

# 简支梁桥的桥面连续结构局部应力分析

林文<sup>1</sup>, 刘名琦<sup>2</sup>, 庄一舟<sup>3</sup>, 赖焕林<sup>2</sup>

(1.福建工程学院 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室,福建 福州 350118;  
2.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108;3.浙江工业大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310023)

**摘要:**以实际工程为背景,采用有限元建模方法研究简支梁桥桥面连续结构的配筋率、桥面系施工顺序等参数。分析表明,当桥面连续结构的配筋率超过1.2%时,混凝土的拉应力随着配筋率的增大而增大;若改变施工顺序将不利于桥面连续结构的受力。因此,在桥面连续结构设计中,建议采用1.2%的配筋率,同时也可采用施工顺序1进行施工。

**关键词:**简支梁桥;桥面连续结构;配筋率;施工顺序;拉应力

**中图分类号:** TU 473

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2019)04-0321-05

## Local stress analysis of the continuous deck of the simply supported girder bridge

LIN Wen<sup>1</sup>, LIU Mingqi<sup>2</sup>, ZHUANG Yizhou<sup>3</sup>, LAI Huanlin<sup>2</sup>

(1.Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2.College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;  
3.College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Taking a practical project as the background, the finite element modeling was adopted to study such parameters as the reinforcement ratio and the construction sequence of the bridge deck system of the simply supported girder bridge as well as other parameters. Results show that when the reinforcement ratio of continuous deck exceeds 1.2%, the tensile stress of concrete increases with the increase of reinforcement ratio, and changing the construction sequence will be unfavorable to the transverse load distribution of the continuous deck. It is suggested to adopt a reinforcement ratio of 1.2% in the design of continuous deck, and to adopt Construction Sequence 1.

**Keywords:** simply supported girder bridge; continuous deck; reinforcement ratio; construction sequence; tensile stresses

简支梁桥为适应主梁的伸缩变形,通常在桥墩及桥台上设置伸缩缝<sup>[1]</sup>。但是,安装在伸缩缝处的伸缩装置长期暴露在大气环境中,易遭破坏且容易老化,很难修补。为了解决简支梁桥因伸缩装置破坏而带来的各种问题,国内外桥梁工程广泛推广简支梁桥桥面连续结构(简称桥面连续结构),其不仅可以减小伸缩装置病害对桥梁耐久性的影响,还能提高行车的平稳性与舒适度。

国内外众多学者对简支梁桥桥面连续结构的性能开展了研究。其中,刘丽芬等<sup>[2-3]</sup>人对混凝土桥面板的简支梁桥桥面连续结构的受力性能进行了研究;王岗等<sup>[4-5]</sup>人对拱形桥面连续结构进行了受力分析;杨敏等<sup>[6-7]</sup>人对桥面连续简支梁桥的破损机理以及防治措施进行了研究;Wing等<sup>[8-9]</sup>人对桥面连续结构的无粘结段进行了研究;而庄一舟等<sup>[10]</sup>人进行了桥面连续结构厚度与

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 福建省教育厅项目(JAT170382)

第一作者简介: 林文(1978-),女,福建长乐人,讲师,硕士,研究方向:无伸缩缝桥梁。

面层材料及无粘结段长度的相关研究;还有部分学者进行了桥面连续结构采用 ECC、FRP 等材料对其性能影响的研究<sup>[11-13]</sup>。然而,这些研究并未涉及桥面连续结构的配筋率以及施工顺序这两个关键参数。为此,本文结合实际工程,分别采用理论分析与有限元建模计算相结合的方法,对桥面连续结构的局部应力进行分析,为简支梁桥的桥面连续结构的设计施工提供参考借鉴。

1 工程背景

本文以福建省某预应力混凝土桥面连续简支梁桥为背景,对桥面连续结构部分进行受力分析。其中,桥梁总长 52 m,宽 11.25 m,共 2 跨,每跨 20 m,且对中间桥墩(1 号墩)进行桥面连续结构改造,如图 1 所示。该桥的空心板与铰缝采用 C50 混凝土,桥面连续结构采用 C40 混凝土,主梁预应力筋采用  $\phi^s15.2$  的钢绞线,普通钢筋采用强度为 HRB335 的钢筋,支座采用的是 GYZF4 250×40 三元乙丙板式橡胶支座,上述材料的力学参数按现行桥梁设计规范进行取值。

原桥的施工顺序为:首先,对主梁进行预制并安装就位,待砂浆强度达到设计强度的 50% 时进行铰缝的浇筑;然后,分别按顺序对主梁混凝土现浇层、桥面连续结构与沥青混凝土桥面铺装层进行施工;最后,安装附属设施并成桥。

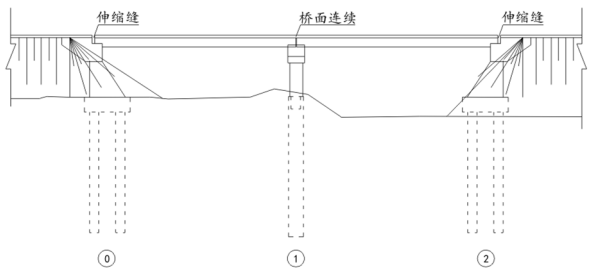


图 1 桥梁纵向立面图  
Fig.1 Longitudinal elevation of the bridge

2 理论计算

由于桥面连续结构的刚度比主梁刚度小很多,因此,当考虑竖向力作用时,可假定其为简支体系,而考虑水平力作用时,其仍然为连续体系。根据规范<sup>[14]</sup>可知,本文荷载工况取为二期恒载(沥青混凝土铺装与护栏)、汽车制动力、整体升温 15℃、整体降温 25℃、正温度梯度、负温度梯

度和公路-I 级车道荷载等。文献[15]给出了各荷载工况下桥面连续结构上、下表面产生最大拉、压应力组合的理论计算公式,限于篇幅,其详细计算过程并未给出。

结合工程背景并采用文献[15]中桥面连续结构的理论计算公式即可计算出桥面连续结构的最大应力值,如表 1 所示。

表 1 桥面连续结构的理论计算值  
Tab.1 Theoretically calculated values  
of the continuous bridge deck

方法	最大拉应力		最大压应力	
	上表面	下表面	上表面	下表面
理论计算	17.67	4.69	-3.78	-23.77

由表 1 可知,桥面连续结构上、下表面最大压应力均小于混凝土的抗压强度,但是,其拉应力却超过了混凝土的抗拉强度。因此,在各荷载组合作用下,桥面连续结构混凝土可能出现整体拉裂破坏。

3 有限元模型建立和验证

通过 ABAQUS 大型有限元软件建立单梁的桥面连续结构三维模型。模型立面及连续段铺装层如图 2 所示。其中,主梁与桥面铺装(非连续段及连续段)采用 C3D8R 单元,预应力筋与普通钢筋采用 T3D2 单元。各部分材料的力学参数依据现行桥梁设计规范进行取值,由于桥面连续结构上、下表面最大应力的理论计算值是基于线弹性理论而得到,因此,不考虑桥面连续结构混凝土开裂与钢筋屈服等现象,即本文的有限元仅对其进行弹性分析。在实际工程中,桥面铺装与主梁之间并未出现剪切滑移现象,因此,主梁与非连续段桥面铺装之间采用绑定(Tie)约束,而考虑到桥面铺装的整体性与变形协调性,即非连续段与连续段的桥面铺装之间也采用绑定约束。

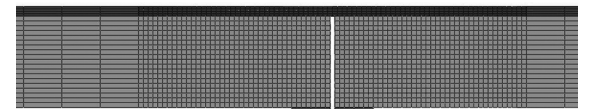


图 2 桥面连续结构立面图  
Fig.2 Elevation of the continuous deck

主梁钢绞线使用初始应力法施加预应力,考虑 ABAQUS 中无法计算钢绞线的预应力损失,所以,根据规范<sup>[16]</sup>计算出扣除损失后的预应力值应为 1 050 MPa。本文在模型上设置刚性大的垫块用来模拟公路- I 级集中荷载的施加,设置垫块主要是为了防止应力集中现象的出现而导致模型收敛性困难,且垫块与主梁之间采用绑定约束,如图 3 所示。

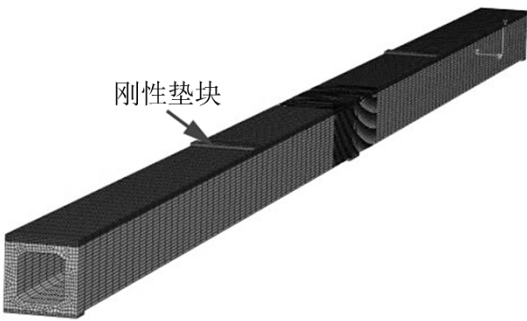


图 3 单梁模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the single girder model

模型采用竖向弹簧单元与纵、横向弹簧单元来模拟主梁下的橡胶支座。橡胶支座的抗压刚度为 28 650 kN/m,抗推刚度为 1 230 kN/m。所以,设置模型竖向弹簧刚度为 28 650 kN/m,而纵、横桥向弹簧刚度为 1 230 kN/m。为了与实际工程相符合,在桥面上施加均布荷载(包含 100 mm 厚混凝土现浇层与沥青混凝土铺装层)。

根据第 2 节的荷载工况,并按照原桥施工顺序进行有限元模型计算。将有限元分析结果与理论计算值进行对比,如表 2 所示。由表 2 可知,有限元结果与理论计算值吻合较好,误差基本控制在 8%以内。因此,通过上述方式建立的有限元模型具有可行性。

表 2 有限元结果和理论计算值对比				
Tab.2 Comparison between finite element results and theoretical calculations				
方法	最大拉应力		最大压应力	
	上表面	下表面	上表面	下表面
理论计算	17.67	4.69	-3.78	-23.77
有限元	17.37	4.55	-3.51	-23.60

## 4 不同参数对桥面连续结构受力性能的影响

文献[15]研究表明,汽车制动力对结果影响较小,因此,本文忽略汽车制动力的影响。同时,增加荷载组合 I 和荷载组合 II 等 2 种荷载工况的作用。其中,二期恒载、公路- I 级车道荷载、整体降温 25 ℃ 与负温度梯度组成荷载组合 I;而二期恒载、整体升温 15 ℃ 与正温度梯度组成荷载组合 II。

4.1 配筋率对桥面连续结构受力的影响

由于实际工程中桥面连续结构的配筋较为随意,因此,本节主要探究桥面连续结构的配筋率对其性能的影响。原桥桥面连续结构的受力钢筋采用 HRB335 钢筋,其中,纵向受力钢筋为直径 16 mm,并在横桥向以 10 cm 间距布置 16 根,即纵向配筋率为 2.1 %,满足规范<sup>[17]</sup>中弯拉构件最小配筋率为 0.2 % 的要求。配筋率参数详见表 3 所示。

表 3 桥面连续结构的配筋率			
Tab.3 Reinforcement ratio of the continuous deck			
型号	直径/mm	布置方式	配筋率/%
HRB335	16	12@ 10 cm	1.2
		16@ 10 cm	2.1
		20@ 10 cm	3.3
		16@ 5 cm	4.1
		18@ 5 cm	5.1

图 4 为各荷载工况作用下桥面连续结构上、下表面最大拉应力随配筋率变化的关系。由图 4 可知,在不同荷载工况作用下,桥面连续结构的最大拉应力均随着配筋率的增加而呈现为线性变化趋势,其中,上表面为线性减小趋势,下表面为线性增大趋势。更细的由图 4(a)可知,当配筋率为 1.2%时,各荷载工况作用下桥面连续结构上表面的最大拉应力均为最大,其值分别为 5.91 MPa(二期恒载)、8.16 MPa(公路- I 级车道荷载)、4.47MPa(负温度梯度)与 17.57 MPa(荷载组合 I)。当配筋率为 5.1%时,桥面连续结构上表面最大拉应力均为最小,其值分别为 5.05、7.96、4.14与 16.71 MPa。由图 4(a)还可知,在荷载组

合Ⅰ作用下的桥面连续结构上表面的最大拉应力要大于其他 3 种工况,且其应力降幅也均要大于其他 3 种工况,其降幅达到了 4.6%。因此,在荷载组合Ⅰ作用下的桥面连续结构上表面最大拉应力受到配筋率的影响最大。

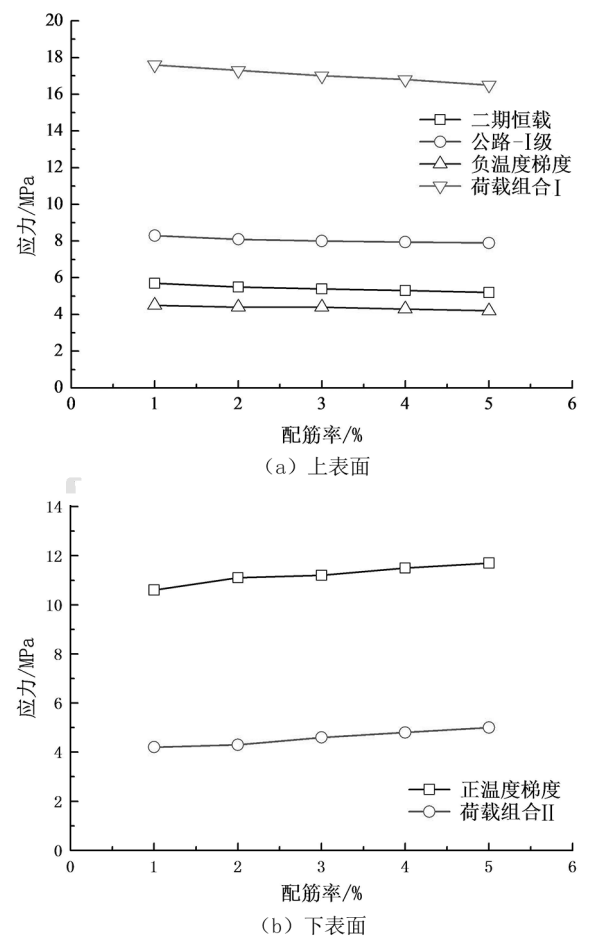


图 4 桥面连续结构上、下表面最大拉应力随配筋率变化曲线

Fig.4 Curve of maximum tensile stress on upper and lower surface of continuous deck changing with the reinforcement ratio

由图 4(b)可知,在正温度梯度作用下,配筋率为 1.2%时桥面连续结构下表面最大拉应力为 10.59 MPa,而当配筋率增大至 5.1%时,其值增长为 11.80 MPa,增长幅度为 11.43%。在荷载组合Ⅱ作用下,配筋率为 1.2%时桥面连续结构下表面最大拉应力为 4.23 MPa,而当配筋率增大至 5.1%时,其值增长为 5.19 MPa,增长幅度为 22.70%。也即在正温度梯度作用下桥面连续结构下表面的最大拉应力要大于荷载组合Ⅱ作用下的,但是,荷

载组合Ⅱ作用下桥面连续结构下表面最大拉应力的增长幅度要大于正温度梯度作用下的。

综上所述,配筋率对桥面连续结构下表面应力的影响要大于上表面的,因此,本文以受到配筋率影响较大的下表面作为参考,当桥面连续结构厚度不变时,建议桥面连续结构采用较小配筋率,这有利于改善桥面连续结构的受力。

4.2 施工顺序对桥面连续结构受力的影响

本节主要讨论桥面系施工顺序对桥面连续结构受力性能的影响,其中,定义原桥的施工顺序为施工顺序 1。而施工顺序 2 定义为待护栏及非桥面连续结构与沥青混凝土铺装层施工完后,再进行桥面连续结构的施工顺序,如图 5 所示。改变施工顺序能有效减小二期恒载对桥面连续结构上表面的作用,但是,其对下表面的受力会产生一定的影响。现将作用在桥面连续结构的二期恒载、公路-I 级车道荷载和负温度梯度组合称为荷载组合Ⅲ,而公路-I 级车道荷载和负温度梯度组合称为荷载组合Ⅳ。

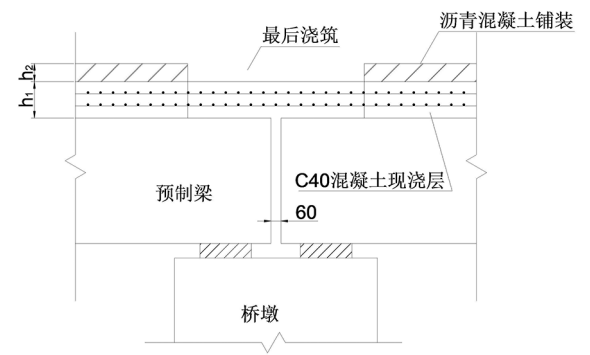


图 5 施工顺序 2 的桥面连续结构示意图(单位:mm)

Fig.5 Diagram of continuous structure of bridge deck in construction sequence 2 (unit: mm)

表 4 为不同施工顺序时桥面连续结构上、下表面最大拉应力的对比。由表 4 可知,在施工顺序 1 与施工顺序 2 作用下的桥面连续结构上、下表面最大拉应力均随着铺装层厚度的增大而逐渐减小,且施工顺序 1 时的桥面连续结构上、下表面最大拉应力均要大于施工顺序 2 的。当上表面受拉时,施工顺序 1 产生的最大拉应力基本是施工顺序 2 的 1.45 倍,而当下表面受拉时,约为 0.41 倍。即施工顺序 2 降低了桥面连续结构上表面最大拉应力,但是,增大了下表面最大拉应力,前者下降了约 31%,后者增大了约 130%。即施工顺



序 2 将不利于改善桥面连续结构的受力性能。

表 4 不同施工顺序时桥面连续结构上、下表面最大拉应力的对比

Tab.4 Comparison of maximum tensile stress of the continuous deck under different construction sequences						
桥面连续结构 铺装层厚度/cm	施 1 时的拉应力/MPa		施 2 时的拉应力/MPa		施 1 时的拉应力/施 2 时的拉应力	
	上表面	下表面	上表面	下表面	上表面	下表面
10	17.51	4.71	12.09	10.85	1.45	0.43
15	16.01	3.92	11.09	10.08	1.44	0.39
20	14.02	3.81	9.95	9.86	1.41	0.39
25	12.04	3.78	8.12	9.06	1.48	0.42

4.3 混凝土桥面连续结构设计建议

经上述分析可知,桥面连续结构的配筋率对其受力性能具有一定的影响,且配筋率较小时对桥面连续结构的受力较为有利;而采用原桥施工顺序对桥面连续结构的受力也较为有利。为此,本文提出的混凝土桥面连续结构设计建议为:桥面连续结构部分采用 1.2% 的配筋率,且其施工顺序应先为主梁混凝土现浇层的施工、紧接着进行桥面连续结构与沥青混凝土桥面铺装层的施工。这样可以有效减小桥面连续结构下表面所受到的最大拉应力,而由文献[15]可知,在桥面连续结构上表面的应力集中处嵌入薄铝片或者软木条(应力分散措施)可有效减小其上表面最大拉应力的发生。

为防止桥面连续结构上、下表面发生整体开裂现象,本文建议在桥面连续结构上、下表面处设置多道锯缝,其能够有效减小桥面连续结构混凝土表面裂缝的产生。

5 结论

本文分析了桥面连续结构受力性能的参数,包括配筋率、桥面系施工顺序等,并得出各个参数

对桥面连续结构局部受力的影响,同时给出桥面连续结构的设计建议:

1)桥面连续结构上表面的最大拉应力随配筋率的增大而减小,而下表面的最大拉应力随配筋率的增大而增大。但是,下表面最大拉应力的变化幅度要大于上表面的,且前者为后者的 4.93 倍。因此,配筋率对桥面连续结构的受力性能产生影响,尤其对其下表面的影响更大。

2)桥面连续结构下表面在施工顺序 2 作用下所产生的最大拉应力要大于施工顺序 1 时的,且增大了 130%。也即施工顺序 2 对桥面连续结构的受力性能将产生不利的影响。

3)在进行桥面连续结构设计时,建议采用 1.2% 的配筋率,且采用施工顺序 1 进行施工。这样将有利于减小桥面连续结构下表面的最大拉应力,而在上表面嵌入薄铝片或者软木条能减小上表面的最大拉应力。

4)本文虽然进行了桥面连续结构配筋率、桥面系施工顺序等参数的分析。但是,还未进行桥面连续结构采用 UHPC 等新型材料的研究,为此,将来还需探讨新型材料应用于桥面连续结构中的受力性能。

参考文献:

[1] 陈宝春,陈友杰. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2013.

[2] 刘丽芬. 混凝土简支梁桥面部分连续新型构造研究[D]. 西安:长安大学,2006.

[3] 邹小魁. 钢筋混凝土桥桥面铺装层应力分析与计算[D]. 西安:长安大学,2009.

[4] 王岗,谢旭,王城泉,等. 简支梁桥拱型桥面连续构造的受力性能[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(6):1049-1057.

[5] 王城泉,申永刚,王岗,等. 空心板梁桥桥面连续构造的受力特性试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(8):1438-1445.

[6] 杨敏,刘艳莉,邓旭东. 桥面连续简支板桥损伤动力机理分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016,12(3):234-238.