

## 某输煤栈桥改造加固工程卸荷技术研究

孟文清<sup>1</sup>,张铭雨<sup>1</sup>,崔邯龙<sup>1</sup>,路中科<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 中煤邯郸设计有限责任公司,河北 邯郸 056031)

**摘要:** 为提升某输煤栈桥负载状态下新增托架及支架部分与原结构的协同工作性能并减少原结构加固量,采用千斤顶对原结构实施卸荷。通过有限元软件模拟不同卸荷程度与卸荷方式,系统性对比杆件内力、千斤顶读数及超限构件数量的变化情况。结果表明:当卸荷使原结构位移恢复至0 mm时,卸荷程度最佳,可同步降低结构内力并减少加固工程量;施工中采用整体同比例位移卸荷方案,可使内力和位移呈线性变化,实现结构安全及可控过渡至目标卸荷状态。

**关键词:** 输煤栈桥;改造加固;螺栓球节点;卸荷程度;卸荷方式

**中图分类号:** TU391

**文献标识码:** A

## Study on Unloading Technology of a Coal Conveying Trestle Reconstruction and Reinforcement Project

MENG Wenqing<sup>1</sup>, ZHANG Mingyu<sup>1</sup>, CUI Hanlong<sup>1</sup>, LU Zhongke<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. China Coal Handan Design Co., Ltd., Handan, Hebei 056031, China)

**Abstract:** To enhance the collaborative working performance of the newly added brackets and supports on a certain coal conveying bridge under load conditions and to reduce the reinforcement volume of the original structure, this study utilized jacks to implement load relief on the original structure. Through simulation using finite element software with different levels of load relief and relief methods, the changes in internal forces of members, jack readings, and the number of over-limit components were systematically compared. The results show that when the deformation of the original structure returns to 0 mm, the load relief degree is optimal, which can simultaneously reduce the internal forces of the structure and decrease the reinforcement workload; during construction, a scheme of overall proportional displacement load relief can be adopted, which enables the internal forces and displacements to change linearly, achieving a safe and controllable transition of the structure to the target load relief state.

**Key words:** coal transfer trestle; renovation and reinforcement; bolt ball node; unloading degree; unloading method

在既有结构负载状态下的加固工程中,应力滞后现象普遍存在于整体加固和局部构件加固过程中,导致新增构件与原结构难以形成有效协同工作机制。在实践中,通过精准卸荷调控原结构荷载水平,可优化新旧结构内力传递路径,提升加固后结构的承载能力。当前国内研究主要聚焦于不同卸荷程度对单个构件破坏形态及极限承载力的影响,已形成梁柱构件分级卸荷的完整理论体

系<sup>[1-2]</sup>。然而对于大跨度空间结构(如螺栓球节点网架)中卸荷程度与协同工作性能的关联机制仍需进一步研究。特别在工业建筑加固领域,如何通过多级卸荷实现新旧结构内力重分布,仍需进行系统性研究。

本文以某螺栓球节点网架输煤栈桥改造加固工程为背景,通过对原结构进行卸荷处理以提升新增结构与原结构协同工作性能。常规卸荷一般

收稿日期:2022-07-12

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2020402079,E2022402103);河北省科技重大专项(21283804Z)

第一作者:孟文清(1966—),男,河北邯郸人,硕士,教授,从事钢结构和工程施工方向的教学与科研工作。

借用外部刚度较大的胎架或平台进行卸荷,并在卸荷完成后拆除。与之不同的是,本工程以新增结构体系为平台,对原结构进行卸荷,在卸荷完成后不再拆除,与原结构共同承担荷载。本文充分考虑新增结构与原结构的刚度,探究合理的卸荷方式与卸荷程度,使得新增结构与原结构协同工作,避免原结构因不当卸荷受到损伤。在负载状态下,通过将部分荷载从原结构转移至新增结构,可降低原结构实际受力。此方法既能减少原结构加固需求,又能实现项目不停工,为同类改造加固工程提供可行性参考。

## 1 工程概况

本文以某选煤厂的输煤栈桥为例,它是该选煤厂产品仓至筛分车间的输煤栈桥,至今已使用 11 年,共计 12 跨,采用螺栓球节点空间网格结构体系,总高 6.0 m(一层至二层 2.0 m,二层至三层 4.0 m),宽度 5.3 m。下部支承体系采用正放四角锥网架结构,设置多点支承的平板压力支座,支架采用钢-混凝土组合支撑系统,栈桥整体立面图、网架剖面图分别如图 1、图 2 所示。

本工程因增设隔声设施、更换强力皮带等导致结构荷载增加,致使原结构承载能力不足。产品仓至筛分车间仅有一条栈桥,且加固时不能停产。在满足现行相关设计规范和标准的前提下<sup>[3-6]</sup>,对栈桥进行结构加固设计。由于工程设计和施工资料不全、螺栓球节点检测困难等问题<sup>[7]</sup>,最终确定加固方案为在原栈桥下方新增托架与支架(图 3)。本文以跨铁路 21—22 轴为例详述改造方案。新增托架高度为 3 m,宽度与原网架栈桥第三层相同(2.65 m)。托架上弦节点与原栈桥下部节点采用钢管焊接连接,两端搭设于原支架。鉴于原支架部分杆件已出现明显弯曲,故增设支架以分担原支架受力。新增支架同时支撑托架与原栈桥,多数位于跨中;跨铁路、河流的栈桥则将其置于两侧,全长采用相同加固方法。若新增托架、支架与原结构连接未采取技术措施,二者无法协同

工作<sup>[8-9]</sup>。为此,需在适当位置对原结构卸荷,以降低杆件内力、提升协同性能,从而减少加固需求。卸荷后,对承载力不足的杆件及节点分别采用包管加固法<sup>[10]</sup>与肋板加固法<sup>[11]</sup>处理。

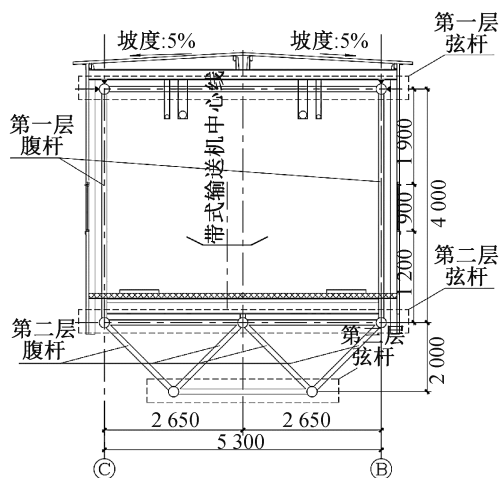


图 2 网架剖面图(单位:mm)

Fig. 2 Grid section(unit:mm)

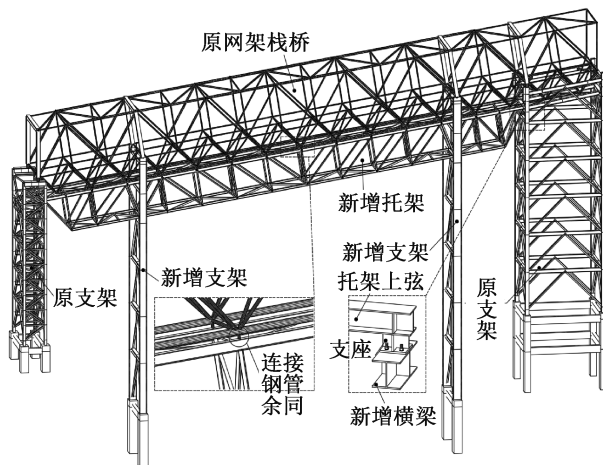


图 3 改造加固方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of retrofit scheme

## 2 结构卸荷程度研究

### 2.1 结构卸荷程度

为探究合理的结构卸荷程度,本研究设定 3 种卸荷目标:将结构初始变形恢复至  $L/2\ 000$ 、0 及

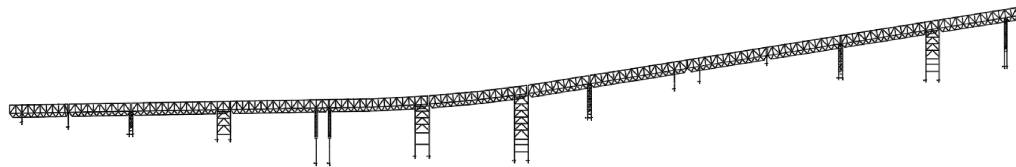


图 1 栈桥整体立面图

Fig. 1 Overall elevation drawing of the pier bridge

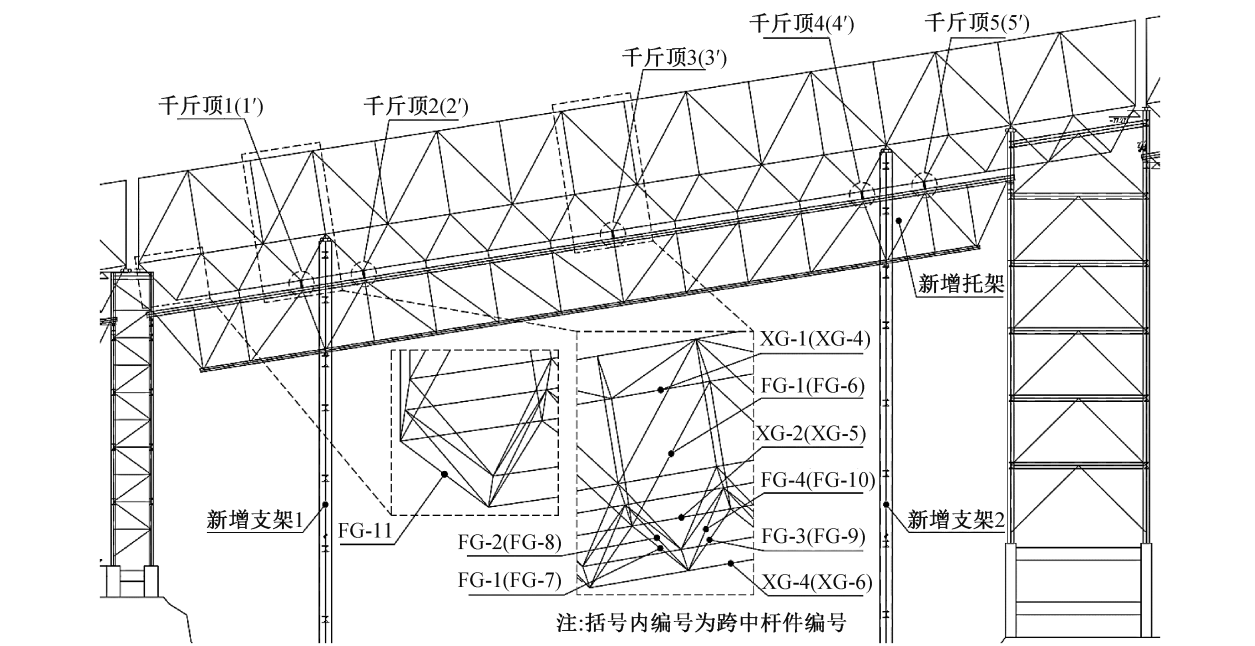


图 4 千斤顶与杆件编号图

Fig. 4 Numbering diagram of the jack and the rods

反拱  $L/2\ 000$  ( $L$  为支座间距)。为避免卸荷点分布过密或分散,共设置 10 个千斤顶,通过调节其行程控制原结构绝对位移<sup>[12]</sup>。

基于原结构刚度分布特性,支架区域刚度较高,而跨中区域在千斤顶作用下位移响应更显著,故优先在新增支架附近及跨中布置千斤顶,以实现目标卸荷效果。为分析不同卸荷程度对结构内力的影响,对原结构跨中及端部关键杆件进行内力实时跟踪,千斤顶与跟踪杆件编号如图 4 所示。

2.2 施工步骤划分

实际施工中先完成新增托架与支架的施工,再对原结构卸荷。根据施工过程将施工步骤进行划分,如表 1 所示。表 1 中初始荷载为 1.0 恒载+1.0 皮带正常运行活荷载。设计荷载考虑最不利荷载组合,即 1.30 恒载+1.50×0.90 活载+1.50 风载+1.50×0.60 温度作用+1.50×0.70 屋面活荷载。

| 表 1 施工步骤划分                            |           |      |
|---------------------------------------|-----------|------|
| Tab. 1 Division of construction steps |           |      |
| 序号                                    | 施工步骤      | 荷载状态 |
| 1                                     | 原结构       | 初始荷载 |
| 2                                     | 施工新增托架与支架 |      |
| 3                                     | 千斤顶加荷     |      |
| 4                                     | 安放连接钢管    |      |
| 5                                     | 千斤顶卸荷     |      |
| 6                                     | 上下结构协同工作  | 设计荷载 |

2.3 有限元模拟分析

2.3.1 有限元模型假定

采用 3D3S Design V2021 软件建立三维有限元模型,模型中单元类型按以下规则划分:

(1)杆单元:原结构网架杆件、原支架及新增支架的柱间支撑、托架腹杆与支撑;

(2)梁单元:原支架及新增支架的梁柱构件、托架弦杆。

连接钢管在计算模型中选用 DN50 型号,其杆端节点设置为理想铰接约束,并定义为仅受压单元<sup>[13-14]</sup>。通过施加温度作用模拟千斤顶对结构的顶升作用<sup>[15]</sup>,并按施工阶段进行非线性有限元计算<sup>[16]</sup>。

2.3.2 有限元分析

(1)位移计算结果

通过有限元分析 3 种卸荷程度,得到在初始荷载下的结构卸荷位移与千斤顶行程,如表 2 所示。

(2)内力分析

施工步骤 3 中杆件内力计算结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,弦杆内力随卸荷程度增加呈先减小后反号增大趋势,其中卸荷程度为 2 时内力达到最小值,卸荷程度为 3 时出现反号现象;跨中及支架附近第一、第三层弦杆(XG-1、3、4、6)的内力变化显著。图 5(b)表明,多数腹杆内力随卸荷程度增加逐渐减小,卸荷程度为 2 时内力绝对值较小,而支架附近腹杆(FG-1、2、11)在卸荷程度为 3 时内力出现反号现象且变化显著。结合初始荷载下内力分布可知,卸荷程度为 2 时弦杆与腹杆的内力绝对值较小。

表 2 结构卸荷位移与千斤顶行程

Tab. 2 Structure unloading displacement and jack stroke

| 编号 | 卸荷程度                      | 结构位移及<br>千斤顶行程/mm | 千斤顶编号   |         |         |         |         |
|----|---------------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|    |                           |                   | 1(1')   | 2(2')   | 3(3')   | 4(4')   | 5(5')   |
| 0  | 原结构                       | 结构位移              | -23.854 | -31.232 | -42.458 | -23.255 | -15.654 |
| 1  | 恢复结构变形<br>约为 $L/2\ 000$   | 结构位移              | -11.723 | -15.548 | -21.788 | -11.596 | -7.742  |
|    |                           | 千斤顶行程             | 12.943  | 17.610  | 27.851  | 13.207  | 8.457   |
| 2  | 恢复结构变形<br>约为 0            | 结构位移              | 0.283   | 0.076   | -1.392  | -0.306  | -0.240  |
|    |                           | 千斤顶行程             | 24.993  | 34.384  | 52.713  | 25.487  | 16.377  |
| 3  | 恢复结构变形约为<br>反拱 $L/2\ 000$ | 结构位移              | 12.299  | 15.838  | 20.511  | 11.606  | 7.804   |
|    |                           | 千斤顶行程             | 38.020  | 51.679  | 80.681  | 38.54   | 24.641  |

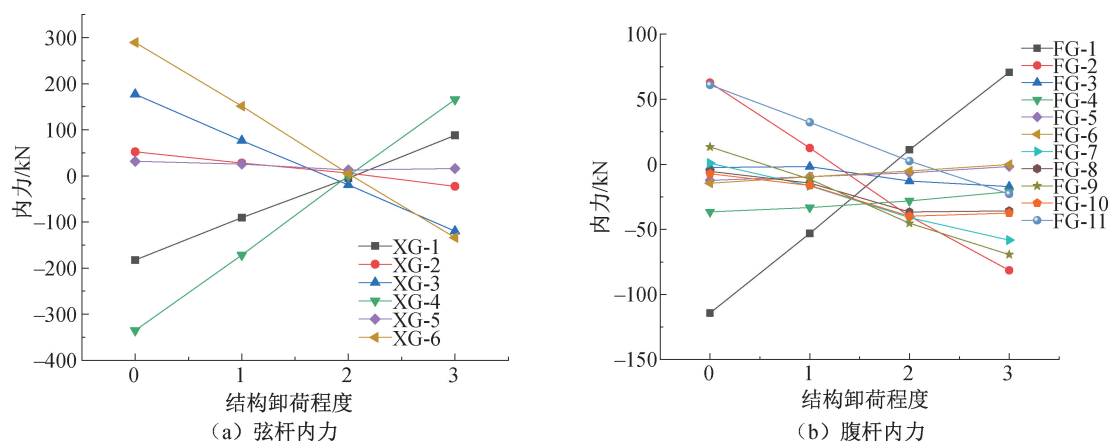


图 5 施工步骤 3 杆件内力

Fig. 5 Construction step 3 internal forces of members

施工步骤 6 的杆件内力变化如图 6 所示(0 为未卸荷状态)。图 6(a) 显示的弦杆内力变化趋势与图 5(a) 一致:卸荷程度为 2 时多数杆件内力达最小值,卸荷程度为 3 时弦杆内力出现反号现象;图 6(b) 表明,腹杆变化呈局部化特征,仅支架附近的 FG-1、2、4、11 内力显著变化,其余无明显波动。结合设计荷载下内力分布可知,卸荷程度为 2 时弦

杆与腹杆内力绝对值较小。

## 2.4 结构卸荷程度对比分析

为评估不同卸荷程度对原结构加固构件数量的优化效果,表 3 统计了超限杆件及节点的数量。不同卸荷阶段超限杆和节点的位置均有不同:未卸荷时,超限杆件集中于第一层跨中弦杆及两侧原支架附近的第二层腹杆,超限节点则分布于支

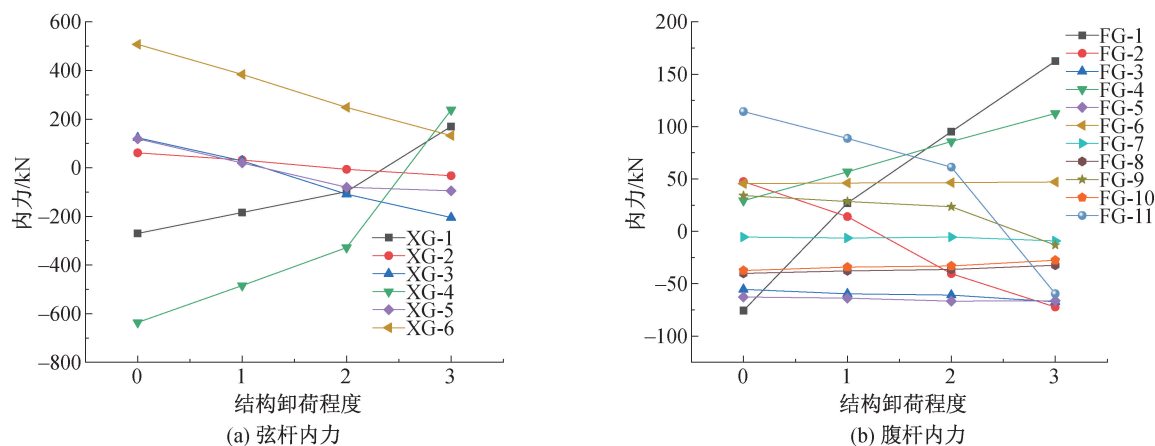


图 6 施工步骤 6 杆件内力

Fig. 6 Construction step 6 internal forces of members

| 表 3 承载力超限杆件及节点数量                               |          |          |
|------------------------------------------------|----------|----------|
| Tab.3 Numbers of over-limit members and joints |          |          |
| of bearing capacity                            |          |          |
| 结构卸荷程度                                         | 超限杆件数量/根 | 超限节点数量/个 |
| 0                                              | 41       | 102      |
| 卸荷程度 1                                         | 30       | 50       |
| 卸荷程度 2                                         | 39       | 26       |
| 卸荷程度 3                                         | 53       | 34       |

座与跨中区域;卸荷程度为 1 时,仅有支架附近第二层腹杆超限;卸荷程度为 2、3 时,超限杆件多出现在第二层弦杆,且跨中节点超限现象完全消除。数据表明,卸荷可显著减少跨中区域加固构件数量。

通过综合分析可知,结构卸荷程度为 2 时较合理,它不仅改善了上部结构受力情况,相对于未卸荷状态还减小了弦杆以及节点的加固数量。

3 卸荷方式研究

前人关于结构卸荷程度的研究没有考虑分步

卸荷,但实际工程中卸荷过程要分步进行,以避免杆件内力突变<sup>[17]</sup>。针对大跨度钢结构,现有卸荷控制方法主要包括整体同比比例位移法、同步等位移法及分区卸荷法<sup>[18]</sup>。本工程中,新增支架导致卸荷点下部刚度分布不均(支架区>跨中区),同步等位移卸荷仅对千斤顶 1(1')、5(5')有效,其余点位因刚度不足发生脱离,支点数量不足易引发卸荷失稳风险。基于此,研究选取卸荷程度为 2 的工况,对比分析整体同比比例位移卸荷与分区卸荷的结构内力和位移变化情况。

3.1 整体同比比例位移卸荷

采用位移控制法对原结构分 10 步进行等比例卸荷,各卸荷点对应的原结构第三层节点位移及千斤顶读数如图 7 所示,关键杆件内力变化过程见图 8。数据分析表明,卸荷过程中千斤顶读数呈线性增长趋势,而结构位移与杆件内力同步线性减小,全程未出现应力突变等不利现象。

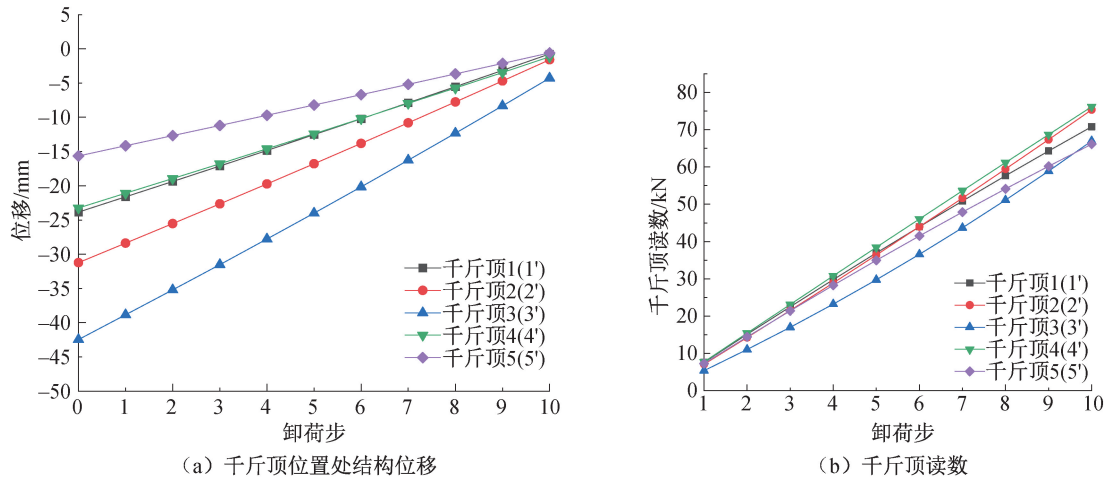


图 7 整体同比比例位移卸荷结构位移及千斤顶读数

Fig.7 Overall proportional displacement unloading structure displacement and jack reading

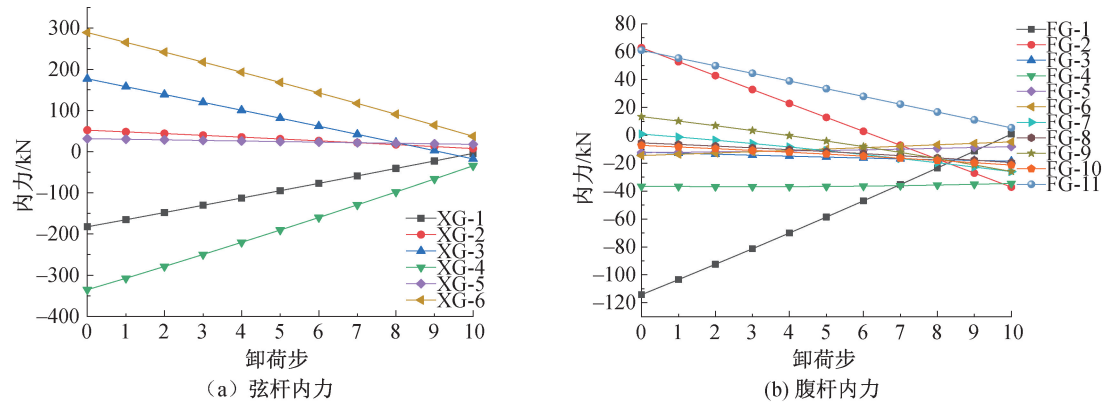


图 8 整体同步等比例卸荷杆件内力

Fig.8 Internal force of the overall synchronous proportional load-sharing members

### 3.2 分区卸荷

为便于施工,在实际操作中可以对某些区域按顺序卸荷。根据新增结构刚度分布特点应优先对千斤顶行程及荷载响应较高的点位进行卸荷(跨中→左侧→右侧)。跨中卸荷后,原结构位移已恢复至较小位移,仅需通过千斤顶 2(2')、3(3')、4(4')进行操作即可实现与整体同比例位移等效的卸荷状态。具体分步卸荷施工方法为:跨中千斤顶 3(3') 执行 10 步卸荷,随后千斤顶 2(2')与 4(4')各完成 2 步卸荷。卸荷点对应原结构第三层节点的位移情况以及千斤顶读数在卸荷过程的变化如图 9 所示,卸荷过程杆件内力变化如图 10 所示。

由图 9、图 10 可知,跨中卸荷阶段(千斤顶 3(3') 加载)中,荷载变化呈线性增长,结构位移与杆件内力同步线性减小;而端部卸荷阶段(千斤顶 2(2')、4(4') 加载)时,千斤顶 3(3') 读数显著下

降,且原结构杆件内力呈现不同程度内力震荡现象。

### 3.3 卸荷方式对比分析

分析表明,两种卸荷方案均未发生杆件应力超限现象。其中,分区卸荷虽可降低施工复杂度,但杆件内力会出现不同程度的震荡现象;而整体同步等比例位移卸荷方案中,结构内力与位移呈线性变化,且卸荷点位集中、施工协调难度低,显著提升了施工过程的平稳性与安全性。基于数据对比分析,推荐采用整体同步等比例位移方案。

## 4 结论

本文结合实际工程,分析了不同结构卸荷程度对结构内力、超限杆件以及节点数量的影响。在较为合理的结构卸荷程度下对卸荷方式进行探讨,得出了以下结论:

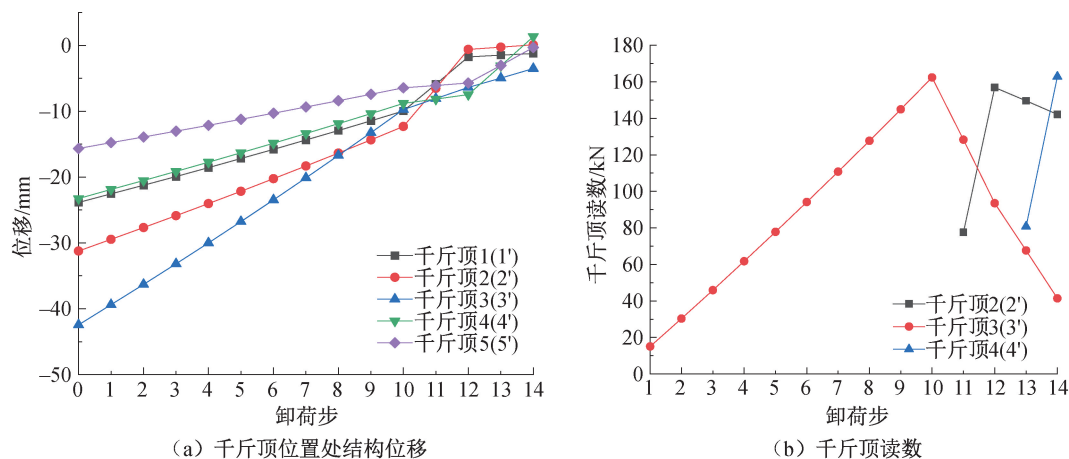


图 9 分区卸荷结构位移及千斤顶读数

Fig. 9 Displacement of the partitioned unloading structure and reading of the hydraulic jack

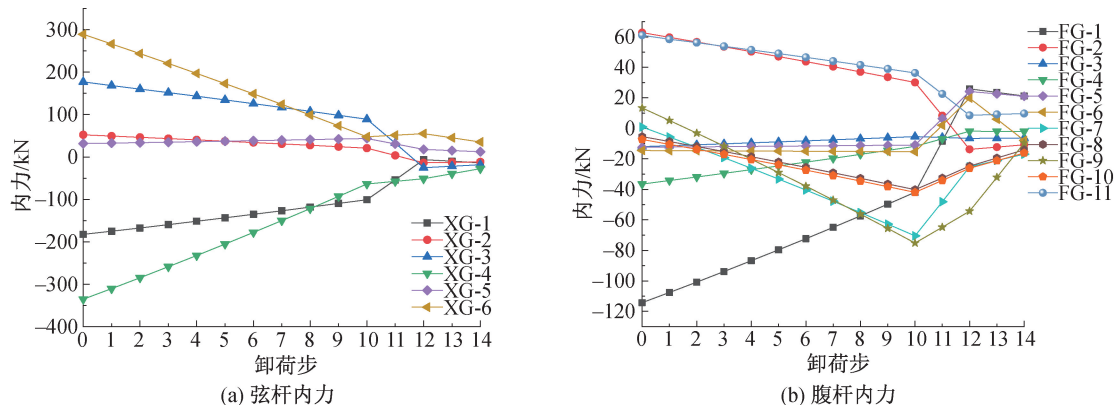


图 10 分区卸荷杆件内力

Fig. 10 Internal force of the partitioned load-sharing members

1)当结构位移卸荷至0 mm时,新增托架及支架与原结构协同效应显著。原结构弦杆内力恢复至低应力水平,跨中弦杆内力大幅下降,但不发生内力反号现象;施加设计荷载后,上部结构内力较未卸荷状态降低,原结构杆件以及节点的加固数量大幅下降。

2)整体同比例位移卸荷方案较其他方案更适应实际施工。在该方案卸荷过程中,结构内力与位移全程呈线性变化,可确保结构平稳过渡至目标状态,降低施工难度。

#### 参考文献:

- [1] 李小卫. 液压顶升卸载技术在粘贴加固中的应用[D]. 西安:长安大学,2014.
- [2] 罗露. 不同卸载程度下碳纤维布加固损伤梁的研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2016.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [5] 中国煤炭建设协会. 煤炭工业建筑结构设计标准:GB 50583—2020[S]. 北京:中国计划出版社,2020.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构加固设计标准:GB 51367—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [7] 林健. 某螺栓球节点网架厂房坍塌事故分析[D]. 太原:太原理工大学,2016.
- [8] 苏庆田,王思哲,薛智波,等. 卸载程度对钢桁梁桥主桁构件加固效果的影响[J]. 工程力学,2019,36(S1):92-97+105.
- [9] 赵士永,强万明,李占文,等. 某多层框架结构加固设计与施工[J]. 建筑结构,2007,37(S1):81-83.
- [10] 黄炳生,崔海涛,杨放,等. 轴心受压钢管构件加固后性能试验[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(6):1460-1469.
- [11] 丁北斗,陈洁,冯大帅. 网格结构螺栓球节点加固有限元精细化分析[C]//中国建筑科学研究院有限公司,中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第十七届空间结构学术会议论文集. 2018:860-866.
- [12] 郑江,郝际平,王宇,等. 大跨度钢屋盖卸载过程力学模拟与分析[J]. 建筑科学,2014,30(3):80-84.
- [13] 刘学武. 大跨度钢结构屋盖拆撑过程千斤顶-接触单元法[J]. 施工技术,2020,49(16):128-133.
- [14] 袁波,曹平周,杨文侠,等. 哈尔滨万达滑雪场钢屋盖卸载方案研究[J]. 建筑科学,2015,31(11):114-119.
- [15] 郭彦林,郭宇飞,刘学武. 大跨度钢结构屋盖落架分析方法[J]. 建筑科学与工程学报,2007(1):52-58.
- [16] 何荣,陈以一,王剑非,等. 曲靖体育场钢屋盖支撑卸载过程及模拟分析[J]. 施工技术,2014,43(2):58-61.
- [17] 苏英强,王留成,段先军,等. 北京新机场航站楼屋盖钢结构卸载技术研究[J]. 建筑技术,2018,49(9):951-955.
- [18] 李晨,马艳飞,周志健,等. 国家会展中心(天津)工程186 m四弦凹形钢桁架屋盖卸载施工技术[J]. 施工技术,2020,49(22):11-13.

(责任编辑 张爱丽)