

大跨径预应力钢混组合连续箱梁结构设计及仿真计算过程中的关键点分析与研究

张永超¹, 田 晓²

¹中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安

²中交路桥建设有限公司海外分公司, 北京

收稿日期: 2021年11月21日; 录用日期: 2021年12月5日; 发布日期: 2021年12月21日

摘 要

大跨径钢混组合连续箱梁的墩顶负弯矩区混凝土桥面板在使用状态下易因拉应力过大而开裂, 因而结构设计时经常需要配置相应的预应力钢束。考虑到组合梁刚度的绝大部分由钢主梁提供, 配置钢束后的预应力效应必然主要向钢主梁转移, 而不足以抵消外荷载产生的拉应力。为了解决这个难题, 结构设计考虑在预应力作用区域设置抗拔不抗剪连接件, 保证预应力效应对桥面板的绝对影响, 这就使得组合梁的结构设计和仿真计算分析显得异常复杂。本文通过选取某在建工程的大跨预应力钢混组合连续箱梁, 按照普通钢筋混凝土桥面板、预应力混凝土桥面板和钢主梁三种构件, 同时考虑钢与混凝土的普通抗剪效应、抗拔不抗剪效应、预应力效应、施工阶段划分等多种因素和关键点, 对大跨径组合梁进行整体仿真计算分析和研究, 得到的成果用来指导本工程的组合梁结构设计, 对公路其它大跨预应力组合桥梁结构与仿真计算也具有一定的参考价值。

关键词

大跨径预应力组合箱梁, 仿真计算, 抗拔不抗剪, 分析与研究

Analysis and Research on Key Points in the Structural Design and Simulation Calculation of Long-Span Pre-Stressed Steel-Concrete Composite Continuous Box Girder

Yongchao Zhang¹, Xiao Tian²

¹CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Overseas Branch of China Communications Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing

文章引用: 张永超, 田晓. 大跨径预应力钢混组合连续箱梁结构设计及仿真计算过程中的关键点分析与研究[J]. 土木工程, 2021, 10(12): 1229-1238. DOI: 10.12677/hjce.2021.1012135

Abstract

The concrete bridge deck at the negative moment position on the top of the pier of the long-span steel-concrete composite continuous box girder is prone to cracking due to excessive tensile stress in operation period, so the corresponding pre-stressed steel strands are often required in the structural design. Considering that most of the rigidity of the composite beam is provided by the steel main girder, the pre-stressed effect is inevitably transferred to the steel main girder, which is not sufficient to offset the tensile stress generated by the external load. In order to solve this problem, the structural design still needs to be equipped with Uplift-Restricted and Slip-Permitted Connection keys in the pre-stressing area to ensure the absolute influence of the pre-stressed effect on the bridge deck. This makes the structural design and simulation calculation analysis of the composite beam extremely complicated. This paper selects a large-span pre-stressed steel-concrete composite continuous box girder for a certain project under construction, according to the three components of ordinary reinforced concrete deck, pre-stressed concrete deck and steel main girder, while considering various factors and key points such as the ordinary shear effect of steel and concrete, Uplift-Restricted and Slip-Permitted effect, pre-stressed effect, construction stage division, etc. and carries out overall simulation calculation analysis and research on long-span composite beams. The results obtained are used to guide the design of the composite beam structure of this project, and have certain reference value for the structural design and simulation calculation of other large-span pre-stressed composite bridges on the highway.

Keywords

Large-Span Pre-Stressed Composite Box Girder, Simulation Calculation, Uplift-Restricted and Slip-Permitted, Analysis and Research

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大跨径连续组合梁在负弯矩作用下的受力性能是结构设计中需要特别考虑的问题[1], 如果仍然按照传统常规跨径连续组合梁的设计理念与设计方法, 可能会导致组合结构在外荷载作用下桥面板发生开裂[2], 甚至结构因强度不足而破坏。

目前常用的大跨连续组合梁减少墩顶负弯矩桥面板拉应力设计方法主要有支座顶升、合理安排正负桥面板和钢主梁的施工过程、在墩顶负弯矩区配置一定数量的预应力钢束等方法。

支座顶升法在中小跨径组合梁设计中比较适用, 在大跨径组合梁设计中提供的预应力值经常不足以抵消外荷载产生的拉应力; 调整施工阶段顺序能在组合刚度形成之前让桥面板以湿重形式作用在钢主梁上, 桥面板发挥作用时不再承担钢主梁的自重荷载, 是一种非常有效地减小桥面板墩顶负弯矩区桥面板拉应力的方法。

在墩顶负弯矩区配置预应力钢束能给组合梁提供足够大的预压力, 但是传统栓钉的抗剪特性又将绝大部分预应力效应传递到了钢主梁, 通过增加预应力钢束反而对提高桥面板预压应力没有显著效果。鉴于此,

清华大学土木工程学院提出利用抗拔不抗剪连接件代替传统栓钉[3], 保证预应力效应主要向桥面板传导, 以此提高负弯矩区混凝土板的抗裂性能, 此方法已在多个国内项目中得到应用[4], 工程反馈效果显著。

本文以大跨预应力混凝土组合连续箱梁为计算模型, 运用 Midas Civil 有限元分析软件的平面杆系法对结构建立双主梁模型[5] [6], 比较和分析了不同因素下(抗剪键、抗拔不抗剪键、预应力效应、温度效应、收缩徐变效应、施工阶段划分等)对结构性能的影响[7], 从而为结构设计选取最合理的参数取值, 比较方法和结论为工程设计提供参考。

2. 仿真计算及关键点分析

某在建大跨预应力钢混组合梁桥跨径布置为(58 + 105 + 58) m, 桥梁全长 221 m, 桥宽 11 m, 主桥根部梁高 5.2 m, 跨中梁高 2.6 m, 全桥桥面混凝土板厚度统一, 均为 32 cm。

为了能准确分析全桥的应力状态及分布, 采用空间有限元程序 Midas Civil 对钢主梁、正弯矩区普通钢筋混凝土桥面板、负弯矩区预应力混凝土桥面板进行了模拟。全桥仿真计算模型共离散为 686 个节点, 684 个单元, 为双主梁模型(混凝土桥面板和钢主梁分别建立节点和单元), 仿真计算模型如下图 1 所示。

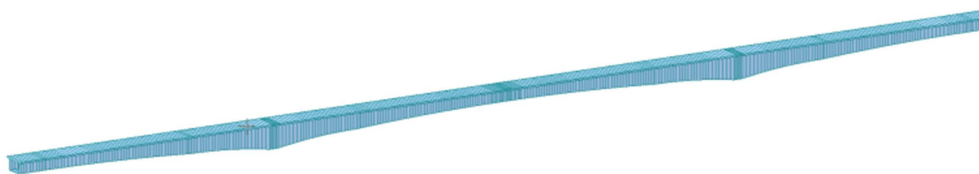


Figure 1. Calculation model of long-span composite continuous beam
图 1. 大跨径组合连续梁计算模型简图

2.1. 预应力的施加

在组合梁结构设计时, 中墩负弯矩区混凝土的拉应力控制为结构设计的关键, 因为此位置极易因拉应力超限而引起混凝土开裂。应用在工程实践中常用的避免或控制负弯矩区混凝土开裂的方法主要有以下三种:

1) 控制负弯矩区桥面板的配筋限制裂缝宽度

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3236-2018) [8]关于最大裂缝宽度的计算公式(如下), 墩顶负弯矩区最大裂缝宽度与混凝土结构的配筋率密切相关, 在中小跨径常规连续组合梁桥结构设计或仿真计算时此方法是非常合理的方案。

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.30+1.4\rho_{te}} \right)$$

但是考虑到本桥跨径大, 桥面板结构尺寸限制了配筋率, 通过理论计算发现, 只通过此方法无法从根本上解决大跨径连续组合梁墩顶位置桥面板开裂的问题, 结构耐久性不能得到很好地保证。

2) 调整支座相对高度(顶升法)形成预应力

此方法在工程实践中应用较多, 主要应用在中等跨径以上连续组合梁的墩顶负弯矩区裂缝控制。该方法的基本原理是: 混凝土浇筑完毕并硬化后, 通过调整连续组合梁桥各桥墩的相对高度, 以此改变结构的内力分布, 在负弯矩区混凝土内形成预压力。在 Midas Civil 仿真计算中是通过对比支座施加节点强制位移来实现, 但是经过理论计算和参考既有项目经验发现, 支座调整的高度通常与桥梁跨径成正比, 对于跨径较大的组合梁, 顶升工程量可能太大而无法实施。下表是不同顶升量(或落梁)下, 仿真计算分析得出的墩顶负弯矩区桥面板拉应力值。

Table 1. Tensile stress value of bridge deck in negative moment area of pier top under jacking method
表 1. 顶升法下墩顶负弯矩区桥面板拉应力值

墩号	顶升量(cm)	频遇组合下最大拉应力(Mpa)	拉应力限值(Mpa)	是否满足
1#主墩	0	8.6	1.92	否
	10	8.3	1.92	否
	20	7.7	1.92	否
	30	7.3	1.92	否
	45	6.9	1.92	否
	50	6.4	1.92	否
	100	4.3	1.92	否
	150	2.1	1.92	否
	180	-1.3	1.92	是

由上表 1 可知, 若用顶升法达到满足控制墩顶负弯矩区裂缝宽度的要求, 本桥大跨径下需要的顶升量要在 1.5 m 以上, 这在工程实践中根本无法实施, 因此本方法并不是理想的选择。

3) 张拉钢丝束在混凝土桥面板内施加预应力[9]

此法为预应力施加最有效的方法, 考虑到本桥组合梁桥跨较长, 总共 210 m, 全桥长范围内张拉不经济, 因此只选择在墩顶负弯矩作用范围内进行张拉。根据计算需要, 在墩顶负弯矩桥面板板宽度范围内配置 22 根 9-15.2 型号的预应力钢束。

2.2. 抗拔不抗剪连接技术的应用

抗拔不抗剪连接技术指在负弯矩区布置新型的抗拔不抗剪连接件, 这种连接件纵向抗剪刚度很弱, 可使混凝土板与钢主梁上翼缘钢板之间沿纵向自由滑动, 从而有效释放混凝土板中的拉应力, 但同时这种连接件可以抵抗因车辆偏载引起的桥面板掀起作用。使用抗拔不抗剪连接件最直接的效果是, 由于桥面板与钢主梁在纵向抗剪上相互剥离, 施加预应力后, 可以使预应力效果最大程度的作用在桥面板上, 降低了桥面板因拉应力过大而开裂的可能。

鉴于仿真计算中采用双梁模型模拟混凝土单元和钢主梁模型, 因此普通抗剪栓钉和抗拔不抗剪连接件在程序上通过设置两种单元之间的边界条件方式实现, 具体如表 2 所示:

Table 2. Boundary Conditions for Shear and pullout resistance of studs
表 2. 栓钉抗剪和抗拔不抗剪的边界条件

类型	边界条件	抗剪连接件(KN/m)	抗拔不抗剪连接件(KN*m [rad])
节点弹性连接	SDx	1,000,000,000	1,000,000,000
	SDy	1,000,000,000	0
	SDz	1,000,000,000	0
	SRx	1,000,000,000	1,000,000,000
	SRy	1,000,000,000	0
	SRz	1,000,000,000	1,000,000,000

仿真计算发现, 采用抗拔不抗剪连接件和普通栓钉抗剪件建立的模型界面处出现了突变和锯齿(如图 2 所示), 这都是合理现象, 究其原因主要有以下几个方面:

1) 仿真计算用到的模型都是梁单元模型, 在模拟两种抗剪特性时, 由于抗剪区域和非抗剪区域两种弹性连接的刚度差异很大, 存在刚度突变, 导致应力结果出现了突变。

2) 汽车荷载中的集中力布载时作用在界面位置处也会引起突变。

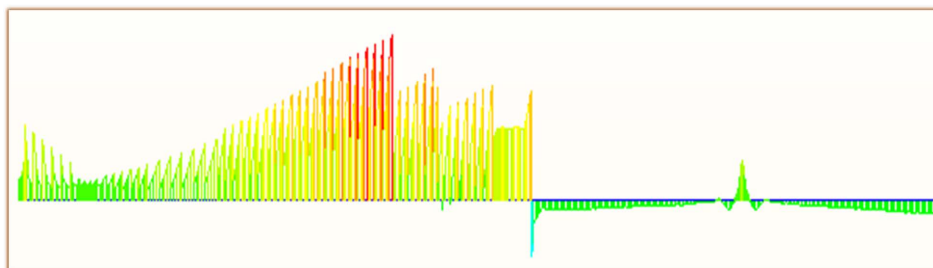


Figure 2. Abrupt change of interfacial stress in shear zone and non-shear zone
图 2. 抗剪区域和非抗剪区域界面应力结果突变示意图

2.3. 施工阶段划分

合理设置施工阶段, 可以减少负弯矩区混凝土的受力, 同时也可以降低收缩徐变对混凝土桥面板开裂的影响。施工阶段划分有两个思路: 1) 有支架安装钢主梁, 无支架浇筑桥面板, 保证桥面板刚度形成前, 混凝土桥面板湿重全部作用在钢主梁上, 减少负弯矩区桥面板拉应力提前产生。2) 有支架安装钢主梁和浇筑正弯矩桥面板, 正弯矩桥面板混凝土强度形成后拆支架, 然后浇筑负弯矩桥面板。考虑到本桥跨径大, 无支架浇筑混凝土现场施工保证措施多, 通过软件对比分析, 决定采用后者方法, 即施工阶段划分如下表 3 所示:

Table 3. Construction phase division

表 3. 施工阶段划分

序号	阶段名称	施工周期
1	安装支架并架设钢主梁	30
2	浇筑正弯矩桥面板并形成刚度	45
3	拆除支架	3
4	浇筑负弯矩桥面板并形成刚度	45
5	张拉钢束	7
6	桥面铺装	10
7	收缩徐变	3650

3. 仿真计算结果及比较分析验算

3.1. 整体受力分析计算结果分析

本部分计算了大跨预应力钢混组合梁结构从安装支架到成桥的全部施工过程。考虑到组合梁结构采用双梁模型进行模拟, 其单元类型包含钢筋混凝土单元、预应力混凝土单元和钢结构单元[10], 因此需要按照规范分别对其进行验算。

1) 正弯矩区桥面板验算

正弯矩区桥面板为钢筋混凝土单元, 在结构设计和计算中主要考虑其承载力以及控制其裂缝宽度, 单元类型按照轴心受拉构件考虑, 其正弯矩区内力计算结果如下图 3 所示。

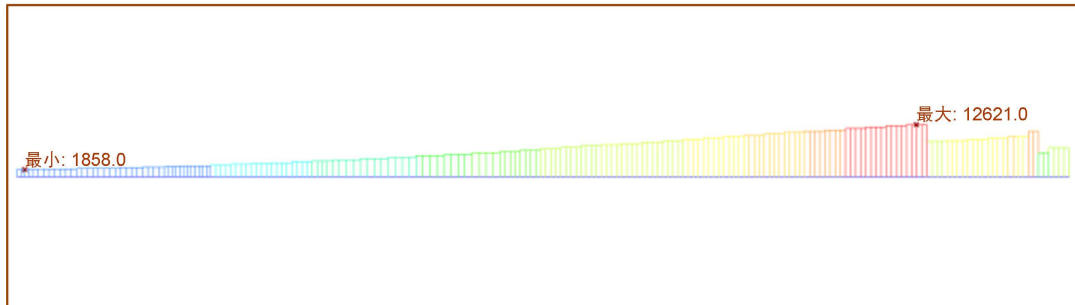


Figure 3. Axial diagram of bridge deck under bearing capacity in positive moment area
图 3. 正弯矩区桥面板承载力状态下轴力图

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3236-2018)第 5.4.1 条规定, 轴心受拉构件的正截面抗拉承载力计算应符合下列规定:

$$\gamma_0 N_d \leq N_{\mu d} = f_{sd} A_s$$

Table 4. Checking table of bearing capacity of bridge deck in positive bending moment area
表 4. 正弯矩区桥面板承载力验算表

单元类型	最大轴力(kN)	容许轴力(kN)
桥面板	12,621.0	16,838.3

承载力计算结果见表 4。可知, 在承载力状态下, 正弯矩区桥面板承载力满足规范要求, 此外其最大裂缝宽度按照规范计算最大为 0.16 mm, 也满足规范中规定的最大不超过 0.2 mm 的要求。

2) 负弯矩区桥面板验算[11]

中墩墩顶负弯矩区桥面板为预应力混凝土单元, 在结构设计和计算中主要考虑按照 A 类构件进行频遇组合和准永久组合下相应的应力控制, 两种组合下的桥面板上缘正应力如下图 4、图 5 所示, 单元类型按照受弯构件考虑。

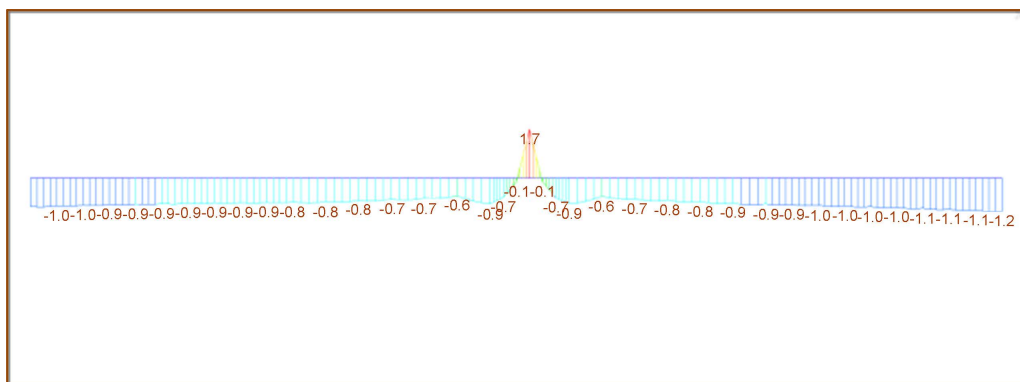


Figure 4. Normal stress diagram of upper edge of bridge deck under frequency combination
图 4. 频遇组合下桥面板上缘正应力图

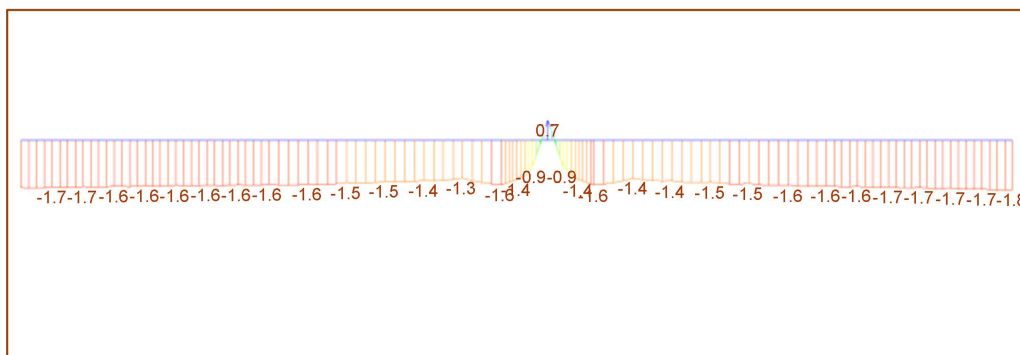


Figure 5. Normal stress diagram of upper edge of bridge deck under quasi-permanent combination
图 5. 准永久组合下桥面板上缘正应力图

从图中可以看出, 在频遇组合下, 负弯矩区桥面板均未出现拉应力(刨去失真区域), 最大应力值为 -0.6 Mpa , 满足规范规定的:

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq 0.7f_{tk} = 1.92 \text{ Mpa}$$

同时在准永久组合下, 负弯矩区桥面板也未出现拉应力, 最大应力值为 -0.9 Mpa , 满足规范规定的:

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq 0$$

考虑到正弯矩区混凝土桥面板和钢主梁单元采用节点刚性连接形式, 不考虑滑移效应, 而负弯矩区则通过弹簧来模拟栓钉(抗拔不抗剪区域), 并在建模中通过设置弹簧沿梁纵向的刚度为零来释放纵向约束, 两者存在刚度突变, 因此建模分析中, 在抗剪区和非抗剪区应力也随之出现突变, 结构模拟失真, 其计算结果可以不予考虑。

3) 钢主梁验算

大跨预应力钢混组合梁的钢主梁部分, 在结构结构设计合计算中主要考虑其抗弯承载力和抗剪承载力, 承载力组合下的钢主梁上下缘正应力和剪力计算结果如下图 6、图 7 所示:

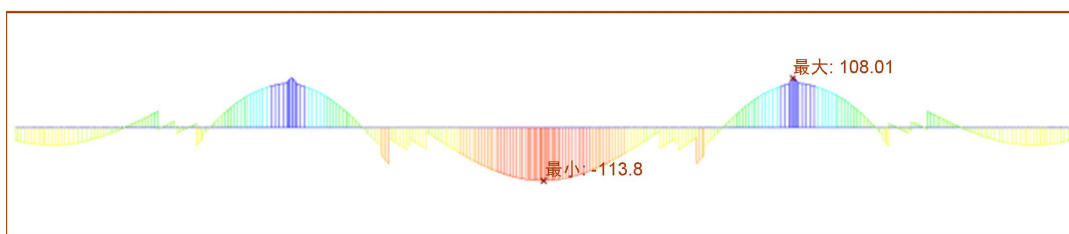


Figure 6. Normal stress diagram of upper edge under bearing capacity of steel main girder
图 6. 钢主梁承载力状态下上缘正应力图

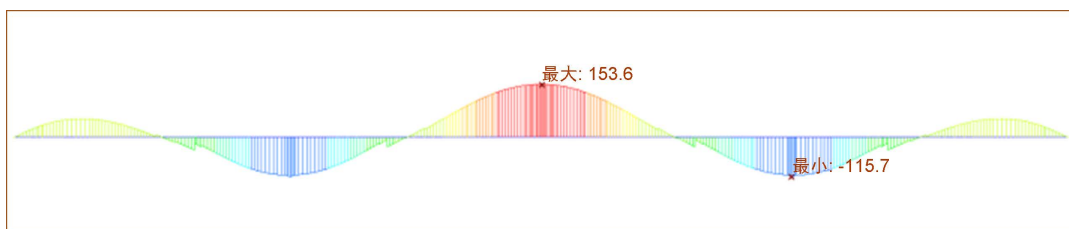


Figure 7. Normal stress diagram of lower edge under bearing capacity of steel main girder
图 7. 钢主梁承载力状态下下缘正应力图

从上述两图的钢主梁正应力计算结果来看,其最大应力值为 153.6 Mpa,出现在中墩负弯矩位置附近,根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015) [12]第 11.2.1 条第 2 款的规定,组合梁钢梁部分抗弯承载力应采用线弹性方法计算,并应符合下列规定:

$$\gamma\sigma \leq f = 270 \text{ Mpa}$$

鉴于大跨预应力钢混组合梁在墩顶负弯矩区采用了抗拔不抗剪连接件,从计算结果上看由于钢主梁的正应力最大效应值比容许值要小很多,从结构设计上来看经济性不高,后期应考虑采用抗拔不抗剪连接技术后可以对钢主梁梁高和板厚进行适当降低来达到结构优化和节省造价的目的。

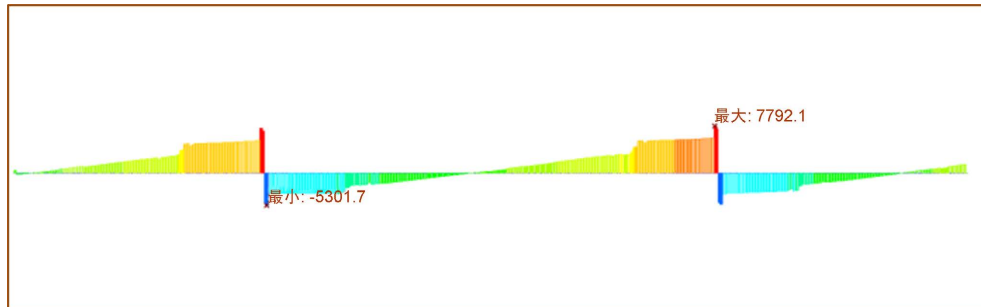


Figure 8. Shear value diagram of steel main girder under bearing capacity
图 8. 钢主梁承载力状态下剪力值图

承载力组合下的钢主梁剪力计算结果如上图 8 所示。从计算结果来看,其最大剪力值为 7792.4 kN,出现在中墩负弯矩位置附近,根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015)第 11.2.2 条的规定,应对组合梁截面抗剪进行验算,钢-混凝土组合梁的抗剪承载力应满足:

$$\gamma_0 V \leq h_w t_w f_{vd}$$

容许剪力值为 41,698.7 kN,钢主梁抗剪承载力满足规范要求,且富裕值极高,设计应考虑从降低梁高和减小腹板厚度等来达到结构优化和降低造价的目的。

3.2. 抗拔不抗剪连接件对组合梁应力的影响

本小节按照上一节中的施工阶段划分,并考虑负弯矩区是否设置预应力钢束,分别按照负弯矩区域为普通抗剪区域和抗拔不抗剪区域进行对比验算,由于篇幅所限,下面只对墩顶位置处的桥面板上缘正应力和钢主梁的上缘正应力列表展现(见表 5),荷载组合桥面板应力为频遇组合,钢主梁为基本组合。

Table 5. Influence of pull-out and non-shear connector on stress of composite beam
表 5. 抗拔不抗剪连接件对组合梁应力的影响

单元类型	连接类型	应力值(Mpa)
桥面板 (频遇组合)	无预应力	7.8
	有预应力, 抗剪	3.3
	有预应力, 抗拔不抗剪	-0.4
钢主梁 (基本组合)	无预应力	137.0
	有预应力, 抗剪	69.3
	有预应力, 抗拔不抗剪	102.6

注: 应力值压负拉正。

从表 5 不难发现, 大跨预应力钢混组合梁设置预应力钢束后确实能减少桥面板墩顶负弯矩区拉应力, 但在大跨径下, 由于墩顶拉应力过大, 仅通过设置预应力钢束并不能完全将拉应力控制在容许值范围内。通过在负弯矩区设置抗拔不抗剪连接件, 能有效发挥预应力效应, 降低预应力效应向钢主梁部分转移的可能, 最大程度地减小桥面板拉应力。

3.3. 桥面板施工顺序对组合梁应力的影响

本小节按照负弯矩区设置预应力钢束, 并考虑设置抗拔不抗剪连接件, 对支架拆除阶段的施工划分对组合梁结构应力影响进行对比分析验算。由于篇幅所限, 下面只对墩顶位置处的桥面板上缘正应力和钢主梁的上缘正应力列表展现, 荷载组合桥面板应力为频遇组合, 钢主梁为基本组合。按照上述原则, 主要考虑 5 个施工工况:

工况 1: 钢主梁安装完成后, 立即拆除支架, 然后浇筑正弯矩桥面板, 最后浇筑负弯矩桥面板;

工况 2: 钢主梁安装完成后, 立即拆除支架, 然后浇筑负弯矩桥面板(包括张拉钢束), 最后浇筑正弯矩桥面板;

工况 3: 正弯矩桥面板浇筑完并形成刚度后, 拆除支架, 然后浇筑负弯矩桥面板;

工况 4: 负弯矩桥面板浇筑完并形成刚度后, 拆除支架, 然后浇筑正弯矩桥面板;

工况 5: 正负弯矩桥面板浇筑完并形成刚度, 负弯矩区桥面板预应力钢束张拉完成后再拆除支架。

Table 6. Influence of bridge deck construction sequence on stress of composite beam

表 6. 桥面板施工顺序对组合梁应力的影响

单元类型	施工工况	应力值(Mpa)
桥面板 (频遇组合)	工况 1	-0.2
	工况 2	1.1
	工况 3	-0.4
	工况 4	1.8
	工况 5	3.0
钢主梁 (基本组合)	工况 1	110.5
	工况 2	93.8
	工况 3	102.6
	工况 4	89.5
	工况 5	62.3

注: 应力值压负拉正。

从表 6 发现, 钢主梁安装完成后拆除支架对减少桥面板拉应力有很大作用, 这是因为拆除支架后再浇筑桥面板, 在桥面板形成刚度前, 其湿重已经全由钢主梁承担, 而桥面板基本没有应力, 待其形成刚度后也只是受到二期恒载和汽车活载等后续荷载作用。因此, 调整桥面板施工顺序能控制裂缝的发展, 从减少混凝土主梁拉应力来说, 工况 3(正弯矩桥面板浇筑完并形成刚度后, 拆除支架, 然后浇筑负弯矩桥面板)是最合理的方案。

4. 结论

通过对某在建大跨径预应力钢混组合连续箱梁仿真计算和结构设计的分析研究, 得出如下结论:

1) 常规组合梁仿真计算分析常采用 Midas 的联合截面法, 但是在跨径组合连续箱梁中由于需要考虑负弯矩区的抗拔不抗剪作用, 采用双梁模型更合理、有效。

2) 大跨径预应力组合连续箱梁墩顶负弯矩区桥面板拉应力可通过设置抗拔不抗剪连接件及合理安排桥面板施工顺序进行控制, 且效果明显, 设计者可根据实际需要进行合理取舍。

3) 大跨径预应力组合连续箱梁结构单元类型多, 包含钢筋混凝土构件、预应力混凝土 A 类构件和钢主梁构件, 设计需要依据规范进行相对应的验算, 并据此做出有针对性的结构设计方案。

4) 大跨径预应力组合连续箱梁在结构设计阶段也可通过对材料、工艺等的选择、安排来减少桥面板和钢主梁应力, 如桥面板材料可以选择使用无收缩混凝土减少收缩应力、选择合理的施工时间减少温度应力、防撞护栏采用钢护栏减少二期恒载对结构的作用应力等。

参考文献

- [1] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1986.
- [2] 陈佳佳. 钢-混组合梁负弯矩区抗、阻裂方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [3] 清华大学土木工程系. 钢-混凝土组合结构在中小跨径桥梁中的比较[R]. 北京: 清华大学, 2007.
- [4] 同济大学桥梁工程系. 上海长江大桥大跨径钢与混凝土组合连续箱梁关键技术研究初步研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] 贾金青, 陈凤山. 桥梁工程设计计算方法及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] 邱顺冬. 桥梁工程软件 Midas Civil 应用工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [9] 贾金青, 孟刚, 朱伟庆. 预应力型钢超高强混凝土组合梁受弯性能试验研究及承载能力分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 1-10.
- [10] 杜欢欢. 预应力钢-混凝土连续组合梁力学性能分析及承载力计算[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [11] 童乐为, 刘洋, 孙波. 负弯矩作用下钢-混凝土组合梁受力性能有限元分析及受弯承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2014(10): 1-9.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.