

大型商混搅拌站机制砂掺配比例对混凝土工作性能的影响分析

范学芳

沂南县鲁碧新型建材有限公司, 山东 临沂 276317

[摘要]针对天然河砂资源枯竭、河道禁采导致商混企业细骨料供应短缺的行业现状,以站内本地灰岩破碎水洗机制砂、沂河存量天然中砂为试验原材料,设置 0%、20%、40%、60%、80%、100% 六组机制砂取代天然砂掺配比例,开展 C30 泵送混凝土坍落度、保坍性能、泌水率等六项性能检测试验,试验数据显示:机制砂内部石粉含量维持在 5%~7% 区间、MB 值不大于 1.0 时,机制砂最优掺配比例为 40%,该配比下混凝土放置 2h 坍落度损失仅 35mm,泌水率 0.82%,各项性能适配高层建筑泵送施工需求;当机制砂掺配比例超过 60%,其颗粒棱角粗糙且石粉总量超标,会大幅提升浆体屈服应力,管道堵塞概率大幅上升。依托试验结论搭建机制砂掺配动态台账、原料进场逐项复检、现场配合比实时微调三项联动管控举措,构建全流程混凝土质量闭环管控体系。

[关键词]商混搅拌站;机制砂掺配比例;混凝土工作性能;泵送保坍

DOI: 10.33142/ect.v4i6.19935

中图分类号: TU528.5

文献标识码: A

Analysis of the Influence of Sand Mixing Ratio on the Workability of Concrete in Large-scale Commercial Mixing Plants

FAN Xuefang

Yinan Lubi New Building Materials Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276317, China

Abstract: In response to the current situation in the industry where natural river sand resources are depleted and river channels are prohibited from mining, resulting in a shortage of fine aggregate supply for commercial mixing enterprises, the local limestone crushing and washing machine sand in the station and the natural medium sand in the Yihe River stock were used as experimental raw materials. Six groups of machine sand were set up to replace natural sand with 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% mixing ratios. Six performance tests were conducted on C30 pumped concrete, including slump, slump retention performance, and bleeding rate. The test data showed that when the internal stone powder content of machine sand was maintained in the range of 5% to 7% and the MB value was not greater than 1.0, the optimal mixing ratio of machine sand was 40%. Under this ratio, the slump loss of concrete after 2 hours of placement was only 35 mm, and the bleeding rate was 0.82%. All performance Provide pumping construction requirements for high-rise buildings; When the proportion of mechanism sand exceeds 60%, its particle edges are rough and the total amount of stone powder exceeds the standard, which will significantly increase the yield stress of the slurry and significantly increase the probability of pipeline blockage. Based on the experimental conclusions, establish a dynamic ledger for the mixing of mechanism sand, conduct item by item re inspection of raw materials upon arrival, and implement real-time adjustment of on-site mix proportions as three linkage control measures to build a closed-loop control system for the quality of concrete throughout the entire process.

Keywords: commercial mixing plant; mixing ratio of mechanism sand; concrete workability; pump protection collapse

引言

2020 年天然河砂实施全域开采管控政策后,县域预拌混凝土企业天然砂原料采购运距延长,综合原材料成本提高^[1];长距离转运工况引发集料含水率、颗粒级配指标离散性增大,混凝土匀质性与成型质量可控性大幅下降。辖区年产大型预拌搅拌站自 2023 年全面推行石灰岩尾矿

机制砂替代天然河砂资源化应用工艺以来,生产运行阶段显现两项核心管控短板,现场操作班组为压缩原材料耗用成本,擅自变更机制砂复配掺量,致使频发泵送堵管故障与塑性收缩开裂质量缺陷^[2];试验室检测台账与生产线实时生产数据信息割裂,未形成数据互通闭环。本研究以站内标准化试验室为载体,采用工程现场在用原状原材料,

定量标定不同机制砂复配掺量下混凝土工作性能临界控制阈值,同步构建检测试样资料标准化归档体系与生产配合比动态分级审批机制,落实检测岗与资料管理岗协同联动质控模式。

1 试验概况

1.1 试验依托工程与生产工况

本次试验全部原材料、拌合设备、运输车辆均取自某新型建材有限公司一号生产线,生产线配置全自动砂石配料秤、螺旋粉料输送机、聚羧酸外加剂自动滴定系统,骨料露天密闭料仓堆放,设置防雨喷淋围挡,模拟鲁南地区春季(3~4月)平均气温12~18℃、空气湿度58%的常态施工环境,是机制砂含水率波动最大的季节^[3]。试验混凝土标号选取站内年用量占62%的C30泵送混凝土,适配12~28层高层住宅梁板泵送施工,泵送垂直高度最大82m。

1.2 原材料性能检测

所有原材料均按照日常试验检测流程完成进场复检,检测数据录入预拌混凝土质量监管平台,同步留存纸质原始台账,各项指标如下:

(1) 水泥:采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,3d抗压强度26.8MPa,28d抗压强度44.2MPa,标准稠度用水量26.2%,安定性合格,初凝时间185min,终凝时间260min,进场批次复检合格率100%。

(2) 矿物掺合料:Ⅱ级粉煤灰,需水量比99%,细度18.4%,烧失量3.12%;S95矿粉,28d活性指数97.6%,流动度比103%,双掺比例为粉煤灰12%、矿粉8%,为站内C30混凝土固定掺合料配比。

(3) 粗骨料:5~31.5mm连续级配石灰岩碎石,表观密度2680kg/m³,针片状含量6.3%,压碎指标17.2%,含泥量0.41%,全部为站内自产碎石,与机制砂同源,骨料界面相容性更好。

(4) 细骨料:①天然砂:存量水洗中砂,细度模数2.56,含泥量2.1%,泥块含量0.3%,颗粒圆润,级配处于Ⅱ区中砂范围;②机制砂:本地石灰岩尾矿破碎水洗机

制砂,破碎机为冲击式破碎设备,经双层振动筛筛分,实测细度模数3.12,石粉含量6.4%,亚甲蓝MB值0.92,松散堆积密度1580kg/m³,棱角性系数1.73,区别于外地花岗岩机制砂,灰岩机制砂石粉为惰性碳酸钙,不具备胶凝活性,吸水膨胀率更低。

(5) 外加剂:聚羧酸高性能保坍型减水剂,固含量18.3%,减水率29.6%,适配灰岩骨料,针对机制砂高棱角性提前优化分子支链结构,避免高掺量下拌合物干涩。

(6) 拌合用水:站内地下水循环拌合用水,氯离子含量126mg/L,硫酸盐含量232mg/L,符合拌合用水标准,无需额外处理。

1.3 试验方案设计

以机制砂质量取代天然砂为变量,保持水胶比0.44、砂率43%、胶凝材料总量345kg/m³、外加剂外掺量2.1%全部固定,设置6组平行试验组,编号S0-S5:S0(0%机制砂,100%天然砂)、S1(20%机制砂)、S2(40%机制砂)、S3(60%机制砂)、S4(80%机制砂)、S5(100%机制砂)。每组拌合3盘混凝土,每盘拌合量200L,采用生产线实际双卧轴强制式搅拌机拌合,拌合顺序:碎石+细骨料干拌15s→水泥+掺合料干拌20s→加水与外加剂湿拌45s,复刻现场生产时序。

出站0min坍落度、扩展度;出站60min、120min保坍性能;常压泌水率、压力泌水率(模拟泵送管道压力3.2MPa);拌合物含气量、目视黏聚性、离析等级。同时配套资料记录要求:每组试验记录骨料实时含水率、拌合环境温度、外加剂滴定偏差,纳入月度试验资料归档,对应配合比变更需经技术负责人签字审批,杜绝无记录随意改配比。

2 试验结果与性能影响机理分析

2.1 不同掺配比例对坍落度及经时保坍的影响

各组混凝土坍落度、扩展度经时变化实测数据如表1所示,数据为3盘平行试样平均值,剔除偏差超过5%的异常数据:

表1 不同掺配比例对坍落度及经时保坍的影响

组别	机制砂掺比	0min 坍落度 (mm)	0min 扩展度 (mm)	60min 坍落度 (mm)	120min 坍落度 (mm)	2h 坍落度损失 (mm)
S0	0%	225	560	202	186	39
S1	20%	223	555	201	184	39
S2	40%	224	558	206	189	35
S3	60%	218	532	191	168	50
S4	80%	209	501	172	143	66
S5	100%	201	476	158	129	72

由表 1 可知,灰岩机制砂在 0~40%掺配区间内,对预拌混凝土出站初始坍落度几乎无负面影响,且 40%掺配比例下拌合物 120min 保坍性能显著优于纯天然砂对照组。该现象由颗粒摩擦、石粉填充两种反向作用动态调控:一是颗粒形貌差异,天然砂颗粒表面圆润光滑,颗粒间滚动摩擦系数仅为 0.21,而灰岩机制砂棱角分明、表面粗糙,颗粒摩擦系数达 0.47,纯机制砂会大幅提升浆体内部剪切阻力,削弱混凝土流动能力^[4];二是石粉填充效应,本次试验机制砂含 6.4%惰性灰岩石粉,可有效填补天然砂堆积空隙,混合砂空隙率从纯天然砂的 39.2%下降至 36.1%,节约了填充空隙的自由砂浆,富余自由水改善拌合物流动性。两类效应在 40%掺比下相互抵消,实现流动性动态平衡。当掺比超 40%,棱角摩擦效应主导性能变化,加之石粉比表面积为水泥 1.8 倍,持续吸附聚羧酸外加剂,导致外加剂后期效能衰减,混凝土 120min 坍落度损失超 50mm,突破山东预拌混凝土泵送 $\leq 45\text{mm}$ 的施工限值。

2.2 不同掺配比例对泌水率与黏聚性的影响

泌水与离析是商混现场楼板开裂、表层起砂的核心诱因,本次同步测试常压泌水率与压力泌水率,黏聚性采用倒置坍落度筒目视判定,结果如表 2:

表 2 不同掺配比例对泌水率与黏聚性的影响

组别	机制砂掺比	常压泌水率 (%)	压力泌水率 (%)	黏聚性等 级	目视离析情况
S0	0%	2.15	32.6	一般	轻微浆骨分离
S1	20%	1.43	27.1	良好	无离析
S2	40%	0.82	22.3	优良	无离析、无泌浆
S3	60%	0.79	21.8	优良	无离析
S4	80%	0.71	20.5	偏干涩	骨料外露抱团
S5	100%	0.65	19.2	干涩粘稠	局部结块

试验表明,混凝土泌水率随机制砂掺量提高逐步降低,整体保水性能稳步改善,但拌合物黏聚性会出现明显拐点。纯天然砂自身级配存在缺陷,缺少 0.315mm 以下微细粉料,骨料间隙易形成连续贯通的泌水通道,导致常压泌水率超出规范限值。采用纯天然砂浇筑楼板时,表层游离水分蒸发速度快,混凝土塑性阶段易产生不规则网状收缩裂缝^[5]。掺入机制砂后,其中所含石粉可填充骨料微小空隙,阻断泌水通路,当机制砂掺比控制在 40%~60%时,拌合物保水效果达到最佳。若掺量突破 60%,体系细颗粒总量过多,砂浆富余包裹层厚度远超粗骨料适配需求,拌合物内摩擦阻力大幅增大,产生假性粘稠现象。施工现场泵送压力由常规 16MPa 骤增至 24MPa,管道负荷陡增,

大幅提升堵管、爆管风险,不利于混凝土正常泵送施工。

2.3 不同掺配比例对含气量与外观匀质性的影响

天然砂颗粒表面圆润光滑,骨料间隙摩擦小,混凝土拌合时极易卷入大尺寸游离气泡,且气泡膜壁薄弱、消散速度快。试验空白组(S0 纯天然砂)混凝土含气量达 3.82%,内部气泡粒径大多超过 0.3mm,浇筑成型后构件表层分布大量粗大蜂窝气孔,无法满足清水混凝土外观验收标准。反观机制砂,颗粒表面凹凸且内部存在微孔结构,能够吸附拌合产生的微小气泡,加固气泡膜壁,稳定内部孔隙体系。试验数据显示,40%机制砂掺配比例下,混凝土含气量降至 3.11%,孔隙细密且分布均匀,完美适配清水混凝土外观管控要求。但机制砂掺量突破 80%后,骨料附带的过量石粉会包裹封闭气泡,阻碍振捣排气,使含气量反弹至 4.05%,后续易引发表层空鼓、立方体抗压强度离散超标。结合多雨潮湿区域工况,偏高含气量会割裂混凝土内部浆体结构,大幅削弱抗冻融能力,室外市政道路构件仅经历 1~2 个冻融循环就会出现表层砂浆剥落。因此,多雨地区机制砂配比设计不可单一侧重保水效果,必须同步把控含气量阈值,实现外观与耐久性双向平衡。

3 搅拌站现场实操痛点与资料管控问题剖析

3.1 料仓动态含水率波动导致配比失效

站内机制砂露天料仓无全覆盖防雨棚,春季昼夜温差大,夜间返潮导致机制砂单日含水率波动 2.3%~7.8%,一线拌合班组仅采用固定含水率修正用水量,未按照试验岗位每 2h 一次的现场含水率抽检数据动态调参。含水率每上升 1%,同等掺配比例下混凝土坍落度下降 12~15mm,即便采用 40%最优掺比,含水率超标依然会引发拌合物干涩。目前站内原有资料台账仅记录每日一次含水率,不符合动态管控要求。

3.2 掺配比例口头调整,无闭环资料追溯

站内前期为降低骨料采购成本,生产调度口头要求提升机制砂掺比至 70%,试验室未开展性能复检,资料台账未更新。后续出现泵送堵管后,无法通过资料追溯配比变更原因。所有细骨料掺配比例调整,必须同步留存原材料复检报告、拌合物性能验证记录、技术负责人审批文件、生产投料数据截图四类资料,缺一不可。

3.3 石粉含量超限与掺配比例叠加负面影响

站内偶尔接收未水洗原生机制砂,石粉含量达到 9.2%,此时即便采用 40%掺比,依然会出现保坍快速损失。过往试验资料未将石粉含量、MB 值与掺配比例联动归档,仅单独记录掺配数据,导致质量缺陷溯源时无法判

定是掺配比例超标还是石粉超标导致性能失效。

4 适配大型商混搅拌站的掺配管控与资料优化方案

4.1 分级划定机制砂掺配使用阈值

结合不同施工场景,划分三级掺配标准,纳入站内永久配合比库:(1)高层泵送(垂直高度 $>50\text{m}$):固定机制砂掺比 $35\%\sim 40\%$,石粉控制 $5\%\sim 7\%$,压力泌水率 $\leq 23\%$,2h坍落度损失 $\leq 40\text{mm}$;(2)中层非泵送(垂直高度 $15\sim 50\text{m}$):掺比 $40\%\sim 60\%$,可适度放宽保坍要求;(3)地面垫层、围墙低标号混凝土:掺比 $60\%\sim 80\%$,无需严格控制保坍,优先控制生产成本。严禁所有场景统一采用高掺配比。

4.2 试验检测动态质控流程优化

修订试验室作业指导书,细骨料实行“两检制度”,进场批次复检+料仓原位抽检,白天生产时段每2h检测一次混合砂含水率、细度模数、MB值,检测数据实时上传搅拌站MES生产系统,自动修正拌合用水量。当混合砂细度模数超出 $2.4\sim 2.7$ 最优区间时,立即下调机制砂掺比 5% ,同步开展拌合物复试。

4.3 资料闭环归档标准化改造

针对住建局监管要求,重构机制砂掺配专项资料台账,分为四级档案:(1)源头档案:细骨料供货合同、矿石原产地证明、水洗出厂检测报告;(2)进场复检档案:亚甲蓝、石粉、级配原始试验记录、仪器校准证书;(3)配比变更档案:掺比调整申请、性能验证试验报告、技术负责人签字审批单;(4)生产溯源档案:MES系统砂石投料曲线、混凝土运输交付坍落度检测记录。所有资料电子档同步混凝土监管平台,纸质档保存5年,匹配竣工资料移交要求。另外,以往资料仅归档最终检测数据,新增异常数据溯源附件,针对坍落度损失超标、泌水异常,记录异常原因、整改掺比、复检结果,彻底解决过往资料数据与现场脱节问题。

4.4 低成本现场工艺配套措施

无需改造拌合设备,仅调整外加剂滴定参数:40%最优掺比下,聚羧酸减水剂维持 2.1% 外掺量;掺比每提升 10% ,外加剂保坍组分提升 0.08% ,抵消石粉吸附损耗。同时在细骨料料仓加装简易防雨喷淋罩,将机制砂含水率波动控制在 $\pm 1\%$ 以内,消除含水率对掺配效果的干扰。

5 结论

大型商品搅拌站使用灰岩水洗机制砂($\text{MB}\leq 1.0$ 、石粉 $5\%\sim 7\%$),C30泵送混凝土最优机制砂取代天然砂掺配比例为 40% 。该配比下混凝土出站坍落度 224mm ,2h保坍损失 35mm ,常压泌水率 0.82% ,含气量均匀,配合高层长距离泵送施工,施工顺畅的前提下还能控制原料成本。掺配比例 $0\sim 40\%$ 区间,机制砂填充级配空隙,改善保水性与黏聚性; $40\%\sim 60\%$ 区间,保水性继续提升,但流动性开始衰减; $>60\%$ 区间,拌合物干涩、泵送阻力激增,堵管、骨料抱团风险大幅上升,禁止用于高层泵送工况。

[参考文献]

- [1]于国庆,陶燕超,孙威.机制砂石粉含量对公路预制T梁混凝土泵送施工性能及外观质量的影响研究[J].水泥,2026(6):147-149.
 - [2]张海江,樊永亮,范帅垒,等.引气剂及矿物掺合料对机制砂混凝土性能的影响[J].混凝土世界,2026(5):19-24.
 - [3]顾春平,包哲南,张佳慧,等.石粉和MB对机制砂混凝土干缩和抗氯性的影响[J].浙江工业大学学报,2026,6(17):1-8.
 - [4]张文一,王红星,赵迁乔,等.机制砂品质和取代率对混凝土性能的影响[J].青岛理工大学学报,2026,47(2):36-43.
 - [5]彭祥富.基于外加剂和矿物掺合料复掺的机制砂高性能混凝土耐久性研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
- 作者简介:范学芳(1984—),女,山东临沂人,毕业于青岛理工大学土木工程专业,现就职于沂南县鲁碧新型建材有限公司,从事试验检测及资料管理等。