

# 暗梁式全预制板连接结构受弯性能研究

李明<sup>1</sup>,周稚竣<sup>1</sup>,李俊楠<sup>2</sup>,李思贤<sup>1</sup>,郭伟强<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457)

**摘要** 目的 提出一种暗梁式全预制板-板连接结构,并研究其力学性能,为该结构的设计提供依据。**方法** 采用 ABAQUS 对暗梁式全预制板-板连接结构受力过程进行有限元分析,研究暗梁式连接方式的可行性,分析新旧混凝土之间摩擦系数、连接处混凝土强度、拼缝宽度等参数对结构力学性能的影响。**结果** 采用上述连接结构具有更强的抗弯承载力,较现浇式提高了 3.8%;新旧混凝土之间摩擦系数和抗剪钢条强度对承载力几乎无影响;增加连接处混凝土强度、拼缝宽度和抗剪钢条厚度对承载力影响很小,最大相差不足 4%;抗剪钢条长度和截面高度对承载力有一定影响,最大相差超过 5%。**结论** 采用暗梁式板-板连接结构具有可行性,且抗剪钢条长度和截面高度对结构受弯承载力影响相对较大。

**关键词** 暗梁式;全预制板;力学性能;抗剪钢条;受弯承载力

中图分类号 TU398.1 文献标志码 A

## Research on Flexural Performance of Fully Prefabricated Slabs Connected with Dark-beam

LI Ming<sup>1</sup>, ZHOU Zhijun<sup>1</sup>, LI Junnan<sup>2</sup>, LI Sixian<sup>1</sup>, GUO Weiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457)

**Abstract:** In this paper, a fully prefabricated slabs connected with dark-beam was proposed, and the mechanical properties of it was studied. The load-bearing process of the structure was analyzed by ABAQUS, and the feasibility of such connection form was studied. How the parameters influence the mechanical property was analyzed, such as the friction coefficient between the old and the new concrete, the concrete strength at the connection area, the width of the stitching gap, etc. Compared with the cast-in-place slab, the slab connected by the above manner has higher bending capacity by 3.8%. The friction coefficient between the new and the old concrete and the strength of shear resistant steel slab (SRSS) has little effect on the bearing capacity. Increasing the concrete strength at the connection, the width of the stitching gap and the thickness of SRSS has little effect on the

收稿日期:2021-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);辽宁省教育厅基金面上项目(LJKZ0561);住房和城乡建设部科技攻关项目(2019-K-080)

作者简介:李明(1979—),男,副教授,博士,主要从事组合结构、钢结构等方面研究。

bearing capacity, and the maximum difference of them is less than 4%. The length and the section height of SRSS has a certain influence on the bearing capacity, and the maximum difference is more than 5%. The results show that the fully prefabricated slabs connected with dark-beam is feasible, and the length or the section height of SRSS has relatively large influences on the bending capacity of it.

**Key words:** dark beam; fully prefabricated slabs; mechanical properties; shear resistant steel slab; bending capacity

预制楼板是装配式混凝土结构的重要组成部分之一。目前,对预制楼板的研究主要集中于叠合板,如自承式钢筋桁架、冷轧钢筋桁架及带肋预应力混凝土叠合楼板等<sup>[1-8]</sup>。叠合板由工厂预制的底板和现场浇筑的叠合层组成,具有节省模板、整体性好等优点。但因叠合层现场浇筑,施工湿作业量大,并且预制底板与叠合层间存在龄期差异,导致二者收缩应力存在差别。全预制板整体全部由工厂预制,可有效地解决上述问题,在我国曾被广泛应用,但后来因其整体性较差逐渐被现浇板取代。如今,土木工程的生产施工技术已经取得了极大进步,采用新型的方式连接全预制板,使其具有更好的整体性已有可能。然而,仅少数学者针对全预制板-板连接结构进行了研究。李建峰等<sup>[9]</sup>提出下沉式全预制板-板采用锚栓连接结构,并通过有限元分析了锚栓直径、强度、间距和边距等因素对其受力性能的影响。谭刚等<sup>[10]</sup>通过有限元模拟对蜂窝状全预制板在施工及使用阶段的力学性能进行了研究,并提出了蜂窝状全预制板-板之间采用板底纵筋间接搭接的连接方式。

基于上述分析,笔者提出了一种新型的暗梁式全预制板-板连接结构,即暗梁式全预制板,并采用 ABAQUS 有限元软件分析其受弯性能;研究表明:采用暗梁式板-板连接结构具有可行性,且抗剪钢条长度和截面高度对结构受弯承载力影响相对较大。

## 1 暗梁式全预制板及连接结构

暗梁式全预制板结构如图 1(a) 所示。

图中,板底部的纵向和横向钢筋伸出板侧并弯折成 U 形筋,弯折后 U 型筋的端部埋于板内,形成预留在板侧一定长度的 U 形筋。在 U 型筋之间,布置一定数量的抗剪钢条。装配时,两块全预制板的 U 型筋相互搭接形成四肢封闭箍,在箍内插入 4 根角钢,分别绑扎于封闭箍的 4 个角部,最后在连接处浇注混凝土,形成的暗梁式全预制板-板连接结构如图 1(b) 所示。全预制板间的弯矩通过连接后的 U 型筋传递,全预制板间的剪力通过抗剪钢条及后浇混凝土与全预制板侧面的摩擦力传递。抗剪钢条位于板的中和轴附近,以减轻其对连接处受弯性能的影响。

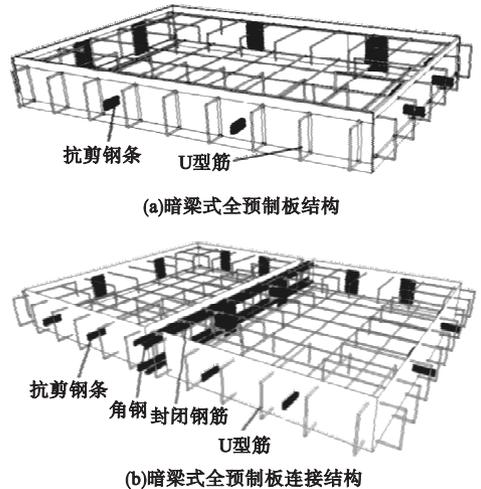


图 1 暗梁式全预制板及连接结构

Fig. 1 The structure of fully prefabricated slabs and the connection of dark-beam

## 2 有限元模拟方法及验证

为探讨上述全预制板连接的可行性及力学性能,首先基于有限元模拟方法进行分析。有限元软件采用 ABAQUS,模拟前,参照了

与本研究相近的现浇板试验<sup>[11]</sup>对模拟方法进行验证。模拟时:混凝土和加载垫块本构采用塑性损伤模型,混凝土单元类型为C3D8R泊松比为0.2<sup>[12-13]</sup>;钢筋采用双折线模型,第二折线斜率为0;钢筋和混凝土材料参数按试验<sup>[11]</sup>取值;不考虑抗剪钢条及钢筋与混凝土之间的滑移;边界条件和加载方式与试验相近,即板两端铰接,三分点加载。有限元模型如图2所示,其中加载点和支座处设置垫梁,以避免局压破坏。求解采用Newdon-rapson方法。

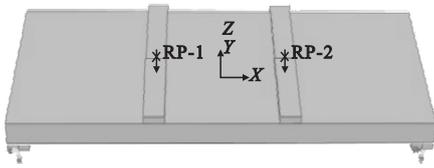


图2 有限元模型

Fig. 2 The finite element model

采用上述有限元方法模拟了板的受力过程,并与试验结果<sup>[11]</sup>进行了对比。图3为模拟与试验跨中荷载-挠度曲线对比。表1为模拟与试验初始刚度及承载力对比,其中,初始刚度为20%屈服荷载时荷载-位移曲线的斜率,开裂荷载、屈服荷载、极限荷载分别是指板底混凝土最大主应力达到抗拉强度、纵向受力钢筋应力达到屈服强度、极限荷载是指受拉钢筋应变达到0.01时对应的荷载值。从图3和表1可看出,模拟与试验荷载-挠度曲线变化规律相近,初始刚度、开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别相差6.98%,1.87%,2.46%和

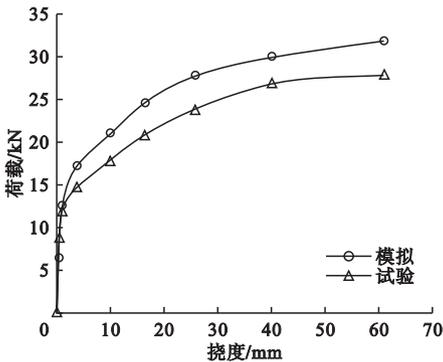


图3 荷载-挠度曲线

Fig. 3 The load-deflection curves

7.21%。上述分析表明建立的有限元模拟方法具有一定的可靠性。

表1 初始刚度及承载力对比

Table 1 The comparison of bearing capacity and initial stiffness

方法	初始刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	开裂荷载/ kN	屈服荷载/ kN	极限荷载/ kN
试验	18.04	18.20	24.36	28.00
模拟	16.78	17.86	24.96	30.02

### 3 暗梁式全预制板可行性分析

参考实际工程,设计了相同尺寸及配筋的现浇混凝土板(Cast-in-place Concrete Slab, CCS)和暗梁式全预制板(Fully Prefabricated Slabs Connected With Dark-beam, FPSCWD),模拟了二者的受力过程。通过对比二者的承载力、受力过程,探讨上述装配方法的可行性。其中,抗剪钢条本构采用三折线模型,第二折线斜率取0.1,单元类型为T3D2,泊松比取0.3,材料参数取标准值<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 FPSCWD 和 CCS 的设计

CCS 和 FPSCWD 的尺寸及配筋如图4所示。其中,混凝土强度均为C30,钢筋均为HRB335,抗剪钢条为Q235,板厚均为120 mm,两块FPSCWD拼装后的总长同CCS,均为3 030 mm。

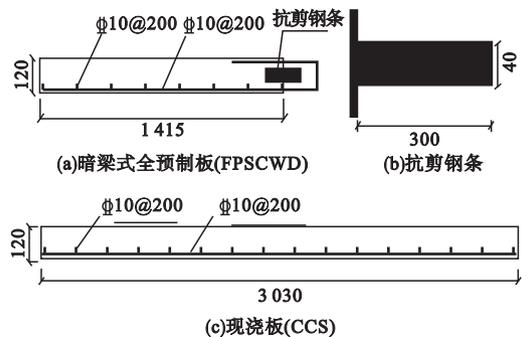


图4 装配与现浇试件配筋图

Fig. 4 The reinforcement diagram of cast-in-situ and precast slabs

### 3.2 FPSCWD 和 CCS 的受弯承载力对比分析

FPSCWD 和 CCS 的跨中荷载 - 挠度曲线如图 5 所示,初始刚度及承载力对比如表 2 所示。

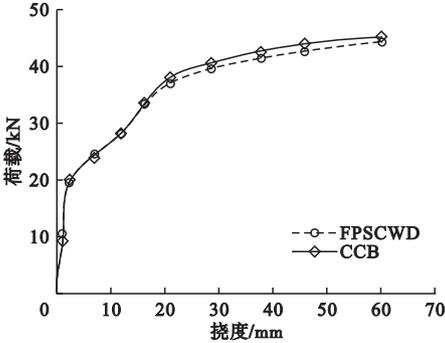


图 5 跨中荷载 - 挠度曲线对比

Fig. 5 The comparison of load-deflection curves in mid-span

表 2 初始刚度及承载力对比

Table 2 The comparison of bearing capacity and initial stiffness

试件	初始刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
CCS	2.10	10.60	33.36	42.66
FPSCWD	2.06	9.66	33.96	44.28

从图 5 和表 2 可看出,FPSCWD 的荷载 - 挠度曲线在初始阶段略低于 CCS,其初始刚度、开裂荷载分别较 CCS 低 1.9% 和 8.87%;在后期,逐渐高于 CCS,其屈服荷载和极限荷载分别较 CCS 高 1.8% 和 3.8%。这主要是因为加载初期,FPSCWD 连接处新旧混凝土结合面抗拉较弱,因此 FPSCWD 的初始刚度和开裂荷载较低,但因结合面处 U 型筋相互搭接形成 4 肢封闭箍并且该处设置抗剪钢条,对混凝土的开裂有一定的限制作用,所以开裂荷载偏低的程度很小。后期,相互搭接 U 型筋形成的封闭箍和抗剪钢条的作用进一步增加,因此,FPSCWD 的屈服荷载和极限荷载较 CCS 略微增大。由此说明 FPSCWD 具有工程可行性。

### 3.3 FPSCWD 和 CCS 受力过程对比

图 6 为开裂荷载、屈服荷载和极限荷载

时,FPSCWD 和 CCS 的混凝土损伤云图对比。由图可知,FPSCWD 与 CCS 板侧的裂缝发展规律不同,从开裂荷载到极限荷载,CCS 跨中裂缝一直最大,而 FPSCWD 在开裂荷载和屈服荷载时,跨中裂缝小于相邻两侧,到极限荷载,跨中裂缝才与两侧接近。由此说明 FPSCWD 和 CCS 的破坏过程不同,FPSCWD 的后浇混凝土处板侧混凝土破坏后于 FPSCWD 本身板侧混凝土的破坏,可满足“强连接弱构件”的设计原则。



图 6 不同荷载 CCS 和 FPSCWD 板侧塑性损伤云图对比

Fig. 6 The comparison of DAMAGET cloud images between CCS and FPSCWD under different load

为进一步对比 FPSCWD 和 CCS 的受力过程,提取了开裂时二者板底混凝土的最大主应力云图,如图 7 所示,屈服荷载时二者钢筋的 Mises 应力云图如图 8 所示。

由图 7 可知,FPSCWD 和 CCS 的板底混凝土最大主应力分布范围相近,CCS 的最大主应力在  $-2.34 \sim 2.12$  MPa,FPSCWD 的最大主应力在  $-2.02 \sim 2.15$  MPa;二者的最大主应力分布区域明显不同,CCS 加载垫梁间的混凝土几乎均达到最大主应力,而 FPSCWD 在连接处仅 U 型筋搭接处混凝土达最大主应力,其余最大主应力处分布于搭接部分两侧。由图 8 可知,FPSCWD 和 CCS 的板底钢筋 Mises 应力分布范围相近,均约为  $0 \sim 350$  MPa;二者的 Mises

应力分布区域明显不同,CCS 加载垫梁间的钢筋几乎均达到屈服应力,而 FPSCWD 在连接处

U 型筋搭接处钢筋未屈服,连接两侧 FPSCWD 的钢筋发生屈服。

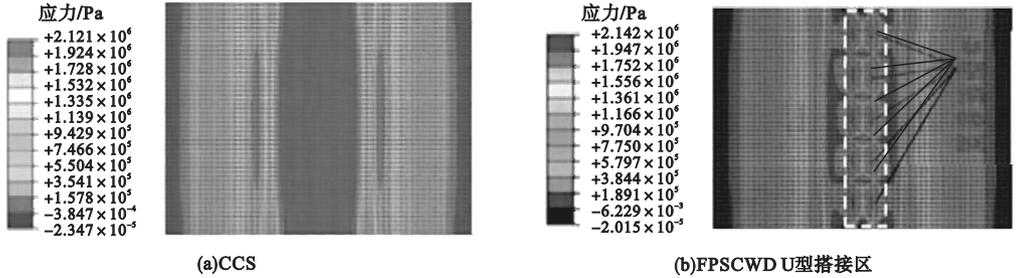


图7 开裂时 FPSCWD 和 CCS 板底混凝土最大主应力云图

Fig. 7 The cloud diagrams of maximum concrete principal stress on the bottom of CCS and FPSCWD when cracking

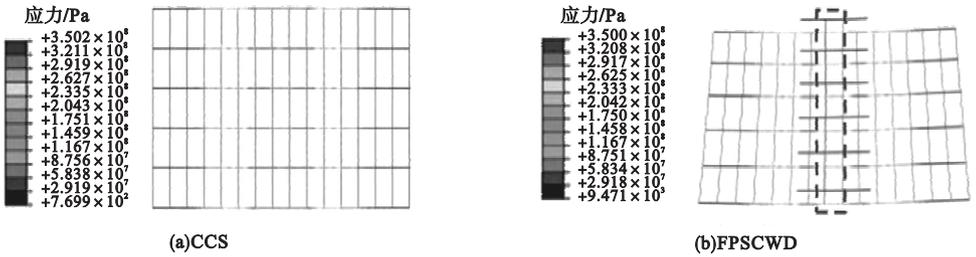


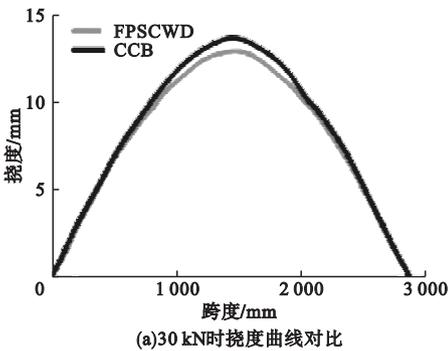
图8 屈服时 CCS 和 FPSCWD 钢筋的 Mises 应力云图

Fig. 8 The Mises stress cloud diagrams of the bars of CCS and FPSCWD when yielding

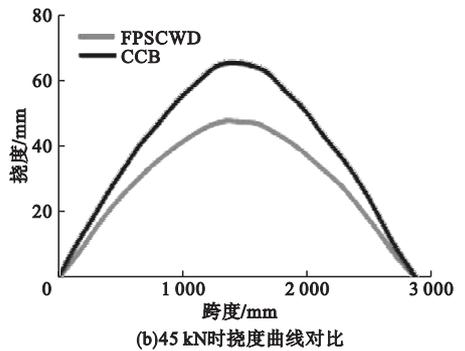
由此进一步说明,CCS 和 FPSCWD 的破坏过程不同,FPSCWD 的后浇板底混凝土和 U 型筋搭接处破坏后于 FPSCWD 本身板底混凝土和钢筋的破坏,可满足“强连接弱构件”的设计原则。

为对比 FPSCWD 和 CCS 沿板长方向的挠度变化,提取了荷载为 30 kN( 临近屈服荷载)和 45 kN( 临近极限荷载)时,位于 0、L/4、L/2 和 3L/4 处二者的挠度值(L = 2 880 mm,为支座间板长),并绘制了沿板长方向的挠度曲线,如图 9 所示。

### 3.4 FPSCWD 和 CCS 挠度对比



(a)30 kN时挠度曲线对比



(b)45 kN时挠度曲线对比

图9 不同荷载 FPSCWD 与 CCS 的挠度曲线对比

Fig. 9 The comparison of the deflection curves between FPSCWD and CCS under different load

由图 9 可知,FPSCWD 与 CCS 挠曲线形状相近,均与正弦半波曲线形状接近,说明 FPSCWD 的变形过程与 CCS 相似,连接处受

力钢筋和抗剪钢条的传力性能较好,连接处与整体的变形协调一致;30 kN 时 FPSCWD 沿板长方向的挠度与 CCS 接近,最大相差

0.74 mm,约为现浇板最大挠度的5%;45 kN时,FPSCWD沿板长方向的挠度远小于CCS,最大相差7.9 mm,约为现浇板最大挠度的12%。由此说明屈服荷载前FPSCWD的挠度较CCS偏大,但偏大的值很小,几乎可忽略;屈服荷载后FPSCWD的挠度小于CCS,并且随荷载增加,FPSCWD挠度小于CCS的程度更明显,具有更优越的抗弯性能,因此FPSCWD具有工程可行性。

### 4 暗梁式全预制板连接受弯性能影响因素分析

为分析不同参数对暗梁式全预制板受弯性能的影响,笔者基于FPSCWD设计了共22个试件,参数包括新旧混凝土之间摩擦系数、连接处后浇混凝土强度等级、接缝宽度、抗剪钢条强度等级、厚度、长度和截面高度。

(1)新旧混凝土之间摩擦系数和抗剪钢条强度等级对FPSCWD的受弯性能几乎无影响,摩擦系数由0.3增加到0.9,抗剪钢条强度等级从Q235变化到Q390,FPSCWD跨中荷载-挠度曲线几乎重合,开裂荷载、屈服荷载和极限荷载对应的破坏形态基本相同。

(2)连接处后浇混凝土强度等级仅对FPSCWD的开裂荷载有一定影响,对其他受弯性能几乎无影响。后浇混凝土强度等级由C30增加到C40,开裂荷载由10.43 kN增加到11.78 kN,增大12.9%。

(3)拼缝宽度变化对FPSCWD的受弯性能影响很小,当拼缝宽度由200 mm减小到100 mm时,各阶段承载力有所降低,但降低幅度在4%以内。当拼缝宽度由200 mm增加到400 mm时,跨中荷载-挠度曲线几乎重合,开裂荷载、屈服荷载、极限荷载对应的破坏形态基本相同。

(4)抗剪钢条厚度对FPSCWD的受弯性能影响较小,当抗剪钢条截面高度从3 mm增加到10 mm时,FPSCWD的屈服荷载、极限荷载均略有提高,提高幅度在4%以内,跨

中荷载位移曲线几乎一致。

(5)抗剪钢条长度和截面高度对板受弯性能有一定影响,下文对将此进行详细分析。

为研究抗剪钢条长度*l*对FPSCWD受弯性能的影响,模拟了抗剪钢条长度为200 mm、300 mm、400 mm时,FPSCWD的受力过程,荷载-挠度曲线对比如图10所示。由图10可以看出,抗剪钢条长度由200 mm增加到400 mm,荷载-挠度曲线在屈服荷载前几乎重合,在屈服荷载后随抗剪钢条长度的增加,抗弯承载力增大,屈服荷载和极限荷载分别提高3.36%和5.82%。

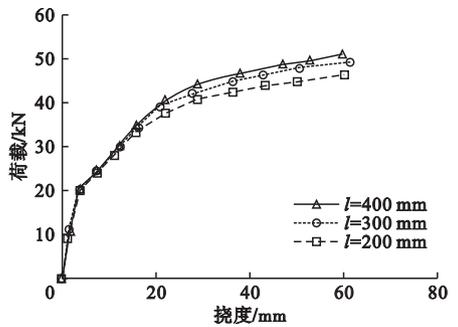


图10 不同抗剪钢条长度时FPSCWD跨中荷载-挠度曲线

Fig. 10 The mid-span load-deflection curves of FPSCWD with different shear bar lengths

笔者提取了不同钢条长度时屈服荷载和极限荷载对应的抗剪钢条应力云图如图11、图12所示。

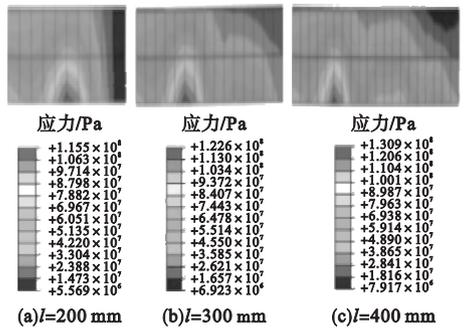


图11 抗剪钢条长度不同时屈服荷载对应的应力云图

Fig. 11 The stress nephogram under yield load with different shear bar lengths

由图11可看出,三块板( $l=200\text{ mm}$ 、 $l=300\text{ mm}$ 、 $l=400\text{ mm}$ )达到屈服荷载时抗剪钢

条最大应力比较接近,分别为 115.5 MPa、122.6 MPa 和 130.9 MPa,均远小于抗剪钢条的屈服强度,因此,荷载-挠度曲线在屈服前几乎重合。由图 12 可看出,三块板 ( $l = 200\text{ mm}$ 、 $l = 300\text{ mm}$ 、 $l = 400\text{ mm}$ ) 达到极限荷载时,抗剪钢条最大应力及应力分布差别较大,分别为 187.3 MPa、238.7 MPa、288.9 MPa,分别低于、接近、高于抗剪钢条屈服强度。因此,在屈服荷载后随抗剪钢条长度的增加,抗弯承载力增大。

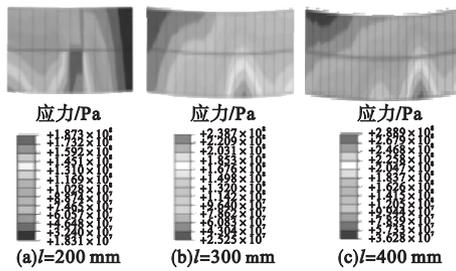


图 12 抗剪钢条长度不同时极限荷载对应的应力云图  
 Fig. 12 The stress nephogram under ultimate load with different shear bar lengths

为研究抗剪钢条截面高度  $h$  对 FPSCWD 受弯性能的影响,模拟了抗剪钢条截面不同高度 (5 mm、15 mm、40 mm) 的 FPSCWD 的受力过程,荷载-挠度曲线对比如图 13 所示。

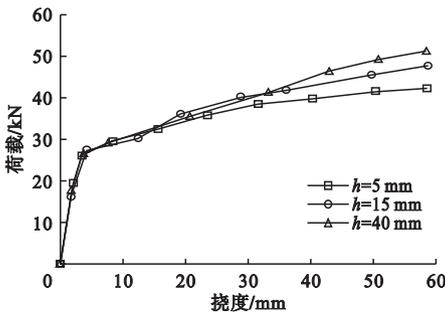


图 13 抗剪钢条截面高度不同时 FPSCWD 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 13 The mid-span load-deflection curves of FPSCWD with different shear bar section height

由图 13 可看出,抗剪钢条截面高度由 5 mm 增加到 40 mm,荷载-挠度曲线在屈服前几乎重合,在屈服荷载后随抗剪钢条截面

高度增加,抗弯承载力增大,屈服荷载、极限荷载分别提高 4.87%、5.44%。

笔者提取了不同抗剪钢条截面高度时屈服荷载和极限荷载对应的抗剪钢条应力云图如图 14 和图 15 所示。由图 14 可看出,3 块板 ( $h = 5\text{ mm}$ 、 $h = 15\text{ mm}$ 、 $h = 40\text{ mm}$ ) 达到屈服荷载时抗剪钢条最大应力及应力分布差别较大,分别为 174.9 MPa、189.3 MPa 和 294.7 MPa,前两者 ( $h = 5\text{ mm}$ 、 $h = 15\text{ mm}$ ) 远小于抗剪钢条的屈服强度,后者 ( $h = 40\text{ mm}$ ) 高于抗剪钢条屈服强度,因此,荷载-挠度曲线在屈服前随抗剪钢条的截面高度的增加,抗弯承载力增大。由图 15 可以看出,三块板 ( $h = 5\text{ mm}$ 、 $h = 15\text{ mm}$ 、 $h = 40\text{ mm}$ ) 达到极限荷载时,抗剪钢条最大应力及应力分布差别较大,分别为 239.3 MPa、332.7 MPa、348.6 MPa,分别接近 ( $h = 5\text{ mm}$ )、远高于 ( $h = 15\text{ mm}$ 、 $h = 40\text{ mm}$ ) 抗剪钢条屈服强度。因此,在屈服荷载后随抗剪钢条截面高度的增加,抗弯承载力增大。

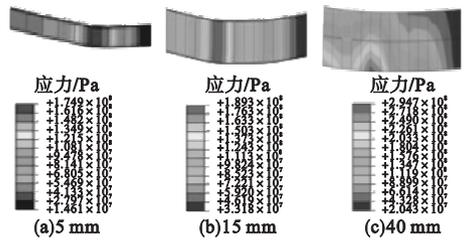


图 14 抗剪钢条截面高度不同时屈服荷载对应的应力云图

Fig. 14 The stress nephogram under yield load with different shear bar section height

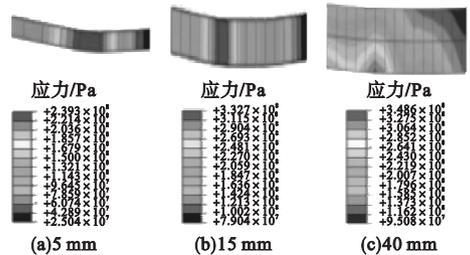


图 15 抗剪钢条截面高度不同时极限荷载时应力云图  
 Fig. 15 The stress nephogram under ultimate load with different shear bar section height

## 5 结 论

(1)全预制楼板采用暗梁式连接,连接后的楼板(FPSCWD)破坏过程不同于CCS,连接处的破坏后于全预制板破坏,可满足“强连接弱构件”的设计原则。

(2)FPSCWD的屈服和极限承载力略高于CCS,屈服和极限荷载对应的挠度低于CCS,抗弯性能更优越,而FPSCWD的开裂荷载和初始刚度略低于CCS,抗弯性能略差,这可能是因为模拟时未考虑新旧混凝土界面的粘结力引起的,但相差程度很小,因此FPSCWD具有可行性。

(3)抗剪钢条长度和截面高度对FPSCWD承载力影响相对较大,连接处混凝土强度仅对开裂荷载有影响,抗剪钢条厚度对FPSCWD的受弯性能影响较小,新旧混凝土之间的摩擦系数、拼缝宽度、抗剪钢条强度对FPSCWD的受弯性能几乎无影响。

## 参考文献

- [1] 刘戈,李楠.装配式混凝土建筑发展及研究现状[J].建筑技术,2020,51(5):542-545.  
(LIU Ge, LI Nan. Development and research status of prefabricated concrete buildings [J]. Architecture technology, 2020, 51(5): 542-545.)
- [2] 李胜强,杨博,金焕,等.装配式混凝土结构体系研究及探讨[J].建筑技术开发,2021,48(19):3-6.  
(LI Shengqiang, YANG Bo, JIN Huan, et al. Study and discussion on prefabricated concrete structure system [J]. Building technology development, 2021, 48(19): 3-6.)
- [3] TIAN L, KOU Y, HAO J, et al. Flexural performance of a lightweight composite floor comprising cold-formed steel trusses and a composite mortar slab [J]. Thin-walled structures, 2019, 144: 106361.
- [4] COLAJANNI P, LA MENDOLA L, LATOUR M, et al. Analytical prediction of the shear connection capacity in composite steel-concrete trussed beams [J]. Materials and structures, 2017, 50(1): 1-18.
- [5] LIU J, HU H, LI J, et al. Flexural behavior of prestressed concrete composite slab with precast inverted T-shaped ribbed panels [J]. Engineering structures, 2020, 215: 110687.
- [6] 石磊,王洪欣,王庆华,等.预应力带肋混凝土

叠合板力学性能分析[J].建筑结构,2021,51(增刊1):1135-1141.

(SHI Lei, WANG Hongxin, WANG Qinghua, et al. Mechanical performance analysis of pre-stressed ribbed composite slab [J]. Building structure, 2021, 51(S1): 1135-1141.)

- [7] 聂建国,姜越鑫,聂鑫,等.叠合板中桁架钢筋对预制板受力性能的影响[J].建筑结构学报,2021,42(1):151-158.

(NIE Jianguo, JIANG Yuexin, NIE Xin, et al. Effect of truss reinforcement on mechanical properties of prefabricated slabs [J]. Journal of building structures, 2021, 42(1): 151-158.)

- [8] 刘香,倪东阳,李娟.预制带肋钢筋桁架叠合板的试验与有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(1):42-52.

(LIU Xiang, NI Dongyang, LI Juan. Experimental study and finite element analysis of prefabricated ribbed steel truss laminated slabs [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(1): 42-52.)

- [9] 李建峰,南晓东,郁有升.全装配下沉式楼板锚栓式连接面内抗剪性能研究[J].工业建筑,2019,49(6):176-182.

(LI Jianfeng, NAN Xiaodong, YU Yousheng. Research on the in-plane shear behavior of anchor bolted connection in total-prefabricated sinking RC floor [J]. Industrial construction, 2019, 49(6): 176-182.)

- [10] 谭刚,刘亚东.新型蜂窝全预制免撑楼板研究[J].城市住宅,2019,26(6):78-82.

(TAN Gang, LIU Yadong. Study on new honeycomb fully-prefabricated unbraced floor [J]. City & house, 2019, 26(6): 78-82.)

- [11] 王立国.带抗剪键叠合板的力学性能及影响因素研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2016.

(WANG Ligu. Study on mechanical properties and influencing factors of laminated plates with shear bond [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)

- [12] 李明,王浩然,赵唯坚.单向带抗剪键叠合板的力学性能及设计方法[J].建筑科学与工程学报,2019,36(6):35-45.

(LI Ming, WANG Haoran, ZHAO Weijian. Mechanical properties and design method of one-way laminated slab with shear keys [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2019, 36(6): 35-45.)

- [13] 王浩然.带抗剪键叠合板的受力性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2019.

(WANG Haoran. Study on mechanical behavior of laminated slab with shear keys [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.)

- [14] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures GB50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)