

全机制砂对混凝土工作性与强度的影响研究

谢胜利

焦作千业新材料有限公司 河南焦作 454000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16012

[摘要] 随着天然砂资源的日益短缺, 机制砂作为天然砂的替代材料在混凝土工程中的应用愈发广泛。本文通过试验研究全机制砂对混凝土工作性与强度的影响, 分析机制砂的石粉含量、细度模数等关键特性与混凝土坍落度、扩展度、抗压强度的关联性, 提出全机制砂混凝土的优化配合比设计思路。结果表明, 适量石粉可改善全机制砂混凝土的黏聚性和保水性, 细度模数在 2.6-3.0 时混凝土工作性与强度综合表现最优。研究为全机制砂在混凝土工程中的合理应用提供了试验依据和技术参考。

[关键词] 全机制砂; 混凝土; 工作性; 抗压强度; 石粉含量

引言

混凝土作为土木工程中应用最广泛的材料之一, 其原材料的可持续供应对行业发展至关重要。近年来, 天然砂因过度开采导致资源枯竭和生态破坏, 多地已限制天然砂开采。机制砂通过岩石破碎加工而成, 具有级配可控、来源广泛等优势, 成为解决天然砂短缺的重要途径。然而, 全机制砂混凝土因机制砂表面粗糙、棱角多、石粉含量波动大等特点, 易出现工作性差、强度不稳定等问题, 制约了其大规模应用^[1]。现有研究多聚焦于机制砂与天然砂混合使用的情况, 对全机制砂混凝土的系统性研究较少。本文通过设计不同石粉含量、不同细度模数的全机制砂混凝土试验, 系统分析其对混凝土工作性(坍落度、扩展度、凝结时间)和强度(7d、28d 抗压强度)的影响规律, 明确全机制砂混凝土的性能调控机制, 为工程实践中全机制砂的合理应用提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

①水泥。采用焦作千业水泥有限责任公司生产的普通硅酸盐 P·O 42.5 级水泥, 初凝时间 151min, 终凝时间 206min, 3d 抗压强度 32.4MPa, 28d 抗压强度 53.7MPa; ②机制砂。采用焦作千业新材料公司石灰岩破碎加工的机制砂, 表观密度 2650kg/m³, 堆积密度 1520kg/m³。设置 4 组不同石粉含量(3%、5%、7%、9%)和 4 组不同细度模数(2.2、2.6、3.0、3.4); ③粗骨料。采用焦作千业新材料公司生产的 5-25mm 连续级配石灰岩碎石, 表观密度 2700kg/m³, 压碎值 10%; ④外加剂。聚羧酸高性能减水剂, 减水率 25%, 固含量 10%^[2]。

水: 普通地下水。

1.2 配合比设计

试验以 C30 混凝土为基准, 固定水胶比 0.50, 胶凝材料总用量为 400kg/m³, 其中包含水泥和机制砂中的石粉。减水剂掺量设定为 2.0%, 以保证拌合物的基本流动性。基准配合比为水泥 380kg, 机制砂 780kg, 粗骨料 1050kg, 水 180kg, 减水剂 8kg^[3]。

设计变量为机制砂的石粉含量和细度模数, 其中石粉含量设为 3%、5%、7%、9% 四个梯度, 细度模数设为 2.2、2.6、3.0、3.4 四个等级, 通过变量组合形成 16 组不同配合比, 以此系统研究两种参数对混凝土性能的影响规律。

1.3 试验方法

工作性测试严格按照 GB/T 50080《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测定混凝土坍落度、扩展度, 观察黏聚性和保水性; 采用贯入阻力法测定初凝和终凝时间^[4]。

强度测试参照 GB/T 50081《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。将各配合比的混凝土拌合物分别装入 150mm×150mm×150mm 的立方体试模, 分两层振捣密实, 每层振捣至表面出现水泥浆且不再显著下沉, 刮平试模表面后置于标准养护室养护, 养护条件为温度 20±2℃、相对湿度≥95%。分别在养护至 7d 和 28d 时取出试块, 采用压力试验机进行抗压强度测试, 加载速度控制在 0.5-0.8MPa/s, 每组测试 3 个试块, 按照规范规定计算出该组的强度结果。

2 试验结果与分析

2.1 全机制砂对混凝土工作性的影响

2.1.1 石粉含量的影响

机制砂中的石粉对混凝土拌合物的工作性影响显著。由表 1 可知, 当石粉含量从 3% 增至 7% 时, 混凝土坍落度和

扩展度呈现先增大后减小的趋势: 石粉含量 5% 时, 坍落度达到最大值 210mm, 扩展度达到最大值 580mm; 石粉含量超过 7% 后, 坍落度和扩展度明显下降, 9% 时坍落度降至 160mm, 扩展度降至 490mm。黏聚性和保水性随石粉含量的变化规律与流动性一致: 石粉含量 5%~7% 时, 拌合物黏聚性好, 倒置坍落度筒后无离析现象, 保水性良好, 底部泌水率 < 1%; 石粉含量 3% 时, 因细颗粒不足, 拌合物黏聚性较差, 出现

轻微离析; 石粉含量 9% 时, 过多的石粉吸附自由水和外加剂, 导致拌合物黏稠度增加, 流动性下降, 且易出现黏聚性过强导致的泵送困难。初凝和终凝时间随石粉含量增加而延长, 这是因为石粉的填充效应延缓了水泥水化速率, 9% 时初凝时间较 3% 时延长 45min, 终凝时间延长 50min, 有利于混凝土浇筑后的抹面和养护。

表1 不同石粉含量的全机制砂混凝土工作性指标

石粉含量 %	坍落度 mm	扩展度 mm	黏聚性	保水性	初凝时间 min	终凝时间 min
3	180	520	一般	一般	195	260
5	210	580	良好	良好	210	280
7	190	550	良好	良好	225	295
9	160	490	较差	较差	240	310

2.1.2 细度模数的影响

细度模数反映机制砂的粗细程度, 对混凝土工作性影响显著。当细度模数从 2.2 增至 3.0 时, 坍落度和扩展度逐渐增大: 细度模数 3.0 时, 坍落度达 205mm, 扩展度达 570mm; 细度模数超过 3.0 后, 流动性开始下降, 3.4 时坍落度降至 175mm, 扩展度降至 510mm。细度模数 2.2 偏细时, 机制砂比表面积大, 需水量增加, 导致流动性偏低, 且拌合物易出现黏聚性过强; 细度模数 3.0 中粗时, 颗粒级配合理, 粗颗粒骨架作用与细颗粒填充作用平衡, 流动性最佳; 细度模数 3.4 偏粗时, 粗颗粒占比过高, 颗粒间空隙增大, 需水量增加, 且黏聚性下降, 易出现离析泌水^[5]。

2.2 全机制砂对混凝土强度的影响

2.2.1 石粉含量的影响

石粉对全机制砂混凝土强度的影响呈现“适量有利, 过量有害”的规律。由表 2 可知, 7d 和 28d 抗压强度均在石粉含量 5% 时达到最大值, 分别为 25.8MPa 和 43.5MPa; 石粉含量超过 7% 后, 强度明显下降, 9% 时 28d 抗压强度降至 38.2MPa, 较 5% 时降低 12.2%。适量石粉 5%~7% 的填充效应可优化混凝土内部结构, 减少孔隙率, 提高密实度, 从而提升强度; 但石粉含量过高 9% 时, 石粉与水泥水化产物的界面过渡区易形成薄弱环节, 且过多石粉会降低水泥有效用量, 导致强度下降。28d 强度增长率, 相对于 3% 石粉含量, 在 5% 时达到最高, 表明此时石粉的积极作用最为显著。

表2 不同石粉含量的全机制砂混凝土抗压强度

石粉含量 %	7d 抗压强度	28d 抗压强度	28d 强度增长
	MPa	MPa	率 %
3	22.5	39.6	-
5	25.8	43.5	9.8
7	24.2	41.2	4.0
9	20.1	38.2	-3.5

2.2.2 细度模数的影响

细度模数对全机制砂混凝土强度的影响与工作性类似。细度模数 2.6~3.0 时, 7d 和 28d 抗压强度均较高。2.6 时 28d 强度 42.8MPa, 3.0 时 28d 强度 43.2MPa; 细度模数 2.2 偏细时, 因需水量大导致水胶比实际增大, 28d 强度降至 38.5MPa; 细度模数 3.4 偏粗时, 颗粒间空隙大, 密实度不足, 28d 强度降至 39.1MPa。中粗砂细度模数 2.6~3.0 的颗粒级配更合理, 既能形成稳定骨架, 又能通过细颗粒填充空隙, 有利于强度发展; 过细或过粗的机制砂均会因结构缺陷导致强度降低。

2.3 工作性与强度的关联性分析

全机制砂混凝土的工作性与强度存在一定关联性。当石粉含量 5%、细度模数 3.0 时, 工作性, 坍落度 210mm, 扩展度 580mm 和 28d 抗压强度 43.5MPa 均达到最优, 表明此时机制砂的特性与混凝土内部结构形成了最佳匹配。工作性过差, 如石粉 9%, 会导致浇筑密实度不足, 间接降低强度; 工作性过好, 如细度模数 3.4。可能伴随离析泌水, 同样影

响强度均匀性。因此,全机制砂混凝土需在工作性与强度之间寻求平衡,通过调控石粉含量和细度模数实现性能优化。

3 全机制砂混凝土的优化应用建议

3.1 机制砂特性控制

石粉含量应严格控制在 5%-7% 的区间内,这一范围既能借助石粉的微集料效应填充机制砂颗粒间的空隙,改善混凝土拌合物的黏聚性和保水性,减少离析泌水现象,又能通过优化界面过渡区提升混凝土强度。对于强度等级为 C40 及以上的高强度混凝土,石粉含量宜控制在 5% 左右,因为过高的石粉可能会在集料与浆体界面形成薄弱层,削弱界面粘结强度,影响整体承载能力;而对于大流动性混凝土,如泵送混凝土,石粉含量可采用 7%,利用其增加浆体黏稠度的特性,增强拌合物的抗分离性,确保泵送过程顺畅。

细度模数推荐选用 2.6-3.0 的中粗机制砂,该范围的机制砂级配较为合理,颗粒间的嵌锁作用与浆体包裹性达到平衡,能有效减少单位用水量,同时保证混凝土工作性与强度的协调发展。若实际使用的机制砂偏细,细度模数 <2.6 ,因其比表面积大、吸水量多,可适当提高减水剂掺量 0.2%-0.5%,以弥补流动性损失;若机制砂偏粗,细度模数 >3.0 ,由于颗粒空隙率增大,易导致浆体不足、保水性下降,可掺入 5%-10% 的石灰石粉来补充细颗粒,填充空隙,改善集料骨架结构,提高混凝土的密实度。

3.2 配合比优化

全机制砂混凝土的水胶比设计需充分考虑机制砂表面粗糙、吸水性强特点,建议比天然砂混凝土降低 0.02-0.05,以此抵消额外吸水对浆体流动性的不利影响。以 C30 混凝土为例,水胶比可控制在 0.48-0.50,既能保证水泥水化所需的水分,又能避免因过量用水导致的强度降低和泌水现象。对于强度等级更高的混凝土,如 C50 及以上,水胶比宜进一步降低至 0.40-0.45,通过提高胶凝材料的密实填充作用,弥补机制砂棱角多带来的界面缺陷。同时,需根据机制砂的实际吸水率动态调整用水量,确保拌合物工作性稳定。

外加剂的选择与掺量调整对全机制砂混凝土性能至关重要,推荐选用缓凝型聚羧酸减水剂,其掺量可比天然砂混凝土提高 0.2%-0.5%,利用其更强的分散性改善机制砂颗粒的团聚现象,提升拌合物流动性。当机制砂石粉含量处于 7%-9% 时,由于石粉对减水剂的吸附作用增强,可采用引气型减水剂,通过引入 3%-5% 的稳定气泡,不仅能减少减水剂消耗,

还能增加浆体体积,提高拌合物的流动性和抗离析性。此外,对于低石粉含量的机制砂,可适当复配少量保坍剂,延长混凝土的工作性保持时间,适应长距离运输或大体积浇筑需求。

3.3 施工工艺控制

搅拌工艺延长搅拌时间 30-60s,确保机制砂与水泥浆充分混合,避免石粉聚集。搅拌顺序宜采用“骨料(部分)+石粉+水泥+水预拌 30s→骨料(部分)+外加剂搅拌 30s”的方式,提高石粉分散均匀性。

针对浇筑与养护,全机制砂混凝土初凝时间较长,浇筑后应及时覆盖保湿,初凝后洒水养护,养护期不少于 14d,以减少早期收缩裂缝。对于大体积混凝土,可采用蓄水养护,确保强度稳定发展。

4 结语

综上所述,本文通过试验研究了全机制砂的石粉含量和细度模数对混凝土工作性与强度的影响。结果显示,石粉含量在 5%-7%、细度模数在 2.6-3.0 时,混凝土工作性与强度综合表现最优。适量石粉可改善混凝土黏聚性和保水性,中粗机制砂能平衡工作性与强度。基于此提出的机制砂特性控制、配合比优化及施工工艺控制建议,为全机制砂在混凝土工程中的合理应用提供了技术支撑,有助于缓解天然砂短缺问题,推动混凝土行业可持续发展。后续可进一步研究不同岩性机制砂的影响,完善应用体系。

[参考文献]

- [1] 李中奇. 关于机制砂在高强度混凝土中的应用[J]. 散装水泥, 2025 (1): 25-27+31.
 - [2] 韩虎. 桥梁高强机制砂混凝土坍落度和强度影响因素研究[J]. 价值工程, 2025, 44 (2): 122-124.
 - [3] 朱星流. 全机制砂在商品混凝土生产中的应用研究[J]. 砖瓦, 2025 (4): 57-59.
 - [4] 郭雨雨, 周海龙, 张洁, 韩长君, 王海龙. 养护温度与沙漠砂替代率对机制砂混凝土抗压强度与孔结构的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43 (1): 45-52.
 - [5] 陈波, 陈尚伟, 王涛. 机制砂-超高性能混凝土抗压强度研究进展[J]. 绿色建筑, 2025, 17 (1): 148-153+168.
- 作者简介: 谢胜利(1978—)男,汉族,河南武陟人。高级工程师、国家注册一级建造师,本科,土木工程专业,主要从事过施工技术、项目管理、混凝土生产技术,现从事砂石骨料、预拌混凝土建筑材料及管理工作等。