

水利水电工程中水工建筑物抗震设计方法改进

王航宇 黄杏荣

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530000

摘要: 地震作为一种突发性强、破坏力巨大的自然灾害,对水利水电工程的安全构成严重威胁。水工建筑物一旦在强震中失事,不仅会造成巨大的直接经济损失,更可能引发洪水、堰塞湖等次生灾害,危及下游人民生命财产安全,后果不堪设想。因此,科学、先进的抗震设计方法是保障水工建筑物乃至整个流域安全的关键技术支撑。本文以现行《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247)为基础,系统梳理了传统抗震设计方法的核心框架及其在理论与实践层面面临的挑战。在此基础上,深入探讨了当前抗震设计理念的演进趋势,并从地震动输入精细化、结构分析模型高保真化、性能目标多元化、风险评估体系化以及新材料新结构应用等五个维度,提出了系统性的改进策略。研究旨在为构建更加安全、可靠、韧性的现代水工建筑物抗震设计体系提供理论参考与发展方向。

关键词: 水工建筑物; 抗震设计; 性能化设计; 地震动输入

引言

水利水电工程是国家重要基础设施,在防洪、供水等多方面发挥战略作用。我国位于环太平洋与欧亚地震带交汇处,地震频繁且强度大,许多大型水利水电工程位于或邻近地震高烈度区。历史经验显示,如海城地震中的参窝水库、唐山地震中的密云水库白河主坝等,均曾遭受震害,凸显水工建筑物抗震安全的重要性。传统抗震设计遵循“小震不坏、中震可修、大震不倒”原则,通过拟静力法或简化动力法计算地震作用,结合构造措施确保结构稳定,为我国水利工程建设提供了基本安全保障。但随着工程规模扩大、结构复杂化,以及社会对工程安全性和韧性要求的提高,传统设计方法在精确性、适应性和前瞻性上显现局限。因此,改进现有水工建筑物抗震设计方法成为紧迫课题。

1 传统水工建筑物抗震设计方法及其局限性

1.1 传统设计方法的核心框架

我国水工建筑物传统抗震设计以确定性分析为核心,主要包括四个环节:(1)根据工程重要性、规模及区域地震活动性,按规范或地震安全性评价确定设计基准地震动(如50年超越概率10%)的峰值加速度(PGA)和反应谱;(2)采用拟静力法(适用于重力坝、土石坝等刚性结构,将地震惯性力简化为静态水平力)或振型分解反应谱法(用于高耸结构如进水塔,结合SRSS或CQC组合多振型响应)计算地震作用;(3)将地震作用与自重、水压力等荷载组合,通过材料或结构力学方法验算关键部位的应力与变形是否满足规范容许值;(4)辅以抗震构造措施,如设置廊道、加强配筋、优化施工缝处理等,以提升结构整体性、延性与耗能能力。该方法计算简便、概

念清晰,但缺乏对地震不确定性与结构非线性的充分考虑。

1.2 传统方法面临的主要局限性

1.2.1 地震动输入的单一性与不确定性忽略

传统方法通常仅采用一条或少数几条具有代表性的加速度时程或一个标准化的反应谱作为输入^[1]。这无法充分反映实际地震动的空间变异性、频谱特性和持时效应,忽略了地震动本身固有的巨大随机性和不确定性,导致设计结果可能过于保守或存在安全隐患。

1.2.2 结构模型的理想化与线性假设

为便于手算或简化分析,传统方法常将复杂的三维结构简化为二维平面问题,并假定材料处于线弹性工作状态。然而,在强震作用下,混凝土开裂、钢筋屈服、地基-结构相互作用(SSI)以及库水-结构相互作用(FSI)等非线性效应极为显著。忽略这些非线性因素,会严重高估结构的刚度和承载力,低估其真实变形和损伤程度。

1.2.3 性能目标的模糊性与单一性

传统“三水准”设防目标虽然直观,但其内涵较为模糊。“不坏”、“可修”、“不倒”缺乏明确、量化的性能指标(如位移、残余变形、功能损失等)。这种单一的、以生命安全为核心的设防目标,难以满足现代社会对关键基础设施在震后快速恢复功能(即“韧性”)的更高要求。

1.2.4 风险视角的缺失

传统设计本质上是一种基于经验与校准的确定性方法,未能建立起地震危险性、结构易损性与潜在后果(经济损失、人员伤亡、社会影响)之间的定量联系。这使得决策者难以在不同设计方案之间进行基于风险的成本-

效益权衡,也无法对工程的总体抗震安全水平做出客观评估。

2 水工建筑物抗震设计方法的改进方向

2.1 地震动输入的精细化与多维化

2.1.1 场地相关地震动时程集的生成与选波准则

摒弃单一的设计地震动,转而采用一组(通常不少于7条)能够真实反映场址特定地震危险性特征的天然或人工合成地震动时程。这些时程应在幅值、频谱和持时三个维度上与目标反应谱相匹配,并能体现近断层脉冲效应等地震动特性。选波过程需遵循严格的统计准则,确保时程集的均值反应谱在关键周期段内包络或接近目标谱,同时保留足够的离散性以反映地震动的不确定性。

2.1.2 空间相干性与行波效应的精细化模拟

对于跨度大、基础分布广的水工建筑物(如长距离渡槽、大型水闸、跨河倒虹吸),必须考虑地震动在空间上的非一致性。通过引入基于实测数据或理论模型的相干函数,模拟地震波沿结构传播所产生的行波效应^[2]。这要求在动力分析中,为结构的不同支座施加具有时间延迟和相位差的地震动输入,从而更真实地反映结构各部分间的相对运动,这对于评估结构的整体稳定性和连接节点的受力状态至关重要。

2.1.3 竖向地震动作用的系统考量

传统设计往往侧重于水平地震作用,而对竖向地震动关注不足。研究表明,竖向地震动对高拱坝坝踵、坝趾的拉应力分布,重力坝的抗滑稳定性验算,以及大型机电设备基础的受力均有不可忽视的影响。改进的设计方法应明确规定在高烈度区、近断层区域或对竖向响应敏感的结构类型中,必须同步考虑竖向地震作用,并提供相应的输入参数(如竖向与水平向PGA比值、竖向反应谱)的确定方法。

2.2 结构分析模型的高保真化与非线性化

2.2.1 全三维精细化有限元建模技术

充分利用现代高性能计算能力,建立包含真实几何形状、材料分区、施工缝、灌浆廊道、排水系统等工程细节的全三维有限元模型。对于混凝土结构,应采用能够准确描述其拉压非线性、损伤演化、塑性流动和刚度退化等复杂行为的先进本构模型,如弹塑性损伤模型(Concrete Damaged Plasticity, CDP)或微平面模型(Microplane Model)。

2.2.2 多物理场耦合效应的系统集成模拟

地基-结构相互作用(SSi)精确处理上,把地基视为半无限域或用合理粘弹性人工边界条件,模拟地震波辐射阻尼效应及与上部结构动态耦合,避免地震响

应失真,尤其针对软弱地基上的高耸结构;库水-结构相互作用(FSI)高精度模拟方面,挡水建筑物先可用Westergaard附加质量法估算,高坝或复杂库形则直接用流体-固体耦合数值方法,准确捕捉动水压力影响。

2.2.3 非线性时程分析(NLTHA)作为核心验算手段

将非线性时程分析从辅助验证手段提升为核心设计验算工具,全面取代或补充传统的线弹性分析。通过对前述高保真模型施加多条经过严格筛选的地震动时程,可以全过程、全方位地获取结构在强震下的位移、速度、加速度、内力、损伤指数、能量耗散等关键响应参数,为后续的性能评估与安全评定提供直接、可靠的量化依据。

2.3 性能目标的量化与多元化

2.3.1 建立多层次、量化的性能水准体系

借鉴建筑结构化设计经验,将性能水准与工程需求挂钩。典型性能水准有:运行性能水准,结构无或仅有不影响功能的轻微损伤,震后能立即正常运行;损伤控制性能水准,结构有可修复损伤,主要功能不受影响或短期可恢复;生命安全性能水准,结构严重损伤但整体不失稳,能保障人员安全撤离;防止倒塌性能水准,结构濒临倒塌但能维持逃生时间,防止溃坝。

2.3.2 性能指标的选取与限值设定

针对每一性能水准,需选取一组能够有效表征结构状态的工程需求参数(Engineering Demand Parameters, EDPs),如坝顶位移、坝体最大拉应变、基础滑移量、残余变形等^[3]。这些EDPs的限值应通过大量的数值模拟、模型试验甚至震害调查数据进行标定,确保其与所定义的性能水准内涵一致。

2.3.3 基于功能重要性的性能目标差异化设定

不同的水工建筑物因其在流域系统中的功能重要性、失效后果的严重程度不同,所对应的性能目标也应有所差异。例如,承担城市生命线供水任务的水库大坝,其性能目标应远高于一般的灌溉或景观水库。设计时应根据工程的具体功能、社会经济价值和潜在次生灾害风险,合理选择与之匹配的性能水准和相应的地震设防水准。

2.4 风险评估与决策体系的引入

2.4.1 构建完整的地震风险分析框架

将抗震设计从传统的强度或稳定性验算提升至基于全生命周期风险的决策层面。该框架包含四个核心环节:首先,通过概率地震危险性分析(PSHA)评估场址处不同地震动参数(如PGA、Sa(T))的年超越概率;其次,利用大量非线性时程分析建立地震动强度(IM)与结构达到或超过特定性能水准概率之间的关系,形成易损性曲线;第三,量化各性能水准下的直接经济损失(如修复

成本)、间接损失(如停产损失)、人员伤亡及社会环境影响;最后,通过数学积分整合前三者,计算工程的年平均总风险(Annualized Loss),为风险管理提供统一、量化的决策依据。

2.4.2 支持基于风险的成本-效益优化设计

通过比较不同设计方案(如不同坝型、不同设防标准、是否采用减隔震措施)的全生命周期成本(Life-Cycle Cost, LCC),其中 $LCC = \text{初始建设成本} + \text{预期地震损失的折现值}$,可以选择出风险-成本最优的方案。这种方法为重大水利工程的抗震设防标准决策提供了科学、透明、量化的依据,有助于实现社会资源的最优配置。

2.4.3 抗震韧性(Resilience)理念的融入

在风险评估的基础上,进一步引入“抗震韧性”理念,即工程系统在遭受地震扰动后,吸收、适应并迅速恢复其预定功能的能力。韧性评估不仅关注损失的大小,更关注功能恢复的速度和程度^[4]。这要求设计不仅要保证“不倒”,更要考虑如何通过冗余设计、模块化设计、快速修复通道预留等措施,缩短震后恢复时间,提升系统的整体韧性。

2.5 新材料、新结构与智能监测技术的应用

2.5.1 高性能材料在抗震加固与新建中的应用

积极探索纤维增强复合材料(FRP)、超高性能混凝土(UHPC)、形状记忆合金(SMA)等新型高性能材料在水工建筑物关键部位的加固或新建应用。这些材料普遍具有高强、高韧、耐腐蚀、自感知等优异性能,能有效提升结构的抗震承载力、变形能力和耐久性,延长工程服役寿命。

2.5.2 隔震与消能减震等被动控制技术的集成

对于特别重要的或位于极高地震烈度区的水工建筑物,可考虑采用基础隔震(如高阻尼橡胶支座、摩擦摆支座)或在结构中设置阻尼器(如粘滞流体阻尼器、金属屈服阻尼器、调谐质量阻尼器TMD)等被动控制技术。这些技术通过主动“隔离”地震能量输入或在结构内部

“消耗”地震能量,从而大幅降低上部主体结构的地震响应,是一种高效、可靠的抗震设计理念。

2.5.3 健康监测与数字孪生驱动的智慧运维

在工程建成后,布设由多种传感器(如加速度计、应变计、GPS、渗压计等)组成的长期健康监测系统,并将实时监测数据与高保真的数值分析模型(即“数字孪生体”)进行深度融合。这不仅能用于震后的快速安全评估与应急决策,还能通过数据驱动的方式不断修正和优化模型参数,实现对结构性能的精准预测,为未来的预防性维护和全生命周期管理提供强大支持。

3 结语

面对日益严峻的地震安全挑战与社会对工程韧性的更高期待,传统水工建筑物抗震设计亟需系统性革新。本文提出推动其从经验性、确定性、单一目标模式,向科学化、概率化、多目标、全生命周期风险管理的现代范式转型。具体路径包括:实现地震动输入的精细化、结构分析模型的高保真化、性能目标的量化与多元化,并将其整合进基于风险的决策体系,从而构建更全面、精准、可靠的抗震设计框架。同时,融合新材料、新结构形式及智能监测与控制技术,可显著提升水工建筑物的抗震能力与震后恢复韧性。未来,随着计算能力跃升、地震观测数据积累及多学科交叉深化,水工抗震设计将迎来深刻变革,不仅保障单体工程安全,更是维护国家水安全、能源安全和公共安全的关键支撑。

参考文献

- [1]詹振彪.《水工建筑物抗震设计规范》地下结构抗震计算讨论[J].西北水电,2023,(01):42-46.
- [2]叶妮.信息化模拟技术在水工建筑物抗震设计中的应用研究[J].水上安全,2025,(21):188-190.
- [3]韩延贵.水工框架结构抗震韧性评价及改进设计研究[D].青海大学,2021.DOI:10.27740/d.cnki.gqhdx.2021.000361.
- [4]乔晨.基于动力法的水闸结构抗震分析[J].河北水利,2024,(06):32-34.