

《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》 行业标准修订

编制说明

（征求意见稿）

《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》标准工作组

2025 年 10 月

《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》行业标准

编制说明

1 工作简况

1.1 任务来源

根据工业和信息化部办公厅《关于印发 2024 年第一批行业标准制修订计划》（工信厅科函[2024]18 号）的要求，由建筑材料工业技术监督研究中心等单位牵头制定《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》，由中国建筑材料联合会归口。

1.2 主要工作过程

本标准的编制过程见表 1

表 1 《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》国家标准研制过程

| 时间（年/月） | 内容 | 进展 |
|-----------|-----------|--|
| 2024-10-8 | 标准修订的前期研究 | 成立了标准小组，初步确定《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》标准修订原则，各单位分工。 |
| 2024-12-7 | 标准工作第一次会议 | 讨论《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》的研制成果。汇总并讨论各单位提出的修订意见。 |
| 2024-4-26 | 标准工作第二次会议 | 讨论《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》标准工作组稿。 |
| 2025-7-2 | 标准工作第三次会议 | 讨论《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》标准工作组稿。 |
| 2025-8-14 | 标准工作第四次会议 | 工作组组讨论修改和完善标准征求意见稿，形成送审稿。 |

1.3 主要参加单位和工作组成员及其所做的工作

起草单位分工如下：

- (1) 建筑材料工业技术监督研究中心：负责标准相关文献搜集、标准文本的撰写；负责标准制定过程中的总体协调。
- (2) 滨州宏基建材有限公司、山东建筑大学：标准内容的编写及负责标准制定过程中的联络。
- (3) 汉德邦建材有限公司、广州立墙、曲阜市宜安建筑科技有限公司、浙江兴大新材料有限公司：标准内容的编写及组织标准工作会议。
- (4) 中国计量科学研究院：提供技术支持；参与标准会议、技术参数的确定；参与文本的撰写与修改。
- (5) 上海市质量监督检验技术研究院：为标准提供技术支持；参与试验验证、技术参数的确定；参与标准会议与修改。
- (6) 其他参编单位（后补）。

表 2 各起草人的主要工作内容

| 单位名称 | 人员 | 分工 |
|-------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 建筑材料工业技术监督研究中心 | 于洋、王桓 | 标准内容的编写及组织标准工作会议。 |
| 滨州宏基建材有限公司、山东建筑大学 | 霍兴泉、李东磊、雷淑忠、刘之春、霍天奇 | 参与标准会议、技术参数的确定；参与文本的撰写与修改。 |
| 广州立墙 | 刘一槿 | 为标准提供技术支持。 |
| 曲阜市宜安建筑科技有限公司 | 孟飞、颜鹏 | 为标准提供技术支持；参与试验验证、技术参数的确定；参与标准会议与修改。 |
| 浙江兴大新材料有限公司 | 高杏兴 | 为标准提供技术支持；参与试验验证、技术参数的确定；参与标准会议与修改。 |

1.4 项目背景

根据工业和信息化部办公厅《关于印发 2024 年第一批行业标准制修订计划》（工信厅科函

[2024]18 号)的要求,由建筑材料工业技术监督研究中心等单位牵头制定《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》,由中国建筑材料联合会归口。

1.5 行业调研情况

目前我国劳动力成本逐年提高,免拆底模钢筋桁架组合板受到工程界的青睐,在工程中应用越来越多。在建筑工程中,免拆底模钢筋桁架组合板是由钢筋桁架和免拆纤维细石混凝土底板连接而成的一种新型组合板,由工厂机械化生产,在模具底层铺设耐碱玻纤网格布,浇筑 20mm 厚纤维细石混凝土后置入带有连接钢筋的钢筋桁架,纤维细石混凝土完全包覆连接钢筋形成底板,经养护、固化后形成的。装配式建筑用钢筋桁架组合板施工阶段兼具底部模板作用,底模在混凝土浇筑后不拆除,使用阶段作为楼板组成部分,与后浇混凝土共同工作、协同受力,属于永久性模板。装配式建筑用钢筋桁架组合板的生产过程可实现全部工业化智能建造,能达到生产的标准化、机械化和规模化,施工快捷,底面平整度好等技术特点。

技术规范标准可以促进装配式建筑行业的发展和 innovation。随着装配式建筑的快速发展,市场上涌现了大量的钢筋桁架组合板产品,但产品质量良莠不齐,由于缺乏统一的应用技术规程标准,钢筋桁架组合板的设计、生产和安装存在一定的混乱和不规范现象。制定相应的技术规程标准可以对钢筋桁架组合板的性能、材料、制造工艺等进行统一规定,提高标准化程度,促进行业的发展和 innovation,做到安全适用、绿色环保、技术先进、经济合理,确保工程质量,进一步推广该技术的应用,急需本规范的制定。

2 标准编制原则和主要内容的说明

2.1、标准编制原则

本规范按照建设部的《工程建设标准编写规定》(建标〔2008〕182 号)起草。本规范遵从以下规则:贯彻执行国家的政策、法规,与产业相关的各项现行国家及行业标准协调一致;技术指标制定先进可行、规范合理;标准制定突出产品特性,促进行业健康发展和产品推广。标准制中的试验方法主要参照现行国家标准和行业标准,以保证技术指标的准确性、科学性与可比性,各项指标值在满足工程要求的前提下,根据各生产企业试样的验证试验结果确定。

2.2 标准主要内容

2.2.1 总则

制定本规范的目的，是为免拆底模钢筋桁架组合板工程应用，做到安全适用、技术先进、经济合理。

2.2.2 术语

该章节解释了免拆底模钢筋桁架组合楼板中所涉及的相关产品以及施工中应用的辅助材料的相关术语。

术语和定义包括：免拆底模钢筋桁架组合板、免拆底模钢筋桁架组合楼板、钢筋桁架、底板、支座钢筋、密拼接缝。

2.2.3 基本规定

该章节内容主要针对免拆底模钢筋桁架组合板的材料、设计、隔声等作出规定，并且规定了对进场检验验收过程中应该注意的问题。

2.2.4 技术要求

通过参照现行标准、对产品的实际应用调研、会议讨论、验证试验分析等多方面工作，确定免拆底模钢筋桁架组合板相关材料各项技术指标要求。

通过规定产品规格、材料性能、连接强度和外观质量等一系列具体技术指标，对钢筋桁架板生产与产品质量进行要求，为保证其在施工阶段作为模板和使用阶段作为楼板组成部分的安全性与可靠性。

2.2.5 设计

对免拆底模钢筋桁架组合板的一般规定、施工验算、楼板设计、构造要求等进行要求，是确保结构安全的核心章节。

对施工阶段、使用阶段进行设计要求确保模板安全；使用阶段设计基于钢筋桁架板与后浇混凝土协同受力的原则，钢筋桁架的上、下弦钢筋可作为楼板的受力钢筋，实现从施工到使用的平稳过渡与可靠结合。

2.2.6 生产与运输

本章通过规范化的生产流程、强制性的检验项目以及细致的储运措施做出要求，是确保产品出厂合格、安全运抵现场的关键环节。

2.2.7 施工和安装

本章规定了免拆底模钢筋桁架组合板在现场的**安装流程、关键技术措施与安全要求**，确保施工

过程安全与质量。确保钢筋桁架板从吊装就位到形成最终结构的过程安全、可控、质量可靠。

2.2.8 施工和安装

本章规定了免拆底模钢筋桁架组合板作为主体分部工程中子分部工程的验收要求，明确了验收流程、检验标准与责任主体，是确保工程质量的最终环节。

验收通过后，应形成完整的验收文件，包括所有检验记录、验收记录及处理记录，并归档保存。
本章通过资料与实体的双重核查，以主控项目为底线、一般项目为质量控制标准，构成了完整的工程质量闭环，确保交付的楼板结构安全可靠，符合设计与规范要求。

3 主要试验数据分析及结论

为保证标准项目要求的合理性，编制工作组对免拆底模钢筋桁架组合板和免拆底模钢筋桁架组合楼板产品进行了广泛的样品收集，并进行了大量的验证试验。为保证标准项目要求的合理性，编制工作组对免拆底模钢筋桁架组合板和免拆底模钢筋桁架组合楼板产品进行了广泛的样品收集，并进行了大量的验证试验。本次所进行的试验验证工作中，试样制备过程具有实际可行性，试验的时间跨度合适，可满足试验的便捷性与可行性。试验项目涉及规范的全部项目，主要包括免拆底模钢筋桁架组合板的钢筋桁架节点焊点抗剪极限承载力、底板与钢筋桁架的连接点的抗拉承载力、免拆底模钢筋桁架组合板的结构性能试验（包括抗裂性、挠度和承载力）、淋水试验、免拆底模钢筋桁架组合楼板的结构性能试验等。

3.1 允许偏差

表 3.1 钢筋桁架组合板结构尺寸允许偏差

| 检验项目 | | 允许偏差 | 样本实测值 | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|-------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 底板长度 L | $L\leq 5\text{m}$ 时 | -3.0, +6.0 | +2 | +1 | +2 | +2 | +1 | +2 | +2 | +1 | +2 | +2 | +1 | +2 |
| | $L> 5\text{m}$ 时 | -4.0, +10.0 | - | - | - | +2 | +1 | +2 | +2 | +1 | +2 | - | - | - |
| 底板宽度 B | | ± 4.0 | 0 | +2 | +2 | 0 | +1 | +1 | 0 | +1 | +1 | 0 | +1 | +1 |
| 底板厚度 t | | -2.0, +3.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 钢筋桁架高度 h_t | | ± 3.0 | 0 | +1 | +1 | 0 | +1 | +1 | 0 | +1 | +1 | 0 | +1 | +1 |
| 钢筋桁架的宽度 b_t | | ± 3.0 | - | - | - | +1 | +1 | 0 | +2 | +1 | +3 | +1 | +3 | +2 |
| 钢筋桁架间距 b | | ± 3.0 | +1 | +3 | +2 | +1 | +3 | +2 | +1 | +3 | +2 | +1 | +3 | +2 |
| 钢筋桁架边距 d | | ± 10.0 | - | - | - | +1 | +4 | +2 | +1 | +6 | +3 | +5 | +3 | +2 |
| 钢筋桁架相邻节点距离 a | | ± 3.0 | +1 | +2 | +1 | +1 | +3 | +2 | +1 | +3 | +2 | +1 | +3 | +2 |
| 钢筋桁架下弦钢筋保护层厚度 c | | ± 2.0 | - | - | - | +1 | +3 | +2 | +1 | +3 | +2 | +1 | +3 | +2 |

根据试验验证的结果分析，除 2 个样品未达到要求，其他检测值 100%符合规范要求范围内，合格率为 83%。

3.2外观质量

表 3.2 钢筋桁架板外观质量

| 项 目 | | 样本实测 | | | | | |
|------|----|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 底板 | 表面 | 未见分层、脱皮 | 未见分层、脱皮 | 未见分层、脱皮 | 未见分层、脱皮 | 未见分层、脱皮 | 未见分层、脱皮 |
| | 裂缝 | 未见裂纹 | 未见裂纹 | 未见裂纹 | 未见裂纹 | 未见裂纹 | 未见裂纹 |
| | 掉角 | 未见掉角 | 未见掉角 | 未见掉角 | 未见掉角 | 见掉角 | 未见掉角 |
| | 掉边 | 未见掉边 | 未见掉边 | 未见掉边 | 未见掉边 | 未见掉边 | 未见掉边 |
| 钢筋桁架 | 1 | 表面未见轻微损伤，未见影响使用的缺陷 | 表面未见轻微损伤，未见影响使用的缺陷 | 表面未见轻微损伤，未见影响使用的缺陷 | 表面未见轻微损伤，未见影响使用的缺陷 | 表面未见轻微损伤，未见影响使用的缺陷 | 表面未见轻微损伤，未见影响使用的缺陷 |
| | 2 | 未见开焊 | 未见开焊 | 未见开焊 | 未见开焊 | 未见开焊 | 未见开焊 |
| | 3 | 焊点处熔化金属均匀，未见脱落、漏焊、裂纹、多孔性缺陷和明显的烧伤现象 | 焊点处熔化金属均匀，未见脱落、漏焊、裂纹、多孔性缺陷和明显的烧伤现象 | 焊点处熔化金属均匀，未见脱落、漏焊、裂纹、多孔性缺陷和明显的烧伤现象 | 焊点处熔化金属均匀，未见脱落、漏焊、裂纹、多孔性缺陷和明显的烧伤现象 | 焊点处熔化金属均匀，未见脱落、漏焊、裂纹、多孔性缺陷和明显的烧伤现象 | 焊点处熔化金属均匀，未见脱落、漏焊、裂纹、多孔性缺陷和明显的烧伤现象 |
| 结论 | | 满足规范要求 | 满足规范要求 | 满足规范要求 | 满足规范要求 | 满足规范要求 | 满足规范要求 |

根据试验验证的结果分析，除 1 个检测值只达到要求的 95%外（不影响使用），其他检测值 100%符合规范要求范围内，合格率为 83%。

3.3节点焊点抗剪极限承载力

表 3.3 钢筋桁架节点焊点抗剪极限承载力

| 腹杆 钢筋 直径 | 指标 要求 | 样本实测值 | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 4.5 | ≥5.68kN | - | - | - | - | - | - | 5.56 | 6.93 | 6.21 | 6.56 | 6.93 | 6.21 |
| 5.0 | ≥7.02kN | 11.22 | 15.88 | 11.21 | 8.56 | 7.93 | 8.21 | - | - | - | - | - | - |

根据试验验证的结果分析，除 1 个检测值只达到要求的 95%外，其他检测值 100%符合规范要求范围内（目前厂家产品的腹杆直径多在 4.5mm 和 5.0mm，其试验结果可能导致试验数据高达标率）。试验验证结果详见附件 1 国检中心检验报告和附件 2 检验报告。

3.4底板与钢筋桁架的连接点的抗拉承载力

表 3.4 底板与钢筋桁架的连接点的抗拉承载力

| 钢结桁架组合板型号 | 样本实测值 | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| GHJ2-110/60 | 2.24 | 2.43 | 2.76 | 2.71 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| GHJ2-120/70 | - | - | - | - | 3.62 | 3.73 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| GHJ4-120/70 | - | - | - | - | - | - | 2.63 | 3.42 | - | - | - | - | - | - |
| GHJ2-130/80 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3.56 | 3.42 | - | - | - | - |
| GHJ5-130/80 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.65 | 3.05 | - | - |
| GHJ2-140/90 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.65 | 2.40 |

根据试验验证的结果分析,检测值 100%符合规范要求范围内,并且检测值远大于指标要求(该数值与底板混凝土质量有很大关系,上述样本是一家企业的产品,其试验结果可能导致试验数据高达标率)。试验验证结果详见附件 3 检验报告。

3.5 免拆底模钢筋桁架组合板的结构性能试验

表 3.5 免拆底模钢筋桁架组合板的结构性能试验

| 序号 | 钢结桁架组合板型号 | 试件平面尺寸 | 跨中支撑情况 | 施工阶段荷载标准组合值 | | 开裂荷载实测值/对应挠度 | 承载力极限值 | | |
|----|-------------|---------|--------|-------------|------------------|--------------|--------|------|--------|
| | | | | 计算值 | 实测挠度 | | 计算值 | 实测挠度 | 实测裂缝宽度 |
| 1 | GHJ4-140/90 | 3.0*1.2 | 一道 | 5.0 | 1.01 (1/1436) | 7.16/1.50 | 10.2 | 2.56 | 0.15 |
| 2 | GHJ4-140/90 | 3.0*1.2 | 一道 | 5.0 | 1.14 (1/1272) | 8.01/1.85 | 10.2 | 2.42 | 0.10 |
| 3 | GHJ4-140/90 | 3.0*1.2 | 无 | 5.0 | - | 3.76/7.77 | - | - | - |

根据试验验证的结果分析,检测值100%符合规范要求范围内。

3.8 免拆底模钢筋桁架组合板的试验研究

3.8.1 受弯承载力试验

1) 试件设计

设计 10 块免拆底模钢筋桁架组合板,其中 7 块用于模拟施工时浇筑混凝土的受力过程,3 块用于免拆底模钢筋桁架组合板施工阶段荷载试验,SG1~SG3 板采用重物加载,SG4~SG10 板现场浇筑混凝土模拟实际施工阶段。

试件 SG1~SG3 板无分布钢筋,SG4~SG10 板上皮布置直径为 10mm 的 HRB400 级钢筋,间距为 200mm,板下皮布置直径为 8mm 的 HRB400 级钢筋,间距为 100mm,为模拟实际使用中组合板连续布置的情况,试验中以 SG4、SG5 为一组,SG6、SG7 为一组,SG8、SG9 为一组,为了后续模拟

连续板，每组两块桁架板之间的固定支座采用现浇墙模拟，且在支座处布置支座附加钢筋，支座附加下筋直径为 8mm 的 HRB400 级钢筋，间距为 200mm，锚固长度为 400mm，支座附加上筋直径为 8mm 的 HRB400 级钢筋，间距为 120mm，锚固长度为 1000mm。以 SG4、SG5 组为例，支座连接处示意图如图 2.4 所示。SG4~SG7 板宽为 1200mm，SG8、SG9 板分别是由两块宽为 600mm 的板拼接而成，SG10 板宽为 600mm。

2) 加载方案

免拆底模钢筋桁架组合板施工阶段荷载试验：在两端简支的条件下，钢筋桁架与底模共同承担楼承板的自重、后浇混凝土的重量和施工荷载，施工荷载取值为 1.5kN/m^2 ，在试验中将后浇混凝土自重和施工荷载以均布荷载的形式施加到板上。

试验采用标准配重铅块进行均布加载，为消除加载铅块之间由于试件变形而引起的拱效应，在铅块之间留有 50mm 的间隙。试验开始前先进行预加载，检验支座是否平稳，仪表及加载设备是否正常，对仪表设备进行调零。试验预加载一层加载块然后卸载，加（卸）载停留时间为 15 分钟。试验采用逐级加载的方式，每级加载 0.85kN/m^2 ，每级持荷时间为 15min，以便充分观察试件的变化，试验中观察并记录加载过程中每级荷载下的挠度、裂缝、应力变化情况。

3) 试验结果分析

a) 开裂荷载分析：SG1 板在跨中加了一道临时支撑，板的净跨为 1.45m，试验初始阶段，试件挠度与荷载呈线性关系。当荷载增加到 7.65kN/m^2 时，试件底面出现裂缝，裂缝宽度为 0.10mm，裂缝沿厚度方向贯通，当荷载增加到 9.35kN/m^2 时，裂缝宽度为 0.15mm。试件并没有出现断裂。SG2、SG3 板与 SG1 板变形类似，只是 SG2 试件在加载到 8.5kN/m^2 时出现裂缝，裂缝宽度为 0.10mm，当荷载加载到 9.35kN/m^2 时，裂缝宽度为 0.12mm。SG3 板跨中无临时支撑，板的净跨为 2.9m，试件在加载到 3.4kN/m^2 时出现裂缝，裂缝宽度为 0.10mm，当荷载加载到 6.80kN/m^2 时，裂缝宽度为 0.18mm。

SG4~SG10 板浇筑完混凝土后并没有出现裂缝。

b) 板挠度分析：对试验数据进行整理，表 3~8 给出了每级荷载作用下试件的挠度变化。

表 3 SG1 板挠度测点测值 (mm)

| 外加荷载 kN/m^2 | 0 | 0.85 | 1.70 | 2.55 | 3.40 | 4.25 | 5.10 | 5.95 | 6.80 | 7.65 | 8.50 | 9.35 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L2 处 | 0.08 | 0.27 | 0.50 | 0.63 | 0.79 | 0.95 | 1.13 | 1.35 | 1.53 | 1.88 | 2.24 | 2.79 |
| L4 处 | 0.07 | 0.28 | 0.45 | 0.58 | 0.76 | 0.90 | 1.08 | 1.26 | 1.46 | 1.71 | 2.01 | 2.33 |

表 4 SG2 板挠度测点测值 (mm)

| 外加荷载 kN/m^2 | 0 | 0.85 | 1.70 | 2.55 | 3.40 | 4.25 | 5.10 | 5.95 | 6.80 | 7.65 | 8.50 | 9.35 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L2 处 | 0.08 | 0.24 | 0.44 | 0.63 | 0.81 | 1.00 | 1.19 | 1.40 | 1.57 | 1.78 | 2.02 | 2.22 |
| L4 处 | 0.09 | 0.28 | 0.52 | 0.71 | 0.91 | 1.10 | 1.31 | 1.51 | 1.73 | 1.92 | 2.21 | 2.42 |

表 5 SG3 板挠度测点测值 (mm)

| | | | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 外加荷载 kN/m ² | 0 | 0.85 | 1.70 | 2.55 | 3.40 | 4.25 | 5.10 | 5.95 | 6.80 |
| L3 处 | 0.62 | 2.01 | 3.53 | 5.04 | 7.68 | 10.95 | 14.64 | 18.59 | 22.16 |

表 6 SG4~5 板挠度测点测值 (mm)

| 加载过程 | 开始 | 浇筑剪力墙 | 1#位置 | 3#位置 | 完成浇筑 | 振动后 | 抹平后 | 结束 |
|------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| L1 | -0.022 | 0.003 | 0.007 | 1.309 | 1.302 | 1.355 | 1.523 | 1.574 |
| L2 | 0.111 | 0.121 | 0.412 | 1.685 | 1.396 | 1.441 | 1.556 | 1.641 |
| L3 | 0.095 | 0.086 | 0.009 | 0.666 | 2.350 | 2.650 | 2.744 | 2.794 |
| L4 | -0.022 | -0.036 | -0.040 | -0.034 | 1.867 | 2.384 | 2.200 | 2.086 |

表 7 SG6~7 板挠度测点测值 (mm)

| 加载过程 | 开始 | 4#位置 | 3#位置 | 2#位置 | 1#位置 | 完成浇筑 | 振动后 | 抹平后 |
|------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L1 | 0 | 0.015 | 0.001 | 0.471 | 1.334 | 2.512 | 2.696 | 2.59 |
| L2 | 0 | 0.007 | -0.002 | 0.891 | 1.758 | 2.194 | 2.263 | 2.206 |
| L3 | -0.009 | 0.123 | 0.883 | 1.594 | 1.220 | 1.418 | 1.436 | 1.405 |
| L4 | -0.014 | 0.749 | 2.016 | 1.915 | 1.861 | 1.852 | 1.822 | 1.743 |

表 8 SG8~9 板挠度测点测值 (mm)

| 加载过程 | 开始 | 4#位置 | 3#位置 | 2#位置 | 完成浇筑 | 振动后 | 完成 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| L1 | -0.335 | -0.407 | -0.405 | -0.477 | -0.331 | 4.663 | 4.483 |
| L2 | -0.010 | -0.268 | -0.271 | -0.296 | 0 | 3.822 | 3.721 |
| L3 | 0.040 | 0.829 | 1.651 | 4.525 | 4.357 | 4.398 | 4.174 |
| L4 | 0.003 | 1.139 | 3.780 | 5.068 | 5.361 | 5.307 | 5.094 |

浇筑混凝土的过程中是从板的一侧开始浇筑，所以荷载-位移曲线中总是有一块板率先开始有挠度，曲线中有凸起部分是由于浇筑混凝土时工人在楼承板上走动导致，从整体来看，荷载-位移曲线在施工完成后挠度趋于稳定。浇筑混凝土的过程中 SG4~SG5 板跨中挠度最大为 2.794mm (L/752)，SG6~SG7 板跨中最大挠度为 2.59mm (L/810)，SG8~SG9 板跨中最大挠度为 5.094mm (L/412)。与 SG1 和 SG2 板相比，在相同荷载作用下，支撑跨度增大，免拆底模钢筋桁架组合板的挠度明显增加，支撑跨度对免拆底模钢筋桁架组合板挠度有很大影响。SG8~SG9 板施工时支撑设置不牢固，导致浇筑混凝土的过程中挠度相比 SG4~SG7 板增加很大，在施工时，应将支撑与免拆底模钢筋桁架组合板紧密连接。

SG10 板浇筑混凝土的过程中跨中挠度最大为 2.583mm (L/1006)。施工过程中，钢筋桁架与纤维水泥底模共同作用，两者紧密连接，并无脱离现象。

c) 应变分析：试验过程测得应力如图 2.22~2.28 所示，各曲线编号与应变片布置图中编号一致，试验数据以受拉为正，受压为负。

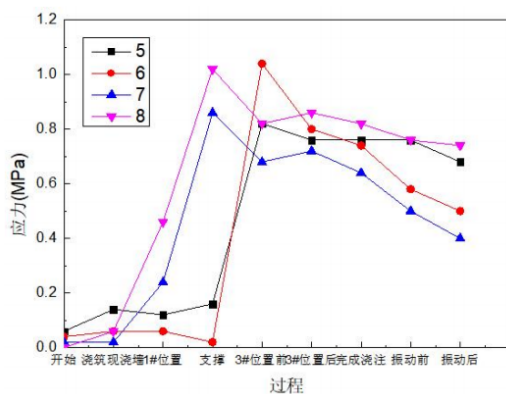


图1 SG4 板应力曲线

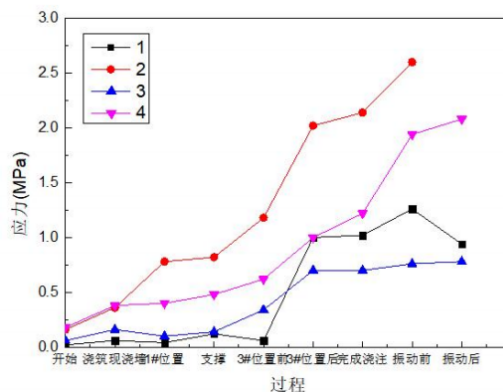


图2 SG5 板应力曲线

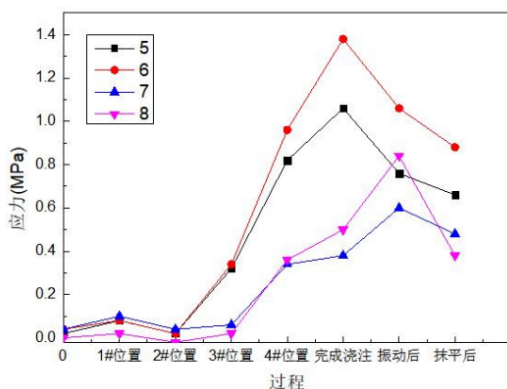


图3 SG6 板应力曲线

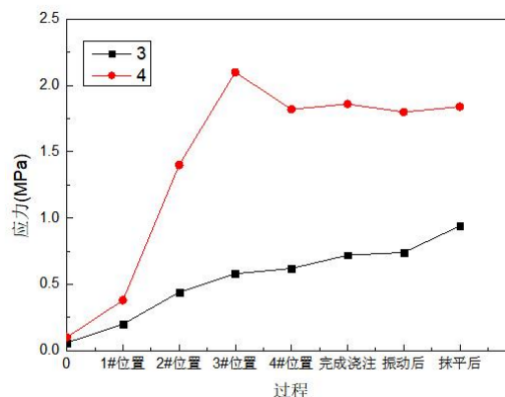


图4 SG7 板应力曲线

应力图中拉为正压为负，由上图可知免拆底模钢筋桁架组合板底面均受拉，施工完成后沿跨度方向的应力最大为 2.6MPa，试验中测得应力较大是由于施工过程中机械、人员等对板的扰动导致。垂直于跨度方向的应变基本为零，板的传力方向大致沿跨度方向，为典型的单向板传力。

4) 结论

施工阶段试验研究：3 块试件直接施加重物进行加载试验，7 块试件模拟现浇混凝土施工进行加载试验。试验结果表明：

在试验过程中钢筋桁架和纤维水泥底模连接良好，未出现脱落、剥离现象，施工阶段钢筋桁架和纤维水泥底模可以共同作用。

免拆底模钢筋桁架组合板初期处于弹性阶段，挠度随荷载线性增加，开裂后载-位移曲线出现明显拐点。跨中设置临时支撑时可以明显减小板的挠度，对于此试验中钢筋桁架高 90mm，板厚 130mm 的免拆底模钢筋桁架组合板跨度不应超过 3m。

3.8.2 适用跨度试验

1) 试件设计

根据选型表确定了选取了 10 块免拆底模钢筋桁架组合板进行试验研究。上、下弦钢筋均采用 HRB400 级钢筋，钢丝和腹杆钢筋采用 CPB550 级钢筋。施工阶段钢筋桁架板自重、施工载荷、后浇混凝土自重均由下面混凝土底板承受。考虑到施工阶段的实际情况，采用了两种试验方案，A1~A6 板采用重物加载，B1~B4 板模拟实际施工进行现场浇筑混凝土。为保证试验安全性，试件尺寸的选择上 A1 板、A4 板、A6 板与选型表一致，B4 板大于选型表所列尺寸，A2 板、A3 板、A5 板、B1~B3

板均小于选型表所列尺寸 0.1m~0.6m 左右。试验试件规格如表 9 所示，A4 试件和 B3 试件尺寸规格完全相同，仅选取的试验方法不同。为细化研究混凝土底板各设计参数对免拆底模钢筋桁架组合板的影响，通过试验验证各个设计参数下对免拆底模钢筋桁架组合板的适用跨度的影响。针对钢筋桁架高度变化的影响，选取了 60mm、80mm、100mm、120mm 的 4 种桁架高度的试件。针对钢筋桁架上、下弦钢筋直径变化的影响，选取了上弦钢筋直径为 10mm、12mm 的工况，下弦钢筋直径 8mm 不变。

表 9 试验构件规格

| 试件编号 | 跨度 mm | 宽 度 mm | 厚 度 mm | 钢筋直径 mm | | | 桁架 高度 mm | 间距 mm | | 保护层 厚度 c (mm) | 支撑条件 |
|------------|----------|--------------|--------------|---------|--------|--------|----------------|--------|--------|---------------------|----------|
| | | | | 上 弦 | 下 弦 | 腹 杆 | | 上 弦 | 下 弦 | | |
| HJ3-60 A1 | 4200 | 600 | 100 | 10 | 8 | 4.5 | 60 | 200 | 100 | 20 | 跨中一道临时支撑 |
| HJ3-60 A2 | 1700 | 600 | 100 | 10 | 8 | 4.5 | 60 | 200 | 100 | 20 | 无支撑 |
| HJ5-80 A3 | 1700 | 600 | 100 | 12 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 20 | 无支撑 |
| HJ3-80 A4 | 2200 | 600 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 20 | 无支撑 |
| HJ3-100 A5 | 2200 | 600 | 140 | 10 | 8 | 4.5 | 100 | 200 | 100 | 20 | 无支撑 |
| HJ3-100 A6 | 2600 | 600 | 140 | 10 | 8 | 4.5 | 100 | 200 | 100 | 20 | 无支撑 |
| HJ3-120 B1 | 5600 | 600 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 120 | 200 | 100 | 20 | 跨中一道临时支撑 |
| HJ3-100 B2 | 4000 | 600 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 100 | 200 | 100 | 20 | 跨中一道临时支撑 |
| HJ3-100 B3 | 2200 | 600 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 100 | 200 | 100 | 20 | 无支撑 |
| HJ3-100 B4 | 3000 | 600 | 140 | 10 | 8 | 4.5 | 120 | 200 | 100 | 20 | 无支撑 |

2) 加载方案

对于 A1-A6 免拆底模钢筋桁架组合板施工阶段荷载试验：在两端简支的条件下，施工荷载取值为 1.5kN/m²，在试验中利用铁块加载模拟后浇混凝土自重和施工荷载以均布荷载的形式施加到免拆底模钢筋桁架组合板上。试验采用标准配重铁块进行均布加载，铁块每块重量为 10kg，此次实验直接加载到开裂荷载为止。在每两榀钢筋桁架之间均布铁块加载，故只能布置两排铁块。

经过计算 B1-B4 板加载情况：B1 试件自重按 4.31kN/m²考虑，经计算 B1 板开裂荷载计算值为 8.9kN/m²；B2 试件自重按 3.35kN/m²考虑，开裂荷载计算值为 13.02kN/m²；B3 试件自重按 3.35kN/m²考虑，开裂荷载计算值为 6.5kN/m²；B4 试件自重按 3.35kN/m²考虑，开裂荷载计算值为 5.0kN/m²。

3) 试验结果分析

a) 挠度-荷载分析

A1~A6 试件在本施工阶段承受的荷载主要为免拆底模钢筋桁架组合板自重以及加载块模拟后浇混凝土的均布荷载。对试验数据进行整理，如表 10~11 给出了每级荷载作用下试件的跨中挠度和 1/4L 处挠度变化情况。对于 A1 板跨中挠度指设置一道支撑后，板两侧的跨中挠度，即 3/4 处和 1/4 处板挠度。

表 10 A1 板每级荷载下挠度测点测量值

| | | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 位置/荷载 情况 | 0.00 | 1.15 | 2.30 | 3.45 | 4.60 | 5.75 | 6.90 | 8.00 | 9.20 |
| 跨中 | 0.00 | 0.43 | 0.92 | 1.50 | 1.83 | 2.3 | 2.95 | 3.34 | 3.7 |

表 11 A2 板每级荷载下挠度测点测量值

| | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 位置/荷载 情况 | 0.00 | 1.37 | 2.74 | 4.11 | 5.48 | 6.85 | 8.22 | 8.90 |
| 跨中 | 0.00 | 0.46 | 0.92 | 1.80 | 1.90 | 2.50 | 2.95 | 3.64 |
| 1/4L 处 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.40 | 0.50 | 0.70 | 1.00 | 1.20 |

B1~B4 试件在本施工阶段承受的荷载主要为免拆底模钢筋桁架组合板自重以及后浇混凝土的自重。对试验数据进行整合，因为浇筑混凝土的过程中采用百分表测量挠度值，没有办法进行分段读取，故仅记录下施工阶段结束后 15min 时挠度值。如下图为 B1 试件百分表摆放位置图。

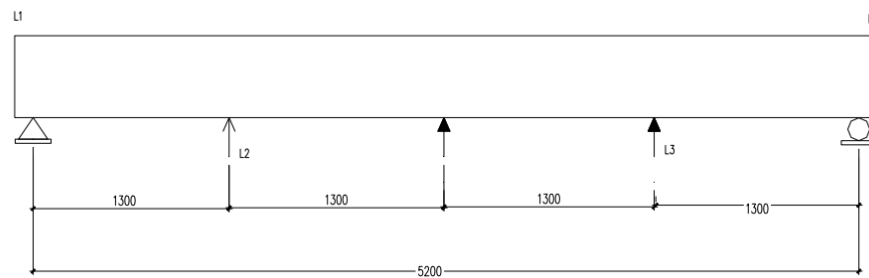
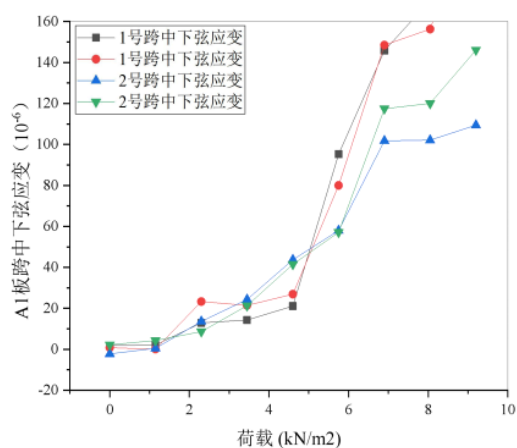


图 5 B1 试件百分表布置图

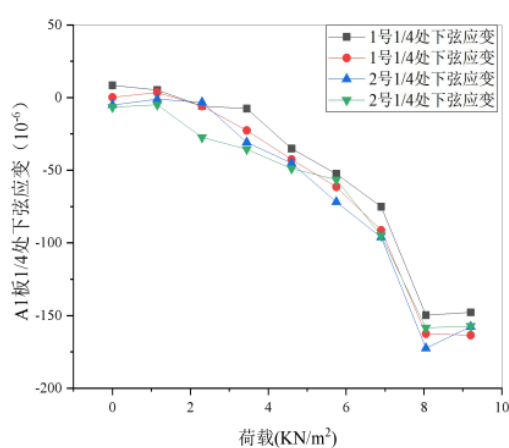
对比 A4 板和 B3 板可得出：相同规格尺寸下的两块免拆底模钢筋桁架组合板，仅在试验方法上有所不同，测得 A4 板跨中挠度值 2.57mm，B3 板跨中挠度值为 2.73mm，挠度情况基本相同，证明采用试块加载模拟施工阶段试验的准确性。

b) 应变分析

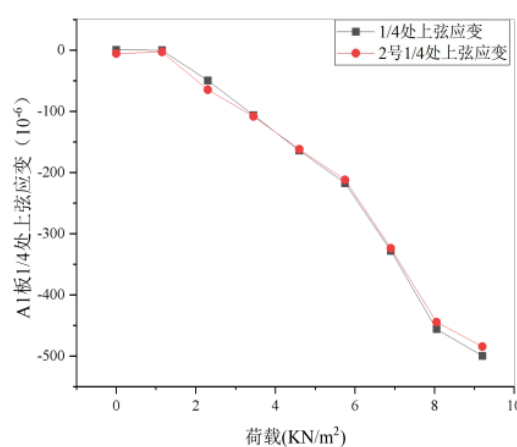
对试件 A1~A6 的应变数据进行整理，试件应力与荷载的关系曲线图，如下图 6 所示。



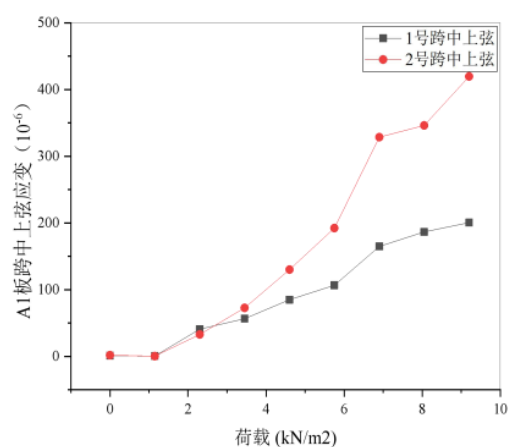
(a) A1 板跨中下弦钢筋应变



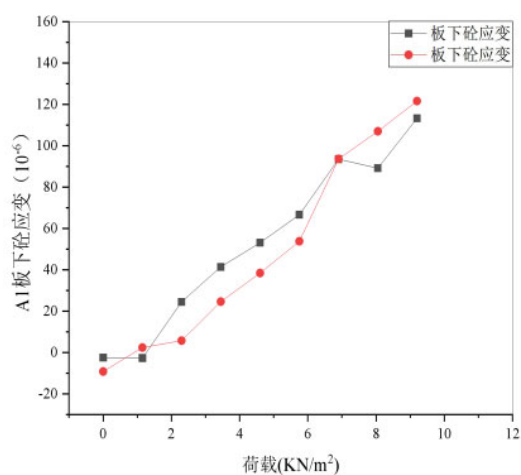
(b) A1 板 1/4 下弦钢筋应变



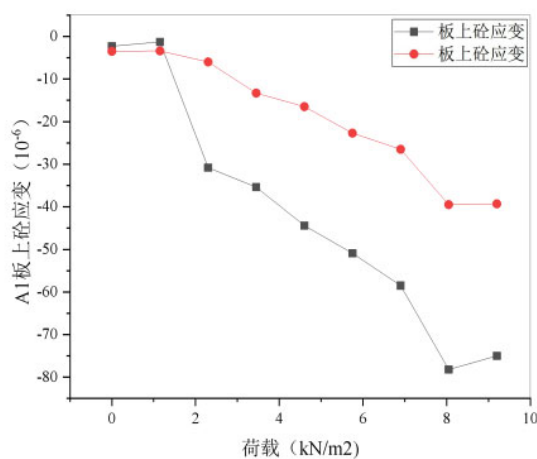
(c) A1 板 1/4 处上弦钢筋应变



(d) A1 板跨中上弦钢筋应变



(e) A1 板板底混凝土应变



(f) A1 板板上混凝土应变

图 6 A1 板钢筋和混凝土底板应变图

由混凝土应变图中拉为正压为负，由上图可知免拆底模钢筋桁架组合板底面均受拉。加载至施工阶段荷载 3.5kN/m^2 时 A1 板对应的应变 2.4MPa ；加载至施工阶段荷载 3.5kN/m^2 时 A2 板对应的应变 2.3MPa ；加载至施工阶段荷载 4kN/m^2 时 A3 板对应的应变 1.9MPa ；加载至施工阶段荷载 4kN/m^2 时 A4 板对应的应变 2.4MPa ，加载至施工阶段荷载 4.5kN/m^2 时 A5 板对应的应变 2.0MPa ；加载至施

工阶段荷载 4.5kN/m²时 A6 板对应的应变 2.5MPa。即加载试块到施工荷载时，各个试件沿跨度方向的混凝土应力最大为 2.5MPa，且 A1 板、A4 板、A6 板本次试验所选跨度即为最大适用跨度，A2 板、A3 板、A5 板最大适用跨度要比本次试验跨度大。

通过对 B1~B4 板应力的测试结果可以看出：在同一位置处应变数据相差很大且受力情况不对，B3 试件和 B4 试件有部分应变片后期未检测到数值，可能因为混凝土中水分渗到应变片表面导致。故后期不再采用 B1~B4 板数据。

4) 结论

本次试验设计并制作了 10 块不同桁架高度、上弦钢筋直径、跨度的免拆底模钢筋桁架组合板试件。试验结果表明：

通过观测施工阶段混凝土应力值可以得到：对于此试验中 A1 板 HJ3-60 在跨中设置一道支撑情况下可以达到 4.2m；A4 板 HJ3-80 在免支撑情况下最大跨度为 2.2m，A6 板 HJ3-100 在免支撑情况下最大可以达到 2.6m，超过该长度后，免拆底模钢筋桁架组合板应增设临时支撑。

在相同跨度作用下，随着桁架高度的提升和上弦钢筋直径的增加均可减小混凝土底板施工阶段的跨中挠度。

3.1.3 钢筋桁架间距的影响试验

1) 试件设计

试验共设计 3 块免拆底模钢筋桁架组合板。选取三块同一型号的钢筋桁架间距为 240mm 的免拆底模钢筋桁架组合板，免拆底模钢筋桁架组合板宽度为 1200mm，混凝土底板板厚为 20mm。根据加载作用位置和试验顺序对三块免拆模钢筋桁架组合板试件进行编号，编号为 BD1~BD3。支座两端均为简支，根据现场条件，铰支座采用“圆钢+混凝土支座”的形式，保持接触面为线接触；

表 12 试验构件规格（单位：mm）

| 试件编号 | 桁架高度 | 板长 | 板宽 | 钢筋直径 | | | | 桁架间距 | 支承间距 |
|------|------|------|------|------|----|----|-----|------|------|
| | | | | 上弦 | 下弦 | 下弦 | 腹杆 | | |
| BD1 | 80 | 1730 | 1200 | 8 | 8 | 8 | 4.5 | 240 | 1200 |
| BD2 | 80 | 1730 | 1200 | 8 | 8 | 8 | 4.5 | 240 | 1200 |
| BD3 | 80 | 1730 | 1200 | 8 | 8 | 8 | 4.5 | 240 | 1200 |

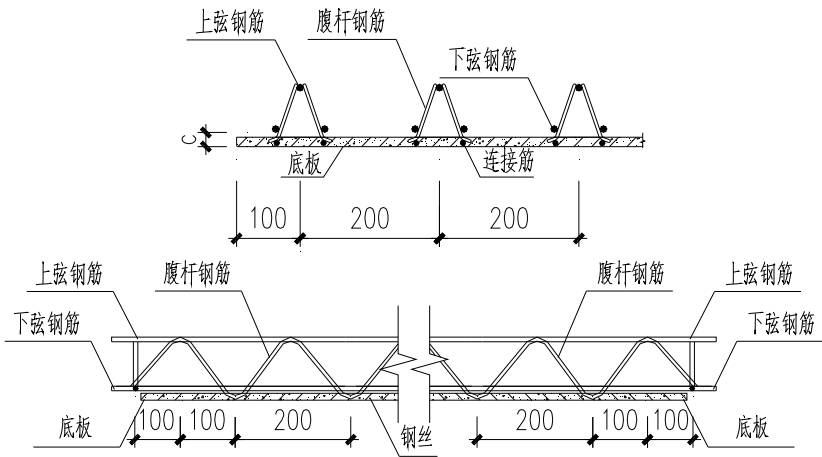


图 7 试件示意图

2) 加载方案

免拆底模钢筋桁架组合板施工阶段人行荷载试验：在两端简支的条件下，人行荷载工况下，钢筋桁架与混凝土底板共同承担楼板的自重、施工人员荷载、机械设备荷载等其他施工荷载，在试验中将施工人员脚踩在混凝土底板上的荷载以集中荷载的形式施加到底板上。试验采用标准配重钢试块进行集中加载，试验用以加载的每块砝码重量为 10.0kg，尺寸为 100*200*150mm，为了模拟施工人员行走在板上作业，每间隔 0.6m 设置一处加载点，在 1.2m 长度内共设有 3 处加载点，共有三种加载位置 A、B、C。正式加载前先加载位置处放置垫块，模拟施工人员在板上作业时脚踩在板面上的作用面，沿板跨方向放置垫块，间隔 600mm，由于试验加载到后期砝码堆加过高亦产生危险，加载时选择在垫块上放置一块钢板，以充分利用钢板面积来堆放试块，后续加载时砝码放置到钢板上。

试验开始前先进行预加载，检验支座是否平稳，仪表及加载设备是否正常，对仪表设备进行调零。试验预加载一层加载块然后卸载，加（卸）载停留时间为 15 分钟。试验采用逐级加载的方式，每级加载 1.8kN，每级持荷时间为 15min，以便充分观察试件的变化，试验中观察并记录加载过程中每级荷载下的裂缝、应力变化情况。试件加载位置情况及现场加载示意图如图 8 所示。依据《混凝土结构试验方法标准》GB50152-2012，采用分级加载。

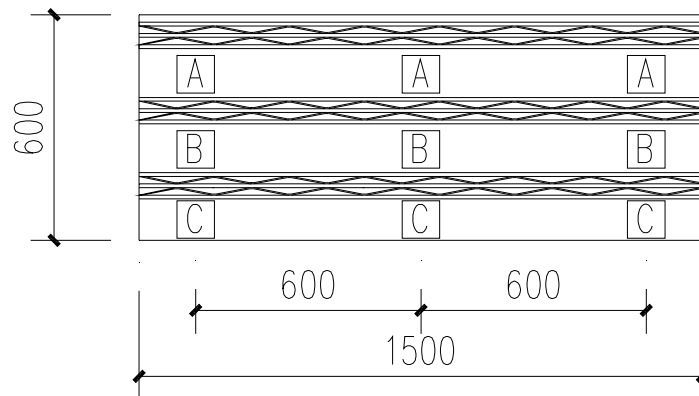


图 8 试验一加载作用点布置图

免拆底模钢筋桁架组合板施工阶段荷载试验：在两端简支的条件下，钢筋桁架与底模共同承担楼承板的自重、以及施工人员自重，在试验中将施工人员自重以集中荷载的形式施加到板上。

经计算该试件达到开裂荷载时一点处集中作用力为 0.7kN。

根据上述计算，开裂试验荷载取 0.7kN（加载系数取 1.2）；试件自重为 0.55kN/m²，开裂试验所需砝码质量为 (700-290) * 3 * 1.2 = 1476N，约 148kg。

用以加载的砝码重量为 10kg，尺寸为 100mm×150mm，根据板面大小 1200mm×1200mm，在两榀桁架间取加载作用点进行集中加载，在跨中 1200mm 距离内分为 3 个加载作用点进行加载，加载时先在板上放置垫块，模拟施工人员在板上作业时脚踩在板面上与板接触的作用面，加载时每层砝码分布可为 6 个/处，其中每个垫块间距为 600mm，每层荷载作用力大小为 600N，该试验加载级数共分为六级，共 6 层。

加载时试砝码布置图如图 9 所示：

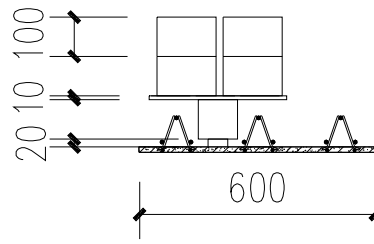


图9 试验一加载砝码布置图

3) 试验结果分析

a) 开裂荷载分析

免拆底模钢筋桁架组合板支承间距为 1.2m，板的净跨为 1.2m，试验初始阶段，试件的混凝土底板处于弹性阶段，应力应变呈线性关系。当加载到开裂荷载时，试件底板未开裂，试件仍未出现明显裂缝，验证了钢筋桁架板的承载能力。当荷载加载到底板开裂时，裂缝方向沿厚度方向贯通，处于裂缝位置处的应变片退出工作，随着荷载持续增加，裂缝继续沿底板主应力方向拓展，整个加载过程中没有出现底板与钢筋桁架脱离和混凝土底板突然破坏现象。实验结果表明，该免拆底模钢筋桁架组合板在实际应用中具有较高的安全性和可靠性。

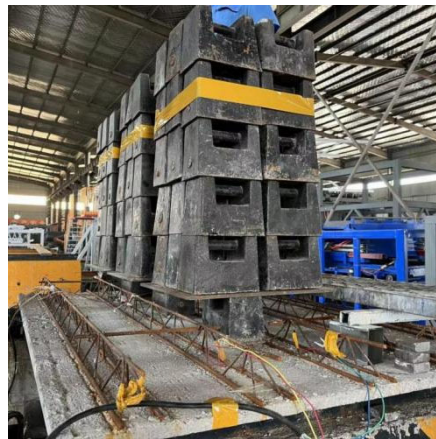


图10 试件现场加载图

b) 钢筋应变分析

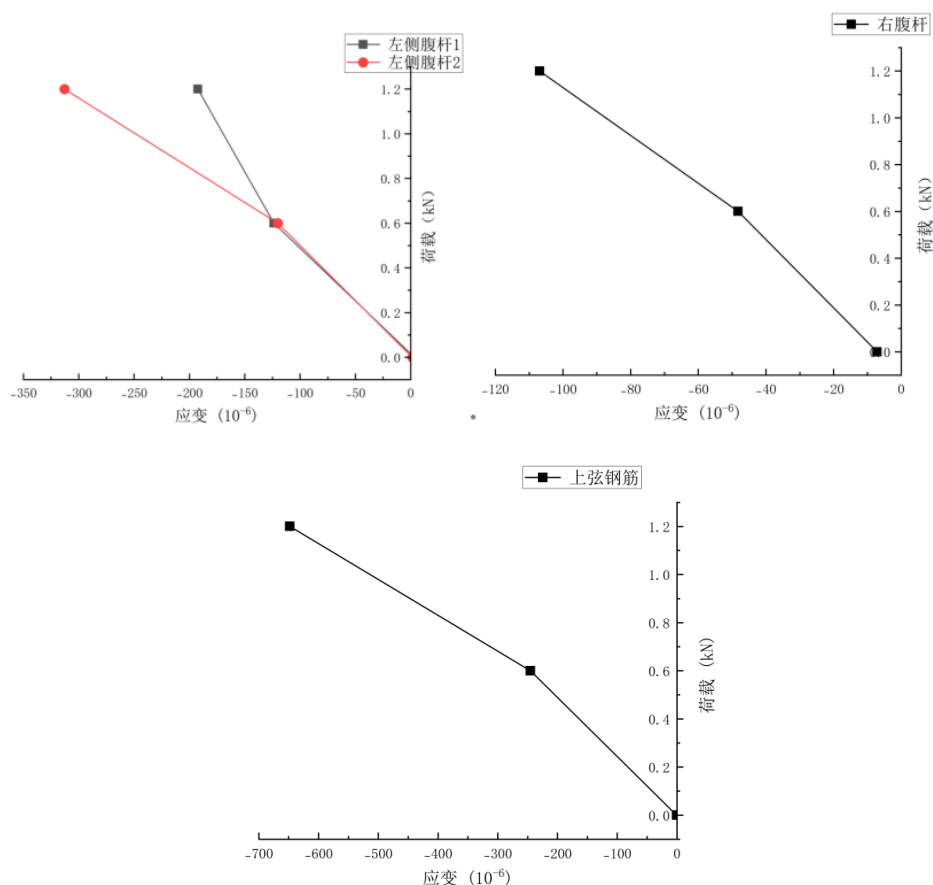


图 11 钢筋-荷载应变曲线

BD3 板荷载-上弦钢筋应变曲线如图所示，图 11 中两曲线为两边支座支承跨中位置两个桁架上弦钢筋应变曲线，可以看出桁架上弦钢筋在支撑跨内受压，并且随着荷载增加桁架上弦钢筋应变逐渐变大。当荷载加载至 1.2kN 时，钢筋仍未屈服。

BD3 板荷载-腹杆钢筋应变曲线如图 11 所示，图中腹杆 1、2 为支承处钢筋桁架板腹杆钢筋的应变曲线，可以看出支撑跨内腹杆钢筋受压，且应力较大，桁架腹杆钢筋在楼承板不同位置受力依然均匀，并且都受压应力。试验加载过程中最边缘钢筋桁架板底板破坏，但腹杆钢筋和底板内钢筋未屈服。钢筋应变较小，具有很大的安全范围。

4) 结论

本次试验通过对 3 块相同参数的免拆底模钢筋桁架组合板在施工阶段进行静力加载试验，以模拟施工阶段免拆底模钢筋桁架组合板在施工人员在板上行走时该种工况下受到的集中荷载作用，可以得出以下结论：

(1) 三组试验过程中钢筋桁架和混凝土底板连接良好，未出现脱落、剥离现象，两者能够协同工作。薄型底板钢筋桁架板在施工阶段刚度表现良好，在施工阶段可以承受来自施工人员在板上作业时产生的荷载。在此施工荷载作用下，薄型底板钢筋桁架板未出现开裂情况。

(2) 免拆底模钢筋桁架组合板的腹杆钢筋与上弦钢筋在施工阶段承受施工人员的人行荷载作用下，具有很大的安全范围，显示出良好的稳定性和承载能力。特别是在达到施工荷载之前，受压腹杆的压应变呈现线性增长趋势，表明其在受压状态下能保持稳定的力学性能，未出现失稳现象。

3.8.4 支承间距的影响试验

1) 试件设计

试验共设计 4 块免拆底模钢筋桁架组合板。试验选用四块不同板长、桁架高度及钢筋直径的免拆底模钢筋桁架组合板，免拆底模钢筋桁架组合板宽度为 1200mm，混凝土底板板厚为 20mm。试件规格如表 12 所示，试件示意图如图 12 所示，支座两端均为简支，根据现场条件，铰支座采用“圆钢+混凝土支座”的形式，保持接触面为线接触；

表 12 试验构件规格（单位：mm）

| 试件编号 | 桁架高度 | 板长 | 板宽 | 钢筋直径 | | | | 桁架间距 | 支承间距 |
|------|------|------|-----|------|----|----|----|------|------|
| | | | | 上弦 | 下弦 | 下弦 | 腹杆 | | |
| BD4 | 140 | 5400 | 600 | 6 | 8 | 6 | 4 | 200 | 1500 |
| BD5 | 100 | 4600 | 600 | 8 | 6 | 6 | 4 | 200 | 1500 |
| BD6 | 100 | 4600 | 600 | 8 | 6 | 6 | 4 | 200 | 1200 |
| BD7 | 80 | 3800 | 600 | 6 | 8 | 6 | 3 | 200 | 1200 |

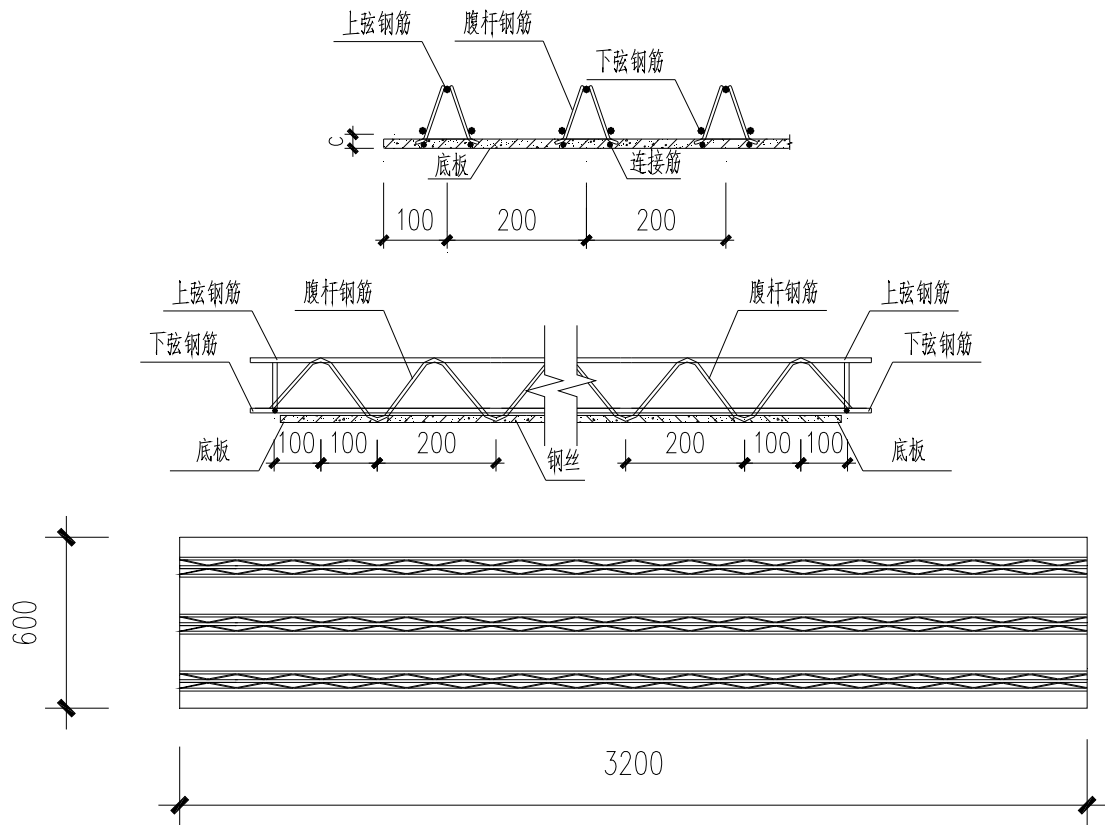


图 12 试件示意图

2) 加载方案

经计算该试件开裂荷载为 5.92kN/m^2 ，施工荷载取为 3kN/m^2 。根据上述计算，开裂试验荷载取 5.92kN/m^2 ；试件自重为 0.54kN/m^2 ，（加载系数取 1.2）；达到开裂试荷载所需砝码质量为 $(5.92-0.54) \times 0.6 \times 1.5 \times 1.2 = 5.81\text{kN}$ ，约 581kg；达到施工荷载试验所需砝码质量为 $(3-0.54) \times 0.6 \times 1.5 \times 1.2 = 2.66\text{kN}$ ，约 266kg。

用以加载的砝码重量为 10kg，尺寸为 100mm×150mm，根据板面大小 1200mm×1750mm，加载时每层砝码分布可为 24 个×2 排=48 块，其中每排间距为 100mm，砝码间间距为 50mm，每层荷载为 1.78kN/m²，该试验加载级数共分为五级，共五层。

加载时试砝码布置图如图 13 所示：

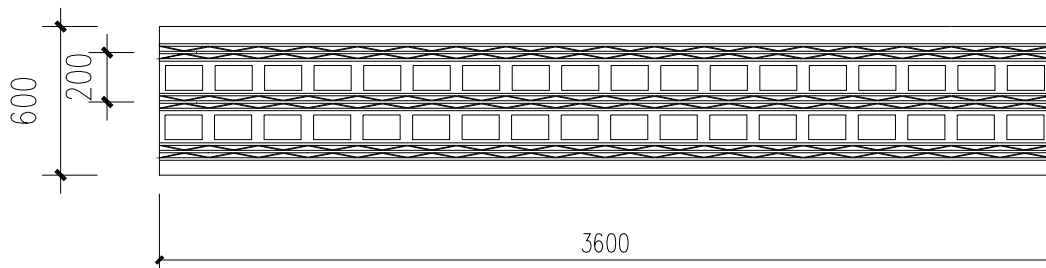


图 13 试验一加载作用点布置图

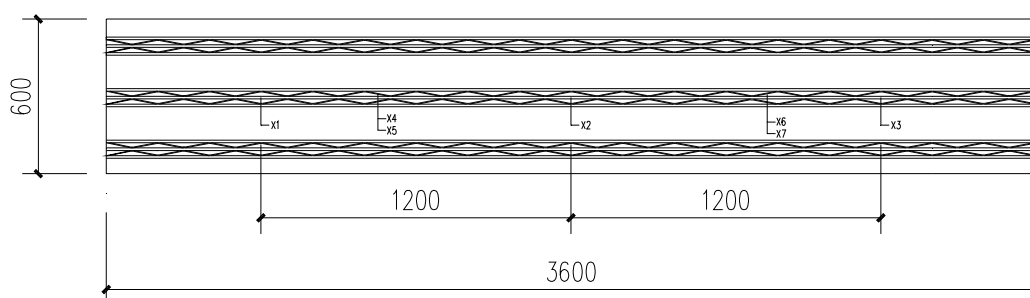


图 14 钢筋应变片布置图

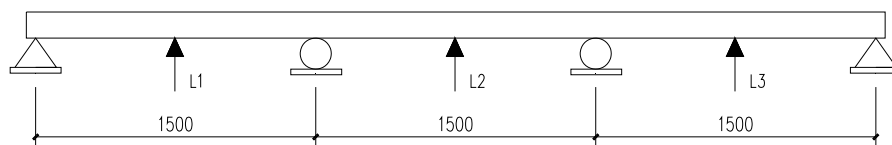


图 15 位移计位置布置图

3) 试验结果分析

试件板长 4.6m，宽度 0.6m，桁架高度 100mm，两端支撑为简支，临时支承将桁架板分为三跨，支承间距为 1.5m，经计算该试件开裂荷载为 5.92kN/m²，施工荷载按 3kN/m²考虑。

考虑到试验加载到后期砝码堆加过高亦产生危险，加载时选择充分利用板面面积堆放砝码，在相邻桁架间板面上沿跨度方向，试块摆放两排，每排能放置 24 个砝码，该试验试件满布一层可布置砝码 48 块。试件在达到开裂荷载前每级加载放置 48 块砝码，开裂荷载后每级放置 48 块砝码，每级加载为 48 块时荷载大小为 1.78kN/m²；当荷载加载到 3kN/m²时，达到施工荷载，此时免拆底模钢筋桁架组合板未开裂；当加载到五级荷载时，试验因砝码累积过高易产生危险而停止，此时已累计所加载砝码 240 块，荷载为 8.89kN/m²，所加荷载远超施工荷载，桁架板未出现异常；加载过程见图 16。



图 16 试件现场加载图

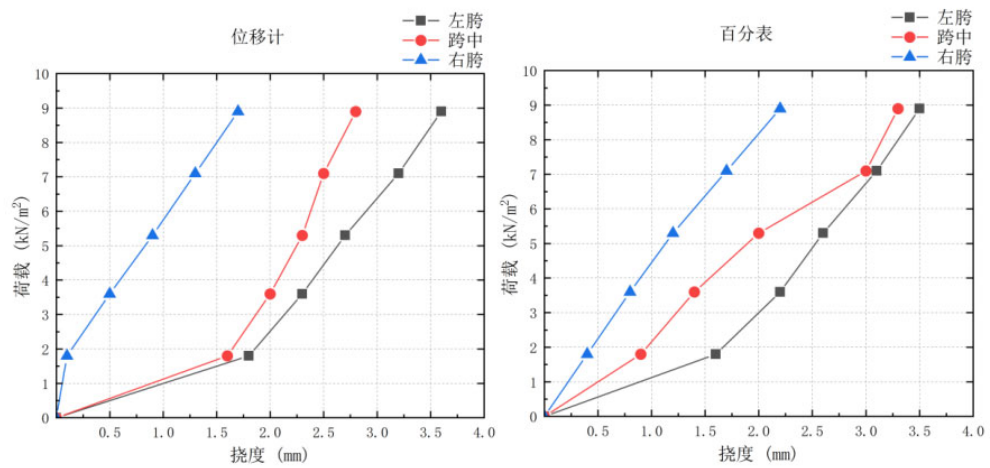


图 17 BD2 荷载挠度曲线图

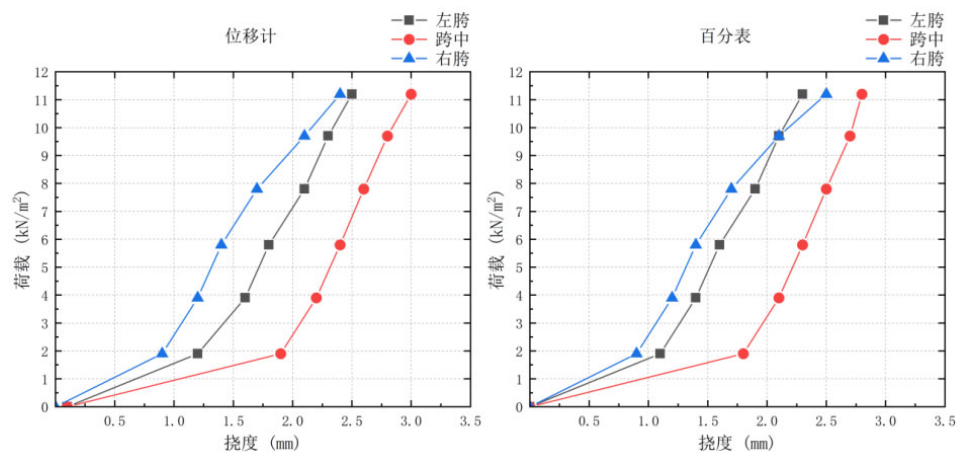


图 18 BD3 荷载挠度曲线图

试验的四块试件加载到 2 倍的施工荷载，其中试件 BD7 加载到 3.7 倍的施工荷载，由表中数据结合手算分析可知，所有试件的开裂荷载均大于荷载标准值，在达到施工荷载后免拆底模钢筋桁架组合板仍有较高承载力，在达到开裂荷载及施工荷载时所产生的挠度均小于《混凝土结构设计规范》GB50010-2010 中挠度限值 $l_0/200$ 。

4) 结论

本次试验通过对 4 块不同参数的免拆底模钢筋桁架组合板在施工阶段进行静力加载试验，以模拟施工阶段免拆底模钢筋桁架组合板在不同支撑间距条件下板的各项受力性能，可以得出以下结论：

试验中的四块免拆底模钢筋桁架组合板在不同支撑间距下荷载达到施工荷载时底板均未出现裂缝，免拆底模钢筋桁架组合板的开裂荷载均大于施工荷载标准值 3kN/m^2 ，尤其时 1.5m 支撑间距的两块免拆底模钢筋桁架组合板最后均加载到 2 倍的施工荷载且钢筋桁架板未破坏，仍处于弹性阶段；在测量挠度时位移计与百分表的量程与精度互补，所得到的数据具有可靠性的前提下，挠度发展均匀，无局部凹陷或突变，在施工荷载作用下的支撑跨中挠度较小均小于规范要求的 $L/200$ ，钢筋桁架板的抗裂性能、抗弯刚度和受弯承载力均满足施工要求，同时其极限承载能力相对于施工阶段的施工荷载也具有足够的安全储备。

3.2免拆底模钢筋桁架组合楼板的试验研究

3.2.1 承载力试验与共同作用试验

1) 试件设计

试验共设计 8 块免拆底模钢筋桁架组合楼板和 1 块普通混凝土楼板试件。将施工阶段的 SG4~SG9 免拆底模钢筋桁架组合板在自然条件下养护至强度达到设计要求，并且编号改为 SY4~SY9，此试件为连续板。此外为了对比免拆底模钢筋桁架组合楼板与普通混凝土楼板的受力性能，试验还设计了两块免拆底模钢筋桁架组合楼板和一块普通混凝土楼板，这组试验的楼板跨度均为 3 米，编号为 A1~A3，A1、A2 板为免拆底模钢筋桁架组合楼板，A3 板为普通混凝土楼板，此试件为简支板。桁架高度指上弦钢筋上表面与下弦钢筋下表面之间的距离，桁架筋均采用 HRB400 级钢筋，混凝土采用 C30 混凝土，试件规格如表 13 所示。

表 13 试验构件规格

| 编号 | 跨度 mm | 宽度 mm | 厚度 mm | 钢筋直径 mm | | | 桁架高度 mm | 间距 mm | | 保护层厚度 mm | | 支撑条件 |
|-----|-------|-------|-------|------------------------|----|-----|---------|-------|-----|----------|----|-----------|
| | | | | 上弦 | 下弦 | 腹杆 | | 上弦 | 下弦 | C1 | C2 | |
| SY4 | 4000 | 1200 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 15 | 20 | 一端简支，一端固定 |
| SY5 | 4000 | 1200 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 15 | 20 | 一端简支，一端固定 |
| SY6 | 4000 | 1200 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 15 | 20 | 一端简支，一端固定 |
| SY7 | 4000 | 1200 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 15 | 20 | 一端简支，一端固定 |
| SY8 | 4000 | 1200 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 15 | 20 | 一端简支，一端固定 |
| SY9 | 4000 | 1200 | 120 | 10 | 8 | 4.5 | 80 | 200 | 100 | 15 | 20 | 一端简支，一端固定 |
| A1 | 3000 | 1200 | 130 | 10 | 8 | 4.5 | 90 | 200 | 100 | 15 | 20 | 两端简支 |
| A2 | 3000 | 1200 | 135 | 10 | 8 | 4.5 | 90 | 200 | 100 | 15 | 20 | 两端简支 |
| A3 | 3000 | 1200 | 120 | 上部钢筋：10@200；下部钢筋：8@100 | | | | | | 15 | 20 | 两端简支 |

2) 加载方案

混凝土凝结硬化后楼板承受的荷载主要有建筑做法的自重以及活荷载，由于试验楼板并没有建筑做法，所以计算中不考虑建筑做法的自重。试件活荷载取值为 2kN/m^2 ，在试验中将楼板所受的活荷载以均布荷载的形式施加到楼板上表面。试验采用标准配重铅块进行均布加载，为消除加载铅块之间由于试件变形而引起的拱效应，在铅块之间留有不小于 50mm 的间隙，如图 19 所示为试件加载布置方式。

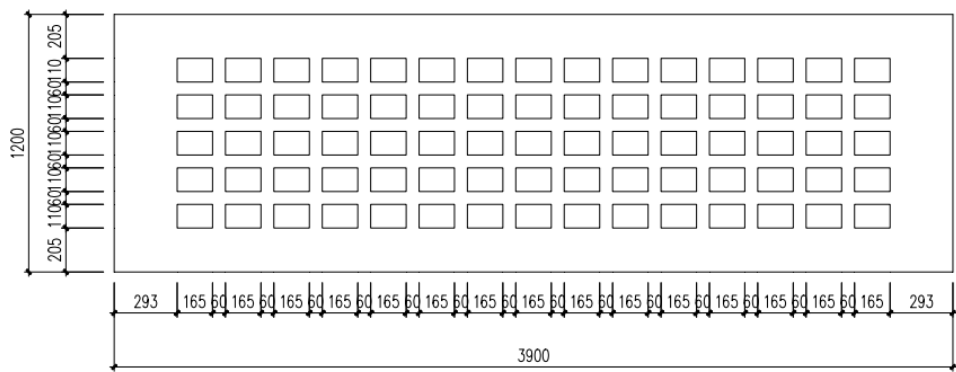
对于 SY4-SY9 板，用以加载的铁块每块重量为 10kg ，试验板自重按 3.45kN/m^2 考虑，正常使用极限状态下试验荷载计算值为 7.78kN/m^2 ，正常使用极限状态下试验荷载值取为 $7.78-3.45=4.33\text{kN/m}^2$ 。开裂荷载计算值为 6.80kN/m^2 ，试验时开裂荷载取值为 $6.80-3.45=3.35\text{kN/m}^2$ 。承载力极限状态荷载计算值为 17.38kN/m^2 ，加载系数取 1.2，结构重要性系数取 1.0，承载力极限状态时试验荷载值取为 $17.38 \times 1.2 \times 1.0 - 3.45 = 17.41\text{kN/m}^2$ 。正常使用极限状态下需 195 块铁块（ 1950kg ），试件开裂需 151 块铁块（ 1510kg ）承载力极限状态时需 785 块铁块（ 7850kg ），本次试验采用逐级加载的方式，每次加载 75 块铁块，每级约 1.60kN/m^2 ，试件开裂需加载到第二级荷载，正常使用极限状态需加载到第三级荷载，承载能力极限状态时需加载到第十一级荷载。

对于 A1~A3，用以加载的铁块每块重量为 20kg ，A1 板自重为 3.7kN/m^2 ，正常使用极限状态下试验荷载计算值为 7.81kN/m^2 ，正常使用极限状态下试验荷载值取为 $7.81-3.7=4.11\text{kN/m}^2$ 。开裂荷载计算值为 13.4kN/m^2 ，试验时开裂荷载取值为 $13.4-3.7=9.7\text{kN/m}^2$ 。承载力极限状态荷载计算值为 14.01kN/m^2 ，加载系数取 1.2，结构重要性系数取 1.0，承载力极限状态时试验荷载值取为 $14.01 \times 1.2 \times 1.0 - 3.7 = 13.11\text{kN/m}^2$ 。正常使用极限状态下需 72 块铁块（ 1440kg ），试件开裂需 169 块铁块（ 3380kg ），承载力极限状态时需 228 块铁块（ 4560kg ），本次试验采用逐级加载的方式，每次加载 50 块铁块，每级约 2.78kN/m^2 ，正常使用极限状态需加载到第二级荷载，试件开裂需加载到第四级荷载，承载能力极限状态时需加载到第五级荷载。

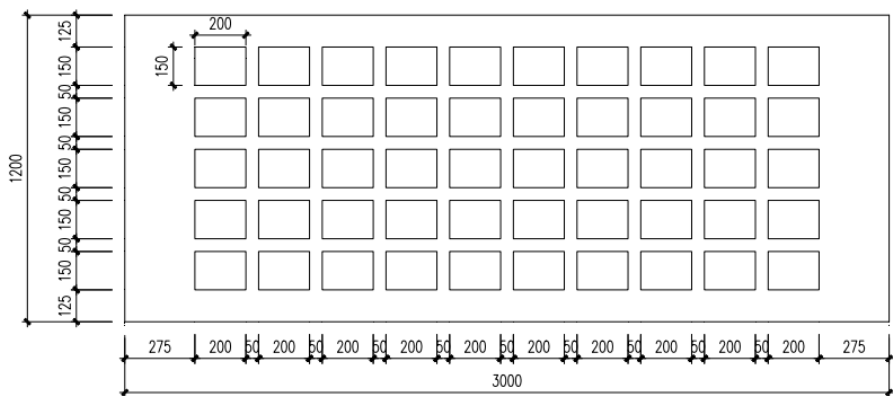
A2 板自重为 3.825kN/m^2 ，正常使用极限状态下试验荷载计算值为 7.97kN/m^2 ，正常使用极限状态下试验荷载值取为 $7.97-3.825=4.15\text{kN/m}^2$ 。开裂荷载计算值为 14.45kN/m^2 ，试验时开裂荷载取值为 $14.45-3.825=10.63\text{kN/m}^2$ 。承载力极限状态荷载计算值为 14.87kN/m^2 ，加载系数取 1.2，结构重要性系数取 1.0，承载力极限状态时试验荷载值取为 $14.87 \times 1.2 \times 1.0 - 3.825 = 14.02\text{kN/m}^2$ 。正常使用极限状态下需 72 块铁块（ 1440kg ），试件开裂需 185 块铁块（ 3700kg ），承载力极限状态时需 244 块铁块（ 4880kg ），本次试验采用逐级加载的方式，每次加载 50 块铁块，每级约 2.78kN/m^2 ，正常使用极限状态需加载到第二级荷载，试件开裂需加载到第四级荷载，承载能力极限状态时需加载到第五级荷载。

A3 板自重为 3.55kN/m^2 ，正常使用极限状态下试验荷载计算值为 7.62kN/m^2 ，正常使用极限状态下试验荷载值取为 $7.62-3.55=4.07\text{kN/m}^2$ 。开裂荷载计算值为 4.59kN/m^2 ，试验时开裂荷载取值为 $4.59-3.55=1.04\text{kN/m}^2$ 。承载力极限状态荷载计算值为 12.28kN/m^2 ，加载系数取 1.2，结构重要性系数取 1.0，承载力极限状态时试验荷载值取为 $12.28 \times 1.2 \times 1.0 - 3.55 = 11.19\text{kN/m}^2$ 。正常使用极限状态下需 71 块铁块（ 1420kg ），试件开裂需 18 块铁块（ 360kg ），承载力极限状态时需 195 块铁块（ 3900kg ），本次试验采用逐级加载的方式，每次加载 50 块铁块，每级约 2.78kN/m^2 ，正常使用极限状态需加载到

第二级荷载，试件开裂需加载到第一级荷载，承载能力极限状态时需加载到第四级荷载。



(a) SY4~SY9 板加载示意图



(b) A1~A3 板加载示意图

图 19 试验加载示意图

3) 试验结果分析

a) 开裂荷载分析

A1 板试件：试验加载初期，试件挠度增加很小，随着荷载的增加挠度呈线性增加。当荷载加载到 5.56kN/m^2 （正常使用极限状态）时，楼板挠度为 0.257mm ，荷载加载到 11.12kN/m^2 时，试件板底跨中位置处出现 4 条裂缝，裂缝间距为 $130\text{mm}\sim 70\text{mm}$ ，最大裂缝宽度为 0.12mm ，裂缝沿板的厚度方向向上延伸 68mm ，最大裂缝宽度为 0.08mm ，荷载加载到 13.9kN/m^2 时，试件板底出现 7 条裂缝，裂缝间距为 $120\text{mm}\sim 230\text{mm}$ ，最大裂缝宽度为 0.18mm ，荷载加载到 16.68kN/m^2 时，试件板底出现 10 条裂缝，裂缝间距为 $50\text{mm}\sim 240\text{mm}$ ，最大裂缝宽度为 0.32mm ，沿板厚方向的裂缝向上延伸至 83mm 处，最大裂缝宽度为 0.18mm ，荷载加载到 19.46kN/m^2 时，试件板底有 13 条裂缝，裂缝间距为 $50\text{mm}\sim 230\text{mm}$ ，最大裂缝宽度为 0.34mm ，沿板厚方向的裂缝向上延伸至 108mm 处，最大裂缝宽度为 0.28mm 。纤维水泥底模与后浇混凝土结合良好，没有出现开裂、滑移现象。

加载过程中，免拆底模钢筋桁架组合楼板表现出与普通混凝土楼板相同的受力性能，裂缝位置出现的位置与普通混凝土楼板相似，裂缝的开展也与普通混凝土楼板相似，在加载过程中普通混凝土板的裂缝数量总是多于免拆底模钢筋桁架组合楼板，且在加载到 19.46kN/m^2 时，普通混凝土板裂缝宽度达到 1.6mm 已经破坏，而此时免拆底模钢筋桁架组合楼板裂缝宽度仅为 0.34mm ，说明免拆底模钢筋桁架组合楼板的受力性能明显优于普通混凝土楼板，试验过程中每组试件的裂缝开展如下图

所示。

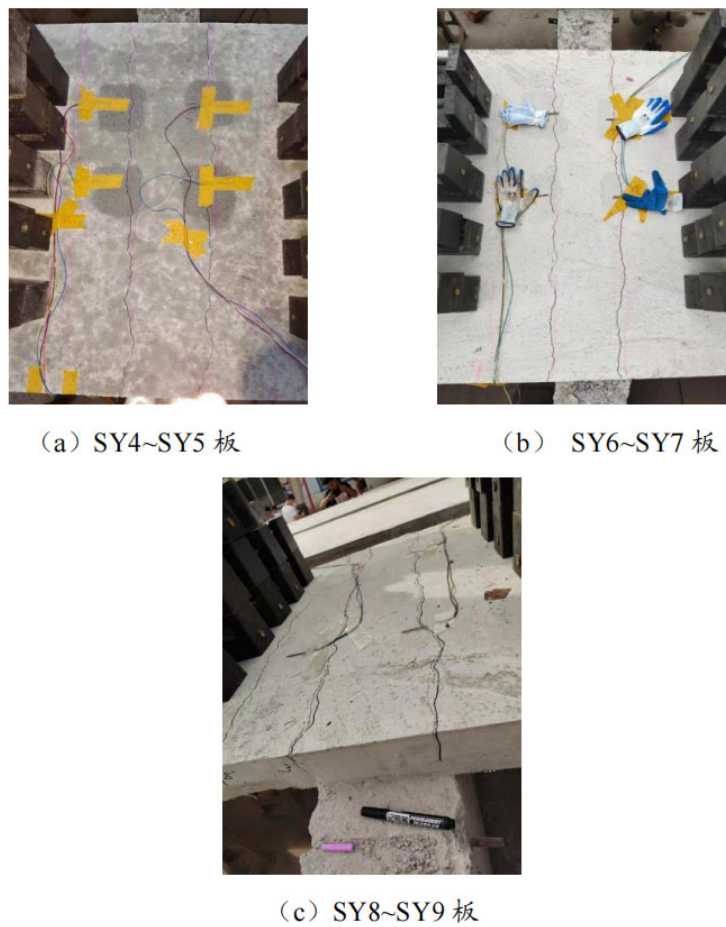


图 20 板试件裂缝开展示意图

b) 板挠度分析

对试验数据进行整理，表 14 给出了每级荷载作用下试件的挠度变化，图 21~22 为试件的荷载-挠度曲线。

表 14 SY4~5 板挠度测点测值

| 外加荷载 kN/m^2 | 1.60 | 3.20 | 4.80 | 8.22 | 11.64 | 15.06 |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| N1 | 0.430 | 1.539 | 3.301 | 10.331 | 18.650 | |
| N2 | 0.73 | 1.75 | 2.78 | 6.99 | 12.43 | |
| N4 | 0.31 | 0.78 | 1.40 | 3.72 | 7.02 | 12.13 |
| N5 | 0.144 | 0.392 | 1.499 | 4.225 | 9.405 | |
| N6 | 0.08 | 0.27 | 0.94 | 2.60 | 5.83 | 10.32 |
| N7 | 0.398 | 0.950 | 3.041 | 9.298 | 19.705 | |
| N8 | 0.23 | 1.19 | 1.88 | 5.63 | 12.03 | |

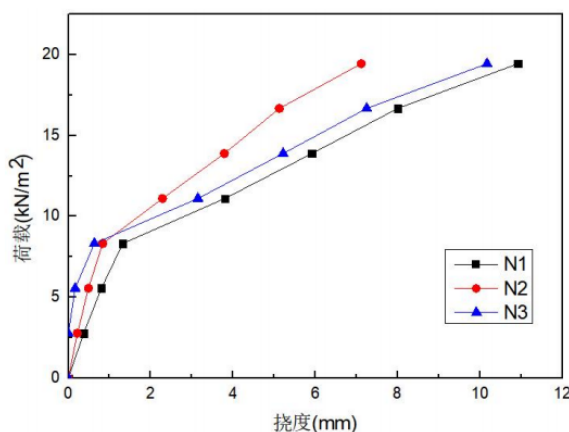


图 21 SY4-5 板荷载-位移曲线

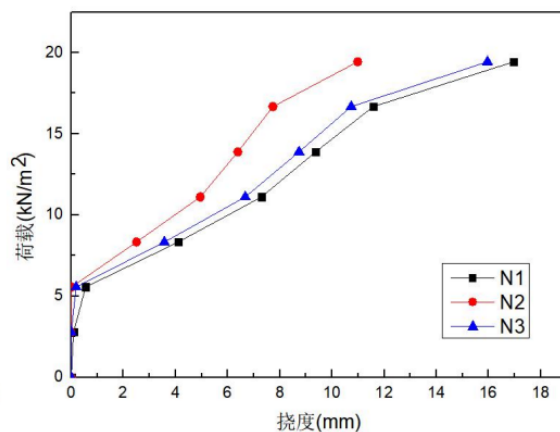


图 22 SG6-7 板荷载-位移曲线

从图 21~图 22 可以看出，免拆底模钢筋桁架组合楼板与普通混凝土楼板的受力性能相似，均为典型受弯性能，对于免拆底模钢筋桁架组合楼板荷载增加到 8.33kN/m² 时，曲线出现拐点，板底开始出现裂缝，对于普通混凝土楼板荷载增加到 5.56kN/m² 时，曲线出现拐点，试件开始出现裂缝。加载到正常使用极限状态时，此时荷载为 5.56kN/m² 时，此时 A1 板的挠度为 0.819mm，挠跨比为 L/3540，A2 板的挠度为 0.802mm，挠跨比为 L/3615，A3 板的挠度为 0.551mm，挠跨比为 L/5263，试验加载到 19.44kN/m² 时，普通混凝土楼板最大裂缝宽度达到 1.6mm，挠度为 16.963mm，试件已经破坏，免拆底模钢筋桁架组合楼板最大裂缝宽度为 0.34mm，挠度为 10.920mm，远未达到破坏，纤维水泥底模可以有效减小楼板的挠度。

c) 楼板应力分析

试验过程测得应力如下图所示，试验数据以受拉为正，受压为负。

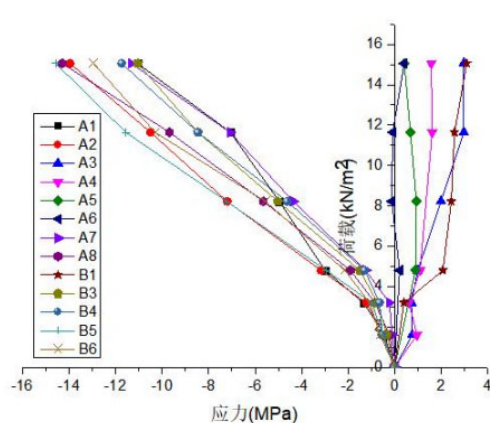


图 23 SY4-5 板荷载-应力曲线

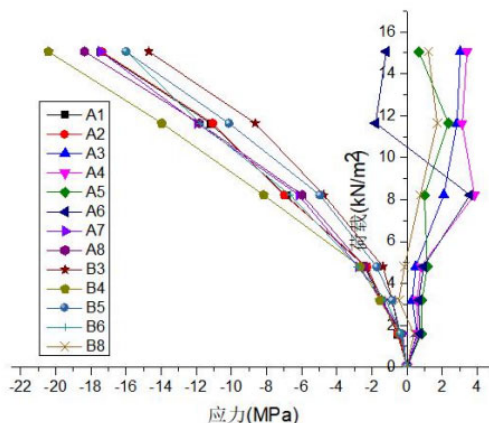


图 24 SG6-7 板荷载-应力曲线

当荷载很小时，免拆底模钢筋桁架组合楼板还未开裂，上下面板处混凝土应力近似相同，荷载-应力曲线近似为直线，试件处于弹性阶段，随着荷载增大，受拉区混凝土开裂退出工作，截面产生应力重分布，拉应力一部分由钢筋承担，此时受压区仍由混凝土承受压力，在此后的加载中，混凝土压应力不断增加，拉应力近似认为不变。加载结束时受压区混凝土应变远未达到极限压应变 0.003。

4) 结论

通过对 9 块免拆底模钢筋桁架组合楼板直接施加重物进行加载试验，根据试验数据可以得出以

下结论：

（1）均布荷载作用下，免拆底模钢筋桁架组合楼板加载初期处于弹性阶段，挠度和应力均随荷载线性增加，试件开裂后，受拉区混凝土退出工作，荷载-位移曲线出现明显拐点。

（2）免拆底模钢筋桁架组合楼板与普通混凝土楼板的受力性能相似，试验中裂缝出现的位置、裂缝开展与普通混凝土楼板一致，施工时跨中临时支撑的设置可有效减小使用阶段免拆底模混凝土楼板的挠度。

（3）纤维水泥板底模与后浇混凝土连接良好，试验过程并未出现滑移、脱落现象，纤维水泥板底模与后浇混凝土可以共同工作、协同受力。

3.2.2 带裂缝工作下的受力性能试验

1) 试件设计

出现裂缝的免拆底模钢筋桁架组合板若直接丢弃不用则会造成浪费，因此需要对其进行深入研究，在满足安全性能的同时最大限度的对材料进行利用。

选取三块型号、跨度均相同的免拆底模钢筋桁架组合板试件，为模拟其在运输、施工吊装、堆放过程中出现裂缝的情况，对其中两块试件进行预开裂加载试验，加载至其裂缝宽度达到 0.2mm，另一块试件不做处理。然后分别进行三块板的施工阶段试验和使用阶段试验，期间持续观察裂缝、挠度、钢筋应力等变化情况，对比初始未开裂板，得出带裂缝底板对免拆底模钢筋桁架组合楼板的影响。

试验设计三块免拆底模钢筋桁架组合板，选用《HJ 钢筋桁架板应用技术规程》中的 HJ1-60 型号的免拆底模钢筋桁架组合板，其中 1 为钢筋桁架规格，60 为桁架高度。试件规格见表 15，试件示意图如图 25 所示。试件 A1 和试件 A2 在预开裂加载阶段荷载试验时，使其开裂，试件 A3 是未开裂板。

表 15 试验构件规格

| 试件 编号 | 楼板 型号 | 跨度 mm | 宽度 mm | 厚度 mm | 钢筋直径 mm | | | 桁架 高度 mm | 间距 mm | | 保护层 厚度 mm |
|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|--------|----------------|--------|--------|-----------------|
| | | | | | 上 弦 | 下 弦 | 腹 杆 | | 上 弦 | 下 弦 | |
| A1 | HJ1-60 | 2100 | 600 | 100 | 8 | 6 | 4.5 | 60 | 200 | 80 | 25 |
| A2 | HJ1-60 | 2100 | 600 | 100 | 8 | 6 | 4.5 | 60 | 200 | 80 | 25 |
| A3 | HJ1-60 | 2100 | 600 | 100 | 8 | 6 | 4.5 | 60 | 200 | 80 | 25 |

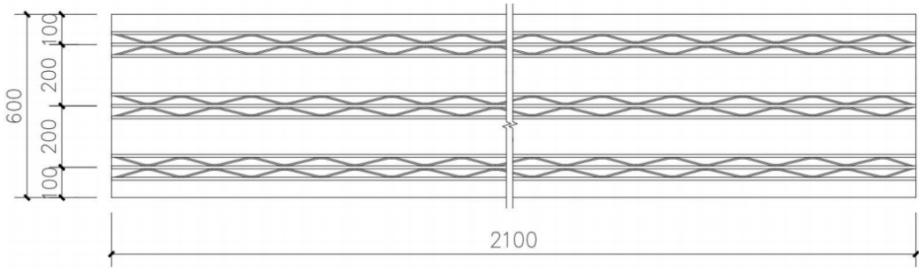


图 25 试件平面图

2) 加载方案

a) 预开裂加载阶段加载方案

只对试件 A1 和试件 A2 进行预开裂加载阶段荷载试验：采用两端铰接支撑，本试验采用堆铁块加载方法，加载时所采用的铁块每块重量 10kg。根据《混凝土结构试验方法标准》[63]规定，试件加载前先进行预加载，主要目的是观察仪器及百分表数值是否准确，支座是否平整。设备检测无误后，通过堆铁块方式逐级加载，每级加载维持 15min 以便所测数据的精准。此次试验主要目的是模拟免拆底模钢筋桁架组合板在施工运输、吊装等环节出现的裂缝，因此需将免拆底模钢筋桁架组合板加载至开裂并继续加载使裂缝扩大至 0.2mm 左右，以便在后续试验过程中能够更加明显的观察裂缝的变化情况以及对使用阶段的影响，运用精度为 0.01mm 的裂缝测宽仪进行测量。试验加载装置及试件加载情况如图 26 所示。

预开裂加载阶段的加载方案：在每两榀钢筋桁架之间均布铁块加载，故只能布置两排铁块。试件一层可布置 14 块，每级铁块荷载折算面荷载为 1.11kN/m²，为控制裂缝宽度达到 0.2mm 左右，需加载五级铁块，折算面荷载为 5.50kN/m²。记录数据和观察现象，最后分级卸除铁块。

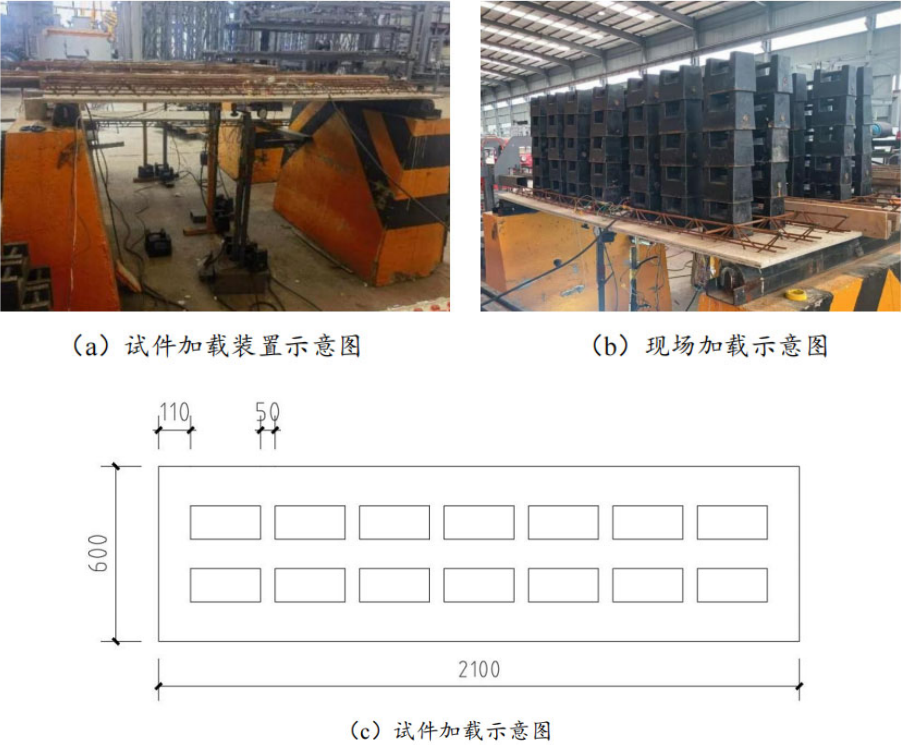


图 26 试件加载装置图 (mm)

b) 施工阶段加载方案

对试件 A1、试件 A2 和试件 A3 进行施工阶段荷载试验：对三个试件分别支模板，现浇混凝土模拟实际施工过程的荷载。将混凝土运送至现场后，为保证试验准确，应在尽量短时间内完成浇筑工作，浇筑过程中，需用振捣棒进行振捣以确保混凝土均匀且密实，直至混凝土达到厚度要求，浇筑期间持续监测应力、挠度、裂缝的变化情况。待浇筑完成后，在板底裂缝处涂抹石灰水，如图 27 所示，以便后期使用阶段试验观察板底裂缝开展情况。



图 27 板底裂缝处涂抹石灰水

c) 使用阶段加载方案

试件 A1、试件 A2 和试件 A3 浇筑完成并养护 28 天以后, 进行使用阶段加载试验。试验采用标准配重铅块进行均布加载。为了消除加载铅块之间由于试件变形而引起的拱效应, 铅块之间留有不小于 50mm 的间隙。试验目的为模拟免拆底模钢筋桁架组合板由于各种原因板底出现裂缝后, 是否影响使用阶段带裂缝免拆底模钢筋桁架组合楼板的正常使用; 加载过程中随时观察裂缝的开展情况及数量变化, 试验加载装置及试件加载情况如图 2.10 所示。

楼板恒荷载可取 1.5kN/m^2 , 活荷载取 2.5kN/m^2 , 使用阶段荷载标准值 4.0kN/m^2 ; 按混凝土抗拉强度为 4.0MPa 进行计算, 试件开裂荷载约为 10.4kN/m^2 。

在试件上均布铁块加载。根据铁块尺寸, 一层可布置 28 块。一级铁块荷载折算面荷载为 2.08kN/m^2 , 达到使用阶段荷载标准值 4.0kN/m^2 时, 需要 2 级荷载; 达到开裂荷载时, 需要 5 级荷载, 此时挠度预计达到 1.84mm。

3) 预开裂加载试验结果分析

a) 开裂荷载及裂缝开展

试件 A1: 试验加载至三级铁块时, 荷载达到 3.33kN/m^2 , 此时跨中出现一条裂缝, 裂缝宽度约为 0.04mm, 跨中挠度为 5.5mm。试验加载至四级 8 块铁块时, 荷载达到 3.97kN/m^2 , 此时跨中位置板底及侧面出现 3 条裂缝, 最大裂缝宽度约为 0.09mm, 跨中挠度为 7.4mm。当四级铁块加载完成时, 荷载达到 4.44kN/m^2 , 此时板底共出现 5 条裂缝, 最大裂缝宽度约为 0.13mm, 跨中挠度为 10.4mm。试验加载至五级 8 块铁块时, 荷载达到 5.08kN/m^2 , 此时板底共出现 6 条裂缝, 其中跨中一条裂缝贯通, 最大裂缝宽度约为 0.19mm, 跨中挠度为 12.5mm。当五级铁块加载完成时, 荷载达到 5.55kN/m^2 , 此时板底共出现 7 条裂缝, 其中三条裂缝贯通, 最大裂缝宽度约为 0.21mm, 跨中挠度为 14.2mm。荷载全部卸载完成后, 最大裂缝宽度约为 0.05mm, 跨中挠度为 3.6mm。

试件 A2: 试验加载至三级铁块时, 荷载达到 3.33kN/m^2 , 此时跨中出现一条裂缝, 裂缝宽度约为 0.02mm, 跨中挠度为 4.3mm。试验加载至四级 8 块铁块时, 荷载达到 3.97kN/m^2 , 此时观察到跨中位置板底及侧面出现 2 条裂缝, 最大裂缝宽度约为 0.07mm, 跨中挠度为 5.9mm。当四级铁块加载完成时, 荷载达到 4.44kN/m^2 , 此时板底共出现 3 条裂缝, 最大裂缝宽度约为 0.11mm, 跨中挠度为 8.4mm。试验加载至五级 8 块铁块时, 荷载达到 5.08kN/m^2 , 此时板底共出现 5 条裂缝, 其中跨中一条裂缝贯通, 最大裂缝宽度约为 0.16mm, 跨中挠度为 9.8mm。当五级铁块加载完成时, 荷载达到 5.55kN/m^2 , 此时板底共出现 6 条裂缝, 其中三条裂缝贯通, 最大裂缝宽度约为 0.19mm, 跨中挠度为

11.6mm。荷载全部卸载完成后，最大裂缝宽度约为 0.04mm，跨中挠度为 2.9mm。

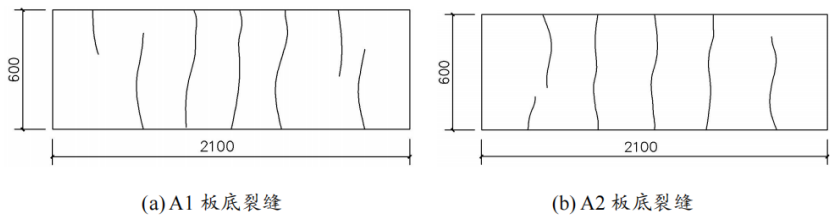


图 28 试件裂缝分布图

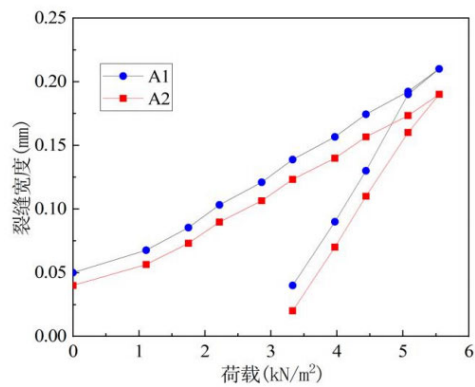


图 29 荷载裂缝宽度曲线

试件裂缝分布情况如图 28 所示，裂缝宽度随荷载变化曲线如图 29 所示，可以看出，在荷载达到 3.33kN/m² 出现裂缝后，随荷载增加，裂缝宽度呈线性增长，两块板的裂缝产生位置、宽度相似。卸载后，预制底板无法回弹到初始状态，裂缝宽度收缩至 0.05mm。

b) 楼板挠度结果

根据试验所测得数据，给出试件 A1 和试件 A2 荷载作用下跨中挠度变化如表 16 所示，图 30 为荷载挠度曲线。

表 16 试件 A1 和试件 A2 荷载下挠度测点测值

| 外加荷载 (kN/m²) | 0.00 | 1.11 | 1.75 | 2.22 | 2.86 | 3.33 | 3.97 | 4.44 | 5.08 | 5.55 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| N1 | 0.00 | 1.77 | 2.20 | 2.92 | 4.01 | 5.47 | 7.95 | 10.41 | 12.53 | 14.23 |
| N2 | 0.00 | 1.61 | 1.89 | 2.49 | 3.39 | 4.36 | 5.95 | 8.38 | 9.82 | 11.57 |

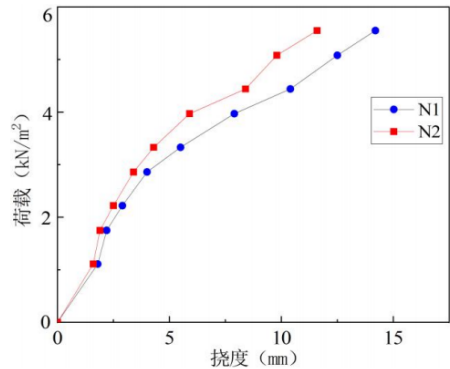


图 30 试件 A1 和试件 A2 荷载挠度曲线

结合试验过程可以看出，试验过程清晰地展示了试件从开始加载到完全破坏的各个阶段。在加载初期，试件表现出了良好的整体性能和刚度。随着荷载逐渐增大，荷载-跨中挠度曲线基本呈现出线性关系，预制底板混凝土为弹性阶段。当面荷载达到 3.33kN/m^2 时，试件开始出现裂缝。受拉区的高性能混凝土因开裂而退出工作状态，导致截面上应力重新分布。随着裂缝的进一步发展，试件抗弯刚度减小，荷载-跨中挠度曲线的斜率也随之变小，试件开始出现塑性变形。

c) 楼板应力结果

表 17 试件 A1 和试件 A2 荷载下跨中板底应力测值

| 外加荷载 (kN/m^2) | | 0.00 | 1.11 | 1.75 | 2.22 | 2.86 | 3.33 |
|--------------------------|----|------|------|------|------|------|------|
| A1 板 | D1 | 0.00 | 1.70 | 2.00 | 2.56 | 2.95 | 4.24 |
| | D2 | 0.00 | 1.41 | 1.63 | 2.13 | 2.52 | 4.12 |
| A2 板 | D1 | 0.00 | 1.36 | 1.70 | 2.36 | 2.92 | 4.32 |
| | D2 | 0.00 | 1.45 | 1.85 | 2.29 | 3.10 | 4.14 |

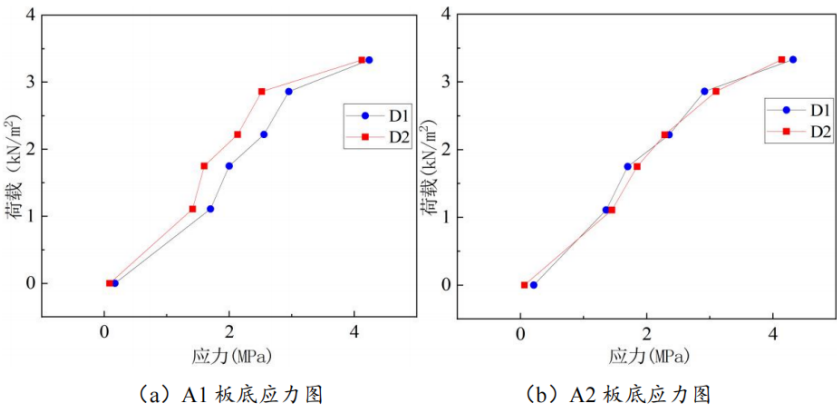


图 31 板底应力图

试验板开裂应力基本稳定在 4.0MPa 左右，与材性试验结果相近，达到开裂应力后，混凝土底板跨中出现裂缝退出工作，混凝土应变片处在裂缝位置，同样退出工作。

d) 钢筋应力结果

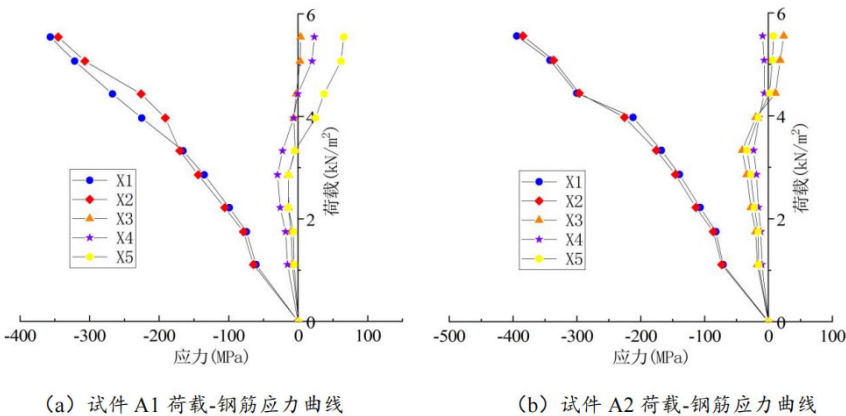


图 32 荷载-钢筋应力曲线图

根据试验数据及图 32 所示，荷载初期上弦钢筋处于受压状态，下弦钢筋也处于受压状态，说明此时中性轴位置位于下弦钢筋形心的下部。随着荷载增加压应力逐渐增大，加载至 4.44kN/m^2 时，此时由于底板开裂，跨中挠度增大，中性轴位置上移至下弦钢筋形心的上部，下弦钢筋处于受拉状态。

4) 使用阶段试验结果分析

a) 开裂荷载分析

试件 A1：重新测量板底裂缝，最大裂缝宽度由 0.14mm 降为 0.10mm ，随着荷载持续增加，裂缝宽度逐渐增大，但并未出现新裂缝，加载至四级铁块时，面荷载达到 12.43kN/m^2 ，增加 1 道裂缝，此时最大裂缝宽度达到 0.20mm ；加载至六级铁块时，面荷载达到 19.05kN/m^2 ，板底增加 2 道裂缝，最大裂缝宽度达到 0.29mm ；加载至八级铁块时，面荷载达到 25.40kN/m^2 ，板底增加 2 道裂缝，最大裂缝宽度达到 0.42mm ，此时板底共产生 12 条裂缝，其中 6 条裂缝贯通。

试件 A2：当面荷载达到 12.65kN/m^2 时，跨中涂抹石灰水处出现 1 道裂缝，裂缝宽度为 0.02mm ；当面荷载达到 16.03kN/m^2 时，板底增加 3 道裂缝，最大裂缝宽度为 0.11mm ；当面荷载达到 19.21kN/m^2 时，板底增加 4 道裂缝，最大裂缝宽度为 0.15mm ；当面荷载达到 22.54kN/m^2 时，板底增加 4 道裂缝，最大裂缝宽度为 0.21mm ；当面荷载达到 25.40kN/m^2 时，无新增裂缝，最大裂缝宽度为 0.44mm ，此时板底共产生 12 道裂缝，其中 5 条裂缝贯通。

试件 A3：加载初期荷载较小，无裂缝产生，当加载至四级铁块时，面荷载达到 10.1kN/m^2 ，板底跨中出现 1 道裂缝，裂缝宽度为 0.09mm ；加载至五级铁块时，面荷载达到 15.87kN/m^2 时，板底增加 8 道裂缝，最大裂缝宽度为 0.13mm ；加载至六级铁块时，面荷载达到 19.05kN/m^2 ，板底增加 3 道裂缝，最大裂缝宽度为 0.20mm ；加载至八级铁块时，面荷载达到 25.40kN/m^2 ，板底增加 1 道裂缝，最大裂缝宽度为 0.30mm ，此时板底共产生 13 道裂缝，其中 6 条裂缝贯通。

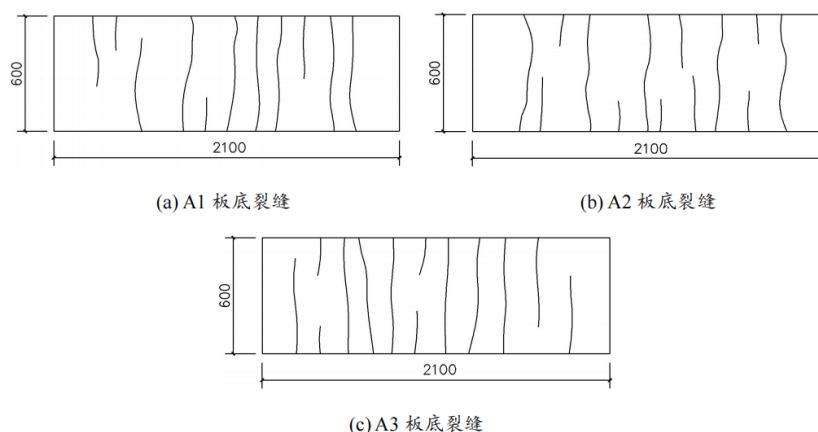


图 33 试件裂缝分布图

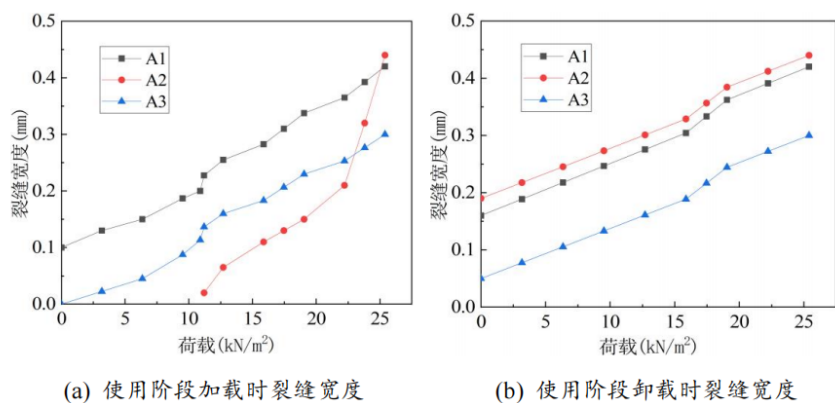


图 34 荷载裂缝宽度曲线

试件裂缝开展情况如图 33 所示，由裂缝的分布可以看出属于较为典型的正截面受弯裂缝类型，由于底板内钢丝的作用，裂缝的间距较小。加载至 25.40kN/m^2 左右时，三块板出现的裂缝数量、位置及贯通裂缝大致相似，带裂缝的试件 A1 和试件 A2 裂缝宽度达到 0.4mm 左右，而施工阶段未开裂的试件 A3 相同荷载下裂缝宽度为 0.3mm ，说明施工阶段免拆底模钢筋桁架组合板出现裂缝会对使用阶段裂缝开展产生影响。

试验过程中每组试件的荷载-裂缝跨度曲线如图 33 所示，从图 34 中可以看出带裂缝试件 A1 与未开裂的试件 A3 随荷载增加裂缝发展趋势相似，带裂缝试件 A2 由于板底涂抹石灰水，加载初期裂缝开展不明显，故无法测量裂缝宽度，在达到开裂荷载时，裂缝出现并开始快速发展，加载至最后裂缝宽度与试件 A1 相差不大。当荷载达到使用阶段荷载标准值 4.0kN/m^2 时，试件 A1 与试件 A3 裂缝宽度均未超过规范限值 0.2mm 。

b) 楼板挠度分析

使用阶段未加载时跨中挠度不为零，而是预开裂加载阶段及施工阶段试验对板产生的挠度的叠加值，对试验数据进行整理，给出了各级荷载作用下免拆底模钢筋桁架组合楼板跨中挠度的变化，图 35 为荷载-位移曲线。

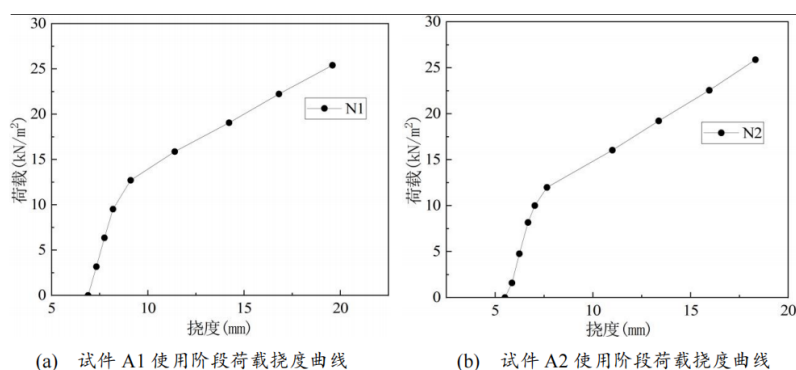


图 35 试件使用阶段荷载-挠度曲线图

根据《钢筋桁架楼承板应用技术规程》和《HJ 钢筋桁架板应用技术规程》规定，当钢筋桁架混凝土板底面外露时，挠度限值宜取为计算跨度的 $1/400$ ，当钢筋桁架混凝土板底面隐蔽时，挠度限值宜取为计算跨度的 $1/250$ 。为安全起见，带裂缝 HJ 钢筋桁架板使用阶段挠度限值取计算跨度的 $1/400$ 。根据图 2.21 可以看出，由于预制底板开裂导致的残余挠度过大，在荷载达到使用阶段载标准值 4.0kN/m^2 时，带裂缝试件 A1 和试件 A2 跨中挠度均超过所设挠度限值 ($10/400=5.25\text{mm}$)。

c) 楼板挠度分析

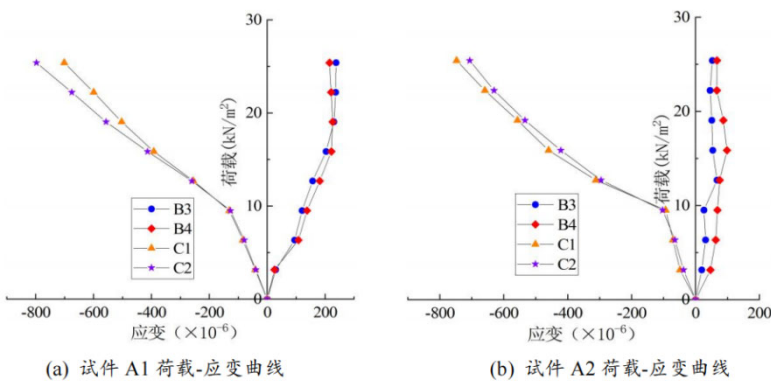


图 36 试件使用阶段荷载-混凝土应变曲线

根据结果可知，试验加载初期，试件 A3 未开裂，试件 A1、试件 A2 未出现新裂缝，此时测得的跨中板底应变与板顶应变数据较为相近。在底板开裂或出现新裂缝后，受拉区部分混凝土退出工作，楼板刚度减小，荷载-应变曲线发生变化。其中，三块试验板板顶受压区混凝土应变均持续增大且并未发生压碎；试件 A1 受拉区混凝土应变在出现新裂缝后基本不再发生变化，试件 A2 受拉区混凝土所测拉应变自始处于较小值并变化不大，这是因为应变片所布位置裂缝密集，传力不再均匀，部分混凝土退出工作，因此应变较小，试件 A3 板底初始未开裂，在底板开裂后，开裂位置正处于钢筋应变片布置处，应变片退出工作。

d) 楼板挠度分析

表 18 给出了使用阶段各级荷载作用下带裂缝及未开裂的免拆底模钢筋桁架组合楼板跨中钢筋应变的变化情况，试验数据受拉为正，受压为负，图 36 为荷载-钢筋应变曲线。

表 18 试件 A1 每级荷载下钢筋应变测值

| 外加载荷 (kN/m ²) | 0.00 | 3.17 | 6.35 | 9.52 | 12.70 | 15.87 | 19.05 | 22.22 | 25.40 |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| X1 | -595.10 | -615.55 | -636.10 | -656.65 | -677.25 | -746.20 | -815.15 | -884.10 | -953.10 |
| X2 | -580.25 | -597.65 | -615.30 | -632.95 | -650.65 | -750.95 | -851.25 | -951.55 | -1051.80 |
| X3 | 257.68 | 276.46 | 293.70 | 313.83 | 480.56 | 802.86 | 1077.71 | 1288.90 | 1776.15 |
| X4 | 250.57 | 271.11 | 290.48 | 313.17 | 385.12 | 793.09 | 1040.44 | 1405.15 | 1840.20 |
| X4 | 331.18 | 358.64 | 388.00 | 426.91 | 706.83 | 1128.13 | 1501.76 | 1721.23 | 2037.40 |

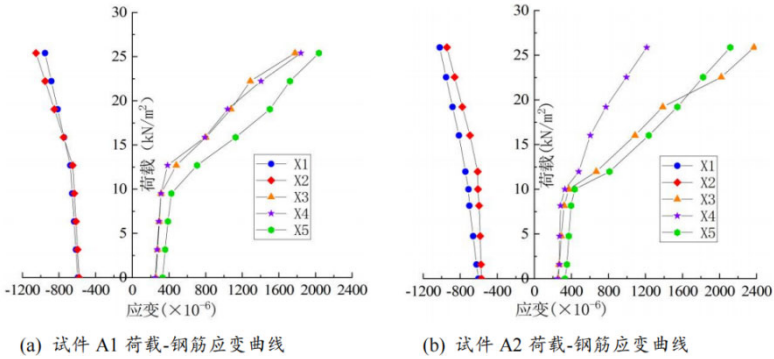


图 37 试验板使用阶段荷载-钢筋应变曲线图

根据整理数据及图 37 中荷载-钢筋应变曲线可以看出,荷载初期上弦钢筋应变随荷载增加较为缓慢,在达到开裂荷载后,增加趋势加快;下弦钢筋在荷载初期由于受拉区混凝土及钢丝作用,下弦钢筋变形较小,达到开裂荷载后应变快速增大,在加载至 25.40kN/m^2 时,三组试验板下弦钢筋接近屈服。且下弦钢筋荷载应变曲线与荷载挠度曲线趋势接近,带裂缝板曲线拐点同样略大于未开裂板。

分析原因是由于浇筑混凝土形成免拆底模钢筋桁架组合楼板后,楼板中性轴位置发生变化,上弦钢筋形心距中性轴位置近,导致整体应变变化不大,而下弦钢筋在楼板开裂或产生新裂缝后,受拉区混凝土逐渐失去作用,荷载由下弦钢筋承担,且下弦钢筋形心距中性轴位置较远,因此应变增长快。

5) 结论

试验设计的免拆底模钢筋桁架组合楼板,拟定合理试验方案,对带裂缝免拆底模钢筋桁架组合楼板试件展开施工及使用全过程试验研究。模拟试验板在底板开裂后施工阶段及使用阶段的受力状态,对比免拆底模钢筋桁架组合楼板在带裂缝及未开裂状态下的受力性能并进行系统地分析和研究,主要得到以下结论:

(1) 免拆底模钢筋桁架组合板在预开裂加载试验阶段,在加载至 3.33kN/m^2 时,底板开裂,加载至 5.55kN/m^2 时,底板裂缝宽度达到最大裂缝宽度限值的 0.2mm 。卸载完成后,裂缝产生的残余应力使得板变形及应力无法恢复到加载前的状态,两块板残余变形分别为 3.6mm 与 2.9mm ,裂缝宽度收缩至 0.05mm 左右。

(2) 施工阶段已开裂的两块免拆底模钢筋桁架组合板在浇筑完成后的挠度增加值略高于板底未开裂的 HJ 钢筋桁架板,但叠加预开裂加载阶段残余变形后,带裂缝板总挠度远大于未开裂板挠度,说明底板开裂对免拆底模钢筋桁架组合板刚度产生一定影响,浇筑期间板底裂缝处并无渗水现象,裂缝并未贯通。浇筑完成后,两块带裂缝板裂缝宽度由 0.05mm 增加到 0.14mm 左右。

(3) 使用阶段试验时,初始未加载时,可能由于后浇混凝土养护阶段收缩,导致板底初始裂缝回缩到 0.1mm 左右。随着荷载施加,带裂缝免拆底模钢筋桁架组合楼板挠度增加与板底未开裂的板相差不大,说明施工阶段带裂缝的免拆底模钢筋桁架组合楼板,在使用阶段荷载对楼板刚度的影响不大。而叠加残余变形的带裂缝板挠度值大于未开裂板。在达到荷载标准值时,超过免拆底模钢筋桁架组合楼板使用阶段挠度限值 ($10/400=5.25\text{mm}$),但裂缝宽度并未超出规范限值 0.2mm ,因此在使用带裂缝 HJ 钢筋桁架预制板时需采取措施满足规范要求。

一、标准中涉及专利情况

本标准中未涉及到专利及其它知识产权问题。

二、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果

本标准完成后，为规范使用免拆底模钢筋桁架组合板提供依据和参考。

三、国外采标及对比情况

目前尚无国际标准。

与国际、国内同类研究相对比，编制组认为该标准各项技术指标均达到国内相关研究技术的先进水平。

四、与现行法律、法规、规章及相关标准的协调性

《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》和相应的标准技术内容都是协调一致的，不存在冲突。

本标准制定过程中已充分查阅相关法律、法规及相关标准，完全符合现行相关法律、法规、强制标准的规定。

五、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大意见分歧。

六、标准性质的建议说明

建议本标准为推荐性行业标准。

七、贯彻标准的要求和措施建议

本标准贯彻标准实施，致力于建立一套简洁、有效、准确的《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》标准，实现免拆底模钢筋桁架组合板的规范化；并紧密地同产品用户沟通交流，保证本标准的适用性、实用性。

在标准颁布前，负责起草单位会制定标准宣贯计划并组织落实。

建议本标准从标准颁布之日起实施。

八、废止现行相关标准的建议

无。

九、其它应予说明的事项

。

《免拆底模钢筋桁架组合板应用技术规范》工作组

2025 年 6 月