

文章编号:1673-2049(2015)01-0051-07

大跨双向张弦结构不平衡支撑式滑移技术研究

郭 猛¹,高未未²,梁存之¹,高丁丁²,袁 泉²,牛功科¹

(1. 中国建筑科学研究院,北京 100013; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘要:针对大跨双向张弦结构提出一种滑移施工方法——不平衡支撑式滑移施工技术,即在施工过程中,通过对索施加合适的预应力,增加结构原有支座的竖向反力,弱化中间滑道临时支撑。基于不平衡支撑式滑移施工技术,以国家体育馆为例建立模型,分析不同索初始索力下关键杆件应力、关键点竖向位移、多滑道支撑的支座反力变化等,探讨大跨双向张弦结构不平衡滑移施工的可行性。研究结果表明:在保证结构安全稳定的前提下,选择适当的索初始索力,可以弱化结构中间临时支撑,减少临时支撑及其下部基础的造价,进而降低滑移施工总成本。

关键词:张弦结构;滑移施工;不平衡支撑;临时支撑;有限元分析;受力机理

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

Research on Unbalanced Support Sliding Technology of Long-span Bidirectional Beam String Structure

GUO Meng¹, GAO Wei-wei², LIANG Cun-zhi¹, GAO Ding-ding²,
YUAN Quan², NIU Gong-ke¹

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The authors presented a new method of sliding construction — the technology of unbalanced support sliding construction, which increased the vertical reaction forces of the original bearing reaction and weakened the middle sliding temporary supports through imposing appropriate pre-stress on cables during construction. Taking the National Stadium as an example, the stress of different key bars with different pre-stress imposing on the cable, vertical displacement of certain key points, and reaction force of support, etc, were analyzed. Moreover, the possibility of unbalanced sliding construction for long-span bidirectional beam string structure was discussed. The study results show that the middle sliding temporary supports can be weakened, and the amount of intermediate temporary supports for steel under the premise of ensuring structural safety can be reduced. Furthermore, the total costs of sliding construction will reduce.

Key words: beam string structure; sliding construction; unbalanced support; temporary support; finite element analysis; force mechanism

0 引言

张弦结构是一种大跨度预应力钢结构体系,作

为一种自平衡受力结构体系,具有自重轻、承载力高及荷载作用下结构变形小等特点^[1-3]。张弦结构成型前刚度较小,通过不同的索拉力实现结构形状的

收稿日期:2014-07-01

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ03B06);国家自然科学基金项目(51308522)

作者简介:郭 猛(1982-),男,内蒙古赤峰人,副研究员,工学博士,E-mail:guomeng673@163.com。

调整,当给上弦压弯构件或结构提供跨中支撑时,结合适当的索力可以满足对结构形状的调整要求。

目前大跨度空间钢结构的施工方法有高空散装法、分条分块吊装法、整体吊装法、整体顶升法、滑移法及一些新型施工方法,如 Pantadome 法等^[4-5]。对于中小跨度张弦结构的施工,一般工程可以采用搭设脚手架原位拼装,或地面拼装后使用起重机械吊装施工,但对于跨度及高度较大的张弦结构或场地狭窄起伏和不方便停放吊装设备等复杂情况下,脚手架方案或吊装方案的实施费用较高,采用滑移施工技术能够很好地解决上述问题。在现有的张弦结构施工方案中,越来越多的工程施工采用高空滑移方案^[6-8]。

相对于单向张弦结构,双向张弦结构形成的整体空间结构能够更大地发挥张弦结构的优势^[2],已有工程实例,如国家体育馆、深圳市福田交通综合枢纽换乘中心、北京安福大厦等采用了双向张弦结构形式。对于大跨双向张弦结构的滑移施工,一般采用结构中间设置临时支撑的方法,中间支撑滑道与结构跨度两端的端支座滑道构成多滑道支撑式施工方案^[9-10]。

三滑道或多滑道滑移施工过程中,结构中间需要设置临时支撑及其下部基础,临时支撑的脚手架或钢结构使用量大,成本高,高空作业量大,降低了滑移施工的经济性。从受力角度分析,中间临时支撑的支座反力要大于两端的支座反力,以三滑道为例,理论上中间临时支撑承受结构总质量的 $5/8$,而两边支座分别承受结构总质量的 $3/16$,临时支撑与支座承担的结构自重比例为 $3.3:1$,导致了临时支撑及其下部基础需要增强设计,这显然增加了施工的临时成本。

结合中国众多滑移工程实例,不难发现,在多滑道滑移施工的整个过程中大量应用了钢结构,尤其是临时支撑和轨道梁,随着建筑高度的不断增大,滑道标高也不断变高,临时支撑和轨道梁的用钢量越来越多,造成滑移施工经济成本较高。因此,有必要在滑移施工设计方面提出一些新技术、新方法,用于减少临时钢结构的使用量,从而减少滑移施工造价,推动中国滑移施工技术的发展。

针对上述双向张弦结构和多滑道滑移施工的特点,笔者提出了一种新的滑移施工方法——不平衡支撑式滑移施工技术,在保证滑移安全可靠的前提下,力图降低滑移施工总成本。

1 不平衡支撑式滑移技术

1.1 滑移技术概念

张弦结构主要由上弦、下弦、撑杆 3 个部分组成。上弦是抗弯刚度较大的刚性梁构件或桁架结构(压弯构件),下弦是高强度柔性拉索(受拉构件),二者之间通过撑杆(压杆)连接^[11],如图 1 所示。张弦结构滑移施工时,在跨中设置一道或多道临时支撑,即为三滑道滑移或多滑道滑移。

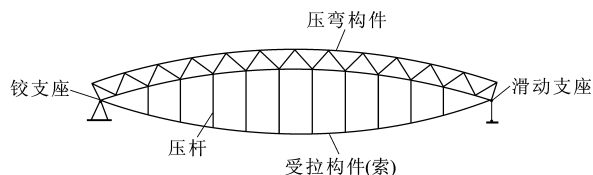


图 1 张弦结构体系示意

Fig. 1 Diagram of Beam String Structure System

对于张弦结构的常规多滑道滑移施工,由于跨中临时支撑减小了结构的跨度,滑移时仅对索张拉很小的力,保证索在滑移过程中不松弛,待滑移到位成型后,通过预先理论分析确定的张拉顺序、张拉补偿等方案对索进行张拉。在常规多滑道滑移施工的基础上,本文提出了适用于大跨双向张弦结构的不平衡支撑式滑移施工技术,即滑移施工过程中,通过主动增大下弦索的预拉力,使张弦结构跨中形成向上起拱的趋势,从而提高两端支座分担的竖向荷载而减小中间支座分担的竖向荷载。

在保证结构安全稳定和符合结构设计规范要求的前提下,当两端支座竖向反力增加时,可以弱化中间临时支撑受力,也即弱化用于中间支座的临时支撑,从而减少临时支撑的用钢量及其下部基础的承压面积。由于通过调整初始索力改变了原有结构在多滑道下的位形及支座之间竖向荷载的原始分配比例,因此称之为不平衡支撑式滑移施工技术。

在大跨双向张弦结构滑移施工过程中,一般进行张弦结构主体构件的滑移,不考虑屋面做法、设备吊重、屋面活载等,在滑移过程中只张拉单向索且辅助一定承载能力的临时支撑,张弦结构能够保持设计的形状,理论上具备可行性。

1.2 滑移受力机理分析

不平衡支撑式滑移施工的基本原理是竖向结构总自重与多个支座竖向支撑力的平衡,在施工过程中,通过对拉索施加不同的预应力,改变结构中间临时支撑的竖向反力,从而使多个支座的竖向反力重新分布。

以三滑道滑移为例,当结构的总自重及外荷载不发生变化时,三滑道支座反力总和则不发生改变。不平衡支撑式滑移技术原理如图 2 所示,其中, G 为总荷载。初始状态时,中间临时支座承受结构总荷载 G 的 $5/8$,两端支座则各承受总荷载 G 的 $3/16$,此时索力理论上为 0;当初始索力增加而达到一定值时,中间临时支座承受结构总荷载 G 的 $1/4$,两端支座则各承受总荷载的 $3/8$;继续增加初始索力,当初始索力达到某一数值时,中间临时支座承受结构总荷载 G 的 $1/8$,两端支座则各承受总荷载的 $7/16$;依此类推,增大索力后,中间支座承受的力越小,两端支座承受的力则越大。

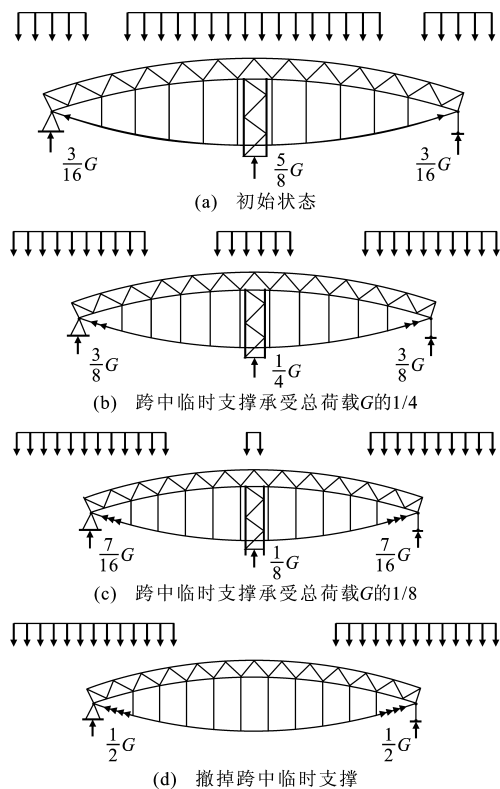


图 2 不平衡支撑式滑移技术原理

Fig. 2 Principle of Unbalanced Support Sliding Technology

当端支座反力逐渐增大到足以承受结构的自重时,可以考虑撤掉中间临时支座。因此,通过具体措施提高端支座的竖向支撑力,可以实现降低中间支座的竖向反力。从受力机理方面来说,常规多滑道施工的支座反力分配情况和两滑道施工可以视为不平衡支撑式滑移技术的 2 种极限情况,即如图 2(a)所示的零索力的初始状态和如图 2(d)所示的对边支撑状态。

1.3 不平衡支撑式滑移控制原则

张弦结构的不平衡支撑式滑移是通过控制索的

初始张拉力来实现的,当索初始张拉力改变时,结构位形、杆件应力、支座受力等也随之改变,初始张拉力的确定是滑移施工设计的一个重要步骤。为保证结构滑移的安全可靠,结合既有单向张弦结构、双向张弦结构的滑移施工实例,确定索的初始索力应满足以下 4 个原则:

(1)控制索的张拉力不应超过标称破断荷载的一定百分比,如破断荷载的 $70\% \sim 80\%$,且不宜超出成型后的设计索力过多。对于不平衡支撑式滑移施工,初始索力越大,显然跨中临时支撑分担的竖向荷载就越小,为了获得相对最小的跨中竖向反力,有可能使初始索力大于成型时的设计张拉力,这将使索的张拉方案有别于常用的“分级张拉,依次增大”的张拉方案,当初始索力大于成型时的设计张拉力时,需要考虑索力的卸载方案。

(2)为满足结构变形要求以及便于施工后的正式张拉,结合现行结构设计规范,应限制结构的最大竖向位移与其跨度的比例,如不应超过结构跨度的 $1/500 \sim 1/300$ 。

(3)结构各类杆件的最大应力均不应超过对应的屈服强度,且必须考虑结构一定的安全储备。滑移过程中偶发情况下拉索不退出工作,保持一定的张力水平。滑移施工后进行双向索张拉,能够使结构顺利脱离临时支撑。

(4)中间临时支撑分担结构自重的预期比例应能够大幅弱化中间临时支撑的受力,降低临时支撑及其地基基础的造价,同时又能保证不过多增加端支座的临时加固量,如端支座下部框架柱之间的联系梁不因承担较大的结构自重而需要大量临时加固等,这在结构柱距较大的情况下表现尤为明显,是不平衡支撑式滑移施工确定初始索力的重点分析内容。

上述控制原则涉及到的数据是从现行结构设计规范及构件安全储备的角度出发暂定的控制数据,尚需要通过试验及工程实践进行修正和完善。

1.4 不平衡支撑式滑移方案实施要点分析

不平衡支撑式滑移施工技术主要应用于大跨双向张弦结构,且为多滑道滑移施工的工程,是通过预张拉索力实现的,具体实施要点如下:

(1)按常规多滑道滑移方案进行设计,确定跨中临时支撑的上部结构、临时基础的结构形式及主要尺寸参数。一般来说,此方案跨中临时支撑的造价最高,但端支座的加固量最小。

(2)确定临时支撑及基础承载力的安全评价标准,如确定构件最大应力比取 0.8 ,基础设计平面尺

寸取计算值的 1.2 倍等,便于与不平衡支撑式滑移施工方案进行比较。

(3)按不平衡支撑式滑移方案进行 2 次设计,即根据张弦结构的成型索力数据,计算不同初始索力下结构的支座反力。本文依据实施要点步骤 2 确定不同初始索力下跨中临时支撑的上部结构、临时基础的结构形式及主要尺寸参数,每个初始索力对应一个滑移施工方案。

(4)对比各方案的经济性、施工复杂程度等,尤其是跨中临时支撑造价的降低程度与端支座加固造价的增加程度(两者呈相反的变化规律),同时考虑结构的安全需要满足规范要求。

(5)综合上述各方面的分析结果,确定最优的初始索力、相应临时支撑及下部基础的设计方案,完成不平衡支撑式滑移施工的设计方案。

2 大跨张弦结构基于不平衡支撑式技术的滑移施工模拟分析

2.1 模型概况

本文以位于北京市奥林匹克公园的国家体育馆为例建立模型,进行基于不平衡支撑技术的滑移施工模拟分析。张弦结构滑移是一个动态的过程,但滑移过程中每榀屋架的受力形式基本相同,为研究索的预拉力对屋盖滑移的影响,可先取一榀或几榀进行分析,研究 3 种支撑方式下索的预应力对屋架支座反力、竖向位移、杆件应力的影响,探讨不平衡支撑式滑移技术应用的可行性。国家体育馆总建筑面积为 80 890 m²,由比赛区、热身区等部分组成,体育馆钢屋架的平面投影为 2 个矩形,比赛区屋盖投影尺寸为 144.5 m×114 m,采用双向张弦空间网格结构,简化后的屋盖立体模型如图 3 所示。钢屋架采用带柱滑移施工方案,在结构中间布置了 1 道滑道,滑移时索的初始索力为成型张拉索力的 10%,滑移就位后预应力施加分为 2 级,第 1 级预应力施加 80%,第 2 级预应力施加 20%^[9-10]。

本文采用通用有限元软件 ANSYS 对该张弦结构的滑移进行模拟分析。结构主要杆件型号为:上弦杆钢管 φ425×16.0;下弦矩形管 450 mm×275 mm×25 mm×20 mm;腹杆钢管 φ219×16.0,撑杆钢管 φ219×12;钢材均为 Q345 钢。拉索规格为 5×367 mm,标称破断荷载为 12 034 kN。采用 Beam188 单元模拟上弦杆、腹杆及下弦杆,可以充分考虑杆件的大应变非线性特征,并且其计算精度和成熟程度均较符合大跨双向张弦梁的分析;由于

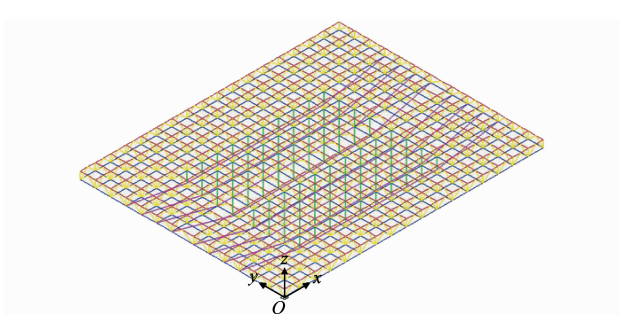


图 3 屋盖立体模型

Fig. 3 Three-dimensional Model of Roof

撑杆可承受拉力或压力,为二力杆,而下弦索只能承受拉力,故采用 Link8 单元模拟下弦与索之间的撑杆,Link10 单元模拟拉索^[12]。

本文在计算中假定钢材为各向同性材料,泊松比为 0.3,屈服强度为 345 MPa,材料密度为 7 800 kg·m⁻³,上弦杆和撑杆选取钢材的弹性模量为 206 GPa,拉索的弹性模量为 160 GPa,采用牛顿-拉普森方法进行求解,根据不平衡支撑式滑移的分析需求提取了不同初始索力与结构 1/4 处的竖向位移、支座反力,其计算结果见表 1。

表 1 位移、支座反力计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Displacement and Support Reaction Force

索力 编号	初始索 力/kN	初应变/10 ⁻⁵	竖向位移/ mm	支座反力/kN	
				端部	中间
1	200	25	-33.1	335.2	745.6
2	400	50	-27.2	366.9	682.9
3	600	75	-21.4	398.4	620.1
4	800	100	-15.6	429.8	557.3
5	1 000	125	-9.7	460.9	494.5
6	1 200	150	-3.9	492.6	431.6
7	1 400	175	1.8	523.8	368.8
8	1 600	200	7.7	555.5	306.2
9	1 800	225	13.5	587.0	243.4
10	2 000	250	19.3	618.4	180.6
11	2 200	275	25.1	649.9	117.8
12	2 400	300	30.9	681.3	55.0
13	2 600	325	36.8	712.8	-7.8

2.2 支座反力

各支座竖向反力的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着初始索力的增加,结构有缓慢向上起拱的趋势,两端支座反力成正比例增加,而中间支座反力相应成反比例减小,即中间支座对应临时支撑的截面尺寸、构造措施以及下部基础尺寸等均可以相应弱化。

当初始索力为 200 kN 时,中间支座承担的结

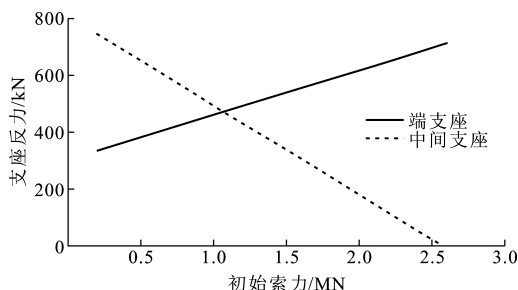


图 4 各支座反力

Fig. 4 Reaction Forces of Each Support

构自重为 745.6 kN,所占比例为 52.7%;当初始索力增加至 1 400 kN 时,中间支座承担的结构自重为 368.8 kN,所占比例下降至 26%,此时初始索力并未达到张拉索力 2 000 kN。显然,在临时支撑的竖向荷载需求减小约 50%的情况下,其结构自身的用钢量将显著降低,且下部地基基础设计对应的建造费用亦将显著降低。在不超过成型控制张拉索力 2 000 kN 的前提下,中间临时支撑分担的结构自重可以降至 13%。

本文模型中,当索的初始索力为 2 600 kN 时,中间支座受力为 -7.8 kN,表明中间支座已经对结构产生向下的拉力,两支座和三支座对应的结构受力状态是基本一致的,此时可以尝试去除中间支座,重新进行模拟分析。通过改变初始索力改变了结构竖向荷载在多个支座之间的原始分配比例,增加端支座竖向反力而减小中间临时支座竖向反力,从而支持了不平衡支撑式滑移技术的可行性。

2.3 结构变形

国家体育馆屋架的纵向跨度为 144.5 m,三支座滑道滑移时实际跨度为原跨度的 1/2,整体结构 1/4 处附近的竖向位移为屋架竖向位移的最大值。

图 5 为下弦索施加不同预拉力时结构 1/4 处竖向位移的变化。由图 5 可见:随着初始索力的增加,结构 1/4 处的竖向位移逐渐减小,基本呈线性变化;本文模型中,当索的预拉力较小(小于 1 200 kN)时,索通过撑杆传递到上弦结构的力不足以抵抗结构的自重,整个结构仍处于下挠状态,当索的预拉力大于 1 400 kN 时,结构开始起拱;当索施加到最大预拉力时,结构 1/4 处竖向位移为 36.8 mm,约为跨度的 1/2 000。与既有施工方案相比,较大的初始索力减小了结构关键点的竖向位移,一般来说,当竖向位移接近于 0 时,结构处于合理的受力状态,因此,在试算过程中,竖向位移的变化可作为确定最优不平衡式支撑滑移方案的指标之一。

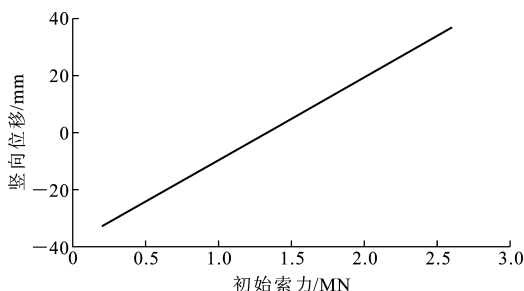


图 5 结构 1/4 处竖向位移的变化

Fig. 5 Variation of Vertical Displacement of Quarter Structure

2.4 钢结构的应力

当初始索力比较大尤其是超过成型设计张拉力时,有可能造成局部杆件的屈曲或破坏,因此,在初始索力接近或超过成型设计张拉力时应详细分析结构杆件的应力变化情况。本文模型通过试算选取应力最大的上弦杆、下弦杆及撑杆,其杆件最大应力随初始索力变化如图 6 所示。

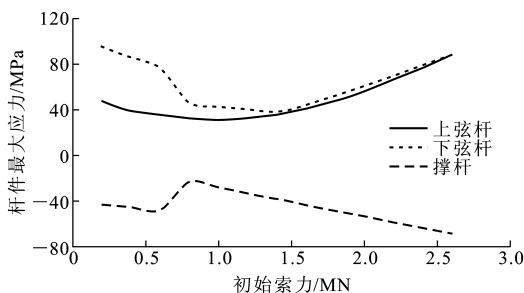


图 6 各杆件最大应力随初始索力的变化

Fig. 6 Variations of Maximum Stress of Each Rod with Initial Tension Force of Cable

由图 6 可知,上弦杆和下弦杆始终处于受拉状态而撑杆则一直处于受压状态,当施加的初始索力较小时,上弦杆最大应力变化较大且逐渐减小,随后变化平缓,缓慢上升。结合结构变形的分析结果,随着初始索力的增加,1/4 处竖向位移下降幅度越来越小,上弦杆的拉应力随之减小,当结构开始向上起拱即 1/4 处竖向位移为正时,上弦杆应力相应增大。

与上弦杆的应力变化相比较,下弦杆的应力变化较为平缓,初始索力较小和结构处于下沉状态时,随下沉量的降低,杆件应力减小;结构起拱后,随起拱程度的增加,杆件应力逐渐加大。撑杆在结构的受力中一直处于受压状态,其应力变化情况和上弦杆的应力变化情况相似。从计算结果来看,3 种杆件的应力变化都在控制范围之内,最大拉应力与最大压应力分别为 95,70 MPa,均小于 100 MPa,而钢材的屈服强度为 345 MPa,可以判断结构有较多的

安全储备,施工强度控制难度亦较低,能够保证不平衡支撑式滑移方案下结构和杆件的强度以及稳定性安全。

2.5 索力的变化

图 7 为索的初始索力与计算索力的对比。由图 7 可知:计算索力的增长较初始索力慢,初始索力每增加 200 kN,计算索力增加约为 160~170 kN;当初始索力小于 800 kN 时,计算索力大于初始索力,当索的初始索力为 800 kN 时,二者数值接近,而后初始索力大于计算索力,差值呈逐渐增大趋势,表明初始索力不能完全发挥作用,张弦结构将会通过增大变形释放张拉力。因此,在利用不平衡支撑确定初始索力时,应注意初始索力与计算索力的效率问题。

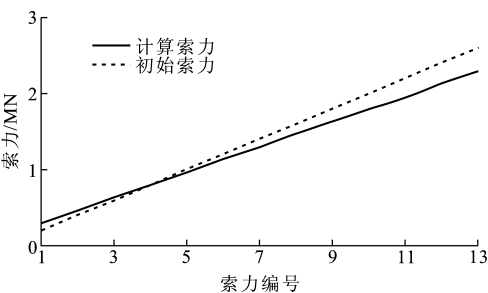


图 7 索力对比
Fig. 7 Comparison of Cable Forces

2.6 三支座滑道、两支座滑道临界状态的对比

本文模型中,索的初始索力为 260 kN 时,两支座滑道与三支座滑道的计算结果见表 2。两支座方案的中间支座提供向下的拉力,拆除后结构整体起拱会增加,跨中竖向位移为 17.7 mm,两支座 1/4 处竖向位移为 48.2 mm,较三支座 1/4 处的竖向位移的 36.8 mm 增加 11.4 mm。从表 2 可见,由于三支座方案的中间临时支撑受力不大,2 种方案的各主要控制指标接近,且均未达到屈服强度,由此可知,通过加大索的初应变弱化或去除中间支座在计算分析上具有一定的可行性。

表 2 不同支座计算结果对比

支座类型	竖向位移/mm		支座反力/kN		索力/kN	上弦应力/MPa
	跨中	1/4 处	端部	中间		
三支座	0.0	36.8	712.8	-7.8	2 300	87.9
两支座	17.7	48.2	702.5		2 260	83.4

不同的张弦结构设计方案下,进行不平衡支撑式滑移方案试算时,结构及构件内力、变形等的具体变化规律不尽相同,尤其是结构内部杆件的应力变

化必然与结构造型、构件分布、截面相对大小等多方面因素有关,如拉索的初始索力应控制到何种程度,中间临时支座分担多少结构自重等,需要针对具体结构进行综合分析。上述以国家体育馆为原型进行的施工模拟分析,主要目的在于在论证不平衡支撑式滑移技术的可行性。

对于类似国家体育馆的大跨双向张弦结构,计算上能够以较大的初始索力实现中间临时支撑分担 1/2,3/8,1/4 等结构自重,直至撤掉中间支座,但为了保证施工安全也宜保留中间支座的部分竖向支撑力,由此提出了“索力-临时支撑-端支座滑道加固-结构施工安全”的优化问题,对此应在不平衡支撑式滑移施工方案的基础上进一步予以研究。

2.7 讨论

对于大跨钢结构,用钢量是人们关注的一个重要指标,竣工后单位体积的综合用钢量大小不仅反映出设计的技术水平,也是投资方看重的投资指标之一。大跨张弦结构通常用于屋面结构,其结构标高较高,中间临时支撑的体积较大,减小中间临时支撑尺寸可以显著减小临时支撑单位体积的用钢量。

不平衡支撑式滑移施工技术提出了控制中间临时支座与端支座的受力关系,对临时支撑受力进行优化,减小临时支撑和下部基础尺寸以及地基的处理范围等,进而减少建筑结构用钢量及施工成本,间接提高了经济效益。

中国除了国家体育馆以外,跨度超过 100 m 的大跨双向张弦结构尚不多见,随着双向张弦结构理论研究的发展,将有更多的大跨双向张弦结构用于大型场馆类建设,对于双向张弦结构的滑移施工技术进行不断创新,无疑也会促进双向张弦结构的研究及其应用。

3 结语

(1)本文提出了大跨双向张弦结构的不平衡支撑式滑移施工技术概念,通过增大下弦索的预拉力,提高两端支座分担的竖向荷载而减小中间临时支座分担的竖向荷载,进而实现对中间临时支撑及其下部地基基础的优化,降低了施工造价。

(2)结合既有张弦结构滑移施工实例,给出了不平衡支撑式滑移施工技术的初始索力控制原则,其中一个重要原则是要综合分析不平衡支撑所引起的弱化中间临时支撑(节省工程造价)和加固端支座滑道下部联系梁(增加造价)两者之间的经济性以及结构滑移施工安全的问题。

(3)以国家体育馆屋架为原型,探讨了大跨双向张弦结构采用不平衡支撑式滑移施工方案的可行性。有限元分析结果表明,随着初始索力的增加,端支座反力增加,而中间支座反力却相应减少。本文模型中,当初始索力增加至成型控制张拉力的70%时,中间支座承担的结构自重比例下降至26%,在不超过成型控制张拉力的前提下,中间临时支撑分担的结构自重可以降至13%,同时结构杆件的变形、应力等均在允许范围内。

(4)近年来,大跨结构滑移施工技术及工艺在不断发展、创新,本文提出的不平衡支撑式滑移施工技术作为一种改进的多滑道滑移施工技术,适用于大跨双向张弦结构。通过对实际工程结构进行计算和论证,在理论上可以实现该滑移技术的应用,可为今后类似工程确定滑移施工方案提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 张毅刚. 张弦结构的十年(一)——张弦结构的概念及平面张弦结构的发展[J]. 工业建筑, 2009, 39(10): 105-113.
ZHANG Yi-gang. Development of Cable-supported Structures in the Last Ten Years(1) — Concept of Cable-supported Structures and Development of Plane Cable-supported Structures[J]. Industrial Construction, 2009, 39(10): 105-113.
- [2] 张毅刚. 张弦结构的十年(二): 双向张弦结构和空间张弦结构的应用和发展[J]. 工业建筑, 2009, 39(11): 93-99.
ZHANG Yi-gang. Development of Cable-supported Structures in the Last Ten Years(2): Application and Developments of Two-way Cable-supported Structures and Spatial Cable-supported Structures[J]. Industrial Construction, 2009, 39(11): 93-99.
- [3] 白正仙, 刘锡良, 李义生. 新型空间结构形式——张弦梁结构[J]. 空间结构, 2001, 7(2): 33-38, 10.
BAI Zheng-xian, LIU Xi-liang, LI Yi-sheng. A New Type of Spatial Structure — Beam String Structure [J]. Spatial Structures, 2001, 7(2): 33-38, 10.
- [4] KAWAGUCHI M, ABE M. On Some Characteristics of Pantadome System[C]//IASS. Proceedings of In-

ternational Symposium on Lightweight Structure in Civil Engineering. Warsaw: IASS, 2002: 50-58.

- [5] 卓 新, 姚纪庆. Pantadome 体系及其施工技术[J]. 施工技术, 2003, 32(6): 53-54.
ZHUO Xin, YAO Ji-qing. Pantadome System and Construction Technique[J]. Construction Technology, 2003, 32(6): 53-54.
- [6] JGJ 7—2010, 空间网格结构技术规程[S].
JGJ 7—2010, Technical Specification for Space Frame Structures[S].
- [7] 陈荣毅, 董石麟, 吴欣之. 大跨度预应力张弦桁架的滑移施工[J]. 空间结构, 2004, 10(2): 40-42, 54.
CHEN Rong-yi, DONG Shi-lin, WU Xin-zhi. Sliding Construction of Prestressed Long-span Truss String Structures[J]. Spatial Structures, 2004, 10(2): 40-42, 54.
- [8] 罗尧治, 邱 鹏, 沈雁彬, 等. 滑移法施工在张弦网壳结构工程中的应用[J]. 施工技术, 2005, 34(10): 18-20.
LUO Yao-zhi, QIU Peng, SHEN Yan-bin, et al. Application of Sliding Construction for Reticulated Shell-string Structure[J]. Construction Technology, 2005, 34(10): 18-20.
- [9] 赵园涛, 王 耀. 国家体育馆钢结构屋架滑移工程[J]. 施工技术, 2007, 36(6): 22-24.
ZHAO Yuan-tao, WANG Yao. Sliding Project of Steel Roof in National Stadium[J]. Construction Technology, 2007, 36(6): 22-24.
- [10] 徐建设, 娄卫校, 李陵灵, 等. 国家体育馆屋盖滑移支撑转换变形分析[J]. 施工技术, 2007, 36(2): 66-68.
XU Jian-she, LOU Wei-xiao, LI Ling-ling, et al. Analysis on Transfer Deformation in Changing Supports of National Stadium Roof Slipping [J]. Construction Technology, 2007, 36(2): 66-68.
- [11] SAITOH M, OKADA A. The Role of String in Hybrid String Structure [J]. Engineering Structures, 1999, 21(8): 756-769.
- [12] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WANG Xin-min. Numerical Analysis for Engineering Structures with ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.