

某航海酒店自由曲面数值仿真 与施工技术研究

高术森¹, 张龙生¹, 陆日超¹, 张兆龙²

(1. 广州市设计院集团有限公司, 广东 广州 510620;

2. 南方鼎元资产运营有限责任公司, 广东 广州 510623)

摘要: 针对自由曲面实现过程中的自由曲面的表达、设计方案中的个体特殊性及清水混凝土施工重点、难点问题, 以某超限高层航海酒店入口自由曲面海螺雨棚及自由曲面象牙屋面进行数值仿真分析, 提出基于 Rhino 软件及 BIM 正向设计的自由曲面成形方式; 并提出对自由曲面分析设计中存在的个体特殊性的解决思路, 即重点考虑传力路径, 进而找出控制截面进行设计, 进行相关变形分析; 对清水混凝土施工从材料选取, 模板深化设计与制作, 浇筑质量, 细节处理等方面进行介绍。该研究满足建筑物自由曲面结构的安全及建筑效果的完美实现, 可为设计部门提供参考。

关键词: 自由曲面; 数值仿真; 应力迹线; BIM 正向设计; 清水混凝土

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0029-07

Free-form Surface Numerical Simulation and Construction Technology of a Navigation Hotel

GAO Shusen¹, ZHANG Longsheng¹, LU Richao¹, ZHANG Zhaolong²

(1. Guangzhou Design Institute, Guangzhou, Guangdong 510620, China;

2. Southern Dingyuan Assets Operation Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510623, China)

Abstract: With the development of computer technology and architects' pursuit of architectural aesthetics, more and more free-form surfaces are used in practical engineering, in which the expression of free-form surfaces, the analysis of individual particularity of design and the construction difficulties of fair-faced concrete are three problems to be solved in the realization of free-form surface. The conch canopy with free-form surface and ivory roof with free-form surface at the entrance of a high-rise navigation hotel were analyzed by numerical simulation considering the individual particularity of free-form surface analysis, this paper proposed the analysis of force transmission path, then find out the control section to design the section as well as the relevant deformation analysis. The selection of materials, the deepening design and manufacture of formwork, the quality of pouring and the detail treatment in fair-faced concrete construction were finally introduced.

Keywords: free-form surfaces; numerical simulation; stress trace; BIM forward design; plain concrete

自由曲面空间结构具有丰富的建筑表现力和强烈的视觉冲击效果, 越来越受到建筑师的青睐, 近年来得到飞速发展和广泛应用^[1]。此类结构设计及施工难度较大, 目前主要存在以下三个关键问题: 一是难以根据几何特征对自由曲面进行归类, 基于几何特征的参数化建模方式难以实现, 影响设计效率;

二是自由曲面结构的稳定性, 应力分析及设计存在个体特殊性; 三是自由曲面施工模板不规则, 深化难度极大, 实际完成效果不如预期, 还存在因曲面应力集中及清水混凝土养护等问题引起开裂的风险^[2-3], 以上是工程建设者们必须要面对和思考的实际问题。

以某超限航海酒店的入口异形海螺雨棚及自由曲面象牙屋面为例,进行数值仿真分析,着重对传力路径进行分析,进而找出控制截面进行截面设计,并进行相关变形分析,同时针对自由曲面的表达提出采用数字化技术,打通软件之间的壁垒,连通 Rhino-Revit-PKPM/YJK-CAD,实现 BIM 的正向设计,同时针对施工模板的深化以及清水混凝土施工的关键问题提出要求,为今后类似工程建设积累一定的实践经验。

1 项目概况

某航海酒店总建筑面积 20.4 万 m^2 ,地上建筑面积为 15.5 万 m^2 。项目由一栋高层酒店塔楼和下部 3 层酒店附属配套设施裙楼组成,地下 1 层,地上 26 层,裙楼 3 层。地下 1 层层高 6 m、局部 4.5 m,首层 6.5 m,2 层 7.35 m,3 层 5.3 m,4 层及以上客房层 3.5 m。地下室主要为停车库,首层主要功能为酒店后勤、厨房区域和美食广场、餐厅,2 层主要功能为游客接待大堂和餐厅,4 层主要功能为客房和餐厅及屋顶游乐平台,5 层~26 层功能为客房。本项目存在两处自由曲面结构:入口处雨棚为自由曲面异形海螺造型,屋面为自由曲面象牙造型。建筑效果和剖面分别见图 1、图 2。

本建筑设计使用年限为 50 年,结构安全等级为二级,抗震设防类别丙类。

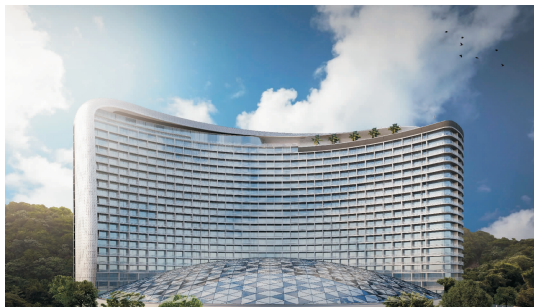


图 1 建筑效果图

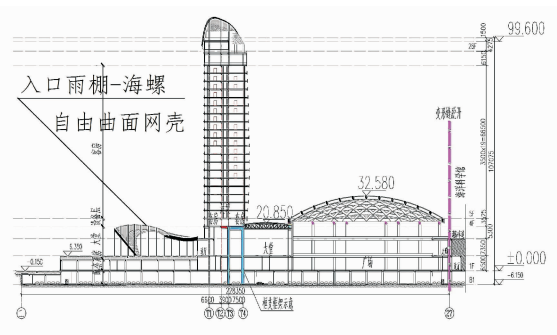


图 2 建筑剖面图

2 结构情况

根据结构平面布置及使用功能要求,采用部分框支混凝土剪力墙结构体系。为满足下部大堂大空间使用功能要求,4 层楼面以下局部取消剪力墙,并于 4 层楼面采用混凝土框架托墙转换,以满足上下两个功能区的使用要求。4 层楼面以上于客房之间布置径向剪力墙。在电梯井以及走廊西侧布置落地剪力墙,提高结构的抗侧和抗扭刚度。剪力墙厚 600 mm~250 mm,柱截面 1100 mm×1100 mm~800 mm×800 mm,混凝土强度等级 C60~C35;转换梁截面 900 mm×1200 mm。

结构属于不超 100 m 的 A 级高度的部分框支剪力墙结构高层建筑,存在 6 项不规则^[4]:扭转不规则及偏心布置,凹凸不规则,楼板不连续,尺寸突变,构件间断和局部穿层柱的其他不规则。针对不规则项进行的分析及对策在相关文献^[5]已有专门介绍,本文不再赘述,重点就自由曲面海螺雨棚,象牙屋面的数值仿真分析与施工关键技术进行研究。

3 入口异形海螺雨棚的数值仿真分析与施工

3.1 异形海螺雨棚基本情况

入口海螺雨棚位于二层酒店入口处,上部支座与三层梁相连,呈海螺状,为自由曲面空间壳体,为本项目的标志性建筑造型之一。平面呈椭圆形,中部设置采光井。海螺雨棚平面尺寸约为 47 m×43 m,海螺示意图如图 2 及图 3(a)所示。入口雨棚拟采用两种可行的结构方案:

方案一:采用钢筋清水混凝土壳,壳厚 600 mm,混凝土材料强度为 C35,如图 3(b)。

方案二:采用型钢主结构梁混凝土板方案,沿雨棚周边以及内部布置型钢构件,壳厚 600 mm,混凝土材料强度为 C35,钢梁材料强度为 Q345,钢梁截面为箱形 300 mm×300 mm×30 mm×30 mm,如图 3(c)。

雨棚分析采用 SAP2000 V19 进行分析,整体采用壳模型,上下支座采用刚接节点。

地面粗糙度类别为 A 类,基本风压 0.85 kN/m^2 ,风荷载体型系数为 1.5,附加恒载 1.3 kN/m^2 ,不上人屋面活载 0.5 kN/m^2 ,分析结果表明,本项目楼板内力控制工况为 1.35D(恒)+0.98L(活)+0.84(W)。

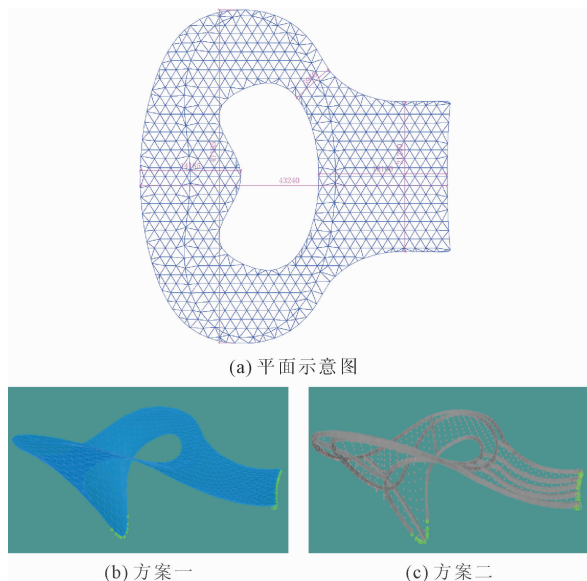


图 3 入口海螺雨棚示意图

3.2 异形海螺雨棚的成形

主要是采用以“形”为主的基于仿生思想和几何变换构造出一种海螺形的自由曲面结构,结构设计师与方案设计师充分沟通,协商调整,确定满足方案要求的最终形状。

该自由曲面的成形和网格划分是基于 Rhino 软件的 Grasshopper 插件实现。采用的非均匀有理 B 样条曲线 (Non-Uniform Rational B-Splines 简称 NURBS),NURBS 曲线是在 B 样条曲线的基础上形成一个 p 次的 B 样条曲线^[6],即:

$$C(u) = \sum_{i=1}^n N_{i,p}(u)P_i \quad (1)$$

式中: $C(u)$ 为以 u 为参数的曲线上的点的直角坐标; $N_{i,p}(u)$ 为定义在 u 方向的 p 次样条基函数; P_i 为曲线上的控制点; u 为方向节点矢量。

通过 B 样条基函数和控制点可以生成 B 样条曲面,一张 $p \times q$ 次的 B 样条曲面表达式如下:

$$S(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)P_{i,j} \quad (2)$$

式中: $S(u,v)$ 为以 u,v 为参数的曲面上的点的直角坐标, $S(u,v) = [x(u,v),y(u,v),z(u,v)]^T$; $N_{i,p}(u)$, $N_{j,q}(v)$ 为定义在 u,v 方向上的 p 次和 q 次 B 样条基函数; $P_{i,j}$ 为曲面上的控制点; u,v 为方向节点矢量。

NURBS 方法是在 B 样条方法基础上引入权因子,可通过 B 样条方法以有理分式的形式表示,得到的 NURBS 曲面和 NURBS 曲线公式如下:

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)} \quad (3)$$

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,p}(u)P_i}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,p}(u)} \quad (4)$$

式中: $w_i, w_{i,j}$ 分别为与控制点 i,ij 对应的权因子。

该自由曲面是先在 Rhino 中根据海螺的外形利用 NURBS 曲线建立出其外形,然后抓取到 Grasshopper 形成 NURBS 曲面,通过调控 u,v 方向节点矢量参数控制网格大小来实现参数化建模,然后烘焙到 Rhino 中,最后导出到 CAD 中进行边界的处理形成一种海螺形状的自由曲面^[7-12],详见图 4。

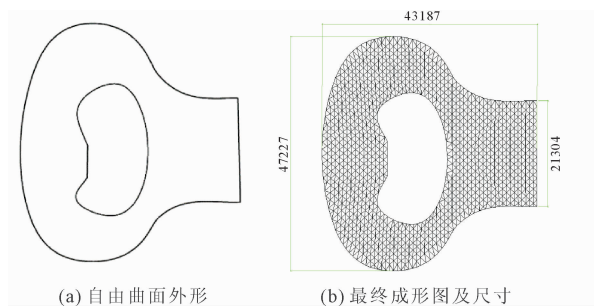


图 4 海螺自由曲面图

3.3 海螺雨棚方案一分析

在控制工况下,空间壳传力路径如图 5 所示,空间板壳主要受压力,压力传力路径主要由两肩部分别向下沿内环传递,直至终于支座处;其中 A、B、C 及 D 区为复杂拉剪扭受力区,为该空间曲面薄弱部位。

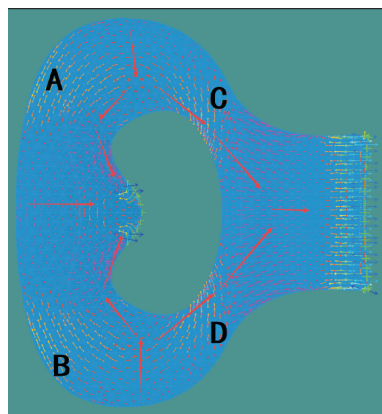


图 5 入口雨棚应力迹线图

控制工况下,板壳分别采用厚 200 mm ~ 600 mm 进行对比分析,拉压应力最大值、最大竖向变形及屈

曲因子计算结果见表 1;随着板厚的增加,板壳拉压应力逐渐减小,且结构整体稳定增强;考虑荷载长期作用影响,根据混凝土规范式(7.2.2.1)^[13]可知,长期挠度限值 $43240/300 = 144$ mm;长期挠度计算结果表明(见图 6,点 1 为变形最大部位):600 mm 厚壳变形可满足规范限值要求,同时整体屈曲因子为 30,大于 2.0 的安全储备,因此最小壳厚取 600 mm。

表 1 不同板厚主要计算指标

板厚/mm	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	控制工况下最大弹性挠度/mm	准永久工况下最大长期挠度/mm	屈曲因子
200	29	91.0	1100	917	2.8
300	28	71.0	550	437	7.3
400	25	60.0	308	274	14.0
500	19	53.7	209	186	21.0
600	15	48.3	165	133	30.0

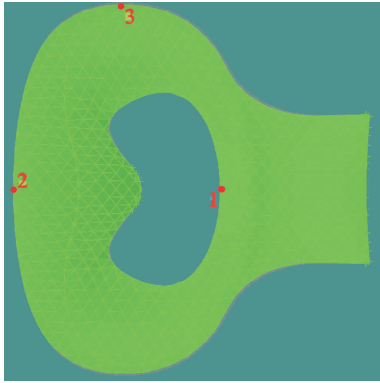


图 6 雨棚变形示意图

在控制工况下,雨棚混凝土壳楼板应力最大值分布如图 7 所示,应力以受拉为正,受压为负;雨棚拉应力沿着整个表面均有分布,在支座处有较大的应力集中,该处需增大配筋率,防止混凝土开裂。

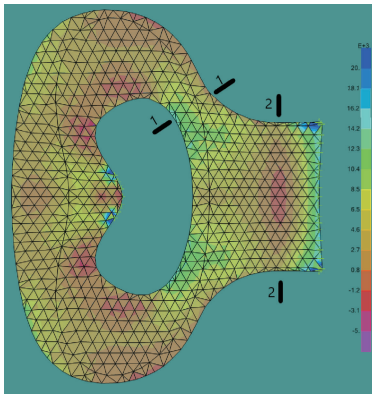


图 7 入口雨棚最大应力图(单位: 10^{-3} MPa)

样图见图 8。

表 2 控制工况下楼板配筋表

剖切面	控制应力组合	截面配筋设计
1-1	顶:5.5 MPa 底:7.2 MPa	计算面积:底部纵筋 $A_s = 3\ 764$ mm^2/m ,三排实配: D22 @ 100 底面以及中间排钢筋 3 801 mm^2/m
2-2	顶:3.5 MPa 底: -0.3 MPa	计算面积:底部纵筋 $A_s = 1\ 972$ mm^2/m ,两排实配: D16 @ 100 底面筋 $A_s = A_s' = 2\ 011$ mm^2/m

注:1-1 剖面与 2-2 剖面位置见应力图。

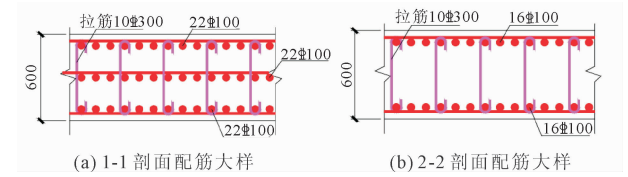


图 8 配筋大样图

3.4 海螺雨棚方案二分析

采用钢筋混凝土壳并沿雨棚周边以及内部布置型钢构件,壳厚 600 mm;控制工况下该方案雨棚混凝土壳楼板应力最大值分布如图 9 所示,应力迹线图如图 10 所示。

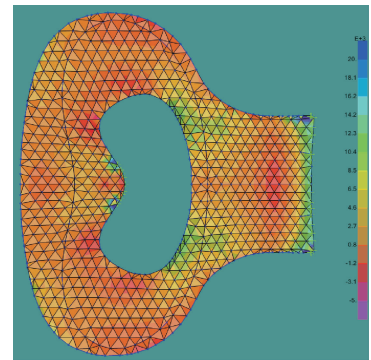


图 9 入口雨棚最大应力图(单位: 10^{-3} MPa)

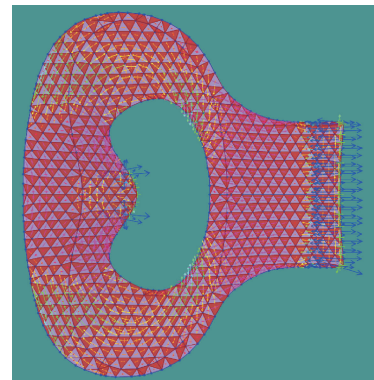


图 10 入口雨棚最大应力迹线图

控制工况下雨棚楼板配筋结果见表 2,配筋大

该方案混凝土壳应力分布与方案一相似,且板壳应力数值大小与方案一相近;压力传力路径主要由两肩部分别向下沿内环传递,直至终于支座处;板厚取 600 mm,该方案整体稳定性及长期挠度满足规范要求,拉压主应力主要有板内型钢承担。

控制工况下雨棚楼板配筋结果见表 3,配筋大样图见图 11。

表 3 控制工况下楼板配筋表

剖切面	控制应力组合	截面配筋设计
1-1	顶:5.7 MPa 底:7.7 MPa	计算面积:底部纵筋 $A_s = 4\ 000\ \text{mm}^2/\text{m}$,三排实配: D25 @ 100 底面以及中间排钢筋 4 909 mm^2/m
2-2	顶:3.8 MPa 底:0.3 MPa	计算面积:底部纵筋 $A_s = 1\ 972\ \text{mm}^2/\text{m}$,两排实配: D16 @ 100 底面筋 $A_s = A_s' = 2\ 011\ \text{mm}^2/\text{m}$

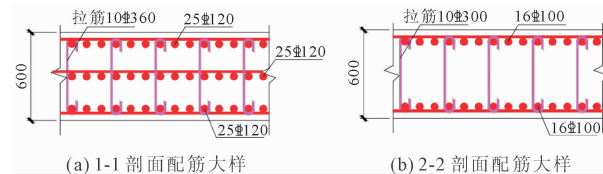


图 11 配筋大样图

3.5 方案优缺点对比

针对自由曲面分析存在个体特殊性的解决思路,上述着重对传力路径进行分析,进而找出控制截面进行截面设计,并进行了相关变形分析。

两种结构方案(方案一混凝土壳方案;方案二型钢主结构梁混凝土板方案)在受力形式,施工难度,完成效果及经济性角度有明显不同。

方案一混凝土壳方案为厚板空间受力体系,板为主要受力构件,板的设计为重点解决问题;施工难点为自由曲面板壳的施工,采用清水混凝土,需特殊模板及施工工艺,成本高,但完成视觉效果好,不需要二次装饰,可满足建筑师设计要求。

方案二型钢主结构梁混凝土板方案,钢梁为主要受力构件,板内应力仍较大,板厚仍需 600 mm,结构自重并未减小;自由曲钢梁为施工难点,需工厂预制生产,需考虑型钢与混凝土界面处理,且增加型钢后造型凸出板面,视觉效果难以满足建筑师设计要求。

综上所述,两种方案从结构角度来说都是可行的方案,但海螺雨棚作为本项目的主入口标志性建筑,造型效果要求高,且体量小对经济性影响不大,各方综合考虑最终选择了无梁的清水混凝土壳方

案。

3.6 清水混凝土自由曲面海螺雨棚的施工

经过与方案建筑师的充分沟通,为保证完成效果,本雨棚决定采用清水混凝土施工。饰面清水混凝土,要求表面颜色基本一致,由有规律排列的对拉螺栓孔眼、明缝、蝉缝、假眼等组合形成的,以自然质感为饰面效果。

清水混凝土的施工效果主要取决于以下四个方面^[14]:

(1) 材料选取的严格控制。采用普通硅酸盐水泥,强度等级不小于 42.5 级,同一单位工程的水泥应为同一厂家生产、同一品种、同强度等级且宜采用同一熟料磨制,颜色均匀的水泥;本项目位于海边潮湿环境,采用非碱性骨料。粗骨料选用强度高、粒径 5 mm ~ 25 mm、连续级配好、颜色均匀、表面洁净的碎石,细骨料选用中砂,细度模数 2.5 ~ 3.4。

(2) 模板制作的精细要求。影响清水混凝土完成效果最重要的是缝的大小及位置,严控模板施工质量,模板与模板之间(蝉缝)采用 1 mm 厚海绵双面胶条;与建筑设计师充分沟通,尽量满足模板的标准化和模数化,对拉螺栓眼开设应严格按照设计图纸及方案要求排列,不允许随意变更螺眼位置。

(3) 高标准要求混凝土的浇筑质量。混凝土浇筑的质量和混凝土透明保护喷漆为清水混凝土施工的关键环节,这两个工序的好坏直接决定了最终清水混凝土墙面的装饰效果,据有效统计,最终效果 60% 取决于混凝土浇筑的质量,40% 取决于后期的透明保护喷涂施工。因此,对于施工方面而言,以高标准、严要求浇筑混凝土,达到清水混凝土施工质量要求是极大的挑战。

(4) 注重细节的处理。对拉螺栓孔眼是清水混凝土表面重要的装饰效果之一,其封堵处理的效果应符合设计的外观质量要求,现场制作专用的螺栓作孔器;螺帽的孔眼采用专用工具进行砂浆(采用与清水混凝土同品牌的水泥砂浆)的填补工作,螺眼内收 5 mm;明显气泡及表面微麻面处理宜采用与本工程所用的同品种普通水泥与白色普通水泥调制的水泥浆进行修补,普通水泥:白水泥 = 1:2,掺用水量 10% 的 108 胶,搅拌均匀后修补,并应先在样板墙上做试验,确认修补方案和材料配合比后施工;模板拼缝处、梁柱接头等处的错台尽量不用砂轮磨,而用鏟刀铲平,确需要磨的,要用本工程所用的同品种普通水泥与白色普通水泥调制的水泥浆进行修补。

4 自由曲面象牙屋面的设计施工

4.1 异形象牙屋面的成形及设计

异形象牙屋面为不规则自由曲面,屋面投影面积为 $3\,300\text{ m}^2$,展开面积为 $7\,690\text{ m}^2$,总长度为 175 m ,最高处标高为 114.448 m 。异形屋面是复杂的、无法用解析函数解析的自由曲面。在方案阶段通过建筑给的表皮体量模型,在 Rhino 中进行分割,提取结构线,得到结构轮廓,Grasshoper 进行曲率优化,对圆滑度不足等问题通过 GH 经过多次模型模拟整合进行修改设计,优化方案阶段的造型利用得到结构优化后的模型,将 Rhino 模型导入到 Revit 模型与下部结构进行合并,最终导入到 YJK 或 PKPM 中进行结构分析与设计^[15-16],本象牙屋面近视效果要求相对入口海螺雨棚低,允许梁外露,为减少板厚节省造价,最终各方确认采用梁板结构,故不同于第三部分海螺雨棚空间结构的三维软件 SAP 分析,本象牙屋面可采用二维软件 YJK 或 PKPM 进行分析设计,相对常规,限于篇幅,不再赘述。最后主要通过三维模型对施工进行指导,见图 12。

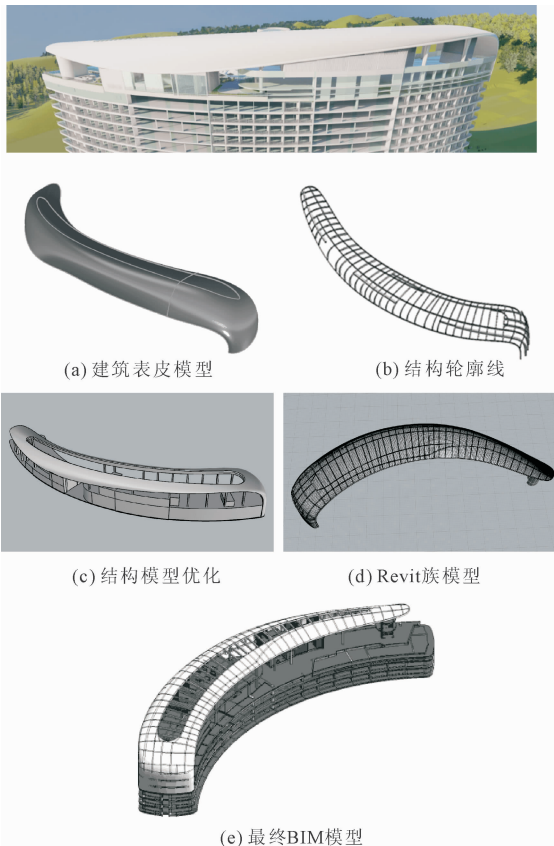


图 12 异形象牙屋面成形图

4.2 异形象牙屋面的施工

异形屋面是不规则的自由曲面,无法通过常规

的模板进行定位支模。通过 BIM 的三维模型,进行自由曲面的标高定位,借助设计提供的每处典型剖面图来指导施工,见图 13。

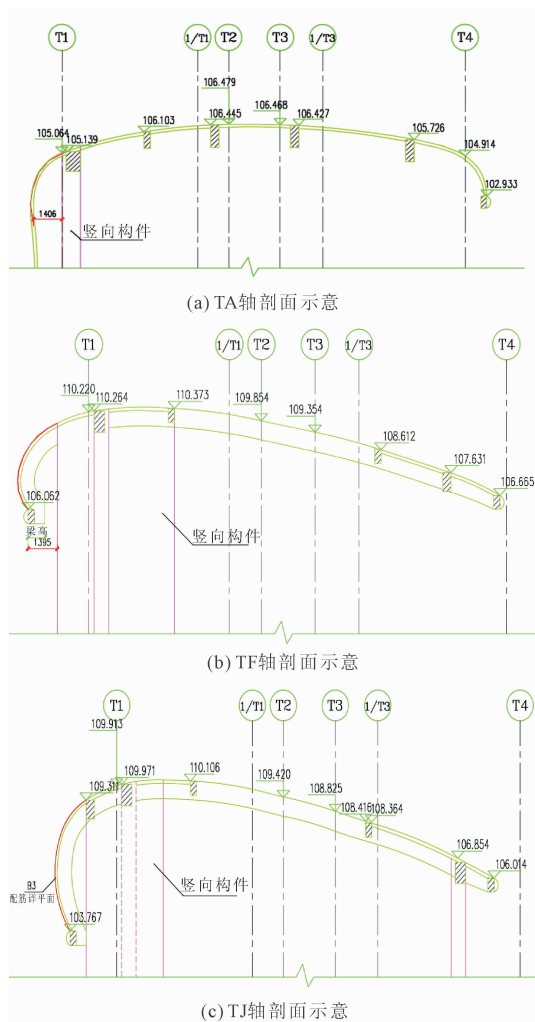


图 13 某轴结构剖面示意图

本工程顶部屋架及屋面造型为不规则曲面体,采用传统钢模板或木模板难以拼装出圆滑、顺畅、弧面自然的效果,且用时长。GFRP 玻璃钢材料作为一种新型模板材料,具有良好的力学性能,接缝少,施工方便,可根据三维模型进行整体浇筑成形,不需要复杂的外部支撑体系,在清水混凝土曲面施工中具有很大的优越性。为此屋架及屋面采用玻璃钢涂层模板。玻璃钢涂层模板厚度 $20\text{ mm} \sim 30\text{ mm}$ (玻璃钢涂层面层 + 木模板),采用分段定制模板,现场拼装,之后一体浇筑成型的施工方法。屋架范围内均存在 $700\text{ mm} \times 1100\text{ mm} \sim 200\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ 的梁,曲屋面为 150 mm 的板。模板支设施工时考虑预拱度设置,对于跨度不小于 4 m 时的梁板结构,其模板要求设置预拱度,本工程起拱度均为 0.2% ,模

板选用曲面板进行布设,见图14。



图14 异形屋面现场图

5 结 语

(1)采用 Rhino 软件可以对复杂的自由曲面进行网格划分,优化曲率,为复杂结构的落地提供可能。BIM 正向设计从方案到设计、施工,可以信息共享,减少二维图纸发现不了的错误,降低返工,提高设计和施工的效率。使用数字化技术,打通软件之间的壁垒,连通 Rhino-Revit-PKPM/YJK-CAD,实现 BIM 的正向设计,做到先有模型后有图纸。

(2)海螺混凝土壳方案进行数值模拟分析显示压力传力路径主要由两肩部分别向下沿内环传递,直至终于支座处,分析发现其中 A、B、C 及 D 区为复杂拉剪扭受力区,为该空间曲面薄弱部位,进行重点设计。

针对自由曲面分析存在个体特殊性的解决思路,提出着重对传力路径进行分析,进而找出控制截面进行截面设计,并进行相关变形分析。

(3)清水混凝土施工应从材料选取,模板深化设计与制作,浇筑质量,细节处理等各方面严要求,才能达到预期方案效果;GFRP 玻璃钢模板对于自由曲面的实现具有优越性。

参考文献:

[1] 董石麟,姚 谏.网壳结构的未来与展望[J].空间结构,1994(1):3-10.

- [2] 周 琦,王 为.结构形态[J].建筑与文化,2008,3(10):54-61.
- [3] 李 欣.自由曲面结构的形态学研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [5] 万志勇,韩建强,张龙生,等.珠海长隆航海酒店超限高层建筑抗震性能设计[J].建筑结构,2019,49(22):64-68.
- [6] 廖 杰.波浪形自由曲面空间网格结构形态分析与稳定性能研究[D].南京:东南大学,2017.
- [7] 郑少鹏,张龙生,王 星,等.某海螺形自由曲面单层网壳结构形态构建和整体稳定分析[J].空间结构,2021,27(3):11-16.
- [8] 姜 涛,张 磊,王晓萌.基于 Grasshopper 的自由曲面网壳菱形网格划分(英文)[J].空间结构,2016,22(2):92-96.
- [9] 朱 鸣,王春磊.使用犀牛软件及 Grasshopper 插件实现双层网壳结构快速建模[J].建筑结构,2012,42(S2):424-427.
- [10] 王敬烨,刘文武.贝壳形空间结构形态研究[J].建筑结构,2012,42(12):69-73.
- [11] 武 岳,李 欣,曹正罡.曲线变换型自由曲面结构的形态创建[J].建筑结构学报,2012,33(5):23-30.
- [12] 沈世钊,武 岳.结构形态学与现代空间结构[J].建筑结构学报,2014,35(4):1-10.
- [13] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [14] 清水混凝土应用技术规程:JGJ 169—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [15] 赵科军,张素梅.结构 BIM 正向设计在高层住宅项目中的应用研究[J].工程技术研究,2021,6(12):189-190.
- [16] 李世茂.基于 BIM 技术的异形体建筑方案设计方法研究[D].广州:广州大学,2020.