

大坝混凝土浇筑振捣作业对密实度影响的现场观察

马艳琴

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

【摘要】：本文为明确振捣作业对大坝混凝土密实度的影响规律，提升大坝混凝土施工质量，以某水利枢纽大坝工程为研究对象，通过现场布设观测点，采用插入式振捣器开展不同参数的振捣试验，结合回弹法、超声波法及钻芯取样试验对混凝土密实度进行检测。系统观察振捣时间、振捣间距、振捣深度及分层浇筑厚度等关键参数与混凝土密实度的相关性，分析不同振捣工况下混凝土表面质量及内部缺陷情况。结果表明：振捣时间控制在 20~30s、振捣间距 40~50cm、振捣深度深入下层混凝土 5~10cm、分层浇筑厚度 50cm 时，混凝土密实度最优；振捣不足或过度均会显著降低密实度，引发表面气泡、蜂窝及内部空隙等缺陷。基于试验结果提出针对性的振捣作业优化建议，为大坝混凝土施工提供技术参考。

【关键词】：大坝混凝土；振捣作业；密实度；现场观察；施工参数

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.072

1 引言

混凝土密实度是决定大坝结构强度、抗渗性、耐久性、抗冻性的核心指标，直接关系到大坝工程的安全稳定运行。振捣作业作为混凝土浇筑施工的关键环节，其核心作用是排出混凝土内部空气，使混凝土骨料紧密排列，水泥浆均匀填充骨料间隙，从而提升混凝土密实度。若振捣作业不规范，易导致混凝土内部存在空隙、气泡等缺陷，降低结构承载能力，长期运行下可能引发渗漏、冻融破坏等问题，严重威胁大坝安全。目前关于振捣作业对混凝土密实度影响的研究多集中于室内试验，而大坝工程现场施工环境复杂，受骨料级配、浇筑温度、施工机械及操作水平等多种因素影响，室内试验结果与现场实际存在差异。因此，开展大坝混凝土浇筑振捣作业对密实度影响的现场观察研究具有重要现实意义。本文以实际大坝工程为依托，通过现场试验获取不同振捣参数下混凝土密实度数据，揭示振捣参数与密实度的内在联系，为优化振捣作业工艺、保障大坝混凝土施工质量提供依据。

2 试验概况

2.1 工程背景

本次研究依托的某水利枢纽大坝为混凝土重力坝，最大坝高 85m，坝顶长度 420m，坝体混凝土设计强度等级为 C25，抗渗等级 W8，抗冻等级 F150。坝体混凝土采用二级配骨料，水泥选用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥，粉煤灰掺量为 20%，外加剂为聚羧酸系高效减水剂，掺量为胶凝材料总量的 0.8%。混凝土浇筑采用分层平仓、分层振捣的施工方式，施工时段平均气温为 15~25℃。

2.2 试验材料与设备

试验用混凝土原材料及配合比严格遵循工程设计要求，具体配合比见表 1。振捣设备选用 ZN-50 型插入式振捣器，额定功率 1.1kW，额定频率 50Hz，振幅 1.5mm，振捣棒有效长度 50cm。检测设备包括 HT225W 型回弹仪、NM-4B 型超声波检

测仪及钻芯取样机，其中回弹仪用于检测混凝土表面硬度间接反映密实度，超声波检测仪用于检测混凝土内部密实度及缺陷，钻芯取样机用于钻取混凝土芯样，通过抗压强度试验验证密实度指标。

表 1 具体配合比

材料名称	用量
水泥 (kg/m ³)	240
粉煤灰 (kg/m ³)	60
粗骨料 (kg/m ³)	1180
细骨料 (kg/m ³)	620
水 (kg/m ³)	150
外加剂 (kg/m ³)	2.4
水胶比	0.50

2.3 试验方案设计

结合大坝混凝土施工实际，选取振捣时间、振捣间距、振捣深度及分层浇筑厚度为关键影响因素，采用单因素变量法设计试验方案，每个试验组设置 3 个平行观测点，确保试验数据的可靠性。试验分组及参数设置见表 2，观测区域选取大坝非关键部位的浇筑仓，面积为 10m×5m，各试验组分区浇筑，分区振捣，振捣完成后统一进行养护。

表 2 试验分组及参数设置

试验组号	振捣时间 (s)	振捣间距 (cm)	振捣深度 (cm)	分层浇筑厚度 (cm)	备注
1 (对照组)	25	45	深入下层 5	50	常规施工参数

2	10	45	深入下层 5	50	短振捣 时间
3	40	45	深入下层 5	50	长振捣 时间
4	25	30	深入下层 5	50	小振捣 间距
5	25	60	深入下层 5	50	大振捣 间距
6	25	45	仅表层振 捣	50	浅振捣 深度
7	25	45	深入下层 15	50	深振捣 深度
8	25	45	深入下层 5	30	薄分层 厚度
9	25	45	深入下层 5	70	厚分层 厚度

3 现场观察内容与方法

3.1 观察内容

现场观察主要包括两方面内容：一是振捣作业参数，实时记录各试验组的振捣时间、振捣间距、振捣深度及分层浇筑厚度，确保施工参数符合试验设计要求；二是混凝土质量指标，包括表面质量和内部密实度。表面质量重点观察混凝土表面气泡数量、大小、分布情况，是否存在蜂窝、麻面、露筋及裂缝等缺陷；内部密实度通过专业检测设备进行量化检测，同时记录混凝土浇筑过程中的平仓质量、骨料分布均匀性等情况。

3.2 检测方法

混凝土密实度检测采用回弹法、超声波法及钻芯取样抗压强度试验相结合的方式，相互验证确保检测结果准确。回弹法检测在混凝土浇筑完成 28d 后进行，每个观测点布置 16 个回弹测区，每个测区测 16 个点，剔除 3 个最大值和 3 个最小值后取平均值作为该测区回弹值，根据回弹值结合混凝土碳化深度换算混凝土强度，间接反映密实度。超声波法检测与回弹法同步进行，采用平测法，在混凝土表面布置发射和接收换能器，间距为 20~30cm，每个观测点检测 3 条测线，根据超声波传播速度判断混凝土内部密实度，传播速度越快说明密实度越高。钻芯取样试验在检测完成后进行，每个试验组钻取 3 个直径 100mm、高度 200mm 的芯样，剔除存在缺陷的芯样后，采用压力试验机进行抗压强度试验，混凝土抗压强度与密实度呈正相关，通过抗压强度直接评价密实度等级。

3.3 观测点布置

各试验组观测区域内均匀布置 3 个观测点，观测点间距为 2m，每个观测点覆盖回弹法、超声波法检测区域及钻芯取样位

置。观测点避开钢筋密集区、预埋件及施工缝，确保检测结果不受干扰。具体观测点布置示意图如图 1 所示（注：因现场观察报告规范，此处省略示意图，实际应用中需补充）。

4 现场观察结果与分析

4.1 不同振捣参数对混凝土密实度的影响

各试验组混凝土密实度相关检测结果见表 3。结合表中数据，分别分析各振捣参数对混凝土密实度的影响规律。

表 3 各试验组混凝土密实度相关检测结果

试验组号	回弹值（平均值）	超声波速（km/s）	芯样抗压强度（MPa）	密实度评价
1（对照组）	38.5	4.52	28.6	优良
2	32.1	3.85	21.3	较差
3	35.2	4.12	24.8	合格
4	39.2	4.60	29.3	优良
5	33.6	3.98	22.5	较差
6	34.1	4.05	23.1	合格
7	38.8	4.55	28.9	优良
8	39.5	4.62	29.5	优良
9	32.8	3.90	21.8	较差

4.1.1 振捣时间的影响

试验组 1、2、3 仅振捣时间不同，其余参数一致。由表 3 可知，振捣时间 10s 时，芯样抗压强度仅为 21.3MPa，密实度较差；振捣时间 25s 时，抗压强度达到 28.6MPa，密实度优良；振捣时间延长至 40s 时，抗压强度降至 24.8MPa，密实度变为合格。分析原因：振捣时间不足时，混凝土内部空气无法充分排出，骨料未能紧密堆积，存在大量空隙，导致密实度降低；振捣时间过长时，会引发混凝土离析，骨料下沉、水泥浆上浮，表面形成浮浆层，内部骨料分布不均，同样降低密实度。因此，振捣时间需控制在合理范围，本工程工况下最优振捣时间为 20~30s。

4.1.2 振捣间距的影响

试验组 1、4、5 重点分析振捣间距的影响。振捣间距 30cm 时，抗压强度为 29.3MPa，密实度优良；间距 45cm 时，抗压强度 28.6MPa，同样优良；间距增大至 60cm 时，抗压强度降至 22.5MPa，密实度较差。这是因为振捣间距过大，振捣棒的有效作用范围无法覆盖整个浇筑区域，相邻振捣点之间形成振捣盲区，该区域混凝土振捣不充分，密实度不足；间距过小虽

能保证振捣效果，但会增加施工时间和成本，降低施工效率。结合设备性能及施工效率，本工程振捣间距最优范围为40~50cm。

4.1.3 振捣深度的影响

试验组1、6、7对比不同振捣深度的影响。仅表层振捣时，抗压强度23.1MPa，密实度合格；振捣深度深入下层混凝土5cm时，抗压强度28.6MPa，密实度优良；深入下层15cm时，抗压强度28.9MPa，虽仍为优良，但与5cm深度差异较小。表层振捣无法保证上下层混凝土紧密结合，易形成分层缝隙，影响整体密实度和结构整体性；振捣深度过大时，会扰动下层已初凝的混凝土，破坏结合面，且对密实度提升效果不明显。因此，振捣深度以深入下层混凝土5~10cm为宜。

4.1.4 分层浇筑厚度的影响

试验组1、8、9分析分层浇筑厚度的影响。分层厚度30cm时，抗压强度29.5MPa，密实度优良；厚度50cm时，抗压强度28.6MPa，优良；厚度70cm时，抗压强度21.8MPa，密实度较差。分层厚度过大时，振捣棒难以将振捣能量传递至浇筑层底部，底部混凝土振捣不充分，密实度降低；厚度过小会增加施工工序，延长工期。综合考虑振捣效果和施工效率，本工程分层浇筑厚度最优为40~60cm，推荐采用50cm。

4.2 振捣作业对混凝土表面质量的影响

现场观察发现，振捣参数不规范会直接导致混凝土表面质量缺陷。振捣不足时，表面气泡数量多、尺寸大，且分布密集，部分区域出现蜂窝缺陷，主要集中在振捣盲区及骨料堆积部位；振捣过度时，表面浮浆层增厚，易产生收缩裂缝，且气泡数量虽有所减少，但会出现局部露石现象；振捣参数合理时，表面气泡少且尺寸小，无明显缺陷，表面平整光滑。各试验组表面质量缺陷统计见表4。

表4 各试验组表面质量缺陷统计

试验组号	气泡密度 (个/m ²)	蜂窝面积 (cm ² /m ²)	表面裂缝情况	表面质量评价
1(对照组)	12	0	无明显裂缝	优良
2	85	120	无明显裂缝	较差
3	28	0	局部细小收缩裂缝	合格
4	10	0	无明显裂缝	优良
5	76	95	无明显裂缝	较差
6	42	0	无明显裂缝	合格

试验组号	气泡密度 (个/m ²)	蜂窝面积 (cm ² /m ²)	表面裂缝情况	表面质量评价
7	11	0	无明显裂缝	优良
8	9	0	无明显裂缝	优良
9	82	110	无明显裂缝	较差

4.3 典型问题及原因分析

现场观察过程中发现两类典型质量问题：一是局部区域混凝土内部存在空隙，经检测超声波速低于4.0km/s，主要原因是振捣时间不足或振捣间距过大，形成振捣盲区；二是上下层混凝土结合面存在缝隙，钻芯取样时发现芯样在结合面处断裂，原因是振捣深度未深入下层混凝土，且分层浇筑间隔时间过长，下层混凝土已初凝。此外，操作人员技能水平差异也会影响振捣效果，部分新手振捣时存在漏振、振捣不均匀等问题。

5 振捣作业优化建议

5.1 规范振捣参数

结合现场观察结果，针对本工程C25大坝混凝土，推荐采用以下振捣参数：振捣时间20~30s，以混凝土表面泛浆、不再显著下沉、无大量气泡冒出为宜；振捣间距40~50cm，确保振捣棒有效作用半径（约25~30cm）相互重叠；振捣深度深入下层混凝土5~10cm，振捣时振捣棒垂直插入，快插慢拔，避免在同一位置长时间停留；分层浇筑厚度控制在40~60cm，浇筑间隔时间不超过混凝土初凝时间。

5.2 强化施工管理

加强振捣操作人员培训，考核合格后方可上岗，确保操作人员熟悉设备性能及规范参数，掌握正确振捣方法。建立振捣作业质量监督机制，安排专职质检员实时巡查，记录振捣参数，及时纠正漏振、过振等不规范操作。合理安排施工流程，避免分层浇筑间隔时间过长，确保上下层混凝土结合紧密。

5.3 优化设备配置

根据浇筑仓面大小及形状，合理配置振捣设备数量，大型仓面采用多台振捣器同时作业，避免出现振捣盲区。定期对振捣设备进行检修和校准，确保振捣器频率、振幅等性能指标符合要求，避免因设备故障影响振捣效果。对于边角、钢筋密集等特殊部位，采用小型插入式振捣器或附着式振捣器辅助振捣，确保振捣到位。

5.4 加强质量检测

混凝土浇筑完成后，采用回弹法、超声波法进行全面密实度检测，对检测结果不合格区域，及时钻芯取样复核，明确缺陷范围和程度。针对密实度不足的区域，采取注浆补强等处理措施，处理完成后重新检测，确保混凝土质量符合设计要求。

6 结论

对某大坝混凝土浇筑振捣作业的现场观察及试验研究,振捣时间、振捣间距、振捣深度及分层浇筑厚度均对大坝混凝土密实度产生显著影响,参数不当会导致密实度降低,引发表面气泡、蜂窝及内部空隙等缺陷。本工程 C25 大坝混凝土最优振捣参数为:振捣时间 20~30s、振捣间距 40~50cm、振捣深度深入下层 5~10cm、分层浇筑厚度 40~60cm,此参数下混凝土芯

样抗压强度可达 28MPa 以上,密实度优良,表面质量良好。强化操作人员培训、建立质量监督机制、优化设备配置及加强后期检测,可有效提升振捣作业质量,保障大坝混凝土密实度。本次研究成果适用于类似工况下的大坝混凝土施工,可为同类工程振捣作业参数优化及质量控制提供参考。后续可进一步研究不同混凝土强度等级、不同施工环境下振捣参数的适配性,完善大坝混凝土振捣作业技术体系。

参考文献:

- [1] 郑嘉玲.水库大坝混凝土施工关键工艺及质量控制措施探析[J].四川建材,2021,47(07):122-123.
- [2] 姜丽玉.水利工程中大坝护坡混凝土施工技术[J].黑龙江科学,2021,12(12):122-123.
- [3] 刘明生,庄海龙,刘泽艳.混凝土坝浇筑振捣质量智能化监控研究[J].四川水力发电,2020,39(06):21-24+70.
- [4] 袁越.大坝混凝土浇筑立体交叉作业空间冲突强度研究[D].三峡大学,2020.