

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.023

预应力 UHPC 局部增强混凝土梁抗弯性能研究

曾勃¹, 曾国良²

(1. 中国葛洲坝集团勘测设计有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 湖南联智科技股份有限公司)

摘要:为研究后张法预应力 UHPC 局部增强混凝土梁的受弯性能,进行了 1 根预应力混凝土梁及 2 根不同 UHPC 厚度的预应力 UHPC 局部增强混凝土梁受弯性能试验,探讨了 UHPC 局部增强层厚度对预应力试件受力过程、破坏形态、裂缝开展以及承载特性等的影响。结果表明:相对于传统的预应力混凝土梁,在 UHPC 局部替代受拉区普通混凝土后,可有效抑制受拉区裂缝发展,使原本宽而少的裂缝转变为细而密的微裂缝,且随着 UHPC 层厚度越大,受拉区主裂缝宽度逐渐越小,裂缝分布更密;增加 UHPC 厚度可显著提高试验梁的极限弯矩,UHPC 层由 0 mm 分别增加到 50 mm 和 100 mm,相应的极限承载力可分别提高约 1.14 倍和 1.35 倍。建立了预应力 UHPC 局部增强混凝土梁开裂弯矩和极限弯矩的计算公式,计算值与试验值吻合较好。

关键词: UHPC; 预应力; 局部增强; 混凝土梁; 受弯性能

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,简称 UHPC)是由水泥、硅灰、粉煤灰、高效减水剂、钢纤维以及石英细砂等组成的一种超高性能水泥基材料,具有强度高、韧性大、耐久性能优异等特

点,可有望解决普通混凝土(Normal Concrete,简称 NC)梁所面临的自重过大、跨越能力受限和耐久性不足等问题,在工程结构中具有广阔的应用前景。目前,国内外学者对全 UHPC 梁抗弯性能开展了大量

偏差为 10.9 mm。考虑测试时间晚于计划时间,温度持续升高导致实测标高偏大,其他误差均为±5 mm,证明了数值分析方法网格优化的正确性。

4 结论

(1) 通过总结主梁顶板、中腹板、底板各测点的温度变化及主塔沿壁厚方向各温度测点的变化规律,对主梁及主塔温度测点进行优化,既能提高数值分析方法的计算效率又能简化测点布置。

(2) 实测 24 h 内主梁标高随大气温度的变化,对比采用数值分析方法计算出各时刻温度场对主梁标高的影响,证明了数值分析方法网格优化的可行性。

参考文献:

[1] 刘兴法. 混凝土桥梁的温度分布[J]. 铁道工程学报,1985(1).

- [2] 刘兴法. 预应力混凝土箱梁温度应力计算方法[J]. 土木工程学报,1986(1).
- [3] 管敏鑫. 混凝土桥梁的日照温度荷载、温度应力的计算和裂纹[J]. 中国铁道科学,1986(2).
- [4] Clark J H. Evaluation of Thermal Stresses in a Concrete Box Girder Bridge[D]. Washington: Washington University,1989.
- [5] 刘来君. 大跨径桥梁施工控制温度荷载[J]. 长安大学学报(自然科学版),2003(3).
- [6] 刘来君. 变分法在桥梁结构温度应力计算中的应用[J]. 中外公路,2004(1).
- [7] 颜东煌,陈常松,涂光亚. 混凝土斜拉桥施工控制温度影响及其现场修正[J]. 中国公路学报,2006(4).
- [8] 应国刚,颜东煌. 桥梁施工控制中结构温度场短期预测方法[J]. 长沙交通学院学报,2002(4).
- [9] 葛耀君,翟东,张国泉. 混凝土斜拉桥温度场的试验研究[J]. 中国公路学报,1996(2).
- [10] 涂光亚. 脱空对钢管混凝土拱桥受力性能影响研究[D]. 湖南大学博士学位论文,2008.

收稿日期:2021-01-06(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073)

作者简介:曾勃,男,高级工程师。

的试验研究,结果表明:采用 UHPC 替代普通混凝土后能有效提高梁的抗弯承载能力,但受 UHPC 高昂造价的限制,其适用性并不强。为此,从提高性价比出发,不少学者开始对 UHPC 与普通混凝土组合梁的抗弯性能开展研究。徐世烺开展了超高韧性水泥基复合材料增强普通混凝土复合梁弯曲性能试验研究,给出了复合梁承载力理论计算公式;鞠彦忠探讨了 UHPC—NC 组合梁弯曲承载力的主要影响因素,指出界面粗糙度对承载力影响最大,UHPC 厚度次之,UHPC 水胶比影响最小;过民龙对 UHPC—NC 组合 T 梁静载抗弯性能开展了研究,分析了 UHPC 受拉区高度、NC 强度等级、受拉纵筋率对组合梁抗弯承载力的影响;邓宗才从加固的角度出发,指出混杂纤维增强 UHPC 加固普通混凝土梁后其抗弯承载力显著提高。但上述研究中 UHPC 与普通混凝土组合梁受拉纵筋主要针对普通钢筋或高强钢筋,很少涉及预应力钢筋。考虑到 UHPC—NC 组合梁采用预应力钢筋后不仅能进一步提升其抗弯承载能力,增大结构的跨越能力,而且能降低 UHPC 的用量,取得良好的性价比。因此,对后张法预应力 UHPC 局部增强混凝土结构受弯性能开展研究具有重要的现实意义。

该文对后张法预应力 UHPC 局部增强混凝土梁开展抗弯承载力试验研究和理论分析。通过 3 根不同 UHPC 厚度预应力混凝土组合梁抗弯承载力试验,对试验梁的破坏特征、裂缝发展、承载特性及荷载—挠度曲线进行探讨,并基于试验结果对预应力 UHPC 局部增强混凝土梁承载力开展理论分析。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了 3 根预应力 UHPC 局部增强混凝土梁,梁

长 3.2 m,截面尺寸为 300 mm×400 mm,其中 UHPC 层位于试验梁的底部受拉区,相应厚度 t 分别为 0、50 和 100 mm。梁底纵筋采用直径 16 mm 的 HRB400 钢筋;梁顶架立筋采用直径 10 mm 的 HRB400 钢筋;箍筋采用直径为 8 mm 的 HPB235 钢筋,按构造布置;预应力筋为 2 根 $\phi^{15.24}$ 的低松弛钢绞线,张拉控制应力为 1 395 MPa,采用 BM—3 锚具进行锚固。试验梁截面配筋如图 1 所示,试件参数如表 1 所示,UHPC 配合比如表 2 所示。

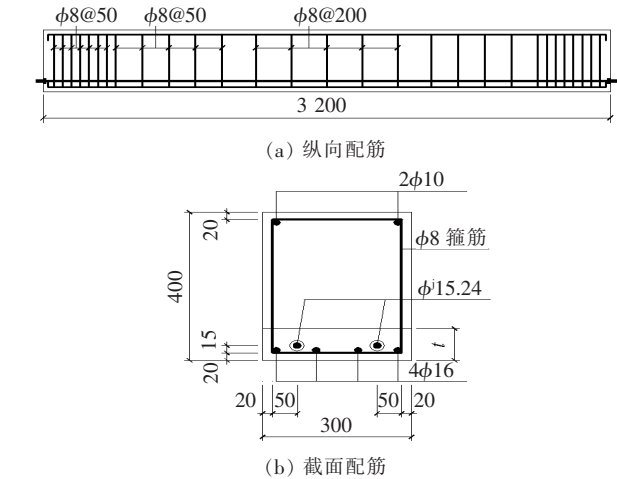


图 1 试验梁配筋(单位:mm)

表 1 试验梁参数

试件编号	UHPC 厚度/mm	梁底纵筋	箍筋	预应力筋
U-0-PC	0	4 ϕ 16	ϕ 8@50/150/200	2 $\phi^{15.24}$
U-50-PC	50	4 ϕ 16	ϕ 8@50/150/200	2 $\phi^{15.24}$
U-100-PC	100	4 ϕ 16	ϕ 8@50/150/200	2 $\phi^{15.24}$

注:试件编号中 U 代表 UHPC,数字代表 UHPC 层的厚度,PC 代表预应力混凝土。

表 2 UHPC 配合比

组成/(kg·m ⁻³)					钢纤维/%	聚丙烯纤维/%	水胶比
水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂	减水剂			
1	0.2	0.25	1.1	0.072	1.48	0.3	0.2

注:钢纤维与聚丙烯纤维为体积参量。

试验梁浇筑时,除试件 U-0-PC 一次成型外,其余两试件首先浇筑普通混凝土,然后在初凝前对界面进行压痕处理并喷洒 TD—F2 型液体界面剂,再浇筑 UHPC 层。试验梁浇筑完成 1 d 后脱模,并放置在室温下自然养护 50 d 后张拉预应力方可进行试验。试验梁制作时,预留同条件养护的立方体试块和棱柱

体试块对 UHPC 以及普通混凝土基本力学性能进行测试。

1.2 材料性能

试验梁普通混凝土采用 C40 混凝土,相应的水泥:水:砂子:石子质量配合比为 415.4:195:605.82:1 183.78。局部增强的 UHPC 配合比见表

2,其中,水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥;粉煤灰等级为 I 级,勃氏比表面为 $400\sim 450\text{ m}^2/\text{kg}$;硅灰平均粒径为 $0.1\sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$,勃氏比表面为 $20\,000\sim 25\,000\text{ m}^2/\text{kg}$;石英砂粒径为 $40\sim 80$ 目;钢纤维长为 12 mm ,直径为 0.2 mm ,抗拉强度不低于 $2\,800\text{ MPa}$;聚丙烯纤维长 6 mm ,直径为 0.02 mm ,抗拉强度不低于 600 MPa ;减水剂为萘系高效减水剂,减水率大于 30% ;减缩剂为 SBT-SRAI 类型。在常温养护 50 d 后实测 C40 混凝土和 UHPC 标准试块的力学性能如表 3 所示,其中 f_t 为劈裂抗拉强度, f_c 为棱柱体抗压强度, f_{cu} 为立方体抗压强度, E_c 为弹性模量。普通钢筋与预应力筋的实测力学性能见表 4。

表 3 混凝土力学性能

类型	f_t/MPa	f_c/MPa	f_{cu}/MPa	E_c/GPa
C40	3.3	33.7	44.3	33.2
UHPC	9.8	105.3	128.5	44.7

表 4 钢筋实测力学性能

钢筋种类	公称直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
箍筋	8	241	382	210
架立筋	10	408	591	211
受拉纵筋	16	412	588	210
钢绞线	—	1 482	1 940	195

1.3 加载方案及测试内容

试验梁采用三分点分级加载,其中纯弯段长 $1\,000\text{ mm}$,如图 2 所示。试件加载前,需进行预压;试件正式加载后,每级加载均持荷 5 min ,待荷载与跨中挠度均稳定后再采集数据。具体步骤如下:

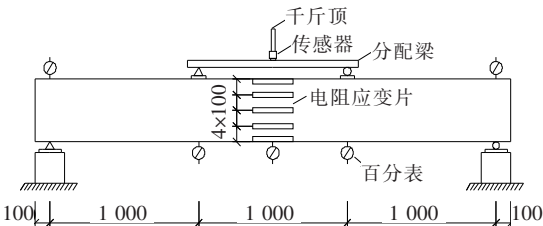


图 2 试验梁加载示意图(单位:mm)

(1) 首先对试件进行预压,预压荷载为 15 kN ,持

荷 5 min ,调试仪器并卸载,待试件卸载变形稳定后,对力传感器及电阻应变片读数调零,并对纯弯段百分表初读。

(2) 对试件开始加载,试件开裂前以每级 10 kN 加载至近开裂荷载,然后以 5 kN 为一级加载至试件开裂。

(3) 试件开裂后,以 15 kN 为一级加载,持荷 5 min ,当荷载稳定后,详细记录裂缝的长度、宽度与新裂缝的生成情况。

(4) 当纵筋屈服后,按跨中挠度变形对试件进行加载,挠度控制变形值每级 5 mm ;当上缘混凝土压碎时认为其达到破坏,随后开始卸载。

试验测量内容包括:竖向荷载、跨中挠度、跨中沿截面高度混凝土应变、纵筋和钢绞线应变、裂缝分布及宽度。其中,竖向荷载通过量程 $1\,000\text{ kN}$ 的千斤顶施加;跨中纯弯段挠度采用百分表测量,百分表在纯弯段纵向布置 3 组,间距 500 mm ;试验梁裂缝使用放大镜和 KON-FK 裂缝宽度检测仪进行详细观察和测量。为观察预应力 UHPC 局部增强混凝土梁截面是否符合平截面假定,在梁跨中侧面沿梁高方向粘贴 5 片电阻应变片,间距 100 mm ;纯弯段纵筋、钢绞线表面布置应变片,并测量其应变,相应的应变采用静态应变测试仪采集。

2 试验结果与分析

2.1 破坏过程及破坏形态

3 个试件均表现出适筋梁破坏特征,最终裂缝开展情况如图 3 所示。

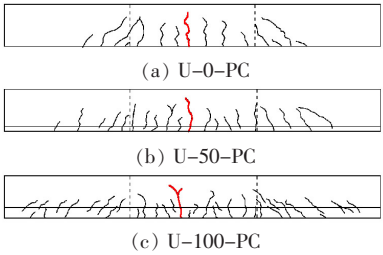


图 3 试验梁破坏时裂缝分布

试件破坏过程如下:

试件 U-0-PC 在荷载为 45.9 kN 时,纯弯段梁底出现第一条微观裂缝;继续加载,在弯剪段开始出现斜裂缝,裂缝宽度和数量随荷载的增大而增加,当荷载达到 109.5 kN 时,梁底纵筋开始屈服,此时纯弯段新裂缝基本不出现,原有裂缝宽度扩展并向上延伸,并在

纯弯段中心靠左位置形成一条主裂缝;当荷载达到130.1 kN时,上缘混凝土被压碎,试验梁产生破坏,此时主裂缝宽度接近2 mm。试件破坏时纯弯段裂缝数量较少,宽度明显大于其他两试件,如图3(a)所示。

试件U-50-PC在加载到51.9 kN时,在跨中纯弯段开始出现竖向裂缝;当加载至123.7 kN时,试件底缘纵筋开始屈服;继续加载至148.4 kN时,上缘混凝土压碎形成贯通的横向裂缝导致试件破坏。与试件U-0-PC相比,由于梁底UHPC的控裂作用,裂缝扩展速率明显放缓,梁最终破坏时,主裂缝宽度变小,约为1.3 mm,表明UHPC局部增强对裂缝发展起到较好的抑制作用,使原本宽而少的裂缝转变为细而密的微细裂缝,如图3(b)所示。

试件U-100-PC裂缝开展和荷载变化与试件U-50-PC相似,由于UHPC局部增强层厚度的增加,相应的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别增大到73.1、149.8和175.4 kN,虽然开裂荷载增长幅度不大,但屈服荷载和极限荷载增加明显,表明增大UHPC层厚度能显著提高梁的承载特性。与试件U-50-PC相比,试件U-100-PC破坏时最大主裂缝宽度进一步减少至1 mm左右,且在纯弯段裂缝分布更密,在弯剪段裂缝有向支点扩展的趋势,部分裂缝甚至出现在UHPC与普通混凝土界面位置,但并未扩展至梁底,如图3(c)所示。

2.2 荷载—挠度关系

图4为试验梁实测的跨中荷载—挠度曲线。从图4可以看出:①3组试件分别经历了弹性工作阶段、带裂缝工作阶段和屈服、破坏阶段;②加载初期,3根试验梁为弹性阶段,荷载—挠度曲线为线性关系,但初始刚度随UHPC层厚度的增加而增大;③截面弯矩达到初裂弯矩后,试件逐渐进入弹塑性受力阶段,曲线斜率开始变缓,由于UHPC中钢纤维的阻裂作用,局部增强后试件的初始开裂应变大于普通混凝土试件;考虑到钢纤维的桥联作用抑制裂缝的扩展,UHPC局部增强梁的弯曲裂缝以多裂缝模式扩展(普通混凝土裂缝少,宽度大),即当UHPC基体达到开裂应变后又出现新裂缝,进而在UHPC增强层形成许多细而小的裂缝;④纵筋屈服后,试件进入屈服破坏阶段,此时受拉区普通混凝土退出工作,导致截面抗弯刚度下降,荷载—挠度曲线出现了转折;试件在到达极限荷载后,梁顶受压边缘被压碎、预应力筋发生屈服,荷载—挠度曲线出现下降,试验梁迅速丧失承载力。考虑到UHPC中钢纤维的阻裂作用,试验梁极限弯矩随UHPC层厚度

的增大而显著增加,当UHPC层分别由0 mm增加到50 mm和100 mm时,极限弯矩分别提高约1.14倍和1.35倍。

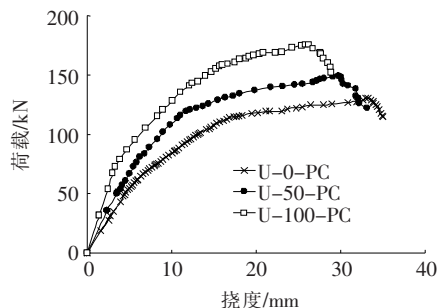


图4 试验梁跨中荷载—挠度曲线

2.3 跨中截面应变变化

3根试验梁的跨中截面应变分布如图5所示。

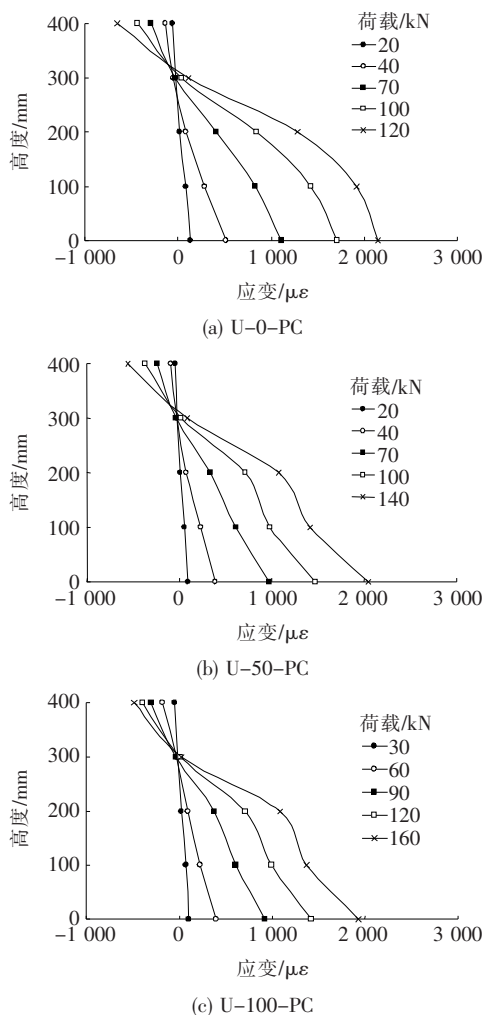


图5 试验梁跨中截面应变

从图5可以看出:3根试验梁跨中截面弯曲正应变沿梁高方向的分布基本符合平截面假定,在开裂前,中和轴基本保持不变,开裂后,截面受拉区应变越来越

大,中性轴高度逐步上升,截面受压区高度随之变小,受压区混凝土应变逐渐增大,两根 UHPC 局部增强预应力混凝土梁的最终破坏形态与预应力混凝土梁相同,表明组合梁截面协同工作性能较好。

3 开裂弯矩和极限弯矩计算

3.1 基本假定

- (1) 截面符合平截面假定,应变沿梁高线性分布。
- (2) 主梁开裂后,受拉区普通混凝土失效,UHPC 继续工作直至试件破坏。
- (3) 试件破坏以受压普通混凝土被压碎为准则,此时预应力筋和非预应力筋均已进入屈服。
- (4) 混凝土与预应力筋、非预应力筋之间无滑移。

3.2 材料本构关系

3.2.1 普通混凝土本构关系

普通混凝土本构关系采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》推荐的简化模型,其中受压应力—应变关系为:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right], & \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ f_c, & \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_c 和 ϵ_c 分别为混凝土压应力和压应变; f_c 为混凝土轴心抗压强度; ϵ_0 为混凝土峰值压应变,按 0.002 取值; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变,按 0.003 3 取值。

3.2.2 UHPC 受拉本构关系

UHPC 受拉应力—应变曲线采用简化模型,其表达式为:

$$\sigma_t = \begin{cases} E_u \epsilon_t, & \epsilon_t \leq \epsilon_{tr,u} \\ f_{tr,u}, & \epsilon_{tr,u} < \epsilon_t \leq \epsilon_{tu,u} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_t 和 ϵ_t 分别为 UHPC 拉应力和拉应变; E_u 为 UHPC 抗拉弹性模量,取 44 700 MPa; $f_{tr,u}$ 为 UHPC 的抗拉强度,取 6 MPa; $\epsilon_{tr,u}$ 为 UHPC 的开裂拉应变; $\epsilon_{tu,u}$ 为 UHPC 的极限拉应变,取 0.007。

3.3 开裂弯矩

根据 JTG D62—2012《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定,预应力受弯构件开裂弯矩可用以下公式计算:

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0 \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{2S_0}{W_0} \quad (4)$$

式中: σ_{pc} 为扣除全部预应力损失后预应力筋在梁底边缘产生的混凝土预压应力; γ 为受拉区混凝土塑性影

响系数; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; W_0 为换算截面抗裂边缘的弹性抵抗矩; S_0 为全截面换算截面重心轴以上(或以下)部分面积对重心轴的面积矩。

UHPC 由于钢纤维的桥联作用,对抑制裂缝的生成与发展具有显著的作用,其抗拉强度远高于普通混凝土,并能有效提高受拉区混凝土塑性变形高度。为此,引入增强系数 α 考虑 UHPC 中钢纤维的阻裂作用,综合式(3),建立预应力 UHPC 局部增强混凝土梁开裂弯矩表达式为:

$$M_{cr} = \left[\sigma_{pc} + (1 + \alpha) \gamma f_{tr,u} \left(\frac{t}{h} \right) + \gamma f_{tk} \left(\frac{h-t}{h} \right) \right] W_0 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\lambda \rho l}{d} \quad (6)$$

式中: λ 为钢纤维抗裂影响系数,根据文献[6]取 λ 为 0.2; ρ 为钢纤维体积率; l 和 d 分别为钢纤维长度和直径; t 和 h 分别为 UHPC 厚度和主梁截面高度; $f_{tr,u}$ 为 UHPC 抗拉强度。

3.4 极限弯矩

预应力 UHPC 局部增强混凝土梁到达承载极限状态时,受压区普通混凝土达到极限压应变,梁开始发生破坏,此时主梁受拉区预应力筋和非预应力筋均已达到屈服,相应的截面应力应变分布如图 6 所示。其中 x_c 为受压区高度; ϵ_p 和 ϵ_s 分别为受压区顶缘普通混凝土达到极限压应变 ϵ_{cu} 时受拉区预应力筋和非预应力筋对应的应变; β 为受压区等效矩形应力图高度系数,按 0.8 取值; f_{py} 和 f_{sy} 分别为预应力筋和非预应力筋的屈服强度,按表 4 取值;受拉区 UHPC 按基本假设以等效矩形考虑,高度为 t ,应力取 UHPC 抗拉强度 $f_{tr,u}$ 。

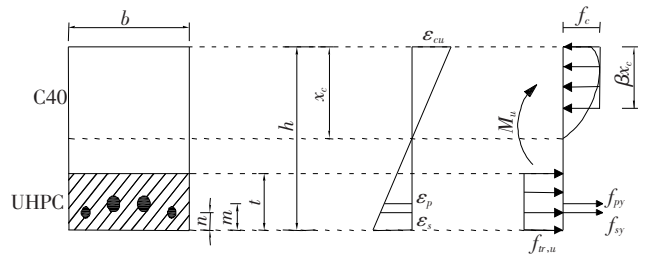


图 6 极限阶段梁截面应力应变分布图

当达到极限状态时,由水平力和弯矩的平衡有:

$$f_c \beta x_c b = f_{tr,u} t b + f_{py} A_p + f_{sy} A_s \quad (7)$$

$$M_u = f_c \beta x_c b \left(x_c - \frac{\beta x_c}{2} \right) + f_{tr,u} t b \left(h - x_c - \frac{t}{2} \right) + f_{py} A_p (h - x_c - m) + f_{sy} A_s (h - x_c - n) \quad (8)$$

式中: A_p 和 A_s 分别为预应力筋和非预应力筋的面积,按表1取值; h 为梁高; m 和 n 分别为预应力筋和非预应力筋中心到梁底缘距离。

根据式(7)可求得受压区高度 x_c ,代入式(8)即可得到极限弯矩 M_u ,对于试件U-0-PC,不考虑受拉区混凝土拉应力效应,相应的 $f_{tr,u}$ 取值为0。

3.5 计算值与试验值对比

应用上述推导的公式(5)、(8),可分别求得试验梁的开裂弯矩和极限弯矩,再结合表达式 $M_u = Pl'/6$ (l' 为试验梁的净距, P 为竖向外荷载),即可得到相应的开裂荷载和极限荷载,表5为两种荷载试验值和计算值。

表5 开裂荷载和极限荷载

试验梁编号	开裂荷载			极限荷载		
	试验值/kN	计算值/kN	试验值/计算值	试验值/kN	计算值/kN	试验值/计算值
U-0-PC	45.9	49.4	0.93	130.1	123.8	1.05
U-50-PC	51.9	58.3	0.89	148.4	145.5	1.02
U-100-PC	73.1	68.3	1.07	175.4	162.4	1.08

从表5可以看出:试验值与理论值吻合较好,表明所建立的公式可用于此类预应力UHPC局部增强梁结构承载力的预测。

4 结论

该文进行了预应力UHPC局部增强混凝土梁抗弯承载力试验研究,分析了组合梁正截面抗弯性能与预应力混凝土梁的异同,提出了适用于预应力UHPC局部增强混凝土梁抗弯计算方法,得到以下结论:

- (1) 采用UHPC对预应力混凝土梁受拉区进行局部增强可有效抑制受拉区裂缝发展,使原本宽而少的裂缝转变为细而密的微细裂缝,UHPC层厚度越大,受拉区主裂缝宽度越小,裂缝分布更密。
- (2) 增大UHPC厚度可显著提高预应力UHPC局部增强混凝土梁的极限弯矩,当UHPC层分别由0 mm增加到50 mm和100 mm时,极限弯矩可分别提高约1.14倍和1.35倍。
- (3) 建立了预应力UHPC局部增强混凝土矩形截面梁开裂弯矩和极限弯矩计算公式,理论值与试验值吻合较好,可为同类型的预应力UHPC局部增强梁结构承载力预测提供参考。

参考文献:

[1] 王德辉,史才军,吴林妹.超高性能混凝土在中国的研究和应用[J].硅酸盐通报,2016(1).

[2] 任亮,梁明元,王凯,等.桥梁伸缩缝超高性能混凝土关键

性能的研究与应用[J].硅酸盐通报,2018(6).

[3] Graybeal BA. Flexural Behavior of an Ultrahigh — Performance Concrete I — Girder[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(6): 602 — 610.

[4] Yoo Doo — Yeol, Yoon Young — Soo. Structural Performance of Ultra — High — Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers[J]. Engineering Structures, 2015, 102: 409 — 423.

[5] 郑文忠,李莉,卢珊珊.钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能分析[J].建筑结构学报,2011(6).

[6] 方志,刘明,郑辉.预应力活性粉末混凝土箱梁抗弯性能试验[J].建筑科学与工程学报,2015(6).

[7] 徐世烺,王楠,李庆华.超高韧性水泥基复合材料增强普通混凝土复合梁弯曲性能试验研究[J].土木工程学报,2010(5).

[8] 鞠彦忠,孙启健,王德弘,等.RPC — NC组合梁弯曲承载力的影响因素[J].实验力学,2017(6).

[9] 过民龙,季文玉.活性粉末混凝土与普通混凝土叠合T梁静载抗弯性能研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017(3).

[10] 邓宗才,张茂晨.混杂纤维增强RPC加固混凝土梁抗弯性能[J].哈尔滨工程大学学报,2015(9).

[11] GB 50010 — 2010 混凝土结构设计规范[S].

[12] JTG D62 — 2012 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[13] 李油油,于晓坤,贾艳敏,等.预应力混凝土连续矮肋T梁抗弯承载力分析[J].中外公路,2020(6).

[14] 黄正猛,方志,贾理.体外配置CFRP预应力筋RPC梁受弯性能非线性分析[J].中外公路,2020(4).