

大跨度球状网壳钢木混合结构施工过程分析及 施工措施建议

——以广州纳米中心圆项目为例

陈敏¹, 陈卓好², 冯永胜², 张富森¹, 刘治², 王洋¹

¹广东省第四建筑工程有限公司, 广东 广州

²广州大学土木与交通工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2024年12月16日; 录用日期: 2025年1月8日; 发布日期: 2025年1月21日

摘要

大跨度钢木混合结构以其高效、美观及经济性, 近年来受到了广泛关注和应用。本文以广州纳米中心圆项目工程为例, 对大跨度球状网壳钢木混合结构的施工过程进行数值模拟, 并提出关键施工措施建议。首先, 利用MIDAS GEN软件对该结构进行分层、整体及不同节点约束的建模。然后, 分析有无玻璃荷载及有无环向拉索的工况组合, 全面模拟了不同的施工过程对结构的影响。最后, 结合现场条件, 提出最优施工措施。研究表明, 节点约束处理对结构变形有显著影响, 刚性节点有利于控制变形; 环向拉索在各种条件下均能有效防止变形。因此, 建议在施工过程中, 节点尽量建造为刚性节点。同时, 采用分层施工并施加环向拉索, 且每施工完一层, 应立即施加拉索。

关键词

钢木混合结构, 球状网壳, 施工分析, 数值计算, 施工措施

Analysis of Construction Process and Suggestions for Key Construction Measures for Large-Span Spherical Reticulated Steel-Timber Hybrid Structures

—Taking the Guangzhou Nano Center Circle Project as an Example

Min Chen¹, Zhuoyu Chen², Yongsheng Feng², Fusen Zhang¹, Zhi Liu², Yang Wang¹

¹Guangdong Fourth Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²School of Civil and Transportation Engineering, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

文章引用: 陈敏, 陈卓好, 冯永胜, 张富森, 刘治, 王洋. 大跨度球状网壳钢木混合结构施工过程分析及施工措施建议[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 38-47. DOI: 10.12677/hjce.2025.141006

Abstract

In recent years, large-span steel-timber hybrid structures have garnered significant attention and application due to their efficiency, aesthetics, and economy. Taking the Guangzhou Nanometer Center Circular Project as an example, this paper conducts a comprehensive numerical analysis of the construction process of a large-span spherical reticulated steel-timber hybrid structure and proposes key construction recommendations. Firstly, the MIDAS GEN software is utilized to establish models for the structure at different levels, as a whole, and with various joint constraints. Subsequently, the impact of different construction processes on the structure is comprehensively simulated by analyzing combinations of working conditions with and without glass loads, as well as considering the influence of circumferential tension cables. Finally, an optimal construction scheme is determined based on the actual site conditions. The research reveals that joint constraint treatment has a significant impact on structural deformation, with rigid joints being beneficial for deformation control. Circumferential tension cables effectively prevent deformation under various conditions. Therefore, it is recommended that tension cables be applied in layers during the construction process, and tension cables should be installed immediately after the completion of each layer.

Keywords

Steel-Timber Hybrid Structure, Spherical Reticulated Shell, Construction Analysis, Numerical Calculation, Construction Measure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今建筑领域，创新与可持续发展成为核心追求。钢木混合结构作为一种新兴的建筑结构形式，受到了广泛的关注和应用，为建筑行业带来了新的活力与潜能。钢木混合结构巧妙地将钢材的高强度、优良的力学性能与木材的自然质感、良好的保温隔热性能相结合。这种融合不仅满足了现代建筑对结构强度和稳定性的要求，还赋予了建筑独特的美学价值和生态友好特性[1]-[3]。

钢木混合结构的发展前景十分广阔，逐渐成为了建筑领域的研究热点。这一趋势促使越来越多的研究人员投身于钢木混合结构的研究中，以期推动该领域技术的不断创新与发展。陈飞等[4]研究了自复位钢木混合剪力墙(SC-STHSW)的抗震性能，通过结合预应力钢框架(PTSF)与轻木剪力墙，并加滑移摩擦阻尼器(SFDs)连接，增强了复位性能。研究发现，提升自复位比率 αE 能显著降低震后残余及最大位移。李征等[5]设计了自重与侧抗力分离的钢-木混合结构(ST-SGLRS)，并创新性地提出了直接位移迭代设计法。研究表明，该设计方法对具备独立重力和侧向抵抗体系的钢-木混合结构是切实可行的。Colin F. Gilbert等[6]研究了新型的钢木混合支撑框架，重点关注钢梁与木柱之间的支撑连接，旨在将高性能结构钢支撑系统应用于重型木结构中。初步验证了可行性，建议未来进行系统地震性能测试，评估不同布局效果。赵伟等[7]探索了新型嵌入式钢木复合柱替换传统钢管柱的设计，以长沙别墅为例验证合理性。研究显示，新设计提升承载与抗屈曲能力，增强结构稳定性，地震模拟中表现优异，能替代纯钢柱确保建筑安全稳

定。

钢木混合结构在实际工程中应用广泛。上海西岸人工智能峰会 B 馆[8]采用了钢木混合网壳结构,以 0.5 m 高的木梁实现成功构建出跨度达 40 m 的空间,是当前世界上在单元材料使用方面最为节省的互承式钢木混合异形网壳。上海崇明体育训练基地游泳馆[9]采用了钢木混合张弦壳体结构,这种钢木混合结构不仅能提供足够的强度,而且还能很好地解决游泳馆建设和使用中保温以及耐腐蚀的难题。位于成都市青羊区的青羊樾府社区中心[10]巧妙地运用了层压胶合木的钢木混合体系,使社区中心具备了良好的结构性能和耐用性,还实现了社区空间的最大化利用。湖南长沙象山国际幼儿园[11]采用了一种创新的胶合木框架支撑-钢框架混合结构,具有较强的空间适应性,可以灵活调整以满足幼儿园不同功能区域的需求。

虽然,钢木混合结构有诸多优点,但由于木结构刚度较小,其在施工过程中容易产生较大变形,影响工程质量,甚至发生工程事故。因此,本文以广州纳米中心圆项目为实例,深入分析其大跨度球状网壳钢木混合结构施工全过程,提出相应的施工关键措施,为大跨度钢木混合结构的施工提供借鉴。本文利用 MIDAS GEN 软件,对广州纳米中心圆球状网壳结构进行了施工过程分析。在建模过程中,全面分析了有无玻璃荷载以及有无环向拉索作用下的多种工况组合,以精确模拟不同施工阶段对结构的影响。基于详细的分析结果,针对该工程提出了针对性的施工措施建议。这些建议旨在确保结构在施工过程中的安全性和稳定性,同时优化施工流程,提高工程效率。通过本文的研究,可为类似大跨度钢木混合结构的施工提供参考和借鉴。

2. 项目概况

广州纳米中心圆项目位于广州市黄埔区护林中路 195 号,其核心结构工程聚焦于纳米园内的标志性中心圆区域。此区域采用了一种创新的球状网壳钢木混合结构体系,巧妙地融合了现代建筑美学与工程技术。纳米中心圆项目的外观效果如图 1 所示。该中心圆最大直径为 38 米,高度为 21 米,垂直空间内规划为三层上部结构及一层地下室。其形态灵感源自自然界的苹果,呈现出一种既现代又和谐的苹果状外观。网壳部分采用了先进的胶合木结构技术,不仅展现了木材的自然美感,还确保了结构的稳固与耐用。而位于“苹果核”位置的核心部分,则是钢结构与外包木结构的完美融合。此外,整个结构的表皮采用了现代感十足的玻璃幕墙体系,不仅为室内引入了充足的自然光线,还营造出一种通透而梦幻的视觉效果,使得这一建筑杰作在日光与夜色中皆能展现出不同的魅力,成为广州市黄埔区一道亮丽的风景线。



Figure 1. Nano center circle project
图 1. 纳米中心圆项目

纳米中心圆工程的结构设计使用年限为 50 年，安全等级为二级。整体采用球状钢木混合网壳结构。同时，该项目的结构耐火等级设计严格遵循木结构标准。在抗震设计方面，项目所在场地的设防烈度为 7 度，地震加速度值为 0.10 g。此外，整个结构的建筑总高度为 21 米，屋面网壳的最高点为 17.3 米。外壳三维示意图如图 2 所示。

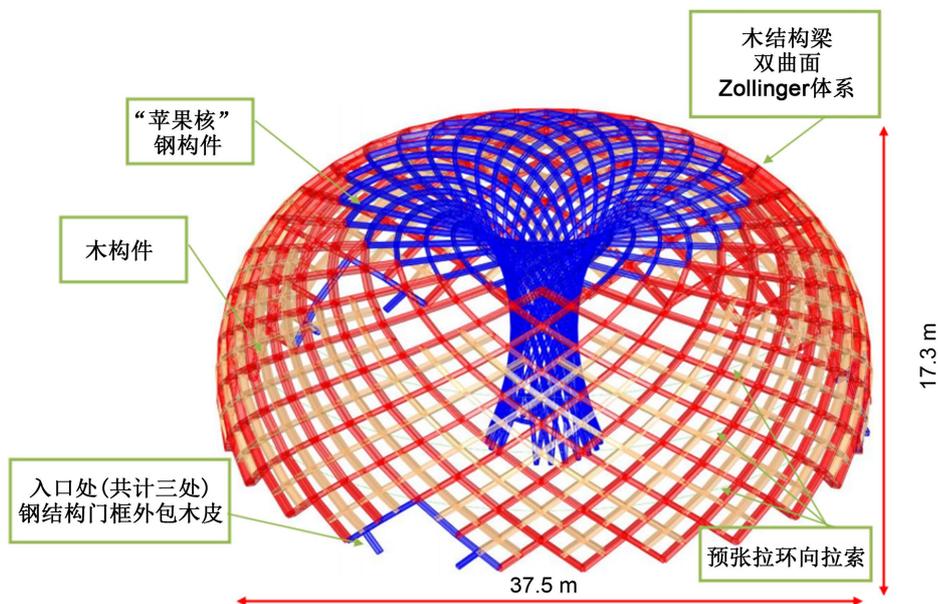


Figure 2. 3D schematic diagram of the shell
图 2. 外壳三维示意图

3. 施工过程数值分析

3.1. 建模过程

3.1.1. 材料特性

1) 结构用材

规格材：有木材认证机构的质量认证记号，墙骨柱木材采用V级及以上级，窗过梁及屋面搁栅木材达到IIIc及以上。项目结构用材如表 1 所示。

Table 1. Structural materials

表 1. 结构用材

材料名称	解释	含水率
SPF	进口云杉、松、冷杉结构材统称	≤15
OSB	木基结构板材	≤15

螺栓：4.8 级普通螺栓；锚栓：材料为 Q355B。

混凝土强度等级为 C30；钢筋强度等级为 1HRB400。

钢材：本单体使用钢构件强度为 Q355。

2) 材料设计指标和允许值

本项目主要的胶合木构件强度等级为 TCt32，系数调整后的设计值根据《木结构设计标准》。材料设

设计指标和允许值如表 2 所示。

Table 2. Material design indicators and allowable values
表 2. 材料设计指标和允许值

强度等级	TCt24	TCt28	TCt32	TCt36	TCt40
抗弯强度设计值 f_m (MPa)	16.7	19.5	22.3	25.1	27.9
顺纹抗压强度设计值 f_c (MPa)	14.8	16.9	19.0	21.1	23.2
顺纹抗拉强度设计值 f_t (MPa)	10.5	12.4	14.2	16.1	17.9
弹性模量 E (MPa)	6500	8000	9500	11,000	12,500

由上述表格可知，强度等级为 TCt32 的胶合木构件的抗弯强度设计值 $f_m = 23.0$ MPa；顺纹抗压及承压强度设计值 $f_c = 19.0$ MPa；顺纹抗拉强度设计值 $f_t = 14.2$ MPa；弹性模量 $E = 9500$ MPa。

SPF 材料力学性能：抗弯强度设计值 $f_m = 11.0$ MPa；顺纹抗压及承压强度设计值 $f_c = 10.0$ MPa；顺纹抗拉强度设计值 $f_t = 14.2$ MPa；顺纹抗剪强度设计值 $f_v = 1.4$ MPa；弹性模量 $E = 9000$ MPa。

Q355B 钢的屈服强度为 345 N/mm²。

3.1.2. 设计荷载

1) 主体结构构件自重

主体结构构件密度取值如表 3 所示。

Table 3. Density value of main structural components
表 3. 主体结构构件密度取值

构件	材料	密度(kN/m ³)
钢构件、链接件	钢	78.5
木梁	TCT32	5.5

2) 附加面荷载

外壳结构承受附加面荷载如表 4 所示。

Table 4. The shell structure bears additional surface loads
表 4. 外壳结构承受附加面荷载

材料名称	重量(kN/m ²)
(10TLOW-E)18A + (10T + 2.28SGP + 8T)超自夹胶中空玻璃	0.768
龙骨	0.2
总和	0.968

3) 活荷载

外壳：不上人屋顶：0.5 kN/m²。

3.2. 分析过程

采用逐层建模分析的方法。首先，构建首层网壳模型，并对其在各种工况下进行的分析；然后在首

层模型的基础上, 继续搭建二层模型, 并同样对各种工况实施分析。最终, 当所有层级模型均构建完毕并经过分析后, 整合形成一个完整的整体模型, 再次进行全面的工况分析。

3.2.1. 分层分析

构建首层网壳模型后, 对其在 1.0DL+1.0LL 工况下产生的变形进行计算。首层模型如图 3 以及图 4 所示。计算结果显示, 首层网壳再无拉索不考虑玻璃荷载的情况下产生的最大节点位移为 100 mm; 产生的 Z 向最大节点位移为 22 mm, 满足规范要求。网壳在无拉索考虑玻璃荷载的情况下产生的最大节点位移为 139 mm; 产生的 Z 向最大节点位移为 30 mm, 满足规范要求。网壳在有拉索考虑玻璃荷载的情况下产生的最大节点位移为 22 mm; 产生的 Z 向最大节点位移为 4.6 mm, 满足规范要求。

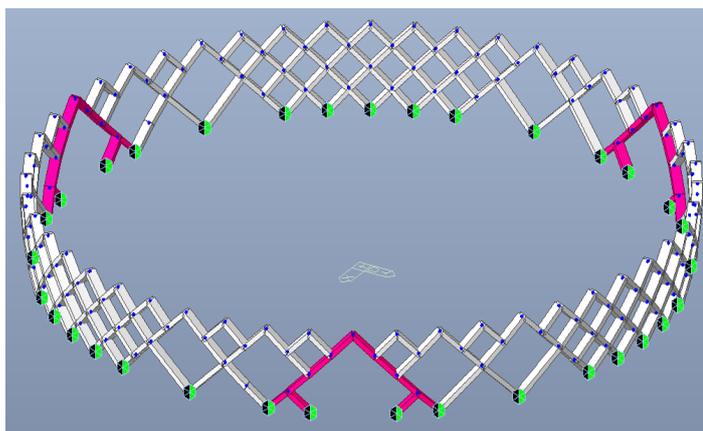


Figure 3. The first layer without cable

图 3. 首层无拉索模型

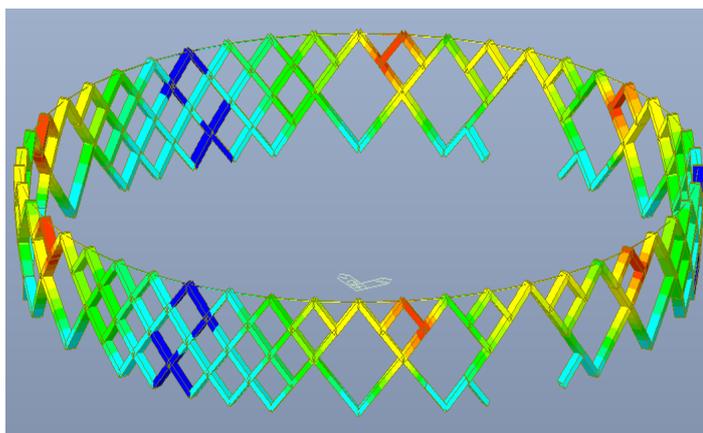


Figure 4. The first floor has a lasso model

图 4. 首层有拉索模型

首层分析完毕后, 继续在首层的基础上构建二层的模型, 然后对其在 1.0DL+1.0LL 工况下产生的变形进行计算。二层模型如图 5 以及图 6 所示。计算结果显示, 二层网壳再无拉索不考虑玻璃荷载的情况下产生的最大节点位移为 9 mm; 产生的 Z 向最大节点位移为 7.6 mm, 满足规范要求。网壳在无拉索考虑玻璃荷载的情况下产生的最大节点位移为 12 mm; 产生的 Z 向最大节点位移为 9.8 mm, 满足规范要求。网壳在有拉索考虑玻璃荷载的情况下产生的最大节点位移为 9 mm; 产生的 Z 向最大节点位移为 5.7 mm, 满足规范要求。

将首层、二层有无拉索以及是否考虑玻璃荷载情况的分析结果汇总于表 5 中。由表 5 中的数据可知，施加拉索可约束网壳产生水平及竖向位移，有效防止木材发生形变。

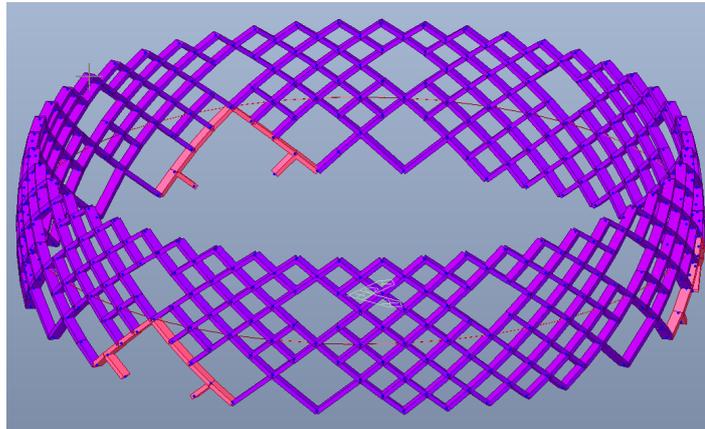


Figure 5. The second layer cable free model
图 5. 二层无拉索模型

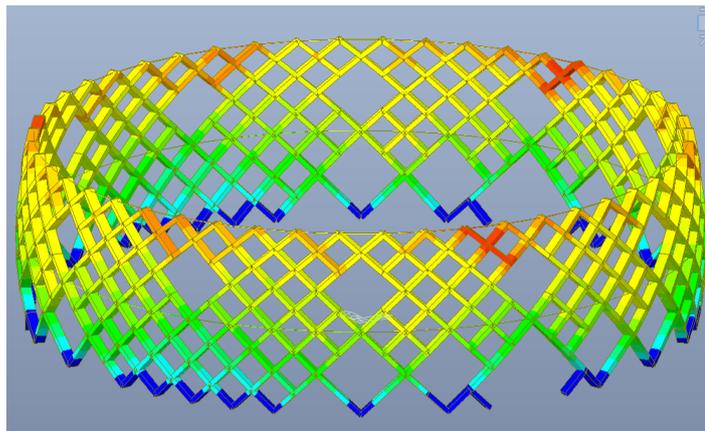


Figure 6. The second floor has a lasso model
图 6. 二层有拉索模型

Table 5. Displacement of nodes in the first and second storey structures
表 5. 首层、二层结构的节点位移

层间	拉索情况	荷载情况	最大节点位移(mm)	z 向最大节点位移(mm)
首层	无拉索	不考虑玻璃荷载	100	22
		考虑玻璃荷载	139	30
	有拉索	考虑玻璃荷载	22	4.6
二层	无拉索	不考虑玻璃荷载	9	7.6
		考虑玻璃荷载	12	9.8
	有拉索	考虑玻璃荷载	9	5.7

3.2.2. 整体分析

在首层、二层的基础上继续建模，最后得到整体模型。整体模型如图 7 以及图 8 所示。然后对整体

模型无拉索情况下进行了多种连接方式的分析，如木梁与木梁之间的固-固连接、固-铰连接，并考虑了铰接一端不同抗弯刚度的影响。还对整体模型有拉索情况下是否考虑玻璃荷载进行了分析。将上述分析内容以及结果汇总于表 6、表 7 以及表 8 中。

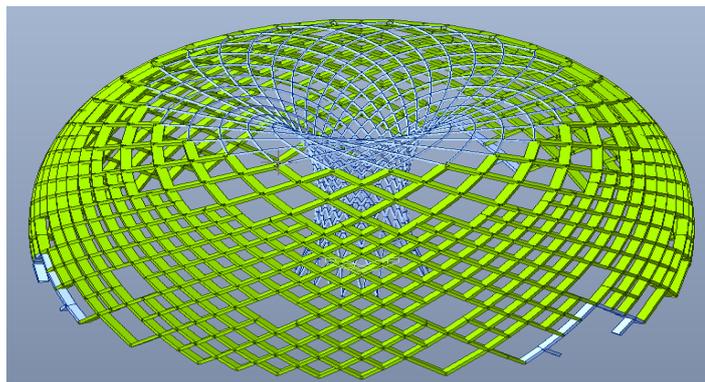


Figure 7. The whole cable free model
图 7. 整体无拉索模型

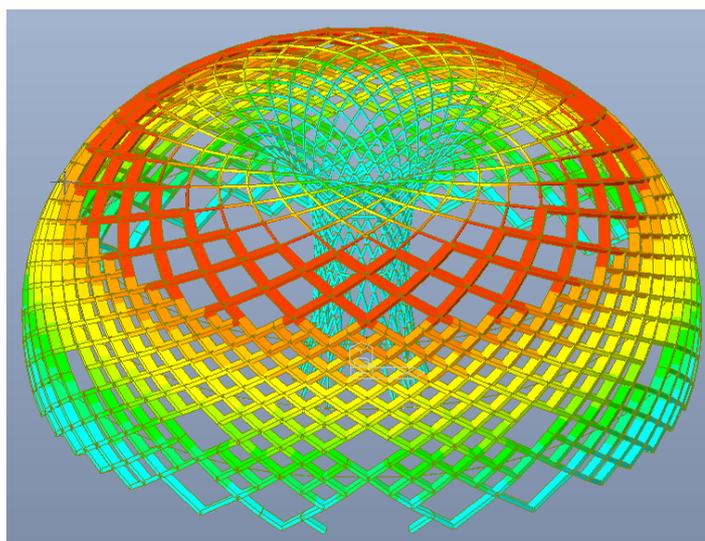


Figure 8. The whole has a lasso model
图 8. 整体有拉索模型

Table 6. Node displacement and circumferential deformation of structures under different degrees of constraint release
表 6. 结构在释放不同约束度下的节点位移与环向变形

层间	拉索情况	木梁与木梁之间的连接方式	释放约束度(%)	最大节点位移(mm)	网壳环向最大变形增加量(mm)
			0	139	867
			20	156	980
整层	无拉索	固-固链接	40	179	1124
			60	215	1350
			80	283	1777

Table 7. Node displacement and circumferential deformation of the structure under different bending stiffness conditions
表 7. 结构在不同抗弯刚度下的节点位移与环向变形

层间	拉索情况	木梁与木梁之间的连接方式	铰接一端的抗弯刚度(%)	最大节点位移(MM)	网壳环向最大变形增量(MM)
整层	无拉索	固 - 铰链接	80	142	892
			60	179	1124
			40	215	1350
			20	282	1771

Table 8. Node displacement and circumferential deformation of structures under different load conditions

表 8. 结构在不同荷载情况下的节点位移与环向变形

层间	拉索情况	荷载情况	最大节点位移(mm)	z 向最大节点位移(mm)	网壳环向最大变形增量(mm)
整层	有拉索	不考虑玻璃荷载	8.6	8.6	54
		考虑玻璃荷载	11	11	70

由表 6~8 的数据可知, 木梁与木梁之间的连接方式对网壳的变形影响较大。完全固 - 固连接抵抗变形的能力最强, 随着释放的约束度的增加, 变形会逐渐增大。在固 - 铰连接的铰接一端保留一定抗弯刚度能在一定程度上提高抗变形能力。

4. 结论

本文对广州纳米中心圆大跨度球状网壳钢木混合结构的施工过程进行了数值分析。使用 MIDAS GEN 软件对该大跨度结构进行分层、整体及不同节点约束的建模, 研究不同工况下结构的形变情况, 对结果进行分析和总结。主要结论如下:

- 1) 玻璃荷载会增加网壳节点位移, 环向拉索有效约束变形, 保持结构稳定。
- 2) 木梁间连接方式影响网壳变形, 固 - 固连接最优, 固 - 铰连接中保留抗弯刚度可提高抗变形能力。
- 3) 建议广州纳米中心圆项目采用刚性节点, 分层施工并即时施加环向拉索, 防止结构形变。
- 4) 类似的大跨度钢木混合结构工程可借鉴上述措施, 确保结构稳定。

基金项目

企业委托科研项目: 大跨度球状网壳木结构施工关键技术研究与应用(523318)。

参考文献

- [1] Zhao, Z., Chen, H., Liu, H., Zhu, Z., Zhao, T. and Zhou, T. (2024) Embodied Carbon Emission Reduction Potential of New Steel-Timber Composite Frame Structure for Rural Houses. *Structures*, **61**, Article ID: 106121. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106121>
- [2] Hawkins, W., Cooper, S., Allen, S., Roynon, J. and Ibell, T. (2021) Embodied Carbon Assessment Using a Dynamic Climate Model: Case-Study Comparison of a Concrete, Steel and Timber Building Structure. *Structures*, **33**, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.013>
- [3] Van Cauteren, D., Ramon, D., Stroeckx, J., Allacker, K. and Schevenels, M. (2022) Design Optimization of Hybrid Steel/Timber Structures for Minimal Environmental Impact and Financial Cost: A Case Study. *Energy and Buildings*, **254**, Article ID: 111600. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111600>
- [4] Chen, F., Li, Z., He, M., Wang, Y., Shu, Z. and He, G. (2021) Seismic Performance of Self-Centering Steel-Timber Hybrid Shear Wall Structures. *Journal of Building Engineering*, **43**, Article ID: 102530. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102530>

-
- [5] 李征, 王振, 何敏娟, 等. 基于增量动力分析的重力-侧力承载体系分离钢木混合结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(12): 1-12.
- [6] Gilbert, C.F. and Erochko, J. (2019) Development and Testing of Hybrid Timber-Steel Braced Frames. *Engineering Structures*, **198**, Article ID: 109495. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109495>
- [7] Wei, Z., Bin, H., Meng, X., Lida, L., Jianyu, Y., Kan, H., *et al.* (2024) Improving Stability and Resilience of Building Structure with Steel-Timber Composite Columns: A Case Study and Simulation Analysis. *Case Studies in Construction Materials*, **21**, e03654. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03654>
- [8] 韩力, 张准, 金晋璞, 等. 轻质钢木混合网壳结构的定制化设计与建造——西岸人工智能峰会 B 馆[J]. 建筑学报, 2020(3): 171-174.
- [9] 钱锋, 余中奇, 汤朔宁. 钢木混合张弦壳体结构游泳馆实践——上海崇明体育训练基地游泳馆设计[J]. 建筑学报, 2017(11): 40-43.
- [10] 聂欣, 荆哲璐, 张怿. 木构体系对空间的释放——成都中铁建青羊樾府社区中心[J]. 建筑技艺, 2024, 30(4): 101-103.
- [11] 陈宇, 艾辉军, 王四清, 等. 长沙象山国际幼儿园装配式钢木混合结构关键问题研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(23): 63-71, 56.