

# PC 连续刚构桥长期下挠参数敏感性分析

Sensitivity Analysis of Long-term Deflection Parameters of PC Continuous Rigid Frame Bridge

钱若霖, 苏佩, 黄春晖

(陕西工业职业技术学院 土木工程学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 随着交通强国建设的不断推进, PC 连续刚构桥以其出色的跨越能力和耐久性, 广泛用于多样化的桥梁建设中。然而, 这种桥梁结构在长期使用过程中可能出现的下挠问题, 对其稳定性和使用寿命产生了重大影响。基于全桥有限元仿真模型, 分别选取了自重、徐变、预应力损失以及刚度折减四个主要参数, 对其下挠表现的敏感性展开研究。结果表明: 混凝土的超重增幅、初始加载龄期过短、成桥时间、预应力的损失以及刚度的折减均会对桥梁长期下挠产生不利影响, 有针对性的采取相应措施可以有效避免长期下挠的持续发展。以便在设计、施工和运营中科学决策, 为同类桥梁建设提供理论支持和技术指导。

**关键词:** 连续刚构桥; 挠度; 有限元; 敏感性分析

**中图分类号:** U448.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 05-0103-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.019

QIAN Ruolin, SU Pei, HUANG Chunhui

(Civil Engineering College, Shannxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** With the continuous promotion of the construction of a transportation powerhouse, PC continuous rigid frame bridges are widely used in diversified bridge construction due to their excellent crossing ability and durability. However, the possible downward deflection issues that may occur during long-term use of this bridge structure have a significant impact on its stability and service life. Based on the finite element simulation model of the entire bridge, four main parameters, namely self weight, creep, prestress loss, and stiffness reduction, were selected to study the sensitivity of their downward deflection performance. The results indicate that the increase in overweight of concrete, short initial loading age, bridge completion time, loss of prestress, and reduction in stiffness can all have adverse effects on the long-term deflection of the bridge. Targeted measures can effectively avoid the sustained development of long-term deflection. In order to make scientific decisions in design, construction, and operation, and provide theoretical support and technical guidance for the construction of similar bridges.

**Keywords:** continuous rigid frame bridge; deflection; finite element analysis; sensitivity analysis

## 0 引言

现代社会对交通运输系统的依赖程度较高, 桥

梁作为交通系统中的关键组成部分, 其功能和结构安全性对于社会和经济活动的稳定性至关重要。预应力混凝土 (Prestressed Concrete, PC) 连续刚构桥梁因其强度高、延性优、耐久性强等优点, 被广泛用于大跨径桥梁<sup>[1-2]</sup>。在使用过程中, 由于荷载及其他因素, 预应力混凝土连续刚构桥可能表现下挠, 针对长期下挠原因展开研究可以有效保障桥梁服役期间的安全性。黄炜等<sup>[3]</sup>从混凝土长期徐变、底板

作者简介: 钱若霖 (1993—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 桥梁结构分析。

收稿日期: 2023-07-27

## 道桥技术

钢束径向力和钢束预应力损失比3个方面阐明了其对大跨度预应力连续刚构桥跨中下挠的影响;黄荣贵<sup>[4]</sup>针对不同混凝土容重、混凝土弹性模量、张拉控制应力及收缩徐变对桥梁成桥线形的影响规律进行比较分析,为桥梁设计参数的取值范围提供参考;林志平等<sup>[5]</sup>选取了预应力和附属设施等方面进行优化,提出了针对大跨径预应力混凝土连续刚构桥长期下挠设计对策;林兆新<sup>[6]</sup>则针对施工过程中的混凝土超方、预应力损失、合龙顺序、合龙误差等因素对大跨径预应力混凝土连续刚构桥长期下挠进行了影响分析,并提出相应对策。但在工程实践中,由于PC连续刚构桥的结构复杂且影响长期下挠的参数敏感程度不一<sup>[7-8]</sup>,所以进一步确定参数重要程度并对影响桥梁结构下挠的各种参数进行量化,进行参数敏感性排序,对于指导桥梁的设计、施工和维护管理,实现桥梁健康状态的有效控制具有重要工程意义。

以连续刚构桥燃灯寺大桥为例,基于全桥有限元仿真模型,选取了影响PC连续刚构桥长期下挠的若干项参数,对其影响下挠表现的敏感性展开研究,旨在通过详尽的敏感性分析,确定最影响PC连续刚构桥下挠表现的关键因素,以便在设计、施工和运营管理中做出科学、合理的决策。同时,也期望通过这项工作,能够为PC连续刚构桥的健康监控和维护管理提供理论支持和技术指导。

### 1 工程概况及有限元建模

燃灯寺大桥为四跨65 m + 2 × 120 m + 65 m 预应力混凝土连续刚构桥。采用悬臂浇筑施工,三向预应力体系,单箱单室截面。大桥箱梁根部高度7.2 m,跨中梁高3.0 m,其间梁高按1.8次抛物线变化。箱梁顶板宽15.9 m,底板宽8.4 m,顶板厚0.32 m,底板厚由跨中0.32 m按1.8次抛物线变化至根部0.80 m,腹板厚跨中段为0.55 m、根部变为0.7 m,渐变段长4.0 m。

主桥中跨底板纵向预应力采用预应力钢绞线,锚下张拉控制应力为1 395 MPa。主桥竖向预应力采用JL32高强度精轧螺纹钢筋,设计张拉力为560 kN,腹板内采用双肢布置。

根据大桥设计参数,利用有限元分析软件Midas Civil建立全桥模型,全桥共划分为238个梁单元,墩梁单元间和墩底均采用刚性连接。同时定义自重、预应力、混凝土材料特征值、温度、二期等参数和组合工况。全桥模型如图1所示。

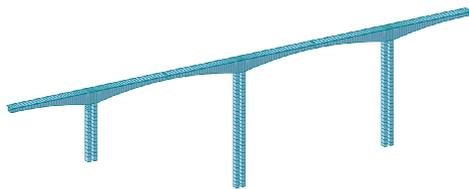


图1 全桥有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the full bridge

### 2 影响长期下挠参数敏感性分析

连续刚构桥的长期下挠现象主要体现在由于荷载作用及材料性能变化所引发的桥梁变形。这种变形不仅仅是单一因素影响的结果,而是由于多种因素的综合影响产生的。主要影响因素包括混凝土的收缩徐变、钢材的松弛以及混凝土病害等。混凝土是一种非线性材料,在持续受力下会发生时间依赖性的应变变化,进而引起长期下挠<sup>[9-10]</sup>;此外,由于钢筋锈蚀、锚固松动等因素,预应力损失也会随之发生<sup>[11-12]</sup>,进而降低了结构的整体刚度和承载能力,产生长期下挠;再加之自然环境的侵蚀和外部活载的作用,桥梁结构发生损伤病害,会进一步降低刚构桥的整体刚度,加剧长期下挠。

综上,连续刚构桥长期下挠主要是由自重效应、混凝土徐变、预应力损失以及结构病害等因素综合作用引起的。研究这些因素对连续刚构桥长期下挠的影响并进行敏感性分析,这对于桥梁的设计、施工和维护至关重要。

#### 2.1 自重

连续刚构桥混凝土超重现象可能由多种原因导致,包括混凝土材料的选择配比、浇筑工艺、施工误差等。为进一步探究混凝土的超重对连续刚构桥长期下挠的影响,在有限元模型中保持材料的容重不变,超重采取z方向的自重系数去控制变量,考虑超重2%、6%、10%、20%四种工况下成桥、成桥5、10、20年后的主跨跨中挠度变化,如图2所示。

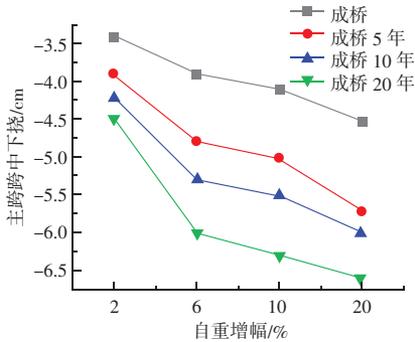


图2 自重增幅对挠度的敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of self weight increase on deflection

在混凝土自重不断增加的过程中,桥梁主跨跨中截面的最大挠度值与自重的涨幅整体呈线性增长趋势。自重增加 2% 工况下,成桥 20 年相对于成桥阶段跨中截面的最大挠度增加了 1.1 cm;而当自重增加了 20% 时,成桥 20 年相对于成桥阶段跨中截面的最大挠度增加了 2.1 cm。由此可见,混凝土超重越严重,对桥梁跨中截面的挠度影响越显著。此外,通过比较自重增加量随着成桥时间的变化,可以观察到以下规律:在桥梁建成的前几年,自重增幅条件下挠度增加较快,然而随着成桥时间的增加,自重增加所引起的梁体跨中挠度值的增速逐渐变缓,趋于稳定。

## 2.2 混凝土徐变

混凝土徐变是指在长期荷载作用下,混凝土会发生不可逆的应力与应变变化。对于连续刚构桥超静定结构来说,混凝土徐变对挠度产生影响更为突出。JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中指出对混凝土徐变变形的主要影响因素包括成桥时间、加载龄期、环境湿度和温度效应等,加载龄期会影响混凝土的成熟度,加载龄期短,混凝土水化反应不充分,其强度尚未达到设计值,提前开始预应力张拉作业,对于桥梁的线性控制不利。

主要考虑不同加载龄期时不同成桥时间下对连续刚构桥长期下挠的影响,取混凝土初次加载龄期为 3、5、7、10 d 以及成桥、成桥 5、10、20 年的工况下主梁跨中挠度值为敏感性分析参数,研究其对主梁跨中挠度的影响,其中加载龄期用有限元中施工阶段控制,成桥时间采用模型信息中徐变系数去控制,方案设计参数和输出结果见表 1。

表 1 敏感性参数设计工况与跨中下挠输出结果

Table 1 Sensitivity parameter design conditions and mid-span deflection output results

加载龄期/d	成桥下挠/cm			
	成桥	5 年	10 年	20 年
3	-4.1	-4.6	-4.9	-5.4
5	-3.4	-3.8	-4.1	-4.4
7	-2.9	-3.2	-3.6	-4.0
10	-2.5	-2.8	-3.1	-3.3

如图 3 所示,为不同混凝土加载龄期下不同成桥时间对跨中位置主梁下挠的影响曲线。

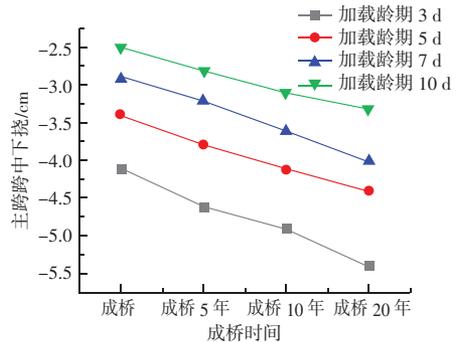


图3 混凝土徐变效应对挠度的敏感性分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of concrete creep effect on deflection

随着初始加载龄期的增加,无论在成桥的哪一阶段,主跨跨中下挠值均呈增长趋势,这是由于加载初期时间越短,混凝土内部反应不充分,强度刚度较低,抵抗外部荷载的能力有限,进而导致挠度值偏大;在成桥阶段,主梁初始加载龄期为 3 d 时,其跨中下挠最大,可达 4.1 cm,加载龄期为 5、7、10 d 时,下挠值分别减小了 0.7、1.2、1.6 cm,可见混凝土加载龄期越短,对于桥梁的变形下挠越不利,这也解释了某些桥梁在施工过程中如果存在赶工现象,主梁梁段在混凝土浇筑后 3 d 即进行预应力筋张拉,会对主梁的线性控制产生不利影响,且随着成桥时间的增加,结构下挠会不断增加,对整桥的结构受力和安全可靠性产生重大影响;随着成桥时间的推移,跨中挠度增长逐渐变缓,在初始加载龄期为 7 d 条件下,成桥 20 年时间相对于成桥阶段挠度仅增加了 1.1 cm,可以推测接下来的很长一段时间内,增加将趋于平缓。

## 2.3 钢束预应力损失

连续刚构桥的钢束预应力损失是指钢束在施加预应力后,由于各种因素导致其预应力逐渐减少的现象。导致钢束预应力损失的原因有钢材存在弛豫

## 道桥技术

和徐变效应,即受到长期荷载作用后会发生应力松弛和形变;其次,如果钢束的锚固效果不好、锚固长度不足、锚固点砂浆质量差等,也会导致钢束预应力损失;再者,预应力钢束与混凝土之间存在的摩擦力也受各种因素的影响,例如润滑剂的使用或环境温度等,当混凝土结构开裂时,钢束的预应力会部分转移到混凝土中,均会导致预应力损失。

考虑以上因素对于预应力损失的影响,分别对预应力损失 5%、10%、15%、20%、30% 不同程度、不同成桥时间工况下的主跨跨中下挠值进行敏感性分析,绘制挠度变化曲线如图 4 所示。

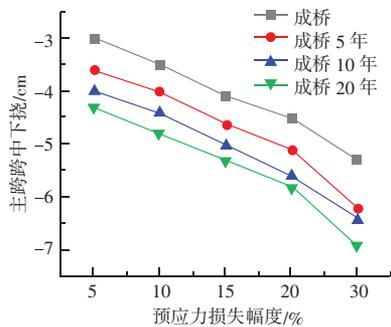


图 4 预应力损失对挠度的敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of prestress loss to deflection

预应力损失会使得成桥阶段主梁跨中挠度值明显增大,预应力损失前增加 5%,下挠会增加 0.5 cm 左右;最不利情况下,成桥 20 年预应力损失 30% 工况下,主跨跨中下挠达到 6.9 cm,可见随着时间推移,预应力损失对于主梁线形的影响十分显著。

预应力能够抵消荷载效应,且具有控制裂缝宽度和限制挠度的效果,以达到提高桥梁承载力的目的,若预应力发生损失,一方面不足以抵消设计荷载效应,另一方面可能导致混凝土发生开裂,长期导致桥梁的下挠值不断增大,对连续刚构桥的行车质量、舒适度以及整体结构性能都会产生不利影响。

### 2.4 刚度折减

刚度是指结构在受力下抵抗变形的能力。主梁的刚度与其截面尺寸、材料性质以及连接方式有关。当主梁出现裂缝时,会导致材料的断裂、局部弯曲等变形情况,裂缝出现的位置、长度、宽度和深度等均会影响整体刚度。且随着桥梁带裂缝工作时间的增长,裂缝在使用过程中逐渐扩展,其影响会逐渐加大,裂缝的扩展可能导致整体刚度的进一步下降。因此,刚度的折减效应对于主梁下挠的影响不

可忽视。

基于全桥有限元模型,通过改变材料弹性模量的特征值来实现主梁刚度的折减,分别采取折减幅度为 3%、5%、10%、15% 四种工况,研究其对不同成桥阶段的主梁跨中挠度的敏感性,如图 5 所示。

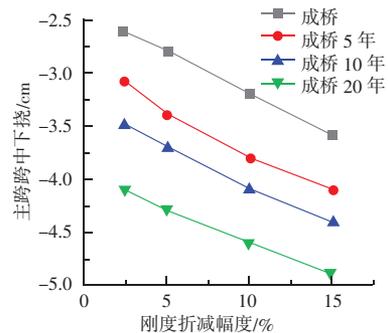


图 5 刚度折减效应对挠度的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of stiffness reduction effect on deflection

随着主梁刚度折减幅度增加,主跨跨中下挠不断增加,基本呈线性趋势,刚度平均每折减 1%,挠度增加 1.2% 左右。最不利情况下,成桥 20 年阶段,刚度折减 15% 时,主梁跨中下挠值可达 4.9 cm,挠度相对于未发生刚度折减前的 2.9 cm,涨幅达到 69%。成桥初期,刚度折减对于挠度的影响较为敏感,成桥时间越长,挠度的变化变缓。

### 2.5 参数敏感性排序

基于以上敏感性参数影响规律,为进一步判断自重、加载龄期、预应力损失、刚度折减 4 个参数对连续刚构桥长期下挠影响程度大小,判断其敏感性,在有限元模型设计参数基准条件下(取成桥阶段且加载龄期为 7 d),对各参数值分别进行不利扰动 10% 和 20%,对比各扰动工况下主梁跨中挠度的变化幅度,对比各参数敏感性程度。各扰动工况下跨中挠度变化情况见表 2。

表 2 敏感性参数扰动工况与跨中下挠值输出结果  
Table 2 Perturbed design conditions of sensitivity parameters and mid-span deflection output results

敏感性参数	扰动 10%		扰动 20%	
	跨中下挠/cm	变化率/%	跨中下挠/cm	变化率/%
自重	-4.1	41.4	-4.5	55.2
加载龄期	-3.1	6.9	-3.3	13.8
预应力损失	-3.5	20.7	-4.5	55.2
刚度折减	-3.2	10.3	-4.1	41.4

对基准设计参数模型进行不利扰动,在 10% 和 20% 的有限扰动幅度范围内,主梁跨中下挠值的变化率响应敏感程度依次为均为自重、预应力损失、

刚度折减和加载龄期。其中敏感性最大参数自重, 当其增加 20% 时, 下挠变化幅度达 55.2%, 且与预应力损失相当。对于更大的不利扰动, 在实际工程中难以复现, 且不符合实际施工标准, 不再过多讨论。综上可以看出, 在有限扰动范围内, 自重对于主梁跨中下挠影响最为明显, 其次为预应力损失、刚度折减以及加载龄期。

### 3 结论

(1) 混凝土的超重增幅、初始加载龄期过短、成桥时间的增加、预应力损失以及刚度折减均会使桥梁长期下挠值增加, 对线性产生不利影响。

(2) 在有限扰动范围内, 自重对于主梁跨中下挠影响最为明显, 其次为预应力损失、刚度折减以及加载龄期, 为有效预防连续刚构桥长期下挠, 可根据各参数敏感性程度采取相应控制措施。

### 参 考 文 献

- [1] 贺秋敏. 某预应力混凝土连续桥设计研究 [J]. 科学技术创新, 2023 (8): 185-188.
- [2] 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]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [3] 黄炜, 余健, 李晓猛, 等. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥跨中下挠原因分析 [J]. 科技和产业, 2023, 23 (4): 254-260.
- [4] 黄荣贵. 某预应力混凝土连续刚构桥成桥线形影响因素分析 [J]. 西部交通科技, 2022 (12): 169-171.
- [5] 林志平, 曾俊铨, 夏江泉, 等. 大跨径连续刚构桥长期下挠设计对策参数化分析 [J]. 福建交通科技, 2020 (2): 76-78, 98.
- [6] 林兆新. 大跨径连续刚构桥长期下挠的施工影响因素参数化分析 [J]. 福建交通科技, 2019 (5): 96-98, 119.
- [7] 李进权. 连续刚构桥施工 BIM 技术应用 [J]. 交通建设与管理, 2023 (6): 94-96.
- [8] 陈瑛, 熊志朋. 连续刚构桥施工监测及参数敏感性分析 [J]. 交通科技, 2023 (3): 80-85.
- [9] 陈瑛, 熊志朋. 连续刚构桥施工监测及参数敏感性分析 [J]. 交通科技, 2023 (3): 80-85.
- [10] 黄安民. 连续刚构跨中下挠影响的研究 [J]. 交通世界, 2024 (Z2): 281-283.
- [11] 秦军, 苗建宝, 张小亮. PC 连续刚构桥跨中长期下挠优化 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2020, 16 (10): 182-185.
- [12] 李华, 王谦. 预应力损失及合龙措施对大跨径 PC 连续刚构桥跨中下挠的影响 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45 (4): 101-104.
- [13] 贺秋敏. 某预应力混凝土连续桥设计研究 [J]. 科学技术创新, 2023 (8): 185-188.
- [14] 徐明雪, 梁兴文, 于婧, 等. UHPC 梁短期刚度理论与试验研究 [J]. 工程力学, 2019, 36 (1): 146-154, 164.
- [15] 徐海滨, 邓宗才. UHPC 梁开裂弯矩和裂缝试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46 (4): 87-92.
- [16] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土梁正截面承载力 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30 (20): 23-30.
- [17] 中国钢铁工业协会. 金属材料拉伸试验第 1 部分室温试验方法: GB/T 228.1-2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [18] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [19] 李海云, 韩金良, 李然, 等. 高强不锈钢筋 UHPC 梁受弯性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (1): 93-100.
- [20] 高迪, 张辉, 王晓峰, 等. 配置高强不锈钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究 [J]. 建筑科学, 2018, 34 (5): 40-43.
- [21] 赵毅, 王晓峰, 赵勇. 高强不锈钢筋混凝土梁短期受弯裂缝宽度和刚度计算方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (增刊 1): 268-276.
- [22] 张国学, 赵峰, 张志浩, 等. 不锈钢筋混凝土梁抗震性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31 (5): 35-40.
- [23] 王照耀, 邵珠山, 梁兴文, 等. 钢筋超高性能混凝土梁细观多机制抗剪模型研究 [J/OL]. 建筑结构学报, 1-14 [2024-09-25]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.0754>.

(上接第 86 页)

43 (11): 288-296.

[9] RABI M, SHAMASS R, CASHELL K A. Experimental investigation on the flexural behaviour of stainless steel reinforced concrete beams [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 19 (12): 1-13.

[10] 高迪, 张辉, 王晓峰, 等. 配置高强不锈钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究 [J]. 建筑科学, 2018, 34 (5): 40-43.

[11] 赵毅, 王晓峰, 赵勇. 高强不锈钢筋混凝土梁短期受弯裂缝宽度和刚度计算方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (增刊 1): 268-276.

[12] 张国学, 赵峰, 张志浩, 等. 不锈钢筋混凝土梁抗震性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31 (5): 35-40.

[13] 王照耀, 邵珠山, 梁兴文, 等. 钢筋超高性能混凝土梁细观多机制抗剪模型研究 [J/OL]. 建筑结构学报, 1-14 [2024-09-