

科技进步奖特等奖项目 2:

锦屏二级超深埋特大引水隧洞发电工程关键技术

完成单位:

雅砻江流域水电开发有限公司	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
中国科学院武汉岩土力学研究所	四川大学
中国水利水电第七工程局有限公司	中铁十八局集团有限公司
中国水利水电第五工程局有限公司	江南水利水电工程公司
北京振冲工程股份有限公司	中铁二局股份有限公司

主要完成人:

张春生、陈云华、陈祥荣、吴世勇、冯夏庭、单治钢、王继敏、周辉、周垂一、侯靖、曾雄辉、吴旭敏、曾新华、潘溢斌、周济芳、鞠小明、张鹏、胡建华、杨安林、李军、冯艺、周春宏、揭秉辉、张洋、李元、刘宁、杨洋、褚卫江、张伟、黄靖乾、吴疆、方杰、曹强、廖卓、杨家松、沙宗天、陈念辉、郑晓红、赵国平、马鹏

锦屏二级水电站装机 4800MW，是我国“西电东送”骨干工程，4条世界埋深最大、规模最大的引水隧洞群为关键控制性工程，长距离穿越高山峡谷岩溶地区，特殊的地质和工程条件带来诸多世界级技术挑战：（1）**超埋深超高地应力**：埋深 2525m 为世界最大埋深水工隧洞群，实测地应力 113.87MPa 为世界地下工程实测最大值，易引发强烈岩爆，严重威胁隧洞施工与人员设备安全；（2）**超高压大流量岩溶地下水**：实测地下水压力 10.22MPa 为世界水电工程实测最高值，实测单点突涌水量高达 7.3m³/s，高压大流量突涌水严重危害施工安全与工程进度；（3）**超深埋隧洞成洞**：100MPa 级超高地应力与 10MPa 级超高外水压力耦合作用下，如何保证隧洞成洞与结构安全，国内外既没有成熟技术可循，也缺乏成功案例可借鉴；（4）**复杂水力瞬变流**：单洞装机 1200MW，引水发电系统长 17.5km、发电流量 457m³/s，水体惯性巨大、波动幅度强烈，特大长引水式电站灵活稳定运行受限，对“西电东送”电网安全和供电品质影响重大。主要创新成果如下：

1. **创建了超深埋特大隧洞强烈岩爆风险预测与防控集成技术体系**。提出了超高地应力场测试分析和岩爆风险分区新方法，构建了岩爆风险多指标评价系统，首创了“超前诱导释放能量，时空分序强化围岩”的岩爆防控集成技术体系。攻克了 100MPa 级超高地应力强烈岩爆区隧洞安全施工难题。

2. 提出了超高压大流量岩溶突涌水灾害预测预警与防治成套技术。建立了高山峡谷岩溶水孕育演化、突涌运移规律的非线性分析预测方法，提出了突涌水灾害风险多尺度递进识别与预警方法，研发了超高压大流量地下突涌水治理成套技术。解决了千米水头级超高压大流量地下突涌水高效治理难题。

3. 建立了超深埋特大隧洞成洞设计方法。构建了超深埋条件下反映真实围岩性状的围岩分类体系，提出了以“抑制围岩时效破裂”为核心的超深埋隧洞成洞和围岩稳定控制方法，建立了以围岩为主体的复合承载结构设计方法。破解了超高地应力和超高外水压力耦合作用下特大隧洞建设的世界级难题。

4. 创新了长大引水发电系统机电一体化水力设计方法和调控方法。提出了大流量长隧洞高压引水发电系统机电一体化水力瞬变流计算方法，建立了以全新差动式调压室为核心的水力调节设计方法，研发了引水发电系统机电一体化精准反馈智能调控技术。实现了大流量长引水式电站的安全稳定灵活运行。

项目成果全面支撑了锦屏二级超深埋特大引水隧洞发电工程建设，攻克了高地应力、高压突涌水、水力瞬变流调控等世界级技术难题，安全优质高效地完成了工程建设，保证了电站的提前发电和安全运行。利用本项目成果建成了中国首个世界最深的地下实验室—中国锦屏地下实验室，对于推动重大基础前沿课题研究意义重大。项目成果推广应用于福建仙游、浙江仙居等多个大中型水电站的工程实践中，解决了一系列复杂水力瞬变流关键技术难题，优化了电站运行方式，确保电站按期并网发电，产生了良好的经济效益。

研究成果已在锦屏二级水电站成功实践，并广泛推广应用于水利水电、矿山、交通等多个工程领域，极大推进了本领域的科技进步，并作为技术攻关成功范例写入《电力发展“十三五”规划》，对此后我国深埋地下工程建设起到引领和示范作用。

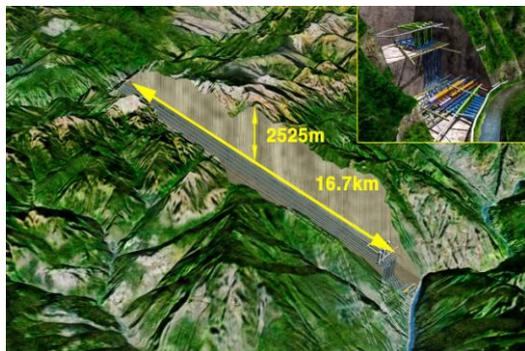


图1 锦屏二级电站引水发电隧洞剖面图



图2 运行一年后引水隧洞放空检查

科技进步奖特等奖项目 3:

水电工程 600m 级高陡边坡变形稳定控制与开挖加固技术

完成单位: 中国水利水电第七工程局有限公司 四川大学
中国水利水电第八工程局有限公司 中国水利水电第四工程局有限公司
中国水利水电第三工程局有限公司 雅砻江流域水电开发有限公司
中国水电建设集团十五工程局有限公司

主要完成人: 席浩 戴峰 尹岳降 向建 王鹏禹 李洪涛 吴旭 李克信
秦健飞 廖勇 周家文 李正兵 王裕彪 陈勇 李国君 赵海洋
杨兴国 牛宏力 王飞跃 李玉凡 廖军 雷永红 彭湘华 王永
姚强 殷本林 王小升 李才平 罗永红 周宏伟

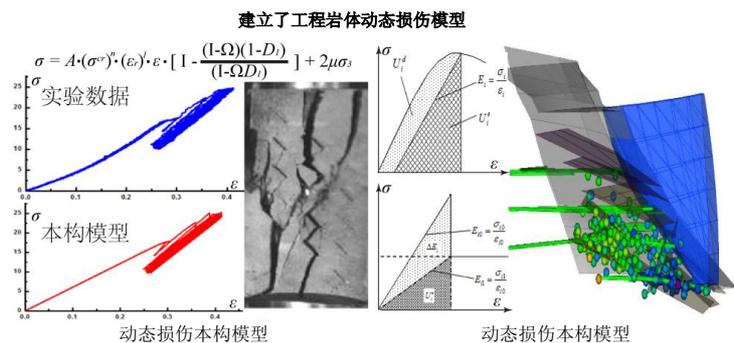
我国主要的水电工程集中在高山峡谷地区,地质条件复杂、河谷深切,巨型水电工程开挖边坡高度达 600m 级,坡度高达 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。高陡边坡赋存地质缺陷和大规模不稳定体,变形失稳机理极其复杂,高拱坝开挖边坡高度达 600m 以上,坡度陡峻,爆破开挖与变形控制难度巨大,高陡边坡施工与运行安全是制约水电工程的突出难题。本项目通过近二十年的产学研协同攻关,形成了系统的高陡边坡变形稳定控制与开挖加固技术,攻克了锦屏、小湾等水电工程边坡施工的世界级技术难题,主要进展如下:

1. 提出了工程岩体动态损伤破坏新理论

提出了岩石断裂属性实验测定新方法,揭示了岩体动态响应机理,建立了岩体动态损伤模型,形成了工程岩体动态损伤破坏理论,提升了对工程岩体随开挖损伤后真实力学参数的实时认知,显著提高了边坡稳定性分析

的准确性,为特高陡边坡工程变形稳定施工控制提供了指导。理论研究成果提升了对岩体动态损伤特征与破坏机理的科学认知,被国际岩石力学学会推荐作为负责人制定岩石断裂实验新的标准方法。

2. 建立了边坡稳定性反馈分析新方法

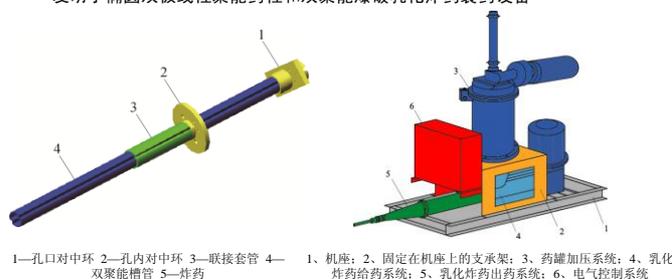


研发了水电工程边坡施工信息三维可视化动态管理系统，创建了边坡开挖与加固时空间距的动态协调方法和变形稳定量化控制指标，实现了边坡施工过程的三维动态模拟和监测预报预警，为施工工序动态协调提供了决策支持。

3. 提出了一套边坡控扰开挖的施工新技术

提出了双聚能预裂爆破方法，研发了用于预裂和光面爆破的椭圆双极聚能药柱及装药设备，有效地提高了预裂爆破的质量及效率；研究采用了高精度延时雷管及与岩性匹配的炸药，科学分层分区，有效控制了爆破对边坡的振动影响；研发了系列开挖钻孔工艺和机具，有效提高了钻孔质量和复杂开挖形体精度。成果形成国家级工法 3 项，纳入多项规范并得到广泛应用，双聚能预裂与光面爆破技术在 2010 年作为建筑业 10 大新技术之一被住房和城乡建设部向全国推广。

发明了椭圆双极线性聚能药柱和双聚能爆破乳化炸药装药设备



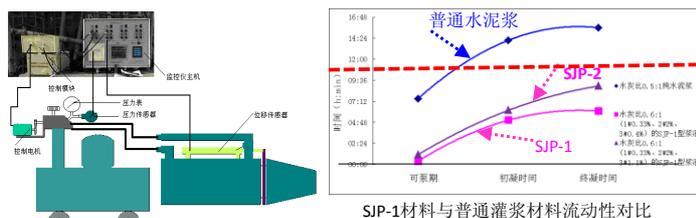
开挖成型的溪洛渡拱坝坝肩边坡



4. 研发了一系列高陡边坡加固处理的施工新技术

研发了 100m 级超深长锚索高精度快速钻孔技术，研制了锚索孔固端新材料和锚索液压自动送索与张拉监控系统，解决了复杂地质条件下大吨位超长锚索施工难题；首创软弱破

发明了锚索张拉自动监控系统和粘度时变性水泥基灌浆材料



碎带高压对穿冲洗置换新方法，建立了出渣量光滑粒子模型计算方法，创建了两管法高压风水旋转往复联合冲洗工艺。形成了锚固、灌浆、置换的成套边坡加固技术。成果获十余项发明专利，纳入多项规范，应用于小湾、锦屏一级等工程，解决了百米级深长锚索成孔、锚固和煌斑岩脉加固等世界级难题。

成果已成功应用于锦屏、溪洛渡、高摩赞等近百座国内外大中型水电工程，并推广应用用于交通、铁路、矿山等行业。工程项目获国际里程碑工程奖 4 项、国家优质工程金奖 3 项、中国建设工程鲁班奖 4 项。