海上异形大体积混凝土胸墙装配式施工关键技术

王润强
（中交一航局第三工程有限公司）

摘　要：为解决海上异形大体积混凝土胸墙现浇施工中存在的模板安装难度大、周期长、工序衔接复杂等问题，以红沿河核电厂取水口拦污网三化改造工程为依托，采用装配式胸墙方案，将现浇混凝土胸墙结构调整为“现浇+预制+现浇”组合结构，充分考虑装配式结构抗震性和整体性要求，以及预制构件吊装重量控制，对异形胸墙采取分层及分块区域划分、预制部分与现浇部分通过预留插筋锚固结合、吊点及吊架成套设计、预制构件安装精度调控等方式，取得施工进度快、作业安全性高、表观质量好、安装精度高的应用成果，同时也是在核电厂取水口水工建筑物中首次成功应用装配式胸墙施工，形成了涵盖结构优化设计、预制及吊装工艺、质量控制标准在内的整套装配式施工技术应用，施工经验可为类似工程施工提供参考。

关键词：装配式胸墙；胸墙预制；海上施工；大体积混凝土

0　引言

近年来，随着海洋工程建设的快速发展，海上大体积混凝土结构施工面临复杂环境与严苛技术要求双重挑战。传统现浇混凝土胸墙施工工艺在海上异形结构工程中普遍存在模板安装难度大、施工周期长等问题，尤其在核电厂取水口等对结构抗震性及耐久性要求极高的场景中，常规施工方法难以满足高效化、标准化需求。现有研究多集中于陆域装配式技术应用，而针对海上异形大体积混凝土结构的装配式施工技术体系仍存在空白，亟需探索兼顾结构性能与施工效率的创新解决方案。

本文以红沿河核电厂取水口拦污网三化改造工程为依托，针对海上异形大体积混凝土胸墙施工难题，提出“现浇+预制+现浇”的装配式施工工艺。通过将原设计整体现浇结构优化为分层现浇与预制构件组合体系，重点突破异形结构重量控制、吊装精度保障及抗震性能协同提升等关键技术难点。涵盖结构分层设计优化、预制件轻量化、模块化吊点布设及海上安装定位工艺等环节，构建适应复杂海况的装配式胸墙施工技术体系。

1　施工背景

红沿河核电厂取水口拦污网三化改造项目第 2 道拦污网采用圆沉箱式独立墩结构，共 10 座圆沉箱，沉箱直径 14.4 m，高 16.5 m，沉箱间净距 10.6 m，见图 1。

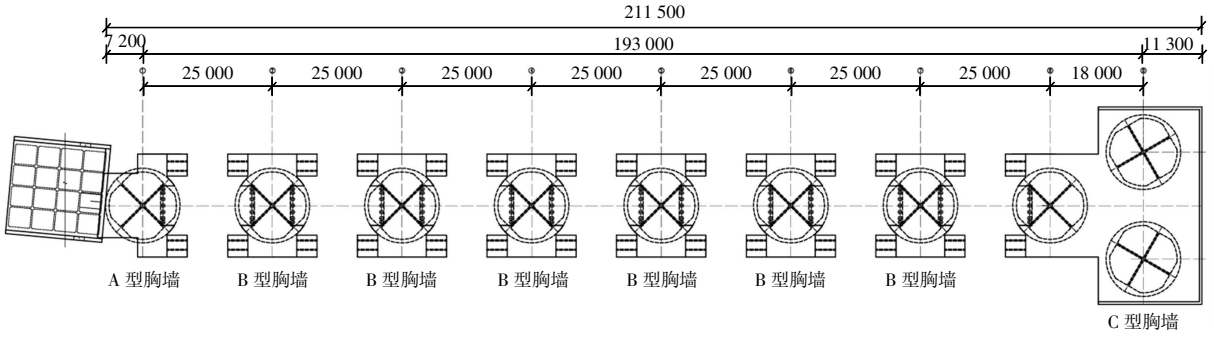
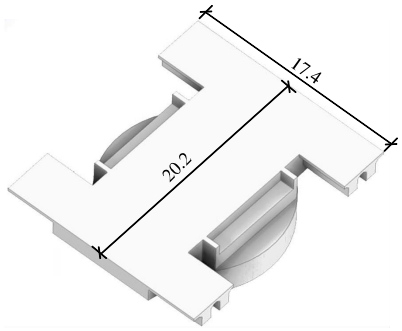
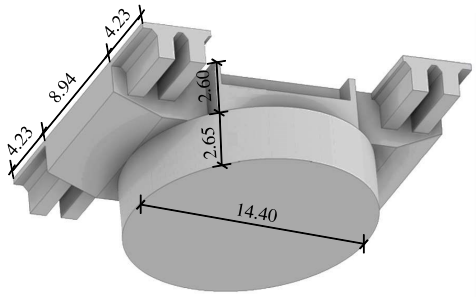


图 1　胸墙整体布置图（mm）

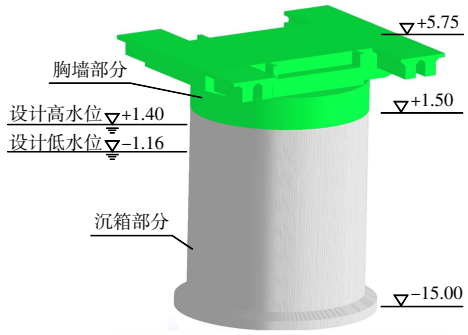
沉箱上部为现浇异形混凝土胸墙，原设计方案中胸墙共分为 A、B、C 三种型号（其中 A 型、C 型各1 段，B 型 6 段），胸墙底标高+1.5 m，顶标高+5.75 m，其异形胸墙悬挑达 4.2 m，且悬挑外带 4.23 m 悬臂，见图 2。本文以 B 型胸墙为例，系统研究海上装配式胸墙施工技术应用。



(a) 平面尺寸



(b) 分层及悬挑尺寸



(c) 立面图

图 2　B 型胸墙示意图(m)

海上异形大体积混凝土胸墙施工难点：

1）胸墙为异形结构，上部胸墙悬挑达 4.2 m，另在悬挑端部设置长 4.23 m 悬臂板梁，若采用现浇结构，胸墙需分层进行施工，且悬挑及悬臂结构形式复杂，模板支立较繁琐，对总体工期控制不利。

2）根据以往经验，每年的 6—8 月为保障红沿河核电冷源取水安全，取水口将实行挂网封闭，海上施工将会暂停。现浇胸墙需在当年冷源挂网封闭结束后进行，胸墙完成后，还需进行预应力空心板梁安装、现浇电缆沟、桥面系、机电设备及附属设施安装等施工，若按照要求的完工节点，将存在巨大的困难。且现场施工受季风影响明显，每年 9 月后，海上有效作业天数将会锐减，对总体工期控制存在巨大的不确定性。

3）海上浇筑大悬挑、大体积混凝土，施工环境恶劣，作业条件差，对实体质量和表观质量控制均不利。

4）胸墙悬挑及悬臂板梁施工模板均需采取支撑加固措施，海上施工难度较大，安全风险较高。

2　施工方法

现浇胸墙施工受异形结构影响海上现浇施工难度大，且现场施工条件差，对施工安全、质量及总体工期均产生不利的影响。

通过沟通提出将现浇施工优化为装配式(陆上预制+海上安装+海上现浇后浇带)施工，可以有效缩短工期，施工质量及安全均可得到有效控制。此种装配式设计方案也属首次应用于核电站取水口项目。

2.1　优化限制条件

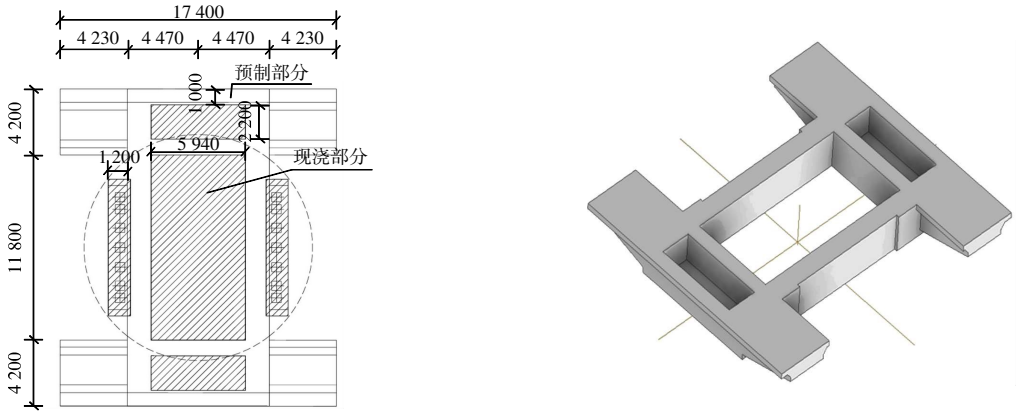
根据船机设备资源，使用 1 000 t 起重船进行安装，对优化后块体的单块重量存在限制。根据施工经验沉箱安装顶面会存在高差，同时考虑沉箱外伸筋影响，需先将沉箱上部现浇接高一段胸墙进行找平。悬挑、悬臂等外形尺寸根据工艺要求确定，其上部的设备及预埋件由工艺确定，优化前已定型，基本无改动空间。块体安装后需充分考虑整体性和抗震性的要求。

2.2　优化思路

考虑 1 000 t 起重船在现场的条件限制，通过扣芯、空腔、优化截面等方式控制块体整体重量在 600 t 以内。考虑沉箱外伸筋与沉箱安装高差问题，下部圆形段采用海上现浇施工，可直接使用沉箱预制外片模板进行施工，将外伸筋浇筑覆盖，同时起到找平作用。在沉箱截面范围内将块体中间进行贯穿扣芯，现浇下层胸墙钢筋外伸，与预制安装块体钢筋浇筑成整体。悬臂可考虑由复杂截面变更为简化截面形式。

2.3　优化后结构设计

B 型胸墙优化后，单块混凝土方量为 220 m^3，重量为 550 t，图 3(a)中阴影部分均为后浇，中间预留空腔为预制胸墙与下层胸墙连接加固的预留现浇部分。胸墙下层现浇时，预留与装配式胸墙中间相同尺寸的空腔，装配式胸墙安装后，在预留空腔内插筋，并伸入预制块体空腔内，最后浇筑形成整体，胸墙效果图见图 3(b)。



(a) 平面尺寸示意图　　(b) 胸墙效果图

图 3　B 型胸墙优化后结构图(mm)

2.4　关键施工工艺

2.4.1　第 1 层胸墙现浇施工

第 1 层现浇胸墙采用海上方驳吊机辅助钢模板支立+陆上地泵长距离混凝土浇筑工艺。在沉箱之间架设临时便桥，通过陆上地泵进行混凝土浇筑。模板采用大片定型钢模板，整个胸墙分为 4 片，每片为 1/4 圆弧形，海上方驳吊机辅助支拆。胸墙模板底端加固在沉箱顶部预留圆台螺母上，顶部采用拉杆对拉加固，相邻 2 片模板采用螺栓进行固定。

第 1 层胸墙浇筑时，在第 2 层胸墙对应空腔位置下面用免拆模板隔出 1 个长 11.8 m、宽 5.94 m、深 0.96 m 的凹槽，免拆模板采用直径 22 mm 的螺纹钢固定牢固。为保证第 2 层预制块体安装精度，在第 1 层现浇胸墙顶面设置限位预埋件，预埋件为采用工字钢制作的梯形结构，距离块体安装边线 2 cm，每间隔 2 m 布置 1 个，块体安装时可沿限位装置的斜坡面下滑，落底时可确保块体的位置在安装边线 20 mm 以内[1]。为减小第 1 层胸墙顶面与第 2 层胸墙底面结合处缝隙，胸墙顶面混凝土平整度控制 10 mm 以内[1]。

2.4.2　第 2 层胸墙预制施工

预制场地选择在长兴岛葫芦山湾港内已建码头，码头前沿水深约 6 m，满足起重船吃水要求。预制完成后通过起重船进行吊装出运，对预制场地进行硬化处理，保证场地平整度。硬化方式为：结构层从上至下分别为 20 cm 厚 C30 混凝土面层、15 cm 厚碎石垫层。施工前检查混凝土面层表面平整度，如遇凹坑、塌陷等问题，先进行修复，保证表面平整度满足要求后方可进行胸墙预制施工。为确保第 2 层预制胸墙底面与第 1 层现浇胸墙顶面有良好接触面，预制场地底胎面层表面平整度应小于 10 mm，高差小于 10 mm[2]。

第 2 层预制胸墙采用汽车吊辅助钢模板支立+泵车混凝土浇筑工艺，为了保证整体重量不超 600 t，利用免拆模板预留空腔。预制胸墙均采用八点吊，预制时预埋 Q355 直径 100 mm 吊环，其中 A、B、C 三种型号的胸墙吊点布置完全相同。混凝土浇筑完毕立即在顶面覆盖土工布和塑料布进行养护，拆模后进行大面积养护，保证混凝土表面湿润。混凝土成型后，覆盖土工布洒淡水潮湿养护 14 d[2]，要求预制块体侧面和端头须覆盖严密，土工布湿润后覆盖塑料布进行养护，并安排专人检查土工布情况，土工布干燥后重新洒水保持湿润。

2.4.3　装配式胸墙安装施工

1) 吊装方式

预制胸墙采用 1 000 t 起重船配专用吊架进行装驳，预制胸墙均采用八点吊。

专用吊架主弦杆采用 ϕ1 020 mm×16 mm 的 Q235 无缝钢管，轴线中心距为 7 440 mm，内部灌注 C40 微膨胀混凝土。垂直腹杆采用 ϕ480 mm×16 mm 的 Q235 无缝钢管。钢结构重量 20 t，混凝土重量 64 t(仅主弦杆，1.8 t/m)，总重 84 t。

预制胸墙采用专用吊架进行吊装，绿色标志位置通过单根 20 m 巨力 RH02 高强环眼型 100 t 吊带，上部半环绕弦杆、下部双环眼通过 120 t 弓形卡环与被吊块吊环连接，钢管外壁焊接挡板用于固定吊带。红色标志位置采用单根 42 m 350 t 高分子环形吊带，下部半兜弦杆，弦杆间对拉斜向支撑作为吊带的限位，上部与起重船吊钩连接(主吊索)。预制胸墙吊装方式见图 4。

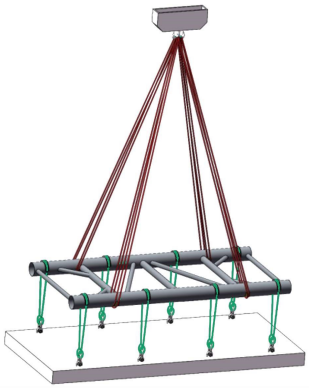


图 4　预制胸墙吊装方式示意图

2）预制胸墙装驳

预制构件强度需达到设计强度的 100%方能装驳，在构件装驳前主要检测构件的尺寸及构件编号等。构件预制完成后要进行喷涂标示，明确构件型号、位置，安装前检查标示是否清晰，避免装船构件型号错误。

1 000 t 起重船吊钩下降使吊具接近预制构件顶面高度，微调使吊具与预制构件准确对位，将吊带挂在吊机的钩头上，使用卡环将吊带连接好。吊带全部挂好后，检查吊带、吊架、钩头以及卡环，确认无误后，指挥起重船缓慢起钩，当吊带绷紧，停止起钩，再次检查每条吊带、卡环，保证吊钩至预制构件的上方对准预制构件的重心点，然后继续指挥起重船缓慢起钩，预制构件吊离地面 20 cm 时，起重船再次停止起钩，再次检查预制构件及吊索具，静止 10 min 没有异常现象后，继续起钩到合适高度，将预制构件放置在运输方驳甲板上，起重人员攀爬至构件顶面将卡环卸下。

预制胸墙构件采用双层装驳，双层装驳的方式。在构件的中梁处满铺双层 800 mm×150 mm×220 mm 垫木进行支垫，同时在船甲板对应位置设置地锚，使用拉索将地锚与上层块体吊环相连接，每个预制构件设置 6 处支垫和 4 处地锚。

3）预制胸墙运输

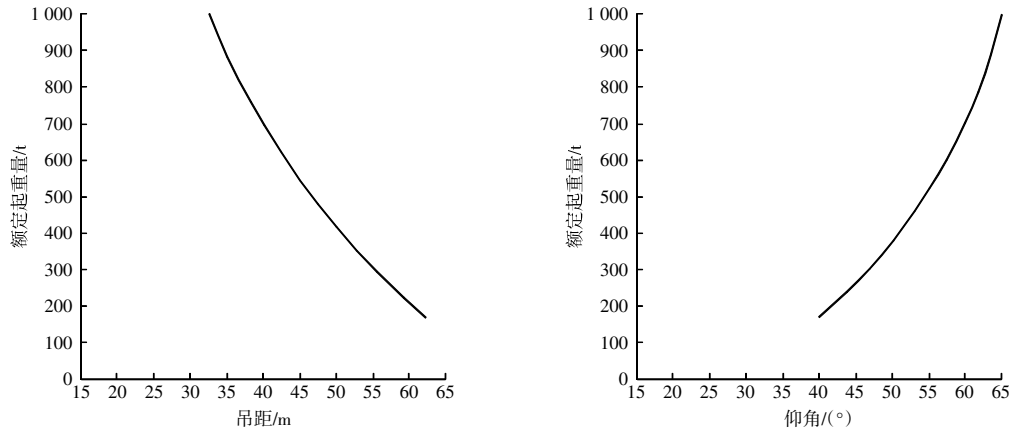
预制构件运输采用自航运输方驳，构件装驳完成后，运输方驳报请相关部门，然后运输，运距约 33 n mile。预制胸墙运输需分别对上层块体和下层块体的稳定性进行核算，因为是双层组合堆载，底层块体不会发生倾覆，所以仅需对底层块体的抗滑稳定性、上层块体的抗滑稳定性和抗倾覆稳定性进行核算。

4）起重船及运输方驳驻位

预制胸墙安装采用 1 000 t 固定趴杆起重船，起重船驻位时应保持船头方向正对安装位置，同时运输方驳需垂直于起重船驻位，以便于起重船起吊预制构件。1 000 t 起重船满载吃水约 4.2 m、6 500 t 运输方驳满载吃水 5 m、2 000 t 运输方驳满载吃水 3 m，安装区域水深最浅为–6.5 m，可满足吊装时起重船和运输方驳吃水要求。

5）预制胸墙安装

吊装预制胸墙时，最远吊距为安装内侧预制胸墙工况，如图 5 所示，在吊距为 37 m 时，最大起重量约为 800 t，预制胸墙自重为 550 t，加入吊索具重量后总重量按 600 t 考虑，吊重按照起重船最大起重量的 85%(680 t)控制，最大起重量可满足要求。在吊距为 37 m 时的吊高约为 80 m，块体安装顶标高为+5.75 m，吊架及吊索具总高度为 37 m，最低潮位按–1 m 考虑，需用的总吊高为 43.75 m，吊高可满足要求。



(a) 吊距与起重量关系　(b) 吊钩仰角与起重量关系

图 5　1 000 t 起重船起吊性能图

在起重量为 600 t 时，起重船的吊钩仰角约为 57°，此时起重船船首与已安装好的预制胸墙距离约为 9.8 m，最低潮位按−1 m 考虑，起重船船首高度为 4.5 m，则最低潮时吊杆底标高为+3.5 m，在距离吊杆 9.8 m 的位置标高为 18.59 m，第 1 层胸墙浇筑后顶标高为+3.75 m，所以起重船的吊杆不会与已浇筑完成的胸墙碰撞。

安装之前，提前 1 h 对第 1 层胸墙顶面进行坐浆处理，坐浆厚度为 10~20 mm[2]，确保块体结合没有间隙。安装过程中使用 4 个手扳葫芦拉块体的 4 个角点吊环进行精调，手扳葫芦的另一端连接已经安装沉箱侧壁预埋的锚环处，根据测量观测的实时位置随时进行调整，以确保块体的安装精度。

采用块体自动定位系统。块体安装前，在块体顶面设置 4 台 GPS 接收天线，船上设置接收装置将块体实时位置信息转化为图像，便于块体安装过程控制块体安装精度。

6）预留空腔浇筑

在施工预留空腔部位的插筋时，需要先将预制胸墙上的钢筋网开孔，开孔尺寸 1 m×1 m，施工人员进入钢筋网内安装插筋，插筋固定、安装完成后再将开孔处的钢筋网补焊好。在硬化的混凝土表面进行凿毛处理，采用风镐等设备使混凝土表面露出粗骨料，清除水泥薄膜、松动石子和软弱混凝土层。在预制箱梁安装处用木模板支模浇筑混凝土。浇筑混凝土前检查模板、钢筋、预埋件位置的正确性，验收合格后采用地泵进行胸墙混凝土的浇筑。混凝土采取分层浇筑，分层厚度不大于 50 cm[3]，混凝土浇筑时要均匀分散，避免集中冲击插筋。

3　结语

本工程结合海上异形大体积混凝土胸墙设计要点和施工难点，为保障海上混凝土胸墙施工进度、安全、质量，通过对设计方案多次论证优化，充分考虑核电厂取水构筑物抗震要求以及其上部自动化设备安装精度要求，形成海上装配式胸墙方案，将异形胸墙分为预制和现浇 2 个部分，其中海上不易施工的异形悬臂部分优化为陆上预制后进行海上安装，剩余现浇部分均为海上易施工部分。施工过程中，通过采取现浇部分标高控制、预制部分质量控制、安装过程精度控制等措施，并设计配套吊架辅助安装，最终成功实施该方案，取得良好实践效果，形成集设计与施工于一体的海上异形大体积混凝土装配式胸墙技术应用，可为后续同类海上异形混凝土结构设计及施工优化提供技术路径与经验借鉴。

参考文献：

[1]　JTS 257—2008 水运工程质量检验标准[S].
[2]　JTS 215—2018 码头结构施工规范[S].
[3]　JTS 202—2011 水运工程混凝土施工规范[S].