

水平底板索连续刚构桥施工阶段混凝土收缩徐变效应研究

马林东¹, 赵若朝², 陶勇²

¹中铁开发投资集团有限公司, 云南 昆明

²中南大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年9月8日; 录用日期: 2023年9月29日; 发布日期: 2023年10月9日

摘要

以贵州山区某高墩大跨水平底板索连续刚构桥为工程背景, 采用有限元方法研究了混凝土收缩徐变对水平底板索连续刚构桥施工阶段力学性能的影响, 并分析了环境相对湿度和混凝土加载龄期对桥梁施工阶段力学性能的影响。研究发现, 在不同施工阶段, 考虑混凝土收缩徐变时水平底板索连续刚构桥的挠度均大于不考虑混凝土收缩徐变时的挠度, 而考虑混凝土收缩徐变时桥梁的压应力均略小于不考虑混凝土收缩徐变时的压应力。并且, 随着环境相对湿度的增大, 桥梁的挠度会减小, 而压应力几乎不变。此外, 随着混凝土加载龄期的增大, 桥梁的挠度会先增大后减小, 而压应力几乎不变。本文研究成果可为水平底板索连续刚构桥的设计和施工提供有益的指导。

关键词

水平底板索连续刚构桥, 混凝土收缩徐变, 环境相对湿度, 加载龄期, 施工阶段

Research on the Effects of Concrete Shrinkage and Creep during the Construction Stage of Continuous Rigid-Frame Bridge with Horizontal Bottom Slab Cables

Lindong Ma¹, Ruochao Zhao², Yong Tao²

¹China Railway Investments Group Limited, Kunming Yunnan

²School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Received: Sep. 8th, 2023; accepted: Sep. 29th, 2023; published: Oct. 9th, 2023

文章引用: 马林东, 赵若朝, 陶勇. 水平底板索连续刚构桥施工阶段混凝土收缩徐变效应研究[J]. 土木工程, 2023, 12(10): 1238-1246. DOI: 10.12677/hjce.2023.1210144

Abstract

Taking a high-pier and large-span continuous rigid-frame bridge with horizontal bottom slab cables (CRFB-HBSC) in the mountainous area of Guizhou as the engineering background, the influence of concrete shrinkage and creep on the mechanical properties of the bridge during construction was studied using the finite element method, and the effects of environmental relative humidity and concrete loading age on the mechanical properties of the bridge during construction were analyzed. It was found that, at different construction stages, the deflection of the CRFB-HBSC considering concrete shrinkage and creep was greater than that without considering it, while the compressive stress of the bridge considering concrete shrinkage and creep was slightly smaller than that without considering it. Moreover, as the environmental relative humidity increased, the deflection of the bridge decreased, while the compressive stress remained almost unchanged. In addition, as the concrete loading age increased, the deflection of the bridge first increased and then decreased, while the compressive stress remained almost unchanged. The research results of this paper can provide beneficial guidance for the design and construction of CRFB-HBSC.

Keywords

Continuous Rigid-Frame Bridge with Horizontal Bottom Slab Cables, Concrete Shrinkage and Creep, Environmental Relative Humidity, Concrete Loading Age, Construction Stage

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国高速交通建设迅猛发展,高墩大跨连续刚构桥得到了广泛应用,并且,墩高、跨径不断增大[1][2]。但随着跨径增大,连续刚构桥下挠、底板开裂和承载力下降等问题愈发突出,造成这些问题的原因包括管理养护工作不力、混凝土收缩徐变、施工不当等[3][4]。混凝土收缩徐变作为混凝土材料的关键特性,对混凝土桥梁服役性能有至关重要的影响[5]。因此,相关学者和技术人员对连续刚构桥的混凝土收缩徐变问题进行了一系列的研究。研究表明,混凝土的大部分收缩变形在龄期 0.5~1 年内出现,而大部分的徐变变形则在 1~2 年内出现,并且在前 3~6 个月发展最快[6]。由于桥梁施工阶段是混凝土收缩徐变发展较快的时期[6],所以研究连续刚构桥在施工阶段的混凝土收缩徐变效应十分重要。

混凝土收缩徐变一直是相关学者和技术人员重点研究的问题,也是土木工程领域的研究热点。但是,混凝土收缩徐变影响因素多、变化机理复杂、随机变量大,其对桥梁的影响至今还没有被人们完全掌握。混凝土收缩是指由于混凝土内部水泥胶凝体中的水分蒸发,导致混凝土硬化时体积变小的一种物理化学现象[7][8]。这种变化与混凝土所承受的荷载没有直接关系而与时间密切相关[7],而且,混凝土收缩持续时间长而发展缓慢,其增长速度是越来越缓慢的,直到一定时间后会趋于平稳[9]。研究表明,大多数的混凝土收缩在 3 个月内可完成 40%~80%,并且在 1 年内可完成 66%~85% [10]。混凝土徐变是混凝土固有的性质,它主要是与时间密切相关的非线性变形,并且可以持续很长一段时间,但其增长速度与时间会形成反比例的关系。一般来说,混凝土的徐变变形是瞬时变形的 1~3 倍,而且在不利情况下混凝土的徐变变形会变得更大[11]。

对于连续刚构桥施工阶段的混凝土收缩徐变效应,目前有许多研究人员开展了相关研究工作。陈爽等[12]研究了环境相对湿度对连续刚构桥内力和挠度的影响,发现低湿环境下混凝土收缩徐变对连续刚构桥产生的不利影响更大。通过对比分析考虑和不考虑混凝土收缩徐变的情况,马显红和余毅[13]发现不考虑混凝土收缩徐变时连续刚构桥的挠度比考虑混凝土收缩徐变时的挠度减小了 59 mm。韩树亮[9]发现混凝土收缩徐变对连续刚构桥悬臂施工阶段的节点位移有较为明显的影响。通过有限元分析,洪帆和周征征[14]发现不同徐变计算模式对连续刚构桥施工预拱度的影响不同。

为了消除传统曲线底板索连续刚构桥由于钢束按照底板曲线布置引起的径向力,重庆交通大学吴国松等[15][16]提出在连续刚构桥中采用水平底板索技术,并且研究发现采用该技术后混凝土收缩徐变对连续刚构桥运营阶段的不利影响会大大降低。虽然水平底板索连续刚构桥可以在运营阶段较好地抵抗混凝土收缩徐变带来的不利影响,但其在施工阶段的力学性能受混凝土收缩徐变的影响规律尚不明确。本文采用有限元方法系统地分析了混凝土收缩徐变对水平底板索连续刚构桥施工阶段力学性能的影响,验证了水平底板索连续刚构桥的工程应用价值。

2. 工程背景与分析方法

2.1. 工程背景

本文依托工程为贵州山区某高墩大跨水平底板索连续刚构桥,其跨径布置为(86 + 160 + 86) m,底板束水平布置。主梁为单箱单室箱梁结构,箱梁梁高变化采用的抛物线次数为 1.5,主墩采用箱式整体断面和双肢薄壁空心墩组合桥墩,如图 1 所示。桥梁 0 号梁段采用托架现浇,其余梁段采用挂篮悬臂对称浇筑,中跨合龙梁段采用吊架浇筑合龙,边跨合龙梁段、边跨现浇段采用导梁法施工。

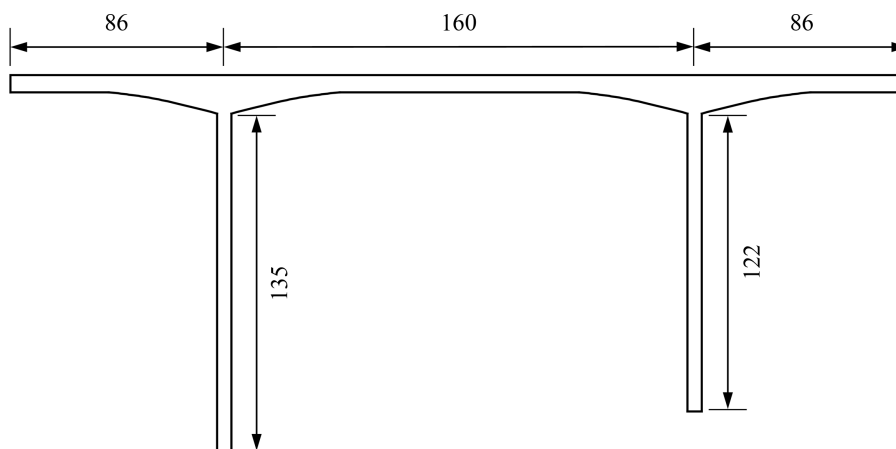


Figure 1. Elevation diagram of CRFB-HBSC (unit: m)

图 1. 水平底板索连续刚构桥立面图(单位: m)

2.2. 有限元模型

影响混凝土收缩徐变的因素可以分为内部因素和外部因素[9]。内部因素主要包括水泥品种、水灰比和养护条件等,而外部因素主要包括环境相对湿度和混凝土加载龄期等[9]。由于混凝土收缩徐变的机理和影响因素复杂,其对水平底板索连续刚构桥力学性能的影响无法以简单的方法准确计算出来。

本文采用 MIDAS/Civil 2020 建立上述水平底板索连续刚构桥的有限元模型,模型单元类型为梁单元,上部箱梁与墩柱固结,墩柱根部与承台固结,有限元模型如图 2 所示。模型设置了 84 个施工阶段,混凝土收缩徐变的计算采用我国规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018) [17]。

通过改变环境相对湿度和混凝土加载龄期，分别研究两者对水平底板索连续刚构桥施工阶段不同位置处挠度与应力的影响，并分析混凝土收缩徐变对桥梁施工阶段力学性能的影响。为方便描述水平底板索连续刚构桥的不同位置，以桥梁成桥时的桥端处为原点，以顺桥向为 x 轴建立图 2 所示坐标系。

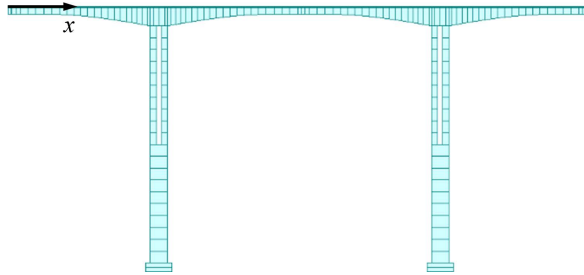


Figure 2. Finite element model of CRFB-HBSC
图 2. 水平底板索连续刚构桥有限元模型

3. 混凝土收缩徐变对桥梁施工阶段力学性能的影响

3.1. 混凝土收缩徐变对挠度的影响

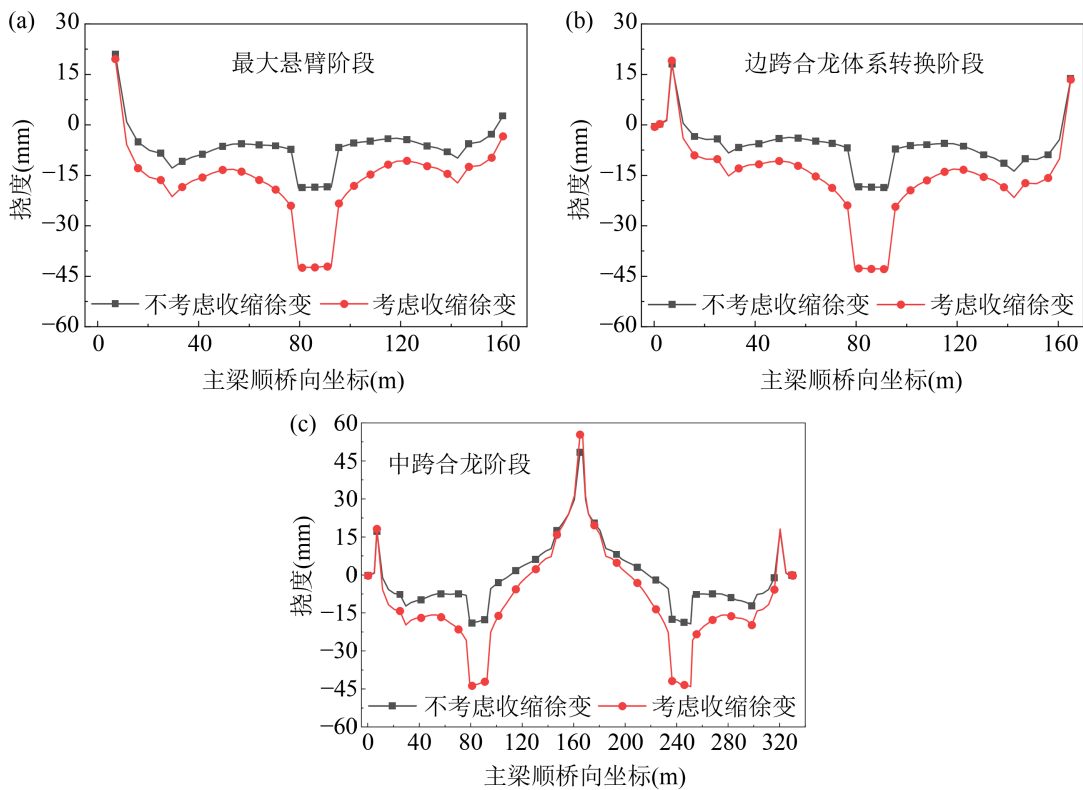


Figure 3. The relation between deflection and coordinate of bridge at different construction stages when considering and not considering concrete shrinkage and creep

图 3. 考虑和不考虑混凝土收缩徐变时桥梁在不同施工阶段的挠度与坐标的关系

图 3 给出了考虑和不考虑混凝土收缩徐变时水平底板索连续刚构桥在最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段的挠度与坐标的关系。从图 3 可以看出，在不同的施工阶段，桥梁挠度受混凝土收缩徐变的影响相似：考虑混凝土收缩徐变时桥梁的挠度均大于不考虑混凝土收缩徐变时桥梁的挠度，

且两者在桥墩处($x = 80 \text{ m}$)的差值最大,即桥墩处的桥梁挠度受混凝土收缩徐变的影响最大。以最大悬臂阶段为例,不考虑混凝土收缩徐变时桥墩处的桥梁下挠为 18.84 mm ,而考虑混凝土收缩徐变时桥梁下挠为 42.57 mm ,该值是不考虑混凝土收缩徐变时桥墩处桥梁下挠值的 2.26 倍。这是因为混凝土收缩徐变不仅会使预应力损失增加[18],从而导致桥梁下挠增大,而且会使桥梁在自重等荷载作用下的下挠随时间的增加而增大[19]。因此,混凝土收缩徐变对水平底板索连续刚构桥施工阶段的挠度影响较大。

3.2. 混凝土收缩徐变对应力的影响

图 4 给出了考虑和不考虑混凝土收缩徐变时水平底板索连续刚构桥在最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段的压应力与坐标的关系。从图 4 可以看出,桥梁的压应力在最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段受混凝土收缩徐变的影响相似:考虑混凝土收缩徐变时桥梁的压应力均略小于不考虑混凝土收缩徐变时桥梁的压应力,且两者在桥墩处的差值最大,即桥墩处的桥梁压应力受混凝土收缩徐变的影响最大。以最大悬臂阶段为例,不考虑混凝土收缩徐变时桥墩处的桥梁压应力为 14.66 MPa ,而考虑混凝土收缩徐变时桥梁压应力为 14.13 MPa ,与前者相比减小了 0.53 MPa ,该减小值仅为不考虑混凝土收缩徐变时桥墩处桥梁压应力的 3.62% 。因此,混凝土收缩徐变对水平底板索连续刚构桥施工阶段的应力影响较小。

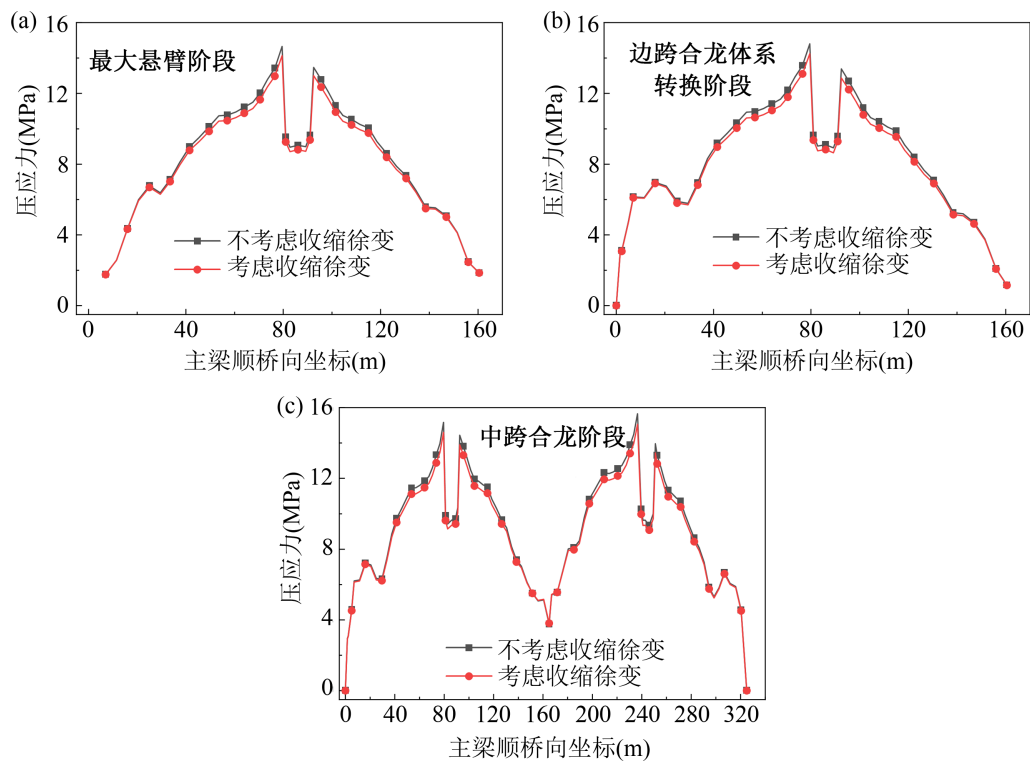


Figure 4. The relation between stress and coordinate of bridge at different construction stages when considering and not considering concrete shrinkage and creep

图 4. 考虑和不考虑混凝土收缩徐变时桥梁在不同施工阶段的压应力与坐标的关系

4. 外部因素对桥梁施工阶段力学性能的影响

4.1. 环境相对湿度的影响

由于桥梁所处的环境相对湿度(RH)会对混凝土收缩徐变产生重要影响[9],因此,本节以水平底板索

连续刚构桥有限元模型为基础,将环境相对湿度分别设置为 40% 和 98% 来模拟低湿度环境和高湿度环境,同时设置环境相对湿度为 70% 作为对照,分析环境相对湿度对桥梁施工阶段力学性能的影响。

图 5 给出了最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段环境相对湿度不同时水平底板索连续刚构桥的挠度与坐标的关系。从图 5 可以看出,在不同的施工阶段,水平底板索连续刚构桥的挠度受环境相对湿度的影响相似:随着环境相对湿度的增大,水平底板索连续刚构桥的挠度均会减小,与曲线底板索连续刚构桥的挠度受环境相对湿度的影响类似[20]。以最大悬臂阶段为例,当环境相对湿度为 40% 时,桥墩处的桥梁下挠可达到 49.17 mm;而当环境相对湿度为 98% 时,桥墩处的桥梁下挠为 34.62 mm。由此可知,与环境相对湿度为 40% 时桥墩处的桥梁下挠值相比,环境相对湿度为 98% 时桥墩处的桥梁下挠值减小了 14.55 mm,即减小了 29.59%。这是因为环境相对湿度对水泥水分有重要的影响,随着环境相对湿度的增大,水泥水分的散失会减小,从而导致混凝土收缩徐变减小[21],水平底板索连续刚构桥的挠度也会减小。由以上分析可知,在施工阶段,环境相对湿度对水平底板索连续刚构桥的挠度影响较大。

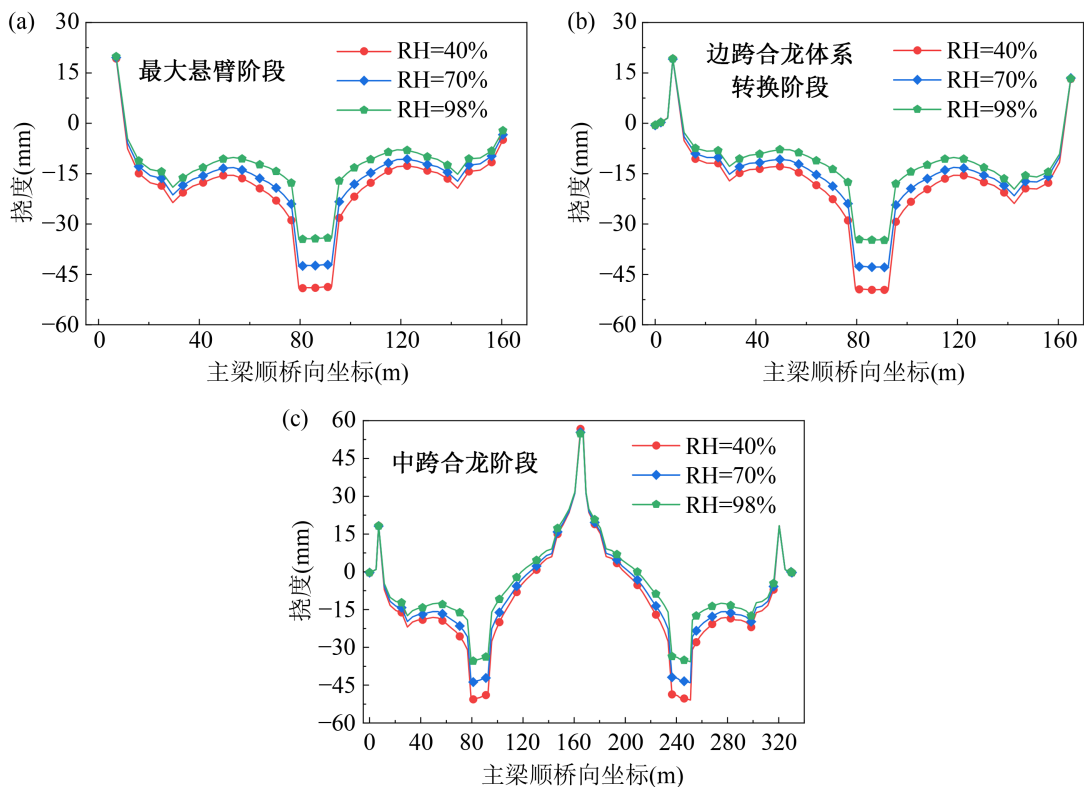


Figure 5. The relation between deflection and coordinate of bridge at different construction stages and different environmental relative humidity

图 5. 环境相对湿度不同时桥梁在不同施工阶段的挠度与坐标的关系

图 6 给出了最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段环境相对湿度不同时水平底板索连续刚构桥的压应力与坐标的关系。从图 6 可以看出,在不同的施工阶段,环境相对湿度对水平底板索连续刚构桥的压应力的影响相似:随着环境相对湿度的增大,水平底板索连续刚构桥的压应力几乎不变。以最大悬臂阶段为例,当环境相对湿度为 40% 时,桥墩处的桥梁压应力可达到 14.00 MPa;而当环境相对湿度为 98% 时,桥墩处的桥梁压应力为 14.26 MPa。与环境相对湿度为 40% 时桥墩处的桥梁压应力相比,环境相对湿度为 98% 时桥墩处的桥梁压应力仅增加了 0.26 MPa,该增加值是环境相对湿度为 40% 时桥墩处的桥梁压应力的 1.86%。因此,在施工阶段,环境相对湿度对水平底板索连续刚构桥的应力影响

很小。

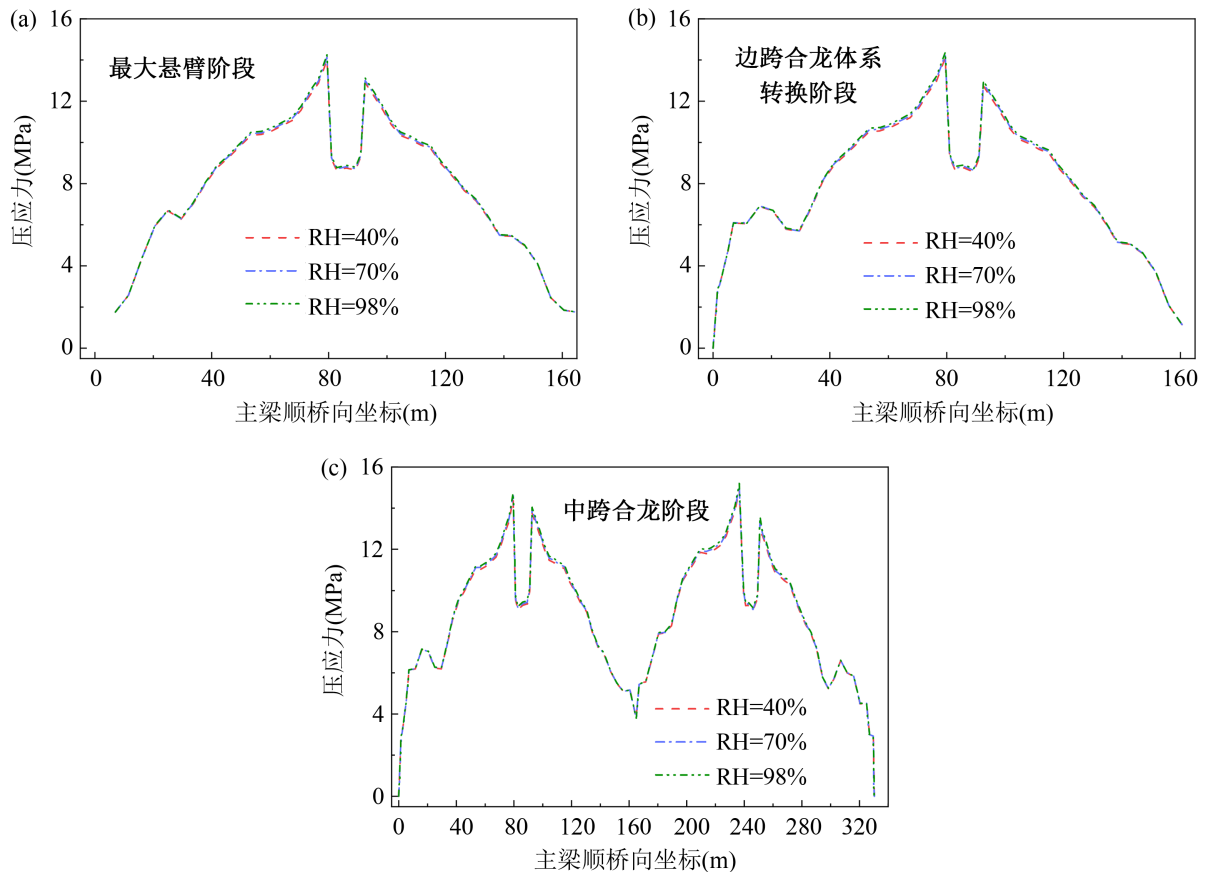


Figure 6. The relation between stress and coordinate of bridge at different construction stages and different environmental relative humidity

图 6. 环境相对湿度不同时桥梁在不同施工阶段的压应力与坐标的关系

4.2. 混凝土加载龄期的影响

混凝土加载龄期是影响混凝土收缩徐变的重要因素之一，而且，当加载龄期不同时，混凝土的力学性能也会不同[9]。因此，本节以水平底板索连续刚构桥有限元模型为基础，将加载龄期分别设置为 3 天、7 天、14 天、21 天和 28 天，研究加载龄期对水平底板索连续刚构桥施工阶段力学性能的影响。

图 7 给出了最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段加载龄期不同时水平底板索连续刚构桥的挠度与坐标的关系。从图 7 可以看出，在不同的施工阶段，水平底板索连续刚构桥的挠度受加载龄期的影响相似：随着加载龄期逐渐增大，水平底板索连续刚构桥的挠度会先增大后减小，在加载龄期为 14 天时，桥梁不同坐标处的挠度均最大。以最大悬臂阶段为例，当混凝土加载龄期由 3 天增大到 28 天时，桥梁在桥墩处的下挠值先由 40.14 mm 增大至 44.00 mm，然后减小至 40.16 mm。

图 8 给出了加载龄期不同时水平底板索连续刚构桥在最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段的压应力与坐标的关系。从图 8 可以看出，在不同的施工阶段，水平底板索连续刚构桥的压应力受加载龄期的影响相似：随着加载龄期逐渐增大，桥梁的压应力几乎不变。以最大悬臂阶段为例，当加载龄期为 28 天时，桥墩处的桥梁压应力可达到 14.26 MPa，比加载龄期为 3 天时桥墩处的桥梁压应力仅增大了 0.03 MPa。因此，水平底板索连续刚构桥施工阶段的应力受混凝土加载龄期影响很小。

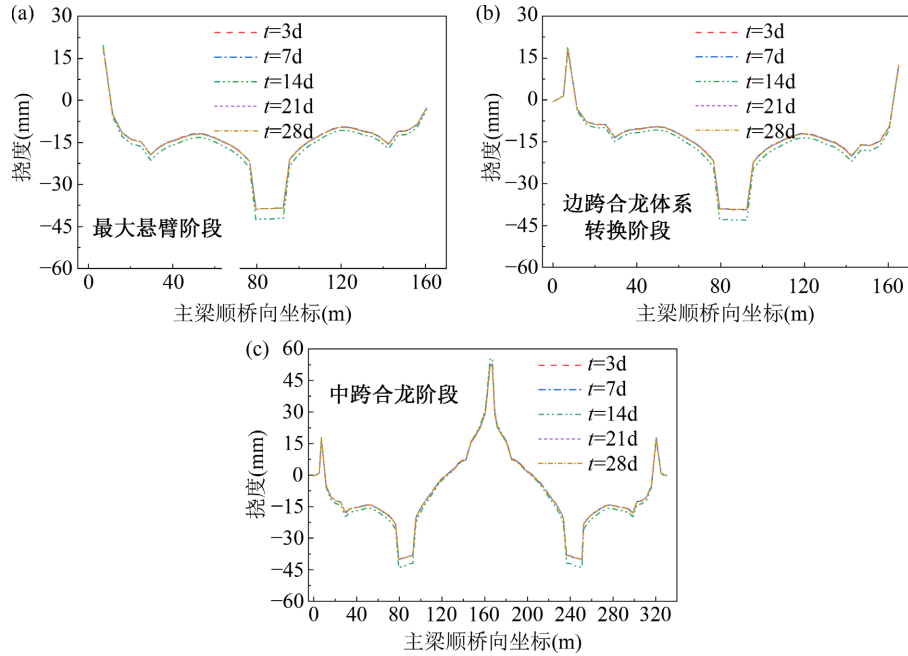


Figure 7. The relation between deflection and coordinate of bridge at different construction stages and different concrete loading ages

图 7. 混凝土加载龄期不同时桥梁在不同施工阶段的挠度与坐标的关系

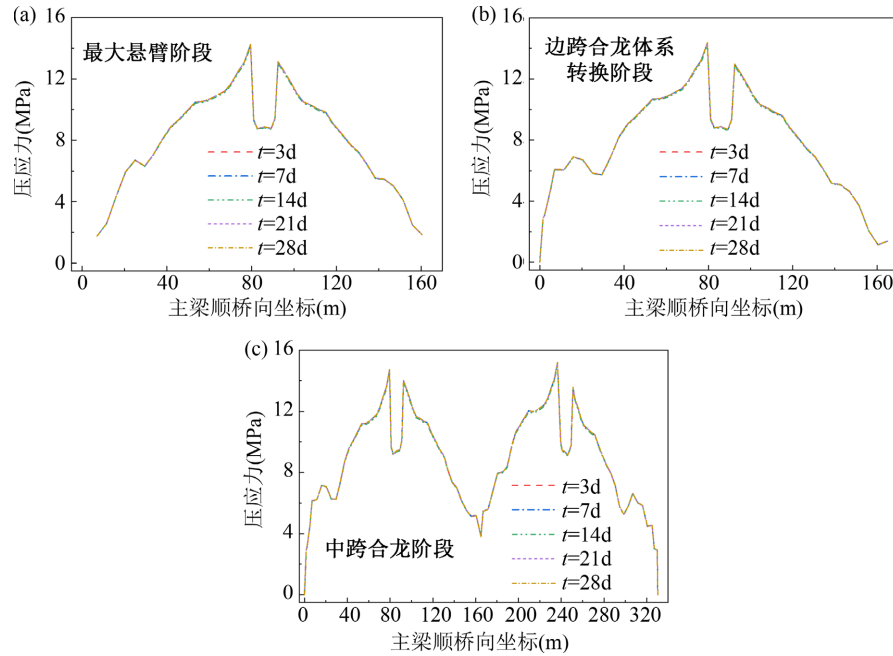


Figure 8. The relation between stress and coordinate of bridge at different construction stages and different concrete loading ages

图 8. 混凝土加载龄期不同时桥梁在不同施工阶段的压应力与坐标的关系

5. 结论

本文依托贵州山区某高墩大跨水平底板索连续刚构桥，建立了水平底板索连续刚构桥的有限元分析模型，分析了在不同施工阶段的水平底板索连续刚构桥力学性能受混凝土收缩徐变、环境相对湿度和混

凝土加载龄期的影响，主要结论如下：

1) 在最大悬臂阶段、边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段，混凝土收缩徐变对水平底板索连续刚构桥的挠度有显著影响，但对应力的影响较小；考虑混凝土收缩徐变时，桥梁的挠度大于不考虑混凝土收缩徐变时的挠度，而桥梁的压应力则略小于不考虑混凝土收缩徐变时的压应力。

2) 在本文所研究的施工阶段，随着环境相对湿度的增大，水平底板索连续刚构桥的挠度会减小，而压应力几乎不变，环境相对湿度对桥梁应力的影响很小；随着加载龄期的增大，桥梁的挠度会先增大后减小，而压应力几乎不变，混凝土加载龄期对桥梁应力的影响也很小。

基金项目

中铁开投科技研究开发计划项目(项目编号：2021-B类-05)。

参考文献

- [1] Yao, S., Peng, B., Wang, L. and Chen, H. (2022) Estimation Formula of Finished Bridge Pre-Camber in Continuous Rigid-Frame Bridges. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 16034. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20449-4>
- [2] 韦仕荣, 杨斌, 陈闯, 徐桂弘, 汪权明. 贵都高速大跨径连续刚构桥-石门坎大桥长期挠度监测分析[J]. 土木工程, 2018, 7(3): 367-374.
- [3] 唐文斌, 覃亮, 袁博, 陶勇. 预应力损失对水平底板索连续刚构桥施工阶段力学性能影响分析[J]. 土木工程, 2023, 12(4): 472-482.
- [4] Zhao, J., Jia, H. and Zhan, Y. (2023) Seismic Vulnerability Analysis of Multi-Main-Span High Pier Continuous Rigid-Frame Bridge in Terms of Cloud Method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **27**, 2519-2534. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0250-6>
- [5] 郑婵. 不同收缩徐变模型下的刚构桥结构响应研究[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(6): 79-81.
- [6] 张飞, 黄福云, 王燕. V型墩刚构桥悬浇施工中应变修正与应力监测[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(3): 36-41.
- [7] 熊学玉, 黄炜一, 张亚东, 王国民. 预应力混凝土收缩徐变效应测试与分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(4): 65-68.
- [8] 张海洋. 大跨度PC刚构桥的徐变效应分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [9] 韩树亮. 混凝土收缩徐变对连续刚构桥施工及成桥的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [10] 向小斌. 大跨径连续刚构梁桥混凝土徐变试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [11] 王斐. 连续刚构桥施工监控与收缩徐变效应分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [12] 陈爽, 唐慧琪, 李继芸, 文涛, 陈威庭, 李福海. 低湿环境对连续刚构桥收缩徐变影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(18): 34-38.
- [13] 马显红, 余毅. 高墩大跨连续刚构桥施工控制参数敏感性分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(3): 57-62.
- [14] 洪帆, 周征征. 混凝土收缩徐变在连续刚构桥施工中的影响分析[J]. 交通科技, 2009(S1): 1-3.
- [15] 车俊, 武维宏, 吴国松. 基于水平底板索理念的大跨度PC连续刚构桥徐变下挠控制措施研究及工程应用[J]. 工程建设与设计, 2022(11): 109-112.
- [16] 吴国松, 胡嘉鸿. 一种预应力混凝土变截面箱桥梁及其施工方法[P]. 中国, CN201310007747.5. 2015-03-18.
- [17] 中交公路规划设计院有限公司. JTG 3362-2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [18] 徐梓宸. 收缩徐变对加劲钢桁连续刚构组合梁桥变形的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [19] 邓宜峰. 大跨连续刚构桥混凝土收缩徐变效应分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [20] 卓斌. 大跨连续刚构桥典型力学问题分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [21] 刘洁. 大跨径连续刚构桥混凝土收缩徐变效应分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.