

文章编号:1673-9468(2008)04-0014-03

受压钢构件失稳的主动控制研究

吴天河,邓长根

(同济大学土木工程学院建筑工程系,上海 200092)

摘要:阐述了受压钢构件失稳主动控制的设计思路,从理论上分析受压钢构件失稳主动控制的可行性,并且介绍了几种典型失稳控制技术的相关研究进展,并总结了失稳主动控制技术的设计和计算要点、适用性以及受压钢构件失稳主动控制中需要进一步研究的问题。

关键词:压杆失稳;失稳主动控制;可行性分析

中图分类号: TU323

文献标识码: A

Study on active buckling control of compression steel members

WU Tian-he, DENG Chang-gen

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The collapse induced by the buckling of compression steel members is severe in steel structures engineering. It is a new field to control the buckling of compression steel members and to increase its stability bearing capacity with the technology of active buckling control. Active control of buckling has a good prospect because of its explicit control mechanism and its well control effect. After the design idea of this technology was introduced, this paper analyzed the feasibility of buckling control of compression steel members. Then the related research progress of several typical buckling control methods and their applicability together with the outline of their design and analysis were represented in this paper. And lastly some issues further studied were put forward.

Key words: buckling of compression member; active control of buckling; feasibility analysis

受压钢构件的稳定问题是钢结构设计中需要考虑的重要环节,现代钢结构工程史上不乏因受压钢构件失稳破坏致使整个结构出现严重工程事故的先例^[1]。1907年加拿大圣劳伦斯河上的钢桥,由于悬臂钢桁架中个别受压钢构件失稳而造成全桥坍塌;1978年美国哈特福特的大跨网架结构体育馆也是因压杆屈曲突然倒塌;1988年太原市某屋盖工程的平板网架结构由于压杆连续失稳造成脆性垮塌;1992年深圳某展览中心展厅网架因积水过多荷载过大致使腹杆受压失稳整个网架倒塌。这些工程事故均因受压钢构件失稳造成了严重的经济损失,有的还引起了重大的人员伤亡,因此在钢结构设计中就非常有必要采取切实可行的措施来避免受压钢构件发生失稳。除了充分发掘受压钢构件稳定性能的潜力以及完善其稳定计

算理论^[2],利用失稳主动控制技术控制受压钢构件的失稳是一个新的研究方向。

1 设计思路

结构振动控制技术中的主动控制是利用外部能源在结构物受到外部激励而发生振动的过程中,通过主动控制元件瞬时施加控制力或瞬时改变结构的动力特性来衰减结构物的振动幅值。失稳主动控制也是通过主动控制元件来减小梁柱等基本构件的变形幅值。然而两者之间有着本质区别:结构振动控制时预先假设结构物是稳定的,而失稳控制时结构或构件等本身则有不稳定的倾向,结构或构件趋于发生严重的倒塌破坏而不仅仅是振动。

收稿日期:2008-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50478107)

作者简介:吴天河(1978-),男,安徽安庆人,工学博士,从事钢结构稳定的研究。

受压钢构件的失稳主动控制的设计思路可以概括为“防患于未然”。在传感器检测到受压钢构件即将发生失稳时,通过作动器施加作动力驱使构件恢复到平衡位置,这时受压钢构件仍然近乎直线,因此将承受几乎所有的轴向荷载,而主动控制力不需直接承担外荷载,仅仅需要其消除外部扰动以及初始缺陷等所带来的失稳隐患。

2 可行性分析

两端铰接的轴心受压钢构件在微小弯曲变形情况下对其进行弹性弯曲屈曲分析可以求解出构件对应于各阶屈曲模态的屈曲荷载^[2],其中的第一阶屈曲荷载(又称欧拉荷载)因低于其它各阶屈曲荷载而成为构件稳定承载力的决定因素。可以通过如图 1 所示的简单的铰接刚性杆单元模型来模拟杆件在轴心压力作用下的弯曲变形,通过推导并粗略估计控制轴压杆件第一阶屈曲失稳所需要的主动控制弯矩 M (或力 F)的大小。

模型中杆件受轴向压力 P 作用时杆端转角为 θ ,将轴压杆件受轴压弯曲近似模拟为两个刚性杆在 A 点通过一个抗弯弹簧铰接连接,图 1(a)所示是将主动控制弯矩 M 作用在杆件上 A 点附近,轴压力仍然沿着构件原来的轴线作用。弹簧的抗弯弹性常数 k_s 取杆件第一阶屈曲模态弯曲刚度,利用图 1 (b)所示隔离体建立力矩平衡方程得

$$P_{cr} \cdot (l \sin \theta) / 2 - k_s \cdot (2\theta) = 0 \quad (1)$$

式中 P_{cr} —杆件的第一阶屈曲荷载 ($P_{cr} = P_E = \pi^2 EI / l^2$); l —杆件长度;小变形情况下 $\sin \theta \approx \theta$; $k_s = P_{cr} \cdot l / 4$ 。

对于图 1(a)所示的刚性杆,运用能量法建立能量方程

$$\Pi = U + V = 1/2 \cdot k_s \cdot (2\theta)^2 + [-P(l - l \cos \theta) - M \cdot (-2\theta)] \quad (2)$$

在平衡状态,由 $\partial \Pi / \partial \theta = 0$ 及小变形情况下可推出主动控制弯矩

$$M = (Pl - 4k_s) \cdot \theta / 2 = (P - P_{cr}) \cdot l \theta / 2 \quad (3)$$

与在杆件上 A 点附近施加主动控制弯矩 M 这种控制方法不同,若在 A 点施加主动控制力 F 如图 1(c)所示,则同样运用能量法建立能量方程

$$\Pi = U + V = 1/2 \cdot k_s \cdot (2\theta)^2 + [-P(l - l \cos \theta) - F \cdot (-l \sin \theta) / 2] \quad (4)$$

在平衡状态,由 $\partial \Pi / \partial \theta = 0$ 及小变形情况下可推出主动控制力

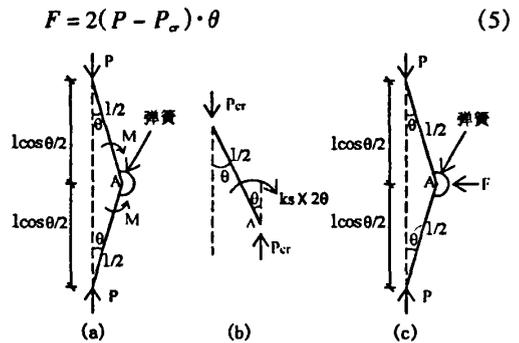


图1 两端铰接轴心受压钢构件模型
Fig.1 The mode of an axial compression member with pinned ends

在 l, θ 已知的情况下,即可通过式(3)或式(5)粗略估算出控制轴压杆件第一阶屈曲失稳所需的主动控制弯矩 M (或力 F)的大小。例如对于一根长为 5m 截面为 0.1m × 0.1m 的钢杆,当轴向压力 P 的值比 P_{cr} 高出 5.0kN 时,只需在 A 点附近施加大小为 $1.25 \times 10^{-2} \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的控制弯矩或在 A 点施加大小为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ kN}$ 的控制力就足以控制轴压杆件第一阶屈曲失稳;而将杆件的稳定承载力从 $6.77 \times 10^2 \text{ kN}$ 提升到 $2.7 \times 10^3 \text{ kN}$ 时(即轴向压力 P 为第一阶屈曲荷载 P_{cr} 的 4 倍),只需在 A 点附近施加大小为 5.08kN·m 的控制弯矩或在 A 点施加大小为 4.06kN 的控制力。

需要特别指出的是实际上所需的控制力应该大于由式(3)或式(5)所推导的上述数值,原因有两个方面:一方面是由于模型忽略了材料在 A 点的连续性,并且也未考虑高阶屈曲模态对第一阶屈曲模态的影响;另一方面在实际的失稳控制发生时,系统的作动装置施加的力不是静止状态的,因而动能的损耗也没有考虑。

3 粘贴压电材料的失稳主动控制

伴随着智能材料的提出和发展,大应变、高强度压电材料的研制成功为压电材料在主动控制领域中的应用提供了可靠的保证^[3],压电陶瓷作动器在钢结构稳定控制领域展示了良好的应用前景。压电陶瓷作动器对受压钢构件进行失稳主动控制主要是利用压电材料的机电耦合效应,通过施加控制电压使得压电作动器本身变形对结构产生驱动作用,是一种应变作动器。如图 2(a)所示,当电场极化方向平行于 Z 轴时,压电陶瓷 Z 轴方

向上将产生应力导致收缩变形, X轴和Y轴方向上将发生伸展变形。X轴方向的伸展(或收缩)变形结果相当于对杆件施加了弯矩。如图2(b)所示, 贴在上下表面的压电陶瓷分别受到不同方向的电场极化后, 上表面收缩而下表面伸展, 因而对杆件施加了弯矩。

Andrew A. Berlin^[4]利用压电陶瓷作动器对钢压杆作了失稳的主动控制试验研究。10个压电陶瓷作动器和10个电阻应变测量仪在钢压杆的两表面成对间隔布置, 结果显示通过控制前两阶屈曲模式, 屈曲荷载由未控制时的5.27N提升到控制后的29.88N, 当轴向压力超过29.88N时产生第二阶屈曲模式破坏而第一阶模式仍旧得到控制, 在主动控制器关闭后钢压杆回到第一阶屈曲模式。

Chandrashekara与Bhatia^[5]将单个的压电陶瓷作动器装置在板的中心, 运用有限元数值分析模拟了板的单轴受压第一阶屈曲失稳, 利用线性控制算法对板的单轴屈曲失稳进行了主动控制研究。他提出了一个环氧组合板模型(这种有限元模型比Andrew A. Berlin用的9节点等参数四边形板单元更加复杂), 并运用有限元方法模拟了板的轴向承载情况, 模拟结果显示其屈曲荷载提高了10%左右。

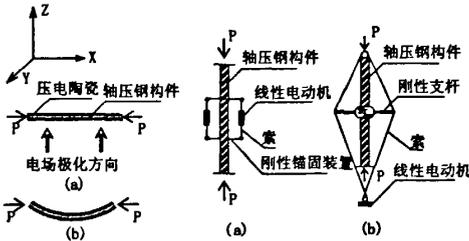


图2 压电陶瓷作动

Fig. 2 Piezoelectric ceramic actuation

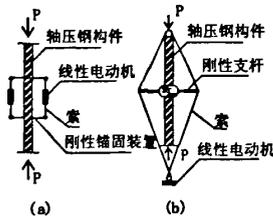


图3 张拉索作动

Fig. 3 Pulling tendons actuation

Meressi与Paden^[6]探讨了失稳主动控制的可行性, 证实利用电阻应变测量仪和压电PVDF (Polyvinylidene Fluoride)薄膜通过线性反馈可以控制钢压杆的第一阶屈曲模式的稳定。文中将PVDF薄膜连续贴在钢压杆的两表面对钢压杆施加弯矩, 运用了线性二次型调整控制策略, 结果发现在4.1倍第一阶临界屈曲荷载的轴向压力作用下钢压杆发生失稳。

4 加设张拉索的失稳主动控制

张拉索装置也是在传感器监测到受压钢构件即将发生失稳时通过对受压钢构件施加弯矩来实现失稳主动控制, 如图3所示。图3(a)中线性电动机通过固定在杆件上的刚性锚固装置对索进行张拉, 索受张力因而对杆件施加弯矩从而能够控制杆件的失稳。与图3(a)不同的是图3(b)中的线性电动机不是直接附设在轴压杆件上, 但两者都是利用传感器监测受压钢构件的变形继而通过作动器施加作动力使得线性电动机对索进行张拉。线性电动机能产生很大控制力且整个装置相对来说重量较轻, 因而对原构件影响不大。采用图3(a)所示的这种装置形式, 通过有限元数值模拟找出控制轴压杆件各阶屈曲模式失稳时施加弯矩的最佳位置, 在这些位置上安装这种张拉索作动器就可以对轴压杆件的多个屈曲模式进行失稳控制; 而由于图3(b)所示的这种失稳主动控制装置的设计特点, 它只能对轴压杆件的第一阶屈曲模式进行失稳控制。这种控制装置还可以将张拉索作动器与被控制的杆件隔开一段距离设置, 以控制跨越峡谷大桥中的受压钢杆件免遭失稳^[4]。

失稳主动控制的设计及计算中, 要特别注意的几个要点: ①传感器的类型选择和位置布置; ②作动控制策略的确定以及作动器的控制程序设计; ③建立失稳主动控制分析的力学方程和简化模型。

5 结束语

粘贴压电材料和加设张拉索这两种作动技术, 进行失稳主动控制均是通过主动施加弯矩迫使受压钢构件回到其平衡位置来抑制失稳的发生, 因而大大提高了受压钢构件的稳定承载力, 可以应用于桁架、网架以及网壳等空间结构。总的来说, 受压钢构件的失稳主动控制技术控制机理明确, 控制失稳的效果比较可观, 有比较好的应用前景, 然而也有下述的一系列问题亟待解决:

粘贴压电材料和加设张拉索这两种作动技术进行失稳主动控制都必须与传感器和控制器一起协同工作, 因而要确保传感器能灵敏监测到杆件的初始失稳发生, 控制器的控制策略要合理选择, 还要区分失稳引起的变形与其它原因(如振动)引起的变形, 这些因素都影响到主动控制技术中失稳控制的可行性和效果。(下转第32页)

3.4 静载试验

该试验采用千斤顶反力加载,荷载分级加载值按设计预测值取值,第一级取其2倍,试验时采用慢速维持荷载法。典型的复合地基曲线 $p-s$ 如图2。

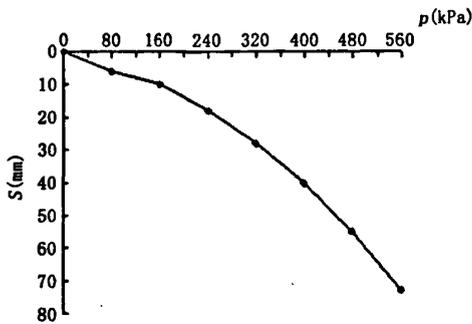


图2 复合地基 $P-s$ 曲线

Fig.2 $P-s$ curve of composite foundation

3.5 检测结果

根据检测报告,处理后的复合地基承载力标准值达到 288kPa,满足 270kPa 的设计要求,最大沉降量 27.16mm,满足设计要求 50mm;通过标准贯入试验,加固后该楼场地钻孔揭露范围内已完全消除液化。

4 结论

1) 碎石与 CFG 两桩型复合地基可以较大幅度的提高地基承载力,并有效的控制地基变形。

2) 碎石与 CFG 两桩型复合地基对消除地基土液化的作用显著。

3) 利用碎石与 CFG 两桩型复合地基对特定工程地质与水文地质条件的地基处理具有显著效果,本设计计算方法与目前专业规范要求相符合。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] 朱奎, 徐日庆. 刚-柔性桩复合地基[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] GB 50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [4] 史三元, 王皓然. 柔性桩复合地基有效桩长的简化计算方法[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 3(1): 3-5.
- [5] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [6] 吴雄志, 王志军, 葛云海. 水泥土桩单桩承载力影响因素的探讨[J]. 河北建筑科技学院学报, 2004, 21(1): 39-41.

(责任编辑 闫纯有)

(上接第 16 页)

参考文献:

- [1] 雷宏刚. 钢结构事故分析与处理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2003.
- [2] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 欧进萍. 结构振动控制-主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] ANDREW A BERLIN. Towards intelligent structures: active

control of buckling[D]. Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 1994.

- [5] CHANDRASHEKHARA K, BHATIA K. Active buckling control of smart composite plates - finite - element analysis [J]. Smart Materials and Structures, 1993, (2): 31-39.
- [6] TEFAY MERESSI, BRAD PADEN. Buckling control of a flexible beam using piezoelectric actuators [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1993, 16(5): 977-980.

(责任编辑 刘存英)