

多孔混凝土在水工结构中的透水与保温特性研究

顾滨 李欢

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7091

[摘要] 多孔混凝土由于具有特有的内部孔隙结构,在透水性和保温性方面有明显的优势,近几年来在水工结构中的应用越来越普遍。本文主要研究多孔混凝土在水工结构中透水和保温的特性,阐述其对于水工材料技术革新、生态环保性能提高、工程应用领域拓展等所具有的重要意义;然后从孔隙率和透水系数的关系机理、多孔结构对导热系数的影响规律、透水和保温性能的协同作用、不同配合比对综合性能的影响四个方面进行分析;最后从骨料级配优化、改性材料掺入、一体化构造方案构建、施工工艺改进等几个方面给出优化策略。

[关键词] 多孔混凝土; 水工结构; 透水性; 保温性; 孔隙结构; 优化策略

中图分类号: TV3 文献标识码: A

Study on the Water Permeability and Thermal Insulation Properties of Porous Concrete in Hydraulic Structures

Bin Gu Huan Li

Zhongshui Northeast Survey, Design and Research Co., Ltd.

[Abstract] Porous concrete, due to its unique internal pore structure, exhibits significant advantages in terms of water permeability and thermal insulation. In recent years, its use in hydraulic structures has become increasingly common. This paper focuses on the properties of porous concrete related to water permeability and thermal insulation in hydraulic structures, and discusses its importance for technological advancements in hydraulic materials, improvements in ecological and environmental performance, and expansion of engineering application areas. The analysis covers four aspects: the relationship between porosity and water permeability coefficient, the influence of porous structure on thermal conductivity, the synergistic effects of water permeability and thermal insulation, and the impact of different mix proportions on overall performance. Finally, optimization strategies are proposed in areas such as aggregate gradation optimization, incorporation of modified materials, development of integrated construction methods, and improvement of construction techniques.

[Key words] Porous concrete; Hydraulic structures; Water permeability; Thermal insulation; Pore structure; Optimization strategies

引言

水工结构长期处于复杂水文环境中,对建筑材料的透水性、与保温性提出了较高要求。多孔混凝土由于内部存在连通的孔隙网络,具有较好的透水和隔热性能,正在成为水工领域新型材料研究的主要方向。但是现有的研究对于两者协同作用机制的系统分析还远远不够。

1 多孔混凝土透水与保温特性的研究意义

1.1 推动水工结构材料技术革新

传统的水工结构材料主要是密实混凝土,透水性差、保温效果差,不能满足现代水工建设对材料综合性能的要求。多孔混凝土凭借独有的开放孔隙结构,在保证结构承载能力的基础上,实

现了透水和保温的有机结合,给水工材料体系技术升级赋予了新的途径。深入探究其特性,有益于推进水工结构材料由单功能向多功能复合转变,促进整个行业技术水平的提高^[1]。

1.2 提升水工建筑生态环保性能

水工建筑如果使用不透水材料,容易造成地表径流加大、水体自净能力降低等生态问题。多孔混凝土透水性好可以促进雨水自然渗透补充地下水,减少地面积水,维持水文循环平衡,保温性好可以降低水温变化幅度,保护水域生物多样性。因此,对多孔混凝土在水工结构中的应用进行研究,对于推进生态友好型水工建设、实现绿色低碳发展目标有十分重要的现实意义^[2]。

1.3 拓展多孔混凝土工程应用领域

目前多孔混凝土在路面透水铺装、城市海绵设施等地方已经比较成熟地应用,但是对水工结构的系统研究较少。探究它在坝体护坡、堤防衬砌、水渠内壁等水工场景中的透水和保温性能,既可以充实多孔混凝土的理论研究体系,又可以给水工工程师在材料选择和结构设计时提供更多的可行方案,进而扩大多孔混凝土的工程化应用范围^[3]。

2 多孔混凝土在水工结构中的透水与保温性能分析

2.1 孔隙率与透水系数的关联机制

孔隙率是决定多孔混凝土透水性能的主要因素。研究表明,孔隙率越大,混凝土内部连通孔道就越多,水分在孔隙网络中渗流的通道就越畅通,透水系数也就越大。但是它并不是简单的线性关系,孔隙的连通程度、孔径分布以及孔道弯曲率等微观特征都会对透水系数造成影响。当孔隙以封闭孔为主的时候,即使总孔隙率高,透水系数也较低;而以连通孔为主的孔隙结构可以明显提高渗透效率。水工环境中的水压梯度发生变化时,透水系数也会随之变化。因此,在水工建设实际中要考虑到孔隙率和孔隙结构特点来创建更加准确的透水系数预测模型,从而达到对多孔混凝土透水性能进行精准控制的目的,满足水工结构在各种渗流条件下工程的要求。需要注意的是,长期水流冲刷会使孔道形态慢慢发生变化,从而影响透水系数的稳定性,在工程设计阶段应该予以足够的重视^[4]。

2.2 多孔结构对导热系数的影响规律

多孔混凝土的保温性能用导热系数来表示。由于内部孔隙被充填了空气,空气的导热系数比固体骨料和水泥基体小得多,所以多孔混凝土整体导热系数比普通密实混凝土低得多,具有较好的隔热保温性能。通过研究可知,导热系数和孔隙率呈负相关关系,孔隙率越大,导热系数越小,保温效果越好。但是孔径大小和孔隙分布的均匀程度也会导热系数产生不可忽略的影响,细小均匀分布的孔隙可以有效地阻止热传导,保温效果更稳定。另外,水工环境中的孔隙内常常会有液态水充填,水的导热系数比空气大得多,使保温效果变差。因此,在评价多孔混凝土保温性能的时候,必须考虑到孔隙含水状态对于导热系数的动态影响,才能使保温性能评价结果更加接近实际情况。另外,骨料本身的矿物组成和密实程度也会对基体导热系数产生一定的影响,在选择骨料时应尽量选用导热系数低的骨料品种,从源头上提高多孔混凝土的整体保温效果^[5]。

2.3 水工环境下透水与保温性能的协同作用

透水性和保温性是多孔混凝土两个主要的功能,二者在水工结构中有内在的联系。一方面,良好的透水性可以疏导水工结构中渗流的压力,减小扬压力对结构的不利影响,引导水分有序流动,防止局部积水造成的冻融破坏;另一方面,保温性能提高可以减缓水工结构内部温度梯度的变化,降低由于热胀冷缩引起的裂缝风险,间接保持透水通道的完整。季节性温差大的水工环境里,两者共同起作用。透水与保温性能不相称就会出现孔隙堵塞、渗流异常和冻融循环损伤加大的问题。因此,研究二者在

复杂的水工环境中协同演变的规律,对提高多孔混凝土设计参数、延长水工结构使用寿命有重大的理论和现实意义。建立透水性与保温性互相制约、互相促进的量化评价指标体系,可以有利于工程设计人员在两者之间找到最佳平衡点,进而制定出更有针对性的材料配合比和构造设计方案。

3 多孔混凝土透水与保温特性的优化策略

3.1 骨料级配与孔隙结构的优化设计

骨料级配是控制多孔混凝土孔隙结构的主要方法,合理的级配设计可以达到透水性和保温性的平衡。在骨料粒径的选择上,应根据水工结构的透水要求来确定主粒径范围,一般以单粒径或者窄级配骨料为主,有利于形成连通性好、孔径均匀的孔隙网络,保证透水通道的畅通。对保温性能要求较高的水工部位,可适量掺入细骨料,改变粗细骨料的搭配比例,在保证一定连通孔的基础上提高孔壁密实度,减小整体导热系数。利用数值模拟的方法可以预测不同的级配方案下孔隙分布的特点,以孔隙率、连通孔比和平均孔径为主要的控制指标,防止出现孔隙过于集中造成结构薄弱区的情况。另外,在水工结构不同的部位,根据透水压力分布和温度场特点,采取分区变级配的设计方法,对性能进行精细化的调节。需要注意的是,骨料表面的粗糙度和吸水率也会对孔隙结构的稳定性造成影响,表面粗糙的骨料与水泥浆体的粘结性更好,有利于保持孔道形态的长期稳定,减少水工环境中由于水力冲刷造成的孔道扩大或者堵塞问题。通过对骨料级配进行系统的试验研究,得到级配参数与透水系数、导热系数之间的定量关系曲线,为以后的配合比设计提供科学依据,提高多孔混凝土在水工结构中的综合适用性。

3.2 改性材料掺入对性能提升的技术路径

在多孔混凝土中加入一定量的改性材料,可以提高多孔混凝土的透水性和保温性。粉煤灰、硅灰等活性矿物掺合料可以参与水泥水化反应,细化孔隙结构,提高骨料和水泥浆体界面过渡区的密实度,在不明显降低孔隙率的情况下提高基体强度,改善孔道稳定性及耐久性。轻质骨料掺入方面,陶粒、膨胀珍珠岩等低密度多孔轻骨料具有自身孔隙结构和较低导热系数的双重优势,掺入后可以增大整体孔隙率,同时又能降低混凝土导热系数,从而提高保温效果。纤维增强材料中聚丙烯纤维或者玄武岩纤维的掺入可以抑制混凝土内部微裂缝的扩展,防止由于裂缝贯通造成孔道结构破坏,从而保持透水通道的完整性以及长期稳定性。另外,憎水型表面处理剂的加入可以在孔道内壁形成疏水涂层,减少孔隙含水率,降低由于液态水充填造成的导热系数上升问题,对水工环境下的保温性能长效保持有积极作用。对于复合使用改性材料来说,要重视各个组分之间相容性以及协同效应,防止由于材料叠加使用而出现孔隙堵塞或者力学性能变差的情况发生。采用正交试验法对各改性材料掺量组合透水系数和导热系数进行综合评价,确定最佳掺配方案。综合使用上述的改性技术,根据水工结构具体使用的环境选择合适的掺入方案,是提高多孔混凝土性能的重要途径。

3.3 透水保温一体化构造方案的构建

从水工结构设计角度出发,创建透水 and 保温功能合一的复合构造方案,这是多孔混凝土工程化的关键之处。一体化方案的基本思想就是用合理层次化的结构设计来使各个功能层共同发挥其作用,防止单一均质多孔混凝土层因性能取舍而造成的不足。具体来说,可以采用外层透水功能层和内层保温功能层相结合的双层复合结构,外层用高孔隙率、大连通孔的多孔混凝土来保证水分渗透和排水的需求,内层用含有封闭微孔或者掺入轻质骨料的多孔混凝土来发挥隔热保温的作用,减少水工结构与外界环境之间热交换。两层结合界面处要采取专门的处理措施,防止层间开裂造成结构整体性降低。另外,在寒冷地区水工建筑物的渠道衬砌、高水压堤坝的坡面等特殊工况下,可以采用防冻功能层或者排压层,使构造体系的功能更加全面。构造厚度的设计要考虑透水量的需求、热阻的目标值以及结构承载的要求,用参数化设计的方法来确定各个功能层的合理厚度比例,防止由于层厚分配不合理造成某一个性能严重弱化。一体化构造方案设计要联系有限元数值分析和物理模型试验,对温度场、渗流场和应力场实施多物理场耦合验证,保证方案在实际水工环境中的可靠性与适用性。

3.4 水工结构中多孔混凝土的施工工艺改进

施工工艺是否合理,直接决定多孔混凝土透水和保温性能能否在工程实践中得到充分的体现。拌合工艺上要严格控制拌合时间和投料顺序,防止由于过度搅拌造成骨料表面浆体包裹层过厚,堵塞连通孔道,影响透水性能发挥。水工结构浇筑时应避免过度振捣,因为多孔混凝土骨料骨架结构比较脆弱,强振捣容易造成孔隙坍塌,破坏已有的孔隙结构;采用轻振或者免振捣工艺,并配合适当的自密实处理来保证浇筑质量。水工环境中的温湿度变化较大,在养护工艺上要注意保湿覆盖,防止早期失水过快造成孔道干缩裂缝,在寒冷季节施工时还要采取保温保暖措施,防止冻害破坏孔隙结构的连通性。模板工艺上应选择透气性好的模板材料,防止模板封闭造成混凝土表层孔隙在成型时受压变形,影响表面透水效果;合理控制拆模时间,过早拆模会造成孔道边缘破损,影响孔隙结构的完整性。施工质量控制上要

制定专门的多孔混凝土检测标准,在施工期间对透水系数、导热系数等进行定期抽样检测,及时发现并纠正工艺上的问题,保证最终成品的性能达到设计指标的要求,给水工结构的长期安全运行提供可靠的保障。

4 结语

多孔混凝土由于具有独特的孔隙结构,在水工结构的透水和保温方面有着非常大的应用前景。本文从研究意义、性能机理分析、优化策略三个方面对多孔混凝土在水工领域的主要问题进行梳理。从研究可知,孔隙率、配合比以及孔隙连通性都是决定透水和保温性能好坏的重要因素,而骨料级配优化、改性材料加入、一体化构造设计以及施工工艺改进等都是提高综合性能的有效途径。未来要继续加强多物理场耦合机理研究,完善水工环境下的多孔混凝土长期耐久性评价体系,推动该材料在更广泛的水工场景中标准化应用,为水工结构的绿色、高效建设提供坚实的材料技术支撑。在未来的实践和研究中还要积极促进多孔混凝土有关技术标准、规范的制定和完善,给多孔混凝土在水工结构上的大范围使用提供制度上的支持。

【参考文献】

- [1] 苏凯,周鑫,龚睿,等.基于水荷载增量过程的高压隧洞钢筋混凝土衬砌设计方法[J].水利学报,2025,56(12):1543-1555.
- [2] 熊优优,杨雁,崔天祥.生态多孔混凝土结构特性与性能匹配研究进展[J].河南城建学院学报,2020,29(4):35-39.
- [3] 李锦峰,范秀梅.公路路面水损害分析与多孔混凝土的特性探讨[J].科技信息,2011,(9):I0342.
- [4] 周薛霞,杨赞中,徐艳娇,等.轻质多孔混凝土防水剂的研究进展[J].材料导报,2019,33(15):2546-2551.
- [5] 袁伟,张善德,丁来彬,等.C25 建筑垃圾多孔混凝土的试验研究[J].砖瓦,2018,(2):26-29.

作者简介:

顾滨(1983—),男,汉族,上海市浦东新区人,大学本科,高级工程师,研究方向:水利(或水利水电)工程结构设计。