

· 施 工 ·



港珠澳大桥香港口岸人工岛大型箱涵 浮运封闭工艺

马 林

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 港珠澳大桥香港口岸人工岛大型箱涵采用节段预制、水上浮运的安装工艺。为保证浮运过程中箱涵不出现渗漏, 对箱涵封闭结构(钢封门)进行结构设计 with 验算, 并通过多次密水试验对钢封门的止水构造进行优化。结果表明, 上述箱涵封闭工艺是可行的, 现场 29 个节段的水上浮运过程中未发现渗水、漏水等病害, 并且该工艺显著提升施工工效、降低施工成本, 可为类似工程实施提供参考。

关键词: 箱涵; 浮运; 密封; 钢封门; 港珠澳大桥

中图分类号: U 655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0185-04

Floating transport and sealing technology for large-scale box culverts adopted in artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge-Hong Kong Boundary Crossing Facilities

MA Lin

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The installation technologies for large-scale box culverts adopted in the artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge-Hong Kong Boundary Crossing Facilities (HKBCF) are sectional prefabrication and floating transport. To avoid the leakage of box culverts during floating transport, we carry out structural design, calculation, and verification for the leakproof structure of box culverts (with steel seal doors) and optimize the leakproof structure on the basis of watertightness tests. The result shows that the above sealing technology is feasible, and no seepage or leakage is reported for 29 sections of prefabricated box culverts during floating transport. Moreover, the technology significantly improves the construction efficiency and reduces the construction cost, which may serve as a reference for similar projects.

Keywords: box culvert; floating transport; sealing; steel seal door; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

近年来, 箱涵浮运落底安装工艺在水工领域被越来越多地采用, 主要是因为施工中无需修筑围堰, 施工时间更短, 经济效益更优, 例如浙江舟山港二期围涂工程^[1]、青岛奥运会帆船中心水工项目^[2]、港珠澳大桥香港口岸人工岛项目^[3]等。箱涵浮运通常有 2 种做法: 1) 借助气囊使箱涵漂浮^[4-5], 这类箱涵多为钢结构, 自重不会很大; 2) 使箱涵封闭自漂浮^[6-7], 这类箱涵多为钢筋

高程结构, 自重和排水体积都很大。箱涵自漂浮的前提是保证其封闭不出现渗水、漏水等病害, 此时通常采用钢封门结构^[8-12]。但是关于钢封门的设计与止水工艺研究较少。浮运过程中, 钢封门不仅需要足够的强度抵抗外部的水压力、波浪力等外力, 还需要足够的刚度抵抗外力作用下的变形。此外, 若箱涵浮运线路较长, 还需要优良的密水止水可靠性。本文依托港珠澳大桥香港口岸

收稿日期: 2021-06-07

作者简介: 马林(1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程设计与施工。

人工岛水工项目, 研究箱涵封闭结构(即钢封门)的设计验算、止水做法, 并对实施过程与效果进行全过程监控。

1 工程概况

港珠澳大桥香港口岸人工岛西南角的 D 区是与香港机场连通的陆岛通道, 宽约 150 m, 为超深淤泥上的砂石填筑结构(图 1), 其下布置有 5 道箱涵用于过水, 箱涵在筑堤回填、地基处理后再开挖进行施工。其中, C1 段箱涵内底高程为 -4.50 ~ -4.06 m; C2、C3 段箱涵内底高程为 -4.50 ~ -4.11 m; C4 段箱涵内底高程为 -4.500 ~ -4.135 m; EC1 段箱涵内底高程为 0.16 ~ 0.00 m。箱涵高度 6.2 m, 混凝土强度等级为 C45。每 30 m 设 1 道伸缩缝。



图 1 香港口岸人工岛

C1 ~ C4 为四孔箱涵, 底板厚 1 m, 顶板厚 0.7 m, 总高度为 6.2 m, 外壁厚 0.6 m, 内壁厚 0.5 m, 总宽度 22.7 m。南侧斜坡提出水口箱涵为异形扶壁结构, 高 6.2 m, 长约 20 m, 宽 22.7 m。箱涵结构见图 2。

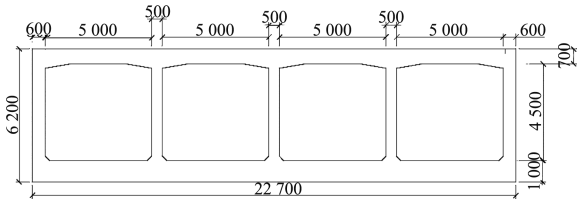


图 2 C1 ~ C4 箱涵结构典型断面 (单位: mm)

箱涵采用工厂预制、海上浮运、水上安装工艺。即: 箱涵结构在预制厂预制→用半潜驳将箱涵节段运至现场附近的下潜坑(距离箱涵安装位置 4.3 km)→用 2 艘拖轮将上述节段拖运至基槽安装

位置→在卷扬机集中控制系统与 GPS 定位系统的帮助下完成落底着床与水下对接。

本工程 C1 ~ C4 段箱涵共有 21 个预制节段, 其最大长度 38.2 m, 最大质量约 5 100 t。浮运过程中, 箱涵节段须保证封闭、不渗水。施工难点如下:

1) 封堵面积大。预制箱涵为开敞式构筑物, 普通箱涵前后共 8 孔, 单孔面积为 4.5 m×5.0 m; 斜坡提出水口为多面开敞结构, 开敞面面积为 23.0 m×5.5 m、5.5 m×10.0 m。由于堵水面积大, 封闭结构与高程接缝长, 紧固螺栓孔洞多, 潜在漏水点多。

2) 浮运路线长。箱涵下潜点距基槽安装位置约 4.3 km, 周边有进出机场航道, 往来行驶的高速客轮造成船行波很大, 箱涵封堵结构必须充分考虑波浪力和水流力, 确保结构可靠、能抵御频繁外力冲击而不漏水。

3) 异型结构多。预制箱涵结构形式多, 异型箱涵的预埋螺栓实际位置有偏差, 而封闭结构的螺栓孔又不宜过大, 否则易漏水, 螺栓对位难, 高精度安装难度大。

2 箱涵封闭

2.1 结构设计

为使箱涵获得足够的浮力, 必须对其敞开的端部进行封堵。同时, 单个箱涵分为多个节段, 节段之间需纵向连接, 因此, 箱涵节段必须保证结构稳固、无较大变形。因取材方便、加工快捷, 通常采用型钢组合作为箱涵封闭结构(简称, 钢封门)。采用 I25 工字钢作为支撑主梁(间距 1.25 m), 纵横分配梁分别采用 I12 工字钢(间距 0.6 m)和 I12 槽钢(间距 0.6 m), 面板采用 10 mm 厚钢板, 型钢之间采用焊缝连接, 型钢与高程之间采用高强螺栓连接(图 3)。结构计算时, 按照最不利工况考虑, 海域最大流速 2 m/s, 据此计算水流阻力和波浪撞击力, 同时, 按照极端高潮位 2.5 m 计算箱涵落底着床的水压力, 所有作用分项系数均取 1.5。计算结果显示, 主梁最大挠度 9.6 mm, 次

梁最大挠度 0.6 mm，均满足规范要求。

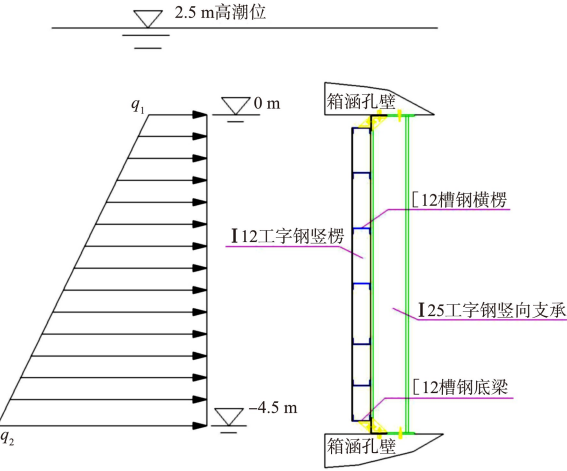


图 3 极端水头差工况下钢封门受力分析

因箱涵结构形式不同，中间段为普通矩形结构，两端斜坡堤段为异形扶壁结构(图 4)。矩形结构直接利用高程结构壁作为钢封闭门的支撑受力部位，异形结构须补齐扶壁结构的三角形缺口部分，整体设计类似矩形结构，以满足均匀受力要求。



a) C1~C4段普通矩形结构



b) 斜坡堤出水口段异形结构

图 4 箱涵钢封门

2.2 初步方案

钢封闭门不仅要保证高强度、小变形，还须对其止水密水效果进行补充设计，其中最重要的是做好角钢门框与高程壁接缝处、门框与钢封门接缝处、螺栓孔处的密封止水，这是箱涵浮运密

封工艺的关键。经过多次讨论，堵缝密封标准工艺(图 5)如下：

- 1)角钢门框(L16 角钢)与高程壁、钢封门与角钢门框间缝隙，采用 L 型止水橡胶条+X-SEAL 密封胶工艺；
- 2)连接螺栓孔处，采用钢垫片+橡胶垫片+X-SEAL 密封胶工艺。

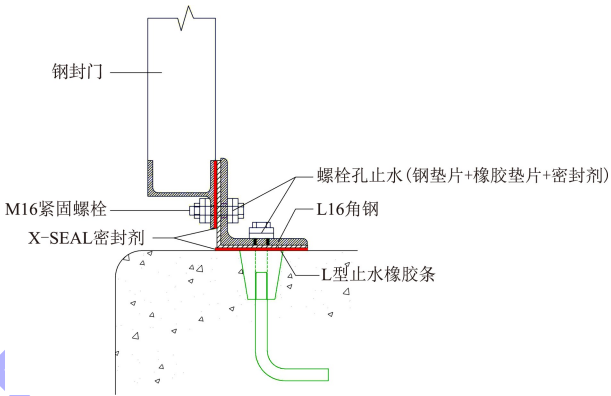


图 5 接缝处密封工艺

2.3 改进方案

基于上述工艺，在预制厂进行钢封门的密封性试验，现场发现局部有渗水、漏水现象，因此须对上述密封工艺进行改进。问题及处理措施如下：

- 1)角钢门框与箱涵接触不紧密。处理措施：
 - ①角钢门框分区、分块，直线段统一加工，现场统一安装；
 - ②箱涵下倒角根据实测尺寸，精确加工角钢门框拐角，单独安装(图 6)；
 - ③角钢门框分块安装后，现场焊接成整体，防止门框分缝漏水。

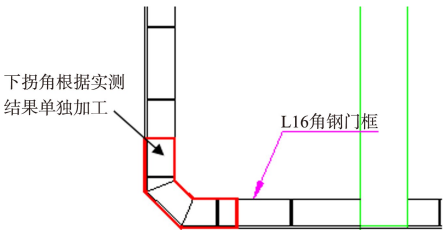


图 6 角钢门框下拐角位置

- 2)止水材料效果不佳。处理措施：
 - ①L 型橡胶条厚 2 cm，具有较好压缩性，邵氏硬度 55，能

压缩至 1 cm 厚以内(图 7); ②所有接缝处外加 1 道高强止水胶堵缝(图 8)。



图 7 定型加工 2 cm 厚 L 型止水条



图 8 钢封门内外接缝均刷高强止水胶

3) 预埋连接螺栓孔洞大。处理措施: ①实测箱涵预埋螺母位置, 在角钢门框上精确放线、磁力钻现场开孔(图 9); ②采用 1 cm 厚钢垫片压紧压缩性高的橡胶垫片; ③所有螺栓孔系统编号, 每节箱涵出运前均需钢封门密封性检测, 若发现螺栓孔漏水, 则记录编号, 事后用止水结构胶再次堵孔; ④所有 M22 连接螺栓均用量程为 280~760 N·m 的扭力扳手测量, 确保所有螺栓扭力均 $>280 \text{ N}\cdot\text{m}$, 保证螺栓充分拧紧, 压紧垫片。



图 9 现场实测后用磁力钻开孔

4) 模拟实际工况, 做好密封性检测。箱涵节段出运前, 在同等工况下对钢封闭门进行密封性检测试验, 在钢封门外侧设置整体钢桁架大模板, 内部注水达 6 m 高, 静置 24 h, 检验箱涵内部漏水情况。若有漏水, 则标记漏水点, 待密封检测后局部处理, 确保完全止水。

3 结论

1) 考虑最不利工况设计箱涵钢封门, 以 I25 工字钢作为支撑主梁(间距 1.25 m), 以 I12 工字钢和 [12 槽钢作为纵横分配梁(间距 0.6 m), 面板厚度 10 mm。计算结果表明, 其主梁最大挠度 9.6 mm, 次梁最大挠度 0.6 mm, 均满足规范要求。

2) 钢封门加工时, 型钢交接处采用母材等强焊缝连接, 型钢与高程交接处采用高强螺栓连接, 采用 L 型止水橡胶条+X-SEAL 密封胶工艺; 所有接缝处外加 1 道高强止水胶堵缝。

3) 钢封门的角钢门框根据高程结构实测结构定尺加工, L 型橡胶条厚 2 cm, 邵氏硬度 55, 能压缩至 1 cm 厚以内; 所有 M22 高强螺栓应确保扭力均 $>280 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。此外, 钢封门安装完成后, 须进行多次密水试验检查潜在渗漏点, 确保完全止水后方可外运。

4) 工程应用表明, 每节箱涵经海上长距离浮运过程中受到波浪、水流作用, 亦无明显漏水, 密封止水效果良好。箱涵密封工艺为水上浮运安装起到了关键作用, 具有较大的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 温仲奎. 浮运箱涵式水闸新型施工工艺研究与应用[J]. 浙江水利科技, 2011(2): 59-61.
- [2] 李青美, 董胜, 杨正云. 沉箱—箱涵整体浮运安装方法的分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(27): 151-153.
- [3] 顾建华. 大型混凝土预制箱涵海上浮运拖带及半潜卸船的操作: 香港口岸人工岛施工项目解析[J]. 航海, 2016(5): 45-50.