

钢管混凝土拱桥力特性研究

李书嘉 刘刚

江苏河海建设有限公司, 江苏 镇江 212000

[摘要]文基于有限元方法, 利用 MATLAB 编程, 建立了钢管混凝土拱肋的动力方程, 并求解了该方程的特征值。分析不同含钢率, 支座形式, 矢跨比和拱轴线型条件下, 剪切变形对钢管混凝土拱肋动力特性的影响。

[关键词]钢管混凝土; 有限元; 动力特性

DOI: 10.33142/hst.v5i7.7600

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

Research on Force Characteristics of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge

LI Shujia, LIU Gang

Jiangsu Hehai Jianshe Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu, 212000, China

Abstract: Based on the finite element method and MATLAB programming, the dynamic equation of concrete filled steel tubular arch rib is established, and the eigenvalue of the equation is solved. The influence of shear deformation on the dynamic characteristics of concrete-filled steel tubular arch rib is analyzed under the conditions of different steel ratio, support type, rise-span ratio and arch axis line type.

Keywords: concrete-filled steel tube; finite element; dynamic characteristics

1.1 剪切变形对不同含钢率下拱架自振特性的影响

所谓含钢率是指钢管混凝土中钢管面积和混凝土面积之比, 是反映钢管混凝土受力性能的一个重要概念, 通常用 α 表示。为研究不同含钢率下, 钢管混凝土拱架动力特性的变化规律, 特对钢管混凝土某拱架在不同含钢率下的固有频率进行了计算。

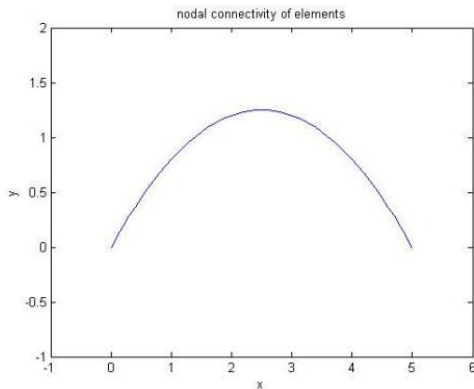


图1 钢管混凝土拱架模型

图1所示为一跨度为5m的钢管混凝土拱架, 截面为外径为0.2m的圆截面。拱轴线型为抛物线, 矢跨比为1/4, 两端支座条件均为铰支端, 混凝土为C30级。

在进行有限元计算时, 将钢管混凝土拱架划分为一系列的梁单元, 全拱共离散为100个单元。支座边界条件则均视为固定支座。

表1-1列出了剪切变形在不同含钢率下拱架固有频率的影响。

表1 剪切变形在不同含钢率下拱架固有频率的影响

含钢率	固有频率(Hz)							
	1阶		2阶		3阶		4阶	
	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB
0.05	43.16	47.74	86.61	95.40	158.10	174.38	175.99	180.56
0.10	49.20	57.36	98.72	114.11	180.20	207.54	200.59	209.32
0.15	53.94	64.97	108.24	128.85	197.58	228.77	219.94	236.94
0.20	57.75	71.01	115.88	140.52	211.52	245.77	235.45	258.84

5阶		6阶		7阶		8阶	
EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB
250.18	275.21	315.03	330.36	365.61	392.48	452.69	510.79
285.14	329.73	359.06	380.04	416.70	468.13	515.94	612.75
312.64	372.94	393.68	418.53	456.89	528.62	565.70	692.96
334.69	407.28	421.45	449.16	489.11	576.87	605.60	756.30

注: EB表示经典 Euler-Bernoulli 梁单元, S-EB表示考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 梁单元。

通过观察表1-1可知同一含钢率的情况下, 对于钢管混凝土拱架考虑剪切变形的固有频率要比不考虑剪切变形时的固有频率高。这主要是因为考虑剪切变形时所用到的刚度矩阵相对不考虑剪切变形时的刚度矩阵要大。下面画出各含钢率下考虑剪切变形的对比图。如图2为不同含钢率下拱架自振频率对比图, 图中实线代表采用经典 Euler-Bernoulli 梁单元时得出的阶次-频率图, 虚线代表采用考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 单元时得出的

阶次-频率图。

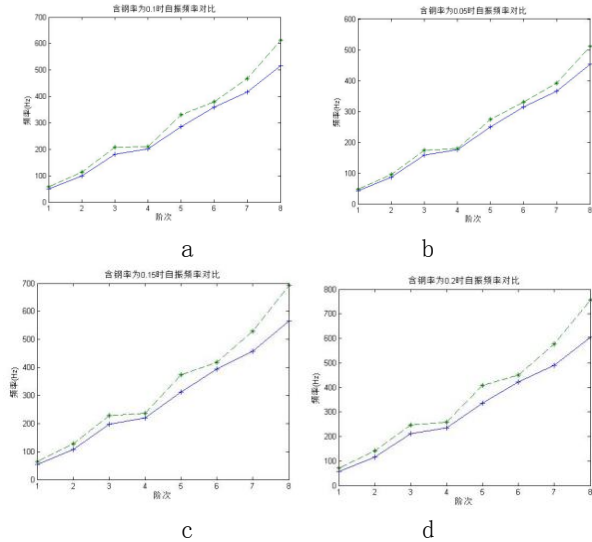


图2 不同含钢率时的自振频率对比

观察图 2 可知, 在不同含钢率下, 剪切变形在 1-4 阶和 4-6 阶的影响是先增大后减小的, 对 6 阶之后的影响越来越大。其中在 1 阶和 4 阶处剪切变形的影响较小, 对高阶处的影响较大。下面给出相同阶次不同含钢率下的剪切变形影响图。

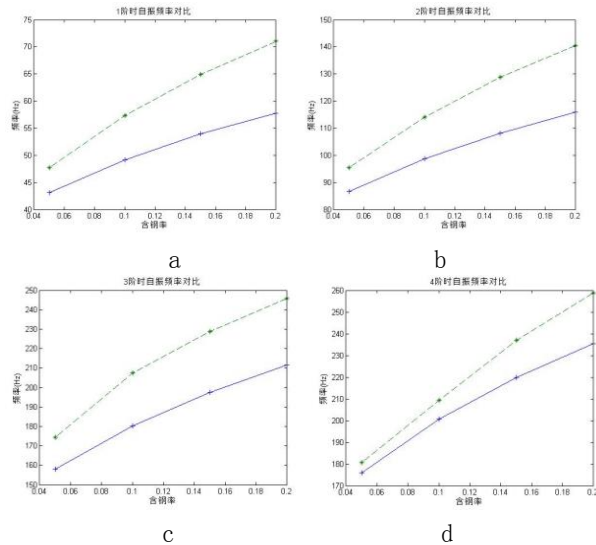


图3 不同含钢率下的剪切变形对比

如图 3 所示, 实线代表采用经典 Euler-Bernoulli 梁单元时得出的含钢率-频率图, 虚线代表采用考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 单元时得出的含钢率-频率图。

分析表 1 和图 3 可知自振频率随含钢率的增大而变大, 剪切变形的影响随含钢率的增大而变大。

下面列出含钢率为 0.20 时该拱架的模式。如图 4 所示, 其中图 a 为不考虑剪切变形时该拱架的 1 阶模式, 图 b 为考虑剪切变形时该拱架的 1 阶模式。

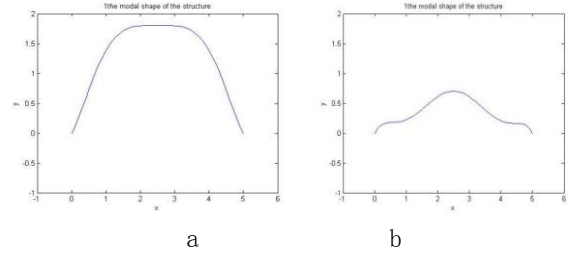


图4 剪切变形时该拱架的 1 阶模式

1.2 剪切变形对不同支座约束下拱架自振特性的影响

拱架两端的约束情况, 即拱架支座的约束对拱架自振特性是有影响的。约束分为两端固定 (S-C), 两端铰支 (C-C) 和一端固定一端铰支 (S-C) 三种情况讨论。

模型依然取图 1-1 所示跨度为 5m 的钢管混凝土拱架, 截面为外径为 0.2m 的圆截面。含钢率为 0.2。拱轴线型为抛物线, 矢跨比为 1/4, 混凝土为 C30 级。在进行有限元计算时, 将钢管混凝土拱架划分为一系列的梁单元, 全拱共离散为 100 个单元。单元的刚度度量按式 (1-1)、式 (1-2) 和式 (1-3) 进行计算。当支座边界条件分别为两端固定, 两端铰支和一端固定一端铰支时, 分别计算得表 2 如下:

表 2 剪切变形对不同支座约束下钢管混凝土拱架的影响

支座约束	固有频率(Hz)							
	1 阶		2 阶		3 阶		4 阶	
	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB
S-S	57.75	71.01	115.89	140.52	211.52	245.77	235.45	258.84
C-C	34.14	42.37	87.24	108.10	166.28	206.90	234.90	244.84
S-C	44.96	55.80	101.40	125.04	187.48	230.86	235.98	246.67

续表 2

固有频率(Hz)							
5 阶		6 阶		7 阶		8 阶	
EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB
334.69	407.28	421.45	449.16	489.11	576.87	605.60	756.30
280.61	338.66	379.35	446.25	467.99	501.18	526.66	667.44
305.92	373.65	404.66	449.02	473.40	539.17	566.23	715.38

注: S-S 表示两端固定, C-C 表示两端铰支, S-C 表示一端固定一端铰支, EB 表示经典 Euler-Bernoulli 梁单元, S-EB 表示考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 梁单元。

根据表 2 中数据, 画出相同支座条件下, 剪切变形对拱架自振频率的影响对比图。如图 5 所示, 图中实线代表采用经典 Euler-Bernoulli 梁单元时得出的阶次-频率图, 虚线代表采用考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 单元时得出的阶次-频率图。

分析表 2 中的数据和图 5 中的对比, 可得当不考虑剪

切变形的影响时,频率随阶次的提高而增大,每个阶次之间的增量大体相等,即阶次与频率之间线性关系比较明显。但当考虑剪切变形时,这种线性关系在低阶次时不明显,当阶次较高时才逐渐明显。由图可以看出,考虑剪切变形时的频率都要比不考虑剪切变形时的频率高,另外1阶到4阶,4阶到6阶时剪切变形的影响先增加后减小,6阶之后影响逐渐增加。可知在1阶和4阶时剪切变形的影响相对其它阶次要小。

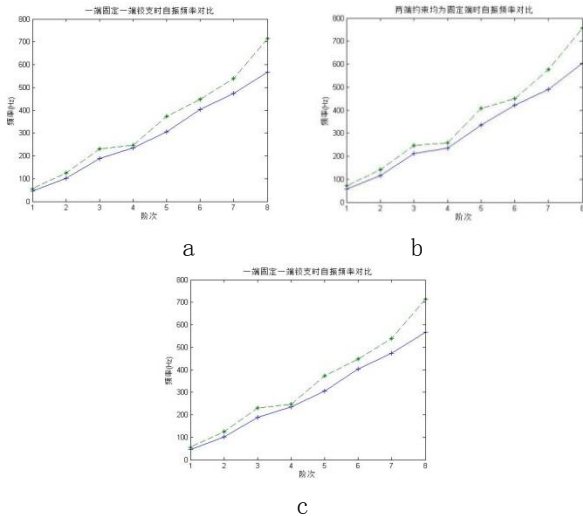


图5 阶次-频率图

分析表2中的数据 and 图5中的对比,可得当不考虑剪切变形的影响时,频率随阶次的提高而增大,每个阶次之间的增量大体相等,即阶次与频率之间线性关系比较明显。但当考虑剪切变形时,这种线性关系在低阶次时不明显,当阶次较高时才逐渐明显。由图可以看出,考虑剪切变形时的频率都要比不考虑剪切变形时的频率高,另外1阶到4阶,4阶到6阶时剪切变形的影响先增加后减小,6阶之后影响逐渐增加。可知在1阶和4阶时剪切变形的影响相对其它阶次要小。

观察表2的各阶次的列数据可知当支座两端约束越多,钢管混凝土拱架的自振频率越高,这是因为当支座两端的约束增多时,拱架的刚度会有所提高,而质量不变,所以得到的自振频率会越高。

图6所示为支座约束为简支端,考虑剪切变形该拱架的前3阶模态图。

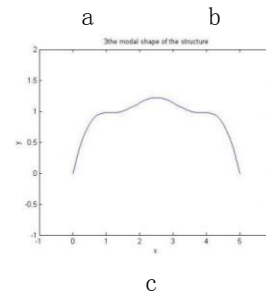
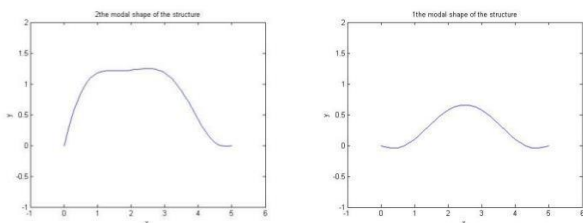


图6 剪切变形该拱架的前3阶模态图

1.3 剪切变形对不同矢跨比的拱架自振特性的影响

矢跨比为拱桥中拱圈(或肋拱)的计算矢高 S 与计算跨径 l 之比(S/l), 又称矢度。用于表征拱的坦陡程度, 它不但影响主拱圈内力的大小, 还影响拱桥的构造形式和施工方法的选择, 同时影响拱桥与周围景观的协调。一般的矢跨比小于 $1/5$ 的拱桥称坦拱, 大于或等于 $1/5$ 的称陡拱。

模型为一跨度为 5m 的钢管混凝土拱架, 拱轴线型为抛物线, 混凝土为 $\text{C}30$ 级, 支座边界条件则均视为固定支座, 在进行有限元计算时, 将钢管混凝土拱架划分为一系列的梁单元, 全拱共离散为 100 个单元。如图1-1所示。下面讨论剪切变形对不同矢跨比的钢管混凝土拱架自振特性的影响。

表3 剪切变形对不同矢跨比的拱架自振频率的影响

矢跨比	固有频率(Hz)							
	1阶		2阶		3阶		4阶	
	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB
0.125	80.03	99.30	112.47	119.12	175.67	210.23	265.30	330.34
0.139	77.83	96.64	119.05	128.11	178.42	209.43	259.72	323.36
0.156	74.93	93.09	124.23	137.55	184.32	209.82	252.34	314.26
0.179	70.99	88.81	126.29	145.41	195.58	213.45	242.25	301.92
0.208	65.52	81.33	123.83	147.91	215.21	224.56	226.81	285.02
0.250	54.60	67.73	109.56	133.90	199.99	232.73	222.61	246.84
0.313	46.60	57.28	100.89	123.53	182.39	224.31	253.03	274.90
0.417	30.91	38.00	76.11	93.51	140.65	173.25	213.64	259.86
	5阶		6阶		7阶		8阶	
	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB	EB	S-EB
	403.76	460.91	455.11	503.77	565.89	708.29	745.51	890.26
	396.73	460.51	453.67	494.51	556.99	695.80	731.93	882.71
	387.39	459.72	451.39	482.44	545.40	679.31	713.90	871.45
	374.76	458.32	447.44	465.94	530.25	656.93	689.36	852.65
	357.49	443.03	439.58	455.54	510.94	625.74	655.04	819.06
	316.44	388.34	398.47	425.09	462.45	549.90	572.58	720.81
	317.77	365.14	379.66	432.97	470.29	517.75	531.75	668.27
	310.93	352.63	334.56	372.91	437.28	459.73	543.61	586.16

注: EB表示经典 Euler-Bernoulli 梁单元, S-EB表示考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 梁单元。

根据表 3 中的数据,做出了剪切变形对同一矢跨比下拱架自振频率的对比图。

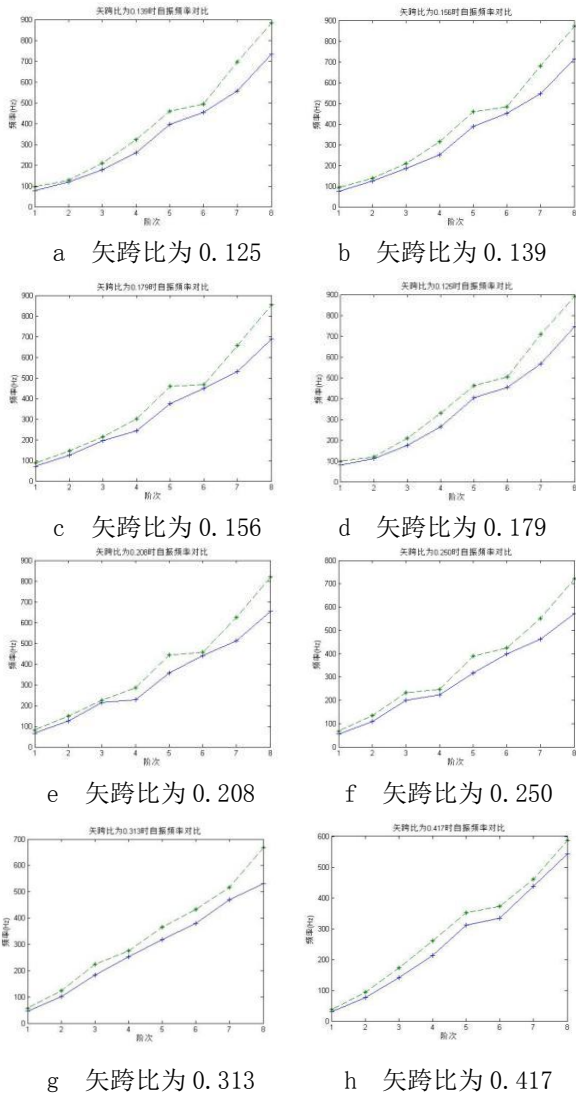


图 7 剪切变形对拱架自振频率对比图

如图 7 所示,为各不同矢跨比的拱架考虑剪切变形与不考虑剪切变形得出的自振频率对比图,图中实线代表采用经典 Euler-Bernoulli 梁单元时得出的阶次-频率图,虚线代表采用考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 单元时得出的阶次-频率图。由图可知当矢跨比较小时,如图 1-7a,剪切变形对拱架自振频率的影响随阶次的增加而逐渐增大;随着矢跨比的增大,剪切变形的影响将会在 6 阶次处出现下降,如图 1-7b-f 所示。当矢跨比为 0.313 时阶次与频率间的线性关系很明显,剪切变形对其影响较为一致。

下面讨论同一阶次下,不同矢跨比时,剪切变形对拱架自振频率的影响。如图 8 所示,图中实线代表采用经典 Euler-Bernoulli 梁单元时得出的矢跨比-频率图,虚线

代表采用考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 单元时得出的矢跨比-频率图。

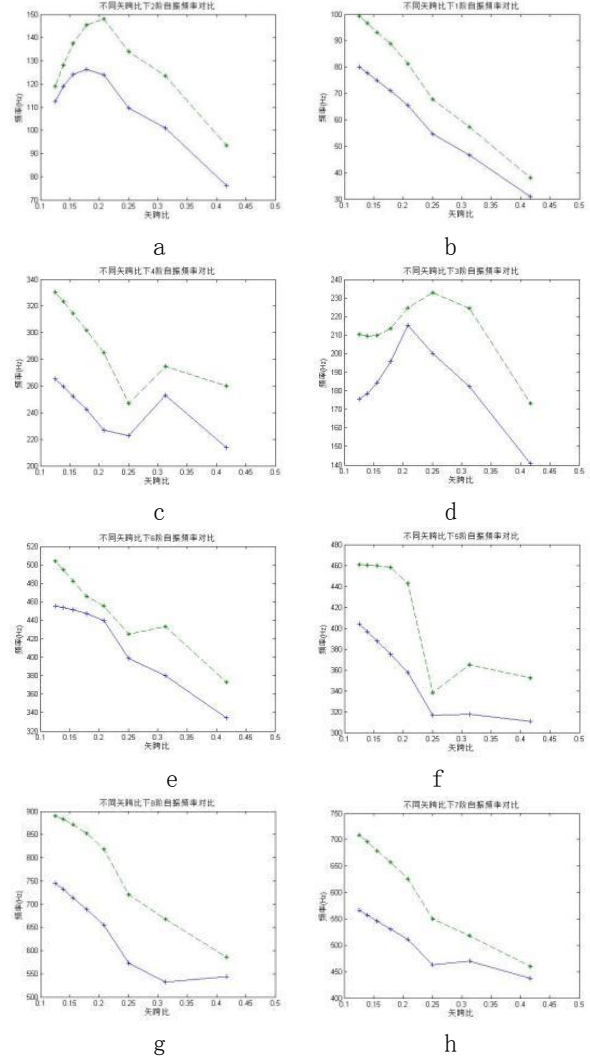


图 8 剪切变形对拱架自振频率的影响

结合表 3 中的数据,观察图 8 中的 8 个图可知,如图 8a 所示拱架的 1 阶固有频率随矢跨比的增大而比较均匀的减小,线性关系比较明显,考虑剪切变形的 1 阶固有频率也随矢跨比的增大而减小,剪切变形的影响随矢跨比的增加有减小的趋势。

如图 8b、c 所示,2、3 阶固有频率随矢跨比的增大而有先增加后减小的趋势,其中在矢跨比为 0.2-0.25 处达到最大值;对于 3 阶频率,剪切变形对其影响是先增加后减小,对于 4 阶频率,剪切变形对其影响为先减小后增加然后再减小的趋势。如图 8d、e 所示,4、5 阶固有频率随矢跨比的增加有先减小,然后增加,再减小的趋势;剪切变形对其影响有先减小,后增加,再减小的趋势。对于 6、7、8 阶的固有频率,这种曲折的变化将会逐渐不明显,剪切变形对固有频率的影响表现为逐渐减小。

下面列出考虑剪切变形时的矢跨比为 0.208 的部分模态图，如图 9 所示。

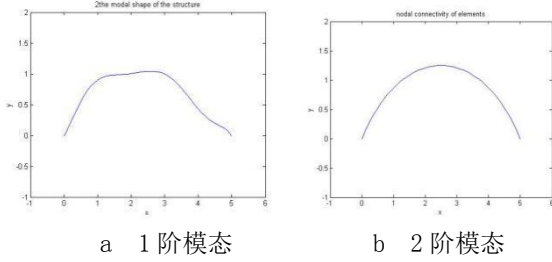


图 9 剪切变形对拱架的模态图

1.4 剪切变形对不同拱轴线型的拱架自振特性的影响

拱轴线就是拱的中轴线。拱轴线型有圆弧(包括多心圆弧)线，抛物(包括多次抛物线线，悬链线。

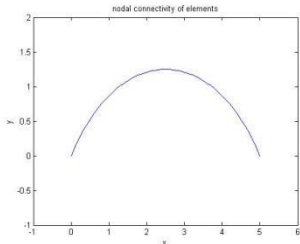


图 10 拱轴线型为圆弧线的拱架模型图

下面列出了相同跨径，相同矢跨比，相同截面特性，但拱轴线不同的拱的自振频率。取模型为一跨度为 5m 的钢管混凝土拱架，混凝土为 C30 级，支座边界条件则均视为固定支座，如图 10 所示。在进行有限元计算时，将钢管混凝土拱架划分为一系列的梁单元，全拱共离散为 100 个单元。下面讨论不同拱轴线型对该钢管混凝土自振特性的影响。

表 4 剪切变形对不同拱轴线型的拱架的影响

拱轴线型	自振频率(Hz)							
	1阶		2阶		3阶		4阶	
	ED	S-ED	ED	S-ED	ED	S-ED	ED	S-ED
抛物线	57.75	71.01	115.88	140.52	211.52	245.77	235.45	258.84
圆	55.40	68.10	98.66	119.11	194.34	236.96	241.86	266.45
悬索线	52.10	65.42	84.32	103.57	172.66	217.61	229.75	248.16

附表

5阶		6阶		7阶		8阶	
ED	S-ED	ED	S-ED	ED	S-ED	ED	S-ED
334.69	407.28	421.45	449.16	489.11	576.87	605.60	756.30
360.18	411.32	397.38	458.35	563.13	601.01	661.37	718.98
354.13	401.22	389.84	442.16	457.22	554.26	549.68	708.59

注：EB 表示经典 Euler-Bernoulli 梁单元，S-EB 表示考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 梁单元。

下面列出考虑剪切变形时各拱轴线型拱架自振频率的对比图。

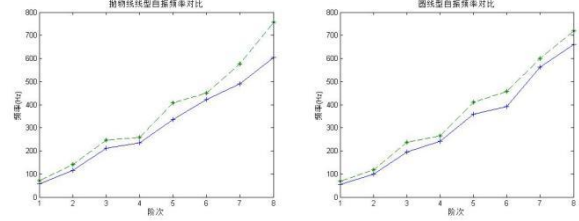


图 11 抛物线型 图 12 圆弧线型

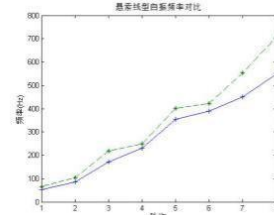
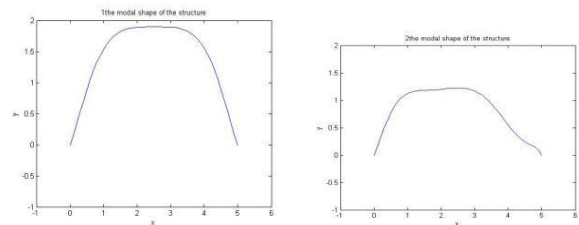


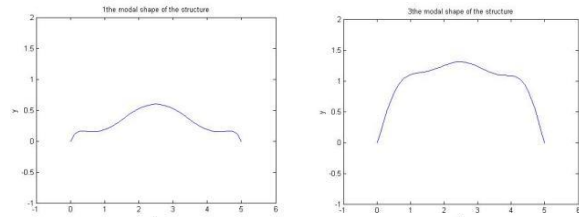
图 13 悬索线型

如图 11 所示为不同拱轴线型下，剪切变形对拱架自振频率的影响的阶次-频率对比图。图中实线代表采用经典 Euler-Bernoulli 梁单元时得出的阶次-频率图，虚线代表采用考虑剪切变形的 Euler-Bernoulli 单元时得出的阶次-频率图。由图 11 可知当拱轴线型为抛物线和悬索线时，该拱架在不考虑剪切变形时的频率随阶次增加，线性关系较为明显；当考虑剪切变形时，剪切变形对其自振频率的影响随阶次的增加而呈现变大的趋势，但在 1、4 和 6 阶处相对要小一点。由图 12 可知，当拱轴线型为圆弧线型时，不考虑剪切变形时的自振频率随阶次增加的线性关系不够明显。但考虑剪切变形影响时，剪切变形对各阶次频率的影响较为均匀。

下面列出拱轴线为圆弧线时该拱架的模态图。图 14 为不考虑剪切变形时该拱架的前 3 阶模态，图 14 为考虑剪切变形时该拱架的前 3 阶模态



a 1阶模态 b 2阶模态



c 3阶模态 d 4阶模态

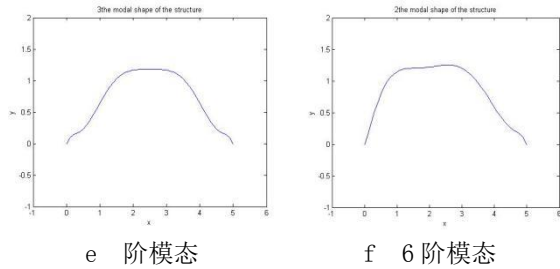


图 14 剪切变形时该拱架的前 3 阶模态

2 结语

通过计算得出的数据,并对数据进行对比分析可得出:在不同含钢率下,剪切变形在 1-4 和 4-6 阶次的影响是先增大后减小的,对 6 阶之后的影响越来越大。其中在 1 阶和 4 阶处剪切变形的影响较小,对高阶处的影响较大。阶次相同时自振频率随含钢率的增大而变大,剪切变形的影响随含钢率的增大而变大。

当支座约束不同时,不考虑剪切变形的影响时,频率随阶次的提高而增大,每个阶次之间的增量大体相等,即阶次与频率之间线性关系比较明显。但当考虑剪切变形时,这种线性关系在低阶次时不明显,当阶次较高时才逐渐明显。由图可以看出,考虑剪切变形时的频率都要比不考虑剪切变形时的频率高,另外 1 阶到 4 阶,4 阶到 6 阶时剪切变形的影响先增加后减小,6 阶之后影响逐渐增加。可知在 1 阶和 4 阶时剪切变形的影响相对其它阶次要小。支

座两端约束越多,钢管混凝土拱架的自振频率越高,这是因为当支座两端的约束增多时,拱架的刚度会有所提高,而质量不变,所以得到的自振频率会越高。

剪切变形对拱架自振频率的影响随阶次的增加而逐渐增大;随着矢跨比的增大,剪切变形的影响将会在 6 阶次处出现下降。当矢跨比为 0.313 时阶次与频率间的线性关系很明显,剪切变形对其影响较为一致。拱架的 1 阶固有频率随矢跨比的增大而比较均匀的减小,线性关系比较明显,考虑剪切变形的 1 阶固有频率也随矢跨比的增大而减小,剪切变形的影响随矢跨比的增加有减小的趋势。

[参考文献]

- [1]钟善桐. 高层钢管砼结构[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1999.
 - [2]钟善桐. 钢管混凝土统一理论[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
 - [3]韩林海. 钢管混凝土的特点及发展[J]. 工业建筑,1998(2):1-4.
 - [4]王道斌. 结构矩阵分析原来与程序设计[M]. 成都:西南交通大学出版社,2004.
 - [5]刘延柱. 振动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.
- 作者简介:李书嘉(1987.12-),男,学历:本科,目前职务:项目经理。