

本版内容由《工程新闻记录》杂志（ENR）提供，《建筑时报》编译，版权所有，未经ENR的书面同意，不得以任何形式整体或部分出版或转载。

本专刊内容转载自美国《工程新闻记录》

第 167 期

ENREngineering News-Record

美国西雅图水族馆设计方案让建筑商绞尽脑汁

作者：Nadine M. Post

CMC钢筋制造安装公司的运营经理帕特里克·内申将5万平方英尺（约4645平方米）西雅图水族馆主水箱的钢筋工程描述为一个“怪物”。在他看来，这就像“在高尔夫球上绑扎496吨重的钢筋”。实际上，这次施工更像是编织一个巨大的“钢筐”。工人不得不费力地靠双手为35万加仑容量的水箱双曲面和倾斜混凝土墙穿插钢筋，一次一根钢筋，为41英尺（约12.5米）高的“钢筐”创建密集的网格。

内申表示，“珊瑚峡谷”水箱的施工远远超出了CMC的经验范围。但这并没有难倒他。

他说：“我从一开始就很兴奋。”尽管如此，内申表示，当他第一次看到水箱的概念设计时，他发出一声轻微的咒骂，因为几乎每个钢筋都必须弯曲到规定的半径。

据实施混凝土工程的总承包商特纳建筑公司称，2英尺（约0.6米）厚的“珊瑚峡谷”墙壁有6层钢筋，每立方码（约0.76立方米）混凝土的钢筋量是位于地震多发的西雅图典型高层建筑核心筒的三倍多。

钢筋网格——大部分需要预弯曲，每个都是不相同的，并在空间中安排在不同的方向——如此令人生畏，以致特纳创建了一个3D数字模型来描述和定位每一根钢筋。钢筋非常密集，为了透过钢筋，泵入墙体模板的混凝土混合物不仅必须是自固化的，还必须具有不含骨料的泥浆般的稠度。

内申并不是唯一一个被该项目震撼的建筑老手。“‘珊瑚峡谷’是迄今为止我们做过的最复杂的混凝土建筑，”特纳的运营经理布莱斯·麦克道尔说。至少在去年初，也就是水箱铸造后的四个月，特纳建造了海洋馆27600加仑容量的“群岛”水箱。麦克道尔说，复杂的几何坐标——三个无定形的连体混凝土水箱——使得“群岛”可能是最具挑战性的水箱。特纳使用喷射混凝土建造“群岛”。

在59号码头和60号码头现有水族馆的街对面，两层高的海洋馆由LMN建筑师事务所设计，带有一个屋顶公园，它坐落在老阿拉斯加路的右边，一个面积38000平方英尺（约3530平方米）的城市地带。虽然是一个独立的开发项目，但这座海洋馆被视为该市耗资10亿多美元翻新普吉特湾海滨的核心，价值1.6亿美元。这个名为西雅图海滨的基础设施项目将于2025年完工。这是对拆除双层阿拉斯加高架桥的回应，该高架桥连接着99号国道，直到2019年2月SR99隧道开通时被拆除。

海洋馆的建设一直是个难题。特纳的建筑主管斯图尔特·基比说，他从未有过如此伤脑筋的工作。“这一点儿都不正常，也不容易，”基比说，“如果我们把它建在爱荷华州的玉米地里，这个建筑会很困难。”他补充道。但是，在地震带的填土场，城市滨水区的环境建造一栋零边界线的建筑，就不仅仅是非常困难的事情了。“我觉得没有一个人知道这件事将会有多复杂，”基比说。

马格努松·克萊門西克联合公司（MKA）退休的高级负责人杰伊·泰勒说，扩建的地点对游客来说是“绝对正确的”，因为它靠近现有的水族馆。然而，他补充说，高度可液化的土壤、污染物和一座有数百年历史的滨水码头下的未标记的地下木材残余，使其成为一个“绝对错误的位置”去建造一个35万加仑容量的水箱。

“很难找到比这更糟糕的地方了，”泰勒说。他是一位经验丰富的设计师，包括最近在纽约世贸中心开放的佩雷尔曼表演艺术中心，都是他的作品。这座50英尺（15.24米）高的海洋馆被强行塞入一个没有中转或搁置的空间。更糟糕的是，西雅图有两个同时进行的滨水项目触及水族馆所在地——南北阿拉斯加路从展馆的西侧到东侧重新调整，以及观景人行桥，它位于重新调整的阿拉斯加路上，连接通往海滨的山顶上的标志性建筑派克市场。交织在一起的三个项目意味着大量的协调工作，甚至是合作施工。在施工期间，观景步道支撑穿过海洋馆的结构，并由海洋馆的基础支撑。

“我们知道建设中会有一些挑战，”西雅图水族馆项目金融主任苏珊·布勒迪克说，她是该市所有水族馆的经营者，海洋展品的所有者和海洋馆的开发商。

但没有人能预测到新冠肺炎疫情的影响、材料和燃料成本的上涨，以及从2021年12月开始的为期五个月的混凝土工人罢工。



施工现场

“我们刚脱离疫情，就遭遇了罢工，”西雅图滨水区和市政项目办公室主任安吉拉·布雷迪说。她说，罢工造成了阿拉斯加道路重新规划项目的延误和资金问题。

道路延误影响了展馆的进度。特纳原本计划利用展馆西侧腾出的狭长地带来支撑主水箱的西墙。

特纳不得不停止施工，重新组织安排，并建立了一个长途运输保护平台，这是水箱的支撑和中转地。这不仅花费了100万美元，还使展馆进度推迟了一年。基比说，这也是特纳的最高保证金从9800万美元增加到1.13亿美元的原因之一。

展馆的建造应该在去年春天完成。原定于去年夏季开放。“（当时的环境）我们可以继续干下去，这太不容易了。”布雷迪说。水族馆本身在疫情期间关闭了206天。

强强联合

为了攻克这个难关，设计团队和特纳，甚至特纳的下属单位，在设计阶段集思广益，以削减成本，提高模板和钢筋的制作和建造能力。基比说，虽然合同义务是约定俗成的，但就团队行为而言，项目类似于渐进的设计-建造方式。MKA的高级设计工程师汉娜·A·波诺托将这些行为描述为类似于项目一体化交付，尤其是在设计和深化设计阶段。

波诺托说：“主水箱的协调和建造只能由特纳指出一个值得信赖的伙伴来完成。”他指出，特纳和MKA已经一起合作了50年。

合作的核心是LMN的3D参数化设计模型。基比说，LMN的主水箱模型是写在合同文件中，还有2D的图纸。特纳直接使用该模型作为其建筑信息模型的基础，而不是像通常那样，使用2D图纸从头开始构建模型。

在价值评估工程中，LMN和特纳取消了位于地下水位以下的地下室，节省了300多万美元。相反，LMN把海洋生物的生命支持系统藏在紧挨着北面的广场下面。

LMN还重新构思了屋顶公园和观景步道，作为一个无缝衔接的走道，在海滨到达山顶。“我们与观景步道建筑设计师米勒·赫尔合作开发了一个设计，两个项目之间的界限很模糊，”LMN合伙人马克·雷丁顿说。

这使得两个项目都有相同的景观设计师——詹姆士事务所，以及土木工程师——MKA。

这促成另一项工作的简化。MKA最初的基础概念设计是由深螺旋灌注桩支撑的基础。根据基础分包商的反馈，特纳建议采用一种基层来代替成本较低的深层土壤混合柱。基层表面兼作建筑物的底层。

在另一个妙招中，为降低主水箱模板的成本，LMN把特纳介绍给了雅尼克工业制造公司，这是一家位于西雅图北部的制造商，为飞机、船只、风力涡轮机和其他奇怪的形状制

造零件、工具和模具。

LMN合伙人斯科特·克劳福德说：“我们已经和雅尼克合作了将近10年，讨论如何将他们的工具和流程引入施工领域。他们最终使用我们的3D数字模型为珊瑚峡谷制造了所有的（泡沫板），这节省了一大笔钱。”他补充道。

MKA-特纳的其他对话导致了两个关键的变化，使钢筋更具建设性。在特纳和CMC的建议下，主水箱的钢筋从直径较大的9号和11号钢筋——几乎不可能在现场弯曲以满足水箱的各种曲率——变为更小、更容易弯曲的6号钢筋，9号钢筋被替代为两个6号钢筋，11号钢筋被替代为三个6号钢筋。MKA还允许钢筋安装在任何倾斜方向，只要在钢筋网格中，大部分的钢筋保持垂直于它们的交叉钢筋。

同一片海洋，同一个未来

该项目是自2007年以来西雅图水族馆首次大规模扩建。非营利组织西雅图水族馆协会耗资1.6亿美元的“同一片海洋，同一个未来”活动将持续一年。迄今为止，该集团已经实现了8000万美元私人资金目标的89%和8000万美元公共资金目标的72%。

鱼必须得游泳，尤其是转弯——这可能是LMN的口头禅，它为展览的3500种热带海洋生物（动物和植物）进行全方位的设计。主水箱的双曲面形状是基于鲨鱼和鲑鱼的转弯半径和游泳习惯。

展馆将容纳鲜活的展品，包括珊瑚礁和红树林；具备后勤职能；还有一个圆形露天剧场。建筑南入口上方的悬挑的圆形视窗将允许公众无需购票即可观看“珊瑚峡谷”生态系统展览。“我们想吸引每年数百万路过西雅图的游客，”雷丁顿说。

海洋馆也被设计成未来更可持续发展的水族馆的典范。“总体而言，水族馆项目越来越关注在倡导保护和应对气候变化方面的作用，”雷丁顿说。据PAE咨询工程公司称，与典型的水族馆相比，该项目可减少70%的能源消耗和95%的总体运营碳排放。

主水箱的混凝土结构还支撑着从东向西延伸的钢梁架。他们依次将建筑的外墙框架悬挂在水箱的西侧。

PAE的主管兼首席创新官艾伦·蒙彼利埃表示，展馆不使用化石燃料，这在2015年PAE开始实施该项目时是一个相当“大胆的想法”。“现在，这是城市法规规定的。”

阿杜拉集团负责人克里斯·埃克尔斯说，普吉特湾是展览的主要补给水源，这“大大减少了饮用水的用量”。阿杜拉集团负责设计海洋生物的生命支持系统。

蒙彼利埃说，PAE和阿杜拉首次合作开发了一种使用空气源热泵的能量回收系统，可以“非常有效地”从冷冻和加热热水回路中回收和转移热量，从而进一步节约能源。

“我们的协调就像是展馆的热交换

器，”埃克尔斯说。“我们在咸水边，而PAE在淡水边。”

当建筑物的某些部分需要冷却，展品需要加热时，空气源热泵可以将热量从冷却回路转移到加热热水回路。

此外，水热交换器将从排放的舱水中回收热量，并用于加热来自普吉特湾的补充海水。

该团队的目标是获得LEED黄金认证和国际未来生活研究所的零碳认证。该项目还减少了隐含碳排放：结构和表皮的全局变暖潜能值（千克二氧化碳当量）减少了32%，混凝土的全球增温潜势（千克二氧化碳当量）减少了38%。

可持续设计

MKA设计了这座建筑，以41英尺（约12.5米）高的主水箱为中心，长98英尺（约29.87米），宽55英尺（约16.76米）。水箱的厚度和加固是由水的载荷、地震因素和地震载荷引起的晃动决定的。

水箱结构能够支撑位于其上的扭曲的钢梁架。横梁从水箱壁向西伸出，支撑着建筑的西墙。水箱还支撑着二层钢和混凝土框架以及一个混凝土框架夹层。

MKA的泰勒说：“从整体来看，我们几乎不费力地获得了屋顶的支撑。”刚好在水面上方的环梁增加了墙壁的硬度。除了在东侧有一个30英尺（9.14米）的缺口外，环梁220英尺（67.1米）环绕着水箱一周。

由于其规模和刚度，主水箱承担了建筑的绝大部分横向载荷。从侧面来看，该建筑还由主水箱、电梯和楼梯核心处的钢筋混凝土剪力墙支撑。

水箱长边上的钢筋混凝土锥形“翼”墙向南伸出23英尺（约7米），向北伸出13英尺（约3.96米）。

南入口处还有一个32英尺（约9.75米）长的悬挑，包含主水箱直径18英尺（约5.49米）的视窗，让人可以抬头看到海洋生物。

屋顶公园由许多屋顶钢梁支撑。它们40英寸（1.02米）深，80英尺（24.38米）长，预应力空心混凝土板之间跨度约20英尺（约6.1米）。

在另一个区，群岛区北部圆形剧场上方1英尺（0.3米）深的结构板是海洋馆的一部分；然而，完成的摊铺立面是观景步道的结构。

MKA的波诺托说，14英寸（35.56厘米）的厚喷射混凝土墙通过夹层楼板框架中的接缝与建筑的其余部分抗震隔离，因为墙壁“非常坚硬”，会消解部分的地震力。“通过隔离水箱结构，我们可以降低壁厚，”她补充道。

LMN于2016年夏天开始了该项目，并于2020年秋季发布了施工计划，那年12月开始施工。

海洋馆的设计比大多数水族馆更具可持续性。

数字建模

面对1000根土壤混合柱，大多数

直径为3英尺（约0.9米），泰坦挖掘公司的施工人员挖掘了3英尺（约0.9米）深的土壤，以创建一个水平的“浴缸”，使高大的钻机能够在不被固定的情况下行驶。

挖掘发现了码头的遗迹——是一个三到四条轨道宽的铁路栈桥。特纳的项目主管戴尔·R·英格尔斯说：“我们挖出了几百根木桩。这些意外导致施工推迟了大约一周。”

凯勒钻井公司设计并安装了22英尺（6.7米）至28英尺（8.53米）长的柱子，在现场的配料车间进行混合。特纳铸造了4英尺（1.22米）厚的基层，此前施工人员在地下铺设了电线、水管和生命支持系统管道。井点降水是必要的。

与此同时，特纳通过对模板进行3D建模，然后与模板供应商分享，为主水箱工程做准备。通过一个模型，特纳和雅尼克为260个易碎泡沫插入物以及所有相关的连接孔设计制作了一个程序，规格20英尺（6.1米）×8英尺（2.4米），每个都是不一样的。

每个聚苯乙烯板都由4英尺（1.22米）×3英尺（0.9米）×8英尺（2.4米）的泡沫块粘合在一起，并使用特纳的3D模型信息雕刻成最终形状。雅尼克使用计算机数控机床制造泡沫板。雅尼克的首席项目经理埃里克·詹博尔说，这个操作相当于“雕刻一个巨大的3D拼图”。

通过佩里模板系统公司，雅尼克将其面板粘合到金属板上。詹博尔说，严格的误差和与金属的接口是这项工作最困难的一面。

在制造过程中，雅尼克在每个金属板的背面贴上标签，以便在现场进行正确的定位。误差非常严格，以最大限度地减少现场堆叠误差的影响，如果误差叠加，可能会破坏水箱的形状和整体性。

金属模板被运送到普吉特湾涂料公司，在那里，泡沫面板经过喷涂，以保护它们免受钢筋安装的损坏。然后，它们被储存在附近的仓库中，以



效果图

便及时运送到施工现场。

詹博尔说，在大多数情况下，现场安装都很顺利。但也有调整，特别是添加了3D模型中缺失的玻璃纤维杆。

施工进度顺利

首先安装外部模板。特纳的麦克道尔说，倾斜的模板必须向外支撑，因为当混凝土流动时，它会对模板施加压力，导致它们移动甚至被踢出去。另外，泡沫板会浮起来。“框架结构必须被锁定，”他补充道。

麦克道尔说，在泵送过程中，一个没有固定的翼墙模板被顶起，“我们损失了10立方码（约7.65立方米）的混凝土”。除此之外，抽水还算顺利。

钢筋施工排在模板之后。在冰屋形状的主水箱北端，墙壁更像一个石板，所以只需要底部模板。大约1500平方英尺（约139平方米），或珊瑚峡谷表面积的7%有单面更传统的模板。麦克道尔说，剩下的就是双面模板系统。

CMC的内申表示，如果没有特纳的3D数字钢筋模型，整个工作就不可能完成。

内申拒绝透露CMC合同额，只是说这项工作“非常昂贵”，比大多数工作需要更多的时间和脑力。

从设计阶段开始，就有钢筋施工会议，特纳和MKA的波诺托讨论如何进行。

“通常钢筋工人不会过早介入，也不会去见结构工程师，”内申说。

在预制弯曲钢筋之前，CMC为最拥挤的区域制作了一个20英尺（6.1米）宽×30英尺（9.14米）高的模板实体模型。

墙壁有六层钢筋。内申说，水箱窗户周围的是最难安装的。所有钢筋都在平面图上进行了标记和标注。仿佛是按照一种细致的缝纫模式，工人们在放置钢筋后爬上了钢筋，开始在北面水箱圆顶底部的倾斜铆钉处安装铁条。

工人需要手持液压折弯机和台式折弯机去弯曲钢筋。“我们对这个装置非常满意，”内申说。

施工人员在钢筋工程后安装了模板，形成了一个夹层来容纳混凝土。10000磅/平方英寸的主水箱混凝土比普通混凝土的密度高33倍。特纳制作了模型来计算填充率，以控制流体静压，确保泡沫板在放置过程中能够保持正确的形状，并获得LMN的批准。

主水箱是分三层铸造的。第一层也是最大的一次浇筑，施工始于2022年11月12日凌晨3点，耗时23个小时，为了将墙提升到大约30英尺（约9.14米）的水位线。680立方码（约520立方米）混凝土被连续泵送以避免冷接缝。水箱的其余部分是在两个不同的时间铸造的。

基比说，铸造和随后的拆模是具有里程碑意义的，但“最大的胜利”发生在2023年6月，当时装满三天水的水箱通过了水密性测试。这时，他惊讶道：“我们的计划成功了！”

回顾这个项目，麦克道尔说，“团队中没有一个人有损己主义。如果他们这样，这个项目就不会成功。”

“这个项目看起来更难、更复杂、压力更大，但回报更大。”他补充道。

工人们目前正在安装由Thinc设计公司设计的鱼缸展品。水族馆将在里面注入盐水。

人们的期待越来越强烈，尤其是这个工程经历了如此多的风雨。

“团队肩负并解决了所有问题，”西雅图水族馆的布勒迪克说。“当你去和工人们交谈时，他们脸上都带着微笑。”