

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.015

地质弱层与骨料远运双重约束下的坝型决策

——某水库 RCC 重力坝与 CSG 坝的深度比选

韩晓荣¹, 王民侠¹, 贾保振², 陈平平¹

(1. 陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710001;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 针对砂泥岩互层软岩地基变形控制要求高、天然骨料匮乏需长距离运输等难题, 以陕西普化水库工程为依托, 对碾压混凝土重力坝与胶结砂砾石坝开展系统比选。从地质条件、筑坝材料来源、地基应力变形适应性、施工工艺及生态环境经济指标等方面进行多维度定量与定性分析。结果表明: 胶结砂砾石坝对建基面岩体质量要求较低, 地基变形协调能力强, 可充分利用工程开挖料, 显著缩短骨料运距、减少弃渣量, 且施工简便、温控要求低。综合比选显示, 胶结砂砾石坝方案较碾压混凝土重力坝节约投资约 6.7%, 在保障安全前提下具有更优的经济与环境效益。推荐采用胶结砂砾石坝, 研究成果可为软岩地基及骨料匮乏条件下的坝型决策提供科学依据。

关键词: 胶结砂砾石坝; 碾压混凝土重力坝; 砂泥岩互层; 软岩地基; 骨料远距运输; 坝型比选

中图分类号: TV642.3; TV649

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0105-08

Dam Type Decision-making Under Dual Constraints of Geological Weak Layers and Long-distance Aggregate Transport-An In-depth Comparison Between RCC Gravity Dam and CSG Dam for a Reservoir Project

HAN Xiaorong¹, WANG Minxia¹, JIA Baozhen², CHEN Pingping¹

(1. Shaanxi Provincial Water Resources and Electric Power Survey and Design

Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710001, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To address the strict deformation control of sand-mudstone interbedded soft rock foundation and the long-distance transport of scarce natural aggregates, a systematic comparison between an RCC gravity dam and a cemented sand and gravel (CSG) dam was conducted for the Puhua Reservoir project in Shaanxi. Multi-dimensional analyses were performed on geological conditions, material sources, foundation stress-deformation adaptability, construction technology, and eco-economic indicators. Results show that the CSG dam imposes lower requirements on foundation rock quality, exhibits better deformation compatibility, fully utilizes excavated materials, significantly reduces aggregate haul distance and waste disposal, and features simpler construction with lower temperature control demands. The CSG dam saves approximately 6.7% of investment compared with the RCC gravity dam, offering superior economic and environmental benefits while ensuring safety. The CSG dam is recommended, providing scientific guidance for dam type selection under similar soft rock and aggregate-scarce conditions.

Keywords: cemented sand and gravel dam; roller compacted concrete gravity dam; sandstone-mudstone interbedding; soft rock foundation; long-distance aggregate transport; dam type comparison

收稿日期: 2025-11-11

修稿日期: 2026-02-25

基金项目: 陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司项目“陕西省麟游县漆水河普化水库工程”(经生 2020Y-水电-10)

作者简介: 韩晓荣(1972—), 女, 高级工程师, 主要从事水利水电工程设计等方面工作。E-mail: 706949844@qq.com

随着“双碳”战略的深入实施与生态文明建设的持续推进,我国重大水利工程建设正面临地质条件复杂化、生态环境约束趋紧、建设材料供应紧张等多重挑战^[1-3]。在此背景下,筑坝建库作为调控水资源时空调配、保障能源安全、构筑防洪屏障的关键工程措施,其技术路径的经济性、安全性与环境友好性,直接决定了工程建设的成效与长期服役性能^[4-5]。而坝型比选,作为统筹工程功能定位与地质适应性的首要决策环节,成为水库建设前期工作的核心要务^[6-8]。

当前,我国水利工程建设正加速向地质条件复杂、生态环境敏感、交通不便的西部地区延伸,以黄河古贤水利枢纽为代表的一批重大工程正在攻克“千层饼”状软硬互层地基、超高强度混凝土智能温控等世界级技术难题^[9-10]。在此背景下,传统常态混凝土重力坝虽技术成熟,但其水泥用量大、水化热高、工期长等固有局限日益凸显,而碾压混凝土坝(RCC)、胶凝砂砾石坝(CSG)等新型坝型及智能建造技术的创新发展,为复杂条件下的坝型优化比选提供了更丰富的技术选项^[11-13]。

为应对复杂建坝环境带来的挑战,坝工技术持续向快速施工、经济节约、低碳环保方向演进。碾压混凝土坝自 20 世纪 70 年代问世以来,凭借其薄层连续碾压工艺,在缩短工期、降低水泥用量、简化温控措施等方面表现出显著优势,已成为高坝建设的主流坝型之一^[14-15]。与此同时,一种更具“因地制宜”特色的新型坝型——胶凝砂砾石坝正受到广泛关注。该坝型主张“宜材适构”,充分利用现场砂砾石料,仅掺入少量胶凝材料形成低强度、低弹模的坝体材料,在材料本土化利用、降低碳排放、适应地基变形及进一步节约造价等方面展现出独特潜力,尤其适用于对坝体强度要求不高的中低坝工程^[16-17]。

胶凝砂砾石坝与碾压混凝土重力坝均代表了现代坝工向高效节约化发展的重要方向。目前,两类坝型的比选研究已积累一定成果:龙欣^[18]从施工工艺、材料性能和经济指标等维度对二者进行了系统比较,指出胶凝砂砾石坝在中小型水利工程中更具推广价值;丁泽霖^[19]通过地质力学模型试验,对比了复杂地基条件下 CSG 坝与重力坝的极限承载能力和破坏机理,研究表明,CSG 坝具有更高的超载系数和安全储备。然而,在具体工程决策中,面对特定复杂地质条件、材料供应约束及缺乏永久工程先例的多重约束,坝型选择仍面临诸多困惑,亟需建立系统化的综合比选框架。

针对上述问题,本文以陕西普化水库工程为研究背景,该工程面临的砂泥岩互层软岩地基、天然骨料匮乏需长距离运输、以及省内尚无胶结砂砾石坝永久工程先例等条件,构成了典型的复杂决策场景。研究从地质适应性、材料可获得性、坝基应力与变形协调、施工便捷性及生态环境影响等多个维度,对碾压混凝土重力坝与胶结砂砾石坝开展系统性综合比选,通过定性分析与定量评价相结合的方法,对两种坝型进行多准则综合评判。本研究旨在为同类复杂条件下挡水坝型决策提供科学依据与可靠数据支撑,推动适宜性坝工技术的理论发展与实践应用。

1 工程概况与比选基础

1.1 工程基本概况

普化水库工程地处陕西省宝鸡市麟游县境内渭河支流漆水河上游,坝址位于九成宫镇紫石崖村,坝址距麟游县 13 km,距西安市 177 km。工程为Ⅲ等中型工程,主要任务为城镇和工业供水。水库枢纽由挡水、泄水和取水建筑物组成。坝顶高程 948.50 m,正常蓄水位和设计洪水位为 946.50 m,校核洪水位 946.95 m,总库容 1 581 万 m³,多年平均向城镇及工业供水量 768.7 万 m³。

1.2 工程地质条件

坝址为“U”型谷,岸坡大部基岩裸露,坝基岩性以砂、泥岩为主,呈互层状分布,岩层倾向上游和左岸。强风化带岩体厚度 3.0~4.2 m,弱风化上带岩体厚度 6.4~7.3 m,弱风化下带岩体厚度 16.3~17.3 m。根据地层分布情况,距地面 18~27 m 以内、18~39 m 处、47~51 m 处分别有厚度约 2、4、7 m 左右砂岩层。胶结砂砾石坝坝基可坐落于弱风化上部基岩上,碾压混凝土重力坝需建在微风化至弱风化中部基岩上。

三维地质模型如图 1 所示,坝基岩体主要由砂岩、砂质泥岩组成,呈互层状分布,岩层倾向上游和左岸。左右坝肩为岩土质混合边坡,由砂岩、砂质泥岩和砾质砂岩组成。

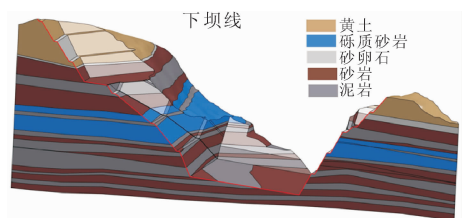


图 1 坝址三维地质模型图

依据《普化水库工程初步设计阶段地质勘察报告》试验成果,强风化带不宜作为坝基,予以清除,弱风化带基岩物理力学指标及工程地质分类见表1。

表1 坝基(肩)岩体物理力学指标

岩性	风化带	饱和抗压强度 /MPa	变形模量 /GPa	承载力 /MPa	工程地质分类
砂岩	弱风化上带	49.0	3.5	2.0	BIV1 较坚硬岩
	弱风化下带	75.0	6.0	3.0	AIII2 坚硬岩
砂质泥岩	弱风化上带	17.7	1.5	0.8	CIV 较软岩
	弱风化下带	26.8	2.0	1.2	CIV 较软岩
砾质砂岩	弱风化上带	33.6	4.0	2.0	BIV2 较坚硬岩
	弱风化下带	67.4	6.5	2.5	AIV1 坚硬岩

1.3 建筑材料来源与特性分析

1.3.1 人工石料及混凝土骨料

库区料源:包括2处,料场轧制后的石料作为碾压混凝土重力坝粗、细骨料不满足规范对粗、细骨料质量技术指标要求;若作为胶结砂砾石坝的筑坝材料结合试验成果合理使用。

外购料源:岐山县祝家庄镇曹家沟石料场,距工程区约45 km,沿线有乡道、县道,交通便利,粗、细骨料各项指标基本满足规范对常态及碾压混凝土质量要求。

1.3.2 天然建筑材料

库底石料场:位于一级阶地范围,综合评价混凝土用天然粗、细骨料不符合规范要求。

宝鸡陈仓区阳平镇第六寨国有标准化砂石厂(位于渭河一级阶地):供应的人工筛制天然粗细骨料,其质量指标部分符合要求,但仍存在以下突出问题:粗、细骨料均具潜在碱活性,需进一步鉴定以评估工程风险;粗骨料堆积密度偏低,细骨料含泥量超标。料场至坝址区运距约85 km,主要依托乡道、县道运输。

1.3.3 坝址区开挖弃渣

坝基(肩)及进场道路开挖石渣料质量技术指标不满足规范对碾压混凝土重力坝骨料要求。开挖料若用于胶结砂砾石坝,较完整的强风化砂岩及砾质砂岩建议结合试验成果分区使用,弱~微风化砂岩及砾质砂岩为主的岩体建议结合试验成果合理使用。

2 坝型比选分析

普化水库坝址区地层岩性为砂、泥岩互层,具备建造重力坝的地质条件。关于坝型选择,目前存在

不同观点:一方主张采用技术成熟、安全可靠的碾压混凝土重力坝;另一方则认为胶结砂砾石坝更为经济、绿色,且能因地制宜,具有对建基面要求较低、可利用开挖石渣作为骨料等优势。本文将从地质条件、筑坝材料、坝基应力与地基适应性、施工条件及工程投资等方面,对两种坝型进行综合比较分析。

2.1 工程地质与建基面选择

因材料特性、结构受力及防渗体系的差异,碾压混凝土重力坝与胶结砂砾石坝对建基面的要求存在本质区别。前者依赖高强度岩体,对地基条件要求严苛;后者则表现出更强的适应性,对地基的宽容度较高。根据《胶结颗粒料筑坝技术导则》^[20](SL 678—2014),胶结砂砾石坝可建于弱风化上部基岩,经充分论证后条件可进一步放宽;而《混凝土重力坝设计规范》^[21](SL 319—2018)则明确规定,碾压混凝土重力坝须坐落于微风化至弱风化中部基岩。这一差异深刻反映了两者在工程适应性与地基要求上的本质不同。

综合考虑坝基砂泥岩互层、岩层倾向上游及左岸的地质条件,结合两种坝型对地基的差异化要求,在结构安全性与地基承载力之间进行综合权衡,最终确定各自的建基面方案。从比选结果来看(图2),碾压混凝土重力坝对地基岩性及风化深度要求更为严格,必须置于弱风化下带砂岩层;而胶结砂砾石坝则可建基于弱风化上带岩体,并通过设置齿墙等结构措施有效避开坚硬岩层开挖。这一差异深刻反映了两种坝型在结构体系与地质适应性方面的本质区别。

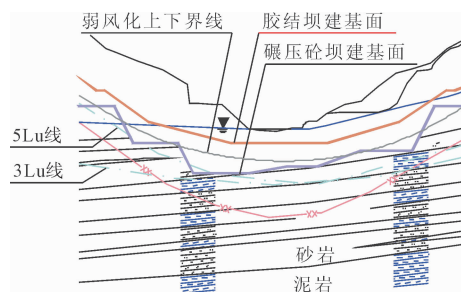


图2 两坝型建基面比选图

2.2 坝型结构与材料应用

2.2.1 枢纽布置与坝型结构

碾压混凝土重力坝和胶结砂砾石坝枢纽工程均主要由拦河坝段、坝身泄洪表底孔、取水建筑物等组成。

碾压混凝土重力坝坝顶长210.0 m,坝顶宽8.0 m,坝顶高程948.50 m,坝基高程883.50 m,最大坝高

65.0 m,最大坝底宽 63.3 m。大坝上游面 930.00 m 以上直立,以下坡比 1:0.2,下游坝面坡比 1:0.85。自左至右布置为:左岸挡水坝段长 97.3 m,取水口长 5.5 m、泄洪排沙底孔长 7.2 m、泄洪表孔长 43 m、右岸挡水坝长 57 m。

胶结砂砾石坝坝顶长 210.0 m,坝顶宽 8.0 m,坝顶高程 948.50 m,坝基高程 892.5 m,最大坝高 56.0 m,最大坝底宽 77.0 m。大坝上下游坝面坡比 1:0.6。自左至右布置为:左岸挡水坝长 97.7 m,取水口长 5.5 m、泄洪排沙底孔长 7.2 m、泄洪表孔长 43 m、右岸挡水坝长 56.6 m。

碾压混凝土重力坝与胶结砂砾石坝枢纽布置型式基本一致,见图 3,两坝型断面结构见图 4。

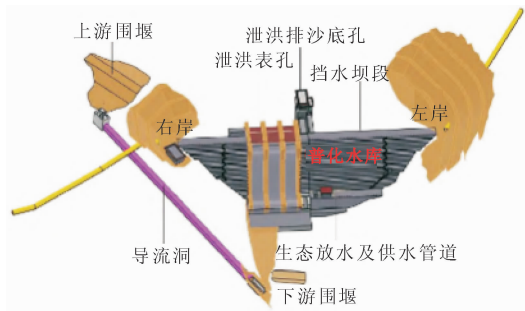


图 3 枢纽布置图

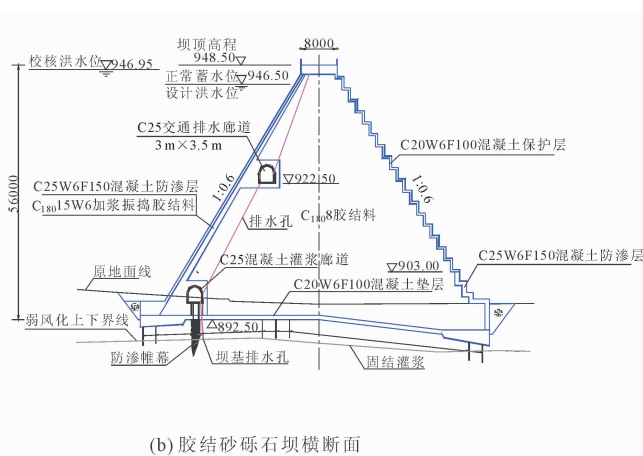
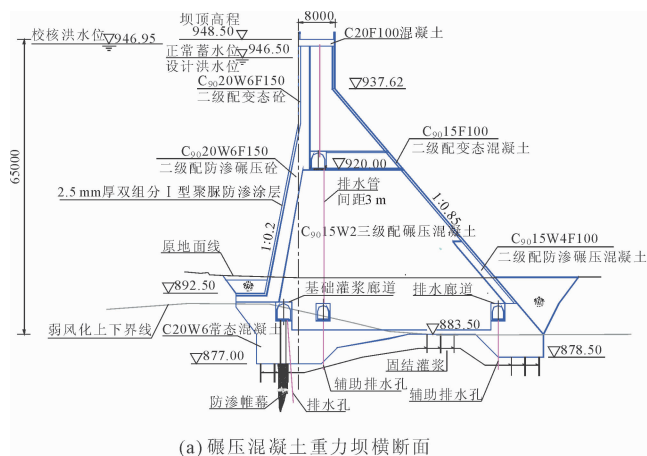


图 4 坝型结构图

从坝型结构来看,由于坝基砂泥岩互层地质条件导致岩体力学指标偏低,为满足坝基应力及抗滑稳定要求,碾压混凝土重力坝下游坝坡需放缓至 1:0.85,超出《规范》^[21] 建议的 1:0.6~1:0.8 范围;同时,其坝底宽度与坝高之比达 0.97,亦高于规范值 0.7~0.9,结构合理性欠佳。相比之下,胶结砂砾石坝上下游坝坡均可取 1:0.6,完全符合《导则》^[20] 对上游坝坡 1:0~1:0.6、下游坝坡 1:0.5~1:1.2 的规定,坝体结构更为合理。这一对比表明,在相同地质条件下,胶结砂砾石坝具有更优的结构适应性与设计可行性。

从坝高设计来看,碾压混凝土重力坝因需坐落于弱风化基岩下带,其建基面相对较深;而胶结砂砾石坝只需置于弱风化基岩上带,建基面抬高,相应坝高降低约 9m。这一高程优势不仅减少了坝基开挖量和坝体混凝土工程量,同时有效规避了深基坑施工带来的安全风险,体现出胶结砂砾石坝在特定地质条件下更优的工程适应性和经济性。

2.2.2 材料应用与分区设计

碾压混凝土重力坝主体材料以碾压混凝土为

主,辅以常态混凝土与变态混凝土;胶结砂砾石坝则主要由胶结材料与粗骨料填筑而成,常态混凝土作为辅助材料。依据现行规范要求,两种坝型所用筑坝材料均须满足强度、抗渗、抗冻、抗侵蚀、抗冲刷及低热等性能指标。实际设计中,应结合坝体不同部位的工作条件、性能需求及料源特性,对混凝土进行合理分区与优化选用,以确保工程安全与经济性相协调。

碾压混凝土重力坝坝体分区,设置上游变态砼(I区)、下游变态砼(II区)、大坝上游防渗层碾压砼(III区)、大坝下游防渗层碾压砼(IV区)、坝基常态砼(V区)、坝顶常态砼(VI区)、大坝主体采用 C15W2 三级配碾压砼(VII区)。

胶结砂砾石坝坝体分区,设置上下游防渗层(I区)、坝基垫层及坝顶混凝土、下游保护层(II区)、上游加浆振捣胶结料(III区)、大坝主体采用 C8 胶结料(IV区)。

坝体材料分区见图 5。

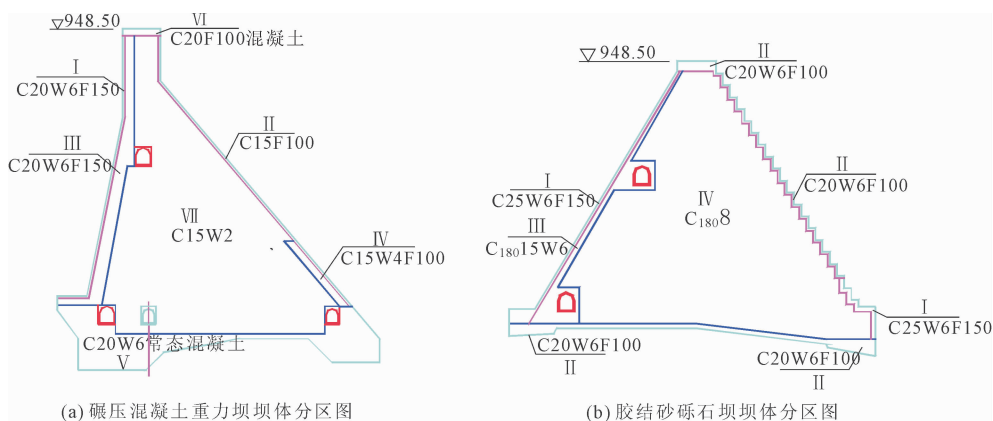


图 5 坝体材料分区图

从坝体分区与筑坝材料来看,碾压混凝土重力坝的分区相对复杂,坝体主体采用 C15W2 混凝土。其骨料选择面临明显制约:距坝址 85 km 外的宝鸡陈仓区标准化砂石厂所产天然骨料因运距过长且存在潜在碱活性而未能采用,最终选用 45 km 外岐山县祝家庄镇曹家沟石料场的骨料,其粗细骨料指标虽基本满足要求,但运距仍较远,材料成本偏高。

胶结砂砾石坝则具有分区简单的特点,主体采用 C8 胶结料,其核心优势在于可就地取材。贾保振等^[22]在《普化水库胶结坝材料试验研究成果报告》中对陕西普化水库胶结料坝材料试验研究表明,坝区道路及坝基(肩)开挖石渣可作为胶结料骨料。研究同时指出,部分开挖骨料虽存在潜在碱硅酸反应活性,但通过掺入不低于 40 kg/m³ 的粉煤灰可有效抑制碱骨料反应。该方案免除了骨料筛分调配工序,运距极短,在显著降低工程造价的同时也有效减少了弃渣量。

配合比试验进一步揭示,胶结砂砾石在胶凝材料用量上具有显著优势,其水泥与粉煤灰掺量均控制在 40 ~ 60 kg/m³,远低于碾压混凝土的 60 ~ 75 kg/m³ 水泥及 90 ~ 105 kg/m³ 粉煤灰用量。较低的胶材占比不仅从材料层面奠定了经济性基础,更与就地取材的技术路径形成协同效应——二者共同赋予胶结砂砾石坝在中低坝应用中兼顾技术适应性与成本可控性的工程特质。

2.3 坝基稳定与地基适应性

本研究选取挡水坝段最大断面作为典型断面,对两种坝型的坝基稳定及地基适应性进行对比分析。其中,碾压混凝土重力坝最大坝高 65.0 m,胶结砂砾石坝最大坝高 56.0 m,分析以此为基础展开。

2.3.1 计算荷载

计算荷载:坝体自重,上、下游静水压力,坝前泥沙压力,扬压力,浪压力,地震力。

坝基稳定计算荷载见图 6。

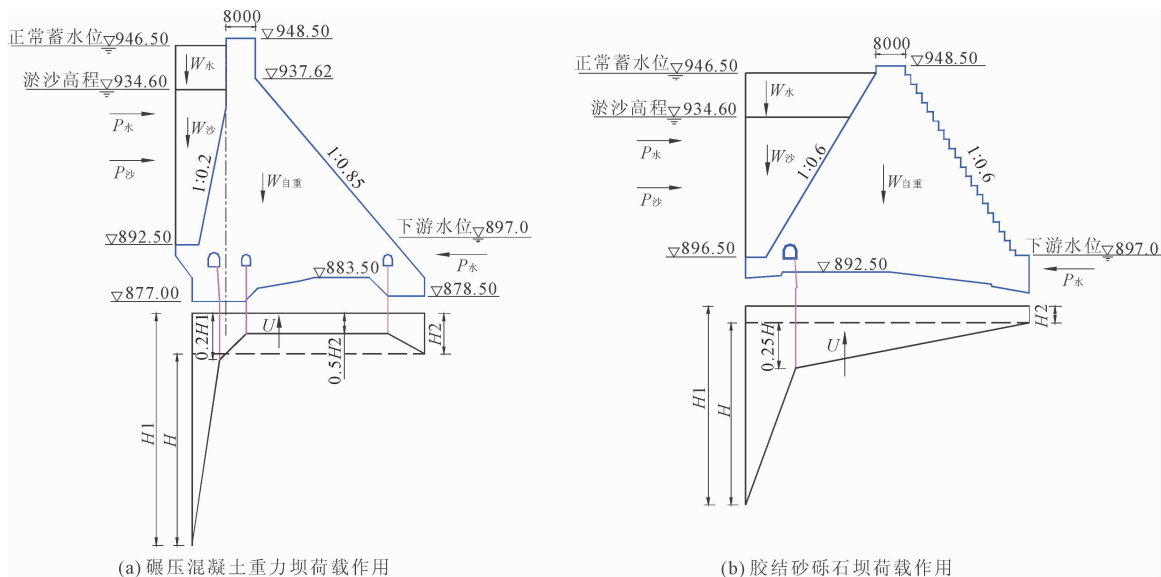


图 6 坝体荷载作用图

2.3.2 坝基稳定计算

碾压混凝土重力坝与胶结砂砾石坝的建基面分别位于弱风化下带砂岩及弱风化上带砂泥岩。以材料力学法为基础,对两方案在基本荷载组合与特殊荷载组合工况下的坝基应力及抗滑稳定性进行复核。

鉴于坝基岩体为砂泥岩互层且倾向上游及左岸,为综合反映潜在滑动面及拉裂面的力学特性,坝基抗滑稳定分析采用抗剪断强度公式,并通过对不同岩性接触面物理力学参数进行加权平均,确定其综合抗剪断参数。经计算,碾压混凝土重力坝坝基面综合抗剪断参数取 $f' = 0.81$ 、 $c' = 0.56$ MPa;胶结砂砾石坝则取 $f' = 0.64$ 、 $c' = 0.30$ MPa。

(1) 坝基应力计算

坝基应力计算结果如表 2 所示,由表 2 可知,胶结砂砾石坝的应力分布较为均匀,整体应力水平较低。各计算工况下,上游坝踵最大应力为 656.80 kPa,下游坝趾最大应力为 904.49 kPa。除正常蓄水位(827.48 kPa)、设计洪水位(800.90 kPa)及地震工况(904.49 kPa)下坝趾应力略高外,其余工况下坝踵与坝趾应力均低于弱风化上带砂质泥岩的容许承载力 800 kPa。因此,将坝基置于弱风化上带岩体,并在坝趾处设置坐落于砂岩层(承载力 2.0 MPa)的齿槽,可使胶结砂砾石坝在各工况下的应力满足设计要求。

表 2 坝基应力计算结果表

坝段	坝基岩性	荷载组合	计算工况	坝基应力/kPa			
				碾压混凝土重力坝		胶结砂砾石坝	
				坝踵	坝趾	坝踵	坝趾
挡水坝段 最高坝段	砂岩、泥岩	基本组合	正常蓄水位工况	1277.39	1605.97	648.93	827.48
			设计洪水位工况	1245.28	1560.88	632.63	800.90
		特殊组合	施工完工工况	1246.82	1476.50	632.70	739.64
			校核洪水位工况	1214.08	1575.47	617.30	788.18
			地震工况	1126.68	1627.2	571.92	904.49

碾压混凝土重力坝的计算结果显示,上游坝踵最大应力达 1 291.70 kPa,下游坝趾最大应力为 1 627.20 kPa。根据地质资料,弱风化下带砂质泥岩的容许承载力为 1.2 MPa,砂岩为 3.0 MPa。为满足建基面应力要求,须将坝基及坝肩上部厚度 2.3~8.7 m 的泥岩层挖除,使坝体坐落于承载力更高的弱风化下带砂岩层中。

从坝基应力水平与地基承载力的匹配性来看,胶结砂砾石坝的应力分布更趋均匀,对地基条件的要求相对宽松,较之碾压混凝土重力坝展现出更强的工程适应性。

(2) 坝基抗滑稳定计算

坝基抗滑稳定计算结果如表 3 所示,由表 3 可知,相较于碾压混凝土重力坝,胶结砂砾石坝在坝基

表 3 坝基抗滑稳定计算结果表

坝段	荷载组合	计算工况	抗滑稳定安全系数			
			碾压混凝土重力坝		胶结砂砾石坝	
			允许值	计算值	允许值	计算值
挡水坝段	基本组合	正常蓄水位工况	3.0	3.38	3.0	3.34
		设计洪水位工况	3.0	3.33	3.0	3.27
最高坝段	特殊组合	校核洪水位工况	2.5	3.32	2.5	3.21
		地震工况	2.3	3.03	2.3	2.86

较浅、岩体较差的条件下,抗滑稳定安全与之基本相当,坝基抗滑稳定更优。

2.4 施工条件对比

胶结砂砾石坝的施工主要包括常态混凝土、加浆振捣胶结料及碾压胶结料三大工序,其中加浆振捣胶结料的施工工艺与碾压混凝土坝中的变态混凝土一致,碾压胶结料的施工方法则与碾压混凝土相同。两种坝型在施工工艺上具有高度相似性,其核心差异在于材料配比所引发的温控要求与施工组织复杂度。

碾压混凝土因胶凝材料比例较高,绝热温升显著,增加了温度裂缝风险,对温控措施要求极为严格,主要体现在:①表面保温,以控制内外温差;②薄层浇筑,碾压层厚控制在 30 cm,并严格控制间歇时间以利于散热;③高温季节施工时需预埋冷却水管进行通水冷却。此外,其层面处理要求高,施工对工艺连续性的依赖极强。

相比之下,胶结砂砾石胶凝材料用量显著偏低,绝热温升远低于碾压混凝土,大幅简化了温控措施,降低了温度裂缝风险。其碾压层厚可增加至 45~70 cm,有利于实现快速、连续施工。从施工效率与温控难度来看,胶结砂砾石展现出更优的施工便捷

性与经济性。

2.5 环境与征地影响分析

胶结砂砾石坝凭借其对地基条件的强适应性,在建基面抬高、开挖范围收窄的基础上,于水土保持、环境影响及征地移民三方面均展现出显著优势,较碾压混凝土重力坝方案更具生态友好性与资源集约性。

2.5.1 水土保持影响分析

胶结砂砾石坝在水土流失控制方面优势明显。其水土流失防治责任范围、扰动地表面积及损毁植被面积等关键指标均优于碾压混凝土重力坝方案,工程建设引发的水土流失总量较小。在弃渣处理方面,通过对开挖渣渣进行科学合理的资源化利用,有效减少弃渣量达 40.22 万 m³。这一优势直接降低了弃渣场的规模等级与堆置高度,使渣场占地面积显著减小,进而促使水土保持专项投资减少 329.09 万元,实现了生态效益与经济效益的统一。

2.5.2 环评影响分析

从生态环境影响来看,胶结砂砾石坝因开挖量小、弃渣量少,对地表植被的损毁范围和施工期生态扰动强度均低于碾压混凝土重力坝方案,体现了更为环保的工程特性。针对重大环境敏感目标——陕西舒庄省级自然保护区,胶结砂砾石坝开挖工期短、施工活动强度低,在空间与时间两个维度上有效降低了对保护区及其周边生境的干扰程度。上述优势直接反映在环保投资上,胶结砂砾石坝方案较碾压混凝土重力坝方案减少环保投资 149.27 万元,进一步印证了其在生态保护与经济性之间的协调平衡能力。

2.5.3 移民占地影响分析

在土地资源占用方面,胶结砂砾石坝同样表现出明显的集约优势。其枢纽区占地 377.95 亩,较碾压混凝土重力坝方案的 527.03 亩减少 149.08 亩;受淹没区范围相同影响,总征地面积 1769.47 亩,较对比方案减少 146.38 亩,相应征地投资减少 390.40 万元。这一差异的根源在于两种坝型对地基要求的本质不同:碾压混凝土重力坝需开挖至弱风化基岩下带,基坑深度大、边坡开挖范围广,导致枢纽区占地扩大;而胶结砂砾石坝对地基适应性更强,建基面抬升至弱风化基岩上带,开挖范围显著收窄,枢纽区用地随之集约。较小的征地范围不仅降低了工程投资,也减少了对原有土地用途的干预,降低了工程实施的社会协调成本。

综上,胶结砂砾石坝在水土保持、环境影响及征

地移民三方面均体现出更优的综合效益,其对地形地质条件的宽容度直接转化为工程实际中的环保与占地优势,属于资源节约型、环境友好型的优选方案。

2.6 工程投资对比

两坝型工程投资对比见表 4。

表 4 碾压混凝土重力坝与胶结砂砾石坝投资对比分析表

单位:万元

序号	投资或费用项目名称	碾压混凝土重力坝(1)	胶结砂砾石坝(2)	差值(1)-(2)
1	工程部分投资	37740.81	34204.71	3536.10
1.1	建筑工程投资	26820.87	23082.81	3738.06
1.2	机电设备及安装工程投资	2514.22	2514.22	0.00
1.3	金属结构设备及安装工程投资	2403.40	2403.4	0.00
1.4	施工临时工程投资	6002.32	6204.28	-201.96
2	专项部分投资费用	28239.24	27350.82	888.42
2.1	建设征地和移民安置补偿专项投资费用	25215.93	24825.53	390.40
2.2	水土保持工程专项投资费用	1874.04	1552.36	321.68
2.3	环境保护工程专项投资费用	1149.27	972.93	176.34
差额	胶结砂砾石坝方案投资少	4424.52 万元		

从投资对比来看,胶结砂砾石坝方案总投资较碾压混凝土重力坝方案减少 4 424.52 万元,经济效益显著。其核心优势主要体现为以下两个方面:

一是建安工程成本的降低。得益于胶结砂砾石坝对地基条件的强适应性,坝基开挖深度显著减小,同时筑坝材料可充分利用开挖渣料,有效减少了对料场的开采及材料外购,使得建筑工程投资减少 3 738.06 万元。

二是专项投资的节约。由于弃渣量大幅减少,与之相关的移民占地、水土保持及环境保护等专项投资相应降低,共计减少 888.42 万元。

上述经济性优势并非简单的工程量缩减所致,而是源于胶结砂砾石坝材料特性与工程需求的深度契合——通过对地质条件的宽容度实现开挖量的有效控制,进而转化为从工程源头到末端处置的全链条投资节约,充分印证了其在同类型坝址条件下应用的合理性与经济性。

2.7 综合比选结果

经全面比较,胶结砂砾石坝在技术适应性、经济性与环境友好性方面均优于碾压混凝土重力坝。该坝型对地基条件要求较低,可显著减少基坑开挖量

与坝体高度,降低施工风险;其断面形态有利于应力扩散,对砂泥岩互层地基表现出更强的结构性适应。在筑坝材料上,遵循“因材施教”原则,可直接利用开挖石渣作为骨料,既解决了远距离运输制约,又减少了弃渣及环境扰动。施工方面,工序简化、温控要求低,有利于加快工程进度;在环境与征地影响层面,亦展现出更优的生态友好性与资源集约性。工程投资层面,该方案可节约投资约 6.7%,符合安全、绿色、创新的坝工发展方向。

综上所述,胶结砂砾石坝兼具显著的经济、生态与社会效益,推荐作为普化水库工程的选用坝型。

3 结 论

本文对普化水库工程胶结砂砾石坝与碾压混凝土重力坝两种代表性坝型进行了技术可行性、经济合理性、环境影响与社会适应性综合比选,主要结论如下:

(1) 技术适应性方面,胶结砂砾石坝展现出更强的地质包容性与材料兼容性。其对地基条件要求较低,可有效适应砂泥岩互层及岩体风化剧烈的复杂地质条件;同时,坝体材料允许直接利用工程开挖石渣及低品质骨料,在较软岩坝址中具有独特的技术可行性优势。

(2) 经济性方面,胶结砂砾石坝具有显著的直接工程成本优势。胶凝材料用量的大幅降低及对当地开挖料的最大化利用,有效节约了材料采购与远距离运输费用;施工工艺简化、温控要求低,有利于缩短工期、降低施工组织成本,实现快速经济筑坝。

(3) 环境与社会影响方面,胶结砂砾石坝将大量工程弃渣转化为坝体填筑材料,极大减少了专用料场开采及弃渣堆放规模,有效降低了水土流失风险与生态环境扰动,同时减小了工程永久征地范围,具有更高的社会可接受性与生态友好性。

(4) 工程示范价值方面,普化水库作为陕西省胶结砂砾石坝建设先例,验证了该新型绿色坝型在复杂地质条件下的适用性与综合效益优势,可为省内乃至其他地区类似条件水利工程的坝型选择与决策提供参考。

参考文献:

[1] 王自高,张宗亮.金沙江中游梯级电站复杂坝基关键技术研究及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2023.

[2] 刘志福.水利工程建设中的水土保持与生态环境保护研究[J].工程建设与设计,2024(19):126-128.

[3] 熊新宇,姚勇强,王曙东,等.西藏扎拉水电站混凝土骨料料源选择分析[J].水利水电快报,2024,45(08):47-51.

[4] 王建华,张云昌,胡鹏.生态大坝科学内涵与建设路径探析[J].中国水利,2025(20):23-28.

[5] 朱晓平,张关军,陈浩敏.大坝对河流水文特性及水生生态的影响[J].黑龙江水利科技,2024,52(12):54-56.

[6] 孙兆祥,王海波,田锋.西山水库坝型比选及堆石重力坝结构设计计算[J].云南水力发电,2024(10):216-219.

[7] 何绮玲.山区综合性水利工程坝型比选研究[J].水利科技与经济,2021,27(12):22-25.

[8] 谭军,项武林.六枝特区河头上水库工程坝型比选分析[J].河南水利与南水北调,2023,52(04):75-76.

[9] 罗常炜,刘然,陈媛,等.密集缓倾软弱夹层影响下的坝基失稳破坏模式研究[J].中国农村水利水电,2023(10):240-247.

[10] 刘毅,辛建达,张国新,等.大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J].硅酸盐学报,2023,51(05):1228-1233.

[11] 李荣果,田正宏,夏维学.碾压混凝土筑坝施工新技术[M].北京:中国水利水电出版社,2022.

[12] 贾金生,郑瑾莹,王月,等.胶结颗粒料坝筑坝理论探讨与实践进展[J].中国科学:技术科学,2018,48(10):1049-1056.

[13] 刘毅,雒翔宇,赵宇飞,等.大坝工程智能建造技术与实践探索[J].中国水利,2025(16):46-52.

[14] 胡宏峡.黄登水电站大坝碾压混凝土性能及特点综述[J].广西水利发电,2019(04):12-17.

[15] 蔡为武.碾压混凝土温控防裂探讨[J].水利水电科技进展,2000,20(02):28-30.

[16] 张涛,任红磊,武颖利.胶结砂砾石料的动力特性及损伤本构模型[J].水利水运工程学报,2025(03):116-126.

[17] 陈昊,胡其德,王彤彤,等.金鸡沟水库软岩胶结材料筑坝技术研究[J].四川水利,2020,41(02):6-9.

[18] 龙欣,王彦红.雷山县西江水库坝型比选与胶结砂砾石坝的应用优势分析[J].工程技术研究,2023,8(11):105-107.

[19] 丁泽霖,王肖楠,张宏洋,等.复杂地基重力坝与胶结砂砾石坝变形破坏对比分析[J].工程科学与技术,2023,55(04):197-206.

[20] SL 678—2014 胶结颗粒料筑坝技术导则[S].北京:中国水利水电出版社,2014.

[21] NB/T 10332—2019 碾压混凝土重力坝设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2020.

[22] 贾保振,顾业香,任强,等.陕西普化水库胶结料坝材料试验研究[J].西北水电,2024(06):57-62.