

南水北调中线工程几个技术问题的解决与思考

汪易森

(国务院南水北调工程建设委员会 专家委员会, 北京 100038)

摘要: 根据南水北调中线一期工程建设过程中的科技攻关, 本文重点介绍了长距离自流输水线路输水型式选择、施工测量控制、混凝土重力坝再加高和软基中承受内水压力的水工隧洞设计施工中的几个关键技术问题, 系统阐述了上述关键技术问题的解决思路和作者的再思考。

关键词: 南水北调中线工程; 输水型式; 测量控制保障系统; 大坝加高; 软基中水工隧洞

中图分类号: TV68

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860(2015)06-0079-08

Consideration and solution of several technical problems of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project

WANG Yisen

(The South-to-North Water Diversion Project Construction Commission of the State Council, Beijing 100038, China)

Abstract: In accordance with the scientific and technological breakthroughs made during the construction of the phase I of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, several key technical problems encountered during both the design and the construction of the project, i. e. the selection of the type of water conveyance for the line of long-distance water transfer with gravity flow, the control of construction survey, the further heightening of the concrete gravity dam and hydraulic tunnel under internal water pressure in soft soil foundation, etc., are emphatically described herein, and then the solving considerations and the author's rethinking on the key technical problems are systematically expatiated as well.

Key words: the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project; water transfer type; survey control and guarantee system; dam heightening; hydraulic tunnel in soft soil foundation

1 概述

南水北调中线工程南起丹江口水库陶岔进水闸, 北至北京市团城湖和天津市外环河, 线路总长约 1 432 km, 除北京、天津段采用地下管涵外, 其余均采用新开挖渠道输水(见图 1)。全线仅利用百米左右的水位落差, 自流输水到河南省、河北省、北京市、天津市。为保证输水水质安全, 中线总干渠与沿线河流、道路全部立交, 逢山开洞、遇水架槽, 共布置河渠交叉、渠渠交叉、路渠交叉建筑物和控制性建筑物(分水口门、节制闸、退水闸)及其他建筑物(隧洞、埋管、泵站)约 2 300 余座。

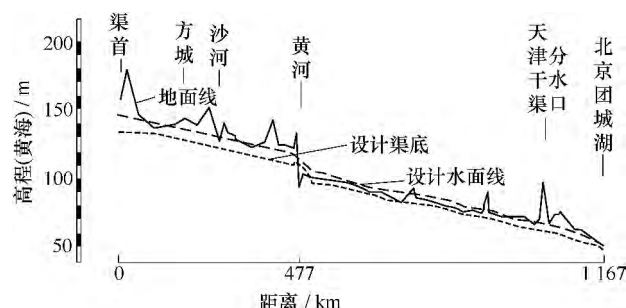


图1 南水北调中线工程输水干线纵断面示意

中线工程建设过程中碰到许多工程技术难题, 重

收稿日期: 2015-04-16

作者简介: 汪易森(1944—), 男, 教授级高级工程师。

大关键技术问题主要有超长输水线路输水型式选择及水力控制、自流输水线路施工测量控制、丹江口大坝再加高、穿黄隧洞、特大型渡槽和倒虹吸、大型 PCCP 输水管道、输水渠道膨胀土边坡处理、高填方渠段风险处理、煤矿采空区安全处理等。本文仅就其中几个问题的攻关体会,谈谈关键技术问题的解决思路与再思考。

2 自流输水安全对策措施

2.1 输水形式选择

南水北调中线工程输水形式比选时曾考虑过全线渠道、全线管涵、明渠与局部管涵相结合等多种输水方式,明渠方案调水量大、工程投资少、水价低,可在丰水年加大流量输水,便于兼顾农业和生态用水,但占地较多,水量损失较大,需要采取输水安全保障措施。管涵方案水量损失小、占地仅为明渠方案的 1/10,输水安全性高,但与明渠同等输水规模条件下,投资和水价均高出一倍以上,且难以兼顾农业和生态用水。经技术经济综合分析比较,总干渠采用以明渠为主、结合局部管涵的方案。明渠部分全断面衬砌,与交叉河道全部立交。北京段因交叉建筑物密集,天津段因坡降较陡,需穿越大清河分蓄洪区等原因,采用管涵输水。国务院批准的《南水北调工程总体规划》中肯定了这一方案,明确指出“中线工程地理位置优越,可基本自流输水。”

2.2 保证自流输水安全的对策措施

自流输水的优点是运行期不消耗能源,可节约运行成本,但对于长距离、大流量输水线路,输水渠道不可避免将出现填方和挖方甚至高填方和深挖方渠段,尤其是高填方渠段(见图 2),必须绝对保证输水安全。

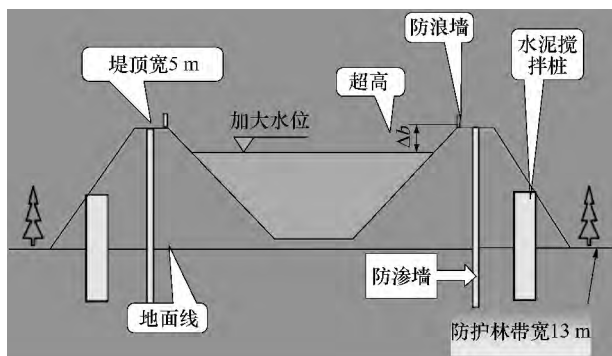


图2 典型高填方渠道剖面示意

为了保证中线填方渠道输水安全,中线工程专题进行了全线输水风险分析,并采取了多种加强高填方

渠道输水安全的保障措施,各种加强措施归纳起来可描述为“设计标准、适当提高;节制灵活、退水有槽;防渗排水,各司其道;基础处理、坚实可靠;填料合格、压实质好;堤防穿越,严禁渗绕;安全监测,及时警报。”

“设计标准、适当提高”是指填方渠道的安全超高、堤顶宽度、内外边坡、衬砌厚度、铺膜厚度等均根据风险情况高于国家标准和南水北调工程技术标准规定。

“防渗排水,各司其道”是指全面复核填方渠段的渗流稳定,确保防渗系统和排水系统的完整性,根据复核结果加强贴坡排水反滤设计,在贴坡排水的外坡脚附近设置渗流排水沟。

“节制灵活、退水有槽”是指工程发生突发事件时节制闸能及时关闸,退水闸能有效退水,必要时增设高填方渠段退水闸。

“基础处理、坚实可靠”是指要求施工要坚决按照设计要求进行填方渠道基础的湿陷性黄土状土处理、饱和液化砂土处理及宅基地人工杂填土处理,确保不因基础处理不到位引起堤身的不均匀沉陷。

“填料合格、压实质好”是指保证填方渠道的填筑料或回填料质量合格,填筑含水率、干密度满足设计要求;水平分层填筑,严格控制层厚;碾压机具功能强大,碾压遍数合格;高填方渠堤填筑时要先超宽后削坡等。

“堤防穿越,严禁渗绕”是指渠道与穿堤建筑物结合部位的开挖填筑要符合相关规定。另对于渠道填方段缺口处填筑接头要有专门的设计,渠道分段施工时衔接部位新老填土接坡要缓,缺口的接触面要做专门处理,缺口填筑后到混凝土衬砌板施工间要留足够的预沉降期。

“安全监测,及时警报”是指加强高填方渠道的安全监测设计,适当增加监测断面及监测点,及时监测沉降、位移、渗流状态和工程发生的不均匀沉降、裂缝等异常现象,做好渠道的应急预案设计,要通过现代信息手段及时报警。

2.3 对于大型输水工程输水形式选择及对策措施的再思考

目前国内多项处于前期审查阶段或近年来已建成的大型调水工程都有一个共同特点,即为了节约运行期抽水费用,尽可能采用自流输水。为此,从水源取水工程开始,输水线路尽可能沿高位布置输水隧洞、渡槽和倒虹吸等输水建筑物,在山体中建设隧洞输水是个好办法,但输水洞进出口高程越

高,山体之间连接建筑物渡槽和倒虹吸的布置高程也就越高。有些工程设计中,连接隧洞的高架渡槽下部结构已高过地面百米以上,倒虹吸支架高度高达几十米也是常有的事,这些建筑物如果布置在高烈度地震区,所跨越的河谷又是城镇和人口密集地区,应在项目前期设计阶段中增加工程运行风险分析的相关内容,如果在某些方面确实存在较大风险又无法考虑替代方案时,经过论证分析,应当采取南水北调中线的对策,提高相应的设计标准和严格控制施工质量。

3 超长输水线路施工测量控制网

利用百米左右的水头实现中线一期工程全线基本自流输水,就要对输水全线统一进行水头分配,严格控制渠道和建筑物的水头损失。对于渠道而言,最重要的是严格按照水力计算要求进行渠道断面和纵坡施工。为此,就必须在“全面控制、统一设计、整体实施”的原则下,沿总干渠全线布设高精度施工测量控制系统,为渠段和建筑物的施工提供统一的测量保障。

3.1 南水北调超长输水线路施工控制网建网方案

现有国家大地控制网主要为满足国家基本比例尺地形图测图和地球科学研究需要,不可能为服务于某一具体工程而进行国家大地控制网的设计。南水北调中线一期工程是通过布设首级施工控制网来建立国家控制网与工程测绘的联系,同时也为全线施工提供统一的控制基准。首级施工控制网建立与国家控制网统一的坐标系,并限制测量误差的积累,保证施工测量精度,同时为工程竣工测量、变形监测等提供测量控制基准。

南水北调中线工程首级施工控制网平面控制采用 GPS B 级网作为骨干网,骨干网与 GPS 永久跟踪站联测,然后在骨干网的控制下布设 GPS C 级网作为总干渠全线首级平面施工测量控制网,并且均匀地联测国家一、二等平面控制点。首级施工控制网首先在 WGS-84 坐标系下进行整体平差(保持 GPS 网的原有精度),然后分区求 WGS-84 坐标与 1954 年北京坐标的转换关系,并实现分区间无缝连接。建筑物施工控制网独立挂靠于总干渠首级施工控制网上,既保证建筑物控制网的高精度,又利于渠道与建筑物的连接。这种布网,有效地控制了测量误差的累积,能获取高精度的 WGS-84 坐标系和 1954 年北京坐标系坐标,也方便国家坐标系向工程坐标系的转换,同时也可以检查施工坐标与设计坐

标的一致性。首级施工控制网高程控制采用二等水准精度布网,经论证能满足因总干渠纵坡比小对测量提出的特殊要求。根据渠道沿线国家水准点的稳定性和一等水准三期观测动态平差成果,选择变化速率小的一等水准点作为已知点,同时对不同期的高程成果,运用数理统计理论进行垂直位移显著性的检验,以确保所采用已知点的点位稳定,数据可靠。

根据该方案建成的跨越长江、淮河、黄河、海河 4 大流域总干渠首级施工控制网是国内外覆盖范围最大的高精度水利工程施工控制网系统。

3.2 长距离输水施工控制网坐标系统选择

高斯投影是一种视地球为球体的横轴等角切圆柱投影,将横圆柱面展开成平面,子午线在圆柱面上的投影线和赤道面与圆柱面的正交直线构成高斯-克吕格平面直角坐标系。为减少投影变形,高斯-克吕格投影一般分为 3°带和 6°带投影。我国的经度范围西起 73°东至 135°,可分成六度带十一带或三度带二十二带。

南水北调中线工程设计阶段测量采用的 1954 年北京坐标系(3°带),其边长设影误差满足不了施工测量要求,为减小边长设影误差,南水北调长距离输水渠道工程施工控制网坐标系统决定采用 1954 年北京坐标系统(1°带)、建筑物采用挂靠 1954 年北京坐标系(1°带)的独立坐标系统方案,并对采用 1°带坐标系统的边长投影变形进行了数据分析,其结果既满足规范对控制网边长的精度要求,又保证了建筑物坐标系统和渠道坐标系统的有效连接,同时还能保证规划、设计、施工阶段资料使用的连接性和前期成果转换的方便性。这也是在国内大型水利工程施工测量中首次采用 1954 年北京坐标系(1°带)独立坐标系统方案。

3.3 国家控制点稳定性分析及解决控制成果不兼容问题

南水北调中线干线通过的区域地质条件较为复杂,为保证国家控制点有足够的稳定性,根据总干渠沿线国家一等水准点的三期测量成果,通过计算 1~3 期水准成果年速率,年速率变化对测区内国家一等水准点进行稳定性分析,选择稳定性好的国家一等水准点作为施工控制网的高程起算点。

国家大地控制网分级、分阶段建成,不同等级、不同期控制点间存在不兼容问题。通过对数据处理方案的研究,研究了国家三角测量控制成果不兼容对大型水利工程测量的影响问题,并提出了在

生产中处理控制成果不兼容问题的方案。将 C 级网分为三段: 北京段、石家庄以北段、石家庄以南段。分别对每段进行 1954 年北京坐标系下的网平差。将一部分已知点作为未知点参加平差, 根据平差坐标与已知坐标的差异来判断不兼容的程度, 对兼容性特别差的已知点进行剔除; 然后采纳剔除后剩余的已知点进行网平差, 由于已知点之间仍然存在一定程度的不兼容性, 平差结果可能使控制网发生局部的扭曲, 为克服控制网局部被扭曲, 选用较远的两个网点(其中一点是非已知点)的平差坐标作为新的已知数据对该段的控制网进行第二次平差。第二次平差效果等价于将控制网进行了相似变换, 使其附合在选取的两个作为新已知点的网点上, 从而避免 GPS 网在原已知点附近的扭曲变形, 保持了网点之间相对位置精度的均衡性。当原已知点的平差值与已知值之差 $< 0.14 M$ (M 为测图比例尺分母), 认为第二次平差成果有效。否则, 剔除超限的已知点, 重复第一次平差和第二次平差, 直至达到要求为止, 实践证明, 这是一种简单易行的对已知点不兼容性的处理方案。

3.4 高精度 GPS 短边混合网平差模型研究及平差软件的开发应用

利用 GPS 数据处理模型及 GPS 数据的特点, 进行了高精度超短边长的 GPS 混合网平差数字模型研究与软件开发, 并通过已完成的类似工程数据进行实验, 使之不断优化、完善, 解决了南水北调中线工程中交叉建筑物施工控制网的平差计算问题。开发的《GPS 短边混合网平差软件》能对水准测量、三角高程测量、边长测量、角度测量及 GPS 观测进行综合处理, 并能对长距离水准测量进行日月引力改正计算。

3.5 对建立超长输水线路施工测量控制网的再思考

(1) 南水北调工程筹建初期, 国务院南水北调办技术领导就提出要为工程建立一套全线统一的高精度施工测量控制系统, 对此相当多的单位和人员不理解, 有些专家认为, 勘察设计系统已经建立的各省分散的测量网可以作为全线施工控制网使用, 不必再建立统一的控制网。事实证明, 对于大型长距离自流输水工程, 没有一个全线统一的高精度测量控制系统, 就不能保证在渠道纵坡比较小的情况下(一般为 $1/25\ 000$, 部分地区达到 $1/30\ 000$), 能够利用南高北低的地形条件, 实现自流输水。所以在南水北调工程建设初期, 建立全线统一的高精度施工测量控制系统是十分必要的。

(2) 委托水利部长江勘测设计研究院设计, 并由南水北调中线建设管理局组织实施的南水北调中线一期工程总干渠首级施工测量控制网设计方案周密, 各项技术指标满足规范要求, 具有创新性。该系统不但在工程施工期间为不同施工单位、不同施工区段提供了施工放样依据, 为各工程建设监管单位提供了监管依据, 同时在验收阶段也成为工程验收的重要依据。

4 重力坝大坝加高关键技术

国内外重力坝加高形式一般分为后帮式、前帮式、外包式、坝顶直接加高等四种方式。丹江口大坝加高即采取后帮式(见图 3), 系在老坝坝体下游面向下游扩大坝体断面、增加坝体厚度, 同时加高坝顶到设计所需的大坝高度。

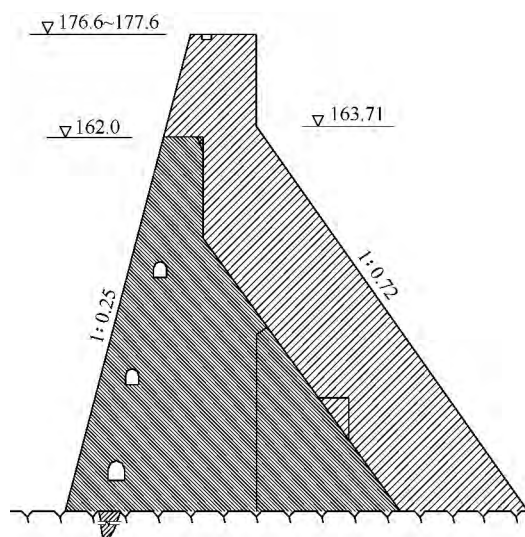


图3 丹江口挡水坝段后帮式加高(单位: m)

丹江口大坝加高时, 由于后加高系从初期坝体下游增厚和加高坝体, 故加高过程中初期坝始终处于限制挡水状态, 初期大坝仍可承担加高前的一部分汉江中下游防洪、发电等任务, 但在非汛期混凝土浇筑期间要对初期坝前蓄水位作适当限制。

混凝土重力坝加高有别于一般重力坝建设, 有一系列工程技术问题必须研究解决, 这些问题贯穿在大坝加高前的工程调查与处理、大坝加高工程设计、大坝加高工程施工三个阶段中。

4.1 大坝加高前的工程调查与处理

大坝加高工程前工程调查主要是地形、地质勘察和已建坝体缺陷调查, 地形、地质勘察内容与新建大坝类同, 重点是下游侧加厚坝基岩条件和坝基抗滑稳定计算参数的复核。已建坝体缺陷调查要重点调查初期大坝施工缺陷和初期运行问题, 运行

中的漏水量、变形量和坝基扬压力实测值等初期大坝现状。

丹江口初期工程于1958年9月开工,1974年2月完工。受当时技术水平、经济条件及政治环境的影响,施工中出现了部分架空、冷缝、强度不合格、裂缝等质量缺陷。在加高前及加高过程的裂缝检查中相继发现裂缝近千条。根据裂缝长度、深度、宽度、部位进行分类并提出处理要求,由于大坝上游面裂缝,对大坝应力、稳定条件造成直接影响,处理时重点采取防水、排水减压措施,丹江口大坝加高时裂缝分类及处理情况如表1所列。

表1 丹江口大坝加高时裂缝分类及处理情况

类别	判别条件	处理措施
I类	$\delta < 0.2 \text{ mm}$, $h \leq 30 \text{ cm}$	一般不作处理
II类	$0.2 \text{ mm} \leq \delta < 0.3 \text{ mm}$, $300 \text{ cm} \leq h < 1000 \text{ cm}$, $3000 \text{ cm} \leq L < 5000 \text{ cm}$	浅层化灌或仅作缝口封闭
III类	$0.3 \text{ mm} \leq \delta < 0.5 \text{ mm}$, $1000 \text{ cm} \leq h < 5000 \text{ cm}$, $L \geq 5000 \text{ cm}$	进行灌浆处理,设置钢筋网,大坝上游面裂缝需采取防水措施

注: δ 、 h 、 L 分别为裂缝宽度、深度和长度。

丹江口初期大坝局部还存在混凝土“蜂窝”和“狗洞”等缺陷,对于表层深度小于50 cm的混凝土缺陷一般采用凿除后回填预缩砂浆或环氧砂浆(用于过流表面)方式进行处理;对于深度大于50 cm的混凝土缺陷则清除松动块体,设置分布杆筋,采用预缩砂浆或细石混凝土填充。而对于深部“蜂窝”和“狗洞”一般采用水泥进行灌浆处理。

丹江口溢流坝段闸墩须进行结构性加固,根据审查要求在混凝土内植入钢筋,比较了多种植筋方式后最终采取钻孔植筋加固闸墩纵向钢筋(见图4)。

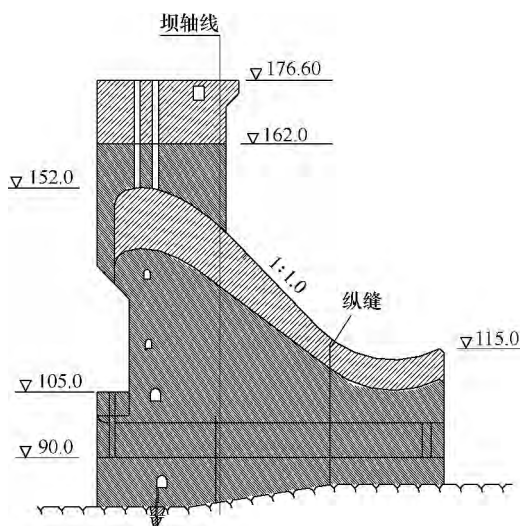


图4 丹江口溢流坝段加高(单位: m)

4.2 大坝加高工程设计

大坝加高工程设计主要包括新老坝体结合面构造设计,分期加高坝体应力计算及抗滑稳定计算和混凝土温控与防裂措施设计。

新老混凝土结合面结构和处理方式与大坝断面设计要求的新老坝体结合面状态相一致。如按整体式受力设计,则要求加高后的大坝在运行期间,新老坝体能结合在一起并协调变形,在进行结合面处理设计时,应设法尽量提高结合面的结合强度。如按半分离受力设计时,则允许加高后的大坝在施工及运行期间,新老坝体结合面裂开,但可通过结合面的一系列构造措施,使新老坝体在结合面处的相对变形受到一定的约束作用,新老坝体按设计要求传递剪力和推力,在进行新老混凝土结合构造设计时,与整体式没有本质差别,但在锚筋布置和结合面缓冲层方面可适当简化。

采用材料力学法进行加高重力坝断面设计时必须做如下假定,即假设大坝加高后新老混凝土为整体;忽略新混凝土硬化收缩引起的体积变化;忽略新老混凝土物理性质差异;大坝降低水位进行加高施工时,老坝体承担水荷载作用,新混凝土在硬化过程中只承受自重作用,加高后新老坝体共同分担荷载,坝体、坝基应力由应力迭加产生。国外曾通过大量有限元计算证明,上述假定对设计成果虽有一定的影响,但仍在可接受范围内。大坝加高设计中,还应结合大坝加高施工过程采用有限单元法对加高后大坝的工作状态进行全面分析研究,但分期加高大坝的有限元应力计算涉及到在加高时初期大坝的应力状态和温度场、新老坝体材料的物理力学性能差异,新浇混凝土施工时的温度环境,新老坝体之间的结合面构造等许多因素,因此,大坝加高工程的坝体有限元应力计算远比一般的大坝复杂。

采用后帮方式进行大坝加高重力坝稳定分析时,若老坝处在挡水条件下,加高时老坝已承担了加高期间与水库水位相应的水压力作用,大坝加高后将进一步承担一部分因水库蓄水位抬高增加的水压力,从大坝总体而言,加高后的大坝水平断面上剪应力分布特点与一次建成后蓄水条件下大坝水平断面上的剪应力分布特点存在较大的差别,如果仍采用整个大坝综合计算大坝的稳定,则有可能由于水平截面上剪应力分布不均匀性,导致一部分区域粘结强度提前破坏或安全系数偏低,故坝体稳定分析应区别对待。丹江口大坝加高设计时,一是采用有限元法计算成果,将老坝和扩大断面水平截面上

的正应力和剪应力各自分别积分得出 W 和 Q ，分别按规范推荐的公式对老坝和扩大坝体进行抗滑稳定分析，其安全系数按老坝和扩大部分均满足现行规范要求控制；二是对于大坝建基面稳定分析时，当加高坝体坐落于基岩面，可适当提高抗滑稳定复核安全系数的控制标准。

混凝土温控设计较一般重力坝复杂，因为重力坝加高时，初期坝体混凝土温度已降至稳定温度，加高工程在初期混凝土坝体背面进行大面积的贴坡混凝土浇筑，新混凝土的水化热会导致温度上升并在冷却到稳定温度场的过程中产生收缩，其收缩受到老坝体和基岩的约束，将在沿老坝体和基岩的接触面产生拉应力，同时在已建坝体下游面产生压应力，作为其反作用，已建坝体下游面挠曲，上游面则产生拉应力。因此新老混凝土温度控制是大坝加高的重要环节，应尽量减小坝体下游贴坡混凝土降温收缩对坝体应力特别是上游应力的影响；应保证新浇混凝土不发生危害性裂缝。为此，大坝加高除采取有效的结构措施外，还应采取严格的施工温控措施，限制新混凝土的最高温度，合理地控制新老混凝土的温差。

4.3 大坝加高工程施工

大坝加高施工主要包括施工度汛、大坝坝基开挖、问题混凝土的拆毁和新老混凝土结合面处理等几部分。

为确保大坝加高工程施工期间工程安全，通常要求大坝加高施工度汛标准不低于初期工程的运行标准。大坝坝体加高施工期间，大坝下游面的坝基开挖，枢纽工程的所有挡水建筑物均应满足大坝加高期间施工度汛挡水要求，在每年汛前，过流部分新加高的坝体混凝土龄期和强度应满足过流要求。堰顶加高可能影响表孔汛期泄洪能力，与水库防洪相关的防洪限制水位、度汛水位均应与表孔加高后的过流能力一致。

丹江口大坝加高部分的坝基开挖在一期工程期间已完成，故本次未进行专门的坝基开挖设计，一般而言，由于新坝基础开挖是在初期大坝附近进行的，所以应严格限制新加高大坝基础开挖对原坝址的影响，禁止使用爆破施工或严格限制爆破振动速度。

大坝加高新浇混凝土施工前，对老坝与加高坝体结合面区域老混凝土面应进行清理，拆毁混凝土作业需要专业性施工，坝面清理施工作业时，对与清理面相通的孔洞应进行妥善保护，防止堵塞处理，应在坝面以下适当的高度设置安全网，防止混凝土块下坠，

破坏大坝下部结构和设施。施工期间，应对非拆除大坝设施和设备进行妥善保护，并必须保证原有建筑物构件和设备的正常使用，清理施工一般可用人工或机械作业，严禁锤击。新老混凝土结合面需要新增键槽时，键槽施工只能采用人工或机械静力切割法形成键槽，不得对大坝结构造成损伤，对采用切割方法施工形成的键槽，应将键槽表面进行人工凿毛，并不应残留切割缝根。新老混凝土结合面除结合面处理外，还要十分重视老混凝土止水、排水施工处理，确保无漏水进入新老坝体结合面。

4.4 对重力坝加高工程设计施工的再思考

(1) 选择重力坝加厚加高部分的经济断面的三个原则，一是大坝加高完成蓄水后，应力迭加的坝体上游面最小主压应力小于规定值；二是保证规范要求的坝基抗滑稳定安全系数；三是决定加高坝体下游坡度时还要考虑加高施工的允许库水位降低。丹江口大坝加高审查时，考虑到大坝施工中上游面要保持一定挡水位，新老混凝土实际上存在结合面等特殊情况，要求设计单位突破我国现有重力坝规范规定，对挡水坝段坝基抗剪断安全系数取用 3.5，实践证明这一决策有利于新老坝体结合面传力。

(2) 大坝加高过程中最重要的问题是如何进行混凝土温控。重力坝加高如果每立方米混凝土中含 200 kg 水泥，每公斤水化热量约 70 ~ 80 K，则丹江口大坝加高 100 万 m^3 混凝土产生的热量相当于燃烧 2 000 t 煤释放的能量。在热量产生到消散的过程中，坝的体积相应会发生膨胀和收缩，由于受到老坝体的约束，在新坝体上游面在混凝土收缩过程中会产生拉应力，老坝体下游面产生压应力，其反作用使老坝体下游面受弯，上游面受拉，处置不当会产生坝踵裂缝，破坏大坝防渗设计。

(3) 随着社会经济的不断发展，建坝目的从以防洪、发电为主逐步向供水和水资源综合利用为主方向变化，库容加大和功能变更将使大坝加高将成为一个新的专业类型。应当结合丹江口大坝加高科研、设计和施工及今后的运行观测，认真总结我国大坝加高工程的经验教训，早日制定我国大坝加高相关设计规定。

5 软基中承受内水压力的水工隧洞结构型式选择

穿黄工程过河建筑物的型式选择是关键技术问题之一，设计单位经对隧洞和渡槽两种型式深入研究后，认为穿黄隧洞方案将行洪断面宽度缩窄至 3.5

km, 对穿黄河段河势与防洪条件无实质性影响; 隧洞深埋于河床中, 越出砂层震动液化范围, 低于河床最低冲刷线, 不存在冲刷影响隧洞安全问题。最终选定的结构形式为隧洞方案。穿黄隧洞起自黄河南岸荥阳县王村的 A 点, 终点为北岸温县马庄东的 S 点, 全长约 19.3 km; 工程设计流量为 $265 \text{ m}^3/\text{s}$, 加大流量为 $320 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计工况下可利用水头为 10 m。主要建筑物包括南岸连接明渠、退水建筑物、过河建筑物、北岸河滩明渠、连接明渠等, 按一级建筑物设计。

5.1 软基中承受内水压力水工隧洞的合理结构型式

软基中的水工隧洞既承受外部水土压力, 又承受较高内水压力, 能够采用的结构形式大致可分为四种, 即内外衬砌分担荷载的常规结构、外衬和内衬分离式结构、外衬和内衬一体化结构和单一衬砌结构。这四种结构形式各有特点, 应当结合工程实际选择。

5.1.1 内外衬砌分担荷载的常规结构

这种结构形式先施工隧洞外衬, 后施工内衬, 随着内衬混凝土硬化收缩, 在两层衬砌之间会有一定间隙, 外部水土压力和内部水压力由两层衬砌分担, 但是两层衬砌各分担多少, 取决于在荷载作用下内外衬砌的实际变形。由于结构受力实际情况与计算情况难以一致, 加之内衬如产生裂缝, 内水外渗, 则内水压力可能直接作用于外衬, 难以实现外、内衬分担荷载的设计理念。软基中施工的隧洞工程很少采用这种结构型式。

5.1.2 外衬和内衬一体化结构

这种结构型式外衬和内衬联合受力, 共同承担内部水压力和外部水土压力。如何使先后分两次施工的两层衬砌共同受力, 一种设想是内、外衬通过榫接头(合缝销钉或暗榫等)相互结合在一起, 尽可能减少两层衬砌的变形不协调性, 但是榫接头设计也成了必须重点研究和试验的问题; 另一种设想是在内、外衬间通过大量插筋相连接, 保证两层衬砌间的变形协调, 但插筋的一端在外衬管片手孔回填混凝土中, 另一端在内衬的混凝土中, 其间隙 Δ 自由变形量级很小, 内衬预应力张拉后, 内、外衬间内缩变位差 δ 与 Δ 同属一个量级, 可能引起拉筋屈服, 故采用拉筋作为两层衬砌一体化的设计方案也必须经过相应的试验研究证实后才能采用。

5.1.3 外衬和内衬分离式结构

这种结构型式是在外衬和内衬之间增设弹性垫层, 使两层衬砌完全分开受力, 外衬承担外部水、土

荷载, 内衬承担内部水压力, 内外分开, 受力明确, 剪力和变形在两层衬砌间不相传递, 内衬不得产生渗水裂缝, 弹性垫层既要隔离两层衬砌又要方便施工。这种结构型式除要求施工中要严格保证内、外衬工程质量外, 还要严格控制从各种管段接缝和封堵孔洞外渗到内外衬砌之间的水量不得超过设计排水容量。

5.1.4 单一衬砌结构

采用单一衬砌承受内、外水土压力的结构时, 一般采用盾构施工水工隧洞, 管片拼装后的隧洞衬砌将成为水工隧洞的唯一衬砌, 承担所有的内外荷载。上海青草沙水库源水输送水工隧道是我国首次采用盾构法单层衬砌输水工程。设计部门需要系统研究单层衬砌结构的设计荷载、承载能力与使用性能等问题, 通过管片直接头试验和接头部位夹片试验验证关键节点和构造的可行性和有效性, 验证结构计算和接头设计的合理性, 以及提出对施工质量控制的相关要求。

穿黄隧洞可以选择的结构形式, 一种是外衬和内衬一体化结构, 施工期外衬单独承受外围土、水压力和施工荷载, 运行期内外衬共同承担内、外水压力和黄河河床冲淤变化等附加荷载; 二是外衬和内衬分离式结构, 两层衬砌间由防排水垫层分隔, 相互独立工作, 外层衬砌主要承受外围土、水压力和黄河河床冲淤变化引起的附加荷载; 而内水压力则主要由内层衬砌来承担。

穿黄隧洞系从游荡性河道的软基中穿过, 大约有 $1/3$ 洞段为砂层(见图 5), 隧洞内水压高于外水压约 20 m, 结构受力条件较复杂, 如果内外衬联合受力, 外衬环向(或管片间)必然存在拉应力, 万一外衬管片接缝渗水, 势必出现渗水洞段压力水外渗, 管节就可能因不均匀沉降而破坏。内外衬各自独立受力可以保证外衬管节始终处于外水压力作用下保持环向受压状态, 即使有接缝缺陷, 渗水也是由外向里渗漏, 可保持外部砂层的稳定。考虑到以上情况, 设计单位在穿黄方案比选、立项、可行性研究、初步设计和招标设计阶段均推荐采用内、外层衬砌间设置防排水垫层的双层结构隧洞, 即外衬为拼装式钢筋混凝土管片结构, 混凝土等级 C50, 厚度 40 cm; 内衬为现浇有粘结预应力混凝土结构, 混凝土等级 C40, 厚度 45 cm; 内、外衬由弹性排水垫层分隔, 分别独立工作。该方案经水利部审查批准作为南水北调中线一期工程穿黄技术方案。

5.2 对于衬砌分离式结构混凝土施工难点及对策措施的再思考

(1) 穿黄隧洞外衬为盾构施工的分块拼装结构,

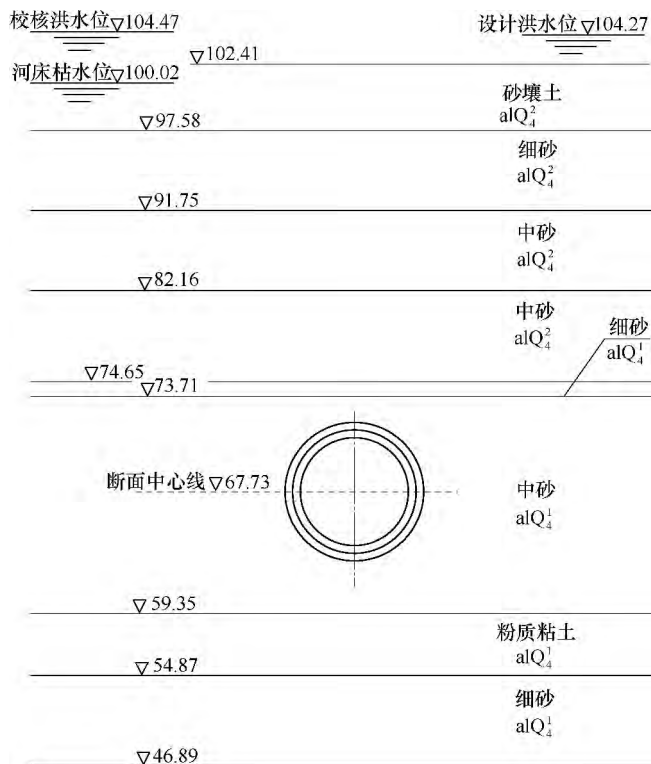


图5 穿黄隧洞剖面布置(单位: m)

管片接缝众多,而内衬又承受高内水压力,如发生内水外渗,将会造成外衬接缝张开,导致洞外砂土渗透破坏,危及隧洞安全。据设计分析,当内外层间渗压水头接近外压水头90%时,外衬纵缝将处于临界张开状态,由于拼装式外衬接缝面仅有螺栓联系,故外衬拼装式管片结构有可能发生失稳。内衬与外衬界面间虽然布置有可排水的弹性垫层,但仅用于排放少量渗水。这种结构形式要求施工中必须严格保证内衬的水密性,堵塞每一处可能的渗漏通道,其中包括内衬管节间结构缝、先浇底板再浇边顶拱形成的纵向施工缝、回填灌浆孔、通信光缆手孔和监测电缆手孔以及南、北岸竖井与隧洞接缝部位等。从防渗不留死角观点出发,施工中要认真做好每一处缝、洞的检查和堵漏,为此施工中堵漏防渗工作量十分庞大。

(2) 外衬和内衬分离式结构的内衬采用现浇法施工,多采用后张法预应力钢筋混凝土整体结构。南水北调采用有粘结预应力结构,施工时由于常规钢筋、预应力钢丝、波纹管 and 锚具槽等几乎充斥整个模内空间,尽管可以考虑钢模台车多开孔、边顶拱衬砌混凝土采用一级配、适当改变坍落度参数等措施,但实际施工中仍感混凝土浇筑十分困难,如何采用高新混凝土技术,加强施工管理成了工程关键。

日本和欧美各国已有近20年的自密实混凝土研究应用历史,我国自密实混凝土的研究应用虽处于起步阶段但发展迅速。自密实混凝土成功应用的关键是要选择一个既满足设计指标要求又与当地混凝土原材料相适应的优良配合比,穿黄工程内衬施工前,国务院南水北调专家委员会曾邀请清华大学安雪晖教授专题介绍国内外自密实混凝土研究应用情况,并建议建设单位委托清华大学针对穿黄隧洞内衬进行自密实混凝土配合比设计研究,将其用于南水北调中线穿黄隧洞内衬混凝土施工中,后由于各种原因,来自清华大学的自密实混凝土研究成果最终未能在南水北调穿黄隧洞施工中得到应用,但上述技术思路和建议可供其他类似工程参考。

6 结 语

南水北调中线一期工程已于2014年12月12日实现了全线通水,在关注这一举世瞩目的工程给中国水资源配置带来社会经济效果时,也应该关注工程建设中的科技创新和经验总结,总结成功经验、避免再走弯路,不但有助于更好更快地实施调水工程建设,也必将有力地推动我国水资源优化配置工作更上一个新台阶。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会,水利部. 南水北调工程总体规划[R]. 北京: 国家发展和改革委员会,水利部.
- [2] 汪易森,杨爱明,姚楚光,等. 南水北调中线工程测量控制系统[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 1-5.
- [3] 汪易森. 南水北调中线京石段应急供水工程设计和施工中的主要技术问题[J]. 水利水电技术, 2009, 46(1): 10-15.
- [4] 长江勘测规划设计研究院. 丹江口水利枢纽大坝加高工程初步设计报告中册[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究院.

(责任编辑 欧阳越)

