

文章编号:1671-8879(2008)04-0043-04

钢筋混凝土系杆拱桥稳定性影响参数

贺拴海¹, 李春风^{1,2}, 吕 婷³, 周勇军¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 交通运输部 科技教育司, 北京 100736;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:以某钢筋混凝土系杆桥为对象, 基于拱桥稳定性分析理论, 采用非线性有限元分析方法, 研究了布载方式、矢跨比、加劲梁抗弯刚度、拱肋刚度、吊杆刚度和横撑数量等参数对拱面内和面外失稳的影响。结果表明: 不对称布载方式会降低拱桥的稳定性, 全桥均布满载的稳定系数要比全桥均布半载的高; 当矢跨比为 $1/4.5 \sim 1/6.5$ 时, 其面内与面外的失稳特征值随着矢跨比的减小而减小, 但减小幅度最大不超过 2%; 加劲梁的面内抗弯刚度对面内失稳的影响大于对面外失稳的影响; 增加拱肋抗弯刚度能有效提高面内及面外稳定系数; 当吊杆刚度增加或横撑数量增加时, 面内失稳特征值增加不大, 而面外失稳特征值呈线性递增趋势。

关键词:桥梁工程; 钢筋混凝土系杆拱桥; 稳定性; 影响参数; 非线性

中图分类号:U448.225

文献标志码:A

Influencing parameters of stability for reinforced concrete tied-arch bridge

HE Shuan-hai¹, LI Chun-feng^{1,2}, LU Ting³, ZHOU Yong-jun¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Science and Education, Ministry of Transport, Beijing 100736, China; 3. Chinese First Institute Limited Corporation of Highway Survey and Design, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the stability theory of arch bridge, the nonlinear finite element method is used to study the influencing parameters to the in-plane and out-plane stability of a reinforced concrete tied-arch bridge, those parameters include the load-arrangement method, the rise/span ratio, the bending rigidity of stiffening girder, the rigidity of rib, the rigidity of suspender, the numbers of diaphragm. The results indicate that: the unsymmetrical load-arrangement can reduce the stability of arch bridge; the stability coefficient under the full-uniform load is higher than that under the half-uniform load; when the rise/span ratio varies from $1/4$ to $1/7$, the bulking eigenvalue increases with the rise/span ratio, though the variation is not more than 2%; the influence of plane's bending rigidity of stiffening girder on the in-plane stability is greater than the one on the out-plane stability; the increasing of bending rigidity of arch rib can effectively enhance the stability coefficients of in-plane and out-plane; when the suspender's rigidity or the numbers of the diaphragm increase, the in-plane bulking eigenvalue increases not as remarkably as the

收稿日期:2007-08-20

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200538151215)

作者简介:贺拴海(1962-),男,陕西洛川人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: keji_l@chd.edu.cn.

one of out-plane eigenvalue, the later has a linear growth tendency. 2 tabs, 10 figs, 12 refs.

Key words: bridge engineering; RC tied-arch bridge; nonlinear analysis; stability; parameters analysis

0 引言

随着交通量的增加,尤其是汽车超载现象越来越严重,使得过去几十年修建的一些混凝土系杆拱桥出现不同程度的破坏,拱桥稳定性和承载能力便成为研究的热点。拱桥稳定问题研究由弹性理论到挠度理论,进而发展到考虑几何非线性和材料非线性的拱的极限稳定分析理论。早期研究以圆弧拱为主,分析影响拱弹性稳定的各种因素,明确了非保向力效应对提高下承式拱桥稳定性的机理;对拱桥极限稳定承载力的研究,以应用非线性有限元为主,在引入混凝土简化本构模型的基础上,对钢筋混凝土拱的极限稳定承载力进行了研究,取得了不少成果^[1-5]。研究内容涉及拱式拱上结构钢筋混凝土拱桥的极限承载力,钢管混凝土拱桥几何非线性分析,单拱面预应力混凝土系杆拱桥的极限承载力,系杆拱桥吊杆刚度对极限承载力的影响,劲性骨架法施工阶段考虑双重非线性的稳定性,考虑施工过程中结构体系不断变化、荷载逐步增加以及拱桥结构大位移的大跨度拱桥非线性稳定分析等。目前单拱肋的面内外弹性稳定分析方法已经很成熟,但对于复杂体系的系杆拱桥,由于吊杆和桥面结构的影响,其侧倾稳定荷载没有解析解,必须采用数值方法计算^[6-11]。为此,本文采用非线性有限元方法,分析了不同布载方式、矢跨比、加劲梁、拱肋刚度、吊杆刚度和横撑数量等对两类稳定性的影响。

1 非线性有限元方法

采用 ANSYS 软件及 U L 增量平衡方程式求解。桩基础简化为水平补偿弹簧与比拟杆的组合,刚度系数采用 m 法计算。考虑混凝土材料本构关系时,忽略对极限承载力影响很小的抗拉能力,并把受压上升段曲线简化为 3 段折线,所以整个应力-应变($\sigma-\epsilon$)关系曲线最终简化为 4 段折线。钢筋应变在未超过比例极限以前,其应力-应变关系为直线;屈服后,应力不再增大,而应变不断增加。

加载时,全桥构件的自重以桥体重力的形式作用在单元上,结构的一些构造重力转换为集中节点荷载。桥上的二期恒载和附属设施的质量换算为质量单元,按照均布力施加在加劲梁单元上。车辆活

荷载根据横向车道和纵向车道分布情况,按照静力等效的原则,换算为线荷载形式,作用在加劲梁单元上。同时,根据规范^[12]要求,考虑荷载的横向折减系数和纵向折减系数。对于拱肋结构不计入冲击力,对于温度影响力和混凝土收缩效应均考虑温度变化。

2 稳定性分析

2.1 工程概况

山东省某钢筋混凝土中承式系杆拱桥始建于 1996 年,设计荷载为汽车-20 级,挂车-100,行人 3.5 kN/m²;主桥为钢筋混凝土中承式系杆拱桥,东岸引桥为两跨刚架拱桥,西岸引桥为一跨空心板和一跨刚架拱,桥跨为 10 m+60 m+90 m+60 m+54 m,桥梁全长为 333.28 m。桥面宽度为净 15 m+2×1.5 m 人行道,桥面总宽为 20.9 m,刚架拱桥面全宽为 18.5 m。主桥为等截面悬链线无铰拱,桥梁净跨径 90 m,净矢高 20 m,净矢跨比 1/4.5,拱轴系数 m 为 1.756。钢筋混凝土拱肋为高 2.2 m、宽 1.2 m 的箱型截面,主桥共有吊杆 12 对,拱上立柱 8 根,每处吊杆采用 2×84Φ5 mm 的钢丝束,采用 C30 混凝土。横梁采用带有凸头的工字形截面的预应力混凝土构件,采用 C40 混凝土。横梁在吊架上预制,预应力筋采用钢绞线。加劲梁采用预制钢筋混凝土空心板,采用 C30 混凝土。墩身为钢筋混凝土空心墩,设悬臂墩帽。基础采用 14 根或 10 根钻孔灌注桩,桩径 1.5 m,入土深度 30 m。

2.2 特征值分析

由于结构的几何刚度矩阵 K_G 与结构的受力状态有关,在计算时,按照一次落架计算一期恒载作用时的内力,再作用二期恒载及活荷载,由此计算得到 K_G ,活载为全桥均布,表 1 列出了前四阶屈曲特征值。

表 1 第一类稳定特征值 Hz

阶数	恒载+二期恒载	恒载+二期恒载+活荷载	失稳模态
第一阶	16.17	15.16	面内反对称
第二阶	16.47	14.06	面内对称
第三阶	36.36	32.58	面外反对称
第四阶	37.01	30.74	面外反对称

该桥失稳模态除第二阶为面对称失稳外,其他失稳模态均为反对称失稳。面内失稳时,跨中鼓

出平面,形状为半个正弦波,拱肋变形与空心板加劲梁变形方向一致,但拱肋变形幅度大于空心板变形幅度,这是由于后者的刚度大于前者。此时,吊杆已经倾斜,其水平分力使拱肋扶正,即吊杆对拱肋的作用力属于非保向力系。

3 影响参数分析

3.1 不同布载方式

采用 3 种不同的布载方式。工况 1:恒载+全桥均布活荷载;工况 2:恒载+半跨均布活荷载;工况 3:恒载+半边桥均布活荷载。计算结果见表 2。

表 2 不同布载方式对失稳特征值的影响 Hz

阶 数	工况 1		工况 2		工况 3	
	失稳特征值	失稳模态	失稳特征值	失稳模态	失稳特征值	失稳模态
第一阶	15.160	面内反对称	10.540	面内反对称	11.990	面内对称
第二阶	14.060	面内对称	11.260	面内对称	12.580	面外对称
第三阶	32.580	面外反对称	26.480	面外反对称	30.160	面外反对称
第四阶	30.740	面外反对称	23.150	面外反对称	27.550	面外反对称

由表 2 可知,不同的活荷载布载方式所求得的失稳特征值和失稳模态有所不同。工况 2 的第一阶失稳特征值比工况 1 的减小了 30.47%,比工况 3 的减小了 12.09%。在工况 2 的布载方式下,该桥最容易发生第一类失稳。

3.2 矢跨比

在跨径等因素不变的情况下,矢跨比从 1/4.5 减小到 1/6.5,共 11 个状态。计算结果如图 1、图 2 所示。

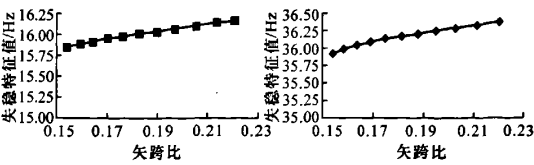


图 1 面内失稳特征值与矢跨比的关系

随着矢跨比的减小,面内失稳和面外失稳的特征值均有所减小,但减小速率缓慢。当矢跨比为 1/6.5 时,面内失稳特征值为 15.855,面外失稳特征值为 35.924,分别比原设计减小了 1.9% 和 1.2%。

3.3 加劲梁面内抗弯刚度

加劲梁的面内抗弯刚度从原设计的 0.2 倍增至 2 倍,共 10 个状态(图 3、图 4)。

加劲梁的面内抗弯刚度对面内失稳特征值的影响要大于对面外失稳特征值的影响。当加劲梁的面内抗弯刚度增加 1 倍时,面内失稳特征值增加了

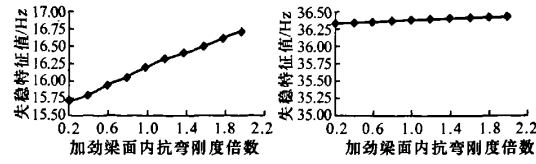


图 3 面内失稳特征值与加劲梁面内抗弯刚度的关系

3.5%,面外失稳特征值仅增加了 0.01%;当加劲梁的面内抗弯刚度减小到 0.2 倍时,面内失稳特征值减小了 2.8%,面外失稳特征值仅减小了 0.08%。

3.4 拱肋抗弯刚度

拱肋抗弯刚度从原设计的 0.2 倍增到 2 倍,共 10 个状态(图 5、图 6)。

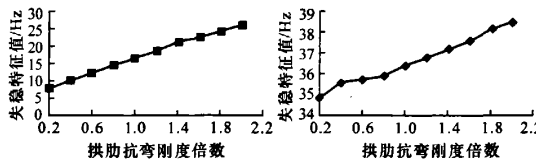


图 5 面内失稳特征值与拱肋抗弯刚度的关系

面内失稳特征值随着拱肋抗弯刚度的变化基本呈线性变化。当拱肋抗弯刚度比原设计增加 1 倍时,面内失稳特征值比原设计增加了 60.45%,面外失稳特征值比原设计增加了 5.84%;当拱肋抗弯刚度减小到原设计的 0.2 倍时,面内失稳特征值比原设计减小了 52.15%,面外失稳特征值比原设计减小了 4.21%。

3.5 吊杆刚度

吊杆刚度从原设计的 0.2 倍增到 2 倍,共 10 个状态(图 7、图 8)。

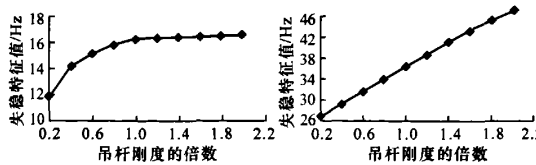


图 7 面内失稳特征值与吊杆刚度的关系

失稳特征值随吊杆刚度的增加均有所增加,面内失稳特征值的增加逐渐趋于平缓,而面外失稳特征值基本呈线性关系增加。当吊杆刚度为原设计的 2 倍时,面内失稳特征值只增加了 1.78%,而面外失稳特征值增加了 30.65%。

3.6 横撑数量

原设计未布置横撑,现分别考虑布设了 3 道、5 道、7 道及 9 道横撑的情况,每道横撑水平间距 4 m,共 5 个状态(图 9、图 10)。

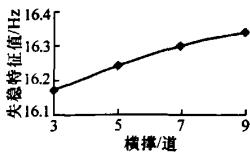


图9 面内失稳特征值与横撑数量的关系

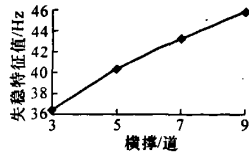


图10 面外失稳特征值与横撑数量的关系

横撑数量对面内失稳的影响不大,而对面外失稳的影响较大。布置9道横撑时,面内失稳特征值只比不布置横撑的原设计增加了1.00%,而面外失稳特征值增加了26.01%。

4 结 语

(1)不对称布载方式会降低拱桥的稳定性。半跨均布活荷载时面内失稳特征值比均布活荷载时减小了30.47%,可见半跨均布活荷载容易使拱桥失稳。系杆拱桥的矢跨比一般为1/4~1/7。通过分析可知,随着矢跨比的逐渐减小,面内及面外稳定性也随之减小,但减小速率逐渐缓慢,当矢跨比减小到1/6.5时,面内失稳特征值与面外失稳特征值分别比原设计减小了1.9%和1.2%。

(2)加劲梁的主要作用是承受活荷载作用下的弯矩,从受力的角度来看,其刚度不宜太大,但从稳定的角度来看,加劲梁的刚度对结构的稳定性有一定影响,且加劲梁的面内抗弯刚度对面内失稳特征值的影响要大于对面外失稳特征值的影响。因此,也不宜采用太柔的加劲梁。

(3)拱肋抗弯刚度的增加能够有效地提高面内及面外的稳定性。当吊杆刚度很小时,随着吊杆刚度的增加,面内及面外稳定性均有提高,但当吊杆刚度增大到一定值时,对面内稳定性的影响微乎其微,而对面外稳定性的影响仍基本呈线性增长。横撑数量的增加,对面内稳定性几乎无影响,与面外稳定性呈线性递增趋势。

参考文献:

References:

- [1] 陈 峰,胡大琳.大跨径钢管混凝土拱桥非线性静风稳定性[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):42-46.
CHEN Feng, HU Da-lin. Aerostatics stability of long-span concrete-filled steel tube arch bridge[J].

Journal of Chang'an University; Natural Science Edition,2006,26(2):42-46.

- [2] Boonyapinyo V, Yamadah H, Miyata T. Wind-induced nonlinear lateral-torsional buckling of cable-stayed bridges[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,1994,120(2):486-506.
- [3] Emil S, Robert H S. Application of wind to structure [M]. Shanghai: Tongji University Press,1992.
- [4] 陈宝春,韦建刚,王加迫.钢管混凝土横桥的挠度限值研究[J].中国公路学报,2007,20(6):56-60.
CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, WANG Jia-po. Research on deflection limit value for CFST arch bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(6):56-60.
- [5] 方明山,项海帆,肖汝诚.大跨径缆索承重桥梁非线性空气静力稳定理论[J].土木工程学报,2000,33(2):73-79.
FANG Ming-shan, XIANG Hai-fan, XIAO Ru-cheng. Nonlinear aerostatic stability theory of large-span cable-stayed bridges[J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(2):73-79.
- [6] JTJ 024-85,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [7] 贺拴海.桥梁结构理论与计算方法[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [8] 戴公连,李德建,曾庆元,等.单拱面预应力混凝土系杆拱桥空间稳定极限承载力分析[J].中国公路学报,2002,15(2):44-47.
DAI Gong-lian, LI De-jian, ZENG Qing-yuan, et al. Ultimate load analysis on spacial stability of single arch bowstring prestressed concrete bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 44-47.
- [9] 陈 群.高墩大跨径桥梁稳定性仿真分析[D].西安:长安大学,2003.
- [10] Yong L P, Trahair N S. Non-linear buckling and post buckling of elastic arches [J]. Engineering Structure, 1998,20(7):571-579.
- [11] 赵灿晖.上承式钢桁拱桥面内极限承载力分析[J].交通运输工程学报,2007,7(6):80-85.
ZHAO Can-hui. In-plane ultimate bearing capacity analysis of deck-type steel braced arch bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007,7(6):80-85.
- [12] JTG D60-2004,公路桥涵设计通用规范[S].