

## 不同构造形式绿色混凝土叠合板受弯性能试验

黄炜, 罗斌<sup>†</sup>, 李斌, 徐学坤, 苏衍江

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**为推动绿色再生类材料在叠合楼板中的应用,将不同性能要求的钢纤维增强绿色混凝土材料应用于叠合板中,研究不同构造形式所组成的钢纤维绿色混凝土叠合板受弯性能差异.开展了6块钢纤维增强绿色混凝土叠合板和2块普通混凝土叠合板足尺试件的抗弯性能对比试验.得到了其破坏形态、荷载-跨中挠度曲线、荷载-跨中板底受力钢筋应变曲线及荷载-跨中板顶面混凝土压应变曲线等特征参数,对比分析了各试件的破坏机理、变形特征、裂缝分布规律.研究表明,钢纤维增强绿色混凝土叠合板与普通混凝土叠合板相比受弯破坏过程类似,均经历了弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段,且裂缝、挠度发展均较为充分,未有突然断裂或沿叠合面出现水平裂缝等破坏现象,均具有较好的延性;同时,不同的预制底板构造形式对叠合楼板的受弯性能也有较大影响,其中配置钢筋桁架的叠合板,尤其是附肋钢筋桁架对叠合板的受力性能有较为显著的提高;开裂荷载及极限承载力计算应考虑构造形式及不同混凝土材料预制底板对所组成叠合板受弯性能的影响.

**关键词:**绿色混凝土;预制混凝土;叠合板;静力试验;受弯性能

**中图分类号:**TU375.2

**文献标志码:**A

## Experiment on Flexural Behavior of Green Concrete Composite Slab with Different Structural Forms

HUANG Wei, LUO Bin<sup>†</sup>, LI Bin, XU Xuekun, SU Yanjiang

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Steel fiber reinforced green concrete was applied to the composite slab in order to promote the application of green ecological materials in the composite slab. The flexural behavior of the steel fiber reinforced green concrete composite slab with different structural forms were studied. Full-scale comparative test of six steel fiber reinforced green concrete composite slabs and two ordinary concrete composite slabs were carried out. The characteristic parameters, such as failure mode, load-deflection curves, load-rebar strain curves, and load-concrete strain curves, were obtained. Further, the failure mechanism, deformation characteristics, and crack distribution were comparatively analyzed. The results show that the flexural processes of eight specimens are similar, which experienced elastic stage, elastic-plastic stage and failure stage. All specimens are bonded well on the connection interface, with-

\* 收稿日期:2018-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578446, 51508021), National Natural Science Foundation of China(51578446, 51508021); 教育部“创新团队发展计划”项目(IRT-17R84), Program for Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China(IRT\_17R84)

作者简介:黄炜(1975—),男,陕西西安人,西安建筑科技大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: Robin198595@163.com

out any break-off and other phenomenon but with good cooperative work performance. Meanwhile, different structure forms of prefabricated base slabs have significant influence on the flexural behavior of the composite slab. It is noted that steel bar truss with ribs improves the flexural behavior of the composite slab significantly. In addition, the cracking strength and ultimate load-carrying capacity of the composite slab were affected by the effects of different structural forms and different material on flexural behaviour of prefabricated base slab.

**Key words:** green concrete; prefabricated concrete; composite slab; static tests; flexural behavior

发展装配式建筑是建造方式的重大变革,是实现建筑业节能减排、提升劳动生产效率的必由之路<sup>[1]</sup>。已有研究表明<sup>[2-4]</sup>,叠合楼板作为装配式结构重要的部品,其具有整体性好、施工速度快、节约模板等优点,近年来随着我国政府层面推广装配式建筑力度的不断加大,而越来越广泛地应用于实际工程中。但目前国内外装配整体式建筑中叠合板采用的材料大多为天然骨料制备的普通混凝土,如果能够将大量的建筑固废垃圾进行循环再生利用,在混凝土制备中用再生骨料代替天然骨料,制备出绿色混凝土<sup>[5-8]</sup>,并将其应用于装配式部品工业化生产中,形成绿色预制部品,不仅能有效缓解天然骨料的过度消耗而造成的生态隐患,减少建筑垃圾排放对环境的污染,亦符合我国目前大力提倡的“建筑产业现代化、绿色建筑”发展方向。

但由于再生类骨料所制备的混凝土普遍存在表观密度小、内部微裂纹、压碎指标值高等诸多先天缺陷,致使其力学性能普遍不如传统天然骨料混凝土,这在一定程度上制约了其在工程中的应用<sup>[9-10]</sup>。针对上述问题,课题组前期将钢纤维和绿色混凝土有机地结合起来,制备出多种钢纤维增强绿色混凝土材料<sup>[11-12]</sup>。本次课题组将所制备材料研究成果应用于叠合板体系中,同时为设计受力性能更佳的叠合板,提出底部采用不同构造形式的钢纤维绿色混凝土预制底板,顶部后浇层采用普通天然骨料混凝土的叠合板,并通过8块足尺试件静载试验,对比分析了采用不同种类混凝土及不同构造形式预制底板的叠合板抗弯性能,重点研究了不同钢纤维增强绿色混凝土材料及不同构造形式预制底板所组成的叠合板与普通混凝土叠合板的受弯性能异同,得到的数据和结论可为此类叠合板研究及设计提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

共设计了8块单向板试件,试件编号及基本参数见表1。预制底板中:钢纤维淤泥陶粒混凝土是用城市地下淤泥制作的陶粒作为混凝土的粗骨料(取代率为100%),并掺入1%钢纤维,细骨料采用天然砂,制备的钢纤维增强绿色混凝土;钢纤维再生混凝土是用经破碎筛分后的废弃混凝土作为混凝土的粗骨料(取代率为100%),并掺入1%钢纤维,细骨料采用天然砂,制备的钢纤维增强绿色混凝土。配置钢筋桁架的预制底板,其钢筋桁架采用A90型;配置带肋的预制底板在肋内配2 $\phi$ 8构造钢筋。所有试件预制底板中的纵向受力钢筋均采用 $\Phi$ 8@160、横向分布钢筋采用 $\phi$ 8@240;为防止试件起吊时开裂,在后浇层中配置 $\phi$ 8@200的纵向构造钢筋及 $\phi$ 6@240的横向构造钢筋。试件构造形式及配筋如图1及图2所示。

表1 试件基本参数

Tab.1 Basic parameters of specimens

试件 编号	构造形式	预制底板		
		材质(混凝土中 粗骨料)	后浇层 材质	$L \times W \times t_b \times t_t / (mm \times mm \times mm \times mm)$
CS-1	单纵肋	普通混凝土		
CS-2	钢筋桁架	普通混凝土		
CS-3	无肋	钢纤维淤泥陶粒混凝土	普通混凝土	
CS-4	单纵肋	钢纤维淤泥陶粒混凝土		3 000×900×60 ×60
CS-5	十字肋	钢纤维淤泥陶粒混凝土		
CS-6	单纵肋	钢纤维再生混凝土		
CS-7	钢筋桁架	钢纤维再生混凝土		
CS-8	附肋钢筋桁架	钢纤维再生混凝土		

注:①所有试件叠合面均采用人工拉毛处理(且保证凹凸面 $\geq 4$  mm);②单肋、十字肋中的肋高度为30 mm,肋宽度为200 mm;③CS-2及CS-7钢筋桁架高出叠合面40 mm,CS-8桁架钢筋高出纵肋10 mm;④L表示叠合板长度(跨度),W表示叠合板宽度, $t_b$ 表示预制底板厚度, $t_t$ 表示后浇层厚度。

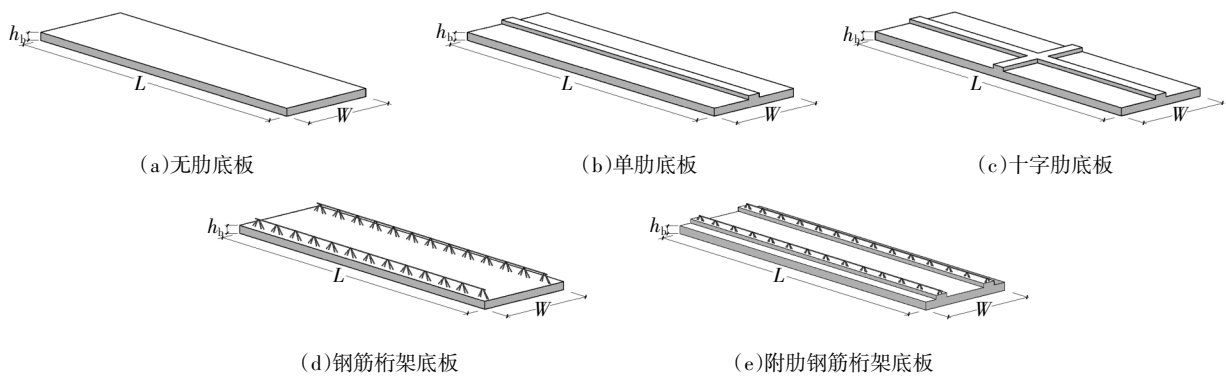


图 1 预制底板构造形式

Fig.1 Prefabricated base slab structure forms

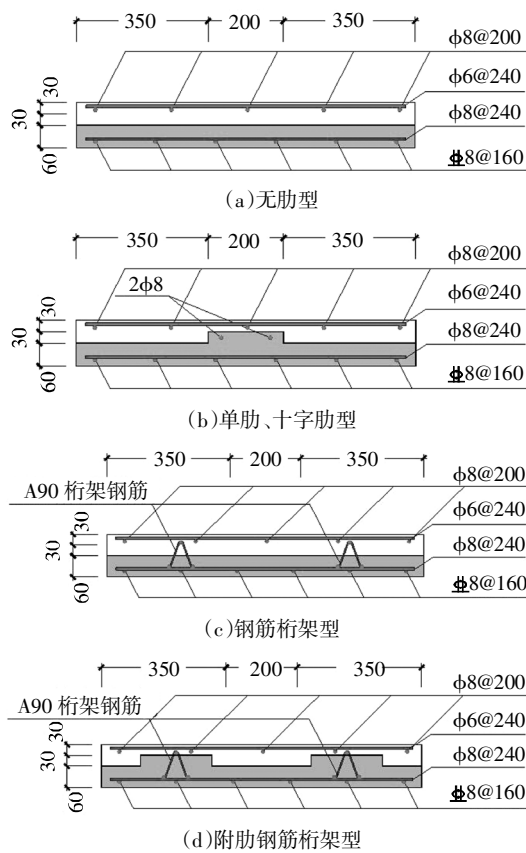


图 2 试件横断面示意图(单位:mm)

Fig.2 Specimens cross-section (unit: mm)

### 1.2 试件制作

试件制作过程主要包括预制底板及后浇层制作两道工序. 1) 预制底板制作: 首先清理车间钢结构模胎, 固定底模及侧模, 并涂刷脱模剂, 然后在底模内绑扎钢筋, 之后再固定好加强肋的模板(若有), 最后浇筑混凝土, 待混凝土初凝后将其表面进行人工拉毛处理; 2) 后浇层制作: 待预制底板达到一定强度后, 以预制底板为底模(本次试验在预制底板制作完成 10 d 后进行后浇层混凝土浇筑), 四

周固定好侧模, 绑扎钢筋, 待确认无误后, 浇筑后浇层混凝土, 形成叠合板试件. 需要说明的是, 由于本次试验研究对象为一阶段受力叠合板, 所以在后浇层混凝土制作过程中, 始终保证预制底板具有可靠支撑, 避免加载前预制底板提前受力<sup>[13]</sup>.

### 1.3 材料性能

8 块试件为同批次制作, 试件混凝土设计强度等级均为 C30. 试件浇筑时, 同期制作立方体及棱柱体试块, 标准养护 28 d 后, 实测预制底板中: 普通混凝土的立方体抗压强度平均值为 31.9 MPa, 轴心抗压强度平均值为 25.7 MPa; 钢纤维淤泥陶粒混凝土立方体抗压强度平均值为 32.4 MPa, 轴心抗压强度平均值为 21.7 MPa; 钢纤维再生混凝土立方体抗压强度平均值为 43.0 MPa, 轴心抗压强度平均值为 32.7 MPa. 实测 8 块试件后浇层的普通混凝土立方体抗压强度平均值为 35.9 MPa, 轴心抗压强度平均值为 26.7 MPa.

试件中除预制底板纵向受力钢筋采用 HRB400 外, 其余钢筋均采用 HPB300, 实测性能见表 2. 6 块钢纤维增强绿色混凝土叠合板中的钢纤维采用薄板剪切型钢纤维, 长度 35.00 mm, 直径 0.56 mm, 抗拉强度  $2.3 \times 10^3$  MPa, 弹性模量  $2.0 \times 10^4$  MPa.

表 2 钢筋力学性能

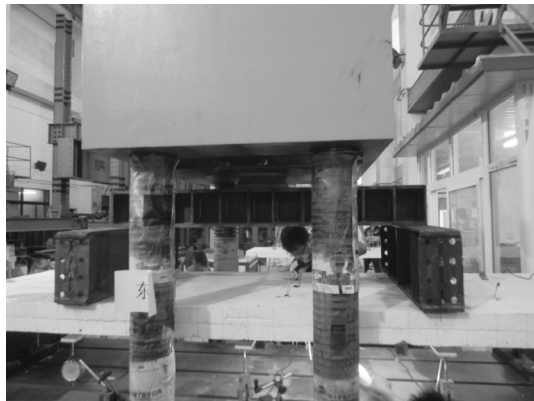
Tab.2 Mechanical properties of reinforcement

直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
6	300	429	$2.1 \times 10^5$
8	310	447	$2.1 \times 10^5$
8	434	613	$2.0 \times 10^5$

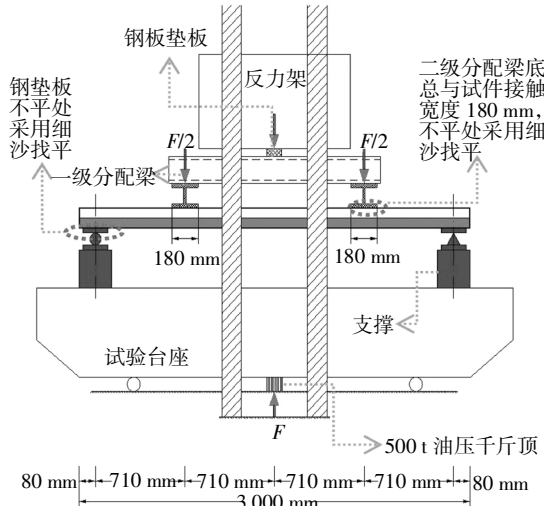
### 1.4 加载方案

试验采用在板跨度四分点位置施加 2 个相等的竖向集中荷载模拟均布荷载的方法, 加载点使用

500 t 油压千斤顶, 由液压伺服仪进行加载. 加载装置如图 3 所示.



(a) 加载现场



(b) 加载装置示意

图 3 试验加载

Fig.3 Test loading

依据文献[14], 加载分为预加载与正式加载 2 个过程, 预加载分三级加载、三级卸载, 每级加(卸)载取值为 2 kN; 进入正式加载阶段后, 开裂前每级荷载增量取 2 kN, 直至混凝土出现裂缝后, 每级荷载增量调整为 4 kN, 加载至极限荷载理论计算值的 90% 后, 再次将每级加载增量调整为 2 kN, 直到加载至试件破坏, 随后进行卸载.

本次试验, 当试件跨中挠度达到跨度的 1/200 或最大裂缝的宽度超过 0.2 mm 时, 认定试件达到正常使用极限状态; 当试件跨中挠度达到跨度的 1/50、板底混凝土裂缝宽度达到 1.5 mm、钢筋应变达到 0.01、叠合面破坏、受压区混凝土压坏或受拉主筋断裂的条件之一时, 认定试件已达到承载能力极限状态并停止加载.

### 1.5 测点布置

钢筋应变片粘贴于板底纵向受拉钢筋跨中和 1/4 跨位置, 对于试件 CS-2、CS-7 及 CS-8 分别在其钢筋桁架的上、下弦及腹杆跨中位置及 1/4 跨处布置了钢筋应变片; 位移计及混凝土应变片布置如图 4 所示.

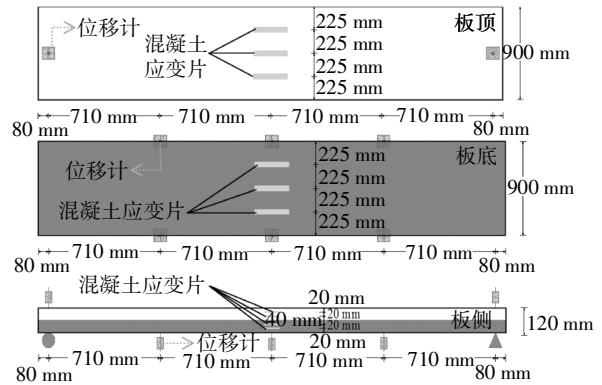


图 4 应变及位移计测点布置

Fig.4 Strain and deflection measuring locations

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 试验过程及破坏形态

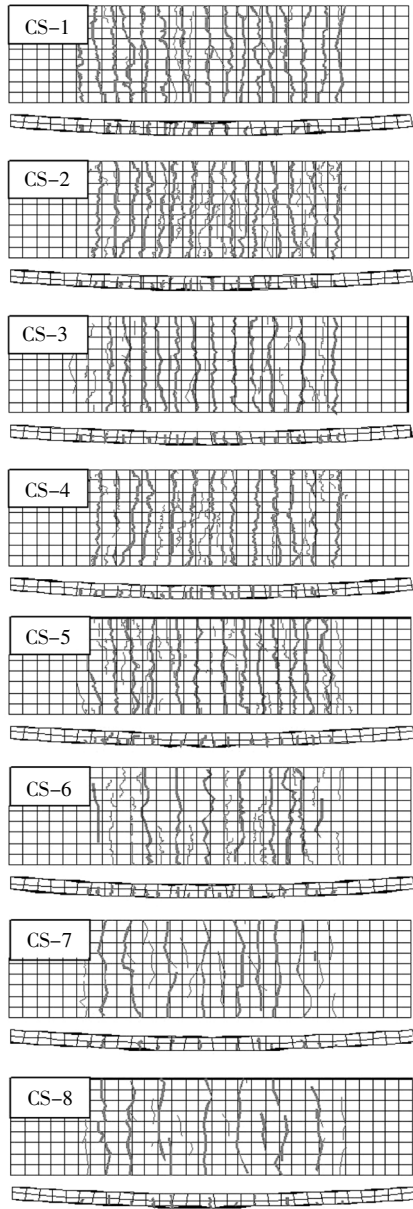
试件最终破坏形态如图 5 所示. 通过 8 块叠合板试件破坏过程对比分析, 可以发现:

1) 从整个加载过程来看, 8 块试件的反应基本相似, 均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段, 最终破坏均是由于挠度、最大裂缝或者受拉主筋应变值超过限值要求而宣告试件破坏, 呈现典型的弯曲破坏特征.

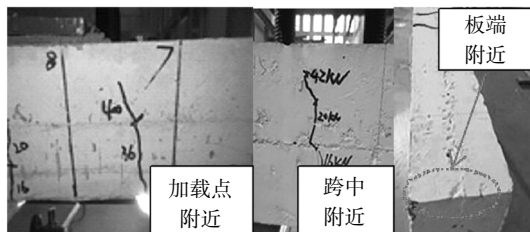
2) 对比不同混凝土预制底板所构成的叠合板, 从试件最终的裂缝分布来看, 预制底板为钢纤维再生混凝土的叠合板, 其裂缝数量最少, 预制底板采用钢纤维淤泥制陶粒混凝土的叠合板裂缝数量次之, 普通混凝土叠合板裂缝数量最多, 且其裂缝宽度最大. 这是因为 6 块钢纤维增强绿色混凝土叠合板中的钢纤维在基体混凝土中呈乱向分布状态, 阻碍了混凝土内部裂缝的扩展, 有效提高了基体的抗拉、抗裂能力, 使裂缝发展较为缓慢<sup>[15]</sup>.

3) 对比不同构造形式预制底板所构成的叠合板, 文献[16]研究表明, 对于普通混凝土或高强混凝土叠合板采用自然振捣、抹光、拉毛、设抗剪钢筋 4 种不同叠合面作法均可保证叠合面有足够的抗剪能力, 不发生沿叠合面的剪切破坏. 本次试验得出与上述研究相似的结论, 所有试件在整个加载过程

中其预制底板与后浇层均未发生沿叠合面滑移现象,亦未出现叠合面黏结破坏现象(如图 5(b)所示,仅以 CS-3 为例),表明采用拉毛、单纵肋、十字肋、钢筋桁架、附肋钢筋桁架的叠合面处理方式均可保证该类叠合板的预制底板与后浇层协同工作性能。



(a) 试件最终板侧及板底裂缝分布



(b) 试件 CS-3 破坏形态

图 5 破坏形态和最终裂缝分布

Fig.5 Failure patterns and crack distribution of specimens

## 2.2 荷载-挠度曲线

根据实测跨中位移均值绘制的跨中荷载-挠度曲线(如图 6 所示)可以看出:

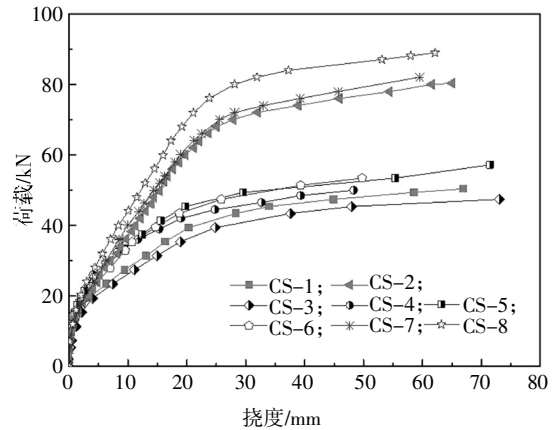


图 6 荷载-跨中挠度对比曲线

Fig.6 Comparison of load-deflection curves at mid-span

1)从整个加载过程来看,8 块试件的跨中荷载-挠度曲线均呈现明显的三段式分布.加载初期,曲线近似为一条直线,此时试件刚度较大,挠度较小;随着荷载的增大,挠度值的增大幅度开始变大;当受拉钢筋逐渐屈服后,试件刚度急剧下降,荷载上升缓慢,挠度迅速发展,出现近似平直段,直至试件达到承载能力极限状态。

2)对比不同混凝土预制底板所构成的叠合板,在同级荷载下,底板材质为钢纤维淤泥制陶粒混凝土的试件挠度较大,且极限承载力较低,底板材质为钢纤维再生混凝土的试件在同级荷载下挠度最小,极限承载力最高。

3)对比不同构造形式的预制底板所构成的叠合板,试件在弹性阶段挠度发展趋势相似,进入弹塑性阶段后,随着荷载不断增大及试件混凝土裂缝的不断开展,曲线呈现明显的差异.试件 CS-3 刚度明显削弱,表现为曲线斜率明显减小,试件挠度迅速增大,曲线偏向挠度轴一侧,承载能力基本不再增大;采用单肋形式的预制底板次之;试件 CS-2、CS-7、CS-8 挠度发展最慢,与文献[17]得出“与普通混凝土板相比,设置桁架钢筋的普通混凝土板,可有效提高试件的后期刚度,抑制裂缝的发展,减小跨中挠度”的结论相似.可见采用钢筋桁架形式是提高混凝土受弯板类构件力学性能最为行之有效的措施之一.尤其是本次试验所采用附肋钢筋桁架叠合板,其挠度增长最慢,后期刚度最大,极限承载力最高。

### 2.3 荷载-钢筋应变曲线

根据板底跨中位置的钢筋应变读数,取平均值后得各试件荷载-钢筋应变曲线(如图7所示),分析可知:

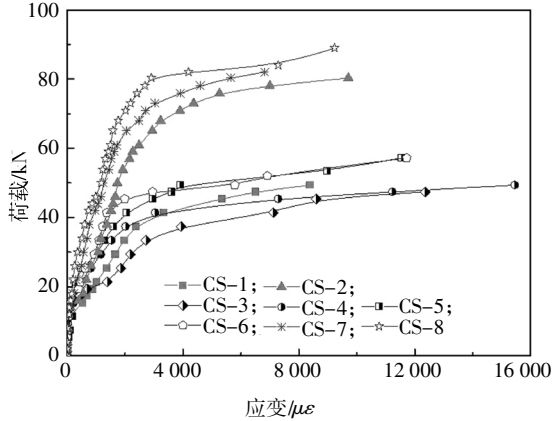


图7 荷载-跨中钢筋应变对比曲线

Fig.7 Comparison curve of load-strain at mid-span of reinforcement

1)从整个加载过程来看,8块试件的板底荷载-钢筋应变曲线均由混凝土开裂前的直线段、开裂后到钢筋屈服前的曲线爬升段及钢筋屈服后至试件达到承载能力极限状态时的平缓段组成。

2)对比不同混凝土预制底板所构成的叠合板,在混凝土开裂后,试件CS-1、CS-2受拉区裂缝处拉应力完全由板底纵向受拉钢筋承担,因此曲线出现明显的转折点.而预制底板采用钢纤维增强绿色混凝土的6块试件,由于混凝土基体刚刚出现裂缝时,钢纤维混凝土并未立即破坏,而是随着裂缝的稳定扩展,承载力继续上升,跨越裂缝的钢纤维将裂缝两侧混凝土联结在一起共同受力,所以其曲线在混凝土开裂后并没有明显的转折点;但随着荷载的增大,当板底受力钢筋屈服后,由于钢纤维的长度有限,且在基体内随机分布,其方向和形状没有规律,锚固长度无法得到充分保证,因此钢纤维在高应力作用下逐根地发生滑动,并渐渐地被拔出,甚至出现拉断的现象.此时曲线才出现较明显拐点,随后呈平缓趋势发展<sup>[18]</sup>.

3)对比不同构造形式的预制底板所构成的叠合板,试件CS-2、CS-7、CS-8,虽在破坏阶段板底纵向受拉钢筋均超过屈服应变,但其钢筋应变明显小于其他5块试件.这是由于钢筋桁架上、下弦及腹杆均参与受力,分担了混凝土开裂后底部受拉钢筋

所承担的荷载,如图8所示.与文献[19]对叠合板中钢筋桁架的受力结论相似.

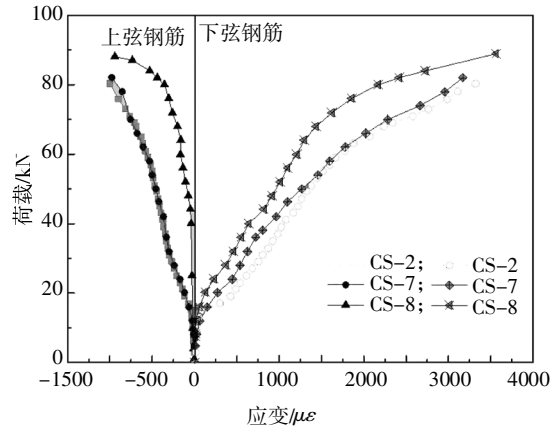


图8 荷载-上、下弦杆钢筋应变对比曲线

Fig.8 Comparison curves of load-strain at top/ bottom chords

### 2.4 荷载-混凝土压应变关系

根据板顶跨中位置混凝土测点数据,平均后得到板顶混凝土荷载-应变曲线(如图9所示),分析可知:

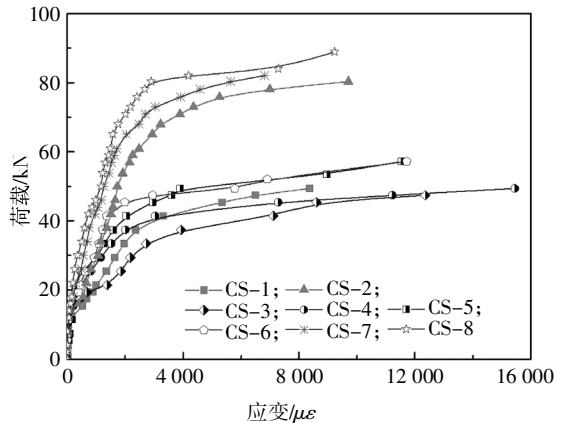


图9 荷载-跨中板顶面混凝土应变对比曲线

Fig.9 Comparison curve of load-strain relationship at mid-span of concrete at top

1)对比不同混凝土预制底板所构成的叠合板,8块试件的板顶混凝土荷载-应变曲线基本相似,整个加载过程中所有试件的受压区混凝土均未出现压碎现象。

2)对比不同构造形式的预制底板所构成的叠合板,CS-2、CS-7及CS-8由于钢筋桁架中的上弦钢筋参与板顶受力,分担了板顶混凝土中的压应力,使其板顶混凝土压应变直至构件破坏仍呈线性增长,而其他5块试件板顶混凝土表现出塑性状态,曲线逐级趋于平缓。

### 3 影响受弯承载力的因素及分析

根据本次试验加载过程实测数据,得到的各试件开裂荷载( $P_{cr}$ )、正常使用极限荷载( $P_L/200$ )、屈服荷载( $P_y$ )、极限荷载( $P_u$ )、板底最大裂缝宽度( $\omega_{max}$ )及最大挠度( $\delta_{max}$ )详见表 3.

表 3 各试件特征参数汇总表

Tab.3 Module characteristic parameter summary table

试件 编号	$P_{cr}$ /kN	$(P_L/200)$ /kN	$P_y$ /kN	$P_u$ /kN	$\omega_{max}$ /mm	$\delta_{max}$ /mm
CS-1	15.00	35.60	37.00	50.40	2.00	66.90
CS-2	17.00	47.15	53.35	78.60	1.80	65.02
CS-3	13.40	31.40	32.50	45.40	1.80	73.09
CS-4	14.80	33.46	34.60	47.90	1.80	62.03
CS-5	21.40	39.00	39.00	53.40	1.70	71.74
CS-6	15.40	36.00	38.00	55.00	1.60	56.77
CS-7	21.00	48.35	64.00	80.05	1.50	58.00
CS-8	21.00	55.30	70.20	87.80	1.50	62.14

注:荷载均已经计入加载分配钢梁质量,但未计入试件自重.

#### 3.1 3 种不同混凝土预制底板的影响

预制底板中:采用钢纤维再生混凝土的试件的特征荷载值( $P_{cr}$ 、 $P_L/200$ 、 $P_y$  及  $P_u$ )普遍较大,而其最大裂缝宽度与挠度最小;采用普通混凝土的试件特征荷载值普遍略小于钢纤维再生混凝土试件,但其最大裂缝宽度与挠度在 3 种材料中最大;采用钢纤维淤泥陶粒混凝土的试件特征荷载值普遍较小.

#### 3.2 不同预制底板构造形式的影响

1)对比 CS-1 与 CS-2,CS-2 的开裂荷载比 CS-1 提高了 13.33%, 正常使用极限荷载提高了 32.44%, 屈服荷载提高了 44.19%, 极限荷载提高了 55.95%, 表明钢筋桁架对试件开裂后的承载能力提高较为显著.

2)对比 CS-3、CS-4 及 CS-5,CS-5 的开裂荷载、正常使用极限荷载、屈服荷载、极限荷载最大, 分别比 CS-4 提高了 44.59%、16.56%、11.28%、11.48%, 比 CS-3 提高了 59.70%、24.20%、20.00%、14.98%; CS-4 比 CS-3 的开裂荷载、正常使用极限荷载、屈服荷载、极限荷载分别提高了 10.45%、6.56%、6.46%、5.51%. 说明十字肋对提高叠合楼板的承载能力较单纵肋更为显著.

3)对比 CS-6、CS-7 及 CS-8,CS-8 的极限荷载、屈服荷载及正常使用极限荷载最大,CS-7 次之, CS-6 最小,表明附肋钢筋桁架可有效提高叠合板承载能力.

### 4 承载力分析

#### 4.1 开裂荷载

根据上述试验结果分析可知,不同材料及构造形式的预制底板对试件开裂荷载均有较大影响. 因此本次计算开裂荷载时,同时考虑不同材料及不同构造形式对其影响,换算截面惯性矩计算采用如图 10 所示的横截面计算模型.

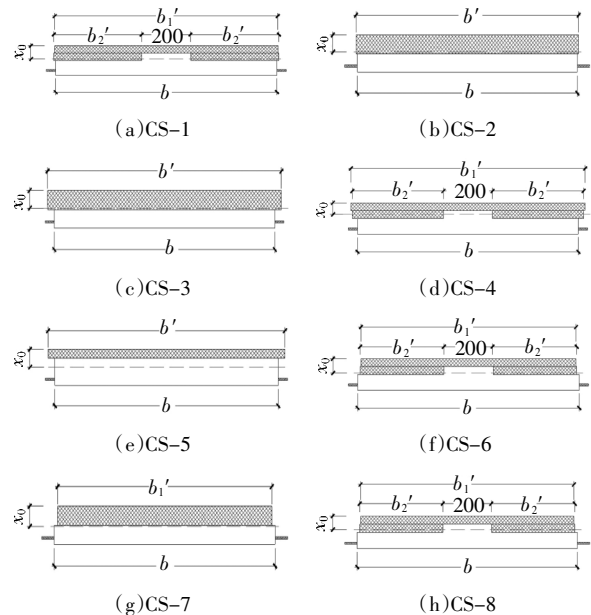


图 10 试件截面开裂荷载计算模型简图

Fig.10 Calculation model of cracking load of specimen cross-section

注:①依据文献[20]将试件的后浇层截面及底部受拉钢筋按照与预制底板弹性模量比进行截面换算.

②对于叠合面采用桁架钢筋的试件,考虑钢筋桁架中的下弦钢筋对开裂荷载提高的有利作用,并按照“①”中所示进行换算.

③ $b'$ 、 $b_1'$  及  $b_2'$  为换算后的后浇层截面宽度; $x_0$  为换算后的截面受压区高度.

1)对于 CS-1 及 CS-2,开裂荷载计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$M_{cr} = \gamma f_{tk} W_0 \tag{1}$$

$$\gamma = \left( 0.7 + \frac{120}{h} \right) \gamma_m \tag{2}$$

式中: $\gamma_m$  为叠合板的截面抵抗矩塑性影响系数基本

值,本文建议取 1.55; $f_{tk}$  为普通混凝土抗拉强度标准值,采用文献[14]中公式  $f_{tk} = 0.395f_{cu}^{0.55}$  计算混凝土抗拉强度,其中  $f_{cu}$  取实测的混凝土立方体抗压强度.式(1)和式(2)中其他符号及取值参见文献[21]中 7.2 节的相关规定.

2)对于 CS-3~CS-8,考虑钢纤维对试件底部受拉区混凝土的有利作用,本次开裂荷载计算采用文献[22]及文献[23]推荐的方法一进行,其具体公式为:

$$M_{cr} = \gamma(1 + \alpha_1 \lambda_f) f_{tk} W_0 \quad (3)$$

式中: $f_{tk}$  为不考虑钢纤维增强作用的混凝土抗拉强度,仍采用公式  $f_{tk} = 0.395f_{cu}^{0.55}$  计算,其中  $f_{cu}$  取实测的混凝土立方体抗压强度; $\alpha_1$  为钢纤维对混凝土的抗拉强度影响系数,本文建议取 0.42; $\lambda_f$  为钢纤维含量特征值; $M_{cr}$  为考虑钢纤维对受拉区绿色混凝土增强作用后试件 CS-3~CS-8 的开裂弯矩;其他符号及取值参见文献[22]中的相关规定.

由表 4,对比各试件正截面开裂弯矩计算值和实测开裂弯矩值可知:

1)对比不同混凝土预制底板所构成的叠合板,计算结果与试验现象基本一致,预制底板采用钢纤维再生混凝土的试件其开裂荷载最大,采用钢纤维淤泥陶粒混凝土的预制底板试件的开裂荷载普遍较小,亦证明了本次计算模型的可行性.

2)对比不同构造形式预制底板所构成的叠合板,开裂荷载计算应考虑预制底板的构造形式影响,本次计算中对采用拉毛处理的预制底板叠合板计算误差最小,对采用桁架钢筋及矩形肋形式的

表 4 开裂荷载对比

Tab.4 Comparison of cracking load

试件编号	实测值/(kN·m)	计算值/(kN·m)	相对误差/%
CS-1	8.20	7.98	2.76
CS-2	8.91	8.11	9.86
CS-3	7.63	7.51	1.60
CS-4	8.12	7.68	5.73
CS-5	10.47	8.35	25.39
CS-6	8.34	8.20	1.71
CS-7	10.33	9.41	9.78
CS-8	10.33	9.50	8.74

计算误差在 10%以内,亦可满足工程计算精度要求,但十字肋形式预制底板叠合板计算误差较大,其开裂荷载计算模型的简化有待进一步深入研究.

## 4.2 极限荷载

根据试验分析可知:1)采用钢筋桁架形式的预制底板其对试件后期的承载能力提高最为显著.所以本次承载力计算中,考虑 CS-2、CS-7 及 CS-8 中上弦、下弦钢筋对正截面抗弯的贡献;2)钢纤维的掺入对叠合楼板正截面受弯承载力的作用不可忽略,所以本次对于受拉区钢纤维增强绿色混凝土的抗拉强度,参照文献[22]处理方法,将受拉区等效矩形应力图形的抗拉强度,采用公式  $f_{tm} = \beta_m \lambda_f f_t$  进行计算,其中  $f_t$  的取值与 4.1 节中相同, $\beta_m$  为钢纤维对构件正截面受拉区混凝土抗拉强度的影响系数,本文取 1.30, $\lambda_f$  为钢纤维含量特征值.

同时,考虑到由于防止试件开裂在后浇层配置的纵向构造钢筋,在实际受力中会与后浇层混凝土一起参与工作,因此对于 CS-3~CS-8 本文采用如图 11 所示的正截面受弯承载力极限状态计算模型,计算采用式(4)、式(5);对于 CS-1 及 CS-2 计算采用式(6)、式(7).

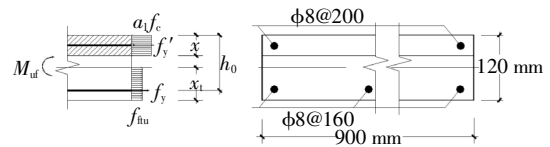


图 11 试件 CS-3~CS-8 受弯承载力计算简图

Fig.11 Calculation diagram of flexural capacity of specimens CS-3 ~ CS-8

$$M_u = f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{tm} b x_1 \left( h_0 - \frac{x}{2} - \frac{x_1}{2} \right) - f_y' A_s' a_s' \quad (4)$$

$$\alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' = f_y A_s + f_{tm} b x_1 \quad (5)$$

$$M_u = f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) - f_y' A_s' a_s' \quad (6)$$

$$\alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' = f_y A_s \quad (7)$$

式(4)~(7)中: $M_u$  为试件 CS-1 及 CS-2 的极限弯矩; $M_m$  为考虑钢纤维对受拉区绿色混凝土增强作用后的试件 CS-3~CS-8 极限弯矩; $f_c$  为试验实测棱柱体轴心抗压强度平均值; $f_y$  为实测钢筋抗拉强度值; $x_1$  为构件的受拉区高度,本文取 0.06 m,其余符号含义及取值参见文献[21-22].



由表5,分析各试件正截面极限承载力的计算值与实测值可知:

1)对比不同混凝土预制底板所构成的叠合板,预制底板采用钢纤维再生混凝土的试件其受弯承载力最大,采用钢纤维淤泥陶粒混凝土的预制底板试件的极限荷载普遍较小,与试验现象较为吻合。

2)对比不同构造形式预制底板所构成的叠合板,采用拉毛、矩形肋及十字肋形式的预制底板其极限承载力计算值与试验值吻合较好,误差均在10%以内。预制底板采用钢筋桁架的试件其承载力计算应考虑上、下弦杆钢筋对其受弯承载力的贡献。附肋钢筋桁架的计算值与试验值相差较大,其承载力计算公式有待进一步深入研究。

表5 承载力对比

Tab.5 Comparison of load bearing capacity

试件编号	实测值/(kN·m)	计算值/(kN·m)	相对误差/%
CS-1	21.99	20.98	4.81
CS-2	30.80	26.67	15.49
CS-3	18.99	20.40	-6.91
CS-4	19.87	20.40	-2.60
CS-5	21.83	20.40	6.55
CS-6	22.08	21.91	7.01
CS-7	31.45	26.78	17.44
CS-8	34.56	26.78	29.05

## 5 结论

1)8块试件受力情况相似,均经历弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段。破坏前均有较明显特征,如裂缝、挠度持续发展,受拉钢筋逐级屈服等弯曲破坏特征,均属于延性破坏。

2)不同预制底板构造形式,均未发生叠合面破坏或叠合面水平裂缝,没有预制底板与后浇层脱开等现象,预制层与后浇层协同工作性能良好。

3)钢纤维增强绿色混凝土与普通混凝土相比,绿色混凝土由于钢纤维的掺入对试件的抗裂性能有较大提升,克服了其本身骨料抗裂性差、延性低的缺点,试件均未发生脆性断裂现象。同时,采用钢

纤维再生混凝土的叠合板特征荷载值普遍较大,而其最大裂缝宽度与挠度最小;采用普通混凝土预制底板的叠合板的特征荷载值普遍略小于钢纤维再生混凝土叠合板,但其最大裂缝宽度与挠度在3种材料中最大;预制底板采用钢纤维淤泥陶粒混凝土的叠合板特征荷载值均较小,其最大裂缝宽度与挠度略小于普通混凝土,但均大于钢纤维再生混凝土叠合板。

4)对于开裂荷载及受弯承载力计算应考虑预制底板的构造形式对其影响。依据本次试验结果及理论计算,叠合板开裂荷载从大到小依次为:十字肋、附肋钢筋桁架、钢筋桁架、单纵肋及拉毛;承载力从大到小依次为:附肋钢筋桁架、钢筋桁架、十字肋、单纵肋、拉毛。

## 参考文献

- [1] CAO X, LI X, ZHU Y, *et al.* A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 109: 131—143.
- [2] LI M, SUN Z Z, ZHAO W J, *et al.* Research progress on reinforced concrete laminated slab in China [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 174/177: 263—267.
- [3] 刘东卫, 蒋洪彪, 于磊. 中国住宅工业化发展及其技术演进[J]. *建筑学报*, 2012(4):10—18.  
LIU D W, JIANG H B, YU L. Development of domestic housing industrialization and technical evolution [J]. *Architectural Journal*, 2012(4):10—18. (In Chinese)
- [4] 王元清, 袁霞, 张延年, 等. 拼装式混凝土双向叠合楼板承载性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(9):14—22.  
WANG Y Q, YUAN X, ZHANG Y N, *et al.* Experimental study of the load carrying capacities of assembled concrete superimposed two-way slabs [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(9): 14—22. (In Chinese)
- [5] 李惠强, 杜婷, 吴贤国. 建筑垃圾资源化循环再生骨料混凝土研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(6): 83—84.  
LI H Q, DU T, WU X G. Recycled aggregate concrete from construction debris [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Sciences)*, 2001, 29(6):83—84. (In Chinese)
- [6] 邓寿昌, 张学兵, 罗迎社. 废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望[J]. *混凝土*, 2006, 1(11):20—24.  
DENG S C, ZHANG X B, LUO Y S. Abandon the concrete present

- condition of the reborn exploitation analysis and the research outlook [J]. *Concrete*, 2006, 1(11):20—24. (In Chinese)
- [7] DULSANG N, KASEMSIRI P, POSI P, *et al.* Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste [J]. *Materials & Design*, 2016, 96: 350—356.
- [8] 李文贵, 罗智予, 龙初, 等. 纳米再生骨料混凝土的动态力学性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(9):92—99.  
LI W G, LUO Z Y, LONG C, *et al.* Experimental study on the dynamical mechanical performance of nanomodified recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(9):92—99. (In Chinese)
- [9] KIM S W, YUN H D. Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete [J]. *Engineering Structures*, 2013, 48:133—143.
- [10] 王长青. 再生混凝土结构性能研究最新进展 [J]. *建筑结构*, 2014(22):60—66.  
WANG C Q. Latest research progress on structural performance of recycled aggregate concrete [J]. *Building Structure*, 2014 (22): 60—66. (In Chinese)
- [11] 李斌, 黄炜, 李昌宁, 等. 钢纤维再生砖骨料混凝土损伤本构模型研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1):17—23.  
LI B, HUANG W, LI C N, *et al.* Study on damage constitutive model of steel fiber recycled brick aggregate concrete [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2017, 45(1):17—23. (In Chinese)
- [12] 黄炜, 李斌, 宋林, 等. 纤维淤泥质陶粒混凝土正交试验研究 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(1):22—28.  
HUANG W, LI B, SONG L, *et al.* Orthogonal experiment research on the strength of fiber reinforced silt ceramist concrete [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science)*, 2017, 49(1):22—28. (In Chinese)
- [13] 赵顺波, 张新中. 混凝土叠合结构设计原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001:16—29.  
ZHAO S B, ZHANG X Z. Design principle and application of concrete composite structure [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001:16—29. (In Chinese)
- [14] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:17—25.  
GB/T 50152—2012 Standard methods for testing of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012:17—25. (In Chinese)
- [15] 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, 2003:76—81.  
GUO Z H, SHI X D. Reinforced concrete theory and analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:76—81. (In Chinese)
- [16] 聂建国, 陈必磊, 陈戈. 钢筋混凝土叠合板的试验研究 [J]. *工业建筑*, 2003, 33(12):43—46.  
NIE J G, CHEN B L, CHEN G. Experimental study on shear behavior of RC laminated slabs [J]. *Industrial Construction*, 2003, 33 (12):43—46. (In Chinese)
- [17] 曹万林, 张洁, 董宏英, 等. 带钢筋桁架高强再生混凝土板受弯性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(10):31—38.  
CAO W L, ZHANG J, DONG H Y, *et al.* Experimental research on flexural performance of high strength recycled aggregate concrete slabs with steel bar truss [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(10):31—38. (In Chinese)
- [18] ÖZCAN D M, BAYRAKTAR A, SAHIN A, *et al.* Experimental and finite element analysis on the steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behaviour [J]. *Construction & Building Materials*, 2009, 23(2):1064—1077.
- [19] 刘轶. 自承式钢筋桁架混凝土叠合板性能研究 [D]. 浙江: 浙江大学建筑工程学院, 2006:18—29.  
LIU Y. Performance research of steel bar truss and concrete composite slab [D]. Hangzhou: College of Civil Engineering, Zhejiang University, 2006:18—29. (In Chinese)
- [20] 孙训方. 材料力学 (II) [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2002:9—13.  
SUN X F. Mechanics of materials (II) [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2002:9—13. (In Chinese)
- [21] GB 50010—2015 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015:19—21.  
GB 50010—2015 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015:19—21. (In Chinese)
- [22] CECS38: 2004 纤维混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004:15—30.  
CECS38: 2004 Technical specification for fiber reinforced concrete structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2004:15—30. (In Chinese)
- [23] 赵军, 宋纪文, 黄石安. 钢筋钢纤维混凝土梁正截面抗裂计算方法 [J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2000, 32(2):37—40.  
ZHAO J, SONG J W, HUANG S A. Calculating method of crack-resistant capacity of steel fiber reinforced concrete beams [J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science)*, 2000, 32(2): 37—40. (In Chinese)