

大跨度混凝土连续梁桥长期下挠加固方案研究

刘鲜庆¹, 周晓宇¹, 贾晓明²

[1.上海市城市建设研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125; 2.靖边县市政设施管护中心, 陕西 靖边 718500]

摘 要: 针对某城市主跨为 129 m 的预应力混凝土连续梁桥运营 7 a 以来中跨不断下挠情况, 在不中断交通的条件下, 从箱室内加体外预应力、外加结构角度出发, 分析不同加固方案对挠度控制的有效性及其对原结构的影响, 以期加固已下挠的连续梁、防止其继续下挠提供一种有效的加固方案。

关键词: 连续梁桥; 长期下挠; 挠度控制措施

中图分类号: U448.35

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)06-0126-04

0 引言

预应力混凝土连续梁桥结构刚度大, 变形小, 行车平顺, 经济性好, 在我国始建于 20 世纪 60 年代。20 世纪末开始, 大跨径混凝土连续梁桥在我国公路、城市建设中得到大量运用。近年来, 大跨度连续梁桥的病害逐渐暴露出来, 其中跨的长期下挠是比较典型的病害之一。

大跨度预应力混凝土桥梁经过 5~10 a 的运营, 由徐变引起的下挠一般趋于稳定。但若建成后桥梁跨中下挠长期增长, 使其长期挠度远大于设计计算的预计值, 将影响行车舒适性及安全性, 且持续下挠会伴随混凝土开裂, 降低结构刚度, 从而加速下挠^[1]。

1 工程概况

某城市轨道交通桥梁采用预应力混凝土连续梁桥, 跨径布置为 75.5 m+129.0 m+75.5 m, 与高速公路斜交约 46°。桥梁上部结构纵向采用变高度: 中支点梁高 8.0 m、边支点梁高 4.0 m、跨中梁高 4.0 m, 梁底按 1.8 次抛物线线型变化。箱梁采用单箱单室直腹板形式, 箱梁顶宽 9.5 m, 底宽 5.4 m, 悬臂板长度 2.05 m。

桥梁上部结构采用转体施工工法, 中支点上长 127 m 箱梁沿桥下高速采用满堂支架施工; 拆除支架后, 悬臂端下挠约 90 mm, 与设计不符, 转体合拢后在墩顶加索, 上抬约 32 mm。

2 监测情况及下挠原因分析

成桥后对桥梁道床标高情况进行观测记录, 图 1 为桥梁中跨跨中挠度曲线。由图 1 可见, 桥梁中跨跨中挠度总体呈现逐年增大趋势。根据检测单位数据, 桥梁中跨下挠最大为 2020 年 12 月, 数值为 66 mm, 远大于最初的设计值, 但未观测到裂缝。



图 1 成桥后中跨跨中挠度变化

根据施工过程以及后续运营各阶段的情况, 从预应力损失和混凝土的收缩徐变特性上进行参数化的模拟计算分析。通过调整 T 构状态下的预应力损失及混凝土的收缩徐变系数, 模拟与实测值吻合的成桥后中跨跨中挠度曲线, 并预测 20 a 后该挠度将达到约 80 mm, 如图 2 所示。

此外, 支座摩阻力使桥梁中跨跨中挠度随温度起伏而变化的数值约为 5 mm; 在运营 5 a 后, 支座摩阻力增大, 使桥梁中跨跨中挠度在冬夏季的变化达 10 mm。

2019 年 8 月对该桥梁进行了静载试验。在 2 列列车加载的静载工况下, 控制截面实测挠度和应变均小于理论计算值; 实测挠度校验系数为 0.72, 应变校验系数为 0.32~0.82, 相对残余均小于 20%。说明在

收稿日期: 2020-12-27

作者简介: 刘鲜庆(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。



图2 桥梁中跨跨中挠度计算与实测的拟合曲线

整个加载过程中,结构均处于弹性工作阶段,各控制截面在试验荷载作用下受力正常。试验前后及过程中分别对支座、箱梁以及墩柱等构件进行了外观跟踪检查,均未监测到有裂缝出现或开展。

模拟计算数据及静载试验数据表明,该桥梁结构目前是安全的,中跨下挠主要由徐变引起。施工过程中T构状态下预应力不足,造成过大的初始挠度;采用的混凝土收缩徐变系数较大,在使用过程中使挠度迅速发展,而支座摩阻力增大又使挠度随温度起伏的变化幅度增加^[2]。

为控制桥梁中跨跨中挠度继续增大,将对原结构实施加固方案。

3 体外预应力加固方案

如图3所示,在箱室内设置体外预应力钢束,利用中跨跨中隔板为转向块,两侧锚固在中墩横梁处。钢束规格为19- ϕ 15.2,共8束,张拉控制应力取 $0.65 f_{pk}$ (f_{pk} 为预应力钢绞线抗拉强度标准值),张拉力合计约2 500 t。对中墩横梁进行局部加强,张拉侧加厚1 m,背侧加厚0.4 m,锚固侧箱室内顶板腹板均用钢板加强,如图4所示。

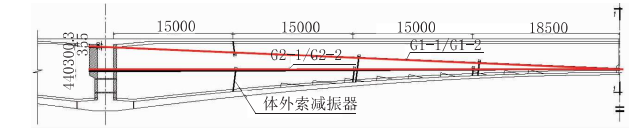


图3 体外预应力加固立面示意(单位:mm)

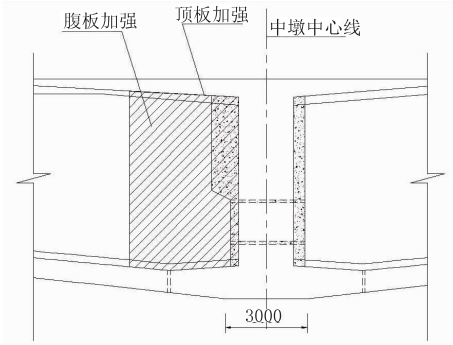


图4 中支横梁加强示意(单位:mm)

图5为仅在体外索荷载作用下的结构应力图。由图5可见:梁截面上缘受压,跨中压应力为-1.0 MPa,中支点压应力为-1.4 MPa;梁截面下缘跨中受压,产

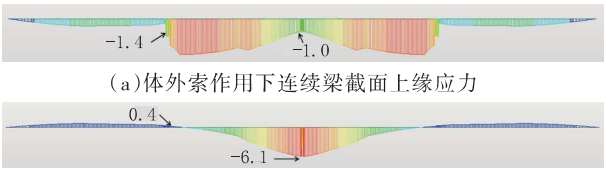


图5 体外索作用下结构应力图(单位:MPa)

生的压应力为-6.1 MPa,中支点下缘受拉,拉应力为0.4 MPa,能够较好地改善结构的受力情况。

图6为在体外索荷载作用下,中跨跨中挠度随时间的变化曲线。由图6可见:中跨跨中发生向上的瞬时位移,约为26 mm;经过20 a长期发展后,与未实施加固相比,中跨跨中挠度改善可达32 mm,较好地改善了原结构的挠度。

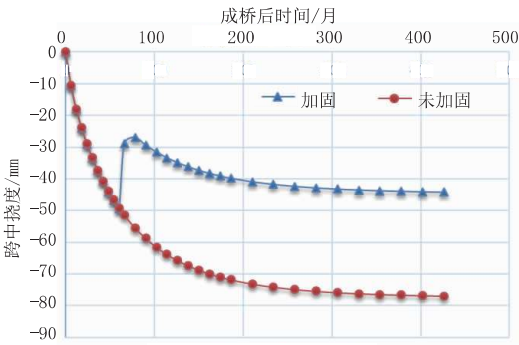


图6 体外索作用下中跨跨中挠度变化趋势

由于张拉力较大,采用局部实体模型分析体外索张拉力作用下的中横梁局部应力状态。

建立中支点位置长12 m梁段实体模型,如图7所示。约束支点位置单元节点平动自由度近似节段梁边界条件,两端断面位置内力边界通过Midas杆系模型提取施加。

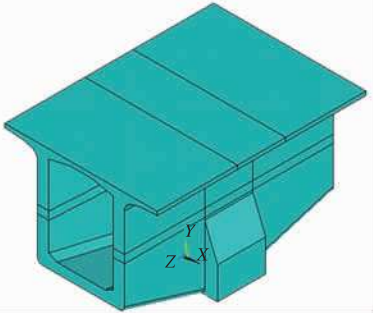


图7 中支点实体模型

中横梁张拉侧主要受压,图8为张拉力与两端实际内力状态组合作用下的中横梁张拉侧应力云图(显示截面以混凝土受拉为正)。由图8可见,在体外索张拉力和梁体实际内力组合下,横隔板张拉侧受压,横桥向应力最大压应力为5.0 MPa,大部分区域压应力约为2.0 MPa,竖向最大压应力约为4 MPa,

在张拉点附近取得;竖向局部区域受拉,平均应力约为 0.5 MPa,深度约为 0.4 m,受拉区钢筋为 $\phi 16@100$,设 2 层,钢筋应力为 55 MPa。

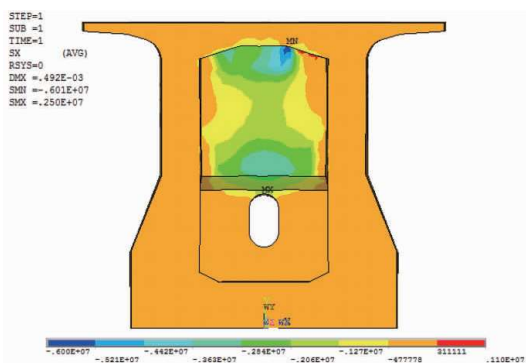


图 8 中横梁张拉侧应力云图(单位:MPa)

中横梁张拉背侧主要受横向拉力。图 9 为中横梁张拉力和梁段端部实际内力边界条件下,张拉背侧横桥向应力云图。由图 9 可见,中横梁张拉背侧整体受拉,最大拉应力约为 2.0 MPa,深度约为 0.4 m,大部分范围拉应力为 0.8~1.0 MPa;背侧钢筋直径为 16 mm,间距 100 mm,最大钢筋应力为 99 MPa。

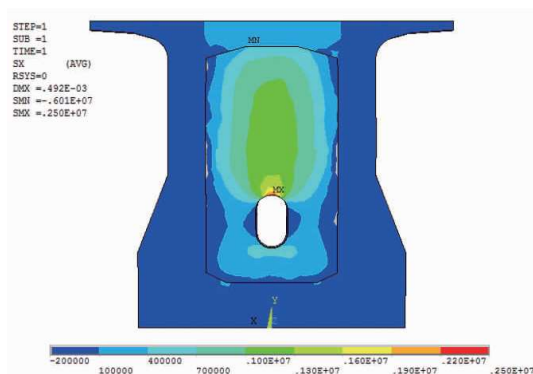


图 9 中横梁张拉背侧应力云图(单位:MPa)

图 10 为中横梁张拉侧顶板、腹板顺桥向应力云图。由图 10 可见,在张拉力作用下,中横梁与顶板连接位置存在约 1.5 m(横桥向)×0.4 m(顺桥向)的拉应力区,拉应力深度约为 50~300 mm,拉应力水平约为 1.8~3.6 MPa;采用厚 5 mm Q345B 钢板加强,顺桥向加强长度为 4 m,钢板应力约为 162 MPa。对于腹板,在张拉力作用下,中横梁与腹板连接位置存在约 4 m(竖向)×1.0 m(顺桥向)的拉应力区,拉应力深度约为 400 mm,拉应力水平约为 0.8~2.0 MPa;腹板全高采用粘贴厚 5 mm Q345B 钢板加强,顺桥向加强长度为 4 m,钢板应力约为 112 MPa。

根据计算结果,该方案能瞬时减小中跨跨中挠度约 26 mm。发展 20 a 后,与未加固比较,该挠度减小约 32 mm;加固的张拉力对原结构中横梁处顶板、腹板将产生一定不利影响,采取外贴钢板加固的方

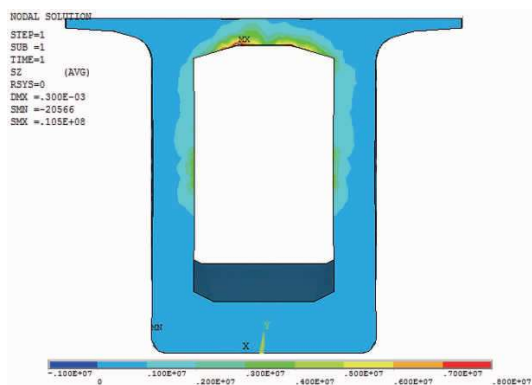


图 10 中横梁张拉侧顶板、腹板顺桥向应力云图(单位:MPa)
式,可将不利影响控制在规范允许范围内。

4 外结构加固

从实际工程经验来看,体外索加固的效果往往并不理想^[3]。因此提出新建外结构的加固方案,并与箱室内体外索方案进行比较。

本工程中,加固的主要目的是控制中跨跨中的继续下挠,因此考虑在跨中施加一个弹性约束,来达到这一效果。

图 11 为在中跨跨中施加竖向向上的荷载(1 000 kN、1 500 kN、2 000 kN)后,跨中挠度的变化情况。由图 11 可知:在 1 000 kN 竖向力作用下,跨中瞬时挠度可减小 18 mm;经过 20 a 长期发展后,与未施加向上荷载时相比,跨中挠度可减小约 30 mm。

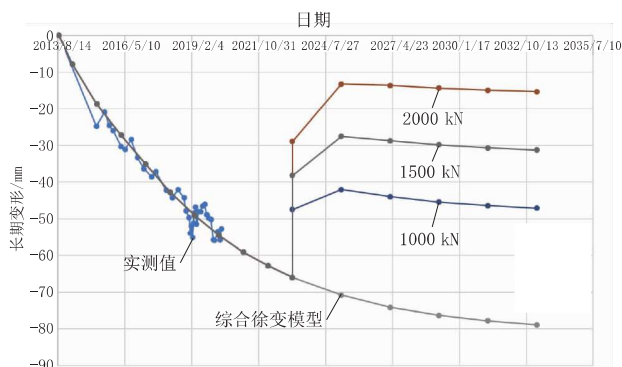


图 11 竖向力作用下的跨中挠度变化曲线

同时,在 1 000 kN 竖向力作用下,跨中下缘压应力增加约 1.6 MPa,支点上缘拉应力减小约 0.3 MPa,能略微改善结构的受力状态;中支点反力减小约 660 kN,边支点反力增大约 180 kN,有利于利用中墩基础新建外结构。

4.1 拱架加固方案

如图 12 所示,在原结构中跨新建简支系杆拱架,支撑在中墩承台上,拱架跨中设横梁;在连续梁底吊杆与横梁连接,张拉后托住原连续梁。

拱架采用钢结构,矢高 25 m,拱肋尺寸为 2 m ×

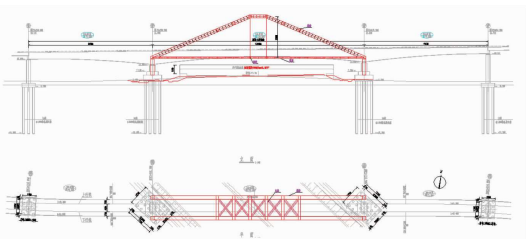


图 12 拱架加固方案平面立面

1.7 m, 系梁为 1 m×1 m, 2 片拱肋间设置 5 道 X 型风撑, 吊杆采用 12- ϕ 15.2 钢绞线; 跨中横梁高 1 m, 于连续梁底板间设置垫块, 横向侧设挡块, 4 个吊点张拉力合计 1 000 kN。

该方案中墩基础增加荷载约 4 970 kN, 由于基础采用 24 根 ϕ 1.2 m 钻孔桩, 单桩承载力设计值约 6 500 kN, 每根桩增加竖向力 207 kN; 边墩基础增加荷载 160 kN, 每根桩基增加约 13 kN, 对桩基的安全性基本无影响。

图 13 为在 100 t 荷载作用下的拱架挠度值。此时拱架挠度为 17 mm, 拱架刚度为 58 823 kN/m; 而主梁刚度为 55 555 kN/m, 略小于拱架刚度, 因此新建拱架能有效控制原连续梁的徐变下挠。

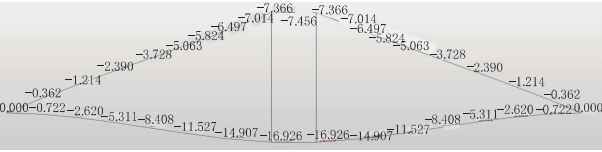


图 13 拱架加固方案下的拱架挠度(单位:mm)

图 14 为在恒载作用下的拱架应力情况。由图 14 可见, 拱架最大应力为 141 MPa, 因此拱架结构满足强度要求。

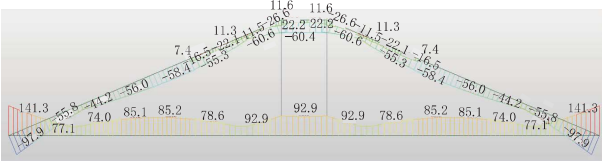


图 14 拱架加固方案下的拱架应力(单位:MPa)

4.2 斜拉加固方案

如图 15 所示, 利用中墩承台新建桥塔, 边墩位置新建地锚, 中跨跨中设横梁; 在连续梁梁底设 1 对通长拉索, 通过塔顶、跨中横梁的转向装置锚固在地锚处, 张拉后在跨中托住原连续梁。

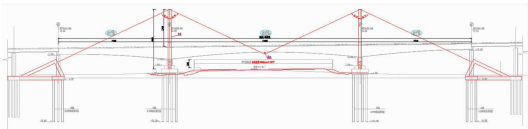


图 15 斜拉加固方案下的拱架应力(单位:MPa)

利用中墩承台新建桥塔, 桥塔截面尺寸为 2 m×1.7 m, 桥面以上高 25 m, 下部采用钢筋混凝土结构,

并与主桥主墩相连; 桥塔上部采用钢结构, 减轻重量; 拉索采用 12- ϕ 15.2 钢绞线, 拉索力为 600 kN; 跨中横梁高 1 m, 于连续梁底板间设置垫块, 横向侧设挡块。

图 16 为地锚平面图。地锚基础与原桥梁基础完全分离, 地锚承台高 2 m, 设置 16 根 ϕ 800 mm 钻孔灌注桩, 桩长 50 m; 承台前侧设置钢筋混凝土挡土墙, 墙厚 0.8 m, 埋深 6 m。根据勘察资料复核, 地锚基础能承担约 6 000 kN 水平荷载, 对应于跨中提供的竖向力为 5 400 kN, 不仅可满足加固的要求, 还能预留索力调节空间。

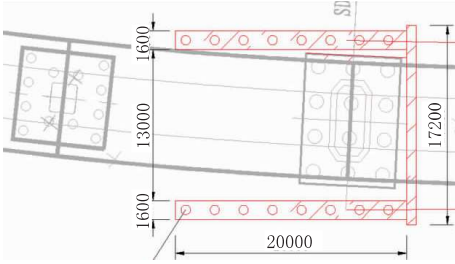


图 16 地锚平面(单位:mm)

该方案中墩基础增加荷载约 2 988 kN, 每根桩增加竖向力 125 kN, 边墩基础增加荷载 160 kN, 每根桩基增加约 13 kN, 对桩基的安全性基本无影响。

5 结 语

(1) 箱室内加体外索不改变结构外观, 可适当控制中跨跨中挠度, 减小中跨跨中挠度约 26 mm。但由于张拉力较大, 对结构本身将产生一定不利影响, 需采取局部加强措施; 此外, 由于荷载试验中实测桥梁的刚度大于计算值, 以及预应力钢束的松弛效应, 实际应用中对中跨跨中挠度的改善效果将小于理论计算值, 且箱室内空间已全部占用, 无法预留再次加固的条件。

(2) 新建外结构的加固方案受力明确, 对原结构影响小, 能够有效地改善中跨跨中挠度, 并且可以通过调整索力来动态控制该挠度发展。但是, 由于外结构新建的施工难度较大, 尤其是在中跨跨越河流或者高速公路时, 且费用较高; 此外, 该方案将较大地改变原结构外观, 带来一定的社会影响。

(3) 2 种加固方案各有利弊, 实际应用中需综合考虑。在原结构不存在承载力不足的安全问题, 仅需对由徐变引起的挠度稍加控制的情况下, 可采用箱室内体外预应力方案; 当原结构已存在结构安全问题, 继续下挠将带来严重事故的情况下, 宜采用外结构加固方案。

(下转第 136 页)

天桥打造成地标性景观;同时也为现有的空旷环境增加活力和色彩。在设计上要使其具有较强的识别性,除了利用现有的道路或节点外,还可以在特定区域选取创意新颖的装饰元素,产生特殊的吸引力。

5.3.1 星空方案

在外形设计上,以创新文化、创新精神为内涵,打造具有科技感、现代感于一体的网红天桥。主桥扶手栏杆内安装人体感应互动式 LED 条形灯,随人动而亮、人离而熄。在主桥顶棚安装定制的 LED 十二星座星光灯,营造桥内的星空效果,十二星座灯光控制连接互动显示屏,通过程序控制,输入对应信息或手机 APP,即可点亮并闪烁对应的星座。利用星光灯和星座灯,营造互动体验和时空穿越感(见图 11、图 12)。



图 11 “星空”主题天桥方案设计立面效果图

5.3.2 学海无涯方案

以书的造型为设计主题,展现莘莘学子勤奋拼搏的风貌。整个桥体为半封闭式设计,顶棚利用轻钢和彩色玻璃作为装饰,体现清新和充满活力的城市风貌;同时也为现有的空旷环境增加活力和色彩(见图 13)。



图 12 “星空”主题天桥方案设计内部效果图



图 13 “学海无涯”主题天桥方案设计效果图

6 结 语

本文借鉴国外优秀人行天桥案例,分析总结现阶段我国人行天桥景观造型普遍存在的问题,提出了具体设计策略。针对赣州的特色地理环境和人文风貌,提出赣州市老城区 3 座人行天桥景观造型的设计理念及方案,以为同类型天桥景观设计提供参考。

参考文献:

- [1] 吕琴琴. 城市过街天桥景观形象设计研究[J]. 合肥学院学报(社会科学版), 2014, 31(1): 90-93.
- [2] 刘殿胜, 王维. 人行天桥设计及施工技术要点分析探讨[J]. 科技创新导报, 2013(33): 74, 76.
- [3] 邹建聪. 城市人行天桥人性化设计研究——以成都市为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

(上接第 129 页)

参考文献:

- [1] 王法武, 石雪飞. 大跨径预应力混凝土梁桥长期挠度控制研究[J]. 公路, 2008(8): 72-76.
- [2] 刘鲜庆. 大跨度预应力混凝土连续梁桥下挠原因分析[C]// 中国公路

学会桥梁和结构工程分会 2020 年桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2020: 758-764.

- [3] 石雪飞, 陈辉, 沈炯伟. 已下挠连续梁加固方案研究[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2010, 23(1): 1-5.