

水工结构抗震设计探讨

徐 俏

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 天津 300000

摘要：水工结构抗震设计需满足强度、刚度与延性要求，考虑场地选择、结构选型与布置、地震作用分析等因素。大坝、水闸与输水管道等不同类型的水工结构，其抗震设计要点各异，需针对性采取措施。抗震计算方法包括拟静力法、动力分析法、反应谱法及有限元分析，而构造措施则注重钢筋配置、土石坝防护层设置及节点连接加强等。此外，抗震监测与维护也是确保水工结构安全的关键，通过实时监测与定期检查，及时发现并处理安全隐患，保障水工结构在地震作用下的稳定运行。

关键词：水工结构；抗震设计；探讨

引言：水工结构作为水利工程的重要组成部分，其抗震设计是确保结构在地震作用下安全运行的关键。随着地震活动的频繁发生，水工结构的抗震性能日益受到重视。抗震设计不仅要求结构具有足够的强度和刚度，以抵御地震引起的巨大惯性和附加荷载，还需注重结构的延性设计，以提高其在地震作用下的塑性变形能力和耗能能力。本文将从水工结构抗震设计的基本要求出发，探讨抗震设计的关键因素，分析不同类型水工结构的抗震设计要点，并介绍抗震计算方法及构造措施。同时，本文还将强调抗震监测与维护的重要性，以期水工结构的抗震设计提供全面而深入的指导，确保其在极端地震条件下的稳定性和安全性。

1 水工结构抗震设计的基本要求

(1) 强度要求：强度是水工结构抗震设计的基石。在地震作用下，结构需能够承受由地面运动引起的巨大惯性力，以及可能伴随的动水压力等附加荷载。这要求设计者在材料选择、截面尺寸确定及构造细节处理上，均需严格遵循抗震设计规范，确保结构各部分具有足够的承载力，以抵御地震作用下的极端应力状态。具体而言，需通过精确的地震响应分析，预测并评估结构在不同烈度地震下的受力情况，进而采取相应的加强措施，如增设抗震支撑、使用高强度材料等，以提高结构的整体抗震性能。(2) 刚度控制：除了强度外，结构的刚度也是抗震设计中不可忽视的重要因素。刚度决定了结构在地震作用下的变形程度。合理的刚度设计旨在将变形控制在允许范围内，避免结构因过度变形而丧失稳定性或导致次生灾害的发生。为此，设计中需综合考量结构的动力特性，如自振周期、阻尼比等，通过优化结构布置、调整构件截面及采用耗能减震装置等手段，实现刚度的合理分布与有效控制。同时，还需关注结构在地震

后的恢复能力，确保变形后的结构易于修复，快速恢复使用功能。(3) 延性设计：延性是衡量结构在地震作用下塑性变形能力的重要指标，对于提高结构的抗震韧性至关重要。延性好的结构能够在地震过程中通过自身的塑性变形吸收并耗散大量的地震能量，从而有效减轻地震对结构的直接破坏。实现这一目标，需要在设计中注重结构的塑性铰区域设计，采用延性良好的材料，如高延性混凝土、屈服点较低的钢材等，并合理设置塑性变形集中区，以引导和控制结构的塑性变形路径。此外，通过进行详细的非线性动力时程分析，可以评估结构在强震作用下的延性表现，进一步优化设计，确保结构在极端情况下的安全性能^[1]。

2 抗震设计关键因素

2.1 场地选择

场地条件作为水工结构抗震设计的首要考量，直接关系到结构的抗震响应特性与安全性。理想情况下，应选择对抗震有利的地段进行建设，这类地段通常具备坚硬土或开阔平坦、密实均匀的中硬土等特征，能够有效减少地震波的传播与放大效应，降低结构的抗震响应。相反，抗震不利地段，如软弱土、液化土、条状突出的山嘴、高耸孤立的丘等，因易于产生地基失效、地表变形等问题，应尽量避免。然而，在实际工程中，完全避开不利地段往往难以实现。此时，需采取针对性的抗震措施，如针对软弱地基进行加固处理，常用的方法包括换填法、强夯法、桩基加固等，旨在提高地基的承载能力与稳定性，减少地震作用下的沉降与变形。此外，对于存在液化风险的土层，可采用排水固结、化学注浆等技术手段进行改良，以减轻液化现象对结构安全的影响^[2]。

2.2 结构选型与布置

结构选型与布置是抗震设计的关键环节，直接关系

到结构的抗震性能与经济性。对于大坝而言,重力坝因其自身重量大、稳定性好,成为抗震设计的优选方案,但需合理设计坝体断面尺寸与材料强度,确保在地震作用下既能承受巨大的水平推力,又能保持良好的整体稳定性。拱坝则对地形与地质条件要求较高,在适宜的地形条件下,能够充分发挥其结构优势,通过拱效应将地震荷载传递至两岸山体,实现良好的抗震效果。土石坝则需注重坝体材料的选择与坝坡的稳定性设计,采用抗剪强度高的材料,如粘性土、砂砾石等,并通过合理的坝坡设计,提高坝体的整体稳定性。在结构布置方面,应遵循“均匀、对称、规则”的原则,避免质量与刚度分布不均导致的应力集中与薄弱部位。例如,水闸的闸室布置应尽量规则,减少突出部分与孔洞的设置,以降低地震作用下的动力响应。同时,应合理设置抗震缝与伸缩缝,以减轻地震引起的结构变形与应力集中,提高结构的整体抗震韧性。

2.3 地震作用分析

准确分析地震作用是抗震设计的基础,直接关系到结构安全性的评估与抗震措施的制定。常用的地震作用分析方法包括拟静力法与动力分析法。拟静力法将地震作用简化为等效的静力荷载施加在结构上进行计算,虽然方法简单直观,但精度相对较低,适用于小型水工结构或对地震作用要求不高的情况。相比之下,动力分析法能够更真实地反映结构在地震过程中的动力响应,如时程分析法,通过输入实际的地震波记录,对结构进行动力计算,可得到结构在整个地震过程中的位移、速度、加速度等反应,为抗震设计提供更为精确的数据支持。在实际工程中,应根据水工结构的重要性、规模、场地条件以及抗震设防要求等因素,选择合适的地震作用分析方法,确保结构在地震作用下的安全性与稳定性。

3 不同类型水工结构的抗震设计要点

3.1 大坝抗震设计

大坝作为水利枢纽的关键组成部分,其抗震设计直接关系到下游人民生命财产安全及水利设施的正常运行。重力坝以其结构简单、稳定性好的特点,在水坝建设中占据重要地位。其抗震设计的核心在于确保坝体在地震作用下的强度和稳定性。首先,需精确核算坝体在地震动荷载下的应力分布,避免拉应力过大导致坝体开裂或压应力超限引起材料破坏。为此,可通过增加坝体重量、优化断面形状(如采用变厚度设计)等手段,提升坝体的整体刚度和抗震性能。同时,采用高性能混凝土材料,提高坝体的抗压强度和耐久性,也是增强重力坝抗震能力的重要途径。(1)拱坝则以其对地形和地质

条件的高适应性及良好的经济性,成为特定条件下的优选坝型。拱坝的抗震设计需特别关注拱座的稳定性,拱座应牢固嵌入坚实的基岩中,通过详细的地质勘察和稳定性分析,确保拱座在地震作用下不发生滑移或倾覆。此外,拱坝的体形设计也需精心规划,合理确定拱圈半径、拱冠梁高度等参数,以优化拱坝的动力性能,减少地震响应。(2)土石坝作为另一种常见的大坝类型,其抗震设计则侧重于防止坝体的液化和滑坡。通过严格控制坝体材料的颗粒级配,确保坝体具有良好的排水性能,可有效降低地震作用下坝体发生液化的风险。同时,合理设计坝坡坡度,采用适当的加固措施(如土工格栅、加筋土等),增强坝坡的稳定性,防止地震引发的滑坡灾害^[1]。

3.2 水闸抗震设计

水闸作为控制水流、调节水位的重要水工建筑物,其抗震设计同样至关重要。水闸的抗震设计首先要确保闸室结构的整体性,通过加强闸墩与底板之间的连接,设置可靠的止水设施,使闸室在地震作用下形成一个坚固的整体,共同抵抗地震荷载。此外,闸基的抗震稳定性也是设计的关键,需对闸基进行详尽的地质勘察,必要时采取加固措施,如桩基础、深层搅拌桩等,以提高闸基的承载能力和抗滑稳定性。对于水闸的上部结构,如工作桥、交通桥等,也应进行抗震设计,确保其在地震作用下的安全。这包括采用合理的结构形式、加强节点连接、设置减震装置等,以提高上部结构的抗震韧性和变形能力。

3.3 输水管道抗震设计

输水管道作为水利系统中的生命线工程,其抗震设计同样不容忽视。管道材料的选择直接影响其抗震性能,应优先选用延性好、强度高的管材,如钢管、球墨铸铁管等,这些材料在地震作用下具有较好的变形能力和抗裂性能。在管道敷设方式上,应尽量避免穿越地震断裂带或活动断层,选择地形平坦、地质稳定的地段进行敷设。对于必须穿越不良地质条件的管道,应采取特殊的抗震措施,如设置减震支架、采用柔性接头等,以减少地震对管道的影响。管道的连接部位是抗震的薄弱环节,需采用柔性连接方式,如橡胶圈接口、波纹管接头等,以适应地震作用下管道的变形,减少连接处的破坏。同时,对管道进行必要的支撑和保护,如设置锚固墩、防护套管等,也是提高管道抗震能力的重要手段。

4 抗震计算方法及构造措施

4.1 抗震计算方法

抗震计算方法是评估水工结构在地震作用下响应情

况的重要手段。除了之前提及的拟静力法和动力分析法,反应谱法也是在实际工程中广泛应用的一种方法。反应谱法基于大量的地震记录分析,通过统计归纳得到地震反应谱,从而确定结构在地震作用下的最大反应。该方法结合了地震动的统计特性和结构的动力特性,能够较为准确地反映结构的地震响应。在使用反应谱法时,需根据场地类别、设计地震分组等因素,选择合适的反应谱曲线。不同场地类别和地震分组对应的地震反应谱特征不同,因此,正确选择反应谱曲线是确保计算结果准确性的关键。此外,对于一些复杂的水工结构,如大型拱坝、土石坝等,由于其结构形式复杂、动力特性多样,采用有限元分析方法进行抗震计算更为适宜。有限元分析方法将结构离散为有限个单元,通过计算机模拟计算结构在地震作用下的力学行为,能够更精确地反映结构的动力响应特性^[4]。

4.2 构造措施

构造措施是提高水工结构抗震性能的重要手段。在混凝土结构中,合理配置钢筋是增强结构延性、提高抗震能力的关键。例如,在大坝的坝体中设置温度钢筋和构造钢筋,可以有效提高坝体的抗裂性能和抗震能力。温度钢筋用于抵抗温度变化引起的裂缝,而构造钢筋则用于提高坝体的整体性和抗剪能力。(1)对于土石坝,由于其材料特性与混凝土结构不同,需采取针对性的构造措施。可在坝顶和坝坡设置防护层,如采用土工格栅、加筋土等材料,以增强坝体的抗剪强度和整体性,防止地震作用下坝体材料的流失。同时,对土石坝的排水系统进行优化设计,确保在地震作用下坝体内部的水分能够及时排出,降低坝体发生液化的风险。(2)在水工结构的节点部位,加强连接构造也是提高抗震性能的关键。节点是结构中的薄弱环节,其连接方式的可靠性直接影响结构的整体稳定性。因此,在设计中应采用焊接、螺栓连接等可靠的连接方式,确保节点在地震作用下的传力性能。此外,对于关键节点部位,还可采用预应力技术或增设减震装置,以提高节点的抗震能力。

4.3 抗震监测与维护

抗震监测是确保水工结构在地震作用下安全运行的重要手段。通过在水工结构上布置位移计、加速度计等监测设备,可以实时监测结构在地震过程中的反应。这些监测设备能够捕捉结构在地震作用下的位移、加速度等动态参数,为评估结构的抗震性能提供数据支持。通过对监测数据的分析,可以及时发现结构存在的安全隐患。例如,当监测数据显示结构位移超出设计允许范围时,应立即采取措施进行加固处理。此外,在日常维护中,应定期对水工结构进行检查,检查结构的外观是否有裂缝、变形等情况。对发现的问题及时进行修复和加固,确保水工结构始终处于良好的运行状态^[5]。

结束语

综上所述,水工结构的抗震设计是一个系统工程,涉及强度要求、刚度控制、延性设计等多个方面,同时需充分考虑场地选择、结构选型与布置、地震作用分析等关键因素。针对不同类型的水工结构,如大坝、水闸、输水管道等,需采取针对性的抗震设计措施,确保结构在地震作用下的安全性和稳定性。此外,抗震计算方法的选择与构造措施的实施也是提高结构抗震性能的关键。通过科学的抗震监测与维护,能够及时发现并处理结构的安全隐患,保障水工结构在极端条件下的正常运行。未来,随着抗震技术的不断进步和抗震设计理念的持续创新,水工结构的抗震设计将更加完善,为水利工程的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]朱越.解析水工结构抗震分析及设计[J].市场周刊·理论版,2020(24):0196-0196.
- [2]冯少艳.水工建筑物抗震设计策略探讨[J].建材与装饰,2019(23):301-302.
- [3]刘晓嫒,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):230-231.
- [4]韦扣均.基于反应位移法的地下结构抗震分析[J].北方建筑,2020(1):21-25.
- [5]王刚.地下水池结构抗震概念分析与研究[J].城市道桥与防洪,2020(5):286-289.