

Dynamic Stability Analysis of Single-layer Reticulated Shell Structure

Yuji Zhang¹ Cheng Wang¹ Jie Zhang¹ Benjun Xiang²

1.School of Water Conservancy and Electric Power of Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang, 150080, China

2.School of Architecture and Engineering of Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang, 150080, China

Abstract

In this paper, the dynamic stability of single-layer reticulated shell structure under different beam-span ratios is deeply studied from various angles of energy change of the structure. The change response characteristics of single-layer reticulated shell structure under different strength forces are studied, and it is verified that when the energy consumed by reticulated shell structure greatly exceeds the total energy input by external power, the dynamic instability of single-layer reticulated shell structure will occur. On this basis, the author puts forward a new criterion based on energy quantification to determine whether the dynamic stability of reticulated shells changes. By studying the minimum value of the energy function of the single-layer reticulated shell structure, the whole process curve of the peak value of the function changes with the acceleration of the force, and finally the specific critical load of the single-layer reticulated shell structure under the force can be obtained.

Keywords

single-layer reticulated shell; stability defect; structural dynamics

单层网壳结构动力稳定性分析研究

张裕己¹ 王程¹ 张杰¹ 向本军²

1. 黑龙江大学水利电力学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150080

2. 黑龙江大学建筑工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150080

摘 要

论文主要从结构在能量变化的各个角度, 深入研究了单层网壳结构在不同梁跨比下的动力稳定性。在研究单层网壳结构在不同强度力的作用下的变化响应特性, 验证了当网壳结构消耗的能量大大超过外部动力所输入的总能量时, 单层网壳结构将发生动力失稳。在此基础上, 作者提出了一种基于能量的定量, 确定网壳结构的动力稳定性是否变化的新判据。而通过研究单层网壳结构的能量函数的最小值, 也得出了随着力的加速度变大, 其函数峰值发生变化的全过程曲线, 最终可以得到单层网壳结构在力的作用下具体的临界荷载。

关键词

单层网壳; 稳定性缺陷; 结构动力

1 引言

论文从两个方面出发, 深入分析了初始几何缺陷下单层网壳结构的整体稳定性, 并采用随机缺陷的模态法和 N 阶特征缺陷的模态法, 对 4 个不同的梁跨比的 K8 单层网壳结构, 在实验中进行了近 1300 次的弹塑性荷载位移的全过程研究分析, 基于实用的角度讨论了不同分析方法的科学性和可行性。

经过研究实验的结果表明, 随机缺陷模态法虽然能够科学地评估不同初始几何缺陷对单层网壳结构稳定性的影响, 但本身的数据计算量较大; 而在分析具有稳定承载力系数的总体试样统计特征时, 代表空间试样 N 的个数不能小

于 100; 而 N 阶特征缺陷的模态法就能够通过较少的计算量得出最终的稳定承载力的系数, 因此建议采用“3a”原则下的 N 阶特征缺陷的模态法, 能够最高效的确定单层网壳结构的最终稳定承载力的系数。

2 单层网壳结构的动力稳定性研究要点

由于单层网壳结构的平面总体外刚度较弱。而随着跨距长度的增加, 整体结构的承载力主要由结构稳定性控制, 因此稳定性验算已成为单层网壳结构设计的重要部分。除此以外, 大部分的单层网壳对初始几何缺陷非常敏感, 而初始缺陷的分布和值的计算也就是该领域的主要研究方向之一。

单层网壳结构的初始缺陷还包括不同节点位置的安装偏差、结构构件的初始弯曲度、结构构件的初始偏心度等, 而后两者都与构的整体强度有关。在分析单层网壳结构的稳

【作者简介】张裕己 (1995-), 男, 中国海南海口人, 硕士, 从事大跨度钢结构研究。

定性中还有一个前提,即在单层网壳结构的强度设计阶段,就要对单层网壳结构的所有构件先进行预设计和各个项目的校核,以保证整体结构的强度和稳定性^[1]。

3 随机缺陷模态法

3.1 基本假设

当我们采用随机缺陷模态法开始对单层网壳结构开展稳定性系数分析时,主要采用了以下的两个基本假设点:

①各节点要在坐标轴的三个方向上,实际安装偏差均符合在双均方差范围内,使用正态概率密度函数,即要求各节点的安装偏差的随机变量数值为 $Rx/2$,其中随机变量的 x 服从标准意义下的正态分布, R 为最大的安装偏差数值,将偏差随机变量的范围划定为 $[-R, R]$ 。

②单层网壳结构的各节点安装误差的随机变量数值是相互独立的。因此,基于以上假设,单层网壳结构各节点安装偏差数值为多维独立的随机变量,而且每个空间样本点均要对对应结构初始缺陷的分布模式。此外,就可以取 N 个样本进行非线性的稳定性系数分析,最后得到相应的 N 个稳定承载力值。

3.2 分析研究步骤

论文采用随机缺陷模态法对单层网壳结构开展稳定性系数分析的基本步骤如下:首先,将初始安装偏差根据不同的要求引入各节点,然后形成随机计算的数学模型。接下来对模型进行非线性的稳定性分析,然后就可以得到稳定承载力的系数,即不同稳定承载力系数在样本空间中的一个对应样本。其次,再重复上述步骤并进行多次计算,还可以得到多个稳定承载力的系数,即在单层网壳结构的稳定承载力系数样本空间内可以形成 N 个样本。最后,基于概率论和数理统计的方法,对单层网壳结构的稳定承载力系数样本的整体统计特性进行分析,最终确定单层网壳结构的最终稳定承载力系数数值^[2]。

3.3 研究结果分析

当单层网壳结构的稳定承载力系数的样本空间内分布函数可以确定时,就可以得到具有一定准确率的单层网壳结构的实际稳定承载力系数。结合以上研究可发现,随机缺陷的模态法不仅能够真实反映单层网壳结构的实际工作性能,其计算所获得的稳定承载力系数也更加科学。同时,这种随机缺陷模式法也可以成为验证其他分析方法的标准。但这里需要注意的一点是,运用随机缺陷模态法的数据计算量很大。

4 N 阶特征缺陷模态法

4.1 概述

而为了考虑在 N 阶屈曲模态对单层网壳结构整体稳定性的影响,同时保证网壳结构的稳定性承载力数据计算的高准确率,论文提出了一种基于 N 阶特征的缺陷模态法。所谓 N 阶特征缺陷模态法就是用单层网壳结构的一阶特征屈曲模态来模拟 N 个初始缺陷的分布模态,然后计算这 N 个

稳定承载力的不同系数,最后取最不利值来整体评价单层网壳结构的稳定性能。这种 N 阶特征缺陷模态方法是对随机均匀缺陷模态计算方法的一种改进,同时也是对均匀缺陷模态方法下相关理论的扩展以及发展。当使用 N 项特征缺陷模式方法时,还有一个吸纳的 N 阶截断问题,即 N 的值如何界定。 N 阶截断的前提是确保单层网壳结构的稳定承载力系数,其最不利值的计算有一个令人满意的准确率,即可以开展 N 阶的非线性稳定性系数分析。

4.2 分析步骤

当采用 N 阶特征的缺陷模态法开展对单层网壳结构的稳定性分析时,其基本研究步骤是:首先,对单层网壳结构进行特征的屈曲分析,然后得到单层网壳结构的一阶屈曲模态以及相应的特征值;加下来采用这个一阶特征屈曲模态来作为初始缺陷的分布模态,然后分别应用于具体的单层网壳结构。

经过初始几何缺陷计算值其最大值设定为结构跨度的 $1/300$;加下来对结构开展第 N 次的非线性分析,然后计算出 N 个稳定的承载力系数,最终取最不利值作为单层网壳结构的最终稳定承载力系数具体数值^[3]。

4.3 结果分析

当采用 N 阶特征缺陷的模态法对单层网壳结构进行稳定承载力系数分析,我们取 $N=20$ 进行分析试算。然后基于随机缺陷模式的方法的整体结果空间样本,深入分析了各模型的最最终稳定承载力系数所对应的准确率。这里以梁跨比为 $1/5$ 的单层网壳结构为例。由于整体结构和荷载的对称性,一些特征的屈曲模态会成对出现,我们可以将其归为一类。因此,在具体应用的工程实践中,可以采用单层网壳结构的前 20 个特征屈曲模态,以此来模拟初始几何缺陷下的分布模态,对于其结果分别进行 20 次的非线性屈曲分析,然后取最不利值来作为单层网壳结构的最终稳定承载力系数。该方法可以科学、严谨地评价单层网壳结构的整体稳定性。

5 结语

根据以上研究可以发现,以 $K8$ 的单层网壳结构为研究对象,能够得出以下具体分析:

①运用随机缺陷模态法虽然可以合理地计算出初始几何缺陷下对单层网壳结构的稳定承载力影响,但总体的数据计算量较大。

②运用 N 阶特征的缺陷模态法可以通过较少的数据计算,来获得满足在“ $3a$ ”原则下要求的结构稳定承载力,并且可以科学严谨地评价单层网壳结构的整体稳定性能。

参考文献

- [1] 曲扬,罗永峰,黄青隆.单层柱面网壳动力稳定性评估的阶跃推覆分析方法[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(1):81-88.
- [2] 徐军,孙锐.地震作用下单层网壳结构动力稳定性分析的能量准则[J].结构工程师,2018,34(S1):42-47.
- [3] 蔡健,贺盛,姜正荣,等.单层网壳结构稳定性分析方法研究[J].工程力学,2015,32(7):103-110.