovations are reviewed. According to the history of dam construction in Xinjiang, it is concluded that the characteristics of dam construction techniques in Xinjiang is the clay core rock-fill dam as the basic dam type, and the concrete faced sandy gravel and rock dam and asphalt concrete core rock-fill dam as the main direction of development in the area of special environment and unfavorable geological conditions such as severe cold area, high seismic area, deep overburden layer. Efforts of improvement and innovation on key techniques, including dam design, basement treatment, construction technology and construction materials, will improve the construction techniques, operation management and dam safety.

Key words: Xinjiang; dam construction, technical characteristic; development trend

1 大坝建设概况

目前, 新疆已建成水库 577 座, 总库容 101.85 亿 m³, 但仍以小型水库和平原水库为主。自 20 世纪 80 年代以来, 在国家的大力支持下, 新疆已建和在建的大中型山区水库工程共 60 座, 其中黏性土防渗土石坝 13 座, 混凝土面板堆石坝 19 座, 沥青混凝土心墙堆石坝 11 座, 混凝土和碾压混凝土坝 7 座, 土工膜防渗

土石坝 6 座, 浆砌石坝 4 座。坝高超过 70 m 的有 25 座, 其中大于 100 m 的有 14 座, 参见表 1。

进入 21 世纪以来, 新疆的坝工建设及筑坝技术取得了较大的进展, 筑坝材料也在当地材料坝的基础上不断改进, 碾压混凝土坝、面板坝、沥青心墙坝等

表 1 新疆坝高 70 m 以上水库大坝统计表
Table 1 Statistics of dams with height over 70 m in Xinjiang

序号	大坝名称	坝型	建成年	河流	地点	坝高/m	坝长/m	总库容/亿 m ³	装机/MW
1	石城子	浆砌石拱坝	1979	石城子河	哈密市	78	72.63	0.206	
2	大山口	重力拱坝	1990	开都河	和静县	72	198	0.298	80
3	“635”水库	黏土心墙	2000	额河干流	福海县	70.6	320	2.82	32
4	石门子	碾压砼薄拱坝	2000	塔西河	玛纳斯县	109	1176.5	0.501	6.4
5	乌鲁瓦提	面板堆石坝	2000	喀拉喀什河	和田县	133	365	3.47	60
6	恰甫其海	黏土心墙	2005	特克斯河	巩留县	108	350	17.7	320
7	吉林台一级	面板堆石坝	2006	喀什河	尼勒克县	157	445	25.3	460
8	下天吉	面板堆石坝	2007	精河	精河县	71.5	207	0.1438	
9	察汗乌苏	面板堆石坝	2007	开都河	和静县	110	352	1.25	309
10	照壁山	沥青心墙	2007	板房沟河	乌鲁木齐	71	121	0.0753	
11	喀腊塑克	碾压砼重力坝	2010	额尔齐斯河	富蕴县	121.5	1570	24.19	140
12	冲乎尔	碾压砼重力坝	2010	布尔津河	布尔津县	74	600	0.8	110
13	白杨河	黏土心墙	在建	白杨河	阜康市	78	735	0.13	
14	大西沟	黏土心墙	在建	乌鲁木齐河	乌鲁木齐	98	451	0.7	
15	吉音	面板堆石坝	在建	克里雅河	于田县	124.5	489	0.82	24
16	中葛根	面板堆石坝	在建	中葛根河	奇台县	77.63	210.05	0.1365	
17	肯斯瓦特	面板堆石坝	在建	玛纳斯河	玛纳斯县	129.4	475	1.88	100
18	柳树沟	面板堆石坝	在建	开都河	和静县	106	183.5	0.77	180
19	斯木塔斯	面板堆石坝	在建	阿克牙孜河	昭苏县	106	664.73	1.449	110
20	温泉电站	面板堆石坝	在建	喀什河	尼勒克县	102	306	2.07	135
21	吉勒布拉克	面板堆石坝	在建	哈巴河	哈巴河县	146.3	455	2.42	140
22	下坂地	沥青心墙	在建	塔什库尔干河	塔什库尔干	78	406	8.67	150
23	五一	沥青心墙	在建	迪那河	轮台县	102.5	374	0.968	
24	阿拉沟	沥青心墙	在建	阿拉沟河	托克逊县	105.26	365.5	0.445	
25	布尔津山口	碾压砼拱坝	在建	布尔津河	布尔津县	94	319	2.22	220

坝型不断涌现, 在高寒地区、高地震区、深厚覆盖层等特殊环境下的筑坝技术, 也取得了新突破。在地震烈度Ⅷ度区, 建成坝高 157 m 的吉林台一级混凝土面板砂砾石堆石坝和坝高 108 m 的恰甫其海黏土心墙土石坝; 在河床覆盖层达 150 m 厚、海拔 2960 m 的叶尔羌河上游修建了坝高 78 m 的下坂地沥青混凝土心墙坝; 在年平均温度仅 2.7℃ 的额尔齐斯河上修建了坝高 121.5 m 的喀腊塑克全断面碾压混凝土重力坝; 在软岩坝基、坝肩上建成坝高 109 m 的塔西河石门子碾压混凝土薄拱坝; 多座百米级沥青混凝土心墙堆石坝相继开工建设, 很多关键技术和施工工艺都有所创新。近期在叶尔羌河上游拟建的依扎克水电站和在库玛拉克河上拟建的大石峡水电站, 其坝高均超过 200 m。

建设最早的土工膜防渗土石坝是前苏联 1970 年建成的阿特巴申(Atebasheng)大坝(今吉尔吉斯斯坦境内), 坝高 79m; 建成最高的是西班牙 1984 年建成的波扎捷洛斯拉莫斯(Poza de Los Ramos), 坝高 97 m。西班牙的帕拉拾拉(Paradela)原为混凝土面板堆石坝(坝高 110 m), 西安市石砭峪原为沥青混凝土面板坝(坝高 85 m), 均由于建成运行 20 多年坝体渗漏严重, 无法正常蓄水, 采用在面板上贴土工膜防渗补强后才得以修复^[1]。我国土工膜防渗土石坝起步较晚, 且此类坝型较少, 规模量级也不大, 参见表 2^[2]。由于受土工膜的强度、接缝焊接质量、老化、鼠害等问题困扰, 对其可靠性尚存诸多顾虑, 因此推广应用也受到了一些限制。

(2) 新疆土工膜防渗土石坝特点和发展趋势

新疆从 20 世纪 90 年代中期开始研究引进土工膜防渗筑坝技术, 首先用于“635”水利枢纽工程围堰防渗, 并建成博斯塘土工膜斜墙土石坝, 随后又建成了

2 土石坝筑坝技术新进展

2.1 土工膜防渗土石坝

(1) 国内外发展进程

表2 中国土工膜防渗土石坝主要特性表

Table 2 Main characteristics of earth-rock dams by anti-seepage geomembrane in China

坝名	省别	建成年	坝高/m	坝型	上游坡率	垫层	上游护坡
塘房庙坝		2000	51	土工膜心墙	1:1.8	风化砂	块石护面
钟吕坝		1998	51.5	土工膜斜墙	1:1.5	无砂混凝土	块石护面
田村坝		1990	48	土工膜心墙	1:1.5	风化砂	块石护面
小岭头坝	浙江	1995	36	土工膜斜墙	1:1.3	无砂混凝土	预制混凝土板
博斯塘坝	新疆	1998	37	土工膜斜墙	1:1.65	无砂混凝土	现浇混凝土

希尼尔(坝高18 m)、风城高库副坝(坝高23 m)土工膜防渗坝。新疆土工膜防渗多应用于库盘防渗处理,如:策勒胜利水库、皮墨灌区调节水库、阿拉山口供水工程尾部江巴斯调节水库均采用土工膜全防渗,防渗面积分别达到385万 m^2 、147万 m^2 和15.11万 m^2 ;其次在病险水库坝体防渗处理、城市污废水处理等方面也得到了广泛的应用。特别是土工膜制作工艺的不断改进,强度、耐久性的不断提高,现场焊接及检验技术的不断完善,为土工膜防渗土石坝开辟了更广阔的发展空间。

2.2 黏性土防渗土石坝

(1) 国内外发展进程

20世纪40~50年代,随着大型碾压机械的问世,世界各国开始采用黏土心墙或斜墙土石坝,并得到了迅速发展。20世纪60年代,建成坝高100 m以上的土石坝50余座。1974年加拿大建成坝高242 m的买卡(Mica)斜心墙土石坝,1980年前苏联建成坝高300 m的努列克(Нурек)心墙土石坝,目前全世界共建成坝高230 m以上的黏性土防渗土石坝9座^[1]。我国1976年建成坝高101.8 m的碧口心墙土石坝,已建成的瀑布沟水电站坝高186 m,正在建设中的糯扎渡水电站坝高261.5 m^[2]。参见表3。

(2) 新疆黏土防渗土石坝特点和发展趋势

建成于1958年的头屯河水库和1961年的乌拉泊水库,是新疆第一批黏土防渗土石坝,截至目前,共建成13座。2005年建成了108 m高的恰甫其海黏土心墙土石坝。与世界和国内此类坝型相比,新疆虽不占高,但因其鲜明的特点,而成为中国土石坝建设中的一个亮点。

a) 建造在活断层上的克孜尔土石坝

克孜尔水库土石坝建于1985~1991年,总库容为6.4亿 m^3 ,主坝长920.6 m,最大坝高44 m,副坝长1288 m,最大坝高32.6 m,大坝设防烈度为8.5度。副坝右坝肩建在 F_2 活动断层上,跨越活动断层筑坝,在国内尚属首例。大坝抗震结构设计主要采取了以下措施:一是采用上下游边坡均为1:1的肥大心墙和高塑性黏性土防渗,加强反滤保护措施;二是坝基采取柔性连接处理,在开挖好的坝基岩面上喷涂3~5 cm的热沥青;三是在副坝断层处设置双副坝;四是建立微震和

强震监测台网^[4-5]。1999年水库以东约18 km处发生的5.6级地震,经复核库区地震烈度为VIII度;2005年水库周边地区发生5次4级地震群^[6],经过多次地震检验,坝体未发生裂缝和错动变形,运行状况良好。

b) “自愈式肥心墙”坝体渗流控制及抗震结构设计

恰甫其海大坝按基本烈度提高一度即9度设防,大坝防渗土料为风积黄土,黏粒含量仅17%,土料抗冲蚀能力较低。“635”坝址右副坝穿越锡泊渡活动断裂,土料中黏粒含量平均为45.0%~50.8%,胀缩性和压缩性均较大,加之钠蒙脱石含量较高,为过渡性土料,具有一定的分散性^[7]。在大坝剖面设计时充分考虑到大坝抗震要求和防渗土料抗冲蚀能力低的特点,主要采取了以下5项措施:①加大坝顶宽度,采用较大的坝顶超高,放缓上、下游坝坡;②大坝防渗体采用较厚的正心墙,两侧边坡均为1:0.3,有效避免心墙沉降过大在心墙内部产生拱效应而出现横向裂缝;③心墙上、下游两侧设置3.0 m宽的反滤层,反滤层外设过渡保护层,上游侧宽度为3 m、下游侧4 m,以确保当地震造成防渗体错动时,心墙不与坝壳料直接接触;④研究制定了反滤层设计原则,即:对于一般黏土等效粒径 $D_{20} \leq 0.8 \text{ mm}$;对于分散性黏土 $D_{20} \leq 0.5 \text{ mm}$, $C_u = 5 \sim 30$,小于0.1 mm的颗粒含量不超过5%^[7],确保渗流出口防渗体出现裂缝时,能起到使裂缝自行愈合的作用;⑤对坝体填料采用较高的压实标准,要求砂砾石料相对密度 $D_r \geq 0.85$,堆石料孔隙率 $n \leq 20\%$,提高坝体的密实程度,增强抗震能力^[6,8]。

c) 土料改性研究与分区填筑筑坝控制技术

“635”心墙土石坝坝高70.6 m,主坝长320 m,河床左右岸阶地上副坝长分别为840,740 m,左副坝最大坝高为21 m,右副坝最大坝高为37.5 m,由于主副坝高差较大,且心墙土料黏粒含量较高,胀缩性和压缩性较大,在大坝建成投入运行后,其防渗体特别是主副坝连接段的防渗体很可能出现裂缝,从而形成渗流通道而危及大坝的安全。I料场土料压缩系数0.11~0.34,属于中等压缩性土。VI料场土料压缩系数0.35~0.73,有近20%土料压缩系数大于0.5,属于高压缩性土。为了提高土料的抗分散能力,采用含 Ca^{2+} 较高的河水并掺加1%石灰粉,在土料中掺洒1%~

表 3 中国百米级黏性土防渗土石坝主要特性表

Table 3 Main characteristics of earth-rock dams by anti-seepage clay with height over 100 m in China

序号	坝名	省别	建成年	坝高/m	坝型	坝长/m	库容/亿 m ³	装机/MW
1	糯扎渡	云南	在建	261.5	心墙	608.16	237.03	5850
2	瀑布沟	四川	2009	186	心墙	573	53.9	3300
3	小浪底	河南	2005	154	斜心墙	1667	126.5	180
4	黑河	西安	2001	127.5	心墙	443.6	2	20
5	狮子坪	四川	2007	136	心墙	309.4	1.327	195
6	恰甫其海	新疆	2005	108	心墙	350	17.7	320
7	水牛家	四川	2006	108	心墙	317	1.4	70
8	鲁布革	云南	1991	103.8	心墙	217.17	1.224	600
9	碧口	甘肃	1976	101.8	心墙	297	5.21	30

表 4 中国混凝土面板堆石坝主要特性表

Table 4 Main characteristics of concrete faced rock-fill dams in China

序号	坝名	省别	建成年	坝高/m	坝顶长/m	装机/万 kW	库容/亿 m ³
1	水布垭	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	宁波	2001	124.4	398	1.8	1.684
12	泰安抽水蓄能	泰安	2005	100.5	540.46	114.7	1.432

6%的石灰粉等方法对土料进行改性研究^[9]；为了降低土料的压缩性和膨胀率，还进行了大量的掺砾试验研究。工程实际运用中，直接采用掺洒含 Ca²⁺较高的额河水调整施工填筑含水率的改性方案，改性效果十分明显，并结合科学周密的反滤层和过渡层结构设计，强化渗流控制，成功地解决了土料抗冲蚀能力差的难题；结合坝体结构，根据土料的物理力学特性，采取“下硬上软，主硬副软”的分区填筑方法和“先主后副”的施工进度控制方案，较好地适应了土料的工程性能^[10]。

d) 土料特性及黏土防渗土石坝的发展趋势

新疆防渗土料按区域划分，主要有 3 个明显特征：天山南北两侧以风积黄土为主，这些土料易开裂、易冲蚀，抗震性能差，施工质量难以控制；塔里木盆地南缘一带，基本以粉土为主，黏粒含量普遍较低；部分第三系地层发育地区，广泛分布有黏粒含量较高的黏土，但一般具有中等膨胀性和高压缩性，有的土料中蒙脱石含量较高，具有一定的分散性。这些不良工程特性，都给大坝结构设计和工程施工带来许多麻烦，但黏土防渗土石坝造价低的优势往往是比较明显的，这对于经济欠发达的新疆通常还是我们的更多选择。

2.3 混凝土面板砂砾石堆石坝

(1) 国内外发展进程

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，当坝高超过 100 m 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，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 大坝取得成功后，混凝土面板堆石坝获得复兴，并取得了迅猛发展^[1]。我国在 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 58.5 m，1990 年建成了西北口水库大坝，坝高 95 m。据不完全统计，到 2009 年，全球建成坝高 100 m 以上的混凝土面板堆石坝 40 余座，其中 1/4 以上在中国^[2-3]，见表 4。

(2) 新疆混凝土面板砂砾石堆石坝的特点和发展趋势

利用天然砂砾石填筑坝体，是新疆区别于一般面板堆石坝主要特征。新疆是率先引进面板坝的省区，其筑坝技术一直处于国内领先水平。1981 年在 37.5 m 的深覆盖层上建成第一座坝高 41.5 m 的柯柯亚混凝土面板堆石坝，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，同时也是全国首座 9 度设防的混凝土面板砂砾石堆石坝。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。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年来,新疆共建成面板堆石坝20座,其中坝高100m以上的有8座(见表1),在许多关键技术的研究与应用方面均有新突破。

a) 高地震区坝体渗流控制及抗震结构设计

目前国内外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。新疆面板堆石坝的抗震结构设计主要建立在堆石坝料的变形控制和坝体渗流控制上,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,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、铺盖区、盖重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。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。渗流控制是高地震区混凝土面板砂砾石堆石坝坝体结构设计的关键,其设计准则为:一防、二限、三排、四滤。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^[11-14]。

b) 坝面溢流结构设计

榆树沟水库最大坝高67.5m,是我国建成并运行的第一座坝面溢流混凝土面板堆石坝工程。为避免左岸陡峻岩壁的高边坡开挖,将溢洪道直接布置在右岸阶地填筑密实的堆石坝体上,节省了工程投资。将泄槽段的横缝与掺气槽结构巧妙地结合起来,即在掺气槽处,上下段地板纵向上采用叠瓦式滑动连接结构,以适应槽身的伸缩和小量的转动,并兼作沉降缝;为防止水流脉动压力诱发溢洪道泄槽系统产生较大的振动,采用阻滑板及预埋锚固拉筋等加固措施,将溢洪道与堆石坝体锚固连结,加大了泄槽—堆石坝体的结构刚度。实践证明,此种结构措施能够很好地适应堆石体的变形,有效避免因共振导致的结构失稳问题^[15]。

c) 寒冷地区面板止水结构研究

吉林台一级结合高地震区、高坝和寒冷地区的特殊要求,对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和止水材料开展了系统研究,在可靠性、方便施工、适应大变位等方面得到了明显改进,研发提出了周边缝自愈型止水结构^[16]。

2.4 沥青混凝土防渗土石坝

(1) 国内外发展进程

沥青混凝土防渗土石坝有心墙和斜墙(面板)两种坝体结构形式。国内已建的沥青混凝土面板堆石坝均存在一些问题,主要是由于沥青斜墙抗变形能力较差,易产生裂缝^[2]。沥青混凝土心墙坝是一种新兴的坝体结构,1962年第一座采用机械压实的沥青混凝土心墙坝在德国建成,此后在世界范围内建成近100座沥青混凝土心墙坝,20世纪90年代由于沥青品质的改进和施工机械程度的提高,在国内也得到了大量的推广应用^[17]。目前,对于坝高低于100m的沥青混凝土心墙坝已经有了较为成熟的设计施工经验,对于100m以上的高坝,尚未形成国际公认的建坝经验^[18]。我国已建成的百米级沥青混凝土心墙高坝仅有茅坪溪和冶勒,见表5^[2]。

(2) 新疆沥青防渗土石坝特点和发展趋势

新疆从20世纪90年代首先引进浇筑式沥青混凝土心墙坝,先后建成多拉特(坝高34.5m)和加音塔拉(坝高26.64m)两座水库,并在恰甫其海(堰高49.5m)和喀腊塑克(堰高31m)水库围堰工程中应用,这些工程均在一个冬季施工完毕,运行状况良好。同期还引进了碾压式沥青混凝土心墙坝,2001年建成坝高51.3m的坎尔其水库,2007年建成坝高71m的照壁山水库,将于2010年建成坝高78m的下坂地水库。目前,正在建设的同类坝型有7座,其中五一水库坝高102.5m,阿拉沟水库坝高105.26m,参见表1。鉴于沥青心墙坝适应变形能力较强的突出特点,对高震区、深厚覆盖层地质条件下筑坝,具有较好的推广价值。同时还需就配合比对沥青混凝土心墙工作性状的影响、碾压式沥青混凝土应力应变关系、心墙细部结构、寒冷地区碾压式沥青混凝土施工技术等问题开展进一步研究,在材料试验、设计理论、施工工艺方面不断完善。

3 寒冷地区碾压混凝土坝及温度控制技术

3.1 国内外发展进程

碾压混凝土(RCC)筑坝技术是世界筑坝史上的一次重大突破。20世纪60年代以来,美、英、日等一些国家开始进行研究碾压混凝土筑坝技术,截止

表 5 中国沥青混凝土防渗土石坝主要特性表

Table 5 Main characteristics of earth and rock dams by anti-seepage asphalt concrete in China

序号	坝名	省别	建成年	坝型	坝高/m	坝顶长/m	装机/MW	库容/亿 m ³
1	天荒平	浙江	1998	面板	72	577	1800	0.33
2	张河湾	河北	2008	面板	57	2843	1000	0.079
3	西龙池	山西	2007	面板	50	537	1200	0.04942
4	宝泉	河南	2008	面板	94.8	600.37	1200	0.0782
5	峡口	甘肃	2000	心墙	36	264	—	0.0745
6	茅坪溪	湖北	2003	心墙	104	1840	—	—
7	冶勒	四川	2005	心墙	125.5	411	240	2.98
8	尼尔基	黑龙江	2006	心墙	41.5	1658.31	250	86.1
9	江阴核电	广东	2007	心墙	43.4	395	—	—
10	洞塘	重庆	2003	心墙	48	145.5	330	0.1210
11	龙头石	四川	2008	心墙	72.5	371	600	1.347

表 6 我国已建的部分 RCC 高坝统计表 (截止 2007 年底)

Table 6 Statistics of Some Built Roller Compacted Concrete High Dam in China (until the end of 2007)

坝名	省别	建成年	坝高/m	坝顶长/m	RCC 体积/万 m ³	总体积/万 m ³
光照	贵州	2007	201	412	82	287
龙滩	广西	2007	192	761	462.3	641
大花水	贵州	2006	135	306	56	65
沙牌	四川	2001	132	25	36.2	39.2
金安桥	云南	2008	160	640	240	443
观音岩	湖北	2009	160	1250	647.3	936.4
云龙河	湖北	2008	135	119	18.2	20.7
洪口	福建	2008	130	348	68.1	74.5

2007 年底, 世界 RCC 坝 (坝高超过 15 m) 至少有 420 座。目前我国已建和在建数量均为世界之最, 分别有 117 座和 15 座 (见表 6), 显示了我国该坝型发展的迅猛态势^[19]。近年来, 我国认真总结已建工程存在的一些问题^[20-21], 在严格控制基础温差、水平浇筑层面和接缝面的短期表面保护、大坝上下游表面的长期表面保护等方面, 开展了广泛的研究与实践, 为克服“无坝不裂”提供了先进的技术支撑^[22]。

3.2 新疆碾压混凝土坝特点和发展趋势

针对 RCC 坝的施工速度快, 温度控制简单, 费用省, 且比较适宜寒冷地区筑坝的特点, 新疆在 20 世纪 90 年代末期引进 RCC 坝, 于 2000 年建成了石门子拱坝 (坝高 109 m), 该工程是我国首次在高寒地区建成的碾压混凝土高拱坝。而后又引进了碾压混凝土重力坝, 先后建成了喀腊塑克水利枢纽 (坝高 121.5 m)、特克斯山口水电站 (坝高 49.8 m) 及冲乎尔水电站 (坝高 74.0 m), 这些大坝均处于高寒和高地震区, 其中喀腊塑克水利枢纽是我国乃至世界上首次在高纬度地区修建的坝高最高、工程量最大的百米级全断面碾压混凝土重力坝。上述工程的建设, 在新技术、新材料、新工艺引进吸收和理论研究、技术创新等方面进行了大量有益的探索。特别是在碾压混凝土坝温度控制方面, 为新疆乃至全国在类似环境条件下的筑坝技术提供了宝贵经验。

(1) 严寒地区大体积混凝土温度场变化规律及保温技术研究与应用

喀腊塑克水利枢纽和冲乎尔水电站均处于阿尔泰山高寒山区, 冬季寒冷且历时较长, 最低气温为 -49.8℃, 最高气温为 40.1℃; 12 月、1 月、2 月多年月平均气温均在 -20℃ 以下。工程建设紧密围绕严寒地区混凝土温度场变化规律、长期保温条件下混凝土热学参数变化规律、寒潮 (气温骤降) 对混凝土温度的影响、越冬期间混凝土最低温度控制、保温材料选择等开展了系统的理论和试验研究。建立了严寒地区大体积混凝土温度场变化规律数学模型, 在基础理论方面, 完善了热力学理论在严寒地区混凝土温控领域的应用。研究提出的大体积混凝土永久和越冬层临时保温方案, 以及大体积混凝土成套保温技术, 在碾压混凝土重力坝得到成功应用^[23-25]。

(2) 大掺量石灰石粉与粉煤灰在寒冷地区碾压混凝土重力坝中得到成功应用

特克斯山口水电站坝址区, 最低气温为 -32℃, 最高气温为 39℃, 工程建设充分利用当地丰富的石灰石资源, 系统地开展了石灰石粉与粉煤灰双掺料在碾压混凝土中的应用研究, 揭示了石灰石粉—粉煤灰—水泥三元结构对碾压混凝土的力学、热学、耐久性、层间结合特性及施工性能等方面的作用机理, 制定了大掺量石灰石粉与粉煤灰双掺料碾压混凝土最优配合比

表7 国内部分深厚覆盖层上土石坝基础处理措施统计

Table 7 Statistics of some basement treatments of earth and rock dams constructed on deep burden layer in China

坝名	省别	竣工年限	坝型	坝高/m	河床覆盖层		
					最大厚度/m	覆盖层土类型	基础防渗形式
瀑布沟	四川	在建	砾石土心墙坝	188	75	漂石、砾卵石加砂	防渗墙78 m
长河坝	四川	拟建	砾石土心墙坝	240	79	漂石、卵砾石加砂	防渗墙51 m
小浪底	河南	2001	填土斜墙坝	160	80	砂、砂砾石互层	防渗墙82 m+水平铺盖
狮子坪	四川	2010	碎石土心墙坝	136	102	砾卵石、砂、壤土	混凝土防渗墙90 m
黄金坪	四川	拟建	沥青混凝土心墙坝	82.5	130	漂石、砂卵砾石	防渗墙90 m+帷幕45 m
下坂地	新疆	在建	沥青混凝土心墙坝	78	150	冰渍、漂块砾石、砂层	防渗墙85 m+帷幕66 m
冶勒	四川	2005	沥青混凝土心墙坝	125.5	>420	弱胶结砂卵砾石、粉质壤土	防渗墙140 m+帷幕60 m
察汗乌苏	新疆	2007	面板堆石坝	110	46.7	漂石、砂卵砾石、中粗砂	防渗墙40.8 m

设计准则,提出了碾压混凝土掺用石灰石粉的技术标准。施工中采用石灰石粉与粉煤灰各30%的大掺量碾压混凝土,以及表面采用喷涂聚氨酯作为保温保湿材料等综合措施,将混凝土的入仓温度放宽 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,减少加冰与冷却水管等温控措施,加快了施工进度,降低了工程投资^[26-29]。

(3)柔性拱和软弱地基上的碾压混凝土双曲薄壁拱坝

石门子双曲薄壁拱坝厚高比为0.273,坝址区地震设计烈度8级,最高气温 33.2°C ,最低气温 -31.5°C 。两岸及河床砾岩为泥钙质胶结,其中红色砾岩浸水软化后的变形模量为4 GPa ($< 20\text{ GPa}$),个别样品浸水后出现散塌,为软弱地基。坝体结构设计采用在坝肩上游面设人工短缝、拱冠设中缝(下游面预留1 m的部位不灌浆)、在拱坝上游早期降温区设“铰点”、下游面设人工短缝等措施,以降低坝体的刚度,限制拱座变位及加大拱坝变位,达到释放温度应力及减少水压作用下的拉应力集中,也就是采用“柔性拱”的方法来改善坝体应力^[30-31]。“柔性拱”结合坝肩加厚的方法,有效地解决了在软弱基础上建造拱坝时坝体位移加大引起应力恶化的问题,开辟了在高寒、软弱基础上修建百米级碾压混凝土双曲薄壁拱坝的先河。

4 深厚覆盖层坝基防渗处理技术

4.1 国内外深厚覆盖层坝基防渗处理技术进展

深厚覆盖层的渗流控制主要采取上游水平铺盖防渗和垂直防渗两种方法,或者是将两者相结合。其中坝基垂直防渗处理措施主要有3种:混凝土防渗墙、帷幕灌浆、防渗墙与帷幕灌浆相结合。随着防渗墙坝基防渗技术的不断成熟,20世纪60~70年代,国内外一批受技术条件约束的深厚覆盖层上的高坝相继开工建设。目前,国外坝基处理深度最大的混凝土防渗墙为加拿大的马尼克工程主坝,防渗墙最大深度131 m;

我国在深厚覆盖层上修建大坝有很多成功的经验,四川冶勒水电站,建造于高震区、超过400 m的深厚不均匀覆盖层上,采用混凝土防渗墙接帷幕灌浆联合防渗,防渗墙深度居世界之首。据2009年不完全统计,我国深度超过40 m的防渗墙已有70道左右。国内部分深厚覆盖层土石坝及基础处理措施见表7^[32-34]。

4.2 新疆深厚覆盖层坝基防渗处理技术进展

新疆深厚覆盖层坝基防渗一般采用垂直防渗墙或倒挂井施工技术。在建的下坂地水库具有“三高一深”的显著特点,即:高寒地区、高海拔(2966 m)、高地震区、深厚覆盖层(150 m)。坝基河床覆盖层主要由冲积砂砾石层、湖积软黏土层、土砂层、冰渍及冰水积层组成,渗透系数基本为 10^{-1} cm/s ,采用“上墙下幕”垂直防渗形式,防渗墙深85 m、厚1 m,灌浆帷幕厚10 m,布置4排灌浆孔。坝基渗流控制标准为:渗流量小于多年平均流量的1%,即 $< 0.346\text{ m}^3/\text{s}$,砂砾石层允许水力坡降 < 0.1 ,渗透系数 $< 10^{-4}\text{ cm/s}$ 。现场检测表明,成墙质量和帷幕灌浆满足设计对坝基渗流控制预期目标。“钻抓法”成槽工艺墙体深度(102 m),预埋灌浆管深度(100 m)和接头管起拔深度(72.7 m)均创造了国内新记录^[35-36]。目前拟建的阿尔塔什水利枢纽最大坝高162.8 m,河床最深覆盖层达100 m,设计采用在面板趾板段设两道混凝土防渗墙防渗,墙体厚1.2 m。

5 结 语

(1)具有良好抗震性能的“自愈式肥心墙”渗流控制坝体结构已成为黏土心墙堆石坝业已定型的典型坝型,而被广泛应用;“一防、二限、三排、四滤”的混凝土面板砂砾石堆石坝坝体渗流控制及抗震结构设计,已成为高地震区面板堆石坝的代表性坝体结构;沥青心墙堆石坝筑坝技术的不断突破,为当地材料坝的选型又提供了更多的选择;通过RCC坝建设,使严

寒地区大体积混凝土温度控制技术取得了显著成效。

(2) 高寒、高地震区、深厚覆盖层地质环境下的筑坝技术, 是新疆坝工建设的显著特点。混凝土面板砂砾石堆石坝和沥青混凝土心墙堆石坝是目前采用较多, 并具有广泛推广前景的当地材料坝。今后 10~20 年是新疆大坝建设的最好时期, 除表 1 中所列的在建工程外, 还将建设 29 座水库大坝。因此, 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] 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))
- [2] 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))
- [3] 潘家铮, 何璟. 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 WaterPower Press, 2000, 9. (in Chinese))
- [4] 林昭. 土石坝设计应重视工程实践经验[J]. 水利水电工程设计, 2005, 24(2): 1 - 2. (LIN Zhao. Extra attention to be paid on engineering practice and experience in design of the earth-rockfill dam[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2005, 24(2): 1 - 2. (in Chinese))
- [5] 尹力峰, 唐丽华, 王海涛, 等. 克孜尔水库大坝的地震动力反应分析[J]. 世界地震工程, 2002, 18(4): 165 - 172. (YIN Li-feng, TANG Li-hua, WANG Hai-tao, et al. Seismic response analysis of Kezier reservoir dam[J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(4): 165 - 172. (in Chinese))
- [6] 曲延军, 李志海, 杨成荣. 2005 年 9 月新疆克孜尔震群活动特征分析与震后趋势判定[J]. 内陆地震, 2007, 21(1): 19 - 27. (QU Yan-jun, LI Zhi-hai, YANG Cheng-rong. The Characteristic analysis of earthquake swarm activity of Xinjiang Kezier in Sep. 2005 and the tendency determination after the earthquake[J]. Inland Earthquake, 2007, 21(1): 19 - 27. (in Chinese))
- [7] 邓铭江, 周小兵, 石泉, 等. “635”水利枢纽大坝心墙防渗土料工程特性及防渗结构设计[J]. 新疆水利, 2000(5): 5 - 13. (DENG Ming-jiang, ZHOU Xiao-bing, SHI Quan, et al. Engineering characteristic of anti-seepage materials for core wall “635”multipurpose dam and its anti-seepage design[J]. Xinjiang Water Resources, 2000(5): 5 - 13. (in Chinese))
- [8] 唐新军, 凤家骥, 凤炜. “635”水利枢纽黏土心墙坝反滤料特性分析与试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(2): 5 - 9. (TANG Xin-jun, FENG Jia-ji, FENG Wei. Analysis of ECRD's filter characteristic and study on experiment of "635" multipurpose dam project[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(2): 5 - 9. (in Chinese))
- [9] 阿不力米提, 曲苓. 恰甫其海黏土心墙坝的材料选择及结构设计[J]. 水利技术监督, 2008(4): 52 - 54. (ABULIMITI, QU Ling. Selection and structural design of material clay core wall dam of qiapuqihai water conservancy multipurpose project[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2008(4): 52 - 54. (in Chinese))
- [10] 邓铭江, 周小兵, 万金平, 等. “635”水利枢纽大坝心墙防渗土料分散性[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 673 - 677. (DENG Ming-jiang, ZHOU Xiao-bing, WAN Jin-ping, et al. Dispersion appraisal and modification analyses of the impervious soil materials for the core wall of the dam of “635” water control project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 673 - 677. (in Chinese))
- [11] 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))
- [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] 彭卫军, 范金勇. 吉林台一级水电站混凝土面板砂砾石一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))
- [14] 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-I hydropower station[J]. *Water Power*, 2006, **32**(6): 40 - 43. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 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))
- [17] 朱 晟, 闻世强. 当代沥青混凝土心墙坝的进展[J]. *人民长江*, 2004, **35**(9): 9 - 11. (ZHU Sheng, WEN Shi-qiang. Present-day progress of asphalt concrete core wall dam[J]. *Yangtze River*, 2004, **35**(9): 9 - 11. (in Chinese))
- [18] 郝巨涛, 刘增宏. 水工沥青混凝土防渗技术. In: 中国大坝委员会. 中国大坝技术发展水平与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007, **12**: 186 - 192. (HAO Ju-tao, LIU Zeng-hong. Anti-seepage technique for asphalt concrete in hydraulic engineering: China Hydropower Commission. China Hydropower technique and its engineering cases[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007, **12**: 186 - 192. (in Chinese))
- [19] M.邓斯坦. 2008 年世界 RCC 坝纵览[J]. *水利水电快报*, 2009, **30**(6): 23 - 25. (DENG SITAN M. 2008 World prospectives of RCC dams[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2009, **30**(6): 23 - 25. (in Chinese))
- [20] 余丕玉. 光照水电站碾压混凝土坝施工期温度控制措施[J]. *企业科技与发展*, 2009(10): 120 - 123. (YU Pi-yu. Some temperature control measures during the construction of gravity dam for Guangzhao hydropower station[J]. *Enterprise Science and Technology & Development*, 2009(10): 120 - 123. (in Chinese))
- [21] 沈崇刚. 中国碾压混凝土坝技术的进展与运行经验[J]. *水力发电*, 1999(10): 43 - 46, 69. (SHEN Chong-gang. Technological advance and operation experience of RCC dam in China[J]. *Water Power*, 1999(10): 43 - 46, 69. (in Chinese))
- [22] 朱伯芳. 当前混凝土坝建设中的几个问题[J]. *水利学报*, 2009, **40**(1): 1 - 9. (ZHU Bo-fang. On some problems in construction of concrete dams[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(1): 1 - 9. (in Chinese))
- [23] 阮新民, 夏世法, 鲁一晖, 等. 寒冷地区某 RCC 重力坝保温措施及效果分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, **7**(3): 27 - 30. (RUAN Xin-min, XIA Shi-fa, LU Yi-hui, et al. Application and effect evaluation for the heat preservation measures of a rcc gravity dam in cold region[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, **7**(3): 27 - 30. (in Chinese))
- [24] 罗伟邦, 刘 涛, 刘 君. 喀拉塑克重力坝应力应变分析及体型优化[J]. *东北水利水电*, 2007, **25**(12): 1 - 2. (LUO Wei-bang, LIU tao, LIU Jun. Stress analysis and dam body optimization of Kelasuke gravity dam[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2007, **25**(12): 1 - 2. (in Chinese))
- [25] 牛万吉, 王建平, 罗清萍, 等. 严寒干旱地区 RCC 重力坝的保温防裂措施[J]. *水利水电科技进展*, 2009, **29**(1): 44 - 46. (NIU Wan-ji, WANG Jian-ping, LUO Qing-ping, et al. Research on the heat preservation and crack-prevention measures for RCC gravity dam in severely cold and dry area[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, **29**(1): 44 - 46. (in Chinese))
- [26] 杨长征, 曹 伟, 范金勇, 等. 严寒地区碾压混凝土坝施工技术及其仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 11. (YANG Chang-zheng, CAO Wei, FAN Jin-yong, et al. Construction technique and its simulation of roller concrete dam in severe cold area[M]. Beijing: Science Press, 2009, 11. (in Chinese))
- [27] 李世新, 杨长征, 杜 彬, 等. 新疆山口水电站混凝土拱坝保温保湿方案分析[J]. *水力发电学报*, 2008, **27**(3): 43 - 47. (LI Shi-xin, YANG Chang-zheng, DU Bin, et al. Analysis of heat and moisture insulation schemes for a concrete dam of Shankou hydropower station in Xinjiang Province[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, **27**(3): 43 - 47. (in Chinese))
- [28] 胡新丽, 董 芸, 黄成显. 石灰石粉与粉煤灰双掺在山口水电站碾压混凝土中应用的施工特性[J]. *粉煤灰*, 2009, **21**(5): 22 - 25. (HU Xin-li, DONG Yun, HUANG Cheng-xian. Construction features on application of limestone powder in rolled concrete for shankou hydroelectric station[J]. *Coal Ash China*, 2009, **21**(5): 22 - 25. (in Chinese))
- [29] 肖开涛, 董 芸, 杨华全. 石灰石粉用在碾压混凝土掺和料的试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2009, **26**(4): 44 - 47. (XIAO Kai-tao, DONG Yun, YANG Hua-quan. Test study of limestone powder mixed in RCC[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, **26**(4): 44 - 47. (in Chinese))

- Chinese))
- [30] 刘光廷, 徐增辉, 李鹏辉. 柔性拱和软弱地基上的碾压混凝土拱坝[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, **42**(10): 1365 - 1368. (LIU Guang-ting, XU Zeng-hui, LI Peng-hui. Flexible RCC arch dam on a weak foundation[J]. Journal of Tsinghua university (Science and Technology), 2002, **42**(10): 1365 - 1368. (in Chinese))
- [31] 刘光廷, 胡昱, 王恩志, 等. 石门子碾压混凝土拱坝温度场实测与仿真计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, **42**(4): 116 - 119. (LIU Guang-ting, HU Yu, WAN En-zhi, et al. Analysis and measurement of the temperature field in the Shimenzi RCC arch dam[J]. Journal of Tsinghua university (Science and Technology), 2002, **42**(4): 116 - 119. (in Chinese))
- [32] 杨海林. 深厚覆盖层基础上堆石坝防渗系统优化研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 6 - 7. (YANG Hai-lin. Study on Anti-seepage System Optimization for Rock-fill dam on the Basement of Deep Overburden Layer[D]. Nanjiang: Hohai University, 2007: 6 - 7. (in Chinese))
- [33] 赵明华, 陆希. 西藏部分电站深厚覆盖层渗控体系综述及优化初探[J]. 西北水电, 2009, **28**(2): 34 - 38. (ZHAO Ming-hua, LU Xi. Summary and optimization study of seepage control system for deep overburden in some hydropower projects in Tibet[J]. Northwest Water Power, 2009, **28**(2): 34 - 38. (in Chinese))
- [34] 关艳平, 薛建军. 冶勒水电站深厚覆盖层帷幕灌浆试验研究[J]. 四川水利, 2006(4): 73 - 76. (GUAN Yan-ping, XUE Jiang-jun. Experiment of curtain grouting for deep overburden layer at Yele hydropower station[J]. Sichuan Water Conservancy, 2006(4): 73 - 76. (in Chinese))
- [35] 韩军, 黄小宁. 新疆下坂地水利枢纽坝基深厚覆盖层防渗措施试验研究[J]. 水利水电技术, 2005, **36**(7): 64 - 67. (HAN Jun, HUANG Xiao-ning. Study on anti-seepage measures experiment on basement of deep overburden layer at Xiabandi project, Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, **36**(7): 64 - 67. (in Chinese))
- [36] 王根龙, 崔拥军, 寿立勇, 等. 新疆下坂地水利枢纽坝基垂直防渗试验研究[J]. 人民长江, 2006(6): 59 - 61. (WANG Geng-long, CUI Yong-jun, SHOU Li-yong, et al. Test and study on vertical seepage control of dam foundation of Xiabandi hydroproject in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Yangtze River, 2006(6): 59 - 61. (in Chinese))

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 2009 年起每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)