

后期收缩徐变对结合梁斜拉桥受力影响研究

涂光亚, 邹磊, 石洋

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为了探究混凝土后期收缩徐变对大跨度结合梁斜拉桥受力的影响规律,以赤壁长江公路大桥为工程背景,采用桥梁结构设计与施工控制计算软件 BDCMS 进行受力计算,选取控制截面对比分析,发现混凝土后期收缩徐变会使桥塔发生竖向变形和偏转,主梁发生内力应力重分布,桥面板轴力减小,钢主梁轴力增大,但总轴力基本不变;主梁弯矩在墩塔位置变化较大,受轴力变化量和挠度影响明显;主梁应力在墩塔和中跨跨中处变化明显,桥面板应力减小,钢主梁应力增大,平均变化率为 20% 左右。

关键词:结合梁;斜拉桥;收缩徐变;应力重分布

1 前言

钢—混凝土结合梁是由外露的钢梁截面通过连接件与钢筋混凝土桥面板结合而形成整体的组合结构。钢结构主要承受拉应力,混凝土受压性能良好主要承受压应力,两种材料扬长避短、各尽所能、协同工作,使其在当前工程建设中表现突出。钢—混凝土结合梁在长期荷载作用下,由于混凝土收缩徐变效应的影响,组合截面的应力和应变随时间而发生改变,对于超静定结合梁还会引起构件内力的变化,发生内力重分布。

目前国内外专家学者对结合梁的收缩徐变理论已经进行了大量的研究。Lliopoulos 结合常用组合梁参数介绍了组合梁的收缩徐变应力计算;Liu 等对组合梁的收缩徐变影响进行理论计算和试验分析,得到了收缩徐变对结构变形的影响;樊健生等通过理论分析和试验考虑收缩、徐变和开裂影响对组合梁长期受力性能展开研究,结果表明混凝土的收缩徐变对组合梁的应力、内力、变形等长期性能有重要影响;韩春秀通

过解析计算、数值模拟和试验分析得到了双跨连续超静定组合梁的收缩徐变力学规律;黄琼等通过对某叠合板桥面钢管混凝土拱桥的有限元分析,探讨了不同龄期混凝土对组合梁应力重分布的影响,结果表明收缩徐变会引起现浇混凝土、预制板和钢梁三者之间的应力重分布,并且预制桥面板比现浇混凝土板收缩徐变更小;唐继舜等采用 Midas/Civil 对某双塔叠合梁斜拉桥进行有限元分析,结果表明收缩徐变对叠合梁弯矩有较大影响,使其产生内力重分布,对正弯矩有削峰作用,造成负弯矩增加较大。

相关一系列研究对组合梁结构的发展具有推动作用,使组合梁结构计算更加简便。但由于组合梁结构在中国发展较晚,并且不同工程结构其受力特性有很大区别,造成许多收缩徐变理论未能普遍适用。有关学者虽然对组合梁斜拉桥的收缩徐变引起的内力重分布已有研究,但对其分布规律和发展趋势不够深入。该文以钢—混凝土结合梁斜拉桥——赤壁长江公路大桥为工程背景,对其成桥后的收缩徐变效应规律进行研究,为今后同类型结合梁斜拉桥的设计提供一定的参考。

- *****
- [7] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of Structures[M]. 2nd ed. Berkeley: Computers & Structures Inc, 2004.
- [8] 陈得意. 人行桥人致振动舒适度研究[D]. 华南理工大学博士学位论文, 2019.
- [9] 黄智文. 电涡流阻尼器理论研究及其在桥梁竖向涡振控制中的应用[D]. 湖南大学博士学位论文, 2016.
- [10] 吴长青, 张志田, 吴肖波. 抗风缆对人行悬索桥动力特性和静风稳定性的影响[J]. 桥梁建设, 2017(3).
- [11] 肖海珠, 张晓勇, 徐恭义. 武汉杨泗港长江大桥主桥静、动力特性研究[J]. 世界桥梁, 2019(6).
- [12] 李勇, 赵晓莎, 陈彦江, 等. 钢管混凝土拱桥缩尺模型静动力试验研究[J]. 公路, 2019(3).

收稿日期: 2020-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51878073)

作者简介: 涂光亚, 男, 博士, 副教授. E-mail: 328354390@qq.com

2 收缩徐变理论

根据现有混凝土收缩徐变研究,收缩徐变对结构的内力、应力、变形的影响不可忽略。对于组合梁斜拉桥大多采用悬臂施工、逐段拼装而成,结构成形和自重增加是逐步的,造成混凝土桥面板收缩徐变时程不一,使结构的收缩徐变更为复杂,结构内力应力重分布更为显著,对施工、监控和运营影响更大。该文采用文献[9]的收缩徐变初应变计算公式计算结合梁斜拉桥的收缩徐变效应,将钢主梁和桥面板模拟为梁单元,两者之间通过刚臂连接来建立结合梁微元的内力关系。

混凝土桥面板收缩徐变会在桥面板单元产生轴力 ΔN_c 、弯矩 ΔM_c 变化,通过刚臂传递给钢主梁单元,使钢主梁产生轴力 ΔN_s 、弯矩 ΔM_s 变化。

2.1 混凝土收缩计算

混凝土在空气中凝固和硬化过程中,体积减小的现象称为收缩,通常认为混凝土收缩是由凝胶体本身收缩和混凝土因失水产生的体积收缩组成。

混凝土收缩应变计算公式:

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

式中: $\epsilon_{cs}(t, t_s)$ 为混凝土龄期从 t_s 到 t 时的收缩应变; t 为计算所考虑时刻的混凝土的龄期(d); ϵ_{cs0} 为混凝土名义收缩系数; t_s 为收缩开始计算时刻的混凝土龄期(d)。

桥面板收缩应变产生的杆端等效节点荷载增量大小等于单元收缩固端力,为:

$$\Delta P_{n+1}^{\epsilon} = -\Delta R_{n+1}^{\epsilon} = [\Delta H \quad 0 \quad 0 \quad -\Delta H \quad 0 \quad 0] \quad (2)$$

2.2 混凝土徐变理论

根据 JTJ 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》附录 C。徐变系数计算公式为:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (3)$$

式中: ϕ_0 为混凝土名义徐变系数; β_c 为混凝土徐变随时间的增长系数。

桥面板单元在任意 Δt_{n+1} 内徐变增量为:

$$\Delta \epsilon_{0i} dv = \Delta F_i + \Delta R_i = \Delta F_i^{\epsilon} = [K] e \Delta \delta_i^{\epsilon} - \int B^T D \Delta \epsilon_{0i} dv \quad (4)$$

式中: D 为应力矩阵; $\Delta \epsilon_i$ 为节点位移产生的应变增量; $\Delta \epsilon_{0i}$ 为由上一时程制造误差、温度、收缩徐变引起的初应变增量; ΔF_i 为由节点位移增量引起的杆端力增量; ΔR_i 为由初应变增量引起的杆端力; ΔF_i^{ϵ} 为不

包括非节点外荷载作用引起的杆端力。

将 $\Delta \epsilon_c^{n+1}$ 作为初应变,按有限元计算方法,则等效节点荷载增量为:

$$\Delta P_{n+1}^{\epsilon} = \int B^T D \Delta \epsilon_c^{n+1} dv = \int B^T D \sum_{i=0}^n \frac{\Delta \sigma_i}{D} \Delta \varphi(t, \tau_i) dv = \sum_{i=0}^n \Delta F_i^{\epsilon} \Delta \varphi(t_{n+1}, \tau_i) \quad (5)$$

推导得到如下递推公式:

$$\Delta P_{n+1}^{\epsilon} = \Delta F_n^{\epsilon} [\beta_a(\tau_n) + \bar{\beta}(0)] + \sum_{i=1}^4 W_{n+1}^i (1 - e^{-q_i \Delta t_{n+1}}) \quad (6)$$

式中: $W_{n+1}^i = W_n^i e^{-q_i \Delta t_n} + \Delta F_n^{\epsilon} C_i(\tau_n)$; $W_0^i = \Delta F_0^{\epsilon} \cdot C_i(\tau_0)$ ($i=1 \sim 4$); τ_0 和 τ_n 分别为 F_0^{ϵ} 和 F_n^{ϵ} 的加载龄期。

3 工程概况

赤壁长江公路大桥为目前同类桥型世界第一大跨径的结合梁斜拉桥(图1),桥跨布置为(90+240+720+240+90)m, H形双塔对称结构,半漂浮体系。

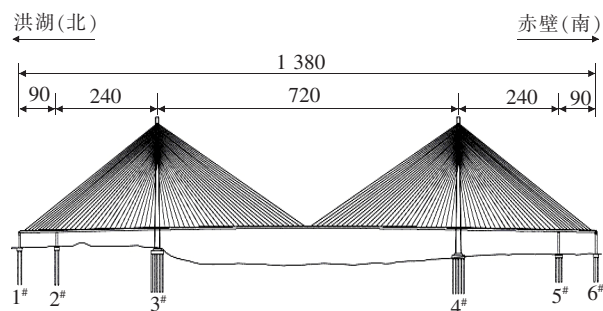


图1 赤壁长江公路桥型立面布置图(单位:m)

主梁全长 1 377.8 m, 采用双边箱截面形式(图2), 横梁设置在两边箱之间, 通过高强螺栓与腹板连接, 每隔 4 m 设置一道, 全桥共 352 片横梁, 为保证横梁上部受压区侧向稳定, 在横梁中部设置有全桥通长的小纵梁。

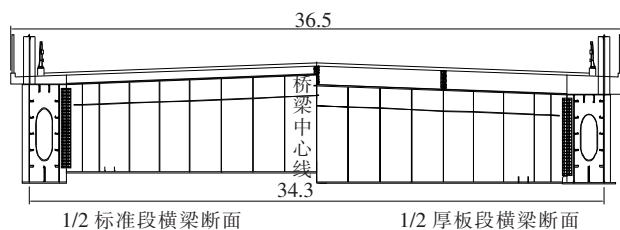


图2 钢梁横断面布置图(单位:m)

全桥主梁分为 121 个梁段, 长度有 8、8.9、12 和

16 m 4 个类型。桥面板全宽 36.5 m,采用 C60 混凝土预制桥面板,安装前至少存放 6 个月,以减小收缩徐变影响。预制板间现浇缝、边主梁顶现浇带、小纵梁顶现浇带、桥面板变厚段使用 C60 微膨胀混凝土现浇,边跨伸缩缝现浇段使用 C60 钢纤维混凝土现浇;桥面板通过布置在横梁顶和钢主梁顶的剪力钉与钢梁结合。斜拉索采用标准抗拉强度为 1 860 MPa、直径为 7 mm 高强镀锌铝合金镀层平行钢丝索,采用双索面,一共 232 根。

4 有限元模型建立

采用桥梁结构设计与施工控制计算软件 BDCMS 进行有限元计算分析,全桥有限元模型共建立 901 个节点,1 712 个单元,其中部分结构对应的单元号如表 1 所示。

按照实际施工组织设计进行工况划分,全桥共划分 23 个大工况,首先施工基础、承台、桥塔和桥墩,然后悬臂拼装主梁。主梁对称悬臂施工每个梁段划分 6~10 个小工况,主要包括:① 吊机前移;② 安装钢梁单元;③ 斜拉索张拉;④ 铺设预制桥面板;⑤ 湿接缝浇筑等。主梁悬臂施工完进行边跨、中跨合龙和调索操作,上二期恒载,最后计算成桥后 25 年的收缩徐变。

表 1 主梁网格图单元分布

结构	位置分布	单元号
钢箱梁	北岸边跨	1~165
	主跨	166~525
	南岸边跨	526~690
	北岸边跨	691~855
桥面板	主跨	856~1 215
	南岸边跨	1 216~1 380

5 分析结果

该文主要考虑后期收缩徐变对结合梁斜拉桥受力及变形的影响,后期收缩徐变考虑时间为 25 年,即考虑刚成桥至成桥后 25 年这段时间的收缩徐变效应。

5.1 对主桥结构变形的影响

混凝土收缩徐变会使斜拉桥墩塔和主梁发生变形,桥塔变形包括纵向水平位移和竖向位移,北侧墩塔竖向位移如表 2 所示,桥塔竖向位移由下而上逐渐增大,导致主梁挠度由主塔向两侧逐渐变大。

表 2 收缩徐变前后北侧墩塔沉降

时间	沉降/mm			
	边界墩	辅助墩	塔梁支座	塔顶
成桥时	2.2	5.0	15.1	52.2
25 年后	8.8	9.3	15.8	83.0

图 3 为收缩徐变引起的北塔塔偏。

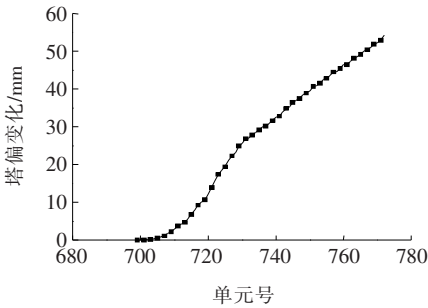


图 3 收缩徐变引起北塔塔偏

从图 3 可以看出:混凝土收缩徐变使桥塔发生了向中跨侧的位移,塔顶变化 54.2 mm,使主梁在中跨跨中挠度增加,边跨挠度减小。

在桥塔和桥面板的共同收缩徐变作用下,主梁挠度如图 4 所示,中跨部分由塔向跨中逐渐增大,中跨跨中挠度最大增加 138 mm,边跨挠度增大但最大不超过 17.5 mm,辅助墩右侧 60 m 内挠度略微减小,墩塔位置挠度为 0。

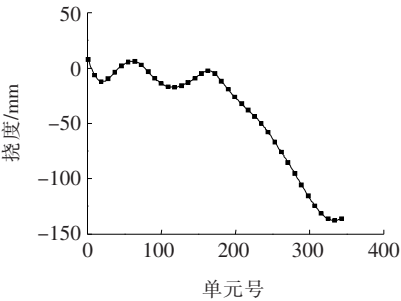


图 4 收缩徐变产生的主梁挠度(半桥)

5.2 对斜拉索索力的影响

结合梁斜拉桥发生收缩徐变后,结构变形会对索力产生影响,从成桥 25 年后北塔各斜拉索索力变化图(图 5)可以看出:由于桥塔发生竖向位移,塔、墩位置处索力减小量最大,分别为 203.9、104.8 kN,并向两侧逐渐缩小,中跨 $L/4 \sim L/2$ 梁段索力变化相对较小。

5.3 对主梁轴力的影响

混凝土收缩徐变使结合梁斜拉桥主梁发生轴力重分布,图 6 为收缩徐变前后钢主梁和桥面板单元轴力变化图。

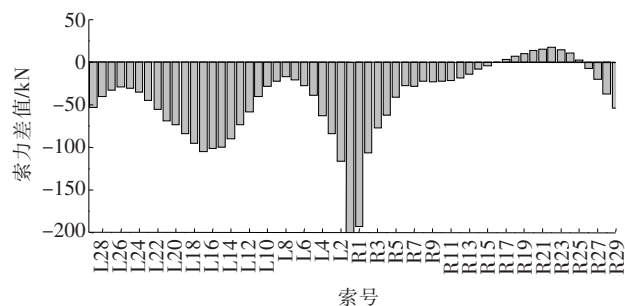


图5 收缩徐变前后北桥索力差值图(半桥)

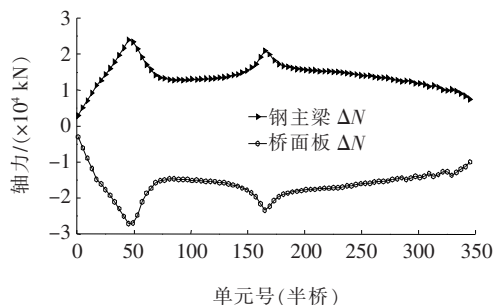


图6 收缩徐变前后主梁轴力变化(半桥)

由图6可知:混凝土收缩徐变25年后,桥面板轴力减小,钢主梁轴力增大,前者和后者量值之比为1.0~1.36。轴力变化量由桥塔位置向两侧变小,在辅助墩位置突然变大,钢主梁轴力最大增加24 102.9 kN,桥面板轴力最大减小27 114.7 kN。

由交界墩附近比值可知:收缩徐变引起的钢主梁和桥面板轴力变化之比为1:1,但因为主塔收缩徐变变形影响,中跨跨中、交界墩和辅助墩之间挠度较大,桥面板比钢主梁轴力变化值略大;另外收缩徐变不改变主梁总轴力(图7),这和收缩徐变理论也是吻合的。

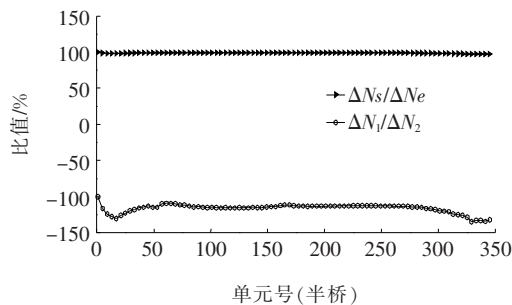


图7 收缩徐变前后主梁轴力、轴力变化比值(半桥)

5.4 对主梁弯矩的影响

主梁弯矩变化是在混凝土桥面板和桥塔收缩徐变的共同作用下产生的,它的变化往往和挠度是对应的,这对主梁的线形有重要影响。

图8为收缩徐变前后主梁各单元弯矩变化图。

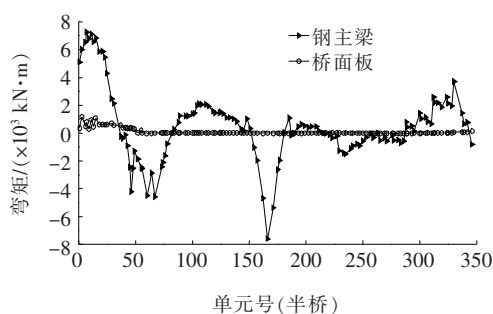


图8 收缩徐变前后主梁弯矩变化值(半桥)

由图8可知:混凝土桥面板基本不承受弯矩,弯矩主要由钢主梁承担。交界墩至辅助墩之间主梁承受弯矩(下侧受拉为正),桥塔和辅助墩处受负弯矩,其余梁段在斜拉索之间桥跨呈波浪形正负弯矩振荡。后期收缩徐变使主梁辅助墩至交界墩正弯矩区域以及跨中正弯矩增大,辅助墩和桥塔位置负弯矩增大。因收缩徐变产生最大正弯矩为7 261.3 kN,最大负弯矩为7 588.1 kN,收缩徐变会使结合梁发生内力重分布。

5.5 对主梁应力的影响

图9、10为收缩徐变前后钢主梁、桥面板应力图。

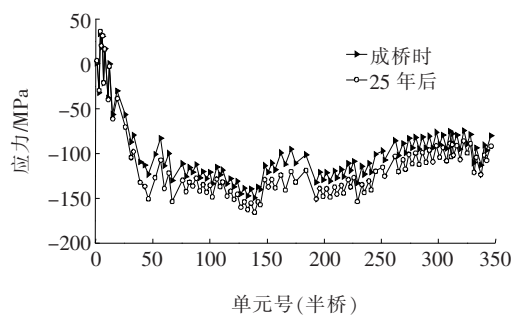


图9 收缩徐变前后钢主梁应力(半桥)

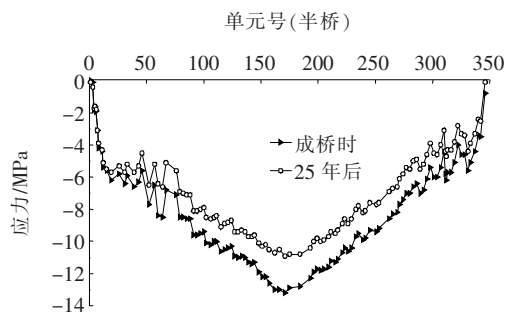


图10 收缩徐变前后桥面板应力(半桥)

由图9、10可知:主梁应力大小总体呈由桥塔向两侧逐渐减小,由于辅助墩位置轴力和弯矩较大,因此应力增加较多。收缩徐变后辅助墩位置钢主梁应力最大达到25.8 MPa,总应力达到179.2 MPa,桥面板最大应力为13.2 MPa,小于设计抗压强度26.6 MPa,但仍

在结构容许应力范围之内,结构安全。

混凝土收缩徐变使结构产生应力重分布,交界墩附近由于没有斜拉索,轴压力小,钢主梁下缘出现拉应力,桥面板压应力减小。根据收缩徐变前后应力计算结果(图 11),主梁在墩塔、中跨跨中处的应力变化率较大,钢主梁下缘平均应力变化率为 19%,桥面板上缘平均应力变化率为 18%。

桥面板和钢主梁交界面理论上应是变形协调的,因此桥面板和钢主梁在收缩徐变作用下应变相等,在双层单元模拟中,由于两种材料弹性模量不同,因此收缩徐变产生的应力不等,另外钢主梁和桥面板初始应力不同,应力变化率也不同,但其变化规律是合理对应的(图 12)。

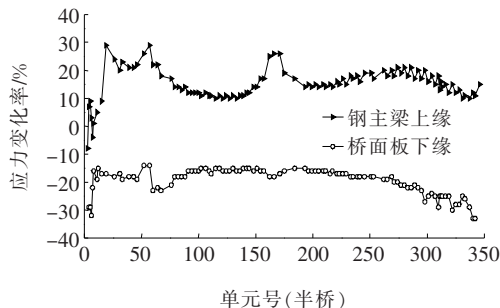


图 11 收缩徐变前后结合梁交界面应力变化率(半桥)

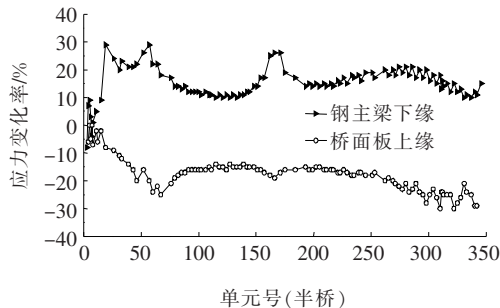


图 12 收缩徐变前后主梁顶面底面应力变化率(半桥)

6 结论

采用 BDCMS 软件对赤壁长江公路大桥进行有限元计算,综合考虑塔偏、索力、主梁轴力、弯矩和应力等关键变量,对结合梁斜拉桥后期收缩徐变效应规律进行分析,所得结论如下:

(1) 后期收缩徐变使桥塔产生竖向位移和塔偏,竖向位移沿塔高逐渐增大,使主梁挠度由主塔向两侧

逐渐增大;塔偏使中跨主梁下挠,边跨主梁上拱。

(2) 后期收缩徐变使结合梁斜拉桥主梁发生内力重分布,桥面板轴力减小,钢主梁轴力增大,总轴力基本不变;桥面板主要承受轴力,弯矩由钢主梁承担;收缩徐变对桥面板弯矩影响不大,但钢主梁弯矩受轴力重分布影响较大,在结合梁斜拉桥设计中需要特别关注墩塔位置钢主梁弯矩的收缩徐变影响。

(3) 后期收缩徐变使结合梁斜拉桥主梁发生应力重分布,钢主梁应力增大,桥面板应力减小,平均变化幅度为 20% 左右,总体变化呈桥塔向两侧减小的趋势,墩塔和跨中位置应力值得重点关注。另外结合梁双层单元模拟中,为减小因结构变形产生的误差,应尽可能减小划分单元的长度。

参考文献:

- [1] 黄侨. 桥梁钢—混凝土组合结构设计原理[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 杨胜. 钢混结合梁大边跨连续箱梁桥总体设计[J]. 中外公路,2019(2).
- [3] Lliopoulos A. Kriechbeiwerte für die berechnung von verbundtragern[M]. Berlin:Ernst & Sohn Verlag,2006.
- [4] Liu Xingpei,Bradford M A,Erkmen R E. Time-Dependent Response of Spatially Curved Steel-Concrete Composite Members. I:Computational Modeling[J]. Journal of Structural Engineering,2013,139(12):1.
- [5] 樊健生,聂鑫,李金旺. 考虑收缩徐变及开裂影响的组合梁长期受力性能研究[J]. 土木工程学报,2009(3).
- [6] 韩春秀. 钢—混凝土组合梁徐变和收缩效应的理论与试验研究[D]. 昆明理工大学博士学位论文,2016.
- [7] 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).
- [8] 唐继舜,李海岗. 混凝土收缩徐变效应对含叠合梁段混合梁斜拉桥主梁受力行为的影响[J]. 山东理工大学学报,2017(6).
- [9] 颜东煌. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有限元方法与应用[J]. 中国公路学报,2004(2).
- [10] 赵辛玮,肖汝诚,孙斌,等. 常温养护型超高性能混凝土组合桥面板收缩性能研究[J]. 中外公路,2020(3).
- [11] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京:人民交通出版社,2014.
- [12] 黄运林,杨聪,万和安,等. 石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁横向受力有限元计算模型分析[J]. 中外公路,2019(1).