

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.02.021

考虑施工步骤收缩徐变因素的钢管混凝土拱桥线形控制研究

刘 栋

(中铁三局集团广东建设工程有限公司, 广东 广州 510630)

摘要: 大跨度钢管混凝土系杆拱桥线形控制考虑混凝土收缩徐变的影响因素时,通常按照理想的连续施工时间历程进行分析。然而工程实践中,常因长时间停工造成施工不连续,忽略停工期间的收缩徐变对线形控制的影响,这对成桥线形要求较高的高速铁路钢管混凝土系杆拱桥线形控制是非常不利因素。本文依托高速铁路72 m标准跨度的钢管混凝土系杆拱桥,提出考虑施工步骤过程对收缩徐变变形的影响,采用有限元仿真分析和现场监测相结合的方法,分析该因素对大跨度钢管混凝土系杆拱桥成桥线形的影响。结果表明:考虑施工步骤的收缩徐变因素时,系梁和拱肋收缩徐变变形增大,系梁应力在拱脚处保持不变,拱脚处钢管应力减小。因此,在高速铁路大跨度钢管混凝土系杆拱桥的线形控制技术中,应考虑施工步骤收缩徐变因素对线形的影响,确保后期无砟轨道标高的精确控制。

关键词: 高速铁路;钢管混凝土系杆拱桥;收缩徐变;施工步骤;线形控制

中图分类号: U213.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0143-06

Alignment Control of Concrete Filled Steel Tubular Tied Arch Bridge Considering Shrinkage and Creep Factors of Construction Steps

LIU Dong

(Guangdong Construction Engineering Company Limited of China Railway Third Group, Guangzhou, Guangdong 510630, China)

Abstract: Influence of concrete's shrinkage and creep factors is usually considered according to ideal and continuous construction time history for alignment control of long span concrete filled steel tubular tied arch bridge. However, the deformation of shrinkage and creep caused by construction discontinuity of long downtime is usually ignored in engineering practice, which is very adverse factors for the highly requiring linear control about high-speed railway concrete-filled steel tube tied arch bridge. In this work, a high-speed railway concrete-filled steel tube tied arch bridge which standard span is 72 m is taken as an example, the deformation of shrinkage and creep caused by construction process was proposed, and the method of combining finite element simulation analysis and on-site monitoring was adopted to analyze the influence of this factor on the alignment of long-span concrete-filled steel tube tied arch bridge. The results show that the deformation of shrinkage and creep of tie beam and arch rib is increased when concrete's shrinkage and creep factors of construction steps will be considered, the stress of the tie beam remains is unchanged at the arch foot, and the cross-section stress of the tie beam mid-span is increased, and the stress of steel tube at arch foot is decreased. So, the influence of shrinkage and creep of construction steps should be considered as one of the influencing factors in the alignment control of long span concrete filled steel tubular tied arch bridge, and then elevation of ballast-less track can be ensured to control precisely.

Keywords: high-speed railway; concrete-filled steel tubes tied arch bridge; shrinkage and creep; construction steps; alignment control

收稿日期:2022-10-10

修稿日期:2022-11-20

基金项目:招商局重庆交通科研设计院有限公司国家重点实验室开放基金(2022-05)

作者简介:刘 栋(1984—),男,高级工程师,主要从事工程施工管理等方面研究工作。E-mail:76742802@qq.com

钢管混凝土系杆拱桥具有跨越能力大、外形美观、经济性好等优点,近 30 年来在我国得到了广泛应用。大跨度桥梁的施工建造过程中,需考虑自重、温度、二期恒载和结构体系转换等各种因素的影响,对桥梁进行线形控制,事先预留后期发生的变形,确保成桥线形达到设计线形。对于混凝土桥梁而言,收缩与徐变变形是必须考虑的主要因素。研究表明,收缩徐变效应对组合体系桥梁应力和线形产生影响较大^[1-3]。文献[4]采用继效流动理论分析了钢管混凝土轴心受压构件和压弯构件,结果表明徐变会导致混凝土应力减小钢管应力增大,使钢管混凝土拱肋挠度增加从而改变结构形状。文献[5]采用逐步积分法推导了钢管混凝土长期应力应变计算公式,在此基础上修正了 5 种经典收缩徐变模型,并得出简化计算方法-平均应力法,得出的结果更符合工程实际情况。文献[6]采用考虑龄期调整的有效模量法,结合有限元模型对大跨度钢管混凝土拱桥进行施工过程模拟计算,结果表明:由徐变引起的工后钢管应力和钢管挠度的变化幅度为 10%,钢管内混凝土应力的变化幅度为 50%,须考虑施工过程中几何非线性和徐变的耦合效应。总而言之,国内外学者^[7-16]关于收缩徐变对钢管混凝土拱桥和钢混结构桥梁应力和线形的影响研究,成果非常显著。

高速铁路大跨度钢管混凝土系杆拱桥的线形控制,显然也需要考虑混凝土收缩徐变的影响因素,但通常是按照理想的连续施工时间历程,进行施工仿真分析,控制收缩徐变对线形的影响。然而工程实践中,常因长时间停工造成施工不连续,忽略长时间的停工时间引起的收缩徐变变形,从而造成成桥线形影响。高速铁路桥梁的成桥线形要求很高,这个因素的忽略对大跨度高速铁路钢管混凝土系杆拱桥线形控制是非常不利的。因此,考虑施工步骤对收缩徐变变形的影响,研究该变形对大跨度钢管混凝土系杆拱桥成桥线形的影响,是非常必要的。本文依托福厦高速铁路常见大跨度的 72 m 标准跨度钢管混凝土系杆拱桥,采用有限元仿真分析和实际监测相结合的方法,进行考虑施工步骤的收缩徐变因素对成桥线形和应力影响的研究。

1 桥梁结构概况

72 m 跨度钢管混凝土系杆拱桥是高速铁路常见标准跨度,属于刚性系杆刚性拱的组合结构体系。主桥立面布置图如图 1 所示。系梁采用单箱三室预

应力混凝土箱型截面,桥面箱宽 17.1 m,梁高 2.5 m,底板厚度为 0.3 m,顶板厚度为 0.3 m,边腹板厚度为 1.3 m,中腹板厚度为 0.3 m。每个吊杆的吊点处设置横梁,拱脚处设置端横梁,系梁标准横截面如图 2 所示。

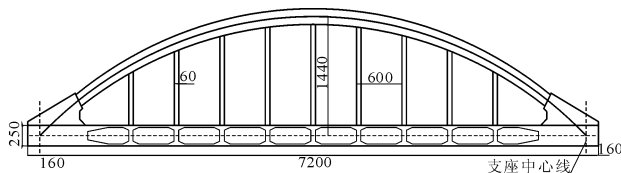


图 1 主桥立面布置图(单位:cm)

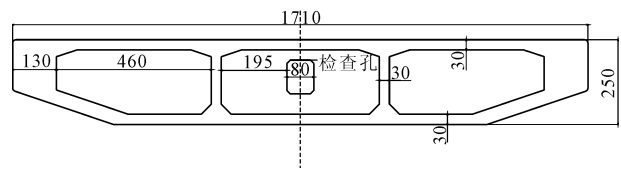


图 2 系梁标准横截面(单位:cm)

拱肋采用哑铃型钢管混凝土截面,钢管直径为 1 m,截面高度为 3 m,由厚 16 mm 钢板卷制而成,钢管内填充 C55 混凝土。每根拱肋的两钢管之间用厚 16 mm 腹板连接,腹腔内不填充混凝土,仅在拱脚范围 1 m 填充 C55 无收缩混凝土。钢管和腹板均采用 Q345qD 钢材。两拱肋之间共设 3 道横撑,拱顶处设 X 型横撑,拱顶至两拱脚间设 2 道 K 型横撑,横撑内部不填充混凝土。拱肋截面如图 3 所示。

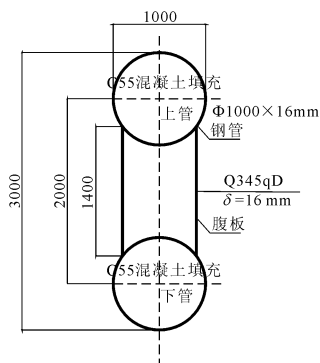


图 3 拱肋截面图(单位:mm)

拱肋采用悬链线线型,矢跨比 1/5,矢高 14.4 m,悬链线方程为:

$$y = f(\text{Chk}\xi - 1)/(m - 1) \quad (1)$$

$$k = \ln(m + \sqrt{m - 1}) \quad (2)$$

式中: $\xi = 2x/L = x/36$; $f = 14.4$; $m = 1.127$; x 为拱顶至计算点处的距离。

吊杆布置采用纵向双吊杆体系,共设 18 对吊

杆,吊杆中心纵向间距为 6 m,双吊杆中心距为 0.6 m。吊杆均采用 73 根 $\phi 7$ 高强低松弛镀锌平行钢丝束,冷铸墩头锚,索体采用 PES 低应力防腐索体,并外包不锈钢防护层。各阶段单根吊杆成桥索力如表 1。

表 1 单根吊杆索力表

吊杆编号	初张拉力/kN	二期恒载/kN	支架拆除/kN
D01	525	745	655
D02	600	863	710
D03	425	844	650
D04	275	818	602
D05	200	809	588

2 收缩徐变计算理论

目前所有的混凝土收缩徐变预测模型都基于半理论半经验公式。各国的工程环境和地域条件各不相同,因此不同预测模型在公式选型、参数选择、参数的取值范围、拟合过程、预测精度等方面存在较大差异。在工程应用中,选择适用的收缩徐变预测模型对提高收缩徐变的高预测精度具有重要意义。

我国铁路桥涵设计规范历经多次更新,但均采用 CEB-FIP(MC78)模型所建议的方法来计算结构的收缩徐变。该计算模型历经多年的实践检验,表现出较强的应用性,其缺点是收缩徐变变形的计算值偏大。高速铁路桥梁相比普通铁路桥梁对工后线形变化的控制更为严格,该模型对于高速铁路桥梁来说是偏安全的。本文按照《铁路桥涵混凝土结构设计规范》^[17](TB 10092—2017)的规定,采用 CEB-FIP(1978)收缩徐变计算模型,混凝土材料(C50、C55)的材龄为 3 d。

2.1 收缩应变

CEB-FIP 78^[18]模式中混凝土 t 时刻的收缩应变公式为:

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_s[\beta_s(t) - \beta_s(t_1)] \quad (3)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s1}\varepsilon_{s2} \quad (4)$$

$$h_0 = \lambda \frac{A_c}{u/2} \quad (5)$$

式中: ε_{s1} 、 λ 为环境湿度相关系数^[17],如表 2 所示。本桥 ε_{s1} 取 -0.00032 、 λ 取 1.5; A_c 为构件横断面面积; t 为混凝土龄期; t_1 为混凝土干燥龄期; β_s 为混凝土收缩发展系数, ε_{s2} 为与理论厚度 h_0 有关的系数,本桥 h_0 由有限元软件自动计算; u 为与大气接触截面周长。

表 2 环境湿度系数表

环境条件	相对湿度 /%	收缩系数 ε_{s1}	徐变系数 φ_{II}	湿度系数 λ
水中	—	0.00010	0.8	30.0
潮湿大气	90	-0.00013	1.0	5.0
一般室外	70	-0.00032	2.0	1.5
干燥大气	40	-0.00052	3.0	1.0

2.2 徐变应变

CEB-FIP 78^[18]模式中徐变应变为弹性变形和塑性变形两部分相加的结果,徐变应变的计算公式为:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \varphi(t, t_0) \frac{1}{E_{c28}} \right] \quad (6)$$

式中: $E_c(t_0)$ 为加载龄期 t_0 时混凝土弹性模量; $\varphi(t, t_0)$ 为徐变系数,计算公式为:

$$\varphi(t, t_0) = \beta_a(t_0) + \varphi_d \beta_d(t - t_0) + \varphi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \quad (7)$$

式中: t 为计算龄期, t_0 为加载龄期; $\beta_a(t_0)$ 为初期流变; φ_d 为迟滞弹性模量,一般取 0.4; $\beta_d(t - t_0)$ 为随时间增长的迟滞弹性应变; $\beta_f(t)$ 为随时间增长迟滞塑性应变; φ_f 为流塑系数,计算公式为:

$$\varphi_f = \varphi_{\text{II}} \cdot \varphi_{\text{I2}} \quad (8)$$

式中: φ_{II} 为环境湿度相关系数,见表 2,本桥 φ_{II} 取 2.0; φ_{I2} 为与理论厚度 h_0 有关的系数,本桥 h_0 由有限元软件自动计算。

3 施工仿真分析有限元模型

采用 midas Civil 2020 有限元软件进行有限元建模。全桥共建立 401 个节点,454 个单元,包括 36 个桁架单元,418 个梁单元。系梁和拱脚采用梁单元模拟,拱肋采用施工联合截面模拟,吊杆采用桁架单元模拟。拱肋截面采用 midas 程序的联合截面。本文建立的高速铁路 72 m 标准跨度钢管混凝土系杆拱桥的有限元模型如图 4 所示。

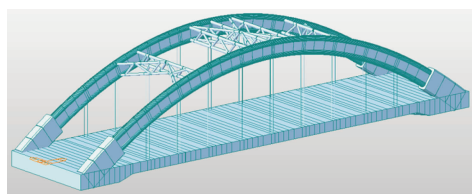


图 4 有限元模型

按照施工图纸和施工组织方案对桥梁进行施工过程的模拟,全桥施工过程共分为 15 个施工步骤,如表 3。在设计阶段,通常假设系梁和拱肋同时安装,而不考虑二者施工的时间差。在实际施工过程中

中,系梁和拱肋之间存在必然存在一定时间间隔,有时候还会因为各种原因,造成长时间停工,因此形成混凝土的加载龄期差,从而导致收缩徐变变形与设计不一致。

表 3 施工步骤表

施工步骤	施工内容	时间/d
cs1	主孔基础及墩身施工	160
cs2	搭设支架并预压	40
cs3	现浇系梁及拱脚混凝土	28
cs4	第一阶段系梁预应力张拉	10
临时施工步	拱肋施工滞后系梁	—
cs5	安装拱肋及横撑	35
cs6	泵送拱肋下管管内混凝土	5
cs7	泵送拱肋上管管内混凝土	5
cs8	安装 D02、D02#吊杆并张拉	1
cs9	安装 D03、D03#吊杆并张拉	1
cs10	安装 D04、D04#吊杆并张拉	1
cs11	安装 D05、D05#吊杆并张拉	1
cs12	安装 D01、D01#吊杆并张拉	1
cs13	第二阶段系梁预应力张拉	10
cs14	拆除系梁支架	20
cs15	安装二期恒载	50

在施工步骤 4 和施工步骤 5 之间插入收缩徐变时间,以模拟系梁浇筑施工完成后,拱肋施工滞后的情况。分别按照一次成桥、拱肋滞后 30 d、拱肋滞后 60 d、滞后 90 d、拱肋滞后 180 d 四种情况进行分析。根据混凝土材料的特殊性质,混凝土浇筑凝固即开始产生收缩变形,并在桥梁自重等荷载作用下产生徐变。收缩徐变使节点位置发生改变,将边界条件激活方式定义为“变形后”,此时节点保留前序施工阶段发生的位移,节点不产生强制位移和反力。

本桥在建模初期,是按施工组织方案,假设拱肋安装滞后系梁施工完毕 30 d。实际施工时,因停工原因拱肋安装滞后系梁施工约 90 d。考虑这种长时间停工,收缩徐变变形对桥梁成桥线形的影响,需要对施工步骤对收缩徐变的变形影响进行分析。

4 施工步骤对收缩徐变变形的影响分析

4.1 收缩徐变对系梁的影响

对一次成桥和拱肋施工滞后 30 d、60 d、90 d、

180 d 五种情况进行模拟计算。五种施工步骤下,仅考虑收缩徐变变形引起的成桥系梁挠度如图 5 所示,成桥运营初期系梁应力如表 4 所示。

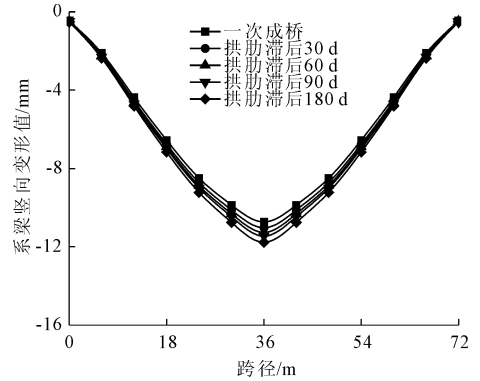


图 5 收缩徐变变形引起的系梁竖向挠度值

表 4 系梁应力变化对比

跨径	一次成桥	滞后 30 d /MPa	滞后 60 d /MPa	滞后 90 d /MPa	滞后 180 d /MPa
0	-4.50	-4.50	-4.50	-4.50	-4.50
L/4	-7.30	-7.40	-7.40	-7.40	-7.45
L/2	-8.50	-8.60	-8.70	-8.70	-8.70

由图 5 可以得到,成桥系梁的竖向收缩徐变变形值随着拱肋施工滞后的时间而增加。系梁跨中截面下挠变形值增量最大并逐渐向拱脚位置减小。拱肋施工滞后 30 d、60 d、90 d、180 d 系梁跨中截面挠度增量分别为 0.298 mm、0.533 mm、0.722 mm、1.040 mm,对比一次成桥分别增加 0.86%、1.53%、2.07%、2.99%。

由表 4 可以看出,相比一次成桥,拱肋施工滞后不同时长,成桥运营初期系梁应力有所变化。拱脚附近系梁应力保持不变,跨中截面系梁应力增加。拱肋施工滞后 180 d 系梁应力增加 0.2 MPa,对比一次成桥增加 2.35%。

4.2 对拱肋线形和拱脚应力的影响

对一次成桥和拱肋施工滞后 30 d、60 d、90 d、180 d 五种情况进行模拟计算。五种施工步骤下,成桥钢管拱肋竖向收缩徐变变形值相对于一次成桥拱肋的变形值如图 6 所示。

由图 6 可以得到,成桥运营初期钢管拱肋的竖向收缩徐变变形值随着拱肋施工滞后的时间而增加。拱肋拱顶截面竖向收缩徐变变形值增量最大并逐渐向拱脚位置减小。拱肋施工滞后 30 d、60 d、90 d、180 d 拱肋拱顶截面挠度增量分别为 1.093 mm、1.362 mm、1.610 mm、1.960 mm,对比一次成桥分

别增加 3.61%、4.50%、5.32%、6.48%。

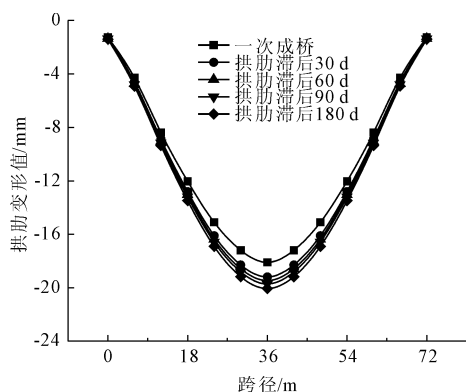


图 6 拱肋收缩徐变变形值对比

一次成桥以及拱肋施工滞后 30 d、60 d、90 d、180 d 成桥初期拱脚应力如表 5 所示。通过表 5 可以得出,随着拱肋施工滞后时间增加,拱脚钢管应力呈现减小的趋势,拱肋施工滞后 180 d 对比一次成桥减小 1.63%;钢管内核心混凝土应力无变化。

表 5 系梁应力变化对比 单位:MPa

	一次成桥	滞后 30 d	滞后 60 d	滞后 90 d	滞后 180 d
钢管	-140.8	-139.4	-139.1	-138.9	-138.5
上杆混凝土	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2
下杆混凝土	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4

分析图 5 和图 6 以及表 4 和表 5,可知:

(1) 拱肋施工滞后系梁施工的时间越长,拱肋和系梁的成桥线形的徐变下挠度越大,系梁的徐变下挠度值接近 20 mm,达到规范的容许值。

(2) 钢管的应力随着拱肋施工滞后系梁施工的时间延长而减小,混凝土的应力变化较小。

4.3 拱肋和系梁线形实测对比

实际施工过程中,对拱肋和系梁的线形,进行了监测和控制。并选取了拱肋安装滞后系梁施工约 90 d 的有限元计算结果进行对比。

在桥墩上方的横梁处高程基准点,采用高精度水准仪和徕卡智能全站仪进行测量。系梁分别在顺桥向 1/4L、1/2L、3/4L 三处设置测量断面,每处断面横桥向设置 5 个测点;拱肋分别在顺桥向 1/4L、1/2L、3/4L 和两端拱脚五处设置测量断面,每处断面横桥向设置 2 个测点。全桥标高测点的位置如图 7 所示。

为说明有限元模型的精确性,假设系梁和拱肋在较短时间内的徐变形变很小,可以忽略,则短时间内的变形均为结构的弹性变形。

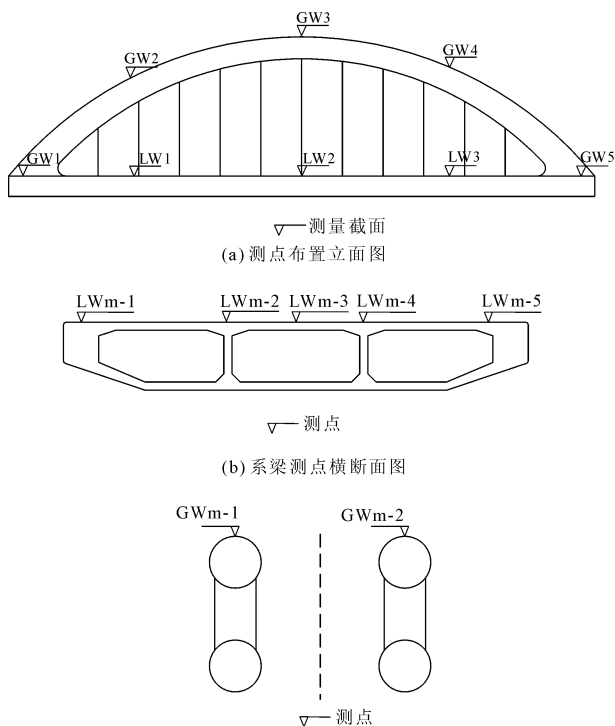


图 7 系梁和拱肋测点布置图

分别对吊杆张拉前后一天内的系梁和拱肋高程进行测量,其线形变量的实测结果与 midas 有限元模型计算结果进行对比,结果如表 6 所示。

表 6 吊杆张拉前后线形变化量对比 单位:mm

测点位置	实测值	计算值	偏差
系梁 1/4L	2.3	1.8	-0.5
系梁 1/2L	4.0	3.3	-0.7
系梁 3/4L	2.3	1.8	-0.5
拱脚 L	0.2	—	—
拱肋 1/4L	0.7	0.6	-0.1
拱肋 1/2L	1.8	2.1	0.3
拱肋 3/4L	0.7	0.6	-0.1
拱脚 R	0.2	—	—

由表 6 可知:吊杆张拉前后系梁和拱肋线形变量的实测值与计算值偏差很小,拱肋拱顶截面的偏差为 0.3 mm,系梁线形最大偏差为 0.7 mm,说明考虑了停工周期影响的有限元模型是精确的。在精确的模型基础上,修改施工步骤和停工时间周期,研究考虑施工步骤收缩徐变对线形控制的影响,是可靠的。

5 结 论

(1) 在高速铁路大跨度钢管混凝土系杆拱桥的线形控制中,应考虑施工步骤收缩徐变因素对线形的影响。如遇施工组织变化或长时间停工,有限元

仿真分析可增加停工施工步骤,应确保后期无砟轨道标高的精确控制。

(2) 考虑施工步骤的收缩徐变因素时,系梁和拱肋收缩徐变变形增大,系梁应力在拱脚处保持不变,拱脚处钢管应力减小。钢管内核心混凝土应力无变化。

(3) 其他大跨度桥梁的施工线形控制,也应充分考虑施工步骤的收缩徐变因素对成桥线形的影响,将其作为施工线形控制的影响因素之一。

参考文献:

- [1] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
- [2] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等.我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J].建筑结构学报,2013,34(S1):1-10.
- [3] 韩冰,杜金生,王元丰.徐变对钢管混凝土拱桥的影响分析[J].公路交通科技,2005(6):75-77,93.
- [4] 王玉银,耿悦,张素梅.钢管混凝土收缩徐变模型及计算方法对比分析[J].天津大学学报,2011,44(12):1075-1082.
- [5] 武文杰,王元丰,马伊硕.考虑几何非线性及施工的钢管混凝土拱桥徐变[J].西南交通大学学报,2013,48(4):645-650.
- [6] 周履.混凝土收缩徐变引起的钢-混凝土结合梁的内力重分配[J].桥梁建设,2001(2):1-4.
- [7] 张正阳,赵人达.基于贝叶斯理论的钢管混凝土劲性骨架拱桥收缩徐变效应分析[J].铁道标准设计,2017,61(5):86-90,95.
- [8] 郭安娜.大跨度铁路预应力混凝土斜拉桥收缩徐变影响及控制措施研究[J].铁道标准设计,2021,65(6):73-77.
- [9] 姜嫚.基于实测数据修正的徐变预测模型在铁路桥拱度计算中的应用[J].铁道建筑,2014(5):5-8.
- [10] Naaman H A E, et al. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3[J]. Materials & Structures, 1996,29(2):126-126.
- [11] Ma Yishuo, Wang Yuanfeng. Creep of high strength concrete filled steel tube columns[J]. Thin-Walled Structures, 2012,53(5):91-98.
- [12] 宋郁民,刘媛,周世军.预应力混凝土桥梁悬臂施工中徐变挠度的计算[J].兰州交通大学学报,2008(4):25-28.
- [13] 吕福钢,柴金义,夏宏光.钢管混凝土拱桥收缩徐变计算模式的探讨[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(6):318-322.
- [14] 王龙飞.桥梁混凝土收缩徐变效应时变过程综合仿真[J].公路交通科技,2021,38(2):54-61.
- [15] 张文光.钢管混凝土拱-梁组合桥拱脚区域局部受力分析[J].安徽建筑,2021,28(8):225-226.
- [16] 白艳.收缩徐变对钢管混凝土系杆拱桥静力性能的影响[J].铁道建筑技术,2016(5):45-48.
- [17] 铁路桥涵混凝土结构设计规范:TB 10092—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017:100-103.
- [18] 袁伦一.1978年国际预应力协会(FIP)关于混凝土徐变系数及收缩应变的研究[J].国外公路,1981(6):10-13.

(上接第 127 页)

- [23] Zhang Wanlu, Zhao Lunyang, Bryan A. M, et al. Dredged marine sediments stabilized/solidified with cement and GGBS: Factors affecting mechanical behaviour and leachability[J]. Science of the Total Environment, 2020,733:138551-138567.
- [24] 徐奋强,郭先凯.高液限土路基掺砂改良试验研究[J].科学技术与工程,2013,13(33):10054-10058.
- [25] 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [26] Crossin E. The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute[J]. Journal of Cleaner Production, 2015,95:101-108.
- [27] Ahmad A, Fabjola B, Alessandra Z, et al. Zero-waste approach in municipal solid waste incineration: Reuse of bottom ash to stabilize fly ash[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,245:118779-118791.