

基于超高性能混凝土组合桥面钢箱梁的混合梁钢与混凝土结合段受力性能仿真分析

曹方亮,陈玉宝,童汉元

(南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司,江西 南昌 330038)

摘要:对于某钢混凝土组合-混合连续箱梁桥,提出了跨中采用钢-超高性能混凝土(UHPC)组合梁、桥面板采用矮肋板的方案以减轻自重,钢-混结合段区域上表面再覆盖一层UHPC,从而形成超高性能混合梁。为重点研究钢-混结合段的受力性能,首先采用MIDAS/CIVIL桥梁专用有限元计算软件建立了连续箱梁桥的大尺度整体模型,以确定钢-混结合段的最不利受力工况及其具体的内力数值;随后采用ABAQUS建立了钢-混结合段的小尺度局部有限元模型进行精细化分析,以明确该区域钢、普通混凝土(NC)和UHPC的应力分布情况。计算表明该桥钢-混结合段的刚度能平稳过渡,钢、NC和UHPC的应力水平均较低,具有良好的安全储备,能够满足桥梁的受力要求。

关键词:连续箱梁桥;钢-混结合段;有限元分析;超高性能混凝土(UHPC)

中图分类号:U448.21+6

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)05-0085-04

0 引言

钢-混凝土混合梁由于能充分发挥钢梁自重轻、混凝土梁造价低的优势,使得跨越能力和经济性能得以提升,从而被广泛应用于桥梁工程中^[1],特别是斜拉桥和大跨度的梁桥。对于大跨度的梁桥,靠近墩顶的区域通常采用刚度大的预应力混凝土梁以降低造价,并且能避免采用钢梁时,支座处钢底板过厚的问题;跨中区域则通常采用钢梁以减轻自重,从而提高跨越能力,并且可以避免采用预应力混凝土梁时,跨中存在过度下挠的问题^[2]。但是,跨中的钢桥面系存在容易疲劳开裂和铺装层损坏这两大难题^[3]。

由于从混凝土梁过渡到钢梁存在刚度突变,容易成为结构的薄弱环节,所以钢-混结合段作为关键受弯节点应起到使刚度平稳过渡、内力分配合理的作用^[4]。国内外学者对钢-混结合段也进行了广泛的研究,主要集中在构造形式、灌注材料、受力性能以及传力机理等方面。周立兵等对斜拉桥中的4种钢-混结合段的构造形式进行了对比分析,并提出了一系列的改进措施,如采用超高性能混凝土(UHPC)作为灌浆料等^[5]。伍彦斌等基于ANSYS对

红水河特大斜拉桥的钢-混结合段的传力机理进行了有限元分析,验证了方案的可行性^[6]。霍学晋等基于ABAQUS对斜拉桥中的4种不同构造的单格室模型进行了非线性分析,研究了不同类型传力构件各自的传力比例及钢-混结合段的极限承载力^[7]。周阳等对铁路斜拉桥的钢-混结合段进行了试验研究,结果表明其具有一定的疲劳安全储备^[8]。由此可见,大部分学者均是针对斜拉桥中的钢-混结合段进行了一系列的研究,而对于大跨梁桥中钢-混结合段的研究较少。

本文以某钢混组合-混合连续箱梁桥为研究背景,为避免钢桥面系易出现疲劳开裂和铺装层损坏的难题,跨中采用了钢-UHPC组合梁来代替钢箱梁,桥面板采用矮肋板,从而形成超高性能混合梁。为重点研究钢-混结合段的受力性能,首先采用MIDAS/CIVIL桥梁专用有限元软件建立了全桥的整体计算模型,以确定钢-混结合段的最不利受力工况及其具体的内力数值;随后采用ABAQUS建立了钢-混结合段的局部有限元模型进行精细化分析,以明确该区域的应力分布情况,为该类桥梁的设计提供一定的借鉴价值。

1 工程概况

主桥为钢混凝土组合-混合连续梁桥,上部箱梁为单箱单室直腹式结构,跨径最大的是中跨(190 m),

收稿日期:2022-4-22

作者简介:曹方亮(1991—),男,工学硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

并在跨中设置 60 m 的钢-UHPC 组合梁以减轻自重,同时能避免出现疲劳开裂和铺装层损坏的问题。跨中区域采用矮肋板作为桥面板,其中桥面板的上部为 100 mm 配筋的 UHPC 平板,下部为 140 mm 厚纵肋(含 8 mm 厚钢板条)。采用 180 mm 高的栓钉连接钢板条和 UHPC,桥面板总厚度为 240 mm。

钢-混结合段的长度为 2 m,采用有格室-后承压板式构造,顶板、底板以及腹板的预应力钢筋通过张拉锚固在后承压板上,并且在格室内布置栓钉和 PBL 剪力键将纤维 C55 混凝土和钢结构进行连接,在其上现浇一层 UHPC,如图 1 所示。

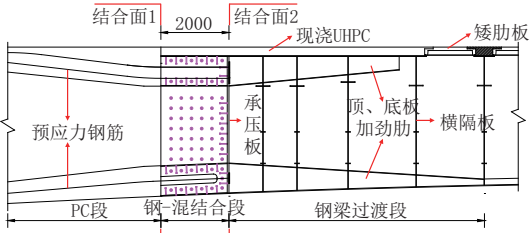


图 1 钢-混结合段纵剖面构造图(单位:mm)

2 钢-混结合段有限元模型建立

2.1 整体有限元模型

为了确定钢-混结合段的最不利受力工况及具体的内力数值,采用 MIDAS/CIVIL 桥梁专用有限元软件建立了全桥的整体计算模型,中跨有限元模型如图 2 所示。钢材、NC 和 UHPC 等材料均采用线弹性本构关系,材料的相关参数如表 1 所示。该模型中考虑了恒载、温度荷载、汽车荷载、预应力荷载、支座沉降等荷载。

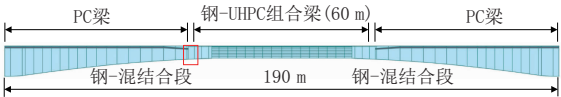


图 2 中跨的整体有限元模型

表 1 材料的相关参数

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹模 E_c / GPa	泊松比 ν	线膨胀系数 $\alpha / (^\circ\text{C}^{-1})$
钢材	7 850	206	0.3	1.2×10^{-5}
UHPC	2 650	42.6	0.2	1.0×10^{-5}
NC	2 400	35.5	0.2	1.0×10^{-5}
预应力钢束	7 850	195	0.3	1.2×10^{-5}

根据整体有限元模型的计算结果,提取了最不利作用组合下弯矩最大、剪力最大对应的作用组合效应,具体的内力值如表 2 所示。

2.2 局部有限元模型

为了揭示钢-混结合段中钢、NC 和 UHPC 的应

表 2 内力组合

序号	控制指标	剪力 /kN	弯矩 /($\text{kN} \cdot \text{m}$)
1	正弯矩最大	4 279	125 149
2	负弯矩最大	-60	-17 850
3	正剪力最大	4 869	92 777
4	负剪力最大	-1	-704

注:剪力(竖直向上为正),弯矩(底部受拉为正)。

力分布情况,采用 ABAQUS 建立了钢-混结合段的局部精细化有限元模型。根据圣维南原理及规范要求^[9],为减小边界条件对结合段受力的影响,取 PC 梁段 16.5 m、钢-混结合段 2 m、钢-UHPC 组合梁段 16 m,总长为 34.5 m。几何模型的纵剖面如图 3 所示。

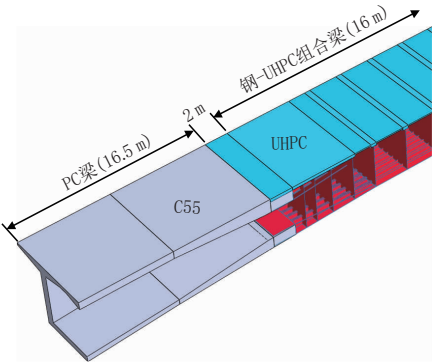


图 3 几何模型的纵剖面

所有材料同样采用线弹性本构关系,材料相关参数如表 1 所示。该模型中钢结构采用壳单元(S4R)模拟,UHPC 与 NC 结构采用实体单元(C3D8R)模拟,预应力钢筋采用桁架单元(T3D2)模拟。为了保证在使用阶段结合段的界面不存在滑移,在格室内布置了众多的栓钉和抗剪刚度大的 PBL 剪力键,并在承压板处张拉锚固预应力筋,所以结合段的界面基本无滑移;同时,结合段中剪力连接件的应力水平较低,本文重点关注的是实桥设计方案的可行性,即结合段中钢、NC 和 UHPC 的应力水平,故为方便建模,利用参考文献[1]中的建模方式,将钢-混结合段中的钢、NC 进行 Tie 连接,并且计算精度能够满足工程需求。考虑了钢-混结合段内部的预应力钢筋,偏安全地不考虑普通钢筋和 PC 梁段的预应力钢筋。预应力钢筋与混凝土结构间的相互作用采用嵌入(Embedded Region)进行模拟。局部有限元模型如图 4 所示。

由于结合段一侧混凝土箱梁的刚度较大,位移较小,同时边界条件对结合段的受力影响较小,故将该端面进行固结约束,使模型成为悬臂结构。在钢-UHPC 组合梁的端面形心处建立参考点,并与此端面进行耦合以施加从整体有限元模型中提取得到的内力组合。此外还考虑了恒载、预应力荷载、温度荷载

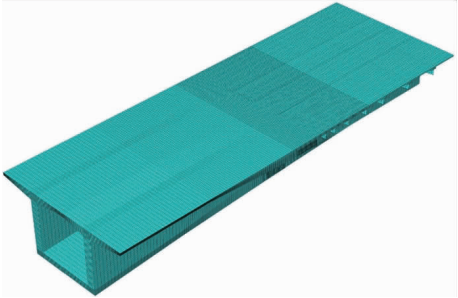


图 4 局部有限元模型

和汽车荷载等,预应力荷载通过降温法施加,并考虑 15%的预应力损失。采用弹性模量折减的方法考虑 C55 和 UHPC 的徐变,采用降温的方法考虑 C55 的收缩。由参考文献[10]中可以得知,当 UHPC 采用高温蒸养时,不考虑其后期收缩。

为研究钢-混结合段上的 UHPC 层是否存在开裂风险,取两辆车横向加载,钢梁衔接段的顶板加劲肋采用开口板肋,横桥向考虑肋间(工况 1)、肋上(工况 2)以及其中一辆车的车轮关于腹板对称(工况 3)这三种加载方式,如图 5 所示。

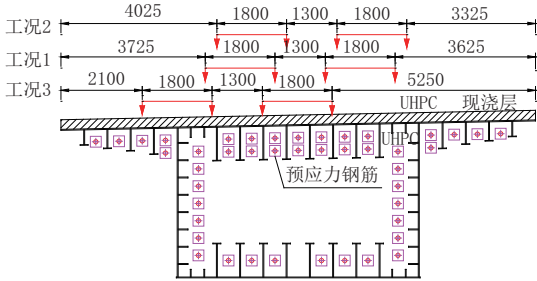


图 5 车轮荷载分布图(单位:mm)

3 钢-混结合段受力性能分析

3.1 钢结构部分的应力分析

不同内力组合下钢结构的 Mises 应力计算结果如表 3 所示。钢-混结合段中承压板、顶板、底板和预应力钢筋的最大应力分别为 168.6 MPa、119.1 MPa、134.1 MPa 和 1 469 MPa,应力水平均较低,且正弯矩最大工况(组合一)下的承压板、底板和预应力钢筋的应力最大。组合一中钢结构的 Mises 应力云图如图 6 所示。承压板由于预应力锚固导致局部出现应力集中,但所占区域很小,大部分区域的应力水平均较低。

表 3 钢结构的 Mises 应力

内力组合	Mises 应力 /MPa			
	承压板	顶板	底板	预应力钢筋
组合一	168.6	116.6	134.1	1 469
组合二	138.9	119.1	96.9	1 411
组合三	163.8	113.7	117.6	1 464
组合四	139.3	117.8	94.2	1 409

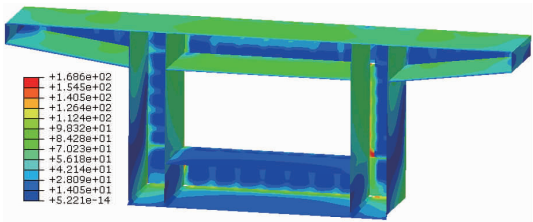


图 6 组合一中钢结构的 Mises 应力云图(单位:MPa)

3.2 混凝土部分的应力分析

混凝土的横向应力较小,不存在纵向开裂的风险,表 4 为不同内力组合下混凝土的纵向应力计算结果,图 7 为组合一中混凝土的纵向应力云图。由于顶板中布置了大量的预应力钢筋,所以最大的纵向压应力达到了 17.83 MPa。由于钢-混结合段内部构造复杂和预应力钢筋的作用,导致混凝土在边角和锚固处出现应力集中现象,最大纵向拉应力达 10.12 MPa,位于结合面 2 的位置,但所占区域很小。在最不利正弯矩工况(组合一)下,底板的压应力最小,大部分混凝土都处于受压状态,且结合段采用了掺入纤维的 C55 混凝土,不存在开裂的风险。由于顶板压应力较大,底板压应力较小,故可考虑适当减小顶板的预应力钢筋数量,增加底板的预应力钢筋数量。

表 4 混凝土的纵向应力

内力组合	纵向应力 /MPa	
	拉应力	压应力
组合一	10.12	17.83
组合二	2.43	16.81
组合三	9.17	17.44
组合四	2.16	16.86

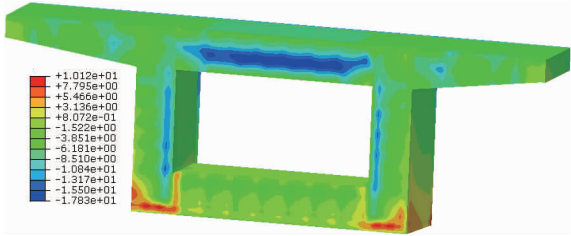


图 7 组合一中混凝土的纵向应力云图(单位:MPa)

3.3 UHPC 层的应力分析

不同内力组合下 UHPC 层的横、纵向拉应力计算结果如表 5 所示,组合一中 UHPC 层的横向拉应力云图如图 8 所示。组合一、三下 UHPC 层在纵桥向不存在拉应力,组合二、四下存在纵向拉应力,且最大值为 3.1 MPa。四种不同内力组合下的 UHPC 层的横向拉应力均为 5.3 MPa 左右,位于结合面 1 的中部区域,表明 UHPC 层的横向拉应力与施加的内力组合无关。由此可见,UHPC 层中的拉应力水平较低,不存在开裂风险,并且在钢-混结合段上布置

UHPC层,可避免布置NC层时出现开裂的现象。

表 5 UHPC 层的拉应力

内力组合	拉应力 /MPa	
	横向拉应力	纵向拉应力
组合一	5.37	-6.24
组合二	5.27	3.10
组合三	5.30	-5.47
组合四	5.29	2.38

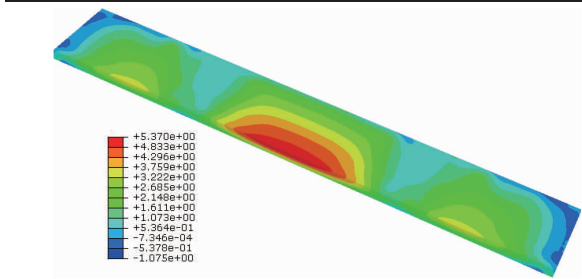


图 8 组合一中 UHPC 层的横向拉应力云图(单位:MPa)

4 结 语

(1)钢-混结合段中钢结构、混凝土和 UHPC 层的应力水平均较低,均能满足要求,不存在开裂的风险,且应力传递较顺畅,具有一定的安全储备。

(2)钢-混结合段中混凝土顶板的压应力较大,底板的压应力较小,可适当减少顶板的预应力钢筋

数量,增加底板的预应力钢筋数量。

(3)跨中采用钢-UHPC 组合梁可很好地减轻自重,且钢-混结合段上布置 UHPC 层,可避免布置 NC 层时出现开裂的现象。

参考文献:

[1] 黄细军. 超高性能混合梁钢-混结合段受力性能有限元分析[D].长沙:湖南大学,2016.

[2] 邵旭东,詹豪,雷薇,等. 超大跨径单向预应力 UHPC 连续箱梁桥概念设计与初步实验[J].土木工程学报,2013,46(8):83-89.

[3] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等. 正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25(2):40-45.

[4] 贺绍华. 混合梁斜拉桥高性能钢混结合段受力性能试验研究[D].长沙:湖南大学,2017.

[5] 周立兵,丁望星,张家元. 斜拉桥主梁钢-混结合段技术性能提升关键技术[J].桥梁建设,2019,49(2):30-35.

[6] 伍彦斌,黄方林. 红水河特大桥主梁钢-混结合段传力机理分析[J].桥梁建设,2018,48(4):56-61.

[7] 霍学晋,程曦. 钢-混结合段的极限承载力研究[J].公路交通科技,2017,34(3):52-61.

[8] 周阳,蒲黔辉,施洲,等. 铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段传力及疲劳性能试验研究[J].土木工程学报,2015,48(11):77-83.

[9] JTG/T D64-01-2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].

[10] Graybeal B. Material property characterization of ultra-high performance concrete [R]. US Department of Transportation,Federal Highway Administration; 2006.

(上接第 68 页)

[3] 徐林,徐欣,彭元诚.苏岭山大桥主桥设计与施工[J].世界桥梁,2018,46(4):6-11.

[4] 张建功,翟晓亮,冯云成.大跨连续钢桁架拱桥设计[J].中外公路,2016,36(1):153-158.

[5] 孙亮.大跨度桁架拱设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2021(4):61-64.

[6] JTG D30-2015,公路桥涵设计通用规范[S].

[7] JTG 3362-2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].