水库面板堆石坝面板混凝土浇筑施工技术研究

石　海
中交汾河投资控股有限公司　山西　太原　030000

摘　要：面板堆石坝因其适应性强、经济性优而广泛应用于水库工程建设，其防渗面板的混凝土浇筑质量直接决定大坝安全运行寿命。本文系统梳理了面板混凝土浇筑的关键技术环节，包括原材料优选与配合比优化、滑动模板系统设计、混凝土制备运输、仓面浇筑工艺、振捣密实控制、面板表面处理及养护保护等，重点分析了滑模速度调控、坍落度动态管理、温度裂缝防治及接缝止水处理等核心技术难点。在此基础上，提出了基于施工全过程精细化控制的技术策略，涵盖季节适应性施工措施、质量实时检测手段及应急处理预案。研究表明，面板混凝土浇筑须将材料科学、机械装备与现场管理有机统一，方能确保面板的均匀性、致密性与耐久性，为水库长期安全蓄水提供可靠屏障。

关键词：面板堆石坝；面板混凝土；滑模浇筑；配合比优化；温度裂缝防治

引言

面板堆石坝以堆石体为支承主体，以钢筋混凝土面板作为防渗结构，具有占地少、投资省、施工快、对地质条件适应性强等显著优势，已成为高坝建设的主流坝型之一。面板作为大坝直接挡水、防渗的第一道防线，其混凝土浇筑质量关乎大坝结构安全与服役寿命。然而，面板混凝土浇筑属于大面积薄壁结构施工，具有坡度陡（通常1:1.3~1:1.6）、长度大（单块面板可达百余米）、厚度小（一般30~60cm）、约束强（受垫层及周边结构约束）等特点，加之施工期暴露于自然环境中，受温度、风速、日照等气象因素影响显著，极易产生裂缝、蜂窝、错台、脱空等质量缺陷。近年来，随着面板堆石坝向高坝大库方向发展，面板高度和面积不断增大，对混凝土浇筑技术提出了更高要求。传统施工方法在应对大落差、长距离运输、高温季节浇筑等方面暴露出诸多不足，亟需从材料设计、工艺参数、装备配套及过程管控等维度进行系统性技术升级。

1 面板混凝土原材料与配合比设计

1.1 原材料品质控制

面板混凝土对原材料的稳定性要求极为严格。水泥宜选用中热硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其水化热较低，有助于减小温度应力；严禁使用早强型水泥或掺有过多活性混合材的水泥，以免影响后期体积稳定性。骨料应优先采用灰岩或花岗岩加工的碎石与机制砂，粗骨料最大粒径不宜超过面板厚度的1/3且不大于40mm，并控制针片状颗粒含量低于8%；细骨料细度模数宜在2.6~3.0之间，含泥量不超过2%。粉煤灰作为掺合料可改善混凝土工作性和抗裂性，其掺量宜控制在15%~25%范围内，并选用Ⅰ级或Ⅱ级灰[1]。外加剂方面，高效减水剂、引气剂和缓凝剂复合使用，可有效调控坍落度经时损失和含气量，但须通过适应性试验确定最佳组合。

1.2 配合比优化原则

面板混凝土配合比设计应遵循“低水胶比、适宜坍落度、较高抗裂性”的总体原则。水胶比一般控制在0.38~0.45之间，胶凝材料用量不宜低于350kg/m³也不宜超过450kg/m³。坍落度设计值需兼顾运输损失和滑模工艺需求，通常出机口坍落度控制在50~70mm，入仓时保持在30~50mm，过大会导致浇筑后表面浮浆过厚、易产生塑性裂缝，过小则振捣困难且不易密实。含气量控制在3.5%~5.5%，可显著提高抗冻融能力。配合比设计中还应特别关注体积稳定性，通过限制水泥用量、掺入膨胀剂或纤维材料来补偿收缩变形，减少早期开裂风险。砂率需根据骨料级配和泵送要求综合确定，一般取38%~42%，过高会增大干缩，过低则影响和易性。

2 面板混凝土浇筑施工工艺

2.1 滑动模板系统选型与安装

滑模是面板浇筑的核心装备，其设计合理性直接决定施工效率与面板几何精度。无轨滑模因其灵活性强、适应变坡能力好而被广泛采用，模体由桁架式主梁、模板面板、行走机构及侧向调节装置组成。模板长度宜按坝块宽度设置，通常为12~16m，面板曲率半径须与坝面设计线型吻合。安装时，滑模底缘应与垫层表面保持紧密接触，同时设置侧向限位装置以防止滑移偏位[2]。牵引系统多采用卷扬机配合钢丝绳，其牵引力需按滑模自重、混凝土黏附力及施工荷载之和的2.0倍以上配置，并设置双保险制动装置。轨道或滑道的基础必须平整坚实，每5m检测一次高程偏差，确保滑升轨迹符合设计坡比。

2.2 混凝土制备与运输组织

面板混凝土宜采用集中拌和站生产，配料计量误差须控制在±1%以内，拌和时间不少于90s以确保匀质性。运输方案需根据坝高和地形条件选择：对于低坝，可采用自卸车直接入仓；对于中高坝，常用混凝土泵车或溜槽配合缓降器输送。溜槽输送时应控制卸料高度不超过3m，并在溜槽末端设置减速弯头或缓冲挡板，防止骨料离析。高温季节运输车辆应加盖隔热布或喷淋降温，混凝土出机至入仓完成的时间不宜超过60min。运输能力须与滑模上升速度匹配，避免因供料中断造成冷缝或滑模停滞。每车混凝土到场后必须检测坍落度和温度，不合格品坚决退回。

2.3 仓面浇筑与振捣密实

浇筑采用分层连续作业，每层铺料厚度控制在25~30cm，铺料方向应与滑模滑升方向一致。入仓混凝土先用人工或小型推料器均匀摊平，随后立即进行振捣。振捣器选用高频插入式，振点间距不超过有效半径的1.5倍（约40~50cm），振捣深度插入下层混凝土5~10cm，以混凝土表面泛浆、不再冒气泡且无明显下沉为度。振捣过程中应避免振捣器触及滑模模板、钢筋网和止水片，防止移位或损伤[3]。边角部位需辅以人工插捣。为减少层间冷缝，下层混凝土初凝前必须覆盖上层混凝土，当气温高于25℃时，层间间歇时间不宜超过45min。

2.4 滑模滑升速度控制

滑升速度是面板浇筑的核心工艺参数，其确定需综合考虑混凝土的凝结时间、入仓强度、气温条件及面板厚度。速度过快，混凝土尚未获得足够强度，出模后易塌落变形；速度过慢，则易导致黏模或拉裂。一般原则为：滑升速度（m/h）与混凝土坍落度（cm）呈反比关系，与气温呈正比调整。常温条件下（15~25℃），滑升速度宜控制在1.0~1.8m/h；高温季节可适当提高至2.0~2.5m/h，但须同步增加缓凝剂掺量；低温季节则降至0.6~1.0m/h。滑升操作应保持匀速，每次提升间隔时间不大于30min，每次提升高度为10~15cm。滑升过程中必须随时观察出模混凝土表面状态，若出现流淌或塌边，应减缓速度并加强振捣；若表面发干或拉裂，则应加快速度并检查坍落度是否偏低。

3 面板混凝土施工质量控制关键技术

3.1 温度裂缝防治技术

温度裂缝是面板混凝土最常见的病害之一，其成因包括水泥水化热温升、环境温度骤变及内外温差过大。防裂措施应从材料、结构和施工三方面综合施策。在材料层面，采用低热水泥并掺入粉煤灰，同时加入聚丙烯纤维或钢纤维以增强抗拉韧性；配合比中可掺入适量膨胀剂补偿收缩。在结构层面，面板分缝长度不宜大于15m，垂直缝和水平缝设置合理的键槽和止水系统，释放温度应力。施工层面是防裂的关键：严格控制入仓温度，高温季节须将混凝土入仓温度降至设计允许值（一般不超过28℃），方法包括骨料预冷、加冰拌和、液氮冷却等；低温季节则需采取热水拌和、骨料加热等措施，确保入仓温度不低于5℃。浇筑后应及时覆盖保温保湿材料，如土工布+塑料薄膜，并洒水养护，使混凝土表面与内部温差控制在20℃以内。拆模后的面板暴露面应立即涂刷养护剂或覆盖保温被，避免昼夜温差造成温度冲击。

3.2 接缝止水与结构缝处理

面板按坝块分条浇筑，纵缝和横缝处的止水系统是防渗薄弱环节。铜片止水或橡胶止水带必须按设计位置准确埋设，采用专用卡具固定于钢筋架上，浇筑过程中严禁振捣器直接冲击止水片。止水片搭接长度不小于20mm，采用双面焊接或硫化连接，焊接前须清除表面油污和氧化层。水平缝处增设遇水膨胀止水条，并与铜片止水形成复合止水体系[4]。结构缝的填充材料应选用低弹性模量的闭孔泡沫板或聚乙烯棒，以保证面板在温度变化和水压力作用下能自由变形而不产生附加应力。接缝顶部需设置预留槽，后期用柔性密封胶嵌填，形成多道防线。

3.3 表面平整度与外观质量管控

面板表面平整度直接影响水流流态和抗冲磨性能。滑模出模后，应立即进行人工抹面压光，采用木搓板粗平、铁抹子精平，并用2m靠尺随时检测平整度，要求偏差不超过±5mm。对于局部凹凸或气泡缺陷，需在混凝土初凝前用原浆修补，严禁撒干水泥或加水抹面。面板表面宜在终凝前进行拉毛处理，增强与后续防护涂层的黏结力。外观质量控制还应包括色差管控，要求同一仓面板色泽均匀，避免因水泥批次不同或外加剂掺量波动产生明显色差。

3.4 季节性施工应对措施

夏季施工面临高温曝晒和干燥大风，混凝土水分蒸发快，极易产生塑性收缩裂缝。应对措施包括：调整浇筑时段至早晚或夜间，避开正午高温；在仓面上游设置遮阳棚或喷雾装置降低环境温度；缩短运输和摊铺时间，每车混凝土入仓后10min内必须开始振捣。冬季施工则需关注防冻问题，当气温低于5℃时，暂停浇筑作业；若必须施工，则须在混凝土中掺入防冻剂，并采用暖棚法或电热毯覆盖保温，保证混凝土在达到抗冻临界强度

前不受冻害。雨季施工需备足防雨布，一旦下雨立即覆盖新浇面板，并做好仓面排水，防止雨水冲刷造成水泥浆流失。

4 面板混凝土养护与成品保护

养护是面板混凝土获得设计强度的最后关键环节，其核心是维持适宜的温湿度条件。面板出模后，应立即采用喷雾保湿，然后覆盖双层养护材料——下层为吸水性好的土工布，上层为不透水塑料薄膜，使混凝土表面始终处于饱和湿润状态。养护用水应采用与拌和水相同品质的清洁水，水温与混凝土表面温差不宜超过15℃。养护龄期至少应达到14天，对于高强或大体积面板，建议延长至28天。在养护期内，应设专人定时检查覆盖物完整性和湿润度，并及时补充水分。成品保护方面，严禁在未达到设计强度的面板上堆放重物、行驶车辆或进行冲击性作业；如需在面板上设置施工便道，必须铺设保护垫层。冬季养护还需注意防雪覆盖和融雪剂侵蚀。

5 施工过程监测与动态调整

现代面板混凝土施工强调信息化动态控制。应在滑模上安装位移传感器和倾角仪，实时监测滑升速度和倾斜变化；在混凝土拌和站和仓面分别设置温度传感器，记录入仓温度和出模温度；在面板内部埋设应变计和温度计，跟踪早期温升和应变发展。所有监测数据需在施工指挥中心集中显示，并设定阈值报警。当监测值接近警戒线时，应及时调整配合比、滑升速度或养护措施。例如，若面板内部温升速率超过5℃/h，则应减缓滑升速度并加强表面冷却；若应变计显示拉应变过快增大，则需检查养护湿度是否不足或滑模是否卡滞。此外，每浇筑5~10m面板应进行无损检测（如回弹法或超声法），评估已浇段混凝土强度，为后续施工参数调整提供依据。

6 常见质量缺陷预防与应急处理

尽管采取各项控制措施，施工中仍可能出现局部缺陷。对于表面微细裂缝，可在裂缝稳定后采用环氧树脂灌缝封闭；对于蜂窝麻面，需凿除松散层至密实混凝土，用高强修补砂浆修复并保湿养护；对于错台或鼓包，用角磨机打磨平顺。应急处理预案应涵盖：滑模卡滞时的紧急顶升方案、混凝土供应中断时的冷缝处理方案（如加设施工缝并凿毛）、突遇暴雨时的覆盖与排水方案。所有缺陷处理必须形成书面记录，并经监理验收合格后方可进行后续浇筑。预防优于处置，关键在于将质量关口前移至每一道工序，真正做到“工前有交底、工中有检查、工后有验收”。

7 结语

水库面板堆石坝面板混凝土浇筑是一项系统工程，其技术难点集中体现在薄壁结构、陡坡施工、温控防裂和连续作业等方面。本文从原材料配合比、滑模工艺、振捣密实、温度控制、接缝止水、养护保护及动态监测等全链条环节进行了系统剖析，明确了各工序的核心控制参数和操作要点。研究表明，高品质面板混凝土的实现并非依赖单一先进技术，而是靠精细化施工管理理念贯穿始终——从材料进场的每一批检测，到滑模提升的每一厘米调整，再到养护覆盖的每一平方米落实，均需严谨执行。随着数字化施工技术的发展，未来面板混凝土浇筑将向智能化监控、自适应调控方向演进，但基于材料科学与工艺原理的扎实基本功仍是不可替代的基础。期望本文的研究能够为面板堆石坝施工技术人员提供有益参考，推动面板浇筑质量向更高水平迈进。

参考文献

[1]张社荣,王超,李慧.面板堆石坝混凝土面板温度应力与裂缝控制研究进展[J].水利学报,2022,53(4):412-425.

[2]陈祖煜,汪小刚,贾志欣.高面板堆石坝关键技术问题与发展趋势[J].岩土工程学报,2021,43(8):1387-1396.

[3]刘毅,张国新,王振红.基于滑模施工的面板混凝土配合比优化设计[J].混凝土,2023,(2):78-83.

[4]杨启贵,卢建华,周伟.面板堆石坝施工期面板裂缝成因及防控措施综述[J].水利水电技术,2022,53(6):45-52.