

文章编号: 1001-8360(2005)06-0077-08

钢管混凝土单圆管拱 空间受力双重非线性有限元分析

陈宝春, 林嘉阳

(福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 提出钢管混凝土拱(单圆管)空间受力的双重非线性有限元分析方法并编制了有限元程序。有限元建模时采用空间梁单元。材料非线性中正应力-正应变关系采用纤维单元模型,剪应力-剪应变关系采用统一理论的标准曲线。应用该方法对钢管混凝土单肋模型拱和双肋模型拱进行了分析,并对非线性性能和横向力作用进行了分析。分析结果表明,本文提出的方法能较好地反映钢管混凝土拱空间受力全过程的非线性性能。在空间荷载作用下,钢管混凝土拱的几何非线性影响要大于材料非线性的影响;单肋拱的空间受力的特征要明显大于双肋拱。

关键词: 钢管混凝土; 拱; 空间; 非线性; 有限元

中图分类号: U442.5 **文献标识码:** A

Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Filled Steel Tubular (Single Tube) Arch Subjected to Spatial Loads

CHEN Bao-chun, LIN Jia-yang

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

Abstract: A method to analyze the dual nonlinearity behaviors of CFST (single tube) arch subjected to spatial loads is presented. Spatial beam element is used in the finite element model. The fiber element model is used for the normal stress-strain relation and the standard curve in the unify theory of CFST is used for the shear stress-strain relation. The analyses of the nonlinear property of the CFST model arches both with a single rib and two ribs indicate that the method proposed herein can get out the basic mechanic behaviors of the steel tubular CFST arch subjected to spatial loads on the whole loading progress. Under the spatial loads, the affection of the geometric nonlinearity to the behaviors of CFST arch is more seriously than the material nonlinearity. The spatial actions of the CFST arch with single rib is obviously great than that with double ribs.

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

拱的稳定按失稳形态分为面内稳定和面外稳定,从失稳时是否发生平衡分枝分为分枝点失稳和极值点失稳。拱的稳定问题,在材料性能方面又有线性弹性稳定和非线性非弹性问题,在几何方面又有小挠度和大挠度问题。因此,拱的稳定问题是一个复杂的问题。将具有较高的抗压强度的钢管混凝土应用到以压弯为主的结构中,其稳定问题,尤其是面外稳定问题,更

为人们所关注。应用现代有限元技术,弹性分枝点失稳的临界荷载求解,已为工程界所熟悉与掌握。由于没有考虑材料的非线性和大挠度影响,因此它只是真实解的上限,再加上失稳的突然性和严重的后果,所以在工程上常采用较大的安全系数,一般要求弹性分枝点失稳的临界荷载为实际荷载的 4~6 倍。但 4~6 的安全系数是否合理,则缺乏理论依据。由于弹性分枝点失稳并非真正的稳定极限承载力,因此,它还经常导致计算分析中得出不正确的结论。如在进行弹性分枝点稳定计算中,考虑风力、偏载、横向几何误差影响等,计算所得的临界荷载相差不大,因此得出这些因素对

收稿日期: 2003-05-12; 修回日期: 2004-03-12

基金项目: 福建省重大科技项目(2003F007);
交通部西部交通科技项目(2003-318-798-20-1)

作者简介: 陈宝春(1958—),男,福建罗源人,教授,博士生导师。

E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn

面外稳定影响很小的结论^[1]。因此,在钢管混凝土拱空间稳定问题中考虑材料非线性和几何非线性的影响已引起人们的重视。

一些研究者在钢管混凝土拱的求一类稳定的特征值时,或考虑材料非线性,或考虑了大挠度的影响^[2,3],计算的稳定系数比不考虑非线性时的稳定系数小,但由于在使用荷载作用下结构的材料非线性和几何非线性并不明显,且仍然是分枝点失稳问题,二者的差异并不十分明显,所求得稳定系数也仍然只能是真实解的上限。另一些研究者则从二类稳定(极值点荷载)的角度,考虑大挠度影响进行钢管混凝土拱空间受力稳定极限承载力的研究,但材料模型采用线性或理想弹塑性,因此,所求得的极限荷载还不是真正的稳定极限荷载^[4~7]。同时考虑材料非线性与几何非线性的钢管混凝土拱空间受力双重非线性分析,目前仅见文献[7]和文献[8],然而这两个方法都还存在着明显的不足之处(详见下一节介绍)。

为此,本文在文献[9]钢管混凝土拱面内受力双重非线性有限元分析方法的基础上,提出了钢管混凝土拱空间受力双重非线性有限元计算方法,钢管混凝土的正应力-正应变关系采用纤维单元模型,钢管混凝土的剪应力-剪应变关系采用统一理论的组合材料剪切标准曲线。通过对截面数值积分,求得空间梁单元的刚度矩阵。应用本文提出的计算方法对文献[7]和文献[8]进行的钢管混凝土单肋拱和双肋拱的试验结果进行了计算。

1 现有双重非线性算法的简要介绍与评述

1.1 文献[7]的计算方法

文献[7]采用大型通用程序 ANSYS 进行双重非线性有限元计算。几何非线性分析采用 U.L 列式法。非线性方程求解时,选用牛顿-拉夫逊法(N-R 法)。有限元模型中,杆单元采用 beam188 单元。钢管混凝土拱肋用双单元法建模,即在模型离散时,在同一段有限元模型中将钢管和混凝土分别作为两根杆件输入,但二者的节点坐标完全相同,在相同的节点间建立两个单元,钢管环状单元赋予钢材的材料属性,混凝土柱状单元则赋予混凝土的材料属性。钢管的应力-应变关系采用理想弹塑性模型。管内混凝土采用 W. F. Chen 模型^[10]。钢管与混凝土的材料剪切模量 G 与相应的泊松比、弹性模量有关,通过公式(1)进行计算。

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1)$$

式中, μ 为常量,一般钢、混凝土的泊松比分别取为 0.283、0.167; E 为变量,与材料的应力-应变关系曲线

和所处的应力水平有关。

1.2 文献[8]的计算方法

文献[8]以空间曲梁单元建模。几何非线性分析采用 U.L 列式法。采用荷载增量法求解非线性方程组,当接近结构极限荷载时,采用控制位移的方法反过来控制荷载增量。各单元的刚度抗压抗弯刚度不考虑分层计算,钢管混凝土的应力-应变采用统一理论的轴压构件的应力-应变关系^[11],抗扭刚度采用组合构件的换算剪切模量进行计算。钢管混凝土的组合构件换算剪切模量为

$$G_{sc} = \frac{E_{sc}}{2(1 + \mu_{sc})} \quad (2)$$

式中, E_{sc} 为钢管混凝土弹性阶段、屈服阶段和强化阶段的组合模量 E_{sc} 、 E_{sc}^1 和 E_{sc}^2 ; μ_{sc} 为钢管混凝土组合材料的横向变形系数, $\mu_{sc} = (\mu_s A_s + \mu_c A_c) / (A_s + A_c)$; μ_c 、 μ_s 分别为钢、核心混凝土的横向变形系数,具体表达式详见文献[11]。

1.3 简要评述

上述两种方法在几何非线性与双重非线性的计算方法上差别不大。在材料非线性方面,在进行截面刚度计算时,两种方法也都没有对杆件的截面进行数值积分,均无法反映混凝土在较低的拉应力下开裂的特征。钢管混凝土在压弯扭转复杂受力状态下的本构关系,也都是采用正应力-正应变关系与剪应力-剪应变关系分别考虑的方法。在正应力-正应变关系中,文献[7]采用的分离单元模型较之简单地按刚度换算成一种材料的单一单元模型前进了一步,但相比而言,文献[8]采用的统一理论模型是经过大量的试验研究总结出来的模型,它更能反映钢管混凝土的组合材料受力行为。在剪应力-剪应变关系方面,两种计算方法都采用材料力学公式的形式。所不同的是,式(2)视钢管混凝土为单一材料,且泊松比采用变量。在式(1)和式(2)的剪应力-剪应变关系中,剪切模量 G 与扭矩的大小无关,对纯扭构件而言,材料的剪应力-剪应变将始终保持线弹性,这显然不符合实际情况。由后面的分析可知,目前这两种计算方法,都还不能准确地反映钢管混凝土拱空间受力的双重非线性性能。

2 本文提出的有限元分析

2.1 基本方法

本文提出的钢管混凝土拱空间受力双重非线性有限元分析方法是在文献[9]的面内受力分析方法基础上发展起来的。有限元采用空间直梁单元。几何非线性求解采用流动坐标迭代法(U.L 列式法)。非线性问题采用牛顿-拉夫逊法(N-R 法)求解。双重非线性

中将几何非线性嵌入材料非线性的增量法之中。材料非线性分析中,采用非线性的应力-应变关系,对梁单元截面进行数值积分求得梁端的截面刚度,以其平均值作为梁单元的单元刚度。

2.2 钢管混凝土应力-应变关系

2.2.1 钢管混凝土压弯扭应力-应变关系

钢管混凝土中的钢管和混凝土,由于两者横向变形性能之间的差异,在纯压状态下就已处于复杂的受力状态。在压弯扭剪荷载作用,这两种材料的受力行为就更为复杂了。目前尚无比较合适的应力-应变关系模型。因此,本文仍然沿用文献[8]和文献[9]的思路,将压应力-正应变关系和剪应力-剪应变关系分开考虑,但选用更为合适的本构关系模型。在计算截面轴向刚度和抗弯刚度时,采用文献[12]所提出的适合于钢管混凝土偏压构件的 σ - ϵ 关系的纤维单元模型;在计算截面抗扭刚度时,采用文献[12]提出的适合于钢管混凝土纯扭构件以统一理论为基础的复合材料剪切 τ - γ 标准曲线。

2.2.2 钢管混凝土偏心受压关系曲线

钢材的应力-应变关系采用文献[11]提出的四折线简化的数值模型。核心混凝土轴向 σ - ϵ 关系中抗压段采用文献[12]提出的套箍作用对提高核心混凝土强度和延性、也考虑偏心率对套箍作用削弱影响的应力-应变关系模型。文献[9]应用这一模型对钢管混凝土拱面内的双重非线性分析结果表明,这个模型在大偏心率的钢管混凝土拱中应用的是合适的。在文献[12]的核心混凝土应力-应变关系模型中,不考虑混凝土的抗拉能力。文献[13]认为不考虑混凝土的抗拉能力无法完全反映混凝土的受力特性,因此本文考虑了混凝土的抗拉能力。核心混凝土受拉的应力-应变关系详见文献[13]。

2.2.3 钢管混凝土 τ - γ 关系曲线

钢管混凝土的剪应力-剪应变(τ - γ)关系较为复杂,文献[14~18]已对其开展了研究,取得了一定的成果。本文通过比较,选取了文献[15]提出的钢管混凝土复合材料剪切 τ - γ 标准曲线(图 1)。 τ - γ 标准曲线可近似分为三个阶段:弹性阶段、塑性阶段和塑性强化阶段,根据 τ - γ 关系曲线确定各相关力学指标。图 1 中,符号具体表达式详见文献[15]。

2.3 截面分析

由于本文将正应力-正应变关系与剪应力-剪应变关系分开考虑,而不是考虑压弯扭剪共同作用下钢管混凝土的应力-应变关系。因此,在求解梁单元的压弯刚度、抗扭刚度时,需采用不同的截面网格划分来进行截面积分。

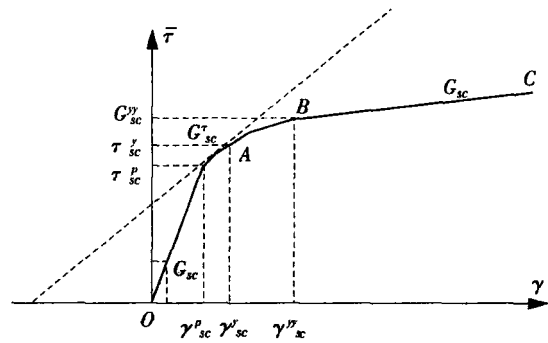


图 1 $\bar{\tau}$ - γ 标准关系曲线

进行截面分析时,假定钢管和混凝土整体变形协调,两者之间无相对滑移;在轴力和弯矩作用下符合平截面假定;在扭转变形过程中不发生翘曲。文献[9]进行面内受力分析时,截面积分时采用条带单元,然而对于空间受力的压弯构件而言,两个方向均应进行条带划分,即在截面上为纤维单元。纤维单元划分常见的

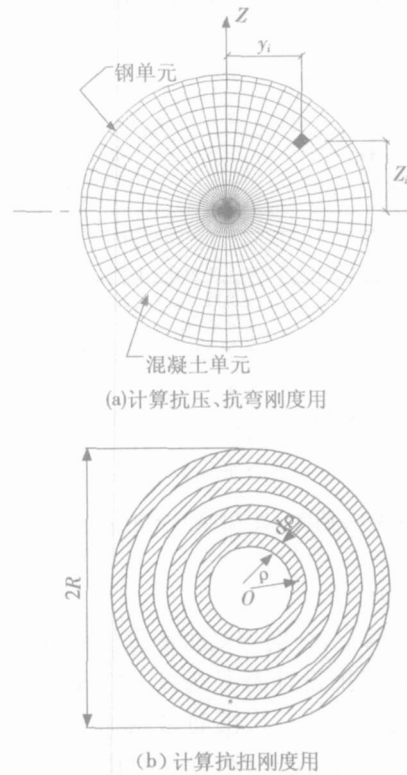


图 2 圆钢管混凝土截面划分图

有矩形单元和扇形单元两种,本文采用扇形单元,钢管与混凝土的界面应成为环状划分线,见图 2(a)。在计算抗扭刚度时,由于采用的是统一理论,视钢管混凝土为一种材料,钢管与混凝土的界面不一定是划分线,对于圆形截面来说,扭转角只与半径有关,所以按环状划分为 n 个环,见图 2(b)。

根据截面计算假定,在给定的截面变形后,可以通过截面数值积分计算出截面承受的内力,如果此内力与截面处的作用力相等或二者误差在容许范围内,则

所给的截面的变形就是正确的,可以依此计算截面的刚度。否则,应调整截面变形重新计算,直至符合要求。

3 钢管混凝土模型拱试验简介

3.1 单肋拱^[7]

模型拱的跨径为 7 500 mm。拱肋为 $\phi 21 \times 4.5$ mm 直缝钢管,内填 C50 混凝土。管内混凝土试块 28 天立方体抗压强度为 66.7 MPa,钢管的弹性模量为 206 MPa,屈服应力为 322 MPa,屈服应变为 1.513×10^{-6} 。试验采用面内、面外共同加载。面内(竖向)为五点对称加载,在跨径的六分点截面处施加集中力。采用标准的铸铁块进行重力加载。竖向加载采用杠杆形成集中荷载并给以放大。面外(水平)仅在拱顶处施加一集中力,重力荷载通过钢绞线和滑轮实现转向。荷载值以悬挂于杠杆下的传感器为准。试验装置见图 3。

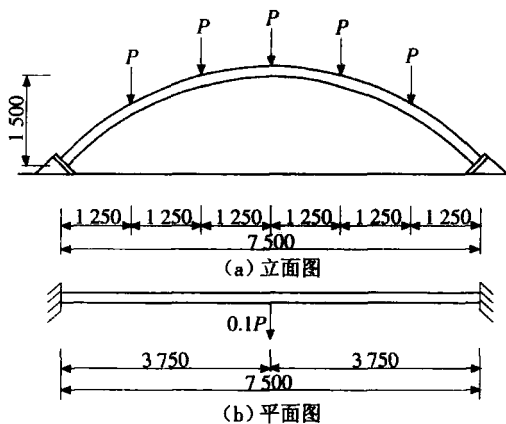


图 3 单肋拱加载示意图(单位:mm)

3.2 双肋拱^[8]

模型拱有两个,分别为双肋平行拱和双肋 X 型拱(提篮拱)。模型拱设计跨径为 6 000 mm,矢高 $f = 1\ 500$ mm,矢跨比为 1/4,拱肋采用 $\phi 82 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的钢管,内填 C40 混凝土;平行双肋拱的宽跨比为 1/20,提篮拱拱顶宽跨比为 1/40,拱脚宽跨比为 1/20;横撑沿跨度均布,纵桥向间距 1 000 mm,共 5 根,采用 $\phi 60 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的钢管;拱轴线采用悬链线曲线,拱轴系数 $m = 1.167$ 。试验采用面内、面外共同加载。面内(竖向)为五点对称加载,在跨径的六分点截面处施加集中力。面外荷载也为五个,其值为竖向荷载的 3%。图 4 是 X 型双肋模型拱的示意图。

4 钢管混凝土模型拱计算分析

4.1 计算模型

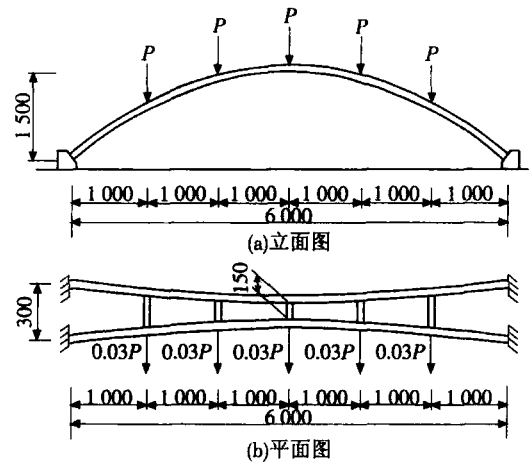


图 4 X 型双肋拱加载示意图(单位:mm)

单肋拱模型分析中,将钢管混凝土模型拱肋划分为 48 个空间直梁单元。由试验得到的钢材和混凝土的力学性能指标为:钢材 $E_s = 2.130 \times 10^5$ MPa;钢材屈服强度 $f_s = 322.0$ MPa;核心混凝土 $E_c = 3.563 \times 10^4$ MPa;核心混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 66.7$ MPa。双肋模型拱拱肋划分为 96 个空间直梁单元,横撑划分为 5 个空间梁单元。钢管混凝土模型拱钢材和混凝土的力学性能指标为:钢材 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa;钢材屈服强度 $f_s = 215.0$ MPa;核心混凝土 $E_c = 3.01 \times 10^4$ MPa;核心混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 39.93$ MPa。由于双肋模型拱试验中,平行拱在对称荷载作用下结构变形和应变的非对称特别明显,所以本文在进行双肋模型拱分析时,只将提篮拱模型拱作为分析对象。

4.2 荷载-位移曲线

单肋模型拱试验得到的各典型截面处的荷载-位移曲线和应用本文提出的有限元算法、应用文献[7]介绍的 ANSYS 计算方法计算的曲线如图 5 和图 6 所示。比较可知,本文的计算曲线与 ANSYS 计算曲线变化规律相同,但从总体上说,本文的计算曲线与试验曲线吻合程度要好于 ANSYS 的计算曲线。在图 5 的荷载-竖向位移曲线中两计算曲线的斜率,前期基本相同,后期本文计算的略高于 ANSYS 的。对于图 6 的荷载-横向位移曲线,本文计算的曲线斜率与 ANSYS 的计算结果相比,基本上都有所增加。极限荷载值的计算结果,本文计算的为 76.50 kN,虽仍小于试验值 97.11 kN,但高于 ANSYS 计算的 71.89 kN,与试验结果更加接近。

双肋模型拱(提篮拱)在进行计算结果比较时,除与单肋模型拱一样考虑了试验曲线、本文计算曲线和文献[7]应用 ANSYS 程序的计算曲线之外,还加入了

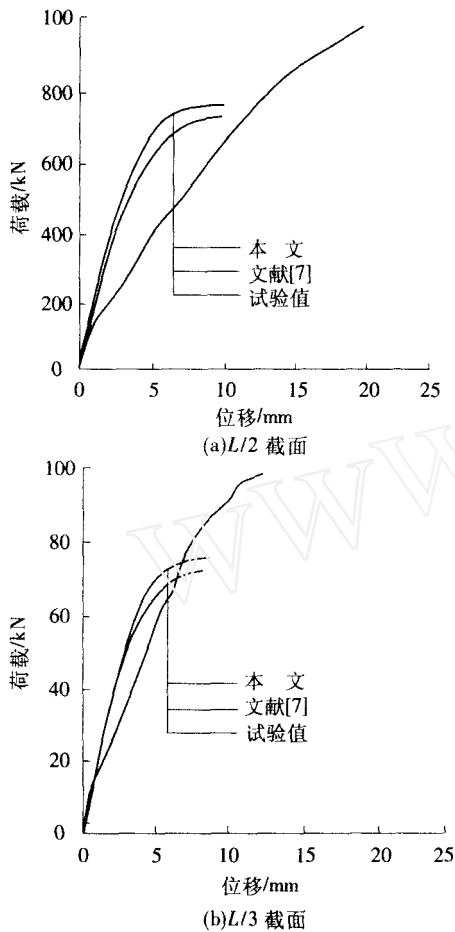


图 5 单肋模型拱荷载-竖向位移图

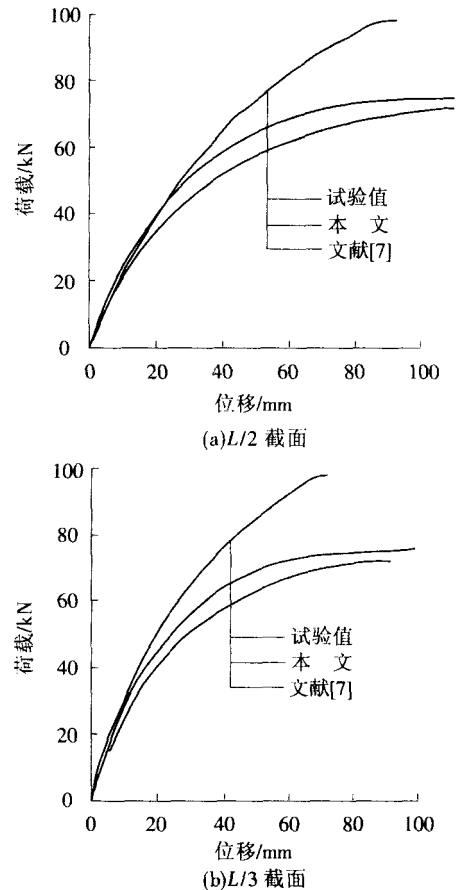


图 6 单肋模型拱荷载-横向位移图

文献[8]提出的计算方法计算的曲线,计算结果见图 7 和图 8。总体上而言,三种计算方法与试验结果的吻

合度,文献[8]的计算结果最差,本节计算结果最好,文献[7]应用 ANSYS 程序的计算结果居中。

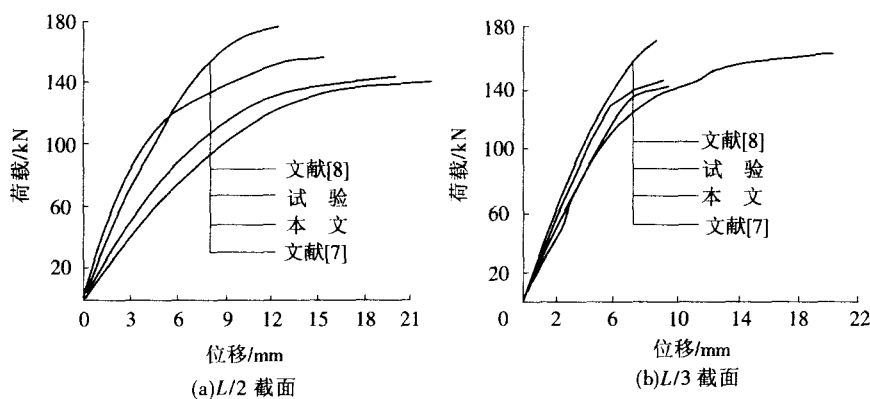


图 7 双肋模型拱荷载-竖向位移图

由图 7 可知,文献[8]计算得到的曲线在受力前期与试验曲线相近,但曲线的非线性不明显,当荷载达到计算的极限荷载 176.20 kN 时,计算曲线仍以较大的斜率呈继续上升的趋势,与试验曲线产生明显的偏离。在图 8 的荷载-横向位移曲线中,受力前期的计算曲线在试验曲线之下,但后期明显高于试验曲线。计算的

极限荷载 176.20 kN 为试验最大荷载 163.00 kN 的 1.08 倍,偏于不安全。文献[8]认为造成这种偏差的主要原因是其选用的“钢管混凝土轴压本构关系不能全面反映拱肋受力较大时弯扭剪的复合非线性行为”。本文认为,文献[8]选用的材料本构关系模型存在的问题,主要有两个方面,一是所采用的轴压本构关系无法

考虑偏心距对紧箍作用的削弱影响,过高地估计了紧箍对核心混凝土强度提高的作用,二是剪应力-剪应变关系采用组合材料换算剪切模量不能正确反映材料的实际受力状况。此外,文献[8]没有对截面进行数值积分,简单地采用杆单元的计算,也是其计算结果不能反

映材料非线性行为的一个重要原因。与文献[8]计算曲线相反,文献[7]提出的 ANSYS 算法的计算曲线基本都处于试验曲线之下,计算的极限荷载 140.75 kN 小于试验的最大荷载 163.00 kN。

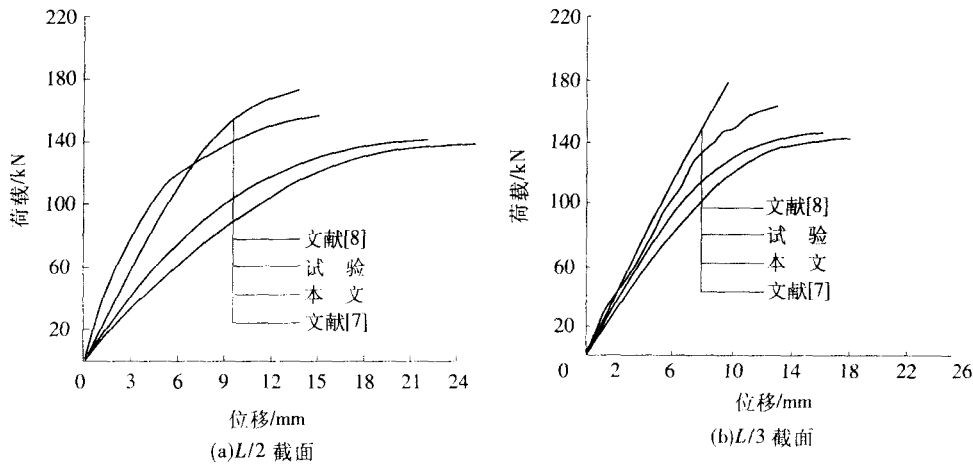


图 8 双肋模型拱荷载-横向位移图

本文计算曲线介于文献[8]与文献[7]ANSYS 的计算曲线之间,基本能反映模型拱的空间受力情况,计算的极限荷载 145.00 kN 小于试验的最大荷载 163.00 kN 和文献[8]计算的 176.20 kN,但比 ANSYS 计算的 140.75 kN 更接近试验结果且偏于安全。

从单肋模型拱和双肋提篮拱的分析比较看出,本文提出的双重非线性计算方法,总体上比文献[7,8]的计算方法更接近试验情况。一方面,本文提出的计算方法在计算刚度时,进行截面积分;另一方面,本文的应力-应变关系更适合钢管混凝土拱的受力行为。因此,下一节将应用本文提出的计算方法对模型拱进行参数分析,以进一步了解钢管混凝土拱的空间受力性能。然而,本文的计算结果与试验曲线还存在一定差异,除测试误差和材料的初始缺陷等因素外,主要原因是将压弯扭剪复杂受力状态下的本构关系简单分成正应力-应变关系和剪应力-剪应变关系,没有考虑相互耦合作用,这个问题在下一步的研究中重点考虑。

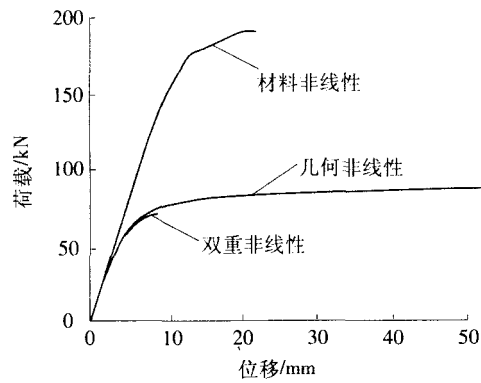
比较单肋拱与双肋拱的计算结果可以发现,无论是本文的计算曲线还是文献[7]应用 ANSYS 的计算曲线,从定性上看,它们与试验曲线的偏离规律相似,这是因为计算原理相同所致。但从定量上来说,双肋拱的计算结果与试验曲线的吻合度均要比单肋拱的好很多。因为双肋拱(尤其是 X 型双肋拱)在横向力作用时,双肋组成的面外抗弯刚度和抗扭刚度远大于单肋拱,单根肋的面外抗弯与抗扭刚度在整体结构受力中的作用下降,因此,计算中选用的材料本构关系模型的不合理性引起的误差也在下降,这样,采用同样计算

方法所得的双肋拱的计算结果与试验结果的吻合程度就要高于单肋拱。实际桥梁工程中,钢管混凝土拱桥多为双肋拱,极少数为单肋拱,且本文提出的计算方法偏于保守,所以在没有更好的方法之前,它可以作为工程计算的一种方法。当然,从科研的角度出发,应该以单肋拱为研究的基本对象,继续钢管混凝土拱空间受力的双重非线性有限元计算方法的研究,为工程应用提供更为合理的计算方法。

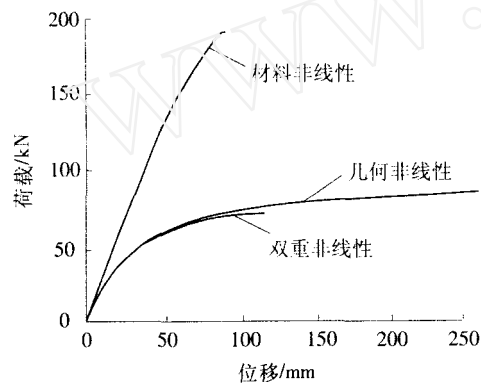
4.3 非线性性能分析

用本文提出的双重非线性计算方法对单肋模型拱和双肋提篮拱进行单一(材料或几何)非线性的分析。计算纯几何非线性时,材料的应力-应变关系假定为线性。纯材料非线性计算中,不考虑几何非线性影响。

从图 9 和图 10 可以看出,纯几何非线性计算曲线与双重非线性计算曲线较接近,而纯材料非线性的计算结果则偏差较大。从文献[8]可知,仅受面内荷载作用的模型拱,在非线性能中,其材料非线性的影响大于几何非线性。由此可见,拱肋在受了横向力作用后,几何非线性的影响增大,在非线性能中从次要影响上升为主要影响。比较而言,单肋拱中几何非线性在结构受力中的影响程度要远大于双肋拱中的影响程度。因为,单肋拱的面外刚度远小于双肋拱,结构空间受力的特征更为明显。从模型拱的分析结果看,单肋拱的非线性分析和极限承载力计算中,不能不考虑几何非线性的影响,但可以忽略材料非线性的影响。对于双肋拱来说,同样不能不考虑几何非线性的影响,但材料非线性的影响也应该考虑。

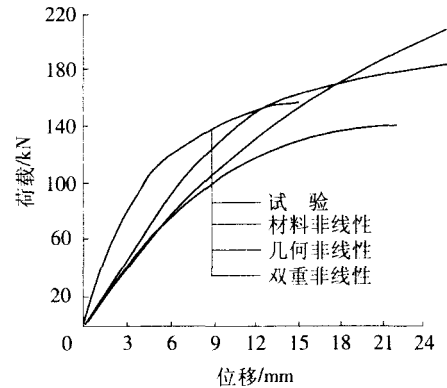


(a) 荷载-竖向位移曲线

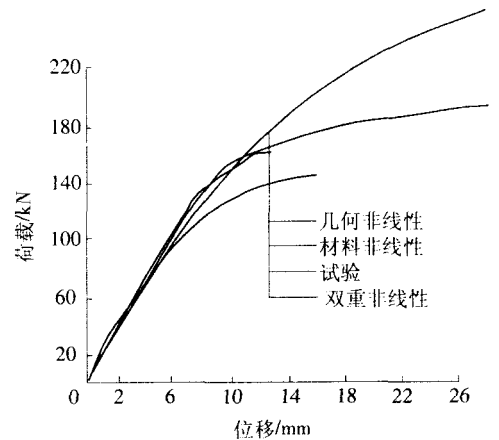


(b) 荷载-横向位移曲线

图 9 单肋拱拱顶荷载-位移曲线非线性性能比较图



(a) 荷载-竖向位移曲线



(b) 荷载-横向位移曲线

图 10 双肋拱拱顶荷载-位移曲线非线性性能比较图

4.4 横向荷载大小对空间受力性能的影响

为了解横向力大小对模型拱空间受力性能的影响,进行了不同横向力情况下的双重非线性有限元分析。计算中以横向力与竖向力的比值为参数,取值分别为 0、1%、3%、5%、7%、10%和 12%。在不同荷载比值作用下,模型拱拱顶截面荷载-位移曲线的计算结果见图 11 和图 12。

从图 11、图 12 可以发现, β 值对横向位移的影响要大于对竖向位移的影响, β 值在单肋拱中的影响要大于双肋拱中的影响。对竖向荷载来说, β 值主要对受力后期产生影响,对受力前期影响很小,对荷载-竖向位移曲线的形状也基本上没有影响。然而,不同的 β 值,荷载-横向位移曲线从受力开始就出现不同。

对双肋拱和 β 值较小的单肋拱,荷载-横向位移曲线呈现明显的三段线式(线性段、非线性段和强化段),而对于单肋拱当 β 值较大时,该曲线没有明显的三段线,而是从一开始就呈现出明显的非线性。

5 结束语

(1) 本文提出了钢管混凝土拱空间受力全过程双重非线性有限元分析方法。对钢管混凝土模型拱的分析表明,由于本文提出的方法选取了较为合适的钢

管混凝土的应力-应变关系、在刚度计算时进行了截面积分,因此其计算结果较之其他两种方法与试验曲线吻合得更好。然而,该方法计算结果在受力后期与试验结果还有一定的差距,因此如何在有限元模型的材料本构关系中考虑弯剪扭共同作用,使之准确描述钢管混凝土在空间受力情况下横向变形的力学性能,还需进一步研究。

(2) 与钢管混凝土拱面内受力全过程中材料非线性影响大于几何非线性影响不同,空间受力的钢管混凝土拱受力全过程中,几何非线性的影响要大于材料非线性的影响。横向荷载的存在,是拱从面内受力向空间受力的最主要的因素,它对横向位移的影响要大于对竖向位移的影响。

(3) 单肋拱的横向抗弯刚度与抗扭刚度要远小于双肋拱,其空间受力的特征更为明显。几何非线性的影响、横向力对结构受力行为的影响均要大于双肋拱。同样,有限元分析中本构关系对计算结果准确性的影响,在单肋拱中反映得更为明显。反过来说,本文提出的有限元计算方法对双肋模型拱(提篮拱)的计算结果与试验结果的吻合程度要好于单肋拱,在没有更好的方法之前,可供研究与实际应用参考。实际桥梁工程中,钢管混凝土拱桥多为双肋拱,极少数为单肋

拱,从这个意义上说,本文提出的计算方法具有较强的现实意义。

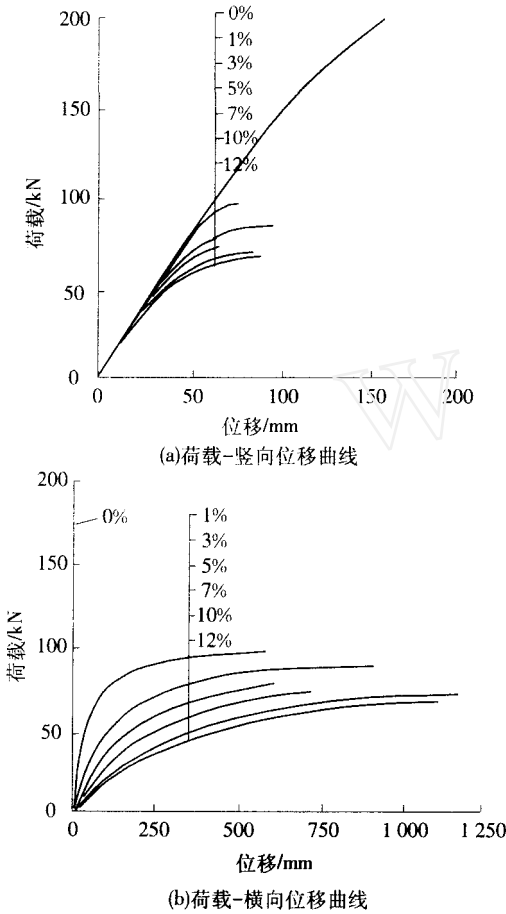


图 11 单肋拱横向力大小影响图

参考文献:

[1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥计算理论研究进展[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 47—57.

[2] 吴尚杰. 大跨径钢管混凝土肋拱桥侧向稳定的有限元分析[D]. 福州:福州大学, 1995.

[3] 郑存辉. 下承式钢管混凝土拱桥的侧倾稳定分析[D]. 广州:华南理工大学, 2001.

[4] 赵长军,王锋君,陈强. 等. 大跨度钢管混凝土拱桥空间稳定性分析[J]. 公路, 2001, (2): 15—18.

[5] 颜全胜,韩大建. 钢管混凝土系杆拱桥的非线性稳定分析[A]. 第十三届全国桥梁会议论文集[C]. 上海:同济大学出版社, 1998.

[6] 胡大琳,艾夫·哈依姆,黄安录. 大跨径钢管混凝土拱桥空间几何非线性分析[J]. 中国公路学报, 1998, (2): 45—51.

[7] 林嘉阳. 钢管混凝土(单圆管)单肋拱空间受力研究[D]. 福州:福州大学, 2003.

[8] 杨永清. 钢管混凝土拱桥横向稳定性分析[D]. 成都:西南交通大学, 1998.

[9] 陈宝春,秦泽豹,彦坂熙,陈友杰. 钢管混凝土拱(单圆管)面内受力双重非线性有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 80—84.

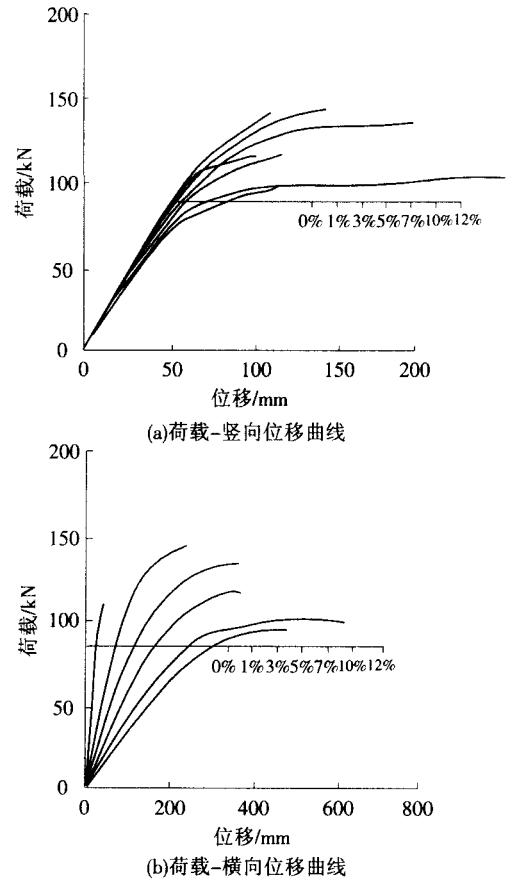


图 12 双肋拱横向力大小影响图

[10] Chen W F, Chen C H. Analysis of Concrete-Filled Steel Tubular. Beam-Columns (Vol. 33-) [R]. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1973. 37—52.

[11] 钟善桐. 钢管混凝土结构(修订版) [M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 1994.

[12] 陈宝春,陈友杰,王来永,韩林海. 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.

[13] 张文福,赵文艳,张素梅. 方钢管混凝土双向压弯截面非线性分析算法[J]. 黑龙江工程学院学报, 2000, (2): 13—16.

[14] 杨卫红,阎善章. 钢管混凝土基本剪切问题的研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991(增刊), 17—25.

[15] 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, 1995.

[16] 韩林海,钟善桐. 钢管混凝土弯扭构件的理论分析和实验研究[J]. 工业建筑, 1994, 24(2): 3—8.

[17] 韩林海,钟善桐. 钢管混凝土纯扭转问题研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(1): 7—13.

[18] 韩林海,钟善桐. 钢管混凝土基本剪切问题研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994, (6): 28—34.

(责任编辑 安鸿逵)