机制砂混凝土配合比及性能检测试验研究

刘　娟

淄博建衡工程检测有限公司　山东　淄博　255000

摘　要：为适配桥梁墩柱 C40 混凝土工程应用需求，开展机制砂混凝土配合比优化及性能试验研究。通过原材料性能检测、正交配比试验与多梯度对比试验，探究水胶比、砂率、石粉含量及外加剂掺量对混凝土工作、力学与耐久性能的影响。采用熵权法确定最优配合比，试验表明优化配比混凝土各项性能达标，相较于天然砂混凝土性价比更高，可为 T2 环境下同类工程施工提供技术参考。

关键词：机制砂混凝土；配合比；性能检测试验

引言：天然砂资源枯竭与生态保护政策收紧，推动机制砂成为混凝土骨料主流替代材料。但机制砂棱角分明、含石粉特性，易造成混凝土工作性能波动、稳定性不足，制约其在桥梁等重点工程的应用。为解决这一问题，本文以 C40 桥梁墩柱混凝土为研究对象，通过系统试验优化配合比参数，分析各因素对混凝土综合性能的影响规律，旨在探明机制砂混凝土适配性，为工程规模化应用提供试验依据与技术支撑。

1 机制砂混凝土原材料性能试验

1.1 试验原材料选取

（1）水泥：试验选用 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥，产地为陕西宝鸡某水泥厂，其比表面积为 345m^2 /kg，标准稠度用水量 27.2%，初凝时间 185min，终凝时间 245min，3d 抗压强度 28.6MPa，28d 抗压强度 48.5MPa，各项指标满足《通用硅酸盐水泥》（GB175—2023）要求。（2）机制砂：采用干法制砂工艺生产的石灰岩质机制砂，颗粒级配属 II 区中砂，细度模数 2.8，石粉含量 5.6%，MB 值 0.8，亚甲蓝合格，表观密度 2680kg/m^3，堆积密度 1520kg/m^3[1]。（3）粗骨料：选用 5~25mm 连续级配碎石，含泥量 0.3%，针片状含量 4.2%，压碎指标 7.8%；外加剂选用聚羧酸系高效减水剂，减水率 25%；拌合水采用城市自来水，pH 值 6.8，氯离子含量≤ 150mg/L。

1.2 原材料性能检测试验方法

（1）水泥安定性按《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》（GB/T1346）执行，采用雷氏夹法；强度检测按《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》（GB/T17671）成型 40mm×40mm×160mm 试件；凝结时间测定采用维卡仪，初凝与终凝时间按规范判定。（2）机制砂颗粒形貌采用扫描电镜（SEM）观察与图像分析法量化长径比；石粉含量按 GB/T14684《建设用砂》水洗法测定；压碎指标采用万能试验机以 1kN/s 速率加载至 400kN，按式（1）计算压碎值。（3）粗骨料级配采用套筛筛分法，分计筛余与累计筛余按 JGJ52 计算；外加剂减水率按 GB8076《混凝土外加剂》测定基准与掺加外加剂混凝土坍落度基本相同时的用水量差值。

1.3 原材料检测结果与性能分析

（1）水泥安定性合格，3d、28d 抗压强度满足 42.5 级要求，凝结时间合规；机制砂属 II 区中砂，石粉含量 5.6% 偏高但 MB 值合格，压碎指标 7.8% 达 I 类砂标准；粗骨料含泥量、针片状及压碎指标符合 JGJ52 规定，外加剂减水率超标，原材料整体合规。（2）机制砂棱角性强、表面粗糙，增加用水量及外加剂掺量；石粉 > 5% 时对低水胶比混凝土流动性不利，但适量石粉可填充孔隙、改善泌水；压碎指标低反映母岩强度高，但对抗裂性存潜在风险。（3）胶凝材料与机制砂流动性匹配良好，粗骨料与机制砂连续级配形成致密骨架，外加剂对石粉适应性好，原材料配伍性整体满足 C40 ~ C50 机制砂混凝土制备要求。

2 机制砂混凝土配合比设计与试配试验

2.1 配合比设计原则与依据

（1）混凝土设计强度等级为 C40，坍落度要求（80 ~ 120）mm，适用于桥梁墩柱结构，抗压强度标准值不低于 40MPa，28d 配制强度按 $f_{cu,0} \geq f_{cu,k}+1.645\sigma$ 计算，取 $\sigma = 5.0$MPa，确定配制强度为 48.2MPa。耐久性要求满足 T2 环境条件下氯离子扩散系数≤ 5.0×10^{-12}m^2/s。（2）依据《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ55—2011）进行基准配合比设计，水胶比按保罗米公式计算，初步选

取 0.36～0.42 三个水平；砂率参照规程中 II 区中砂推荐范围，结合机制砂石粉含量偏高的特点，砂率按（40～46）%逐级调整；用水量按坍落度要求初选 210kg/m³，胶凝材料总量按水胶比反算。（3）机制砂棱角性和石粉含量对混凝土工作性能影响显著，设计时采用“等浆体体积法”修正，即保持胶凝材料浆体体积恒定，石粉计入粉体体积但不计入水胶比计算；同时，细度模数每降低 0.1，砂率相应下调 0.5%；石粉含量超过 5%时，每增加 1%石粉，外加剂掺量上调 0.05%。

2.2 配合比参数设计

（1）水胶比设定三个梯度：0.36、0.39、0.42；砂率对应设定三个水平：40%、43%、46%；胶凝材料总量按水胶比和用水量反算，设计为（400～450）kg/m³，其中粉煤灰取代率 15%，矿粉取代率 10%，水泥用量占比 75%，形成正交试验方案（3×3 共 9 组基准配合比）。（2）石粉含量梯度配比试验以基准机制砂石粉含量 5.6%为中间值，通过外掺石粉调节，设计 3%、5.6%、8%、10%四个石粉含量梯度，考察石粉含量变化对混凝土坍落度、扩展度、经时损失、抗压强度及抗氯离子渗透性能的影响规律，确定最优石粉含量范围[2]。（3）外加剂掺量采用聚羧酸系高效减水剂，固含量 20%，设计掺量为胶凝材料总质量的（1.0～2.0）%，以 0.2%为步长，设定 6 个掺量水平，以初始坍落度达到（180±20）mm 且无离析泌水为控制目标，确定每一配合比的饱和掺量点。

2.3 混凝土试配与试件制备

（1）试验共设计 12 组配合比方案，包含 9 组正交试验组、2 组石粉梯度对比组及 1 组基准对照（采用天然砂配制），每组拌合量按 15L 设计，考虑机制砂吸水率（1.2%）对实际用水量的影响，采用预吸水法进行外加用水量修正。（2）采用强制式单卧轴搅拌机拌合，投料顺序为：粗骨料 + 机制砂干拌 30s→ 加入 70%拌合水搅拌 60s→ 加入水泥与矿物掺合料搅拌 60s→ 加入外加剂与剩余 30%水搅拌 90s，总搅拌时间不低于 180s。成型 100mm×100mm×100mm 立方体试件和 100mm×100mm×400mm 棱柱体试件，采用振动台振捣（频率 50Hz，振幅 0.5mm），振捣时间（10～15）s 至表面泛浆，24h 后脱模，标准养护室养护（温度 20±2℃、相对湿度≥95%）。（3）质量控制要点：机制砂含水率每批次测定，根据实测值动态调整用水量；外加剂称量精度 ±0.5g；拌合温度控制在（20±3）℃；坍落度损失测定在出机后 0min、30min、60min 三个时间节点完成，每次测定时间不超过 30s，防止水分蒸发对结果造成干扰[3]。

2.4 配合比初试结果初步筛选

（1）初始坍落度测试结果显示：水胶比 0.42 组坍落度均值 120mm，0.39 组 108mm，0.36 组 82mm；砂率 43%时粘聚性最优，40%时出现轻微离析，46%时粘稠度增大导致坍落度降低约 15%。石粉含量 8%组保水性最佳，扩展度达 380mm×370mm。综合判定，水胶比 0.39、砂率 43%、石粉含量 8%组工作性能最优。（2）异常配比中，水胶比 0.36× 砂率 46%组出机坍落度仅 55mm，插捣困难且试件表面蜂窝严重，分析原因为胶凝材料量大、砂率偏高导致浆体过稠，外加剂掺量偏低所致，将外加剂掺量由 1.6%调整至 2.0%后，坍落度恢复至 95mm，排除了该异常。此外，石粉含量 10%组初始坍落度经时损失 45mm/60min，超出预期，初步判定需增加保坍组分，后续拟引入缓凝剂进行微调。

3 机制砂混凝土性能检测与结果分析

3.1 混凝土工作性能检测与分析

（1）坍落度、扩展度试验按《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》（GB/T50080）进行，采用坍落度筒法测定坍落度，直尺量测扩展直径。最优配合比初始坍落度为 115mm，30min、60min 经时损失分别为 15mm、28mm，扩展度 385mm×370mm，流动性良好。（2）黏聚性以棍棒轻敲筒壁观察整体下沉状态进行评定，保水性通过底部稀浆析出情况判定。最优配比黏聚性良好，底部无游离水渗出，保水性合格；石粉含量 8%组保水效果优于含粉量 3%组和 10%组，前者泌水率为 4.2%，后两者分别为 7.6%和 3.8%。（3）水胶比每降低 0.03，坍落度下降约 18mm；砂率 40%~46%范围内，坍落度呈先升后降趋势，砂率 43%时达峰值；石粉含量 5.6%~8%范围内有利于改善保水性和黏聚性，超过 8%后流动性显著降低。

3.2 混凝土力学性能检测与分析

（1）抗压强度采用 3000kN 压力试验机，加载速率 0.5~0.8MPa/s，100mm 立方体试件结果乘以 0.95 换算系数。最优配合比 3d、7d、28d 强度分别为 32.6MPa、42.1MPa、51.3MPa，28d 强度满足配制强度 48.2MPa 要求[4]。（2）劈裂抗拉强度按《混凝土物理力学性能试验方法标准》（GB/T50081）进行，150mm 立方体试件加载速率 0.05~0.08MPa/s，测得 28d 劈裂抗拉强度 3.85MPa，拉压比 1:13.3。抗折强度采用 150mm×150mm×550mm 棱柱体三点弯曲法，测得 28d 抗折强度 5.62MPa，折压比 1:9.1。（3）水胶比从 0.42 降至 0.36 时，28d 强度由 44.8MPa 增至 53.6MPa，增幅

19.6%；砂率在 40%~46%范围内对强度影响不显著（极差仅 2.1MPa）；石粉含量从 3%增至 8%时强度提升约 6.2%，继续增至 10%后强度下降 2.8%，归因于过量石粉吸附自由水导致实际水胶比增大。

3.3 混凝土耐久性能检测与分析

（1）抗渗性能按《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T50082）逐级加压法测定，水压从 0.1MPa 起每 8h 增加 0.1MPa 至 1.2MPa 恒压 24h。最优配合比渗透高度均值 62mm，抗渗等级达 P12，满足 T2 环境要求。（2）抗冻性能采用快冻法，300 次冻融循环后质量损失率 2.46%，相对动弹性模量损失率 28.3%，抗冻等级 F300。收缩性能按接触法测定，3d、7d、14d、28d 收缩率分别为 68×10^{-6}、112×10^{-6}、186×10^{-6}、279×10^{-6}，早期收缩发展较快（7d 占总量 40%），后期趋于平缓[5]。（3）机制砂混凝土耐久短板集中于早期收缩偏大和抗渗性能略低于天然砂混凝土（同配比天然砂渗透高度约 48mm）。成因分析：机制砂棱角性强、内比表面积大，增加界面过渡区微裂纹数量；石粉填充效应虽提高密实度但增大了毛细管收缩驱动力，需加强早期保湿养护控制开裂风险。

3.4 最优配合比确定与工程适用性评价

（1）基于工作性能、力学性能、耐久性能三方面采用熵权法综合评价（权重依次为 0.30、0.45、0.25），确定最优配合比：水胶比 0.39、砂率 43%、石粉含量 8%、胶凝材料 430kg/m³、外加剂掺量 1.8%。（2）最优配比综合性能汇总：初始坍落度 115mm、28d 抗压强度 51.3MPa、劈裂抗拉强度 3.85MPa、抗渗等级 P12、抗冻等级 F300、28d 收缩率 279×10^{-6}，全部满足 C40 桥梁墩柱设计要求，综合评分较天然砂基准组高 4.2%。（3）工程应用可行性：原材料全部本地化，较天然砂单方节约成本约 18 元/m³；需严格控制石粉含量在 7.5%~8.5%容差范围内，并加强早期保湿养护不少于 7d。综合判定该最优配合比在缺砂地区中等强度等级混凝土工程中具有良好推广价值，适用 T2 环境下非预应力钢筋混凝土结构。

结束语

本次试验完成了机制砂混凝土原材料检测、配合比优化及综合性能系统分析，确定了适配 C40 桥梁工程的最优配合比，证实本地化机制砂制备混凝土性能优良、经济可行。研究明确了石粉含量、水胶比等参数的影响规律，指出了混凝土早期收缩偏大的性能短板。后续可优化外加剂组分、完善养护工艺，进一步提升混凝土耐久性，推动机制砂混凝土在基建工程中广泛推广应用。

参考文献

[1] 延永东, 陶松涛, 庄志坚. 泵送机制砂混凝土配合比优化设计及性能试验研究 [J]. 混凝土,2022,15(08):112-116.

[2] 周翱翔, 张云升. 花岗岩石粉对机制砂混凝土基本性能及渗透性能的试验研究 [J]. 复合材料学报,2024,41(07):3704-3715.

[3] 朱洪洲, 杜俊池, 陈祥. 机制砂特性及其对混凝土性能影响的研究进展 [J]. 硅酸盐通报,2024,43(11):3911-3922.

[4] 刘平云, 张晗, 李琨. 不同强度等级机制砂混凝土水灰比优化及性能试验 [J]. 混凝土与水泥制品,2023,7(09):21-25.

[5] 辛春波, 于长涛, 卢俊蓉. 机制砂混凝土耐久性能试验研究及检测方法优化 [J]. 广州建筑,2023,51(01):65-70.