

文章编号: 0451-0712(2007)02-0043-03

中图分类号: U448.52

文献标识码: B

# 中承式外倾拱桥的美学与力学

辛丽华

(江苏省交通规划设计院 南京市 210005)

**摘要:** 从中承式外倾拱桥的结构造型论述了它的美学特征,并简述了它在实际中的应用及适用情况,然后通过有限元分析,进而研究了外倾拱桥的结构静力、弹性稳定和极限承载力等方面的力学特征。

**关键词:** 中承式外倾拱桥; 美学与应用; 结构静力; 弹性稳定; 极限承载力

随着桥梁建造技术的日益成熟,人们对桥梁美学的追求也越来越高,建筑艺术与造型得到了空前发展。而拱结构本身能给人一种强劲的力度感,加之拱桥优美的曲线造型,多跨拱桥的动感变化,是桥梁结构型式中最富于千变万化的,所以一直受到人们的关注和推崇。拱桥可以通过拱肋、拱面、吊杆造型以及风撑形式的调整来展示变化,也可以将行车桥面支承在拱肋的上、中、下不同的位置,还可以以单拱、连拱及“飞燕式”等多种形式出现。从拱肋数量上,可以有单片拱、双片拱、三片拱等;从拱肋截面上,可以有矩形、箱形、工形、哑铃形等;在拱肋线形上,可以有圆弧、抛物线、悬链线等;在拱肋材料上,可以有钢筋混凝土、钢管混凝土、钢结构等;从吊杆形式上,可以有垂直、倾斜、网状等;从风撑形式上,可以有一字、米字、X形、桁式、薄壁镂空等;从拱面上,主要通过拱面倾角变化来实现,有拱面内倾,称之为提篮拱,有拱面垂直平行,现在逐渐发展到拱面外倾,以求更多的桥上空间。

## 1 中承式外倾拱桥的美学与应用

发展得最早、建造得最多的是垂直平行拱桥,其结构受力合理、经济实用,四平八稳,极易满足大众的审美习惯与需求。但是,无论多么优美的建筑出现的太多,就显得雷同而单调,让人产生审美疲劳。这时候适时地出现了外倾拱桥,以新、奇、特的感官刺激满足了人们的求变心态。外倾拱桥典型的结构型式为中承式,拱脚固结,拱肋与桥面相交处设置强劲的横撑(横梁),桥面以上一般不设风撑,好似敞开了

宽阔的胸怀,显得生动而大气。外倾拱桥给人的感觉与传统的平行拱或提篮拱的稳重朴实感完全相反,它给人的是一种奇特、变异、新颖的不平衡感,符合现代思想和风尚,同样也给人以美感——满意、愉快、欣赏、舒畅、振奋。

外倾拱桥的外倾拱肋及吊杆,好似振翅欲飞的蝴蝶,又似高山流水的竖琴,对称、韵律、张扬、动感,是古典与现代的有机结合,视觉效果时尚、活泼、赏心悦目。而且这种半起半卧的姿态,很能令人怦然心动。虽然物以稀为贵,但是外倾拱桥在力学合理性方面存在的某些欠缺以及施工难度的增加,阻止了它在实际应用中的发展。目前我国建成使用的外倾拱桥实例屈指可数,根据资料,天津大沽桥是非对称的外倾拱桥,跨径在100 m左右;广西南宁大桥也是外倾拱桥,正处于设计和探讨中,由著名设计大师林同炎先生构思。建成使用的世界第一大外倾拱是南京奥体中心主体育馆的钢结构拱,其跨径达300多m,拱肋外倾达45°。它是外国建筑师设计的,但是,国内的一些专家对此颇有异议,认为结构不甚合理,必然造成材料的浪费,建设投资极大,后期养护与管理费用很高。有专家分析,如果奥体中心的双拱倾斜度改为55°(与水平面夹角),估计可以省下20%的建设费用,而且它的稳定性也同时得到提高。所以,外倾拱桥一般适合于人行桥、自行车桥、公园湿地景观桥或小跨径小规模的车行桥中。由于规模小、总造价低,因此结构异化所引起的构造复杂、施工困难和费用上升都是有限的。国外就出现了一些小规模的外倾拱桥,成为点缀环境的景致,例如伦敦的千禧桥及英

国的蝴蝶大桥。

几座外倾拱桥的实例见图1~图4所示。

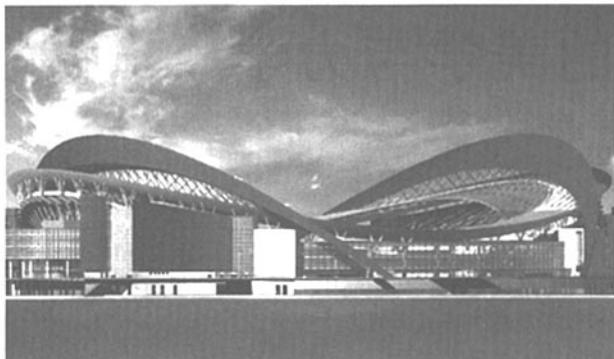


图1 南京奥林匹克中心



图4 英国蝴蝶大桥

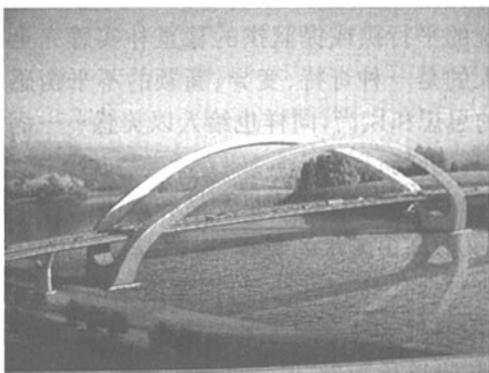


图2 广西南宁大桥

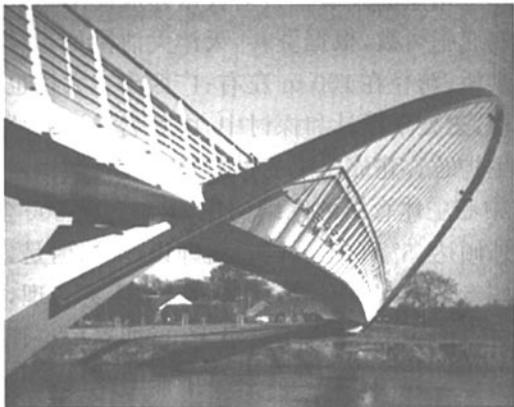


图3 伦敦千禧桥

## 2 中承式外倾拱桥的力学特征

下面通过某“飞燕式”中承式外倾拱桥的实例计算,可以直观地反映出外倾拱桥在结构静力、稳定等方面的一些特点。该拱桥的中跨为110 m,边跨为30 m,拱脚固结,拱顶设置5道风撑。桥面宽度为27 m,按双向四车道来考虑。柔性系杆柔性吊杆刚性拱,主拱肋为4根直径为650 mm的钢管混凝土结

构,边拱肋为钢筋混凝土结构,不考虑系杆在使用过程中的收缩变形,把系杆的面积赋大值,且不计系杆自重。研究是在三维有限元的基础上,采用大型通用程序ANSYS进行结构分析。拱肋倾角按10°及20°两种情况分别计算。

### 2.1 结构静力

在恒载和活载作用下,外倾拱肋的弯矩均比垂直拱大,而且外倾角度越大,拱肋弯矩也越大,面外弯矩比面内弯矩大得更多。就外倾10°的拱肋而言,在恒载作用下且考虑风的作用,面内弯矩是拱顶截面增加的最多,是垂直拱的3倍以上;面外弯矩是拱脚截面增加的最多,是垂直拱的25倍以上,显而易见,外倾拱肋在自身恒载作用下就存在较大的面外弯矩,而垂直拱肋一般不存在自身恒载面外弯矩。在最不利活载作用下,弯矩变化趋势同恒载作用,但变化幅值不大,拱顶的面内弯矩是垂直拱的1.3倍;拱脚的面外弯矩是垂直拱的4倍。外倾拱肋的轴向压力与垂直拱没有显著的差异,除了拱脚以外,外倾拱的轴力要比垂直拱稍小一点。另外,拱肋倾角对中承式外倾拱的吊杆拉力影响不大,不同倾角的吊杆拉力在竖直方向的分力几乎相等。这是因为刚性拱肋柔性系杆和柔性吊杆的中承式系杆拱桥,其吊杆内力主要是悬挂在吊杆上的横梁以及相应桥面板上传递下来的荷载,只要作用在横梁以及相应桥面板上的恒载和活载相对不变,其吊杆的竖向拉力也不变,吊杆内力仅与倾角有关,拱肋倾角越大,吊杆内力就越大。外倾拱的吊杆拉力在水平方向的分力,对横梁起着预拉力的作用,这对横梁是不利的。最后,外倾拱的系杆拉力一般比垂直拱的要小40%左右。

### 2.2 弹性稳定

稳定分析是中承式外倾拱桥研究的重要问题之

一。在实际工程中,拱桥的失稳常常具有突发性,失稳以后承载力很快丧失,而且弹性稳定解又近似地代表第2类稳定问题解的上限,加之弹性稳定分析又相对比较方便,因此,在实际的拱桥设计中,绝大多数还是以弹性稳定系数作为结构安全稳定的评定标准。

在对称荷载和不对称荷载作用下,结构的稳定安全系数都随着拱肋外倾角度的增大而减小,也就是说,拱肋外倾角度越大,稳定安全系数越小。外倾 $10^\circ$ 的拱桥的稳定安全系数是垂直拱的82%,而外倾 $20^\circ$ 的拱桥的稳定安全系数就只有垂直拱的65%。对称荷载下的弹性稳定系数要比不对称荷载下的小12%左右,这是因为在弹性稳定计算中没有考虑弹性大变形的影响,而且对称荷载要比不对称荷载在汽车活载上大1倍。

外倾拱桥的失稳模态与垂直拱桥相同,先后以拱肋向两边的侧倾失稳、拱肋同向侧倾失稳、面内反对称失稳以及反对称扭转失稳为主要失稳模式。结构的一阶失稳为拱肋向两边侧倾失稳,形成2个屈曲半波;二阶失稳为拱肋同向侧倾失稳,面内反对称失稳也出现的比较早,之后出现的通常是拱肋的反对称扭转失稳。在拱肋外倾 $20^\circ$ 的结构中,面内反对称失稳并非接着拱肋侧倾失稳,中间反而出现了若干阶风撑失稳的局部失稳模态,这说明了拱肋外倾的结构形式稳定性较小,对风撑的要求更高一些。

### 2.3 极限承载力

极限承载力是指结构破坏时的承载能力,对于拱桥也称为压溃荷载,拱的第2类稳定即是丧失承载能力的概念,但在具体运用中,很多学者提出了很多不同的判断标准,本文是以荷载位移曲线为判别依据,即荷载不再增加而拱肋位移急剧增大时的荷载作为结构的极限承载力。

考虑材料—几何双重非线性后,在对称荷载下,外倾拱桥的极限承载力要小于垂直拱桥,而且外倾角度越大,承载力小得越多,外倾 $10^\circ$ 的拱桥极限承载力与垂直拱桥相近,比值在98%左右,而外倾 $20^\circ$ 的拱桥极限承载力比值下降为85%。在不对称荷载下,外倾拱桥的极限承载力同样要小于垂直拱桥,而且不论是外倾拱还是垂直拱,其极限承载力均要比

对称荷载下小一些,外倾 $10^\circ$ 的拱桥要小25%,外倾 $20^\circ$ 的拱桥要小18%。由此可见,荷载分布方式的不同对结构的极限承载力产生一定的影响。

外倾拱桥极限破坏时,拱肋竖向位移与垂直拱桥相似,均是拱顶的竖向位移要比拱肋其他部位都大,越靠近拱顶,竖向位移越大,越靠近拱脚,竖向位移越小。就侧向位移而言,外倾拱桥与垂直拱桥有较明显的差异。外倾角度越大,结构极限破坏时的侧向位移就越大,这就意味着同样规模的桥梁,外倾角度越大,几何大变形效应就越明显。

### 3 结语

拱是桥梁最强的具体表现,它的结构外形能够清晰地表达出它的功能。基于对桥梁美学及结构造型多样化的追求,促使拱结构的形式在不断变化与翻新,出现了一些造型奇异的拱结构,如异型拱和外倾拱。但外倾拱桥在力学合理性方面存在一些问题,如拱肋弯矩偏大,特别是面外弯矩过大,稳定系数小,极限承载力小等等,限制了它的普遍应用。本文是在有风撑的情况下得出的结论,如果取消风撑,外倾拱桥的拱肋弯矩将会更大,稳定系数及极限承载力将会更小,为了结构的安全,势必要增大拱肋的构造尺寸及刚度,造成材料的增加。本文旨在为桥梁工作者在桥梁景观设计及桥型方案选择时提供一些外倾拱的美学和力学概念,以便迅速做出定性分析与正确评价。

### 参考文献:

- [1] 王振英. 新型拱式跨构[M]. 成都:成都科技大学出版社,1989.
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [3] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动(修订版)[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
- [4] 项海帆,刘光栋. 拱结构的稳定与振动[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
- [5] 杨永清. 钢管混凝土拱桥横向稳定性分析[D]. 西南交通大学,1998.
- [6] 程进,江见鲸,肖汝城,项海帆. 大跨度钢拱桥结构极限承载力分析[J]. 工程力学,2003,(4).