

引用本文:何庆锋,杨凯华.分离式拼缝混凝土叠合板受力性能研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(3):21-29.

HE Qing-feng, YANG Kai-hua. Mechanical Property Study on Split Joint Concrete Composite Slab[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3): 21-29.

DOI:10.19815/j.jace.2020.03042

# 分离式拼缝混凝土叠合板受力性能研究

何庆锋<sup>1,2</sup>, 杨凯华<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;  
2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为研究采用马镫钢筋作为抗剪拉结钢筋的分离式拼缝混凝土叠合板的受力性能,通过3块简支板的静力加载试验,对其在不同马镫钢筋布置下的荷载-挠度曲线、承载能力、变形性能进行了研究,并分析了其裂缝成因、拼缝处受力机理,推导了其开裂荷载的计算式。结果表明:规范分离式拼缝叠合板的荷载-挠度曲线发展趋势为三折线形,其开裂荷载计算与普通叠合板计算有所区别;试件拼缝处易产生沿着叠合面的撕裂破坏,其附加钢筋容易发生局部滑移或者锚固失效;试件屈服荷载受附加钢筋的黏结滑移影响有一定的降低,其极限承载力取决于拼缝处现浇混凝土与预制板的拉结强度;试件拼缝处裂缝数目与宽度和马镫钢筋有关,合理改变马镫钢筋布置能够有效减少裂缝数目及宽度;试件屈服前变形呈现整体弯曲,屈服后变形主要集中在拼缝处,最终试件均出现了混凝土压碎现象,其破坏形态呈现二折线形;根据相关规范,针对附加钢筋滑移问题可通过锚固弯钩、加长钢筋长度、抬高钢筋位置等措施进行改进。

**关键词:**钢筋混凝土叠合板;分离式拼缝;马镫钢筋;受力性能;附加钢筋

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)03-0021-09

## Mechanical Property Study on Split Joint Concrete Composite Slab

HE Qing-feng<sup>1,2</sup>, YANG Kai-hua<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory on Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of split joint reinforced concrete composite slab with stirrup as shear tie reinforcement, the load-deflection curve, bearing capacity and deformation performance of three simply supported slabs under different stirrup arrangements were studied. The causes of the cracks, the mechanical mechanism of the joints and the calculation formula of the cracking load were also analyzed. The results show that the development trend of load-deflection curve of standard split joint composite slab is trilinear, and the calculation of cracking load is different from that of common composite slab. The joint of the specimen is prone to tear along the composite plane, and the additional reinforcement is easy to slip or anchor failure. The yield load of the specimen is affected by the bond slip of the additional

收稿日期: 2020-08-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0701400)

作者简介: 何庆锋(1979-),男,湖北黄冈人,高级工程师,工学博士, E-mail: sammyhqf@163.com.

reinforcement, and its ultimate bearing capacity depends on the tensile strength between the cast-in-place concrete and the precast slab at the joint. The number and width of cracks are related to stirrup bars. Reasonable arrangement of stirrup bars can effectively reduce the number and width of cracks. Before yielding, the deformation of specimens present overall bending, and after yielding, the deformation is mainly concentrated in the joint. The concrete crushing phenomenon appears in all specimens, and the failure mode is close to two fold linear. According to the relevant codes, the problem of additional reinforcement sliding can be improved by anchoring hooks, lengthening the length and raising the position of reinforcement.

**Key words:** reinforced concrete composite slab; split joint; stirrup reinforcement; mechanical property; additional reinforcement

## 0 引言

双向叠合楼盖作为一种应用较为广泛的装配式楼盖形式,其拼缝多采用整体式拼缝。该拼缝虽然有着承载能力等同现浇、可靠性高的优点<sup>[1]</sup>,但同样存在着施工拼装复杂、效率低下、成本较高的缺点。分离式拼缝尽管承载能力较低,但在满足规范的前提下亦可用于双向板的拼缝连接<sup>[2]</sup>,且其构造施工方式简单、拼装效率高。因而,从建筑工业化的发展趋势看,分离式拼缝具有较大的优势,但由于分离式拼缝多用于单向板非受力方向的拼接,因此其拼缝性能仍需要进行进一步研究<sup>[3]</sup>。

国内外许多学者对于采用新型材料的拼接叠合板双向受力性能<sup>[4-8]</sup>及其内力重分布<sup>[9-10]</sup>进行了大量的研究,但有关传统混凝土分离式拼缝叠合板的研究相对较少。近些年由于建筑工业化的蓬勃发展,相关的研究开始逐渐增多。聂建国等<sup>[11]</sup>对于高强混凝土叠合板的抗剪性能进行了试验研究,指出设置抗剪钢筋可确保叠合板不发生沿着叠合面的剪切破坏;侯和涛等<sup>[12]</sup>对附加钢筋的锚固长度进行试验分析,指出附加钢筋的锚固是影响拼缝处承载力的主要因素;叶献国等<sup>[13-14]</sup>对叠合板拼缝的受力性能进行了研究,试验显示钢筋桁架能够防止构件在拼缝处发生脆性断裂,但其抗弯性能相较现浇板降低了10%左右;黄璐<sup>[15]</sup>采用线性回归与试验相结合的方法,对PK板非预应力方向拼缝对抗弯刚度的影响进行了研究,就多拼缝叠合板与构件刚度的关系进行了总结。从试件的抗剪拉结钢筋看,众多学者的研究主要集中在桁架钢筋上,但马镫抗剪拉结钢筋也是规范推荐的一种连接形式,相比桁架钢筋,其具有制作工艺简便、工业化效率高、含钢量低等优势,然而对马镫钢筋作为抗剪拉结钢筋<sup>[16]</sup>的分离式拼缝板的研究也较少。

本文在此背景之下,依据规范拟布置马镫钢筋作为预制层与现浇层的抗剪拉结钢筋,通过改变拼缝附近马镫钢筋间距,来改变预制层与叠合层拉结强度的大小,对马镫钢筋间距变化前后分离式拼缝板破坏形态、承载能力变化进行了研究,分析了其对试件受力及破坏形态的影响,以此确定马镫钢筋合理布置。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

为研究马镫钢筋对拼缝性能的影响,依据规范设计了3块分离式拼缝混凝土叠合板,编号为YB1~YB3,板厚均为200 mm。试验时改变马镫钢筋的布置及直径2个参数。各试件的具体尺寸如图1所示。附加钢筋由拼缝处截面计算确定,锚固长度取为 $1.2l_{ae}$ <sup>[16-17]</sup>, $l_{ae}$ 为规范计算的现浇结构钢筋锚固长度。拼缝构造见图2。钢筋及混凝土强度见表1。

### 1.2 试验方案

本文采用四点弯试验方法,加载点位于1/6点处,边界条件为简支,板净跨 $L$ 为4.5 m,纯弯段长度为3.0 m。试验装置如图3所示。试验分为3个阶段,开裂前,每级2 kN;开裂后,每级6 kN;屈服后,采用位移加载,每级10 mm,直至达到规范所述极限承载力特征值<sup>[18]</sup>。钢筋及混凝土的应变片布置如图4所示。

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 荷载-挠度曲线

图5为试件的荷载-挠度曲线。试件在破坏前经历了弹性、弹塑性以及破坏3个阶段,其荷载-挠度曲线呈现为三折线形。由图5中标示的点可知其荷载-挠度曲线的发展规律, $C, Y, U$ 分别为开裂点、屈服点、极限荷载点。各试件开裂及屈服荷载基本

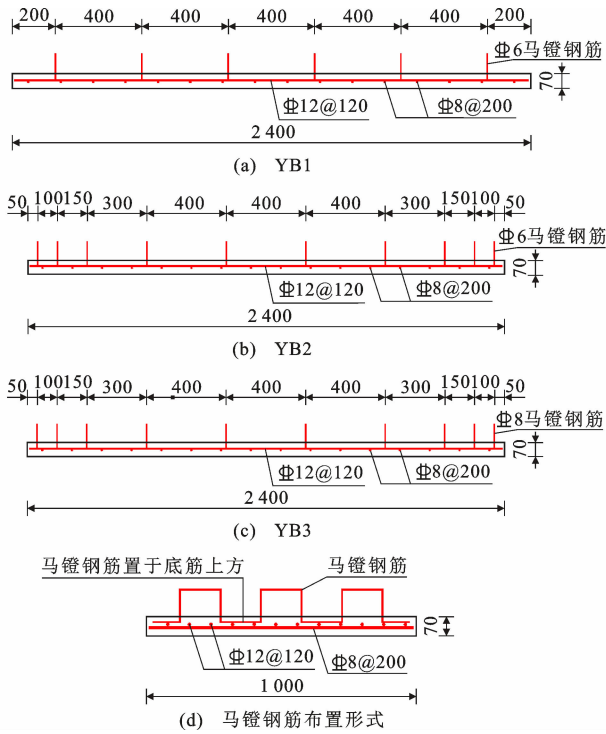
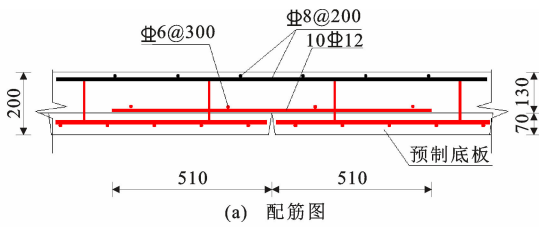


图 1 试件尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Sizes of Specimens (Unit: mm)



(b) 现场施工图1 (c) 现场施工图2

图 2 拼缝构造 (单位: mm)

Fig. 2 Construction of Joint (Unit: mm)

表 1 材性性能

Tab. 1 Properties of Material

钢筋型号		Φ 6	Φ 8	Φ 12
钢筋抗拉屈服强度 / MPa		476.3	473.8	488.5
钢筋抗拉极限强度 / MPa		670.2	664.5	648.9
断后伸长率 / %	$\delta_5$	20.1	26.3	26.2
	$\delta_{10}$	17.8	19.2	19.1
混凝土立方体抗压强度 / MPa	预制底板	42.1		
	现浇层	31.3		

相同。

表 2 为各板的屈服、极限弯矩以及理论屈服弯

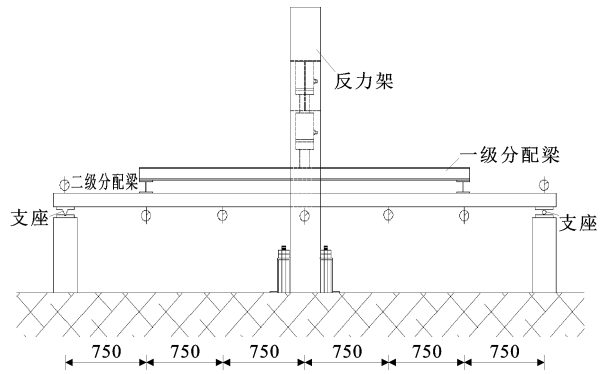
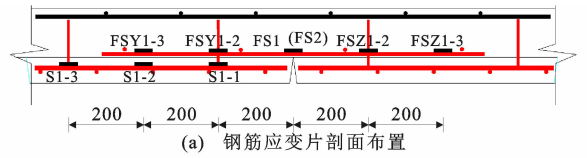
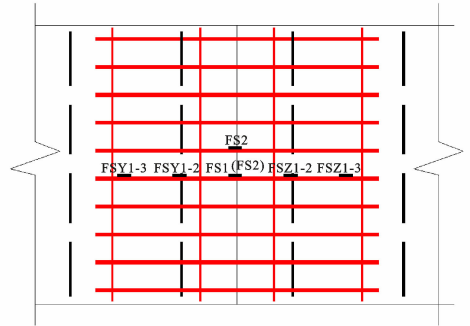


图 3 试验装置 (单位: mm)

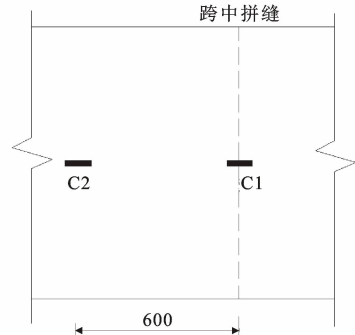
Fig. 3 Test Setup (Unit: mm)



(a) 钢筋应变片剖面布置



(b) 钢筋应变片平面布置

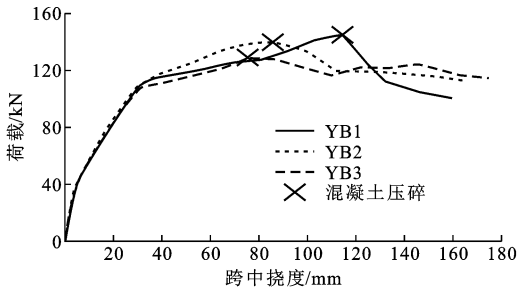


(c) 混凝土应变片布置

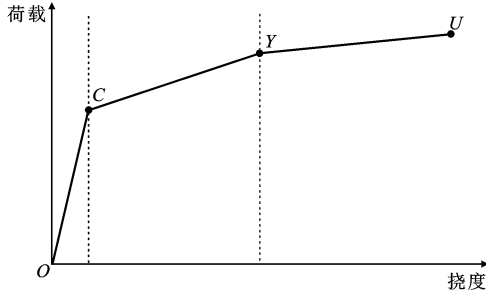
图 4 应变测点布置 (单位: mm)

Fig. 4 Arrangement of Strain Measuring Points (Unit: mm)

矩。由表 2 可知:各试件屈服弯矩试验值与其弯矩理论计算值的相对误差较大,说明该分离式拼缝板在加载过程中,当试件达到屈服时,其拼缝内部部分钢筋并未达到屈服;不同马镫钢筋布置下的试件其屈服弯矩较为接近,极限弯矩及位移差别略大,说明马镫钢筋主要影响了试件的极限弯矩与位移延性,其对试件屈服影响较小。



(a) YB1~YB3荷载-跨中挠度曲线



(b) 各板受力特征曲线

图5 各试件荷载-挠度与特征曲线

Fig. 5 Load-deflection and Characteristic Curves

表2 各试件弯矩

Tab. 2 Bending Moment of Specimens

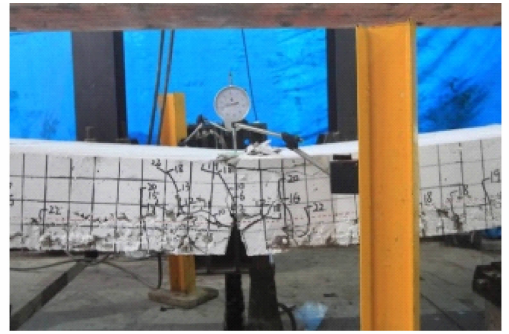
试件编号	$M_{y1}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{u1}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{y2}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$E_R/\%$
YB1	41.08	54.51	50.49	18.64
YB2	40.87	52.62	50.49	19.05
YB3	40.93	50.78	50.49	18.93

注:  $M_{y1}$ ,  $M_{u1}$  分别为试验屈服弯矩和极限弯矩;  $M_{y2}$  为计算屈服弯矩;  $E_R$  为屈服弯矩相对误差,  $E_R = |(M_{y1} - M_{y,2})| / M_{y,2}$ 。

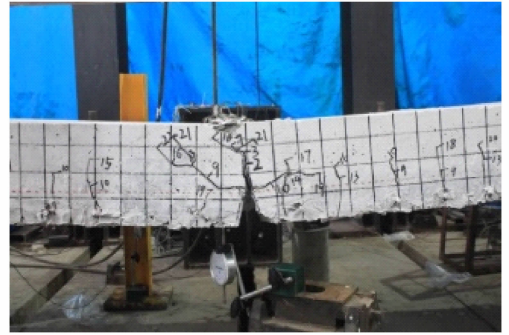
## 2.2 试验现象与破坏形态

拼缝在第2级荷载作用下就出现了开裂,但随着荷载增大,该裂缝开展较缓慢。考虑到附加钢筋平铺于预制板上,钢筋下部的现浇混凝土较少,且此时试件的挠度仍线性增长,因此可认为此时板仍处于弹性阶段(OC段),即该裂缝并没有影响板的整体刚度。当加载至叠合面出现水平裂缝时,试件刚度出现退化,因此将水平裂缝的开展点视为C点。此后板受力进入弹塑性阶段(CY段),但此时试件的主要裂缝仍位于拼缝周边500~600mm范围内。当荷载逐渐接近屈服荷载时,拼缝外部预制板底才出现少量的弯曲裂缝。试件屈服后,拼缝处水平裂缝逐渐发展为斜裂缝,裂缝宽度不断增大,最终拼缝处的板顶混凝土压碎,试验结束。各试件的破坏形态见图6。

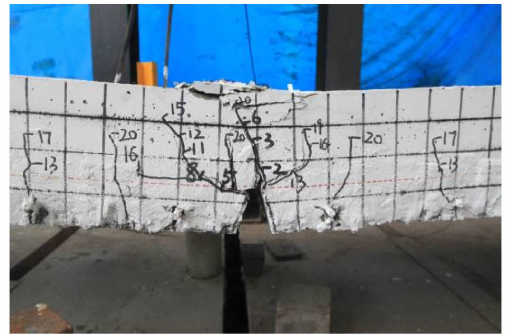
图7为拼缝宽度的变化曲线。由图7可知,在加载初期,各试件的拼缝宽度变化基本为线性增长,并且随着马镫钢筋的加密或者直径加大,其增长速



(a) YB1



(b) YB2



(c) YB3

图6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure Patterns of Specimens

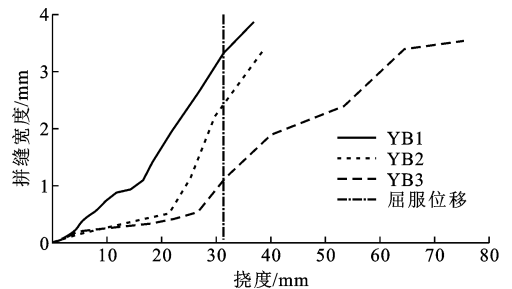


图7 拼缝宽度变化

Fig. 7 Changes of Crack Width of Joints

率越缓慢。YB1拼缝线性增长的最大宽度为0.88mm, YB2为0.52mm, YB3为0.31mm。因此,马镫钢筋起到了加强预制层与现浇层拉结,限制拼缝宽度开展的作用。

随着荷载的增加,各试件的拼缝宽度均出现了

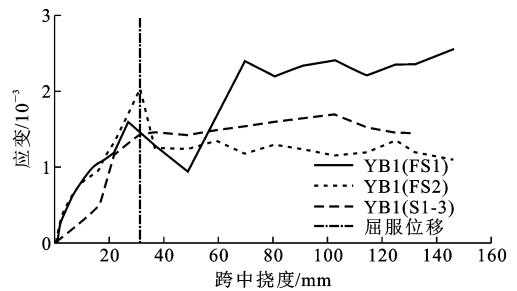
急剧增长。YB1 试件屈服前最大拼缝发展宽度为 3.25 mm, YB2 为 2.28 mm, YB3 为 1.06 mm, 均远大于其线性增长所对应的拼缝宽度, 表明试件布置的马镫钢筋随着荷载的增大, 其拉结作用逐渐减弱, 钢筋出现屈服, 其限制拼缝宽度的作用也会逐渐减小, 拼缝宽度显著增大, 故对拼缝周边的马镫钢筋进行加密或直径加大是有必要的。随着拼缝处马镫钢筋的加密(YB1 与 YB2), 拼缝处裂缝数目也呈现出减少的趋势, 即马镫钢筋加密还能有效减少裂缝数目; 若进一步增大马镫钢筋直径, 尽管同加载级的拼缝宽度继续减小(YB2 与 YB3), 但其裂缝数目反而增多。因此, 马镫钢筋布置的加密或者直径加大虽然都能够减缓拼缝宽度的发展速率, 但从减少拼缝处的裂缝数目的角度考虑, 应尽量采用加密马镫钢筋布置的方法对拼缝节点进行加强, 避免加大直径使得拼缝处裂缝数目增加。

### 2.3 钢筋应变

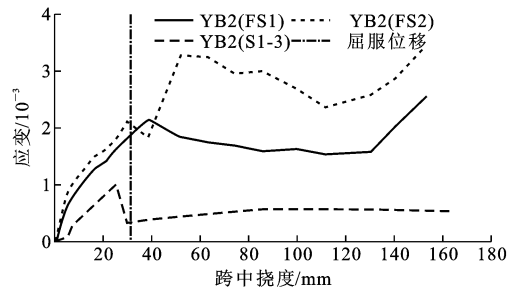
图 8 为钢筋应变-挠度曲线。试件屈服前, 其应变随着跨中挠度的增加呈线性增长。由于拼缝处有效截面高度远小于外部截面高度, 附加钢筋的应变增长速率较普通钢筋快。因浇筑过程中叠合层混凝土的水泥砂浆及骨料难以进入钢筋的另一侧, 与其肋部充分接触形成完全握裹, 故部分拼缝钢筋在荷载并未达到钢筋屈服前就出现了滑移, 导致试件未达到设计承载力。

由钢筋的应变-挠度曲线可知, 附加钢筋主要可分为 2 类: 锚固牢固及锚固失效<sup>[19]</sup>。预制板上的拉毛虽然使得混凝土得以进入大多数的钢筋下部形成黏结, 但是仍无法形成充分的接触, 因此各钢筋在受力后应变出现差异。钢筋下部混凝土较少甚至没有混凝土时, 在荷载的作用下钢筋一侧与混凝土的黏结虽然仍能发挥作用, 但在达到临界黏结应力时, 钢筋就会发生锚固失效, 出现滑移。拼缝钢筋提前屈服, 预制底板钢筋亦未达到其屈服强度, 部分钢筋因附加钢筋传力性能下降导致了应变减小, 见 S1-3 测点曲线。

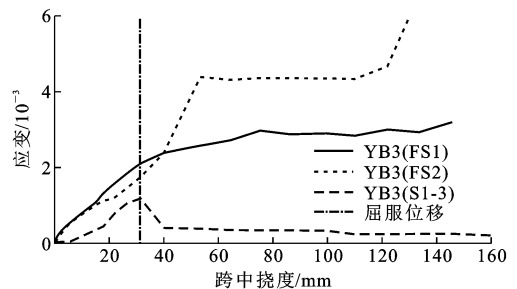
图 9 为附加钢筋及板底钢筋在各受力各阶段的应变分布曲线(以 YB1 为例)。各受力阶段中, 荷载从附加钢筋传递至板底钢筋的范围主要在 200~300 mm 之间, 但由于加载后期, 马镫钢筋屈服, 叠合面的水平裂缝逐渐增大, 锚固端长度则逐渐减小, 钢筋二次传力性能减弱, 附加钢筋承受的荷载亦逐渐向端部传递, 使得部分钢筋出现锚固失效, 试件出现提前屈服的现象。



(a) YB1



(b) YB2



(c) YB3

图 8 钢筋应变-挠度曲线

Fig. 8 Reinforcement Strain-deflection Curves

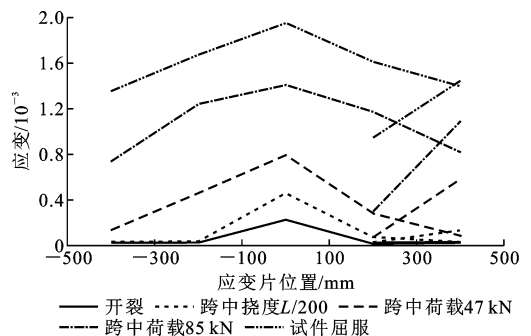


图 9 钢筋各阶段应变分布

Fig. 9 Strain Distribution of Reinforcement in Each Stage

### 2.4 混凝土应变与变形曲线

图 10 为试件混凝土应变-挠度曲线。试件屈服前, 其应变-挠度曲线变化趋势与钢筋应变-挠度曲线基本一致, 板顶混凝土应变增长较其他位置快。试件屈服后, 拼缝上方混凝土应变急剧增大, 而其他位置混凝土压应变基本不变, 这表明在试件屈服之前, 板的变形呈现整体弯曲, 此时板的变化主要集中在拼缝处。

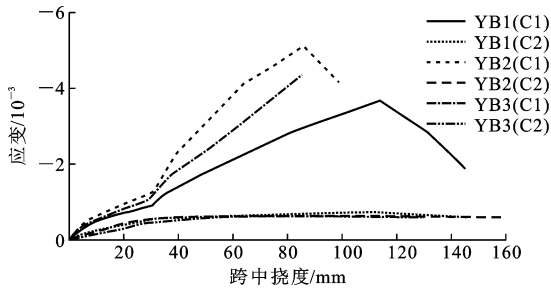


图 10 混凝土应变-挠度曲线

Fig. 10 Concrete Strain-deflection Curves

各试件变形曲线如图 11 所示,板在加载过程中其挠曲形状逐渐向二折线形转化。由于拼缝相较外部截面提前屈服,因此屈服后其主要变形集中在拼缝处,拼缝处混凝土变形不断增长,而拼缝外混凝土应变基本不变,同时随着拼缝处马镫钢筋的加密及直径的增大,板的最大挠度呈现出降低的趋势,试件位移延性逐渐降低。

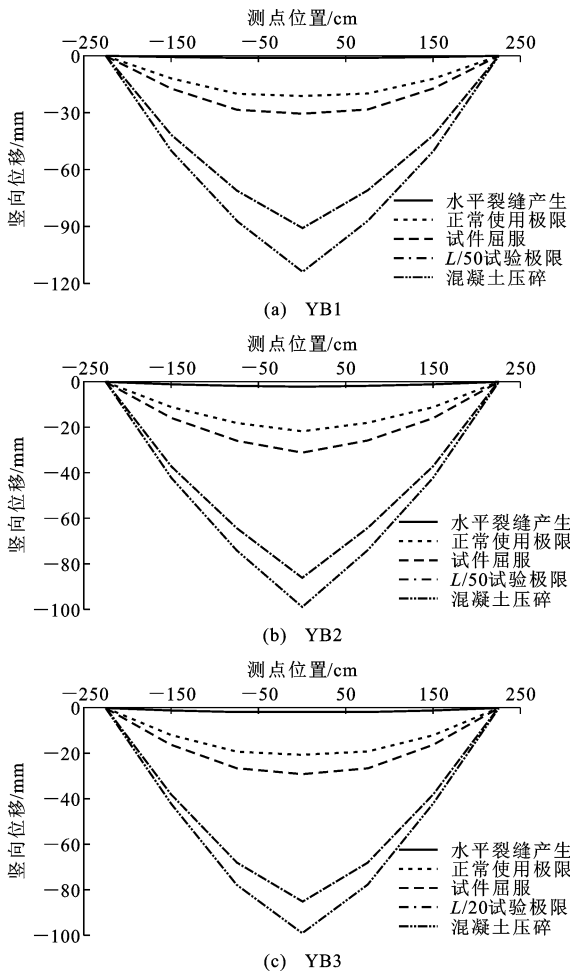


图 11 试件变形曲线

Fig. 11 Deformation Curves of Specimens

### 3 受力性能分析

#### 3.1 承载力分析

随着试件拼缝处裂缝宽度逐渐发展,混凝土与附加钢筋的接触面面积逐渐减小,参考相关文献将其简化为钢筋拉拔试验模型进行分析,如图 12 所示。钢筋在受力过程中其环向分力直接作用于叠合面与预制板之间<sup>[20]</sup>,如图 13 所示。在没有马镫钢筋的情况下,该分力在达到了分界处的混凝土黏结强度后,将使叠合板发生沿着叠合面的撕裂,最终发生脆性破坏<sup>[21-23]</sup>。当预制板中存在马镫钢筋时,新旧混凝土开裂后,多余的径向应力将会由马镫钢筋承担,限制叠合层水平裂缝的继续开展,也在一定程度上限制钢筋在混凝土之中的滑移,增强其锚固性能。试验时,由于钢筋的黏结情况、所处的位置不同,其受力表现也有所不同,并且随着水平裂缝的张开,马镫钢筋限制附加钢筋滑移的作用逐渐减弱。因此,拼缝板附加钢筋仍有锚固失效及局部滑移的情况发生,而这正是导致试件提前屈服的原因。

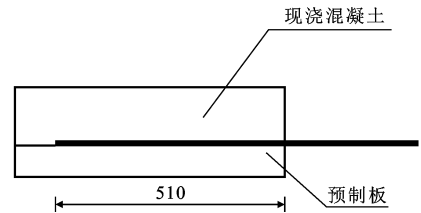


图 12 附加钢筋受力模型(单位:mm)

Fig. 12 Stress Model of Additional Reinforcement (Unit:mm)

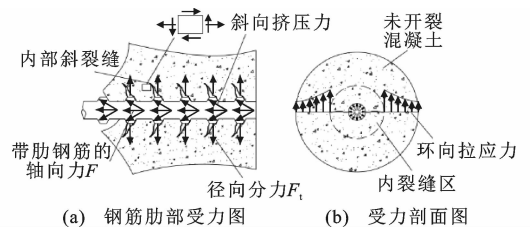


图 13 钢筋受力示意图

Fig. 13 Stress Diagram of Reinforcement

从试件的屈服荷载看,马镫钢筋拼缝叠合板的屈服荷载其试验值相较计算值降低了接近 20%,而桁架钢筋拼缝叠合板的屈服荷载下降仅为 10%<sup>[13]</sup>。对两者叠合面的受力进行分析可知,相较马镫钢筋,桁架钢筋的腹杆能够承担更多的径向应力,限制了水平裂缝的发展,加强了附加钢筋在叠合面的锚固,提升其二次传力性能,而这对于拼缝叠合板屈服承载力的提高是有利的。因此,提升马镫钢筋对叠合

面与预制板的拉结强度能够进一步改善拼缝叠合板的受力性能。

马镫钢筋的加密或者直径加大能够提升附加钢筋的锚固性能,但由表2所示的极限承载力可知,其极限承载力却出现了下降,这与附加钢筋受拉产生的破坏形态有关。在钢筋拉拔试验中,其破坏主要分为:劈裂破坏、剥离破坏以及劈裂剥离破坏<sup>[24]</sup>。试验中的破坏形式更接近劈裂剥离破坏。马镫钢筋虽然限制了水平裂缝的发展,但在受力过程中,附加钢筋也会对于周边的混凝土造成损伤,使其混凝土受压强度出现降低,并随马镫钢筋加密或者直径增大,其影响越大,试件的极限承载力亦出现了下降。

### 3.2 裂缝形态分析

试件最终破坏时,其裂缝形态与普通无拼缝叠合板有所区别<sup>[22]</sup>,裂缝主要集中在拼缝处,且有斜裂缝的产生。根据该种叠合板拼缝处的受力特征,其受力模型如图14所示,其中 $A, A', C$ 分别为弯矩在叠合层、预制底板以及整体受力的作用点, $\theta$ 为试件拼缝处的变形转角, $y_A$ 为底板位移, $M$ 为弯矩, $f_t$ 为混凝土黏结力, $l_a$ 为变形协调长度<sup>[25]</sup>。

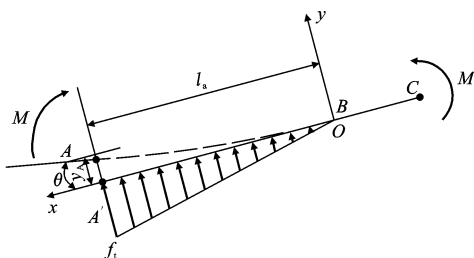


图14 水平裂缝受力简化图

Fig. 14 Simplified Stress Diagram of Horizontal Crack

由试验结果可知,该拼缝叠合板的开裂荷载为叠合面出现水平裂缝时的荷载,此时仅有 $A, C$ 端受弯矩作用。由于试件开裂时附加钢筋产生的径向应力主要由预制板及叠合层的黏结力承担,马镫钢筋受力较小,故忽略此时马镫钢筋的作用,根据试验现象及加载时裂缝的开展情况(图6),取叠合面混凝土的受拉范围长度 $l_a = 50$  mm。

在混凝土黏结力 $f_t$ 作用下,由于 $A$ 点与 $A'$ 点的挠度一致<sup>[22]</sup>,故开裂弯矩 $M_0$ 为

$$M_0 = \frac{11bf_t h_0^3}{60 h_1^3} l_a^2 \quad (1)$$

式中: $b$ 为试件宽度; $h_0, h_1$ 分别为叠合板总厚度及叠合层厚度。

拼缝处叠合面是该种叠合板的薄弱部位,因此其黏结强度 $f_t$ 无法按照整浇混凝土的黏结强度进

行计算。考虑对 $f_t$ 进行修正,令

$$f_t' = kf_t \quad (2)$$

式中: $k$ 为抗拉强度修正系数。

根据相关文献可知, $k$ 的选取与叠合面的处理方式有关,通常 $k$ 在60%~85%之间<sup>[26]</sup>,在本文试验中取 $k = 85%$ ;各板的开裂弯矩如表3所示。由表3可知,开裂荷载试验值与计算值的相对误差较小,因此式(1)适用于拼缝叠合板开裂荷载的计算。

表3 横向裂缝开裂弯矩

Tab. 3 Cracking Moment of Horizontal Crack

试件编号	弯矩试验值 $M_{c1}$ / (kN·m)	弯矩计算值 $M_{c2}$ / (kN·m)	相对误差/%
YB1	27.33	27.26	-2.68
YB2	26.60	27.26	-2.42
YB3	26.94	27.26	-1.17

拼缝处水平裂缝随着荷载增加逐渐发展,在接近马镫钢筋所在位置时,其形态发生变化,由水平裂缝转化为斜裂缝。由于马镫钢筋的存在限制了水平裂缝的开展,使得钢筋与混凝土仍能紧密地结合在一起,也使钢筋肋部的斜向挤压力在水平裂缝出现后能够继续提升。当该斜向挤压力达到混凝土极限受拉强度时,水平裂缝就会逐渐发展为斜裂缝,使得上部混凝土受压截面持续减小,最终出现混凝土压碎,形成了如图6所示的叠合板板侧斜向裂缝。

## 4 结语

(1)分离式拼缝板在荷载作用下易出现附加钢筋的滑移,甚至钢筋锚固失效现象。附加钢筋受力性能与周边水泥砂浆握裹程度和所在的位置有关,且滑移会影响叠合板的承载能力。

(2)附加钢筋在预制板上的混凝土握裹不足可导致锚固失效,故可采用降低钢筋位置、增加截面有效高度、增加锚固弯钩以及加长附加钢筋锚固长度等方法来改善钢筋的传力性能,提高拼缝叠合板的承载能力。

(3)加大马镫钢筋直径或者加密马镫钢筋间距可以限制试件裂缝宽度的发展,但在钢筋受力过程中会造成周边混凝土强度的降低,导致拼缝处极限承载力出现下降。

(4)拼缝叠合板的裂缝形态与现浇板不同,其开裂荷载由水平裂缝控制,荷载大小可由预制底板与现浇层受力变形协调进行计算;随着荷载增大,水平裂缝会逐渐转化为斜裂缝,试件破坏最终由混凝土压碎控制。

## 参考文献:

## References:

- [1] 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.  
ZENG Min, HU Xiang, CHEN Pei-liang, et al. Study on Test and Calculation Method of Prestressed Concrete Composite Slab[J]. Housing Science, 2016, 36(4): 13-17.
- [2] JGJ 1—2014, 装配式混凝土结构技术规程[S].  
JGJ 1—2014, Technical Specification for Precast Concrete Structures[S].
- [3] 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.  
YU Yong-tao, ZHAO Yong, GAO Zhi-qiang. Experimental Research on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Composite Slab Connected Without Gap[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 29-37.
- [4] LUKASZEWSKA E, FRAGIACOMO M, JOHNSON H. Laboratory Tests and Numerical Analyses of Prefabricated Timber-concrete Composite Floors[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 136(1): 46-55.
- [5] BANK L, OLIVA M, RUSSELL J, et al. Double-layer Prefabricated FRP Grids for Rapid Bridge Deck Construction; Case Study[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(3): 204-212.
- [6] NAM J H, YOON S J, MOON H D, et al. Development of FRP-concrete Composite Bridge Deck in Korea State-of-the-art Review[J]. Key Engineering Materials, 2006, 236-328: 1705-1708.
- [7] SAKKA Z, GILBERT R I. Structural Behavior of Two-way Slabs Reinforced with Low-ductility WWF[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(12): 04017166.
- [8] QUINTAS V. Two Main Methods for Yield Line Analysis of Slabs[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(2): 223-231.
- [9] CHUNG J H, JUNG H S, BAE B I, et al. Two-way Flexural Behavior of Donut-type Voided Slabs[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 1-13.
- [10] FALL D, SHU J P, REMPLING R, et al. Two-way Slabs: Experimental Investigation of Load Redistributions in Steel Fibre Reinforced Concrete[J]. Engineering Structures, 2014, 80: 61-74.
- [11] 聂建国, 陈必磊, 陈戈, 等. 钢筋混凝土叠合板的试验研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 43-46, 33.  
NIE Jian-guo, CHEN Bi-lei, CHEN Ge, et al. Experimental Study on Shear Behavior of R. C. Laminated Slabs[J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 43-46, 33.
- [12] 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.  
HOU He-tao, CHEN Lei, CHENG You-dong, et al. Study on the Bond Behavior of Steel Bars in Precast Concrete Composite Slabs[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(2): 63-68.
- [13] 叶献国, 华和贵, 徐天爽, 等. 叠合板拼接构造的试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 59-63.  
YE Xian-guo, HUA He-gui, XU Tian-shuang, et al. Experimental Study on Connections of Superimposed Slabs[J]. Industrial Construction, 2010, 40(1): 59-63.
- [14] 刘运林, 叶献国, 种迅, 等. 端拼缝叠合楼板受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(4): 85-89.  
LIU Yun-lin, YE Xian-guo, CHONG Xun, et al. Experimental Study on Mechanical Performance of Composite Slab with End Joints[J]. Building Structure, 2015, 45(4): 85-89.
- [15] 黄璐. PK 混凝土拼接叠合板受力性能试验研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.  
HUANG Lu. Study of Load-bearing Properties of PK Non-prestressed Composite Slab[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [16] DBJ 43/T 301—2013, 混凝土叠合楼盖装配整体式建筑技术规程[S].  
DBJ 43/T 301—2013, Technical Specification for Concrete Composite Floor Assembly Integrated Building[S].
- [17] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [18] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].  
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [19] 何庆锋, 杨凯华. 密拼叠合板接缝构造与抗弯受力性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2020, 52(5): 684-692.  
HE Qing-feng, YANG Kai-hua. Study on the Joint Structure and Bending Resistance of Composite Slab Connected Without Gap[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2020, 52(5): 684-692.
- [20] 沈蒲生, 梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 4版. 北

- 京:高等教育出版社,2012.
- SHEN Pu-sheng, LIANG Xing-wen. Design Theory for Concrete Structures[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [21] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- GUO Zhen-gai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyses[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [22] 刘运林. 双向叠合楼板拼缝处受力机理试验研究与数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
- LIU Yun-lin. Experimental Research and Numerical Analysis on Stress Mechanism in the Joint of Two-way Superimposed Slab[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [23] 翁传阳. 含附加钢筋的混凝土叠合板试验研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2014.
- WENG Chuan-yang. Experimental Study About Concrete Composite Slabs with Additional Bars [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2014.
- [24] 张麟斌. 装配式混凝土节点形式及梁柱结构抗倒塌性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
- ZHANG Lin-bin. Experimental Study on Forms of Assembled Concrete Joints and Collapse Resistance of Beam-column Structures[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [25] 付伟. 新型叠合板拼缝构造静载试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- FU Wei. The Joint of New Type Composite Slab Performance Under Static Test [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [26] 赵志方,赵国藩,刘健,等. 新老混凝土粘结抗拉性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 51-56.
- ZHAO Zhi-fang, ZHAO Guo-fan, LIU Jian, et al. Experimental Study on Adhesive Tensile Performance of Young on Old Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 51-56.