文章编号:1674-2974(2026)03-0044-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026023

水泥基植物纤维预制装配式叠合板受弯性能研究

张望喜[1,2†],张晨[1],谢向荣[3],袁超[1],周益渤[1],易伟建[1]
(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;
3. 绿建科技集团新型建材高技术有限公司,湖南 长沙 410200)

摘 要:为研究水泥基植物纤维叠合板的受弯性能,对10块足尺叠合板进行四点受弯试验,测得相应的荷载-挠度曲线、荷载-应变曲线、破坏形式及相应的破坏荷载等,分析混凝土叠合层厚度、保护层厚度对叠合板力学性能的影响,包括预制底板对叠合板的抗裂性能和破坏模式的影响以及承载过程中截面的受力情况.结果表明:由于水泥基植物纤维底板的材料特性,承受正弯矩的叠合板的破坏模式与现浇混凝土板存在差异,水泥基纤维叠合板在开裂前无明显前兆,开裂较为突然,表现为预制底板中的玻璃纤维网整体性拉断,玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced plastics,GFRP)网格拉断后,叠合板的承载力会有小幅度下降;在受拉侧设置水泥基纤维板,可提高叠合板的极限承载力与延性;预制底板与后浇混凝土的协同受力性能良好,叠合面未出现滑移现象.承受负弯矩的叠合板在达到极限承载力时,上层钢筋和底层钢筋均处于受拉屈服状态,其极限承载力较现浇混凝土板有所降低,破坏模式与适筋板破坏相似.此外,将受拉区水泥基植物纤维预制板的应力等效为拉力F_g,受压区水泥基植物纤维预制板等效为厚度为d的混凝土层,根据试验数据算得F_g和d的值,并对规范公式进行修正.

关键词:预制装配式叠合板;植物纤维水泥基材料;GFRP网格加固;受弯性能
中图分类号:TU375.2 **文献标志码**:A

Research on flexural properties of cement-based plant fiber prefabricated composite slabs

ZHANG Wangxi[1,2†],ZHANG Chen[1],XIE Xiangrong[3],YUAN Chao[1],ZHOU Yibo[1],YI Weijian[1]
(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory of Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Lüjian Technology Group New Building Materials High Technology Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: To study the flexural properties of cement-based plant fiber composite slabs, static tests were conducted on 10 full-scale composite slabs, and corresponding load-deflection curves, load-strain curves, failure modes, and corresponding failure loads were revealed. The effects of concrete layer thickness, protective layer

* **收稿日期**:2025-02-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52478167),National Natural Science Foundation of China(52478167);湖南省重大科技攻关“揭榜挂帅”制项目(2025AQ2034),Hunan Province Major Scientific and Technological Breakthrough Project under the “Open Competition for Leadership” System(2025AQ2034)
作者简介:张望喜(1971—),男,湖北黄冈人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: wxizhang2000@hnu.edu.cn

thickness, and span on the mechanical behavior of composite slabs were investigated, including the influence of prefabricated base plates on crack resistance, failure modes, and sectional stress distribution. The results indicate that, owing to the material properties of cement-based plant fiber base plates, the failure modes of composite slabs under sagging moment are different from those of cast-in-place concrete slabs. The cracking of cement-based fiber composite slabs is more sudden without obvious precursors, manifested as the overall breakage of the glass fiber mesh in the prefabricated base plate. After the glass fiber reinforced plastics (GFRP) mesh is broken, the bearing capacity of the composite slab decreases slightly. Setting cement-based fiberboard on the tensile side can improve the ultimate bearing capacity and ductility. The cooperative stress performance of prefabricated bottom plate and post-cast concretes is good, the phenomenon of slipping does not occur on the laminated surface. When the composite slab under hogging moment reaches the ultimate bearing capacity, both the upper reinforcement and the bottom reinforcement are under tension, its ultimate bearing capacity is lower than that of cast-in-place concrete slabs, and the failure mode was similar to that of appropriate reinforcement slabs. In addition, the stress of fiberboard under tension is equivalent to a tensile force F_g, and the fiberboard under compression is equivalent to a concrete layer with thickness d. According to the test data, the values of F_g and d are calculated, and the formula is modified.

Key words: prefabricated composite slabs; plant fiber cement-based composites; GFRP grid reinforcement; flexural properties

叠合板能有效解决现浇混凝土楼板施工周期长、易受天气影响、生产效率低、支模工程量大以及难以实现工业化施工等问题,是我国建筑产业化发展的重要构件.

水泥基植物纤维防火保温预制装配式叠合板相比现有装配式叠合板,具有重量轻、成本低、楼板薄、防火保温、施工周期短等优点.纤维增强水泥基复合材料有较高抗拉与抗折强度[1-2],相较于普通混凝土具有更好的抗裂性能.国内外学者对纤维增强水泥基复合材料叠合板进行了相关研究.曹锐等[3]通过单向受弯试验探究了板底部加固碳纤维增强复合材料(carbon fiber-reinforced polymer,CFRP)网格对构件抗弯承载力的影响,结果表明CFRP网格使板的极限荷载提高1.12倍,并显著提高板的抗弯刚度;Fang等[4]研究了FRP格栅面板增强混凝土叠合板的受弯性能,结果表明减小纤维网格增强混凝土组合板(composite concrete slabs reinforced by fiber-reinforced polymer grid facesheets, CFGF)格筋间距可显著提高板的抗弯刚度和承载力;安海玉等[5]对3块不同参数的纤维水泥叠合板进行了静力加载试验,研究了施工阶段与使用阶段的受力性能;彭亚萍等[6]将碳纤维增强复合材料(CFRP)片材粘贴于叠合板拼缝下表面处,试验结果表明CFRP参与截面受力,可显著提高构件的开裂荷载及使用状态试验荷载值;吴方伯等[7]对工业化生产的预制薄板进行了静载试验,表明其极限承载力满足施工阶段要求,可做施工无支撑模板,同时对预制薄板叠合板进行了静载试验,表明叠合板整体受力良好,可按整浇板件计算整体受力性能;董加柱[8]研究了复合材料永久模板,以及其与现浇混凝土叠合板的受力性能;Li等[9]将超高韧性水泥基复合材料作为永久模板,结果表明采用ECC面板作为永久模板可显著提高混凝土构件的承载能力和韧性.随着建筑业向着节能环保转型,众多学者对植物纤维混凝土材料进行了研究:陈宣东等[10]的研究表明,植物纤维可以提高混凝土的抗拉强度和韧性;文献[11]利用剑麻长纤维制备了增强水泥复合材料层压板,拉伸试验结果显示,增强后的水泥薄板弹性模量、抗拉强度和极限拉伸应变都大幅提高;李培兵等[12]通过弯曲试验研究了菠萝叶纤维和苎麻纤维水泥基材料的弯曲韧性指数,结果表明纤维的加入显著提高了试件破坏时的弯曲挠度;Farooqi等[13]的研究表明,在钢筋混凝土梁柱中掺入麦秸纤维后,其抗弯强度、耗能、韧性指标有了较大提高;Ahmad等[14]探究了椰子纤维含量对高强混凝土的影响,结果表明添加椰子纤维的混凝土具有

更高的抗压、劈裂拉伸和抗弯强度;文献[15-17]的研究表明,在混凝土或砂浆中掺入植物纤维能够降低混凝土材料的导热系数.

目前,鉴于水泥基植物纤维材料的上述优势,相关研究主要围绕材料层面和构件层面进行,但鲜有学者对水泥基植物纤维材料作为永久模板的装配式叠合板进行试验与理论研究.在此背景下,本文研究了一种水泥基植物纤维预制装配式叠合板,该叠合板由预制水泥基植物纤维防火保温板材和后浇混凝土组成,其水泥基植物纤维预制底板的上表面和下表面各加固一层玻璃纤维网,相比混凝土预制底板,水泥基植物纤维板重量轻、成本低、施工简单,抗拉强度显著提高,厚度大幅度减小.本文对10块叠合板试件进行四点弯曲试验,分析叠合板在一类环境中,其加载过程中截面的受力情况,以及在正、负弯矩下的破坏模式和承载性能.

1 试验简介

1.1 试件设计与制作

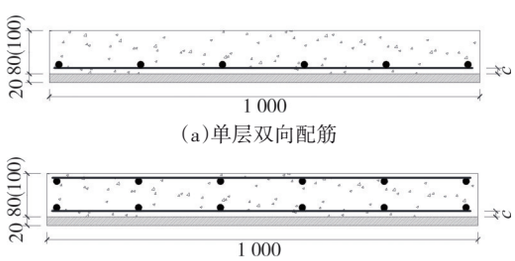
试验设计3组共10块足尺水泥基植物纤维预制装配式叠合板,其水泥基植物纤维预制底板由水泥、纳米硅膨胀树脂颗粒、官能化偶联剂、水稻纤维和玻璃纤维网加工而成.纳米硅膨胀树脂颗粒是在树脂中加入戊烷、纳米硅、改性剂等材料制作而成,在高温中膨胀成发泡颗粒,颗粒与水泥产生化学反应,生成以硅酸钙凝胶为主要成分的高强物质;官能化偶联剂是含羟基官能团添加剂,不仅能与水稻纤维的羟基形成牢固共价键,同时还能与水泥产生化学反应,从而实现植物纤维与水泥反应生成高强物质;玻璃纤维网格布的拉伸断裂强力为1 772 N/50 mm,网孔边长为6 mm,加固在厚度为19 mm的水泥基植物纤维材料的上表面和下面板,进一步增强预制底板的抗拉强度.通过上述工艺制成的水泥基植物纤维预制底板具有轻质、高强、保温的特点,在施工中可直接作为叠合板的免拆永久模板使用.

叠合板试件长度为1 700 mm,宽度为1 000 mm,各试件参数如表1所示,表1中的混凝土保护层厚度c按钢筋边缘到叠合面的距离计算.试件构造及配筋如图1所示,其中预制底板厚20 mm,后浇叠合层厚度分别为80 mm和100 mm.以水泥基植物纤维叠合板承受正弯矩还是负弯矩为依据,将试件分为正弯矩区叠合板(ZWB)与负弯矩区叠合板(FWB),其中ZWB3和FWB4为现浇钢筋混凝土板,板厚100 mm,起对照作用.正弯矩区叠合板设置单层双向Φ8@200 mm钢筋,支座处加密为Φ8@100 mm,负弯矩区叠合板配筋为双层双向Φ8@200 mm,支座处加密为Φ8@100 mm.

表1 试验试件参数

Tab.1 Specimen parameters

试件编号	预制板厚/mm+叠合层厚/mm	混凝土保护层厚度c/mm	计算跨度l/mm
FWB1	20+80	5	1 500
FWB2	20+80	10	1 500
FWB3	20+80	15	1 500
FWB4	100	15	1 500
FWB5	20+100	0	1 500
FWB6	20+100	5	1 500
FWB7	20+100	10	1 500
ZWB1	20+80	0	1 500
ZWB2	20+80	10	1 500
ZWB3	100	15	1 500



(a)单层双向配筋

(b)双层双向配筋

图1 叠合板试件配筋(单位:mm)

Fig.1 Reinforcement of composite slad(unit:mm)

1.2 试验材料

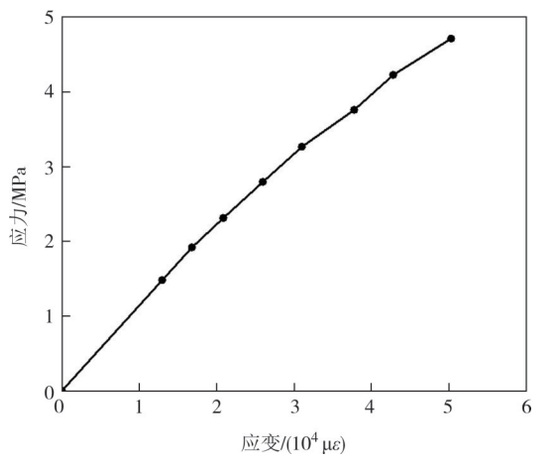
试件所用混凝土强度等级为C25,采用HRB400E钢筋,均为同一批次浇筑,经材料性能试验测试,实测混凝土立方体抗压强度平均值$f_{cu,k}$=26.1 MPa,钢筋抗拉强度平均值为f_y=468.5 MPa,植物纤维混凝土材料的立方体抗压强度为14.7 MPa.根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[18]中的相关规定,对水泥基植物纤维预制底板进行了单轴抗拉试验,试件长750 mm、宽100 mm、厚20 mm,试验实拍图、试件应力-应变曲线和试件尺寸示意图如图2所示.

1.3 试验装置与加载制度

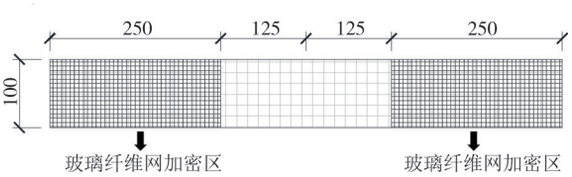
试验采用20 t千斤顶加载,力传感器读取荷载,百分表读取跨中挠度,试件跨度为1 500 mm,加载点



(a)试验实拍图



(b)植物纤维底板应力-应变曲线



(c)水泥基植物纤维预制板轴拉试件示意图(单位:mm)

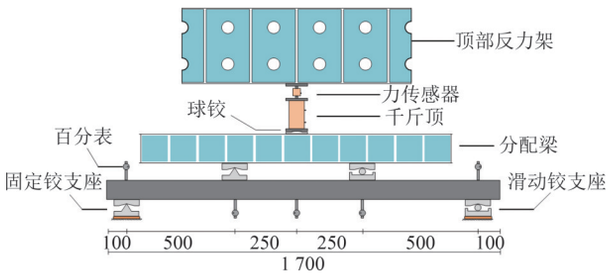
图 2　预制底板单轴抗拉试验

Fig.2　Uniaxial tensile test of precast slab

位于板跨 1/3 位置处,加载装置如图 3 所示. 试件处于弹性阶段时,采用力控制进行加载,每级荷载为 5 kN;试件屈服后,采用位移控制进行加载,每级位移为 4 mm;当试件承载力显著下降时,停止加载. 对于承受负弯矩的试件,在加载前将试件按照水泥基植物纤维预制底板朝上进行放置,从而实现对叠合板施加负弯矩.

1.4　测点布置

如图 3(a)所示,在跨中、加载点、支座设置百分表测量叠合板挠度变化,在叠合板侧面跨中位置和纵筋中部布置应变片. 应变片测点布置如图 4 所示.



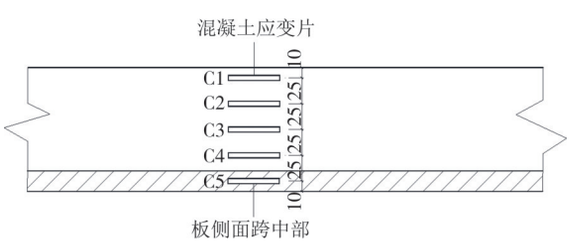
(a)加载装置示意图(单位:mm)



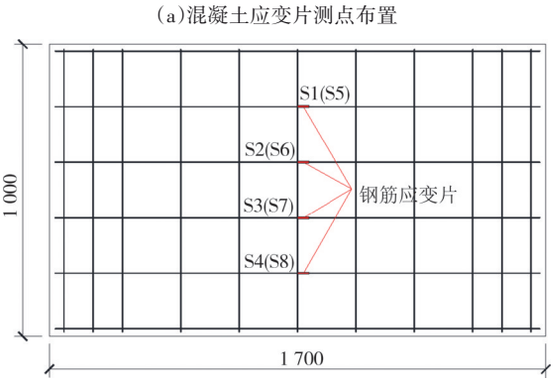
(b)实际加载装置

图 3　加载装置

Fig.3　Loading device



(a)混凝土应变片测点布置



(b)钢筋应变片测点布置

图 4　试件测点布置(单位:mm)

Fig.4　Arrangement of measurement points for test piece (unit:mm)

2　试验现象

2.1　加载过程

在加载过程中,水泥基植物纤维叠合板会因其

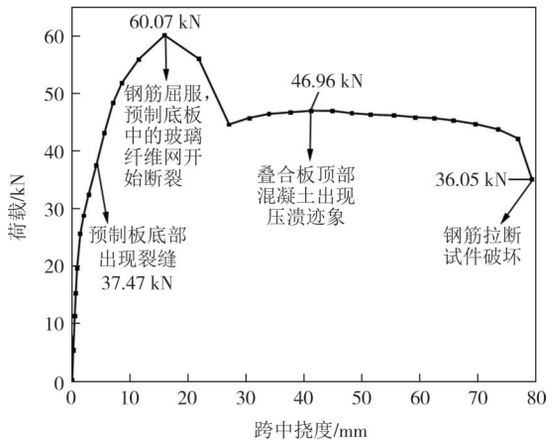
受到的是正弯矩还是负弯矩,在试验现象上呈现较大区别,但相同类型的试件,其试验现象大致相同.本节选取正弯矩区试件ZWB2和负弯矩区试件FWB3为代表进行描述,其破坏过程中特征点描述如图5所示.

ZWB2的荷载-挠度曲线见图5(a),其加载过程:加载初期,试件尚未开裂,处于弹性受力阶段,其挠度值缓慢增长,挠度与荷载基本呈线性关系;加载至37.47 kN时,试件底面跨中位置出现裂缝,此时跨中挠度为4.18 mm;加载至60.07 kN时,荷载达到峰值,底部受拉钢筋屈服,并听到GFRP网格拉断的声音,水泥基植物纤维预制底板内的玻璃纤维网开始断裂,试件底面主裂缝宽度迅速增加并延伸贯通;加载至跨中挠度为41.24 mm时,试件顶部跨中位置的混凝土出现压溃迹象,此时荷载为46.96 kN;最终加载至跨中挠度为79.41 mm,底部钢筋拉断,试件破坏,荷载下降至36.05 kN.

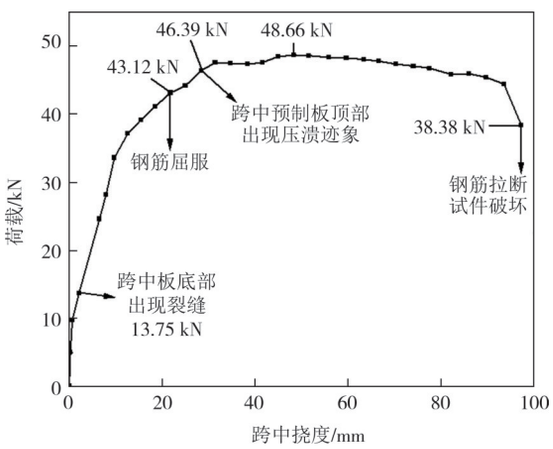
FWB3的荷载-挠度曲线见图5(b),其加载过程:加载初期,试件尚未开裂,处于弹性受力阶段,其挠度值缓慢增长,挠度与荷载基本呈线性关系;加载至13.75 kN时,试件底部跨中位置出现裂缝,此时跨中挠度为2.12 mm;加载至43.12 kN时,底部受拉钢筋屈服,跨中挠度为21.79 mm;加载至跨中挠度为28.43 mm时,水泥基植物纤维板顶部出现压溃迹象,此时荷载为46.39 kN;加载至跨中挠度为48.30 mm时,试件承载力达到峰值,此时荷载为48.66 kN;最终加载至跨中挠度为97.3 mm,底部钢筋拉断,试件破坏,荷载下降至38.38 kN.

2.2 破坏特征

试件破坏实际情况如图6所示.试验结果显示,正弯矩区叠合板的破坏模式与现浇钢筋混凝土板不同,受玻璃纤维网脆性影响,水泥基植物纤维预制底板的开裂无明显前兆,表现为突发性的GFRP网格断裂与预制底板整体性拉断并退出工作,此时叠合板顶部跨中混凝土未出现压碎迹象,试件尚未进入破坏阶段.在GFRP网格断裂后,荷载出现小幅下降,随后进入强化阶段,荷载缓慢上升,直至受拉钢筋拉断,试件破坏.在加载过程中,叠合面未出现横向裂缝,说明水泥基植物纤维预制底板与后浇混凝土之间黏结紧密,没有产生相对滑移.负弯矩区叠合板的破坏模式与适筋板破坏类似,表现为受压区的水泥基植物纤维预制底板和混凝土压碎,叠合板底层受拉钢筋拉断.



(a)ZWB2荷载-挠度曲线



(b)FWB3荷载-挠度曲线

图5 叠合板荷载-挠度曲线

Fig.5 Load-deflection curve of composite slab

正弯矩试件与负弯矩试件破坏模式的差异源于水泥基植物纤维预制底板的材料特性.水泥基植物纤维预制底板因掺入玻璃纤维网进行加固,较混凝土材料具有更高的抗拉强度,在承受正弯矩时,预制底板发挥抗拉性能,与底层钢筋共同承担拉力,GFRP网格断裂后,水泥基植物纤维预制底板退出工作,钢筋混凝土仍能继续承载,故荷载呈现迅速小幅下降后缓慢上升.在承受负弯矩时,由于水泥基植物纤维预制底板位于受压侧,受拉侧仅有钢筋提供拉力,故叠合板的破坏过程与适筋板破坏类似.

3 试验结果与分析

3.1 荷载-挠度曲线

10块试件的荷载-挠度曲线分为3组,如图7所示.由图7可知,承受正弯矩的试件在加载过程中大致可分为4个阶段:加载初期,各试件均处于弹性状


(a)FWB3 板顶


(b)FWB3 板底


(c)FWB4 板顶


(d)FWB4 板底


(e)FWB7 板顶

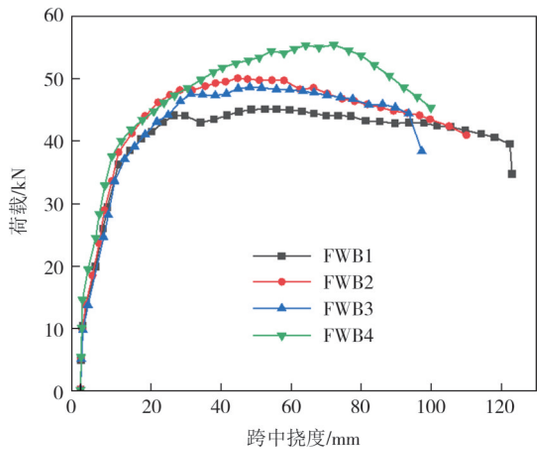

(f)FWB7 板底


(g)ZWB2 板顶

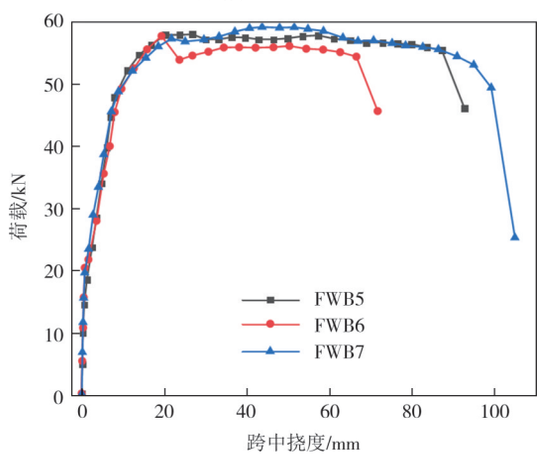

(h)ZWB2 板底

图 6　试件破坏图

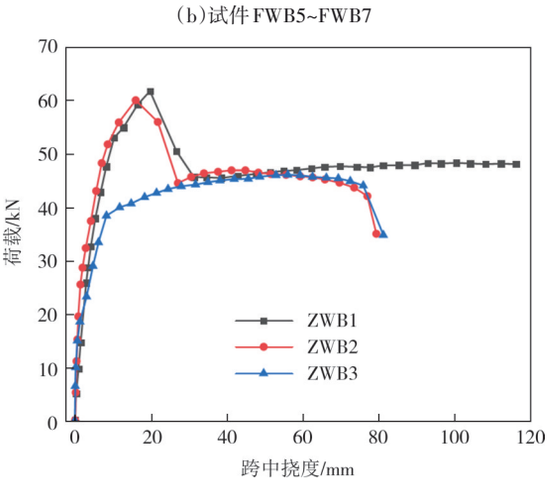
Fig.6　Failure diagram of specimen



(a)试件 FWB1~FWB4



(b)试件 FWB5~FWB7



(c)试件 ZWB1~ZWB3

图 7　荷载-挠度曲线

Fig.7　Load-deflection curves

态,荷载-挠度曲线为直线;随着荷载增加,水泥基植物纤维预制底板陆续出现数条平行的细小裂缝,试件刚度逐渐降低;跨中挠度继续增加,水泥基植物纤维预制底板中的 GFRP 网格被拉断,试件刚度大幅度降低;随着挠度进一步增加,混凝土的开裂程度不断加剧,直至试件破坏. 承受负弯矩的试件在加载过程中则可分为线弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段 3 个阶段,相比承受正弯矩的试件,没有荷载突然下降的阶段. 由图 7 可知,同类型试件的荷载-挠度曲线趋势基本一致.

由图 7(a)可知,(20+80)mm 的负弯矩区叠合板(FWB3)极限承载力比 100 mm 的现浇钢筋混凝土板(FBW4)低约 12.2%,这是因为水泥基植物纤维材料的抗压强度约为 6.3 MPa,远低于相同厚度的混凝土,导致叠合板的换算截面高度小于现浇混凝土板. 由图 7(c)可知,(20+80)mm 的正弯矩区叠合板(ZWB1)极限承载力比 100 mm 的现浇钢筋混凝土板(ZWB3)高约 33.7%,并且在水泥基植物纤维预制底板失效前,承受相同荷载时,叠合板的挠度要明显小于现浇混凝土板,文献[19]研究表明纤维编织网增

强混凝土模板的使用可显著提高构件强度和刚度，这是因为水泥基植物纤维预制底板在两侧用玻璃纤维网加固，有良好的抗拉性能，与受拉钢筋协同工作，能抵抗更大的弯矩．在GFRP网格断裂后，叠合板的承载力回落到与现浇混凝土板接近的水平，由于叠合板具有更高的极限承载力，且水泥基纤维板断裂后仍保持与现浇混凝土板接近的承载力，故叠合板比现浇混凝土板具有更高的安全储备与耗能性能．对比图7(a)和7(b)，可知增加后浇混凝土叠合层的厚度，叠合板的抗弯承载力也得到显著提高．结合图7(a)(b)(c)，相同厚度的叠合板荷载-挠度曲线都较为接近，考虑到试件加工存在误差，可以认为板厚不变时，改变混凝土保护层厚度对叠合板的抗弯承载力影响不明显，因此在施工中可令保护层厚度为0，从而极大简化施工工序．

试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载见表2．由表2可知，(20+100)mm的负弯矩叠合板(FWB5)极限承载力较100 mm的现浇混凝土板(FWB4)提升约4.5%，这表明在受压侧设置水泥基植物纤维预制底板对叠合板极限承载力的提升不大；(20+80)mm的负弯矩叠合板(FWB3)开裂荷载较100 mm的现浇混凝土板(FWB4)降低5.8%，(20+80)mm的正弯矩叠合板(ZWB1)开裂荷载较100 mm的现浇混凝土板(ZWB3)提升约104.0%，极限承载力提升约33.9%，据文献[20]可知，在受拉侧采用纤维底板，能够显著提升叠合板的抗裂性能和极限承载力．

表2 试件特征荷载实测值

Tab.2 Measured value of specimen characteristic loads

试件编号	叠合板开裂荷载/kN	钢筋屈服荷载/kN	极限荷载/kN
FWB1	13.86	44.15	45.14
FWB2	13.73	46.23	50.09
FWB3	13.75	43.12	48.66
FWB4	14.60	40.07	55.45
FWB5	18.51	56.22	57.93
FWB6	21.73	52.45	57.64
FWB7	23.39	54.13	59.07
ZWB1	37.94	53.06	61.79
ZWB2	37.47	60.07	60.07
ZWB3	18.60	40.04	46.13

3.2 钢筋应变

图8为试件ZWB2和FWB7的钢筋荷载-应变曲线．由图8(a)可知，正弯矩区叠合板ZWB2在加载初期，钢筋均处于弹性阶段，应变增长较缓慢，应变随荷载基本呈线性变化；随着预制板底中的裂缝持续开展，钢筋应变随着荷载增长的幅度有所提高；在水泥基植物纤维预制底板两侧的GFRP网格断裂时，钢筋应力突然增大，随后钢筋屈服，应变快速增加但荷载几乎不再增加．由图8(b)可知，负弯矩区叠合板FWB7开裂前，钢筋应变基本呈直线增长；试件开裂后，受拉区钢筋应变增长的幅度有所提高，但“受压区”钢筋应变的增长趋势基本保持不变；在试件达到极限承载力之前，受拉区钢筋已经屈服，在试件达到极限承载力时，“受压区”钢筋也进入受拉屈服状态，说明随着荷载的增加，中性轴会不断上移，最终超过了“受压区”钢筋所在高度，试件中的底层钢筋和上层钢筋均处于受拉状态，试件达到极限承载力时，两层钢筋均已屈服．

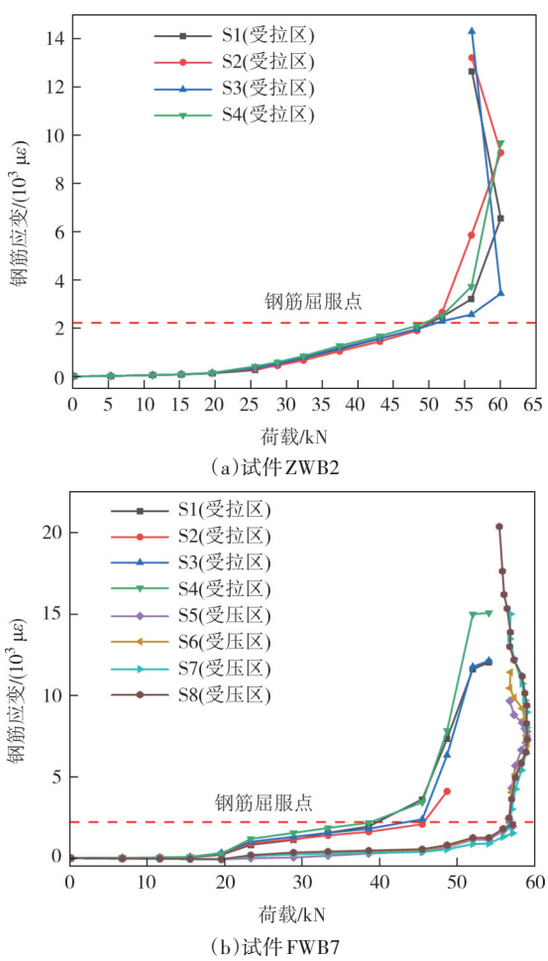


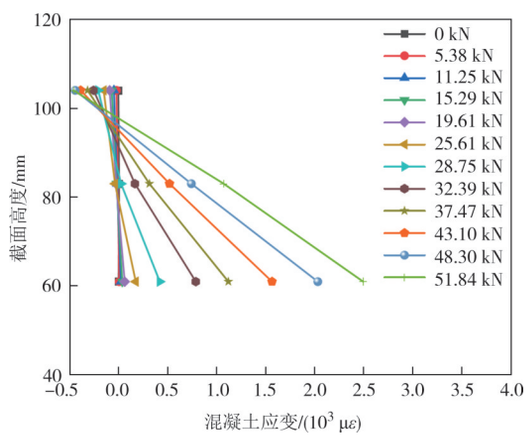
图8 试件钢筋荷载-应变曲线

Fig.8 Curves of load-strain of reinforcing bar

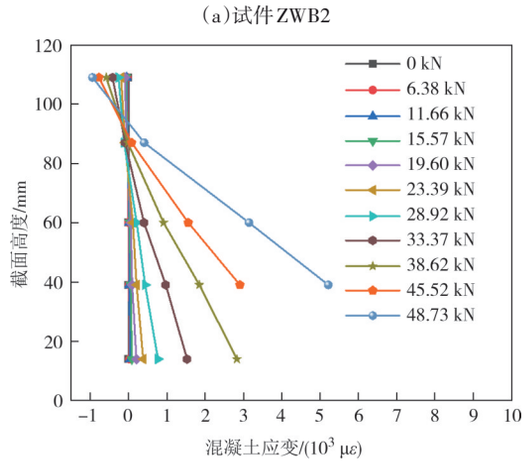
3.3 混凝土应变

试件ZWB2和FWB7的混凝土应变曲线如图9所示，其中试件ZWB2有2根应变片与混凝土表面的黏结发生了松动，未能记录到有效数据．图9表明，

叠合板截面的应变与截面高度基本呈线性关系,符合平截面假定;中性轴位置随荷载的增大明显上移,其中 FWB7 的中性轴位置已经超过上层钢筋高度,这同样表明在负弯矩区叠合板中,随着荷载增加,上层钢筋由受压转变为受拉.上层钢筋受力转变的原因是,负弯矩区叠合板的水泥基植物纤维预制底板位于截面受压侧,使上层钢筋的布设高度远低于现浇板,随着荷载增加,受压区高度减小,上层钢筋就由受压变为受拉.



(a)试件 ZWB2



(b)试件 FWB7

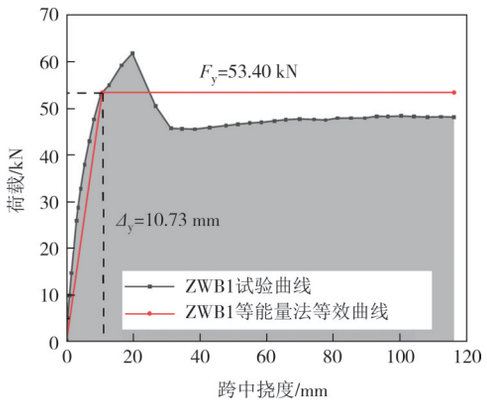
图 9　试件混凝土应变曲线

Fig.9　Concrete strain curves of specimens

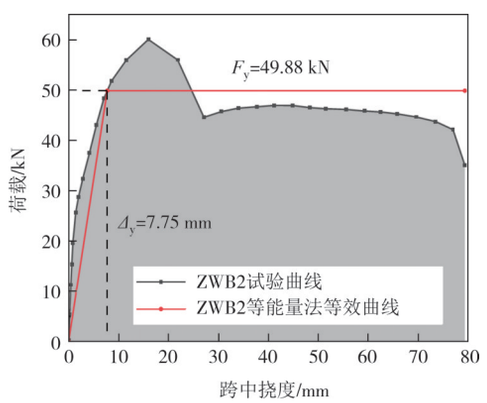
3.4　延性分析

本节讨论叠合板的延性.混凝土结构塑性和延性设计理论中,在分析延性系数时,重点关注屈服位移的定义.考虑加载前期玻璃纤维网的影响,叠合板试件的屈服点与钢筋屈服点并不完全重合,故采用等能量法[21]来确定叠合板试件的屈服点,并在此基础上计算试件的延性系数.正弯矩区试件 ZWB1、ZWB2 和负弯矩区试件 FWB1、FWB2 的等能量法等效曲线如图 10 所示.

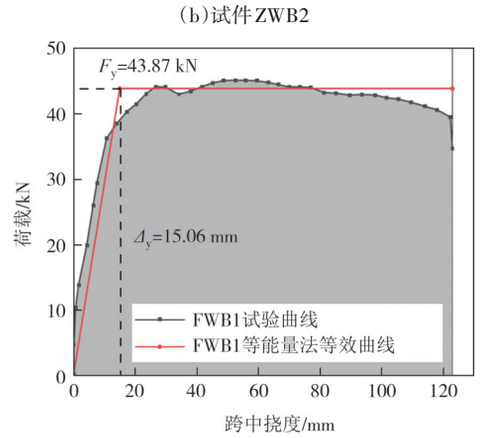
延性系数μ=破坏挠度Δ_u/屈服挠度Δ_y,叠合板试



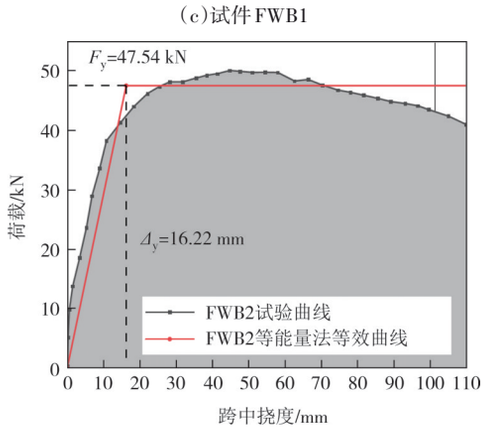
(a)试件 ZWB1



(b)试件 ZWB2



(c)试件 FWB1



(d)试件 FWB2

图 10　等能量法等效曲线

Fig.10　Equivalence curves of equivalent energy method

件的屈服挠度和延性系数见表3. 由表3可知,正弯矩区叠合板ZWB1和ZWB2的延性系数较现浇混凝土板ZWB3分别提高了33.8%和26.5%,表明在受拉区设置水泥基植物纤维预制底板,能够显著增强叠合板的变形能力,提高叠合板的延性;负弯矩区叠合板FWB1和FWB2的延性系数相比现浇混凝土板FWB4分别降低了5.1%和20.8%,这表明在水泥基植物纤维预制底板位于受压区时,耗能能力低于同厚度的混凝土,导致叠合板的延性系数低于同厚度现浇混凝土板.

表3 叠合板试件延性系数

Tab.3 Ductility coefficient of composite slab specimens

试件编号	屈服挠度 Δ_y/mm	破坏挠度 Δ_u/mm	延性系数μ
ZWB1	10.73	116.31	10.84
ZWB2	7.75	79.41	10.25
ZWB3	10.04	81.28	8.10
FWB1	15.06	123.08	8.17
FWB2	16.22	110.06	6.82
FWB4	11.60	99.89	8.61

4 理论分析

4.1 开裂弯矩计算对比

计算现浇纯混凝土板的开裂弯矩,并与相同厚度叠合板的开裂弯矩进行比较. 混凝土板开裂弯矩采用文献[22]提出的方法计算,公式如下:

$$X_{cr}=\left(1+\frac{2\alpha_E A_s}{bh}\right)/\left(1+\frac{\alpha_E A_s}{bh}\right)\frac{h}{2} \tag{1}$$

$$M_{cr}=f_t b\left(h-X_{cr}\right)\left(\frac{h-X_{cr}}{2}+\frac{2X_{cr}}{3}\right)+2\alpha_E f_t A_s\left(h_0-\frac{X_{cr}}{3}\right) \tag{2}$$

式中:X_{cr}为混凝土开裂时的受压区高度;M_{cr}为混凝土试件开裂弯矩;b为混凝土试件宽度;h为混凝土试件高度;h_0为截面有效高度;α_E为钢筋弹性模量E_s和混凝土弹性模量E_c之比;A_s为受拉钢筋面积;f_t为混凝土抗拉强度设计值. 各试件开裂弯矩试验值与计算值见表4.

由表4可知,在承受正弯矩时,叠合板的开裂弯矩实测值明显大于同厚度现浇混凝土板开裂弯矩的计算值,采用水泥基植物纤维预制板底模能显著提高板的抗裂性能;在承受负弯矩时,叠合板的开裂弯矩实测值、现浇混凝土板的开裂弯矩实测值与计算值三者非常接近,实测值与计算值的误差小于20%,表明在负弯矩区,叠合板的抗裂性能等同于现浇混凝土板,根据式(1)和式(2)计算得到的板开裂弯矩是准确的.

表4 试件开裂弯矩对比

Tab.4 Comparison of cracking moment of specimens

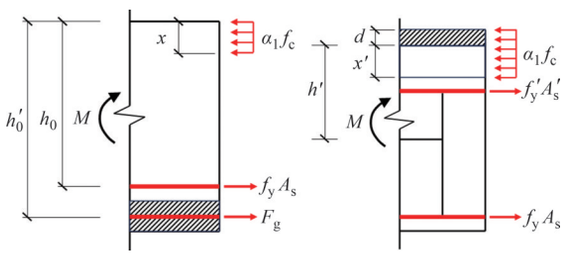
试件编号	开裂弯矩试验值 M'_{cr}/(kN·m)	开裂弯矩计算值 M_{cr}/(kN·m)	M'_{cr}/M_{cr}
FWB1	4.42	4.04	1.09
FWB2	4.39	4.04	1.09
FWB3	4.39	4.04	1.09
FWB4	4.69	4.04	1.16
FWB5	5.71	5.41	1.06
FWB6	6.19	5.41	1.14
FWB7	5.99	5.41	1.11
ZWB1	11.68	4.04	2.89
ZWB2	11.73	4.04	2.90
ZWB3	4.80	4.04	1.18

4.2 正截面抗弯承载力分析

由1.2节材性试验结果可知,混凝土立方体抗压强度标准值$f_{cu.k}$=26.1 MPa,钢筋抗拉强度f_y=468.5 MPa,根据规范[23],混凝土抗压强度标准值$f_{ck}=0.88\times0.76\times f_{cu.k}$ = 17.5 MPa. 对于现浇混凝土板试件ZWB3,取纵向受拉钢筋合力作用点到混凝土受拉区边缘的距离a_s=15 mm,计算得试件正截面抗弯承载力M_u=11.53 kN·m,试验测得结果为11.46 kN·m,误差为0.6%,表明采用规范方法计算得到的试件正截面抗弯承载力是准确的.

在计算承受正弯矩的叠合板的正截面抗弯承载力时,因水泥基植物纤维预制板和玻璃纤维网位于受拉侧,发挥抗拉性能,故可将水泥基植物纤维预制板和GFRP网格的拉力等效为一个作用在预制板中点的拉力F_g. 计算承受负弯矩的叠合板的正截面抗弯承载力时,因水泥基植物纤维预制板和玻璃纤维网位于受压侧,GFRP网格不发挥抗拉作用,故可将水泥基植物纤维预制板等效为一层更“薄”的混凝土,厚度为d,由3.2节可知,叠合板达到极限承载力时,底层钢筋和上层钢筋都已经处于受拉屈服的状态,因此将底层钢筋的拉力和上层钢筋的拉力等效为一个合力,在对称配筋时,合力作用点位于两层钢筋的中点,于是便可按规范[23]中单筋矩形截面的正截面抗弯承载力计算方法计算承受负弯矩的叠合板的极限承载力. 图11为叠合板截面受力示意图,图11(a)为承受正弯矩的叠合板的截面受力示意图,其中F_g为水泥基植物纤维预制底板的等效拉力,

α_1为混凝土受压区等效矩形应力图的强度系数,f_c为混凝土轴心抗压强度;图 11(b)为承受负弯矩的叠合板的截面受力示意图,其中 d 为水泥基植物纤维预制板等效为混凝土层的厚度,x'为混凝土受压区高度,h'为钢筋合力作用点到叠合面的距离.



(a)承受正弯矩的叠合板　　(b)承受负弯矩的叠合板

图 11　叠合板截面受力图

Fig.11　Sectional force diagram of composite slabs

根据截面受力平衡和弯矩平衡,可列出式(3)和式(4),其中h_0'为水泥基植物纤维预制板中点至叠合板顶端的距离:

$$f_c \times b \times x = f_y \times A_s + F_g \tag{3}$$

$$f_y \times A_s \times \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + F_g \times \left(h_0' - \frac{x}{2}\right) \leqslant M_u \tag{4}$$

对于承受正弯矩的叠合板试件 ZWB1,取 h_0'=90 mm, h_0=75 mm, M_u=16.40 kN·m, 计算得 F_g=79.86 kN;在计算正弯矩区叠合板正截面承载力时,取 F_g=85 kN,再根据式(3)、式(4)得到叠合板的正截面抗弯承载力.

对于现浇混凝土试件 FWB4,f_y'=468.5 MPa,A_s'=302 mm^2,a_s'取 20 mm,a_s取 10 mm,计算得到试件正截面抗弯承载力 M=13.28 kN·m,试验测得结果为 14.90 kN·m,误差为 10.9%,表明采用上述方法计算得到的现浇板正截面抗弯承载力是准确的.由截面受力平衡和弯矩平衡,可得式(5)和式(6):

$$f_c \times b \times (x' + d) = f_y \times A_s + f_y' \times A_s' \tag{5}$$

$$(f_y \times A_s + f_y' \times A_s') \times \left(h' - \frac{x' - d}{2}\right) \leqslant M_u \tag{6}$$

对于承受负弯矩的叠合板试件 FWB2,板厚为(20+80)mm,a_s'取 15 mm,a_s取 10 mm,M_u=13.48 kN·m,计算得 d=13.22 mm,x'=2.95 mm;再以试件 FWB7 为例,板厚为(20+100)mm,a_s'取 15 mm,a_s取 10 mm,M_u=15.86 kN·m,计算得到 d=11.63 mm,x'=4.53 mm;在计算承受负弯矩的叠合板正截面抗弯承载力时,从安全角度考虑,取 d=11.5 mm,再根据式(5)和式(6)算得叠合板的正截面抗弯承载力.

基于上述方法,取 F_g=85 kN 验算承受正弯矩的叠合板的正截面抗弯承载力,取 d=11.5 mm 验算承受负弯矩的叠合板的正截面抗弯承载力,计算结果见表 5. 由表 5 可知,包括承受正弯矩和承受负弯矩的所有叠合板,按上述方法算出的正截面抗弯承载力的计算值与实测值的误差很小,表明将受拉区水泥基植物纤维预制板的拉力等效为 F_g=85 kN 和将 20 mm 的受压区水泥基植物纤维预制板等效为 11.5 mm 的 C25 混凝土层是恰当的.

表 5　试件承载能力计算结果

Tab.5　Theoretical predictions of the bearing capacity of specimens

试件编号	计算值 M_u'/(kN·m)	实测值 M_u/(kN·m)	$(\lvert 1 - M_u'/M_u \rvert)$/%
FWB1	12.28	12.24	0.3
FWB2	12.99	13.48	3.6
FWB3	13.70	13.12	4.4
FWB4	14.90	13.28	12.2
FWB5	14.41	15.57	7.4
FWB6	15.12	15.86	4.7
FWB7	15.82	15.50	2.1
ZWB1	16.83	16.40	2.6
ZWB2	15.41	15.97	3.5
ZWB3	11.53	11.46	0.6

5　结 论

1)承受正弯矩的叠合板开裂呈现“脆”性,开裂前无明显征兆,在 GFRP 网格断裂后承载力有个快速下降的阶段;承受负弯矩的叠合板为适筋破坏.

2)混凝土保护层厚度对叠合板极限抗弯承载力的影响不明显.承受正弯矩的叠合板的极限承载力较同厚度的现浇混凝土板有显著的提高;承受负弯矩的叠合板的极限承载力略低于同厚度的现浇混凝土板.在受拉侧设置水泥基植物纤维预制板,能在一定程度上提升叠合板的极限承载力、抗裂性能和延性.

3)计算承受正弯矩的叠合板极限抗弯承载力时,可将水泥基植物纤维预制板的拉应力等效为一个作用于预制底板中点的合力.

4)计算承受负弯矩的叠合板极限抗弯承载力时,上层钢筋与底层钢筋都视作受拉屈服,水泥基植物纤维预制板可等效成一定厚度的混凝土层.

参考文献

[1] 刘茂军,许国平.植物纤维增强混凝土性能研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(10):3499-3509.
LIU M J,XU G P. Advances in properties of plant fiber reinforced concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(10): 3499-3509.(in Chinese)

[2] MUKHOPADHYAY S, KHATANA S. A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete[J]. Journal of Industrial Textiles,2015,45(2):239-264.

[3] 曹锐,岳清瑞. 碳纤维网格筋加固钢筋混凝土单向板的试验研究[J]. 建筑结构,2006,36(1):78-80.
CAO R, YUE Q R. Experiment research on RC slab strengthened with CFRP grid[J]. Building Structure, 2006, 36(1): 78-80.(in Chinese)

[4] FANG H, XU X, LIU W Q, et al. Flexural behavior of composite concrete slabs reinforced by FRP grid facesheets[J]. Composites Part B:Engineering,2016,92:46-62.

[5] 安海玉,郑子硕,曹宇,等. 钢筋桁架纤维水泥叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构,2022,52(16):74-78.
AN H Y, ZHENG Z S, CAO Y, et al. Experimental study on flexural performance of reinforced truss fiber cement composite slabs[J]. Building Structure,2022,52(16):74-78.(in Chinese)

[6] 彭亚萍,王文超,金鹏,等. 碳纤维增强复材-混凝土密拼双向叠合楼板静载试验研究[J]. 工业建筑,2022,52(1):205-210.
PENG Y P, WANG W C, JIN P, et al. Experimental research on CFRP-concrete two-way composite floor slab connected without gap under static load[J]. Industrial Construction, 2022, 52(1): 205-210.(in Chinese)

[7] 吴方伯,黄海林,陈伟,等. 预制带肋薄板混凝土叠合板件受力性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(4):7-12.
WU F B, HUANG H L, CHEN W, et al. Experimental analysis on the mechanical properties of concrete composite slabs with precast prestressed rectangular rib panels [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(4): 7-12.(in Chinese)

[8] 董加柱. 复合材料永久模板与现浇混凝土叠合板抗弯性能试验研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
DONG J Z. Experimental study on flexural behavior of cast-in-situ concrete laminated slabs with composite permanent templates [D]. Changchun: Jilin University, 2014.(in Chinese)

[9] LI H D, LEUNG C K Y, XU S L, et al. Potential use of strain hardening ECC in permanent formwork with small scale flexural beams[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition),2009,24(3):482-487.

[10] 陈宣东,刘光焰,王晓峰,等. 剑麻纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. 硅酸盐通报,2018,37(11):3481-3486.
CHEN X D, LIU G Y, WANG X F, et al. Research progress on sisal fiber reinforced cement-based composite materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11): 3481-3486.(in Chinese)

[11] DE ANDRADE SILVA F, MOBASHER B, FILHO R D T. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10): 721-730.

[12] 李培兵,张鹏,赵铁军, 等. 植物纤维增强水泥基复合材料的弯曲韧性研究[J]. 混凝土,2019(11): 94-97.
LI P B, ZHANG P, ZHAO T J, et al. Research on the flexural toughness of atural fiber reinforced cement composites [J]. Concrete,2019(11):94-97.(in Chinese)

[13] FAROOQI M U, ALI M. Contribution of plant fibers in improving the behavior and capacity of reinforced concrete for structural applications[J]. Construction and Building Materials,2018,182: 94-107.

[14] AHMAD W, FAROOQ S H, USMAN M, et al. Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete[J]. Materials,2020,13(5):1075.

[15] 白诗淇. 植物纤维混凝土性能研究[J]. 中国新技术新产品,2020(24):73-75.
BAI S Q. Study on properties of plant fiber concrete [J]. New Technology & New Products of China, 2020 (24): 73-75.(in Chinese)

[16] WANG G H, HAN Y. Research on the performance of straw fiber concrete [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2018,394:032080.

[17] 陈兵,刘宁. 基于磷酸镁水泥的植物茎秆增强混凝土试验研究[J]. 建筑材料学报,2016,19(6):1046-1050.
CHEN B, LIU N. Experimental investigation on green concrete using magnesium phosphate cement (MPC) and rape stalk [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19 (6): 1046-1050.(in Chinese)

[18] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.(in Chinese)

[19] 王浩宇,田稳苓,卿龙邦,等. 玻璃纤维编织网增强混凝土免拆模板抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(6):37-42.
WANG H Y, TIAN W L, QING L B, et al. Study of stay-in-place formwork bending test of glass textile reinforced concrete [J]. Industrial Construction,2015,45(6):37-42.(in Chinese)

[20] 张锡治,黄俊伟,马相,等. 免拆纤维板底模钢筋桁架叠合板受弯性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(9):902-911.
ZHANG X Z, HUANG J W, MA X, et al. Test of flexural performance on rebar truss composite slabs with permanent fiberboard formwork[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2024,57(9):902-911.(in Chinese)

[21] 殷晓三. 无明显屈服特征构件屈服点的确定与评价[J]. 地震工程与工程振动,2019,39(3):143-150.
YIN X S. Evaluation and determination methods on yield point of structural components without obvious yield feature [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2019,39(3): 143-150.(in Chinese)

[22] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 2版. 上海:同济大学出版社,2011.
GU X L. Basic principles of concrete structures[M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press,2011.(in Chinese)

[23] 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2024.
Standard for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2024.(in Chinese)