

高拱坝抗震安全分析及安全评价准则研究进展调研

抗震中心 涂劲, 欧阳金惠, 郭胜山, 张翠然

在中国水电建设取得举世瞩目的成就的同时,我国的高拱坝工程抗震研究在国际上地位也逐渐提升。在这种背景下,有必要梳理近年来高拱坝抗震分析研究领域在计算模型、考虑因素、模拟手段、分析平台等各方面的重大进展,并对高拱坝抗震安全评价准则方面各国规范规程的评价框架体系进行分析比较,为进一步改进完善我国高拱坝抗震安全评价体系,并在国际范围内获得更广泛的认可奠定基础。本项研究通过调研工作,对高拱坝抗震安全分析理论与方法及高拱坝抗震安全评价准则研究的目前研究进展、待解决的问题和进一步研究工作的主要方向进行了分析和总结。

在高拱坝抗震安全分析理论方法的研究方面,国内外已取得的主要进展为:对无限地基辐射阻尼作用、坝体-库水-地基相互作用、坝基地震动不均匀输入、横缝开合影响、坝体-坝肩滑裂体耦合作用、坝体混凝土受拉损伤等复杂影响因素建立了相应的多种模拟方法。使高拱坝抗震分析在从基于材料力学的、拟静力的、坝体地基分离的、线弹性的分析模式向基于有限元的、动力时程分析的、坝体与地基耦合的、非线性的分析模式的转变。并可通过自行开发的高性能分析软件或大型通用计算软件在逐渐接近真实性态的基础上,完成对高拱坝-地基-库水体系的抗震安全分析。

在高拱坝抗震安全评价方面,我国 2015 年颁布实施的《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB35047-2015)在分类设防的基础上,增加了在最大可信地震下不发生库水失控下泄的设防目标,形成了二级设防的框架体系,与欧美等大坝建设的先进国家保持了一致。对于 MCE 的抗震性能目标无论国内还是国外,基本均设定为不致发生库水失控下泄导致严重地震灾变。对于这一性能目标,国外规范未给出明确的抗震安全评价准则,通过对线弹性方法的地震反应结果提出一系列偏于安全的假定及判断准则,对非线性计算分析结果则主要强调通过工程师的丰富经验和抗震安全措施来确保大坝抗震安全;我国规范则初步建议了特征位移随地震超载倍数变化曲线出现拐点为判断依据的抗震安全评价准则,在最新的破坏机理研究中将这一安全评价准则与结构体系中关键部位的变形累积达到

一定界限，形成新的、允许更大位移量的变形机制相对应，且在多项重大高拱坝工程抗震安全复核评价中得到应用。

在高拱坝抗震安全分析理论与方法的研究中，最主要的趋势就是尽可能地接近真实性态去模拟大坝-地基体系的地震响应。为此，必须进一步解决目前计算分析体系与高拱坝抗震工作的实际状况尚存在差距的几项关键技术难点，研究高拱坝多耦合体系地震损伤演化机理，并在此基础上提出反映其真实破坏机理的抗震安全评价准则。因此主要需在以下 4 个方面开展研究工作：

1) 建立材料动态损伤与大坝-地基系统整体稳定耦合的高拱坝抗震分析理论体系。

2) 构建完整的混凝土拉压损伤加卸载循环全过程应力应变关系数值模型。

3) 进一步考虑地基岩体材料的动态拉、压损伤。

4) 在更准确地模拟高拱坝-地基系统极限地震作用下的损伤破坏发展过程的基础上，通过特征位移-地震超载曲线拐点和破坏模式、破坏机理的深入研究，实现拱坝抗震安全评价的量化指标与高拱坝-地基系统变形机制变化相统一。

归纳各国规范的高拱坝抗震设防体系所得到的一项启示是：“确保安全”是拱坝抗震安全评价的基本理念与要求。高拱坝工程一旦失事，其对居民、环境、对国民经济带来的威胁远高于普通建筑工程，因此在计算分析能力有限、坝体基岩材料存在不确定性、地震本身存在很大不确定性等各种制约条件下，采取偏于保守的安全评价准则是合理且必要的。

在以上工作的基础上，为进一步完善我国的高拱坝抗震安全评价的框架体系，鉴于国内强震区已建和在建了多座 200-300 米级高拱坝工程，其抗震安全问题事关重大，且 200 米以上高拱坝在抗震工作特性上体现出与普通拱坝相比有所不同，目前规范要求进行“专门研究”，因此建议适时编制 200 米以上高拱坝的抗震规范，对从极端地震的确定、到抗震分析理论模型、再到抗震安全评价准则，进一步进行梳理和确定，确保这类拱坝抗震安全。另一方面，中国水电已成为世界水电行业的引领者，在世界水电工程招标中，大多数是中国企业中标，然而在工程建设中却常要求套用国外规范，为改变这种现状，需要加强对我国高拱坝抗震设计方法、理念、标准的宣传，扩大影响力，真正成为高拱坝抗震设计与研究的引领者。