

水平底板索连续刚构桥运营阶段收缩徐变效应分析

丁宏伟¹, 陈希侯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: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年11月29日; 发布日期: 2025年12月15日

摘 要

为了研究混凝土收缩徐变效应对水平底板索连续刚构桥运营阶段力学性能的影响规律, 本文以我国西南山区某水平底板索连续刚构桥为研究对象, 采用Midas/Civil分析了成桥年限及徐变系数对桥梁挠度和顶底板应力的影响。研究表明, 混凝土收缩徐变对水平底板索连续刚构桥顶底板应力的影响很小, 但对桥梁下挠的影响较大。随着成桥年限的增大, 桥梁下挠增大, 且下挠受成桥年限的影响会逐渐减小; 而随着徐变系数的增大, 桥梁挠度几乎线性增长。此外, 通过与曲线底板索连续刚构桥对比可知, 水平底板索连续刚构桥的下挠受成桥年限及徐变系数变化的影响相对较小。

关键词

水平底板索连续刚构桥, 运营阶段, 混凝土收缩徐变, 应力, 挠度

Shrinkage and Creep Effect Analysis of a Continuous Rigid Frame Bridge with Horizontal Bottom Slab Cables during the Operation Stage

Hongwei Ding¹, Xiyu Chen², Yong Tao²

¹China Railway Investments Group Limited, Kunming Yunnan

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

Received: November 8, 2025; accepted: November 29, 2025; published: December 15, 2025

文章引用: 丁宏伟, 陈希侯, 陶勇. 水平底板索连续刚构桥运营阶段收缩徐变效应分析[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 2903-2913. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412312

Abstract

In order to study the influence law of concrete shrinkage and creep effect on the mechanical properties of the continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables during the operation stage, this paper takes a continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables in the mountainous area of southwest China as the research object, and analyzes the influence of bridge formation age and creep coefficient on the deflection and the top and bottom slabs' stresses of the bridge by using Midas/Civil. The study shows that the effect of concrete shrinkage and creep on the top and bottom slabs' stresses of the continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables is small, but the effect on the bridge deflection is large. With the increase of the bridge formation age, the bridge deflection increases, and the deflection affected by the bridge formation age is gradually reduced; while with the increase of the creep coefficient, the bridge deflection increases almost linearly. In addition, by comparing with the continuous rigid frame bridge with curved bottom slab cables, it can be found that the deflection of the continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables is relatively less affected by the bridge formation age and the change of creep coefficient.

Keywords

Continuous Rigid Frame Bridge with Horizontal Bottom Slab Cables, Operation Stage, Concrete Shrinkage and Creep, Stress, Deflection

Copyright © 2025 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

桥梁工程是我国交通基础设施的核心组成部分,对维系交通运输畅通与稳定至关重要,是交通运输事业的命脉。特别是我国西南地区,地形结构复杂,主要以高原、山地为主,道路建设过程中不可避免地需要架设桥梁。连续刚构桥具有建造成本低、行车舒适度高、跨越能力强以及施工简便等优点[1]-[3],受到了桥梁设计人员的广泛青睐。但是,随着连续刚构桥的大量修建,其主梁下挠过大引起的底板开裂和承载能力下降等问题日益凸显,对桥梁结构的安全性及耐久性造成了严重威胁。预应力损失、汽车活载、基础不均匀沉降及混凝土收缩徐变等都是造成连续刚构桥长期下挠的重要因素[4][5]。其中,混凝土收缩徐变作为混凝土材料的基本特性,对预应力混凝土连续刚构桥的长期承载能力有着至关重要的影响[6]。研究表明,在连续刚构桥运营阶段,由混凝土收缩徐变引起的挠度在总挠度中占比较大[3]。因此,深入研究连续刚构桥运营阶段的混凝土收缩徐变效应至关重要。

混凝土收缩和徐变是混凝土在不同条件下产生的两种不同类型的变形。混凝土收缩源于混凝土内部水分子的蒸发,随着水分占据的空隙减少,混凝土整体体积会缩小,故混凝土收缩与外部荷载作用无关;混凝土徐变是指在外荷载作用下,混凝土变形随时间推移而逐渐增大的现象[7][8]。这两种变形在连续刚构桥运营阶段均可能出现,从而影响桥梁的安全性和耐久性。因此,为了探究混凝土收缩徐变对连续刚构桥运营阶段力学性能的影响,许多研究人员开展了相关研究。杨莹[9]研究了混凝土收缩徐变对曲线底板索连续刚构桥下挠的影响,发现由混凝土收缩徐变引起的挠度随成桥年限的增大而逐步趋于稳定。赵新宏等[10]采用有限元方法分析了不同徐变系数对曲线底板索连续刚构桥下挠的影响,结果表明,相较

于徐变系数不变的情况，徐变系数增大 40% 时，桥梁中跨跨中的挠度增大 41.22%。郑婵[11]通过 ACI 模型、CEB-FIP 模型、欧洲模型及 JTG D62-2004 模型分析了曲线底板索连续刚构桥在运营阶段的变形，发现采用不同模型时，尽管桥梁挠度的变化趋势相似，但挠度预测值存在明显差异，最大可达 3 倍。

由于传统连续刚构桥普遍存在跨中下挠过大和底板开裂的问题[12][13]，对桥梁结构的性能和行车安全造成了严重影响，极大限制了连续刚构桥的使用寿命。现有研究表明，连续刚构桥底板预应力钢束曲线布置而产生的径向力是加剧主梁下挠及预应力损失的主要原因[14]-[16]。为解决曲线布置预应力钢束对连续刚构桥造成的负面影响，吴国松等[17]提出了水平布置连续刚构桥底板预应力钢束的方案，并申请了国家发明专利。研究发现[18]，水平布置连续刚构桥底板预应力钢束可有效控制由径向力引起的主梁下挠及预应力损失。此外，门晟明等[19]采用有限元方法分析了连续刚构桥底板预应力钢束全部水平布置和部分水平布置时的主梁下挠情况，结果表明，相较于底板预应力钢束部分水平布置，底板预应力钢束全部水平布置会使主梁下挠现象明显减弱。虽然上述研究表明水平布置底板预应力钢束可有效抑制连续刚构桥下挠，但目前关于水平底板索连续刚构桥力学性能的研究十分有限，且混凝土收缩徐变对其在运营阶段的影响规律还有待研究。

为了揭示混凝土收缩徐变效应对水平底板索连续刚构桥运营阶段力学性能的影响规律，本文采用有限元方法，系统研究了成桥年限及徐变系数对主梁挠度及顶底板应力的影响，研究结果将为水平底板索连续刚构桥的设计和运营提供指导和借鉴。

2. 工程概况与有限元模型

2.1. 工程背景介绍

本文研究对象为我国西南山区建设的某水平底板索连续刚构桥，桥梁跨径布置为(86 + 160 + 86) m，底板预应力钢束水平布置，如图 1 所示。主梁为单箱单室箱梁结构，箱梁梁高按 1.5 次方抛物线变化，主墩采用箱式整体断面和双肢薄壁空心墩组合桥墩，上部箱梁均为变截面单箱单室断面，箱顶宽 12.8 m，底宽 6.8 m。

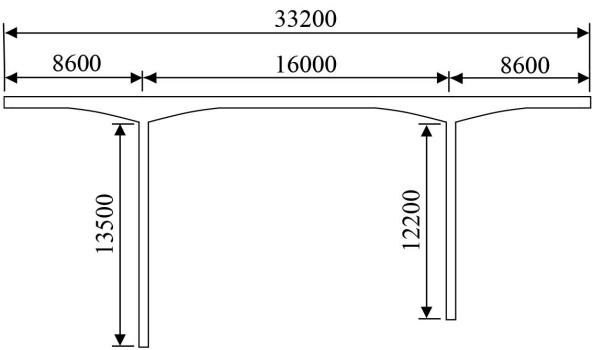


Figure 1. Elevation diagram of a continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables (unit: cm)

图 1. 水平底板索连续刚构桥立面图(单位: cm)

2.2. 材料与荷载参数

2.2.1. 材料参数

桥体主梁采用 C60 混凝土，其弹性模量为 3.60×10^4 MPa；桥墩采用 C50 混凝土，其弹性模量为 3.45×10^4 MPa。纵向预应力采用低松弛高强度钢绞线，其抗拉强度为 $f_{pk} = 1860$ MPa，松弛率 $\rho = 0.035$ ，松

驰系数 $\zeta = 0.3$ 。

2.2.2. 荷载参数

(1) 永久荷载：桥梁结构自重按实际断面尺寸计算，主梁和桥墩混凝土容重按 26 kN/m^3 取值。

(2) 汽车活载：按公路 I 级荷载设计。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)，桥梁基频宜采用有限元方法计算。通过有限元计算可知，本桥基频 $f = 1.212 \text{ Hz}$ 。根据上述规范，当 $f < 1.5 \text{ Hz}$ 时，汽车活载冲击系数取 $\mu = 0.05$ 。

(3) 施工荷载：挂篮移动产生的竖向临时荷载，按使用同种挂篮的梁段最大自重的 0.5 倍取值。本桥挂篮荷载按 1000 kN (包括施工机具和施工人员) 设计，以集中荷载的形式施加于梁端前沿 50 cm 处。

2.3. 有限元模型建立

本文通过 Midas/Civil 2020 建立水平底板索连续刚构桥三维有限元模型，如图 2 所示。根据桥梁结构特性及施工特点，全桥均采用梁单元进行模拟，上部箱梁与墩柱固结，墩柱根部与承台固结。本模型共有 218 个节点和 177 个梁单元，其中，主梁划分了 98 个节点和 97 个梁单元。

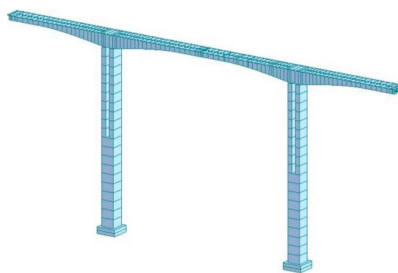


Figure 2. Finite element model of a continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables

图 2. 水平底板索连续刚构桥有限元模型

目前，常用的混凝土收缩徐变模型大都是经验公式或半理论半经验公式[20]。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)，混凝土的收缩应变可按下列公式计算：

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

式中： t 表示计算考虑时刻的混凝土龄期(d)； t_s 表示收缩开始时的混凝土龄期(d)，可假定为 $3 \sim 7 \text{ d}$ ； $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ 表示收缩开始时的龄期为 t_s ，计算考虑时刻的混凝土龄期为 t 时的收缩应变； ε_{cs0} 表示名义收缩系数； β_s 表示收缩随时间发展的系数。

混凝土的徐变系数可按下列公式计算：

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (2)$$

式中： t_0 表示加载时的混凝土龄期(d)； t 为计算考虑时刻的混凝土龄期(d)； $\phi(t, t_0)$ 表示加载龄期为 t_0 ，计算考虑时刻的混凝土龄期为 t 时的徐变系数； ϕ_0 为名义徐变系数； β_c 为加载后徐变随时间发展的系数。本文所建立的有限元模型均采用上述规范进行混凝土收缩徐变的计算。

3. 桥梁运营阶段力学性能影响因素分析

3.1. 混凝土收缩徐变的影响

图 3 给出了成桥 10 年时水平底板索连续刚构桥是否考虑混凝土收缩徐变在不同位置处的挠度变化

曲线。可以看出,相较于不考虑混凝土收缩徐变的情况,考虑混凝土收缩徐变时桥梁在边跨支座处(图 3 中桥跨 1.6 m 和 330.4 m 处)的挠度变化很小,而在其余位置处的挠度变化较大。例如,考虑混凝土收缩徐变时,桥墩处(图 3 中桥跨 86 m 和 246 m 处)的挠度可达 56.71 mm,比不考虑混凝土收缩徐变时桥墩处的挠度增大了 38.52 mm。由此可见,混凝土收缩徐变对水平底板索连续刚构桥挠度的影响不容忽视。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018),桥梁在成桥阶段产生的最大挠度不应超过计算跨径的 $1/600$ 。因此,本文研究的水平底板索连续刚构桥在中跨和边跨处的最大挠度应分别不超过 266.67 mm 和 143.33 mm。结合图 3 可知,该桥梁在成桥 10 年时任意位置处的挠度值均符合规范要求。

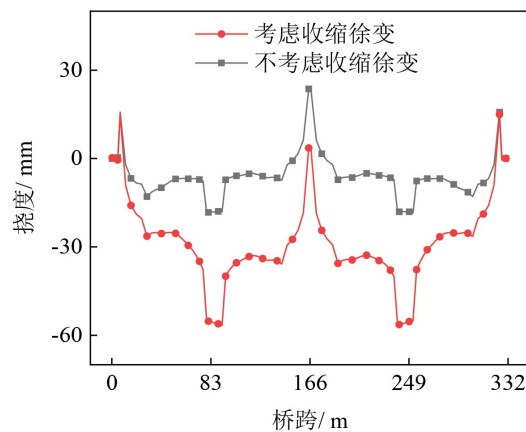


Figure 3. The influence of concrete shrinkage and creep on the bridge deflection
图 3. 混凝土收缩徐变作用对桥梁挠度的影响

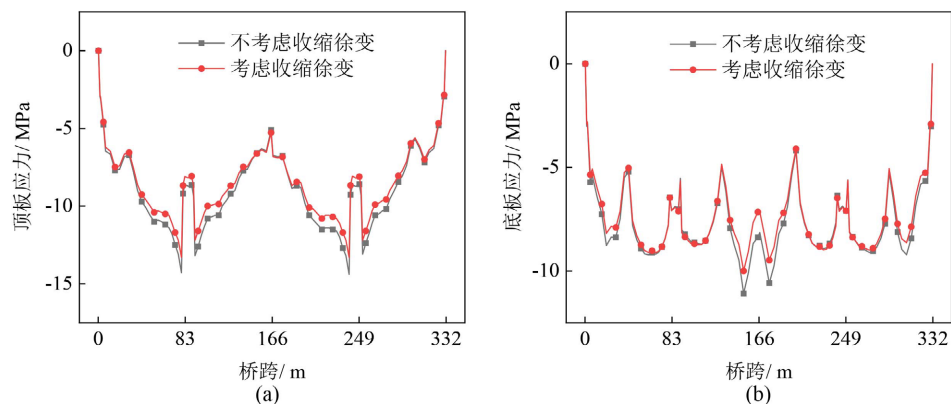


Figure 4. The influence of concrete shrinkage and creep on the (a) top and (b) bottom slabs' stresses of the bridge
图 4. 混凝土收缩徐变对桥梁(a)顶板和(b)底板应力的影响

图 4 给出了成桥 10 年时水平底板索连续刚构桥是否考虑收缩徐变在不同位置处的顶板和底板应力变化曲线。可以看出,桥面各处均处于受压状态,相较于不考虑混凝土收缩徐变的情况,考虑混凝土收缩徐变时桥梁中跨跨中(图 4 中桥跨 166 m 处)附近的顶板应力略有增大,而在桥梁其他位置处的顶板应力及桥梁各个梁段的底板应力均有所减小。这是由于以下两种因素叠加作用所导致的结果:其一是混凝土收缩徐变引起的次内力使桥梁结构的应力减小;其二是桥梁跨中附近梁段在成桥后受混凝土收缩徐变、自重、预应力损失等因素影响,使得桥梁挠度增大,从而使箱梁顶板产生压应力,而底板产生

拉应力[21]。例如,考虑混凝土收缩徐变时,桥梁边跨跨中(图4中桥跨43 m和289 m处)、中跨跨中及中跨L/4(L为桥梁中跨长度)处的顶板应力分别为-9.26 MPa、-5.28 MPa和-9.03 MPa(负号表示该应力为压应力),底板应力分别为-5.04 MPa、-7.16 MPa和-6.63 MPa,比不考虑混凝土收缩徐变时桥梁相应位置处的顶板应力分别减小0.48 MPa、-0.17 MPa和0.61 MPa,底板应力分别减小0.23 MPa、1.22 MPa和0.12 MPa。由此可见,水平底板索连续刚构桥在运营阶段的顶板和底板应力受混凝土收缩徐变的影响不大。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362-2018),桥梁受压区混凝土的最大压应力不应超过 $0.5f_{ck}$,即19.25 MPa。结合图4可知,该桥梁在成桥10年时任意位置处的应力值均符合规范要求。

3.2. 成桥年限的影响

成桥年限是影响连续刚构桥下挠的重要因素之一[4]。因此,本节通过建立水平底板索连续刚构桥有限元模型,将成桥年限分别设置为5年、10年、15年和20年,并以5年为一个阶段,将刚成桥至成桥20年分为四个阶段,研究成桥年限对水平底板索连续刚构桥运营阶段力学性能的影响。

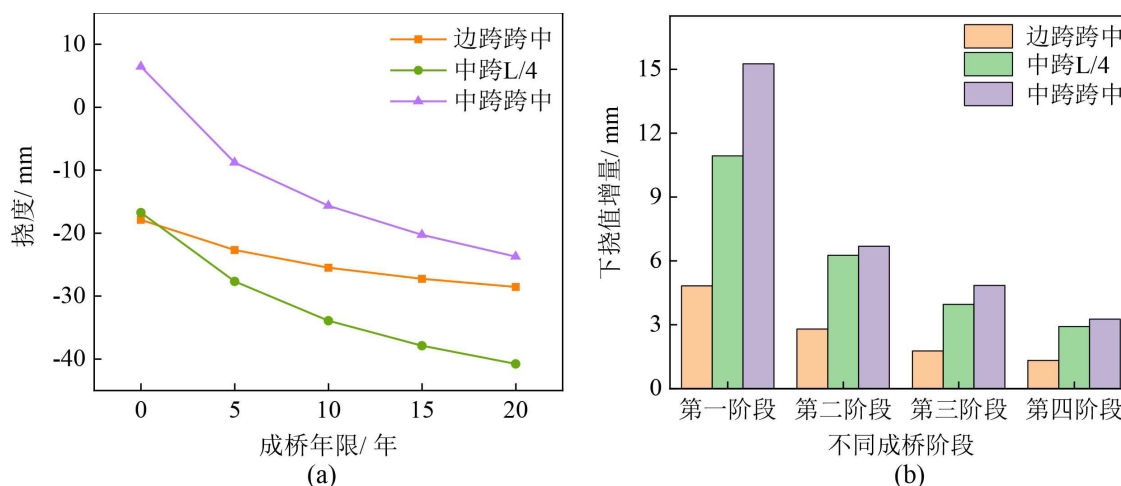


Figure 5. Variation of (a) bridge deflection and (b) downward deflection increment with bridge formation time
图5. (a)桥梁挠度及(b)下挠值增量随成桥时间的变化

图5给出了水平底板索连续刚构桥在不同位置处的挠度随成桥年限的变化以及不同成桥阶段桥梁的下挠值增量。由图5(a)可知,当成桥年限增大时,桥梁边跨跨中、中跨L/4以及中跨跨中处的挠度值会随之增大。然而,由图5(b)可知,桥梁在这些位置处的下挠值增量均随成桥年限的增大而减小;并且,相较于边跨跨中及中跨L/4处,桥梁中跨跨中处的下挠值增量在各成桥阶段均最大。由此可见,随着成桥年限的增大,水平底板索连续刚构桥的挠度受混凝土收缩徐变的影响逐渐减弱。

图6和图7分别给出了水平底板索连续刚构桥由混凝土收缩和徐变单独作用引起的挠度随成桥年限的变化及不同成桥阶段桥梁的下挠值增量。可以看出,当成桥年限增大时,由混凝土收缩和徐变单独作用引起的桥梁挠度值均随之增大,并且,桥梁边跨跨中、中跨L/4及中跨跨中处各阶段的下挠值增量均随成桥年限的增大而减小。由此可见,随着成桥年限的增大,混凝土收缩和徐变效应对桥梁下挠的影响均会减弱。通过对比图6(b)与图7(b)可知,相较于混凝土收缩效应,混凝土徐变效应引起的桥梁挠度增量减小得更为迅速,在第三成桥阶段开始之后桥梁的挠度变化由混凝土收缩主导。

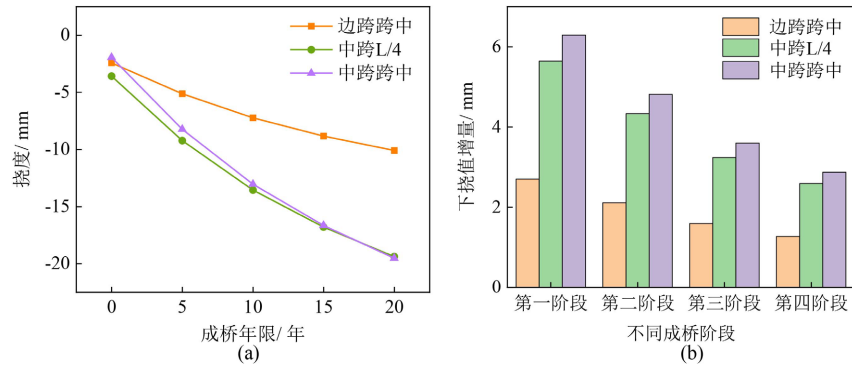


Figure 6. The influence of concrete shrinkage on the (a) bridge deflection and (b) downward deflection increment
图 6. (a)桥梁挠度及(b)下挠值增量受混凝土收缩单独作用影响

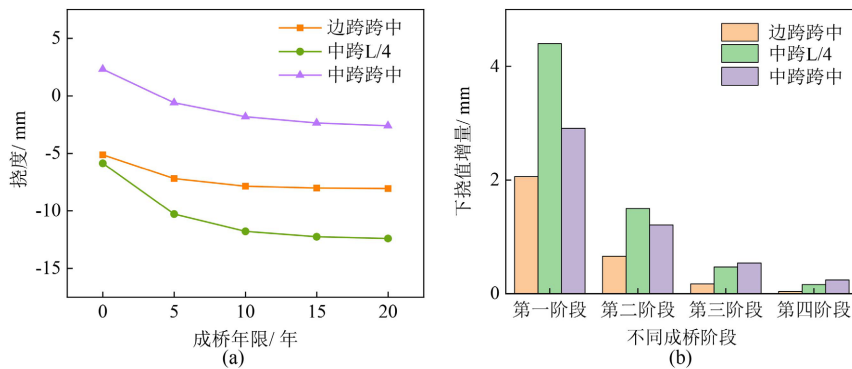


Figure 7. The influence of concrete creep on the (a) bridge deflection and (b) downward deflection increment
图 7. (a)桥梁挠度及(b)下挠值增量受混凝土徐变单独作用影响

图 8 给出了水平底板索连续刚构桥在成桥年限不同时不同位置处的顶板和底板应力变化曲线。可以看出, 在运营阶段桥梁各个梁段的顶板和底板均处于受压状态。由图 8(a)可以看出, 随着成桥年限的增大, 顶板应力在桥梁中跨跨中附近略有增大, 而在其余位置的顶板应力均有所减小。以成桥 20 年为例, 相较于刚成桥时, 桥梁中跨跨中处的顶板应力增大 0.18 MPa, 而桥梁边跨跨中处的顶板应力则减小 0.20 MPa。由图 8(b)可以看出, 随着成桥年限的增大, 桥梁各梁段处的底板应力均有所减小。以成桥 20 年为例, 相较于刚成桥时, 桥梁中跨跨中及边跨跨中处的底板应力分别减小 0.76 MPa 和 0.27 MPa。由此可见, 成桥年限对水平底板索连续刚构桥在运营阶段的顶板和底板应力影响不大。

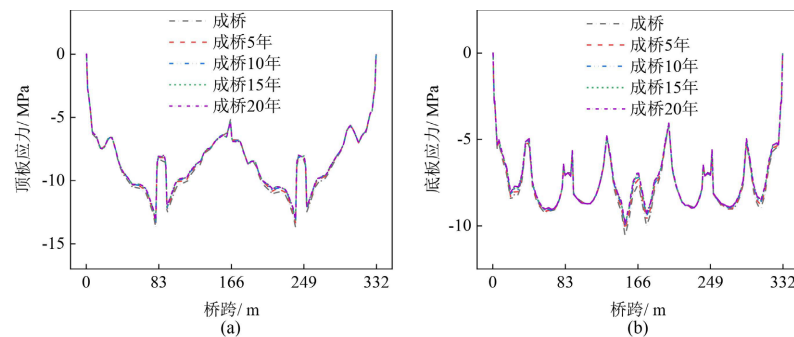


Figure 8. Stress variation curves of (a) top and (b) bottom slabs of bridges with different bridge formation ages
图 8. 成桥年限不同时桥梁的(a)顶板和(b)底板应力变化曲线

3.3. 徐变系数的影响

图 9 给出了成桥 10 年时水平底板索连续刚构桥在徐变系数不同时的桥梁挠度变化曲线。可以看出, 当徐变系数增大时, 桥梁挠度值也随之增大。徐变系数不变时, 桥梁边跨跨中及中跨 $L/4$ 处的下挠值分别为 25.49 mm 和 33.97 mm。当徐变系数分别增大 10%、20%、30% 时, 桥梁边跨跨中处下挠值分别为 27.93 mm、30.32 mm、32.80 mm, 即每当徐变系数增大 10% 时桥梁的挠度变化值均在 2.44 mm 左右; 桥梁中跨 $L/4$ 处的下挠值分别为 38.54 mm、43.00 mm、47.61 mm, 即每当徐变系数增大 10% 时桥梁的挠度变化值均在 4.55 mm 左右。由此可知, 增大徐变系数导致桥梁的下挠值增量是相对稳定的。

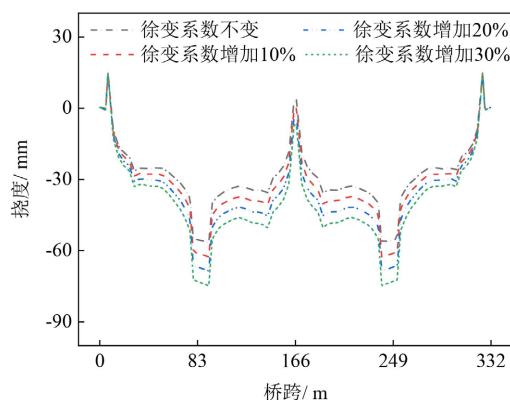


Figure 9. Deflection variation curves of bridges with different creep coefficients

图 9. 徐变系数不同时桥梁挠度变化曲线

图 10 给出了成桥 10 年时水平底板索连续刚构桥在徐变系数不同时的桥梁顶板和底板应力变化曲线。由图 10(a)可以看出, 随着徐变系数的增大, 顶板应力在桥梁中跨跨中附近几乎不变, 而在其余位置的顶板应力均有所减小。例如, 相较于徐变系数不变的情况, 徐变系数增大 30% 时桥梁边跨跨中处的顶板应力减小 0.22 MPa。由图 10(b)可以看出, 随着徐变系数的增大, 桥梁各梁段的底板应力均有所减小。例如, 相较于徐变系数不变的情况, 徐变系数增大 30% 时桥梁中跨跨中及边跨跨中处的底板应力分别减小 0.52 MPa 和 0.07 MPa。由此可见, 徐变系数的变化对水平底板索连续刚构桥在运营阶段的顶板和底板应力影响不大。

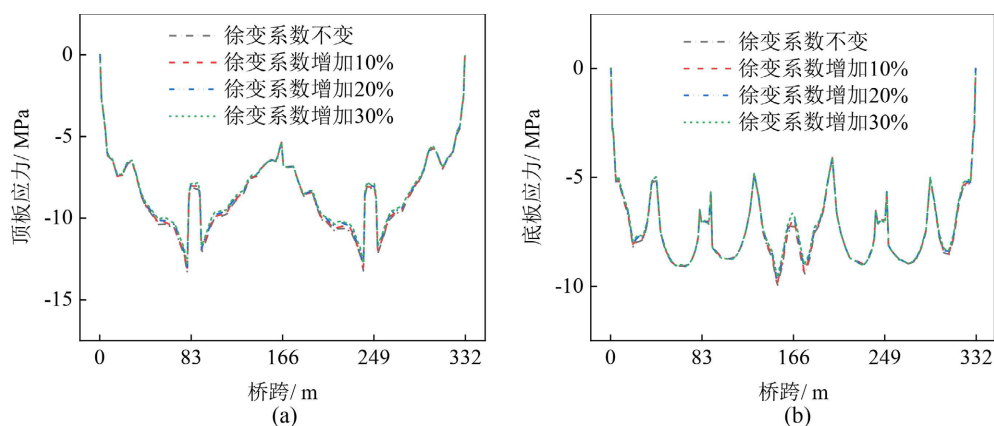


Figure 10. Stress variation curves of (a) top and (b) bottom slabs of bridges with different creep coefficients

图 10. 徐变系数不同时桥梁的(a)顶板和(b)底板应力变化曲线

4. 与曲线底板索连续刚构桥对比

为了研究对比水平底板索连续刚构桥与曲线底板索连续刚构桥在运营阶段的下挠受成桥年限及徐变系数的影响,建立了与本文所研究的水平底板索连续刚构桥具有相同跨径的曲线底板索连续刚构桥的有限元模型,曲线底板索连续刚构桥的有限元模型示意图如图 11 所示。为了便于研究分析,同上文所述,将成桥年限以 5 年为一个阶段,共分为四个阶段。并且,以成桥 10 年为例,将徐变系数每增大 10% 为一个阶段,共分为四个阶段。

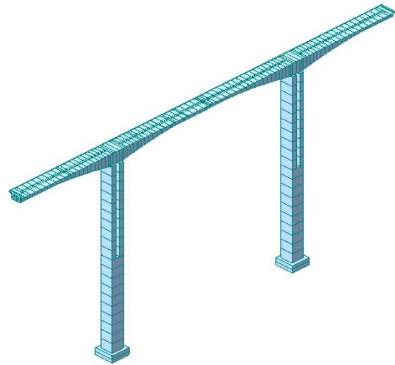


Figure 11. Finite element model of a continuous rigid frame bridge with curved bottom slab cables

图 11. 曲线底板索连续刚构桥有限元模型

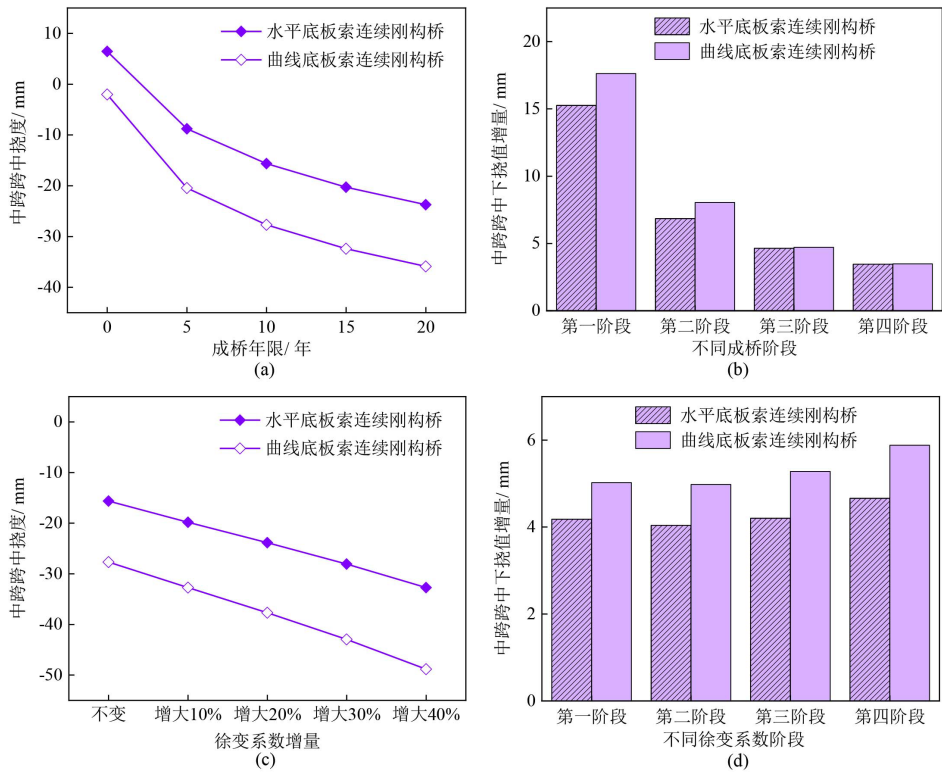


Figure 12. Comparison of mid-span deflection and downward deflection increment between continuous rigid frame bridges with horizontal and curved bottom slab cables

图 12. 水平底板索连续刚构桥和曲线底板索连续刚构桥中跨跨中挠度及下挠值增量对比

图 12 给出了水平底板索连续刚构桥与曲线底板索连续刚构桥在中跨跨中处的挠度和下挠值增量随成桥年限及徐变系数的变化,其中,挠度变化以刚成桥时为基准,各阶段的下挠值增量为该阶段的最终挠度与初始挠度之间的差值。由图 12(a)可以看出,当成桥年限增大时,水平底板索连续刚构桥在中跨跨中处的下挠比曲线底板索连续刚构桥更小。由图 12(b)可以看出,在成桥初期,当成桥年限变化时,相较于曲线底板索连续刚构桥,水平底板索连续刚构桥的下挠值增量更小;但是,在第三成桥阶段开始之后,两种桥梁由成桥年限增大所引起的下挠值增量几乎相同。由图 12(c)~(d)可以看出,当徐变系数增大时,相较于曲线底板索连续刚构桥,水平底板索连续刚构桥在中跨跨中处的挠度及下挠值增量均更小。由此可见,水平布置连续刚构桥底板预应力钢束可以有效控制桥梁下挠受成桥年限及徐变系数变化的影响。

5. 结论

本文以我国西南山区某水平底板索连续刚构桥为研究对象,采用 Midas/Civil 2020 建立桥梁三维有限元模型,分析了混凝土收缩徐变、成桥年限及徐变系数对水平底板索连续刚构桥运营阶段力学性能的影响。主要结论如下:

- (1) 在运营阶段,混凝土收缩徐变会使水平底板索连续刚构桥的下挠显著增大,而桥梁的顶底板应力受混凝土收缩徐变的影响很小。
- (2) 当成桥年限及徐变系数增大时,水平底板索连续刚构桥的挠度也随之增大。但是,混凝土收缩徐变引起的桥梁下挠值增量随成桥年限的增大而减小,而由徐变系数增大引起的桥梁下挠值增量近乎稳定。
- (3) 与曲线底板索连续刚构桥相比,水平底板索连续刚构桥由成桥年限增大而引起的下挠值增量在成桥初期更小,而在成桥 10 年之后几乎相等。但是,水平底板索连续刚构桥中跨跨中的挠度在任意成桥阶段相较于曲线底板索连续刚构桥均更小。
- (4) 当徐变系数增大时,水平底板索连续刚构桥中跨跨中处的挠度及下挠值增量相较于曲线底板索连续刚构桥均更小。

基金项目

中铁开投科技研究开发计划项目(2021-B 类-05)。

参考文献

- [1] 邓继华, 许斌林, 黄学文, 等. 大跨径体内外混合配束连续刚构桥有限元分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(1): 51-57.
- [2] 崔冰, 周尚猛, 王岩. 大跨度连续刚构桥精细化专用收缩徐变模型及其实桥应用研究[J]. 公路, 2022, 67(9): 146-152.
- [3] 周浩. 连续刚构桥运营期下挠及合理预拱度研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [4] 韩朝辉. 预应力混凝土连续刚构桥长期下挠影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [5] Zhang, K., Qi, T., Li, D., Xue, X. and Zhu, Z. (2021) Load Testing and Health Monitoring of Monolithic Bridges with Innovative Reinforcement. *International Journal of Structural Integrity*, **12**, 904-921. <https://doi.org/10.1108/ijsi-11-2020-0103>
- [6] 黄学文, 胡守旺, 刘洋, 等. 体内外混合配束连续刚构桥主梁下挠及处治分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 12(3): 68-76.
- [7] 张笑语. 带底板预制的劲性骨架混凝土拱桥收缩徐变效应研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [8] 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]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [9] 杨莹. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥长期下挠影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [10] 赵新宏, 费维水, 宋宁, 等. 大跨度连续刚构桥长期下挠影响参数敏感性分析[J]. 科技通报, 2023, 39(9): 83-89.

-
- [11] 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.
 - [12] 韦景光. 竖向预应力施加顺序对 PC 连续刚构桥腹板混凝土开裂影响研究[J]. 公路, 2023, 68(9): 232-237.
 - [13] 张禹, 袁博, 周德, 等. 水平底板索连续刚构桥下挠影响因素研究[J]. 江西建材, 2024(5): 277-281.
 - [14] 褚文涛, 肖奎, 康凯乐, 等. 曲线连续刚构桥径向位移分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25(2): 96-99.
 - [15] 王云峰. 大跨连续刚构桥主梁跨中底板配束优化设计研究[J]. 四川水泥, 2024(8): 261-263, 266.
 - [16] 郭丰哲, 钱永久, 李贞新. 预应力混凝土连续刚构桥合龙段底板崩裂原因分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 68-70, 83.
 - [17] 吴国松, 吴明生, 卢勤, 等. 底板索水平布置预应力混凝土变截面箱梁桥及其施工方法[P]. 中国专利, 200610167318.4. 2009-03-04.
 - [18] 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.
 - [19] 门晟明, 付锐, 董学申, 等. 连续刚构桥底板束水平布置的优化模拟[J]. 中国水运, 2018, 18(8): 50-51.
 - [20] 汪建群, 吕鹏, 许巧, 等. 混凝土徐变计算模型及其实用性评述[J]. 工程力学, 2018, 35(S1): 156-160.
 - [21] 唐灿. 高墩大跨连续刚构桥收缩徐变效应研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.