

## 宁波市甬江大桥异形截面拱肋受力机理研究

张海君

(山西省交通规划勘察设计院, 山西 太原 030012)

**摘要:** 宁波市甬江大桥采用双肢钢箱提篮拱桥, 跨中 315 m 范围内拱肋截面为凸状异形截面, 受力较复杂。为研究双肢钢箱提篮拱桥受力机理, 采用大型有限元软件 Ansys 建立三维混合有限元模型, 并对其在不同荷载工况下的拱肋受力特性、结构弹性特征、屈曲特性进行研究, 以验证大桥结构设计的合理性、截面的可靠性。

**关键词:** 提篮拱桥; 双肢钢箱截面; 混合有限元模型; 弹性特征屈曲

近年来钢箱拱桥作为大跨径拱式桥梁的一种得到了迅速发展。自 2002 年云南小湾大桥作为中国首座中承式钢箱提篮拱桥建成通车以来, 中国陆续修建了多座钢箱拱桥, 设计及施工技术均得到了大幅度提高和发展。但是早期建设的钢箱拱桥均采用单箱钢箱截面形式。2011 年, 主跨 450 m 的明州大桥建成通车, 这是中国第一座大跨径双肢钢箱拱桥。该类型桥梁截面新颖、桥型美观, 揭开了拱桥发展的新篇章。但双肢钢箱拱肋结构复杂、设计及施工难度较高。该文以宁波市甬江大桥双肢钢箱拱桥为研究背景, 采用通用有限元程序 Ansys 建立“梁—壳”三维混合有限元模型, 以研究“凸”状异形截面拱肋的结构稳定及受力特性。

## 1 工程概况

宁波市甬江大桥跨径布置为 (100+450+100) m, 总体布置如图 1 所示。边跨拱肋与中跨拱肋保持在一个倾斜平面内, 横向倾斜度 1:5。两片拱肋之间设置“K”形风撑及“一”字撑以保证其整体性和稳定性。加劲梁通过吊杆或立柱实现支承。中跨加劲梁的两端支承于中跨拱梁交汇处的横梁上, 端支承为纵向滑动支座, 横向和纵向设置阻尼限位装置。边跨加劲梁分别在中跨和边跨的拱梁交汇处与拱肋固结。桥梁两边跨端横梁之间布置强大的水平拉索, 以平衡中跨拱肋的水平推力。

## 2 混合有限元仿真模型建立

仿真分析模型计算结果应既能反映大桥的整体受

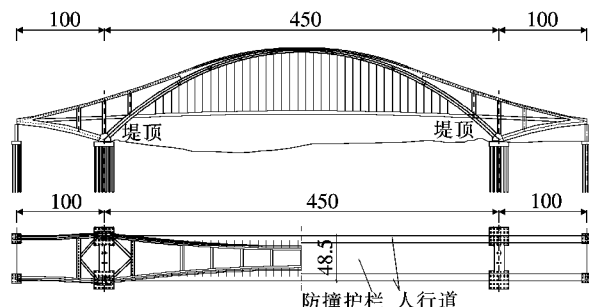


图1 甬江大桥总体布置图(单位:m)

力特点, 又能够突出关键部位的局部受力状态。为避免在局部模型中施加边界条件存在的不足, 此次计算采用混合有限元模型对“凸”状异形截面拱肋受力进行分析, 即在整体杆系模型的基础上嵌入拱顶 30 m 拱肋壳单元模型, 通过位移协调方程实现壳单元与杆系单元内力与位移的有效传递。

三维混合有限元模型采用 Ansys13.0 建立, 其中跨中拱肋顶部嵌入长度为 30 m 的壳单元模拟, 其他部位拱肋采用梁单元模拟。杆系单元与壳单元通过“刚域”形成“梁—壳”三维混合有限元模型。系梁、立柱、横梁、横撑和风撑采用梁单元模拟, 吊杆采用桁架单元模拟。混合有限元模型如图 2 所示。

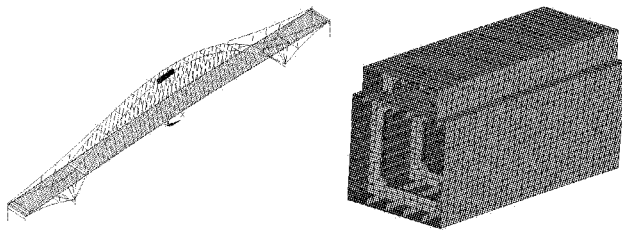


图2 混合有限元模型图

收稿日期:2018-06-17

作者简介:张海君,男,硕士,工程师.E-mail:zhj-bridge-2008@163.com

边墩与上部结构之间用弹簧单元模拟支座,主墩与边墩的底部按照固结边界模拟。

3 杆系模型与混合有限元模型计算结果对比

为了验证混合有限元模型的正确性,对杆系模型与混合单元模型计算结果进行对比(表 1)。由表 1 可得:除拱顶面外弯矩外,两个模型的计算内力偏差较小,最大相对偏差为 6.34%。拱顶处面外弯矩差异较大,分析其原因主要是由于混合模型在该部位同时应用了梁单元和壳单元,两种单元通过自由度耦合连接,

局部内力失真。但是面外弯矩绝对值较小,对结构应力分析影响可忽略,因此建立混合模型进行仿真分析是可行的。

4 有限元模型仿真计算结果

4.1 拱顶节段计算结果

由于篇幅有限,文中仅列出了拱顶标准截面和横向加劲肋截面的恒载工况(工况 1)、恒载+活载+风载工况(工况 2)计算结果。为方便表述,拱顶标准截面编号定为 A,拱顶横向加劲肋截面编号定为 B。计算结果见图 3、4。

表 1 恒载作用下结构内力对比

项目	拱顶				上下肢结合处			拱脚		
	轴力/ kN	面内弯矩/ (kN·m)	面外弯矩/ (kN·m)	竖向位 移/m	轴力/ kN	面内弯矩/ (kN·m)	面外弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	面内弯矩/ (kN·m)	面外弯矩/ (kN·m)
混合模型	75 724	12 963	796	0.207 4	83 154	80 103	553	75 810	177 410	19 687
梁杆模型	75 611	12 190	628	0.207 8	83 122	80 067	560	75 806	177 430	19 668
偏差/%	0.15	6.34	26.75	-0.19	0.04	0.04	-1.25	0.01	-0.01	0.10

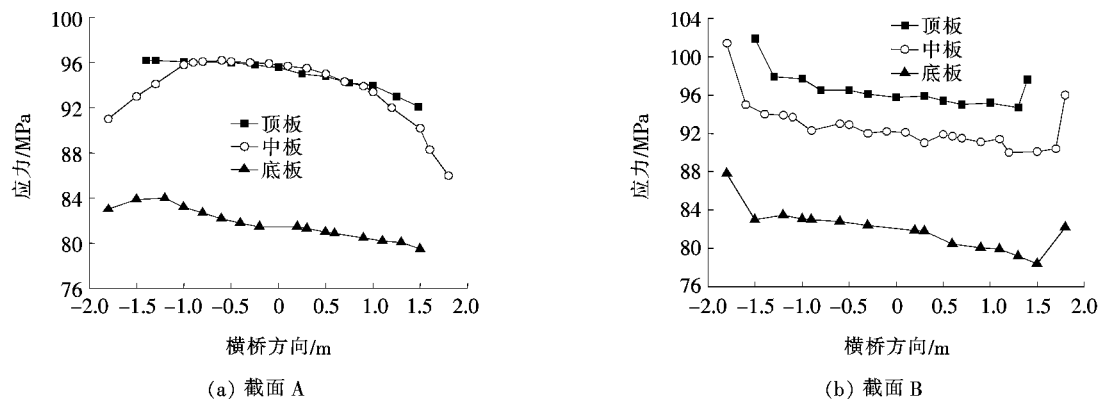


图 3 恒载作用下截面压应力(工况 1)

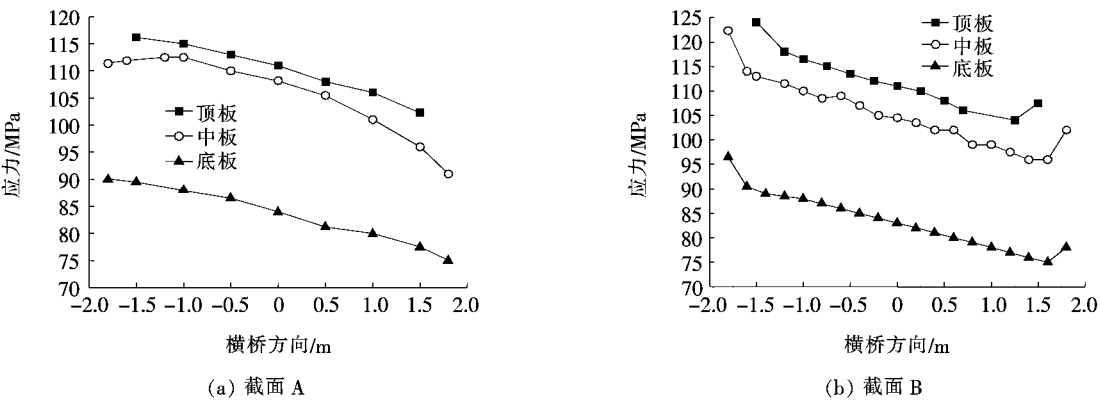


图 4 恒载+活载+风载工况下截面压应力(工况 2)

由图 3、4 可知:在恒载工况、恒载+活载+风载工况拱肋应力总体水平较低,应力范围为 $-90 \sim -130$  MPa,其中恒载应力占主导地位;拱肋存在空间的扭转效应,内、外侧的拱肋有 $4 \sim 19$  MPa 的应力差;杆件端部与杆件中部应力存在较大偏差,尤其横向加劲肋截面端部应力较中部存在增大趋势。应力偏差较大,分析其产生原因主要与“以直代曲”的施工方法有关,导致节段交接处存在明显转角,造成局部应力增大。

由于横向风荷载的作用,桥梁结构的内力分布规律与恒载工况略有不同,在布置有横隔板或横向加劲肋的截面普遍发生正剪力滞,标准截面则产生负剪力滞,但整体上剪力滞影响不大。

#### 4.2 弹性特征屈曲计算结果

表 2 为杆系模型与混合模型弹性特征屈曲计算结果,图 5 为结构第 1 阶屈曲模态。

表 2 弹性特征屈曲分析结果

阶数		屈曲系数		模态描述
		工况 1	工况 2	
第 1 阶	混合模型	8.302	7.152	面外正对称屈曲
	杆系模型	8.114	6.983	
第 2 阶		9.356	8.117	面外反对称屈曲
第 3 阶		11.223	9.630	面外反对称屈曲
第 4 阶		12.731	10.824	中板屈曲
第 5 阶		13.002	11.025	顶板屈曲

由表 2 和图 5 可得:杆系模型与混合模型计算结果较接近,桥梁第 1 阶屈曲均为面外失稳;前 3 阶振型均为桥梁结构的整体屈曲;第 4、5 阶为杆件的局部屈曲振型,并且结构的中板、顶板、横隔板可能会首先发生局部屈曲。从结构屈曲模态可得,整体屈曲发生在局部屈曲之前,说明结构设计是合理的。

## 5 结论

(1) 恒载工况、恒载+活载+风载工况拱肋应力总体水平较低,应力范围为 $-90 \sim -130$  MPa,其中恒载应力占主导地位;拱肋存在空间扭转效应,内、外侧的拱肋有 $4 \sim 19$  MPa 的应力差。

(2) 拱肋截面的剪力滞相对较小,对桥梁结构的受力影响较小,可忽略不计。

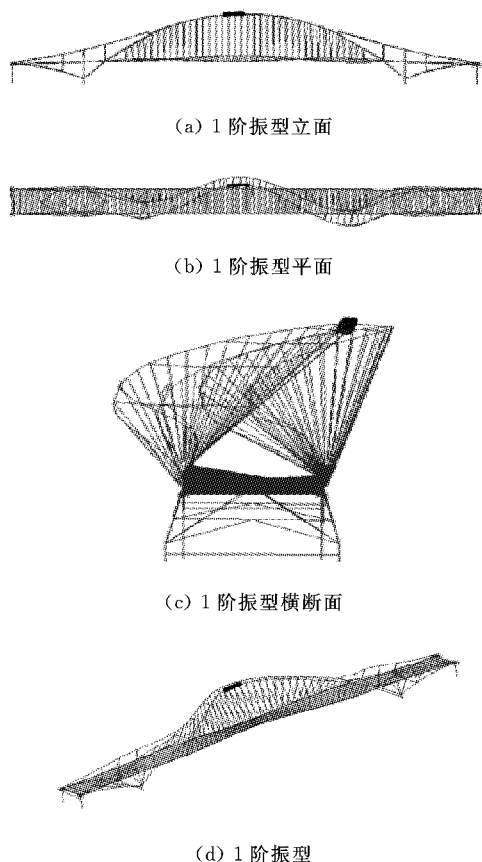


图 5 第 1 阶屈曲模态图

(3) 桥梁的整体屈曲发生在构件局部屈曲之前,结构设计是合理的。一旦发生局部屈曲,则中板、顶板、横隔板可能会首先发生。

#### 参考文献:

- [1] 田仲初.大跨度钢箱拱桥的施工控制关键技术与动力特性研究[D].中南大学博士学位论文,2007.
- [2] 周超舟,姚森.大跨度中承式双肢钢箱系杆提篮拱桥施工方案研究[J].桥梁建设,2008(6).
- [3] 陆春阳,吴冲.上海长江大桥索梁锚固区局部受力分析[J].哈尔滨工业大学学报,2007(2).
- [4] 蒲黔辉,么超逸,施洲,等.新型铁路钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构传力机理及应力分析[J].中国铁道科学,2015(5).
- [5] 田仲初,陈耀章,等.连续钢梁顶推过程局部接触分析及改善措施[J].长安大学学报:自然科学版,2012(4).
- [6] 谢静,李爱群,王浩.外倾角对异形空间组合拱肋拱桥受力性能影响的研究[J].公路,2006(1).
- [7] 王忠斌,沈锐利,唐茂林.悬索桥钢桁架加劲梁施工方法分析[J].石家庄铁道学院学报,2006(1).