

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.016



# ECC/钢筋混凝土叠合梁正截面受弯 承载力试验与理论研究

高淑玲<sup>1,2</sup>, 郭亚栋<sup>1</sup>, 吴耀泉<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

**摘要:**为了探究 ECC/高强钢筋混凝土叠合梁的正截面受弯特征,以及 ECC 层厚度对叠合梁整体受弯性能的影响,做了两组共 5 根梁试件的正截面受弯试验。发现与高强钢筋混凝土梁相比,叠合梁的承载力更高,相同荷载下的挠度值和最大裂缝宽度较小。在受弯全过程中其截面应变仍符合平截面假定,钢筋与 ECC 也可以实现协调变形,说明受拉区使用 ECC 可以使得高强钢筋的应力得到充分发挥。但 ECC 层厚度过大可能会使叠合梁发生脆性破坏。进一步地,在此研究的基础上,对已有 ECC 的本构模型进行简化,忽略其应力强化贡献,并运用叠加原理,提出一种用于计算 ECC/钢筋混凝土叠合梁正截面受弯承载力的方法,将计算结果与试验结果及诸多文献结果进行比较,发现吻合度较高。

**关键词:**叠合梁;正截面;受弯承载力;控裂能力;叠加原理

**中图分类号:**TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0123-09

## Experimental analysis and calculation theory on normal section flexural capacity of ECC/ steel reinforced concrete composite beams

Gao Shuling<sup>1,2</sup>, Guo Yadong<sup>1</sup>, Wu Yaoquan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, P. R. China)

**Abstract:** Experiments on normal section flexural capacity with two groups of five ECC/ high strength reinforced concrete composite beams were implemented to explore its flexural characters with different ECC depths. It was found that compared with steel reinforced beams, composite beams gained more flexural capacity, and had the less deformation and crack width under the same load. Plane-section assumption was still applicable, strains between steel and ECC were also well accorded with, which showed that ECC could bring the high strength steel into full play, while it would happen brittle fracture when the ECC's depth increased to one half of the beam. On the basis above, combined with superposition principle, constitutive model of ECC was been simplified to neglect its stress hardening behavior, a new calculation method for the

**收稿日期:**2016-07-26

**基金项目:**国家自然科学基金(51108151);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB623203);江苏省土木工程材料重点实验室开放基金

**作者简介:**高淑玲(1977-),女,副教授,博士,主要从事超高性能水泥基复合材料的形成机理及断裂特性研究,(E-mail) gsl200001@126.com。

**Received:**2016-06-26

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(No. 51108151); Major State Basic Research Development Program of China(973 Program) (No. 2009CB623203)

**Author brief:** Gao Shuling(1977-), associate professor, PhD, main research interests: formation mechanism and fracture characteristics of ultra high toughness cementitious composites, (E-mail) gsl200001@126.com.

capacity of the composite beams was proposed. To verify the theory, results by the calculated and the experimented had been compared.

**Keywords:** composite beams; normal section; flexural capacity; crack control; superposition principle

对于 HRB500 级钢筋混凝土受弯构件, 由于高强钢筋在使用荷载下较大的工作应力和引起的较大裂缝宽度也使构件的变形增大, 因此, HRB500 级钢筋在普通钢筋混凝土中的高强度发挥受到正常使用极限状态下裂缝和挠度变形的限制, 影响了 HRB500 级钢筋在建筑工程中的大量推广应用。因此, 如何有效地控制 HRB500 级钢筋混凝土的裂缝宽度使其应力得到充分发挥是其推广应用急需解决的关键问题。

工程用水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composites, 以下简称 ECC), 是一种基于微观力学和材料力学设计的, 以水泥、粉煤灰等粒径不大于 5 mm 的细集料作为基体, 在纤维体积掺量约为 2% 的情况下就可以获得 3% 极限拉应变的新型水泥基复合材料<sup>[1]</sup>。相比之普通混凝土, ECC 因其优越的抗拉性能被越来越多地应用于工程领域<sup>[2-3]</sup>。诸多研究已经表明<sup>[4-11]</sup>, 配筋 ECC 梁具有卓越的抗震、受弯、控裂性能。但由于 ECC 的造价大约是混凝土的 4 倍<sup>[12]</sup>, 将 ECC 全部替代混凝土不经济, 因此, 许多研究人员尝试仅将 ECC 浇筑在混凝土梁的受拉区<sup>[13-18]</sup>, 弥补钢筋混凝土梁受拉区混凝土的低抗拉性能。但由于高强钢筋在中国的普及时间较晚, 故多数仅是将 ECC 与普通钢筋混凝土相结合。另外, 虽然已有提出 ECC/钢筋混凝土叠合梁的计算方法<sup>[19-21]</sup>, 但其计算过程繁琐, 不利于实际理解和工程计算, 因此有必要提出一种既简便、效率又高的计算理论。

鉴于上述原因, 课题组采用 HRB500 级高强钢筋作为受力主筋, 在受拉区浇筑不同高度的 ECC 来替换混凝土, 研究了 ECC 层厚度对叠合梁整体受弯性能的影响, 并建议出最佳的 ECC 层浇筑高度范围。进一步分析了 ECC/钢筋混凝土叠合梁受弯过程中的截面应力应变、承载能力, 以及高强钢筋与 ECC 之间的协调变形性能。并在此基础上探讨出一种较为简便的 ECC/钢筋混凝土叠合梁受弯承载力的计算方法。

## 1 试验研究

### 1.1 试验方案

做了 2 组共 5 个试件, 第 1 组尺寸较小, 为 1 根

钢筋混凝土对照梁和 1 根有  $h/4$  ECC 厚的 ECC/钢筋混凝土叠合梁, 旨在探究 ECC 层的加入对钢筋混凝土梁的影响; 第 2 组梁的底部分别浇筑了为  $h/4$ 、 $h/3$ 、 $h/2$  厚 ECC 层, 旨在探究不同 ECC 层厚度下叠合梁的受弯机理, 具体参数如图 1、表 1 所示。其中受拉纵筋为 HRB500 钢筋, 实测抗拉屈服强度 496 MPa。箍筋与架立筋为 HRB400 钢筋, 直径分别为 8、10 mm。纤维采用日本 Kuraray 公司生产的 REC15KURALON K-II 新型聚乙烯醇 (Polyvinyl Alcohol, PVA) 系列纤维, 其具体性能见表 2。为了环保节能, 并增加流动性, 在混凝土中掺入了少量粉煤灰和减水剂, 混凝土和 ECC 的配比见表 3。为了便于进一步地理论分析, 在浇筑中每根梁试件做了混凝土伴随试块, 其抗压强度在表 8 中列出。并对 28 d 的 ECC 薄板进行了单轴拉伸试验, 测得其起裂强度 2.8 MPa, 极限强度 3.2 MPa。

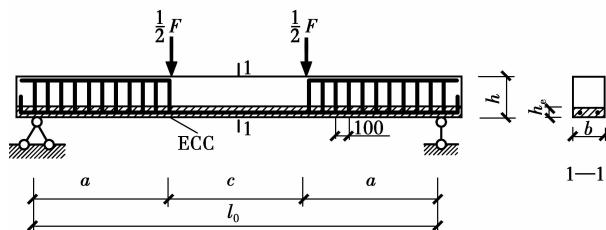


图 1 试件几何参数

Fig. 1 Parameters of specimens

表 1 试件尺寸

Table 1 Dimensions of specimens

梁编号	$l_0$ /mm	$a$ /mm	$b$ /mm	$h$ /mm	$h_e$ /mm
FB1-1(第 1 组)	2 400	800	150	250	0
FB1-2(第 1 组)	2 400	800	150	250	$62.5(h/4)$
FB2-1(第 2 组)	3 000	1 000	200	300	$75(h/4)$
FB2-2(第 2 组)	3 000	1 000	200	300	$100(h/3)$
FB2-3(第 2 组)	3 000	1 000	200	300	$150(h/2)$

表 2 PVA 纤维性能参数

Table 2 Parameters of PVA fiber

密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	极限延 伸率/%	长度/ mm	直径/ $\mu m$
1.3	1 620	42.8	7.8	12	26

表3 配合比

Table 3 Mix proportions for concrete and ECC

材料	水泥	粉煤灰	水	河砂	精细砂	减水剂	PVA ( $V_f$ )
混凝土	1	0.111	0.324	1.645		0.002	
ECC	1	1.200	0.659		0.549	0.044	2%

## 2 试验结果分析

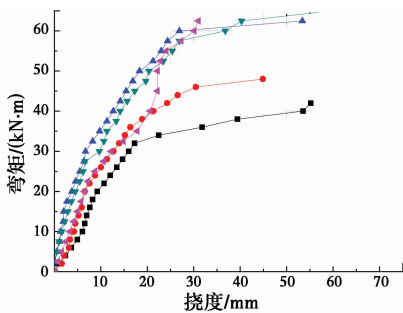
### 2.1 承载力和变形分析

试验采用力加载方式,级差 5 kN,当梁上部混凝土压碎甚至剥落而不能继续承载时,认定达到承载力极限状态,试验终止。最终的典型破坏形态如图 2 所示。同时在梁跨中底部安置了位移计,最后得到的荷载-挠度关系如图 3 所示。



图2 叠合梁试件典型破坏形态及纯弯段裂缝图

Fig. 2 Typical failure pattern and cracks in pure bending section for composite beams



注: ■ FB1-1 ● FB1-2 ▲ FB2-1 ▼ FB2-2 ◆ FB2-3

图3 荷载-挠度关系

Fig. 3 Load-deflection curves

与 FB1-1 相比,由于梁底部使用了  $h/4$  厚 ECC,FB1-2 的承载力由  $42.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$  提高到  $48.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,提升幅度约 14.3%。并且由图 3 还可以看出,在相同荷载下,FB1-2 的挠度值较 FB1-1 的小,这种差距随着荷载的增大而变大,最终 FB1-2 的极

限挠度较 FB1-1 的小 18.7%。这主要是因为与混凝土受拉断裂后基本退出工作不同,ECC 在开裂后由于纤维的桥接作用,仍可以继续承担拉应力,从而使得叠合梁的同期挠度较小,而承载力较大。

### 2.2 控裂能力分析

HRB500 高强钢筋与混凝土材料共同使用时的开裂问题一直是研究者们比较关注的话题,宏观裂缝的出现会严重影响钢筋混凝土结构的耐久性和使用寿命。钢筋混凝土结构构件一旦开裂,外界大气中的水蒸气、二氧化碳、氧气等物质就会进入到结构构件的内部引起钢筋锈蚀,进而导致混凝土层剥落、承载能力降低等后果。因此如何做到对裂缝宽度的有效控制,就成了 HRB500 高强钢筋在推广使用过程中当中亟待解决的问题。基于以上观点,本次试验采用裂缝测宽仪等工具重点观察了 ECC 材料的加入对裂缝宽度控制的影响。

表 4 列出了加载过程中部分加载时刻第一组两根梁裂缝最大宽度进行对比。从表中数据可以看到,FB1-1(混凝土)在外加荷载到达 20 kN 时最大裂缝宽度就已经到达了规范当中二类、三类环境对应要求的裂缝宽度限值 0.2 mm,而此时叠合梁(FB1-2)的裂缝还只在 ECC 层发展,裂缝宽度非常小;继续加载到约 45 kN 左右,叠合梁的混凝土层出现裂缝,由于刚出现不久,裂缝宽度在一个很低的水平(图 4(b))。而此时 FB1-1(图 4(a))的裂缝宽度已经达到了规范<sup>[22]</sup>当中一类环境对应要求的裂缝宽度限值 0.3 mm,与叠合梁的裂缝宽度差距非常大。之后随着荷载的增加,各梁的裂缝宽度也在慢慢加大,根据实测的数据可以看到叠合梁(FB1-2)ECC 层的裂缝宽度基本不会超过 0.1 mm,混凝土层的裂缝宽度虽然不如 ECC 层那么细,但相比同期 FB1-1(混凝土)的裂缝宽度则减小了很多。ECC 对裂缝的控制不仅表现在裂缝宽度上,最终量测裂缝基本出齐之后的裂缝平均间距,叠合梁混凝土层的平均裂缝间距相比 FB1-1(混凝土)同样减小了很多,分别减小了约 6 和 4.4 cm;ECC 层的裂缝则更加密集,这种细密的裂缝正是工程上所希望看到的。

表4 第1组梁受弯过程中裂缝发展情况比较

Table 4 Crack development comparisons between the FB1

梁号	20 kN 时最大 缝宽/mm	45 kN 时最大 缝宽/mm	65 kN 时最大 缝宽/mm	钢筋屈服时 最大缝宽/mm	平均裂缝 间距/cm
FB1-1	0.2	0.3	0.4	1.84	13.6
FB1-2	0.02(ECC 层)	0.06(ECC 层)	0.08(ECC 层)	0.1(ECC 层)	1.9(ECC 层)
		0.04(混凝土层)	0.1(混凝土层)	0.39 混凝土层)	7.6(混凝土层)

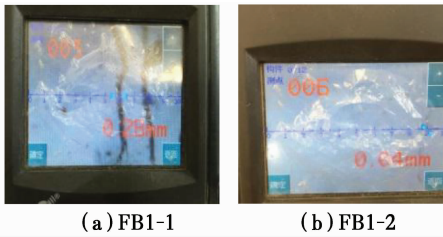


图 4 40 kN 时最大缝宽

Fig. 4 Maximum crack width for 40 kN moment

表 5 是 ECC 层叠合梁构件受弯过程中裂缝发展情况。整体来说 ECC 层厚度的增加对 ECC 本身的裂缝形态特征没有多大影响, 依然保持多缝开裂的特

表 5 第 2 组梁受弯过程中裂缝发展情况比较

Table 5 Crack development comparisons between the FB2

梁号	20 kN 时最大 缝宽/mm	40 kN 时最大 缝宽/mm	60 kN 时最大 缝宽/mm	80 kN 时最大 缝宽/mm	100 kN 最大 缝宽/mm
FB2-1	0.03	0.06	0.04(混凝土层) 0.08(ECC 层)	0.2(混凝土层) 0.09(ECC 层)	0.26(混凝土层) 0.1(ECC 层)
FB2-2	0.02	0.05	0.08(混凝土层) 0.06(ECC 层)	0.16(混凝土层) 0.1(ECC 层)	0.25(混凝土层) 0.11(ECC 层)
FB2-3	0.04	0.06	0.05(混凝土层) 0.07(ECC 层)	0.14(混凝土层) 0.09(ECC 层)	0.17(混凝土层) 0.1(ECC 层)

### 2.3 最佳浇筑高度

ECC 层高度由  $h/4$  增加到  $h/3$  时, 承载力由 FB2-1 的  $62.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$  提高到 FB2-2 的  $65.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 可见当 ECC 层厚度大于  $h/4$  时, ECC 层的厚度于整个叠合梁的承载能力的影响已不大。当 ECC 层厚度继续增加到  $h/2$  时, 叠合梁的极限承载力仍为  $65.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 不再继续增长, 但 FB2-3 的挠度值却较 FB2-2 的小很多, 且实际试验中 FB2-3 的钢筋未屈服, 破坏没有明显预兆, 为脆性破坏。按应力等效原则, 由  $A'_s = \sigma_{ub} b h_e / f_s$  (各参数具体含义见 3.1) 经过换算发现此时的 ECC 层若等效为钢筋, 则钢筋的有效面积由  $402 \text{ mm}^2$  增加到了  $595 \text{ mm}^2$ , 增加幅度达  $41.8\%$ , 但若按一般的配筋率计算公式, 其配筋率仅为  $1.1\%$ , 低于超筋的界限配筋率。说明此时普通配筋率及界限配筋率公式已经无法适用; 且 ECC 层的厚度已经过大, 甚至有些已经进入受压区, 于叠合梁的整体受力起了副作用。由第 2 组试验结果看来, ECC 层的厚度并非越大越好, 以  $h/4$  左右为宜。从一般性角度来说, 对于 HRB500 钢筋 ECC 叠合梁, 受压区混凝土抗压强度越高, 受拉区

征; 不过对混凝土层裂缝的约束效果还是有所差别。裂缝在 ECC 层发展阶段, 大量的细密裂缝出现在梁底, 3 根梁的裂缝最大宽度基本相差不大, 说明 ECC 浇筑层的增加对 ECC 层本身的裂缝发展影响不大; 当混凝土层起裂之后, 混凝土层裂缝发展的趋势就有所不同。随着 ECC 浇筑高度的增加, 相同阶段混凝土层裂缝最大宽度呈现变小的趋势。以  $80 \text{ kN}$  为例, FB2-3 ( $h/2$  厚 ECC) 的混凝土裂缝最大宽度较 FB2-1 ( $h/4$  厚 ECC) 的混凝土裂缝最大宽度减小了  $0.6 \text{ mm}$ , 这说明了 ECC 层对混凝土裂缝宽度的抑制效果随着 ECC 层高的增加在逐步加强。

ECC 最佳浇筑高度就越大。

表 6 极限挠度和荷载值

Table 6 Values for ultimate deflection and load

梁编号	极限挠度/mm	极限荷载/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
FB1-1	55.2	42.0
FB1-2	44.87	48.0
FB2-1	53.36	62.5
FB2-2	59.70	65.0
FB2-3	31.00	65.0

### 2.4 应力-应变分析

在试验时, 除在梁底安置位移计外, 同时在梁侧不同高度处和跨中附近的钢筋处粘贴了混凝土应变片和钢筋应变片以采集相应的应变值, 并将同高度处的钢筋应变和混凝土应变作了对比。以 FB2-1 的结果为代表, 如图 5 和图 6 所示。可以看出, 叠合梁的应变沿梁高基本呈线性变化, 且钢筋与同高度处 ECC 应变变化基本一致, 即叠合梁的正截面受弯全过程中基本符合平截面假定且 ECC 与钢筋的变形相协调。

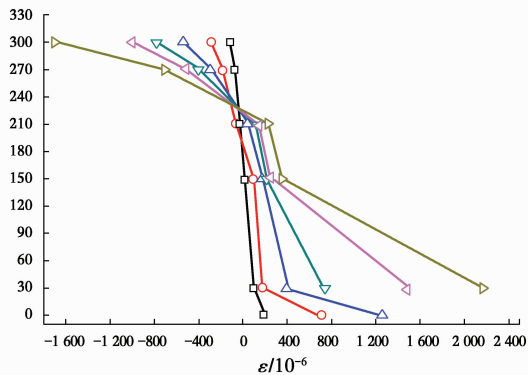


图 5 不同梁高度处应变值

Fig. 5 Strain distributions along the height of beams

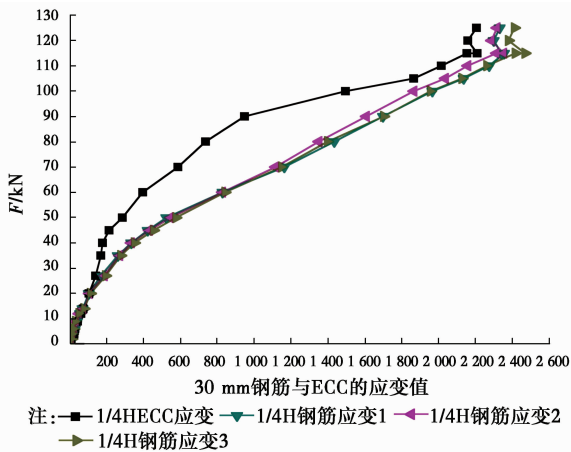


图 6 钢筋应变与同高度处 ECC 应变比较

Fig. 6 Strain comparisons between reinforcements and ECC at the same height

与普通钢筋混凝土梁类似,叠合梁的正截面受弯全过程也可划分为 3 个阶段—未裂阶段、开裂阶段和破坏阶段。当荷载很小时,沿梁高各处的应变也很小,叠合梁的应力与应变成正比,由于 ECC 的弹性模量较小,叠合梁测得的梁底部应变值较未加 ECC 的大些。这一阶段称为叠合梁的未裂阶段。当弯矩继续增加到  $M_{cr}^0$  (开裂弯矩) 时,受拉区 ECC 边缘纤维的应变值也即将达到开裂应变  $\epsilon_{ic}$ ,此时是未裂阶段末。

荷载继续增加,受拉区 ECC 边缘纤维达到开裂应变  $\epsilon_{ic}$  而开裂,叠合梁的挠度和截面曲率突然增大,从而进入带裂缝工作状态。由于 ECC 中纤维的桥接作用,使得其在开裂后仍能继续承受拉应力,裂缝扩展慢,而且裂缝条数增加,裂缝间距较小。弯矩继续增大,当与 ECC 相接的混凝土边缘纤维达到开裂应变  $\epsilon_{ic}$  时,在 ECC 上部的混凝土产生裂缝,裂缝间

距较 ECC 大,而此时受压区混凝土应变增长速度比应力增长速度快,表现出明显的塑性特征。

继续加荷至受拉钢筋屈服,叠合梁随之进入破坏阶段。此时截面曲率和梁的挠度也明显增大,混凝土内的裂缝宽度随之扩展并沿梁高向上延伸,受压区混凝土边缘纤维应变也迅速增长,塑性特征表现得越来越明显。达到极限承载力时,混凝土受压边缘纤维压应变达到极限压应变值  $\epsilon_{cu}$ ,受压区混凝土被压碎甚至剥落而丧失承载力。同时从图 5 中可以看出当达到破坏荷载时即使是 150 mm 高度处的拉应变值也在  $400 \mu\epsilon$  左右,而混凝土的极限拉应变一般为万分之一,说明此时 150 mm 高度处也早已开裂;而由图 6 的实测数据可以看出,当达到极限承载力时,ECC 的应变值在 2 500 个微应变左右,远小于 ECC 10 000~30 000  $\mu\epsilon$  左右的极限拉应变值,此时仍处于应变硬化阶段,虽然 ECC 与混凝土的抗拉强度无明显差别,但纤维的桥接作用使得 ECC 层可以继续受拉,而混凝土一旦开裂则无法继续受拉。由此,可以得出破坏阶段叠合梁截面的应力-应变分布如图 7 所示。

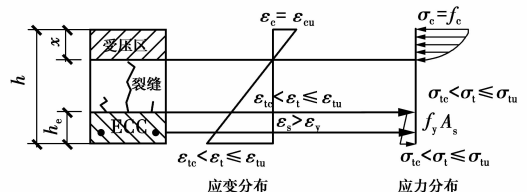


图 7 破坏阶段截面应力-应变分布

Fig. 7 Stress and strain distributions at failure stage

### 3 计算理论

#### 3.1 基本假定

在以上分析的基础上,对 ECC/钢筋混凝土叠合梁的受弯承载力提出以下基本假定:

- 1) 叠合梁受弯过程中截面应变保持平面。
- 2) 钢筋与 ECC 或混凝土变形相协调。
- 3) 不考虑混凝土的抗拉贡献,混凝土受压的应力与压应变关系曲线(图 8)按下列规定取用:

当  $\epsilon_c \leq \epsilon_0$  时(上升段)

$$\sigma_c = f_c [1 - (1 - \epsilon_c / \epsilon_0)^n] \quad (1)$$

当  $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$  时(水平段)

$$\sigma_c = f_c \quad (2)$$

参数  $n$ 、 $\epsilon_0$  和  $\epsilon_{cu}$  的取值具体见文献[22],  $f_c$  为混凝土的轴心抗压强度。



大。这也是采用忽略 ECC 应变硬化的本构模型的原因之一,即通过降低 ECC 的合力  $T$ (亦  $C_2$ )来抵消叠加过程中造成的内力臂增大的不足。

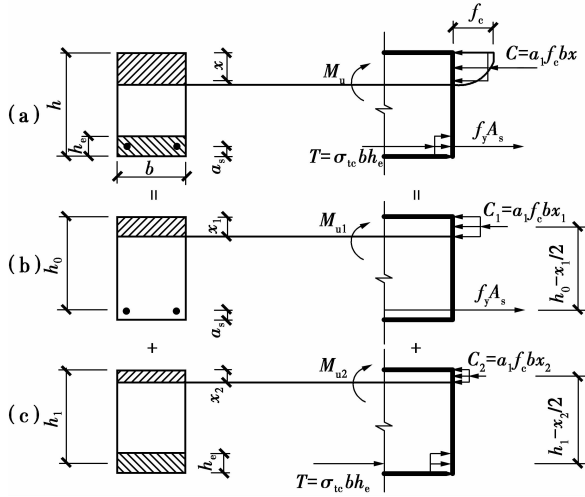


图 12 正截面受弯承载力计算简图

Fig. 12 Calculation diagrams for normal section flexural capacity

图 12(b)中,  $h_0$ 、 $f_y$ 、 $A_s$ 、 $f_c$  已知,由力和力矩的平衡条件可得

$$M_{u1} = f_y A_s (h_0 - f_y A_s / 2\alpha_1 f_c b) \quad (8)$$

图 12(c)中,根据之前的假设,  $T$  的合力作用点位于  $h_e$  中间,由力和力矩的平衡条件亦可得

$$M_{u2} = \sigma_{tic} b h_e (h_1 - \sigma_{tic} b h_e / 2\alpha_1 f_c b) \quad (9)$$

求出了  $M_{u1}$  和  $M_{u2}$ ,将其代入式(7)中即可求出 ECC/混凝土叠合梁单筋矩形截面的最大受弯承载力  $M_u$ 。

$$M_u = f_y A_s (h_0 - f_y A_s / 2\alpha_1 f_c b) + \sigma_{tic} b h_e (h_1 - \sigma_{tic} b h_e / 2\alpha_1 f_c b) \quad (10)$$

依据叠合梁单筋矩形截面正截面受弯承载力的计算方法,其他如双筋矩形、T形截面的正截面受弯承载力方法可在此基础上推导演化出来,不再赘述,将推导过程整理,最后得出的结果如表 7 所示。

表 7 ECC/钢筋混凝土叠合梁正截面极限承载力

Table 7 Normal section flexural capacities for ECC/ steel reinforced concrete composite beams

截面简图	承载力 $M_u$ 计算公式
<p>(a)</p>	$M_u = f_y A_s (h_0 - f_y A_s / 2\alpha_1 f_c b) + \sigma_{tic} b h_e (h_1 - \sigma_{tic} b h_e / 2\alpha_1 f_c b)$
<p>(b)</p>	$M_u = f_y A_s (1 - \gamma) [h_0 - f_y A_s \gamma / 2\alpha_1 f_c b] + \sigma_{tic} b h_e (h_1 - \sigma_{tic} b h_e / 2\alpha_1 f_c b) + f_y' A_s' h_2$ <p>其中 <math>\gamma = f_y' A_s' / f_y A_s</math></p>
<p>(c)</p>	$M_u = f_y A_s (h_0 - f_y A_s / 2\alpha_1 f_c b'_f) + \sigma_{tic} b h_e (h_1 - \sigma_{tic} b h_e / 2\alpha_1 f_c b'_f)$
<p>(d)</p>	$M_u = \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f (h_0 - h'_f / 2) + [f_y A_s - \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f] [h_0 - f_y A_s / 2\alpha_1 f_c b + (b'_f - b) b h'_f / 2] + \sigma_{tic} b h_e (h_1 - \sigma_{tic} b h_e / 2\alpha_1 f_c b)$

### 3.4 试验结果验证

为了验证提出的计算理论的有效性和准确性,除了课题组的试验结果外,还选取了文献[13-17]的相关试验数据进行了比较。将以上各数据汇总对比,得到的结果如表 8 所示。

表 8 数据对比分析

Table 8 Comparisons between tests and calculations

试件来源	$b \times h /$ mm <sup>2</sup>	$h_u /$ mm	$h_0 /$ mm	$h_1 /$ mm	$A_s /$ mm <sup>2</sup>	$A'_s /$ mm <sup>2</sup>	$\sigma_{tic} /$ MPa	$f_c /$ MPa	$f_y /$ MPa	$f'_y /$ MPa	$M_{u}^{cal} /$ (kN · m)	$M_{u}^{ex} /$ (kN · m)	相对误差 / %
文献[13]	300 × 500	60	440	470	1 134	157	1.6	33.0	450	450	234.0	221.0	5.9
文献[14]	150 × 230	30	140	215	157		6.2	30.4	365		13.6	15.1	9.9
文献[15]	114.3 × 152.4	50.8	127	127	380		3.2	41.4	414		19.7	18.1	8.9
文献[16]	120 × 200	15	169	193	226		4.0	16.7	400		16.8	14.9	12.8
文献[16]	120 × 200	50	169	175	226		4.0	16.7	400		17.3	16.9	2.4
文献[17]	120 × 150	70	115	115	157		4.0	33.6	310		9.0	8.8	2.3
文献[17]	120 × 150	74	113	113	308		4.0	26.7	335		13.8	11.9	16.0

续表 8

试件来源	$b \times h /$ mm <sup>2</sup>	$h_u /$ mm	$h_0 /$ mm	$h_1 /$ mm	$A_s /$ mm <sup>2</sup>	$A'_s /$ mm <sup>2</sup>	$\sigma_{tc} /$ MPa	$f_c /$ MPa	$f_y /$ MPa	$f'_y /$ MPa	$M_{01}^{pl} /$ (kN · m)	$M_{02} /$ (kN · m)	相对误差 / %
文献[17]	120×150	76	112	112	402		4.0	35.4	400		18.9	16.9	11.8
FB1-1	150×250	0	222		402			48.9	496		41.9	42.0	0.2
FB1-2	150×250	62.5	222	281	402		2.8	45.3	496		49.0	48.0	2.1
FB2-1	200×300	75	272	338	402		2.8	46.7	496		66.6	62.5	6.6
FB2-2	200×300	100	272	250	402		2.8	49.7	496		66.5	65.0	2.3
FB2-3	200×300	150	272	275	402		2.8	47.2	496		75.0	65.0	(钢筋未屈服)
平均值											6.8		

由表 8 可以看出,除了文献[17]的第 2 组相对误差(16.0%)较大外,其余的相对误差均较小,平均相对误差不到 7%,可以有效地预计出叠合梁的实际承载力,说明了本计算理论具有足够的可靠性。对于无 ECC 的钢筋混凝土梁的 FB1-1,计算结果与试验结果也极为接近,说明了本计算方法的普遍性。但对于 FB2-3,由于 ECC 层厚度过大,已不属于适筋梁范围,故本计算理论已不再适用,表中也列出了相应的计算结果,可以看出其值与试验结果有不小出入。

## 4 结论

1)ECC 材料的加入对裂缝控制效果明显,并且受弯过程中裂缝形态往裂缝数量较多、裂缝间距较小、裂缝宽度较低的方向发展。ECC 材料不但可以保证自身材料层的多缝开裂,而且还可以帮助限制混凝土层裂缝的发展,这对构件整体的耐久性和安全性十分有利。

2)与高强钢筋混凝土梁相比,ECC/钢筋混凝土梁具有更高的承载力,且其相同荷载下的挠度值较小。将 ECC 用于高强钢筋混凝土梁底部受拉区时,ECC 与钢筋可以实现协调变形,说明受拉区使用 ECC 可以使得高强钢筋的应力得到充分发挥。当 ECC 层厚度在  $0 \sim h/3$  内时,叠合梁承载力随 ECC 层的增加而增大,但当其增加到  $h/2$  时,承载力不再增加,且发生“超筋破坏”。

3)忽略 ECC 受拉时的应变硬化行为,采用双直线本构模型,弥补了叠加过程中造成的内力臂增大的不足。同时对受拉区 ECC 的应力分布进行简化来计算 ECC/钢筋混凝土叠合梁的正截面受弯承载力,经过与相关文献研究与试验结果对比发现吻合度较好。

4)由于经费和时间问题,样本数据较少,对于 FB2-3 发生的“超筋破坏”,用已有计算理论和公式无法解释,故还有待进一步研究。另外,仅对 ECC/钢筋混凝土叠合梁的单筋/双筋矩形截面的受弯承载力的计算理论进行了验证,T 形截面可能由于受拉区面积较小,ECC 的加入对其受拉贡献较小的原因,目前还未有学者进行相应方面的研究,因此,其计算理论还有待验证。

## 参考文献:

- [1] 徐世焯,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 45-60.  
XU S L, LI H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60. (in Chinese)
- [2] LEPECH M, LI V C. Durability and Long Term Performance of Engineered Cementitious Composites [C]// Proceedings of International Workshop on HPRCC in Structural Applications, Bagnaux; RILEM Publications SARL, 2005: 23-26.
- [3] LI V C. Progress and application of engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 1-6.
- [4] 田艳华. 自密实超高韧性水泥基复合材料试验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2008.  
TIAN Y H. Experimental research on self-compacting ultra high toughness cementitious composite [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] 李贺东,徐世焯. 超高韧性水泥基复合材料弯曲性能及韧性评价方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 32-39.  
LI H D, XU S L. Research on Flexural properties and flexural toughness evaluation method of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil



- Engineering Journal, 2010, 43(3): 32-39. (in Chinese)
- [6] 苏骏,徐世焯. 超高韧性水泥基复合材料新型梁柱节点抗裂性能研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(8): 99-102.  
SU J, XU S L. Research on cracking behavior of a new type of UHTCC frame beam-column joints [J]. Industrial Construction, 2010, 40(8): 99-102. (in Chinese)
- [7] 侯利军. 超高韧性水泥基复合材料弯曲性能及剪切性能试验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2012.  
HOU L J. Experimental investigation on flexural and shear behaviors of ultra high toughness cementitious composite [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 范明明. 超高韧性水泥基复合材料新型梁柱节点抗震性能试验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2012.  
FAN M M. Experimental research on seismic behavior of beam-column joints with ultra high toughness cementitious composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] HIROSHI F, YUKIHIRO S, LIV C, et al. Ductile engineered cementitious composite elements for seismic structural application [C]//12WCEE, 2000: 1-8.
- [10] MOHAMED M, SER T Q, ZHANG J. Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(2): 143-152.
- [11] SHAIKH F U A, MOHAMED M, PARAMASIVAM P. Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21: 1088-1097.
- [12] CHEUNG Y N. Investigation of concrete components with a pseudo-ductile layer [D]. Hong Kong: Department of Civil and Environmental Engineering of Hong Kong University of Science and Technology, 2004.
- [13] YUN Y K, BANG Y L, Bang J W, et al. Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with strain-hardening cementitious composite and high strength reinforcing steel bar [J]. Composites (Part B Engineering), 2014, 56(1): 512-519.
- [14] ZHANG Y. Simplified method for evaluating the behavior of strain hardening cementitious composite flexural strengthening reinforced concrete members [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 121: 11-27.
- [15] MAALEJ M, LI V C. Introduction of strain-hardening engineered cementitious composites in design of reinforced concrete flexural members for improved durability [J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(2): 167-176.
- [16] 徐世焯,蔡新华. 超高韧性水泥基复合材料取代保护层混凝土梁抗锈蚀性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 79-85.  
XU S L, CAI X H. Corrosion resistance of reinforced concrete beams with cover replaced by UHTCC [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 79-85. (in Chinese)
- [17] 张秀芳,徐世焯,侯利军. 采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(II): 试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(10): 53-66.  
ZHANG X F, XU S L, HOU L J. Improvement on flexural and cracking behavior of RC beam using ultra high toughness cementitious composite II: experimental study [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(10): 53-66. (in Chinese)
- [18] LAAAY H, LAMYA A. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete on high strength concrete composite members [J]. Construction and Building Materials, 2015, (5): 1-12.
- [19] CHO C G, KAPPOS A J, MOON H J, et al. Experiments and failure analysis of SHCC and reinforced concrete composite slabs [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 56: 320-331.
- [20] DONG L T, PAN J L, YUAN F, et al. Flexural behaviors of steel reinforced ECC/concrete composite beams [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2012, 28(2): 195-202.
- [21] 徐世焯,李庆华. 超高韧性复合材料控裂功能梯度复合梁弯曲理论研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(6): 1081-1094.  
XU S L, LI Q H. Research on flexural behaviors of UHTCC-FGC beams [J]. Science China Series E: Science of Technology, 2009, 39(6): 1081-1094. (in Chinese)
- [22] 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, 2010.  
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, 2010. (in Chinese)