

球形粗骨料与传统粗骨料在建筑混凝土中的对比分析

唐好建 杨溟鑫 邢德进 苏敦磊

山东交通学院 山东济南 250357

摘要: 粗骨料作为混凝土的核心组分, 其形态、级配等特性直接决定混凝土的工作性能、力学性能及耐久性能。传统粗骨料以碎石、卵石为主, 存在形态不规则、棱角多等特点, 易导致混凝土内部应力集中、流动性不佳等问题。球形粗骨料凭借其优异的颗粒形态, 在改善混凝土综合性能方面展现出显著优势。本文以球形粗骨料与传统粗骨料为研究对象, 从颗粒特性参数入手, 系统对比分析两种骨料在混凝土工作性、力学性能、耐久性能及经济环保性方面的差异, 揭示球形粗骨料提升混凝土性能的作用机理。研究表明: 球形粗骨料可使混凝土坍落度提升 15%~30%, 28d 抗压强度提高 10%~20%, 抗渗等级提升 1~2 级; 在同等级性能要求下, 采用球形粗骨料可减少水泥用量 5%~10%, 降低混凝土生产成本。本文研究为球形粗骨料在建筑工程中的推广应用提供理论支撑与实践参考。

关键词: 球形粗骨料; 传统粗骨料; 混凝土性能; 工作性; 力学强度; 耐久性能

1 球形粗骨料与传统粗骨料的颗粒特性对比

粗骨料的颗粒特性主要包括粒形、表面纹理、级配及空隙率, 这些参数直接影响骨料与水泥浆体的黏结性能及混凝土内部的结构密实性。球形粗骨料与传统粗骨料在颗粒特性上存在显著差异, 具体对比如下。

1.1 粒形与表面纹理

通常采用粒形系数(颗粒长轴与短轴的比值)和球形度(颗粒与同体积球体的接近程度)来评价粒形, 其中传统碎石粒形系数一般为 1.8 - 2.5、球形度较低、多呈棱角状或针片状且表面存在明显凹凸纹理, 天然卵石粒形系数约为 1.5 - 2.0、球形度略高于碎石但仍存在扁形、棒形等不规则形态且表面因水流冲刷相对光滑但仍有细小纹理; 球形粗骨料经破碎、整形、筛分等工艺制备, 其粒形系数可控制在 1.0 - 1.2 之间、球形度高达 0.9 以上、颗粒形态接近完美球体, 表面经特殊处理后光滑度均匀、无明显棱角和凹凸缺陷, 这种规整粒形使骨料颗粒之间接触由传统骨料的“点接触”转变为“面接触”以有效减少颗粒间应力集中现象^[1]。

1.2 级配与空隙率

级配指骨料颗粒的大小搭配情况, 合理级配通过降低骨料空隙率、减少水泥浆体用量, 而传统粗骨料级配因受天然资源和破碎工艺限制, 易出现级配间断现象, 导致较高空隙率(碎石空隙率一般为 40% - 45%, 天然卵石空隙率约为 35% - 40%); 球形粗骨料凭借精准筛分实现连续级配, 使

得颗粒大小分布均匀、相邻颗粒嵌挤作用更合理, 将空隙率降低至 30% - 35%, 较低空隙率意味着配制混凝土时相同体积骨料所需填充水泥浆体更少, 进而不仅降低水泥用量, 还提升混凝土密实性, 试验数据表明在相同级配区内, 球形粗骨料空隙率相比传统碎石低 8% - 12%、相比天然卵石低 5% - 8%。

2 两种骨料对混凝土工作性的影响对比

混凝土的工作性是指混凝土在拌和、运输、浇筑及振捣过程中表现出的流动性、黏聚性和保水性, 主要通过坍落度、扩展度及倒筒时间等指标评价。两种骨料因颗粒特性不同, 对混凝土工作性的影响差异显著。

2.1 流动性对比

混凝土工作性的核心指标流动性, 主要受骨料颗粒间摩擦力和水泥浆体润滑作用影响, 传统粗骨料因棱角多、形态不规则致颗粒间摩擦力较大, 在拌和过程中需更多水泥浆体包裹骨料表面以降低摩擦力, 进而导致混凝土流动性较差, 试验表明采用传统碎石配制的 C30 混凝土在水灰比 0.5、水泥用量 350kg/m³ 条件下, 坍落度一般为 120~150mm 且扩展度为 350~400mm; 而球形粗骨料因表面光滑、粒形规整使颗粒间滑动阻力显著降低, 且水泥浆体在骨料表面形成的润滑层更均匀, 从而有效提升了混凝土的流动性, 在相同配合比条件下, 采用球形粗骨料的 C30 混凝土坍落度可达到 150~195mm、扩展度提升至 450~500mm, 坍落度提升幅度

达15%~30%，即使减少5%~10%的水泥用量，球形粗骨料混凝土的流动性仍能满足施工要求，为降低混凝土生产成本提供空间。

2.2 黏聚性与保水性对比

黏聚性差异导致混凝土出现离析、泌水现象进而影响其均匀性和力学性能，传统碎石因表面粗糙与水泥浆体黏结力较强使得混凝土黏聚性较好但颗粒间空隙大保水性一般，天然卵石因表面光滑与水泥浆体黏结力较弱易出现离析现象^[2]；球形粗骨料虽表面光滑但因其级配均匀、空隙率低使混凝土内部结构更密实，水泥浆体可均匀包裹骨料颗粒从而有效避免离析、泌水问题，试验表明球形粗骨料混凝土泌水率仅为传统碎石混凝土的60%~70%且黏聚性指标（如倒筒时间）与传统碎石混凝土相当，展现出优异综合工作性能，这种良好工作性可降低施工振捣难度、提高施工效率，尤其适用于预制构件批量生产。

3 两种骨料对混凝土力学性能的影响对比

混凝土的力学性能主要包括抗压强度、抗拉强度及弹性模量，是评价混凝土结构安全性的核心指标。骨料的颗粒特性通过影响混凝土内部的应力分布和界面黏结性能，进而对力学性能产生显著影响。

3.1 抗压强度对比

混凝土最主要的力学性能指标抗压强度，其大小与混凝土内部的密实性和应力集中程度密切相关，传统粗骨料因棱角多、形态不规则，在混凝土内部尤其承受压力时易在棱角处形成应力集中区域，导致混凝土提前破坏，且其高空隙率使混凝土内部存在较多微裂缝，降低了抗压强度；而球形粗骨料的规整形态可使混凝土内部应力分布更均匀，有效减少应力集中现象，其较低的空隙率使得混凝土结构更密实，微裂缝数量显著减少，试验数据显示，在相同配合比和养护条件下，采用球形粗骨料的C30混凝土28d抗压强度可达38~45MPa，比传统碎石混凝土提高10%~20%，C50高性能混凝土采用球形粗骨料后28d抗压强度可突破60MPa，提升效果更为显著，且随着养护龄期的延长，球形粗骨料混凝土因球形骨料与水泥浆体的界面过渡区更密实，水化产物可更充分地填充界面空隙、提升界面黏结强度，强度增长速率高于传统骨料混凝土。

3.2 抗拉强度与弹性模量对比

混凝土抗拉强度主要受骨料与水泥浆体界面黏结强度

影响而较低，其中传统碎石因表面粗糙与水泥浆体机械咬合力较强故抗拉强度相对较高，天然卵石却因表面光滑抗拉强度较低，而球形粗骨料虽表面光滑，但通过优化级配和表面处理技术能与水泥浆体形成良好化学黏结和物理吸附作用^[3]；试验表明球形粗骨料混凝土28d抗拉强度比传统碎石混凝土提高8%~15%、比天然卵石混凝土提高20%~25%，在弹性模量方面其比传统碎石混凝土高5%~10%，意味着承受荷载时变形更小、结构稳定性更强，凭借这种优异力学性能可用于如桥梁承重梁、高层建筑柱等承受大荷载的结构部位。

4 两种骨料对混凝土耐久性能的影响对比

混凝土的耐久性能直接决定其使用寿命，主要包括抗渗性、抗冻性、抗碳化性及抗侵蚀性等。骨料的颗粒特性影响混凝土的密实性，进而对耐久性能产生关键影响。

4.1 抗渗性对比

抗渗性指混凝土抵抗水分渗透的能力且主要取决于其内部孔隙结构和密实程度，传统粗骨料因空隙率高使混凝土内部易形成连通孔隙通道致水分易渗透进而引发钢筋锈蚀等问题，传统碎石混凝土抗渗等级一般为P6~P8，天然卵石混凝土因易离析抗渗性更差仅为P4~P6，而球形粗骨料混凝土因空隙率低、结构密实，内部多为封闭孔隙有效阻断水分渗透通道，试验表明其抗渗等级可达P8~P10比传统碎石混凝土提升1~2级，在水压渗透试验中其渗水高度仅为传统碎石混凝土的50%~60%展现出优异抗渗性能，该性能对地下工程、水利工程等潮湿环境中的混凝土结构尤为重要可显著延长结构使用寿命。

4.2 抗冻性与抗碳化性对比

混凝土的抗冻性是在冻融循环作用下保持性能稳定的能力且与内部孔隙含量和水饱和度密切相关，传统粗骨料混凝土因孔隙率和内部水分含量高在冻融循环中水分结冰膨胀易致开裂破坏，其抗冻等级一般为F100~F150难以满足寒冷地区工程需求；而球形粗骨料混凝土因内部密实、水饱和度和低在冻融循环中产生的膨胀应力较小，抗冻性能显著提升，试验表明其抗冻等级可达F200~F300可适应寒冷地区恶劣环境，在抗碳化性方面，其密实结构可减缓二氧化碳渗透速度有效保护钢筋不被锈蚀，试验数据显示其碳化深度比传统碎石混凝土降低30%~40%，抗碳化性能提升显著。

5 两种骨料的经济环保性对比

在建筑工程中,骨料的经济成本和环保性能也是选择骨料的重要考量因素。球形粗骨料与传统粗骨料在经济环保性方面的对比主要体现在生产成本、资源消耗及环境影响三个方面。

5.1 生产成本对比

传统粗骨料因原材料资源丰富,其碎石由天然岩石破碎而成、天然卵石直接从河道开采,故而生产成本较低,一般为50~80元/吨;而球形粗骨料因需经整形、筛分等多道工序处理致原材料利用率相对较低,生产成本略高,一般为80~120元/吨。但从混凝土整体生产成本看,球形粗骨料因可减少5%~10%的水泥用量且能降低施工能耗和运输成本(因其流动性好可减少运输过程中的离析损失)而具有显著优势,综合计算,采用球形粗骨料的混凝土生产成本比传统骨料混凝土降低3%~8%,以C30混凝土为例,每立方米混凝土可节省成本20~50元,对大型工程而言经济效益十分显著。

5.2 环保性能对比

传统粗骨料开采和加工过程因碎石开采需大量挖掘山体致水土流失、山体滑坡等生态问题,天然卵石开采破坏河道生态环境影响水生生物栖息地,且传统骨料混凝土因水泥用量大在水泥生产过程排放大量二氧化碳加剧温室效应,对环境影响较大。球形粗骨料采用工业废渣(如高炉渣、钢渣)作原材料实现固体废弃物资源化利用减少对天然资源依赖,同时因球形粗骨料混凝土水泥用量减少每立方米混凝土减少二氧化碳排放50~100kg降低对环境的污染,且其生产工艺通过优化实现低能耗、低粉尘排放进一步提升环保性能,从长远看符合绿色建筑材料发展方向具有良好环境效益。

6 结论与展望

6.1 结论

通过对球形粗骨料与传统粗骨料在颗粒特性、混凝土工作性、力学性能、耐久性能及经济环保性方面系统对比得出以下结论:在颗粒特性上,球形粗骨料因具有粒形规整(球形度 ≥ 0.9)、表面光滑、级配均匀、空隙率低(30%~35%)等优势而显著优于传统碎石和天然卵石;在工作性上,球形粗骨料凭借使混凝土坍落度提升15%~30%、泌水

率降低30%~40%,在提升流动性的同时保证良好黏聚性和保水性,进而降低施工难度;在力学性能上,球形粗骨料混凝土较传统碎石混凝土,28d抗压强度提高10%~20%、抗拉强度提高8%~15%、弹性模量提高5%~10%,且应力分布更均匀、结构稳定性更强;在耐久性能上,球形粗骨料混凝土抗渗等级提升1~2级、抗冻等级达到F200~F300、碳化深度降低30%~40%,从而显著延长使用寿命;在经济环保性上,尽管球形粗骨料单价较高,但因可减少水泥用量5%~10%使综合生产成本降低3%~8%,且其可利用工业废渣生产以减少二氧化碳排放,环保优势突出。

6.2 展望

在提升混凝土综合性能方面展现出巨大潜力的球形粗骨料,目前在建筑工程中的应用仍处于起步阶段,存在生产工艺复杂、规模化应用不足等问题,未来可从以下方面开展研究:一是通过优化球形粗骨料的生产工艺,以提高原材料利用率并降低生产成本;二是深入研究球形粗骨料与不同胶凝材料(如粉煤灰、矿渣粉)的适配性,从而开发高性能绿色混凝土;三是开展球形粗骨料混凝土的长期性能研究,为其在重大工程中的应用提供更充分的依据,随着技术的不断进步,球形粗骨料有望成为未来高性能混凝土的核心骨料,推动建筑材料行业朝着绿色、高效、高性能方向发展。

参考文献:

- [1] 刘志方,柳刚,徐金龙,等.孟加拉国路用砖骨料环境及经济效益分析研究[J/OL].中外公路,1-6[2025-11-20].
<https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20251120.1545.008>.
- [2] 于新涛,祁钰,王强,等.“双碳”目标下绿色建筑工地废弃污染防治技术研究[J].环境科学与管理,2025,50(11):115-119.
- [3] 高海华.施工现场建筑垃圾再生骨料配比优化与混凝土强度预测模型构建[J].建筑工人,2025,46(11):16-18.

作者简介:

唐好建(1998.12-),男,汉,山东菏泽人,硕士,研究方向:混凝土固废

杨溟鑫(1999.6-),男,汉,山东滨州市人,硕士

邢德进(1975.1-),男,汉,山东济南人,博士,教授

苏敦磊(1989-),男,汉,山东德州人,博士,副教授