

# 密拼钢筋混凝土叠合板冲切性能试验研究及有限元分析

李雨<sup>1</sup>, 林百川<sup>1,2\*</sup>

(1. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 通过对密拼钢筋混凝土叠合板进行静力加载试验,研究了其在集中载荷下的受力性能。试验结果表明:拼缝的存在会降低板的刚度,密拼叠合板易在拼缝处发生破坏;在拼缝处设置桁架钢筋可以加强后浇层与现浇层的黏结作用,提高叠合板的刚度和承载能力;通过在桁架叠合板中配置人字形钢筋,可以有效降低混凝土的损伤程度,并且显著提高叠合板的刚度和极限承载力。随后通过有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 建立的精细化模型对试验进行了数值模拟。数值模拟获取的跨中荷载-挠度曲线及破坏模式与静力试验结果基本吻合,验证了有限元模拟的可靠性。基于有限元进行拓展参数分析,发现钢筋桁架平行于拼缝放置时,叠合板的跨中挠度更小,且靠近跨中的人字形钢筋对于提高叠合板整体刚度具有显著作用。

**关键词:** 密拼钢筋混凝土叠合板; 桁架钢筋; 静力加载试验; 集中荷载; LS-DYNA

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0043-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240329001

## Experimental Investigation and Finite Element Analysis on Punching Shear Property of Reinforced Concrete Composite Slabs without Gap

LI Yu<sup>1</sup>, LIN Baichuan<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

\*Corresponding author: linbaichuan@glut.edu.cn

**Abstract:** The mechanical performance of reinforced concrete (RC) composite slabs without gap subjected to concentrated loads was studied through the static loading test. The test results show that the stiffness of the slab is reduced due to the existence of the joint, and the composite slabs without gap are easy to fail at the joint. The truss reinforcement can strengthen the bonding effect between the post-cast layer and the cast-in-situ layer, and improve the stiffness and bearing capacity of the composite slab. By configuring the chevron-shaped steel bar in the truss composite slab, the concrete damage can be effectively reduced, and the stiffness and ultimate bearing capacity of the composite slab can be significantly improved. Subsequently, the experiments were numerically simulated by the finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA. The mid-span load-deflection curves and failure modes obtained from the numerical simulation were compared with the static test results, which were basically in good agreement, verifying the reliability of the finite element simulation. Based on the extended parametric analysis, it is found that when the truss

收稿日期: 2024-03-29

基金项目: 广西研究生教育计划创新项目(YCSW2022336)

作者简介:

李雨(1996—),女,硕士,主要从事结构抗冲击性能方面的研究。E-mail: liyu001@glut.edu.cn。

通信作者:

林百川(1992—),男,博士,讲师,主要从事结构抗冲击性能方面的研究。E-mail: linbaichuan@glut.edu.cn。

reinforcement is arranged parallel to the joint, the RC composite slab gains smaller mid-span deflection, and the chevron-shaped steel bar close to the middle of the span has a significant effect on improving the overall stiffness of the composite slab.

**Keywords:** reinforced concrete composite slab without gap; truss reinforcement; static loading test; concentrated load; LS-DYNA

作为装配式建筑中一种重要的预制构件类型,叠合楼板是在钢筋混凝土预制底板的上层后浇混凝土而形成的。由于其生产效率高、质量可靠、污染较低等优点,目前在装配式建筑当中有着相当广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。钢筋混凝土叠合板底板常采用多块预制板进行拼缝连接,而拼缝处预制底板与现浇层之间力的有效传递对于保持共同工作的稳定性至关重要。目前常用的拼缝连接形式主要有后浇带式 and 拼缝密接两种,后浇带式拼缝凭借其承载能力等同现浇楼板和可靠性能高的优点使用较多,但其存在施工复杂、生产效率低的不足<sup>[4]</sup>。相比来说,密拼式拼缝连接因其构造简单、施工简便、拼装效率高等优点被越来越多地使用。因此,研究密拼叠合板的受力性能具有重要的工程意义。

国内外许多学者虽已针对不同叠合面处理方式对各类新型叠合板受力性能的影响开展了大量研究<sup>[5-7]</sup>,但有关传统钢筋混凝土叠合板的研究相对较少。近年来,我国成立了由多位相关领域专家组成的叠合结构专题科研组,对叠合结构开展了系统的研究。崔士起等<sup>[8]</sup>通过静力加载试验研究了密拼拼缝叠合板的协同工作情况、破坏模式、拼缝的数量和位置等因素对叠合板抗弯刚度的影响,发现相同拼缝方式的试件抗弯刚度与后浇层厚度呈正相关。吴方伯等<sup>[9]</sup>对不同拼缝构造措施的叠合板进行了试验研究,结果表明,叠合试件会在拼缝处发生劈裂剥离破坏,增加拼缝处的附加纵筋可有效抑制拼缝的开裂,控制其破坏程度。余泳涛等<sup>[10]</sup>对10块单缝密拼叠合板进行试验研究,试验结果表明,单缝密拼叠合板承载力及刚度比整浇板均大幅下降,设置桁架钢筋后可提高密拼叠合板的承载力和刚度。侯和涛等<sup>[11]</sup>对附加钢筋的锚固长度进行试验分析,发现附加钢筋的锚固长度是影响拼缝处承载力的主要因素。章雪峰等<sup>[12]</sup>通过足尺加载试验研究了四边不出筋的密拼钢筋桁架叠合双向板的受力性能,发现在拼缝处加密钢筋桁架、增强附加钢筋等措施可以有效限制拼缝处裂缝的开展,有助于弯矩的传递。

综上所述,虽然目前对密拼叠合板的受力性能已经有诸多研究,众多学者的研究结果也验证了不同截面形式以及不同拼缝构造形式的叠合板工程应用的可行性。但多为节点试验,边界条件、荷载形式等与实际工程均有较大差异,且大多缺乏叠合板与现浇板抗弯性能的对比如试验,故还需对无外伸纵筋的密拼叠合板在实际工程中的受力性能进行进一步的试验验证和深入研究。因此,

本文对5块同一尺寸的钢筋混凝土板进行了静力荷载试验和数值模拟分析,通过对比密拼叠合板以及拼缝加强的密拼叠合板与现浇板的破坏形态、刚度和承载力,研究密拼式叠合板的力学性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本试验根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[13]</sup>、《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)<sup>[14]</sup>、《装配式混凝土建筑技术标准》(GB/T 51231—2016)<sup>[15]</sup>及实际工程经验,设计制作了4块钢筋混凝土叠合板和1块现浇板试件,尺寸均为1 650 mm×1 650 mm×130 mm的四边固支双向板。除连接区域外,4个叠合板试件的尺寸和板内配筋均相同,主要参数见表1和图1。钢筋间距为200 mm,试件配筋率为0.23%,板内上下纵筋及横向分布筋均采用直径为8 mm的HRB400热轧带肋钢筋,桁架钢筋腹杆采用的是6 mm的HPB300钢筋,钢筋主要的力学性能见表2。对于叠合试件按现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[13]</sup>进行设计,符合下列规定:叠合板的预制板厚度不宜小于60 mm,后浇混凝土叠合层厚度不应小于60 mm,预制底板的厚度 $h_1$ 取值取60 mm,后(现)浇混凝土层的厚度 $h_2$ 取值取70 mm,符合现行国家标准的规定。

试件的连接构造方式分别有现浇板(试件RCF)见图1a)、密接拼缝叠合板(试件CRF)见图1b)、带有桁架钢筋的密拼叠合板(试件CTF)见图1c)。桁架钢筋依据规范《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)<sup>[14]</sup>中的布置要求,试验中桁架钢筋的上下钢筋采用直径为8 mm的HRB400钢筋,中间支撑钢筋采用直径为6 mm的HPB300钢筋,桁架钢筋间距为400 mm,桁架钢筋尺寸见图2。拼缝进行人字形钢筋加强的密拼叠合板(试件RRF)见图1d),板内拼缝区域设置14个凹槽,凹槽深30 mm、长宽均为150 mm,由此组成7个长凹槽,其内现场放置人字形桁架式搭接钢筋,人字形钢筋设置见图3,均满足规范要求。既带有桁架钢筋且拼缝通过人字形钢筋加强的密拼叠合板(试件RTF)见图1e)。

### 1.2 加载方案

试验加载装置见图4,使用半球形锤头,因为半球形锤头的设计可以确保在试验过程中施加的力均匀分布在叠合板的表面上,这有助于减小局部应力集中,使试

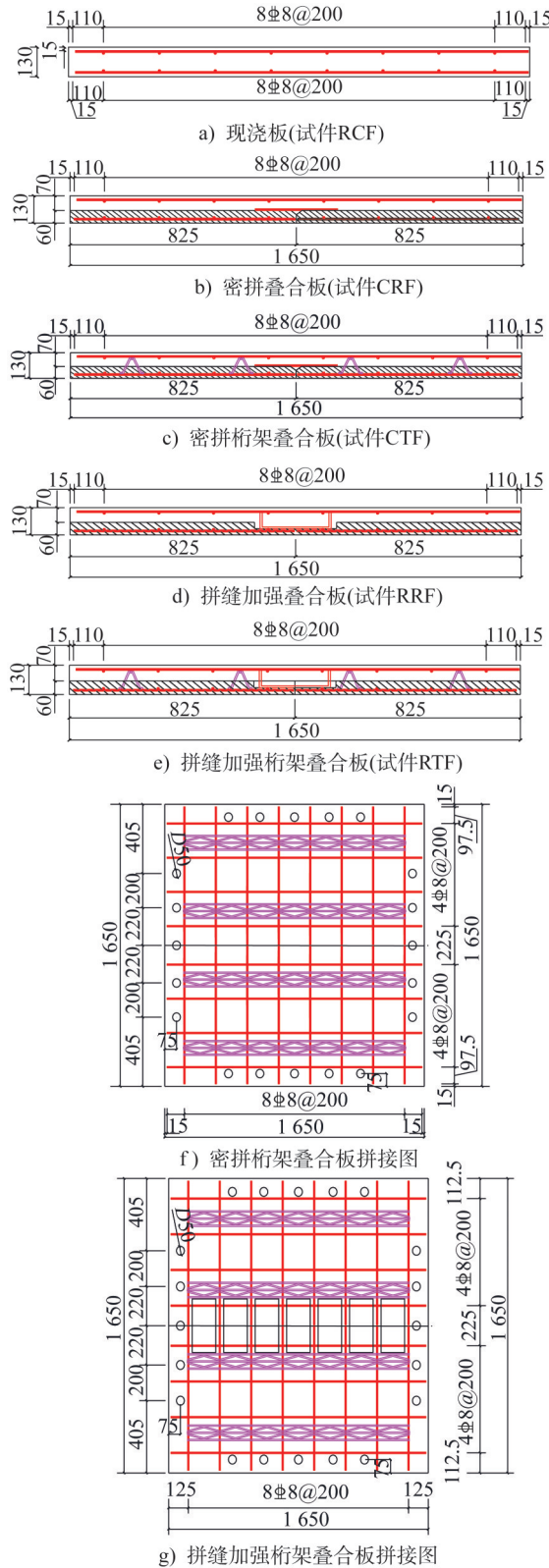


图1 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and reinforcement of specimens (unit: mm)

验结果更加准确和可靠。采用2 000 kN的液压千斤顶进行加载。试验使用单点加载的方案进行加载,通过单点集中加载,可以更精确地控制施加在叠合板上的荷载

表1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件编号	$b/mm$	$l/mm$	$h_1/mm$	$h_2/mm$	$f'_{cu1}/MPa$	$f'_{cu2}/MPa$
RCF	1 650	1 650	—	130	40.2	—
CRF	1 650	1 650	60	70	37.6	36.9
CTF	1 650	1 650	60	70	36.1	37.8
RRF	1 650	1 650	60	70	37.3	38.2
RTF	1 650	1 650	60	70	39.3	37.4

注: $l$ 和 $b$ 分别是预制混凝土板的长度和宽度; $h_1$ 和 $h_2$ 分别为预制底板和后(现)浇混凝土层的厚度; $f'_{cu1}$ 和 $f'_{cu2}$ 分别为预制混凝土板和后(现)浇混凝土层在同条件养护下的立方体混凝土试块抗压强度实测值。

表2 钢筋的主要力学性能指标实测值

Table 2 The measured values of main mechanical performance indicators of steel bars

钢筋种类	直径/ mm	弹性模 量/GPa	断裂强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	极限伸长 率/%
HRB400	8	209	535	627	12.0
HPB300	6	205	433	540	13.2

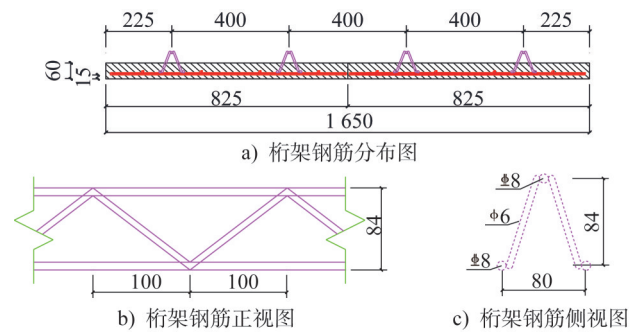


图2 桁架钢筋尺寸图(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of truss reinforcement (unit: mm)

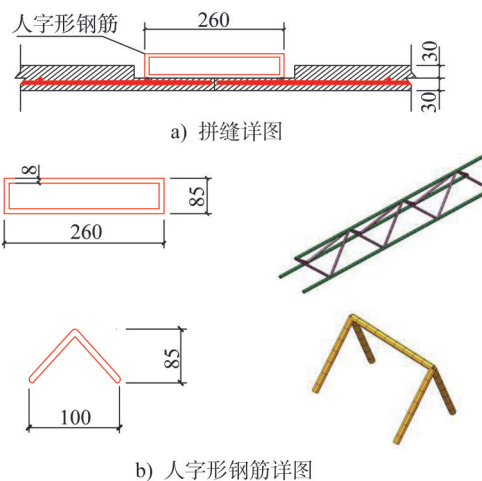


图3 人字形钢筋尺寸图(单位:mm)

Fig. 3 Dimensions diagram of human-shaped steel bars (unit: mm)

大小和位置,从而得到更准确的试验数据。支座尺寸为1 650 mm×1 650 mm×500 mm的钢结构,上部使用20个150 mm×150 mm×20 mm的铁片,参考文献[16]中的设计,通过20个M30的高强螺栓将板固定于底部支座上,完成固支边界条件。

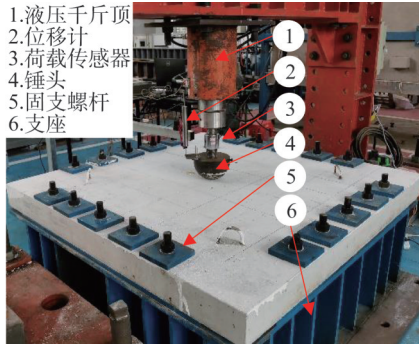


图4 加载装置

Fig. 4 Loading setup

试验按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[17]</sup>的有关规定进行加载,试验正式加载前,对板预施加10%的荷载,维持荷载十分钟,这可以使试验试件与支座之间的空隙压实,并且可以检查试验仪器是否正常。预压之后卸载,重新开始加载,加载前期使用力控制,后期使用位移控制,前期每5 kN一级进行荷载的加载,达到预估承载力的80%后,以每0.5 mm一级进行位移加载,直至试件破坏,当受力出现突降20%以上,认为此时板已经破坏,停止加载,试验结束。

### 1.3 测量内容及方法

将激光位移计安装于型铝上,型铝底部使用12个高强度磁铁吸附于支座上。试验对板底5个测点进行位移测量,每个位移计间距为225 mm,为板净跨的三分点,从而获取板的挠度变化。测点布置如图5所示。

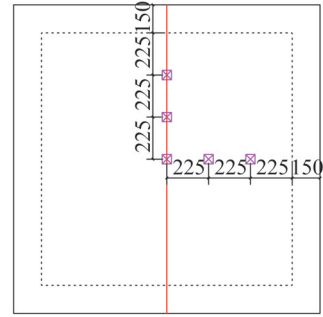
## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

不同连接方式的试件,其破坏过程以及破坏形态存在较大差异,板加载试验完成后,各试件的板底裂缝形态见图6。从图中可见,冲切试验虽仅造成局部破坏,但通过对该区域破坏模式及强度特征的分析,仍可比较不同连接方式试件的承载能力与性能。

随着荷载的不断增大,裂缝主要集中在板底跨中的矩形区域内,随后初始裂缝不断向外扩展、延伸,逐渐形成由矩形区域向板四角发展的斜裂缝,与此同时板侧面出现斜裂缝。随着荷载的继续增加,裂缝数量基本不再增加,裂缝宽度增加,直至试件破坏。

试件RCF表现为受弯试件受力形态,随着荷载的不



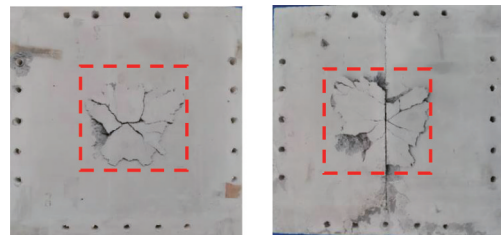
a) 板底位移测点



b) 位移计布置实拍

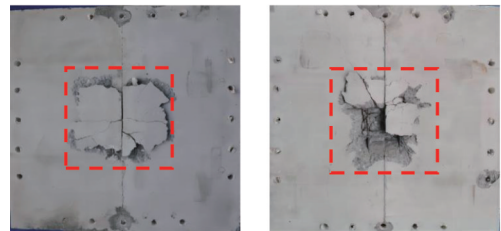
图5 板底位移计布置图

Fig. 5 Arrangement of bottom displacement meters



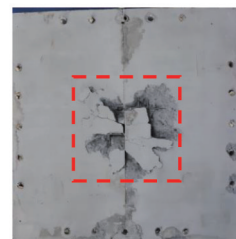
a) 试件RCF

b) 试件CRF



c) 试件CTF

d) 试件RRF



e) 试件RTF

图6 试件破坏时板底裂缝形态

Fig. 6 Crack modes at the plate bottom during specimen failure

断增大,主裂缝不断开展和延伸,且伴随细小裂缝的出现,破坏时,主要裂缝所在截面位于跨中附近,板面混凝土被压碎;随着荷载的不断增大,试件CRF的裂缝在拼

缝处集中开展并向两边延伸,裂缝分布与整浇板较为接近,破坏时,主要裂缝位于拼缝处,板底的斜裂缝与拼缝夹角约为 $45^\circ$ ,并出现裂缝分叉;随着荷载的不断增大,试件CTF的裂缝虽然也从拼缝处开始发展,但由于桁架钢筋的约束作用,其裂缝的发展较为缓慢,破坏时,拼缝处裂缝的宽度较宽而其他裂缝的宽度较窄且数量较少;随着荷载的增大,试件RRF板底陆续出现多条分散性细小裂缝,说明人字形钢筋在混凝土板中起到有效的锚固作用,破坏时,拼缝附近混凝土大范围脱落,板底的斜裂缝沿板边方向向外延伸;随着荷载的增大,试件RTF板底新增多条细微斜裂缝,由于桁架钢筋与人字形钢筋的双重约束作用,破坏时,拼缝附近混凝土部分脱落,板底产生较多斜裂缝,裂缝较为明显且与拼缝夹角大于 $45^\circ$ 。

通过对比试件CTF与CRF以及试件RTF与RRF的试验现象,可以看出,经过桁架钢筋约束的板底裂缝较细且密集,裂缝数量少且波动较小,走势更加平缓,说明桁架钢筋可以加强后浇层与现浇层的黏结作用,使其整体协同作用效果大于无桁架钢筋的混凝土板;而采用人字形钢筋加固的试件RRF和RTF,板底拼缝位置开裂时间相对较晚,裂缝宽度相对较窄,说明人字形钢筋可以有效地抑制拼缝处裂缝的发展,增强叠合板的连接强度。

## 2.2 荷载-挠度曲线

叠合板与现浇板的跨中荷载-挠度曲线见图7。由图7可知,跨中荷载-挠度曲线呈三折线的形式,板在荷载作用下经历了以下3个阶段,第一阶段挠度随荷载的增加呈线性关系,此时钢筋混凝土板处于弹性阶段;第二阶段曲线斜率降低,板底开始出现裂缝,此时钢筋混凝土板处于弹塑性阶段;第三阶段挠度发展很快,曲线突然下降,钢筋屈服,最终板发生破坏。

对比分析5种拼接构造试件的荷载与板底跨中挠度的关系,可以看出:(1)试件CRF,荷载-挠度曲线在弹性阶段的走势与曲线的数值同试件RCF较为接近,说明密拼叠合板有着等同于现浇板的受力性能,能够较好的传递内力,但后期下将较快,这是因为由于拼缝的存在,板的极限承载能力会有所下降。(2)试件CTF,由于配置了桁架钢筋,前期曲线斜率最大,相对于其他试件来说,表现出了较大的刚度和较高的承载力。(3)试件RRF与RTF,底板拼缝区域设置了凹槽,有一定程度的刚度削弱,前期曲线曲率小于整浇板,但由于配置了人字形钢筋,刚度衰减缓慢,承载力均超过现浇板,且叠合板的延性有显著提升。

## 2.3 板底挠度曲线

利用板底位移传感器采集的数据,将数据点用直线

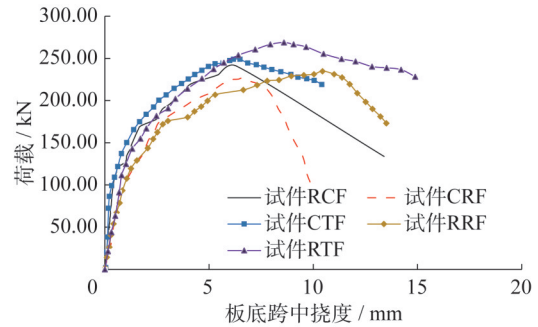


图7 试件跨中荷载-挠度曲线

Fig. 7 Mid-span load-deflection curves of specimens

连接,绘制出板的挠度曲线,除试件RTF为板的中点每移动2 mm时,绘制出一条新的挠度曲线外,其余试件均间隔1.5 mm。叠合板与现浇板的板底挠度曲线见图8。

由图8可知,各试件板在不同加载阶段下的变形曲线均较为饱满。试件RCF在靠近加载区域处,随着荷载的增大挠度变化程度较为明显。此时加载区域与周边区域产生相对竖向位移,说明RCF试件发生了冲切破坏。同理,除RTF试件在板底跨中位移为8 mm处发生了冲切破坏,其余试件均在板底跨中位移为6 mm时发生了冲切破坏。叠合板试件在发生破坏前,挠度分布较为均匀,曲线形状类似等腰三角形,说明在板开裂前,变形处于线性状态。发生破坏后,各测点的连线不再为等腰三角形,但曲线关于中轴线对称,可见叠合板表现出了良好的受力性能。

## 3 有限元模型建立

### 3.1 单元选取

采用有限元软件ANSYS/LS-DYNA进行有限元模拟。试验中试件由混凝土、钢筋和钢板组成,其中锤头、配重、混凝土、支座均采用Solid实体单元进行模拟。由于钢筋在密拼钢筋混凝土叠合板中通常承受着较大的弯曲应力和变形,而Beam161梁单元在考虑弯曲效应时能够提供比较准确的计算结果,能较好地模拟钢筋承受弯曲应力时的变形和破坏过程,因此钢筋采用Beam161梁单元进行模拟。

### 3.2 材料模型选取

有限元模型中的混凝土材料本构模型采用ANSYS/LS-DYNA软件中的KCC模型。该本构模型常用于模拟混凝土类材料在静动态条件下的力学性能<sup>[18]</sup>,被研究者们广泛使用<sup>[19-20]</sup>,KCC模型使用三个独立的破坏面来控制混凝土类材料的复杂力学行为。三个破坏面分别是:初始屈服破坏面、最大强度破坏面和残余强度破坏面。其在子午面上的强度曲面可分别用如下公式表示:

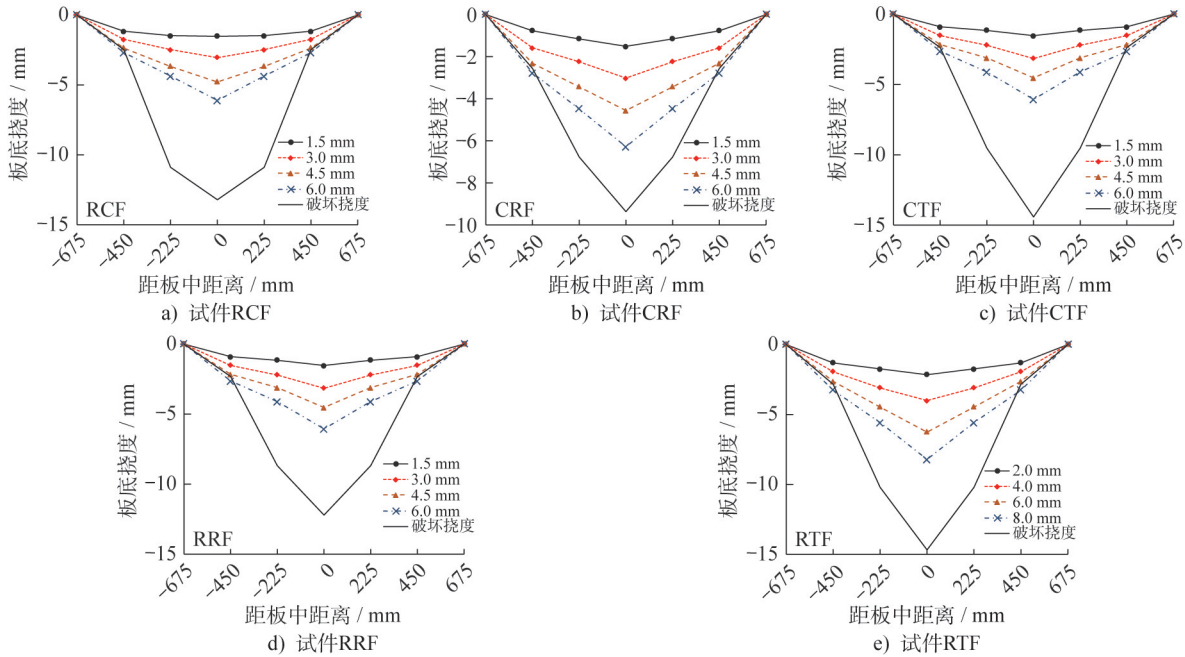


图8 试件板底挠度曲线

Fig. 8 Plate bottom deflection curves of specimens

$$\Delta\sigma_y = a_{oy} + \frac{P}{a_{1y} + a_{2y}P} \quad (\text{初始屈服破坏面}) \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_m = a_o + \frac{P}{a_1 + a_2P} \quad (\text{最大强度破坏面}) \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{P}{a_{1f} + a_{2f}P} \quad (\text{残余强度破坏面}) \quad (3)$$

式中:  $a_i, a_{iy}, a_{if}$  可通过三轴压缩试验确定;  $\Delta\sigma = \sqrt{3J_2}$  为

应力偏量,  $J_2 = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{6}$  为

应力偏量第二不变量;  $P = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$  为静水压力 ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  为第一、第二、第三主应力)。

通过国内外学者的研究发现<sup>[21-22]</sup>, 对于抗压强度小于 45.4 MPa 的普通混凝土来说, 只需输入对应的单轴抗压强度值, 系统便可以自动生成初始屈服破坏面、最大强度破坏面、残余强度破坏面等相关参数。具体公式如下:

$$a_o = 0.295 f_c \quad (4)$$

$$a_1 = 0.446 3 \quad (5)$$

$$a_2 = 0.080 8 / f_c \quad (6)$$

$$a_{oy} = 0.223 2 f_c \quad (7)$$

$$a_{1y} = 0.625 \quad (8)$$

$$a_{2y} = 0.257 5 / f_c \quad (9)$$

$$a_{1f} = 0.441 7 \quad (10)$$

$$a_{2f} = 0.118 3 / f_c \quad (11)$$

钢筋的材料模型选用关键字 \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 定义, 是一种适用于各向同性和随动强化

的材料模型, 且模型考虑了材料的弹塑性性质, 并且能够对材料的强化效应 (随动强化和各向同性强化) 和应变率变化效应加以描述, 该材料模型采用 Cowper-Symonds 模型<sup>[23]</sup> 来考虑应变率效应对钢筋材料力学性能的影响, 即:

$$\sigma_y = \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{C}\right) \times (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (12)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$  为应变率;  $C$  为应变率参数;  $\sigma_0$  为初始应力;  $\beta$  为硬化参数;  $E_p$  为塑性硬化模量;  $\epsilon_p^{\text{eff}}$  为等效塑性应变。

由于静载试验的过程中加载速度较慢, 短时间内应变率非常小, 因此应变率通常设置为 0。

螺杆、螺帽、上下垫板采用关键字 \*MAT\_ELASTIC 定义, 锤头、支座模型均采用关键字 \*MAT\_RIGID 定义。

### 3.3 边界条件与有限元模型

由于试验模型结构和荷载均对称, 本次模拟取实际试件尺寸的 1/4 进行分析, 如图 9 所示 (由于试件 RTF 同时配置了桁架钢筋和人字形钢筋, 因此以此试件为例)。边界条件与试验的相同, 并对锤头进行约束, 采用位移控制加载的方式施加于锤头顶部使其保持竖直方向的自由度。基于网格尺寸敏感性分析, 选择尺寸为 10 mm 的网格进行模拟计算。由于本试验所有叠合板的板底两方向受力筋较为密集, 考虑钢筋混凝土黏结滑移会产生较多的共节点约束, 且不利于网格的划分, 故叠合板的有限元分析不考虑黏结滑移的作用。并且假设钢筋和混凝土之间完美黏结, 采用关键字 \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID\_ID 进行耦合, 以便协同工作。

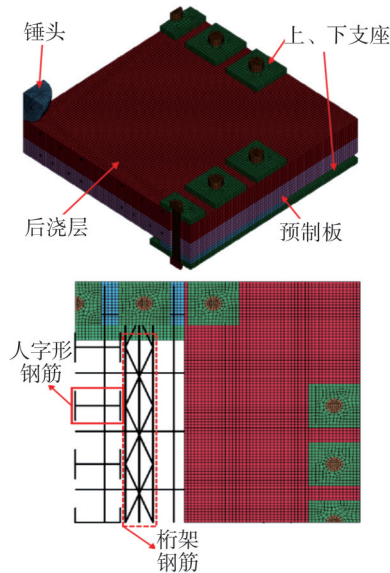


图9 精细化有限元模型

Fig. 9 Refined finite element model

### 3.4 有限元模型验证与结果分析

叠合板的跨中荷载-挠度曲线与混凝土损伤云图可集中表现叠合板在竖向荷载作用下的变形发展规律,图10给出了叠合板跨中荷载-挠度曲线的模拟结果与试验结果的对比。为了便于分析及比较,将同一类型(同时配

置桁架钢筋与同时配置人字形钢筋)叠合板的曲线绘于同一图中。表3列出了各试件试验与有限元计算的开裂荷载、极限承载力。

对比有限元计算值和试验值可以看出,本次模拟的叠合板挠度发展整体规律与试验结果吻合情况较好。该有限元模型可以较为准确地模拟叠合板在均布荷载作用下的变形趋势,证明叠合板模型较为可靠。加载前期,跨中挠度随荷载的增加呈线性发展,试件处于弹性受力状态;随后板底开始出现裂缝,荷载-挠度曲线曲率减小并出现拐点,叠合板进入弹塑性受力状态。弹性阶段时有限元分析求解的挠度曲线与试验测得的挠度曲线较为吻合,误差均在10%以内,此时有限元分析的误差较小;塑性阶段时,有限元计算的挠度值比试验值偏大。分析其原因为:由于叠合板的特殊性,所选取的混凝土本构关系与实际有所差别,无法精确地描述每个时刻对应的应力-应变关系。

结合表3与图6中试件破坏时板底裂缝形态可知,试件CTF与试件RTF的开裂荷载值,分别比试件CRF与试件RRF的开裂荷载值要高出21%与41%,且均大于现浇板的开裂荷载值,可以看出拼缝处设置的桁架钢筋对拼缝有较强的约束作用;试件CTF与试件RTF的峰

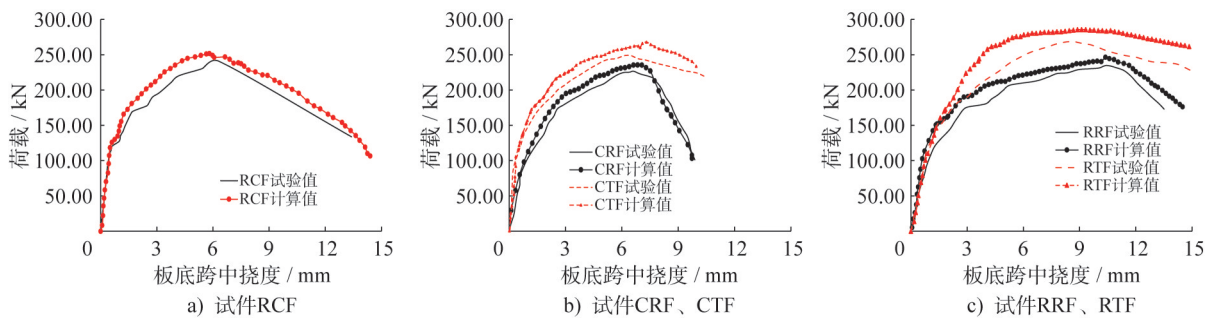


图10 试件有限元与试验跨中荷载-挠度曲线对比

Fig. 10 Comparison of load-deflection curves between FEA and test of specimens

表3 各试件跨中极限荷载和开裂荷载的试验值及有限元值比较

Table 3 Comparison of mid-span ultimate load and cracking load between FEA and test of specimens

试件编号	开裂荷载/kN			峰值荷载/kN		
	实测值/kN	有限元值/kN	有限元值 实测值	实测值/kN	有限元值/kN	有限元值 实测值
RCF	135.30	149.28	1.10	239.94	253.68	1.06
CRF	113.39	124.81	1.10	226.73	235.61	1.04
CTF	137.28	140.26	1.02	248.99	267.86	1.08
RRF	129.11	154.84	1.19	234.81	246.44	1.05
RTF	181.87	200.53	1.10	268.78	285.66	1.06

注:有限元分析得到的极限荷载按与试验破坏标志一致时的荷载取值;开裂荷载通过观察模拟数据并结合模拟的跨中荷载-挠度曲线转折点取值。

值荷载值也分别比试件CRF与试件RRF的峰值荷载值高出10%与14%，说明拼缝处设置桁架钢筋可以减小拼缝处混凝土的应力集中，降低混凝土的损伤程度，提高叠合板的承载能力；试件RRF与试件RTF的开裂荷载值，分别比试件CRF与试件CTF的开裂荷载值要高出14%与32%，表明采用人字形钢筋可以对混凝土产生较强的锚固作用；试件RRF与试件RTF的峰值荷载值也分别比试件CRF与试件CTF的峰值荷载值要高出4%与8%，说明人字形钢筋的配置，可以降低叠合面混凝土的损伤程度，极限承载力更高。而对于没有配置桁架钢筋的CRF与RRF来说，其开裂荷载值与峰值荷载值均小于整浇板RCF，说明拼缝的存在会降低板的承载力和刚度。

通过混凝土损伤云图(图11)可以看出，有限元模型可以很好地预测试验的破坏模式。不论哪种类型的叠合板在整体上都表现出双向板的应力分布特性，裂缝均出现在板底拼缝附近，且拼缝的存在对于叠合板的内力传递影响较小。在拼缝处设置的桁架钢筋，可以使新旧混凝土之间协同工作，减少拼缝处的应力集中。对于配置了人字形钢筋的叠合板来说，人字形钢筋承受了拉力，同时对现浇的混凝土产生了有效的约束作用，所以其开裂后的刚度有了较明显的提升。

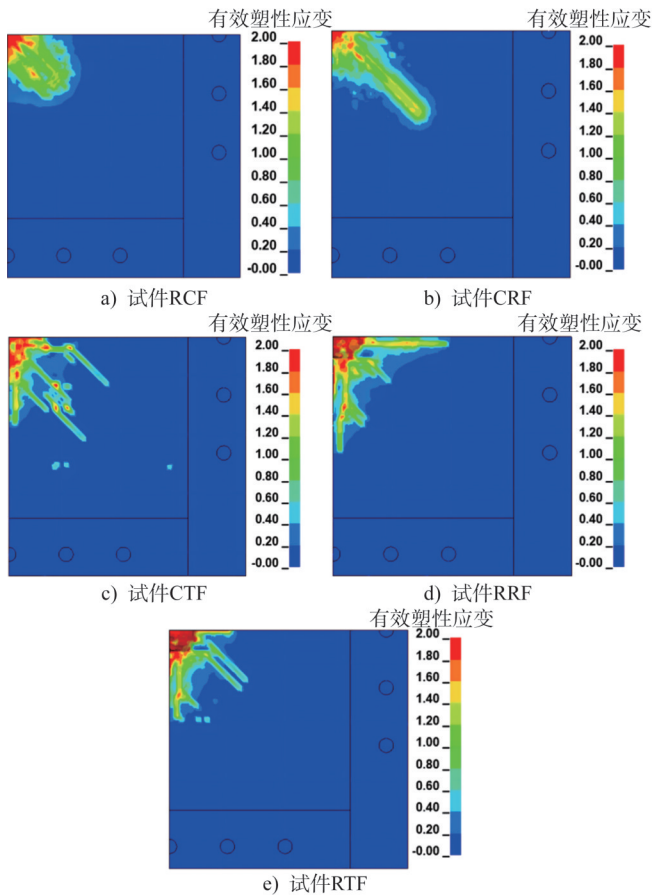


图 11 有限元模型破坏模式

Fig. 11 Finite element model failure modes

## 4 拓展参数分析

### 4.1 桁架钢筋布置方向对跨中挠度的影响

由于试验试件条件有限，并不能对所有可能的参数进行试验研究。本节通过已验证的有限元模型开展拓展参数分析，研究桁架钢筋布置方向对密拼钢筋混凝土叠合板跨中挠度的影响。试验中所采用的方式是平行于拼缝布置桁架钢筋，在此采用垂直于拼缝的方式布置桁架钢筋。

图12a)为试件CTF改变桁架钢筋布置方向后的有限元模型CTF-T。图12c)为改变桁架钢筋布置方向后的跨中荷载-挠度曲线，从图中可以看出，试件CTF-T的峰值荷载为235.17 kN，相较于CTF下降了5%，说明桁架钢筋垂直于拼缝相比平行于拼缝放置，叠合板的跨中挠度更大，刚度更小。从图12b)试件CTF-T的破坏模式可以看出，其在拼缝处，由于钢筋的交叉连接，强度会相对较高，而在其他部位，强度相对较低。由此说明，平行于拼缝的钢筋布置可以增加拼缝区域的刚度。当荷载作用在结构上时，平行于拼缝的钢筋可以更好地分担荷载，减小拼缝的变形和开裂，提高结构的整体刚度和稳定性。

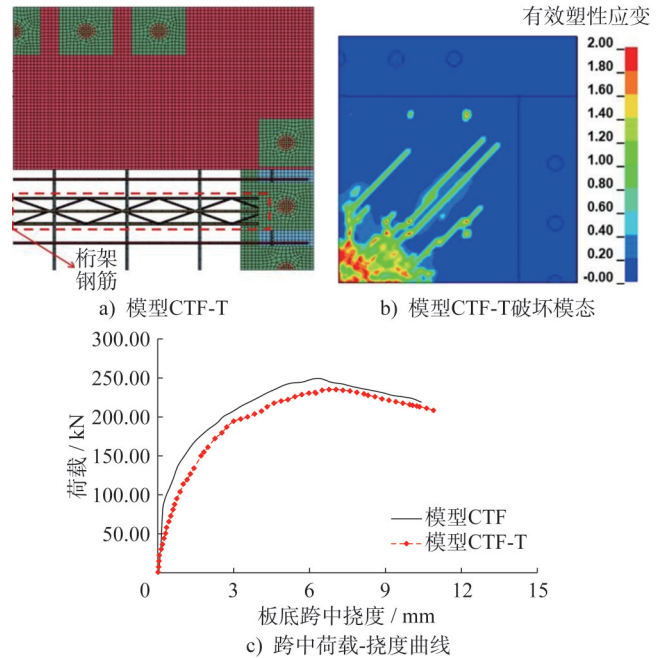


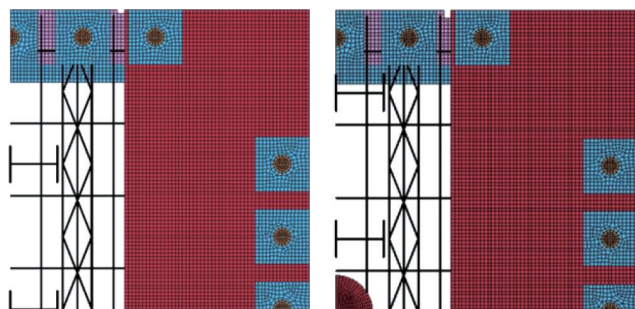
图 12 试件 CTF-T 的模拟结果

Fig. 12 Simulation results of specimen CTF-T

### 4.2 人字形钢筋布置的影响

从试件RTF的试验结果可知，人字形钢筋可以有效的提高叠合板的承载能力，使其的力学性能优于现浇混凝土板的力学性能。考虑到造价及施工工艺的影响，探讨减少不同位置的人字形钢筋对密拼钢筋混凝土叠合板性能的影响。图13为减少了试件RTF中的人字形钢筋的有限元模型，其中图13a)为去除靠近板边的第一、三道人

字形钢筋的有限元模型 RTF-T1, 图 13b) 为去除靠近板边的第二、四道人字形钢筋的有限元模型 RTF-T2。



a) 模型RTF-T1                      b) 模型RTF-T2

图 13 试件 RTF 拓展的有限元模型

Fig. 13 Extended finite element models of specimen RTF

图 14 为改变了人字形钢筋布置后叠合板的跨中荷载-挠度曲线及破坏模式。从跨中荷载-挠度曲线可以看出, 模型 RTF-T1 和模型 RTF-T2 的峰值荷载分别为 239.02 kN 和 219.94 kN, 相较于 RTF 分别下降了 11% 和 18%。说明靠近跨中的人字形钢筋对于提高叠合板整体刚度、防止拼缝处叠合面发生撕裂具有显著作用。从破坏模式可以看出, 当跨中的人字形钢筋被去除时, 叠合板的刚度会降低, 破坏加剧, 由此说明跨中的人字形钢筋可以提供刚性支撑, 减小叠合板在该位置的变形, 保持结构的稳定性。且 RTF-T1 的峰值荷载, 相较于 RCF 仅仅下降了 0.38%。考虑到经济、轻便等因素, 建议在实际工程中可适当减少非荷载集中区的人字形钢筋。

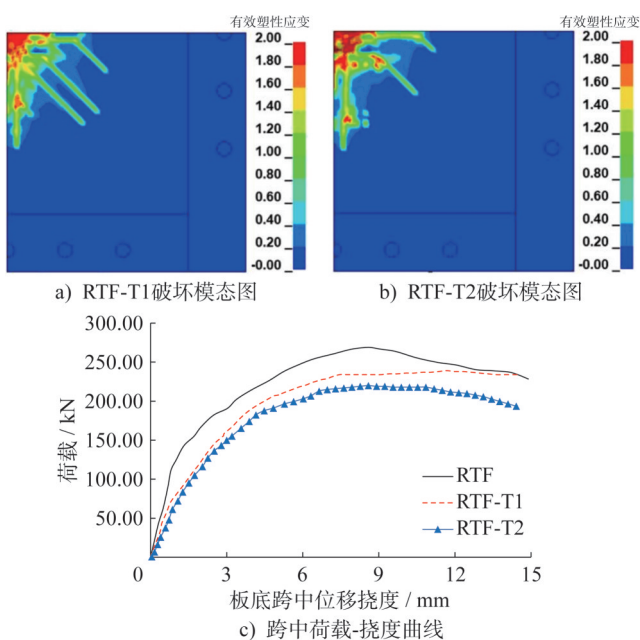


图 14 人字形钢筋不同布置的模拟结果

Fig. 14 Simulation results of different arrangements of human-shaped steel bars

## 5 结论

本文通过对钢筋混凝土叠合板进行静力加载试验, 分析了叠合板的破坏模式和刚度、承载能力等力学性能。并通过 ANSYS/LS-DYNA 建立精细化有限元模型, 对比已有试验结果, 验证了有限元模型的准确性, 得到以下结论:

(1) 由于叠合面处混凝土结合强度较低, 密拼叠合板易在拼缝处发生破坏, 相比现浇板其承载力降低约 6%。但在拼缝处设置桁架钢筋后, 承载力有所提高, 密拼桁架叠合板与拼缝加强桁架叠合板的峰值荷载值分别比普通密拼叠合板与拼缝加强叠合板高出 10% 与 14%。

(2) 对于带拼缝的叠合板来说, 拼缝会降低板的刚度, 使其开裂荷载比普通钢筋混凝土板小。但在拼缝处设置桁架钢筋后, 桁架钢筋可以减小拼缝处的应力集中, 从而降低混凝土的损伤程度并防止叠合面的撕裂破坏。

(3) 采用人字形钢筋加强的叠合板能够提高叠合板的承载能力, 相比普通密拼叠合板的刚度和极限承载力均有所提高。人字形钢筋可以限制拼缝处钢筋与叠合面混凝土裂缝的发展, 使上部所受到的力有效传递到底板钢筋上, 使预制层与现浇层整体协同工作, 基本能够实现与整浇板相同的受力性能。

(4) 对于配置了桁架钢筋的叠合板来说, 额外配置人字形钢筋的桁架叠合板具有较高的承载能力和良好的延性, 相比于普通混凝土板其屈服荷载与极限荷载提高 34% 与 12%, 相比于桁架钢筋叠合板其屈服荷载与极限荷载提高 32% 与 8%, 但板底破坏较为严重。

(5) 钢筋桁架垂直于拼缝放置与平行于拼缝放置相比, 叠合板的跨中挠度更大, 故建议将钢筋桁架平行于拼缝放置; 靠近跨中的人字形钢筋对于提高叠合板整体刚度具有显著作用, 在实际工程中, 可以适当减少非跨中的人字形钢筋的布置。

## 参考文献:

- [1] 张敏, 秦稳, 卢旦, 等. 预制混凝土叠合楼板新型连接构造的力学性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 26-31, 130. DOI: 10.19701/j.jzjg.20200782.  
ZHANG Min, QIN Wen, LU Dan, et al. Research on mechanical properties of prefabricated concrete composite floor with new connection[J]. Building Structure, 2022, 52(6): 26-31, 130. DOI: 10.19701/j.jzjg.20200782. (in Chinese)
- [2] 钱凯, 李治, 何畔, 等. 螺栓连接预制混凝土梁-板子结构抗连续倒塌机理研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 173-180. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0497.  
QIAN Kai, LI Zhi, HE Pan, et al. Progressive collapse mechanism of PC beam-slab substructure with bolted connections[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 173-180. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0497. (in Chinese)

- [ 3 ] 钱凯,李治,翁运昊,等.后浇整体式预制混凝土梁-板子结构抗连续倒塌机理研究[J].建筑结构学报,2021,42(7):183-193.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0665.  
QIAN Kai, LI Zhi, WENG Yunhao, et al. Load resisting mechanisms of assembled monolithic precast concrete beam-slab substructures to resist progressive collapse[J].Journal of Building Structures, 2021, 42(7): 183-193. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0665. (in Chinese)
- [ 4 ] 曾敏,胡翔,陈培良,等.预应力混凝土叠合板试验及计算方法研究[J].住宅科技,2016,36(4):13-17.DOI:10.13626/j.cnki.hs.2016.04.004.  
ZENG Min, HU Xiang, CHEN Peiliang, et al. Study on test and calculation method of prestressed concrete composite slab[J]. Housing Science, 2016, 36(4): 13-17. DOI: 10.13626/j.cnki.hs.2016.04.004. (in Chinese)
- [ 5 ] ALTOUBAT S, OUSMANE H, BARAKAT S. Experimental study of in-plane shear behavior of fiber-reinforced concrete composite slabs[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(3): 04015156. DOI: 10.1061/(ASCE) ST. 1943-541X. 0001413.
- [ 6 ] RÍOS J D, CIFUENTES H, MARTÍNEZ-DE LA CONCHA A, et al. Numerical modelling of the shear-bond behaviour of composite slabs in four and six-point bending tests [J]. Engineering Structures, 2017, 133: 91-104. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.025.
- [ 7 ] IBRAHIM I S, ELLIOTT K S, ABDULLAH R, et al. Experimental study on the shear behaviour of precast concrete hollow core slabs with concrete topping [J]. Engineering Structures, 2016, 125: 80-90. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.005.
- [ 8 ] 崔士起,刘传卿,刘文政,等.分离式接缝叠合板垂直接缝方向抗弯刚度的试验及计算方法研究[J].建筑结构学报,2018,39(9):75-84.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.09.009.  
CUI Shiqi, LIU Chuanqing, LIU Wenzheng, et al. Research on experiment and calculating methods of flexural stiffness in direction perpendicular to separating-type joints for concrete composite slab[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 75-84. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.09.009. (in Chinese)
- [ 9 ] 吴方伯,刘彪,李钧,等.新型叠合板拼缝构造措施的试验研究及有限元分析[J].工业建筑,2015,45(2):50-56,75.DOI:10.13204/j.gyjz201502012.  
WU Fangbo, LIU Biao, LI Jun, et al. Experimental study and finite element analysis of structural measures for joints between new type of superposed slabs[J]. Industrial Construction, 2015, 45(2): 50-56, 75. DOI: 10.13204/j.gyjz201502012. (in Chinese)
- [ 10 ] 余泳涛,赵勇,高志强.单缝密拼钢筋混凝土叠合板受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(4):29-37.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.04.003.  
YU Yongtao, ZHAO Yong, GAO Zhiqiang. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete composite slab connected without gap[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 29-37. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.04.003. (in Chinese)
- [ 11 ] 侯和涛,陈磊,程佑东,等.预制混凝土叠合板钢筋黏结性能的研究[J].混凝土与水泥制品,2016(2):63-68.DOI:10.19761/j.1000-4637.2016.02.016.  
HOU Hetao, CHEN Lei, CHENG Youdong, et al. Study on bond behavior of steel bar in precast concrete composite slabs [J]. China Concrete and Cement Products, 2016(2): 63-68. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2016.02.016. (in Chinese)
- [ 12 ] 章雪峰,郑曙光,单玉川,等.四边不出筋密拼连接叠合双向板足尺试验研究[J].建筑结构,2019,49(15):83-87.DOI:10.19701/j.jzjg.2019.15.015.  
ZHANG Xuefeng, ZHENG Shuguang, SHAN Yuchuan, et al. Experimental study on full-scale steel bar truss superimposed two-way slabs without extending reinforcement on all sides and connected without gap[J]. Building Structure, 2019, 49(15): 83-87. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.15.015. (in Chinese)
- [ 13 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [ 14 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部.装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Precast Concrete Structures: JGJ 1—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [ 15 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.装配式混凝土建筑技术标准:GB/T 51231—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Standard for Prefabricated Concrete Buildings: GB/T 51231—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [ 16 ] YAO Xiao. Dynamic behavior of reinforced concrete slabs under rapid loading and low velocity impact[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2016.
- [ 17 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic

- of China. Standard for Test Method of Concrete Structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [18] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9/10): 847-873. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00023-7.
- [19] XU H, WEN H M. A computational constitutive model for concrete subjected to dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 91: 116-125. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.01.003.
- [20] YAO S J, ZHANG D, CHEN X G, et al. Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 66: 120-129. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.027.
- [21] MAGALLANES J M, WU Y C, MALVAR L J, et al. Recent improvements to release III of the K&C concrete model [C] // 11th International LS-DYNA Users conference. Ann Arbor: University of Michigan, 2010.
- [22] KONG X Z, FANG Q, LI Q M, et al. Modified K&C model for cratering and scabbing of concrete slabs under projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 217-228. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.02.016.
- [23] LSTC. LS-DYNA® Keyword User's Manual— Volume II—Material Models [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2012.