堆石混凝土技术概述

北京华石纳固科技有限公司

二零二二年

1. 堆石混凝土技术介绍

1.1 技术定义

大体积混凝土，特别是大坝混凝土，为了降低混凝土的水化热和成本，都希望降低水泥用量。一般而言，可以采用减少用水量或采用大粒径骨料以增加骨料用量的方法。前者，如碾压混凝土，即是采用干硬混凝土的方法，但需要大功率的碾压机械，依靠强大的机械力量使混凝土密实。在常态混凝土中，如大坝混凝土往往采用四级配骨料，骨料最大粒径可达到 150mm，但受到拌和与振捣能力的限制，难以使用更大的骨料。混凝土砌石、毛石混凝土、砼砌块石等方式也较为普遍的用于筑坝，但是，这些筑坝方式需要较多的技术工人，施工质量主要受工人技术水平和责任心的控制，在目前的技术和管理水平下，实际工程中往往难以保证质量，再加上近年来人工费用的不断上涨，混凝土砌石、毛石混凝土、砼砌块石等筑坝技术正面临越来越大的困难。

清华大学水利水电工程系金峰和安雪晖教授从 2003 年首次提出以大块石与自密实混凝土相结合的新型混凝土技术思路发明堆石混凝土技术（Rock-Filled Concrete，简称 RFC），并用于筑坝技术和新坝型的研究。依托国家“863”计划、国家自然科学基金、国家重点实验室资助及企业合作课题，通过十余年深入研究，结合数十个大坝工程的应用实践逐步建立了堆石混凝土筑坝技术体系。

堆石混凝土技术具有低碳环保、低水化热、工艺简便、造价低廉、施工速度快等特点。堆石混凝土是指先将满足一定粒径要求的块石（或卵石）自然堆满仓面，然后在堆石体表面浇注满足特殊要求的高自密实性能混凝土，无需振捣仅依靠其自重充填堆石体的空隙，所形成完整密实的混凝土，其构成如图 1-1 所示。

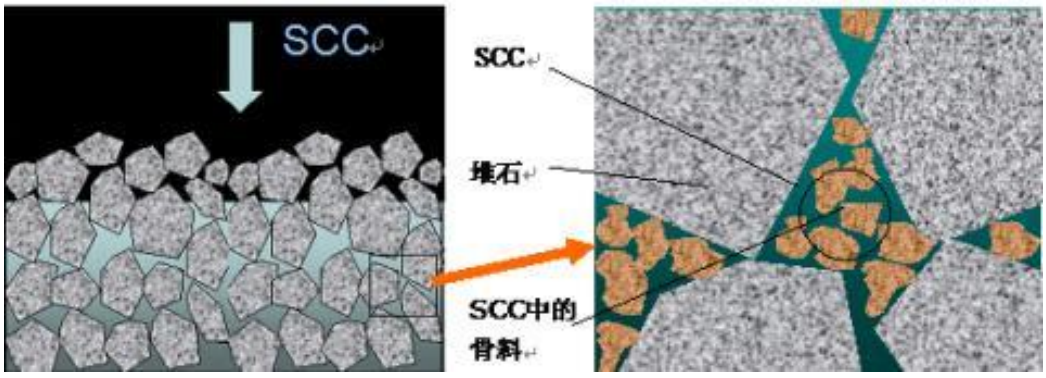


图 1-1　高自密实性能混凝土充填堆石体形成堆石混凝土示意图

1.2 知识产权

堆石混凝土技术自 2003 年由清华大学水利水电工程系发明以来，已逐步形成以堆石混凝土、自流可控灌浆和水下自护混凝土等技术为代表的堆石混凝土系列专利技术 20 余项，其中堆石混凝土大坝施工相关并获得国家发明专利授权的专利见表 1-1，专利证书见图 1-2。

表 1-1　堆石混凝土术相关发明专利

专利名称	专利号	申请日	公告号
堆石混凝土大坝施工方法	ZL031026074.5	20030214	CN1521363
普通型堆石混凝土施工方法	ZL200710100315.3	20070608	CN101074560
抛石型堆石混凝土大坝施工方法	ZL200710121791.3	20070914	CN101144279
堆石混凝土和胶凝砂砾石复合材料坝及其设计与施工方法	ZL201010256664.6	20100818	CN101935995A



图 1-2　堆石混凝土技术专利证书

1.3 技术特点

堆石混凝土施工技术作为一种全新的大体积混凝土施工技术，利用了大量堆石，混凝土中堆石的体积比例一般可以达到 55%~60%，能够充分利用初级开采

的石料或者开挖料中的大块石，最大限度地降低了胶凝材料的用量。同时，堆石混凝土施工技术还在骨料破碎、混凝土生产浇筑等施工环节上大量节约能耗，减少了二氧化碳的排放。因此，堆石混凝土技术是一种新型低碳环保的混凝土施工方法。

堆石混凝土施工技术作为一种全新的大体积混凝土施工技术，利用了大量的块石作为建筑材料，并且充分发挥了低水化热高自密实性能混凝土性能优势，具有以下特点和性能优势。

（1）低水泥用量与低水化热

常规的 C15～C25 混凝土一般需要 200～350kg 左右的水泥，而 C15～C25 堆石混凝土只需要 70～100kg 左右的水泥；其单方水泥用量与碾压混凝土相当，与常规混凝土相比减少了 70%左右。其原因在于堆石混凝土使用了大量的块石（约 55%）作为主要建筑材料，只需要使用 45%的高自密实性能混凝土进行空隙的充填。另外，堆石混凝土可以充分利用粉煤灰、矿渣粉、石粉等活性或惰性掺和料，配合低水泥高自密实性能混凝土配合比设计方法保证了低水泥用量的实现，因此对于水泥的用量显著降低，其材料构成如图 1-3 所示。

工程实测的大体积混凝土实际水化温升在 10℃左右，在大体积混凝土施工过程中可以减少，甚至取消温控措施。

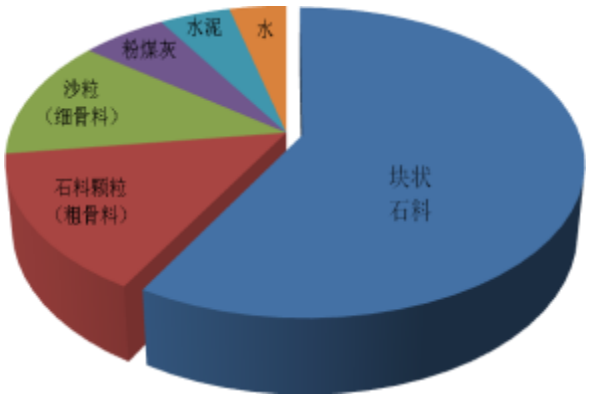


图 1-3　堆石混凝土的构成

对吉牛水电站、蒙山水库、清峪水库、佰佳水电站、恒山水库、布尔津山口电站、藏木水电站、贵州石龙沟水库、新疆乌苏铁路、向家坝沉井回填、中山长坑水库工程共计 11 个工程共计 170 个测点的温升监测数据进行了统计，分布如图 1-4 所示：

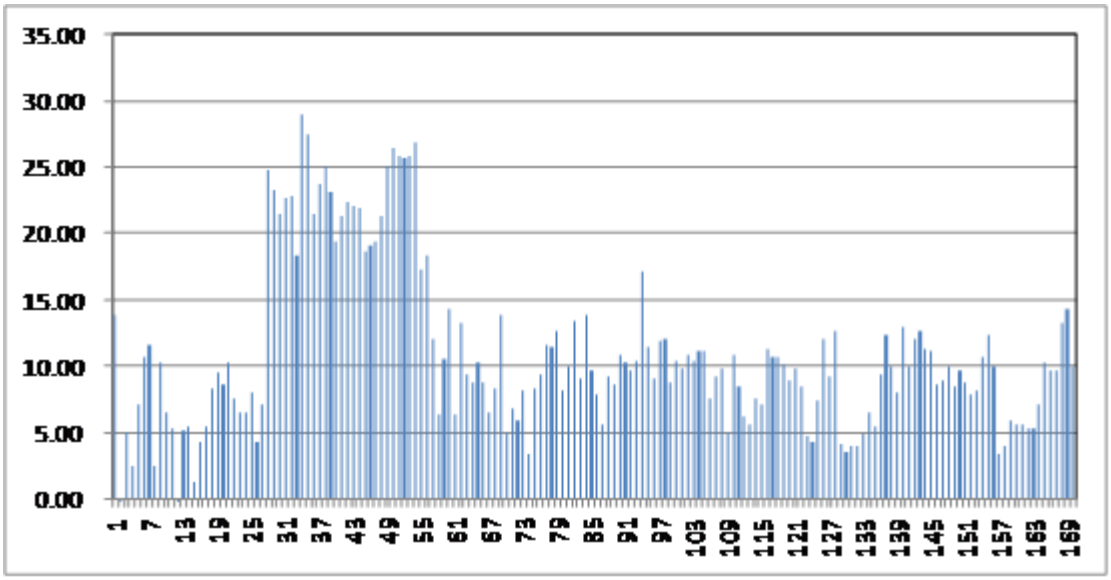


图 1-4　温升分布图

从图中可以看出堆石混凝土的温升一般能控制在 15℃以内。经统计 170 个测点中：0-10℃的 94 个占 55%；10-15℃47 个，占 28%，15℃以上 29 个，占 17%，且基本全部在吉牛水电站、蒙山水库的监测中出现。

经过对现有温升监测的结果的分析总结，主要有以下主要结论：

1）堆石混凝土控制层高 1.5-2.0m 和 SCC 填充率在 45%以内，在不进行任何温控措施的情况下最大温升一般可以控制在 15℃以内。

2）堆石混凝土层高超过 2.0m，或者填充率超过 45%的情况下要密切关注温升情况，如果超过标准需要进行适当的温控措施及解决方案。

（2）工艺简便，施工快速

堆石混凝土施工主要包括两道工序：堆石入仓和高自密实性能混凝土的生产浇筑。通过合理的施工组织设计，两道工序均可以通过大规模的机械化施工来完成，减少了工人的参与，避免了人为的干扰。

在完成一定堆石仓面后堆石入仓和混凝土生产浇筑可以平行进行，工序间干扰小，生产效率成倍提升的同时还降低了设备生产强度的要求。

堆石混凝土施工工艺保证施工层面会有大量的块石棱角裸露，增加了层间混凝土的结合面，通过混凝土与块石棱角的咬合可提高堆石混凝土层间的抗剪能力，可以免除或者简化层间结合面的凿毛工序。

简化消除温控措施、混凝土生产运输浇筑量减半且无需振捣、免除或简化凿毛工序等都为加快建设速度、缩短工期提供了强有力的保证。

（3）显著降低施工成本

堆石混凝土施工的综合成本在相同条件下较常态混凝土可降低 10%~20%，主要通过三个方面实现：

1）大量使用堆石减少胶凝材料用量，堆石混凝土的材料成本较常态混凝土有所降低；

2）由于高自密实性能混凝土的用量不高于 45%，所以在混凝土生产、运输以及浇筑等工序的施工成本更能够显著降低；

3）堆石混凝土施工机械化程度高，简化或消除了温控措施，浇筑过程免去了振捣工序减少了人工成本的投入。

（4）综合性能稳定，安全系数高

堆石混凝土是由相互搭接的堆石骨架和用于胶结堆石的高自密实性能混凝土构成的。堆石骨架在提高材料抗压、抗剪强度，抑制干缩变形，提高结构体积稳定性等方面都有着显著的效果；而高自密实性能混凝土独特的设计与工艺，使其具有卓越的流动性能、充填性能和抗离析性能，在浇注过程中不离析不泌水既保证了高自密实性能混凝土的充填均匀性，又避免了混凝土与骨料胶结面过渡区薄弱层的产生。

（5）技术先进，环境友好，适用面广

堆石混凝土技术采用大量块石和粉煤灰，减少了水泥用量和大功率的碾压机械，可以减少温室气体排放和能量消耗，是一种环境友好的混凝土。堆石混凝土在北京、河南、四川、贵州、新疆、江西、山西、云南等省区的实际工程的应用，所用的堆石既有块石，也有卵石；高自密实性能混凝土的粗、细骨料既有人工碎石和人工砂，也有天然卵石和天然砂；所有工程都使用当地的水泥和粉煤灰。这些应用成果表明，堆石混凝土技术以及低水化热低成本高自密实性能混凝土配合比设计方法和专用外加剂，能够适应国内各地不同的原材料，具有广泛的适应性。

1.4 技术指标

堆石混凝土的技术指标主要包括从强度、抗冻、绝热温升等。

在抗压强度方面，堆石混凝土的强度比自密实混凝土提高了 20%~50%，与大块石强度有关，根据试验与工程资料，一般的岩石高 20%~30%，花岗岩等坚硬岩石可以高到 50%。目前水利部与国家能源局相关技术标准已将这些强度富裕

系数作为安全储备，进一步保障了大坝安全。

在抗拉强度方面，堆石混凝土极限拉伸值可以超过 100 个微应变，拉压强度比约为 0.075~0.085，C20 等级以上轴拉强度能够达到 1.5MPa。

在抗剪强度方面，堆石混凝土具有优异的抗剪强度，其 f 值可达到 1.5 以上，c 值可达到 1.7MPa，块石之间的咬合作用有助于抗剪强度的提高。

在抗冻性能方面，在实际工程中，部分已建的高原堆石混凝土工程的抗冻性能可以达到 F300。

在绝热温升方面，常态是 25%~30%、碾压是 16%~20%，堆石混凝土是 10%~15%。大坝整体温度应力不大，最大主应力不超过 1.5Mpa，没有超过混凝土极限拉伸强度值，故在施工期间大坝不会产生温度裂缝。

1.5 经济指标

水利部黄委设计院受水利部委托修订水利行业工程定额，他们在大量实际工程案例调查的基础上，对堆石混凝土造价进行了专项研究，得到的基本结论是：在同等条件下，堆石混凝土单位造价约是碾压混凝土的 88%至 92%，节约成本约 10%；这还不包括 10%左右温控费用的节约。

根据黄委设计院修订的水利部施工定额，人、材、机三个方面。

人工以常态混凝土为 100，则碾压混凝土为 30，堆石混凝土为 20。

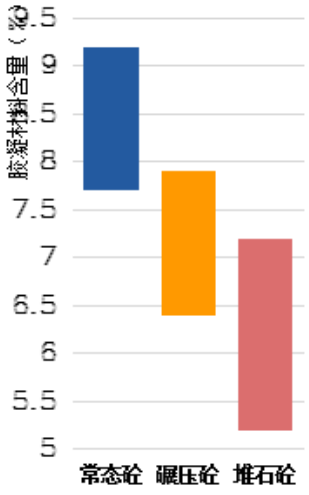
机械能耗，若常态混凝土为 100，则碾压混凝土约 90，堆石混凝土约 60。

材料方面，以最贵的水泥等胶结材料分析，常态混凝土占比为 7.7%~9.2%，碾压混凝土占比为 6.4%~7.9%，堆石混凝土为 5.2%~7.1%。

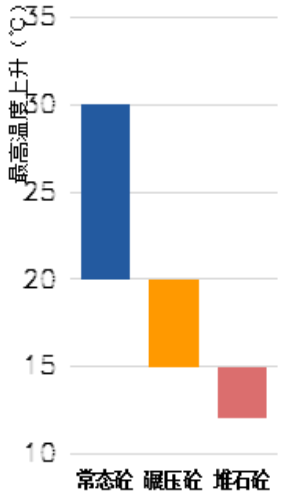
堆石混凝土技术的碳减排原理即采用大量取自河道的卵石或开挖的块石，替代混凝土比例可达 55%，最大限度地减少胶凝材料的用量，从而减少混凝土原材料中的水泥使用量，减少 CO_2 的排放，堆石混凝土单位 CO_2 的排放量为 0.078t/m³，而常态混凝土单位 CO_2 的排放量为 0.12t/m³，而碾压混凝土单位 CO_2 的排放量为 0.10t/m³。由于堆石混凝土对机械化要求低，机械种类简单，使得机械能耗较低，故堆石混凝土单方机械消耗为 0.62GJ/m³，而常态混凝土单方机械消耗为 1.05GJ/m³，碾压混凝土单方机械消耗为 0.93GJ/m³。此外，堆石混凝土施工过程中，人工的使用相对较少，据统计，堆石混凝土人员消耗 0.2 工时/m³，而常态混凝土人员消耗 1.27 工时/m³，碾压混凝土人员消耗 0.39 工时/m³。对于堆石混

凝土造价方面，以常规混凝土造价为 100%为标准，则碾压混凝土相对造价为 90%，而堆石混凝土造价为 80%。此外，由于堆石混凝土技术施工设备简化，施工速度快， 施工工期较常态混凝土可节约 10%~20%，项目提前投产也会带来较大的经济效益。在山区地质条件比较好的坝址，采用堆石混凝土坝可以降低成本，在与面板堆石坝的对比中已体现出了优势。如：云南娇子沟水库，原方案为面板堆石坝方案，造价 1.125 亿、工期 42 个月，后经过比选采用了我们发明的堆石混凝土坝，总造价降低至 0.936 亿元，工期缩短至 31 个月，总筑坝材料减少了 21 万方，减少了 4.36 万 m^3 弃渣、节约了 80 亩耕地。其实，山西清峪水库、广西清平水库、云南松林水库等工程也是进行了堆石混凝土与面板堆石坝的对比，最终采用了堆石混凝土坝。

堆石混凝土技术的各项指标与常态混凝土和碾压混凝土相比在水泥胶材用量、绝热温升、人材机、CO_2及工程经济等方面对比显示，堆石混凝土简化工艺、节约人工、环境友好、经济性好，实现了自身不裂的混凝土大坝。具体优势对比如下图所示。



（a）水泥胶材用量



（b）绝热温升

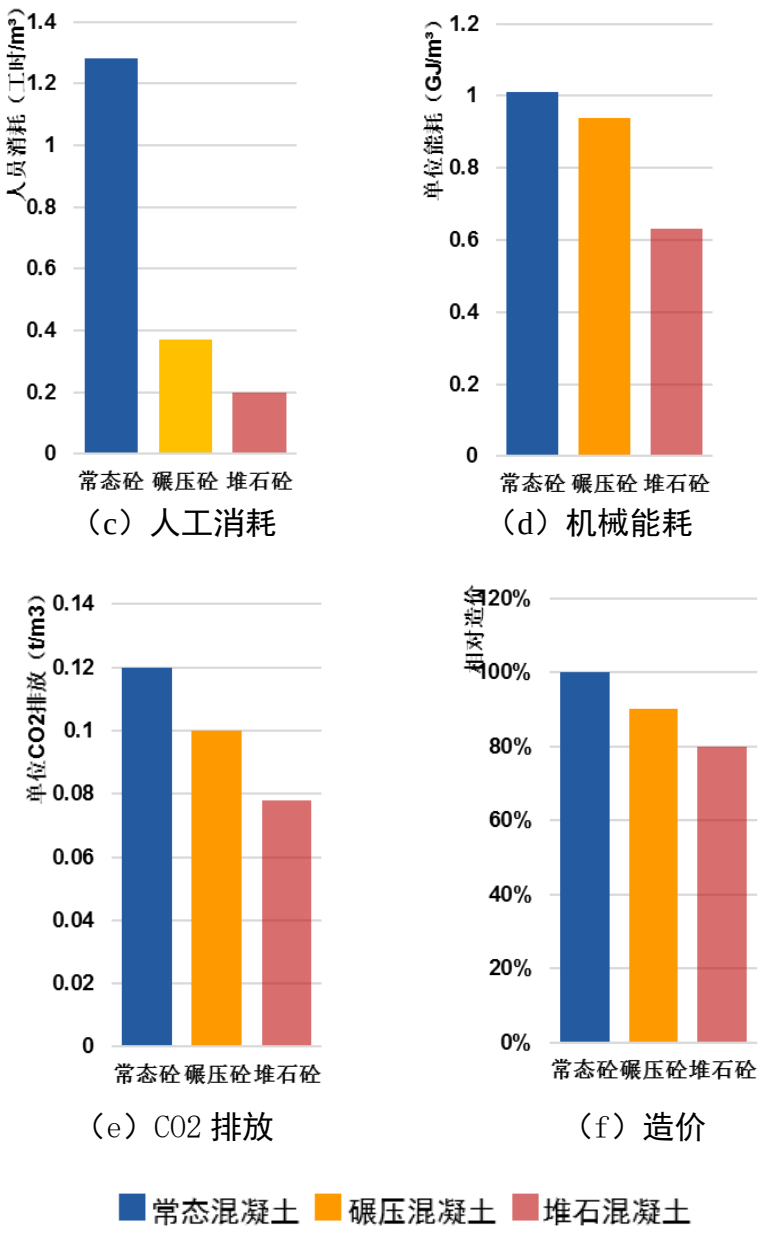


图 1-5　综合指标比较

1.6 技术认证与发展情况

2008 年堆石混凝土技术获得水利部科技成果鉴定，得到了以潘家铮院士为组长、时任水利部总工刘宁为副组长的专家组的一致好评，被鉴定为国际领先水平，图 1-6、1-7 为鉴定会情况和鉴定证书。2014 年，教育部组织了由马洪琪、张超然、钟登华、钮新强、张勇传等 5 位院士在内的专家组对堆石混凝土技术进行鉴定，一致认为：“该项研究成果具有原创性自主知识产权，为水利水电工程筑坝技术开拓了一条新的途径，是混凝土筑坝方法的重大创新。该成果达到国际领先水平”，鉴定证书见图 1-8。



图 1-6　2008 年水利部堆石混凝土技术科技成果鉴定会



图 1-7　堆石混凝土技术水利部科技成果鉴定证书（2008 年）



图 1-8　堆石混凝土技术教育部科技成果鉴定证书（2014 年）

2011 年坝工泰斗潘家铮院士联名 11 位院士致信时任国家发改委副主任解振华同志，希望国家发改委对该项技术予以大力支持，潘总在信中指出：“清华大学水利水电工程系发明的堆石混凝土技术是一项具有自主知识产权的新型大体积混凝土解决方案，……这项技术推广应用对国家经济建设和人民生活改善都很有意义”，见图 1-9。

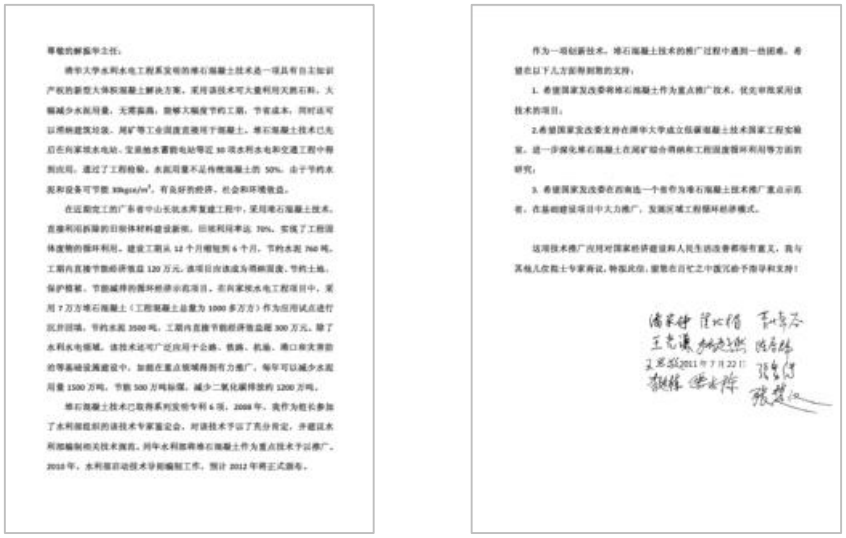


图 1-9　潘家铮等 11 位院士联名推荐信

堆石混凝土技术自 2008 年起，持续被被列入水利部水利先进实用技术重点推广指导目录，见图 1-10。



图 1-10　水利部水利先进实用技术推广证书（2008～2015 年）

2012 年，堆石混凝土技术进入国家发改委、环保部、科技部、工信部四部委联合发布的《国家鼓励的循环经济技术、工艺和设备名录（第一批）》（共 42 项），见图 1-11。



中华人民共和国国家发展和改革委员会
中华人民共和国环境保护部
中华人民共和国科学技术部
中华人民共和国工业和信息化部

公 告

2012 年 第 13 号

为贯彻落实《循环经济促进法》，推广先进技术、工艺和设备，提升循环经济发展技术支撑能力和装备水平，提高资源产出率，我们组织编制了《国家鼓励的循环经济技术、工艺和设备名录（第一批）》，现予公布。

本名录涉及减量化、再利用和再制造、资源化、产业共生与链接四个方面，共 42 项重点循环经济技术、工艺和设备。

附件：《国家鼓励的循环经济技术、工艺和设备名录（第一批）》

—1—

8	节材型超薄陶瓷砖生产技术及设备	针对传统建筑陶瓷砖生产过程中原料消耗大、能耗大、污染重等问题，采用自主研发的陶瓷砖自动液压压砖机、墙地砖布料及模具系统，高效节能超速窑和陶瓷超大超薄板材冷加工等整线装备生产超大超薄陶瓷砖，实现源头节材、降低能耗、减少三废排放。	产品性能符合相关标准，产品合格率≥96%；瓷板规格 900×1800 mm，厚度 3～6 mm 可调；节约原材料用量 50%以上；较传统瓷砖生产节能 30%以上。	陶瓷砖生产行业	推广
9	低水泥用量堆石混凝土技术	针对常规混凝土水泥用量大、施工能耗高等问题，采用高流动性、抗分离性能好的自密实混凝土浇筑粒径较大的块石堆积体表面，依靠自密实混凝土自重完全充填块石空隙形成完整、密实、低水化热的大体积混凝土，施工过程不需要采取振捣密实和温控措施，既提高浇筑速度也可保证浇筑质量，实现源头减少水泥用量与降低能耗。	与传统混凝土工艺相比，每 m^3 混凝土水泥用量减少 50%以上；单位体积混凝土比传统混凝土施工能耗降低 35%以上。	大中型建设工程领域混凝土浇筑	推广
二	再利用与再制造技术、工艺及设备				
10	废旧机械零部件自动化高速电弧喷涂再制造技术及设备	针对汽车发动机缸体、曲轴等机械零部件，利用铁基、铝基等金属丝材作为喷涂材料，将雾化后的喷涂材料高速喷射到工件表面形成致密涂层，采用基于先进机器人技术和高速电弧喷涂技术集成的自动化高速电弧喷涂设备，实现数字自动控制，提高再制造质量和效率。	铁基涂层的结合强度≥30 MPa；铝铝基涂层强度≥20 MPa；再制造一台发动机缸体时间为手工喷涂的 30%。	发动机缸体、曲轴等关键零部件的再制造	示范

3

图 1-11　堆石混凝土技术入选国家发改委等 4 部联合发布的《国家鼓励的循环经济技术、工艺和设备名录（第一批）》

清华大学作为技术发明单位、北京华石纳固科技有限公司作为技术推广与服务单位于 2016 年共同获得教育部技术发明一等奖，并于 2017 年获得国家技术发明二等奖，获奖证书见图 1-12、1-13。



获奖项目：堆石混凝土筑坝技术及其工程应用

获奖单位：清华大学（第1完成单位）

奖励等级：技术发明奖一等奖

奖励日期：2017年2月

证 书 号：2016-118

教 育 部

二〇一七年二月二十二日

获奖项目：堆石混凝土筑坝技术及其工程应用

获奖单位：北京华石纳固科技有限公司（第2完成单位）

奖励等级：技术发明奖一等奖

奖励日期：2017年2月

证 书 号：2016-118

教 育 部

二〇一七年二月二十二日

图 1-12　堆石混凝土技术获得教育部技术发明一等奖证书



图 1-13　堆石混凝土坝获得国家技术发明二等奖

在堆石混凝土技术的发展中，得到了国家有关部门的大力支持，以及国内外同行的认可与肯定。作为具有我国自主知识产权的新型大体积混凝土技术，堆石混凝土经过 10 余年的研究与发展，积累丰富的工程经验，形成比较成熟的技术体系。

2009 年，由水利部水规总院牵头，清华大学和水科院共同参与主编《胶结颗粒料筑坝技术导则》；2012 年 9 月~2013 年 9 月召开专家咨询会征求意见，完成送审稿；2013 年 12 月 报批稿通过审定；2014 年 3 月 28 日水利部正式颁布堆石混凝土水利部行业标准《胶结颗粒料筑坝技术导则》SL678-2014。



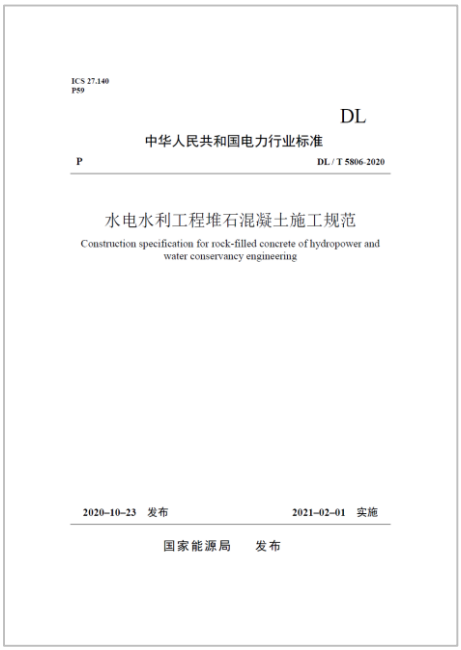
图 1-14　水利部行业中英文标准《胶结颗粒料筑坝导则》

根据《国家能源局关于下达 2014 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2014〕298 号）的要求，华东勘测设计研究院有限公司、清华大学作为主编单位，会同中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司、贵阳勘测设计研究院有限公司、国电大渡河流域水电开发有限公司、北京华实纳固科技有限公司等参编单位制定《堆石混凝土筑坝技术导则》（以下简称“导则”），编号为“能源 20140435”。导则的送审稿已于 2015 年 12 月份完成，并于 2017 年 5 月份通过水电规划总院的审查，2018 年 10 月 29 日正式颁布堆石混凝土能源局行业标准《堆石混凝土筑坝技术导则》NB/T 10077-2018。



图 1-15　能源局行业中英文标准《堆石混凝土筑坝技术导则》

2015 年根据《国家能源局关于下达 2015 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2015〕283 号）的要求，中国水利水电第八工程局有限公司、浙江省围海建设集团股份有限公司、清华大学及北京华石纳固科技有限公司作为主编单位，制定《水电水利工程堆石混凝土施工规范》（以下简称“施工规范”），2018 年 11 月完成送审稿，2020 年 10 月 23 日正式颁布了能源局行业标准《税点水利工程堆石混凝土施工规范》DL/T 5806-2020。


ICS 27.140
P59

DL

中华人民共和国电力行业标准

P DL / T 5806-2020

水电水利工程堆石混凝土施工规范

Construction specification for rock-filled concrete of hydropower and water conservancy engineering

2020-10-23 发布 2021-02-01 实施

国家能源局 发布

图 1-16 能源局行业标准《水电水利工程堆石混凝土施工规范》DL/T 5806-2020

2019 年 6 月国际大坝委员会 CMD 技术公报 Bulletin of ICOLD《Rock-Filled Concrete Dam》已通过审查。


ICOLD

COMMITTEE ON CEMENTED MATERIAL DAMS

Cemented Material Dam: Design and Practice -

Rock-Filled Concrete Dam

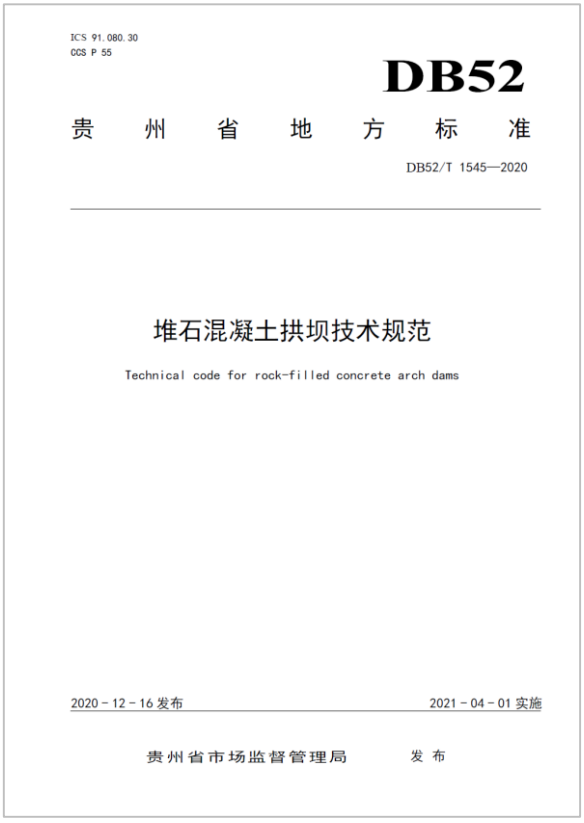
JUNE 2019

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES
61, avenue Kléber, 75116 Paris
Téléphone : (33-1) 47 04 17 80 - Fax : (33-1) 53 75 16 22 http://www.icold-cigb.org/

Final for ICOLD publication i 1 January 2020

图 1-17 技术公报审查会和技术公报

2019 年由遵义水利水电勘测设计研究院与清华大学主编单位，制定了贵州省地方标准《堆石混凝土拱坝技术标准》（以下简称“拱坝标准”）。2020 年 7 月形成报批稿，2020 年 12 月 16 日正式颁布贵州省地方标准《堆石混凝土拱坝技术规范》DB52/T 1545-2020。


ICS 91.080.30
CCS P 55

DB52

贵 州 省 地 方 标 准

DB52/T 1545—2020

堆石混凝土拱坝技术规范

Technical code for rock-filled concrete arch dams

2020-12-16 发布　　2021-04-01 实施

贵州省市场监督管理局　　发布

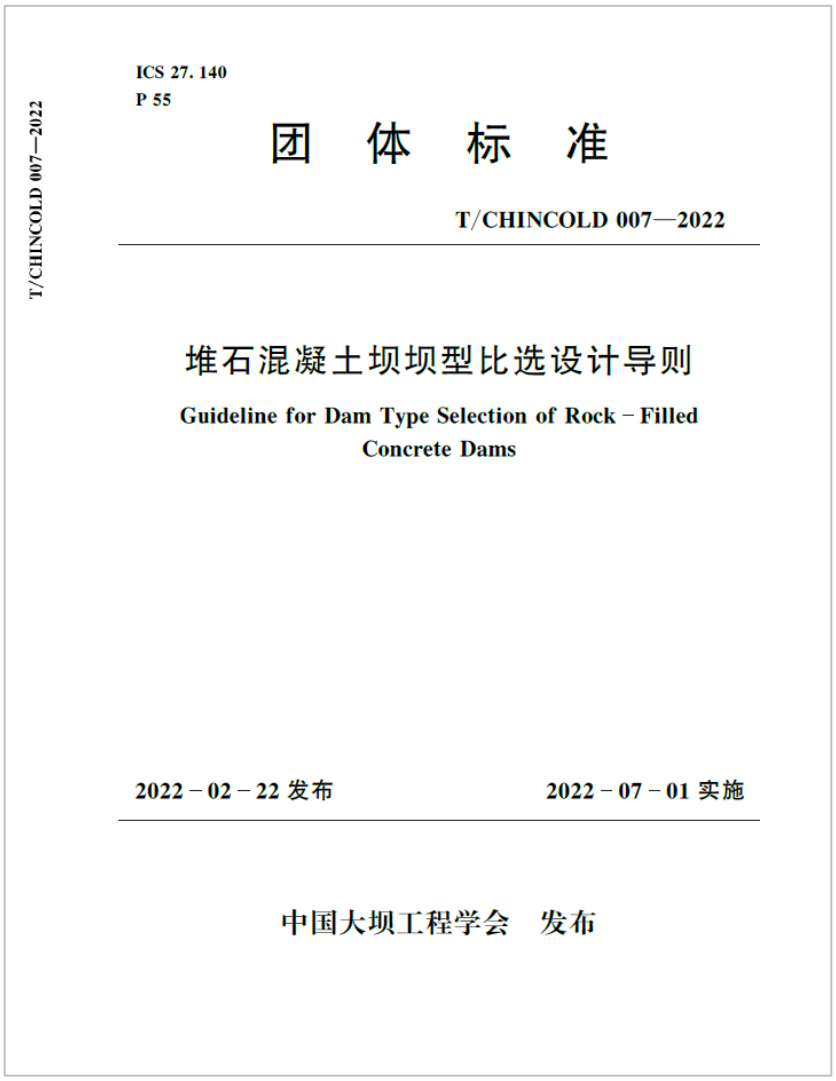
图 1-18　贵州省地方标准《堆石混凝土拱坝技术规范》DB52/T 1545-2020

2020 年由水利部水利水电规划设计总院与清华大学为主编单位，编制了由中国水利水电出版社出版的《堆石混凝土坝典型设计图集》，2022 年 6 月已正式颁布。



图 1-19　《堆石混凝土坝典型设计图集》

2020 年由水利部水利水电规划设计总院与清华大学为主编单位，编制了系列大坝工程学会团体标准，2022 年 2 月已正式颁布了《堆石混凝土坝坝型比选设计导则》T/CHINCOLD 007-2022 和《堆石混凝土坝典型结构图设计导则》T/CHINCOLD 008-2022。


T/CHINCOLD 007—2022

ICS 27.140
P 55

团 体 标 准

T/CHINCOLD 007—2022

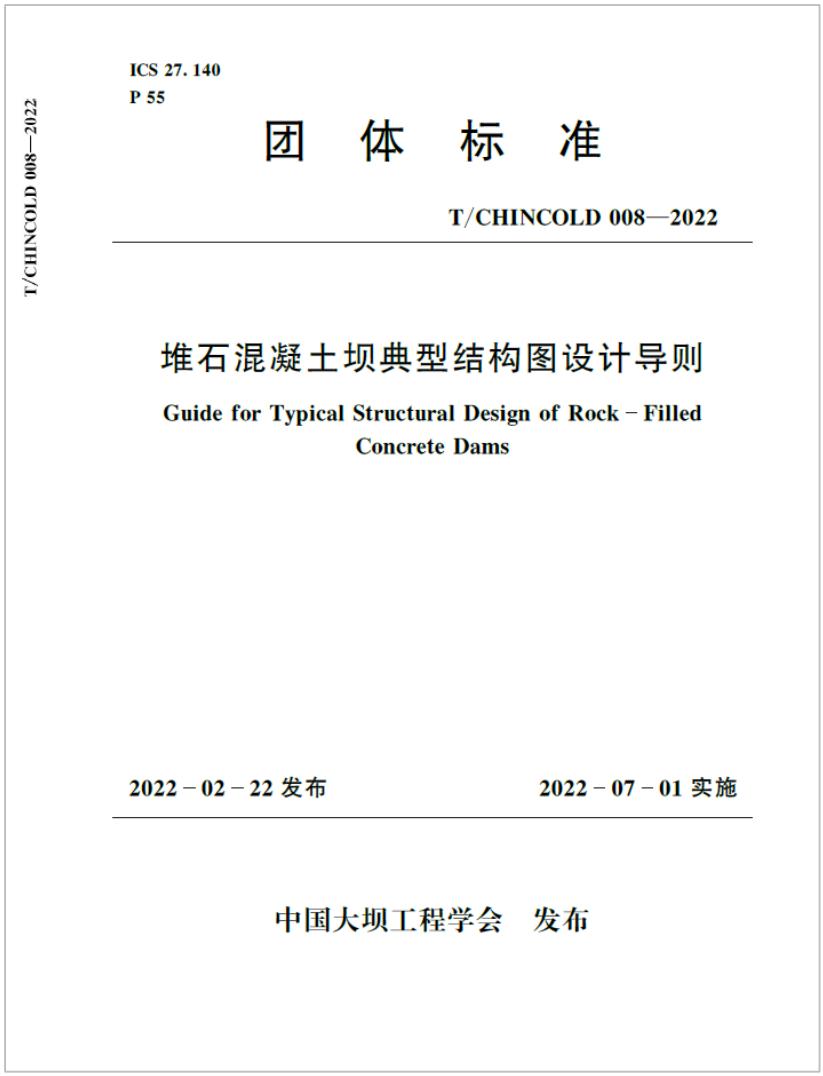
堆石混凝土坝坝型比选设计导则

Guideline for Dam Type Selection of Rock－Filled Concrete Dams

2022－02－22 发布　　2022－07－01 实施

中国大坝工程学会　发布

图 1-20　《堆石混凝土坝坝型比选设计导则》T/CHINCOLD 007-2022



ICS 27.140
P 55

团 体 标 准

T/CHINCOLD 008—2022

T/CHINCOLD 008—2022

堆石混凝土坝典型结构图设计导则

Guide for Typical Structural Design of Rock－Filled Concrete Dams

2022－02－22 发布　　2022－07－01 实施

中国大坝工程学会　发布

图 1-21　堆石混凝土坝典型结构图设计导则》T/CHINCOLD 008-2022

2 工程应用情况

2.1 工程应用情况

2005 年堆石混凝土首次在工程中正式应用，堆石混凝土的应用不仅为每个工程解决了棘手的问题，而且缩短了施工工期、节约了施工成本，得到了建设各方的一致好评。截止至目前北京华石纳固科技有限公司已在北京、河北、河南、山东、山西、陕西、甘肃、新疆、西藏、四川、云南、广东、广西、福建等二十多个省进行堆石混凝土技术进行指导，堆石混凝土技术在水利、水电、交通、铁路、港口等行业成功应用近 620 余万方，应用工程数量 210 余个工程。

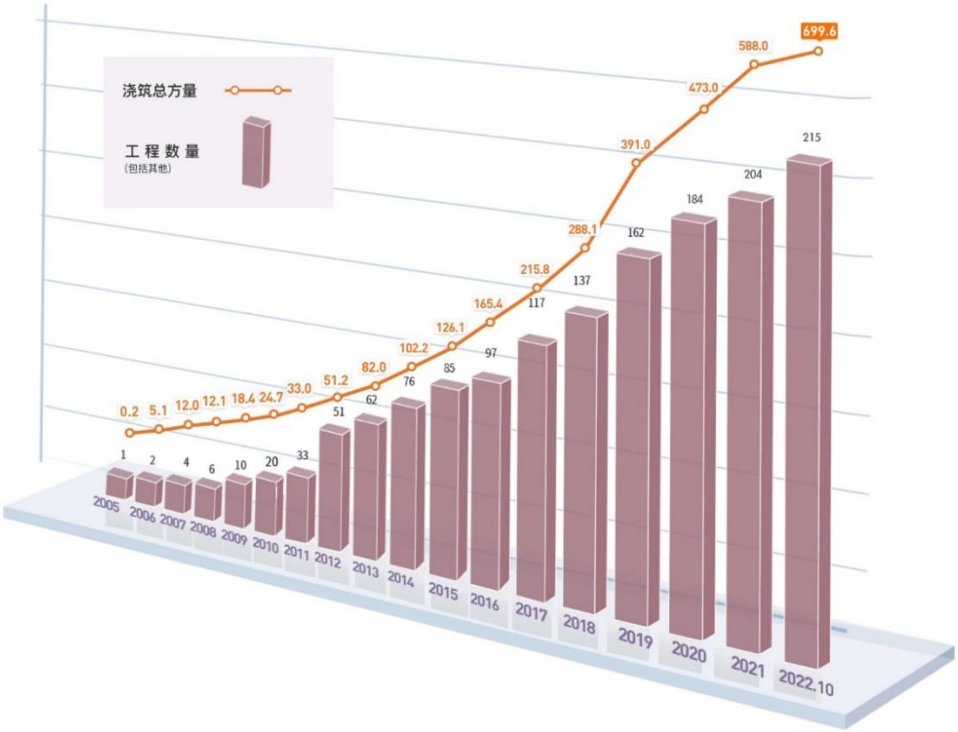


图 2-1　堆石混凝土应用方量增长图

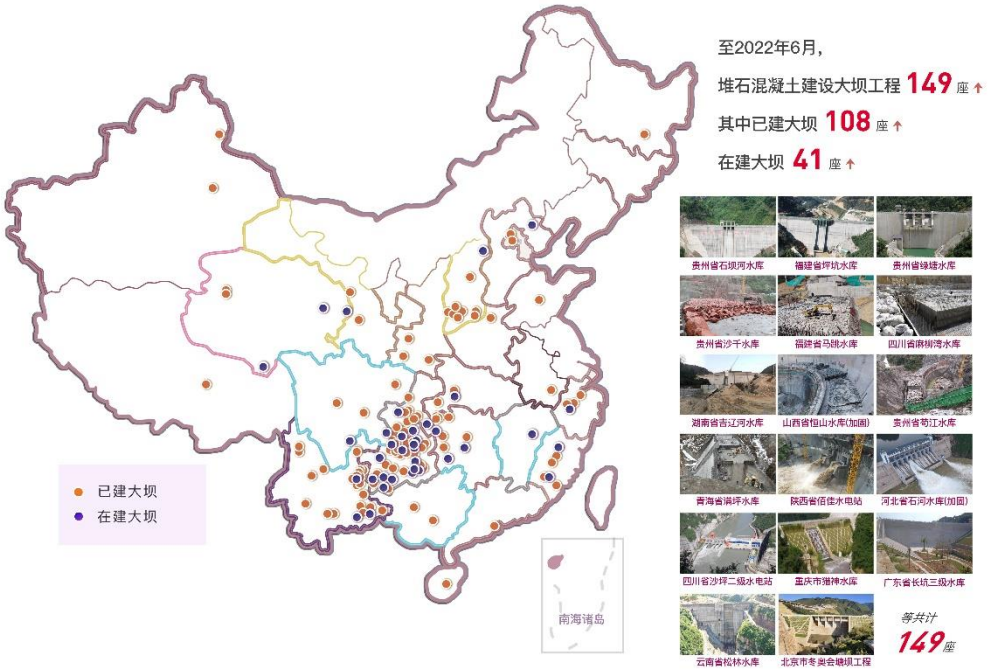


图 2-2　堆石混凝土工程应用分布图

堆石混凝土坝的出现与推广应用，进一步完善了坝工技术体系，长期的应用

实践使堆石混凝土施工工艺得到了完善。堆石混凝土技术现多应用于中小型工程，在高重力坝和拱坝建设方面仍具有较大发展空间。2014 年 8 月 24 日，四川沙坪二级电站闸坝基础堆石混凝土工程顺利完工，经钻孔取芯及孔内摄像检验，堆石混凝土各项指标满足设计要求，层间结合良好，完成了“快速并优质”的施工任务。2015 年底，云南彝良松林水库的 90m 高堆石混凝土重力坝已经正式开展堆石混凝土施工，将会为堆石混凝土在高重力坝及拱坝上的应用积累宝贵的工程经验。结合今后的一批高坝、拱坝的建设，应继续研究与提高堆石混凝土的综合性能，完善施工工艺，早日实现堆石混凝土在百米级大坝及高拱坝上的推广应用。部分堆石混凝土大坝工程。

表 2-1 堆石混凝土重力坝工程 (H > 15 m)

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
1	宝泉蓄水电站[1]	河南	36.9	168	8	CVC[2]	49	2006.03	2006.10
2	清峪水库	山西	42.6	203	5.5	CVC	45.6	2009.04	2012.11
3	围滩水电站	山西	59	111	8	CVC	41.2	2009.11	2010.09
4	长坑三级水库	广东	26.5	88	5.5	SCC[3]	17.3	2010.07	2011.03
5	东升水电站	黑龙江	33	340	6	CVC	8.4	2011.09	2012.10
6	虎跳峡水库	云南	55	104	6	SCC	46.3	2012.04	2013.05
7	咸盈河水电站	湖北	44.5	117	4	SCC	2.9	2012.06	2012.11
8	迷牛水库	云南	41.9	133	5	SCC	40.7	2012.06	2013.12
9	那河二级水电站	青海	46	330	4	SCC	27.2	2012.08	2013.01
10	普腊水库	云南	44	160	5	SCC	47.7	2012.11	2013.12
11	洒谷水库	云南	44.3	111	5	SCC	26.9	2012.12	2014.05
12	吉牛水电站	四川	22	66.7	7.5	SCC	12.9	2013.03	2013.06
13	口上水库	山西	58.4	120	6	CVC	24.2	2013.03	2013.09
14	坪底水库	山西	31	——	——	——	20	——	2013.11
15	石门河调蓄引水工程	甘肃	48.5	122	6	CVC	47	2013.09	2015.09

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
16	毛坡河水电站	云南	39.3	68.4	5	SCC	17.5	2013.10	2014.12
17	清平水库补水工程	广西	38	221	5	SCC	13.9	2013.12	2016.11
18	旱塘水库	云南	43.8	93.5	6	SCC	23	2013.12	2015.04
19	新马房水库	云南	41	112	6	CVC	30	2014.01	2016.05
20	老坝口水库	云南	42.6	61.6	4	CVC	30	2014.10	2017.01
21	拉里么水库	云南	57.2	107	4	CVC	60	2014.04	2017.10
22	吐峪沟水库	新疆	22	188	——	SCC	4.8	2014.04	2014.12
23	迤启水库	云南	46.2	196	5	CVC	52.3	2014.04	2015.12
24	沙坪二级水电站[4]	四川	66.5	332	——	SCC	29.2	2014.04	2014.08
25	那河三级水电站	青海	23.8	32	——	SCC	2	2014.05	2014.08
26	沈家河水库	云南	55.7	106.7	3	CVC	27.6	2014.05	2016.01
27	黄沙坑水库	福建	44.5	189	5	SCC	72.2	2014.08	2017.06
28	吉辽河水库	湖南	40.5	249	——	SCC	60	2015.01	2016.12
29	保处鲁水库	云南	50.3	122	5	CVC	50	2015.07	2018.05
30	瓜裕水库	山西	69.5	86	7	——	60	2015.07	2016.12
31	白涛化工园区拦截闸坝	重庆	17	——	——	——	2.7	2015.08	2015.10
32	松林水库	云南	90	230	6	SCC	300	2015.11	2022.04
33	落水洞水库	湖南	33.5	——	4.5	SCC	1.8	2015.12	2016.05
34	小老厂水库	云南	51.5	137	5	CVC	50	2016.03	2016.10
35	永宁水库	浙江	26	50	7	SCC	3	2016.04	2016.06
36	仙洞沟水库	山西	61.4	77.5	6	SCC	60	2016.04	2020.10
37	打鼓台水库	贵州	41	197	6	SCC	79	2016.05	2017.05
38	横岩坪水库	湖北	47.2	145	6	——	19	2016.05	2018.12
39	盐井沟水库	云南	43.8	95.1	6	SCC	30	2016.06	2017.09

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
40	九九坑水库	福建	33.5	210	5	SCC	32	2016.08	2018.12
41	深沟水库	云南	52.1	125	4	——	13.4	2016.08	2017.11
42	三道沟水库	云南	36.3	87	4.6	——	20	2016.09	2017.08
43	堡子湾水库	山西	40.3	154	5	CVC	40	2016.09	2018.11
44	火马坪水库	湖南	38	115	6	——	30	2016.09	2017.12
45	大土水库	贵州	56.5	136	4	——	30	2016.10	2017.10
46	茅坡水库	贵州	45	145	10	SCC	60	2016.10	2017.08
47	溪源水库	福建	77	339	5	SCC	280	2017.02	2020.12
48	芹菜塘水库	云南	54.1	128	6	——	50	2017.02	2018.10
49	穿家坪水库	贵州	23.5	130	5	RFC	20	2017.03	2018.07
50	七一水库	四川	36.5	85.5	7	SCC	31	2017.03	2018.07
51	刁口水库	山西	40.5	165	6	——	70	2017.03	2018.11
52	万家沟水库	贵州	35	101	6	RFC[5]	32	2017.04	2018.01
53	王千庄水库	山西	64.5	169	6	CVC	100	2017.07	UC[6]
54	军屯水库	贵州	33.2	177	6	SCC	60	2017.08	2020.09
55	石沟水库	陕西	61	144	6	SCC	91.6	2017.09	2019.10
56	深溪河水库	湖北	63	144	5	SCC	80	2017.11	2019.09
57	克海水库	云南	40.2	116.6	6	——	40	2018.01	2018.11
58	玉龙湾水库	重庆	22.7	——	——	——	8	——	2018.11
59	楠竹坪水库	湖南	41.5	90	4	SCC	21	2018.03	2019.08
60	金塘湖水库	贵州	35.5	100	8	SCC	80	2018.03	2019.01
61	小乌江水库	贵州	47.2	195	5	SCC	70	2018.04	2019.06
62	那哈水库	云南	47.1	93	5	CVC	38	2018.04	2019.06
63	牛街河水库	云南	46.6	123	5	CVC	38	2018.05	2020.12
64	白云水库	云南	53.8	199	5	SCC	83	2018.05	2020.09
65	猎神水库	重庆	32.5	90	4.5	SCC	32	2018.06	2019.07

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
66	满坪水库	青海	77	130	6	SCC	120	2018.06	2022.10
67	花脸岩水库	云南	58.6	158	5	SCC	80	2018.06	2020.11
68	九龙水库	云南	46.1	227	7	SCC	95	2018.07	2020.11
69	南峪水库	山西	47	168	5	CVC	50	2018.07	2021.04
70	黄沙水库	重庆	30	209	8	SCC	70	2018.07	2020.07
71	黄家湾水库	贵州	31	106	5	SCC	30	2018.09	2019.11
72	坪坑水库（更名天宫雁湖）	福建	79.7	361	4.5	SCC	320	2018.10	2021.11
73	金桥水电站	西藏	28.5	106	12	——	——	——	2019.05
74	猫溪沟水库	贵州	44.5	150	8	SCC	40	2018.11	2019.10
75	石坝河水库	贵州	57	228	7	SCC	180	2018.12	2020.09
76	洛艾水库	贵州	45	158	5	SCC	60	2018.12	2020.01
77	新寨水库	云南	62.5	236.6	6	CVC	120	2019.01	UC
78	蔺家坪水库	贵州	33	123	6	SCC	40	2019.03	2019.07
79	清沙河水库	贵州	34.5	196	5	SCC	45	2019.03	2020.01
80	官箐水库	云南	49	128	4	CVC-SCC	49	2019.03	2021.01
81	冬奥会1050m高程塘坝	北京	58	77	5	CVC	50	2019.05	2019.09
82	冬奥会900m高程塘坝	北京	28	74.8	10	CVC	29	2019.05	2019.09
83	沙坝水库	重庆	29.8	82	6	SCC	32	2019.05	2020.10
84	后场箐水库	云南	76	162	6	CVC	180	2019.05	2021.11
85	龙宝塘水库	重庆	38.5	161.3	6	SCC	34	2019.06	2020.10
86	龙潭河水库	湖南	60.6	139	5.5	SCC	50	2019.07	2020.09
87	新寨水库	贵州	29	98	6	SCC	35	2019.07	2020.08
88	吐香坝水库	贵州	30.5	86	6	RFC	20	2019.07	2020.10

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
89	洗马塘水库	贵州	26.5	117	——	——	20	2019.08	2020.06
90	阿合塔斯水库	新疆	33.5	130	7	CVC	50	2019.10	2020.10
91	平正水库	贵州	29.5	140	6	RFC	43	2019.10	2020.12
92	沿塘水库	重庆	32.3	125	7	CVC	18	2020.01	2021.01
93	太平水库	贵州	43.5	183	6	SCC	84	2020.01	2021.05
94	富强水库	贵州	48	168	7	SCC	80	2020.03	2020.12
95	渔溪河水库	贵州	53.5	123.89	5	SCC	86	2020.04	2022.04
96	曲卜藏水库	青海	38.5	132	6	CVC	30	2020.05	2022.07
97	杨公岩水库	贵州	65.5	200	6	SCC	194	2020.05	UC
98	南甲水库	贵州	63	179.3	5	SCC	150	2020.05	UC
99	新花水库	贵州	57	160	5	SCC	80	2020.08	2022.11
100	官山水库	贵州	24.6	120	5	CVC	20	2020.08	2021.05
101	王烈水库	广西	27	80	5	SCC	16	2020.11	2021.05
102	广山水库	贵州	32	220	5.8	SCC	40	2020.11	2021.09
103	大湖坪水库	湖南	61.8	235.5	6	SCC	90	2020.11	2021.09
104	麻柳湾水库	四川	75	147	7	SCC	170	2020.12	UC
105	小河边水库	贵州	45.3	180	5	CVC	40	2020.12	UC
106	三岔河水库	贵州	61	131.1	5	SCC	100	2020.12	UC
107	车拗口水库	贵州	51	114	6	SCC	78	2020.12	UC
108	文达水库	贵州	37	117	5	SCC	28	2020.12	2021.10
109	德隆水库	贵州	53	230	7	SCC	205	2020.12	UC
110	巫家水库	贵州	34	125	5	SCC	50	2020.12	2021.10
111	木林岩水库	贵州	34.5	135	6	SCC	56	2020.12	UC
112	半江坝水库	湖南	41.8	77	5	CVC	19	2021.01	UC
113	镇安抽水蓄能拦砂坝	陕西	34.5	107	3.7	SCC	40.7	2021.03	2021.09

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
114	马跳水库	福建	69	330	6	SCC	250	2021.03	UC
115	翠云水库	重庆	29.5	117.5	5	SCC	31	2021.03	2022.07
116	五龙冲水库	湖南	66	136	5	CVC/ SCC	75	2021.03	2022.08
117	桃花源水库	重庆	50.5	131	8	SCC	86	2021.03	UC
118	秀峰水库	贵州	40.5	222	6	SCC	70	2021.04	UC
119	立达水库	云南	46.8	108.2	6	CVC	35	2021.04	UC
120	翁养水库	贵州	48.5	139	5	SCC	48	2021.04	2022.07
121	荒田沟水库	贵州	50.5	130.7	5	SCC	70	2021.04	2022.06
122	民生水库	贵州	48.5	120	5	SCC	50	2021.05	UC
123	朱家咀水库	湖北	55	184	5	——	——	2021.05	UC
124	井山水库	江西	29	305	6	SCC	100	2021.08	UC
125	鸽子洞水电站	河北	40	340.2	5	SCC	109.8	2021.09	UC
126	湾子寨水库	云南	44	157	5	SCC	70	2021.10	UC
127	晓龙沟水库	青海	44	117	8	SCC	70	2021.10	UC
128	天宝水库	陕西	46.5	120	5	SCC	40	2021.11	UC
129	九羊水库	贵州	49	139	5	SCC	110	2021.12	2022.11
130	秀水水库	湖南	57.7	140	7	SCC	80	2022.01	UC
131	母冲水库	贵州	38.8	254.5	6	CVC	102	2022.02	UC
132	潭子口水库	贵州	27	250	6	SCC	40	2022.03	UC
133	张源水库	福建	53.5	234.6	6	SCC	100	2022.04	UC
134	下河沿水库	云南	39.5	214	6.5	CVC	30	2022.04	UC
135	富阳饮水工程	浙江	27.2	114	5	CVC	9	2022.05	UC
136	岩头溪水库	湖北	26.3	85	4	SCC	12	2022.05	UC
137	毛古河水库	四川	53	155	6	SCC	75	2022.05	UC
138	李村水库	江西	49	123.2	5	SCC	74	2022.11	UC

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
139	三门塘水库	贵州	62.7	167.0	6	SCC	120	2022.11	UC
140	崔家坪水库	重庆	47.5	125	6	SCC	60	2022.11	UC

注[1]：仅用于部分坝体和基础回填；

注[2]：CVC 表示为上游面防渗层为常态混凝土；

注[3]：SCC 表示为上游面防渗层为高自密实性能混凝土；

注[4]：仅用于坝体下部；

注[5]：RFC 表示为防渗层与坝体为一体，均为堆石混凝土，坝体自身防渗；

注[6]：UC 表示为在建工程。

表 2-2 堆石混凝土拱坝工程（H ＞ 15 m）

序号	工程名称	工程所在地	坝高（m）	坝轴线长（m）	坝顶宽(m)	防渗层	工程量(1000 m^3)	开工时间	完工时间
1	蒙山水库	山东	24.5	129.8	3	RFC	11	2012.06	2013.03
2	佰佳水电站	陕西	69	203	5	SCC	92.2	2013.01	2016.04
3	绿塘水库	贵州	53.5	181.4	6	SCC	52.3	2017.12	2018.11
4	苟江水库	贵州	41	127.4	4	SCC	20	2018.04	2019.05
5	小源里水库	浙江	46.6	116	3.5	SCC	18	2019.04	2020.05
6	风光水库	贵州	48.5	112	5	SCC	28	2019.04	2021.08
7	龙洞湾水库	贵州	48	174.7	5	SCC	46	2019.05	2020.12
8	牛洞口水库	湖南	64	128.25	5	SCC	60	2020.01	2021.08
9	桃源水库	贵州	37	113	5	SCC	16	2020.11	2021.10
10	龙源水库	浙江	40.5	148.6	4.5	CVC	14	2020.11	2022.01
11	沙千水库	贵州	66	190.4	6	SCC	121.1	2021.05	UC
12	乔兑水库	贵州	45	136.5	4	SCC	28	2022.04	UC
13	永丰水库	福建	83	253.4	5.0~5.5	SCC	150.0	2022.09	UC

2.2 部分大坝工程案例

（1） 山西围滩水电站（59 米堆石混凝土重力坝）

围滩水电站位于山西晋城市泽州县金村镇围滩泉附近的丹河干流上，属山西省 35 个重点新水源项目之一，是以发电、城市生活和工业供水为主，兼顾生态

旅游等综合利用的水利项目。水库最大设计坝高 59m。2009 年 10 月，堆石混凝土浇筑工作开始，2010 年 9 月，主坝浇筑完成。

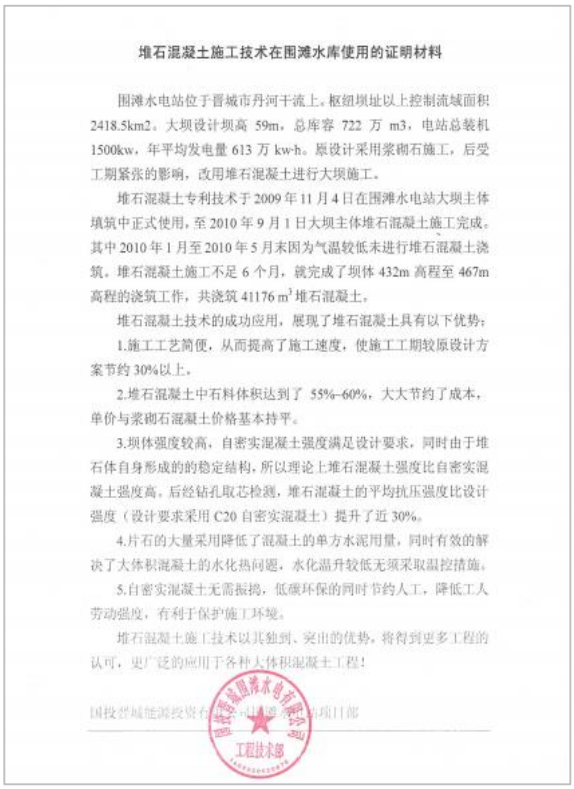
围滩水电站坝型原设计为浆砌石重力坝，由溢流坝段、非溢流坝段及冲沙闸段组成。由国投晋城围滩水电有限公司投资建设，山西省水利建筑工程局承担大坝工程的施工。因浆砌石施工速度慢，不能保证施工质量，为了加快大坝施工进度，提高工程质量，大坝 M10 浆砌石坝体改为 C15 堆石混凝土，并通过对山西第一个堆石混凝土重力坝清峪水库堆石混凝土重力坝的调研，结合本工程材料价格情况，经分析，堆石混凝土方案成本与原方案相比，增加很少，但可以大大提高施工进度，并保证工程质量，因此堆石混凝土技术开始在围滩水电站应用。

方案变更后，坝体的结构尺寸不变，大大加快施工进度，保证了工程按期完工，累计浇筑堆石混凝土 41176m³。在浇注方式上，高自密实性能混凝土用泵送方式，通过泵送的高自密实性能混凝土在出机后其流动性、均匀性、稳定性及抗离析性能基本保持不变。浇筑完成后采用挖坑灌水法和 MC-4 型核子密度仪对堆石混凝土密实度进行检测，检测结果满足设计要求。

堆石混凝土在围滩水电站的使用，大大减少了人工施工带来的质量隐患，保证了施工进度与质量。原来计划近百人的施工队伍精简到 20 多人，而且施工速度提高 4 倍。



图 2-3　山西晋城围滩水电站堆石混凝土重力坝



堆石混凝土施工技术在围滩水库使用的证明材料

围滩水电站位于晋城市丹河干流上。枢纽坝址以上控制流域面积2418.5km2。大坝设计坝高 59m，总库容 722 万 m3，电站总装机1500kw，年平均发电量 613 万 kw·h。原设计采用浆砌石施工，后受工期紧张的影响，改用堆石混凝土进行大坝施工。

堆石混凝土专利技术于 2009 年 11 月 4 日在围滩水电站大坝主体填筑中正式使用，至 2010 年 9 月 1 日大坝主体堆石混凝土施工完成。其中 2010 年 1 月至 2010 年 5 月末因为气温较低未进行堆石混凝土浇筑。堆石混凝土施工不足 6 个月，就完成了坝体 432m 高程至 467m 高程的浇筑工作，共浇筑 41176 m^3 堆石混凝土。

堆石混凝土技术的成功应用，展现了堆石混凝土具有以下优势：

1.施工工艺简便，从而提高了施工速度，使施工工期较原设计方案节约 30%以上。

2.堆石混凝土中石料体积达到了 55%-60%，大大节约了成本，单价与浆砌石混凝土价格基本持平。

3.坝体强度较高，自密实混凝土强度满足设计要求，同时由于堆石体自身形成的的稳定结构，所以理论上堆石混凝土强度比自密实混凝土强度高，后经钻孔取芯检测，堆石混凝土的平均抗压强度比设计强度（设计要求采用 C20 自密实混凝土）提升了近 30%。

4.片石的大量采用降低了混凝土的单方水泥用量，同时有效的解决了大体积混凝土的水化热问题，水化温升较低无须采取温控措施。

5.自密实混凝土无需振捣，低碳环保的同时节约人工，降低工人劳动强度，有利于保护施工环境。

堆石混凝土施工技术以其独到、突出的优势，将得到更多工程的认可，更广泛的应用于各种大体积混凝土工程！

国投晋城能源投资有限公司[illegible]项目部

工程技术部

图 2-4　山西围滩水电站工程应用证明

（2） 云南松林水库（90 米堆石混凝土重力坝）

松林水库位于云南省彝良县金沙江三级支流松林河中上游奎香乡松林村至树林村的河段上。坝址区距县城 94km，距昭通市 165km，距省会昆明市 600km。松林水库为中型水利工程，工程等别为Ⅲ等，最大坝高 90m，坝顶宽度为 6.0m，坝轴线长度为 230.00m，是首座近百米级堆石混凝土重力坝。松林水库的主要任务是以人畜饮水为主，同时兼顾农田灌溉。本工程为中型水利工程，工程等别为Ⅲ等。水库死水位 1920.30m，死库容 128 万 m^3，正常水位 1958.80m，正常库容 1347 万 m^3，兴利库容 1219 万 m^3，校核洪水位 1960.45m，总库容 1471 万 m^3，松林水库的设计情况如所示。该项目于 2015 年 11 月开始坝体首仓堆石混凝土施工，于 2022 年 4 月坝体封顶，大坝完成堆石混凝土方量 30 万余方。

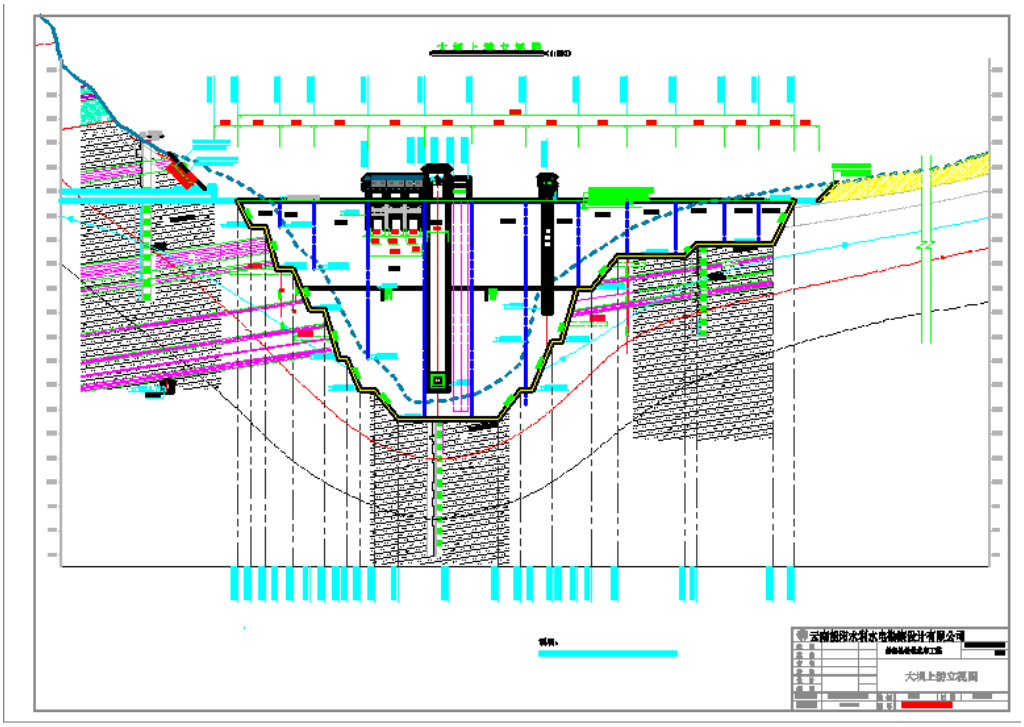


图 2-5　云南省彝良县松林水库大坝设计图



图 2-6　云南省彝良县松林水库大坝建设情况

（3）陕西佰佳水电站（69 米堆石混凝土拱坝）

佰佳水电站位于陕西省安康市镇坪县境内，控制流域面积 962km²，据镇平

县城约 20km，据安康市约 180km，工地现场紧靠平镇公路，交通方便。大坝坝型为双曲混凝土拱坝，坝高 69 m，目前是最高的堆石混凝土拱坝。总装机容量 4.98 万千瓦，总库容 2285 万立方米，多年平均发电量 1.6907 亿千瓦时，电站枢纽属于III等中型工程。项目总投资 3.7841 亿元。佰佳水电站项目工期紧迫，进度要求较高，堆石混凝土施工成本低，速度快，是解决此问题的最佳方案。2013 年 1 月开工，2015 年 10 月佰佳水电站第一台机组开始发电，2015 年底实现大坝封顶。



图 2-7　陕西安康市佰佳水电站工程



应用证明

项目名称	堆石混凝土坝	
应用单位	镇坪县佰佳能源开发有限公司	
单位注册地址	陕西省安康市镇坪县牛头店镇国庆村六组	
应用起止时间	2014 年 5 月—2016 年 1 月	
经济效益（万元）		
自 然 年	新增销售额	新增利润
2014 年		
2015 年		
2016 年	1260	
累　计	1260	

所列经济效益的有关说明及计算依据：
佰佳水电站设计为堆石混凝土双曲拱坝，项目于 2016 年 1 月完成堆石混凝土施工，累计完成堆石混凝土浇筑方量约 10 万方。经初步计算，堆石混凝土综合单价每方可节省 100 元左右，节省温控措施费用 40 元每方，此部分总计降低成本约 1400 万元。另外利用坝基开挖的弃石料 5 万余方作为堆石混凝土的堆石料，降低成本约 350 万元。故采用堆石混凝土筑坝技术综合降低成本约 1750 万元。另外，佰佳水电站提前 3 个月蓄水发电，新增销售额约 1260 万元。

具体应用情况：
佰佳水电站位于陕西省安康市镇坪县境内南江河干流上，厂址位于镇坪县牛头店镇上游 300 米电站为混合式水电站，电站总装机容量 4.9 万 kw，年发电量 1.68 亿度。截止 2016 年 1 月，堆石混凝土应用方量约为 10 万方。

应用单位法定代表人签名：吴刚
2017 年 1 月 5 日

镇坪县佰佳能源开发有限公司

注：社会公益类和国家安全类项目如无经济效益，可不填经济效益相关栏目。

图 2-8　陕西安康市佰佳水电站工程应用证明

（4）沙坪二级水电站工程

沙坪二级水电站位于四川省乐山市峨边彝族自治县和金口河区境内，是大渡河中游 22 个规划梯级中第 20 个梯级沙坪梯级的第二级，上接沙坪一级水电站，下邻已建龚嘴水电站，为 II 等大（2）型工程，枢纽主要由泄洪闸、鱼道、右岸挡水坝段、河床式厂房等建筑物组成。混凝土闸坝坝顶高程 557.0m，最大坝高 63.0m，闸坝基础采用堆石混凝土，首次在大中型水电站主体工程中应用堆石混凝土。2014 年 5 月，开始堆石混凝土浇筑，8 月 24 日完成堆石混凝土浇筑，方量约 3 万 m^3，产生直接经济效益 185.06 万元，还节约工期 3 个月。



图 2-9　四川省沙坪二级水电站

（5）溪源水库工程

溪源水库工程位于福建省永安市，是一座灌溉为主兼有供水等综合效益的水利枢纽工程，水库正常蓄水位 428m，总库容 1510 万 m^3，为 III 等中型水库。工程主要由拦河坝、引水系统等建筑组成。拦河坝为堆石混凝土重力坝，坝高 77m，坝顶宽度 7m，坝底宽度 63m，坝顶长 339m。工程项目于 2016 年 5 月 27 日开工，2020 年 12 月 28 日大坝主体全面完工，是福建省首座完工的堆石混凝土高坝工程。



图 2-10　福建省溪源水库