

文章编号:1671-1637(2001)04-0051-04

材料性质对钢管混凝土拱桥动力性质的影响

李延强<sup>1</sup>, 武兰河<sup>1</sup>, 安蕊梅<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道学院 力学与工程科学系, 河北 石家庄 050043;  
2. 石家庄铁道学院 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要:采用空间有限元理论,结合拱桥自身的受力特点,将钢管混凝土拱桥离散成一系列空间梁单元和空间杆单元,建立了有限元动力方程,研究钢管混凝土拱桥中钢管和混凝土这两种材料对其动力特性的影响。  
关键词:钢管混凝土;拱桥;动力特性;空间有限元  
中图分类号:U441; U448.22 文献标识码:A

Dynamic Properties of Steel Pipe-encased Concrete Arch Bridge Effectuated by Its Materials

LI Yan-qiang<sup>1</sup>, WU Lan-he<sup>1</sup>, AN Rui-mei<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanics and Engineering Science, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China;  
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Based on the spacial finite elements theory and combined with the bearing capacity of arch bridge, the steel pipe-encased concrete arch bridge was divided into a series of spacial beam elements and truss elements to establish its finite elements dynamic equations. With these equations, the effect of steel pipe-encased concrete arch bridge's dynamic performance by the materials characteristics of steel pipe and concrete was studied.  
**Key words:** steel pipe-encased concrete; arch bridge; dynamic performance; spacial finite elements

钢管混凝土作为一种新型的建筑材料,利用钢管对混凝土的套箍作用,使混凝土处于复杂应力状态,从而使混凝土强度提高,塑性得到改善,同时混凝土的存在也增强了钢管壁的稳定性。钢管混凝土具有强度高、重量轻、塑性好、耐疲劳和耐冲击、大幅节约钢材、木料及水泥、简化施工工艺、同时缩短工期的优点,因此在工程界得到广泛的应用。自从中国第一座钢管混凝土拱桥——四川旺苍大桥建成至今,短短几年的时间,钢管混凝土在桥梁上的应用得到全面推广。因此有必要将钢管混凝土本身的受力特点结合拱桥的受力特点,对钢管混凝土拱桥进行深入研究。  
钢管混凝土构件工作的实质在于钢管及其核心

混凝土之间的相互作用和协同互补,从而提高构件的承载力。这种组合作用使钢管混凝土具有一系列优越的力学性能,同时也导致了其力学性能的复杂性,因此,如何合理地估计这种相互作用的“效应”成为迫切需要解决的钢管混凝土理论研究热点课题。

1 钢管混凝土拱桥的刚度模量

钢管混凝土拱桥中钢管混凝土构件的刚度模量采用文献[1]所述的“统一理论”进行计算。将钢管和混凝土视为同一种材料,并利用全过程分析法得到了钢管混凝土截面名义平均应力与轴向平均压应变之间的关系曲线如图 1 所示。把全过程曲线化分为 3 个阶段:弹性(*oa*)、弹塑性(*ab*)和强化阶段(*bc*),来

计算其刚度模量。本文只确定弹性阶段的刚度模量。

根据文献[1],可得出钢管混凝土构件的轴压弹性模量

$$E_{sc} = f_{sc}^p / \epsilon_{sc}^p \quad (1)$$

图 1 应力—应变关系

式中:  $E_{sc}$  为钢管混凝土的轴压弹性模量;  $f_{sc}^p$ 、 $\epsilon_{sc}^p$  分别为轴压比例极限和对应的应变。不同截面形式时,  $f_{sc}^p$  的计算公式不同, 具体形式参见文献[2]。

由式(1)计算出构件的轴压弹性模量后, 钢管混凝土拱桥的抗拉刚度为  $E_{sc}A$ 。

拱桥中, 钢管混凝土拱肋主要为压弯构件, 因此还必须确定其抗弯刚度。钢管混凝土构件的抗弯刚度由文献[2]提供的钢管混凝土纯弯构件的荷载—变形关系(图 2)确定。同样将弯矩( $M$ )—曲率( $\varphi$ )关系曲线分为弹性(OA)、弹塑性(AB)和强化(BC)三个阶段, 只确定弹性阶段的抗弯刚度。

定义  $M_u$  为钢管混凝土构件的抗弯承载力, 它主要和构件截面抗弯模量  $W_{sc}^m$ 、约束效应系数  $\xi$  及轴压屈服极限  $f_{sc}^y$  有关。

钢管混凝土构件的抗弯刚度计算公式为

$$E_{sc}^m I_{sc}^m = AM_u / \varphi_e \quad (2)$$

不同截面形式时,  $A$ 、 $M_u$ 、 $\varphi_e$  的取值各不相同, 具体参见文献[2]。

## 2 有限元方法分析

在桥梁结构的动力分析中, 结构的固有频率和振型是重要的动力特性。对拱桥的固有频率的计算通常采用有限元的方法。对钢管混凝土拱桥进行动力分析时仍以有限元法为基础, 但主要是研究钢管混凝土材料对拱桥动力特性的影响, 因此在建立有限元模型时, 主要考虑拱圈和吊杆间的相互作用, 对桥面系、基础间的相互作用以及阻尼等因素的影响暂不考虑。设有一座钢管混凝土拱桥, 跨度为 90 m, 拱轴为悬链线, 拱轴系数为 1.167, 矢跨比  $f/l = 1/4.5$ , 每 5 m 设有一根吊杆, 全桥共计 34 根, 设有 5 道横撑。边界支撑条件假设均为固结。将拱圈划分为一系列空间梁单元, 而将吊杆视为空间杆单元, 建立如图 3 所示的有限元计算模型, 运用达朗贝尔原

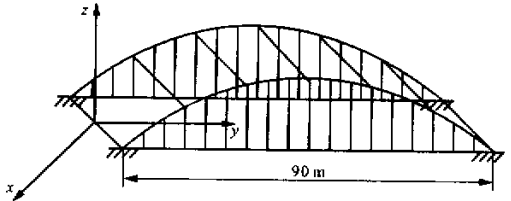
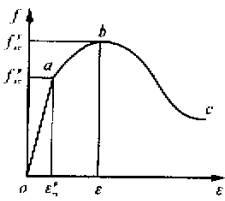


图 3 计算模型

理, 可得到钢管混凝土拱桥的频率特征方程

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0$$

式中:  $[M]$  为质量矩阵;  $[K]$  为刚度矩阵。

由于拱桥的轴力效应对结构固有频率的影响较大, 通常在恒载轴力的基础上, 通过几何刚度矩阵近似地按线性二阶理论考虑[3], 因此刚度矩阵中包括弹性刚度矩阵和几何刚度矩阵。推导过程和具体形式见文献[3]。由于钢管混凝土拱桥的跨度较大, 因此得到的整个结构的动力方程阶数较高, 求解该方程较为困难。但桥梁结构中一般只有前几阶频率对结构的动力性能影响较大, 因而只需求出该特征方程的前几阶频率。求解多自由度结构前几阶频率最有效的方法是子空间迭代法。子空间迭代法的具体求解过程采用文献[4]提供的形式。

此外, 需特别指出的是: 在组集总质量矩阵和总刚度矩阵时, 为避免两类单元共面时, 产生奇异矩阵, 采用在总质量矩阵和总刚度矩阵的主对角元素为零处引入一个奇异性修正系数的方法来修正总质量矩阵和总刚度矩阵。

## 3 材料性质对拱桥动力性质的影响

钢管混凝土作为一种新型建筑材料, 其材料性质对拱桥的动力特性有很重要的影响。影响钢管混凝土材料性质的主要因素有: 含钢率、钢管和混凝土材料的匹配等方面。

### 3.1 含钢率对拱桥动力性质的影响

所谓含钢率是指钢管混凝土构件中钢管面积  $A_s$  和混凝土面积  $A_c$  之比, 习惯上用  $\alpha$  来表示。即

$$\alpha = A_s / A_c$$

含钢率是反映钢管混凝土受力性能的一个重要概念, 不仅直接影响钢管混凝土构件的强度, 而且对钢管混凝土结构的动力特性也有非常重要的影响。钢管混凝土拱桥的动力特性主要通过固有频率和振型来反映。不同含钢率下, 钢管混凝土拱桥的固有频率计算结果见表 1。

根据表中数据, 做出钢管混凝土拱桥一阶频率

表 1 不同含钢率下钢管混凝土拱桥固有频率变化

含钢率	固有频率/Hz		
	一阶	二阶	三阶
0.05	0.629 512	0.732 116	1.062 670
0.06	0.621 835	0.731 371	1.048 914
0.07	0.611 389	0.730 424	1.030 210
0.08	0.603 838	0.729 776	1.016 713
0.09	0.596 362	0.729 151	1.003 381
0.10	0.588 535	0.728 496	0.989 468
0.11	0.583 738	0.728 086	0.980 974
0.12	0.577 107	0.727 491	0.969 278
0.13	0.571 081	0.726 909	0.958 708
0.14	0.566 828	0.726 463	0.951 290
0.15	0.562 206	0.725 935	0.943 270
0.16	0.557 498	0.725 340	0.935 157
0.17	0.553 891	0.724 835	0.928 982
0.18	0.550 550	0.724 323	0.923 299
0.19	0.546 868	0.723 699	0.917 083
0.20	0.543 521	0.723 068	0.911 480
0.25	0.531 849	0.720 181	0.892 413
0.30	0.525 932	0.717 744	0.883 405
0.35	0.527 223	0.716 925	0.886 439
0.40	0.539 257	0.719 055	0.907 446
0.45	0.570 237	0.725 678	0.961 357

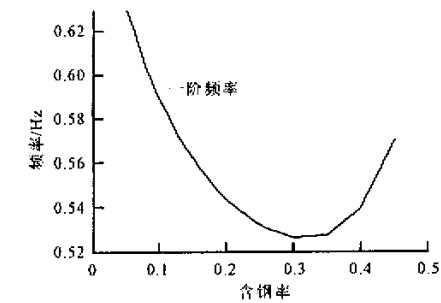


图 4 含钢率与固有频率关系

与含钢率的变化曲线如图 4 所示,钢管混凝土拱桥随着含钢率的提高,其固有频率有先降后升的变化趋势。这主要是因为含钢率对钢管混凝土构件质量和刚度影响的非线性造成的。随着含钢率的提高,钢管混凝土构件的质量和刚度均在提高,但是含钢率较小时,构件质量的提高大于刚度的提高,因而拱桥的固有频率会有下降的趋势;当含钢率达到一定值时,刚度增加大于质量的增加,此时拱桥的固有频率上升。由此可见存在一个最佳含钢率的问题。从图

4 可直观地看到:当含钢率在 0.3~0.35 之间变化时,钢管和混凝土之间的紧箍效应最佳,因而一般地,钢管混凝土拱桥尤其是主跨的含钢率应控制在 0.3~0.35 之间。

3.2 两种材料匹配对拱桥动力性质的影响

钢管混凝土的工作机理是钢管和混凝土相互作用的紧箍力,使混凝土处于三向受压,而钢管处于异号力场,从而提高构件的承载力。随着钢管和混凝土强度等级的提高,钢管混凝土构件的强度承载力随之增大,但是其动力性质却并不一定随之得到改善。因此钢管和混凝土之间存在一个材料匹配问题,即两种材料怎样匹配时,才能使钢管混凝土构件的强度及对其动力特性的影响达到最佳。不同材料组合下钢管混凝土拱桥的固有频率的计算结果见表 2。为方便比较做出了不同材料匹配时钢管混凝土拱桥固有频率直方图如图 5 所示。

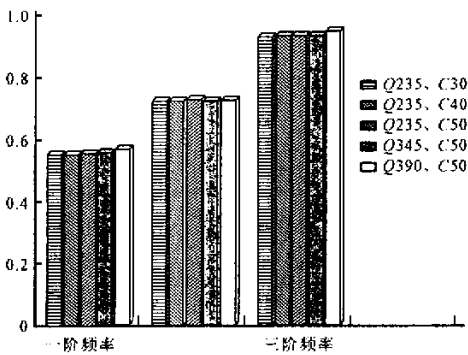


图 5 不同材料匹配时频率直方图

从表 2 中可以看出,采用同一种型号的钢材时,随着混凝土强度等级的提高,钢管混凝土拱桥的固有频率有升高的趋势,但变化幅度不大。文献[2]研究表明:其他条件相同而核心混凝土强度不同的试件,其纵向应变分布受到核心混凝土弹性模量的影响,即核心混凝土的弹性模量随其强度的增大而增大,但钢与混凝土间的纵向应变完全连续的长度却随着核心混凝土强度的增大而变短;也即随着核心混凝土强度的增大,钢与混凝土间粘结应力部分的长度变长。因此,随着混凝土强度等级的提高,钢与混凝土之间的紧箍效应增强,从而导致钢管混凝土构件刚度的提高,因而其自振频率有升高的趋势。同时从表 2 中还可以看出,采用不同型号的钢材时,钢管混凝土拱桥的自振频率变化不明显。这主要是因为钢材的屈服极限与其强度无关,随着钢材屈服强度的提高,钢管混凝土构件的刚度几乎不发生变化。因而其动力特性的变化亦不明显。

表 2 材料匹配对钢管混凝土拱桥固有频率的影响

钢材	混凝土	固有频率/Hz		
		1	2	3
Q235	C20	0.553 398	0.724 357	0.929 773
	C25	0.554 484	0.724 629	0.931 615
	C30	0.552 316	0.724 921	0.934 839
	C40	0.553 764	0.726 962	0.938 217
	C50	0.556 860	0.728 917	0.940 806
	C60	0.558 453	0.729 356	0.943 838
Q345	C20	0.544 794	0.722 661	0.914 918
	C25	0.553 897	0.724 726	0.930 462
	C30	0.557 889	0.725 596	0.937 283
	C40	0.557 899	0.725 642	0.937 234
	C50	0.558 384	0.727 476	0.940 643
	C60	0.560 486	0.729 666	0.944 053
Q390	C20	0.543 626	0.722 450	0.912 089
	C25	0.556 100	0.725 250	0.933 470
	C30	0.562 742	0.726 637	0.944 945
	C40	0.566 456	0.727 425	0.951 378
	C50	0.568 210	0.728 219	0.955 627
	C60	0.571 702	0.728 791	0.961 234

3.3 截面形状对拱桥动力性质的影响

钢管混凝土的截面形状对拱桥的静力性质和动力性质都有着至关重要的影响。钢管混凝土拱桥中常见的截面形式主要有两种：圆形截面和方形截面。两种截面形式下钢管混凝土拱桥的固有频率计算结果见表 3。为方便比较，同样作了相同含钢率(0.3)下拱桥固有频率的直方图，如图 6 所示。

表 3 不同截面形式下拱桥固有频率 (Hz)

截面形状	自振频率阶数	含 钢 率					
		0.18	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
圆形截面	1	0.550 6	0.543 5	0.531 8	0.525 9	0.527 2	0.539 3
	2	0.724 3	0.723 1	0.720 2	0.717 7	0.716 9	0.719 1
	3	0.923 3	0.911 5	0.892 4	0.883 4	0.886 4	0.907 4
方形截面	1	0.610 4	0.603 3	0.590 9	0.583 1	0.581 0	0.586 4
	2	0.767 9	0.766 6	0.763 4	0.760 3	0.757 9	0.757 1
	3	1.034 5	1.021 4	0.998 7	0.984 6	0.980 9	0.990 6

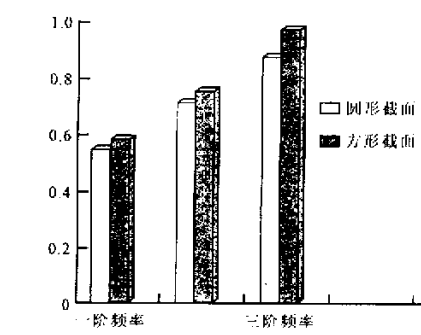


图 6 不同截面形状相同含钢率(0.3)时频率直方图

对表 3 中数据进行分析可知：在同一含钢率下，方形截面的钢管混凝土拱桥比圆形截面的钢管混凝土拱桥的固有频率稍大。这是因为同一含钢率下，方形截面的钢管混凝土构件的刚度较圆形截面的刚度要大。文献[2]研究表明，圆形钢管混凝土的钢管与混凝土之间的约束效应强于方形截面。这表明，并不是钢管和混凝土之间的约束效应越好，钢管混凝土拱桥的动力性能就越好。

4 结 语

钢管混凝土拱桥具有较大的跨越能力，随着跨径的增大，拱桥的动力问题会越来越突出；加之钢管混凝土拱桥为一柔性体系(固有频率均小于 2 Hz)，由于自身刚度较弱而引起的问题较为突出，在该类拱桥的设计和施工中要特别注意钢管混凝土材料的刚度问题。此外，钢管混凝土构件中钢管和混凝土之间的相互作用十分复杂，材料对拱桥动力性质的影响尚需进一步研究。

参考文献：

[1] 钟善桐. 高层钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999. 16—58.

[2] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 101—289.

[3] 项海帆, 刘光栋. 拱结构的稳定与振动[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991. 160—247.

[4] 石 洞, 石志源, 黄东洲. 桥梁结构电算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. 234—267.