

水工混凝土钻芯法强度检测误差控制分析

吴文君¹, 周兴俊²

(1. 江苏中准工程质量检测技术有限公司, 江苏 无锡 214142;

2. 江苏祥通建设有限公司, 江苏 无锡 214142)

摘要 钻芯法能够直接获得水工混凝土实体抗压强度, 是大坝、闸墩、厂房基础及输水建筑物质量复核的重要手段。水工结构体量大、骨料粒径大、长期处于潮湿或饱水环境, 芯样代表性容易受到浇筑分层、钻取扰动、尺寸加工和加载操作影响。本文围绕检测原理, 分析钻芯位置、钻取损伤、芯样加工及抗压试验形成误差的机理, 并从布点、设备参数、端面验收、含水状态和数据复核等方面提出控制方法, 以期水工混凝土强度判定提供参考。

关键词 水工混凝土; 钻芯法; 强度检测; 检测误差

中图分类号: TV41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.003

0 引言

水工混凝土承担挡水、泄水、支承和抗冲磨等作用, 其实体强度会受到原材料波动、温控措施、分层浇筑及长期环境作用影响。标准试件只能反映取样时的拌合物质量, 回弹或超声检测又依赖经验关系, 当检测结果存在争议时, 钻芯法常被用于直接验证。然而, 钻芯取样具有局部破损性, 任何环节的偏差都可能被带入最终强度值。检测结论还直接影响加固范围和运行安全判断。因而, 有必要按照误差传递路径设置控制界限, 使检测结果能够反映结构真实状态。

1 水工混凝土钻芯法强度检测的技术基础

1.1 钻芯法检测原理

钻芯法以金刚石薄壁钻头从结构内部取得圆柱体芯样, 经切割、磨平和尺寸验收后, 在压力试验机上沿芯样轴线加载至破坏^[1]。其测得的是取芯位置在检测龄期、实际含水状态和既有损伤条件下的实体抗压性能, 与标准养护立方体试件并不完全相同。检测前应结合设计分区、施工仓面和运行环境划分同类检测单元, 再用钢筋扫描、超声或雷达了解内部构造。对最大骨料粒径为 40 mm 的混凝土, 按芯样直径不小于骨料粒径 3 倍的原则, 直径宜达到 120 mm 以上; 当骨料粒径更大且结构条件不允许取大芯时, 应通过专项对比试验确定小直径芯样的适用性, 不能直接套用普通混凝土参数。

1.2 芯样强度计算方法

芯样抗压强度按破坏荷载与实际受压面积计算。设芯样破坏荷载为 F , 平均直径为 d , 则强度 f_c 按式 (1)

计算。直径应在芯样中部两个相互垂直的方向测量并取平均值, 荷载由经校准的压力试验机读取。对于高径比接近 1.0 的标准芯样, 所得值可直接用于实体强度评价; 高径比偏离规定范围时, 端部约束和细长效应会改变破坏形态, 应按有效规程或专项试验修正。

$$f_c = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1)$$

由于受压面积与直径平方成正比, 尺寸误差会被放大。忽略高阶小量时, 荷载和直径对强度的相对误差可按式 (2) 估算。

$$\frac{\Delta f_c}{f_c} \approx \frac{\Delta F}{F} - 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (2)$$

式 (2) 中, f_c 为芯样抗压强度, F 为破坏荷载, d 为平均直径, Δf_c 、 ΔF 和 Δd 分别为相应量的测量偏差。以直径 100 mm 的芯样为例, 若直径被多测 1 mm, 而荷载读数正确, 计算强度约低估 2%; 若试验机荷载误差为 1%, 两项同向叠加后偏差可接近 3%。因此, 尺寸测量、设备校准和端面质量应作为同一条误差链控制。

2 水工混凝土钻芯法强度检测的误差来源

钻芯法的误差由结构非均质性与检测操作共同形成^[2]。如图 1 所示, 位置选择决定样本是否具有代表性, 钻取过程影响芯样完整性, 加工质量控制受压几何条件, 加载操作决定荷载是否均匀传递。四类误差会在强度计算中叠加, 其中有些造成系统性偏低, 有些增大离散性, 只有沿全过程追溯才能判断数据能否用于强度推定。

2.1 钻芯位置选择误差

水工结构不同部位的混凝土并非均质材料。坝体上下游面、闸墩边角、施工缝附近及长期渗水区的密

作者简介: 吴文君 (1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利施工、水利工程检测。

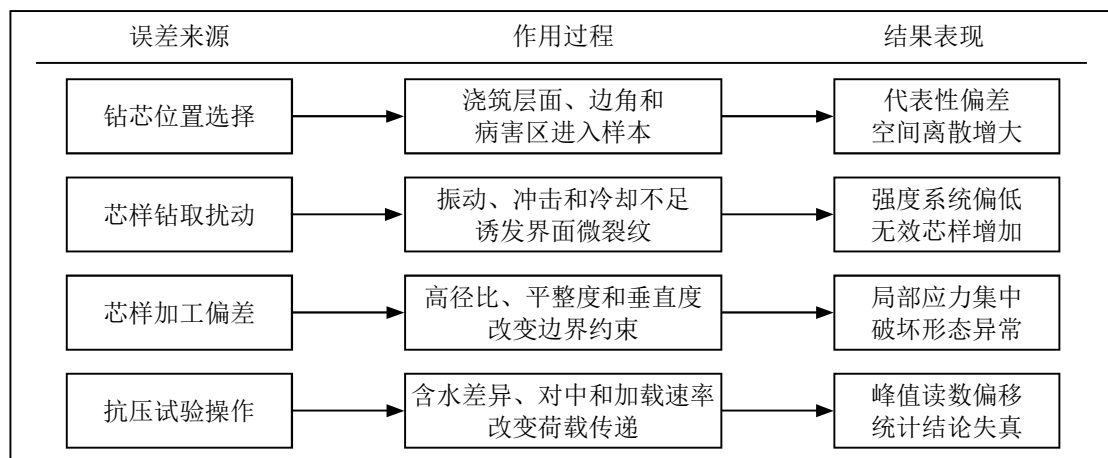


图1 水工混凝土钻芯检测误差传递路径

实度和损伤程度可能明显不同,钻芯位置过度集中会使局部特征被当成整体水平。钻头穿过钢筋、冷却水管或预埋件,不仅改变有效受压面积,还可能在取样时产生裂纹^[3]。

2.2 芯样钻取损伤误差

钻取损伤主要来自钻机晃动、进尺过快、钻头磨损和冷却不足。钻机底座未固定时,钻头产生径向摆动,芯样外缘会出现环状划痕、掉角或肉眼难以发现的微裂纹;遇到大骨料后强行加压,骨料与浆体界面可能被拉开,使抗压值偏低。冷却水流量过小会升高钻头温度并使浆体表层受热,流量过大又可能冲刷软弱夹层。取芯后若用撬杠侧向折断芯样,根部会形成弯拉裂缝,即使芯样外观完整,也不适合用于抗压强度判定。

2.3 芯样加工处理误差

芯样加工误差集中在直径、高度、端面平整度和轴线垂直度。切割位置不当会保留表层浮浆、施工缝或钻取根部损伤,造成试件本身不具代表性。端面存在0.5 mm局部凸起时,初始荷载会集中在很小的接触区,裂纹提前扩展,最终强度明显降低。水泥浆、硫磺胶泥等补平材料若强度不足或厚度不均,也会产生附加变形^[4]。芯样中含有沿轴向分布的钢筋、贯穿孔洞或长度较大的裂缝时,其受力状态已经偏离圆柱体试件假定。加工阶段若只追求达到尺寸而忽视缺陷记录,试验结果虽能计算,却缺乏工程解释。

2.4 抗压试验操作误差

抗压试验误差主要与含水状态、对中、加载速率和设备量程有关。水工混凝土长期处于潮湿或饱水环境,芯样取出后在室内风干,孔隙水状态发生改变,同批样品放置时间不同会增加离散性。试件中心未与

压板中心重合,或上下端面不平行,会使轴向压力转化为偏心压力,破坏面常呈单侧劈裂。记录人员只抄取峰值荷载,未观察破坏形态,难以及时识别端面压碎、局部剪切和钢筋影响等无效结果,后续统计可能把操作异常误判为结构强度不足。

3 水工混凝土钻芯法强度检测的误差控制

误差控制应覆盖方案、取样、加工、试验和复核五个阶段,并形成可追溯记录。各环节的验收结果需要反馈到下一步;芯样一旦在前一环节不合格,应及时补取或重新加工。主要量化控制要求见表1,实际工程可结合结构等级、骨料级配和现行标准细化。

3.1 科学确定钻芯位置

合理布点的前提是明确检测目的,用于验收争议时,应在同强度等级、同配合比和相近龄期的区域随机取样;用于病害评估时,则需同时布置受损区和对照区,避免把环境劣化与原施工强度混为一谈。检测人员可先绘制仓块、高程、浇筑方向及已知缺陷分布图,再依据无损检测结果选取高、中、低三个强度水平的代表位置。钻孔中心应避开主筋、止水、锚固件和冷却管,并远离明显裂缝交汇处;确需评价施工缝时,应另设专项芯样,不与普通芯样合并统计^[5]。每个钻孔应记录坐标、高程、取芯方向、构件表面状态和附近渗水情况。通过空间分层与随机抽取结合,可减少人为选择“好位置”或“差位置”造成的系统偏差,也便于在异常结果出现后追溯同仓次施工资料。

3.2 规范控制钻取过程

稳定钻进比单纯提高取芯速度更重要,作业前应检查钻机主轴跳动、钻头磨损和供水系统,采用锚固或真空底座使机架保持刚性,并在开孔阶段低速轻压

表 1 钻芯法强度检测主要量化控制要求

控制环节	量化要求	控制说明
芯样直径	标准芯样宜为 100 mm，且不小于最大骨料粒径 3 倍	大粒径水工混凝土应增大直径或专项换算
高径比	0.95 ~ 1.05	减少端部约束与细长效应
冷却水	3 L/min ~ 5 L/min，出水温度不高于 30 ℃	限制热损伤并及时排屑
承压面	平整度偏差不大于 0.1 mm，垂直度偏差不大于 1°	降低偏心和局部应力集中
试验机	1 级精度，量程使用 20% ~ 80%	降低荷载读数相对误差
加载速度	C30 ~ C60 宜为 0.5 MPa/s ~ 0.8 MPa/s	保持破坏过程可比
样本数量	检测批宜不少于 15 个，单个构件宜不少于 3 个	降低偶然取样影响

形成导向槽。钻进遇到粗骨料或阻力突增时，应降低进尺并保持连续冷却，不得通过摆动钻机扩大孔径。钻头直径应依据最大骨料粒径确定，条件允许时优先采用 100 mm 及以上芯样；水工大粒径混凝土无法满足 3 倍粒径要求时，应增加芯样直径或建立项目换算关系。芯样接近钻孔底部后可降低推力，使用专用取芯器平稳取出，禁止侧向敲击。取出后立即标明上、下游方向和钻孔编号，用湿布或密封袋保持原有含水状态，并在孔洞清理后按设计要求采用不低于原结构强度等级的材料修补。

3.3 提高芯样加工质量

加工质量应通过尺寸验收来控制，切割前先剔除钻头入孔段、根部裂损段及不具代表性的表层，再按目标高径比预留磨削量。两端宜采用金刚石锯切后机械磨平，补平材料只在无法磨平时使用，并验证其早期强度和刚度。标准芯样高径比宜控制在 0.95 ~ 1.05，承压面平整度偏差宜不大于 0.1 mm，端面与轴线的垂直度偏差宜不大于 1°。直径至少在两个互相垂直方向测量，高度沿周边对称位置测量；发现椭圆、斜切或局部缺损时，应重新加工。含钢筋芯样要记录钢筋直径、数量和位置，钢筋靠近端面、与轴线近似平行或引起裂缝时不应作为有效强度试件^[6]。完成验收后，同批芯样应采用一致的保湿、饱水或规定环境处理，统一放置时间，避免含水差异超过加工误差本身。

3.4 严格规范抗压试验

抗压试验前应核对试验机校准状态、量程和压板清洁度，预计破坏荷载宜处在所选量程的 20% ~ 80%。放置芯样时利用同心圆或定位尺完成对中，先施加小于预计破坏荷载 5% 的初始荷载，确认两端接触均匀后再连续加载。对于常见 C30 ~ C60 水工混凝土，可按 0.5 MPa/s ~ 0.8 MPa/s 控制应力增长速度，并在达到峰值前保持速率稳定。试验中同步记录峰值、破坏持续时间和裂缝

形态；出现单侧压碎、明显偏心、端面补层先破坏或钢筋主导破坏时，应判为异常并复核。数据处理不能只比较平均值，还应查看极差、标准差和变异系数。单值明显偏离同组数据时，先核查取芯记录和试件照片，再依据统计规则决定是否剔除；不得为了满足设计强度任意删除低值。最终报告应列出原始尺寸、荷载、换算过程、不合格芯样和孔洞修补情况，使结论能够复算。

4 结束语

钻芯法的直接性并不意味着结果天然准确。水工混凝土的分区浇筑、大粒径骨料及长期饱水环境，会把取样代表性问题放大；钻机振动、端面偏差和加载偏心又会把局部损伤转化为强度误差。检测工作应使误差来源与控制措施逐项对应，通过分层随机布点、稳定钻取、严格加工、统一含水状态和规范加载形成闭环。只有保留完整的原始记录，并结合无损检测与施工资料解释异常值，钻芯结果才能用于结构强度评价和修复决策，也可减少无效补芯和重复试验。

参考文献：

- [1] 先钊铭. 建筑混凝土强度检测技术应用探究[J]. 工程建设, 2023, 06(06): 136-138.
- [2] 孙学龙. 回弹-钻芯法在混凝土抗压强度检测中的应用研究[J]. 北方建筑, 2024, 09(06): 36-40.
- [3] 杨连喜. 基于钻芯法检测水利水电工程混凝土强度的实验研究[J]. 建材发展导向, 2024, 22(08): 70-72.
- [4] 方化龙. 钻芯法检测混凝土抗压强度精度分析与优化[J]. 建筑设计与研究, 2024, 05(24): 16-18.
- [5] 千明德, 王梓晨, 刘宁. 钻芯法检测混凝土强度中欧标准比较研究[J]. 四川水泥, 2025(04): 61-64, 67.
- [6] 杨英. 混凝土结构钻芯法强度检测精度影响因素分析[J]. 工程建设, 2025, 08(06): 48-50.