

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.014

离岸系泊式海藻牧场的动力响应分析

连宇顺^{1,2,3}, 潘正虎^{1,2}, 郑金海^{1,2}, 朱 晋², 沈舒天², 石建高⁴, 俞 俊⁵

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 浙江理工大学纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室, 浙江 杭州 310018;
4. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090; 5. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 为应对全球气候变暖, 助力实现国家“双碳”目标, 提出建设蓝碳工程——离岸系泊式海藻牧场, 论述了离岸海藻牧场的设计分析流程, 并对海藻牧场单元的核心养殖设施进行了数值模拟分析。结果表明, 在极端海况下, 系泊缆绳、养殖绁绳、连接绳和吊绳的张力均未超过极限破断值; 浮标升沉运动对海藻正常接受光照的影响较小, 海藻柄部发生破断也为极小概率事件; 所提出的设计分析方法可为水深超过 40 m 的离岸海域海藻牧场的系泊设计提供参考。

关键词: 系泊系统; 离岸海藻牧场; 动力响应; 数值模拟

中图分类号: P737 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0107-10

Dynamic response analysis of offshore moored kelp farms

LIAN Yushun^{1,2,3}, PAN Zhenghu^{1,2}, ZHENG Jinhai^{1,2}, ZHU Jin², SHEN Shutian², SHI Jiangao⁴, YU Jun⁵

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. National Engineering Laboratory for Textile Fiber Materials & Processing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
4. East China Sea Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
5. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: To respond to the global climate change and to help achieve the “double carbon” goal in China, this paper proposed an idea of implementing the “Blue Carbon Project” offshore moored kelp farms. Based on this idea, the design and analysis procedures for the offshore moored kelp farms were described, and numerical simulations of core breeding facility in the kelp farm module were also conducted. The results show that tension values of mooring ropes, breeding boom ropes, connecting ropes and lifting ropes do not exceed the breaking limit values in extreme sea conditions. Besides, the heaving motion of buoys makes little impact on the regular sunlight exposure of seaweed and the breakage of seaweed’s holdfast is an event of low probability. The design and analysis method proposed in this paper will provide a reference for the mooring design of kelp farms with a water depth over 40 m.

Key words: mooring system; offshore kelp farms; dynamic response; numerical simulation

2021 年,《中共中央“碳达峰碳中和”工作意见》中指出要“持续巩固生态系统碳汇能力,提升碳汇增量,整体推进海洋生态系统保护和修复,提升红树林、海草床、盐沼等固碳能力”。可见,提升海洋碳汇能力,对我国实现“双碳”目标极为重要。海洋作为全球最大的二氧化碳吸收汇,是碳循环的重要组成部分,而“蓝碳”正是指利用海洋活动和海洋生物吸收并固定 CO₂ 的过程、活动和机制^[1]。大型海藻作为海洋初级生产者重要组成部分,可通过光合作用将海水中的无机物转化为有机物,并释放出氧气,可有效降低大气中 CO₂ 的浓度^[2-4]。研究表明,包括大型海藻在内的“蓝碳”植物,其碳封存量是陆地植物 10 倍^[5]。

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20201314);国家自然科学基金项目(51979050);国家重点研发计划项目(2022YFB4200704);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200201002);中国博士后科学基金项目(2022M722820);大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP2213);天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金项目(HESS-1910)

作者简介: 连宇顺(1987—),男,教授,博士,主要从事深水锚泊技术研究。E-mail:yushunlian@hhu.edu.cn

引用本文: 连宇顺,潘正虎,郑金海,等. 离岸系泊式海藻牧场的动力响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):107-116.
LIAN Yushun, PAN Zhenghu, ZHENG Jinhai, et al. Dynamic response analysis of offshore moored kelp farms[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6):107-116.

海藻养殖在改善水体、空气等方面呈现出巨大优势^[4],如大型海藻可通过吸收 CO₂ 提高水体溶解氧,进而提高海水 pH 值,防止海洋酸化;亦可高效吸收氮磷,防止海域富营养化^[2-3]。值得注意的是,规模化海藻养殖在助力实现“蓝碳”、提升经济效益和生态效益方面也具有重要作用,如海藻生物质可作为“生物炭”原料,当海藻生物炭被改良到土壤中时,可极大提高土壤肥力,增加作物产量^[6]。生物炭高度稳定,不易分解^[7-8],可在土壤中进行有效的碳封存^[9];此外,海藻场还可为各种鱼类和无脊椎动物创造栖息地并提供食物^[10],有助于维持生物多样性。

海带作为我国养殖产量最大的藻种,其养殖设施主要是浮筏,主要由浮球(标)、锚绳、纜绳、木橛和养殖苗绳组成,通过锚绳进行系泊^[11]。国内学者曾开展过筏式养殖等方面研究。例如:邓推等^[12]采用 4 阶 Runge-Kutta 法求解运动方程分析了一种新型筏式养殖系统,探究了浮标在波浪下的运动响应以及波浪入射角度对锚绳张力的影响,结果显示,浮标在波浪作用下水平位移幅值很大,此外,将养殖系统主轴布置于与波浪入射方向一致最为适宜;崔勇等^[13]通过数值求解对浮标以及锚绳受力进行分析,结果表明,浮标最大位移值的变化与流速的增加基本成线性关系,且两侧锚绳布置的初始形态对锚绳受力的影响较大;张光发等^[14]利用 Broyden 迭代法求解有限元方程,计算了在不同波高下的筏架系统位移和桩绳的最大张力,结果显示,流速大小与波流方向对筏架系统的抗风浪能力影响较大;张光明等^[15]利用 OrcaFlex 软件对浮筏养殖设施进行了数值模拟,分析比较了采用不同防浪挡板材料对浮筏结构在波浪中动力响应的影响。

近年来,随着藻类养殖产业扩张,养殖密度加大以及近岸航运运输等冲突,离岸深水区养殖海域开发的必要性日益凸显。2020 年我国海藻养殖面积为 14.18 万 hm²,仅占海水养殖总面积 7.3%,且目前浮筏养殖大多集中在近岸风浪较小的浅水区^[16-17]。刘福利等^[18]调研表明,福建和山东等海带养殖区大多集中在离岸 10 km 以内的 30 m 水深附近,最大水深也仅为 40 m 左右。可见,构建离岸深水式海藻牧场仍具有巨大潜力和发展空间,然而传统的浮筏养殖锚绳大多采用麻绳等植物纤维绳,这些植物纤维绳的破断强度低,抗风浪能力不足,这对离岸养殖系统和系泊材料强度提出更高的要求。

国外离岸海藻养殖试验起步较早,海藻养殖设施形式(表 1)和系泊设计一直为研究热点。早在 1981 年,美国加州“海洋生物质能源计划”项目建设和海藻养殖试验区^[19],虽然由于恶劣海况和养殖技术的不成熟使得该计划以失败告终,但它提高了人们对离岸复杂海况和养殖系泊技术重要性的认识。2004 年,德国学者 Buck 等^[20]提出一种采用单点系泊的“环形海藻养殖设施”,该设施成功应用于离岸 14 m 的水深;2012 年,西班牙学者 Peteiro 等^[21-23]设计了一种系泊形式为 2 组×8 根/组的浮筏海藻牧场,其系泊纜绳与锚定点交错固定,并在每根系泊纜绳上配重块压重,该结构能够承受高达 3 m 波高的恶劣海况。2018 年,智利 Bio Architecture 实验室^[24]设计了一套网格格式种植系统,采用矩形均匀布置形式,该结构成功应用于离岸 60 m 的水深。同年,美国 Ocean Rainforest 公司^[25]成功开发系泊形式为 2 组×2 根/组的大型海藻养殖设备 MACR(Macroalgae Cultivation Rig),该系统多年来能够承受有效波高达 4 m 的波浪,表明在暴露恶劣的环境中该养殖系统也具有良好的生存能力。

表 1 国外几种典型的系泊式海藻牧场养殖设施

Table 1 Farming facilities of several typical offshore moored kelp farms in abroad

装置名称	国家	系泊形式	应用水深/m	海况描述		文献
				最大有效 波高/m	最大流速/ (m/s)	
“环形”海藻养殖设施	德国	单点	14	6.4	1.52	[20]
浮筏海藻牧场	西班牙	2 组×8 根/组	约 20	3	0.92	[21-23]
纜绳网格格式种植系统	智利	矩形均匀分布	60	3	1.15	[24]
大型海藻养殖设备	丹麦	2 组×2 根/组	70	4	0.25	[25]

此外,在数值研究方面,Zhu 等^[26]模拟了一种三维数值模型的纜绳养殖系统,研究了海带纜绳系统在潮流情景下的动力学特性,结果表明纜绳张力在涨潮时随水位到达峰值,且非平行水流会增大纜绳系统的张力。Chen 等^[27]构建了一种自由漂浮式海藻养殖设施(NOMAD)模型,模拟了海藻养殖设施(NOMAD)养殖糖海带、公牛海带和二者混养海带 3 种情形,模拟结果发现纜绳及海藻的运动响应在纜绳淹没水深为 5 m 时动力响应较温和,采用同时混养两类海带的纜绳构型比仅养殖一种海带的纜绳,其漂浮海藻养殖设施 NOMAD 的动力响应更温和更具优越性。

可以看到,目前国外正积极探索离岸系泊式海藻牧场的构建技术,然而关于离岸系泊式海藻牧场的动力分析技术仍然缺乏。本文以离岸系泊式海藻牧场的单元模块为研究对象,重点考虑在水深超过 40 m 的离岸海域开展海藻养殖,突破国内养殖技术仅仅限于 40 m 以内的水深。在充分了解国内外海藻养殖设施发展现状的基础上,提出建设蓝碳工程——离岸系泊式海藻牧场,论述了离岸海藻牧场的分析设计流程和关键步骤,通过分析海藻牧场的系泊缆绳、养殖缆绳、连接绳和吊绳的张力以及海藻叶片和浮标的运动响应,以期为构建离岸系泊式海藻牧场提供参考。

1 离岸系泊式海藻牧场的设计分析流程

图 1 为离岸系泊式海藻牧场的三维效果图,整个海藻牧场由养殖海藻的缆绳、浮标、锚缆设施三部分构成。为了使本文计算结果更具普适性,以海藻牧场的单元模块为研究对象,海藻牧场的单元模块由 4 根系泊缆绳固定,布置形式为 4 组×1 根/组(图 2)。两根平行养殖缆绳的四角与吊绳相接,每根吊绳顶端系有浮标,底端坠有沉子。浮标采用 3D buoy 模型,直径为 0.457 m,淹没部分提供的浮力为 45.36 kg;柱形沉子直径为 0.18 m,密度为 2 400 kg/m³,质量为 4.58 kg^[27]。养殖缆绳采用碳纤维缆绳^[27],其直径为 0.015 m,线密度为 0.19 kg/m,破断强度为 250 kN。系泊系统采用悬链式系泊,为了保证海藻牧场不会由于系统过重而下沉,采用混合缆,即上部系缆采用聚酯缆,下部系缆采用钢链。

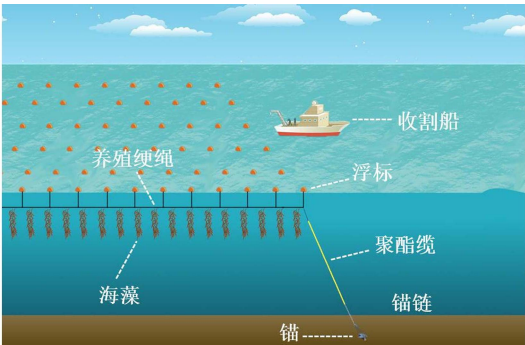


图 1 海藻牧场的三维效果

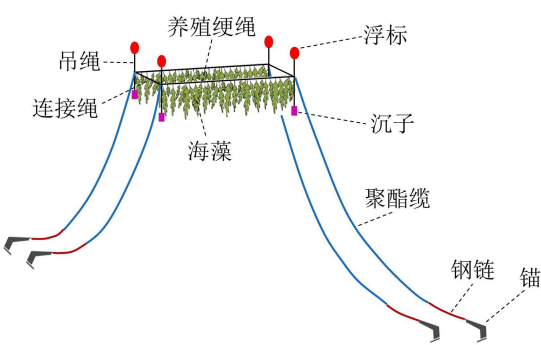


图 2 海藻牧场单元模块示意图

Fig.1 Three-dimensional schematic diagram of seaweed farms

Fig.2 Diagram of the kelp farm module

离岸系泊式海藻牧场设计分析流程(图 3)主要包括参数确定、锚泊设计和分析计算三部分。

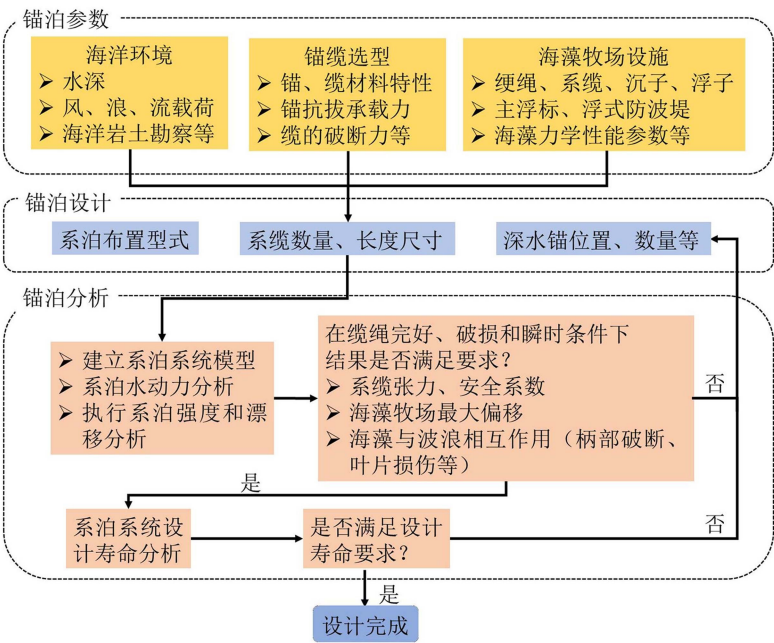


图 3 离岸系泊式海藻牧场设计分析流程

Fig.3 Design and analysis flow chart of offshore moored kelp farms

除图3中列举的具体步骤外,海藻模型的建立还需要注意以下3个方面:

- a. 大型藻类的生长极度依赖光照,养殖系统应不限制藻类对光的获取。大型藻类光合速率会随着辐照度的增加而增加,并当辐照度达到一定水平后,光合速率会达到饱和,此时进一步增加辐照度对光合速率没有影响。如在光合有效辐照下,糖海带的光饱和速率为 $90\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ^[28],然而当辐照度低于 $90\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,糖海带的生长便会受到抑制,因此必须保证其端部的淹没深度小于或等于 4.5 m ^[29]。
- b. 在考虑离岸海藻养殖时,相邻海藻之间种植间距不宜过小。当种植间距适宜时,相邻海藻叶片的相互作用非常温和,不会产生类似碰撞的行为^[30];此外,当海藻单株生长时,这些海藻更易将其根部附着在缆绳上,而不会和相邻海藻根部聚集在一起,这种单株种植的海藻可承受更强的海流和波浪力,对柄部断裂和位移的抵抗力也更加强^[31]。
- c. 相邻养殖缆绳的间距要结合单位长度海藻的产量加以考虑。如英国海带养殖手册曾指出,当海带种植的产量大于 $3.725\text{ kg}/\text{m}$ 且缆绳间距为 3 m 时,海带产量提升更为明显;而当两根缆绳间隔为 1.5 m 时,容易产生养殖缆绳相互交叉缠绕的问题^[32]。此外,在波流作用下海藻叶片与养殖缆绳之间频繁摩擦,易导致海带叶片断裂,进而影响海藻产量。

2 离岸系泊式海藻牧场的数值模型

2.1 数值模型构建

海藻牧场的系泊数值模型主视图如图4所示,定义水平向右和垂直向上分别为模型坐标的 x 轴和 z 轴正方向。其中海面距海床 45 m ,海藻养殖缆绳位于水下 2 m 处,长度为 15 m ,通过长度为 3 m 的连接绳相连。混合缆中聚酯部分总长 70 m ,锚链部分总长 47.5 m 。具体的海藻牧场建模参数见表2。

以糖海带为例构建海藻模型,参照Chen等^[27]的叶片模拟方式,将缆绳上的糖海带简化为柔性的圆柱型线缆,如图5所示。糖海带除受到自身重力(F_w)影响外,还受到波流载荷,包括拖曳阻力(F_w)、表面摩擦阻力(F_f)、升力(F_l)及浮力(F_b)影响。OrcaFlex采用Morison方程^[33]的扩展形式计算作用在糖海带上的波流载荷,扩展形式的Morison方程^[34]为

$$F = (ma_r + C_a ma_r) + \frac{1}{2} \rho C_d A v_r |v_r|$$

(1)

式中: F 为波流作用载荷; m 为糖海带排开水的质量; a_r 为流体加速度; a_r 为流体相对加速度; C_a 为附加质量系数; C_d 为拖曳系数; ρ 为水的密度; A 为阻力面积; v_r 为流体相对速度。

表2 海藻牧场的建模参数

Table 2 Modeling parameters of kelp farm

组成部分	直径/m	空气中线密度/ (kg/m)	轴向刚度/kN	弯曲刚度/ (N·m ²)	破断强度/kN	长度/m	法向拖曳 系数	切向拖曳 系数	参考文献
聚酯缆	0.032	0.778	1492	0	154	70	1.20	0.008	[34-35]
锚链	0.012	3.150	1454	0	138.21	14.5+33	2.60	1.400	[34,36]
碳纤维缆绳	0.015	0.190	7.74×10 ⁶	1.088×10 ⁵	250	15	1.20	0.008	[27]
连接绳	0.020	0.180	424	0	56.9	3	1.20	0.008	[34-35]
吊绳	0.024	0.260	610.56	0	79.7	2	1.20	0.008	[34-35]
海藻	0.031	0.824	3.77	0.227	55×10 ⁻³	0.85	0.45	0.010	[27]

经过90 d的生长期,糖海带的长度约 0.85 m ,密度为 $1092\text{ kg}/\text{m}^3$,缆绳上单位长度糖海带质量为 13.81 kg ^[27]。在考虑上述太阳辐照度的限值对海藻生长的影响后,将海藻养殖缆绳布置于海面以下 2 m 处是合理的。此外,根据糖海带叶片长度和宽度的线性相关函数^[31],当糖海带长度为 0.85 m 时,叶片宽度约为 0.048 m ,故种植间距设置为 0.05 m 。

根据海藻的长度、密度、种植间隔和缆绳单位长度质量,利用每米缆绳海藻质量守恒原理,可推导出圆柱

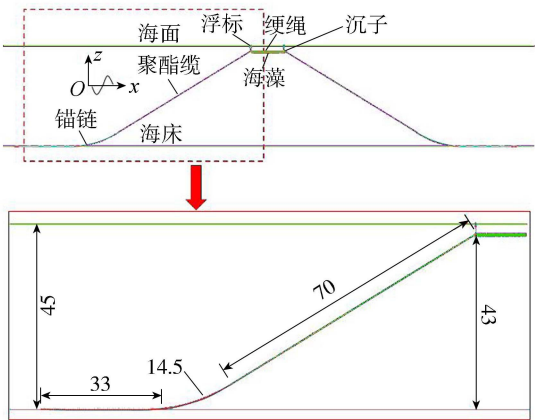


图4 海藻牧场的系泊数值模型主视图(单位:m)
Fig.4 Front view of numerical model for mooring systems of floating kelp farm (unit:m)

型海藻的直径计算公式为

$$ML = L\rho_{\text{藻}} V/\Delta \tag{2}$$

其中 $V = \pi d^2 l/4$

则有
$$d = \sqrt{4\Delta M/(\pi\rho_{\text{藻}} l)} \tag{3}$$

式中： M 为每米纆绳海藻质量； L 为纆绳长度； Δ 为海藻种植间距； $\rho_{\text{藻}}$ 为海藻密度； V 为海藻体积； d 为海藻等效直径； l 为海藻长度。

2.2 环境载荷

以山东半岛东部黄海模拟海域,该海域属于温带季风型海洋大陆性气候,四季分明,光线充足,海水中的营养盐特别适合海藻生长。采用 ERA5^[37] 波浪后报数据集计算波浪相关参数,波浪场数据以空间分辨率 0.5°、时间分辨率 1 h 覆盖全球海域。数据的时间跨度为 1979—2020 年,空间范围为 34°~39°N、118°~125°E,水深 45 m 的空间范围为 35°94′~35°97′N、122°21′~122°24′E。取出各网格点的年极值波高序列,随后选择威布尔分布函数进行拟合,得到山东半岛东部黄海 20 年一遇重现期的空间分布(图 6)。海流流速的统计资料采用 2021 年 6—12 月 NCEP CFSRv2 的海流数据,提取水深 5 m 处的流速数据,采用定常流速,平均流速设为 0.22 m/s。不规则波浪谱采用 JONSWAP 谱,具体参数设置为:有义波高 5.43 m,谱峰周期 4.03 s,谱峰因子 γ 为 7.64,波流载荷的入射角度包括 3 种:0°,22.5°和 45°。考虑海藻在养殖成熟期的最不利载荷组合工况,即波浪和水流设置为同一方向,山东半岛东部黄海的常浪向和强浪向分别为东北和北北东方向^[38-42],故波流入射角度选取 22.5°和 45°。波流入射角度和各缆绳编号如图 7 所示。

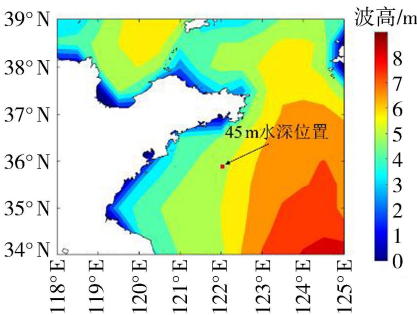


图 6 山东半岛东部黄海 20 年一遇波高重现期分布
Fig.6 Distribution of wave height return period once in 20 years in Yellow Sea, east of the Shandong Peninsula

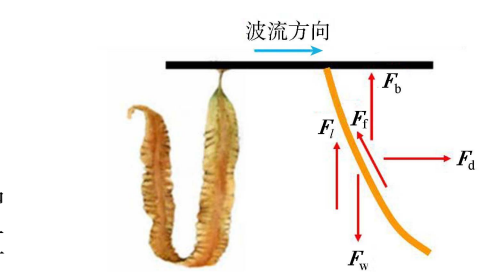


图 5 简化的糖海带模型
Fig.5 Simplified numerical model of sugar kelp

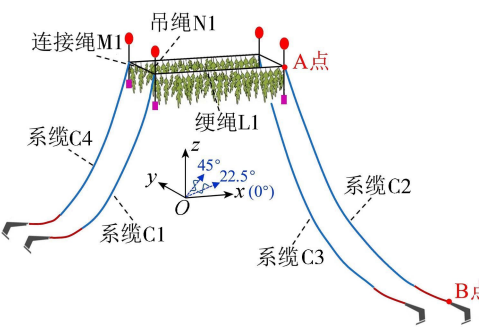


图 7 海藻牧场单元波流入射方向
Fig.7 Wave and current load directions for the kelp farm module

3 数值模拟结果与分析

根据本文提出的离岸海藻牧场系泊分析流程,采用 OrcaFlex 软件开展数值模拟,分析系泊缆绳、纆绳、吊绳和连接绳的张力及海藻叶片受力和浮标运动响应,并对获得的数值结果进行整理。

3.1 系泊缆绳张力分析

极端海况下,系泊缆绳不发生破断是离岸海藻牧场安全定位和生存的重要保障。为了研究不同浪向作用下系泊缆绳张力的影响规律,对混合缆 A 点(聚酯缆顶点)和 B 点(锚链触地点)的张力响应作重点分析。不同波流入射角度下的系泊缆绳最大张力对比见表 3。

分析表 3 可知,关于 x 轴对称的系缆 C1、C4 和系缆 C2、C3 的系泊缆绳最大张力大致相同,且当波流以 0°、22.5°和 45°角度入射时,聚酯缆顶点和锚链触地点的缆绳最大张力远小于极限破断力 138.21 kN,离岸海藻牧场系泊定位较为安全。

随着波流入射角度的增大,聚酯缆顶点和锚链触地点迎浪侧(C1 和 C4)的系缆张力逐渐减小,而背浪侧(C2 和 C3)反之,且迎浪侧的系缆张力均大于背浪侧。分析原因可知,当入射波流与系泊缆绳呈一定夹角时,由于迎浪侧的系泊缆绳受力方向与波流入射方向相反,此时迎浪侧缆绳处于拉紧状态,张力较大,而背浪

侧缆绳较为松弛,张力较小;若此夹角变小,则迎浪侧缆绳绷紧程度越大,故缆绳张力越大,而背浪侧缆绳张力变化恰好相反。

基于上述分析,系泊缆绳的布置应该充分考虑实际海况的常浪向或强浪向,尽量避免缆绳的布设与波流入射的夹角过小。

3.2 纆绳、连接绳和吊绳的张力分析

不同波流入射角度下纆绳 L1 (外侧)最大张力/压力轮廓和时程曲线如图 8 所示(以 L1 的最左端为起点)。由图 8 可知,纆绳布设位置不变的情况下,当波流入射角度逐渐减小并趋近于 0°时,成排状的海藻消波能力也逐渐减弱,此时海藻绕纆绳翻滚运动不断加剧,故纆绳在海藻和连接绳的相对运动下,张力或压力也不断增大,值得注意的是,0°波流入射下纆绳张力变化范围最大。图 9 给出了纆绳 L1 最大张力发生位置处的张(压)力时程曲线,可以看到未出现张力突变时,3 个方向波流入射下的张力均稳定在 1.6 kN 附近。即使在最不利载荷工况下(0°),纆绳最大张力仍小于 5 kN,此张力也远小于纆绳的极限破断力。

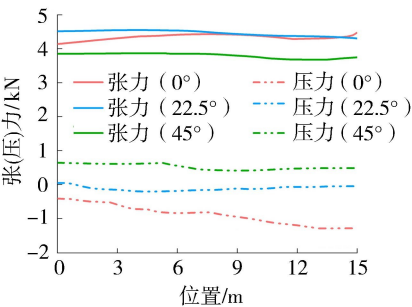


图 8 纆绳 L1 最大张(压)力轮廓线

Fig. 8 Maximum tensile force and compressive force envelopes along the longline L1

表 4 给出了不同方向波流入射下纆绳 L1、连接绳 M1 和吊绳 N1 最大张力变化。随着波流入射角度的不断增大,连接绳 M1 的受力也逐渐增加,但张力值较小;由于纆绳沿着 x 轴方向布设,当波流入射角度逐渐增大时,投影在纆绳上的波流作用力却逐渐减小,此时纆绳由绷紧变得松弛,故纆绳 L1 的受力随着波流入射角度的增大而减小;吊绳 N1 的张力变化介于二者之间,也无破断风险。

3.3 海藻叶片的受力分析

值得注意的是,海藻叶片柄部(图 10)的疲劳损伤会影响海藻叶片的生长安全,造成脱苗风险。在不同方向波流入射下,养殖纆绳上海藻的受力及运动响应大致相同,故以纆绳 L1 上的海藻为研究对象,对纆绳左端至右端海藻进行顺序编号(1~300 号)。不同方向波流入射下海藻柄部最大张力如图 11 所示。

由图 11 可知,波流入射角度的变化对海藻柄部张力的影响较为明显,随着入射角度的不断增大,海藻柄部张力逐渐减小。此外,靠近纆绳两端附近的海藻柄部张力较大,而越靠近纆绳中间段,海藻柄部受到的张力较小。推断其原因可能为纆绳中间段海藻受到相邻海藻的消波作用更明显,海藻的运动也相对温和,故柄部张力较小。特别地,除 0°波流入射下的 1 号、296~299 号海藻和 22.5°波流入射下的 33 号海藻柄部张力超过极限破断值(55 N)外,其余海藻柄部张力均处于破断限值内。

图 12 给出了柄部张力出现最大值的(1 号海藻)张力时程曲线,可以看到在整个模拟阶段,海藻柄部发生破断的时刻为 150 s,此时最大张力约 70 N,其余时刻海藻张力仍处于安全限值内。综上所述,即使在极端

表 3 不同波流入射角度下系泊缆绳最大张力对比

Table 3 Comparison of maximum tension of mooring ropes under different wave-current incident angle

所测系缆力的位置	波流入射角度/(°)	系缆 C1/ kN	系缆 C2/ kN	系缆 C3/ kN	系缆 C4/ kN
聚酯缆顶点	0	4.33	2.66	2.68	4.16
	22.5	4.25	2.72	2.75	3.99
	45	3.95	2.95	3.99	3.82
锚链触地点	0	4.46	2.57	2.61	4.44
	22.5	4.20	2.70	2.66	4.27
	45	3.92	2.95	2.95	3.71

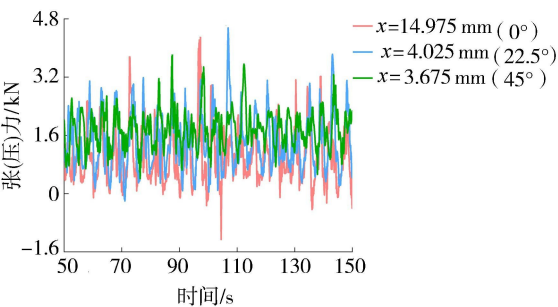


图 9 纆绳 L1 最大张力发生位置处的张(压)力时程曲线

Fig. 9 Time history curve of tensile force and compressive force at the maximum-tension location of longline L1

表 4 不同波流入射角度下各绳最大张力统计值

Table 4 Statistical values of maximum tension of each rope under different wave-current incident angle

波流入射角度/(°)	最大张力/kN		
	L1	M1	N1
0	5.61	0.18	4.15
22.5	4.55	0.42	4.23
45	3.95	0.54	3.17

海况下,海藻柄部发生破断仍为极小概率事件,海藻生长较为安全。

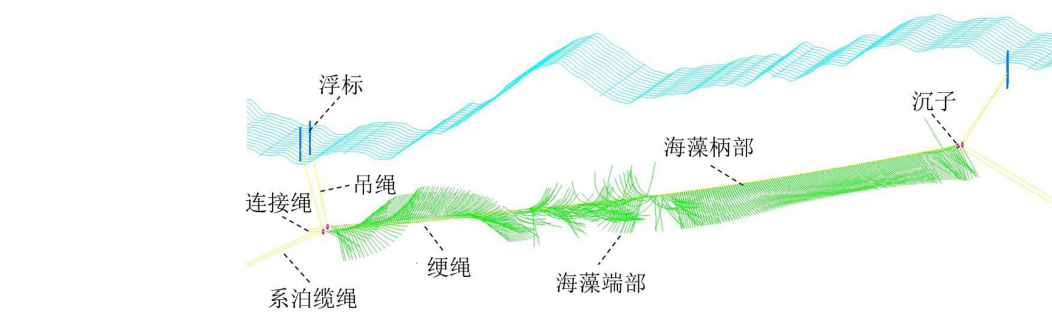


图 10 海藻运动示意图
Fig. 10 Diagram of seaweed movement

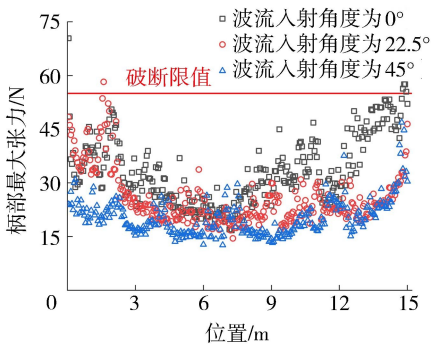


图 11 缆绳 L1 各位置处的海藻柄部最大张力
Fig. 11 Maximum tension of seaweed holdfast along the longline L1

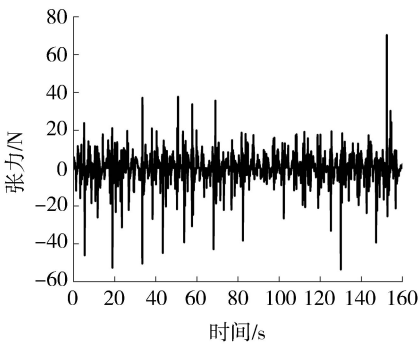


图 12 0°波流入射下 1 号海藻的张力时程曲线
Fig. 12 Time history curve of tension of kelp holdfast No. 1 under the 0° wave-current incident angle

3.4 浮标的运动响应分析

与前文工况设置相同,对浮标 1(图 13)的运动响应进行分析,浮标 1 的 3 个自由度位移统计值见表 5 (以海平面为基准面)。由表 5 可知, y 方向的位移受波流入射角度的影响较大,而 x 方向的位移受波流入射角度的影响较小。分析原因为:由于系泊缆绳均布置在 x 轴方向,因此浮标 1 在 x 方向受到较大的系泊约束,位移较小,并且随着波流入射角度的不断增大,位移有略微减小的趋势;浮标 1 在 y 方向约束较小,因此位移较大,且随着波流入射角度的持续增大,位移增大更为明显,其中 45° 波流入射下的最大位移达到了约 22 m,对海藻牧场的安全定位产生极不利影响。此外,在浮标 1 的升沉运动过程中,浮标 z 负方向位移最大平均值为 1.69 m,海藻端部位置距海面 4.49 m (<4.5 m),而当负方向位移达到最大值时,海藻端部位置距海面 7.79 m (>4.5 m)。综上所述,在浮标的正常升沉运动中海藻的光照条件并不会受到影响,仅当浮标负方向位移达到最大值时,对海藻正常接受光照的影响较大。

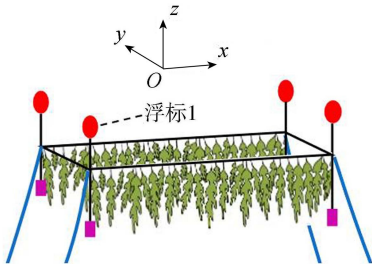


图 13 浮标 1 位置示意图
Fig. 13 Position diagram of Buoy 1

表 5 浮标 1 的 3 个自由度位移统计值
Table 5 Statistical displacement values of three degrees of freedom of buoy 1

波流入射角度/(°)	x 方向		y 方向		z 方向	
	最大值/m	平均值/m	最大值/m	平均值/m	最大值/m	平均值/m
0	3.62	1.34	0.24	0.08	-3.97	-1.29
22.5	3.28	1.30	13.84	10.05	-4.13	-1.33
45	2.19	0.87	21.58	16.23	-4.94	-1.69

4 结 语

围绕离岸系泊式海藻牧场设计分析流程,本文建立了离岸海藻牧场数值模型,分析了海藻牧场的系泊缆绳、养殖缆绳、连接绳和吊绳张力以及海藻叶片受力和浮标运动响应。分析结果表明,在极端海况下,除连接

绳外,系泊缆绳、连接绳和吊绳张力随波流入射角度变化较为明显,由于本文选取的缆绳材料强度足够,张力均较小,所以未出现破断情况。因此,当缆绳材料强度不足时,应避免各缆绳布设角度与波流荷载的夹角过大。在极端海况下,浮标升沉运动对海藻正常接受光照的影响较小;此外,海藻柄部发生破断为极小概率事件,海藻生长较为安全。

在借鉴国内近岸筏式养殖设施基础上,本文给出了离岸系泊式海藻牧场的分析流程和设计要点,考虑在水深超过 40 m 的离岸海域开展海藻养殖,突破国内浮筏养殖区域的水深限制。构建离岸系泊式海藻牧场,可为国家蓝碳工程提供借鉴,助力实现国家“双碳”目标。

参考文献:

[1] 张继红,刘纪化,张永雨,等. 海水养殖践行“海洋负排放”的途径[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 252-258. (ZHANG Jihong, LIU Jihua, ZHANG Yongyu, et al. Strategic approach for mariculture to practice “Ocean Negative Carbon Emission” [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 252-258. (in Chinese))

[2] 杨宇峰,罗洪添,王庆,等. 大型海藻规模栽培是增加海洋碳汇和解决近海环境问题的有效途径[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 259-269. (YANG Yufeng, LUO Hongtian, WANG Qing, et al. Large-scale Cultivation of Seaweed is Effective Approach to Increase Marine Carbon Sequestration and Solve Coastal Environmental Problems[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 259-269. (in Chinese))

[3] 何培民,刘媛媛,张建伟,等. 大型海藻碳汇效应研究进展[J]. 中国水产科学, 2015, 22(3): 588-595. (HE Peimin, LIU Yuanyuan, ZHANG Jianwei, et al. Research progress on the effects of macroalgae on carbon sink[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(3): 588-595. (in Chinese))

[4] 章守宇,刘书荣,周曦杰,等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 2004-2014. (ZHANG Shouyu, LIU Shurong, ZHOU Xijie, et al. Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 2004-2014. (in Chinese))

[5] LUBCHENCO J, HAUGAN P M, PANGESTU M E. Five priorities for a sustainable ocean economy[J]. Nature, 2020, 588(7836): 30-32.

[6] ROBERTS D A, PAUL N A, DWORJANYN S A, et al. Biochar from commercially cultivated seaweed for soil amelioration[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-6.

[7] PARIYAR P, KUMARI K, JAIN M K, et al. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application[J]. Science of the Total Environment, 2020, 713: 136433.

[8] YAASHIKAA P R, KUMAR P S, VARJANI S, et al. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy[J]. Biotechnology Reports, 2020, 28: e00570.

[9] SUN J, NOROUZI O, MAŠEK O. A state-of-the-art review on algae pyrolysis for bioenergy and biochar production[J]. Bioresource Technology, 2022, 346: 126258.

[10] BUSCHMANN A H, CAMUS C, INFANTE J, et al. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity[J]. European Journal of Phycology, 2017, 52(4): 391-406.

[11] 常宗瑜,张扬,郑中强,等. 筏式养殖海带收获装置的发展现状[J]. 渔业现代化, 2018, 45(1): 40-48. (CHANG Zongyu, ZHANG Yang, ZHENG Zhongqiang, et al. Development status of the raft-cultivation harvesting devices for kelp[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(1): 40-48. (in Chinese))

[12] 邓推,董国海,赵云鹏,等. 波浪作用下筏式养殖设施的数值模拟[J]. 渔业现代化, 2010, 37(2): 26-30. (DENG Tui, DONG Guohai, ZHAO Yunpeng, et al. Numerical simulation of raft-cultivation model under wave action [J]. Fishery Modernization, 2010, 37(2): 26-30. (in Chinese))

[13] 崔勇,蒋增杰,关长涛,等. 水流作用下筏式养殖设施动力响应的数值模拟[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(3): 102-107. (CUI Yong, JIANG Zengjie, GUAN Changtao, et al. Numerical simulation of dynamic response of long-line culture facility to the current[J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33(3): 102-107. (in Chinese))

[14] 张光发,栾剑,张斌,等. 基于有限元的深水延绳式浮筏养殖装置抗风浪能力分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 197-203. (ZHANG Guangfa, LUAN Jian, ZHANG Bin, et al. Analysis on wind resistance ability of deep-water long-line rope aquaculture facility by finite element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 197-203. (in Chinese))

[15] 张光明,储备,张尧,等. 筏式海水养殖设施在波浪作用下的水弹性分析[J]. 海洋工程, 2021, 39(6): 67-77. (ZHANG

- Guangming, CHU Bei, ZHANG Yao, et al. Hydro-elastic analyses of a floating raft for marine aquaculture in waves [J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(6): 67-77. (in Chinese))
- [16] LIU Y, WANG Z, YANG X, et al. Satellite-based monitoring and statistics for raft and cage aquaculture in China's offshore waters [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 91: 102-118.
- [17] 农业部渔业局. 2021 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [18] 刘福利, 梁洲瑞, 张朋艳, 等. 中国海带养殖向离岸深水发展初步探讨 [J]. 渔业科学进展, 2019, 40(1): 161-166. (LIU Fuli, LIANG Zhourui, ZHANG Pengyan, et al. Preliminary discussion on the development of saccharina japonica offshore aquaculture in China [J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(1): 161-166. (in Chinese))
- [19] HARGER B W W, NEUSHUL M. Test-farming of the giant kelp, *Macrocystis*, as a marine biomass producer [J]. Journal of the World Mariculture Society, 1983, 14(1/2/3/4): 392-403.
- [20] BUCK B H, BUCHHOLZ C M. The offshore-ring: a new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae [J]. Journal of Applied Phycology, 2004, 16(5): 355-368.
- [21] PETEIRO C, FREIRE Ó. Outplanting time and methodologies related to mariculture of the edible kelp *Undaria pinnatifida* in the Atlantic coast of Spain [J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(6): 1361-1372.
- [22] PETEIRO C, SÁNCHEZ N, DUEÑAS-LIAÑO C, et al. Open-sea cultivation by transplanting young fronds of the kelp *Saccharina latissima* [J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(1): 519-528.
- [23] PETEIRO C, SÁNCHEZ N, MARTINEZ B. Mariculture of the Asian kelp *Undaria pinnatifida* and the native kelp *Saccharina latissima* along the Atlantic coast of Southern Europe: an overview [J]. Algal Research, 2016, 15: 9-23.
- [24] CAMUS C, INFANTE J, BUSCHMANN A H. Overview of 3 year precommercial sea farming of *Macrocystis pyrifera* along the Chilean coast [J]. Reviews in Aquaculture, 2018, 10(3): 543-559.
- [25] BAK U G, MOLS-MORTENSEN A, GREGERSEN O. Production method and cost of commercial-scale offshore cultivation of kelp in the Faroe Islands using multiple partial harvesting [J]. Algal Research, 2018, 33: 36-47.
- [26] ZHU L H, HUGUENARD K, FREDRIKSSON D W. Dynamic analysis of longline aquaculture systems with a coupled 3D numerical model [C]//The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference. Hawaii: OnePetro Press, 2019: ISOPE-I-19-235.
- [27] CHEN M, YIM S C, COM D, et al. Hydrodynamic load modeling for offshore free-floating macroalgal aquaculture under extreme environmental conditions [C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Glasgow: American Society of Mechanical Engineers Press, 2019: 58837: V006T05A008.
- [28] BROCH O J, ELLINGSEN I H, FORBORD S, et al. Modelling the cultivation and bioremediation potential of the kelp *Saccharina latissima* in close proximity to an exposed salmon farm in Norway [J]. Aquaculture Environment Interactions, 2013, 4(2): 187-206.
- [29] SOLVANG T, BALE E S, BROCH O J, et al. Automation concepts for industrial-scale production of seaweed [J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 613093.
- [30] ENDRESEN P C, NORVIK C, KRISTIANSEN D, et al. Current induced drag forces on cultivated sugar kelp [C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers. Glasgow: American Society of Mechanical Engineers Press, 2019: 58837: V006T05A007.
- [31] BUCK B H, BUCHHOLZ C M. Response of offshore cultivated *Laminaria saccharina* to hydrodynamic forcing in the North Sea [J]. Aquaculture, 2005, 250(3/4): 674-691.
- [32] FLAVIN K, FLAVIN N, FLAHLIVE B. Kelp farming manual: a guide to the processes, techniques, and equipment for farming kelp in New England waters [R]. Saco: Ocean Approved LLC, Saco, 2013, 1-123.
- [33] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A. The force exerted by surface waves on piles [J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5): 149-154.
- [34] OrcaFlex user manual. Modelling, data and results [EB/OL]. [2022-05-25]. <https://www.orcina.com/resources/documentation/>
- [35] 连宇顺, 刘海笑. 海洋系泊工程中合成纤维系缆研究述评 [J]. 海洋工程, 2019, 37(1): 142-154. (LIAN Yushun, LIU Haixiao. Review of synthetic fiber ropes for deepwater moorings [J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(1): 142-154. (in Chinese))
- [36] 连宇顺, 刘海笑, 黄维. 超深水混合缆绷紧式系泊系统非线性循环动力分析 [J]. 海洋工程, 2013, 31(3): 1-8. (LIAN Yushun, LIU Haixiao, HUANG Wei. Cyclic nonlinear analysis of ultra-deepwater hybrid mooring systems [J]. The Ocean

Engineering,2013,31(3): 1-8. (in Chinese))

[37] HERSBACH H,DE-ROSNAY P,BELL B,et al. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. Technical Report, ERA Report Series 27[R]. Shinfield Park: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2018.

[38] 崔晶,张丰启,李宏江. 山东半岛东部沿海海浪预报方法初步探讨[J]. 海洋预报,2009,26(4): 101-105. (CUI Jing, ZHANG Fengqi,LI Hongjiang. A preliminary discussion on the wave forecasting method in the east coast of Shandong Peninsula [J]. Marine Forecasts,2009,26(4): 101-105. (in Chinese))

[39] 魏诗晏,杨伟,赵亮. 荣成外海海流特征及影响因素[J]. 海洋科学,2022,46(4): 55-66. (WEI Shiyan,YANG Wei,ZHAO Liang. Characteristics and influencing factors of the currents in the Rongcheng offshore region[J]. Marine Sciences,2022,46(4): 55-66. (in Chinese))

[40] 刘凡,陆小敏,徐丹,等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):387-393. (LIU Fan,LU Xiaomin,XU Dan,et al. Research progress of ocean waves forecasting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):387-393. (in Chinese))

[41] 郑金海,鲍仕昱,张蔚,等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4): 1-6. (ZHENG Jinhai,BAO Shiyu,ZHANG Wei,et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):1-6. (in Chinese))

[42] 殷妍,邓夕贵,王慧,等. 中国东部大陆架海域波能流特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):96-103. (YIN Yan,DENG Xigui,WANG Hui,et al. Characteristic study of wave energy flux in the continental shelf of eastern China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):96-103. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-12 编辑:彭桃英)

(上接第 106 页)

[20] 倪静,王子腾,耿雪玉. 植物-生物聚合物联合法固土的试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(11):2131-2137. (NI Jing, WANG Ziteng,GENG Xueyu. Experimental study on combined plant-biopolymer method for soil stabilization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(11):2131-2137. (in Chinese))

[21] 刘瑾,张达,汪勇,等. 高分子稳定剂生态护坡机理及其应用[J]. 地球科学与环境学,2016,38(3):420-426. (LIU Jin, ZHANG Da,WANG Yong,et al. Reinforcement mechanism of soil slope surface-with polymer soil stabilizer and its application [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2016,38(3):420-426. (in Chinese))

[22] 喻永祥,郝社锋,蒋波,等. 基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究[J]. 水文地质工程地质,2021,48(2):174-181. (YU Yongxiang,HAO Shefeng,JIANG Bo,et al. An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials [J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2021, 48(2): 174-181. (in Chinese))

[23] 王琼亚,刘瑾,李鼎,等. 高分子稳定剂改良河道岸坡表层砂土水稳定性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020,40(4): 566-573. (WANG Qiongya,LIU Jin,LI Ding,et al. Experimental study on water stability of polymer stabilized sand on river bank slope surface[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2020,40(4):566-573. (in Chinese))

[24] WANG Y,YANG K,TANG Z. In situ effect of combined utilization of fly ash and polyacrylamide on sand stabilization in North China[J]. Catena,2018,172: 170-178.

[25] 彭劼,商志阳,曹天赐,等. 高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(1):99-104. (PENG Jie, SHANG Zhiyang, CAO Tianci, et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):99-104. (in Chinese))

[26] 梅红,赵洪岩,李明阳,等. 剑麻纤维复合基材土岩界面剪切性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5): 79-86. (MEI Hong, ZHAO Hongyan, LI Mingyang, et al. Experimental study on shear properties of soil-rock interface of sisal fiber composite material[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):79-86. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-26 编辑:刘晓艳)