东庄水利枢纽二道坝工程
堆石混凝土关键技术研究与实践

陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司

2023年10月

目录

CONTENTS

1 工程概况

2 二道坝设计方案

3 堆石混凝土坝浇筑施工工艺

4 堆石混凝土坝智能信息化应用

5 科学试验

1 工程概况

习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上指出

◆ 要紧紧抓住水沙关系调节这个“牛鼻子”，完善水沙调控机制

破解多沙河流工程泥沙设计难题，建设重大水工程调控水沙，是支撑黄河流域生态保护和高质量发展的关键，东庄是黄河水沙调控工程之一。

东庄水库位于泾河下游峡谷出山口段，距西安直线距离90km，是渭河防洪减淤体系的重要组成部分，是黄河水沙调控体系中的重要支流水库，在黄河治理开发中具有十分重要的作用。



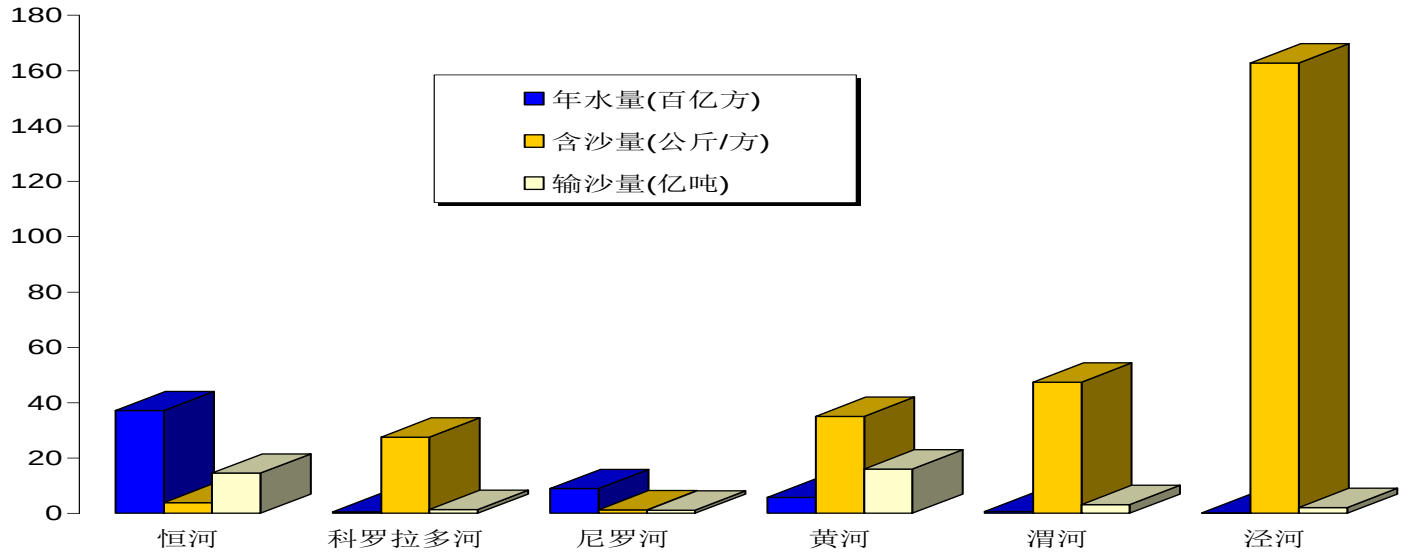
2019年9月17日下午，习近平在河南省郑州黄河国家地质公园

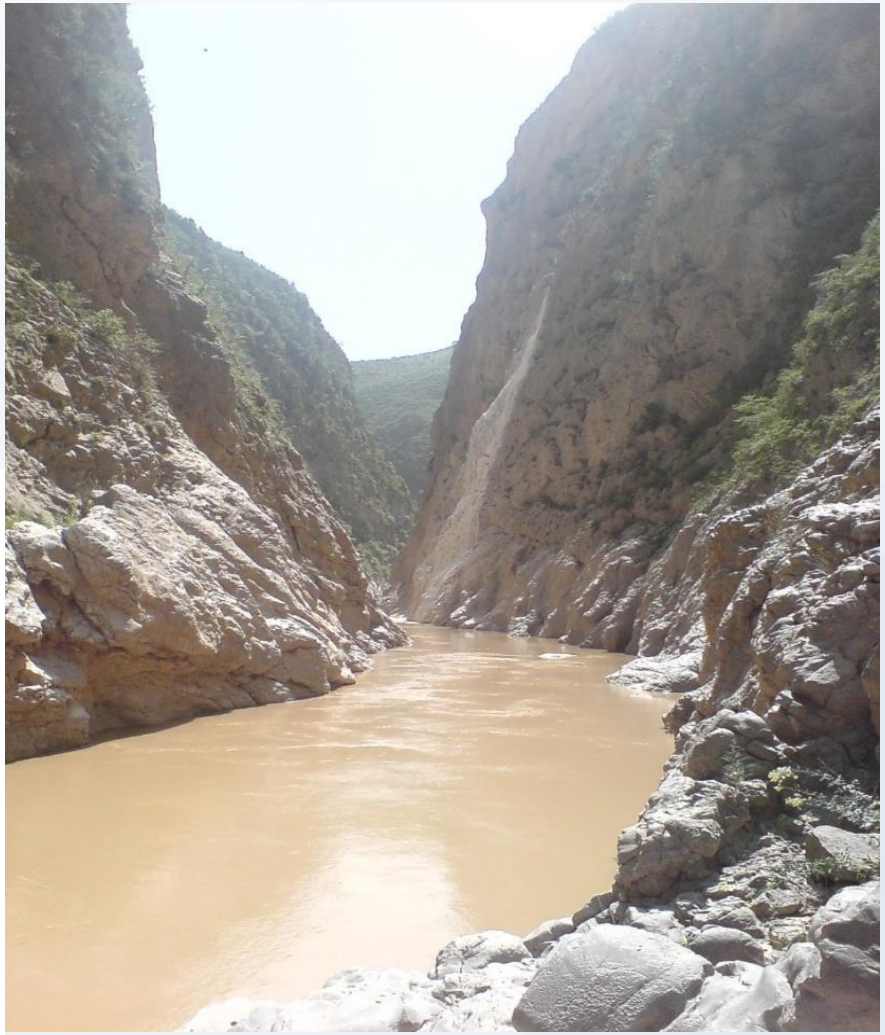
1 工程概况



泾河是**黄河的二级支流**，渭河的最大支流，发源于六盘山东麓宁夏回族自治区泾源县老龙潭，海拔2540m，由西北向东南流经宁夏、甘肃、陕西三省，于高陵汇入渭河。干流总长455公里，流域面积45421平方公里。 **东庄工程主要任务：“以防洪减淤为主，兼顾供水、发电及改善生态环境等综合利用”。**

泾河一石，其泥数斗。泾河以洪水猛烈、输沙量大著称，是世界上含沙量最大的河流。泾河实测最大含沙量为1430kg/m³，年均含沙量为145kg/m³，含沙量是黄河的4.4倍，是渭河的2.9倍。多年平均侵蚀模数7000~11000t/(km².a)，多年平均输沙量2.37亿吨。



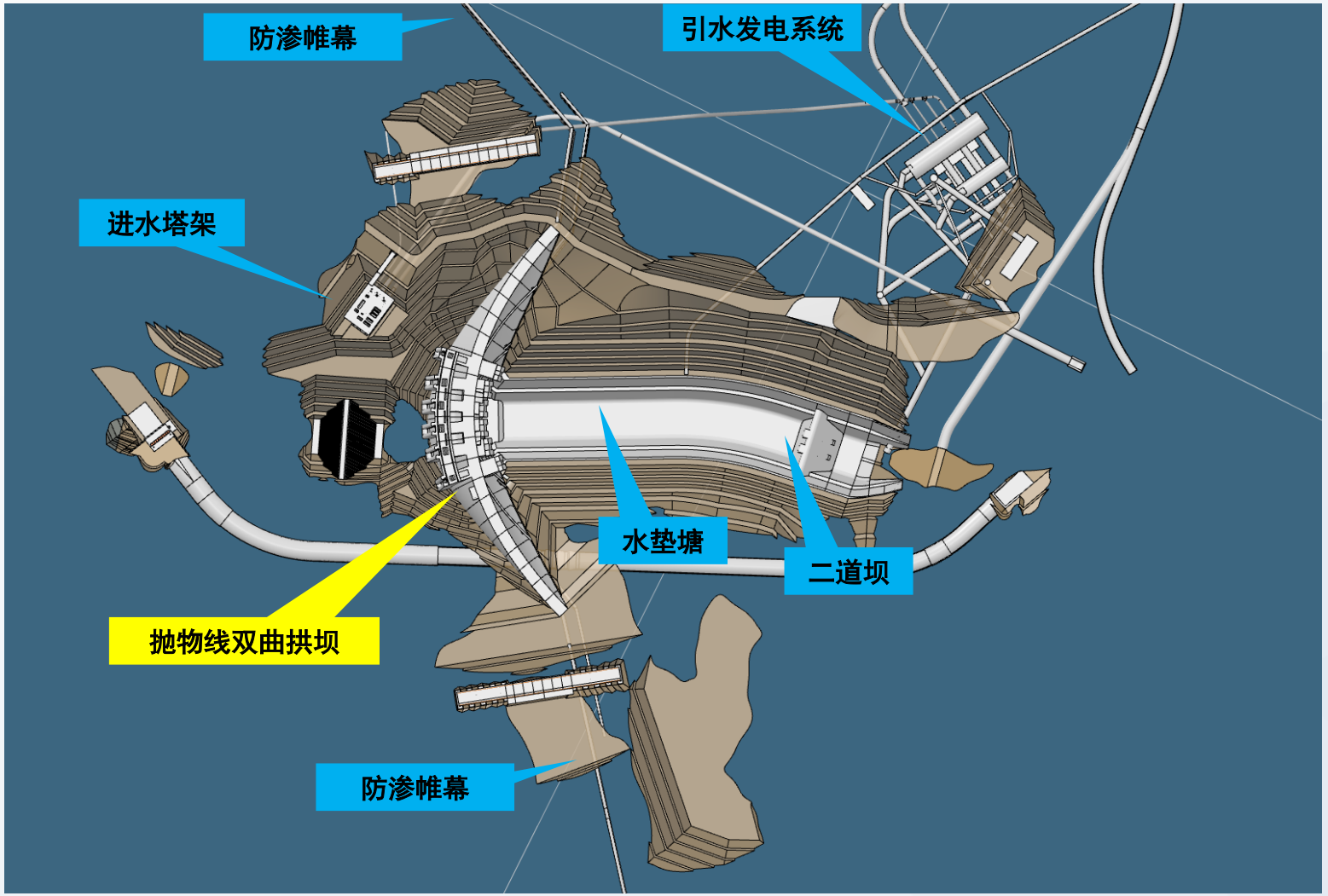


东庄水利

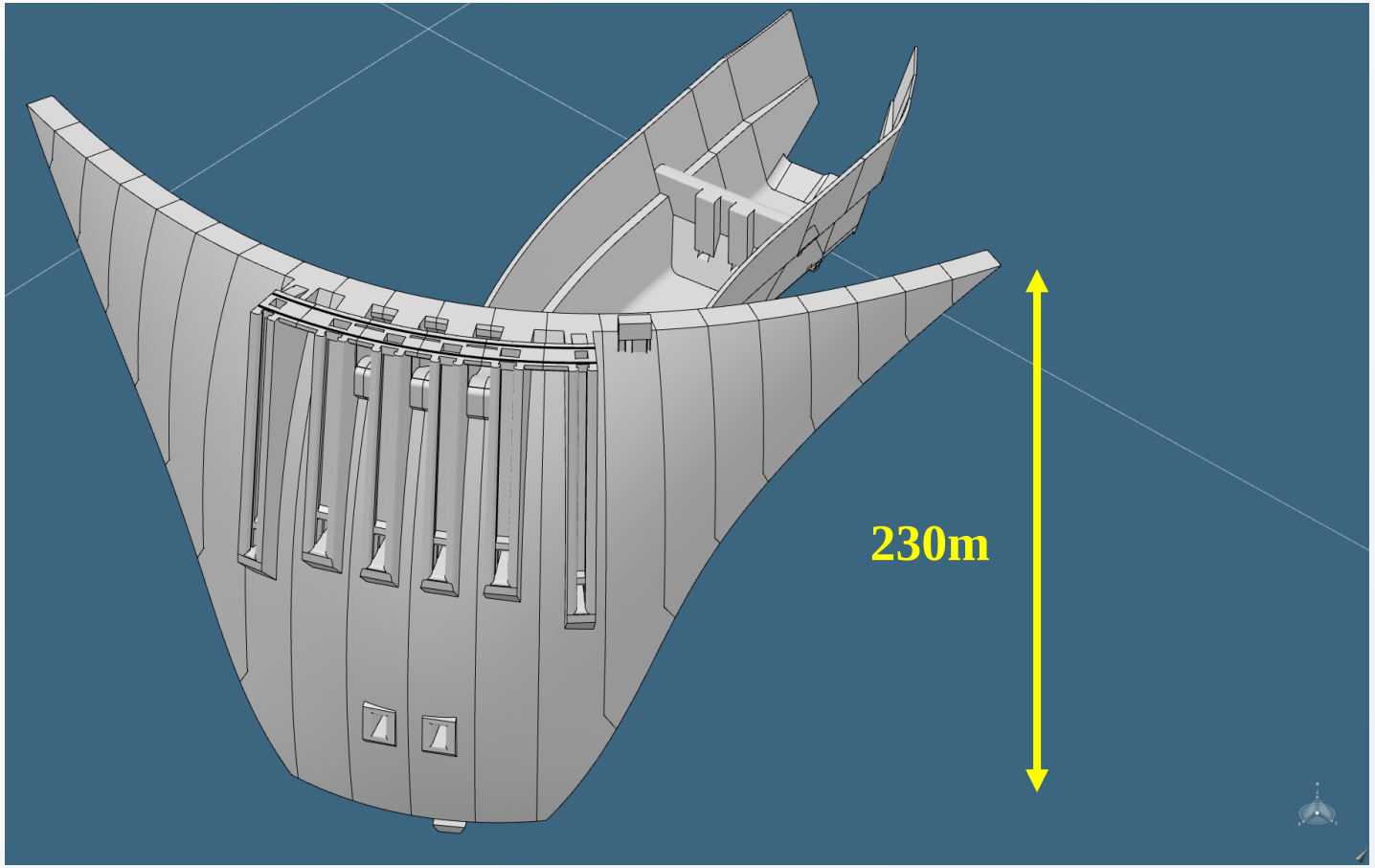
东庄水利枢纽为I等工程，工程规模为大（1）型。

枢纽主要建筑物：

- 混凝土双曲拱坝
- 坝身排沙泄洪建筑物
- 水垫塘及二道坝
- 进水塔架
- 引水发电系统
- 防渗帷幕



东庄水利枢纽工程建成后，将是超高含沙量河流上第一个超高拱坝

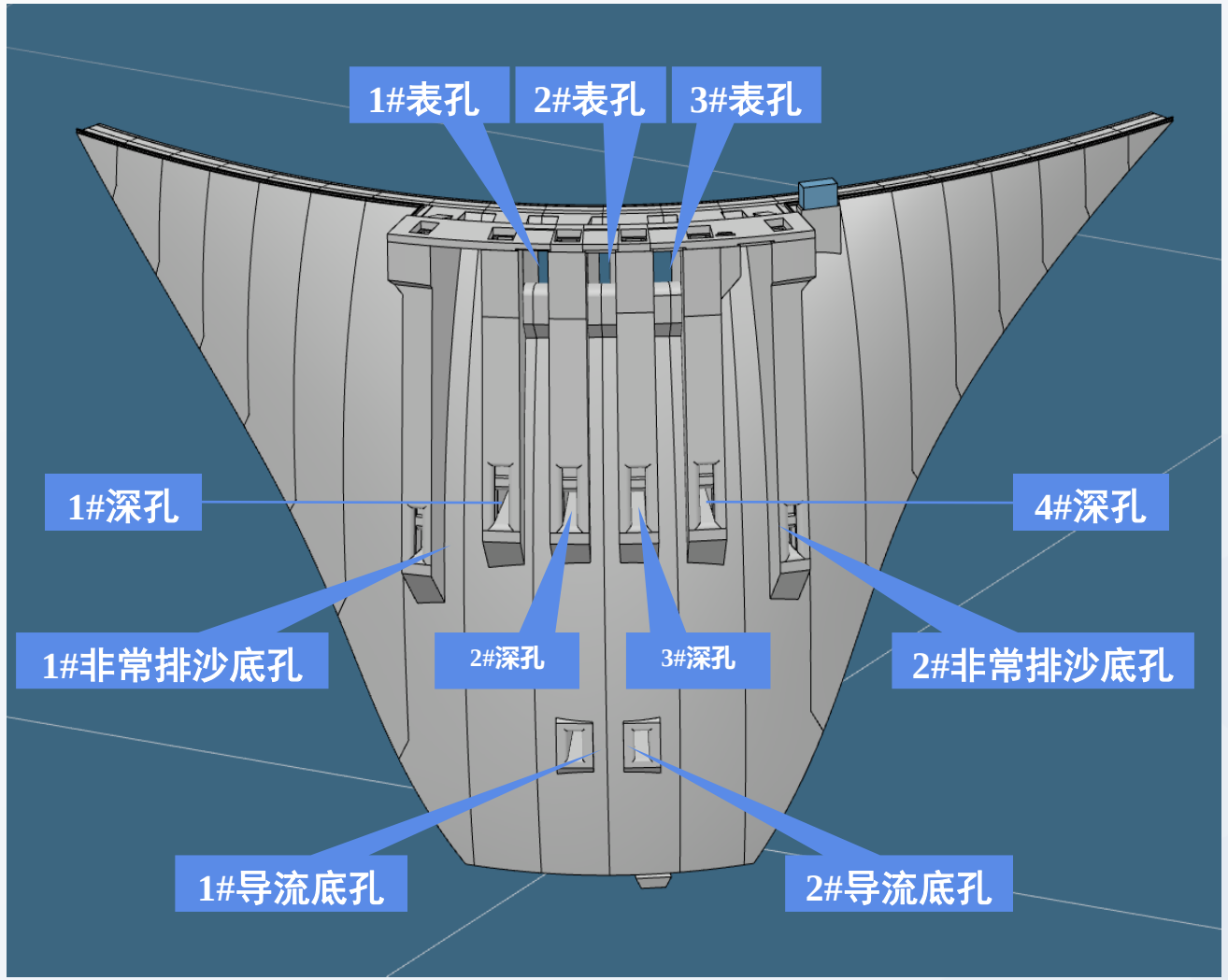


东庄拱坝主要参数：

- ◆坝顶高程： 804m
- ◆最大坝高： 230m
- ◆底层拱圈高程： 578m
- ◆坝顶厚度： 12m
- ◆坝底厚度： 50m
- ◆坝顶弧长：456.06m
- ◆最大中心角：92°
- ◆混凝土方量：171万m^3

坝身泄洪排沙建筑物

- 3个溢流表孔
- 4个排沙泄洪深孔
- 2个非常排沙底孔



东庄水利枢纽的五个特点

（1）世界第一座以防洪减淤为主要任务的高拱坝

东庄拱坝开发任务以防洪减淤为主，兼顾供水、发电和改善生态等综合利用，设计拦沙库容达20.53亿m^3，占总库容的62.7%，30年左右即达到冲淤平衡，是世界上最高的以防洪减淤为主要任务的拱坝，相比其它特高拱坝，泥沙调控难度大，极具挑战性。

（2）坝址区河段含沙量和单位水沙荷载最大的高拱坝

东庄水库河段年均含沙量为140kg/m^3，汛期平均含沙量为207kg/m^3，东庄拱坝校核和设计洪水时容重达1.33t/m^3，汛限水位780m时容重为1.68t/m3，水容重超过正常水容重33%~68%，在相同体型结构情况下，承受水压荷载和应力状态均会异于常规。同时东庄水库正常运行淤积高程725m，淤积高度达182m，占坝高的65.6%。

（3）悬托型河谷上修建的第一座高拱坝

东庄水库近岸坡地下水位总体平缓，动态观测的地下水位高程在545m~555m，低于河水位高程约30~50m，为悬托型河谷，在200m以上特高拱坝中十分特殊。

（4）库区防渗规模世界最大、孔深最深的水利工程

东庄水利枢纽工程地质条件复杂，灰岩地质条件存在岩溶渗漏风险，基础处理工程量大。库区防渗帷幕灌浆轴线全长约3266米，钻灌进尺100万米，投资约11亿元，是世界防渗规模最大的水利工程；基岩防渗帷幕最大孔深达到219m，超过其它特高拱坝。

（5）世界上第一座在二道坝工程采用堆石混凝土技术修建的1级水工建筑物

东庄水利枢纽二道坝工程高41m，坝顶宽6m，长75.1m，坝身布置2孔1.8×1.8m的检修放空孔，世界上第一座在二道坝工程采用堆石混凝土技术修建的1级水工建筑物。

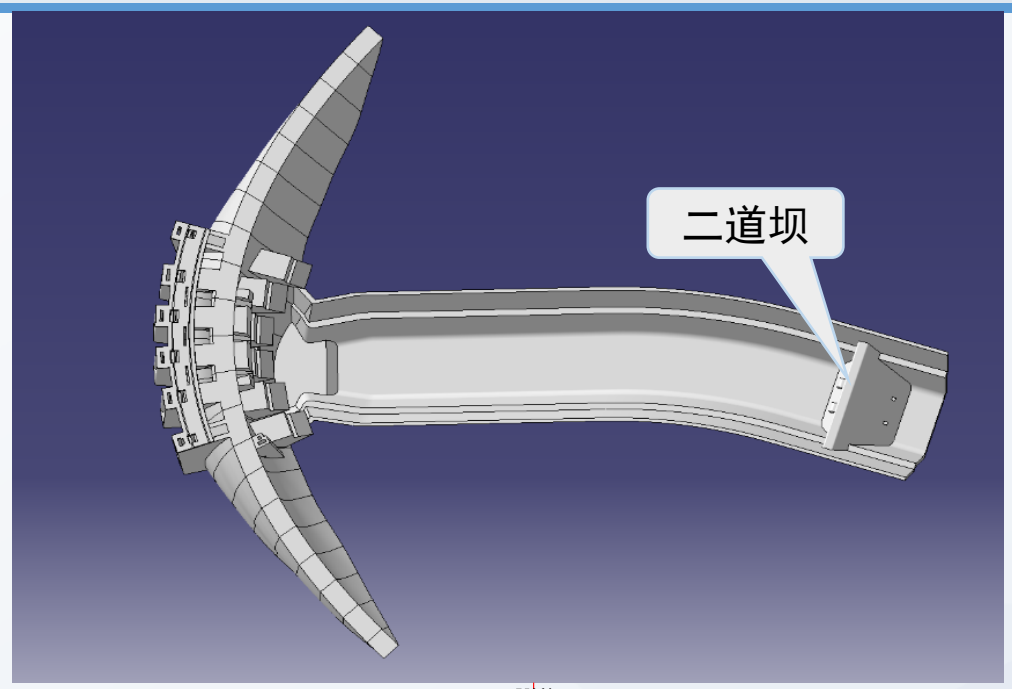
2 二道坝设计方案

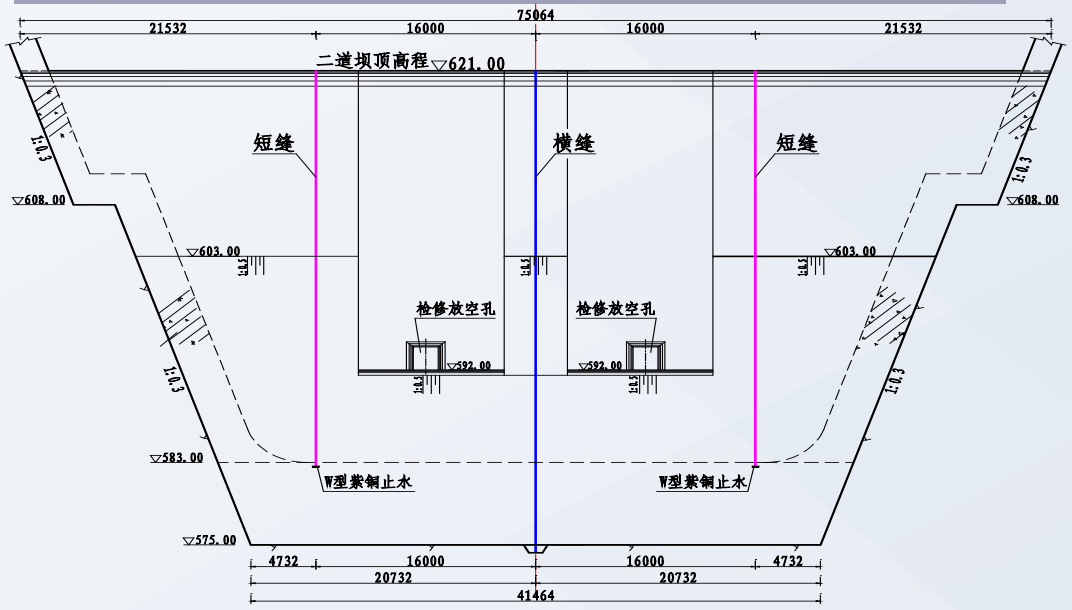
2 二道坝工程设计方案

东庄水利

东庄二道坝为堆石混凝土重力坝，是世界上第一座在二道坝工程采用堆石混凝土技术修建的1级水工建筑物。

二道坝坝顶高程621.0m，最大坝高40.5m，坝顶宽度6m，坝顶长75.1m。坝体中部设置1条横缝，横缝左右两侧各16m处设置一条短缝。坝身布置2孔1.8×1.8m的检修放空孔。





2 二道坝工程设计方案

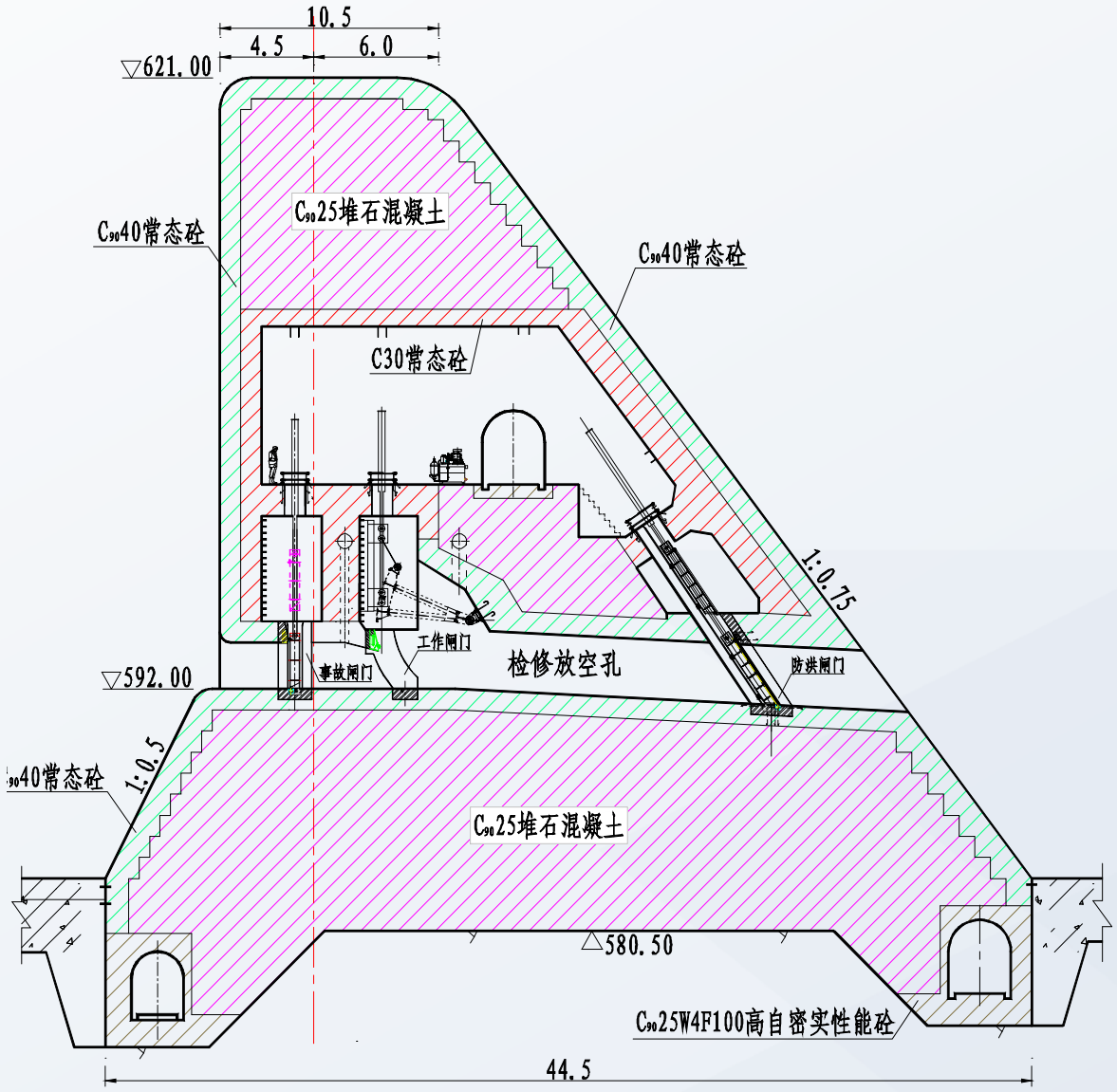
（1）东庄水利枢纽二道坝工程为1级水工建筑物，合理使用年限100年。100年一遇洪水设计，最大下泄流量7880m³/s；1000年一遇洪水校核，最大下泄流量9500m³/s。

（2）泄洪消能具有“高水头、大流量、窄河谷、陡岸坡”的特点，并具有“高含沙、厚淤积”的水流特性。

（3） 东庄水利枢纽坝址处于寒冷地区，二道坝混凝土长期受高含沙河水（弱~中等硫酸盐型腐蚀性）的侵蚀。

（4）二道坝结构复杂、大泄量造成坝体水流动力复杂的特性。

所以，对二道坝混凝土的耐久性、抗冲耐磨性、力学性能及温控防裂性要求高。



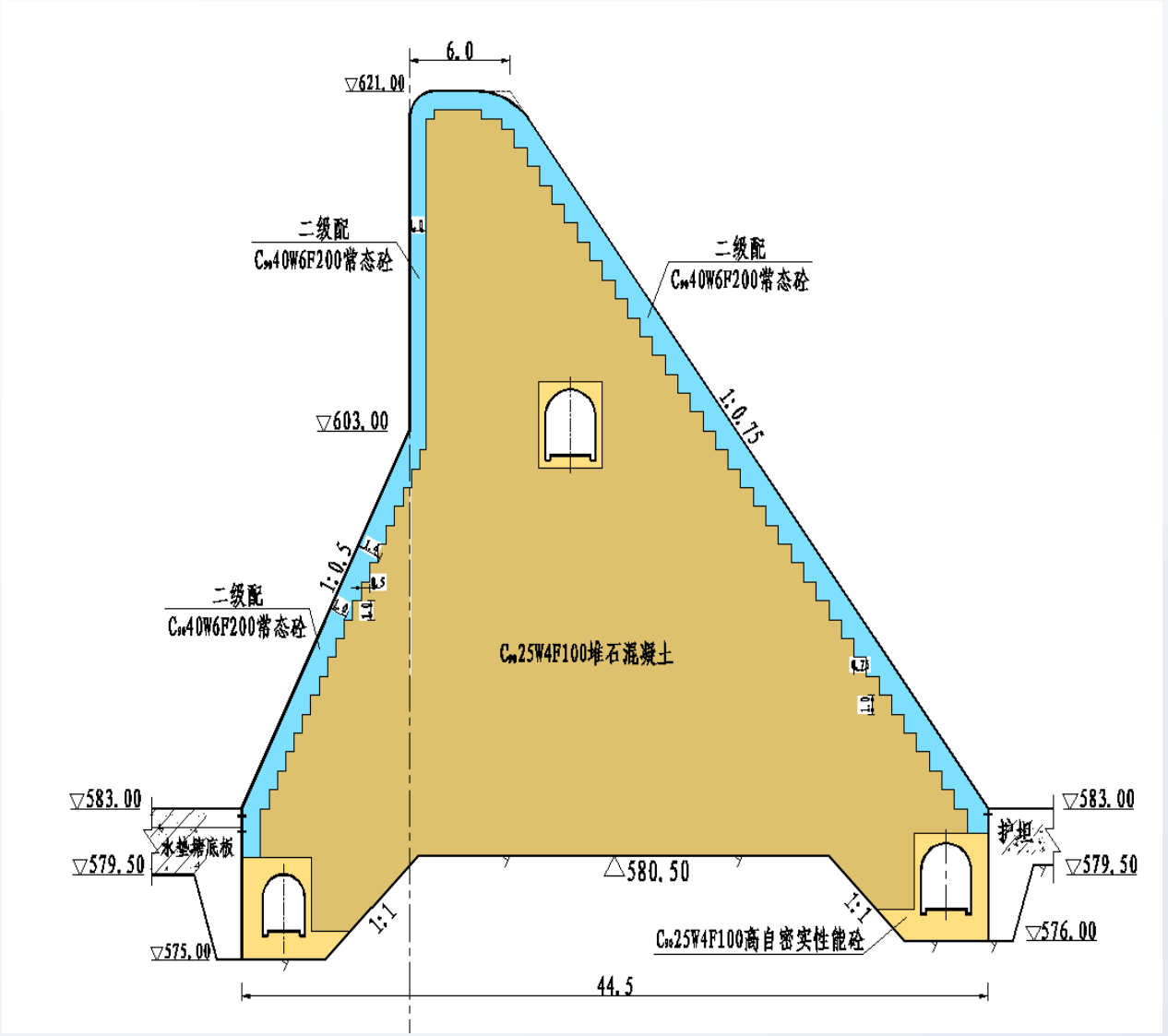
二道坝检修放空剖面

2 二道坝工程设计方案

二道坝坝体混凝土采用“金包银”的型式。

坝体表面及检修放空孔过流面为C_{90}40W6F200常态混凝土，坝体内部为堆石混凝土，坝内廊道为C_{90}25W4F100高自密实混凝土，与堆石混凝土一体化浇筑，混凝土之间采用Φ25@1.0m×1.0m插筋进行加强连接。

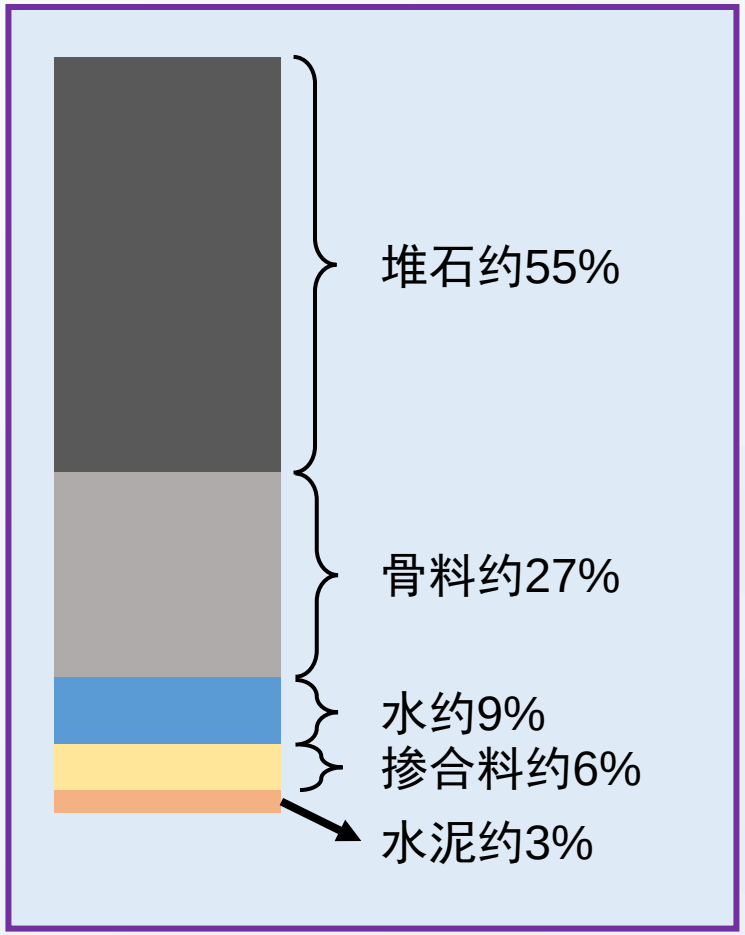
坝体混凝土总方量为5.5万m³，其中堆石混凝土和自密实混凝土约4.58万m³。



二道坝典型剖面

堆石混凝土性能特点

- ✓ 低水泥用量与低水化热
- ✓ 高密实度保证与高容重
- ✓ 体积稳定抗裂性能突出
- ✓ 强化抗剪能力简化凿毛
- ✓ 显著提高工效缩短工期
- ✓ 大幅节约工程建设投资
- ✓ 施工质量控制简便有效
- ✓ 节能低碳环保意义重大



堆石混凝土原材料构成的体积比例

3 堆石混凝土坝浇筑施工工艺

3 堆石混凝土坝浇筑施工工艺

堆石混凝土
主要施工流程


堆石选取


堆石筛洗


堆石运输


堆石入仓





堆石仓完成


支立模板

钢筋与预埋件






HSCC生产

HSCC运输

HSCC浇筑




RFC冲毛


RFC养护



3 堆石混凝土坝浇筑施工工艺





1、**选石：**在原左岸小拌合站堆存石料，在挖机斗上开孔挑选合格堆石料，装车前冲洗干净，采用25t自卸汽车运输至二道坝前

2、**堆石码放：**将堆石在二道坝前由挖机转运一次，并人工清除由于车辆运输、碰撞等产生的碎石；仓面内采用1台1.2m^{3}挖机码放堆石，由下游至上游依次码放，靠近模板部位采用人工进行码放

3 堆石混凝土坝浇筑施工工艺





3、混凝土交界面处理：二道坝C25堆石混凝土与坝体表面C40常态混凝土之间采用5目钢丝网（孔4.5mm，丝0.6mm）进行分隔，堆石时在混凝土分界线内侧30cm处整齐码放堆石，并按照1.0m*1.0m间排距布置插筋，进行浇筑施工

4、混凝土运输车辆安排：二道坝混凝土浇筑时采用6台12m^{3}罐车、2台6m^{3}罐车运输，2台天泵入仓，浇筑时控制钢丝网两侧自密实混凝土与常态混凝土同步上升

3 堆石混凝土坝浇筑施工工艺



选石



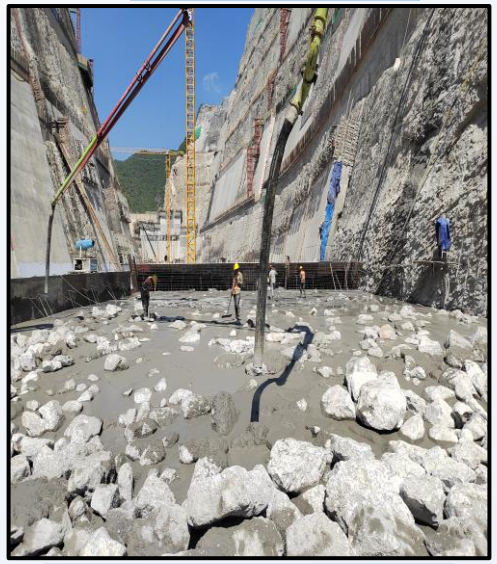
冲洗石头



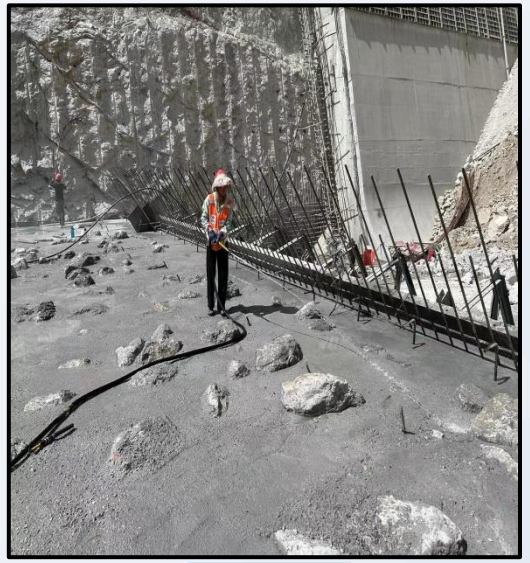
码放



边线码放



混凝土浇筑



养护

堆石混凝土浇筑质量检测

- 钻孔取芯的直径不宜小于200mm，可取150mm的芯样进行检测。
  - 堆石体积占比1/3～3/4的为堆石混凝土芯样试件；
  - 芯样试件的强度值离散性较大，因此应保证一定数量，
    - 直径不小于200mm的芯样试件不宜少于10个；
    - 直径不小于150mm的芯样试件建议不少于30个。
  - 坝体堆石混凝土强度等级按80%保证率结合芯样试件强度标准差进行计算和评定。







4 堆石混凝土坝智能信息化应用

4.1 技术路线

传感器、物联网、和云平台

全面收集工程数据

堆石混凝土真实结构

开展仿真分析与反馈

二道坝数字孪生模型

堆石混凝土二道坝真实工作性态

堆石混凝土坝施工质量实时监测、评价、展示与预警

东庄堆石混凝土二道坝施工智能信息系统

4.2 信息系统主要功能

施工仓面基本数据影像资料采集

系统进行**单元工程的创建划分**，实时跟进现场的施工进度，获取工程建设过程中的**数据、图片及视频。**







4 堆石混凝土坝智能信息化应用

东庄水利

全过程视频实时监控与过程追溯

通过在坝肩布设**高清网络摄像头**，实现对坝体堆石混凝土施工仓面的**全过程视频监控**，基于**关键帧提取算**法获得施工过程的压缩版本，实现项目管理人员对工程现场的**远程监控**和历史**追溯回放**。

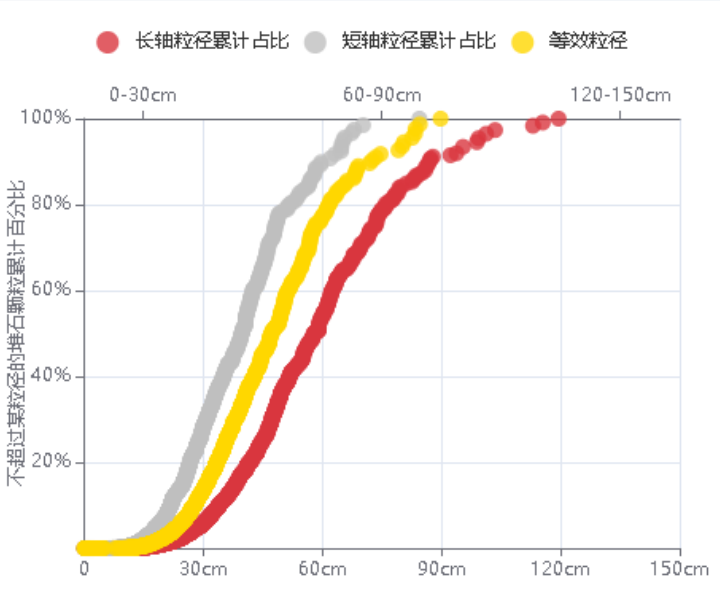




4 堆石混凝土坝智能信息化应用

入仓堆石粒径实时监测与质量评价

对于摄像头拍摄的**仓面堆石照片**，利用已经训练并在其他工程应用实测的堆石粒径**AI识别系统**，能够有效的对入仓堆石粒径进行**实时拍照与粒径分析**，实现对入仓**堆石粒径**的全过程监控、快速评价与实时预警。





区域	评价结果	照片数量/张	识别块石数量/块	逊径料占比/%	粒径离散度/-	针片状含量/%	逊径块石数量
4-2	优秀	3	85	0.00	1.53	6.14	1
4-3	优秀	3	76	0.00	1.31	3.54	3
4-4	优秀	3	73	0.00	1.37	7.48	0
5-0	优秀	3	86	0.00	1.45	1.58	1
4-1	优秀	2	58	0.00	1.41	16.32	1
4-0	优秀	3	65	0.00	1.53	1.60	1
3-4	优秀	3	86	0.00	1.10	3.99	1
3-3	优秀	3	84	0.00	1.28	5.50	0
2-4	优秀	3	65	0.00	1.26	6.45	0
3-0	优秀	3	58	0.00	1.27	5.76	2
3-1	优秀	3	79	0.00	1.33	2.06	1

4 堆石混凝土坝智能信息化应用

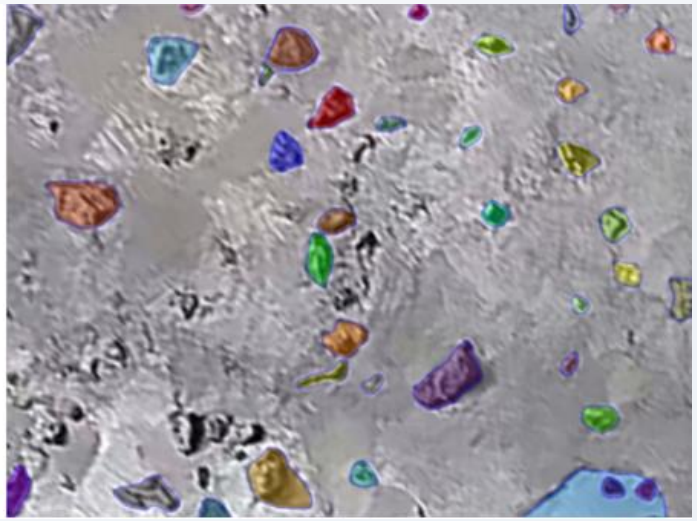
东庄水利

层间堆石裸露率情况评价

监控摄像头拍摄的浇筑完成的施工仓面，利用开发训练的堆石裸露**AI识别系统**，能够对层面的**堆石外露率**进行分析与评价，实现对**层间质量**的快速评价与施工浇筑指导。







4 堆石混凝土坝智能信息化应用

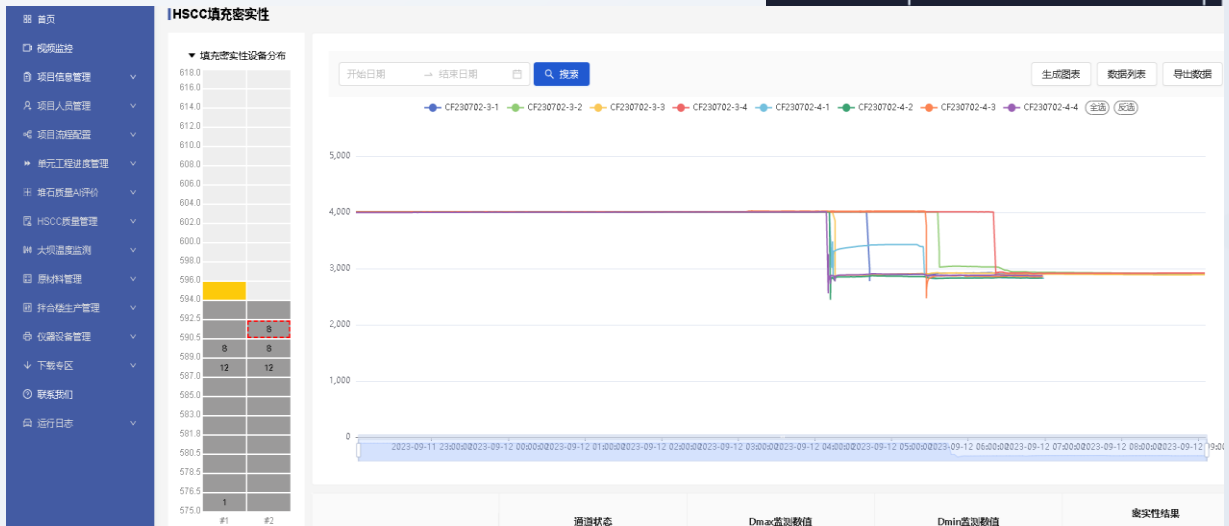
东庄水利

浇筑质量实时监测评价与预警

在仓内布设堆石内的**密实度监测传感器**和**层间密实度监测传感器**，对于浇筑密实度进行**实时检测**，对于浇筑不密实的部位进行**及时预警与补救**。







4 堆石混凝土坝智能信息化应用

东庄水利

坝体温度监测与防裂预警

针对**不同季节、不同结构、典型仓面**等单元工程进行**温度传感器的布设**，实时监测混凝土浇筑后的**水化温升**情况，为大坝的温控措施提供数据支撑。



(a) 堆石预钻孔



(b) 测量堆石孔深



(c) 埋入堆石温度传感器



(d) 固定SCC温度传感器

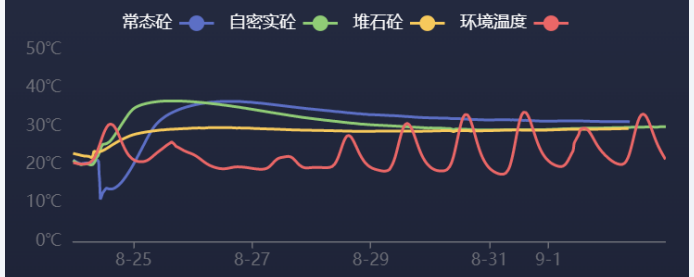


单元工程编号: 右坝肩EL589.8-EL591.8 [浇筑完成]

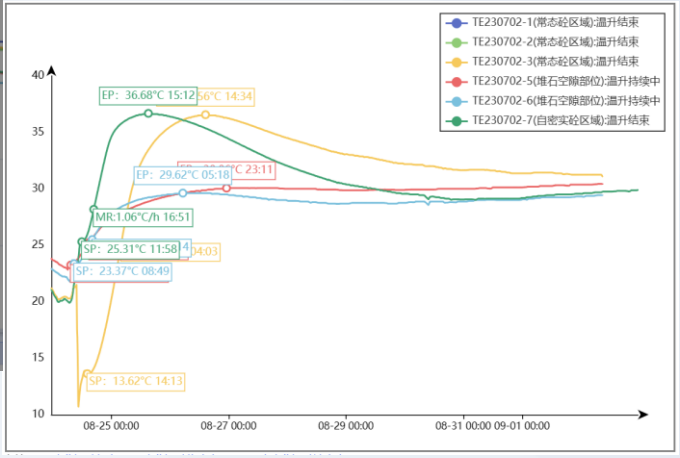
传感器总支数： 6支

自密实混凝土浇筑时长： 16.0h

代表性温度传感器监测曲线



指标	常态砼	自密实砼	堆石砼
温升阶段	温升结束	温升结束	持续温升中
入仓温度	13.62 ℃	25.31 ℃	23.37 ℃
峰值温度	36.56 ℃	36.68 ℃	29.62 ℃
温升度数	22.94 ℃	11.37 ℃	6.25 ℃
达峰时长	48.00 h	27.00 h	44.00 h
温升速率Max	1.33 ℃/h	1.06 ℃/h	0.47 ℃/h



4 堆石混凝土坝智能信息化应用

原材料温度的监测采集与分析

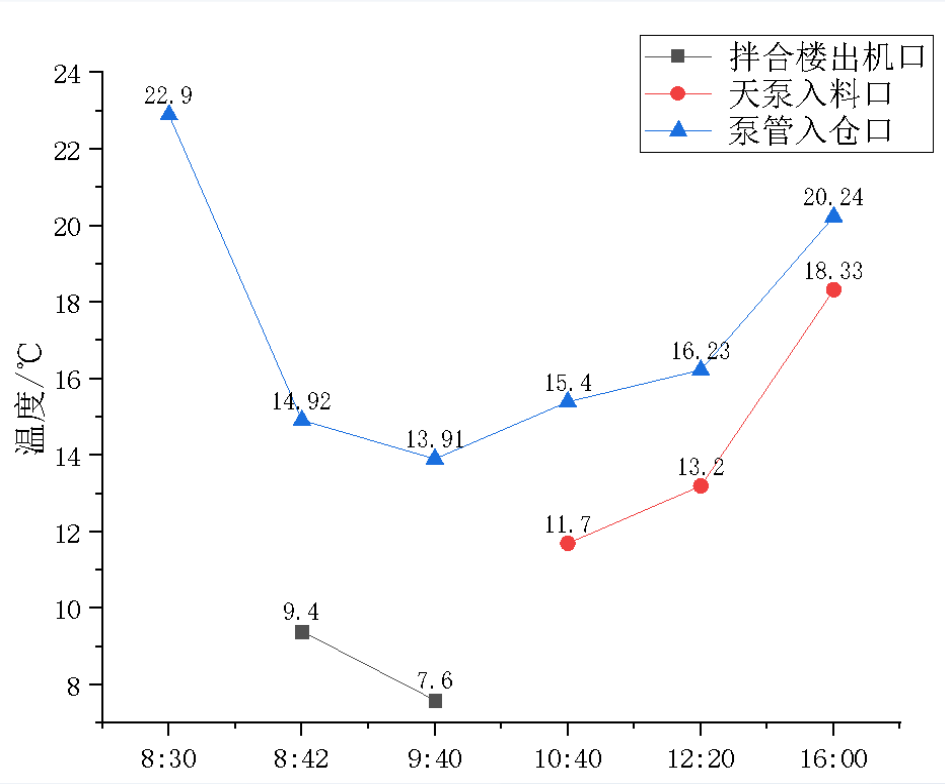
针对混凝土的原料情况，生产过程中采集各种**原材料的温度监测**，建立**原材料温度**与**混凝土生产温度**的关系，为混凝土的**生产温控**提供数据支撑。

当前单元工程编号：左坝肩EL587.8-EL589.8
堆石入仓时间范围：2023-08-02 17:00 至 2023-08-06 14:00
SCC浇筑时间范围：2023-08-06 22:00 至 2023-08-07 23:00

左坝肩EL587.8-EL5 | 选择位置 | 开始日期 → 结束日期 | 搜索 | 添加 | 删除 | 导出

	单元工程	sn	时间	位置	目标距离(m)	红外式温度(°C)	接触式温度(°C)
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-14 09:35:51	蓄水池	18	22.35	23.12
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-12 20:51:45	蓄水池	13	23.24	23.77
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-12 20:51:28	蓄水池	15	23.2	23.87
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-12 20:50:34	蓄水池	14	23.15	23.77
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-09 10:38:38	石子料场	31	34.82	26.85
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-09 10:38:24	石子料场	10	34.14	26.97
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-09 10:38:24	石子料场	10	34.13	26.97
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-09 10:38:24	石子料场	10	34.13	26.97
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-09 10:36:29	砂子料场	33	27.16	25.19
○	左坝肩EL587.8-EL5...	TQ230F01	2023-08-09 10:36:20	砂子料场	14	26.92	25.2

< 1 2 3 4 5 ··· 9 >



4 堆石混凝土坝智能信息化应用

DZH WATER 东庄水利

现场环境量监测界面

采集二道坝施工现场的**光照强度**、**温湿度变化情况**等数据，探究环境因素对堆石混凝土生产浇筑的影响情况。



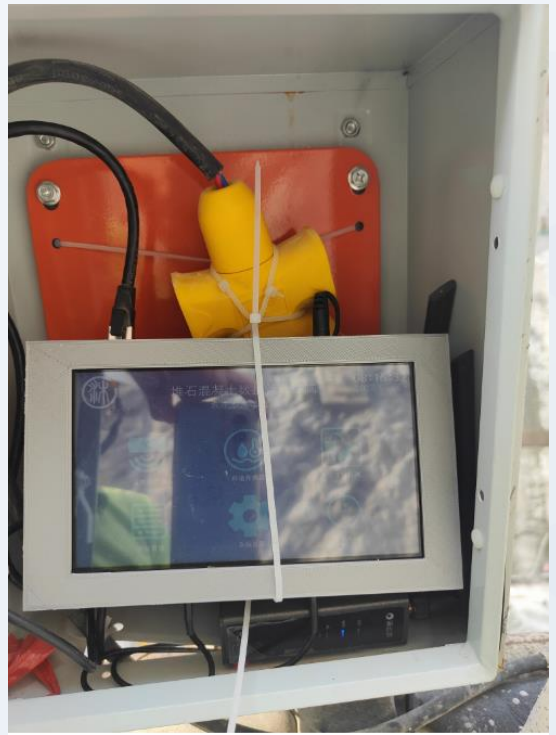
4.3 现场实施情况

（1）数据采集系统设备的现场安装

- 安装监控摄像头：右边坡二道坝上边马道安装两个高清摄像头
- 坝体数据采集设备的安装：搭建**无线网络**，实现数据的实时采集传输
- 环境量设备的安装：监测二道坝区域的**气温**、**空气湿度**及**光照强度**







(2) 监控系统的搭建应用

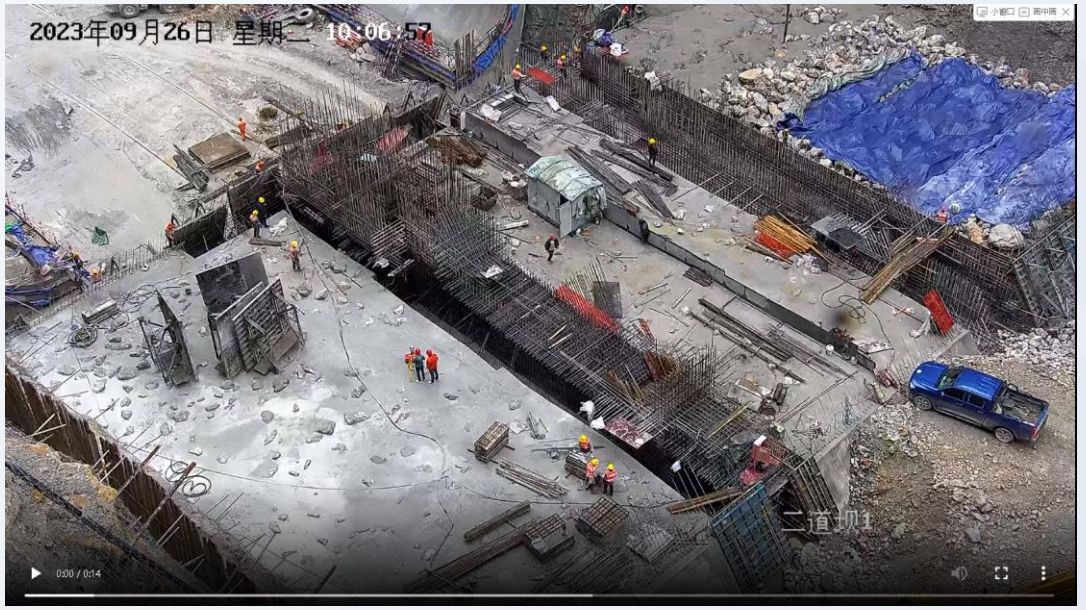
- 监控调取方式：调取**内网映射API接口**并入堆石混凝土施工管理系统
- 监控应用途径：

  获取堆石入仓过程中的照片，进行**双目识别**研究**块石粒径**

  采集施工仓面浇筑完成后的照片，进行**堆石裸露情况**统计

  定时拍照，合成视频，存储施工过程中重要影像资料

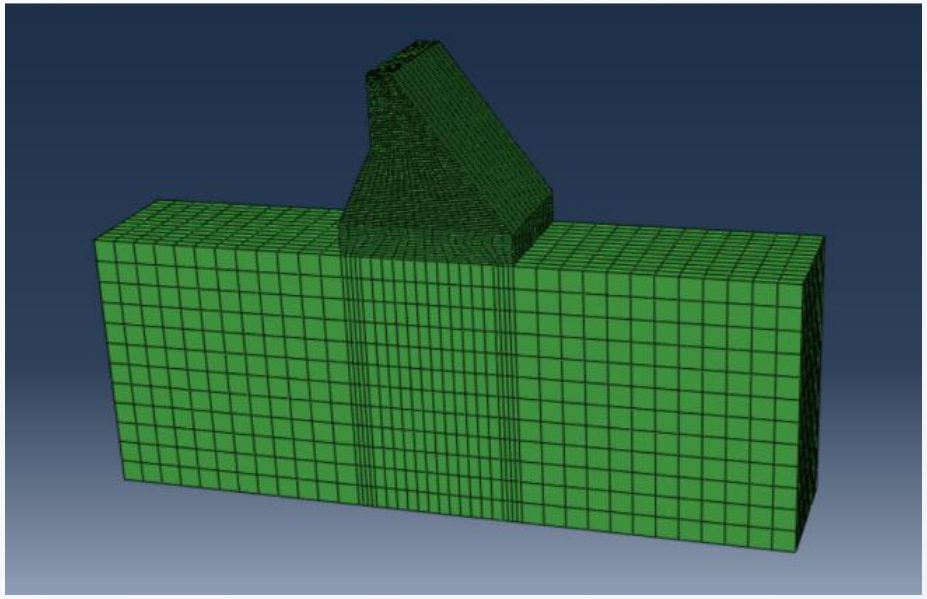


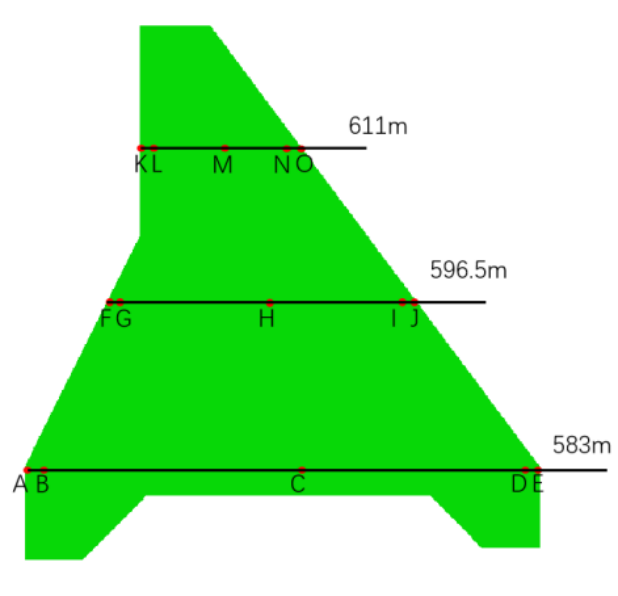


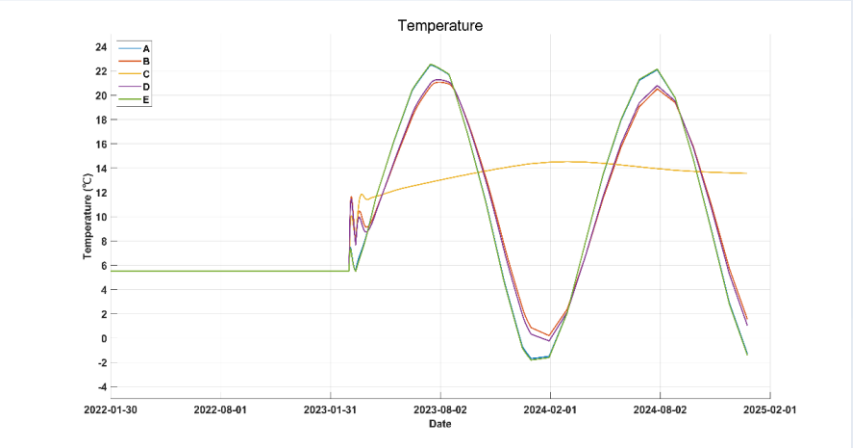
（3）温度仿真应力分析

主要内容

根据施工进度及二道坝结构特点，建立有限元模型进行**三维温度应力仿真分析**。得到坝体不同时期的温度应力分布情况，为实际施工提供温度应力数据参考，指导实际的温度监测。







（4）坝体施工仓面温度监测

根据二道坝一体化浇筑情况及有限元温度仿真分析结果，施工仓面的温度计监测点布设位置主要为：**上下游C40常态混凝土区域、C40常态混凝土与C25堆石混凝土交界面区域、C25堆石混凝土中间区域、块石体内部、基岩内部、施工横缝位置**。






（5）坝体施工仓面温度监测

根据块石入仓形成的不同堆石结构：块石正常堆积接触形成的**堆石体空隙**，块石与块石面面接触形成的**堆石体窄缝**，块石与底层混凝土接触的**层间结合面**，小粒径块石堆积形成的**逊径块石集中处**。布设若干**填充密实性检测仪器**检测堆石混凝土结构内部的填充效果。







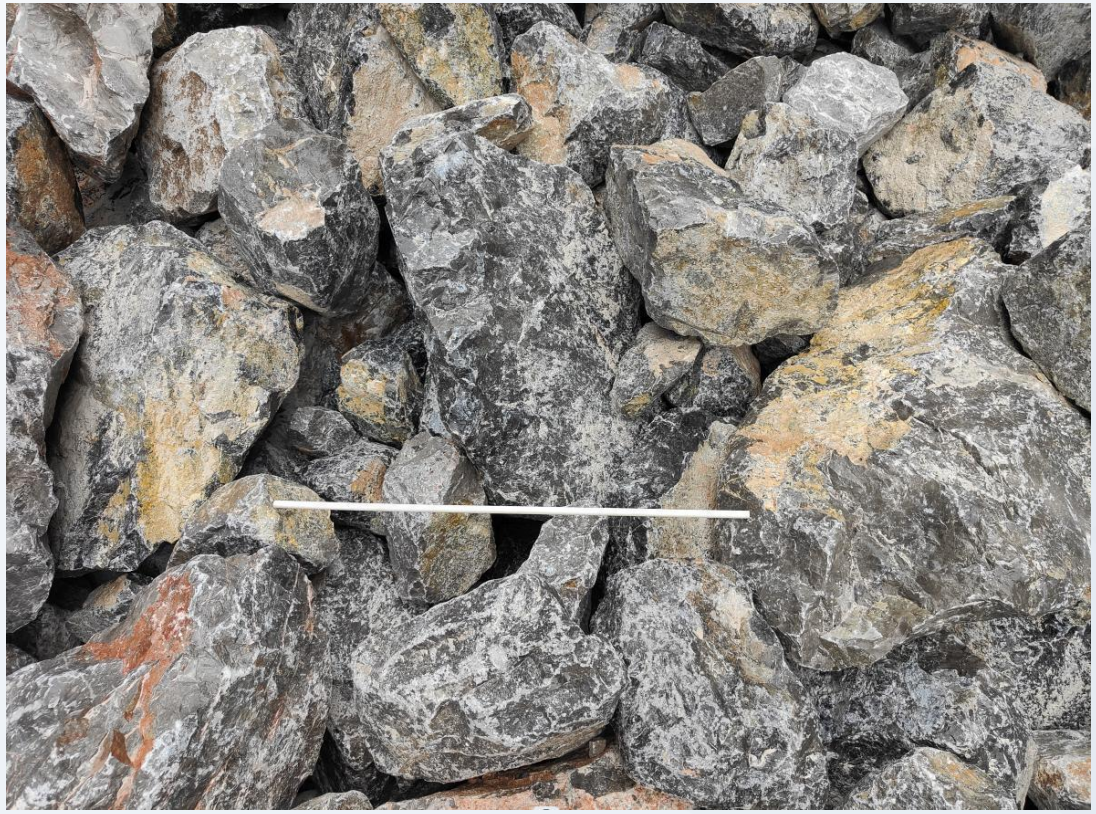




（6）坝体施工仓面堆石粒径照片获取

- 监控摄像头获取：调整摄像头的焦距截取带有参照物的照片，系统AI识别堆石粒径。
- 人工拍照获取：堆石完成后，按照一定的拍照方法及顺序规则，人工放置参照物拍摄堆石粒径照片。





（7）施工仓面原材料温度数据采集

二道坝施工浇筑过程中，采用手持式温度枪对拌合楼处的**砂**、**石**、**水泥**、**粉煤灰**、**水**等原材料进行温度监测，同时对施工仓面的**自密实混凝土**及**堆石表面**进行温度监测。









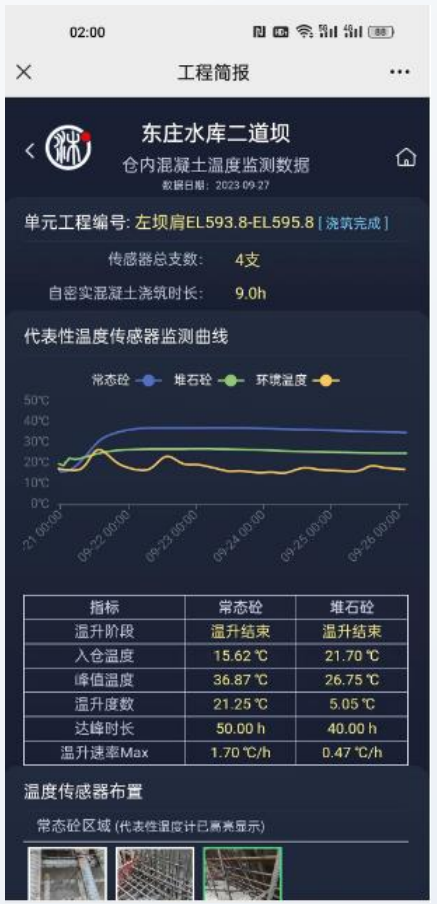


（8）工程简报推送

依托微信小程序，绑定现场人员角色，每天固定时间进行简报推送，包括环境量数据、堆石入仓质量数据评价结果、堆石混凝土工作性能情况、混凝土温度监测数据、填充密实性监测结果和系统预警情况统计。









（9）形成数据监测报告

单元工程数据监测完成后，第一时间分析撰写检测报告，将监测结果、质量问题、施工改进建议等反馈给工程相关相关单位。



4.4 二道坝堆石混凝土浇筑质量检测成果

- 混凝土芯样表面光滑、 芯样柱状连续、完整， 混凝土胶结好，骨料大小分布均匀，芯样成长柱状及短柱状，断口吻合较好，侧面见少量小气孔，且强度合格。
- 高自密实性能混凝土坍落扩展度和V形漏斗试验均检验合格；
- 堆石混凝土浇筑密实度、力学性能和抗渗性能均满足要求。



扩展度检测



坍落度检测



V漏斗时间检测



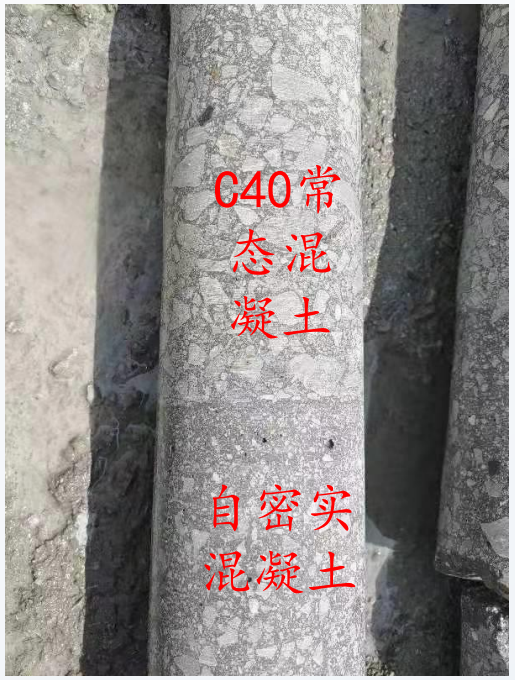
含气量检测



压水试验

4 堆石混凝土坝智能信息化应用







上图所取芯样为常态C40混凝土与C25自密实混凝土芯样，自密实混凝土外观棱角清晰、顺直，表面光洁、色泽一致，无麻面、孔洞；常态混凝土振捣密实，无蜂窝、孔洞等，并与自密实混凝土融合效果较好。C_{90}40W6F200常态混凝土与C_{90}25W4F100堆石混凝土可有效融合，并能够保证浇筑质量，抗压强度、抗冲耐磨强度及抗冻抗渗性能均满足设计要求。

4.5堆石混凝土智能信息化系统的建设意义

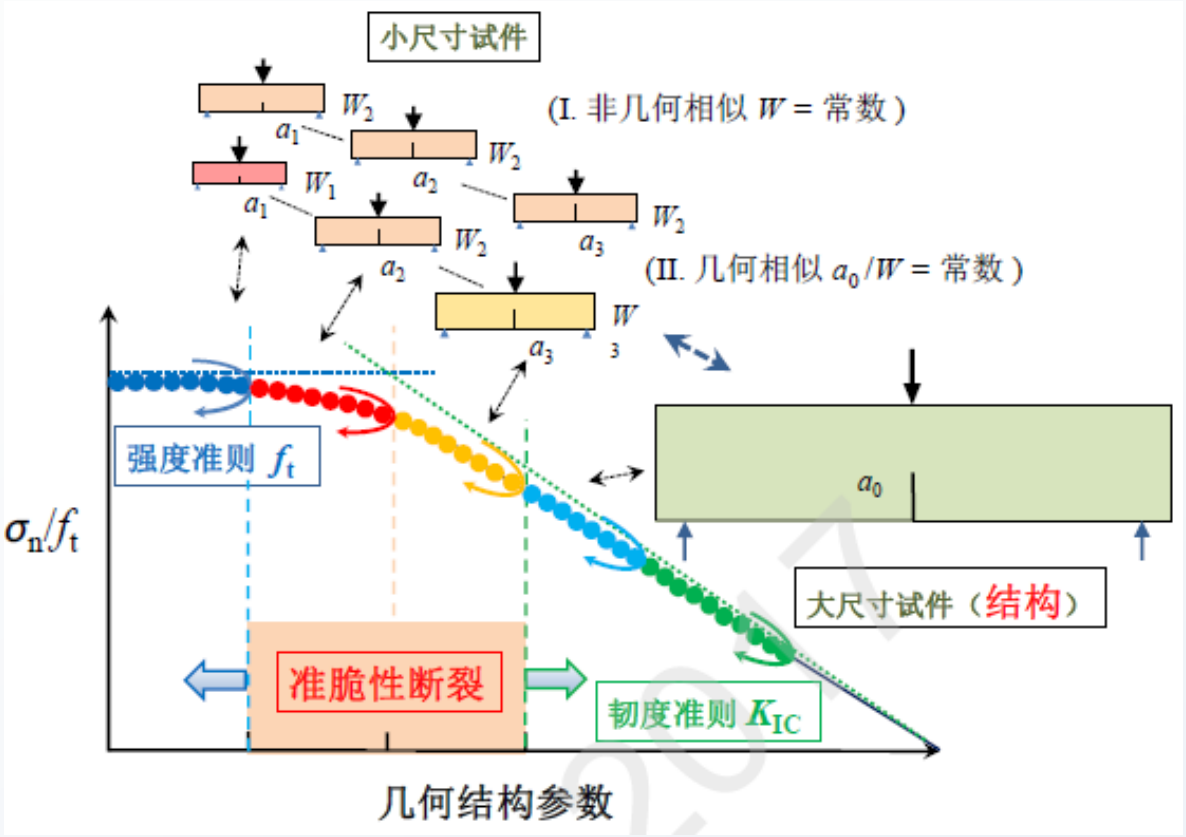
建设意义

- 实现东庄二道坝堆石混凝土的**数字化、信息化、精细化**建设与管理
- 东庄水库二道坝堆石混凝土的**建设及信息化系统**的应用，对堆石混凝土筑坝技术在**I级水工建筑物**中的应用具有**引领作用**，并对于**堆石混凝土**在水电行业的推广应用具有**示范意义**
- 通过开展东庄水库二道坝堆石混凝土施工质量智能信息化监测的专题研究与相关系统的实施应用，不仅可以对现场施工**提供有效的技术支撑**，进一步丰富**完善堆石混凝土筑坝理论体系**，积极响应了国家水利工程信息化建设的号召

5 科学试验

堆石混凝土力学性能尺寸效应及其细观机理

- 工程尺度堆石混凝土力学性能试验方法



普通混凝土和堆石料均有显著的尺寸效应，堆石混凝土更加复杂

普通混凝土尺寸效应规律及理论不一定适用于堆石混凝土

突破点

获得工程尺度的堆石混凝土等效标准试件力学性能指标

抗冲磨SCC开发与一体化工艺及构造设计方法

- 抗冲耐磨混凝土一体化浇筑工艺及构造设计方法













进行密实度与综合力学性能的测试与评价

结合一体化浇筑工艺

✓ 开展多因素组合的浇筑充填试验

提出可用于工程抗冲耐磨层一体化浇筑的工艺、质量控制标准与构造设计方法

抗冲磨SCC开发与一体化工艺及构造设计方法

- 抗冲耐磨混凝土一体化浇筑工艺及构造设计方法



提出可用于工程抗冲耐磨层一体化浇筑的工艺、质量控制标准与构造设计方法

研制出具有优异抗冲耐磨性能和较低水化热温升的自密实混凝土配合比，并确定设计方法及性能指标；提出可用于工程抗冲耐磨层一体化浇筑的工艺、质量控制标准与构造设计方法

5 科学试验

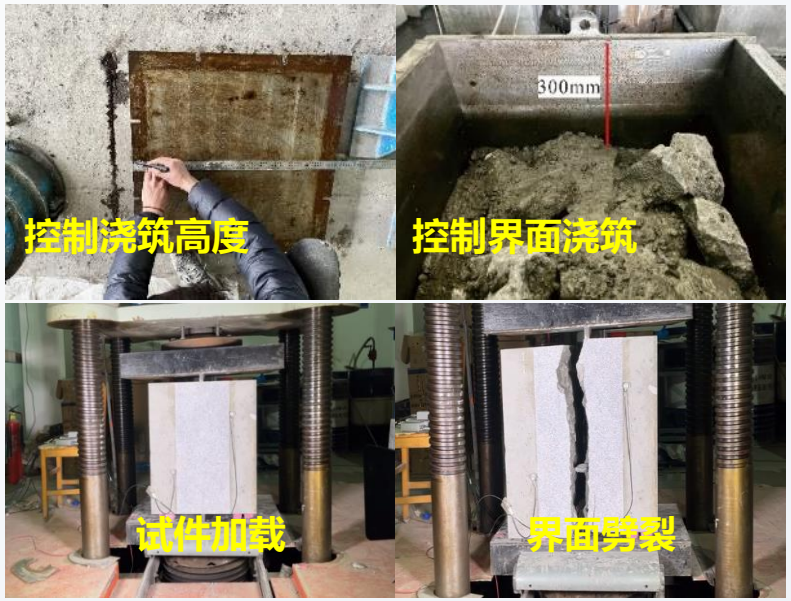
DZH WATER 东庄水利

➢ 堆石混凝土立方体抗压强度尺寸效应



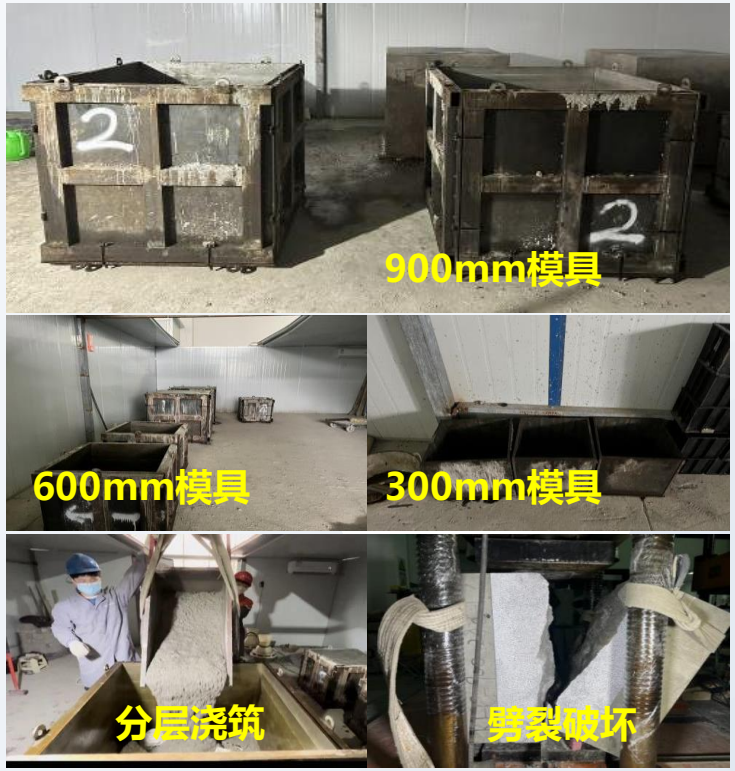
立方体抗压强度尺寸效应试验

➢ 一体化界面工程尺度劈裂抗拉性能



一体化界面劈裂抗拉试验

➢ 堆石混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应



劈裂抗拉强度尺寸效应试验

5 科学试验

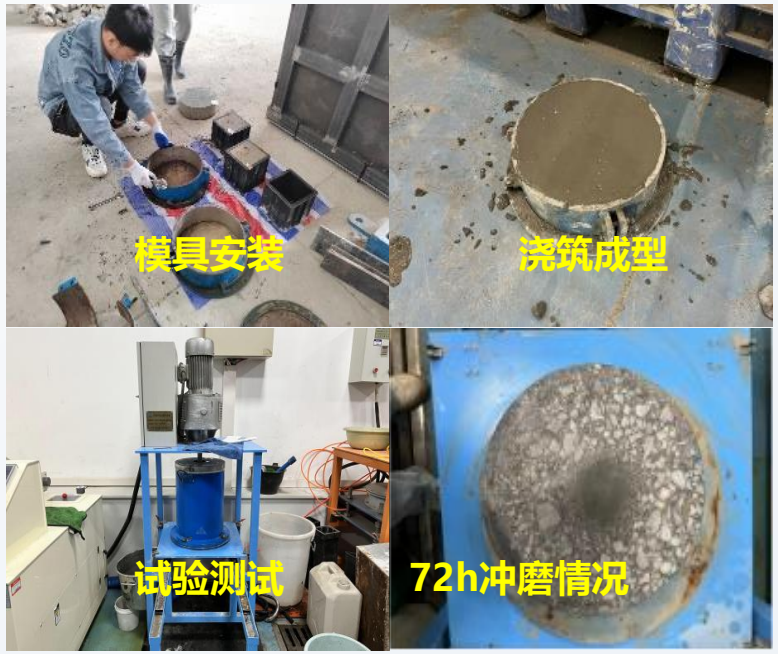
DZH WATER 东庄水利

➢ 高耐久自密实混凝土配合比优化设计



工作性能测试

➢ 面层高性能自密实混凝土抗冲耐磨性能



抗冲耐磨试验

➢ 工程尺度堆石混凝土立方体抗压性能

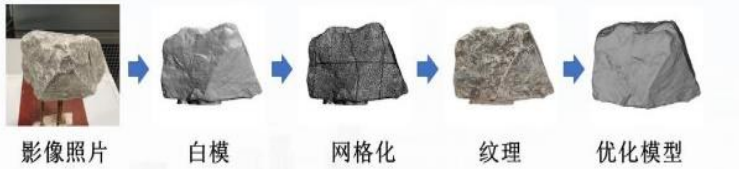


抗压强度测试

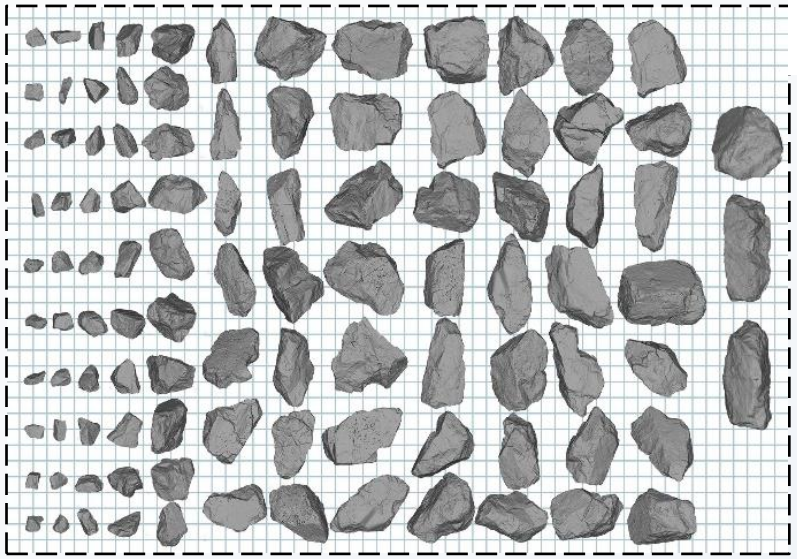
5 科学试验

➢ 基于倾斜摄影技术的堆石体三维模型

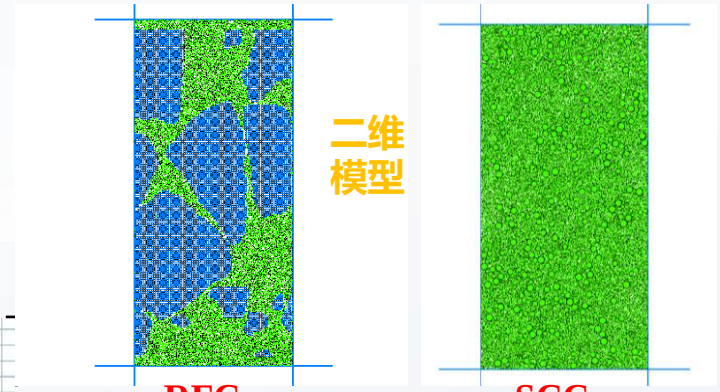
建模流程

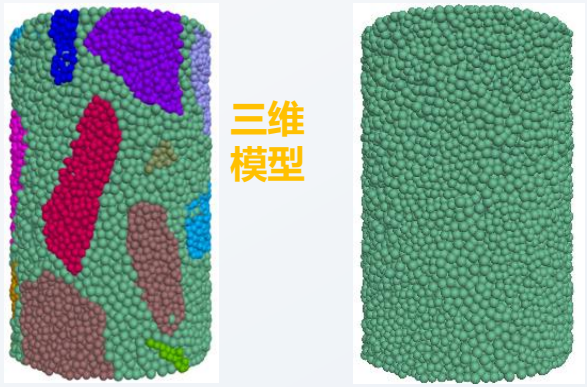


堆石料三维模型



➢ 堆石混凝土细观数值模拟





➢ 堆石混凝土层面抗剪性能



层面剪切强度试验

5 科学试验

首次采用堆石混凝土筑坝技术的I级水工建筑物，具有重要的研究与应用推广价值。

筑坝材料

- 室内试验
- 数值模拟
- 现场试验

- 堆石混凝土力学性能尺寸效应及其细观机理
- 开发抗冲磨自密实混凝土并建立其一体化施工工艺及构造设计方法

标志性工程 + 突破性研究 = 堆石混凝土技术迈上新台阶

为工程决策提供依据，也为国内外类似工程设计与施工质量控制提供参考。

请各位专家批评指正，谢谢！