

大型墙梁式渡槽二次预应力施工过程分析研究

李晓克, 赵晴天, 赵顺波

(华北水利水电学院 土木与交通学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 结合南水北调中线京石段左岸排水工程麻黄沟预应力渡槽结构设计, 应用叠合结构设计与施工原理, 提出了预制和现浇结构有机结合的墙梁式渡槽二次预应力施工方案. 对渡槽施工全过程进行了三维有限元数值模拟, 明确了墙梁式渡槽在二次预应力施工过程中混凝土的应力分布规律及变形特性, 建立了合理有效的施工顺序. 结果表明, 采用二次预应力施工方案, 不仅解决了高空架设模板和混凝土浇筑等施工难题, 而且能够减小槽体反拱值.

关 键 词: 墙梁式渡槽; 二次预应力; 施工方案; 受力分析

中图分类号: TV332

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)01-0059-07

大型预应力混凝土墙梁式渡槽在南水北调中线工程中得到了广泛应用, 但施工过程存在许多技术难题: 结构断面尺寸和自重较大, 若采用预制吊装施工, 将受到机械设备起吊能力的限制; 若采用整体现浇施工, 因渡槽跨越河流、山谷等, 往往不具备良好的施工操作平台, 使得渡槽模板架设、混凝土浇筑等难度加大或出现施工费用过高的状况^[1,2]. 当渡槽长期处于空槽无水状态时, 由混凝土收缩徐变产生的反拱变形将成为控制设计的重要指标之一. 因此, 有必要对预应力混凝土墙梁式渡槽的传统设计和施工方法进行研讨.

本文结合南水北调中线京石段左岸排水工程麻黄沟预应力混凝土墙梁式渡槽结构设计, 应用叠合结构设计和施工原理^[3,4], 将预制和现浇结构有机结合, 提出了大型墙梁式渡槽二次预应力施工方案. 采用三维有限元数值分析方法, 研究了渡槽在二次预应力施工过程中的应力分布规律和变形特性.

1 渡槽二次预应力施工方案

1.1 渡槽结构设计概况

麻黄沟渡槽位于河北省保定市唐县, 是南水北调中线京石段应急供水工程中一座大型预应力混凝土排水渡槽. 建筑物级别 I 级, 结构安全等级 I 级, 渡槽跨度为 21.97 m, 槽身混凝土强度等级为 C50, 后张有粘结预应力体系, 预应力筋采用 1860 级 Φ 15.2 高强低松弛钢绞线, 张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.75 f_{ptk} = 1\,395$ MPa, 普通钢筋为 HRB335 级, 设计断面尺寸见图 1.

渡槽设计时, 边墙与中墙混凝土受到的纵向拉压应力限制系数按预应力混凝土结构取值, 横梁和底板的拉应力限制系数按钢筋混凝土结构取值^[5].

收稿日期: 2008-04-28

基金项目: 河南省高等学校创新人才培养工程资助项目(豫教高[2004]294号)

作者简介: 李晓克(1975-), 男, 河南许昌人, 副教授, 博士, 主要从事预应力混凝土结构理论研究.

E-mail: lixk@ncwu.edu.cn

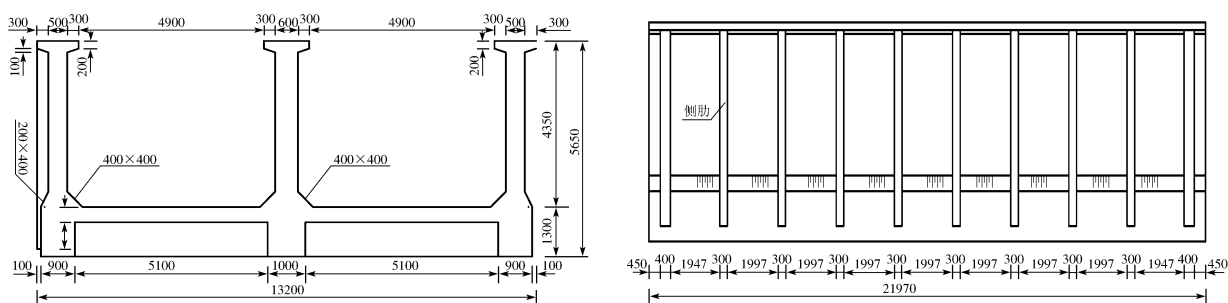


图 1 渡槽截面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimension of the aqueduct (unit: mm)

1.2 渡槽分层叠合位置

根据以往工程经验和麻黄沟预应力混凝土渡槽整体受力分析,竖墙与底板连接部位贴角区域的混凝土易产生较大的拉应力,有产生沿水流方向裂缝的趋势.考虑该处本身就是整个渡槽结构承受内水荷载的薄弱环节,为避免二次浇筑混凝土时叠合面选择不当造成新的薄弱区域,渡槽分层叠合位置即选取该区域上部截面^[6](见图2).渡槽的节点设计包括横梁及下层底板与预制纵梁非预应力筋的锚固和横梁及下层底板与预制纵梁接缝处的填料等.采用的节点连接方式如图3所示.

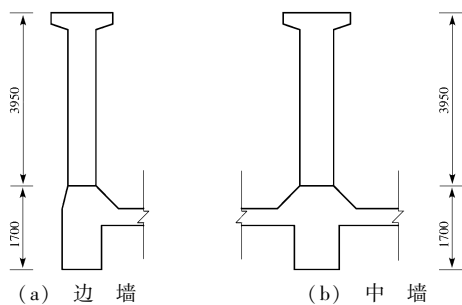


图 2 渡槽梁体分层高度(单位:mm)

Fig. 2 Layer depths of aqueduct wall-beams (unit: mm)

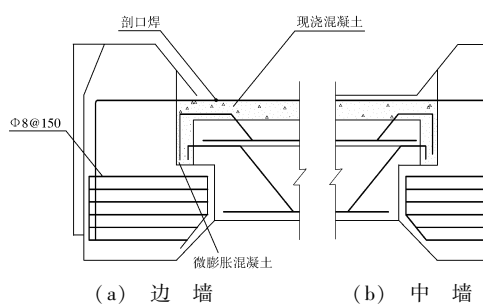


图 3 节点连接方式

Fig. 3 Node connection

1.3 二次预应力施工方案

渡槽二次预应力施工各部分组成如图4所示,施工流程:预制纵梁、横梁及下层底板→张拉第1批预应力筋→吊装就位预制纵梁→吊装就位横梁、下层底板→浇筑完成一期墙体混凝土→浇筑上层底板混凝土→浇筑二期墙体混凝土→张拉第2批预应力筋.预应力钢筋张拉控制应力与整体现浇施工方案相同,第1批预应力钢筋张拉控制应力与第2批相同.考虑到预制纵梁将承担后续施工过程中横梁、底板、一期墙体和二期墙体所传来的钢筋混凝土自重及其它外部荷载,预制纵梁第1批张拉的预应力筋数量应尽量多,预应力筋宜采用直线形,以利于纵梁底部混凝土建立较大的预压应力^[7,8].

1.4 预应力钢筋布置

二次预应力混凝土墙梁式渡槽与整体式渡槽相比,预应力筋总用量、线型保持不变,仅根据渡槽受力需要调整各层的配置数量,边墙和中墙的预应力筋布置如图5(a)和(b)所示.边墙预应力筋由下向上共分

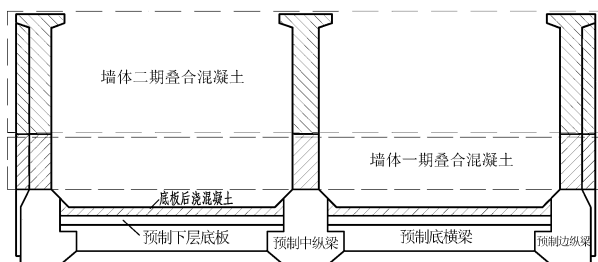


图 4 墙梁式渡槽二次预应力施工各组成部分示意图

Fig. 4 Composition of two-time prestressing aqueduct

3层,第1层为 $2 \times 12\Phi^{15.2}$ 直线形,第2层为 $4\Phi^{15.2}$ 弧线形,第3层为 $4\Phi^{15.24}$ 弧线形,预应力筋从下层到上层依次编号为1~4(见图5(c));中墙预应力筋由下向上共分4层,第1层为 $2 \times 9\Phi^{15.24}$ 直线形,第2层为 $9\Phi^{15.24}$ 弧线形,第3层为 $6\Phi^{15.24}$ 弧线形,第4层为 $2 \times 6\Phi^{15.24}$ 弧线形.预应力筋从下层到上层依次编号为1~6(见图5(d));根据对称张拉、交错布置的原则,按照先边墙后中墙、先下部后上部的方式确定预应力钢筋张拉施工顺序如下:第1批为预制梁中预应力筋,边墙预应力筋1、2号筋同时张拉,中墙预应力筋先同时张拉1、2号筋再张拉3号筋;第2批为上部墙体预应力筋,按如下步骤:对称张拉边墙3号筋,张拉中墙4号筋,对称张拉边墙4号筋,同时张拉中墙5、6号筋.

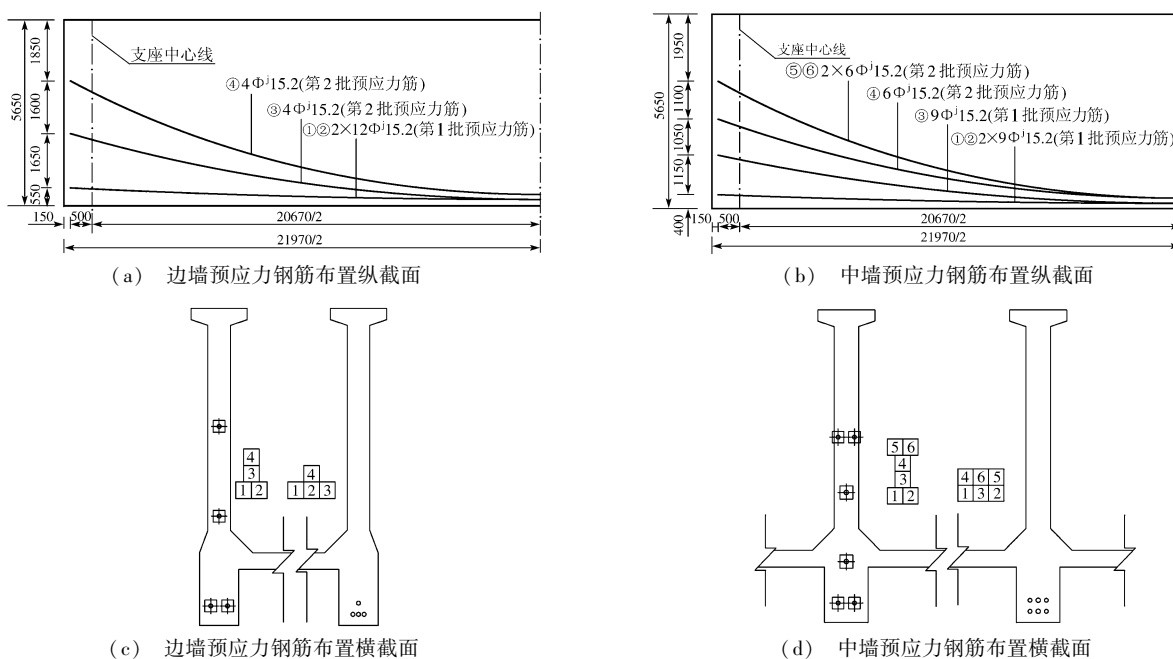


图5 竖墙预应力钢筋布置

Fig. 5 Arrangement of prestressing strands of wall

2 施工过程三维有限元数值分析

2.1 数值分析模型

为确定预应力墙梁式渡槽二次预应力施工方案在整个施工过程中槽体混凝土的受力性能和变形规律,采用 ANSYS 进行了三维有限元数值^[9],数值模型见图6,混凝土采用块体元 Solid45 模拟,预应力筋采用空间杆元 Link8 模拟;精确估算预应力钢筋沿程损失,采用降温法利用耦合方程逐点施加预拉力于 link8 单元,以在渡槽槽体混凝土中建立精确的预应力效应;考虑普通钢筋的作用,取用均化弹性模型进行计算;有限元数值分析时,采用单元生死技术来模拟渡槽2次预应力施工全过程^[10,11].各施工阶段荷载组合见表1.

表1 施工阶段荷载组合

Tab. 1 Load cases during the construction course

	1	2	3	4	5	6
	吊装预 制纵梁	吊装预制横梁 和下层底板	浇筑一 期墙体	浇筑上 层底板	浇筑二 期墙体	张拉二 批钢筋
荷 载			①+②+③	①+②+③	①+②+③+④	①+②+③+④
组 合	①+⑥	①+②+⑥+⑧	①+②+③ +⑥+⑧	①+②+③ +④⑥+⑧	①+②+③+④ +⑤+⑥+⑧	①+②+③+④ +⑤+⑥+⑦+⑧

注:①预制梁重;②预制横梁和下层底板重;③一期墙重;④上层底板重;⑤二期墙重;⑥第一批预应力;⑦第二批预应力;⑧人群荷载.

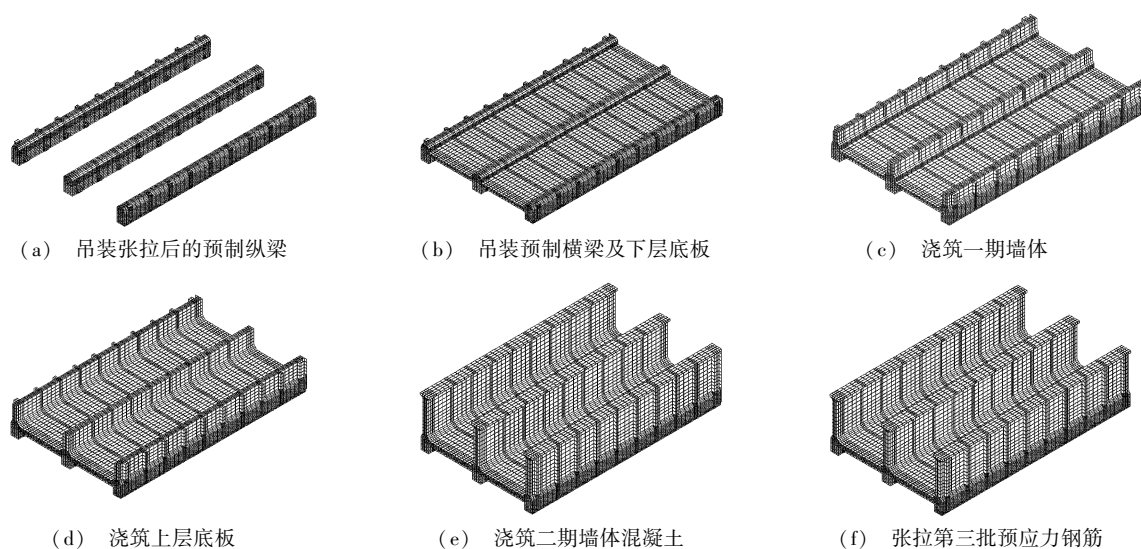


图 6 渡槽三维有限元数值模型

Fig. 6 Three-dimensional finite element numerical simulation model of aqueduct

2.2 数值分析结果

2.2.1 应力分布 为分析渡槽在施工过程中的应力变化,选取渡槽边墙和中墙跨中下表面、横梁跨中下表面、底板跨中下表面、竖墙与底板贴角处等二次预应力施工过程中的控制位置进行分析.对于竖墙,主要研究其纵向应力,对于横梁、底板,主要研究其横向应力,对于竖墙与底板贴角处,主要研究其竖向应力.根据有限元计算成果列出渡槽各施工阶段相应控制点的应力见表 2.横梁和底板均从墙端到跨中依次编号 1~5.

由表 2 可见,第一批预应力钢筋张拉完成后在预制纵梁中建立了较大的预压应力,混凝土最大纵向压应力在边墙跨中下表面为 -4.05 MPa 、中墙跨中下表面为 -4.18 MPa ;第 1~5 阶段,边墙和中墙跨中下表面混凝土纵向压应力不断减小并由压应力转变为拉应力;在第 5 阶段,边墙和中墙跨中混凝土下表面纵向拉应力达最大值,边墙为 1.03 MPa 、中墙为 1.46 MPa .同时,横梁 5 跨中混凝土下表面横向拉应力达最大值 1.51 MPa .在第 6 阶段,张拉第二批预应力钢筋使得渡槽内力重新分布,边墙和中墙跨中混凝土下表面纵向应力变为受压状态,边墙为 -1.86 MPa 、中墙为 -1.87 MPa ,同时横梁 5 和底板 5 跨中混凝土下表面横向拉应力减小,横梁为 1.0 MPa 、底板为 -0.15 MPa ;在第 7 阶段,渡槽承受槽内水重,应力变幅较大,边墙和中墙跨中混凝土下表面纵向应力分别为 -0.68 MPa 和 -0.35 MPa ,横梁 5 和底板 5 跨中下表面混凝土横向应力分别为 2.28 MPa 和 0.89 MPa ;竖墙与底板连接部位贴角区域混凝土最大拉应力发生在第 7 阶段,最大横向拉应力值为 0.99 MPa .第 2~6 阶段,竖向应力增幅较小,最大值为边墙、底板 5 贴角处 0.38 MPa ,中墙、底板 5 贴角处 0.26 MPa ,第 7 阶段竖向应力增幅较大,最大值为边墙、底板 5 贴角处 1.7 MPa ,中墙、底板 5 贴角处 0.4 MPa .可见,二次预应力混凝土墙梁式渡槽在二次预应力施工过程及正常运营阶段,控制截面控制点的应力均满足规范中对应力的控制要求.

为分析渡槽在施工完后各种工况下的应力变化趋势,选取渡槽边墙和中墙下表面、横梁下表面等控制位置进行分析研究.根据有限元计算成果绘制渡槽各种工况相应水平截面混凝土的应力变化曲线(见图 7).可见,空槽状态下竖墙下表面压应力变化不大;设计水位时,竖墙下表面压应力从墙端到跨中逐渐减小,横梁下表面拉应力从梁端到跨中逐渐增大;校核水位时,竖墙下表面压应力与横梁下表面拉应力变化趋势同设计水位,竖墙压应力减至最小,横梁拉应力增至最大.选取渡槽边墙和中墙跨中下表面、横梁跨中下表面、底板跨中下表面等控制位置,二次预应力混凝土渡槽和整体浇筑渡槽在运营期的应力对比分析见表 3.可见,相同工况下,二次预应力混凝土渡槽保留的纵向压应力较大、横向拉应力较小,表明二次预应力渡槽比整体预应力渡槽受力更为合理.

表 2 渡槽施工全过程控制截面应力

Tab.2 Stresses of controlled cross section during construction of aqueduct (单位: MPa)										
施 工 阶 段	纵 向 应 力				竖 向 应 力		横 向 应 力			
	边墙 跨中	下表面 1/4 跨	中墙 跨中	下表面 1/4 跨	底板 3	底板 5	横梁下表面			
							2	3	4	5
吊装预制纵梁	-4.05	-4.58	-4.18	-4.32						
吊装预制横梁 和下层底板	-2.40	-2.80	-1.60	-2.00	0.011/0.004	0.042/0.005	0.60	0.74	0.76	0.80
浇筑一期墙体	-1.20	-1.90	-0.60	-1.10	0.11/0.06	0.15/0.08	0.64	0.86	0.98	1.00
浇筑上层底板	0.90	-1.20	0.50	-0.20	0.15/0.09	0.16/0.10	0.80	1.03	1.17	1.25
浇筑二期墙体	1.03	-0.20	1.46	0.50	0.33/0.20	0.36/0.21	0.97	1.23	1.42	1.51
张拉二批钢筋	-1.86	-1.75	-1.87	-1.72	0.36/0.25	0.38/0.26	0.64	0.86	0.96	1.00
设计水位下	-0.68	-0.55	-0.35	-0.24	1.60/0.36	1.70/0.40	1.56	1.94	2.15	2.28

施 工 阶 段	横 向 应 力											
	底板下表面				横梁、边墙交接处				边墙、底板交接贴角处			
	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
吊装预制横梁 和下层底板	0.05	0.08	0.10	0.12	-0.33	0.10	0.25	0.35	0.01	0.10	0.13	0.01
浇筑一期墙体	0.11	0.13	0.17	0.19	0.12	0.19	0.36	0.42	0.16	0.17	0.18	0.19
浇筑上层底板	0.19	0.21	0.25	0.27	0.43	0.46	0.59	0.62	0.19	0.24	0.28	0.29
浇筑二期墙体	0.21	0.23	0.32	0.35	0.66	0.76	0.89	0.92	0.22	0.30	0.33	0.35
张拉二批钢筋	-0.22	-0.19	-0.18	-0.15	0.46	0.55	0.60	0.67	-0.47	-0.46	-0.41	-0.39
设计水位下	0.67	0.79	0.87	0.89	0.74	0.79	0.93	0.97	0.89	0.97	0.97	0.99

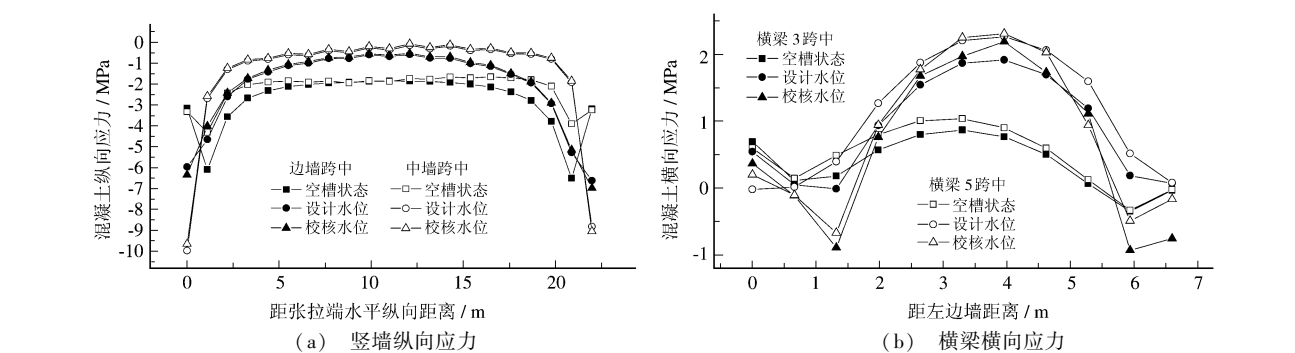


图 7 三种工况下竖墙纵向应力及横梁横向应力

Fig. 7 Longitudinal stress of vertical wall and lateral stress of beams under three load cases

表 3 二次预应力方案与整体现浇方案应力比较

Tab.3 Stresses comparison between two-time prestressing construction and integral cast construction (单位: MPa)					
工 况	施 工 方 案	纵 向 应 力		横 向 应 力	
		边墙跨中下表面	中墙跨中下表面	横梁 5 跨中下表面	底板 5 跨中下表面
设 计	二次预应力方案	-0.68	-0.35	2.28	0.89
水 位	整体现浇方案	-0.46	-0.18	2.43	0.92
校 核	二次预应力方案	-0.58	-0.28	2.3	0.93
水 位	整体现浇方案	-0.36	-0.1	2.45	0.95

2.2.2 变形分析 麻黄沟预应力墙梁式渡槽二次预应力施工方案各阶段竖墙底部跨中位置竖向位移见表4,同时也列出了对应工况的整体浇筑施工方案的竖向位移.为考虑渡槽使用阶段预压应力长期作用即徐变的影响,将设计水位和校核水位状态下计算求得的预加应力反拱值乘以增大系数2.0.由表4可见,从施工阶段1预制纵梁吊装就位到施工阶段5浇筑二期墙体混凝土,渡槽二次预应力施工方案竖墙跨中底部最大竖向位移逐渐增加,预制纵梁吊装就位后,边墙和中墙底部跨中挠度均为竖直向上,浇筑二期墙体混凝土后墙梁位移转为向下,在张拉完成第二批预应力钢筋后,墙梁跨中竖向位移又转为竖直向上.在设计水位和校核水位时,其最大竖向位移均不超过挠度允许值 $l_0/500 = 80 \text{ mm}$ (短暂状况荷载组合)或 $l_0/550 = 73 \text{ mm}$ (持久状况荷载组合),满足设计要求.

对比渡槽整体浇筑施工方案,在空槽即张拉完成全部预应力钢筋时,其竖墙跨中最大竖向位移为边墙向上0.6 mm,中墙向上0.53 mm,大于渡槽二次预应力施工方案对应的竖向位移,显然,渡槽施工采用二次预应力方案可减小渡槽槽身的竖向反拱值,有利渡槽空槽状态时的长期持荷.

表4 渡槽竖墙底部跨中最大竖向位移

Tab.4 Maximum vertical deformation at mid-span of wall-beams of aqueduct

(单位: mm)

部 位	施 工 方 案	施 工 阶 段						运行阶段	
		吊装预 制纵梁	吊装预制横梁 和下层底板	浇筑一 期墙体	浇筑上 层底板	浇筑二 期墙体	张拉二 批钢筋	设计 水位	校核 水位
边 墙	二次预应力 整体现浇	4.1	2.5	0.9	-0.5	-1.9	0.27	-2.4	-2.5
							0.6(空槽)	-2.6	-2.72
中 墙	二次预应力 整体现浇	2.9	1.4	0.1	-1.6	-2.5	0.19	-2.6	-2.68
							0.53(空槽)	-2.9	-3

3 结 语

(1)麻黄沟墙梁式渡槽二次预应力施工的三维有限元分析表明,以该施工方案指导渡槽设计和施工是可行的,渡槽混凝土在各个施工阶段的受力性能和结构变形均满足相应的规范要求,从而有效解决了渡槽全预制吊装施工方案起吊机械吊装能力不足,避免整体现浇方案建立施工操作面的困难;

(2)麻黄沟二次预应力墙梁式渡槽竖墙的最不利受力状态均发生在二期墙体混凝土浇筑阶段,此时其纵向拉应力和竖墙向下竖向位移的数值最大,该阶段应是渡槽施工过程中的重要控制阶段;

(3)将二次预应力技术应用于大型墙梁式渡槽施工,可有效减小渡槽在空槽状态下的竖向反拱值,对墙梁式预应力渡槽,尤其是对墙梁式预应力排水渡槽的长期持荷受力是非常有益的.

参 考 文 献:

- [1] 赵文华,陈德亮,颜其照. 渡槽(第二版)[M]. 北京:水利电力出版社,1984:10-15. (ZHAO Wen-hua, CHEN De-liang, YAN Qi-zhao. Aqueduct[M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1984: 10-15. (in Chinese))
- [2] 赵顺波,张利梅,李树瑶. 大型预应力混凝土渡槽结构受力性能试验研究[J]. 水力发电学报,2003,(1):44-54. (ZHAO Shun-bo, ZHANG Li-mei, LI Shu-yao. The experimental study of large prestressed concrete aqueduct under loads[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2003, (1): 44-54. (in Chinese))
- [3] 赵顺波,陈文义,黄和法,等. 南水北调预应力混凝土渡槽叠合结构设计研究[J]. 人民黄河,1999,(2):35-37. (ZHAO Shun-bo, CHEN Wen-yi, HUANG He-fa, et al. Design of prestressed concrete superposition aqueduct in Water Transfer Project from South to North[J]. *Yellow River*, 1999, (2): 35-37. (in Chinese))
- [4] 赵顺波,张新中. 混凝土叠合结构设计原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001:137-142. (ZHAO Shun-

- bo, ZHANG Xin-zhong. Design Principle and Application of Concrete Superposition Structures[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2001: 137-142. (in Chinese))
- [5] SL/T 191-96. 水工混凝土结构设计规范[S]. (SL/T 191-96, Design Code for Hydraulic Concrete Structures[S]. (in Chinese))
- [6] 赵顺波, 孙尔超. 大型叠合式预应力混凝土渡槽结构与施工研究[J]. 工程力学, 1997, (1): 616-620. (ZHAO Shun-bo, SUN Er-chao. Study of design and construction of large prestressed concrete superposition aqueduct[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1997, (1): 616-620. (in Chinese))
- [7] 赵顺波, 李晓克, 赵国藩. 预应力施工阶段混凝土压力管道受力性能研究[J]. 水力发电学报, 2004, (23): 36-41. (ZHAO Shun-bo, LI Xiao-ke, ZHAO Guo-fan. Study on the properties of prestressed concrete penstock in construction stage [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, (23): 36-41. (in Chinese))
- [8] 赵顺波, 李晓克, 李凤兰. 环形预应力混凝土结构设计计算方法[J]. 预应力技术, 2004, (6): 8-11. (ZHAO Shun-bo, LI Xiao-ke, LI Feng-lan. Design of circular prestressed concrete structures[J]. **Prestressed Technology**, 2004, (6): 8-11. (in Chinese))
- [9] 张 波, 赵顺波. 预应力混凝土梁受力全过程有限元分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, (2): 47-49. (ZHANG Bo, ZHAO Shun-bo. Finite element analysis of prestressed concrete beam under loads[J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power**, 2007, (2): 47-49. (in Chinese))
- [10] 王智勇, 刘许超, 赵顺波. 大型多纵梁渡槽结构计算分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, (3): 21-23. (WANG Zhi-yong, LIU Xu-chao, ZHAO shun-bo. Calculation and analysis of large reinforced concrete aqueduct with multi-longitudinal beam[J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power**, 2007, (3): 21-23. (in Chinese))
- [11] 赵顺波, 李晓克. 大型钢筋混凝土多纵梁渡槽结构设计方法的研究[J]. 水利学报, 1999, (4): 35-39. (ZHAO Shun-bo, LI Xiao-ke. On the design method for large reinforced concrete aqueduct with multi-longitudinal beam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1999, (4): 35-39. (in Chinese))

Analysis of two-time prestressing construction of aqueduct with large wall-beams

LI Xiao-ke, ZHAO Qing-tian, ZHAO Shun-bo

(School of Civil Engineering and Communication, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: By considering the design of prestressed concrete aqueduct of Mahuanggou left-bank-drain subject in Shijiazhuang-Beijing part of the Central Route of Water Transfer Project from South to North and by using the theory of superposition structure design and construction, the construction scheme of two-time prestressing of the aqueduct with large wall-beam combining precast and cash irrigation structure is proposed. The three-dimensional finite element numerical simulation of the aqueduct is carried out to analyze the concrete stress distribution and the deformation during the construction course and to establish rational and effective construction sequence. It is proved that not only the difficult problems of construction but also the large inverted deformation of the aqueduct can be solved by utilizing two-time prestressing construction scheme. It can be used as a reference for similar project design and construction.

Key words: aqueduct with wall-beam; two-time prestressing scheme; construction; mechanical analysis