第45卷 第6期
2025年12月

中 外 公 路
JOURNAL OF CHINA & FOREIGN HIGHWAY

Vol. 45 No.6
Dec. 2025

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.06.014

文章编号:1671-2579(2025)06-0119-08

千米级钢-UHPC组合梁斜拉桥桥面板过渡段力学性能研究

李秋[1],职海涛[1],彭彦庆[2],彭建新[2*],袁勤[1],吴学伟[3]

(1.中交第二公路勘察设计研究院 桥梁设计院,湖北 武汉 430000;2.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;3.湖北交通投资集团有限公司,湖北 武汉 430000)

摘要:为研究钢箱梁与钢-UHPC组合梁之间钢混结合段的力学性能,该文以主跨1 160 m的观音寺长江大桥为背景,通过精细化有限元建模,分析了钢混结合段在最不利荷载工况下的受力特点,揭示了钢混结合段的传力机理,并讨论了影响结合段受力的主要因素。结果表明:在最不利荷载工况下,钢混结合段各构件的应力均在160.4 MPa以内,低于材料强度设计值,具有充足的安全储备;在纵桥向,结合段对钢箱梁底板及中腹板的传力影响较小,应力从钢箱梁到组合梁方向总体呈下降趋势,变化幅度在20 MPa以内;钢格室顶板、腹板、底板应力水平在承压板附近分别下降了25.6%、73.3%、3.50%;剪力钉传力过程中,钢格室顶板剪力钉传力占比最多,且越靠近组合梁端比例越高,最高达到57%;增加结合段填充混凝土厚度可降低结构应力,取350~400 mm厚度能实现结构的最优受力;结合段越长,越有利于剪力钉的应力过渡。

关键词:组合梁斜拉桥;钢混结合段;有限元模拟;传力机理;参数分析

中图分类号:U448.27;U443.31 **文献标志码:**A

Mechanical Properties of Transition Section of Cable-Stayed Bridge with Kilometer-Scale Steel-UHPC Composite Girders

LI Qiu[1], ZHI Haitao[1], PENG Yanqing[2], PENG Jianxin[2*], YUAN Qin[1], WU Xuewei[3]

(1. Bridge Design Institute, CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hubei Communications Investment Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: To study the mechanical properties of the steel-concrete composite section between steel box girders and steel-ultra-high performance concrete (UHPC) composite girders, the Guanyinsi Yangtze River Bridge with a main span of 1 160 m was used as the background. Through refined finite element modeling, the stress characteristics under the most unfavorable load conditions and transmission mechanism of the steel-concrete composite section were analyzed, and the main factors affecting the stress of the composite section were discussed. The results indicate that under the most unfavorable load conditions, the stress of each component in the steel-concrete composite section is within 160.4 MPa, which is lower than the material strength design value, and there is sufficient safety reserve. Along the longitudinal direction of the bridge, the influence of the composite section on the force transmission of the bottom plate and middle web of the steel box girder is relatively small, and the stress generally shows a downward trend from the steel box girder to the composite girder direction, with a variation amplitude within 20 MPa. The stress levels of the top plate, web plate, and bottom plate of the steel lattice chamber decrease by 25.6%, 73.3%, and 35% near the bearing plate, respectively. In the process of transmission force through shear nails, the proportion of force transmitted by shear nails of the top plate in the steel lattice chamber is the highest, and a closer proximity to the end of the

收稿日期:2024-05-30 **修回日期:**2025-09-25

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2600900);国家自然科学基金资助项目(编号:52078056,52378125)

作者简介:李秋,男,硕士,工程师. E-mail:745569874@qq.com

***通信作者:**彭建新,男,博士,教授. E-mail:jianxinpeng@csust.edu.cn

composite girder indicates a higher proportion, with a maximum of 57%. Increasing the thickness of concrete filled in the composite section can reduce the structural stress, and a thickness of 350 mm – 400 mm can achieve the optimal stress of the structure. A longer composite section is more conducive to the stiffness transition of the shear nails.

Keywords: cable-stayed bridge with composite girder; steel-concrete composite section; finite element simulation; force transmission mechanism; parameter analysis

0 引言

混合体系斜拉桥以其优异的跨越能力、良好的经济性能及平衡结构受力的优势，已经成为一种极具竞争力的大跨度桥型之一[1-3]，而钢混结合段作为一种由两种材料组合而成的过渡结构，通常处于整桥受力相对较大的区域，且构造复杂，是影响全桥安全性和可靠性的关键位置[4]。在实际工程中，要确保结合段内混凝土与钢结构结合性能可靠、结构细节合理、受力性能良好，实现整桥协同受力和协调变形，有必要对钢混结合段进行重点研究。

国内外众多学者通过模型试验对结合段的整体力学性能进行了研究[5-8]。李小珍等[9]研究表明，钢混结合段在1.7倍设计荷载下仍具有充足的强度和良好的变形性能，结构安全储备充足；Pu等[10]对钢混结合段足尺模型进行了疲劳试验，结果表明承压板厚度和剪力钉直径对结合段的疲劳性能有显著影响。此外，有限元模拟也是研究结合段力学性能的有效手段。韦锋等[11]和秦凤江等[12]分别基于实测数据和缩尺试验分析了钢混结合段的受力特点，并验证了局部有限元模拟的可靠性；金杰等[13]通过有限元方法模拟了钢梁与UHPC梁结合段的受力情况，结果表明该结构可更好地实现材料和结构刚度的过渡。

在结合段传力构件方面，Cheng等[14]开展了钢格室剪力键的推出试验，并结合有限元模拟分析了钢混结合段的传力机理；林一宁等[15]分析了钢混结合段截面应力的分布规律及结构各部位剪力钉的应力特点，并指出结合段设计时应重点关注上下翼缘位置；张凯等[16]通过数值模拟研究了连接件构造形式对钢混结合段受力性能的影响，分析得出连接件在靠近承压板位置处应力较大；蒲黔辉等[17]通过有限元分析得出承压板为混合梁斜拉桥钢混结合段主要轴力传递构件，传递比例随着其厚度的增加而增大的结论。

以上研究均表明，钢混结合段具有良好的服役性能。但是，在工程实例中，各个钢混结合段内部构造存在一定差异，现有研究难以形成完整的理论用于评估其受力性能。此外，随着桥梁对跨越能力需求的增长，钢箱梁与普通混凝土梁的结合难以满足大跨径需求。钢箱梁与钢-UHPC组合梁结合的新型结构可以有效应对大跨度桥梁轴力急剧增大，跨中局部受拉的难题[18-19]。与传统结合段不同的是，钢箱梁与钢-UHPC组合梁结合段仅设置在结构上部，下部为贯穿的钢底板与U肋，目前关于该类结合段的研究极少，二者结合的安全性和可靠性以及在未来桥梁中的应用潜力亟待研究。基于此，本文以观音寺长江大桥为依托工程，对该类型结构进行了精细化建模，并结合子模型法分析了钢箱梁与钢-UHPC组合梁结合段的受力特点，揭示了结合段的传力机理，研究成果可为该类桥梁的设计及工程应用提供参考。

1 工程概况

1.1 立面布置

观音寺长江大桥采用对称式双塔双索面半漂浮体系斜拉桥结构形式，跨江主桥跨径布置为(62＋64＋2×72＋80＋1 160＋96＋72＋2×64＋54) m＝1 860 m，是目前世界上跨度最大的公路斜拉桥(在建)。主桥中跨两侧为UHPC桥面板，长度均为428 m；中跨中间为钢-UHPC叠合桥面板(L_0)，其长为304 m；两边边跨为混凝土箱梁，长350 m。大桥采用单层桥面布置，双向六车道高速公路，设计速度120 km/h。车辆荷载等级为公路-Ⅰ级。路基宽34.5 m，主梁宽41 m(含风嘴及锚固区)。观音寺长江大桥总体布置如图1所示。

1.2 钢箱梁与钢-UHPC组合梁结合段

为实现不同主梁之间内力的合理过渡，全桥共设置两类4个钢混结合段，分别位于靠近桥塔和靠近跨中位置。本文所研究的钢混结合段位于距跨中截面152 m位置处，连接钢箱梁与钢-UHPC组合梁，对应图1中钢混结合面2的位置。钢材型号为Q370qd，组合梁预制混凝土板及钢混结合段填充混凝土均采用UHPC160，具体构造形式如图2所示。

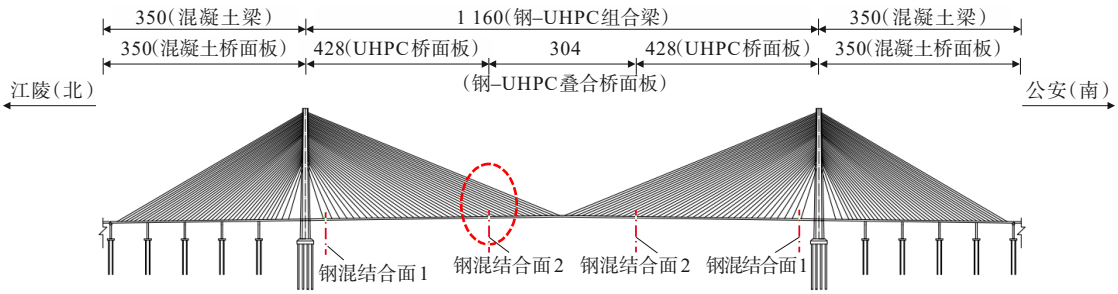

图 1　观音寺长江大桥总体布置图(单位：m)

Figure 1　Overall layout of Guanyinsi Yangtze River Bridge (unit: m)

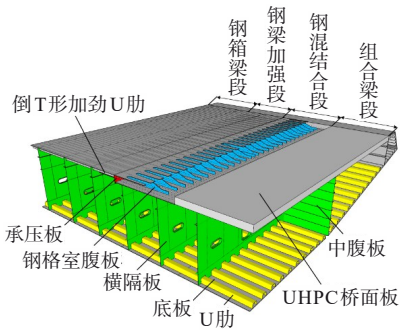

图 2　钢箱梁-组合梁结合段构造图

Figure 2　Structure of composite section of steel box girder and composite girder

2　钢混结合段有限元精细化模型

2.1　全桥计算模型及结果

采用Midas Civil建立全桥空间有限元杆系模型。桥塔与主梁采用梁单元，斜拉索采用杆单元，采用修正弹性模量的方法模拟非线性因素对索的影响；基于刚度等效原则对钢混结合段进行简化；钢材材料参数按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)[20]中的规定取值；UHPC材料参数参考文献[21]取值。整体有限元模型见图3，主梁标准断面如图4所示。

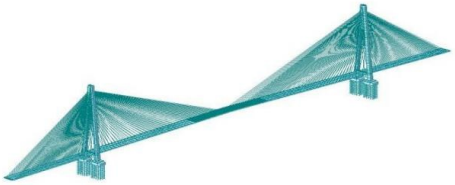

图 3　全桥有限元数值模型

Figure 3　Numerical finite element model of entire bridge

成桥阶段分析依据《公路桥涵设计通用规范》(JDG D60—2015)[22]计算各工况下的永久作用及可变作用，并计算承载能力极限状态下作用基本组合的效应设计值。为研究钢-混结合段在各阶段的受力特性，并得到结合段局部模型所应施加的边界荷载，本文在全桥模型中取钢梁侧距承压板7.25 m位置处截面A-A的内力进行分析，以结合段最大轴力荷载组合为结构最不利荷载工况，得出该荷载工况下，截面A-A的轴力为−178 462 kN、剪力为3 679 kN、弯矩为134 626 kN·m。

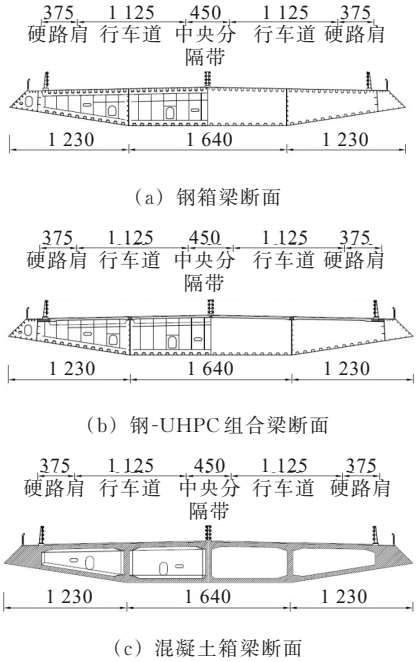

图 4　主梁标准断面(单位：cm)

Figure 4　Standard section of main girder (unit: cm)

2.2　钢混结合段计算模型

采用有限元软件Abaqus建立钢箱梁-组合梁结合段局部有限元模型，分析其在最不利荷载工况下的受力状态。为削弱边界条件对结合段应力分布状况的影响，选取17.5 m梁段建模，依次包括4 m普通钢箱梁节段＋3.25 m钢梁加强段＋3.25 m钢混结合段＋7 m组合梁节段，以横桥向中心面为基准取半桥

宽度进行计算。

结合段UHPC层厚度取350 mm，钢板厚度及钢梁细部尺寸按图纸取值，模型网格尺寸取50 mm×50 mm，钢板采用壳单元S4R模拟，UHPC层采用实体单元C3D8R模拟；UHPC与钢箱梁之间采用绑定及内置区域的约束方式连接，计算模型如图5所示。

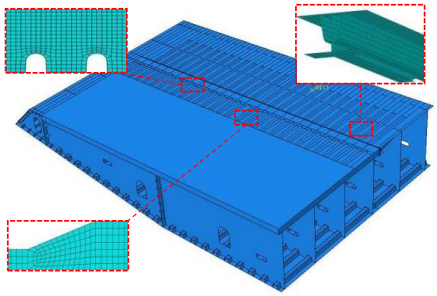

图5 钢混结合段计算模型

Figure 5 Calculation model of steel-concrete composite section

本文研究只限于线弹性部分的有限元模拟，不涉及非线性分析，故只需取材料的弹性模量和泊松比，具体参数如表1所示。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
UHPC	4.30×10^4	0.20	3 760
钢材	2.06×10^5	0.31	7 850

2.3 边界条件及加载工况

边界条件的加载按照参考文献[11,23]中的处理方法，考虑约束组合梁侧主梁截面所有自由度，钢箱梁侧主梁截面释放所有自由度，在横桥向中心面设置对称约束。依据前文所提取的Midas整桥模型中截面A-A的内力，取该截面内力值的一半施加在钢箱梁侧主梁截面上(表2)，以模拟主梁节段在整体模型中的受力状态，从而研究钢混结合段的应力分布状况。

表2 加载面内力

Table 2 Internal forces of loading surface

轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
−89 231	1 840	67 313

2.4 钢混结合段内力结果分析

在最不利荷载工况下，钢结构的Mises应力云图如图6所示。结构整体处于受压状态，纵桥向弯曲应力基本符合平截面假定。横隔板应力水平较低，在与钢梁底板及中腹板交接附近应力稍大；底板应力在横桥方向有明显分层，离截面中心线越近，应力越大；顶板应力沿横桥向分布均匀；结构局部存在应力集中现象，应力集中区域发生在边界的风嘴折角处、腹板与底板连接处以及T形加劲肋与U肋交接处，因为应力集中引起的高应力区域范围较小，其应力水平都处于160.4 MPa以下，远小于Q370钢材的极限屈服强度，故不影响结构的总体稳定性。

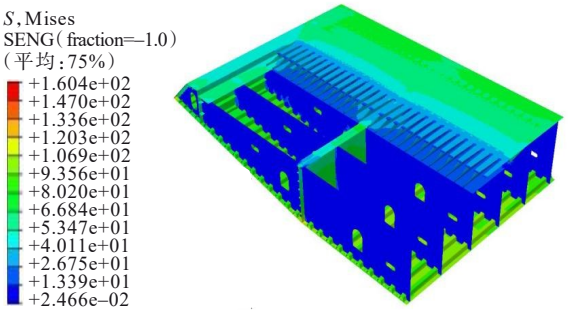

图6 钢结构整体Mise应力(单位:MPa)

Figure 6 Overall Mise stress of steel structure(unit: MPa)

图7为钢梁各部件轴向正应力沿纵桥方向的变化情况。

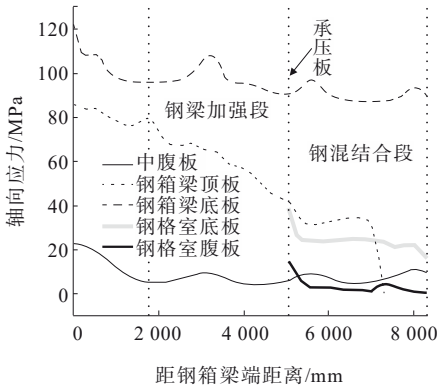

图7 钢结构纵桥向应力变化图

Figure 7 Stress variation of steel structure along longitudinal direction

由图7可知：钢梁底板及中腹板应力在纵桥向没有明显突变，总体呈降低趋势，应力变化幅度在20 MPa以内，应力传递平顺，仅在横隔板位置处略高，说明组合梁-钢箱梁结合段对底板及中腹板的传力影响较小。钢箱梁顶板加劲段的应力水平普遍低于普通钢箱梁段的应力水平，且总体呈下降趋势，说明通过设置变高T肋的方式可以有效地扩散结构应力，实现结构刚度的平顺过渡。结合段内部的钢结构与

混凝土共同受力，整体应力水平有明显下降，应力水平均在50 MPa以内。钢格室顶板、腹板、底板的应力水平在靠近承压板位置处有大幅度下降，分别下降25.6%、73.3%、35%，随后保持平顺，说明承压板在此处起到了有效的应力传递作用。

图8为承压板纵桥向应力云图。承压板整体应力分布较为均匀，处于受压状态，在与加劲U肋、钢格室底板和PBL剪力键焊接区域压应力较大，最大压应力为－28.7 MPa，在材料极限承载能力范围内。

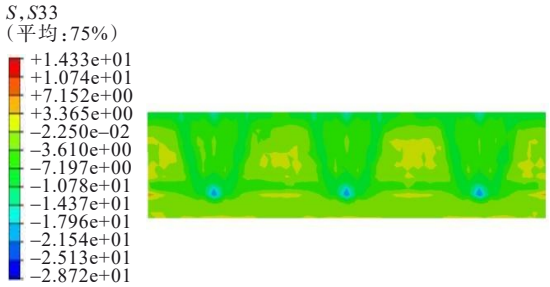

图8　承压板纵桥向应力云图（单位：MPa）

Figure 8　Stress cloud map of bearing plate along longitudinal direction (unit: MPa)

UHPC部分纵桥向应力云图如图9所示。钢混结合段内的UHPC的整体应力水平低于组合梁段UHPC的应力水平，在与钢格室顶板、PBL剪力键结合部位出现比较明显的应力集中现象，说明结合段内，钢结构与UHPC黏结可靠，共同受力性能良好。UHPC纵桥向以压应力为主，在钢格室末端位置应力最大，最大压应力为－21.5 MPa，仍处于材料极限承压范围内，不会产生开裂。

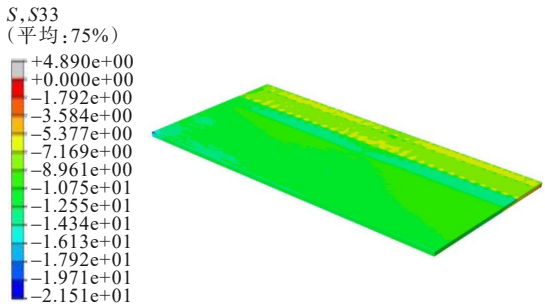

图9　UHPC纵桥向应力云图（单位：MPa）

Figure 9　Stress cloud map of UHPC bridge along longitudinal direction (unit: MPa)

综合上述分析，钢箱梁与钢-UHPC组合梁之间钢混结合段的应力过渡平顺，结构整体安全可靠，具有良好经济性和实用性。

2.5　钢混结合段子模型分析

前文钢混结合段局部模型因受计算规模的限制，对抗剪连接件的模拟进行了简化，未考虑抗剪连接件的剪切刚度和滑移，故本节建立了包含剪力钉、开孔板贯穿钢筋的结合段顶部钢格室子模型，对剪力钉的传力规律和传力比例进行分析。

钢格室子模型网格尺寸取10 mm，切割整体模型中子模型对应的边界位置，提取切割边界的计算位移值施加到子模型中，得到子模型受力情况如图10所示。

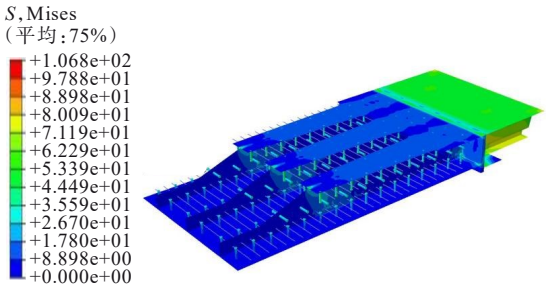

图10　钢结构Mises应力（单位：MPa）

Figure 10　Mises stress of steel structure (unit: MPa)

子模型中各部件与钢混结合段整体模型中对应部件的受力规律基本一致。剪力钉在较大程度上分担了各构件的传力比例，钢格室中剪力钉横桥向应力分布较为均匀，在中腹板位置处应力稍大。取剪力钉根部，分析纵桥向应力分布规律，结果如图11所示。

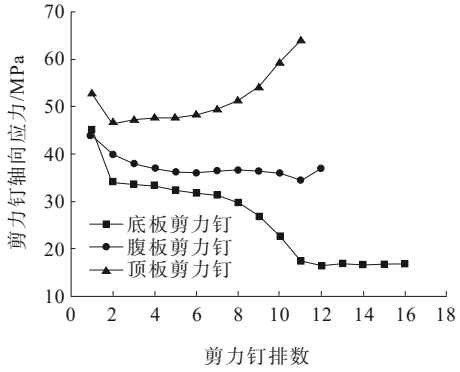

图11　剪力钉纵桥向应力变化图

Figure 11　Stress variation of shear nails along longitudinal direction

由图11可知：各部位首排剪力钉受力明显，这与文献[16]中剪力钉的受力规律一致；顶板剪力钉受力逐渐增大，在距承压板最远位置处达到峰值，这与文献[24]中所述靠近混凝土梁端的剪力钉受力最大的规律一致，说明了本模型的可靠性；腹板位置处剪

力钉整体应力水平比较均匀;底板剪力钉应力水平呈下降趋势,变化位置与顶板剪力钉对应,在顶板剪力钉退出工作后保持平稳。结合段内部剪力钉的最大应力值均小于210 MPa,满足《栓钉焊接技术规范》(CECS 226:2007)[25]的要求。

综合上述分析,钢混结合段钢格室内部顶板剪力钉传力占比高于腹板剪力钉和底板剪力钉,尤其是在格室顶板末端位置处,传力占比达剪力钉总体传力的57%,在设计过程中应重点考虑此处剪力钉的布置。

3 钢混结合段参数优化

钢混结合段内部构造复杂,两种材料弹性模量相差大,在荷载作用下,钢混结合面两侧变形量的差异是影响行车平稳的重要因素之一。确定合理的结合段尺寸及过渡段形式以平衡两种材料的弹性模量差别,实现结构应力的平顺过渡十分重要。为优化钢混结合段内部构造,在保证结构安全的同时提高材料的利用率,故建立不同几何参数的钢混结合段局部模型,分析钢混结合段内部构件的受力情况。

3.1 UHPC层厚度分析

本桥组合梁标准段中UHPC层设计厚度为170~250 mm,在钢混结合段需提高UHPC层厚度以提升结构刚度,为研究合理厚度的取值范围,本节分别取钢混结合段UHPC层厚度为250 mm、300 mm、350 mm、400 mm分析结合段的受力情况,结合段内部PBL剪力键高度随UHPC层厚度一同变化。

在最不利荷载工况下,结合段中各结构最大应力分布情况如表3所示,表中负值表示受压。

表3 UHPC层厚度变化时结合段受力

Table 3 Stress of composite section when thickness of UHPC layer changes

结合段UHPC层厚度/mm	UHPC轴向应力/MPa	承压板轴向应力/MPa	钢结构轴向应力/MPa	剪力钉轴向应力/MPa
250	−20.6	−38.8	−145.7	−104.1
300	−21.0	−33.1	−127.8	−80.2
350	−21.5	−28.7	−107.7	−64.3
400	−22.3	−29.1	−99.1	−69.6

由表3可知:UHPC层取250 mm时,结构的受力情况最为不利,钢结构最大Mises应力达145.7 MPa,最大应力位于U肋两侧与承压板交接处;剪力钉最大纵桥向应力达104.1 MPa。提高UHPC层的厚度可以有效改善结构的受力情况,UHPC层取350 mm和400 mm时,结合段内部各构件应力均有明显的下降,下降幅度相差不大,其中钢结构应力分别下降26.0%、31.6%,但过厚的UHPC层会加大剪力钉和承压板的负荷,不利于结构的受力。

综上所述,在钢箱梁与组合梁结合段需要提高混凝土层的厚度来改善结构的受力,但混凝土层不宜过厚,针对本文的工程实例,钢混结合段内UHPC层的厚度取350~400 mm可以实现材料的合理利用及结构的最优受力。

3.2 结合段长度分析

该桥钢混结合段设计长度为3 250 mm,上述分析中,钢格室内部应力水平仅在距承压板500 mm范围内出现明显波动,随后保持平稳。为研究结合段长度对结构受力的影响,同时考虑钢混结合段必要的构造长度,本节取结合段长度为2 250 mm、2 750 mm、3 250 mm、3 750 mm,分析结合段的受力情况,结合段内部PBL剪力键长度随结合段长度一同变化。

表4为最不利荷载工况下,钢混结合段各结构的应力分布情况,表中负值表示受压。

表4 结合段长度变化时结合段受力

Table 4 Stress of composite section when length of composite section changes

结合段长度/mm	UHPC轴向应力/MPa	承压板轴向应力/MPa	钢结构轴向应力/MPa	剪力钉轴向应力/MPa
2 250	−21.0	−28.9	−118.3	−64.9
2 750	−21.4	−29.0	−110.4	−63.6
3 250	−21.5	−28.7	−107.7	−64.3
3 750	−21.2	−30.2	−120.2	−61.3

由表4可知:结合段长度对UHPC层的最大压应力及承压板的最大轴向应力影响较小;随着钢混结合段长度的增加,钢结构应力呈现下降趋势,但过长的结合段长度会导致结构应力集中水平的大幅度增加,应力集中部位发生在结合段内钢格室顶板与腹板交接端部;结合段长度对剪力钉最大轴向应力的影响较小,但结合段越长,剪力钉应力过渡越均匀。

综合上述分析可知,结合段的长度主要影响钢结构应力和剪力钉的应力过渡,针对本文工程实例,结合段长度取2 750~3 250 mm可以实现结构的安全受力及刚度的合理过渡。

3.3 剪力钉直径分析

格室内的剪力钉主要起到传递顶底板的轴力及腹板和承压板的竖向剪力,同时也具有一定的抗拔

力。本桥结合段中钢格室内部剪力钉直径为22 mm，上述分析中，格室内各部位剪力钉的承载能力均满足实际要求，且有一定的安全储备，本节取剪力钉直径为18 mm、20 mm、22 mm、24 mm分析结合段的受力情况。

表5为最不利荷载工况下，钢混结合段各结构的最大应力分布情况，表中负值表示受压。

表5　剪力钉直径变化时结合段受力

Table 5　Stress of composite section when diameter of shear nails changes

剪力钉直径/mm	UHPC轴向应力/MPa	承压板轴向应力/MPa	钢结构轴向应力/MPa	剪力钉轴向应力/MPa
18	−21.4	−26.7	107.8	−92.1
20	−21.4	−27.4	107.7	−74.6
22	−21.5	−28.7	107.7	−64.3
24	−21.5	−28.5	106.8	−61.3

由表5可知：剪力钉直径的变化只对其本身的受力状态有一定影响，对结合段其他构件的应力分布影响并不大；对于剪力钉本身而言，增大剪力钉的直径有利于其本身的应力过渡，降低顶板末端剪力钉的应力，但当直径增加到一定程度以后，这种效果将会被削弱。

综合上述分析可知，结合段剪力钉直径对结合段的受力影响不大，建议在顶板末端采用大直径剪力钉，在靠近承压板位置采用小直径剪力钉以节省成本。

4　结论

本文通过建立钢箱梁与钢-UHPC组合梁结合段精细化有限元模型，分析其受力特点、传力机理及各参数对钢混结合段的影响，得到以下结论：

（1）结构整体受力性能良好，应力过渡平顺。最不利荷载工况下，钢混结合段各部件的应力最大值为160.4 MPa，远小于结构设计强度，具有充足的安全储备；在纵桥方向上，结合段对钢箱梁底板及中腹板的传力影响较小，应力从钢箱梁到组合梁方向总体呈下降趋势，变化幅度在20 MPa以内。

（2）钢格室剪力钉传力过程中，顶板剪力钉传力占比高于其他位置处的剪力钉，在距承压板最远处达到峰值，约占57%，在设计过程中应重点考虑此处剪力钉的布置。

（3）提高UHPC层厚度可以改善钢箱梁与组合梁结合段的受力性能，过厚的UHPC层会增加剪力钉和承压板的负荷，不利于结构的受力，本文工程实例取UHPC层厚度350～400 mm最佳；增加结合段长度有利于结构应力的过渡，过长的结合段会导致钢格室内部应力集中水平上升；剪力钉直径仅对其本身受力有影响，对结构整体受力影响不大。

参考文献：

References：

[1] 徐国平，张喜刚，刘玉擎，等. 混合梁斜拉桥[M]. 北京：人民交通出版社，2013.
XU Guoping, ZHANG Xigang, LIU Yuqing, et al. Hybrid girder cable-stayed bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.

[2] LIU J, LIU Y J, ZHANG Z J. Numerical simulation on thermomechanical coupling behavior of early-age concrete in the large-scale steel-concrete connecting segment of a hybrid-girder cable-stayed bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(11): 05020009.

[3] 施洲，贾文涛，宁伯伟，等. 高铁大跨度斜拉桥主梁钢混结合段力学性能研究[J]. 铁道学报，2023，45(3): 37-46.
SHI Zhou, JIA Wentao, NING Bowei, et al. Study on mechanical performance of steel-concrete composite segment of main girder of long span cable-stayed railway bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(3): 37-46.

[4] 金龙，杨永伟，邓露，等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段受力性能的有限元分析[J]. 中外公路，2019，39(2): 70-75.
JIN Long, YANG Yongwei, DENG Lu, et al. FEM analysis on mechanical behavior of steel-concrete joint section of hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 70-75.

[5] 姚亚东，杨永清，刘振标，等. 大跨度铁路钢箱梁混合斜拉桥钢混结合段模型试验研究[J]. 铁道学报，2015，37(3): 79-84.
YAO Yadong, YANG Yongqing, LIU Zhenbiao, et al. Model tests on the steel-concrete joint section of hybrid cable-stayed railway bridge with long-span steel box girder[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(3): 79-84.

[6] 黄彩萍，张仲先，陈开利. 混合梁斜拉桥钢混结合段试验与传力机理研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2012，40(1): 67-71.
HUANG Caiping, ZHANG Zhongxian, CHEN Kaili. Model test and transfer mechanism of steel-concrete composite structure for hybrid girder cable-stayed bridges[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(1): 67-71.

[7] YANG S L, PU Q H, SHI Z, et al. Mechanical behavior of steel-concrete composite joints in railway hybrid cable-stayed bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173: 106242.

[8] 陈华婷，李德旺，孙平宽，等. 自锚式悬索桥钢混结合段

受力性能试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(5): 837-846,856.
CHEN Huating, LI Dewang, SUN Pingkuan, et al. Experimental investigation on the structural behavior of the steel-concrete composite segments of self-anchored suspension bridges[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(5): 837-846,856.

[9] 李小珍, 肖林, 黄玲, 等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段静力行为[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 75-82.
LI Xiaozhen, XIAO Lin, HUANG Ling, et al. Static mechanical behavior of steel-concrete joint section of hybrid beam cable-stayed bridges[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 75-82.

[10] PU Q H, YANG S L, SHI Z, et al. Fatigue performance of an innovative steel-concrete joint in long-span railway hybrid box girder cable-stayed bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 04020129.

[11] 韦锋, 罗慧文, 梁立农, 等. 基于实桥测试的大跨度混合梁斜拉桥钢混结合段受力性能分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 54-65.
WEI Feng, LUO Huiwen, LIANG Linong, et al. Mechanical performance analysis of steel-concrete joint section of a long-span hybrid girder cable-stayed bridge based on field test[J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2021, 41(5): 54-65.

[12] 秦凤江, 周绪红, 梁博文, 等. 大跨度自锚式悬索桥主梁钢-混结合段模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 52-64.
QIN Fengjiang, ZHOU Xuhong, LIANG Bowen, et al. Experiment on steel-concrete joint of hybrid girder of a long-span self-anchored suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 52-64.

[13] 金杰, 张君琳, 李业, 等. 独塔混合梁大跨斜拉桥钢–混结合段的受力分析[J]. 公路, 2023, 68(1): 111-117.
JIN Jie, ZHANG Junlin, LI Ye, et al. Mechanical analysis of steel-concrete joint section of long-span cable-stayed bridge with single tower and mixed beam[J]. Highway, 2023, 68(1): 111-117.

[14] CHENG X, NIE X, FAN J S. Structural performance and strength prediction of steel-to-concrete box girder deck transition zone of hybrid steel-concrete cable-stayed bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11): 04016083.

[15] 林一宁, 蔡巍, 姚泽锋. 混合梁斜拉桥钢-混结合段力学性能研究[J]. 世界桥梁, 2019, 47(4): 53-57.
LIN Yining, CAI Wei, YAO Zefeng. Study of mechanical performance of steel-concrete joint section in hybrid girder cable-stayed bridge[J]. World Bridges, 2019, 47(4): 53-57.

[16] 张凯,刘永健,琚明杰,等.无格室钢–混结合段构造形式与受力性能分析[J].公路交通科技,2016,33(4):73-79,95.
ZHANG Kai, LIU Yongjian, JU Mingjie, et al. Analysis of structural types and mechanical performance in steel-concrete connections without cell[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(4): 73-79,95.

[17] 蒲黔辉, 周阳, 施洲. 铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段受力及参数分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 12-17.
PU Qianhui, ZHOU Yang, SHI Zhou. Mechanical behavior and parametric analysis of steel and concrete joint section of railway hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 12-17.

[18] 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.
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.

[19] 刘明虎. 桥梁钢–混凝土结合技术工程实践与展望[J]. 桥梁建设, 2022, 52(1): 18-25.
LIU Minghu. Practices and prospects of steel-concrete composite technology in bridge engineering[J]. Bridge Construction, 2022, 52(1): 18-25.

[20] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[21] 黄赟, 赵华, 涂磊. 钢板–UHPC组合梁抗弯性能试验及有限元分析[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 69-76.
HUANG Yun, ZHAO Hua, TU Lei. Test and finite element analysis on flexural properties of steel plate-UHPC composite beam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 69-76.

[22] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[23] 袁辉辉, 黄珍珍, 吴庆雄, 等. 大跨混合连续箱梁桥钢混结合段传力机理试验与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(7): 44-56.
YUAN Huihui, HUANG Zhenzhen, WU Qingxiong, et al. Testing and analysis on force transmission mechanism of steel-concrete joint of large-span hybrid continuous girder bridge[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(7): 44-56.

[24] 高翔, 周尚猛, 陈开利. 混合梁斜拉桥钢混结合段试验研究技术新进展[J]. 钢结构, 2015, 30(6): 1-4.
GAO Xiang, ZHOU Shangmeng, CHEN Kaili. New development of the experimental research on steel-concrete composite joint of composite beam cable-stayed bridge[J]. Steel Construction, 2015, 30(6): 1-4.

[25] 中冶集团建筑研究总院. 栓钉焊接技术规程:CECS 226:2007[S].北京:中国计划出版社,2008.
Central Research Institute of Building and Construction, MCC. Technical pecification for welding of stud: CECS 226:2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.