

世界已建高坝大库统计分析

庞 琼^{1,2},王士军^{2,3},倪小荣^{2,4},张大伟²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所,江苏 南京 210029;
3. 水利部大坝安全管理中心,江苏 南京 210029; 4. 江苏省交通规划设计院股份有限公司,江苏 南京 210005)

摘要:为了解和掌握世界范围内的高坝大库建设情况,统计全球已建成的特大型高坝大库资料。在此基础上,根据地区、坝型和建成年代对高坝大库有关特征进行分析,总结了世界高坝大库的地区分布规律、主要坝型和历史建设趋势,得出如下结论:世界高坝大库工程主要分布于亚洲、欧洲、北美洲;高坝的坝型通常是混凝土拱坝、堆石坝和混凝土重力坝,而形成特大型水库的大坝多为混凝土重力坝、堆石坝和混凝土拱坝;高坝大库工程基本上建成于 1945 年以后,目前世界高坝大库的建设中心已转移至中国。

关键词:世界高坝大库;坝高;库容;统计分析

中图分类号:TV631 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)06-0034-04

Statistical analysis of world existed high dams and large reservoir//PANG Qiong^{1,2}, WANG Shijun^{2,3}, NI Xiaorong^{2,4}, ZHANG Dawei² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, PRC, Nanjing 210029, China; 4. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210005, China)

Abstract: Statistical analysis of built high dams and large reservoirs all over the word was carried out to better understand its current status. Based on the statistical analysis, which mainly focused on regional distribution, dam type, and construction time, the regional distribution law, the main dam types, and the trend of dam construction were obtained. High dams and large reservoirs are mainly distributed throughout Asia, Europe, and North America. High concrete dams, rockfill dams, and concrete gravity dams are the main high dam types. Dams with super-larger reservoirs are mainly high concrete dams, rockfill dams, and concrete arch dams. Most high dams and large reservoirs were completed after 1945. China is the construction center of high dams and large reservoirs at present.

Key words: world high dams and large reservoir; height of dam; reservoirs capacity; statistical analysis

拦河大坝是人类开发河水资源、征服大自然的杰作,从公元前 3 000 年人类开始筑坝至今,世界主要河流已建设 10 万多座大坝,它们在蓄水、灌溉、发电、供水、防洪和航运等方面对人类社会起到了重要保障作用。随着水资源需求的增大、筑坝技术的进步和大坝安全重要性的提高,高坝大库成为社会关注的热点。为了解和掌握世界范围内的高坝大库情况,将全球已建成的高坝大库工程进行统计(截至 2010 年 12 月 31 日),分别按照坝高、库容确定世界高坝大库前 100 名,其中有 21 个工程同时排入库容前 100 名和坝高前 100 名。本文以这 179 个工程资料为基础,对高坝大库的有关特征进行统计

分析。

1 世界大坝概况

根据世界大坝委员会 ICOLD (International Commission on Large Dams) 2011 年数据库显示,世界范围内已有 37 626 座大坝。这些大坝形成的水库总库容大约为 149 130 亿 m³,对水资源高效利用和管理以及克服水资源时空分布不均作出了重要贡献。

世界注册大坝中有 26 996 座大坝为单一功能的水利工程,其中,具有灌溉、发电、防洪、供水、娱乐、养殖、航运及其他功能的大坝分别有 13 510 座、

4915 座、2571 座、3 214 座、1 341 座、38 座、112 座、1 295 座;有 9 300 座大坝为多功能综合性水利工程,具有以灌溉、发电、防洪、供水、娱乐、养殖、航运及其他功能为主的多功能大坝分别有 5 567 座、3 775 座、4 574 座、3 928 座、2 798 座、1 342 座、541 座、942 座(其中部分大坝主要功能重叠)^[1]。

大坝主要类型为土坝、堆石坝、重力坝、支墩坝、闸坝、拱坝、连拱坝,分别有 23 640 座、2 883 座、6 378 座、418 座、251 座、1 828 座、158 座,其他坝型有 2 070 座^[1]。

2 世界大坝特征分析

依据世界大坝委员发布的最新数据,参考中国水利水电出版社出版的《世界江河与大坝》^[2]、水利部大坝安全管理中心建立的全国水库大坝基础数据库、国际大坝会议发布的资料以及全球最大网络百科全书维基百科等相关资料,分别按照坝高、库容确定了世界高坝大库前 100 名。截至 2010 年 12 月 31 日,全球已建成的特大型水库大坝中,坝高前 100 名的大坝坝高范围为 166 ~ 300 m,库容前 100 名的大坝库容范围为 115.2 亿 ~ 2 048 亿 m³。

2.1 库容最大和坝高最高的大坝

世界已建大坝形成的库容最大的水库是乌干达欧文瀑布水库,水库总库容为 2 048 亿 m³,若包括维多利亚湖在内则为 27 000 亿 m³,该工程大坝为纳鲁贝尔坝,是一座高 31 m、长 831 m 的混凝土重力坝。

世界已建最高坝为塔吉克斯坦的努列克水泥心墙堆石坝,坝高 300 m。不同坝型已建最高坝工程概况见表 1。

表 1 不同坝型已建最高坝工程概况

坝 型	坝 名	国 家	坝高/ m	世界 排名
心墙堆石坝	努列克坝	塔吉克斯坦	300.0	1
混凝土拱坝	小湾水电站大坝	中 国	294.5	2
混凝土重力坝	大狄克桑斯坝	瑞 士	285.0	3
混凝土重力拱坝	萨彦舒申斯克坝	俄罗斯	245.0	13
混凝土面板堆石坝	水布垭水利枢纽大坝	中 国	233.0	19
混凝土连拱坝	丹尼尔·约翰逊坝	加拿大	214.0	33
碾压混凝土重力坝	光照水电站大坝	中 国	200.5	44

2.2 地区和国家分布

世界高坝大库前 100 名的地区分布见表 2。坝高前 100 名和库容前 100 名的世界大坝国家分布分别见表 3 和表 4。由表 2 和表 3 可知,高坝工程分布在 36 个国家,主要分布在亚洲(36%)、欧洲(27%)和北美洲(20%),其中中国 14 座,美国 12 座,土耳其 9 座,伊朗 7 座,加拿大 6 座,瑞士 5 座。由表 2 和表 4 可知,大库容的工程分布在 29 个国家,主要分布在北美洲(24%)、欧洲(24%)和亚洲(23%),

其中俄罗斯 20 座,加拿大 17 座,巴西 14 座,中国 10 座,美国 6 座,阿根廷 4 座。由此可知,不论在高坝分布还是大库分布方面,亚洲、欧洲和北美洲都在世界范围内占主导地位。相对而言,非洲高坝大库工程建设较少,表明其水电开发程度、水资源调控能力都较低,而大洋洲虽然目前有不少灌溉建坝、小水电开发及电站更新改造项目,但规模都不大^[3],所以无论是高坝还是大库都仅有 1 座进入世界前 100 名。

表 2 世界高坝大库前 100 名地区分布比例 %

类 别	亚洲	欧洲	北美洲	南美洲	非洲	大洋洲
坝高前 100 名分布	36	27	20	13	3	1
库容前 100 名分布	23	24	24	19	9	1

表 3 坝高前 100 名的世界大坝国家分布

排名	国 家	座数	排名	国 家	座数
1	中 国	14	19	俄罗斯	1
2	美 国	12	20	洪都拉斯	1
3	土耳其	9	21	黑 山	1
4	伊 朗	7	22	吉尔吉斯斯坦	1
5	加拿大	6	23	马来西亚	1
6	瑞 士	5	24	西班牙	1
7	印 度	4	25	菲律宾	1
8	墨西哥	4	26	冰 岛	1
9	巴 西	4	27	埃塞俄比亚	1
10	哥伦比亚	3	28	莱索托	1
11	格鲁吉亚	2	29	澳大利亚	1
12	奥地利	2	30	法 国	1
13	意大利	2	31	希 腊	1
14	罗马尼亚	2	32	莫桑比克	1
15	日 本	2	33	阿根廷	1
16	老 挝	2	34	厄瓜多尔	1
17	塔吉克斯坦	1	35	乌兹别克斯坦	1
18	哥斯达黎加	1	36	阿尔巴尼亚	1

表 4 库容前 100 名的世界大坝

排名	国 家	座数	排名	国 家	座数
1	俄罗斯	20	16	委内瑞拉	1
2	加拿大	17	17	莫桑比克	1
3	巴 西	14	18	刚 果	1
4	中 国	10	19	科特迪瓦	1
5	美国	6	20	苏里南	1
6	阿根廷	4	21	吉尔吉斯斯坦	1
7	印 度	3	22	阿塞拜疆	1
8	哈萨克斯坦	2	23	澳大利亚	1
9	马来西亚	2	24	尼日利亚	1
10	乌克兰	2	25	哥斯达黎加	1
11	土耳其	2	26	叙利亚	1
12	乌干达	1	27	巴基斯坦	1
13	赞比亚/津巴布韦	1	28	泰 国	1
14	埃 及	1	29	伊拉克	1
15	加 纳	1			

此外,结合联合国粮食和农业组织(FAO)发布的世界水资源分布概况和国际货币基金组织(IMF)2010 年公布的世界各国人口数据及人均 GDP 数

据^[4],以 FAO 发布的各国内部可再生水资源世界地图^[5]为背景,绘制了图 1。图中标出了 2010 年人口超过 1 亿的国家及世界排名,2010 年人均 GDP 超过 1 万美元的国家及世界排名,以及各国高坝大库数目。

高坝工程中国最多(14 座),其原因如下:首先,与水资源时空分布和需求密切相关,中国国土面积世界第三,人口总数世界第一,水资源总量丰富但人均占有量低,年内年际分配不均,旱涝灾害频繁,水资源供需矛盾突出;地区分布不均,水土资源不相匹配^[6]。为满足生活用水、农业用水、防洪、发电和清洁能源的需要,修建大型水电工程显得尤为重要。其次,与地理特征有关,中国西南地区多为高山峡谷地貌,两岸岸坡陡峻但岩体的变形稳定性及强度稳定性较高,地区地壳稳定,无倾角断层或仅有小的断层和破碎带,而基岩也多为坚硬类岩,岩石完整,强度高,地形地质条件适宜建设高坝工程。再次,与高坝建设技术有关,中国高坝筑坝工艺近几十年来有了突飞猛进的发展,总体上处于世界先进水平^[7-9]。

大库工程俄罗斯最多(20 座),原因如下:首先,与水资源时空分布有关,俄罗斯国土面积世界第一,河流纵横,湖泊众多,水资源总量仅次于巴西,居世界第二,但分布却极不平衡,面临洪水威胁的土地面积超过 40 万 km²,而大型水库在减少洪涝灾害损失方面发挥着极其重要的作用,因此俄罗斯修建大型水库进行径流调节。其次,与需求有关,俄罗斯人口总数世界排名第九,在灌溉、供水、发电、养殖等方面需求量大,为了保证生产经营和居民用水需要,俄

斯修建了一批大型水库^[10]。再次,与地理特征有关,20 座大型水库中有 7 座位于伏尔加河流域,6 座位于叶尼塞河流域,2 座位于黑龙江流域,其余 5 座分别分布于斯维里河流域、图洛马河流域、勒拿河流域、顿河流域和汉泰河流域,这些河流大多水面开阔,再加之有像贝加尔湖、奥涅加湖和拉多加湖等天然湖泊的存在,拦河坝兴建形成特大型水库。

结合表 2~4 和图 1,高坝大库工程分布在以下地区:

a. 水资源丰富地区及有调水需求的地区。全球淡水资源不仅短缺,而且地区分布极不平衡,巴西、俄罗斯、加拿大、中国、美国、印度尼西亚、印度、哥伦比亚和秘鲁 9 个国家的淡水资源占世界淡水资源的 60%,而阿根廷、阿塞拜疆、孟加拉、玻利维亚、柬埔寨、埃及等 33 个国家的 50% 的可再生水资源依赖于其他国家^[11]。这些国家通过修建大型水电工程合理调配水资源,满足自身灌溉、发电、供水要求。

b. 国土面积广阔地区。这些国家经纬跨度大,具有适合建造高坝大库工程的地形地貌及水文气候条件:高山峡谷地区河谷深切,呈“V”形或“U”形,地形地质条件适宜建设高坝工程;降水充沛地区河谷深,流量大,一旦建坝蓄水就容易形成大型水库。国土面积大也容易导致水资源分布不均衡,洪涝灾害严重,需修建高坝大库进行水资源调配和防洪。

c. 人口众多地区。中国、印度、美国水资源需求量大,为满足生活用水、农业用水、防洪、发电和清洁能源的需要,修建大型水电工程势在必行。

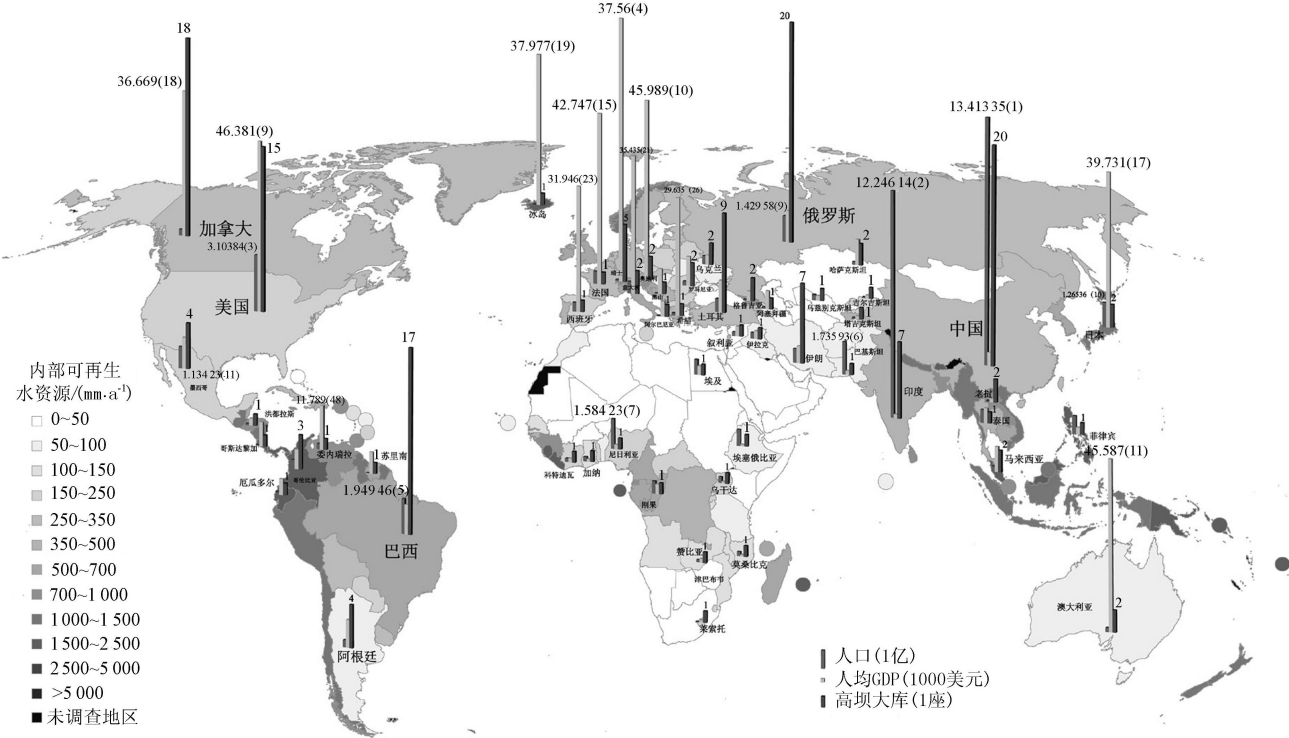


图 1 各国水资源、人口、人均 GDP 及高坝大库分布示意图

d. 经济发达地区。一方面,高坝大库工程耗资巨大,只有经济实力雄厚的国家和地区才有能力修建;另一方面,大坝基础设施建设对推动国家的经济发展有积极作用。基础设施的总量越大,尤其是水库库容越大,对经济增长和发展的贡献就越大。以美国密西西比河水系为例,经过近一个世纪的开发和治理,这一北美洲最大水系已经发展成为集航运、防洪、发电、供水、灌溉、娱乐、环保于一体的综合利用水系,产生了巨大的社会效益^[12]。发达国家已拥有大量的基础设施(大坝),而在发展中国家,建设新坝仍非常重要。

e. 大型水电工程建设技术尤其是高坝筑坝技术领先地区。大型工程的建设条件复杂,大坝失事的危害难以承受,在坝型和枢纽布置选择、建筑物边坡和基础处理等筑坝技术方面仍然面临着许多困难和挑战^[8],技术先进才能建设出更高更安全的大坝。

2.3 坝型分析

根据统计资料,世界坝高、库容前 100 名大坝的坝型分布分别见表 5、表 6。由表 5 可知,高坝的坝型通常是混凝土拱坝、堆石坝和混凝土重力坝。统计表明:全世界 2010 年已建成的坝高大于 166 m 的 100 座大坝中,有 46% 为混凝土拱坝,31% 为堆石坝,14% 为混凝土重力坝,这与不同坝型的自身特点和优势密切相关^[8]。库容前 100 名的大型水库中有 52 座是由 100 m 级以上的高坝兴建而成,这类坝多为混凝土重力坝、堆石坝和混凝土拱坝,高坝拦蓄的水库平均水深大,加之河流面积广就会产生特大型

表 5 世界坝高前 100 名的大坝坝型分布

坝高前 100 名 的大坝	混凝土拱坝(46 座)
	堆石坝 { 心墙堆石坝(25 座)
	{ 面板堆石坝(13 座)
	混凝土重力坝(14 座)
	心墙土坝(1 座)
	主坝为堆石坝的混合坝(1 座)

表 6 世界库容前 100 名的大坝坝型分布

库容前 100 名 的大坝	土坝 {	均质土坝(16 座)
		心墙土坝(5 座)
		水力冲填土坝(2 座)
	混凝土重力坝(21 座)	
	堆石坝 {	心墙堆石坝(18 座)
		面板堆石坝(3 座)
	混凝土拱坝(11 座)	
	混合坝 {	主坝为混凝土重力坝(18 座)
		主坝为土坝(2 座)
		主坝为堆石坝(2 座)
		主坝为圉工重力坝(1 座)
		主坝为混凝土支墩坝(1 座)

水库;其余 48 座工程主要由土坝及主坝为混凝土重力坝的混合坝兴建形成,这类坝坝高较小,尤其是土坝经常出现低水头大库容的现象,这是由于水库并不是由一座坝而是由一系列的坝围成,有的水库还包含天然湖泊,从而产生特大型水库。例如,库容排名第 33 名的加拿大丘吉尔瀑布水电站共建主副土坝 88 座,总长 64 km,主坝最大坝高 32 m,形成斯莫尔伍德水库,水库总库容为 323.2 亿 m³。

2.4 建成年代分析

高坝大库不同时期的建设情况见表 7。第二次世界大战(1945 年)以前,高坝建设主要位于美国,大库容工程主要位于美国、加拿大、中国、朝鲜、俄罗斯,表明这些国家尤其是美国开展大规模水资源开发利用较早,以 20 世纪 30 年代在科罗拉多河上修建坝高 221.4 m 的胡佛大坝为标志,世界高坝建设进入了一个快速发展的时期^[8]。

表 7 高坝大库不同时期的建设数量

分 类	1945 年以前	1946—1959 年	1960—1969 年	1970—1979 年	1980—1989 年	1990—1999 年	2000—2010 年
前 100 名高坝	3	3	16	19	15	15	29
前 100 名大库	6	15	17	27	12	13	10

高坝大库工程基本上建成于 1945 年之后。那时,世界格局趋于稳定,第三次工业革命刚刚开始,各国都将精力重点投入到发展自身经济与推动科技进步上来,为大力发展大型水电事业提供了保障。20 世纪 60 年代至今,几乎每 10 年内都有约 20~45 座高坝大库工程建成,使水资源得到有效利用,对这些国家经济实力的全面提升作出了贡献。

高坝建设的鼎盛时期是 21 世纪,建设中心主要位于亚洲,尤其是中国在总结国外筑坝技术的基础上大力开展自主创新研究,短短 10 年内建成 11 座坝高 150 m 以上的大坝,高坝筑坝工艺已达世界领先水平。

大库工程于 20 世纪 50 年代发展迅速,20 世纪 70 年代进入鼎盛时期,当时的建设中心位于欧洲和亚洲,以俄罗斯为主要建设国家,此后以每 10 年 10 多座的速度增加。21 世纪以后,中国成为大库工程的主要建设国家。

3 结 论

a. 截至 2010 年 12 月 31 日,在全球已建成的特大型高坝大库中,前 100 名高坝的坝高范围为 166~300 m,前 100 名大库的库容范围为 115.2 亿~2048 亿 m³。

b. 高坝工程分布在 36 个国家,中国最多(14 座),大库工程分布在 9 个国家,(下转第 59 页)

参考文献:

[1] 殷宗泽,余湘娟,王媛,等. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[2] 吴春勇. 真空联合堆载预压软土路基稳定控制与沉降预测[D]. 长春:吉林大学,2004.

[3] 王孝存,周健,贾敏长. 不同堆载方法在软基堆载预压中的稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2005, 1(2):299-301.

[4] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京,北京人民交通出版社,2002.

[5] 彭劼,刘汉龙,陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,31(5): 560-562.

[6] 朱群峰,高长胜,杨守华,等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9): 1432-1433.

[7] 任志福. 真空预压法加固软土地基机理相关问题的探讨[J]. 建筑科学, 2008,24(3):43-44.

[8] 李宁,吴跃东,左文荣,等. 真空-堆载联合预压法加固软基效果的理论研究[J]. 水运工程,2008,8(12):233-234.

[9] 向臻锋. 真空联合堆载预压法加固机理及稳定性研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[10] 祝峻. 地基固结过程中软土抗剪强度增长评价[D]. 杭州:浙江大学,2010.

(收稿日期:2012 - 03 - 16 编辑:周红梅)

(上接第 37 页)

俄罗斯最多(20 座)。世界高坝大库工程主要位于亚洲、欧洲、北美洲国家,而非洲、大洋洲国家高坝大库工程建设较少。高坝大库工程主要分布在水资源丰富、国土面积广、人口众多、经济与科技发达的地区。

c. 高坝的坝型通常是混凝土拱坝、堆石坝和混凝土重力坝。有 52 座大库工程是由 100 m 级以上高坝兴建而成,这些高坝多为混凝土重力坝、堆石坝和混凝土拱坝;其余 48 座则是由一系列的土坝围成,或是主坝为混凝土重力坝的混合坝兴建形成。

d. 高坝大库工程基本上建成于 1945 年之后。美国最早建设高坝大库工程,目前世界高坝大库的建设中心已转移至中国,已建最高的混凝土拱坝、最高的混凝土面板堆石坝、最高的碾压混凝土重力坝都位于中国。

参考文献:

[1] International commission on large dams. World register of dams [EB/OL]. [2011-11-17]. http://www.icold-cigb.net/GB/World_register/general_synthesis.asp.

[2] 赵纯厚,朱振宏,周端庄. 世界江河与大坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.

[3] 贾金生,袁玉兰,李铁洁. 2003 年中国及世界大坝情况[J]. 中国水利,2004(13):25-33.

[4] List of countries by population in 2010 [DB/OL]. [2011-12-16]. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_population_in_2010.

[5] FAO. Review of world water resources by country [R]. Rome: FAO,2003.

[6] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.

[7] 贾金生,袁玉兰,马忠丽. 2005 年中国与世界大坝建设情况[C]//水电 2006 国际研讨会论文集. 昆明:中国

水利水电科学研究院,2006.

[8] 周建平,杨泽艳,陈观福. 我国高坝建设的现状和面临的挑战[J]. 水利学报,2006,37(12):1433-1438.

[9] 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.

[10] 阿萨林 A E. 俄罗斯的水资源及其利用[J]. 赵秋云,译. 水利水电快报,2008,29(5):1-4.

[11] FAO. Review of world water resources by country [R]. Rome: FAO,2003:19-22.

[12] 何学民. 我所看到的美国水电:美国密西西比水系的综合开发及其借鉴意义[J]. 四川水力发电, 2007,26(3):117-121.

(收稿日期:2012 - 02 - 21 编辑:骆超)

(上接第 30 页)

[10] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.

[11] 罗刚,张建民,沈珠江. 紫坪铺混凝土面板堆石坝三维应力位移分析[J]. 水力发电学报, 2002, 24(1): 13-18.

[12] 刘芳,张丙印,沈珠江,等. 西龙池下库沥青混凝土面板堆石坝的应力变形分析[J]. 水力发电学报, 2003, 83(4):31-38.

[13] 高希章,杨志宏. 紫坪铺水利枢纽工程混凝土面板堆石坝设计[J]. 水利水电技术,2002,33(11):14-17.

[14] 李桂芳,谭志军. 双沟水电站面板堆石坝反演计算分析[J]. 吉林水利,2009,11(3):13-15.

[15] 吴兴征,周晓光,徐泽平. 鱼跳混凝土面板堆石坝三维静力应力变形分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(1):75-80.

[16] 潘家军,费胜. 混凝土面板堆石坝三维非线性有限元应力变形分析[J]. 水电能源科学,2007,25(2):39-42.

[17] 张丙印,李全明,熊焰,等. 三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝应力变形分析[J]. 长江科学院院报,2004,21(2):18-21.

(收稿日期:2012 - 02 - 17 编辑:周红梅)