水利工程大体积混凝土施工裂缝控制新技术研究

刘兆坤　冯宪勇

邳州市水利建筑安装工程有限公司 江苏 邳州 223100

【摘　要】：大体积混凝土作为水利工程建设的一种重要结构，施工质量的好坏直接影响着工程的安全性、耐久性以及运行稳定性。但由于水化热释放，温度应力，收缩变形以及施工工艺等诸多因素，裂缝问题比较突出，已经成为限制工程质量的主要原因。文章着重介绍了水利工程中大体积混凝土的施工特征，分析了裂缝产生的机理和主要因素，并着重对原材料优化、配合比设计等进行了探讨，温度场调控、全过程质量控制和智能监测是裂缝控制的关键技术，结合典型工程论述了新型防裂技术集成应用模式和优化策略。研究得出建立全过程、智能化、协同化的裂缝控制体系可以有效减少裂缝出现的几率，改善混凝土结构的整体性能，对促进水利工程的施工质量及长期运营安全具有一定的技术借鉴意义。

【关键词】：水利工程；大体积混凝土；裂缝控制；施工技术

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.050

伴随着我国水利基础设施建设的日益扩大，大体积混凝土被广泛的应用在大坝，泵站，水闸以及其他重要的水工建筑物中。因其结构尺寸较大、水化热释放集中，施工周期长等特点，混凝土很容易出现施工期温度裂缝及收缩裂缝等问题，从而影响到工程的耐久性及安全运行[1]。为了更好地提升裂缝控制水平，需要根据工程实际情况对施工技术进行持续优化，将智能监测和全过程管理理念引入其中，建立科学有效的裂缝防治体系，从而为水利工程高质量施工提供技术支持。

1 水利工程大体积混凝土施工裂缝形成机理分析

（1）大体积混凝土裂缝类型及主要特征：水利工程中大体积混凝土的裂缝有温度裂缝、收缩裂缝、沉降裂缝、结构约束裂缝几种。其中温度裂缝最普遍，一般是由于水泥水化热集中地释放出来，内部温度上升和外部散热加快的温度差而产生，以表层裂缝或者贯穿性裂缝形式存在。收缩裂缝往往与混凝土的失水、干缩和塑性收缩等因素相关，往往发生于浇筑初期或维护不到位的地方[2]。基础的不均匀沉降或模板支撑的变形区域是沉降裂缝频繁出现的地方。这些裂缝在影响工程外观的同时还可能会弱化结构的整体性、抗渗性以及耐久性等，所以有必要对其形成阶段做系统的识别。

（2）裂缝形成影响因素与作用机制分析：大体积混凝土裂缝的产生受到材料性能、结构尺寸、施工环境、施工工艺等多种因素的综合作用。在作用机理上混凝土内水化热的释放使温度上升，同时外界环境散热加快，内、外部温差产生了温度应力；温度应力大于混凝土的早期抗拉强度后会出现裂缝[3]。同时水泥的偏量、骨料级配的不合理以及外加剂的适应性不强，都会使收缩变形加剧。如果浇筑分层过厚、振捣不够密实、维护不当，裂缝的风险将进一步增大。所以裂缝不是由单一因素引起的，它是温度、收缩、约束及施工扰动等多种因素综合影响的产物[4]。

（3）水利工程大体积混凝土裂缝控制技术需求分析：水利工程一般结构体量较大、服役周期长，对抗渗抗冻的要求较高，这就对大型体积混凝土裂缝的控制有很高的要求。传统的裂缝控制往往依赖于经验性的降温、保温及后期修补等措施，很难及时了解混凝土内部温度的变化及应力的发展情况，且控制效果具有滞后性。为此目前迫切需要建立一套从材料设计、温控施工、过程监测直至后期维护的裂缝控制全过程技术体系[5]。一方面要采用低热水泥、矿物掺合料以及优化配合比等措施来减少水化热；另一方面要借助于智能测温、数字化监测及风险预警技术对裂缝风险进行动态识别及主动控制。

2 水利工程大体积混凝土施工裂缝控制关键技术研究

（1）原材料优化与混凝土配合比控制技术：原材料优化为大体积混凝土裂缝治理提供了依据。水利工程中应优先选择水化热较低的水泥并适当掺加粉煤灰、矿粉及其他矿物掺合料来减少水泥的使用量，提高水化热集中释放强度。粗细骨料要确保级配的连续性和含泥量的可控性，以减小混凝土的收缩变形。外加剂的选用要综合考虑减水、缓凝及保坍性能等因素，使得混凝土既能满足强度、抗渗及耐久性等要求，又能具有较好的施工及易性。配合比设计应围绕“低热、收缩小、高耐久”的目标展开。降低水胶比、优化砂率及控制胶凝材料总用量等措施可以降低早期温升及干缩裂缝发生的风险。如水闸底板和泵站基础的大体积混凝土的施工，可以利用粉煤灰来推迟水化热的释

放，同时结合试配试验找出最佳掺量。这不仅确保了后期强度的发展，而且降低了内外温差，对后续温控施工也提供了良好的条件。

（2）温度场调控与温控防裂施工技术：温度场调控在大体积混凝土防裂过程中处于核心地位。在施工前应综合考虑结构尺寸、浇筑季节及环境温度等因素对温度场进行仿真分析，预测出混凝土内的最高温度、内外温差以及降温速率。在施工时可以通过预冷骨料、冷却拌合水、分层分块浇筑以及埋设冷却水管的方法来降低混凝土的入仓温度及内部峰值温度以避免温度应力的迅速累积。温控防裂应注意保温、降温等工序的配合。混凝土浇注后表面散热过快易导致内外温差增大，所以要及时加盖保温材料以降低表层温度的突然降低。对坝体和闸墩这种厚度较大的构造，可以在循环冷却水分阶段对其内部温度进行调整，严格控制降温速率。只有实现“缓升温、控峰值、缓降温”，才能有效降低温度裂缝发生概率。

（3）施工全过程质量控制与养护管理技术：在整个施工过程中，质量控制始终贯穿于拌合、运输、浇注、振捣、成型等各个环节。混凝土拌合时要确保计量精确、拌合均匀，并在运输中避免离析、泌水及坍落度的丢失。浇筑时分层厚度及间歇时间应合理控制，以免出现冷缝现象；振捣时要快插慢捣、均匀致密，以防漏振和过振造成结构的内部缺陷。这些工艺的控制与混凝土的整体密实性，抗裂能力等有着直接的联系。养护管理为裂缝控制提供了重要保证。大体积混凝土在浇筑结束时，要根据环境的温湿度及结构特点，适时采取覆盖、洒水、蓄水或者保温等养护措施，以保持混凝土表面的潮湿及温度的平稳。冬期施工要防止前期冻害，夏期施工切忌曝晒而迅速失水。比如在泵站底板建成以后可以用土工布遮盖洒水养护的方法，结合测温数据对养护周期进行调节，以减小表面收缩裂缝的产生。

（4）智能监测与裂缝风险预警技术：智能监测技术的出现为大体积混凝土裂缝的治理提供了一种动态的方法。施工时可以在关键部位设置温度传感器、应变计、湿度传感器以及裂缝监测装置等，对混凝土内部的温度、应力应变以及表面变形等数据进行实时的采集。利用无线传输与数据平台汇总分析相结合的方式，可以及时了解结构内部温度场的变化情况，避免单纯依赖人工巡查带来的信息滞后性问题。

裂缝风险预警要以监测数据分析与阈值控制为前提。在监测结果显示内外温差，降温速率或者拉应变均在控制限值附近的情况下，该系统能够自动进行报警、提示调节冷却水流量、强化表面保温和延长养护时间的措施。对大型水库大坝、船闸及泵站工程而言，智能预警可以使裂缝控制从事后修复变为事前防范，增强施工管理科学性与主动性。

3 水利工程大体积混凝土施工裂缝控制新技术应用与优化

（1）新型防裂技术集成应用模式构建：新型防裂技术的集成应用模式应该以整个过程的控制为核心，将材料的优化、温度的调控、施工的组织、智能的监测和养护管理有机地结合在一起，形成一个“事前预测、事中控制、事后评估”的闭环体系。大体积混凝土裂缝的出现通常并非由单一因素引起，它是水化热、内外温差、结构约束、收缩变形以及施工扰动等综合因素综合影响的结果。所以裂缝的控制不应仅仅依靠后期的修补或者个别温控措施来实现，应通过施工前温度场和应力场的仿真来确定高风险的位置，并减少配合比设计时水泥水化热的影响，对浇筑阶段的入仓温度及浇筑节奏进行控制，对养护阶段的表面温湿度进行稳定，通过监测数据对施工参数进行动态校正。以某大型泵站底板为例，首先可以根据底板厚度、基础约束条件以及施工季节等因素建立温控分析模型来预测混凝土中心处最高温度，表面降温速率以及可能产生拉应力的集中区。然后将低热水泥、粉煤灰与矿粉复合掺合料应用于施工方案以减少水化热的产生，并结合预冷骨料、分层浇筑、埋冷却水管以及保温覆盖的综合控制。浇筑结束后通过温度传感器及应变计进行实时数据采集，如果检测到内外侧温差在控制限值附近，则可以适时调节冷却水流量、延长保温时间或者增大覆盖厚度。

（2）典型水利工程裂缝控制技术应用分析：典型水利工程大体积混凝土多用于水库大坝、泄洪闸、船闸闸室、泵站底板及消力池等重要结构部位。这类结构一般规模较大、约束较强、浇筑量较为集中，服役环境较为复杂，对于抗渗性、整体性以及耐久性都有很高的要求。不同结构对裂缝的控制侧重点有差别：坝体混凝土更加注重水化热积聚与分层温差，而闸墩与边墙结构则更易受到竖向温差与外部环境的作用，由于基础的限制和收缩变形，底板结构经常出现裂痕。为此在裂缝控制技术的运用中应遵循分类施策的原则，依据结构部位、受力条件、环境温度及施工周期等因素选择有针对性的措施，切忌单纯套用统一的方案。如泵站底板的施工、底板和地基的接触面积较大，混凝土的收缩受基础的限制，如果气温过快降低，易产生贯穿性裂缝。针对这种情况，可以通过跳仓浇筑、

布置后浇带、优化浇筑顺序以及增加湿养护时间来减小约束应力。水闸闸墩建造时，因其结构高度大、表面散热迅速，可以采用分层持续浇注，外表面保温及内部测温等措施来避免因表层温度突然降低而产生开裂。坝体混凝土施工时，可以采用埋设冷却水管、控制浇筑层厚度以及分期通水冷却等措施减小内部温度峰值。实践表明：只有与工程结构特点相结合的技术组合才能够真正促进裂缝控制效果的提高。

（3）裂缝控制效果评价与存在问题分析：裂缝控制效果的评价要从外观质量、温控指标、结构性能及长期耐久性几个维度进行，而非仅以建成后表面有无明显裂缝为评判标准。从理论上看对大体积混凝土裂缝的控制评价要着重考虑内部最高温度、内外温差、降温速率、温度应力、收缩变形、抗渗性能以及后期的运行状态。采用现场巡查、无损检测、芯样检测及智能监测数据等方法进行综合分析可更准确的判断防裂技术的有效性。同时评价结果也将反向为施工优化服务，并为以后类似工程的施工提供参数依据，实现裂缝控制由结果验收到过程评价及持续改进的转变。以某泄洪闸底板为例，该泄洪闸底板施工期表面开裂较小，外观质量符合要求，但是测温数据显示混凝土初期的中心温度峰值较高，后期降温速率加快，局部拉应变向警戒值靠近，表明结构内部仍然有可能发生开裂。同类问题体现了一些项目防裂管理中重经验轻监控，重措施布置轻数据分析。有的工程虽设置有测温设备，但是监测点的布设不尽合理、数据分析不够及时，致使预警功能未能完全发挥出来。另外养护措施的实施不持续、温控方案的调整滞后以及施工人员的技术意识不到位等因素也影响了新技术的推广应用。

（4）大体积混凝土裂缝控制技术优化策略：优化大体积混凝土的裂缝控制技术要围绕精准化、智能化、全过程协同等方面进行。一是要加强设计阶段温度场、应力场及收缩变形的模拟研究，预先设定高风险区域及控制指标；二是要对材料阶段的胶凝材料体系进行优化以降低水化热释放强度和增强混凝土的抗裂性能；三是要严格控制施工阶段的入仓温度、分层厚度、振捣质量以及浇筑间歇时间等，以防施工扰动引起裂缝；最后在养护阶段要根据监测数据对保温、保湿、通水冷却等措施进行动态调整，形成“设计预测一施工控制一监测反馈一养护优化”闭环管理机制。以大型水利枢纽或者泵站工程为例，可以搭建数字化温控管理平台对温度传感器、应变监测设备、冷却水管控制系统以及现场养护记录等数据进行统一访问，从而达到数据集中分析及风险分级预警的目的。在系统检测到内外温差过大或者降温速率过快的情况下，能够自动提醒现场加大保温覆盖，调节冷却水流速或者延长养护周期等措施，以降低人为判断滞后带来的危险。同时应加强对施工人员的技术培训，详细制定材料进场检验、配合比复核、浇筑振捣及养护检查等制度。

4 结论

对大体积混凝土裂缝进行控制是确保水利工程建设质量与结构耐久性至关重要的环节。裂缝的产生受到材料性能、温度变化、施工工艺以及养护管理等诸多因素的综合作用，需要遵循全过程、系统化的控制思路。通过对原材料与配合比的优化设计，加强温度场调控、提高施工质量管理、强化养护措施等措施的综合运用，实现了智能监测与风险预警技术相结合，能有效地减少裂缝的出现，增强混凝土的整体稳定性及抗渗耐久性能。同时新型防裂技术集成应用与数字化管理模式，进一步提高裂缝控制科学性与精准性。今后要不断促进绿色低热材料、智能监测平台与数字化施工技术深度结合，继续完善裂缝控制体系，从而为水利工程的安全耐久优质施工提供更可靠的技术保证。

参考文献：

[1] 肖稳,纪德金.水利大体积混凝土温控裂成因与助剂优化研究[J].粘接,2026,53(7)2066-2069.

[2] 杨行,李强,李坤明.水利工程大体积混凝土温控防裂关键技术优化研究[J].水泥,2026,(7)108-110.

[3] 冯凯,翟智发.基于水利水电工程特性的大体积混凝土施工技术分析[J].水泥,2026,(7)147-149.

[4] 鲁常绕,彭文祥.闸墩大体积混凝土缺陷修复及检测技术应用[J].海河水利,2026,(5)131-134.

[5] 黄永刚.水利水闸工程大体积混凝土施工及质量控制[J].中国新技术新产品,2026,(5)82-84.