

桥梁负弯矩区钢 - 混凝土叠合连续梁力学性能研究

Study on Mechanical Properties of Steel - concrete Composite Continuous Beam in Negative Bending Moment Area of Bridge

赵帅磊, 陈光海, 韩雨生

(中交路桥建设有限公司, 北京 100027)

摘要: 针对钢 - 混凝土叠合连续梁桥的负弯矩区容易出现裂缝的问题, 以石清路桥钢 - 混凝土叠合连续梁桥为工程背景, 采用有限元软件建立负弯矩区节段模型, 用超高性能混凝土 (UHPC) 代替部分普通混凝土 (NC) 形成 UHPC - NC 叠合钢梁, 对比分析混凝土类型对叠合钢梁的上表面拉应力以及连接件拉应力的影响, 利用正交分析 UHPC 强度、顶板厚度及宽度对顶板上表面、连接件最大拉应力的影响程度。结果表明: UHPC - NC 叠合顶板相较于钢 - 混顶板, 上表面最大拉应力、连接件拉应力分别降低了 11.2%、10.1%, UHPC - NC 叠合顶板的刚度更强, 掺入的钢纤维提高了整体抗变形能力; 对上表面最大拉应力影响程度排序为 UHPC 混凝土强度、顶板厚度、顶板宽度; 对连接件拉应力影响程度排序为顶板厚度、UHPC 混凝土强度、顶板宽度, 优化方案的上表面最大拉应力、连接件拉应力相较于原方案分别降低了 4.1%、3.0%。研究结果为 UHPC - NC 叠合钢梁设计和实际工程应用提供理论支撑。

关键词: UHPC - NC 叠合钢梁; 负弯矩区; 正交分析

中图分类号: U448.38

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0123-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.021

ZHAO Shuailei, CHEN Guanghai, HAN Yusheng

(Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: This study addresses the problem of crack formation in the negative moment regions of steel - concrete composite continuous beam bridges, using the Shiqing Road Bridge as a case study. A segment model of the negative moment zone was established using Finite element software, wherein ultra - high performance concrete (UHPC) partially replaces ordinary concrete (NC) to create a UHPC - NC composite steel beam. A comparative analysis was conducted to evaluate the effects of different concrete types on the tensile stresses experienced at the upper surface of the composite steel beam and in the connection components. Through orthogonal analysis, we assessed the influence of UHPC strength, top slab thickness, and width on the maximum tensile stresses at both the upper surface and connection components. The results show that the UHPC - NC composite top slab reduces the maximum tensile stress at the upper surface and in the connection components by 11.2% and 10.1%, respectively, when compared to the traditional steel - concrete top slab. The UHPC - NC composite top slab demonstrates superior stiffness, with the inclusion of steel fibers enhancing its overall resistance to deformation. The impact on maximum tensile stress at the upper surface is ranked as follows: UHPC concrete strength, top slab thickness, and top slab width. In contrast, the tensile stress in the connection components is primarily influenced by UHPC concrete strength and top slab thickness. The optimized design leads to decreases of 4.1% and 3.0% in the maximum tensile stress at the upper surface and

道桥技术

the tensile stress in the connection components, respectively, relative to the original design. These research findings provide valuable theoretical support for the design and practical application of UHPC – NC composite steel beams.

Key words: UHPC – NC stacked steel beam; negative bending moment zone; orthogonal analysis

0 引言

钢 – 混组合梁具有自重轻、强度高、适用性强、跨越能力强和抗震性能好等优点，还可以降低截面高度，有良好的施工性，因而具有优越的经济技术优势^[1]。然而连续钢 – 混组合梁负弯矩区存在混凝土桥面板受拉开裂、钢材腐蚀等不足，这些问题是限制钢 – 混组合梁桥发展的技术难题^[2]。

随着新型材料技术的不断进步，桥梁工程领域面板开裂问题得到了解决。超高性能混凝土（UHPC）以其卓越的抗压强度、韧性、抗裂性和耐久性受到广泛关注^[3-4]。在桥梁建设中，UHPC 被逐渐应用于在墩、柱、板、梁等构件^[5-6]。理论方面，檀新宁等^[7]对梁局部的全过程受力进行分析，结果证明负弯矩区结构为延性良好的弯曲破坏，提高受压腹板稳定性。曾丹等^[8]对 UHPC 钢桥面结构进行模型试验，证明提高受拉钢筋配筋率能够有效控制裂缝发展。崔艳等^[9]的研究表明较高配筋率对钢 – UHPC 组合梁负弯矩区的裂缝发展有控制作用，并建议配筋率应小于 4%。结构形式方面，李晓龙等^[10]提出了一种装配式 UHPC 华夫型上翼缘组合梁，有效降低桥体上部结构自重，减少了桥梁负弯矩区的裂缝。朱劲松等^[11-12]将 UHPC 在桥梁上的应用成体系地研究，通过试验证明 UHPC 材料性能优越，比钢 – 混组合梁具有更优异的力学性能。黄荆等^[13]通过试验对不同接口的钢 – UHPC 组合梁进行分析，给出了合理的接口样式和 UHPC 铺设范围。方志等^[14]通过研究负弯矩作用下 UHPC 组合钢梁的开裂荷载和极限抗弯承载力，发现两者均显著增加。杨大海等^[15]通过试验以及参数化分析的方法对栓钉数量进行研究，研究发现其可以提高 UHPC 叠合钢梁的整体性和延性。

已有研究结果表明 UHPC – 普通混凝土（NC）叠合钢梁的设计理论研究都是对缩尺试件进行试验及模拟，基于此，以石清路钢 – 混凝土叠合连续梁桥工程案例进行分析，通过有限元模拟以及正交试验法

分析其承载能力、刚度、构件拉应力，为 UHPC – NC 叠合钢梁设计和实际工程应用提供理论支撑。

1 工程概况

该工程为北三环主路建设项目，主路长 19.64 km（其中桥梁 4.26 km），辅路长 19.06 km（其中桥梁 0.73 km）。主路为城市快速路，设计速度 100 km/h，双向八车道；辅路为城市主干路，设计速度 50 km/h，双向四车道。

新建桥梁上跨石清路，根据石清路规划断面，考虑在侧分带设置桥墩，桥梁跨径组合采用 30 m 混凝土连续箱梁 + 42 m 钢 – 混叠合连续箱梁 + 27 m 混凝土连续箱梁。上部结构采用 NC 叠合钢箱梁以及 UHPC – NC 叠合钢箱梁形式，结构简支。单幅横向设置 3 片钢槽梁，主梁中心间距为 5.6 m，悬臂宽 1.5 m。墩顶设实腹式中横隔梁，梁高 1.42 m。主梁之间每间隔 1 m 设置 1 道中横隔梁，梁高 1.08 m。钢槽梁单箱宽为 2.8 m，钢槽梁高 2.15 m；腹板设 2 道纵向加劲肋，间隔 1 m 设置 1 道竖向加劲肋；间隔 5 m 设置实腹式横隔板；底板设 6 道纵向板式加劲肋，纵向连续。上部桥面板采用混凝土桥面板，桥面板与钢梁采用均布式剪力钉连接。

UHPC 配合比见表 1，钢纤维长度为 13 mm，掺量 2%，直径为 0.18 ~ 0.22 mm。依据相关规范对 UHPC 混凝土试件进行抗拉及抗压试验，C50 混凝土只需要做抗压试验。主要材料力学特性见表 2。

表 1 UHPC 配合比

Table 1 UHPC mixing ratio / (kg/m³)

| 水泥 | 粗砂 | 中砂 | 细砂 | 硅灰 | 减水剂 | 水 |
|----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 1 | 0.2 | 0.8 | 0.2 | 0.3 | 0.02 | 0.23 |

表 2 材料力学性能表

Table 2 Material mechanical properties

| 混凝土类型 | 抗压强度 /MPa | 抗拉强度 /MPa | 弹性模量 /GPa |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| C50 | 59.6 | | 34.5 |
| UHPC | 162.2 | 18.0 | 47.7 |
| Q345C | | 376.2 | 210.1 |

2 有限元模型建立及分析

2.1 有限元模型

采用有限元软件分别建立两种叠合顶板方案，如图 1 所示，分别为 NC 叠合钢梁（A1 组）和 UHPC - NC 叠合钢梁（A2 组）。钢梁、UHPC、钢筋混凝土顶板、连接件采用实体单元 C3D8R，钢筋网采用桁架单元 T3D2。

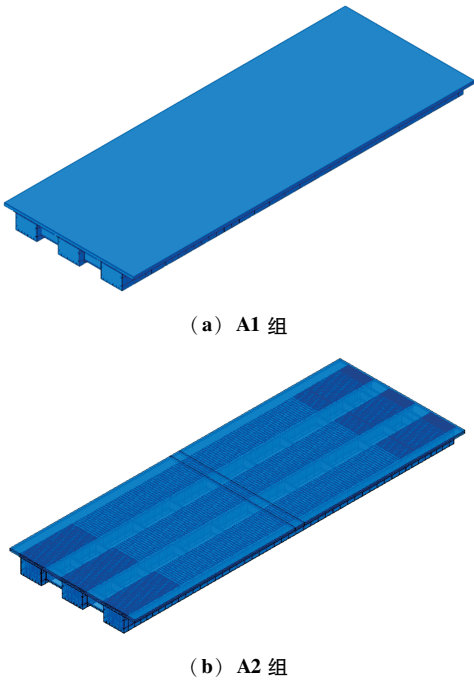


图 1 有限元模型示意图

2.1.1 本构关系

钢材采用双折线模型，不考虑钢材弹塑性硬化。钢筋应力 - 应变公式为：

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon_i & \varepsilon_i \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_i > \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

混凝土采用损伤塑性模型，塑性参数取值见表 3。

| 表 3 混凝土损伤模型参数表 | | | | |
|---|-----|------|---------|---------|
| Table 3 Table of concrete damage modelling parameters | | | | |
| 膨胀角 / (°) | 偏心率 | 强度比 | 常应力比值 | 黏聚系数 |
| 30 | 0.1 | 1.16 | 0.666 7 | 0.000 5 |

UHPC 的受压本构采用文献 [16] 提出的拟合公式：

$$\sigma = f_c \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_c^{-1} \cdot [\eta - 1 + (\varepsilon / \varepsilon_c)^{\eta}]^{-1} \quad (2)$$

受拉本构采用文献 [22] 的拟合公式：

2.1.2 荷载条件及边界条件

荷载设计组合考虑永久作用及可变作用对梁桥受力影响。桥梁上部结构作用主要考虑恒载、汽车荷载、温度作用以及基础变位作用，荷载组合工况为：恒载 + 汽车荷载 + 整体升温 + 支座沉降。汽车荷载采用文献 [17] 的车辆模型，温度作用采用文献 [18] 的竖向温度梯度曲线考虑温度梯度的变化。模型梁的边界条件为一端为固定支座，中间支座以及另一端支座采用活动支座。

2.1.3 相互作用

桥面板与钢箱梁顶板采用绑定，UHPC 混凝土板与 NC 板之间采用面面接触，法向行为设置为硬接触，切向行为设置为“罚”，摩擦系数为 0.3。不考虑钢筋的黏结滑移，将钢筋、连接件内置于混凝土板中，选择内置区域模拟其相互作用关系。

2.2 结果分析

2.2.1 云图分析

经过数值模拟，A1、A2 组顶板应力云图分布规律类似，以 A1 组为例进行分析，如图 2 所示。A1 顶板负弯矩区纵桥向应力均为拉应力，拉应力最大

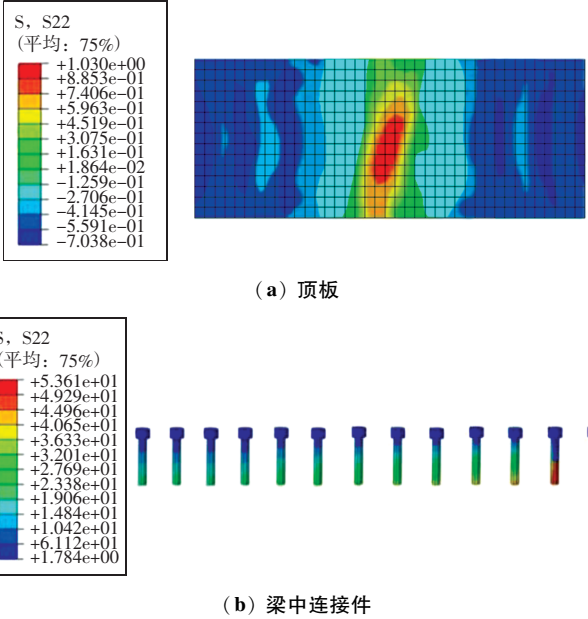


图 2 A1 组应力云图

Fig. 2 Group A1 stress cloud diagram

道桥技术

值为 4.64 MPa，从钢梁中部到 1/4 梁长处，拉应力逐渐减小，顶板表面先受拉后受压，从 1/4 梁长处到两端支座处，压应力逐渐增大，最大值为 0.70 MPa。梁中支座处连接件受到最大拉应力，为 53.61 MPa，存在明显的应力集中现象，相邻连接件拉应力为 45.24 MPa，相比最大拉应力降低了 16%。

2.2.2 构件拉应力分析

连接件及混凝土负弯矩区上表面拉应力值见表 4。A2 组别在负弯矩区上表面的最大拉应力为 4.12 MPa，相较于 A1 更低，相差 11.2%，减小了负弯矩区的应力集中现象，使应力分布更均匀，所以 UHPC - NC 叠合顶板的整体性更好。

A2 组连接件的拉应力为 48.25 MPa，A1 组连接件的拉应力为 53.61 MPa，A2 组连接件最大拉应力相较于 A1 组别减少 0.52 MPa，相差 10.1%，是因为 UHPC 混凝土强度更高且 UHPC 混凝土中加入了钢纤维，提高了强度的同时，增强了整体刚度，分担了连接件的部分应力。

表 4 连接件及混凝土拉应力值

Table 4 Tensile stress values in connectors and concrete

| 指标 | A1 | A2 | 差值 |
|----------------|-------|-------|------|
| 负弯矩区上表面拉应力/MPa | 4.64 | 4.12 | 0.52 |
| 连接件最大拉应力/MPa | 53.61 | 48.25 | 5.36 |

2.2.3 荷载位移曲线分析

根据图 3 曲线变化趋势以及结构受力特点将曲线分为 2 个阶段，即弹性阶段、弹塑性阶段。在弹性阶段，荷载 - 位移曲线基本呈线性发展，此时钢 - 混组合梁整体性良好，混凝土板未出现裂缝，说明钢 - 混组合梁处于弹性工作状态。处于弹塑性阶段时，曲线表现出非线性发展特点，其斜率在逐渐减小。混凝土板出现裂缝，钢 - 混组合梁刚度下降。

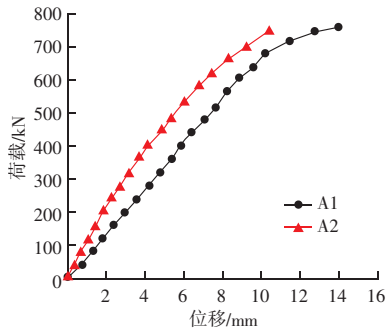


图 3 荷载位移图

Fig.3 Load displacement diagram

A2 对应曲线的初始斜率为 101，A1 对应曲线的初始斜率为 56，A2 曲线斜率较大，即 A2 刚度比 A1 大，表明 UHPC - NC 叠合板对钢 - 混组合梁刚度贡献明显优于 NC 板。曲线的初始斜率大致相当，说明两种钢梁初始刚度并没有显著差别。

3 正交分析

3.1 正交分析方案设计

设置 3 因素 3 水平，见表 5。选用顶板上表面、连接件最大拉应力作为评价桥梁抗裂性能的指标。

表 5 正交因素及水平表

Table 5 Table of orthogonal factors and levels

| 水平 | 因素 | | |
|----|-------------|--------|--------|
| | UHPC 强度/MPa | 顶板厚度/m | 顶板宽度/m |
| 1 | 140 | 0.32 | 16 |
| 2 | 162 | 0.35 | 17 |
| 3 | 180 | 0.38 | 18 |

3.2 不同方案对比分析

通过计算各因素在不同水平状态下的均值，分别针对上表面最大拉应力和连接件最大拉应力两个指标进行分析。由表 6 可知，上表面及连接件最大拉应力 3 个因素排序皆为 $K_{j3} > K_{j2} > K_{j1}$ ，各因素最优水平均为第三水平；上表面最大拉应力各因素影响程度排序为：UHPC 强度、顶板厚度、顶板宽度，连接件最大拉应力各因素影响程度排序为：顶板厚度、UHPC 强度、顶板宽度。

表 6 极差分析表

Table 6 Extreme variance analysis table

| 结构名称 | 因素 | K_{ji}/MPa | | | \bar{K}_j/MPa | | | K_j/MPa |
|----------|---------|---------------------|----------|----------|------------------------|----------------|----------------|------------------|
| | | K_{j1} | K_{j2} | K_{j3} | \bar{K}_{j1} | \bar{K}_{j2} | \bar{K}_{j3} | |
| 上表面最大拉应力 | UHPC 强度 | 4.56 | 3.99 | 3.42 | 1.53 | 1.33 | 1.14 | 0.67 |
| | 顶板厚度 | 5.73 | 5.52 | 5.28 | 1.91 | 1.84 | 1.76 | 0.34 |
| | 顶板宽度 | 6.69 | 6.03 | 5.65 | 2.23 | 2.01 | 1.88 | 0.10 |
| 连接件最大拉应力 | UHPC 强度 | 57.61 | 56.13 | 55.14 | 19.19 | 18.67 | 18.40 | 8.43 |
| | 顶板厚度 | 58.37 | 56.02 | 53.75 | 19.46 | 18.63 | 17.91 | 9.97 |
| | 顶板宽度 | 61.28 | 60.81 | 60.32 | 20.46 | 20.34 | 20.12 | 2.92 |

3.3 方案对比

优化方案见表 7，数值计算模拟结果见表 8。通过分析优化方案与原方案计算结果数据，优化方案的上表面最大拉应力为 3.95 MPa，原方案的上表面最大拉应力为 4.12 MPa，相差 4.1%；原方案的连接件最大拉应力为 48.25 MPa，优化方案的连接件最大拉应力为 46.70 MPa，相差 1.45 MPa，降低了

3.0%。因为连接件 UHPC 强度的增加使整体刚度增加,使得负弯矩区变形分布更均匀,从而更好地改善连接件应力集中现象。

表 7 优化方案参数表

Table 7 Optimization scheme parameter table

| UHPC 混凝土强度/MPa | 顶板厚度/m | 顶板宽度/m |
|----------------|--------|--------|
| 160 | 0.38 | 16 |

表 8 优化结果对比

Table 8 Comparison of optimisation results

| 指标 | 优化方案 | 原方案 | 差值 |
|--------------|-------|-------|-------|
| 上表面最大拉应力/MPa | 3.95 | 4.12 | -0.17 |
| 连接件最大拉应力/MPa | 46.70 | 48.25 | -1.55 |

4 结论

基于石清路 UHPC-NC 叠合连续钢梁数值模拟,对 UHPC-NC 叠合钢梁的上表面拉应力、连接件拉应力进行力学分析,再通过正交试验法对 UHPC-NC 顶板分析 UHPC 混凝土强度、顶板厚度、顶板宽度对上表面最大拉应力、连接件拉应力的影响,得到以下结论:

(1) UHPC-NC 叠合钢梁相较于 NC 叠合梁的整体性更好, UHPC-NC 叠合钢梁上表面最大拉应力为 4.12 MPa,相比较降低了 11.2%; UHPC-NC 叠合钢梁连接件最大拉应力为 48.25 MPa,相比较降低了 10.1%,应力分布更均匀,更充分地发挥了连接件改善受力的作用。

(2) 通过正交分析得到对顶板上表面最大拉应力影响最大的是 UHPC 混凝土强度,其次是顶板厚度,再次之是顶板宽度;连接件最大拉应力影响最大的是顶板厚度,其次是 UHPC 混凝土强度,再次之是顶板宽度。

(3) 通过对比分析,最优方案: UHPC 混凝土强度为 160 MPa,顶板厚度为 0.38 m,顶板宽度为 16 m;上表面最大拉应力降低 4.1%,连接件最大拉应力降低 3.0%,有效提高叠合梁的整体性和抗裂性能,改善连接件应力集中现象。

参 考 文 献

[1] 刘非凡. 国内超高性能混凝土产品的基本性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 45-51.

[2] 谭燕秋, 马立荣. 钢-混凝土组合箱梁底板局部屈曲失稳分析

[J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2013, 30 (2): 9-11, 41.

[3] 邓舒文, 邵旭东, 晏班夫, 等. 轻型组合桥梁负弯矩区接缝抗弯性能试验 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2024, 58 (2): 399-412.

[4] 刘永健, 刘江, 周绪红, 等. 桥梁长寿命设计理论综述 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24 (3): 1-24.

[5] 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.

[6] 白奇, 高山. 钢-UHPC 组合结构中栓钉抗剪件的力学性能影响因素及设计方法综述 [J]. 应用力学学报, 2025, 42 (4): 735-751.

[7] 檀新宁, 郑艳, 祝俊祥, 等. UHPC-NC-充填式窄幅钢箱连续组合梁桥设计与数值分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2025, 50 (3): 489-503.

[8] 曾丹, 曹磊, 刘扬, 等. 钢-GFRP 板条-UHPC 组合桥面结构开裂及裂缝宽度计算方法研究 [J]. 桥梁建设, 2024, 54 (5): 94-101.

[9] 崔艳, 万祥, 徐晓青, 等. 配 GFRP 筋的钢-UHPC 组合梁负弯矩区抗弯性能有限元分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21 (4): 79-85.

[10] 李晓龙, 陈晖, 王泽辉, 等. 带预应力 UHPC 华夫桥面板抗弯性能试验研究 [J]. 桥梁建设, 2024, 54 (3): 100-108.

[11] 朱劲松, 王修策, 丁婧楠, 等. UHPC 华夫桥面单向板的荷载有效分布宽度及抗弯承载力计算方法 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2021, 51 (3): 404-410.

[12] 朱劲松, 徐余锋, 孙雅丹, 等. 基于 UHPC 华夫桥面板应用的桥梁性能提升方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (6): 1584-1594.

[13] 黄荆, 莫时旭, 郑艳, 等. UHPC-窄幅钢箱组合梁负弯矩下受力性能研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2023, 48 (3): 506-518.

[14] 方志, 周楚钰, 洪金圣, 等. 界面不同抗剪连接钢-UHPC 组合梁的受弯性能 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2025, 52 (7): 61-74.

[15] 杨大海, 汪志甜, 王倩, 等. 钢-UHPC-NC 螺栓连接组合梁负弯矩区抗弯试验研究 [J]. 桥梁建设, 2025, 55 (2): 34-42.

[16] ZHU L, LI T S, WANG Y, et al. Experimental and numerical study on T-Shaped UHPFRC beams with high-strength reinforcement [J]. Structural Concrete, 2021, 22 (6): 3630-3645.

[17] 令方, 邵旭东, 刘榕. 钢-UHPC 轻型组合梁桥面板受弯性能有限元分析 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (10): 88-95.

[18] 刘瑜, 邵旭东. 轻型组合梁桥面板在日照作用下温度梯度效应研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (6): 54-61.