

索在索-拱结构中的作用

剧锦三 王芝芳 郭彦林

(中国农业大学水利与土木工程学院) (清华大学)

摘要 应用非线性有限元方法研究了索对索-拱结构平面内稳定性的影响。使用牛顿-拉弗森法和弧长法对荷载位移平衡路线进行跟踪研究,考虑了不同荷载作用及不同矢跨比对索-拱结构稳定性能及变形性能的影响,并从中获得了一些有益的结论。

关键词 索拱结构; 非线性屈曲; 极限荷载; 后屈曲

分类号 TU 311.41

Effect of Cables on Stability Analysis of Cable-arch Structure

Ju Jinsan Wang Zhifang

Guo Yanlin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU) (Tsinghua University)

Abstract The effects of cables on the instability behavior of the structure hybridized by I-section arch and tensile cables have been studied theoretically by using the large deflection (displacement) finite element approach with beam and cable elements, in conjunction with arc-length method and Newton-Raphson iteration. A full load-displacement equilibrium path is obtained, including pre-buckling and post-buckling equilibrium path. It is found from the load-displacement path that the cables have affect significantly to the structure's behavior, including its limit load-carrying capacity and its load-displacement paths, and especially they greatly increase the limit load-carrying capacity of the hybridized structure by near 40% only in the case of the half-span uniformly distributed load. Furthermore, the effects of rise-span ratio on the limit load-carrying capacity are also involved in the theoretical investigation. Some conclusions to the design of the cable-arch structure are drawn from the numerical results obtained in the study.

Key words cable-arch structure; nonlinear bucking analysis; limit load-carrying capacity; post buckling

拱结构^[1]自重小、跨度大,且可充分利用材料强度,在全跨荷载作用下具有承载力高、变形小等优点;但是,在半跨荷载作用下拱的变形较大,承载力会有较大的下降^[2,3]。为了克服这一缺点,笔者提出了索-拱结构^[4]形式。索-拱结构旨在通过合理的布索,改善结构的受力和变形状态,控制结构变形的发展,增大它的稳定极限承载力。

关于纯拱结构的受力性能和稳定性能,前人已有不少研究^[5],但对索-拱结构的研究较少。索的单拉性在加载过程中发挥着特殊的作用,它对拱结构的受力状况、稳定性和屈曲前后的荷

收稿日期: 1999-09-15

剧锦三,北京清华东路17号 中国农业大学(东校区)59信箱,100083

载位移曲线有很大的影响。索是一种自重小且抗拉强度大的构件,与拱共同工作,会改变拱的变形性能及受力状况。

本文中重点对 2 种不同布索形式的索-拱结构在荷载作用下的变形及稳定性进行分析和研究。通过研究不同布索形式对结构屈曲前后性能的影响,可针对不同的荷载控制模型采用不同的布索方案;通过对在不同荷载作用形式和不同矢跨比下的索-拱结构的非线性稳定分析,考察其稳定极限承载力及索对其稳定性和变形性能的影响。

1 基本理论

采用有限元方法^[6]对结构进行分析,使用索单元和梁单元。分析基于以下假设:

- 1) 分析是在弹性范围内。
- 2) 只考虑结构在荷载平面内的作用。

对于非线性屈曲问题,求解过程是一个逐步加载进行平衡迭代的过程。本文中使用了牛顿-拉弗森法和弧长法,索单元和梁单元都是非线性单元。对一个单元使用虚位移原理推导出下面的非线性方程^[7]:

$$\Phi\delta = F - BTdV = 0$$

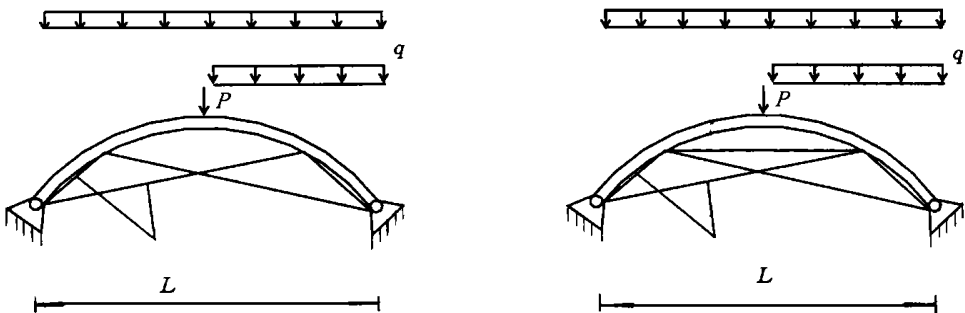
其中: F 是体力和面力的等效节点向量; B 是应变增量矩阵; T 是应力向量; $\Phi\delta$ 是节点不平衡向量。在每次迭代时,结构位移增量 $\Delta\delta$ 可通过求解线性方程 $\Phi\delta = K_r\Delta\delta$ 得到,其中 K_r 是由弹性刚度阵和几何刚度阵组合而成的整体刚度阵。

2 算例及分析

基于牛顿-拉弗森法和弧长法^[8,9]对索-拱结构的非线性分析进行全平衡过程跟踪,包括通过极值点及后屈曲过程的全过程研究。

2.1 索对拱结构极限承载力及平衡过程的影响

图 1 为 2 种不同布索形式的索-拱结构示意图。荷载形式有集中荷载、半跨均布荷载、全跨均布荷载 3 种形式;拱的截面形状是工形,其腹板和翼缘尺寸分别为 358mm × 13mm 和 400mm × 21mm;索是 14 根直径为 5mm 的钢绞线;结构跨度 40m,两端铰接;矢跨比 0.25。



P —集中荷载, q —均布荷载, L —跨度

图 1 2 种布索形式的索-拱结构

下面用实例说明索对拱结构变形及稳定性的影响。

表 1 示出无索拱与有索拱的不同极限承载能力。可以看出,在集中荷载作用下,无索拱与有索拱的极限承载力非常相近,但是在半跨均布荷载作用下,有索拱的极限承载力比无索拱提高约 $40 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,提高了约 36%。索明显地提高了结构的承载能力,且形式 2(图 1(b))在全跨荷载作用下的极限承载力比无索拱提高了约 7.4%。这是因为水平索在拱的上部形成一个小拱,提高了结构的承载力。

表 1 无索拱与有索拱的极限荷载

拱的形式	集中荷载/kN	半跨均布荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	全跨均布荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
无索拱	3 358	109.5	195.2
图 1(a)有索拱	3 360	149.7	191.8
图 1(b)有索拱	3 300	149.6	209.8

拱在半跨荷载作用下,其变形呈现为加载半跨向下挠曲,非加载半跨向上挠曲的变形规律。通过沿弧面 $1/4$ 和 $3/4$ 处施加钢索,并分别与拱脚相连。对于这样的布索形式,无论半跨荷载作用在哪一边,钢索都能有效的控制向上拱起的挠曲变形。

图 2 是无索拱和有索拱(图 1(a))在半跨荷载作用下结构顶点的荷载-挠度曲线,比较图 2(a)和(b)可以看出:第一极值点 A 所对应的荷载和变形都大不相同。图 2(a)中 A 点的荷载值是 $109.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,图 2(b)中 A 点的荷载值是 $149.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$;变形相差更大,图 2(a)中 A 点的挠度是 3.1 m ,而图 2(b)中 A 点的挠度仅为 0.338 m 。这说明索可以非常有效地控制结构的变形。

当跟踪图 2(a), (b) 荷载-挠度曲线全过程时,会出现 2 个正值极值点 A 和 C。这是 2 次变形的跳跃。第 2 极值点 C 只是一个理论点,没有实际意义。图 2(b)中的 C 点是尖点,不同于图 2(a)中光滑曲线上的 C 点,这是由于索是柔性构件,只能单向受拉,而在受压时会退出工作,所以会造成索时而参与工作时而退出工作的情况,形成图 2(b)所示的尖点。

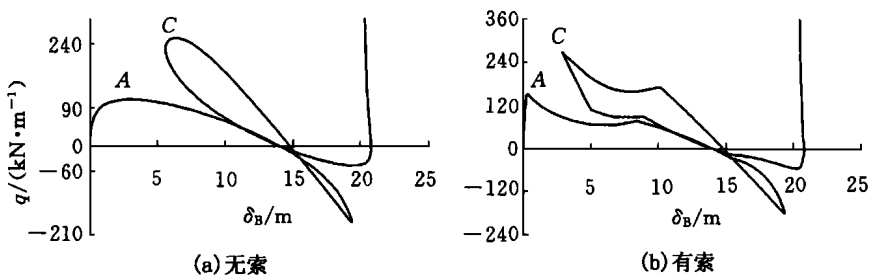


图 2 半跨均布荷载作用下结构顶点的荷载-挠度曲线

图 3 是跨中集中荷载作用下有索和无索结构顶点的荷载-挠度曲线。可以看出,索对集中荷载作用下结构顶点的变形过程及挠度影响不大。

图 4 是全跨均布荷载作用下有索和无索结构顶点的荷载-挠度曲线。从这 2 条曲线可以看到,有索结构的第一极值点的挠度是 2.7 m ,无索结构的第一极值点的挠度是 3.4 m ,而且有索结构的最大负位移也小于无索结构,说明索对全跨均布荷载作用时的挠度有控制作用。

2.2 不同矢跨比对结构极限荷载的影响

不同矢跨比时半跨荷载作用下结构的极限荷载见表 2。可以看出,有索结构当矢跨比小于

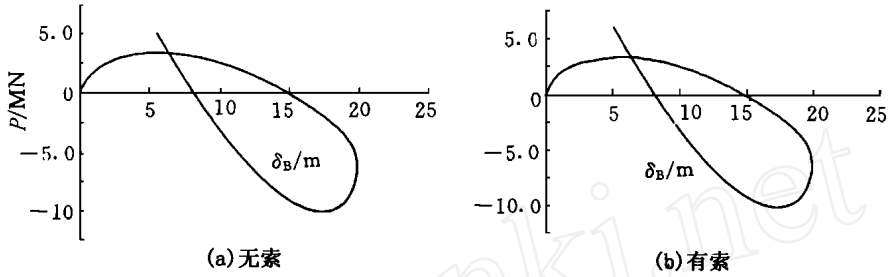


图 3 集中荷载作用下结构顶点的荷载-挠度曲线

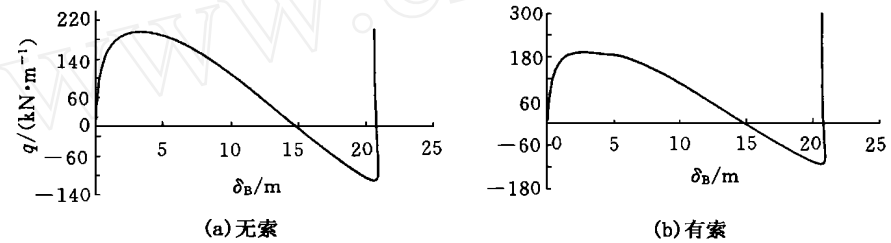


图 4 全跨均布荷载作用下结构顶点的荷载-挠度曲线

0.4 时, 极限荷载随矢跨比的增大而增大; 而当矢跨比继续增大时, 极限荷载却开始下降。说明半跨荷载作用下, 此种结构的最佳矢跨比是 0.4 左右。同样可知, 无索结构的最佳矢跨比是 0.35 左右。

表 2 不同矢跨比时半跨荷载作用下结构的极限荷载 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$

拱的形式	矢跨比					
	0.20	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
图 1(a) 有索结构	124.4	187.1	228.7	308.1	293.3	284.6
无索结构	110.6	123.4	127.6	123.6	119.3	115.6

3 结 论

- 1) 索可以非常有效地控制拱结构的失稳和破坏模式, 提高其极限承载能力。
- 2) 对于图 1(a) 的布索形式, 索可以有效地影响半跨荷载作用时的极限荷载, 而对其他 2 种形式荷载的影响很小; 对于图 1(b) 的布索形式, 索不仅可以有效地影响半跨荷载作用时的极限荷载, 而且对全跨均布荷载的极限荷载也有影响, 所以索的布置要根据荷载情况而定。
- 3) 索可以有效地控制结构的变形, 可以影响结构整个平衡路径的特征。
- 4) 对图 1(a) 所示结构形式在半跨荷载作用下, 不加索的最佳矢跨比为 0.35 左右, 加索的最佳矢跨比为 0.4 左右。

参 考 文 献

- 1 郭彦林, 郑永会 斜拉式彩板波形拱壳屋面结构的极限承载力研究 土木工程学报, 1999, 32(4): 51~ 56
- 2 郭彦林, 郑浩然 彩板波形拱壳屋面结构的折曲屈曲实验研究 工业建筑, 1997, 27(11): 30~ 33
- 3 郭彦林, 郑浩然 彩板波形拱壳屋面结构的破坏机理 工程力学, 1997(增刊): 597~ 605
- 4 剧锦三, 郭彦林 网壳结构稳定研究的现状及展望 见: 中国建筑金属结构协会及清华大学编 98 中国建筑钢结构工程暨学术会议论文集 北京: 企业出版社, 1998 40~ 46
- 5 Timoshenko S. Theory of Elastic Stability. London: Mc Graw-Hill Book Company. Inc 1936 225~ 230
- 6 Giöncü V. Buckling of reticulated shells: State of the art International Journal of Space Structures, 1995, 10(1): 1~ 20
- 7 Teng J G, Lou Y F. Analysis of bifurcation buckling in shell of revolution after axisymmetric snap-through In: Proceedings of A sia-pacific Conference on Shell and Spatial Structures Beijing: China Civil Engineering Society, 1996 579~ 586
- 8 Karim A bedi Gerard A R Parke Dynamic propagation of local instability in singlelayer braced dome In: Proceedings of A sia-pacific Conference on Shell and Spatial Structures Beijing: China Civil Engineering Society, 1996 556~ 563
- 9 Du Shougun, Sun Jianheng and Xia Hengxi Stability behavior investigation of braced barrel vaults International Journal of Space Structures, 1993, 8(4): 62~ 68

本刊加入《中国学术期刊(光盘版)》 和“中国期刊网”告作者书

为适应我国信息化建设需要, 扩大作者学术交流渠道, 本刊自 1996 年第 1 期起入编《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”。《中国学术期刊(光盘版)》免收作者论文发表费, 并免费提供作者文章引用统计资料, 作者可直接向设在清华大学的中国学术期刊文献检索咨询总站查询本人在《中国学术期刊(光盘版)》中发表文章的引用情况。如作者不同意将本人文章编入该数据库, 请向本刊声明, 本刊将做适当处理。

《中国农业大学学报》编辑部
2000 年 4 月