

不同结合方式对预应力组合梁桥受力的影响

张龙伟¹, 邹迪升^{2*}, 陶仙玲³, 黄超⁴, 胡琼¹

(1.台州市交通勘察设计院有限公司, 浙江 台州 318000; 2.同济大学, 上海市 200092;

3.台州高速公路建设指挥部, 浙江 台州 317000; 4.杭州市市政工程集团有限公司, 浙江 杭州 310006)

摘要: 为了明确不同结合方式对预应力组合梁桥受力性能的影响,以一主跨 70 m 的预应力组合梁为例,选取先结合组合梁和后结合组合梁两种结构形式作为对比分析对象,采用空间有限元模型详细模拟了组合梁的施工过程,计算两种不同结合方式的组合梁的受力性能。计算结果表明:采用常规的先结合组合梁在混凝土桥面板张拉预应力后,部分预应力通过连接件传递给钢梁,而后结合组合梁的混凝土桥面板获得全部的预应力。后结合组合梁与先结合组合梁相比,在中支点截面混凝土顶面预压应力前者比后者大 2.84 MPa、钢梁顶板的压应力前者比后者减少 46.74 MPa、钢梁底板的拉应力前者比后者减少 4.84 MPa。后结合预应力桥面板比先结合获得更多的预压应力储备,预压应力提升比例为 30%,提高了桥面板在正常使用过程的抗裂性能。

关键词: 桥梁工程;组合梁;预应力;结合方式

中图分类号: U443.35

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)10-0057-05

0 引言

钢混组合梁桥是一种通过剪力连接件将钢主梁和混凝土桥面板结合成一体,共同承担作用的梁式桥。该种结构形式充分发挥混凝土和钢材的材料性能。随着跨径逐渐增加,当跨越路口和既有线路等中大跨径桥梁时,连续钢混组合梁比混凝土连续梁具有更优秀的跨越能力^[1]。由于中支点附近的梁体承担负弯矩,混凝土桥面板处于受拉状态,钢梁底板处于受压状态,必须重视负弯矩区钢底板失稳和桥面板开裂问题。钢底板可以通过设置加劲肋,或浇筑底板混凝土等措施避免失稳^[2],但是桥面板开裂造成结构刚度下降,严重影响桥梁的耐久性能^[3]。因此提高负弯矩区混凝土桥面板的抗裂性成为连续钢混组合梁桥亟待解决的技术难题。

目前国内外学者对连续组合梁负弯矩区开展了一系列研究,提出了如下改善负弯矩区受力状态的基本思路。第一类是减少负弯矩区混凝土桥面板所受到的拉应力,典型方法有浇筑底板混凝土法、降低抗剪连接程度法^[4]、改变浇筑次序法;第二类是增加负弯矩区混凝土桥面板内的预压应力储备,典型方法有调整支点法、压重法和张拉预应力法^[5];第三类

是提高混凝土材料自身的抗裂性能^[6],选用抗拉性能更好的纤维混凝土材料。工程实践表明,张拉预应力法在中大跨径连续组合梁中具有显著的竞争优势。

张拉预应力法根据钢混结合时间和预应力张拉时间的先后顺序分成先结合法和后结合法。目前应用最广泛的常规方法是先结合法,首先将负弯矩区混凝土桥面板与钢梁形成组合截面,然后再张拉预应力钢束,由于组合截面协同受力,部分预压应力也同时传入钢梁内。对于跨度较大的组合梁桥,钢梁截面相对于组合截面刚度越大,混凝土桥面板获得的预压应力比例越低,钢梁底板越受压不利。后结合法是指采用隔离措施保证负弯矩区桥面板与钢梁之间不连接,首先张拉预应力钢束使得预压应力全部传入混凝土桥面板内,再通过群钉连接件将预应力混凝土桥面板与钢梁组合,并承担结构的后期受力^[7]。当前国内外学者基于后结合预应力法开展了诸多理论研究和模型试验^[8],研究表明后结合预应力组合梁混凝土预压应力施加效率高,提高了混凝土桥面板的抗裂性能,具有较好的推广使用价值和较大的应用发展空间。

目前后结合预应力混凝土组合梁这种新结构的工程实例很少,相关的研究还不够充分,为此本文依据主跨 70 m 的预应力组合梁具体工程,选取先结合组合梁和后结合组合梁两种结构形式作对比分析,计算分析不同结合方式对预应力组合梁桥受力性能的影响。

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 浙江省交通运输厅科技项目(No. 2020031)

作者简介: 张龙伟(1980—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁结构设计与组合结构桥梁研究工作。

1 后结合运用实例

1.1 背景工程介绍

本文背景工程为浙江省台金高速公路东延台州市区连接线工程的 45 m+70 m+45 m 连续槽形钢-混凝土组合梁桥,构造见图 1。为了提高负弯矩区混凝土桥面板在使用过程中的抗裂性能,本工程采用后结合预应力法增加桥面板的预压应力储备。本桥的曲率半径为 720 m,横向由 4 个箱室构成,主梁边主跨段的梁高为 2.6 m,在中支点变高至 3.2 m,混凝土桥面板总宽 26 m,厚度为 240 mm,在现场分阶段浇筑成型。

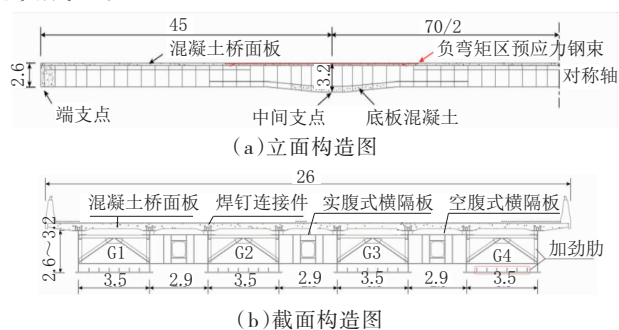


图 1 背景工程桥梁构造图(单位:m)

本工程在正弯矩区段采用连续布置焊钉的传统构造形式,只在负弯矩区段采用钢套筒群钉连接件的特殊构造形式(见图 2、图 3),用于实现混凝土桥面板和钢主梁的完全分离。直径 6 cm 的波纹钢套筒套在直径 22 mm 的圆柱头焊钉外作为混凝土浇筑的内模,防止负弯矩混凝土在浇筑过程中和焊钉根部连为一体。套筒群钉为 4×5 布局,纵向群钉中心间距 1 m,待预应力张拉完毕后,用高强砂浆填充钢套筒,从而使得混凝土桥面板和钢梁形成可靠的连接。



图 2 钢套筒群钉构造

负弯矩区混凝土桥面板在满足计算和构造的条件下,分两批次张拉预应力钢束,预应力钢束的锚固构造见图 4。第一批次的预应力钢束用扁锚锚固在负弯矩区桥面板厚度范围内,第二批次的预应力钢束



图 3 负弯矩区桥面板

用圆锚锚固在混凝土板下方突出的齿块上。预应力钢束张拉控制应力为 1 339 MPa。



图 4 预应力钢束锚固位置

1.2 施工过程介绍

组合结构桥梁的恒载内力与施工过程密切相关,为了降低负弯矩区混凝土桥面板由恒载产生的拉应力,背景工程采用改变浇筑次序法现浇混凝土桥面板,本座后结合预应力组合梁的施工过程可分成如下若干道工序,工序示意见图 5。

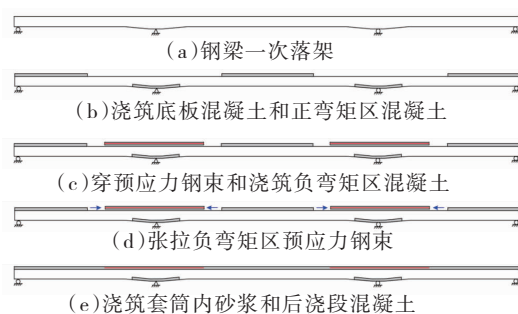


图 5 后结合预应力组合梁桥施工过程示意图

(1)用钢管支架搭设槽型钢主梁,焊接完成后将钢主梁一次落架。

(2)在槽型钢箱中搭设正弯矩区段的桥面板底模,然后浇筑正弯矩区的桥面板混凝土,以及负弯矩区钢主梁底部的双结合混凝土。

(3)在槽型钢箱中搭设负弯矩区段的桥面板底模,在钢筋网中穿预应力钢束,并用钢套筒套住群钉中的每个焊钉,然后浇筑负弯矩区的桥面板混凝土。

(4)分两批次张拉负弯矩区桥面板内的预应力钢束。

(5)浇筑钢套筒内的高强砂浆并形成组合结构,浇筑张拉端的后浇段桥面板混凝土,形成完整的桥梁结构。

2 有限元模型

用 ANSYS 建立背景工程的全桥板壳实体有限

元模型,其中混凝土桥面板采用 SOLID185 实体单元,内置的钢筋用实体单元弥散的加强层模拟;钢主梁的受力板件采用 SHELL181 板壳单元,加劲肋板件用 Beam188 梁单元模拟,并约束在相应的板壳节点上;预应力钢束采用只受轴力的 LINK180 杆单元,且每一个预应力钢束的节点都与最近的混凝土节点自由度耦合,以保证预应力钢束和相邻的混凝土变形协调;焊钉连接件采用 COMBIN14 弹簧单元,赋予三个方向的弹性系数(k_x 、 k_y 和 k_z)以模拟钢混之间的滑移。有限元模型见图 6,模型的材料特性见表 1。

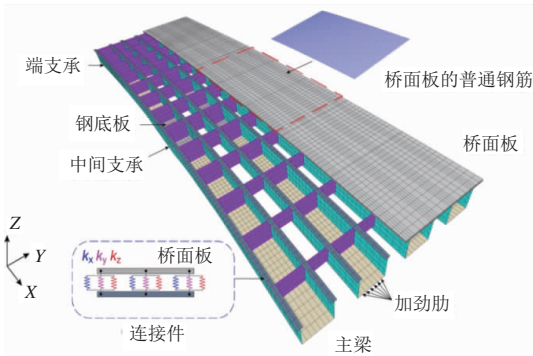


图 6 背景工程半桥板壳实体有限元模型示意图

表 1 材料特性

材料性质	C50 混凝土	Q345 钢材	钢绞线
弹性模量 /GPa	34.5	210	195
泊松比	0.167	0.33	0.33
密度 /(kg·m ⁻³)	2 500	7 800	7 800

3 有限元计算结果

本模型需计算不同结合方式的组合梁在张拉预应力钢束时,正、负弯矩区混凝土桥面板和钢主梁的应力变化。对于后结合预应力组合梁,用生死单元钝化负弯矩区的弹簧单元和后浇段的混凝土;对于先结合预应力组合梁,只需钝化后浇段的混凝土并激活所有弹簧单元,保证负弯矩区混凝土桥面板和钢主梁形成可靠的连接。

3.1 后结合预应力法

图 7 为后结合预应力组合梁桥 1/4 混凝土桥面板在预应力张拉后的应力云图,从中可以看出正弯矩区混凝土内基本没有应力,负弯矩区混凝土的最大预压应力达到 13.5 MPa,中支点附近的平均预压应力为 11.41 MPa。混凝土的预压应力在张拉端附近应力集中,呈现出横向从边护栏向中轴线递增的分布规律,以中支点截面为例,边护栏混凝土的预压应力为 10.48 MPa,是中轴线处混凝土的 87%。

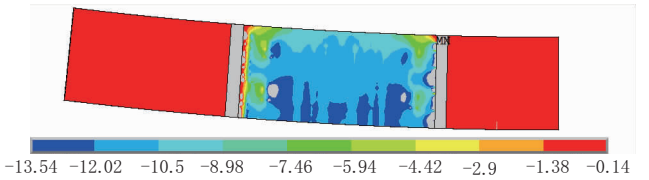


图 7 后结合组合梁桥混凝土板应力云图(1/4 桥,单位:MPa)

图 8 为后结合预应力组合梁桥 1/4 钢主梁在预应力张拉后的应力云图,整体钢主梁产生的应力较小,只有负弯矩区钢顶板受摩擦力的作用产生不到 6 MPa 的预压应力,钢主梁在各个方向上没有变形。计算结果表明后结合构造能够将全部预压应力仅施加到负弯矩区混凝土桥面板内,对桥梁的其他部分的构件没有影响,最大程度的提升了预应力张拉效率,可提高桥面板的抗裂性能。

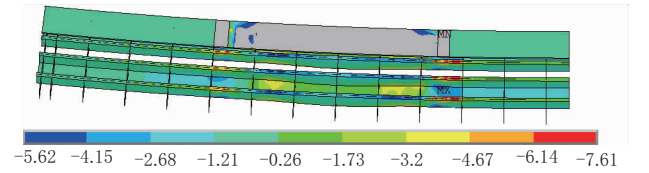


图 8 后结合组合梁桥钢板应力云图(1/4 桥,单位:MPa)

3.2 先结合预应力法

图 9 为先结合预应力组合梁桥 1/4 混凝土桥面板在预应力张拉后的应力云图,从中可以看出正弯矩区的混凝土受到了 1.1 MPa 的拉应力,但是中支点的平均预压应力只有 8.56 MPa,是后结合预应力法的 75%,负弯矩区混凝土的最大预压应力仅为 10.3 MPa。由于桥面板和钢主梁在张拉预应力时已经形成了可靠的连接,混凝土内的预压应力通过连接件传递到钢梁顶板,进而使得全桥产生了预应力的主次效应。

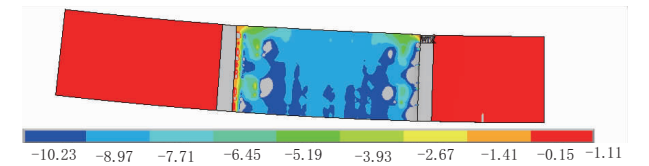


图 9 先结合组合梁桥混凝土板应力云图(1/4 桥,单位:MPa)

图 10 为先结合预应力组合梁桥 1/4 钢主梁在预应力张拉后的应力云图,钢主梁出现较大的整体变形,中支点的赘余反力造成边跨和中跨上拱并承担负弯矩,使得钢梁顶板受拉底板受压。从图中可以看出,钢梁顶板的最大拉应力为 63.4 MPa,位于刚度薄弱的后浇段,此处只有钢梁截面承担预应力产生的次效应,主跨跨中虽然也存在相同的效应,但是由于组合截面刚度较大,钢梁和混凝土的应力相对较小。中支点负弯矩区的钢顶板承担桥面板传递的预压应力,最大压应力为 52.6 MPa,预压应力峰值出现在中

支点截面附近。计算结果表明先结合构造将部分预压应力从负弯矩区桥面板传递到钢主梁内,对桥梁的其他构件产生了预应力主次效应,比后结合预应力法降低了预应力张拉效率。

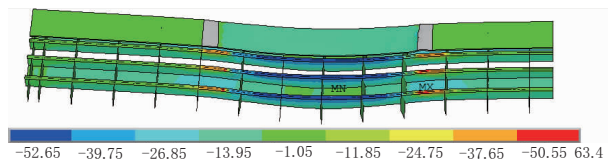


图10 先结合组合梁桥钢板应力云图(1/4桥,单位:MPa)

3.3 不同结合方式的受力性能比较

为了更好的比较不同结合方式对预应力组合梁桥空间受力性能的影响,选择背景工程的边跨跨中截面、中间支点截面和主跨跨中截面这三个关键截面作为分析对象,并提取桥面板混凝土上表面纵向应力,应力提取点见图11。图12为不同结合方式组合梁的混凝土表面应力横向分布图,选取曲线内侧的两个箱室进行分析。从图中可以看出,在边跨跨中和中跨跨中截面上,后结合预应力组合梁混凝土几乎没有应力,而先结合组合梁混凝土产生约0.5~1 MPa的拉应力,并且从边护栏C1到中轴线C9逐渐递增。对于中支点处的混凝土截面,两种结合方式的桥面板预压应力呈现出相同的横向分布规律,虽然先结合桥面板的应力横向分布更为均匀,但是获得的预压应力显著低于后结合桥面板。

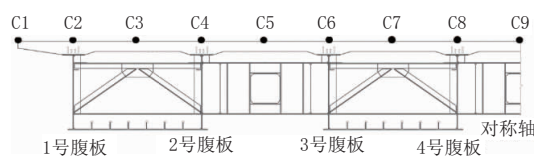


图11 曲线内侧箱室的混凝土应力提取点示意图

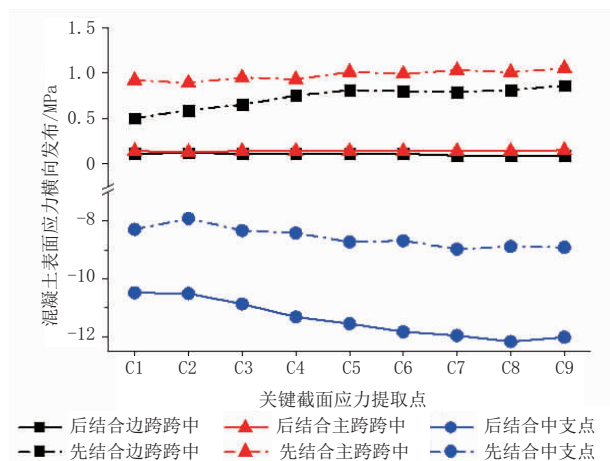


图12 混凝土表面应力横向分布图(单位:MPa)

为了研究中支点预压应力的纵向分布规律,选择桥面板的边护栏C1和中轴线C9,以中支点截面为中心,纵向向两个张拉端延伸并提取相应位置处

的预压应力,两种组合梁的混凝土上表面应力分布见图13。从中可以看出,两种结合方式的边护栏处桥面板获得的预压应力纵向呈V形分布,张拉端两侧的预压应力都很小,只有在中支点截面两侧6 m之内处于稳定状态。中轴线处桥面板获得的预压应力在张拉端出现应力集中,在中支点截面两侧10 m之内均匀分布。

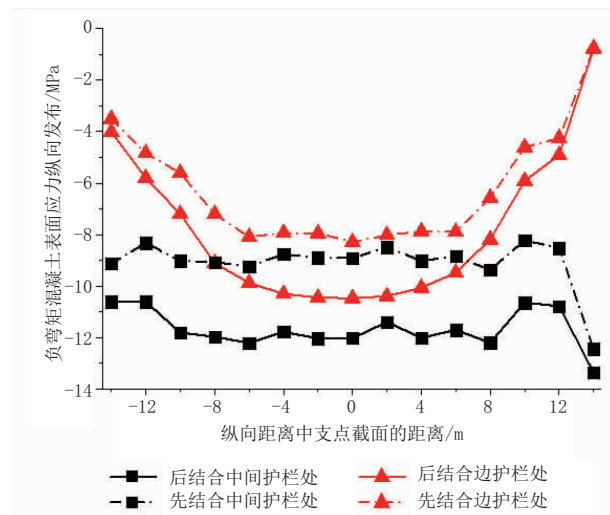


图13 负弯矩区混凝土表面应力纵向分布(单位:MPa)

表2给出了关键截面上混凝土和钢结构的应力。从表中可以看出,后结合预应力组合梁的钢板应力远小于先结合预应力组合梁,尤其是中支点钢顶板的应力仅为先结合的6%,其余位置处的钢板应力为先结合的5%~27%之间,说明后结合预应力技术对边主跨梁段的受力性能影响非常小。后结合中支点处钢梁顶板的压应力比先结合减少46.74 MPa,钢梁底板的拉应力比先结合减少4.84 MPa。先结合组合梁在张拉预应力时,钢主梁受力最不利的位置位于后浇段,此处只有纯钢梁截面承担预应力次效应。桥面板计算结果显示,后结合组合梁与先结合组合梁相比,在中支点截面混凝土顶面压应力前者比后者大2.84 MPa。后结合预应力桥面板比先结合获得更多的预压应力储备,预压应力提升比例为30%,提高了桥面板在正常使用过程的抗裂性能。

4 结 语

本文结合一具体工程建立组合梁空间板壳实体有限元模型,模拟不同结合方式的施工过程,分别计算不同结合方式的组合梁在张拉预应力时的受力性能,对比计算结果得到如下结论:

(1)后结合的负弯矩区桥面板获得全部的预压应力,比先结合多2.84 MPa的预压应力储备,预压

表 2 不同结合方式的组合梁桥计算结果汇总								单位:MPa
计算项目	边跨跨中		中间支点		主跨跨中		后浇筑段	
	后结合	先结合	后结合	先结合	后结合	先结合	后结合	先结合
桥面板平均应力	0.10	0.73	-11.41	-8.57	0.14	0.97	—	—
钢顶板最大应力	0.69	4.81	-2.77	-49.51	0.58	4.36	7.61	63.4
钢底板最大应力	-2.13	-15.34	1.73	6.57	-2.04	-15.13	-5.62	-20.5

应力提升比例为 30%，提高了桥面板在正常使用过程的抗裂性能。

(2)先结合的负弯矩区钢主梁承担由剪力钉传递的预压应力,预应力产生的主次效应远高于后结合组合梁,其中钢顶板的压应力比后结合增加 46.74 MPa,钢底板的拉应力比后结合增加 4.84 MPa。

(3)先结合预应力组合梁的主边跨受预应力次效应出现上拱,钢梁最大应力为 63.4 MPa,出现在刚度薄弱的后浇段,而后结合预应力技术对边主跨梁段的受力性能基本没有影响。

参考文献:

[1] 聂建国,余志武.钢—混凝土组合梁在我国的研究及应用[J].土木工程学报,1999,32(2):3-7.

[2] XU Chen ,SU Qingtian ,WU Chong ,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.

[3] 王明忠,陈世鸣.负弯矩区预应力钢—混凝土组合梁的力学特性[J].工业建筑,1997,27(1):19-22.

[4] 聂建国,李一昕,陶慕轩,等.新型抗拔不抗剪连接件抗拔性能试验[J].中国公路学报,2014,27(4):39-45.

[5] 薛伟辰,李杰,何池.预应力组合梁长期性能试验研究与时随分析[J].中国公路学报,2003,16(4):40-43.

[6] 苏庆田,杨国涛,吴冲.预制预应力混凝土板组合梁受力性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(7):996-1002.

[7] 胡一鸣.后结合预应力槽形组合梁的合理结构与受力性能研究[D].上海:同济大学,2019.

[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.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴，为您提供平台，携手共同发展！

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com