高大渡槽双端圆弧渐变空心墩施工技术

高 文 举， 武 毓， 王 海 源， 高 正 鹏
（中国水利水电第十四工程局有限公司，云南 昆明 650041）

摘 要：亭子口灌区一期工程第Ⅲ标项目全渠线地貌起伏较大，坡陡谷深，共设置高大渡槽 7 座，其支撑体系为双端圆弧渐变空心墩。针对这一特点，笔者以高效模板系统与周转使用的施工技术为研究对象，利用标准段液压爬模系统匹配更换双端半圆模板实现渐变爬升，通过若干个相邻槽墩组合成有限单元，在各单元间组织先高后低周转使用液压爬模系统进行流水作业的过程。该施工技术在桐子坝渡槽槽墩施工中得到了成功的应用，取得了较好的效果。

关键词：桐子坝渡槽；高大渡槽；双端圆弧渐变空心墩；液压爬模；半圆模板；有限单元
中图分类号：[TV91]；TV76；TV52 **文献标志码**： B **文章编号**：1001-2184(2024)02-0076-05

Construction Technology of Double-ended Arc Gradient Change Hollow Piers of High Aqueducts

GAO Wenju, WU Yu, WANG Haiyuan, GAO Zhengpeng
(Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd., Kunming Yunnan 650041)

Abstract: The third bid of Tingzikou Irrigation Area Fase I has a large undulating topography, steep slope and deep valleys. A total of 7 large aqueducts are set up, and the support system is double-ended circular arc gradient hollow pier. In view of this feature, the construction technology of high-efficiency formwork system and turnover use is taken as the research object, and the standard section hydraulic climbing formwork system is used to match and replace the double-ended semi-circular formwork to achieve gradual climbing. The finite element is composed of several adjacent trough piers, and the hydraulic climbing formwork system is used for flow-through operation in the organization of high and low turnover between units. This construction technology has been successfully applied in the construction of Tongziba aqueduct pier, and good results have been achieved.

Keywords: Tongziba aqueduct; Tall aqueduct; Double-end arc gradient hollow pier; Hydraulic climbing formwork; Semicircle template; Finite element

1 概 述

中国西部多以高原地形为主，具有地貌起伏较大、山峰与洼地相间、坡陡谷深的特点。在该地形条件下，许多水利工程中高大渡槽频繁出现。由于高大渡槽具有墩高线长、设计流量大、工程质量及耐久性要求高的特点，渡槽支撑体系多采用钢筋混凝土空心墩结构[1]。但在高大渡槽施工过程中，渐变类空心墩施工往往成为其安全、质量、工期的关键点。因此，选择恰当合理的施工方法是渐变空心墩成功的关键[2]；郑云[3]对桥梁变截面空心薄壁墩的异形模板系统与施工方法做出了重要的论述；王桂军[4]对奉溪大桥变截面矩形空心薄壁墩采用定型角模、通用模板加调节模板组合的方案；李轲[5]对前狼窝特大桥变截面圆端空心墩的内模板采用可调内模板进行了详细的介绍。由此可见，在高大渡槽支撑体系施工过程中，具有周转利用率与重复利用率高、安装拆除便捷、工期短、成本低的模板系统和施工方法不可或缺。

由我公司承建的亭子口灌区一期工程第Ⅲ标项目包含总干渠第 8、9、10 流量段，西干渠第 1、2 流量段以及回龙充水渠等 6 个流量段。全渠线布置的渡槽工程包括：桐子坝渡槽、金甲坪渡槽、粟家庙渡槽、唐家沟渡槽、改河坝渡槽、正沟渡槽、龚家坝渡槽，共 7 座，渡槽渠线长度为 5.7 km，槽墩墩高总长度为 4 949.98 m。其中桐子坝渡槽全

收稿日期：2023-11-25

长为 1 890 m(45 跨、42 m)，最大架空高度达 90 m，远超目前传统地面钢结构支撑体系的极限高度，且槽墩结构形式为双端圆弧渐变空心墩。针对这一实际情况，项目部技术人员通过分析研究认为：若采用全自动液压爬模施工无法有效解决外模双端圆弧段及内模渐变爬升；若采用一模到顶定制翻模施工，其安拆工程占用工期长、吊装作业频繁、安全风险高。项目部根据实际情况最终确定该工程采用“液压爬摸＋同断面更换外模双端圆弧及内模模板”的施工方法以解决一模到顶定制翻模施工工序占用时间长、资源投入大、安全风险高的问题，更适用于双端圆弧渐变空心墩爬升施工。同时，在槽墩施工过程中，为使资源投入科学、周转效率高，项目部将高大渡槽槽墩施工任务分解为有限单元，在有限单元内逐墩满配模板组织平行施工，根据浇筑完成的先后顺序将模板系统投入到下一个有限单元内的最高槽墩(优先启动对象)，依次在有限单元间循环运用先高后低、周转使用的流水施工形式，有效地错开了各墩之间同断面模板的占用，减少了定制模板的投入，降低了成本，实现了综合效益最大化。笔者以桐子坝渡槽为例，介绍了双端圆弧渐变空心墩模板系统在该工程中的成功应用。

2　双端圆弧渐变空心墩模板系统

桐子坝渡槽槽墩的结构形式为双端圆弧渐变空心墩，其圆弧渐变空心墩墩帽下的实心段为 8.5 m×4.6 m 的标准断面，横桥向 3.9 m 为固定直线段，两侧外模最小半径为 2.3 m 的半圆以 50∶1、内模以 60∶1 渐变扩大至承台顶部，通过固定直线段模板、两半圆渐变模板及架体系统三部分组成全自动液压爬模，其标准层浇筑高度为 4.5 m，模板配置高度为 4.65 m，模板下部与混凝土搭接 10 cm 以防漏浆，所有槽墩的分层保持一致。施工时，通过直线段模板与架体系统固定进行自渐变爬升，根据墩高由顶至底截取同尺寸仓位的半圆渐变模板进行匹配更换，进而实现同一个槽墩由底至顶逐仓渐变爬升的目的。同时，针对槽墩逐渐升高而槽墩内部空间逐渐减小造成直线段内模及配套背肋支撑体系使用受限的问题，将直线段模板及配套背肋支撑体系的两端设置为可伸缩调节系统，以此适应槽墩内部空间减小造成的限制。

2.1　液压爬模系统的构成

双端圆弧渐变空心墩液压爬模系统由以下五部分组成，包括：模板系统、爬升系统、液压系统、操作平台单元、预埋件。双端圆弧渐变空心墩液压爬模系统见图 1。其中外模包括可更换的半圆渐变模板与直线段标准模板，其内模根据同尺寸仓位配套使用。爬模系统选用 ZPM100 型液压爬模，高 4.65 m，标准层浇筑高度为 4.5 m，其下部搭接 10 cm，上部高出 5 cm。

爬架从下到上分为－1、＋1、＋2、＋3、＋4 共五层工作平台：

(1)－1 层(吊平台)：主要用于锚锥的拆除、修饰槽墩混凝土表面及设置出入口工作平台的支架。

(2)＋1 层(爬架平台)：为爬升装置的操作平台。

(3)＋2 层(模板平台)：主要用于模板的安装、调整、拆除以及锚锥的安装。

(4)＋3 层(过渡平台)：主要用于上下通道的过渡与拉杆固定。

(5)＋4 层(顶层平台)：主要用于未浇混凝土段的槽墩钢筋绑扎处理及混凝土浇筑时的工作平台。

2.2　液压爬模的渐变爬升工作状态

液压爬模的爬升通过液压油缸对导轨和模架的交替顶升予以实现。爬模整体固定在预埋爬锥上，在解除模架拉结杆件后进入模架升降状态时进行顶升爬模架的操作，在标准液压爬模系统爬升固定后，再进行相同尺寸双端半圆模板的更换，进而实现液压爬模的渐变爬升。

(1)爬模初始状态：导轨和模架通过在槽墩预埋爬锥的连接附墙装置进行固定。

(2)导轨顶升：退模后，在退模留下的爬锥上安装连接螺杆及附墙装置，通过调整上下棘爪的方向顶升导轨，待导轨顶升到该埋件支座后，操作人员转到下平台拆除下平台处的埋件支座与锥形接头。

(3)爬模架的顶升：在解除模架上的拉结杆件后进入模架升降状态、顶升模架。在确保导轨保持不动的条件下，通过调整上下棘爪的方向后启动油缸，模架即开始相对于导轨向上运动。通过导轨和模架交替附墙、互为提升，达到

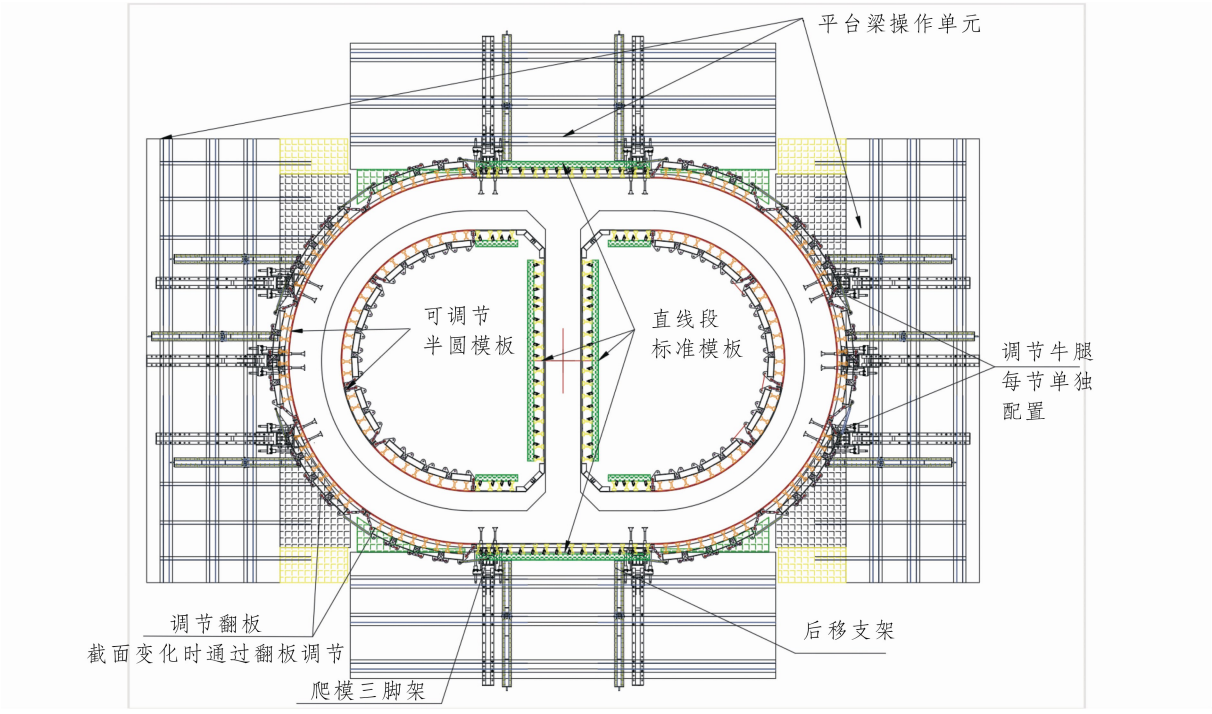

图 1　双端圆弧渐变空心墩液压爬模系统示意图

逐仓爬升的目的。

(4)双端圆弧渐变模板的更换状态:标准模板及模架系统爬升前,拆除上一阶段外模圆弧段的模板及内模模板,待标准模板及模架系统爬升后进行自调节渐变就位并匹配同断面半圆模板拼装加固,完成液压爬模的渐变爬升。

2.3　模板系统的受力分析

对于模板系统的强度、刚度、稳定性问题,通过对施工时模板系统受力分布展开验算,采用有限元软件 midas 进行模板单元建模分析,其中对模板面板采用板单元模拟,对横肋、竖肋、桁架采用空间梁单元模拟,以最不利的浇筑荷载进行模拟计算。有限元模型三维图及模拟荷载赋值见图 2。通过新浇混凝土对模板产生的侧压力,在 midas 中采用压力荷载进行模拟,对倾倒混凝土荷载采用压力荷载进行模拟,其自重由软件自动代入。

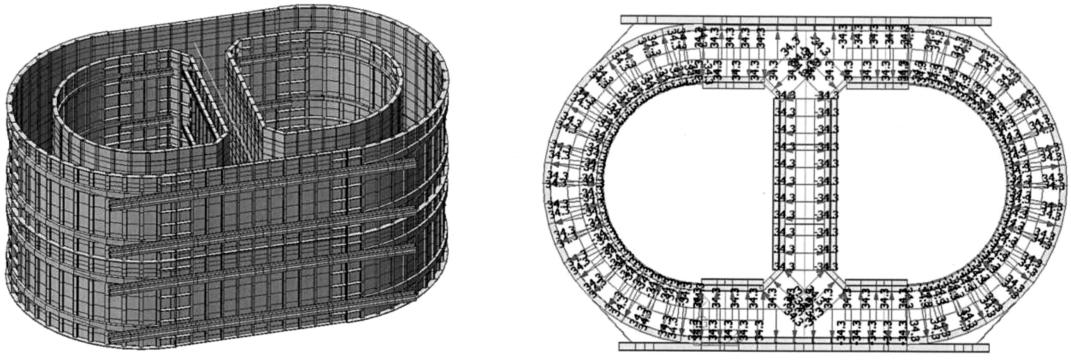

图 2　有限元模型三维图及模拟荷载赋值图

通过验算得知:该渡槽墩模板在给定的荷载条件下其模板的面板、横、竖肋、背楞所受应力值强度、刚度、稳定性的验算满足相关规范要求,验算得出该模板系统施工较为安全的结论,且其更适用于双端圆弧渐变空心墩施工。在结合有限单元间先高后低周转平行施工技术的情况下,成本投入更合理,施工占用时间明显减少。

3　有限单元间先高后低周转平行施工

桐子坝渡槽双端圆弧渐变空心墩共计有 44 个,2 个槽台,其中高度 40 m 以内的槽墩有 8 个,

高于 40 m 的槽墩有 36 个，槽墩高度的总长度为 2 438.9 m，平均墩高为 55.4 m，以 17 号墩为最高墩，最大墩高达 90 m。根据桐子坝渡槽双端圆弧渐变空心墩的特点，以每 4 个槽墩为一个有限单元配置了“4 套液压爬模系统（含标准段模板）+1 套 60 m 双端半圆模板（一模到顶定制）+1 套 90 m 双端半圆模板（一模到顶定制）”组织平行施工。以槽墩墩高由顶至底截取 90 m/60 m 定制半圆渐变模板同断面与 4 块可调节单元组合使用。在标准段模板与模架系统渐变爬升后，通过采用双端圆弧半圆模板匹配更换的方法实现液压爬模的渐变爬升。施工过程中，在首个有限单元内对 4 个槽墩匹配 4 套标准模板及爬升系统组织平行作业，2 套半圆模板作为渐变过程中更换备用，在 4 个槽墩中当最低槽墩完成后优先投入第二个有限单元 4 个槽墩中最高的一个进行施工。当第一个单元内第二个槽墩完成后将模板投入第二个单元内次高的槽墩，依次循环进行。利用单元内各槽墩浇筑完成后模板系统周转时间的先后顺序实现流水施工，缩短间歇时间。该组织方法具有模板周转使用效率高、工序占用时间少、施工成本及劳动力配置少、高墩施工安全风险低等优点，所取得的综合效益更好。

3.1　各槽墩仓位的分解

根据渡槽各槽墩墩高逐墩分解仓位，由顶至底以 4.5 m/每仓为标准仓，将墩底第一仓、墩顶仓及横隔板上下以 2.25 m/每仓作为调节仓。以桐子坝渡槽 26～33 号槽墩为例，33～30 号槽墩为 A 单元，29～26 号槽墩为 B 单元。再将 A、B 单元内 8 个槽墩以 4.5 m/每仓计算各槽墩的启动时间和占用时间。先高后低平行施工的情况见图 3。首先在 A 单元内 4 个槽墩中配置 4 套标准模板与模架系统，再由顶至底匹配同断面 2 套半圆模板，旨在为后续双端圆弧渐变先高后低周转施工打好基础。

单元			A 单元				B 单元			
			2024/10/3	2024/11/7	2024/12/12	2025/1/16	2025/2/20	2025/3/27	2025/5/1	2025/6/5
槽体造槽机施工	分仓高度(m)	用时(天)	第 33 跨	第 32 跨	第 31 跨	第 30 跨	第 29 跨	第 28 跨	第 27 跨	第 26 跨
墩位			33# 墩	32# 墩	31# 墩	30# 墩	29# 墩	28# 墩	27# 墩	26# 墩
墩高			53.25	64.50	66.75	59.85	42.10	60.10	60.10	39.75
盖梁(1.5)m、垫石、支座等	1.5	10	2024/3/17	2023/12/8	2024/3/31	2024/1/8	2024/3/27	2024/5/25	2024/8/2	2024/7/19
墩帽渐变段(1.5m)	1.5	10	2024/3/7	2023/11/28	2024/3/21	2023/12/29	2024/3/17	2024/5/15	2024/7/23	2024/7/9
槽墩第 1 仓实体段(2~2.5m)	2	7	2023/12/4	2023/11/18	2023/11/27	2023/9/19	2024/1/4	2024/2/4	2024/4/13	2024/4/27
槽墩第 2 仓(4.5m)	4.5	7	2023/12/11	2023/11/25	2023/12/4	2023/9/26	2024/1/11	2024/2/11	2024/4/20	2024/5/4
槽墩第 3 仓(4.5m)	4.5	7	2023/12/18	2023/12/2	2023/12/11	2023/10/3	2024/1/18	2024/2/18	2024/4/27	2024/5/11
槽墩第 4 仓(4.5m)	4.5	7	2023/12/25	2023/12/9	2023/12/18	2023/10/10	2024/1/25	2024/2/25	2024/5/4	2024/5/18
槽墩第 5 仓(4.5m)	4.5	7	2024/1/1	2023/12/16	2023/12/25	2023/10/17	2024/2/1	2024/3/3	2024/5/11	2024/5/25
槽墩第 6 仓(4.5m)	4.5	7	2024/1/8	2023/12/23	2024/1/1	2023/10/24	2024/2/8	2024/3/10	2024/5/18	2024/6/1
槽墩第 7 仓(4.5m)	4.5	7	2024/1/15	2023/12/30	2024/1/8	2023/10/31	2024/2/15	2024/3/17	2024/5/25	2024/6/8
槽墩第 8 仓(4.5m)	4.5	7	2024/1/22	2024/1/6	2024/1/15	2023/11/7	2024/2/22	2024/3/24	2024/6/1	2024/6/15
槽墩第 9 仓(4.5m)	4.5	7	2024/1/29	2024/1/13	2024/1/22	2023/11/14	2024/2/29	2024/3/31	2024/6/8	2024/6/22
槽墩第 10 仓(4.5m)	4.5	7	2024/2/5	2024/1/20	2024/1/29	2023/11/21	2024/3/7	2024/4/7	2024/6/15	2024/6/29
槽墩第 11 仓(4.5m)	4.5	7	2024/2/12	2024/1/27	2024/2/5	2023/11/28		2024/4/14	2024/6/22	
槽墩第 12 仓(4.5m)	4.5	7	2024/2/19	2024/2/3	2024/2/12	2023/12/5		2024/4/21	2024/6/29	
槽墩第 13 仓(4.5m)	4.5	7	2024/2/26	2024/2/10	2024/2/19	2023/12/12		2024/4/28	2024/7/6	
槽墩第 14 仓(4.5m)	4.5	7		2024/2/17	2024/2/26	2023/12/19		2024/5/5	2024/7/13	
槽墩第 15 仓(4.5m)	4.5	7		2024/2/24	2024/3/4					
槽墩第 16 仓(4.5m)	4.5	7			2024/3/11					
槽墩第 17 仓(4.5m)	4.5	7	转入 27#	转入 29#	转入 26#	转入 28#				
槽墩第 18 仓(4.5m)	4.5	7								
槽墩第 19 仓(4.5m)	4.5	7								
槽墩第 12 仓(4.5m)	4.5	7								
爬模进场、安装、拆除、转场安装完成时间		20	2024/4/6	2023/12/28	2024/4/20	2024/1/28	2024/4/16	2024/6/14	2024/8/22	2024/8/8
爬模、翻模编号			1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
承台			2023/5/15	2023/5/30	2023/5/30	2023/6/14	2023/6/14	2023/6/29	2023/6/29	2023/7/14
桩基			已完成	已完成	2023/5/20	已完成	已完成	2023/6/19	2023/6/19	2023/7/4

图 3　先高后低平行施工示意图

3.2　有限单元的划分

根据桐子坝渡槽造槽机槽体施工的流向，由下游 44 号墩向上游 1 号墩组织槽墩施工并以此划分有限单元，旨在匹配造槽机的施工进度。桐子坝渡槽共计有 44 个槽墩，以每 4 个相邻槽墩为一个有限单元，共计有 11 个单元。在第一个单元内投入 4 套标准液压爬模系统，1 套 60 m 一模到顶半圆模板和 1 套 90 m 一模到顶半圆模板作为 4 套标准液压爬模系统实现渐变爬升同断面更换备用半圆模板。如图 3 所示，在 A 单元 33 号、32 号、31 号、30 号墩内，由于 33 号墩在本单元内最低，无特殊情况时其将最先完成，完成后即可投入 B 单元最高墩（29 号墩）的施工。同理，在 30 号墩完成后投入 28 号墩，32 号墩完成后投入 29 号墩，31 号墩完成后投入 26 号墩，依次在 11 个单元内以先高后低的顺序进行周转施工直至整个渡

槽完成。该方法在减少了 2 套一模到顶定制半圆模板、降低成本投入的同时减少了各槽墩间的时间间歇。

3.3　施工工艺流程

施工工艺流程如下：施工准备→各槽墩仓位分解→第一单元确定（投入模板数量的墩位）→槽墩首节段施工→爬架架体吊装→标准段模板安装→内模、施工平台吊装→半圆模板吊装→混凝土浇筑→拆除半圆模板→架体爬升→接长槽墩钢筋及预埋件安装→标准段模板及模架系统渐变调节就位→内模平台提升就位→匹配同断面半圆模板安装→下一节段混凝土浇筑→爬架、内模平台多次提升→同步进行半圆模板匹配更换→至墩顶节段施工→爬模系统拆除→转入第二单元最高墩位→同理，进行第一单元内其余墩位的周转施工→依次进行后续单元的施工→槽墩工程施工完成。

（1）第一单元槽墩渐变爬升施工。当承台施工完毕，汽车吊就位、接长预埋钢筋、埋设爬架预埋件及临时施工预埋件（爬梯），立内、外模进行槽墩首节段施工。首节段非爬模施工工艺参考翻模法实施。在首节段混凝土达到设计要求的强度后内、外脱模，汽车吊辅助吊装爬架系统并与首节段预先埋设爬架的预埋件连接固定作为外模第二节施工支撑架。安装槽墩第二节内模施工平台，绑扎钢筋并预埋第三节槽墩施工爬架预埋件。爬架架体吊装完成后，安装标准段模板，进行内模及施工平台的吊装，完成后安装内外半圆模板，进行第二节混凝土浇筑。

（2）在第二节混凝土达到一定强度（15 MPa）后内、外脱模并拆除双端内外半圆模板。通过液压油缸对导轨和模架交替顶升实现相对运动。当爬模架处于工作状态时，导轨和爬模架均支撑在埋件支座上，两者之间无相对运动。退模后在退模留下的锥体螺母上安装受力螺栓、挂座体及埋件支座，调整上下棘爪方向顶升导轨，待导轨顶升到位后与上层埋件支座固定，操作人员转到吊平台拆除导轨提升后露出的、位于吊平台处的埋件支座、锥体螺母等。在解除爬模架上所有拉结后即可进入爬模架爬升状态，顶升爬模架，此时导轨保持不动，调整上下棘爪方向后启动油缸，爬模架即开始相对于导轨向上运动。通过导轨和爬模架交替附墙、互相提升对方，爬模架向上爬升，施工人员即可通过爬架上设置的各层操作平台进行作业。

（3）爬升就位后，加固对拉模架系统，调节标准段内外模板→接长槽墩钢筋→拆除半圆模板→架体爬升→标准段模板系统渐变自调节固定就位→更换半圆模板，重复以上作业，直至最后墩顶节段施工完成。

（4）第一单元 4 个墩位中第一个墩位完成后，进行爬模系统的拆除，根据墩位完成的先后顺序转入第二单元剩余最高墩位，剩余 3 个墩位重复本节中（1）、（2）、（3）、（4）项施工步骤直至完成第一单元 4 个槽墩的施工。

（5）根据第一单元 4 个墩位完成的先后顺序，逐步转入第二单元较高墩位进行模板周转。各单元之间如此循环施工，直至完成全渡槽最后一个槽墩。

4　结　语

该项目的实践证明：在高大渡槽双端圆弧渐变空心墩条件下采用“液压爬模＋双端渐变半圆模板一模到顶”设计，通过在有限单元内组织先高后低周转使用的施工技术，有效地解决了双端圆弧渐变空心墩液压爬升渐变的问题。同时，将高大渡槽槽墩施工任务分解为有限单元，在有限单元内逐墩满配模板组织平行施工，根据墩位浇筑完成的先后顺序确定第二单元内最高槽墩为优先启动对象，依次在有限单元间循环进行先高后低周转施工以错开各墩之间同断面模板的占用，进而减少了定制模板的投入，最终取得了模板周转使用效率好、工序占用时间少、施工成本低、资源占用时间短、高墩施工安全风险低的最大化综合效益。

另外，通过实践积累，申报了《一种空心墩施工用邻墩间模板周转调节机构》以及《一种双端圆弧渐变空心墩液压爬模组合系统》等 2 项专利；申报了《双端圆弧高墩扩大顶托＋矩形墩帽组合施工用支撑体系施工工法》以及《椭圆渐变空心墩模板系统先高后低周转组合浇筑施工工法》等 2 项施工工法，为类似工程提供了一定的参考依据，具有良好的社会价值。

（下转第 88 页）

调整有产生塑性变形的可能；对于极高应力及部分高应力洞段的Ⅳ类围岩，在其进行初期支护时，为确保隧洞施工安全，防止围岩变形量过大，增设了 Φ22 钢筋格栅拱架@1.0 m。

对于Ⅴ类围岩洞段，其初期支护采用钢拱架支撑、挂网喷锚，在开挖断面（边墙和顶拱）范围喷 C20 混凝土，厚 18 cm，并挂 Φ6.5 钢筋网@20 cm，同时在顶拱设置 Φ22 钢筋、边墙设置 Φ22 系统锚杆，L 为 2～3 m，间排距为 0.75～1.0 m；钢拱架采用 I14 型或 I16 型@0.5～1 m，锚杆与拱架相连，在其底板设置 C15 混凝土垫层，厚 20 cm。根据地勘报告，部分深埋隧洞随着开挖后应力的调整有产生塑性变形的可能；对于具有极高应力及部分高应力洞段的Ⅴ类围岩，在实施初期支护时，为确保隧洞施工的安全，防止围岩变形量过大，增设了 Φ22 钢筋格栅拱架@1.0 m。对于地质条件极差的洞段，应考虑在其顶拱 150°范围内增加超前锚杆支护的方案，Φ25 超前锚杆的 环向间距为 30 cm，长 4.5 m，搭接长度为 2.0 m，仰角为 5°～15°。对于覆盖层洞段，应考虑在其顶拱 150°范围内采用管棚超前支护方案，采用 Φ42 超前注浆小导管进行支护，其环向间距为 30 cm，管长 4.5 m，壁厚 3.5 mm，搭接长度为 2.0 m，仰角为 5°～15°。对于Ⅴ类围岩洞段，其二期支护采用 Φ25 混凝土全断面衬砌，其厚度根据洞径的不同设计为 0.3～0.5 m。

4　结　语

红层软岩洞段的开挖与支护施工是该工程施工中的重难点，其中厚层的粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩岩体破碎、强度低，性软，产生轻微扰动后即有发生较大规模塌方的可能。因此，为了确保施工安全和施工的正常进行，在地下工程施工之前有效开展超前地质预报、及早判断前方地质情况以应对突发不良地质情况及时决策是决定施工成败的关键。在施工过程中，一定要结合超前地质预报获得的信息针对Ⅴ类破碎围岩及时采取超前支护、增加超前小导管或小管棚等措施。对于施工过程中遭遇到的破碎岩体，在其开挖完成后必须尽快对岩面采取封闭措施以加强岩体的稳定性，然后逐步进行后续的系统支护施工。

参考文献：

[1] 李磊，谭忠盛，郭小龙，等. 挤压陡倾千枚岩地层小净距隧道大变形研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(2)：276-286.

[2] 沙鹏，伍法权，李响，等. 深埋隧道结构型围岩变形机理及控制研究[J]. 现代隧道技术，2018，55(3)：112-120，159.

[3] 张传庆，张洋，周辉，等. 深埋软岩隧洞围岩变形控制方法[J]. 现代隧道技术，2018，55(2)：28-35.

[4] 王才品，周勇，魏桦，等. 深埋软岩水工隧洞开挖支护设计及工程对策[J]. 大坝与安全，2021，35(3)：32-38.

[5] 赵利奎，李晓丽，冯立红，等. 滇中红层深埋软岩隧洞支护措施研究[J]. 地下空间与工程学报，2020，16(增刊 2)：737-743，761.

作者简介：

张传航（1997-），男，山东济宁人，助理工程师，硕士，从事水利水电工程项目管理工作；

杨　帆（1994-），男，四川南充人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工安全管理工作；

张晓川（1984-），男，宁夏固原人，工程师，学士，从事水利工程建设技术与管理工作；

郭一萌（1995-），女，吉林长春人，助理工程师，学士，从事水利水电工程监理工作.

（编辑：李燕辉）

（上接第 80 页）

参考文献：

[1] 谢三鸿，尤岭，李世平. 南水北调中线工程矩形渡槽设计与施工方案研究[J]. 人民长江，2010，41(16)：32-35.

[2] 彭彦彬，张彦光. 谷拉河大桥混凝土薄壁空心墩爬模施工技术[J]. 国防交通工程与技术，2005，3(3)：52-54.

[3] 郑云. 变截面空心薄壁墩模板支架翻模法施工技术探究[J]. 黑龙江交通科技，2020，43(9)：166-168.

[4] 王桂军. 变截面空心薄壁墩模板设计[J]. 城市道桥与防洪，2012，29(5)：160-163.

[5] 李轲. 变截面圆端空心桥墩可调内模板设计与施工研究[J]. 铁道建筑技术，2013，51(增刊 2)：49-51.

作者简介：

高文举（1991-），男，贵州威宁人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

王海源（1991-），男，云南红河人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

武　毓（1992-），男，甘肃白银人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

高正鹏（1997-），男，云南保山人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工技术与管理工作.

（编辑：李燕辉）