

粗细集料对比对混凝土工作性的影响分析

文 / 柳丰巧 浙江路诚检测服务有限公司

王亚峰 浙江路诚检测服务有限公司

摘要：为解决粗细集料对比对混凝土工作性影响的问题，本文对粗细集料的粒径级配、砂率、含泥量等因素进行了分析，并探讨了其对混凝土流动性、粘聚性及保水性的作用机制。针对不同对比对拌合物性能的不利影响，提出选择合适的水泥品种、控制含泥量、合理使用外加剂及改进施工工艺等措施，以提高混凝土的施工适应性和耐久性能。通过科学调整粗细集料比例，可有效改善混凝土拌合物的均匀性，增强流动性，减少离析和泌水现象，以期为混凝土材料的合理配制及工程施工提供参考，确保混凝土结构的质量与长期服役性能。

关键词：粗细集料配比；混凝土工作性；影响

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.032

引言

混凝土作为工程建设中最常用的结构材料，其工作性直接影响施工质量和最终成型效果。合理的工作性可确保拌合物均匀流动，增强粘聚性，降低离析与泌水风险，提高浇筑密实度。粗细集料作为混凝土的主要骨架，其对比对拌合物的流动特性、黏聚性能及可施工性具有决定性作用。砂率、粒径级配及含泥量的变化均会影响混凝土的流变性能，进而影响拌合物的均质性和结构稳定性。通过科学优化粗细集料配比，可提高混凝土施工适应性，确保工程质量及耐久性满足规范要求。

一、混凝土工作性的基本概念

混凝土工作性是指新拌混凝土在运输、浇筑、振捣和成型过程中表现出的流动性、粘聚性及保水性等性能的综合体现。其主要衡量指标包括坍落度、扩展度、维勃稠度、流动度及黏度等。坍落度用于评价普通混凝土的流动性，一般取值范围在 10mm ~ 230mm 之间，扩展度主要用于自密实混凝土，通常控制在 500mm ~ 750mm 之间。维勃稠度测试适用于低坍落度混凝土，其标准范围为 2s ~ 15s，而流动度常用于砂浆体系，取值范围通常为 140mm ~ 200mm。工作性的优劣直接影响混凝土的可施工性及最终成型质量。流动性不足会导致混凝土难以浇筑且振捣不密实，进而产生离析及泌水问题，影响结构的强度和耐久性。相反，过高的流动性会造成混凝土离析、沉降不均或骨料分层，降低整体均质性。合理的工作性控制可确保混凝土拌合物流动均匀，增强骨料间的粘聚性，提高施工质量和耐久性^[1]。

二、粗细集料对比对混凝土工作性的影响机制

(一) 粗集料级配对混凝土工作性的影响

粗集料级配是指不同粒径粗集料的组合方式，其合理性直接影响混凝土拌合物的流动性、粘聚性及泌水性能。优化级配能够减少粗集料间的空隙率，提高颗粒间的嵌挤效果，从而增强混凝土的密实度和均质

性。连续级配的粗集料通常具有较小的空隙率（一般在 30% ~ 38% 之间），可有效降低单位用水量，提高拌合物的流动性，并减少泌水率至 1% ~ 2%。当粗集料采用单粒径分布时，空隙率增大至 40% 以上，导致浆体填充不足，混凝土粘聚性下降，离析趋势明显，流动性降低，坍落度减少幅度可达 50mm ~ 100mm。此外，粗集料最大粒径对混凝土的可泵性及流动特性具有显著影响。一般情况下，当最大粒径控制在 20mm ~ 31.5mm 范围内时，混凝土的可泵性较优，泵送压力适中，流动性稳定。若最大粒径超过 40mm，粗集料骨架效应增强，内部摩阻力增大，导致输送阻力上升 20% 以上，泵送性能显著下降，同时易产生堵管现象。

(二) 粗集料针片状对混凝土工作性的影响

粗集料颗粒形态亦是决定级配合理性的关键因素，粒形规则、表面光滑的集料摩擦系数较低，可减少内阻，提高混凝土的坍落度 10mm ~ 30mm，而针片状颗粒含量高于 15% 时，混凝土的流动阻力显著增加，振捣密实性变差，最终影响施工质量和耐久性^[3]。粗集料级配参数对混凝土工作性的影响及数据分析见表 1。

(三) 细集料颗粒级配与细度模数对混凝土工作性的影响

细集料颗粒级配与细度模数是决定混凝土流动性、粘聚性及保水性的关键因素。合理的颗粒级配可优化集料的填充效果，提高砂浆的流变性能，使混凝土拌合物具有良好的施工适应性。细集料通常分为粗砂（细度模数 3.1 ~ 3.7）、中砂（细度模数 2.3 ~ 3.0）和细砂（细度模数 1.6 ~ 2.2）。当细度模数在 2.3 ~ 3.0 范围内时，细集料颗粒级配合理，砂浆具有良好的黏聚力和流动性，混凝土坍落度可保持在 80mm ~ 180mm，泌水率维持在 2% ~ 3%。若细度模数大于 3.0，砂粒偏粗，表面积较小，浆体润滑作用减弱，导致混凝土拌合物粘聚性下降，易产生离析现象，且坍落度下降幅度可达 30mm ~ 50mm。

表 1 粗集料级配参数对混凝土工作性的影响及数据分析

粗集料级配参数	影响因素	具体影响	相关数据
空隙率 (%)	流动性、粘聚性	空隙率低, 提高流动性和粘聚性; 空隙率高, 离析加剧	连续级配: 30% ~ 38%; 单粒径: $\geq 40\%$
最大粒径 (mm)	可泵性、输送阻力	粒径大, 摩阻力增大, 泵送阻力升高; 粒径适中, 流动性稳定	20 ~ 31.5mm: 可泵性良好; $\geq 40\text{mm}$: 输送阻力 $\uparrow 20\%$
坍落度变化 (mm)	流动性	级配优化, 减少摩擦, 提高坍落度	连续级配: +10mm ~ 30mm; 单粒径: -50mm ~ 100mm
泌水率 (%)	施工均质性	连续级配降低泌水, 提高均匀性; 单粒径导致浆体分离	连续级配: 1% ~ 2%; 单粒径: $\geq 3\%$
针片状颗粒含量 (%)	流变性能、振捣密实性	过多影响施工, 降低混凝土均匀性	$\leq 15\%$: 流动阻力较低; $> 15\%$: 振捣密实性下降

细度模数低于 2.0 时, 砂浆颗粒间摩阻力增大, 水需求量上升 5% ~ 10%, 拌合物流变性恶化, 混凝土黏稠度增加, 导致可泵性下降。不同细度模数下, 细集料的颗粒组成也影响混凝土工作性, 连续级配的细集料可减少砂浆空隙率, 提高粘聚性和保水性, 而单一粒径分布的砂料易使混凝土浆体结构不稳定, 降低施工质量。

(四) 粗集料的含泥量及泥块含量混凝土工作性的影响

严格控制集料的含泥量和泥块含量可有效改善混凝土的粘聚性、流动性及耐久性能。集料的含泥量和泥块含量应控制在规定范围以下, 否则泥质颗粒会包裹在骨料表面, 降低浆体与骨料的界面结合力, 导致混凝土坍落度下降, 泌水率增加。高含泥量集料的吸水性较强, 会额外消耗混凝土拌合物中的自由水, 使水灰比失衡, 流动性降低, 增加拌合物的黏稠度, 并引发施工困难。采用筛分 (见图 1) 和水洗工艺可有效降低集料中的泥质颗粒, 提高拌合物的均匀性, 增强粘聚性, 确保混凝土拌合物坍落度稳定在 80mm ~ 160mm 范围内。对于高要求工程, 可采用机械筛分系统将细集料含泥量控制在 1.5% 以下, 以减少混凝土拌合物的早期强度损失, 提高施工适应性。此外, 掺加高效减水剂可减少泥质颗粒对水灰比的影响, 保持混凝土的合理流变特性, 提高拌合物的稳定性和最终结构的耐久性。



图 1 集料机械筛分

(五) 混合水温度对混凝土工作性的影响

混合水温度是混凝土工作性能中一个关键因素, 直接影响混凝土的流动性、粘聚性及早期强度发展。理想温度范围内, 水的温度提升可以加速水泥水化反应, 从而提高初期混凝土的流动性和易操作性。例如, 水温在 20℃ ~ 30℃ 之间时, 混凝土的塑性和保形能力达到最优, 有利于施工操作和成型。水温过高 (超过 40℃), 会导致水泥过快水化, 引起混凝土流动性急剧下降, 并可能增加收缩裂缝的风险。此外, 高水温还会降低混凝土中水的有效使用率, 因为部分水分会因蒸发而减少, 影响混凝土的保水性和终结强度。实际应用中, 控制混合水的温度是确保混凝土质量和工作性的关键措施, 特别是在高温环境下施工时, 采用冰水或冷却系统以维持水温在规定的技术标准内, 是提升工程质量的有效策略。因此, 精确控制混合水温度, 对于保证混凝土的工作性和结构性能至关重要^[4]。

三、提高混凝土工作性的优化措施

(一) 选择合适的水灰比和水泥品种

选择合适的水灰比和水泥品种对混凝土的工作性能及最终强度具有决定性影响。水灰比是水泥与水的质量比, 直接影响混凝土的流动性和强度。理论与实践均证明, 水灰比越低, 混凝土的孔隙率减小, 密实度增加, 从而提高其抗压强度和耐久性。例如, 水灰比在 0.4 ~ 0.6 范围内, 可以获得优良的抗压强度。同时, 水泥品种的选择也是关键因素, 不同类型的水泥其水化速率和强度发展特性各异。例如, 硅酸盐水泥因其较快的强度发展适用于早期强度要求高的工程, 而矿渣水泥则因其低热水化特性适用于大体积混凝土结构。合理匹配水灰比和水泥品种, 不仅能优化混凝土的加工和施工性能, 还能提升其长期使用性能, 特别是在抗渗、抗冻等性能的提高上显著。因此, 工程设计中应综合考虑环境条件和结构要求, 科学选择水灰比和水泥品种, 以确保混凝土的性能满足设计标准^[5]。

（二）合理使用外加剂

科学选择并合理使用外加剂可显著改善混凝土的流变性能，提高拌合物的流动性、粘聚性及保水能力。高效减水剂能在保持水灰比不变的情况下，使混凝土坍落度提高 50mm ~ 120mm，同时降低单位用水量 10% ~ 20%，从而增强混凝土的流动性，减少泌水率至 2% 以下。引气剂可在混凝土内部引入微小均匀的气泡，提高浆体的润滑作用，增强混凝土的抗离析能力，使粘聚性增强，坍落扩展度提升 5% ~ 10%。增稠剂能有效提高混凝土的保水性能，减少拌合物的泌水率，使含水量稳定，适用于高流态混凝土和自密实混凝土的工作性调控。膨胀剂可用于降低混凝土的干缩率，减少塑性收缩裂缝的产生，提高施工适应性。合理复配多种外加剂，如减水剂与引气剂的复合应用，可在不降低混凝土强度的情况下，提高拌合物的均匀性，增强施工的可操作性，确保最终结构的耐久性和稳定性。

（三）合理优化砂率

砂率是指细集料在混凝土总集料中的质量分数，其对混凝土流动性的影响主要体现在骨料颗粒间的填充效应与润滑作用。砂率对混凝土粘聚性与保水性的作用主要体现在骨料级配优化和浆体均匀性调控两方面。当砂率在 35% ~ 42% 范围内时，细集料颗粒能够均匀分布于浆体中，提高胶凝材料与骨料界面的结合力，使拌合物具有良好的粘聚性和抗分离性。在该范围内，混凝土的泌水率通常控制在 1.5% ~ 3.5%，表现出较好的保水能力。当砂率低于 30% 时，浆体不足以完全包裹粗集料，粘聚性降低，离析现象明显，导致混凝土泌水率升高至 4% 以上，使拌合物工作性下降。砂率超过 45% 时，浆体黏度增大，导致混凝土粘聚性过强，使其在泵送过程中产生较大的输送阻力，易发生管道堵塞。同时，细集料的增多提高了表面积需求，使得混凝土内部自由水减少，保水性降低，拌合物易出现早期失水收缩^[2]。

砂率增大时，细集料颗粒增多，可填充粗集料之间的空隙，提高浆体的包裹性，从而降低内部摩擦阻力，提高拌合物的可流动性。在砂率为 30% ~ 42% 范围内，混凝土流动性随砂率增大而提升，坍落度可提升 20mm ~ 80mm。当砂率超过 45% 时，由于砂浆体积占比过大，黏稠度增加，拌物流变性能下降，导致泵送性能变差，易出现粘管现象。此外，砂率过低（小于 30%）时，粗集料间的相互嵌挤作用增强，混凝土流动性明显下降，坍落度降低幅度可达 40mm ~ 100mm，并伴随离析趋势增强。合理控制砂率可优化混凝土的流变性能，提高拌合物的均匀性和施工适应性。

（四）施工工艺优化

优化施工工艺可显著提高混凝土的流动性、粘聚性及整体成型质量，从而改善施工适应性，减少缺陷产生。合理控制拌合时间和搅拌顺序是提高混凝土均匀性的关键，通常拌合时间应控制在 90s ~ 180s 范围内，搅拌不足易导致骨料分布不均，浆体包裹性降低，而搅拌过度会使气泡含量增加，影响混凝土的粘聚性和流动性。合理控制浇筑速度和方式，可避免混凝土离析与泌水，确保拌合物均匀铺展，提升结构的整体密实度。在泵送施工中，输送压力应控制在 4MPa ~ 8MPa 范围内，压力过高易导致混凝土分层，过低则会引发堵管现象。振捣工艺对混凝土的密实度和工作性影响显著，振捣频率一般控制在 50Hz ~ 70Hz，振捣时间过长会导致内部空隙未能充分消除，过长则会造成混凝土离析。采用合理的养护措施，如湿养护或蒸汽养护，可有效减少混凝土内部水分流失，提高硬化后的密实度，使早期强度提升 10% ~ 15%^[6]。

结语

总而言之，粗细集料的合理配比对混凝土的工作性具有决定性影响。选择合适的水灰比和水泥品种能提高混凝土的流动性和强度，增强其抗压强度和耐久性。严格控制集料的含泥量和泥块含量，有助于保持混凝土拌合物的均匀性，增强浆体与骨料的结合力。合理使用外加剂可进一步改善混凝土的流变性能，使其满足不同施工工艺的要求。此外，优化施工工艺可有效提升拌合物的均质性和可操作性，确保混凝土的最终成型质量。通过精确调整粗细集料配比，可显著提高混凝土的施工适应性，增强工程质量和耐久性。

参考文献

- [1] 尹博威. 高性能混凝土配合比设计及其力学性能检测研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(11): 111-113.
- [2] 王涛. 高性能混凝土配合比设计研究 [J]. 交通世界, 2024, (27): 17-20.
- [3] 李梅芳. 公路工程中水泥混凝土原材料试验检测技术 [J]. 运输经理世界, 2024, (22): 153-155.
- [4] 赵尚传, 刘龙龙, 刘忠凯, 等. 考虑石粉含量的机制砂混凝土配合比设计方法研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(08): 37-42.
- [5] 薛璐, 王冬, 王磊, 等. 双掺再生粗细骨料混凝土的抗氯盐侵蚀性能研究 [J]. 混凝土, 2024, (12): 98-102.
- [6] 陈彬, 花旭. 商品再生粗细骨料性能分析与评价 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(11): 104-106.