

# 大型预应力混凝土渡槽结构受力性能试验研究

赵顺波 张利梅 李树瑶 胡志远

(华北水利水电学院土木工程系 郑州 450008)

**摘要:** 本文介绍南水北调中线工程河南段初步设计中提出的跨度为40m, 双箱矩形断面大型预应力混凝土渡槽结构的1:5仿真模型试验研究情况, 对预应力混凝土渡槽结构仿真模型试验中结构自重的模拟与结构承受水荷载作用前初始应力状态的建立、水荷载施加方法等关键技术问题进行了分析讨论。试验结果表明, 采用调整混凝土初始预应力的方法模拟预应力混凝土渡槽结构在结构自重作用的受力状态是可行的, 采用单面橡胶和钢结构组成的单腔和多腔加载水囊可以准确地模拟渡槽中水荷载的作用, 采用全自动数据采集处理系统是保证大型结构模型试验数据采集同步而精确的必要设备条件, 为大型预应力混凝土结构模型试验提供重要成功经验。针对渡槽单箱承受水荷载和双箱承受水荷载时主要构件的性能测试结果, 提出各构件的设计方法和结构构造措施以及需要进一步改进的结构设计建议。

**关键词:** 水工结构工程 应力与裂缝 模型试验 渡槽 预应力混凝土

## 1. 渡槽原型概况

南水北调中线工程渡槽建设任务量大, 渡槽的过水流量、水深及水荷载均很大, 其规模居于世界前列, 小跨径、普通的结构形式已不适应其建设规模及要求。因此, 研究采用大跨新颖、技术经济性能先进的结构形式, 成为南水北调中线工程渡槽结构设计的主要任务之一。作者依托跨越河南省新郑市境内双洎河的渡槽工程, 对钢筋混凝土多纵梁渡槽结构的设计方法和受力性能进行了研究, 表明采用预应力混凝土技术在改善渡槽正常使用性能方面具有明显的优越性, 是需要进一步深入研究的课题<sup>[1,2]</sup>。

因此, 在综合考虑使用、经济、结构和施工等方面要求的基础上, 总结借鉴国内外预应力混凝土渡槽建设经验, 通过综合比较后设计了新型的双箱式渡槽结构, 如图1所示, 其基本构件为纵向大梁(中墙和边墙)、底板、底部横梁、边墙竖肋、边墙纵向水平加劲肋和顶部横杆<sup>[3,4]</sup>。其组成特点是: 纵向大梁既做挡水结构又做承载结构, 材料充分利用; 纵向大梁因高度大而能够充分利用曲线预应力筋的优点; 中墙将渡槽横向分成两个过水区域, 便于运行中检修, 中间采用双墙形式, 可有效增加抗侧向水荷载作用的刚度; 底板采用肋形梁板结构, 与

平板式结构相比, 能减少工程量, 增加刚度, 使底板受力合理; 底部横梁、竖肋和顶部横杆形成横向封闭环, 提高了纵向大梁的侧向稳定性和结构侧向受力的整体性。

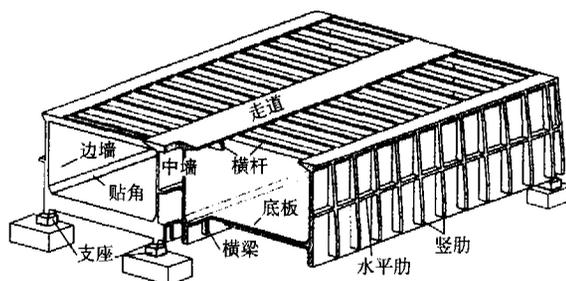


图1 渡槽原型外观及纵横断面立体图

以双洎河渡槽工程为依托进行结构设计, 渡槽单跨跨度为40.0m, 宽度为25.6m, 高度为9.6m; 单箱过水断面宽度为10.5m, 设计水深为6.70m, 校核水深为7.42m。沿横向设宽度0.40m、高1.4m(含槽底板厚0.40m)的底部横梁15根, 与底部横梁相应设宽度0.40m的竖肋和宽0.40m高0.50m的顶部横杆; 在两侧墙外侧腰部设高0.30m的水平肋, 与竖肋和边墙形成竖向梁板结构、混凝土强度等级为C50, 槽身普通受力钢筋采用Ⅱ级热轧钢筋, 分布钢筋采用Ⅰ级热轧钢筋, 预应力筋采用 $\phi^j 15$ 高强低松弛钢绞线(标准强度 $f_{ptk}=1770\text{MPa}$ , 截面积 $A_s=150\text{mm}^2$ , 弹性模量 $E_s=1.9\times 10^5\text{MPa}$ , 张拉控制应力



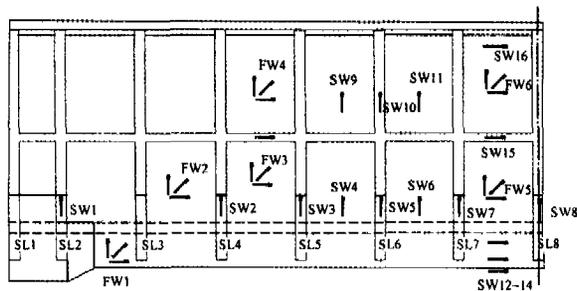


图4 渡槽边侧墙混凝土应变片布置

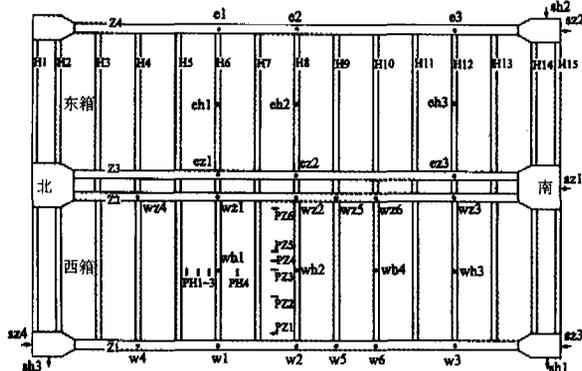


图5 渡槽底部和支座位移计及底板混凝土应变片布置

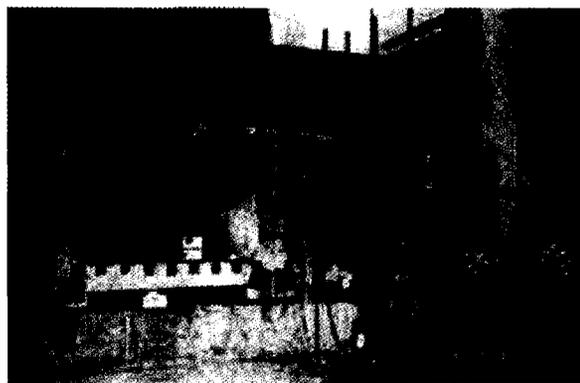
### 2.3 加载系统

在正常运行状态下,渡槽主要承受结构自重和水荷载作用。水荷载的加载装置和水压力测试仪器布置借鉴多纵梁式钢筋混凝土渡槽模型试验的成功经验<sup>[1]</sup>。竖向水荷载采用大型单面橡胶皮单一空腔水压力装置模拟,通过该装置上部的1根纵向钢梁与4套反力架组成的反力系统达到向渡槽底板加压的目的;横向水荷载采用沿高度方向分成四个压力空腔的大型单面橡胶皮空腔水压力装置模拟,每一空腔单独外接入水口向空腔内注水,即把三角形分布的水荷载用四个小梯形来代替,通过该装置侧面的横向钢支撑作为反力装置达到向渡槽侧墙加压的目的。单槽加载和双槽加载的荷载系统全景如图6所示。

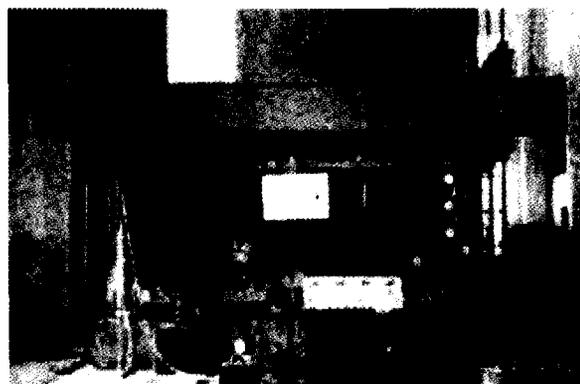
### 2.4 试验程序

模型在试验室内沿南北纵向放置。本模型主要试验程序分为六个阶段:(1)模型制作阶段,包括钢筋应变片的设置、钢筋骨架绑扎、模板、混凝土浇筑与养护;(2)加载设备安装阶段,进行水荷载加载装置的制作、安装并反

复调试以保证正式试验成功;(3)测试系统的安装调试阶段,布置混凝土应变片,加载系统调试,布设电阻式位移计,联机后进行仪器的全面调试;(4)施加预应力阶段,初读数,按照先纵向(先水平筋、后曲线筋)、再横向、后竖向的顺序张拉预应力筋,并记录相应的数据;(5)单槽加载试验阶段,将西槽加载装置架空,初读数;然后水荷载沿竖向和横向同时以设计水位的倍数(简称为荷载比)施加,加载至荷载比为1/3、2/3、1.0、1.11(校核水位)、1.18(满槽水位)时分别读数;(6)双槽加载试验阶段,架空加载设备,读数;然后加载至荷载比为1/3、2/3、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.8、2.0时分别读数。从设计水位(荷载比1.0)后开始进行裂缝监测,裂缝出现后进行记录并读取典型裂缝的宽度。实际试验施加至2倍设计水位水荷载时,渡槽模型纵向主梁裂缝宽度超过了0.4mm的正常使用裂缝控制极限状态,至此完成全部试验工作。



单槽加载



双槽加载

图6 渡槽加载全景

### 3. 试验成果分析

#### 3.1 预应力施加效果

由于研究的是结构小变形问题，并且混凝土、钢筋和预应力筋均处于弹性工作状态，因此，预应力混凝土渡槽模型试验中结构自重的模拟，可以通过调整预应力筋的实际张拉力使模型与原型在自重和预应力共同作用下建立相同的初始应力状态加以解决。首先采用三维有限元分析得到渡槽原型在自重和预应力共同作用下的应力分布，然后通过反复调整渡槽模型的预应力筋的张拉力，采用三维有限元分析方法进行相应的计算分析得到与渡槽原型整体应力分布相近、主要控制断面应力等值的模型。模型试验过程中，对预应力摩擦损失进行了测试，结合模型钢筋和混凝土应变片实测结果，再次对各预应力筋的实际张拉力进行调整，保证渡槽原型和模型在承受水荷载前具有相同的应力分布。限于篇幅，有关预应力混凝土渡槽在自重和预应力作用下初始应力状态的整体三维有限元分析方法及比较详见研究报告<sup>[7]</sup>。同样地，本文仅限于渡槽模型试验结果的分析。与三维有限元分析计算结果的对比从略。

#### 3.2 单槽加载时模型的受力状况

西箱单槽加载至满槽水位时，整个结构仍处于弹性变形阶段。

横梁的正截面应变沿截面高度线性变化并基本符合平均应变平截面假定。西箱横梁跨中正截面在水荷载作用下梁底表面受拉并沿截面高度而减小，叠加预压应力后梁底边缘仍保持0.73MPa左右的压应力。东箱横梁由于整体结构变形协调向上弯曲，梁底表面受压并沿截面高度减小，整截面均处于受压应力状态。

渡槽底板在水荷载作用下的纵横向拉应变随着荷载的增加而增加，但叠加预压应力后仍处于受压状态。图7为渡槽施加预应力之后，随着水荷载的增加沿底板宽度方向布置的PZ系列混凝土应变片的测试结果。随着水荷载的增加，板底混凝土预压应变减小，板的控制设计

截面为距离两侧纵向大梁约0.5m的中间区段。加载至满槽水位时，西箱跨中底板的板底表面仍至少保持的0.23MPa压应力。

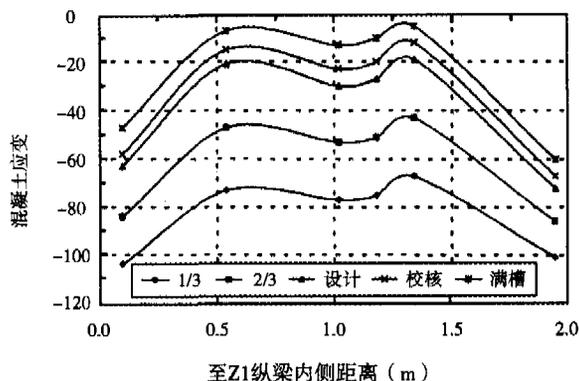


图7 横梁H7~H8间底板板底混凝土应变分布

Z1纵梁与底板交接贴角偏上的纵截面，在水荷载作用下的内（东）侧受拉，外（西）侧受压，叠加预压应力后内侧在位于SL5~SL11竖肋之间的区域仍存在竖向拉应力，最大拉应力为0.6MPa。Z2和Z3纵梁与底板交接贴角偏上的纵截面在水荷载作用下西侧受拉，东侧受压，叠加预压应力后全截面处于压应力状态。Z4纵梁与底板交接贴角偏上的纵截面在水荷载作用下内（西）侧受压，外（东）侧受拉，但拉压应力均很小，叠加预压应力后全截面处于压应力状态。

四根纵梁跨中正截面均基本符合平均应变平截面假定，并处于受压应力状态。Z1纵梁底边缘压应力最小，数值为1.37MPa，并且仍存在0.03mm的反拱。

上部横杆的应变很小，最大拉应力为0.7MPa。

#### 3.3 双槽加载时模型的受力性能

(1) 渡槽底板。根据渡槽底板混凝土应变实测结果分析，渡槽底板表现出短边固定单向板的典型受力特征。加载到设计水位荷载时，位于渡槽跨中的第7块（H7~H8横梁之间）板底表面混凝土至少保持0.35MPa压应力，当加载到1.6倍设计水位荷载时，板底沿板长边方向开始出现裂缝；加载到1.8倍设计水位荷载时，该块板底沿板长边方向的裂缝延伸，并与沿对角线

方向出现的裂缝相连,形成如图8所示的明显类似于板极限承载时塑性铰线的连续裂缝,东箱以中纵梁为对称轴与西箱基本相同。第8块(H8~H9横梁之间)板底也有类似裂缝分布形态,但未形成连续裂缝,其它位置的板底未出现裂缝。这表明渡槽跨中竖向变形增大了跨中板底的混凝土拉应变,与渡槽底板本身沿短跨受弯产生的板底拉应变叠加,导致板底裂缝的发生与发展,同时,由于中间纵向大梁的抗弯刚度小于两边纵向大梁的抗弯刚度,使得中间纵向大梁的挠度大于两侧边纵梁,从而使靠近中间纵向大梁的板底表面裂缝发展比较充分。

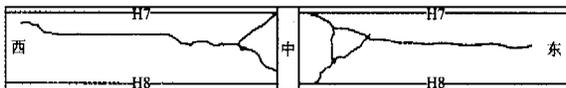


图8 渡槽跨中板底裂缝分布形态

(2) 渡槽底部横梁。根据渡槽底部横梁跨中沿高度方向的混凝土应变实测结果分析,渡

槽两端的4根横梁混凝土拉应变很小,在整个加载过程中均未出现裂缝,起到了对两端支座的固定和拉结作用。随远离两端向渡槽跨中放置的横梁,其跨中正截面混凝土应变符合平截面假定但不存在截面中性轴,表现出弯拉构件的受力特征。在设计水位荷载作用下,横梁底表面混凝土至少保持1.62MPa压应力。当加载至1.3倍设计水位荷载时,H5和H6横梁的跨中段各出现呈垂直状态的1~2条正截面裂缝。随着荷载的增加,整个结构的内力因各构件混凝土截面刚度变化而不断地进行动态调整,使裂缝或闭合或扩展,并伴随新的裂缝出现。加载至1.6倍设计水位荷载时的最大裂缝宽度为0.19mm,位于H9横梁西箱跨中区。加载至1.8倍设计水位荷载时,最大裂缝宽度为0.24mm,位于H6横梁的东箱跨中区。加载至2.0倍设计水位荷载时,最大裂缝宽度为0.27mm,位于H6和H7横梁东箱跨中区。H3~H13横梁跨中的裂缝分布如图9所示。

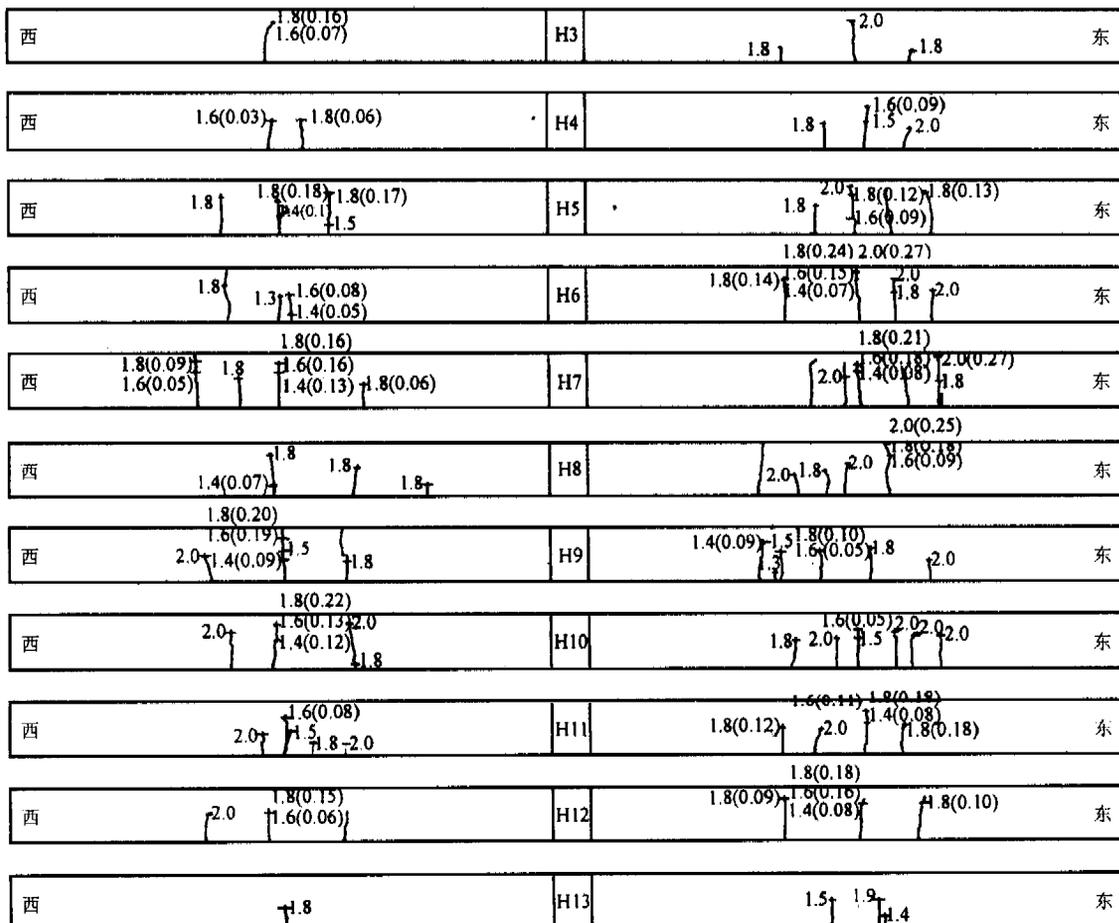


图9 渡槽横梁侧面裂缝分布形态

图10绘出了横梁6、8、12的荷载~挠度曲线,可以看出在加载至1.6倍设计水位荷载之前,渡槽西箱和东箱横梁的变形是基本相同的,之后由于东侧纵向大梁出现裂缝后变形增大,东箱横梁较西箱横梁的裂缝发展加快、裂缝条数增多,截面刚度降低致使变形也随之加大。

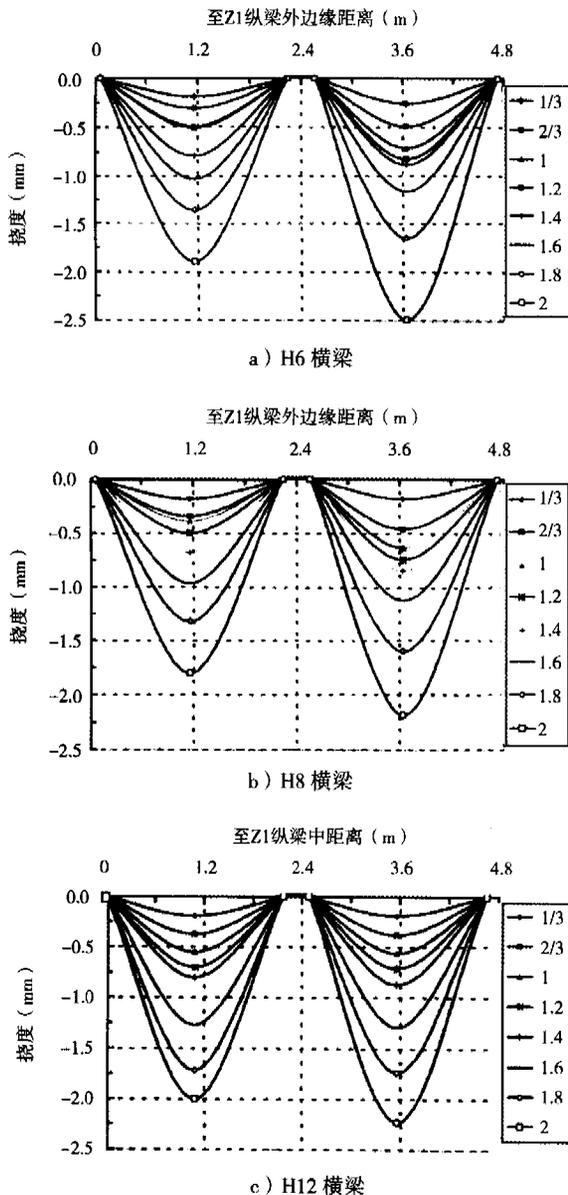


图10 渡槽横梁挠度曲线

(3) 渡槽纵向大梁。根据各纵向大梁跨中截面混凝土应变实测结果分析,纵向大梁沿高度方向的正截面混凝土应变基本符合平截面假定,中性轴位置位于距梁底0.5m~0.8m之间并随

荷载的增加向梁顶发展,其受力形态与一般简支梁相同。在设计水位荷载作用下,两侧纵向大梁底表面混凝土至少保持1.72MPa压应力,中间纵向大梁底表面混凝土至少保持1.54MPa压应力。

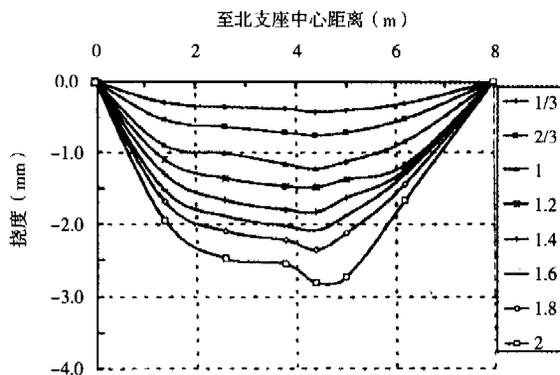
当加载至1.5倍设计水位荷载时,纵梁的跨中区段在渡槽底板以下部分产生1~2条正截面裂缝,但随着荷载的增加,裂缝发展非常缓慢;加载至1.6倍设计水位荷载时,在跨中区纵横梁节点处因横梁向纵梁传递集中力而在位于渡槽底板以下部分的两根中纵梁的跨中区段产生局部弯剪斜裂缝;加载至2.0倍设计水位时,渡槽东边侧墙和西边侧墙各有一条接近跨中的垂直向裂缝迅速发展,裂缝宽度超过控制值0.4mm,整个结构达到极限破坏状态。

图11绘出了西箱纵向大梁的荷载~挠度曲线,可见本设计渡槽两侧纵向大梁因截面刚度稍大于中间的纵向大梁,使得两侧纵向大梁的变形小于中间的纵向大梁,在设计水位荷载作用下跨中挠度约相差0.5mm使渡槽两侧纵向大梁沿横向产生微小的内移,对顶部横杆产生压力,减小了横杆混凝土的拉应力,保证其抗裂性能。

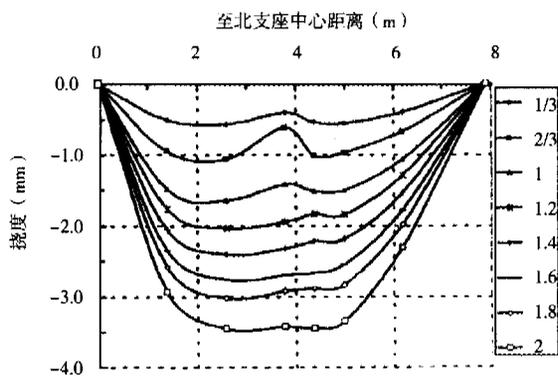
由应变花的测试结果分析,纵向大梁侧面混凝土主拉应力方向与水平线夹角在 $50^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$ ,竖肋起到了防止斜裂缝发生的加强作用。

根据渡槽两侧边纵梁内外侧和中纵梁两侧表面的竖向混凝土和钢筋应变片测试结果分析,边纵梁在横向水荷载作用下的抗裂控制截面位于边纵梁与底板交接贴角偏上的纵截面跨中区域,在设计水位荷载作用下,该区域存在1.45MPa的最小压应力;在1.8倍设计水位荷载作用下,该区域槽内侧受拉区混凝土进入弹塑性工作状态,东(Z4)、西(Z1)边纵梁在位于SL7竖肋的内侧表面均出现微裂缝,达到抗裂设计极限状态;当荷载达到2.0倍设计水位荷载时,边纵梁内侧表面裂缝延伸相连,裂缝呈水平状态。

渡槽两端采用双横杆对于减小横向端部变形,保证槽间止水的可靠性是必要的。



a) Z1 纵梁



b) Z2 纵梁

图11 纵向大梁挠度曲线

(4) 渡槽顶部横杆。随着距边缘距离的增加,横杆跨中底部和侧面(正截面中部)应变逐渐减小。

加载至1.4倍设计水位荷载时,与SL9竖肋相连的西箱横杆在接近Z1纵向大梁一侧1/4跨处出现一条正截面裂缝;加载至1.5倍设计水位荷载时,与SL8竖肋相连的东箱横杆在接近Z4纵向大梁一侧1/4跨处出现一条正截面裂缝;加载至1.6倍设计水位荷载时,与SL5竖肋相连的东箱横杆也在接近Z4纵向大梁一侧1/4跨处出现一条正截面裂缝。但整体来说,横杆的裂缝比较轻微,裂缝宽度在0.06mm以内。从横杆截面应变和裂缝出现位置分析,横杆在中间两根纵向大梁端部因纵向大梁不发生侧向位移而基本上表现为轴心受拉状态,在两侧边墙端部因受到侧墙水平

侧移的影响而处于弯拉状态。

顶部横杆的存在,加强了各纵向大梁之间的联系,提供给纵向大梁顶部侧向支撑,保证了它们在水荷载作用下的共同受力。

### 3.4 双槽加载时模型的“破坏”特征

渡槽组成构件按横梁、顶部横杆、底板、边纵梁与底板交接贴角偏上的纵截面的顺序达到抗裂控制极限状态。构件开裂后,渡槽整体结构在后续的受荷过程中不断进行内力重分配,具有较强的内力重分布能力。纵向大梁的垂直裂缝出现后发展较慢,受力性能与一般简支梁相同。渡槽结构以两侧边纵梁接近跨中的垂直向裂缝迅速发展为标志达到正常使用极限状态,超载安全系数可达设计水位的2.0倍。

## 4. 结论与建议

1. 双箱矩形断面预应力混凝土渡槽结构为空间整体受力结构,但由于其组成构件的荷载传递路径比较明确,因此,在结构的初步设计阶段可将其划分成底板受力单元、纵向平面受力单元和横向平面受力单元进行内力计算。

底板受力单元可取沿渡槽横向单位宽度的板带进行计算。在自重和水荷载作用下,按多跨连续简支状态计算板的跨中弯矩并进行板底配筋设计,按单跨固定状态计算板在横梁处支座弯矩并进行板顶配筋设计。

结构纵向受力单元由纵向大梁、底板和顶部走道板组成。除结构自重荷载外,两侧边纵向受力单元各承受1/4竖向水荷载、中间纵向受力单元承受1/2竖向水荷载,按简支梁计算内力进行结构配筋设计。

结构横向受力单元由横梁及相关底板、竖肋及相关侧墙板、中间对应长度的中墙板以及顶部横杆形成的框架结构组成,考虑框架底部两边节点为铰支座,中节点与边节点具有竖向位移差,该位移差可由结构纵向受力单元跨中挠度计算确定,按结构力学方法计算内力进行结构配筋设计。

(下转第29页)

必须有能使偏心扩孔钻头张开的空间。这一空间的直径应该大于或者等于扩孔直径，长度要不小于扩底钻头的可张敛部分的长度。潜孔锤跟管钻进在跟管完毕后，管靴底部的钻孔空间是能使扩底钻头张开的。此时下入扩底钻具，让钻具到达孔底，缓慢回转钻具，在钻具回转不受阻时送压缩空气，开始进行扩底钻进。扩底直径可等于或稍大于套管外径，使锚索的锚固力更大。

如果扩底钻具不能回转，可以将套管向上拔动，让扩底钻头有足够的空间张开。

有的工程需要在完整岩层扩底，这需要在扩孔端起始时使用合金或金刚石扩孔器扩大一段锚孔以使潜孔锤扩底钻头张开。在较软的砂岩、页岩，可以用弹簧张敛式的合金钻头扩孔。但在花岗岩、片麻岩等硬岩地层扩孔，怎样使金刚石扩孔钻具能适应低转速的锚固钻机且有较高的扩孔效率，这还是一个值得研究的问题。

#### (上接第9页)

渡槽结构因主要承受水荷载，不需要进行组成构件的斜截面抗剪设计。

对横梁与纵向大梁的节点应按梁板结构的集中力传递节点计算配置附加钢筋。

2. 预应力混凝土渡槽结构的仿真模型试验能够比较准确地反映渡槽原型结构受力全过程的力学和变形性能，为进一步优化结构设计提供了比较全面直观的试验资料，具有重要的工程价值。根据仿真模型试验结果，纵向大梁作为渡槽结构的最终安全保障，其承载能力大于其它组成构件是合理的，但边纵墙在横向水荷载作用下的抗裂控制截面与底板和横梁的抗裂控制截面并非同时达到极限状态，有必要对结构做进一步的优化，使其受力更加合理。同时，中间纵向大梁的抗弯刚度略小于两侧边纵梁，对于减小顶部横杆的混凝土拉应力是有利的，可考虑减少横杆数量或采用钢骨混凝土构

## 4. 结论

配合潜孔锤跟管钻进方法进行潜孔锤扩底钻进工艺是有效解决在高边坡和不稳地层中钻进大直径锚索孔的新方法。这一方法的基本原理与偏心潜孔锤跟管钻进的原理相似，但是它工作时不需要带动套管，因此钻进效率高。如果在扩底钻进中又遇到大段垮塌地层，可以提出扩底钻具，再将套管推入已扩孔的完整岩石段再进行跟管，如此反复完成最复杂地层的锚索造孔施工。该工艺已在丹江口水库的较软砂岩的锚固中应用。今后随着工程实践的不断进行，钻具和工艺的不断完善，潜孔锤跟管钻进与扩底钻进工艺会得到推广应用。

#### 参考文献

- [1] 耿瑞伦, 陈星庆主编. 多工艺空气钻探. 地质出版社 1995年.
- [2] 汪彦枢. 潜孔锤跟管钻进方法的研究. 西部探矿工程 1991年3期.
- [3] 汪彦枢. 潜孔锤跟管钻进方法的开发及应用. 探矿工程, 2003年增刊.

件减小横杆截面，并为大跨杆件的施工创造有利条件。

#### 参考文献

- [1] 赵顺波, 胡志远, 李晓克. 大型多纵梁式钢筋混凝土渡槽结构受力试验研究[J]. 水力发电学报, 1999, (3): 42~52.
- [2] 赵顺波, 李晓克, 赵平. 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.
- [3] 陈文义, 赵顺波, 李树瑶. 南水北调工程大型预应力混凝土渡槽结构选型研究[J]. 华北水利水电学院学报, 1996, (2): 9~14.
- [4] 赵顺波, 陈文义, 黄和法, 李树瑶. 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.
- [5] E富马加利著, 蒋彭年等译. 静力学模型与地力学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- [6] 赵顺波主编. 工程结构试验[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- [7] 赵顺波主编. 南水北调大型预应力混凝土渡槽结构设计与试验研究[R]. 郑州: 华北水利水电学院, 1999.
- [8] 赵顺波, 张新中编著. 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.
- [9] 朱以文. 微机有限元前后处理系统Vizi CAD及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1993.