

# ANSYS在市政桥梁设计中的应用

#### 顾民杰/ 道桥院总工

#### 上海市政工程设计院总院(集团)有限公司









- ➢ 宁波中兴大桥采用上层机动车、下层非机动车的双层布置,主跨 400m, V型桥塔桥面以上高度37m,为国内外最大跨径的单索面 矮塔斜拉桥;
- 主梁主跨采用钢箱梁,边跨采用叠合梁,塔梁固接处主梁最大高度10.5m;
- ▶ V型主塔,竖向倾角25°,主塔横桥向宽3.6m;
- ▶ 拉索共36对,倾角13.8~31.5°之间
- ▶ 主墩基础: 30根2m直径钻孔桩。





### 1.高腹板稳定分析



为分析主梁高腹板的稳定性,采用大型通用有限元软件ANSYS建立主梁LZS1~3 节段模型。

模型一端固接约束,另一端自由;为加载荷载方便,并保证加载位置不率先失稳, 在模型自由端接一段2m长的梁单元,力的边界条件从整体模型中读取,选取恒载+满人+人非工况加载。



模型验证:

	杆系模型	ANSYS板壳模型
顶板应力	7.9MPa	9.0MPa
底板应力	-144MPa	-141MPa





#### 1.高腹板稳定分析 > 前四阶失稳模态



外腹板失稳,系数=4.54



内腹板失稳,系数=5.79





外腹板失稳,系数=5.66



**底板失稳, 系数=6.2** 



ANSYS UGM 2017



## 1.高腹板稳定分析



改变腹板厚度及加劲形式,第一阶失稳模态不同:



外腹板=22mm, 内腹板=20mm, 系数=6.0



内腹板=20mm,外腹板=12mm,纵向加劲12x150,系数=4.1



内外腹板=22mm,去除腹板环向加劲,系数=2.98

通过比选不同板厚及加劲布置形式下腹板的 失稳模态及稳定系数,中兴大桥腹板的稳定性满 足设计要求。









主桥立面图 ( 单位:m )

- 背景桥梁跨越某IV级航道内河,通航净宽要求为192m,桥址处为 软土地基,在此条件下,拟建造主跨225m斜拉桥。
- 桥位附近原有一座老桥,为85+200+85m平形索面斜拉桥,存在 耐久性问题,且已无法满足未来通航及交通规划要求。新桥建成 之前,老桥需继续承担部分交通功能,无法提前拆除,导致新桥 横向空间受限,须采用中间索面方案以保证新桥交通功能及施工 安全净距。







为分析该桥空间效应,采用大型通用有限元软件ANSYS建立全桥板壳模型。其中,塔、梁板件采用shell63单元模拟,斜拉索采用link10单元。按照主桥实际边界条件,约束支座面积范围内节点的相应自由度。



主桥一期恒载通过加速度方式施加,二期 恒载通过节点力方式施加于对应节点。活 载仅考虑全桥满布、中跨满布,中跨半跨 满布及全桥偏载等四种情况。通过规范集 度折算为节点力施加于桥面节点上。



#### 板壳模型与杆系模型结果对比

	支反力 (kN)			跨中 位移
	主墩	辅助墩	过渡 墩	(mm)
板売	80493	11841	10956	0.133
杆系	78823	12505	10357	0.129
偏差	2.1%	5.3%	5.5%	3.0%









塔根截面顶板正应力横向分布(MPa)



塔根截面底板正应力横向分布 (MPa)

工祝	恒载	满布活载	中跨满布	半中跨淌布
		顶板		
平均值	-9.2	11.6	8.5	7.3
最大值	-17.4	45.4	41.7	40.2
不均匀系数	1.894	3.928	4.902	5.505
剪力滞系数	1.861	1.567	1.593	1.633
		底板		
平均值	-59.5	-107.9	-103.5	-96.6
最大值	-87.4	-161.6	-155.8	-148.1
不均匀系数	1.469	1.497	1.506	1.533
剪力滞系数	2.109	1.898	1.934	1.991

不均匀系数最大达5.5, 且各种荷载工况下变化较大。由于剪力滞效应主要由构件弯剪作用引起, 扣除轴力后的比值更具有客观性, 本桥剪力滞系数在1.5~2。0之间, 量值较大,设计中必须加以考虑。





主梁扭转

#### 2.斜拉桥空间效应分析





偏载作用下主桥变形图 (mm)



偏载作用下主桥变形横向图 (mm)

根据有限元计算结果,主梁扭转角度为6.79‰,据薄壁杆件力学估算,截面 抗扭常数按外框板件由自由扭转公式估算:

 $J = \frac{4A^2}{\Sigma}$ 

$$\sum_{t_i}^{s_i}$$
  
利口截面围成的面积, $t_i$ 为板厚, $S_i$ 为板件宽度。

式中,A为闭口截面围成的面积,t<sub>i</sub>为板厚,S<sub>i</sub>为板件宽度。按上式估算扭转角为7.10‰,误差较小,且计算简便,可作为初步设计时的估算手段。







#### 主墩横向支座反力分配 ( kN )

工况	恒载	满布活载	偏载
左支座	435	565	-3658
中支座	79624	101640	88194
右支座	435	565	7481

- 在对称荷载(恒载、活载满布)作用下,主要由中支座发挥作用,承 担竖向支撑作用,边支座受力较小,仅为中支座的1/20左右。
- ▶ 偏载作用下,边支座将分担较大荷载,一侧支座需承担负反力,应采 用拉力支座。
- ▶ 结构主墩应采用墙式墩,以减小基桩力臂,改善承台受力。



## 3.钢—UHPC组合桥面板分析



MSYS

国内外许多正交异性桥面板均出现了钢桥面疲劳开裂、钢桥面铺装开裂、车辙、 拥包、推挤等病害。而传统钢-混组合结构桥梁虽然能克服上述问题,但其自重较 大,承受负弯矩能力较弱,适用跨径较小。

超高性能混凝土(UHPC)是一种刚度与强度较大,韧性、粘结性、耐久性较好的材料,作为刚性铺装参与钢桥面板受力,形成钢-UHPC组合面板,可以解决钢桥面疲劳破坏以及桥面铺装病害问题,同时自重较轻,负弯矩区抗裂能力较强,适用范围较广。

本院拟在若干新建及维修项目中采用该新型桥面板方案。





## 3.钢—UHPC组合桥面板分析





#### UHPC层按刚度折算为钢板厚度, 采用壳单元进行分析。





#### UHPC层按实体单元建模,钢板 件采用壳单元进行分析。







## 3.钢—UHPC组合桥面板分析



两种建模方案对比分析



两种建模方案对比分析表明:

- ➤ UHPC折算为钢板的方式计算 效率较高,但无法准确读取 UHPC顶、底层应力。
- ▶ 顶板加劲较弱时, UHPC折算 钢板计算方式误差较大。
- ▶ 横纵梁板件采用支撑形式替换 影响较小。





标准轮压 140kN

方案

## 3.钢—UHPC组合桥面板分析

竖向

位移

(mm)



#### 以宁波某桥维修方案为例





#### UHPC层可提高桥面板受力性能,即使磨耗层损坏前提下, 仍能有效降低钢板应力,提高桥面板刚度。

纵向

应力

(MPa)

横向

应力

(MPa)

81.5

123.9

44.5

55.3



ERS	完好	1.124	64.5
	破损	1.601	74.4
UHPC	完好	0.998	60.7
	破损	1.053	62.8

铺装/磨耗

层



### 4.桥塔局部受压稳定板壳单元分析



▶ 背景工程主桥采用钢拱塔斜拉桥,双索面半漂浮体系,跨径布置为L=2×94m,两侧引桥跨径30m,总长248m。

> 钢拱桥塔箱形截面采用三种标准段构造尺寸,从 塔顶到塔底分别为方案1、2、3。为分析本工程 主桥桥塔局部受压稳定情况,在全桥整体杆系单 元分析的基础上,对三种构造尺寸方案进行了板 壳单元特征值屈曲分析计算,并结合规范计算结 果进行对比验证。



桥塔横截面图

方案号	顶底板、腹板厚t <sub>1</sub> (mm)	横隔板及人孔加劲肋厚t <sub>2</sub> (mm)	加劲肋厚t <sub>3</sub> (mm)	加劲肋宽l <sub>3</sub> (mm)
1	20	16	20	200
2	30	16	22	220
3	40	16	25	250

#### 三种构造尺寸方案实常数表





### 4.桥塔局部受压稳定板壳单元分析



为分析该桥桥塔标准段局部受压稳定情况,采用大型通用有限元软件ANSYS建立标准节段板壳单元模型。顶底板、腹板、加劲肋板件采用shell93单元模拟。节段端部平面约束节点垂直轴向的平动自由度,释放轴向平动自由度和转动自由度。





根据全桥整体分析得到恒、活载作用 下拱肋受到的最大压应力,再根据板 件厚度折算为板件在节段端部平面的 线均布荷载。



#### 板壳模型与理论计算结果对比

	方案 号	构造尺寸 ( mm )	板壳分 析模型	理论 计算	偏差
油向	1	20 ( 20×200 )	6.131	6.233	1.64%
玉缩 量	2	30 ( 22×220 )	6.133	6.233	1.60%
( mm )	3	40(25×250)	6.135	6.233	1.57%





前3阶特征值屈曲模态荷载系数

模态号	荷载系数	失稳类型	纵向加劲肋类型	横向加劲肋类型
1	9.6911	纵向加劲板件局部失稳	刚性加劲肋	刚性加劲肋
2	9.7091	纵向加劲板件局部失稳	刚性加劲肋	刚性加劲肋
3	9.7227	纵向加劲板件局部失稳	刚性加劲肋	刚性加劲肋



一阶屈曲失稳模态形状图



构造尺寸方案1一阶屈曲失稳模态 荷载系数9.6911,大于4.0,满足 规范安全性要求。

前十阶屈曲失稳模态均为拱肋顶 底板、腹板发生的加劲间板件的 局部失稳,加劲板在加劲肋处形 成节线。

纵向、横向加劲肋均为刚性加劲 肋,符合规范计算结果。

ONVERGENCE

方案1



## 4.桥塔局部受压稳定板壳单元分析



前3阶特征值屈曲模态荷载系数

7	方案2		模态号	荷载系 数	失稳类型	纵向加劲肋类 型	横向加劲肋类 型
		1000 00100 00100 000000000000000000000	1	12.885	纵向加劲板件整体失稳	柔性加劲肋	刚性加劲肋
			2	13.027	纵向加劲板件整体失稳	柔性加劲肋	刚性加劲肋
			3	13.409	纵向加劲肋局部失稳	柔性加劲肋	刚性加劲肋

#### 一阶屈曲失稳模态形状图



三阶屈曲失稳模态形状图

构造尺寸方案2一阶屈曲失稳模态荷载系数 12.885,大于4.0,满足规范安全性要求。 前两阶屈曲失稳模态为拱肋顶底板、腹板发生 的加劲板件的整体失稳,加劲肋与加劲板共同 变形。三到十阶屈曲失稳模态为拱肋顶底板、 腹板发生的加劲肋局部失稳,加劲肋失稳而母 板未失稳。

纵向加劲肋为柔性加劲肋,横向加劲肋为刚性 加劲肋,符合规范计算结果。







前3阶特征值屈曲模态荷载系数

模态	5. 荷载系 数	失稳类型	纵向加劲肋类 型	横向加劲肋类 型
1	14.426	纵向加劲肋局部失稳	柔性加劲肋	刚性加劲肋
2	14.426	纵向加劲肋局部失稳	柔性加劲肋	刚性加劲肋
3	14.456	纵向加劲肋局部失稳	柔性加劲肋	刚性加劲肋



一阶屈曲失稳模态形状图



方案3

**WANSYS**用户技术大会

ONVERGENCE

构造尺寸方案3一阶屈曲失稳模态 荷载系数14.426,大于4.0,满足 规范安全性要求。 前十阶屈曲失稳模态均为拱肋顶 底板、腹板发生的加劲肋局部失 稳,加劲肋失稳而母板未失稳。 纵向加劲肋为柔性加劲肋,横向 加劲肋为刚性加劲肋,符合规范 计算结果。

August 3, 2017





目前,塔柱钢混过渡结构的设计思路主要有:

- 承压面连接:承压面下方混凝土局部应力较大,混凝土难以浇注且浇注密实度 难以检测,如果振捣不密实,容易出现局部混凝土受压过大的问题。
- PBL剪力键连接:方式的荷载传递由上而下的过程中,上层承压面相邻区域承担了大多数的荷载,传递路径较短,没有有效的整个过渡段共同分担荷载的传递。

本次设计采用的钢混过渡结构包括:格构式钢塔柱、端承压板、剪力钉、竖向钢 筋和竖向预应力束。该连接性能良好、荷载传递路径可靠、现场施工便捷,能满 足钢塔柱部分巨大的塔身荷载向下传递至混凝土结构的需要,荷载在过渡段内能 够根据设计的需要逐步扩散,同时具备多重可靠的连接措施,且钢-混分界面无台 阶,节点区无明显结构分层,景观效果良好。





背景工程



	0	T4				
	l n					

-

7









模型中钢板采用SHELL63四节点弹性壳单元模拟,混凝土采用SOLID65八节点实体单元模拟,连接件采用COMBIN14三向弹簧单元模拟,预应力筋应用实体力筋法采用link8杆单元赋予初应变的方法模拟。











#### 钢结构Mises应力在0~140MPa之间。



23 © 2017 ANSYS, Inc. August 3, 2017

ANSYS UGM 2017











钢混节段混凝土主压应力最大为-13MPa,主拉应力最大在1MPa内。













混凝土底座主压应力最大为-11MPa,主拉应力最大在1MPa内。





**NNSYS** 



剪力钉剪力图

#### 剪力钉剪力最大为73kN



#### 6.桁架式横隔梁钢箱梁分析



连续钢箱梁是公路、市政项目中常用桥梁结构形式。钢箱梁因其刚度大、自重小、 抗扭抗弯性能好等优点,在工程中获得了广泛应用。

在连续钢箱梁设计中,通常采用正交异性钢桥面,实腹式横隔板。工程应用上,梁内横隔梁对减小桥面板计算跨度、减小箱梁扭转、畸变效应。然而实腹式横隔 板自重较大,经济性较差。 本院拟在跨径42+70+42m连续钢箱梁设计中采用空腹桁架式横隔梁,以提高箱 梁经济性。





#### 6.桁架式横隔梁钢箱梁分析



相对于实腹式横隔板,桁架式横隔梁对桥面板的支承作用、对箱梁 畸变变形的约束作用均有所减弱,为分析桥面板及横隔梁自身的效 应,采用大型通用有限元软件ANSYS建立局部板壳模型。其中,顶 底板、腹板、加劲肋等板件采用shell63单元模拟,横梁桁架杆件采 用beam4单元。按照相应分析内容,确定相应边界条件,约束支承 范围内节点的相应自由度。





#### 6.桁架式横隔梁钢箱梁分析





车辆荷载按照不同工况分别加载,得出桥面板最大应力55.3MPa,钢箱梁挑臂应力 137MPa,受力满足规范要求。

横隔板刚度 $K = 2EA_c^2 \frac{A_b}{L_b^3} = 6.982E + 13 > 20 \frac{EI_{dw}}{L_d^3} = 4.78E + 13$ ,满足规范要求。





# 感谢聆听

