

钢管混凝土拱桥横撑形式对稳定性的影响研究

周涛, 史召锋, 徐威

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 以一座200 m跨径的下承式钢管混凝土拱桥为研究对象, 采用数值模拟方法, 分析了不同横撑形式对结构基频、最大横向变形和整体稳定系数的影响。研究表明, 设置横撑能显著提高结构的横向刚度, 降低横向变形, 提升整体稳定性。其中, 设置横撑后, 结构基频最大可增加207%, 最大横向变形可减少90.4%, 整体稳定系数可增加399%。此外, 通过引入结构稳定性经济指标 η 评估横撑的经济性, 发现米字形横撑虽然提供较高的横向刚度和稳定性, 但其经济性低于K形和L形横撑。因此, 在满足结构稳定性要求的前提下, 建议优先选择经济性更优的K形或L形横撑, 可为同类型桥梁的设计提供参考。

关键词: 钢管混凝土; 钢管混凝土拱桥; 横撑; 稳定; 弹性稳定系数

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0078-04

Study on Influence of Bracing Forms on Stability of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges

ZHOU Tao, SHI Zhaofeng, XU Wei

(Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Taking a 200-m span through concrete-filled steel tube arch bridge as a research object, the numerical simulation method is used to analyze the effects of different bracing forms on the fundamental frequency, maximum lateral deformation and overall stability coefficient of the structures. The results indicate that the setting up of of bracing can significantly enhance the lateral stiffness of the structure, reduce the lateral deformation, and improve the overall stability. Specifically, the fundamental frequency of the structure can increase by 207%, the maximum lateral deformation can decrease by 90.4%, and the overall stability coefficient can increase by 399% after the bracing is set up. Furthermore, by introducing the structural stability economic index η to evaluate the economy of the bracing, it is found that the cross-shaped bracing provides the higher lateral stiffness and stability, but its economic efficiency is lower than K-shaped bracing and L-shaped bracing. Therefore, under the premise of meeting the structural stability requirements, it is recommended to give priority to the K-shaped bracing or L-shaped bracing with more economy, which can provide the reference for the design of similar bridges.

Keywords: concrete-filled steel tube; concrete-filled steel tube arch bridge; bracing; stability; elastic stability coefficient

0 引言

钢管混凝土结构(Concrete-Filled Steel Tube, CFST)作为一种独特的组合结构形式, 通过在钢管内部填充混凝土, 并利用钢管的径向约束作用限制混凝土的侧向膨胀, 使混凝土处于三向受压状态, 从而显著提高其抗压强度与变形能力^[1-3]。不仅提高了结构承载力, 还增加了结构延性。钢管混凝土拱桥以该结构作为拱肋, 凭借承载能力大、施工便捷与经

济性好等显著优势, 已在我国桥梁基础设施建设中得到广泛应用^[4-6]。

拱桥在服役期间需要承受包括车辆荷载、风荷载及潜在地震荷载等多种复杂荷载作用。若拱桥的稳定性不足, 在这些荷载的共同作用下, 可能导致结构发生屈曲失稳, 进而引发拱肋的过度变形甚至破坏, 严重影响桥梁的正常功能并威胁结构安全^[7-8]。因此, 在钢管混凝土拱桥的设计、施工及后期维护过程中, 确保其稳定性是至关重要的任务之一, 需要深入探讨各类因素对稳定性的影响, 并采取相应的措施加以保障。

横撑作为钢管混凝土拱桥结构中的关键构件之一, 可以显著增强桥梁的横向刚度, 分散外部荷载,

收稿日期: 2025-01-21

作者简介: 周涛(1982—), 男, 学士, 正高级工程师, 从事桥梁结构设计和研究工作。

通信作者: 徐威(1999—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事桥梁结构设计 and 研究工作。电子邮箱: xuwei_t@163.com

减小局部变形,从而提高拱肋的横向稳定性,防止在荷载作用下发生横向变形或失稳^[9]。如何选择合适的横撑方案,成为设计钢管混凝土拱桥时必须解决的重要问题。

本文以一座 200 m 跨下承式钢管混凝土拱桥为例,通过数值模拟的方式,对钢管混凝土拱桥横撑的最优形式进行研究,探讨其对结构稳定性与受力性能的影响,对不同横撑的经济性进行对比分析,可为同类型桥梁提供设计借鉴。

1 稳定性计算原理及规范要求

现行《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)^[10]与《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013)^[11]均规定主拱弹性整体稳定系数不应小于 4.0 来保证结构的稳定性,因此本文主要采用结构弹性整体稳定系数作为稳定性评价指标。同时,本文所采用的案例为 200 m 跨钢管混凝土拱桥,根据上述规范,可仅开展弹性特征值稳定分析,即第一类稳定问题。

对于弹性特征值稳定分析,结构极限平衡状态方程可写为^[12]:

$$([K_0] + \lambda[K_G])\{\Delta\delta\} = 0 \tag{1}$$

式中:[K_0]为弹性刚度矩阵;[K_G]为几何刚度矩阵; $\{\Delta\delta\}$ 为单元节点位移增量; λ 为稳定系数。

通过上式可计算得到 λ 最低值作为结构整体稳定系数。

2 工程概况

该桥桥型设计为计算跨径 $L=200\text{ m}$ 的下承式钢管混凝土桁架拱桥,桥面宽度 8 m,双向两车道,设计荷载采用城—A 级,总体布置见图 1。拱轴线采用悬链线,拱轴系数 $m=1.5$,计算矢高 $f=40\text{ m}$,设计矢跨比为 1/5。

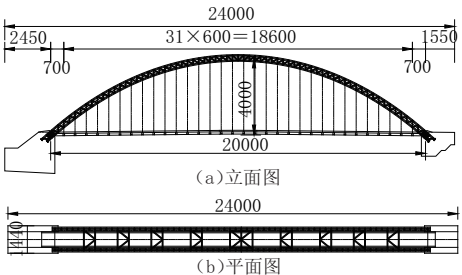


图 1 桥梁总体布置(单位:cm)

拱肋采用等截面钢管混凝土桁架结构,截面高度为 3.5 m,宽度为 2.2 m。单个拱肋采用 4 根 $\phi 820\text{ mm}$

钢管,壁厚 20 ~ 16 mm,拱肋中心距 10.9 m,桥梁宽跨比为 1/18.35。桥梁断面见图 2。

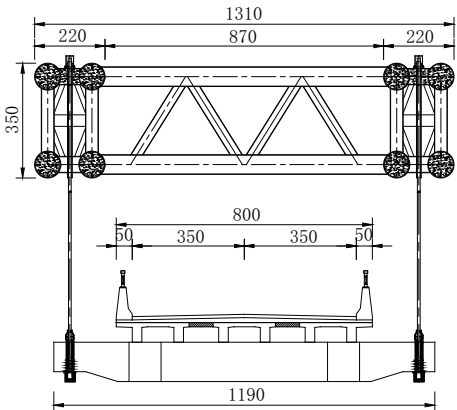


图 2 桥梁断面布置(单位:cm)

拱肋之间设置 9 道空钢管 L 形横撑结构,横撑上下弦杆采用 $\phi 600\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 钢管,斜杆采用 $\phi 500\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 钢管,腹杆采用 $\phi 325\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管。吊杆处上、下横联采用 $\phi 500\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 钢管,其余横联及拱肋腹杆均采用 $\phi 402\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管。拱肋弦杆内灌注 C55 自密实补偿收缩混凝土,杆件钢材均采用 Q355C 钢材。吊杆采用整束挤压式钢绞线吊杆,1# ~ 3#吊杆索体采用 16 $\phi 15.2$ 钢绞线,4# ~ 16#吊杆索体采用 12 $\phi 15.2$ 钢绞线,吊杆纵向间距为 6.0 m,钢绞线抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 。桥道系采用混凝土格子梁,横梁采用预制预应力混凝土 T 梁,两道横梁之间采用钢筋混凝土纵梁连接,纵梁预制段与横梁共同预制。桥面板采用预制装配式钢筋混凝土 II 梁,横向布置 3 片 II 梁。预制结构采用 C50 混凝土,现浇结构采用补偿收缩 C50 混凝土。

3 计算模型的建立

结构计算采用桥梁领域通用结构分析及设计软件 MIDAS Civil 建立全桥有限元计算模型,吊杆采用桁架单元模拟,其余构件均采用梁单元模拟。钢管混凝土结构采用施工阶段联合截面,在不同节段分别激活相应截面。拱脚处均采用固结约束体系,模型共包含梁单元 3 419 个,桁架单元 64 个。计算荷载考虑恒荷载、风荷载、温度荷载与移动荷载等,相关荷载取值按现行《公路桥涵设计通用规范》、《公路桥梁抗风设计规范》等取值。其中移动荷载通过追踪拱脚单元轴力最大工况下的移动荷载布置,将其转换为均布荷载与集中力施加到结构上作为分析荷载。通过屈曲分析计算桥梁弹性整体稳定系数,计算模型见图 3。



图3 结构有限元模型

4 横撑影响分析

分别考虑了无横撑、一字撑、L形撑、K形撑、Δ形撑、X形撑、米字撑等7种横撑形式,各横撑结构见图4。通过有限元模型计算不同横撑形式下结构的基频、最大横向变形、整体稳定系数等。仅考虑横撑形式对结构特性的影响,因此横撑杆件的尺寸、长度均保持不变,横撑数量均为9道。

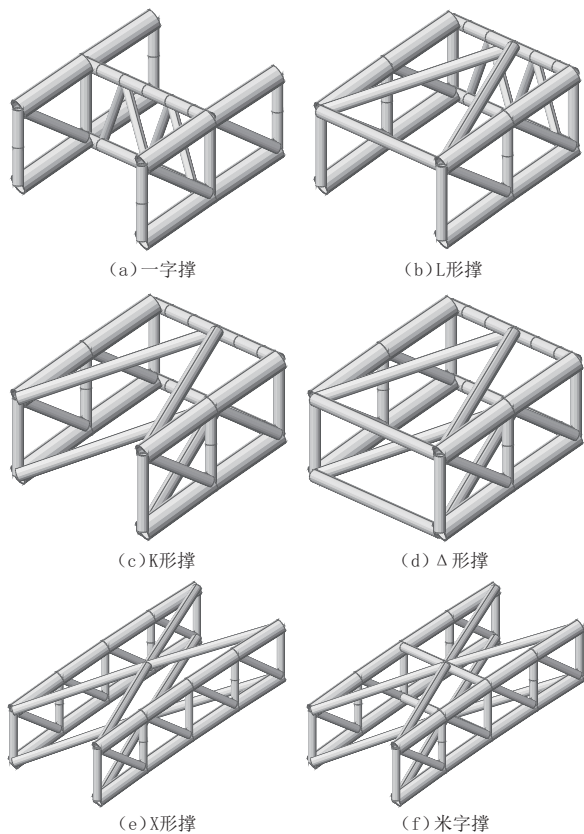


图4 考虑的横撑形式

各类横撑下结构基频对比见图5,所有结构一阶振型均为拱肋面外横向弯曲。可以看到横撑对结构基频具有较大影响,不设置横撑时,结构基频仅为0.167 Hz,而设置米字形横撑时,结构基频为0.513 Hz,增加幅度达207%。

各类横撑下结构最大横向变形对比见图6,最大横向变形均发生在拱肋顶部。在无横撑情况下最大变形为366 mm,而设置横撑后横向变形大幅降低,采用米字形横撑时,横向变形为35.1 mm,仅为无横撑情况的9.6%。因此横撑对提升结构横向刚度,降

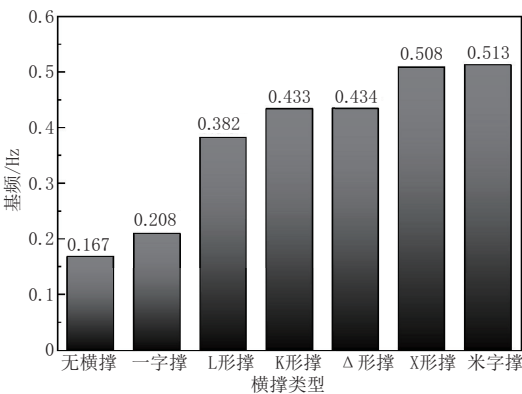


图5 横撑形式对结构基频的影响(单位:Hz)

低横向变形具有决定性作用。合理选择横撑形式与布置方案,是保证结构的横向稳定性的有效举措。

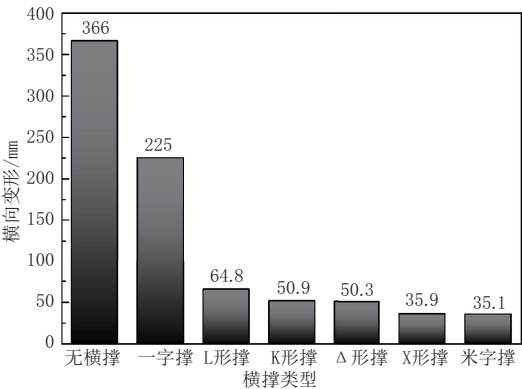


图6 横撑形式对结构最大横向位移的影响(单位:mm)

不同横撑形式下结构整体稳定系数对比见图7,各结构一阶失稳模态均为拱肋面外失稳。在无横撑和一字横撑情况下,结构整体稳定系数小于4.0,不满足规范要求,显然无法用于实际结构设计。而采用其他横撑形式时,结构整体稳定系数均大于4.0。其中米字撑稳定性最优,稳定系数为9.03,相对于不设置横撑,米字撑稳定系数增长幅度达399%。横撑形式对于保证结构整体稳定起着至关重要的作用,不同横撑形式在保障结构稳定性方面存在显著差异。

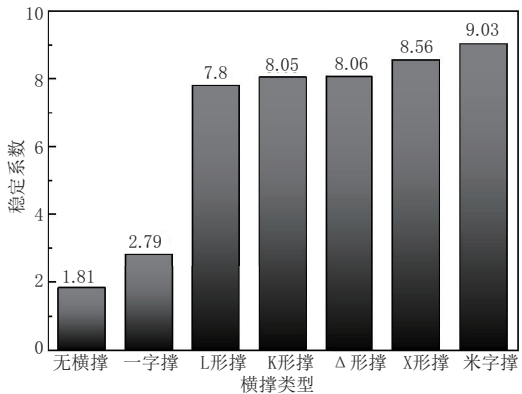


图7 横撑形式对结构整体稳定系数的影响

通过上述分析可以看到,米字撑可提供最大的横向刚度与整体稳定系数,但在实际设计中,除保证

结构整体稳定性外,还应考虑经济性因素,避免结构造价过高。本文提出稳定性经济指标 η :

$$\eta = \frac{t}{\lambda} \tag{2}$$

式中: t 为横撑用钢量,t; λ 为结构整体稳定系数。

通过该指标来对不同横撑的经济性进行评价,计算得到各横撑形式对应的稳定性经济指标 η 见图 8。

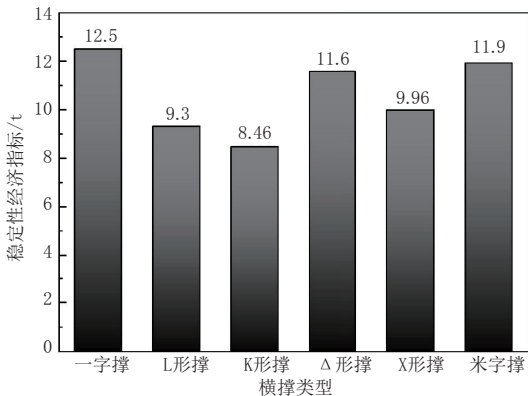


图 8 不同横撑的稳定性经济指标(单位:t)

结果表明,虽然米字撑提供的刚度与稳定性最大,但经济性并不理想。相比之下,K形撑与L形撑在经济性方面表现更优。在相同稳定系数情况下,K形撑可比米字撑节省 29% 的钢材。因此,在保证结构整体稳定性满足规范要求的情况下,建议优先选择 K形和 L形等经济性更优的横撑形式。

5 结 语

本文以一座 200 m 跨径的下承式钢管混凝土拱桥为例,计算了在无横撑、一字撑、L形撑、K形撑、Δ形撑、X形撑、米字撑等横撑形式下结构的基频、最大横向变形与结构整体稳定系数等结构特性参数,得到结论如下:

(1)横撑对增加结构横向刚度,降低横向变形,

提升整体稳定系数具有决定性作用,相比不设置横撑,设置横撑后结构基频最大可增加 207%,最大横向变形最多可减少 90.4%,结构整体稳定系数最多可增加 399%。因此结构设计时可通过合理选择横撑形式与布置方案来增加结构横向刚度,保证横向稳定性。

(2)提出了结构稳定性经济指标 η 来评估横撑的经济性,结果表明:米字形横撑虽然可提供较高的横向刚度与稳定性,但其经济性却低于 K形横撑与 L形横撑。因此在结构设计时在保证结构整体稳定性满足规范要求的情况下,建议优先选择经济性更优的 K形横撑与 L形横撑。

(3)钢管混凝土拱桥的横撑设计是一个综合性问题,需要充分考虑结构稳定、造价、美观、行车等因素。

参考文献:

[1] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S].
[2] 韩林海,陶忠,刘威. 钢管混凝土结构——理论与实践[J]. 福州大学学报(自然科学版),2001(6):24-34.
[3] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学,2005.
[4] 陈宝春,韦建刚,周俊,等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报,2017,50(6):50-61.
[5] 郑皆连,王建军. 中国钢管混凝土拱桥[J].Engineering,2018,4(1):306-331.
[6] 郑皆连,王建军,牟廷敏,等. 700 m 级钢管混凝土拱桥设计与建造可行性研究[J]. 中国工程科学,2014,16(8):33-37.
[7] 张建民,郑皆连,秦荣. 拱桥稳定性研究与发展[J]. 广西交通科技,2000(增刊1):1-7;18.
[8] 黄云,张清华,叶华文,等. 钢管混凝土系杆拱桥空间稳定性分析[J]. 桥梁建设,2014,44(4):50-56.
[9] 董锐,陈亚钊,郑穆然,等. 带 L形横撑的大跨 CFST 桁式拱桥稳定性分析[J]. 土木工程学报,2020,53(5):89-99.
[10] JTG/T D65-06—2015, 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
[11] GB 50923—2013, 钢管混凝土拱桥技术规范[S].
[12] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.