

# 地震区水利工程场地地震安全性评价与工程措施

畅鹏飞

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i2.6846

**[摘要]** 我国大陆地区地震分布广泛、强度高,水利工程抗震安全性能直接关系到公共安全与生态安全。场地地震安全性评价是地震区水利工程勘察、设计与抗震设防的关键性技术依据。本文依据现行水利水电工程与抗震技术规范,系统论述地震区水利工程场地地震安全性评价的技术内涵、工作程序与核心方法,重点对区域构造稳定性分析、地震危险性概率评估、场地类别划分、饱和砂土液化判别及地震地质灾害评价等核心内容进行系统归纳。结合工程实践经验,针对坝基、坝体、边坡、隧洞、水闸等主要建筑物,系统提出包括抗液化处理、地基加固、结构抗震加强、锚固支护、减隔震技术及安全监测在内的综合抗震工程技术对策。研究成果可为地震区水利工程勘察设计、抗震安全性鉴定、加固改造提供理论参考与实践指导。

**[关键词]** 水利工程; 地震安全性评价; 场地类别; 砂土液化; 抗震措施

中图分类号: TV5 文献标识码: A

## Seismic Safety Evaluation and Engineering Measures of Water Conservancy Project Sites in Seismic Areas

Pengfei Chang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd.

**[Abstract]** Earthquakes in mainland China are widely distributed and of high intensity, and the seismic safety performance of water conservancy projects is directly related to public safety and ecological security. Seismic safety evaluation of sites is a key technical basis for the survey, design, and seismic fortification of water conservancy projects in seismic zones. Based on the current technical specifications for water conservancy and hydropower projects and seismic engineering, this paper systematically discusses the technical connotation, work procedures, and core methods of seismic safety evaluation for water conservancy project sites in seismic zones, with a focus on systematically summarizing core contents such as regional tectonic stability analysis, probabilistic assessment of seismic hazard, site classification, discrimination of liquefaction of saturated sand, and evaluation of seismogeological hazards. Combining engineering practice experience, aiming at major structures such as dam foundations, dam bodies, slopes, tunnels, and sluices, the paper systematically proposes comprehensive seismic engineering technical countermeasures including anti-liquefaction treatment, foundation reinforcement, structural seismic strengthening, anchoring support, seismic isolation and reduction technology, and safety monitoring. The research results can provide theoretical reference and practical guidance for the survey and design, seismic safety appraisal, and reinforcement and renovation of water conservancy projects in seismic zones.

**[Key words]** water conservancy project; seismic safety evaluation; site classification; sand liquefaction; seismic measures

### 引言

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带交汇区域,地震活动呈现频率高、强度大、分布范围广的显著特征。水利水电工程常位于地质构造复杂的山区河谷地带,地形与地质条件特殊,

地震作用易诱发地基液化、坝体变形、边坡失稳、隧洞开裂及渗流破坏等多种震害,严重时可能导致溃坝、决堤等重大安全事故。依据《水利水电工程地质勘察规范》及《水工建筑物抗震设计标准》<sup>[1-2]</sup>等相关规范,对于大(1)型水利枢纽、高坝以及地

震动峰值加速度 $\geq 0.10g$ (相当于Ⅶ度及以上烈度)地区的重要工程,必须开展专门的场地地震安全性评价工作,旨在查明地震地质条件,科学确定设计地震动参数,评估地震灾害风险,并为抗震设防与工程措施提供可靠依据。本文从工程地质与勘察设计的角度,系统梳理地震区水利工程场地地震安全性评价体系及相应工程措施,以期为同类工程提供技术参考与支撑。

### 1 场地地震安全性评价内容、流程及关键技术

水利工程场地地震安全性评价划分为三个等级,分别为区域地震构造评价、近场区地震构造评价和工程场地评价。区域评价范围的半径通常不小于150公里,重点分析区域构造特征、断裂活动性及潜在震源区划分;近场区评价范围一般为25~30公里,重点评估发震断裂的空间展布特征及其对工程场地的影响;工程场地评价则以枢纽建筑物及主要构筑物为核心,开展详细地质测绘、勘探、原位测试与室内试验,并完成相关专项评价。整体工作流程遵循“资料收集→现场勘察→测试试验→地震危险性分析→场地地震效应评价→设计地震动参数确定→抗震工程措施提出”的技术路线逐步推进。

区域构造稳定性评价是地震安全性评价的基础<sup>[3]</sup>,通过地质调查、钻探、物探、槽探及年代测定等方法,判定断裂是否属于晚更新世以来活动的发震构造。对邻近关键建筑物的活动断裂应优先采取避让措施;若无法避让,则需进行专项论证并采取相应的工程处理方案。

地震危险性分析采用概率地震危险性分析(PSHA)方法,通过建立地震活动性模型和选择适宜的地震动衰减关系,计算不同概率水准下的地震动参数。水利工程的设防标准通常采用基准期50年超越概率10%(对应基本烈度)和基准期100年超越概率2%(对应罕遇地震)。核心输出参数包括峰值地面加速度、反应谱特征周期及设计地震动时程。

场地地震效应评价主要包括场地类别划分、饱和砂土与粉土液化判别以及地震地质灾害评价。场地类别依据土层等效剪切波速和覆盖层厚度划分为I0、I1、II、III、IV类,评定过程依赖于钻孔剪切波速测试与脉动观测结果。饱和砂土与粉土的液化判别需经初判和详判两阶段,通过计算液化指数 $I_{le}$ 进一步划分为轻微、中等和严重三个液化等级。地震地质灾害评价重点关注地震引发的边坡失稳、滑坡涌浪、渗透破坏等潜在灾害。

场地地震安全性评价的关键技术方法主要包括勘察与测试技术、场地地震反应分析以及静动力稳定性分析。勘察与测试多采用钻探、坑探与物探相结合的综合方法,辅以标准贯入试验、波速测试等原位试验,以及常规土工试验和动三轴试验等室内测试,以获取可靠的岩土参数。场地地震反应分析通常借助一维或二维土层反应分析程序,输入基岩地震动,计算地表地震动参数,并对设计反应谱进行修正。静动力稳定性分析采用极限平衡法与有限元法,针对坝基抗滑稳定、坝体动力响应、边坡稳定性及隧洞动力行为等进行计算分析,并通过安全系数、应力分布和位移响应等指标综合评价工程的抗震安全性。

### 2 地震区水利工程抗震工程措施

针对地震区水利工程中各类建筑物及关键部位,需系统性采取成套抗震工程措施,从整体设计到局部构造多维度提升抗震能力,以保障工程整体的抗震安全。坝基抗震处理主要针对液化地基与软弱破碎地基两类不良地基条件:对于液化地基,可采用振冲碎石桩加密、水泥土搅拌桩复合地基、浅层换填及强夯碾压等方法,通过增密、排水和增强颗粒间联结以提升其抗液化能力;针对软弱破碎地基,则通常通过固结灌浆与帷幕灌浆相结合的方式增强岩体完整性与抗渗性能,并在坝基与坝体连接区域设置齿墙、键槽及系统锚固结构等措施,进一步提高整体抗滑稳定性,防止地震时发生基础失稳<sup>[4]</sup>。

坝体抗震结构措施需依据坝型区别设计。土石坝应合理控制坝坡坡度,设置多级马道,完善内部排水反滤体系,以有效控制与消散地震引起的超静孔隙水压力,防止液化及坝体失稳;坝顶与坝坡可采用土工格栅加筋以增强整体性,并应特别加强防渗体与岸坡及坝基的连接部位,采用扩大接触面、设置止水系统等方式,防止地震作用下发生拉裂和渗漏破坏。混凝土坝则应通过合理分缝分块以协调变形,在关键部位如孔口、廊道及坝踵坝趾区配置抗震钢筋以提高抗拉性能,并可采用高性能混凝土、纤维混凝土等新型材料,全面提升结构的延性、耗能能力及抗裂韧性。

边坡抗震加固通常采用预应力锚索<sup>[5]</sup>、全长粘结锚杆与格构梁联合支护模式,增强坡体整体稳定性,并配合抗滑桩和挡土墙结构以有效抑制边坡滑移;对于表层岩土体,可通过锚喷支护与挂网喷射混凝土防止震时剥落与崩塌,同时必须完善地表截排水沟与地下排水盲洞、排水孔系统,显著降低动孔隙水压力及地下水对边坡稳定的不利影响。

输水及泄水建筑物中,隧洞与地下厂房等地下结构需在断层破碎带、节理密集区等薄弱区段采取抗震加强措施,包括超前支护、系统锚杆、可缩性钢支撑及钢筋混凝土衬砌等手段;同时应加固进出口边坡,设置明拱或护坡结构,并合理设置变形缝以释放地震应力。水闸、渡槽、倒虹吸等敞开式或高耸结构宜采用整体式底板增强基础刚度,加强闸墩与排架的环向和竖向配筋,并在接头部位采用柔性连接、减震支座与金属或黏弹性耗能阻尼装置,从而显著增强消能防冲设施与主体结构连接可靠性,避免应力集中和局部破坏。

此外,可在重要节点部位选用铅芯橡胶支座、摩擦摆支座等隔震装置,结合黏滞阻尼器与摩擦阻尼器等耗能部件,有效延长结构周期、分散和消耗地震输入能量,进一步降低结构地震动力响应;同时应全面布设强震加速度、结构位移、渗流压力及应力应变等多参数自动化监测系统,实现地震作用下的实时数据采集、动态响应分析与智能安全预警,从而构建涵盖监测—评估—控制—应急的完整多层次抗震防护体系。

### 3 工程实践要点

结合地震区水利工程的勘察设计及运行管理实践,为系统推进场地地震安全性评价并保障抗震工程措施的有效实施,需

在技术可行性、经济合理性与安全可靠之间实现统筹协调,重点把握以下四项核心要求:

其一,应坚持评价与勘察、设计协同推进。场地地震安全性评价需与工程地质勘察及结构设计全过程结合,通过资料、现场及成果同步对接,确保地震动参数和风险结论直接用于枢纽布置、结构选型与地基处理,避免评价与设计脱节,提升工程协调性与抗震可靠性。应建立跨专业协作机制,明确接口要求,实现信息高效传递与集成应用。

其二,应加强复杂场地条件下的专项论证。针对高烈度区、近活动断裂带、厚覆盖层、液化土层及岩溶区等复杂地质环境,应在常规评价基础上开展地震危险性分析、液化评价、边坡稳定性论证等深入研究,通过细化指标和优化测试方案提升结果准确性,为抗震措施提供科学依据。应结合数值模拟与物理试验,对地震波传播、土-结构相互作用等进行精细分析。

其三,应遵循科学设防原则。贯彻“预防为主、避让优先、处理为辅、监测保障”原则,选址时优先规避活动断裂和严重液化区;对无法避让的风险区域,采取可靠、经济的工程处理措施,并建设监测预警系统,实现动态风险管控。应注重设防标准的适用性与前瞻性,结合地震趋势与工程寿命合理设定目标,避免设防不足或过度。

其四,应建立健全已建工程的抗震运维机制。对运行中的水利工程,应定期进行抗震安全性能鉴定与评估,重点检测坝体、坝基、边坡等关键部位抗震能力。对不符合标准或存在隐患的建筑物,应及时加固改造,更新监测设施,采用新材料与新技术提升抗震韧性。同时完善应急预案和演练机制,提高应急响应与恢复能力,减轻灾害损失。

通过以上系统性措施的推进与落实,可显著提升地震区水利工程在全生命周期内的抗震安全性能,实现工程效益与风险控制的有机统一,为区域水资源安全与防灾减灾提供坚实支撑。

#### 4 结论

在工程实践中,应着重把握四个核心要点:首先,地震安全性评价工作须与工程勘察、设计阶段同步开展,确保评价成果能够直接指导抗震设防设计;其次,针对高烈度区、近断层区域、厚覆盖层、可液化土层及岩溶区等复杂场地条件,应开展专项论证工作,以提高评价与设计措施的针对性与可靠性;第三,应贯彻“预防为主、避让优先、处理为辅、监测保障”的基本原则,实现技术可行性、经济合理性与安全可靠性的统一;第四,对已建工程应定期进行抗震安全鉴定,并对不满足现行抗震设防要求的建筑物及时采取加固改造措施。

本文依据现行水利水电工程抗震相关规范,结合工程勘察

设计实践<sup>[6]</sup>,对地震区水利工程场地的地震安全性评价及抗震工程措施进行了系统研究,得出以下结论:

首先,场地地震安全性评价是地震区水利工程抗震设防的强制性基础工作,其核心价值体现于科学查明区域及场地的地震地质条件,合理确定设计地震动参数,有效规避活动断裂、饱和砂土液化、地震边坡失稳等重大地震风险,为工程规划、勘察与设计提供关键技术支持,是保障工程抗震安全的重要前提。

其次,地震区水利工程场地地震安全性评价主要包括区域构造稳定性评价、地震危险性分析、场地类别划分、饱和砂土液化判别及场地地震效应评价等内容,需综合运用地质测绘、钻探、原位测试、室内试验与数值模拟等多种技术方法,以确保评价成果具有科学性、准确性与可靠性,并符合工程实际需求。

第三,地震区水利工程抗震工程措施应构建全方位、多层次的防护体系,覆盖坝基、坝体、边坡、输水建筑物及泄水建筑物等关键部位,通过地基抗液化处理、岩体加固、结构加强、锚固支护、减隔震技术以及自动化监测预警等综合技术手段,全面提升工程的抗震承载能力与抗变形能力。

最后,坚持“评价—勘察—设计—施工—监测—运维”全流程管控,严格落实工程实践要点,加强复杂场地专项论证,完善已建工程的抗震运维机制,可显著提升地震区水利工程的抗震安全水平,保障其在全生命周期内的安全稳定运行,并为类似工程提供可参考的技术经验。

#### [参考文献]

[1]肖富桔.大河沟水库大坝坝型设计方案比选[J].四川水利,2017,38(01):23-25.

[2]《建筑结构》2010版抗规疑问解答01-09-道客巴巴《互联网文档资源(<http://www.doc88.com>)》,2019.

[3]谭成轩,孙叶,吴树仁,韩金良,吴芳,孙炜峰.“5.12”汶川M<sub>S</sub>8.0大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考[J].地质力学学报,2009,15(2):142-150.

[4]黄帅,刘静伟,李天昊.降雨-地震时序作用下边坡动力响应及变形失稳机理研究[J].振动与冲击,2025,44(4):265-274.

[5]王秒,李海波,刘亚群,等.顺层岩质边坡预应力锚索抗震加固机制研究[J].岩土力学,2013,34(12):3555-3560.

[6]姜杰,杨健,霍宇翔.面向地质工程专业的“机械设计基础”课程教学创新与实践——以成都理工大学为例[J].黑龙江教育(理论与实践),2025(2):69-71.

#### 作者简介:

畅鹏飞(1994--),男,汉族,陕西咸阳人,硕士,工程师,研究方向:水利水电工程地质。