

大跨径钢筋混凝土箱拱的非线性空间稳定性分析

李睿¹,程海根²,俞进³

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 华东交通大学 土木学院, 江西 南昌 330013; 3. 云南华能澜沧江水电有限公司, 云南 昆明 650011)

摘要: 讨论了钢筋混凝土箱拱非线性稳定性分析的方法, 并编制计算程序对一座大跨度钢筋混凝土拱桥进行了空间稳定性分析. 分析表明, 非线性对大跨度箱拱的稳定性有较大的影响.

关键词: 非线性稳定性; 钢筋混凝土拱桥; 大跨径桥梁

中图分类号: U448.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2007)02-0069-04

Nonlinear Spatial Stability Analysis of Long Span Reinforced Concrete Box Arch Bridge

LI Rui¹, CHENG Hai-gen², YU Jin³

(1. Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University Nanchang, Nanchang 330013, China;
3. Yunnan Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650011, China)

Abstract: The method of nonlinear stability analysis of concrete box arch bridge is discussed in this paper. A computer program is then developed for spatial stability analysis of a concrete box arch bridge. It is argued through the analysis that nonlinearity has a great influence on stability of long span concrete box arch bridge.

Key words: nonlinear stability; reinforced concrete arch bridge; long-span bridge

0 引言

随着我国科学技术、国民经济和交通事业的发展,大跨径桥梁日益增多,尤其是我国西南、西北山区公路和铁路的兴建,由于地形、地貌条件,使得拱桥在这些地区得到广泛应用.且跨径越来越大.在西南山区修建的高等级公路,由于地形复杂,山高坡陡,很多桥梁不得不跨越河谷和深沟,这样,大跨径钢筋混凝土拱桥就显示出其不可比拟的优越性.以后随着高等级公路建设的加快,大跨径钢筋混凝土箱拱的应用还会越来越多.

随着桥梁跨径的增加,钢筋混凝土拱桥的跨径不断增大,几何非线性和材料非线性的影响成为稳定性计算中不可忽视的因素.在对桥梁进行稳定性分析的时候,必须考虑其非线性的影响,并进行空间分析,结果才能更接近实际.

1 稳定性分析理论

拱桥的失稳可分为平衡分支失稳(第一类)和极值点失稳(第二类)两类.第一类稳定问题,力学概念单纯明确,结构稳定通常转化为特征值问题,计算方便,而且其临界荷载近似地代表第二类稳定问题的上限,受到技术人员的欢迎.但由于拱桥结构不可避免地存在初始的弯曲、偏心等缺陷,尤其对于大跨度拱桥结构,在外荷载作用下主拱肋的内力除了轴向压力外,弯矩、扭矩所占比重也较大,结构的变形呈非线性状

收稿日期:2006-10-25.

第一作者简介:李睿(1974~),男,博士研究生.主要研究方向:桥梁防灾减灾. E-mail: liruiking@163.com

态,因此拱桥的失稳皆为第二类稳定问题^[1,2].

1.1 线性屈曲分析^[3,4]

线性稳定性法是假定结构和材料均是线性的,结构的内力与外荷载成比例关系,把结构的稳定分析转化为求解特征值问题,得出的最小特征值就是失稳临界荷载.在临界荷载下,拱桥结构线性屈曲的平衡方程为:

$$([K_b] + \lambda[K_c])\{\delta\} = 0 \quad (1)$$

式中:[K_b]为弹性刚度矩阵;[K_c]为几何刚度矩阵,只与构件的轴向力有关; λ 为荷载稳定系数;{ δ }为结构的位移增量.式(1)为广义特征值问题,其最小特征值在工程上才有意义,应用各种迭代方法可求解.

线性屈曲法计算简便,概念清楚,但它的理论基础是分支点稳定理论,只能用于理想结构,不能考虑各种初始缺陷的影响.

1.2 几何非线性屈曲分析^[3~6]

拱桥的几何非线性稳定分析主要是指在荷载的作用下,拱轴线与荷载压力线的偏离问题,因为这种偏离是不可避免的.如施工阶段,压力线随架设过程的不断变化,施工预拱度的设置,各种施工偏差,拱轴线的弹性压缩等.所以严格地说拱的失稳皆属于第二类失稳.拱的几何非线性属于弹性大变形问题.几何非线性屈曲法假定材料是线性的,考虑结构的梁柱效应及大位移效应,通过增量和迭代相结合的方法求解失稳临界荷载.

拱桥结构的非线性平衡方程为^[1~3]:

$$([K_0] + [K_L] + [K_\sigma])\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

式中:[K_0]为小位移弹性刚度矩阵,[K_L]为大位移矩阵,[K_σ]为初应力矩阵,{ F }为节点位移,{ δ }为等效节点荷载,[K_L]、[K_σ]是{ δ }的函数.所以(1)为非线性方程组.

非线性方程组的求解方法——荷载增量法.荷载从零开始,按照某种增量形式逐步增大到 $\lambda_i[F]$.当{ δ }开始发散时, $\lambda_i[F]$ 即为拱桥极限承载力.通常将非线性方程组写成如下形式:

$$[K(\delta)]\{\delta\} - \lambda_i\{F\} = \{0\} \quad (2)$$

λ 为荷载因子,可以做这样的假定:

$$0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_i < \lambda$$

在每一个荷载步内对非线性方程(2)进行线性化,可得增量形式的平衡方程:

$$\begin{aligned} [K(\delta)]\{\Delta\delta\} - \lambda\{\Delta F\} &= \{0\} \\ \{\Delta F\} &= (\lambda_i - \lambda_{i-1})\{F\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:{ $\Delta\delta$ }为节点位移增量;{ ΔF }为等效节点荷载增量.

可以设 $\lambda = 100$ (一般下承式拱桥达到极限承载力时的稳定系数不大于10).在每一个荷载步内,为了改进求解的精度,可以应用牛顿法进行迭代.结构的极限承载力在开始发散的荷载和在此前一级已收敛的荷载之间.如荷载增量步分得较细,可以偏于安全地认为是前一级荷载,而避免更加复杂的计算.

1.3 材料非线性屈曲分析^[7]

考虑材料非线性的分析方法与几何非线性分析基本上是一致的,只不过此时要不断修正各单元的中性轴及材料参数.

梁单元的材料非线性分析模型主要有二类:不分层梁和分层梁,不分层梁模型主要用于规则的截面,如矩形、圆形等;而分层梁单元模型则避免了上述的局限性,其截面形式可为任意,而且不同的梁层可具有不同的材质,本文采用分层梁的计算模式.为了分析简化,作如下基本假设:

- 1) 梁单元长度取得足够短,对于每一层,其应变均匀分布,近似等于该层平均应变;
- 2) 拱桥的拱圈一般是小偏心受压,因而忽略梁单元中性轴的位置变化;

- 3) 不考虑钢筋的滞回效应,不考虑混凝土拉应力作用;
- 4) 截面混凝土的应力应变关系曲线还是服从单轴轴压关系曲线,其应力应变关系采用三次曲线:

$$\sigma(\varepsilon) = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 \tag{4}$$

其中 $a_0 = 0, a_1 = E_0, a_2 = 3f'_c/\varepsilon_{co}^2 - 2E_0/\varepsilon_{co}, a_3 = E_0/\varepsilon_{co}^3 - 2f'_c/\varepsilon_{co}^3, \varepsilon_{co}$ 为混凝土的极限应变,取 $\varepsilon_{co} = 0.0035, E_0$ 为混凝土的初始弹性模量,暂取 $E_0 = 1.2E_c, f'_c$ 为极限抗压强度。

本文采用上述方法编制拱桥稳定性分析程序,为验证程序的正确性,程序与 sap2000 软件进行比较,同时用本文的程序与 sap2000 对文献[6]中的模型拱进行计算,模型拱的尺寸数据如表 1 所示,稳定系数计算工况取恒载作用的情况.用本程序计算的第一阶失稳的稳定系数为 8.756,用 sap2000 计算的第一阶失稳的稳定系数为 8.755,二者非常接近,说明本程序计算结果准确。

表 1 模型拱的尺寸

Tab.1 Size of model arch

跨径度 L/cm	矢高 f/cm	矢跨比 f/L	拱肋宽 b/cm	拱肋宽 b/cm	截面配筋面积 A_s/cm^2
400	80	0.2	5.5	20	0.628

2 算例

本文用所编制的程序对大跨径钢筋混凝土箱型拱桥进行稳定性分析.计算所采用的是四川省甘孜州的一座钢筋混凝土箱拱桥.该桥净跨径 160 m,拱轴系数为: 1.89,矢跨比为 1/5,桥梁横向为分离式双幅,单幅宽 8.5 m,单幅拱圈截面由 5 个拱箱组成,箱高 2.5 m,成桥后,拱箱顶板厚 30 cm,板厚 20 cm,边腹板厚 12 cm,中腹板厚 42 cm.设计荷载为公路 I 级.计算时取单幅桥进行计算.用有限元对桥梁进行离散建立分析模型,拱圈及拱上建筑全部按空间梁单元进行离散.图 1 为该桥的结构布置示意图。

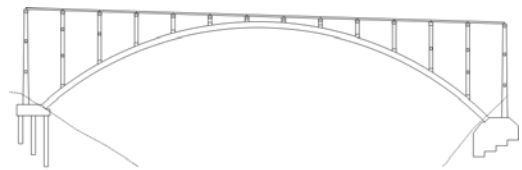


图1 桥梁结构布置示意图
Fig.1 Arrangement plan of bridge

进行稳定性分析时,考虑 2 个计算工况。

工况 1:只有恒载作用的情况;

工况 2:恒载 + 活载(公路 I 级荷载中集中荷载位于跨中)。

计算前三阶失稳模态的稳定安全系数如表 2 所示。

表 2 稳定安全系数计算结果

Tab.2 Calculated stability factors

失稳阶次	工况	不考虑几何非线性	考虑几何非线性	考虑双重非线性	失稳模态
1	1	20.6	17.7	13.5	面内,对称
	2	19.7	16.9	12.2	面内,对称
2	1	28.5	26.7	22.3	面内,反对称
	2	26.5	25.1	21.3	面内,反对称
3	1	39.2	35.2	26.7	面外,对称
	2	37.8	34.1	25.6	面外,对称

由表 2 的计算结果可以看出,活载对特宽桥的稳定安全系数的影响比较小,且前两阶失稳模态主要是面内失稳,几何非线性和材料非线性对桥梁稳定安全系数的影响不可忽视,特别是材料非线性对拱桥稳定安全系数的影响更大。

