



漂浮联通未来

——离岸风电及挪威浮式吊桥浮式基础带来的启示

文/蔡俊镡

海洋占全球面积约70%，海域离岸风电成为重要再生能源之一。离岸风电基础依海床深度，可分为固定式基础和浮式基础。

固定式基础适用于水深小于50m，有单桩式（Mono Pile）及套管式（Jacket）两种形式。浮式基础则适用于水深大于50m区域，由浮动平台、系缆系统与锚碇基础组成，有半浮式平台（Semi-submersible）、张力脚平台（Tension Leg Platform, TLP）、柱状浮筒（Spar Buoy）等三种型式，原本应用于石油天然气钻井平台，全球海洋面积92%水深超过200m，浮式基础有其发展潜能。

挪威政府E39公路长达1100km，沿线共有8处跨海渡轮区，拟花费250亿美元兴建跨海峡桥梁，达成全线免渡轮计划（Ferry Free E39）。但在某些区域海峡宽达5km，海床深达1.5km，目前跨海桥梁桩基施工纪录约100m，长跨径跨海大桥需考虑用浮式吊桥。

浮式基础较固定式基础的优点是易于施工安装，不需要大型工作船机，不受海床土壤地质条件限制，在陆地制造后可以随时拖拉至海域工址锚碇。半浮式平台可以在岸边码头组装，易于维修，但焊接技术高，水中锚碇采用悬链式铁链，需额外配置动态平衡系统及主动舱压水系统以强化其稳定性。张力脚平台不需额外配置动态平衡系统及主动舱压水系统，平台成本相对较半浮式低，锚碇采用垂直式预应力钢键，锚碇钢键长期处于高张力，及周遭海流引致的反复应力，易产生金属疲劳的问题。柱状浮筒锚碇采用悬链式铁链，不需额外配置动态平衡系统及主动舱压水系统，但结构体相较前两种更为巨大，无法在岸边码头组装，发生故障也无法拖回岸边维修。

离岸风机设计寿命约20-25年，跨海桥梁设计寿命约50-150年，浮式基础设计考虑结构自重、车辆载重（桥梁）、风、水位、波浪、海流、海啸、地震、台风、船舶撞击力、海生物附着及浮力等载重。设计应检讨结构基本振动与其他风、风浪产生的互制效应，是否产生共振及疲劳的问题，并能承受极限载重的安全强度及稳定性要求。浮式基础分析设计较固定式基础困难，除结构安全强度外，须特别考虑平台定位、锚碇基础及漂动稳定。浮式平台6个自由度包含位移（surge, sway, heave）及旋转（pitch, yaw, roll）运动，类似船舶分析，并考虑安装、运输、运转、极端载重等稳定要求，动态分析及结构非线性行为。张力脚平台钢键采预应力式，受到波浪、海流及海生物附着，另需考虑水动力疲劳的问题。

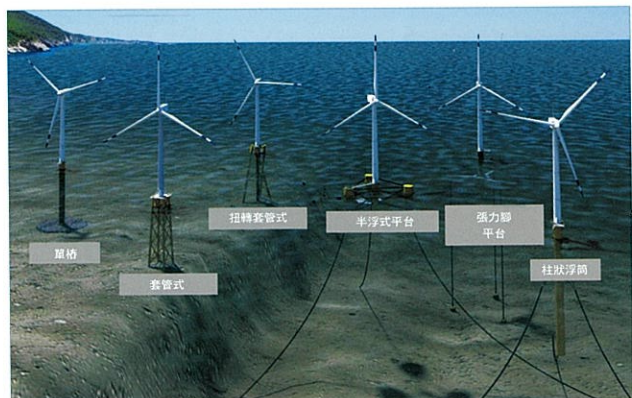


图1 离岸风机固定式及浮式基础示意图
(参考美国国家再生能源试验室)

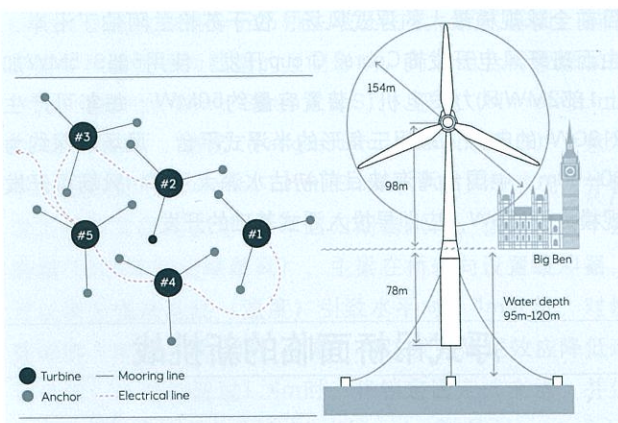


图2 Hywind Scotland 浮筒式平台(参考equinor官方网站)



图3 Kincardine半浮式平台(参考windtaiwan官方网站)

加快浮式风机的研发进程

离岸风机由浅水区固定式基础发展至深水区浮式基础，更能扩大开发风场。浮式风机可以先在岸上组装完成，再拖往外海放置，较固定式基础可以节省海上施工与组装时间。

浮式风机的发展程序须先进行示范风机计划，借由实测数据以验证设计分析程序。2001年Hywind计划取得概念模型专利，2009年挪威国家石油公司Statoil在挪威安装全球首座全尺寸实体浮式风机测试机组，装置容量2.3MW，平台采用SPAR浮筒式，风场水深约为220m。2017年，Statoil在苏格兰彼得黑德外海的Hywind Scotland，装置容量30MW，使用5部6MW风力发电机，浮式平台采用SPAR浮筒式，风场水深约为95~120m。2021年完工的Kincardine为

目前全球规模最大的浮式风场，位于苏格兰阿伯丁沿岸，由西班牙风电开发商Cobra Group开发，使用5部9.5MW加上1部2MW风力发电机，装置容量约50MW，每年可产生218GWh的电力，采用三角形的半浮式平台，风场水深约为60—80m。中国台湾海峡目前初估水深大于50m风场可开发规模大于10GW，应尽早投入浮式基础的开发。

浮式吊桥面临的新挑战

浮式桥梁由小而大，从跨越湖泊的短跨径浮式梁桥，发展到跨越海峡的长跨径浮式斜张桥及吊桥，实现了在深海床建造跨海峡大桥的可行性。

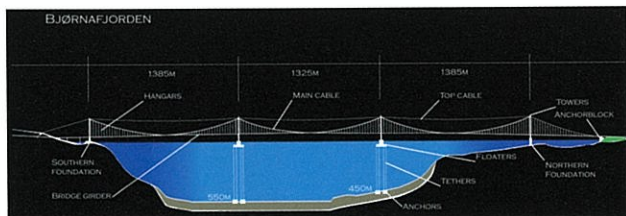
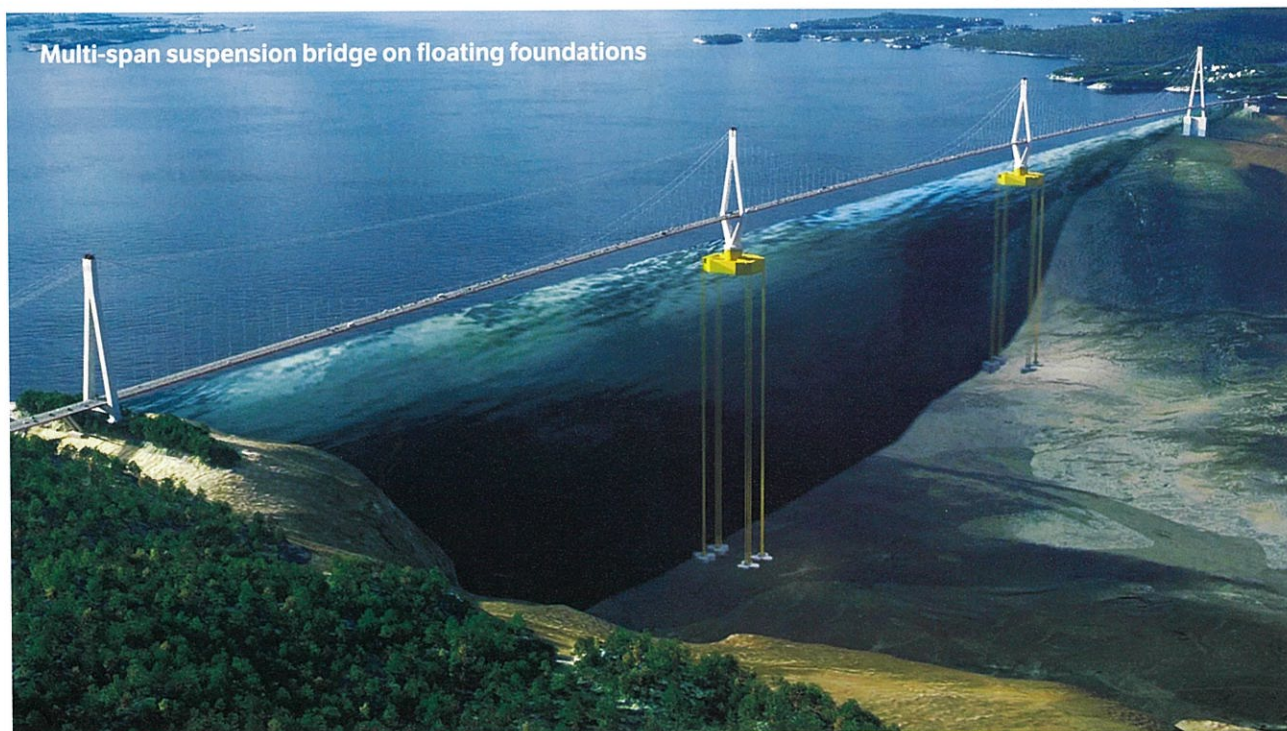


图4 浮式吊桥
(参考Multi-span Suspension Bridge
on Floating Foundation, NPRA, 2018)

全世界目前最长浮桥美国西雅图Evergreen Point Floating Bridge，为浮式梁桥，全长2350m。挪威Bjørnafjord峡湾宽达5km，主跨径无法以单跨跨越，海床深达550m，挪威公共道路管理部门(The Norwegian Road Public Administration, NPRA)自2011年进行可行性研究，以浮式吊桥方案跨越深海床。2015年提出连续三跨浮式吊桥，跨径布置为(1385+1385+1385)m，2018年修改为1385+1325+1385m，桥宽30.6m，流线型箱梁深3.92m，桥下通航净空45m，4座主塔顶端并串联主缆索增加抗风稳定。海床地质为海洋黏土层，深海区配置两座浮式基础，深度分别为550m、450m，其他浅水区为固定式基础。浮式桥塔基础采用张力脚平台，锚碇钢键永远保持垂直及平行在初始平台的位置，对于偏摆(yaw)耦合波浪影响仍能维持顶端及底部钢键的距离，钢键无张力减少问题，且顶端漂浮物受到波浪作用，无俯仰(pitch)运动。每座桥塔张力脚平台由4—6处锚碇钢键固定，包含三部分：钢键顶端连接器、钢键、钢键底部锚碇区。底部海床锚碇区为抗钢键拉力，采取负压式沉箱基桩(suction piles)结合重力式基础。每处锚碇配置多根钢键，便于维修时逐根更换维持安全，并为维持每根钢键预力状态，可以借着长度调整节点(Length adjustment joint, LAJ)长度。

图5 浮式吊桥(参考youtube视频)



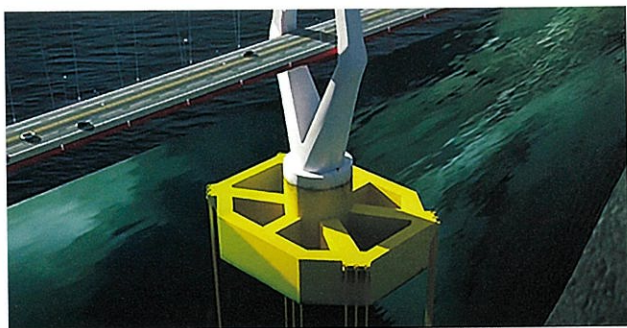


图6 浮式吊桥基础(参考youtube视频)

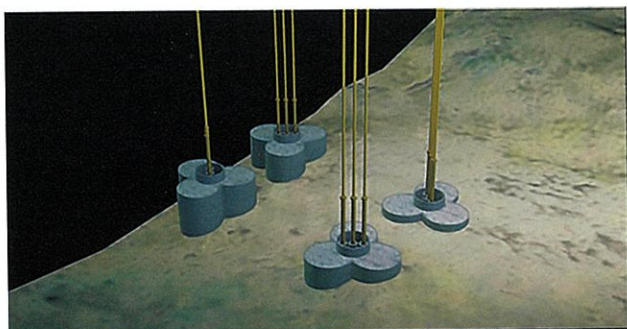


图7 浮式吊桥基础钢键锚碇区(参考youtube视频)

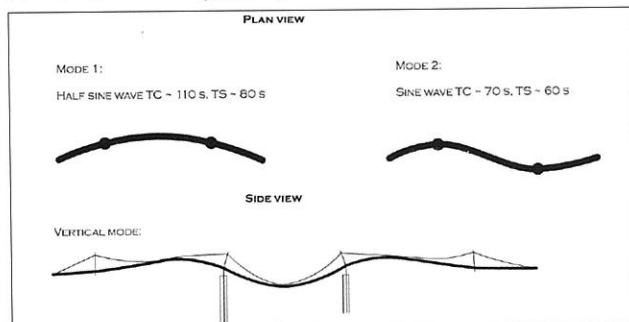


图8 浮式吊桥基本振动形态
(参考Multi-span Suspension Bridge
on Floating Foundation, NPRA, 2016)

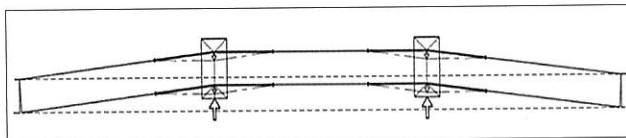


图9 浮式吊桥基础沿桥轴的横向变位
(参考Veie J. & Holtberget S.H.)

浮式桥梁基础分析设计比浮式风机复杂, 浮式风机为单一个体, 而浮式桥梁为连续多跨结构, 且须确保桥面行车安全。最大环境载重考虑风及浪(100年回归期), 海中段结构采用水动力(hydrodynamic)分析方法, 考虑波浪作用的影响及确认其稳定性。结构分析采用商用程序(如Abaqus、USFOS、SIMA、SOFiStik等)建立3D数值模型,

以几何非线性数值分析吊桥主塔及主梁、浮式基础、锚碇钢键等构件受不同载重的互制影响。荷载组合需考虑服务(Serviceability Limit States, SLS)、极限(Ultimate Limit States, ULS)、疲劳(Fatigue Limit Stated, FLS)、意外事故及受损(Accidental Limit States, ALS)等情况, 并确保正常情况结构安全(1年回归期暴风), 极端气候不会坍塌(100年回归期暴风)。主梁在桥轴向设置缓冲器, 可以承受慢速运动(温度)引致水平向1.4m变位, 对快速运动(车辆、风、浪、地震)可以发挥阻尼效应降低运动变位; 当变位超过1.4m时, 将锁定固定式支承, 并使每个桥塔承受水平力约60MN (Veie J. & Holtberget S.H, 2015)。

浮式吊桥基础面临设计新挑战为预测结构动态行为, 包含下部结构(浮式基础及水下系泊设施)与上部结构(桥塔及主梁)的结构与流体复杂的互制行为, 水动力(hydrodynamic)及气动力(aerodynamic)模拟是一个重要课题。流体及结构互制动态仿真包含水弹力、气弹力及非线性结构行为仿真, 可以采取频率域(概率)或时域(确定性)进行动力分析。频率域分析优点较省时间, 缺点对非线性及短暂反应需要提供非线性方程式进行解析; 时域分析优点可精确仿真所有非线性模式, 缺点为分析时间较长。结构分析特别观察结构在强风大浪下的稳定性, 预测严苛环境下极端动态反应, 确保维持桥梁及行车稳定, 当桥塔振动时激发主梁的变位, 须限制桥塔倾斜动态反应。分析流程是首先建立整体模型, 计算水平及垂直向结构基本振态, 考虑规则及非规则波浪运动效应, 并考虑风、风浪的个别作用影响。风力动态分析考虑100年回归期历时纪录, 并考虑不同桥塔承受风、风浪及涌浪动态载重的多支承历时效应。浮式基础采用张力脚平台在北海已验证可承受浪高20m, 在墨西哥湾可承受飓风吹袭(American Society of Mechanical, 2004)。在1年回归期暴风服务载重情况下, 沿桥轴的横向容许变位控制在1/200内, 锚碇钢键顶端侧向水平位移约21m。

浮式基础可以为深海床设置离岸风机及跨海桥梁提供可行的方案, 目前商用离岸风机浮式基础采用浮筒式及半浮式平台, 解决离岸风机水深超过50m设置难题, 扩大了离岸风场设置范围, 增加再生能源的开发。挪威提出创新浮式吊桥构想, 解决深海床桥梁基础的配置问题。浮式基础采用张力脚平台, 经评估是可行性方案, 只有在极端气候下(如台风、海啸、地震等)需考虑桥梁的安全性及稳定性, 并制定运营阶段暂停通车的封桥标准。■

编辑: 裴小吟