2022年3月 沈阳建筑大学学报(自然科学版) Mar. 2022
第38卷第2期 Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science) Vol. 38, No. 2

文章编号:2095-1922(2022)02-0288-08 doi:10.11717/j.issn:2095-1922.2022.02.12

基于后结合法的钢-混组合连续梁桥负弯矩区阻裂方法

宋福春[1],刘 帅[1],王依琳[2],苏洪业[1],苏宇祺[3]

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457;
3. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司,辽宁 沈阳 110166)

摘 要 目的 对钢-混组合连续梁桥在负弯矩区的不利受力形式进行抗裂优化分析,提出一种通过特殊布置的剪力连接方式延缓负弯矩区钢梁与混凝土桥面板组合时间的方法即后结合分析法,改善组合梁桥面板开裂问题。**方法** 以一座(40+50+40)m钢-混组合连续梁桥为例,利用有限元软件建立全桥梁单元模型,将改进的后结合法与预压法、支座位移法及部分预应力法等常规方法进行比较分析,对比负弯矩区成桥阶段混凝土桥面板应力值、不同措施下应力储备情况、开裂弯矩及最大裂缝宽度。**结果** 后结合法对于组合连续梁负弯矩区的改善效果明显,相同配筋下应力储备为5.76 MPa,是部分预应力法的1.56倍、预压法压重500 kg/m^{2}的4.8倍、支座位移法顶升20 cm的2.1倍;开裂弯矩较之预压法、支座位移法等有显著提升,运营阶段中支点处最大裂缝宽度仅为0.08 mm。**结论** 部分预应力法应力储备不足;预压法及支座位移法应力储备值较小抗裂效果不明显,更适合用于中小跨径桥梁中,或作为预防开裂的辅助措施,与其他措施配合使用;后结合技术对于组合连续梁负弯矩区处理效果最优,可在大跨度或重载组合连续梁桥中采用。

关键词 钢-混组合连续梁;负弯矩;抗裂;后结合技术

中图分类号 TU398$^+$.9;U448.21$^+$6 **文献标志码** A

Crack Resistance Method of Negative Bending Moment Region for Steel-Concrete Composite Continuous Beam Bridge Based on Post-combination Method

SONG Fuchun[1], *LIU Shuai*[1], *WANG Yilin*[2], *SU Hongye*[1], *SU Yuqi*[3]

收稿日期:2021-04-23
基金项目:"十三五"国家重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809600,2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201904)
作者简介:宋福春(1971—),男,副教授,博士,主要从事钢管混凝土拱桥、组合结构设计与计算理论方面研究。

(1. School of Traffic Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457; 3. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110166)

Abstract: In order to improve the cracking of steel-concrete composite beam bridge deck, the anti-cracking optimization analysis of the steel-concrete composite continuous beam bridge with the unfavorable stress forms in the negative bending moment region is carried out. And a new method of delaying the combination time in the negative bending moment region between the steel beam and the concrete bridge deck by the special arrangement of shear connection is studied, namely the post-combination analysis method. A (40 + 50 + 40) m steel-concrete composite continuous girder bridge taken as an example, the whole bridge element model is established by the finite element software. And the improved post-combination method is compared with the conventional methods such as preloading method, bearing displacement method and partial prestress method. The stress value of concrete bridge deck slab, stress reserve under different measures, cracking moment and maximum crack width in the negative moment area with the method mentioned above are compared. Under the same reinforcement, the stress reserve is 5.76 MPa, which is 1.56 times that of the partial prestressing method, 4.8 times that of the preloading method with compress weigh 500 kg/m^2, and 2.1 times that of the bearing displacement method with support 20 cm. The cracking moment is significantly improved compared with other methods, and the maximum crack width at the fulcrum in the bridge operation stage is only 0.08 mm. The prestress applied by the partial prestress method is not efficient; The stress reserve value of preloading method and bearing displacement method is small, and the anti-cracking effect is not obvious, which is more suitable for medium and small span bridges, or as an auxiliary measure to prevent cracking, combined with other measures; The post-combination technology has the best treatment effect on the negative bending moment area of composite continuous beam, and it is recommended to be used in large span or heavy load composite continuous beam bridges.

Key words: steel-concrete composite continuous beam; negative bending moment; crack resistance; post-combination technology

钢-混凝土组合梁(简称组合梁)通过剪力连接件将钢材与混凝土组合到一起,可以扬长避短,兼具钢材与混凝土的综合优势,具有截面小、承载力高、受力合理等优点。但在连续梁结构中存在跨中部分弯矩转移至支撑处,使桥墩处的弯矩翻转出现负弯矩区,造成下部钢梁受压,上部混凝土板受拉开裂[1-2]的不利受力状态,从而降低截面刚度及桥梁结构的耐久性,这与组合梁最初的目的相悖。因此,负弯矩区桥面板应力以及开裂的控制是组合连续梁设计中的关键问题[3-5]。

针对组合连续梁桥负弯矩区混凝土桥面板的受力特点,目前的处理方式主要有 3 种:一是通过在桥面板中增加一定数量的纵向钢筋,抑制桥面板裂缝宽度;二通过张拉顶部预应力筋法[6],使负弯矩区混凝土桥面板预存压应力;三是通过预压法或支座位移法等技术通过对钢梁负弯矩进行一定程度的预弯,形成组合截面后使钢梁回弹为桥面板储存一部分的压应力。鉴于此,Jiang Shuan 等[7]研究预应力筋对钢-混组合梁的影响,并给出裂缝宽度推荐公式。吴丽丽等[8]分析了预压法的关键参数。刘沐宇等[9]通过有限元分析及模型试验研究,采用设置纵向预应力筋、支点抬高与回落等方式,明确了支点顶升的合理范围。并在武汉长江大桥非通航区连续梁桥[10]、港珠澳大桥浅水区[11]、上海崇明越江通道长江大桥[12]等多项工程中应用。经研究发现,预压法及支点位移法存在施工复杂、混凝土桥面板抗裂性差等问题。而在组合梁中无论施加体外或是体内预应力,均会

使部分预应力转移到钢梁上,使其施加效率大大降低。鉴于此,笔者采取一项改进方式—后结合法,并通过实例加以验证。

1 常规钢-混连续梁桥负弯矩区阻裂方法

1.1 预压法

预压法是在钢梁架设完毕浇筑的正弯矩段混凝土板与钢梁形成的组合截面,预压法施工如图1所示。在①、②、③段组合截面施加一定大小的预加荷载,之后浇注④、⑤段负弯矩区支点桥面板,待负弯矩段达到规定强度设计值与钢梁形成组合梁后清除堆载,为负弯矩区预存部分压应力。

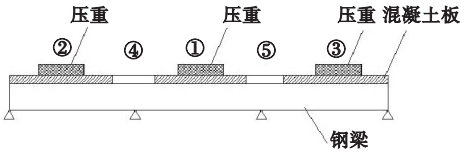


图1 预压法施工图

Fig. 1 Preloading construction drawing

1.2 支座位移法

支座位移法的施加效果如图2所示。

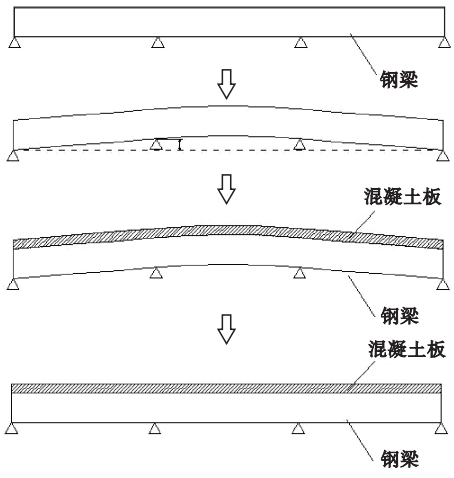


图2 支点位移法施工图

Fig. 2 Construction drawing of pivot displacement method

在钢梁架设后,将中支点抬高至预定位置,后浇筑混凝土桥面板,待桥面板达到规定强度设计值与钢梁形成组合截面后回落钢梁,通过组合梁的下落、变形为桥面板预存压应力。

1.3 部分预应力法

部分预应力法与预压法及支座位移法处理方式相似,通过架设好钢梁并浇筑完混凝土桥面板待其达到设计强度,此时两者形成组合截面,在负弯矩区分段张拉一定数量预应力束为桥面板提供与应力储备,以达到桥面板的抗裂效果。

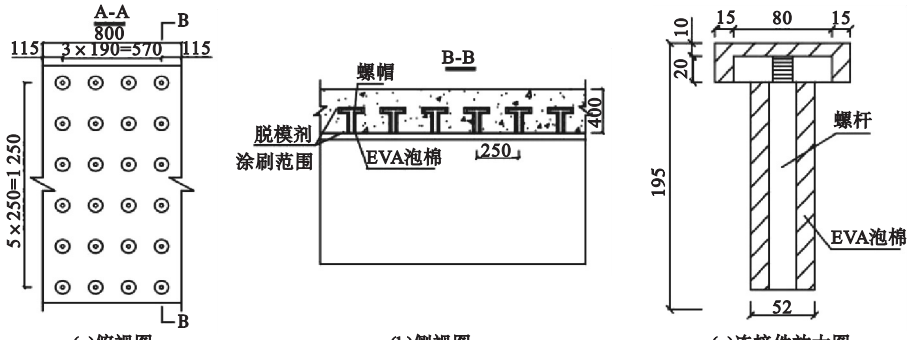
3种方法均存在一定的局限性。①预压法为桥面板的预存压应力幅度有限,且施工周期较长。②在实际工程中,支座位移法对跨径较大或不等跨组合连续梁,钢梁中支座处需要抬高很多,施工难度较大,对跨河桥梁须在河道内搭设支架,较为困难,且由于强迫变形为桥面板储存的预应力会随着混凝土的徐变作用逐渐降低。③部分预应力法存在由于剪力钉作用分散预应力施加效果的影响,使预应力有效利用率大大降低。

2 后结合法阻裂技术

为有效改善组合连续梁负弯矩区桥面板拉应力问题,笔者根据预压法、支座位移法及部分预应力法所面临的问题,提出了改进的后结合法。后结合法是通过特殊布置的连接件延缓钢梁与桥面板结合时间,使预应力筋充分作用至桥面板后,混凝土桥面板与钢梁形成组合截面,避免将预应力分担至钢梁上。笔者提出两种方法实现后结合技术。

方法一:采用抗拔不抗剪连接技术[13],其布置方式如图3所示。处理方式为在钢梁正弯矩段布置普通型号剪力钉,在负弯矩段焊接抗拔不抗剪剪力钉螺杆,套入EVA泡棉至螺杆外侧,将螺母穿入螺杆后套入EVA泡棉,保留传统连接件的抗拔作用,利用此低弹模材料在几乎不削弱组合梁整体刚度的同时消除负弯矩段张拉预应力筋时剪力钉的传导作用,降低其抗剪效果,保留原始的抗拔能

力,使负弯矩段由组合梁受力模式变为叠合梁受力模式,保证张拉预应力束的有效性。



(a)俯视图　　(b)侧视图　　(c)连接件放大图

图 3　新型连接件布置方式

Fig. 3　New connector layout

方法二:在负弯矩段钢梁上间隔 1 m 焊接剪力钉簇,群钉每簇分为 4 排 5 列 800 mm × 600 mm 网格,横向间距为 170 mm,纵向间距为 120 mm。正弯矩段钢梁均匀焊接剪力钉,先浇注正弯矩段及负弯矩群钉外混凝土,预留出与正负弯矩段之间的后浇段,当混凝土达到设计强度后在负弯矩段张拉钢束,形成预应力后浇筑群钉预留槽及正负弯矩段湿接缝。图 4 为群钉布置示意图。

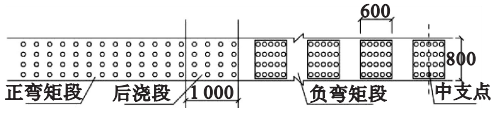


图 4　连接件布置方式

Fig. 4　Connector arrangement

3　工程概况

某桥主桥桥型布置为(40 + 50 + 40)m,3 跨钢-混组合连续梁桥,总长 130 m。其立面布置图如图 5 所示。边跨至中支座 11 m、中支座至中跨 16 m 处梁高由 2.2 m 变高至 2.6 m。截面采用单箱双室钢-混凝土组合箱梁(见图 6)。钢梁采用 Q345d 钢材,上翼缘宽 800 mm,板厚 28 mm,底板宽 6 300 mm,板厚 28 mm,腹板高度 1 744 ~ 2 144 mm,厚度为16 mm。混凝土采用 C50 补偿收缩混凝土,宽 10.5 m,板厚 20 ~ 40 mm。纵向主筋 d 采用 Φ20 mm 的 HRB335 钢筋,配筋率 ρ 为 1.87%。考虑自重、二期恒温度梯度、混凝土桥面板收缩徐变、汽车荷载及不均匀沉降等作用。

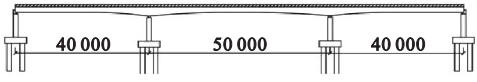
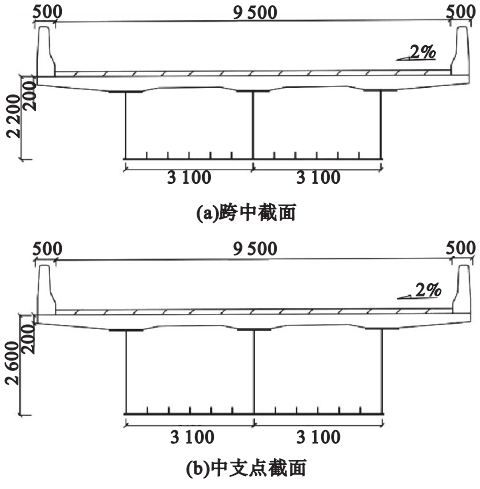


图 5　立面图

Fig. 5　Elevation drawing



(a)跨中截面

(b)中支点截面

图 6　组合梁截面

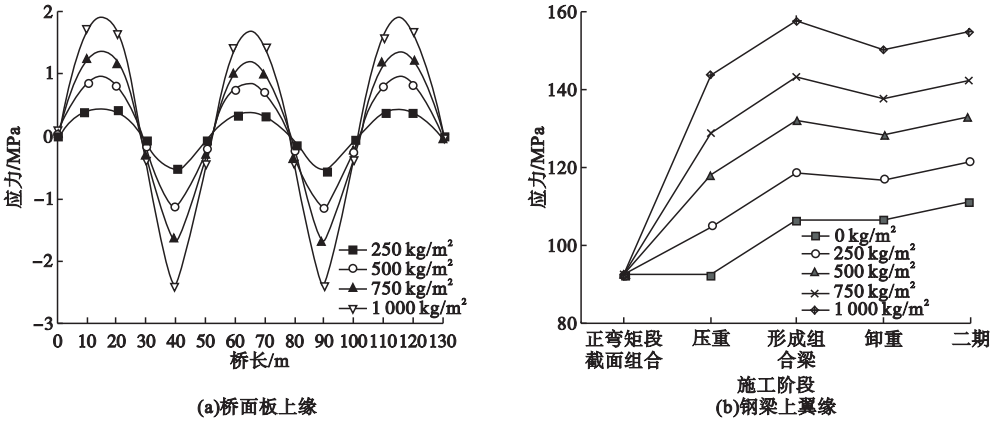
Fig. 6　Section of composite beam

4　结果与分析

4.1　不同方法下压应力储备量

图 7 为预压法在不同压重下,桥面板应力储备及施工阶段钢梁上翼缘中支点处应力图。从图 7(a)可以看出,预压法每压重增加 250 kg/m^2 能为桥面板提供 0.6 MPa 左右的

应力储备,当提供1 000 kg/m^{2}的压重也仅能抵消桥面板2.4 MPa左右的拉应力,根据计算此时跨中需要重达440 t左右的堆载量。从图7(b)可以得出,钢梁上翼缘应力随压重增加呈线性增长趋势,与压重阶段增长的钢梁应力相比,尽管在卸除压重后钢梁应力有所下降,但仍有部分残余应力永久存在于钢梁上翼缘中。分析结果可得,施加500 kg/m^{2}的压重更为合理,但此时成桥阶段桥面板应力储备仅为1.2 MPa,储备幅度有限。

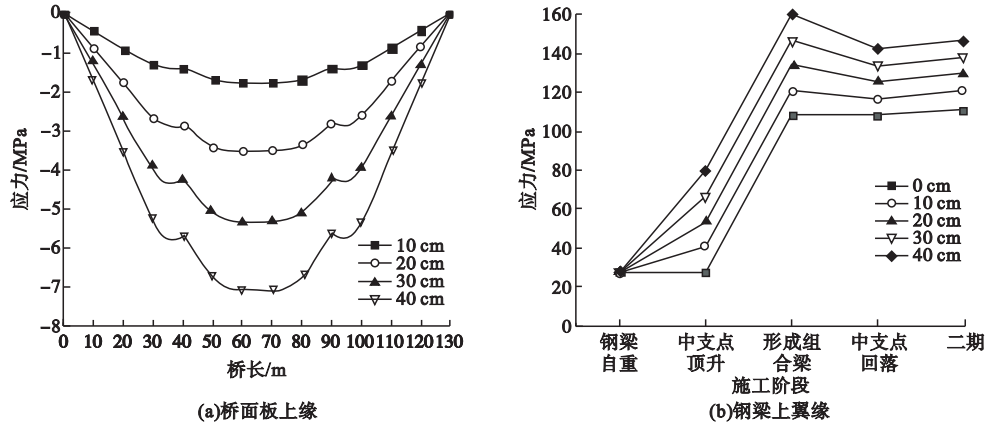


(a)桥面板上缘 (b)钢梁上翼缘

图7 预压法应力储备

Fig. 7 Stress reserve of preloading method

图8为支座位移法在不同顶升高度下,桥面板应力储备及施工阶段钢梁上翼缘中支点处应力图。从图8(a)可以看出,支座位移法每顶升10 cm在支点处能为桥面板提供1.4 MPa左右的应力储备。对比图7(a),累计叠加效果要明显优于预压法。由于支座位移法受顶升装置以及桥梁跨径的影响,在此取中支点抬高20 cm进行后续比较分析。



(a)桥面板上缘 (b)钢梁上翼缘

图8 支座位移法应力储备

Fig. 8 Stress reserve of bearing displacement method

对负弯矩中支点两侧8 m张拉4束12ΦS15.2预应力钢束,12 m张拉4束9ΦS15.2预应力钢束时,部分预应力法与后结合技术桥面板的预应力储备对比值如图9所示,图10为部分预应力法对组合梁桥面板及钢梁产生的主次效应结果。通过对比,后结合法的压应力储备是图7(a)预压法压重500 kg/m^{2}的4.8倍,图8(a)顶升中支座20 cm的2.1倍。其中部分预应力法的应力储备值为3.69 MPa,后结合法的应力储备值为5.76 MPa,不难看出预应力筋的利用率后结合技术明显要好于部分预应力法,主要是

由于在组合梁形成后施加预应力,受剪力钉的影响将部分预应力传递至钢梁如图 10(a)所示。不仅如此,结合图 10(b)部分预应力法中预应力筋引起的桥面板主次效应可以发现,对于超静定的钢-混组合连续梁桥,预应力筋会对截面同时产生主次效应,且引起的主效应为正,使翼缘受拉,次效应为负,使翼缘受拉,但总弯矩仍使混凝土翼缘受压。也正印证了图 9、图 10(a)中部分预应力法钢束张拉的有效利用率不高,致使部分作用效应传递至钢梁的问题。

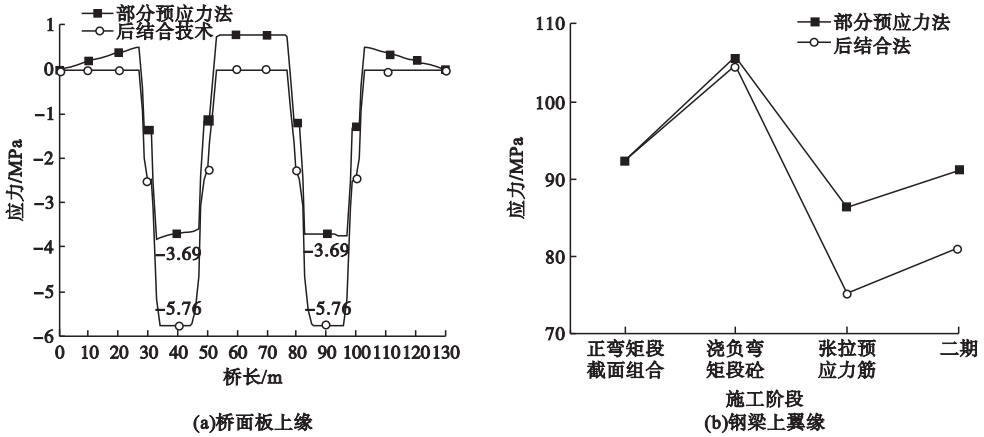


图 9　部分预应力法及后结合法应力储备

Fig. 9　Stress reserve of partial prestressing method and post-bonding method

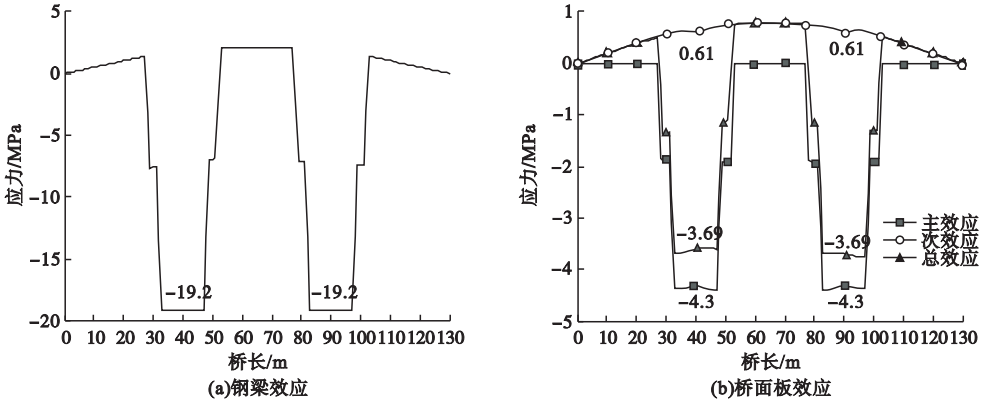


图 10　部分预应力法引起的效应

Fig. 10　Effect of partial prestressing method

4.2　负弯矩区的开裂弯矩

组合连续梁桥由于在负弯矩区桥面板受拉,为尽可能保证负弯矩区桥面板处于不开裂状态,对组合梁采取阻裂措施时需对混凝土桥面板进行开裂验算。

开裂弯矩可通过对有限元计算结果所取得的桥面板上缘应力反向计算求得,按汽车荷载作用效应频遇组合桥面板上缘应力 σ_{cr} 为

$$\sigma_{cr}=\frac{M_g-M_p+0.7M_q+M_s}{\alpha I_{sr0}}(h-y_{sr0})-\frac{N_p}{\alpha A_{sr0}}\leqslant[\sigma]. \tag{1}$$

式中:M_g 为结构恒载产生的弯矩;M_p 为有效预应力引起的中支点截面弯矩,若为钢筋混凝土构件均取 0;M_q 为汽车荷载作用产生的弯矩值;M_s 为支座沉降、温度梯度等其他荷载作用弯矩值;α 为钢材与混凝土弹性模量

之比,I_{sr0}为组合截面惯性矩;h 为组合截面梁高;N_p 为有效预应力引起的中支点截面轴向压力;A_{sr0}为组合截面面积。

由式(1)可近似求出混凝土容许拉应力$[\sigma]$为 $0.7f_{tk}$的截面弯矩。组合梁在负弯矩区的开裂弯矩 M_{cr}:

$$M_{cr}=\frac{\alpha I_{sr0}}{(h-y_{sr0})}\left[0.7f_{tk}+\frac{N_p}{\alpha A_{sr0}}+\frac{M_p}{\alpha I_{sr0}}(h-y_{sr0})\right]. \tag{2}$$

混凝土开裂弯矩如表1所示。对比不同改善措施的开裂弯矩计算值,发现部分预应力法与后结合技术能较好地提升组合梁的开裂弯矩,分别为42 885 kN·m、60 969 kN·m。可以看出后结合技术可以显著增强组合梁负弯矩区的开裂荷载,提高组合梁在正常使用阶段下的受力性能。

表1 开裂弯矩

Table 1 Cracking moment

方法	开裂弯矩/(kN·m)
预压法	15 646
支座位移法	15 646
部分预应力法	42 885
后结合法	60 968

4.3 裂缝宽度计算

我国组合梁桥主要是通过确定桥面板内纵向钢筋的应力来计算裂缝宽度值,笔者采取两种计算方法对组合梁桥的裂缝宽度值进行对比。

方法一:采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)的轴心受拉构件计算组合梁的裂缝宽度,裂缝宽度 ω_1 计算式为

$$\omega_1=C_1C_2C_3\frac{\sigma_{ss}}{E_s}\left(\frac{c+d}{0.28+10\rho}\right). \tag{3}$$

式中:C_1 为钢筋表面形状系数,对光圆钢筋取1.4,对带肋钢筋取1.0,C_1 为1.0;C_2 为作用长期效应影响系数,$C_2=1+0.5N_l/N_s$,考虑在无支架施工中收缩徐变的影响 C_2 取值为1.2;C_3与构件受力性质有关的系数,对组合梁受弯状态取 C_3为1.0。

方法二:采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)新规中的修正公式,即:

$$\omega_2=C_1C_2C_3\frac{\sigma_{ss}}{E_s}\left(\frac{c+d}{0.3+1.4\rho}\right). \tag{4}$$

组合梁桥的结构参数以《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG—T D64-01—2015)为标准,此规范中是以方法一的计算公式来确定裂缝宽度值,但为考虑与现行规范相协调,在此引入《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018),即方法二进行对比研究。最大裂缝宽度计算结果如表2所示。

表2 最大裂缝宽度

Table 2 Maximum crack width

方法	钢筋应力σ_{ss}/MPa	ω_1/mm	ω_2/mm
预压法	190.1	0.153	0.219
支座位移法	167.6	0.135	0.193
部分预应力法	106.5	0.086	0.122
后结合法	69.6	0.056	0.08

通过规范对比可知,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中最大裂缝宽度值要明显高于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004),前者裂缝宽度值为后者1.4倍左右。鉴于此,笔者处于偏安全考虑,对于今后组合梁的裂缝计算式可参考方法二中 ω_2 的方法计算。

从表2可知,各项阻裂方法均能起到一定降低裂缝宽度的作用,支座位移法及预压法改善效果并不明显,原因在于两种方法受支点位移量及压重量的影响。而施加部分预应力及后结合技术改善效果显著,中支点裂缝宽度分别为0.122 mm、0.08 mm,其中后结合法降低裂缝宽度效果最好。

5 结 论

(1)预压法及支点位移法为桥面板施加

的压应力储备效果不明显,更适合与其他阻裂方法综合使用,作为预防开裂的辅助措施。同配筋下相比部分预应力法,后结合技术表现更好,为桥面板提供 5.7 MPa 左右的应力储备,是部分预应力法的 1.56 倍。

(2)后结合法的开裂弯矩为 60 968 kN·m,较之预压法、支座位移法、部分预应力法有明显的提升,裂缝宽度值仅为 0.08 mm,改善效果明显。

(3)对比规范裂缝宽度计算值存在的差异,组合梁裂缝宽度计算式可采用方法二中 ω_2 的方法计算。

参考文献

[1] 聂建国,张眉河. 钢-混凝土组合梁负弯矩区混凝土板裂缝研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),1997,37(6):95-99.
(NIE Jianguo, ZHANG Meihe. Study on the concrete flange in tension of composite steel-concrete baeams [J]. Journal of tsinghua university(science and technology),1997,37(6):95-99.)

[2] 余志武,郭风琪. 部分预应力钢-混凝土组合连续梁负弯矩区裂缝宽度试验研究[J]. 建筑结构学报,2004,25(4):55-59.
(YU Zhiwu, GUO Fengqi. Experimental study of crack width in negative bending region of partially prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. Journal of building structures,2004,25(4):55-59.)

[3] SONG Aiming, WAN Shui, JIANG Zhengwen, et al. Residual deflection analysis in negative moment regions of steel-concrete composite beams under fatigue loading [J]. Construction and building materials,2018,158(1):50-60.

[4] JOHNSON R P, ALLISON R W. Cracking in concrete tension flanges of composite T-beams [J]. The structural engineer,1983,61(3):9-16.

[5] 陈百玲,李明姝,刘文文,等. 工字形曲线组合梁负弯矩区侧向失稳分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(4):586-592.
(CHEN Bailing, LI Mingzhu, LIU Wenwen, et al. Lateral buckling analysis of I-curve composite beams in negative moment region [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2021,37(4):586-593.)

[6] AYYUB B M, SOHN Y G, SAADATMANESH H. Prestresssed composite girders. I: experimental study for negative moment [J]. Journal of structural engineering, ASCE, 1992, 118(10): 2743-2763.

[7] JIANG Shuan, BAI Lili, XUE Weichen. Calculation of crack width of steel-concrete composite beam prestressed with internal tendons [J]. Advanced materials research, 2014,889(2):1445-1449.

[8] 吴丽丽,聂建国. 钢-混凝土连续组合梁非张拉预应力技术的关键参数分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2011,39(4):156-162.
(WU Lili, NIE Jianguo. Analysis of key parameters of non-tensioned prestressing technology for steel-concrete continuous composite beams [J]. Journal of south China university of technology (natural science edition),2011,39(4):156-162.)

[9] 刘沐宇,毛玉东,邓晓光,等. 港珠澳大桥组合连续箱梁模型试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(9): 90-95.
(LIU Muyu, MAO Yudong, DENG Xiaoguang, et al. Model test of continuous composite box girder in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Journal of Wuhan university of technology,2014,36(9): 90-95.)

[10] 朱家海. 连续组合梁桥负弯矩区支点顶升施工受力研究[J]. 中外公路,2014,34(3): 110-113.
(ZHU Jiahai. Study on jack-up construction stress of fulcrum in negative moment zone of continuous composite beam bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2014, 34(3): 110-113.)

[11] 郑和晖,巫兴发,黄跃,等. 钢-混组合连续梁负弯矩区桥面板抗裂措施[J]. 中外公路,2014,34(5):152-155.
(ZHENG Hehui, WU Xingfa, HUANG Yu, et al. Anti-cracking measures of bridge deck in negative moment zone of steel-concrete composite continuous beam [J]. Journal of China & foreign highway,2014,34(5):152-155.)

[12] 曾德礼,田洪松. 钢-混凝土组合梁中支点负弯矩段混凝土预应力施加技术[J]. 世界桥梁,2013,41(1):22-25.
(ZENG Deli, TIAN Hongsong. Prestressing technology of concrete in negative moment section of steel-concrete composite beam [J]. World bridges,2013,41(1):22-25.)

[13] 聂建国,陶慕轩,聂鑫,等. 抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J]. 土木工程学报,2015,48(4):7-14.
(NIE Jianguo, Tao Muxuan, Nie Xin, et al. New technique and application of uplift-restricted and slip-permitted connection [J]. China civil engineering journal,2015,48(4): 7-14.)

(责任编辑:徐玉梅　英文审校:唐玉兰)