

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.08.025

钢纤维增强自应力混凝土连续叠合梁的弯曲性能

王伯昕, 王国超, 王 清
(吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130061)

摘 要: 基于钢纤维自应力混凝土优异的抗裂性能, 将其作为叠合层铺筑于普通混凝土两跨连续 T 梁翼缘, 制成连续叠合梁研究其抗裂性能和整体的弯曲性能. 试验表明, 钢纤维自应力混凝土叠合层可大幅提高连续叠合 T 梁支座负弯矩区的开裂荷载和跨中极限挠度, 延缓支座处上部裂缝的发展速度, 显著改善连续梁的弯曲性能. 建立了钢纤维自应力混凝土连续叠合梁开裂荷载的计算方法, 并对连续叠合梁的弯曲性能进行了有限元模拟; 理论值、试验值与数值模拟结果吻合较好, 表明该计算方法可用来计算此类弯曲构件的开裂荷载.

关 键 词: 自应力混凝土; 叠合梁; 弯曲; 开裂荷载; 挠度
中图分类号: TU 377.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)08-1183-06

Flexural Performance of Steel Fiber Reinforced Self-Stressing Concrete Continuous Composite Beams

WANG Bo-xin, WANG Guo-chao, WANG Qing
(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China. Corresponding author: WANG Qing, E-mail: wangqing@jlu.edu.cn)

Abstract: Owing to the excellent crack resistance of steel fiber reinforced self-stressing concrete (SFRSSC for short), the flexural performance and crack resistance of a two-span continuous composite beam with SFRSSC laminated layers were investigated. The experimental results show that the cracking load and the ultimate mid-span deflection of the test beams are increased greatly. Meanwhile, the cracks develop slowly around the support and the flexural behavior of continuous composite beam is improved obviously. Furthermore, a procedure to determine the crack load of SFRSSC continuous composite beams was established and a FEM simulation was given. The theoretical results are in good agreement with the test results and the numerical results, which indicates that the method can evaluate the crack resistance of continuous composite beams.

Key words: self-stressing concrete; composite beam; bend; cracking load; deflection

混凝土连续桥梁的中支座处产生负弯矩, 是桥面铺装层开裂的危险区域^[1-8]. 钢筋钢纤维自应力混凝土由于在硬化过程中钢筋、钢纤维以及约束面限制了自应力混凝土的膨胀, 在基体内部产生自压应力, 从而有效提高了混凝土的抗裂性能^[9-12]. 本文将钢筋钢纤维自应力混凝土用于普通混凝土连续 T 梁的叠合层, 通过试验研究连续叠合 T 梁中支座负弯矩区的抗裂性能和整体的弯曲性能, 为钢纤维自应力混凝土应用于桥面铺

装提供设计依据.

1 连续叠合 T 梁的弯曲试验

1.1 试验材料及其力学参数

水泥: 普通混凝土(C)及钢纤维混凝土均使用普通硅酸盐水泥 P·O 42.5R 配制, 钢纤维自应力混凝土(SFRSSC)用 4.0 级自应力硫铝酸盐水泥. 砂石: 石选用石灰石碎石, 粒径为 5~20 mm;

砂选用优质河砂,中砂。

钢纤维:采用卢森堡 Arcelor 集团生产的型号为 HE0.75/35 的钢纤维,形状为两端带弯钩,中间为平直状,长度 35 mm,等效直径 0.7 mm,抗拉强度 600 MPa,极限拉伸率为 12%,弹性模量 200 GPa。

钢筋:纵筋采用 HRB335,箍筋选用 HPB300。
减水剂:采用 Sika ViscoCrete3301 超塑化剂。
钢纤维自应力混凝土的配合比见表 1,混凝土的基本力学参数见表 2。

表 1 混凝土配合比						
Table 1 Concrete mix proportion						kg/m ³
混凝土种类	水	水泥	砂	石	超塑化剂	钢纤维体积率
C	193	350	645.7	1133	6.50	0
SFRSSC	250	550	609	913	8.25	1%

表 2 混凝土的性能指标				
Table 2 Properties of the concrete				
混凝土种类	$f_{cu,k}/\text{MPa}$	f_c/MPa	E/GPa	f_{ts}/MPa
C	48.7	45.2	33.5	3.5
SFRSSC	59.9	52.0	33.4	5.2

注: $f_{cu,k}$ 、 f_c 、 f_{ts} 分别为立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度。

1.2 模型试验设计

试验共制作两根两跨连续 T 形叠合梁,以模拟采用钢纤维自应力混凝土作为桥面铺装层的连续混凝土桥梁在负弯矩作用下的工作性能。

两跨连续 T 形叠合梁截面尺寸和配筋情况见图 1,两跨连续 T 形叠合梁的试验情况见图 2 和图 3。

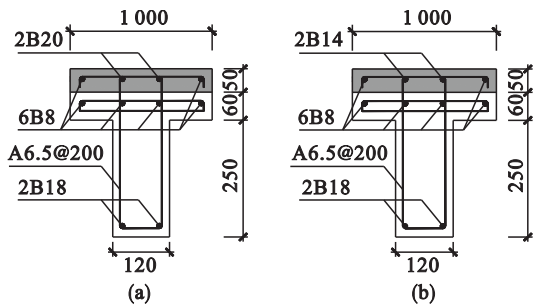


图 1 叠合梁配筋图(mm)
Fig. 1 Reinforcement of composite beam
(a)—支座截面;(b)—跨中截面。

荷载使用荷载传感器监控,位移使用电感式位移传感器采集,截面应变使用东华静态数据采集系统采集,裂缝宽度使用裂缝显微镜读取,位于叠合层端部的夹式引伸仪用于监测叠合层与 T 梁的黏结滑移情况。

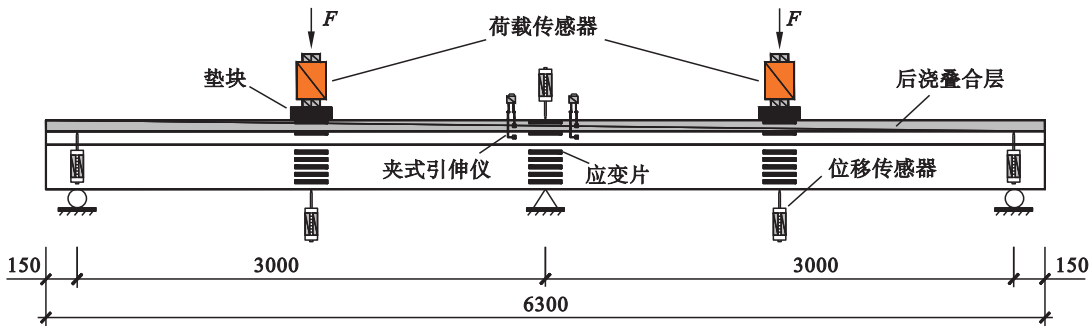


图 2 两跨连续 T 形叠合梁抗弯试验详图(mm)
Fig. 2 Details of the two-span continuous beams test

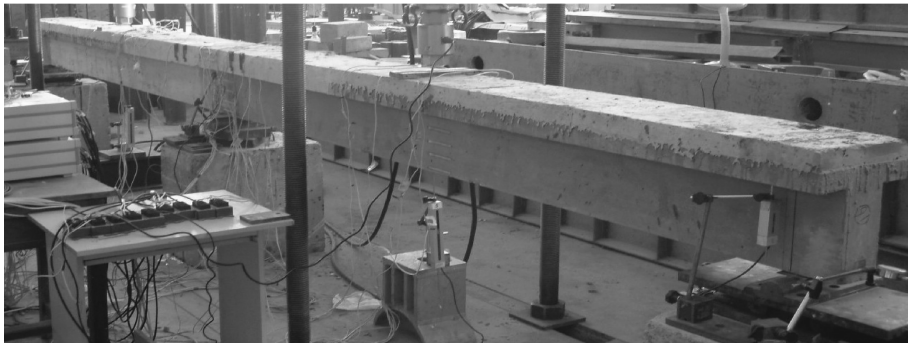


图 3 两跨连续 T 形叠合梁
Fig. 3 Picture of two-span continuous beam

钢筋网扎制完成后,使用普通混凝土浇筑 T 形梁,静置养护 28 天后对梁上表面进行凿毛处理

并配置钢筋(见图 4),然后分别浇筑普通混凝土、钢纤维自应力混凝土作为叠合层,继续进行 28 天

养护. 试件列表及相关参数见表 3.

表 3 叠合梁试件			
Table 3 Details of composite beam			
梁编号	叠合层材料	配箍率/%	中支座纵筋配筋率/%
CCB-2	C	0.24	0.97
ZCB-2	SFRSSC	0.24	0.97

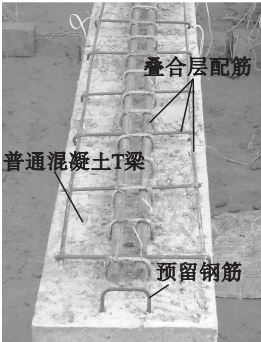


图 4 凿毛后的试验梁

Fig. 4 Test beam after artificial chiseling

2 试验结果分析

2.1 开裂与弯曲性能分析

两根两跨连续 T 形叠合试验梁均发生弯曲破坏. 试验结果见表 4、图 5 和图 6. 试验结果表明, 仅占 T 梁截面高度 14% 的叠合层, 使梁 ZCB-2 中支座开裂荷载比 CCB-2 提高 2.2 倍, 屈服荷载提高了 14%, 钢纤维自应力混凝土叠合

层极大地提高了连续 T 形叠合梁中支座处的抗裂性能. 在试验开始前, 由于自应力混凝土自应力的作用, 试验梁 ZCB-2 在叠合层中已存在一定的预压应力, 当试验梁在邻跨荷载作用下产生支座负弯矩时, 这种自应力会将混凝土的开裂推迟, 因而提高了梁的中间支座开裂荷载. 同时钢纤维阻碍了裂缝的开展, 对梁的屈服荷载也有一定的提高, 但是由于钢纤维并不是梁屈服的决定性因素, 对梁屈服荷载提高并不明显. 夹式引伸仪的采集结果表明叠合层与原 T 梁间无相对滑移.

对于跨中截面, 从表 4 可以看出, 钢纤维自应力混凝土叠合层对跨中屈服荷载影响不大, 但是对梁的变形能力有较大影响, 破坏时跨中极限挠度 ZCB-2 比 CCB-2 高 53.1%. 图 6 为实测跨中挠度与荷载关系, 可以看出, 开始阶段, ZCB-2 比 CCB-2 的跨中挠度要小得多, 随着荷载的不断增加, 二者之间的差距越来越小. 这是因为在试验初期, 钢纤维自应力混凝土产生的自应力延迟了支座处混凝土开裂, 梁的刚度因此提升, 相同荷载下 ZCB-2 的跨中挠度比 CCB-2 要低 22.45% ~ 64%. 中间支座处混凝土开裂后, 钢纤维自应力混凝土的自应力逐渐释放, 随着裂缝开展, 中支座处的自应力将彻底消失, 梁 ZCB-2 与梁 CCB-2 的刚度差距逐渐减小, 二者跨中挠度相差越来越小. 梁进入屈服阶段后, 由于钢纤维的存在, 梁 ZCB-2 的韧性较 CCB-2 有所增强, 因而其极限挠度比 CCB-2 高 53.1%.

表 4 两跨连续 T 形叠合梁试验结果
Table 4 Results of the two-span continuous beam test

试验梁编号	中支座开裂荷载/(kN·m)	中支座屈服荷载/(kN·m)	跨中屈服荷载/(kN·m)	跨中极限挠度/mm
CCB-2	13.05	85.41	90.81	53.52
ZCB-2	28.84	97.41	92.21	81.96

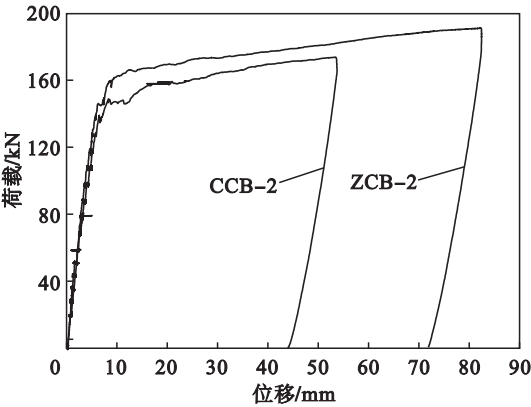


图 5 两跨连续 T 形叠合梁荷载位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curves

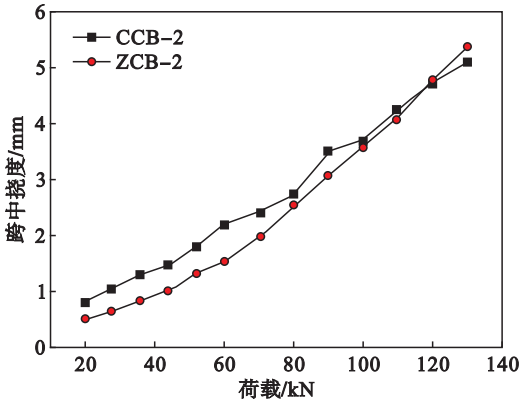


图 6 实测跨中挠度与荷载关系图
Fig. 6 Measured displacement-load curves

2.2 裂缝发展情况

试验对两跨连续 T 形叠合梁试验过程中裂缝的开展情况进行了观测,见图 7~图 11。可以看出,钢纤维自应力混凝土产生的预压应力明显延迟了支座处混凝土的开裂,从而使梁 ZCB-2 支

座处裂缝的宽度、高度发展均滞后于梁 CCB-2。随着荷载的增加,二者裂缝高度之间的差距越来越小,至试验梁破坏时,两根试验梁支座处裂缝的高度趋于一致,但 SFRSSC 的裂缝宽度始终小于普通混凝土。

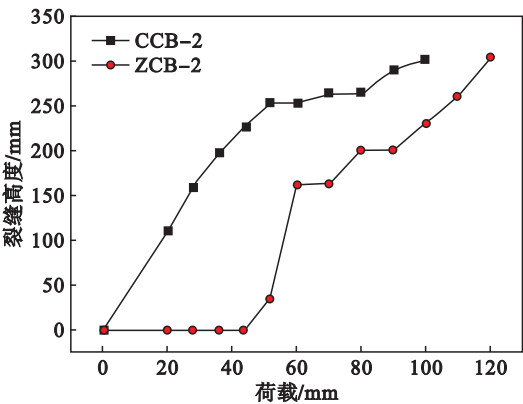


图 7 中间支座处裂缝高度与荷载关系
Fig. 7 Fracture height vs. load at the support

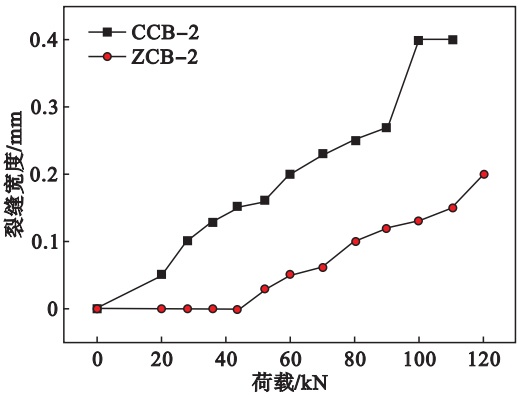


图 8 中间支座处裂缝宽度与荷载关系
Fig. 8 Fracture width vs. load at the support



图 9 ZCB-2 裂缝分布
Fig. 9 Fracture distribution of ZCB-2

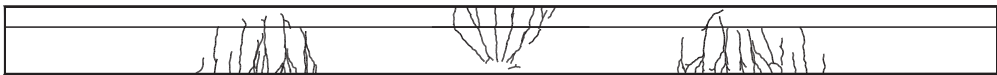


图 10 CCB-2 裂缝分布
Fig. 10 Fracture distribution of CCB-2

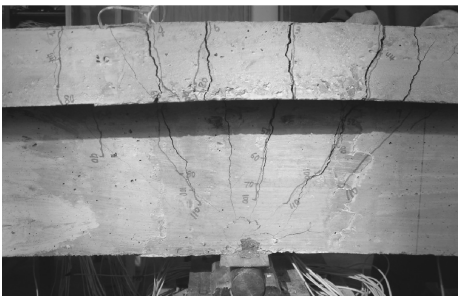


图 11 ZCB-2 支座处裂缝
Fig. 11 Fracture distribution at the support of ZCB-2

3 开裂荷载的计算方法

结合试验情况,对两跨连续 T 形叠合梁的弯曲性能进行理论分析,为此作如下基本假定:

- ①叠合梁截面变形符合平截面假定;
- ②钢筋与混凝土之间无相对滑移;
- ③钢筋、混凝土本构关系已知;
- ④叠合层与原 T 梁之间无相对滑移;
- ⑤叠合构件变形满足小变形假设。

根据基本假定,两跨连续 T 形叠合梁受弯

时,截面应变连续,应变关系如图 12 所示。由于叠合层自应力的存在,截面应力在叠合面处发生突变,突变差值即为自应力值,如图 12 所示。因此截面转角:

$$\varphi = \frac{\sigma_{zl} + \sigma_{z0}}{h - x} \tag{1}$$

式中 σ_{z0} 为初始自应力。

截面其他各点应变值均可用截面转角及截面参数表示。

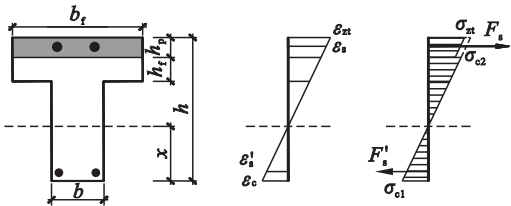


图 12 叠合梁截面参数及应力应变分布
Fig. 12 Section size and stress/strain distribution of composite beam

截面存在力、弯矩两个平衡关系,如下式:

$$\int_0^x b \sigma dy + \sigma'_s A'_s = \int_0^{h-x-h_f-h_p} b \sigma dy + \int_{h-x-h_f-h_p}^{h-x-h_p} b_f \sigma dy + \int_{h-x-h_p}^{h-x} b_f (\sigma - \sigma_0) dy + \sigma_s A_s, \tag{2}$$

$$M = \int_0^x b\sigma_y dy + \int_0^{h-x-h_t-h_p} b\sigma_y dy + \int_{h-x-h_t-h_p}^{h-x-h_p} b_f\sigma_y dy + \int_{h-x-h_p}^{h-x} b_f(\sigma - \sigma_0)y dy + \sigma'_s A'_s(x - a'_s) + \sigma_s A_s(h - x - a_s) . \tag{3}$$

式中： σ_s 和 A_s 为受拉区钢筋应力和钢筋横截面积； σ'_s 和 A'_s 为受压区钢筋应力和钢筋横截面积； σ 为混凝土应力； σ_0 为自应力混凝土产生的预压应力。

混凝土本构关系^[13]：

$$\sigma_c = \begin{cases} \sigma_0[2(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}) - (\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0})^2], & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0; \\ \sigma_0[1 - 0.15(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0})], & \varepsilon_0 < \varepsilon_c < \varepsilon_u. \end{cases} \tag{4}$$

钢筋本构关系^[14]：

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s, & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \\ f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_s. \end{cases} \tag{5}$$

根据课题组前期研究^[10-12]，钢筋钢纤维自应力混凝土自应力值按下式计算：

$$\sigma_{z0} = \sigma_{rz} + \sigma_{rz,f} = \frac{\rho}{1-\rho} E_s C e^{-\alpha \rho} + 0.368 \alpha \rho_f \frac{l_f}{d_f} f_{tk} . \tag{6}$$

式中： ρ 为叠合层配筋率； α, C 为与材料有关的系数； σ_{rz} 为钢筋限制下的自应力值； $\sigma_{rz,f}$ 为钢纤维限制下的自应力值； E_s 为钢筋的弹性模量； ρ_f 为钢纤维在混凝土中的体积率； l_f 和 d_f 为钢纤维的等效长度和等效直径； f_{tk} 为普通混凝土的轴心抗拉强度。

将本次试验各参数代入式(6)可得初始自应力值为 $\sigma_{z0} = 2.17 \text{ MPa}$ 。

将式(4)、式(5)代入式(2)、式(3)，解得梁 ZCB-2 的开裂荷载理论值为

$$M_{ZCB-2} = 35.89 \text{ kN} \cdot \text{m} .$$

同样的方法可以求出梁 CCB-2 的开裂荷载为

$$M_{CCB-2} = 16.83 \text{ kN} \cdot \text{m} .$$

理论值与试验值吻合较好。

4 弯曲性能的数值模拟

4.1 建模

使用 ANSYS 建立等尺寸三维有限元模型对试验梁进行了非线性有限元分析。模型尺寸与试验梁尺寸相同，所用材料基本参数均为试验实测数值。此外，考虑到钢纤维自应力混凝土铺筑长度不同对两跨连续叠合梁抗弯性能的影响，本文做了相应的数值分析。

采用整体式与分离式结合的建模方法，叠合层中的纵向钢筋采用分离式，其他纵筋及箍筋采用整体式模型。其中，用 SOLID 65 单元模拟混凝土、钢纤维混凝土及钢纤维自应力混凝土，采用控温模拟自应力的存在，选用 LINK180 单元模拟钢筋。混凝土的本构模型采用 Hogenstad 模型(式(4))，采用多线性等强化模型 KINH 模拟输入。钢筋则采用 LINK180 单元模拟，其应力应变关系使用理想的弹塑性模型，本构关系的输入则采用双线性等向强化模型 BISO 模型。完整模型如图 13 所示。

建模过程中输入混凝土的热膨胀系数 $\gamma_c = 1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，设置初始温度为 0°C ，加载时通过控制温度的方式模拟自应力混凝土自应力值的产生并控制自应力值的大小。试验荷载作用下两跨连续 T 形叠合梁的应力分布见图 14。

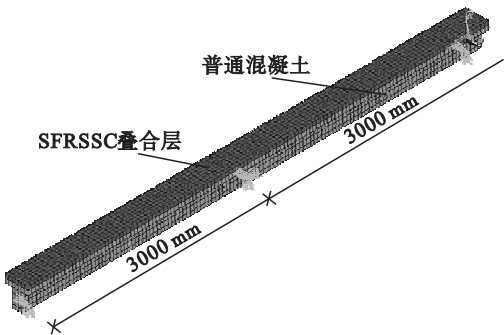


图 13 两跨连续 T 形叠合梁模型
Fig. 13 Finite element model of the two-span continuous beam

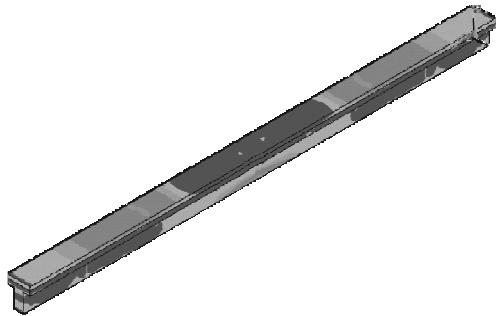


图 14 两跨连续 T 形叠合梁应力云图
Fig. 14 Stress nephogram of the two-span continuous beam

4.2 两跨连续 T 形叠合梁数值模拟

通过数值模拟得到两根试验梁的荷载跨中位移曲线如图 15 所示。由于未考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移，导致加载过程中梁的跨中挠度与试验值相比偏小，但是并不影响试验梁的荷载特征值。

图 16 为模拟试验梁支座处上表面混凝土节点的荷载-应力曲线，从图中可以看出，加载前，

试验梁 ZCB-2 在叠合层的自应力作用下,在中间支座处产生明显的预压应力,从中读取试验梁的开裂荷载.从表 5 可以看出,试验值与理论值、模拟值吻合较好.

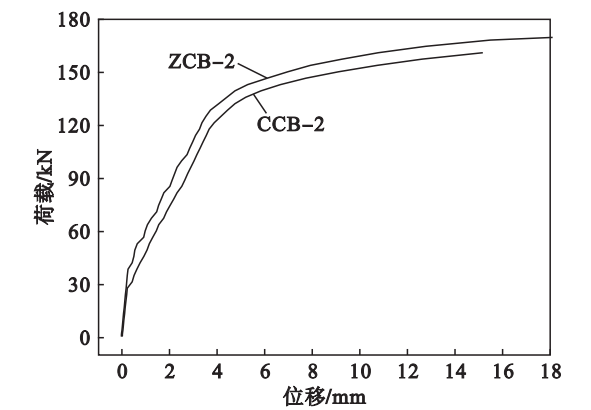


图 15 模拟荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves by numerical simulation

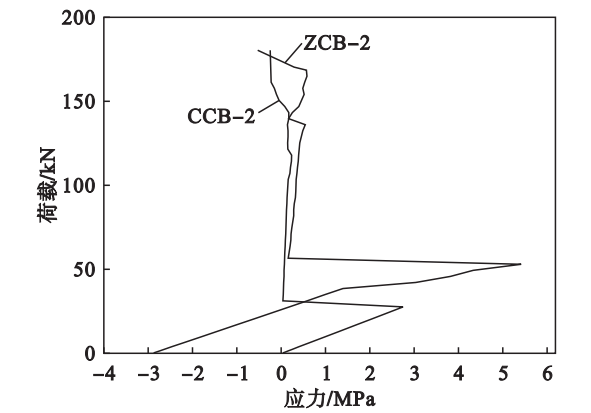


图 16 中支座顶部节点荷载-应力曲线

Fig. 16 Load-stress curves of mid-support point

表 5 中支座开裂荷载对比

Table 5 Comparison of cracking load at the mid-support

试验梁	中支座开裂荷载/(kN·m)		
	试验值	模拟值	理论值
CCB-2	13.05	15.64	16.83
ZCB-2	28.84	29.81	35.89

5 结 论

- 1) 钢筋钢纤维自应力混凝土叠合层明显提高了混凝土连续 T 梁支座负弯矩区的开裂荷载,仅占 T 梁截面高度 14% 的叠合层,却使 T 梁支座负弯矩区的开裂荷载提高 2.2 倍.
- 2) 建立了钢筋钢纤维自应力混凝土连续叠合梁开裂荷载的计算方法,与试验结果吻合较好.
- 3) 钢纤维自应力混凝土叠合层对连续 T 梁的变形能力有较大影响,连续 T 梁跨中极限挠度

较普通混凝土连续梁提高 53.1% .

4) 钢筋钢纤维自应力混凝土叠合层对于连续 T 梁的屈服荷载与极限荷载的影响不明显.

参考文献:

[1] 钟俊飞. 简支体系桥面连续病害防治技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
(Zhong Jun-fei. Research on disease prevention and control technology of simple-supported system with continuous deck [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)

[2] 王永胜. 双排支座先简支后连续 PC 箱梁桥病害分析及加固方法[D]. 西安:长安大学,2014.
(Wang Yong-sheng. Disease analysis and reinforcement method of simply supported continuous PC box girder bridge with double supports[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)

[3] 王伯昕. 简支转连续体系自应力法加固旧桥研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
(Wang Bo-xin. Study on old bridge strengthening in transforming simply supported into continuous system by self-stressing method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.)

[4] Al-Osta M A, Isa M N, Baluch M H, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134(3): 279-296.

[5] Shan C L, Yi Y H. An experimental and numerical study on the behavior of a continuous orthotropic bridge deck with sandwich construction[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 111(2): 138-144.

[6] Subramaniam K V L. Identification of early-age cracking in concrete bridge decks [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(6): 0000915.

[7] Noël M, Fam A. Design equations for concrete bridge decks with FRP stay-in-place structural forms [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(5): 0000681.

[8] Fu T F, Deboodt T, Ideker J H. Development of shrinkage limit specification for high performance concrete used in bridge decks[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2016, 72: 17-26.

[9] 何化南, 黄承逵. 钢纤维自应力混凝土的膨胀特征和自应力计算[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(2): 156-160.
(He Hua-nan, Huang Cheng-kui. Expansive characteristics and self-stress value of self-stressing concrete reinforced with steel bar and steel fiber[J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(2): 156-160.)

[10] Wang B X, Jin H N, Man T, et al. Study on the mechanical property of textile reinforced self-stressing concrete sheets [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 107: 1-10.

[11] Wang B X, Man T, Jin H N. Prediction of expansion behavior of self-stressing concrete by artificial neural networks and fuzzy inference systems [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 84: 184-191.

[12] Wang B X, Zhao J Y, Wang Q. Self-stress value distributed models in textile reinforced self-stressing concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126: 286-296.

[13] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 33-51.
(Guo Zhen-hai. Strength and constitutive relations of concrete: principles and applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 33-51.)

[14] Arthur H N, David D, Charles W D. Design of concrete structures [M]. 14th ed. New York: McGraw Hill, 2010: 70-79.