

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

特高拱坝结构性态诊断与监控方法述评

赵二峰, 顾冲时

Review on diagnosis and monitoring methods of structural behavior of superhigh arch dams

ZHAO Erfeng, GU Chongshi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211203005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特高拱坝动态安全风险分析系统研发及应用

Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam

水利水电工程学报. 2020(1): 112 <https://doi.org/10.12170/20181201002>

特高拱坝运行初期变形监测预报模型及构建方法

Deformation forecasting model and its modeling method of super high arch dams during initial operation periods

水利水电工程学报. 2020(5): 63 <https://doi.org/10.12170/20190908001>

库区滑坡涌浪三维数值模拟分析

Three-dimensional numerical simulation analysis of landslide surge in reservoir area

水利水电工程学报. 2020(6): 64 <https://doi.org/10.12170/20191125002>

考虑非饱和渗流的谷幅变形对高拱坝影响分析

Analysis of the influence of valley width deformation on high arch dam considering unsaturated seepage

水利水电工程学报. 2021(4): 36 <https://doi.org/10.12170/20210114003>

基于安全监测的水闸健康诊断体系研究

Analysis of sluice health diagnosis system based on safety monitoring

水利水电工程学报. 2018(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.001>

考虑坝体-地基接触效应的特高心墙堆石坝结构安全性研究

Study on safety of a high earth-core rockfill dam considering contact effect between dam and foundation

水利水电工程学报. 2019(6): 107 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.012>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211203005

赵二峰, 顾冲时. 特高拱坝结构性态诊断与监控方法述评[J]. 水利水运工程学报, 2023(1): 16-26. (ZHAO Erfeng, GU Chongshi. Review on diagnosis and monitoring methods of structural behavior of superhigh arch dams[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1): 16-26. (in Chinese))

特高拱坝结构性态诊断与监控方法述评

赵二峰, 顾冲时

(河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 我国已建、在建多座特高拱坝工程, 这些工程往往面临着高水头、高边坡和复杂地质条件等特殊服役环境, 其设计、施工及安全监控等技术指标突破了现行规范适用范围和以往的工程认知。与一般大坝相比, 特高拱坝工程复杂程度高, 结构的力学行为具有独特特征, 工程建设和运行安全控制要求更为严格。论述了坝体体型工程经验性评价参数、地质力学模型试验、数值模拟仿真分析等特高拱坝结构性态诊断关键技术, 以及施工质量控制、温控防裂、跟踪监测反馈等安全监控技术; 在此基础上, 指出了特高拱坝长效服役健康诊断与安全控制的前沿热点问题, 包括时空演化特征挖掘方法、服役风险率实时诊断模型、结构安全动态控制模式、智能感知与超前预警技术等。研究可指导特高拱坝的建设和运行管理。

关键词: 特高拱坝; 结构性态; 模型试验; 数值模拟; 安全监控

中图分类号: TV698

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)01-0016-11

20 世纪 90 年代以来, 我国的高混凝土拱坝建设取得了较大进展, 已建的坝高超过 200 m 的特高拱坝有 7 座(锦屏一级、小湾、溪洛渡、拉西瓦、二滩、构皮滩和大岗山), 在建的有白鹤滩、乌东德等, 这些工程在国家能源供应安全保障中占有重要地位, 发挥了巨大的社会效益。但由于工程坝址地质条件极其复杂, 工程安全常受到高水推力、高边坡、高地应力等特殊环境的制约, 很多工程安全技术指标已经突破了现行规范的适用范围和标准, 给工程建设和运行等带来了诸多难题。与一般大坝工程相比, 特高拱坝工程复杂程度随坝高成倍增加, 结构的力学行为具有独特特征, 工程实践经验仍比较缺乏。与此同时, 特高拱坝在长期服役过程中, 结构性能随着时间逐步损伤和退化, 超高的坝体与复杂的服役环境给特高拱坝安全运行带来了极大挑战。

本文从拱坝体型工程经验性评价参数、模型试验、数值模拟和安全监控等方面论述特高拱坝结构性态诊断与监控方法研究进展, 针对特高拱坝长期服役性能演化和安全控制, 指出今后研究的前沿热点。

1 特高拱坝结构性态诊断关键技术

近年来建设的多座特高拱坝, 坝基断层、裂隙、卸荷带等极大地影响了地基整体稳定性, 在巨大库水推力作用下, 基础破坏、坝踵开裂、坝肩稳定、抗震设防等均超出现有规范适用范围^[1], 特高拱坝结构性态安全控制面临着严峻挑战。

1.1 工程经验性评价参数

拱坝体型是决定其结构性态安全的主要因素之一, 我国特高拱坝工程体型特征如表 1 所示。为适应河谷形状、改善稳定与应力状况, 采用了抛物线拱、椭圆拱和对数螺旋线拱。拱坝体型设计时, 通常采用拱梁

收稿日期: 2021-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079046, 51779086, 51739003); 中央高校基本科研业务费项目(B210202017)

作者简介: 赵二峰(1986—), 男, 安徽亳州人, 教授, 博士, 主要从事水工结构安全监控与健康诊断研究。

E-mail: zhaoerfeng@hhu.edu.cn 通信作者: 顾冲时(E-mail: csgu@hhu.edu.cn)

分载法计算坝体应力,以应力水平和分布规律为判据,并复核坝肩抗滑稳定,进行多方案比选优化确定。不同的拱坝体型,即使坝体混凝土方量不变,拱坝安全度可能会有很大差异。

表 1 我国特高拱坝工程体型特征
Tab. 1 Shape characteristics of superhigh arch dams in China

序号	坝名	水平拱型	坝高/m	坝顶弧长/m	拱冠厚度/m		厚高比	弧高比	中心角/°
					顶部	底部			
1	锦屏一级	抛物线	305.0	552.43	16.00	63.00	0.207	1.811	93.55
2	小湾	抛物线	294.5	892.79	12.00	72.91	0.248	3.032	90.10
3	白鹤滩	椭圆	289.0	708.70	14.00	63.50	0.218	2.450	96.43
4	溪洛渡	抛物线	285.5	581.51	14.00	60.00	0.210	2.037	95.60
5	乌东德	抛物线	270.0	326.95	11.98	51.41	0.190	1.211	101.79
6	拉西瓦	对数螺旋线	250.0	475.80	10.00	49.00	0.196	1.903	92.40
7	二滩	抛物线	240.0	769.00	11.00	55.74	0.232	3.204	91.50
8	构皮滩	抛物线	230.5	552.55	10.25	50.28	0.216	2.377	88.00
9	大岗山	抛物线	210.0	622.42	10.00	52.00	0.248	2.964	93.50

为综合反映河谷跨度及拱坝形态的影响,Lombardi 于 1986 年提出用柔度系数 C 对拱坝体型厚薄及安全作经验性评估。

$$C = F^2 / (VH) \tag{1}$$

式中: F 为拱坝中曲面的展开面积(m^2); V 为坝体基本体型的混凝土方量(m^3); H 为最大坝高(m)。

对于相同坝高 H 来说,体积越大,坝体相对厚度越大, C 值越小,坝越安全。图 1(a) 为已建拱坝的柔度系数随坝高的分布,大多位于 10~20。图中虚线是 Lombardi 建议的破损曲线 $C=25-0.05H$,用于对拱坝是否发生开裂破坏进行经验性判别。可以看出,凡是坝高和柔度系数落在这条直线以上的拱坝,发生开裂破坏的可能性都很大。但是对于 300 m 级小湾和锦屏一级特高拱坝,都没有在 Lombardi 破损线中得到有效反映。为此,有学者提出了包含坝体混凝土强度参数的修正曲线^[2],图 1(a) 中的点划线为与坝体混凝土容许压应力 $\sigma=10\text{ MPa}$ 对应的破损线;也有学者将抗压强度用抗拉强度代替^[3],图 1(b) 为对应坝体混凝土抗拉强度 $\sigma=1.5\text{ MPa}$ 时的破损线。世界上已建拱坝的高宽比大都介于 1/3~1,而失效或破损拱坝的高宽比都比较大。

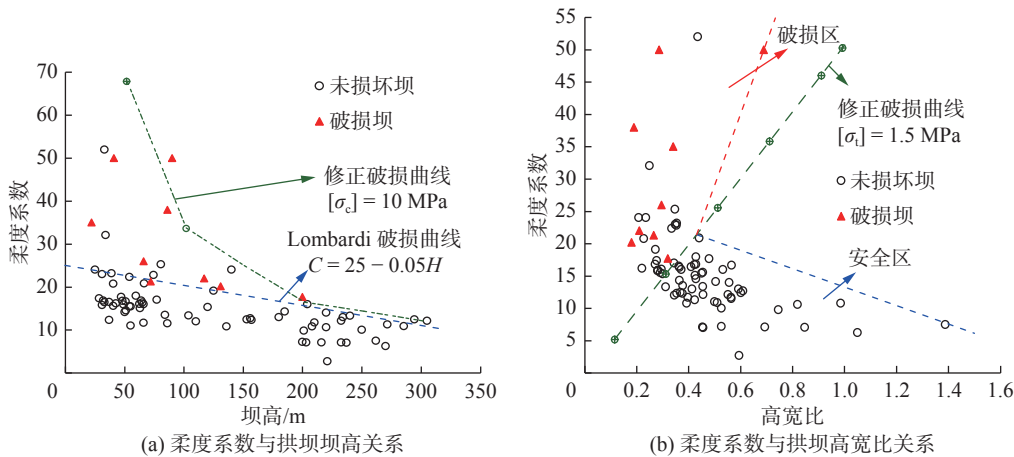


图 1 典型拱坝柔度系数分布

Fig. 1 Flexibility coefficient distribution of typical arch dams

参照现行规范(SL 282—2018),拱坝设计主要关注坝体强度及坝肩稳定性;但体型设计时的影响参数很多,尤其是特高拱坝高强度混凝土的应用,拱坝几何形状和位移、应力、抗裂、结构稳定、坝基开挖等边界条件都极其复杂。这些工程经验性参数仅能粗略地对拱坝体型合理性进行评价,大体上作为拱坝安全的经验判据。

1.2 模型试验

特高拱坝地质力学模型试验主要用于研究坝体与坝基坝肩的整体稳定性及其破坏形态,通过测量缩尺模型大坝与地基在超载、降强或两者结合作用下的变形分布特性和变化规律,获得拱坝破坏模式、破坏路径及工程综合安全度。如大岗山^[4]、乌东德^[5]、白鹤滩^[6]等项目研究中利用超水荷载法,模拟了拱坝及基础从加荷到失稳破坏的变形特征和裂缝发展过程,采用三安全度技术评价了工程整体稳定性;利用综合试验法,探究了小湾^[7]、锦屏一级^[8]、溪洛渡^[9]等工程大坝、坝基和两岸坝肩变形变化规律及拱坝失稳破坏形态,揭示了特高拱坝整体失稳破坏机理。这些模型试验直观展示了特高拱坝坝体局部开裂和裂缝扩展及变形失稳全过程,不仅为特高拱坝坝基、坝肩加固处理提供了依据,也推动了模型试验技术的发展,如采用可溶性高分子材料研发了变温相似材料^[10]、研制了获取内部结构面相对位移的测量仪器^[11],创建小块体砌筑法^[12]及声发射技术^[13]等。尽管如此,这些特高拱坝模型试验难以对温度变化、基础渗流等进行模拟,得到的整体安全度也仅作为参考,而且试验耗时长、费用高,有时无法满足工程实际需求。

1.3 数值模拟

对于坝基地质条件较为复杂的特高拱坝,现行规范规定在采用拱梁分载法和弹性有限元等效应力法进行分析的基础上,要同时考虑采用非线性有限元法进行弹塑性分析。弹塑性力学、损伤力学、断裂力学等宏-细观力学理论,以及边界元、离散元、流形元、颗粒流等数值分析方法,均被应用于特高拱坝结构性态的仿真模拟分析。

1.3.1 坝基处理加固效果评价 目前规范中对坝高 200 m 以下拱坝坝基可利用岩体选择作定性描述;而坝高 200 m 以上的特高拱坝坝基普遍存在风化卸荷现象,还受到复杂断层、层间错动带及节理裂隙切割等影响(表 2),给工程结构安全保障带来极大挑战。特高拱坝坝基最大压应力为 7~10 MPa,破坏模式为压剪破坏。结合国内 7 座已建特高拱坝建基面岩体特性,特高拱坝通常要求岩石坚硬完整、变形模量高及具有较高的抗剪强度^[14]。白鹤滩、溪洛渡等大坝利用柱状节理岩体为基础,这种坝基力学指标较低,开挖后易卸荷松弛,为此,白鹤滩大坝在利用离散元模拟柱状节理岩体卸荷松弛过程的基础上^[15],采用变形加固理论计算扩大基础对拱坝局部和整体稳定性的加固效果^[16],揭示了特高拱坝具备适应这种基础岩体的能力^[17]。此外,三维非线性有限元模拟分析表明,小湾、白鹤滩和乌东德等大坝基坑回填土石体能够延长特高拱坝基础渗流路径、提高坝面保温和大坝抗震性能^[18],乌东德采用的“表封闭、浅加密、深提压、严监控、少引管”的全坝基无盖重固结灌浆技术^[19]有效解决了坝基加固与坝体浇筑间相互影响的难题。与一般拱坝不同,特高拱坝坝基加固处理措施更为复杂多样。鉴于特高拱坝坝基与坝体的交互作用,未考虑变形调整的刚体极限平衡法和以弹性设计为主的拱梁分载法在特高拱坝结构性态评价中的应用均有较大的局限性,尤其是特高拱坝坝基普遍存在的卸荷松弛,使得特高拱坝非线性变形和局部开裂损伤破坏的研究显得尤为重要。

1.3.2 坝体开裂分析 通常坝体应力水平与坝的高度成正比,特高拱坝总体应力水平较一般拱坝的要高。利用拱梁分载法计算得到的最大应力如表 2 所示。特高拱坝最大拉应力为 1.0~1.2 MPa,应力安全储备相对较小,混凝土局部开裂可能造成坝体应力普遍超限,严重威胁拱坝安全。坝体开裂主要是由温度变化和所受结构约束引起,比如小湾大坝浇筑至中下部高程时相继发现诸多温度裂缝^[20],主要分布在 1 100 m 高程以下但未延伸至基础,顶端均止于限裂钢筋处;裂缝沿坝轴线方向分布,且不连通,在横缝处错开;裂缝高度大多为 20~50 m,平均缝宽约 1.7 mm,其中不大于 1 mm 的占 13.3%、1~2 mm 的占 56.1%、2~3 mm 的占 27.6%、超过 3 mm 的占 3.0%;这些裂缝处于压剪状态,对大坝影响较小^[21]。近年来,断裂力学理论^[22]、格构模型和有限元耦合方法^[23]等均被用于研究小湾、溪洛渡、白鹤滩等特高拱坝坝体裂缝和上游坝面损伤裂缝

产生及扩张的影响。此外,比例边界元^[24]在特高拱坝坝体-基础交互动力作用模拟中得到进一步应用,地基辐射阻尼、坝体横缝与混凝土断裂耦合模型也被应用于模拟大岗山拱坝抗震开裂过程^[25],考虑基础辐射阻尼和接缝张开的非线性并行动力计算方法也被研发用以评估拱坝地震损伤敏感性^[26-28]。由于特高拱坝分期施工、浇筑程序、蓄水进度对坝体应力影响较一般拱坝更加显著,在巨大水推力通过拱-梁效应传递至两岸后,坝基和坝肩山体内部的应力条件十分复杂,有可能在不断恶化条件下导致拱坝整体破坏失效。因此,在对特高拱坝工程进行合理设计、规范施工及易损部位加固处理的同时,尚需开展坝踵、坝趾、基础软弱断层等破坏多发部位在高应力梯度、高渗透压力和温度变化的耦合作用下的受力机制研究。

表 2 我国特高拱坝应力水平

Tab. 2 Maximum principal stresses of superhigh arch dams in China

单位: MPa

序号	坝名	坝基岩性	最大应力	
			拉应力	压应力
1	锦屏一级	微风化弱卸荷Ⅲ ₁ 类大理岩、砂板岩为主	1.19	9.64
2	小湾	微-新黑云母花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩为主	1.10	9.80
3	白鹤滩	块状玄武岩为主,河床部位出露角砾熔岩	1.03	8.82
4	溪洛渡	弱风化下段玄武岩为主	1.14	9.20
5	乌东德	灰岩、白云岩、大理岩化白云岩为主	0.99	7.22
6	拉西瓦	花岗岩和变质岩微-新岩体为主	1.18	7.97
7	二滩	正长岩、玄武岩的弱风化下段为主	0.99	8.82
8	构皮滩	灰岩,建于Ⅰ、Ⅱ级岩体,局部Ⅲ级岩体	1.00	7.00
9	大岗山	中、低高程微-新花岗岩,上部为弱风化下段	0.48	6.04

注:拉应力均发生在坝踵、压应力均发生在下游坝面。

1.3.3 坝肩稳定评价 特高拱坝结构性态安全不仅取决于坝基的安全和坝体结构的安全,坝肩抗滑稳定也是工程安全的关键,尤其坝肩断层、软弱结构面易引起拱坝基础的非协调变形,造成坝体局部开裂等使得整体失稳破坏。因此,边坡岩体爆破效应量化、加固治理、监测预警及长期运行安全评价等成为了西南地区特高拱坝边坡工程治理的关键技术^[29]。与此同时,针对坝肩不利结构面的加固处理显得尤为重要,特高拱坝普遍采用了混凝土垫座、格栅、平洞置换、固结灌浆等边坡加固措施。锦屏一级、小湾、乌东德等大坝均采用非线性有限元^[30-31]或刚体弹簧元^[32]计算评价了坝肩抗力体不利结构面对大坝变形、开裂等的影响,针对性地采取了综合加固措施以保证坝肩边坡长期稳定。尽管如此,准确评价坝肩变形稳定和抗滑稳定仍十分困难,这主要是坝肩岩体复杂工程地质条件、水文地质条件及岩体力学特性在数值计算中无法精确模拟造成的,加之除坝体推力外,岩体自重、渗透压力、初始应力等都将产生重要影响,勘测、试验等手段的制约导致了特高拱坝坝肩稳定性评价的复杂性。

1.3.4 拱坝整体稳定评价 拱坝整体稳定性是指拱坝与坝基、坝肩组成的非线性结构系统在极限荷载作用下抵抗变形破坏的能力,尤其是特高拱坝工程地质条件极为复杂,其整体稳定评价已超出了现行规范适用范围。从拱坝整体稳定出发,可以认为拱坝的破坏是局部屈服、损伤和开裂等不断积累最终影响工程系统稳定的过程。因此,能够反映坝体混凝土和坝基岩体非线性特征的FLAC^{3D}显式有限差分法^[33]、黏塑性损伤模型^[34]、塑性余能范数^[35]等被广泛用于模拟特高拱坝整体失稳这种复杂非线性变化行为,比如特高拱坝时效变形、损伤演化过程、渐进破坏模式等,以揭示局部破坏和拱坝超载变形稳定时空演化机制。此外,我国特高拱坝大都处于高地震烈度区,工程地震危险性分析和抗震安全性评价至关重要,文献^[36-39]考虑坝体接缝张开、混凝土开裂、坝肩滑动、基础辐射阻尼效应等,研究了大岗山、白鹤滩拱坝地震易损性和失稳

模式。总体来看,特高拱坝整体稳定性分析仍依赖工程经验进行极限安全评估,缺乏完备的评价体系和控制标准,采用常规非线性有限元对特高拱坝安全评价时,对极限承载过程中的破坏模式和破坏层次尚不够明晰。

1.3.5 库盘和谷幅变形分析 特高拱坝水库蓄水期间,库水自重或渗透作用及温度场变化等将引起库岸边坡的变形效应^[40],使得谷幅呈下部扩展、上部缩窄的变形状态,同时使得拱坝产生一定的向上游倾倒变形。究其原因,坝址复杂地质条件、基岩开挖引起的岩体卸荷、蓄水后库盘水压和岸坡渗流场变化及坝基软弱结构面时效变形等均是特高拱坝谷幅和弦长收缩变形的诱发因素^[41]。锦屏一级拱坝采用考虑裂隙水压力的 Drucker-Prager 屈服准则进行了蓄水期库盘变形模拟^[42],揭示了裂隙水压力产生的塑性变形是谷幅收缩主要驱动力,并评估了非饱和渗流引起的谷幅变形对坝体挤压作用造成的结构性态变化的影响^[43];溪洛渡拱坝谷幅变形主要归因于库盘水压、基岩温降、蓄水期近坝区水文地质条件变化引起的岸坡蠕变等^[44];白鹤滩大坝的谷幅变形模拟则从库水入渗引起软弱结构面摩阻力降低角度出发,开展了边坡岩体遇水弱化效应敏感性分析^[45]。可见,特高拱坝库盘和谷幅变形影响因素众多,对库盘和谷幅变形诱发机制尚缺乏科学合理的解释。同时,现有数值模拟大都仅局限于近坝区,库盘和谷幅变形计算成果与实测结果难以吻合,对特高拱坝结构性态产生的影响也无法精准评估,这成为了坝工界面临的新课题。

2 特高拱坝结构性态安全监控技术

我国特高拱坝对施工建设和运行安全控制要求极高,通过对特高拱坝实际工作性态开展适时分析评价和控制,包括施工质量控制、坝体温控防裂、跟踪监测反馈等,能够达到对工程建设过程及正常运行期间实施安全监控的目的。

2.1 施工质量控制

特高拱坝坝基开挖使得围压解除产生基岩松弛效应,会影响坝体应力分布和拱座稳定性。锦屏一级特高拱坝对坝基出露 f_2 断层进行了刻槽开挖、混凝土置换等,对复杂地质断层进行了水泥灌浆加固^[46],采取“先阻后排、防排并举”的帷幕防渗和排水的实施效果较好^[47];白鹤滩拱坝针对复杂地质条件,采用长短期记忆网络估计了左岸基础卸荷松弛深度^[48],以及利用实测抬动位移资料,建立坝基分区等效灌浆压力模型^[49],通过控制拱坝抬动来选择恰当的灌浆时机。与此同时,随着水电工程数字化、智能化的发展,利用现代传感、卫星通信、大数据挖掘、虚拟现实、数值仿真等技术针对溪洛渡、乌东德、白鹤滩等大坝,创建了融合全要素感知、全环节分析和全过程控制的工程智能建造体系,研发了涵盖多专业的工程建设信息管理平台,提升了我国水电工程建设技术水平^[50-51]。特高拱坝施工质量的严格控制是提高工程安全性和耐久性、降低失事风险、提升工程服役寿命的关键。今后需要继续研发新技术、新工艺、新材料等,依靠先进科学技术提高施工质量,并加强各环节质量控制,从而保障工程结构安全。

2.2 温控防裂

特高拱坝混凝土除高强度要求外,还要具有微膨胀性或低收缩性、高耐久性和良好的防裂性能与施工性能,多采用高水泥用量和高掺粉煤灰。由表 1 可见,我国特高拱坝坝高、底厚,施工浇筑仓面大(最大超过 2 000 m²),新浇混凝土受下部结构约束强,高掺粉煤灰使得混凝土早期发热慢、后期发热量大,加之施工速度较快,导致二期冷却温降幅度增大,增加了坝体浇筑混凝土温控防裂的难度^[52]。相比于中低拱坝,尽管特高拱坝温度应力变化规律与之是一致的,但温控难度更大,温控标准和措施更为严格。为此,特高拱坝混凝土抗裂能力、温控关键部位和时段、温度梯度控制、同冷区高度控制和水管冷却模式及对改善坝体混凝土应力的效果等均需进行深入研究^[53-54],通过优化调整坝体混凝土胶凝材料可以减弱地温、水温、气温和残余水化热引起拱坝温度回升的作用效应^[55],溪洛渡上下游坝面还采取了高密挤塑聚苯乙烯保温板进行低温季节保温^[56]等。目前,我国特高拱坝工程实践总结出了“小温差、早冷却、缓慢冷却”、“全面温控、长期保

温”等温控理念,但温控设计措施尚有待改进,施工期温度裂缝成因和机理尚有待进一步明晰,保温材料老化的问题尚未解决,同时须开展温度监控实时化和智能化反馈、及时进行开裂预警等研究。

2.3 跟踪监测反馈

在特高拱坝施工蓄水阶段,库水位逐步上升可能在坝基和坝体产生局部开裂破坏,根据分期蓄水、跟踪分析、分级预测、反馈检验等思路,需要对蓄水期变形、应力、渗流等时空变化规律和分布特征进行客观评价。如通过对小湾大坝右岸坝肩混凝土置换体与围岩结合、内部变形应力等监测成果分析^[57],评价了置换体与围岩结合效果和传力性能;溪洛渡大坝蓄水期间,利用实测资料剖析了拱坝变形与库水位变化的同步性,以及大坝变形实测数据的连续性、规律性和收敛性等特征^[40];利用大岗山微震实测资料,揭示了微震变形与坝体结构实测性态具有一定关联性^[58],采用数值模拟综合评估了拱坝廊道裂缝形成和扩展原因^[59]。与此同时,为有效表征各影响因素作用效应,在传统统计模型的基础上,应用面板数据理论建立了特高拱坝施工期及首次蓄水期的时空监控模型^[60],开展了特高拱坝热力学参数动态反演分析^[61],建立了特高拱坝跟踪预测、运行风险评估模型,拟定了运行性态监控指标^[62-63]。可见,在上述数学模型和模拟仿真基础上,通过开展特高拱坝蓄水期结构性态预测研究,为工程施工建设和顺利蓄至正常蓄水位提供了技术支撑。

3 研究前沿热点

由于特高拱坝失稳破坏机理和安全评估问题的复杂性,现有分析理论和方法的研究尚不够完善,比如在特高拱坝结构性态演化方面,不仅尚未明晰结构演化时空特征,而且缺乏相应的异常控制模式及有效的风险评估方法。今后,我国特高拱坝在长期服役过程中,在复杂的水力-力学-化学-热耦合作用下,亟待利用监测资料和数值模拟方法,揭示局部劣化形成和加剧变化的驱动机制,发展和完善安全控制理论及方法。

3.1 时空演化特征挖掘方法

研究特高拱坝整体稳定性与局部效应之间的有机联系和时变特征,针对坝体、坝基和坝肩多效应量实测资料的概率分布特性,建立考虑坝体和坝肩交互作用的时空演化特征聚类模型;模拟分析在力学要素与多重环境要素作用下的局部损伤发生、发展过程,挖掘结构损伤累积的宏观力学规律与时空转异效应;利用监测资料和数值模拟,剖析特高拱坝结构稳定性和极限承载能力的时变规律,揭示结构性态转异的驱动机制,利用结构状态熵和安全信息熵表达方法拟定特高拱坝结构转异判据。

3.2 服役风险率实时诊断模型

综合考虑特高拱坝结构性态时空特征及荷载因素和非荷载因素,利用面板理论,引入虚拟变量表征大坝不同部位的特异影响因素作用效应,建立特高拱坝结构性态时变空间自回归面板模型;研究重点部位关键指标辨识的贡献度邻域粗糙集分析模型,针对坝体不同区域的关联性,提出特高拱坝结构性态空间临界域值拟定方法;建立基于跨越率的特高拱坝时变风险率求解模型,解析典型效应量实测数据与时变风险率之间的函数关系,构建实时风险率求解模型。

3.3 结构安全动态控制模式

针对特高拱坝长期服役期间的主要失效模式,建立风险因子的递阶层次结构,对典型失事路径及其风险率变化过程进行辨识;利用 Kriging 模型重构特高拱坝极限承载状态功能函数,提出服役风险率动态评估方法;建立多重失事路径的组合风险率计算模型,分别构建特殊荷载、工程补强和非工程控制措施下的特高拱坝长效服役风险率动态控制模式;利用安全监测和数值模拟成果,反馈分析结构灾变的控制荷载组合模式和控制准则,建立工程补强效能的长期效力预测模型。

3.4 智能感知与超前预警技术

特高拱坝服役期间必须具有足够的抵御意外极端事件的能力,通过研发高端核心信息感知设备,精准

感知大坝所在物理空间的信息资源,以快速获取高分辨、全序列、高时效性的服役工况所有要素数据为目标,建立物物联动的特高拱坝病害缺陷和潜在风险的监测体系;引入智能优化算法建立适用于不同环境条件的特高拱坝安全服役综合诊断与预警模型,通过利用“数据-识别-研判”模型构建基于数据关系的超前预警情景信息链,提升我国特高拱坝运行管理智能化水平。

4 结 语

由于坝高 200 m 以上特高拱坝结构性态安全评价的复杂性,尽管通过一系列科技攻关取得了一定的进展,但许多分析理论和方法缺乏对工程实践的有效技术支持。因此,考虑到特高拱坝服役期间受混凝土材料演化、环境荷载和结构局部损伤等多重因素作用,以及坝体与基岩、坝肩强交互作用的综合影响,今后宜利用已建工程的设计、施工、运行等信息,借助多学科交叉融合和多手段的综合应用,开展特高拱坝长期服役性态健康诊断与安全控制方面的基础理论和方法攻关,为保障工程安全运行及制定新的规范提供科技支撑。

参 考 文 献:

- [1] WANG R K. Key technologies in the design and construction of 300 m ultra-high arch dams[J]. *Engineering*, 2016, 2(3): 350-359.
- [2] 任青文,王柏乐. 关于拱坝柔度系数的讨论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 1-4. (REN Qingwen, WANG Baile. Discussion on slenderness coefficient of arch dams[J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2003, 31(1): 1-4. (in Chinese))
- [3] 徐福卫,田斌. 关于拱坝柔度系数的研究[J]. *人民长江*, 2007, 38(11): 41-42, 50. (XU Fuwei, TIAN Bin. Research on slenderness coefficient of arch dams[J]. *Yangtze River*, 2007, 38(11): 41-42, 50. (in Chinese))
- [4] 张洸,刘耀儒,杨强,等. 基于块体砌筑技术的大岗山高拱坝地质力学模型试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 53-62. (ZHANG Long, LIU Yaoru, YANG Qiang, et al. Research on geomechanical model test of Dagangshan high arch dam based on block masonry technique[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 53-62. (in Chinese))
- [5] 蒋昱州,姜小兰,王瑞红,等. 乌东德双曲拱坝三维地质力学模型试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(10): 139-145. (JIANG Yuzhou, JIANG Xiaolan, WANG Ruihong, et al. Geomechanical model test on global stability of Wudongde double-curvature arch dam[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(10): 139-145. (in Chinese))
- [6] 程立,刘耀儒,潘元炜,等. 基于模型试验与变形加固理论的高拱坝整体稳定性判据研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(11): 2225-2235. (CHENG Li, LIU Yaoru, PAN Yuanwei, et al. Criterion of global stability of high arch dam structures based on model test and edformation reinforcement theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(11): 2225-2235. (in Chinese))
- [7] 杨宝全,张林,陈建叶,等. 小湾高拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 2086-2093. (YANG Baoquan, ZHANG Lin, CHEN Jianye, et al. Experimental study of 3d geomechanical model for global stability of Xiaowan high arch dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2086-2093. (in Chinese))
- [8] LIN P, SHI J, ZHOU W Y, et al. 3D geomechanical model tests on asymmetric reinforcement and overall stability relating to the Jinping I super-high arch dam[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 102: 28-41.
- [9] 段龙海,张林,杨宝全,等. 基于三维地质力学模型试验的溪洛渡高拱坝坝肩稳定性研究[J]. *水电站设计*, 2010, 26(1): 60-63. (DUAN Longhai, ZHANG Lin, YANG Baoquan, et al. Xiluodu high arch dam abutment stability study based on three dimensional geomechanics model test[J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2010, 26(1): 60-63. (in Chinese))
- [10] 何显松,马洪琪,张林,等. 地质力学模型试验方法与变温相似模型材料研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(5): 980-986. (HE Xiansong, MA Hongqi, ZHANG Lin, et al. Study of test method of geomechanical model and temperature analogous model material[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 980-986. (in Chinese))

- [11] 杨庚鑫, 马德萍, 张林, 等. 地质力学模型试验中软弱结构面内埋式位移系统的研制与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 901-907. (YANG Gengxin, MA Deping, ZHANG Lin, et al. Design of structure inbuilt displacement measurement system in geomechanical model test and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 901-907. (in Chinese))
- [12] LIU Y R, GUAN F H, YANG Q, et al. Geomechanical model test for stability analysis of high arch dam based on small blocks masonry technique[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 61: 231-243.
- [13] WANG S G, LIU Y R, ZHOU H W, et al. Experimental study on failure process of arch dam based on acoustic emission technique[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 97: 128-144.
- [14] 罗荣, 李玉婕, 肖国强, 等. 特高拱坝建基面岩体选择的工程类比法研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 84-88, 99. (LUO Rong, LI Yujie, XIAO Guoqiang, et al. Criterion of rockmass selection for super-high arch dam foundation based on engineering analogy method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(7): 84-88, 99. (in Chinese))
- [15] 石杰. 特高拱坝柱状节理坝基变形稳定与加固机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2018. (SHI Jie. Deformation and stability of columnar jointed foundation and reinforcement mechanism of super-high arch dam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese))
- [16] 宋子亨, 刘耀儒, 杨强, 等. 白鹤滩拱坝扩大基础加固效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4403-4411. (SONG Ziheng, LIU Yaoru, YANG Qiang, et al. Study of reinforcement effect analysis of Baihetan arch dam extended foundation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Suppl 2): 4403-4411. (in Chinese))
- [17] 徐建荣, 赖道平, 吴关叶, 等. 适应柱状节理玄武岩坝基的特高拱坝结构研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 155-164. (XU Jianrong, LAI Daoping, WU Guanye, et al. Study on the super high arch dam structure adapting to the columnar basalt base[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(3): 155-164. (in Chinese))
- [18] 林鹏, 李明, 彭浩洋, 等. 特高拱坝基坑回填土石体与大坝作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊2): 3680-3689. (LIN Peng, LI Ming, PENG Haoyang, et al. Mechanism study between earth-rock mixture in pit backfill and super-high arch dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Suppl2): 3680-3689. (in Chinese))
- [19] 黄伟, 魏鹏程. 特高拱坝全坝基无盖重固结灌浆关键技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(7): 582-588. (HUANG Wei, WEI Pengcheng. Key methods for non-cover-weight consolidation grouting of super high dam foundations[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(7): 582-588. (in Chinese))
- [20] 邹丽春. 高拱坝设计理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017. (ZOU Lichun. Theory and project practice of high arch dam[M]. Beijing: China Water Power Press, 2017. (in Chinese))
- [21] 刘耀儒, 王峻, 杨强, 等. 小湾拱坝坝体裂缝对拱坝受力和稳定的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1132-1139. (LIU Yaoru, WANG Jun, YANG Qiang, et al. Research on influences of cracking of Xiaowan arch dam on its stress and stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(6): 1132-1139. (in Chinese))
- [22] LIN P, GUAN J F, PENG H Y, et al. Horizontal cracking and crack repair analysis of a super high arch dam based on fracture toughness[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 97: 72-90.
- [23] 常强. 高拱坝关键区域局部破损分析[D]. 北京: 清华大学, 2015. (CHANG Qiang. Local failure mode analysis for the key area of high arch dam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))
- [24] LI Z Y, HU Z Q, LIN G, et al. A scaled boundary finite element method procedure for arch dam-water-foundation rock interaction in complex layered half-space[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 141: 104524.
- [25] 潘坚文. 高混凝土坝静动力非线性断裂与地基辐射阻尼模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (PAN Jianwen. Nonlinear static and seismic fracture analysis of high concrete dams and modeling of radiation damping for foundation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [26] ZEINIZADEH A, MIRZABOZORG H, NOORZAD A, et al. Hydrodynamic pressures in contraction joints including waterstops on seismic response of high arch dams[J]. *Structures*, 2018, 14: 1-14.
- [27] GUO S S, LIANG H, WU S, et al. Seismic damage investigation of arch dams under different water levels based on massively parallel computation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 129: 105917.
- [28] WANG J T, JIN A Y, DU X L, et al. Scatter of dynamic response and damage of an arch dam subjected to artificial earthquake accelerograms[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 87: 93-100.
- [29] 宋胜武, 冯学敏, 向柏宇, 等. 西南水电高陡岩石边坡工程关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 1-22.

- (SONG Shengwu, FENG Xuemin, XIANG Baiyu, et al. Research on key technologies for high and steep rock slopes of hydropower engineering in Southwest China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 1-22. (in Chinese))
- [30] 林鹏, 石杰, 周华, 等. 乌东德坝肩结构面影响及协调加固稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3937-3946. (LIN Peng, SHI Jie, ZHOU Hua, et al. Stability analysis on structural plane effects and compatible reinforcement relating to Wudongde Dam abutments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl2): 3937-3946. (in Chinese))
- [31] 林鹏, 石杰, 宁泽宇, 等. 不利结构面对高拱坝整体稳定影响及加固分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38(5): 27-36. (LIN Peng, SHI Jie, NING Zeyu, et al. Influence of adverse structural planes on overall stability and abutment reinforcement[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 27-36. (in Chinese))
- [32] 黄志刚, 周钟, 张建海, 等. 锦屏一级高拱坝坝肩刚体弹簧元动力抗滑稳定分析[J]. 西南科技大学学报, 2015, 30(4): 93-99. (HUANG Zhigang, ZHOU Zhong, ZHANG Jianhai, et al. Rigid body spring element method for dynamic anti-sliding analysis of Jinping I arch dam abutment[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2015, 30(4): 93-99. (in Chinese))
- [33] 甘海阔, 赖国伟, 李业盛. 基于三维有限差分法的小湾拱坝施工步模拟及极限承载分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3918-3927. (GAN Haikuo, LAI Guowei, LI Yesheng. Construction process simulation and ultimate bearing capacity analysis of Xiaowan arch dam by 3D finite difference method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Suppl2): 3918-3927. (in Chinese))
- [34] 何柱, 刘耀儒, 邓检强, 等. 基于黏塑性损伤模型的高拱坝长期稳定性评价[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(10): 1105-1110. (HE Zhu, LIU Yaoru, DENG Jianqiang, et al. Evaluation of long-term stability for high arch dam based on the viscoplasticity damage model[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(10): 1105-1110. (in Chinese))
- [35] 程立, 刘耀儒, 吕庆超, 等. 特高拱坝非平衡演化的变形稳定控制理论及应用[J]. 水力发电, 2019, 45(10): 53-58, 115. (CHENG Li, LIU Yaoru, LÜ Qingchao, et al. Theory and application of deformation stability control of non-equilibrium evolution for super high arch dams[J]. Water Power, 2019, 45(10): 53-58, 115. (in Chinese))
- [36] WANG J T, ZHANG M X, JIN A Y, et al. Seismic fragility of arch dams based on damage analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 109: 58-68.
- [37] LIANG H, TU J, GUO S S, et al. Seismic fragility analysis of a high arch dam-foundation system based on seismic instability failure mode[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 105981.
- [38] JIN A Y, PAN J W, WANG J T, et al. Effect of foundation models on seismic response of arch dams[J]. Engineering Structures, 2019, 188: 578-590.
- [39] XU Q, ZHANG T R, CHEN J Y, et al. The influence of reinforcement strengthening on seismic response and index correlation for high arch dams by endurance time analysis method[J]. Structures, 2021, 32: 355-379.
- [40] 张冲, 王仁坤, 汤雪娟. 溪洛渡特高拱坝蓄水初期工作状态评价[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 85-93. (ZHANG Chong, WANG Renkun, TANG Xuejuan. Safety evaluation of Xiluodu ultra-high arch dam during the initial impoundment period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 85-93. (in Chinese))
- [41] 刘有志, 张国新, 程恒, 等. 特高拱坝谷幅缩窄成因及对大坝变形和应力的影响分析[C]//高坝建设与运行管理的技术进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2014: 51-60. (LIU Youzhi, ZHANG Guoxin, CHENG Heng, et al. Analysis on causes of valley width narrowing of superhigh arch dam and its influence on dam deformation and stress[C]//Technical Progress of High Dam Construction and Operation Management. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2014: 51-60. (in Chinese))
- [42] 杨强, 潘元炜, 程立, 等. 高拱坝谷幅变形机制及非饱和裂隙岩体有效应力原理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2258-2269. (YANG Qiang, PAN Yuanwei, CHENG Li, et al. Mechanism of valley deformation of high arch dam and effective stress principle for unsaturated fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2258-2269. (in Chinese))
- [43] 辛长虹, 赵引. 考虑非饱和渗流的谷幅变形对高拱坝影响分析[J]. 水利水电工程学报, 2021(4): 36-45. (XIN Changhong, ZHAO Yin. Analysis of the influence of valley width deformation on high arch dam considering unsaturated seepage[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 36-45. (in Chinese))

- [44] 张国新,程恒,周秋景,等.高拱坝蓄水期谷幅时效变形机理分析[J].[中国科技论文](#),2019,14(1):77-84.(ZHANG Guoxin, CHENG Heng, ZHOU Qiuqing, et al. Analysis of mechanism of valley creep deformation of high arch dam during impoundment[J]. [China Sciencepaper](#), 2019, 14(1): 77-84. (in Chinese))
- [45] 钟大宁,刘耀儒,杨强,等.白鹤滩拱坝谷幅变形预测及不同计算方法变形机制研究[J].[岩土工程学报](#),2019,41(8):1455-1463.(ZHONG Daning, LIU Yaoru, YANG Qiang, et al. Prediction of deformation of valley width of Baihetan arch dam and deformation mechanisms of several methods[J]. [Chinese Journal of Geotechnical Engineering](#), 2019, 41(8): 1455-1463. (in Chinese))
- [46] 黄平,李正兵.锦屏一级水电站特高拱坝建基面f2断层综合处理技术[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会第12次全国学术会议.北京:中国水利水电出版社,2013:421-427.(HUANG Ping, LI Zhengbing. Comprehensive treatment technology of f2 fault on the foundation surface of superhigh arch dam of Jinping I Hydropower Station[C]//The 12th National Academic Conference of Foundation and Basic Engineering Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 421-427. (in Chinese))
- [47] 李仁鸿,唐兰,侯波,等.锦屏一级水电站300 m级高拱坝渗流控制工程措施[J].[水电站设计](#),2012,28(4):7-11.(LI Renhong, TANG Lan, HOU Bo, et al. Seepage control engineering measures of 300 m high arch dam of Jinping I Hydropower Station[J]. [Design of Hydroelectric Power Station](#), 2012, 28(4): 7-11. (in Chinese))
- [48] HE M J, LI H, XU J R, et al. Estimation of unloading relaxation depth of Baihetan Arch Dam foundation using long-short term memory network[J]. [Water Science and Engineering](#), 2021, 14(2): 149-158.
- [49] 魏鹏程,林鹏,汪志林,等.白鹤滩特高拱坝坝基灌浆时机与抬动控制[J].[清华大学学报\(自然科学版\)](#),2020,60(7):557-565.(WEI Pengcheng, LIN Peng, WANG Zhilin, et al. Foundation grouting times and uplift control of the Baihetan super-high arch dam[J]. [Journal of Tsinghua University \(Science and Technology\)](#), 2020, 60(7): 557-565. (in Chinese))
- [50] 樊启祥,张超然,陈文斌,等.乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J].[水力发电学报](#),2019,38(2):22-35.(FAN Qixiang, ZHANG Chaoran, CHEN Wenbin, et al. Key technologies of intelligent construction of Wudongde and Baihetan super high arch dams[J]. [Journal of Hydroelectric Engineering](#), 2019, 38(2): 22-35. (in Chinese))
- [51] 谭尧升,樊启祥,汪志林,等.白鹤滩特高拱坝智能建造技术与应用实践[J].[清华大学学报\(自然科学版\)](#),2021,61(7):694-704.(TAN Yaosheng, FAN Qixiang, WANG Zhilin, et al. Intelligent construction methods for the Baihetan super high arch dam[J]. [Journal of Tsinghua University \(Science and Technology\)](#), 2021, 61(7): 694-704. (in Chinese))
- [52] 王继敏,段绍辉,胡书红,等.锦屏一级水电站特高拱坝温控防裂技术与实践[J].[水利水电技术](#),2013,44(12):41-46.(WANG Jimin, DUAN Shaohui, HU Shuhong, et al. Practice and technology of temperature control and anti-cracking for super-high arch dam of Jinping I Hydropower Station[J]. [Water Resources and Hydropower Engineering](#), 2013, 44(12): 41-46. (in Chinese))
- [53] 张国新,刘有志,刘毅,等.特高拱坝施工期裂缝成因分析与温控防裂措施讨论[J].[水力发电学报](#),2010,29(5):45-51.(ZHANG Guoxin, LIU Youzhi, LIU Yi, et al. Analysis on the causes of crack formation and the methods of temperature control and crack prevention during construction of super-high arch dams[J]. [Journal of Hydroelectric Engineering](#), 2010, 29(5): 45-51. (in Chinese))
- [54] 张国新,樊启祥,刘有志,等.特高拱坝温控标准与措施的优化研究[J].[水利学报](#),2012,43(增刊1):52-58.(ZHANG Guoxin, FAN Qixiang, LIU Youzhi, et al. Discussion for standard and measure of temperature controlling in super-high arch dams[J]. [Journal of Hydraulic Engineering](#), 2012, 43(Suppl1): 52-58. (in Chinese))
- [55] 杨萍,刘玉,李金桃,等.溪洛渡拱坝后期温度回升影响因子及权重分析[C]//高坝建设与运行管理的技术进展.郑州:黄河水利出版社,2014:275-285.(YANG Ping, LIU Yu, LI Jintao, et al. Analysis of influencing factors and weights of temperature rise in late stage of Xiluodu arch dam[C]//Technical Progress of High Dam Construction and Operation Management. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2014: 275-285. (in Chinese))
- [56] 樊启祥,邬昆,陈文夫.溪洛渡特高拱坝混凝土保温技术研究与应用[J].[水力发电学报](#),2019,38(4):213-223.(FAN Qixiang, WU Kun, CHEN Wenfu. Study and application of superficial thermal insulation of Xiluodu super high arch dam concrete[J]. [Journal of Hydroelectric Engineering](#), 2019, 38(4): 213-223. (in Chinese))
- [57] 胡波,刘观标,王思敬,等.基于原型监测的特高拱坝软弱带置换效果评价[J].[水利学报](#),2011,42(7):876-882.(HU Bo, LIU Guanbiao, WANG Sijing, et al. Evaluation and research on replacement reinforcement quality at abutment of ultra-high

- arch dam based on prototype monitoring[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(7): 876-882. (in Chinese))
- [58] 马克, 王龙江, 庄端阳, 等. 大岗山水电站高拱坝蓄水初期工作性态演化研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019(9): 1776-1785. (MA Ke, WANG Longjiang, ZHUANG Duanyang, et al. Study on working performance evaluation of the high arch dam of Dagangshan hydropower station during the initial impoundment period[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019(9): 1776-1785. (in Chinese))
- [59] ZHUANG D Y, MA K, TANG C N, et al. Study on crack formation and propagation in the galleries of the Dagangshan high arch dam in Southwest China based on microseismic monitoring and numerical simulation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 115: 157-172.
- [60] 王继敏, 顾冲时, 张晨, 等. 基于面板时空模型的锦屏一级大坝变形性态分析[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(11): 21-30. (WANG Jimin, GU Chongshi, ZHANG Chen, et al. Deformation behavior analysis of Jinping arch dam based on spatiotemporal model of variable intercept panel data[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(11): 21-30. (in Chinese))
- [61] LI H K, WANG G, WEI B W, et al. Dynamic inversion method for the material parameters of a high arch dam and its foundation[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 71: 60-76.
- [62] ZHAO E F, WU C Q. Unified egg ellipse critical threshold estimation for the deformation behavior of ultrahigh arch dams[J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110598.
- [63] ZHAO E F, WU C Q. Risk probabilistic assessment of ultrahigh arch dams through regression panel modeling on deformation behavior[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28: e2716.

Review on diagnosis and monitornig methods of structural behavior of superhigh arch dams

ZHAO Erfeng, GU Chongshi

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Several superhigh arch dams have been built or are under construction in China. These projects are often located in special service environments with high water head, high slope and complex geological conditions. Their technical indicators have broken through the applicable scope of current codes and previous engineering cognition, including design, construction, safety monitoring, etc. Compared with ordinary arch dams, the engineering complexity of superhigh arch dams increases sharply with the dam height, and the structural mechanical behavior has more unique characteristics, leading to stringent requirements of safety control during construction and operation. The key technologies of structural behavior diagnosis of superhigh arch dams have been explored systematically, such as engineering empirical evaluation parameters, geomechanical model tests, numerical simulation analysis. Furthermore, safety control technologies have been deeply investigated, including construction quality control, temperature control and crack prevention, monitoring feedback analysis. On this basis, hot issues of health diagnosis and safety control of superhigh arch dams during future long-term operation are expounded, including the mining of methods of space-time evolution characteristics, real-time diagnosis model of operation risk probability, dynamic control model of structural safety, intelligent perception and early warning technology. The aforementioned research aspects are critical for improving the future intelligent construction and management of superhigh arch dams.

Key words: superhigh arch dam; structural behavior; model test; numerical simulation; safety monitoring