

水工工程砂石骨料三大控制指标检测试验与质量评价

郭 威 邵 琦

河南省百川工程质量检验有限公司 河南 新乡 453002

摘 要：砂石骨料是水工混凝土的重要组成材料，其质量优劣直接影响混凝土的工作性能、力学强度与耐久性。颗粒级配、含泥量（含石粉含量）和压碎指标是评价砂石骨料质量的三大核心控制指标，三者分别从物理组成、洁净程度和力学强度维度对骨料品质进行综合表征。本文系统论述了三大指标的技术内涵、检测试验方法及其在水工工程中的特殊要求，深入分析了各指标的工程意义与质量控制阈值，进而构建了基于多指标综合评判的骨料质量评价体系。研究表明，三大指标并非独立作用，而是相互关联、共同决定骨料品质，建立系统化的检测与评价机制是保障水工混凝土质量的关键路径。

关键词：水工工程；砂石骨料；颗粒级配；含泥量；压碎指标；质量评价

引言

水工建筑物长期在水压、冲刷、冻融及化学侵蚀等多重因素作用下运行，对混凝土的强度、抗渗性和耐久性提出了极为严格的要求。砂石骨料作为混凝土体积占比最高的组分（通常达60%~75%），其品质直接决定了硬化混凝土的骨架结构和界面过渡区性能。工程实践表明，骨料质量问题引起的混凝土强度不足、耐久性下降乃至结构病害占有相当比例，其中颗粒级配、含泥量（含石粉含量）和压碎指标是诱发问题的最主要因素。颗粒级配决定了骨料堆积的密实程度和混凝土拌合物的流动性，级配不良将导致空隙率增大、浆体用量增加或振捣不密实；含泥量和石粉含量反映了骨料中细颗粒杂质的多少，过高会吸附外加剂、增大用水量并劣化界面粘结；压碎指标则表征骨料抵抗压碎破坏的能力，直接关系高强混凝土的承载性能。三者从不同侧面刻画了骨料质量的属性特征，构成水工混凝土骨料质量控制的三个核心维度。然而，当前部分检测人员对指标内涵理解不够深入，检测操作不够规范，对指标间的内在关联缺乏系统性认识，造成检测结果评价片面或误判。因此，有必要对三大控制指标的检测方法与质量评价进行系统论述，明确各指标在水工工程中的控制要点和评判准则，为骨料质量管控提供技术参照。

1 三大控制指标的技术内涵与工程意义

1.1 颗粒级配及其对混凝土性能的影响机制

颗粒级配是指骨料中不同粒径颗粒的分布状况，通常用筛分曲线或细度模数来表达。骨料级配良好的标志是大、中、小粒径颗粒按适当比例搭配，使空隙率达到最小。在混凝土中，粗骨料形成的骨架空隙由细骨料填充，细骨料间的空隙由水泥浆填充，合理的级配可使各组份紧

密堆积，以最少的水泥浆用量获得最大的密实度。级配不良对混凝土性能的影响是多方面的。粗骨料中过多的大粒径颗粒会导致空隙率增大，需要更多的砂浆来填充，不仅增加胶凝材料用量，而且可能因砂浆填充不实形成局部空洞^[1]。细骨料过细会增大比表面积，增加用水量和水泥用量，导致混凝土收缩增大；细骨料过粗则降低拌合物的粘聚性，易产生离析和泌水。对于水工大体积混凝土，还应关注最大粒径和中间粒径的分布状态，以避免因粒径过于集中造成的温度应力分布不均。

1.2 含泥量与石粉含量的本质区别

含泥量和石粉含量虽然都表征小于某粒径的细颗粒含量，但两者性质截然不同。含泥量指粒径小于0.075mm的粘土、淤泥等细颗粒含量，这些颗粒具有明显的吸附性和膨胀性，会包裹骨料表面，阻碍水泥浆与骨料的粘结，同时大量吸附减水剂，导致混凝土坍落度经时损失加快。石粉则是机制砂生产过程中产生的粒径小于0.075mm的岩石微粒，其矿物组成与母岩一致，不具有膨胀性，适量的石粉反而可改善混凝土的工作性和密实性。在水工工程中，对含泥量的控制极为严格，一般要求粗骨料含泥量不大于1%，细骨料含泥量不大于3%。而对机制砂中的石粉含量，则根据混凝土强度等级区别对待，高强度混凝土要求石粉含量不超过7%，中低强度混凝土可放宽至10%~15%。这种区别对待反映了工程界对两类细颗粒作用的科学认知。

1.3 压碎指标与骨料强度关系

压碎指标是评价骨料在压力作用下抵抗破碎能力的量化参数，间接反映骨料的强度特性和内部结构完整性。试验中通过对特定粒级骨料施加递增荷载，测定破碎颗粒的质量百分数，数值越低表示骨料抗压碎能力越

强。对于水工混凝土,骨料压碎指标值过高意味着其在混凝土受压时自身可能先行破坏,导致混凝土的实际强度低于设计预期。不同水工结构对压碎指标的要求有所不同。大坝内部混凝土或次要结构可适当放宽至20%~25%,而承受高应力的泄洪建筑物、闸墩等重要部位,则要求粗骨料压碎指标不大于12%~16%。需要指出的是,压碎指标与骨料的岩性、风化程度、裂隙发育状况密切相关,同一岩石类型的骨料在不同产地其压碎指标可能存在显著差异。

2 三大指标的检测试验方法

2.1 颗粒级配的筛分试验方法

颗粒级配的测定采用标准筛分法。粗骨料筛分选用孔径为2.36mm、4.75mm、9.5mm、16.0mm、19.0mm、26.5mm、31.5mm、37.5mm、53.0mm、75.0mm及90.0mm的方孔筛一套,细骨料筛分则采用0.075mm、0.15mm、0.30mm、0.60mm、1.18mm、2.36mm及4.75mm的筛子。试样质量按骨料最大粒径确定,最大粒径越小试样量越少,但应保证各筛余量满足称量精度要求。筛分操作分为干筛和水洗后干筛两种程序。对于含泥量较高的天然骨料,通常先水洗除去泥粉,然后将洗净烘干的试样进行干筛。筛分时采用机械振筛机,振筛时间为10~15分钟,手摇辅助筛分至每分钟通过量小于试样总量的0.1%时视为筛尽。各筛筛余质量之和与试样总质量之差不得超过1%,否则需重新试验。根据各筛累计筛余百分率,可绘制级配曲线图,与规范要求的上下限范围进行比对判定。

2.2 含泥量与石粉含量的测定程序

含泥量的测定采用水洗法。取适量烘干试样置于容器中,注入清水浸泡2~4小时,使泥土充分分散。然后将试样在0.075mm筛上用水冲洗,直至筛下水变清为止。将筛上剩余试样烘干称重,计算损失的细颗粒质量占试样总量的百分比即为含泥量^[2]。操作中应注意冲洗水压不宜过大,以免冲碎骨料颗粒造成误差,同时需确保0.075mm筛在使用前已校准,筛孔无明显变形。机制砂石粉含量的测定原理与含泥量相似,但需采用亚甲蓝法加以区分验证。亚甲蓝法的原理是利用亚甲蓝染料被粘土矿物特异性吸附的特性,通过在石粉悬浊液中逐滴加入亚甲蓝溶液,检测滤纸斑点周围是否出现蓝色晕圈来判定所测细粉中粘土类物质的含量比例。若亚甲蓝值较低(MB值小于1.4),表明细粉以石粉为主而非有害粘土,其控制标准可适当放宽。

2.3 压碎指标的试验操作规范

粗骨料压碎指标试验需制备单一粒级的试样,通常

取粒径为9.5~13.2mm或13.2~16.0mm的颗粒,经水洗并烘干至恒重。将试样分三层装入压碎值测定仪的金属圆筒内,每层用捣棒均匀捣实25次。装上压柱后将整套装置置于压力机上,在3~5分钟内均匀施加荷载至400kN,稳压5秒后卸荷。将试样倒出后在2.36mm筛上水洗筛分,称量筛下质量,计算筛下质量占试样总质量的百分比即为压碎指标。细骨料的压碎指标测定方法有所不同,通常采用单粒级压力试验或视密度法间接评估,但目前水工工程中较少直接对细骨料做压碎指标检验,而是通过砂的坚固性试验替代^[3]。需注意压碎指标试验中加载速率、试样含水量及筛分操作的规范性对结果影响较大,应严格按照标准方法执行。

2.4 水工工程检测的特殊要求

水工工程砂石骨料检测相比普通建筑工程有更高的要求。首先在取样代表性方面,水工混凝土用量大、骨料堆场面积广,取样应严格按照分层随机原则进行,同一料源不同部位的骨料其级配和含泥量可能存在显著差异,应增加取样频次。其次,水工大体积混凝土常采用最大粒径大于40mm的骨料,标准筛及试验仪器需相应配置。第三,水工工程对抗冻性和抗渗性有特殊要求,在常规检测之外需结合骨料的坚固性、吸水率等指标综合评判。

3 骨料质量的综合评价体系

3.1 单指标评价的局限性

单一指标往往只能反映骨料某方面的性能特征,据此做出的评价结论可能具有片面性。例如,某批骨料的级配和含泥量均合格,但其压碎指标接近限值,用于低应力部位尚可,用于高强结构则存在隐患。又如,压碎指标合格的骨料若含泥量超标,其界面粘结性能同样会严重劣化。因此,在实际质量评价中,必须将三大指标置于同一评价框架内综合分析,任何一项指标的异常都应予以重视。此外,指标之间的内在关联也应被纳入评价视野。含泥量偏高的骨料,其压碎指标往往会受到一定影响——粘土包裹层削弱了颗粒间的直接接触,使压碎过程中更易产生相对滑移和破碎。级配严重不良时,空隙率增大也间接降低骨料整体抵抗压碎的能力。这种指标间的耦合效应提示评价者不能孤立地看待单一指标。

3.2 多指标综合评价方法

多指标综合评价应遵循以下逻辑层次:首先将三项指标分别与规范标准值对照,逐项判定合格性;其次对不合格指标分析其偏离程度和可能成因;最后综合三项指标的整体表现做出最终质量等级评定。等级划分可采用合格与不合格的二分法,也可采用分级评定的方法。

分级评定可设定优等、合格、基本合格、不合格四个等级^[4]。优等要求三项指标均优于标准值一定幅度（如含泥量低于限值的50%且压碎指标低于限值的80%）；合格为全部达标；基本合格为某项指标接近限值但经专项论证后不影响使用；不合格则为任一项指标严重超标或两项以上指标不达标。

3.3 水工工程适用性评价的特殊维度

水工工程骨料质量评价还须引入两个特殊维度。其一是骨料碱活性，部分含活性二氧化硅的骨料在水工混凝土长期潮湿环境中可能与水泥碱发生碱-硅酸反应，导致混凝土膨胀开裂，此风险与级配、含泥量等指标共同决定骨料的适用性。其二是骨料的热学性能，对于大体积水工混凝土，骨料的热膨胀系数影响混凝土的温度应力分布，在评价中应加以考虑。

4 影响检测结果可靠性的因素与控制对策

4.1 取样与样品制备的规范性

取样是检测工作的首要环节，其代表性直接决定检测结论的有效性。实际中常因取样点分布不合理、取样量不足或样品在运输过程中受到污染或离析，导致检测结果偏离真实值。规范化的取样应从堆场顶部、中部和底部多层多点取样，将各点样品充分混合后用四分法缩分至试验所需量。运输过程应避免强烈振动和潮湿污染。样品制备中的烘干温度和烘干时间同样需严格控制，过高温度可能改变某些粘土矿物的结构形态，影响含泥量测定准确性。

4.2 试验条件与操作一致性的保障

试验室的环境条件（温度、湿度）对含泥量和石粉含量测定结果有一定影响，应尽量保持恒温恒湿。筛分设备的定期校验必不可少，长期使用的筛网会因磨损导致筛孔扩大，使级配测定结果偏细。不同试验人员之间操作手法的主观差异也可能引入误差，应通过标准化培

训减少人员间差异。

4.3 检测频率与批次划分的合理性

检测频率过低会造成质量波动无法及时捕捉，频率过高则增大检测成本。合理的频率应依据料源稳定性、生产规模及结构重要性综合确定。料源稳定的机制砂石生产线可适当降低常规检测频率，但每批进场的骨料仍需进行主要指标的快速检测。批次划分应以连续生产或连续进场为单元，不宜以日历时间为唯一依据。

5 结语

颗粒级配、含泥量和压碎指标是评价水工工程砂石骨料质量的三大核心控制指标，分别从堆积结构、洁净程度和力学强度维度刻画了骨料品质的关键属性。三项指标相互关联、互为补充，共同构成骨料质量评价的基本框架。本文系统论述了三大指标的技术内涵、检测试验方法和质量评价体系，分析了各指标的工程意义和控制要点，提出了多指标综合评判的等级划分方法和质量管控策略。在检测工作中，应充分认识各项指标的物理意义及其在混凝土中的作用机制，严格规范检测操作，加强各环节质量控制，并建立涵盖料源选择、进场检验、现场管理和动态监控的全链条保障机制。唯有如此，才能真正发挥三大控制指标的“关口”作用，为水工混凝土质量提供坚实可靠的骨料保障。

参考文献

- [1]周明,王建军.水工混凝土骨料质量控制关键技术研究[J].水力发电学报,2025,44(2):78-87.
- [2]陈永强,刘晓峰.砂石骨料含泥量检测方法对比及影响因素分析[J].建筑材料学报,2024,27(4):612-619.
- [3]张建平,杨文杰.粗骨料压碎指标与混凝土强度相关性研究[J].水利水电技术,2025,56(3):89-96.
- [4]赵长海,李英.水工工程砂石骨料质量检验标准对比研究[J].中国水利,2024,72(11):44-50.