

文章编号:1673-2049(2007)04-0074-08

# 大跨度预应力张弦式管道试验与有限元分析

薛伟辰<sup>1</sup>, 刘 晟<sup>1</sup>, 王恒栋<sup>2</sup>, 卫 丹<sup>2</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

**摘要:**以一榀100 m跨度预应力张弦式管道为原型,设计了1:15比例缩尺模型,在中国首次开展了张弦式管道在预应力张拉阶段、正常使用阶段及承载力极限阶段的受力全过程试验研究。基于ANSYS软件对试验全过程进行了非线性有限元模拟,并结合一致缺陷模态法与柱面弧长法,进行了同时考虑初始几何缺陷与几何非线性的屈曲分析。结果表明:半跨荷载对预应力张弦式管道较为不利,结构整体变形与上弦应力增长较为迅速;结构对平面外的初始几何缺陷较为敏感,半跨荷载下的屈曲临界荷载较全跨荷载作用时稍低;结构具有可靠的稳定性与较大的安全储备,极限承载力达到设计荷载的2.68倍;有限元计算值与试验结果吻合良好;该非线性有限元分析方法能较好地实现对预应力张弦式管道受力全过程的模拟。

**关键词:**大跨度预应力张弦式管道;预应力张弦梁;模型试验;非线性有限元全过程分析;屈曲分析  
**中图分类号:**TU393.3 **文献标志码:**A

## Experiment and FEM Analysis on Long-span Prestressed Beam String Pipes

XUE Wei-chen<sup>1</sup>, LIU Sheng<sup>1</sup>, WANG Heng-dong<sup>2</sup>, WEI Dan<sup>2</sup>

(1. Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Municipal Engineering Design General Institute, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on a 100 m-span beam string pipe as an original type, a 1:15 scaled model was firstly tested to investigate the full-range behaviors of this structure during the stretching phase, normal serviceability phase and ultimate load carrying phase in China. Nonlinear finite element simulation for the test of full-range was conducted by using ANSYS software. In addition, buckling analysis simultaneous considering initial geometrical imperfection and geometrical nonlinear was performed by combining uniform imperfections mode method and cylindrical arc length method. The results show that the whole structural deformations and member stresses increase relatively fast under half-span load, and the half-span load is disadvantaged for prestressed beam string pipe. The beam string pipe is sensitive to the out-plane initial geometrical imperfection; critical buckling load of the half-span is a little lower than that of full-span. This structure develops reliable stability and relatively large safety reserve with an ultimate load up to 2.68 times design load. The analytical results by using nonlinear finite element method analysis are in good agreement with the test results, which indicate that the nonlinear finite element method analysis is capable for the full-range simulation of prestressed beam string pipes.

**Key words:** long-span prestressed beam string pipe; prestressed string beam; model test; nonlinear finite element full-range analysis; buckling analysis

收稿日期:2007-09-12

基金项目:混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放基金项目(2005)

作者简介:薛伟辰(1970-),男,江苏扬州人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:xuewc@mail.tongji.edu.cn。

## 0 引言

预应力张弦梁(Beam String Structure,BSS)是一种用受压腹杆将上弦压弯构件和下弦受拉构件组合在一起而形成的自平衡体系<sup>[1-6]</sup>,该体系由 Masao 于 1984 年首先提出。目前,预应力张弦梁结构主要应用于大跨度屋盖结构。中国较为典型的工程有上海浦东国际机场跨度为 82.6 m 的张弦梁屋架、广州国际会展中心跨度为 126.5 m 的张弦桁架和哈尔滨国际体育与会议展览中心跨度为 128 m 的张弦桁架。管道运输是运具与线路合二为一的一种新型运输方式,既可以输送液体和气体物资(水、石油、天然气等),又可以输送固体物资(煤、矿石等)。在管道运输的过程中可能遇到江河或沟壑的阻隔,为了跨越这些障碍,目前各国大多采用传统的架设桥梁或开挖隧道的方式,造价十分昂贵。预应力张弦梁结构受力性能良好,且适用于 100~150 m 的大跨度,若将其上弦设计为运输管道,便成为管道跨越江河或沟壑等障碍的一种新型结构形式——大跨度预应力张弦式管道。

与目前应用较多的张弦梁屋盖相比,大跨度预应力张弦式管道在结构形式与荷载工况等方面具有特殊性:①大跨度预应力张弦式管道为单榀孤立存在,无法像屋盖结构那样依靠各榀张弦梁之间的连梁、支撑等连接构件来保证其侧向稳定,只能采取在上弦靠近两端支座处设置斜撑等措施,因此结构的稳定性问题尤为重要;②大跨度预应力张弦式管道除受到对称荷载作用外,在输送物资进入管道时还受到半跨荷载这种不利的非对称荷载作用。

预应力张弦梁结构体系研究是当前预应力空间钢结构领域的一个前沿课题<sup>[7-8]</sup>,目前仍很不成熟。各国对预应力张弦梁极限承载力的研究还很少,中国也尚未制定预应力张弦梁结构的设计规范,并且各国关于大跨度预应力张弦式管道的研究基本是空白,文献[9]为目前检索到的惟一相关资料,但该文仅对预应力张弦式输水管道的受力特点和设计方法进行了初步的探讨,未开展具体的试验与理论研究工作。为促进大跨度预应力张弦式管道在工程上的应用与推广,笔者在中国首次开展了大跨度预应力张弦式管道的模型试验,对结构在预应力张拉阶段、正常使用阶段及承载力极限阶段的受力性能进行了较为深入的研究。

## 1 试验设计

### 1.1 模型结构设计

大跨度预应力张弦式管道原型结构由同济大学与上海市政工程设计研究总院共同设计,如图 1 所示。其中,上弦的 1 066 mm×28 mm 圆钢管和腹杆的 325 mm×8 mm 圆钢管均采用 Q235B,下弦采用 199Φ5 高强钢丝束。

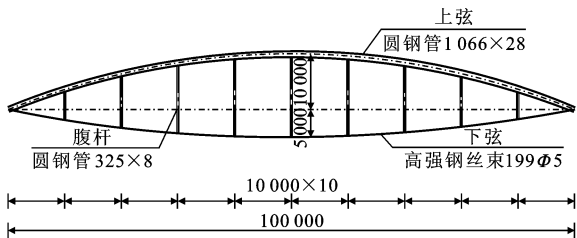


图 1 原型结构(单位:mm)

Fig. 1 Full-scaled Structure(Unit:mm)

试验模型与原型结构的几何尺寸相似比例为 1:15。模型结构的上弦为圆钢管 76 mm×2 mm,腹杆为 Φ18 圆钢,下弦为单根 Φ5 高强钢丝,如图 2 所示。各构件的材料力学性能见表 1。

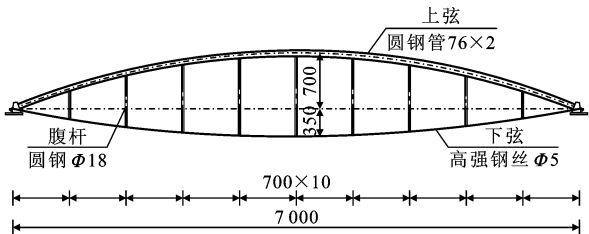


图 2 模型结构(单位:mm)

Fig. 2 Model Structure(Unit:mm)

表 1 材料力学性能

Tab. 1 Material Mechanical Properties

构件	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/10 <sup>5</sup> MPa	延伸率/%
上弦	224	461	1.85	9.5
腹杆	429	702	2.06	18.0
下弦	1 582	1 873	2.08	7.0

### 1.2 预应力张拉与加载方案

#### 1.2.1 自重的模拟与边界条件

根据相似理论,模型与原型结构的质量密度比为 15:1,为了解决模型质量相似比的问题,试验中采取在上弦各节段施加吊装的方法。吊装的布置如图 3 所示,各吊载点加载质量均为 25 kg。

两端支座在平面内和平面外均为铰接。为增强结构稳定性,原型结构方案在上弦靠近两端支座的 2 个节点处均设置了侧向斜撑,试验中采用如图 3 所示的侧向支撑对此进行了模拟。

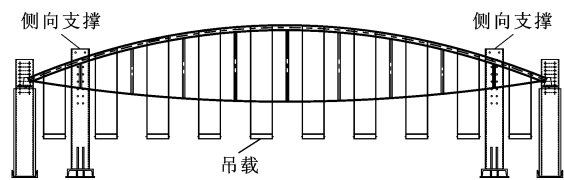


图 3 吊载及侧向支撑

Fig. 3 Gravity Loads and Lateral Braces

1.2.2 预应力张拉方案

采用油泵和穿心式千斤顶对下弦高强钢丝束进行张拉。为了便于对张拉过程中结构的几何位形及时进行调整,采用两端张拉的方式,具体流程是:①安装千斤顶;②第 1 级张拉,使得张拉装置与试验模型接触良好;③施加吊载;④第 2 级张拉;⑤锚固。由于跨中反拱对张拉力的增大较为敏感<sup>[10]</sup>,试验中以跨中反拱作为预应力张拉的主要控制指标,锚固后的跨中反拱控制在18.3 mm左右。

1.2.3 加载方案

试验加载考虑 5 种工况:①工况 1,张弦梁结构自重加 1.5 倍半跨水荷载;②工况 2,1.0 倍恒载标准值;③工况 3,1.0 倍恒载标准值加 1.0 倍活载标准值;④工况 4,1.2 倍恒载标准值加 1.4 倍活载标准值;⑤工况 5,加载至承载力极限。其中,工况 1 为半跨(靠近固定端的半跨)加载,工况 2~5 为全跨加载,半跨与全跨均采用液压加载系统进行同步加载。半跨加载时,荷载施加在靠近固定端的 4 个节点  $J_1 \sim J_4$  上;全跨加载时,荷载施加在上弦各节点上,加载装置及分布如图 4、5 所示。其中,节点  $J_1 \sim J_4$  和  $J_6 \sim J_9$  分别用 1 台 200 t 液压加载器加载,节点  $J_5$  用 1 台 50 t 液压加载器加载。各液压加载器的荷载均采用荷载传感器进行测量。各工况下加载点的荷载如表 2 所示。

表 2 各工况下加载点的荷载

Tab. 2 Load at Loading Points Under Each Case

	1( $J_1 \sim J_4$ )	2	3	4	5
荷载	1.06	0.78	0.84	1.09	加载至承载力极限

1.3 测试内容

测试内容主要有:①上弦、腹杆和下弦的应变;②上弦各节点的竖向位移;③两端支座竖向沉降和水平位移。共布置应变片 78 个,位移计 14 个。

2 试验结果与分析

2.1 预应力张拉阶段

2.1.1 跨中反拱

随着下弦应变的增大,上弦钢管逐渐向上拱起,



图 4 加载装置

Fig. 4 Loading Installation

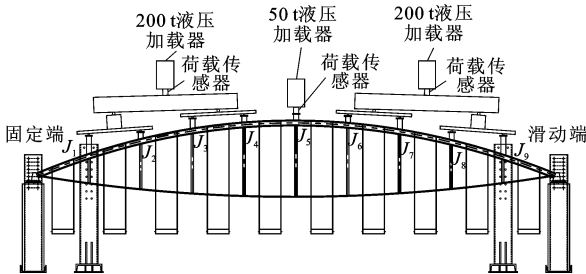


图 5 加载装置分布

Fig. 5 Distribution of Loading Installation

试验中锚固后的跨中反拱为18.34 mm,由此可见,张拉控制的效果较为理想。

2.1.2 支座水平位移

在张拉过程中的支座水平位移均集中在滑动端,为28.51 mm;而固定端的水平位移很小,为0.21 mm。

2.2 半跨加载阶段

2.2.1 结构变形

在半跨加载过程中,预应力张弦式管道模型的变形呈倒 S 形,即加载半跨向下挠曲,非加载半跨向上拱起,而跨中挠度基本不发生变化,如图 6 所示。在 1.5 倍半跨水荷载作用下(工况 1),上弦向下的挠度最大值为21.6 mm(节点  $J_2$ ),为跨度的1/324;上弦向上拱起的最大挠度为-36.4 mm(节点  $J_7$ ),为跨度的1/192。

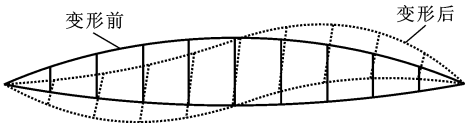


图 6 工况 1 下的结构变形

Fig. 6 Structure Deformation Under Case 1

2.2.2 构件应力

在 1.5 倍半跨水荷载作用下(工况 1),预应力张弦式管道模型各构件的最大应力见表 3。

表 3 工况 1 下各构件的最大应力

Tab. 3 Maximum Stress of Each Member

Under Case 1			MPa
构 件	上 弦	下 弦	腹 杆
应 力	-172.6	376.3	-44.3

从表 3 可以看出:在1.5倍半跨水荷载的作用下(工况 1),模型结构各构件上弦的最大应力为-172.6 MPa,仍在弹性范围内;下弦和腹杆的最大应力分别为376.3、-44.3 MPa,这远远没有达到材料的屈服强度。

2.3 全跨加载阶段

2.3.1 结构变形

各工况下模型上弦跨中的最大挠度见表 4。从表 4 可以看出:在预应力和恒载共同作用下(工况 2),上弦的跨中挠度为-0.07 mm(向上),为跨度的1/98 592,可见预应力的施加较好地控制了结构在工作状态下的变形;在标准荷载(工况 3)和设计荷载(工况 4)作用下,上弦的跨中挠度分别为1.66、8.38 mm,为跨度的1/4 217和1/835。

表 4 各工况下的跨中挠度

Tab. 4 Mid-span Deflection Under Each Case

工 况	跨中挠度/mm	跨中挠度占跨度的比例
张拉加自重	-18.34	1/382
2	-0.07	1/98 592
3	1.66	1/4 217
4	8.38	1/835

2.3.2 构件应力

各工况下预应力张弦式管道模型上弦、下弦和腹杆的应力见表 5。从表 5 可以看出:在标准荷载和设计荷载作用下,预应力张弦式管道模型上弦的最大应力分别为-45.8、-66.8 MPa,均处于弹性范围内;在设计荷载作用下,预应力张弦式管道模型的下弦应力为617.6 MPa,应力比(下弦应力与其设计强度的比值)为0.37,由此可见,下弦高强度钢丝束的材料强度被较为充分地利用了;在标准荷载和设计荷载作用下,预应力张弦式管道模型腹杆的最大应力分别为-47.8、-49.6 MPa,均处于弹性范围内。

2.4 稳定性

在预应力张拉阶段、正常使用阶段及承载力极限阶段,预应力张弦式管道模型均未出现任何形式的屈曲,结构的稳定性良好。

2.5 极限承载力

以预应力张弦式管道模型构件材料的屈服作为结构达到承载力极限状态的标准。当各加载点荷载

表 5 各工况下的构件应力

Tab. 5 Stresses of Members Under Each Case MPa

工 况	上 弦	下 弦	腹 杆
张拉加自重	-26.4	145.4	-18.1
2	-39.6	493.8	-46.8
3	-45.8	517.9	-47.8
4	-66.8	617.6	-49.6

达到3.46 kN时,上弦跨中上表面首先发生屈服;荷载达到3.72 kN时,下弦高强度钢丝束才发生屈服。上弦发生屈服时的荷载为荷载设计值的2.68倍,由此可见,结构具有较大的安全储备。

3 非线性有限元分析

3.1 试验全过程有限元模拟

基于 ANSYS 9.0 软件建立的张弦式管道的有限元模型如图 7 所示,其中上弦采用空间梁单元 Beam188,腹杆和下弦均采用空间杆单元 Link8。建模时采用了根据材料性质试验结果简化而得出的多折线本构关系,如图 8 所示;分析中还考虑了由于大变形而引起的几何非线性,并且采用生死单元法对张弦式管道下弦钢索的预应力作用进行了模拟。

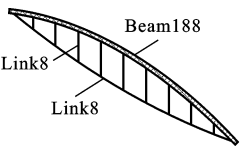


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite Element Model

3.1.1 预应力张拉阶段

跨中反拱的试验值与理论值对比如图 9 所示。由图 9 可以看出:预应力张弦式管道的跨中反拱与下弦应力的增长近似呈线性关系;跨中反拱的试验值与理论值吻合较好。

3.1.2 半跨加载阶段

(1)结构变形

半跨加载阶段上弦的最大挠度如图 10 所示。从图 10 可以看出:半跨加载阶段上弦的最大挠度(发生在节点 $J_7$ )与荷载基本呈线性关系;与全跨加载阶段对比可见,半跨荷载作用下结构的挠度增长较快;试验值与 ANSYS 计算值吻合良好。除节点 $J_7$ 以外,上弦其余各节点的挠度与荷载基本呈线性关系。

(2)上弦和下弦应变

半跨加载阶段的上弦和下弦的应变情况如图 11 所示。从图 11 可以看出:在半跨加载过程中,上弦的最大应变和下弦应变与荷载均基本呈线性关系,由此可见,预应力张弦式管道仍处于线弹性工作

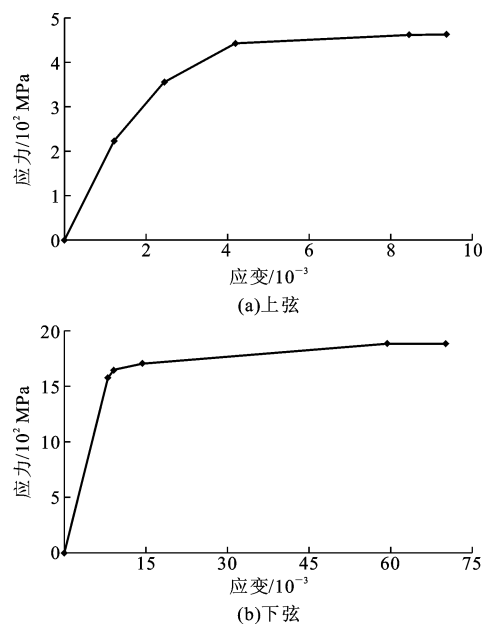


图 8 多折线本构关系曲线

Fig. 8 Multi-linear Constitutive Relationship Curves

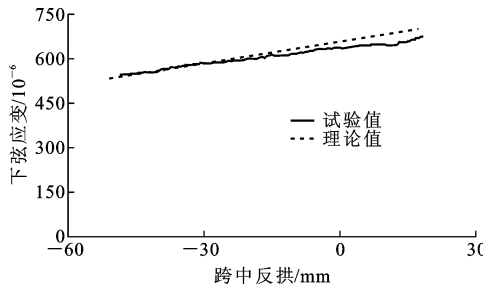


图 9 预应力张拉阶段的跨中反拱

Fig. 9 Mid-span Camber During Prestress Stretching Phase

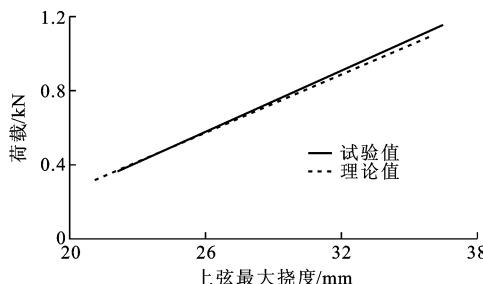


图 10 半跨加载阶段的上弦最大挠度

Fig. 10 Maximum Deflection of Beam During Half-span Loading Phase

状态,结构的强度是可靠的;与上弦最大挠度的变化规律相似,在半跨荷载作用下,上弦的应变较全跨荷载作用时增长较快,由此可见,在大跨度预应力张弦式管道的设计中,半跨荷载作用是一个关键的、起控制作用的工况,并且试验值与理论值吻合较好。

3.1.3 全跨加载阶段

(1) 结构变形

图 12 为全跨加载阶段结构跨中挠度与各加载

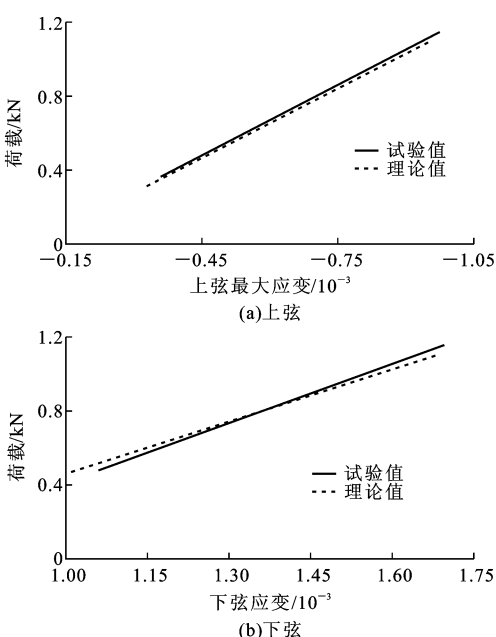


图 11 半跨加载阶段的应变曲线

Fig. 11 Strain Curves During Half-span Loading Phase

点荷载的关系。由图 12 可以看出:当荷载小于 3.46 kN 时,跨中挠度与荷载基本呈线性关系;当荷载超过 3.46 kN(上弦发生屈服)时,结构的刚度逐渐减小;当荷载达到 3.72 kN(下弦发生屈服)时,跨中挠度的增长非常迅速,结构已基本丧失了整体刚度;在弹性阶段和非线性阶段,试验值和计算值吻合良好。

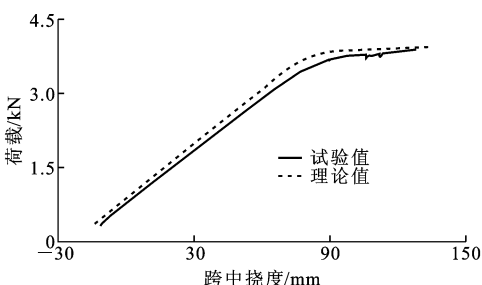


图 12 全跨加载阶段的跨中挠度

Fig. 12 Mid-span Deflection During Full-span Loading Phase

(2) 上弦和下弦应变

全跨加载过程中,上弦和下弦应变情况如图 13 所示。从图 13 可以看出:当各加载点的荷载小于 3.46 kN 时,上弦的最大应变和下弦应变与荷载均基本呈线性关系;此后上弦发生屈服,其应变增长速度明显加快,而下弦仍处于弹性状态,但由于上弦刚度的降低,下弦应力加速增长,应变的变化也随之加快;当荷载达到 3.72 kN 时,下弦也发生屈服,此时上弦与下弦的应变增长均非常迅速,结构失去继续

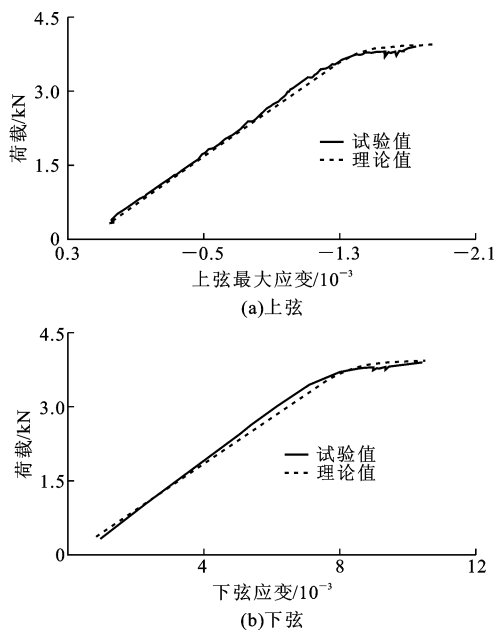


图13 全跨加载阶段的应变曲线

Fig. 13 Strain Curves During Full-span Loading Phase

承载的能力。在整个全跨加载过程中,试验值与理论值均吻合良好。

### 3.2 非线性屈曲分析

笔者结合一致缺陷模态法与柱面弧长法,通过考虑结构初始几何缺陷与几何非线性的屈曲分析,对预应力张弦式管道模型在全跨与半跨荷载作用下的稳定性进行了研究。

#### 3.2.1 全跨荷载作用

在进行非线性屈曲分析之前,通过特征值屈曲分析得到了结构在平面内和平面外的1阶理论屈曲荷载及其屈曲模态,以对预应力张弦式管道模型可能产生的屈曲形式进行了初步判断。平面内和平面外的1阶理论屈曲荷载分别为4.10、5.73 kN,屈曲模态如图14、15所示,其中,图14为平面内的2个半波,图15为上弦在侧向支撑之间平面外的1个半波。在非线性屈曲分析中,采用一致缺陷模态法<sup>[11]</sup>分别考虑了与这2种可能产生的屈曲形式相一致的初始几何缺陷,根据《钢结构工程施工质量规范》(GB 50205—2001)中的相关规定,初始几何缺陷的峰值均取为模型结构跨度的1/1 000。

对模型结构施加平面内的初始几何缺陷进行非线性屈曲分析得到的跨中挠度与各加载点荷载的关系如图16(a)所示。从图16(a)可以看出,当荷载加载至37.9 kN时,荷载-挠度曲线仍沿基本路径进行,非线性屈曲得到的结构在平面内的稳定承载能力远远超过特征值屈曲分析所得到的理论屈曲荷载。这

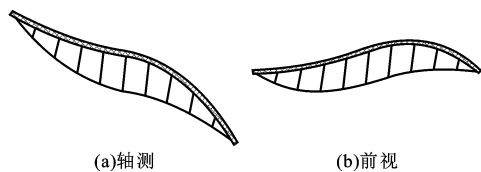


图14 平面内1阶屈曲模态

Fig. 14 In-plane First-order Buckling Modes

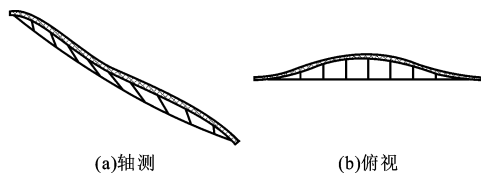


图15 平面外1阶屈曲模态

Fig. 15 Out-plane First-order Buckling Modes

表明,由于未能考虑到结构的几何非线性、下弦钢索的应力刚化等非线性特征,特征值屈曲分析有可能产生过于保守的结果。

对模型结构施加平面外的初始几何缺陷进行非线性屈曲分析得到的跨中挠度如图16(b)所示。从图16(b)可以看出,当荷载达到4.51 kN时,跨中挠度突然增大,结构发生失稳。由于初始缺陷的存在,结构的屈曲临界荷载较特征值屈曲分析得出的理论屈曲荷载值小。试验中全跨加载至最大荷载3.89 kN时,结构仍未出现任何形式的屈曲,这与非线性屈曲分析的结果是吻合的。

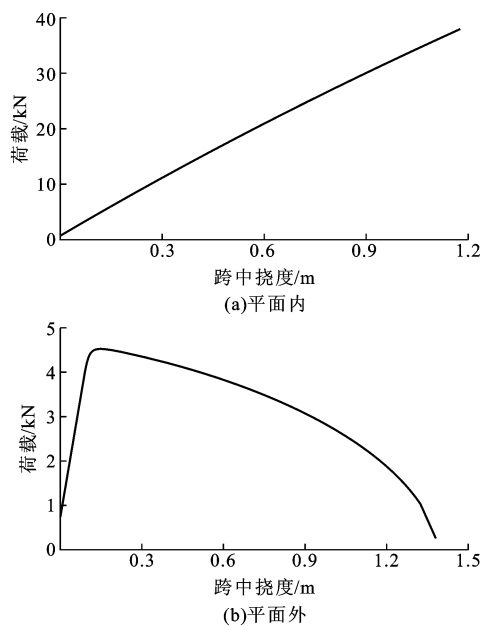


图16 施加平面内、外初始几何缺陷时的跨中挠度

Fig. 16 Mid-span Deflections Considering In-plane and Out-plane Initial Geometrical Imperfection

3.2.2 半跨荷载作用

由特征值屈曲分析得出的半跨荷载作用下的平面内和平面外 1 阶屈曲模态与全跨荷载作用下的屈曲模态一致,如图 14、15 所示,其理论屈曲荷载分别为 10.46、13.44 kN。

对模型结构施加平面内的初始几何缺陷进行非线性屈曲分析得到节点  $J_3$  的挠度与各加载点荷载关系如图 17(a)所示。与全跨荷载作用相似,施加平面内初始几何缺陷后,结构并未出现失稳,其屈曲临界荷载远大于特征值屈曲分析所得出的理论屈曲荷载。

对模型结构施加平面外的初始几何缺陷进行非线性屈曲分析得出的节点挠度如图 17(b)所示。从图 17(b)可以看出:当荷载达到 8.22 kN 时,各节点挠度突然增大,结构发生失稳;由于初始几何缺陷和非线性的影响,结构发生平面外屈曲的半跨临界荷载较相应的理论屈曲荷载值小;比较发生屈曲时的荷载总量可见,半跨荷载作用下的屈曲临界荷载值较全跨荷载作用时的屈曲临界荷载值要小。

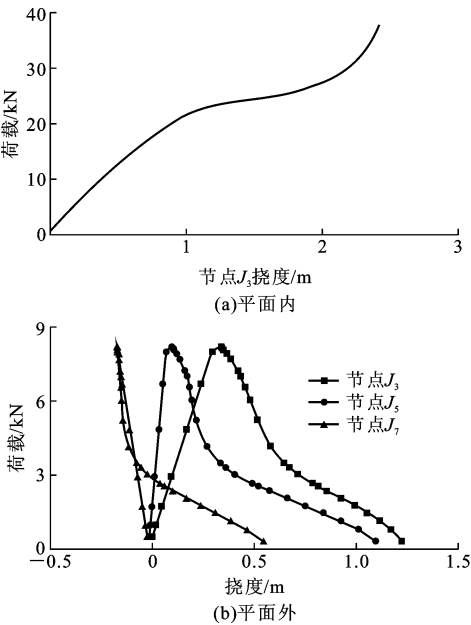


图 17 施加平面内、外初始几何缺陷时的节点挠度  
Fig. 17 Deflections of Nodes Considering In-plane and Out-plane Initial Geometrical Imperfection

4 原型结构受力性能评判

由于试验模型与原型结构在几何尺寸与材料性能方面建立起了良好的对应关系,并且在试验过程中通过施加吊载和设置支撑的方法对原型结构的自重与边界条件进行了较为准确的模拟,因此,笔者基

于模型试验结果与相似理论,对原型结构的受力性能进行了评判。

4.1 结构变形与构件应力

根据试验模型与原型结构的位移及应力的相似关系,由试验结果推得原型结构的变形与构件应力(表 6)。由表 6 可以看出:

表 6 试验模型与原型结构的变形与构件应力

Tab. 6 Deformation and Member Stresses of Test Model and Full-scaled Structure

结 构	$\Delta_1$ /mm	$\Delta_2$ /mm	$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_2$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa
试验模型	18.3	-36.4	172.6	66.8	618
原型结构	261.1	-520.8	172.6	66.8	618

注: $\Delta_1$  为预应力张弦式管道在全跨水荷载作用下(不考虑自重和预应力)的跨中挠度,以向下为正,下同; $\Delta_2$  为 1.5 倍半跨水荷载作用下上弦的最大挠度; $\sigma_1$  为 1.5 倍半跨水荷载作用下上弦的最大应力; $\sigma_2$  为设计荷载作用下上弦的最大应力; $\sigma_s$  为设计荷载作用下下弦的应力。

(1)在全跨水荷载作用下(不考虑自重和预应力),原型结构跨中的挠度为 261.1 mm,是跨度的 1/383,满足使用要求;在 1.5 倍半跨水荷载作用下,原型结构上弦的最大挠度达到 -520.8 mm,是跨度的 1/192,由此可见,原型结构的变形受半跨荷载的增大较为敏感。

(2)在 1.5 倍半跨水荷载作用下,原型结构上弦的最大应力达到 172.6 MPa,远远超过设计荷载作用时的 66.8 MPa,由此可见,1.5 倍半跨水荷载为原型结构设计中的最不利工况。设计荷载作用下的下弦应力为 618 MPa,此设计充分地利用了高强钢丝束的材料强度。

4.2 稳定性与极限承载力

第 2.1、2.2 节中,试验模型在预应力张拉阶段、正常使用阶段及承载力极限阶段的稳定性均是可以保证的;全跨荷载作用下的极限承载力达到设计荷载的 2.68 倍。根据相似理论可以得出原型结构的稳定性是可靠的,其结构具有较大的安全储备。

5 结 语

(1)在预应力张拉过程中,跨中反拱与下弦应力近似呈线性关系;结构变形与上弦应力对半跨荷载表现得较为敏感;结构在工作状态下的强度与稳定性均是可靠的;全跨荷载作用下结构极限承载力为设计荷载的 2.68 倍,此时结构具有较大安全储备。

(2)有限元计算值与试验结果吻合良好,表明本文中采用的基于 ANSYS 的非线性有限元分析方法能较好地实现对大跨度预应力张弦式管道在预应力

张拉阶段、正常使用阶段与承载力极限阶段受力性能的模拟。

(3)在半跨荷载和全跨荷载作用下,预应力张弦式管道对平面内的初始几何缺陷并不敏感,结构的失稳形式均为上弦的平面外屈曲;单纯采用特征值屈曲分析的方法对大跨度预应力张弦式管道进行稳定性分析既可能产生非保守的结果,又可能产生过于保守的结果。

(4)结构在全跨水荷载作用下变形较小,满足使用要求;在1.5倍半跨水荷载作用下的结构变形与构件应力均较大,为设计中的最不利工况,结构具有可靠的稳定性与较大的安全储备。

### 参考文献:

### References:

[1] MASAO S. Study on Mechanical Characteristics Complex Structure Composed of a Membrane and a Beam of a Light-weight String Structure[C]//JOHN F A, JOHN W L, CELINA U P. Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium 1994 on Spatial, Lattice and Tension Structures. Atlanta: ASCE, 1994: 633-641.

[2] SHIRO K, SHOJI N, YASUO M, et al. Active Control of Axial Forces in Beam String Space Frames [C]//JOHN F A, JOHN W L, CELINA U P. Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium 1994 on Spatial, Lattice and Tension Structures. Atlanta: ASCE, 1994: 664-673.

[3] 薛伟辰, 王晓辉. 有黏结预应力 CFRP 筋混凝土梁试验及非线性分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 41-47.

XUE Wei-chen, WANG Xiao-hui. Experiment and Nonlinear Analysis of Concrete Beams with Bonded Prestressing CFRP Tendons [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 41-47.

[4] 董满生, 葛斐, 惠磊, 等. 水中悬浮隧道研究进展[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 101-107.

DONG Man-sheng, GE Fei, HUI Lei, et al. Research Progress in Submerged Floating Tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 101-107.

[5] 刘小燕, 颜东煌, 张峰, 等. 预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 58-61.

LIU Xiao-yan, YAN Dong-huang, ZHANG Feng, et al. Ultimate Load Analysis of Prestressed High-strength Concrete Beam [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 58-61.

[6] MASAO S, AKIRA O. The Role of String in Hybrid String Structure [J]. Engineering Structures, 1999, 21(8): 756-769.

[7] 薛伟辰. 现代预应力结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

XUE Wei-chen. Design of the Modern Prestressed Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.

[8] 刘晟, 苏旭霖, 陆平, 等. 上海源深体育馆预应力张弦梁设计计算[J]. 建筑结构, 2006, 36(增1): 43-46.

LIU Sheng, SU Xu-lin, LU Ping, et al. Design Calculation of Prestressed Beam String Structure of Shanghai Yuanshen Arena [J]. Journal of Building Structures, 2006, 36(S1): 43-46.

[9] 胡云程, 严勤, 范民权. 一种新颖的大跨度输水管道——张弦梁输水管道桥设计研究[J]. 特种结构, 2005, 22(增1): 136-138.

HU Yun-cheng, YAN Qin, FAN Min-quan. A New Long-span Water Conveying Pipe Bridge — Study of Tensioning Chord Beam Water Conveying Pipe Bridge Design [J]. Journal of Special Structures, 2005, 22(S1): 136-138.

[10] 陈以一, 沈祖炎, 赵宪忠, 等. 上海浦东国际机场候机楼 R2 钢屋架足尺试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(2): 9-17.

CHEN Yi-yi, SHEN Zu-yan, ZHAO Xian-zhong, et al. Experimental Study on a Full-scale Roof Truss of Shanghai Pudong International Airport Terminal [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(2): 9-17.

[11] 沈士钊, 陈昕. 网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

SHEN Shi-zhao, CHEN Xin. Stability of Latticed Shells [M]. Beijing: Science Press, 1999.