

机制砂掺量对混凝土变形与力学性能影响的实验研究

卿小强 王忠友 丁文旗 罗凯文 林其涛

南京航空航天大学金城学院航空运输与工程学院 江苏 南京 211156

【摘要】：通过设置 0%、30%、40%、50%、60%、70%、100% 七种机制砂掺量梯度，采用轴心抗压强度试验、工作性能测试、弹性模量测定、早期塑性开裂观测、干缩与徐变试验等多指标测试方法，系统分析机制砂掺量对混凝土关键性能的影响机制。同时，在最佳机制砂掺量条件下，研究 10% 和 15% 石粉掺量对混凝土工作性与强度的双向作用。结果表明：机制砂掺量为 50% 时混凝土综合性能最优，此时轴心抗压强度达最大值，工作性能良好，早期塑性开裂风险最低；石粉掺量 10% 时可进一步优化混凝土粘聚性与耐久性，而 15% 掺量会导致流动性下降。

【关键词】：机制砂；变形性能；力学性能；工作性能

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.066

我国基础设施建设的快速发展，使建筑工程对砂石骨料的需求持续增长。天然砂作为传统混凝土细骨料，因资源丰富、颗粒圆润等特点长期占据主导地位，但过度开采已造成其资源日益枯竭，还引发河道破坏、生态失衡等环境问题。在此背景下，响应国家节能减排与资源保护政策，寻找天然砂的优质替代材料，成为土木建筑领域的重要研究方向。

机制砂通过机械破碎、筛分制成，原料来源广泛，生产工艺可控且性能稳定，被视为最具潜力的天然砂替代材料。然而，机制砂颗粒不规则、棱角分明，且含有石粉等成分，这些特性会直接影响混凝土的工作性能、力学强度及变形稳定性。

当前市场上机制砂质量参差不齐，技术性质的不稳定性导致机制砂混凝土在实际应用中，常出现拌和物流动性差、强度波动大、易开裂等问题，严重制约其大规模推广。因此，系统研究机制砂掺量对混凝土变形与力学性能的影响规律，确定最佳掺量范围，并探究石粉等掺合料的调控作用，对于提升机制砂混凝土性能、推动其工程应用，具有重要的现实意义。

1 原材料以及实验方法

1.1 原材料

(1) 水泥：选用普通硅酸盐水泥，强度等级达到 42.5 级其各项技术特性符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175-2007) 要求。

(2) 石粉：石粉为自机制砂生产过程中的副产物，其主要化学成分与机制砂相似，但颗粒粒径更细。

(3) 细集料：包括河沙和机制砂 2 种：

河砂：本实验采用来自江西赣江，其基本性能指标如下表。

表 1 自然砂的基本性能指标

| 指标 | 数值范围 | 检测标准 | 工程意义 |
|-------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| 细度模数 | 2.3-2.8(中细砂) | GB/T 14684-2022 | 适用于泵送混凝土 (C30-C50) |
| 含泥量 | ≤3.0%(I类砂) | JGJ 52-2006 | 影响强度和耐久性 |
| 泥块含量 | ≤0.5% | | |
| 表观密度 | 2600-2650 kg/m ³ | GB/T 14685-2022 | 反映砂的密实程度 |
| 堆积密度 | 1400-1500 kg/m ³ | | 影响混凝土配合比设计 |
| 氯离子含量 | ≤0.02% (预应力要求) | GB/T 176-2017 | 防止钢筋锈蚀 |
| 云母含量 | ≤1.0% | | 降低粘结强度 |
| 轻物质含量 | ≤1.0% | | 影响混凝土密实性 |
| 碱活性 | 非活性 (多数样本) | GB/T 50733-2011 | 避免碱-骨料反应 |

机制砂：由江苏省南京市溧水区生产的机制砂，岩石种类为石灰岩，其基本性能指标见下表。

表 2 机制砂的基本性能指标

| 指标 | 数值范围 | 标准依据 |
|------|-------------|-----------------|
| 细度模数 | 2.8-3.2(中砂) | GB/T 14684-2022 |
| 颗粒级配 | 符合II区砂要求 | 机制砂级配见表 2.4 |
| 石粉含量 | 5% | JGJ 52-2006 |
| 压碎指标 | ≤18% | GB/T 14684-2022 |

| | | |
|--------|-----------------------------|--|
| 表观密度 | 2650-2720 kg/m ³ | |
| 松散堆积密度 | 1480-1550 kg/m ³ | |

注：续表 2。

(1) 粗骨料：选用粒径处于 5 到 20 毫米范围内且具有连续级配特征的碎石材料，其压碎指标值被限制在 8% 以内，针片状颗粒所占比例不超过 4%，并且含泥量要小于 1%，从而符合高品质工程应用的要求。

(2) 减水剂：选用聚羧酸高效减水剂，固含量 20%，减水率 25%，符合《混凝土外加剂》（GB 8076-2017）标准。其作用是在保证混凝土流动性的前提下减少用水量，降低水胶比，提升混凝土强度与密实度。

1.2 配合比

确定基准配合比：以天然砂作为细骨料，按照普通混凝土配合比设计规程，设计出满足设计强度等级为 C50 的基准配合比。基准配合比中各原材料的用量如下表所示：

表 3 C50 混凝土实验配合比

| 序号 | 机制砂掺量(%) | 水 /Kg/m ³ | 水泥 /Kg/m ³ | 细骨料/Kg/m ³ | | 粗骨料 /Kg/m ³ | 石粉 /Kg/m ³ |
|--------|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----|------------------------|-----------------------|
| | | | | 机制砂 | 河砂 | | |
| S0P5 | 0 | 188 | 470 | 0 | 810 | 1160 | 0 |
| S30P5 | 30 | 188 | 470 | 243 | 567 | 1160 | 12.15 |
| S40P5 | 40 | 188 | 470 | 324 | 486 | 1160 | 16.20 |
| S50P5 | 50 | 188 | 470 | 405 | 405 | 1160 | 20.25 |
| S50P10 | 50 | 188 | 440 | 405 | 405 | 1160 | 40.50 |
| S50P15 | 50 | 188 | 410 | 405 | 405 | 1160 | 60.75 |
| S60P5 | 60 | 188 | 470 | 486 | 324 | 1160 | 24.30 |
| S60P10 | 60 | 188 | 440 | 486 | 324 | 1160 | 48.60 |
| S60P15 | 60 | 188 | 410 | 486 | 324 | 1160 | 72.90 |
| S70P5 | 70 | 188 | 470 | 567 | 243 | 1160 | 28.35 |
| S100P5 | 100 | 188 | 470 | 810 | 0 | 1160 | 40.50 |

注：实验 S50P10, S50P15, S60P10 和 S60P15, 是在后期优化方案中使用，在机制砂掺量对混凝土变形与力学性能影响的实验研究中，并未使用该实验。

1.3 实验方法

力学性能测试参照《混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081-2019）：28d 龄期时，用 100mm×100mm×300mm 棱柱体试件，通过压力试验机以

0.5MPa/s 加载速率测轴心抗压强度，每组 3 个试件取平均值；同期用弹性模量测试仪测试该类试件，加载至轴心抗压强度的 40% 并保载 3min 后卸载，重复 3 次，取第三次加载的应力-应变曲线斜率作为弹性模量值。

2 结果分析

2.1 机制砂掺量对混凝土力学性能影响的数据分析

2.1.1 抗压强度的数据分析

表 4 机制砂掺量对混凝土抗压强度的影响

| 序号 | 试块抗压强度/MPa | | | 试块平均抗压强度/MPa |
|--------|------------|------|------|--------------|
| | 试块一 | 试块二 | 试块三 | |
| S0P5 | 57.0 | 54.7 | 55.3 | 55.7 |
| S30P5 | 64.6 | 61.5 | 64.7 | 63.6 |
| S40P5 | 69.2 | 67.5 | 65.5 | 67.4 |
| S50P5 | 74.2 | 74.1 | 73.6 | 74.0 |
| S60P5 | 68.0 | 69.0 | 65.8 | 67.6 |
| S70P5 | 64.2 | 64.1 | 64.0 | 64.1 |
| S100P5 | 55.9 | 57.4 | 57.1 | 56.8 |

实验数据显示，变量不变时，机制砂掺量接近 50% 时，混凝土抗压强度最佳，试块平均抗压强度最大。其抗压强度呈先增后减趋势，且数值显著高于天然砂混凝土，骨料替换率近 50% 时力学性能达顶峰。机制砂混凝土强度更优，因机制砂改善了胶结剂与集料的界面构造，提升了混凝土致密性与集料咬合强度。相较于天然砂，机制砂表面无风化层、多棱角，这一特性对增强界面粘附力和结构稳定性至关重要。

2.1.2 弹性模量的数据分析

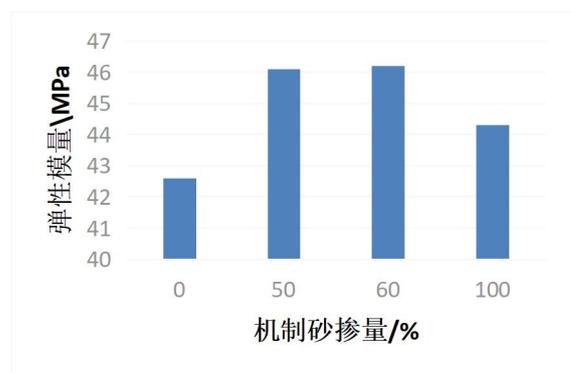


图 1 机制砂掺量对混凝土弹性模量的影响

由以上的柱状图可以轻松得出，机制砂掺量在 50% 和 60% 最佳。

2.2 机制砂混凝土变形性能的数据分析

2.2.1 早期塑性开裂的数据分析

表5 机制砂掺量对混凝土早期塑性抗裂性能的影响

| 编号 | 初裂时间/min | 裂缝最大宽度/mm | 单位开裂面积 c/(mm ² /m) |
|------|----------|-----------|-------------------------------|
| S0 | 345 | 0.55 | 134 |
| S30 | 365 | 0.49 | 123 |
| S40 | 370 | 0.41 | 113 |
| S50 | 375 | 0.38 | 102 |
| S60 | 385 | 0.35 | 98 |
| S70 | 395 | 0.26 | 91 |
| S100 | 435 | 0.13 | 78 |

机制砂可有效替代河砂提升混凝土早期抗裂性能。相较于纯河砂混凝土(S0),掺入机制砂的S40、S70、S100样品初始裂纹起始时间分别延后25、50、90分钟,且随机制砂掺量增加,混凝土初期抗裂性逐步增强。同时,机制砂掺量升至100%时,混凝土裂缝最大宽度和单位面积开裂面积均递减,S100的两项指标最优,抗裂等级达V级,而S0仅为IV级,S100在混凝土耐久性与结构稳定性上优势显著。

2.2.2 干缩的数据分析

表6 机制砂掺量对混凝土不同龄期收缩率的影响 (×10⁻⁶)

| 机制砂掺量/% | 天数/d | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 45 |
| 0 | 124.7 | 140.1 | 131.1 | 213.7 | 345.9 | 405.6 |

参考文献:

[1] 高楚文,张金海.混合砂在中、低强度混凝土中的应用研究[J].混凝土,2008,(10):87-91.
 [2] 蔡基伟.石粉对机制砂混凝土性能的影响及机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
 [3] 李洋,刘纪伟,安小龙.不同机制砂取代率下混凝土性能研究[J].人民长江,2015,46(08):47-49.
 [4] 何盛东,刘立新,王俊,等.不同替代率下机制砂混凝土弹性模量试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2010,35(04):698-701.
 [5] 何盛东,刘立新,王华,等.不同替代率下机制砂混凝土抗压强度的试验研究[J].混凝土,2010,(10):109-111.
 [6] 李凤兰,罗俊礼,赵顺波.不同骨料的高强混凝土早期徐变性能研究[J].长江科学院院报,2009,26(02):45-47.
 [7] 邓翀,鄢佳佳,叶仙松.机制砂掺量对混凝土力学性能和体积稳定性的影响研究[J].新型建筑材料,2018,45(04):42-46.
 [8] Mohammdd Moyunddin,et al.Effect of manufactured sand on strength and durability properties of concrete[J]. Construction and Building Materials,2020,245:118456.

| | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 50 | 132.4 | 145.2 | 153.6 | 225.7 | 387.9 | 427.1 |
| 100 | 139.6 | 152.3 | 157.9 | 295.6 | 413.8 | 456.8 |

混凝土干缩与养护龄期呈幂函数关联,早期干缩率增长显著。28天养护后,纯河砂混凝土S0、50%机制砂掺量S50、全机制砂S100的干缩率分别达345.9×10⁻⁶、387.9×10⁻⁶以及413.8×10⁻⁶,且干缩率随机制砂掺量增加而升高,S100较S0增幅达19.6%。这是因机制砂掺量提升会增加石粉含量,使浆体总量和水灰比上升,未参与水化的自由水蒸发引发内部水分失衡,最终加剧了混凝土干缩。

3 结论

本研究通过系统实验,探究了不同机制砂掺量对混凝土工作性能、力学性能与变形性能的影响规律,以及粉煤灰掺量的调控作用,得出以下主要结论:

(1)机制砂掺量对混凝土工作性能影响显著:随着掺量增加,坍落度与扩展度逐渐下降,粘聚性先提升后下降,泌水性逐渐抑制;当掺量为50%时,工作性能最佳,坍落度171mm,扩展度472mm,粘聚性显著提升,无泌水现象。

(2)机制砂掺量对混凝土力学性能的影响呈先上升后下降趋势:当掺量为50%时,28d轴心抗压强度达最大值62.5MPa,弹性模量达3.82×10⁴MPa,比天然砂混凝土分别提高18.4%和10.7%。

(3)机制砂掺量对混凝土变形性能具有显著调控作用:当掺量为50%时,早期塑性开裂等级达V级,90d干缩率为425×10⁻⁶,270d徐变变形为385×10⁻⁶,变形稳定性最优。