

# 连续刚构桥体外预应力加固适用性研究

柯亮亮<sup>1</sup>, 苗建宝<sup>1</sup>, 戴杰<sup>2</sup>

(1. 西安公路研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 长安大学, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 通过对预应力混凝土连续刚构病害调研、现状评估和有限元模拟分析研究, 得出体外预应力加固连续刚构的适用条件及合理时机, 提出了研究连续刚构桥体外预应力加固适用性条件, 并通过实际工程案例对所提结论进行了验证, 可为此类桥梁的体外预应力加固设计、施工和运营管理提供技术支持。

**关键词:** 连续刚构桥; 体外预应力加固; 适用性研究

中图分类号: U445.72

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0125-07

## Applicability of External Prestressed Reinforcement of Continuous Rigid Frame Bridge

KE Liangliang<sup>1</sup>, MIAO Jianbao<sup>1</sup>, DAI Jie<sup>2</sup>

(1. Xi'an Highway Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** By conducting research on the diseases of prestressed concrete continuous rigid frames, evaluating the current situation, and conducting finite element simulation analysis, the applicable conditions and reasonable timing for external prestressed reinforcement of continuous rigid frames were obtained. The applicability conditions for external prestressed reinforcement of continuous rigid frame bridges were proposed, and the conclusions were verified through actual engineering cases. This can provide technical support for the design, construction, and operation management of external prestressed reinforcement of such bridges.

**Keywords:** continuous rigid frame bridge; external prestressing reinforcement; applicability research

近年来,我国桥梁建设发展较快,连续刚构桥因其跨越能力强、受力性能好、行车舒适等优点,在大跨径预应力混凝土桥梁中应用广泛。但随着交通量不断增大,重型车辆增加,超载现象严重,加上原有桥梁重建轻养的思想,许多连续刚构桥在运营阶段出现了较多病害,主要表现为跨中下挠<sup>[1-2]</sup>和主梁开裂,严重影响桥梁安全,如加拿大的格朗梅尔桥,于1979年建成,全长258 m,在通车7年后跨中下挠达到300 mm;瑞典的Massongex高架桥在建成8年后跨中挠度达113 mm,且出现了大量的梁体裂缝;湖北省黄石长江大桥在建成通车7年后,其主跨发生了较大的跨中下挠现象,同时梁体开裂情况也较

为严重。综上所述,此类桥梁如若不采取相应的加固措施,会严重影响桥梁运行安全。因此,开展连续刚构桥体外预应力加固适用性研究具有重要意义。

国内方面,卫星等<sup>[3]</sup>通过对施工过程中腹板开裂的问题进行探讨,结合模型分析与试验检测分析了腹板开裂的原因及其规律;马振栋等<sup>[4]</sup>通过分析预应力混凝土连续刚构桥过度下挠及其危害,提出了同类桥梁有效控制过度下挠的技术措施及避免过度下挠的建议;曹自俊等<sup>[5]</sup>通过有限元模型,从荷载、预应力损失等方面进行分析,分析了连续刚构桥顶、底板及腹板大量开裂的主要原因,提出了对应的有效加固方案;王强<sup>[6]</sup>利用已有的混凝土和钢材的

本构模型及泊松比,通过具体算例从截面刚度的变化方面研究了其对跨中下挠的影响,提出了钢管混凝土劲性骨架合拢设计方案,有效减小了跨中挠度;张阳等<sup>[7]</sup>通过研究得出了布置体外预应力束能改善刚构桥跨中下挠及跨中截面抗裂的效果。

国外方面,Dischinger 认识到了混凝土应变随时间变化的粘弹性效应(混凝土收缩徐变)会导致有效预应力的慢慢丧失,但由于当时没有可靠的理论去计算这种效应,因此他选择再次张拉以补偿混凝土收缩徐变导致预应力损失<sup>[8-9]</sup>,设计了世界上第一座体外预应力混凝土桥,该桥通过 1962 年和 1983 年的两次维修,并重新张拉预应力筋,使用至今<sup>[8-9]</sup>,Bilal El-Ariss 和 Chen Shiming 等<sup>[10-11]</sup>综合考虑各因素,通过与实验结果大范围比较,提出了符合实际情况的计算假定,建立较为完善和成熟的极限应力公式。

目前国内外的研究主要集中于对既有桥梁下挠的原因分析及加固设计方案方案。本文主要从连续刚构的最大主拉应力、长期挠度、长期挠度耦合关系三个方面对连续刚构采用体外预应力加固的适用性进行研究。

# 1 体外预应力适用性预期目标及加固时机的确定

## 1.1 体外预应力适用性加固目标的确定

连续刚构桥在运营阶段,受行车荷载的反复作用,其主梁挠度与主拉应力形成相互影响的恶性循环过程。在桥梁检测过程中,主梁的挠度值可实测得出,而主拉应力无实测值,只能通过主拉应力是否超过混凝土的抗拉强度值判断混凝土是否开裂,因此可以采用挠度、应力拟合方法,建立与桥梁结构现状相符的结构损伤模型。由于处在弹性工作阶段的桥梁,从结构的整体效应出发,认为结构的局部预应力损失、结构几何尺寸误差、混凝土弹性模量、收缩徐变系数、重度等变化都将导致材料应变,最终反映在结构的整体变形,结构整体变形是各种变形的累积<sup>[12-14]</sup>。因此,体外预应力加固连续刚构合理预期目标定义为结构跨中最大挠度。

## 1.2 体外预应力适用性加固时机的确定

综合对 14 座国内外预应力加固连续刚构进行调查,获取了桥梁的实际加固时机及效果情况<sup>[12]</sup>,如表 1 所示。

表 1 国内外连续刚构桥体外预应力加固时机及效果统计表<sup>[12]</sup>

	桥名	桥型	国家	主跨跨径 L/m	加固时下 挠量 D/mm	加固时机 D/L	加固效果
国外 桥梁 调研 资料	Stolma	连续刚构	挪威	301.0	92	1/3272	显著
	Stovset	连续刚构	挪威	220.0	200	1/1100	显著
	Parrotts	连续刚构	美国	195.0	635	1/307	不显著
	Lutrive	连续刚构	瑞士	131.5	160	1/822	不显著
	Fegire	连续刚构	瑞士	107.0	120	1/892	显著
	Norrdalsfjord	连续刚构	挪威	230.0	170	1/1353	显著
	Koror - Babeldaob	连续刚构	帕劳	241.0	1200	1/201	不显著
	Puttesund	连续刚构	挪威	138.0	450	1/307	不显著
	Kingstone	连续刚构	英国	143.3	300	1/478	不显著
国内 桥梁 调研 资料	湖北黄石长江大桥	连续刚构	中国	245.0	305	1/803	显著
	重庆江津长江大桥	连续刚构	中国	240.0	317	1/757	不显著
	广东虎门大桥辅航道桥	连续刚构	中国	270.0	207	1/1304	不显著
	河南三门峡黄河公路大桥	连续刚构	中国	140.0	220	1/636	不显著
	广东南海金沙大桥	连续刚构	中国	120.0	220	1/545	不显著

根据表 1 可知,体外预应力加固连续刚构加固时机的选择对于加固效果影响显著,加固时机选择越晚(挠度/跨径越大),加固效果越差。国内外相关桥梁体外预应力加固时机的选择( $D/L$ )介于

0.0003~0.0050 之间,当加固时机在 0.0010 以下时,加固效果显著,考虑样本数量有限且同时兼顾安全考虑,本文初步拟定加固时机为 0.0008(1/1200)以下时,采取体外预应力加固连续刚构效果较明显。

## 2 工程简介及仿真建模

### 2.1 工程简介

实桥工程为某四跨预应力混凝土连续刚构桥。主桥跨径组合为(60+2×100+60)m,主桥箱梁采用单箱单室截面,40号混凝土,标准轴心抗压强度28MPa,标准轴心抗拉强度2.6MPa;箱梁顶板宽11m,底板宽6m,翼缘板悬臂长2.5m,支点截面梁高5m,跨中截面梁高2.2m,梁高及底板厚度按二次抛物线变化;顶板厚20cm,底板厚由跨中22cm增至根部50cm,腹板厚30cm,在根部梁段由30cm增至50cm;梁体设纵向及竖向预应力,顶、底板均采用 $\Phi_15-12$ 钢绞线,准强度 $R_{yb}=1500$ MPa;竖向预应力筋采用 $\Phi 32$ 高强精轧螺纹钢筋,标准强度 $R_{yb}=750$ MPa;引桥上部结构为25m装配式预应力混凝土筒支箱梁;主桥下部结构为双薄壁空心墩,中墩为明挖扩大基础,两边墩为嵌岩桩基础,引桥下部结构为组合式台、双柱式桥墩、摩擦桩基础。

### 2.2 仿真建模

为了探究连续刚构桥适用性分析,根据圣维南原理,采用midas有限元数值模拟分析<sup>[15]</sup>软件建立了梁单元整体模型,全桥共318个单元,323个节点,如图1所示。为了分析桥梁的局部主拉应力,采用Ansys有限元分析软件建立尽量远离边界区域的局部模型进行分析,其中混凝土采用Solid65实体单元模拟,预应力钢绞线采用LINK8三维杆单元模拟,二者通过节点耦合法连接;边界条件从整体模型中提取,选取对应位置的等效荷载加到局部模型中,预应力荷载采用降温法施加,其局部空间有限元模型如图2所示,局部竖向和纵向预应力钢束如图3、图4所示。

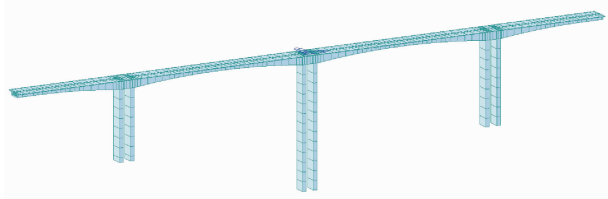


图1 桥梁整体模型仿真示意图

## 3 体外预应力适用性分析

### 3.1 主拉应力分析

#### 3.1.1 体内预应力损失的影响

在不同初始累积挠度情况下,分别考虑0、2%、5%、10%、20%、30%的体内预应力损失,计算在上

述各工况下体外预应力加固前后主梁最大主拉应力,计算结果见表2,以有效预应力损失系数为自变量,将加固前后主梁最大主拉应力数值绘制成点线,如图3所示。

表2 体外预应力加固前后最大主拉应力  
(考虑体内预应力损失)

初始累积 挠度 /mm	预应力 损失程度	最大主拉 应力(加固前) /MPa	最大主拉 应力(加固后) /MPa
0	1.00 $\sigma_{pe}$	0.11	0.14
	0.98 $\sigma_{pe}$	0.12	0.15
	0.95 $\sigma_{pe}$	0.13	0.17
	0.90 $\sigma_{pe}$	0.15	0.19
	0.80 $\sigma_{pe}$	0.48	0.22
	0.70 $\sigma_{pe}$	1.17	0.67
100	1.00 $\sigma_{pe}$	0.15	0.18
	0.98 $\sigma_{pe}$	0.16	0.19
	0.95 $\sigma_{pe}$	0.18	0.21
	0.90 $\sigma_{pe}$	0.21	0.23
	0.80 $\sigma_{pe}$	0.70	0.28
	0.70 $\sigma_{pe}$	1.32	0.76
150	1.00 $\sigma_{pe}$	1.19	0.68
	0.98 $\sigma_{pe}$	1.27	0.75
	0.95 $\sigma_{pe}$	1.44	0.89
	0.90 $\sigma_{pe}$	1.81	1.19
	0.80 $\sigma_{pe}$	2.40	1.71
	0.70 $\sigma_{pe}$	3.21	2.39
250	1.00 $\sigma_{pe}$	1.66	1.08
	0.98 $\sigma_{pe}$	1.75	1.16
	0.95 $\sigma_{pe}$	1.94	1.32
	0.90 $\sigma_{pe}$	2.24	1.58
	0.80 $\sigma_{pe}$	2.97	2.23
	0.70 $\sigma_{pe}$	3.85	2.93
400	1.00 $\sigma_{pe}$	2.38	1.68
	0.98 $\sigma_{pe}$	2.42	1.77
	0.95 $\sigma_{pe}$	2.65	1.95
	0.90 $\sigma_{pe}$	2.97	2.24
	0.80 $\sigma_{pe}$	3.81	2.91
	0.70 $\sigma_{pe}$	4.73	3.83

结果表明:当结构未出现下挠时,混凝土中的预压力仍有留存,此阶段采用体外预应力加固后会小幅增大结构最大主拉应力,但在结构后续运营过程中体内预应力损失会增大,当体内预应力损失超过10%后,体外预应力加固作用将逐渐发挥,能够大幅降低主梁最大主拉应力;当结构累积挠度为100

mm,体内预应力已有部分损失,当此项损失达到20%时,体外预应力将开始充分发挥作用;当结构累积挠度150 mm时,体内预应力损失较大,此阶段采用体外预应力加固后,主拉应力随即显著降低,加固后应力曲线斜率与未加固相比,略有降低;当结构累积挠度250 mm时,采取体外预应力加固后仅能保证后续体内预应力损失较小时的结构安全,但加固后应力曲线斜率与未加固相比仍有所降低;当结构累积挠度400 mm时,体外预应力虽然可以降低结构最大主拉应力,但降低效果仍不能保证结构安全,且加固后的桥梁在后续体内预应力持续损失时主拉应力曲线斜率明显增长,与加固前相近。

### 3.1.2 活载放大系数的影响

在不同初始累积挠度情况下,活载放大系数分别考虑1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0时,以活载放大系数为自变量,将加固前后主梁最大主拉应力数值绘制成点线图,如图4所示。

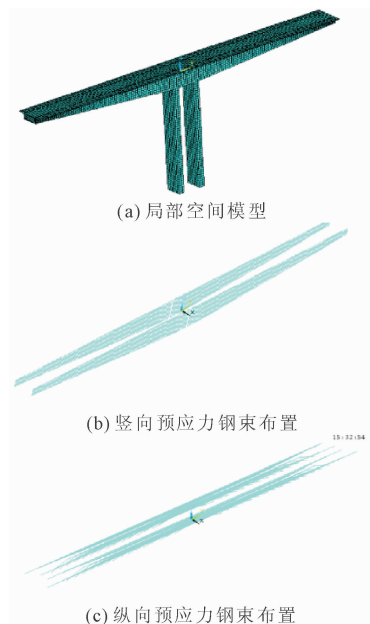


图2 局部模型仿真示意图

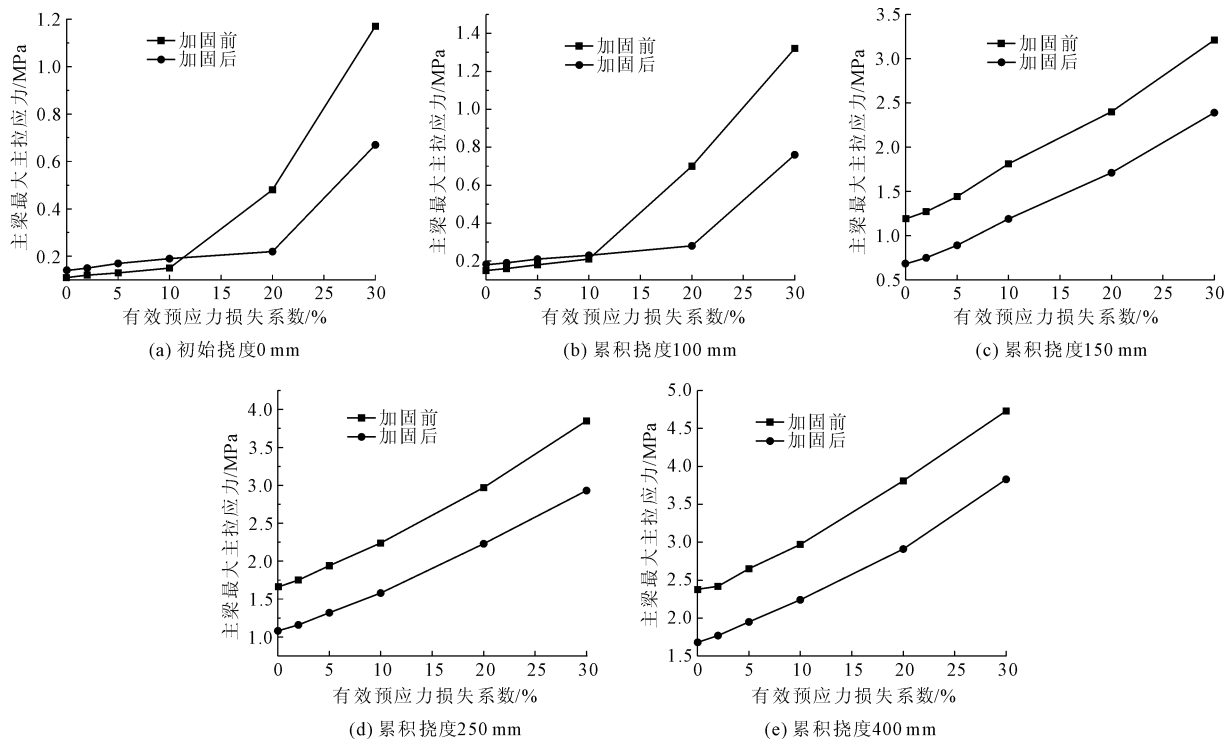


图3 不同挠度下主拉应力与预应力损失关系曲线

由图4可知:当结构初始挠度为0时,采用体外预应力加固后,会小幅减小结构最大主拉应力,此时随着活载的不断加,加固效果不明显;当结构累积挠度100 mm时,采用体外预应力加固可显著降低结构最大主拉应力,随着活载的不断加,加固效果开始显现;当结构累积挠度150 mm时,采用体外预应力加固可大幅降低结构最大主拉应力,加固前后

主拉应力差值进一步扩大,且随着活载的不断加,加固效果有逐渐显现;当结构累积挠度250 mm时,采用体外预应力加固可大幅降低结构最大主拉应力,且加固前后主拉应力差值进一步扩大,且随着活载的不断加,加固效果达到最佳;当结构累积挠度400 mm时,采用体外预应力加固可大幅降低结构最大主拉应力,且加固前后主拉应力差值进一步扩大,

加固效果随活载增长略有提升。

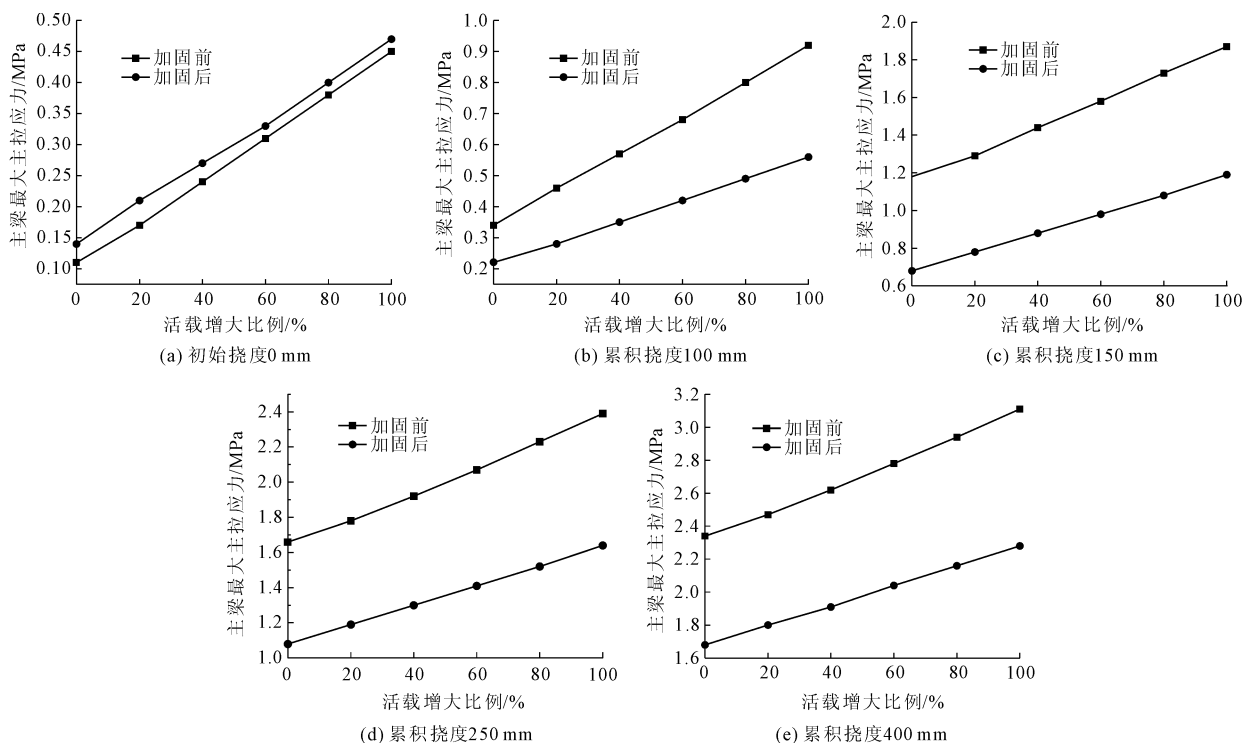


图4 不同挠度下主拉应力与活载放大系数关系曲线

## 3.2 长期挠度分析

### 3.2.1 体内预应力损失的影响

在不同初始累积挠度情况下,分别考虑0%、2%、5%、10%、20%、30%的体内预应力损失,计算在各初始累积挠度工况下体外预应力加固前后主梁最大挠度累积量,计算结果见图5所示。

由图5可知,当结构未出现明显下挠时(初始挠度0 mm),采用体外预应力加固可有效减小结构下挠,当结构下挠较小时(累积挠度100 mm),采用体外预应力加固后的挠度显著降低,但随着预应力损失的增加,加固前后的挠度差值不断缩小。当结构发生明显下挠时(累积挠度150 mm),采用体外预应力加固后的挠度明显降低,且随着后期体内预应力损失的增加,加固前后的挠度差值保持不变,加固措施的效果较好。当结构下挠量很大时(累积挠度250 mm~400 mm),采用体外预应力加固后的结构挠度明显降低,且随着后期体内预应力损失的增加,加固前后的挠度差值呈现缓慢增加的趋势,加固效果明显,但不足以保证结构安全。

### 3.2.2 活载放大系数影响分析

在不同初始累积挠度情况下,分别考虑1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0的活载放大系数,计算在上述各工况下体外预应力加固前后主梁最大挠度累积

量。

当结构未出现明显下挠时(初始挠度0 mm),采用体外预应力加固可显著降低结构最大挠度,但在活载放大系数小于1.6时,加固后的挠度曲线斜率较小,加固效果较弱。当结构开始明显下挠时(累积挠度100 mm),采用体外预应力加固可显著降低结构最大挠度,但在活荷载系数小于1.4时,加固后的挠度曲线斜率较小,加固效果较弱。当结构发生较大下挠时(累积挠度150 mm),采用体外预应力加固可显著降低结构最大挠度,但在活荷载系数小于1.2时,加固后的挠度曲线斜率较小,加固效果偏弱。当结构开始显著下挠时(累积挠度250 mm),采用体外预应力加固可显著降低结构最大挠度,曲线线形与累积挠度150 mm时相近。当结构发生严重下挠时(累积挠度400 mm),采用体外预应力加固可显著降低结构最大弹性挠度,曲线线形与累积挠度250 mm时相近。

## 3.3 最大主拉应力与长期挠度耦合关系

本文利用结构应力/挠度随预应力损失与活载大小的变化关系,可以得到体外预应力加固前后最大挠度与最大主拉应力耦合关系,绘制的散点图见图6所示,结果表明体内预应力损失对结构的影响(应力、挠度)离散性较大,相比活载放大系数更加

复杂,两种因素作用下结构最大主拉应力与最大挠度近似正相关,且应力增幅要大于挠度增幅。以最大主拉应力为 1.2 MPa 作为界限,可以得出考虑结

构最大挠度工况下体外预应力加固连续刚构的合理时机为弹性挠度 47 mm(累积挠度 81 mm),且体内预应力损失小于 10%。

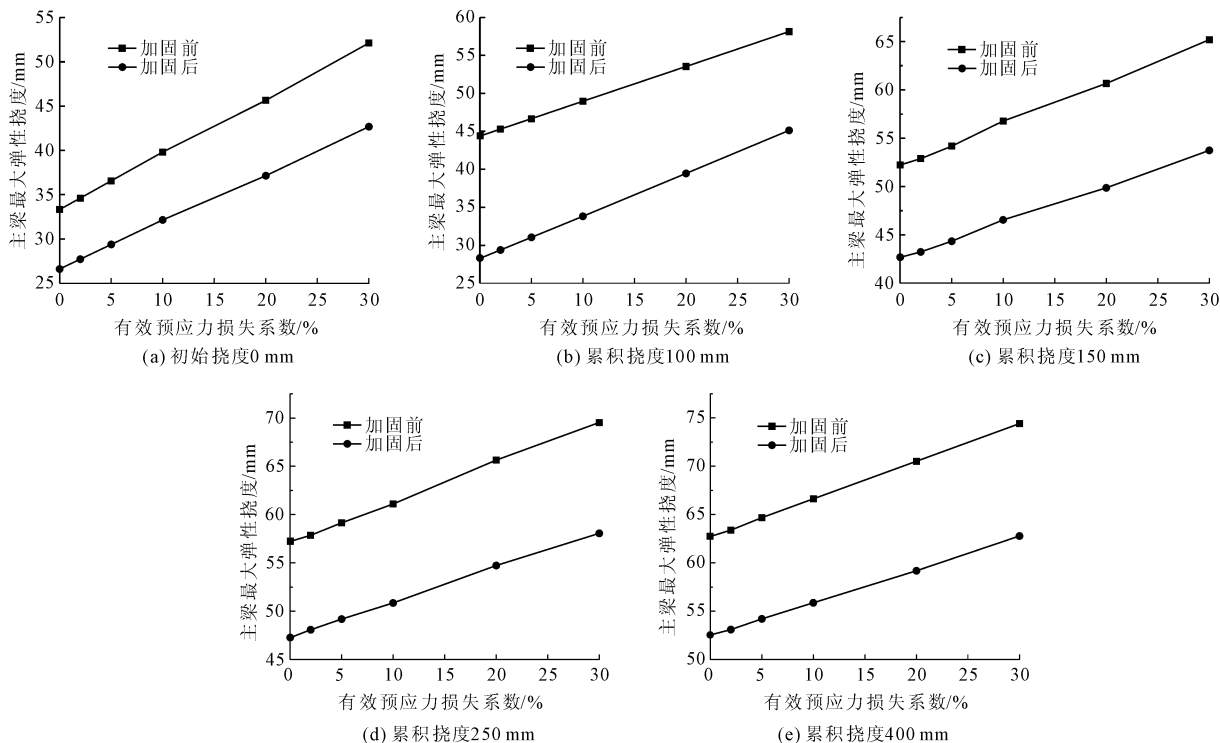


图 5 不同挠度下主拉应力与活载放大系数关系曲线

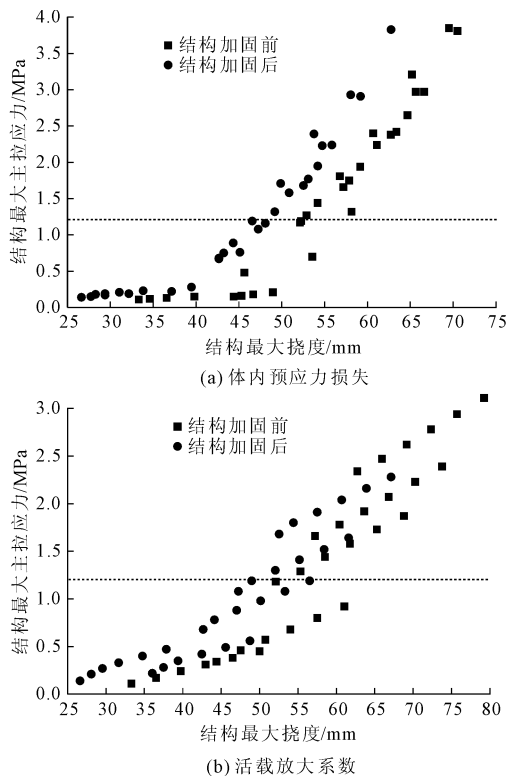


图 6 体外预应力加固前后挠度与主拉应力耦合关系

### 3.4 合理加固时机

综上所述,可以得出体内预应力损失对混凝土连续刚构主梁最大主拉应力与最大挠度的影响比活载放大系数更为显著,因此,体外预应力加固连续刚构合理加固时机的确定主要考虑体内预应力损失的影响。

体内预应力损失对体外预应力加固连续刚构前后最大主拉应力影响较大,当结构初始挠度不大时(累积挠度为 0 mm~100 mm),体外预应力加固效果不足以充分发挥,但可以有效应对持续增加的体内预应力损失;当结构累积挠度过大时(累积挠度为 250 mm~400 mm),采取体外预应力加固虽能降低结构最大主拉应力,但此时结构安全储备较小,且最大主拉应力变化曲线斜率降低不明显。综上,考虑结构最大主拉应力发展变化趋势,本案例工程体外预应力加固的合理时机为主梁跨中弹性挠度为 52 mm(累积挠度 128 mm),且体内预应力损失小于 10%。

体内预应力损失对体外预应力加固连续刚构前后最大挠度的影响较大,当结构初始挠度不大时(0 mm~100 mm),采用体外预应力加固后的挠度显著

降低,且在体内预应力损失控制在一定范围的情况下,加固前后的挠度差值较大,说明加固效果较好。当结构发生明显下挠时(150 mm~400 mm),采用体外预应力加固后的挠度明显降低,但加固前后的挠度差值较小,加固效果一般,且随着后期体内预应力损失的增加,不足以保证结构安全。综上,考虑结构最大主拉应力发展变化趋势,本案例工程体外预应力的合理时机为主梁跨中弹性挠度为44 mm(累积挠度72 mm),且体内预应力损失小于10%。

案例工程体外预应力加固合理时机可偏于安全建议为主梁跨中弹性挠度为44 mm(累积挠度72 mm),且体内预应力损失小于10%。因此,累积挠度 $72\text{ mm} < L/1200 = 83\text{ mm}$ ,从理论角度验证了本节所提体外预应力加固连续刚构合理加固时机的正确性。

## 4 结 论

(1) 通过对预应力混凝土连续刚构病害调研及现状评估,明确了引起混凝土连续刚构适用性预期目标及加固时机计算方法,明确影响连续刚构病害发展程度的主要参数。

(2) 通过分析不同体外预应力损失和活载放大系数对连续刚构桥主拉应力、长期挠度控制指标的影响,结果表明:体内预应力损失对混凝土连续刚构主梁最大主拉应力与最大挠度的影响比活载放大系数更为显著,因此体外预应力加固连续刚构合理加固时机的确定主要考虑体内预应力损失的影响。

(3) 通过最大主拉应力和长期挠度间的耦合关系,验证了合理加固时机方法的正确性,相关研究成果可为此类桥梁的体外预应力加固设计、施工和运营管理提供技术支持。

### 参考文献:

[1] 刘婷婷. 大跨径连续刚构桥跨中下挠因素分析及体外

预应力加固措施研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.

- [2] 曾 勇,等. 波形钢腹板刚构桥和普通PC刚构桥跨中下挠对比分析[J]. 公路工程,2020,45(4):1-12,35.
- [3] 卫 星,赵骏铭,肖 林,等. 连续刚构桥施工过程中腹板裂缝检测与研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(7):38-43.
- [4] 马振栋,刘安双. 控制大跨连续刚构桥梁过度下挠的技术措施[J]. 桥梁建设,2015,45(2):71-76.
- [5] 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.
- [6] 王 强,提高大跨径PC梁抗下挠能力技术措施研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [7] 张 阳,肖晓灿,刘 榕,等. 大跨PC梁桥张拉临时体外束降低后期徐变下挠分析[J]. 公路工程,2018,43(2):139-144.
- [8] 盛丽娟. T型刚构桥的体外预应力加固技术研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2006.
- [9] 熊学玉. 体外预应力结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [10] Bilal El-Ariss. Stiffness of reinforced concrete beams with external tendons [J]. Engineering Structures, 2004,26(14):2047-2051.
- [11] Chen Shiming. Experimental Study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments[J]. Journal of Constructional Steel Research,2005,61(12):1613-1630.
- [12] 宋文锋,连续刚构桥体外预应力加固技术应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.
- [13] 张 浩. 刚架拱桥病害分析及体外预应力加固探索[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [14] 白 嵩. 桁式组合拱桥病害分析及体外预应力加固技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2010.
- [15] 马运朝,胡 隽,陈昭旭. 预应力混凝土连续梁桥有限元数值模拟及设计探讨[J]. 公路工程,2018,43(5):94-98.