

不等五跨刚构-连续梁桥长期下挠影响参数分析

陈春霞, 刘神斌, 邹 卓

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 为探究桥梁工程中连续刚构跨中长期下挠的影响因素, 采用数值模拟计算的方式, 以某不等五跨刚构-连续梁桥为例, 系统评估了纵向预应力损失、环境湿度变化、桥面铺装超重及底板混凝土超方等因素对跨中下挠的影响。研究结果显示: 上述参数均会不同程度地导致跨中下挠, 且其引起的挠度增长主要集中在前十年内; 跨径越大, 各参数变化对下挠的影响也越显著, 其中预应力损失是引起跨中下挠的最主要因素, 调平层超重的影响最为微弱, 参数敏感性排序为预应力损失>底板超方>环境湿度。

关键词: 连续刚构; 长期下挠; 预应力损失; 环境湿度; 铺装超重; 底板超方

中图分类号: U443.32; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0218-06

Analysis on Parameters Influencing Long-Term Downward of Unequal Five-Span Rigid-Frame Continuous Beam Bridge

CHEN Chunxia, LIU Shenbin, ZOU Zhuo

(Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: To explore the factors influencing the continuous rigid-frame mid-span long-term downward in the bridge engineering, the numerical simulation and calculation method is used to systematically evaluate the factors, such as longitudinal prestress loss, environmental humidity variation, deck paving overweight and over-cubic concrete in bottom slab, influencing the mid-span downward based on an unequal five-span rigid-frame continuous beam bridge. The results indicate that all these factors contribute to varying degrees of mid-span downward, and its caused deflection growth is mainly concentrated within the first ten years. The larger the span length, the more significant the influence of each parameter change on downward, in which the prestress loss is the most main factor causing the mid-span downward, and the impact of overweight in the leveling layer is the weakest. The parameter sensitivity ranking is prestress loss > over-cubic concrete in bottom slab concrete > environmental humidity.

Keywords: continuous rigid frame; long-term downward; prestress loss; environmental humidity; paving overweight; over-cubic concrete in bottom slab

0 引言

连续刚构桥采用墩梁固结的一体化设计, 集成了T形刚架、连续梁的优点, 具有结构刚度大、整体性强、受力稳定、行车舒适、维护简便和跨越能力强等优势^[1-4], 是大跨径桥梁结构中的理想形式。但是, 其主跨跨中在长期运营后易出现持续下挠, 影响行车舒适性、桥下净空, 甚至威胁结构安全^[5]。

近年来, 众多学者致力于攻克大跨径连续刚构桥的跨中长期下挠难题, 围绕其成因与影响因素不断深化认识, 相关研究已取得阶段性成果。黄荣贵^[6]等通过系统比较混凝土容重、弹性模量、张拉应

力及收缩徐变等关键设计参数对成桥线形的影响规律, 为相关参数的合理取值提供了依据。陈宇峰等^[7]的研究表明, 箱梁开裂会削弱桥梁的抗弯、抗剪刚度, 进而导致跨中挠度相应增大。林兆新^[8]利用桥梁博士软件重点分析了混凝土超方、预应力损失、合拢顺序、合拢误差等关键施工偏差对桥梁长期下挠的影响, 并据此提出了针对性控制措施。杨晋文^[9]基于MIDAS Civil建立的贺坪峡大桥模型, 分析得出混凝土收缩徐变是影响主梁挠度的主要因素。张澎等^[10]基于某六跨连续刚构桥, 通过实桥调查与有限元分析, 指出预应力损失与结构超方是导致桥梁跨中下挠的主因, 并证实体外预应力加固能有效抑制下挠并改善结构状态。李万根^[11]针对主梁的长期下挠问题, 从预应力损失与混凝土开裂等角度展开了成因分析。

收稿日期: 2025-11-19

作者简介: 陈春霞(1993—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

目前研究发现,连续刚构桥的长期下挠是一个持续且不可逆的变形过程,其核心特征在于它与混凝土的收缩、徐变以及预应力损失相互耦合,形成恶性循环^[12-14]。该过程受施工质量与设计参数影响显著,表现为跨中挠度在桥梁运营后随年限不断累积增大,最终对结构安全、耐久性及使用性能构成严重威胁。鉴于此,为探究连续刚构桥下挠的关键影响因素,本文以浙江某不等跨五跨刚构-连续梁为案例,运用MIDAS软件就施工过程中的多个参数进行敏感性分析。本研究以成桥长期下挠量为指标,甄别主要影响因素,旨在为同类桥梁的下挠控制提供理论依据。

1 工程概况

该桥为五跨 119 m+212 m+182 m+152 m+85 m 现浇预应力混凝土刚构-连续梁桥,1#~3#主墩与主梁固结,4#主墩、边墩均设置滑动支座,主桥采用挂篮对称悬臂浇筑施工方案。下部结构1#~3#主墩为双肢薄壁墩,4#主墩为空心薄壁墩。图1为桥梁立面图。

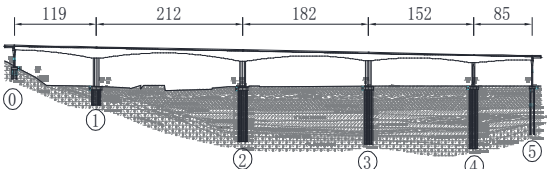


图1 桥梁立面图(单位:m)

主梁采用单箱单室变高预应力混凝土箱梁,箱梁顶板宽16.25 m,底板宽8.15 m。梁高、底板厚度均按照1.8次抛物线过渡。跨中梁高4.5 m,1#、2#主墩根部梁高13.2 m,3#、4#主墩根部梁高9.5 m。顶板厚度30 cm,翼缘板厚20~95 cm,翼缘板悬臂长4.05 m;跨中底板厚32 cm,212 m主跨根部底板厚120 cm,152 m主跨根部底板厚100 cm。212 m跨从箱梁根部至跨中梁段腹板厚由1.1、0.8、0.5 m组成,152 m跨从箱梁根部至跨中梁段腹板厚由0.9、0.7、0.5 m组成。图2为大桥标准断面图。

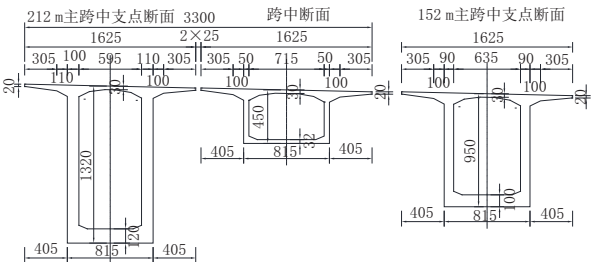


图2 大桥标准断面图(单位:cm)

2 模型建立

根据大桥设计参数,采用MIDAS Civil建立空间杆单元模型进行结构静力分析。根据实际施工过程中,主桥共划分306个单元、326个节点。为了有效地模拟结构施工过程中的体系转换,本研究在多个必要节点处设置临时支撑,并根据施工需要进行添加和删除。全桥模型如图3所示。



图3 大桥有限元计算模型

3 长期下挠影响参数分析

为甄别影响连续刚构桥挠度的主次因素,本文对纵向预应力损失、环境湿度、混凝土调平层超重和底板超方4个参数展开了系统的敏感性分析。

3.1 预应力损失

预应力损失按发生时间可分为瞬时与长期两类。瞬时损失主要由张拉阶段的孔道摩阻、锚具滑移及混凝土弹性压缩导致;长期损失则源于混凝土收缩、徐变与钢绞线应力松弛等材料的时随特性^[15]。这些因素共同造成预应力效能持续衰减,对结构刚度和长期变形产生决定性影响。

基于以上因素对预应力损失的影响,本文通过设定0%、5%、10%、15%四级预应力损失水平,考察了不同运营年限内各主跨跨中挠度的敏感性,绘制各主跨不同预应力损失水平下每十年挠度增量曲线,如图4至图6所示。

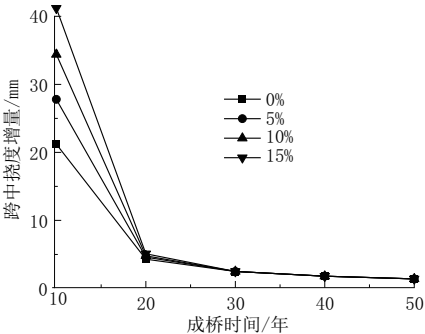


图4 212 m主跨预应力损失对挠度的敏感性分析

图6显示,152 m主跨在预应力损失水平较低时,成桥十年跨中会出现反拱,其根本驱动力来自于成桥初期箱梁截面上下缘较大的压应力差。这种应力差导致了下缘混凝土的徐变缩短比上缘混凝土更为显著,从而在跨中截面引发了向上的反向弯曲变形。变形结果符合力学原理。

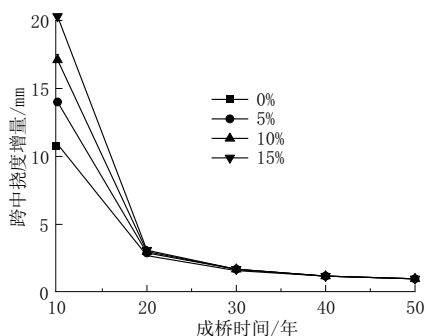


图5 182 m主跨预应力损失对挠度的敏感性分析

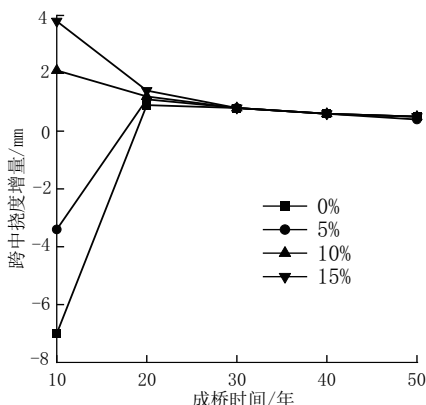


图6 152 m主跨预应力损失对挠度的敏感性分析

由图4至图6可知:在各预应力损失水平下,成桥十年内的挠度变形量最大,后期挠度变形量较小,且有收敛趋势;预应力损失水平越大,跨中变形量越大。

基于以上结论,为探究不同跨径跨中挠度对预应力损失水平的敏感性,绘制成桥十年时各主跨挠度变化曲线(见图7)。

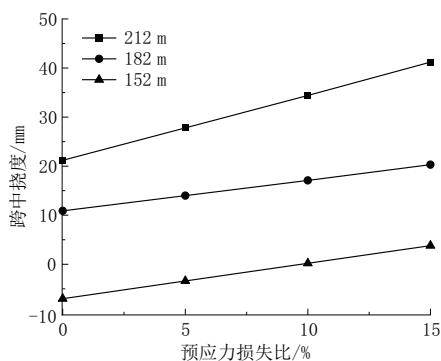


图7 各主跨预应力损失对挠度的敏感性分析

规律显示,在同等预应力损失比情况下,主跨跨径越大则跨中挠度越大。各主跨中,212 m主跨的变形响应最为剧烈,其挠度-损失比曲线斜率最大,明确验证了其对预应力损失具有最高敏感性。

为进一步探索哪类预应力钢束对跨中下挠影响最大,本文将纵向预应力钢束分为腹板束、顶板束与跨中合龙束,针对212 m主跨,量化分析了各类钢束损失对长期下挠的贡献度。具体结果如图8所示。

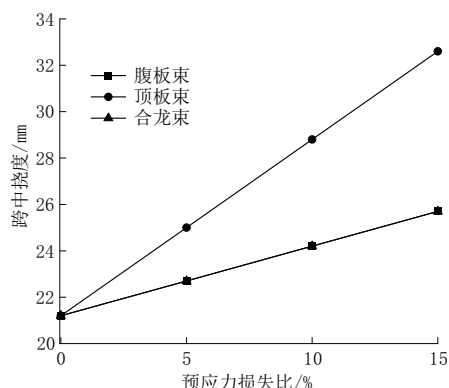


图8 不同类型预应力损失对挠度的敏感性分析

综合分析图8可知,顶板束对跨中长期下挠的影响居主导地位,表现为在相同损失率下其产生的挠度最大,且挠度增长速率(曲线斜率)也最为显著,证明顶板束预应力损失是控制结构长期下挠的最关键因素。

3.2 环境湿度

环境湿度通过调控混凝土的收缩与徐变进程,间接驱动连续刚构桥的跨中长期下挠。为探究环境湿度对连续刚构跨中下挠的影响,本文通过设定60%、65%、70%、75%、80%五级环境湿度,考察不同运营年限内各主跨跨中挠度的敏感性,绘制各主跨不同环境湿度下每十年挠度变化曲线,如图9至图11所示。

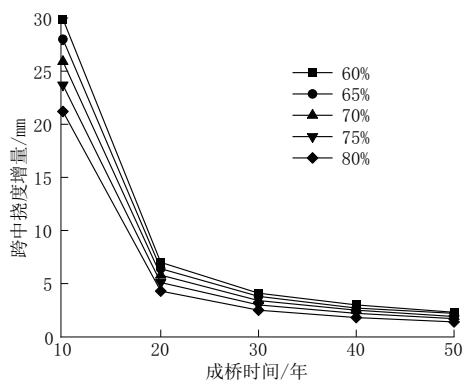


图9 212 m主跨环境湿度对挠度的敏感性分析

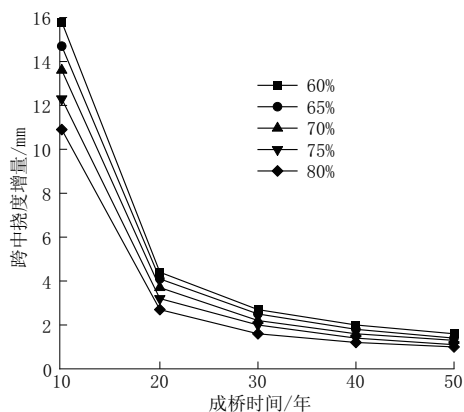


图10 182 m主跨环境湿度对挠度的敏感性分析

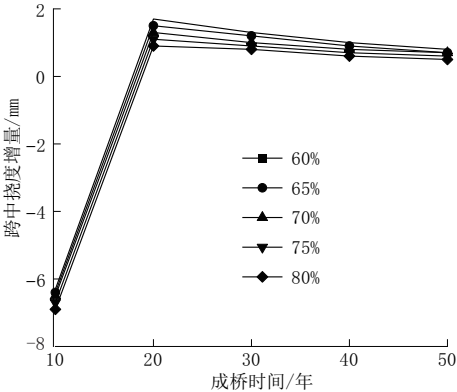


图 11 152 m 主跨环境湿度对挠度的敏感性分析

由图 9 至图 11 可知:各环境湿度下,成桥十年内的挠度变形量最大,后期挠度变形量较小,且有收敛趋势;环境湿度越小,跨中挠度变化越大。

基于以上结论,绘制成桥十年时不同环境湿度下各主跨挠度变化曲线(见图 12)。

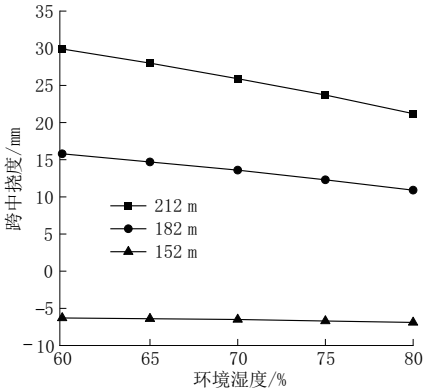


图 12 各主跨环境湿度下对挠度的敏感性分析

由图 12 可知:相同环境湿度下,跨中挠度随主跨跨径的增大而显著增加,这一现象归因于大跨径结构更显著的收缩徐变时随效应,其变化规律符合理论预期;通过分析曲线斜率可知,212 m 主跨的斜率最大,182 m 主跨的斜率次之,152 m 主跨的斜率最小,说明主跨跨径越大,跨中挠度对环境湿度变化越敏感。

3.3 混凝土调平层超重

混凝土调平层虽旨在修正施工线形误差,但过厚的调平层会显著增加二期恒载,从而加剧结构长期下挠风险。

本文通过设定调平层超重 0%~15% 的 4 种工况,系统分析了各主跨跨中挠度对调平层超重的敏感性。其每十年的挠度发展历程如图 13 至图 15 所示。

由图 13 至图 15 可知:各调平层超重水平下,成桥十年内的挠度变形量最大,后期挠度变形量较小,

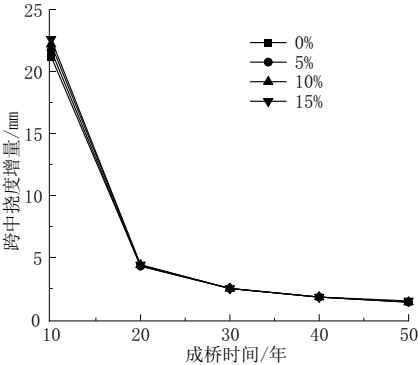


图 13 212 m 主跨调平层超重对挠度的敏感性分析

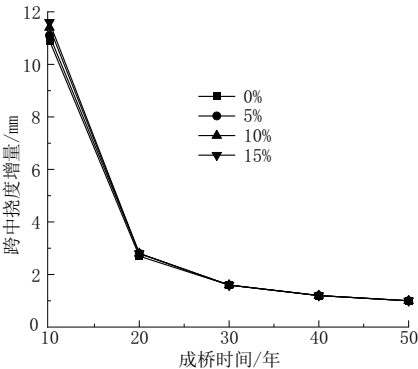


图 14 182 m 主跨调平层超重对挠度的敏感性分析

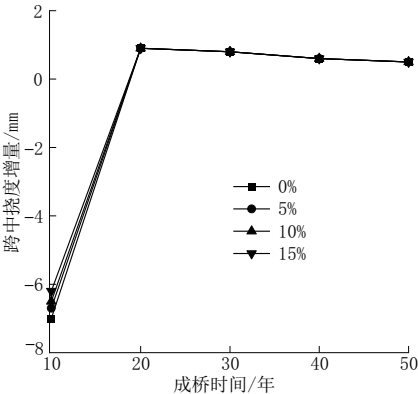


图 15 152 m 主跨调平层超重对挠度的敏感性分析

且有收敛趋势;调平层超重越大,跨中挠度变化越大。

基于以上结论,绘制成桥十年时不同调平层超重工况下各主跨挠度变化曲线(见图 16)。

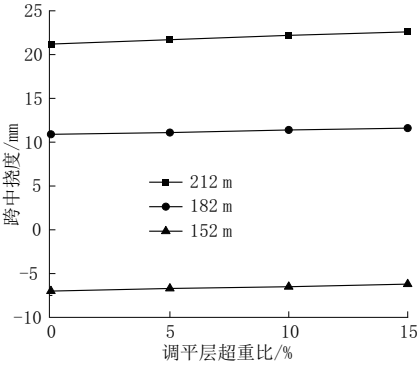


图 16 各主跨调平层超重对挠度的敏感性分析

据图16分析可知:在相同调平层超重条件下,跨中挠度随主跨跨径增大而显著增加,二者与超重水平均呈现明确的正相关关系。这一规律反映了结构刚度降低与恒载增加对下挠变形的协同作用,符合经典力学理论预期。然而,通过对比曲线斜率发现,各跨径的跨中挠度随超重比增加的幅度较为有限,说明主跨挠度对调平层超重变化的敏感程度相对较低。

3.4 底板超方

与调平层超重类似,底板超方通过增加结构恒载对跨中下挠产生显著影响:超方混凝土形成的附加自重会持续作用于主梁,直接增大了控制截面的长期弯矩,从而加剧混凝土徐变效应,导致跨中下挠持续发展。

通过将底板超方等效为自重系数增加(0%~15%)进行建模,本文评估了各主跨跨中下挠对此施工偏差的敏感程度。图17至图19具体呈现了不同工况下挠度随运营年限的发展曲线。

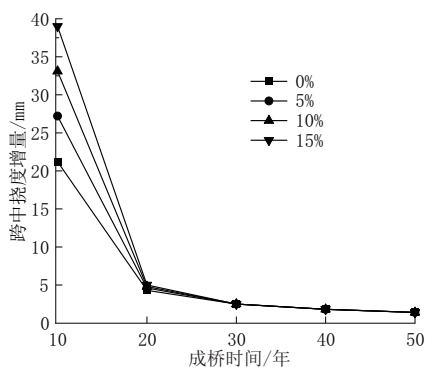


图17 212 m主跨底板超方对挠度的敏感性分析

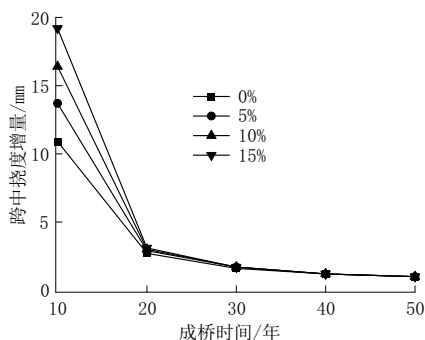


图18 182 m主跨底板超方对挠度的敏感性分析

图17至图19表明:底板超方引发的挠度主要在成桥十年内快速发展,后期渐趋收敛;超方程度越大,跨中挠度的累积值与增长幅度也越显著。

据此,将成桥十年作为关键时间节点,绘制了不同底板超方水平与各主跨挠度值的对应关系(见图20)。

据图分析可以得出以下结论:在相同底板超方

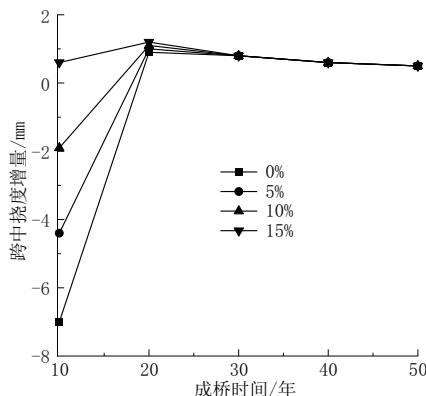


图19 152 m主跨底板超方对挠度的敏感性分析

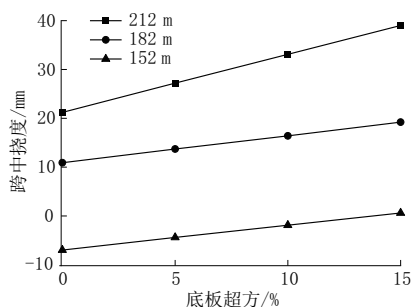


图20 主跨底板超方对挠度的敏感性分析

条件下,跨中挠度随主跨跨径增大呈现显著增长趋势,且两者均与超方水平保持明确的正相关关系。这一变化规律体现了结构刚度降低与恒载增大对下挠变形的耦合作用,与经典力学理论预期相符。进一步分析曲线斜率发现,212 m主跨的跨中挠度随超方比增加的幅度最为显著,表明该主跨挠度对底板超方变化的敏感程度最高。

3.5 影响参数敏感性排序

基于上述参数影响规律,为量化评估预应力损失、环境湿度、调平层超重和底板超方4个参数对连续刚构桥长期下挠的敏感性差异,本文在有限元模型基础上,对各参数分别施加5%、10%、15%三个等级的不利扰动。通过对比不同扰动工况下各主跨跨中挠度的变化幅度,系统分析各参数的敏感性程度,从而识别对长期下挠影响最为显著的关键因素。各扰动工况下跨中挠度变化情况见图21至图23。

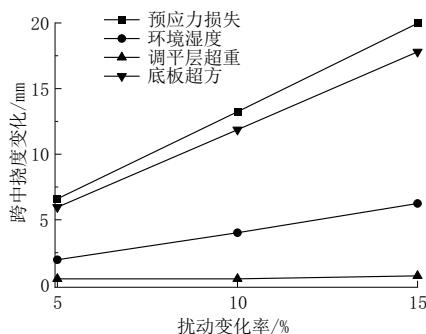


图21 212 m主跨影响参数敏感性分析

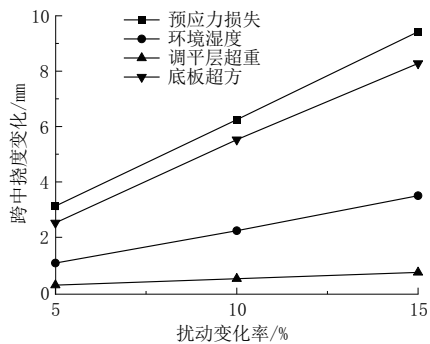


图 22 182 m 主跨影响参数敏感性分析

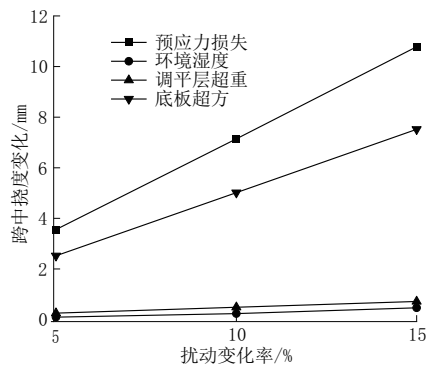


图 23 152 m 主跨影响参数敏感性分析

根据图 21 至图 23 的分析结果可知:在相同扰动变化率条件下,调平层超重引起的挠度变化最小,其余参数对主梁跨中挠度的影响程度依次为预应力损失、底板超方和环境湿度。通过对比各参数曲线的斜率发现,其敏感性顺序为预应力损失>底板超方>环境湿度。综合分析表明,在影响跨中下挠的各项参数中,预应力损失是主导因素,底板超方次之,环境湿度影响相对最小,三者的敏感性排序与上述结论一致。

4 结 语

通过 MIDAS Civil 软件对不等五跨刚构-连续梁桥进行建模分析比较,得出以下结论:

- (1)各参数引发的挠度主要在成桥十年内快速发展,后期渐趋收敛。
- (2)预应力损失越大,跨中下挠越大,且 212 m 主跨下挠随预应力损失变化更敏感。在各类钢束中,顶板束预应力损失是控制结构长期下挠的最关键因素。

- (3)环境湿度越小,跨中挠度变化越大,且跨径越大跨中挠度对环境湿度的敏感性越高,这源于大跨径结构具有更显著的收缩徐变效应。
- (4)在相同调平层超重条件下,跨中挠度虽随跨径增大而增加,但其随超重比的增长幅度有限,表明主跨挠度对该参数的敏感性相对较低。
- (5)底板超方越多,跨中挠度变化越大,且跨中挠度随跨径增大而显著增加。
- (6)在影响跨中下挠的各参数中,预应力损失为主导因素,调平层超重的影响最为微弱,且敏感性排序为预应力损失>底板超方>环境湿度。

参考文献:

[1] 汪金磊.大跨径预应力连续刚构桥施工技术[J].城市道桥与防洪,2018(3):130-132.

[2] 姚洪帅.高墩大跨径连续刚构桥施工关键技术研究[J].交通世界,2016(23):64-65.

[3] 黄熙术.大跨连续刚构桥设计与计算分析[J].科技创新与应用,2025(24):128-131.

[4] 张溪.山区复杂地形下连续刚构桥的优化设计策略[J].运输经理世界,2025(24):93-95.

[5] 马亚腾,秦佳伟,何哲,等.大跨高速铁路连续刚构桥的梁体变形影响分析[J].山西建筑,2025(16):178-181.

[6] 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.

[7] 陈宇峰,徐君兰,余武军.大跨PC连续刚构桥跨中持续下挠成因及预防措施[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2007(4):6-8.

[8] 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.

[9] 杨晋文.连续刚构桥跨中下挠的影响因素分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2015,28(2):17-20.

[10] 张澎,要荆荆.特大跨连续刚构桥下挠成因分析及处治应用[J].公路,2025,70(3):98-103.

[11] 李万根.大跨连续刚构的长期下挠问题分析与预测方法研究[D].西安:长安大学,2016.

[12] 许梁.大跨度预应力混凝土连续刚构桥的长期挠度分析[D].广州:华南理工大学,2016.

[13] 何天涛.大跨径预应力混凝土梁桥挠度研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.

[14] 刘欢.大跨连续梁长期下挠影响因素分析[J].国防交通工程与技术,20221(5):34-37.

[15] 白宗峰,王丽龙,刘慧娟,等.桥梁工程预应力损失控制策略研究[J].现代工程科技,2025(6):33-36.