

钢-UHPC 组合桥面板构造参数研究

刘国光

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要:以某高速公路跨航道大桥为背景工程,着眼于钢-UHPC 组合桥面板参与第一体系受力的关键参数,采用有限元分析软件 ANSYS 建立全断面节段模型,重点对比钢板和 UHPC 板厚度的影响、不同加劲肋形式的影响、不同加劲肋间距的影响和箱室中部不同剪力钉间距的影响,为组合桥面板设计优化提供方向。

关键词: 组合桥面板;UHPC;加劲肋;剪力钉

中图分类号: U443.31

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)02-0206-08

0 引言

近几年,大跨径钢桥的正交异性钢桥面板疲劳病害和铺装损坏问题日渐显著,钢-薄层RPC组合桥面板、钢-薄层UHPC组合桥面板成为维修该类型桥面的主要结构形式,也促使在钢桥面上铺设UHPC铺装层得到发展^[1],成为学者研究的重点。

现在有关钢-UHPC组合桥面板的研究成果主要包括承载能力、疲劳问题、开裂问题、剪力连接件等方面的内容,组合桥面板受力体系主要为第二、三体系^[2-7],较少涉及桥面板参与第一体系整体受力分析研究。本研究着眼于钢-UHPC组合桥面板参与第一体系受力的关键参数分析,对比分析多项设计控制因素,为组合桥面板设计优化提供新思路。

1 背景工程及分析模型

某高速公路跨航道大桥采用大跨径闭口钢箱组合梁,跨径组合为(85+138+81)m,双幅布置,单幅标准桥宽 16.25 m。主梁采用闭口钢箱组合梁,钢桥面板上设置 150 mm 普通混凝土板,形成钢-普通混凝土组合桥面板。主梁支点梁高 7.15 m,跨中梁高 3.65 m,钢箱梁为单箱单室,其挑臂宽 4.375 m,箱室宽 7.5 m。桥梁总体断面布置如图 1 所示。本研究基于此背景工程,将其组合桥面板普通混凝土板改为 UHPC 板,并进行一系列研究分析。

本研究采用有限元分析软件 ANSYS 建立全断面节段模型,特征断面每侧取 3~4 个节段,确保断

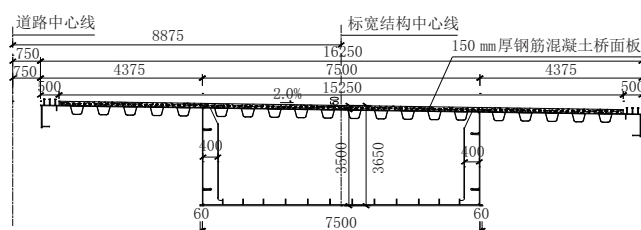


图 1 跨航道大桥标准横断面(单位:mm)

面应力分布与实际相符。考虑到断面应力分布规律与桥梁跨径相关,建模时节段两侧外接一定长度梁单元,整个模型总长度按连续梁反弯点位置,近似取 $L/2$ (L 为桥梁跨径)。模型中,梁单元采用 Beam44 模拟,局部节段箱梁的钢板采用板壳单元 shell63 模拟,UHPC 面板采用 solid65 单元模拟,剪力钉采用 combine39 双线性弹性单元模拟,钢筋采用 link8 单元模拟。模型约束按实际模拟,跨中断面分析模型约束两端梁单元的三方向位移及绕纵桥轴扭转。中支点断面约束两端梁单元三方向自由度和中支点截面竖向位移。由于研究重点是组合桥面板参与第一体系的整体受力特征,外荷载采用均布加载方式加载,即梁单元采用线荷载、板壳单元采用面荷载模式加载。跨中和支点的有限元分析模型如图 2 所示。

钢材材料特性按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)取值,UHPC 材料抗压强度取常规的 120 MPa 作为极限值,对应抗拉强度取 20 MPa,弹性模量取 41.9×10^3 MPa。

2 UHPC 板厚度变化研究

结合背景工程实例,本研究将工程实例中组合桥面板的普通混凝土层材料替换为 UHPC。采用钢板厚度分别为 12 mm、14 mm、16 mm, UHPC 板厚度分别为 50 mm、60 mm、80 mm,进行相互组合形成 9 种组

收稿日期：2023-01-11

作者简介: 刘国光(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

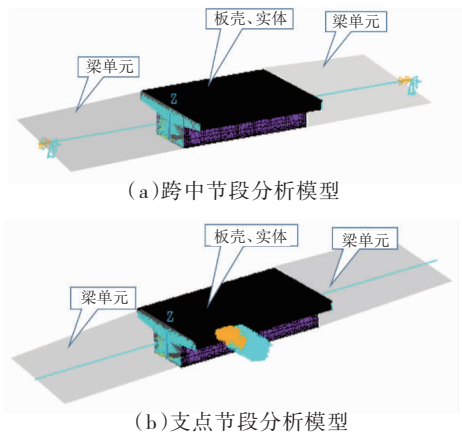


图 2 ANSYS 有限元分析模型

合桥面板,来研究钢板厚度、UHPC 板厚度变化时对组合桥面板受力的影响。

桥面板加劲肋采用 U 型纵肋,尺寸为(360×300×8)mm,加劲肋标准间距为 720 mm。UHPC 板厚度分别为 50 mm 和 80 mm 时,钢板厚 12~16 mm,组合桥面板受力特性如图 3、图 4 所示。

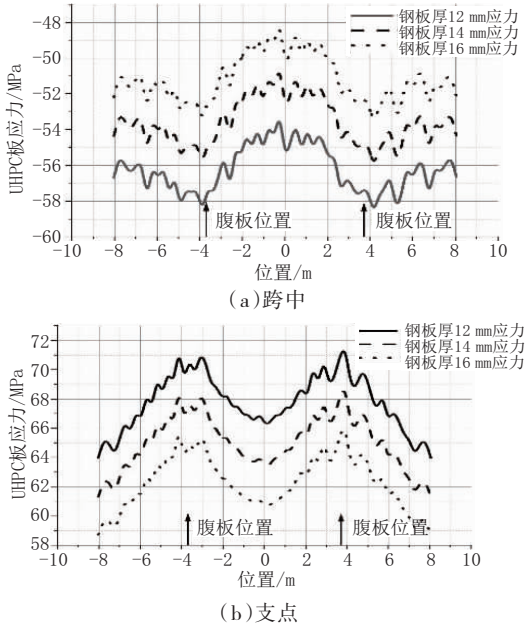


图 3 钢板厚度变化断面应力(UHPC 板厚 50 mm)

由图 3、图 4 可知,随着钢板厚度的增大,UHPC 板的应力逐渐减小。

在 UHPC 板厚 50 mm 条件下,当组合桥面板钢板厚度从 12 mm 增大到 16 mm 时,跨中区域腹板附近 UHPC 板压应力减小 9.62%,箱室中部 UHPC 板压应力减小 10.8%;而支点区域腹板附近 UHPC 板拉应力减小 8.47%,箱室中部 UHPC 板压应力减小 9.48%。

在 UHPC 板厚 80 mm 条件下,当组合桥面板钢板厚度从 12mm 增大到 16mm 时,跨中区域腹板附近 UHPC 板压应力减小 6.58%,箱室中部 UHPC 板

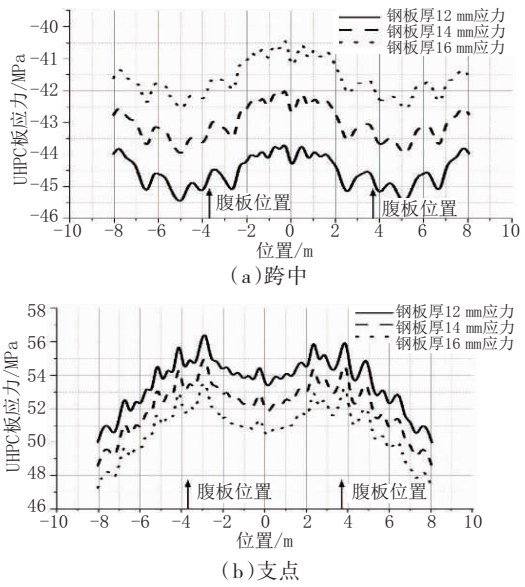


图 4 钢板厚度变化断面应力(UHPC 板厚 80 mm)

压应力减小 8.44%;而支点区域腹板附近 UHPC 板拉应力减小 5.28%,箱室中部 UHPC 板压应力减小 5.95%。

由此可知,钢桥面板板厚变化对其应力影响幅度不大,且 UHPC 板越厚,钢桥面板厚度变化对其应力的影响越小。

UHPC 板厚度变化时,组合桥面板最大挠度见表 1。

表 1 组合桥面板最大挠度变化				单位:m
钢板厚度	12 mm	14 mm	16 mm	
tt=50 mm	0.222	0.217	0.212	
tt=80 mm	0.215	0.210	0.206	
增减幅度	-3.3%	-3.3%	-2.9%	

注:tt 为 UHPC 板厚度,下同。

由表 1 可知,在钢板厚 12 mm 时,UHPC 板厚从 50 mm 变化至 80 mm,组合桥面板最大挠度减小 3.26%。在钢板厚 14 mm 时,UHPC 板厚从 50 mm 变化至 80 mm,组合桥面板最大挠度减小 3.33%。在钢板厚 16 mm 时,UHPC 板厚从 50 mm 变化至 80 mm,组合桥面板最大挠度减小 2.91%。

由此可见,在板厚 50~80 mm 范围内,UHPC 板厚增加对组合桥面板挠度的提升较为有限。

由表 2 可知,UHPC 板厚从 50 mm 变化至 80 mm,UHPC 板有效分布宽度变化不大,特别是对于支点位置;而钢板有效分布宽度有 4%左右的减小。

3 钢板厚度变化研究

桥面板加劲肋采用 U 型纵肋,尺寸为(360×300×8)mm,加劲肋标准间距为 720 mm。钢板厚度分别为

表2 不同板厚参数桥面板有效分布宽度系数对比

板厚组合	跨中有效宽度系数		支点有效宽度系数	
	钢板	UHPC板	钢板	UHPC板
ts=12 mm tt=50 mm	0.829	0.947	0.724	0.936
ts=12 mm tt=80 mm	0.796	0.969	0.698	0.933
ts=16 mm tt=50 mm	0.849	0.942	0.742	0.930
ts=16 mm tt=80 mm	0.822	0.965	0.716	0.933

注:ts为钢板厚度,下同。

12 mm和16 mm时,UHPC板厚50~80 mm,组合桥面板受力特性如图5、图6所示。

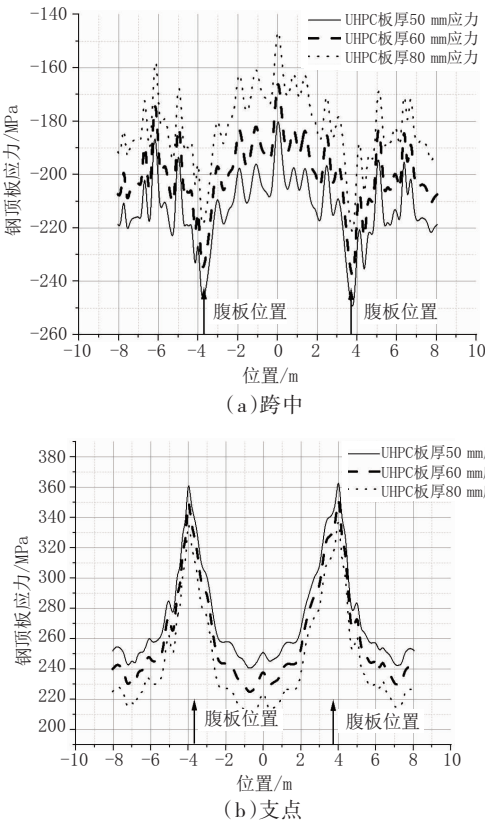


图5 UHPC板厚度变化断面应力(钢板厚12 mm)

由图5、图6可知,随着UHPC板厚度的增加,钢桥面应力均有所下降。

当钢桥面板厚12 mm时,UHPC板厚由50 mm增加至80 mm,跨中区域腹板附近钢桥面板压应力减小15.1%,箱室中部钢板压应力减小20.6%;支点区域腹板附近钢桥面板拉应力减小10.8%,箱室中部钢板拉应力减小15.9%。

当钢桥面板厚16 mm时,UHPC板厚由50 mm增加至80 mm,跨中区域腹板附近钢桥面板压应力减小15.3%,箱室中部钢板压应力减小19.3%;支点区域腹板附近钢桥面板拉应力减小11.7%,箱室中

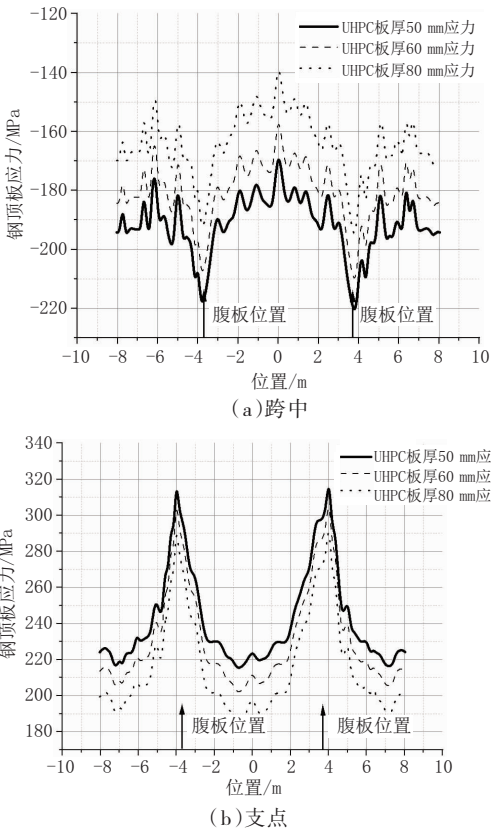


图6 UHPC板厚度变化断面应力(钢板厚16 mm)

部钢板拉应力减小16.1%。

由此可知,UHPC板厚的增加对减小组合桥面板中钢桥面板的应力较为有效,特别是对跨中区域的压应力。

钢板厚度变化时,组合桥面板最大挠度见表3。

表3 组合桥面板最大挠度变化				单位:m
UHPC板厚度	50 mm	60 mm	80 mm	
ts=12 mm	0.222	0.219	0.215	
ts=16 mm	0.212	0.210	0.206	
增减幅度	-4.7%	-4.3%	-4.4%	

当UHPC板厚50 mm时,钢板厚从12 mm增加至16 mm,挠度减小了4.72%;当UHPC板厚60 mm时,钢板厚从12 mm增加至16 mm,挠度减小了4.29%。当UHPC板厚80 mm时,钢板厚从12 mm增加至16 mm,挠度减小了4.37%。

随着UHPC桥面板的增厚,钢板厚度变化对桥面板刚度的提升越来越小。

由表4可以看出,钢板厚从12 mm变化至16 mm,UHPC板有效分布宽度变化不大,特别是对于支点位置;而钢板有效分布宽度增大2%~3%。

4 不同加劲肋形式对比研究

对于不同加劲肋形式的比选,组合桥面板采用

表 4 不同板厚参数桥面板有效分布宽度系数对比

位置	跨中有效宽度系数		支点有效宽度系数	
	钢板	UHPC 板	钢板	UHPC 板
ts=12mm tt=50mm	0.829	0.947	0.724	0.936
ts=16mm tt=50mm	0.849	0.942	0.742	0.930
ts=12mm tt=80mm	0.796	0.969	0.698	0.933
ts=16mm tt=80mm	0.822	0.965	0.716	0.933

12 mm 钢板 +50 mm UHPC 板和 16 mm 钢板 +80 mm UHPC 板厚度两种组合,钢板加劲肋采用 U 肋(尺寸为 360 mm × 300 mm × 8mm、间距 720 mm)、板肋(尺寸为 16 mm × 180 mm、间距 360 mm)和球扁钢(尺寸为 200 mm × 10 mm、间距 360 mm)三种形式,比较组合桥面板受力特性。

钢板断面应力如图 7、图 8 所示。

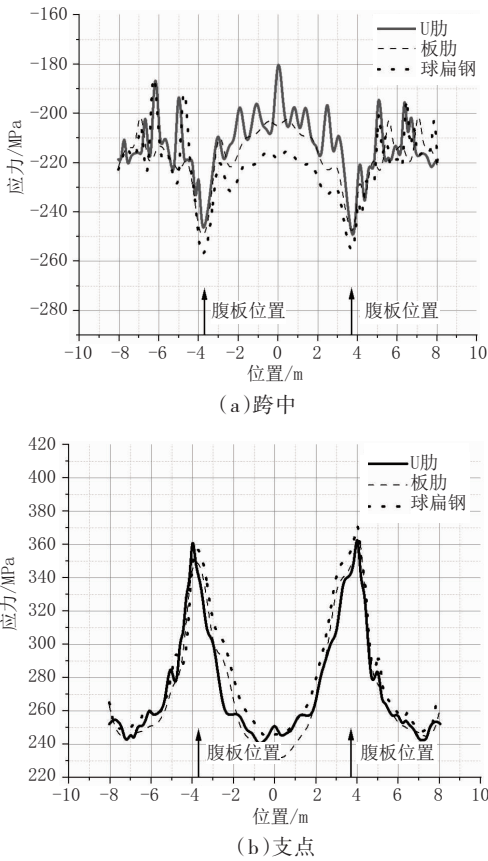


图 7 钢板断面应力(12 mm 钢板 +50 mm UHPC 板)

UHPC 板断面应力如图 9、图 10 所示。

由图 9、图 10 可知,加劲肋类型变化时,钢板和混凝土板应力变化均较小。相对而言,板肋引起的变化较大。经分析,加劲肋类型变化时,钢板和 UHPC 板的应力变化均小于 5%,表明加劲肋类型对钢-UHPC 组合桥面板受力影响较小。

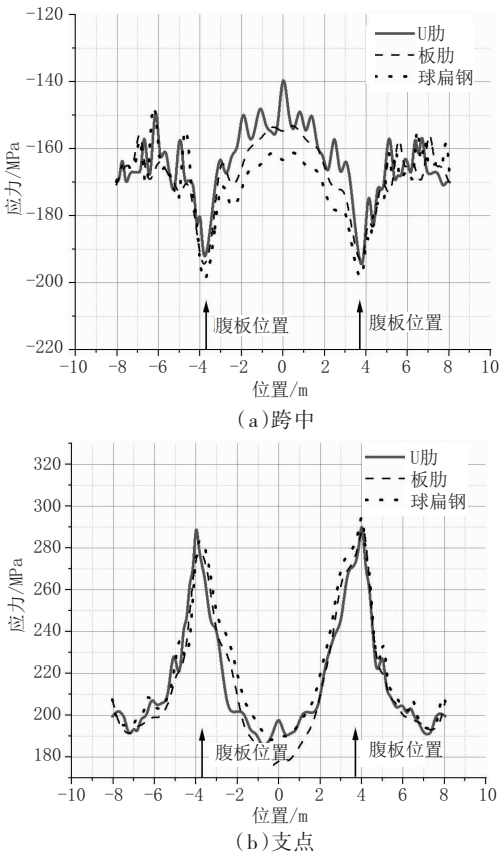


图 8 钢板断面应力(16 mm 钢板 +80 mm UHPC 板)

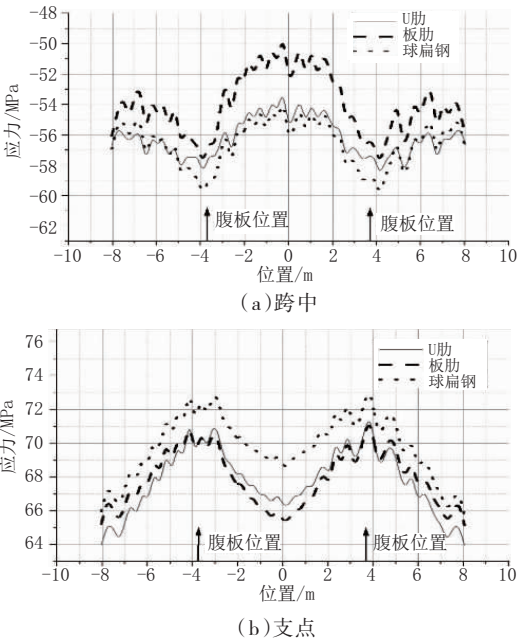


图 9 UHPC 板断面应力(12 mm 钢板 +50 mm UHPC 板)

钢板厚度变化时,组合桥面板最大挠度见表 5。

由表 5 可知,加劲肋形式对钢-UHPC 组合桥面板的刚度影响较大,U 肋和球扁钢组合板挠度变化小于 1%,而采用板肋挠度增加 9.5%。板厚变化时,规律不变。

综上所述,加劲肋形式对板件受力影响较小,截面变化小于 5%;对于组合桥面板刚度,板肋较弱,板

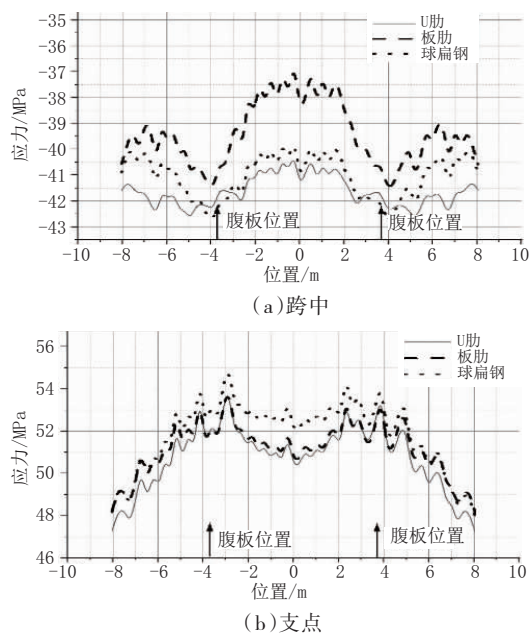


图 10 UHPC 板断面应力(16 mm 钢板 +80 mm UHPC 板)

表 5 组合桥面板最大挠度变化 单位:m

钢板加劲肋	U 肋	板肋	球扁钢
ts=12 mm, tt=50 mm	0.222	0.243	0.224
ts=16 mm, tt=80 mm	0.206	0.223	0.207
增减幅度	-7.8%	-8.4%	-8.21%

件挠度增加 9.5%。

由表 6、表 7 可以看出,不同加劲肋类型对组合桥面板的有效分布宽度有一定影响,但影响较小,变化幅度在 2%以内,且球扁钢加劲肋结果与 U 肋结果较为接近。

表 6 不同加劲肋类型桥面板有效分布宽度系数对比(跨中)

钢板加劲肋	位置	U 肋	板肋	球扁钢
ts=12 mm, tt=50 mm	钢板	0.829	0.851	0.835
	UHPC 板	0.947	0.921	0.931
ts=16 mm, tt=80 mm	钢板	0.822	0.841	0.827
	UHPC 板	0.965	0.939	0.950

表 7 不同加劲肋类型桥面板有效分布宽度系数对比(支点)

钢板加劲肋	位置	U 肋	板肋	球扁钢
ts=12 mm, tt=50 mm	钢板	0.724	0.723	0.725
	UHPC 板	0.936	0.939	0.940
ts=16 mm, tt=80 mm	钢板	0.716	0.716	0.720
	UHPC 板	0.933	0.938	0.931

5 不同加劲肋间距对比研究

对不同加劲肋间距的对比研究,本研究以 U 肋为研究对象,组合桥面板采用 12 mm 钢板 +50 mm

UHPC 板和 16 mm 钢板 +80 mm UHPC 板厚度两种组合,钢板加劲肋采用 U 肋(尺寸为 360 mm × 300 mm × 8 mm),加劲肋间距分别采用 600 mm、720 mm、840 mm,比较组合桥面板受力特性。

钢板断面应力如图 11、图 12 所示。

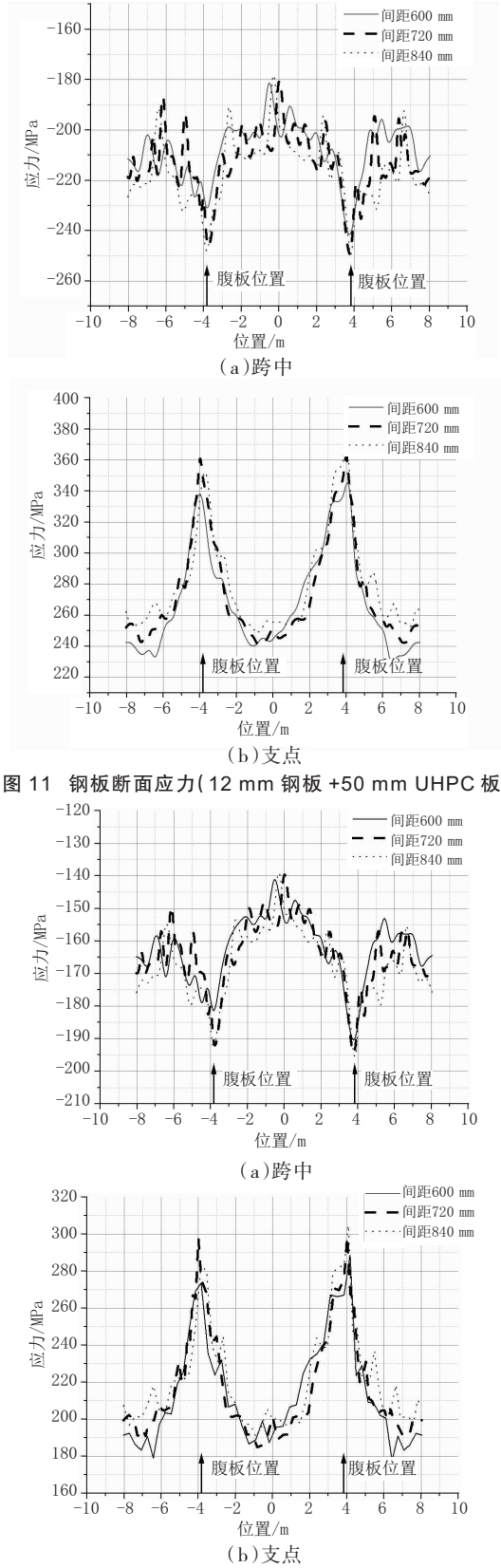


图 11 钢板断面应力(12 mm 钢板 +50 mm UHPC 板)

图 12 钢板断面应力(16 mm 钢板 +80 mm UHPC 板)

UHPC 板断面应力如图 13、图 14 所示。

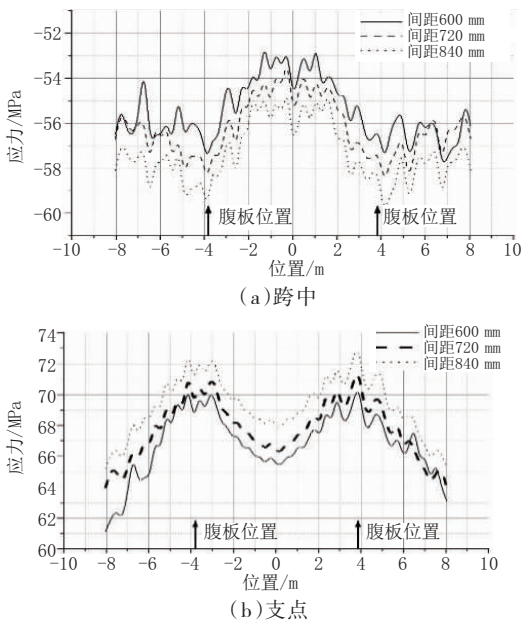


图 13 UHPC 板断面应力(12 mm 钢板 +50 mm UHPC 板)

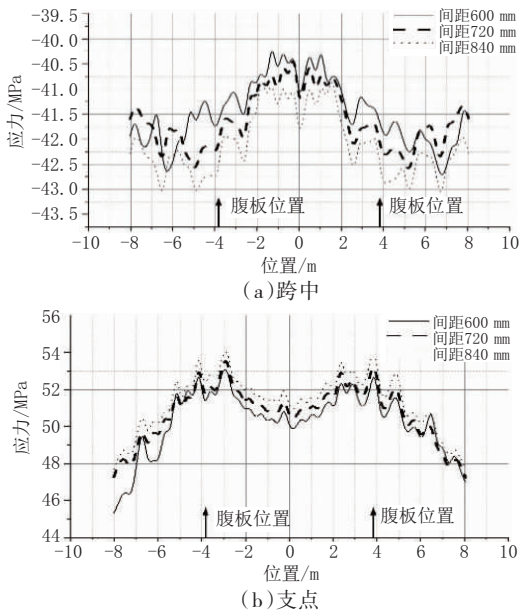


图 14 UHPC 板断面应力(12 mm 钢板 +50 mm UHPC 板)

由上图可知,U 肋间距的增大钢板和 UHPC 板的应力均增大。这是因为参与受力钢板减少,应力自然增加。此规律与板厚无关。

U 肋间距从 600 mm 增大至 840 mm, 钢板应力最大增幅为 4.11%,UHPC 板应力最大增幅为 8.47%。可见,加劲肋间距对 UHPC 板受力影响较大,最大相差 8.47%,但其影响随板厚加厚而减弱。

钢板厚度变化时,组合桥面板最大挠度见表 8。

由表 8 可知,随着 U 肋间距的增大,组合桥面板最大挠度也增大。板厚越薄,增加越多,最大为 3.66%。计算表明,U 肋增加间距时,对组合桥面板受力和刚度均影响较小。因此,设计时,可以适当放大间距。

表 8 组合桥面板最大挠度变化 单位:m

钢板加劲肋间距	600 mm	720 mm	840 mm
ts=12 mm,tt=50 mm	0.218	0.222	0.226
ts=16 mm,tt=80 mm	0.203	0.206	0.209
增减幅度	-7.39%	-7.77%	-8.13%

由表 9、表 10 可以看出,不同加劲肋间距对钢板的有效分布宽度有一定影响,但影响较小,变化幅度在 2%以内。对于 UHPC 板的有效分布宽度影响较小,可以忽略。

表 9 不同加劲肋间距桥面板有效分布宽度系数对比(跨中)

钢板加劲肋	位置	间距 600 mm	间距 720 mm	间距 840 mm
ts=12 mm,tt=50 mm	钢板	0.840	0.829	0.818
	UHPC 板	0.947	0.947	0.943
ts=16 mm,tt=80 mm	钢板	0.831	0.822	0.814
	UHPC 板	0.959	0.965	0.962

表 10 不同加劲肋间距桥面板有效分布宽度系数对比(支点)

钢板加劲肋	位置	间距 600 mm	间距 720 mm	间距 840 mm
ts=12 mm,tt=50 mm	钢板	0.742	0.724	0.726
	UHPC 板	0.934	0.936	0.936
ts=16 mm,tt=80 mm	钢板	0.734	0.716	0.720
	UHPC 板	0.930	0.933	0.932

6 不同剪力钉间距对比研究

对不同剪力钉间距的研究,着眼于箱室中部区域剪力钉的布置间距,保持腹板区域剪力钉间距为 240 mm 不变。组合桥面板采用 16 mm 钢板 +80 mm UHPC 板厚度组合,钢桥面板加劲肋采用 U 肋(尺寸为 360 mm × 300 mm × 8 mm,间距 720 mm),箱室中部区域剪力钉间距分别采用 240 mm、360 mm、480 mm 时,比较组合桥面板受力特性。

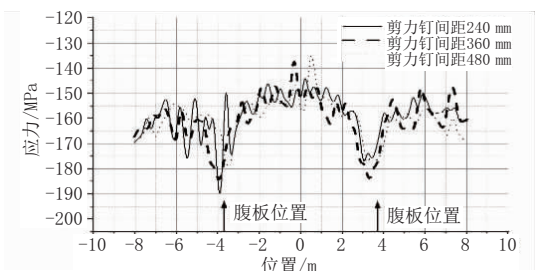
钢板断面应力如图 15 所示。

UHPC 板断面应力如图 16 所示。

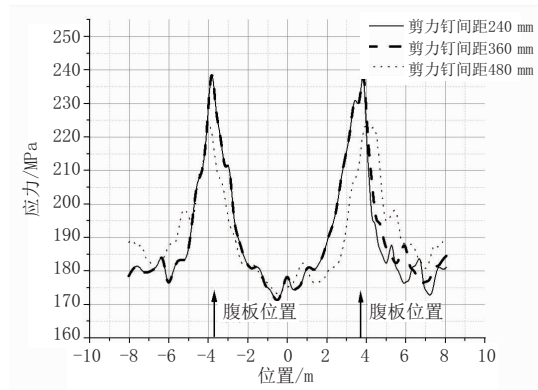
由图 15、图 16 可知,剪力钉间距的变化对于组合桥面板中钢板及 UHPC 桥面板应力状态影响均较大,主要体现在跨中区域 UHPC 板的横向应力分布变化、支点区域钢板的横向应力分布变化。

另外,根据图 15、图 16 分析可知,剪力钉间距变化时,对钢板和 UHPC 板应力峰值的影响总体上较小,剔除变异性,最大差值 4.25%。可见,剪力钉间距对结构受力影响较小。

由表 11 可以看出,不同剪力钉间距对于钢板的有效分布宽度有一定影响,剪力钉间距从 240 mm 增

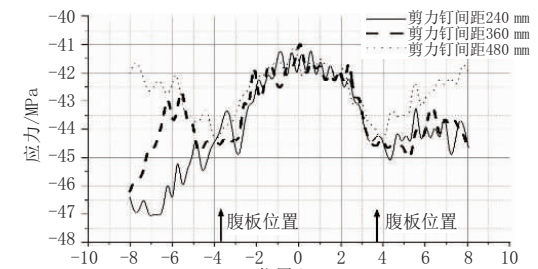


(a)跨中

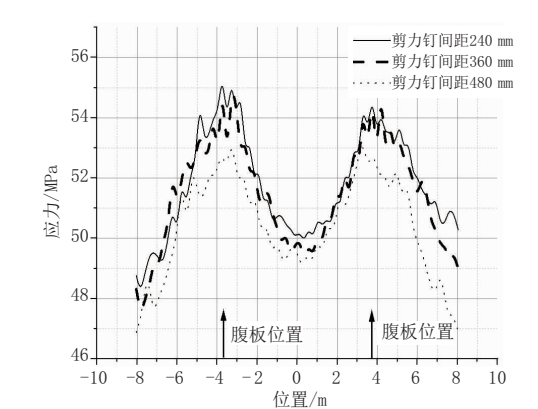


(b)支点

图 15 钢板断面应力(16 mm 钢板+80 mm UHPC 板)



(a)跨中



(b)支点

图 16 UHPC 板断面应力(16 mm 钢板+80 mm UHPC 板)

表 11 不同剪力钉间距横向分布系数对比

钢板加劲肋	位置	间距 240 mm	间距 360 mm	间距 480 mm
跨中位置	钢板	0.806	0.849	0.872
	UHPC 板	0.922	0.932	0.951
支点位置	钢板	0.761	0.767	0.842
	UHPC 板	0.923	0.921	0.935

大至 480 mm,横向分布系数最大变化幅度在 10%左右,但对于 UHPC 板的有效分布宽度影响较小,可以忽略。

各工况剪力钉受力如图 17 至图 20 所示。

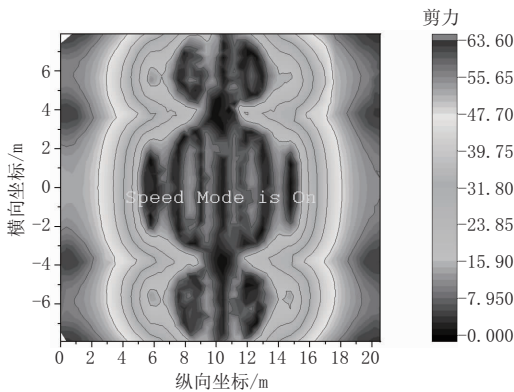


图 17 跨中剪力钉受力云图(间距 240 mm)(单位:kN)

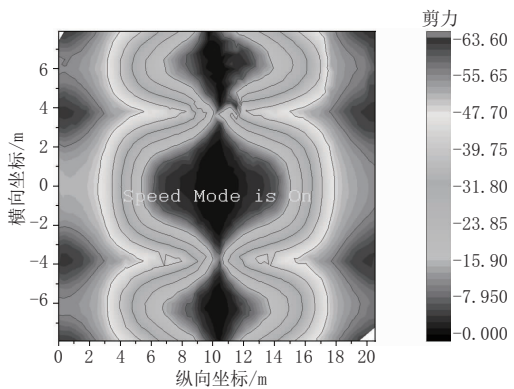


图 18 支点剪力钉受力云图(间距 240 mm)(单位:kN)

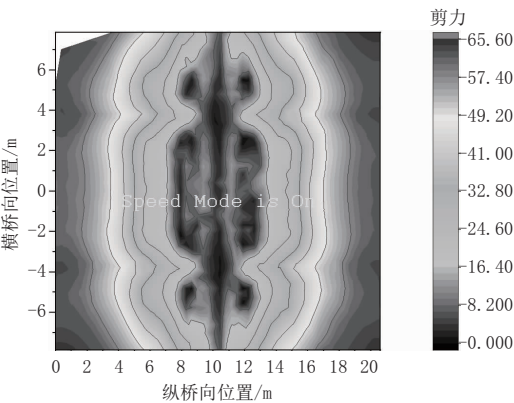


图 19 跨中剪力钉受力云图(间距 420 mm)(单位:kN)

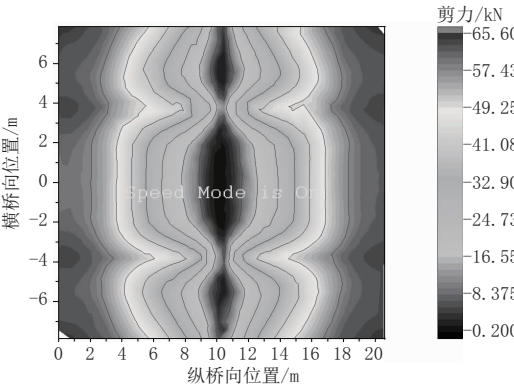


图 20 支点剪力钉受力云图(间距 420 mm)(单位:kN)

从剪力钉的受力分布来看,箱室中部区域的剪力钉间距越大,横桥向受力分布就越均匀,剪力钉发挥越充分。可见,适当加大剪力钉间距可节约材料。

7 结 语

(1)钢-混凝土组合桥面板中,钢板、混凝土板厚度变化时,钢板厚度对组合桥面板的受力和刚度影响均较小,相差 10%以内。混凝土板厚度变化时,组合桥面板受力和刚度变化略大,相差约 20%。因此,组合桥面板相对于钢箱梁可以适当减薄钢板厚度,节约钢材。

(2)钢桥面板加劲肋采用板肋时,钢板+UHPC 组合桥面板的刚度较差,且增加混凝土板厚无明显效果,而球扁钢表现出较佳性能,与 U 肋相差不大。考虑到球扁钢加劲肋施工较 U 肋方便,故类似工程设计中可将球扁钢加劲肋作为一种加劲方案比选。加劲肋类型对组合桥面板的受力影响较小。

(3)钢板加劲肋间距对组合桥面板应力分布影响较大,但对其峰值应力影响较小。U 肋间距由 600 mm 增加至 840 mm,钢板应力变化约 4%,UHPC 板应力变化约 8%。可见,加劲肋间距对主要受力板件应力影响不大,设计中可以适当增加间距。

(4)箱室间剪力钉间距变化时,组合桥面板应力

影响较小,对跨中断面变化约 4.25%,对支点断面变化约 3.63%,而且剪力钉所受剪力增加较小。故剪力钉间距可适当放大,且间距越大,剪力钉横桥向受力分布就越均匀,可以充分发挥材料性能。

(5)组合桥面板中钢板及 UHPC 板厚度变化、加劲肋类型及间距变化等对组合桥面板有效分布宽度影响较小,剪力钉间距变化对组合桥面板中钢板的有效分布宽度有一定的影响,设计中应注意。

参考文献:

- [1] 肖丽,常城,王滔,等.钢-超高性能混凝土组合桥面铺装现状[J].公路交通技术,2022,38(4): 1-5.
- [2] 邵旭东,周环宇,曹君辉.钢-薄层 RPC 组合桥面结构栓钉的抗剪性能[J].公路交通科技,2013,30(4): 34-39,64.
- [3] 曹君辉,赵宇航,邵旭东,等.钢-薄层 UHPC 轻型组合桥面结构抗弯疲劳及剩余承载力试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(11): 89-104.
- [4] 方恒.钢-超薄 UHPC 组合桥面板界面抗剪性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [5] 田启贤,高立强,周尚猛.超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面受力性能研究[J].桥梁建设,2017,47(3): 13-18.
- [6] 史占崇,苏庆田,陈亮.钢-UHPC 组合桥面板中焊接栓钉的疲劳性能及设计布置方法[J].中国公路学报,2023(6): 107-122.
- [7] 刘瑞,赵华,安家禾.钢板-UHPC 组合桥面板抗弯性能试验及有限元分析[J].铁道科学与工程学报,2023(2): 628-640.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com