

100 m 跨预应力张弦式管道优化设计研究

刘 晟¹, 薛伟辰¹, 卫 丹², 王恒栋²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

摘要: 对 100 m 跨预应力张弦式管道的矢跨比、垂跨比及上、下弦截面等设计参数进行了有限元分析与优化, 并分析了不同支承条件下该结构的非线性稳定性. 以优化后的设计方案为原型, 通过 1:15 缩尺模型的预应力张拉与加载试验, 进一步研究了张弦式管道的全过程受力性能. 结果表明, 半跨荷载工况在张弦式管道设计中起控制作用; 张弦式管道对平面外的几何缺陷较为敏感, 通过合理设置侧向斜撑可以保证结构的平面外稳定性; 有限元计算值与试验结果吻合良好.

关 键 词: 预应力张弦式管道; 优化设计; 非线性有限元分析; 非线性稳定性; 缩尺模型试验; ANSYS
中图分类号: TU311.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2007)03-0017-09

Optimization design of a 100 m-span prestressed beam string pipe

LIU Sheng¹, XUE Wei-chen¹, WEI Dan², WANG Heng-dong²

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: The rise-to-span ratio, sag-to-span ratio, beam cross-section and area of the cables of a 100m-span beam string pipe are analyzed and optimized by using FEM, and the nonlinear stability of this structure under different support conditions is compared. Based on the optimized structural scheme, the full-range behaviors of the beam string pipe according to 1:15 scaled model test of the stretching and loading are studied. Results show that the half-span load is a control loading condition in the design, that the beam string pipes are relatively sensitive to out-plane initial geometrical imperfection, that the out-plane stability of this structure is reliable by adding lateral braces reasonably, and that the analytical results calculated by the nonlinear FEM are in good agreement with the test results.

Key words: prestressed beam string pipe; optimization design; nonlinear finite element analysis; nonlinear stability; scaled model test; ANSYS

预应力张弦式管道是运输管道跨越江河或沟壑的一种新型结构形式, 它采用了屋盖结构中的张弦梁结构体系, 其上弦为运输管道自身, 腹杆为受压构件, 下弦为高强抗拉钢索(见图1). 预应力张弦式管道跨越能力强, 跨度可达 100~150 m. 此外, 由于采用了管道自身作为主要的受力构件之

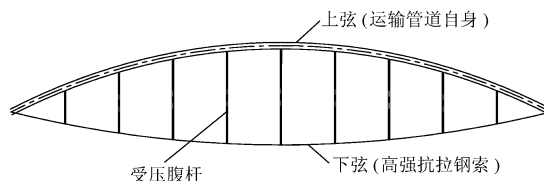


图1 预应力张弦式管道示意图

Fig. 1 Sketch of the prestressed beam string pipe

收稿日期: 2006-12-23

基金项目: 教育部混凝土与预应力混凝土重点实验室 2005 年开放课题

作者简介: 刘 晟(1982-), 男, 湖南浏阳人, 硕士, 主要从事预应力结构体系的研究.

一,预应力张弦式管道较传统的敷设于桥梁或隧道上的管道造价低,具有良好的应用前景.

我国于 1999、2002 和 2003 年分别建成了上海浦东国际机场 82.6 m 跨张弦梁屋架^[1]、广州国际会展中心 126.5 m 张弦桁架^[2]和目前国内跨度最大的哈尔滨国际体育与会议展览中心的 128 m 张弦桁架^[3]等大型张弦梁屋盖工程,在预应力张弦梁的设计计算方面取得了一定的成功经验. 2005 年,胡云程等^[4]对预应力张弦式输水管道的受力特点与设计方法进行了初步探讨. 但总体看,国内外关于预应力张弦式管道的具体的理论分析与试验研究工作开展不足,这阻碍了该结构在工程上的推广应用. 另外,较张弦梁屋盖而言,预应力张弦式管道在结构形式与荷载工况等方面均具有特殊性,在其结构设计中存在如下有待解决的新问题:其一是预应力张弦式管道除受对称荷载作用外,在水或石油等运输物资进入管道时还承受半跨荷载作用,这种非对称荷载作用下的受力性能需要进行系统分析与研究;其二是预应力张弦式管道为单榀孤立存在,采用何种支承条件才能保证结构的稳定性. 因此,开展预应力张弦式管道的理论分析与试验研究对其大规模推广应用是十分必要的.

本文以拟建中的 100 m 跨预应力张弦式管道为对象,通过有限元分析与 1:15 比尺模型的预应力张拉与加载试验,对预应力张弦式管道的优化设计进行了研究.

1 基于 ANSYS 的预应力张弦式管道有限元分析方法

1.1 有限元建模

采用 ANSYS 建立的预应力张弦式管道的有限元模型如图 2 所示,其中上弦采用空间两节点梁单元 BEAM188,腹杆和下弦均采用空间杆单元 LINK8. BEAM188 与 LINK8 均能够同时考虑结构的材料非线性与几何非线性,其中 BEAM188 基于 Timoshenko 梁理论,考虑了剪切变形的影响.

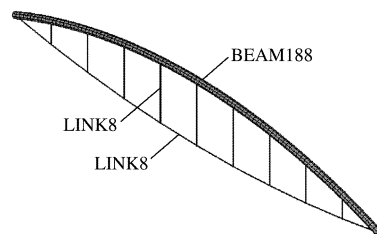


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.2 预应力的模拟与优化方法

1.2.1 预应力的模拟 在有限元分析中,通常采用等效降温法、初应变法和生死单元法来模拟预应力的作用. 对张弦式管道

而言,采用等效降温法和初应变法施加预应力时,由于上弦的弹性压缩将产生预应力损失,常常需要进行多次试算. 而生死单元法只需一次计算便可以准确地施加预期的预应力,避免了繁琐的试算过程. 故本文采用生死单元法来模拟张弦式管道下弦钢索的预应力作用,具体步骤^[5]如下:①将下弦钢索靠近支座的 2 个单元分别替换为一对等值反向的力,该力的数值即为所要施加的预应力值,同时对下弦其它单元采取设置初始应变的方法来模拟预应力的作用;②撤除步骤①中施加的两对等值反向的力,并激活下弦钢索靠近支座的 2 个单元.

1.2.2 预应力的优化 张弦梁结构体系中,下弦钢索的预应力张拉对结构成型后的变形和内力起到控制作用^[6-7],因此,有必要对张弦式管道下弦钢索的预应力进行优化,以改善结构的受力性能. 本文采取以控制张弦式管道在恒载和预应力共同作用下的挠度作为预应力优化设计的原则.

预应力的优化设计可采用 ANSYS 的优化设计模块. ANSYS 中提供了子问题逼近法和一阶方法两种优化方法. 其中,子问题逼近法是一种高级的零阶方法,通过对目标函数添加罚函数将问题转化为非约束的优化问题,然后用曲线拟合来建立目标函数与设计变量之间的关系来实现逼近. 一阶方法同样通过对目标函数添加罚函数将问题转化为非约束的优化问题,然后使用因变量对自变量的偏导数进行梯度计算,从而确定搜索方向,并用线搜索法对非约束问题进行最小化. 由于一阶方法比子问题逼近法具有更高的计算精度,故采取一阶方法对下弦钢索的预应力进行优化.

1.3 稳定性分析方法

ANSYS 中提供的计算结构屈曲临界荷载的方法主要有:特征值屈曲分析与非线性屈曲分析. 前者用于计算一个理想弹性结构的理论屈曲荷载,而实际工程中结构的几何缺陷、力学缺陷(残余应力)与非线性通常使得结构先于理论屈曲荷载而发生失稳. 因此,单纯采用此法有可能产生非保守的结果. 在预应力张弦式管道的稳定性分析中可将两者结合起来,即首先通过特征值屈曲分析得到结构的一阶理论屈曲荷载及其屈

曲模态,以对张弦式管道可能的屈曲形式进行初步判断.在此基础上,对张弦式管道施加与其屈曲模态一致的初始几何缺陷^[8],并进行非线性屈曲分析,所得的最大荷载即为张弦式管道的屈曲临界荷载.参照《钢结构工程施工质量规范》^[9]中相关规定,初始几何缺陷的峰值可取为张弦式管道跨度的1/1 000.

2 预应力张弦式管道有限元结构设计计算

为改善预应力张弦式管道的受力性能,减少用钢量,设计计算中对矢跨比、垂跨比、腹杆布置、构件截面等进行了ANSYS有限元对比分析,在此基础上得出了张弦式管道的优化设计方案.

2.1 有限元参数分析

2.1.1 参数的选择 预应力张弦式管道跨度为100 m,上弦与腹杆的材料均为Q235B,下弦采用高强钢丝束.以初步设计方案作为中心设计方案,对预应力张弦式管道共进行了17个方案的参数分析,研究了矢跨比、垂跨比、腹杆数量、构件截面等关键设计参数对结构受力性能的影响.各设计方案的参数见表1.

表1 参数设置

Tab.1 Design parameters

方案编号	矢跨比	垂跨比	腹杆数量/根	上弦截面	下弦截面	腹杆截面
中心方案	0.100	0.05	9	1 400 mm×16 mm	Φ5×187 mm	325 mm×8 mm
BSS-1	0.050	—	—	—	—	—
BSS-2	0.075	—	—	—	—	—
BSS-3	0.125	—	—	—	—	—
BSS-4	0.150	—	—	—	—	—
BSS-5	—	0.03	—	—	—	—
BSS-6	—	0.07	—	—	—	—
BSS-7	—	0.09	—	—	—	—
BSS-8	—	—	5	—	—	—
BSS-9	—	—	7	—	—	—
BSS-10	—	—	11	—	—	—
BSS-11	—	—	—	1400 mm×14 mm	—	—
BSS-12	—	—	—	1400 mm×18 mm	—	—
BSS-13	—	—	—	—	Φ5×163 mm	—
BSS-14	—	—	—	—	Φ7×91 mm	—
BSS-15	—	—	—	—	Φ5×199 mm	—
BSS-16	—	—	—	—	—	245 mm×8 mm
BSS-17	—	—	—	—	—	350 mm×10 mm

注:“—”表示与中心方案一致.

参数分析中主要考虑以下3种荷载工况:①工况一,预应力+张弦式管道自重;②工况二,预应力+张弦式管道自重+1.5×半跨水荷载(1.5为动力放大系数);③工况三,预应力+1.2×恒载标准值+1.4×活载.其中,张弦式管道自重为结构不承受水荷载时的重量,恒载标准值为张弦式管道自重+全跨水荷载标准值.

2.1.2 参数分析结果 参数分析的主要计算结果见表2.其中, λ_1 和 λ_2 分别为预应力张弦式管道在全跨水荷载作用下以及1.5倍半跨水荷载作用下(均不考虑自重和预应力)的挠度与跨度的比值,可反映各设计方案在全跨与半跨荷载作用下的结构刚度; σ_{1M} 和 σ_{1N} 为工况二上弦的弯曲应力和轴向应力; σ_{2M} 、 σ_{2N} 和 σ_S 分别为工况三上弦的弯曲应力、轴向应力以及下弦应力.

表 2 主要计算结果

Tab. 2 Main analytical results

方案编号	λ_1	λ_2	σ_{1M}/MPa	σ_{1N}/MPa	σ_{2M}/MPa	σ_{2N}/MPa	σ_s/MPa
中心方案	1/475	1/331	149.9	24.2	17.6	34.0	604
BSS-1	1/220	1/293	155.0	32.8	26.3	47.3	888
BSS-2	1/332	1/316	151.2	27.4	19.6	39.2	719
BSS-3	1/627	1/334	150.3	22.1	17.2	30.5	521
BSS-4	1/796	1/333	152.4	20.7	18.9	28.0	459
BSS-5	1/362	1/317	151.6	27.5	20.4	38.9	685
BSS-6	1/601	1/340	149.1	21.6	15.8	30.2	544
BSS-7	1/706	1/347	147.8	19.6	12.9	27.3	501
BSS-8	1/460	1/331	147.0	24.1	18.0	33.9	599
BSS-9	1/465	1/328	153.7	24.1	16.7	33.9	600
BSS-10	1/468	1/327	152.4	24.3	16.9	34.1	607
BSS-11	1/468	1/294	174.4	26.5	18.4	37.9	589
BSS-12	1/473	1/363	134.2	22.3	16.8	31.0	619
BSS-13	1/419	1/326	150.3	24.1	19.0	33.9	691
BSS-14	1/462	1/332	149.5	24.1	18.5	34.0	633
BSS-15	1/499	1/332	149.5	24.2	16.8	34.1	568
BSS-16	1/472	1/331	149.1	23.6	17.0	33.4	603
BSS-17	1/480	1/333	149.1	23.8	17.6	33.7	608

对比 BSS-1 ~ BSS-17 与中心方案的计算结果,分析设计参数与结构变形以及构件应力之间的关系。

①矢跨比 全跨均布荷载作用下的结构变形随矢跨比的增大而减小。当矢跨比小于 0.075 时,半跨荷载作用下的结构变形随矢跨比的增大而减小;当矢跨比大于 0.075 时,半跨荷载作用下结构变形对矢跨比的增大并不敏感。

各荷载工况下,上弦的轴向应力和下弦应力均随矢跨比的增大而减小。当矢跨比小于 0.10 时,半跨荷载(工况二)作用下上弦的弯曲应力 σ_{1M} 和全跨荷载(工况三)作用下上弦的弯曲应力 σ_{2M} 均随矢跨比的增大而减小;当矢跨比大于 0.10 时, σ_{1M} 和 σ_{2M} 随矢跨比的增大反而稍有增加。

②垂跨比 全跨均布荷载作用下的结构变形均随垂跨比的增大而减小,但半跨荷载作用下的结构变形对垂跨比的增大较不敏感。

与矢跨比相似,各荷载工况下上弦的弯曲应力、轴向应力和下弦应力均随垂跨比的增大而减小。

③腹杆数量 腹杆数量的变化对结构变形与构件应力的影响均较小。

④上弦截面 全跨均布荷载作用下,结构的变形对上弦截面的增减不敏感,半跨荷载作用下结构的变形随上弦截面的增大而减小。随上弦截面的增大,各荷载工况下上弦的弯曲应力和轴向应力均明显减小,而下弦应力由于结构自重的增大而有所增大。

⑤下弦截面 全跨均布荷载作用下,结构的变形随下弦截面的增大而减小,半跨荷载作用下结构的变形对下弦截面的增大较不敏感。下弦应力随下弦截面的增大而减小,而上弦的弯曲应力和轴向应力对下弦截面的变化并不敏感。

⑥腹杆截面 全跨均布荷载和半跨荷载作用下,结构变形与构件应力对腹杆截面的变化均不敏感。

由上述分析可见,预应力张弦式管道的矢跨比、垂跨比以及上、下弦截面对其受力性能的影响较大,是预应力张弦式管道的关键设计参数。综合矢跨比、垂跨比、腹杆数量和构件截面等设计参数对结构受力性能的影响,并考虑到预应力张弦式管道下部河流的通航等使用功能的要求,最终确定中心方案作为预应力张弦式

管道的优化设计方案(见图3)。

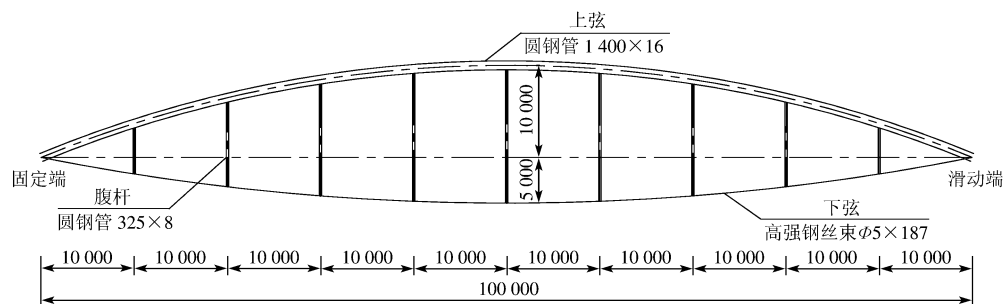


图3 优化设计方案(单位: mm)

Fig. 3 Optimal design scheme (unit: mm)

2.2 优化设计方案分析

2.2.1 预应力优化设计 在进行各设计方案的参数分析之前,均采用前文所述的基于 ANSYS 的有限元方法对预应力进行了优化设计. 限于篇幅,这里仅给出优化设计方案的预应力优化结果. 在预应力与恒载共同作用下上弦的竖向挠度与弯矩见图4. 从图4可见,正负最大挠度的绝对值仅相差0.03 mm,表明结构的挠度已经趋于最小;上弦正负最大弯矩分别为183.4kN·m和-264.9kN·m,其绝对值较为接近,而上弦为上下对称截面,可见上弦的弯曲应力也得到了较好的控制。

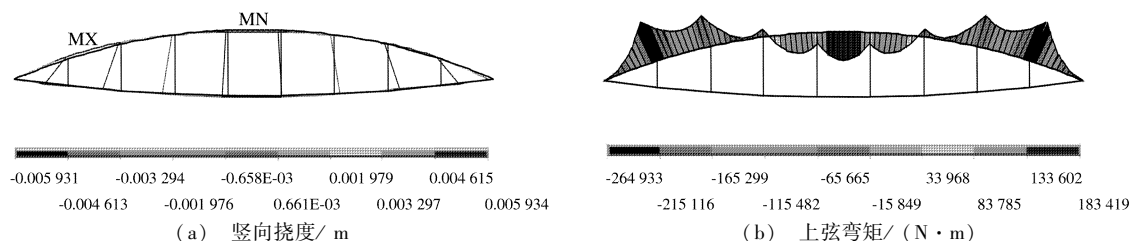


图4 结构竖向挠度和上弦弯矩

Fig. 4 Vertical deflection and moment of the beam

2.2.2 受力性能分析 为更全面地了解优化设计方案在各荷载工况下的受力性能,表3给出了工况一至工况三结构的最大挠度以及各构件的最大应力. 可见,①在1.5倍半跨水荷载作用下结构的挠度较大,为跨度的1/331;②各工况下,各构件均处于弹性范围内. 其中,在1.5倍半跨水荷载(工况二)作用下上弦的应力达到最大,为171.9 MPa;在设计荷载(工况三)作用下,下弦的应力达到最大,为604 MPa,应力比(下弦应力与其设计强度的比值)为0.36,较充分地利用了下弦钢索的材料强度;各荷载工况下腹杆均处于较低的应力状态。

表3 结构变形与构件应力

Tab. 3 Structural deformation and member stresses

荷载工况	最大挠度/mm	挠度/跨度	上弦应力/MPa	下弦应力/MPa	腹杆应力/MPa
工况一	-210.4(向上)	1/475	36.9	162	2.5
工况二	-302.0(向上)	1/331	171.9	405	7.0
工况三	86.6(向下)	1/1155	49.9	604	10.7

3 预应力张弦式管道稳定性分析

采用上述特征值屈曲分析与非线性屈曲分析结合的方法,对半跨荷载与全跨荷载作用下张弦式管道的

稳定性进行了分析. 分析中考虑了以下 3 种支承条件(见图 5): ① 支座端平面外刚接, 在上弦靠近两端支座的十等分点处设置侧向斜撑; ② 支座端平面外铰接, 在上弦靠近两端支座的十等分点处设置侧向斜撑; ③ 支座端平面外刚接, 无侧向斜撑. 3 种支承条件中, 支座端在平面内均为铰接.

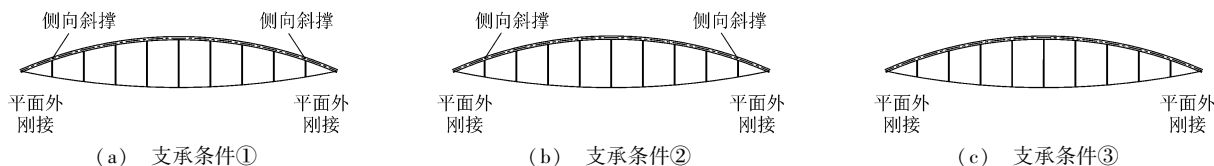


图 5 支承条件示意图

Fig. 5 Sketch of the supporting conditions

3.1 半跨荷载作用下的稳定性分析

由特征值屈曲分析得到的 3 种支承条件下张弦式管道在平面内、平面外的一阶屈曲模态如图 6 所示. 其中, 各支承条件下的平面内的一阶屈曲模态均如图 6(a) 所示, 为平面内的 2 个半波; 支承条件①、②下的平面外一阶屈曲模态为 2 个侧向斜撑之间平面外的一个半波, 而支承条件③下则表现为两端支座之间平面外的一个半波(见图 6(b)、6(c)).

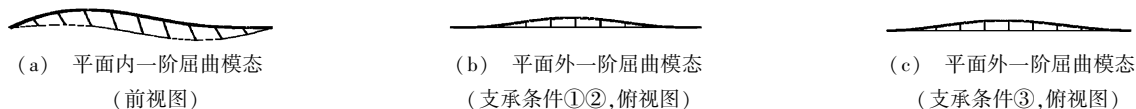


图 6 一阶屈曲模态

Fig. 6 First-order buckling mode

对张弦式管道分别施加平面内和平面外的几何缺陷后, 进行了非线性屈曲分析, 结果表明, 各支承条件下, 结构对平面内的几何缺陷均不敏感, 并未发生失稳; 而平面外的几何缺陷对结构的稳定性有较大影响. 施加平面外几何缺陷后得到的 3 种支承条件下上弦节点 J3 的挠度曲线如图 7 所示. 从图 7 可见, 3 种支承条件下的屈曲临界荷载从大到小依次为: 支承条件①($233.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)、支承条件②($227.9 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)、支承条件③($166.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$), 分别为 1.5 倍半跨水荷载($21.6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)的 10.8 倍、10.6 倍和 7.7 倍. 比较支承条件①、③下的屈曲临界荷载可见, 侧向斜撑的设置对增强张弦式管道在半跨荷载作用下的稳定性十分有利. 比较支承条件①、②下的屈曲临界荷载则可以发现, 在有侧向斜撑的条件下, 支座端平面外设置为刚接并不能明显提高结构屈曲的临界荷载.

3.2 全跨荷载作用下的稳定性分析

由特征值屈曲分析得出的全跨荷载作用下的平面内和平面外一阶屈曲模态与半跨荷载作用下一致(见图 6). 与半跨荷载作用的情况相似, 施加平面内的几何缺陷后, 结构并未出现失稳. 图 8 为施加平面外几何缺陷后进行非线性屈曲分析得到的张弦式管道的跨中挠度曲线, 支承条件①~③对应的屈曲临界荷载分别为 134.7 、 129.7 和 $86.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 为设计荷载($26.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)的 5.1 倍、4.9 倍和 3.2 倍. 可见, 全跨荷载作用下的结构稳定性与半跨荷载相似, 即侧向斜撑的设置对保证结构的稳定性十分有利, 而在有侧向斜撑的条件下, 支座端平面外设置为刚接对结构屈曲临界荷载的提高并不明显.

综合半跨与全跨荷载作用下的分析结果可见, 采用支

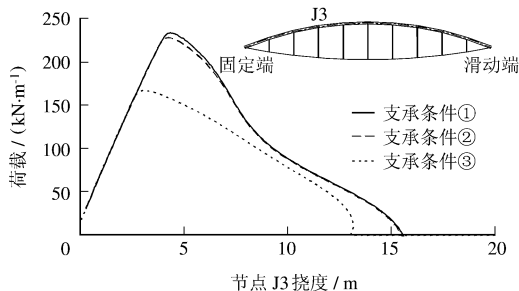


图 7 半跨荷载作用下节点 J3 挠度

Fig. 7 Deflection of node J3 under half-span load

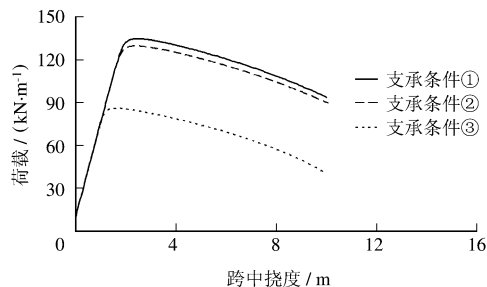


图 8 全跨荷载作用下跨中挠度

Fig. 8 Mid-span deflection under full-span load

座端平面外铰接并在上弦靠近两端支座的十等分点处设置侧向斜撑的方式,即支承条件②,是较为经济、合理的。

4 预应力张拉与加载试验研究

为进一步研究张弦式管道优化设计方案在预应力张拉阶段、正常使用阶段以及承载力极限阶段的全过程受力性能,并对本文采用的基于 ANSYS 的张弦式管道有限元分析方法进行验证,进行了优化设计方案 1 : 15 缩尺模型的预应力张拉与加载试验。

4.1 试验方案

4.1.1 试件设计 试验模型与原型的几何相似比为 1 : 15。模型结构的上弦为圆钢管 76 mm×2 mm,腹杆为 $\Phi 18$ 圆钢,下弦为单根 $\Phi 5$ 高强钢丝(见图 9)。各构件的材料力学性能见表 4。

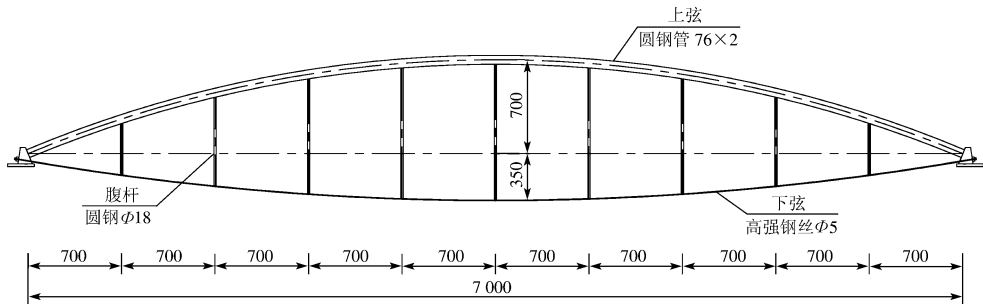


图 9 模型结构示意图(单位:mm)
Fig. 9 Sketch of the tested specimen (unit: mm)

表 4 材料力学性能

Tab. 4 Material properties of the members

构件名称	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa	延 伸 率
上 弦	224	461	1.85×10^5	9.5%
腹 杆	429	702	2.06×10^5	18.0%
下 弦	1 582	1 873	2.08×10^5	7.0%

4.1.2 预应力张拉与加载方案 根据相似理论,模型与原型的质量密度比应为 15 : 1,为了解决模型质量相似比的问题,试验中采取了在上弦各节点施加吊装的方法,吊载的布置如图 10 所示,各吊载点荷载均为 0.25 kN。两端支座为一端固定、一端滑动,在平面内和平面外均为铰接,并在上弦靠近两端支座的两个节点处均设置了侧向支撑(见图 10)。

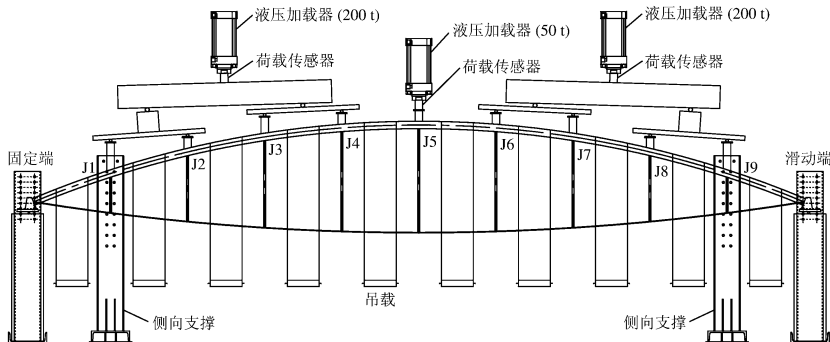


图 10 加载装置示意图
Fig. 10 Sketch of the loading installation

采用油泵和穿心式千斤顶对下弦高强钢丝进行张拉. 为了便于对张拉过程中结构的几何位形及时进行调整, 张拉中采取两端张拉的方式. 由于跨中反拱对张拉力的增大较为敏感^[1], 试验中以跨中反拱作为预应力张拉的主要控制指标.

试验加载考虑以下 5 个荷载工况: ①工况一, 张弦梁结构自重+1.5×半跨水荷载; ②工况二, 恒载标准值; ③工况三, 恒载标准值+活载标准值; ④工况四, 1.2×恒载标准值+1.4×活载标准值; ⑤工况五, 加载至承载力极限. 其中, 工况一为半跨(靠近固定端的半跨)加载, 荷载施加在靠近固定端的 4 个节点 J1、J2、J3、J4 上; 工况二至工况五为全跨加载, 荷载施加在上弦各节点上, 工况一至工况四的各加载点的荷载分别为 1.06, 0.78, 0.84 和 1.09 kN.

4.2 主要试验结果及分析

4.2.1 预应力张拉阶段 跨中反拱的试验值与理论值的比较见图 11. 可见, 预应力张拉式管道的跨中反拱与下弦应变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.

4.2.2 半跨加载阶段 上弦挠度最大的节点 J7 的挠度见图 12. 图 13 和图 14 分别为半跨加载阶段的上弦和下弦的应变. 从图中可以看出, 在半跨加载过程中, 构件应变与荷载基本呈线性关系; 试验值与 ANSYS 计算值吻合良好; 与全跨作用时的上弦挠度(见图 15)与应变(见图 16)对比可以发现, 半跨荷载作用下的上弦挠度与应变均增长较快. 可见, 半跨荷载作用是张弦式管道设计计算中的一个控制荷载工况.

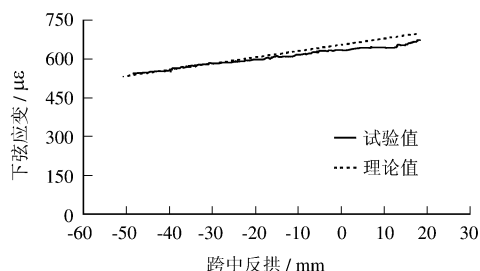


图 11 预应力张拉阶段的跨中反拱

Fig. 11 Camber at the mid-span during stretching phase

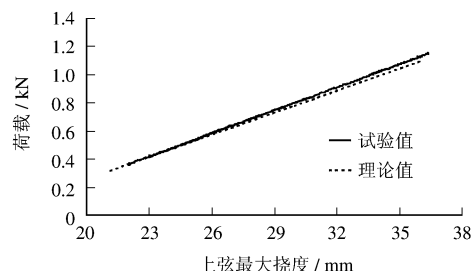


图 12 半跨加载阶段的上弦最大挠度

Fig. 12 Maximum deflection during half-span loading phase

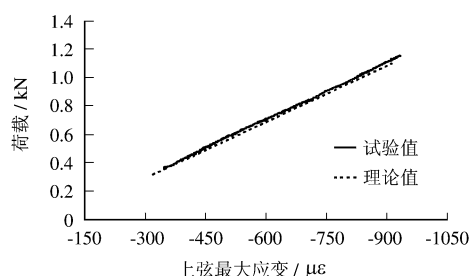


图 13 半跨加载阶段的上弦最大应变

Fig. 13 Maximum strain during half-span loading phase

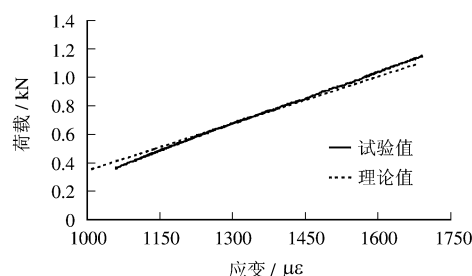


图 14 半跨加载阶段的下弦应变

Fig. 14 Strain during half-span loading phase

4.2.3 全跨加载阶段 图 15 ~ 图 17 分别为全跨加载阶段结构的跨中挠度、上弦与下弦应变. 从图中可以看出, 当荷载小于 3.46 kN 时, 跨中挠度、上弦应变和下弦应变与荷载均基本呈线性关系; 当荷载超过 3.46 kN (为荷载设计值的 3.17 倍) 后, 上弦发生屈服, 结构的刚度逐渐减小, 上弦应变增长速度明显加快, 而由于上弦刚度的降低, 下弦应力加速增长, 其应变的变化亦随之加快; 当荷载达到 3.72 kN (为荷载设计值的 3.41 倍) 时, 下弦发生屈服, 此时上弦挠度与上弦、下弦应变的增长均非常迅速, 结构已失去继续承载的能力; 在弹性阶段和非线性阶段, 试验值和 ANSYS 计算值均吻合良好.

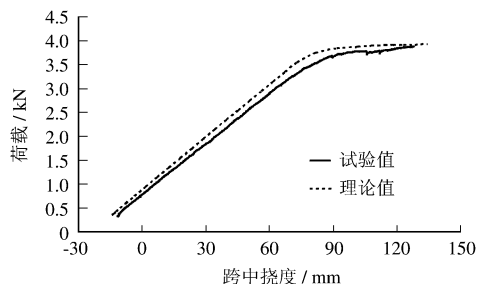


图 15 全跨加载阶段的跨中挠度

Fig. 15 Mid-span deflection during full-span loading phase

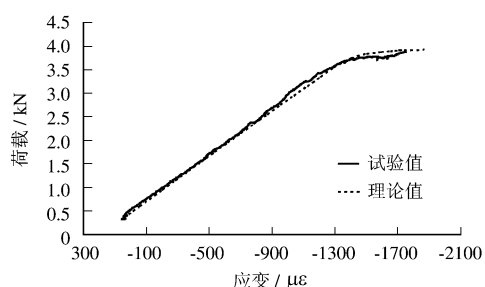


图 16 全跨加载阶段的上弦最大应变

Fig. 16 Maximum strain during full-span loading phase

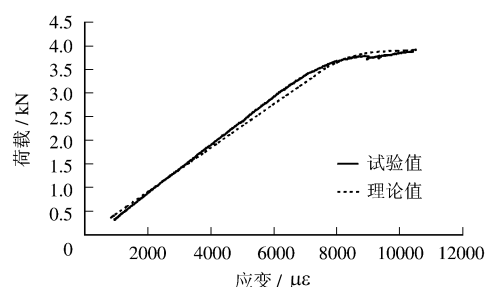


图 17 全跨加载阶段的下弦应变

Fig. 17 Strain of the string during full-span loading phase

5 结 语

(1)建立了预应力张弦式管道的 ANSYS 有限元模型,提出了预应力的模拟与优化以及稳定性分析的计算方法.其中,预应力的优化可采取以控制结构在恒载和预应力共同作用下的挠度作为预应力优化设计的原则,采用一阶方法;稳定性分析可采用特征值屈曲分析与非线性屈曲分析相结合的方法.

(2)通过有限元参数分析,得到了预应力张弦式管道的优化设计方案.参数分析结果表明,矢跨比、垂跨比以及上、下弦截面是张弦式管道设计中的关键参数.其中,适当增大矢跨比和垂跨比有利于改善结构的受力性能;上弦截面的增大可以减小上弦的应力,但对下弦应力和结构刚度的改善作用不明显;下弦截面的增大有利于增大结构刚度,减小下弦应力,但对上弦应力影响不大;腹杆布置和截面的变化对结构受力性能的影响较小.

(3)非线性稳定性分析表明,张弦式管道对平面内的几何缺陷较不敏感,其屈曲模态均发生在平面外.通过合理设置侧向支撑,可以保证张弦式管道的平面外稳定.

(4)进行了预应力张弦式管道优化设计方案的 1:15 缩尺模型试验.试验结果表明,预应力张拉过程中,结构的跨中反拱与下弦应力的增长近似呈线性关系;半跨荷载作用下的上弦挠度与应变的增长均较全跨荷载作用下快,因此,半跨荷载作用是张弦式管道设计计算中的一个关键的、起控制作用的荷载工况.

(5)试验结果与理论值的对比表明,本文采用的基于 ANSYS 的非线性有限元分析方法能较好地实现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.

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 刘 凯,高维成,刘宗仁.大跨张弦桁架新型施工工艺的理论与现场实测的研究[J].建筑结构学报,2004,25(5): 61-65.
- [3] 黄明鑫.大型张弦梁结构的设计与施工[M].济南:山东科学技术出版社,2005:1-3.
- [4] 胡云程,严 勤,范民权.一种新颖的大跨度输水管桥——张弦梁输水管桥设计研究[J].特种结构,2005,(增刊): 136-138.
- [5] 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[C]//首届全国建筑结构技术交流会.首届全国建筑结构技术交流会专辑.北京:《建筑结构》编辑部,2006:3-43-3-46.
- [6] 薛伟辰.现代预应力结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2003:3-5.
- [7] Masao Saitoh, Akira Okasa. The Role of String in Hybrid String Structure[J]. **Engineering Structures**, 1999, 21(8): 756-769.
- [8] 沈士钊,陈 昕.网壳结构稳定性[M].北京:科学出版社,1999:56-60.
- [9] GB50205-2001,钢结构工程施工质量规范[S].