体外预应力转向装置锚固性能研究

王胜超[1],刘 忠[1],李盼盼[2*],刘 斌[2],张国强[1],邓成龙[1]
(1.中冶路桥建设有限公司,山东 淄博 256400;
2.湖南大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室,长沙 410082)

摘 要: 钢内芯-超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)组合箱梁具有板件轻薄、质量轻、施工便捷等特点,工程应用中宜配套采用体外预应力体系。文中针对该组合箱梁,提出了一种体外预应力转向与锚固构造方案:在钢内芯预先开孔,将端部带钢榫的锚固钢腹板穿过开孔并嵌入UHPC,同时利用钢横隔板辅助受力。此外,对背景桥梁进行整体设计与计算,明确了体外预应力产生的转向分力。为研究有无钢横隔板时转向装置与主梁的锚固性能,设计了两组试件开展静力拔出试验研究。结果表明:两组试件均发生拔出破坏;增设钢横隔板可显著提升试件的极限承载力与抗拔刚度。针对文中提出的节点锚固构造方案,在背景工程设计转向力作用下,钢板与UHPC界面最大分离量不超过0.20 mm,结构无开裂与屈服风险,可满足桥梁正常使用极限状态下的受力要求。

关键词: 超高性能混凝土;组合箱梁;体外预应力;转向装置;锚固性能;拔出试验
中图分类号: U443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)07-0073-09
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20241219002

Anchorage Performance Study of the External Prestressing Steering Devices

WANG Shengchao[1], *LIU Zhong*[1], *LI Panpan*[2*], *LIU Bin*[2], *ZHANG Guoqiang*[1], *DENG Chenglong*[1]
(1. MCC Road & Bridge Construction Co., Ltd., Zibo 256400, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience, Hunan University, Changsha 410082, China)
*Corresponding author: lipp@hnu.edu.cn

Abstract: The steel inner core-ultra-high performance concrete (UHPC) composite box girder is characterized by thin plates, lightweight, and convenient construction. For engineering applications, it is recommended to use the external prestressing system in combination. Therefore, based on the composite box girder, an external prestressing steering and anchorage design scheme was proposed. In the scheme, holes were pre-drilled in the steel core, allowing the anchored steel web with steel tenons at the ends to pass through the holes and embed into the UHPC. Then, the steel diaphragms were used to assist in load-bearing. The global calculations were conducted for the background engineering, clarifying the value of steering forces generated by the external prestressing. To investigate the anchorage performance at the connection between the steering device and main girder with or without steel diaphragm, two sets of static pull-out tests were designed. The results indicated that all specimens failed by pull-out.

收稿日期:2024-12-19
基金项目:国家自然科学基金(52378236),交通运输部重点科技项目(2022-MS5-124)
作者简介:
王胜超(1989—),男,学士,高级工程师,主要从事桥梁工程方面的研究。E-mail:wangshengchao518@163.com。
通信作者:
李盼盼(1996—),女,博士研究生,主要从事UHPC高性能桥梁结构方面的研究。E-mail:lipp@hnu.edu.cn。

The addition of steel diaphragms can significantly improve the ultimate bearing capacity and pull-out stiffness. For the proposed scheme, under the action of the designed steering force, the maximum separation displacement at the interface between steel plate and UHPC does not exceed 0.20 mm. There is no risk of cracking or yielding in the structure, and it can meet the force requirements under the normal service limit states of the bridge.

Keywords: ultra-high performance concrete (UHPC); composite box girder; external prestressing; steering device; anchorage performance; pull-out test

预应力混凝土箱梁造价低、施工技术成熟,在中大跨径桥梁中得到广泛应用[1-3]。但普通混凝土自重大、抗拉强度低,易引发梁体下挠与腹板开裂[4-5]。近年来,超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)凭借优异的抗拉、抗压性能与耐久性[6-11],在桥梁工程中得到广泛应用。基于UHPC材料,LI等[12]和邵旭东等[13]提出了钢内芯-UHPC组合箱梁的概念,采用全钢内衬或部分钢内衬包覆UHPC形成组合箱梁,并通过试验研究了箱梁结构的弯曲性能与组合腹板的抗剪性能。UHPC的高强力学性能可有效解决预应力混凝土箱梁的下挠开裂问题。与预应力混凝土箱梁相比,钢内芯-UHPC组合箱梁的板件更薄,UHPC内部通常缺乏足够空间来布置预应力筋,因此需采用体外预应力体系以提升结构的抗裂性能。

体外预应力束通过转向装置实现线型变化并形成吻合束,可在主梁上有效施加预应力,满足各类荷载作用下主梁的受力要求[14]。因此,转向装置是体外预应力体系的核心部件。传统混凝土箱梁中,体外预应力转向装置主要有块式、肋式与横隔板式三种形式[15-17]。陈开利[18]对10个块式转向块开展了破坏试验,研究了转向块形状与配筋形式对受力的影响,并给出转向块配筋建议。宋华茂[19]采用空间有限元分析法分析肋式转向块的应力应变场,验证了其在实桥中的受力可行性。徐栋等[20]采用拉-压杆模型与有限元分析相结合的方法,对块式、板肋式及横隔板式转向块进行了计算对比,结果表明与块式转向块相比,肋式转向块竖向拉应力整体更小,横隔板式转向块的整体刚度较大。但荷载过大时,块式转向装置易在混凝土中发生拉伸破坏,肋式与横隔板式转向装置因高压应力发生劈裂破坏,上述形式的承载能力均受普通混凝土强度较低的限制。鲁邦泽等[21]提出了一种UHPC肋块式体外预应力转向块,通过有限元分析揭示了其5种局部受力效应,结合模型试验得到了转向块的破坏模式与极限承载力,验证了其受力合理性和可靠性。针对钢梁及钢-混凝土组合梁,体外预应力转向装置可采用钢材或混凝土制作。杨明等[22-23]研究了波形钢腹板箱梁桥中混凝土肋式、混凝土块式及钢块式转向块的受力性能,发现三种转向块均呈现偏心破坏特征。李树忱等[24]对某大跨波形钢腹板连续梁桥的横隔板式转向块开展了现场试验与有限元分析,结果表明横隔板式转向结构呈现上部受压、下部受拉特征,且受拉区域主要集中在转向孔道1倍直径范围内。

转向装置的构造设计需与结构形式、受力需求匹配,才能获得良好受力效果。本文以某桥梁工程为背景,提出了一种新型体外预应力转向块的转向与锚固构造,研究钢与UHPC界面在拔出力作用下的分离特性与破坏模式,评估钢榫连接件与钢横隔板的受力贡献,以期为工程应用提供参考。

1 背景工程设计与计算

以跨径布置为49 m+5×70 m+49 m的7跨连续梁桥为背景工程,开展体外预应力设计计算。主梁采用钢-UHPC组合箱梁,纵向为等截面形式。其中,钢内芯厚度均为10 mm,UHPC顶板、腹板、底板厚度分别为100 mm、120 mm、100 mm。钢箱内部设置密集钢横隔板以保证结构整体与局部刚度,横隔板厚度为10 mm,间距为2 m。箱内设置纵向预应力体系协同受力,箱梁截面与体外预应力束沿纵桥向布置如图1所示(图中仅展示第一、二跨线型,其余跨线型布置完全一致)。每个截面布置三种线型预应力束,编号为N1、N2、N3。预应力束的抗拉强度标准值为1 860 MPa,设计张拉控制应力为1 209 MPa。

体外预应力与主梁连接节点构造如图2所示。该转向装置主要特点如下:(1) 转向装置由转向器与两块锚固钢腹板组成,锚固钢腹板上端加工为钢榫形式;(2) 钢横隔板靠近钢内芯位置及钢内芯预先开孔;(3) 转向装置焊接于钢横隔板开孔处,锚固钢腹板穿过钢内芯长条孔并嵌入UHPC中,使转向装置上部与钢内芯紧密焊接并牢固嵌入UHPC中。其中,锚固钢腹板厚度为16 mm,钢榫高度为70 mm,间距为100 mm。

建立背景桥梁全桥Midas有限元模型,计算结果表明,该体外预应力布置方案可满足成桥阶段使用要求。不同线型体外预应力束的张拉力与对应竖向转向分力见表1,其中,F(First)表示第一跨,S(Second)表示第二跨。由表1可知,背景桥最大竖向转向分力为704 kN,该值是后续试验模型设计与性能评估的关键依据。

2 锚固性能试验

2.1 试件设计

为研究竖向力作用下体外预应力转向装置与主梁连

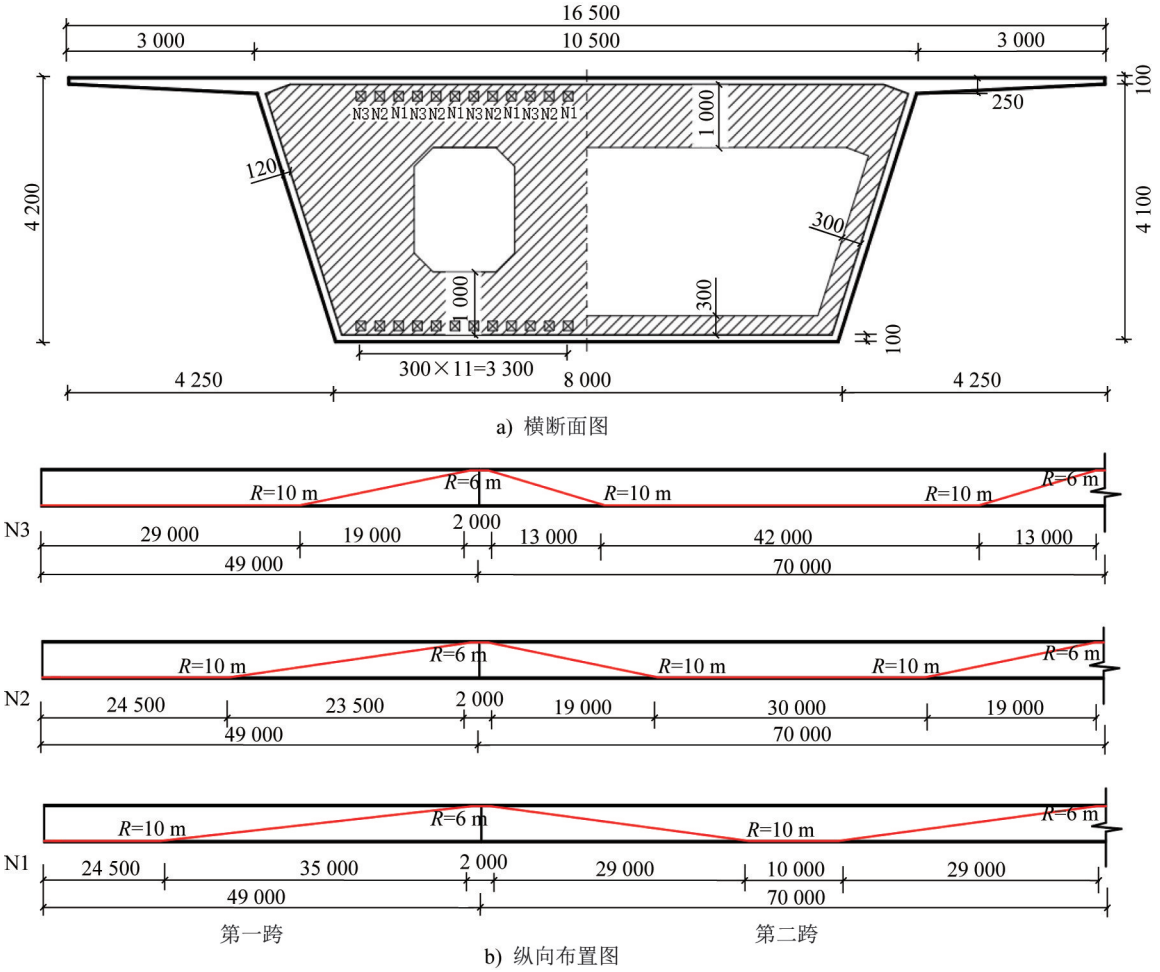


图1　箱梁横断面和体外预应力布置(单位:mm)

Fig. 1　Box girder cross-section and arrangement of external prestressing (unit: mm)

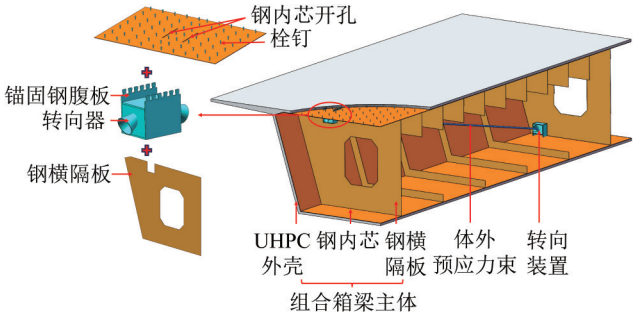


图2　体外预应力转向与锚固构造示意

Fig. 2　Schematic diagram of external prestressing steering and anchoring construction

表1　体外预应力钢束规格参数

Table 1　Specifications and parameters of external prestressing steel tendons

钢束名称	钢束规格	张拉应力/MPa	张拉力/kN	偏转角/°	竖向分力/kN
F-N1	10Φ°15.24	1 209	1 693	7	413
F-N2	10Φ°15.24		1 693	9	530
F-N3	6Φ°15.24		1 016	12	422
S-N1	10Φ°15.24		1 693	8	471
S-N2	10Φ°15.24		1 693	12	704
S-N3	6Φ°15.24		1 016	17	594

接节点处的受力与锚固性能,以背景工程主梁尺寸为基准,设计两组拉拔试件。第一组试件(试件ST)节点连接处仅采用钢棍连接件;第二组试件(试件ST-D)采用钢棍连接件,并与钢横隔板形成框架共同受力。每组制作2个相同试件,共4个试件。试件ST-D详细尺寸如图3所示,试件ST仅缺少钢横隔板。

为确保试件发生完整拔出破坏,避免钢板与UHPC板产生协同弯曲变形,试件设置两道UHPC加劲肋以提升抗弯刚度。钢底板厚度为10 mm;UHPC板厚度为100 mm,板内布置一层直径为12 mm、间距为100 mm的纵横向钢筋网;UHPC肋内设置直径为8 mm的箍筋与直径为12 mm的架立筋;所用栓钉直径为19 mm,焊后高度为70 mm;钢棍与锚固钢腹板厚度为16 mm,钢棍倾角为

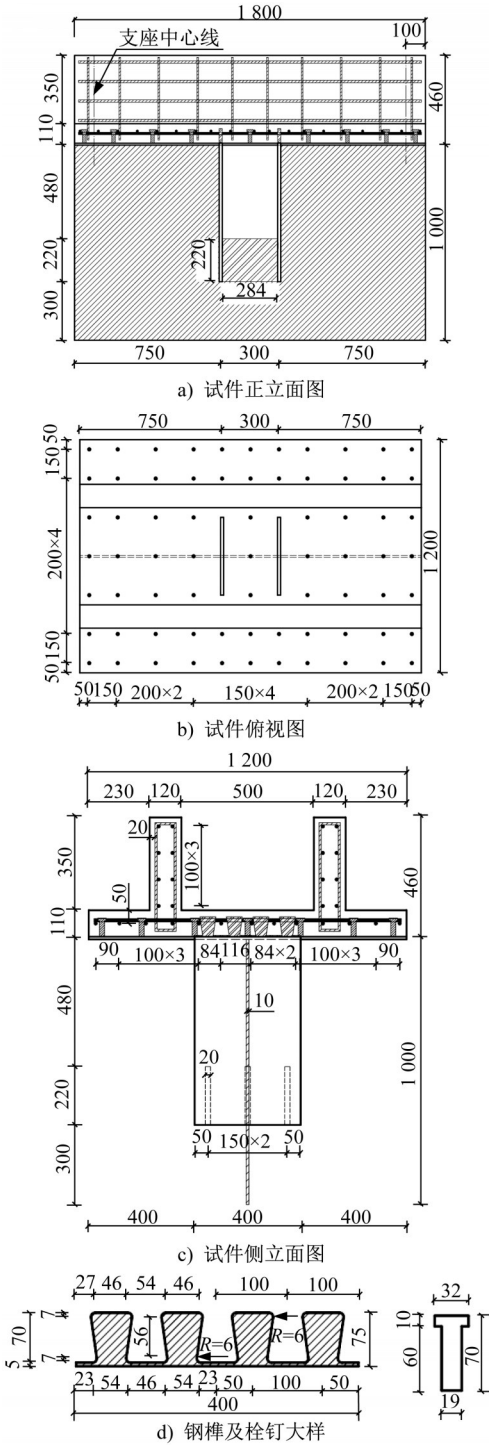


图3 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Dimensions of specimen (unit: mm)

8°,对角点进行圆角处理以减小应力集中效应;钢横隔板厚度为10 mm,高度为1 m;在锚固钢腹板下方设置三道平行肋板(厚度为20 mm),作为试验加载的传力结构。

2.2 加载方案

试件采用框架式自平衡装置加载,如图4所示。该框架结构由上下分配梁与两个钢墩组成,上下分配梁通过钢墩与高强螺栓连接形成整体。在试件下部三道肋板上放置一块自由钢垫板以便对中,加载框架置于该钢垫板上。加载时,千斤顶对框架施加压力,经三道肋板传递至试件,对试件钢结构部分施加向下拉力,用以模拟体外预应力束转向分力的作用。支座沿1.2 m方向布置于试件端部,一侧为铰支座,另一侧为滑动支座;对于无横隔板试件采用一对长1.2 m的支座,有横隔板试件采用两对长0.6 m的支座,分别置于横隔板两侧。

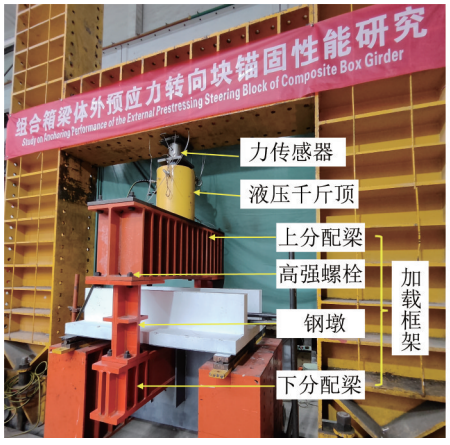


图4 加载装置

Fig. 4 Loading setup

试验采用600 t液压千斤顶加载,千斤顶上方设置力传感器用于实时监测加载状态。正式加载时,首先按10 kN每级的加载流程分级加载;当荷载-位移曲线出现明显拐点(荷载增长缓慢、位移迅速增加)时,改为位移控制加载,按0.1 mm每级增量加载,直至试件完全破坏。加载过程中,采用两台正交水平+竖向激光仪标识加载装置,通过激光与初始标识位置的偏差判断试件是否偏载。

2.3 试验结果

2.3.1 破坏形态

试件ST:加载初期无明显现象;随荷载增大,局部陆续发出界面脱黏、纤维拔出声;达到极限荷载时,伴随较大响声,荷载小幅下降,部分栓钉退出工作、内力重分布,随后进入较长下降段,分离量快速增大、荷载逐步降低,最终考虑到试验安全终止试验。试件呈典型拔出破坏,钢底板向外鼓曲,且中间变形大、四周变形小,试件边缘钢板与UHPC轻微分离,破坏形态如图5a)所示。

试件ST-D:加载前期无明显现象;加载中期,横隔板边缘支座处钢板因受力集中出现明显分离脱开,且随荷载增大脱开程度持续增加,张开区域附近产生裂缝;达到极限荷载后,栓钉退出工作、内力重分布,随后出现较长平台段(难以持荷);随着分离量继续增大,最终横隔板边缘焊缝被拉断,荷载突降,试验终止。试件同样呈拔出破坏形态,仅锚固钢腹板与横隔板周边鼓曲变形较大,其余部位变形较小,破坏形态如图5b)所示。

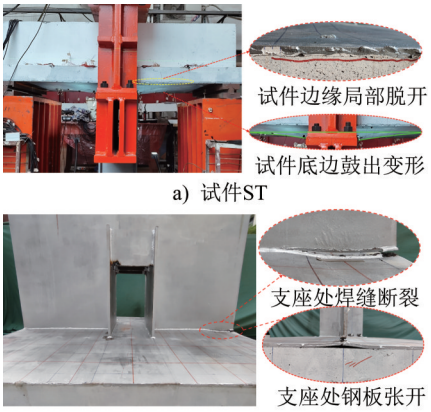


图 5　试件破坏形态

Fig. 5　Failure modes of specimens

2.3.2　荷载–界面分离位移曲线

试件在锚固钢腹板边缘处的分离量最大，提取该位置分离量绘制两组试件的荷载-分离量曲线，如图 6 所示（相同的两个试件取平均值）。根据曲线的变化趋势及加载过程的试验现象，可将试件的拔出过程分为三个阶段：

（1）阶段Ⅰ：未脱黏阶段（0～0.1 mm）：荷载增大，曲线线性度不高、略显离散；当锚固钢腹板边缘分离量达到约 0.1 mm 时，出现纤维拔出和界面剥离声响，核心区域钢板与 UHPC 开始局部脱黏。

（2）阶段Ⅱ：塑性拔出阶段（0.1～2.0 mm）：该阶段分离量随荷载增大稳定增加，试件刚度降低，对应钢棒持荷并缓慢拔出阶段；此时钢板与 UHPC 间黏结力占比极小，故曲线整体较为光滑。

（3）阶段Ⅲ：受力转移阶段（＞2.0 mm）：当锚固钢腹板边缘的分离量达到 2.0 mm 时荷载达到峰值，持荷区域由中心核心受力区向外转移；因转移程度不同，荷载呈强化、不变或下降特征，但分离量都迅速增大，直至达到最大值后试件完全破坏。

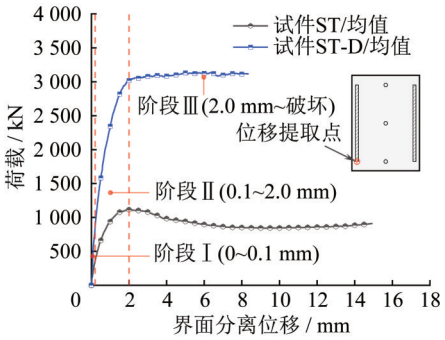


图 6　荷载–界面分离位移曲线

Fig. 6　Load-interface separation displacement curves

2.3.3　荷载–应变曲线

（1）钢底板应变

提取钢底板锚固钢腹板边缘测点 S1 的应变，如图 7 所示。试件 ST-D 钢底板受拉应变的发展速度显著慢于试件 ST 钢底板受拉应变的发展速度。对于试件 ST，钢底板在荷载达 965 kN 时局部屈服，而对于试件 ST-D 则在荷载达到 2 618 kN 时钢底板才屈服，原因是钢横隔板分散了拔出力，降低了锚固钢腹板周边钢底板的受力。

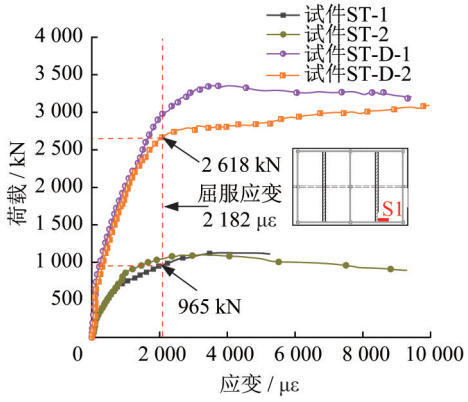


图 7　荷载–钢底板应变曲线

Fig. 7　Load-steel bottom plate strain curves

（2）UHPC 应变

实测发现，UHPC 顶面沿锚固钢腹板方向应变较大，提取该方向应变如图 8 所示。各试件 UHPC 顶面以受压为主，且越靠近中心应变越大。试件 ST 最大压应变未超过 1 500 με，试件 ST-D 最大压应变也未超过 3 000 με，连接件上方 UHPC 无压溃风险。

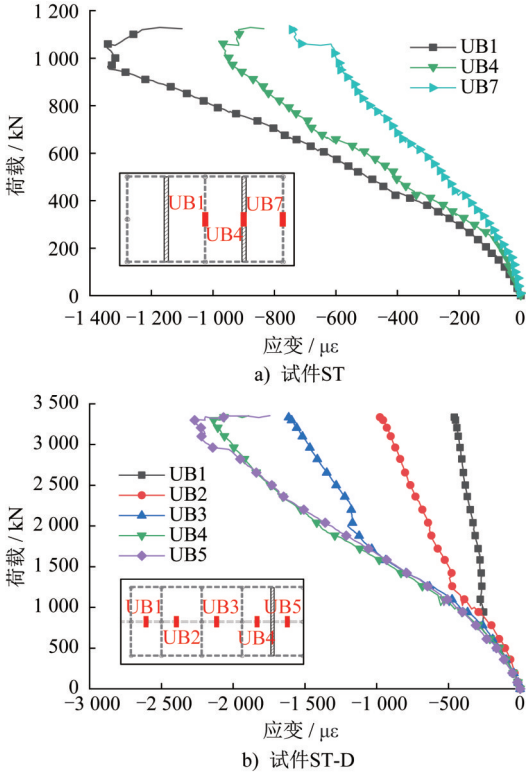


图 8　荷载–UHPC 应变曲线

Fig. 8　Load-UHPC strain curves

3 讨论与分析

3.1 承载能力与最大分离量

取同组两个试件平均值，得到试件的极限承载力与最大分离量（加载终点对应的最大分离量），见表2。由表2可知，试件ST-D的极限承载力远大于试件ST的极限承载力，与试件ST相比提高了190%，表明横隔板可有效分散集中力，显著改善转向装置受力性能、大幅提升试件的极限承载能力。

表2 试件极限承载力和最大分离量

Table 2 Ultimate bearing capacity and maximum separation displacement of specimens

试件编号	极限承载力/kN	平均值/kN	最大分离量/mm	平均值/mm
ST-1	1 129.1	1 114.8 (100%)	15.154	15.214 (100%)
ST-2	1 100.5		15.274	
ST-D-1	3 110.0	3 235.0 (290%)	8.335	9.006 (59.2%)
ST-D-2	3 360.0		9.676	

从最大分离量看，试件ST-D的最大分离量为试件ST最大分离量的59.2%，表明增设横隔板可有效抑制连接节点处钢板与UHPC分离位移的发展。此外，由于试件ST-D锚固钢腹板穿过钢底板开孔直接嵌入UHPC中，并与钢底板双面双侧焊接，传力可靠性更高。

3.2 沿锚固钢腹板长度方向的分离位移

提取两组试件在不同荷载下沿锚固钢腹板长度方向各位置的分离量，如图9所示。由图9可知，两组试件均呈现锚固钢腹板中间分离量小、边缘分离量大的特性，原因是锚固钢腹板边缘受力集中、锚固能力相对更弱，因此边缘分离量更大，且荷载越大，差异越显著。

以锚固钢腹板边缘处的分离量作为各试件分离量的代表值，偏安全取同组两个试件最小值，整理各组试件在分离量为0.10 mm、0.15 mm、0.20 mm时对应的荷载，见表3。

与试件ST相比，试件ST-D在分离量为0.10 mm、0.15 mm、0.20 mm时对应的荷载分别提高了140%、114%、128%。可见，钢横隔板可显著提升节点刚度与极限承载力，对抑制试件早期分离量也作用突出，对实际工程更具意义。

参考规范NF P18-710[25]结合面允许的最大滑移量，取允许最大分离量为0.20 mm。试件ST-D在0.20 mm分离量对应的特征荷载较背景桥最大转向力704 kN高114%，能够满足背景桥转向力需求。由上述分析可知，转向结构仅在局部受力集中处（锚固钢腹板边缘）分离量较大，其余区域整体分离量更小。因此，当采用横隔板辅助结构受力时，可认为该分离量对结构承载能力与正常使用的影响可忽略不计。

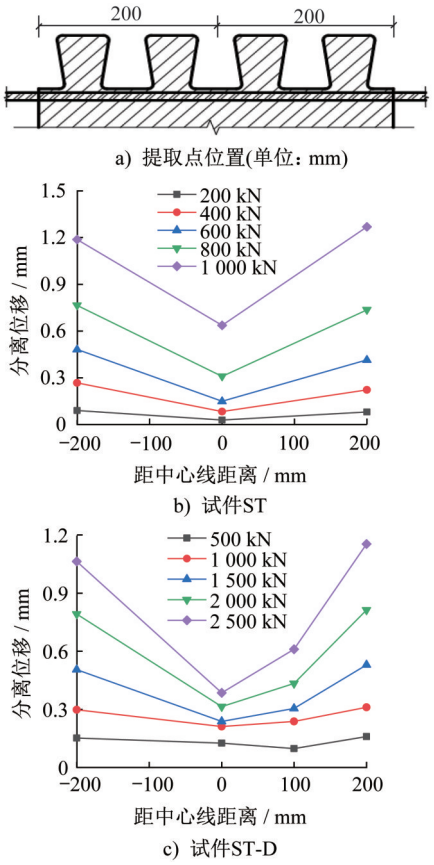


图9 沿锚固钢腹板长度方向不同位置的分离量

Fig. 9 Separation displacement at different locations along the length of anchor steel web

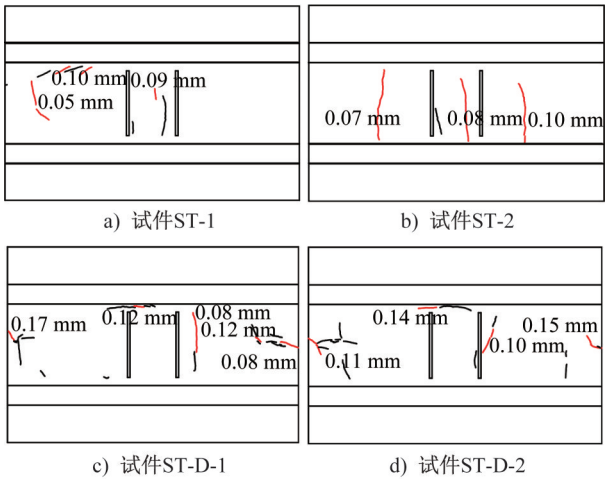
表3 不同分离位移对应的荷载值

Table 3 Load values corresponding to different separation displacements

试件编号	分离量0.10 mm		分离量0.15 mm		分离量0.20 mm	
	荷载/kN	最小值/kN	荷载/kN	最小值/kN	荷载/kN	最小值/kN
ST-1	230.6	208.1	313.1	280.0	380.5	350.1
ST-2	208.1		280.0		350.1	
ST-D-1	621.0	500.0	805.8	598.6	962.0	800.0
ST-D-2	500.0		598.6		800.0	

3.3 裂缝分布

两组试件破坏后，UHPC两肋之间顶面裂缝分布与各区域最大裂缝宽度如图10所示。试件ST裂缝发展较少，主要在钢榫两侧产生平行于钢榫的裂缝；试件ST-D裂缝主要沿横隔板与钢榫周围分布。加载过程中，各试件UHPC顶面裂缝宽度均未超过0.2 mm。



a) 试件ST-1　　b) 试件ST-2

c) 试件ST-D-1　　d) 试件ST-D-2

图10　UHPC裂缝分布

Fig. 10　UHPC crack distribution

3.4　优化设计

上述试验结果表明，各试件最大分离量均出现在锚固钢腹板边缘位置，且沿锚固钢腹板长度方向呈中心小、边缘大的分布特点；应变测试结果也显示锚固钢腹板边缘存在明显应力集中。后续工程设计中，建议采取以下措施来减小应力集中效应：

（1）增大锚固钢腹板长度、增加钢棒数量。此举可延长荷载传递路径，扩大锚固区的有效受力面积，从而分散角点处应力集中。

（2）减小转向器与锚固钢腹板的接触范围，仅沿锚固钢腹板中心区域焊接。对于焊缝连接构件，中心区域焊接应力分布更均匀，限制焊接范围可避免边缘参与传力，减少边缘应力积累。

（3）将锚固钢腹板设计为上大下小的倒梯形，减小边缘受力，如图11所示。倒梯形设计通过扩大顶部截面面积，从而降低边缘区域的应力梯度。

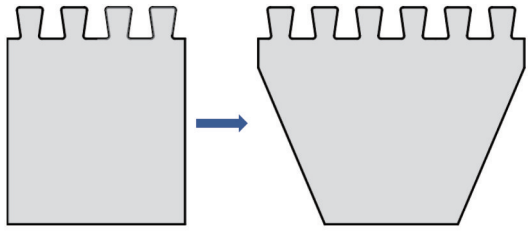


图11　锚固钢腹板优化设计

Fig. 11　Optimal design of anchor steel web

4　结论

本文对钢内芯-UHPC组合箱梁体外预应力转向装置进行构造设计，并开展节点锚固性能研究，主要结论如下：

（1）针对钢内芯-UHPC组合箱梁，提出了一种体外预应力转向与锚固构造方案：在钢内芯开孔，将带钢榫的锚固钢腹板嵌入UHPC中，利用钢横隔板辅助转向结构受力；以背景桥为依托完成组合箱梁体外预应力设计计算，得到背景桥最大体外预应力转向分力为704 kN。

（2）设计两组共4个试件并开展拔出试验研究，所有试件均呈拔出破坏模式；加载过程可划分为未脱黏阶段（0～0.1 mm）、塑性拔出阶段（0.1～2.0 mm）、受力转移阶段（＞2.0 mm）三个阶段。

（3）拔出试验表明，钢横隔板可大幅提升转向块极限承载力与抗拔刚度；本文提出的带横隔板转向方案（试件ST-D），在背景桥转向分力作用下，钢板与UHPC最大分离量不超过0.20 mm，无UHPC开裂与钢结构屈服风险，极限状态下最大分离量仅为试件ST的59.2%，可满足背景桥受力与使用要求，综合性能优良。

参考文献：

[1] 项海帆.桥梁概念设计[M].北京：人民交通出版社，2011.
XIANG Haifan. Conceptual design of bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.(in Chinese)

[2] HUANG H D, HUANG S S, PILAKOUTAS K. Modeling for assessment of long-term behavior of prestressed concrete box-girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(3): 04018002. DOI: 10.1061/(ASCE)be.1943-5592.0001210.

[3] HOU P, YANG C Q, YANG J, et al. Investigation on mechanical performance of prestressed concrete box-girder bridge strengthened using composite trusses with different shapes[J]. Structural Concrete, 2024, 25(3): 1620-1636. DOI: 10.1002/suco.202300183.

[4] 徐向锋，张峰，韦成龙. 预应力混凝土箱梁开裂后的刚度损伤评估[J]. 工程力学，2015，32(7)：95-102. DOI：10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1161.
XU Xiangfeng, ZHANG Feng, WEI Chenglong. Stiffness damage assement of prestressed concrete box-girder after cracking[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 95-102. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1161.(in Chinese)

[5] HU Z J, WU D J, SUN L Z. Integrated investigation of an incremental launching method for the construction of long-span bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 130-137. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.05.001.

[6] YOO D Y, KIM S, KIM J J, et al. An experimental study on pullout and tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with various steel fibers[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 46-61. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.058.

[7] SHEN X J, BRÜHWILER E. Influence of local fiber distribution on tensile behavior of strain hardening UHPFRC using NDT and DIC[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 132: 106042. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106042.

[8] 邵旭东，樊伟，黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J].

土木工程学报,2021,54(1):1-13.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2021.01.001.
SHAO Xudong,FAN Wei,HUANG Zhengyu.Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal,2021,54(1):1-13.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2021.01.001.(in Chinese)

[9] 张云升,张文华,陈振宇.综论超高性能混凝土:设计制备·微观结构·力学与耐久性·工程应用[J].材料导报,2017,31(23):1-16.DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2017.023.001.
ZHANG Yunsheng, ZHANG Wenhua, CHEN Zhenyu. A complete review of ultra-high performance concrete: Design and preparation, microstructure, mechanics and durability, engineering applications[J].Materials Review,2017,31(23):1-16. DOI: 10.11896/j. issn. 1005-023X. 2017.023.001. (in Chinese)

[10] AKEED M H, QAIDI S, AHMED H U, et al. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part IV: Durability properties, cost assessment, applications, and challenges[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01271. DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01271.

[11] FARIED A S, MOSTAFA S A, TAYEH B A, et al. Mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporated with various nano waste materials under different curing conditions [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102569. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102569.

[12] LI P P, SHAO X D, WU S W, et al. Conceptual design and preliminary test of the novel structure of steel inner core-UHPC composite box girder [J]. Engineering Structures, 2024,300:117188.DOI:10.1016/j.engstruct.2023.117188.

[13] 邵旭东,刘淦,李盼盼,等.钢板-UHPC组合腹板抗剪性能试验.中国公路学报,2025,38(3):303-316.DOI:10.3969/j.issn.1001-7372.2025.03.023.
SHAO Xudong, LIU Gan, LI Panpan, et al. Experiment on shear performance of the steel-UHPC composite web. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(3): 303-316. DOI:10.3969/j.issn.1001-7372.2025.03.023.(in Chinese)

[14] PARK Y H, PARK C, PARK Y G. The behavior of an in-service plate girder bridge strengthened with external prestressing tendons[J].Engineering Structures,2005,27(3):379-386.DOI:10.1016/j.engstruct.2004.10.014.

[15] 林峰,李波.体外预应力箱梁桥转向块受力性能分析[J].现代交通技术,2012,9(2):41-43.DOI:10.3969/j.issn.1672-9889.2012.02.013.
LIN Feng, LI Bo. Analysis of mechanical performance of deviators in externally prestressed box-girder bridges [J]. Modern Transportation Technology,2012,9(2):41-43.DOI:10.3969/j.issn.1672-9889.2012.02.013.(in Chinese)

[16] XU D, LEI J, ZHAO Y. Prestressing optimization and local reinforcement design for a mixed externally and internally prestressed precast segmental bridge [J]. Journal of Bridge Engineering,2016,21(7):05016003.DOI:10.1061/(ASCE)be.1943-5592.0000904.

[17] 毛铮,刘龑,李波.体外预应力钢转向块的设计及受力特性研究[J].公路交通技术,2019,35(2):86-91.DOI:10.13607/j.cnki.gljt.2019.02.015.
MAO Zheng, LIU Yan, LI Bo. Design and force characteristics of steel rotation block for external prestressing reinforcement [J]. Technology of Highway and Transport, 2019, 35(2): 86-91. DOI: 10.13607/j. cnki. gljt. 2019.02.015. (in Chinese)

[18] 陈开利.桥梁中后张体外力筋用的转向块的试验研究与设计建议[J].国外桥梁,1994,22(1):44-51.
CHEN Kaili. Experimental study and design suggestion of steering block for post-tensioned external tendons in bridges [J].Foreign Bridges,1994,22(1):44-51.(in Chinese)

[19] 宋华茂.体外预应力转向块空间分析[J].上海公路,1998(增刊1):221-224.
SONG Huamao. Spatial analysis of external prestressed steering block[J].Shanghai Highways,1998(Suppl.1):221-224.(in Chinese)

[20] 徐栋,魏华.体外预应力桥梁转向结构分析及配筋研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(6):722-726.DOI:10.3321/j.issn:0253-374X.2005.06.003.
XU Dong, WEI Hua. Spatial analysis and reinforcement calculation by strut-and-Tie model of deviators of external prestressing structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(6): 722-726. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2005.06.003.(in Chinese)

[21] 鲁邦泽,邵旭东,邱明红,等.密集隔板UHPC箱梁体外预应力束转向构造研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(1):51-59,66.DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2020.01.09.
LU Bangze, SHAO Xudong, QIU Minghong, et al. Steering configuration of external prestressed tendon in UHPC box girder with dense diaphragms [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2020, 39(1): 51-59, 66.DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2020.01.09.(in Chinese)

[22] 杨明,黄侨,马文刚,等.波纹钢腹板体外预应力箱梁混凝土块式转向装置力学性能研究[J].工程力学,2012,29(2):185-191.
YANG Ming, HUANG Qiao, MA Wengang, et al. Research on mechanical characters of concrete block deviator used in externally prestressed box girder with corrugated webs [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 185-191.(in Chinese)

[23] 杨明,黄侨,叶见曙,等.波纹钢腹板体外预应力箱梁桥钢制块式转向装置力学性能[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(1):174-180.DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2011.01.034.
YANG Ming, HUANG Qiao, YE Jianshu, et al. Mechanical characters of steel block deviator used in externally prestressed box girder with corrugated webs [J]. Journal of

Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(1):174-180.DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2011.01.034.(in Chinese)

[24] 李树忱,董旭,彭元诚.波形钢腹板箱梁体外预应力隔板式转向结构试验研究[J].桥梁建设,2018,48(3):17-22.DOI:10.3969/j.issn.1003-4722.2018.03.004.
LI Shuchen, DONG Xu, PENG Yuancheng. Experimental research on diaphragm type external prestress steering structure for box girder with corrugated steel webs[J]. Bridge Construction, 2018, 48(3): 17-22. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2018.03.004.(in Chinese)

[25] NF P18-710 National addition to Eurocode 2-Design of concrete structures: specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)[S].

(上接第48页)

[6] 岳峰,宫海,倪道峻,等.钢框架内嵌ALC双拼板足尺模型振动台试验研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(11):21-31,42.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.11.003.
YUE Feng, GONG Hai, NI Daojun, et al. Shaking table test for full-scale steel frame with embedded ALC double boards[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(11): 21-31, 42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.11.003.(in Chinese)

[7] DU D S, WANG S G, LI W W, et al. Seismic performance of the pre-fabricated steel frame infilled with AAC wall panels and their joint connection: Full-scale shaking table test[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2019, 13(1): 1940004. DOI: 10.1142/s1793431119400049.

[8] 胡精武,徐锋,杜东升,等.整体钢框架内嵌加气混凝土填充墙板足尺模型振动台试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(6):141-148.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.06.015.
HU Jingwu, XU Feng, DU Dongsheng, et al. Experimental study on shaking table test of full-scale steel frame with embedded autoclaved lightweight concrete wall panels[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 141-148. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.06.015.(in Chinese)

[9] 杨宏伟,苏佶智,邢琳,等.装配式节能复合墙板及组装方法:CN116290485B[P].2025-08-26.
YANG Hongwei, SU Jizhi, XING Lin, et al. Prefabricated energy saving composite wall and assembly method: CN116290485B[P].2025-08-26.(in Chinese)

[10] 苏佶智,王公成,乔文涛,等.模块墙建筑新型钢-混凝土组合梁柱节点静力性能研究[J].建筑钢结构进展,2025,27(5):10-18.DOI:10.13969/j.jzgjgjz.20231123001.
SU Jizhi, WANG Gongcheng, QIAO Wentao, et al. Static performance analysis of novel steel-concrete composite beam-column joints in modular wall construction[J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(5): 10-18. DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20231123001.(in Chinese)

[11] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S].(in Chinese)

[12] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature[S].(in Chinese)

[13] GB/T 2975—2018 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备[S].
GB/T 2975—2018 Steel and steel products-Location and preparation of test pieces for mechanical testing[S].(in Chinese)

[14] GB 50011—2010 建筑抗震设计标准[S].
GB 50011—2010 Standard for seismic design of buildings[S].(in Chinese)

[15] 周颖,张翠强,吕西林.振动台试验中地震动选择及输入顺序研究[J].地震工程与工程振动,2012,32(6):32-37.DOI:10.13197/j.eeev.2012.06.013.
ZHOU Ying, ZHANG Cuiqiang, LYU Xilin. Method of ground motion selection and input in shaking table tests[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 32-37. DOI: 10.13197/j.eeev.2012.06.013.(in Chinese)

[16] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S].(in Chinese)

[17] HASHEMI A, MOSALAM K M. Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(14): 1827-1852. DOI: 10.1002/eqe.612.

[18] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S].(in Chinese)