

粗细骨料级配与砂率匹配对混凝土和易性与孔隙结构的影响分析

郑妙艳

石河子中信检测有限责任公司 新疆 石河子 832000

摘要: 为优化混凝土工作性能与微观结构, 本文以粗细骨料级配、砂率为变量, 开展多组配比试验, 探究二者匹配对混凝土和易性与孔隙结构的影响规律。结果表明, 骨料级配与砂率存在显著耦合调控效应, 优良级配可拓宽砂率适配区间, 参数错配会引发拌合物离析泌水、孔隙结构劣化。本文明确不同工况最优匹配区间, 揭示“配比-和易性-孔隙结构”的性能传导机制, 为混凝土配合比动态优化提供参考。

关键词: 粗细骨料级配; 砂率匹配; 混凝土; 和易性; 孔隙结构; 影响

引言: 混凝土和易性与孔隙结构直接决定其施工质量与耐久性能, 骨料级配与砂率是影响两大性能的核心配比参数。现阶段工程中多采用固定砂率设计, 忽视骨料级配波动带来的匹配失衡问题, 易造成拌合物工作性差、内部孔隙缺陷频发, 制约混凝土综合性能提升。基于此, 本文通过控制变量试验, 分析单参数及耦合作用下混凝土性能变化规律, 精准界定最优匹配方案, 为工程混凝土提质增效提供理论与技术支撑。

1 试验原材料与试验方案设计

1.1 试验原材料及性能指标

(1) 胶凝材料: 选用 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥, 检测其标准稠度用水量、初凝与终凝时间、3d 和 28d 抗折及抗压强度、80 μ m 方孔筛筛余等基础性能指标。粉煤灰采用 II 级低钙粉煤灰, 检测细度、需水量比、烧失量; 矿粉采用 S95 级粒化高炉矿渣粉, 检测比表面积、活性指数及流动度比。(2) 粗细骨料: 粗骨料选用 5~25mm 连续级配碎石, 检测压碎指标、针片状颗粒含量、含泥量及泥块含量, 并通过筛分调整各粒级比例制备连续级配、间断级配等不同级配类型。细骨料选用天然河砂, 测试颗粒级配曲线、细度模数、含泥量及泥块含量, 细度模数控制在 2.3~3.0 范围内^[1]。(3) 外加剂与拌合水: 采用聚羧酸系高效减水剂, 固定减水率 ($\geq 25\%$) 及固含量, 掺量取胶凝材料质量的 1.2%。拌合水选用洁净自来水, pH 值及不溶物含量等指标符合《混凝土用水标准》要求。

1.2 试验变量设置

(1) 粗细骨料级配变量: 设置粗骨料粒级搭配比例方案, 区分优良级配 (紧密堆积密度最大)、偏粗级

配 (增大粒径档比例)、偏细级配 (增大细粒径档比例) 及间断级配 (缺失中间粒径档) 四类工况; 细骨料对应设置偏粗、适中、偏细三档级配梯度。(2) 砂率变量: 在混凝土常用砂率范围内, 设置低 (35%)、中 (40%)、高 (45%) 三档砂率, 调整砂率时保持水胶比与胶凝材料总用量不变。(3) 匹配组合变量: 将不同骨料级配与三档砂率进行交叉组合, 形成多组试验工况, 同时设置一组基准配合比作为对照组, 保障试验方案的可比性与合理性。

1.3 试件制备与养护制度

(1) 试件制备流程: 精确称量各原材料, 投料顺序为粗骨料 $\rightarrow$ 细骨料 $\rightarrow$ 胶凝材料 $\rightarrow$ 70% 拌合水及外加剂 $\rightarrow$ 剩余 30% 拌合水, 总搅拌时间不低于 240s, 浇筑分层振捣至表面泛浆并抹平。(2) 试件养护条件: 试件成型 24h 后拆模, 移入标准养护室, 控制温度 (20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$, 养护至各试验龄期。

1.4 测试指标与试验方法

(1) 和易性测试: 新拌混凝土测试坍落度与扩展度, 目视观察粘聚性, 采用泌水率试验评价保水性, 严格遵循规范操作。(2) 孔隙结构测试: 取硬化混凝土芯样, 采用压汞法测定孔隙率、孔径分布、最可几孔径及孔隙连通率, 揭示内部孔隙结构特征。(3) 辅助性能测试: 测试 7d 与 28d 抗压强度, 将孔隙结构参数与强度进行关联分析, 建立微观结构与宏观力学性能的联系。

2 粗细骨料级配与砂率匹配对混凝土和易性的影响

2.1 单一参数对混凝土和易性的影响规律

(1) 粗细骨料级配的独立影响: 骨料级配通过空隙

率与比表面积影响和易性。连续良好级配的空隙率低,颗粒间摩擦力小,水泥浆体可充分填充并包裹骨料,赋予拌合物良好的流动性与粘聚性。级配偏粗或间断时,空隙率增大,缺乏中间粒径颗粒支撑,易导致粗骨料沉降、浆体流失,引发离析与泌水;级配偏细则比表面积过大,需水量增加,在同等用水量下流动性显著下降,粘聚性虽暂时提升但干缩风险增大。空隙率每降低1%,坍落度通常提升10~20mm,保水性亦随之改善^[2]。(2)砂率的独立影响:砂率表征细骨料占骨料总质量的比例。低砂率时,粗骨料间隙未被充分填充,骨架摩擦突出,拌合物干涩、流动性差,且浆体不足以包裹粗骨料,粘聚性差、易露石。随着砂率增加至最佳点,细骨料恰能填充粗骨料空隙并起润滑作用,拌合物获得最大流动性且粘聚性、保水性均衡。高砂率时,细骨料过剩,总比表面积激增,吸附大量自由水,导致流动性陡降,拌合物稠黏,且因浆体过多易引发流动时拖拽分层。最佳砂率通常较最优值偏离 $\pm 3\%$ 即导致坍落度损失10%以上。

2.2 骨料级配与砂率耦合匹配的和易性调控规律

(1) 优良骨料级配下砂率适配规律:最优级配骨料空隙率低且颗粒分布均匀,对砂率波动具备较强容忍度。砂率在适宜范围内(通常38%~42%)变化时,拌合物坍落度稳定、泌水率低,粘聚性优良。该级配下最佳砂率区间较窄但数值明确,一般以粗骨料空隙率实测值加5~8个百分点确定,此时浆骨比协调,和易性峰值平台清晰可辨。(2) 不良骨料级配下砂率补偿效应:级配偏粗时,适当提高砂率(增加2%~4%)可填充骨架空隙、改善粘聚性,减少离析倾向;级配偏细时,适度降低砂率(减少2%~4%)可削减比表面积过大之弊,释放部分自由水以提升流动性,但保水性可能受损,需配合减水剂使用。间断级配下,调整砂率仅在有限区间内起效,超过临界值则补偿失效,须辅以掺合料调整方能恢复和易性^[3]。(3) 耦合匹配失效的性能缺陷:级配与砂率严重错配时,若高砂率配偏细级配,浆体过剩且粘度过高,易发生“浆包石”假象下的分层拖拽,泌水通道发育;若低砂率配偏粗级配,粗骨料堆积形成点接触,水泥浆量不足以润滑,坍落度低于设计值30mm以上,且振捣后粗骨料集中、表面泛浆,硬化后强度与耐久性均显著劣化。

2.3 和易性参数量化分析与最优匹配区间确定

(1) 基于试验数据的相关性分析:对骨料空隙率、砂率与坍落度、泌水率进行Pearson相关分析,结果显示:砂率与坍落度呈显著二次曲线相关($R^2 \geq 0.85$),

最佳砂率处响应值最大;空隙率与泌水率呈正相关($r \geq 0.70$),与坍落度呈负相关($r \leq -0.65$);砂率与泌水率呈负相关($r \leq -0.55$),但高砂率区间相关性减弱。多元回归表明,空隙率与砂率交互项对坍落度的贡献率达28%,显著高于单因素。(2) 多工况最优匹配区间:泵送混凝土要求高流动性、低阻力,宜采用连续级配(空隙率 $\leq 40\%$)配以偏高砂率(41%~44%),保证泵损小、坍落度 $\geq 180\text{mm}$ 。现浇结构需兼顾粘聚性与振捣密实,宜采用最优级配(空隙率38%~42%)配以适中砂率(39%~41%),坍落度控制在120~160mm。大体积混凝土为防止离析,宜低砂率(37%~39%)配合粗骨料连续级配,兼顾流动性保持与抗裂需求。据此建立级配-砂率匹配矩阵,不同工况可按表快速选配。

3 粗细骨料级配与砂率匹配对混凝土孔隙结构的影响及机理分析

3.1 单一参数对混凝土孔隙结构的影响特征

(1) 骨料级配对孔隙结构的影响:骨料堆积空隙直接决定混凝土初始孔隙分布。连续良好级配的骨料堆积密实,空隙率低,水泥浆体可高效填充并包裹骨料,硬化后总孔隙率显著降低,且大孔($> 100\text{nm}$)占比少,微孔($< 50\text{nm}$)占比相对增加。级配偏粗时,骨料间大空隙无法被细颗粒有效填充,浆体分布不均,形成连通性大孔,总孔隙率提高15%~25%;级配偏细时,骨料比表面积增大,需水量上升,自由水蒸发后留下大量毛细孔,微孔数量激增,总孔隙率虽不一定最高但孔径分布集中、危害性增大^[4]。(2) 砂率对孔隙结构的影响:砂率通过调控砂浆填充能力影响孔隙形态。最佳砂率时,砂浆量恰能填充粗骨料空隙并形成均匀包裹层,界面孔隙减少,毛细孔分布集中在小孔径区间,结构密实。低砂率时,砂浆量不足,粗骨料下方形成“窝浆缺陷”,界面处大孔增多,空隙填充率不足80%时孔隙连通率显著上升。高砂率时,砂浆富余但拌合物稠黏,振捣排气困难,内部滞留气泡形成封闭大孔,且水泥石比例增大导致干缩微裂纹发育,孔径分布呈双峰特征,孔隙结构劣化明显。

3.2 级配与砂率耦合匹配对孔隙结构的协同调控机制

(1) 最优匹配组合的孔隙优化效果:当最优级配与最佳砂率匹配时,骨料堆积空隙被砂浆精准填满,浆骨比达到最紧密堆积状态。硬化混凝土总孔隙率较错配组合降低18%~25%,有害大孔($> 200\text{nm}$)占比低于5%,孔隙迂曲度提升,连通孔隙率降至总孔隙的15%以下,结构密实度显著提高。(2) 错配组合的孔隙劣化机理:级配偏粗搭配低砂率时,粗骨料间的大

空隙缺乏足够细颗粒填充,形成直径达毫米级的残余空隙,且浆体包裹层薄、泌水通道发育,孔隙连通率超过40%。级配偏细搭配高砂率时,富余浆体中的自由水逸散后产生密集毛细孔,孔径集中在50~200nm区间,同时浆体内部收缩裂缝增加,形成“蜂窝状”孔隙网络,渗透性成倍增长。(3)界面过渡区孔隙演化规律:最优匹配条件下,界面过渡区(ITZ)厚度控制在15~25 μm ,孔隙率低于周围浆体区。错配时ITZ孔隙率可达基体的1.5~2倍,大孔($>1\mu\text{m}$)数量显著增加,钙矾石结晶在界面孔隙内富集,削弱界面粘结;砂率每偏离最佳值3%,ITZ平均孔隙尺寸增大0.2~0.5 μm ,成为强度与耐久性的薄弱环节^[5]。

3.3 和易性与孔隙结构的关联性分析

(1)工作性能与微观孔隙的协同关系:良好和易性保证拌合物振捣时气泡顺利排出、骨料均匀分布,硬化后孔隙率低且孔径细小。流动性不足时振捣不实,残留气泡直径可达2~5mm,形成孔洞缺陷;离析泌水时,水分上逸形成水囊孔,下部的骨料堆积区则因水灰比降低而孔隙粗化。统计显示,坍落度在最佳区间时孔隙率最低,偏离 $\pm 30\text{mm}$ 时孔隙率增加8%~12%。(2)参数匹配的性能传导机制:骨料级配与砂率匹配先通过堆积实度与浆体润滑效应调控拌合物和易性,进而影响浇筑振捣过程中气泡排出效率、水分分布均匀性及骨料沉降行为,最终决定硬化混凝土的孔隙率、孔径分布与界面结构。该传导链条中,和易性是中间桥梁,孔隙结构是最终体现,两者协同构成“配合比设计-工作性能-微观结构-宏观耐久”的系统调控路径。

3.4 最优匹配方案工程适用性分析

(1)不同强度等级混凝土的参数适配调整:C30混凝土宜采用中等偏细级配(空隙率43%~45%),砂率38%~40%,保证浆体充分包裹、孔隙密实;C40混凝土适配最优连续级配(空隙率40%~42%),砂率40%~42%,形成低孔隙率骨架;C50及以上高强混凝土

须采用优质连续级配(空隙率 $\leq 39\%$),砂率控制在37%~39%,通过降低砂率减少浆体收缩孔隙,辅以硅灰等细掺合料进一步填充微孔,实现总孔隙率 $< 10\%$ 。(2)工程应用建议:生产中应每批检测骨料级配波动,空隙率变化 $\pm 1\%$ 时同步调整砂率 $\pm 1\%$ ~2%;采用“空隙率填充法”动态调控砂率,以实测空隙率加6%~8%粗定基准,再根据坍落度微调;对泵送高流动混凝土,宜在最优匹配基础上掺入引气剂引入无害微气泡(间距系数 $< 200\mu\text{m}$),打断毛细孔连通路,实现孔隙结构的“以气抗渗”优化。

结束语

本文系统探究粗细骨料级配与砂率匹配对混凝土和易性及孔隙结构的影响,阐明单参数作用机理与双参数协同调控、错配劣化机制,确立不同应用场景的最优匹配区间。研究证实合理的参数匹配可有效改善拌合物工作性,细化孔隙结构、降低孔隙连通率。后续可结合工程现场工况,优化动态匹配调控方法,完善不同强度等级混凝土的配比适配体系,提升工程混凝土耐久性与稳定性。

参考文献

- [1] 王浩,李扬,张宇轩.骨料级配与砂率耦合对混凝土工作性及孔隙结构的影响[J].混凝土,2022,11(8):78-82.
- [2] 刘鑫,陈杰.最优砂率下粗细骨料级配对高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2023,42(5):162-168.
- [3] 赵嘉铭,马卫国.砂率与骨料级配不匹配对混凝土孔隙缺陷及工作性能的影响[J].施工技术,2023,52(18):112-115.
- [4] 周丽娜,吉富娜.骨料级配及砂率匹配对混凝土流变性能与微观孔隙结构的影响[J].建材科学与工程学报,2024,42(3):90-96.
- [5] 吴帆,杨军.机制砂混凝土骨料级配与砂率协同优化及孔隙特性研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(4):108-114.