

攀枝花某商业综合体开口穹顶稳定性分析

冷杨川

身份证号码: 510105*****0512 成都 610001

摘要: 常规穹顶结构设计中, 多以双层或单层完整网壳结构为主, 双层网壳结构主要以线弹性计算结果为设计依据, 单层网壳结构则需同时考虑非线性稳定计算问题, 而开口型的单层网壳结构计算分析则工程中较为少见, 本文通过有限元软件对攀枝花某商业综合体椭圆开口穹顶结构进行非线性稳定分析, 提出了竖向荷载下的稳定承载力, 为今后工程设计提供一个参考。

关键词: 穹顶; 非线性稳定; 网壳结构; 有限元; 竖向荷载; 承载力

Open dome stability analysis of Panzhihua commercial complex

LengYangchuan

ID: 510105*****0512, Chengdu 610001, China

Abstract: Usually structure designing of dome are mainly double or single layer latticed shell structure. The design of double layer reticulated shell structures is mainly based on the linear elastic calculation results, while single layer reticulated shell structures require simultaneous consideration of nonlinear stability calculations. However, the calculation and analysis of open type single layer reticulated shell structures are relatively rare in engineering. In this paper, a nonlinear stability analysis of an elliptical open dome structure of a commercial complex in Panzhihua is conducted using finite element software, and the stability bearing capacity under vertical loads is proposed. The result can provide a reference for future engineering design

Keywords: Dome; Nonlinear stability; Reticulated shell structure; Finite element method; Vertical load; Bearing capacity;

1 穹顶简介

穹顶是一种悬垂的半球体空间结构, 最早追溯到意大利文艺复兴时期, 作为大型文艺复兴时期教堂的特色结构形式, 经过了 15 世纪后期的创新之后, 桶式拱顶, 支柱, 鼓和圆顶的组合被开发出来。佛罗伦萨是第一个开发新风格的意大利城市, 其次是罗马, 然后是威尼斯。布拉曼特的 1505-6 项目为全新的圣彼得大教堂标志着在 16 世纪整个圆顶和桶形拱顶组合的哥特式罗纹拱顶的开始移位。意大利以外的文艺复兴风格圆顶的传播始于中欧。近现代时期最为出名的建筑就是位于伦敦东部泰晤士河畔的格林威治半岛上的千年穹顶, 是英国政府为迎接 21 世纪而兴建的标志性建筑。现代建筑应用也是较为常见, 比如一些商场, 展览馆, 火车站或者机场一类的大型公共建筑项目, 这一类建筑特点是多为双层或单层完整网壳结构为主。

2 项目概况

穹顶项目位于攀枝花市, 是一个商业综合体项目的屋盖子项目。屋盖形状是一个半椭球体, 其中有两部电梯穿过屋顶而过, 造成了穹顶的局部开口, 如图 1 所示。



图 1: 开口穹顶结构三维图

穹顶平面长轴长度约 22m, 短轴长度约 13m, 高度约 4.9m, 属于中小跨屋盖钢结构体系。径向构件截面采用矩 250x150x6.0, 环向构件截面采用矩 160x80x6.0 开口处周边构件截面采用矩 300x200x8.0, 从内往外数第三圈构件截面采用矩 300x200x8.0, 最外圈环向构件截面采用方 200x6.0,

靠洞口两道径向构件截面采用矩 300x200x8.0。钢材采用 Q355B。穹顶外层覆盖玻璃幕墙, 网壳开口尺寸为 6m x 3.4m, 与电梯均脱开处理。

3 穹顶结构弹性稳定分析过程简介

该项目弹性设计计算采用的是上海同磊土木工程技术有限公司开发的 3D3S 钢结构设计软件, 考虑恒荷载, 活荷载, 风荷载以及地震荷载后, 验算构件均满足规范要求, 最大应力比为 0.5 左右。用 3D3S 软件进行了考虑几何非线性的有限元法 (即荷载一位移全分析) 进行计算, 不考虑材料非线性, 考虑 1 阶特征值屈曲下的模态作为初始几何缺陷分布, 使用满布恒荷载作为初始加载, 得出单层开口网壳失稳下的极限荷载大小, 约为初始加载值的 55 倍。根据规范《空间网格结构技术规程》JGJ 7-2010 4. 3. 4 条规定: 网壳稳定容许承载力 (荷载取标准值) 应等于网壳稳定极限承载力除以安全系数 K。当按弹性全过程分析时, 安全系数 K 可取为 2. 0; 当按弹性全过程分析、且为单层球面网壳、柱面网壳和椭圆抛物面网壳时, 安全系数 K 可取为 4. 2[1]。因此计算结果满足规范的要求。

4 满布荷载下穹顶结构弹塑性稳定分析过程

为了验证计算的准确性, 采用 ANSYS 通用有限元分析软件对结构进行几何非线性并考虑材料弹塑性的全过程分析, 全部构件单元采用 beam188 梁单元, 该单元基于铁木辛哥梁结构理论, 并考虑了剪切变形的影响, 可以输出单元的弯矩、轴力和剪力等常用的物理量[2]。材料选用 Q355 钢, 本构关系为双折线弹塑性模型, 加载方式为竖向节点荷载。

首先按照均布恒荷载 1.0kN/m², 方向为竖直重力方向, 然后经过导荷之后得到所有节点都竖向力, 如图 2 所示。通过特征值屈曲分析得到结构弹性阶段下

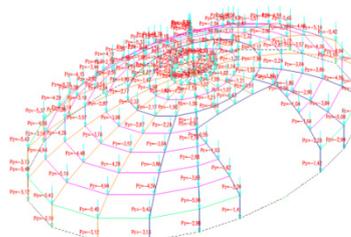


图 2: 开口穹顶满布荷载分布图

的屈曲因子。本文采用 5 阶模态分析,最低阶屈曲因子大小为 96,然后再采用一个大于特征值的荷载(约为最低屈曲因子的 1.15 倍)施加在结构表面,并施加初始缺陷(本文取值为线性屈曲分析产生最大位移的 0.064 倍,按照规范规定的 1/300 跨度值大小折算而来),进行弹塑性有限元稳定分析。开口穹顶失稳后的形态如图 3 所示,极限失稳荷载大小为 26 倍初始荷载,为弹性极限失稳荷载的 0.5 倍左右,这也比较符合规范弹性失稳和弹塑性失稳的安全系数比例关系。从图上可以看出,结构的失稳位置出现在穹顶开口部位,最大位移为 0.216m,这也说明单层网壳体系开口处容易发生应力集中而产生失稳。

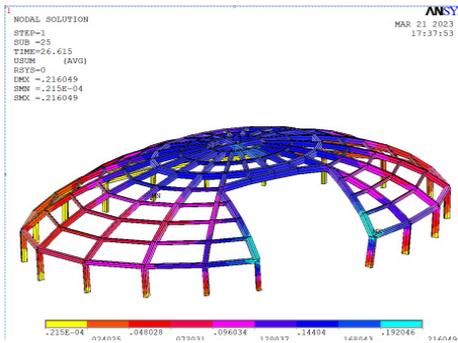


图 3: 开口穹顶满布荷载失稳时位移分布

在 ansys 时间历程后处理器中定义横坐标为荷载 load (为初始加载的倍率)纵坐标为失稳点水平位移变化 displacement (单位 m),绘制荷载-位移全过程曲线(如图 4)可以看到结构失稳极限在 26 倍初始荷载位置附近。

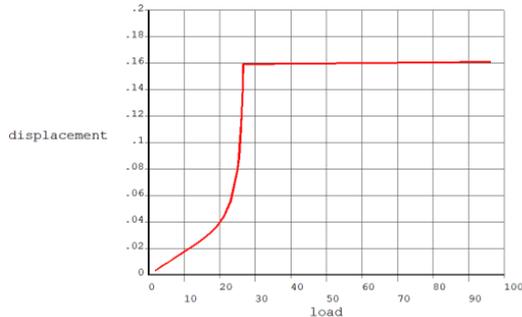


图 4: 开口穹顶满布荷载位移-加载关系

5 半跨荷载下穹顶结构弹塑性稳定分析过程

按照《空间网格结构技术规程》JGJ 7-2010 4. 3. 3 条规定:球面网壳的全过程分析可按满跨均布荷载进行,圆柱面网壳和椭圆抛物面网壳除应考虑满跨均布荷载外,尚应考虑半跨活荷载分布的情况。因此按照规范要求选择在洞口两边对称位置一侧施加半跨活荷载来考察结构的弹塑性稳定承载力。考虑结构及幕墙自重,在穹顶左半跨施加活荷载 0.5KN/m²,方向为竖直重力方向,然后经过导荷之后得到所有节点都竖向力,如图 5 所示

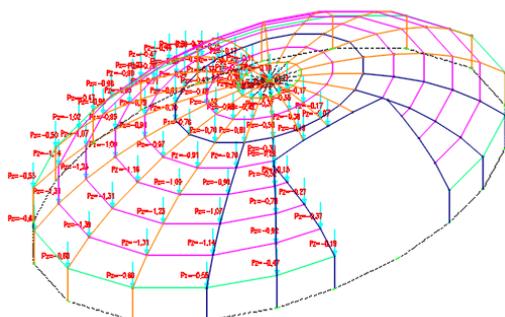


图 5: 开口穹顶半跨荷载分布图

经过特征屈曲分析得到结构弹性阶段下的最低屈曲因子,大小为 101,再采用一个大于特征值的荷载(约为最低屈曲因子的 2 倍)施加在结构表面,并施加初始缺陷,设置非线性参数后,进行全过程弹塑性分析。计算完成后在 114 倍初始半跨荷载处不再收敛,即为半跨活荷载下的极限失稳承载力,开口穹顶失稳后的形态如图 6 所示,

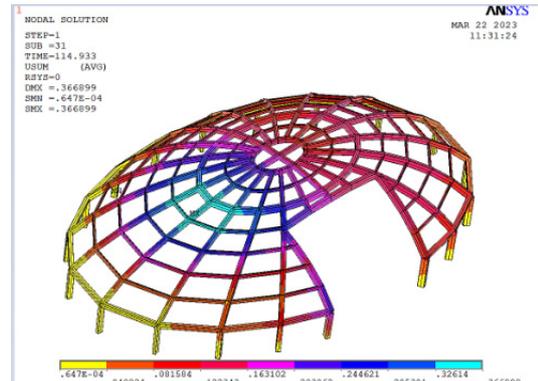


图 6: 开口穹顶半跨荷载失稳时位移分布

从图上可以看出半跨荷载下大约在半跨荷载分布的中间区域出现变形失稳,并不在开口处,这也比较符合预想的受力特征。

按照上文提到的方式绘制荷载-位移全过程曲线(如图 7),其中该纵坐标为失稳点的竖向位移变化,可以看到在 114 倍初始荷载位置附近结构发生失稳破坏。

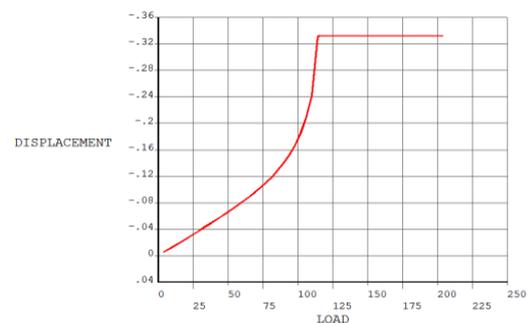


图 7: 开口穹顶半跨荷载位移-加载关系

6 结论

从 ansys 弹塑性分析当中还可以看出,满布荷载下,柱子及其相连的径向梁端部基本都发生的屈服,达到了最大屈服应力 355MPa,而开口处的附近梁基本都发生的屈服,包括环向和径向梁,其失稳也出现在该位置;半跨荷载下,活荷载区域中间部分及端部的柱子及其相连的径向梁基本都发生屈服。半跨荷载情况,因为未做另外两个方向半跨荷载的受力分析,因此推测若荷载并未完全覆盖到开口处,则失稳一般出现在荷载覆盖中间区域,否则仍出现在开口附近。

综上所述,开口穹顶与完整的穹顶相比,因其开口,相当于出现了局部削弱,所以其受力形式发生了变化,削弱部位也会出现应力集中现象,所以,工程实际应用当中应该加强开口处的关键构件设计,从而提高结构整体的稳定承载力

参考文献:

- [1]《空间网格结构技术规程》JGJ 7-2010. 中国建筑科学研究院
- [2]王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 人民交通出版社. 2007.

作者简介:冷杨川,男,工程硕士,一注结构。