

水利工程用砂材料特性检测与混凝土强度关系研究

杨林翰, 王 胜

(四川南充水利电力建筑勘察设计研究院, 四川 南充 637000)

摘 要 为探究水利工程用人工砂材料特性与混凝土强度的内在联系, 本研究对人工砂的颗粒级配、石粉含量、坚固性等特性指标进行精准检测, 并针对不同配合比的混凝土开展立方体抗压、轴心抗压及抗折强度测试。研究发现, 人工砂材料特性显著影响混凝土强度, 其中颗粒级配和石粉含量与混凝土强度关联紧密。通过构建回归模型量化二者关系, 并从微观结构和物理化学层面剖析影响机制, 以为水利工程中人工砂的合理选用及混凝土配合比优化提供科学依据。

关键词 水利工程; 人工砂; 特性检测; 混凝土强度; 配合比

中图分类号: TV543; TV41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.042

0 引言

在水利工程建设中, 其所处环境复杂恶劣, 混凝土结构需具备高强、耐久等性能以抵御水流冲刷、水位波动和冻融循环等作用。人工砂作为混凝土的关键组成部分, 其颗粒级配、石粉含量、泥块含量及坚固性等特性, 对混凝土的工作性能、力学性能和耐久性有着直接且重要的影响^[1]。然而, 目前关于水利工程用人工砂材料特性与混凝土强度之间的具体关系尚不明确。深入开展此项研究, 精准掌握二者关联, 对保障水利工程质量、推动水利建设发展意义重大。

1 人工砂材料特性检测指标与方法

1.1 颗粒级配

颗粒级配反映人工砂中不同粒径颗粒的分布状况, 是衡量人工砂性能的关键指标。人工砂颗粒级配同样可分为粗、中、细等类型, 不同类型人工砂的粒径范围有所差异。检测人工砂颗粒级配常用筛分析法。具体操作时, 先称取一定质量的干人工砂样, 将其依次通过按孔径从大到小排列的标准筛网, 每次筛分后称量筛上颗粒质量, 直至完成所有筛分步骤。最后计算各粒径区间的累积通过率, 并以百分比形式记录, 据此绘制累积筛余曲线或累积通过曲线, 以此直观呈现人工砂的颗粒级配情况。

1.2 石粉含量

石粉含量指人工砂中粒径小于 0.16 mm 的颗粒质量占总质量的百分比, 是影响混凝土性能的重要因素。适量石粉可改善混凝土拌合物的工作性能, 如增加浆

体体积、提高流动性等; 但石粉含量过高, 会导致混凝土需水量增加, 进而降低混凝土的强度和耐久性。一般来说, 水利工程用人工砂石粉含量需控制在合理范围内, 具体数值因工程要求而异。

检测人工砂中石粉含量通常采用水洗法。该方法用于测定人工砂中石粉含量及微粒含量, 操作相对简单, 检测结果较为准确可靠。

1.3 泥块含量

泥块含量是指人工砂中原粒径大于 1.18 mm, 经水浸洗、手捏后小于 0.60 mm 的颗粒质量占人工砂总质量的百分比。检测泥块含量时, 先将人工砂样品筛除大于 1.18 mm 的颗粒, 然后称取一定质量的砂样, 将其放入水中浸泡 24 小时, 使泥块充分软化。浸泡后, 用手捏碎泥块, 再通过 0.60 mm 的筛网进行水洗筛分, 将筛上剩余的砂样烘干至恒重并称重。根据前后两次称量的质量差, 计算出泥块含量。精确测定泥块含量对于评估人工砂质量、保障混凝土性能至关重要, 在水利工程中, 严格控制泥块含量是确保工程质量的关键环节之一, 能有效避免因泥块含量超标导致的混凝土结构性能下降问题。

1.4 有害物质含量

人工砂中可能含有云母、轻物质、有机杂质、硫酸盐等有害物质。这些物质会不同程度地损害混凝土性能, 如轻物质影响砂的密度和强度, 有机杂质干扰水水泥水化反应, 硫酸盐会引发混凝土的腐蚀和膨胀开裂。

针对不同有害物质, 检测方法各有不同。轻物质通过水浮选法测定, 将砂样放入水中搅拌, 漂浮于水

面的轻物质捞出烘干称重计算含量；有机杂质用比色法检测，通过比较砂样溶液颜色变化判断含量；硫酸盐含量则需通过化学分析，测定溶解性硫酸根离子浓度来计算。标准规定砂中轻物质含量应小于 1%，硫酸盐含量一般不超过 0.5%^[2]。

1.5 坚固性

坚固性体现人工砂抵抗外部环境侵蚀、保持自身物理和化学性质稳定的能力，是评估其长期稳定性和耐久性的重要指标。使用坚固性良好的人工砂配制混凝土，可有效降低混凝土长期性能劣化风险，如抗冻性降低、抗压强度下降和耐久性不足等问题。

检测人工砂坚固性通常采用硫酸钠或硫酸镁溶液浸泡试验，通过测定砂在多次干湿循环后的质量损失率来评估其抗侵蚀能力。一般来说，砂的质量损失率越低，坚固性越好，越适合作为混凝土骨料。

2 混凝土强度测试

2.1 混凝土配合比设计

混凝土配合比设计需依据特定的强度、工作性和耐久性要求，确定各组成材料的比例。首先，根据目标强度和所选材料的强度等级，利用水灰比—强度关系曲线初步确定水灰比；其次，结合人工砂的石粉含量和混凝土坍落度要求，选取合适的砂率；最后，根据水灰比和砂率反推水泥、人工砂、石子和水的用量，调整外加剂掺量以满足施工需求。

为研究人工砂材料特性对混凝土强度的影响，设计多个配合比方案。例如方案 A：水灰比 0.45，砂率 40%，胶凝材料用量 420 kg/m³；方案 B：水灰比 0.50，砂率 42%，胶凝材料用量 400 kg/m³。在实验过程中，调整人工砂的颗粒级配和石粉含量，在各配合比基础上制备并测试混凝土试件。结果显示，在其他条件相同的情况下，石粉含量为 8% 的人工砂与方案 A 配合，混凝土立方体抗压强度可达 30 MPa；当石粉含量增至 16% 时，抗压强度下降至 26 MPa，表明优化配合比设计和控制人工砂材料特性可有效提升混凝土强度。

2.2 混凝土制备与成型

混凝土制备过程包括原材料选择、称量、搅拌和试件成型。选用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥、符合要求的人工砂、碎石及清洁自来水作为原材料。原材料检测合格后，严格按照设计配合比精确称量各组分材料。搅拌采用强制式搅拌机，搅拌时间设定为 120 秒，先投入石子和部分水搅拌 30 秒，再加入人工砂和剩余水搅拌 60 秒，最后加入水泥和外加剂搅拌至均匀。搅拌完成后，立即进行坍落度测试，确保混凝土流动性符合施工要求^[3]。

混凝土试件成型严格遵循相关标准。试模内壁涂抹薄层脱模剂，将搅拌均匀的混凝土分三层装入模具，每层插捣 25 次，保证混凝土密实度。用抹刀刮平试件表面，标注编号后放入标准养护室养护。养护条件为温度 20±2℃，相对湿度 95% 以上，试件脱模后继续在相同条件下养护至 28 天龄期。整个制备和成型过程严格控制各环节参数，确保试件的可比性。实验发现，在相同水灰比和胶凝材料用量条件下，石粉含量过高的人工砂制备的混凝土抗压强度较低，且坍落度较大，工作性虽好但强度受影响，说明原材料选择和配比调整对混凝土性能影响显著^[4]。

2.3 混凝土强度测试方法

2.3.1 立方体抗压强度

立方体抗压强度测试是评价混凝土强度最常用的方法，试件尺寸通常为 150×150×150 mm，按相关标准制备并养护至规定龄期后进行测试。测试时，使用液压试验机，加载速度为 0.5~0.8 MPa/s，直到试件破坏，记录最大压力值。立方体抗压强度的计算公式为：

$$f_{cu} = \frac{F}{A}$$

其中， f_{cu} 为立方体抗压强度， F 为破坏荷载， A 为试件承压面积。测试结果表明，石粉含量为 8% 的人工砂制备的混凝土强度可达 30 MPa，石粉含量为 16% 的人工砂制备的混凝土强度 26 MPa。通过多组试件测试数据对比，分析人工砂材料特性对立方体抗压强度的影响，验证了颗粒级配和石粉含量对强度的重要作用。

2.3.2 轴心抗压强度

轴心抗压强度是指在轴心受压条件下，混凝土试件抵抗破坏的能力。试件通常为直径 150 mm、高度 300 mm 的圆柱体，按标准方法制备并养护至 28 天龄期。测试时，液压试验机均匀加载至试件破坏，记录最大压力。轴心抗压强度计算公式为：

$$f_a = \frac{F}{A}$$

其中， f_a 为轴心抗压强度， F 为破坏荷载， A 为试件承压面积。研究发现，石粉含量为 8% 的人工砂制备的混凝土轴心抗压强度为 30 MPa，而石粉含量为 16% 的人工砂制备的混凝土轴心抗压强度仅为 26 MPa。

2.3.3 抗折强度

抗折强度是混凝土在弯曲作用下的抗破坏能力，用于评估混凝土的抗裂性和韧性。测试方法包括中心加载法和三点加载法。试件一般为 100×100×400 mm 的梁形试块，养护至规定龄期后，在弯曲试验机上进行加载。以三点加载法为例，将试件支承在两点上，

中间施加加载力, 逐渐增加荷载直至试件破坏, 记录破坏荷载 F 。抗折强度计算公式为:

$$f_r = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2}$$

其中, f_r 为抗折强度, L 为支点间距, b 和 h 分别为试件宽度和高度。研究显示, 石粉含量为 8% 的人工砂制备的混凝土抗折强度达到 7.8 MPa, 而石粉含量为 16% 的人工砂制备的混凝土抗折强度仅为 6.9 MPa。多组数据对比表明, 颗粒级配良好且石粉含量适宜的人工砂可有效提高混凝土的抗折强度和韧性, 增强其整体抗裂性能。

3 砂材料特性与混凝土强度关系分析

3.1 相关性分析

在探究人工砂材料特性与混凝土强度关系时, 相关性分析是量化特性指标影响程度的有效手段。本研究选取颗粒级配、石粉含量、含泥量、泥块含量等人工砂特性参数, 结合混凝土的立方体抗压强度等性能参数, 运用皮尔逊相关系数计算各项特性与混凝土强度之间的线性相关性。记录人工砂的石粉含量值 (如 8%、12%、16%), 并与相应的立方体抗压强度数据 (如 30 MPa、29 MPa、26 MPa) 配对, 计算皮尔逊相关系数 r 。皮尔逊相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

其中, x_i 和 y_i 分别为砂材料特性值和混凝土强度值的样本点, \bar{x} 和 \bar{y} 为相应的样本均值。在一定范围内, 通过计算得出石粉含量的相关系数 $r = -0.75$, 表明石粉含量与混凝土抗压强度呈较强负相关关系, 即石粉含量越高, 混凝土抗压强度越低。同时, 对颗粒级配曲线的关键粒径参数如中值粒径 d_{50} 和 85% 通过 d_{85} 粒径进行统计, 并与混凝土抗压强度进行相关性计算。结果显示, 中值粒径 $d_{50} = 0.4$ mm 时, 立方体抗压强度达到 30 MPa, $d_{50} = 0.3$ mm 时, 抗压强度降至 28 MPa, 对应的相关系数 $r = 0.78$ 。通过上述计算, 明确了人工砂材料特性中颗粒级配和石粉含量对混凝土强度的显著影响。

3.2 回归分析

回归分析旨在建立人工砂材料特性与混凝土强度之间的数学模型, 实现二者关系的量化。以石粉含量数值范围和颗粒级配分布特性数据为自变量, 混凝土抗压强度具体数值为因变量, 拟合线性回归或多元回归模型^[5]。例如: 将石粉含量 8%、12%、16% 作为代表值, 颗粒级配参数以关键粒径点 d_{50} 、 d_{85} 的具体粒

径值作为输入变量, 利用最小二乘法拟合一元或多元回归模型。模型拟合后, 通过拟合优度检验评估模型的解释能力, 采用显著性检验判断回归系数的意义。通过回归分析建立数学公式, 将人工砂材料特性数据与混凝土强度具体值关联起来, 为优化人工砂选择提供科学依据。

3.3 机制分析

从材料的微观结构和物理化学性质出发, 深入剖析人工砂材料特性影响混凝土整体强度的机制。颗粒级配参数, 如 d_{50} 和 d_{85} , 决定了人工砂在混凝土内部的颗粒排列和孔隙率。当颗粒级配良好时, 大小颗粒相互填充, 减少骨料间孔隙, 增加颗粒接触面积, 提高界面粘结力。石粉含量对混凝土性能影响复杂, 适量石粉可填充孔隙, 改善工作性, 但过量石粉会包裹在骨料表面, 阻碍水泥水化反应, 增加需水量, 导致孔隙率增大, 降低混凝土强度。含泥量过高会在骨料与水泥浆体界面形成薄弱结合面, 影响粘结强度; 通过对这些参数在微观结构和物理化学层面作用的分析, 深入理解人工砂材料特性对混凝土强度的影响机制, 为材料设计和优化提供理论支撑。

4 结束语

本研究系统地探讨了水利工程用人工砂材料特性检测与混凝土强度的关系。通过检测人工砂多项特性指标, 测试不同条件下的混凝土强度, 并运用相关性分析、回归分析等方法, 明确了人工砂材料特性对混凝土强度的影响规律, 构建了相关预测模型。研究成果为水利工程中人工砂的合理选择和混凝土配合比优化提供了科学依据。未来, 可进一步拓展人工砂种类, 考虑更多复杂环境因素, 开展长期性能研究, 不断完善相关理论和技术, 为水利工程质量保障提供更有力的支持。

参考文献:

- [1] 李军传. 基于灌浆技术的水利工程用聚合物灌浆材料抗渗特性试验研究 [J]. 粘接, 2024, 51(01): 173-176.
- [2] 林泽羿, 陈石玮, 燕学博, 等. 基于模拟和混凝土材料特性的 SCM 混凝土施工方案表现计量与决策研究 [J]. 工程管理学报, 2022, 36(04): 111-116.
- [3] 王婧, 孔祥飞. 再生混凝土的材料特性及应用前景分析 [J]. 房地产世界, 2024(15): 170-172.
- [4] 李贵勋, 李硕硕, 孔令辉, 等. 水利工程用环氧树脂改性聚氨酯丙烯酸酯性能研究 [J]. 塑料工业, 2024, 52(04): 84-88, 116.
- [5] 王宗海. 透水混凝土铺装基底材料抗冻胀性能试验研究 [J]. 东北水利水电, 2021, 39(12): 41-43, 72.