

超细粉煤灰替代水泥对混凝土抗冻性能的影响

胡 玥¹, 刘 猛²

(1. 陕西悦腾工程检测有限公司, 陕西 咸阳 712000;

2. 西安大地工程检测有限公司, 陕西 西安 710018)

摘 要 为探究超细粉煤灰替代水泥对混凝土抗冻性能的影响, 本文分析了相关影响因素并提出应对策略, 以影响混凝土抗冻性能的多个因素为切入点, 研究了超细粉煤灰的粒径及比表面积、水泥类型选择、替代量、水胶比和环境因素等对其的作用。结果表明, 这些因素均会对混凝土抗冻性能产生不同程度的影响。为提高混凝土抗冻性能, 可通过控制超细粉煤灰替代水泥的适量、选择合适的水泥类型、提高超细粉煤灰的活性、优化水胶比以及改善养护条件等措施来实现。明确超细粉煤灰替代水泥与混凝土抗冻性能之间的关系, 对于提升混凝土性能具有重要意义。

关键词 超细粉煤灰; 水泥; 混凝土; 抗冻性能

中图分类号: TQ172.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.08.014

0 引言

在建筑领域, 混凝土作为核心材料, 其性能直接关系到建筑质量与安全。随着基础设施建设向寒冷地区不断拓展, 对混凝土抗冻性能提出了更高要求。传统水泥基混凝土在冻融循环作用下, 易出现结构劣化、耐久性降低等问题。超细粉煤灰作为一种工业废料再利用的潜在材料, 因其独特的物理化学性质, 有望改善混凝土性能。研究超细粉煤灰替代水泥对混凝土抗冻性能的影响, 不仅能挖掘其在提升混凝土抗冻性方面的潜力, 还能实现资源的高效利用, 降低建筑成本, 为寒冷地区的建筑工程提供更优质、可持续的材料解决方案。

1 超细粉煤灰替代水泥的影响因素

1.1 超细粉煤灰的粒径及比表面积

超细粉煤灰的粒径和比表面积是影响其替代水泥效果的关键物理特性。粒径较小的超细粉煤灰, 其颗粒分布更为均匀, 能更好地填充水泥颗粒间的空隙, 使混凝土的微观结构更加致密。而比表面积越大, 意味着其表面活性位点越多, 能与水泥水化产物发生更充分的火山灰反应。当超细粉煤灰粒径过小时, 虽然填充效应增强, 但需水量也会增加, 若不能合理控制, 会导致混凝土的工作性能下降^[1]。同时, 比表面积过大可能会使早期反应过于剧烈, 影响混凝土的凝结时间和强度发展。研究表明, 在一定范围内, 随着超细粉煤灰粒径减小和比表面积增大, 混凝土的抗冻性能会有所提升, 因为更致密的结构能有效抵抗冻融循环过程中冰晶的膨胀压力。然而, 一旦超出合适范围,

负面效应就会显现, 如因用水量增加导致孔隙率上升, 反而削弱抗冻性能。

1.2 水泥类型的选择

水泥是混凝土中最主要的胶凝材料, 它的种类对用超细粉煤灰代替水泥有很大的影响。不同种类的水泥, 由于其矿物成分及化学组成的不同, 其水化特征及强度发育也存在差异。如普通硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥, 当掺入超细粉煤灰后, 其性能会发生变化。普通硅酸盐水泥早期强度增长很快, 掺入超细粉煤灰后, 早期可获得一定强度, 但后期强度增长缓慢。复合硅酸盐水泥因其掺量大, 可与超细粉煤灰发挥更好的协同作用, 并可在后期不断进行水化反应, 有利于其强度持续增长及微结构优化。从抗冻性角度看, 水泥种类对混凝土孔结构及孔溶液化学成分有重要影响。适当的水泥种类和超细粉煤灰配合使用, 可使混凝土内部结构更加稳定, 孔隙减少, 抗冻能力增强。如果水泥种类选择不当, 则会加剧冻融作用下混凝土结构的损伤。

1.3 超细粉煤灰的替代量

超细粉煤灰的替代量是影响混凝土性能的关键参数。当替代量较低时, 超细粉煤灰主要发挥填充效应和微集料效应, 改善混凝土的微观结构, 对强度和抗冻性能有一定的提升作用。随着替代量的增加, 火山灰反应逐渐占据主导, 持续消耗水泥水化产生的氢氧化钙, 生成更多的凝胶物质, 进一步细化孔隙结构, 提高混凝土的密实度, 从而增强抗冻性能。但替代量过高时, 会带来一系列问题^[2]。水泥含量的大幅减少

会导致混凝土早期强度增长缓慢,影响施工进度。同时,过多的超细粉煤灰可能会使混凝土的需水量增加,工作性能变差。而且,过高的替代量可能导致混凝土内部碱性环境降低,影响水泥水化的正常进行,使混凝土结构变得疏松,抗冻性能急剧下降。因此,确定合理的超细粉煤灰替代量是实现混凝土性能优化的关键,需要综合考虑工程需求、施工条件等多方面因素。

1.4 水胶比

水胶比是指混凝土中水与胶凝材料(水泥和超细粉煤灰等)的质量比,它对混凝土的性能起着决定性作用。在超细粉煤灰替代水泥的混凝土中,水胶比直接影响着混凝土的孔隙结构和强度。较低的水胶比能使混凝土形成更为致密的微观结构,减少连通孔隙,降低水分的渗入通道。在冻融循环过程中,水分在孔隙中结冰膨胀是导致混凝土破坏的主要原因。水胶比低的混凝土,孔隙率小,且大部分孔隙为封闭孔,能有效抑制水分的侵入和冰晶的生长,从而提高抗冻性能。相反,水胶比过高,会使混凝土内部孔隙增多、孔径增大,水分容易在孔隙中积聚,在冻融循环时产生较大的膨胀应力,加速混凝土结构的破坏。同时,水胶比还影响着水泥和超细粉煤灰的水化程度,过高的水胶比会稀释胶凝材料周围的离子浓度,延缓水化反应,降低混凝土的强度和耐久性。

1.5 环境因素

用超细粉煤灰代替水泥后,环境因素对混凝土抗冻性能的影响不容忽视。在低温环境中,水分更易发生冻结,冰晶膨胀压力可导致混凝土结构破坏。环境湿度是影响混凝土耐久性的关键因素之一,高湿度环境下,混凝土内部含水量增加,冻融循环加剧了混凝土损伤程度。此外,环境侵蚀介质(如氯离子、硫酸盐等)可与混凝土组成发生化学反应,破坏混凝土内部结构,降低抗冻性能^[3]。这一侵蚀现象在海洋环境中或经常使用除冰盐的地区表现得更为明显。冻融次数频繁,导致混凝土内部损伤不断累积,最终导致结构破坏。因此,在考虑超细粉煤灰替代水泥对混凝土抗冻性能的影响时,必须充分考虑实际使用环境,通过合理的配合比设计和防护措施,提高混凝土在复杂环境下的抗冻耐久性。

2 提高混凝土抗冻性能的应对策略

2.1 控制超细粉煤灰替代水泥的适量

在混凝土中,超细粉煤灰替代水泥的比例并非越高越好。适量的替代能够充分发挥超细粉煤灰的填充和火山灰效应,改善混凝土微观结构,增强抗冻性能。

当替代量过低时,超细粉煤灰的优势无法充分体现;而替代量过高,水泥含量大幅减少,早期强度增长缓慢,影响施工进度,还会使混凝土需水量增加,孔隙率上升,降低抗冻性。

通过大量实验研究表明,对于一般建筑工程,超细粉煤灰替代水泥的最佳比例通常在10%~30%之间。在实际工程应用中,需根据具体工程需求、混凝土设计强度等级以及施工环境等因素,通过试验确定精准的替代量。例如,在严寒地区的水工建筑中,由于对混凝土抗冻性能要求极高,替代量可能会控制在较低水平,以确保混凝土在恶劣环境下的耐久性;而在一些对早期强度要求不高的大体积混凝土工程中,可适当提高替代量,在保证抗冻性能的同时,降低成本。

2.2 选择合适的水泥类型

水泥是混凝土中最重要的胶凝材料,其种类对混凝土抗冻性能有很大的影响。普通硅酸盐水泥的早期强度提高较快,而抗冻性较差;特别是耐硫酸盐水泥、硅酸盐大坝水泥,由于其特殊的矿物成分及化学组成,具有优异的抗冻、抗冲击性能。水泥种类的选择应从工程环境及混凝土性能的要求出发。对于需要抗冻的寒区工程,应优先选用抗冻性较好的水泥品种。同时,对超细粉煤灰与水泥的适应性也应加以考虑^[4]。例如,部分水泥矿物组分可与超细粉煤灰产生协同作用,加速二次水化,形成更多胶凝材料,细化孔结构,改善混凝土抗冻性能。

此外,水泥的稳定性也不可忽视,混凝土的稳定性差会引起混凝土内部结构的不稳定,冻融作用下容易产生裂缝。

2.3 提高超细粉煤灰的活性

超细粉煤灰活性的高低直接影响其在混凝土中发挥作用的程度,进而影响混凝土的抗冻性能。物理激发手段中,机械粉磨是常用且有效的方法。通过机械外力对超细粉煤灰进行研磨,能使原本较大的颗粒进一步细化,显著增加其比表面积。比表面积增大意味着更多的活性位点暴露在外,从而更易与水泥水化产物发生火山灰反应。在粉磨时,要严格把控粉磨时间与研磨介质的选择,时间过短,粉磨效果不佳;时间过长,不仅能耗增加,还可能导致颗粒团聚。化学激发则依赖于碱性激发剂。以氢氧化钠、碳酸钠等为代表的碱性物质,能与超细粉煤灰中的活性成分发生化学反应,促使其溶解并参与后续反应,加速火山灰反应进程。在使用化学激发剂时,必须精准控制用量,过少激发效果不明显,过多则可能影响混凝土的凝结

时间和强度发展。将物理与化学激发相结合的复合激发方式,优势更为突出。先进行机械粉磨为化学激发创造良好的物理条件,再添加激发剂,能充分发挥两者的协同作用,大幅提高超细粉煤灰活性,增强混凝土内部结构的稳定性,有效提升混凝土抗冻性能。

2.4 优化水胶比

水胶比在混凝土性能的塑造中扮演着极为关键的角色,尤其是对混凝土抗冻性能有着决定性影响。水胶比,即水与胶凝材料(水泥和超细粉煤灰等)的质量比,直接关联着混凝土内部孔隙结构的形成^[5]。当水胶比较低时,混凝土在硬化过程中,水泥和超细粉煤灰能够更为紧密地结合,形成的微观结构更加致密,连通孔隙大幅减少。这就好比搭建一座坚固的城堡,紧密排列的砖块使得外界的“入侵”变得困难,水分难以渗入混凝土内部,在冻融循环过程中,因水分结冰膨胀导致的破坏风险也随之降低,从而显著提高混凝土的抗冻性能。然而,过低的水胶比也会带来弊端。混凝土的工作性能会受到严重影响,其流动性和可塑性变差,这在实际施工过程中会大大增加施工难度,导致混凝土难以均匀地填充模板,影响建筑结构的成型质量。为了保证混凝土工作性能的同时优化水胶比,高效减水剂发挥着重要作用。它能在不增加用水量的前提下,有效分散水泥和超细粉煤灰颗粒,提高混凝土的流动性和可塑性,为实现低水胶比创造条件^[6]。并且,由于超细粉煤灰的物理特性,其需水量与水泥存在差异,所以必须通过大量试验,依据不同的工程需求和材料特性,精准确定最佳水胶比。例如,当超细粉煤灰比表面积较大时,其表面能高,对水分的吸附能力强,需水量相应增加,此时就需要适当调整减水剂用量和水胶比,确保混凝土在施工过程中具有良好的工作性能,又能在成型后具备优异的抗冻性能^[7]。

2.5 改善养护条件

养护条件是影响混凝土抗冻性的重要因素,混凝土浇筑完成后,超细粉煤灰与水泥之间的水化反应是分阶段进行的,而合适的养护条件是保证该反应充分进行的关键。在补湿养护方面,如果混凝土表面水分蒸发过快,水泥水化反应不充分,就会导致混凝土内部结构疏松、孔隙增多抗冻性能下降。在混凝土表面覆盖一层塑料膜,可有效地防止水分散失,保持混凝土表面湿度,为水化反应提供足够的水分。浇水养护就是定期给混凝土表面补水,使其保持湿润^[8]。随着温度的降低,水泥及超细灰的水化反应速度明显减慢。如果不加保温措施,混凝土内部结构形成过程受阻,强度增长缓慢,就难以起到有效抵御冻融的作用。搭

建温室可为混凝土提供相对稳定的采暖环境,而采用加热装置可直接提高混凝土环境温度,加速水化反应过程。

另外,延长养护周期也很重要。随着养护时间的延长,水泥与超细灰的水化反应更彻底,形成更多胶凝材料,填充孔隙,使混凝土结构更加致密^[9]。在养护期间,要密切关注混凝土内部温湿度的变化,根据实际情况对养护措施进行灵活调整,以全面提高混凝土的抗冻能力。

3 结束语

超细粉煤灰的粒径及比表面积、水泥类型的选择、替代量、水胶比和环境因素等,均与混凝土抗冻性能密切相关。粒径较小、比表面积大的超细粉煤灰在合理替代量下,能改善混凝土微观结构,增强抗冻性。合适的水泥类型、优化的水胶比以及良好的养护条件,对提升抗冻性能同样关键。通过控制这些因素,采取如控制替代量、提高超细粉煤灰活性等应对策略,可有效提升混凝土抗冻性能。这不仅为混凝土材料的优化提供了理论依据,也对寒冷地区建筑工程的材料选择与应用具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 吴兆锋,毕琛琛.超细粉煤灰水泥复合材料的基本性能试验研究[J].中国新技术新产品,2023(07):68-70.
- [2] 姚兆龙.超细粉煤灰混凝土抗压拉强度试验与分析[J].四川建材,2018,44(12):21,29.
- [3] 李启坤,李莉,张琪,等.超细粉煤灰在氯化聚乙烯胶管中的应用研究[J].中国资源综合利用,2018,36(05):12-13,25.
- [4] 王玉斌,尹韶宁,潘栋,等.超细粉煤灰特性及其在混凝土中的应用研究[J].混凝土与水泥制品,2024(04):96-100.
- [5] 赵新峰.高温养护对水泥复合胶凝材料力学性能的影响[J].四川建材,2019,45(03):14-15.
- [6] 郑蔚,刘大翔,张琳瑶,等.不同类型外掺料对植被混凝土抗冻性能的影响[J].金属矿山,2025(01):300-308.
- [7] 刘海峰,姜彦杰,孙竞鹏,等.硫酸盐冻融下沙漠砂混凝土抗冻性能及基于 GM(1,1) 模型强度预测[J].功能材料,2024,55(12):12151-12161.
- [8] 杨怀志,刘学文,杨志强.气泡参数对无砟轨道支承层混凝土抗冻能力影响分析[J].国防交通工程与技术,2024,22(06):20-24.
- [9] 于永波.氯盐与冻融耦合状态下水工混凝土抗冻性研究[J].水利科学与寒区工程,2024,07(10):43-45.