

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

唐文斌¹, 覃亮¹, 袁博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3月21日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

摘要

以桐梓至新蒲高速公路某水平底板索连续刚构桥为依托, 建立MIDAS/Civil有限元模型, 通过控制预应力张拉值和加载龄期, 研究了预应力损失对水平底板索连续刚构桥施工阶段力学性能的影响。研究发现, 预应力损失会导致施工阶段水平底板索连续刚构桥不同截面处下挠增大和压应力减小, 但桥梁全截面仍保持受压。并且, 在桥梁中跨合龙阶段, 混凝土弹性压缩会使跨中钢束预应力增大, 而混凝土收缩徐变和钢筋松弛会使跨中钢束预应力减小。此外, 对于水平底板索连续刚构桥跨中预应力钢束, 随着加载龄期的增大, 预应力总损失值也会减小。

关键词

连续刚构桥, 水平底板索, 预应力损失, 施工阶段

Analysis of the Influence of Prestress Loss on the Mechanical Performance of Continuous Rigid Frame Bridge with Horizontal Bottom Slab Cables during Construction Stage

Wenbin Tang¹, Liang Qin¹, Bo Yuan², Yong Tao²

¹China Railway Investments Group Limited, Kunming Yunnan

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

Received: Mar. 21st, 2023; accepted: Apr. 18th, 2023; published: Apr. 25th, 2023

文章引用: 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. DOI: 10.12677/hjce.2023.124052

Abstract

Based on a continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables on the Tongzi to Xinpu Expressway, a finite element model was established using MIDAS/Civil software. By controlling the prestress tension value and loading age, the influence of prestress loss on the mechanical performance of the continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables during the construction stage was studied. The study found that prestress loss can lead to an increase in deflection and a decrease in compressive stress at different sections of the bridge during the construction stage, but the entire cross-section of the bridge remains under compression. Furthermore, during the mid-span closure stage of the bridge, the elastic compression of concrete will increase the prestress in the mid-span steel tendons, while the shrinkage and creep of concrete and relaxation of steel will decrease the prestress in the mid-span steel tendons. In addition, for the mid-span prestressed steel tendons of the continuous rigid frame bridge with horizontal bottom slab cables, the total prestress loss value will also decrease as the loading age increases.

Keywords

Continuous Rigid Frame Bridge, Horizontal Bottom Slab Cables, Prestress Loss, 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,随着我国西部大开发和“一带一路”建设的不断推进,在山区等复杂地形建造的桥梁逐年增加,综合考虑桥梁的经济性、实用性和观赏性,成为桥梁建造的重要问题之一。连续刚构桥因其跨径大、施工方便,且兼具经济性与观赏性的特点,被广泛运用于桥梁工程中[1] [2] [3]。然而,研究表明,传统曲线底板索连续刚构桥在服役期间由于跨中挠度过大,经常出现底板开裂等病害[4],造成这一现象的原因主要包括混凝土收缩徐变、预应力损失、施工质量不佳等[5]。在连续刚构桥中布置预应力束可以抑制受拉性能较差的混凝土开裂,但预应力损失会影响桥梁的正常使用,甚至造成桥梁倒塌,严重威胁桥梁运营安全。因此,研究预应力损失对连续刚构桥的影响十分重要。

针对连续刚构桥预应力钢束的应力损失问题,相关学者和技术人员开展了一系列工作,研究发现混凝土浇筑和钢绞线张拉是对预应力损失影响最为显著的两个阶段[6]。在混凝土浇筑阶段,随着施工的进行,钢束的预应力瞬时损失值没有变化,但是预应力收缩徐变损失值会逐渐增大[7]。在钢绞线张拉阶段,因摩擦造成的预应力损失比锚具变形损失等造成的预应力损失更大[8]。桥型对连续刚构桥预应力钢束的应力损失同样具有影响,曲线刚构桥的预应力损失比直线刚构桥的预应力损失更大[9]。对于预应力损失对连续刚构桥力学性能的影响,相关学者进行了研究。研究表明,预应力损失会明显降低桥梁结构的刚度,造成桥梁在施工和运营过程中的变形加大[10],且桥梁跨中挠度随预应力损失的增加而增大[11]。此外,竖向预应力损失更容易引起腹板开裂[12]。

我国学者吴国松提出采用水平底板索来消除由于预应力束曲线布置产生的径向力,从而改善传统曲线底板索连续刚构桥出现底板开裂和跨中下挠的现象[13]。水平底板索连续刚构桥作为近年来新兴的一种桥型,与传统曲线底板索连续刚构桥相比具有明显的优势。例如,底板束水平布置可有效减少因预应力

损失和混凝土收缩徐变造成的下挠[14], 水平底板索预应力钢束的有效预应力更大[15], 水平底板索可以从根本上解决连续刚构桥下挠过大的问题等[16]。对于水平底板索和连续刚构桥的相互影响, 门晟明等采用有限元方法研究了全部水平布置底板束的连续刚构桥和部分水平布置底板束的连续刚构桥的力学性能, 结果表明全部水平布置底板束的连续刚构桥刚度更优[17]。通过有限元分析, 谢权研究了主梁几何参数对水平底板索波形钢腹板连续刚构桥力学性能的影响, 结果表明在自重作用下主梁根部截面的弯矩随梁底线型幂次的升高而减小, 跨中弯矩随梁底线型幂次的升高而增大[18]。

尽管水平底板索连续刚构桥具有一系列优良性能, 但由于缺乏施工、运营等方面的系统研究, 其大面积推广应用仍然受到较大限制。本文采用 MIDAS/Civil 软件系统研究了预应力损失对水平底板索连续刚构桥施工阶段力学性能的影响, 研究结果旨在为同类型桥梁的设计与施工提供指导。

2. 工程概况与有限元模型

本文依托工程为贵州桐梓至新蒲高速公路某水平底板索连续刚构桥, 其跨径为(86 + 160 + 86) m, 底板预应力钢束水平布置。主梁采用 C60 混凝土, 梁体为单箱单室, 梁高按 1.5 次抛物线变化, 桥梁立面图如图 1 所示。桥梁采用悬臂挂篮施工和后张法张拉预应力, 预应力结构为三向预应力结构。其中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。

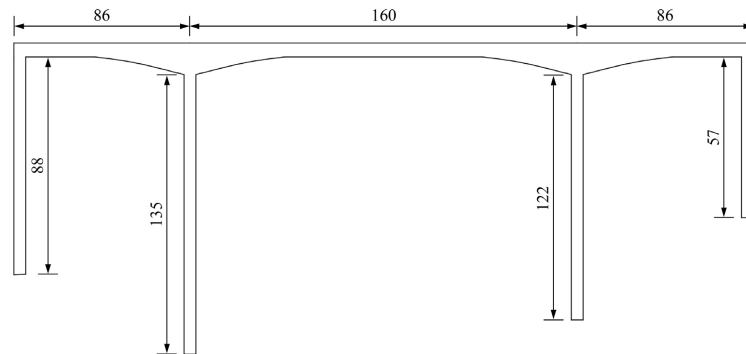


Figure 1. Elevation of the bridge (unit: m)
图 1. 桥梁立面图(单位: m)

本文采用 MIDAS/Civil 2020 进行建模, 梁与桥墩均采用梁单元进行模拟, 本模型共有 218 个节点和 177 个单元。在悬臂挂篮施工过程中, 由于横向与竖向预应力对结构影响相对较小, 故只考虑纵向预应力, 纵向预应力钢束共有 314 束。本模型设置有 84 个施工阶段, 主梁与桥墩采用刚性连接, 墩底采用固定支撑, 有限元模型如图 2 所示。

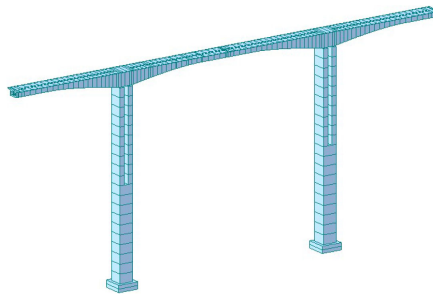


Figure 2. Finite element model of the bridge
图 2. 桥梁有限元模型

通过改变预应力钢束的张拉值和施工阶段的混凝土加载龄期,分别分析不同预应力损失对水平底板索连续刚构桥施工阶段不同截面处应力与挠度的影响以及不同混凝土加载龄期对钢束预应力损失的影响,以此研究预应力损失对水平底板索连续刚构桥施工阶段力学性能的影响。

3. 预应力损失对桥梁力学性能的影响

预应力损失会造成水平底板索连续刚构桥的实际应力状态偏离设计要求,从而影响桥梁质量与安全。通过改变纵向预应力钢束的张拉值,可研究桥梁施工阶段不同截面处的挠度和应力随预应力损失的变化情况。由于边跨合龙与中跨合龙两个阶段会使桥梁内部应力场和应变场处于不利状态[19],故本文选取这两个阶段进行分析。在连续刚构桥施工过程中,预应力损失可达设计值的20%左右[8]。为研究预应力损失对施工阶段水平底板索连续刚构桥不同截面处挠度与应力的影响,分别选取预应力损失为0%、5%、10%、15%、20%进行分析,并将分析结果绘制成如图3~6所示的曲线。

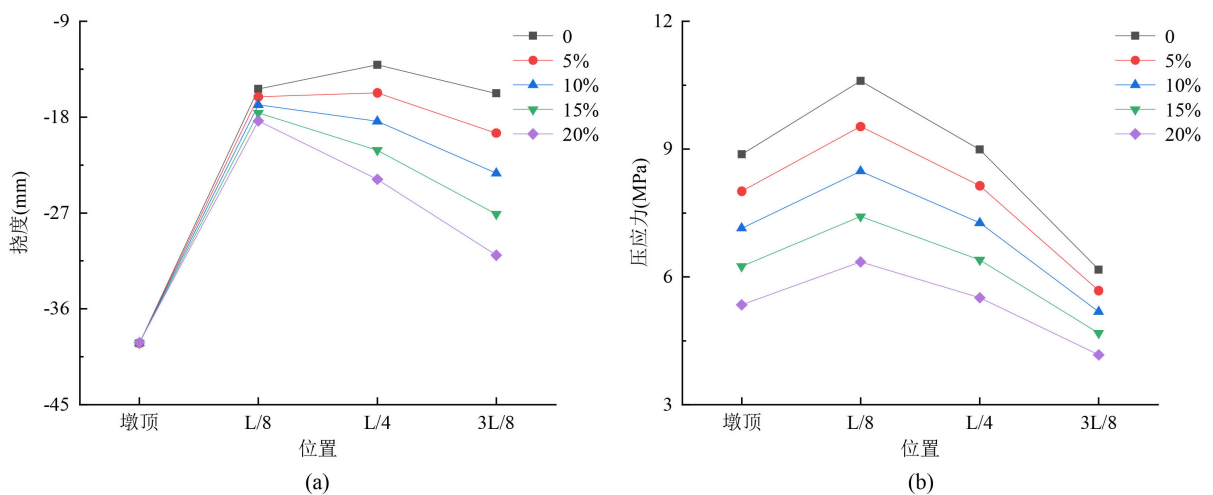


Figure 3. The relationship between (a) deflection, (b) compressive stress and position of the bridge under different prestress loss during the system transformation stage of the side span closure

图 3. 边跨合龙体系转换阶段预应力损失不同时桥梁(a)挠度和(b)压应力与位置的关系

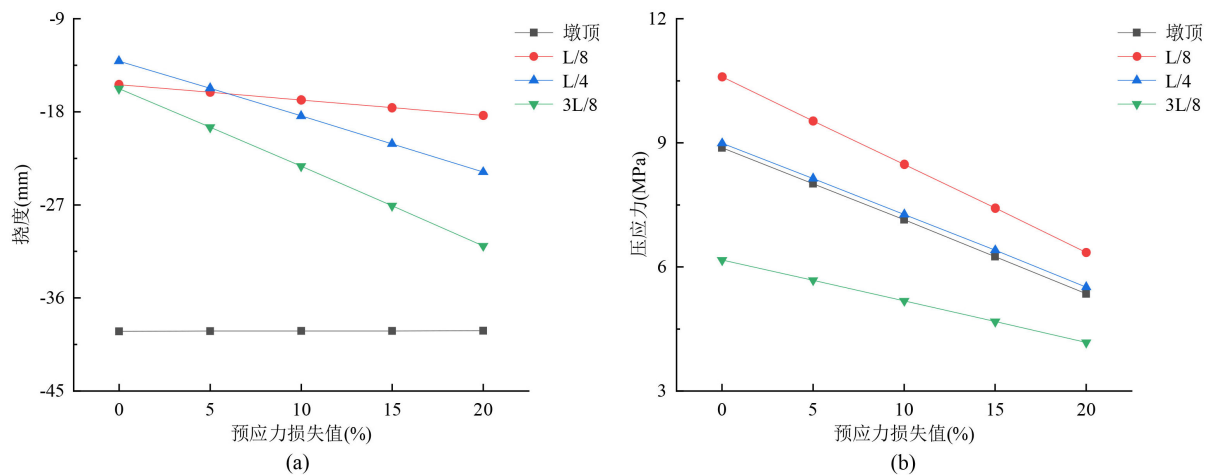


Figure 4. The relationship between (a) deflection, (b) compressive stress and prestress loss of the bridge at different positions during the system transformation stage of the side span closure

图 4. 边跨合龙体系转换阶段桥梁不同位置的(a)挠度和(b)压应力与预应力损失的关系

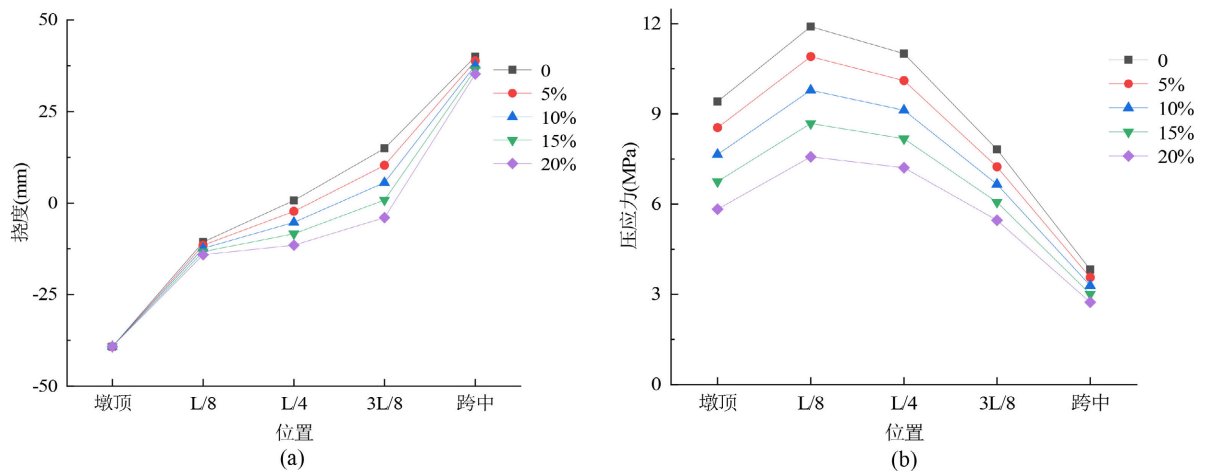


Figure 5. The relationship between (a) deflection, (b) compressive stress and position of the bridge under different prestress loss during the mid-span closure stage

图 5. 中跨合龙阶段预应力损失不同时桥梁(a)挠度和(b)压应力与位置的关系

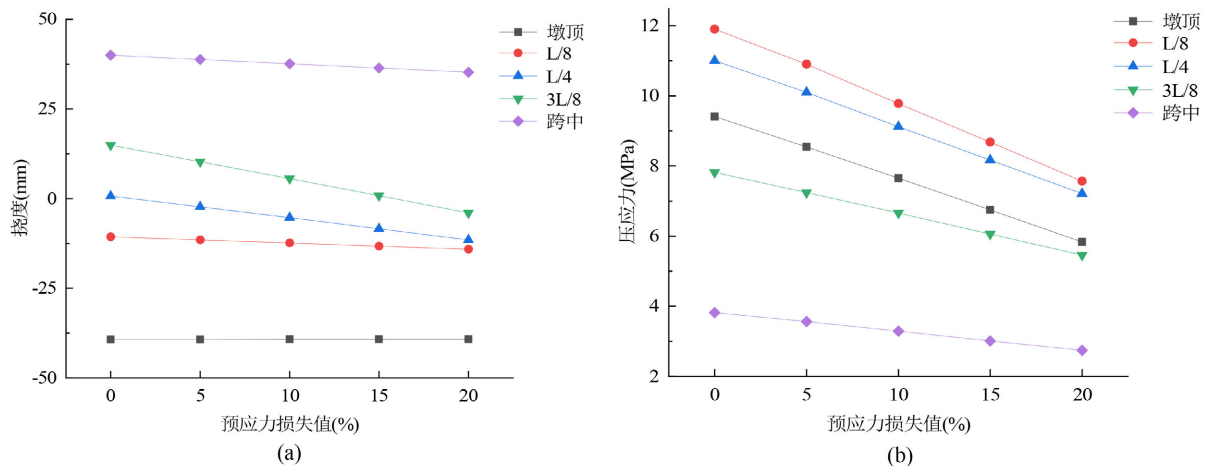


Figure 6. The relationship between (a) deflection, (b) compressive stress and prestress loss of the bridge at different positions during the mid-span closure stage

图 6. 中跨合龙阶段桥梁不同位置的(a)挠度和(b)压应力与预应力损失的关系

3.1. 边跨合龙体系转换阶段

图 3 给出了边跨合龙体系转换阶段预应力损失不同时桥梁挠度和压应力与位置的关系。由图可知，在边跨合龙体系转换阶段，当预应力损失不同时，从墩顶到 3L/8 处，桥梁不同截面处的下挠均先减小后增大，而压应力则先增大后减小。以预应力损失 10% 为例，从墩顶到 3L/8 处，桥梁下挠从 39.20 mm 减小至 16.84 mm，然后增加至 23.27 mm；压应力从 7.14 MPa 增加至 8.48 MPa，然后减小至 5.18 MPa。当预应力损失不同时，下挠产生极小值的截面位置也不同。例如，当预应力损失为 0% 时，下挠在 L/4 处最小；当预应力损失为 5%，10%，15%，20% 时，下挠在 L/8 处最小；而压应力始终在 L/8 处有最大值。

图 4 给出了边跨合龙体系转换阶段桥梁不同位置的挠度和压应力与预应力损失的关系。从图中可以看出，在边跨合龙体系转换阶段，除墩顶外，桥梁不同截面处下挠随预应力损失的增加而增大，而压应力随预应力损失的增加而减小。以桥梁 L/4 处截面为例，当预应力损失从 0% 增加到 20% 时，桥梁下挠从 13.09 mm 增加到 23.84 mm，而压应力则从 8.99 MPa 减小到 5.51 MPa。

通过计算可知,墩顶、L/8、L/4 和 3L/8 处的挠度与预应力损失曲线的斜率分别为 0.44、-17.01、-61.06、-86.49, 这表明在边跨合龙体系转化阶段, 预应力损失对水平底板索连续刚构桥刚度的影响与截面位置有关: 离桥墩越远, 预应力损失对梁体刚度的影响越大。墩顶、L/8、L/4 和 3L/8 处的压应力与预应力损失曲线的斜率分别为-18.44、-22.03、-18.13、-10.44, 这表明在边跨合龙体系转换阶段, 预应力损失对水平底板索连续刚构桥 3L/8 处应力变化的影响最小, 而对 L/8 处应力变化的影响最大。

3.2. 中跨合龙施工阶段

图 5 给出了中跨合龙阶段预应力损失不同时桥梁挠度和压应力与位置的关系。从图 5(a)中可以看出, 当预应力损失不同时, 从墩顶到跨中处, 桥梁均会由下挠转变为上拱, 并且, 在桥梁下挠阶段, 下挠始终减小, 而在桥梁上拱阶段, 挠度一直增大。例如, 当预应力损失为 10%时, 从墩顶到跨中处, 桥梁下挠从 39.20 mm 一直减小至 0, 再由 0 上拱至 37.63 mm。从图 5(b)中可以看出, 当预应力损失不同时, 从墩顶到跨中处, 桥梁不同截面处的压应力先增大后减小。以预应力损失为 10%为例, 从墩顶到跨中处, 不同截面处的压应力从 7.65 MPa 增加至 9.78 MPa, 然后减小至 3.29 MPa, 在 L/8 处具有最大值。

图 6 为中跨合龙阶段桥梁不同位置的挠度和压应力与预应力损失的关系。从图 6(a)中可以看出, 在中跨合龙阶段, 随着预应力损失的增加, L/8 处桥梁下挠逐渐增大, L/4 和 3L/8 处桥梁由上拱转变为下挠, 且下挠逐渐增大, 而在跨中处桥梁始终处于上拱状态, 且挠度逐渐减小。从图 6(b)中可以看出, 在中跨合龙阶段, 随着预应力损失的增加, 桥梁的压应力逐渐减小。以桥梁 L/4 处截面为例, 当预应力从 0 增大至 20%时, 桥梁 L/4 处截面的压应力从 11 MPa 减小至 7.21 MPa。

3.3. 预应力损失对桥梁力学性能影响分析

前述研究结果表明, 在边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段, 随着预应力损失的增加, 水平底板索连续刚构桥各截面处均会下挠。并且, 预应力损失不同时, 桥梁不同截面处的应力均为压应力, 且变化趋势基本相同, 均为 L/8 截面处的压应力最大。在边跨合龙体系转换阶段, 桥梁 3L/8 截面处的压应力最小; 而在中跨合龙阶段, 桥梁跨中截面处的压应力最小。因此, 对于水平底板索连续刚构桥, 在边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段, 即使钢束产生预应力损失, 桥梁不同截面处的应力仍为压应力, 即仍保持为全截面受压; 并且, 钢束预应力损失增加时, 压应力会进一步减小, 桥梁不同截面处的压应力会处于较低水平。

4. 加载龄期对预应力损失的影响

连续刚构桥作为墩梁固结的超静定结构, 中跨合龙阶段是桥梁施工阶段中的控制性阶段[19], 因此, 研究该阶段的预应力损失较为关键。本节将研究水平底板索连续刚构桥在中跨合龙阶段混凝土加载龄期对预应力损失的影响, 为确定最佳加载龄期提供指导。为了方便描述, 对中跨合龙阶段桥梁跨中同一侧不同长度的顶板钢束与底板钢束进行编号, 编号数字随着预应力钢束长度的增加而增大, 预应力钢束编号与其所对应的位置如图 7 所示。

4.1. 加载龄期对弹性变形损失值的影响

图 8 给出了中跨合龙阶段加载龄期不同时水平底板索连续刚构桥跨中顶板和底板预应力钢束的弹性变形损失值。从图 8(a)中可以看出, 不同长度顶板钢束由于混凝土弹性压缩引起的预应力损失值(弹性变形损失值)均为负值, 即由于混凝土弹性压缩, 顶板钢束的预应力会增大。并且, 随着加载龄期的增大, 由于混凝土弹性压缩, 不同长度顶板钢束的预应力会增大。以 3 号顶板钢束为例, 当加载龄期从 3 天增

加至 28 天时, 由于混凝土弹性压缩引起的预应力增加值由 0.25 MPa 增大至 0.27 MPa。但是, 随着顶板钢束长度的增加, 由于混凝土弹性压缩引起的钢束预应力增加值会减小。

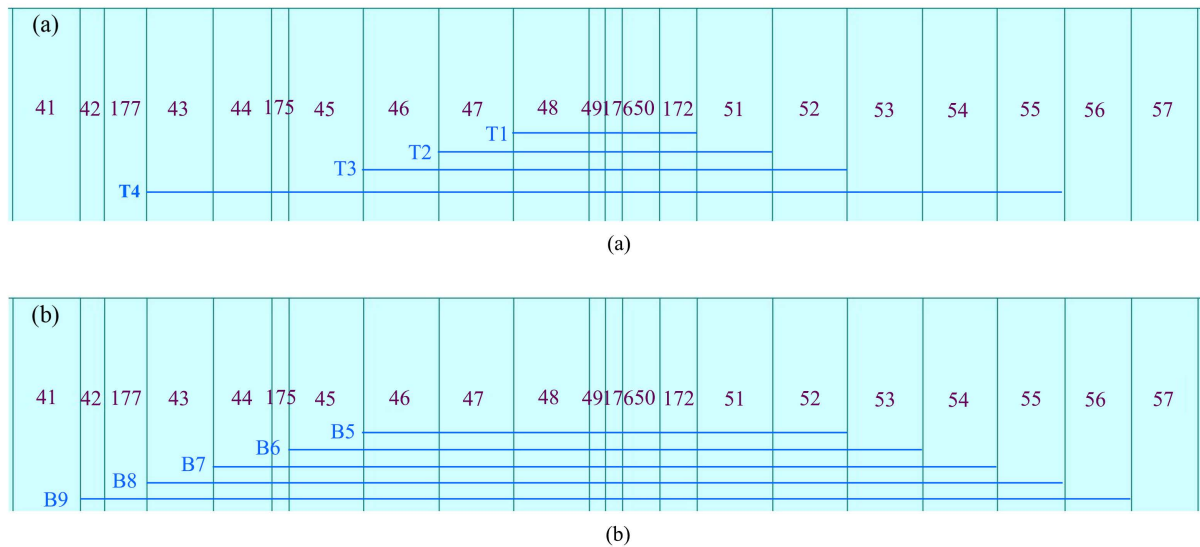


Figure 7. Schematics of prestressed steel tendons numbering for (a) top and (b) bottom slabs in mid-span section of the bridge

图 7. 桥梁跨中段(a)顶板和(b)底板预应力钢束编号示意图

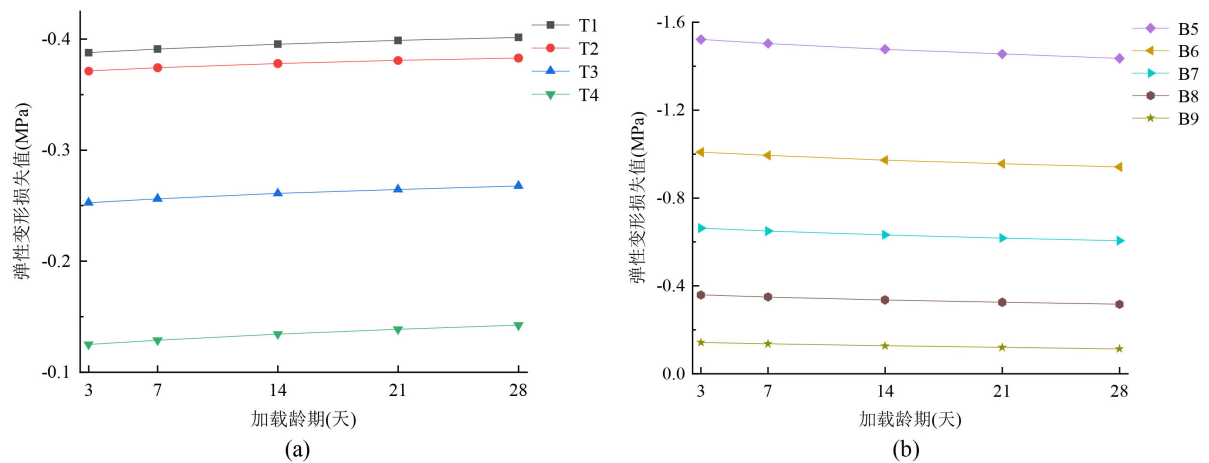


Figure 8. Variation of elastic deformation loss value of prestressed steel tendons in the mid-span (a) top and (b) bottom slabs with loading age during the mid-span closure stage of the bridge

图 8. 桥梁中跨合龙阶段跨中(a)顶板和(b)底板预应力钢束的弹性变形损失值随加载龄期的变化

由图 8(b)可知, 在中跨合龙阶段, 水平底板索连续刚构桥底板钢束的弹性变形损失值亦为负值, 即由于混凝土弹性压缩, 底板钢束的预应力也会增大。这是因为水平底板索连续刚构桥的预应力钢束为水平布置, 无论桥梁上拱或者下挠, 预应力钢束的长度均会增加[15], 从而使由于混凝土弹性压缩造成的预应力损失值为负值, 预应力增加。此外, 随着加载龄期的增大, 由于混凝土弹性压缩, 不同长度底板钢束的预应力增加值会减小。以 7 号底板钢束为例, 当加载龄期从 3 天增加至 28 天时, 由于混凝土弹性压缩, 其预应力增加值会由 0.66 MPa 减小至 0.61 MPa。并且, 随着底板钢束长度的增加, 由于混凝土弹性压缩引起的钢束预应力增加值也会减小。

4.2. 加载龄期对收缩徐变损失值的影响

图 9 给出了中跨合龙阶段水平底板索连续刚构桥跨中预应力钢束的收缩徐变损失值随加载龄期的变化。从图中可以看出,在中跨合龙阶段,随着加载龄期的增大,桥梁跨中顶板与底板预应力钢束的收缩徐变损失值均会减小。以 3 号顶板钢束为例,当加载龄期从 3 天增加至 28 天时,由于混凝土收缩徐变引起的预应力损失值由 5.07 MPa 减小至 4.82 MPa。并且,随着钢束长度的增加,预应力钢束由于混凝土收缩徐变引起的预应力损失值也会减小。

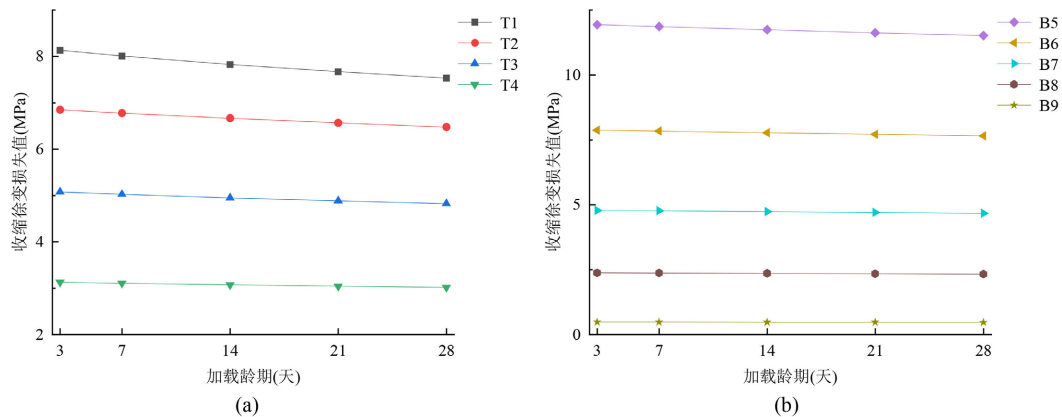


Figure 9. Variation of shrinkage and creep loss value of prestressed steel tendons in the mid-span (a) top and (b) bottom slabs with loading age during the mid-span closure stage of the bridge

图 9. 桥梁中跨合龙阶段跨中(a)顶板和(b)底板预应力钢束的收缩徐变损失值随加载龄期的变化

4.3. 加载龄期对力筋松弛损失值的影响

图 10 给出了中跨合龙阶段水平底板索连续刚构桥跨中预应力钢束的力筋松弛损失值随加载龄期的变化。从图中可以看出,在中跨合龙阶段,随着加载龄期的增大,桥梁跨中顶板与底板预应力钢束的力筋松弛损失值几乎不变。但是,随着钢束长度的增加,顶板钢束由于钢筋松弛引起的预应力损失值增大,而底板钢束由于钢筋松弛引起的预应力损失值先增大后减小。以加载龄期 14 天为例,1、2、3、4 号顶板钢束的力筋松弛损失值分别为 8.24 MPa、11.67 MPa、12.75 MPa、12.99 MPa,5、6、7、8、9 号底板钢束的力筋松弛损失值分别为 14.54 MPa、14.97 MPa、15.02 MPa、14.04 MPa、8.04 MPa。

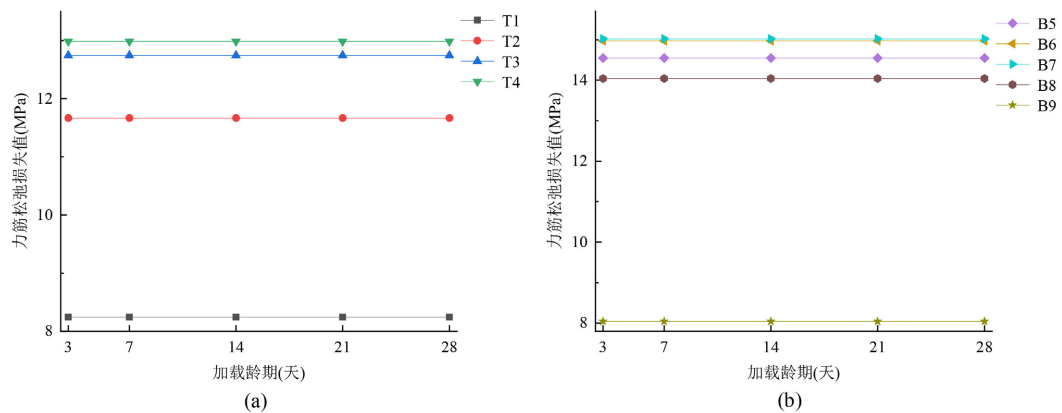


Figure 10. Variation of relaxation loss value of prestressed steel tendons in the mid-span (a) top and (b) bottom slabs with loading age during the mid-span closure stage of the bridge

图 10. 桥梁中跨合龙阶段跨中(a)顶板和(b)底板预应力钢束的力筋松弛损失值随加载龄期的变化

钢筋的应力松弛是指在高拉应力作用下, 随着时间的增长, 钢筋中将产生塑性变形, 在钢筋长度保持不变的情况下, 钢筋的拉应力会随着时间的增长而逐渐降低[7]。中跨合龙阶段水平底板索连续刚构桥跨中预应力钢束的力筋松弛损失值受加载龄期的影响较小, 这是因为加载龄期作用在预应力钢筋张拉前, 因此加载龄期对预应力钢束的力筋松弛损失值影响较小。

4.4. 加载龄期对预应力总损失值的影响

由于混凝土加载龄期变化对瞬时损失没有影响[7] [8], 故本节在计算预应力总损失值时扣除了瞬时损失的影响。图 11 给出了中跨合龙阶段水平底板索连续刚构桥跨中顶板和底板钢束的预应力总损失值随加载龄期的变化。从图中可以看出, 在中跨合龙阶段, 随着加载龄期的增大, 桥梁跨中顶板与底板钢束的预应力总损失值会减小, 但减小的幅度不大。以 3 号顶板钢束为例, 当加载龄期从 3 天增加至 28 天时, 预应力总损失值由 17.56 MPa 减小至 17.33 MPa。但是, 随着钢束长度的增加, 顶板钢束的预应力总损失值先增大后减小, 而底板钢束的预应力总损失值减小。

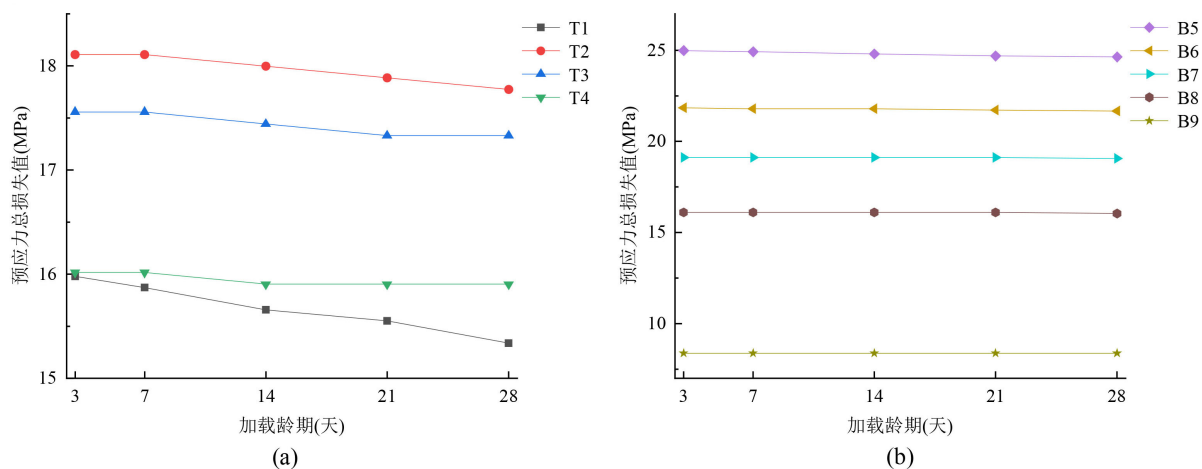


Figure 11. Variation of total prestress loss value of prestressed steel tendons in the mid-span (a) top and (b) bottom slabs with loading age during the mid-span closure stage of the bridge

图 11. 桥梁中跨合龙阶段跨中(a)顶板和(b)底板预应力钢束的预应力总损失值随加载龄期的变化

由于本节在计算预应力总损失值时扣除了瞬时损失的影响, 影响预应力总损失值的因素主要为混凝土收缩徐变和钢筋松弛。其中, 混凝土的加载龄期对混凝土收缩徐变影响较大, 而对钢筋松弛影响较小。加载龄期越大, 混凝土收缩徐变越小[20]。而混凝土的收缩徐变会使箱梁构件体积收缩, 这会使预应力钢束收缩, 预应力钢束产生应力损失[6]。因此, 加载龄期越大, 水平底板索连续刚构桥跨中顶板和底板钢束的预应力总损失值越小。

为了对比水平底板索连续刚构桥与曲线底板索连续刚构桥在不同加载龄期下预应力损失情况, 本文选取了东峪特大桥[7]进行对比。东峪特大桥为(88 + 160 + 88) m 的三跨曲线底板索连续刚构桥, 其跨径与本文所研究的水平底板索连续刚构桥的跨径(86 + 160 + 86) m 相近。东峪特大桥的箱梁采用单箱单室, 预应力结构为三向预应力结构, 其纵向预应力钢束与本文中的相同, 且都采用后张法。

表 1 给出了本文所研究的水平底板索连续刚构桥与曲线底板索连续刚构桥(东峪特大桥)跨中顶板钢束预应力总损失值。由表可知, 在中跨合龙阶段, 随着加载龄期的增大, 与曲线底板索连续刚构桥相比, 水平底板索连续刚构桥跨中顶板钢束预应力总损失值的变化幅度更小, 这表明在中跨合龙阶段, 水平底板索连续刚构桥跨中顶板钢束预应力总损失值受加载龄期的影响更小。但是, 在中跨合龙阶段, 当加载

龄期大于等于 5 天时, 水平底板索连续刚构桥跨中顶板钢束预应力总损失值略大于曲线底板索连续刚构桥跨中顶板钢束预应力总损失值。

Table 1. Comparison of total prestress loss between continuous rigid frame bridges with horizontal bottom slab cables and with curved bottom slab cables under different loading ages during the mid-span closure stage

表 1. 中跨合龙阶段加载龄期不同时水平底板索连续刚构桥与曲线底板索连续刚构桥预应力总损失值对比

加载龄期(天)	曲线底板索连续刚构桥预应力总损失值(MPa)	水平底板索连续刚构桥预应力总损失值(MPa)
3	16.95	15.98
5	15.43	15.92
7	14.47	15.87
10	13.81	15.76
15	13.46	15.65

此外, 由表 1 可知, 随着混凝土加载龄期的增大, 水平底板索连续刚构桥的钢束预应力总损失值会减小。因此, 从减少预应力损失的角度考虑, 加载龄期越大越好。但是, 在实际工程中, 加载龄期的选取还要考虑施工安全、进度安排和经济效益, 故合理选取加载龄期至关重要。

5. 结论

本文以桐梓至新蒲高速公路某水平底板索连续刚构桥为依托, 采用 MIDAS/Civil 建立了桥梁有限元模型并进行分析, 研究了预应力损失对施工阶段桥梁不同截面处挠度与应力的影响, 并分析了混凝土加载龄期对钢束预应力损失的影响, 主要结论如下:

1) 在边跨合龙体系转换阶段和中跨合龙阶段, 随着预应力损失的增加, 桥梁 L/8、L/4、3L/8 和跨中截面处会产生下挠, 各截面的压应力会减小, 但桥梁仍保持为全截面受压。

2) 在中跨合龙阶段, 由混凝土弹性压缩引起的预应力损失值为负值, 而由混凝土收缩徐变和钢筋松弛引起的预应力损失值为正值, 即混凝土弹性压缩会使钢束的预应力增大, 而混凝土收缩徐变和钢筋松弛会使钢束的预应力减小。

3) 在中跨合龙阶段, 随着加载龄期的增大, 跨中顶板钢束由混凝土弹性压缩引起的预应力增加值会增大, 而跨中底板钢束由混凝土弹性压缩引起的预应力增加值会减小; 跨中顶板和底板钢束由钢筋松弛引起的预应力损失值几乎不变, 而由混凝土收缩徐变引起的预应力损失值会减小, 且桥梁跨中顶板与底板钢束的预应力总损失值也会减小。

基金项目

中铁开投科技研究开发计划(2021-B 类-05)。

参考文献

- [1] Liu, Y., Zheng, C., Ba, H., Xu, G., Li, C. and Xie, Q. (2021) Analysis on the Influence Factors of Construction Linear Control of Continuous Rigid Structure Bridge. *E3S Web of Conferences*, **237**, Article ID: 03020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123703020>
- [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] 唐峰, 陆尧, 李德建, 熊蛟. 基于正交试验法的大跨连续刚构桥主梁设计参数影响研究[J]. 土木工程, 2017, 6(4): 378-384.

- [4] 曹自俊, 赵军, 张效军. 大跨 PC 连续刚构桥病害分析与加固技术研究[J]. 公路, 2021, 66(8): 206-211.
- [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] 秦乾飞. 大跨度 PC 连续梁桥悬浇施工阶段预应力损失研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
- [7] 董永霞. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥悬臂施工阶段的预应力损失分析[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013.
- [8] 孙亚林, 杨富社. 大跨度连续刚构桥悬臂施工期预应力损失及其对策探究安排[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 222-226.
- [9] 彭小亮. 大跨径曲线连续刚构桥收缩徐变和预应力损失研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [10] 张利, 张亮, 唐先鹏, 王茜. 预应力损失对大跨混凝土连续刚构桥长期性能影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(6): 157-160.
- [11] 汪磊. 大跨度 PC 连续刚构桥预应力损失影响及后期备用束应用[J]. 公路, 2020, 65(2): 139-142.
- [12] 张宏祥, 包旭. 预应力损失对连续刚构桥刚度和应力状态的影响分析[J]. 世界桥梁, 2014, 42(1): 36-39.
- [13] 吴国松, 吴明生, 卢勤, 孙明星, 李军心, 舒亚健, 郝章喜, 陈为高, 郭宏飞, 范忠焕, 漆国秋. 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.
- [14] 董学申. 连续刚构桥主梁底板预应力束设计优化研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [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] 胡卫东. 水平底板索连续刚构设计关键参数研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2021(16): 68-69.
- [17] 门晟明, 付锐, 董学申, 宁晓骏. 连续刚构桥底板束水平布置的优化模拟[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(8): 50-51.
- [18] 谢权. 水平底板索波形钢腹板连续刚构桥构造与力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [19] 贺红军. 大跨度预应力混凝土连续梁桥悬臂施工控制研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [20] 汪剑. 大跨预应力混凝土箱梁桥非荷载效应及预应力损失研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2006.