

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.11.019

# 钢-混凝土叠合板组合连续梁桥收缩徐变效应分析

顾民杰, 刘晓奎

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:**以某市高架快速路(40 m+55 m+40 m)钢-混凝土叠合板组合连续梁桥为工程背景,采用有限元分析计算其收缩徐变效应。分析结果表明:因预制板和现浇板加载龄期的差异而产生的混凝土收缩徐变差异,会引起现浇板、预制板和钢梁之间的应力重分布;叠合板组合梁的桥面板收缩徐变应力约是现浇板组合梁的 0.82~0.97 倍,成桥后钢梁应力前者约是后者的 0.80~0.94 倍,叠合板对混凝土收缩徐变的“抑制”作用明显。

**关键词:**钢-混组合连续梁;叠合板;收缩徐变;应力重分布

中图分类号: U441+.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)11-0068-03

## 0 引言

钢-混组合梁桥是混凝土桥面板通过连接件与钢梁组合而成的梁式桥,桥面板可以采用现浇、预制、组合结构或叠合桥面板等<sup>[1-3]</sup>。其中,叠合桥面板是指在预制板上现浇一层混凝土,当现浇混凝土硬化后两者形成整体,并通过剪力连接件与钢梁结合在一起,由此形成的组合梁通常被称作钢-混凝土叠合板组合梁<sup>[4-5]</sup>。叠合板组合梁具有节省支模工序、吊装质量轻、现场混凝土浇筑量少、综合效益好等优点,近年来在工业厂房、大跨结构、高层建筑、桥梁结构中得到了广泛应用<sup>[4-5]</sup>。

混凝土收缩徐变会导致组合梁挠度产生变化,负弯矩区桥面板拉应力和裂缝宽度增大,引起钢梁应力重分布,对组合梁结构耐久性产生不利影响<sup>[6]</sup>。预制桥面板的收缩徐变效应比现浇桥面板低,但预制板湿接缝处易发生开裂,整体工作性能不及叠合桥面板<sup>[1]</sup>。

国内已有学者针对叠合板收缩徐变对拱桥、斜拉桥的影响进行了研究。黄琼等<sup>[4]</sup>研究分析了大跨度拱桥叠合桥面板的徐变效应,与现浇板相比,采用叠合板可以减少混凝土的收缩徐变。聂建国等<sup>[5-6]</sup>通过对大跨度组合梁斜拉桥收缩徐变效应的分析发现,采用叠合板组合桥面系比预制板组合桥面系的钢梁应力增加 10%左右。

钢-混凝土叠合板组合连续梁桥作为一种新桥

型,国内对其收缩徐变研究较少。由于预制板对现浇混凝土的约束作用,使得叠合板的收缩徐变效应与现浇桥面板和全预制桥面板均存在差异,准确分析钢-混凝土叠合板组合梁的收缩徐变效应具有重要的工程价值。

## 1 工程概况

本文以某市快速路环线工程为工程背景,选取主线高架(40 m+55 m+40 m)钢-混凝土叠合板组合连续梁桥作为分析对象。

主梁采用“槽型钢梁+预制桥面板+现浇桥面板”组合结构。25 m 桥宽由 4 片钢梁组成,梁距 6.0 m,钢梁之间采用间距 10.0~12.5 m 的横梁连接。梁高为 2.8 m,其中钢梁高 2.5 m,桥面板厚 0.3 m。桥面板采用 C50 低收缩混凝土,其中预制板厚 0.1 m,在工厂预制完成后运输至现场安装,并作为后浇混凝土的模板。

钢梁采用槽型断面,钢材采用 Q345D,顶板宽度 700 mm,厚度 20~40 mm;底板宽度 2 150 mm,厚度 20~40 mm;腹板厚度 16~20 mm;底板、腹板均采用 I 字加劲肋。钢梁与混凝土桥面板通过剪力连接件连接,正弯矩区采用  $\phi 22 \times 180$  mm 圆柱头焊钉,负弯矩区采用抗拔不抗剪连接件,型号为 M22  $\times$  170-D60-T15,以解决负弯矩区桥面板开裂问题<sup>[7]</sup>。

组合梁标准横断面见图 1。

## 2 组合连续梁收缩徐变效应的分析方法

混凝土的收缩徐变具有较大的离散性,混凝土桥的长期性能表现出随机性,经典的收缩徐变计算模型

收稿日期: 2022-03-27

作者简介: 顾民杰(1973—),男,硕士,教授级高级工程师,从事桥梁设计工作。

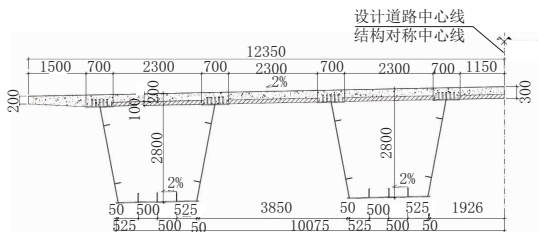


图1 组合梁横断面布置图(单位:mm)

也具有不确定性<sup>[8-10]</sup>,主要有有效弹性模量法(EMM)、徐变率法(RCM)、弹性徐变理论(叠加法)、流动率法(RFM)以及按龄期调整的有效弹性模量法(AEMM)等<sup>[11-12]</sup>。随着有限元分析方法和计算机技术的发展,混凝土的收缩、徐变已能采用更逼近实际的数值模拟方法,我国设计规范也推荐采用有限元方法来计算组合连续梁桥的收缩徐变效应<sup>[2]</sup>。

### 2.1 收缩应变的计算

混凝土的收缩应变与其应力无关,是与时间有关的函数。我国公路桥梁规范基于《CEB-FIP 模式规范》的收缩应变预测模型,给出的收缩应变计算公式为<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (1)$$

$$\epsilon_{cs0} = \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (2)$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[ \frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{cs0}$ 为名义收缩系数; $\epsilon_{cs}(t, t_s)$ 是收缩开始龄期为 $t_s$ ,计算龄期为 $t$ 时的收缩应变; $\beta_s(t - t_s)$ 为收缩随时间发展的系数; $\epsilon_s(f_{cm})$ 为与混凝土抗压强度相关的系数, $f_{cm}$ 为强度等级C25~C50混凝土在28d龄期时的平均圆柱体抗压强度(MPa); $\beta_{RH}$ 为与年平均相对湿度有关的系数; $t_1=1$  d; $h$ 为构件理论厚度, $h_0=100$  mm。

### 2.2 徐变系数的计算

混凝土的徐变是在应力作用下产生的,也是随时间发展的函数。我国公路桥梁规范采用的混凝土徐变系数计算公式为<sup>[2]</sup>:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (4)$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (5)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm} / f_{cm0})^{0.5}} \quad (6)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t/t_0)^{0.2}} \quad (7)$$

$$\phi_{RH} = \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}} \quad (8)$$

式中: $\phi_0$ 为名义徐变系数; $\phi(t, t_0)$ 是龄期为 $t$ 时的徐变系数; $\beta_c(t - t_0)$ 为徐变随时间发展的函数; $\beta(f_{cm})$ 为与混凝土抗压强度相关的系数; $f_{cm0}=10$  MPa; $\phi_{RH}$ 为

与年平均相对湿度有关的系数; $RH$ 为环境年平均相对湿度(%), $RH_0=100%$ ; $f_{cm}$ 、 $h$ 和 $h_0$ 意义同式(2)、式(3)。

## 3 叠合板应力重分布分析

### 3.1 有限元模型

根据上述混凝土收缩徐变模型,采用Midas/Civil建立钢-混凝土叠合板组合连续梁桥的空间有限元模型(见图2),分析收缩徐变对叠合板组合连续梁桥

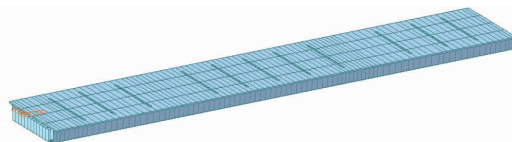


图2 组合连续梁空间有限元模型(40 m+55 m+40 m)

长期受力性能的影响。对比建立2种模型:

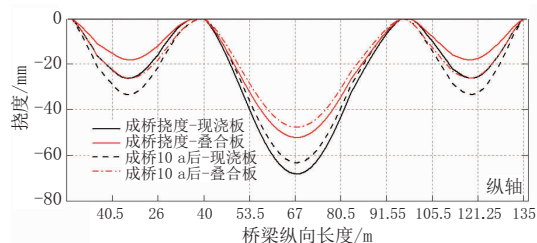
(1)现浇板模型:钢主梁、混凝土后浇层通过双层梁单元模拟,钢梁节点与桥面板节点采用弹性连接模拟,混凝土后浇层厚度为20 cm。预制板仅考虑其施工模板作用,不考虑预制板与钢梁、现浇层之间的结合作用。预制板自重和后浇层湿重以均布荷载施加在钢主梁上。

(2)叠合板模型:钢主梁、预制板和混凝土后浇层采用3层梁单元模拟,预制板和现浇板的加载龄期分别按180 d和3 d进行计算。

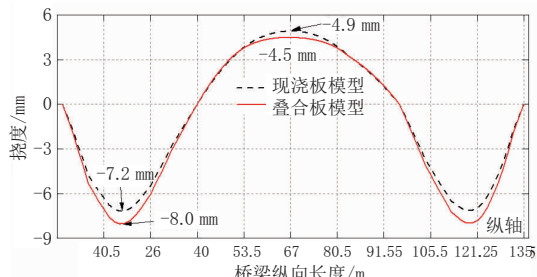
施工过程模拟:(1)架设钢梁;(2)施加预制板和后浇层混凝土湿重;(3)激活桥面板单元(现浇板模型为激活现浇板单元,叠合板模型为激活预制板和现浇板双层单元);(4)施加二期恒载;(5)10 a收缩徐变。

### 3.2 成桥挠度分析

组合梁梁桥成桥10 a前后的挠度结果见图3。



(a)组合梁成桥10 a后挠度



(b)组合梁成桥10 a后挠度增量

图3 组合梁主梁成桥10 a前后挠度图

由图3可以看出:因混凝土收缩徐变导致组合梁边跨挠度逐渐增加,中跨挠度逐渐减小;叠合板模型边跨挠度增加量(8.0 mm)略大于现浇板模型(7.2 mm),中跨挠度减小量(4.5 mm)略小于现浇板模型(4.9 mm),两者挠度变化趋势基本一致。

### 3.3 桥面板应力分析

计算成桥10 a前后桥面板应力,结果如表1所示,其中正值代表拉应力,负值代表压应力。

由表1可知:混凝土收缩徐变引起桥面板产生拉应力,现浇板组合梁桥面板收缩徐变产生的拉应

力为2.90~3.23 MPa,叠合板组合梁桥面板拉应力为2.59~2.80 MPa;叠合板拉应力约是现浇板的0.82~0.97倍,应力值前者比后者低0.3 MPa左右。这是因为预制板上桥时龄期已有半年左右,混凝土收缩徐变超过50%,预制板对后浇混凝土层的收缩徐变产生了“抑制”作用,说明采用叠合板组合梁可以减少混凝土的收缩徐变<sup>[4]</sup>。

### 3.4 钢梁应力分析

计算成桥10 a前后钢梁应力,结果如表2所示,其中正值代表拉应力,负值代表压应力。

表1 桥面板应力计算结果

单位:MPa

位置	现浇板模型			叠合板模型			叠合板增幅/ 现浇板增幅
	成桥时	成桥10 a后	应力增幅	成桥时	成桥10 a后	应力增幅	
支点上缘	1.35	4.25	2.90	1.17	3.97	2.80	0.97
支点下缘	0.96	3.99	3.03	0.96	3.73	2.77	0.91
跨中上缘	-0.27	2.96	3.23	-0.50	2.17	2.67	0.83
跨中下缘	-0.42	2.72	3.14	-0.65	1.94	2.59	0.82

表2 钢梁应力计算结果

单位:MPa

项目	现浇板组合梁		叠合板组合梁		叠合板/现浇板	
	成桥时	成桥10 a后	成桥时	成桥10 a后	成桥时	成桥10 a后
支点上缘	129.0	118.0	108.0	94.0	0.84	0.80
支点下缘	-103.0	-121.0	-91.2	-114.0	0.89	0.94
跨中上缘	-88.0	-108.0	-36.0	-66.1	0.41	0.61
跨中下缘	70.2	43.7	69.7	36.7	0.99	0.84

由表2可知,混凝土收缩徐变对钢梁应力影响较为显著,引起全桥钢梁产生压应力,支点下缘和跨中上缘压应力增大,支点上缘和跨中下缘拉应力减小。对于关键支点上、下缘截面,在成桥10 a前后叠合板组合梁钢梁应力约是现浇板组合梁的0.80~0.94倍,叠合板组合梁的钢梁应力值较低。

## 4 结 语

(1)对于钢-混凝土叠合板组合连续梁桥,由于预制板和现浇板龄期不同,在混凝土发生收缩徐变后,预制板、现浇板和钢梁之间会发生应力重分布。

(2)叠合板模型与现浇板模型相比,对于支点关键截面,混凝土收缩徐变产生的桥面板应力约是现浇板的0.82~0.97倍,钢梁应力前者约是后者的0.80~0.94倍,叠合板模型的桥面板和钢梁应力均比现浇板模型低。

(3)现浇板模型的应力值较大,但建模比叠合板模型方便,因此在进行钢-混凝土叠合板组合梁桥受力分析时,偏保守可以不考虑预制板的叠合作用,采用后浇混凝土层和钢梁组合的现浇板模型进行计算。

### 参考文献:

- [1] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
- [2] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] 刘玉擎.组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [4] 黄琼,叶梅新,韩衍群.钢-混凝土叠合板组合桥面的徐变和应力重分布研究[J].铁道科学与工程学报,2006,3(3):15-20.
- [5] 聂建国,袁彦声.钢-砼叠合板组合梁及其应用[J].建筑结构,1995(8):19-23.
- [6] 聂建国,李法雄,樊健生.组合梁斜拉桥收缩徐变效应分析[C]//2010全国钢结构学术年会.北京:中国钢结构协会,2010:60-64.
- [7] 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(4):7-14.
- [8] 严忠林.变截面钢-混组合梁连续梁桥受力特性分析[D].兰州:兰州交通大学,2014.
- [9] 徐帅.钢-叠合板(RC+UHPC)组合梁抗弯性能试验研究[D].福州:福州大学,2016.
- [10] 胡少伟,徐启华.钢-混凝土叠合板组合梁的非线性分析[J].钢结构,2007,22(2):33-35.
- [11] 杨飞,谭少华,刘殿元,等.组合连续梁桥收缩徐变与滑移效应的影响分析[J].公路交通科技,2017,34(增刊1):1-6.
- [12] 吴迪.混凝土收缩徐变对钢混组合梁桥长期性能的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.