

文章编号:1001-4179(2013)16-0077-05

南水北调中线沙河梁式渡槽桩基承载力测试

申 鲁¹, 张 文 峰¹, 李 剑², 孔 德 刚², 李 非²

(1. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016; 2. 南水北调中线干线工程建设管理局 河南直管建管局, 河南 郑州 450016)

摘要:南水北调中线沙河梁式渡槽槽墩基础设计为混凝土灌注桩,设计时采用的桩侧土层摩阻力标准值以及桩端土层承载力允许值均为相关规范及经验取值。为了验证沙河梁式渡槽桩基设计成果,在渡槽工程场区布置了3组试验桩,采用自平衡法检测基桩竖向抗压承载力。经现场检测,3组试验桩的单桩竖向抗压承载力平均值均达到设计要求。将试验桩实测成果与前期采用勘测资料计算的成果对比分析,表明该渡槽桩基设计是安全可靠的。

关键词:桩基; 抗压承载力; 自平衡法; 沙河梁式渡槽; 南水北调中线工程

中图法分类号: TV672.3 文献标志码: A

1 工程概况

南水北调中线沙河渡槽工程全长9 050 m,其中沙河梁式渡槽长1 410 m,共47跨,单跨跨度为30 m^[1]。沙河梁式渡槽下部支撑结构为空心墩,基础采用桩基。空心墩墩帽长22.4 m,宽5.6 m,高2 m;墩身长22 m,宽5.6 m,墩高5~12 m;墩底承台长23.2 m,宽7.6 m,高3 m。每个槽墩下顺槽向设2排灌注桩,每排桩数5根,共10根,桩径1.8 m,单桩桩长22~33 m,总桩数940根。梁式渡槽下部支撑结构主要结构尺寸见图1。

根据前期勘测资料,沙河梁式渡槽跨越沙河右岸I级阶地和漫滩、河床和左岸漫滩等不同地貌单元^[2]。地质结构由第四系覆盖层和上第三系基岩组成。上部覆盖层为黏砾多层结构,由壤土(重粉质壤土、砂壤土)、砾砂和卵石组成,薄厚不均,下伏上第三系基岩由泥质砂砾岩、砾质泥岩组成,局部为黏土岩和砂岩,

揭露最大厚度54 m。

沙河梁式渡槽桩基灌注桩穿过的主要岩(土)层包括:第③层砾砂、第(13)-1层卵石、第(14)-1层泥质砂砾岩、第(14)-2层砾质泥岩。桩基设计采用各层岩(土)的桩侧摩阻力标准值以及桩端承载力允许值见表1。

表1 沙河梁式渡槽地基(岩)土层力学指标参数

土层编号	土层名称	桩侧摩阻力 标准值/kPa	桩端承载力 允许值/kPa
第③层	砾砂	70	
第(13)-1层	卵石	240	450
第(14)-1层	泥质砂砾岩	140	500
第(14)-2层	砾质泥岩	140	500

2 试验目的及方法

2.1 试验目的

沙河梁式渡槽桩基设计时采用的桩侧土层摩阻力标准值以及桩端土层承载力允许值均为根据相关规范

收稿日期:2013-06-22

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用之大流量预应力渡槽设计和施工技术研究”(2006BAB04A05);南水北调中线干线工程科技项目“大型预应力U形预制槽1:1原型试验和预应力张拉试验研究”(ZXJ/KY/YYL-001)

作者简介:申 鲁,男,高级工程师,主要从事水利水电工程规划设计工作。E-mail:zzshenlu@163.com

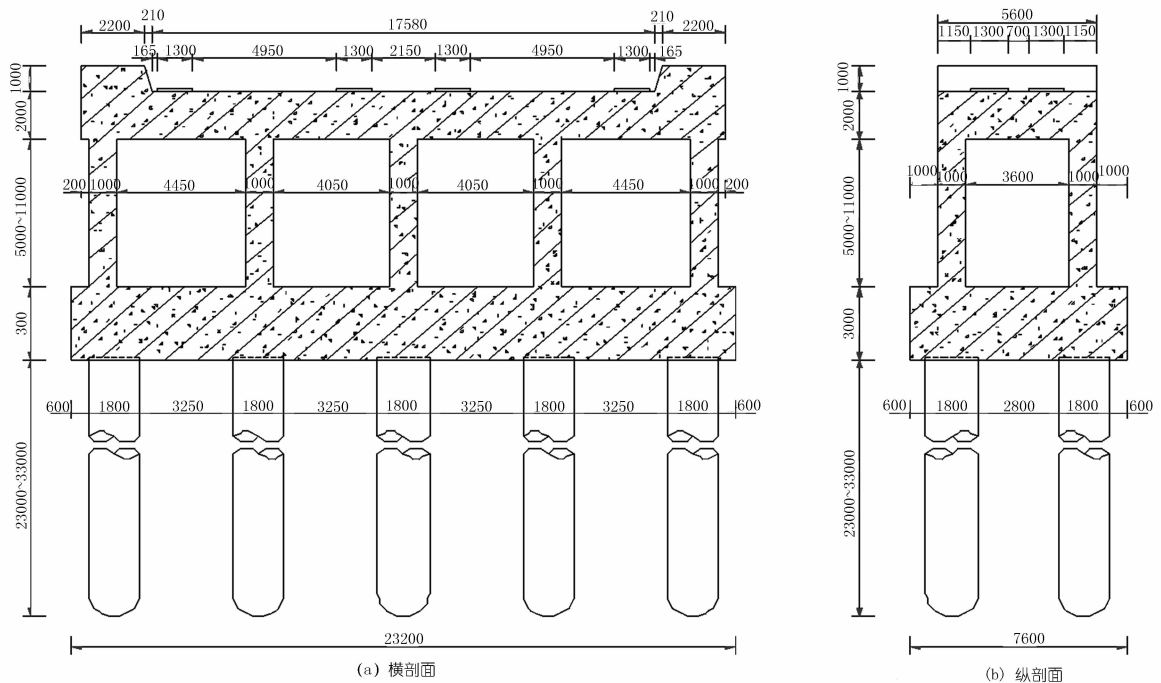


图1 沙河梁式渡槽槽墩及桩基结构(单位:mm)

及经验取值,并无现场试验成果。对于南水北调中线沙河渡槽这种特大型工程,其桩基施工前有必要进行现场承载力试验,检测基桩的抗压极限承载力,以验证桩基设计成果的可靠性,这也是保证渡槽工程安全的重要举措。

2.2 试验方法

目前工程领域常用的基桩抗压承载力试验方法包括:堆载法、锚桩法、自平衡法等等。其中堆载法和锚桩法均为直接在测试桩桩顶加载,由此确定桩的抗压承载力,这种方法优点是检测结果直观,缺点是对于承载力较高的大型桩,检测成本较高,当单桩抗压承载力大于20 000 kN时,检测的难度很大。自平衡法是近些年引入国内的一种基桩承载力检测方法,该方法是将装有千斤顶的荷载箱焊接在桩身钢筋笼上预埋入桩体中,利用荷载箱上部土层摩擦力与下部土层摩擦力及桩端承载力平衡进行加载,进而确定桩的抗压承载力。自平衡法的优点是可加载的吨位大,对于承载力较高的大型桩,检测成本低,缺点是确定荷载箱安装位置(即向上与向下力的平衡点)存在一定难度,且检测结果不如前两种方法直观,需要进行换算。

沙河梁式渡槽设计桩径1.8 m,最大桩长33 m,最大预估极限承载力超过20 000 kN。采用堆载法和锚桩法检测难度都比较大,且费用高、周期长,经综合比较,最终选择自平衡法作为基桩的抗压承载力试验方法。自平衡法检测装置布置见图2。

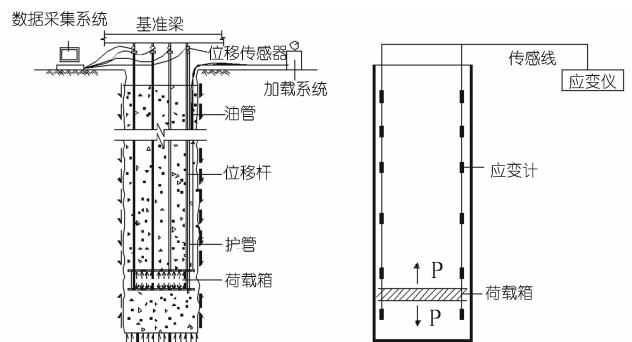


图2 基桩承载力自平衡试验示意

3 基桩现场抗压承载力试验

3.1 试验桩总体布置

试验桩布置有两种比选方案。方案一:先期施工部分工程桩,将其作为试验桩,在桩体中埋设荷载箱等试验装置,待试验完成后,基桩抗压承载力满足设计要求时,利用灌浆等手段对加载破坏后的试验桩进行修复。方案二:在工程桩之外,地质条件有代表性的位置专门布置若干根试验桩,试验桩的桩长、桩径与该处渡槽基桩完全一致。

以上两种方案各有其优、缺点,方案一的优点是利用部分工程桩作为试验桩,节省了试验桩施工的费用,缺点是对破坏后的试验桩进行修复存在一定风险,一旦修复不当可能影响整个桩基的承载能力,且若发现

试验桩承载力未达到设计要求,还需进一步加固桩基。方案二的优点是在工程场区单独布置试验桩,试验中一旦发现问题可及时调整,缺点是需要增加试验桩施工的费用。考虑到沙河渡槽工程的重要性,为了保证渡槽基桩的安全可靠,经综合比较,最终选择方案二作为试验桩的总体布置方案。

根据工程场区地质情况以及渡槽桩基设计情况,此次试验共布置 3 组试桩,每组 3 根,共 9 根。第 1 组试桩布置在渡槽第 6 跨跨中(即沙河右岸河滩),桩长 23 m,桩径 1.8 m;第 2 组试桩布置在渡槽第 27 跨跨中(即沙河主河槽),桩长 32 m,桩径 1.8 m,第 3 组试桩布置在渡槽第 41 跨跨中(即沙河主河槽),桩长 32 m,桩径 1.8 m。

试验桩在工程桩正式施工前先行施工并检测,当试桩抗压承载力检测结果满足设计要求时,再开始工程桩施工。每组试桩施工前先在桩位处进行地质钻探,掌握试桩区地层情况,再进行试桩施工及检测。

3.2 荷载箱初步选型

采用自平衡法检测基桩抗压极限承载力,首要问题就是合理选择荷载箱的加载吨位,荷载箱加载吨位偏小可能出现荷载箱已达到加载极限,而基桩尚未破坏,荷载箱加载吨位偏大,又可能造成比较大的浪费。由于此前没有渡槽工程场区基桩检测资料,想要一次性准确确定试桩荷载箱加载吨位存在一定难度。经分析,最终确定分步走策略,先施工并检测第 1 组试桩,根据第 1 组试桩检测结果进而调整后续试桩荷载箱加载吨位。

(1) 预估试桩极限承载力。第 1 组试桩桩长 23 m,穿越的地层主要包括:第③层砾砂、第(13)-1 层卵石、第(14)-1 层泥质砂砾岩和第(14)-2 层砾质泥岩。根据表 1 中岩(土)层力学指标参数,首先预估第 1 组试桩单桩抗压极限承载力。单桩抗压极限承载力按下式计算^[3]

$$[R_a] = \frac{1}{2}u \sum_{i=1}^n q_{ik}l_i + A_p q_r \quad (1)$$

$$q_r = m_0 \lambda [[f_{a0}] + k_2 \gamma_2 (h - 3)] \quad (2)$$

式中, $[R_a]$ 为单桩轴向受压承载力允许值, kN, 桩身自重与置换土重(当自重计入浮力时,置换土重量计入浮力)的差值作为荷载考虑; u 为桩身周长, m; A_p 为桩端截面面积, m^2 ; n 为土的层数; l_i 为承台底面或局部冲刷线以下各土层的厚度, m; q_{ik} 为与 l_i 对应的各土层与桩侧的摩阻力标准值, kPa, 采用表 1 中数值; q_r 为桩端处土的承载力允许值, kPa, 当持力层为砂土、碎石土时,若计算值超过下列值,宜按下列值采用: 粉砂 1 000 kPa, 细砂 1 150 kPa, 中砂、粗砂、砾砂 1 450

kPa, 碎石土 2 750 kPa; $[f_{a0}]$ 为桩端处土的承载力基本允许值, kPa, 采用表 1 中数值; h 为桩端的埋置深度, m, 对于有冲刷的桩基,埋深由一般冲刷线起算,对无冲刷的桩基,埋深由天然地面线或实际开挖后的地面线起算; h 的计算值不大于 40 m, 当大于 40 m 时,按 40 m 计算; k_2 为允许承载力随深度的修正系数; γ_2 为桩端以上各土层的加权平均重度, kN/m^3 , 若持力层在水位以下且不透水时,不论桩端以上土层的透水性如何,一律取饱和重度,当持力层透水时,则水中部分土层取浮重度; λ 为修正系数,取 0.7; m_0 为清底系数,取 0.7。

(2) 荷载箱初步选型。经计算,第 1 组试桩(桩长 23 m)预估单桩抗压极限承载力为 22 000 kN,最终确定第 1 组试桩荷载箱加载吨位为 22 000 kN(荷载箱自身有一定的超载能力,实际最大加载量可达 25 000 kN)。第 1 组试桩荷载箱额定最大加载值及安装位置见表 2。

表 2 沙河梁式渡槽第 1 组试桩荷载箱主要参数指标

荷载箱额定最大加载值/kN	荷载箱安装位置	每组试桩荷载箱数量
2 × 11000	距桩顶 18m	3

3.3 第 1 组试桩试验

3.3.1 试验规程^[4]

(1) 加载。加载应分级进行,每级加载值取荷载箱额定最大加载值的 1/15,按 15 级分 14 次加载,第一次按两倍荷载分级加载。

(2) 位移观测。每级加载后在第 1 h 内分别于 5, 15, 30, 45, 60 min 各测读一次,以后每隔 30 min 测读一次。电子位移传感器连接到电脑,直接由电脑控制测读,在电脑屏幕上显示 $Q \sim s, s \sim \lg t, s \sim \lg Q$ 曲线。

(3) 稳定标准。每级加载下沉量,在最后 30 min 内如不大于 0.1 mm 时即可认为稳定。

(4) 终止加载条件。① 总位移量大于或等于 40 mm,本级荷载的下沉量大于或等于前一级荷载的下沉量的 5 倍时,加载即可终止,取此终止时荷载小一级的荷载为极限荷载。② 总位移量大于或等于 40 mm,本级荷载加上后 24 h 未达稳定,加载即可终止,取此终止时荷载小一级的荷载为极限荷载。③ 总下沉量小于 40 mm,但荷载已达荷载箱加载极限或位移已超过荷载箱行程,加载即可终止。

(5) 卸载及测试。① 卸载应分级进行,共分 5 级卸载。每级荷载卸载后,观测桩顶的回弹量,观测办法与沉降相同。直到回弹量稳定后,再卸下一级荷载。回弹量稳定标准与下沉稳定标准相同。② 卸载到零

后,至少在 1.5 h 内每 15 min 观测一次,开始 30 min 内,每 15 min 观测一次。

3.3.2 试验过程描述

第 1 组试桩现场检测情况如下:① 1-1 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 13\ 200$ kN 时,加载设备达到破坏,向上、向下 $Q \sim s$ 曲线变化正常,试桩承载力仍有发展潜力;② 1-2 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 13\ 200$ kN 时,加载设备破坏,向上、向下 $Q \sim s$ 曲线变化正常,试桩承载力仍有发展潜力;③ 1-3 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 13\ 933$ kN 时,加载设备破坏,向上、向下 $Q \sim s$ 曲线变化正常,试桩承载力仍有发展潜力。

第 1 组试桩 3 个荷载箱均已达到最大加载量,此时试桩尚未达到终止加载条件,根据检测结果判断,试桩抗压极限承载力高于预估极限承载力,后续试桩荷载箱加载吨位应在预估值基础上适当加大。

3.3.3 试验成果

第 1 组试桩的检测成果见表 3。

表 3 沙河梁式渡槽第 1 组试桩实测成果

编号	预定加载 值/kN	最终加载 值/kN	实测加载 值/kN	荷载箱最大 向上位移/mm	荷载箱最大 向下位移/mm
1-1	$2 \times 11\ 000$	$2 \times 12\ 467$	$2 \times 12\ 467$	16.87	26.29
1-2	$2 \times 11\ 000$	$2 \times 12\ 467$	$2 \times 12\ 467$	22.66	47.35
1-3	$2 \times 11\ 000$	$2 \times 13\ 200$	$2 \times 13\ 200$	23.17	57.01

3.4 第 2,3 组试桩试验

(1) 荷载箱调整。第 2,3 组试桩桩长均为 32 m,穿越的地层主要有:第③层砾砂、第(13)-1 层卵石、第(14)-1 层泥质砂砾岩和第(14)-2 层砾质泥岩。根据公式(1)、(2)计算,第 2 组试桩预估极限承载力为 30 000 kN,第 3 组试桩预估极限承载力为 31 000 kN。

根据第 1 组试桩检测情况,为了实际测定试桩单桩抗压极限承载力,需要在预估值的基础上适当加大荷载箱加载吨位。经综合分析,最终确定荷载箱加载吨位为 50 000 kN。第 2,3 组试桩荷载箱额定最大加载值及安装位置见表 4。

表 4 沙河梁式渡槽第 2,3 组试桩荷载箱主要参数指标

组号	荷载箱额定	荷载箱	每组试桩 荷载箱数量
	最大加载值/kN	安装位置	
第 2 组	$2 \times 25\ 000$	距桩顶 24m	3
第 3 组	$2 \times 25\ 000$	距桩顶 24m	3

(2) 试验过程描述。第 2 组试桩现场检测情况如下:① 2-1 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 25\ 000$ kN 时,向下 $Q \sim s$ 曲线变化正常,向上 $Q \sim s$ 曲线变化迅速增大,且压力无法稳定,试桩达到极限承载力;② 2-2 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 13\ 200$ kN 时,荷载箱出现意

外,停止加载,此时 $Q \sim s$ 曲线变化正常,试桩承载力仍有较大发展潜力;③ 2-3 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 23\ 333$ kN 时,向上 $Q \sim s$ 曲线变化正常,向下 $Q \sim s$ 曲线变化迅速增大,且压力无法稳定,试桩达到极限承载力。

第 3 组试桩现场检测情况如下:① 3-1 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 25\ 000$ kN 时,向上、向下 $Q \sim s$ 曲线变化迅速增大,出现明显陡降段且压力无法稳定,试桩达到极限承载力;② 3-2 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 23\ 333$ kN 时,向上 $Q \sim s$ 曲线变化正常,向下 $Q \sim s$ 曲线变化迅速增大,且压力无法稳定,试桩达到极限承载力;③ 3-3 号试桩荷载箱加载至 $2 \times 25\ 000$ kN 时,向上、向下 $Q \sim s$ 曲线变化迅速增大,且压力无法稳定,试桩达到极限承载力。

(3) 第 2,3 组试桩检测成果见表 5。

表 5 沙河梁式渡槽第 2,3 组试桩实测成果

编号	预定加载 值/kN	最终加载 值/kN	实测加载 值/kN	荷载箱最大 向上位移/mm	荷载箱最大 向下位移/mm
	第 2 组 2-1	$2 \times 25\ 000$	$2 \times 25\ 000$	$2 \times 23\ 333$	>62.79
2-2	$2 \times 25\ 000$	$2 \times 13\ 200$	$2 \times 13\ 200$	13.23	12.34
2-3	$2 \times 25\ 000$	$2 \times 23\ 333$	$2 \times 21\ 667$	32.97	>79.64
第 3 组 3-1	$2 \times 25\ 000$	$2 \times 28\ 000$	$2 \times 26\ 133$	37.44	82.03
3-2	$2 \times 25\ 000$	$2 \times 26\ 133$	$2 \times 24\ 267$	29.48	67.81
3-3	$2 \times 25\ 000$	$2 \times 26\ 133$	$2 \times 24\ 267$	35.07	68.58

3.5 试验成果分析

根据自平衡法检测成果,实际单桩竖向抗压承载力可按下式进行换算^[5]。

$$Q_u = \frac{Q_{us} - W}{\gamma} + Q_{ux} \quad (3)$$

式中, Q_u 为单桩竖向抗压承载力, kN; Q_{us} 为荷载箱上段桩的实测加载值, kN; Q_{ux} 为荷载箱下段桩的实测加载值, kN; W 为荷载箱上部桩有效自重, kN; γ 为荷载箱上部桩侧摩阻力修正系数,取 $\gamma = 0.8$ 。

经计算,各组试桩的单桩竖向抗压承载力见表 6。

表 6 沙河梁式渡槽试桩单桩竖向抗压承载力成果

编号	单桩竖向抗压 承载力/kN	单桩竖向抗压承载力 平均值/kN
	第 1 组 1-1	26668
1-2	26668	
1-3	28297	
第 2 组 2-1	50692	
2-2		48755
2-3	46880	49342
第 3 组 3-1	50591	
3-2	46843	
3-3	50591	

注:2-2 号试桩由于加载过程出现意外,其单桩竖向抗压承载力不再计算。

4 结 语

(1) 对于像沙河梁式渡槽这种单桩承载力较高的桩基,只要合理地选择荷载箱型号及安装位置,采用自平衡法检测基桩竖向抗压承载力是可行的,且检测成本远小于堆载法和锚桩法等传统检测方法。

(2) 从现场试验成果可以看出,沙河梁式渡槽桩基的设计是安全可靠的。

(3) 将试桩实测单桩抗压承载力与前期采用勘测资料计算的单桩抗压承载力对比可以看出,沙河梁式渡槽桩基设计采用的岩(土)层桩侧摩阻力标准值略偏保守,渡槽桩基设计成果还有进一步优化的空间。

参考文献:

- [1] 翟渊军,朱太山.南水北调中线一期工程总干渠沙河河南~黄河南沙河渡槽工程招标设计报告[R].郑州:河南省水利勘测设计研究院有限公司,2009.
- [2] 赵健仓,陈全礼.南水北调中线一期工程总干渠沙河渡槽段施工图阶段工程地质勘察报告[R].郑州:河南省水利勘测设计研究院有限公司,2009.
- [3] 张喜刚,鲍卫刚.公路桥涵地基与基础设计规范[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [4] 龚维明,薛国亚.南水北调中线一期工程沙河渡槽工程基桩检测报告[R].南京:南京东大自平衡桩基检测有限公司,2011.
- [5] 龚维明,薛国亚.基桩静载试验自平衡法[M].北京:人民交通出版社,2009.

(编辑:赵凤超)

In - situ test for bearing capacity of Shahe aqueduct piles in Middle Route Project of South - to - North Water Diversion

SHEN Lu¹, ZHANG Wenfeng¹, LI Zhao², KONG Deguang², LI Fei²

(1. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450016, China; 2. Henan Branch, Engineering Management Bureau of Middle Route Project of South - to - North Water Diversion, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Bored concrete pile was adopted in Shahe aqueduct, a large pre - stressed aqueduct in Middle Route Project of South - to - North Water Diversion, and the design parameters of piles such as side friction resistance of pile and soil bearing capacity were determined by referring related design specifications and experiences. For evaluating the design, 3 sets of test piles in the engineering site were arranged and the vertical bearing capacities were studied by self - balanced method. The test results show that the average bearing capacity of the piles meet design requirement, verifying safety and reliability of the pile design.

Key words: foundation pile; compression bearing capacity; self - balanced method; Shahe aqueduct; Middle Route Project of South - to - North Water Diversion

· 简 讯 ·

中国南水北调相对其他调水工程具有哪些特点?

世界各地有很多调水工程。在 4000 多年以前,世界上就有了调水工程。埃及的尼罗河,印度的恒河,南美的亚马逊河,美国的密西西比河、科罗拉多河都有调水工程。俄罗斯水资源并不短缺,但是主要河流间均用运河联通,形成了纵横交错的大水网。迄今为止全世界 40 多个国家有 400 多项调水工程,南水北调只是其中之一。与其他调水工程相比,南水北调工程具有 4 个特点:

(1) 规模不同。综观国内外调水工程,真正跨流域调水的很少。南水北调横跨长江、淮河、黄河、海河四大流域,通过三条调水线路与长江、淮河、黄河、海河联系,构成了“四横三纵”的水网总体布局。长度不同。东、中线加起来长度近 3 000 km,长距离调水工程受气候的变化影响很大,对工程建设和运行的要求非常高。水量不同。南水北调三条线共调水 448 亿 m³,相当于一条黄河的水量。

(2) 工程目标不同。以往国内外调水工程绝大多数是单一目标,南水北调工程建设是多目标的,不仅是水资源配置工程,更是一个造福人民的综合性生态工程。工程实施后,将极大地

提高受水区水资源与生态环境承载的能力,向沿线 100 多个城市供水,同时把城市侵占的一部分农业用水和生态用水偿还给农业和生态。

(3) 工程领域不同。以往的调水项目主要是工程领域,南水北调不仅涉及工程领域,还涉及社会层面的征地移民、水污染治理、生态环境及文物保护等。东线为满足调水水质要求,就安排治污项目 426 项,投入 140 亿元,且已取得初步成效,为全国其他重点流域污染治理提供了借鉴。

(4) 技术管理不同。南水北调由数千个单位工程组成,面临着很多技术难题。比如:丹江口大坝加高,怎样保证新老混凝土连接、联合受力,国内外尚无类似工程实践;中线穿黄工程,如何从黄河底下复杂地层中开凿数千米的隧洞,承载内外水压,并保证隧洞不漏水;北京的 PCCP 管道,直径 4m,从生产、运输到安装,攻克多个技术难关。在工程实施阶段,很多工程实践没有相应的技术规范 and 标准,需要深入研究和制订,并应用到施工当中去。

(长江)