

# 高烈度地震区水库大坝抗震优化设计与安全评估

张立娟

天津市水务规划勘测设计有限公司, 天津 300204

DOI:10.61369/ETQM.2025090007

**摘要 :** 本文聚焦高烈度地震区水库大坝抗震优化设计与安全评估, 系统分析了高烈度地震区地震动特性对大坝的作用机制, 阐述了不同坝型的抗震设计原则与方法, 并从多方面探讨了抗震优化策略。同时构建了涵盖结构、地质、运行状态的安全评估指标体系, 介绍了传统经验法、数值模拟法、现场检测法及机器学习法等评估方法, 明确了从前期准备到报告编制的全流程评估体系。研究成果为高烈度地震区大坝的抗震设计优化与安全保障提供了理论依据和技术参考。

**关键词 :** 高烈度地震区; 水库大坝; 抗震设计; 优化策略; 安全评估

## Seismic Optimisation Design and Safety Assessment of Reservoir Dams in High-Intensity Earthquake Zones

Zhang Lijuan

Tianjin Water Resources Planning, Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204

**Abstract :** This paper focuses on the seismic optimization design and safety assessment of reservoir dams in high-intensity earthquake zones. It systematically analyses the mechanisms by which seismic motions in high-intensity earthquake zones affect dams, outlines the seismic design principles and methods for different dam types, and explores seismic optimization strategies from multiple perspectives. Additionally, a safety assessment indicator system encompassing structural, geological, and operational conditions is established. Traditional empirical methods, numerical simulation methods, field testing methods, and machine learning methods are introduced as assessment techniques, and a comprehensive assessment framework from preliminary preparation to report compilation is clarified. The research findings provide theoretical foundations and technical references for the seismic design optimisation and safety assurance of dams in high-intensity seismic zones.

**Keywords :** high-intensity seismic zones; reservoir dams; seismic design; optimisation strategies; safety assessment

## 引言

水库大坝作为水资源调配与防洪减灾的核心基础设施, 其安全运行对区域经济社会发展意义重大。然而在高烈度地震区, 频繁且强烈的地震活动给大坝安全带来巨大威胁, 一旦发生震害导致溃坝, 将引发灾难性后果。因此深入研究高烈度地震区水库大坝抗震优化设计与安全评估方法, 成为保障大坝安全、守护人民生命财产的关键课题。

## 一、高烈度地震区水库大坝抗震设计理论

### (一) 高烈度地震区地震动特性分析

在高烈度地震区, 地震动呈现出复杂且独特的特性, 这些特性对水库大坝的抗震设计有着至关重要的影响。高烈度地震区的地震动峰值加速度往往较高, 这意味着大坝在地震发生时会承受巨大的惯性力冲击。例如在某些处于板块交界地带的高烈度区域, 地震动峰值加速度可达  $0.3g$  甚至更高, 这种强大的冲击力会使大坝结构产生剧烈振动, 对大坝的整体稳定性构成严重威胁。地震动的频谱特性也十分关键, 不同场地条件下, 地震动的卓越

周期存在差异。在软土地基, 地震动卓越周期较长, 容易与具有相似自振周期的大坝结构产生共振效应, 加剧大坝的破坏程度; 而在坚硬场地, 地震动卓越周期较短, 其高频成分较多, 会对大坝的局部结构造成较大损伤。此外, 地震动的持时也是不容忽视的因素, 较长的地震持时会使大坝结构经历多次循环加载, 导致结构材料的疲劳损伤积累, 即使地震动峰值加速度相对较小, 长时间的振动也可能使大坝出现裂缝扩展、地基液化等问题, 最终影响大坝的安全性。

### (二) 水库大坝抗震设计原则及方法

地震烈度分为基本烈度和设防烈度。一般情况下, 工程场地

采用《中国地震烈度区划图》确定的基本烈度，抗震设计时也一般采用基本烈度作为设计烈度。《导则》里抗震安全计算方法有拟静力法和动力法，给出了采用不同方法的计算结果相对应的允许系数。除复核计算外，应对大坝原设计抗震措施的有效性进行确认。综合复核计算结果与抗震措施的有效性，对大坝抗震安全性综合评价<sup>[1]</sup>。水库大坝抗震设计需遵循一系列科学合理的原则与方法，以确保大坝在高烈度地震作用下能够保持安全稳定。设计时必须充分考虑各种可能的地震工况，确保大坝在遭遇设计地震和罕遇地震时，都能满足相应的抗震安全要求，避免发生溃坝等灾难性事故，保障下游人民生命财产安全<sup>[2]</sup>。在保证大坝抗震安全的前提下，要综合考虑工程建设成本，优化设计方案，避免过度设计造成资源浪费。例如通过合理选择大坝材料和结构形式，在满足抗震性能的同时降低工程造价。在设计方法上，目前常用的有拟静力法、动力分析法等。拟静力法是将地震惯性力以静力荷载的形式施加在大坝结构上进行分析，该方法计算简便，适用于初步设计阶段对大坝抗震性能的粗略评估；动力分析法则考虑了地震动的时间历程和结构的动力响应，通过建立大坝－地基－库水相互作用模型，利用有限元等数值计算方法，更准确地模拟大坝在地震作用下的实际受力和变形情况，常用于大坝抗震设计的详细分析阶段。

### （三）不同类型水库大坝抗震设计特点

土石坝是常见的大坝类型，其材料主要为土石料，属于散粒体结构，抗剪强度相对较低，在地震作用下容易出现坝坡失稳、坝体裂缝等问题<sup>[3]</sup>。为提高其抗震性能，设计时应合理选择坝坡坡度，避免坡度过陡，同时采用合适的防渗措施，如设置防渗心墙或斜墙，防止因地震导致的渗透破坏引发坝体失稳；在坝体材料选择上，优先选用抗液化性能好的土石料，并通过压实等措施提高坝体的密实度，增强其抗剪强度。混凝土重力坝依靠自身重力来维持稳定，在抗震设计方面与土石坝有所不同，地震作用下，其主要破坏形式包括坝体裂缝、坝踵开裂和坝体沿建基面滑动等<sup>[4]</sup>。为增强其抗震能力，可采用加强坝体结构整体性的措施，如设置纵、横缝的键槽，增强坝体各部分之间的连接；优化坝体断面形状，使坝体在地震作用下的应力分布更加均匀；在坝基处理上，采用固结灌浆等方法提高地基的承载能力和抗变形能力，减少坝体与地基之间的相对位移。拱坝是一种空间壳体结构，其抗震性能与坝体的几何形状、材料特性以及地基条件密切相关，在地震作用下，拱坝的拱圈和坝肩是容易发生破坏的部位。针对拱坝的抗震设计，需要合理设计拱圈的曲率和中心角，优化拱坝的体型，以提高拱坝的整体刚度和抗震能力；加强坝肩的稳定分析和处理，通过对坝肩岩体进行锚固、灌浆等加固措施，增强坝肩的抗滑稳定性；同时考虑坝体－库水－地基的相互作用，采用精确的动力分析方法，准确评估拱坝在地震作用下的动力响应。

## 二、高烈度地震区水库大坝抗震优化设计

### （一）坝体结构抗震优化设计

在高烈度地震区，坝体结构需从材料选择、体型设计和构造

措施多方面进行优化。在材料方面，新型高性能材料的应用为坝体抗震带来新突破。例如纤维增强混凝土具备良好的韧性和抗裂性能，将其应用于坝体关键部位，可有效抑制裂缝扩展，提高坝体在地震作用下的完整性。同时纳米改性材料通过优化微观结构，进一步增强坝体材料的耐久性与抗震韧性。在体型设计上，通过优化坝体轮廓和断面形状，能够调整地震作用下的应力分布。如将土石坝的坝坡设计为变坡形式，上部坡度较缓、下部坡度较陡，既保证坝坡稳定性，又能减少坝体工程量；对于混凝土重力坝，采用倒悬式坝体断面，可降低坝踵拉应力，增强坝体抗倾覆能力<sup>[5]</sup>。此外，通过设置流线型坝体外形，还能有效降低地震波的反射与叠加效应。构造措施方面，设置合理的分缝分块和连接方式，能增强坝体结构的整体性。如在混凝土坝的纵、横缝处设置键槽并进行灌浆处理，使坝体各部分协同工作，共同抵御地震作用。同时引入预应力锚固技术，可进一步提升坝体结构的整体稳定性。

### （二）坝基处理抗震优化设计

坝基作为支撑大坝的“根基”，其抗震性能不仅关乎大坝自身稳定，更直接关系到下游人民生命财产安全与区域生态环境安全。在高烈度地震区，地震动的强烈冲击极易诱发坝基失稳，进而导致大坝溃决等灾难性后果，因此科学合理的坝基处理优化设计成为大坝抗震的关键环节。针对不同的坝基地质条件，需“因地制宜”采取优化措施。当坝基存在软弱夹层或松散土层时，振冲碎石桩与强夯法是行之有效的加固手段。振冲碎石桩施工时，通过振冲器的振动和水冲作用，在软弱地基中形成桩孔，随后填入碎石并振密，最终形成密实的桩体，显著提高地基的承载力与抗液化能力；强夯法则凭借巨大的夯击能，使地基土产生瞬间压缩和重塑，有效降低土的压缩性，增强地基密实度。而对于存在裂隙发育问题的岩基，固结灌浆与帷幕灌浆是常用处理措施<sup>[6]</sup>。固结灌浆通过向岩体裂隙注入浆液，增强岩体的整体性和强度；帷幕灌浆则在坝基中形成连续防渗帷幕，大幅降低坝基渗透压力，从根源上避免渗透破坏引发的坝基失稳风险。此外，在坝基与坝体的连接部位，合理设置垫层或过渡层同样重要。这类特殊结构能够有效调整应力传递路径，缓冲地震作用下坝基与坝体间的变形差异，减少不均匀沉降和应力集中现象，使坝体－坝基系统在地震中形成协同受力的整体，全方位提升大坝抗震性能。

### （三）基于性能的抗震优化设计方法

基于性能的抗震优化设计方法以大坝在不同地震水准下应达到的性能目标为导向，改变了传统设计仅满足抗震规范最低要求的模式，为大坝抗震设计提供了更科学合理的途径。该方法首先明确大坝在小震、中震和大震作用下的性能指标，如小震时要求大坝结构基本完好，不影响正常运行；中震时允许结构出现一定损伤，但经过简单处理后可恢复使用；大震时要保证大坝不发生溃坝等灾难性破坏，确保下游人民生命财产安全<sup>[7]</sup>。在设计过程中，通过建立精细化的数值分析模型，结合可靠度理论和优化算法，对大坝的结构参数、材料特性等进行优化调整。例如利用有限元软件模拟大坝在地震作用下的动力响应，根据性能目标不断优化坝体尺寸、配筋率等参数，使大坝在满足抗震性能要求的同

时，实现经济效益最大化。同时基于性能的设计方法还注重考虑不确定性因素对大坝抗震性能的影响，通过概率分析等手段，评估大坝在不同地震工况下的失效概率，为大坝的抗震设计和风险管理提供更全面的依据。

### 三、高烈度地震区水库大坝抗震安全评估

#### (一) 抗震安全评估指标体系

构建完善的抗震安全评估指标体系是准确判断高烈度地震区水库大坝抗震性能的基础，该体系需涵盖大坝结构、地质条件、运行状态等多维度指标。在结构方面，坝体材料强度、结构完整性、关键部位应力应变水平等是重要指标。例如混凝土坝的抗压强度、裂缝宽度与分布，土石坝的抗剪强度、坝坡稳定性系数等，这些指标直接反映坝体结构在地震作用下的承载能力。地质条件指标包括坝基地质类型、岩土层特性、地震液化可能性等，软弱地基或存在液化土层的大坝，地震风险更高<sup>[8]</sup>。运行状态指标则关注大坝的使用年限、维修养护情况、渗流异常等，长期运行且缺乏维护的大坝，抗震性能可能因材料老化、结构损伤累积而下降。此外，还应考虑环境因素指标，如周边地震活动频率、库水位变化等，这些因素会与地震作用相互影响，共同作用于大坝安全。通过综合这些不同层面的指标，形成层次分明、逻辑严谨的评估体系，为大坝抗震安全评估提供全面依据。

#### (二) 抗震安全评估方法

高烈度地震区水库大坝抗震安全评估方法丰富多样，各有其适用场景。传统经验法依据工程技术人员的实践经验，结合类似工程案例，对大坝抗震安全进行定性或半定量评估，在初步评估阶段或数据有限时较为实用，但主观性较强。数值模拟法借助有限元、离散元等计算软件，建立大坝-地基-库水耦合模型，模拟地震作用下大坝的动力响应，能精确分析坝体应力、变形、位移等，为大坝抗震性能提供定量评估结果，常用于详细评估阶段。现场检测法通过地质勘探、无损检测等手段获取大坝实际参数，如利用钻孔取芯检测坝体材料强度，采用声波检测技术探测

坝体内部缺陷，结合检测数据评估大坝抗震安全，可直观反映大坝的实际状况<sup>[9]</sup>。还有基于机器学习的评估方法，如神经网络算法，通过大量历史数据训练模型，学习大坝抗震性能与各指标间的关系，实现对大坝抗震安全的快速、准确预测，尤其适用于海量大坝数据的批量评估。实际应用中，常综合多种方法，取长补短，以提高评估的准确性和可靠性。

#### (三) 抗震安全评估流程

高烈度地震区水库大坝抗震安全评估需遵循严谨规范的流程，前期准备阶段收集大坝设计资料、施工记录、运行监测数据、区域地震地质资料等信息，明确评估目的和范围，同时组建由地质、结构、抗震等多专业人员构成的评估团队。现场调查与检测环节，对大坝外观进行详细检查，查看是否存在裂缝、渗漏等异常现象，开展地质勘探和材料检测，获取坝体和坝基的实际参数。评估分析阶段运用选定的评估方法和指标体系，对收集的数据进行处理和分析，模拟大坝在不同地震工况下的响应，评估大坝抗震性能。结果判定阶段依据相关标准和规范，将评估结果与安全阈值进行对比，判断大坝抗震安全等级，若存在安全隐患，明确隐患类型和严重程度<sup>[10]</sup>。报告编制与建议阶段，撰写详细的抗震安全评估报告，阐述评估过程、结果及结论，针对发现的问题提出切实可行的加固、维护或管理建议，为大坝后续抗震决策提供支撑。整个流程环环相扣，确保大坝抗震安全评估科学、有序开展。

### 四、结束语

高烈度地震区水库大坝的抗震优化设计与安全评估是一项系统且复杂的工程，需要多学科知识的融合与创新。从地震动特性的深入剖析，到不同坝型针对性的优化设计，再到科学全面的安全评估体系构建，每一个环节都至关重要。随着新材料、新技术的不断涌现，以及计算技术和监测手段的持续进步，未来可进一步探索大坝抗震设计的智能化、精细化路径，加强地震与大坝相互作用的动态研究，完善基于风险的全生命周期安全管理体系。

### 参考文献

- [1]周文渊,徐海波.水库大坝安全评价技术探讨[J].治淮,2016,(08):16-17.
- [2]秦继辉,张颖,王宇,等.水库大坝地震基础液化动力分析[J].水利科技与经济,2015,21(11):1-4.
- [3]伯桐震.花溪水库大坝抗震安全复核[J].水利科技与经济,2015,21(11):26-27.
- [4]何洋,尹刚.黄仁水库震动液化评价与抗震加固设计[J].山东水利,2015,(08):31-32.DOI:10.16114/j.cnki.sdsd.2015.08.017.
- [5]邢喜梅.卡尔塔水库大坝抗震安全评价[J].水利技术监督,2014,22(01):13-15.
- [6]覃克非.武都水库大坝震损处理及抗震设计[J].四川水利,2016,37(01):21-24.
- [7]梁伟宁,黄彩林.关于水库大坝设计重点探究[C]//云南省水利学会.云南省水利学会2018年度学术交流会论文集.楚雄欣源水利水电勘察设计有限责任公司,2018:590-592.
- [8]陈小妮,马雅慧.土石坝抗震加固措施研究[J].陕西水利,2014,(01):83-84.
- [9]岑威钧,王建,王帅,等.水库骤降期偶遇地震作用时高土石坝抗震安全性分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):308-313.
- [10]M.维兰德,胡云鹤.地震与大坝安全[J].水利水电快报,2011,32(02):33-35.DOI:10.15974/j.cnki.slsdkb.2011.02.004.