

三峡大坝混凝土快速施工方案及工艺研究

三峡主体工程的混凝土总量达 2800 万 m³，其中大坝混凝土约 2000 万 m³。大坝混凝土施工是三峡工程能否按照总进度的要求达到计划目标的关键。根据总进度安排，其年最高浇筑量要达到 500 万 m³，月最高要达到 40 万 m³，日最高应达到 2.0 万 m³ 以上。经过对施工手段的多方案比较分析，在充分论证的基础上，决定选用以塔式皮带机连续输送浇筑为主，辅以大型门塔机和缆机的综合施工方案。

1. 概述

三峡工程大坝为混凝土重力坝，最大坝高 181m，枢纽工程混凝土浇筑总量达 2800 万 m³。如此巨大的混凝土工程施工总量，导致了三峡工程混凝土施工浇筑的高强度施工。

1.1 混凝土施工强度

三峡工程混凝土浇筑高峰集中在第二阶段工程，其混凝土浇筑总量达 1860 万 m³。根据施工进度及总进度的安排，1998 年为 118 万 m³，1999 年为 458 万 m³，2000 年为 548 万 m³，2001 年为 403 万 m³，2002 年计划完成 142 万 m³。施工高峰时段主要集中在 1999~2001 年三年间，其中，以 2000 年的混凝土浇筑强度为最高，要求年最高浇筑量达到 500 万 m³，月最高达到 40 万 m³，日最高达到 2.0 万 m³ 以上。

1.2 混凝土施工手段

根据对浇筑强度和施工场地分析，采用传统的门塔机浇筑施工手段是不能满足浇筑强度要求的，必须寻找新型高强度的浇筑手段。

另外，大型门塔机浇筑方案从拌和楼出机口到浇筑仓，均采取间歇式给料方式，供料的中转环节多，供料效率低下，多座拌和楼与多座门塔机再与多个浇筑仓之间生产组合错综复杂，易于错料，更增加了施工管理的难度。

1.3 混凝土施工工艺

三峡大坝沿纵向分若干坝段，沿坝段分若干坝块，沿坝块分几十个升层，每个升层又分若干浇筑层。一个升层即构成混凝土的一个浇筑仓位。一个混凝土仓的施工全过程是从两个同步进行的流程开始的，一个流程是混凝土浇筑的仓面准备；另一个流程是混凝土生产及运输，当两个流程汇集到一起时，便形成仓面混凝土浇筑流程，紧后的流程则是混凝土护理。如此循环推进，三峡第二阶段工程高峰期大坝施工部位将出现 20 多个仓面同步浇筑的景象。

由此可见，采用传统的混凝土浇筑工艺如散装钢模板，人工手持式振捣等已远不能满足如此高强度和十分复杂的混凝土浇筑需要，必须相应采取新的施工仓面配套和施工工艺。

2. 大坝混凝土快速施工布置及方案

以塔(顶)带机为主，辅以大型门塔机和缆机的施工方案总体思路是：塔带机浇筑一条龙作业，生产效率高，适应于连续高强度的混凝土施工，承担混凝土浇筑的主要任务；配备大型门塔机、缆机等作为辅助设备，负责金结安装、备仓、仓面设备转移和浇筑部分混凝土等任务，避免因塔(顶)带机的工况转换而影响效率。拌和能力的配备留有一定余地，以利塔(顶)带机效率的充分发挥。塔(顶)带机供料线布置为一机一带，确保塔(顶)带机运行的可靠性。

2.1 混凝土拌和设备

4个混凝土拌和系统，各拌和楼均能生产7℃冷混凝土。

(1) 布置在基坑下游79m高程拌和系统设置2座4×4.5m³自落式拌和楼，每座楼生产能力为320m³/h。此系统主要供应泄洪坝5#~23#坝段混凝土浇筑。

(2) 布置在左岸厂房坝段上游面90m高程拌和系统设置2座拌和楼。4×6m³自落式拌和楼生产能力为320m³/h，4×3m³自落式拌和楼生产能力为240m³/h。此系统主要供应泄洪坝段1#~5#坝段、导墙坝段及左厂坝段11#~14#坝段混凝土。

(3) 布置在左非泄洪坝段下游120m高程拌和系统设置2座4×3m³自落式拌和楼，生产能力为2×240m³/h。此系统主要供应左非泄洪坝段及左厂1#~10#坝段混凝土。

(4) 布置在左岸进厂房公路左侧82m高程拌和系统设置1座4×3m³自落式拌和楼，生产能力为240m³/h。此系统主要供应左岸厂房混凝土。

2.2 混凝土浇筑设备

主要设备有6台塔(顶)带机，塔带机与拌和楼连接的6条总长3800m的胶带混凝土输送线，4台胎带机，7台MQ2000型高架门机，2台25t摆塔式缆索起重机，1台K1800型塔式起重机，1台MQ6000型门机，2台300t履带吊。

(1) 泄洪坝段 在坝轴线下游76m顺坝轴线方向布置4台塔带机，主要用于该部位的混凝土浇筑，在坝轴线下游121m顺坝轴线45m高程的轨道上布置1台K—1800型塔吊和1台MQ2000型高架门机。其工作任务是，前期协助混凝土施工，后期以吊装金属结构为主。

(2) 厂房坝段 坝轴线下游44m顺轴线布置2台顶带机，主要用于左厂7#~14#坝段混凝土浇筑，坝轴线下游65m顺轴线120m高程的施工栈桥上布置2台MQ2000型门机，专门用于输水压力钢管和水轮发电机埋设件的吊装。

(3) 厂房部位 在厂房下游面距坝轴线195m的30m高程顺坝轴线方向的轨道上布置4台MQ2000型高架门机，用于左岸厂房部位的混凝土施工。

(4) 缆索起重机的布置 2台摆塔式缆索起重机为厂坝第二阶段工程施工提供了一个空中走廊，主塔设在左非泄洪8#坝段185m高程上，副塔设在导流明渠纵向围堰坝段160m高程顶部，跨度1416m，在坝轴线长度方向可控制整个厂坝第二阶段工程的长度，宽度可控制从坝轴线上15m至坝轴线下65m，即2台缆机可控制上下游方向80m宽度且在工作区域宽度方向相互搭

接 20m。

(5) 公用设备 第二阶段工程厂坝部分分 3 个标段，由 3 个施工企业负责施工。4 台胎带机、2 台 300t 履带吊等业主拥有的移动性强的设备不固定在一个标段使用，根据施工需要可灵活调配。

3. 大坝混凝土快速施工仓面配套及工艺

采用塔(顶)带机浇筑混凝土，其浇筑强度将成倍地提高，因此，对浇筑仓面各项资源配置无论是容量还是数量都将明显增加，对仓面组织管理水平的要求也将显著提高。

3.1 塔（顶）带机浇筑的仓面配套

3.1.1 仓面设备配套

(1)平仓机：一般每 1 个塔(顶)带机浇筑仓配置 1 台平仓机和平仓铲，死角部位辅以人工平仓振捣。

(2)振捣机：对于素混凝土或钢筋不太多的混凝土浇筑仓，通常配备 1 台 8 头平仓振捣机加 3~4 部手持式振捣棒或者 1 台 5 头平仓振捣机加 4~5 部手持式振捣棒。对于钢筋非常密集或有水平钢筋网和过流面等比较特殊的仓位，振捣要求比较高，一般不配平仓振捣机，直接配 5~8 部手持式振捣棒用人工振捣。

(3)喷雾机：在高温季节浇筑混凝土时，每仓配备 2~3 部摇摆式喷雾机。

3.1.2 仓面人员配套

(1)施工人员应按照仓位情况进行合理配置，一般素混凝土仓、少筋混凝土仓配备 8~12 人，多筋混凝土仓、水平钢筋网仓、过流面混凝土仓配备 11~16 人。

(2)仓面配备值班木工、钢筋工、预埋工、电工和止水专职人员。各工序值班、带班人员至少 1 名到位，并挂标识牌。

(3)仓面上配置专人分散集中的粗骨料。

3.1.3 仓面工具配套

(1)每个浇筑仓至少配置 2 桶、2 瓢、3 锹用以仓面处理。

(2)为防止混凝土浇筑过程中的骨料分离及骨料集中现象，每个浇筑仓至少配备 2 把专用耙。

(3)配备 2~3 只真空吸水管，用以随时吸除仓面的混凝土泌水或集水。

(4)配备 2 台洒水器，用以收仓后对仓面洒水养护。

注：资料仅供技术交流之用，不可用作它用！

3.1.4 其它器材设施配套

(1) 在混凝土开仓前，保证风、水、电通畅。

(2) 采用平铺浇筑法施工时，浇筑仓应准备保温被待用，随着平仓振捣的进展，及时覆盖保温被，保温被之间应有 10cm 的搭接长度，以确保保温效果。

(3) 雨季施工时，仓面配有彩条布和钢筋等材料，搭设活动防雨棚等。

3.1.5 仓面组织管理

为保证塔带机浇筑混凝土一条龙正常运行，需建立一个组织严密、运行高效、信息反馈及时的仓面组织管理系统。

(1) 综合协调系统：对混凝土一条龙施工提供技术、质量、安全、机电设备保障，确定拌和楼、浇筑手段及开仓时间，协调浇筑过程中出现的各种矛盾，组织处理突发事情。

(2) 浇筑系统（仓面指挥）：仓面指挥由浇筑队长担任，负责浇筑仓面的组织指挥，对仓位、的要料、下料、平仓振捣、温控、排水等负责，确保混凝土浇筑质量。

(3) 操作系统：由调度室负责组织、协调，确保各操作系统正常运行，拌制合格的混凝土，并使混凝土准确、快速入仓。

3.2 仓面工艺设计

3.2.1 设计原则

仓面条带布置要尽量简化，标号切换次数尽可能少，塔带机运行线路要短且易于操作，整个下料过程要易于实现，资源配置要充分，来料流程要优化。

3.2.2 浇筑方法及强度要求

(1) 平浇法：该方法适合于塔带机高强度、快速运送混凝土的特点，在低温季节，除仓面钢筋特别多、结构特别复杂部位外，均采用平浇法浇筑。在高温季节对于仓面面积小于 500m² 采用塔带机入仓时，亦采用平浇法施工，浇筑时铺层厚度可按照 35~55cm 下料。

(2) 台阶法：对于仓面面积大、钢筋密集、结构复杂的仓位，经监理批准后可使用台阶法浇筑，以满足温控及覆盖前混凝土不初凝等条件要求。台阶的一次铺料宽度控制在 8~10m 以上，接头部位台阶宽度不小于 3~4m。

3.2.3 仓面设计的内容

仓面设计标准格式包括以下内容：

注：资料仅供技术交流之用，不可用作它用！

① 仓面情况，包括仓面所在坝段、坝块、高程、面积、方量、混凝土级配种类要求，仓位施工特点等；②仓面预计开仓时间、收仓时间、浇筑历时、入仓强度、供料拌和楼；③仓面资源配置，包括机具、工具、材料、人员数量要求；④仓面设计图，图上标明混凝土分区线，混凝土种类标号，浇筑顺序等；⑤混凝土来料流程表；⑥对仓面特殊部位如止水、止浆片周围、钢筋密集、过流表面等重要部位指定专人负责混凝土浇筑质量工作；⑦对特别重要部位，必须编制专门的施工措施；⑧仓面“浇筑情况评述”，收仓后，由质检人员和监理工程师对该仓混凝土浇筑情况进行简要评述，对可能存在的浇筑质量问题提出处理意见。

仓面设计由浇筑单位提出，一式六份，经监理批准后除班长、质检员及监理随身带外，还应视情况复印送给有关部门（如拌和楼试验室、塔带机操作人员等）。

3.3 塔(顶)带机浇筑新工艺

混凝土快速优质施工，给浇筑工艺提出了更新更高的要求，因此，除对模板工艺、钢筋工艺、预埋工艺外，对许多传统工艺进行了改革。

3.3.1 供料工艺

(1) 供料皮带上设置遮盖或保温措施。

(2) 建立有效的楼(拌和楼)—带(供料皮带)—机(塔带机)—仓(浇筑仓)之间的通讯联系或自动监控系统。

(3) 皮带卸料处设置挡板、卸料导管和刮板，以避免骨料分离和砂浆损失。

(4) 塔带机输送系统装置冲洗设备，卸料后及时冲洗供料皮带上所粘附的水泥砂浆。冲洗时采取措施防止冲洗水流入新浇混凝土中。

3.3.2 布料工艺

(1)布料层面处理：用塔带机浇筑四级配混凝土时，为便于塔带机运输，第一层面处理一般不采取传统的水平层面铺砂浆的方法，而改用小级配混凝土或同强度等级的富砂浆混凝土。具体为：迎水面至排水管前缘区域，采用 20cm 厚二级配混凝土；其余部位（包括中块）采用三级配富砂浆混凝土，层厚为一个浇筑坯层，约 40 cm。

(2)布料方向与次序：当平浇法浇筑时，迎水面仓位铺料方向与坝轴线平行；上块浇筑方向从上往下，下块浇筑方向从下往上，中间仓位视仓面情况确定起始下料点；

基岩面、凸凹不平的老混凝土面及斜坡上的仓位，由低到高铺料；

仓内采用多种标号混凝土时，原则上先高标号后低标号的下料顺序，保证高标号、有廊道、钢管或埋件的部位，卸料时，廊道、钢管两侧均衡上升，其两侧高差不得超过铺料的层厚。

当采用台阶法浇筑时，从块体短边一端向另一端铺料，边前进、边加高，逐步推进并形成明显的台阶。浇筑坝体迎水面仓位时，采取顺坝轴线方向铺料。

(3)铺料厚度与宽度：铺料厚度视混凝土入仓速度、铺料允许间隔时间和仓位大小决定。劳动组合、振捣器工作能力等要满足浇筑的需要，必须保证下层混凝土初凝之前覆盖上一层混凝土。采用平浇法时，铺料层厚度一般采用 50cm；采用台阶法浇筑时，铺料层厚度一般采用 50cm。对于升层高度 1.5m 的仓位，铺料宽度取 10~12 m；对于升层高度 2.0m 的仓位，铺料宽度取 8~10m，台阶宽取 2~3m。

3.3.3 下料和振捣工艺

对没有钢筋的仓面，塔带机下料时，下料导管卸料口距仓面应不大于 1.5m，并均匀移动布料，堆料高度不宜大于 1.0m，以免骨料分离。布料条带清晰，并有足够宽度。在模板周围布料时，卸料点与模板的距离保持在 1~1.5m，人工分散粗骨料后，再用平仓机将混凝土就位。在止水、止浆片和预埋件部位布料时，严禁下料导管直接下料，由人工送料填满。

在进行水平钢筋网浇筑层混凝土下料时，尽量降低下料高度，一次卸料的堆料高度控制在 50cm 以下，浇筑层厚度不大于 30cm。竖向钢筋部位卸料时，卸料部位应离开钢筋 0.5~0.8m，并加强人工平仓。

台阶法浇筑时，平仓振捣机站在中间（第二层）的台阶上，覆盖范围比较理想；平层法浇筑时，平仓机一般站在层面上，紧跟下料接头，随时下料，随时振捣。

混凝土浇筑应先平仓后振捣，严禁以振捣代替平仓。振捣时间以混凝土粗骨料不再显著下沉，并开始泛浆为准，以避免欠振或过振。

使用塔（顶）带机浇筑的大仓位，应配置振捣机振捣。使用振捣机时，振捣棒组应垂直插入到混凝土中，振捣完应慢慢拔出；移动振捣棒组，应按规定间距相接；振捣第一层混凝土时，振捣棒组应距硬化混凝土面 5cm。振捣上层混凝土时，振捣棒头应插入下层混凝土 5~10 cm；振捣作业时，振捣棒头离模板的距离应不小于振捣棒的有效作用半径。

3.3.4 养护工艺

(1)长期流水养护：根据现行水工混凝土施工规范，混凝土浇筑后养护时间一般为 14d，重要部位养护到设计龄期；但三峡工程提出了更高的要求，主体工程普遍采取了长期流水养护。针对这一要求，再采用传统的人工洒水养护工艺已不能满足要求，必须推行新的养护工艺。

旋喷洒水养护适合于 28d 以内的较长间歇期仓面养护。方法是在浇筑仓面按一定间排距 d 设置 360°旋转式喷水嘴，若喷水嘴喷射幅度为 $B(m)$ 则取 $d=0.8 B$ 保持旋喷嘴始终不停地工作，即可做到长流水养护。

喷淋管(花管)养护适合于正常上升仓位的四周垂直面或长间歇期仓面养护。方法是沿仓位边线在模板上口(用于对仓面养护)或支腿(用于对侧立面养护)上铺设花管。所谓花管即在管壁上均匀布钻一排细孔的寸钢管，使用时，将管两端封堵，水雾通过细孔喷出，洒在养护面上。给花

管不停地通水，便可保持长流水养护。

(2)仓面覆盖养护：覆盖保水养护。该方法适合于大于 28 d 的长间歇仓面养护。方法是在养护仓面全面覆盖养护材料，如隔热被，风化砂或土等，给覆盖材料浸水并始终保持覆盖材料处于水饱和状态，即可满足养护要求。

覆盖洒水养护适合于夏季正常上升的仓面养护。由于仓面蒸发快，仅采取洒水养护不能满足要求，因此对仓面覆盖材料洒水养护效果较好。

(3)养护组织管理：在三峡混凝土施工中，养护与钢筋、模板、预埋件和浇筑并驾齐驱，已经成为一项工程。浇筑仓均配置专职养护人员，实行挂牌上岗。养护实施的记录由养护专业人员及时记载，并做到真实、详尽。

4. 结论

(1)根据三峡工程混凝土工程量巨大，施工强度特高的特点，混凝土浇筑选定以塔(顶)带机浇筑手段为主、大型门塔机、缆机浇筑为辅的方案，经过 1999~2001 年三年的工程实施，年浇筑强度均在 400 万 m³ 以上，2000 年实现了年浇筑 548 万 m³、月 55.35 万 m³、日 2.2 万 m³ 的一系列世界记录。

(2)为了与选定的快速施工方案相配套，确保混凝土浇筑进度和质量，相应的施工工艺和仓面配套必须变革。经过大量的研究、论证、试验和实践，全面推行仓面工艺设计，制定一整套严密的浇筑施工工艺，配备与入仓强度相匹配的仓面资源，形成了三峡工程所独有的混凝土快速施工工法。该施工工法既有工艺硬件的突破，也有管理理念的创新，体现了浇筑工艺与浇筑手段的高度协调与融合。