

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.06.027

正交异性组合桥面构造优化

戴昌源, 邵长宇, 陈亮, 汤虎

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 正交异性组合桥面由于其较好的抗疲劳性能和静力承载能力、相对较轻的自重近年来在实际工程中得到较多应用。正交异性组合桥面通常由正交异性钢板和混凝土层组成, 在加入混凝土层后结构刚度发生较大变化, 若正交异性板仍采用传统正交异性钢桥面的构造形式将会造成不必要的钢材用量和焊接量增加。采用遗传算法, 以单位面积造价最小为目标, 结合现有规范考虑了构造约束和承载能力约束两类约束条件, 采用两种应力控制方案, 对不同桥面板跨度和混凝土厚度的正交异性组合桥面的构造进行优化。同时解决了构造改变导致荷载分配改变对承载能力分析造成的影响。优化结果表明, 桥面跨度 4.5m 时, 与未优化组合桥面相比, 优化方案用钢量可降低 1.7%~10.1%, 焊接量可降低 16.5%~31.8%。

关键词: 组合桥面; 构造优化; 遗传算法; 神经网络

中图分类号: U443.31

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)06-0110-05

0 引言

钢-混凝土组合桥面, 见图 1, 具有较高的局部刚度和承载能力, 在车轮荷载局部作用下, 正交异性钢板典型的疲劳位置的疲劳应力幅有显著下降^[1-2]。同时钢-混凝土组合桥面板的铺装耐久性相比正交异性钢桥面也有较大幅度的提升。因此钢-混凝土组合桥面板近年来开始逐步在斜拉桥、拱桥、悬索桥、梁桥等桥型中普及应用。

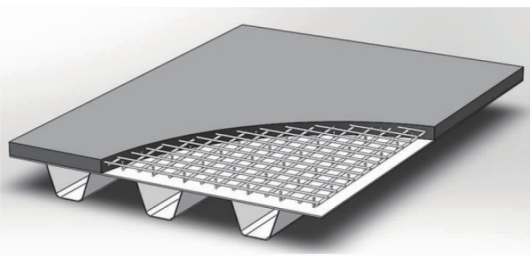


图 1 正交异性组合桥面

通常钢-混凝土组合桥面板的组成形式为在常规正交异性钢桥面板上增加一层厚度为 60~150 mm 不等的混凝土层。常规正交异性钢桥面其加劲肋一般采用 U 型肋, 各国规范依据其设计理论和设计要求对 U 肋的构造尺寸做出一定要求, 例如日本规范要求 U 肋开口宽度在 280~340 mm 之间, U 肋间距在 600~850 mm 之间, 欧洲规范要求 U 肋腹板间距小于 300 mm 等^[3]。考虑国内轮载较大的情况,

收稿日期: 2023-08-30

作者简介: 戴昌源(1990—), 男, 博士, 工程师, 从事桥梁结构设计与科研工作。

国内正交异性钢桥面多采用开口宽度 300 mm、高度 280 mm 或 300 mm, 板厚 8 mm 这一构造形式。这些要求考虑了一般车辆车轮宽度、轮迹线分布规律等对正交异性钢板的受力的影响, 对于正交异性钢板是合理的。但由于组合桥面板刚度较大, 车轮作用下的局部变形相比正交异性钢桥面显著降低, 因此上述要求对钢-混凝土组合桥面板来讲并非必要, 在组合桥面板中仍然采用正交异性钢桥面的构造形式一方面会导致材料强度难以充分发挥, 另一方面密集的加劲也会造成焊接量的提升。

一些学者着手优化钢-混凝土组合桥面板的构造, 胡苏等^[4]针对波形钢板混凝土组合桥面板考虑多种约束条件进行优化。廖贵星^[5]针对正交异性钢板-RPC 组合桥面板采用理想点构造法确定了最优截面构造参数。汤虎^[6]通过参数分析确定 U 肋间距、U 肋高度、钢板厚度、铺装弹模对经济指标和结构应力的影响, 以构件应力与用钢量的比值为指标确定了 U 肋构造参数的合理范围。程斌^[7]等对正交异性夹层钢桥面板的力学性能进行了参数分析。

每次针对单独的变量进行参数分析然后分别确定单独参数最优值的方法由于总体参数取值的不均匀性可能会造成较大的误差。同时, 正交异性钢板加劲肋构造变化, 单个加劲单元所承担的内力也会因此变化。例如, 加劲肋间距增加单个加劲肋承担的内力会增加。前述研究中往往忽略了因素的影响。

综合考虑上述问题, 本文将采用遗传算法, 选取

加劲肋高、混凝土厚度,加劲肋上口宽和下口宽作为参数,考虑结构构造参数变化对单个加劲肋单元承担荷载的影响,以单位面积造价最少为目标,对钢-混凝土组合桥面板构造进行优化。

1 优化方法

考虑到本优化问题的复杂性,这里选取了遗传算法作为优化算法。使用 python 语言基于遗传算法模块 GEATPY 编写了遗传算法程序,采用差分进化算法模板“DE/best/1/L”,算法流程如下^[8]:

- (1)初始化候选解种群,种群数量为 300;
 - (2)若满足停止条件则停止,否则继续执行,最大进化代数为 15;
 - (3)对当前种群进行统计分析,比如记录其最优个体、平均适应度等等;
 - (4)选择变异的基向量,对当前种群进行差分变异,得到变异个体,缩放因子 F 取 0.5;
 - (5)将当前种群和变异个体合并,采用置换重组(交叉)方法得到试验种群,交叉概率取 0.7;
 - (6)在当前种群和实验种群之间采用一对一生存者选择方法(即大奖赛选择算法取 $m=2$)得到新一代种群;
 - (7)回到第 2 步。
- 算法流程见图 2。

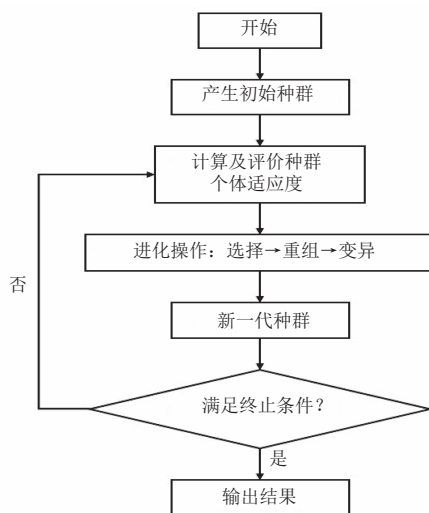


图2 遗传算法流程图

2 优化参数

确定钢-混凝土组合桥面板构造的参数主要有:混凝土板厚 C 、钢顶板厚度 t_s 、加劲肋高 h_s 、加劲肋开口宽度 A 、加劲肋翼缘宽度 B 、加劲肋板厚 t_w 、加劲肋间距等 W ,见图 3。

其中,钢顶板由于在桥面板断面中性轴位置处,

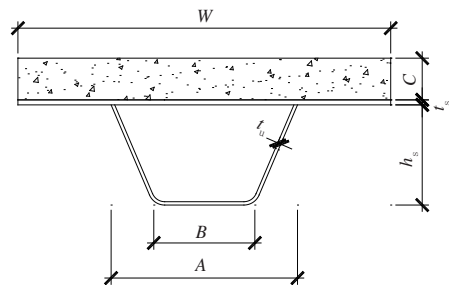


图3 组合桥面构造参数

对桥面第二体系受力贡献不大,其厚度主要由第一体系受力决定,对于组合桥面板一般取 12 mm。加劲肋间距 W 这里取为加劲肋开口宽度 A 的两倍。对于加劲肋板厚,取为三个固定值,分别为 6 mm、8 mm 和 10 mm。

对于混凝土板厚 C ,由于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[9]和《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310—2019)^[10]对保护层厚度有细致的规定。因此混凝土板厚宜依据保护层厚度要求、纵、横向钢筋直径综合确定,这里取 110 mm、120 mm、130 mm、140 mm、150 mm 五个固定值。

除上述取固定值或可通过其他参数推算的参数外,剩余可自由取值的参数有:加劲肋高 h_s 、加劲肋上口宽 A 和加劲肋下口宽 B ,将此三个参数作为优化参数。

3 承载能力约束条件

承载能力约束条件主要考虑最不利单个 U 肋的承载能力大于其承担的荷载设计值。

其中最不利单个 U 肋的承担的荷载设计值方面,可以采用有限元方式。板壳实体模型较为精确的模拟桥面板在车轮荷载作用下的受力状态,但板壳实体模型建模、求解及后处理的流程较为繁琐。采用梁格杆系模型模拟正交异性板具有较好的效果^[11-12],其建模求解成本相比板壳实体模型大大降低,但若全部优化过程中每个个体均采用梁格模型计算,求解代价十分高昂(共需计算 157 500 个个体)。为了降低优化分析过程中的计算量,提高分析效率,在优化过程中采用 BP 神经网络模型代替有限元计算。具体操作方法为:首先采用 4 因素 9 水平的正交试验表确定了 84 组有限元分析样本,对分析样本建立梁格模型进行计算,此后采用 BP 神经网络学习计算结果,得到可快速预测任意构造组合桥面内力分配的模式。

U肋承载能力设计值方面,计算中考虑了板件的剪力滞和局部稳定折减,折减系数按照《公路钢结构桥梁设计规范计算》^[13],折减后断面见图4。同时取下述两种应力控制方案:应力限值方案1:对3.5 m跨、上口宽300 mm、间距600 mm、高300 mm、下口宽170 mm的正交异性桥面在《城市桥梁设计规范》^[14]中重车车辆荷载作用下的应力进行计算,应力取基本组合,取其跨中正弯矩区U肋下缘拉应力(150 MPa)的50%作为组合桥面对应位置的应力限值,即75 MPa。取其负弯矩区U肋下缘压应力(-130 MPa)的50%作为组合桥面对应位置的应力限值,即-65 MPa。对于组合桥面顶板混凝土的应力限值做如下取值:将正交异性钢桥面跨中正弯矩区钢顶板上缘拉应力(-95 MPa)依据钢与混凝土弹模比(混凝土强度按照C60取5.7)换算为混凝土应力再取50%,即-8.3 MPa,作为正弯矩区混凝土压应力限值。对于负弯矩区假定混凝土的极限拉应变为 $1\ 500\ \mu\epsilon$,则在第二体系下拉应变限值定为 $500\ \mu\epsilon$ 。应力限值方案2:在应力限值方案1的基础上对正弯矩区下缘的拉应力限值放宽至95 MPa,上缘混凝土压应力限值按比例放宽至10.5 MPa。负弯矩区上下缘应变应力限值保持不变。

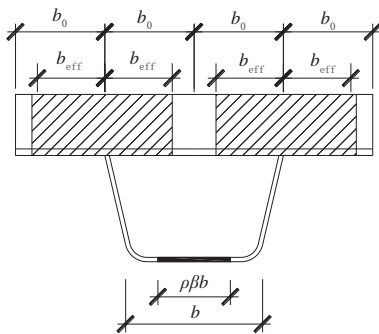


图4 折减后断面

4 构造约束条件

构造优化条件主要考虑板件的宽厚比以及加劲肋腹板倾角。

对于受压加劲板,为了避免局部屈曲发生于材料屈服之前,使材料强度不能充分发挥,对板件的宽厚比做出了限制。《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD64—2015)^[13]规定采用Q345等级钢材时U型加劲肋翼缘的宽厚比应小于30,腹板宽厚比应小于40。同时为了避免出现难以实现或者不合理的取值,对加劲肋高 h_s 、加劲肋上口宽 A 和加劲肋下口宽 B 三个参数的取值范围进行约束。加劲肋高范围为100~400 mm,U肋下口宽为50~300 mm,U肋上口宽为200~500 mm。

对于腹板倾角,日本道路工团倒梯形纵肋标准设计中给出的两种典型构造其U肋腹板倾斜度均为4.5:1。我国典型的上口宽300 mm、高280 mm、下口宽170 mm的U肋腹板倾斜度为4.3:1,当肋高为300 mm时腹板倾斜度为4.6:1。齐鲁黄河大桥钢-混凝土组合桥面板所采用新型U肋腹板倾斜度为5:1。综合考虑上述U型加劲肋构造,本文将加劲肋腹板倾斜度限制在4.3:1~5:1范围内。

5 优化目标

优化目标的选取直接关系到优化结果。此前对正交异性组合桥面或正交异性钢板的优化中有以截面积与抗弯承载能力比值^[4]、构件典型应力与用钢量的比值^[6]、关注部位疲劳应力幅值^[15-16]等为目标函数。这里以桥面板单位面积造价为目标函数进行优化,此造价除包含材料费用外还包括措施费。钢材的材料单价取为1.5万元/t,混凝土材料单价取为0.42万元/m³。因此桥面板每平方米造价的计算公式如式,单位为万元:

$$y = (A_s \cdot \gamma_s / g \cdot 1.5 + C \cdot W \cdot 0.42) / W \quad (1)$$

式中: A_s 为钢结构截面积,m²; γ_s 为钢材容重,取78.5 kN/m³; g 为重力加速度,取9.8 m/s²; C 为混凝土厚度,m; W 为加劲肋间距,m。

6 优化结果

得到相应情况下的最优组合桥面构造后对优化算法的到的直接结果向上取5的整倍数作为最终的优化结果。

优化过程中仅考虑了桥面板本身的用钢量最小,由于桥面板构造亦会影响到横隔板钢材用量,因此采用桥面板与横隔板用钢量之和作为综合用钢量来考虑结构的材料用量,这里横隔板用钢量按照3.5 m跨度、40 m宽度时102.9 kg/m²计,其他情况按比例换算。美国正交异性钢桥面设计手册^[17]中建议在保证桥面板内应力满足要求的前提下尽可能的增加桥面板跨度,在缆索承重结构中,桥面板跨度还需要与缆索在主梁上的锚固间距相配合,满足结构整体的受力需要,因此这里桥面跨度作为一个自由变化的参数。闭口加劲肋通常是冷弯成型,其厚度不宜太厚,此外无其他制约因素,这里将其作为一个从属参数,依据最优综合用钢量选取加劲肋板厚。

将两种应力限值方案下不同桥面跨度时,综合用钢量随混凝土厚度的变化规律绘制于图5和图6,

可以看出,一般的规律为:在相同的跨径下,混凝土厚度越厚、加劲肋厚度越小,综合用钢量越小。

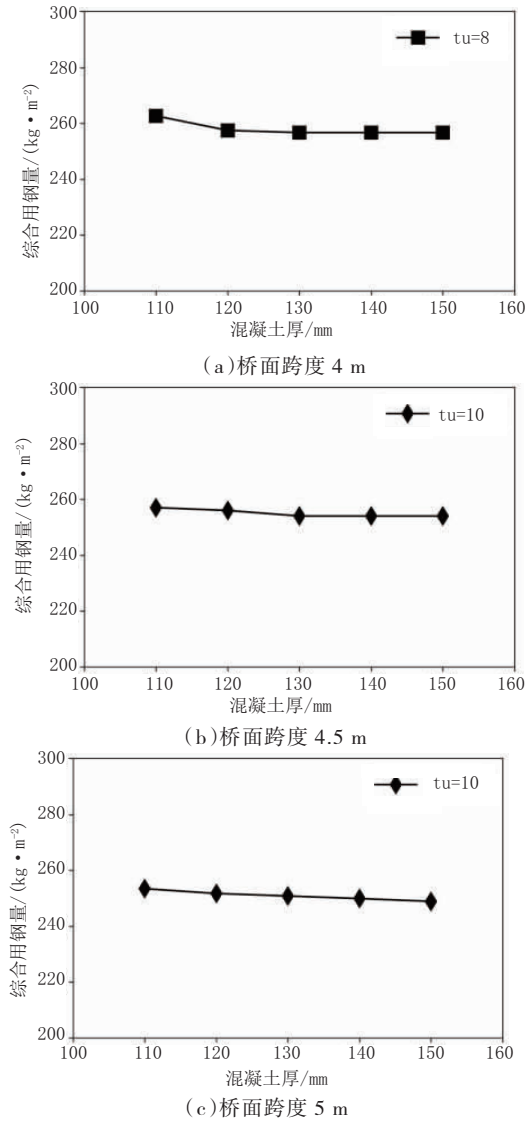


图5 应力控制方案1综合用钢量随混凝土厚度变化规律

最后通过对综合用钢量的分析,取相同条件下综合用钢量最小的构造形式,确定了在不同混凝土板厚和桥面跨度条件下的推荐组合桥面构造,见表1和表2。

从优化结果可以看出,U肋的下口宽度倾向于取到宽厚比要求的最大值,而上口宽度(U肋间距的一半)则根据倾角限制和承载能力需求优化确定,总体倾向于取大值。混凝土厚度增加则可适当降低U肋高度,节省用钢量。当桥面板跨度增加时采用增加U肋高度,放宽U肋间距的方式是较为合适的做法。

当桥面板跨度为4.5m时,若完全采用正交异性钢桥面的常用构造形式,即U肋上口宽300mm,下口宽170mm,肋高300mm,板厚8mm,混凝土厚120mm(钢面板厚度统一取12mm),桥面板每平方米用钢量为179 kg/m²。采用应力控制方案1优化

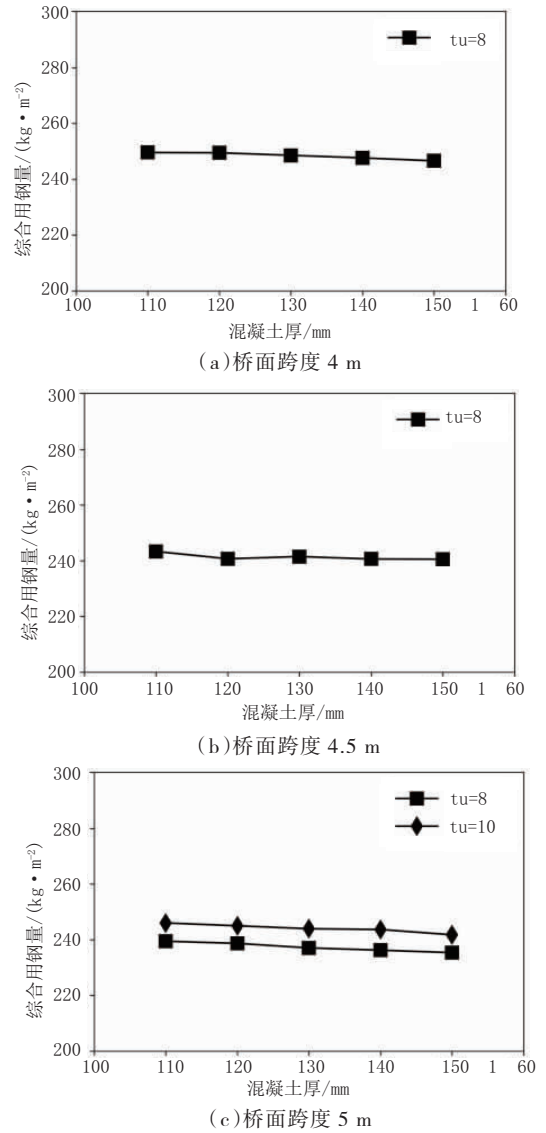


图6 应力控制方案2综合用钢量随混凝土厚度变化规律

表1 应力控制方案1推荐构造

桥面跨度/mm	混凝土板厚/mm	加劲肋厚/mm	U肋高/mm	U肋下口宽/mm	U肋上口宽/mm
4 000	120	8	310	240	395
	140	8	300	240	390
	150	8	300	240	390
4 500	120	10	280	300	440
	140	10	260	300	430
	150	10	260	300	430
5 000	120	10	320	300	460
	140	10	300	300	450
	150	10	285	300	440

后对应构造为上口宽440mm,下口宽300mm,肋高280mm,板厚10mm,桥面板每平方米用钢量为176 kg/m²。用钢量降低1.7%,二者相差不大,但焊接量降低31.8%。采用应力控制方案2优化后对应构造为上口宽360mm,下口宽240mm,肋高235mm,

表2 应力控制方案2推荐构造

桥面跨度 /mm	混凝土板厚 /mm	加劲肋厚 /mm	U肋高 /mm	U肋下口宽 /mm	U肋上口宽 /mm
4 000	120	8	210	240	340
	140	8	200	240	340
	150	8	190	240	335
4 500	120	8	235	240	360
	140	8	230	240	355
	150	8	225	240	350
5 000	120	8	300	240	390
	140	8	275	240	380
	150	8	260	240	370

板厚 8 mm,桥面板每平方米用钢量为 161 kg/m²。用钢量降低 10.1%,焊接量降低 16.5%。

7 结 论

本文采用遗传算法对正交异性组合桥面的构造进行了优化,结合现有规范考虑了构造约束与承载能力约束两类约束条件,解决了优化问题中构造改变其分配荷载随之改变的非线性约束问题,得到主要结论如下。

(1)遗传算法可以很好的解决复杂约束条件下的优化问题,同时结合 bp 神经网络可大幅降低优化求解过程中的计算复杂度,加快求解速度。

(2)考虑了横隔板用钢量后对各种优化方案的综合用钢量进行对比,在相同跨度时,综合用钢量随混凝土厚度的增加而减小,U肋厚度降低时用钢量亦降低。在综合用钢量最小的条件下,优化得到了不同跨度和混凝土厚度下的最优正交异性组合桥面构造。

(3)优化得到的最优构造表明,U肋下口宽均取到了宽厚比要求的最大值,上口宽度(U肋间距的一半)则根据倾角限制和承载能力需求优化确定,桥面板跨度增加时,U肋高度增加,U肋间距适当增加,取

较厚混凝土板时,U肋高度可适当降低,减少用钢量。

(4)与桥面跨度 4.5 m,钢结构构造采用传统正交异性钢桥面板构造的未优化组合桥面相比,采用应力控制方案 1 时,优化方案用钢量可降低 1.7%,焊接量降低 31.8%,采用应力控制方案 2 时,优化方案用钢量可降低 10.1%,焊接量降低 16.5%。

参考文献:

- [1] 曹君辉.钢-薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [2] 裴必达.钢-UHPC 轻型组合结构构造细节疲劳评估与优化研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [3] 赵秋,张骏超,林楚,等.混合钢 U 肋加劲板受压整体稳定承载力数值模拟与计算方法[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):45-54.
- [4] 胡苏,苏庆田,吴冲.正交异性钢-混凝土组合桥面板截面优化研究[J].结构工程师,2015(2):131-137.
- [5] 廖贵星.新型波形顶板正交异性钢板——RPC 组合桥面板疲劳性能研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [6] 汤虎.索承式组合结构桥梁结构体系与设计方法研究[R].上海:同济大学,2016.
- [7] 程斌,孙斌,肖汝诚,等.正交异性夹层钢桥面板力学性能分析与截面优化[J].世界桥梁,2021,49(3):84-90.
- [8] Jazbin.geatpy: The genetic and evolutionary algorithm toolbox with high performance in python [EB/OL]. (2020)[2023-09-01]. <http://www.geatpy.com/>
- [9] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [10] JTG/T 3310—2019,公路工程混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [11] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [12] E. C. 汉勃利.桥梁上部构造性能[M].北京:人民交通出版社,1982.
- [13] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [14] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].
- [15] 庄美玲,缪长青.基于疲劳性能的正交异性钢桥面板构造参数优化分析[J].东南大学学报(自然科学版),2019,48(5):843-850.
- [16] 鞠晓臣,曾志斌,方兴,等.正交异性钢桥面板 U 形肋与横隔板连接处弧形缺口几何参数优化研究[J].钢结构,2016,31(215):19-25.
- [17] FHWA-IF-12-027, Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridges[S].

《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