

超大型沉箱浮坞门升级方案比选

王晓东, 黄文慧

(中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 深中通道工程钢壳混凝土沉管预制厂由港珠澳大桥沉管预制厂升级改造而成, 需要对原有坞口及坞门进行加宽升级改造。提出大小坞门、旧坞门两侧加宽和新建坞门共 3 套方案, 其中旧坞门两侧加宽又提出钢筋焊接搭接、植筋连接和预应力连接的 3 种方案, 并对加宽后坞门结构受力情况进行数值分析; 新建坞门提出钢混组合结构和全混凝土结构的方案。将上述方案依据现场实际条件、结合数值分析结果进行比选。结果表明, 坞门升级改造的 3 种方案在施工工艺上均具有可行性; 坞门扩宽方案在工期和成本方面具有较大优势; 在具体工程实施中最终选择全混凝土结构浮坞门。

关键词: 坞门; 沉箱; 升级; 比选

中图分类号: TU 753.61; U 673.332

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0222-08

Comparison and selection on upgrade plan of ultra-large caisson floating dock gate

WANG Xiao-dong, HUANG Wen-hui

(The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

Abstract: The steel-concrete immersed tube prefabrication yard of Shenzhen-Zhongshan Bridge is upgraded from the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. The original caisson dock gate and entrance need to be widened and renovated. We propose three sets of overall plans including the large and small dock door, widening both sides of the old dock door, and building the new dock door, put forward three schemes including welding of rebar lap, planting bar joint, and pre-stressing joint for the plans of widening both sides of the old dock door, carry out the numerical analysis on the stress of the broadened dock door structure, and propose the schemes of steel-concrete structure and all concrete structure for the plan of building the new dock door. Based on the actual site condition and the analysis results, we compare and select the above schemes for the construction design. The results show that the three upgrading schemes of dock gates are feasible in construction technology. The widening dock gate scheme has great advantages in construction period and cost. The floating dock gate with full concrete structure is finally selected in the specific project implementation.

Keywords: dock gate; caisson; upgrade; comparison and selection

港珠澳大桥的沉管采用工厂法预制的方式, 国内首次创新采用“L”形的沉管预制厂布置形式。厂内设置深、浅坞, 深坞采用大型钢混箱型浮坞门将坞区和外海隔断, 实现“陆上沉管→漂浮沉管”的转换过程^[1]。深坞门又称浮坞门, 采用浮游稳定性高、安全性好的钢筋混凝土与钢结构组合沉箱重力式浮坞门结构^[2]。该设计突破传统的浮坞门结构设计理念, 采用钢筋混凝土沉箱与钢扶壁的组合结构, 有效降低浮坞门结构重心。

同时, 浮坞门内设置用于调整浮坞门垂直度和吃水深度的压载水系统, 能有效提高坞门浮游稳定性^[3]。作为当时国内最大的混凝土沉箱结构, 预制和模板工艺都得到较大发展, 并在港珠澳大桥工程上进行充分应用^[4-5]。厄勒海峡沉管预制厂在世界上首次采用工厂法预制沉管, 其在工程建设完成后基本荒废。港珠澳大桥沉管预制厂作为世界上最大的沉管预制厂, 对其改造再利用可充分发挥工厂法工艺的巨大价值。因此, 将港珠澳大桥沉管预

收稿日期: 2020-12-15

作者简介: 王晓东(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事沉管隧道领域、大型工程技术管理与科研。

制厂改造后用作深中通道钢壳混凝土沉管预制工厂。现有坞口及坞门宽度无法满足深中通道工程需求,亟需拓宽改造。经严格论证分析,坞口扩宽采用拆除单侧坞墩及连接结构后再新建坞墩的工艺,施工工艺与新建时类似。坞门加宽则提出了大小坞门、旧坞门两侧加宽、新建坞门共 3 种方案,以适应加宽后的坞口。本文将这 3 种方案进行严格比选研究,从而为施工和设计提供参考。

1 工程概况

港珠澳大桥管节宽度为 37.95 m。沉管预制厂坞口宽、浮坞门宽分别为 61、59 m,浮坞门与坞口两侧坞墩之间有 1 m 的空隙,此空隙通过小钢闸门止水。坞口宽度首要限制条件是沉管安装船宽度(56.4 m)和沉管出坞所需安全富余(2.3 m)^[6-7]。

深中通道管节宽度为 46 m。采用沉管运输安装一体船进行沉管安装,该船总长、型宽、型深分别为 195、75、14.7 m^[8-9]。原用于港珠澳大桥沉管预制的坞口宽度无法满足深中通道的沉管及安装船出坞,坞口须由原来的 61 m 扩宽至 85 m,相应的坞门需要进行改造或新建。港珠澳大桥与深中通道沉管出坞尺寸需求对比如图 1 所示。

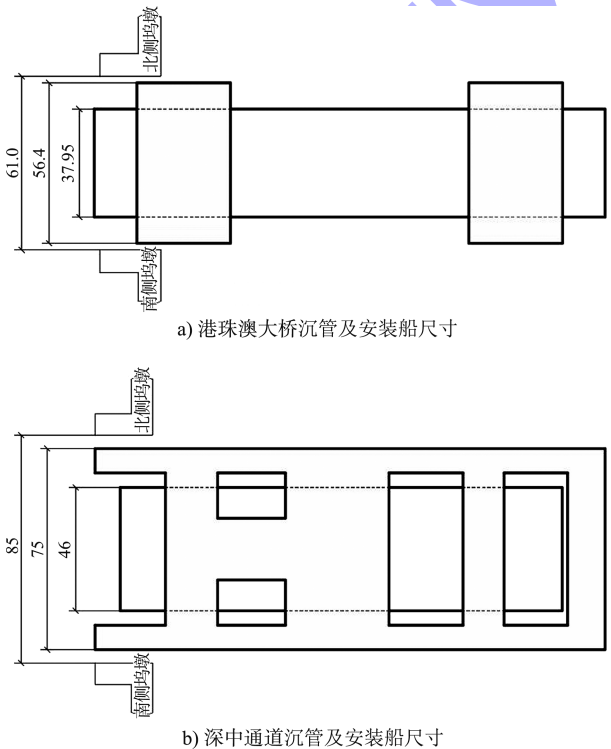


图 1 港珠澳大桥与深中通道沉管出坞尺寸 (单位: m)

原有浮坞门为钢筋混凝土+钢扶壁结构,顶部设置钢扶壁结构进行挡水;沉箱与钢扶壁为一个整体,一起进行浮运安装,见图 2。

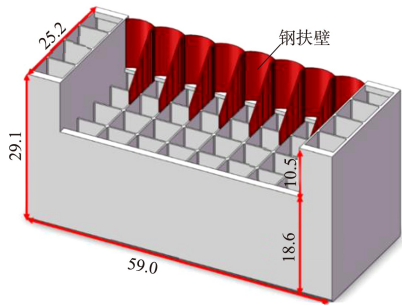


图 2 旧坞门三维结构 (单位: m)

2 大小坞门方案

2.1 方案介绍

原 59 m 宽坞门继续使用,新增 23 m 坞门。在大坞门与坞墩之间、小坞门与坞墩之间、大小坞门之间设置 3 道止水小钢闸门,见图 3。为满足浮游稳定性和起浮高度要求,减轻小坞门总体质量,小坞门上部 9.9 m 高为钢舱格结构。

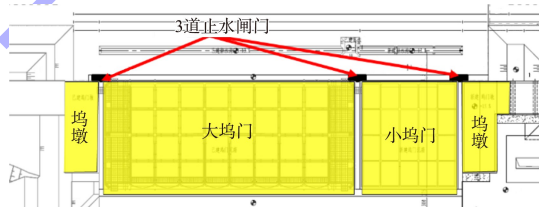


图 3 大小坞门方案

该方案坞门开启流程:坞内排水→坞内外水位持平时开启 3 道止水小钢闸门,并吊至坞门墩侧面固定→小坞门带缆→小坞门抽水起浮→绞缆系统将小坞门浮运至存放区→小坞门沉放坐底→小坞门解缆→大坞门带缆→大坞门抽水起浮→绞缆系统将大坞门浮运至存放区→大坞门沉放坐底→大坞门解缆→坞口开启完毕。关闭流程与开启流程相反,即先关闭大坞门,后关闭小坞门。

2.2 方案难点

- 1) 工期风险高。顶部大量钢舱格焊接对现场作业条件要求高(雨天、大风天气均无法作业)。
- 2) 闸门启闭难度大,渗漏风险大。中间闸门质量约 20 t,距离坞墩约 23 m;灌水期间,因大小坞门存在相对运动,中间闸门与大小坞门之间难以匹配,且两个坞门之间存在缝隙,渗漏风险大,见图 4;小闸门与底部止水带之间存在脱开的

风险，导致底部出现渗漏。

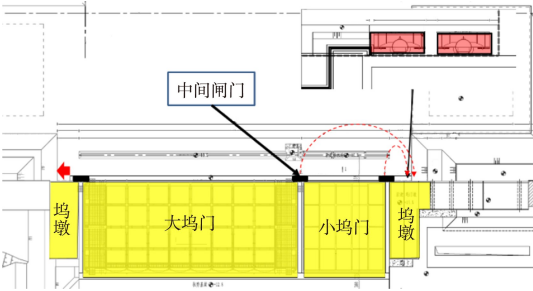


图 4 中间闸门启闭

3)启闭工效低。启闭须进行双坞门的“带缆→起浮→浮运→沉放→解缆”工序，目前单坞门启闭需要 6 d，双坞门启闭至少 10 d，具体坞门启闭时间对比见表 1；珠三角台风普遍具有移动快的特点，10 d 的启闭工期难以满足坞内沉管及安装船的防台需求和沉管安装的窗口期。

表 1 单坞门与双坞门启闭时间对比

工序	启闭时间/d	
	单坞门	双坞门
带缆	2.0	2.0
开小闸门	1.0	1.0
首个坞门排水启闭	1.5	1.5
首个坞门解缆	1.5	1.5
小坞门带缆	—	1.5
小坞门排水启闭	—	1.5
小坞门解缆	—	1.0
合计	6.0	10.0

3 坞门扩宽方案

在原 59 m 旧坞门基础上加宽 24 m 制成单坞门 (图 5)，单侧结构长 12 m、宽 25.2 m、高 29.1 m，布置 8 个舱格。提出 3 种连接方案，分别为钢筋焊接搭接、植筋连接和预应力连接，加宽结构均为钢筋混凝土结构。



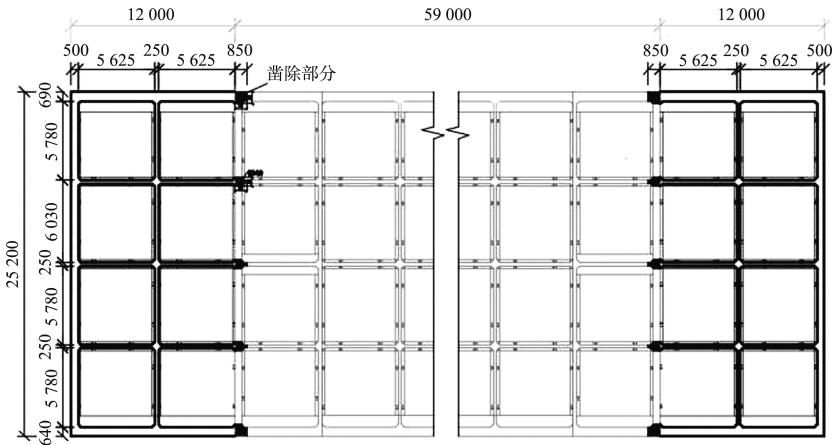
图 5 坞门加宽

3.1 钢筋焊接搭接方案

3.1.1 方案介绍

该方案总体思路为：将旧坞门结构混凝土部分凿除，露出原结构主筋，按照规范进行搭接加宽，新旧搭接面预埋注浆管止水。具体方法为：将旧坞门沉箱 1 道前壁、3 道纵隔墙、1 道后壁及底板位置凿除 850 mm 深混凝土，加宽结构按照原结构进行配筋，新结构主筋与原结构主筋进行单面焊接连接。

沉箱单个舱格尺寸为 5 780 mm×5 625 mm (长×宽)，由底板、前壁、后壁、1 道侧壁、1 道横隔墙、3 道纵隔墙组成(图 6)。



注：加粗部分为加宽结构。

图 6 加宽后坞门结构尺寸 (单位：mm。下同)

凿除原结构混凝土深 850 mm，除去厚 60 mm 的保护层，露出旧坞门结构主筋约 790 mm；新结

构钢筋与旧坞门结构主筋通过焊接连接，焊接连接长度为 300 mm，相邻钢筋错位焊接，见图 7。

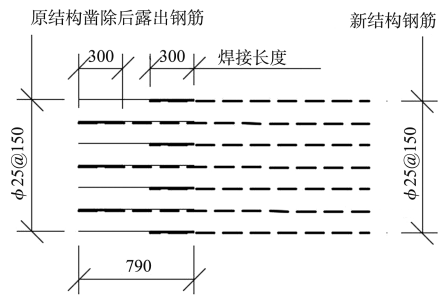


图 7 新旧结构钢筋连接

3.1.2 方案难点

1)旧坞门结构钢筋间距较密，凿除困难且极易将原结构钢筋损坏；凿除后清理困难，焊接质量难以保证；作业空间狭窄，焊接工作量大，无法实现连续单面焊接。

2)旧坞门长 59 m，改造后整体坞门长 83 m，须复核加宽后结构的整体受力状况。

3.2 植筋连接方案

3.2.1 方案介绍

该方案总体思路为：将前后壁、纵隔墙及底板混凝土凿除并露出结构主筋，植筋与新结构相连，并用拉杆连接。具体方法是将旧坞门 1 道前壁、3 道纵隔墙、1 道后壁及底板位置整体凿除 60 mm，露出原结构主筋；然后按照一定间距植筋并与新结构钢筋相连；同时设置锚固点，新沉箱结构预制完成后，通过拉杆将新旧沉箱连接为一体。

植筋钢筋分别布置于前、后壁、纵隔墙及底板的中部，单排布置；底板位置植筋间距 300 mm；前、后壁及纵隔墙位置植筋间距 600 mm。在旧坞门混凝土结构植筋锚固钢筋。锚固钢筋与新旧结构地锚固深度均为 900 mm，见图 8。

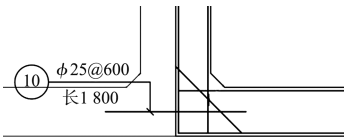


图 8 植筋细部

为保证新旧结构整体性，在前、后壁及纵隔墙两侧布置拉杆。新结构沉箱预制完成后，在预留孔内安装螺杆，两端用螺母锁紧，拉杆直径 36 mm、长 1 200 mm。

依据 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》和 GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》的规定可得，单个锚栓钢材受剪承载力设计值为 326 kN，受拉承载力设计值为 406 kN。因此锚栓受力整体上满足要求，局部需要加强：锚栓剪力满足，局部压应力过大采取增加钢垫板措施，局部拉力较大地方增设锚栓数量。

3.2.2 方案难点

- 1)工期长。植筋作业、拉杆孔在新结构沉箱预制前完成，须在高空搭设大量作业平台。
- 2)施工难度大。拉杆锁紧作业为沉箱预制完成后，同样需要在沉箱内搭设平台来完成。
- 3)需复核加宽后结构的整体受力状况。

3.3 预应力连接方案

3.3.1 方案介绍

该方案总体思路为：加宽结构单独预制，通过预应力螺杆和预应力筋将加宽结构与旧坞门连接为一体，通过止水带止水。具体方法为：加宽结构靠近旧坞门侧预埋钢结构(有螺栓孔,可安装止水带)，预制完成后安装止水带；在旧坞门结构前、后壁位置通过植筋的方式安装锚固台座，加宽结构在预制的过程中预埋锚固件，预制完成后，安装预应力筋并拉紧，止水带充分压缩；同时在侧壁外侧及底板位置设置剪力键抗剪，见图 9。

单侧沉箱张拉布置 26 束预应力，顶部 2 束为钢绞线预应力张拉，其他 24 束为预应力螺杆张拉(考虑到沉箱内或者水下结构采用螺杆形式,为方便后续维护或更换)。新结构预应力锚固头在沉箱预制过程中安装预埋件，旧结构通过植筋锚固的方式安装锚固头。

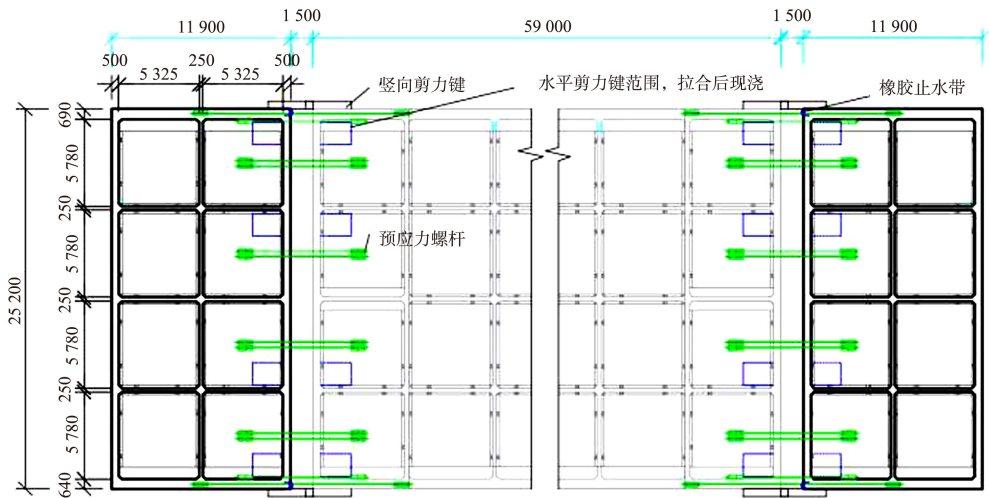


图 9 张拉前新旧坞门结构尺寸

在新、旧结构的前、后壁外侧设置剪力键，新结构剪力键在预制过程中提前预埋钢筋，后续预制；旧结构剪力键通过在前、后壁植筋锚固的方式施工剪力键，见图 10。

水平剪力键布置于底板，在旧坞门侧壁切割 4 个缺口，并在相应位置植筋锚固钢筋；新结构预制过程中预留钢筋及缺口。待张拉完成后，绑扎水平剪力键钢筋，并进行现浇预制。

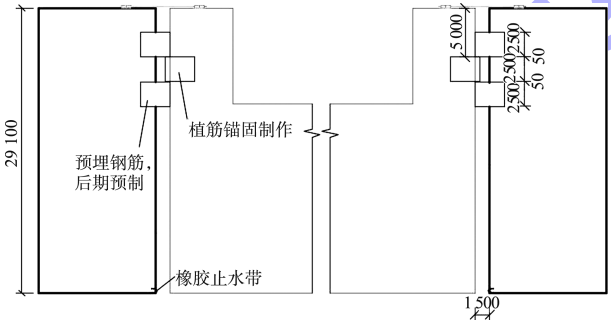


图 10 竖向剪力键布置

3.3.2 方案难点

- 1) 涉及施工方法较多，不确定因素多，存在工期风险。
- 2) 旧坞门锚固点须在原仓格内实施，薄壁结构加强难度大。
- 3) 预应力施工为高风险作业，且该项施工涉及高空作业，有较大安全风险。
- 4) 须复核加宽后结构的整体受力状况。

3.4 加宽后坞门结构受力计算分析

3.4.1 计算模型建立

采用 Midas Civil 软件对新老坞门沉箱进行整

体建模，包括原有沉箱、原有沉箱钢扶壁、新旧沉箱接合面和新浇筑沉箱等，见图 11。

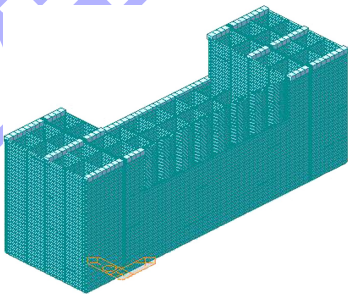


图 11 有限元模型

有限元计算共设置 2 种约束模式，均设置在沉箱底部，分别为：1) 浮运过程中中底部水压力弹性约束；2) 座底状态下布置橡胶支垫弹性约束。

3.4.2 荷载及工况组合

根据工程所处实际环境、现场条件，并依据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》，计算以下 5 种工况的坞门受力状况：

- 1) 预制完成后，开始起浮瞬间：考虑浮力、自身重力。荷载组合： $1.2G+1.2P_{\text{静}}$ (G 、 $P_{\text{静}}$ 分别为重力、静水压力)。
- 2) 浮游状态：仓格内灌水 2 m，外侧吃水，波浪力(最大允许波高 0.6 m)+牵引力 250 kN。荷载组合： $1.2G+1.2P_{\text{静}}+1.5F_{\text{波浪}}+F_{\text{牵}}$ ($F_{\text{波浪}}$ 、 $F_{\text{牵}}$ 分别为波浪力、牵引力)。
- 3) 坐底状态：内外水位相同，非台风(考虑 1 m 波高)，仓格内灌水+10 m(仓格内水位与外海水位相同)。荷载组合： $1.2G+1.2P_{\text{静}}+1.5F_{\text{波浪}}$ 。

4)蓄水作业: 坞内蓄水至 15.35 m(实际最大为 15 m), 外海面按极端低水位-1.41 m 计算。荷载组合: $1.2G+1.2P_{\text{静}}+1.5F_{\text{波吸}}$ ($F_{\text{波吸}}$ 为波吸力)。

5)坐底状态: 内外水位相同, 台风(极端高水位+2.37 m 高波浪), 仓格内灌水+10 m(仓格内水位与外海水位相同)。荷载组合: $1.2G+1.2P_{\text{静}}+1.5F_{\text{波吸}}$ 。

3.4.3 计算结果

1)旧沉箱底板, 工况 4 下存在较大的内力, 包括弯矩、拉力和剪力指标均超出设计值。

2)旧沉箱前壁, 在工况 1、2 和 4 下存在较大的剪力, 超出设计值。

3)旧沉箱后壁(海侧), 工况 1、2 和 4 下弯矩、拉力和剪力指标均超出设计值。

4)旧沉箱横隔板, 在 5 种工况下的剪力值部分也超出设计值。

数值计算结果表明, 59 m 长的旧坞门在加宽成 83 m 的整体坞门后, 结构变形加大、内力增加、局部受力不满足。弯矩云图见图 12, 内力及变形云图因篇幅所限略去。因此, 该旧坞门两侧加宽的方案不可行。

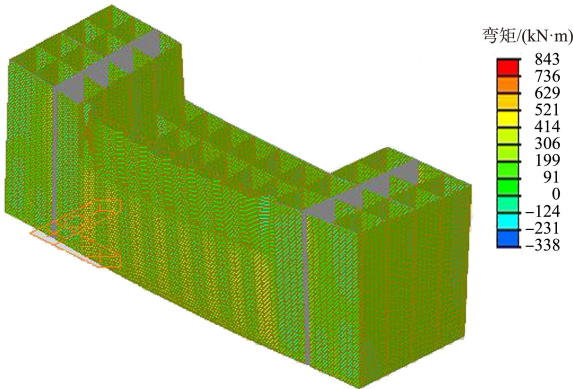


图 12 工况 4 的弯矩云图

4 新建坞门方案

4.1 新建钢混组合结构坞门方案

新建浮坞门同样采用钢筋混凝土重力式箱形结构+钢扶壁组合结构形式, 整个浮坞门沉箱高度方向分为两个部分, 下部 18.6 m 范围内, 由 56 个仓格组成; 上部 10.5 m 范围内, 靠坞墩两侧仓格(共 2 列 8 个仓格)高出 10.5 m, 高出的仓格之间靠海侧处设置 10.5 m 高挡水钢扶壁。预制工艺同

旧坞门, 见图 13。

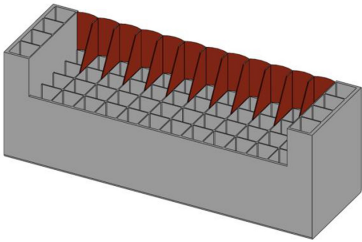


图 13 新建钢混组合结构坞门

4.2 新建混凝土结构坞门方案

新建深坞浮坞门采用钢筋混凝土重力式箱形结构。浮坞门舱格尺寸为: 长 5 600 mm、宽 5 780 mm; 底板、内隔板、坞内侧壁、海侧壁、靠坞门墩侧壁的厚度分别为 800、250、640、690、625 mm。

整个沉箱高度方向分为两个部分, 从沉箱底部向上 18.6 m 范围内浮坞门由 56 个舱格组成; 高程 5.3 m 以上浮坞门靠坞墩两侧舱格高出 9.7 m, 高出的两侧舱格之间靠海侧处将混凝土舱格加高 9.7 m 用于挡水, 见图 14。其他结构形式与旧坞门类似。

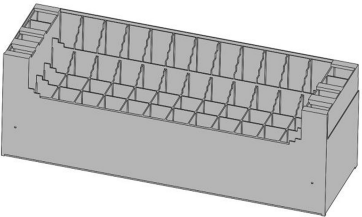


图 14 新建混凝土结构坞门

4.3 方案比选

因旧坞门沉箱尺寸庞大, 无法长距离浮运, 也无法在其他类似水工结构中重复利用, 因此采用新建坞门方案, 需要面临的问题为: 须将旧坞门进行凿除分解, 增加了升级改造成本。

在浮坞门沉箱预制方面, 两种方案均有相对成熟的工艺, 从工期和质量上均有较大保证。在使用和运营维护方面, 主要有以下不同:

1)钢混组合结构坞门浮游稳定性较好, 自身质量相对较轻, 起浮阶段对潮位要求低, 混凝土浇筑过程表观密度偏差要求低; 全混凝土结构自身质量相对较大, 起浮阶段对潮位要求高, 预制过程须严格控制混凝土表观密度和模板变形量。

2)钢混结构中钢扶壁承载较大水压力, 对焊

缝质量和拉杆安装精度要求高，且工程地处海边，钢扶壁腐蚀风险高，在港珠澳大桥施工期间曾进行过多次维护；全混凝土结构后续无需维护。

5 综合比选

从主要工程量、主要施工工艺、方案难点、

工期和成本方面对上述 3 个方案进行综合比选，见表 2。其中工期按照 24 h 作业、单月有效作业时间按照 30 d 进行计算；大小坞门成本费用包含增加的 22 次小坞门启闭次数的费用，其他方案成本费用不含启闭费用。

表 2 各方案综合比选

方案	主要材料用量	主要施工工艺	方案难点	工期/月	成本/万元	
大小坞门	混凝土 2 300 m ³ 、钢筋 700 t、钢舱格 500 t	沉箱 预制、钢舱格焊接、止水钢闸门 远距离吊 装安 工艺	钢结构焊接作业条件要求 高,工期风险大;止水小闸 门启闭难度大,渗漏 风险 大;启闭工效低	4.0	4 800	
坞门扩宽	钢筋焊接搭接	混凝土 3 600 m ³ 、钢筋 950 t	沉箱 预制、混凝土 凿除、 新旧钢筋搭接焊接	混凝土 凿除及清理困难; 焊接空间狭窄	4.4	3 900
	植筋连接	混凝土 3 600 m ³ 、钢筋 950 t、植筋 1 100 m、拉 杆 224 根	沉箱 预制、混凝土 凿除、 植筋连接	工期长;拉杆、植筋施工难 度大	4.3	4 000
	预应力连接	混凝土 3 600 m ³ 、钢筋 950 t、螺杆 24 套、钢绞 线 2 束、止水带 2 条	沉箱 预制、混凝土 凿除、 剪力键植筋锚固、止水带 安装、预应力张拉	施工工艺复杂;薄壁结构 加强难度大;高空进行预 应力施工风险大	4.5	4 300
新建坞门	钢混结构	混凝土 7 400 m ³ 、钢筋 2 000 t、钢扶壁 250 t	沉箱 预制、钢扶壁焊接	钢扶壁焊接作业条件要求 高,工期风险大	5.5	7 000
	全混结构	混凝土 8 700 m ³ 、钢 筋2 200 t	沉箱 预制	混凝土 表观密度及模板变 形量控制要求严格	5.0	6 850

注：坞门扩宽方案的结构整体受力状况不满足要求。

6 结语

1) 提出的 3 种坞门升级改造方案从施工工艺角度分析均具备可行性。

2) 坞门扩宽方案从工期和成本角度看，具备较大优势，并对加宽后结构的整体受力状况进行了数值分析，结果显示加宽后的整体坞门结构变形加大、内力增加、局部受力不满足，故在本工程不可行，但相应工艺及加宽理念可在类似大型混凝土结构加宽中提供借鉴。

3) 考虑到大小坞门方案启闭工效低和渗漏风险高，钢混组合结构坞门中的钢扶壁施工质量要求高且其后续的频繁维护成本高，综合各种因素，在具体工程实施中最终选择全混凝土结构浮坞门，并在预制技术上升级了一大步。

参考文献：

[1] 王晓东,董洪静.大体积钢混凝土组合箱型浮坞门的应

用[J].中国港湾建设,2018,38(2):61-65.
[2] 卢永昌,梁桁,陈良志.一种钢砼组合箱型浮坞门:201220465405.9[P].2012-09-13.
[3] 陈良志,卢永昌,梁桁.新型钢-混凝土组合箱形浮坞门在沉管预制厂中的应用[J].中国港湾建设,2019,39(9):50-54.
[4] 黄文慧,董政.坞门式沉箱模板设计及施工要点[J].中国港湾建设,2015,35(7):32-35.
[5] 李惠明,梁杰忠,袁立.坞门大沉箱预制技术[J].中国港湾建设,2013(3):55-59.
[6] 宁进进,丁宇诚.超大型沉管出坞施工及控制方法[J].中国港湾建设,2014(7):54-55,58.
[7] 李家林,王明祥,王明亮,等.超大型沉管隧道管节浮运安装船的建造与应用[J].公路,2018,63(8):60-63.
[8] 宋神友,陈伟乐,金文良,等.深中通道工程关键技术及挑战[J].隧道建设(中英文),2020,40(1):143-152.
[9] 中国船级社.世界首制!“一航津安1”自航式沉管运输安装一体船交付[J].船舶标准化工程师,2019,52(5):8.

(本文编辑 王璁)