

防浪韧性增强装配式护岸结构传力机制分析*

江 义, 刘亚男, 周清泉

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对水运工程传统护岸结构设计防浪韧性不足的问题, 开展护岸结构传力机制的基本特点及其组合机制的比较研究, 系统性分析了具有复合传力机制的典型护岸结构, 提炼护岸结构的 11 种典型复合传力机制, 并通过工程案例验证具有复合传力机制的护岸结构防浪韧性增强效果。

关键词: 护岸结构; 韧性; 装配式; 传力机制

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0094-07

Force transmission mechanism for prefabricated revetment based on improvement of resilience against wave action

JIANG Yi, LIU Yanan, ZHOU Qingquan

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

Abstract: Regarding the problem that the deficiency of resilience against wave action in the traditional revetment structures design of water transportation engineering, the basic characteristics of the force transmission mechanisms of the revetment structures and the comparative study of its combination mechanism are carried out. Classical revetment structures with the combined force transmission mechanisms are analyzed systematically, and the eleven combined force transmission mechanisms are formulated. The reinforced effects of the resilience are verified via the combined force transmission mechanism using the engineering application.

Keywords: revetment; resilience; prefabricated; force transmission mechanism

韧性的概念出现自 20 世纪 70 年代的生态学, 经历了从“平衡性”到“适应性”的演变, 目前主要集中在研究韧性城市演化机理、韧性城市评价、韧性城市规划等方面^[1-2]。韧性海岸工程强调与环境相协调, 研究护岸在吸收和适应自然力、灾害情况下, 维持其功能以及灾后快速恢复的能力等特征。针对港口与海岸工程建设, 季则舟^[3]提出了韧性工程实施策略及方法, 包括对港口规划与平面布置、复杂环境下的港口与海岸工程韧性设计的优化原则, 主要为多重防护、吸收性防护、变形性防护及生态性防护, 以改善工程与环境的适应性, 增强工程韧性。胡艳华等^[4]将安全韧性

理论引入港口领域, 提出了港口安全韧性三角形模型, 包括灾害系统、承灾系统、安全韧性管理等要素。港口工程韧性设计强调基础设施的系统多样性、安全冗余度、内在协调性、结构鲁棒性和即时可恢复性。

装配式护岸目前的主要研究工作基本集中在内河护岸结构的设计、预制、安装与节点施工, 研究表明: 采用工业化生产的装配式部件可实现装配式护岸建设, 工程质量可靠, 施工效率大幅提高。根据文献调研^[5-9], 目前装配式护岸结构很少直接应用于沿海护岸结构(海堤、防浪墙、码头后方驳岸等)。传统护岸结构设计往往内在结构

收稿日期: 2022-11-15

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600700)

作者简介: 江义(1985—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事港口工程设计与研究工作。

组成要素形式单一、结构安全冗余度不足、内在协调性有待加强，尚未引入结构鲁棒性和即时可恢复性等设计理念。因此，开展基于复合传力机制护岸结构的韧性增强机理研究具有十分重要的意义。

1 防浪增强韧性设计

护岸结构防浪韧性提升的关键是加强结构内在系统组成要素的多样性，提高结构安全冗余度。防浪增强韧性的装配式护岸结构建造的重难点包括：

1) 抗冲蚀防浪韧性强。装配式护岸结构的防浪韧性设计包括：在波浪作用下护岸结构稳定性和相应的护底等抗冲刷破坏两个方面，以提升护岸结构的可恢复性。

2) 预制构件模块标准化。实现防浪韧性增强护岸结构的模块化设计，需充分结合设计船型、装卸工艺、自然、地质地形等条件，研发具有可制造、运输、拼装、经济合理的模块化设计方案，实现工业化生产和机械化安装，保障制作精度高及质量可追溯。

3) 节点连接设计与施工质量可靠。大量的标准模块构件在现场安装，节点连接设计的质量可靠性、可实施性是关键，包括节点的承载能力、构造设计和施工安装工艺，控制制作允许误差，提高现场安装精度。

4) 运营维护方便。防浪韧性增强装配式护岸结构投入运营后，需充分考虑护岸结构的维护使用便利性。在极端波浪条件下，破坏损伤要求恢复时间短、成本低。

本文重点研究在波浪作用下护岸结构的传力机制及其组合方案，具体防浪韧性增强策略包括：

1) 工程消浪措施设计。包括设置缓坡、消浪空心块体、破碎波浪的人工块体、弧形挡浪墙等，有效降低护岸结构的波浪作用；2) 鲁棒性设计。在设计波浪作用下允许护岸结构发生一定程度的破坏损伤，但不导致护岸基本的挡土、防浪功能完全失效，即不发生结构完整性的破坏；3) 可恢复

性设计。在设计波浪作用下，损伤的护岸结构应易于修复，恢复成本低、时间短，可恢复性优越；4) 生态提升设计。即提升护岸结构的生态功能，具体设置潮间带生物繁衍栖息的空间、护岸定量绿化、生态筑堤等，实现环境友好、节能减排和废弃物资源化利用。

2 传力机制

护岸结构的传力路径设计是护岸结构韧性提升设计的重点，需优先采用传力路径较为简洁、可靠的传力机制。总结归纳了 4 种基本传力机制和 6 种附加传力机制，其相应的特点见表 1。

表 1 基本传力机制分析及其组合机制

基本/附加传力机制	主要特点
M-I 重力式结构	利用自身质量实现抵抗外部水平波浪荷载作用
M-II 桩基结构	利用桩基将外部水平波浪荷载作用传递至地基土体
M-III 板桩结构	利用板桩前方被动土压力抵抗外部水平波浪荷载作用
M-IV 斜坡式结构	通过筑堤材料及其护面、镇脚等外部防护结构实现堤身结构在外部波浪荷载作用下的稳定
MF-I 锚定结构	利用锚定墙体或板桩前方被动土压力抵抗部分外部水平波浪作用，一般不单独存在
MF-II 地基加固处理	利用板桩前方被动土压力、后方主动土压力、下方土体区域进行土体地基加固处理，主要的地基加固处理方法可包括水泥土搅拌桩、砂桩、碎石桩等
MF-III 桩基嵌岩或锚杆	利用桩基嵌岩或锚杆等措施提升桩基的抗拔承载力、竖向承载力或嵌固稳定，一般依附于桩基结构存在
MF-IV 遮帘桩	利用遮帘桩的挡土效应减小板桩后方主动土压力，一般不单独存在
MF-V 卸荷板	利用卸荷板的挡土效应减小板桩后方主动土压力，同时利用上部土体质量增加自身抗滑移倾覆稳定性，一般不单独存在
MF-VI 切角、导角或开孔	利用切角、导角或开孔降低重力式结构、消浪块体结构的波浪作用，一般不单独存在

2.1 基本传力机制

护岸结构的基本传力机制主要包括对应直立式护岸的重力式结构(M-I)、桩基结构(M-II)和板桩结构(M-III)3 大类和相对于直立式护岸的斜坡式结构(M-IV)。

1) 重力式结构(M-I), 如矩形、圆形或椭圆形沉箱结构、半圆形沉箱、方块结构、消浪块结构等, 通常是利用自身重力产生的摩擦力抵抗外部水平波浪荷载作用, 传力路径简洁、可靠。

2) 桩基结构(M-II), 诸如高桩承台、低桩承台、斜顶桩承台结构等, 外部水平波浪荷载通过承台和桩基直接传递至地基深部土体, 结构传力路径可靠。

3) 板桩结构(M-III)通过板桩前沿的被动土压力实现外部水平波浪荷载作用的传递, 通常需要其他附加传力机制配合发挥作用。

4) 斜坡式结构在外部波浪荷载作用下, 通过筑堤材料及其外部防护结构实现堤身结构的稳定, 也是最为常见的一种基本传力机制。

2.2 附加传力机制

附加传力机制依赖于护岸结构的基本传力机制发挥作用, 一般不独立存在。1) 在基本传力机制板桩结构(M-III)的基础上, 通过增加锚定结构抵抗外部水平波浪作用, 形成一种传力机制锚定结构(MF-I)。2) 当在软土地基新建护岸结构时, 通过板桩前方被动土压力、后方主动土压力、下方土体区域土体地基加固处理, 实现堤身结构在外部波浪作用下的地基承载力, 形成了附加传力机制地基加固处理(MF-II)。3) 当地基为岩质时, 通过桩基嵌岩或锚杆等措施提升抗拔承载力、竖向承载力或嵌固稳定性, 形成附加传力机制桩基嵌岩或锚杆(MF-III)。4) 板桩结构后方通过遮帘桩减小板桩后方主动土压力, 形成附加传力机制遮帘桩(MF-IV)。5) 板桩结构可通过卸荷板的挡土效应减小板桩后方主动土压力, 同时利用上部土体质量增加自身抗滑移倾覆稳定性, 形成附加传力机制卸荷板(MF-V)。6) 此外, 护岸结构也可通过对上部结构或结构本体进行切角、导角或开孔降低波浪荷载作用, 形成附加传力机制切角、导角或开孔(MF-VI)。

护岸结构需要采用基本传力机制和若干种附加传力机制协同发挥作用, 实现防浪韧性增强作用。因此, 首先分析传统护岸结构进行相关的受

力机制, 然后在此基础上研究新型护岸结构的复合传力机制。

3 护岸结构组合传力机制

3.1 传统护岸结构传力机制

1) 锚定板桩结构、组合板桩结构: M-III + MF-I (+MF-II)。主要通过板桩前沿的被动土压力和后方的锚定结构实现外部水平波浪荷载作用的传递, 综合基本传力机制板桩结构和附加传力机制锚定结构。锚定板桩结构主要适用于砂土、黏性土地基; 组合板桩结构适用于较差的砂土、黏性土地基, 或使用荷载较大的码头、护岸结构。当地基土体为软土时, 可引入附加传力机制进行地基加固处理。

2) 经地基加固处理斜坡式护岸结构: M-IV + MF-II。软土地基可通过地基处理加固解决地基稳定性和承载力, 然后在加固地基上直接填筑形成斜坡式结构, 综合考虑基本传力机制斜坡式结构和附加传力机制地基处理加固。抛石挤淤堤、砂桩处理斜坡堤等适用于软土地基, 且该区域砂石料等大宗材料较为丰富。

3) 多级斜坡式护岸结构: 多重 M-IV (+MF-II)。主要设置多级肩台, 属于复合多重基本传力机制的斜坡式结构。该结构形式广泛应用于防波堤、护岸和围堤结构。当地基土体为软土时, 可引入附加传力机制地基加固处理。另外, 在波浪作用下, 允许肩台和坡面发生一定变形并形成动态平衡剖面, 设计其宽肩台护岸结构。

4) 经地基加固处理重力式护岸结构: M-I + MF-II。软土地基通过地基处理加固解决地基稳定性和承载力, 采用重力式结构直接搁置于经加固处理的地基上, 综合利用基本传力机制重力式结构和附加传力机制地基处理加固, 适用于软土地基。

5) 遮帘板桩结构^[10]: M-III + MF-I + MF-IV (+MF-II)。在锚定板桩结构的基础上增加利用遮帘桩的挡土效应, 减小板桩后方主动土压力, 综合附加传力机制遮帘桩可将传统板桩码头应用拓

展至 20 万 t 深水板桩码头结构。当地基土体为软土时,可引入附加传力机制进行地基加固处理。已成功应用于我国北方曹妃甸地区。

6) 带卸荷板板桩结构: $M-III+MF-I+MF-V(+MF-II)$ 。在锚定板桩结构基本传力机制的基础上增加卸荷板的挡土效应,减小板桩后方主动土压力。当地基土体为软土时,可引入附加传力机制进行地基加固处理。

7) 消角直立堤护岸结构、开孔沉箱护岸结构: $M-I+MF-VI(+MF-II)$ 。采用直立式沉箱结构,通过外壁开孔,内设消浪室,形成波浪消减机制,综合利用基本传力机制重力式结构和附加传力机制切角、导角或开孔。当地基土体为软土时,可引入附加传力机制进行地基加固处理。

8) 双排桩结构: $M-I+M-II+M-III(+MF-II)$ 。通过梁连接形成钢架的前后排板桩或管桩与支护桩顶部的帽梁组成支挡式结构,传力机制较为复杂,综合重力式结构、桩基结构和板桩结构 3 种基本传力机制。双排桩结构适用于砂土、黏性土地基,广泛应用于护岸、码头、船坞和临时围堰工程等。当地基土体为软土时,可引入附加传力机制进行地基加固处理。

3.2 新型护岸结构传力机制

近年水运工程积极推广应用的新结构包括桶式基础结构、插入式钢圆筒结构和斜顶桩护岸结构,相应的传力机制也较为复杂。

1) 桶式基础结构、插入式钢圆筒结构: $M-I+M-III(+MF-II)$ 。桶式基础结构主要利用自身质量和桶体前方的土压力,通过引入基本传力机制重力式结构和板桩结构,实现抵抗波浪作用。当地基土体的含水率、孔隙、压缩性较大且地基承载力很低时,还可引入附加传力机制地基加固处理。该结构形式具有装配式安装施工、用海面积小、少量使用砂石料、结构耐久性好等优势,已成功应用于连云港徐圩新港防波堤。

插入式钢圆筒结构主要利用自身质量、筒体内部土体的剪切稳定和筒体前方的土压力,同时引入基本传力机制重力式结构和板桩结构,实现

抵抗波浪作用的目的。该结构形式一般适用于砂土和黏性土区域,采用振动沉桩。当地基土体较差时,可引入基本传力机制地基加固处理。其具有快速成陆、用海面积小等优势,已成功应用于港珠澳人工岛项目。

2) 斜顶桩结构: $M-II+M-III(+MF-III)$ 。主要利用密排桩基结构形成挡土板桩和桩基前方的斜顶桩,引入基本传力机制桩基结构和板桩结构,实现抵抗波浪作用。该结构形式一般适用于砂土和黏性土区域,需考虑桩基的沉桩性能。当地基土体较差时,可引入附加传力机制地基加固处理;当地基为岩质地基时,可引入附加传力机制岩基桩基嵌岩或锚杆。此外,可设置卸荷板减小前排密排钢管桩的后方主动土压力。由于该方案具有快速成陆、施工技术成熟等优势,在洋山深水港一~四期工程得到了广泛应用。

3) 半直立式生态护岸结构: $M-I+M-IV+MF-VI(+MF-II)$ 。堤身结构主要由块石和惰性材料组成,通过装配式消浪块体实现护岸抵抗堤身土压力,该护岸结构通过装配式消浪块体和顶部弧形挡浪墙抵抗设计波浪作用。在超标准的波浪作用下,上部斜坡式结构仍可有效减少堤顶的越浪量。通过引入多重消浪措施增强护岸结构的韧性。利用基本传力机制包括重力式结构、斜坡式结构和附加传力机制切角、导角或开孔。下部直立式结构设置必要的消浪孔,其位于潮间带,可供生物栖息繁衍,显著提升生态功能。当地基土体较差时,可引入附加传力机制软土地基加固处理。

近年来如何通过其他新型传力机制的研究(如提升沉箱底部抗滑移胶结垫层结构、新型生物增强技术等)发展具有复合传力机制、防浪韧性优越的新型装配式护岸结构,仍是水运工程韧性设计领域具有挑战的热点问题。

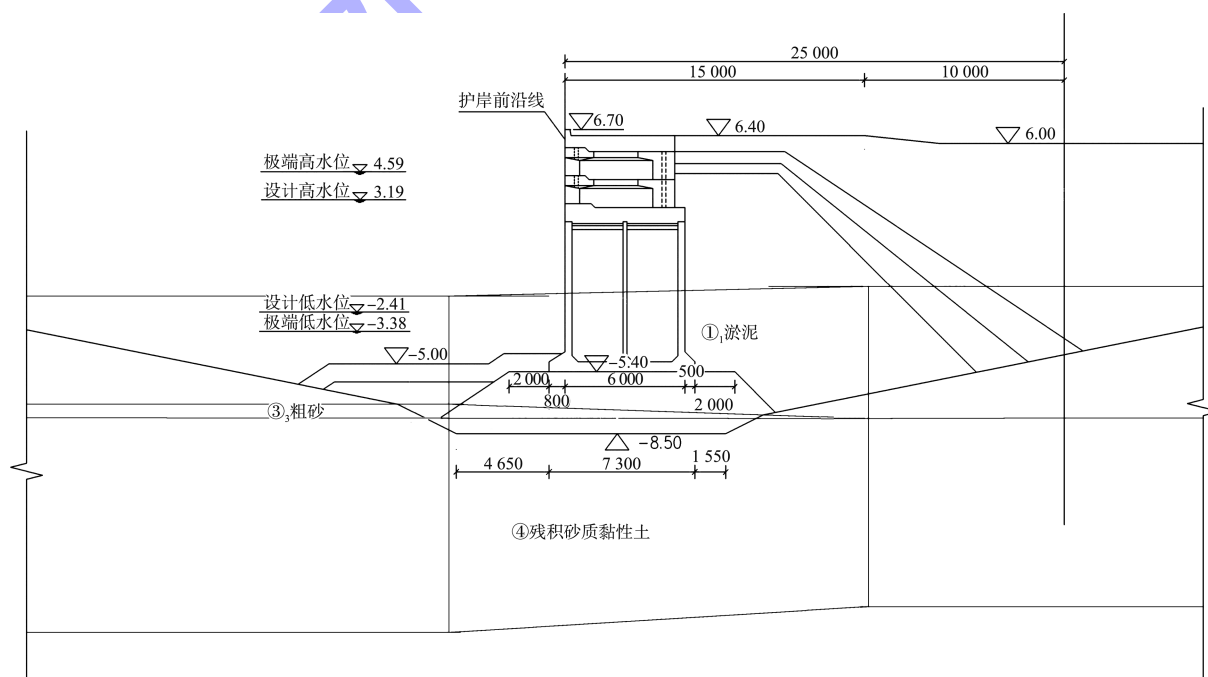
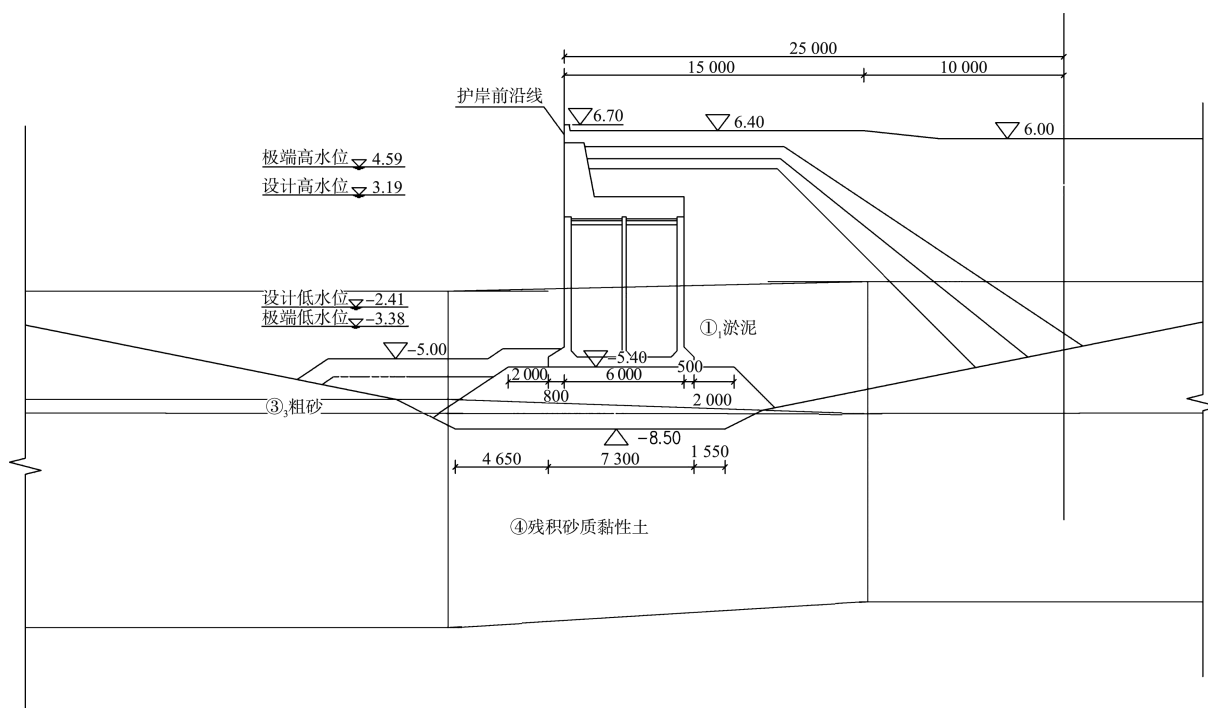
4 工程案例

某岸壁工程为直立式护岸结构,水工建筑物等级为二级,设计使用年限为 50 a。工程设计波

浪,常浪向为 ESE—E 向,50 a 一遇设计波浪 $H_{1\%}=3.6$ m;次浪向为 W 向,50 a 一遇设计波浪 $H_{1\%}=2.3$ m。拟建工程沿线地质岩土层分布包括:淤泥①₁、淤泥混砂①₂、淤泥质土①₃、松散粗砂②、粉质黏土③₁、细砂③₂、粗砂③₃、残积砂质黏性土④、散体状强风化花岗岩⑧等。根据地勘报告,粉质黏土③₁可作为护岸持力层或下卧层。工程位

于抗震设防烈度 7 度区,设计基本地震加速度值为 0.15g,设计地震分组属第 3 组,特征周期为 0.45 s。护岸前沿线至后方陆域 25 m 范围内,护岸结构设计荷载为 15 kPa。

为提升方案的生态功能,有效控制堤顶越浪量和堤顶高程,设计 3 种结构方案进行比选,典型护岸结构断面见图 1。



b) 消浪块复合传力机制

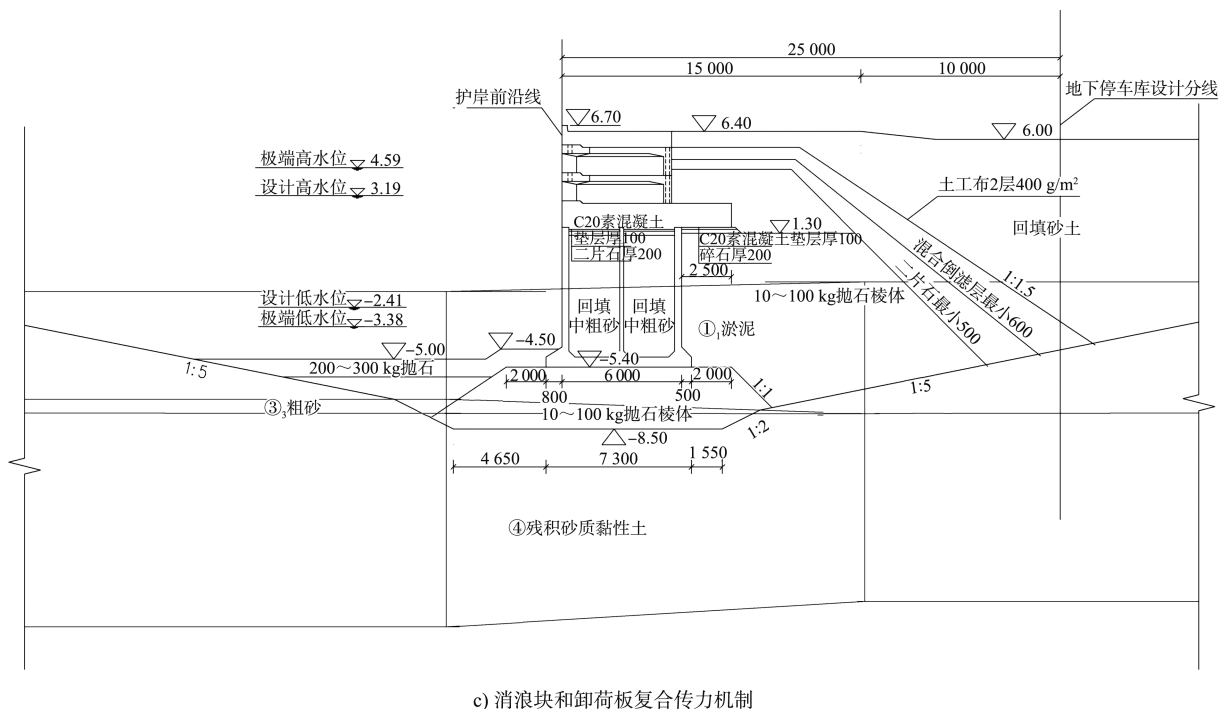


图 1 典型护岸结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

1) 结构方案 1: 沉箱+现浇胸墙结构。典型护岸结构基槽开挖至粉质黏土③₁ 层, 平整开挖面后回填 10~100 kg 块石并夯实基床, 抛石基床上安放尺寸为 15.05 m×6.0 m×7.5 m(长×宽×高)的方沉箱, 单件约 529 t, 沉箱顶高程 2.1 m, 堤顶高程 6.4 m, 沉箱上部为现浇胸墙, 沉箱前趾处设置 0.9 m 厚 200~300 kg 的护底块石, 胸墙后为 10~100 kg 抛石棱体, 棱体后设有二片石垫层、混合倒滤层和 2 层 400 g/m² 土工布, 土工布后方为陆域回填料。

2) 结构方案 2: 沉箱+预制消浪块结构。沉箱平面尺寸、抛石基床、墙后回填料和墙前护底的规格同结构方案 1。沉箱顶高程 2.1 m, 上部设 0.7 m 厚现浇混凝土盖板, 盖板以上设置 2 层消浪块, 尺寸为 5.5 m×3.0 m×1.4 m, 消浪块顶面设 0.8 m 厚现浇混凝土面层, 堤顶高程 6.4 m。

3) 结构方案3: 沉箱+预制消浪块+卸荷板结构。沉箱平面尺寸、抛石基床、墙后回填料和墙前护底的规格同结构方案1。方沉箱顶高程1.6 m, 上部设1.2 m厚现浇混凝土卸荷板, 混凝土卸荷板以上设置2层消浪块, 消浪块顶面设0.8 m厚现

浇混凝土面层，堤顶高程 6.4 m。

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[11]和 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[12]进行计算表明:在极端高水位和设计高水位下沿基床底的抗滑稳定性的抗滑力/滑动力分别为 475/539、497/529 kN/m, 结构方案 1 不满足规范要求;结构方案 2 在极端高水位和设计高水位下沿基床底的抗滑稳定性的抗滑力/滑动力分别为 422/539、451/524 kN/m, 也不满足要求, 主要由于上部结构采用开孔的空心消浪块, 降低了结构自身重力, 相应地降低了结构的抗滑移能力;结构方案 3 考虑预制消浪块和卸荷板效应, 结构安全满足规范要求。从施工可实施性角度, 结构方案 2 和 3 沉箱和消浪块结构均可模块化预制安装, 装配化程度高, 水位变动区现浇工作量小, 可恢复性优越。

结构方案 2 通过引入附加传力机制切角、导角或开孔,降低护岸的波吸力作用和堤顶越浪量,提升了护岸的生态功能,但减小了上部结构的自身重力及整体稳定性能。结构方案 3 通过引入附加传力机制切角、导角或开孔(安装预制消浪块)和卸荷板,不仅降低护岸结构的波浪作用,也有

效控制了护岸堤顶高程和越浪量，消浪块开孔增加潮间带区域生物的栖息繁衍空间，提升了护岸的生态功能。上述 3 个方案的优缺点见表 2。经综

合比选，推荐实施结构方案 3，其复合传力机制为 M-I+MF-V+MF-VI。

表 2 结构方案的优缺点

结构方案	结构安全性	使用性能	生态功能	可实施性
1	沿基底抗滑不满足规范要求	堤顶越浪量较大,与后方使用需要不匹配,需提升堤顶高程至 6.7 m 方可满足	不显著	沉箱结构可模块化预制安装,局部模块化设计
2	开孔消浪块设计,降低波吸力作用,但开孔降低了自身质量导致沿基底抗滑仍不满足规范要求	堤顶高程 6.4 m,开孔消浪块设计,堤顶越浪量满足规范要求	位于潮间带的开孔消浪块可为潮间带生物的栖息繁衍空间	沉箱和消浪块结构均可模块化预制安装,模块化设计,可恢复性强
3	开孔消浪块设计,降低波吸力作用;复合传力机制设计,满足规范要求	同结构方案 2	同结构方案 2	同结构方案 2

5 结论

1) 研究了护岸结构的重力式结构、桩基结构、板桩结构和斜坡式结构等 4 种基本传力机制和锚定结构、地基加固处理、桩基嵌岩或锚杆、卸荷板、遮帘桩、切角/导角/开孔等 6 种附加传力机制的特点及其组合方案，包括桶式基础结构、插入式钢圆筒结构和半直立式生态护岸结构等，研究表明具有复合传力机制的装配式护岸结构防浪增强韧性较优。

2) 防浪韧性增强装配式护岸结构由标准构件模块化组合而成，通过工程消浪措施、鲁棒性、可恢复性和生态提升设计，显著改善了复合传力机制的防浪韧性增强效果，总结提炼了典型护岸结构的 11 种复合传力机制。

3) 结合工程案例研究直立式护岸结构，推荐采用“沉箱+预制消浪块+卸荷板结构”，堤顶越浪量可控，装配化程度高，现场施工方便，防浪韧性优越。

参考文献：

[1] 邵亦文,徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析[J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 48-54.

[2] 李彤玥. 韧性城市研究新进展[J]. 国际城市规划, 2017, 32(5): 15-25.

[3] 季则舟. 基于与环境相协调的韧性海岸工程建设策略[J].

海洋与湖沼, 2022, 53(4): 830-837.

[4] 胡艳华,詹水芬,蒋文新,等. 重大突发事件下港口安全韧性理论模型及其定量评估研究[J]. 水道港口, 2022, 43(2): 266-272.

[5] 杨金龙. 预制装配式波浪桩生态护岸研究[J]. 中国水运(上半月), 2022(4): 29-32.

[6] 邹恒,董蕃宗,马如彬,等. 上海市内河装配式护岸设计研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(4): 108-111, 16.

[7] 顾宽海,汪涛,陈明阳,等. 装配重力式混凝土护岸结构的设计及施工[J]. 水运工程, 2021(6): 6-12, 19.

[8] 杨有军,曹定维,王鹏,等. 工业化箱型装配式护岸生态性分析研究[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(10): 84-85.

[9] 朱红亮,沈旭鸿. 工业化装配式技术在内河航道重力式护岸中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(4): 252-253, 257.

[10] 刘永绣. 板桩码头向深水化发展的方案构思和实践: 遮帘式板桩码头新结构的开发[J]. 港工技术, 2005(S1): 12-15.

[11] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第三航务工程勘察设计院有限公司,中交第四航务工程局有限公司. JTS 167—2018: 码头结构设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[12] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. JTS 154—2018: 防波堤与护岸设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 赵娟)