一种预制胸墙在老码头改造中的应用

陈晓凯[1]，李　杨[2]
（1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290；2. 中国港湾工程有限责任公司，北京 100027）

摘要：随着码头功能需求的日益提高，许多老码头已无法满足大型船舶靠泊的要求，急需改造升级。针对老码头升级改造过程中，因码头边运营边修复导致施工场地有限、水位变化导致乘潮施工、结构需满足百年耐久性等一系列问题，介绍了一种新型的预制胸墙在老码头升级改造中的应用。采用预制与现浇胸墙相结合方案与传统纯现浇胸墙方案对比、理论计算分析以及实施工程举例等方法，得出预制与现浇胸墙相结合方案能够有效解决施工场地有限、水位变化、结构耐久性等导致的施工难题，同时能够省去混凝土浇筑海侧支模拆模和混凝土硬化等工序消耗的时间，缩短工期。研究成果可为后续类似老码头修复改造工程提供实践依据，推动码头升级改造领域的创新和发展。

关键词：预制胸墙；重力式；老码头；改造；钢板桩
中图分类号：U656. 1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0076-07

Application of precast breast wall in existing wharf renovation

CHEN Xiaokai[1], LI Yang[2]
(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;
2. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: With the ever-increasing functional requirements of wharves, many existing wharfs can no longer meet the berthing demands of large vessels and are in urgent need of renovation and upgrading. Aiming at a series of problems in the renovation and upgrading of existing wharves, such as limited construction sites from simultaneous operation and renovation, tide-dependent construction caused by water level fluctuations, and the 100-year durability requirement for the structure, this paper introduces the application of a new precast breast wall in the renovation and upgrading of existing wharves. By comparing the combined precast and cast-in-place breast wall scheme with the traditional full cast-in-place breast wall scheme, carrying out theoretical calculation and analysis, and citing practical engineering project examples, this paper concludes that the combined precast and cast-in-place breast wall scheme can effectively solve construction difficulties caused by limited construction site space, water level variation, structural durability and other factors. Meanwhile, it eliminates the time consumed by working procedures such as formwork erection and removal on the seaward side during concrete pouring as well as concrete hardening, thereby shortening the construction period. The research results can provide a practical basis for subsequent similar reconstruction and renovation projects of existing wharves, and promote innovation and development in the field of wharf upgrading and reconstruction.

Keywords: precast breast wall; gravity structure; existing wharf; renovation; sheet pile

目前，港口的发展史已经很长，部分港口已经超过或接近设计使用寿命，逐渐暴露出一些问题，主要表现为港池回淤、港口设施破损、码头仓储能力不足、货种改变导致装卸工艺设备急需升级更新、码头等级低无法接卸现代化远洋船舶等。因此，在既有港口水工建筑物不断劣化、岸线资源日益减少、码头的使用功能逐渐提高的前提下，对已建老码头结构进行加固改造，充分利

收稿日期：2025-11-10　　**录用日期：**2025-12-03

作者简介：陈晓凯(1992—)，男，高级工程师，从事港口海岸工程设计及项目管理工作。

用现有岸线资源，从而扩大泊位规模、提高作业效率、完善码头功能，是世界各国港口解决泊位资源紧张及装卸能力不足的有效方法，而胸墙是港口工程中的重要构件，主要承担船舶靠泊与抗冲击的核心功能，其设计与施工直接影响整体工程的安全性与耐用性。

国内外学者针对胸墙新建及改造工艺，提出了多种技术方案。例如李斌[1]结合工程实际介绍了利用组合型钢模板胸墙现浇工艺；杨璧榕等[2]、蔡洪滨等[3]提出用植筋与原胸墙连接的现浇工艺；李振羽等[4]、邹伟等[5]等结合海外工程，重点阐述了可以有效减少模板支撑系统荷载的吊模工艺，郑志伟等[6]、候林等[7]、张永敏[8]、樊湘伟等[9]介绍了预制和现浇结合工艺，用以解决胸墙施工潮位影响问题。

然而，目前国内外鲜有预制胸墙既作为现浇胸墙外侧模板、又充当整体胸墙主要受力构件的工程应用案例。本文针对施工场地有限、水位变化、耐久性要求高、受力复杂等难题，提出一种将预制与现浇结合的设计和施工工艺，旨在推动老码头改造领域的创新与发展。

1　工程背景

非洲某重力式方块与板桩组合结构码头由于使用年限较长，上部结构、钢板桩以及附属设施破损严重，同时为了满足船舶大型化的要求，需要进行升级改造。其码头面顶高程为 6.65 m，胸墙底高程为 3.05 m，设计高水位为 3.90 m，设计低水位为 0.40 m，平均海平面为 2.10 m。老码头结构见图 1。

经多方案比选，最终确定工程实施方案：拆除顶部胸墙至 3.05 m、切割旧钢板桩、凿除旧填充混凝土，在现有方块前、旧钢板桩后施打钢板桩，新钢板桩与现有方块间重新填充新混凝土，前、后钢板桩通过上部现浇胸墙相连。为满足不同船型的靠泊需求，设计低水位附近需设置护舷。升级改造上部结构见图 2。

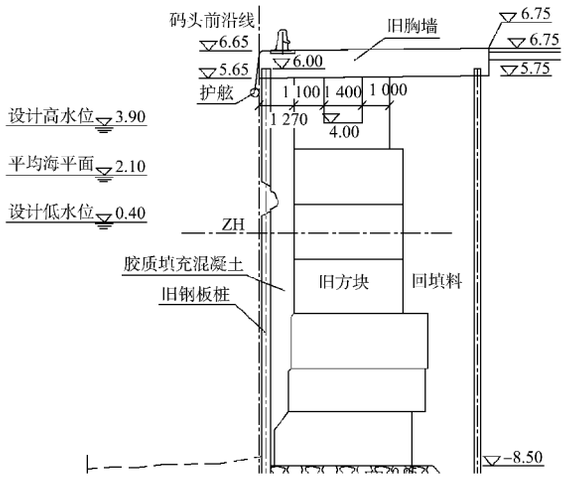


图 1　老码头结构(高程：m；尺寸：mm)

Fig. 1　Structure of existing wharf (elevation：m；dimensions：mm)

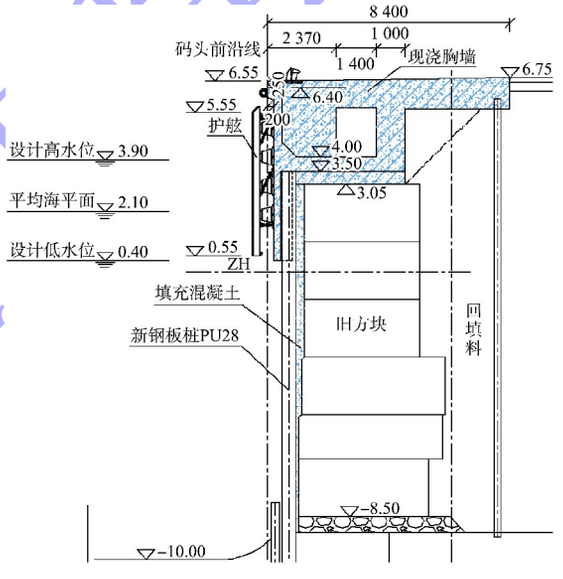


图 2　老码头升级改造上部结构断面(高程：m；尺寸：mm)

Fig. 2　Section of superstructure upgrading and renovation of existing wharf (elevation：m；dimension：mm)

由于老码头需兼顾运营需求，本次改造采用分段施工方案，实行边改造边营运模式。受现有码头营运影响，码头前沿仅预留 9.0 m 空间作为施工作业区域。结合项目特点，本文提出一种新型预制胸墙方案，以解决现场施工场地有限、水位变动区胸墙浇筑和水位变动区钢板桩耐久性的问题。

2　预制胸墙设计

2.1　结构设计

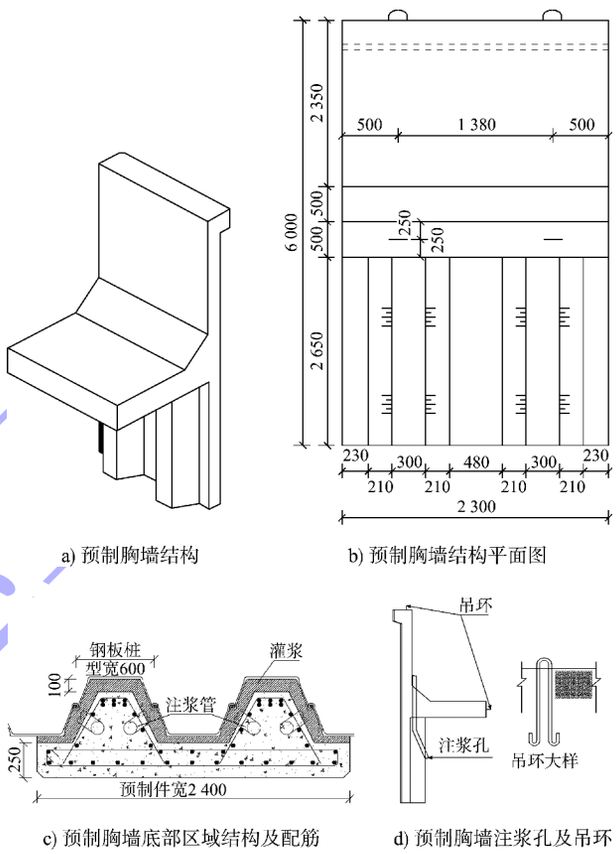
项目胸墙建造方案具有以下难点：1) 部分胸

墙位于水位变动区，现浇混凝土需要考虑潮位对施工方案的影响；2)为不影响原码头装船机使用，码头升级改造过程中不允许前沿线位置变动。部分位于水下的胸墙结构厚度较小，需采用水下抗分散、流动性较大的混凝土浇筑，同时满足设计强度与百年耐久性要求，配合比设计难度较大；3)码头上可供施工区域狭窄，不利于大型混凝土模板作业，且海侧水下模板搭设困难；4)水位变动区的胸墙结构受力需要满足护舷撞击和顶部板桩受力的要求；5)水位变动区的胸墙还需要考虑对钢板桩的保护作用，其结构设计需要考虑钢板桩几何外形的影响。

为解决以上难点，采用预制胸墙和现浇胸墙的组合方式替代传统的现浇方案：1)外侧胸墙在陆上完成预制施工，不再受潮位影响，且预制工序可与其他工序同步施工，缩短工期；2)水下部分胸墙均为预制胸墙，不需要考虑配置水下抗分散、流动性较大的高强度长耐久性混凝土，节约成本；3)作为剩余现浇部分胸墙的外模板，现场现浇施工时，不需要再架设模板，具有较好的经济效益；4)预制胸墙与钢板桩之间预留灌浆空间，通过灌浆填充，对钢板桩进行包裹防护，提高耐久性；5)预制胸墙上设置护舷预埋件，解决护舷预埋件水下施工的问题，同时可以缩短施工工期。

考虑到预制安装过程中的自稳性，将预制块设计成 T 形，见图 3a)，胸墙结构平面图见图 3b)，构件尺寸的控制因素为：1)上部区域根据现浇胸墙的高度确定，同时顶部预留 0.25 m 现浇高度，高 2.85 m；2)底部区域高度按低潮位钢板桩防护高度 0.4 m 控制，整体高度为 2.65 m；3)预制块宽度取钢板桩单幅宽的倍数，并根据现场设备吊重能力和运输能力，取 4 倍钢板桩单幅宽，为 2.4 m；4)T 形板高度根据施工期安装时的自稳定(重心位置)以及吊重限制，取 1.98 m；5)底部预制区域需要贴合钢板桩的几何形状，且考虑到灌浆的施工可行性和钢板桩的打桩误差，与钢板桩之间的净距不小于 100 mm。考虑到保护层厚度和钢筋布置，翼板厚度不小于 250 mm，见图 3c)；6)在预制板上预留注浆管、预埋吊环和护舷螺栓等预埋件，见图 3d)；7)为了方便预制板的安装并保证美观，预制块之间的净距不大于 20 mm，并在外沿设置倒角。

底部预制区域和钢板桩的空隙，可以通过在预制构件内预埋注浆管，待预制胸墙安装就位后进行注浆充填，确保预制构件和钢板桩紧密结合，实现对钢板桩的包裹防护。



a) 预制胸墙结构　b) 预制胸墙结构平面图

c) 预制胸墙底部区域结构及配筋　d) 预制胸墙注浆孔及吊环

图 3　预制块(单位：mm)

Fig. 3　Precast blocks(unit：mm)

2.2　结构配筋

预制胸墙逐块安装，通过预留钢筋和现浇胸墙连成整体；现浇胸墙结构段取预制块整数倍，为 24 m。

施工期间，预制胸墙的配筋需要满足吊装要求。使用期间，上部区域与现浇胸墙连接，满足构造配筋要求即可。结构受力分析的重点在于预制的底部区域，不考虑预制板和钢板桩之间的灌浆填充，底部预制板使用期受力按悬臂板模型考虑，其配筋需要满足朝陆侧护舷反力以及朝海侧板桩顶部反力的双向作用。护舷反力荷载根据护

舷产品确定，产生的弯矩假定为 M_1。桩顶部的反力根据钢板桩-重力式方块复合结构的有限元模型确定，产生的弯矩为 M_2。

2.2.1　M_1 作用配筋计算原则

护舷反力荷载产生的弯矩计算：

$$F_{\mathrm{R,RARE}} = T_{\mathrm{OL}} F_{\mathrm{T}} F_v F_{\mathrm{A}} \tag{1}$$

$$V_{\mathrm{RARE}} = F_{1,\mathrm{RARE}} + F_{2,\mathrm{RARE}} \tag{2}$$

$$V_{\mathrm{ELU}} = 1.5 V_{\mathrm{RARE}} \tag{3}$$

$$M_{\mathrm{RARE}} = F_{\mathrm{R,RARE}} L_1 + F_{\mathrm{R,RARE}} L_2 \tag{4}$$

$$M_{\mathrm{ELU}} = 1.5 M_{\mathrm{RARE}} \tag{5}$$

$$M_{\mathrm{FQ}} = 0.2 M_{\mathrm{RARE}} \tag{6}$$

式中：T_{OL} 为产品生产误差，取 1.100；F_{T} 为温度系数，取 1.023；F_v 为速度系数，取 1.131；F_{A} 为角度系数，取 1.000；L_1、L_2 为护舷中心距预制块底部的距离，分别取 0.5、1.5 m；$F_{1,\mathrm{RARE}}$、$F_{2,\mathrm{RARE}}$ 分别为不同股护舷上准永久荷载下反力；$F_{\mathrm{R,RARE}}$、V_{RARE}、M_{RARE}，分别为准永久荷载下反力、剪力和弯矩；V_{ELU}、M_{ELU} 分别为极限状态荷载下剪力和弯矩；M_{FQ} 为频遇荷载下弯矩。

根据式(1)~(6)可得：$F_{\mathrm{R,RARE}}$ = 230.41 kN，V_{RARE} = 460.82 kN，V_{ELU} = 691.23 kN，M_{RARE} = 460.82 kN，M_{ELU} = 691.23 kN，M_{FQ} = 92.16 kN。护舷受力示意见图 4。

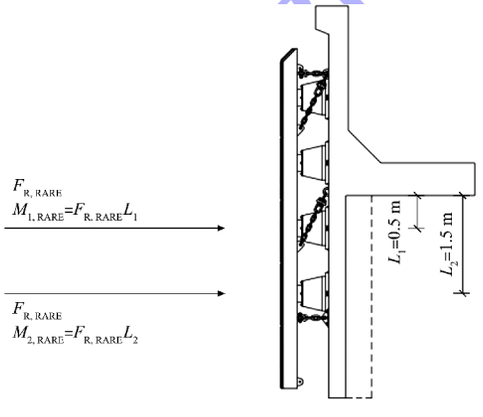


图 4　护舷受力示意图

Fig. 4　Schematic diagram of fender force

2.2.2　M_2 作用配筋计算原则

通过 PLAXIS 有限元模型确定桩顶部的反力，计算结果见图 5。通过数据处理后，可从模型结果中获得板桩反力和弯矩，见表 1。

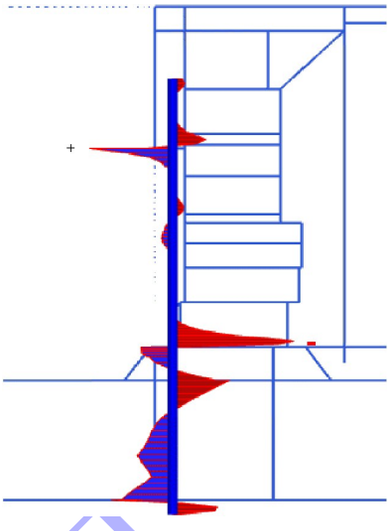


图 5　钢板桩顶部对预制块内侧作用的有限元模型

Fig. 5　Finite element model of sheet pile top acting on inner side of precast block

表 1　PLAXIS 模型下获取的板桩反力

Tab. 1　Reaction force of sheet pile obtained by PLAXIS model

受力状态	剪力/（kN·m^{-1}）	弯矩/（kN·m·m^{-1}）
承载能力极限状态	331.06	661.13
正常使用极限状态下准永久组合	316.96	634.39
正常使用极限状态下频遇组合	190.91	414.82

考虑一正一反钢板桩，即 1.2 m 宽度的预制块，得出其受力情况为：V_{ELU} = 536.31 kN，V_{RARE} = 380.35 kN，V_{FQ} = 229.09 kN，M_{ELU} = 1 071.03 kN·m；M_{RARE} = 761.26 kN·m，M_{FQ} = 497.78 kN·m。

配筋结果见表 2，胸墙预制块 HIDAS 3D 配筋图见图 6。

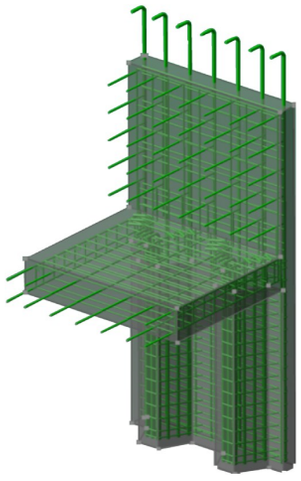


图 6　胸墙预制块 HIDAS 3D 配筋图

Fig. 6　Precast breast wall block HIDAS 3D reinforcement drawing

表 2　配筋结果

Tab. 2　Reinforcement results

预制构件	箍筋	主筋	外伸钢筋
上部	外侧采用 T16@ 200，内侧采用 T12@ 200	外侧采用下部钢筋 T32 的 1/2 延伸上来，其余钢筋 T12	T16@ 400 外伸钢筋，与现浇混凝土连接为整体
中部	采用 T12@ 200	采用 T16	全部主筋外伸，T16，与现浇混凝土连接为整体
下部	采用 T12@ 180	内外侧均采用 T32 钢筋，数量根据受力计算确定	无外伸钢筋

3　预制胸墙施工

3.1　预制块施工

1）预制块生产。混凝土由拌和站集中搅拌，罐车运至预制场，通过料斗卸料，进行混凝土浇筑。预制块模板见图 7。

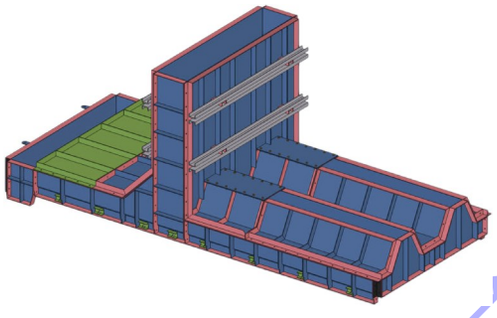


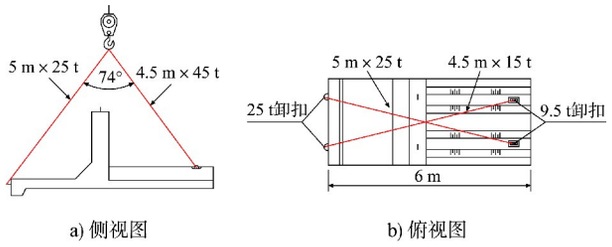
图 7　预制块模板

Fig. 7　Precast block formwork

2）预制块运输。采用平板车将预制块由预制场运输至码头安装现场。

3）预制块吊运至垫层混凝土。采用 160 t 汽车吊将预制块从平板车吊运至混凝土面板垫层；垫层顶面铺设汽车轮胎等软性支撑，避免预制块与垫层直接刚性接触，有效防止结构产生裂缝。

预制块布置 4 根钢丝绳、4 个卸扣，均匀分布在预制块四周，以实现平稳吊运，避免单点拉力过大导致的安全风险，见图 8。



a) 侧视图　　b) 俯视图

图 8　预制块吊索具布置

Fig. 8　Prefabricated block lifting rigging layout

4）垫层处理。预制块安装前对预制块垫层高程进行复核记录，确保垫层平整度满足相关欧洲规范要求，见表 3。然后，采用 SikaGrout-212（该产品成品欧标砂浆，现场自拌砂浆配合比验证后可采用自拌砂浆）对预制块垫层进行找平处理。

表 3　预制块安装垫层平整度要求

Tab. 3　Requirements for flatness of precast block bedding layer

表面状况	范围	误差/mm
封闭或光滑	整体 2 m 范围内	9
	局部 0. 2 m 范围内	4
露天	整体 2 m 范围内	15
	局部 0. 2 m 范围内	6

5）预制块转体。

预制块通过 2 根长度为 5 m×25 t 的钢丝绳挂载在 160 t 汽车吊的吊钩上进行转体操作，转体流程见图 9。

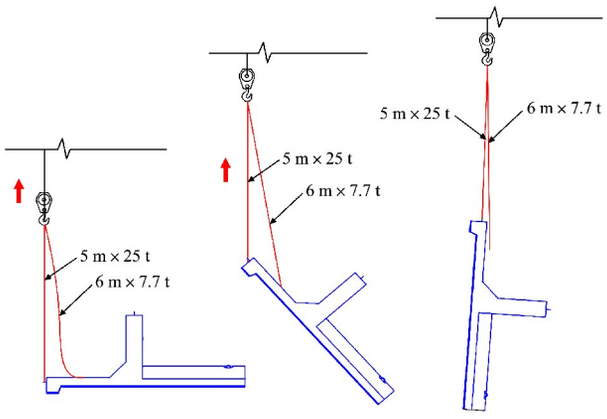
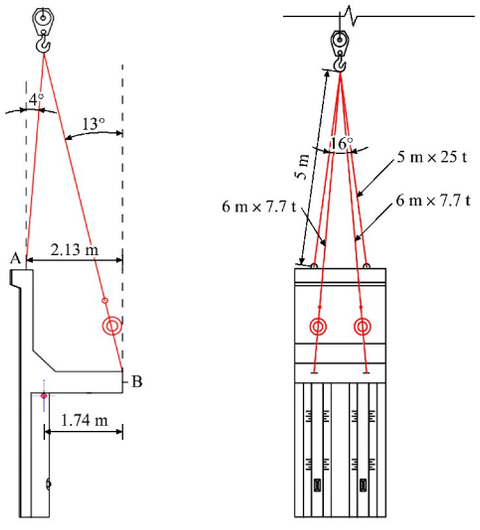


图 9　预制块转体流程

Fig. 9　Precast block rotation process

6）预制块安装。预制块转体完成后，当底部距垫层仅 10 cm 时，将两个 5 t 手拉葫芦分别与 2 根 6 m×7. 7 t 的钢丝绳连接，用于微调预制块姿态，确保平稳落地，避免局部刚性接触后受压破损或产生裂缝，见图 10。

水运工程



a) 侧视图　　b) 正视图

图 10　预制块安装吊索具布置

Fig. 10　Layout of lifting equipment for installing precast blocks

3.2　预制块施工的安全措施和质量控制

预制块安装时，首先要根据预制块的质量和尺寸选择合理的吊装设备，本文案例中 25 t 预制块采用 160 t 汽车吊完全满足吊装安全需求。其次，吊装过程中的转体操作、微调落地等步骤均需精心设计和周密安排，确保安装过程的顺利进行，安装效果见图 11。此外，垫层处理也需要采用特定砂浆材料并进行严格的找平处理，为预制块的平稳安装提供坚实的基础。

1）安全措施。在安装过程中，需要落实各项安全措施。例如，预制块四周的钢丝绳和卸扣需要均匀分布，确保平稳吊运，避免单点拉力过大可能导致的安全风险；同时，在预制块接近垫层时，需要使用两个 5 t 手拉葫芦进行微调，进一步确保预制块的平稳落地；此外，现场还需配备专门的安全监测人员，对吊装过程进行全程监控，确保安装过程的安全性。

2）质量控制。整个安装过程的各个环节需要紧密衔接，确保安装有条不紊地进行。同时，在安装过程中，对预制块的姿态、位置等进行严格的控制和调整，确保了安装质量的稳定性和可靠性。整个安装过程中，首要的质量控制措施是控制混凝土裂缝的产生，其产生原因及控制措施如下。

原因 1：预制块垫层平整度不足会导致预制块在安装时无法均匀受力，从而产生局部应力集中，最终导致裂缝的产生。

解决措施：预制块安装前，采用 SikaGrout-212 对预制块垫层进行找平处理，此方法可确保预制块与垫层的充分接触且减小受力不均匀。

原因 2：预制块翼板姿态未调整水平。

解决措施：在预制块转体前，预先将两根 6 m×7.7 t 钢丝绳挂载于 160 t 汽车吊吊钩上。预制块转体完成后，当底部距垫层仅 10 cm 时，将两个 5 t 手拉葫芦分别与两根钢丝绳连接，用于微调预制块姿态，确保平稳落地，避免局部受压破损。

图 11　预制块安装效果

Fig. 11　Installation effect of precast blocks

4　结语

1）预制胸墙的应用在老码头改造工程中展现了其独特优势，有效地解决了由于水位变化带来的施工困境，同时克服了现场施工空间受限和钢板桩耐久性不足等问题，提升了整体施工效率与安全性。

2）未来预制块的设计和施工中，在确保强度和耐久性的前提下，可采用空心构件或轻质材料做预制构件，将更有利于吊装，加快施工工期。

3）尽管本文从设计及施工角度对预制胸墙的应用进行了全面论述，并提出了有效的措施，但在后续其他实际应用中，仍需关注环境与工程特征的多样性，确保在设计和实施过程中充分考虑相关因素(如不同钢板桩的尺寸形状、码头前沿线的要求、胸墙的设计底高程等)，以增强施工效果的适应性与可持续性。

参考文献：

[1] 李斌. 码头改造技术在秦皇岛港的应用[J]. 甘肃科技, 2009, 25(11): 94-96.
LI B. Application of wharf reconstruction technology in Qinhuangdao Port [J]. Gansu science and technology, 2009, 25(11): 94-96.

[2] 杨璧榕, 丘小标. 珠海电厂重力式码头结构升级改造[J]. 水运管理, 2020, 42(6): 31-34.
YANG B R, QIU X B. Structure upgrading and rebuilding of gravity quay in Zhuhai power plant [J]. Shipping management, 2020, 42(6): 31-34.

[3] 蔡洪滨, 张东领. 化学植筋在码头胸墙修复中的应用[J]. 水运工程, 2012(8): 200-203.
CAI H B, ZHANG D L. Application of bonded rebars in repair of wharf's breast wall [J]. Port & waterway engineering, 2012(8): 200-203.

[4] 李振羽, 熊鹏飞. 板桩码头胸墙工程中的悬吊模法施工工艺: 以以色列阿什杜德港 21 号码头改建施工项目为例[J]. 工程技术研究, 2022, 7(22): 191-193.
LI Z Y, XIONG P F. Suspension formwork construction technology in breast wall engineering of sheet pile wharf: taking the reconstruction construction project of No. 21 wharf in Ashdod Port of Israel as an example[J]. Metallurgical collections, 2022, 7(22): 191-193.

[5] 邹伟, 刘功鑫, 丁红波. 悬吊模法在板桩码头胸墙施工中的应用[J]. 珠江水运, 2019(5): 111-112.
ZOU W, LIU G X, DING H B. Application of suspended formwork method in parapet construction of sheet pile wharf[J]. Pearl River water transport, 2019(5): 111-112.

[6] 郑志伟, 胡湘坤, 张皓, 等. 海外深水板桩码头胸墙施工技术[J]. 水运工程, 2015(8): 94-98.
ZHENG Z W, HU X K, ZHANG H, et al. Overseas construction technology of crest wall for deepwater sheet-pile wharf [J]. Port & waterway engineering, 2015 (8): 94-98.

[7] 侯林, 樊海辉, 费志伟. 镶面板工艺在老码头修复工程中的应用[J]. 水运工程, 2004(11): 139-143.
HOU L, FAN H H, FEI Z W. Application of facing slabs in repairing of an old quay[J]. Port & waterway engineering, 2004(11): 139-143.

[8] 张永敏. 胸墙预制与现浇相结合施工工艺[J]. 中国水运, 2022, 22(6): 152-154.
ZHANG Y M. Construction technology of combining precast and cast-in-place breast wall [J]. China water transport, 2022, 22(6): 152-154.

[9] 樊湘伟, 任宁. 弧型挡浪墙现浇改预制与后浇带相结合的施工工艺[J]. 中国港湾建设, 2013, 33(2): 55-59.
FAN X W, REN N. Technology of combination of prefabrication and post-pouring joints instead of casting-in-situ for construction of arc wave walls [J]. China harbour engineering, 2013, 33(2): 55-59.

[10] Eurocode 0: Bases de calcul des structures: EN 1990: 2002 (E) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

[11] Eurocode 1: Actions sur les structures: EN 1991: 2002(E)[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

[12] Eurocode 1: General rules and rules for buildings: EN 1991-1-1: 2004 (E) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

（本文编辑 王传瑜）

水运工程