

混凝土密肋式锥面网壳结构的地震响应分析

杨水艳¹, 张华刚^{2*}, 师兵兵¹, 龚琨¹

(1. 贵阳信息科技学院 土木工程系, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 空间结构研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 混凝土折板式锥面网壳是通过等分圆锥面, 再由密肋平板在脊线处交汇形成的新型空间网壳结构。文中以混凝土折板式锥面网壳为研究对象, 通过振型分解反应谱法对特例模型结构进行单维和多维不同方向下地震作用的响应进行分析。分析结果表明: 频谱分布均较为密集且随振型阶数的增大有明显的跳跃性, 因结构具有多条对称轴的缘故, 对称性且成对出现的振型较多; 结构主要以竖向振动为主, 振型主要表现在边梁附近密肋折板的竖向振动, 并且振动区域不断向边梁处移动; 本结构受竖向地震和三向地震作用的影响较大, 在做抗震设计时, 应重点考虑其对结构的破坏。

关键词: 混凝土; 地震响应分析; 动内力系数

中图分类号: TU393

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0145-03

80 年代前, 我国关于空间结构抗震的研究极少, 稍有规模的研究起始于 80 年代初期。如 1973 年崔振亚^[1]在北京国际俱乐部网球馆设计中, 对球型节点钢管网架结构进行了抗震估算。随着我国经济的发展, 有一批学者对网壳结构的抗震性能进行广泛的研究; 曹资等^[2]应用多维多点虚拟激励法对常州体育馆网壳结构进行地震响应分析; 薛索铎等^[3]利用 EL-Centro 地震波对双层柱面网壳结构进行时程地震反应分析。因混凝土网壳结构曲面施工困难等问题使其结构在实际工程应用逐渐减少, 针对其抗震性能的研究内容知之甚少。但因混凝土具有耐久性、抗腐蚀、防火性强等优点, 混凝土网壳结构的应用再次出现在人们视线中。

针对曲面施工困难的问题, 我国在薄壳结构的基础上大力发展新型混凝土薄壳结构。如 2008 年潘文臣^[4]将钢管混凝土用于空间结构, 提出了钢管混凝土网壳这一新型空间结构体系, 利用时程分析法对 K8 型钢管混凝土网壳进行了地震反应分析; 张华刚等^[5-11]结合折板结构和密肋平板结构的优点提出混凝土折板式密肋网壳结构。宋勇^[7]利用反应谱法和时程分析法对比分析人字形折板网壳的地震响应特征; 并已经成功将其结构应用到实际工程中, 且具有良好的经济技术指标^[5]。

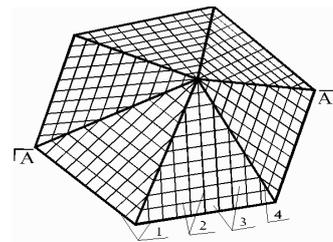
文中针对混凝土折板式密肋锥面网壳结构, 通过有元模型进行静、动力性能分析得到其关键指标的取值建议; 重点采用振型分解反应谱法对结构进行不同方向地震响应分析, 以期为此类结构应用到实际工程提供抗震设计理论的参考依据。

一、结构形式及有限元模型

1. 结构形式

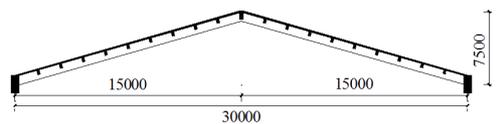
结构形式如图 1 所示, 脊线构成空间折线梁, 脊线与边梁交汇处设置支座, 密肋梁网格形式采用正交正放, 沿斜面

等标高处形成封闭圈的密肋梁称为环向肋, 剩余的密肋梁称为拱向肋, 屋盖矢高 f 为屋脊顶点与支座之间的高差。

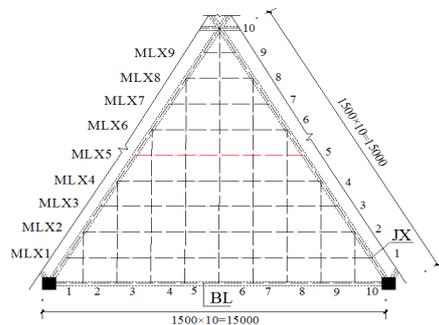


注: 1-边梁, 2-密肋梁, 3-屋面板, 4-脊线

(a) 网壳结构



(b) A-A 剖面图



(c) 1/6 结构平面布置图

图 1 结构布置及几何尺寸 (单位: mm)

收稿日期: 2022-08-26

作者简介: 杨水艳 (1995-), 女, 贵阳信息科技学院 土木工程系, 硕士, 工程师, 研究方向为空间网格结构。

通讯作者: 张华刚, 贵州大学 空间结构研究中心。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51568012); 2022 年贵阳信息科技学院教学内容和课程体系改革项目 (课题编号: 2022JG015)。

2. 基本算例

特例基本参数^[8-10]: 跨度为 30m, 矢跨比为 1/4; 各个构件截面尺寸: 边梁为 $b \times h=400\text{mm} \times 800\text{mm}$, 脊线为 $b \times h=300\text{mm} \times 700\text{mm}$, 密肋梁为 $b \times h=150\text{mm} \times 400\text{mm}$; 采用 C40 混凝土, 弹性模量 $E_c=3.25 \times 10^7 \text{kN/m}^2$, 泊松比 $\nu=0.2$, 钢筋混凝土密度 $\rho=2.42 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 计算荷载为 5.0kN/m^2 (不计自重)。图 1 中图 1 (c) 中中编号 BL、JX 和 ML 分别代表边梁、脊线和环向肋; 1~10 为节间的编号, 节间左右截面方向与节间编号顺序方向一致。

根据抗震设计规范要求, 抗震设防烈度达到 6 度及以下的地区, 建筑必须进行抗震设计。文中采用的基本动力参数为: 地震烈度为 7 度, 地震加速度 0.15g , 多遇地震, 第二组, 场地类别为 II。

二、结构动力特性分析

结构前 50 阶自振频率及其前 6 阶振型如图 2 和 3 所示; 结果分析表明: 频谱分布均较为密集且随振型阶数的增大有明显的跳跃性, 可见结构刚度分布较为均匀; 因结构具有多条对称轴的缘故, 对称性且成对出现的振型较多。结构主要以竖向振动为主, 振型主要表现在边梁附近密肋折板的竖向振动, 并且振动区域不断向边梁处移动。

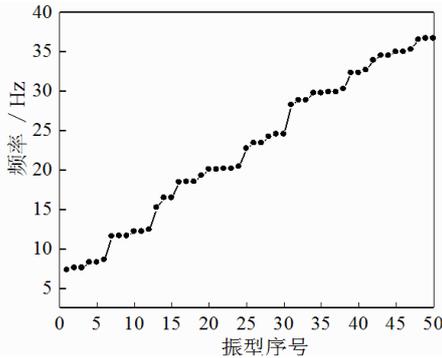


图 2 结构前 50 阶自振频率

由于各阶振型结构内力和位移最大值不会同时出现, 且存在几阶振型自振周期非常相近甚至相同的情况, 根据规范要求需要考虑结构扭转耦联的影响, 因此采用完全二次项组合法 (CQC) 对结构各阶振型进行组合, 文中采用振型分解反应谱法进行地震响应分析。需保证主要主要振动方向上的振型质量参与系数的值累加超过 ASCE 7-10 要求的 90%, 以确保有足够的振型数量。

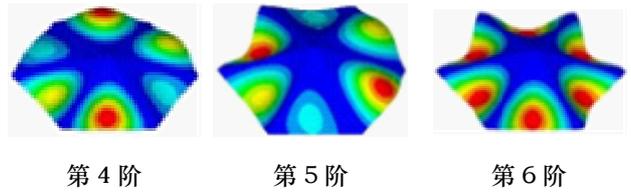
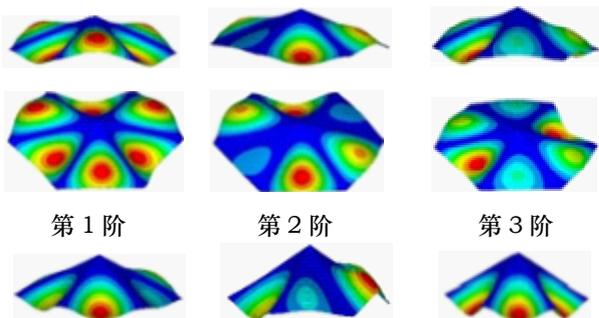


图 3 屋盖的前 6 阶振型图

三、地震特性分析

1. 地震反应特征

根据静力分析结果显示^[8-9], 混凝土密肋锥面网壳结构的构件主要以轴向应力和弯曲应力为主, 剪力作用较小可忽略不计, 对其地震反应的研究主要以轴力和弯矩为主。分别对结构进行水平、竖向和三向地震进行分析, 考虑多维地震响应时, X、Y、Z 的三个方向的地震作用幅值调整比例为 1: 0.85: 0.65, 并采用振型分解反应谱法进行地震作用计算。文中竖向作用的反应谱法和水平作用的反应谱法相同。

文中通过内力系数来描述结构动内力的分布规律, 可达到简化结构动内力设计计算。地震动内力系数 α 表示地震动内力 (N_d, M_d) 和静内力 (N_s, M_s) 之间的关系^[12], 即:

$$\alpha_N = |N_d / N_s|; \alpha_M = |M_d / M_s|$$

注: α_N —轴力系数; α_M —弯矩系数。

结构在水平、竖向和三向地震作用时, 各个构件的内力系数一般分布规律如下: JX 动内力系数分布规律见图 4 所示: 在不同方向地震作用时, 脊线的轴力系数在网壳顶点处最大, 内力系数向支座逐渐减小; 三向地震时, 动内力系数值均较大; 脊线作为主要受压构件, 在考虑动内力系数的影响时, 动静内力数值之和均偏大, 为偏安全考虑, 此时取 8# 左截面最为脊线最大内力系数代表值。

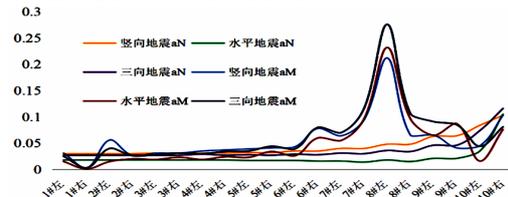


图 4 JX 动内力系数分布规律图

因 1/6 结构内力分布存在对称情况, 取 1/2 边梁进行分析。BL 动内力系数分布规律如图 5 所示: 多维地震内力响应明显大于单维地震作用, 且随着不断靠近跨中截面, 内力系数呈先增大后减小趋势, 内力系数最大值出现在截面受力变化处, 选此处为边梁的地震内力系数代表值;

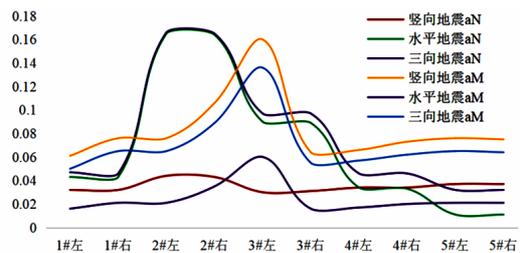


图 5 BL 动内力系数分布规律图

通过静力分析结果可知, 锥面网壳结构可看作由环向折线构成的单向传力结构, 环向肋的内力数值明显大于拱向肋, 且地震内力系数均较大, 但动静内力之和整体偏小, 不会控制设计, 在汇总时只考虑每根环向肋的控制截面。MLX 动内力系数分布规律见图 6 所示: 在不同方向地震作用下, 随着环向肋不断靠近屋顶, 轴力内力系数不断增大, 而靠近边梁和屋顶处的值较大, 密肋板跨中的环向肋值相对较小; 水平地震作用时, 虽内力系数较大, 但内力数值较小, 在设计时可忽略不计。

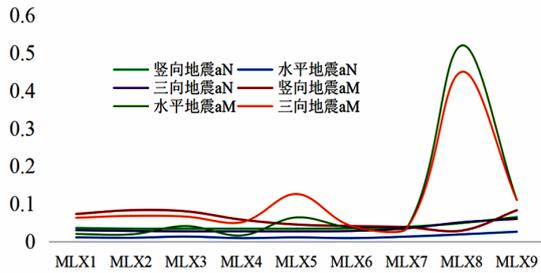


图 6 MLX 动内力系数分布规律图

由上综合分析可推断出, 该网壳结构水平方向跨度大, 竖向刚度小, 易受竖向地震破坏的影响, 且三向地震的影响较大, 在进行抗震设计分析时, 应重点考虑其对结构的影响。

四、结论

通过对混凝土折板式密肋锥面网壳结构的地震响应分析得出以下结论:

(1) 频谱分布均较为密集且随振型阶数的增大有明显的跳跃性, 因结构具有多条对称轴的缘故, 对称性且成对出现的振型较多。

(2) 结构主要以竖向振动为主, 振型主要表现在边梁附近密肋折板的竖向振动, 并且振动区域不断向边梁处移动。

(3) 本结构受竖向地震和三向地震作用影响较大, 在做

抗震设计时, 应重点考虑其对结构的影响。

文献参考

- [1] 薛素铎, 张毅刚, 曹资等. 中国空间结构十年抗震研究的发展和展望[J]. 工业建筑, 2013, 43(6): 105.
- [2] 冯远, 夏循, 曹资等. 常州体育馆索承单层网壳屋盖结构抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(9): 41-44.
- [3] 薛素铎, 曹资, 王健宁. 双层柱面网壳弹塑性震性能[J]. 工业建筑, 2003, (2): 59-61+82.
- [4] 潘文臣. 钢管混凝土网壳的地震反应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [5] 张华刚, 张钰, 吴琴等. 新型混凝土壳体结构的研究概况及工程实践[J]. 空间结构, 2019, 25(3): 3-12+21.
- [6] 张华刚, 杨期柱, 马克俭等. 人字形密肋式折板拱壳的静力性能分析及其工程应用[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(S2): 29-35.
- [7] 宋勇, 张华刚, 姜岚等. 人字形密肋式折板壳结构地震响应分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(6): 98-104.
- [8] 杨水艳. 混凝土密肋锥面网壳的力学性能分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [9] 杨水艳, 张华刚, 龚琨. 正交网格混凝土密肋式锥面网壳的静力性能分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版): 1-7.
- [10] 杨水艳, 张华刚, 马克俭. 混凝土密肋式锥面网壳的动力特性分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 97-103.
- [11] 杨水艳, 张华刚, 王坤平等. 混凝土锥面密肋网壳与下部结构共同工作动力特性分析[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(1): 140-142.
- [12] 曹资, 张毅刚. 单层球面网壳地震反应特征分析[J]. 建筑结构, 1998, (8): 3-5.

(上接第 130 页)

三、结论

乳化沥青温再生方式具有一定的可行性, 乳化沥青的加入可逐步恢复再生沥青结合料的针入度、延度等, 随掺量的提高性能呈线性趋势接近原沥青的性能指标。但要恢复老化沥青的性能, 使再生沥青结合料混合料达到路用效果标准, 单纯的乳化沥青不能保证, 可采用一些改性乳化沥青或其他外掺剂等。

乳化沥青的加入改善了再生沥青结合料的感温性, 随着添加量的提高再生沥青结合料的感温性能改善效果逐渐增加, 135℃表观黏度逐渐降低, 且由计算可知随着掺量的增加拌和与压实温度上下限逐渐降低, 利用乳化沥青再生的混合料施工和易性比老化沥青得到明显的改善。其它如流变性、路用性能等方面需要继续研究验证。

参考文献

- [1] 李泉, 韩庆奎, 张继森等. 高废旧料掺量厂拌热再生技术性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(06): 301-304.
- [2] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 72-88.
- [3] 张攀, 栾雨澄. 老旧沥青路面再生技术的应用[J]. 中国公路, 2021, (13): 99-100.
- [4] 万超, 俞鹏飞. 高速公路乳化沥青厂拌冷再生技术实施效果评价及应用经验总结[C]//中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集.[出版者不详], 2021: 274-278.
- [5] 周银宝. 乳化沥青温拌全再生研究与经济性分析[J]. 工程与建设, 2018, 32(2): 255-257+262.
- [6] 王维营. 大比例温拌再生沥青及混合料性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [7] JTG E20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].