

不同缺陷下拱壳结构的稳定性分析*

路帆 王建省 陈一铭 李露寒 张钊巍 刘戈 毕常森

北方工业大学土木工程学院

摘要: 本文以大跨空间结构为研究背景, 结合实际工程案例建立拱壳结构模型. 通过特征值屈曲分析和几何非线性屈曲分析, 利用规范公式计算主拱混凝土的安全系数, 对不同缺陷造成的结构极限承载力变化进行详细的研究, 最大相差系数为27.5%. 对钢筋混凝土拱壳结构加载, 根据试验数据与理论分析计算, 比较在四种不同缺陷下各内力值的变化趋势, 分析了该结构的破坏机理, 各缺陷节点处会发生剧性突变, 最大弯矩绝对值为24.91kN, 为原结构的80倍, 拱壳结构自身的抵抗变形的能力明显下降. 在此基础上提出拱壳结构稳定性研究, 以便于在实际的工程背景中得以应用和推广.

关键词: 拱壳结构; 受力缺陷; 屈曲分析; 稳定性

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.11.026

拱壳结构有其自身的特点, 在竖向荷载作用下各截面的弯矩比相应跨度的简支梁要小^[1], 其稳定性亦也更优越, 可充分利用材料的抗压性能. 因此拱结构用料较省自重较轻能跨越较大空间^[2]. 但拱壳杆轴为曲线在竖向荷载作用下拱壳杆件因自身形态在支座处必然存在水平推力(除半圆拱外)^[3]这就是拱壳结构区别于普通梁板结构的一个重要标志. 我们研究拱壳结构其既满足所要求适用于大跨度的情况, 良好抵御荷载的情况, 又有良好的外观, 节省材料^[4]. 通过改变拱壳结构缺陷的方法来研究其稳定性能^[5], 对拱壳支座的张拉对结构施加荷载, 可得到拱壳结构在屈曲分析下的结构特征值^[6], 结构的初始几何缺陷会显著地降低结构的稳定极限承载力^[7]. 在上述屈曲分析的基础上, 建立数值模型计算分析内力变化趋势, 就拱壳结构设计中的稳定性分析讨论^[8].

一、工程概况

某厂拱壳结构长度为10m, 宽度为10m, 结构高度为5m. 本文材料选择根据实际工程中常用材料所定, 采用C60混凝土, 地形地质条件设置为理想地质, 且不考虑地下水影响, 钢筋及混凝土力学参数如表1所示.

表1 材料的力学参数

种类	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(kg/m ³)
钢筋	2.1×10 ⁵	0.3	7.85×10 ⁹
混凝土	3.6×10 ⁷	0.2	5.56×10 ⁶

二、拱桥结构模型建立

拱壳结构的主体是由三个相互平行的拱, 通过三条截面面积是5m×10m, 长度是10m的钢条相互焊接连接^[9], 其钢条的焊接位置分别位于两边拱脚的底

部和拱的顶部位置, 其拱壳结构中拱的截面面积是2.5m×2.75m, 拱的下部拱脚处则设计加厚其截面面积是2.5m×0.7m, 拱壳结构中拱的跨度为4.5m, 拱的高度为5m. 模型中共69个节点, 72个单元, 拱壳结构示意图如图1所示.

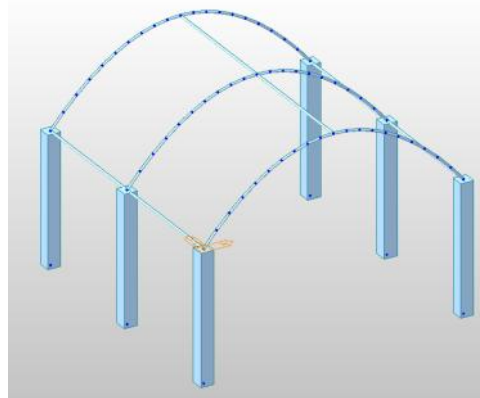


图1 拱壳结构建模示意图

三、拱壳结构的屈曲分析

拱壳结构属于大跨度结构, 在应用中常会出现失稳破坏的情况. 对于该拱壳结构的破坏形式有两种, 材料破坏和稳定性破坏^[10]. 当有荷载施压时, 如果施加的荷载超过了材料自身的承载能力, 则发生材料破坏. 如果因施加荷载后, 整体的结构由于剪力、扭矩、弯矩的作用发生了很大的变形而导致失稳属于稳定性破坏.

(一) 线性屈曲分析

特征值屈曲分析忽略结构在荷载作用下的变形, 是一种线弹性稳定分析, 以小位移线性理论为基础. 为了探究此拱壳结构在初始状态下的稳定性和在不同缺陷下的稳定性, 现采用Midas Civil对初始模型进行屈曲分析, 得到该结构的特征值和对应的屈曲模态, 如图2所示. 拱壳结构的稳定计算比普通直线桥梁要复杂的多, 这是因为拱壳结构的挠曲线微分方程很难求解出解析解, 特征值屈曲分析可预测一个理想线性弹性结构的理论屈曲强度(歧点), 但是非理想性与非线性使大多数实际结构无法达到它们的理论弹性屈曲强度, 所以特征值屈曲通常得到非保守结果, 在使用时要小心. 利用矩阵行列式求解特征值问题, 首先求解线弹性前屈曲加载状态{P0}的载荷一位移关系; 既给定{P0}, 解

$$\{P_0\} = [Ke]\{u_0\} \quad (1)$$

以得到{u0}=加载{P0}的位移结果, 及{s}={u0}引起的应力结果. 假设前屈曲位移很小, 可给出任意状态({P}, {u}, {s})的增量平衡方程:

$$\{DP\} = [[Ke] + [Ks(s)]]\{Du\} \quad (2)$$

这里 $[Ke]$ = 弹性刚度矩阵, $[Ks(s)]$ = 在应力状态 $\{s\}$ 下计算的初始应力矩阵. 假设前屈曲特性是载荷 $\{P0\}$ 的线性函数,

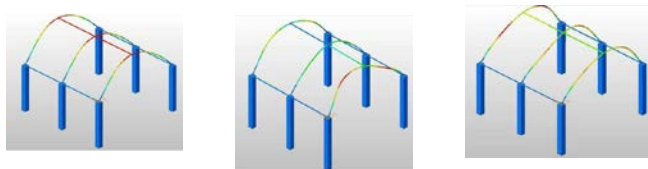
$$\{P\} = 1\{P0\} \{u\} = 1\{u0\} \{s\} = 1\{s0\} \quad (3)$$

我们可得到, $[Ks(s)] = I[Ks(s0)]$. 因此, 对整个前屈曲范围表达的增量平衡方程可写为:

$$\{DP\} = [[Ke] + I[Ks(s0)]]\{Du\} \quad (4)$$

表2 拱壳结构三个阶屈曲特征值

模态	1	2	3
特征值	2.099	5.447	5.471



(a) 第一阶屈曲模态 (b) 第二阶屈曲模态 (c) 第三阶屈曲模态

图2 初始状态下屈曲模态图

从表中可以看出, 该拱壳结构1阶屈曲特征值较小, 2、3阶屈曲模态比较接近, 结构趋于稳定, 便于下文中对不同缺陷下的结构稳定性的分析.

(二) 非线性屈曲分析

通常非线性屈曲分析下的极限承载力比前期的小, 非线性屈曲分析就是考虑几何或材料非线性, 或者同时考虑几何和材料非线性的一种非线性静力分析, 非线性屈曲基于上述线性屈曲分析的基础上, 取拱壳的线性特征值屈曲模态变形作为结构的初始几何缺陷形貌, 再乘以一个缺陷幅值系数, 即可实现基于线性特征值屈曲模态缺陷的拱壳有限元建模, 并对其展开不同缺陷下的非线性屈曲分析, 可得到四个缺陷下的模态结构图.

着荷载的增加, 结构的变形和应力不断增加, 结构变形加快; 当荷载达到峰值时, 荷载增加很少甚至不再增加, 结构也会发生很大的变形, 最终发生失稳破坏,

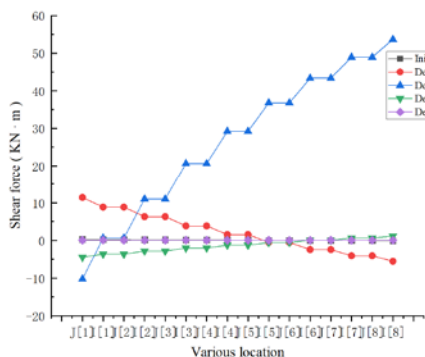
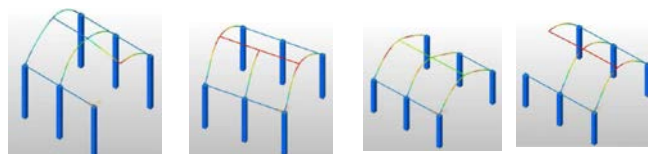


图4 不同缺陷下剪力折线图

其荷载峰值就是结构的失稳荷载, 据此可得到结构的稳定极限承载力分析考虑的非线性破坏历程, 非线性拱壳结构稳定性系数 (安全系数) K 的含义如式:

$$P_{cr} = K(P_{bi} + P_q) \quad (5)$$

式中: P_{cr} 为结构极限承载力; P_{bi} 为结构初始状态受到的恒载; P_q 为结构初始状态受到的活载.



缺陷一 缺陷二 缺陷三 缺陷四

图3 不同缺陷屈曲模态图

将每个缺陷对应的三个模态特征值汇总于表3中, 原拱壳结构模态一特征值为2.099, 模态二特征值为5.447, 模态三特征值为5.471.

表3 缺陷一下三个屈曲特征值表

模态	一	二	三
缺陷一作用下特征值	2.054	4.796	4.973
缺陷二作用下特征值	2.128	4.470	4.906
缺陷三作用下特征值	2.126	4.526	4.932
缺陷四作用下特征值	1.521	4.075	4.405

由各图表可知, 在各个缺陷下, 不同结构特征值相比于原结构都有不同程度的下降. 所有缺陷模态三屈曲特征值均不大于5. 缺陷一下模态三最大特征值为4.973, 与原结构相差相差9.1%. 缺陷一至缺陷三模态一特征值与原结构相差不大, 均在2左右. 缺陷四下模态一屈曲特征值为1.521, 达到所有缺陷中最小值, 与原结构相差27.5%, 为最大变化范围. 通过数值分析的结果, 拱壳结构的屈曲特征值有了明显的下降, 我们以此可以得到证明, 拱壳结构不同位置钢筋缺陷下承载力相比原结构有较为明显的下降趋势.

四、不同缺陷下的内力分析

基于上述屈曲分析的基础上, 根据拱壳结构各杆件均以承受轴力为主、节点处弯矩受力较小的特点. 通过对钢筋混凝土拱壳结构加载, 拱在受到荷载作用时基础

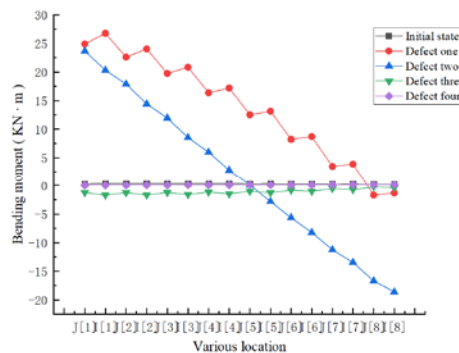


图5 不同缺陷下弯矩折线图

支座会产生水平推力, 这样可维持结构稳定, 从而建立非线性有限元数值模型. 在拱壳分析求解内力计算中, 采用程序计算分析得到不同几何缺陷和初始状态下的剪力、弯矩、扭矩分布模态, 并将其节点数据汇总形成图一、图二、图三折线图.

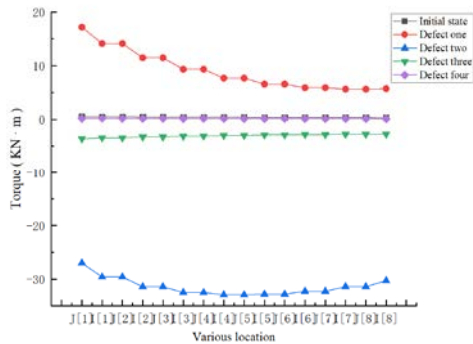


图6 不同缺陷下扭矩图

由图4可知, 缺陷四结构各节点所受剪力与原始状态相比变化不大, 在整个拱壳结构中可近似在同一水平线上. 缺陷四在节点一、节点二处有较小范围的突变, 其余节点处所受剪力绝对值均小于1. 缺陷一、缺陷二和缺陷三所受剪力斜率变化较大, 平均值远大于原结构的平衡状态. 节点8处剪力绝对值达到最大为53.69, 说明其结构在缺陷作用下所受剪切破坏影响较大. 由图5可知, 缺陷三和缺陷四各节点所受弯矩绝对值与原结构相比均在一个百分点变化范围内, 缺陷一和缺陷二各节点发生剧性突变, 最大弯矩绝对值为 $24.91\text{KN}\cdot\text{m}$, 达到原结构的80倍之多, 说明其结构在缺陷作用下弯曲变形影响较大. 由图6可知, 同一缺陷各节点扭矩之间趋于稳定, 其中缺陷一和缺陷二在平衡位置均发生不同方向的扭动, 上下扭矩值均在 $20\sim 30\text{KN}\cdot\text{m}$ 之间, 说明缺陷一和缺陷二作用下对原结构的转动影响较大. 综上可见不同受力钢筋缺陷的存在使得结构自身的抵抗变形的能力明显下降.

五、结论

本文通过对拱壳模型的建立, 屈曲模态的分析, 有限元的计算, 可得到如下结论: 拱壳结构为大跨度结构, 在外界荷载作用下容易发生失稳破坏. 通过线性屈曲分析得出的承载力均大于非线性分析算出来的结果, 前者更为理想化, 后者更贴近生活实际, 更具有普遍的参考价值. 通过有限元分析, 可得到该拱壳模型在四种不同的缺陷下, 抗剪性能, 抗弯性能, 抗扭性能, 都有不同程度的降低. 缺陷四对模型带来的变形程度最小, 缺陷一、二、三使原结构受到的剪力较大, 失稳严重, 缺陷一、二也同时使模型受到较大的弯矩, 使原结构发生变形. 基于结构的几何构造缺陷, 应该在制作过程中严格控制误差, 保证制作精度, 从而提高结构的稳定极

限承载力.

参考文献

[1]Zhang Guojian, Guo Guangli, Gong Yaqiang, Xiao Anliang, Zhao Tonglong, Li Huaizhan.Failure Mechanism of Giant-Thick Strata Characterized by Weak Cementation Based on Superimposed Similar Material Simulation[J].KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26 (8) .

[2]He Tao, Xiang Weiheng, Zhang Jian, Hu Cheng, Zhang Gaozhan, Kou Bin.Influence of Water-Binder Ratio on the Mechanical Strength and Microstructure of Arch Shell Interface Transition Zone[J].Buildings, 2022, 12 (4) .

[3]Tahmasebinia Faham, Ma Yuanchen, Joshua Karl, Sepasgozar Saleh Mohammad Ebrahimzadeh, Yu Yang, Li Jike, Sepasgozar Samad, Marroquin Fernando Alonso.Sustainable Architecture Creating Arches Using a Bamboo Grid Shell Structure: Numerical Analysis and Design[J].Sustainability, 2021, 13 (5) .

[4]孙环宇, 赵政光. 支座径向内移对拱壳结构稳定性影响分析[J]. 中国科技信息, 2022 (08) : 108-111.

[5]周呈祥. 不同缺陷下钢圆柱拱壳的稳定极限承载力[J]. 中国建筑金属结构, 2020 (10) : 56-57.

[6]孙伟苹. 基于SAP2000的单层网壳屈曲分析[J]. 建材技术与应用, 2020 (04) : 19-21.

[7]陈志平, 焦鹏, 马赫, 顾亚楠, 葛鹏. 基于初始缺陷敏感性的轴压薄壁圆柱壳屈曲分析研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57 (22) : 114-129.

[8]姜正荣, 邱俊明, 石开荣, 邓智文, 钟宝泉. 大矢跨比单层球壳结构的非线性屈曲分析[J]. 特种结构, 2022, 39 (3) : 87-92.

[9]何湘锋, 陈学英, 喻泽成, 余波. 复杂随形拱壳混凝土结构施工过程模拟与方案优化[J]. 建筑施工, 2021, 43 (07) : 1256-1260.

[10]林煌, 邓通发, 廖睿, 汤红华. 拱肋的不同宽跨比对拱桥屈曲分析的影响[J]. 科技通报, 2016, 32 (12) : 205-208.

作者简介: 路帆 (2001-08), 男 (汉族), 广西河池人, 就读于北方工业大学, 本科生.

王建省 (1964-), 男, 北京人, 北方工业大学土木工程学院教授, 主要从事土木工程, 力学工程研究.

基金项目: 国家自然科学基金项目资助项 (11572001, 51478004); 2020年度北京市大学生创新创业训练计划项目 (216051360020XN190)