

大跨度壳体结构钢管施工支撑架有限元分析

王 权¹, 郭献忠^{1*}, 杨卿洪²

(1. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中建玖合发展集团有限公司, 北京 100071)

摘 要: 依托于某实际工程, 对大跨度壳体结构钢管施工支撑架进行 PKPM 计算与有限元分析, 分析了满铺加与双向对称加载支撑架的受力性能, 同时与 PKPM 计算结果进行对比。结果表明, 大跨度壳体结构进行浇筑施工时会对支撑架产生由横向拉杆平衡的水平力; 荷载主要由立杆承担; 双向对称加载作用下的支撑架内力与变形均比满铺加载作用下的小; 采用双向对称加载方式安全性得到提高, 为此类施工提供了参考。

关键词: 壳体结构; 支撑架; 满铺加载; 双向对称加载; 有限元分析

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0028-03

引言

钢管支撑架具有承载力大、搭设灵活、装拆简便的特点, 近年在各种类型建筑物大跨度混凝土结构施工中被广泛采用^[1], 作为临时设施的支撑架, 一旦发生整体失稳, 带来的后果将非常严重, 研究表明立杆所受到的最大荷载出现在混凝土浇筑过程中, 而不是在浇筑结束后^[2], 即支撑架坍塌事故大多数发生在浇筑期间。

在混凝土浇筑期间, 高大满堂支撑架的受力较为复杂, 在其上部受到泵管的水平冲击力、机械振捣混凝土所产生的振动力以及混凝土自重, 支撑架中的局部立杆在这些力的作用下会发生失稳, 随之导致部分扣件发生松动、滑移甚至断裂, 进而引起支撑架坍塌^[3, 4]。支撑架作为现浇混凝土结构施工的重要承载部件和施工作业平台, 其稳定性受到竹胶板、方木、立杆的强度、刚度影响^[5]。

文中对大跨度壳体结构钢管施工支撑架基于不同加载方式进行了有限元分析, 对此类施工提供了参考。

一、ANSYS Workbench 模型的建立

1. 工程实例概况

该工程为某市粮油储备中心储备库, 其抗震设防等级为 6 度, 结构安全等级设计为二级, 地面粗糙度为 B 类, 结构类型主要是钢筋混凝土拱板屋架(现浇)和钢筋混凝土柱, 跨度 24m, 开间 30 m, 每隔 3 m 设置一根构造柱, 拱板的曲线符合函数 $y = \frac{4FX(L-X)}{L^2}$, 其中 L 为拱形的跨度长, F 为矢高 2.4 m。为减少建立模型工作量及提高仿真速度, 几何模型开间取 6m, 跨度 24m。

荷载参数均按照《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ162-2008) 及根据实际施工现场情况进行定义。其中新浇筑混凝土作用于模板的最大侧压力标准值 (G_k), 按规范的第 4.1.1 条计算, 经计算 G_k 取 2.7 KN/m², 简化作用于胶合板侧面。

第一种加载方式为满铺加载, 即荷载均匀作用在胶合板

底面上, 简化浇筑方法。

第二种加载方式为双向对称加载, 即因屋面坡度较小, 选用单面模板法。首先需要设置模板, 在屋面模板之间设置浇筑槽, 这样有利于混凝土的后期振捣以及检查工作。接着再进行分层浇筑, 从两边底部往中间浇筑。

2. 几何模型的建立

采用 SC (space claim) 建模, 胶合板及方木通过小型曲线来控制矢高。步距及立杆间距均为 1 m, 剪刀撑搭设角度为 45°, 纵、横向剪刀撑的间距均为 4 m。建立完成后的几何模型如图 1。

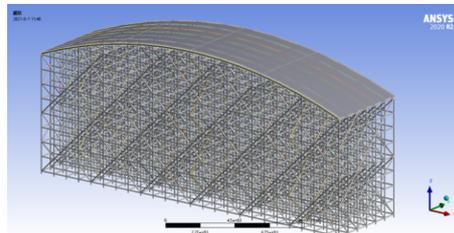


图 1 ANSYS Workbench 几何模型

二、PKPM 简化建模及计算分析

1. 简化建模

根据工程实例及相关参数建立 PKPM 简化模型。PKPM 不计算壳体结构施工支撑架, 故进行整体架高的等效, 实际工程结构柱高 8m, 拱高 2.4 m, 取高度平均值, 即: $(8+2.4+8)/2=9.2$ m。暂不考虑剪刀撑的影响, 施工支撑架三维简图如图 2 所示。

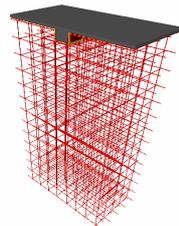


图 2 施工支撑架三维简图

2. PKPM 软件计算

收稿日期: 2022-02-25

作者简介: 王 权 (1997-), 男, 贵州大学土木工程学院, 硕士生, 研究方向为结构工程。

依据现行规范《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB50068-2018)^[6], 永久荷载分项系数取 1.3, 可变荷载分项系数取 1.5。不考虑堆放荷载的作用, 即堆放荷载标准值取为 0。模板支架搭设高度为 9.2m (等效高度), 扣件计算折减系数取 1.0, 不考虑风荷载。水平杆件按集中荷载作用下的连续梁进行计算, 集中荷载取次龙骨支撑杆件传递力的值, 并采用静荷载标准值计算水平杆件的位移。

经 PKPM 计算得: 最大位移 $V_{max}=6.021\text{ mm}$, 最大支反力 $Q_{max}=12.034\text{ KN}$, 最大弯矩 $M_{max}=0.895\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。
模板底部支撑钢管的抗弯强度计算公式:

$$f = \frac{\gamma_0 M}{W} < [f] \quad (1)$$

式中 f — 支撑架抗弯强度计算值;

γ_0 — 结构重要性系数, 取 1.0;

M — 钢管的最大弯矩;

W — 钢管的净截面抵抗矩;

$[f]$ —钢管的抗弯强度设计值;

即抗弯计算强度 $f = \gamma_0 M / W = 1.00 \times 0.895 \times 10^6 / 4,493.0 = 199.20\text{ N/mm}^2$, 小于钢管的许用应力值 205 N/mm^2 , 支撑架最大位移 V_{max} 小于 10mm 和 $L/150 = 1,000/150 = 6.667\text{mm}$ (L 为立杆间距), 依据相关规范满足要求。

3. 立杆稳定性计算

依据模板规范, 当未考虑风荷载作用时, 立杆稳定性按下式计算:

$$\sigma = \frac{\gamma_0 N}{A} \leq f \quad (2)$$

式中: N —支撑架立杆轴心压力设计值;

i —计算立杆截面回转半径, 1.60cm ;

γ_0 —结构重要性系数, 取 1.0;

A —立杆净截面面积, $A=4.24\text{cm}^2$;

l_0 —计算长度, $l_0=k\mu h$, h 为最大步距, $h=1\text{m}$, k 为立杆的计算长度附加系数, 依据《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ1302011)^[7]中表 5.3.4 取为 1.185, μ 为立杆的计算长度系数, 依据规范附表 C-4 取为 2.872, 则计算长度为 3.403m 。

$$\lambda \text{—长细比, } \lambda_x = \frac{l_{0x}}{i_x} = \frac{3403}{16} = 212.69;$$

$$\text{允许长细比 } \lambda_0 = \frac{212.69}{1.185} = 179.49 < 210, \text{ 满足长细比要}$$

求。

Φ 为轴心受压立杆的稳定系数, 查表 $\Phi = 0.160$;

立杆的轴向压力设计值 N 按照现行规范《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB50068-2018) 进行计算 (不考虑风荷载), 经计算 $N=11.179\text{kN}$ 。

$$\text{即 } \sigma = \frac{1.00 \times 11179}{0.160 \times 424} = 164.78\text{ N/mm}^2, \text{ 小于钢管许用应力}$$

205N/mm^2 , 立杆稳定性满足要求。

PKPM 不能模拟顶部壳体结构的施工支撑架, 上述采取等效的方式进行模拟计算, 会产生一定的误差。但施工支撑架的立杆稳定性符合规范。

三、支撑架有限元分析

1. 底部中央立杆轴向压力

经 ANSYS Workbench 有限元软件计算, 得到相关数据, 满铺加载时底部中央立杆轴向压力为 13.441KN , 双向对称加载时中央立杆轴向压力为 12.895KN , 比 PKPM 软件自动计算结果 (12.034KN) 略大, 在误差范围内, 即 ANSYS Workbench 的中央立杆轴向压力计算较为可靠, 符合实际情况。

2. 支撑架应力

满铺加载方式与双向对称加载方式的等效应力计算结果如图 3 和图 4 所示。

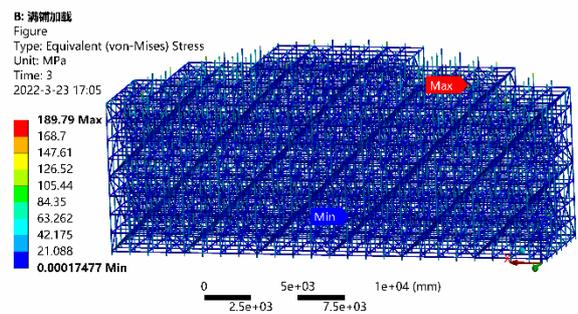


图 3 满铺加载支撑架应力图

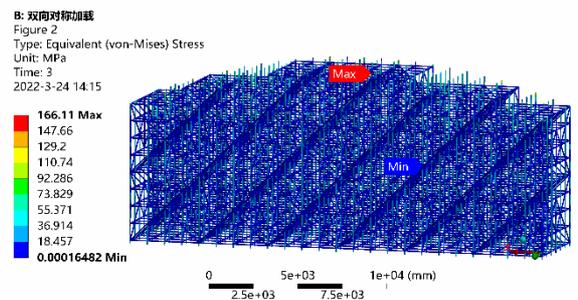


图 4 双向对称加载支撑架应力图

从图中可以发现, 满铺加载时支撑架等效应力最大值出现在支撑架的顶部从右至左第五列第一排竖向立杆, 而双向对称加载时支撑架等效应力最大值出现在支撑架的顶部从右至左第十一列第一排竖向立杆, 由于此模型是采用对称方法建立整个模型的 $1/4$, 所以支撑架等效应力最大值出现 4 处, 且呈对称分布, 应力最大值分别为 189.79N/mm^2 和 166.11N/mm^2 , 均小于该支撑架钢管材料的许用应力值 (205N/mm^2), 即该结构暂无安全隐患。

3. 支撑架总位移

满铺加载方式与双向对称加载方式的总位移计算结果如图 5 和图 6 所示。

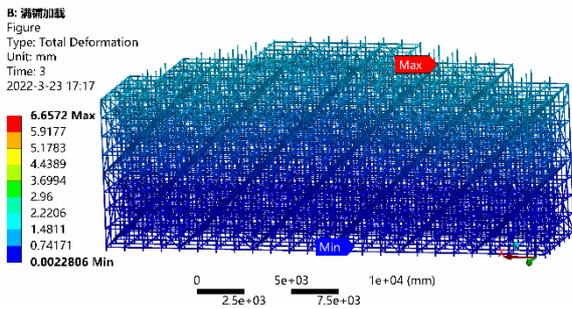


图 5 满铺加载支撑架总位移图

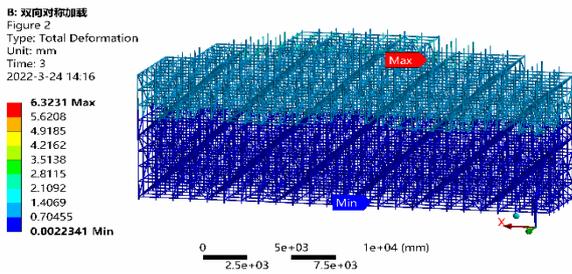


图 6 双向对称加载支撑架总位移图

通过上图所示，满铺加载时总位移最大值比双向对称加载时略大，分别为 6.657mm 和 6.323mm，且接近于 PKPM 软件计算结果 (6.021 mm)，均满足钢结构规范中相关规定即最大位移小于 $L/400=60\text{mm}$ 和 10mm (L 为 24m)。从图中可以看到，支撑架从上到下位移逐渐减小，到达扫地杆位置时，位移几乎为零，支撑架顶部的位移最大，即满铺加载时支撑架总位移最大值出现在支撑架的顶部从右至左第七列第三排竖向立杆，双向对称加载时支撑架总位移最大值出现在支撑架的顶部从右至左第八列第一排竖向立杆，同理，总位移最大值出现 4 处，且呈对称分布，符合实际工程中支撑架的变形状态。

表 1 两种加载方式数据分析表

分析类型	中央立杆轴向压力	支撑架应力 (max)	支撑架总位移 (max)
满铺加载	13.441 KN	189.79 N/mm ²	6.657mm
双向对称加载	12.895 KN	166.11 N/mm ²	6.323mm

通过表 1 及 PKPM 数据分析可知，在 ANSYS Workb

(上接第 9 页)

3. 拖带转向

平台转向要平缓，不易过快。如转向过快，主拖不能转到预期位置，主拖拖缆受船尾导缆桩影响，会对平台转向产生反作用，致使平台转向延迟。主拖应在转向前将导缆桩打开，并备好前后侧推，必要时利用侧推协助转向。

航行至污水 5 号浮时，平台转向角达 114° ，可航水域只有 200m 宽度，右侧和前方都是养殖区，大大压缩了平台的转向余地和拖轮的操纵空间，操纵难度极大。平台临近转向点时，可利用尾部拖轮 T24 减速，使平台速度几乎为 0 节，T5 和 T28 都做好拖拉的准备，待转向完毕后再起拖。

九、结束语

下来 ench 有限元软件中建立的几何模型、荷载的定义、加载及计算运行过程是合理可靠的，较为符合大跨度钢筋混凝土壳体结构施工支撑架在实际工程中的工作状态，具有代表性。

四、结论

(1) 大跨度壳体结构承担上部荷载作用时，由于拱的存在，一部分荷载会分解到水平方向，在混凝土浇筑时对侧面模板产生一定的水平力，进而对支撑架产生水平力，该水平力由横向拉杆平衡，实际施工过程中需注意横向拉杆的设计与搭设。

(2) 荷载主要由立杆承担，双向对称加载时等效应力最大值比满铺加载时小，采用双向对称加载方式支撑架安全性得到提高。

(3) 双向对称加载时总位移最大值比满铺加载时略小，且均接近于 PKPM 软件计算结果，从上到下逐渐减小，符合实际工程中支撑架的变形状态。

参考文献

- [1] 王桂生. 钢管扣件式高大模板支撑架技术在泵房结构施工中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2020, 27(4): 75-77.
- [2] 谢楠. 混凝土浇筑期高大模板支架工作状态的试验测试[J]. 工程力学, 2011, 28(增1): 85-89.
- [3] 熊耀莹, 谢宇岫, 周金根. 关于模板扣件钢管支撑系统诱发荷载讨论[J]. 建筑施工, 2004, 26(1): 56-57.
- [4] 曾凡奎, 刘学兵, 胡长明等. 高大模板支架承受的两种特殊荷载分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 308-309.
- [5] 任伟, 李闻涛, 许世展等. 大跨径桥梁施工监控精细模拟及数据分析[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(5): 554-558.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50068-2018, 建筑结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ130-2011, 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

随着平台制造业发展，特殊引航作业随之增多，平台停泊坐底作业是引航业务的开拓，是引航工作面临的新课题。目前，中集来福士船厂区域已无空余泊位，大量类似平台回到烟台母港无处停放，需要选择最佳停泊水域，总结平台进港停泊坐底的操作经验非常有必要，文中提出的操作方案、安全问题和注意事项对于以后类似的平台航行、停泊操作具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 孙昕初, 江崇功. 大型钻井平台港口附近水域引航操纵[J]. 航海技术, 2017, (2): 1-3.
- [2] 孙本荣. 大型钻井平台“海洋石油 981”进出船坞操作分析[J]. 中国水运, 2020, (7): 115-117.