

[文章编号] 1003-4684(2022)05-0079-05

钢-混组合梁零号块负弯矩区桥面板受力性能分析

李程遥, 王 超

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 钢-混凝土组合梁充分利用钢材和混凝土这两种材料特性, 结构刚度大, 经济效益好。但在结构的负弯矩区混凝土桥面板受拉、钢梁受压对结构受力不利。针对这一问题, 对某半漂浮体系斜拉桥零号块负弯矩区桥面板进行了有限元数值仿真分析, 研究桥面板在成桥状态的局部受力性能, 针对其受力特点, 提出了三种改进措施以改善其受力性能并比较了各种措施的效果。

[关键词] 钢-混组合梁; 负弯矩区; 桥面板; 有限元; 零号块

[中图分类号] U443.35 [文献标识码] A

钢-混凝土组合梁桥通过抗剪连接件将钢梁与混凝土桥面板组合在一起, 充分利用钢材和混凝土这两种材料特性, 这种桥型结构刚度大, 适用于大跨度, 施工工期短, 经济效益好^[1]。但钢-混组合梁桥在负弯矩区处于混凝土桥面板受拉、钢梁受压的不利受力状态, 混凝土开裂后会降低组合梁的刚度, 使之受力更不利, 同时钢梁受压易导致局部屈曲的出现, 这一缺点限制了钢-混组合梁桥的发展^[2]。为了克服该种桥型的这一缺点, 使之得到更为广泛的应用、取得更好地经济效益, 国内外研究人员对此进行了大量的研究。主要从以下三个方面控制负弯矩区桥面板所受的应力来防止、控制裂缝的发展: 采用新的结构形式^[3-5]; 通过某种方式给桥面板施加预应力^[6-8], 但是现场施工比较复杂; 用其他高性能材料替换混凝土^[9-11]。对于半漂浮体系斜拉桥, 零号块处存在负弯矩尖峰, 同时由于支座的约束作用, 局部应力集中非常明显^[12], 主梁如果采用钢-混组合结构, 混凝土桥面板处于复杂的不利受力状态, 有必要对其进行深入研究。本文结合某钢-混组合连续斜拉桥进行数值仿真分析^[13], 研究了桥面板在成桥状态的局部受力性能, 针对其受力特点, 研究提出了三种改进措施以改善其受力性能并比较了各种措施的效果。

1 工程概况

某桥主桥为单索面双塔组合梁斜拉桥, 钢梁采

用单箱三室钢箱结构。桥梁主跨 360 m, 边跨 160 m。桥梁中心线处钢箱梁高 3.05 m, 主塔附近混凝土桥面板厚 45 cm。普通节段钢梁每间隔 4.0 m 设置一道横隔梁, 顶板为开口钢箱, 在索塔附近为闭口钢箱, 与开口钢箱交接位置设置两道间距为 1.5 m 的横隔梁, 然后 2 m 设置一道横隔梁直到索塔中心位置。混凝土桥面板中设置纵横向预应力筋, 主塔处钢束采用 9 Φ^s 15.2 mm 和 12 Φ^s 15.2 mm 钢绞线, 主梁悬拼预应力筋采用 JL32 预应力精轧螺纹钢, 桥面板横向预应力钢束采用 4 Φ^s 15.2 mm 钢绞线。桥塔采用独柱式, 主梁在桥塔位置预留 12 m \times 5.4 m 孔洞, 索塔直接穿过主梁, 在零号块主梁底部对称设置两个支座, 支座中心距 7.65 m。斜拉索在主梁上索距为 8 m, 塔上索距为 2.5 m。

2 数值分析

为了对主梁负弯矩区受力性能进行研究, 首先采用梁单元对全桥结构进行整体分析, 得到结构成桥状况下的整体内力情况, 然后建立零号块局部模型, 基于整体受力得到的结构内力结果来对局部模型施加边界条件, 以使局部模型能有效模拟结构的实际受力状况。

2.1 整体有限元仿真分析

首先, 建立全桥梁单元模型。该桥为斜拉桥, 其结构内力状况与施工过程息息相关, 因此需要详细模拟全桥施工过程来得到结构成桥状况内力。这里

[收稿日期] 2021-08-22

[基金项目] 国家自然科学基金(51408250, 51708188)

[第一作者] 李程遥(1995-), 男, 湖北黄石人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为土木工程

[通信作者] 王 超(1979-), 男, 湖北鄂州人, 工学博士, 湖北工业大学副教授, 研究方向为桥梁健康监测

采用组合截面来建立单主梁模型,其截面依据平截面假定将上部混凝土桥面板等效成钢结构。等效后截面中性轴和原结构保持一致,混凝土部分截面积按照弹模比值相应减小,使得组合结构的轴应变和弯曲应变符合平截面假定,而混凝土结构的应力根据计算出的等效钢结构应变反算回去。全桥有限元模型如图 1 所示。

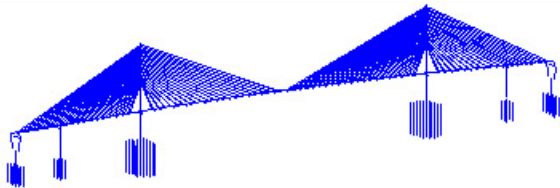


图 1 全桥有限元模型

经过整体有限元仿真分析后,提取结构在成桥状况(含二期恒)下的整体内力和应力。因为这里主要考虑主梁的受力情况,为了显示方便,因此只截取了左半跨主梁的分析结果,主梁的弯矩、轴力、剪力、砼桥面板上缘应力分别如图 2 所示。

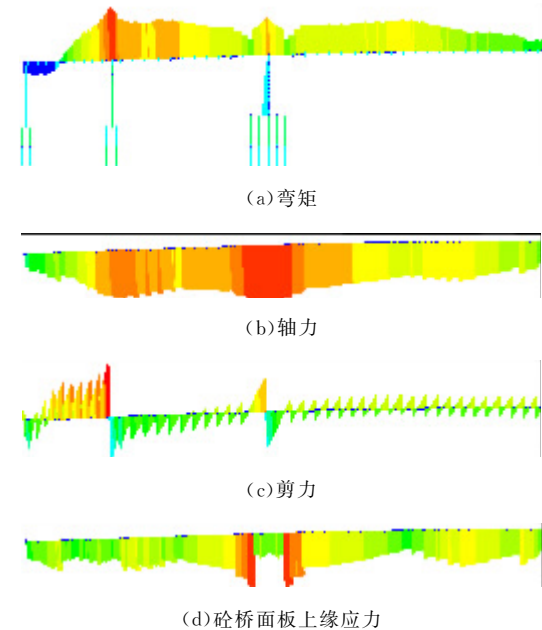


图 2 主梁成桥状态下内力

成桥状态下主梁塔根部截面的内力和应力结果如表 1 所示。

表 1 主梁在塔根部截面内力和应力

位置	塔根部
轴力/kN	-197 193.0
剪力-y/kN	0.04
剪力-z/kN	7798.26
扭矩/(kN·m)	-0.01
弯矩-y/(kN·m)	-138 538.0
弯矩-z/(kN·m)	7.7
上缘应力/kPa	-3395.3

表中,y 方向为横桥向,z 方向为竖桥向

从整体分析结果可以看出,成桥状态下,主梁在主塔根部支座位置附近梁段存在较大负弯矩段。然而,不同于一般连续梁结构,该桥为组合结构斜拉桥,在负弯矩段同时存在很大的轴压力,截面应力包含负弯矩和轴压力的共同作用。从截面上缘应力可以看出,在成桥状态下,负弯矩段主梁上缘并未出现拉应力,全截面都是受压状态,具有一定压应力储备。但是由于主塔穿过主梁,塔根部零号块主梁存在挖空和截面突变,局部应力更加复杂,需要建立零号块的局部有限元模型进行更精细的仿真分析。

2.2 局部有限元仿真分析

这里在顺桥向截取了索塔到跨中和边跨各 10 m 的全部实心段钢混组合梁节段来建立零号块局部实体模型,为简化模型利用对称性在横桥向沿桥梁中心线取了一半结构建立模型。钢结构部分(包括面板、底板、横隔板、纵隔板、小纵肋、加劲板等)采用板壳单元模拟,预应力筋采用杆单元模拟,砼桥面板采用实体单元模拟。桥面板与钢箱梁间的栓钉连接不是本文关注的重点,这里将钢箱梁与桥面板模拟为完全连接。实体模型两端设置了梁单元刚臂,便于施加相应的边界条件。由于整体模型模拟了桥梁的施工过程、混凝土的收缩与徐变等效应,而局部模型采用一次落梁计算,与模拟实际施工过程得到的成桥内力存在差别,很难保证局部模型内力与整体计算结果完全一致。考虑到我们最关注零号块负弯矩最不利位置(塔根部主梁截面)的应力状况,通过在局部模型顺桥向两端施加合适的边界条件,使得局部模型根部截面内力(弯矩、轴力、剪力)与整体计算结果保持一致。横桥向设置对称约束。详细的模型如图 3 所示(为显示模型内部结构,左侧隐去了部分混凝土桥面板)。通过有限元分析,提取混凝土桥面板应力结果如图 5 所示。

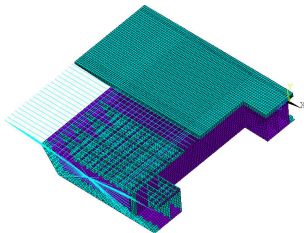
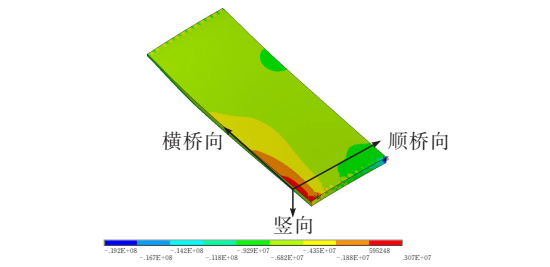


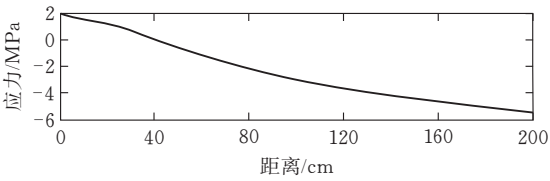
图 3 局部有限元模型

从顺桥向应力分析结果可以看出,斜拉索给主梁提供了较大的压应力储备,桥面板顺桥向主要承受压应力,但是桥面板混凝土在横隔板支撑作用下,局部负弯矩效应非常明显,造成桥面板顶部局部出现拉应力,对应支座中心位置顶板拉应力为 1.92 MPa。从桥面板顶面应力沿着顺桥向、横桥向和竖向三个方向的变化曲线可以看出,拉应力沿顺

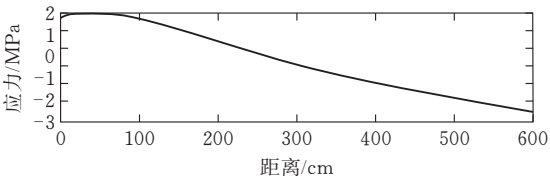


支座中心线对应顶板位置为原点

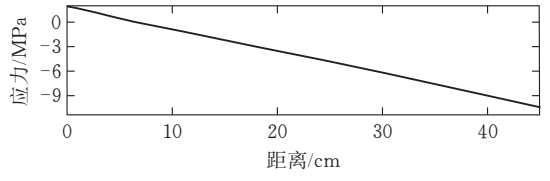
图 4 砼桥面板顶面顺桥向应力云图 Pa



(a) 顺桥向



(b) 横桥向



(c) 竖向

图 5 砼桥面板顶面应力变化曲线

桥向很快降低,在离支座截面 43 cm 之后顶板已经全变为压应力了,拉应力在顺桥向有一定分布范围,在离支座中心点 220 cm 之后全部变为压应力。这一方面是因为主梁横向是往两边倾斜的,越往外顶板顶面离中性轴越近,另外支座位置有纵隔板,顶板受力存在剪力滞效应,越往两边受力越小。再者就是支座的局部支撑效应的离支座越近越明显。顺桥向应力沿着竖向基本呈线性变化,从顶面往下 6.5 cm 后混凝土变为受压状态。

综合顺桥向应力沿三个方向的变化情况,在成桥状态下,由于支座和横隔板的约束作用,混凝土桥面板的第三体系局部受力非常明显,在支座顶部桥面板存在 43 cm×220 cm×6.5 cm 的拉应力区,最大拉应力为 1.92 MPa。

2.3 改进措施

从上述分析可知,由于支座的局部支撑约束作用,桥面板混凝土在横隔板处存在局部负弯矩而产生拉应力,为了改善结构的受力特性,下面研究几种改进措施的效果:1)将与顶板连接的横隔板在支座部位去除一部分;2)在支座处采用加强钢板将支座

位置横隔板和相邻的横隔板(距离支座处 2 m)连接起来;3)增强组合梁顶板纵肋;下面分别来看一下这几种措施的效果。

1) 支座处横隔板顶部部分挖空 由于桥面板在横隔板支撑作用下局部负弯矩作用较大,这里研究将支座位置顶部横隔板去除一部分,改善局部受力状况,改进后的横隔板细部构造如图 6 所示。通过有限元分析,混凝土桥面板应力结果如图 7 所示。

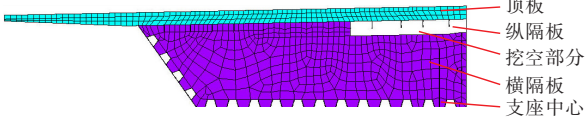


图 6 改进后横隔板细部构造图

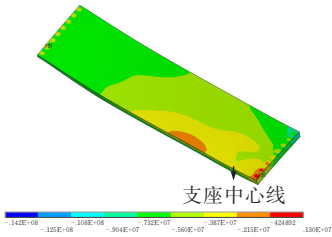
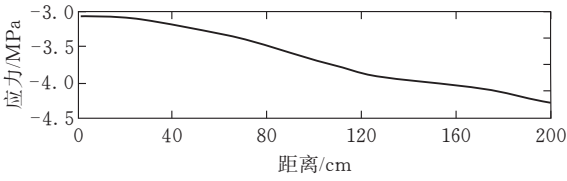
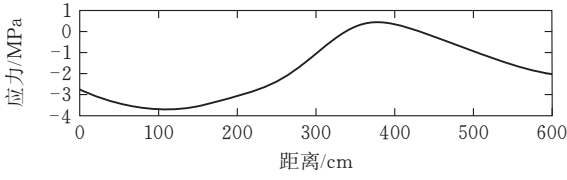


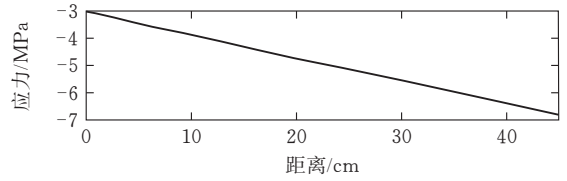
图 7 砼桥面板顶面顺桥向应力云图



(a) 顺桥向



(b) 横桥向



(c) 竖向

图 8 砼桥面板顶面应力变化曲线

从计算结果可以看出,改进后的结构大大改善了支座处顶板混凝土受力性能,支座顶板主要受第一体系受力,支座局部支撑转移到横隔板外侧实心段,完全消除了横隔板处顶板的局部负弯矩尖峰,顶板顺桥向变为了压应力。顶板横桥向应力也相应有所减小,因此,这种改进措施效果很好。

2) 支座处加强板延伸连接相邻横隔板 原结构塔根部横隔板在支座位置处设置了局部加强板,对该处的钢结构底板及横隔板刚度有所增强,但对

顶板受力改善有限。这里拟将加强板往两边延伸至将相邻的两个横隔板连接起来,支座的支撑作用将分散到多个横隔板,有利于减少混凝土顶板的局部负弯矩效应,改进后的结构详细构造如图 9 所示。改进后的结构成桥状态受力结果如图 10 所示。

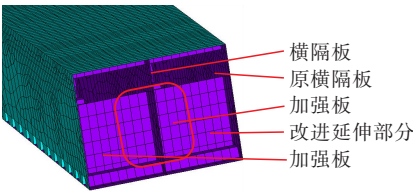


图 9 改进后横隔板处加强板构造图

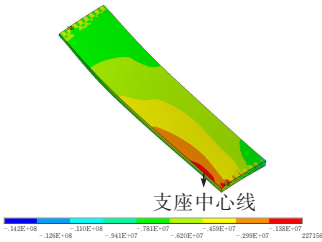


图 10 砗桥面板顶面顺桥向应力

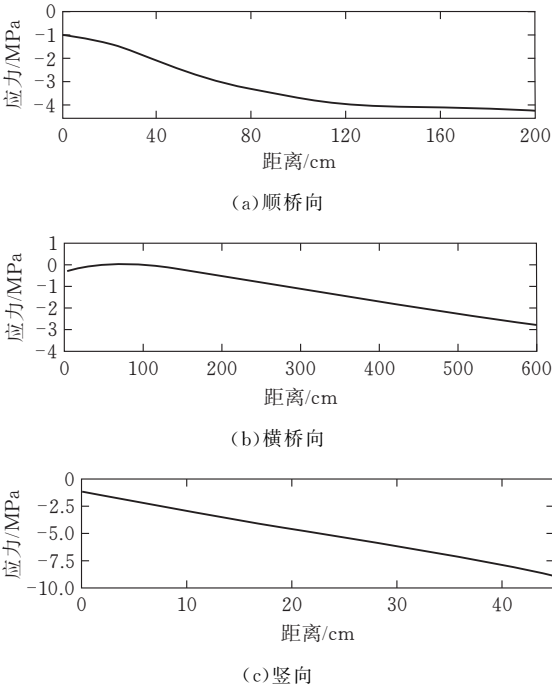


图 11 砗桥面板顶面应力变化曲线

从结果可以看出,改进后的结构在支座处顶板混凝土都变为了压应力。这主要是因为加强版将支座的支撑分散到了三块横隔板,传力更均匀,削减了横隔板处顶板的负弯矩尖峰,因此,这种改进措施效果良好。

3) 增强组合梁顶板纵肋 原结构塔根部钢梁顶板下设置了 24 cm 高的小纵肋,这里将靠近支座正上方位置的部分小纵肋加高为 50 cm,并在加高的小纵肋下缘用钢板连接起来,以增强顶板的局部刚度,增强范围为支座两侧横隔板以内。改进后顶

板详细构造如图 12 所示。改进后的结构成桥状态受力结果如图 13、14 所示。

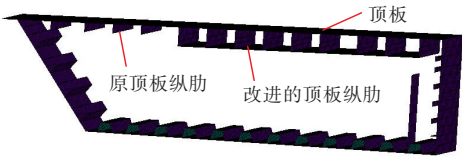


图 12 改进后顶板纵肋构造图

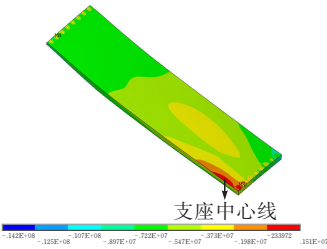


图 13 砗桥面板顶面顺桥向应力

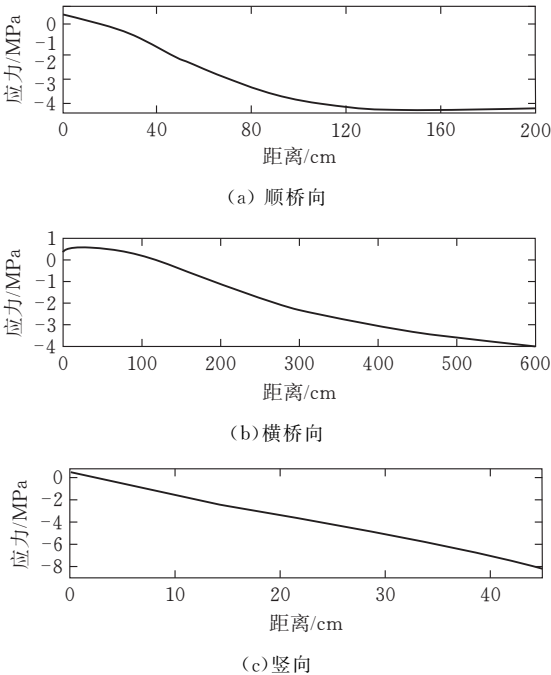


图 14 砗桥面板顶面应力变化曲线

从计算结果可以看出,改进后的结构在支座中心处顶板混凝土拉应力减小到 0.55 MPa,拉应力范围也变小了,拉应力沿顺桥向在离支座截面 19 cm 之后顶板开始变为压应力,横桥向在离支座中点 71 cm 之后顶板全部受压,竖向从顶面往下 27 cm 后混凝土变为受压状态。因此,这种改进措施也可以降低顶板的拉应力状况,但是相对来说,效果没有上一种方式好。

4 结论

对于半漂浮体系组合梁斜拉桥,支座的约束作用导致零号块应力集中和负弯矩尖峰,混凝土桥面板处于复杂的不利受力状态,通过对某桥零号块负弯矩区受力性能进行研究,提出了三种改进措施,研

究结果表明:

- 1)整体模型分析表明成桥状态下零号块主梁存在负弯矩,但是斜拉索给提供了很大的轴压力,负弯矩段上缘混凝土桥面板并未出现拉应力,全截面都是受压状态,具有一定压应力储备。
- 2)零号块桥面板混凝土在横隔板支撑作用下,局部负弯矩效应非常明显,同时由于顶板受力存在剪力滞效应,在支座顶部桥面板存在 $43\text{ cm}\times 220\text{ cm}\times 6.5\text{ cm}$ 的拉应力区,最大拉应力为 1.92 MPa 。
- 3)第一种措施即支座处横隔板顶部挖空一部分的效果最好,能大大改善顶部负弯矩区受力性能,消减局部负弯矩尖峰。第二种措施通过将支座处横隔板加强板延伸至相邻横隔板效果次之,它能将支座的支撑作用分散到三块横隔板,传力更均匀。第三种措施是通过直接加强负弯矩区的顶板刚度来减小桥面板第三体系引起的局部负弯矩作用,效果稍弱。

[参 考 文 献]

[1] 李立峰,王孝亮,冯威,等.考虑钢梁应变强化的钢-混组合梁抗弯承载力计算[J].铁道科学与工程学报,2019,16(11):2822-2831.

[2] 梁显,段树金,孟丽军.负弯矩作用下钢-混凝土组合梁截面受力性能分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(2):124-129.

[3] KIM H, SHIM C S. Experimental investigation of double composite twin-girder railway bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65 (6): 1355-1365.

[4] XU C, SU Q, WU C, et al. Experimental study on

double composite action in the negative flexural region of two-span continuous composite box girder[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67 (10): 1636-1648.

[5] ZHAO Y, ZHOU X, YANG Y, et al. Stiffness and cracking behavior of new U-shaped steel and concrete composite beam under negative bending[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(5):04020046.

[6] 樊健生,聂建国,张彦玲.钢-混凝土组合梁抗裂性能的试验研究[J].土木工程学报,2011,44(2):1-7.

[7] 薛伟辰,杨涛,白丽丽.负弯矩作用下预应力钢-混凝土组合梁的受力性能[J].武汉理工大学学报,2012,34(8):123-127.

[8] 郭瑞,苏庆田,李晨翔,等.后结合预应力组合梁负弯矩区混凝土开裂性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(3):352-356.

[9] 刘新华,周聪,张建仁,等.钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J].中国公路学报,2020,33(5):110-121.

[10] 戴昌源,苏庆田.钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(06):806-813.

[11] QI J, BAO Y, WANG J, et al. Flexural behavior of an innovative dovetail UHPC joint in composite bridges under negative bending moment [J]. Engineering Structures, 2019,200:109716.

[12] 刘耀东,曹红焱,余天庆.钢筋混凝土连续刚构桥零号块力学特性研究[J].湖北工业大学学报,2017,32(4):111-114.

[13] 余天庆,周小亮,寇越,等.特大跨度连续梁桥箱梁偏位的有限元数值模拟[J].湖北工业大学学报,2012,27(2):111-113,121.

Study on Mechanical Behavior of Bridge Deck of Zero Block in Negative Moment Area of Steel Concrete Composite Beam

LI Chengyao,WANG Chao

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: Material properties of steel and concrete have been made full use in steel concrete composite beam, so it has high structural stiffness and good economic benefit. However, the concrete bridge deck bears tension in negative moment area, and the steel beam bears stress, which is disadvantageous to structural mechanical behavior. Aiming at this question, a finite element model of the Zero block in negative moment area of semi floating cable stayed bridge is built, and the local mechanical performance of bridge deck under completed status is studied. Based on the research result, three improvement measures have been proposed and improvement effects of methods have been researched.

Keywords: steel and concrete composite beams; negative bending moment area; bridge deck; finite element; zero block