

水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能研究

刘文军

中铁建设集团中原建设有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 随着城市化进程加快,建筑废弃物激增,传统道路材料消耗加剧生态压力,研究水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能意义重大。基于此,本文分析再生集料物理与化学特性,探究其粒径、掺量、水泥剂量、级配、含水量及环境温度等因素对抗冻性能的影响机制。研究表明,较小粒径和适量掺量的再生集料可提升抗冻性,而大粒径、高掺量及不合理级配、含水量则降低性能;较高水泥剂量和适宜环境温度有助于增强抗冻性。在此基础上,提出了优化再生集料处理工艺、合理设计配合比、添加外加剂、加强施工质量控制等提升措施。研究成果为建筑固废资源化利用提供理论与技术支持,助力缓解天然集料短缺、降低环境污染,后续还需深入研究不同工况下的性能变化,完善技术标准。

关键词: 水泥稳定; 建筑固废; 再生集料抗冻性能

引言:随着城市化进程的加速,建筑废弃物的产生量急剧增加。据统计,全球每年约有20亿吨建筑废弃物产生,而我国作为城市化快速发展的国家,建筑废弃物的产生量也在逐年攀升。这些建筑废弃物若得不到妥善处理,不仅会占用大量土地资源,还会对周边环境造成严重污染。与此同时,传统道路建设材料如天然砂石、水泥等的大规模开采和使用,加剧了自然资源的消耗和生态环境的破坏。所以,针对水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能研究是非常有必要的。

1 建筑固废再生集料的特性分析

1.1 物理特性

建筑固废再生集料的物理特性对其在水泥稳定混合料中的性能表现具有重要影响。从颗粒形态来看,再生集料通常具有不规则的形状,与天然集料相比,其表面更加粗糙,含有较多的棱角和孔隙。不规则的颗粒形态使得再生集料在混合料中的嵌挤作用和摩阻力发生变化,进而影响混合料的整体性能。

在密度方面,再生集料的毛体积密度低于天然集料。主要由于再生集料在破碎过程中,表面附着了一定量的水泥砂浆,导致其内部孔隙增多,结构相对疏松。吸水率是再生集料的一个重要物理指标,研究表明,再生集料的吸水率远高于天然集料^[1]。如,某些再生集料的24小时吸水率可达天然集料的6倍左右究其原因再生集料表面的孔隙和裂纹较多,能够吸收和储存更多的水分。高吸水率不只是会影响混合料的工作性的,需要增加拌合水的用量,还可能对混合料的强度和耐久性产生不利影响。

1.2 化学特性

建筑固废再生集料的化学特性主要源于其来源。再生集料来源于废弃混凝土和其他建筑材料,其矿物组成包含水泥、硅酸盐、碳酸钙等。这些成分的化学稳定性和反应活性对水泥稳定混合料的性能有着重要影响。如,水泥水化产物在再生集料表面形成一层界面过渡区,该区域的强度和稳定性相对较弱,容易成为混合料中的薄弱环节。除此之外,再生集料中可能含有一些杂质,如粘土、淤泥、粉砂等,这些杂质会黏附在再生集料的表面,妨碍水泥与再生集料的粘结,降低混合料的强度,同时增加再生集料混凝土的用水量,加大再生混凝土的收缩,降低抗冻性和抗渗性。

2 影响水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能的因素

2.1 再生集料粒径

再生集料粒径是影响水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能的重要因素之一。不同粒径的再生集料在混合料中的分布和作用不同,从而对抗冻性能产生不同影响。一般来说,随着再生集料粒径的增大,混合料的最佳含水率增大,最大干密度减小。

在抗冻性能方面,研究表明,掺加较小粒径(如4.75~9.5mm)的再生集料时,经过一定次数(如5次)的冻融循环,混合料冻融循环后强度随着掺量增加先升高后降低。这可能是因为较小粒径的再生集料能够更好地填充混合料中的孔隙,提高混合料的密实度,在一定程度上增强其抗冻性能。但当掺量过高时,再生集料中的薄弱环节增多,导致强度下降。而掺加较大粒径(如9.5~19mm与19~26.5mm)的再生集料时,随着再生集料掺量、粒径以及冻融循环次数的增加,混合料的冻融循环后强度逐渐降低^[2]。这是因为较大粒径的再生集料在冻融循环过程中,

更容易受到温度变化引起的应力作用,导致颗粒破碎和混合料内部结构破坏,从而降低抗冻性能。

2.2 再生集料掺量

随着再生集料掺量的增加,混合料的路用性能指标均出现劣化现象。在抗冻性能方面,不同掺量下混合料冻融后的强度损失存在明显差异。

实验研究表明,在较低掺量范围内(如10%~18%),冻融强度损失的下降幅度较大。这可能是因为适量的再生集料掺入,能够在一定程度上改善混合料的级配,提高其密实度和内部结构的稳定性,从而增强抗冻性能。但,当掺量超过一定范围(如18%~28%)时,冲刷质量损失的下降幅度较大,且冻融强度损失也随之增加。这是因为过高的再生集料掺量会导致混合料中再生集料的薄弱环节增多,再生集料与水泥浆体之间的界面粘结性能下降,在冻融循环过程中,水分更容易进入混合料内部,产生冻胀压力,严重破坏混合料的结构,进而降低抗冻性能。

2.3 水泥剂量

水泥在水化过程中会形成胶凝物质,将集料颗粒粘结在一起,提高混合料的整体强度和稳定性。一般来说,随着水泥剂量的增加,水泥稳定建筑固废再生集料的抗压强度和抗冻性能会得到提高。

针对抗冻性能而言,较高的水泥剂量可有效降低材料的吸水率以及质量损失率。这是因为水泥水化产物填充了混合料中的孔隙,显著减少了水分的渗透通道,降低了水分在冻融循环过程中对混合料的破坏作用^[3]。如,有研究表明,在水泥稳定碎砖块集料中,抗冻性随着水泥剂量提高呈增强趋势。当水泥剂量较低时,混合料中的胶凝物质不足,无法有效粘结集料颗粒,在冻融循环过程中,混合料容易出现强度下降和结构破坏;而当水泥剂量增加到一定程度时,混合料的强度和抗冻性能得到显著改善。

2.4 级配

级配是指混合料中不同粒径集料的组成比例。良好的级配能够使混合料中的集料颗粒相互嵌挤、填充,形成紧密的结构,从而提高混合料的密实度和强度,增强其抗冻性能。

在水泥稳定建筑固废再生集料中,如果级配不合理,如细集料过多或粗集料过多,都会对抗冻性能产生不利影响。一方面,细集料过多会导致混合料的比表面积增大,需要更多的水泥浆体来包裹集料颗粒,从而增加了水泥用量,且可能导致混合料的收缩增大,降低抗冻性。另一方面,粗集料过多则会使混合料的空隙率增

大,水分容易渗透和积聚,在冻融循环过程中产生较大的冻胀压力,破坏混合料的结构。所以,通过优化级配设计,使混合料中的粗、细集料比例合理,能够提高混合料的抗冻性能。

2.5 含水量

众所周知,含水量是影响水泥稳定材料性能的重要因素之一。在水泥稳定建筑固废再生集料中,合适的含水量能够保证水泥充分水化,使混合料具有良好的工作性和强度发展。然而,含水量过高或过低都会对抗冻性能产生不利影响。

含水量过高时,混合料在冻融循环过程中,水分结冰会产生较大的冻胀压力,导致混合料内部结构破坏。与此同时,过多的水分会使混合料的孔隙率增大,降低其密实度和强度。含水量过低时,水泥水化不充分,混合料的强度发展不足,且在冻融循环过程中,由于水分不足,无法形成有效的缓冲作用,也容易导致混合料强度下降。因而,利用击实试验确定最佳含水率,并在施工过程中严格控制含水量,对于提高水泥稳定建筑固废再生集料的抗冻性能至关重要。

2.6 环境温度

在寒冷地区,温度的周期性变化会导致混合料中的水分反复冻结和融化,从而产生冻融循环作用,对混合料的性能造成破坏。低温环境下,水分结冰体积膨胀,会对混合料内部产生冻胀压力。当冻胀压力超过混合料的抗拉强度时,就会导致混合料内部产生微裂缝,随着冻融循环次数的增加,微裂缝逐渐扩展和连通,最终导致混合料强度下降和结构破坏。另外,环境温度的变化还会影响水泥的水化反应速率和强度发展。在低温条件下,水泥水化反应减缓,混合料的早期强度增长缓慢,这也会降低其在冻融循环过程中的抵抗能力。

3 提高水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能的措施

3.1 优化再生集料处理工艺

为了提高水泥稳定建筑固废再生集料的抗冻性能,需要优化再生集料的处理工艺。首先,应对再生集料进行冲洗或过筛处理,以清除其中的粘土、淤泥、粉砂等有害杂质。这些杂质会妨碍水泥与再生集料的粘结,降低混合料的强度和抗冻性。经过冲洗或过筛,可以有效减少杂质含量,提高再生集料的质量。其次,采用先进的破碎和筛分设备,对再生集料进行精细加工,控制其粒径分布,使其具有良好的级配。良好的级配能够使混合料中的集料颗粒相互嵌挤、填充,形成紧密的结构,提高混合料的密实度和强度,从而增强其抗冻性能。

3.2 合理设计配合比

应根据再生集料的特性和工程要求, 确定合适的水泥剂量、再生集料掺量和集料级配。

第一, 在水泥剂量方面, 可采用实验确定最佳水泥剂量, 以保证混合料具有足够的强度和抗冻性能。同时, 要考虑水泥剂量对混合料经济性的影响, 避免水泥用量过高导致成本增加。第二, 在再生集料掺量方面, 根据实验结果和工程实际, 选择合适的掺量范围。一般来说, 较低的掺量(如10%~18%)可以在一定程度上提高混合料的抗冻性能, 同时降低成本。第三, 在集料级配方面, 优化粗、细集料的比例, 使混合料具有良好的工作性和力学性能。可以采用骨架密实型级配, 使粗集料形成骨架, 细集料填充空隙, 提高混合料的密实度和稳定性。

3.3 添加外加剂

早强剂可以加速水泥的水化反应, 提高混合料的早期强度, 使其在低温环境下能够更快地形成一定的强度, 抵抗冻融循环的破坏。如, 甲酸钙早强剂能够促进水泥浆中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 凝胶的形成, 提高材料的粘结力, 从而增强混合料的抗冻性能^[4]。引气剂可以在混合料中引入大量微小、均匀分布的气泡, 这些气泡能够缓解冻融循环过程中水分结冰产生的冻胀压力, 减少混合料内部的应力集中, 提高混合料的抗冻性能。但引气剂的掺量需要严格控制, 过量掺入会导致混合料强度下降。

3.4 加强施工质量控制

加强施工质量控制对于保证水泥稳定建筑固废再生集料的抗冻性能至关重要。在施工过程中, 应严格控制含水量, 按照击实试验确定的最佳含水率进行拌和和施工。含水量的波动会直接影响混合料的密实度和强度, 进而影响其抗冻性能。当含水量过高时, 混合料在压实过程中容易出现“弹簧”现象, 无法达到规定的压实度, 且过多的水分在冻融循环过程中结冰膨胀, 会对混合料结构造成严重破坏; 当含水量过低时, 水泥无法充分水化, 混合料的强度发展不足, 抗冻性能也会降低。

并且, 要保证混合料的均匀性和压实度。采用合适

的拌和设备和施工工艺, 确保水泥、再生集料和天然集料充分混合均匀。强制式搅拌机相比自落式搅拌机, 能够更有效地实现各种材料的均匀拌和, 避免出现局部水泥含量过高或过低的情况。在压实过程中, 严格按照规范要求进行操作, 控制压实遍数和压实速度, 使混合料达到规定的压实度。一般来说, 对于水泥稳定再生集料基层, 压实度应不低于97%。良好的压实度能够减少混合料内部的孔隙, 降低水分渗透的可能性, 提高抗冻性能。在某高等级公路施工中, 通过采用重型压路机进行分层压实, 并严格控制压实工艺, 使基层混合料的压实度达到了98%以上, 经过多年的使用, 该路段在冻融环境下依然保持良好的使用性能。

结语: 综上所述, 水泥稳定建筑固废再生集料的抗冻性能受再生集料粒径、掺量、水泥剂量、级配、含水量及环境温度等多种因素综合影响。合理优化再生集料处理工艺、设计配合比、添加外加剂并加强施工质量控制, 可有效提升其抗冻性能。研究成果对推动建筑固废资源化利用、缓解天然集料短缺、降低环境污染具有重要意义, 为道路工程等领域应用水泥稳定建筑固废再生集料提供了理论依据与技术支持。但问题是, 实际工程环境复杂多变, 未来仍需进一步深入研究不同工况下再生集料的性能变化, 完善相关技术标准, 以促进建筑固废再生集料更广泛、高效地应用于工程建设。

参考文献

- [1] 郑甲佳, 张来君, 王曦辉, 等. 水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能研究[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 95-103.
- [2] 杜朝伟, 管玉见, 杜立辉, 等. 固废基层路面基层材料的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(2): 128-133, 143.
- [3] 宾伟, 黄靓, 曾令宏, 等. 水泥固化再生骨料改性盐渍土的路用性能研究[J]. 公路, 2024, 69(8): 94-100.
- [4] 解建伟, 陈智勇, 张军辉. 水泥稳定建筑固废再生集料力学性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 94-104.