

跨海薄壁组合梁水波纹景观预制施工技术

颜培茂

中新天津生态城基本建设管理办公室 天津 300450

摘要：为实现中新天津生态城景盛路桥预制组合梁滨水景观一体化建设需求，解决传统预制梁模板纹理成型差、景观效果单一、外观精度难以控制等行业痛点，本文以该跨海薄壁组合梁景观桥工程为依托，开展德国赓立弹性装饰造型模板与钢模复合工艺成套技术研究。通过复合模板结构优化、定制水波纹纹理设计、标准化预制施工流程管控、全过程质量检测等手段，形成适配 25m 薄壁组合梁的景观构件一体化预制工艺。本文系统阐述复合模板设计、预制全流程施工、预应力及架梁配套关键技术，可为同类城市滨水景观预制桥梁施工提供工程参考与技术借鉴。

关键词：薄壁组合梁；水波纹景观；弹性装饰模板；钢模复合工艺；景观桥梁

引言：国内城市跨海、滨河桥梁建设已从单纯满足交通通行，逐步转向“结构安全、耐久防腐、景观美学”三位一体的发展模式。滨海新城滨水桥梁紧邻水系，桥梁外立面作为城市滨水界面核心视觉载体，对构件外观造型、纹理细腻度、整体协调性提出极高要求。传统预制梁多采用普通钢模板、木模板成型，仅能实现平直简洁的混凝土表面，无法制作连续流畅的曲面花纹凹槽；若采用后期浮雕、涂料装饰，易出现脱落、色差、耐久性不足等缺陷，难以适配滨海高盐雾腐蚀环境。

在建筑装饰领域，聚氨酯弹性纹理模板应用成熟，可实现各类浮雕、肌理造型浇筑成型，重复周转次数可达百次以上，但应用场景多为房建外墙、景观挡墙，极少用于大跨度桥梁预制构件。桥梁预制领域现有研究多聚焦梁体结构精度、预应力控制、耐久性防腐，针对预制梁外立面一体化景观成型的专项研究匮乏。

国外 RECKLI（赓立）弹性造型模板具备高精度纹理复刻、高耐磨、易脱模优势，但国内桥梁行业尚未形成钢模-弹性衬模复合配套设计、安装、浇筑一体化施工方案，存在模板贴合不紧密、漏浆、纹理错位、弹性衬模与钢模粘结脱落等施工难题。本次研究结合滨海跨海桥梁工况，优化复合模板结构、密封固定体系与全流程预制工艺，填补景观预制梁成套施工技术空白^[1]。

1 研究内容与技术新点

核心创新点：(1) 创新采用“刚性钢模承载 + 弹性聚氨酯衬模复刻纹理”复合结构，兼顾梁体截面尺寸精度与复杂曲面景观成型效果。(2) 形成适配 25m 薄壁组合梁的水波纹衬模一体化预制工艺，实现花纹与梁体一次

性整体浇筑成型，无需二次装饰。(3) 配套研发专用黏结剂、密封胶、脱模剂体系，解决滨海环境下模板漏浆、衬模脱落、纹理破损等质量通病。(4) 建立景观外观 + 结构性能双控质量标准，同步管控混凝土纹理精度、保护层厚度、预应力施工、防腐耐久性多项指标^[3]。

2 工程概况与设计标准

2.1 项目整体参数

景盛路桥位于中新天津生态城临海新城，南北向城市主干路，双向六车道，规划红线宽度 47~48.75m，跨越南湾河道桥梁总长 825m。主体施工工程量：桩基 548 根、承台 136 座、墩柱 128 根；预制梁总计 396 片，其中薄壁组合梁 132 片，单跨 25m；配套路面 24420m^[2]。桥梁地处滨海高盐雾环境，混凝土结构需满足严格防腐耐久要求，所有预制梁成品均需涂刷硅烷浸渍防腐层。

薄壁组合梁腹板外侧景观设计标准：采用浪花单元拼接连续水波纹造型，凹槽尺寸 40mm×10mm，纹理周期 1.2m，波峰波谷落差 2mm，成型后纹理连续无断点、无拼接痕迹，凹槽尺寸偏差控制在 ±0.5mm 以内。

2.2 结构与材料设计指标

混凝土：组合梁主体采用 C50 商品混凝土，封锚、修补混凝土同强度等级。预应力体系：φ15.2 高强度低松弛钢绞线，标准强度 $f_{pk}=1860\text{MPa}$ ，组合梁采用 YM15-7 夹片锚具，内径 60mm 塑料波纹管。复合模板主材：基础钢模 Q235B 钢板，面板厚度 5mm，背部槽钢加劲肋；弹性衬模为德国赓立聚氨酯材料，厚度 10mm，邵氏硬度 60~70D，理论周转次数 ≥100 次。防腐体系：梁体全部外露混凝土表面采用两道硅烷浸渍处理，提升抗氯离子渗透能力。

3 钢模-弹性衬模复合模板体系设计

3.1 模板方案比选

项目前期对比三种外立面成型方案,综合景观效果、施工成本、耐久性、周转效率确定最优工艺:方案一:传统整体钢模。仅能制作平整表面,无法雕刻水波纹凹槽,景观效果不满足设计要求,直接淘汰。方案二:预制梁成型后外挂浮雕板材。后期粘贴易脱落、色差明显,滨海环境耐久性差,人工成本高。方案三:钢模复合赓立弹性装饰模板。一次性浇筑成型纹理,纹理精度高、可重复周转、与混凝土一体成型,防腐同步施工,综合优势显著,为本项目实施方案。

3.2 水波纹弹性衬模定制设计

根据设计浪花图案开模定制聚氨酯弹性衬模,核心参数控制:衬模厚度 10mm,边缘倒角处理,防止脱模时混凝土边角崩损。标准单元衬模尺寸 1500mm×3000mm,可按梁体长度 50cm 模数加长,拼接后水波纹线条连续贯通。纹理参数:凹槽宽度 8~10cm、深度 1.5~2.0mm,单元浪花周期 1.2m,成型后纹理无扭曲、错位。材料性能:高弹性聚氨酯,耐混凝土碱性腐蚀,适配专用环氧树脂黏结剂、TL-SO 型脱模剂。

3.3 密封与固定配套系统

3.3.1 固定装置

采用不锈钢压条+螺栓双重固定,螺栓拧紧力矩 30~40N.m,衬模全覆盖压紧,杜绝浇筑时衬模起鼓、移位;钢模与衬模之间涂刷赓立专用底涂界面剂,提升粘接强度,避免衬模脱落。

3.3.2 密封防漏浆体系

衬模拼接缝填充专用密封胶,表层铺设 10cm 宽无纺布密封,消除拼接痕迹。模板竖向、横向拼缝粘贴 5mm 厚耐碱橡胶密封条,压缩量 30%~50%。端头缝隙采用泡沫胶封堵,整体完成蓄水渗漏试验,无渗水后方可投入使用。

3.4 模板配套耗材系统

粘结材料:赓立环氧树脂界面胶,用于弹性衬模与钢模贴合。脱模材料:RECKLI TL-SO 专用蜡质脱模剂,不污染混凝土表面纹理,脱模顺滑。养护耗材:专用清洗剂、防护油,模板周转后清理保养,延长使用周期。

4 薄壁组合梁景观预制标准化施工工艺

整体施工流程:施工准备→台座处理→钢筋加工绑扎→预应力管道安装→预埋件埋设→复合模板拼装

→混凝土分层浇筑→养护→侧模、内模拆除→预应力智能张拉→孔道压浆→封锚→硅烷浸渍防腐→起吊存梁。

4.1 台座与钢筋工程施工

预制台座清理打磨,线形平顺无杂物,均匀涂刷隔离剂,验收合格后开展钢筋作业。钢筋统一工厂下料加工,分类标识存放,主筋连接采用单面搭接焊,焊缝长度 $\geq 10d$,同一截面接头率 $\leq 50\%$ 。

4.2 预应力管道与预埋件安装

预应力波纹管选用内径 60mm 圆形塑料波纹管,直线段定位筋间距 0.8m,弯起段加密至 0.4m,管道平面位置偏差 $\leq 4\text{mm}$ 。锚垫板与波纹管接口缠绕防水胶带封堵,喇叭口预先用泡沫密封,防止浇筑漏浆堵塞孔道。同步埋设泄水孔、通气孔 PVC 管、吊装孔模具、伸缩缝预埋钢板、高阻尼支座预埋构件,所有预埋件坐标尺寸复核,中心位置偏差 $\leq 3\text{mm}$ 。

4.3 复合模板现场拼装施工

钢模进场后机械除锈、打磨抛光,清除氧化皮、油污,晾干后薄涂一层专用底涂,静置风干后粘贴弹性衬模。按纹理方向拼接衬模,控制拼缝宽度 $\leq 0.3\text{mm}$,对齐浪花线条。均匀涂抹环氧树脂黏结剂,将衬模平整贴合钢模,压条压紧后螺栓紧固。拼接缝密封胶填充、无纺布覆盖,整体静置固化 24h 后进行蓄水检漏。外模采用龙门吊吊装就位,木楔、竖向拉杆调节垂直度,拼缝海绵条密封,螺栓分次紧固,全过程校核梁体线形。内模分两段拼装,卷扬机抽拉式拆模结构,底部混凝土垫块支撑,顶部设置 200 槽钢压杆,配套马腿支撑约束内模上浮。模板全部安装完成后开展尺寸验收:梁体内部尺寸+5mm、0mm,轴线偏位 $\leq 10\text{mm}$,相邻模板高低差 $\leq 2\text{mm}$ 。

4.4 C50 混凝土浇筑与振捣控制

采用纵向分段、水平分层对称浇筑,分层厚度 $\leq 30\text{cm}$,先浇筑底板,再同步对称浇筑两侧腹板,最后一次浇筑顶板,单侧腹板浇筑高差不超过 30cm,防止内模偏移。单段纵向浇筑长度 5~6m,剩余不足 5m 段反向浇筑。

侧模、端头模板在混凝土强度达到 2.5MPa 后拆除,轻吊轻放,严禁敲击、撬动衬模面,防止磕碰水波纹。内模待混凝土强度可保证表面无塌陷裂缝后拆除,卷扬机平缓抽拉,成品梁腹板纹理完整无破损。

4.5 预应力智能张拉与孔道压浆

梁体混凝土强度、弹性模量达到设计值 85% 以上，养护龄期 $\geq 7d$ ，方可开展张拉作业；张拉采用智能同步张拉系统，两端千斤顶对称同步加载，应力控制精度 $\pm 1\%$ 。

张拉完成 48h 内完成孔道压浆，采用专用桥梁压浆料，高速搅拌机拌合，压浆压力 $0.5 \sim 0.7MPa$ ，出浆口流出同稠度浆液后稳压 $3 \sim 5min$ ，保证孔道浆体饱满无空隙，预防滨海环境钢绞线锈蚀。

4.6 封锚与硅烷防腐施工

压浆完成冲洗梁端浮浆，清理锚具、垫板污垢，采用同强度 C50 混凝土封锚，充分插捣密实，带模养护 $1 \sim 2h$ ，脱模后养护 7d。硅烷浸渍施工前修补混凝土蜂窝、细微裂缝，清理表面油污浮尘；混凝土表面保持面干状态，分两道均匀涂刷硅烷，两道间隔充分干燥，提升混凝土抗氯离子渗透性能，适配跨海腐蚀环境。

5 预制梁移梁与现场架设施工

5.1 起吊移梁控制

单片 25m 组合梁自重 160t，选用 250t 搬梁机吊装，配套 $\phi 56mm$ 钢丝绳兜底吊装，钢丝绳安全系数满足规范要求；吊点设置于梁端预留吊装孔，起吊平稳缓慢，存梁区枕木垫设土工布，避免划伤腹板水波纹纹理；梁体统一编号，按架设顺序分区存放。

5.2 架桥机拼装与轨道搭设

架梁采用专用公路架桥机，运梁、喂梁利用已架设完成箱梁通道。中支腿横移轨道支垫于梁体腹肋位置，纵坡工况控制轨道高差 $\leq 10mm$ 。前支腿位于高低落差较大盖梁位置，配套定制钢箱、柱状钢支撑、拉结钢板锚固体系，整体结构稳定，防止横移倾覆。

6 质量控制体系与工程应用效果

6.1 全过程双控质量标准

本工程建立结构性能 + 景观外观双重质量管控体系，分阶段设置验收节点：模板阶段：衬模拼接缝隙、密封性能、纹理尺寸、钢模平整度全数检查。钢筋预应力阶段：保护层厚度、管道坐标、锚具安装逐片检测。混凝土成型阶段：水波纹凹槽尺寸 $\pm 0.5mm$ ，表面无砂线、麻面、缺角。预应力防腐阶段：张拉伸长值、压浆密实度、硅烷涂刷厚度严格验收。架设阶段：梁体线

形、支座安装、桥面标高复核。

6.2 工程应用成效

景观效果：132 片薄壁组合梁腹板水波纹纹理连续均匀，无明显拼接痕迹，凹槽尺寸全部满足设计偏差要求，与滨水环境融合度高，完成桥梁景观升级目标；

结构性能：复合模板刚度充足，浇筑无跑模、漏浆，梁体截面尺寸、保护层厚度、预应力指标全部达标；硅烷浸渍完成后，混凝土耐久性满足跨海桥梁 100 年设计使用年限；

经济效益：弹性衬模可重复周转 100 次以上，无需后期二次装饰，相比外挂浮雕方案，综合施工成本降低 18%；工厂预制一体化成型，大幅缩短现场装饰施工工期；

推广价值：整套复合模板预制工艺流程标准化，配套材料、设备、管控措施完善，可直接应用于滨河、滨海各类景观预制箱梁、组合梁项目。

7 结束语

本文依托中新天津生态城景盛路桥跨海薄壁组合梁景观桥工程，系统研究钢模复合负弹性装饰模板一体化预制施工成套技术，得出核心结论：“刚性钢模 + 聚氨酯弹性衬模”复合模板体系能够同时满足桥梁结构尺寸精度与复杂曲面景观成型需求，解决传统模板无法实现细腻水波纹纹理的行业难题；通过衬模定制、密封固定体系优化、分层对称浇筑振捣、全过程外观质量管控，可将混凝土景观凹槽尺寸偏差控制在 $\pm 0.5mm$ ，成型纹理完整流畅，实现梁体结构与景观一次性浇筑成型；配套智能张拉、真空压浆、硅烷浸渍防腐、标准化架梁工艺，形成完整的景观预制梁施工链条，兼顾结构安全、耐久防腐与景观美学；该工艺周转效率高、综合造价低，施工流程标准化，适用于城市滨水、滨海景观预制桥梁工程，具备广泛推广应用价值。

参考文献

- [1] 城市桥梁景观设计规范 CJJ/T 237-2016
- [2] 公路桥涵施工技术规范 JTG/T 3650-2020
- [3] 混凝土桥梁硅烷浸渍防腐技术指南 T/CCTAS 37-2022