

# 钢管混凝土桁拱双重非线性有限元分析

陈友杰, 陈宝春

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 提出钢管混凝土桁拱面内受力考虑材料与几何双重非线性的计算方法并编制了有限元程序. 有限元建模时采用空间梁单元. 材料非线性应用合成法钢管混凝土本构关系. 双重非线性采用混合法, 应用该方法对一钢管混凝土桁拱的受力全过程进行分析, 得出一些有益的结论.

**关键词:** 钢管混凝土; 拱; 桁肋; 非线性; 有限元

中图分类号: U442

文献标识码: A

## Bi-nonlinear finite element analysis of concrete-filled steel tubular arch with truss ribs

CHEN You - jie , CHEN Bao - chun

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

**Abstract:** A method is presented for analyze the behavior of concrete - filled steel tubular (CFST) arch with truss ribs , which considering the material and geometric nonlinear property. A finite element program based on this method is introduced. In the program , beam element and combined CFST constitutive is used. The method of solution used is that of the mixed procedure (incremental method + modified Newton iteration) . Using this method , to analyze a CFST arch with truss under the load , some useful conclusions are reached.

**Key words:** concrete - filled steel tube ; arch ; truss rib ; nonlinear ; finite element

钢管混凝土拱桥的拱肋有实体式和桁式. 实体式有单圆管和哑铃形, 桁式有三管、四管和六管等, 以四管桁式应用最多. 在这些形式中, 单圆管的受力除轴力外, 还要受到较大的弯矩作用, 因此受力最为复杂. 而桁式截面, 则每根管的受力以受轴力为主. 由于钢管混凝土构件具有很高的抗压承载能力, 因此, 钢管混凝土桁拱受力较之实腹式更为合理, 在大跨径钢管混凝土拱桥中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>. 为了解钢管混凝土拱桥的受力性能, 进行了一系列钢管混凝土单圆管的模型拱试验研究<sup>[2,3]</sup>. 在试验研究的基础上, 提出了钢管混凝土单圆管肋桥考虑双重非线性性能的计算方法<sup>[4]</sup>. 本文采用新提出的钢管混凝土桁拱计算方法, 对一净跨为 136 m 的钢管混凝土中承式桁拱(石潭溪大桥)进行受力全过程分析.

## 1 材料非线性分析

钢管混凝土构件由钢管和管内混凝土两种不同材料组成, 受荷后期由于钢管和混凝土之间共同作用, 使得构件即使在单向受力的情况下, 钢管和混凝土都处于三向应力状态, 而混凝土材料本身的本构关系已十分复杂, 又由于两者的相互作用, 使得对钢管混凝土本构关系的描述更加困难. 钟善桐教授在大量试验与理论研究的基础上提出统一理论, 将钢管混凝土视为一种材料, 用合成法求其本构关系<sup>[5]</sup>.

然而, 在偏心受力情况下, 钢管混凝土的本构关系更为复杂, 文献[6]认为:“对应于钢管混凝土偏心受压的某一纤维的纵向应力, 于纵向应变相同时的轴心受压的应力状态有一些区别, 但差异不大, 可

收稿日期: 2002 - 09 - 06

作者简介: 陈友杰(1971 - ), 男, 讲师.

基金项目: 福州大学科技发展基金资助项目(XKJ(YM) - 0113)

以近似地用轴心受压的本构关系计算相应的偏压问题。”文献[4]提出的钢管混凝土单圆管肋拱的双重非线性分析方法中,材料非线性采用合成法,截面采用条带划分,在条带上近似用轴压本构关系代替偏压的本构关系,计算结果与试验结果比较表明,该方法在结构受力前期与试验结果吻合较好,但在受力的后期有一定的误差。模型肋拱钢管应变的实测结果表明,在模型拱的受力前期,结构整体以受压为主,但随着荷载的增加,逐渐转向以受弯为主,因此,计算曲线与实测曲线在受力前期吻合较好而在后期偏差较大。目前对一个单圆管拱的双重非线性有限元分析(从加载至破坏)一个工况作用下的计算时间在普通个人计算机上约需 10 h。然而,钢管混凝土桁拱的拱肋是由多根钢管加上上下平联和腹杆组成。如果仍采用单圆管通过截面划分条带积分的方法求得拱肋的刚度,将使计算工作量数倍甚至十余倍地增加。因此,寻求在满足工程精度范围内缩短计算时间的方法十分必要。

钢管混凝土桁拱其拱肋为全焊结构,各肢之间并非完全铰结。因此,除受轴向力外,杆端还存在弯矩,然而弯矩值并不大。以石潭溪大桥为例,采用弦杆与腹杆完全固结的空间有限元分析表明,在设计荷载作用下,最大设计内力值为恒载 + 汽 20 + 人群荷载的荷载组合时,拱脚处的下弦管,轴力  $N = 995.8$  kN,弯矩  $M = 42.21$  kN·m; 将  $M$  用  $N \cdot e$  表示,则偏心距  $e = 0.042$  m,与管径相比  $e/D = 0.077$ ,偏心率很小<sup>[7]</sup>。因此,本文认为在钢管混凝土桁拱的双重非线性有限元分析中可以应用钢管混凝土轴压本构关系,而且截面分析时也不用进行条带划分,这样就减少了计算的工作量,使其计算成为可能。

## 2 几何非线性分析与双重非线性分析

试验研究表明,钢管混凝土肋拱的刚度较之石板拱和钢筋混凝土肋拱小,其受力性能更接近于钢拱桥,因此几何非线性影响不能忽略<sup>[3]</sup>。对钢管混凝土肋拱的几何非线性问题,本文采用 Newton—Raphson 方法。有限元建模时采用梁单元。单元刚度阵中含有线性刚度矩阵、几何刚度矩阵和大挠度矩阵。几何非线性的具体分析见文献[8]。

钢管混凝土拱桥,特别是大跨径的钢管混凝土拱桥在受力后期往往伴随着大位移和大应变,因此进行受力全过程分析,按材料非线性和几何非线性的双重非线性求解,才能真实反映结构的受力性能。

考虑材料非线性与几何非线性之后的有限元分析的切线刚度矩阵很复杂,因此在实际求解中采用嵌套的方法考虑双重非线性问题。结构受力全过程分析采用混合法求解,将荷载分成若干增量,给定参数,由程序控制加载步长,在各个增量荷载上进行迭代。用增量法考虑材料的非线性影响,将几何非线性嵌入材料非线性的增量法之中,在每级荷载增量中,折减刚度不变,并用修正的 Newton—Raphson 方法考虑几何非线性问题。其求解步骤如下: 在某级荷载作用下,调用材料非线性 EAI 子程序迭代得  $EA_i$ 、 $EI_i$ ; 把  $EA_i$ 、 $EI_i$  代入线性刚度阵 [KO], 求出第一次迭代后的位移及单元内力; 再由所求内力求得单元中点刚度  $EA_i$ 、 $EI_i$ ; 求出杆件单元几何刚度矩阵,从而定出切线刚度矩阵; 应用几何非线性迭代求出考虑几何非线性影响后的杆端位移、杆端力; 再增加一级荷载,应用上述方法继续计算,直至某一断面所承受的弯矩超过其所能达到最大弯矩,输出结果。

## 3 石潭溪大桥双重非线性分析

石潭溪大桥为 316 国道福建闽清境内跨越闽江支流石潭溪口的一座大桥,采用中承式钢管砼桁拱,净跨 136 m,净矢跨比 1/5。桥面净宽净—9+2 ×1.5 m,设计荷载为汽车—20、挂车—120、人群荷载 3.5 kN/m<sup>2</sup>。主拱肋为桁式。大桥详细设计情况见文献[9]。

应用所编的有限元程序计算对石潭溪大桥进行了在设计荷载下的双重非线性分析。考虑到主拱肋在设计荷载恒载加活载作用下以面内受力为主,有限元分析时只取一个拱肋进行计算,恒载与活载通过荷载分布作用于吊杆结点处。活载按最不利情况布载,恒载系数为 1.2,活载系数为 1.4。

有限元分析计算中先将恒载分为 8 级,逐级加载;随后将设计活载分为 8 级也逐级加载计算;假如结构没有破坏,则继续按相同的荷载增量加载直至结构破坏。

计算结果见图 1 和图 2 所示. 图 1 给出了该桥拱肋的单元划分和当  $L/4$  点吊杆所加总荷载为 544 kN 时的杆件受力情况, 其中粗线条的杆件代表该杆件屈服. 从图 1 可见, 钢管混凝土桁拱进入非线性以后, 两拱脚和靠拱顶处的腹杆将出现大面积的屈服, 而在设计计算时, 腹杆的受力一般都很小而以构造控制设计. 分析认为, 在非对称荷载作用下, 随着荷载的增加, 拱所受的弯矩也在不断地增加, 使得受力初期处于主导地位的轴力退居其二, 而受力初期处于次要地位的弯矩则上升为主导地位. 伴随弯矩而增大的剪力对桁式拱肋的腹杆将产生很大的内力, 导致腹杆的受力处于非常不利的地位, 而且腹杆为空钢管, 承载力较低. 因此, 钢管混凝土桁拱中腹杆的受力问题应引起设计人员的注意.

图 1 还可见, 钢管混凝土桁拱进入非线性后, 构件的屈服范围沿着拱轴线扩大很快, 这与钢筋混凝土拱由于混凝土的开裂使得部分截面的刚度削弱很快有很大的不同. 因此, 在混凝土拱桥极限承载力分析中常用的塑性铰法不能简单地套用对钢管混凝土桁拱的分析.

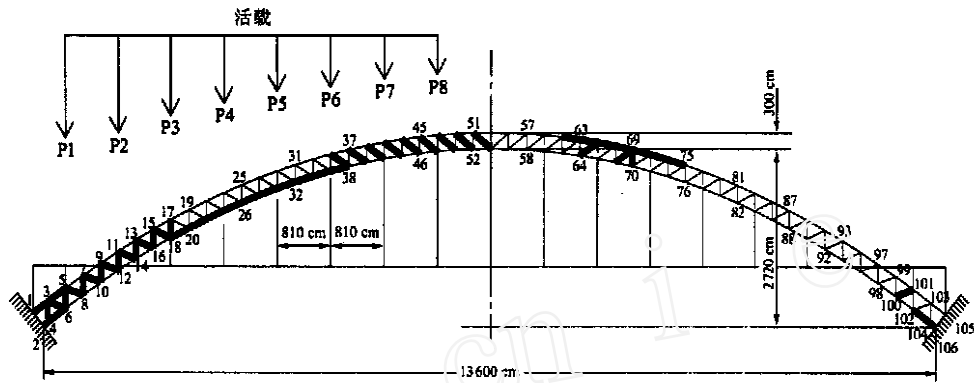


图 1 石潭溪大桥计算模型

Fig. 1 The calculation model of Shitanxi bridge

从图 2 的  $L/4$  处的荷载—挠度图看出, 在前期施加恒载时 ( $L/4$  吊杆力为 279 kN 前), 由于钢管混凝土桁拱的弦杆以受轴力为主 (且基本上为轴压), 因此不存在管内混凝土开裂问题, 所以受力前期结构处于线性阶段, 这与单圆管拱从一开始就有一定的非线性行为不同. 同时, 由于恒载为对称荷载且荷载压力线与拱轴线大致吻合, 所以前期施加恒载时, 荷载—挠度曲线的斜率很大, 结构变形较小. 当活载加上后, 由于活载是非对称荷载, 荷载—挠度曲线的斜率明显变小, 但仍为线性, 直至  $L/4$  处吊杆力达 514 kN ( $L/4$  处设计恒载加活载的吊杆力为 200.6 kN). 因此, 在设计荷载范围内, 结构处于线性受力阶段, 设计荷载作用下的内力计算采用线弹性理论是合理的, 实桥测试也证实了这点<sup>[7]</sup>. 此后, 结构进入了非线性, 荷载—挠度曲线以较小的斜率上升, 但直到  $L/4$  处的挠度达到 0.551 m, 曲线才进入水平段, 认为此时结构达到极限承载力. 与设计荷载相比, 结构计算安全系数为 3.325. 此时,  $L/4$  处的挠度已达到净径径的  $1/247$ , 大于使用极限状态中挠度的限制值. 因此, 钢管混凝土桁拱在设计时, 变形可能成为控制的因素.

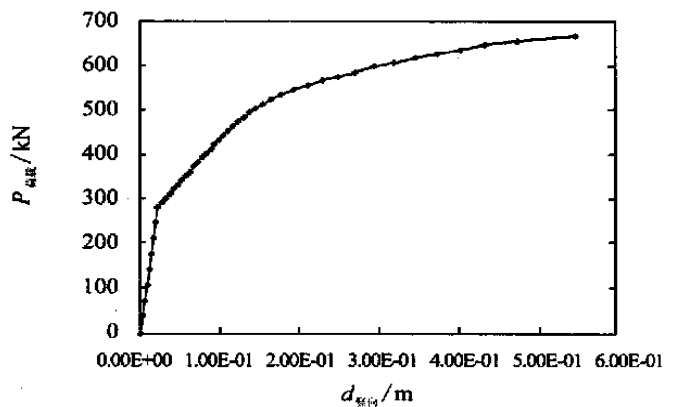


图 2 石潭溪大桥  $L/4$  处荷载—挠度图

Fig. 2 The load+deflection of Shitanxi Bridge's  $L/4$

**参考文献:**

- [1] 吴庆雄, 陈宝春, 高桥和雄, 等. 中国におけるコンクリート充填钢管合成アーチ橋の建設の状況と技術の課題[J]. 桥梁と基礎(日), 2001(10): 40 - 46.
- [2] Chen Baochun, Chen Youjie. Experimental study on whole process of CFST rib arch bridge under in - plane loads[A]. Composite and hybrid structures, proceedings of the 6th ASCCS international conference[C], 2000. 167 - 172.
- [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] 陈友杰, 陈宝春. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程有限元分析[J]. 工程力学, 2000(增刊): 753 - 758.
- [5] 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.
- [6] 潘友光. 圆钢管混凝土轴心受力作用下本构关系的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑工程学院, 1989.
- [7] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土桁拱静力性能分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 62 - 67.
- [8] 赵振铭, 陈宝春. 杆系与箱型梁桥结构分析及程序设计[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1997.
- [9] 陈宝春, 郭金琼, 毛承忠, 等. 316 国道福建闽清石潭溪大桥优化设计[A]. 中国钢协钢 - 混凝土组合结构协会第六次年会论文集[C]. 1997.

---

## 我校科研简讯

### 1. 高层次科研项目立项取得突破

2002 年我校获国家杰出青年科学基金 1 项(实现零的突破)、面上项目 7 项, 计划资助经费 221.0 万元; 福建省自然科学基金重大项目 1 项、资助经费 60.0 万元。

### 2. 重大应用开发研究项目有所进展

2002 年我校获国家科技部 863 计划项目 2 项, 预计当年资助经费 140.0 万元; 作为合作单位获 863 计划项目 1 项, 计划资助经费 100.0 万元; 获 863 计划子课题 3 项, 当年资助经费 65.0 万元; 获省科技厅重大项目 3 项, 计划资助经费 150.0 万元; 重大招标项目 2 项(其中 1 项我校为合作单位), 预计计划资助经费 250.0 万元。

### 3. 研究成果的学术水平稳步提高

在学术论文方面, 2001 年全校共计发表学术论文 1426 篇, 被国际三大检索系统收录 116 篇, 其中《SCI》收录 85 篇, 《EI》收录 22 篇, 《ISTP》收录 9 篇. 分别居全国高校第 39 位、第 60 位, 第 63 位. 在全国 1 400 多种核心科技期刊中, 我校共发表论文 363 篇, 居全国高校第 71 名. 在成果获奖方面, 2002 年获科技成果奖 14 项, 其中省部级科学技术一等奖 2 项; 省科学技术二等奖 3 项; 省科学技术三等奖 8 项; 司法部法学优秀科研成果三等奖 1 项。

(郑美莺摘编)