

钢管混凝土拱材料非线性有限元分析方法

韦建刚, 陈宝春

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 对目前钢管混凝土拱考虑材料非线性的各种分析方法进行了介绍, 应用这些方法对钢管混凝土模型肋拱的受力全过程进行了分析. 分析结果表明, 纤维单元模型能较好地反映钢管混凝土肋拱受力全过程的基本特性, 计算结果可供工程应用.

关键词: 钢管混凝土; 拱; 材料; 非线性; 有限元

中图分类号: TU311.41

文献标识码: A

Finite element methods for analysis on material nonlinearity of concrete - filled steel tubular arch

WEI Jian - gang, CHEN Bao - chun

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Some methods are presented for analyze the behavior of concrete - filled steel tubular (CFST) arch, which considering the material nonlinear property. Using these methods, two CFST model arch are analyzed. Comparisons of numerical results with the test results indicate that the fiber - model can describe the basic mechanic behaviors of the CFST arch and can be used for design.

Key words: concrete - filled steel tube; arch; material; nonlinear; finite element

钢管混凝土拱桥在我国得到了广泛的应用且发展很快^[1], 为了解其受力性能, 已对钢管混凝土单圆管模型肋拱面内全过程受力进行了试验研究^[2, 3]. 由于钢管混凝土肋拱属于曲线状的细长结构, 同时还要考虑钢管与混凝土的共同作用, 给模型制作带来困难, 试验成本也较高. 因此, 目前对钢管混凝土拱桥基本理论的研究主要采用考虑双重非线性的数值计算模拟, 希望能应用经少量试验验证的计算程序和方法求得钢管混凝土拱的极限承载力, 并应用程序进行大量的参数分析得出简化算法以供工程应用. 在双重非线性分析中, 几何非线性已有较成熟的算法, 因此, 材料非线性分析是其关键问题. 钢管混凝土拱属细长结构物, 有限元建模时一般按杆系结构处理, 但其在材料上又属于钢 - 混凝土组合结构, 所以在进行材料非线性特性输入时, 通常采用双材料模型或单材料模型. 而从程序应用方面, 又分为通用程序和自编程序两种途径. 本文将对钢管混凝土拱材料非线性有限元分析中常用的方法进行介绍, 并以文献[2]的模型试验为算例, 通过各种计算结果与试验结果的对比, 对几种方法进行比较与分析.

1 双材料模型

钢管混凝土拱肋由钢管和管内混凝土组成, 因此所谓双材料模型是指在截面模型的建立过程中分别考虑钢和管内混凝土两种材料的非线性特性, 具体又可分为双单元模型和纤维单元模型.

1.1 双单元模型

在进行钢管混凝土拱桥有限元分析时, 首先要进行模型离散. 所谓双单元模型, 是指在模型离散时, 在同一段有限元中将钢管和混凝土分别作为两根杆件输入, 但同时保证二者的节点坐标完全相同.

收稿日期: 2003 - 08 - 26

作者简介: 韦建刚(1971 -), 男, 博士研究生, 工程师.

基金项目: 福建省重大科技资助项目(2003F007); 福建省教育厅科研资助项目(JA03016)

双单元模型通常可利用大型通用程序进行建模, 在相同的节点间建立两个单元, 一个单元赋予钢管的材料属性, 另一个单元则赋予混凝土的材料属性, 这样两种材料的应力 - 应变关系可以得以输入。

应用双单元模型对试验模型进行计算时, 钢管和混凝土的应力 - 应变关系均采用理想弹塑性模型。钢材的屈服强度由材性实验得出, 混凝土的屈服强度则取试块的平均抗压强度乘以 0.67 的系数。

双单元模型能够比较方便地运用大型通用有限元软件建模, 能够求得结构在节点上的受力特性和两种材料的应力和应变数值, 但无法考虑管内混凝土开裂退出工作对结构行为的影响, 同时也无法考虑钢管与核心混凝土的相互作用。

1.2 纤维单元模型^[4]

纤维单元模型在沿拱轴方向上将钢管混凝土拱肋划分为有限个梁单元, 而在拱肋截面上则划分为有限个钢纤维和混凝土纤维, 在求单元的刚度时, 通过截面数值积分求得截面的刚度, 进而求得梁单元的刚度。它与双单元模型一样能够进行结构受力分析并求得两种材料的应力和应变。但通过截面的数值积分它能够模拟钢管内填充的混凝土开裂对结构受力的影响, 同时它可以在钢管和混凝土的应力 - 应变关系模型中考虑两种材料的相互作用。由于材料需要进行截面建模, 同时模型要反映钢管与混凝土之间的相互作用, 所以一般的通用程序较难以实现而要考虑自编程序进行分析。

US - CFSTA 为自编的钢管混凝土拱肋双重非线性有限元计算程序, 该程序中钢管混凝土的应力 - 应变关系采用纤维单元模型。纤维单元模型中, 假定钢管和混凝土完全粘结, 钢管与混凝土之间不设联结单元; 钢管与混凝土相互作用而使得钢管处于三维受力状态的影响略去不计, 钢管仍采用一维的应力 - 应变曲线; 而核心混凝土的应力 - 应变关系则考虑钢管与混凝土相互作用的影响, 这种影响体现在以一维形式表达的混凝土应力 - 应变关系之中。

公式 (1) 为应用纤维单元模型计算时采用的钢管由 4 段曲线构成的应力 - 应变关系式:

$$\text{弹性段:} \quad \sigma = E_y \epsilon \quad (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_1) \quad (1a)$$

$$\text{屈服段:} \quad \sigma = f_y \quad (\epsilon_1 < \epsilon \leq \epsilon_2) \quad (1b)$$

$$\text{强化段:} \quad \sigma = f_y + E_y/150(\epsilon - \epsilon_2) \quad (\epsilon_2 < \epsilon \leq \epsilon_3) \quad (1c)$$

$$\text{二次流塑段:} \quad \sigma = f_u \quad (\epsilon > \epsilon_3) \quad (1d)$$

公式 (1) 中的符号意义详见文献[4]。

公式 (2) 为文献[4]在文献[5]核心混凝土应力 - 应变模型的基础上, 考虑偏心率以及套箍系数对应力 - 应变关系的影响所提出的核心混凝土的应力 - 应变关系模型, 公式 (2) 中的符号意义详见文献[4]。

$$\sigma_c = \left[A \frac{\sigma_c}{\sigma_c} - B \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_c} \right)^2 \right] \quad (\sigma_c > 0) \quad (2a)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} \sigma_c (1 - q) + \sigma_c q \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_c} \right)^{0.1} & (\sigma_c > 1.12) \\ \sigma_c \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_c} \right) \frac{1}{\left[\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_c} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_c} \right)^2 \right]} & (\sigma_c < 1.12) \end{cases} \quad (\sigma_c > 0) \quad (2b)$$

采用纤维单元模型能较真实地模拟钢管混凝土拱肋的受力过程, 但由于其进行双重非线性分析时须进行截面方向与沿拱轴方向的迭代, 故计算机用时较长。

2 单材料模型

所谓单材料模型是指在有限元建模时, 将钢管和混凝土考虑成同一种材料进行输入, 具体又可分为换算材料模型和统一理论模型。

2.1 换算材料模型

2.1.1 钢管混凝土单元模型

目前国内外有许多有关钢管混凝土结构的设计规范或规程, 不同的设计规范或规程给出的钢管混

混凝土截面抗压刚度和抗弯刚度的计算公式也不同,比较常见的计算公式可用式(3)表示:

$$EA = E_s A_s + \alpha_1 E_c A_c \quad (3a)$$

$$EI = E_s I_s + \alpha_2 E_c I_c \quad (3b)$$

式中: E_s 、 E_c 为钢和混凝土的弹性模量; A_s 、 A_c 为钢管和混凝土的截面积; I_s 、 I_c 为钢管和混凝土的抗弯惯矩; α_1 、 α_2 为小于 1.0 的系数,主要考虑对管内混凝土刚度的折减,由各钢管混凝土设计规程给出。

将式(3)计算的刚度作为梁单元截面的刚度,建立钢管混凝土拱的有限元模型,可以计算出结构在各种静力荷载作用下的弹性内力。在这种计算模型中,拱的某一截面上的钢管应力,应根据该截面计算所得的轴力和弯矩,分别按照式(3)进行抗压刚度与抗弯刚度的分配,然后迭加求得。同样以此求得混凝土的应力。

这种方法主要用来求结构在弹性阶段范围内的位移、应力、应变,在桥梁设计阶段比较适用,但其难以考虑材料的非线性性质和结构的极限承载力。采用本方法进行钢管混凝土非线性分析的工作比较困难。

2.1.2 钢单元或混凝土单元模型

钢管混凝土单元模型中的应力计算较为复杂,所以在实际工程运用中有时为了计算方便采用将钢管混凝土截面换算成钢截面或混凝土截面,即取钢管或混凝土作为标准材料,根据另一材料的弹性模量 E_i 与标准材料弹性模量 E_b 之比来换算成组合截面。假定以钢管为标准材料,则换算后的截面几何特性为:

$$A_0 = A_s + (E_c/E_s) A_c \quad (4a)$$

$$I_0 = I_s + (E_c/E_s) I_c \quad (4b)$$

换算后截面的抗压刚度为 $E_s A_0$,截面的抗弯刚度为 $E_s I_0$ 。这种换算成单一材料的模型,同样也主要用于结构的弹性计算中,求出来的内力、位移及应力应变,与钢管混凝土单材料模型相同。

文献[6]应用换算材料法进行钢管混凝土拱桥的非线性分析,它将钢管混凝土换算成钢,用钢的强度作为换算后钢管混凝土的强度,用钢的理想弹塑性来代表材料的非线性性能。显然它不能较准确地反映钢管混凝土的材料非线性性能,并且由于在进行模量换算的同时,无法进行等量的截面强度换算,因此,将组合材料折算成钢材料,其计算结果将大于双单元模型的计算结果。该方法同样无法反映混凝土开裂的特性及其非线性性能,也无法反映二种材料之间的相互作用。

2.2 统一理论模型

钢管混凝土统一理论是钟善桐教授通过对钢管混凝土构件进行长期的试验与理论研究提出的一种钢管混凝土计算理论^[7]。统一理论认为,钢管混凝土构件性能随着物理参数、几何参数、应力状态和截面形式的改变而变化,变化是连续的、相关的和统一的。该理论采用钢材和核心混凝土准确的本构关系,分别计算出简单荷载及各种复杂荷载状态下各种构件的工作曲线全过程,确定了各种构件的极限状态准则后,找出各种荷载作用下承载力的相关关系,最后得到一个同时表达各种荷载情况(偏心受力构件、压扭构件、弯扭构件、压弯扭构件和压弯扭剪构件)的统一设计公式。

因此,应用钢管混凝土统一理论的单一材料模型,表面上是将两种材料特性有很大差异的材料合成一种模型,但实质上它考虑了两种材料的特性和它们之间的相互作用,克服了换算材料模型的主要缺点。

但统一理论也存在着两个缺陷:一是钢管混凝土的材料本构关系还不尽完善,认为可以用轴压本构关系代替偏压本构关系。二是求出钢管混凝土的内力后,先求得核心混凝土的应变和应力,然后再将二者相减求得钢管的应变和应力。核心混凝土的本构关系也是建立在大量的试验研究基础上的半经验半理论公式,由于混凝土所占截面的刚度与面积均较大,所以求得的钢管的应力规律性较差,而在工程与试验研究中,通常是测试钢管的应变来控制钢管的应变,因此实际运用中容易产生偏差。

3 实例分析

文献[2]进行了两根钢管混凝土单圆管肋拱的面内受力全过程试验。模型拱净跨径为 460 cm,净矢高 $f = 153.3$ cm。拱肋钢管为 $\phi 76$ mm \times 3.792 mm 的无缝钢管,肋拱下缘曲线为二次抛物线。管内灌注

C30 混凝土. 相同尺寸的钢管混凝土模型肋拱制作了 A-1 和 A-2 两根. A-1 模型在 $L/4$ 点处加集中力, A-2 模型在 $L/2$ 点处加集中力, 试验荷载通过 10 吨油压千斤顶反顶支承框架取得反力来实施, 图 1 为 A-1 拱的加载装置. 对模型拱受力全过程的若干截面的变形和钢管应变进行了测试. 具体试验内容和结果详见文献[2].

应用自编的考虑双重非线性的有限元分析程序 US-CFSTA 和大型有限元通用程序 ANSYS, 采用本文所讨论的考虑钢管混凝土材料非线性的几种方法, 对该试验模型肋拱进行了受力全过程分析. 其中统一理论模型与纤维模型采用 US-CFSTA 程序计算, 其余模型采用 ANSYS 进行计算. 图 2、图 3 为有限元计算结果和试验结果的荷载与位移关系图. 表 1 为计算结果的对比. 由于钢管混凝土单元模型只能进行弹性计算而无法进行材料非线性计算, 因此图中未给出用此模型进行计算的结果曲线.

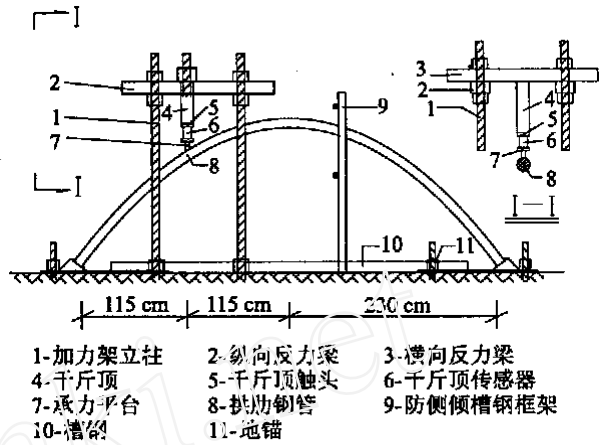


图 1 模型肋拱试验装置示意图

Fig. 1 Test set-up of model

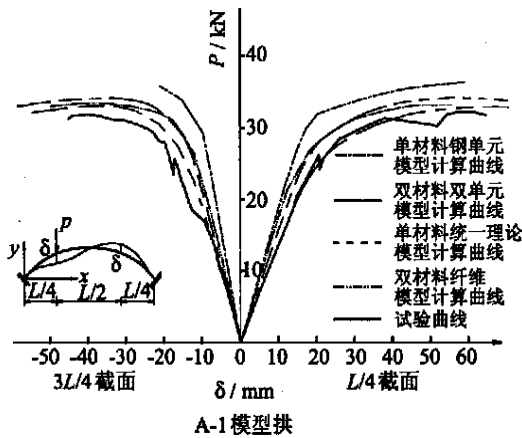


图 2 A-1 模型拱荷载—位移关系图

Fig. 2 Load - deflection curve of model arch A1

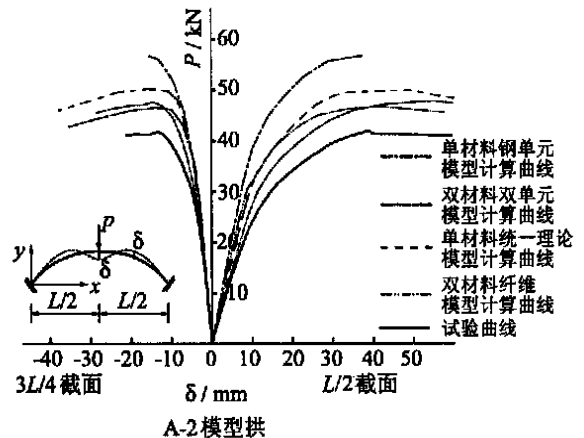


图 3 A-2 模型拱荷载—位移关系图

Fig. 2 Load - deflection curve of model arch A2

由表 1 可以看出, 数值计算的结果均大于试验值, 这主要是实际结构中存在的初始缺陷对承载力的影响无法在数值分析中得以体现, 从而导致计算结果均较试验值偏高.

此外, 从表 1 可以看出, 极限荷载值以双单元模型和纤维模型的计算结果与实测值最为接近. 但从图 2、图 3 可以看出, 虽然双单元模型的极限值与试验值较接近, 但其变形过程曲线与试验曲线偏离较大, 这表明按照纤维单元建模进行的双重非线性有限元算法最能反映钢管混凝土拱的受力特性.

表 1 计算结果与试验结果对比表

Tab.1 Comparison of tested ultimate loads and the predicted values (kN)

模型	比较项目	试验结果	双材料模型计算结果		单材料模型计算结果	
			双单元	纤维单元	钢单元	统一理论
A-1	计算值/试验值	31.90	32.62	32.80	36.33	34.18
			1.02	1.03	1.14	1.07
A-2	计算值/试验值	42.07	46.46	47.90	56.71	49.90
			1.10	1.14	1.35	1.19

统一理论和纤维单元模型同属于截面分层算法,当钢管混凝土应力-应变关系采用统一理论时,计算的荷载位移曲线在受力前期与试验曲线吻合较好,但在受力后期,计算曲线高于试验曲线,极限承载力也大于试验值较多.其主要原因是受力前期,拱以受压为主,从轴压试验得出的合成本构关系基本上能反映材料的性能.但在受力后期,由于受材料非线性和几何非线性的影响,在典型截面中,弯矩值增加很快,截面的偏心率增大,合成本构关系没有考虑由于偏心率引起的应力梯度对紧箍力的削弱作用,因而过高地估计了钢管混凝土的刚度和极限承载力.

双材料双单元(杆单元)由于对截面没有进行分层计算,因此无法考虑混凝土在较低的拉应力作用下开裂对截面刚度的削弱,计算中的结构刚度偏大,因此,其计算的荷载-位移曲线在受力前期就与试验曲线有较大的偏离.在受力计算的后期,由于采用的应力-应变关系中没有考虑钢的强化段,所以其极限承载力反而下降.单材料模型中的等效钢单元方法,由于采用的是刚度等效,因此过高地估计了混凝土的强度,使得计算所得的极限荷载在 4 种算法中是最大的.

4 结语

1) 应用有限元通用软件进行钢管混凝土拱的材料非线性分析,虽简便易行,但计算结果与试验结果有相当的差距.其中,等效钢单元模型因简单地将两种材料用理想弹塑性的钢材料来模拟,无法准确地描述钢管混凝土组合材料的非线性力学性能,计算结果与实测值在 4 种方法中偏差最大.而双单元模型虽然模型拱极限承载力的计算值与实测值较接近,但因将钢材和混凝土视为理想弹塑性材料,不考虑二者之间的组合作用和混凝土开裂问题,计算的变形过程曲线与实测曲线偏离较大.因此,通过二次开发,将较为合理的钢管混凝土材料本构关系应用于有限元通用软件的分析中,是钢管混凝土拱材料非线性分析研究的一个发展方向.

2) 应用自编的有限元软件,能够采用较为合理的钢管混凝土材料本构关系.本文应用的两种材料本构关系中,统一理论视钢管混凝土为单一材料,纤维单元模型则视其为两种材料.计算结果分析表明,应用统一理论所计算的荷载位移曲线与试验曲线在受荷初期吻合较好,但其合成本构关系没有考虑由于偏心率引起的应力梯度对紧箍力的削弱作用,因而后期吻合不好,过高地估计了钢管混凝土的刚度和极限承载力.纤维单元模型计算结果与试验结果吻合程度在 4 种方法中最好,可供工程应用.但目前纤维单元模型只能在自编程序上实现,计算过程较为费时且程序前后处理不如通用软件,对程序本身进行优化和对前后处理的改进是自编程序进一步研究的内容.

本文考虑的是钢管混凝土拱材料非线性问题中最基本和最简单的问题.对于钢管在施工过程中的初始缺陷、钢管与混凝土的脱粘、管内混凝土的收缩徐变、对大跨径拱桥中常用的哑铃形断面和桁式断面等不同截面形式的受力特点等问题的研究,还有待今后的努力.

参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一)[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 陈宝春,陈友杰. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程试验研究[J]. 工程力学,2000,17(2):44-50.
- [3] 韦建刚,陈宝春,林英. 钢管混凝土肋拱面内多点对称加载试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2001,34(增刊):102-106.
- [4] 陈宝春,陈友杰,王来永,等. 钢管混凝土偏心受压应力-应变关系模型研究[J]. 中国公路学报,2004,17(1):24-28.
- [5] 韩林海,钟善桐. 钢管混凝土力学[M]. 大连:大连理工大学出版社,1996.
- [6] 王国鼎,钟圣斌. 桥梁计算示例集-拱桥(第二版)[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [7] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1994.