

木-钢筋桁架混凝土组合梁受弯性能研究

汇报人：史本凯

土木工程学院 建筑工程系

2022.12.28

1

研究背景

2

主要研究内容

3

研究结果

4

结论与展望

1. 研究背景

1.1 现代木结构发展现状

- 随着胶合木、CLT等木材重组技术的发展，现代木结构技术得到迅速发展，在**欧美地区**已经广泛应用于**多高层**办公或住宅建筑。
- 在“**双碳**”目标、**绿色**建筑和**建筑工业化**的发展需求下，**我国**也在积极开展木结构在大跨、多高层等方面的科研和工程实践探索。



法国布洛涅-比扬古社区的一幢8层学生公寓“Golden Cube, 金立方”，于2014年建成。



挪威Trodheim市于2016年建成的学生公寓Moholt50|50，采用CLT剪力墙结构。



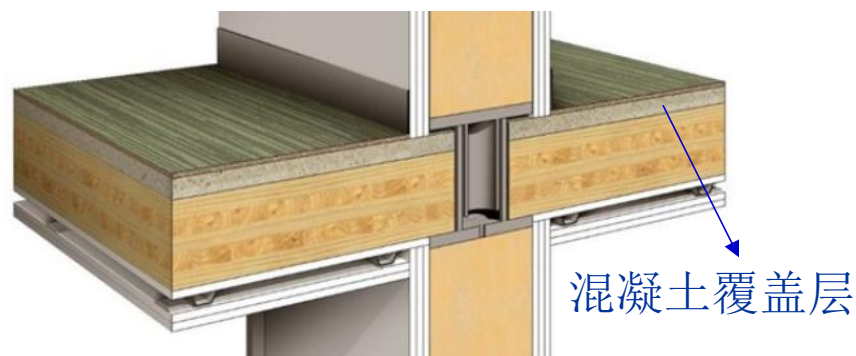
山东鼎驰木业研发大楼，于2020年建成，由南京工业大学建筑设计研究院设计。

1. 研究背景

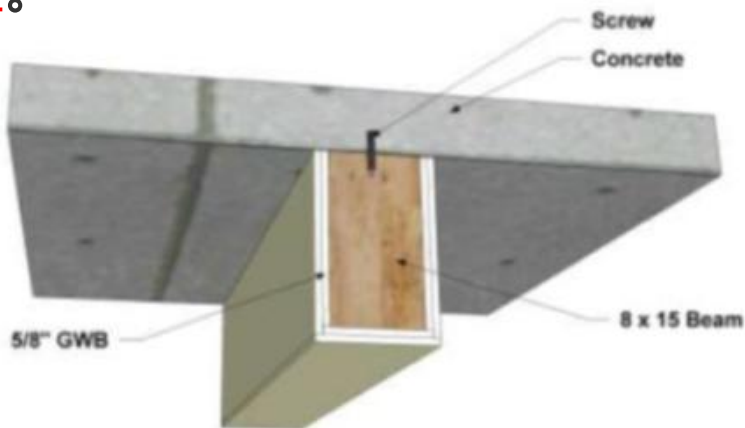
1.2 纯木楼板的不足

尽管木结构建筑用于绿色、环保和宜居的优点，但是采用木结构作为受弯构件时，比如楼板体系或木结构桥梁等，依然存在一定的不足：

- 受弹性模量较小影响，**抗弯刚度**不足；
- 易磨损，影响建筑的**耐久性**；
- 易**振动**，且**防水、防火效果差**。



加拿大UBC学生公寓项目中采用混凝土覆盖层作为防振措施。



防火设计：混凝土板同时起到结构层和防火隔热层的作用。



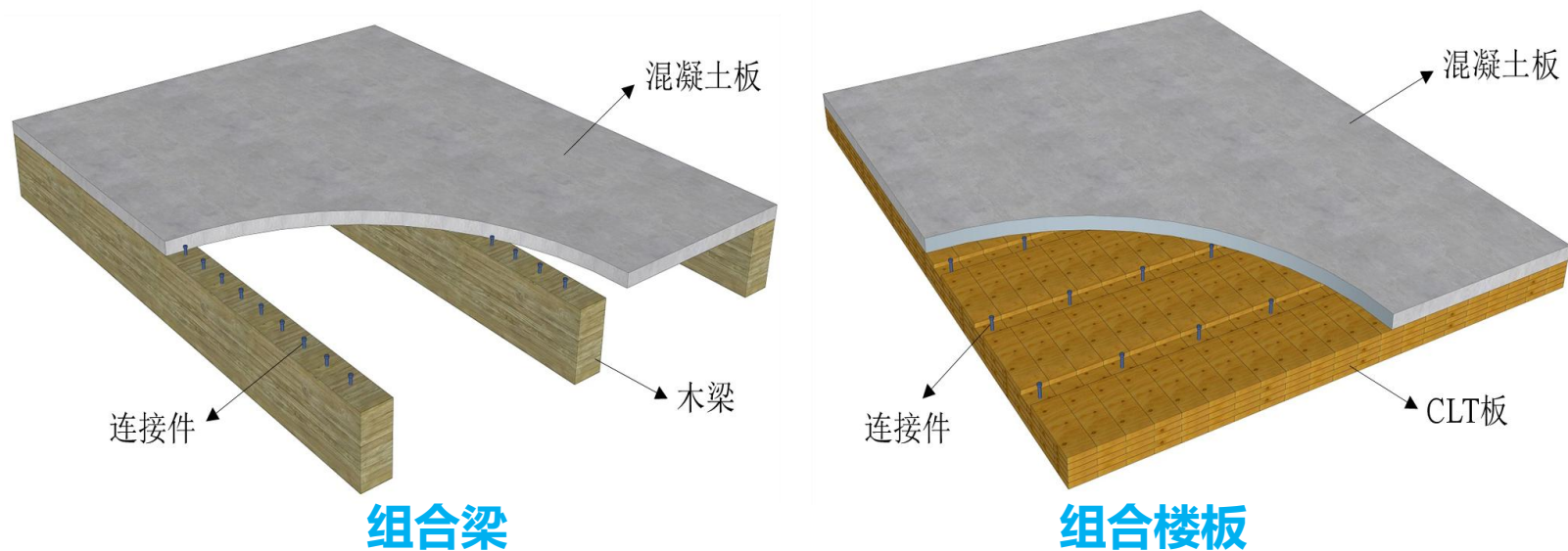
马萨诸塞大学一校园建筑采用“5-CLT+100mm混凝土”楼板形式。

1. 研究背景

1.3 组合楼板的优势

国内外的研究与实践表明：在木结构建筑中采用混凝土楼板，形成木-混凝土组合梁或木-混凝土组合楼板，可以较好地解决纯木楼板的一些不足。具有以下优点：

- 抗弯刚度和承载力较高，可以实现更大的跨度；
- 混凝土板可以对木梁或者木楼板形成可靠的保护，提高建筑的**耐久性**；
- **减轻楼板的振动，隔音和防火性能**得到明显提升。



1. 研究背景

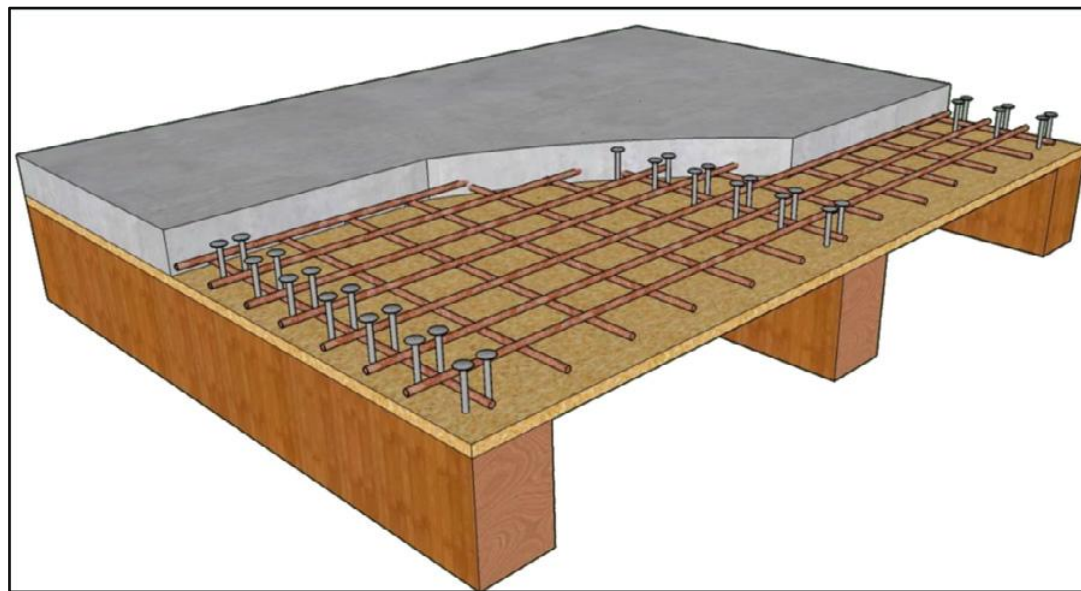
1.4 面临的问题

木构件的特点：全预制构件，没有养护要求。

混凝土构件的特点：现场浇筑，需要支模、养护，工序多，施工周期长。

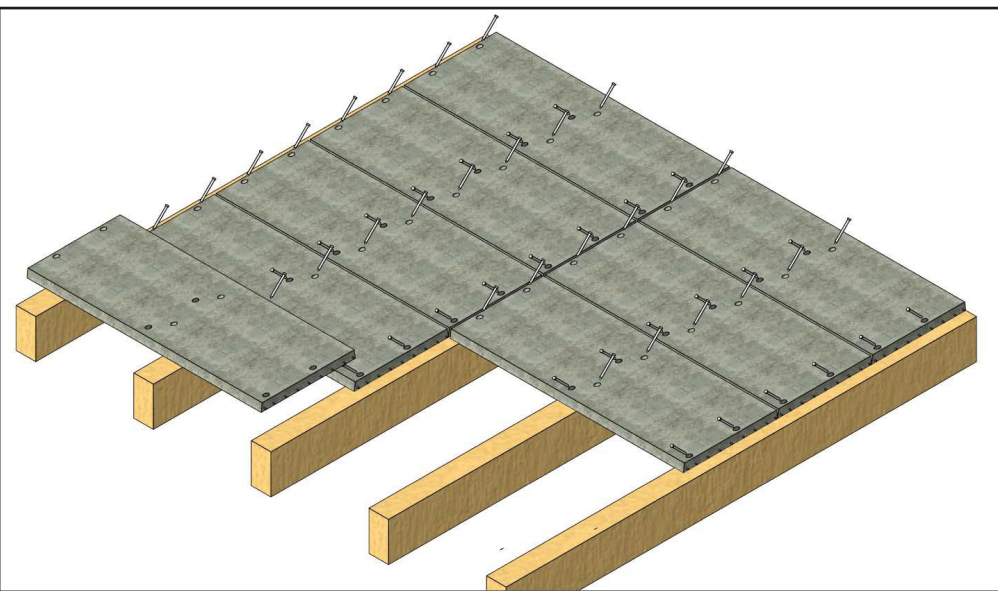
二者在工厂预制、施工周期、施工组织流程等方面存在诸多矛盾。

方案一



设永久模板

方案二



预制混凝土板

1. 研究背景

1.5 新的解决方案

本研究提出一种新方案，将**钢筋桁架楼承板**应用到**木-混凝土组合梁**中，解决其施工现场需要的**模板工程**和**大部分钢筋绑扎工程**等问题。此外，借助钢筋桁架楼承板自身具有一定的抗弯刚度，能够承担施工荷载，可以减少模板支撑工程量，实现自支撑。



钢筋桁架楼承板的应用



钢筋桁架楼承板照片

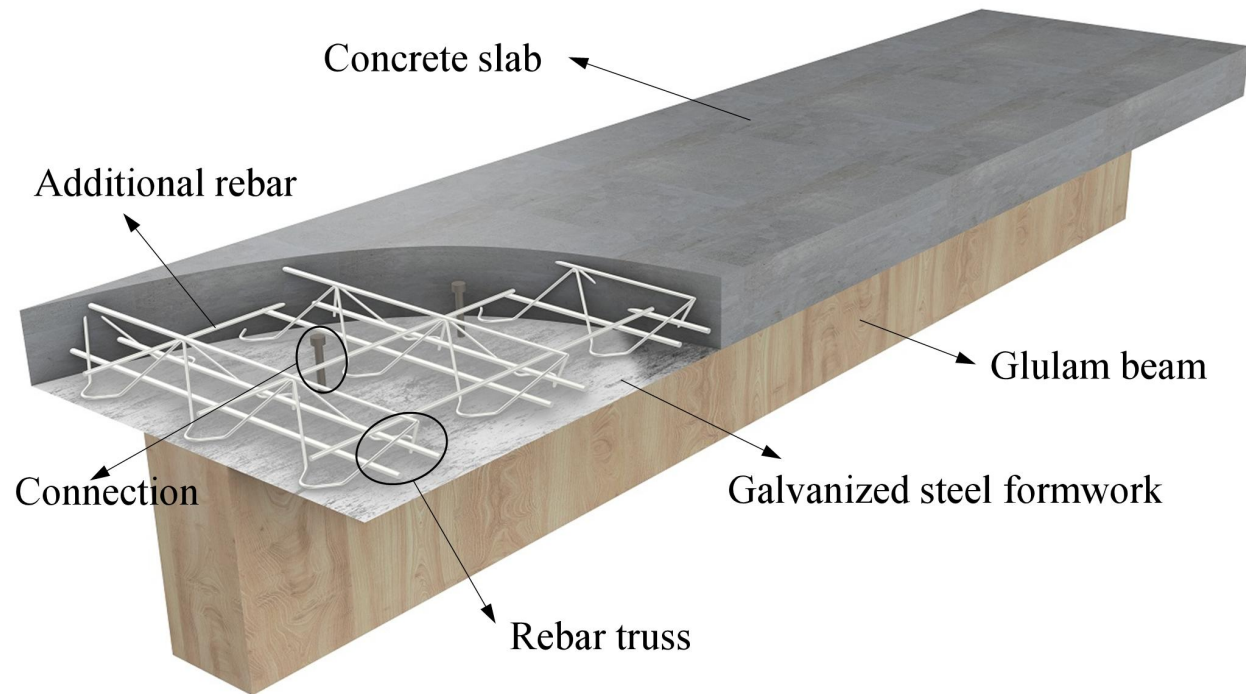
2 主要研究内容-试验设计

为研究钢筋桁架楼承板对新型组合梁界面连接性能和抗弯性能的影响，开展了：

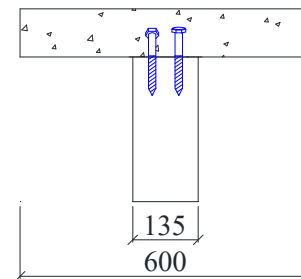
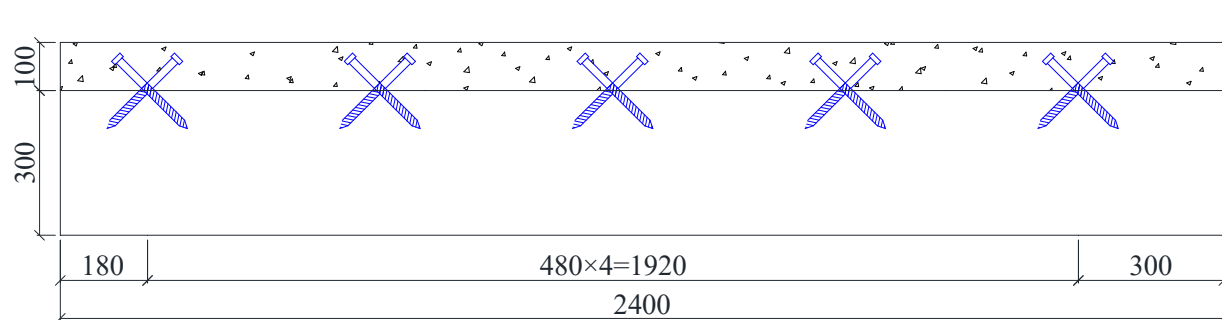
- 连接件的推出试验
- 组合梁的抗弯试验

考虑3种不同的连接方式；作为对比，还进行了采用普通配筋的传统组合梁的抗弯试验和连接件推出试验。

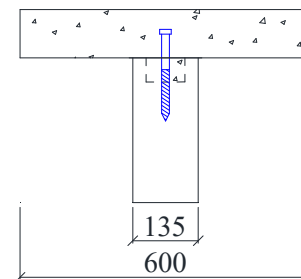
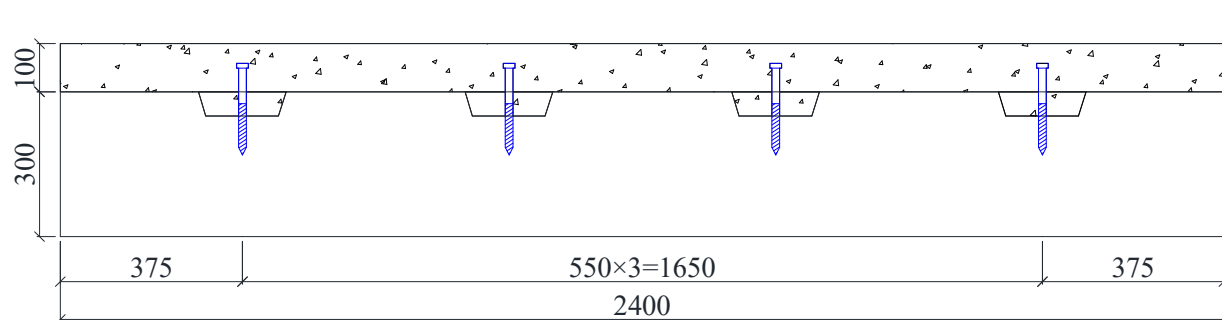
| 试件 | 连接件 | 混凝土板配筋 |
|--------|-----|--------|
| S10(I) | 斜螺钉 | 钢筋桁架楼板 |
| S10 | 斜螺钉 | 普通配筋 |
| N8(I) | 榫-钉 | 钢筋桁架楼板 |
| N8 | 榫-钉 | 普通配筋 |
| G22(I) | 植钢板 | 钢筋桁架楼板 |
| G22 | 植钢板 | 普通配筋 |



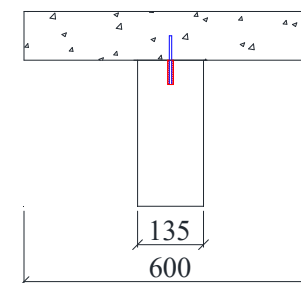
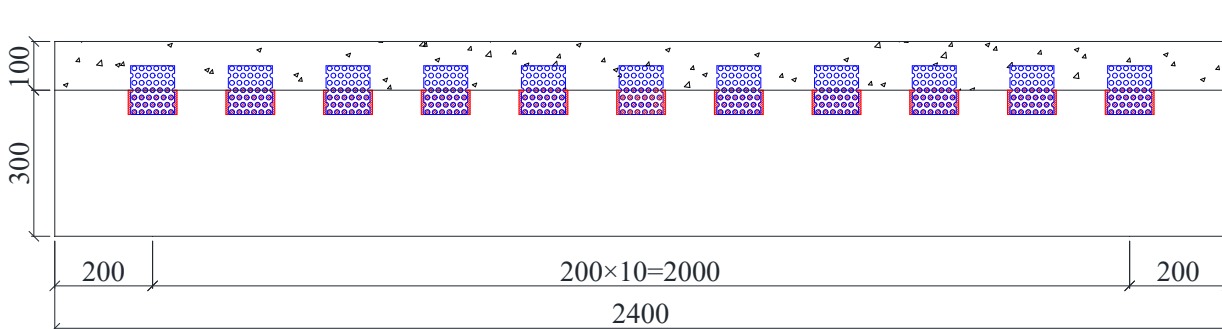
2 主要研究内容-试件设计



斜螺钉连接
BIS16-200



榫-钉连接
NVS16-180



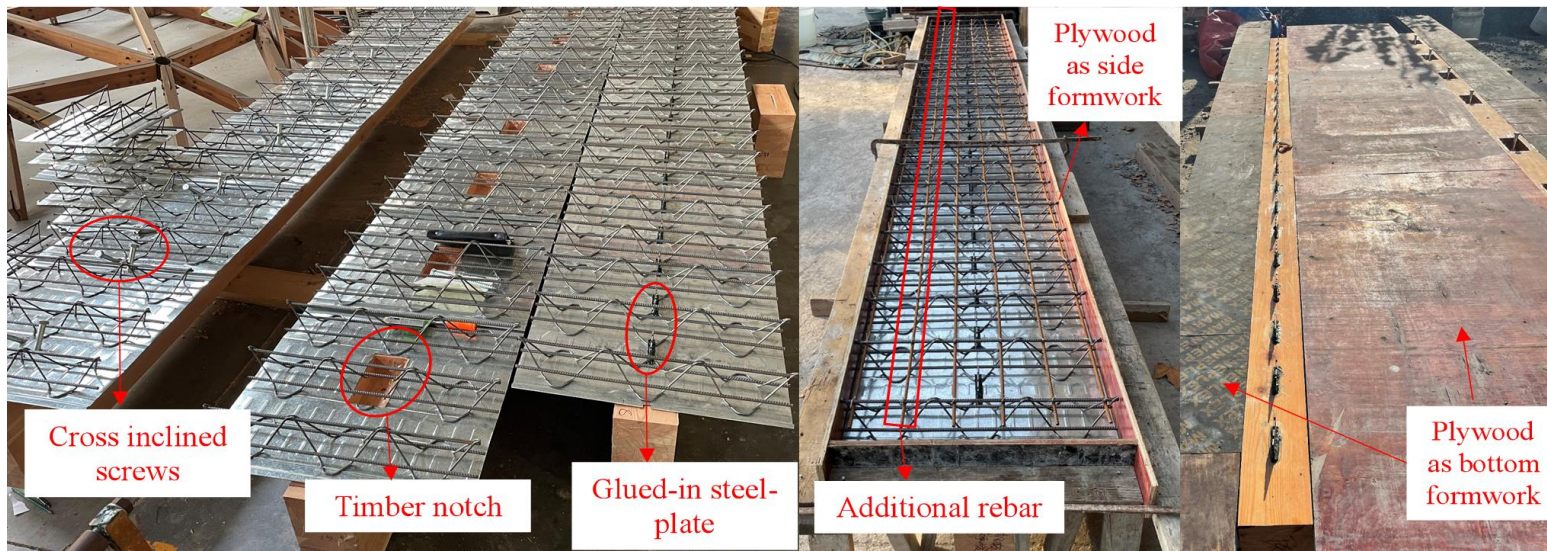
植钢板连接
GSL90

2 主要研究内容-试件加工

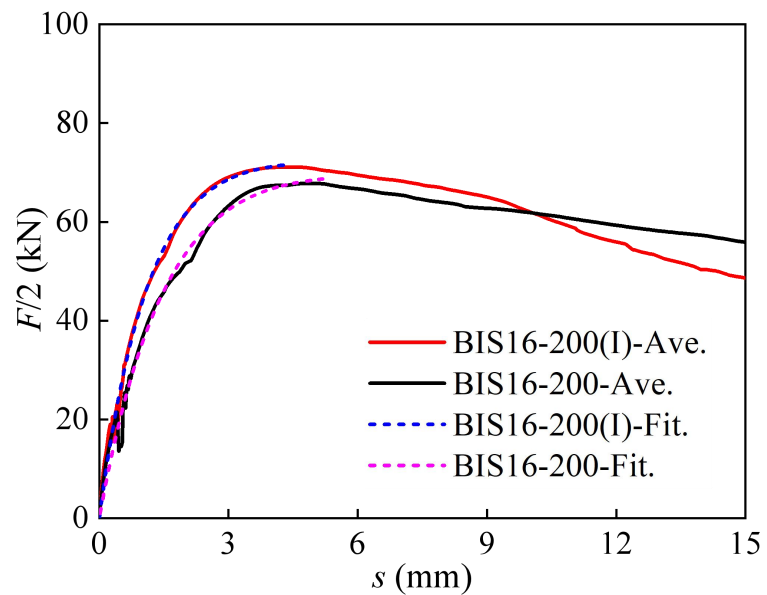
推出试件



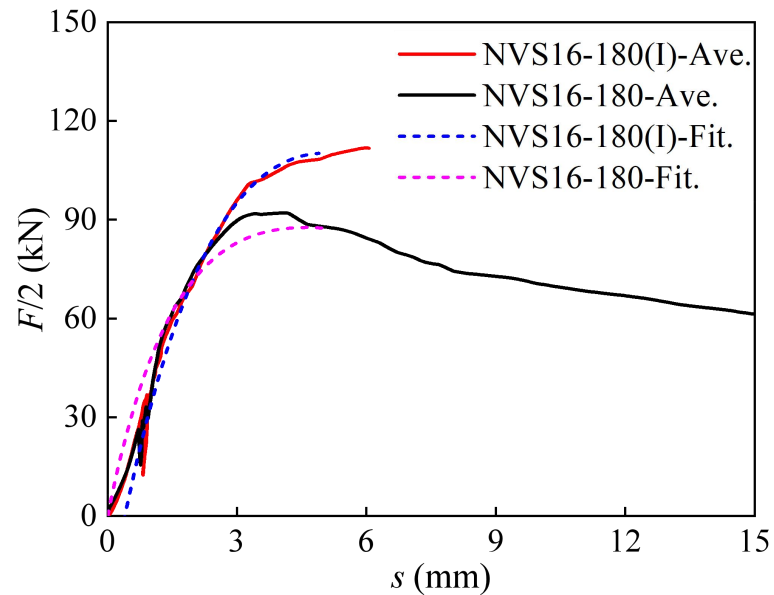
组合梁试件



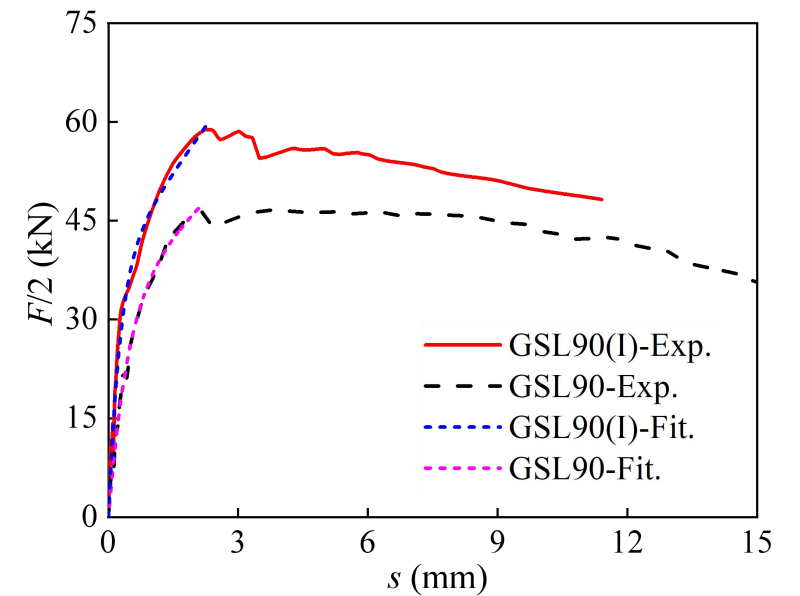
3 研究结果-推出试验



斜螺钉连接
BIS16-200



榫-钉连接
NVS16-180



植钢板连接
GSL90

注：(I)表示试件采用钢筋桁架楼承板。

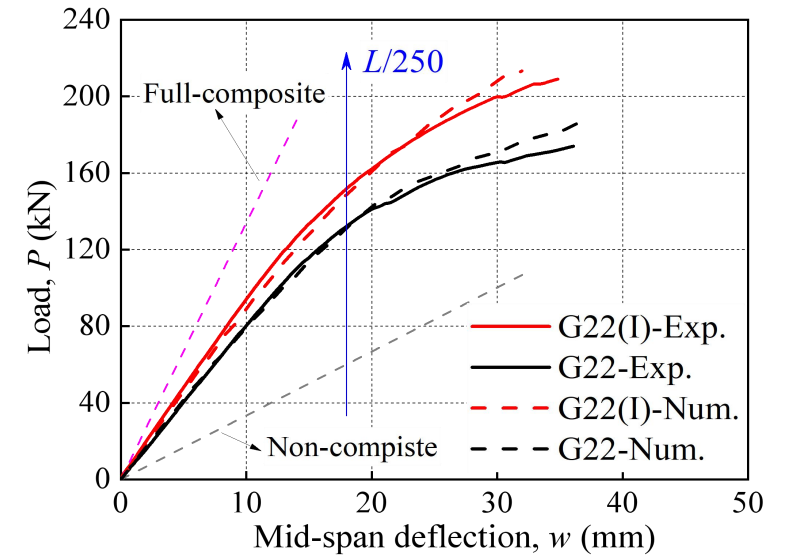
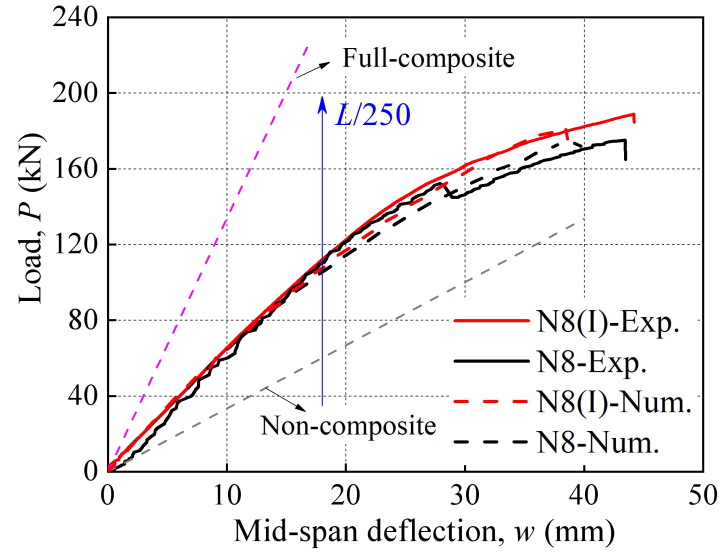
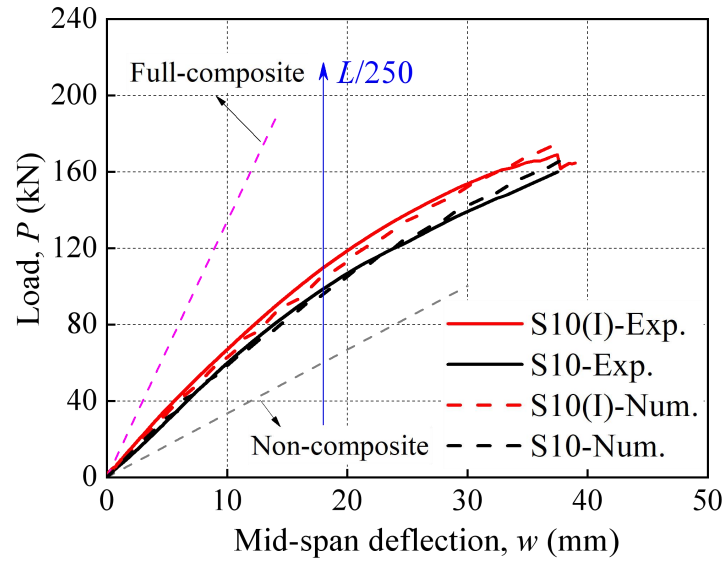
3 研究成果-推出试验

| 组号 | $F_y/2$ (kN) | $F_{max}/2$ (kN) | K_s (kN/mm) | $K_{0.6}$ (kN/mm) | $K_{0.8}$ (kN/mm) |
|--------------|--------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| BIS16-200(I) | 50.9 (3.3%) | 71.3 (4.0%) | 65.7 (7.0%) | 48.6 (13.9%) | 35.3 (11.0%) |
| BIS16-200 | 47.3 (9.4%) | 68.1 (2.1%) | 39.0 (18.0%) | 34.4 (11.2%) | 24.0 (1.8%) |
| NVS16-180(I) | 100.1 (2.4%) | 122.1 (9.2%) | 51.7 (9.1%) | 41.9 (17.4%) | 35.7 (17.8%) |
| NVS16-180 | 81.6 (9.7%) | 92.7 (10.0%) | 46.7 (3.5%) | 49.3 (3.5%) | 41.0 (2.8%) |
| GSL90(I) | 31.9 (15.9%) | 60.6 (0.6%) | 140.6 (10.0%) | 77.2 (42.6%) | 43.5 (28.7%) |
| GSL90 | 28.3 (8.3%) | 48.7 (5.9%) | 71.9 (24.7%) | 51.0 (26.1%) | 37.1 (14.4%) |

采用钢筋桁架楼承板，对新型组合梁界面连接抗剪性能的影响规律：

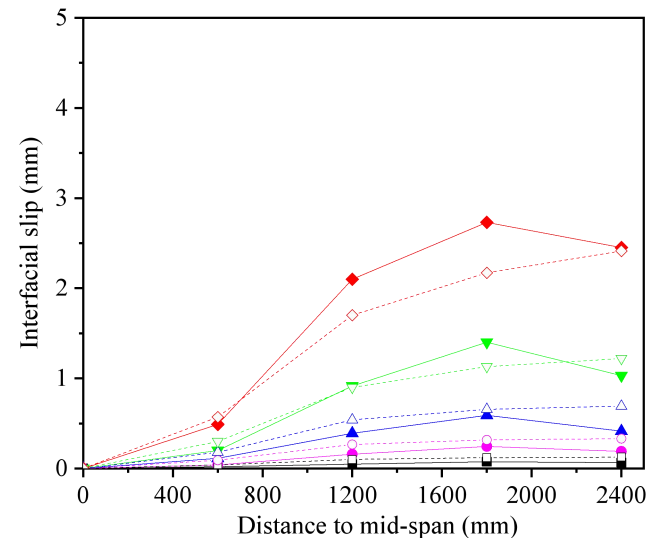
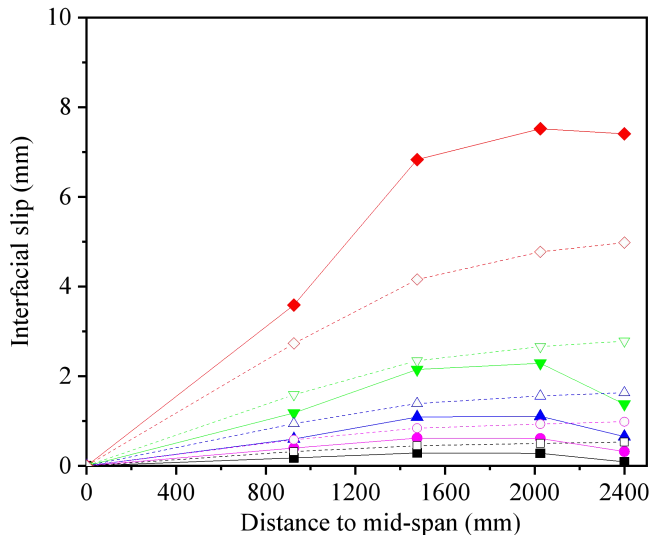
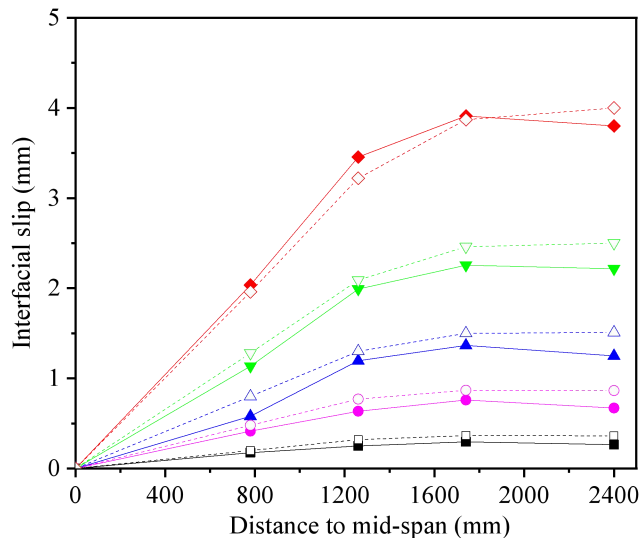
- (1) 对斜螺钉连接的滑移刚度影响比较大，提升约60%；
- (2) 对榫-钉连接的抗剪承载力提高显著，提升约30%；
- (3) 对植钢板连接的承载力和滑移刚度提升均比较明显，分别提升20%和90%左右。

3 研究结果-受弯试验-挠度曲线

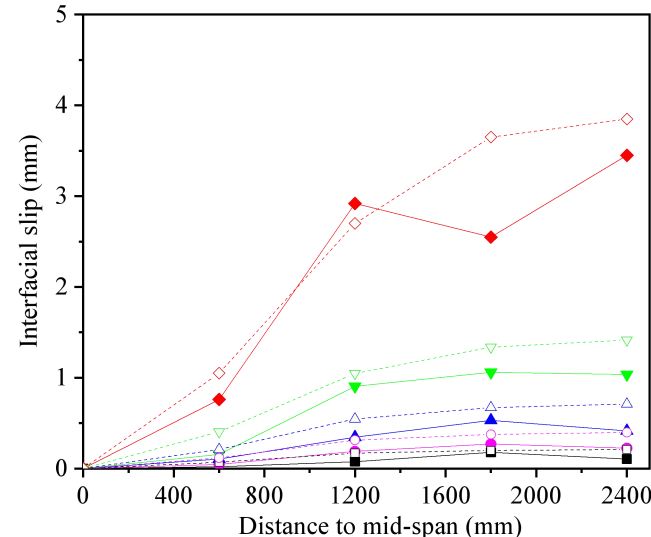
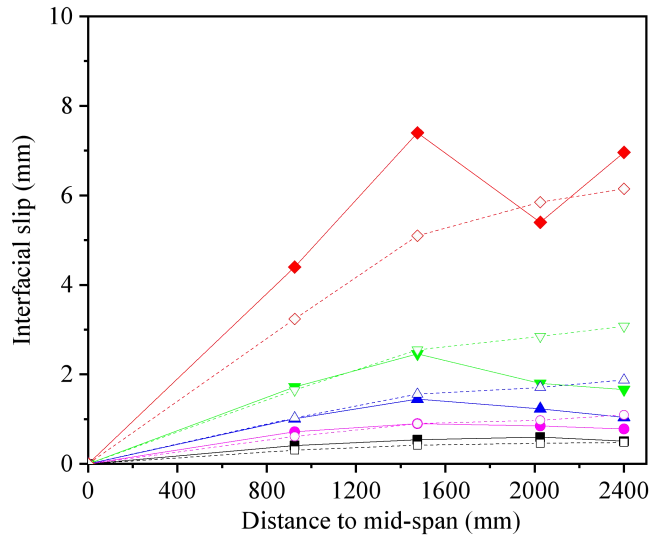
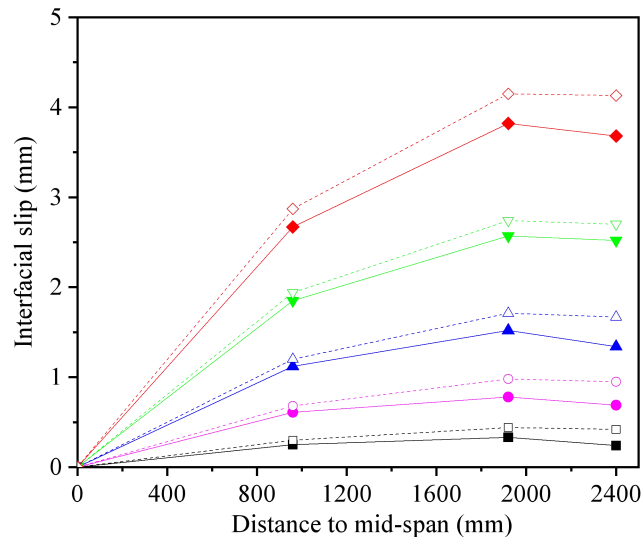


3 研究结果-受弯试验-界面滑移

钢筋桁架楼承板



普通配筋



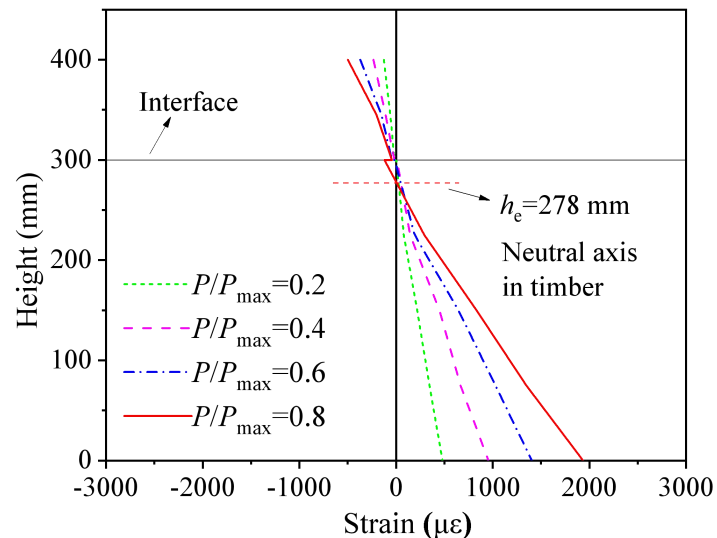
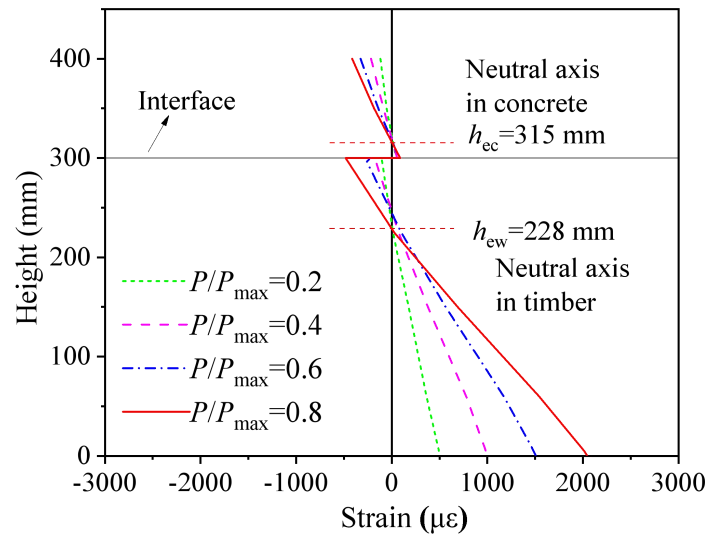
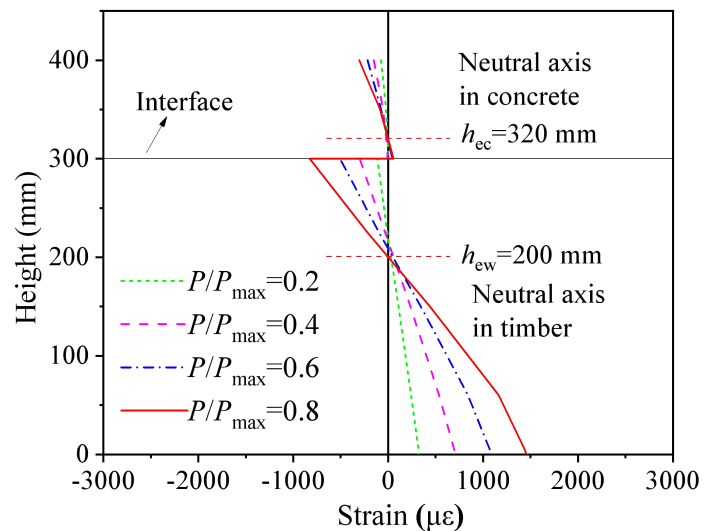
斜螺钉

榫-钉

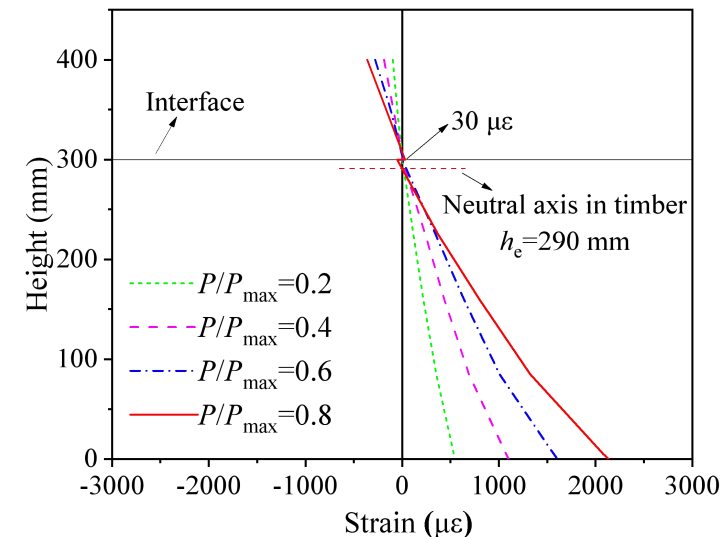
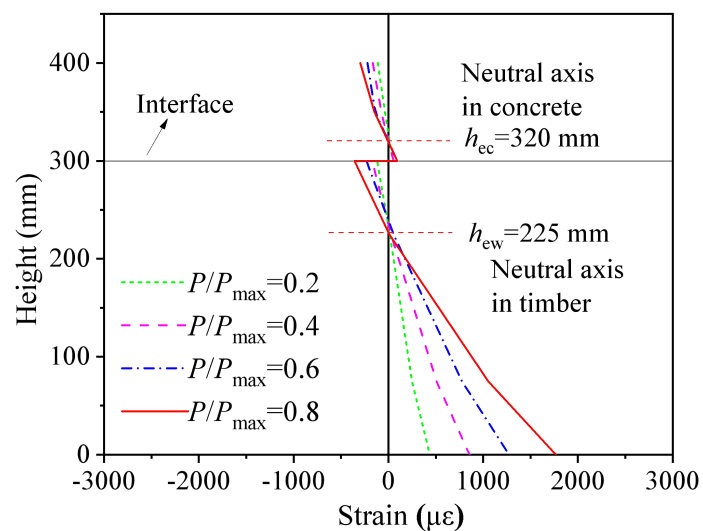
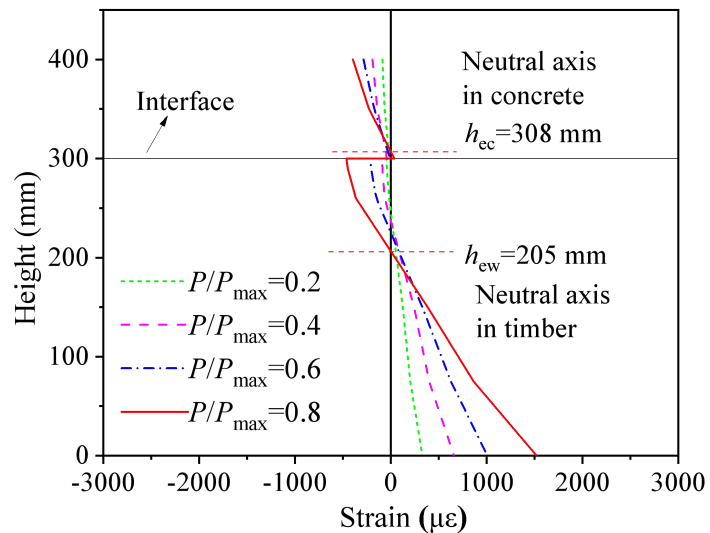
植钢板

3 研究结果-受弯试验-应变分布

钢筋桁架楼承板



普通配筋

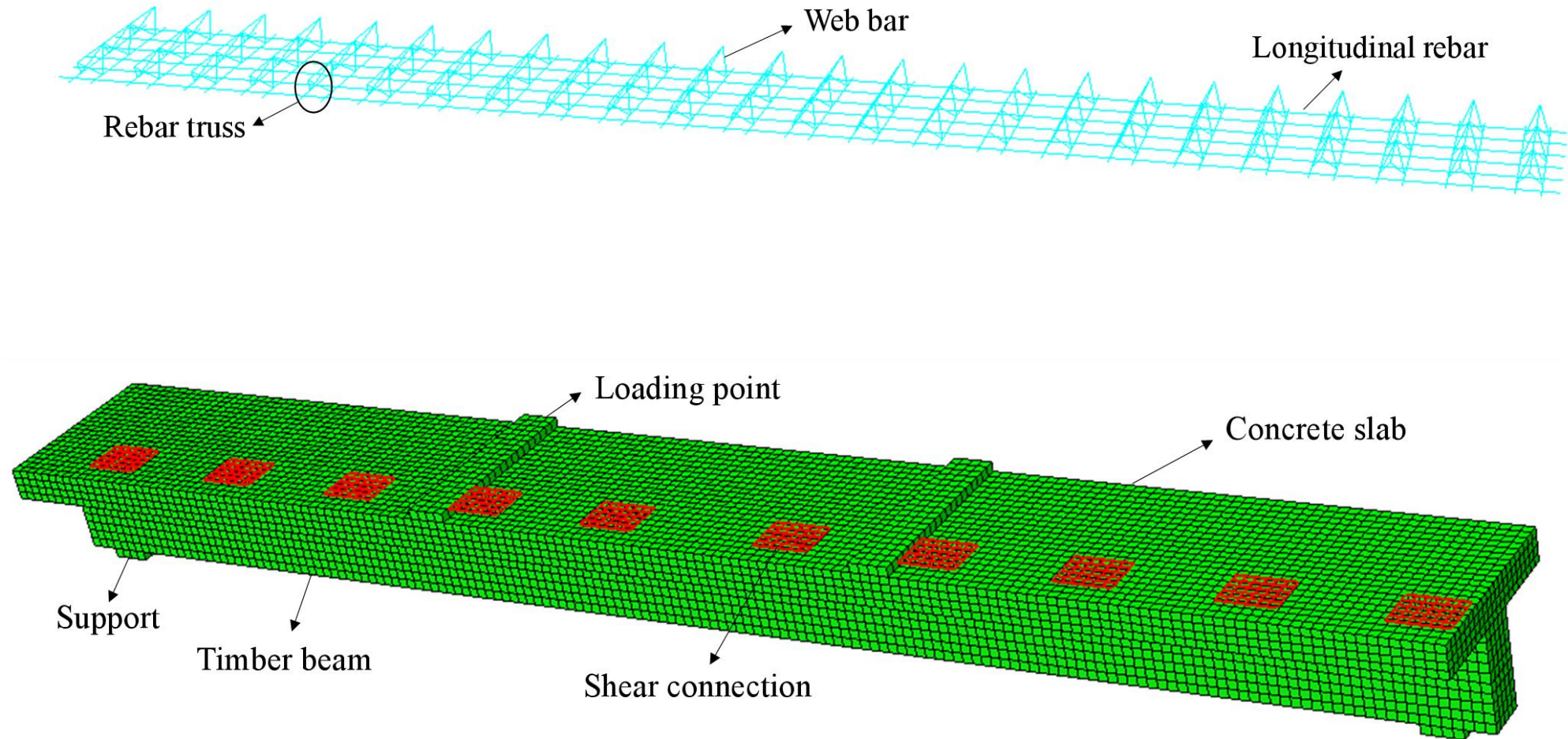


采用斜螺钉连接

采用榫-钉连接

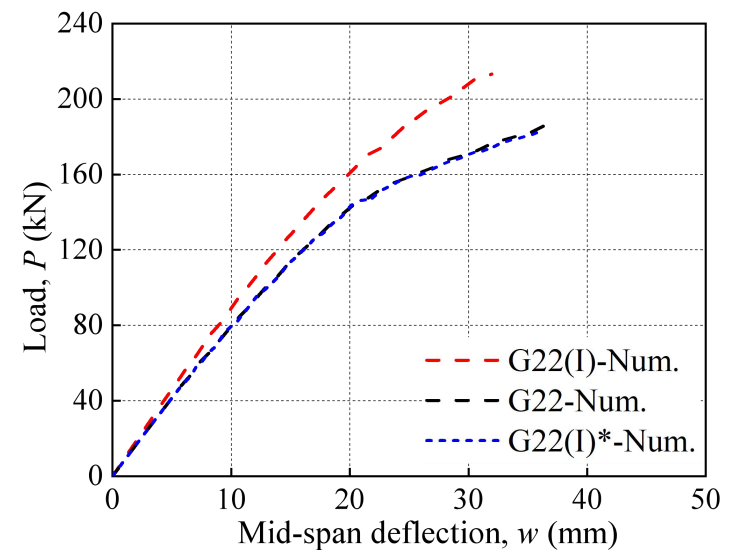
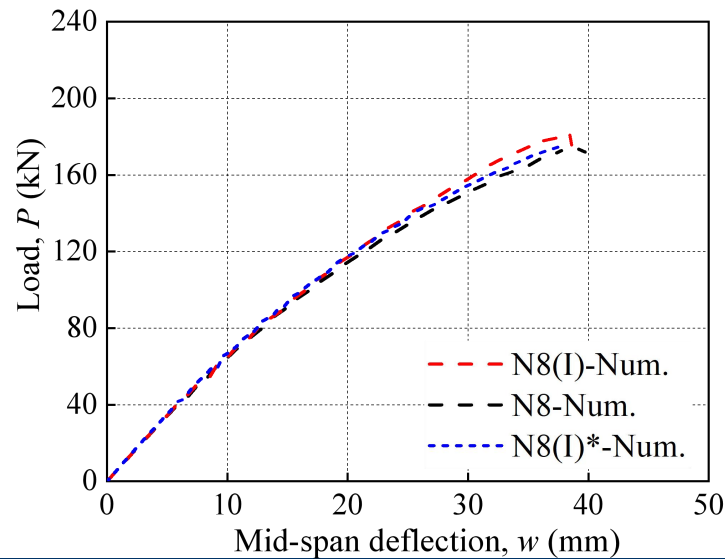
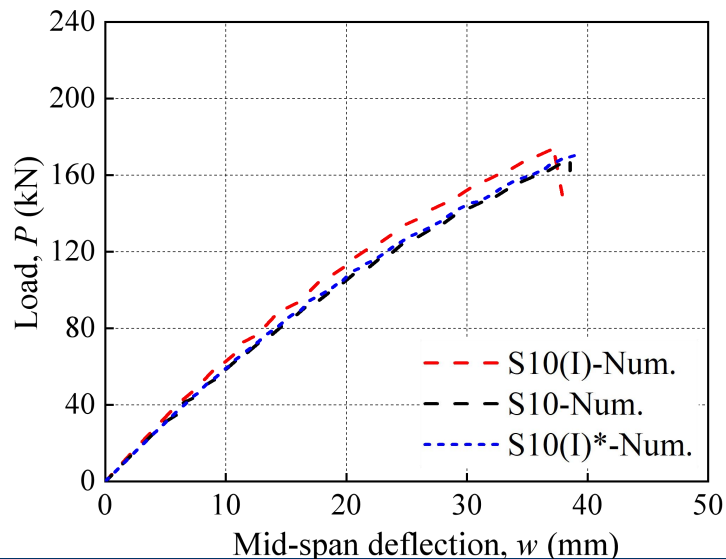
采用植钢板连接

3 研究结果-数值模拟



3 研究结果-数值模拟

| 试件 | 配筋 | 界面连接本构关系 | P_{max} (kN) | EI ($10^{12}N.mm^2$) | w_{max} (mm) |
|---------|------|--------------|----------------|--------------------------|----------------|
| S10(I) | 钢筋桁架 | BIS16-200(I) | 174.4 | 9.9 | 37.6 |
| S10(I)* | 钢筋桁架 | BIS16-200 | 170.1 | 9.1 | 38.9 |
| S10 | 普通配筋 | BIS16-200 | 169.1 | 9.2 | 38.5 |
| N8(I) | 钢筋桁架 | NVS16-180(I) | 181.3 | 10.0 | 38.9 |
| N8(I)* | 钢筋桁架 | NVS16-180 | 174.9 | 10.1 | 37.6 |
| N8 | 普通配筋 | NVS16-180 | 175.8 | 10.1 | 39.8 |
| G22(I) | 钢筋桁架 | GSL90(I) | 213.4 | 14.3 | 32.0 |
| G22(I)* | 钢筋桁架 | GSL90 | 183.3 | 12.6 | 36.2 |
| G22 | 普通配筋 | GSL90 | 185.7 | 12.6 | 36.4 |



3 研究结果-理论分析

木-混凝土组合梁的抗弯承载力分析主要考虑木梁的受弯破坏。对木梁与混凝土板之间的界面连接，考虑刚度退化和承载力破坏两种情况。

方法1：考虑混凝土开裂和连接件刚度退化的组合梁受弯破坏

$$M_{ie} = \frac{(EI)_{\text{eff}}}{E_w} \frac{f_b f_t}{\gamma a_w f_{w,b} + 0.5 h_w f_{w,t}} \quad h_{c,\text{eff}} = \sqrt{\alpha^2 + \alpha(h_w + h_c)} - \alpha \leq h_c$$

方法2：耦合考虑界面连接破坏和木梁受弯破坏的弹塑性分析方法

$$M_{ep} = \frac{nF_{\text{max}}}{2} \left(\frac{h_w}{2} + h_c - \frac{h_{c,\text{eff}}}{3} \right) + \sigma_{w,M} \frac{b_w h_w^2}{6} \quad h_{c,\text{eff}} = \sqrt{\frac{nF_{\text{max}} E_w h_w}{2E_c \sigma_{w,M} b_c}} \leq h_c \quad \sigma_{w,M} = f_{w,b} \left(1 - \frac{nF_{\text{max}}}{2f_{w,t} A_w} \right)$$

3 研究结果-理论分析

结果表明：

- ✓ 两种方法的预测准确性均较好，且预测结果基本接近；都一定程度上高估了试件的承载力。
- ✓ 方法2对榫-钉连接的N8(I)和N8更为准确，这与该组试件梁发生梁板分离、界面连接失效的破坏现象相适应。
- ✓ 两种方法的推导原理也证明了采用钢筋桁架楼承板的新型组合梁性能的提升主要得益于钢筋桁架对界面连接性能的提升。

| 试件 | 试验结果, M_{exp} | 方法1, M_{ic} | M_{ic}/M_{exp} | 方法2, M_{cp} | M_{cp}/M_{exp} |
|--------|-----------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| S10(I) | 126.5 | 139.2 | 1.10 | 139.3 | 1.10 |
| S10 | 119.9 | 127.9 | 1.07 | 128.4 | 1.07 |
| N8(I) | 152.6 | 139.6 | 0.91 | 161.6 | 1.06 |
| N8 | 138.9 | 143.5 | 1.03 | 141.8 | 1.02 |
| G22(I) | 156.8 | 172.4 | 1.10 | 180.5 | 1.15 |
| G22 | 130.5 | 167.5 | 1.28 | 161.4 | 1.24 |

4 结论与展望

钢筋桁架楼承板为工业化产品，具有一定的抗弯刚度，通过合理的设计可以实现免模板支撑，将其应用到木-混凝土组合结构中，解决了在木结构建筑中采用混凝土楼板时遇到的需要模板及支撑体系、钢筋绑扎工作量大和施工周期长等问题。

此外，新型木-钢筋桁架楼承板组合梁较传统木-混凝土组合梁在**界面连接抗剪性能和组合梁受弯性能**等方面均有显著提升。

基于前期研究，仍需从以下方面开展新型组合梁受弯受力机理的研究：

- ① 钢筋桁架楼承板纵向布置时，桁架自身刚度的影响；
- ② 钢筋桁架对界面连接的增强机理与规律；
- ③ 新型组合梁的振动性能研究；

.....

感谢各位聆听，请批评指正！

史本凯

南京工业大学 土木工程学院

benkaishi@njtech.edu.cn