

# 含小型粗骨料 UHPC 板抗弯性能研究

王 衍<sup>1,2</sup> 邵旭东<sup>1,2</sup> 曹君辉<sup>1,2</sup> 邓舒文<sup>1,2</sup> 李玉祺<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 研制新型的含小型粗骨料 UHPC 板, 提升传统大跨径组合梁斜拉桥普通混凝土桥面板的抗弯性能。通过对含小型粗骨料 UHPC 进行基本材料性能研究, 以及对含小型粗骨料 UHPC 板试件进行抗弯试验, 材性试验探究含小型粗骨料 UHPC 材料的本构关系、弹性模量和终凝后的干燥自收缩等, 发现在 UHPC 中添加小型粗骨料后, UHPC 在抗压性能方面得到提高, 减小终凝后的干燥自收缩, 但会降低一定的抗弯拉强度和韧性; 含小型粗骨料 UHPC 板试件的抗弯试验探究了试件的荷载-挠度关系与弯矩-最大裂缝宽度关系。发现 UHPC 板试件具有较高的开裂强度, 结构破坏呈现出多裂缝发展。抗弯试验、有限元分析和承载力公式计算结果表明: 含小型粗骨料 UHPC 板具有较好的抗弯、抗裂性能, 但计算承载能力时应充分考虑添加小型粗骨料后对结构拉伸性能降低的影响。

**关键词:** 桥梁工程; 含小型粗骨料 UHPC 板; 抗弯性能; 钢-UHPC 轻型组合梁

**中图分类号:** U443.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)03-0067-13

## Research on flexural performance of UHPC deck panel containing small coarse aggregates

Wang Yan<sup>1,2</sup> Shao Xudong<sup>1,2</sup> Cao Junhui<sup>1,2</sup> Deng Shuwen<sup>1,2</sup> Li Yuqi<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A novel UHPC deck panel containing small coarse aggregates was proposed and used to improve the flexural performance of ordinary concrete bridge deck for long-span composite girder cable-stayed bridges. Both the basic material properties of UHPC containing small coarse aggregates and the flexural performance of the UHPC deck panel containing small coarse aggregates were studied in the present work. Based on material tests, the constitutive relation, elastic modulus and drying autogenous shrinkage of UHPC containing small coarse aggregates were investigated. It was found based on the results that by adding small coarse aggregates to UHPC, the compressive performance can be improved and the drying autogenous shrinkage of UHPC can be decreased, but the bending or tensile strengths and toughness may also be decreased. In the bending tests of UHPC deck panel containing small coarse aggregates, the load-deflection relation and the moment-maximum crack width relation of the specimens were studied. It was found that the specimens had high cracking strengths and failed with multiple crack development. The results of bending tests, finite element analysis and bearing capacity calculation showed that the UHPC deck panel containing small coarse aggregates had good flexural performance and crack resistance, but the adverse effect of adding small coarse aggregates to UHPC on its tensile properties should be fully taken into account when calculating the bearing capacity.

**Keywords:** bridge engineering; UHPC deck panel containing small coarse aggregates; flexural performance; steel-UHPC lightweight composite girder

**E-mail:** yanwang@hnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51778223)、国家青年科学基金(51708200)、湖南省科技重大专项(2017SK1010)和湖南省研究生科研创新项目(CX2018B217)

作者简介: 王衍, 博士研究生

通讯作者: 邵旭东, 博士, 教授

收稿日期: 2018-05-02

## 引言

对于大跨径钢-混凝土组合梁斜拉桥,目前主要面临着两个难题。①传统的钢-混凝土组合梁中普通混凝土桥面板的厚度较大,平均厚度在28cm左右,导致钢-混凝土组合梁的自重较大,其中普通混凝土桥面板的自重可以占组合梁总重量的70%以上,最终,导致组合梁斜拉桥主梁的经济适用跨径难以突破600m<sup>[1-5]</sup>;②由于普通混凝土材料的抗拉性能不理想,在车辆荷载作用下,大跨径组合梁的普通混凝土桥面板面临着较大的开裂风险。国内外学者为了解决上述问题,通常在混凝土桥面板上缘中施加预应力<sup>[6]</sup>、降低上部混凝土桥面板与下部钢梁间剪力连接件的约束作用等措施<sup>[7-9]</sup>,但这些措施同时又会带来由于混凝土收缩、徐变而引起预应力损失增长的难题<sup>[10-11]</sup>,最终导致常规大跨径斜拉桥普通混凝土桥面板防裂措施的长期效果不甚理想。

采用超高性能混凝土(ultra-high performance concrete,简称UHPC)发展新型桥面板结构是解决上述难题的有效途径。UHPC的组成成分中包含着微米级水泥与纳米级硅灰,是以最大密实度原理设计的新型水泥基复合材料,配合超低的水胶比,具有超高的力学性能与耐久性<sup>[12-14]</sup>。UHPC的抗压强度一般可以超过150MPa,掺入2%~3%的钢纤维之后,其抗折强度可达到30~60MPa,并表现出超高的韧性<sup>[13]</sup>。

利用UHPC的超高力学性能来设计新型的桥面板,桥面板的平均厚度可以降低到13~17cm<sup>[15]</sup>,明显降低组合梁桥面板结构的自重的40%~50%,再与下部钢梁结合形成新型的钢-UHPC轻型组合桥梁,可以降低传统钢-混凝土组合梁结构自重的35%~50%<sup>[15]</sup>,新型的钢-UHPC轻型组合梁可以扩大组合梁斜拉桥的经济适用跨径,提升组合梁在大跨径斜拉桥中的应用。此外,UHPC结构具有良好的抗裂性能和超高的耐久性能<sup>[16]</sup>,配筋后UHPC桥面板受弯破坏时表现多裂缝发展的特征。当UHPC结构受弯微裂缝发展阶段,2%~3%的钢纤维在UHPC基体开裂后发挥出桥接作用,使UHPC可以承担较高的稳定拉应力(通常为7~10MPa)<sup>[13]</sup>,且微裂缝发展阶段UHPC受拉工作截面退化缓慢,保证了结构刚度。因此,利用UHPC设计新型桥面板结构可以有效预防截面高度退化,并提高桥面板结构开裂后的刚度与破坏时的受拉应力水平<sup>[16]</sup>。

目前,主跨超过600m的大跨径斜拉桥还没有采

用纯UHPC制作的桥面板,但2017年开始建造的南京长江第五大桥(以下简称“南京五桥”)是一座主跨600m的三塔组合梁斜拉桥,并首次采用了含小型粗骨料UHPC制作主梁桥面板,小型粗骨料选用了高弹模、低收缩的4~5mm粒径的河砂与6~8mm粒径的玄武岩。

UHPC添加高弹性模量的河砂、玄武岩作为小型粗骨料不仅可以提高UHPC的弹性模量<sup>[17-18]</sup>,还可以降低UHPC的收缩<sup>[19]</sup>。不添加粗骨料UHPC的弹性模量通常约为42.6GPa<sup>[15-16]</sup>,而本文中所述的含小型粗骨料UHPC的弹性模量由试验测得可以达到52.1GPa,相对提高约22%,因此,含小型粗骨料UHPC板可以在一定程度上弥补因桥面板结构变薄所造成结构刚度下降的问题。此外,UHPC由于较高的凝胶材料用量<sup>[20]</sup>,UHPC材料的总收缩高于普通混凝土或高性能混凝土,如果UHPC材料的收缩受到约束作用,则UHPC材料比普通混凝土或高性能混凝土更易开裂<sup>[21]</sup>。Ma等<sup>[19]</sup>的研究表明在UHPC中掺入一些粒径为2~5mm的玄武岩能显著降低UHPC材料的自收缩量。

然而,通常我国《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)中,介绍UHPC中的骨料粒径不超过1.25mm的石英砂,对于含有大量小型粗骨料(河砂与玄武岩)UHPC的研究,目前我国及其他国家的相关UHPC规范都尚未涉<sup>[21-23]</sup>,且南京五桥是首次使用含小型粗骨料UHPC的实际工程。因此,本文对含小型粗骨料UHPC板结构展开了基本材料性能试验与抗弯性能试验研究,探究含粗骨料UHPC结构与已有UHPC结构在设计计算中的区别。并采用有限元计算分析及推导含粗骨料UHPC板试件的抗弯承载能力计算公式两种方式,来模拟试验结果。探究含小型粗骨料UHPC板结构受弯的破坏机理,为以后实际工程应用提供依据。

## 1 含小型粗骨料UHPC基本材料性能试验研究

### 1.1 配合比

本文试验中使用的含小型粗骨料UHPC材料主要由水泥、小型粗骨料、石英砂、硅灰、粉煤灰、石英粉、高效减水剂、端勾型钢纤维(长13mm,直径0.2mm)。采用的小型粗骨料为4~5mm粒径的河砂与6~8mm粒径的玄武岩,含小型粗骨料UHPC的详细组成见表1,试验中含小型粗骨料UHPC的容重为25.80kN·m<sup>-3</sup>。

表 1 1m<sup>3</sup>含小型粗骨料 UHPC 组成成分  
Table 1 Composition of 1m<sup>3</sup> UHPC containing small coarse aggregates

材料名称	UHPC 凝胶材料	河沙	玄武岩	端构型钢纤维	水
重量 (kg)	1080	580	600	157	162.6
体积率	41.8%	22%	18%	2%	16.2%

1.2 基本性能

依据我国《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015), 对含小型粗骨料 UHPC 材料的立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗折强度、弹性模量的基本力学性能进行试验测试, 力学性能试验结果如表 2 所示。

表 2 含小型粗骨料 UHPC 力学性能试验及结果

Table 2 Experimental results of mechanical behavior of UHPC containing small coarse aggregates

序号	检验项目	试件尺寸 (mm×mm×mm)	检验数量 (组)	试验结果平均值 (MPa)
1	标准养护立方体抗压强度	100×100×100	10	151.0
2	标准养护轴心抗压强度	300×100×100	5	127.1
3	标准养护抗折强度	400×100×100	5	22.4
4	标准养护弹性模量	300×100×100	5	52.1×10 <sup>3</sup>

1.2.1 受压本构关系

对于受压本构关系, 杨剑等<sup>[24]</sup>测试了 UHPC 轴压应力-应变曲线, 并提出了 UHPC 的轴压本构关系模型, 如式(1)所示。结合本文含小型粗骨料 UHPC 材料力学性能试验结果, 标准养护 28d 其标准立方体抗压强度平均值为 151MPa, 弹性模量为 52.1GPa, 轴心抗压强度  $f_c = 127.1\text{MPa}$ , 对应的极限压应变  $\varepsilon_0$  为  $3500\mu\varepsilon$ 。参考式(1)可得到含小型粗骨料 UHPC 的受压本构模型, 如图 1 所示。

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \frac{n\xi - \xi^2}{1 + (n-2)\xi} & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ f_c \frac{\xi}{2(\xi-1)^2 + \xi} & \varepsilon > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f_c$  为 UHPC 的轴心抗压强度;  $\xi$  为应变比,  $\xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ ;  $n = \frac{E_c}{E_{sec}}$ ,  $E_c$  为初始弹性模量,  $E_{sec}$  为峰值点的割线模量。

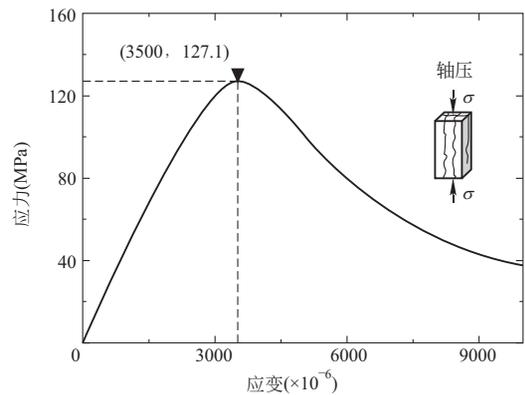


图 1 含小型粗骨料 UHPC 轴压本构关系曲线

Fig. 1 Compressive constitutive relation of UHPC containing small coarse aggregates

1.2.2 受拉本构关系

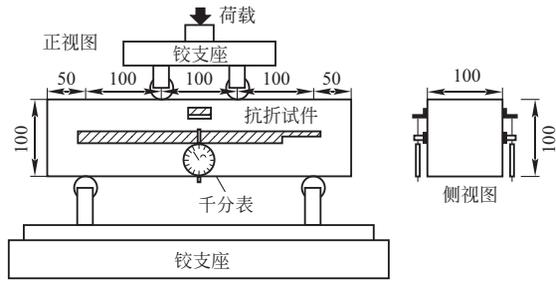
对于 UHPC 受拉本构关系, 参考相关 UHPC 及纤维混凝土文献, UHPC 的受拉本构关系采用文献[25-26]推荐的双线性应力-应变关系。文献中测试了 UHPC 在轴拉荷载作用下与四点弯曲荷载作用下的应力-应变关系, 利用二次倒推法分析方法得到了二者之间的转化关系, 并提出了 UHPC 受拉本构模型。采用式(2)计算弹性阶段试件跨中截面的曲率, 试件开裂后到极限承载能力下的跨中截面曲率可采用式(3)计算。

$$\phi = \frac{24}{3L^2 - 4a^2} \left( \delta - \frac{36Fa}{25Ebh} \right) \quad F < 0.7F_{max} \quad (2)$$

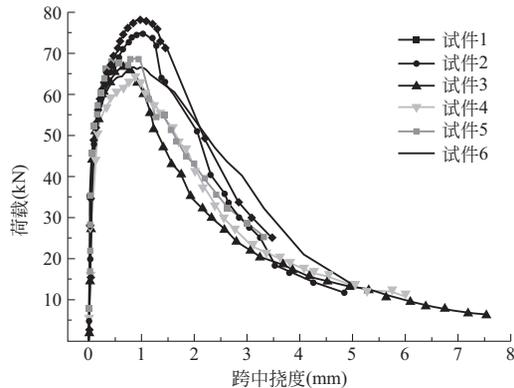
$$\phi = \frac{8}{L^2 - 4a^2} \left( \delta - \frac{9Fa^3}{2Ebh^3} - \frac{36Fa}{25Ebh} \right) \quad F \geq 0.7F_{max} \quad (3)$$

式中:  $\phi$  为试件跨中截面的曲率;  $L$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $h$  分别为试件的计算跨径、纯弯段的长度、跨中截面宽度和高度;  $F$  为外部荷载;  $F_{max}$  为极限荷载;  $\delta$  为试件的跨中挠度。

本文参考上述文献的方法, 对含小型粗骨料 UHPC 材料在抗折试验中的荷载-挠度关系转化为在轴拉荷载作用下的应力-应变关系。首先, 采用四点弯曲试验来检测标准养护 28d 的含小型粗骨料 UHPC 的弯拉性能。试件尺寸为  $400\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ , 得到了 6 个棱柱体试件的弯拉全曲线, 试验及结果如图 2 所示, 然后, 利用式(2)、式(3)得到 UHPC 四点弯曲试验中试件在线弹性阶段、挠度硬化阶段的跨中截面曲率, 最终将含小型粗骨料 UHPC 材料四点弯曲试验中极限荷载前的全曲线转化为单轴拉伸应力-应变曲线, 结果如图 3(a)所示, 法国 UHPC 规程<sup>[22]</sup>提出的简易倒推法假定了双折线形式的应力应变曲线, 本文对二次反推得到的单轴拉伸应力-应变曲线进行简化, 简化曲线如图 3(b)所示。



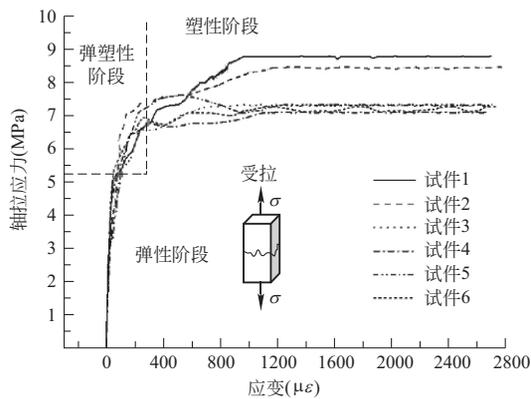
(a) 含小型粗骨料UHPC材料四点弯曲试验



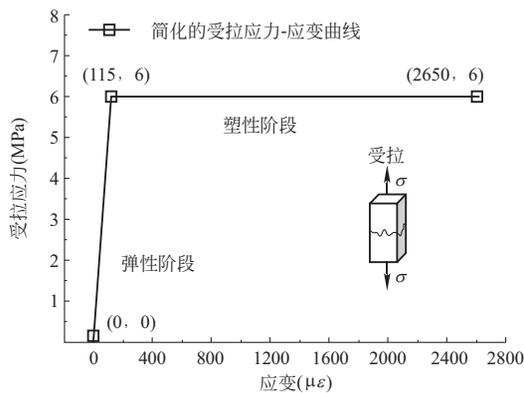
(b) 四点弯曲试验荷载-挠度曲线

图2 四点弯曲试验与荷载-挠度曲线

Fig. 2 Four-point bending test and load-deflection curves



(a) 推导出的受拉应力-应变



(b) 简化的受拉应力-应变关系

图3 含小型粗骨料UHPC受拉应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile constitutive relation of UHPC containing small coarse aggregates

1.2.3 干燥自收缩测量

在我国UHPC终凝后的自收缩可根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)中的接触法测量,试件尺寸为100mm×100mm×515mm,试件从3d龄期时(从UHPC搅拌加水时算起)从标准养护室取出,放入恒温恒湿室(20℃,相对湿度50%),采用混凝土卧式收缩膨胀仪定期测量试件收缩的读数,定期测量含小型粗骨料UHPC材料终凝后的自由收缩量,测量结果与文献[27]中不含粗骨料UHPC的干燥自收缩测量结果共同汇总于图4中。

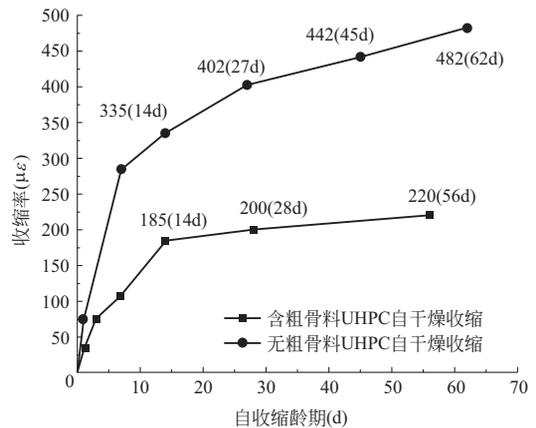


图4 自然养护下不同UHPC干燥自收缩

Fig. 4 Drying autogenous shrinkage of different UHPC with natural curing

本文采用的含小型粗骨料UHPC中小型粗骨料总体积率约40%(河砂与玄武岩的体积率可见表1),自然养护下56d含小型粗骨料UHPC材料的干燥自收缩量为220μ $\epsilon$ ,与不含粗骨料UHPC的自收缩<sup>[27]</sup>相比,可降低约50%。

1.2.4 性能对比

本团队<sup>[25]</sup>研究了含2%端钩型钢纤维的UHPC(不含小型粗骨料)的材料性能,与本文的含小型粗骨料UHPC(同类型的2%端钩型钢纤维)的材料性能进行对比,将对比结果汇总于表3。

表3 材料性能对比结果

Table 3 Comparison of material properties

材料性能	含粗骨料UHPC	不含粗骨料UHPC	比值
抗压强度(MPa)	151.0	143.0	1.06
弹性模量(GPa)	52.1	42.8	1.22
抗折强度(MPa)	22.4	25.0	0.90
韧性指数 $I_5$	3.93	4.64	0.85
韧性指数 $I_{10}$	7.76	11.25	0.69
韧性指数 $I_{20}$	13.02	31.32	0.42
抗拉应力(MPa)	7.66	8.43	0.91
极限拉应变( $\mu\epsilon$ )	2650	5900	0.45

对比结果显示添加高弹模的小型粗骨料 UHPC 在抗压性能方面得到了提高, 抗压强度提高了 6%, 弹性模量提高约 22%, 但是在材料的抗弯拉性能方面, 含小型粗骨料 UHPC 的抗折强度与抗拉强度约有 10% 的减弱, 韧性方面降低许多, 尤其是韧性指数  $I_{20}$  降低约 58%, 极限拉应变降低约 55%, 文献 [28-29] 的研究同样表明添加粗骨料对 UHPC 的抗折强度与断裂能具有 8%~15% 的下降作用。

含小型粗骨料 UHPC 与以往不含小型粗骨料的 UHPC 在材料性能上存在较大的差异, 因此在 UHPC 结构的上的设计计算上应充分考虑。

## 2 含小型粗骨料 UHPC 板抗弯性能试验研究

### 2.1 抗弯试验试件设计

主跨超过 600m 的常规钢-混凝土组合梁斜拉桥中普通混凝土桥面板的平均厚度通常在 28cm 以上, 例如安徽望东长江大桥(主跨 638m, 普通混凝土桥面板厚度 28cm)、福州青州闽江大桥(主跨 605m, 普通混凝土桥面板厚度 25cm)、上海杨浦大桥(主跨 602m, 普通混凝土桥面板厚度 26cm), 并且在纵向和横向有加厚与工字钢结构结合。南京长江五桥(主跨 600m, 采用含小型粗骨料 UHPC 板厚度为 17cm)。

本文拟采用更轻薄一些的, 厚度为 16cm 的含小型粗骨料 UHPC 板进行抗弯性能试验。厚度为 16cm 的含小型粗骨料 UHPC 板至少可减轻传统组合梁桥面板(按 28cm 后的普通混凝土计算)自重的 39%, 简要自重计算对比见表 4 所示, 进一步可减轻组合梁整体的自重。

本文试设计是 16cm 厚的含小型粗骨料 UHPC 矩形截面板, 采用 HRB400 热轧螺纹钢筋进行配筋, 纵向配筋为  $\Phi 16@70$ , 保护层厚度为 2cm; 横向配筋为  $\Phi 12@100$ , 保护层厚度为 4cm。选取试验试件情况如图 5 所示。

表 5 UHPC 板试验试件基本参数

Table 5 Basic parameters of UHPC deck panel specimens

试件编号	总尺寸	纵向钢筋	纵向钢筋配筋率	纵向钢筋保护层厚度	横向钢筋	横向钢筋保护层厚度	养护方式
PB-1~PB-6	长 150cm 宽 35cm 高 16cm	—	—	—	—	—	自然 养护
LB-1~LB-6		5 $\Phi 16@70$	1.8%	2cm	15 $\Phi 12@100$	4cm	
TB-1~TB-6		4 $\Phi 12@100$	0.8%	4cm	21 $\Phi 16@70$	2cm	

注: P(L/T)B-X 中“P”代表素 UHPC、“L”代表纵向、“T”代表横向、“B”代表弯曲、X 代表试件编号。

表 4 自重计算对比

Table 4 Comparison of self-weight calculation

项目	含粗骨料 UHPC	普通混凝土	重量比值
厚度(cm)	16	28	—
容重(kN/m <sup>3</sup> )	25.8	24	—
重量(kN/m <sup>2</sup> )	4.13	6.72	0.61

注: 表格中的容重暂不考虑钢筋, 混凝土的容重参考我国《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011), 含小型粗骨料 UHPC 的容重取本文试验值。

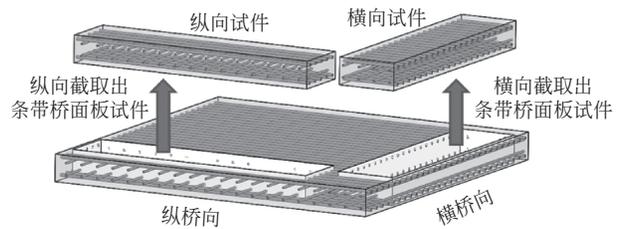


图 5 UHPC 板试验试件截取示意图

Fig. 5 Partitioned specimens of UHPC deck panel

为探究 16cm 厚度的含小型粗骨料 UHPC 板的静力抗弯性能, 从实际 UHPC 桥面板的纵桥向截取出条带试验试件(纵向试件), 用来进行桥面板纵向抗弯试验, 本文制作了 6 个纵向抗弯试验试件(编号为 LB-1~LB-6); 从实际 UHPC 桥面板的横桥向截取出条带试验试件(横向试件), 用来进行桥面板横向抗弯试验, 本文制作了 6 个横向抗弯试验试件(编号为 TB-1~TB-6)。此外, 还制作了不配钢筋的素 UHPC 试件(试件编号为 PB-1~PB-6), 用以探究含小型粗骨料 UHPC 材料在桥面板足尺情况下的抗弯性能。考虑到实际组合梁桥面板具有正负弯矩受力的情况, 本文对 UHPC 板构件进行了双层对称钢筋网布置, 即上下两层钢筋网相同, 各试件编号及主要参数如表 5 所示, 不同试件的配筋布置及不同保护层厚度的选取, 如图 6 所示。

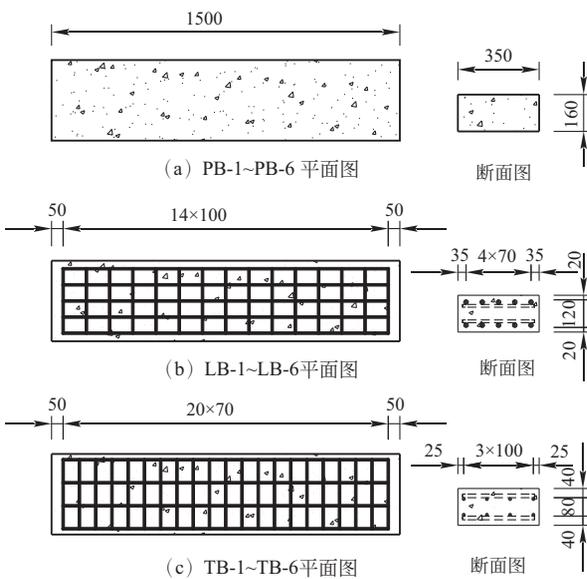


图 6 UHPC 板试验试件(单位: mm)

Fig. 6 UHPC deck panel specimens (unit: mm)

### 2.2 加载方案及测量设备

UHPC 板抗弯试验采用四点对称加载, 跨中的纯弯段可以很好地反映出 UHPC 板试件的抗弯性能, 并排除其他因素的影响。板试件及上部分配梁两端简支, 支座一端采用固定铰支座, 另一端为滚动铰支座, 支座用水平仪找平, 使用 50t 千斤顶作为跨中加载设备, 用力传感器测量荷载大小, 并通过分配梁传递给两点加载, 支座、加载装置及跨径布置如图 7(a)所示。以 5kN 为一级荷载, 对试件进行逐级加载, 用百分表及千分表测量试验试件跨中及梁端

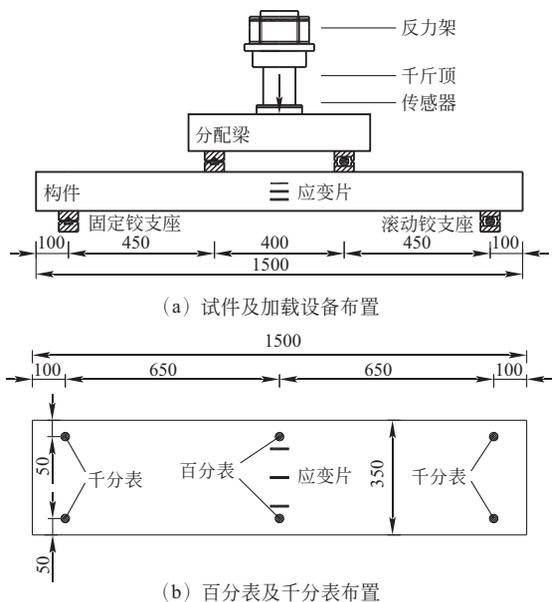


图 7 四点弯曲试验的试件及设备布置(单位: mm)

Fig. 7 Arrangement of specimens and equipment in four-point bend tests (unit: mm)

的竖向位移, 百分表和千分表布置如图 7(b)。利用裂缝观测仪测量试件逐级荷载下的裂缝宽度, 用应变片测量跨中截面的 UHPC 与内部纵向钢筋的应变情况。

随着千斤顶施加的跨中荷载增加, 逐级测量出三类试件的跨中挠度, 得到试件的荷载-挠度曲线, 观测试件的破坏形态和破坏荷载。通过利用裂缝观测仪测量逐级荷载下试验试件底面受拉区的裂缝宽度, 重点观测最大裂缝宽度在 0.05~0.2mm 的发展过程, 得到试验试件的弯矩-最大裂缝宽度曲线。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试件破坏形式

#### 3.1.1 不配筋含小型粗骨料 UHPC 试件

不配筋试验试件的抗弯试验主要反映含小型粗骨料 UHPC 材料在桥面板足尺情况下的抗弯性能。本文对试件 PB-1~PB-6 进行了四点弯曲抗弯试验, 试验现象表明试件 PB-1~PB-6 在受弯开裂后, 荷载可以明显的持续增加, 直到达到破坏荷载。因此, 试验现象可以说明本文中添加 2% 体积率的端钩型钢纤维的含小型粗骨料 UHPC 材料在桥面板足尺寸的情况下仍具有挠度硬化的弯曲特征, 具有良好的弯曲塑性, 没有发生脆性破坏。

#### 3.1.2 配筋含小型粗骨料 UHPC 试件

对原桥面板中纵向截取出的纵向抗弯试件(编号为 LB-1~LB-6)与横向截取出的横向抗弯试件(编号为 TB-1~TB-6)进行四点弯曲试验, 试验结果分别代表原桥面板的纵向抗弯性能与横向抗弯性能。

试验现象表明配筋试件 LB-1~LB-6、TB-1~TB-6 的破坏形式为典型的弯曲破坏, 且破坏前表现出良好的塑性。当试件受拉区钢筋达到屈服强度后, 试件的承载能力增长幅度减小, 而跨中位移增加速度显著。与普通混凝土适筋梁破坏不同的是, 在达到钢筋屈服强度前, 含小型粗骨料 UHPC 试件由于 UHPC 材料中钢纤维及钢筋的作用, UHPC 受拉工作截面退化缓慢, 试件的刚度保持良好, 在开裂后具有较长的裂缝发展阶段。

### 3.2 裂缝发展过程

与普通钢筋混凝土结构不同, 含小型粗骨料 UHPC 试件极限破坏时, 试件的底面受拉区出现了十几条可见裂缝, 其中有一条裂缝宽度最大的主裂缝横向贯穿整个试件, 试件破坏后的裂缝情况如图 8 所示。而普通混凝土桥面板试件底面受拉区一旦出现一条裂缝, 裂缝就会很快发展成为单一的主裂缝,

并伴随着明显的结构刚度下降。

抗裂性能作为混凝土类桥面板的重要设计指标之一，法国规范要求钢筋 UHPC 结构的最大裂缝宽度不应超过 0.2mm (XC4 类环境)，对于海洋环境工程，则不应超过 0.1mm (XD3、XS3 类环境)<sup>[22]</sup>，按照我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)，钢筋混凝土构件计算的最大裂缝宽度不应超过 0.2mm (Ⅱ类环境)。德国学者 Rafiee<sup>[30]</sup> 的研究表明当 UHPC 裂缝宽度在 0.05mm 及以下时，对于 UHPC 结构的耐久性没有任何影响，因此，本文以 UHPC 开裂 0.05mm 时的名义受拉应力作为结构的开裂应力，该状态下试件所受的外部荷载为开裂荷载。

含小型粗骨料 UHPC 试件的裂缝发展分为三个阶段：①裂缝数量增多阶段。试件达到开裂应力时，受拉区域出现长度为 2~5cm 的短小裂缝，随着荷载增加，短小裂缝数量逐渐增多；②短小裂缝发展阶段。当短小裂缝的数量发展到一定程度时，短小裂缝逐渐横向发展、延伸，相互连接横向贯穿试件底面；③主裂缝形成与发展阶段。在横向贯穿的裂缝中，有一条裂缝宽度发展较快，形成主裂缝，并逐渐向试件的内部延伸，直至破坏。

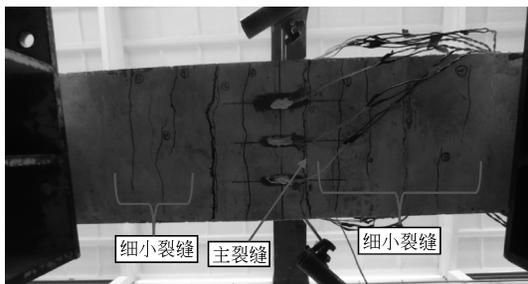


图 8 极限破坏时 UHPC 受拉表面裂缝分布

Fig. 8 Crack pattern on tensile surface of UHPC at failure

### 3.3 荷载-挠度曲线

通过四点弯曲试验，得到三类试件的荷载-挠度曲线试验结果，如图 9 所示。从图 9 中可分析出，在试件达到极限破坏前，对于配筋含小型粗骨料 UHPC 试件的荷载-挠度曲线可以明显的分为 3 个阶段：弹性阶段、裂缝发展阶段、屈服阶段。试件达到开裂荷载后，从弹性阶段进入到裂缝发展阶段，当试件受拉钢筋屈服时，试件开始进入到屈服阶段，直到试件达到极限破坏。与不配筋试件 PB-1~PB-6 对比，可发现对含小型粗骨料 UHPC 板结构进行配筋后，试件 LB-1~LB-6、TB-1~TB-6 的延性和裂缝发展阶段的抗弯刚度得到了显著提高，其中，保护层厚度

为 2cm、纵向配筋率为 1.8% 的试件 LB-1~LB-6 在试件开裂后，试件的抗弯刚度保持良好。

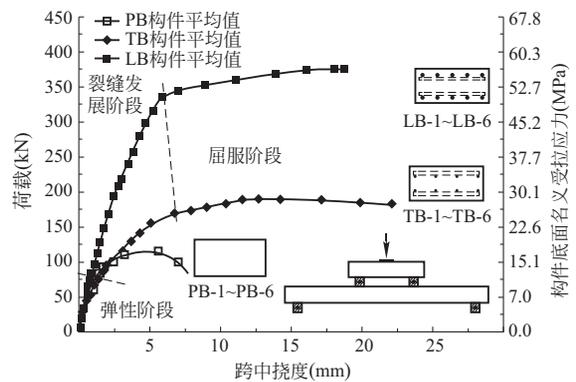


图 9 荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves

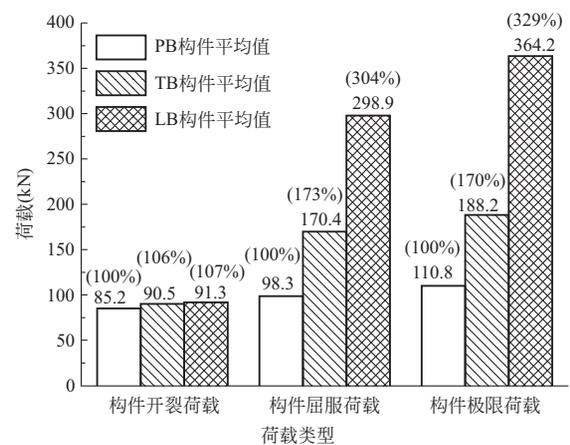


图 10 三类试件在不同阶段下的荷载

Fig. 10 Load level on three kinds of specimens at different stages

将三类试件各自在不同阶段的荷载汇总于图 10 中，分析可知：三类试件的开裂荷载比较接近，表明配筋对含粗骨料 UHPC 试件的开裂荷载影响不大。根据参考文献[25-26]，本文将不配筋 UHPC 试件极限抗弯荷载的 70% 作为该试件的屈服荷载。与不配筋的试件 PB-1~PB-6 相比，对于屈服荷载，试件 TB-1~TB-6 的屈服荷载提升了 73%，而试件 LB-1~LB-6 的屈服荷载提升了 204%；对于极限荷载，试件 TB-1~TB-6 的极限荷载提升了 70%，而试件 LB-1~LB-6 的极限荷载提升了 229%。表明了含小型粗骨料 UHPC 板内的纵向配筋和横向配筋钢筋可以很好地分别提升板结构的纵向抗弯性能与横向抗弯性能。当达到极限破坏荷载时，不配筋含粗骨料 UHPC 板试件(编号：PB-1~PB-6)底部名义拉应力平均值为 16.7MPa，原桥面板中纵向截取的纵向抗弯试件(编号：LB-1~LB-6)底部 UHPC 名义拉应力平均值为

54.9MPa, 横向截取的横向抗弯试件(编号: TB-1~TB-6)底部UHPC名义拉应力平均值为28.4MPa。

### 3.4 弯矩-最大裂缝宽度曲线

通过四点弯曲试验, 得到三类试件的弯矩-最大裂缝宽度曲线, 主要观测裂缝宽度在0.05~0.2mm的发展过程, 如图11所示。当三类试件底面的最大裂缝宽度达到0.05mm、0.1mm、0.15mm、0.2mm时, 将对应的试件底面名义受拉应力汇总于图12中。

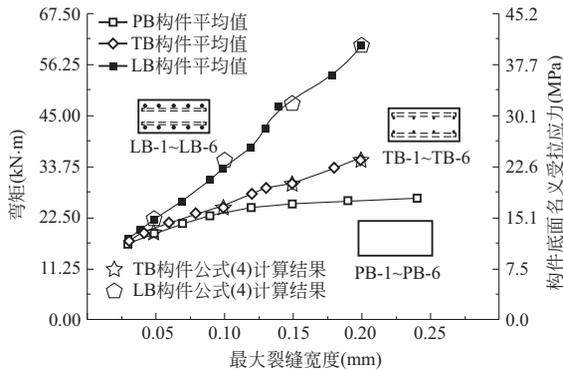


图11 弯矩-裂缝宽度曲线

Fig. 11 Moment-cracking width curves

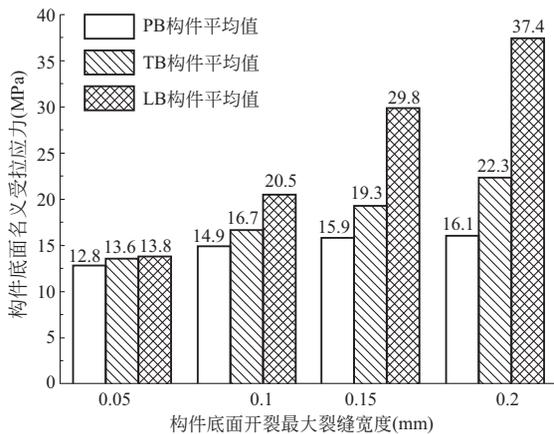


图12 三种试件不同阶段名义受拉应力

Fig. 12 Nominal tensile stresses of three kinds of specimens at different stages

由图12可知三类试件在开裂0.05mm时的试件底部名义受拉应力水平接近, 平均名义受拉应力在12.8~13.8MPa, 但是, 开裂后的性能却有较大的区别。不配筋含粗骨料UHPC板试件(编号: PB-1~PB-6)达到开裂强度(12.8MPa)后, 裂缝宽度很快就达到了0.2mm(试件底部名义受拉应力平均值为16.1MPa); 原桥面板中横向截取的横向抗弯试件(编号: TB-1~TB-6)达到开裂强度(13.6MPa)后, 裂缝宽度发展较为缓慢, 裂缝宽度达到了0.2mm时, 试件底部名义受拉应力平均值为22.3MPa; 原桥面板中

纵向截取的纵向抗弯试件(编号: LB-1~LB-6)达到开裂强度(13.8MPa)后, 裂缝宽度发展更为缓慢, 裂缝宽度达到了0.2mm时, 试件底部名义受拉应力平均值为37.4MPa。

参考某院对某主跨600m的三塔钢-UHPC组合梁斜拉桥实际设计方案(桥面板厚度为16cm)进行的组合梁桥面板局部有限元分析结果, 车辆荷载采用《公路桥涵设计通用规范》中车辆荷载, 每辆车总重为550kN, 活载冲击系数取1.3, 计算结果表明桥面板纵向最大拉应力为10.34MPa, 横向拉应力为6.08MPa。本试验中设计的16cm厚的含小型粗骨料UHPC板的纵向抗弯试件(编号: LB-1~LB-6)的平均开裂强度为13.8MPa, 横向抗弯试件(编号: PB-1~PB-6)的平均开裂强度为13.6MPa, 均满足有限元局部计算结果。

此外, 法国UHPC结构规范已经给出了详细的UHPC配筋结构的裂缝宽度计算公式, 本文就不再详细描述, 参考法国UHPC规范中的推导过程, 结合本文的试验研究, 在此提出符合本文研究的裂缝宽度经验计算公式(4)如下, 其中 $w$ 为UHPC裂缝宽度,  $c$ 为UHPC表面到受拉钢筋的中心距离,  $w$ 与 $c$ 的单位为mm。 $\sigma$ 为试件受拉面的名义应力, 单位为MPa, 由截面受到的弯矩 $M$ 除以截面抵抗矩 $W$ 得到。将LB与TB构件开裂0.05mm, 0.10mm, 0.15mm, 0.20mm时的计算结果绘制于图11中, 对比表明适用性良好。

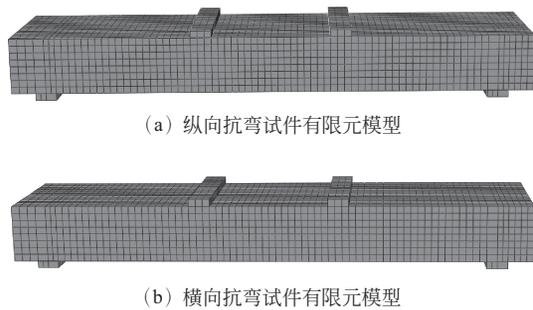
$$w = \frac{\sigma - 0.176c - 1.389}{335.3 - 5.88c} \quad (4)$$

## 4 试验试件有限元计算分析

本文对配筋含小型粗骨料UHPC板试件进行有限元模拟计算, 并将有限元计算的结果和试验结果进行对比较准, 为以后研究含小型粗骨料UHPC板结构变参数分析提供理论依据。

本文采用ABAQUS有限元计算软件对抗弯试验试件进行有限元模拟。模拟试件的试验环境, 在软件中建立试件模型, 有限元模型的尺寸与实际试验试件的尺寸相同, 定义材料参数及试件分析类型, 定义荷载及边界条件, 划分网格后进行计算分析。含小型粗骨料UHPC采用实体单元C3D8R, 单元C3D8R是一种三维单元(3D), 带有8个节点, 每个节点有3个平动自由度。而HRB400热轧螺纹钢筋采用带有两个节点的三维桁架单元T3D2, 每个节点同样具有三个平动自由度。模型分析的网格大小为

2cm, 有限元计算模型如图 13 所示。



(a) 纵向抗弯试件有限元模型

(b) 横向抗弯试件有限元模型

图 13 有限元模型

Fig. 13 Finite element models

### 4.1 有限元材料参数定义

结构材料方面, 含小型粗骨料 UHPC 板由含小型粗骨料 UHPC 和 HRB400 热轧螺纹钢筋两部分组成, 因此, 有必要介绍本文有限元分析中关于含小型粗骨料 UHPC 和 HRB400 热轧螺纹钢筋材料性能参数的定义。

#### 4.1.1 含小型粗骨料 UHPC 本构关系

有限元计算中采用了混凝土损伤塑性模型来模拟含小型粗骨料 UHPC 材料, 按轴压和受拉分别定义应力-应变关系。根据前文的研究, 按照图 1 与图 3 (b) 分别定义有限元计算中含小型粗骨料 UHPC 的轴压和受拉分别定义应力-应变关系。

#### 4.1.2 HRB400 热轧螺纹钢筋本构关系

钢筋是具有良好的力学稳定性的塑性材料, 其强度与弹性模量都要高出水泥基材料数倍。对于试件中的 HRB400 热轧螺纹钢筋, 本文采用理想弹塑性模型, 按照我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 中的规定, 钢筋的屈服强度  $\sigma_y = 400\text{MPa}$ , 弹性模量  $E_s = 200\text{GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ , 有限元中钢筋的本构关系如图 14 所示。

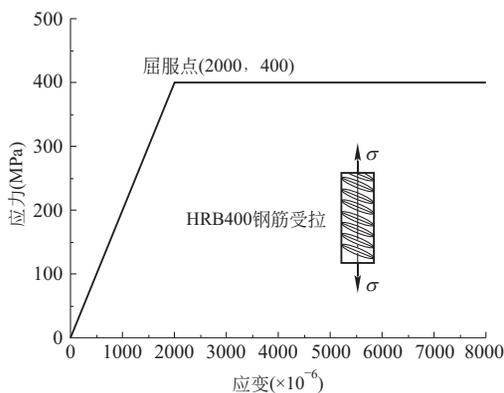


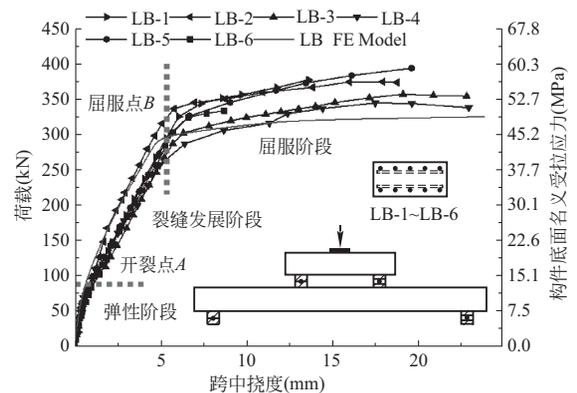
图 14 钢筋受拉本构关系

Fig. 14 Tensile constitutive relation of reinforcement

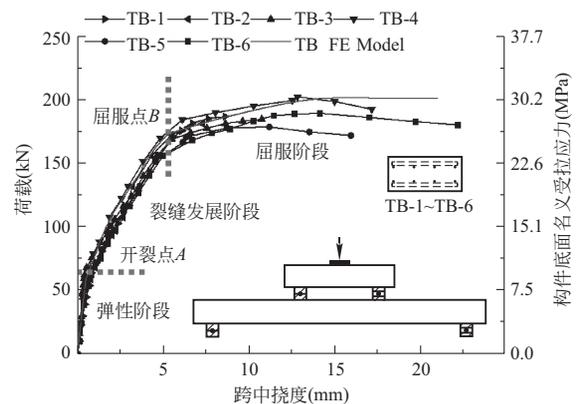
### 4.2 ABAQUS 有限元计算结果

利用 ABAQUS 有限元分析软件, 模拟本文中试件 LB-1~LB-6 和试件 TB-1~TB-6 的试验情况, 进行有限元计算分析, 提取出两种试件的荷载-挠度曲线, 并与试验结果进行对比校验, 对比结果如图 15 所示。

从图 15 中可以看出用上述方法对配筋含小型粗骨料 UHPC 试件的有限元分析计算情况。与试验结果相比, 有限元计算很好地模拟出了四点弯曲试验中试件 LB-1~LB-6、TB-1~TB-6 荷载-挠度曲线三个阶段的划分, 试验结果与有限元分析结果二者吻合良好, 说明有限元材料参数定义的比较合理。



(a) 纵向抗弯试件及有限元模型荷载-挠度曲线



(b) 横向抗弯试件及有限元模型荷载-挠度曲线

图 15 试验试件及有限元模型荷载-挠度曲线

Fig. 15 Load-deflection curves of test specimens and finite element models

开裂点 A 对含小型粗骨料 UHPC 的开裂强度十分敏感, 有限元计算中含小型粗骨料 UHPC 的开裂强度为 6.0MPa, 与试验结果相比, 有限元分析对试件 LB-1~LB-6、TB-1~TB-6 的开裂点 A 和弹性阶段刚度的计算十分准确, 说明本文利用二次倒推法分析方法得到的开裂应力比较合理。

屈服点 B 对钢筋的屈服强度比较敏感, 有限元计算中 HRB400 热轧螺纹钢筋的屈服强度为 400MPa,

与试验结果相比,有限元计算很好的模拟了试件 LB-1~LB-6、TB-1~TB-6 的屈服点  $B$  和试件在裂缝发展阶段的抗弯刚度。试件在裂缝发展阶段的抗弯刚度比弹性阶段的抗弯刚度略微下降,这是因为含小型粗骨料 UHPC 在达到开裂应力后,试件受拉区的 UHPC 工作截面开始退化,造成宏观上试件的抗弯刚度下降。

对于屈服点  $B$  的试件屈服荷载,试件 LB-1~LB-6 的平均试验结果为 298.9kN,有限元计算结果为 288.7kN,低于平均试验结果 3.4%;而试件 TB-1~TB-6 的平均试验结果为 170.4kN,有限元计算结果为 172.9kN·m,高于平均试验结果 1.5%。

### 5 抗弯承载能力计算

#### 5.1 UHPC 构件的承载能力计算

对于普通混凝土,受拉区混凝土开裂后,假定拉力全部由钢筋负担,即不考虑混凝土受拉,然而含小型粗骨料 UHPC,由于端钩型钢纤维的增强作用将承担部分拉应力,提供稳定拉应力,直到钢纤维被拔出,因此,计算构件的承载能力时,在 UHPC 内部钢纤维被拔出之前,需要考虑构件截面受拉区 UHPC 对构件承载能力的贡献。

对于 UHPC 受拉本构关系,目前已有相关 UHPC 及纤维混凝土文献,UHPC 的受拉本构关系推荐的双线性应力-应变关系。主要考虑 UHPC 材料的稳定开裂应力  $f_t$ 、开裂应变  $\epsilon_{t0}$  和极限拉应变  $\epsilon_{tu}$  对承载力的影响,表 6 列举一些已有的 UHPC 构件承载能力计算公式中各参数的取值情况。

表 6 UHPC 各参数取值对比  
Table 6 Comparison of UHPC parameters

编号	开裂应力 $f_t$ (MPa)	开裂应变 $\epsilon_{t0}$ ( $\mu\epsilon$ )	极限拉应变 $\epsilon_{tu}$ ( $\mu\epsilon$ )
文献[31]	10.3	196.5	7000
文献[32]	8.84	201.4	6041
文献[33]	10.19	249.0	—
文献[34]	7.81	156.0	—
文献[25]	8.43	196.9	5900
含小型粗骨料 UHPC	6.00	115	2650

注:文献[33-34]进行了开裂时的弯矩计算,并未提供极限拉应变  $\epsilon_{tu}$  的取值;文献[25]为本文团队对不含粗骨料 UHPC 材料的研究。

从表 6 中对比可发现,已有的关于不含小型粗骨料 UHPC,其开裂应力  $f_t$ 、开裂应变  $\epsilon_{t0}$  和极限拉应变  $\epsilon_{tu}$  的取值都高于本文研究的含小型粗骨料 UHPC 的

受拉性能。UHPC 构件在钢筋屈服时,UHPC 可能还没有达到极限拉应变的取值,但对于含小型粗骨料 UHPC 构件,当内部钢筋屈服时,含小型粗骨料 UHPC 的最大拉应变已经超过了极限拉应变的取值。因此,在计算含小型粗骨料 UHPC 构件的承载能力计算时,应充分考虑材料在开裂后的极限拉伸应变的取值,并且忽略部分 UHPC 的受拉作用。

#### 5.2 含小型粗骨料 UHPC 的承载能力计算

本文主要针对试件 LB-1~LB-6、TB-1~TB-6 的屈服点  $B$  进行抗弯承载能力计算分析,并将计算结果与试验结果、有限元计算结果三者进行比较。

然而对于含小型粗骨料 UHPC,由于端钩型钢纤维的增强作用将承担部分拉应力,开裂后含小型粗骨料 UHPC 截面的应变及应力分布如图 16 所示,其应变几何关系满足平面假设,受拉为正,受压为负。

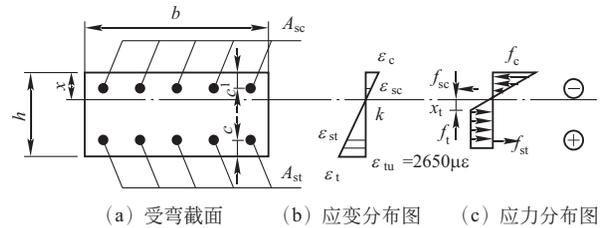


图 16 试件截面及应变、应力分布图

Fig. 16 Section, strain and stress distribution of specimen

图 16 中,根据本文第 1.2.2 节中的研究结果,含小型粗骨料 UHPC 的受拉性能参考图 3 中的试验结果,开裂应变  $\epsilon_{t0}$  取 1.15‰,开裂强度  $f_{ct}$  为 6MPa,极限拉应变  $\epsilon_{tu}$  取 2.65‰,本文中假设受拉截面中拉应变超过极限拉应变  $\epsilon_{tu}$  的含小型粗骨料 UHPC 将不再提供拉应力,针对含小型粗骨料 UHPC 受弯试件的屈服点  $B$ ,受拉钢筋屈服,受拉应变  $\epsilon_{st} = 2‰$ ,列出轴力平衡方程和弯矩平衡方程,如式(5)~式(8)。

$$\sum N = 0, \frac{f_{ct}x_1b}{2} + f_{ct}\left(\frac{0.00265}{k} - x_1\right)b + E_s(h - x - c)kA_{st} - \frac{1}{2}E_c(xk)(bx) - E_s(x - c')kA_{sc} = 0 \quad (5)$$

$$\sum M = 0, M_{cu} = \frac{1}{3}f_{ct}x_1^2b + f_{ct}\left(\frac{0.00265}{k} - x_1\right) \times \left(\frac{0.00265}{2k} + \frac{x_1}{2}\right)b + \frac{1}{3}E_cx^3kb + E_s(h - x - c)^2kA_{st} + E_s(x - c')^2kA_{sc} \quad (6)$$

$$x_1 = (f_{ct}/E_c)/k \quad (7)$$

$$k = (f_{sy} / E_s) / (h - x - c) \quad (8)$$

式中： $M_{cu}$  为计算的抗弯承载力； $h$  为截面高度； $x$  为含小型粗骨料 UHPC 受压区高度； $x_l$  为含小型粗骨料 UHPC 受拉区未开裂高度； $A_{st}$ 、 $A_{sc}$  分别为受拉、受压钢筋面积； $c$ 、 $c'$  分别为受拉、受压钢筋中心到截面下缘、上缘的距离； $E_c$ 、 $E_s$  分别为含小型粗骨料 UHPC 和钢筋的弹性模量； $f_{ct}$ 、 $f_{sy}$  分别为含小型粗骨料 UHPC 的受拉开裂强度和钢筋受拉屈服强度； $k$  为受弯截面的曲率。

根据上述的计算公式(5)~式(8)对配钢筋含小型粗骨料 UHPC 试件屈服点  $B$  的抗弯承载力和含小型粗骨料 UHPC 上缘最大受压应力进行计算，并将计算结果与试验结果和有限元计算结果进行汇总于图 17。

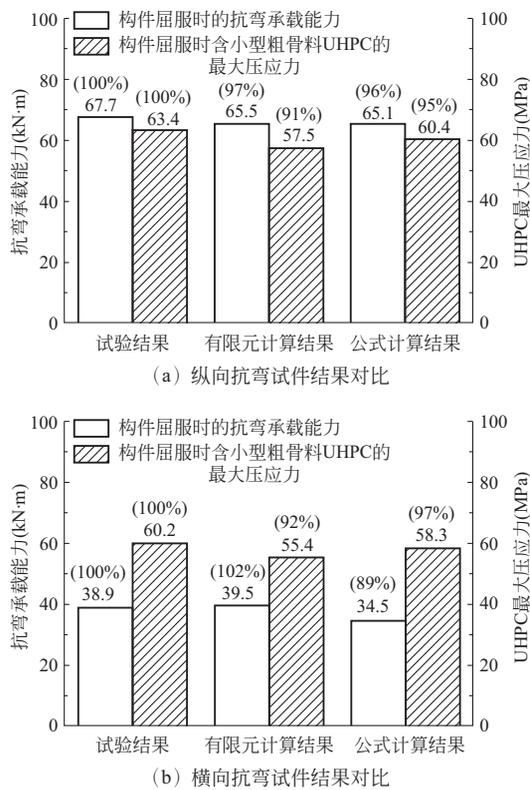


图 17 抗弯承载力与受压应力结果对比

Fig. 17 Comparison of flexural capacity and compressive stress results

从图 17 中可以看出，对于两种配筋含小型粗骨料 UHPC 试件在屈服时的抗弯承载能力和含小型粗骨料 UHPC 的最大压应力，试验结果、有限元计算结果和公式计算结果三者之间比较接近。对于纵向抗弯试件，屈服时抗弯承载力平均试验结果为 67.7kN·m，有限元计算结果 65.5kN·m，公式计算结果为 65.1kN·m；屈服时含小型粗骨料 UHPC 的

最大压应力平均试验结果为 63.4MPa，有限元计算结果 57.5MPa，公式计算结果为 60.4MPa。对于横向抗弯试件，屈服时抗弯承载力平均试验结果为 38.9kN·m，有限元计算结果 39.5kN·m，公式计算结果为 34.5kN·m；屈服时含小型粗骨料 UHPC 的最大压应力平均试验结果为 60.2MPa，有限元计算结果 55.4MPa，公式计算结果为 58.3MPa。综合来看，最大误差不超过 11%，说明本文中有限元分析、公式计算与试验结果三者结果比较接近。含小型粗骨料 UHPC 材料在计算承载力时，各项受拉性能参数的取值要小于已有 UHPC 材料的相关数值。

## 6 结 论

(1) 本文中厚度为 16cm 的含小型粗骨料 UHPC 板可减轻传统组合梁桥面板(按 28cm 后的普通混凝土计算)自重的 39%，进一步可减轻组合梁整体的自重。此外，UHPC 添加小型粗骨料可以提高 UHPC 的弹性模量约 22%，降低终凝后的干燥自收缩，有利于适当提高桥面板的抗弯刚度。

(2) 与传统钢-混凝土组合梁相比，含小型粗骨料 UHPC 板可以明显降低桥面板的开裂风险。通过试验研究 16cm 含小型粗骨料 UHPC 板试件的抗弯性能，纵向抗弯试件的平均开裂强度为 13.8MPa，横向抗弯试件的平均开裂强度为 13.6MPa，均满足相关设计的有限元局部计算要求。达到各自破坏荷载时，原桥面板中纵向截取的纵向抗弯试件底部 UHPC 名义拉应力平均值为 54.9MPa，横向抗弯试件底部 UHPC 名义拉应力平均值为 28.4MPa。

(3) 为了进一步提供给设计人员关于该结构的研究依据，本文参考目前已有的相关文献和本文中的试验结果，定义了含小型粗骨料 UHPC 的轴压与受拉本构关系，并提出了含小型粗骨料 UHPC 试验试件抗弯性能的计算理论，从有限元分析与计算公式两方面对试验结果进行了模拟，三者结果比较接近。

(4) 鉴于目前国内外对含小型粗骨料 UHPC 结构的研究较少，本文进行了该结构的概念设计与初步试验研究，发现含小型粗骨料 UHPC 的拉伸性能与以往不含粗骨料的 UHPC 相比具有一定的下降，因此，今后应用于实际工程时，在计算含小型粗骨料 UHPC 构件的承载力计算时，应充分研究材料在开裂后的极限拉伸应变的取值，以及忽略部分 UHPC 的受拉作用。

## 参 考 文 献

- [1] 李辉. 钢-混凝土组合梁斜拉桥病害及其影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008 (Li Hui. The analysis of disease and its effect on cable stayed bridges with composite girder[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese))
- [2] 邵长宇, 陈亮, 汤虎. 大跨径组合梁斜拉桥试设计及力学性能研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 101-106 (Shao Changyu, Chen Liang, Tang Hu. Study of trial design and mechanical performance of long span composite girder cable-stayed bridges [J]. Bridge Construction, 2017, 47(4): 101-106 (in Chinese))
- [3] 单宏伟. 结合梁斜拉桥桥面板抗裂对策研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
- [4] 薛伟辰, 张士前, 梁智殷. 1年持续荷载下 GFRP-混凝土组合梁长期性能试验[J]. 复合材料学报, 2016, 33(5): 998-1008 (Xue Weichen, Zhang Shiqian, Liang Zhiyin. Long-term property test of GFRC-concrete composite beam under sustained load for one year[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(5): 998-1008 (in Chinese))
- [5] 赵品, 荣学亮, 叶见曙. 波形钢腹板组合箱梁横向受力有效分布宽度研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(7): 105-110 (Zhao Pin, Rong Xueliang, Ye Jianshu. Research on the lateral effective width of composite box-girders with corrugated steel webs [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(7): 105-110 (in Chinese))
- [6] Mander T J, Henley M D, Scott R M. Experimental performance of full-depth precast, prestressed concrete overhang, bridge deck panels [J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(5): 503-510
- [7] 季文玉, 过民龙, 李旺旺. RPC-NC 组合梁界面受力性能研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 46-52 (Ji Wenyu, Guo Minlong, Li Wangwang. Interface mechanical behavior of RPC-NC composite beam [J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 46-52 (in Chinese))
- [8] 罗平杰, 李亚东, 揭志羽, 等. 滑移效应对钢-混凝土组合梁弹性应力的影响[J]. 钢结构, 2016, 31(7): 26-29 (Luo Pingjie, Li Yadong, Jie Zhiyu, et al. The influence of slip effect on the elastic stress of steel-concrete composite beam [J]. Steel Construction, 2016, 31(7): 26-29 (in Chinese))
- [9] 朱力, 聂建国, 季文玉. 钢-混凝土组合箱型梁的滑移和剪力滞效应[J]. 工程力学, 2016, 33(9): 49-58 (Zhu Li, Nie Jianguo, Ji Wenyu. Slip and shear-lag effects of steel-concrete composite box beam [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(9): 49-58 (in Chinese))
- [10] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012 (Nie Jianguo. Steel-concrete composite structure bridges [M]. Beijing: China Communication Press, 2012 (in Chinese))
- [11] Su Q T, Yang G T, Wu C. Experimental investigation on inelastic behavior of composite box girder under negative moment [J]. International Journal of Steel Structures, 2012, 12(1): 71-84
- [12] Steinberg E. Structural reliability of prestressed UHPC flexure models for bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(1): 65-72
- [13] Wang D, Shi C J, Wu Z, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 368-377
- [14] Garas V Y, Kahn L F, Kurtis K E. Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(3): 147-152
- [15] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015 (Shao Xudong, Hu Jianhua. The steel-UHPC lightweight composite bridge structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2015 (in Chinese))
- [16] 邵旭东, 吴佳佳, 刘榕, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥梁结构华夫桥面板的基本性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 218-225, 245 (Shao Xudong, Wu Jiajia, Liu Rong. Basic performance of waffle deck panel of lightweight steel-UHPC composite bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 218-225, 245 (in Chinese))
- [17] Collepardi S, Coppola L, Troli R, et al. Mechanic properties of modified reactive powder concrete [C]//Proceeding of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete, Rome, Italy, 1997. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 1997
- [18] Shi C J, Wu Z, Xiao J F, et al. a review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 741-751
- [19] Ma J, Dehn F, Schmidt D, et al. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates [C]//Proceeding of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel: Kassel University Press, 2004
- [20] Yazici H, Yardimci M Y, Aydin S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1223-1231
- [21] Recommendation; ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPC), construction material, dimensioning and application [S]. Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016
- [22] AFGC, SETRA. Ultra high performance fiber reinforced concrete recommend-ations [M]. Paris: AFGC & SETRA Working Group, 2016
- [23] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015 (GB/T 31387—2015 Reactive powder concrete[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese))
- [24] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J]. 混凝土, 2008, 7: 11-15 (Yang Jian, Fang Zhi. Research on stress-strain relation of ultra-high performance concrete [J]. Concrete, 2008, 7: 11-15 (in Chinese))

- [25] 申鼎宇. 超高性能混凝土弯拉基本性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017 (Shen Dingyu. The basic research on the flexural properties of ultra high performance concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2017 (in Chinese))
- [26] 张哲. 钢-配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016 (Zhang Zhe. Bending behaviors of composite bridge deck system composed of OSD and reinforced UHPC layer [D]. Changsha: Hunan University, 2016 (in Chinese))
- [27] 胡攻球. 不同养护条件下超高性能混凝土 (UHPC) 的收缩性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015 (Hu Gongqiu. Research on the shrinkage performance of ultra high performance concrete under different curing condition [D]. Changsha: Hunan University, 2015 (in Chinese))
- [28] Zhao S J, Fan J J, Sun W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 540-548
- [29] Graybeal B A. Material property characterization of ultra-high performance concrete [R]. McLean: U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2006
- [30] Rafiee A. Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete [M]. Kassel: Kassel University Press, 2012
- [31] Graybeal B A. Flexural behavior of an ultrahigh-performance concrete I-girder [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(6): 602-610
- [32] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土梁正截面承载力 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 23-30 (Yang Jian, Fang Zhi. Normal section bearing capacity of ultra high performance concrete beam [J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 23-30 (in Chinese))
- [33] 郑文忠, 李莉, 卢姗姗. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 125-134 (Zheng Wenzhong, Li Li, Lu Shanshan. Experimental research on mechanical performance of normal section of reinforced reactive powder concrete beam [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 125-134 (in Chinese))
- [34] 邓宗才, 王义超, 肖锐, 等. 高强钢筋 UHPC 梁抗弯性能试验研究与理论分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 68-78 (Deng Zongcai, Wang Yichao, Xiao Rui, et al. Flexural test and theoretical analysis of UHPC beams with high strength rebars [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 68-78 (in Chinese))

王 衍(1990— ),男,博士研究生。主要从事大跨钢-UHPC 组合梁结构理论与应用研究。

邵旭东(1961— ),男,博士,教授。主要从事大跨与新型桥梁结构理论与应用研究。

曹君辉(1984— ),男,博士,副教授。主要从事钢-UHPC 超高性能轻型组合桥面理论与应用研究。

邓舒文(1988— ),女,博士研究生。主要从事 UHPC 新型结构理论及应用研究。

李玉祺(1992— ),男,博士研究生。主要从事钢-UHPC 组合梁桥结构设计理论研究。