

含有改性混凝土叠合层的 T 形梁抗裂性能研究

王伯昕^{1,2}, 黄承逵^{*1}, 何化南¹, 杨成蛟^{1,3}, 陈生年^{1,4}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 吉林大学 建筑工程学院, 吉林 长春 130026;

3. 沈阳都市建筑设计有限公司, 辽宁 沈阳 110015;

4. 沈阳铝镁设计研究院, 辽宁 沈阳 110001)

摘要: 基于 8 根混凝土倒 T 形叠合梁受弯试验, 研究了钢筋钢纤维自应力混凝土做加固材料层二次浇注到待加固混凝土 T 形梁, 从而形成的叠合梁在负弯矩区的抗裂性能. 试验结果表明, 仅占叠合梁高 13.9% 的叠合层将梁的开裂弯矩提高 44.9%. 同时根据已有理论模型, 推导了自应力混凝土叠合 T 梁后加自应力的求法和负弯矩区正截面抗裂计算公式, 其计算结果与试验结果比较吻合.

关键词: 钢纤维; 自应力混凝土; 抗裂; 叠合梁; 负弯矩区

中图分类号: TU528.571 **文献标志码:** A

0 引言

随着我国经济建设的高速发展, 行车数量、载重量和车速的不断提高, 许多修建于 20 世纪 80 年代以前的桥梁已不能适应现代交通运输的要求^[1]. 针对需加固的简支梁旧桥, 将多跨简支梁的梁端连接起来变为多跨连续梁, 以达到改善结构受力状况, 提高桥梁承载能力的目的. 随之而来的问题是连接段处于负弯矩区, 承受很大的负弯矩作用, 一旦开裂, 裂缝又出现在桥面, 雨水、除冰盐等极易进入结构层使钢筋锈蚀, 对于加固后桥梁的耐久性和适用性造成巨大危害. 国内外比较系统地研究了一些新型加固材料^[2]和加固后连续梁跨中受力性能的改善^[3,4], 但对于加固后连续梁负弯矩区的抗裂性能研究较少. 本文通过对 T 形叠合梁抗裂性能的试验, 探讨在简支变连续加固桥梁时, 将普通钢筋混凝土、钢筋钢纤维混凝土和钢筋钢纤维自应力混凝土 3 种加固材料用于负弯矩区对抗裂性能的提高作用, 并给出钢筋钢纤维自应力混凝土做叠合加固层的自应力计算公式和正截面抗裂计算公式, 为用新材料加固旧桥的抗

裂设计提供参考.

1 试验概况

1.1 试件的设计和制作

本试验共设计了 8 根 T 形叠合梁. 先浇注下部 T 形试验梁, 模拟待加固旧桥. 静置 3 个月 after 在梁翼缘上表面凿毛, 配置受力钢筋和箍筋后分别浇注普通混凝土、钢纤维混凝土和钢筋钢纤维自应力混凝土, 成为具有新老混凝土结合特点的叠合 T 形梁. 试验梁腹板截面尺寸为 120 mm × 250 mm, 翼缘截面尺寸为 300 mm × 60 mm; 后浇叠合层厚 50 mm, 占梁截面高度的 13.9%. 梁长 $L=3\ 200$ mm, 净跨 $L_0=3\ 000$ mm, 后浇叠合层长 $L_1=2\ 800$ mm. 混凝土采用强度等级为 C30 的商品混凝土, 后浇叠合层为按试验设计的普通混凝土、钢纤维混凝土(钢纤维体积率为 1%)和钢筋钢纤维自应力混凝土(钢纤维体积率为 1%). 受拉钢筋为 HRB335 级钢, 箍筋为 HPB235 级钢. 试验梁详见图 1 和 2, 各种材料性能指标见表 1、2 和 3, 试件情况见表 4.

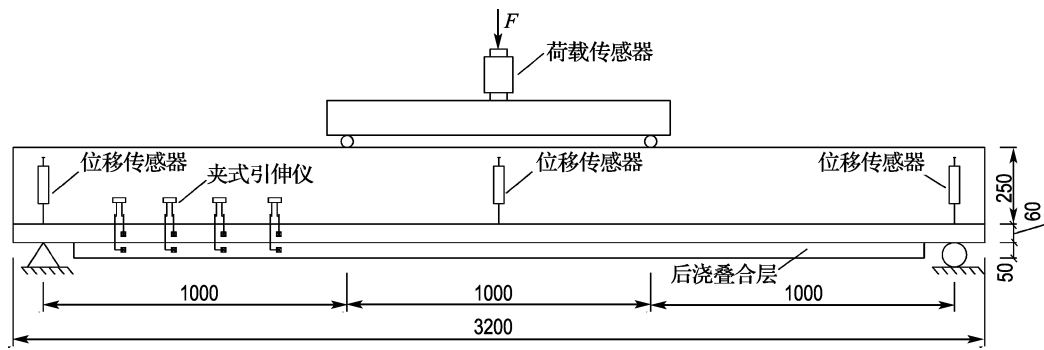


图 1 试验梁外形图(单位:mm)

Fig.1 Design configuration of specimens (unit: mm)

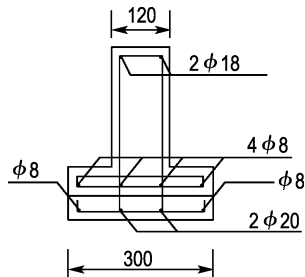


图 2 试验梁截面图

Fig.2 Cross section of specimens

表 1 钢筋的性能指标

Tab.1 Mechanical properties of steel bars

ϕ /mm	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	极限伸长率/ %
20	200	377.4	571.7	24.5
18	200	349.9	521.0	24.2
8	210	306.5	444.9	31.6
6.5	210	486.6	734.3	30.1

表 2 混凝土的性能指标

Tab.2 Mechanical properties of concrete

混凝土品种	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	劈裂抗拉强度/MPa
商品混凝土	48.7	45.2	33.5	3.5
钢纤维混凝土	60.5	55.9	36.0	5.1
钢纤维自应力混凝土	59.9	52.0	33.4	5.2

表 3 钢纤维性能参数

Tab.3 Properties of steel fibers

长度/mm	等效直径/mm	纤维外形特点	抗拉强度/MPa	极限伸长率/%	弹性模量/GPa
35	0.7	两端带弯钩,长度为平直状	600	12	200

表 4 试件列表

Tab.4 Description of specimens

梁编号	叠合层混凝土品种	新浇叠合层配箍率	新浇叠合层纵筋配筋率
PL2-100	普通混凝土	0.47% ($\phi 6.5@100$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)
SL2-100	钢纤维混凝土	0.47% ($\phi 6.5@100$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)
SL2-200	钢纤维混凝土	0.24% ($\phi 6.5@200$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)
ZL2-200	钢纤维自应力混凝土	0.24% ($\phi 6.5@200$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)
SL2-400	钢纤维混凝土	0.12% ($\phi 6.5@400$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)
ZL2-400	钢纤维自应力混凝土	0.12% ($\phi 6.5@400$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)
SL2-800	钢纤维混凝土	0.06% ($\phi 6.5@800$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)
ZL2-800	钢纤维自应力混凝土	0.06% ($\phi 6.5@800$)	4.86% ($2\phi 20+2\phi 8$)

1.2 试验方案

试验时将 T 形叠合梁倒置加载,使加固叠合层位于梁底受拉区,以模拟连续梁桥在负弯矩区的受力特点.静力加载采用反力架三分点加载,荷载应用荷载传感器采集,应变采集应用东华静态数据采集系统,位移采用电感式位移传感器采集,裂缝宽度采用读数显微镜读取.试验梁采用分级加载,记录梁叠合层的开裂荷载和开裂后的裂缝开展情况.

2 试验结果分析

2.1 叠合层对开裂弯矩的影响

钢纤维的增韧阻裂作用以及配筋钢纤维自应力混凝土中化学预应力的存在^[5],极大地提高了叠合梁混凝土的抗裂能力.从试验结果来看(见图 3),用钢纤维混凝土做叠合层的试验梁的开裂弯矩较对比梁提高了 25.2%,用钢纤维自应力混凝土做叠合层的试验梁的开裂弯矩较对比梁提高了 44.9%.由于开裂弯矩 M_{cr} 正比于 f_t , f_t 正比于 $f_c^{0.55}$,可以用 $M_{cr}/f_c^{0.55}$ 作为一个参数衡量叠合梁混凝土的抗裂能力.从图 3 可以看出,钢纤维自应力混凝土的 $M_{cr}/f_c^{0.55}$ 较普通混凝土的提高了 38.4%,较钢纤维混凝土的提高了 32.0%.

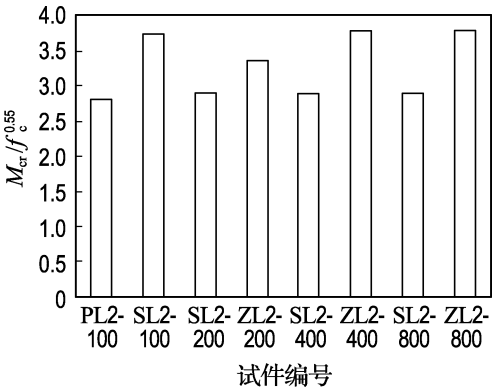


图 3 各梁的 $M_{cr}/f_c^{0.55}$
Fig. 3 $M_{cr}/f_c^{0.55}$ of each beam

2.2 叠合层对裂缝宽度的影响

本次试验对试验梁纯弯段内每条裂缝在各级荷载下的宽度进行观测,对每条裂缝的高度增长情况予以记录,并整理出各级荷载下的最大裂缝宽度.试验结果表明:

(1)在试验荷载(50~70 kN·m)下,普通混凝土叠合层裂缝宽度为 0.15~0.20 mm,钢纤维混凝土叠合层裂缝宽度为 0.10~0.17 mm,钢纤

维自应力混凝土叠合层裂缝宽度为 0.08~0.10 mm;

(2)试验梁屈服前(90 kN·m)的裂缝宽度,钢纤维混凝土叠合层和普通混凝土叠合层基本一致,达到 0.40~0.60 mm,钢纤维自应力混凝土的裂缝宽度只有 0.17~0.20 mm;

(3)试验梁屈服前(90 kN·m),8 根试验梁的裂缝开展高度基本相同,都在 204~238 mm.

3 钢纤维混凝土叠合层的抗裂计算

混凝土基体中掺加了三维乱向分布的钢纤维,混凝土的抗拉强度提高.根据纤维间距理论,钢纤维混凝土的抗拉强度可按式计算^[6]:

$$f_{t,tk} = \left(1 + \alpha_t \rho_f \frac{l_f}{d_f}\right) f_{tk} \quad (1)$$

式中: α_t 为普通钢纤维混凝土抗拉影响系数,取 0.47; ρ_f 为钢纤维体积配筋率; l_f 为钢纤维等效长度; d_f 为钢纤维等效直径; f_{tk} 为普通混凝土的轴心抗拉强度标准值.

故钢纤维混凝土叠合层在受拉区的抗裂公式为

$$M \leq W_0 \alpha_{ct} \gamma \left(1 + \alpha_t \rho_f \frac{l_f}{d_f}\right) f_{tk} \quad (2)$$

将本次试验的数据代入式(2)可得理论开裂弯矩 $M = 26.35 \text{ kN} \cdot \text{m}$,与实际开裂弯矩 $M = 27.77 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 相差 5.4%,故验证式(2)适用于钢纤维混凝土的抗裂验算.

4 后加叠合层自应力计算模型

本次试验的倒 T 形梁后加叠合层采用钢筋钢纤维自应力混凝土.钢筋钢纤维自应力混凝土中硫铝酸盐水泥的化学膨胀受到来自钢筋、钢纤维和叠合界面的约束而产生预压应力,从而使叠合层混凝土尚未受力即处于受压状态,提高了混凝土的抗裂能力.根据本次试验钢筋钢纤维自应力混凝土叠合层的实际约束条件,自应力主要来自钢筋限制引起的自应力值 σ_{ef} 、由钢纤维限制引起的自应力值 $\sigma_{re,f}$ 、由叠合界面限制引起的自应力值 σ_l 、由混凝土徐变引起的自应力值 σ_{cr} 和由混凝土弹性回缩引起的自应力值 σ_e .

由于钢筋和自应力混凝土形成自平衡体系,根据力的平衡存在如下关系:

$$A(1 - \rho) \sigma_{ef} = A_p E_s \epsilon_s \Rightarrow \sigma_{ef} = \frac{\rho}{1 - \rho} E_s \epsilon_s \quad (3)$$

钢筋在限制自应力混凝土变形时的应变关系满足指数关系 $\epsilon_s = Ce^{-\alpha\rho}$, 其中 C 和 α 为与试验有关的参数, 可通过材料试验测得^[7]. 故由钢筋约束产生的自应力值为

$$\sigma_{ef} = \frac{\rho}{1-\rho} E_s C e^{-\alpha\rho} \tag{4}$$

式中: ρ 为混凝土截面配筋率; E_s 为钢筋的弹性模量.

钢纤维产生的自应力不能直接与钢筋产生的自应力线性叠加, 二者之间存在耦合关系. 在充分考虑上述影响和进行大量试验的基础上, 建立了钢纤维约束产生的自应力计算公式^[8]:

$$\sigma_{rc,f} = 0.368\alpha_t\rho_f \frac{l_f}{d_f} f_{tk} \tag{5}$$

式中系数 0.368 是考虑到钢纤维与钢筋之间的耦合关系对钢筋产生的自应力的影响, 在大量试验回归基础上得到的折减系数.

叠合界面对自应力混凝土的约束所产生的自应力 σ_1 , 由于其与钢筋约束产生的自应力 σ_{ef} 之间也存在耦合关系, 计算起来比较复杂. 通过本次试验测定的不同配筋率下混凝土自应力值的变化情况, 回归统计出式(4)中 C 和 α 的值, 绘出混凝土截面配筋率与钢筋约束产生的自应力值之间的函数图像, 见图 4.

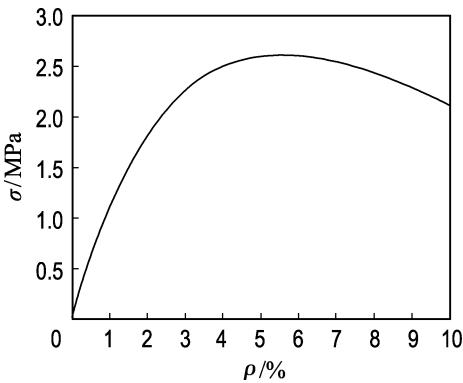


图 4 自应力值与配筋率的函数关系
Fig. 4 Function relation between self-stress and ratio of reinforcement

从图 4 可以看到, 在 $0 < \rho < 10\%$, 自应力值存在最大值 σ_{max} . 即当 $\rho = 0.5 - \frac{\sqrt{\alpha^2 - 4\alpha}}{2\alpha}$ 时, σ_{ef}

$= \frac{\rho}{1-\rho} E_s C e^{-\alpha\rho}$ 存在最大值 $\sigma_{max} = \frac{\alpha - 2 - \sqrt{\alpha^2 - 4\alpha}}{2} E_s C e^{(\frac{\sqrt{\alpha^2 - 4\alpha} - \alpha}{2})}$, 其物理意义为

对于配合比一定的自应力混凝土, 随着对其约束的增强, 自应力混凝土产生的自应力值不能无限增加, 而是存在最大值. 这一理论可以用来解释钢筋约束与叠合面约束之间的关系, 即叠合界面约束很强的情况下, 自应力混凝土已经达到其自应力的最大值, 其中的钢筋处于低预应力状态(可忽略级)或无预应力状态, 混凝土的预压应力全部由叠合面约束提供. 通过对叠合梁自应力混凝土叠合层中钢筋变形的观测发现, σ_1 和 σ_{ef} 之间成反比关系, 且当钢筋产生拉伸变形时, 叠合界面产生的自应力值很小; 而如果叠合界面对自应力混凝土的约束较强时, 钢筋产生的自应力值很小甚至不产生自应力值. 考虑到上述现象的存在并忽略混凝土徐变和弹性回缩的影响, 可建立如下计算式:

$$\sigma_{pc} = \sigma_{ef} + \sigma_{rc,f} + \sigma_1 = \frac{\rho}{1-\rho} E_s C e^{-\alpha\rho} + 0.368\alpha_t\rho_f \frac{l_f}{d_f} f_{tk} \tag{6}$$

或

$$\sigma_{pc} = \sigma_{ef} + \sigma_{rc,f} + \sigma_1 = 0.368\alpha_t\rho_f \frac{l_f}{d_f} f_{tk} + \frac{\alpha - 2 - \sqrt{\alpha^2 - 4\alpha}}{2} E_s C e^{\frac{\sqrt{\alpha^2 - 4\alpha} - \alpha}{2}} \tag{7}$$

式(6)适用于当叠合层厚度较大, 叠合面约束影响较小, 钢筋产生拉应变, 自应力主要由钢筋约束提供的情况; 式(7)适用于当叠合层厚度较小, 叠合面约束影响很大, 钢筋产生很小拉应变或无拉应变, 自应力主要由叠合界面约束提供的情况.

5 钢筋钢纤维自应力混凝土叠合梁正截面抗裂计算公式

根据文献[9]中关于预应力钢筋混凝土抗裂的计算模式, 可建立后加自应力混凝土叠合梁的正截面抗裂公式:

$$\sigma_c \leq \alpha_{ct} \gamma f_{f,tk} + \sigma_{pc} \tag{8}$$

式中: α_{ct} 为混凝土拉应力限制系数; γ 为混凝土受拉区塑性影响系数.

考虑到钢纤维除了能够产生自应力外还能对混凝土基体产生阻裂作用^[6], 钢纤维混凝土基体抗裂强度可表示为下式:

$$f_{f,tk} = \left(1 + \alpha_t\rho_f \frac{l_f}{d_f}\right) f_{tk} \tag{9}$$

将式(6)、(7)、(9)代入式(8)并考虑到 $\sigma_c = M/W_0$ 可得钢筋钢纤维自应力混凝土叠合梁正截

面抗裂计算公式：

$$M \leqslant W_0 \left\{ \frac{\rho E_s}{1-\rho} C e^{-\varphi} + \alpha_{ct} \gamma \left[1 + \left(1 + 0.368 \frac{\rho E_s}{1-\rho} C e^{-\varphi} \right) \alpha_{tl} \rho_l \frac{l_t}{d_t} \right] f_{tk} \right\} \quad (10)$$

将本次试验的数据代入式(10)可得理论开裂弯矩 $M=35.31\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，与实际开裂弯矩 $M_{ZL2-200}=31.77\text{ kN}\cdot\text{m}$ ， $M_{ZL2-400}=35.77\text{ kN}\cdot\text{m}$ ， $M_{ZL2-800}=35.77\text{ kN}\cdot\text{m}$ 吻合较好。

6 结 论

- (1)钢纤维自应力混凝土作为叠合层加固 T 形梁可有效地提高抗裂性能. 试验证明, 钢筋钢纤维自应力混凝土叠合层的梁开裂弯矩较普通钢筋混凝土提高了 44.9%, 较钢筋钢纤维混凝土提高了 15.7%.
- (2)建立了后加钢纤维自应力混凝土叠合层的自应力计算式(6)、(7)和钢筋钢纤维自应力混凝土叠合梁正截面抗裂计算式(10), 其计算结果与试验结果比较吻合.
- (3)采用钢筋钢纤维自应力混凝土进行简支体系转化连续体系加固桥梁是一种可行的方法, 可以避免预应力加固法的预应力筋锚固困难和施工复杂问题, 也可以避免传统加固方法混凝土裂缝和负弯矩区钢筋过密的问题.

参考文献：

[1] 蒙 云, 卢 波. 桥梁加固与改造[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004:1-3

[2] FARHAT F A, NICOLAIDES D, KANELLOPOULOS A, *et al.* High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) — Performance and application to retrofitting [J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2007, **74**(4):151-167

[3] 邵永松, 王洪达. 钢纤维混凝土叠合梁理论及试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, **26**(4):116-120

[4] 朱惠诚, 何山清, 彭 英. 叠合式受弯构件在旧桥加固中的应用与计算[J]. 中外公路, 2004, **24**(3): 60-63

[5] 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

[6] 黄承逵. 纤维混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004:133-135

[7] 戴建国. 配筋钢纤维自应力混凝土的变形及自应力计算理论[D]. 大连: 大连理工大学, 2000:102-112

[8] 张 明. 钢纤维自应力混凝土构件抗拉性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000:29-43

[9] 中华人民共和国水利部. SL191—2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009:93-94

Study of crack resistance of modified concrete layers reinforced composite T-beams

WANG Bo-xin^{1,2}, HUANG Cheng-kui^{*1}, HE Hua-nan¹,
YANG Cheng-jiao^{1,3}, CHEN Sheng-nian^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;
3. Shenyang Urban Architecture Design Co., LTD, Shenyang 110015, China;
4. Shenyang Aluminum & Magnesium Engineering & Research Institute, Shenyang 110001, China)

Abstract: Based on the experiments of 8 composite concrete inverted T-beams, crack resistance in negative moment area of the beams reinforced steel fiber self-stressing concrete layer was investigated. The test results obviously indicate that the composite layers enhance the cracking moments 44.9% more than that of common concrete layers, though its height is only 13.9% of the cross section height. Meanwhile according to the existing theoretical models, a procedure to determine the self-stress is supplied and a formula which evaluates the crack resistance of composite T-beams in negative moment area is deduced, and the calculated results agree well with the test results.

Key words: steel fiber; self-stressing concrete; crack resistance; composite beam; negative moment area