

高层正交胶合木-混凝土核心筒体系力学性能参数分析

熊海贝, 王治方, 宋依洁

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于国内外高层木结构及木-混凝土混合结构的研究, 结合正交胶合木(CLT)的材料性能优势, 设计了一种高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构体系. 运用有限元分析方法, 研究不同参数对该混合结构的力学性能、变形、动力特性等的影响. 结果表明, CLT 板连接刚度的变化对 CLT 结构竖向位移的影响较大, 提高 CLT 板间的连接刚度, 可减小 CLT 结构竖向位移和楼层水平位移; 混凝土核心筒墙体厚度增加, 结构楼层水平位移平均减小 9.07%, 但对 CLT 结构竖向位移几乎无影响; 一定范围内楼层数的变化对结构周期和楼层水平位移的影响较大, 而对 CLT 剪力墙结构竖向位移的影响相对较小.

关键词: 混合结构; 高层建筑; 正交胶合木(CLT); 正交胶合木-混凝土核心筒结构; 参数分析

中图分类号: TU973.14

文献标志码: A

Parametric Analysis on Mechanical Properties of High Rise CLT-concrete Core-tube System

XIONG Haibei, WANG Zhifang, SONG Yijie

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the state-of-the-art of high-rise wood structures and wood-concrete hybrid structures, combined with the performance superiority of cross-laminated timber (CLT), a hybrid structural system made of CLT shear wall and concrete core-tube was proposed. By using the finite element method, the effect of different parameters on the mechanical properties of the hybrid structure was studied. The results indicate that the variation of connection stiffness of CLT plates has great influence on the vertical displacement of CLT system. The increase of connection stiffness of CLT shear walls can significantly reduce the vertical displacement of CLT shear wall and the lateral displacements of global system. With the increase of concrete core wall thickness, the horizontal drift of global system decreases by 9.07% on

average, but it has little effect on the vertical displacement of CLT system. The change in the number of floors, to some extent, has great influence on the global structural periods and the lateral drifts, but it has little effect on the vertical displacement of CLT system.

Key words: hybrid structure; high rise building; cross-laminated timber (CLT); CLT-concrete core-tube structure; parametric analysis

高层木-混凝土混合结构与高层纯混凝土结构相比, 结构自重大幅减轻, 基底剪力减小, 结构具有优越的抗震性能. 基底剪力和倾覆力矩的减小, 降低了对地基承载力的要求, 可有效减少桩基数量, 从而减少基础施工量, 节省施工时间和经济成本. 以“相同的建筑平面与面积、相同的使用功能、满足基本安全与经济目标”为原则, 对同一办公楼分别采用混凝土框架核心筒-木盒混合结构、混凝土框架-核心筒结构进行设计, 计算结果表明: 木-混凝土混合结构的质量比混凝土结构减轻 26.3%, X 向和 Y 向基底剪力分别减小 31.7% 和 38.5%^[1].

在保证合理的结构分析、设计及施工质量下, 多高层木结构及木-混凝土混合结构均具有良好的承载能力和抗震、抗火性能, 结构安全可靠^[2]. 目前国外已有多个木-混凝土混合结构项目建成. 加拿大英属哥伦比亚大学(UBC) Brock Commons 学生公寓是目前世界上最高的现代木-混凝土混合结构建筑. 该公寓共 18 层, 建筑高度 54.81 m, 采用“混凝土双核心筒+胶合木框架柱”的混合结构形式, 基础、底层以及核心筒为混凝土结构, 2 层至 18 层由胶合木柱和正交胶合木(CLT)楼板组成^[3]. 2 个混凝土核心筒提供足以抵抗建筑整体高度上的侧向风载和地震作用的结构刚度和强度, 胶合木框架柱作为木结构

收稿日期: 2018-12-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(22120180315); 地震工程国际合作联合实验室合作研究项目(TMGFXX-2015-002-2)

第一作者: 熊海贝(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构、木结构及混合结构的抗震性能.

E-mail: xionghaibei@tongji.edu.cn

通信作者: 王治方(1992—), 男, 硕士生, 主要研究方向为木结构. E-mail: 1630683@tongji.edu.cn

部分的竖向承载力构件. 该公寓结构包含多种连接类型: CLT 楼板与混凝土核心筒竖向采用角钢支撑, 角钢焊接到铸入核心筒壁的钢板; CLT 楼板与混凝土横向设置金属拉条, 金属拉条与 CLT 楼板采用螺钉连接, 金属拉条与混凝土采用螺栓连接, 可承受节点处纵向和横向剪切力传递. 胶合木柱与 CLT 楼板的连接采用特制的金属柱帽, CLT 楼板支撑于下方木柱顶部, 由 4 根螺杆栓接, 连接通过木柱直接传递竖向荷载. 胶合木柱与屋面结构的连接类似于木柱与木柱的连接, 屋面钢梁用焊接钢组件支撑, 钢组件栓接锚固到木柱顶部^[3].

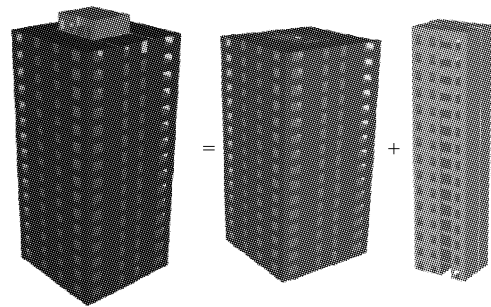
针对木-混凝土混合结构中的连接, 国内外学者通过试验验证、数值模拟及理论分析等方法开展了相关研究. Hossain 等^[4]对植入自攻螺钉的 CLT 板连接节点进行了单调加载和低周往复加载试验, 研究节点的承载力、屈服强度、变形、刚度和延性. 结果表明: 垂直植入自攻螺钉的节点延性好, 十字交叉倾斜植入自攻螺钉的节点刚度大但延性较差, 低周往复荷载作用下节点的承载力与单调加载下相比降低 40%. Yasumura 等^[5]研究了采用抗拉锚固件(hold-down)和自攻螺钉的 CLT 剪力墙在侧向低周往复荷载作用下的破坏模式, 得到了 CLT 剪力墙的荷载-位移曲线. Gavric 等^[6]对应用于意大利林业与木材研究所(IVALSA)项目中的典型 CLT 连接进行了试验, 研究了设置于 CLT 墙板与基础或 CLT 墙板与楼板之间的抗拉锚固件以及角支架(angle bracket)等连接件的力学性能. 结果表明: 抗拉锚固件在受拉方向上呈现出很高的强度和刚度, 但在受剪方向上由于金属部分的屈服, 强度和刚度均较低; 角支架在抗拉和抗剪 2 个方向上均具有良好的强度和刚度.

基于上述研究, 结合 CLT 材料性能优势, 针对一种高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构体系进行参数分析. 选取 CLT 板材连接刚度、混凝土核心筒墙体厚度、楼层数等参数, 运用有限元分析方法, 分析不同参数对该混合结构力学性能、变形、动力特性等的影响, 以期对高层木-混凝土混合结构体系的设计及推广应用提供参考.

1 高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构

高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构采用“混凝土核心筒+CLT 剪力墙”的结构形式, 如图 1

所示. 该结构的基础与核心筒为现浇混凝土结构, 核心筒外围木结构采用“CLT 剪力墙+CLT 楼板”的结构形式.



整体结构=CLT 剪力墙+混凝土核心筒

图 1 高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构

Fig.1 High-rise CLT-concrete core-tube hybrid structure

根据抗震概念设计原则, 建筑体形和结构总体布置宜尽量规则. 高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构的平面布置如图 2 所示, 建筑平面长度与宽度均为 25.5 m, 楼层层高为 3.4 m. 利用建筑平面中心的电梯井、楼梯间和楼电梯厅等服务性公用面积形成核心筒区域, CLT 剪力墙围合成公寓区域. CLT 剪力墙与混凝土核心筒没有直接连接. 核心筒墙体和楼板采用 C35 混凝土, CLT 墙体和楼板采用美国规范《Standard for performance-rated cross-laminated timber》^[7]中 E1 等级强度的 CLT 层板, 初步选取构件的强度如表 1 所示.

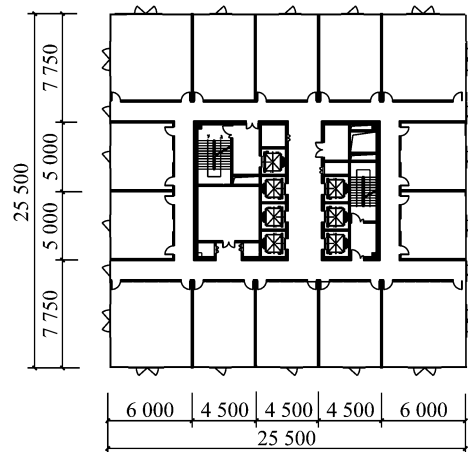


图 2 混合结构平面布置示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of the hybrid structure (unit: mm)

该混合结构高层建筑按位于上海市进行抗震和抗风设计, 结构设计使用年限为 50 年, 抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度为 0.10g, 设计地震分组为第一组, 场地条件为 IV 类, 特征周期为 0.9 s,

表 1 构件截面及材料强度

Tab.1 Section of members and material strength			
区域	构件	强度等级	厚度/mm
核心筒区域	外筒剪力墙	C35	300~400
	内隔墙	C35	300~400
	核心筒楼板	C35	120
木结构区域	木剪力墙	E1	175
	楼板	E1	175

基本风压为 $0.55 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 场地地面粗糙度类别为 D 类. 设计时主要考虑恒载、屋面和楼面活载、风荷载及地震作用. 根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012), 楼面恒载按材料的实际重量取值, 为减少楼板振动, 木结构楼面部分铺设 35 mm 轻质混凝土, 天花板防火用两层石膏板以及喷淋系统, 楼面恒载取 $2.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$; 电梯井楼板按 120 mm 厚混凝土楼板、大理石地面面层和 20 mm 天花找平等; 考虑防火石膏板吊顶、喷淋系统以及屋面防潮做法和屋面瓦, 屋面恒载取 $2.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. 楼面均布活载按住宅取 $2.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, 屋面按不上人取 $0.50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. 考虑风压脉动对结构产生的顺风向风振影响. 根据规范进行承载力极限状态和正常使用极限状态的效应组合.

高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构中的连接类型主要包括 CLT 楼板与混凝土核心筒的连接, 以及 CLT 板材之间的连接. CLT 楼板与混凝土核心筒的连接如图 3 所示. 在 CLT 楼板下部设置金属支托, 水平支托与 CLT 楼板采用螺栓连接, 竖向支托与混凝土采用螺栓连接; CLT 楼板与混凝土之间设置金属条带, 竖向条带通过螺栓与混凝土连接, 水平条带通过螺钉与 CLT 楼板连接^[3]. 此连接方式通过金属支托、金属条带和螺栓的组合形式增强连接节点的刚度. CLT 板材之间的连接包括 CLT 墙板与墙板、CLT 墙板与楼板之间的连接. 通常采用以下 3 种连接件结合运用的形式^[8]: 抗拉锚固件, 用于 CLT 墙板端部以及靠近门洞的位置与 CLT 楼板之间的竖向连接, 主要起抗拉、抗倾覆作用, 如图 4a 所示; 角支架, 布置于 CLT 墙板中间与 CLT 楼板相连, 主要承受剪切荷载, 防止板材之间滑动, 如图 4b 所示; 自攻螺钉, 用于 CLT 墙板与墙板之间的连接, 防止墙板之间的相对运动, 如图 4c 所示. 抗拉锚固件采用 HTT22, 角支架采用 BMF 90 mm × 48 mm × 3 mm × 116 mm, 自攻螺钉采用 $\Phi 8 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$.

除常用的连接形式外, 新型的连接系统也用于 CLT 板材的连接. X-rad 连接是意大利公司 Rothoblaas 专门为 CLT 结构设计的连接方式^[9], 将

标准的金属连接件放置在 CLT 板材的角部连接处, 如图 4d 所示. 金属连接件由金属盒和预先填入的硬木插入物组成, 与 CLT 板材用特制的螺纹螺钉连接. X-rad 连接剪切刚度大, 抗震性和整体性能好.

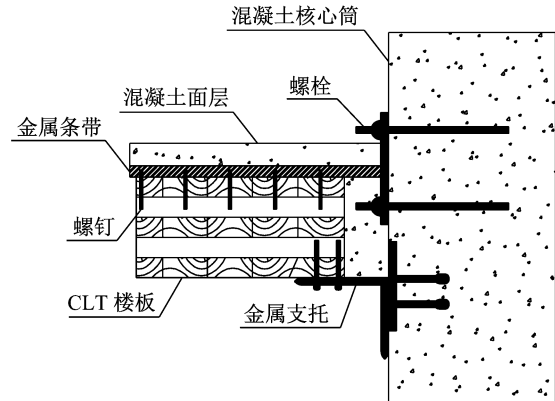
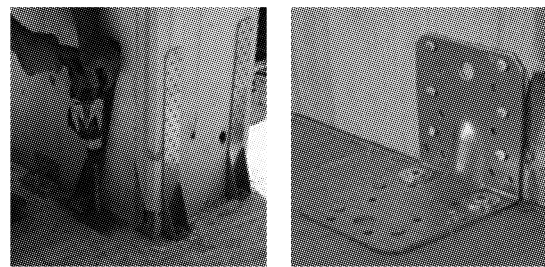
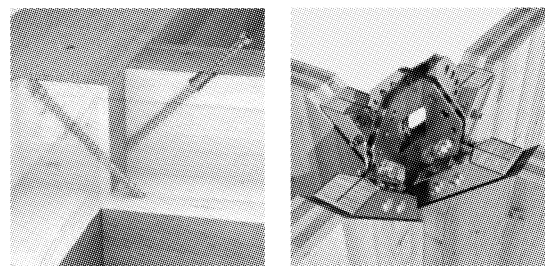
图 3 CLT 楼板-混凝土核心筒螺栓连接^[3]Fig. 3 CLT floor-concrete core-tube bolted connection^[3]a 抗拉锚固件^[8]
(墙板与楼板)b 角支架^[8]
(墙板与楼板)c 自攻螺钉^[8]
(墙板与墙板)d X-rad 连接件^[9]

图 4 CLT 板材连接

Fig. 4 CLT panel connection

2 混合结构模型建立

2.1 材料参数

2.1.1 材性设置

CLT 板的力学特性参考美国规范《Standard for performance-rated cross-laminated timber》^[7], CLT 层板顺纹方向弹性模量 $E_0 = 11\ 700 \text{ MPa}$, 横纹方向

弹性模量 $E_{90}=9\ 000\ \text{MPa}$, 厚度为 $35\ \text{mm}$. 结构中采用 5 层 CLT 层板, 将 CLT 层板弹性模量参数转化为 5 层正交截面的主方向弹性模量 $E_{5,0}$. CLT 板截面计算简图如图 5 所示. 根据抗弯刚度等效原则可得

$$E_{5,0}I = \sum_i E_i I_i \quad (1)$$

$$E_{5,0} \frac{1}{12} b h^3 = 3E_0 \frac{1}{12} b h_1^3 + 2E_0 b h_1 d_2^2 + 2E_{90} \frac{1}{12} b h_1^3 + 2E_{90} b h_1 d_1^2 \quad (2)$$

式中: E_0 和 E_{90} 分别为 CLT 层板截面主方向(3 层顺纹层板的方向)和次方向(2 层横纹层板的方向)的弹性模量; b 为 CLT 板宽度, 取 $1\ \text{m}$; h 为复合截面总厚度; h_1 为 CLT 层板厚度; d_1 和 d_2 为单板截面中心到 CLT 截面中心轴的距离; I 为截面转动惯量.

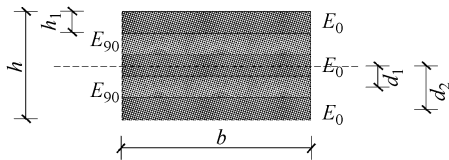


图 5 CLT 板弹性模量计算简图

Fig.5 Calculation diagram for elasticity modulus of CLT panel

计算可得主方向弹性模量 $E_{5,0}=11\ 000\ \text{MPa}$, 次方向弹性模量 $E_{5,90}=9\ 000\ \text{MPa}$. 根据剪切类比法得到 CLT 顺纹剪切模量 $G_0=1/16 \times E_{5,0} \approx 680\ \text{MPa}$, 横纹剪切模量 $G_{90}=1/10 \times G_0=68\ \text{MPa}$. 模型中所采用的 CLT 板材性参数如表 2 所示, 其中 E_L 、 E_R 和 E_T 分别表示主方向 L、次方向 R 和横纹次方向 T 的弹性模量, G_{LT} 、 G_{RL} 和 G_{TR} 分别表示 L、R、T 3 个方向组成的平面内的剪切模量, ν_{LT} 、 ν_{RL} 和 ν_{TR} 分别表示相应的泊松比. 混凝土采用考虑塑性损伤因子的混凝土塑性损伤本构模型, 依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[10] 中混凝土单轴受压及受拉应力-应变曲线计算公式得到受压和受拉本构关系.

表 2 CLT 板材性参数

Tab.2 Material parameters for CLT panel

弹性模量/MPa			剪切模量/MPa			泊松比		
E_L	E_R	E_T	G_{LT}	G_{RL}	G_{TR}	ν_{LT}	ν_{RL}	ν_{TR}
11 000	9 000	9 000	680	680	68	0.20	0.18	0.21

2.1.2 CLT 板连接本构关系

CLT 剪力墙体系中抗拉锚固件、角支架和自攻螺钉连接的荷载-位移三折线模型如图 6 所示. 图 6 中, F_y 为屈服荷载, F_m 为峰值荷载, F_u 为极限荷载,

u_y 为屈服位移, u_m 为峰值位移, u_u 为极限位移, k_{el} 为初始刚度, k_{p1} 为上升段刚度, k_{p2} 为下降段刚度. 根据 Gavric 研究结果, 得到 3 种连接的模型刚度参数, 如表 3 所示^[6]. 其中, h 代表抗拉锚固件连接, a 代表角支架连接, s 代表自攻螺钉连接, t 代表受拉方向, v 代表受剪方向, l 代表齿搭接节点 (half-lap joint), p 代表单面搭接节点 (spline joint).

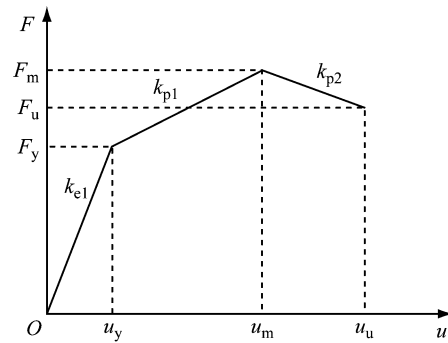


图 6 CLT 板连接荷载-位移三折线模型^[6]

Fig.6 Trilinear load-displacement model of CLT panel connection^[6]

表 3 三折线模型参数^[6]

Tab.3 Parameters of trilinear load-displacement model^[6]

连接		刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)			荷载/kN			位移/mm		
		k_{el}	k_{p1}	k_{p2}	F_y	F_m	F_u	u_y	u_m	u_u
h	t	4.6	0.7	-2.8	41.0	48.0	39.0	8.8	20	24
	v	3.2	0.2	0	3.6	10.0	10.0	1.1	30	30
a	t	2.7	0.4	-0.9	19.0	24.0	19.0	7.3	18	23
	v	2.0	0.2	-1.6	23.0	27.0	22.0	12.0	29	32
s	l	1.3	0.1	-0.1	3.2	5.3	4.2	2.6	24	32
	p	0.9	0.1	-0.5	4.9	7.3	5.9	5.7	34	38

X-rad 连接刚度从制造商 Rothoblaas 官方提供的产品手册中得到, X-rad 连接件的有限元模型如图 7 所示, 有限元模拟中采用的 X-rad 连接刚度参数如表 4 所示^[9].

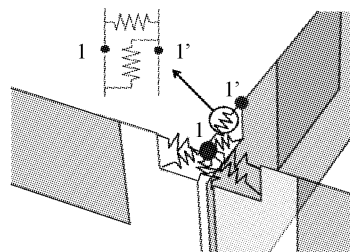


图 7 X-rad 连接件弹簧模拟^[9]

Fig.7 X-rad connector spring simulation^[9]

2.1.3 CLT-混凝土连接本构关系

CLT 楼板与混凝土的连接采用线性连接单元模拟, 如图 8 所示. 连接节点中螺栓的线性剪切刚度取值参照规范 ASTM-D5652-15^[11] 中对节点初始刚

度参数定义的方法.取荷载-位移曲线上的原点与 $0.4P_{max}$ (P_{max} 为螺栓连接的极限荷载)的割线刚度.根据试验得到的木-混凝土单螺栓荷载-位移曲线^[12],螺栓线性剪切刚度取 $1.9 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,抗拉刚度取 $2.4 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$.

表 4 X-rad 连接模型参数^[9]

Tab.4 Parameters of X-rad model^[9]

X-rad 连接件	受力方向	刚度/($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)
竖向螺钉	受拉	10.00
	受剪	2.44
斜向螺钉	受拉	15.00
	受剪	2.44
水平螺钉	受拉	10.00
	受剪	2.44

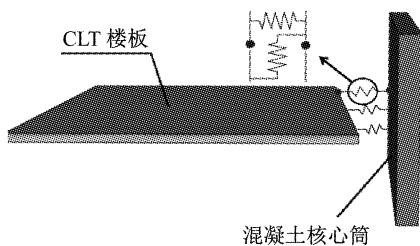


图 8 连接单元模型

Fig.8 Connecting element model

2.2 模型建立

通过 SAP2000 有限元软件建立高层正交胶合木剪力墙-混凝土核心筒混合结构模型.混凝土筒体剪力墙和楼板以及 CLT 剪力墙与楼板均采用壳(shell)单元模拟,结构模型如图 9 所示.

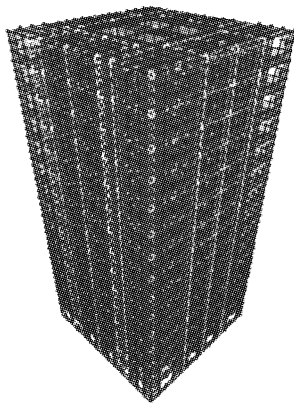


图 9 整体结构模型示意图

Fig.9 Schematic diagram of the structural model

3 混合结构参数有限元分析

高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构体系实质为混凝土核心内筒与 CLT 剪力墙的结合,因此混凝土核心筒的刚度以及 CLT 结构的刚度对混合

结构的整体性能有着重要影响.混凝土核心筒墙体厚度的变化会改变核心筒刚度;CLT 板组成的建筑单元主要依靠节点抵抗水平荷载并控制结构变形,节点刚度和延性性能是保证结构整体性能和抗震性能的基础;木-混凝土混合结构向着高层趋势发展,木-混凝土结构楼层高度的变化会引起结构力学性能、抗震性能等的改变.综上,选取 CLT 板连接刚度、混凝土核心筒墙体厚度、楼层数等参数,运用有限元分析方法,研究不同参数对高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构性能的影响.

3.1 参数设置

为研究各参数变化对结构性能的影响,对每个参数设置一定变化范围,参数变化如表 5 所示.“常用连接”指 CLT 板之间结合运用抗拉锚固件、角支架和自攻螺钉 3 种连接件;“刚性连接”指 CLT 墙板与楼板之间假定为固接.

表 5 参数选择

Tab.5 Values of parameters

模型参数	参数设置		
	常用连接(1)	X-rad(2)	刚性连接(3)
CLT 板连接刚度			
混凝土核心筒墙体厚度/mm	300	350	400
楼层数	15	20	20

对模型进行编号,含义如表 6 所示,如 1-300-15 代表采用常用连接、300 mm 厚混凝土核心筒墙体、15 层的正交胶合木-混凝土核心筒混合结构.

表 6 模型编号含义

Tab.6 Meaning of model number

模型编号	连接刚度	核心筒墙体厚度/mm	楼层数
1-300-15	常用连接	300	15
1-350-15	常用连接	350	15
1-350-20	常用连接	350	20
1-400-20	常用连接	400	20
2-300-15	X-rad 连接	300	15
2-350-15	X-rad 连接	350	15
2-350-20	X-rad 连接	350	20
2-400-20	X-rad 连接	400	20
3-300-15	刚性连接	300	15
3-350-15	刚性连接	350	15
3-350-20	刚性连接	350	20
3-400-20	刚性连接	400	20

3.2 CLT 连接刚度

模型 1-300-15、2-300-15、3-300-15 的变量为 CLT 板连接刚度,分别对应常用连接、X-rad 连接和刚性连接.通过有限元分析,CLT 板连接刚度对楼层位移、层间位移角、竖向位移、自振周期的影响如图 10 和表 7 所示.

通过 3 个模型比较结果发现:当连接方式由常用连接变为 X-rad 连接时,随连接刚度增加,结构

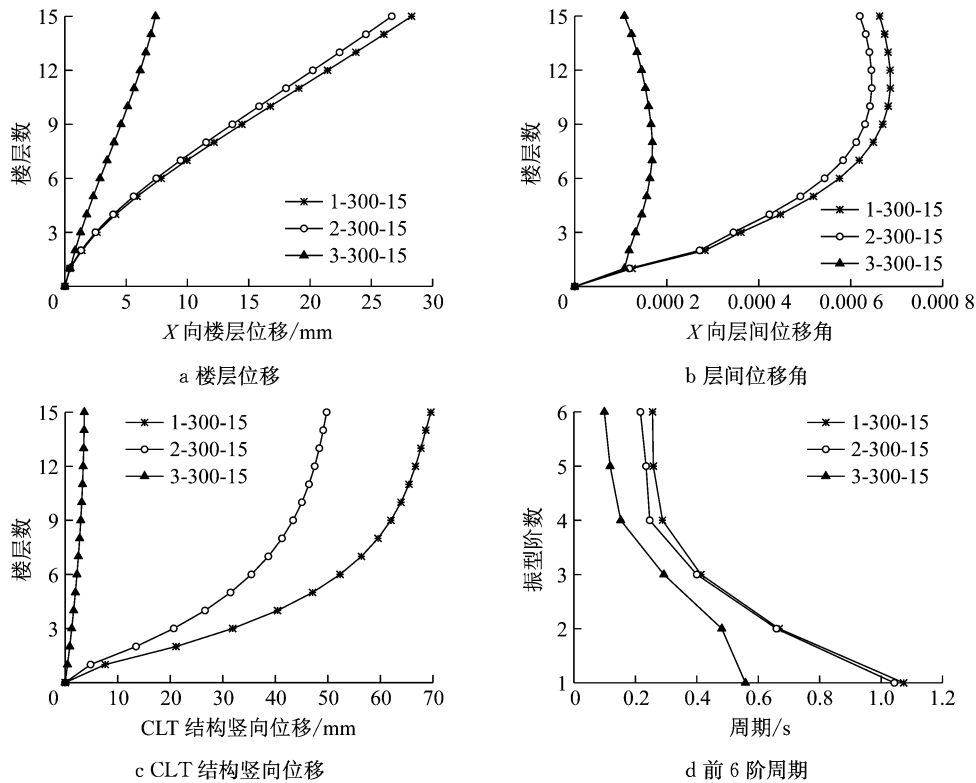


图 10 连接刚度对结构性能的影响

Fig.10 Effect of connection stiffness on structural performance

表 7 不同连接刚度对结构性能的影响

Tab.7 Effect of different connection stiffnesses on structural performance

模型编号	一阶周期/s	最大水平位移/mm	最大层间位移角	CLT 结构竖向位移/mm	CLT-混凝土结构竖向位移差/mm
1-300-15	1.07	28.29	1/1457	69.61	64.73
2-300-15	1.04	26.67	1/1548	49.77	45.03
3-300-15	0.56	7.39	1/5918	3.64	1.04

周期变化并不显著;楼层水平位移减小 5.73%;CLT 结构竖向位移变化较为显著,减小 28.5%;CLT 结构和混凝土的竖向位移差减小 30.4%。模型 3-300-15 为极限状态,假定 CLT 墙板刚性连接,由表 7 可知,结构楼层水平位移及 CLT 结构竖向位移显著减小。以 CLT 板连接刚度为变化参数的其他模型对比如表 8 所示。

由表 8 可知,当 CLT 板连接方式由常用连接变为 X-rad 连接时,随连接刚度的增加,结构楼层最大水平位移平均减小 4.98%,CLT 结构竖向位移平均减小 28.28%;当 CLT 墙板与楼板达到刚性连接时,相比于常用连接方式,结构楼层最大水平位移平均减小 74.73%,CLT 结构竖向位移平均减小 91.93%。连接刚度的变化对 CLT 结构竖向位移的影响较大,提高 CLT 板的连接刚度可显著减小 CLT 结构竖向位移。

表 8 各模型连接刚度对结构性能的影响

Tab.8 Effect of connection stiffness on structural performance for models

模型编号	一阶周期/s	最大水平位移/mm	最大层间位移角	CLT 结构竖向位移/mm	CLT-混凝土结构竖向位移差/mm
1-350-15	1.06	25.34	1/1619	69.11	64.72
2-350-15	1.03	24.03	1/1711	49.34	45.06
3-350-15	0.56	7.39	1/5918	3.64	1.04
1-350-20	1.53	57.90	1/957	72.85	65.46
2-350-20	1.49	54.95	1/1013	54.30	47.07
3-350-20	0.79	13.98	1/3893	5.68	1.71
1-400-20	1.52	52.87	1/1044	72.07	65.32
2-400-20	1.48	50.39	1/1096	53.57	46.94
3-400-20	0.81	14.08	1/4014	5.63	1.94

3.3 混凝土核心筒墙体厚度

模型 1-300-15、1-350-15 的变量为混凝土核心筒墙体厚度,分别对应 300 mm 和 350 mm 厚度的核心筒墙体。通过有限元分析,混凝土核心筒墙体厚度对楼层位移、层间位移角、竖向位移、自振周期的影响如图 11 所示。

通过模型的计算结果可知:混凝土核心筒墙体厚度增加,结构楼层水平位移平均减小 9.07%;对结构周期、CLT 结构竖向位移影响不大。混凝土核心筒墙体厚度的变化对结构楼层水平位移的影响较大,墙体厚度的增加可减小楼层的水平位移,但对竖

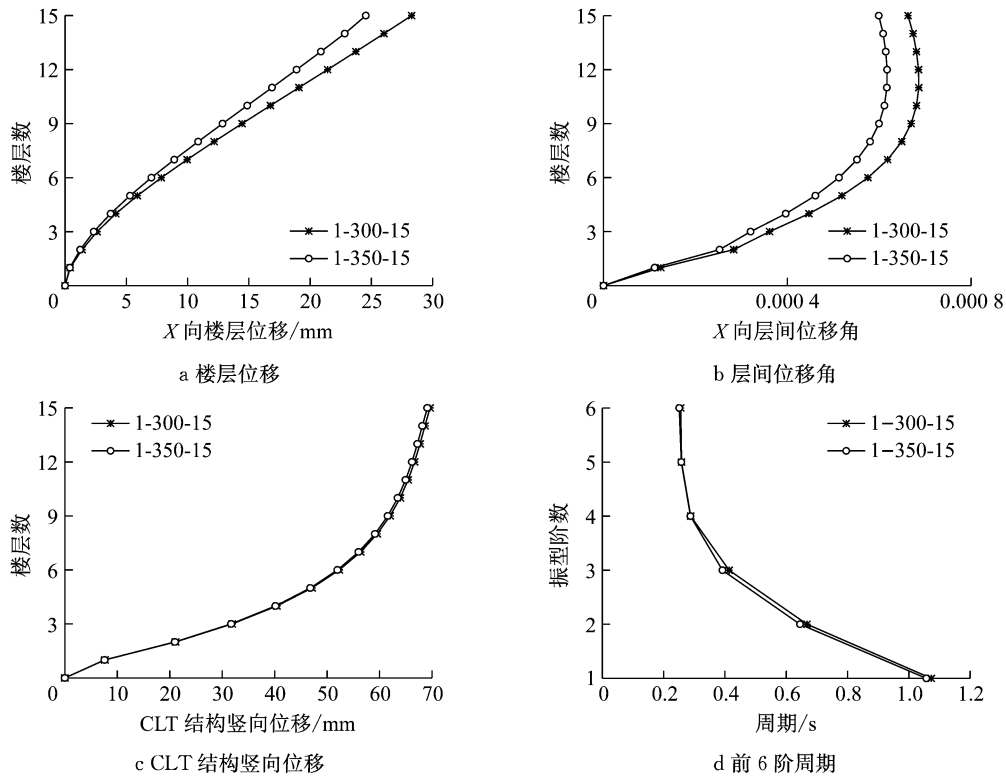


图 11 混凝土核心筒墙体厚度对结构性能的影响

Fig. 11 Effect of concrete core wall thickness on structural performance

向位移几乎无影响.

3.4 楼层数

模型 1-350-15、1-350-20 的变量为楼层数,分别

对应 15 层和 20 层的高层正交胶合木-混凝土核心筒混合结构. 通过有限元分析,楼层数对楼层位移、层间位移角、竖向位移、自振周期的影响如图 12 所示.

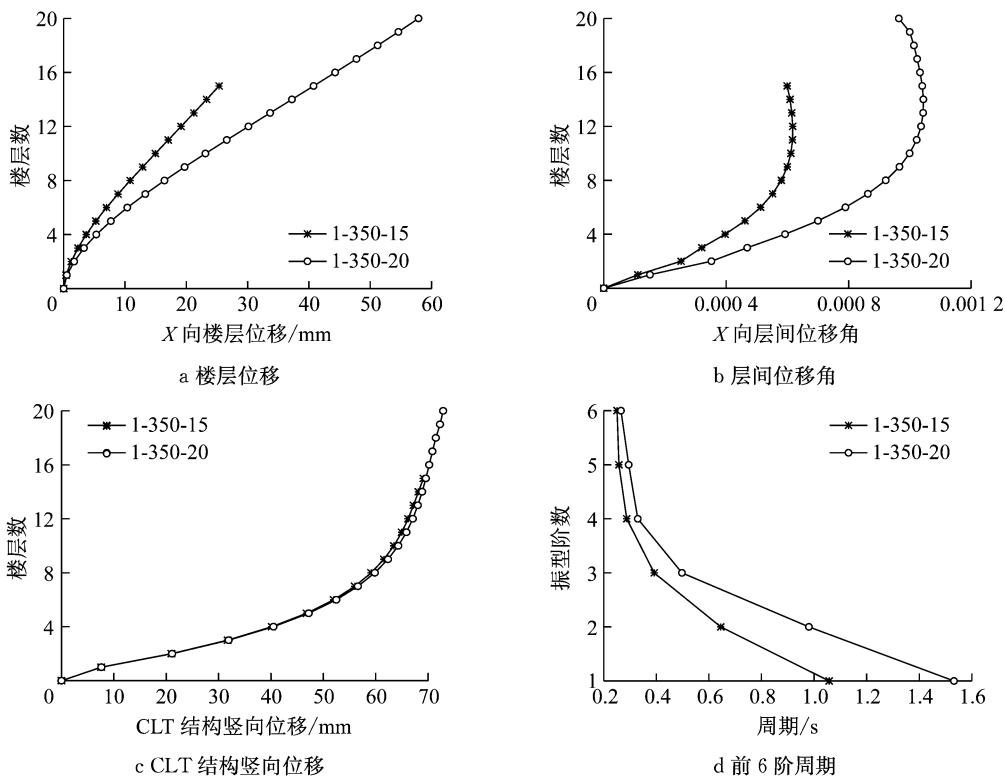


图 12 楼层数对结构性能的影响

Fig. 12 Effect of floor numbers on structural performance

通过模型的计算结果可知:随着楼层数的增加,结构周期平均增加 43.35%,楼层水平位移平均增加 115.44%,CLT 结构竖向位移平均增加 23.83%;楼层数的变化对结构周期和楼层水平位移的影响较大,而对竖向位移的影响相对较小。

4 结论

(1) CLT 板连接刚度的变化对 CLT 结构竖向位移的影响较大,对结构楼层水平位移的影响相对较小。随连接刚度的增加,结构楼层最大水平位移平均减小 4.98%,CLT 结构竖向位移平均减小 28.28%;当 CLT 墙板与楼板达到刚性连接的极限状态,相比于常用连接方式,结构楼层最大水平位移平均减小 74.73%,CLT 结构竖向位移平均减小 91.93%。提高 CLT 板的连接刚度,可显著减小 CLT 结构竖向位移。

(2) 混凝土核心筒墙体厚度的变化对结构楼层水平位移的影响较大,混凝土核心筒墙体厚度增加,结构楼层水平位移平均减小 9.07%,但对 CLT 结构竖向位移几乎无影响。

(3) 楼层数的变化对结构周期和楼层水平位移的影响较大,而对 CLT 结构竖向位移的影响相对较小。随着楼层数的增加,结构周期平均增加 43.35%,楼层水平位移平均增加 115.44%,CLT 结构竖向位移平均增加 23.83%。

参考文献:

- [1] 熊海贝,陈佳炜,吴颖. 高层混凝土框架核心筒-木盒混合结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(8):62.
XIONG Haibei, CHEN Jiawei, WU Ying. Research on seismic performance of a concrete-wood hybrid structural system for tall building [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(8):62.
- [2] 何敏娟,陶铎,李征. 多高层木及木混合结构研究进展[J]. 建筑结构学报,2016,37(10):1.
HE Minjuan, TAO Duo, LI Zheng. State-of-the-art of research advances on multi-story timber and timber-hybrid structures [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10):1.
- [3] MOUDGIL M. Feasibility study of using cross-laminated timber core for the UBC tall wood building [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2017.
- [4] HOSSAIN A, POPOVSKI M, TANNERT T. Cross-laminated timber connections assembled with a combination of screws in withdrawal and screws in shear[J]. Engineering Structures, 2018, 168:1.
- [5] YASUMURA M, KOBAYASHI K, OKABE M, *et al.* Full-scale tests and numerical analysis of low-rise CLT structures under lateral loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(4): E4015007.
- [6] GAVRIC I, FRAGIACOMO M, CECCOTTI A. Cyclic behavior of CLT wall systems: experimental tests and analytical prediction models [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(11): 04015034.
- [7] APA—The Engineered Wood Association. Standard for performance-rated cross-laminated timber: ANSI/APA PRG-320 [S]. Tacoma: American National Standards Institute, 2011.
- [8] LATOUR M, RIZZANO G. Seismic behavior of cross-laminated timber panel buildings equipped with traditional and innovative connectors [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(2):382.
- [9] POLASTRI A, GIONGO I, PACCHIOLI S, *et al.* Structural analysis of CLT multi-storey buildings assembled with the innovative X-rad connection system: case-study of a tall-building [C] // WCTE 2016, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering. Vienna: DAAAM International Vienna, 2016.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [11] ASTM International. Standard test methods for single-bolt connections in wood and wood-based products: ASTM D5652-15[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [12] 熊海贝,付豪,欧阳禄. 木-混凝土单螺栓连接抗剪承载力试验及参数化分析[J]. 结构工程师,2018,34(3):136.
XIONG Haibei, FU Hao, OUYANG Lu. Experimental and parametric analysis on the shear bearing capacity of single-bolted wood-concrete connection [J]. Structural Engineers, 2018, 34(3):136.