

水利工程混凝土强度现场检测常见问题及对策研究

白忠威

湖北韩宇检测有限公司 湖北 武汉 841306

摘要:混凝土强度是评价水利工程结构安全性的核心指标,现场检测结果的准确性直接关系到工程质量的判定与后续处理决策。水利工程混凝土具有大体积、高掺量粉煤灰、长期水环境接触及施工质量离散性大等特点,使得现场强度检测面临比建筑工程更为复杂的条件。本文系统梳理水利工程混凝土强度现场检测的主要方法及其适用性,深入分析回弹法、超声回弹综合法、钻芯法及剪压法等在水利场景中应用的常见问题,涵盖检测方法选择失当、碳化深度修正偏差、高含水率影响、大骨料干扰、测区布置不规范及芯样加工不标准等方面,并从检测方法优化、现场条件修正、操作标准细化及人员能力提升等维度提出系统化的对策。研究表明,提升水利工程混凝土现场检测可靠性的关键在于方法适配、条件修正与操作规范三者的有机统一。

关键词:水利工程;混凝土强度;现场检测;回弹法;钻芯法;检测误差

引言

混凝土是水利工程中应用最为广泛的结构材料,其强度等级直接决定了大坝、水闸、渡槽、隧洞衬砌及堤防涵闸等水工建筑物的承载能力和耐久性。在工程质量验收、运行期安全鉴定及除险加固改造中,混凝土强度的现场检测是不可或缺的关键环节。准确获取结构的实际混凝土强度,不仅是判定工程是否满足设计要求的依据,也是制定维修加固方案、评估结构剩余寿命的基础。与建筑工程相比,水利工程混凝土现场检测面临更为复杂的条件。水工混凝土通常为大面积浇筑,骨料粒径大、掺合料掺量高,表面状态受水流冲刷和水位变动影响显著,加之许多检测作业在高湿、水下或狭小空间内进行,使得常规的检测方法和操作规程往往难以直接适用。近年来,在水利工程质量检查和病险水库鉴定中,因现场检测结果争议而引发的工程纠纷屡见不鲜——同一结构采用不同检测方法可能得出差异悬殊的强度结论,究竟是检测误差还是真实质量缺陷,常常难以定论。

1 水利工程混凝土强度现场检测的主要方法及其特点

水利工程混凝土强度现场检测主要有回弹法、超声回弹综合法、钻芯法和剪压法四种方法。回弹法通过弹簧驱动重锤撞击混凝土表面,以回弹值推定强度,操作简便、速度快、成本低,适合大面积普查,但仅能反映表层(约3~5cm)质量,且受碳化、湿度、龄期等因素影响显著,在水利工程高湿环境下误差较大。超声回弹综合法在回弹法基础上增加超声波声速测量,利用表层硬度与内部密实度的互补关系提高检测精度,但水工混

凝土粗骨料粒径大、级配不均,超声波散射强烈,声速测量的稳定性受到制约。钻芯法是现场唯一能直接获取芯样进行抗压试验的半破损方法,结果直观可靠,被视为强度检测的“校准基准”,但对结构有局部损伤、成本高、效率低,且水利工程中面临水下钻孔、钢筋避让等特殊困难。剪压法通过对结构边缘施加剪切荷载推算强度,属微破损检测,损伤小、操作简便,适用于无法钻芯的薄壁结构,但在水利工程中应用较少,相关测强曲线积累不足,可靠性尚待验证。

2 水利工程混凝土强度现场检测的常见问题

2.1 检测方法选用不当导致结果偏差

水利工程混凝土构件类型多样,不同部位对检测方法的要求不同,但部分检测人员习惯于采用“回弹法走天下”的做法,忽略了大体积混凝土内部与表层质量差异大、长期浸水构件表面潮湿软化等现实因素^[1]。例如,对于水下浇筑的混凝土或长期处于水位变动区的结构,表层混凝土因水化程度高但可能受水流冲刷造成表面疏松,回弹法测值偏低且离散性大,此时若以回弹法为主要依据作出强度不合格的判定,很可能误判。反之,若盲目依赖钻芯法,又可能因芯样代表性问题而高估或低估实际强度。

2.2 碳化深度测量与修正偏差

碳化是混凝土表面受大气中二氧化碳作用发生的中性化反应,使表层pH值降低并改变表面硬度。在回弹法中,碳化深度的测量用于对回弹值进行修正——碳化层硬度较高,回弹值偏高,需根据碳化深度进行折减。实

际检测中常见的问题包括：碳化深度测量点选取过少或不具代表性，仅在测区边缘取点而未覆盖碳化深度差异较大的区域；测量时用酚酞试剂观察显色边界，人为判断误差大；对碳化深度较大的构件仍采用标准测强曲线而未进行专项修正。对于使用年限较长或表面有防碳化涂层的水利工程，碳化深度的不均匀性更为突出，测量和修正的难度进一步加大。

2.3 高含水率条件对检测结果的干扰

水利工程混凝土长期与水接触，含水率普遍较高。高含水率对回弹法和超声法的检测结果均有显著影响：水分使表层混凝土软化，回弹值降低；超声波在水中的传播速度高于空气，含水率的增加导致声速升高，但具体影响程度因孔隙结构和含水饱和度的不同而差异极大，难以建立统一修正系数。尤其在非饱和含水状态下（如水位变动区和干湿交替带），混凝土含水率的空间和时间变化更为复杂，检测结果的稳定性和可重复性受到严重削弱。

2.4 大骨料对检测代表性的影响

水利工程大体积混凝土中常采用最大粒径达 80~150mm 的大骨料，粗骨料含量较高。在回弹检测中，弹击杆遇到紧贴表面的大粒径骨料时回弹值会异常偏高，而打在砂浆层上则偏低，导致单点回弹值的离散性极大。在超声检测中，大骨料对声波产生强烈的散射和绕射，声速测量值的波动范围显著增大^[2]。大骨料的存在还使芯样钻取的代表性面临挑战——直径 100mm 的芯样可能恰好包含一颗大粒径骨料，其抗压强度与不含大骨料的砂浆部分差异悬殊，使单组芯样难以代表结构整体强度。

2.5 测区布置不规范与龄期影响

现场检测中测区布置的随意性是影响结果代表性的重要因素。部分检测人员为操作方便，习惯将测区布置在便于操作的构件底部或边缘，或有意避开表面缺陷明显的位置，导致测区不能真实反映构件混凝土的整体质量状况。在水利工程中，同一结构不同部位的混凝土施工条件（入仓方式、振捣质量、养护条件）可能存在差异，测区选择不当会使检测结果出现显著偏倚。此外，水工混凝土中大量掺用粉煤灰和矿渣等掺合料，其强度增长速率与普通混凝土不同，使用规范推荐的标准龄期测强曲线（通常基于 28d 或 56d 龄期）对水工混凝土进行强度推定可能产生系统性偏差。

2.6 芯样加工与试验中的问题

钻芯法中的芯样加工环节是误差的重要来源。常见

问题包括：芯样端面切割不平整，不垂直度超差，受压时产生应力集中导致提前破坏；高径比不满足要求（标准高径比为 1:1）且未进行尺寸修正；芯样中含有大粒径骨料时未按要求排除或标注；潮湿芯样未经干燥或浸水处理直接试验，强度与实际状态不符。这些加工与试验环节的细节疏漏，可能使芯样强度试验结果偏离结构真实强度达 10% 以上，严重影响检测结论的可靠性。

3 常见问题成因的综合分析

上述问题的成因可从三个层面加以审视。在技术层面，水利工程混凝土的组成（大骨料、高掺合料）、结构形态（大体积、厚截面）和工作环境（高湿、水位变动）与常规检测方法的适用边界之间存在不匹配。大多数检测方法的测强曲线和修正系数基于普通混凝土建立，对水工混凝土的特殊性考虑不足。在操作层面，部分检测人员对水利工程的检测条件认识不充分，习惯于套用建筑工程的检测规程，对碳化修正、含水率影响和骨料干扰等特殊因素缺乏针对性的处理措施。检测流程中的细节控制不够严格，操作标准化程度偏低。在标准层面，目前水利行业混凝土强度现场检测的标准体系尚不完善，对高含水率修正、大骨料影响系数等水工特殊问题缺乏明确的技术规定，各检测单位之间的方法选择和数据处理存在较大差异，造成结果可比性差。

4 提升检测可靠性的系统化对策

4.1 基于检测目的和结构特点的方法适配

检测方法的选择应遵循“因材施教、因结构制宜”的原则。大面积普查性检测应以回弹法为主，但需对高湿表面进行规范处理（在待测表面喷洒吸水材料并等待至合适干燥状态后再进行测试），且回弹值应进行含水率修正。重要性结构或存在争议的部位，应采取回弹法普查与钻芯法校准相结合的方式——先用回弹法大范围筛查，发现强度偏低的测区后钻取芯样进行验证，以芯样强度对回弹结果进行修正^[3]。对于水下或长期浸水部位，不宜以回弹法为唯一依据，应优先采用水下钻芯法或预埋传感器法获取更可靠的强度数据。

4.2 碳化修正的精细化操作

碳化深度的测量和修正应从“粗估”走向“精确”。在每个回弹测区中，应选择 3~5 个代表性位置测量碳化深度，取平均值作为该测区的修正依据，避免以点代面。测量时采用新鲜断面并及时滴加酚酞试剂，在 1~2 分钟内观察显色边界，测量至 0.5mm 精度。对于碳化深度超过 6mm 的构件，标准测强曲线的修正精度下降，应优先采用钻芯法进行强度校准或按专项测强曲线

进行推定。此外,对表面有涂层或防护材料的水工混凝土,应在清除涂层后再进行碳化深度测量和回弹测试,确保结果反映本体混凝土的真实状态。

4.3 含水率影响的分类处理

含水率问题不宜一概而论,建议按结构部位进行差异化处理:对处于干燥环境(如闸室上部、启闭机房)的构件,按常规方法检测,无需特殊修正;对水位变动区、干湿交替带的构件,应在低水位季节或连续晴天条件下检测,尽量使检测时含水状态一致,同时在检测报告中详细记录检测时的环境湿度和构件表面状态,供强度评定时参考;对长期浸水或水下部位的构件,建议采用钻芯法检测水下部分芯样,并在试验前将芯样处理至饱和面干状态进行抗压试验,以反映实际工作状态下的强度。应积累不同含水状态下的回弹值与芯样强度的对比数据,逐步建立水利工程专用含水率修正系数,弥补通用规范的缺失。

4.4 大骨料影响的规避与统计处理

对大骨料影响的控制,应贯穿检测全过程。在回弹法检测中,每个测区应均匀布置16个测点,且测点间距不小于3cm,避免测点过于集中在某颗骨料表面,测区回弹值取测点平均值以降低单点离散影响。对于石子外露严重的表面,应在砂浆富集区域布点测试,同时记录骨料外露情况作为异常数据判读的依据^[4]。在钻芯法中,芯样直径不应小于最大骨料粒径的3倍(水利工程大骨料情况下,往往需要钻取直径 $\geq 150\text{mm}$ 的大直径芯样),否则应在报告中注明骨料粒径对结果的可能影响;芯样抗压试验后应检查破坏断口,若破坏面经过多颗粗骨料,其强度可信度较低,应适当增加芯样数量进行统计平均。

4.5 钻芯法操作流程的精细化管控

钻芯法的可靠性依赖于全流程的精细控制。钻取过程中,应避开主筋和预埋件,芯样取出的长径比应满足1.5~2.0的要求(用于抗压试验时须加工至标准高径比),芯样两端面应平行于轴线,垂直度偏差不超过 1° ,不平整度不超过0.1mm。端面加工应采用双面锯切割并辅以磨平机磨平,严禁用锤击或凿削方法整平。试验前芯样应浸泡在水槽中48h以上达到饱和状态,取出后拭干表面明水即可试验。试验结果应按照相关标准进

行尺寸修正和异常值判定,以3个以上有效芯样的平均值作为该部位的推定强度。每一步操作均需记录在原始记录中,确保过程可追溯。

4.6 建立水工专用测强曲线与标准

鉴于水利工程混凝土的配合比和原材料与建筑工程差异显著,具备条件的检测机构或地区应建立本区域的水工混凝土专用测强曲线。通过在同一结构或同配合比的试件上同步进行回弹测试、超声测试和钻芯取样,建立实测回弹值(或声速值)与芯样强度的回归关系,从根本上消除通用测强曲线带来的系统偏差。行业主管部门应加快推进水利工程混凝土现场检测标准的修订,纳入高湿修正系数、大骨料尺寸效应修正方法及不同掺合料条件下的龄期修正等内容,减少各检测单位在方法选择和数据处理上的随意性。

结束语

水利工程混凝土强度现场检测是一项面临特殊困难的检测工作,其挑战不仅来自技术方法本身的局限性,更来自水利结构在材料组成、环境条件和施工工艺方面的显著特殊性。本文系统分析了回弹法、超声回弹综合法和钻芯法在水利场景中面临的碳化偏差、含水率干扰、大骨料影响和芯样加工不标准等突出问题,并从方法适配、操作细化、修正建立和标准完善等方面提出了系统化的应对策略。这些对策的核心逻辑是在充分认知水利工程特殊性的前提下,通过精细化的操作管理和有针对性的技术措施,将检测误差控制在可接受的范围内。应认识到,没有任何单一方法可以解决所有问题,提升检测可靠性的最佳路径是在理解各种方法优劣势的基础上,采用多方法互相验证、钻芯最终校准的组合策略,并以持续积累的数据逐步完善水利工程专用检测体系。

参考文献

- [1] 张雄,陈思,赵岩.水工混凝土强度现场检测方法适用性比较研究[J].水利水电技术,2022,53(11):78-85.
- [2] 王平,刘洋,李明.回弹法检测水工混凝土强度的含水率影响与修正[J].混凝土,2023(7):156-161.
- [3] 刘浩,孙涛,周明.水工大骨料混凝土钻芯检测中的尺寸效应研究[J].水力发电学报,2024,43(2):112-120.
- [4] 陈刚,张华,杨帆.碳化深度测量对回弹法检测精度的影响分析[J].水利水运工程学报,2023(6):98-105.