

钢-UHPC 组合梁桥面板静承载能力比较分析

冯 峥, 李传习, 邓 帅, 吴善友, 雷智杰

(长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为解决传统钢-混组合梁由于混凝土板本身缺陷所引起的桥面板开裂问题, 提出一种性价较优的钢-UHPC 组合梁桥面板截面形式, 以某桥为工程背景设计了 4 种桥面板方案, 即矮胖型带肋板方案、瘦高型带肋板方案、矩形平板方案、华夫板方案, 利用 ABAQUS 进行了桥面板影响线及静承载能力分析, 得到了以下结论: (1) 桥面板轮载应力影响范围是局部的, 纵桥向作用于两相邻横隔板之外的荷载对该两横隔板间跨中桥面板各点的应力几乎无贡献, 横桥向作用于距某板肋超过横隔板间距的荷载对该板肋及其附近面板的应力几乎无贡献, 而纵隔板上部的板肋荷载横向影响范围较广, 约为 2 倍横隔板间距; (2) 各方案桥面板主拉应力值较大区域集中在跨中肋(面)板下底缘以及与纵隔板相接处的面板顶缘; (3) 桥面板截面型式对自身的抗弯承载能力影响较大, 瘦高型带肋板方案具有较优的综合性能。

关键词: 桥梁工程; 带肋桥面板; 静力性能; 静承载能力分析; 钢-UHPC 组合梁桥

中图分类号: U443.32

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0551-08

Comparative analysis of static bearing capacity on bridge deck in Steel-UHPC composite beams

FENG Zheng, LI Chuanxi, DENG Shuai, WU Shanyou, LEI Zhijie

(Key Laboratory of Safety Control for Bridge Engineering of the Ministry of Education,
Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to solve the problem with the bridge deck cracking caused by the concrete plate defects itself in the traditional steel-concrete composite beam and to find a cost-effective steel-UHPC composite beam bridge deck section, four kinds of bridge deck scheme were designed with a bridge as the engineering background, namely pyknic-type rib scheme, lanky-type rib scheme, rectangular plate scheme and waffle slab scheme, respectively. The influence line and static bearing capacity of bridge deck was analysed by ABAQUS, and the conclusions are as follows: (1) The stress influence range in bridge deck under the action of vehicles is local. In the longitudinal direction, the load away from two adjacent diaphragms makes almost no contribution to the bridge deck stress in the middle of the two diaphragms. In the transverse direction, the load away from the diaphragm spacing makes almost no contribution to the rib and its adjacent panel normal stress, but the transverse load influence range of the panel there is onto longitudinal clashboard is wide, about twice the spacing of diaphragm. (2) The large tensile stress area in projects is concentrated upon the bottom of the rib (panel) plate and the upper plate onto the longitudinal clashboard. (3) The bridge deck cross-section has a great influence on its flexural capacity, and the lanky-type rib scheme has a better comprehensive performance.

Key words: bridge engineering; ribbed bridge panel; static performance; analysis of static bearing capacity; steel-UHPC composite beam bridge

钢-混组合梁桥面板由于混凝土材料抗拉强度低、脆性大、收缩徐变明显等缺点, 桥面板在外荷载及约束荷载作用下易开裂。常规构造措施, 如加大桥面板厚度、增加配筋率、配置预应力筋等^[1-2], 不能从根本上解决问题反而增加了主梁自重。随着交通荷载流量的持续增长、日趋增长的

环境保护压力以及大跨度桥梁的高速发展, 要求现代混凝土材料需具备高强度、高韧性和高耐久性等力学特性^[3], 一种添加了钢纤维的超高性能混凝土(UHPC, 抗压强度在 150 MPa 以上, 具有超高韧性、超长耐久性的水泥基复合材料)材料得到了世界范围内的广泛关注和认可^[4-8], 并已成功应

收稿日期: 2018-07-28

修改稿日期: 2019-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(51778069); 桥梁工程领域省部级重点实验室开放基金(18KE04); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B522)

第一作者: 冯 峥(1992—), 男, 博士生, 主要从事 UHPC 桥梁结构研究。E-mail: fzlluf@163.com

用于实际工程且形成了相关的设计规范^[8-12]。

为了减轻钢-混组合结构桥面板的自重以及减小桥面板负弯矩区的混凝土受拉易开裂等问题,文献[13-14]通过实验及有限元计算研究了一种适用于大跨度桥梁的钢-UHPC 轻型组合桥梁结构,通过将钢梁与 UHPC 矮肋华夫板用剪力钉连接成整体,共同受力,该结构大大减轻了主梁的自重,拓宽了钢-混组合梁的使用范围,但该结构构造复杂,耗材较大。考虑到 UHPC 单价过于昂贵,应该在保证其承载能力的基础上尽可能使结构构造简单。文献[15]利用有限元比较分析了钢-UHPC 组合梁桥面板上下缘的轮载应力情况,发现带纵(横)肋桥面板方案纵肋下缘纵向拉应力较等厚板方案增大约 25%,但文章中各方案桥面板的横截面积(即材料用量)并未保持一致,且该文对关注部位表述过于宽泛,未给出桥面板关键受力部位的相关应力值,文章根据影响线进行加载但未见有关应力影响线的必要表述。文献[16]针对某 UHPC 连续箱梁(桥宽 18 m)利用有限元及静力试验研究了不同截面形式桥面板的受力性能,主要关注了横隔板、湿接缝以及桥面板跨中三个部位的应力情况,得出了矮肋截面桥面板性能较优的结论,该矮肋桥面板箱梁通过在相邻横隔板之间设置横肋来减小桥面板弹性支撑间距。

本文在已有研究成果的基础上,以广东省某待建实桥为工程背景,在保证横截面面积基本一致的情况下,设计了不同截面尺寸的带肋桥面板方案、矩形平板方案、华夫板方案,利用 ABAQUS 建立标准节段有限元模型,分析各方案

关键受力部位的静承载能力情况,从中找到一种既承载能力高又经济的桥面板方案。

1 工程背景

1.1 钢-UHPC 组合梁结构形式

广东省某钢-UHPC 组合梁桥 UHPC 带肋桥面板的标准构元(由面板和板肋组成)如图 1 所示,钢槽梁主体结构采用 Q345qD(弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3)钢材,桥面板采用弹性模量为 45 GPa,泊松比为 0.2,重度为 28 kN/m³的 UHPC;标准梁段高 3.5 m,总宽 41.0 m,顶板宽 38.6 m,底板宽 24.8 m;钢槽梁底板厚 12 mm,斜底板厚 16 mm,纵隔板厚 14 mm;横隔板板厚 12 mm,间距为 3.5 m;底板、斜底板纵向采用 U 形加劲肋;纵、横隔板顶部的桥面板厚度与全桥最厚处板肋一致,横隔板顶部板肋沿纵桥向宽度为 40 cm,纵隔板顶部板肋沿横桥向宽度为 100 cm,并均沿 45 度坡度过渡到标准带肋断面;钢槽梁在纵、横隔板顶部均焊接 8 mm 厚条形钢板,其宽度根据其相连的 UHPC 板肋宽而定;通过在条形钢板上焊接剪力钉与 UHPC 桥面板紧密结合,协调受力。

1.2 UHPC 桥面板截面合理参数选取

根据 UHPC 桥面板的标准构元截面尺寸(表 1)不同设计了 4 种桥面板方案(为便于比较分析,各方案桥面板截面面积保持基本一致),其中方案 1 为矮胖型带肋板方案(板肋高宽比小于 0.6,其宽度指的是梯形肋的平均宽度)、方案 2 为瘦高型带肋板方案(板肋高宽比在 0.6~1.5 之间)、方案 3 为矩形平板方案、方案 4 为华夫板方案。

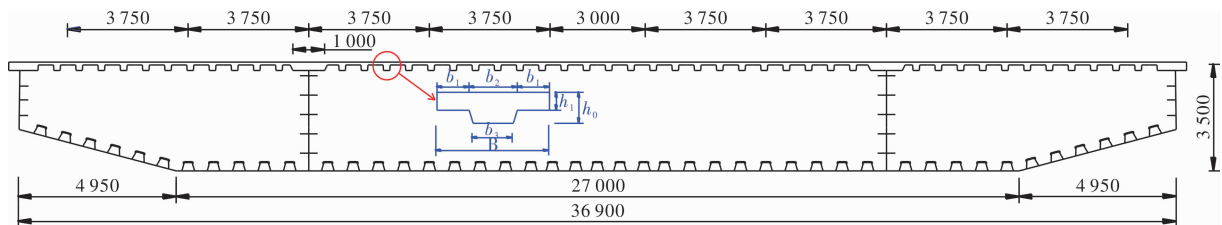


图 1 钢-UHPC 组合梁标准横断面图(单位: mm)

Fig. 1 The standard cross-section of steel-UHPC composite girder (Unit: mm)

表 1 组合箱梁各参数取值

Tab. 1 The value of each parameter of composite box girder cm

设计方案	b_1	b_2	b_3	h_1	h_0	备注
方案 1	20	30	25	11	19	带肋板方案
方案 2	24	22	20	9	26	
方案 3	/	/	/	14	14	平板方案
方案 4	24	22	20	9	26	华夫板方案

注:方案 4 在方案 2 所述面板尺寸的基础上将相邻横隔板之间的桥面板横桥向增添两根梯形肋,其纵桥向间距分别为 120 cm、110 cm、120 cm,截面尺寸中肋高 17 cm、顶缘宽 13 cm、底缘宽 10 cm。

根据弯曲应力计算公式 $\sigma = M/W$ 可计算出截面的弯曲应力值,通过比较应力值大小可初步判别各方案的性能优劣。由于各方案仅顶板构造细节不同而其他构造一致,在相同车轮荷载作用下,

各方案桥面板对应的截面弯矩值 M 近似相等, 因此只需比较桥面板抗弯截面系数 W 即可, 利用理论公式计算出桥面板截面特性如表 2 所示。

表 2 各方案桥面板截面特性计算
Tab. 2 Calculation of cross-section characteristics
of each project bridge deck

设计 方案	截面 面积 S/cm^2	抗弯惯 性矩 I $/\text{cm}^4$	y 板肋下缘 $/\text{cm}$	W 板肋下缘 $/\text{cm}^3$
方案 1	990	24 380.3	11.39	2 140.71
方案 2	987	51 360.7	16.80	3 057.57
方案 3	980	16 000.0	7.00	2 285.71
方案 4	987	51 360.7	16.80	3 057.57

由表 2 可知, 在截面面积相近的情况下, 带肋桥面板截面抗弯惯性矩均显著大于矩形平板截面, 但由于肋高的增加, 使得纵肋下缘的抗弯截面系数不一定更大(如方案 1<方案 3); 方案 2、方案 4 由于板肋高度的增加, 宽度的适当减小, 使得板肋下缘的抗弯截面系数得到显著提升, 可见采用方案 2、方案 4 的板肋截面形式可减小板肋下缘的弯曲应力。下面通过有限元计算进一步验证分析。

2 有限元模型及关注部位的选取

2.1 有限模型的建立

利用 ABAQUS 建立标准梁段(含 6 个横隔板)的线弹性有限元模型(图 2), 模型中横隔板编号从一端向另一端依次为 1#~6#。

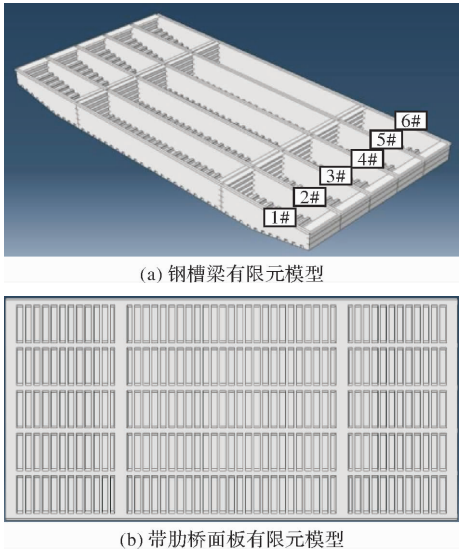


图 2 有限元模型

Fig. 2 The finite element model

钢槽梁各板件采用 S4R 板壳单元, UHPC 桥面板采用 C3D8R 实体单元; 整体网格中各单元平面尺寸不超过 300 mm, 关注部位单元平面尺寸不超过 20 mm, 粗细网格之间逐步过渡; UHPC 桥面板关注部位沿板厚方向单元划分不少于四层, 非关注部位不少于两层; 不考虑栓钉的滑移效应, UHPC 层与钢顶板之间采用 Tie 绑定约束; 箱梁一端约束 X、Y、Z 三个方向平动自由度, 另一端仅约束梁端竖向位移, 未考虑配筋的影响。单元总数在 110 万左右时, 计算结果收敛良好。

2.2 桥面板关注部位的选取

为更好表述桥面板板肋处受力情况, 将左纵隔板顶部板肋命名为 0# 肋, 左纵隔板与桥梁中心线之间的板肋依次命名为 1#~12# 肋, 见图 3。

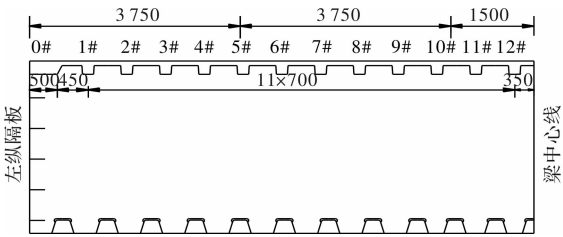


图 3 带肋桥面板局部横截面图(单位: mm)

Fig. 3 Local cross-section diagram of ribbed bridge deck
(Unit: mm)

从图 3 中可知桥梁横桥向中部有 3 m 宽的中央分隔带, 因此左幅桥车轮荷载横向从左至右至多只能移动到 10# 板肋正上方。考虑轮载移动范围并定性分析桥面板受力情况, 本模型关注部位选为: 横向受力为两纵隔板中间部位的桥面板下缘和纵隔板附近桥面板上缘(取单幅桥), 纵向受力为两横隔板顶桥面板上缘及两横隔板间跨中部位的板肋下缘, 具体见图 4 所标注的各点位置。

其中 A 点位于面板顶, 纵向跨中(文中所述纵向跨中为 3#、4# 横隔板中间部位, 下同)、横向在 0# 板肋过渡到相邻面板的变截面较薄处; B 点位于面板顶, 纵向跨中、横向为 0# 板肋中心; C 点位于面板顶, 4# 横隔板正上方、横向位于 6#、7# 肋板之间中心; D 点位于 7# 板肋底, 纵向跨中; E 点位于面板底, 纵向跨中、横向为 7#、8# 板肋中间部位; F 点位于面板底, 纵向跨中、横向位于 1#、2# 板肋中间; G 点位于面板顶, 纵向为 4# 横隔板带横肋变截面断面较薄处(图中表示在 3# 横隔板位置)、横向位于 6#、7# 板肋中间; H 点位于靠近中央分隔带的 10# 板肋底, 纵向跨中。各方案关注部位在空间位置上保持一致。

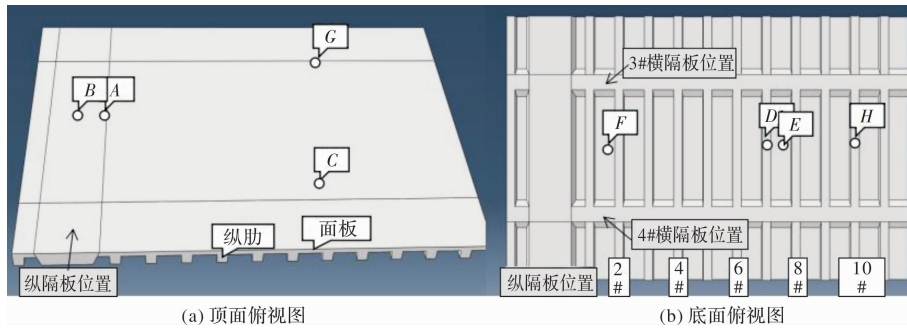


图 4 桥面板关注部位示意图

Fig. 4 The diagrammatic sketch of various concerned areas on bridge deck

3 轮载应力影响线

为了得到 UHPC 桥面板各关注点的轮载应力影响范围,可先计算不同纵、横向位置轮载面积 ($200\text{ mm} \times 600\text{ mm}$) 单位力 (即轮载面积上的均布力的合力为单位力,而不是量值为单位力的集中力) 作用下的关注部位的应力,所得结果可称为关注部位应力的影响面。考虑到桥梁的条带形状,为方便计算,可先确定关注部位的纵、横向的轮域均布荷载影响线,进而利用该纵、横向的轮域均载影响线近似确定车辆纵、横向布置的最不利位置,最终求得最不利位置下的应力值。

下面所作的轮域均载横向影响线 (以方案 2 为例) 是指轮域均载的合力为 1 (为便于计算,1 取 1 kN), 合力作用点纵向位于两相邻横隔板之间的跨中处,横向移动 (e 改变) 时某物理量的变化情况。下图中横向位置坐标 e 以左纵隔板为原点,向右为正。所作的轮域纵向影响线是指轮域均载合力为 1, 合力作用点横向位于某处 (因关注部位不同而异) 纵向移动所得的某物理量变化情况,其中纵向 Z 位于跨中部位为 0,朝 4# 横隔板方向为正。为更好地观测各关注点影响线的变化趋势,图中所作影响线均只列出了应力影响较大的区域范围,其他数值接近于 0 的区域范围在图中未示出。

考虑桥面板各点纵、横向受力情况,限于篇幅,仅列出 A~D 点主受力方向的影响线 (F 点位置与 E 点相似, H 点位置与 D 点相似)。其中 A 点、B 点横桥向应力 (拉为正,下同) 的横向影响线 (纵向布置于相邻两横隔板之间的跨中,即 $Z=0$) 见图 5(a), A 点横桥向应力的纵向影响线 (轮域均载合力作用点位于 $e=1\,400\text{ mm}$ 处) 见图 5(b), B 点横桥向应力的纵向影响线 (轮域均载合力作用点位于 $e=800\text{ mm}$ 处) 见图 5(b); C 点、G 点纵桥向应力的横向影响线 (纵向布置于 $Z=600\text{ mm}$ 处) 见图 6(a), C 点、G 点纵桥向应力的纵向影响线 (轮

域均载合力作用点位于 $e=4\,800\text{ mm}$ 处) 见图 6 (b)。

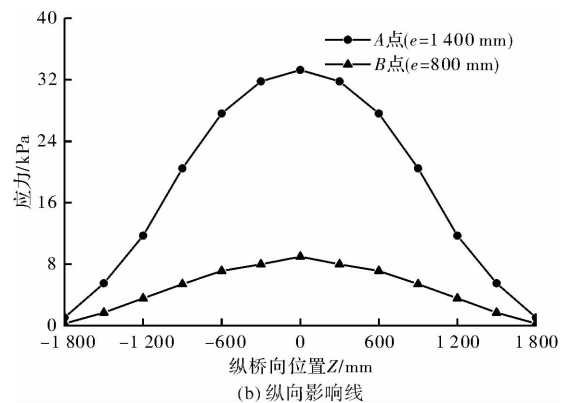
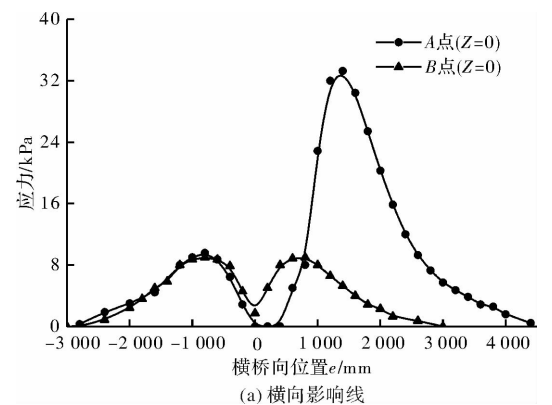
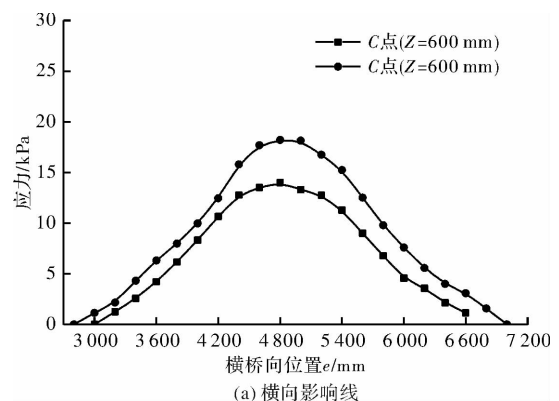


图 5 A 点、B 点横桥向应力影响线

Fig. 5 The transverse stress influence line of point A and point B



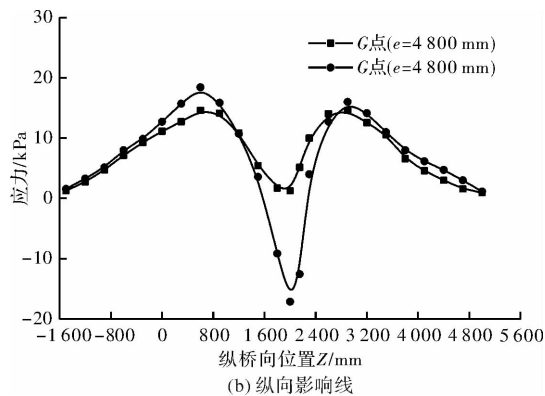


图6 C点、G点纵桥向应力影响线

Fig. 6 The longitudinal stress influence line of point C and point G

D 点纵桥向应力的横向影响线(纵向布置于 $Z=0$ 处)见图7(a), D 点纵桥向应力的纵向影响线(轮域均载合力作用点位于 $e=5150$ mm处)见图7(b); E 点横桥向应力的横向影响线(纵向布置于 $Z=0$ 处)见图8(a), E 点横桥向应力的纵向影响线(轮域均载合力作用点位于 $e=5500$ mm处)见图8(b).

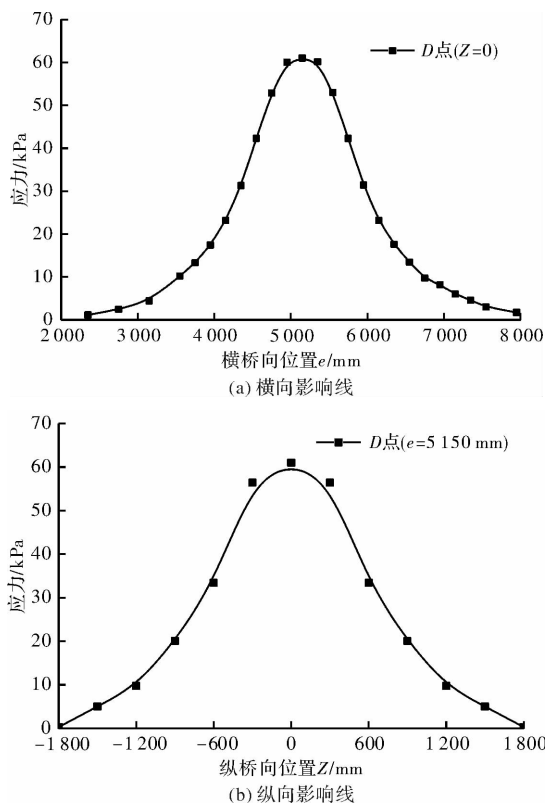


图7 D点纵桥向应力影响线

Fig. 7 The longitudinal stress influence line of point D

从各关注部位的纵、横向影响线分析可知:

①根据影响线应力分布范围可认为轮载应力影响范围是局部的. 从纵向影响线看, 处于跨中部位的关注点应力影响线为单峰分布, 而处于横

隔板附近的关注点应力影响线为双峰分布; 作用于两相邻横隔板之外的荷载对该两横隔板间跨中桥面板各点的纵、横向应力几乎无贡献; 横隔板相邻两跨以外的荷载对该横隔板处附近桥面板的纵、横向应力几乎无贡献.

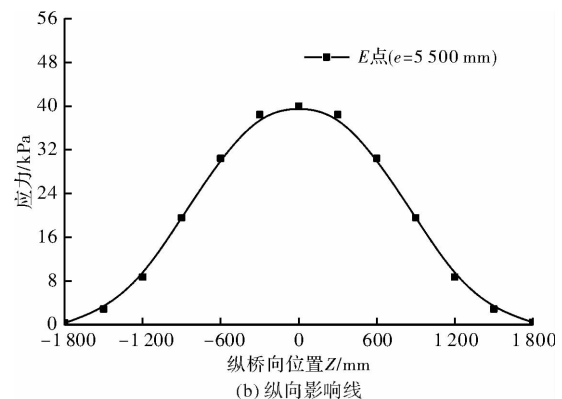
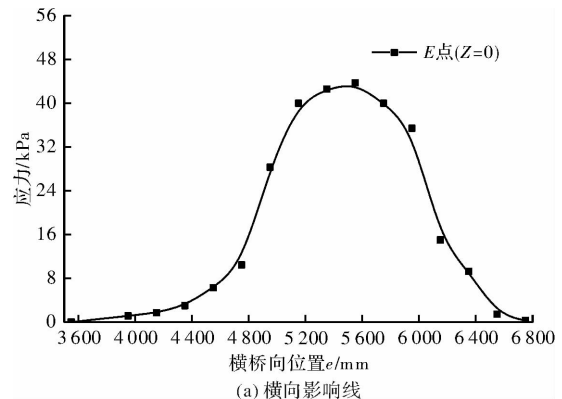


图8 E点横桥向应力影响线

Fig. 8 The transverse stress influence line of point E

②从横向影响线看, 处于纵隔板附近的关注点应力影响线为双峰分布, 远离纵隔板部位的关注点应力影响线为单峰分布. 横向距某板肋超过相邻横隔板间距的荷载对该板肋的纵、横向应力的贡献可忽略; 距离纵隔板超过一定距离的面板横桥向影响范围较小, 约为板肋间距的4倍; 而纵隔板附近的面板荷载横向影响范围较广, 约为2倍横隔板间距.

③距两纵隔板一定距离后的各板肋跨中(两横隔板中间)下缘纵桥向应力(D 点、 H 点)的纵、横向影响线形状与量值基本相同, 影响线位形相对关注物理量位置相同; 距两纵隔板一定距离后的各面板下缘横向应力(E 点、 F 点)的纵、横向影响线形状与量值基本相同, 影响线位形相对关注物理量位置相同.

④板肋下缘纵向应力的影响线峰值最大(D 点、 H 点), 纵隔板附近桥面板变厚较薄处上缘(约58~67 cm)(A 点)的横向应力值次之. A 点、 B 点、 D 点、 E 点、 F 点、 H 点等跨中(两横隔板

间)各点纵、横向应力的纵向影响线等峰线均位于跨中部位,横隔板处桥面板各点(C点、G点)的纵向应力的纵向影响线等峰线位于距跨中约 $1/6$ 横隔板间距处;各关注点应力横向影响线峰值点位置各有不同,除纵隔板附近桥面板各点(A点、B点)外一般位于关注点正上方处(A点、B点横向影响线峰值点位置距离其自身约 80 cm)。

4 加载车模型及布载方式

4.1 加载车模型

采用公路I级汽车荷载(图9)模型对各方案进行桥面板静承载能力分析,总重 550 kN,其中前轴重 30 kN,中轴重 120 kN,后轴重 140 kN,横向轮距 1.8 m,轴距 1.4 m,中轴与后轴之间相隔 7 m。

由于组合结构局部模型轮载作用影响范围有限,纵向一般不超过两个横隔板间距,并且车辆纵向移动时前轴会超出节段模型,考虑到两后轴重量超过了前轴和中轴重量的总和,为了减小有限元模型的容量及增加计算效率,因此本分析模

型仅考虑了后两轴的作用(即 2×140 kN),并计入 0.3 倍的冲击系数。本计算模型考虑桥面板的自重效应。

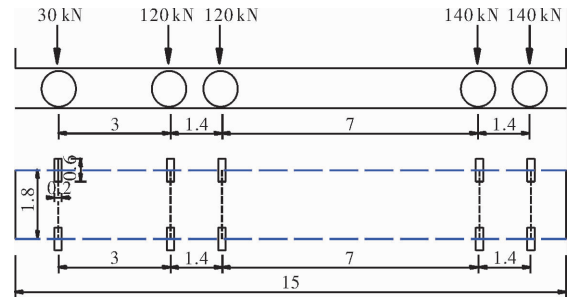


图9 加载车模型(单位: m)

Fig. 9 The loading model car (Unit: m)

4.2 各关注点布载方式

为了得到在移动荷载作用下各点的最不利轮载应力,根据各点的纵、横向应力影响线进行布载,限于篇幅仅以方案2中的A点为例进行说明,如图10所示,其他方案各点的布载方式根据其各自的应力影响线特点进行布置。图中车轮的最不利加载位置根据量值影响线加载的叠加原理确定。

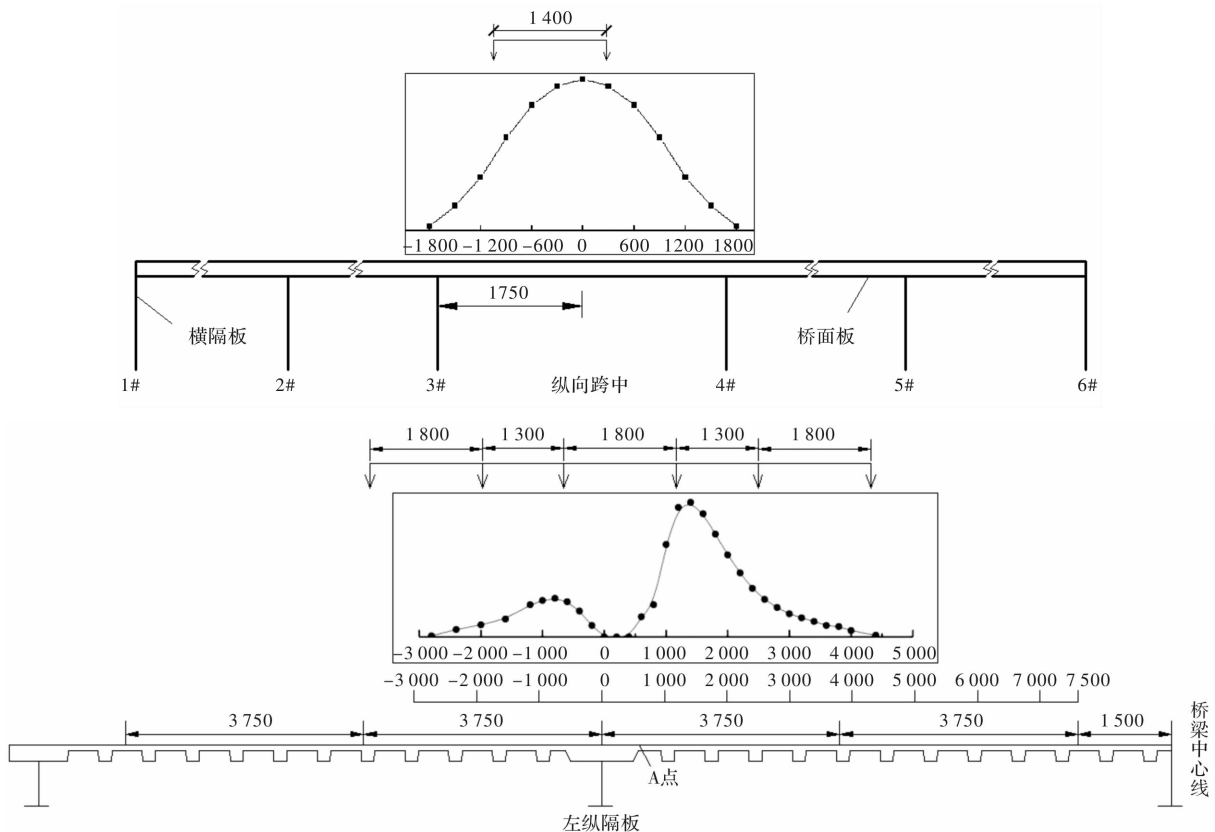


图10 A点纵横向加载方式示意图(单位: mm)

Fig. 10 The longitudinal and transverse loading schematic diagram of point A (Unit: mm)

5 各方案桥面板静承载能力计算分析

根据上述车辆活载布载形式以及考虑桥面板

自重和 10 cm 厚的铺装层恒载效应,可得出各方案关注部位的最不利轮载拉应力值,见表3。其中方案1、方案2、方案4的最大主拉应力所在位置均

位于 D 点，应力方向沿纵桥向分布，面板上缘 A 点的横桥向主拉应力次之；而方案 3 的最大主拉应力值位于 B 点，应力方向沿横桥向分布，面板下缘 E 点(D 点)处的纵桥向主拉应力值次之。

根据计算也可知各方案桥面板最大主压应力值

均未超过 -10 MPa ，其值不及 UHPC 极限抗压承载能力的十分之一(根据最新的研究成果及规范《活性粉末混凝土》GB/T 31387-2015 所述：UHPC 材料的抗压强度不应低于 100 MPa ，一般可达到 150 MPa 以上)，具备足够的抗压承载能力，无需重点关注。

表 3 各关注部位的最不利拉应力

Tab. 3 The most disadvantageous tensile stress of various concerned areas

MPa

方案	A 点		B 点		C 点		D 点		E 点		F 点		G 点	
	横向	纵向	横向	纵向	纵向	横向	纵向	横向	横向	纵向	横向	纵向	纵向	横向
方案 1	7.51	0.96	4.13	0.58	2.67	0.18	9.69	0.84	3.48	4.31	3.67	3.77	3.82	0.73
方案 2	5.93	0.31	2.42	0.12	1.49	0.03	7.22	0.93	3.14	1.61	3.22	1.42	2.35	0.03
方案 3	5.31	0.17	10.07	0.87	4.56	0.21	8.96	2.78	2.78	8.96	3.11	7.02	5.23	0.64
方案 4	3.73	0.26	2.04	0.05	1.29	0	7.15	0.41	1.60	1.42	2.18	1.36	2.31	0.23

方案 1 面板上缘最大拉应力为 7.51 MPa (横桥向)，面板下缘最大拉应力为 4.31 MPa (纵桥向)，梁肋下缘最大拉应力为 9.69 MPa (纵桥向)。方案 2 面板上缘最大拉应力为 5.93 MPa (横桥向)，面板下缘最大拉应力为 3.22 MPa (横桥向)，梁肋下缘最大拉应力为 7.22 MPa (纵桥向)。方案 2 相较于方案 1，受益于其截面抗弯惯性矩及板肋下缘抗弯截面系数的大幅提高，其肋板下缘最大主拉应力值减小了 25.5% ，由此可见带肋桥面板方案板肋截面形式对桥面板抗弯承载能力影响较大。

方案 3 面板上缘最大主拉应力值为 10.07 MPa (横桥向)，面板下缘最大拉应力为 8.96 MPa (纵桥向)。方案 3 面板下缘的最大主拉应力值要小于方案 1 板肋下缘的主拉应力(相差 7.5%)，由此说明带肋板方案相较于平板方案不一定具有更优的纵向抗弯承载能力；但方案 3 桥面板上、下缘最大主拉应力值均要显著大于方案 2，其中面板下缘的最大主拉应力与方案 2 板肋下缘最大主拉应力相比，其应力值超出 24.1% ，其面板上缘的最大主拉应力与方案 2 面板上缘的最大主拉应力相比，其应力值超出 69.8% ，面板下缘的最大主拉应力与方案 2 面板下缘最大主拉应力相比，其应力值超出 178.3% 。因此，当对桥面板进行抗裂设计时，平板方案需沿桥宽密布配筋，而带纵肋方案仅需在纵肋上配置纵向受拉钢筋或预应力筋即可。因此采用带肋桥面板只要截面尺寸设计得当，能显著减小桥面板的最大主拉应力值、大大减少钢筋的用量、更好的发挥钢筋的受拉性能，进而更大程度上提高截面的抗弯承载能力。

方案 4 面板上缘最大主拉应力值为 3.73 MPa

(横桥向)，面板下缘最大拉应力为 2.18 MPa (横桥向)，梁纵肋下缘最大拉应力为 7.15 MPa (纵桥向)，梁横肋下缘最大拉应力为 3.77 MPa (横桥向)。方案 4 与方案 2 相比，①其板肋下缘最大主拉应力值变化不大(主拉应力值最大仅减小了 1%)，但其板肋下缘的横桥向应力大大提升(主要为横肋应力的提升)，横肋的存在对减小肋板下缘纵桥向的主拉应力值几乎没有帮助；②方案 4 面板应力降幅明显，其中面板下缘最大主拉应力降幅为 32.3% 、面板上缘最大主拉应力最大降幅为 37.1% 。其原因为横肋的存在分担了原本由面板所承担的横桥向的应力。对于方案 2 而言，其桥面板横桥向的应力值本身较小，未超过 6 MPa (位于纵隔板附近处)，并且其应力值还可以通过增加纵隔板处板肋的横向宽度及板厚进一步减小，而对面板下缘的应力值则更小，未超过 3.5 MPa 。因此，华夫板结构对减小桥面板最大主拉应力值并无多大帮助，反而增大了施工难度，增加造价。

6 结论

(1)轮载应力影响范围是局部的，从纵向影响线看，作用于两相邻横隔板之外的荷载对该两横隔板间跨中桥面板各点的纵、横向应力几乎无贡献；横隔板相邻两跨以外的荷载对该横隔板处附近桥面板的纵、横向应力几乎无贡献。从横向影响线看，横向距某板肋超过相邻横隔板间距的荷载对该板肋的纵、横向应力的贡献可忽略；距离纵隔板超过一定距离的面板横桥向影响范围较小，约为板肋间距的 4 倍；而纵隔板附近的面板荷载横向影响范围较广，约为 2 倍横隔板间距。

(2)带肋桥面板方案板肋下缘纵向应力的影响峰值最大,纵隔板附近桥面板变厚较薄处上缘的横向应力次之,各方案桥面板的主拉应力值较大区域均集中在跨中肋(面)板下底缘以及与纵隔板相接处的面板顶缘。

(3)截面形式对桥面板的抗弯承载能力影响较大。瘦高型带肋板方案相较于矮胖型带肋板方案抗弯承载能力更优,相较于矩形平板方案,其板肋下缘、面板上下缘应力均得到显著减小,相较于华夫板方案,桥面板最大主拉应力值相差不大。华夫板横肋的存在对减小带肋桥面板板肋下缘的最大主拉应力几乎没有帮助。

参考文献 References

- [1] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 110-112.
NIE Jianguo, TAO Muxuan, WU Lili, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 110-112.
- [2] 单宏伟. 结合梁斜拉桥桥面板抗裂对策研究[D]. 上海: 同济大学. 2007.
SHAN Hongwei. Study on crack resistance measures of bridge deck of composite beam cable-stayed bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [3] SUNG W Y, JINKYO F. C. Evaluation of the flexural behavior of composite beam with inverted T steel girder and steel fiber reinforced ultra high performance concrete slab[J]. Engineering Structures, 2016, 118: 1-15.
- [4] ZHOU M, LU W, SONG J W. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 1257-1266.
- [5] 陈宝春, 季韬. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 33(3): 1-23.
CHEN Baochun, JI Tao. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 33(3): 1-23.
- [6] 郑文忠, 李莉. 活性粉末混凝土配置及其配合比计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版) 2009, 36(2): 13-17.
ZHEN Wenzhong, LI Li. Preparation and mix proportion calculation of reactive powder concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2009, 36(2): 13-17.
- [7] 吴炎海, 何雁斌. 活性粉末混凝土(RPC200)的配置试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 44-49.
WU Yanhai, HE Yanbin. Experimental research on proportion of reactive powder concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 44-49.
- [8] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
SHAO Xudong, HU Jianhua. The steel-UHPC lightweight composite bridge structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [9] RUSSEL H G, GRAYBEAL B A. Ultra-high performance concrete; A state of the art report for the Bridge community, FHWA-HIF-13-060 [R]. McLean, D. C.: Federal Highway Administration, 2013.
- [10] AFGC. Ultra high performance fibre-reinforced concretes [S]. Paris: AFGC and SETRA Working Group, 2013.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 活性粉末混凝土: GB/T 31387-2015. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015-11-01.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P. R. China. Rective power concrete: GB/T 31387-2015. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015-11-01.
- [12] AALETI S, PETERSEN B, SRITHARAN S. Design guide for precast UHPC waffle deck panel system, including connections[R]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2013.
- [13] 邵旭东, 吴佳佳, 刘榕, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥梁结构华夫桥面板的基本性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 218-225, 245.
SHAO Xudong, WU Jiajia, LIU Rong, et al. Basic performance of waffle deck panel of lightweight steel-UHPC composite bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 218-225, 245.
- [14] 孔令方, 邵旭东. 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.
KONG Lingfang, SHAO Xudong. Finite element analysis of flexural performance of steel-UHPC lightweight composite girder deck[J]. Journal of highway and transportation Research and Development, 2016, 33(10): 88-95.
- [15] 吴佳佳, 邵旭东, 刘榕. 钢-UHPC 轻型组合梁桥面板结构形式研究[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 77-81.
WU Jiajia, SHAO Xudong, LIU Rong. Structural featureresearch on UHPC deck of steel UHPC lightweight composite bridge[J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 77-81.
- [16] 丘明红, 邵旭东, 甘屹东, 等. 单向预应力 UHPC 连续箱梁桥面体系优化设计研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 87-97.
QIU Minghong, SHAO Xudong, GAN Yidong, et al. Research on optimal design of deck system in longitudinal prestressed UHPC continuous box girder bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 87-97.

(编辑 桂智刚)