DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.003

装配式板片组合木网壳结构静力稳定性参数化研究

魏 越1,葛荟斌1,2,罗尧治1

(1. 浙江大学 空间结构研究中心,浙江 杭州 310058;

2. 浙江大学长三角智慧绿洲创新中心 未来城市(智慧城市)实验室,浙江 嘉兴 314100)

摘 要:装配式板片组合木网壳结构是一种采用曲线轮廓平面木板建造曲面空间网壳的新型结构体系.为探究这 类结构体系的稳定性能与破坏机理,建立两类球面木网壳、四类柱面木网壳的有限元模型,开展非线性全过程分 析,对比网格尺寸、矢跨比、荷载分布、初始缺陷、节点半刚性等因素对网壳静力稳定性能的影响.研究表明,装配式 板片组合木网壳存在整体失稳破坏、局部失稳破坏和强度破坏三种破坏形式,其整体失稳模态呈现"凸起"与"塌 陷"交替的对称波形.这类结构的极限承载力随着网格尺寸的减小、矢跨比的增大而增大,节点刚度对木网壳稳定 承载力的影响较大.本文旨在为新型木网壳结构体系的分析与设计提供参考. 关键词:木网壳结构;板片构件;结构稳定性;参数化分析

中图分类号:TU366.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-6578(2025)01-0003-10

Parametric analysis of static stability of prefabricated wooden reticulated shell composed of plate members

WEI Yue¹, GE Hui-bin^{1,2}, LUO Yao-zhi¹

Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
 Future City Laboratory, Innovation Center of Yangtze River Delta, Zhejiang University, Jiaxing 314100, China)

Abstract: The prefabricated wooden reticulated shell structure composed of plate members is a new structural system, which uses spatial curved wooden plate members to build curved-surface reticulated shell structure. In this paper, to investigate the stability and failure mechanism of this structural system, finite element models of two types of spherical wooden shells and four types of cylindrical wooden shells were established, followed by a full structural nonlinear analysis. The static stability of the wooden reticulated shells was examined by parametric analysis, and the influences of mesh size, rise-span ratio, load distribution, initial imperfection and node stiffness are analyzed. Research shows that there are three types of failure modes of the prefabricated wooden reticulated shell composed of plate members: overall instability damage, local instability damage and strength damage. The overall instability mode shows a symmetrical waveform with alternating "bulge" and "collapse". The ultimate load capacity of the wooden shells increases of the rise-span ratio. The influence of node stiffness on the ultimate load capacity of wooden shells is relevantly large. This research can provide a reference for the analysis and design of new wooden shells structural system.

Key words: wooden reticulated shell structure; plate member; structural stability; parametric analysis

作者简介:魏越(1996一),男,山东滨州人,硕士,主要从事大跨空间结构研究. E-mail: 21912272@zju. edu. cn

通信联系人:罗尧治,男,博士,教授.E-mail.luoyz@zju.edu.cn

收稿日期: 2022-05-31.

基金项目:国家自然科学基金项目(51778568);浙江省自然科学基金项目(LQ23E080016);浙江省博士后择优资助项目(ZJ2022081).

随着土木工程技术发展和建筑行业需要,我国 大力推广绿色、装配化建筑,推动定制化、商品化、低 碳化结构构件的研发与应用^[1-4].罗尧治等^[5]提出了 装配式板片组合木网壳结构,如图1所示,该结构以 曲线轮廓的平面木板为主要构件,可通过数控切割 技术进行定制化加工,具备自动化预制、高效化储运 和装配化施工等特点.通过板片构件的曲线轮廓拟 合网壳的曲面造型,实现结构与屋面一体化,为自由 曲面网壳的塑造提供了一种高效便捷的方式.





静力稳定性一般是单层网壳结构体系设计计算 的关键问题,涉及到材料与几何双重非线性问 题^[6-8].传统钢结构网壳的非线性有限元和参数化分 析方法较为成熟^[9-10],为木网壳结构体系的研发与 应用提供了有效手段.近年来,木网壳结构的稳定性 能逐渐得到研究人员的关注^[11-12].孙小鸾等^[13]开展 了基于多段梁模型的K6木网壳非线性有限元模拟, 讨论了节点刚度和矢跨比对木网壳结构稳定性的影 响;DAVALOS^[14]通过数值模拟研究了荷载工况对 木网壳稳定性能的影响;HOLZER 等^[15]、PAN 等^[16]分别通过有限元模拟分析了矢跨比、网格划分 和节点刚度等对木网壳临界荷载的影响;何敏娟 等^[17]通过有限元分析研究了节点半刚性对单层木 网壳稳定性能的影响.

目前,针对以胶合木板片为主要构件的空间网 壳结构的稳定性能研究较少.为了解装配式板片组 合空间木网壳结构的稳定破坏机理及影响规律,本 文建立了两类球面木网壳、四类柱面木网壳的参数 化有限元模型,分别开展了非线性全过程分析,分析 对比了网格尺寸、矢跨比、荷载分布、初始缺陷、节点 半刚性等因素对木网壳稳定性的影响,从而为新型 结构体系的分析与设计提供参考.

1 装配式板片组合木网壳结构

装配式板片组合木网壳结构是一类以拥有曲线 轮廓的平面木板为基本构件的曲面空间网壳结构, 主张以简单的平面板片建造复杂的空间曲面结构. 图 2 为结构体系概念图,与传统曲面木网壳相比,装 配式板片组合木网壳结构在构件、节点、支座与屋面 系统等方面有一定创新.

板片构件主要选用胶合木板,通过数控切割技术加工而成,可进行定制化加工,如任意形式的曲线轮廓、变宽度构件截面等.板片构件具备明显的平面属性和曲线轮廓特征,其布置形式遵循"线-面" 原则^[4].



Fig. 2 Conceptual diagram of prefabricated wooden reticulated shell composed of plate members

装配式板片组合木网壳结构节点处采用螺栓连接,节点类型主要包括:钢填板节点、钢夹板节点、植筋节点及组合节点.在节点设计中引入"插板"与"扣板",可有效实现装配化的节点连接.为满足结构功能与建筑造型的统一,在节点板设计时需考虑角度偏移与轮廓曲线.

装配式板片组合木网壳结构常用的屋面系统包 括金属板屋面、玻璃采光屋面和卷材涂膜屋面三种 类型.其中,玻璃屋面设计简单、附属结构少、装配化 程度高,在采光、造型、能耗等方面具备一定的优势. 装配式板片组合木网壳的支撑体系包括支承结构与 支座节点两方面,按照支承结构的不同可分为框架 柱支承和拱落地支承两种类型,支座节点主要包括 刚性支座、铰支座和弹性支座三种类型.

2 网壳数值模型建立与分析

本节将通过有限元软件 ANSYS 建立装配式板 片组合木网壳结构的有限元模型,开展非线性全过 程分析,跟踪木网壳失稳全过程的平衡路径,得到典 型结构的荷载-位移曲线.

2.1 基本建模参数

胶合木材呈现明显的各向异性,本文在理想弹 塑性本构模型^[18]的基础上进行简化,采用双直线 模型描述木材的应力-应变关系.胶合木材力学参 数选自 GB/T 50708-2012《胶合木结构技术规范》、 LY/T 2383-2014《结构用木材强度等级》,具体取值 见表1和表2.

梁单元常用于单层网壳结构的有限元建模,能 有效模拟结构的整体失稳破坏过程,因此采用 BEAM188单元建立胶合木板片构件模型.本文研 究对象采用了装配式节点,属于半刚性的连接方式^[17].节点有限元等效模型如图 3 所示,采用弹簧 单元 COMBIN40 分别模拟节点坐标系下绕 u、v、w 轴的转动刚度 k_u、k_v、k_w,并耦合节点 1、2 的平动自 由度.本文采用的相对节点刚度为与对应板片构件 线刚度的比值.



图 3 半刚性节点模拟

Fig. 3 Semi-rigid joint simulation

$$Ix = w^3 t / 12 \tag{1}$$

$$I_y = wt^3 / 12 \tag{2}$$

$$K_{\rm out} = k_{\rm out} E I y / L_0 \tag{3}$$

$$K_{\rm in} = k_{\rm in} E I x / L_0 \tag{4}$$

式中:w 为板片构件的宽度;t 为板片构件的厚度; K_{out}为平面外节点刚度;K_{in}为平面内节点刚度; k_{out}为平面外相对节点刚度;k_{in}为平面内相对节点 刚度.

在周边节点处设置固定支座,将均布面荷载转 换为节点荷载施加,如图 4 所示.分析时同时考虑几 何与材料非线性,采用一致缺陷模态分析法施加初 始几何缺陷,根据弹性屈曲分析结果中的最低阶屈 曲模态确定几何缺陷分布形状,大小为跨度的 1/300.

| 表1 胶合木材力学参数取值 |
|---------------|
|---------------|

| Table 1 | Mechanical | parameters | of | glued | timber |
|---------|------------|------------|----|-------|--------|
| | | p | | 8 | |

| E_x/GPa | $E_y/{ m GPa}$ | $E_z/{ m GPa}$ | Pr_{xy} | Pr_{xz} | Pr_{yz} | G_{xy}/GPa | $G_{yz}/{ m GPa}$ | $G_{xz}/{ m GPa}$ |
|------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| 12.00 | 0.61 | 0.61 | 0.40 | 0.03 | 0.03 | 0.92 | 0.73 | 0.22 |
| 注:E、Pr | G分别为弹性相 | 莫量、泊松比和剪 | 切模量. | | | | | |

表 2 胶合木材屈服强度特征值(单位:MPa)

| Table 2 Yield strength characteristic value of glued timber (Unit: MPa) | | | | | |
|---|------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| $F_{\epsilon x}$ | $F_{\epsilon y}$ | $F_{\epsilon z}$ | F_{uxy} | F_{vyz} | F_{vzx} |
| 41.0 | 12.5 | 12.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |

注:F_ε、F_ν分别为抗压强度特征值、剪切强度特征值.



国 • 有限尤模型 Fig. 4 Finite element model

2.2 典型网壳分析结果

以凯威特(K6)球面网壳为例,建立有限元模型 并开展非线性分析,建模参数见表 3.

表 3 典型网壳参数化建模方案

| Table 3 | Parametric | modeling | scheme | for | typical | shel | 1 |
|---------|------------|----------|--------|-----|---------|------|---|
|---------|------------|----------|--------|-----|---------|------|---|

| 网壳参数类型 | 参数取值 |
|---------------------------|----------|
| 网壳类型 | 凯威特型球壳 |
| 跨度/m | 20 |
| 平均网格尺寸/m | 2 |
| 板片构件宽度/cm | 36 |
| 板片构件厚度/cm | 12 |
| 矢跨比 | 1/4 |
| 均布荷载/(kN/m ²) | 30 |
| 荷载分布 | 满跨分布 |
| 初始几何缺陷幅值/mm | 1/300 跨度 |
| 相对节点刚度 | ~~ |

注:相对节点刚度为节点转动刚度与对应板片构件线刚度的 比值.

图 5 给出了典型板片组合木网壳的荷载-位移 曲线,可以看出:荷载-位移曲线在加载初期呈线性 关系,随后开始呈现非线性.施加至极限荷载时,结 构无法进一步承受荷载而发生失稳破坏.

图 6 为极限荷载状态下凯威特型球面木网壳的 应力云图和位移云图.可以看出,板片构件内应力分



Fig. 5 Load-displacement curve

布呈现中间大、两端小的分布规律;球壳顶部两环区 域内的板片构件应力较大,率先发生绕弱轴弯曲失 稳破坏,部分板片构件绕节点整体扭转.



(a) 应力云图



(b) 位移云图

图 6 凯威特型球面木网壳应力、位移分布

Fig. 6 Stress and displacement distribution of Kiewittype spherical wooden reticulated shell

2.3 网壳破坏机理

板片组合单层钢网壳的整体稳定性破坏是最常见的破坏形式之一;板片构件在受到轴压力作用时,

容易发生绕弱轴的弯曲失稳,从而导致板片组合网 壳结构发生局部失稳破坏^[4].木网壳结构中,由于木 材的延展性能较差,结构构件在荷载作用下容易发 生撕裂破坏^[3].在表3的基础上调整计算参数,探究 装配式板片组合木网壳结构可能发生的破坏形式. 结果如图7所示,装配式板片组合木网壳结构具有 三种不同的破坏形式,具体特征如下.



(c) 强度破坏

图 7 破坏形式 Fig. 7 Failure modes

1)整体失稳破坏:在荷载作用下整体结构呈现 出较大位移,进而发生整体失稳破坏,包括整体结 构发生塌陷和大量构件发生平面外弯曲两种 情况.

2)局部失稳破坏:结构中部分板片构件发生绕 弱轴弯曲失稳,导致结构发生局部失稳破坏,包括部 分节点处塌陷失稳与局部区域的板片构件绕节点整 体扭转两种情况.

3)强度破坏:在荷载作用下,胶合木构件在节点 位置和外边缘处产生强度破坏.强度破坏一般发生 在板片构件截面较大且荷载较大的木网壳结构中, 原因是网壳结构中应力分布不均匀,截面越大,这种 不均匀性越明显.

3 装配式板片组合球面木网壳稳定性 参数化分析

为探究装配式板片组合木网壳结构的稳定性 能,建立了两种典型球面网壳结构的有限元模型:凯 威特型和短程线型,如图 8 所示.参数化分析方案见 表 4.



(a) 凯威特型



(b) 短程线型

图 8 球面木网壳有限元模型

Fig. 8 Finite element model of spherical wooden reticulated shell

表 4 球面木网壳参数化建模方案

| 参数类型 | 取值范围 | 标准取值 |
|-------------|----------------|----------|
| 跨度/m | $5\!\sim\!40$ | 20 |
| 平均网格尺寸/m | 0.8~3.5 | 2 |
| 板片构件宽度/cm | $10 \sim 120$ | 36 |
| 板片构件厚度/cm | $5 \sim 36$ | 12 |
| 矢跨比 | $1/3 \sim 1/7$ | 1/4 |
| 荷载分布 | 满跨分布 半跨分布 | 满跨分布 |
| 初始几何缺陷幅值/mm | 0~235 | 1/300 跨度 |
| 相对节点刚度 | 0.01~∞ | ∞ |

注:相对节点刚度为节点转动刚度与对应板片构件线刚度的比值.

3.1 网格尺寸

图 9 给出了不同网格尺寸下球面木网壳的极限 荷载,可以看出,随着网格尺寸的减小,网壳极限荷 载提高.原因是网格尺寸越大,板片构件布置越稀 疏,网壳整体刚度变小,球壳的极限荷载降低.



3.2 矢跨比

图 10 给出了不同矢跨比下装配式板片组合球 面木网壳的极限荷载.随着矢跨比的增大,球壳的极 限荷载提高,这是因为网壳结构的矢跨比越大,网壳 起拱的角度越大,构件内力中轴力的比例增大.胶合 木板片构件的抗弯和抗剪强度较弱,提高构件内力 中的轴力比例,可充分发挥板片构件的力学性能.设 计时选用较大矢跨比,可以充分发挥板片构件顺纹 抗压、抗拉强度较强的力学性能.





Fig. 10 Effect of rise-span ratio on ultimate load

3.3 荷载分布

考虑满跨均布荷载和半跨均布荷载两种情况, 图 11 给出了不同荷载分布下球面木网壳的荷载-位



图 11 不同荷载分布下球面木网壳荷载-位移曲线对比

Fig. 11 Comparison of load-displacement curves for spherical wooden reticulated shells under different load distributions

移曲线.对比分析可知:凯威型球壳满跨荷载分布下的极限承载力低于半跨荷载分布下的极限承载力, 短程线型球壳的极限承载力对荷载分布形式不敏感.

3.4 初始几何缺陷

选取前 10 阶屈曲模态作为初始几何缺陷分布 施加于网壳有限元模型上,进行非线性有限元分析. 图 12 给出了不同初始几何缺陷分布下的球壳极限 荷载.对比分析可知:设计分析时可以将结构的最低 阶特征值屈曲模态作为最不利初始几何缺陷分布.

图 13 给出了不同初始几何缺陷幅值下的球壳 极限荷载,随着初始缺陷幅值的增大,网壳结构的极 限荷载逐渐降低;初始缺陷从无到有阶段,结构的极 限荷载变化显著,说明初始几何缺陷的存在对网壳

8





Fig. 12 Effect of initial geometric imperfection distribution on ultimate load



图 13 初始几何缺陷幅值对极限荷载的影响



结构的稳定性有较大影响;随着缺陷幅值的继续增大,极限荷载降低的幅度减小.

3.5 节点刚度

分析节点刚度的不同对木网壳结构稳定承载力 的影响,结果如图 14 所示.其中,纵坐标为相对极限 荷载 *φ*,即半刚性节点连接与刚性节点连接木网壳 极限荷载的比值.对比分析可知,随着节点刚度的减 小,木网壳的稳定承载力发生明显下降,当相对节点 刚度大于 1 时,两类木 网壳的相对极限荷载达到 95%以上,可认为节点近似于刚接;当相对节点刚度 小于 0.2 时,木网壳的相对极限荷载在 60%以下,可 认为节点近似于铰接;当相对节点刚度在 0.2~1.0 时,可认为节点为半刚性节点.





4 装配式板片组合柱面木网壳稳定性 参数化分析

为进一步研究装配式板片组合木网壳结构的稳定性能,本章建立了肋环型和联方型柱面木网壳的 有限元模型,如图 15 所示,考虑两纵边支撑和四周 支撑两种约束形式,参数化分析方案见表 5.



Fig. 15 Finite element model of cylindrical wooden reticulated shell

| l able 5 | rationlated shall | ng scheme for cylir | idrical wood |
|----------|-------------------|---------------------|--------------|
| | Tetreulated Shell | | |
| | 参数类型 | 取值范围 | 标准取值 |
| | 跨度/m | $5\!\sim\!40$ | 20 |
| | 长宽比 | 1~3 | 1 |
| 곡 | 平均网格尺寸/m | 0.8~3.5 | 2 |
| 杤 | 〔片构件宽度/cm | $10 \sim 100$ | 36 |

 $5 \sim 36$

 $1/2 \sim 1/5$

满跨分布

半跨分布

12

1/4

满跨分布

表 5 柱面木网壳参数化建模方案

1 1. 1 len

| 相对节点刚度 0.01~∞ ∞ | 初始几何缺陷幅值/mm | $0\!\sim\!235$ | 1/300 跨度 |
|-----------------|-------------|----------------|----------|
| | 相对节点刚度 | 0.01~~~ | ∞ |

注:相对节点刚度为节点转动刚度与对应板片构件线刚度的比值.

4.1 网格尺寸

板片构件厚度/cm

矢跨比

荷载分布

图 16 给出了不同网格尺寸下柱面木网壳的极 限荷载,随着网格尺寸的减小,网壳极限荷载提高. 原因是网格尺寸越小,构件越密集,网壳整体刚度 越大.



图 16 网格尺寸对极限荷载的影响

Fig. 16 Effect of mesh size on ultimate load

4.2 长宽比

本文引入长宽比的概念,即柱壳纵向跨度与横 向跨度之比.图 17 给出了不同长宽比下柱壳的极限 荷载.随着长宽比的增大,柱壳的极限荷载降低,但 逐渐趋于某一极限值.

4.3 矢跨比

图 18 给出了不同矢跨比下装配式板片组合柱 面木网壳的极限荷载.随着矢跨比的减小,柱壳的极 限荷载呈现先提高再降低的趋势,分析其原因:柱壳



图 17 长宽比对极限荷载的影响





图 18 矢跨比对极限荷载的影响



的矢跨比较大时,支座附近的纵向板片构件应力较 大,网壳发生局部失稳破坏;矢跨比较小时,网壳的 起拱角度小,板片构件中承受弯矩较大,承受顺纹轴 力较小,未能充分发挥胶合木板片构件顺纹抗压/拉 能力较强的特点.

4.4 荷载分布

对四种柱面木网壳分别施加满跨均布荷载和半 跨均布荷载,进行有限元分析,得到其荷载-位移曲 线(图 19),其中半跨均布荷载考虑柱壳纵边方向 (纵向)与端边方向(横向)的不同.对比分析可知,装 配式板片组合柱面木网壳对横向半跨荷载分布不敏 感,纵向半跨荷载对结构的极限荷载影响较大.

4.5 初始几何缺陷

图 20 给出了不同初始几何缺陷分布下柱面木 网壳的极限荷载.对比分析可知:柱面木网壳的稳定 承载力对初始几何缺陷分布的敏感度不高,除纵边











支撑联方型柱壳的稳定承载力变化较明显外,其余 三类柱壳的稳定承载力变化区间均低于 3%.

图 21 给出了不同初始几何缺陷幅值下柱壳的 相对极限荷载,对比分析可知:纵边支撑约束下的柱 面木网壳对缺陷幅值的敏感度较高,四周支撑约束 下的柱面木网壳对缺陷幅值的敏感度较低.一般情 况下,初始缺陷幅值越大,网壳结构的极限荷载越 低;特殊地,对于四周支撑联方型柱壳,极限荷载随 着初始缺陷幅值的增大呈现先提高后降低的趋势.







4.6 节点刚度

分析节点刚度的不同对柱面木网壳结构稳定承载力的影响,结果如图 22 所示.对比分析可知,随着节点刚度的减小,木网壳的稳定承载力发生明显下降,当相对节点刚度大于 2.0 时,木网壳的相对极限荷载达到 80%以上,可认为节点近似于刚接;当相



图 22 节点刚度对极限荷载的影响 Fig. 22 Effect of node stiffness on ultimate load

对节点刚度小于 0.5 时,木网壳的相对极限荷载在 50%以下,可认为节点近似于铰接;当相对节点刚度 在 0.5~2.0 时,可认为节点为半刚性节点.

5 结 论

本文针对装配式板片组合木网壳结构的静力稳 定性能,开展参数化数值模拟研究,对比了两类球面 木网壳、四类柱面木网壳的整体稳定性,研究了这类 结构的失稳形态与破坏机理,探讨了网格尺寸、矢跨 比、荷载分布、初始缺陷、节点半刚性等因素对木网 壳稳定性的影响规律,为装配式板片组合木网壳结 构的分析和设计提供了参考.本文的主要结论如下:

1)装配式板片组合木网壳结构主要呈现三种破 坏形式:整体失稳破坏、局部失稳破坏和强度破坏. 由于木材延展性较差,在临界受力状态时易发生脆 性破坏.

2)装配式板片组合木网壳结构的稳定承载力总体上随矢跨比减小而减小,随网格尺寸减小而增大; 柱面木网壳结构中,稳定承载力随着柱壳长宽比的 增大而减小,但逐渐趋于某一极限值.

3)荷载分布对装配式板片组合球面木网壳的影 响较小,对柱面木网壳的影响较大.柱面木网壳在纵 向半跨荷载分布下的极限承载力较低.

4)开展非线性分析计算时,最低阶屈曲模态可 作为装配式板片组合木网壳结构的最不利初始几何 缺陷分布.其中,球面网壳与柱面网壳相比,其稳定 承载力对初始几何缺陷幅值更为敏感.

5)装配式板片组合木网壳的稳定承载力受节点

平面外刚度影响较大.相对节点刚度大于 2.0 时,木 网壳的极限荷载下降小于 20%,可认为节点近似于 刚接;相对节点刚度小于 0.2 时,木网壳极限荷载下 降已达到 50%,可认为节点近似于铰接;相对节点 刚度在 0.2~2.0,节点为半刚性.

参考文献

[1] 董石麟,裘涛,罗尧治.空间结构[M].北京:中国计划出版社,2003:174-175.

DONG Shi-Lin, QIU Tao, LUO Yao-zhi. Spatical sturctures [M]. Beijing: China Planning Press, 2003: 174-175.

[2] 董石麟. 中国空间结构的发展与展望[J]. 建筑结构学报,2010,31(6): 38-51.

DONG Shi-lin. Development and expectation of spatial structures in China [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 38-51.

- [3] 刘伟庆,杨会峰. 现代木结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 16-43.
 LIU Wei-qing, YANG Hui-feng. Research progress on modern timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 16-43.
- [4] 葛荟斌. 再分式板片组合空间网壳结构体系及其稳定性 能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021: 13-17.
 GE Hui-bin. Stability of reticulated shell structure composed of plate members with sub-units [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 13-17.

- [6] 罗尧治,曷荟斌,冉分式极片组合球网壳结构体系[C]// 第十六届空间结构学术会议,杭州,2016.
- [7] GE Hui-bin, WAN Hua-ping, LUO Yao-zhi. Experimental and numerical study on stability behavior of reticulated shell composed of plate members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 171: 106102.
- [8] GE Hui-bin, WAN Hua-ping, LUO Yao-zhi. Experimental investigation into flexural buckling of doublelimb built-up plate members under compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 179: 106516.

(下转第34页)

^[5] 罗尧治,魏越,葛荟斌,等.采用板片构件的装配式木网 壳结构设计[J].南京工业大学学报(自然科学版), 2021,43(3): 294-299.
LUO Yao-zhi, WEI Yue, GE Hui-bin, et al. Design of prefabricated wooden reticulated shell structure composed of plate members [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2021, 43 (3): 294-299.
[6] 罗尧治,葛荟斌.再分式板片组合球网壳结构体系[C]//

Structure, 2008, (10): 90-92.

[6] 李庆祥,周云,汪大洋.L形和U形三维钝体结构绕流的数值模拟研究[J].防灾减灾工程学报,2011,31(3): 247-254.

LI Qing-xiang, ZHOU Yun, WANG Da-yang. Threedimensional numerical study on wind field around L-and U-shaped models[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(3): 247-254.

- [7] 葛义娇,范存新.十字形高层建筑风场数值模拟[J].苏州科技学院学报(工程技术版),2014,27(1):21-26.
 GE Yi-jiao, FAN Cun-xin. Numerical simulation of wind field on cross-shaped high-rise building [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineerng and Technology), 2004, 27(1):21-26.
- [8] 顾明,黄鹏,周晅毅,等.北京首都机场3号航站楼风荷载和响应研究[J].土木工程学报,2005,38(1):40-44.
 GU Ming, HUANG Peng, ZHOU Xuan-yi, et al. A study on wind loads and responses of Terminal 3 at Beijing Capital Airport [J]. China Civil Engineering Jour-

(上接第12页)

[9] 董石麟. 网状球壳的连续化分析方法[J]. 建筑结构学报, 1988,9(3):1-14.

DONG Shi-lin. Continuum analogy method for analyzing latticed spherical shells [J]. Journal of Building Structures, 1988, 9(3): 1-14

[10] 沈世钊. 网壳结构的稳定性[J]. 土木工程学报,1999, 32(6):11-19.

SHEN Shi-zhao. Stability of latticed shells [J]. China Civil Engineering Journal, 1999,32(6):11-19.

- [11] 冯远,龙卫国,欧加加,等.大跨度胶合木结构设计探索
 [J].建筑结构,2021,51(17):43-49.
 FENG Yuan, LONG Wei-guo, OU Jia-jia, et al. Exploration on design of large-span glulam structures
 [J]. Building Structure, 2021, 51(17):43-49.
- [12] 陆伟东,陆斌辉,屈丽荣,等.大跨木结构研究现状及关 键技术[J].四川建筑科学研究,2021,47(4):1-26.
 LU Wei-dong, LU Bin-hui, QU Li-rong, et al. Research status and key technologies of large span timber structures [J]. Sichuan Building Science, 2021,47 (4):1-26.
- [13] 孙小鸾,瞿以恒,刘伟庆,等.K6 型单层球面木网壳稳 定承载力非线性分析[J]. 土木工程学报,2020,53 (2):62-71.

SUN Xiao-luan, QU Yi-heng, LIU Wei-qing, et al. Nonlinear finite element analysis of stability of K6-type single layer spherical timber latticed shell [J]. China nal, 2005,38(1): 40-44.

[9] 顾明,杨伟,傅钦华,等.上海铁路南站屋盖结构平均风 荷载的数值模拟[J].同济大学学报(自然科学版), 2004,32(2):141-146.

GU Ming, YANG Wei, FU Qin-hua, et al. Numerical simulation of wind loads acting on roof of Shanghai Railway Station Building[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(2): 141-146.

- [10]许伟.大气边界层风洞中风场的数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:23.
 XU Wei. Numerical simulation of the airflow in atomospheric airflow in atomospheric-boundary-layer wind tunnel [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007:23.
- [11] 孙虎跃. 基于 CFD 和 PIV 技术的大跨屋盖表面流动结构研究[D]. 南京:东南大学,2017:43-44.
 SUN Hu-yue. Research on the flow structure around large-span roofs by CFD and PIV techniques[D]. Nanjing: Southeast University, 2017:43-43.

Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 62-71.

- [14] DAVALOS J F. Geometrically nonlinear finite element analysis of a glulam timber dome [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989: 167-192.
- [15] HOLZER S M, WU C H, TISSAOUI J. Finite element stability analysis of a Glulam Dome [J]. International Journal of Space Structures, 1992, 7 (4): 353-361.
- [16] PAN D H, GIRHAMMAR U A. Influence of geometrical parameters on behaviour of reticulated timber domes [J]. International Journal of Space Structures, 2003, 18(2): 105-121.
- [17] 何敏娟,胡超,舒展.节点半刚性对 K6 单层木网壳稳定 性能的影响[J].特种结构,2018,35(4):69-80.
 HE Min-juan, HU Chao, SHU Zhan. Influence of joint semi-rigidity on stability of K6 single-layer timber reticulated shell with slotted-in joints [J]. Special Structures,2018, 35(4): 69-80.
- [18] 陈志勇,祝恩淳,潘景龙.复杂应力状态下木材力学性 能的数值模拟[J]. 计算力学学报,2011,28(4): 629-634.

CHEN Zhi-yong, ZHU En-chun, PAN Jing-long. Numerical simulation of mechanical behaviour of wood under complex stress [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011,28(4): 629-634.