

预应力混凝土梁模态分析的有限元软件实现

李瑞鸽¹, 杨国立¹, 张耀庭²

(1. 台州学院建筑工程系, 浙江 台州 318000; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为建立预应力混凝土梁模态分析的有限元模型, 以 ANSYS 有限元分析软件为例, 提出预应力混凝土梁式结构在利用大型有限元软件进行模态分析时, 可采用初应变法施加预应力, 并且将混凝土受到的预压力影响转化为对单元材料弹性模量的影响, 通过对变弹性模量的有限元模型进行模态分析, 得到预应力混凝土梁在各级预应力下的自振频率和振型。通过与试验值对比可知, 改进后的有限元模型可以用于预应力混凝土梁的模态分析。

关键词: ANSYS; 预应力混凝土梁; 频率; 模态

中图分类号: TU 378

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)02-0188-05

结构或构件的模态参数是结构设计和评估的重要参数^[1-3], 结构的模态参数和动力反应计算比较复杂, 因此采用大型有限元软件分析结构的动力性能是科研和工程人员常用的方法。有限元软件对结构进行瞬态动力分析时可以考虑其非线性特性, 但是在进行模态分析时采用的都是线性模型, 例如 ABAQUS、ANSYS、ADINA 等国际著名有限元软件, 在进行模态分析时采用的方法都是子空间迭代法或者 Lanczos 法, 这些分析方法对模型中所定义的非线性特性会自动忽略。预应力混凝土结构是依靠张拉预应力筋对混凝土施加压应力的, 如果将混凝土和钢筋当做线弹性材料, 并忽略混凝土受压后梁的轴向微小变形, 则钢筋所受到的拉力和混凝土所受到的压力都是系统的自内力, 由于没有外部能量的加入, 对预应力混凝土结构进行分析就会得出预应力的变化不会影响系统的动力性能的结论, 显然这与已有的试验结果不相符。预应力混凝土梁式结构的振动频率、模态等动力性能参数是预应力混凝土结构抗震研究及设计的重要参考依据, 也是基于动力性能进行无损检测的重要参数^[4-5]。但是直接用有限元软件进行预应力混凝土结构的模态分析显然无法得到正确的结果。本文以 ANSYS 软件为例, 从预应力处理、单元选择、耦合处理等方面考虑改进, 用改进后的模型计算预应力混凝土梁的模态, 并且与试验值进行比较来验证改进后的有限元程序对预应力混凝土梁模态分析的可行性。其他有限元软件进行模态分析的方法与此类似。

1 预应力的处理

ANSYS 是国际最著名的大型通用有限元软件之一, 在 ANSYS 中有种类齐全的各种单元供调用, 还有良好的二次开发功能和开放性^[6]。在 ANSYS 中预应力的模拟有两大类, 即外荷载法和整体法。外荷载法就是以荷载的形式取代预应力钢筋的作用, 典型的如等效荷载法。这种方法在静力分析中是可行的, 但是明显异于结构的实际受力情况; 而整体法是将二者的作用一起考虑, 典型的如 ANSYS 中用 link 单元模拟力筋, 采用初应变或模拟退火的方法在预应力筋上施加预应力, 并通过预应力筋与混凝土的耦合将预应力传递到混凝土上。整体法与混凝土结构的实际受力很相近。

在 ANSYS 动力分析中, 程序会忽略结构的非线性性质, 而是作为线弹性材料处理的。下面根据 ANSYS 计算预应力混凝土梁动力特征参数的原理, 推导大型有限元软件对预应力混凝土梁频率的计算结果。

预应力混凝土梁的长细比一般为 15~20 左右, 是比较细长的杆件, 在动力性能分析中, 其剪切影响

收稿日期: 2011-07-06 修改稿日期: 2012-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078166/E0808)

作者简介: 李瑞鸽(1973-), 女, 河南叶县人, 副教授, 博士, 从事混凝土及预应力混凝土结构的研究及教学。

和转动惯量的影响都很小,因此可以忽略. 梁的弯曲振动方程为^[7]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) + N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: N 为轴力, \bar{m} 为梁的单位长度上的质量, EI 是混凝土梁和钢绞线受拉后的刚度值的组合, 即: $EI = E_c I_{cs} + E_p I_p$, $E_p I_p$ 为预应力筋受到张拉力后的刚度. 轴向力 N 以受压为正.

预应力筋承受拉力时, 其弯曲刚度值不能单纯的用预应力钢筋的实际弹性模量与其截面惯性矩的乘积, 而应该考虑其受拉后刚度强化效应^[8]. 将预应力筋等效为长度为 l 的简支梁, 根据拉索的自振频率与梁的自振频率相等的原则即可求出预应力筋受拉后的刚度 $E_p I_p$.

$$E_p I_p = \left(\frac{l}{n\pi}\right)^2 N \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

所以预应力梁总的弯曲刚度为:

$$EI = E_c I_{cs} + \left(\frac{l}{n\pi}\right)^2 N \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 考虑简支梁的边界条件可以解得:

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{1 - \frac{Nl^2}{n^2 \pi^2 [E_c I_{cs} + \left(\frac{l}{n\pi}\right)^2 N]}} \sqrt{\frac{E_c I_{cs} + \left(\frac{l}{n\pi}\right)^2 N}{m}} \quad (4)$$

整理式(4)得:

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{n^2 \pi^2 [E_c I_{cs} + \left(\frac{l}{n\pi}\right)^2 N] - Nl^2}{n^2 \pi^2}} \times \frac{1}{m} \quad (5)$$

化简式(4)得:

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{E_c I_{cs}}{m}} \quad (6)$$

式中: ω_n 为第 n 阶梁的自振频率; l 是预应力筋张拉锚固后, 并且预应力梁受到压缩变形后的跨度.

$$l = l_c \left(1 - \frac{N}{A_c E_c}\right) \quad (7)$$

式中 l_c 是当预应力为 0 时预应力混凝土梁的长度; l 是承受预应力后混凝土梁的实际长度, 承受预应力前后梁的长度变化很小, 可以忽略不计.

由式(6)可以看出, 如果忽略构件的压缩变形, 同时考虑混凝土受压和钢绞线受拉后的刚度变化, 预应力混凝土梁的自振频率与不承受预应力的普通混凝土简支梁的频率计算公式是相同的, 也就是说预应力梁的频率与预应力的大小没有关系. 这种结果也可以用能量法解释: 如果将混凝土和钢筋看做理想的弹性材料, 在混凝土受到预压力时, 该系统中钢绞线同时受到了大小相同的拉力, 这种压力和拉力都是系统的内力, 整个系统并没有承受任何外力的作用和外来的能量, 因此按理想均质材料计算的预应力混凝土梁的自振频率是不随预应力的改变而变化的. 这与试验结果相矛盾, 是因为预应力的施加使混凝土的实际弹性模量发生了变化, 从而引起了频率的变化. 根据这个结果, 在 ANSYS 分析中, 可以采用回归分析的方法, 找出预应力与混凝土弹性模量的关系, 在 ANSYS 程序中, 根据预应力的变化来修改混凝土的弹性模量.

根据预应力修改混凝土的弹性模量, 则必须建立预应力与弹性模量的相关关系, 但是从表面上看, 混凝土的弹性模量与预应力的关系并不明确, 必须根据已有的大量试验数据进行分析, 根据梁的频率反算出梁在各级预应力作用下的实际弹性模量, 将该弹性模量值映射到一个适宜的坐标上. 通过分析, 将混凝土弹性模量的增加倍数 $y = \frac{E_q}{E_c}$ 映射到 x 坐标上 (E_q 为等效弹性模量, E_c 为混凝土的实测弹性模量)

可以得到良好的效果, x 坐标的具体表示为:

$$x = \frac{N}{bh f_{ck}} \cdot 10^{\left(\frac{f_0}{10h} + \frac{3\epsilon_0}{h}\right)} \quad (8)$$

通过映射, x 和 y 的关系呈有规律性分布, 映射前后的分布规律如图 1 和 2 所示.

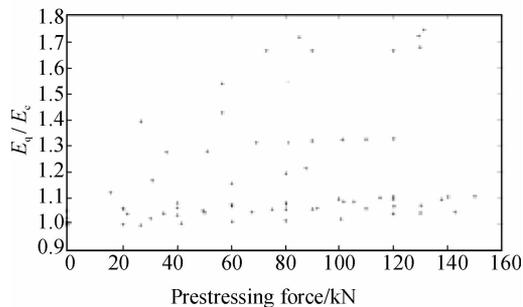


图 1 映射前的数据分布

Fig. 1 Data distribution before mapping

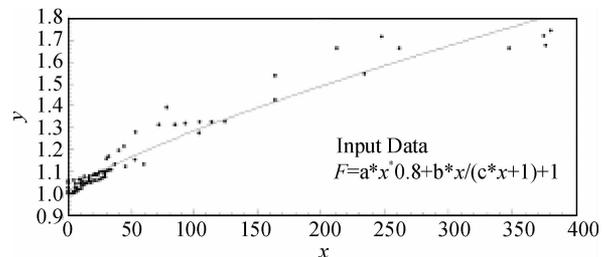


图 2 映射处理后的数据分布及拟合曲线

Fig. 2 Mapped data distribution and fitting curve

由图 1 和图 2 对比可知, 如果不进行映射处理, 则数据的分布没有任何规律, 无法发现预应力施加前后弹性模量变化定量关系; 经过映射处理后, 数据出现了明显的规律, 可以进行拟合.

采用 DATAFIT9.0 对已经处理好的数据进行拟合, 根据数据的分布规律, 构造函数进行拟合, 最终构造的函数为:

$$y = ax^{0.8} + \frac{bx}{cx+1} + 1 \quad (9)$$

通过 DATAFIT9.0 的拟合, 各系数取值如下:

$$a = -6.651\ 418\ 8 \times 10^{-3}$$

$$b = 7.512\ 877\ 8 \times 10^{-3}$$

$$c = 2.409\ 094\ 7 \times 10^{-3}$$

拟合后的曲线如图 2 所示.

回归分析的拟合度水平见表 1.

由表 1 可以看出, 显著性水平为

0, 拟合结果达到了较高的标准, 可以接受.

表 1 拟合数据的方差分析

Tab. 1 Variance analysis of fitting data

方差来源	自由度	平方和	均方和	F 值	显著性水平 α
回归系数	2	2.832 955 9	1.416 477 97	526.203 582	0
残差	66	0.177 664 2	2.691 882 04		
总和	68	3.010 620 2			

2 预应力筋及普通钢筋与混凝土的耦合处理

在建立了混凝土梁模型和钢筋、钢绞线模型后, 为了让钢筋与混凝土协同工作, 则必须在钢筋和混凝土附近的节点上进行耦合. 本文利用 APDL 编写循环语句进行该工作. 为了保证耦合后结构模型计算收敛, 则应让钢筋与混凝土尽量在共用节点上耦合. 为了保证钢筋与混凝土有共用节点, 则在建立模型时需要一些特殊的处理. 本程序在建立预应力混凝土模型时, 采用两种措施来保证共用节点: (a) 保护层厚度与单元网格的尺寸相等, 这样可以保证在普通钢筋节点的位置附近有混凝土节点与之耦合. (b) 在预应力筋的位置对应处, 混凝土梁截面上强制出现网格.

3 单元选择

ANSYS 中有专门的混凝土三维单元 solid65, 可以模拟混凝土在各种条件下的受力. 普通钢筋采用 link8 单元, 该杆单元, 具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形、大应变等功能^[6]. link10 单元独一无二的双线性刚度矩阵特性使其成为一个轴向仅受拉或仅受压杆单元. 预应力筋在混凝土中依靠张拉力建立预应力, 由于该预应力筋是无粘结的, 即使没有施加预应力, 预应力筋也不会随着混凝土受压, 因此采用 link10 单元做预应力筋是合适的.

4 计算结果与试验结果的比较

将预应力的改变反映在混凝土弹性模量的变化上, 编写 ANSYS 的 APDL 语言程序, 计算试验梁的频率. 为验证 ANSYS 程序的准确性, 分别对 2009 年试验梁^[9]、2005 年试验梁^[10] 和 Saiidi 试验梁^[11]

三批试件进行 ANSYS 分析并与试验值进行比较,结果如表 2、表 3、表 4 所示.表中一阶和二阶频率的误差计算方法为:(频率试验值-频率计算值) \times 100/频率试验值.

表 2 2009 年试验梁 L1 频率试验值与 ANSYS 计算值比较

Tab.2 Contrast of the experimental and ANSYS calculated values of test beam L1 in 2009

预应力 N/kN	一阶频率试验 /Hz	二阶频率试验 /Hz	一阶频率 Ansys 计算/Hz	二阶频率 Ansys 计算/Hz	一阶误差 %	二阶误差 %
0	60.740	209.794	60.753	222.310	0.021	5.966
21.7	61.733	210.162	61.168	223.827	-0.915	6.502
35.1	61.776	209.602	61.516	225.098	-0.421	7.393
50.0	61.851	209.602	61.918	226.565	0.108	8.093
67.5	61.923	209.688	62.395	228.307	0.762	8.880
80.1	62.190	211.307	62.738	229.559	0.881	8.638
92.2	62.334	211.517	63.065	230.753	1.173	9.094
105.5	63.063	211.482	63.421	232.051	0.568	9.726
115.3	63.503	210.312	63.679	232.996	0.277	10.785

表 3 2005 年试验梁频率试验值与 ANSYS 计算值比较

Tab.3 Contrast of the experimental and ANSYS calculated values of test beam in 2005

预应力 N/kN	一阶频率试验 /Hz	二阶频率试验 /Hz	一阶频率 Ansys 计算/Hz	二阶频率 Ansys 计算/Hz	一阶误差 %	二阶误差 %
0	28.360	100.710	28.378	104.548	0.065	3.811
20	28.360	102.670	28.566	105.239	0.725	2.502
40	28.830	103.090	28.824	106.190	-0.022	3.007
60	29.320	104.070	29.091	107.175	-0.781	2.984
80	29.480	105.050	29.358	108.160	-0.412	2.960
100	29.690	105.500	29.622	109.130	-0.230	3.441
120	29.800	105.530	29.879	110.079	0.266	4.310

表 4 Saiidi 试验梁频率试验值与 ANSYS 计算值比较

Tab.4 Contrast of the experimental and ANSYS calculated values of Saiidi's test beam

预应力 N/kN	一阶频率试验 /Hz	二阶频率试验 /Hz	一阶频率 Ansys 计算/Hz	二阶频率 Ansys 计算/Hz	一阶误差 %	二阶误差 %
0.000	11.410	43.990	11.674	45.868	2.309	4.269
26.732	13.470	44.890	13.059	51.306	-3.050	14.292
56.579	14.150	45.710	14.050	55.192	-0.706	20.744
80.865	14.190	45.570	14.540	57.114	2.469	25.332
120.052	14.720	45.860	14.973	58.809	1.719	28.236
129.392	14.970	46.100	15.031	59.035	0.405	28.057
131.260	15.070	45.870	15.040	59.073	-0.196	28.784
129.882	14.780	45.860	15.033	59.045	1.713	28.750
90.205	14.720	46.200	14.677	57.649	-0.292	24.782
85.535	14.950	46.320	14.612	57.394	-2.262	23.907
72.929	14.720	46.050	14.404	56.578	-2.149	22.862
56.592	13.630	45.420	14.050	55.193	3.084	21.517
36.064	12.890	44.690	13.428	52.754	4.177	18.044
15.532	12.090	44.110	12.526	49.213	3.604	11.568

由表 2、表 3、表 4 可知,该预应力梁动力计算模型的一阶频率计算值与试验结果吻合较好,二阶值稍有误差.其中误差最大的是 Saiidi 的试验梁,其原因是 Saiidi 的试验梁在制作过程中由于人为的因素造成了试验梁的损伤,在梁的跨中部位出现一条微小的裂缝,该裂缝的存在会影响梁的自振频率,尤其是对高阶频率影响较大.

为了验证 ANSYS 计算的频率是否与预想的频率阶数一致,同时检验动力模型的有效性,在动力计算时,也同时采集了预应力混凝土梁前两阶振型,如图 3 和图 4 所示,由图可知,一阶频率和二阶频率对应的振型是预应力混凝土简支梁的前两阶竖向振型.



图3 预应力混凝土梁的一阶振型

Fig. 3 The first-order modal of PSC beam



图4 预应力混凝土梁的二阶振型

Fig. 4 The second-order modal of PSC beam

5 结 论

对影响预应力混凝土梁频率的几个因素进行映射处理,映射处理后,数据分布呈较明显的规律性,对映射后的数据进行拟合处理,得到修正混凝土弹性模量的函数表达式.将修正后的混凝土弹性模量关系式用于 ANSYS 模型中计算预应力混凝土梁的自振频率.动力计算结果与预应力混凝土梁试验结果对比,发现一阶频率的 ANSYS 计算值与试验值吻合较好,部分二阶试验值与计算值吻合较差,例如 Saiidi 的试验梁误差达到了 28.7%,其它梁吻合较好.究其原因是因为 Saiidi 的试验在制作过程中跨中出现了裂缝,对高阶频率影响较大.裂缝对预应力混凝土梁自振频率的影响将是以后研究的一个方向.

参考文献 References

- [1] 楼梦麟,洪婷婷.预应力梁横向振动分析的模态摄动方法[J].工程力学,2006,23(1):107-111.
LOU Meng-lin, HONG Ting-ting. Mode Perturbation Method for Lateral Vibration Analysis of Prestressed Beams [J]. Engineering Mechanics, 2006,23(1):107-111.
- [2] 黄豪,唐小兵,张开银,等.竖向预应力作用效果的数值模拟与预应力损失的试验研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2007,31(5):922-924.
HUANG Hao, TANG Xiao-bing, ZHANG Kai-yin et al. Numerical Simulation on Vertical Prestressed Effect and Experimental Studies on Prestressed Loss[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2007, 31(5): 922-924.
- [3] 李瑞鸽,杨国立,张耀庭.预应力混凝土梁动力性能数值分析[J].土木建筑与环境工程,2009,31(1):1-6.
LI Rui-ge, YANG Guo-li, ZHANG Yao-ting. Numeric Analysis of the Dynamic Performance of a Prestressed Concrete Beam[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009,31(1):1-6.
- [4] 张耀庭,蔡利建.基于摄动法的体外预应力梁基频分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2006,36(6):118-121.
ZHANG Yao-ting, CAI Li-jian. Study on the Basic Frequency Analysis of External Prestressed Concrete Beams Based on Perturbation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2006,36(6):118-121.
- [5] ZHANG Yao-ting, LI Rui-ge. Natural Frequency of Full-Prestressed Concrete Beam[J]. Transactions of Tianjin University, 2007, 13(5): 354-359.
- [6] NSYS Inc. Theory reference for ANSYS and ANSYS workbench[M]. US: ANSYS Inc, 2005.
- [7] Clough R W, Penzien J. Dynamic of Structures[M]. McGraw Hill, USA,1982.
- [8] Kim J T, Ryu Y S, YUN Chung-Bang. Vibration-based method to detect prestress-loss in beam-type bridges[J]. Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 5057(1): 559-568.
- [9] 李瑞鸽.全预应力梁预应力损失的动力检测研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
LI Rui-ge. Research on Dynamic performance of Full Prestressed Concrete Beam and Identification of Virtual Prestressing Force. [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [10] 李瑞鸽.全预应力混凝土梁的动力性能及有效预应力识别[D].武汉:华中科技大学,2009.
LI Rui-ge. Research on Dynamic Performance of Full Prestressed Concrete Beam and Identification of Virtual Prestressing Force[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [11] SAIIDI M, DOUGLAS B, FENG S. Prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges[J]. Journal of structural Engineering, 1994,120(7):2233-2241.

(下转第197页)

- [8] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京:人民交通出版社,1990.
WU Shi-wei. Structure reliability analysis[M]. Beijing:People's traffic press,1990.
- [9] 景诗庭. 隧道结构可靠度[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
JING Shi-ting. The tunnel structure reliability[M]. Beijing:China railway publishing house,2002.

Reliability analysis on the lining structure of loess railway tunnel

NIU Ze-lin, HUO Run-ke

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: As a used tunnel, is its structure safe and reliable with time passing by? This has been paid close attention to by the people. In view of the fact that the method of the traditional safety coefficient already can't play a role, the inspection method on the reliability of the lining structure can only use the knowledge of mathematical statistics. But it is more less in term of the application results about the reliability of lining structure at present, this is blamed on the underground structure since it has too much uncertainty. And the loess tunnel has certainly not been universal in the research results of the structure reliability with the tunnel of the other strata. So at the present stage, one of the main tasks is to find a reasonable evaluation method of loess tunnel lining structure's reliability. Therefore, this paper offers SIR-3000 geological radar detection as the means, from real thickness of the lining, and applies probability and statistics knowledge for operation of loess tunnel lining structure reliability to make evaluation. At the same time, this paper puts forward an iclea about reducing the construction cost by reducing the thickness to in the condition of ensuring the reliability necessary for the structure.

Key words: loess areas; tunnel; mathematical statistics; lining; reliability

Biography: NIU Ze-lin. Lecturer, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-15591859597, E-mail:nz1109109@163.com

(上接第 192 页)

Modal analysis of prestressed concrete beam with finite element software

LI Rui-ge¹, YANG Guo-li¹, ZHANG Yao-ting²

(1. Taizhou University, Taizhou 318000, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to create the modal analysis finite element model of prestressed concrete beams, a new analysis method has been proposed by the example of ANSYS finite element software. The prestressing force of beam is used by initial strain when the prestressed concrete beam modal is analyzed with finite element software. The prestressing force influence of the beam is changed to the impact of element materials elastic modulus. The frequencies and modals of prestressed concrete beams using ANSYS procedure is analyzed by varied modulus. The calculated natural frequencies at all levels prestressing force fit close with the experimental results. It shows that the modified finite element analysis model is feasible.

Key words: ANSYS; prestressed concrete beam; frequency; modal

Biography: LI Rui-ge, Associate Professor, Ph. D., Taizhou 318000, P. R. China, Tel:0086-13666899576, Email: lrg@tzc.edu.cn