

# 永久性浮式桥梁结构的工程实践概述与展望

曾卓<sup>1</sup>, 郑宏刚<sup>1</sup>, 向升<sup>2</sup>, 程斌<sup>2,3\*</sup>

(1. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 上海交通大学 土木工程系, 上海市 200240; 3. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海市 200240)

**摘要:**随着桥梁工程向深水环境拓展,永久性浮式桥梁结构日益受到国内外学者的关注。该文系统梳理了世界范围内具有代表性的永久性浮式桥梁工程案例,归纳了已建永久性浮式桥梁工程的结构体系,并针对永久性浮式桥梁的力学特性、施工流程和特殊构造相关研究和应用进展进行了介绍,最后从工程经济性、环境适用性的角度对永久性浮式桥梁的发展前景进行了分析。研究表明:永久性浮式桥梁结构在世界范围内获得了一定的工程应用,形成了连续浮箱和离散浮箱两种主要结构体系,在深水条件中显示出了优越的工程经济性。通过深化研究论证,永久性浮式桥梁结构有望在深水跨越工程中获得推广。

**关键词:**浮式桥梁;动力性能;结构体系与构造;工程经济性;环境适用性

中图分类号:U445

文献标志码:A

## Overview and Prospect of Engineering Practice of Permanent Floating Bridge Structures

ZENG Zhuo<sup>1</sup>, ZHENG Honggang<sup>1</sup>, XIANG Sheng<sup>2</sup>, CHENG Bin<sup>2,3\*</sup>

(1. CCCO Wuhan Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As the bridge construction goes forward to the deep-water environments, the permanent floating bridge structures have attracted more and more attention from international scholars. The project cases of worldwide representative permanent floating bridges were presented. The structural systems of the built permanent floating bridges were summarized. The research and application advances regarding the mechanical features, the construction process, and the special configurations of the permanent floating bridges were introduced. Finally, from the perspectives of the engineering economy and environment applicability, the development prospect of permanent floating bridges was analyzed. The research shows that the permanent floating bridge structure has been applied in engineering around the world and has two types of structural systems, which are the continuous pontoon system and the discrete pontoon system. The permanent floating bridges adopted in deep-water environments have shown superior engineering economy. Based on further research and verifications, the permanent floating bridge structures can be applied in deep-water crossing projects.

**Keywords:** floating bridge; dynamic performance; structural system and configuration; engineering economy; environment applicability

## 0 引言

浮桥作为一种历史悠久的结构形式,时至今日仍被广泛应用于临时通行、应急抢险等临时性场景,

通常不要求具备长期服役的安全性和一般公路的承载性<sup>[1]</sup>。现代浮式桥梁一般指永久性结构,其结构承载力、安全性、耐久性均需满足现代交通基础设施的设计要求。永久性浮式桥梁通过浮力承载结构自重

收稿日期:2024-08-16(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278192,52208180);上海市科技创新行动计划项目(编号:20200741600)

作者简介:曾卓,女,硕士,高级工程师.E-mail: 390234103@qq.com

\*通信作者:程斌,男,博士,教授.E-mail: cheng\_bin@sjtu.edu.cn

及交通活载,采用下部锚索系泊、端部约束等方式实现结构的系泊定位,避免了承载于土层或基岩的传统桥梁深水基础的建造,其造价对桥址水深的敏感性相对有限,在环境友好和工程经济性方面具有明显的竞争优势,与“基础设施高品质建设”的发展理念相契合,也符合中国公路交通建设的实际需求。

目前,已建成的永久性浮式桥梁工程数量有限,主要集中于美国、挪威、日本等发达国家,中国尚无工程应用案例。近年来,随着桥梁建设逐步走向深水环境<sup>[2-3]</sup>,永久性浮式桥梁受到了国内外学者的广泛关注,成为桥梁工程领域的研究热点之一<sup>[4]</sup>。本文重点基于已建工程对永久性浮式桥梁的应用实践进行概述,并从结构体系、特殊构造、工程经济性、环境适用性等方面总结相关结构特点与应用经验,以期永久性浮式桥梁后续研究提供参考。

## 1 工程应用概述

美国自20世纪40年代起在华盛顿州共修建了5座永久性浮式桥梁,分别为Lacey V. Murrow桥、Evergreen Point桥、Homer M. Hadley桥、胡德运河大桥和SR520公路浮桥<sup>[4]</sup>。上述5座桥梁均采用方形预应力混凝土浮箱拼接,并设置多组系泊索提供横、纵向约束。其中,2016年建成通车的SR520公路浮桥长达2 350 m,是目前世界上最长的浮式桥梁。相较于早期工程,该桥优化了水动力性能和承载能力,并铺设了轻轨,成为世界上第一座承载轨道交通的永久性浮式桥梁。除上述结构以外,美国夏威夷的Admiral Clarey桥、加拿大的William Richard Bennett桥也采用了相似结构体系。

20世纪90年代,挪威在西南沿海修建了Bergsøysund桥和Nordhordland桥<sup>[4]</sup>,两桥的浮桥段长度分别为845 m和1 246 m,其主梁结构由多个分散布置的钢筋混凝土浮箱支撑,两者通过固定连接的方式共同构成桥梁浮体。由于桥址海况较弱,两桥均未设置水下系泊约束,仅通过主梁端部与桥台之间的连接进行约束。Nordhordland桥的南端为独塔斜拉桥,为船舶交通提供了必要的通航条件。为了实现浮桥段与斜拉桥之间的桥面衔接,浮桥段南侧一定节段内采用支撑构造对桥面进行了抬升。

2000年日本大阪建成的Yumemai桥是一座由两个钢浮箱支撑的浮式系杆拱桥,主体结构长410 m(主跨为280 m),依靠主梁平衡拱肋端部的水平推力。全桥通过主梁两端的限位机构进行约束,结构

整体可绕其一端实现水平面内转体,必要时为大型船舶打开航道。

2009年南美洲国家圭亚那建成了横跨Berbice河的浮式桥梁,全长1 570 m。该桥上部结构采用模块化钢桁架部件拼装,下部钢制浮箱通过斜向锚链锚定于河床,浮箱上表面采用栓接的形式与装配式桁架桥墩相连接。其技术要求较上述桥梁较低,设计寿命为30年。

除以上大型公路工程外,浮式桥梁结构还被应用于景观步行桥,如英国伦敦西印度码头步行桥(West India Quay Footbridge)和荷属安地列斯群岛的艾玛女王桥(Queen Emma Bridge)。西印度码头步行桥于1996年建成,全长94 m,净跨度为80 m。该桥中部梁体可绕两侧水平轴向上旋转抬升,以供船只通行。艾玛女王桥始建于1888年,并分别于1939年和2006年进行了修缮,全长167 m,该桥可整体绕其一端的铰链机构旋转以开启航道。

制式承压舟浮桥被广泛应用于中国黄河流域以供两岸人员往来和物资输运,通常在每年的汛期和冰凌期需对这些浮桥进行周期性的拆卸和架设。作为临时性交通设施,承压舟浮桥的设计年限一般不超过30年,其承载力、耐久性、结构形变等要求均未达到一、二级公路的水准,因此不符合本文所述永久性浮式桥梁范畴。

从构造形式上看,已建的永久性浮式桥梁大致可划分为连续浮箱和离散浮箱两种结构体系,其典型构造分别如图1所示。连续浮箱体系由多个箱体首尾连接形成长条形浮体,如Lacey V. Murrow桥、Evergreen Point桥以及SR520公路浮桥。离散浮箱体系是由多个分散布置的浮式承台支撑上部主梁,Bergsøysund桥、Nordhordland桥、Yumemai桥和西印度码头步行桥等属于此类体系。

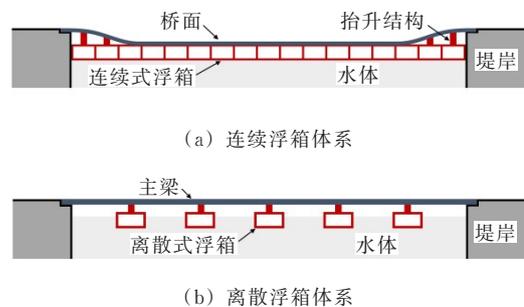


图1 已建浮式桥梁典型结构体系

Figure 1 Typical structural systems of built permanent floating bridges



气动-水动耦合振动特性;Wang等<sup>[16]</sup>针对 Sulafjord 峡湾的浮式悬索桥概念方案,通过 Abaqus 有限元分析,研究了结构在脉动风、非均匀波、剪切流联合作用下的结构动力响应特征,并对不同类型环境荷载在此类结构设计中的重要性展开评估。该研究所采用的数值模型中,基于准静态假定对主梁所受脉动风分量进行了实时计算。研究表明:该悬索桥方案在桥塔下部仅设置了竖向张力腿系泊,导致结构具有水平面内的顺应性特征,从而产生较大的横桥向水平位移;魏凯等<sup>[17-18]</sup>针对某设置张力腿基础的三跨浮式悬索桥,考虑风浪荷载作用,研究了主缆垂跨比、基础淹没深度、张力腿拉索倾角等设计参数对桥梁动力性能的影响规律。

此外,部分学者还基于数值分析对永久性浮式桥梁系泊索的振动与疲劳特性开展研究。Cantero等<sup>[19]</sup>对永久性浮式桥梁预张拉系泊索进行了参数共振研究,对端点激励频率、幅值以及锚索预张力、长度、倾角等参数进行了分析,研究结果表明:当端点激励频率为系泊索一阶自振频率的2倍时共振现象最为明显,索的跨中位移可达激励振幅的5倍以上,而索张力幅值并未显著增加;其他频率下系泊索的共振现象不明显;Dai等<sup>[20]</sup>针对 Bjørnafjorden 峡湾的直线形浮式刚构桥方案,研究了非均匀波作用下的结构动力行为,并基于响应计算结果,分析了非均匀波条件下桥梁系泊索的疲劳损伤发展规律。

现有永久性浮式桥梁的力学特性相关研究主要以特定工程方案的数值分析为主,相关工作在一定程度上揭示了此类结构的动力性能特点。值得注意的是,由于浮式桥梁试验成果较为有限,上述研究所依托的数值方法的准确性有待进一步验证。

### 3 施工流程与特殊构造

#### 3.1 永久性浮式桥梁施工流程

如前所述,永久性浮式桥梁主要分为连续浮箱体系和离散浮箱体系。本节基于两种体系的典型工程案例,介绍永久性浮式桥梁的主要施工流程。

##### 3.1.1 SR520 公路浮桥

SR520 公路浮桥紧邻 Evergreen Point 桥修建,该桥建成以后,已服役 53 年的 Evergreen Point 桥即被拆除。SR520 公路浮桥两端与陆地衔接的刚构引桥采用了混凝土薄壁桥墩与扩大基础,预应力混凝土主梁为单箱双室截面,采用悬臂浇筑法施工。主梁顶板和底板设置了横、纵桥向的后张拉预应力筋,以

提高结构刚度。主梁顶板的最上层钢筋采用了环氧树脂涂层钢筋,以提升结构的耐久性。浮桥所采用的预应力混凝土浮箱在桥址附近的船坞内制造,其建造流程具体包括:搭建外墙混凝土模板、布置内部预制钢筋混凝土隔板(起到划分隔舱、阻水防水的作用)、浇筑混凝土外墙及隔板连接处的混凝土柱、搭建顶板模板并浇筑混凝土、拆除模板、施加后张预应力。

SR520 公路浮桥现场施工的主要步骤包括<sup>[21]</sup>:  
① 在桥址近岸区建造施工集结区来作为浮箱节段拼装及其上部结构建造的临时区域;② 精确定位浮桥的各个锚点,并安装对应的锚;③ 开展围堰施工,建造引桥桥墩,同时将预制好的浮箱拖航至集结区开展拼装作业;④ 在已拼装的浮箱上部浇筑墩梁结构,安装预制桥面板;⑤ 将拼装好并完成上部结构建造的浮桥节段拖航到目标位置,连接系泊索后进行定位;⑥ 铺设桥梁路面材料;⑦ 架设过渡跨,将浮桥段与两端的引桥进行连接;⑧ 启用新桥,拆除旧桥。

##### 3.1.2 Nordhordland 桥

如图 3(a)所示,Nordhordland 桥的浮式承台在桥址附近的船坞中建造,其底板采用现浇工艺施工,外墙和隔板采用滑模法施工。完成底板、外墙和隔板施工后,承台被拖至海上进行顶板施工。在浮式承台建成后,即进行钢箱梁的水上拼接作业,如图 3(b)所示。钢箱梁被预制为 21 m、36 m 和 42 m 长的 11 个直节段,并与相应的浮式承台焊接,形成最终的浮体结构。为保证钢箱梁拼接过程的准确定位,施工过程中采用了支撑筏进行临时支撑。

在建造浮式承台的同时,桥址处的独塔斜拉桥部分和浮桥段两端的固定桥台也同步开展施工。斜拉桥的建造采用悬臂吊装施工法,即主梁节段随着斜拉索的锚固依次吊装到位,斜拉桥主梁由轻质钢筋混凝土材料制成。

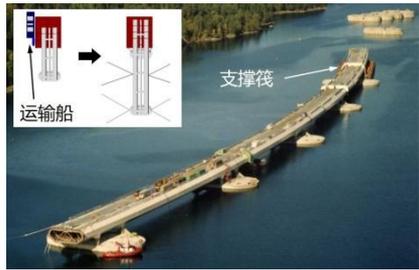
当桥台和斜拉桥部分建设完成,且浮桥段拼接形成整体后,即进行浮桥段的湿拖航和现场安装,分别如图 3(c)、(d)所示。浮桥段调整到位后,通过特殊的连接构造与桥台相连。最后,完成浮桥段抬高桥面的建造,与斜拉桥桥面进行衔接。

##### 3.2 永久性浮式桥梁特殊构造

永久性浮式桥梁因其体系受力原理与传统桥梁存在本质区别,为保证各类荷载作用下的结构安全与通行安全,其边界约束也具有区别于传统桥梁的特殊要求。已建工程结构为满足相关受力要求,采



(a) 船坞中建造浮式承台



(b) 钢箱梁的水上拼接作业



(c) 浮桥段的湿拖航



(d) 浮桥段现场安装

图3 Nordhordland 桥建造过程

Figure 3 Construction process of Nordhordland Bridge

取了一些特殊构造形式。本节从结构受力的角度对此类特殊构造的设计思想和实现方式进行分析介绍。

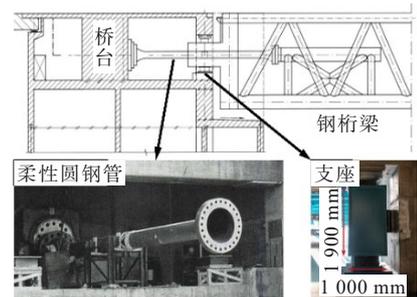
### 3.2.1 梁端-桥台连接

对于离散浮箱体系浮式桥梁,各跨内的竖向荷载主要由相邻的浮箱式承台承担。因此,由主梁传递至端部桥台的结构自重和交通荷载相对较小,而潮汐水位变化所引起的竖向反力则较为显著。针对已建的 Bergsøysund 桥和 Nordhordland 桥,由于桥梁在水平面内具有拱的受力特性,波浪、水流及风荷载不仅可使桥台处产生横桥向反力,还能引起沿桥轴的纵向反力。

针对以上两方面的受力特点,桥台对梁端的约束不仅需要承担横、纵方向较大的支座反力,还应在绕水平轴方向具有一定的转动能力,弱化对桥梁竖平面内变形的约束作用,以减轻因水位变化而引起的梁端弯矩和剪力。为此,Bergsøysund 桥和 Nordhordland 桥对梁端支座进行了特殊构造处理。如图4、5所示。



(a) Bergsøysund 桥



(b) 梁端支座特殊处理

图4 Bergsøysund 桥<sup>[4]</sup>

Figure 4 Bergsøysund Bridge<sup>[4]</sup>



(a) Nordhordland 桥



(b) 钢箱梁端部处理

图5 Nordhordland 桥<sup>[4]</sup>

Figure 5 Nordhordland Bridge<sup>[4]</sup>

Bergsøysund 桥梁端与桥台之间通过一根长 12 m、直径 540 mm、壁厚 140 mm 的柔性圆钢管和若干个橡胶支座进行连接,如图 4(b)所示。该柔性圆钢管采用屈服强度为 550 MPa 的钢材制作,可同时满足强度和柔性需求。柔性管的两端通过法兰盘分别与钢桁梁和桥台连接固定,在荷载作用下能够发生弹性变形。该连接构造中,橡胶支座分置桥台两侧,对梁端的横向水平位移、竖向位移以及绕桥轴扭转自由度进行约束;柔性管不仅提供沿桥轴切线方向的位移约束,还通过其弹性弯曲变形,实现了梁端绕水平轴的弹性转角约束。

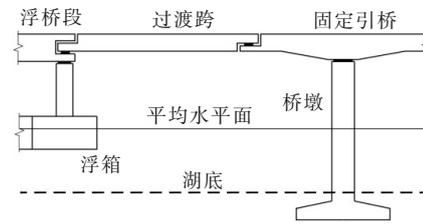
Nordhordland 桥的钢箱梁端部则通过柔性钢板连接件与桥台连接,如图 5(b)所示。连接件与桥台之间通过拉索进行固定,拉索的远端锚于桥台的另一侧;连接件与钢箱梁之间则采用螺栓连接。水平布置的柔性钢板连接件可在水平面内提供较强的抗剪能力,能够抵抗桥体所受波浪、水流等水平作用力。连接件在绕横向水平轴旋转的方向上具有良好的弯曲韧性,使梁端具有一定的转动能力。由此,桥梁在水位变化的作用下可产生竖向的适应性变形,从而有效避免结构内力(尤其是边跨的弯矩和剪力)的显著变化。

### 3.2.2 过渡跨

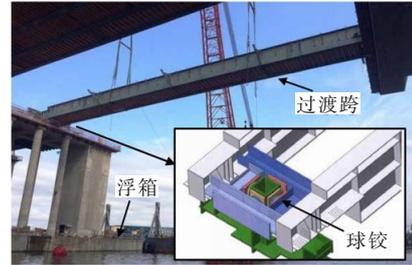
已建的连续浮箱体系桥梁,绝大部分都设置了下部系泊索进行全段锚定,主要通过系泊索进行定位约束,而较少依赖于桥端的约束。即便如此,为保证车辆通行,仍需在引桥和浮桥段之间设置过渡段,以对两部分桥面进行衔接。过渡段主要起衔接桥面的作用,并不对浮桥段结构形成约束作用。浮桥段因波浪、水流、风荷载以及水位变化的作用,相对于传统桥梁结构,其位移变化可能较为明显。因此,过渡段需满足所衔接两部分结构的相对运动需求,同时保证结构的安全性。

2016 年建成通车的 SR520 公路浮桥,采用预制钢梁作为两岸引桥与浮桥段的衔接过渡结构。如图 6(a)所示,过渡跨梁体支撑于引桥的悬臂端和浮桥段的支撑柱上,连接支座为特殊设计的铰节点[图 6(b)],该节点容许过渡跨两端在竖直向、横桥向发生最高 61 cm 的相对线位移。同时,基于特殊设计的限位构造,铰节点具有一定的承载能力,以防止落梁事件的发生,从而保障结构和交通安全。上述两端固定铰接的过渡梁结构也被应用于 Lacey V. Murrow 桥、Homer M. Hadley 桥以及 William R. Bennett 桥等桥梁

结构中。



(a) 预制钢梁示意图

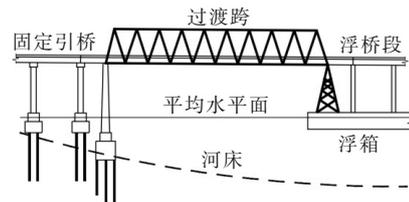


(b) 连接支座

图 6 SR520 公路浮桥<sup>[21]</sup>

Figure 6 SR520 Highway-Type Floating Bridge<sup>[21]</sup>

除梁结构外,桁架结构也被应用于浮桥段与引桥的衔接过渡。如图 7 所示,胡德运河大桥在其浮桥段两端采用了钢桁架进行衔接,桁架两端的支撑节点同样为固定铰,其设计思路与前述节点类似,即允许过渡段两端产生必要的相对位移。



(a) 钢桁架结构



(b) 胡德运河大桥

图 7 胡德运河大桥<sup>[4]</sup>

Figure 7 Hood Canal Bridge<sup>[4]</sup>

### 3.2.3 系泊系统

系泊系统是由一端锚定于水底,另一端与浮体相连接的一根或多根系泊索所构成的约束体系。该

系统主要对浮体结构进行定位。从材料角度来看,海洋工程结构中所采用的系泊索包括钢锚链、钢丝绳、聚酯缆等;从形式上看,一般包括悬链线系泊索、斜向张紧式系泊索和竖向张紧式系泊索(或称张力腿)等。不同形式的系泊索具有各自的力学性能特点,能够满足不同的结构受力需求。

斜向张紧式系泊索因其索力具有水平面内分量,可为结构提供相应水平方向上的约束作用。如图8所示为SR520公路浮桥的平面图和典型断面图。

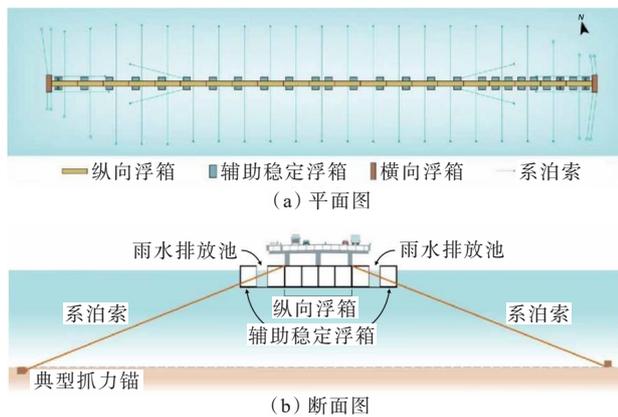


图8 SR520公路浮桥结构布置<sup>[21]</sup>

Figure 8 Structural layout of SR520 Highway-Type Floating Bridge<sup>[21]</sup>

由图8可知:①该桥设置了多对横桥向布置的系泊索为浮箱提供了侧向约束,并具有抵抗横桥向荷载的作用;②该桥设置了4对沿纵桥向(或其水平面投影与纵桥向呈锐角)布置的斜向系泊索,为全桥提供纵向的定位约束。

竖向张紧式系泊索凭借其自身较大的拉伸刚度,可对结构竖向运动提供有效的约束作用,从而减小结构在荷载作用下产生的竖向位移。图9为西印度码头步行桥的结构立面图。从图9可以看出:该桥在各组胶囊形浮筒的下部均设置了竖向张紧式系泊索。该桥本身自重较轻,且浮筒的水线面积较小,若不设系泊索将导致桥梁在行人荷载作用下产生明显的竖向静位移或振动。设置竖向张紧式系泊索后,浮筒的吃水量增加,由此增加的浮力(称为剩余浮力)由索张力平衡。当竖向荷载小于索张力时(即系泊索保持张紧状态),结构的竖向刚度近似等于系泊索的总拉伸刚度,从而有效限制了结构的竖向位移。

由以上分析可知,永久性浮式桥梁的受力原理与传统桥梁结构存在本质区别,因此需要通过特殊

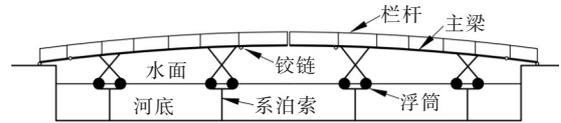


图9 西印度码头步行桥立面图

Figure 9 Elevation of West India Quay Footbridge

的构造设计来满足其结构受力要求。不同的梁端约束和系泊系统形式对结构力学性能的影响也各不相同,在研究与设计工作中应予以足够的重视。

## 4 工程经济性与环境适用性

### 4.1 工程经济性分析

工程经济性是桥梁工程结构选型决策中须考虑的关键因素。对于传统桥梁结构而言,基础工程成本占工程总造价的比例相当高,尤其在深水或弱地基环境下,这一占比将进一步提高。大型桥梁深水基础包括桩基础、沉箱基础、沉井基础、设置基础等,在中国已建的深水桥梁中,非通航桥主要采用钻孔灌注桩基础和打入钢管桩基础,航道桥主塔则常采用沉井基础。一方面,这些深水基础体量较大,例如桩基础通常需要深入土层几十米乃至上百米,因此在深水环境下施工难度极大,工程造价也随水深呈几何级数增长;另一方面,当跨越水域宽度较大时,传统桥梁结构的工程造价也将变得相当昂贵。

中国工程院 Moan 院士等<sup>[5]</sup>基于实际工程条件,预估并对比了浮式桥梁、悬索桥、悬浮隧道、海底隧道4类结构方案的工程造价随跨越水域宽度的变化规律(图10),由于传统多跨梁桥不适用于超深水域,因而并未列入对比。从图10可以看出:在同等跨越距离下,浮式桥梁的工程造价一般低于悬索桥和悬浮隧道,且这三类结构的造价受水深的影响均较有限,因此图中未给出其随水深的变化规律。对于海底隧道,隧道口至隧道水平段之间需要斜坡过渡,隧道的总长度将随水深 $D$ 的增大而明显增加,这不可避免地导致其造价随水深变化显著,图10给出了不同水深对应的造价变化曲线。从工程造价的角度来看,浮式桥梁结构在深水条件下具有显著的经济性优势。

### 4.2 环境适用性分析

已建与在研的永久性浮式桥梁工程,桥长分布在600~2500m范围内<sup>[4]</sup>。从受力原理上看,其跨越水域宽度基本不受限制,能够适应不同的跨海、跨湖、跨航道等工程场景。已建永久性浮式桥梁以连

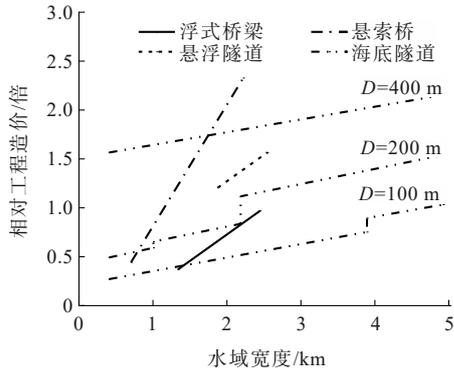


图10 各类结构工程造价对比

Figure 10 Comparison of engineering costs of various structural types

续浮箱体系为主,部分桥梁因桥跨内存在通航要求而采用离散浮箱体系;浮箱式承台以预应力或钢筋混凝土结构为主,少数工程采用钢结构方案。文中工程实例所对应的最大水深从10 m到500 m不等,可见浮式桥梁对水深条件也并不敏感。已建浮式桥梁的设计水位变化值最低为-2.0 m,最高可达+4.8 m。其中,连续浮箱体系桥梁在极端水位情况下,可通过调整压载的方式来改变吃水深度(如SR520公路浮桥),离散浮箱体系桥梁则通过自身的柔性变形来适应水位的变化。永久性浮式桥梁的设计风速范围为27~45 m/s<sup>[4]</sup>,与中国一般的山区、沿海桥梁结构较为接近。对于设计波浪环境,有义波高范围为1.4~3.4 m,美国华盛顿湖的波浪有效周期在5 s以内,其他沿海工程有效周期则分布较广,为3.3~10.0 s<sup>[4]</sup>。基于国家海洋局划分的9级海浪标准,这些工程结构的设计浪高可达第5级“大浪”水平(浪高为2.5~4.0 m),对应于中国内湖或具有一定自然屏障(如岛屿、半岛)的沿海海域。已建永久性浮式桥梁的设计流速普遍小于1.75 m/s<sup>[4]</sup>,一般的湖泊与沿海海域水流条件均在此范围内。

以上分析涉及的永久性浮式桥梁结构中,主要包括了设置系泊系统的连续浮箱体系桥梁和不含系泊系统的离散浮箱体系桥梁。在离散浮箱体系桥梁相对于连续浮箱体系桥梁更有利于减轻风、浪、流荷载效应的前提下,可推断设置系泊系统的离散浮箱体系桥梁有望应用于比以上条件更为严苛的工程环境,具有更为优越的环境适用性和结构安全性。因此,针对设置系泊系统的离散浮箱体系浮式桥梁开展深入研究,可作为下一阶段浮式桥梁结构的重要发展方向之一,这对于推动浮式桥梁的工程应用具

有重要意义。

## 5 结论

本文汇总了世界范围内具有代表性永久性浮式桥梁相关工程信息,总结归纳了永久性浮式桥梁的典型结构体系。针对永久性浮式桥梁动力特性、施工流程和特殊构造等方面的研究与应用进展进行了介绍,最后从工程经济性和环境适用性的角度对永久性浮式桥梁的发展前景进行了分析。已有工程实践表明:已建永久性浮式桥梁结构体系主要分为连续浮箱体系和离散浮箱体系。其中,离散浮箱体系桥梁水动力性能相对较优,且能够满足一定的通航需求;由于浮式桥梁的受力体系与传统桥梁存在本质区别,因此采用端部柔性约束更有利于满足相应的受力需求。针对不同的受力条件,可选用不同形式系泊系统;在大跨度深水水域,浮式桥梁与悬浮隧道、悬索桥、海底隧道等结构形式相比,具有良好的经济性;已建永久性浮式桥梁较好地适应了相关水域的设计环境条件,通过结构体系与构造改进,可拓宽永久性浮式桥梁的环境适用性,以便在中国湖泊、沿海地区推广应用。

基于现有的实践应用与研究成果,对永久性浮式桥梁的后续工作可围绕以下几方面深入研究:

(1) 数值分析方法的发展与完善。由于永久性浮式桥梁结构承受风、浪、流荷载联合作用,因此浮式桥梁荷载效应的数值计算方法有待进一步发展和完善。

(2) 结构动力特性与减振措施。针对不同结构体系和局部构造的浮式桥梁,开展动力特性及相应的减振理论与方法研究,可为此类结构的进一步推广应用提供科学依据。

(3) 结构设计标准与规范的制定。在已有实践经验和研究成果的基础上,开展永久性浮式桥梁设计标准与规范的制定工作,是推广其工程应用、保障结构安全的重要一环。

## 参考文献:

### References:

- [1] 邹焕华. 浮桥的历史与现状[J]. 中外公路, 2004, 24(6): 71-73.  
ZOU Huanhua. The history and current status of floating bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24(6): 71-73.
- [2] 李东洋, 郭馨艳, 高康平, 等. 波浪力作用下环岛桥梁受力

- 特性研究[J].中外公路,2021,41(2):91-96.
- LI Dongyang, GUO Xinyan, GAO Kangping, et al. Study on mechanics characteristic of round-the-island bridge under wave force[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2):91-96.
- [3] 李怡辰,冯仲仁,吕尔燕.基于云模型的深水桥梁基础施工风险评估[J].中外公路,2021,41(1):164-169.
- LI Yichen, FENG Zhongren, LYU Eryan. Risk assessment of deepwater bridge foundation construction based on cloud model[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1):164-169.
- [4] 程斌,向升.深水浮式桥梁研究应用进展[J].土木工程学报,2021,54(2):107-126.
- CHENG Bin, XIANG Sheng. Advances in research and application of deep-water floating bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(2):107-126.
- [5] MOAN T, EIDEM M E. Floating bridges and submerged tunnels in Norway: The history and future outlook[M]. Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019:81-111.
- [6] VIUFF T, XIANG X, ØISETH O, et al. Model uncertainty assessment for wave- and current-induced global response of a curved floating pontoon bridge[J]. Applied Ocean Research, 2020, 105:102368.
- [7] FUMOTO K, NIIZATO H, UTSUNOMIYA T, et al. Experiment on motions of elastic floating bridge in winds and waves[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu A, 2007, 63(1): 206-219.
- [8] RODRIGUES J M, VIUFF T, ØKLAND O D. Model tests of a hydroelastic truncated floating bridge[J]. Applied Ocean Research, 2022, 125:103247.
- [9] XIANG S, CHENG B, LI D R, et al. Structural dynamic performance of floating continuous beam bridge under wave and current loadings: An experimental study[J]. Applied Ocean Research, 2023, 137:103604.
- [10] CHENG Z S, GAO Z, MOAN T. Wave load effect analysis of a floating bridge in a fjord considering inhomogeneous wave conditions[J]. Engineering Structures, 2018, 163: 197-214.
- [11] SHA Y Y, AMDAHL J, AALBERG A, et al. Numerical investigations of the dynamic response of a floating bridge under environmental loadings[J]. Ships and Offshore Structures, 2018, 13(1):113-126.
- [12] VIUFF T, XIANG X, LEIRA B J, et al. Software-to-software comparison of end-anchored floating bridge global analysis[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(5): 04020022.
- [13] XIANG S, CHENG B, ZHANG F Y, et al. An improved time domain approach for analysis of floating bridges based on dynamic finite element method and state-space model[J]. China Ocean Engineering, 2022, 36(5):682-696.
- [14] XIANG S, CHENG B, TANG M, et al. Effects of spatial inhomogeneity of wave excitations on structural behaviors of multi-span floating bridges[J]. Ocean Engineering, 2022, 243:110340.
- [15] XU Y W, ØISETH O, MOAN T, et al. Prediction of long-term extreme load effects due to wave and wind actions for cable-supported bridges with floating pylons[J]. Engineering Structures, 2018, 172:321-333.
- [16] WANG J G, CHEYNET E, SNÆBJÖRNSSON J Þ, et al. Coupled aerodynamic and hydrodynamic response of a long span bridge suspended from floating towers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 177:19-31.
- [17] WEI K, ZHANG F, ZHANG M J, et al. Influence of the sag-to-span ratio on the dynamic response of a long-span bridge suspended from floating towers under wave and wind loads[J]. Ships and Offshore Structures, 2022, 17(5): 1023-1041.
- [18] 魏凯,张枫,廖翔,等.张力腿基础刚度对大跨浮式悬索桥风-浪动力响应的影响[J].土木工程学报,2022,55(6):47-61,101.
- WEI Kai, ZHANG Feng, LIAO Xiang, et al. Effect of tension leg foundation stiffness on dynamic responses of a long-span floating suspension bridge under wind and wave loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(6):47-61,101.
- [19] CANTERO D, RØNNQUIST A, NAESS A. Tension during parametric excitation in submerged vertical taut tethers[J]. Applied Ocean Research, 2017, 65:279-289.
- [20] DAI J, LEIRA B J, MOAN T, et al. Inhomogeneous wave load effects on a long, straight and side-anchored floating pontoon bridge[J]. Marine Structures, 2020, 72:102763.
- [21] Washington State Department of Transportation. SR520 Floating Bridge and landings project-building the world's longest floating bridge[EB/OL], 2017.