

DOI:10.11918/202412007

超高性能混凝土带肋桥面板抗弯及抗冲切性能试验

徐 召^{1,2}, 王俊颜^{3,4}, 马雪媛², 焦烽智²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 济南 250101;

3. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804; 4. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804)

摘要: 超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 因其优异的力学性能和耐久性, 近年来在桥梁工程中得到了广泛应用。为了在保持 UHPC 高性能的同时降低成本, 以 1.2% 体积掺量的平直形镀铜微细钢纤维配置 UHPC, 并通过不同配筋条件 (普通钢筋和高强钢筋) 下 UHPC 带肋桥面板的抗弯性能与抗冲切性能试验, 研究其力学性能和破坏特征。结果表明: 不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板均为受弯破坏, 表现出良好的延性, 采用高强钢筋显著提高了极限承载力, 充分发挥了其材料性能; 在抗冲切性能方面, 不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板均呈现冲切破坏模式, 具有较大延性; 相同配筋率下, 高强钢筋可提高受冲切承载力约 25%, 但配筋率增加对承载力的影响有限。研究结果证明, 使用较低体积掺量的钢纤维和高强钢筋, 可在降低成本的同时充分发挥 UHPC 和高强钢筋的优越性能, 提高结构耐久性和经济性。

关键词: 超高性能混凝土; 带肋桥面板; 抗弯性能; 抗冲切性能; 高强钢筋

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)02-0022-09

Experimental study on flexural and punching shear performance of ribbed UHPC bridge deck panels

XU Zhao^{1,2}, WANG Junyan^{3,4}, MA Xueyuan², JIAO Fengzhi²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shandong Provincial Transportation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

4. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) has been widely used in bridge engineering in recent years due to its superior mechanical properties and durability. To reduce costs while maintaining the high performance of UHPC, this paper investigates the mechanical properties and failure characteristics of ribbed UHPC bridge decks reinforced with 1.2% volume fraction of straight copper-plated micro steel fibers, under different reinforcement conditions (ordinary steel bars and high-strength steel bars), through bending and punching shear performance tests. The results indicate that UHPC ribbed bridge decks exhibited good ductility and flexural failure modes under different reinforcement conditions. The use of high-strength rebar significantly improved the ultimate bearing capacity, fully utilizing the material properties of the high-strength reinforcement. In terms of punching shear performance, the UHPC ribbed bridge decks showed a punching-flexural failure mode with substantial ductility. High-strength rebar increased the punching shear capacity by approximately 25% at the same reinforcement ratio, but further increases in reinforcement ratio had limited impact on bearing capacity. The findings demonstrate that using lower volume fractions of steel fibers and high-strength rebar can reduce costs while maximizing the superior properties of UHPC and high-strength steel bars, enhancing both the durability and economic efficiency of structures.

Keywords: ultra-high performance concrete (UHPC); ribbed bridge deck; flexural performance; punching shear performance; high-strength rebar

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种基于颗粒紧密堆积、低水胶比 (<0.25) 以及纤维增强原理设计的新型水泥基复合材料, 具备极高的抗压强度 (≥ 120 MPa)、优异

的韧性、卓越的耐久性和良好的工作性能^[1-2]。将 UHPC 与钢筋组合形成配筋 UHPC, 可解决诸如普通混凝土构件中高强钢筋易导致的混凝土过早压溃、裂缝宽度过大及钢筋屈曲问题, 使水泥基结构材料

收稿日期: 2024-12-02; 录用日期: 2025-01-17; 网络首发日期: 2025-04-08

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250408.1355.006>

基金项目: 国家自然科学基金 (52278271); 山东省交通运输科技项目 (2022B73)

作者简介: 徐 召 (1983—), 男, 研究员; 王俊颜 (1982—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 王俊颜, 14529@tongji.edu.cn

的全面性能发生跨越式进步^[3-4]。另外,虽然UHPC的胶凝材料用量较高,但其每单位抗压强度下的材料消耗远低于普通混凝土,展现出显著的节材减碳效益^[5-6]。据不完全统计,世界各国使用UHPC建造的桥梁已超过1 000多座^[7],中国约有120座桥梁使用了UHPC材料。然而,虽然UHPC具备出色的力学性能和耐久性,由于制备技术和成本等原因,2023年中国UHPC的使用量仍只有14.65万m³^[8],应用规模较为有限。UHPC难以广泛推广的主要原因之一是其高昂的成本,尤其是UHPC材料中的钢纤维成本占比极高,约为40%。当钢纤维掺量超过2%时,UHPC的成本可能是C50混凝土的十倍以上^[9]。然而,作为UHPC的核心材料之一,钢纤维对UHPC的抗压强度有一定的增强作用^[10-11]。在受拉破坏时,钢纤维在裂缝处起到了桥接作用^[12],使UHPC相比普通混凝土具有更高的抗拉强度和韧性^[13-14]。因此,为保持UHPC高性能的同时降低其成本,开展低纤维掺量UHPC的力学性能研究具有重要的现实意义。

关于配筋UHPC构件的力学性能研究已取得了长足进展。陈彬^[15]对配筋预应力UHPC梁进行了抗剪实验,赵冠远等^[16]对配筋UHPC柱进行了无轴压的低周往复试验,赵秋等^[17]则对配筋UHPC板的抗弯性能进行了深入研究。为了防止主裂缝处钢筋过早断裂,进而导致构件延性不足,高纤维掺量的UHPC构件通常需要采用5%以上的配筋率^[18]。然而,过高的配筋率不仅大幅增加了构件的制作成本,还会引发碳排放增加以及在强约束条件下出现过早开裂的问题^[19-22]。在实际工程应用中,使用高强钢筋替代普通钢筋可以减少钢材用量,还能显著提高结构的耐久性和使用寿命,为工程结构带来更高的安全性和可靠性。

因此,为了在保持UHPC高性能的同时降低成本,采用1.2%体积掺量的平直形镀铜微细钢纤维配置UHPC。为了分析UHPC桥面板在不同荷载作用下的综合性能,通过不同配筋条件下(普通钢筋和高强钢筋)桥面板的抗弯性能试验和抗冲切性能试验,研究低纤维掺量UHPC带肋桥面板的受弯承载力和局部集中荷载作用下的承载能力,研究成果为UHPC的工程应用提供了理论基础和实践指导。

1 材料基本力学性能

UHPC中使用的纤维多采用镀铜细钢微细钢纤维,其价格是UHPC成本较高的主要原因之一。为降低成本,采用1.2%体积掺量的平直形镀铜微细钢纤维配置带肋桥面板的UHPC(记为UHPC-1.2)。

为研究其基本力学性能的变化,采用2.2%体积掺量的端钩形镀铜微细钢纤维作为对照组(记为UHPC-2.2)。试验采用的UHPC基体配合比如表1所示,其中未使用高强骨料。两种材料均按照配合比分别计算粉料、水、钢纤维三者用量,采用预混料+水+镀铜微细纤维的拌合方式进行制作。两种材料的搅拌流程为:1)取预混料倒入行星式搅拌机,均匀搅拌20 s;2)倒入已称量好水,搅拌3 min;3)均匀撒入已称量好钢纤维,搅拌至自流平状态;4)搅拌3 min,倒入运输器具。

表1 UHPC基体配合比

Tab. 1 Mix ratio of UHPC matrix						kg/m ³
水泥	硅灰	石英粉	微珠	石英砂	水	高效减水剂
797.0	71.0	200.9	31.7	1 002.6	198.1	8.2

1.1 抗压性能

采用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块测试UHPC的抗压强度,弹性模量采用100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试件进行测试。UHPC抗压性能试验过程如图1所示,各龄期抗压强度平均值如表2所示,抗压弹性模量平均值如表3所示。



(a) 试块成型



(b) 立方体抗压强度测试



(c) 弹性模量测试

图1 抗压性能试验

Fig. 1 Compressive performance test

表 2 各龄期抗压强度平均值

Tab.2 Average compressive strength at different ages

龄期/d	抗压强度平均值/MPa	
	UHPC-1.2	UHPC-2.2
3	86.7	91.3
7	125.3	130.5
14	137.6	145.7
28	142.5	149.6

表 3 抗压弹性模量平均值

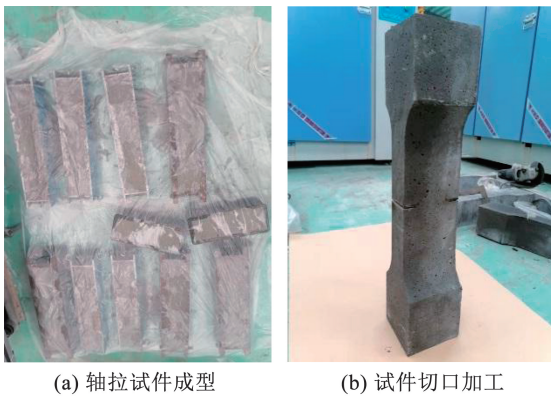
Tab.3 Average compressive elastic modulus

龄期/d	抗压弹性模量平均值/GPa	
	UHPC-1.2	UHPC-2.2
28	49.5	52

从表 2 和表 3 可以看出,虽然钢纤维的体积掺量减少了 45%,但 UHPC-1.2 的各龄期抗压强度和弹性模量均只有少量降低,各龄期抗压强度最多仅减少了 6%。

1.2 抗拉性能

采用单轴拉伸试验测定 UHPC 的抗拉性能,为更好地表示材料的裂后残余抗拉性能,采用带切口的截面为 50 mm × 100 mm 的哑铃型试件,切口深度为 25 mm。轴拉试件制作和试验过程如图 2 所示。两种材料的轴拉应力-裂缝宽度曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,UHPC-2.2 表现出明显的拉伸应变硬化特征,UHPC-1.2 则在开裂后表现出拉伸应变软化特征,其轴拉应力在开裂的瞬时突降较小。此外,UHPC-2.2 初裂强度略低于 UHPC-1.2。



(a) 轴拉试件成型 (b) 试件切口加工 (c) 轴拉性能测试

图 2 轴拉性能试验

Fig.2 Axial tension performance test

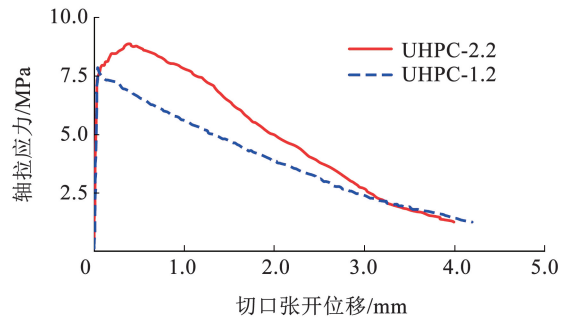
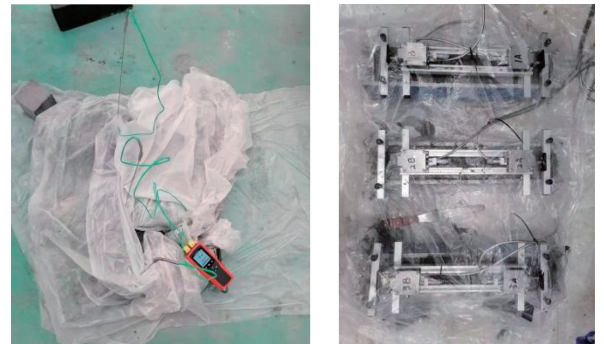


图 3 实测轴拉应力-切口张开位移曲线

Fig.3 Measured axial tensile stress-crack opening displacement curve

1.3 收缩性能

由于 UHPC 中胶凝材料用量大,两种材料的收缩主要为早期的自收缩,两种材料以及未掺纤维的基体收缩测试均采用非接触收缩的测试方法,如图 4 所示,测试结果如图 5 所示。可以看出,两种材料的收缩应变均明显小于未掺纤维时基体的自由收缩,而 2.2% 掺量 UHPC 的收缩又小于 1.2% 掺量 UHPC。这表明纤维掺量的增加可减小基体的收缩,主要是因为纤维起到了约束基体的作用。



(a) 试件内部温度记录 (b) 非接触收缩测试

图 4 收缩性能试验

Fig.4 Shrinkage performance test

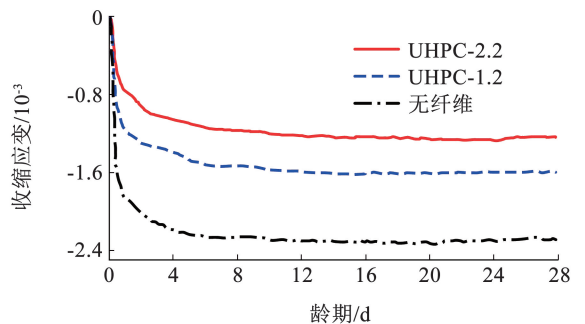


图 5 收缩随龄期变化曲线

Fig.5 Shrinkage-age variation curve

1.4 钢筋受拉应力-应变曲线

采用 HRB400 普通钢筋和 HRB635 高强钢筋制作带肋桥面板。每种钢筋截取 3 个试件进行单轴拉

伸试验, 试件直径为 16 mm, 两种钢筋的受拉应力-应变曲线如图 6 所示(N16 表示直径 16 mm 普通钢筋, H16 表示直径 16 mm 高强钢筋)。可以看出, 两种钢筋的力学性能均与规范较为吻合, 且表现出较好的塑性性能。

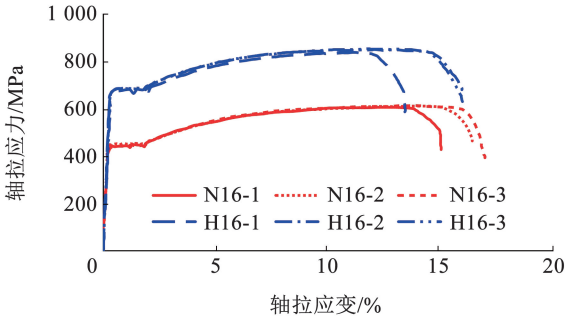


图 6 钢筋应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of reinforcement

2 带肋板抗弯性能试验

2.1 试件制作

为研究不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板的抗弯性能, 取计算单元进行抗弯试件制作, 如图 7 所示, 并进行三分点加载测试。所有试件尺寸均保持一致, 主要试验参数为钢筋种类及配筋率, 纵筋采用 HRB400 钢筋和高强 HRB635 钢筋, 箍筋采用 HPB300, 试件参数如表 4 所示。试件编号中 M 代表抗弯试件, 400 和 635 分别代表 HRB400 钢筋和高强 HRB635 钢筋, 100 和 200 代表板纵横向筋间距, 1.2% 代表纤维体积掺量, L 代表肋部配筋少。试件 M-400-100-1.2 的尺寸及配筋如图 8 所示。UHPC 带肋桥面板的制作过程如图 9 所示。

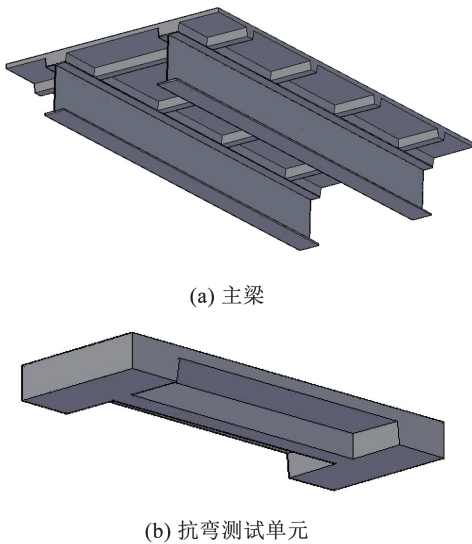


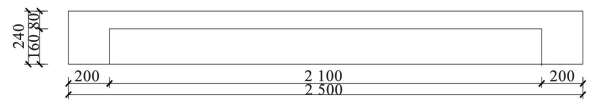
图 7 主梁及抗弯试件

Fig. 7 Main beam and bending test specimen

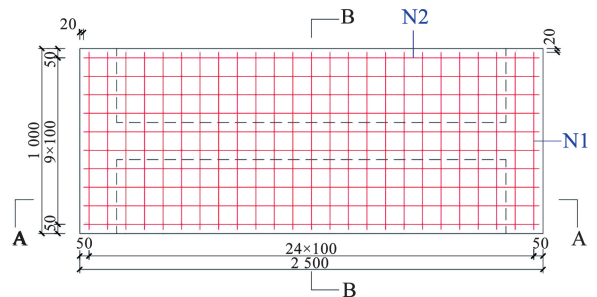
表 4 UHPC 带肋桥面板单元抗弯试件参数

Tab. 4 Bending test specimen parameters of UHPC ribbed bridge deck

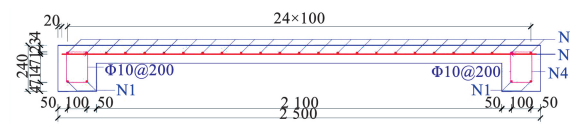
试件编号	钢筋种类	肋部配筋	板内配筋	纤维掺量/%
M-400-100-1.2	HRB400	2Φ20	Φ12@100	1.2
M-635-100-1.2	HRB635	2Φ20	Φ12@100	1.2
M-635-100-1.2-L	HRB635	2Φ16	Φ12@100	1.2
M-635-200-1.2	HRB635	2Φ20	Φ12@200	1.2



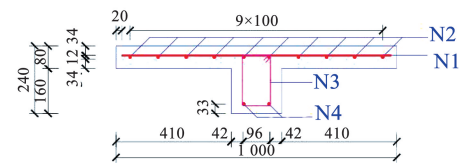
(a) 试件立面



(b) 试件顶面钢筋布置



(c) A-A断面

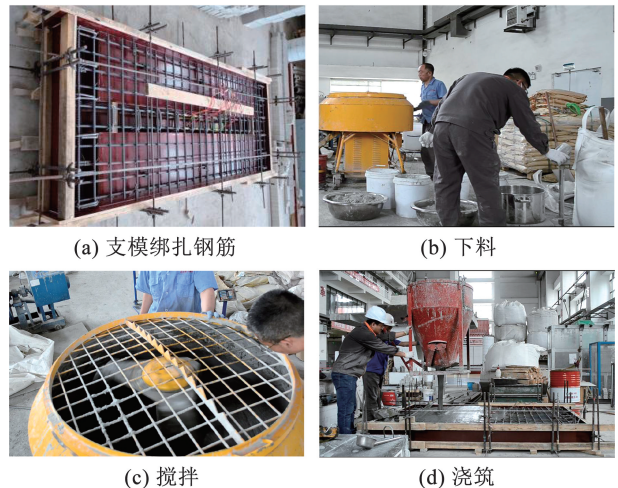


(d) B-B断面

单位: mm

图 8 M-400-100-1.2 试件尺寸及配筋

Fig. 8 M-400-100-1.2 specimen dimensions and reinforcement



(a) 支模绑扎钢筋

(b) 下料

(c) 搅拌

(d) 浇筑



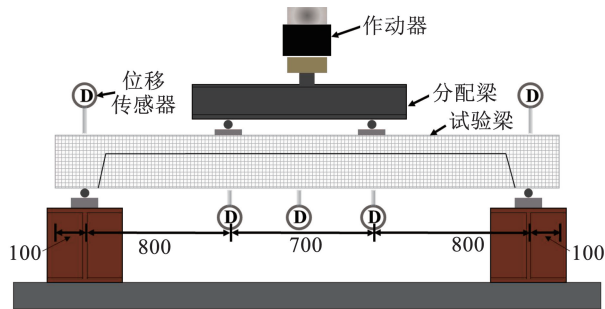
(e) 覆膜养护 (f) 脱模堆放

图 9 试件制作过程

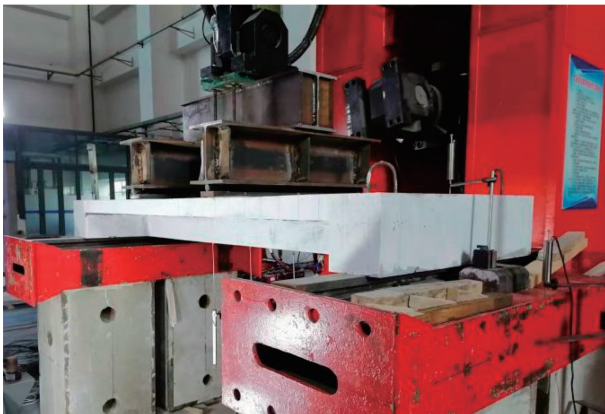
Fig. 9 Fabrication process of specimens

2.2 试验加载

在试验过程中, UHPC 带肋桥面板的抗弯性能试验采用分级加载制度, 在裂缝宽度达到 0.1 mm 之前, 采用荷载控制, 每级 10 kN, 加载速率为 10 kN/min。当裂缝宽度达到 0.1 mm 后, 采用位移控制, 加载速率为 1 mm/min。试验加载装置如图 10 所示。



(a) 加载装置示意



(b) 现场加载装置

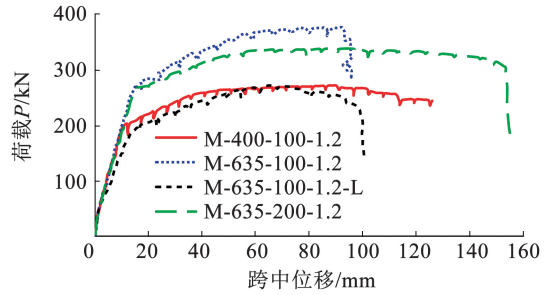
图 10 试验加载装置

Fig. 10 Device of testing loading

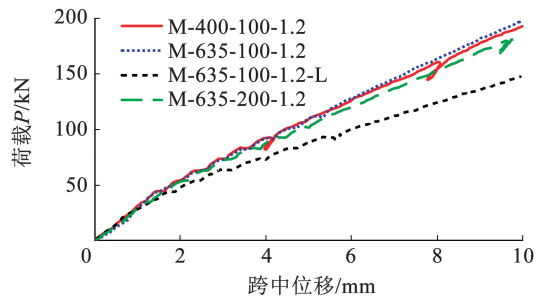
2.3 试验结果及分析

不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板的荷载-位移曲线如图 11 所示, 桥面板承载能力极限状态下的主要特征指标如表 5 所示。从图 11 可以看出, 不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板均具有很好的延性性能。对比 M-635-100-1.2 和 M-400-100-1.2 可以看出, 在相同配筋率下, 采用高强钢筋可以显著提高 UHPC 带肋桥面板的极限承载力, 但会使构件的延

性降低约 47%。与 M-400-100-1.2 相比, 试件 M-635-100-1.2-L 虽然刚度和延性有所减小, 但极限承载力较为接近, 因此, 采用高强钢筋可显著降低构件的用钢量, 进而达到低碳目的。对比 M-635-100-1.2 和 M-635-200-1.2 可以看出, 板内高强钢筋配筋率减小 50% 会使构件的延性提高约 57%, 但承载力会降低 10% 左右。



(a) 全曲线



(b) 局部曲线

图 11 实测荷载-位移曲线

Fig. 11 Measured load-displacement curve

表 5 承载能力极限状态下主要特征指标

Tab. 5 Main characteristic indicators at ultimate load-bearing capacity state

试件编号	受弯承载力 $M_u / (\text{kN}\cdot\text{m})$	屈服变形 Δ_y / mm	极限变形 Δ_u / mm	延性 比 δ
M-400-100-1.2	110.8	10.8	125.3	11.6
M-635-100-1.2	152.8	15.1	93.3	6.1
M-635-100-1.2-L	111.1	13.6	94.4	6.9
M-635-200-1.2	137.6	15.4	148.9	9.6

UHPC 带肋桥面板正常使用极限状态下主要特征指标如表 6 所示。对比 M-635-100-1.2 和 M-400-100-1.2 可以看出, 在相同弯矩下, 采用高强钢筋可以显著减小 UHPC 带肋桥面板的裂缝宽度。虽然板内高强钢筋配筋率减小 50%, 在相同弯矩下, M-400-100-1.2 和 M-635-200-1.2 裂缝宽度保持不变。因此, 在 UHPC 中使用高强钢筋, 可以在降低成本的同时充分发挥材料的优越性能。另外, 对比试件 M-635-100-1.2-L 与 M-600-100-1.2 可以看出, 肋部钢筋对 UHPC 带肋桥面板的裂缝有显著影响。

表 6 正常使用极限状态下主要特征指标

Tab.6 Main characteristic indicators at normal serviceability limit state

试件编号	缝宽/ mm	挠度/ mm	弯矩/ (kN·m)	弯矩/受弯 承载力/%
M-400-100-1.2	0.10	3.5(1/660)	36.5	32.9
M-635-100-1.2	0.08	3.8(1/600)	36.6	23.9
M-635-100-1.2-L	0.08	3.8(1/600)	29.6	26.6
M-635-200-1.2	0.10	3.7(1/620)	36.5	26.5

不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板的最终破坏状态如图 12 所示。可以看出,不同配筋条件下的 UHPC 带肋桥面板均表现出了典型的受弯破坏特征,即混凝土在受拉区出现大量竖向弯曲裂缝,受压区边缘混凝土发生受压破坏。试验结果表明,UHPC 能够与高强钢筋形成良好的配合,充分发挥高强钢筋的材料性能。



图 12 试件破坏状态

Fig.12 Failure state of specimens

不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板的经济性指标如表 7 所示。可以看出,与普通钢筋相比,UHPC 与高强钢筋可以达到更高的经济性指标。但是当高强钢筋的配筋量较少时,由于无法充分发挥 UHPC 的优异性能,经济性指标有所减低,仅能达到普通钢筋的水平。

表 7 经济性分析

Tab.7 Economic analysis

试件编号	用钢量/ (kg·m ⁻²)	经济性指标 (承载力/材料成本)	材料单价指标
M-400-100-1.2	29.4	0.20(110.8/571)	UHPC:3 500 元 HRB400:5 000 元
M-635-100-1.2	29.4	0.25(152.8/600)	
M-635-100-1.2-L	27.8	0.19(111.1/585)	HRB635:6 500 元
M-635-200-1.2	21.7	0.25(137.6/554)	

3 带肋板抗冲切性能试验

3.1 试件制作

为研究不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板的抗冲切性能,取计算单元进行抗冲切试件制作,如图 13 所示,并按轮胎着地面积进行加载测试。所有试件尺寸保持一致,纵筋采用 HRB400 钢筋和高强 HRB635 钢筋,箍筋采用 HPB300 钢筋,主要试验参数为桥面板配筋率及钢筋种类,试件参数如表 8 所示。试件编号中 P 代表抗冲切试件,400 和 635 分别代表 HRB400 钢筋和高强 HRB635 钢筋,100、150、200 代表板纵横向筋间距,1.2% 代表纤维体积掺量。其中,试件 P-400-100-1.2 的配筋如图 14 所示。

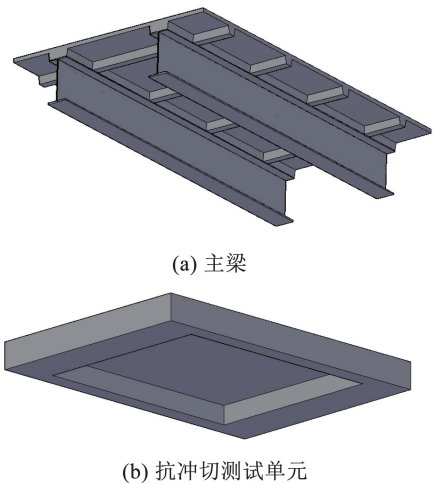


图 13 主梁及抗冲切试件

Fig.13 Main beam and punching shear test specimen

表 8 UHPC 带肋桥面板单元抗冲切试件参数

Tab.8 Punching shear test specimen parameters of UHPC ribbed bridge deck

试件编号	钢筋种类	肋部配筋	板内配筋	纤维 掺量/%
P-400-100-1.2	HRB400	2Φ20	Φ12@100	1.2
P-635-100-1.2	HRB635	2Φ20	Φ12@100	1.2
P-635-150-1.2	HRB635	2Φ20	Φ12@150	1.2
P-635-200-1.2	HRB635	2Φ20	Φ12@200	1.2

3.2 试验加载

在试验过程中,UHPC 带肋桥面板的抗冲切性能试验采用分级加载制度,在裂缝宽度达到 0.1 mm 之前,采用荷载控制,每级 10 kN,速率取为 10 kN/min。当裂缝宽度达到 0.1 mm 后,采用位移控制,速率取为 1 mm/min。试验加载装置如图 15 所示。

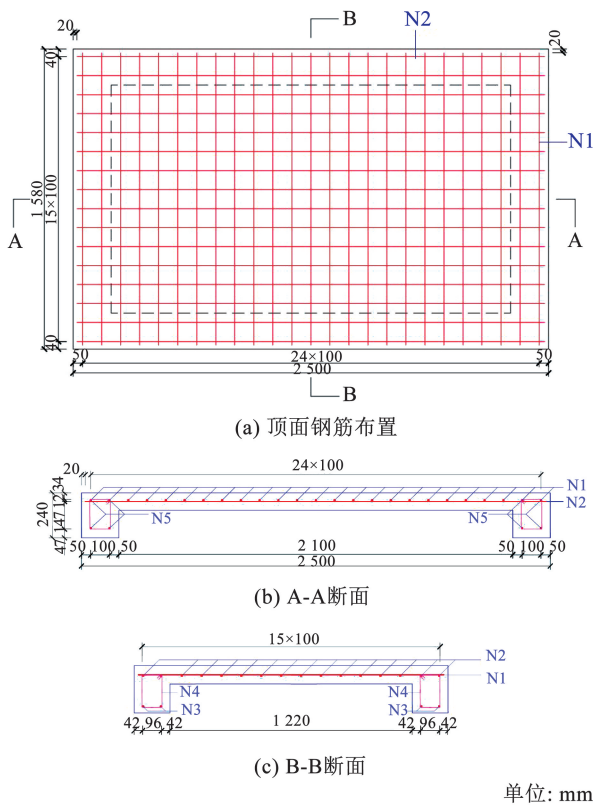


图 14 P-400-100-1.2 试件尺寸及配筋

Fig. 14 P-400-100-1.2 specimen dimensions and reinforcement

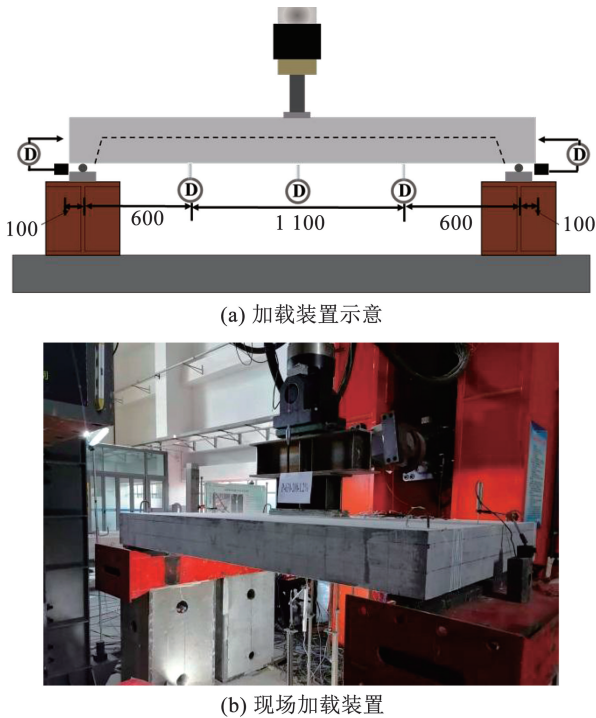


图 15 试验加载装置

Fig. 15 Device of testing loading

3.3 试验结果及分析

不同配筋条件下 UHPC 带肋桥面板的荷载-冲

切点位移曲线如图 16 所示,各试件最终破坏状态如图 17 所示。从图 16 和图 17 可以看出,所有试件均呈冲切破坏,且具有较大延性,破坏时双向钢筋均已屈服。相同配筋率下,采用高强钢筋可提高板的受冲切承载力 25%,而随着板高强钢筋配筋率提高一倍,板的受冲切承载力只提高了 5% 左右,可见 UHPC 板的抗冲切性能受高强钢筋配筋率的影响较小。

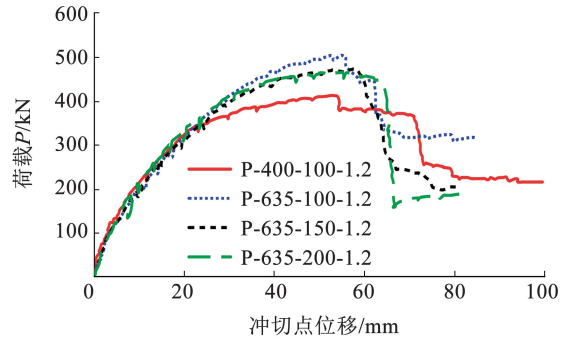


图 16 实测荷载-位移曲线

Fig. 16 Measured load-displacement curve

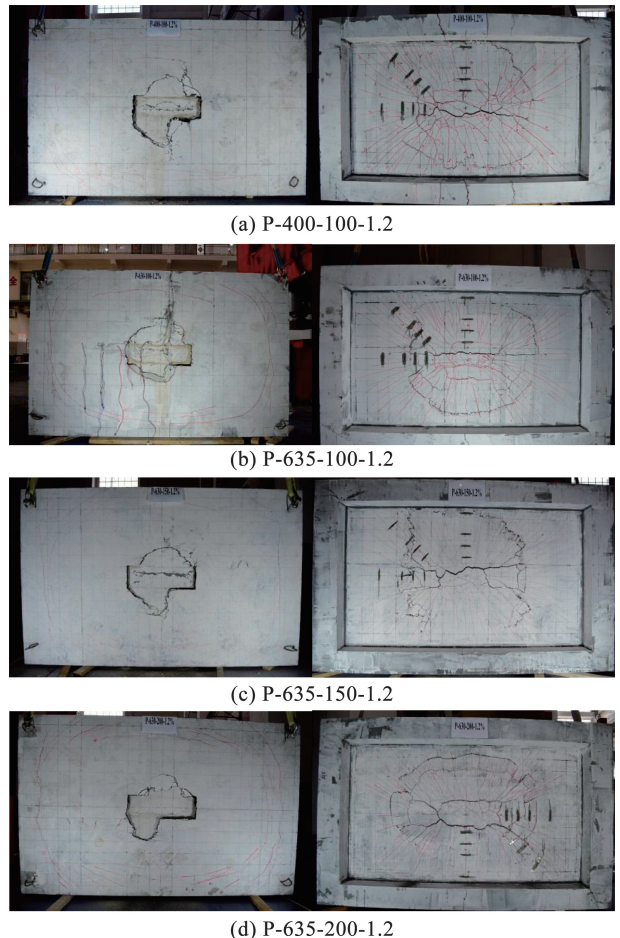


图 17 试件破坏状态

Fig. 17 Failure state of specimens

4 结 论

1)由1.2%体积掺量的平直形镀铜微细钢纤维配置的UHPC与2.2%体积掺量的端钩形镀铜微细钢纤维配置的UHPC相比,虽然纤维掺量减少了45%,但各龄期抗压强度和弹性模量仅少量降低。

2)在单轴拉伸试验中,2.2%体积掺量UHPC表现出明显的拉伸应变硬化特征,1.2%体积掺量UHPC则表现为拉伸应变软化特征。

3)不同配筋条件下UHPC带肋桥面板均具有良好的延性性能,采用高强钢筋可以显著提高UHPC带肋桥面板的极限承载力,但会使构件的延性降低。合理调整配筋率可以在满足结构设计要求的前提下,实现低碳和高性能的设计目标。

4)不同配筋条件下UHPC带肋桥面板均呈现出冲切破坏模式,且具有较大延性。相同配筋率下,采用高强钢筋约可提高板的受冲切承载力25%。此外,UHPC板的抗冲切性能受高强钢筋配筋率影响较小。

总体而言,本研究证明了在UHPC中合理使用较低体积掺量的钢纤维和高强钢筋,可以在降低成本的同时充分发挥材料的优越性能,提高结构的耐久性和经济性。这为UHPC在桥梁工程中的广泛应用提供了理论依据和实践指导。

参 考 文 献

- [1]郭义庆,王俊颜. 基于切口梁弯曲响应的UHPC受拉性能反演分析[J]. 工程力学, 2024, 41(4): 151
GUO Yiqin, WANG Junyan. Inverse analysis for determining the tensile properties of UHPC based on bending response of notched beams[J]. 2024, 41(4): 151. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0368
- [2]王俊颜,喻星乔,周田. 掺轻质砂超高性能混凝土的轴拉力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(2): 28
WANG Junyan, YU Xinqiao, ZHOU Tian. Uniaxial tensile properties of ultra high performance concrete doped with lightweight sand [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 28. DOI: 10.11918/202211080
- [3]HUNG C C, EL-TAWIL S, CHAO S H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: behavior, analysis, and design[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(9): 312. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003073
- [4]BILLAH A, KABIR M. Development of performance limit states for concrete bridge piers with high strength concrete and high strength steel reinforcement [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2021, 48(11): 1454. DOI: 10.1139/cjce-2019-0709
- [5]赵筠,廉慧珍,金建昌. 钢-混凝土复合的新模式超高性能混凝土(UHPC/UHPFR)之四: 工程与产品应用, 价值、潜力与可持续发展[J]. 混凝土世界, 2014, 55(1): 48
ZHAO Yun, LIAN Huizhen, JIN Jianchang. A new model of steel-concrete composites ultra-high performance concrete (UHPC/UHPFR) part 4: engineering and product applications, value, potential, and sustainability[J]. China Concrete, 2014, 55(1): 48
- [6]SHAO Y, PARKS A, OSTERTAG C. Carbon footprint between steel-reinforced concrete and UHPC beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2023, 149(3): 1. DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-11449
- [7]邱明红. 钢筋UHPC构件的基本受力性能与计算理论[D]. 长沙: 湖南大学, 2021
QIU Minghong. Study on the basic performance and calculation theory of reinforced UHPC members [D]. Changsha: Hunan University, 2021. DOI: 10.27135/d.cnki.gghudu.2021.004618
- [8]中国混凝土与水泥制品协会超高性能水泥基材料与工程技术(CCPA-UHPC)分会. 2023年中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告(上)[J]. 混凝土世界, 2024, 6: 24
China Concrete and Cement-based Products Association Ultra-high Performance Cement-based Materials and Engineering Technology (CCPA-UHPC) Branch. 2023 China ultra-high performance concrete (UHPC) technology and application development report (Part 1)[J]. China Concrete, 2024, 6: 24. DOI:10.3969/j.issn.1674-7011.2024.06.007
- [9]SHAO Y, BILLINGTON S. Impact of UHPC tensile behavior on steel reinforced UHPC flexural behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(1): 04021244. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003225
- [10]安明喆,宋子辉,李宇,等. 不同钢纤维含量RPC材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 34
AN Mingzhe, SONG Zihui, LI Yu, et al. Study on mechanical performance of reactive powder concrete with different steel fiber contents under uniaxial compression [J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 34. DOI: 10.3321/j.issn:1001-4632.2009.05.006
- [11]ZHENG Wenzhong, LI Haiyan, WANG Ying. Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 931. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.031
- [12]岳健广,夏月飞,方华. 钢纤维混凝土断裂破坏机理及受拉损伤本构试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2): 93
YUE Jianguang, XIA Yuefei, FANG Hua. Experimental study on fracture mechanism and tension damage constitutive relationship of steel fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(2): 93. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2021.02.010
- [13]季韬,陈宝春,庄一舟,等. 活性粉末混凝土抗裂性能试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 434
JI Tao, CHEN Baochun, ZHUANG Yizhou, et al. Study for the cracking resistant behavior of reactive powder concrete[J]. Journal

- of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2011, 39(3): 434
- [14] 姚志雄, 周健, 周瑞忠. 活性粉末混凝土断裂性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006(6): 654
YAO Zhixiong, ZHOU Jian, ZHOU Ruizhong. Experimental study on fracture properties of reactive powder concrete (RPC) [J]. Journal of Building Materials, 2006(6): 654. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2006.06.005
- [15] 陈彬. 预应力 RPC 梁抗剪性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007
CHEN Bin. Study on the shear strength of prestressed RPC girders [D]. Changsha: Hunan University, 2007
- [16] 赵冠远, 阎贵平. 活性粉末混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 94
ZHAO Guanyuan, YAN Guiping. Experimental study on seismic performance of reactive powder concrete columns[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 94. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2004.07.024
- [17] 赵秋, 杨明, 李聪, 等. 配筋 UHPC 板抗弯性能实验研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 331
ZHAO Qiu, YANG Ming, LI Cong, et al. Experimental study on flexural behavior of reinforced UHPC plates[J]. Journal of Ningxia University(Natural Science Edition), 2019, 40(4): 331. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2328.2019.04.008
- [18] SAQIF M, TAI Y S, EL-TAWIL S. Experimental and computational evaluation of the ductility of UHPC beams with low steel-reinforcement ratios[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(7): 402. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003378
- [19] MEZQUIDA-ALCARAZ E, NAVARRO-GREGORI J, MARTI-VARGAS J, et al. Effects of tension stiffening and shrinkage on the flexural behavior of reinforced UHPFRC beams[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00746. DOI: 10.1016/j.csem.2021.e00746
- [20] BISCHHOOF P. Effects of shrinkage on tension stiffening and cracking in reinforced concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28(3): 363. DOI: 10.1139/cjce-28-3-363
- [21] YOO D. Shrinkage characteristics of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review [J]. Innovations in Corrosion and Materials Science, 2016, 6(2): 77. DOI: 10.2174/2352094906666160712233144
- [22] YOO D, PARK J, KIM S, et al. Influence of reinforcing bar type on autogenous shrinkage stress and bond behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 150. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.014
- [23] 韩孟君, 郝松硕, 张文康, 等. 配置高强钢筋混凝土的经济效益分析[J]. 安徽建筑, 2023, 30(1): 65
HAN Mengjun, HAO Songshuo, ZHANG Wenkang, et al. Economic benefit analysis of high-strength reinforced concrete configuration[J]. Anhui Architecture, 2023, 30(1): 65. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2023.1.028
- [24] 戎贤, 杨松, 李艳艳, 等. 配置 630 MPa 高强钢筋 UHPC 梁裂缝宽度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1084
RONG Xian, YANG Song, LI Yanyan, et al. Experimental study on crack width of UHPC beam with 630 MPa high-strength steel bars [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1084. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20220331001
- [25] 邓明科, 姚昕, 张阳玺, 等. 基于梁式试验的 UHPC-高强钢筋搭接黏结性能[J]. 复合材料学报, 2024, 10(10): 5527
DENG Mingke, YAO Xin, ZHANG Yangxi, et al. Bonding properties of UHPC-high strength rebar based on beam test [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 10(10): 5527. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240011.002
- [26] 金凌志, 何来, 吴欣珂. HRB500 级钢筋活性粉末混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 5(15): 87
JIN Lingzhi, HE lai, WU Xinke. Experimental study on flexural property of reactive powder concrete beams with HRB500 steel [J]. Building Structure, 2015, 5(15): 87. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.15.016

(编辑 刘 彤)