



木结构设计理论与实践丛书

THEORY AND DESIGN OF  
STEEL-TIMBER HYBRID STRUCTURES

# 钢木混合结构设计 理论与方法

李征 何敏娟 著

中国建筑工业出版社

木结构设计理论与实践丛书

# 钢木混合结构设计理论与方法

李 征 何敏娟 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

钢木混合结构设计理论与方法/李征, 何敏娟著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019.3  
(木结构设计理论与实践丛书)  
ISBN 978-7-112-23168-3

I. ①钢… II. ①李…②何… III. ①建筑结构-钢结构-木结构-混合-结构设计-研究 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 009055 号

本书系统介绍了钢木混合结构体系的形式、受力特点以及研究进展, 归纳了钢木混合结构体系设计的基本假定、重要设计参数以及参数的确定方法, 阐述了钢框架和木剪力墙的设计方法以及钢木混合楼(屋)盖的受力特点、参数、构造连接及抗震性能等, 提出了钢框架与木剪力墙的连接构造及受力特点。本书既包含钢木混合结构体系中各部分的基本原理, 又通过大量试验验证了各部分的结构性能, 还通过工程案例展示了设计方法。本书可作为从事该类结构设计、施工和工程管理工作的工程技术人员的技术手册, 也可作为大学本科高年级学生和研究生科研参考资料。

责任编辑: 王梅 辛海丽

责任校对: 芦欣甜

木结构设计理论与实践丛书  
钢木混合结构设计理论与方法  
李征 何敏娟 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)  
各地新华书店、建筑书店经销  
北京科地亚盟排版公司制版  
大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

\*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 287千字  
2019年3月第一版 2019年3月第一次印刷

定价: 38.00元

ISBN 978-7-112-23168-3  
(33251)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

近年来，随着对建筑业可持续发展和建筑装配化的推动，业内对钢结构和木结构的应用发展越来越重视。木材资源最可再生，墙体保温性能好；钢木材料均可循环利用、工厂预制和现场组装、可实现绿色施工；且钢木结构重量轻、韧性好，抗震能力强。基于钢结构和木结构的众多优越特点，提出了一种可适用于多高层结构体系的钢木混合结构。木楼（屋）盖与钢框架梁组成水平抗侧力体系、木剪力墙与钢框架组成竖向抗侧力体系，这种体系充分发挥钢木材料各自的优势和特点，不失为一种受力合理、经济性好、可持续的新型结构体系。

目前，国内外对这类新型钢木混合结构体系的结构性能研究较少，尚无适用的设计标准。本书基于对该类结构开展的大量研究工作提出了设计方法。研究主要内容包括钢木混合结构抗侧力体系性能、钢木混合楼（屋）盖的平面内受力性能以及钢木构件间的连接方式及对结构抗侧力性能的影响；进行了钢木混合墙体试验、单层钢木混合结构拟静力试验、四层钢木混合结构整体振动台试验等大量试验工作；对连接、墙体、楼（屋）盖及结构整体等进行了全面的数值模拟计算；采用易损性分析方法和响应面法对钢木混合抗侧力体系的地震可靠度进行了分析。这些研究成果为钢木混合结构设计方法奠定了重要的理论基础。本书对钢木混合结构体系设计、受力特点及分析方法、构造要求等方面进行了系统介绍，以期对投资方进行工程决策、设计师进行工程设计、管理部门进行工程审批，以及相关工程技术人员从事项目建设与管理有所帮助。

本书共分八章，第一章对结构形式及优点、受力特点、研究与应用展望进行了概述；第二章规定了水平和竖向荷载计算假定、结构的重要设计参数以及相关参数的确定方法；第三章和第四章分别介绍了钢框架和木剪力墙的计算、构造要求和结构抗侧刚度确定方法；第五章阐述了钢木混合楼（屋）盖的特点、水平荷载转移能力、剪切位移角、构造及连接，并通过工程实例和试验研究进一步描述了该种楼（屋）盖体系的受力特征；第六章介绍了钢框架与木剪力墙的连接特点、计算及构造措施，并通过对单层钢木混合结构拟静力加载试验分析了不同连接方式下钢木混合墙体的抗侧力性能；第七章通过钢木混合结构抗侧力体系试验、带阻尼器的钢木混合结构框架剪力墙抗侧性能试验、四层钢木混合结构振动台试验，阐述了钢木混合结构的整体抗侧力性能；第八章结合设计案例介绍了钢木混合结构的设计方法。

本书由同济大学李征副教授和何敏娟教授合作完成。内容融合了团队近年来的大量研究成果，许多研究生参与了试验和数值模拟计算，博士研究生王希珺、罗琪对文字工作付出了很多努力，在此一并表示感谢。本书研究工作获得多个科研项目资助，本书出版得到加拿大木业协会的经费支持，也表示衷心感谢。限于作者时间和水平，书中谬误在所难免，敬请读者指正。

李征 何敏娟

2018年10月于同济园

# 目 录

第一章 概述 .....	1
第一节 结构形式及优点 .....	1
第二节 受力特点 .....	3
第三节 研究与应用展望 .....	4
第二章 设计基本规定 .....	6
第一节 基本假定 .....	6
第二节 重要设计参数 .....	6
第三节 层间位移角限值确定方法 .....	8
第四节 等效阻尼比确定方法 .....	18
第三章 钢框架设计 .....	26
第一节 钢框架计算 .....	26
第二节 钢框架构造要求 .....	26
第三节 钢框架弹性抗侧刚度确定方法 .....	26
第四章 木剪力墙设计 .....	28
第一节 木剪力墙计算 .....	28
第二节 木剪力墙构造要求 .....	30
第三节 木剪力墙弹性抗侧刚度确定方法 .....	31
第五章 钢木混合楼(屋)盖设计原理 .....	32
第一节 钢木混合楼(屋)盖的特点 .....	32
第二节 楼(屋)盖的水平荷载转移能力 .....	32
第三节 楼(屋)盖平面内剪切位移角 .....	33
第四节 楼(屋)盖构造及连接 .....	33
第五节 楼(屋)盖设计实例 .....	36
第六节 轻型钢木混合楼(屋)盖水平抗侧性能试验 .....	39
第七节 钢木混合结构水平抗侧性能试验 .....	47
第八节 楼盖平面内刚度对钢木混合结构抗震性能影响 .....	62
第六章 连接性能 .....	92
第一节 钢框架与木剪力墙连接计算 .....	92
第二节 钢框架与木剪力墙连接构造 .....	93
第三节 单层钢木混合结构拟静力加载试验 .....	97
第七章 钢木混合结构竖向体系与整体结构试验 .....	104
第一节 钢木混合竖向抗侧力体系抗侧性能试验 .....	104
第二节 有阻尼钢木混合结构框架剪力墙抗侧性能 .....	121

---

第三节 四层钢木混合结构振动台试验 .....	131
第八章 钢木混合结构设计方法 .....	143
第一节 基于承载力的抗震设计方法 .....	143
第二节 直接位移抗震设计方法 .....	144
第三节 阻尼器的设计方法 .....	148
第四节 设计案例 .....	150
附录一 木剪力墙精细化建模方法 .....	164
附录二 轻型木楼盖数值模拟 .....	167
附录三 钢木混合结构简化模型建模要点 .....	171
附录四 钢框架轻型木剪力墙连接模拟 .....	174
参考文献 .....	177

# 第一章 概 述

## 第一节 结构形式及优点

钢木混合结构是指在钢框架梁上铺设木楼（屋）盖、在钢框架柱间设置木剪力墙的新型多层混合结构。这种混合结构利用了钢框架体系结构效率高、木楼盖抗挠曲变形能力强的特点，可适用于建造多层乃至小高层房屋<sup>[1]</sup>。

### 一、结构形式

#### （一）水平向结构体系

钢木混合结构的水平向结构体系可采用轻型木楼盖或新型的轻型钢木混合楼盖。其中，新型的轻型钢木混合楼盖由卷边槽钢作为楼板搁栅，其上面铺规格木材，楼板搁栅与木规格材采用木螺钉相连，如图 1-1 所示。规格材间的缝隙以伸缩缝防水胶条填充。在木规格材上表面以骑马钉钉装钢筋网片，并浇筑聚酯砂浆，以增强楼板的整体性、抗震动性能和防火性能。该楼板可按照一定模数在工厂预制，现场直接安装在钢框架的钢梁上即可，在楼板双拼钢搁栅之间设置一块钢板，坐落于钢主梁的下翼缘上，并用螺栓连接。因此，该楼板的现场安装工作量仅为拧紧楼板搁栅与钢主梁的连接螺栓即可，相比于混凝土楼板和组合楼板，该楼板体系的应用可大大减少施工现场工作量，加快建造速度。

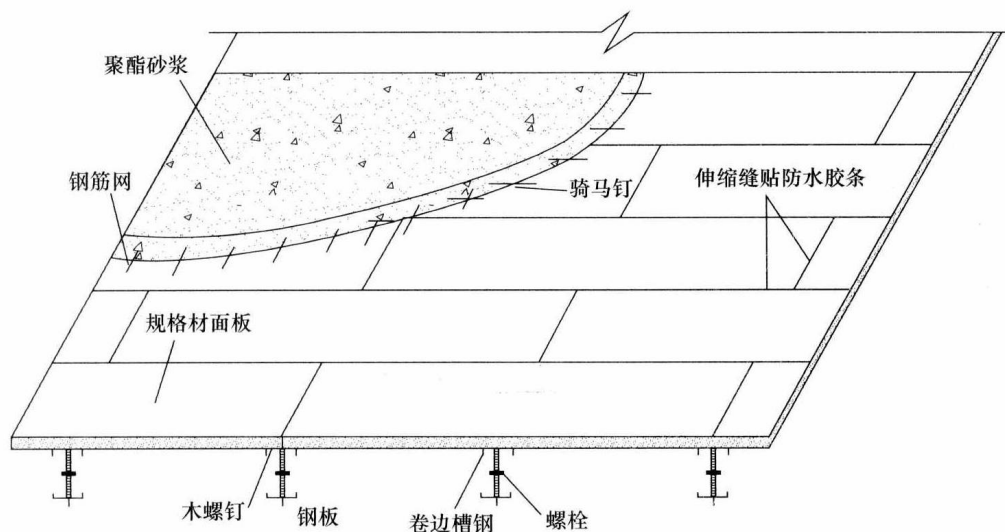


图 1-1 钢木混合楼盖

钢木混合结构的水平向结构体系除了承受竖向重力荷载外，还可以将水平地震作用、风荷载等分配到结构竖向抗侧力构件中，使结构各竖向抗侧力构件能够协同作用，充分发挥各自抵抗侧向荷载的能力，防止结构在地震作用下倒塌<sup>[2]</sup>。

## (二) 竖向抗侧力体系

钢木混合结构的竖向抗侧力体系由钢框架和内填轻型木剪力墙组成，两者通过螺栓连接，协同工作，共同抵抗地震、风等侧向荷载对结构的作用。

其中，轻型木剪力墙作为钢框架的填充墙，与钢框架共同工作，抵抗侧向荷载，并可在建筑中起到分隔的作用。图 1-2 为钢木混合结构的竖向抗侧力体系示意图。在实际应用中，若需更高的墙体抗侧承载力，可采用双面覆板的内填木剪力墙<sup>[1]</sup>。

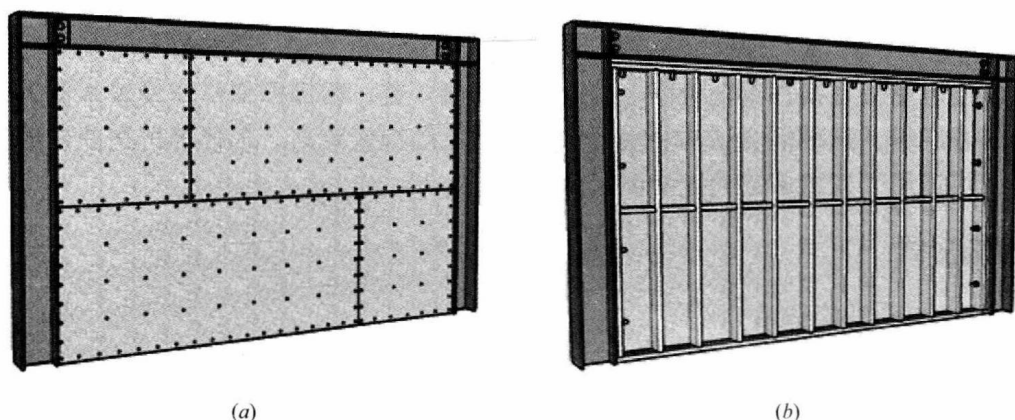


图 1-2 钢木混合结构竖向抗侧力体系示意图  
(a) 前视图；(b) 后视图

## (三) 钢木连接

合理的钢木连接形式是钢木协同工作的基础，合理便捷的连接形式同时可以解决钢框架与轻型木剪力墙的安装问题。

钢框架与木剪力墙间连接形式诸多，较常见的连接形式包括普通螺栓连接和高强螺栓连接<sup>[3]</sup>。其中，高强螺栓连接相比于普通螺栓连接具有更大的连接刚度，对结构极限承载力的提高也更加显著。

## 二、优点

钢木混合结构结合了钢框架结构与轻木结构的特点，具有诸多优势，主要包括以下几个方面：

### (一) 抗震性能好

钢木混合结构充分发挥钢材和木材优点：钢材具有较高的抗拉和抗压强度以及较好的塑性和韧性，且钢材与木材自重轻，使钢木混合结构受到的地震作用较小，可在地震作用下表现出较好的抗震性能。

### (二) 节能环保

在钢木混合结构的建筑材料中，木材自然生长，具有天然环保之属性，是绿色建筑的首选建筑材料，图 1-3 为木结构房屋碳循环示意图；钢材轻质高强，且资源可重复利用。除此之外，钢木混合结构的施工过程中湿作业少，可实现绿色施工，具有节能环保的特点。

### (三) 施工安装方便

钢木混合结构具有工业化生产程度高的特点：钢构件为工厂制作，具备成批大件生产

和成品精度高等特点；单个木构件尺寸小、重量轻，为工厂化生产后的运输提供了可能。因此钢木混合结构可以实现工厂提供构件、现场拼装的建筑施工方式，从而提高了生产效率、加快了建设进程。

#### (四) 通风、保温和隔热性能好

多层钢木混合结构的墙体和楼（屋）面包含了大量的规格材及胶合板，只要设计中构件的布置方向适当，各种管线的排放、保温材料的填放都较方便，从而提高了建筑物的通风、保温和隔热性能，保证了居住者的舒适度<sup>[4]</sup>。

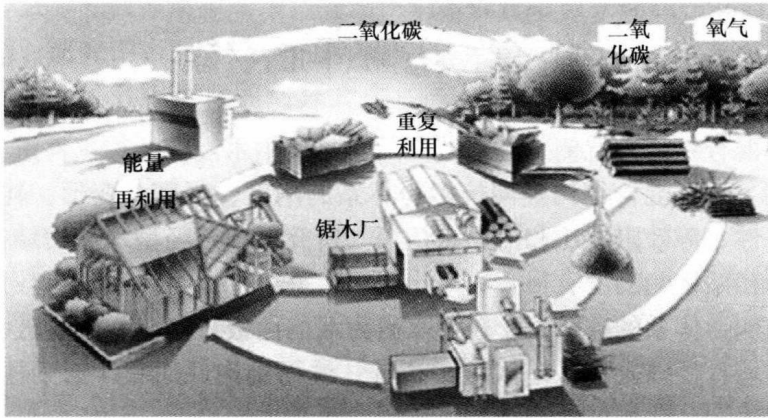


图 1-3 木结构房屋碳循环示意图

## 第二节 受力特点

基于结构行为或力的方向，可以把建筑物荷载分为两种类型，它们包括：竖向荷载和水平荷载（即侧向荷载），如表 1-1 所示<sup>[5]</sup>。

由方向来分类的建筑物荷载

表 1-1

竖向荷载	水平（侧向）荷载
恒荷载	风荷载（水平）
活荷载	地震作用（水平）
雪荷载	洪水（静态和动态水压力）
风荷载（竖向吸力）	土压力（侧向压力）
地震作用（竖向）	—

多层钢木混合结构的竖向荷载通过楼面（屋面）传递到钢梁上，再由钢梁传递到钢柱及木剪力墙，其中钢框架承担了大部分竖向荷载。

除此之外，结构常受到风荷载、地震作用等水平荷载的作用，钢木混合结构的楼（屋）盖除承受竖向重力荷载外，还将水平地震作用、风荷载等分配到由钢框架及内填轻型木剪力墙组成的竖向抗侧力构件中，使它们能够协同作用，充分发挥各自抵抗荷载的能力。其中，钢框架的存在可以限制剪力墙的上拔变形，而剪力墙的覆面板之间相互挤压耗能，固定覆面板与墙骨柱的钉连接变形耗散大量能量，使得轻型木剪力墙具有良好的耗能性能。在较大荷载作用下，轻型木剪力墙的抗侧刚度比钢框架更高，可以保护钢框架，避

免钢框架因承受过大的水平荷载而进入塑性；在极大变形条件下，轻型木剪力墙具有良好的耗能性能和填充作用，可以预防结构连续性倒塌。同时，由于钢框架的参与，钢木混合结构拥有比纯木结构更强的变形能力。

### 第三节 研究与应用展望

#### 一、研究进展

目前，钢木混合结构的研究进展主要包括以下几个方面。

##### (一) 结构抗侧力性能试验

为研究钢木混合结构的抗侧力性能，对两个足尺钢木混合结构试件进行往复加载试验研究，试验得到了钢木混合结构竖向抗侧力体系的刚度、强度、变形、耗能和破坏形态，以及其恢复力特性、等效阻尼比和滞回特性等。研究发现：轻型木剪力墙被填充在钢框架中，对钢框架的初始抗侧刚度有很大提高作用，且整个抗侧力体系具有较好的延性。钢木混合结构竖向抗侧力体系的破坏始于轻型木剪力墙的面板钉连接，主要破坏模式有钉子被剪断、钉子拔出墙骨柱以及钉头陷入覆面板等；继而钢构件屈服，钢梁柱连接节点破坏。但由于钢木之间采用足够的螺栓连接，未发现在单独木剪力墙试验中常见的墙骨柱上拔等破坏模式。

为研究钢木混合楼盖的水平抗侧性能，对  $4.8\text{m} \times 2.8\text{m}$  的新型轻型钢木混合楼盖分别进行了垂直及平行于搁栅方向水平往复加载拟静力试验，试验分别考察其垂直及平行于搁栅方向的平面内刚度、强度、耗能、延性及变形特征等侧向性能，试验发现：轻型钢木混合楼盖垂直和平行于搁栅加载时，变形均以剪切变形为主，主要破坏形式均是两加载点外面板钉剪断。垂直于搁栅加载时，C型钢搁栅跨中下翼缘局部屈曲，上翼缘因上铺面板对其有加强作用，未发生屈曲。此外，还定义了楼盖水平荷载转移能力系数，对楼盖水平荷载转移能力进行了量化。

除此之外，为研究不同的钢木连接方式对结构抗侧性能的影响，对普通螺栓和高强螺栓连接的钢木混合墙体进行了往复荷载下的抗侧性能试验研究。通过试验对比了钢木混合墙体在侧向力作用下的破坏模式，并由试验数据，分析其刚度退化、剪力分配情况和耗能性能等，试验表明，高强螺栓连接比普通螺栓连接的连接刚度更大，对钢木混合墙体极限承载力提高更加明显。与单榀纯框架相比，单榀钢木混合墙体体现出了良好的延性和耗能性能，但也伴随着明显的刚度退化。

##### (二) 结构整体动力试验

为研究钢木混合结构在真实地震作用下的抗震性能，对缩尺比例为  $2/3$  的四层钢木混合结构模型进行了振动台试验。通过试验，获得了钢木混合结构在不同水准地震作用下的振动特性、动力响应、剪力分配和破坏模式。试验发现：随着地震强度的增加，轻木剪力墙出现刚度退化，所承担的地震剪力逐步减小，但仍能够承担相当一部分的地震剪力；振动台模型结构在地震作用下基本保持完好，仅在轻木剪力墙中出现钉头拔出、陷入覆面板和钉孔挤坏等现象，钢框架和钢木连接均没有发生破坏，并表现出良好的协同工作能力，显示了混合结构良好的抗震性能。

### (三) 结构数值模拟方法

基于模拟木剪力墙中钉连接特性的“HYST”算法，在通用有限元软件 ABAQUS 中开发相应用户自定义单元子程序，模拟钢木混合结构中木剪力墙的抗侧力性能。除此之外，提出了钢木混合结构在 OpenSees 中的简化模拟方法，并验证了此种方法的有效性。详细的模拟方法见附录部分。

### (四) 结构抗震可靠度分析和设计理论

采用易损性分析方法和响应面法两种方法对钢木混合抗侧力体系的地震可靠度进行计算和分析。结合试验和数值模拟结果，提出了钢木混合结构立即居住和防止倒塌性能水准层间位移角限值。研究钢木混合结构的等效阻尼比、钢木协同工作性能以及耗能性能等，提出了钢木混合结构等效阻尼比的估算公式，进一步提出了钢木混合结构的抗震设计方法，为实际工程提供参考。

## 二、应用展望

近年来，随着经济发展，我国的环境问题日益突出，节能减排和保护环境的重要性受到了政府和社会的广泛关注。建筑业作为我国国民经济支柱产业，其能源消耗总量从 2001 年的约 3 亿吨标准煤增长到 2014 年约 8.14 亿吨标准煤<sup>[6]</sup>，给我国的生态文明建设带来了巨大的挑战。我国民用建筑的建造和使用过程消耗了社会水资源和原材料总量的 50%，同时产生了 42% 的温室气体排放。民用建筑在建材生产、建造和使用过程中，能耗占全社会总能耗的 49.5%，其中建材生产能耗占 20%，建造能耗占 1.5%，使用能耗占 28%<sup>[7~9]</sup>。相关研究表明，通过大力发展建筑节能与绿色建筑，预计到 2020 年，每年可以节约 4200 亿度电和 2.6 亿吨标准煤，同时可以减少 8.46 亿吨的温室气体排放量<sup>[10]</sup>。

木材依靠太阳能而周期性地自然生长，只要合理种植、开采，可认为是一种再生产容易、绿色环保的建筑材料<sup>[4]</sup>；钢结构具有轻质高强、资源可重复利用等优点。将钢材与木材结合，形成的钢框架梁上铺设木楼（屋）盖、在钢框架柱间设置木剪力墙的新型多层混合结构，可以充分发挥钢材和木材的优点，该结构抗震性能好、节能环保、施工安装方便，且通风、保温、隔热性能较好，适用于建造多层乃至小高层房屋，具有一定的应用前景。

## 第二章 设计基本规定

### 第一节 基本假定

#### 一、水平荷载单向受力假定

钢木混合结构简化计算时，可把整个结构看作由若干平面框架和剪力墙等抗侧力结构组成。在平面正交布置的情况下，假定每一方向的水平力只由该方向的抗侧力承担，垂直水平力方向的抗侧力结构，在计算中不予考虑。在结构单元中框架和剪力墙与主轴方向成斜交时，在简化计算中可将柱和剪力墙的刚度转换到主轴方向上再进行计算<sup>[11]</sup>。

#### 二、竖向荷载计算假定

竖向荷载作用下，钢框架承担了大部分荷载，木剪力墙也承担了一部分荷载，有利于减小钢构件的偏心受力情况。在钢木混合结构设计的简化计算中，假定竖向荷载全部由钢框架承担，可对钢框架进行初步估算和设计，确定钢框架的材料及截面等特性，进一步对木剪力墙及楼屋盖进行设计，并进行验算。

### 第二节 重要设计参数

#### 一、层间位移角限值

在钢木混合抗侧力体系中，钢构件中的应力水平、木剪力墙中钉连接的破坏状况等均可作为结构性能目标，然而，这些性能目标仅能反映结构局部破坏状况，无法对应结构整体的安全性。北岭地震后，美国研究学者已经对轻型木结构和钢框架的性能需求与各水准地震作用之间相互关系做了较深入研究，并对不同水准地震作用下房屋所需达到的性能目标提出建议。现今，基于结构层间位移的性能目标为广大学者所接受<sup>[12,13]</sup>。层间位移不仅能反映结构整体的安全情况，还能反映结构主要构件的破坏情况。

我国《建筑抗震设计规范》<sup>[14]</sup>将建筑结构的性能划分为三个水准。其中，第一水准要求主体结构在震后达到不受损坏或无需修理可继续使用的水准（以下简称立即居住性能水准）；第二水准允许结构在震后发生损坏，但要求结构经一般性修理仍可继续使用（以下简称生命安全性能水准）；第三水准要求结构在震后不致倒塌或发生危及生命的严重破坏（以下简称防止倒塌性能水准）。并规定我国抗震设防的基本目标为：当结构遭受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震影响时，需满足立即居住性能水准要求；当结构遭受相当于本地区抗震设防烈度的设防地震影响时，需满足生命安全性能水准要求；当结构遭受高于本地区抗震设防烈度的罕遇地震影响时，需满足防止倒塌性能水准要求。

钢木混合结构在不同性能目标下的层间位移角限值如表 2-1 所示。

钢木混合结构性能目标

表 2-1

结构性能水准	立即居住	生命安全	防止倒塌
层间位移角限值	0.6%	1.5%	2.4%

## 二、竖向抗侧力体系抗侧刚度比

钢木混合结构的竖向抗侧力体系是由钢框架和木剪力墙组成的双重抗侧力体系。若木剪力墙抗侧刚度太低，对结构体系抵抗水平作用的贡献较小，会使结构无法满足抗侧力的需求；若木剪力墙的刚度太大，会造成结构刚度过大、自振周期过小，从而增加结构所承担的地震作用，造成不必要的浪费。因此适宜的刚度对比对实现结构延性破坏机制尤为重要。

内填轻型木剪力墙和钢框架的抗侧刚度比值  $\lambda$  对结构在水平地震作用下结构的最大层间位移角和木剪力墙承担结构水平剪力比率有较大影响，为保证两者能在水平力作用下充分发挥作用，建议在钢木混合结构设计中，抗侧刚度比  $\lambda$  取为 1.0~3.0， $\lambda$  的定义见式 (2-1)。

$$\lambda = k_{\text{wood}}/k_{\text{steel}} \quad (2-1)$$

式中  $k_{\text{wood}}$ ——内填轻型木剪力墙的弹性抗侧刚度；

$k_{\text{steel}}$ ——钢框架的弹性抗侧刚度。

## 三、楼盖水平荷载转移能力系数

楼盖主要承受楼面竖向荷载，同时也决定着水平荷载在竖向抗侧力构件中的分配。我国《建筑抗震设计规范》规定的结构的楼层水平地震剪力分配原则如下：现浇和装配式混凝土楼、屋盖等刚性楼、屋盖建筑，宜按抗侧力构件等效刚度的比例分配；木楼盖、木屋盖等柔性楼、屋盖建筑，宜按抗侧力构件从属面积上重力荷载代表值的比例分配<sup>[14]</sup>。ASCE7-05 规定当楼盖的最大平面内变形是其下竖向抗侧力构件顶部平均位移 2 倍以上时为柔性楼盖，反之为刚性楼盖<sup>[15]</sup>。楼盖的刚柔直接决定了水平荷载的分配方式。

轻型钢木混合楼盖具有诸多优点，如质量轻、抗震性能好、抗弯强度及抗弯刚度大、工厂预制化程度高、现场湿作业少及绿色节能等。以楼盖平面内刚度与竖向抗侧力构件抗侧刚度比值  $\alpha$ 、楼盖水平荷载转移能力系数  $\beta$  量化此种楼盖平面内刚度对水平荷载分配的影响，并根据  $\alpha$  及  $\beta$  数值大小定义刚性楼盖：当  $\alpha \geq 3$  时，增加楼盖平面内刚度对水平荷载的分配影响不大，楼盖为完全刚性。

## 四、钢木混合结构等效阻尼比

阻尼是反应结构动力特性的重要参数之一，其反映了结构在地震作用中能量耗散的能力。通常认为能量耗散主要来源于结构在线弹性受力范围内的耗能和结构进入弹塑性阶段后引起的能量耗散。其中，结构线弹性阶段的耗能主要包括材料的内摩擦作用使机械能转化为热能、周围介质对结构振动的阻尼、各构件连接处以及体系与支承之间的摩擦、通过地基散失的能量；当结构进入弹塑性之后，还会产生非线性滞回性能引起的能量耗散，这部分的能量耗散通常比结构在线弹性阶段的耗能更多<sup>[16]</sup>。

由于结构阻尼机制十分复杂，常用结构的等效阻尼比  $\xi$  来衡量结构的耗能水平， $\xi$  的计算方法如式 (2-2) 所示<sup>[17]</sup>。

$$\xi = \xi_{\text{int}} + \xi_{\text{hys}} \quad (2-2)$$

式中  $\xi_{\text{int}}$ ——结构的黏滞阻尼比，代表结构处于线弹性阶段的耗能，对于钢木混合结构，可取  $\xi_{\text{int}} = 0.045$ ；

$\xi_{\text{hys}}$ ——结构的滞回阻尼比，代表结构非线性滞回性能引起的耗能，对于钢木混合结构，可取  $\xi_{\text{hys}} = (1.0787 - 0.0818\lambda)\mu - 1/\pi\mu$ <sup>[18]</sup>。

## 五、钢木剪力分配系数

在钢木混合结构设计过程中，确定木剪力墙和钢框架的剪力分配对结构设计至关重要。通过定义剪力分配系数  $\kappa$  以量化分配到钢框架和木剪力墙中的剪力，剪力分配系数  $\kappa$  的定义式见式 (2-3)。

$$\kappa = \frac{V_{\text{wood}}}{V_{\text{wood}} + V_{\text{steel}}} \quad (2-3)$$

式中  $V_{\text{wood}}$ ——木剪力墙所承担的剪力值；

$V_{\text{steel}}$ ——为钢框架所承担的剪力值。

研究表明，在弹性阶段，钢框架和木剪力墙的剪力分配近似按刚度比进行分配，即钢木混合结构的弹性设计阶段的剪力分配系数取  $\lambda/(\lambda+1)$ 。

## 第三节 层间位移角限值确定方法

### 一、立即居住性能水准层间位移角限值

《建筑抗震设计规范》对建筑结构立即居住性能水准的具体描述是：在该性能水准下，建筑主体结构不受损坏，非结构构件（包括围护墙、隔墙、幕墙、内外装修等）没有过重破坏并导致人员伤亡，保证建筑的正常使用功能。对于钢木混合结构来说，即在该性能水准下，允许钢框架有极少钢构件进入局部屈服，允许轻型木剪力墙的门窗洞口角部出现石膏板裂纹，钢木混合抗侧力体系整体处于弹性阶段<sup>[1]</sup>。以下将介绍钢木混合结构在立即居住性能水准下层间位移角限值的确定方法。

#### (一) 有限元分析方法

##### (1) 分析对象

分析采用单层单榀的钢木混合抗侧力体系模型，模型示意图如图 2-1 所示。其中钢框架由热轧 H 型钢拼装而成，钢材选用 Q235B，钢框架和木剪力墙间采用高强螺栓连接，此时钢框架和木剪力墙之间可视为完全连接。

由于钢木混合结构中木剪力墙与钢框架的刚度比  $\lambda$  对结构的抗侧力性能有较大影响，故将  $\lambda$  作为参数分析的参数之一，以衡量不同钢木混合抗侧力体系中木剪力墙和钢框架的相对强弱。分析考虑了五个不同的  $\lambda$  取值，分别为：1.0，1.5，2.0，2.5 和 3.0。除此之外，为考虑尺寸对钢木混合抗侧力体系抗侧性能的影响，分析结合了工程实际中的常用尺寸，选取了不同高度（2.4m，3.0m，3.6m，4.2m，4.8m）和跨度（3.6m，4.8m，

6.0m, 7.2m) 的钢木混合抗侧力体系模型, 具体参数组合如表 2-2 所示。表 2-2 同时还给出了这些钢木混合抗侧力体系中钢构件截面的具体信息以及钢框架的抗侧刚度。

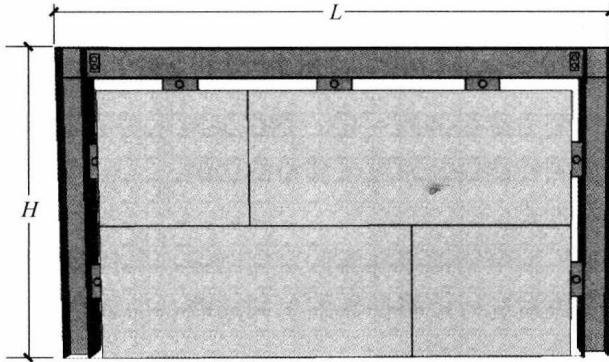


图 2-1 参数分析模型示意图

钢木混合抗侧力体系分析参数

表 2-2

框架号	$H(\text{m})$	$L(\text{m})$	钢柱截面	钢梁截面	$k_{\text{steel}}(\text{kN}/\text{mm})$
1	2.4	3.6	H200×200×8×12	H200×150×6×9	8.62
2	2.4	4.8	H200×200×8×12	H250×175×7×11	10.15
3	2.4	6.0	H300×300×12×12	H350×175×7×11	28.51
4	2.4	7.2	H300×300×12×12	H350×175×7×11	26.74
5	3.0	3.6	H200×200×8×12	H200×150×6×9	4.76
6	3.0	4.8	H200×200×8×12	H250×175×7×11	5.57
7	3.0	6.0	H300×300×12×12	H350×175×7×11	15.95
8	3.0	7.2	H300×300×12×12	H350×175×7×11	14.98
9	3.6	3.6	H200×200×8×12	H200×150×6×9	2.93
10	3.6	4.8	H200×200×8×12	H250×175×7×11	3.39
11	3.6	6.0	H300×300×12×12	H350×175×7×11	9.87
12	3.6	7.2	H300×300×12×12	H350×175×7×11	9.29
13	4.2	3.6	H200×200×8×12	H200×150×6×9	1.93
14	4.2	4.8	H200×200×8×12	H250×175×7×11	2.22
15	4.2	6.0	H300×300×12×12	H350×175×7×11	6.55
16	4.2	7.2	H300×300×12×12	H350×175×7×11	6.18
17	4.8	3.6	H200×200×8×12	H200×150×6×9	1.35
18	4.8	4.8	H200×200×8×12	H250×175×7×11	1.54
19	4.8	6.0	H300×300×12×12	H350×175×7×11	4.59
20	4.8	7.2	H300×300×12×12	H350×175×7×11	4.33
21	2.4	3.6	H300×300×12×12	H350×175×7×11	34.75
22	2.4	4.8	H300×300×12×12	H350×175×7×11	31.72
23	2.4	6.0	H350×350×10×16	H400×200×8×12	55.17
24	2.4	7.2	H350×350×10×16	H400×200×8×12	52.04

采用附录三的 OpenSees 简化模拟方法对表 2-2 中的钢木混合抗侧力体系进行建模，表中钢框架的抗侧刚度  $k_{steel}$  通过有限元软件的 pushover 分析确定。由于参数分析的样本量较大，故将样本进行分组，以“框架号-刚度比”来表示每一个样本编号，例如钢框架号为 2 的木剪力墙与钢框架刚度比  $\lambda=3.0$  的钢木混合抗侧力体系可表示为：“2-3.0”。表中 21~24 组钢木混合抗侧力体系的高度及跨度与 1~4 组相同，但框架的梁柱截面较 1~4 组强，以研究在钢木混合抗侧力体系高跨一定、钢框架与木剪力墙刚度比  $\lambda$  相同的条件下，体系总抗侧刚度对体系抗侧性能以及屈服位移角的影响。

(2) 边界条件和加载方式

钢木混合抗侧力体系模型中钢框架柱脚假定为刚接，梁柱节点假定为完全刚接。对每一个钢木混合抗侧力体系模型进行位移控制的单调加载，加载点设置在钢木混合抗侧力体系模型的左上角梁柱节点处。

(二) 分析结果

(1) 屈服位移

目前，对于无明显转折点的力学行为的材料、构件及结构，其屈服点的确定方法主要包括作图法、等能量法以及残余塑性变形法等<sup>[19]</sup>。针对轻型木剪力墙，其等效屈服点的定义主要包括以下五种：Karacabeyli and Ceccotti 法（简称 K&C 法）<sup>[20]</sup>、CEN 法<sup>[21]</sup>、CSIRO 法<sup>[22]</sup>、Equivalent Energy Elastic Plastic 法（简称 EEEP 法）<sup>[23]</sup> 和 Yasumura and Kawai 法（简称 Y&K 法）<sup>[24]</sup>。

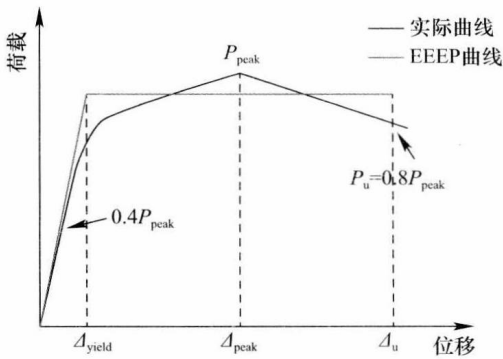


图 2-2 EEEP 曲线

由于 EEEP 法可以较好地反映结构的耗能情况，考虑采用 EEEP 法来定义钢木混合抗侧力体系的屈服点。EEEP 法主要通过 EEEP 曲线来定义研究对象的弹性极限和屈服点，并以 EEEP 曲线下从原点至钢木混合抗侧力体系破坏位移面积与单调荷载作用下的荷载-位移曲线或往复荷载作用下的第一循环包络线从原点至体系破坏位移面积相同的原则定义 EEEP 曲线，如图 2-2 所示。

利用 EEEP 法对上述的 120 个钢木混合抗侧力体系的屈服位移进行分析计算，各抗侧力体系的屈服层间位移角的统计结果如表 2-3 所示。

钢木混合抗侧力体系屈服位移角统计表

表 2-3

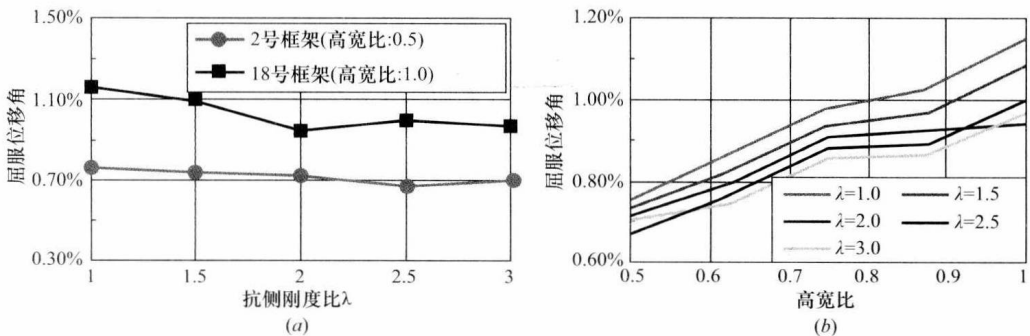
框架号	钢木混合抗侧力体系屈服位移角 (%)				
	$\lambda=1.0$	$\lambda=1.5$	$\lambda=2.0$	$\lambda=2.5$	$\lambda=3.0$
1	0.80	0.81	0.81	0.81	0.82
2	0.76	0.74	0.72	0.67	0.71
3	0.65	0.66	0.73	0.74	0.75
4	0.68	0.72	0.73	0.69	0.69
5	0.82	0.79	0.76	0.74	0.73
6	0.86	0.82	0.79	0.77	0.75
7	0.71	0.71	0.71	0.71	0.62

续表

框架号	钢木混合抗侧力体系屈服位移角 (%)				
	$\lambda=1.0$	$\lambda=1.5$	$\lambda=2.0$	$\lambda=2.5$	$\lambda=3.0$
8	0.72	0.71	0.71	0.71	0.70
9	0.94	0.91	0.88	0.87	0.85
10	0.98	0.94	0.91	0.88	0.86
11	0.73	0.72	0.70	0.69	0.69
12	0.79	0.78	0.77	0.77	0.76
13	0.99	0.94	0.90	0.87	0.85
14	1.03	0.97	0.93	0.89	0.87
15	0.76	0.73	0.72	0.70	0.69
16	0.83	0.81	0.79	0.78	0.77
17	1.05	0.96	0.91	0.86	0.83
18	1.15	1.08	0.95	1.00	0.97
19	0.82	0.78	0.75	0.72	0.70
20	0.88	0.84	0.82	0.80	0.78
21	0.65	0.67	0.69	0.70	0.71
22	0.61	0.62	0.63	0.63	0.63
23	0.66	0.68	0.70	0.71	0.72
24	0.66	0.68	0.69	0.70	0.71

## (2) 参数分析

从表 2-3 中可以看出,不同钢木混合抗侧力体系的屈服位移角数值大小存在明显差别。总体来看,相比于体系的高宽比,木剪力墙与钢框架的抗侧刚度比  $\lambda$  对屈服位移角的影响不显著。以 2 号框架和 18 号框架对应的钢木混合抗侧力体系为例,如图 2-3 (a) 所示,其中第 2 组混合抗侧力体系的高宽比为 0.5,第 18 组抗侧力体系的高宽比为 1.0。可以看出,当钢木混合抗侧力体系的抗侧刚度比  $\lambda$  从 1.0 增加到 2.0 时,2 号框架和 18 号框架所对应混合抗侧力体系的屈服位移分别降低了 4.35% 和 17.61% 左右;当混合抗侧力体系的抗侧刚度比  $\lambda$  从 1.0 增加到 3.0 时,2 号框架和 8 号框架所对应混合体系的屈服位移分别降低了 6.66% 和 15.59% 左右。而当体系的高宽比从 2 号框架的 0.5 增加到 18 号框

图 2-3 抗侧刚度比  $\lambda$ 、高宽比对屈服位移角的影响(a) 抗侧刚度比  $\lambda$  的影响; (b) 高宽比的影响