

分阶段卸载在连体提升施工中的应用分析

宗 荣¹, 叶冬晨^{2*}, 杨 飞¹, 贾尚瑞², 乔聚甫¹, 张之浩²

(1. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040; 2. 浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030)

摘要: 连体结构在连体与塔楼间采用刚性连接时, 该连接段受力复杂, 特别是在考虑提升施工的影响后, 连接段杆件受力与设计一次成型的杆件受力有显著区别。由此提出可通过分阶段卸载的方式使连接段内力与设计状态对应内力接近。分阶段卸载的分析可归纳为3个关键步骤: 首先根据施工方案、现场环境等客观因素确定卸载方案; 再采用有限元软件获取每个阶段(含多次卸载及拆杆)的杆件内力变化情况; 最后通过优化理论可获得单阶段最佳的卸载量分析。以杭州云门钢结构为例, 进行分阶段卸载的方案探讨、计算假定的验证以及结构空间效应分析, 结果表明分阶段卸载极大提高了施工后与设计一体成型的连接段结构内力的一致性。

关键词: 分阶段卸载; 有限元分析; 优化理论; 提升施工; 连体; 杭州云门

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0114-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230809001

Application Analysis of Multi-stage Unloading in the Lifting Construction of Connected Structures

ZONG Rong¹, YE Dongchen^{2*}, YANG Fei¹, JIA Shangrui², QIAO Jufu¹, ZHANG Zhihao²

(1. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China;

2. Zhejiang Jingong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China)

*Corresponding author: ye.dongchen@163.com

Abstract: For the connected structure with rigid connection, the force between the connected structure and the tower is complex. Especially considering the influence of lifting construction, the force of the structural member between the connected structure and the tower is significantly different from that of the design one-time forming. It has been pointed out that the internal force of the connecting member can be close to the design state by means of multi-stage unloading. The analysis method is divided into three key steps. Firstly, the unloading scheme is determined according to the objective environment such as construction scheme and field environment. Secondly, the finite element software is used to obtain the changes of member internal force in each stage (including multiple unloading and dismantling). Finally, through the optimization theory, the optimal unloading analysis in a single stage could be obtained. After that, taking Hangzhou Yunmen steel structure as an example, the scheme of multi-stage unloading, the verification of calculation assumptions and the analysis of structural spatial effect are carried out. The results show that multi-stage unloading greatly improves the consistency of the internal force of the connecting section structure integrated with the design after construction.

Keywords: multi-stage unloading; FEM analysis; optimization theory; lifting construction; connected structure; Hangzhou Yunmen

收稿日期: 2023-08-09

作者简介:

宗 荣(1984—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事结构施工技术、施工管理方面的工作。E-mail: 39844125@qq.com。

通信作者:

叶冬晨(1992—), 男, 博士, 工程师, 主要从事钢结构施工技术方面的工作。E-mail: ye.dongchen@163.com。

连体结构^[1-2]是通过连体建立两座或多座塔楼间联系的结构形式,连体本身建筑功能丰富,可用作观光、行人通道或商务办公,因此在实际工程中得到广泛应用。然而连体的存在引起了塔楼间不可忽略的耦合效应,导致连体结构在结构设计中存在诸多难点^[3-6]。黄坤耀等^[3]将连体视为有限刚度弹性梁,建立了新的结构分析模型,从而探讨了连体刚度对结构力学特性的影响。除连体本身外,连体与塔楼的连接方式对结构的受力机理与动力特性也有着显著影响。连体与塔楼的连接一般可分为柔性连接与刚性连接,柔性连接一定程度上减轻了塔楼间的相互作用,并且可通过在连接处设置隔震支座^[7]、耗能阻尼器^[8]等方式降低塔楼的地震响应;刚性连接则是加强了塔楼间的相互联系,极大地提高了连体结构的整体性。然而刚性连接不仅需要承担自身的荷载,而且需要协调塔楼间变形,这使得塔楼与连体的连接段受力情况复杂。

对于连体结构,整体提升^[9-10]因具备施工效率高、安全性好且质量稳定等优势而成为了连体常采用的施工工艺。通过整体提升施工的连体结构,连体与塔楼连接段的杆件内力分配情况与设计预期存在一定偏差,这是施工因素所导致的,在工程实践中较为常见^[11-13]。对于连体整体提升的施工方式而言,由于提升点所在杆件作为结构本身的一部分,承担较大的提升荷载,在提升作业卸载后,该杆件内力会随着变形回复而减小,但无法回复至与设计状态接近。本文提出可采用分阶段卸载的方案对上述情况进行优化。分阶段卸载方案是指连体结构提升就位后,首先连接一部分杆件再利用提升器卸载部分荷载,所卸荷载由已连接的杆件承担;然后再进行部分杆件的连接,并继续卸载,同样所卸荷载将由已连接杆件承担。重复上述过程直至后补杆件全部连接且提升器完全卸载。本文提出了连体分阶段卸载的分析原则及对应的分析方法,并以杭州云门钢结构为例,验证了分析方法的可行性与有效性。

1 连体分阶段卸载的分析原则

本文规定了分阶段卸载方案的设计与计算原则,具体如下:

1) 实际工程中,分阶段卸载的施工方案受制于诸多因素,因此卸载方案(包括卸载次数及每次卸载的连接杆件)可综合现场施工条件、提升设备能力进行初定,但需注意施工状态的内力明显小于设计状态的杆件应优先考虑连接及卸载。

2) 连接杆件主要承担连体结构的自重,因此后续分析以竖向内力为对比指标。后文若无特别说明,杆件内力均指竖向内力分量。

2 连体分阶段卸载的分析方法

本文分析基于既定的卸载施工方案,本节将着重给出每一卸载阶段卸载量的确定方法,使得结构内力分布在已有卸载方案下与设计状态最为接近。

连体的每一次卸载量都会在已连接杆件中进行分配,内力分配结果与杆件的位置、截面形式、长度、连接方式等多种因素有关。为综合考虑上述因素,本文分析遵循如下技术路径:1) 有限元施工分析(以MIDAS软件为例);2) 获取各阶段内力分配结果以及卸载量与内力分配的关系;3) 每阶段卸载量优化。具体操作步骤如下:

步骤1: MIDAS软件施工分析

通过MIDAS软件进行卸载施工模拟,同时提取每次卸载完成以及拆杆结束时各连接杆件的竖向内力。将施工全过程参与卸载内力分配的杆件数量记为 N ,该数量包括原设计的连接杆以及施工中临时增设的加强杆。将每个阶段各杆件竖向内力占内力总和的比值记为向量 $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_M$,这些向量的内涵是每个阶段下连接杆件的内力分配情况,其中 \mathbf{P}_0 指提升阶段,其余依次对应于不同的卸载阶段。同时各阶段的卸载量记为 G_m 。

步骤2: 提升阶段内力分析

连体结构提升施工时,各杆件的竖向内力可表示为 \mathbf{GP}_0 ,具体如式(1)所示。

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{GP}_0 = \begin{pmatrix} f_{0,1} \\ f_{0,2} \\ \vdots \\ f_{0,n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: G 为提升重量; $f_{0,n}$ 指连接段第 n 个杆件的竖向内力,未安装杆件的竖向内力记为0。

步骤3: 分阶段卸载的内力分配与卸载量关系

首次连接后增补杆件并卸载 G_1 ,部分杆件竖向内力减小,剩余杆件竖向内力增大。用 Δ_1 表示内力变化的情况,记为:

$$\Delta_1 = (\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_1)G \quad (2)$$

构建内力变化量与卸载量的比值 δ_1 来表征杆件内力的变化情况,如式(3)所示。

$$\delta_1 = \frac{\Delta_1}{G_1} \quad (3)$$

由此获得第一次卸载后的杆件内力分布,如式(4)所示,该式指出了卸载量与内力分配结果的关系。

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_0 + \delta_1 G_1 \quad (4)$$

同理,如式(5)所示按上述步骤可得第 m 次的内力分配结果,其中 δ_m 为第 m 阶段的内力变化参数。

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_{m-1} + \delta_m G_m \quad (5)$$

步骤4: 拆杆后的内力分配与被拆杆件的关系

将拆杆状态下的内力分量占比表示为 $\mathbf{P}_c, \mathbf{P}_c - \mathbf{P}_m$ 中

的负值表示对应杆件内力减小,其中被拆杆件的内力减小为0,其余杆件内力减小量按比例减小。 $P_c - P_m$ 中正值表示对应杆件内力增加,增加的总和为杆件内力减小量的总和,且按比例增加,将内力的转移比例记为 δ_c 。杆件内力增加及减小的总和相同,记为 F_t 。由此可得拆杆后的内力分布如式(6)所示。

$$F_c = F_m + \delta_c F_t \quad (6)$$

步骤5:卸载量的优化分析

通过步骤1~4获得施工最终阶段的内力分配计算表达式,该分配结果与各个阶段的卸载量相关。本文的操作步骤将优化各个阶段的卸载量,使最终的内力分配结果与设计状态最为接近。

首先计算设计一体成型状态和考虑施工两种状态下的连接段杆件内力,并将杆件竖向内力的差值记为 Δ_F ,如式(7)所示。

$$\Delta_F = F_c - F_D = \begin{pmatrix} \Delta_{F1} \\ \Delta_{F2} \\ \vdots \\ \Delta_{F11} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: F_D 为设计一体成型状态下的杆件竖向内力,可由MIADS软件获取,也可由提升重量与内力分配量来表达,如式(8)所示。

$$F_D = GP_D \quad (8)$$

将设计目标定为求取残差平方和 Q 的最小量,表达如式(9)所示, Q 值越小则表示其与设计状态越接近。

$$\min Q = \min \sum \Delta_{Fi}^2 \quad (9)$$

通过优化理论进行最优求解,如最速下降法等。考虑到实际工程中分阶段卸载次数有限且每次卸载量难以精准控制,可采用较简单直观的优化方法,如仅两次卸载可采用一维搜索方法进退法。

3 分阶段卸载在杭州云门中的应用分析

3.1 杭州云门项目概况

杭州云门钢结构工程是由2座约80 m高的塔楼及连体组成,该工程采用整体提升的施工技术进行连体的安装。该工程的关键施工步骤如图1所示,连体整体提升至设计标高后安装连体和塔楼间的连接杆,随后拆除额外的加强杆并安装其余杆件。

如图2所示,连接段共有11根连接杆件,其中5号杆为施工中的临时加强构件,需待卸载后拆除。

3.2 分阶段卸载方案分析

采用MIDAS软件进行分析,与实际工程相比,对分析模型做如下3个部分简化:1)除桁架A/B/E/F轴(提升点所在主桁架)外,其余位置均未设置塔楼与连体结构的连接杆件。此外,前期分析中假定各榀桁架间相互独

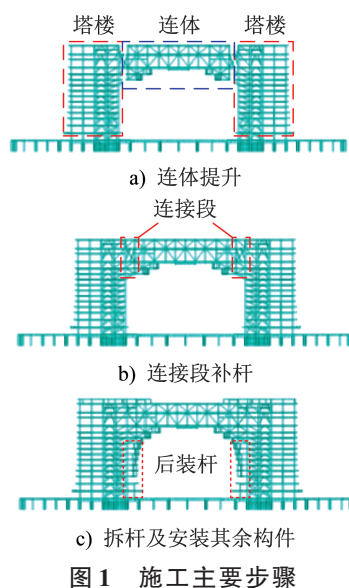


图1 施工主要步骤

Fig. 1 Main construction stages

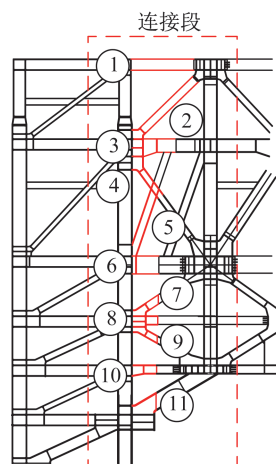


图2 连接段杆件示意

Fig. 2 Schematic diagram of connecting members

立,即每榀桁架的连接杆件不会承担其他桁架的卸载量。该假定并不完全成立,因此单独分析讨论空间效应;2)考虑到连体的混凝土楼板在完全卸载后才安装,因此分析中未考虑;3)不考虑1至11层的后装部分,如图1c)所示。

首先设计如图3所示的卸载方案。卸载分为2个阶段实施,第1阶段连接底部5根杆件并进行首次卸载;第2阶段连接剩余杆件并完全卸载,然后拆除施工中额外增设的加强杆件。

根据上述施工流程进行施工模拟,需特别注意的模拟参数包括:1)提升时连体与塔楼设置索单元连接;2)下提升点施加极小的水平约束($1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$);3)通过对索单元施加温度增量的方式实现部分卸载。

根据施工模拟结果,提取各阶段杆件竖向内力,将每根杆件的内力占比情况分别记为 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_c ,分别对应

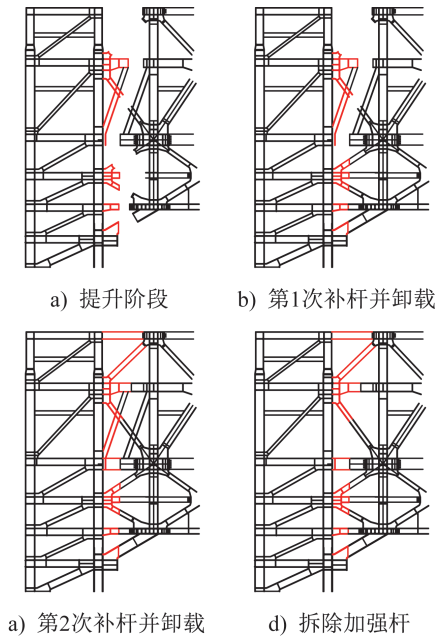


图3 分阶段卸载方案

Fig. 3 Multi-stage unloading scheme

初始阶段、第1次卸载、第2次卸载及拆杆阶段。如表1所示。从表中可看到,提升阶段杆件3~5分担提升荷载。在第1次卸载阶段,杆件3~5的荷载减小,此部分荷载由杆件7~11分配。与第1次卸载阶段相似,在第2次卸载和拆改阶段,杆件的内力在所有连接杆件中进行重新分配。

此外,同样可得到设计一次成型状态下各杆件的竖向内力分配情况 P_D ,如表1所示。

表1 内力分配情况

Table 1 Distribution of internal forces %

杆件	P_0	P_1	P_2	P_c	P_D
1	0.00	0.00	0.20	0.16	0.45
2	0.00	0.00	2.56	7.79	12.44
3	13.49	6.52	1.36	5.22	2.08
4	5.58	2.65	8.75	22.10	18.53
5	80.93	43.66	21.66	0.00	0.00
6	0.00	0.00	15.02	4.93	3.18
7	0.00	15.36	16.99	21.03	12.55
8	0.00	0.64	0.69	0.85	0.47
9	0.00	13.65	14.32	16.29	10.83
10	0.00	0.99	1.00	1.12	0.89
11	0.00	16.52	17.45	20.50	38.58

通过表1中数据,计算 δ_1 、 δ_2 及 δ_c ,如表2所示。将不同的卸载量 (G_1 和 G_2) 代入式(10),可计算得到

表2 内力变化参数

Table 2 Parameters of internal force variation %

杆件	δ_1	δ_2	δ_c
1	0.00	0.38	-0.20
2	0.00	4.87	24.17
3	-14.74	-9.83	17.84
4	-6.16	11.61	61.63
5	-78.46	-41.88	-100.00
6	0.00	28.59	-46.57
7	32.36	3.10	18.68
8	1.36	0.09	0.73
9	28.76	1.27	9.11
10	2.10	0.01	0.56
11	34.79	1.79	14.05

施工最终步的杆件内力分配结果。需要额外注意的是,式(10)中 F_1 指两次卸载后5号杆件的内力。

$$F_c = P_0 G + \delta_1 G_1 + \delta_2 G_2 + \delta_c F_1 \quad (10)$$

本文分别计算了两种不同的施工卸载量,并与设计状态下的杆件内力进行了对比,如图4所示,杆件11和杆件4的设计与施工两个状态的内力相差显著,但首次卸载3 000 kN时,两个状态下的内力分配相对接近。

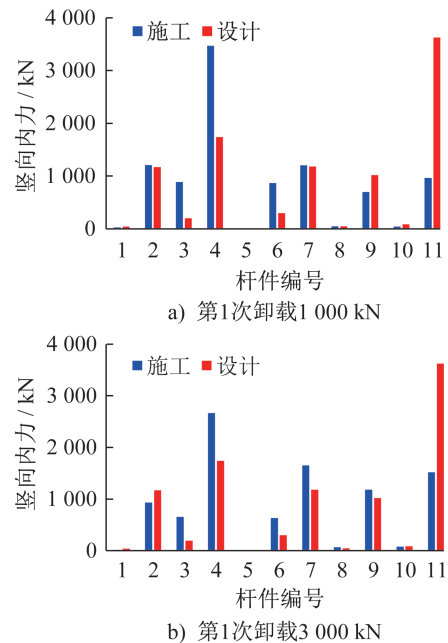


图4 不同卸载量的内力分配结果

Fig. 4 Distribution results of internal forces with different unloading amounts

为量化不同卸载量方案,根据式(8)进一步计算施工状态与设计状态杆件内力的残差平方和,计算结果如图5

所示,当首次卸载量为5 000 kN时,可获得杆件内力与设计内力最接近的情况。

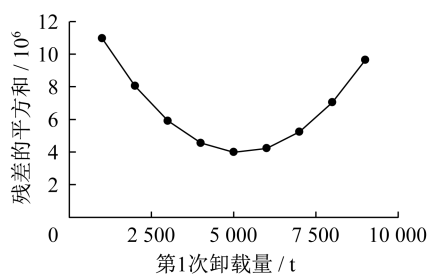


图5 不同卸载量的 Q 值

Fig. 5 Q for different unloading amounts

3.3 计算假定的验证

在3.2节的计算分析方法中隐含了在不同的卸载量下内力分配规则不变的假定。通过MIDAS软件分别计算如表3所示不同卸载量下杆件内力变化比例,计算结果如图6所示,二者计算结果接近,因此认为原计算结果中的假定合理。

表3 不同卸载量方案

Table 3 Different unloading scheme			
卸载量方案	提升重量	第1次卸载	第2次卸载
方案1	9 388.2	4 456.5	4 931.6
方案2	9 388.2	837.0	8 551.1

3.4 不同卸载方案对比

本文提出第2种可行的卸载方案,同样采用两阶段卸载方案,区别在于首次卸载时,除4号杆外,其余斜向杆件均连接,如图7所示。

计算流程与3.2节一致,因此不再赘述。

两种不同卸载方案下的残差平方和 Q 对比,如图8所示,方案1中 Q 的最小值为 4.0×10^6 ,方案2中 Q 的最小值为 5.7×10^6 ,显然卸载方案1可达到与设计状态更为接近的内力状态,因此卸载方案1优于卸载方案2。

此外,针对卸载方案1和卸载方案2的最佳卸载量如图9所示,两个方案中杆件设计与施工状态的受力仍有差距,特别是最底层牛腿(11号杆)施工状态的受力明显小于设计状态的受力。因此,为提高施工状态与设计状态的杆件内力吻合度,设计了三阶段的加载方案,如图10所示。该方案中第1阶段连接10/11号杆并卸载,随后连接7~9号杆并卸载,最后连接剩余杆件并完全卸载。

分析计算结果如图11所示,给出了不同卸载量的残差平方和 Q ,其中每一条曲线代表第1次卸载的卸载量,横坐标代表第2次的卸载量,纵坐标代表不同卸载量的残差平方和。

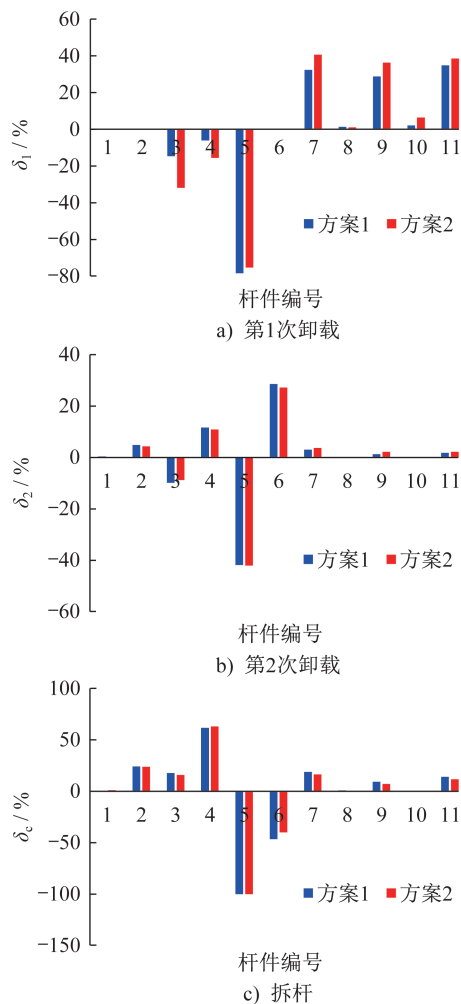


图6 不同卸载量的内力变化对比

Fig. 6 Comparison of internal force changes with different unloading amounts

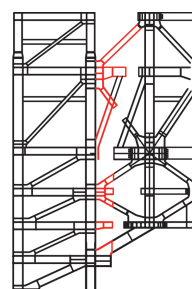


图7 分阶段卸载方案2

Fig. 7 Multi-stage unloading scheme 2

计算结果表明,第1次卸载3 000 kN,第2次卸载2 000 kN的卸载量方案最优,残差平方和 Q 仅为 4.0×10^5 ,远小于两阶段卸载的方案对应值。

最优卸载量的计算方案下,连接段杆件的竖向内力与设计状态的竖向内力对比如图12所示,可见分阶段卸载可使竖向内力与设计状态内力非常接近。

为了验证推导计算的可靠性,采用MIDAS软件计算得到的施工最终步的杆件内力分布与理论推导结果对

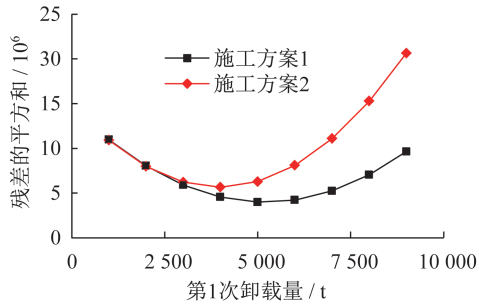


图8 不同卸载量的Q对比

Fig. 8 Comparison of Q for different unloading amounts

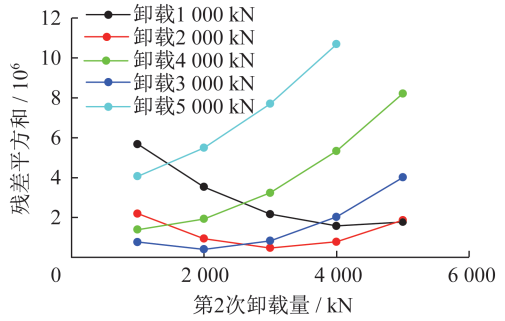
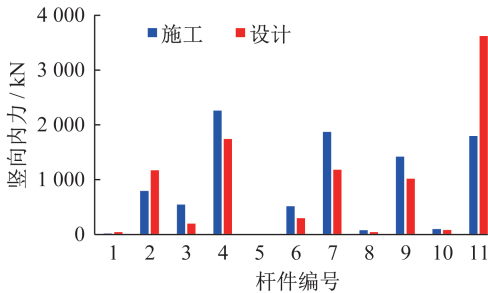
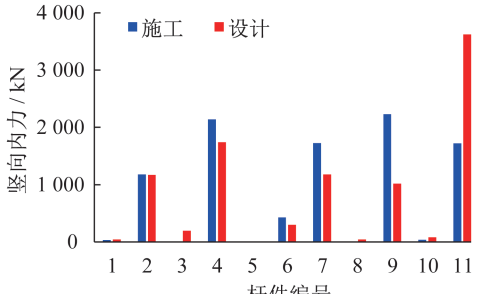


图11 三阶段卸载不同卸载量的Q对比

Fig. 11 Comparison of Q for different unloading amounts of three-stage unloading scheme



a) 卸载方案1, 第1次卸载5000 kN



b) 卸载方案2, 第1次卸载4000 kN

图9 不同卸载量的杆件内力对比

Fig. 9 Comparison of member internal forces with different unloading amounts

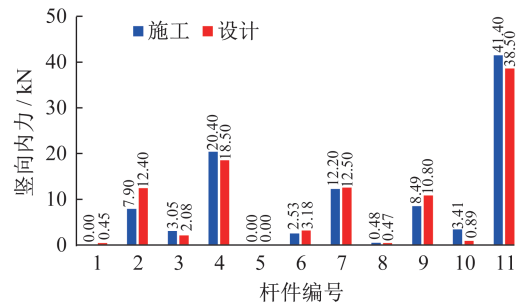


图12 施工与设计状态的竖向内力对比

Fig. 12 Comparison of vertical internal forces between construction and design states

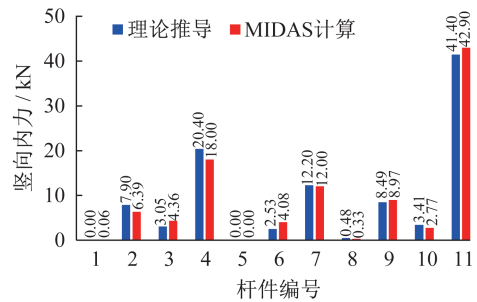


图13 理论推导与MIDAS计算结果对比

Fig. 13 Comparison of theoretical derivation and MIDAS calculation results

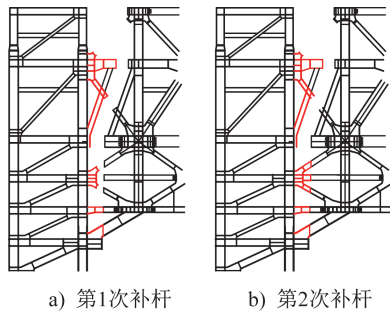


图10 三阶段卸载

Fig. 10 Three-stage unloading scheme

比,如图13所示,二者的计算结果非常接近,再次验证了所提出分阶段卸载方案计算方法的可靠性。

3.5 空间效应的分析

事实上,在不同轴线位置的提升器卸载过程中,其所卸载的内力在所有已连接杆件中进行重新分配,并不会

局限于该提升器所在桁架,因此卸载分析时应考虑结构整体的空间效应。

仍以杭州云门钢结构工程为例进行算例演示,计算模型如图14所示。与图2相比,该结构增加了连体结构与塔楼中间轴的连接杆件。

考虑结构整体分阶段卸载时,其补杆与卸载如图15所示分两阶段进行。经计算,第1次卸载量为25000 kN时,施工与设计状态最为接近,如图16所示。

考虑空间效应时涉及到多个提升器的卸载,应对所有提升点逐个卸载,获取在任意一个提升点卸载过程中所有已连接杆件的内力分配情况。但是实际施工时提升

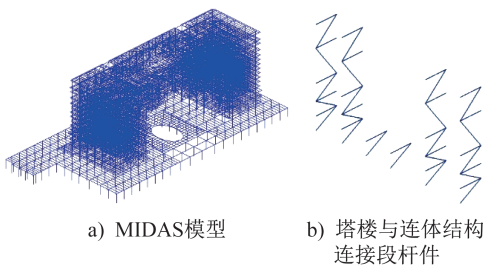


图 14 考虑空间效应的 MIDAS 模型
Fig. 14 MIDAS model considering spatial effect

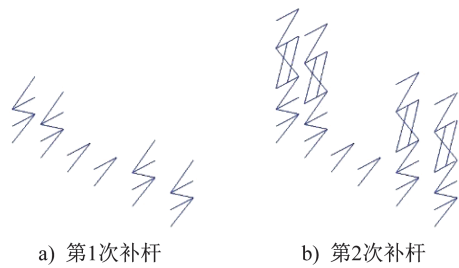


图 15 两阶段补杆顺序
Fig. 15 Two-stage installation sequence

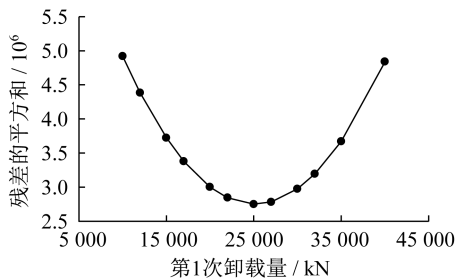


图 16 两阶段补杆顺序的 Q 值
Fig. 16 Q value for two-stage installation sequence

点数量多,上述操作非常复杂,实际的可操作性大大降低。因此将所有杆件在每个阶段的内力变化量统一分析,但需注意每个提升点的卸载量比例保持与MIDAS软件的计算结果一致。本次各提升点卸载量比例如表4所示。

表 4 卸载量比值

Table 4 Ratio of unloading amounts %

提升点	卸载量比值(第1次)	卸载量比值(第2次)
轴线 A	23.94	21.49
轴线 B	25.96	30.89
轴线 E	26.18	28.95
轴线 F	23.93	18.66

根据上述分析对云门钢结构进行分阶段卸载模拟,并与未实施分阶段卸载的情况进行对比(图17),可见杆件4和杆件11的施工与设计状态更为接近,但杆件7

和杆件9的内力数值相差增大。以残差平方和Q为衡量依据,不考虑分阶段卸载时,Q为 4.8×10^7 ,而分阶段卸载时,Q为 1.7×10^7 ,显然分阶段卸载时,施工与设计状态的吻合程度更高。

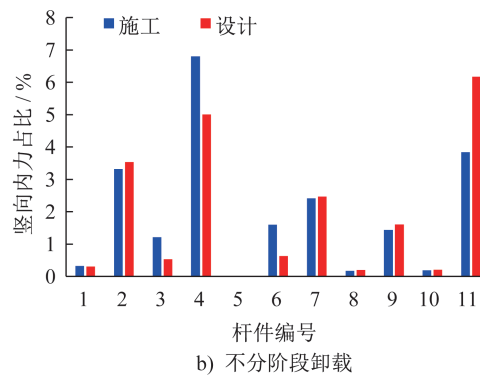
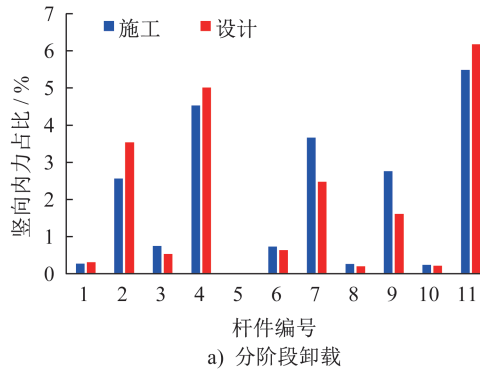


图 17 云门钢结构的分阶段卸载计算结果(以A轴为例)
Fig. 17 Calculation results of multi-stage unloading of Yunmen steel structure (taking A-axis as an example)

3.6 监测结果校核

本项目在实施过程中对连接段杆件进行了轴力监测以确保结构的安全性。轴力的监测采用应变计反算获得,共设置9个应变测点,布置如图18所示,其中桁架A布置6个监测测点,桁架B布置3个测点。

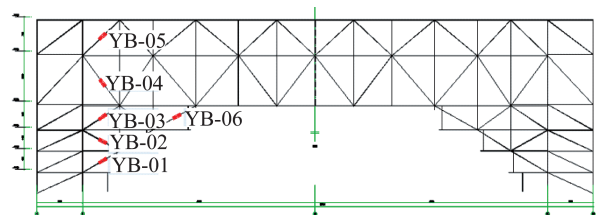


图 18 应变测点布置

Fig. 18 Arrangement of strain measurement points

监测结果与软件模拟结果如表5所示,可以看到轴力结果的数量级基本一致,表明了计算方法的可靠性,但是由于1)实际工程中连体重量与计算模型存在差异,包括节点重量、楼承板重量等因素(部分钢筋桁架楼承板放置在结构上一同提升);2)杆件存在弯矩,使单

个应变计反算轴力结果不准确。因此,监测结果仅可供参考。

表5 轴力的实测与模拟结果对比

Table 5 Comparison of axial force between measured and simulated results

kN

观测点	观测时间							
	2022.01.19	2022.02.13		2022.09.21		2022.10.23		
		实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	
桁架 A	YB-01	0	-2 094	-1 518	-6 163	-6 343	-6 532	-6 343
	YB-02	0	958	1 117	2 698	2 687	2 790	2 687
	YB-03	0	-1 330	-1 647	-2 880	-3 803	-3 320	-3 803
	YB-04	0	0	0	7 356	7 762	7 765	7 762
	YB-05	0	0	0	-4 466	-4 491	-4 653	-4 491
	YB-06	0	-89	-121	-156	-169	-290	-169
桁架 B	YB-01	0	-4 239	-2 171	-9 428	-9 202	-9 675	-9 202
	YB-03	0	-2 360	1 653	-7 879	-7 825	-8 231	-7 825
	YB-05	0	0	0	-6 320	-6 741	-6 539	-6 741

4 结论

本文针对连体结构的整体提升施工工艺,提出可通过分阶段卸载的施工方案使结构施工后的受力状态与设计一体成型状态吻合,该分析方法简单易行,且通过案例计算表明分阶段卸载可使连接段杆件的竖向力与设计状态接近,验证了分阶段卸载的有效性。具体研究结论如下:

(1) 分阶段卸载的分析方法可划分为3个步骤:首先,应依据客观的施工条件及环境制定分阶段卸载方案;其次,通过有限元模拟分析获取各施工阶段(含卸载及拆杆)的杆件内力变化及杆件最终内力与卸载量的关系;最后,根据前述关系计算杆件施工与设计状态接近时的各个阶段卸载量。

(2) 本文通过杭州云门钢结构工程分析分阶段卸载的应用情况,探讨了不同卸载方案、不同分阶段次数以及结构空间效应的影响。对杭州云门钢结构工程而言,当采用三阶段卸载方案时,连接段杆件施工状态与设计状态吻合程度较高。此外,在空间效应的分析中指出了当结构包含多个提升点时的简便分析方法。

(3) 杭州云门工程的各提升点接近,无需移动泵站,且卸载前的主要施工作业为对接杆件的焊接,多次卸载对工期影响小,因此未考虑不同卸载方案对其的不利影响。若在网架、桁架等空间结构提升作业中,各提升点分散,多次反复卸载会影响工期,应结合工期综合考虑卸载方案。同时,后续将结合更多工程项目及测量监测手段就分阶段卸载分析的普适性进一步分析。

参考文献:

- [1] 朱岩松,程煜,李婧瑶,等.北京世纪城市项目三塔连体结构设计[J].建筑结构,2022,52(2):43-48.DOI:10.19701/j.zjg.ZJ210062.
ZHU Yansong, CHENG Yu, LI Jingyao, et al. Structural design on three-tower connected structure of Beijing Century City project[J].Building Structure, 2022, 52(2): 43-48. DOI: 10.19701/j.zjg.ZJ210062. (in Chinese)
- [2] 杨随新,许嘉辉,柳冰强,等.广州某超限高层连体结构设计与分析[J].建筑结构,2021,51(增刊2):26-33.
YANG Suixin, XU Jiahui, LIU Bingqiang, et al. Design and analysis of an out-of-code high-rise connected structure in Guangzhou[J].Building Structure, 2021, 51(Suppl.2): 26-33. (in Chinese)
- [3] 黄坤耀,孙炳楠,楼文娟.连体刚度对双塔连体高层建筑地震响应的影响[J].建筑结构学报,2001,22(3):21-26,42. DOI:10.3321/j.issn:1000-6869.2001.03.004.
HUANG Kunyao, SUN Bingnan, LOU Wenjuan. Influence of the connection stiffness on seismic response of the double-tower connected tall buildings[J].Journal of Building Structures, 2001, 22(3): 21-26, 42. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6869.2001.03.004. (in Chinese)
- [4] 闫琪,赵雪莲,陈建兴,等.不对称高层连体结构分析与设计[J].建筑结构,2022,52(10):136-141,117. DOI:10.19701/j.zjg.HDY2216.
YAN Qi, ZHAO Xuelian, CHEN Jianxing, et al. Analysis and design of asymmetric high-rise connected structure [J]. Building Structure, 2022, 52(10): 136-141, 117. DOI: 10.

- 19701/j.jzjg.HDY2216.(in Chinese)
- [5] 王吉民,黄坤耀,孙炳楠,等. 连体刚度和位置对双塔连体高层建筑受力性能的影响[J]. 建筑结构, 2002, 32(8): 59-62. DOI:10.19701/j.jzjg.2002.08.022.
WANG Jimin, HUANG Kunyao, SUN Bingnan, et al. Affection of the stiffness and location of connection structure on the capability of double-tower tall buildings [J]. Building Structure, 2002, 32(8): 59-62. DOI: 10.19701/j.jzjg.2002.08.022.(in Chinese)
- [6] 黄坤耀,孙炳楠,楼文娟,等. 非对称双塔连体结构的动力特性和地震响应分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(8): 27-29. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2001.08.010.
HUANG Kunyao, SUN Bingnan, LOU Wenjuan, et al. Dynamic characteristics and seismic response analysis of unsymmetrical connected double-tower structure [J]. Industrial Construction, 2001, 31(8): 27-29. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2001.08.010. (in Chinese)
- [7] 梁梓群. 双塔连体结构连接处采用铅芯橡胶支座减震方法的研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2017.
LIANG Ziqun. Twin towers conjoined structure joint with lead rubber bearing damping method research. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2017. (in Chinese)
- [8] 贺辉,刘乐,郝霖霏,等. 利用惯容黏滞阻尼器的高层连体结构消能减震设计[J]. 施工技术, 2020, 49(5): 91-97. DOI: 10.7672/sgjs2020050091.
HE Hui, LIU Le, HAO Linfei, et al. Seismic mitigation design of tall adjacent structures using viscous inerter dampers [J]. Construction Technology, 2020, 49(5): 91-97. DOI: 10.7672/sgjs2020050091.(in Chinese)
- [9] 刘明国,姜文伟,于琦. 南京金鹰天地广场连接体施工方案影响分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(7): 22-27. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.07.004.
LIU Mingguo, JIANG Wenwei, YU Qi. Analysis on influence of construction scheme of connected lobby of Nanjing Golden Eagle Tiandi Plaza [J]. Building Structure, 2019, 49(7): 22-27. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.07.004.(in Chinese)
- [10] 袁鹏程,蒋礼,邹国雄,等. 广州天建花园空中连体结构整体提升技术[J]. 施工技术, 2010, 39(8): 144-147.
YUAN Pengcheng, JIANG Li, KUAI Guoxiong, et al. Integral lifting technology for air connection structure of Guangzhou Tianjian Garden [J]. Construction Technology, 2010, 39(8): 144-147. (in Chinese)
- [11] 崔嘉慧,邹海涛,邵冰,等. 周边支承钢屋盖滑移施工附加应力与变形控制研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(4): 97-104. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.04.010.
CUI Jiahui, ZOU Haitao, SHAO Bing, et al. Research on the additional stress and deformation control of sliding construction of peripheral supported steel roof [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(4): 97-104. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.04.010. (in Chinese)
- [12] 崔嘉慧,邵冰,邹海涛,等. 不同施工工艺下周边支承网架结构附加应力分布及安全性研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(6): 85-96. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010.
CUI Jiahui, SHAO Bing, ZOU Haitao, et al. A study on the additional stress distribution and safety of peripheral supporting grid structure under different construction technologies [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(6): 85-96. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010. (in Chinese)
- [13] 刘哲,严加宝,史奉伟. 白浪河无轴式摩天轮钢结构施工过程模拟与监控[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(4): 141-148. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.017.
LIU Zhe, YAN Jiabao, SHI Fengwei. Construction process simulation and monitoring of Bailang River spoke-free ferris wheel [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(4): 141-148. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.017. (in Chinese)