

水工结构抗震设计的关键技术研究

冯秀娟

天津市水务规划勘测设计有限公司，天津 300204

摘要： 本文对水工结构抗震设计的关键技术进行了研究。分析了震害特点，总结了抗震设计的原则，包括安全性、经济性、适用性、可靠性和灵活性。接着介绍了基于抗震安全度、基于性能和基于 IDA 的抗震设计方法。然后又讨论了抗震设计中的关键技术，包括地震动输入、土结构相互作用分析、材料和构件抗震性能以及抗震加固技术。文章系统全面地介绍了水工结构抗震设计的关键技术。

关键词： 水工结构；抗震设计；关键技术；抗震加固技术

Research on Key Technologies for Seismic Design of Hydraulic Structures

Feng Xiujuan

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

Abstract： This paper researches the key technology of seismic design of hydraulic structures. The characteristics of earthquake damage are analyzed and the principles of seismic design are summarized, including safety, economy, applicability, reliability and flexibility. Then seismic design methods based on seismic safety, performance-based and IDA-based are introduced. Key technologies in seismic design are then also discussed, including ground vibration inputs, soil-structure interaction analysis, seismic performance of materials and components, and seismic reinforcement techniques. The article systematically and comprehensively introduces the key technologies for seismic design of hydraulic structures.

Key words： hydraulic structures; seismic design; key technology; seismic reinforcement technology

引言

水工结构抗震设计是水利工程领域中的重要研究方向，涉及水坝、水闸、堤防等水工建筑物的安全和稳定。在地震频发的地区，水工结构的抗震设计显得尤为关键，因为它不仅关系到工程本身的安全，还直接影响到周边环境和人民生活的安全。我国是一个地震多发国家，近年来多次发生破坏性地震，给水利工程带来了巨大的损失。因此，加强水工结构抗震设计技术的研究，提高水利工程抗地震能力，是我国水利工程领域面临的重要任务。

一、震害分析及抗震设计原则

（一）震害分析

大型水利工程由于其巨大的库容拦蓄了大量河水，在遭遇地震等灾害时，如果主体建筑受损，库水无法及时放空，就会对下游人民生命财产安全构成极大的威胁。^[1]地震灾害给人类带来了巨大的损失，对水工结构的破坏也尤为严重。本节通过分析历次地震中水工结构的破坏情况，总结出震害的主要特点和原因，以便为抗震设计提供有力的依据。

地震作为一种自然灾害，对水工结构的影响深远，其影响因素多样，包括地震波的特性、场地条件、结构类型、尺寸以及连接方式等。在地震作用下，水工结构可能出现各种震害现象，如结构破坏形态的多样性、损伤程度的轻重不一以及破坏区域的选择性。

这些震害现象的根本原因在于地震动输入的复杂性、土与结构之间的相互作用以及材料和构件本身的抗震性能。因此，在水工结构抗震设计中，必须综合考虑这些因素，以确保结构在地震发生时的安全性和可靠性。

（二）抗震设计原则

1. 安全性原则：确保结构在地震作用下不发生破坏，或在一定程度上的损伤是可修复的。
2. 经济性原则：在满足安全性的前提下，合理利用材料，降低工程成本。
3. 适用性原则：确保结构在地震作用后仍能满足使用功能和美观要求。
4. 可靠性原则：考虑地震动的随机性和不确定性，使结构具有足够的抗灾能力。
5. 灵活性原则：考虑结构在地震作用下的变形能力，以吸收

和消耗地震能量。

二、水工结构抗震设计的基本理论与规范标准

（一）地震作用机理

地震作用机理是研究地震波如何传播、作用于结构物以及这些作用对结构物造成的影响的复杂领域。地震波包括纵波（P波）、横波（S波）和面波（L波），它们在不同地层和结构中的传播特性不同，且随着传播距离增加，地震波能量逐渐衰减。地震动的特性分析关注振幅、周期、持时等参数，这些参数对结构物的影响至关重要，为抗震设计提供了重要依据。在抗震设计中，确定地震荷载是一个关键步骤，需要基于地震动特性、结构动力特性和场地条件等因素。地震反应谱是评估结构物在地震作用下响应的重要工具，通过分析地震动特性，可以绘制出地震反应谱，从而了解结构物在不同频率下的振动放大效应。为了深入理解地震作用机理，研究人员采用了多种研究方法，包括理论分析、数值模拟和实验研究，这些方法可以相互验证，为抗震设计提供更为可靠的依据。此外，地震风险分析与评估也是地震作用机理研究的重要方面，通过对地震可能造成的损失进行预测和评估，可以为抗震设计提供更为全面的风险控制策略。

（二）水工结构抗震设计规范与标准

水工结构抗震设计规范与标准是确保水工建筑物在地震作用下保持安全可靠的指导文件，它们是在长期的地震工程实践和研究中形成的，反映了人类对地震作用机理和水工结构响应特性的深入理解。我国抗震设计规范的发展从早期的经验性规定演变为现代的基于科学研究和实验验证，这一过程体现了我国对地震工程认识的深化和技术进步。为了借鉴国际先进经验和做法，我国工程师和研究人员经常对国际抗震设计标准进行对比分析，了解不同国家和地区在面对地震威胁时采取的策略和技术，为我国水工结构的抗震设计提供参考。规范的主要内容包括设计原则、设计方法、设防标准和抗震措施等，适用于水工结构的设计、施工、运维和检修各个阶段。然而，规范的实施面临着地震不确定性和设计技术复杂性等挑战，要求工程师和研究人员不断深入研究地震工程，积累工程实践经验，为规范的更新和完善提供坚实的基础，从而不断提高水工结构的抗震能力，确保其在地震作用下保持安全可靠。

三、水工结构抗震设计方法

（一）基于抗震安全度的设计方法

基于抗震安全度的设计方法是一种传统的抗震设计方法，其核心思想是在地震^[2]作用下，结构应具有足够的强度、刚度和延性，以承受地震引起的荷载和变形。为了实现这一目标，设计过程中需要确定地震动输入，这涉及根据地震波的特性、场地条件和结构类型，选取合适的地震动输入。接下来，计算结构在地震作用下的响应，包括内力、位移和变形等。然后，根据抗震安全度指标，如极限状态方程、安全系数等，判断结构在地震作用下

的安全性。这一系列步骤构成了基于抗震安全度的设计方法，旨在确保水工结构在地震发生时能够保持稳定和可靠，保护人民生命财产安全。

（二）基于性能的设计方法

基于性能的水工结构抗震设计方法将结构性能目标与地震响应相结合，通过设定性能指标如极限状态和变形限制，确保结构在地震中的安全可靠。设计过程包括明确性能指标、计算地震响应、评估性能表现以及调整设计参数以优化结构性能。^[3]这种方法使设计更加精细灵活，旨在提升水工结构在地震中的韧性，保障其长期稳定运行。

（三）基于IDA的方法

基于IDA的抗震设计方法强调性能目标，通过逐步增强地震动输入来考察水工结构在动态变化下的响应，以评估其抗震性能。设计过程从选取适宜的地震动输入开始，然后在不同强度地震动输入下进行逐步动态分析，监测结构的内力、位移和变形等指标。接着，根据预设的性能指标对结构性能进行评估，通过评估数据来确定和优化结构的抗震设计参数，如抗剪强度和连接强度等。这一方法为水工结构提供了系统的抗震性能评估和设计手段，有助于提升结构的地震适应性和安全性。^[4]

四、抗震设计中的关键技术

（一）地震动输入

地震动输入是抗震设计中的关键技术之一。在地震动输入过程中，需要考虑地震波的特性、场地条件和结构类型等因素。正确选择和处理地震动输入对结构响应的影响至关重要。^[5]

1. 地震动选取：在选取地震动记录时，需要考虑结构所在地区的地震烈度、震级和震中距离等因素，以确定合适的地震动记录。^[6]通常情况下，应选择与结构所在地区地震特性相似的地震动记录，以确保结构设计的安全性和可靠性。

2. 地震动调整：在地震工程中，根据场地条件和结构类型的不同，对选取的地震动记录进行调整是至关重要的。^[7]这可能涉及对地震动的时程、幅值、持续时间以及频谱特性进行修正，以确保所得到的地震作用能够真实反映实际可能遭遇的地震情况。这样的调整过程有助于确保结构设计能够准确地预测和应对潜在的地震风险，从而提高结构的安全性和抗震能力。

3. 地震动输入方式：在结构分析和设计中，需根据结构的特点和分析需求，确定地震动的输入方式。这可能包括单向输入、双向输入或多向输入。例如，对于简单的线性结构，单向输入可能就足够了；而对于复杂非线性结构，可能需要考虑双向或多向输入，以更真实地模拟结构在地震作用下的响应。

（二）土结构相互作用分析

土结构相互作用分析是考虑地震动输入后，分析土体与结构之间的相互作用对结构响应的影响。^[8]

1. 土体模型选取：在地震工程和岩土工程中，根据土体的物理性质和力学特性，选取合适的土体模型至关重要，以准确模拟土体在地震作用下的响应和变形行为。

2.土结构相互作用效应分析：在地震作用下，土体与结构之间的相互作用对结构的响应有着显著影响。^[9]需要通过分析这种相互作用，以评估土体对结构响应的影响，从而确保结构设计能够充分考虑并应对这种影响，提高结构的安全性和可靠性。

3.土结构整体分析：在地震工程中，将土体和结构作为一个整体进行分析，以反映土结构相互作用对结构响应的实际情况，对于确保结构的安全性和可靠性至关重要。

（三）材料和构件的抗震性能

在抗震设计中，了解和评估材料和构件的抗震性能至关重要。

1.材料性能测试：为了确保结构设计的安全和可靠，需要通过实验测试来获取结构材料的弹性模量、强度、延性等性能参数。这些参数对于评估结构在荷载作用下的反应和耐久性至关重要。

2.构件抗震性能评估：为了评估构件在地震作用下的抗震性能，必须考虑材料性能，如弹性模量、强度和延性，以及结构构件的特点，如尺寸、连接方式和工作条件。通过这些综合分析，可以预测构件在地震发生时的行为，以及其抵抗地震破坏的能力。

3.抗震设计准则：根据对构件在地震作用下的抗震性能的评估结果，需要制定合理的抗震设计准则，如强度准则、延性准则等。^[10]这些准则将确保结构设计能够有效地提高结构在地震发生时的安全性和可靠性，通过规定必要的材料和构件性能要求，以及抗震措施和构造细节，以减少地震灾害风险。

（四）抗震加固技术

抗震加固技术是对现有水工结构进行抗震性能提升的一种技术手段。

1.加固方案设计：为了提高结构的抗震能力，应根据其特点和抗震性能评估结果，制定合理的加固方案，这可能包括结构元

件的增强、连接的改善或整体结构的调整，以确保在地震发生时能有效承受震动影响。

2.加固材料选择：在选择加固材料时，应优先考虑那些具有良好的抗震性能和耐久性的材料，如钢筋、碳纤维等。这些材料能够有效地提高结构的承载能力和延性，同时具备良好的抗腐蚀和抗疲劳特性，以确保结构的长期稳定性和安全性。

3.加固施工技术：在施工过程中，选用适宜的加固技术至关重要，这涉及合理选材、应用恰当的施工方法与顺序，并严格遵守安全与质量规范。同时，必须对施工全过程进行严格监控和质量控制，确保加固工程的安全可靠。

结束语

水工结构抗震设计在保护人民生命财产安全方面至关重要，随着社会经济的快速发展，水工建筑物在防洪、灌溉、供水、发电等方面扮演着越来越重要的角色。然而，地震作为一种不可预测的自然灾害，对水工结构的安全构成了严重威胁。因此，研究水工结构抗震设计的关键技术，提高水工结构在地震中的抗震能力，对于保护人民生命财产安全具有重要意义。

本文深入探讨了水工结构抗震设计的关键技术，包括地震动输入、土结构相互作用、材料和构件抗震性能以及抗震加固技术。这些技术对于确保水工结构在地震中的安全稳定具有重要意义。水工结构抗震设计是一个综合性问题，需要从多个角度综合考虑，包括地震动输入、土结构相互作用、材料和构件抗震性能以及抗震加固技术等。只有综合考虑这些因素，才能取得良好的抗震效果。

通过本文的论述，期望为水工结构抗震设计提供有益的参考，促进我国水工结构抗震设计水平的提升，并希望引起更多研究者对水工结构抗震设计的关注，推动该领域的研究和发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李振亮. 解析水工结构抗震分析及设计 [J]. 珠江水运, 2020,(09):4647.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2020.09.022.
- [3] 冯少艳. 水工建筑物抗震设计策略探讨 [J]. 建材与装饰, 2019,(23):301302.
- [4] 叶祥记. 强震区珊瑚砂地质港口水工结构抗震设计关键技术及应用. 天津市, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 20210817.
- [5] 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):4246.
- [6] 张德康. 大型倒虹吸水工结构地震反应分析研究 [D]. 华北水利水电大学, 2021.DOI:10.27144/d.cnki.ghbsc.2021.000331.
- [7] 刘晓嫚, 闫毅志. 水工结构抗震分析及设计 [J]. 中国水运 (下半月), 2019,19(07):230231.
- [8] 李王坤. 水工结构抗震设计探讨 [J]. 山西水利, 2017,(06):4748.
- [9] 第五届全国水工抗震防灾学术交流会在宜举行 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2016,38(01):10.
- [10] 王磊. 水工建筑地下结构抗震特点及分析方法概述 [J]. 河南水利与南水北调, 2013,(04):5960.