

复杂海域薄壁空心墩无拉杆翻模施工技术

马进, 路明远, 吕光智

(1. 中交第一航务工程局有限公司; 2. 中交一航局第五工程有限公司)

摘要:为解决复杂海洋环境薄壁空心墩无拉杆翻模施工的技术难题,通过改进模板结构形式、钢筋绑扎架体、优化翻模工艺等一系列技术方法,有效提升了墩身保护层合格点率和墩身的垂直度指标,提升了墩身的实体质量。研究表明,墩柱无拉杆翻模施工技术能够有效克服复杂海域条件对墩身质量干扰,为类似复杂海域环境薄壁空心墩施工提供了可靠的技术借鉴和实践指导。

关键词: 海洋环境; 翻模; 无拉杆; 合格点率; 垂直度

0 引言

在复杂海域环境下,薄壁空心墩施工常面临风浪、腐蚀等严苛条件挑战,传统带拉杆模板工艺易导致墩身质量不稳定、工效低下等问题。针对海洋环境下薄壁空心墩无拉杆翻模施工的系统研究仍较为缺乏,施工精度与质量控制难度较大。本文依托厦金大桥(厦门段)欧厝互通匝道桥工程,以79根薄壁空心墩为对象,开展无拉杆翻模施工技术研究。

1 工程概况

厦金大桥(厦门段)起自厦门市思明区环岛路,止于大嶝岛翔安新机场,全长20.615 km,全线设置香山、观音山、欧厝、大嶝4处互通式立交。本文主要以厦金大桥(厦门段)欧厝互通匝道桥下部结构施工为工程基础,墩柱共计79根,其中A匝道桥墩柱28根,B匝道桥墩柱26根,C匝道桥墩柱14根,D匝道桥墩柱11根。墩柱采用薄壁空心墩结构形式,壁厚70 cm,底部1 m为实心结构,平面尺寸分为5 m×3.5 m、6 m×3.5 m两种。5 m×3.5 m墩柱高度为8.875~23.358 m,平均高度为15.97 m;6 m×3.5 m墩柱高度为18.383~32.543 m,平均高度为19.37 m。

2 自然条件

由于本工程位于复杂海域,波浪、风况、潮汐等对施工过程产生重要影响,这些环境因素的作用增加了复杂海域薄壁空心墩无拉杆翻模施工的技术难度与风险,需通过针对性技术措施予以控制。

1) 波浪

对工程产生影响的主要为风成浪,尤其是台

风影响形成的风浪。本海域的大浪主要发生在台风影响期间及冬季的东北大风期间,最大波高的极大值出现在台风盛行的7月、8月、9月。波浪对高空无拉杆模板体系的稳定性构成直接冲击,持续的波浪力会传递至墩身和支架系统,导致模板产生水平晃动或位移,影响墩身混凝土的均匀浇筑与初期凝结质量,并威胁高空作业安全。

2) 风况

厦门海域每年7—10月为台风季节,平均每年3.7次,瞬时最大风速80 m/s。频繁的台风及高风速环境对施工影响尤为突出,大风会显著增加模板系统承受的风荷载,导致其产生较大变形或摆动,严重影响墩身垂直度的测量与控制精度。同时,大风条件会迫使大型吊装作业中断,影响模板翻升、钢筋安装等关键工序的连续性与工期。

3) 潮汐

本工程施工范围潮汐类型属正规半日潮,每日2次周期性水位涨落,直接影响结构物防腐施工以及结构物检查。低潮位时暴露承台,便于底部检查与施工衔接;高潮位时则可能淹没部分作业面,限制施工活动,施工计划必须紧密围绕潮汐窗口期进行安排。

3 工艺优化

3.1 钢筋工程高精度定位工艺

针对环氧钢筋在海洋环境中的防腐要求及复杂风况下高空绑扎精度难控的问题,在钢筋存放及运输环节,采用多层尼龙板铺垫的专用存放架与严格的支垫、苫盖措施,实现了对环氧涂层的全程防护。在钢筋绑扎阶段,创新性地采用了专用钢筋绑扎操作架。该架体通过螺栓牢固连接于

墩身外部三角架，并设置4道防风拉锚，形成了一个在风载下依然稳固的高空作业平台。结合尼龙定位板限位、扭力扳手施拧套筒及画线绑扎箍筋等精细化操作，确保了在主筋接头100%机械连接、保护层垫块梅花形布置的前提下，即使遭遇突发大风，钢筋骨架的空间位置与保护层厚度仍能得到有效控制，从根源上保障了墩身的耐久性与结构精度。

3.2 无拉杆模板体系设计

面对台风期波浪与强风的持续作用，传统的拉杆式模板体系存在易渗漏、干扰布筋、且对波浪力敏感等缺点，研发了无拉杆的钢模板体系，并通过精细化的MIDAS Civil整体建模计算予以验证。在模板设计部分，模板采用抱角精轧螺纹钢连接替代对拉杆，彻底消除了因拉杆孔洞可能造成的质量隐患。建模验算涵盖了面板、竖肋、背杠、桁架及模板-混凝土界面摩擦力，确保在风浪荷载组合下，各构件应力与变形均满足规范要求。这种无拉杆结合加强背楞桁架的结构形式，在保证足够刚度的同时，为混凝土外观质量提升奠定了基础。

3.3 模板面层工艺与循环翻升工法

为提升墩身混凝土表观质量与施工效率，进行模板面层处理与翻升流程的优化。在模板准备环节，创新性引入透水模板布施工工艺。在除锈打磨的钢面板上精准喷涂胶粘剂并铺设模板布，能有效导出新浇混凝土表层多余水分与气泡，显著提高墩身表面密实度与均匀性，减少色差与气泡等海洋环境下的常见表观缺陷。在模板翻升这一关键工序中，形成了“保留顶节、三角支撑、循环作业”的高效工法。具体而言，始终保留已浇筑段最上一节模板作为上部模板的支撑基座；内模拆除与安装借助可调节的内模三角支撑架完成，该架体固定于预埋的大头螺母上，提供了安全、便捷的内模操作平台。翻模时，拆除的下部模板经清理并重新粘贴透水模板布后循环使用。此工法将模板安装、混凝土浇筑、养护、拆模清理等工序组织成标准化循环，大幅减少了模板整体吊装次数，降低了对复杂海域天气窗口的依赖，提高了作业连续性与安全性。

3.4 混凝土动态实时监控

在混凝土浇筑及养护阶段，为应对潮汐、风浪可能引起的模板微小变形，采用了六点对称布

料、串桶下料、分层分区振捣的浇筑方法，确保混凝土均匀填充，减少侧压力偏差。浇筑过程中，安排专人实时监控模板连接螺栓状态，一旦因风浪冲击出现松动可立即紧固，实现了施工过程的动态质量控制。浇筑完成后，及时覆盖水能量养护膜进行长期保湿养护，有效抑制了海洋环境下混凝土表面的早期开裂。

4 施工工艺流程

薄壁空心墩施工主要包括钢筋制作与安装、模板制作与安装、混凝土浇筑以及硅烷防护处理四大核心工艺流程。施工采用翻模工艺，墩柱模板在混凝土达到强度后拆卸并向上翻升、循环安装，从而实现墩身逐节、连续浇筑成型。施工工艺流程如图1所示。

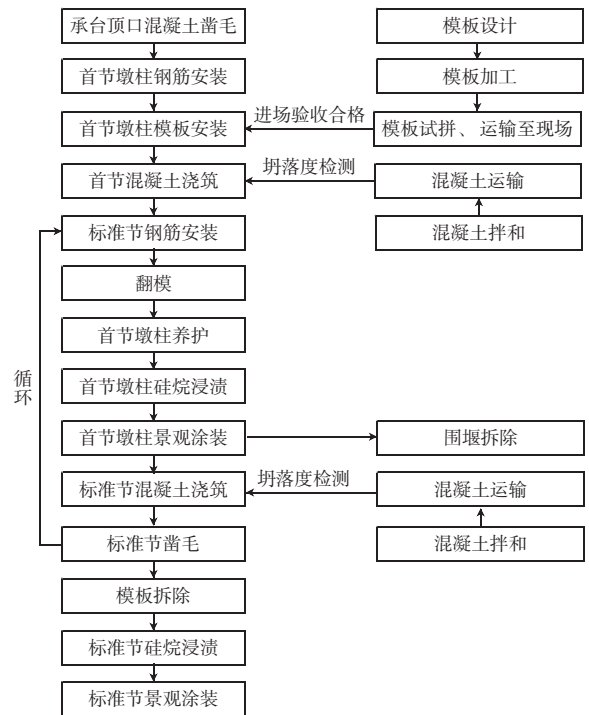


图1 薄壁空心墩施工工艺流程图

5 施工方法

5.1 钢筋制作

本工程墩柱采用环氧钢筋施工，环氧钢筋于漳州预制场喷涂，打包运输至现场钢筋加工车间弯曲加工成型，采用锯切套丝打磨生产线、数控弯曲机等设备进行钢筋加工，数控弯曲机的芯轴外侧安装高强度尼龙套，加工成型的半成品经验收合格后转至后场材料堆放区，按材料规格分类码放整齐，标识明确。

5.2 钢筋存放及运输

半成品钢筋采用钢筋存放架存放,钢筋距离地面高度不少于30 cm,钢筋下方合理布设支点防止钢筋下垂。钢筋码放时,根据不同外形的钢筋合理匹配,保证钢筋码放合理有序,环氧钢筋码放架设置成多层结构并铺垫尼龙板等材料避免破坏涂层。钢筋运输过程中采用木枋进行支垫防止钢筋下沉,涂层钢筋捆与捆之间不超过5层,到达现场后采用木枋进行临时支垫,下垫高度不少于30 cm,上盖苫布防晒避雨。

5.3 混凝土凿毛

墩身轮廓线向内2 cm处使用墨线标记,标记后采用锯切机器进行切边处理,区域内采用手持式凿毛机进行凿毛,凿除混凝土表面的砂浆和松散层,露出粗骨料,清除残渣及松动石子,混凝土浇筑前洒水使混凝土保持潮湿状态。

5.4 梯笼安装

采用独立式梯笼作为垂直上下通道,梯笼与栈桥采用焊接连接,梯笼与栈桥设置焊接板作为加强,梯笼与墩柱间采用过跳连接成整体,梯笼四周采用防风拉锚进行固定,与栈桥相连接,梯笼需验收合格后方可使用,验收合格后明确同时上下人员数量,确保梯笼稳定。

5.5 钢筋绑扎

钢筋绑扎采用现场绑扎工艺,先安装钢筋绑扎架,绑扎架作为钢筋绑扎过程中的操作平台,操作平台距墩柱外侧钢筋15 cm,绑扎架底部落在墩柱外部三角架上,采用螺栓连接,设置4道防风拉锚,靠近栈桥侧与栈桥布设2道,其余2道与栈桥对侧封底混凝土顶部预埋锚栓相连接。

钢筋绑扎时,采用吊带吊装防止环氧钢筋破损,优先安装墩身4个角点位置主筋,在中间及顶部临时绑扎箍筋固定,然后安装其余部位主筋,主筋安装时采用尼龙定位板进行限位,保证其位置准确,采用扭力扳手旋转直螺纹套筒连接,主筋钢筋绑扎时主筋接头错开50%,按35倍主筋直径长度错位施工,主筋安装完成后安装内外侧水平筋及箍筋,箍筋与主筋绑扎牢固,箍筋安装前,在主筋上按箍筋间距进行画线标识,按图纸要求间距,按标识采用扎丝由下往上依次绑扎箍筋,最后进行拉钩筋绑扎,拉钩筋安装时外皮不要超出最外层水平筋,确保保护层受控,钢筋绑扎完成后对环氧钢筋破损情况进行检查,存在破损及

时修补。墩柱外侧水平筋安装C45海工混凝土梅花形垫块,按5个/m²梅花形布置,合模前对垫块的数量和与钢筋连接紧固程度进行检查,检查合格后进行下道工序。

5.6 透水模板布施工

为消除墩柱外观质量通病,采用透水模板布施工工艺^[1],提升外观质量。透水模板布粘贴前,采用角磨机对板面进行除锈打磨处理,然后根据模板尺寸裁剪模板布,边缘预留约6 cm的富余量。裁剪完成后进行喷胶和铺贴模板布处理,将胶粘剂均匀喷涂于洁净、干燥的模板表面及其四周边缘区域,人员佩戴鞋套于已粘贴模板布上方,从模板一端向另一端进行铺贴,采用滚轮施加压力使其完全贴合于模板表面,铺贴后核查其表面是否平顺,存在未消除的皱褶或内部气泡进行修整处理。

5.7 模板设计

5.7.1 模板结构

薄壁空心墩模板均采用钢模板,侧模设计最大高度为2.25 m,模板面板为6 mm厚钢板,竖肋为10号槽钢,最大水平间距0.30 m,背杠为双30号槽钢,间距1 m,背楞采用双16号槽钢,最大间距为2.25 m,抱角采用 $\phi 25$ mm精扎螺纹钢连接,模板间采用M20高强螺栓连接^[2]。

5.7.2 模板受力验算

1) 薄壁空心墩采用MIDAS Civil建立整体计算模型,其中钢面板采用板单元,其他构件均采用梁单元模拟,板与梁单元、梁单元与梁单元采用弹性连接,分别对钢面板、竖肋、背杠、桁架以及主墩与模板摩擦力进行验算,模型如图2所示。

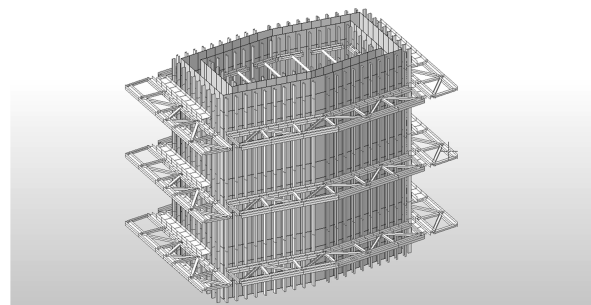


图2 薄壁空心墩模板计算模型

2) 板单元所受组合应力为65.5 MPa < 215 MPa,满足规范要求;板单元相对变形值为0.85

mm<1.5 mm, 满足规范要求。

3) 竖肋所受组合应力为 127.6 MPa<215 MPa, 满足规范要求; 竖肋所受剪应力为 26.5 MPa<215 MPa, 满足规范要求; 竖肋相对变形值为 7.8 mm<15 mm, 满足规范要求。

4) 背杠所受组合应力为 24 MPa<215 MPa, 满足规范要求; 背杠所受剪应力为 5.8 MPa<215 MPa, 满足规范要求; 背杠相对变形值为 1.1 mm<7.1 mm, 满足规范要求。

5) 第 2 层桁架所受组合应力为 170.8 MPa<215 MPa, 满足规范要求; 桁架所受剪应力为 39.6 MPa<125 MPa, 满足规范要求; 桁架产生相对挠度为 5.8 mm<7.5 mm, 满足规范要求。

6) 主墩与模板摩擦力因建模受限, 采用手动计算, 风嘴处混凝土 24.9 m³, 荷载为 647.4 kN; 墩柱 3 m 模板重 10.34 t, 荷载为 103.4 kN; 盖梁模板、过跳等重 8.45 t, 荷载为 84.5 kN。

上部荷载安全系数取 1.3, 上部荷载设计值 $F=1\ 086$ kN, 摩擦力 $N=5\ 265$ kN。 $F<N$, 满足受力要求。

5.8 模板安装

1) 墩柱外模板标准节采用 3 m 高模板, 调整节采用 2 m、1 m、0.5 m、0.2 m、0.1 m 共 5 种模板, 第一片模板安装首先采用手拉葫芦调节、固定, 下端与下节模板顶端使用螺栓进行固定, 第二片模板安装与第一片模板安装步骤相同, 2 片模板间使用抱角螺栓进行连接; 模板安装完成后, 在模板顶部展开梯笼翻板, 作为施工人员操作平台; 在翻模施工过程中, 下节墩柱最顶层模板不拆除, 作为上节墩柱施工时的支撑平台。

2) 内模安拆原则: 拆解操作平台螺栓后, 先拆段收缩拆除; 单侧模板收缩向内移动后拆除, 重复一次后全部拆除(安装与拆除相反)。

3) 模板安装完成后, 通过线锤法进行垂直度测量^[3], 然后利用全站仪进行复测, 在测量人员的指挥下在模板拼接处增加钢板垫片, 采用手拉葫芦调节模板垂直度。

5.9 模板翻升

待浇筑完混凝土达到拆模强度后, 可拆除底下 2 节模板, 底下 2 节模板采用 25 t 汽车吊配合手拉葫芦拆除, 顶层模板作为下一节墩柱模板的持力点, 拆除的模板用履带吊吊至安拆平台, 同时拆除透水模板布并对板面残余物进行清理, 清

理完成后重新粘贴透水模板布。已浇筑墩柱强度达到 2.5 MPa 后进行凿毛, 即可进行下一循环的钢筋绑扎, 当下一节钢筋绑扎完成后, 用吊车将模板安放到位, 进入下道工序^[4-5]。至此, 翻模施工完成一个循环, 每节操作如下:

1) 首节模板安装

首节外模 1.1 m+两节标准节 3 m, 内模首节 3.1 m(墩柱底节 1 m 为实心段)+标准节 3 m, 墩柱底部采用砂浆带调整墩柱标高, 同时方便墩柱模板的拆除; 首节内模高度超出墩身内孔变截面 0.1 m, 方便模板制作及安装。

2) 模板翻升

模板翻升接高为 6 m, 拆除底段及第二段外模及内芯模板, 保留顶端外模及墙内预埋的大头螺母, 设置内模三角支撑架, 三角支撑架上放置操作平台, 三角支撑架顶面距已浇筑混凝土顶面 10 cm, 底口固定在大头螺母上, 用作接高内模安装支撑; 内模下节采用 3.1 m 模板, 落在三角支撑架体上部, 同时包住下节混凝土 10 cm, 顶口与外模顶口平齐; 内模施工时于内模内顶杆上放置操作平台。

3) 墩柱顶节模板施工

浇筑顶段变截面位置时^[6], 同翻模施工保留外模顶段不拆除用作支撑, 内模保留一排大头螺母及对拉放置内模三角支撑架, 顶口平齐外模顶口, 底口固定在大头螺母上, 三角支撑架上放置操作平台; 外模顶部 2 m 采用定型模板, 根据高度不同对变截面下部采用调整节施工(调节段高度>4 m 采用 3 m 模板翻升浇筑一次; 调节段高度≤4 m, 连同内模 2 m 定型模板一次到顶), 顶端底部调节段<1 m 范围使用系列模板(调节段)进行高度调节。

5.10 混凝土浇筑及养护

混凝土运送至施工现场后, 采用泵车泵送入模, 浇筑前检查混凝土送料单是否正确, 核对混凝土施工配合比是否符合设计配合比要求, 同时检查混凝土和易性。

墩柱浇筑时均匀设置 6 个布料点, 混凝土浇筑采用串桶对称下料, 水平分层分区振捣^[7], 每层混凝土布料厚度按 30 cm 控制, 采用人员进入模板内部进行振捣, 确保振捣密实, 振捣选用 $\phi 50$ mm 规格的加长型振捣棒进行混凝土密实作业, 操作时需确保振捣棒轴线与混凝土浇筑表面保持垂直, 执行“快速插入、缓慢拔出”的振捣方式,

并在作业面上采用Z字形均匀布点,单点振捣持续时间宜控制在约20~30 s,以观察到混凝土表层无明显沉陷、充分泛出水泥浆液且气泡基本停止上浮时为止。在混凝土持续浇筑期间,需配置专职人员实时监控模板螺栓的稳固性,出现松动、变形或位移须立即实施复位并采取可靠加固措施,同时,严密监视模板系统的状态,一旦发现变形或漏浆迹象,及时启动相应的处理预案。待后续模板拆除工序完成后,在墩身顶面精确弹设环向切割定位线,沿此线进行切割并人工精细切除超浇部分的混凝土体,以确保墩顶最终成型面的平整度与外观质量符合要求,墩柱表面覆盖水能量养护膜养护,时间不少于7 d。

6 结语

本文以高精度、抗风扰的钢筋绑扎工艺为起点,以经过力学验证的无拉杆模板系统为承载核心,以融合透水模板布的高效循环翻模工法为操作主线,并以全过程的动态监控与养护为保障。实测全高垂直度最大偏差为1/1 800 mm,施工墩

柱保护层合格点率均达到95%以上,确保了在波浪、大风、潮汐多因素耦合的复杂海域环境中,薄壁空心墩的垂直度、保护层合格率、混凝土内在与表观质量等关键指标均能得到有效控制,从而形成了可复制、可推广的成套施工技术,为类似工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 刘艳玲. 桥墩钢模板贴透水布施工工艺[J]. 交通世界, 2023(8): 144-146.
- [2] 靳文源. 桥梁薄壁空心墩无支架翻模施工技术应用探讨[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(9): 93-95.
- [3] 徐祥志, 刘冰. 薄壁空心高墩翻模施工中对垂直度影响因素及预控措施[J]. 智能城市, 2016, 2(6): 193.
- [4] 任剑. 桥梁墩柱翻模施工中的模板安装、翻升及质量保证措施[J]. 建材世界, 2023, 44(1): 64-67.
- [5] 王建勋. 平潭海峡大桥薄壁空心墩翻模施工技术研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(1): 196-200.
- [6] 王海泉. 渝怀铁路龙桥河大桥薄壁空心墩翻模施工技术[J]. 科技创新与生产力, 2015(3): 109-111.
- [7] 张允海, 李金成. 薄壁空心高墩翻模施工质量控制[J]. 公路, 2013(10): 261-263.