

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.018

引用格式: 韩兆宇, 吴尉靖, 何滨冰. 大跨径钢管混凝土拱桥稳定性分析[J]. 公路与汽运, 2024, 40(6): 92-98.

Citation: HAN Zhaoyu, WU Weijing, HE Binbing. Stability analysis of long-span steel tube concrete arch bridge[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 92-98.

大跨径钢管混凝土拱桥稳定性分析*

韩兆宇^{1,2}, 吴尉靖^{1,2}, 何滨冰^{1,2}

(1. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西智慧交通重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为研究不同重现期风荷载下跨径 500 m 以上拱桥的稳定性, 以某中承式钢管混凝土拱桥为例, 采用有限元计算软件, 分析不同风荷载工况下混凝土强度、钢管强度、矢跨比、拱肋刚度等因素对成桥稳定性的影响。结果表明, 拱桥稳定性主要取决于其结构特性及恒载, 横向风荷载作用对其影响较小; 双重非线性下拱桥的稳定系数与弹性状态下相比显著下降, 在实际分析时不能忽略双重非线性对拱桥稳定性的影响; 随着混凝土强度的提高, 拱桥的稳定系数提高; 提高钢管强度, 非线性稳定系数有较大提升; 随着矢跨比的增大, 稳定系数呈先增大后减小的趋势, 矢跨比为 1/4 时最大; 拱肋刚度变化 20% 时, 相较于抗扭刚度和竖向抗弯刚度, 侧向抗弯刚度对钢管混凝土拱桥整体稳定性的影响更大。

关键词: 桥梁; 钢管混凝土拱桥; 风荷载; 稳定性分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)06-0092-07

中国的钢管混凝土拱桥发展极快, 建造水平在世界上位居前列^[1-2]。但随着钢管混凝土拱桥跨径的增大, 拱肋截面不断加大, 材料用量大增, 经济性变差, 不同工况下的稳定性及施工安全问题也更突出。为解决以上技术瓶颈和践行绿色发展理念, 需进一步提高构件承载能力并研究成桥稳定性^[3]。

一些学者对大跨径拱桥的抗风稳定性进行了研究, 如涂俊等对某单拱肋拱桥进行 1:100 全桥气弹模型风洞试验, 发现风偏角对拱肋和主梁的加速度响应有显著影响^[4]; 柴生波等对澜沧江黎明大桥施工阶段进行全过程稳定性分析, 结果表明布设抗风缆索能显著提升拱肋合龙后施工阶段的稳定性^[5]; 金晓东等研究不同拱脚约束方式下风荷载作用对钢管拱肋悬拼阶段的影响, 确定了“先临时铰接, 后临时固结, 最后永久固结”的拱脚约束方式^[6]; 彭文韬等使用有限元软件对某钢管箱形提篮拱桥进行稳定性分析, 结果表明考虑非线性影响时其安全稳定系数明显降低^[7]; 陈佳等分析初始缺陷、混凝土强度、拱肋截面含钢率等因素对钢管混凝土拱桥稳定性的影响, 结果表明混凝土强度和截面含钢率对结构稳定性影响较大, 初始缺陷影响很小^[8]; 杨吉新等从横撑

形式、横撑刚度及横撑间距三方面分析了横撑对大跨度钢管混凝土拱桥稳定性的影响^[9]; 王青应用静力弹性稳定和有限元方法分析某双主跨钢桁梁拱桥不同时期的力学行为, 研究了大跨度钢桁梁柔性拱桥在施工阶段和运营期的稳定性^[10]。上述文献主要针对 500 m 以下钢管混凝土拱桥进行稳定性分析, 对跨度达到 500 m 以上拱桥的研究较少。本文以跨径 500 m 以上的某中承式钢管混凝土拱桥为研究对象, 采用有限元软件建立计算模型, 对桥梁在不同风荷载作用下的稳定性进行分析, 并研究混凝土强度、钢管强度、矢跨比、拱肋刚度等参数对其稳定性的影响, 为大跨径钢管混凝土拱桥结构设计提供参考。

1 拱桥的稳定性分析理论

根据结构失稳特点, 失稳主要分为 2 种情况^[11-12]。

1.1 第一类稳定

第一类稳定问题(又称弹性一类稳定)是指当结构受到外荷载作用达到临界荷载时, 除原有平衡状态外还存在其他平衡状态, 这样会出现平衡分支。第一类稳定问题可用有限元平衡方程表达, 其线性

* 基金项目: 广西研究生教育创新计划(YCSW2021171)

屈曲平衡方程为:

$$([\mathbf{K}_0] + [\mathbf{K}_\sigma])\{\boldsymbol{\delta}\} = \{\mathbf{P}\} \quad (1)$$

式中: $[\mathbf{K}_0]$ 为弹性刚度矩阵; $[\mathbf{K}_\sigma]$ 为几何刚度矩阵; $\{\boldsymbol{\delta}\}$ 为位移; $\{\mathbf{P}\}$ 为荷载。

当式(1)存在非零解时,有:

$$([\mathbf{K}_0] + \lambda[\mathbf{K}_\sigma]) = 0 \quad (2)$$

第一类稳定安全系数可用式(2)求得,若方程存在 n 阶,求解可得 n 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 。考虑工程实际情况,只有最小的特征值 λ_{cr} 才有实际意义。第一类失稳考虑的是弹性屈曲问题,将失稳问题转化为计算特征值问题,计算较容易。

1.2 第二类稳定

第二类稳定问题涉及弹塑性屈曲,通常受材料非线性和几何非线性的影响,需建立三维有限元模型进行计算和分析^[13]。只考虑几何非线性的平衡方程为:

$$([\mathbf{K}_0] + [\mathbf{K}_\sigma] + [\mathbf{K}_L])\{\boldsymbol{\delta}\} = \{\mathbf{P}\} \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{K}_0]$ 为结构弹性刚度矩阵; $[\mathbf{K}_\sigma]$ 为结构几何刚度矩阵; $[\mathbf{K}_L]$ 为结构大位移矩阵; $\{\boldsymbol{\delta}\}$ 为节点位移; $\{\mathbf{P}\}$ 为等效节点荷载。

计入双重非线性影响时,结构的总体平衡方程为:

$$([\mathbf{K}_0]_{ep} + [\mathbf{K}_\sigma] + [\mathbf{K}_L]_{ep})\{\boldsymbol{\delta}\} = \{\mathbf{P}\} \quad (4)$$

式中: $[\mathbf{K}_0]_{ep}$ 为弹塑性刚度矩阵; $[\mathbf{K}_L]_{ep}$ 为结构弹塑性大位移矩阵。

通过增量法和迭代法可求得拱桥失稳的临界荷载。

1.3 钢管混凝土本构关系

钢管混凝土本构关系采用统一理论^[14]进行分析(见图1),即将钢管混凝土视为统一的组合材料。该模型将钢管混凝土分为弹性、弹塑性、线性强化3个阶段。

$$f_{sc}^y = (1.212 + B\xi + C\xi^2)f_{ck} \quad (5)$$

$$f_{sc}^p = \left(0.192 \frac{f_y}{235} + 0.488\right)f_{sc}^y \quad (6)$$

$$\epsilon_{sc}^p = 0.67 \frac{f_y}{E_s} \quad (7)$$

$$\epsilon_{sc}^y = \epsilon_{sc}^p + \frac{2(f_{sc}^y - f_{sc}^p)}{E_{sc} - E_{sc}'} \quad (8)$$

式中: f_{sc}^y 为组合材料的屈服强度极限; $B = 0.476 \times f_y / 235 + 0.974$; f_y 为钢材的屈服强度; ξ 为套箍指标, $\xi = \alpha f_y / f_{ck}$; α 为含钢率, $\alpha = A_s / A_c$; A_s 、 A_c 分别为钢管、混凝土的截面面积; f_{ck} 为混凝土抗压强度

标准值; $C = -0.104 f_{ck} / 20 + 0.031$; f_{sc}^p 为组合材料的轴向应力比例极限; ϵ_{sc}^p 为组合材料的弹性变形比例极限; E_s 为钢材的弹性模量; ϵ_{sc}^y 为组合材料的极限屈服应变; E_{sc} 为组合材料的弹性模量, $E_{sc} = f_{sc}^p / \epsilon_{sc}^p$; E_{sc}' 为组合材料的强化模量, $E_{sc}' = 5\,000\alpha + 550$ 。

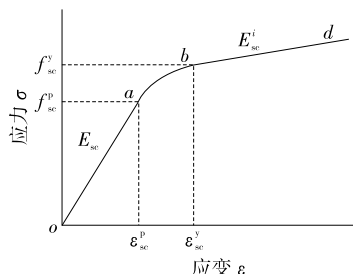


图1 钢管混凝土的本构关系

2 工程概况及模型建立

2.1 桥梁概况

广西平南某跨浔江大桥全长 1 035 m, 其中主桥长 575 m(净跨径 548 m), 计算跨径为 560 m, 为中承式钢管混凝土拱桥。主拱为钢管混凝土桁架式结构, 拱肋主弦管直径为 1.4 m, 矢跨比为 1/4, 拱轴系数为 1.5, 吊杆平行布置, 纵桥向间距为 15.5 m。该桥道路等级为二级公路, 设计速度 60 km/h, 设计荷载为公路-I 级。桥梁布置见图2。

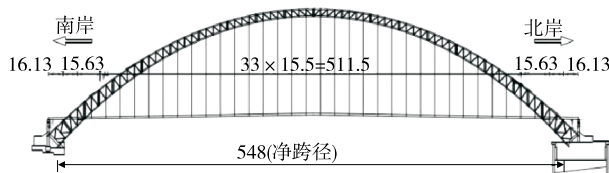


图2 某中承式钢管混凝土拱桥主桥立面布置(单位: m)

2.2 材料特性

主拱圈采用 Q420 钢和 C70 混凝土组合, 横撑、格子梁采用 Q345 钢, 桥面板采用 C50 混凝土, 吊杆采用 1860 级钢绞线。材料参数见表 1。

表1 材料参数特性

构件名称	材料	弹性模量/Pa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)
拱肋	Q420	2.06×10^8	0.3	76.98
核心混凝土	C70	3.70×10^7	0.2	25.00
吊杆	1860 级钢绞线	1.95×10^8	0.3	78.50
横撑	Q345	3.70×10^7	0.3	76.98
桥面板	C50	3.45×10^7	0.2	25.00
格子梁	Q345	3.70×10^7	0.3	76.98

2.3 有限元模型

使用 MIDAS/Civil 有限元软件建立该桥三维模型,其中吊杆采用桁架单元模拟,拱肋、腹杆与横撑采用梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟,拱脚和桥面系两端采用固结处理,不考虑钢管与管内混凝土之间的相对变形与滑移。主桥共划分为 3 040 个节点、6 640 个单元。图 3 为有限元基础模型。



图 3 某中承式钢管混凝土拱桥有限元模型

2.4 荷载工况

在进行稳定性分析前,确定拱桥所承受的荷载种类及大小。本文研究成桥状态,作用在拱桥上的二期荷载包括人行道、桥面铺装、防护栏杆等,取为 2.5 kN/m^2 。设计荷载按照文献[15]中公路-I 级车道荷载布置,人群荷载按 2.5 kN/m^2 取值。

根据文献[16]计算风荷载基本风速为 24.8 m/s 。按表 2 所示工况进行静力稳定分析。

表 2 稳定性计算时荷载组合工况

工况编号	荷载组合
工况 1	恒载+活荷载
工况 2	恒载+活荷载+风荷载 1(基本风速)
工况 3	恒载+活荷载+风荷载 2(2 倍基本风速)
工况 4	恒载+活荷载+风荷载 3(3 倍基本风速)

3 稳定性分析

3.1 第一类稳定分析

运用有限元模型进行屈曲分析控制,计算该桥在不同工况下的前 10 阶稳定模态。4 种工况作用下前 3 阶及第 10 阶的稳定系数见表 3,工况 4 下失稳模态见图 4。对于钢管混凝土拱桥,第一类稳定系数应不小于 $4.0^{[17]}$ 。

由表 3、图 4 可知:1) 4 种工况下第 1 阶线弹性稳定系数均大于 7,其中工况 4 下线弹性稳定系数最小,为 7.195,满足规范中拱桥第一类稳定系数大于 4 的要求。2) 4 种工况下拱桥前 9 阶失稳模态均表现为拱肋面外失稳而桥面没有发生变化,从第 10 阶开始发生全桥面内失稳,且其线弹性稳定系

表 3 钢管混凝土拱桥稳定性计算结果

工况编号	阶次	稳定系数	失稳模态描述
工况 1	1	7.532 53	拱肋面外对称
	2	8.762 34	拱肋面外反对称
	3	10.091 45	拱肋面外对称
	10	15.957 39	全桥面内失稳
工况 2	1	7.483 07	拱肋面外对称
	2	7.781 45	拱肋面外反对称
	3	9.636 98	拱肋面外对称
	10	15.462 59	全桥面内失稳
工况 3	1	7.341 26	拱肋面外对称
	2	7.682 34	拱肋面外反对称
	3	9.491 45	拱肋面外反对称
	10	14.524 71	全桥面内失稳
工况 4	1	7.194 57	拱肋面外对称
	2	7.493 24	拱肋面外对称
	3	9.289 01	拱肋面外反对称
	10	14.126 17	全桥面内失稳

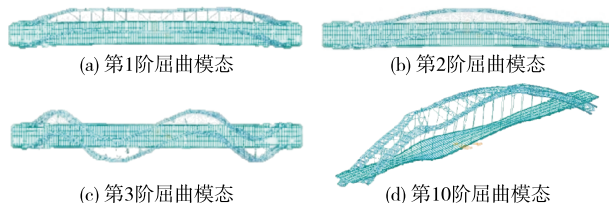


图 4 工况 4 下钢管混凝土拱桥的失稳模态

数较大,说明该桥面外刚度相对于面内刚度较小。拱桥设计中应着重考虑面外稳定性。3) 对比工况 4 与其他 3 种工况,由不同风速产生的风荷载会降低拱桥的线弹性稳定系数,但各工况下稳定系数相差不大,最大只降低 4.7%,说明拱桥的整体稳定性主要取决于其结构特性及恒载,横向风荷载作用影响较小。

3.2 第二类稳定分析

在钢管混凝土拱桥建造过程中,由于各种因素的影响,结构不可避免地存在初始缺陷。在线弹性分析的基础上考虑结构的几何缺陷,将线弹性分析的第 1 阶屈曲模态作为初始缺陷的形状,缺陷大小取计算跨径 L 的 $0.1\%^{[18]}$,分别考虑几何非线性和双重非线性,计算各工况下该桥稳定系数,计算结果见表 4。

由表 4 可知:1) 施加 $0.1\%L$ 初始缺陷时,几何非线性稳定系数与线弹性稳定系数的比值均在 0.9

表 4 钢管混凝土拱桥非线性稳定系数计算结果

工况编号	稳定系数			非线性稳定系数与线弹性稳定系数的比值	
	线弹性	几何非线性	双重非线性	几何非线性	双重非线性
工况 1	7.532	6.961	3.644	0.924	0.484
工况 2	7.483	6.877	3.607	0.919	0.482
工况 3	7.341	6.626	3.516	0.903	0.479
工况 4	7.195	6.539	3.439	0.909	0.478

以上,4 种工况下的稳定系数下降幅度为 7.6%~9.7%,且 4 种工况下的稳定系数相差不大,最大差值仅为 0.422,表明结构稳定性对考虑初始缺陷的几何非线性因素并不敏感。2) 考虑双重非线性时,拱桥的稳定系数大幅度降低,4 种工况下双重非线性稳定系数为线弹性稳定系数的 47.8%~48.4%。而根据上述分析,几何非线性对拱桥稳定性的影响较小,据此推断材料非线性对拱桥稳定性的影响更显著,仅考虑几何非线性的影响会高估拱桥的稳定性,在分析计算中应综合考虑双重非线性的影响,从而

对拱桥稳定性作出客观评价。

4 影响参数分析

4.1 混凝土强度的影响

分析不同混凝土强度等级对拱桥承载能力的影响,在保持钢管材料及钢管混凝土结构尺寸不变的情况下,通过更换模型中的混凝土强度等级,内填混凝土分别采用 C70、C75、C80、C100、C110、C120^[19],在 4 种工况下进行稳定性计算分析,稳定系数计算结果见图 5。

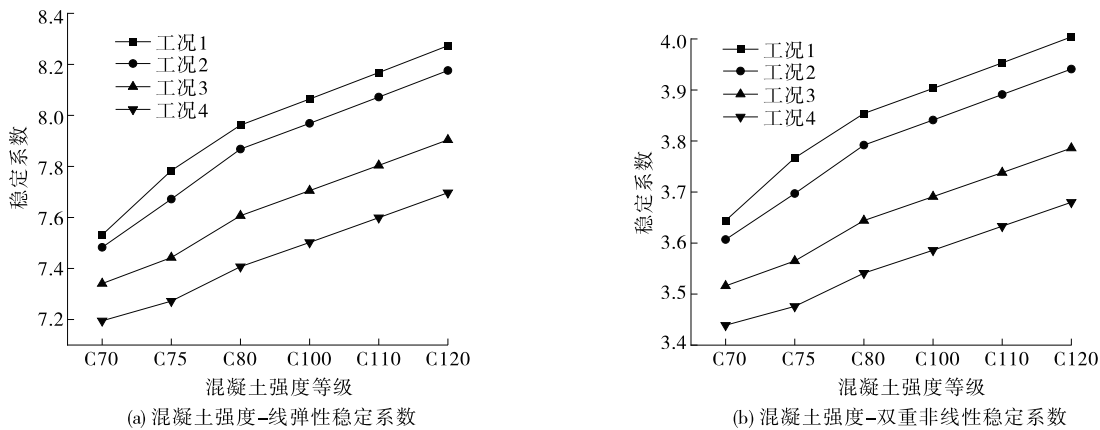


图 5 混凝土强度与钢管混凝土拱桥稳定系数的关系

由图 5 可知:随着主拱肋内填混凝土强度的提高,拱桥的稳定系数增大。钢管内填混凝土强度等级由 C70 提升至 C80 时,拱桥的稳定系数提高 5.5%~5.7%,提高幅度较大;钢管内填混凝土强度等级继续由 C80 提升至 C120 时,拱桥的稳定系数提高 3.6%~3.9%,提高幅度减小。表明较低强度的内填混凝土可显著提高拱桥的稳定系数,而较高强度的混凝土对稳定系数的提升作用较小。

4.2 钢管强度的影响

钢材屈服强度是影响非线性行为的重要因素。钢管强度等级从 Q345 提升至 Q500 时,4 种工况下该桥的稳定系数见图 6。

由图 6 可知:随着钢管强度的增大,该桥的线弹

性稳定系数略有波动,整体变化幅度较小,而非线性稳定系数变化显著。钢管强度等级从 Q345 提高至 Q500 时,线弹性稳定系数仅增加 0.29%~0.45%;双重非线性稳定系数增加 21.1%~21.9%,但提高幅度逐渐减小。以工况 4 为例,钢管强度等级由 Q345 提高至 Q390、Q420、Q460、Q500 时,双重非线性稳定系数分别增加 5.9%、5.7%、4.6%、3.8%。

4.3 矢跨比的影响

矢跨比是影响中承式钢管混凝土拱桥稳定性的重要因素之一。通常情况下,矢跨比越小,拱轴线的压力越大。以矢跨比 1/4 为参考,在原模型的基础上改变拱桥的矢跨比,分析矢跨比对拱桥稳定性的影响,结果见图 7。

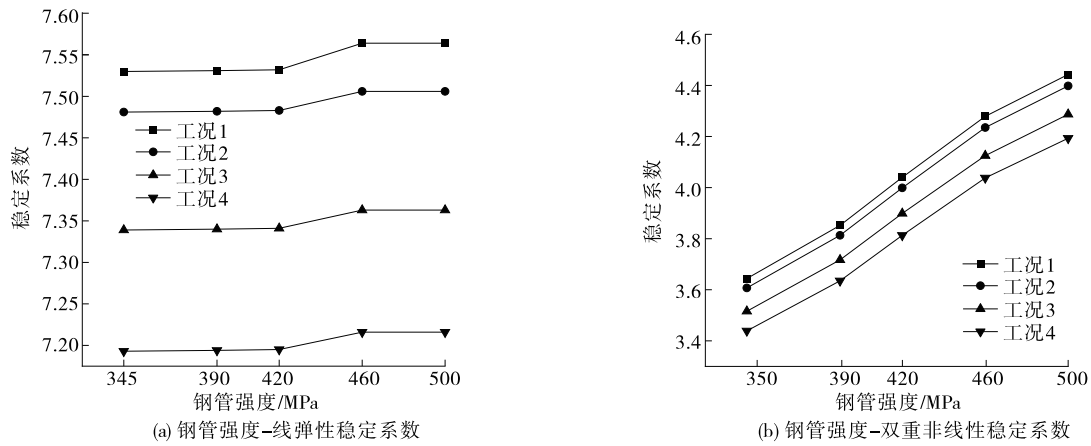


图 6 钢管强度与钢管混凝土拱桥稳定系数的关系

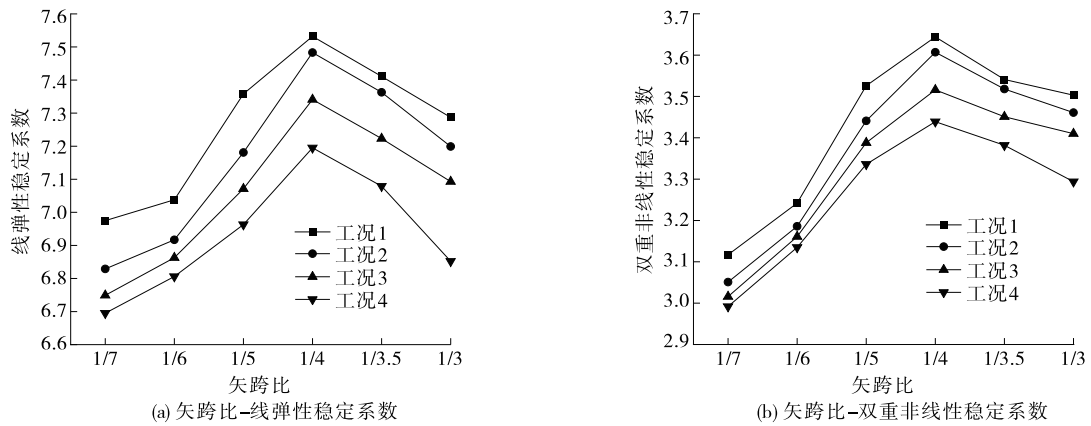
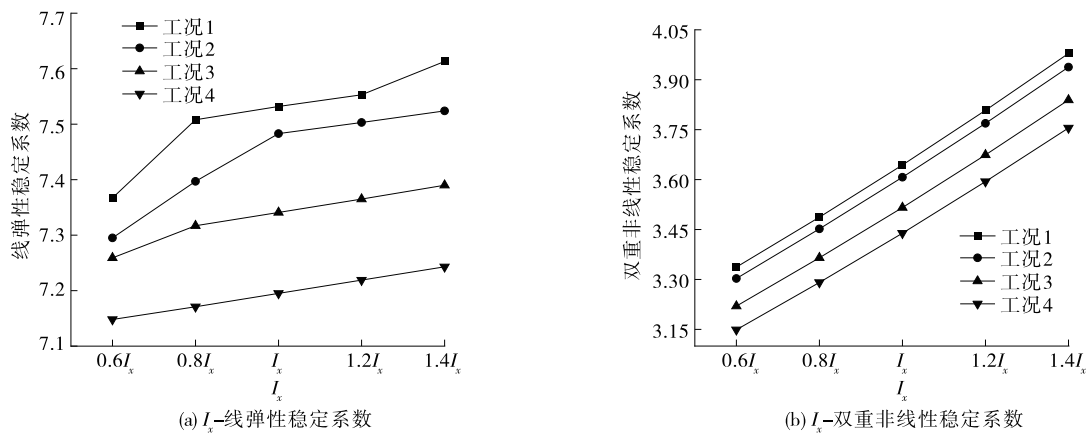


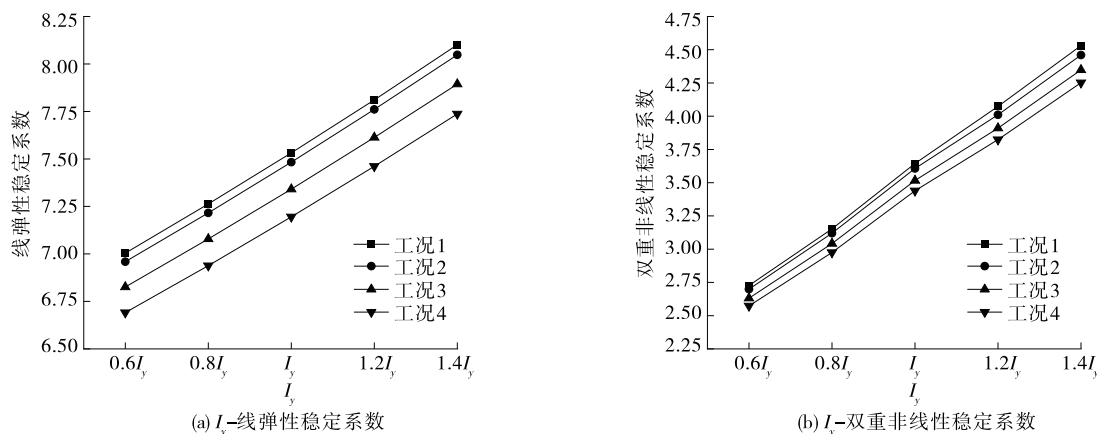
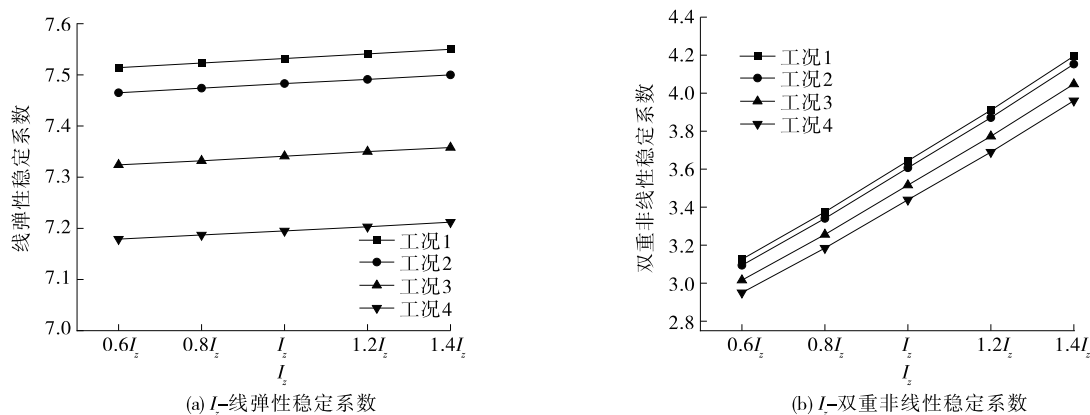
图 7 矢跨比与钢管混凝土拱桥稳定系数的关系

由图 7 可知:随着矢跨比从 $1/7$ 提高至 $1/3$,拱桥的稳定系数呈先增大后减小的趋势,矢跨比为 $1/4$ 时稳定系数最大,稳定性最强。矢跨比由 $1/7$ 增加到 $1/4$ 时,拱桥的稳定系数提高 $7.4\% \sim 9.6\%$,提高幅度较大;矢跨比超过 $1/4$ 时,稳定系数开始下降,矢跨比为 $1/3$ 时,与矢跨比为 $1/4$ 时相比,稳定系数降低 $3.4\% \sim 3.9\%$ 。

4.4 拱肋刚度的影响

拱肋作为钢管混凝土拱桥的主要受力构件,是整个桥梁的核心部分,也是拱桥稳定性研究的主要对象。拱肋的空间刚度主要包括抗扭刚度 I_x 、侧向抗弯刚度 I_y 、竖向抗弯刚度 I_z 。在原模型的基础上增大或减少拱肋刚度,分析其对结构稳定性的影响,结果见图 8~10。

图 8 拱肋抗扭刚度 I_x 与钢管混凝土拱桥稳定系数的关系

图 9 拱肋侧向抗弯刚度 I_y 与钢管混凝土拱桥稳定系数的关系图 10 拱肋竖向抗弯刚度 I_z 与钢管混凝土拱桥稳定系数的关系

由图 8~10 可知:随着拱肋刚度的增加,拱肋的稳定系数增大,但 3 种拱肋刚度对拱桥稳定性的影响程度存在差异。以工况 4 为例,抗扭刚度 I_x 增大或减小 20% 时,拱桥稳定系数变化率为 0.33%;侧向抗弯刚度 I_y 增大或减小 20% 时,拱桥稳定系数变化率为 3.7%;竖向抗弯刚度 I_z 增大或减小 20% 时,拱桥稳定系数变化率为 0.11%。在刚度变化情况相同的情况下,侧向抗弯刚度增大或减小时拱桥稳定系数变化率明显高于其他两种刚度,表明侧向抗弯刚度对结构稳定性的影响较大。在拱肋设计中,应重点关注侧向抗弯刚度的合理设计。

5 结论

本文采用有限元分析方法对某中承式钢管混凝土拱桥的稳定性进行计算分析,并分析主拱肋内填混凝土强度、钢管强度、矢跨比、拱肋刚度对其稳定性的影响。结论如下:

(1) 4 种工况下拱桥的稳定系数均满足规范要求,风荷载对拱桥稳定性的影响较小,该中承式钢管

混凝土拱桥成桥状态下抗风稳定性良好,结构安全可靠。

(2) 相较于线弹性稳定分析,几何非线性对拱桥稳定性的影响并不显著,而考虑双重非线性时拱桥稳定系数明显下降,分析拱桥稳定性时需考虑双重非线性因素的影响。

(3) 随着混凝土强度的提高,拱桥的稳定系数增大,结构承载能力增强。随着钢管强度的增大,拱桥的非线性稳定系数增大,但增大幅度逐渐减小。

(4) 矢跨比增大,拱桥的稳定系数先增大后减小,矢跨比为 1/4 时稳定系数最大。就稳定性而言,该桥矢跨比选择 1/4 较为合理。

(5) 侧向抗弯刚度、抗扭刚度和竖向抗弯刚度分别变化 20% 时,拱桥的稳定系数变化率分别为 3.7%、0.33%、0.11%,侧向抗弯刚度对拱桥整体稳定性的影响最大。

参考文献:

[1] 项贻强,竺盛,赵阳.快速施工桥梁的研究进展[J].中国

- 公路学报,2018,31(12):1-27.
- [2] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.
- [3] 李学松,张怡孝,高仲康,等.高强钢管-高强混凝土(HS-CFST)拱平面内承载能力研究[J].工程力学,2022,39(增刊1):115-120.
- [4] 涂俊,王玉银,刘永健,等.大跨钢箱拱-波形钢-桁架组合梁拱桥抗风性能[J].建筑科学与工程学报,2019,36(4):47-54.
- [5] 柴生波,杨清华,王秀兰,等.大跨径中承式钢箱系杆拱桥施工阶段稳定性分析[J].科学技术与工程,2022,22(18):8095-8102.
- [6] 金晓东,邹力,云俊,等.南浦溪特大桥钢管拱肋悬拼阶段拱脚约束方式研究[J].世界桥梁,2021,49(1):33-38.
- [7] 彭文韬,刘峰.基于非线性稳定理论的大跨钢箱形提篮拱桥结构分析研究[J].中外公路,2019,39(2):94-97.
- [8] 陈佳,胡文军.大跨度上承式钢管混凝土拱桥整体稳定性研究[J].铁道建筑,2020,60(8):16-19.
- [9] 杨吉新,梁亚兰,余越,等.横撑对大跨度钢管砼拱桥稳定性的影响分析[J].公路与汽运,2018(5):118-120.
- [10] 王青.大跨度铁路钢桁梁柔性拱桥的弹性稳定性[J].交通科学与工程,2018,34(4):16-21.
- [11] 傅金龙,黄天立,夏智.外倾式拱梁组合桥梁的稳定性研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(5):853-862.
- [12] 张继权,季日臣.铁路大跨度钢管混凝土拱桥弹性稳定性分析[J].铁道建筑,2020,60(8):12-15.
- [13] 王红伟,陈光辉,姜梅英,等.大跨度钢管混凝土拱桥稳定性问题研究综述[J].西部交通科技,2018(11):49-55.
- [14] 韩林海.钢管混凝土结构[M].北京:科学出版社,2000.
- [15] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTGD60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [16] 同济大学.公路桥梁抗风设计规范:JTGT3360-01—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [17] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院.公路钢管混凝土拱桥设计规范:JTGTD65-06—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [18] 赵攀攀.基于 Midas/Civil 的钢管混凝土拱桥双非线性稳定性分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2021.
- [19] 曾鑫彬.高强钢管-超高性能混凝土拱(UHCFST)稳定承载能力试验研究[D].广州:广州大学,2021.

收稿日期:2023-09-22

(上接第 91 页)

应根据建设条件、“三区三线”、重大不良地质,从路线布设进行多层次、多方案比选,选取合适的走廊,从而减小工程规模、降低实施难度;应基于历史遥感影像、无人机正射影像、勘测结果等,采用 BIM 等技术进行精细化设计,灵活选用技术指标;应结合自然景色、人文环境对生态环境进行恢复,减少人工痕迹,融路于景。多个项目按上述方法进行设计、实施,增强了公路的抗灾能力,提高了公路等级,改善了行车条件,基本达到了“安全、生态、舒适、畅通”的目标。

参考文献:

- [1] 文丽娜,王万江,何健杰,等.高寒高海拔高烈度地区高

速公路总体设计研究[J].公路与汽运,2022(3):80-85.

- [2] 吴明先,赵立廷,陈常明,等.西南山区高速公路总体设计问题与分析[J].公路,2022,67(5):1-8.
- [3] 刘小滔,薛佳,曹放,等.川西地区某省道改建工程路线设计选择与方案研究[J].公路与汽运,2021(2):93-95.
- [4] 程昊,泮俊.浅谈低碳高速公路设计[J].公路交通科技(应用技术版),2011,7(5):53-55.
- [5] 边世斌.山区高速公路设计与环境保护问题的探讨[J].交通标准化,2008(5):127-130.
- [6] 陈胜武.总体设计对路线方案比选的作用和影响[J].中外公路,2011,31(4):12-14.
- [7] 宁选杰.山区高速公路总体设计[J].中外公路,2010,30(6):10-13.

收稿日期:2023-11-23