

碾压混凝土坝高升层连续翻升技术及模板稳定性分析

吴都督¹, 段 川², 罗长青¹, 侯 炼¹, 王亚磊¹

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;
2. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南 迪庆 674608)

摘要: 为了充分发挥碾压混凝土快速上升的优势, 本文提出在低温季节采用连续翻升施工并结合智能建造技术的方案, 以保障大坝快速升层。施工前, 采用数值模拟方法计算不同升层高度下的荷载分布, 分析模板在翻升施工过程中的受力与位移态势, 从而确保模板在翻升过程中的稳定性和安全性。通过 TB 水电工程的应用实践表明, 该技术施工便捷、安全稳固, 且能够确保浇筑成型的混凝土具有优良的表现质量。

关键词: 碾压混凝土; 连续翻升; 高升层; 智能建造; 模板稳定性分析

中图分类号: TV642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2024)S1-0106-05

Continuous lifting technology and formwork stability analysis for high lifting layers of roller-compacted concrete dam // WU Dudu¹, DUAN Chuan², LUO Changqing¹, HOU Lian¹, WANG Yalei¹ (1. Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China)

Abstract: In order to fully utilize the advantage of the rapid rise of roller-compacted concrete (RCC), this paper proposes a scheme of adopting continuous lift-up construction combined with intelligent construction technology during the low-temperature season to ensure the rapid lift of the dam. Before construction, the numerical simulation method is used to calculate the load distribution under different lift heights, and the stress and displacement states of the formwork during the lift-up construction process are analyzed, so as to ensure the stability and safety of the formwork during the lift-up process. The application practice in the TB Hydropower Station shows that this technology is convenient in construction, safe and stable, and can ensure that the cast concrete has excellent appearance quality.

Key words: roller-compacted concrete; continuous lifting; high lifting; intelligent construction; formwork stability analysis

为充分发挥碾压混凝土施工快速的优势, 结合大型水电工程的施工实践, 关键在于大坝混凝土的施工工艺、模板的快速拆立以及快速跨廊道层等方面。在确保工程安全和质量的前提下, 夏季采用连续翻升模板和高升层连续上升施工技术是可行的, 不仅能够加快施工进度, 还可降低工程成本^[1]。国内外已有许多成功范例, 美国的盖尔斯维尔坝在 45 d 内浇筑了 17 万 m³ 混凝土, 柳溪坝于 5 个月内浇筑了 33 万 m³ 混凝土。在官地碾压混凝土重力坝施工期间, 混凝土日浇筑强度超过 2 万 m³, 月施工强度达到 28.6 万 m³, 为工程提前发电提供了有力保障^[2]。龙滩水电站借助三维有限单元法, 对从施工期至运行期的温度徐变应力进行分析与论证, 结果表明, 只要能够满足所要求的温控措施, 在夏季连续上升 6 m 也是可行的^[3]。大花水水电站通过灵活多样的人仓方式, 实现了 34 d 连续上升 33.5 m 的施

工记录^[4]。TB 水电工程采用预留缺口跨廊道层施工技术, 在 20 d 内跨过一层 200 m 长的廊道层^[5]。索风营水电站采用 3.1 m×3.0 m 交替上升大模板与连续翻升台阶模板, 并做好温控措施, 在挡水坝段按照 12~18 m 升层推进, 在非溢流坝段实现一次浇筑到坝顶, 最大升层高达 31.4 m^[6]。下凯富峡水电站采用连续翻升模板确保大坝快速上升, 其最大连续上升高度达 24.6 m^[7]。综上所述, 碾压混凝土施工技术完全可以实现高升层连续、快速施工。

翻转模板施工技术是一种专用于大型工程项目施工建设中的模板施工技术, 相较于传统的模板施工技术, 其机械化程度显著提高, 极大地提升了模板的利用率, 有效降低了模板施工成本^[8]。在混凝土浇筑施工前, 模板的验收和规范化操作是确保混凝土浇筑安全的关键环节, 这就对模板工程的安全性提出了高标准的要求。尤其是在高空作业以及大体

作者简介: 吴都督 (1989—), 男, 高级工程师, 主要从事水利水电施工技术与管理工。E-mail: 981583241@qq.com

积连续浇筑混凝土时,更需遵循严格的标准和要求。在浇筑施工的整个流程、模板翻升过程中,模板随混凝土浇筑厚度的增加,其应力与位移都在不断变化。因此,在进行连续翻升作业时,务必要确保模板的稳定性,以保障施工安全。本文对碾压混凝土坝高升层连续翻升技术进行了介绍,并分析了模板稳定性,以期对混凝土坝施工提供参考。

1 高升层连续翻升施工及质量控制

1.1 快速连续翻升模板应用及使用技巧

自水电八局在普定水电站中研制并首次应用连续上升全悬臂钢模板^[9]以来,这种全悬臂翻升模板被广泛应用于碾压混凝土大坝的施工中,有效地解决了碾压混凝土坝在超过 3 m 升层时的快速连续上升关键技术难题。近年来,随着外加剂性能的不断提升,碾压混凝土的初凝时间已超过 10 h,终凝时间达到 22 h 甚至更长。为了确保碾压混凝土在快速连续上升过程中的体型控制和施工安全,对 3.0 m×3.0 m 悬臂翻升模板进行了微小改动,增设了一排拉模孔,将拉模筋的间距控制在 90 cm 以内,以此确保模板在连续翻升过程中的稳定性及结构安全。

在连续翻升模板的安装要求方面,对于新安装的模板(底部第 1 层无悬臂翻升模板作为基础),备仓时需一次性安装 3 层,除了采用拉模筋进行常规拉模外,下游斜坡面模板在仓面内还需采用型钢进行支撑。当老混凝土面留有 1 层悬臂翻升模板时,仅需在该模板上面再架设 2 层模板,模板拉模筋只需安装蛇形筋即可。在施工过程中,当混凝土浇筑至 4.5 m 高时,开始进行翻模作业:将最下层老混凝土面模板吊运至最上层,上层模板沿着下层模板的导向机构精准就位后,通过桁架后部的调节螺杆进行铰接,使上、下层模板连成一个整体,形成新的悬臂模板。当上层模板被混凝土覆盖一半时,拆除最下层模板,并按照前述方法重复开展安装作业,以此方式在后续施工过程中循环连续翻升多层模板。

1.2 连续翻升模板实际拆立模效率及资源分析

依据现场实际施工经验的统计数据显示,每块悬臂翻升模板的平均翻升时间(包括拆除和安装)为 0.5 h。在碾压混凝土施工时,以 0.3 m 作为一层进行浇筑(单块模板的高度被划分为 10 层)。在低温季节,坏层覆盖时间最长为 6 h,而在高温季节则为 4 h。碾压混凝土外加剂的生产厂家根据夏季高温和冬季低温的特点,对其所生产的外加剂产品中的缓凝成分进行调整。夏季碾压混凝土的初凝时间约为 16 h45 min,终凝时间约为 21 h;冬季碾压混凝土的初凝时间约为 14 h20 min,终凝时间约为 18 h。

通过计算最大仓面尺寸来确定所需的模板数量,进而得到模板翻升所需的总时间。配备足够数量的吊车,确保在底层模板进行翻升操作时,第一层模板层的混凝土最小覆盖时间能够超出混凝土的终凝时间,从而确保混凝土强度能够满足模板支撑的要求。

1.3 连续翻升施工质量控制要点

为确保碾压混凝土的连续快速上升,首先要确保拌和系统运转顺畅且原材料储备充足,从而能够持续不断地为施工现场供应混凝土。针对不同的外界条件,选择科学合理的快速入仓手段和方法是实现大坝快速施工、确保工程质量和安全的重要措施^[10]。其入仓手段应确保各高程作业的连续性。当采用满管、真空溜管、胶带机等入仓方式时,在施工过程中仅需进行简单的拆卸操作,无需进行大量的安装与拆除工作,这样是切实可行的。原则上,因入仓手段的调整而占压的单层直线工时不得超过 2 h。

快速连续上升施工更适宜采用薄层平铺法进行浇筑,即每次铺料厚度为 35 cm,碾压厚度为 30 cm。在施工过程中,需要重点控制碾压混凝土的层间结合时间、模板清理、过程钢筋绑扎等关键环节。在悬臂翻升模板拆模前,应在仓面内提前铺设足够面积的彩条布,用于放置已拆卸的模板,防止模板携带的混凝土碎渣污染仓面。模板清理完毕后,将彩条布上的碎渣收集至集渣斗中,并通过缆机将集渣斗吊离仓面。当模板翻升过程中需要吊车进行吊装作业时,吊车支腿底部需采用彩条布加以覆盖铺垫。同一位置的模板翻升吊装时间应控制在 2 h 内完成,吊装完成后,在起吊占压区域摊铺碾压混凝土前,应铺洒一层净浆。若吊装时间接近 2 h 却仍未完成吊装任务,则需让出工作面,优先进行碾压混凝土施工。在模板翻升过程中,模板吊装施工区域与钢筋绑扎施工区域应相互错开进行作业。钢筋和止水结构在浇筑过程中会随着模板的上升而持续加高。在混凝土浇筑前,需再次涂刷脱模剂。当钢筋施工部位的高度较高时,可采用臂式高空作业车配合移动操作平台辅助完成作业。需要安装的钢筋由缆机和汽车吊运至钢筋待安装区域,由人工配合安装并调整钢筋位置,严格按照设计的间距和排距进行钢筋的定位焊接,定位无误后,根据相关要求对钢筋焊接工艺施工。同一个部位的钢筋不宜过度集中,要确保同一占压区的施工时间不超过 2 h。

2 连续翻升模板稳定性数值计算与分析

2.1 模板翻升稳定性分析

在混凝土施工的同时,仓内进行模板翻升作业,翻升施工过程中的受力状况与开仓前备仓期间存在

差异。为确保翻升施工时的安全性,当考虑混凝土浇筑层底部存在未拆除模板的情形时,上部两层模板内侧不设置支撑筋,仅在浇筑过程中设置拉杆。在混凝土浇筑前,两层模板均通过模板背架上的调节丝杆和模板肋板间的连接螺栓进行固定。针对不同升层高度下的工况,采用数值模拟方法对模板在翻升过程中的受力与位移情况进行分析。对模板背架及连接丝杆进行复核计算,可在三维模型上展示关键点的受力状况,并设置阈值以便对受力情况进行预警。

2.2 数值模拟受力分析计算要点

2.2.1 实施步骤

本次数值分析依照如下步骤予以实施:①根据TB大坝3.0m×3.0m及3.0m×1.831m模板的结构图,建立满足所需精度的几何模型;②根据相关规范、施工方案以及结构图等资料,确定基本荷载值;③根据模板升层施工和现场翻模施工的工序资料,确定不同的荷载组合;④对不同荷载工况进行有限元模拟,并记录关键位置的计算结果;⑤对所得计算结果进行深入分析,以评估模板翻升施工方案的安全性。

2.2.2 数值模拟实施

2.2.2.1 材料参数及单元属性

依据前期资料收集成果,在本次数值模拟分析中,各部件对应的材料参数及单元属性如表1所示。在进行有限元计算时,所采用的单位制为N-mm-MPa制。

2.2.2.2 荷载值的确定

a. 新浇筑混凝土侧压力 P_1 按照以下公式计算:

$$P_1 = \min(0.22\gamma t_0 \beta_1 \beta_2 v^{1/2}, \gamma H) \tag{1}$$

式中: γ 为混凝土重力密度,kN/m³; t_0 为新浇混凝土初凝时间,取 $t_0=12\text{ h}$; v 为混凝土的浇筑速度,取 $v=0.3\text{ m/h}$; H 为计算处至新浇混凝土顶面的总高度,取 $H=1.2\text{ m}$; β_1 为外加剂的影响修正系数,不掺外加剂时取1.0,掺加外加剂时取1.2,这里取 $\beta_1=1.2$; β_2 为混凝土坍落度影响修正系数,当坍落度小于30mm时取 $\beta_2=0.85$,坍落度为50~90mm时取 $\beta_2=1.0$,坍落度为110~150mm时取 $\beta_2=1.15$,这里取 $\beta_2=0.85$ 。结合施工方案计算得 $P_1=24\text{ kN/m}^2$ 。

b. 在振捣混凝土的过程中,所产生的荷载 P_2 标准值依照相关规范可取4.0kPa,且此荷载作用在新浇筑混凝土侧压力的有效压头高度范围之内。同时,考虑到碾压混凝土施工会产生影响,根据工程资料将碾压时的动载最大值直接施加在已凝固的混凝土表面,以此适当放大碾压施工对模板的影响,从而确保计算结果能够为施工方案的制定提供有效的参考依据。

c. 倾倒混凝土时水平荷载 P_3 标准值按规范可取10kPa。

d. 风荷载 P_4 标准值按GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》中的规定计算:

$$P_4 = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 \tag{2}$$

式中: β_z 为高度 Z 处的风振系数; μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; ω_0 为基本风压,kPa。结合已有资料,可以按上式计算 P_4 ,或参考施工方案取 $P_4=0.84\text{ kPa}$ 。

综上所述,最终确定施工过程中的均布荷载计算值为 $P=P_1+P_2+P_3+P_4=0.03884\text{ MPa}$,在翻升过程中的冲击荷载计算值 $F=14\,000\text{ N}/(3\,000\text{ mm}\times5\text{ mm})=0.93\text{ MPa}$ 。

2.2.2.3 几何模型

采用梁板式结构以自下而上的方式构建模型,选取主要受力结构后,所形成的初步几何模型如图1所示。

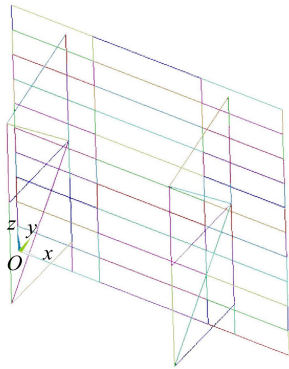


图1 初步几何模型

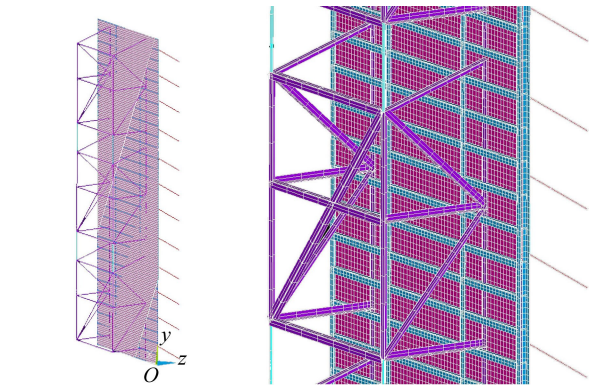
2.2.2.4 网格划分

按照表1中的单元参数,对桁架和模板面相关构件进行了材料属性设置、截面参数设定和网格划分。单元尺寸控制在50mm,最终总计划分单元

表1 各部件材料参数及单元属性

部件	材料	材料编号	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(t/mm ³)	形状	单元类型	单元编号	断面编号
模板版面	钢	1	205 000	0.3	7.80×10 ⁻⁹	5 mm 等厚板	shell181	1	1
模板横筋	钢	1	205 000	0.3	7.80×10 ⁻⁹	10 号槽钢	beam188	2	3
桁架	钢	1	205 000	0.3	7.80×10 ⁻⁹	角钢 63×63×86	beam188	2	4
拉模筋	C16 钢	1	205 000	0.3	7.80×10 ⁻⁹	C16	beam188	2	5
桁架连接杆	C28 钢	1	205 000	0.3	7.80×10 ⁻⁹	C28	beam188	2	6

14312 个,其中壳单元 10800 个,梁单元 3512 个,划分完成的网格如图 2 所示。



(a) 模版整体网格示意图 (b) 支撑梁单元细部网格示意图

图 2 网格划分情况

2.2.2.5 荷载加载

根据施工方案,确定荷载施加方式如表 2 所示。

2.2.2.6 计算结果与实际情况对比

经计算可得,模板面板的最大应力为 8.27 MPa,该数值远小于钢材的屈服强度,因此不会导致结构破坏。桁架系统的最大应力为 79.28 MPa,同样小于钢材的屈服强度,故桁架系统也不会发生破坏。拉模筋的受力位置一般在与模板

和桁架连接的端部。随着浇筑高度的逐步上升,拉模筋的最大应力在 38~80 MPa 变化,值均未超过 C16 钢筋的屈服强度。

经计算可知,模板与桁架的最大位移均发生在浇筑至 4.5 m 高度时(即浇筑至第三层模板中央,准备翻升前),位移量为 0.54 mm,该位移发生在浇筑部位的中央,属于局部变形,且其数值与理论计算结果相吻合,表明数值模拟计算结果较准确,模板不会出现明显变形,不会对模板翻升施工造成危害。在其他浇筑高度下,位移均较小,最小位移仅为 0.18 mm。在进行模板翻升操作时,第三层模板的位移仅为 0.27 mm,在有效的监测措施下,这种微小位移几乎不会对翻升作业及后续浇筑工作产生影响。

3 智能建造技术保障高升层施工质量

TB 大坝右岸 6~10 号坝段在跨过中层廊道顶部 1645 m 高程后,坝体结构变得相对简单,且已越过强约束区。鉴于 10 号坝段在 1665 m 高程处设有中孔底板,而中孔为度汛前关键线路施工项目,结合中孔底部钢筋布置,采用碾压混凝土连续快速上升技术,一次性将 6~10 号坝段从 1645 m 高程采用平

表 2 各荷载步加载情况

部件	层数	荷载步部位						
		1	2	3	4	5	6	7
混凝土	1~10	全约束	全约束	全约束	全约束	全约束	全约束	全约束
	11	均布荷载						
	12	均布荷载						
	13							
	14		均布荷载					
	15		均布荷载					
	16							
	17			均布荷载				
	18			均布荷载				
	19							
	20				均布荷载			
	21				均布荷载			
	22					均布荷载		
	23					均布荷载		
	24						均布荷载	
	25						均布荷载	
	30							顶部冲击荷载
拉模筋	1~4	全约束	全约束	全约束	全约束	全约束	全约束	全约束
	5		全约束	全约束	全约束	全约束	全约束	全约束
	6			全约束	全约束	全约束	全约束	全约束
	7			全约束	全约束	全约束	全约束	全约束
	8				全约束	全约束	全约束	全约束
	9					全约束	全约束	全约束
	10							全约束

层法连续快速上升浇筑至 1663 m 高程,整仓一次性上升 18 m,总计 60 层,最大仓面面积达 5885 m²。仓面主要配备 6 台碾压机、4 台平仓机等设备进行施工。结合智能建造技术的应用,实时对碾压质量及温控情况进行统计分析,确保连续快速上升施工质量受控。同时,为了更有效地对高升层连续快速上升过程中的温控数据进行监控和分析,在 6~10 号坝段仓内布置 22 支温度计,共铺设 12 层冷却水管,冷却水管层间距为 1.5 m,从坝后预埋盒引出,共计 156 个回路。

采用智能碾压系统监测连续施工过程中的碾压质量,实时动态追踪仓面碾压机械的运行轨迹、速度、振动状态以及碾压遍数,同时,平仓机可自动计算摊铺时间和厚度。当平仓、碾压作业过程参数未达标时,监控人员便会及时向质量人员反馈,以便进行补碾操作。在每仓施工结束后,系统会输出碾压质量图形报表,为仓面质量验收提供辅助材料。此外,对摊铺作业过程实施管控,实现了摊铺厚度与平整度的智能控制。根据监控结果,压实度合格率达到 100%,碾压遍数覆盖率达到 97% 以上,摊铺厚度最大可达 36.88 cm,层间覆盖时间最长为 380.71 min。

在碾压作业完成后,主要借助及时通水和智能通水的方式来控制最高温度。根据仓面设计规划来布置冷却水管和温度计,并将其接入智能温控柜。冷却水管铺设完成立即通水,系统可自动实现实时在线感知混凝土进出口温度、流量等关键参数,同时进行实时在线监测和协同仿真分析,为每个浇筑块选择最优的控温策略和通水调控时机、流量以及开度。根据温控系统监测的数据显示,最高温度为 33.23℃,低于设计允许的最高温度 34℃,一期冷却通水 21 天期间内部平均温度为 26.92℃。

4 结 语

TB 水电工程应用连续翻升模板技术,该技术施工便捷、安全稳固,且能够确保浇筑成型的混凝土具有优良的表现质量,尤其适用于高空作业中的大幅面混凝土的施工。通过模板数值模拟分析和智能建造技术的应用,为连续翻升施工的安全与质量额外加装了一道“安全锁”,从而确保了碾压混凝土在翻模过程中的安全性和层间结合质量。

参考文献:

[1] 武孔学. 碾压混凝土大坝快速施工研究与应用[J]. 陕西水利, 2023 (11): 187-189. (WU Kongxue. Research and application of RCC dam rapid construction [J]. Shaanxi Water Conservancy, 2023 (11): 187-189. (in

Chinese))
[2] 韩国松,杨海燕,姜一天,等. 官地水电站大坝碾压混凝土快速施工关键技术[J]. 山西建筑, 2020, 46 (18): 179-180. (HAN Guosong, YANG Haiyan, JIANG Yitian, et al. Key technology of RCC rapid construction of dam of Guandi Hydropower Station [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46 (18): 179-180. (in Chinese))
[3] 黄淑萍,吴旭,石端学,等. 龙滩碾压混凝土重力坝连续浇筑混凝土可行性研究[J]. 水利水电技术, 2006 (5): 59-62. (HUANG Shuping, WU Xu, SHI Duanxue. Feasibility study on continuous pouring of concrete for RCC gravity dam in Longtan [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006 (5): 59-62. (in Chinese))
[4] 田福文. 大花水电站碾压混凝土拱坝快速施工技术[J]. 湖北水力发电, 2008 (6): 37-39. (TIAN Fuwen. Rapid construction technology of RCC arch dam of Dahua Hydropower Station [J]. Hubei Hydroelectric Power, 2008 (6): 37-39. (in Chinese))
[5] 吴都督. 水电工程中两种快速跨廊道层施工技术研究与应用[J]. 水利水电施工, 2023 (1): 43-46. (WU Dudu. Research and application of two kinds of rapid cross-corridor layer construction technology in hydropower engineering [J]. Water Resources and Hydropower Construction, 2023 (1): 43-46. (in Chinese))
[6] 姚国虎. 索风营水电站碾压混凝土重力坝连续上升施工技术. [J]. 湖南水利水电, 2011 (1): 37-39. (YAO Guohu. Construction technology of continuous rise of RCC gravity dam of Suofengying Hydropower Station [J]. Hunan Water Resources and Hydropower, 2011 (1): 37-39. (in Chinese))
[7] 高元博,靳俊杰. 下凯富峡水电站碾压混凝土大坝层、缝间处理工艺[J]. 西北水电, 2021 (4): 52-55. (GAO Yuanbo, JIN Junjie. Treatment process of RCC dam layer and interseam of Lower Kaifuxia Hydropower Station [J]. Northwest Hydropower, 2021 (4): 52-55. (in Chinese))
[8] 王玲. 试析翻转模板施工技术在下浒山水库工程中的应用[J]. 陕西水利, 2023 (9): 128. (WANG Ling. Application of construction technology of flipping formwork in Xiahushan Reservoir project [J]. Shaanxi Water Conservancy, 2023 (9): 128. (in Chinese))
[9] 陈宗卿,庞声宽. 普定碾压混凝土拱坝筑坝新技术研究[J]. 水力发电, 1988 (3): 57-58. (CHEN Zongqing, PANG Shengkuan. Research on new technology of Puding RCC arch dam damming [J]. Hydroelectric Engineering, 1988 (3): 57-58. (in Chinese))
[10] 吴都督. 浅论碾压混凝土大坝入仓技术[J]. 水利水电施工, 2019 (1): 56-60. (WU Dudu. A brief discussion on the storage technology of RCC dam [J]. Water Resources and Hydropower Construction, 2019 (1): 56-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 02 编辑: 雷燕)