

# 山区公路不对称连续刚构桥力学特性及加固方法研究

王九胜<sup>1</sup>, 李萍<sup>2</sup>, 王育兴<sup>1</sup>, 金祖灿<sup>2</sup>, 吴平<sup>3</sup>

(1. 甘肃省公路事业发展中心, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050;

3. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 由于受山区特殊地形的限制, 需要把连续刚构桥设计成非对称的结构型式, 为研究其结构特点, 采用 MIDAS Civil 有限元软件建立模型, 对位于山区公路上的某大跨度不对称连续刚构桥梁从内力、应力和位移等因素进行力学特性分析, 研究各因素在恒载和活载作用下的变化规律。结合不对称连续刚构桥内力和位移的不同分布规律, 对该类型桥梁出现的跨中下挠、箱底横向以及腹板斜向裂缝等病害进行成因分析, 提出体外预应力加固方法, 使桥梁中跨上、下缘应力均衡, 降低竖向位移变化趋势, 可为同类型桥梁加固提供借鉴。

**关键词:** 山区公路; 不对称连续刚构桥; 力学特性; 体外预应力加固

中图分类号: U442.5; U448.121

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0133-05

## Mechanical Characteristics and Reinforcement Methods of Asymmetric Continuous Rigid Frame Bridges on Mountainous Highways

WANG Jiusheng<sup>1</sup>, LI Ping<sup>2</sup>, WANG Yuxing<sup>1</sup>, JIN ZuCan<sup>2</sup>, WU Ping<sup>3</sup>

(1. Gansu Provincial Highway Development Center, 730030 Lanzhou, China; 2. Lanzhou University of Technology, 730050 Lanzhou, China; 3. China Municipal Engineering Northwest Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** Due to the limit of special terrain in mountainous areas, the continuous rigid-frame bridge needs to be designed into an asymmetric structural form. To research its structural characteristics, the MIDAS Civil finite element software is used to establish a model to analyze the mechanical properties of a long-span asymmetric continuous rigid-frame bridge on a mountainous highway from factors such as internal forces, stresses and displacements, and to study the variation laws of various factors under the action of dead load and live load. Combined with the different distribution laws of internal forces and displacements of the asymmetric continuous rigid-frame bridge, the causes of diseases such as mid-span deflection, transverse cracks at the bottom of the box, and diagonal cracks in the web are analyzed. The method of an external prestressing reinforcement is proposed to balance the stresses at the upper and lower edges of the mid-span of the bridge and reduce the trend of vertical displacement changes, which can provide a reference for the reinforcement of similar bridges.

**Keywords:** mountain highway; asymmetric continuous rigid-frame bridge; mechanical characteristic; external prestressing reinforcement

## 0 引言

预应力混凝土连续刚构桥在构造上采用了主梁和墩柱固结的连接方式, 可有效减少跨中弯矩, 相比同规模大跨径变截面预应力混凝土连续梁桥可极大

提升跨越能力, 具有施工便捷、无体系转换、行车平顺等优点, 该桥型在我国被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

山区峡谷两岸阶地地势起伏较大, 难以布置成常规对称结构, 需要结合所处地理条件采用左右不对称的连续刚构结构<sup>[4-6]</sup>。吴志华等以石崆山Ⅱ号右线高架桥在平面曲线段不对称悬浇大跨径连续刚构箱梁的设计及施工为例, 分析了曲线不对称悬浇对箱梁、桥墩结构的受力影响, 采取永久压重和临时压重相结合的措施, 解决桥墩两侧受力不平衡问题<sup>[7]</sup>。陈兵以某三跨不对称预应力混凝土连续刚构桥为例, 分析了不对称连续刚构桥在施工和运营过

收稿日期: 2025-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168042)

作者简介: 王九胜(1974—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁工程与信息化管理工作。

通信作者: 李萍(1972—), 女, 博士, 教授/博导, 从事路基路面材料研究工作。电子邮箱: lzliping@126.com

程的受力特点,施工过程中桥梁短期出现拉应力,成桥后收缩徐变对中跨的竖向位移影响要大于两边跨<sup>[8]</sup>。受不对称因素的影响,两个T构结构内力较对称钢构桥复杂,温度荷载、恒载、活载等在各T构上的荷载效应不同,在设计过程中应当充分考虑T构间的刚度差,以确保结构设计安全可靠<sup>[9]</sup>。康厚军等建立 $n$ 跨单墩刚构桥模型,用传递矩阵法计算桥墩有效长度系数,经有限元法验证,发现整体结构刚度等因素对其有重要影响,为桥墩稳定性研究提供新思路<sup>[10]</sup>。吴彤和孙全生借助OpenSees平台与非线性时程分析,研究不对称连续刚构桥地震损伤,表明该桥地震时位移大,铰内钢筋等易损,为桥梁抗震设计提供重要参考<sup>[11]</sup>。宗周红等采用振动台阵试验系统对1:15缩尺两跨箱形墩预应力混凝土连续刚构桥模型进行地震反应特性试验,试验表明预应力混凝土连续刚构桥中心墩在地震激励下的响应最大,所有情况下损伤均首先出现在中心墩的下端<sup>[12]</sup>。黄柳云等对广西某预应力混凝土连续刚构桥检测评定,分析外观、材质等并计算承载能力,发现桥虽满足荷载要求,但构件病害影响承载,需加强养护<sup>[13]</sup>。谢肖礼等针对预应力连续刚构桥的病害和传统加固方法存在的不足,提出一种在原结构上增设钢上弦杆和腹杆,并以原预应力混凝土结构作为下弦杆,形成桁式结构共同抵抗部分荷载的加固方法<sup>[14]</sup>。何世荣等针对PC连续刚构桥出现跨中挠度过大、箱梁腹板出现较多裂缝的情况,采用体外预应力加固技术进行加固设计,桥梁的承载能力提高,应力储备有所增加,达到了加固设计的要求<sup>[15]</sup>。

综上所述,对称连续刚构桥应用广泛且在桥墩稳定性、地震损伤、病害检测评定与加固等方面有诸多研究成果,但是不对称连续钢构桥受多种因素影响内力复杂,有必要进一步对其受力特性及加固方法深入研究。本研究以云南杭瑞高速澜沧江大桥为

工程背景,研究在不对称程度下的内力、应力及位移变化规律以及该类型桥梁出现的典型跨中下挠、腹板斜向裂缝等典型病害进行成因分析,优化体外预应力钢束加固形式,为制定针对性的加固方案提供理论依据。

1 不对称连续刚构桥梁的力学性能

1.1 模型建立

以位于某山区高速公路三跨预应力混凝土连续刚构桥为例,为研究不对称结构的力学特性,采用MIDAS Civil有限元软件建立模型,分别从结构内力、应力、变形3个方面进行分析比较。通过将研究跨径240 m T一侧对称形成新的连续刚构体系,并在此基础上通过减少梁段数量形成不同程度的不对称连续刚构形式,跨径组成分别拟定为(130+240+130) m、(130+220+107.5) m、(130+200+85) m(见图1)。

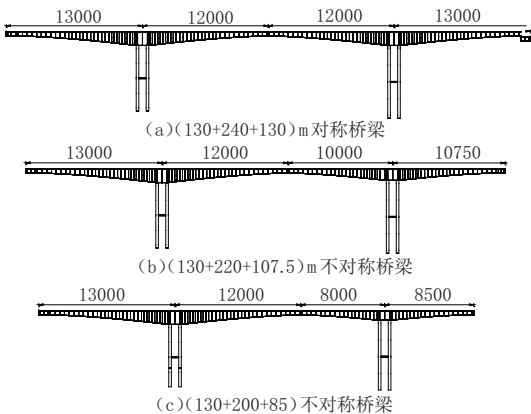


图1 不同跨径组成的连续刚构立面布置(单位:cm)

1.2 内力分析

桥梁服役运营阶段,主梁在自重和活载作用下内力见表1。在恒载作用下,对称和非对称结构的中跨最大弯矩出现在合龙段,但是活载作用下,发现2个非对称结构的中跨最大弯矩从合龙段向中跨 $L/2$ 位置处偏移,且内力值低于对称结构的主梁内力值。

表1 3种跨径组成桥梁的主梁内力

| 不同跨径组成 |        | (130+240+130) m |              | (130+220+107.5) m |              | (130+200+85) m |              |
|--------|--------|-----------------|--------------|-------------------|--------------|----------------|--------------|
|        |        | 出现位置            | 内力值/(kN·m)   | 出现位置              | 内力值/(kN·m)   | 出现位置           | 内力值/(kN·m)   |
| 恒载     | 中跨最大弯矩 | 0.50L           | 67 033.4     | 0.55L             | 61 251.0     | 0.60L          | 52 913.1     |
|        | 墩顶最小弯矩 | —               | -4 444 833.8 | —                 | -4 408 088.8 | —              | -4 372 945.8 |
| 活荷载    | 中跨最大弯矩 | 0.50L           | 54 342.8     | 0.51L             | 51 176.9     | 0.52L          | 48 746.7     |
|        | 边跨最大弯矩 | 0.36L           | 56 758.1     | 0.36L             | 55 757.3     | 0.36L          | 54 982.4     |
|        | 墩顶最小弯矩 | —               | -253 559.6   | —                 | -228 504.8   | —              | -203 971.0   |

1.3 施工和运营阶段竖向位移分析

以跨径组成为(130+200+85) m为分析对象,在

边跨合龙前、中跨合龙前和中跨合龙后3个施工阶段T构悬臂端施加单位力分析结构竖向位移(见图2),

结果表明,对大T和小T悬臂端同时施加单位力,大T刚度较小,中跨合龙前大T悬臂端竖向变形较小T大;中跨合龙后中跨最大竖向位移偏离中跨合龙段向跨中位置偏移。

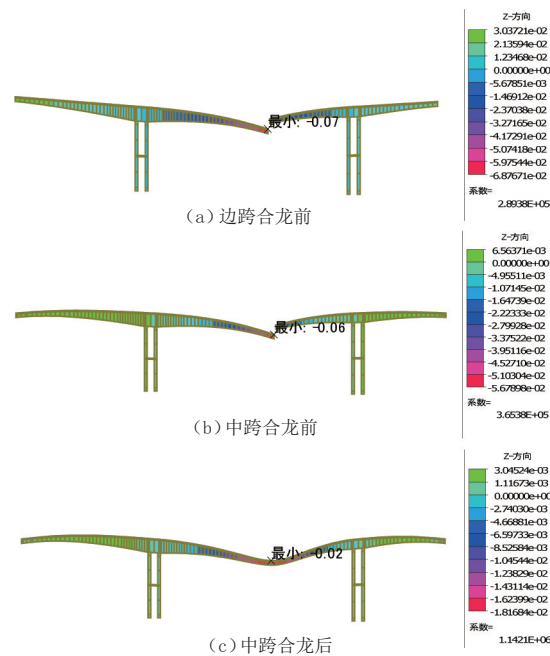


图2 T构悬臂端施加单位力竖向位移(单位:m)

结合图2的分析结果,在活载作用下,不对称连续刚构的中跨最大弯矩和最大竖向位移在合龙后会

表3 3种跨径连续刚构桥的主梁自重应力

| 位置 | 施工阶段 | (130+240+130) m |             | (130+220+107.5) m |             | (130+200+85) m |
|----|------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|----------------|
|    |      | 大T的悬臂根部/MPa     | 小T的悬臂根部/MPa | 大T的悬臂根部/MPa       | 小T的悬臂根部/MPa | 悬臂根部/MPa       |
| 上缘 | 中跨合龙 | 23.90           | 15.60       | 23.90             | 19.20       | 23.90          |
|    | 二期恒载 | 25.70           | 17.60       | 25.90             | 21.20       | 26.10          |
|    | 变化幅值 | 1.80            | 2.00        | 2.00              | 2.00        | 2.20           |
| 下缘 | 中跨合龙 | -20.00          | -15.50      | -20.00            | -17.30      | -20.00         |
|    | 二期恒载 | -21.6           | -17.50      | -21.80            | -19.30      | -22.00         |
|    | 变化幅值 | -1.60           | -2.00       | -1.80             | -2.00       | -2.00          |

2 桥梁病害及成因分析

现以云南杭瑞高速澜沧江大桥为例,探讨不对称结构的加固方案及工效。该桥桥梁全长415 m,跨径布置为(130+200+85) m,中跨合龙段两侧桥梁长度分别为230 m和185 m,桥梁所在路线位于山岭重丘区,主桥箱梁为单箱、单室断面,其中箱梁的底板宽度为12.2 m,翼缘板宽度为5.15 m,箱梁根部大跨径侧梁高13.0 m,小跨径侧梁高9.0 m,合龙段梁高4.0 m,箱梁高度按1.5次抛物线由桥梁根部变化至合龙段。

2.1 桥梁病害情况

在桥梁定期检查中,发现该桥存在以下病害。

向跨中位置偏移,但是边跨的最大弯矩和最大竖向位移在活载作用下变化并不明显(仍在0.36L处出现)。

施工阶段240 m T侧箱梁上、下缘应力随着中跨跨径减小而减小,另一侧箱梁上、下缘应力变化较小。在活载作用下,连续刚构中跨最大竖向位移从中跨合龙段向跨中位置偏移,边跨最大竖向位移位置均未发生变化,出现在边跨0.36L处。

运营阶段图1中3种不同跨径连续钢构桥的主梁在活载作用下竖向变形见表2。

表2 3种跨径连续刚构桥的主梁活载竖向位移

| 跨径组成              | 活载/mm  |       |        |       |
|-------------------|--------|-------|--------|-------|
|                   | 中跨最大位移 | 出现位置  | 边跨最大位移 | 出现位置  |
| (130+240+130) m   | -58.0  | 0.50L | -16.4  | 0.36L |
| (130+220+107.5) m | -47.3  | 0.52L | -16.2  | 0.36L |
| (130+200+85) m    | -37.5  | 0.55L | -15.9  | 0.36L |

1.4 应力分析

在自重作用下,通过对中跨合龙和施加二期恒载两个施工阶段的主梁应力变化幅值进行分析比较,240 m T侧箱梁上、下缘应力随着中跨跨径减小而减小,另一侧箱梁上、下缘应力变化不大。施工阶段3种跨径组成的主梁在自重应力见表3。

(1)箱梁表观病害

箱梁腹板的斜向裂缝和底板的横向裂缝是该桥箱梁的主要外部病害(见图3),中跨的跨中至合龙段区域范围出现横向裂缝,有部分的横向裂缝由下向上延伸至腹板位置处,大部分的裂缝长度为0.6~1.3 m,裂缝宽度约为0.1~0.2 mm,个别裂缝长度达8.5 m。箱梁内部病害主要为底板分层崩裂,出现在中跨跨中区域,最大裂缝宽度达1.0 mm,部分底板分层裂缝延伸至两侧腹板形成斜向裂缝。

(2)桥梁中跨下挠

桥梁在建成时,相比路线高程,中跨合龙段预拱度为4.3 cm,桥梁运营11 a后,最大挠度出现在中跨合龙段位置,该位置竖向向下位移达19.25 cm,相对



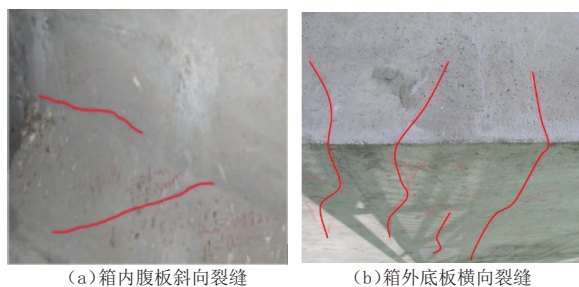


图3 箱梁腹板和底板裂缝

于桥梁建成时合计竖向向下位移 23.6 cm, 平均每年竖向变位达 2 cm, 桥梁中跨跨中线形向下持续发展。桥梁实测线形见图 4。其中 D1 到 D5 为 1 号墩测点, D5 到 D13 为合龙段测点, D13 到 D17 为 2 号墩测点。

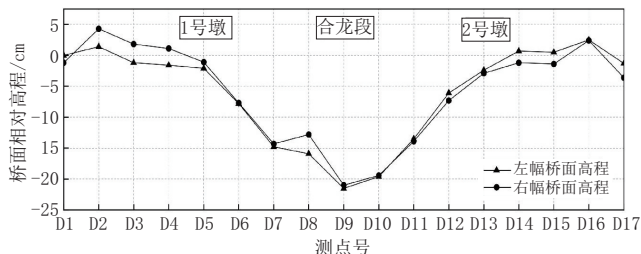


图4 桥梁桥面线形实测相对高程

## 2.2 病害成因分析

大跨径连续刚构桥跨中下挠是该类型桥梁的常见病害, 结合桥梁现状和不对称桥梁力学特点, 桥梁下挠成因主要包括以下几个方面:

(1) 通过对连续刚构桥多种不对称程度的分析, 桥梁中跨最大竖向位移位于中跨合龙段位置, 与实际观测结果一致。

(2) 主桥合龙段附近箱梁底板存在较多横向裂缝, 部分横向裂缝延伸至腹板, 箱梁内部底板存在分层崩裂, 部分底板分层裂缝延伸至两侧腹板形成斜向裂缝, 根据对连续刚构桥多种不对称程度的分析, 桥梁中跨最大弯矩出现在中跨合龙段附近, 该位置内力较大, 也导致合龙段附近箱梁出现较多横向裂缝。

(3) 桥梁运营多年后一般存在预应力损失, 经多年调研分析, 顶板纵向预应力的损失对跨中变形影响更为显著。

(4) 主桥的箱梁为单箱、单室的宽幅结构, 箱梁的桥面宽度 22.5 m, 底板的宽度 12.2 m。由于宽幅箱梁有剪力滞效应的现象, 在远离腹板的顶底板以及其中的预应力钢束在结构受力中并不能完全参与受力, 实际受力面积较小, 在荷载作用下桥梁结构实际向下变形量比理论值偏大。

(5) 大型重载车辆的增多, 造成部分活荷载大于

理论设计值, 车辆荷载的变化也是连续刚构桥梁下挠的重要原因之一。

## 3 加固措施及工效分析

### 3.1 加固措施

该桥箱梁底板在中跨跨中区域出现较多横向裂缝, 部分延伸至腹板, 一定程度上会削弱主梁刚度, 同时主桥箱梁存在一定程度的竖向向下变位, 且处于持续发展状态, 若桥梁状况进一步恶化, 将影响桥梁运营安全。通过张拉体外预应力, 使桥梁中跨上、下缘应力趋于均衡, 降低竖向位移变化趋势, 改善主梁应力状态, 提高桥梁承载能力。

考虑大跨径不对称桥梁的力学特性, 优化体外预应力钢束布置型式, 以达到加固桥梁的目标。在每幅箱梁的两侧腹板内侧各布置 6 束  $19\phi_{15.24}$  mm 体外预应力钢束, 中跨箱梁内部通长布设体外预应力钢束, 长度约 218 m, 通过钢制转向器分 3 批下弯, 对于钢束转向角度较大的位置采用混凝土转向块, 钢束锚固于桥墩墩顶边跨侧位置, 采用自重较轻的钢制转向器以减小自重增加对加固效果的影响, 见图 5。

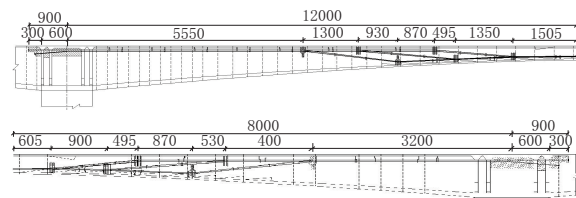


图5 箱梁体外预应力立面布置示意(单位:cm)

### 3.2 加固工效

基于非对称桥梁结构的病害情况, 加固工效中考虑预应力损失 30% 和开裂区域刚度折减 15% 等因素的影响, 加固前和加固后服役阶段的主要控制截面处的主梁正常使用极限状态应力、变形计算分析结果见表 4。其中工况 1 至工况 5 是桥梁加固前的工况, 工况 6 至工况 7 是桥梁加固后的工况。体外预应力钢束的布置形状考虑了不对称连续刚构桥梁的结构特点, 通过模拟分析, 体外预应力张拉后, 桥梁中跨将向上变位 23.3 mm。

根据不同因素对桥梁结构的影响分析, 结合桥梁目前病害状态, 得出以下结论:

(1) 加固后, 结合张拉预应力和转向装置以及其他加固措施产生的自重, 中跨合龙段向上变形 18.0 ~ 18.8 mm, 在一定程度上抑制了主梁下挠。

(2) 加固前中跨合龙段上缘应力 -3.1 MPa, 下缘

表 4 运营阶段正常使用极限状态主梁应力、变形分析结果

| 加固<br>状态 | 工况 | 变化因素               | 最 值 | 主跨跨中应力/MPa |       | 主跨合龙段应力/MPa |       | 主跨合龙段<br>变形/mm | 长悬臂根部应力/MPa |       |
|----------|----|--------------------|-----|------------|-------|-------------|-------|----------------|-------------|-------|
|          |    |                    |     | 上缘         | 下缘    | 上缘          | 下缘    |                | 上缘          | 下缘    |
| 加固前      | 1  | 原设计                | 最大值 | -6.0       | -4.3  | -2.5        | -5.7  | -48.0          | -6.3        | -13.1 |
|          |    |                    | 最小值 | -14.0      | -8.9  | -10.3       | -10.3 |                | -14.1       | -15.2 |
|          | 2  | 顶板预应力<br>损失 30%    | 最大值 | -5.2       | -3.0  | -3.8        | -4.2  | -83.2          | 2.0         | -14.3 |
|          |    |                    | 最小值 | -13.2      | -7.7  | -11.5       | -8.8  |                | -5.8        | -16.5 |
|          | 3  | 底板预应力<br>损失 30%    | 最大值 | -5.2       | -2.0  | -1.6        | -2.4  | -57.3          | -6.1        | -13.3 |
|          |    |                    | 最小值 | -13.2      | -6.7  | -9.3        | -7.0  |                | -13.9       | -15.5 |
|          | 4  | 裂缝区域刚度<br>折减 15%   | 最大值 | -6.3       | -4.3  | -2.9        | -5.7  | -49.4          | -6.2        | -13.1 |
|          |    |                    | 最小值 | -13.4      | -8.7  | -9.8        | -10.0 |                | -14.0       | -15.2 |
|          | 5  | 工况 2+工况 3+<br>工况 4 | 最大值 | -4.6       | -1.0  | -3.1        | -1.1  | -94.0          | 2.3         | -14.6 |
|          |    |                    | 最小值 | -11.7      | -5.4  | -10.0       | -5.4  |                | -5.5        | -16.7 |
| 加固后      | 6  | 原设计                | 最大值 | -8.2       | -5.3  | -3.3        | -8.7  | 18.0           | -8.1        | -13.3 |
|          |    |                    | 最小值 | -16.2      | -10.0 | -11.1       | -13.4 |                | -16.0       | -15.5 |
|          | 7  | 工况 2+工况 3+<br>工况 4 | 最大值 | -7.4       | -2.3  | -4.3        | -4.9  | 18.8           | 0.4         | -14.6 |
|          |    |                    | 最小值 | -14.5      | -6.7  | -11.1       | -9.1  |                | -7.4        | -16.7 |

应力-1.1 MPa,加固后上缘应力-4.3 MPa,下缘应力-4.9 MPa,加固后中跨应力状态趋于平衡。通过张拉体外预应力,中跨跨中下缘和合龙段下缘压应力储备各增加了 1.2 MPa 和 3.8 MPa,有效增加了截面下缘压应力储备。

4 结 语

本文对不同程度不对称连续刚构桥的力学特性进行了研究分析,对该类型桥梁的加固应考虑其受力特点,主要结论如下:

(1)在自重作用下,不对称连续刚构的中跨最大弯矩出现在合龙段;在活载作用下,最大弯矩和最大竖向变形由中跨合龙段向跨中位置偏移,由于桥梁合龙后刚度发生重分配,最大弯矩和最大变形向着桥梁刚度较小的一侧偏移。

(2)对该类型桥梁的加固,可通过张拉体外预应力的方式抑制主梁下挠,提高桥梁承载能力安全储备,改善主梁应力状态,预应力钢束布置型式应充分考虑桥梁不对称程度的影响,体外预应力线形由中跨合龙段向两侧桥墩分别弯起布置。

(3)对于不对称连续刚构桥竖向位移分析中,仅进行了活载的对比分析,对运营过程中预应力损失、混凝土收缩徐变等因素可进一步研究。

参考文献:

[1] 何世荣,骆维斌,陈建民,等.体外预应力加固 PC 连续刚构受力性能分析[J].公路,2022(7):256-260.  
[2] 朱良清,杨艳,陈裕波.大跨度不对称连续刚构桥悬臂施工技术研究[J].科技通报,2022,38(8):96-102.

[3] 王华,王龙林,张子墨,等.基于裂缝宽度变化的连续刚构桥安全性预警技术[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(6):1650-1657.  
[4] Chuang C, Xuyi W, Qidong L, et al. A Closure Jacking Force Calculation Algorithm for Curved Prestressed Concrete Continuous Rigid-Frame Bridges with Asymmetric Cantilevers and Piers[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022(1): 5-41.  
[5] 张永,陈伟杰,程剑煌,等.不对称悬浇混合梁刚构桥线形控制敏感性分析[J].科技创新与应用,2021,11(32):61-64.  
[6] 翁方文,吴成,鲁祖泽.大跨度不对称连续梁设计与施工关键技术[J].铁道建筑,2021,61(12):28-30.  
[7] 吴志华,何以群,叶顺汉.曲线不对称悬浇对连续刚构箱梁桥受力的影响及对策[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2023,33(4):81-88.  
[8] 陈兵.不对称预应力混凝土刚构桥静力数值分析[J].湖南交通科技,2018,44(1):115-118.  
[9] 邓晓红,陈冠桦.山区不对称连续刚构桥设计[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(5):249-251.  
[10] Wu T, Sun Q. Seismic Damage Study of Asymmetric Continuous Rigid Frame Bridge Based on Nonlinear Time History Analysis. The Open Civil Engineering Journal[J]. 2015, 9(1): 489-494.  
[11] Jun H K, Zhong G, Yu X Z, et al. Effective length coefficient of pier of multi-span continuous rigid-frame bridge based on transfer matrix method with branch. Journal of Central South University[J]. 2024, 31(2): 542-557.  
[12] Zong, Z H, Xia, ZH, Liu, H H. et al. Collapse Failure of Prestressed Concrete Continuous Rigid-Frame Bridge under Strong Earthquake Excitation: Testing and Simulation[J]. Journal of Engineering, 2016, 21(9): 25-32.  
[13] 黄柳云,孟金,程振庭.基于检测的连续刚构桥病害分析及承载能力验算[J].广西科技大学学报,2020,31(1):45-49;58.  
[14] 谢肖礼,杨创捷,周远航.连续刚构桥钢桁架加固原理及其应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(2):44-51.  
[15] 何世荣,骆维斌,陈建民,等.体外预应力加固 PC 连续刚构桥受力性能分析[J].公路,2022,67(7):256-260.