

国家体育馆双向张弦结构静力性能模型试验研究¹⁾

秦 杰^{*,2)} 覃 阳[†] 徐亚柯^{**} 李振宝^{††}

^{*}(北京市建筑工程研究院, 北京 100039) [†](北京市建筑设计研究院, 北京 100045)

^{**}(国奥投资发展有限公司, 北京 100101) ^{††}(北京工业大学, 北京 100022)

摘要 以国家体育馆比赛馆为原型, 制作了 1:10 结构试验模型. 通过模型试验研究了双向张弦结构的力学性能. 试验内容包括不同顺序的张拉方法和不同加载方案, 测试了在张拉和加载过程中钢结构应力和拉索索力的变化情况, 从横向拉索索力、纵向拉索索力、钢结构应力和结构变形等 4 方面详细研究了结构的性能. 对双向张弦结构性能特点进行了总结, 提出了一些对后续研究工作有益的结论.

关键词 双向张弦结构, 模型试验, 静力性能

THE STATIC EXPERIMENTAL STUDY ON THE TWO-WAY BEAM STRING STRUCTURE(TBSS) ROOF OF THE NATIONAL STADIUM FOR OLYMPICS 2008¹⁾

QIN Jie^{*,2)} QIN Yang[†] XU Yake^{**} LI Zhenbao^{††}

^{*}(Beijing Building Construction Research Institute, Beijing 100039, China)

[†](Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China)

^{**}(Guoao Investment & Development Co. Ltd, Beijing 100101, China)

^{††}(Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract The National Stadium is one of the most important stadiums for Olympics 2008. The stadium roof (114m×144.5m) is two-way beam string structure (TBSS), a new and efficient spatial structure. To study the mechanical features of the structure, a 1:10 structure model of 11.4m×14.45m is made. The following cases are included in the experiment: different tension methods, different load cases and emergency load cases (such as when the cables are destroyed). Transverse cable force, longitudinal cable force, stresses and deformation in the structure are studied in detail.

Key words two-way beam string structure, model experiment, static characteristics

概 述

张弦结构是由上弦刚性压弯构件和下弦柔性拉索通过撑杆联系起来以共同承担荷载的一种预应力结构体系, 是一种介于刚性结构和柔性结构之间的半刚性结构. 这种结构体系材料利用率高、钢材用量省、结构刚度大、稳定性强, 因而日益受到人们的青睐. 北京奥运场馆的建设极大地推进了我国大跨度张弦结构应用水平, 结构形式由简单的单向张弦

结构发展成为双向张弦结构、多向及辐射状张弦结构, 同时在建筑物跨度、结构体系复杂程度、施工技术及节点构造方面均有较大突破.

作为奥运会三大场馆之一的国家体育馆屋盖结构热身馆部分采用双向张弦结构, 其平面尺寸达到 114m×144.5m, 在同类结构中为世界之最. 由于跨度大、结构布置复杂, 该体系的设计和预应力施工均具有很高的科技含量.

目前国内外学者对预应力双向张弦结构在设计

2008-03-28 收到第 1 稿, 2008-04-12 收到修改稿.

1) 北京市科技计划项目资助 (Z005184041131).

2) E-mail: qjcumt@263.net

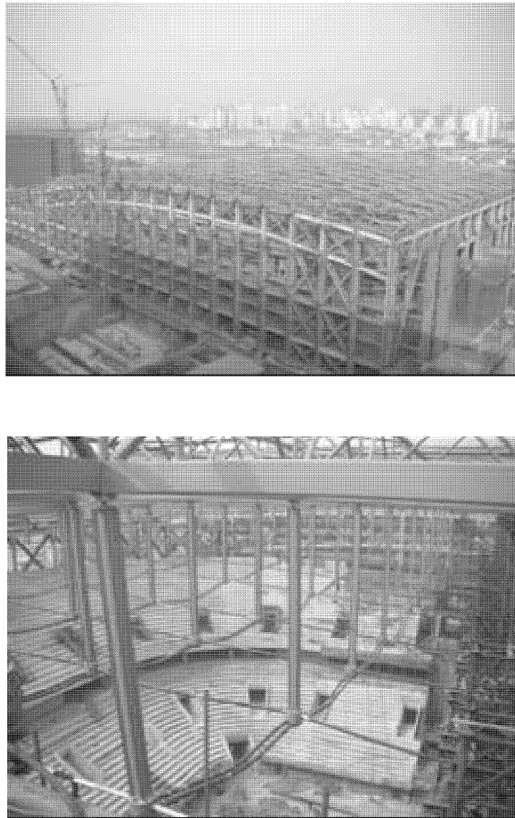


图 1 国家体育馆张弦屋盖施工现场

理论和施工方法方面已经进行了比较系统的研究，对这种结构体系的受力性能、施工方法与步骤有了比较深入的认识，对于双向张弦结构的模型试验方面也已经做了一些探索性的研究工作。但总的说来，目前的研究工作还不够充分，其中还有一些问题没有很好地解决，一些结论还没有达成共识，研究的广度和深度有待于进一步加强。

鉴于国内外的研究状况以及国家体育馆的重要性，以国家体育馆为原型制作完成了 1:10 模型。通过预应力张拉及静力性能试验，对双向张弦结构的设计和施工中的一些关键问题作进一步的探索，主要研究内容包括：(1) 双向张弦结构在预应力施加过程中的力学性能；(2) 针对双向张弦结构的预应力施加方案；(3) 双向张弦结构在各种静力荷载作用下的力学性能；(4) 在非常规工况下结构的宏观力学性能；(5) 利用试验模型对施工过程进行模拟，提出对实际工程施工有益的建议。

1 模型设计与制作

1.1 模型设计

试验模型以国家体育馆为原型，以 1:10 的比例进行缩尺。

国家体育馆屋盖上弦为正交空间网格结构，杆件种类及布置均比较复杂。网格结构上弦面内所有杆件及腹杆为圆管，圆管截面范围为 $\phi 159 \times 6 \sim \phi 480 \times 24$ ，采用无缝钢管；网格下弦面内所有杆件为矩形管，截面范围为 $350 \times 200 \times 8 \times 8 \sim 450 \times 275 \times 25 \times 20$ ，采用轧制或焊接管；上弦节点采用焊接球，直径范围为 $D500 \times 18 \sim D700 \times 35$ ，直径大于 600 mm 时采用碗形节点；下弦采用相贯节点。标准网格单元如图 2 所示。撑杆为圆管，截面为 219×12 。撑杆的最大长度为 9.248 m。张弦屋盖下弦钢索采用挤包双护层大节距扭绞型缆索，索体单束型号为 $\phi 5 \times 109 \sim \phi 5 \times 367$ 。双向索体和撑杆布置如图 3 所示。

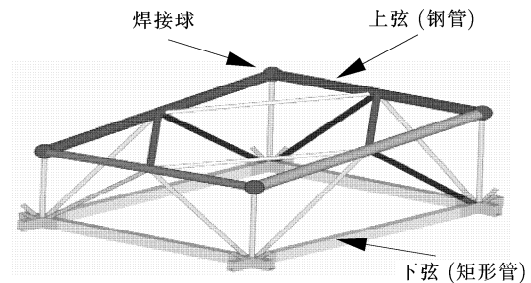


图 2 上弦空间网格标准示意图

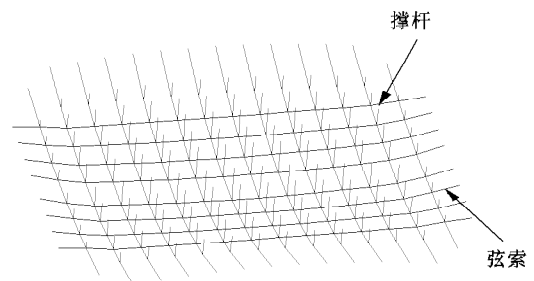


图 3 索与撑杆布置图

根据物理缩尺和力学分析，确定模型试验用各杆件尺寸如表 1。

表 1 试验模型杆件

构件	截面	构件	截面
桁架上弦杆	圆管 $\phi 42 \times 2$	桁架下弦杆	矩形钢管 $50 \times 30 \times 2 \times 2$
桁架腹杆	圆管 $\phi 22 \times 2$	撑杆	圆管 $\phi 22 \times 1.5$
索体型号	$\phi 5 \times 8$ $\phi 5 \times 5$		$\phi 5 \times 4$ $\phi 5 \times 3$

根据相似理论，模型材料密度须为原型的 10 倍，但实际钢材的密度是相同的。试验采用铺设钢板和沙袋来模拟增加的自重，如图 4 所示。另外，原结构弦索端部为钢铸件，为模拟铸钢件的重量，在相应位置施加配重块，如图 5 所示。



图4 桁架模型自重模拟

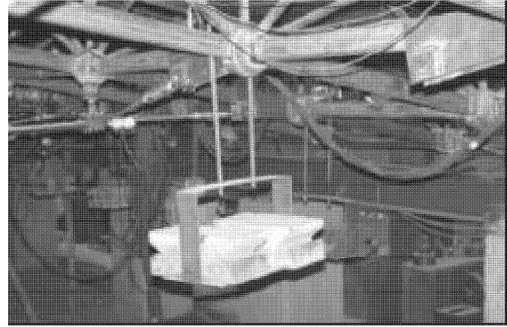


图5 集中荷载自重模拟

为检验试验模型对原型的相似程度,采用 ANSYS 有限元程序分别对模型和原型进行分析,并作对比.采用 3 kN/m^2 的检验荷载,结果如表 2.

表 2 中数据表明,模型基本能够反映原型的应力分布规律,模型竖向位移与原型缩尺后差别很小,说明两者变形接近,刚度相似性较好.

表 2 桁架内力和变形相似比

参数	应力极值 (受压 / 受拉)/MPa					竖向位移 /mm
	东南跨	东北跨	西南跨	西北跨	全跨	
原型	-234/150	-186/151	-234/149	-198/151	-234/151	204.1
模型	-180/142	-180/142	-218/168	-218/168	-218/168	19.5

1.2 模型加工与制作

试验模型的制作顺序为:先加工纵向桁架,再加工横向桁架,最后焊接撑杆、装索.模型桁架先在构件加工厂进行纵楹的下料与拼装,与此同时在试验

室进行模型支座的制作,然后将工厂加工完成的纵楹桁架运进试验室进行吊装定位,吊装完毕后通过焊接横向杆件进行整体空间的组装.图 6 为桁架加工过程中的照片.



图6 模型加工过程

2 加载方案

2.1 预应力施加方案

在施工过程中,如果可能的话,所有拉索同时张拉是比较有利的,这样既可以缩短工期,又避免了索力之间的互相影响.但实际上由于拉索的数量较多,如果所有拉索同时张拉,需要大量的张拉设备和施工人员,各张拉点之间的同步协调也非常困难,所以实际施工往往是分步进行张拉.但是分步张拉会导致索力在张拉过程中相互影响,使得索力的最终

张拉值与理论值存在差异.根据理论分析和施工经验,实际工程一般采用分步张拉进行预应力施工,通过选择合理的施工方法和施工顺序来尽量减小索力的最终张拉值与理论值之间的差异.

在 ANSYS 理论分析的基础上,对于本实验模型,选择两种预应力施加方案进行比较:(1)方案 1:1 级(7 步)张拉到设计值的 100%;(2)方案 2:分 50%, 80%, 100% 3 级(21 步)张拉到设计值.拉索轴线编号如图 7 所示.

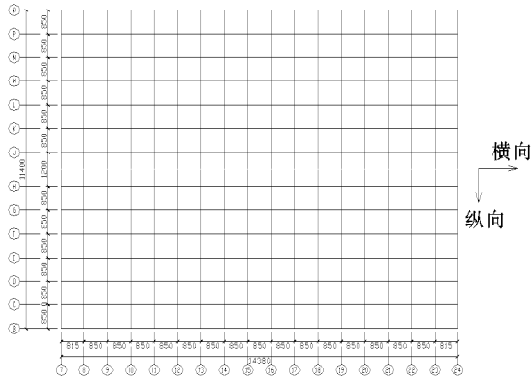


图 7 拉索轴线编号图

方案 1 采取每步张拉 4 根索方案. 张拉顺序如下: 第 1 批次为 9 轴, 22 轴, E 轴和 M 轴; 第 2 批次为 10 轴, 21 轴, F 轴和 L 轴; 第 3 批次为 11 轴, 20 轴, G 轴和 K 轴; 第 3 批次为 12 轴, 19 轴, H 轴和 J 轴; 第 4 批次为 13 轴, 18 轴; 第 5 批次为 14 轴和 17 轴; 第 6 批次为 15 轴和 16 轴.

方案 2 采取的第 1 轮张拉顺序与方案 1 相同, 第 2 轮从第 6 批次张拉至第 1 批次完成.

试验过程中着重考察了两种张拉方案的索力最终值, 以期寻找一种科学可靠的张拉方法使实际索力最终值尽量靠近理论值.

2.2 静力性能试验

国家体育馆屋面荷载标准值: 恒载 1.5 kN/m^2 , 活载 0.5 kN/m^2 . 模型试验首先模拟这部分荷载, 采用与模拟自重相同的方法, 在桁架上表面均匀施加沙袋. 模拟荷载不考虑分项系数, 直接按照荷载标准值施加沙袋. 在荷载达到 2.0 kN/m^2 后, 如果结构没有出现破坏, 继续施加荷载至 4.0 kN/m^2 , 即达到设计荷载标准值的 2 倍时停止加载, 此时沙袋总重约 $80 \times 10^3 \text{ kg}$, 试验加载结束.

2.2.1 恒载

恒载为满跨加载. 考虑到加载的可操作性, 分 3 级加载, 每级加载 0.5 kN/m^2 , 沿桁架纵向从跨中向两端交替对称施加 (图 8). 每级荷载加完后, 结构持荷达到 15 min 后, 再按同样步骤进行下级荷载施加.

2.2.2 活载

为充分研究试验模型在不同活载分布下的受力性能, 活载加载按照 3 种方式进行, 首先是 1/4 跨加载, 其次是半跨加载, 最后是全跨加载. 其中, 半跨加载分纵向和横向半跨两种. 加载区域和顺序如图 9 所示.

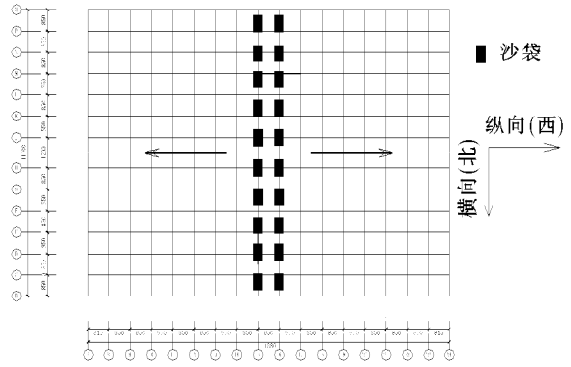


图 8 恒载每级施加示意

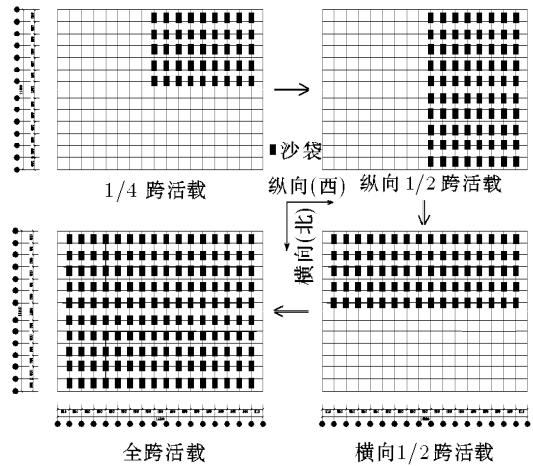


图 9 活载施加示意

2.2.3 吊挂荷载

作为一个多功能场馆, 国家体育馆在演出活动中, 可能会在屋盖中央产生一些吊挂荷载. 试验模拟吊挂荷载 0.5 kN/m^2 , 施加区域选取中间 4 轴 (图 10).

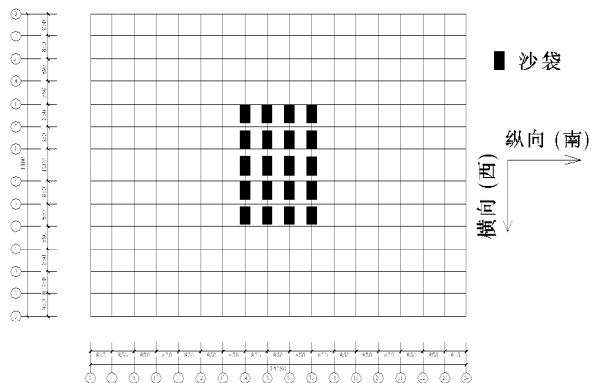


图 10 吊挂荷载示意图

2.2.4 超载

为了解实验模型的最大承载力, 在吊挂荷载施加后, 继续增加荷载, 直至面荷载达到 4.0 kN/m^2 , 即

超越荷载标准值 2.0kN/m². 超越荷载施加分 4 级, 每级 0.5kN/m².

总结以上恒载、活载和超载的加载顺序可用图 11 表示.

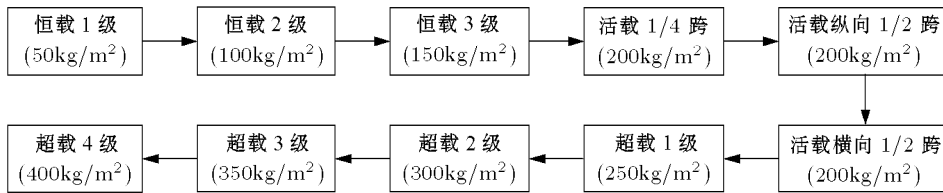


图 11 荷载施加顺序 (括号内为面荷载为累加值)

2.3 断索模拟试验

由于国家体育馆是奥运核心区的重点工程, 因此按照设计要求需考虑在突发事件下结构的性能. 按照顺序分 4 步对受力最大的 15 轴、16 轴、H 轴和 J 轴 4 个轴线拉索模拟失效工况, 考察结构是否突然坍塌.

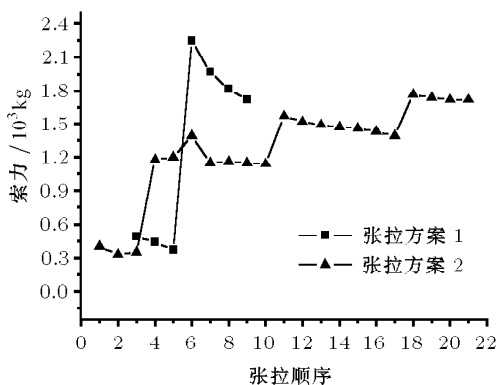
3 试验结果及分析

3.1 预应力施加试验结果及分析

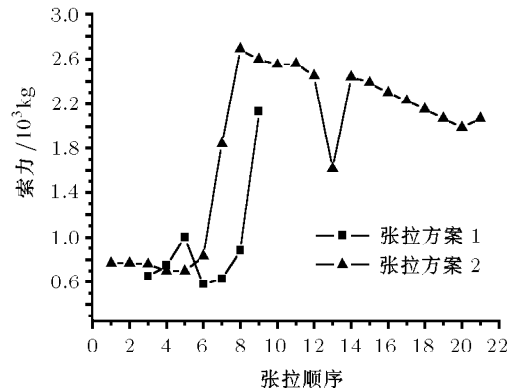
3.1.1 索力

为了对两种张拉方案的索力进行比较, 绘出了所有拉索的索力变化曲线. 图 12 是有代表性的两条索力变化曲线 (H 轴和 15 轴索力变化曲线).

从图 12 可以看出, 两种张拉方案的最终索力大体相当, 只是方案 1 索力分 7 步变化到最终值, 方案 2 分 21 步变化到最终值. 另外, 通过对两种方案的所有最终索力进行分析, 发现方案 1 的最终索力与理论值的误差较大, 最大误差绝对值可达 38.19%, 而方案 2 的最终索力误差仅为 8.36%, 所以从索力最终值上来看, 分 3 级张拉显然比 1 级张拉要更为理想; 从张拉设备的角度考虑, 1 级张拉索力比较大 (实际工程的最大索力超过 200×10³kg), 而分 3 级张拉索力要小一些, 从而降低对张拉设备的要求.



(a) H 轴索力



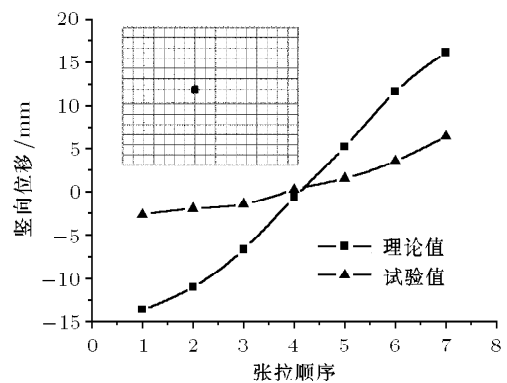
(b) 15 轴索力

图 12 索力变化趋势

3.1.2 结构变形

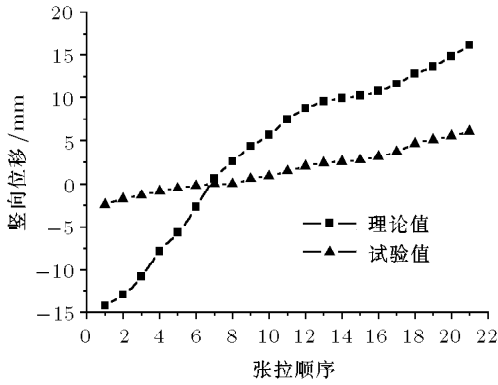
为了分析实验模型在张拉过程中的变形规律, 给出了有代表性的两条变形曲线. 如图 13 所示.

从图 13 可以看出: 两种张拉方案的位移变化规律是一致的, 张拉完成后的最终起拱值也基本相等, 单就位移而言, 两种张拉方案区别不大; 两种张拉方案的竖向位移均远小于理论值, 其变化趋势也比理论值平缓, 经分析认为这是由于实验模型的支座摩擦力较大, 与计算模型中假定的滑动支座差别所致.



(a) 方案 1 竖向位移变化

图 13 竖向位移变化比较



(b) 方案 2 竖向位移变化

图 13 竖向位移变化比较 (续)

3.1.3 钢结构应力

在预应力施工过程中, 由于索力分布的不均匀, 可能会导致部分杆件的应力过大. 为保证张拉过程的安全, 选取部分应力变化较大的杆件, 结合理论分析的结果, 考察其在张拉过程中的应力变化规律及变化范围是很有必要的.

在试验过程中, 选取了一些有代表性的杆件, 包

括网格结构的上弦、下弦、腹杆以及网格结构与拉索之间的部分撑杆. 根据其应力变化规律并与理论计算值进行比较可以看出: (1) 应力试验值与理论计算值的大小及其变化规律比较吻合; (2) 两者的应力变化都在控制范围之内, 结构在张拉过程中是安全的.

3.2 静力性能试验结果及分析

3.2.1 索力

图 14 为 9~22 轴横向索从恒载 (1.5 kN/m^2) 到超载 4 级 (4 kN/m^2) 的索力变化规律.

从图 14 可以看出: (1) 越靠近结构中部索力越大, 中间 15, 16, 17 轴横向索力最大, 且数值基本相同; (2) 随着荷载的增加, 索力逐渐增大, 结构中部横向索力的增幅明显大于结构端部横向索力的增幅, 说明对于双向张弦结构, 越靠近结构中部, 拉索对于结构的变形和受力所起的作用越大.

图 15 给出了 E~M 轴纵向索从恒载 (1.5 kN/m^2) 到超载 4 级 (4 kN/m^2) 的索力变化规律.

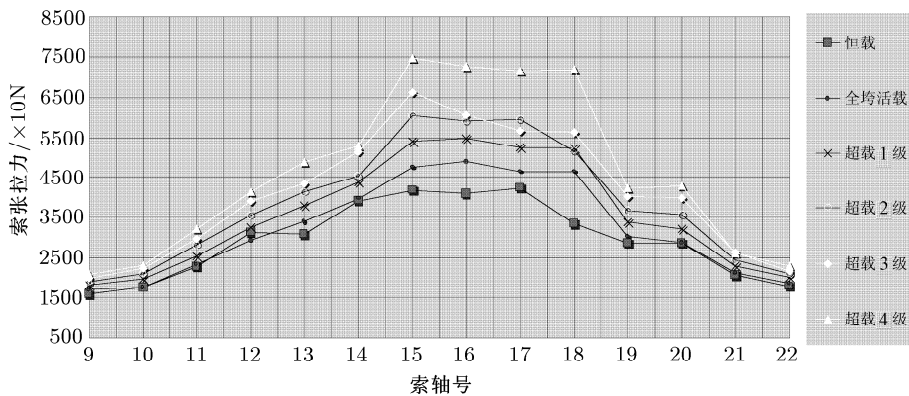


图 14 横索内力变化和分布

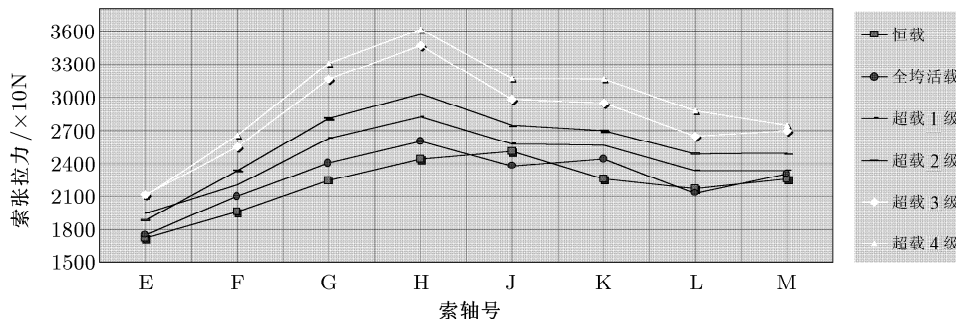


图 15 纵索内力变化和分布

从图 15 可以看出: (1) 由于结构的纵向拉索不是规则的圆弧, 所以索力的分布不像横向索那么有规律, 但基本上还是结构中部的索力大于结构两边

的索力; (2) 随着荷载的增加, 索力逐渐增大, 结构中部索力的增幅大于两边索力的增幅, 但差别没有横向索那么大; (3) 纵向索力明显小于横向索力, 说

明对于本工程来说，结构以横向受力为主。

在实验中还考察了不同活荷载分布对索力的影响，经过分析发现：活荷载只是对其分布区域的索力影响比较明显。但总的来说，由于活荷载在整个荷载中所占比例不大，索力变化对于不同的活荷载

分布不是很敏感。

3.2.2 结构变形

为方便在曲线中表现结构的变形规律，首先对荷载的施加顺序进行编号，如表 3 所示。

表 3 荷载施加顺序

荷载施加	恒载			活载				超载				
	1 级	2 级	3 级	1/4 跨	纵向 1/2 跨	横向 1/2 跨	全跨	吊挂	1 级	2 级	3 级	4 级
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

图 16 是结构中 4 个节点在荷载施加过程中的竖向位移变化曲线，横坐标为上表中的荷载施加顺序编号，纵坐标为节点的位移值。

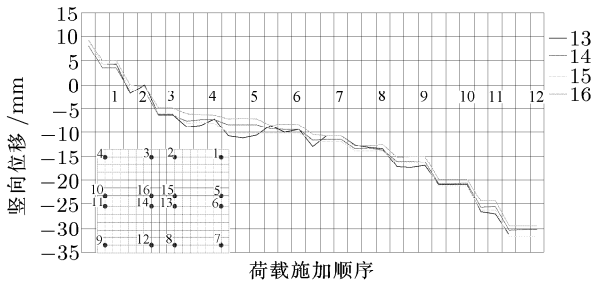


图 16 结构中部竖向位移变化曲线

从图 16 可以看出：(1) 在预应力施加完成之后，屋面恒载施加之前，结构中部向上起拱，起拱值约 7mm；(2) 在屋面恒载第 2 级施加完成后，结构中部的挠度接近于零，恒载施加完毕后，结构中部挠度约为 6mm，在超越荷载施加完毕后，结构中部挠度达到 31.87mm，为跨度的 1/358，说明结构具有很好的刚度；(3) 随着荷载的增加，结构的挠度逐渐增大，且二者之间基本上呈现线性变化关系。

3.2.3 钢结构应力

为了进一步了解结构在静力荷载下的受力性能，选取了网格结构的部分上弦、下弦、腹杆以及部分撑杆，并对这些杆件在荷载施加过程中的应力变化规律进行考察。图 17 给出了两条有代表性的应力变化曲线。

经过对应力数据进行分析，可得以下结论：(1) 网格结构的上弦杆件大部分为受压杆件，压应力随着荷载的增加而增加；(2) 下弦杆件在结构中部为拉应力，在结构周边，由于受到拉索的影响为压应力，应力数值随着荷载的增加而增加；(3) 腹杆的应

力分布没有明显的规律性，但大部分腹杆的应力不大，说明腹杆的截面一般取决于杆件的长细比；(4) 屋盖结构上弦与下弦之间的撑杆为受压构件，压应力随着荷载的增加而增加，但应力数值很小。

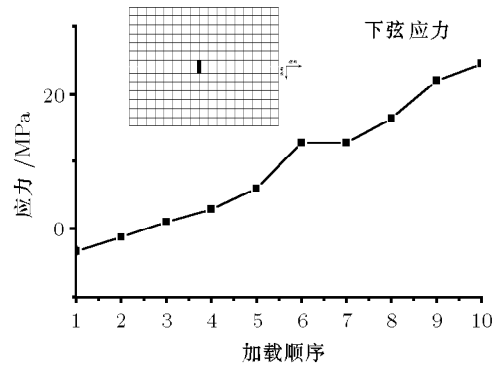
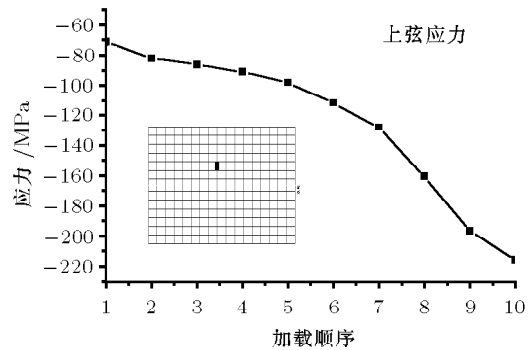


图 17 应力变化曲线

3.3 断索试验结果及分析

从图 18 曲线可以看出，随着 4 根受力最大的拉索相继失效，结构没有出现整体坍塌的情况。其中部 13 点和 16 点竖向位移曲线基本呈现线性降低，反映出双向张弦结构具有很好的空间作用，结构自适应能力强。

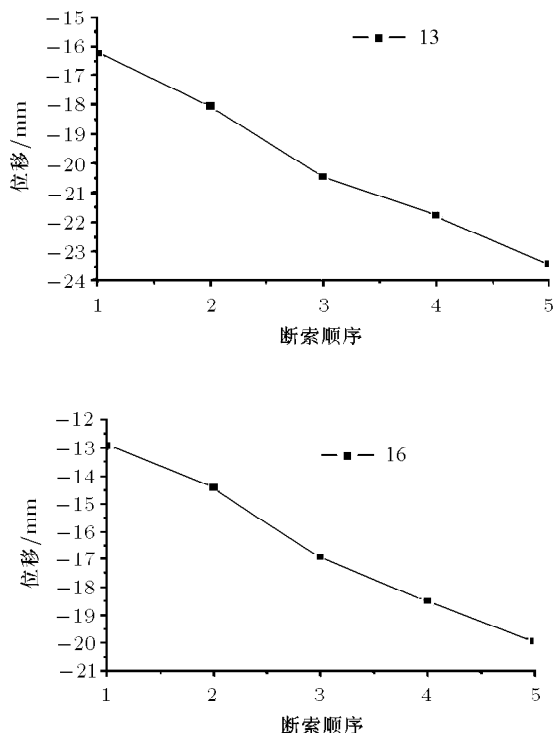


图 18 竖向位移曲线

4 结 论

本文以国家体育馆屋面预应力钢结构为原型，通过模型试验的方法研究了双向张弦结构的预应力施加方法和静力性能，得出以下主要结论：

(1) 由于双向张弦结构含有纵向拉索和横向拉索，因而与单向张弦结构相比具有显著的双向受力特征，这个特征在预应力施加阶段和静力荷载作用阶段均充分展现；

(2) 在对双向张弦结构施加预应力的过程中，不同轴线的拉索索力互相影响很大。试验表明，分步张拉是比较有效的方案，同时张拉步骤细化会减小最终的张拉损失；

(3) 在静力荷载作用下，双向张弦结构桁架上弦受压，跨中杆件内力要明显大于角部杆件，横向杆件明显大于纵向杆件；桁架下弦杆件在跨中始终受力很小；

(4) 在设计恒荷载作用下，结构竖向变形小于规范规定数值，表明双向张弦结构具有很好的刚度，在大跨度结构中有明显的优势；

(5) 在设计活载作用下，有活载布置和无活载布置区域的变形相差不大。这充分显示出双向张弦结构力学性能的优越性，双向弦索对半跨活载作用下桁架的不对称变形有明显的调节作用；

(6) 断索试验结论表明双向张弦结构不会因某一根索的破断而产生结构的整体坍塌，该结构类型具有很好的可靠性，在对安全性要求较高的公共建筑中有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 陆赐麟, 尹思明, 刘锡良. 现代预应力钢结构. 北京: 人民交通出版社, 2003
- 日本钢结构协会. 陈以一, 傅攻义译. 钢结构技术总揽——建筑篇. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- 刘锡良, 白正仙. 张弦梁结构受力性能的分析. 钢结构, 1998, 13(4): 4~8 (Liu Xiliang, Bai Zhengxian. Analysis of mechanics behaviour of beam string structure. *Steel Construction*, 1998, 13(4): 4~8 (in Chinese))
- 黄里新. 高科技技术与刷新纪录. 田径, 1998, 7: 45 (Huang Lixin. High-tech and new record creating. *Track and Field*, 1998, 7: 45 (in Chinese))
- 渠广伟. 玻璃纤维竿的应用. 体育师友, 2003, 2: 27 (Qu Guangliang. Application of GFRP pole. *TiYu Shi You*, 2003, 2: 27 (in Chinese))
- Dillman CJ, Nelson RC. The mechanical energy transformations of pole vaulting with a fiberglass pole. *Journal of Biomechanics*, 1968, 1(3): 175~183
- Burgess SC. The modern olympic vaulting pole. *Materials and Design*, 1998, 19: 197~204
- Ekevad M, Lundberg B. Simulation of 'smart' pole vaulting. *Journal of Biomechanics*, 1995, 28(9): 1079~1090
- 张武纪, 王代才. 论现代撑竿跳高技术. 成都体育学院学报, 1994, 20(4): 26~32 (Zhang Wuji, Wang Daicai. Modern vault techniques. *Journal of Chengdu Physical Education Institute*, 1994, 20(4): 26~32 (in Chinese))
- http://www.neovault.com/articles_physics_of_pole_vaulting.asp 或 http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/Daniel.Lenord/vault.html
- Schade F, Arampatzis A, Brüggemann GP. Influence of different approaches for calculating the athlete's mechanical energy on energetic parameters in the pole vault. *Journal of Biomechanics*, 2000, 33: 1263~1268
- Ekevad M, Lundert B. Influence of pole length and stiffness on the energy conversion in pole vaulting. *Journal of Biomechanics*, 1997, 30: 259~294
- http://www.eng2.bham.ac.uk/metallurgy/people/Kukureka_Files/PoleVaultforEngineers.pdf
- 杜艳, 张玉泉. 布勃卡撑竿跳高制胜因素分析. 湖北体育科技, 2001, 20(4): 7~10 (Du Yan, Zhang Yuquan. An analysis of winning factors of Bulekaps pole vaulting. *Journal of Hubei Sports Science*, 2001, 20(4): 7~10 (in Chinese))

(上接第 70 页)