

文章编号:1673-2049(2008)04-0073-05

大跨度索支承实腹式门式刚架 钢结构的设计分析

王元清¹, 李久志¹, 石永久¹, 石小敏¹, 陈 宏²

(1. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学 建筑设计研究院, 北京 100084)

摘要:以某 72 m 跨度的粮食仓库为实例, 计算了索支承实腹式门式刚架结构在不同荷载工况作用下的内力及变形分布, 并与不同类型的大跨门式刚架分析结果进行了比较, 探讨了索支承门式刚架结构的工作原理和设计方法。结果表明:索支承刚架的预应力效果比普通预应力刚架更加明显, 更好地改善了刚架的受力性能;在索支承刚架的设计过程中, 不可忽略撑杆和钢拉索的变形, 必须按几何非线性计算。

关键词:索支承门式刚架;预应力;大跨度;荷载;变形

中图分类号:TU393.3 **文献标志码:**A

Design and Analysis of Long-span Portal Frame Steel Structures with Prestressed Cable-strut

WANG Yuan-qing¹, LI Jiu-zhi¹, SHI Yong-jiu¹, SHI Xiao-min¹, CHEN Hong²

(1. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Ministry of Education,
Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Architectural Design and Research
Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The distributions of stress and deformation were computed for the portal frame with prestressed cable-strut under various load conditions based on a grain warehouse with 72 m span, and the results were compared with that of different long-span portal frames. The method was developed to analyze the mechanical principle of portal frame with prestressed cable-strut. The results show that the effect of prestress of the portal frame with prestressed cable-strut is more effective than common prestressed frames, and effectively improves the mechanical behavior of portal frames due to deformations of the strut and cable should be considered in the design of portal frame; therefore, the deformations should be computed by geometry nonlinearity.

Key words: portal frame with cable-strut; prestress; long-span; load; deformation

0 引言

大跨度门式刚架中对设计起控制作用的往往不是内力而是变形, 而中国现有建筑钢材的弹性模量基本相同, 增大钢材强度不能提高截面刚度, 导致刚

架梁柱的截面随跨度增大, 钢材的强度却没有得到充分利用, 普通大跨度实腹式门式刚架经济性指标大大下降。中国自行设计的大连 72 m 跨度门式刚架粮仓储备库, 最大截面已达到 1 800 mm×300 mm×12 mm×14 mm, 用钢量(仅刚架, 不包括围护结构)

收稿日期:2008-08-26

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20050003080)

作者简介:王元清(1963-), 男, 安徽霍山人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: wang-yq@mail. tsinghua. edu. cn.

达到 $49.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ [1]。

针对上述问题,建议采用索支承实腹式门式刚架这种新型预应力钢结构形式,索支承实腹式门式刚架只须通过伸长撑杆施加预应力,与其他需要张拉钢索的预应力钢结构相比,它是一种节点构造简单、施工简便、预应力效果明显的结构。近年来,中国对索支承门式刚架的承载性能进行了系统的理论和试验研究^[2-6],文献[2]、[3]中对索支承门式刚架的承载原理和工程应用情况进行了分析;文献[4]中进行了 1 榀 10 m 跨度的索支承门式刚架模型的承载性能试验研究;而文献[5]中对索支承门式刚架承载性能的影响因素进行了分析。以上这些研究成果对索支承门式刚架的工程应用提供了理论基础。笔者结合某 72 m 跨粮食仓库的设计,分析了其承载原理和设计方法。

1 索支承实腹式门式刚架结构

1.1 结构形式

索支承门式刚架由拉索和撑杆组成,通过旋动钢套管的外管使撑杆伸长从而对刚架施加预应力,如图 1 所示。索支承刚架在现场拼装后、安装钢拉索前的形式和普通刚架相同,这时刚架只承受自重;安装钢拉索后的形式见图 1(a),钢索没有拉紧,索中拉力为 0,刚架仍然只承受自重;旋动撑杆的外套管,撑杆渐渐伸长最终形成如图 1(b)所示的形式。撑杆伸长时张紧钢索使索中产生预应力。

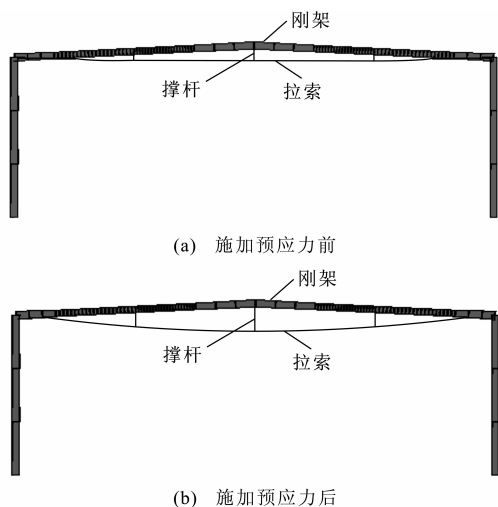


图 1 索支承门式刚架构造

Fig. 1 Structure of Portal Frames with Prestressed Cable-strut

1.2 特点

索支承门式刚架除了具有传统预应力结构增强

结构刚度、降低柱顶弯矩及柱底反力的优点外^[7-9], 还具有一些自身的独特优势:

(1) 预应力效果更明显,具有更大的承载能力。施加预应力后,不仅钢拉索对柱顶产生向内的拉力,同时撑杆还对刚架产生向上的顶力。向上的顶力抵消很大一部分竖向自重荷载,因此施加了预应力的索支承门式刚架承受外荷载后,梁柱中最终弯矩减小甚至为负。

(2) 具有更大的结构刚度。拉索不仅给结构施加了预应力,而且成为刚架横梁的下弦杆,较传统采用的紧贴刚架梁下弦布置预应力索的方式具有更大的结构刚度。此外,在竖向荷载作用下,撑杆和钢拉索分别对刚架梁和柱起到弹性支撑的作用,增强了刚架特别是梁的刚度。

(3) 预应力大小容易控制,施加预应力的方法简单。给索支承刚架施加预应力就是通过旋长撑杆来张紧和拉长钢索使钢索中产生预应力,钢索再通过撑杆和索端锚具给刚架施加预应力的过程,因此可以通过撑杆的伸长量来控制钢索预应力的。索支承结构只须拧动撑杆使之伸长以张紧钢拉索,无须直接张拉钢索,避免了一般预应力刚架在刚架拼装完成后直接张拉钢索必须高空作业给施工带来的不便。

(4) 应采用几何非线性分析计算。因索支承门式刚架中撑杆在施加预应力的过程中伸长量很大,计算时应考虑其大变形,采用几何非线性方法。

2 工程设计实例

为分析索支承实腹式门式刚架的受力性能,本文中对跨度为 72 m,檐口高度为 18 m,柱距为 9 m,屋面坡度为 1:20 的四川某粮食仓库采用的索支承门式刚架进行了计算。施工过程中刚架的实际受力过程分为 3 个阶段:

第 1 阶段:刚架在现场拼装完成后,此时刚架只承受自重。

第 2 阶段:刚架拼装后,安装钢拉索和撑杆,然后拧动撑杆施加预应力,此时刚架同时承受自重和预应力。

第 3 阶段:刚架在正常使用阶段承受全部使用荷载。

由上述可知,刚架受力性能分析计算可按照以上 3 个阶段进行。

2.1 荷载取值及计算工况

屋面恒荷载为 0.3 kPa(不包括刚架自重,自重

由软件自动加入),屋面活荷载为 0.5 kPa,屋面雪荷载为 0.3 kPa,基本风压为 0.35 kPa。

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001),刚架在正常使用阶段的荷载最不利组合要考虑以下 4 种计算工况:①1.2 倍恒荷载加 1.4 倍活荷载;②1.0 倍恒荷载加 1.4 倍风荷载(向右);③1.2 倍恒荷载加 1.4 倍风荷载(向右);④1.2 倍恒荷载加 1.4×0.85 倍活荷载加风荷载(向右)。

2.2 计算参数

计算中,刚架采用 Q345 钢材,钢材强度设计值 $f=315\text{ MPa}$ (挠度 $t\leqslant 16\text{ mm}$),弹性模量 $E=2.06\times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。预应力钢索采用 7 股钢绞线,钢绞线抗拉强度设计值 $f_{py}=1\,260\text{ MPa}$,钢绞线抗拉强度标准值 $f_{ptk}=1\,860\text{ MPa}$,弹性模量 $E=1.7\times 10^5\text{ MPa}$ 。钢索的应力控制在 $0.6f_{py}$ 以下。

根据《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102:2002):主刚架梁的挠度限值取跨度的 $1/180$;主刚架柱侧移限值取高度的 $1/100$ 。

2.3 计算结果

表 1 中数据和不同阶段刚架内力变化表明:
(1)施加的预应力对刚架起到了很好的卸载作用。自重作用下刚架横梁跨中挠度为 $L/400$ (向下, L 为刚架梁跨度),施加预应力并控制横梁跨中挠度 t 达到 $L/250$ (向上,反拱),此时梁柱节点弯矩由自重作用下的 $-406\text{ kN}\cdot\text{m}$ 变为 $224\text{ kN}\cdot\text{m}$,梁跨中弯矩由 $196\text{ kN}\cdot\text{m}$ 变为 $-432\text{ kN}\cdot\text{m}$ (图 2、3)。
(2)刚架承受外荷载作用时,虽然在工况②、③作用下由于风荷载对屋盖向上的吸力作用使刚架的内力在施加预应力后的内力基础上略有增加,但

表 1 72 m 跨度索支承实腹式门式刚架在不同受力阶段的应力及变形

Tab. 1 Stresses and Deformations of 72 m Span Portal Frame with Prestressed Cable-strut in Different Force Stages						
受力阶段	梁应力/MPa	柱应力/MPa	梁跨中挠度/mm	左柱柱顶侧移/mm	撑杆应力/MPa	索应力/MPa
第 1 阶段			180(向下)	8(向左)		
第 2 阶段	132.5	75.3	281(向上)	23(向右)	14.4	181.3
第 3 阶段	工况①	270.8	265.8	247(向下)	14(向左)	45.5
	工况②	142.6	188.4	44(向上)	113(向右)	29.4
	工况③	161.8	200.5	44(向上)	113(向右)	26.1
	工况④	154.1	156.8	169(向下)	105(向右)	39.7

内力显著增加(图 4、5),承受了部分外荷载,使索支承刚架比普通刚架具有更大的承载力。

2.4 3 种门式刚架的比较

2.4.1 内 力

索支承刚架引入预应力后,大大改善了梁柱的

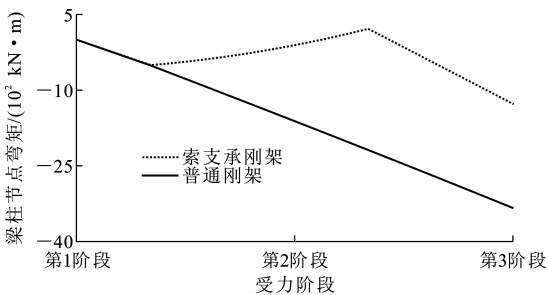


图 2 刚架梁柱节点弯矩变化

Fig. 2 Moment Changes of Beam-column Joints of Portal Frame

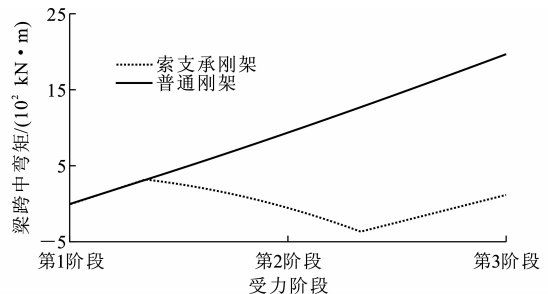


图 3 刚架梁跨中弯矩变化

Fig. 3 Moment Changes of Beam Mid-span of Portal Frame

结果表明这 2 种工况都不起控制作用。在起控制作用的工况①作用下,刚架梁柱节点弯矩由第 2 阶段的 $224\text{ kN}\cdot\text{m}$ 变为 $-1\,320\text{ kN}\cdot\text{m}$,梁跨中弯矩由 $-432\text{ kN}\cdot\text{m}$ 变为 $-103\text{ kN}\cdot\text{m}$ (图 2、3)。
(3)施加预应力后刚架梁跨中产生有效的反拱,增大了刚架的整体刚度。挠度由自重作用下的 180 mm (向下)变为 281 mm (向上),柱顶侧移由 8 mm (向左)变为 23 mm (向右)。
(4)在起控制作用的工况①作用下,钢索和撑杆

受力性能,提高了承载能力,增大了整体刚度,减小了柱底反力。为了便于比较,图 6 中给出了控制工况①作用下 3 种刚架的弯矩,表 2 中列出了普通刚架、普通预应力刚架和索支承刚架在不同工况下的柱底反力。

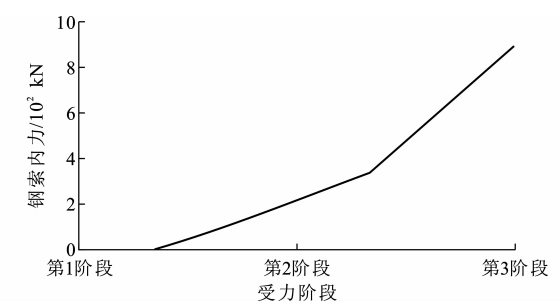


图 4 钢索内力变化
Fig. 4 Stress Changes of Cable

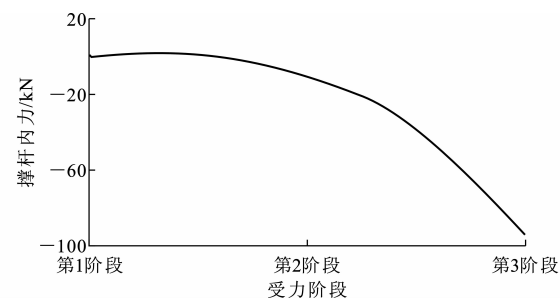


图 5 撑杆内力变化
Fig. 5 Stress Changes of Brace

由图 6 和表 2 比较可知,索支承刚架引入预应力后,梁跨中弯矩和梁柱节点弯矩都大大减小。另外,柱底反力和弯矩也减小很多,相应地降低了基础造价。

2.4.2 用钢量

图 6 和表 3 中给出了该 72 m 跨度粮仓分别采用普通刚架、普通预应力刚架和索支承门式刚架

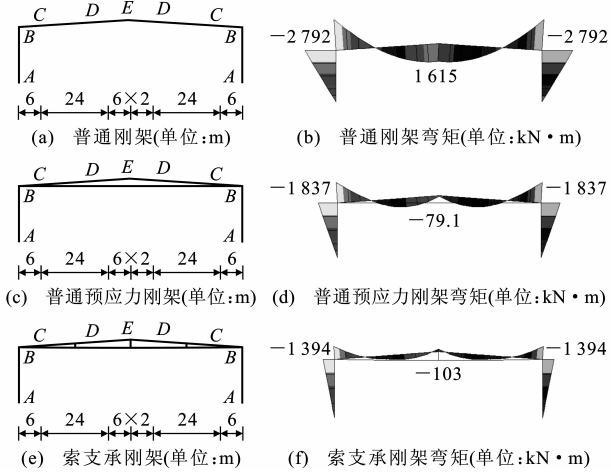


图 6 刚架及弯矩
Fig. 6 Frames and Moments
表 2 72 m 跨度的 3 种刚架柱底反力比较
Tab. 2 Comparisons of Reaction Forces in Columns of Three Types of Frames

工 况	柱底反力		
	普通刚架	普通预应力刚架	索支承刚架
①	155.1	102	77
②	52.3	-105	-83
③	65.0	-91	-76
④	153.0	118	59

注:反力指向柱内侧翼缘为正,指向外侧翼缘为负。
的截面尺寸。对此工程的用钢量统计表明,采用索支承预应力门式刚架用钢量(仅为刚架部分,未包括钢拉索和撑杆)为 $32.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,比普通门式刚架节省 35% 左右。

表 3 刚架截面尺寸
Tab. 3 Section Dimensions of Frames

位置	普通刚架				普通预应力刚架				索支承刚架			
	翼缘高度	翼缘宽度	翼缘厚度	腹板厚度	翼缘高度	翼缘宽度	翼缘厚度	腹板厚度	翼缘高度	翼缘宽度	翼缘厚度	腹板厚度
AB 段	500~1 700	300	14	12	500~1 500	300	14	10	500~1 300	250	12	10
BC 段	1 100~1 700	300	14	12	1 000~1 500	300	14	10	850~1 300	250	12	10
CD 段	1 100	300	12	8	1 000	300	12	8	850	250	10	8
DE 段	1 100~1 700	300	14	12	1 000~1 500	300	14	10	850~1 100	250	12	10

3 结 语

- (1)索支承刚架的预应力效果比普通预应力刚架更加明显,更好地改善了刚架的受力性能。
- (2)索支承结构通过伸长撑杆施加预应力,方法简便、易操作,无须直接张拉钢索,避免了一般预应力刚架在刚架拼装完成后直接张拉钢索必须高空作业给施工带来的不便。
- (3)在索支承刚架的设计过程中,不可忽略撑杆和钢拉索的变形,必须按几何非线性计算。

(4)屋盖的向上风吸力和预应力共同作用可能成为起控制作用的最不利组合,设计计算中应引起足够的重视,但是通过合理选择刚架梁柱截面、控制预应力的可以解决这一问题;预应力的控制可以通过增减撑杆数目和伸长量以及施加预应力前后钢拉索的线形来实现。

参考文献:
References:

[1] 宿明彬,胡战波.大跨度门式刚架钢结构轻型房屋建筑之应用[J].钢结构,2000,15(1):12-14.

- SU Ming-bin, HU Zhan-bo. Application of Large-span Portal Frame Light Steel Structure Building[J]. Steel Construction, 2000, 15(1): 12-14.
- [2] 石小敏, 王元清, 石永久. 预应力钢结构及其在大跨度门式刚架中的应用研究[J]. 钢结构, 2000, 15(增): 304-310.
- SHI Xiao-min, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu. Investigation and Application of Prestressed Steel Structures in Large-span Portal Frame[J]. Steel Construction, 2000, 15(S): 304-310.
- [3] 石小敏, 张 勇, 王元清, 等. 大跨度索支承实腹式门式刚架钢结构及其应用[J]. 工业建筑, 2003, 33(2): 68-70.
- SHI Xiao-min, ZHANG Yong, WANG Yuan-qing, et al. The Application of Large-span Portal Frame with Prestressed Cable-strut [J]. Industrial Construction, 2003, 33(2): 68-70.
- [4] 张 勇, 王元清, 石永久, 等. 索支承门式刚架模型静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 79-86.
- ZHANG Yong, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu, et al. Static Load Experimental Investigation to Model of Cable-strut Portal Frame [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 79-86.
- [5] 张 勇, 王元清, 石小敏, 等. 索支承门式刚架承载性能影响因素分析[J]. 建筑结构, 2004, 34(5): 22-25.
- ZHANG Yong, WANG Yuan-qing, SHI Xiao-min, et al. Analysis of Effect Parameters for the Load-carrying Performance of Cable-strut Portal Frame [J]. Building Structure, 2004, 34(5): 22-25.
- [6] 贺拥军, 周绪红, 刘永健, 等. 超大跨度巨型网格结构[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 25-29.
- HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, et al. Super-span Reticulated Mega-structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 25-29.
- [7] 陆赐麟, 尹思明. 预应力钢结构技术讲座(5-3)——预应力钢结构空间结构体系[J]. 钢结构, 2000, 15(4): 61-65.
- LU Ci-lin, YIN Si-ming. Presentation (5-3) About Prestressed Steel Structures—Spatial Structural Systems of Prestressed Steel Structures [J]. Steel Construction, 2000, 15(4): 61-65.
- [8] SAITOH M, OKADA A, MIYASATO N. Proposal of Reversed Progress Technique for Tension Structures and Its Application [C]//IASS. Proc. of International Symposium on Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures. Nagoya: IASS, 2001: 128-129.
- [9] 钟善桐. 预应力钢结构[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1986.
- ZHONG Shan-tong. Prestressed Steel Structures [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1986.

《建筑科学与工程学报》影响力大幅度提高

根据《中国学术期刊综合引证年度报告》(2008)统计,《建筑科学与工程学报》2007年的影响因子已达到2.650,影响力大幅度提高。《中国学术期刊综合引证年度报告》是中国科学文献计量评价研究中心、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社根据《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》2007年6500种统计刊源析出的350万条中国期刊引文数据及CNKI“中国期刊网”中心网站2007年1~12月全文下载记录(3.1亿篇次)的大样本数据进行统计分析的,具有一定的权威性。此数据表明,《建筑科学与工程学报》在中国土木建筑领域的影响力已得到大幅提升。

《建筑科学与工程学报》自2005年改刊名以来,加大了约稿力度,汇集了众多建筑科学领域的名家、大家的稿件,国家自然科学基金、“八六三”、“九七三”等国家级科研项目产生的学术论文占70%以上。《建筑科学与工程学报》荣获“2005、2006年度陕西省科技期刊审读优秀奖”。2006年11月,在教育部科学技术司组织开展的“首届中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖评比活动”中,《建筑科学与工程学报》荣获首届中国高校特色科技期刊奖。《建筑科学与工程学报》正在不断进步,不断完善,已成长为建筑领域的权威性学术期刊。