

基于与环境相协调的韧性海岸工程建设策略*

季则舟

(中交第一航务工程勘察设计院有限公司 天津 300220)

摘要 对于海岸工程所遇到的自然灾害, 仅以加大结构尺度与结构强度的传统方法应对是不可取的。改变传统理念, 通过改善工程与环境的关系, 提高工程韧性是较合理的选择。韧性海岸工程以工程系统与环境相协调, 具有吸收和适应自然力、灾害情况下维持其功能以及灾后可快速恢复的能力为特征。针对港口工程、海岸及港口防护工程建设提出了韧性工程实施策略及方法。以韧性工程理念对港口规划与平面布置、复杂环境下的码头结构及航道工程设计提出优化原则与方案。海岸及港口防护工程可采用多重防护、吸收性防护、变形型防护及生态型防护等类型, 以改善工程与环境的适应性, 增强工程韧性。

关键词 韧性海岸工程; 港口工程; 海岸防护; 环境; 航道; 防波堤

中图分类号 P753; U656; U651 **doi:** 10.11693/hyhz20211200344

在我国海岸工程中, 港口及海岸防护工程是非常重要的基础设施。我国水运承担了全国 90% 以上的外贸物资运输和大量的跨区域物资交流, 这其中港口发挥着巨大作用。我国岸线资源丰富, 拥有大陆海岸线 1.84 万 km、岛屿海岸线 1.4 万 km、南京以下长江岸线 800 余 km, 分布有 61 个沿海港口, 其中主要港口 27 个。我国也是港口大国, 长期以来, 世界吞吐量前 10 位的港口我国占据 7 个, 2020 年达到 8 个; 至 2020 年, 我国集装箱吞吐量已连续 17 年位居世界第一, 在全球集装箱吞吐量排名前 10 位的港口中也占据了 7 席, 在海岸带建设的港口已成为构建国际国内经济双循环的重要支撑。为保障港口陆域及船舶停泊作业安全, 需建设港口护岸、防波堤等防护建筑物提供掩护。除港口设施外, 为抵御风暴潮及海岸侵蚀, 我国沿海修建了大规模的海岸防护设施, 包括防护大堤、丁坝、离岸堤等。据统计, 我国大陆人工海岸线占海岸线总长度将近 60% (Ma *et al.*, 2014)。

港口及海岸防护设施等海岸工程一方面对水上交通运输及陆域防护起到保障作用, 另一方面对海岸生态环境也造成一定影响。长期以来, 海岸带人工设施与自然环境常常处于对立状态, 人类注重的是

设施的正常运转与防护功能, 针对高潮、大浪、强流、地震, 为保证防护设施及被保护区的安全而采用更高的标准, 设计更高、更大、更强的结构去对抗。而在对抗过程中, 水动力能量聚集, 冲刷海床, 使水工结构附近水域地形变化, 水深增大进一步加大了波流能量并对防护设施基础造成破坏, 后果是投资大而效果不佳, 结构损毁屡见不鲜, 并造成生态环境的破坏。由于海岸工程一般规模较大, 且周边地形环境改变, 故修复也较困难, 这反映出我国一些海岸工程韧性不足, 还需从与环境相协调角度, 从设计理念、策略方法等方面加以改进。本文针对我国海岸工程存在的主要问题提出提高工程韧性的对策与建议。

1 中国海岸工程面临的主要自然灾害

1.1 港口工程

港口工程占用自然岸滩, 造成自然及生态环境的改变。在淤泥质及粉沙质海岸开挖港池和航道会造成水域泥沙淤积。建设港口防波堤等防护建筑物会使海域水动力场改变, 在某些地区会造成海床地形变化。在港口陆域, 基于土地成本及经济效益, 往往土地资源利用最大化, 除生活辅建区外, 均会布置成货

* 国家自然科学基金资助项目, U1906231 号; 天津市交通运输科技发展项目计划, 2020-11 号。季则舟, 正高级工程师, E-mail: jizezhou@fdine.net

收稿日期: 2021-12-27, 收修改稿日期: 2022-02-25

物堆场及道路, 并进行地基处理及面层硬化, 自然地貌所具有的雨水渗透、滞纳功能丧失, 使得港口抗涝能力降低。

粉沙质海岸泥沙运动活跃, 在风浪作用下, 极易起动, 风浪减弱后也极易沉降, 在此类海岸开挖的航道在大风浪天气常常发生泥沙骤淤, 堵塞航道, 造成灾害。2003 年 10 月 10 日至 13 日, 我国渤海湾的一次特大风暴潮过程, 使位于粉沙质海岸承担“北煤南运”重任的黄骅港遭受了淤积灾害, 该港外航道发生了强烈骤淤, 11 m 深的航道基本淤平, 一次淤积量高达约 1 000 万 m^3 , 港口被迫停止运营(神华集团黄骅港建设指挥部等, 2003)。此前在黄骅港建设过程中, 就因为外航道淤积严重, 且沉积泥沙板结密实, 疏浚开挖效率极低, 航道不得不改线建设。与此同时, 距黄骅港约 140 km 建成不久的京唐港也遭受了同样的灾害, 外航道发生了严重骤淤, 最大淤积厚度达 5.5 m, 淤强大于 2.0 m 的长度达 2.35 km, 航道沿程

平均淤厚约为 1.9 m, 航道淤积量近 200 万 m^3 (孙林云等, 2008)。此后通过联合攻关研究, 逐步掌握了粉沙质海岸泥沙运动规律及淤积机理, 实施了黄骅港外航道整治工程, 提出了整治和通航标准, 设置防沙堤及长 4 km、宽 2 km 的消能缓冲区, 解决了航道骤淤灾害问题(季则舟等, 2005)。整治工程实施以来, 港口吞吐量稳步提升(表 1)。虽已消除航道骤淤碍航灾害, 随着航道扩建、规模加大(5 万吨级双向航道, 宽 270 m, 长约 44 km), 泥沙年总淤积量较大(表 1)。通常评价航道建设的经济性可用航道年维护疏浚量与港口吞吐量的比值(E)来衡量, 根据国内外港口航道数据统计分析, 当 $E \leq 0.2$ 时航道运营在经济方面是可接受的。从表 1 看出, 黄骅港煤炭港区航道近 10 年其 E 值最小为 0.07, 最大为 0.27, 尤其近 5 年基本在 0.1 左右, 其淤积量完全可以承受, 事实上, 整治工程实施后黄骅港煤炭港区不仅生产运营正常, 且经济效益良好。

表 1 黄骅港煤炭港区历年吞吐量及航道泥沙淤积量表
Tab.1 Annual throughput and channel siltation at coal district of Huanghua Port

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
吞吐量 $Q/\text{万 t}$	9 359	10 058	10 554	13 759	14 248	12 430	18 368	20 154	20 922	20 557	21 093
淤积量 $V/\text{万 m}^3$	2 553	2 315	2 548	2 166	1 403	2 300	1 902	1 655	3 147	1 778	1 561
$E(V/Q)$	0.27	0.23	0.24	0.16	0.10	0.19	0.10	0.08	0.15	0.09	0.07

注: 2018 年存在短期内发生小强度但多频次的泥沙淤积情况, 使淤积量较 2017 年增加近 1 倍

我国港区陆域以货物的堆存、转运功能为主, 主要布置堆场、道路及辅助生产建筑。为避免地面沉降, 一般均进行地基加固处理, 表层采用混凝土联锁块、混凝土大板或沥青混凝土铺面。这种方式使得地面吸纳雨水能力很弱, 降雨易形成径流, 目前环保要求严格, 不允许雨水直排入海, 而港区污水处理设施均按处理初期雨水设计, 处理能力有限, 导致港区陆域在降雨期极易积水, 尤其是矿石、煤炭等干散货码头堆场在堆货荷载长期作用下堆场发生沉降, 加剧了积水的严重性(图 1)。对于普遍缺水的北方港口, 码头公司还需大量外购水用于干散货堆场洒水抑尘需求, 给港口营运增加了较大成本。

1.2 港口及海岸防护工程

在无掩护海域, 通常需建设防波堤使港口有较好的泊稳条件。此类海域往往波、流水动力较强, 防护工程的建设使水动力与结构产生相互作用。以前我们主要关注的是水动力对结构的作用及结构的安全问题, 如选择适合的结构形式、稳定的护面块体和足

够的高度等, 以保证结构的安全及越浪量满足要求, 而忽略了结构对波浪水流产生的反作用以及引起的环境变化, 这种变化反而会对结构安全造成危害。如加纳詹姆斯敦渔港防波堤, 反射波及沿堤流使堤前海床逐渐冲刷, 造成护脚块石跌落, 堤身结构局部失稳(图 2, 图 3)。在潮流较强海域, 防波堤等防护设施的建设会改变局部流场, 其产生的挑流作用, 会加大



图 1 某矿石码头堆场积水情况

Fig.1 Waterlogging zone in an ore terminal stockyard

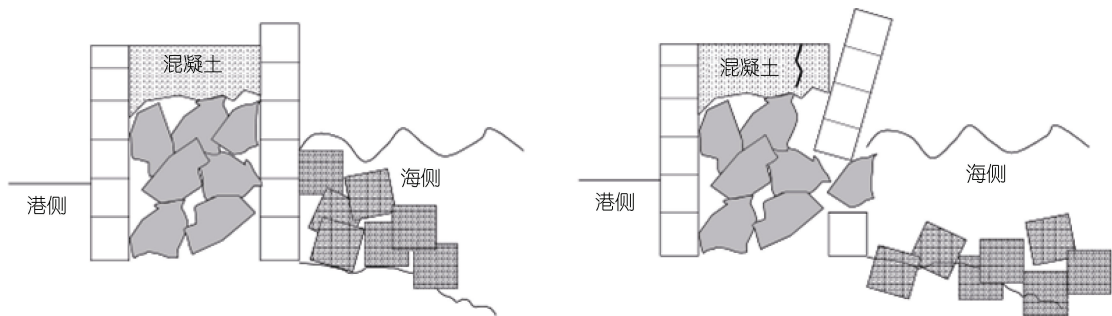


图 2 加纳詹姆斯敦渔港防波堤建成时及后期损坏断面示意图(DHV-MDC Consultant Team, 2007)

Fig.2 Cross-section schematic of breakwater of Jamestown fishing port in Ghana at completion (left) and damage after completion (right) (DHV-MDC Consultant Team, 2007)



图 3 加纳詹姆斯敦渔港防波堤损坏情况

Fig.3 Damaged breakwater of Jamestown fishing port in Ghana

涨落潮流速,与波浪作用叠加对防护设施端部附近海床造成冲刷。对于粉细砂地质的海床,冲刷会以冲刷坑的形式出现。水流及波浪作用将海床冲刷出浅坑后,形成涡流,在底层强涡流作用下,冲坑不断被加深、拓宽,对港口防护设施稳定造成危害。我国某港防波堤由于未按设计接续建设二期潜堤延长工程,防波堤建成后挑流明显,水域最大流速由 1.5 m/s 加大到 2.48 m/s,增大 65.3%,与波浪作用叠加使堤头附近发生冲刷。防波堤建成 3 年 9 个月后,表层不足 2 m 抗冲性较好的河口三角洲相沉积(淤泥质黏土)和陆相沉积(粉质黏土)层冲刷殆尽,下面抗冲性差的粉细砂在涡流作用下冲刷严重,仅 9 个月时间,增加深度达 15.8 m,冲坑上沿附近(−20 m)面积达 4.58 万 m²,坑底(−30 m)面积约 2.14 万 m²,坑外沿已到达防波堤护底软体排边沿,威胁到防波堤安全(曾成杰,2018)。

在海岸防护方面,我国沿海建设了大量沿海防护堤,而在大风浪作用下防护堤的损毁事件也屡屡发生,其中很重要一个原因是堤前海床冲刷,造成结构失稳。在粉沙质海岸,风暴潮发生时,波浪与防护堤相互作用剧烈,海床侵蚀范围较大。在 2015 年 11

月 5~7 日风暴潮期间,东营港开发区 6 km 长防护堤发生局部失稳(图 4)。风暴潮过后大堤修复施工单位沿堤进行了堤前海床水深测量,测图显示堤前海床普遍冲刷 1~2 m 左右,冲刷范围达距防护堤脚 500 m 以外(表 2)。

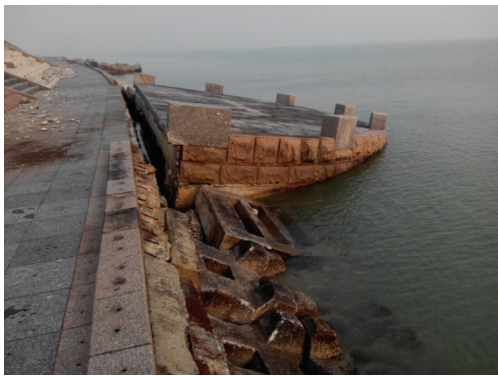


图 4 防护大堤观景平台失稳情况

Fig.4 Instability of a sight-seeing platform on levee revetment

表 2 防护堤前海床冲刷范围及深度表

Tab.2 Scouring range and depth of seabed in front of levee revetment

测量断面	断面 I	断面 II	断面 III	断面 IV
断面距堤脚海向距离/m	5	10	100	500
断面平均冲刷深度/m	1.0~2.0	1.0~2.5	1.0~2.6	2.2~2.4

2 韧性海岸工程概念及实施策略

韧性概念首次应用于生态学,用于定义生态系统稳定状态特征(Holling, 1973),后逐渐被引入到人类社会系统,并广泛应用于社会、管理、经济、自然科学等众多研究领域,形成了较为全面的应对灾害与气候变化的重要理念。韧性研究主要集中在 4 个领域:组织领域、经济领域、社会领域和工程领域(毕熙荣等, 2020)。不同学者和机构对不同领域韧性内涵有

不同理解,而针对工程领域,也给出了不同定义,其中国际基础设施咨询委员会(NIAC)给出的定义更为贴切:预测、吸收、适应自然灾害等破坏性事件和快速恢复的能力(NIAC, 2009)。目前对于海岸工程在复杂自然条件下的稳定性、功能实现及灾后修复技术等研究较多,而对于如何吸收、适应自然力的研究较少。因此,基于对韧性理念的理解,韧性海岸工程应是:工程系统与环境相协调,具有吸收和适应自然力、在灾害情况下维持其功能以及灾后可快速恢复的能力。强调工程系统应对复杂、灾害事件及从灾害事件中恢复并再适应的能力,也关注工程功能修复的经济性和效率的最大化。

基于韧性海岸工程概念,需由面对灾害事件时传统的“抵御”、“控制”转变为“吸收”、“适应”,这有助于从整体上控制风险,并确保整个工程全生命周期的安全、效益与效率,从而达到海岸工程防灾减灾的预期效果。

韧性海岸工程的防灾减灾策略:在设计理念上尊重自然,对自然环境审慎改变;在工程方案上避免与自然环境的直面对抗,以避让、顺应、吸纳、逐步消减的方式,最终达到防灾减灾的目的。这一策略也与环境与生态保护相呼应,虽然这其中的机理还需深入研究,但对自然尽量小的扰动会是最好的策略。当然,为达到工程的设定目标与功能,对自然的扰动不可避免,这就需要在设计时将工程本身或再采取其他工程措施将此扰动降至最低,最终使得工程初始投资与维护成本构成的生命周期成本最低。

3 韧性港口工程实施策略与方法

3.1 规划与布置

港口设施的建设首先需符合政府批复的港口规划,因此韧性港口工程的实现,港口规划十分重要。

在规划港口岸线及陆域时,要尽量少占用自然岸线及滩涂,提高岸线使用效率。一方面滩涂是重要的后备土地资源,另一方面滩涂对于生物多样性、维护海洋生态平衡起到重要作用(Goodwin *et al.*, 2001; Cui *et al.*, 2016)。对于原有的港口规划,摒弃资源利用最大化理念,以韧性理念重新梳理、科学调整是必要的。如南通港通州湾港区由原规划 7 个港池,调整为 3 个港池,占用自然岸线由 21.7 km,调整为约 12 km,形成港区陆域面积由 339.3 km² 调整为 48.8 km²,占江苏岸滩湿地比例由近期 1.2%、远期 5.2%,调整为 0.7%,避让了环境敏感区,降低了对环境的影响(胡

怡等, 2021);大连港太平湾港区规划由接岸式调整为离岸式,并缩小陆域面积,占用自然岸线由 16 km 调整为 0.6 km,港区面积由 46 km² 调整为 14 km² (崔柳等, 2021)。

在港口规划平面布置方面,对于泥质及沙质海岸采用挖入式布置可有效减少占用自然岸线,而可以形成较长的码头岸线,占用滩涂面积也大大降低。如我国第一个挖入式海港唐山港京唐港区,规划占用自然岸线 19 km,可形成港口岸线达 37.7 km;盐城港滨海港区,采用挖入式布置,占用自然岸线 13.1 km,可形成港口岸线 27 km;唐山港曹妃甸港区采用挖入、近填结合规划布置,占用自然岸线 21.5 km,可形成码头岸线达 70 km。对于自然环境复杂的江苏辐射沙洲海域,自然环境对海岸工程更加敏感,采用离岸岛式布置方式,对自然环境扰动较小,如南通港洋口港区西太洋沙人工岛码头区布置,人工岛面积 2.5 km²,人工岛北侧及南侧布置码头,人工岛与陆地由总长 12.6 km 引桥连接(杨长义等, 2019)。另一方面,当地渔民反映工程建成后,附近鱼类逐渐增多,分析是人工岛岛壁护面块体及码头桩基为海生物提供了遮蔽、附着条件,使得生物多样性改观。

港区陆域除布置生产设施、铺设硬化面层结构外,应留出适当的生态空间,使生态环境与港区生产设施相融合,增加港区抗灾害的弹性与韧性。国外发达国家较为注重港口与自然的融合,如比利时安特卫普港务局在 2000 年即实施了“让安特卫普港更加自然”项目,保留 5% 的港区面积(约 650 hm²),作为生态基础设施。对于我国新港区,在规划陆域面积时,除传统的按预测货物周转量估算陆域面积外,还应根据当地环境、港区货运性质规划出一定的生态环境面积。对于已建成老港区,可充分利用港区因近些年集疏运“公转铁”而废弃的停车场以及铁路车场调车“灯泡”线空地、边角空间、预留用地等,布置池塘、水系、人工湿地等,用于收纳雨水、淡压舱水、初处理的污水等,其建设成本较混凝土水池、传统绿化等低很多。收纳水可重复利用,在节约水资源、改善环境的同时,增加了港区抗涝能力。经对津冀部分煤炭矿石港区各类闲置空地、已绿化占地面积的统计,通过改造,港区生态空间面积占港区面积比均可达到 5% 以上。黄骅港煤炭港区利用港区空地打造以“两湖”“两湿地”为主体的生态水循环系统,新增水域面积约 30 万 m²,对雨水、压舱水及含煤污水进行收集处理回用,不仅做到雨、污水“零”排放,每年节省大

量外购用水费用,既解决了夏季内涝、其他季节缺水问题,且港区环境大为改观,获评国家 3A 级旅游景区。

3.2 码头结构与港口水域

在水动力、泥沙运动复杂海域,码头采用桩基结构较为合理,其具有的透空性,可降低对环境的影响,同时桩基引起的冲刷不会马上对结构造成灾害,可有针对性地采取防护措施。在此类海域进行码头桩基设计计算时,需预留出冲刷深度。在洋口港区 LNG 码头设计中,预留了桩基冲刷深度 8 m,投产后部分桩基附近海床冲刷达 6 m,采取抛石护底措施后海床稳定,码头运转正常(王丽等, 2014)。在地质条件较好的海域,码头结构可采用重力式。重力式结构对码头荷载的适应性及耐久性好,但与水动力环境相互作用较大。开孔沉箱结构已广泛使用,可有效降低波浪反射系数。从韧性理念出发,重力式结构还可与局部透空结构相结合,进一步吸收波浪能量,降低波浪与结构的相互作用。在烟台港西港区原油码头设计中,采用了重力式开孔沉箱与上部透空双柱块体结合的结构形式,较上部为传统实体胸墙结构,码头最大上水高度降低 0.6~0.7 m (李斌等, 2020)。此类结构可降低码头面高程,节省投资,且由于结构有大量空腔,改善了波流状态,对生态应有正面影响,但由于缺乏长期观测资料,还难以对水生物影响进行量化评价。在强震区的码头结构采取改良基础、消除地基液化层,采用基于结构性能的抗震设计方法,充分发挥结构延性变形能力是提高结构抗震韧性的有效途径。

对于港口水域,较大的自然灾害是港池航道的泥沙淤积问题,尤其是粉沙质海岸港口外航道的泥沙骤淤灾害。研究及实践表明,单纯依靠疏浚不能解决问题,一场大风引起的淤积就会使航道碍航;修建超长且高的防沙堤将航道均掩护起来,理论可行,但经济上不允许,且对水动力环境造成很大影响。较合理方法是“疏浚与防护相结合”、航道设置合理的备淤深度,防沙堤采用出水堤与潜堤相结合方式。防沙堤高程由岸向海逐步降低为潜堤,这样可减小对海域水动力场的扰动,降低挑流形成的横流,利于船舶通航。据计算,京唐港区口门防波堤由出水堤改为按潜堤延长 1 km 后,航道口门处最大横流由 0.85 m/s 降至 0.67 m/s (肖立敏等, 2020),并能有效阻挡底部高浓度含沙层。故航道设计理念为:以保障航道通航水深为目的,在减淤措施与自然淤积两方寻找经济平衡点,使人工干预与自然环境达成新的平衡。为此,

首先需确定航道合理的防骤淤标准以及通航标准,再确定防沙堤长度、高度及合理的航道备淤深度(季则舟等, 2021)。

4 韧性防护工程实施策略与方法

从韧性工程角度,梳理港口及海岸防护工程,归纳为多重防护、吸收性防护、变形型防护及生态型防护几个类型,可为今后港口及海岸防护工程所采纳。总结的几个防护类型实质均以衰减、吸收波浪水流动力为目的,改善与环境的关系。

4.1 多重防护

采用多重防护可逐步削减波浪能量,减小波浪与护岸的相互作用,降低波浪爬高。护岸可采用不同高程的分级阶梯式结构形式,构成多重防护,可有效减小波浪爬高,降低护岸顶高程,改善环境景观(李艳群, 2018; 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2022a)。也可在结构前方水域布置潜堤或低顶堤构成二重堤,消减部分波能,减小波浪对主体结构的作用。

4.2 吸收性防护

结构本身采用透空式,在与水动力相互作用时利于结构空腔吸收、消耗其能量,降低波浪反射与爬高,减小对堤前海床冲刷。如双柱消浪块、天力消浪块护岸,兼顾消波与景观,可用于城市直立式护岸(王美茹等, 2001)。长期以来防波堤结构大都采用实体堤,为避免挑流造成的海床冲刷,均采用大范围护底块石或软体排等护底结构。采用潜堤虽能缓解挑流强度但在潮流动力较强海域,仍能在堤头附近形成冲刷,威胁结构安全。以韧性理念重新审视此问题,可采用吸收性防护结构,吸收强流部分能量,由排斥、挑流转变为吸收、融合。即根据防浪、挡沙、减流不同功能,将防波堤结构由单一实体结构改变为实体与透空结构相组合,在防波堤轴线方向由近及远分别采用实体结构(图 5)、半透空结构、透空结构,在潮流与防波堤相互作用过程中,能量不断被吸收,减小堤头流速。半透空结构可采用由日字块体组成的斜坡式结构(中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2021) (图 6),其省却了堤心石及护面,兼顾挡沙及透流。经试验计算,其阻水率达 80%~90% (沈雨生等, 2020),估算挡沙率 80%以上。透空结构块体可采用空心方块(图 7),该结构块体空隙率达到 63.3%,堤身空隙率达 40% (谢世楞等, 2009),有较好的吸收效果。此类轻型结构的应用,也可解决因生态环保政策导致石料来源困难、价格昂贵问题,同时可兼顾鱼礁作

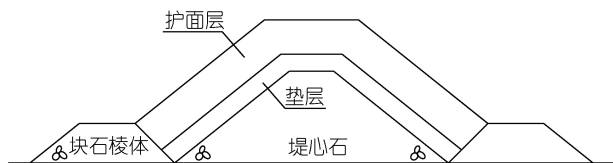


图5 传统实体抛石结构防波堤断面示意图

Fig.5 Cross-section schematic of traditional rubble-mound structure breakwater

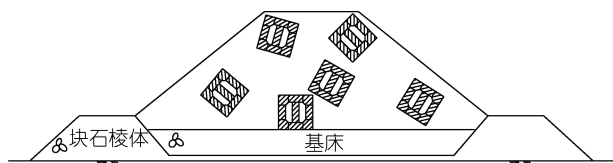


图6 日字块体防波堤断面示意图

Fig.6 Cross-section schematic of bulkhead-hollow block structure breakwater

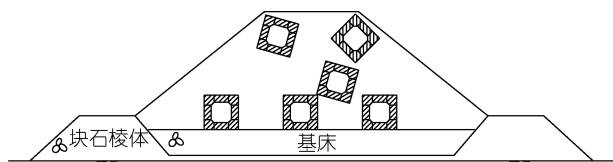


图7 空心方块防波堤断面示意图

Fig.7 Cross-section schematic of hollow-square block structure breakwater

用, 具有较好的经济与生态效益。实体结构、日字块结构、空心块结构防波堤各自长度, 可根据功能要求, 结合工程所处自然环境经模型试验确定。

4.3 变形型防护

此类结构水动力与结构相互作用时, 允许结构变形, 以此吸收波浪能量, 使水动力作用与结构达成平衡。宽肩台抛石防波堤即是此种类型, 其无需混凝土护面块体, 由块石护面, 在波浪作用下允许坡面发生变形, 最终形成稳定的平衡坡面(图8)。采用此结构的前提是当地有丰富的石料资源。宽肩台抛石防波堤最早在冰岛、丹麦、美国等国家应用, 我国首次在大连北良粮食码头防波堤设计中采用(谢世楞, 1996)。在沿岸输沙较大海岸, 防波堤海测结构也可由吹填沙组成, 形成与波浪及沿岸输沙相适应的平衡坡面。英国德瑞斯顿湾(Duriston Bay)至赫斯特岬角(Hurst Spit)之间的几十座丁坝设计中也采用了变形防管理念, 在加强监测和及时维护的前提下, 允许坝体有一定变形, 从而简化了结构, 节省了投资(Kemp *et al*, 2016)。

4.4 生态型防护

近些年, 生态型防护技术大量研究与应用, 这实质是使人工结构更接近自然属性, 也是韧性工程的

重要组成部分。生态型防护形式需根据波浪能量选择, 在波能较强的海岸坡面单纯选择绿植防护并不适宜(Griggs *et al*, 2019)。在防护堤护坡上设置混凝土潮水池或在护面块石上留出储水浅坑, 可在落潮时留存海水, 为水生物生长及鸟类提供食物来源(Perkol-Finke *et al*, 2015; Naylor *et al*, 2017)。也可对人工护面块体进行改进, 中交一航院在天津南港工业区岸线生态修复工程中即应用了生态型四脚空心方块作为护面块体(中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2022b), 在传统四脚空心方块基础上, 将顶部与四个脚对应的位置设计四个坑洞, 落潮时可留存海水, 并在主体顶面、侧面设置条状凹槽, 利于海生物栖息及附着(图9)。仿生草技术自20世纪80年代由英国发明以来, 主要应用于海底管线防冲刷, 我国多应用于海底油气管线局部冲刷悬空治理(刘锦昆等, 2008), 此技术在海岸工程岸滩重点部位防护中的应用值得探索。

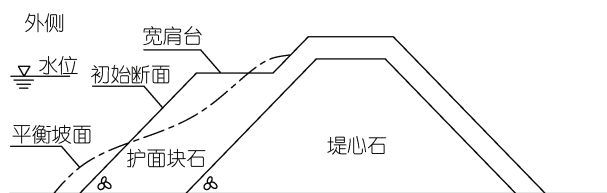


图8 宽肩台结构防波堤断面示意图

Fig.8 Cross-section schematic of berm breakwater

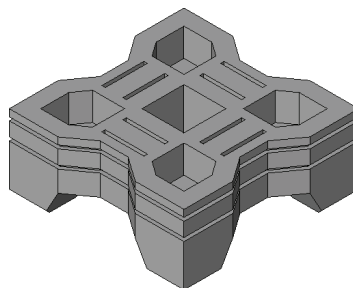


图9 生态型四脚空心方块

Fig.9 Ecological hollow block with four feet

以上4类防护方式, 均不同程度改善了结构与波流的相互作用, 变排斥为吸纳融合, 降低了结构损毁的风险, 改善了生态环境, 即使在损坏后也利于快速恢复功能, 达到提高结构韧性的目的。

5 结论与展望

(1) 海岸工程在抗灾害过程中, 传统地单纯通过提高结构规模与强度并不是最佳选择, 宜通过改变设计理念, 优化工程设计, 改善工程与环境的关系, 提

高工程韧性。

(2) 韧性海岸工程以工程系统与环境相协调, 具有吸收和适应自然力、灾害情况下维持其功能以及灾后可快速恢复的能力为特征。

(3) 针对港口工程, 提出了韧性港口工程实施策略及方法。港口规划与平面布置方案中尽量少占自然岸线与滩涂, 陆域宜留有一定面积的生态空间。码头结构采用透空或部分透空方式可改善水动力作用。疏浚与防护相结合, 合理的防沙堤尺度与航道备淤深度, 使其与水动力、泥沙运动达成环境与经济的平衡点, 可有效解决航道骤淤灾害问题。

(4) 针对海岸及港口防护工程, 提出了韧性防护工程实施策略及方法。从韧性工程角度, 可采用多重防护、吸收性防护、变形型防护及生态型防护, 其实质以衰减、吸收波浪水流动力为目的, 并利于生态环境, 可根据不同工程功能及自然环境条件选用。

(5) 对韧性海岸工程从不同角度、目的及方法方面已有较多的研究与实践, 但还缺乏长期观测数据及整体系统性研究。科学问题包括工程结构与环境的相互作用机理、机制以及对生态影响的量化效应等方面。技术问题包括材料、结构形式、结构稳定与耐久性以及灾后功能快速恢复技术等。

(6) 结合研究与实践, 需构建韧性海岸工程量化评价指标, 建立评价体系, 并修订及编制相关技术标准。

参 考 文 献

- 王丽, 莫秋荣, 2014. 江苏 LNG 项目接收站配套码头及栈桥桩基冲刷防护设计[J]. 中国港湾建设(8): 27-29.
- 王美茹, 谢善文, 郭科, 等, 2001. 双柱消浪块的开发和研究[J]. 港工技术(2): 7-10, 39.
- 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2021. 新型块体防波挡沙堤: 202021216503.X [P]. 2021-02-23 [2022-03-04].
- 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2022a. 水运工程生态保护修复与景观设计指南[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司: 8-10.
- 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2022b. 生态型消浪块体: 202121790376.9 [P]. 2022-01-25 [2022-03-04].
- 毕熙荣, 冀昆, 宗成才, 等, 2020. 工程抗震韧性定量评估方法研究进展综述[J]. 地震研究, 43(3): 417-430.
- 刘锦昆, 张宗峰, 2008. 仿生防冲刷系统在埕岛油田中的应用[J]. 中国造船, 49(S2): 575-579.
- 孙林云, 孙波, 刘建军, 2008. 粉沙质海岸京唐港航道风暴潮骤淤及整治关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院: 1-2.
- 李艳群, 2018. 从滨海景观角度谈东营港广利港区圆弧段护岸设计[J]. 中国港湾建设, 38(6): 55-58.

- 李斌, 马旭, 2020. 外海开敞墩式码头的上水情况研究[J]. 港工技术, 57(6): 15-19.
- 杨长义, 刘红宇, 2019. 辐射沙洲港口总体布置[M] // 交通运输部水运局. 水运工程建设创新技术(2009—2019). 北京: 人民交通出版社股份有限公司: 209-214.
- 肖立敏, 于泳, 孙林云, 等, 2020. 京唐港区 20 万 t 级航道横流减控措施研究[J]. 港工技术, 57(5): 5-8.
- 沈雨生, 周益人, 2020. 盐城港滨海港区北港池防波堤及一期工程断面物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院: 60.
- 季则舟, 杨希宏, 杨玉森, 2005. 沿海深水长航道及整治工程设计特点[C] // 神华首届科技研讨会论文集. 北京: 神华集团: 827-832.
- 季则舟, 张华庆, 肖立敏, 等, 2021. 粉沙质海岸泥沙运动理论与港口航道工程设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社: 211-258.
- 胡怡, 王金华, 孙路, 等, 2021. 基于环境影响的通州湾港区规划方案优化[J]. 水运工程(9): 60-65, 92.
- 神华集团黄骅港建设指挥部, 交通部天津水运工程科学研究所, 2003. 黄骅港泥沙淤积研究资料汇编[R]. 天津: 天津水运工程科学研究所: 2-5.
- 崔柳, 杜木子, 陈云飞, 2021. 大连港太平洋港区总体布置调整[J]. 水运工程(7): 76-79.
- 曾成杰, 2018. 盐城港滨海港区防波挡沙堤堤头局部冲刷防护工程物理模型试验研究[R]. 南京水利科学研究院: 48-56.
- 谢世楞, 1996. 宽肩台斜坡式防波堤设计[J]. 港工技术(2): 1-8.
- 谢世楞, 谢善文, 2009. 新型空心方块斜坡堤结构在长江口深水航道治理工程中的应用[J]. 水运工程(1): 23-29.
- CUI B S, HE Q, GU B H, *et al*, 2016. China's coastal wetlands: understanding environmental changes and human impacts for management and conservation [J]. Wetlands, 36(S1): 1-9.
- DHV-MDC Consultant Team, 2007. Siting- and master plan report fish landing sites, Ghana [R]: 31.
- GOODWIN P, MEHTA A J, ZEDLER J B, 2001. Coastal wetland restoration: an introduction [J]. Coastal Research, 27: 1-6.
- GRIGGS G, PATSCH K, 2019. The protection/hardening of California's coast: times are changing [J]. Journal of Coastal Research, 35(5): 1051-1061.
- HOLLING C S, 1973. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 4: 1-23.
- KEMP J, HARLOW D, 2016. Briefing: non-standard rock Groynes between Durlston Bay and Hurst spit [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 169(4): 143-147.
- MA Z J, MELVILLE D S, LIU J G, *et al*, 2014. Rethinking China's new great wall [J]. Science, 346(6212): 912-914.
- National Infrastructure Advisory Council (NIAC), 2009. Critical infrastructure resilience final report and recommendations [EB/OL]. (2017-09-28). <https://bsesc.energy.gov/sources/critical-infrastructure-resilience-final-report-and-recommen>

- dations.
- NAYLOR L A, MACARTHUR M, HAMPSHIRE S, *et al*, 2017. Rock armour for birds and their prey: ecological enhancement of coastal engineering [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 170(2): 67-82.
- PERKOL-FINKE S, SELLA I, 2015. Harnessing urban coastal infrastructure for ecological enhancement [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 168(3): 102-110.

CONSTRUCTION STRATEGIES FOR RESILIENCE COASTAL ENGINEERING IN HARMONY WITH ENVIRONMENT

JI Ze-Zhou

(CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China)

Abstract Natural disasters cannot be well-prevented by coastal works by selecting traditional methods such as the increment of structural sizes and strength. In comparison with the traditional concept, it is appropriate to improve the coastal resilience by coordinating the project with local environment. Coastal resilience works integrates the whole system with the environment and absorbs or adapts to natural force in order to maintain its functions under natural disasters, or quickly recover its performance after the disaster is gone. The resilience strategies and methods were recommended for port, coastal, and protective projects. Based on the concept of resilient engineering, the optimization principles and plans were proposed for port planning and plane layout, the design of berth structure, and channel in complex environment. In the protective works of coast and port, multi-protection, absorptive protection, deformation protection, and ecological protection can be used to improve the performance of the protective construction in harmony with local environment, and consequently enhance the engineering resilience.

Key words resilience coastal engineering; port engineering; coastal protection; environment; channel; breakwater