

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0069

左丽,付军,冀荣贤,等.深水条件下自平衡组合式钢围堰设计与现场试验研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):139-146. ZUO L, FU J, JI R X, et al. Design and field trial of self-balanced composite steel cofferdam in the condition of deep water [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 139-146. (in Chinese)

# 深水条件下自平衡组合式钢围堰设计与现场试验研究

左丽<sup>1</sup>, 付军<sup>2</sup>, 冀荣贤<sup>2</sup>, 赵海涛<sup>3</sup>

(1. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038; 2. 南水北调中线干线工程建设管理局 河南分局, 郑州 450000; 3. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210024)

**摘要:**大型输水渠道衬砌在冻融循环等作用下易产生剥蚀破坏等缺陷,同时渠底反滤排水系统在运行过程中可能会失效,需要进行检修和维修。大型输水工程一般不具有停水或者降低水位运行条件,因此在不停水条件下渠道衬砌面板缺陷与破坏修复技术是大型调水输水工程检修、维护的重点和难点问题之一。以南水北调中线干渠衬砌修复现场试验为依托,进行了一种水下3.0~3.5 m钢围堰的结构设计,深入研究了挡水面板、支撑传力系统并进行了有限元受力分析,研究了不同部位结构新型止水型式,提出了便于安装且止水效果好的自平衡组合式围堰成套技术,以及钢围堰水面装配、入水就位及拆卸转场施工技术,并结合现场试验成果进行不断优化,可以为大型输水工程衬砌水下修复干地作业提供有益参考。

**关键词:**自平衡;组合式钢围堰;止水构造;深水条件;衬砌面板

中图分类号:TV52;TU279.7 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design and field trial of self-balanced composite steel cofferdam in the condition of deep water

ZUO Li<sup>1</sup>, FU Jun<sup>2</sup>, JI Rongxian<sup>2</sup>, ZHAO Haitao<sup>3</sup>

(1. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China; 2. Henan Branch of the Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450000, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Large-scale water conveyance canal lining is easy to erode and damage under freeze-thaw cycles and the drainage system at the bottom of the canal may fail during the operation processes. These disadvantages need to be improved. Large-scale water diversion projects generally do not have the conditions of water-stopping or water level reduction. Therefore, the repairing techniques of the defects and damages under the condition of non-stop water are one of the key and difficult problems in the operational and maintenance of large-scale water diversion projects. Based on the field testing of lining repair of main canal in the middle route of South-to-North Water Diversion Project, the structure design of an underwater 3.0~3.5 meter steel cofferdam was carried out. A set of self-balanced combined cofferdam techniques, which were easy to install and had effective water-stopping, was proposed in this study through further researches of water-retaining panel, supporting force transfer system and new water-stopping types of structures in different parts. Construction technology of water surface assembly, water-entry and dismantling-transfer site of steel cofferdam have also been proposed. The results can provide useful references for underwater repair of dry land with lining of large water conveyance projects.

**Key words:** self-balanced; composite steel cofferdam structure; water-blocking structure; condition of deep water; lining surface of canal

收稿日期:2019-01-26 修回日期:2019-03-08 网络出版时间:2019-03-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190311.1346.008.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405006);国家自然科学基金(51878245)

作者简介:左丽(1979—),女,河北邯郸人,高级工程师,主要从事水工结构方面研究。E-mail: zuoli@nsbd.cn

通信作者:赵海涛(1978—),男,河南西华人,副教授,博士,主要从事水工结构方面研究。E-mail: zhaoh@hhu.edu.cn

一般大型调水输水工程线路长,沿线地质条件复杂,环境条件变化大,渠道易出现衬砌面板裂缝、表层冻融破坏、剥离、塌陷等缺陷。目前,国内外渠道缺陷处理一般都是在降低水位运行或停水情况下实施,然而大型调水输水工程一般不具备降低水位运行或者停水检修条件<sup>[1-6]</sup>,对水面线以下渠道衬砌面板塌陷、隆起及水面线上下冻融破坏等缺陷只能采用压重等临时措施,为工程带来安全隐患<sup>[7-11]</sup>。陈洪伟等设计了一种组合式围堰,但其槽钢骨架需要深入土层,对衬砌混凝土及下部止水结构有破坏,不适合运行期渠道检修与维护<sup>[12]</sup>。通常的钢板桩围堰也具有上述类似的缺点。郝清华等研究了一种沉箱式水下设备,进行衬砌板水面交接部位冻损修复研究,但围堰宽度和入水深度均有限,只适合渠道水下浅层部位修复,深水条件下其稳定性差,不利于安全施工<sup>[13]</sup>。一般的土石围堰、混凝土围堰等占地面积大,不适

用渠道衬砌修复。因此,目前已有的围堰设施或技术普遍存在水下施工难度大、止水密封效果差等问题,同时一般围堰入水深度有限(小于 1 m)、每次仅能对一块或少数块面板局部进行修复<sup>[14]</sup>,远远无法满足大型调水输水工程正常维修与养护需求<sup>[15]</sup>。因此,研发安全可靠、止水效果好、可拆解组合、工程造价低、适用性强的新型组合式挡水设备具有重要的意义与应用价值。

## 1 围堰整体结构形式

结合边坡修复不能破坏原有良好坡面的使用条件,提出一种基于重力自沉稳定的自平衡组合式围堰,其概念设计方案见图 1。该围堰包括分段拼装而成的水平投影为敞口八字形围挡结构,用于对围挡结构每个分段单元分别进行支撑的一组支撑结构,以及用于对围挡结构整体进行稳定和加固的反力平衡结构三大部分。

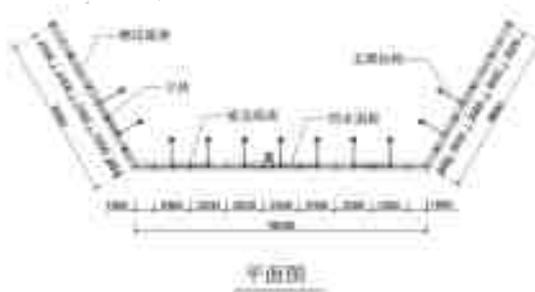
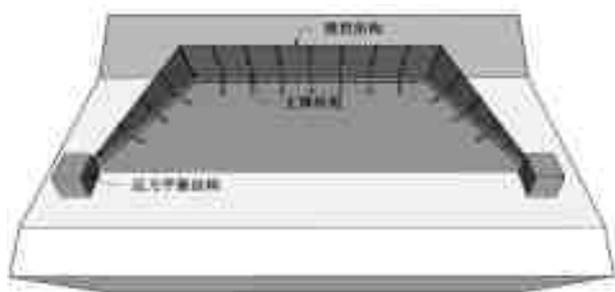


图 1 自平衡组合式围堰设计

Fig. 1 Design of self-balanced composite cofferdam

### 1.1 围挡结构

围挡结构的每个分段单元包括底座、立柱和挡水面板三部分。

根据所处位置的不同,围挡结构的底座可分为底边底座、侧边底座以及用于连接底边、侧边底座的拐角底座三种。底边底座的截面形状为直角梯形,该直角梯形四个角中的锐角角度等于渠道(河道)衬砌坡面与水平面间的夹角;侧边底座的截面形状为矩形;拐角底座由分别与侧边底座和底边底座的截面相同的两段连接而成。围挡结构中的每个底座的重量不低于 1 t,其构造形式包括设置于底座两端的 T 型承插槽和 T 型承插头,用于固定立柱的安装卡口和用于安放挡水面板的限位槽。底座上表面有一组四个吊环,用于底座的安装、移动。以底边底座为例的底座见图 2。

立柱的径向两侧分别设置有用于插入挡水面板的限位槽,并在一端设置有与底座上的立柱安装卡口相匹配的插座式连接安装定位接头。立柱上还设置

有用于连接支撑结构的支撑孔位结构。立柱见图 3。



图 2 底边底座

Fig. 2 Diagram of bottom base



图 3 立柱图

Fig. 3 Detail diagram of column

挡水面板的主体为平面钢板,钢板背水面焊接有加强筋板。挡水面板安装于底座和立柱的限位

槽内,与底座和立柱共同构成围挡结构。挡水面板见图 4。

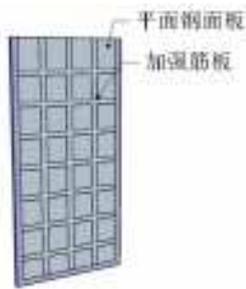


图 4 挡水面板

Fig. 4 Diagram of water retaining panel

### 1.2 支撑结构和反力平衡结构

支撑结构安装于立柱的后侧,以提高围挡结构平面外刚度,增强每个围挡结构单元的稳定性。支撑结构包括支撑杆系和平板支座两部分,其中支撑杆系为可调式三角结构,包括上部连杆、下部连杆以及设置于上、下部连杆两端的四个连接套筒。上部连杆和下部连杆均为两端分别设置有矩形丝杠传动齿的实心圆棒,上部连杆中部设置有一组销轴孔。连接套筒的截面为圆环,其内环设置有与上面所述矩形丝杠传动齿相适配的矩形内齿。平板支座固定于渠道(河道)衬砌坡面上,用于支撑杆系的安放固定。支撑结构见图 5。

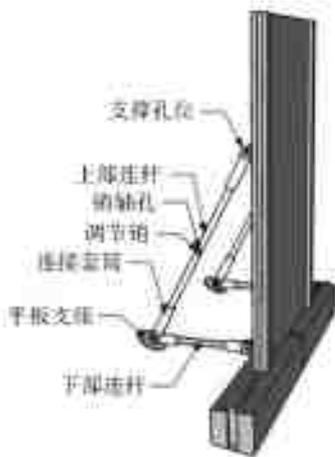


图 5 支撑结构

Fig. 5 Diagram of supporting structures

反力平衡结构作为整体结构的支撑结构,可用于保证整体结构相对于渠道边坡的稳定。反力平衡结构由固定设置于边坡坡面上的一组可容纳配重物的反力箱和连接杆组成。每个反力箱可分别通过连接杆与围挡结构的底座连接。当围挡结构底座与边坡接触状况较差时,其接触面摩擦力过小,围堰整体向上推移,造成结构失稳。将反力箱放置在干燥渠坡上,反力箱的底面设置有平板软质橡胶板,该橡胶板作为摩擦结构能增大反力箱与边坡坡面之间的摩

擦系数,利用反力箱及内部配重物的总重力和反力箱底部与渠坡的摩擦力达到整体结构的受力平衡,使结构维持稳定。反力平衡结构见图 6。



图 6 反力平衡结构

Fig. 6 Diagram of counterforce balance structure

### 1.3 受力状态有限元分析

采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立各部件三维有限元模型,进行工作状态下的受力分析,水深取 3.0 m。工作状态下,底座主要承受水压,见图 7、图 8,底座在组合式围堰内部无水状态下,受到最大侧向水压和重力作用,最大应力为 7.98 MPa,最大变形为 0.004 mm,具有足够的强度和刚度。支撑杆起到支撑钢板和立柱的作用,在立柱受到水的侧向力时,支撑杆抵消一部分侧向力,以减小立柱的变形和应力,见图 9、10,可知支撑杆(直径 60 mm 圆钢)和立柱(直径 160 mm 圆钢)组合最大形变量是 0.15 mm,出现在立柱上部。最大应力为 27.5 MPa,发生在支撑杆与立柱连接处,远小于 Q235 钢的屈服强度 235 MPa,满足刚度和强度条件。围堰挡水钢板承受较大的压力,且水深增大时压力显著增大,10 mm 厚面板应力和变形见图 11、图 12,由图可见,钢板中部的变形不过 1.38 mm,最大应力为 23.1 MPa,满足刚度和强度条件。

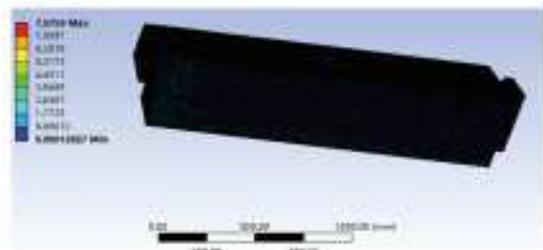


图 7 底座应力

Fig. 7 Stress of bottom base

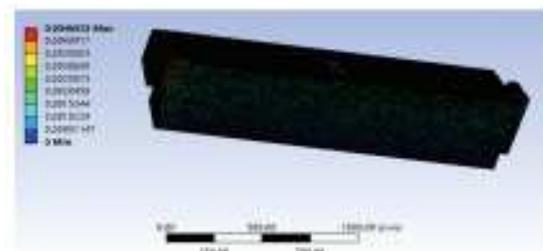


图 8 底座变形

Fig. 8 Deformation of bottom base

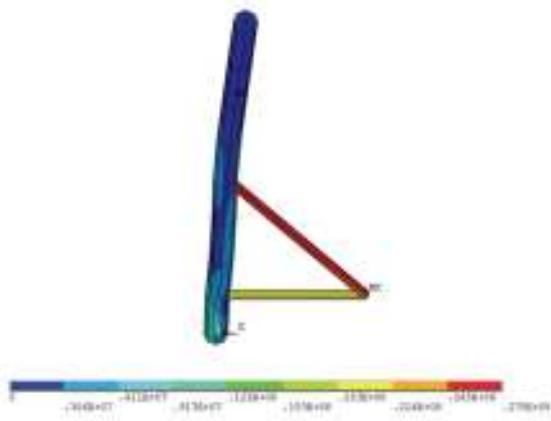


图 9 立柱及支撑杆应力

Fig. 9 Stress of column and supporting structures

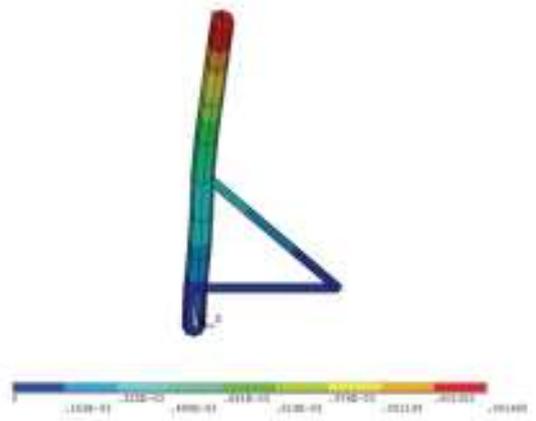


图 10 立柱及支撑杆变形

Fig. 10 Deformation of column and supporting structures

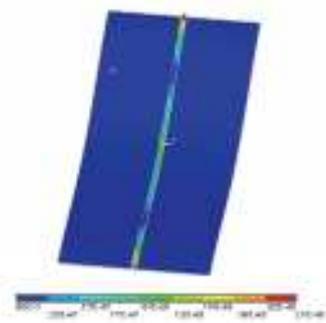


图 11 挡水面板应力

Fig. 11 Stress of water retaining panel

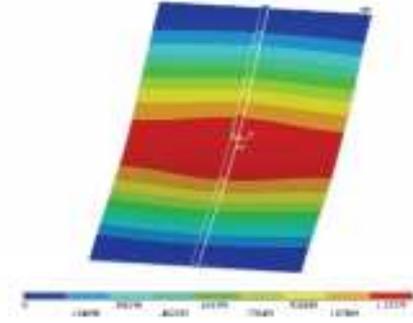


图 12 挡水面板变形

Fig. 12 Deformation of water retaining panel

## 2 围堰止水构造

### 2.1 底座止水构造

底座止水包括底座之间止水,底座底部止水和底座外侧止水三部分。

底座之间采用 T 型承插头和 T 型承插槽的连接机构, T 型承插头与 T 型承插槽间依靠构件间配

合精度及相互咬合关系,迷宫止水。

因渠坡存在起伏不平、坑洼凸起、局部错台等情况,造成围堰底座安装就位后与渠坡面板间形成渗水通道,因此底座底部止水问题非常重要。可采取两种方案:(a)采用膨胀止水条止水<sup>[16-17]</sup>或充气气囊<sup>[18-20]</sup>止水等止水方式,见图 13。(b)底座底部与渠坡混凝土面板间放置一块平板软质橡胶板用于止水。

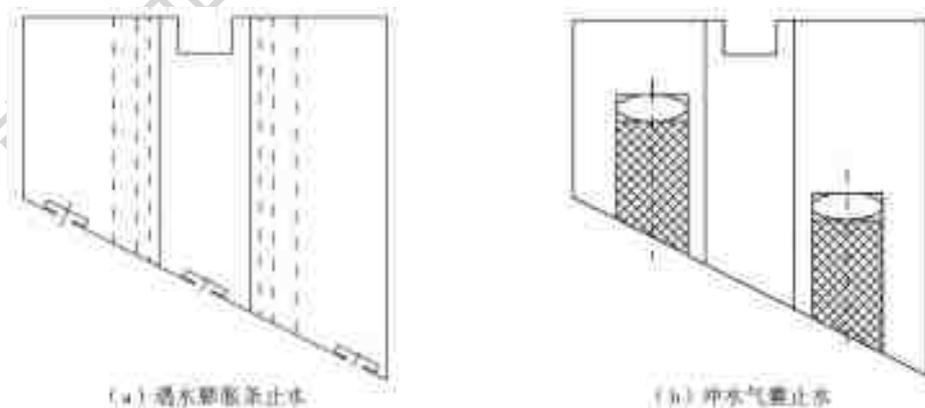


图 13 底座底部膨胀止水条或充气气囊止水方式图

Fig. 13 Diagrams of expansion water-blocking strip and water filling air bag at the bottom of base

底座外侧止水采用三种方案:沙管止水、棉花管止水和外侧橡胶阻水帘。(1)沙管止水。在底座外围迎水面与渠坡面板接触部位通长围绕一条帆布沙管阻水。(2)棉花管止水。为保证外围阻水材料与

渠坡面板的有效贴合,并能自动随水流冲击填塞渗水缝隙,在底座外围迎水面与渠坡面板接触部位通长围绕一条粗布棉花管阻水。(3)双层橡胶阻水帘。在底座外侧迎水面的下方用螺栓固定双层软质平板

橡胶止水帘,该双层软质平板橡胶止水帘主要利用较薄层橡胶板贴合好、搭接缝隙小的特点形成阻水层,利用较厚层橡胶板自身强度大抗流性能强的特点作为薄层橡胶板的限位固定层。底座止水见图14(以橡胶止水帘为例)。



图14 底座止水构造

Fig. 14 Diagram of water-blocking at bottom of base

## 2.2 挡水面板止水

挡水面板插入底座和立柱的限位槽的三边设有相应的止水措施,用柔性平板橡胶板或者膨胀止水条作为止水带,粘贴固定于挡水面板边缘的背面和侧面,依靠围堰内降水后形成的内外水位差产生的压力压紧,进而实现围挡结构间的止水,见图15。

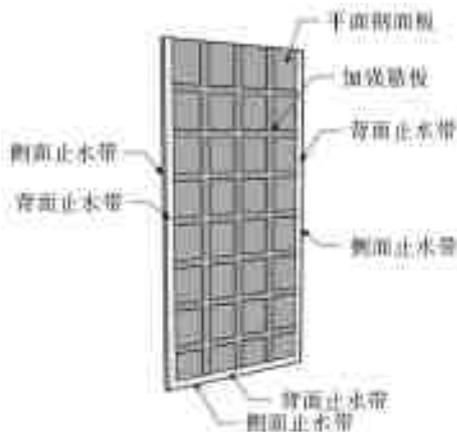


图15 挡水面板止水构造

Fig. 15 Diagram of water-blocking at water retaining panel

## 3 现场试验

### 3.1 围堰安装、降水和拆卸

现场试验场地选择在南水北调荥阳管理处渠段

大张村跨渠公路桥下游100 m左岸。输水断面采用单一边坡的梯形断面,渠道两侧边坡系数为1:2.5,底宽15 m,水深7.0 m。衬砌范围为渠底和过水边坡,边坡衬砌至一级马道,渠坡顶部设水平封顶板,坡脚设齿墙。主要采用现浇混凝土衬砌,混凝土衬砌渠底厚度为8 cm,渠坡厚度10 cm,衬砌混凝土为C20。

各构件加工完毕、准备工作就绪后,开始现场钻孔、攻丝、安装橡胶板、吊环、止水条等工作,并开始围堰结构组装。围堰结构安装先从底座开始,按照从下游到上游的次序将底边底座依次吊装至边坡坡面上并连接,然后按照先上游后下游的次序将两个拐角底座与第一个和最后一个底边底座分别连接,最后按照上游和下游交错进行的次序分段安装侧边底座。底座安装完毕,开始立柱的安装,按照从上游到下游的顺序依次插入已安装好的底座上的立柱安装卡口中,然后安装支撑结构。框架安装完成后,将连成一体的底座及立柱向水中同步顶推至水中预定深度处,再将挡水面板按照从上游到下游的顺序依次插入各立柱限位槽中,挡水面板安装完成即整个围挡结构的安装完毕。为保证整体结构的稳定性,立即安装反力平衡结构。安装过程见图16。

安装完毕后,将围堰结构顶推至预定吃水深度后开始降水工作,将围挡结构内侧的水采用抽水泵向外侧排出,直至围堰密封良好,无明显渗漏水。待作业完成后,按照先下游侧面挡水面板,再底边挡水面板,最后上游侧挡水面板的顺序依次将挡水面板吊出,挡水板拆卸完成后。然后按照先下游侧立柱,再底边立柱,最后上游侧立柱的顺序依次将立柱吊出。挡水面板和立柱拆卸完成后清理归纳以备后用,再将底座向上牵拉至边坡坡顶后将底座拆除。

### 3.2 止水效果分析与优化

#### 3.2.1 挡水面板止水

挡水面板的两侧和下方装有宽50 mm,厚10 mm的止水橡胶,挡水面板背水面周边与底座矩形



(a) 底座安装



(b) 立柱及支撑结构安装



(c) 挡水面板安装

图16 安装过程

Fig. 16 Installation processes

槽和立柱矩形槽接触面之间也装有同样的止水橡胶。根据试验观察,围堰挡水面板随水深增大而所受压力显著增大,依靠水位差产生的压力压紧,进而实现围挡结构间的止水,降水试验结果显示挡水面板止水效果较好。

### 3.2.2 底座底部止水

#### (1) 膨胀止水条止水

在围堰底座底部加工出两条宽 20 mm、深 30 mm 卡槽,卡槽内安装厚 20 mm、宽 50 mm 遇水膨胀条,在围堰底座安装完成水中就位后开始膨胀,达到将渗水通道阻断的目的。根据现场试验,遇水膨胀条能阻断缝隙 2 cm 范围内的渗水通道,但若缝隙超过 2 cm,由于其所含膨润土成分在入水后变得滑腻,膨胀方向的不确定性(主要是纵向膨胀无法克服),易从底座卡槽中脱出,造成止水失效,且易损坏,膨胀后重复使用率较低。



图 17 底座膨胀条纵向膨胀后脱出卡槽

Fig. 17 The longitudinal expansion strips of the base and then disengagement from the chute

#### (2) 平板软质橡胶板止水

因考虑到橡胶密度大、不透水、较柔软的特性,为追求更好的止水效果,在底座底部与渠坡混凝土面板间放置一块 20 mm 厚平板软质橡胶板<sup>[21-22]</sup>于止水。根据现场试验,围堰入水后,底座底部无渗水现象,止水效果好。

### 3.2.3 底座侧边止水

#### (1) 沙管止水

在底座外围迎水面与渠坡面板接触部位通长围绕一条直径 150 mm 帆布沙管(18 m 粗砂 18 m 细沙)阻水(图 18)。根据现场试验,沙管入水后变硬不能紧贴底座与渠坡面板缝隙,无法达到阻水目的。

#### (2) 棉花管止水

在底座外围迎水面与渠坡面板接触部位通长围绕一条直径 150 mm 粗布棉花管阻水(图 19)。为防止棉花管入水后上浮,在每节底座外围焊接一条花管定位架,使花管保持与底座渠坡缝隙贴紧状态。

根据抽水过程中通过水下电视观察,围堰外部底座与渠坡接触部位,花管与渠坡面板贴合较好,局部有部分花管被水流吸入缝隙中现象,围堰内部底座与渠坡接触部位有微弱水流迹象,花管能够有效阻水,水泵能够有效降水。但因棉花特性,花管无法彻底阻断渗水。



图 18 底座外围阻水沙管

Fig. 18 Water-blocking sand pipe of outside base



图 19 底座外围阻水棉花管

Fig. 19 Water-blocking cotton tube of outside base

#### (3) 双层橡胶止水帘

为了保证橡胶板与渠坡面板贴合效果,采用长 2100 mm(搭接 100 mm)、宽 200 mm、厚 3 mm 的薄橡胶板,用螺栓固定在底座外围,入水后保证有 100~150 mm 的橡胶板自沉贴合在渠坡上,在围堰内部抽水时,如有渗水通道,橡胶板可靠自重、水压力及水流压力作用下自动贴紧渠坡,达到阻水目的。根据现场试验,入水后,受水流冲击影响,上游侧边底座及底板底座安装的 3 mm 橡胶板被浮漂卷起,未达到试验效果。分析原因是因为橡胶板过薄、自身强度无法抵御水流冲击所致。

将 3 mm 橡胶板更换为厚橡胶板进行试验。通过对厚度 6、8 mm 橡胶板进行单节现场入水后的贴合性、抗流性试验,6 mm 厚橡胶板表现出较好的贴合性及抗流性,8 mm 橡胶板抗流性强但贴合性较差。决定采用 6 mm 厚橡胶板将 3 mm 橡胶板替换。经现场试验,发现 6 mm 厚橡胶板与渠坡面板贴合效果仍不理想,特别是搭接部位错台后形成的

缝隙较大,易形成渗水通道。

采用3 mm+6 mm 双层橡胶板进行试验。主要利用3 mm 橡胶板贴合好、搭接缝隙小的特点形成阻水层,利用6 mm 橡胶板自身强度大抗流性能强的特点作为3 mm 橡胶板的限位固定层。根据经抽水过程中水下电视观察,双层橡胶板未被水流冲起,围堰内侧底座与渠坡接触部位无明显水流现象,围堰内水位下降明显,止水问题得到良好解决。

#### 4 结 语

依托南水北调中线干线渠道衬砌修复现场试验,设计了一种由模块化单元分段拼装的自平衡组合式挡水围堰,最大吃水深度可在3.0~3.5 m。通过现场试验不同优化结构型式,实现了不同边坡长度、不同入水深度和不同边坡系数施工需求,且安全可靠、止水效果好、可拆解组合、工程造价低,克服了以往围堰止水及形成干地作业后设备抗浮、上滑、入水深度小等技术难题,具有很强的操作性和适用性,同时可缩短围堰的就位、拆装时间,简化了操作步骤、节约了操作时间,缩短工期,提高装置的周转效率。为大型调水输水工程不停水条件下正常检测、维修及养护提供了有价值的参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 南水北调中线干线工程建设管理局. 一种可快速就位和移除的整体式围堰及其施工方法:中国,201811247951.3[P]. 2018-10-25. (Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project. An integral cofferdam with quick location and removal and its construction method; China, 201811247951.3[P]. 2018-10-25.)
- [2] 黄晓健,赵旭特. 双钢板桩围堰监测分析[J]. 工程质量,2018,36(4):58-63. (HUANG X J, ZHAO X T. Monitoring and analysis for double steel sheet-piled cofferdam[J]. Construction Quality, 2018, 36(4): 58-63. (in Chinese))
- [3] 王浩,郑和震,雷晓辉,等. 南水北调中线干线水质安全应急调控与处置关键技术研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(2):1-6. (WANG H, ZHENG H Z, LEI X H, et al. Key technologies of intelligent control and emergency regulation for the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 48(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001.
- [4] 孔祥林,张沙,肖雪. 南水北调中线水源区水库联合调度与水情预报[J]. 水利水电快报,2010,31(2):17-19. (KONG X L, ZHANG S, XIAO X. Joint dispatching and water regime forecast of the water source area of the middle route of South-to-North Water Diversion [J]. Water Resources and Hydropower Express, 2010, 31(2): 17-19. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-0081.2010.02.004.
- [5] 刘毅卿,宋飞. 渠道衬砌混凝土拌和物质量控制[J]. 人民长江,2014(10):84-86. (LIU Y Q, SONG F. Quality control of canal lining concrete mixture[J]. Yangtze River, 2014(10): 84-86. (in Chinese))
- [6] 聂艳华,黄国兵,崔旭,等. 南水北调中线工程应急调度目标水位研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):198-202. (NIE Y H, HUANG G B, CUI X, et al. Research on the target water level in emergency dispatch of the South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 198-202. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.032.
- [7] 任华春,石正宝. 浅水工程中薄壁钢围堰的设计及应用[J]. 人民长江,2017,48(2):159-163. (REN H C, SHI Z B. Design and application of thin-walled steel cofferdam in shallow water engineering[J]. Yangtze River, 2017, 48(2): 159-163. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.S2.042.
- [8] 仲志余,刘国强,吴泽宇. 南水北调中线工程水量调度实践及分析[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(1):95-143. (ZHONG Z Y, LIU G Q, WU Z Y. Analysis and practices of water regulation in the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1), 95-143. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0015.
- [9] 宋玲,陈瑞考,马铭悦,等. 冬季输水梯形渠道冻胀时水力因素对刚性衬砌层内力影响研究[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(2):158-163. (SONG L, CHEN R K, MA M Y, et al. Influence of hydraulic factors on the inner forces of rigid lining of trapezoidal water conveyance canal in winter during frost heaving [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 158-163. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0053.
- [10] 胡玮,冯晓波,朱锐,等. 南水北调中线某节制闸弧形门小开度振动观测与安全评价[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):139-151. (HU W, F X B, ZHU R, et al. Field tests and safety evaluation of radial gate vibration under small opening condition in the middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 139-151. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0135.

- [11] 陈洪伟,任元林.组合式围堰在雷州青年运河灌区续建配套与节水改造工程中的应用[J].广东水利水电,2016(8):33-36.(CHEN H W,REN Y L. Application of combined cofferdam to irrigation district rehabilitation and water saving reform in Leizhou Youth canal [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2016(8):33-36. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-0112. 2016. 08. 007.
- [12] 赵鸣雁,孔令仲,郑艳侠,等.串联渠道闸门同步关闭情况下关闸时间对闸前水位雍高影响[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):157-170.(ZHAO M Y, KONG L Z,ZHENG Y X, et al. Analysis of the gate closure time on the height of the water level before the control gate in a multi-channel system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6):157-170. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0166.
- [13] 郝清华,王伟,马成杰.南水北调中线衬砌面板冻损破坏修复技术[J].河南水利与南水北调,2017(10):28-29.(HAO Q H,WANG W,MA C J. Repair technology of frost damage of lining surface in middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Henan Water Conservancy and South-to-North Water Transfer, 2017(10):28-29. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1673-8853.2017.10.016
- [14] 孙佑光,王兵.胶东调水输水明渠运行主要问题原因分析及处理措施[J].水利建设与管理,2018(1):90-92.(SUN Y G,WANG B. Analysis and treatment measures of main problems of operation in Jiaodong water diversion channel[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2018(1):90-92. (in Chinese)) DOI: 10. 16616/j. cnki. 11—4446/TV. 2018. 01. 23.
- [15] 程德虎,苏霞.南水北调中线干线工程技术进展与需求[J].中国水利,2018,844(10):32-35.(CHENG D H,SU X. Technical advancement and demand of middle route scheme of South-to-North Water Diversion Project[J]. China Water Resources, 2018, 844(10):32-35. (in Chinese)). DOI: CNKI; SUN; SLZG. 0. 2018-10-017.
- [16] 张亚丰,王化民,张元波.混凝土蓄水池产生裂缝的原因和预防措施[J].河南水利与南水北调,2011(18):13-14.(ZHANG Y F, WANG H M, ZHANG Y B. Causes of cracks in concrete storage pools and preventive measures[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2011(18):13-14. (in Chinese)).
- [17] 侯俊,苑超俊,师建新.防渗混凝土墙体施工缝的处理[J].河南水利与南水北调,2010(6):97-98.(HOU J, YUAN C J, SHI J X. Treatment of construction joints of anti-seepage concrete wall [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2010(6):97-98. (in Chinese)).
- [18] 杜建军.对空气阀用于长距离输水工程的探索[J].河南水利与南水北调,2016(5):108-110.(DU J J. Exploration of air valve used in long distance water conveyance project [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2016(5):108-110. (in Chinese)).
- [19] 郭永鑫.管道充水过程气液两相流动力学特性分析[J].南水北调与水利科技,2013(5):65-69.(GUO Y X. Analysis of dynamic characteristics of Gas-liquid flow during water-filling process in pipeline [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(5):65-69. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.05065.
- [20] 房彦梅,郭永鑫,杨开林.南水北调西四环暗涵安全输水关键问题[J].南水北调与水利科技,2011(4):137-139.(FANG Y M, GUO Y X, YANG K L. Analysis of operational safety of the west fourth ring culvert of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011(4):137-139. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.04137.
- [21] 徐耀,郝巨涛.混凝土面板堆石坝面板接缝止水技术的发展与展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5):457-465.(XU Y, HAO J T. Development and prospect of slab joint water-stop technology of CFRDs [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5):457-465. (in Chinese))
- [22] 刘凌锋,陈聪, VAN STEE Joel, 等.沉管隧道可逆式主动止水最终接头小梁端部平整度问题的分析与处置[J].中国港湾建设,2018,38(11):14-18.(LIU L F, CHEN C, VAN S J, et al. Analysis and disposal of flatness problem of retractable frames of the reversible active water-stop closure joint for immersed tunnel [J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(11):14-18. (in Chinese))