



## midas Civil 2010拱桥专题—拱桥分析专题

Integrated Solution System for Bridge and Civil Structures

# 目 录

- 一. 拱桥概述 ..... - 1 -
  - 1.1 按照静力图式拱桥分类 ..... - 1 -
  - 1.2 按照桥面所处空间位置拱桥分类..... - 1 -
  - 1.3 主拱圈的截面形式分类 ..... - 2 -
- 二. midas Civil中的吊杆拱桥分析功能 ..... - 2 -
  - 2.1 拉索单元模拟..... - 2 -
  - 2.2 未知荷载系数法功能 ..... - 3 -
  - 2.3 索力调整功能..... - 4 -
- 三. 拱桥实例分析 ..... - 5 -
  - 3.1 系杆拱桥模型概况..... - 5 -
  - 3.2 系杆拱桥成桥分析..... - 5 -
  - 3.3 系杆拱桥施工阶段仿真模拟 ..... - 11 -
  - 3.4 拱桥的稳定分析 ..... - 14 -
  - 3.5 混凝土拱桥模型模拟与设计关键点 ..... - 14 -

## 一. 拱桥概述

拱桥 (archbridge) 指的是在竖直平面内以拱作为上部结构主要承重构件的桥梁。与其它桥梁一样, 拱桥也是由桥跨结构 (上部结构) 及下部结构两大部分组成。

图1.1表示拱桥各主要组成部分名称。拱桥的上部结构包括拱圈 (主要承重结构) 和拱上建筑 (桥面系、传力构件或填充物)。拱桥的下部结构包括墩台、基础、拱铰; 拱圈的上曲面称为拱背, 下曲面称为拱腹。

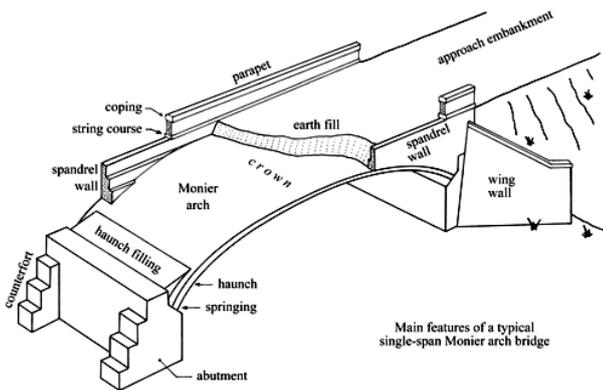


图1.1 拱桥组成示意图

### 1.1 按照静力图式拱桥分类

#### (1) 简单体系拱桥

按静力体系它可以分为: 三铰拱、双铰拱、无铰拱, 如图1.2所示;

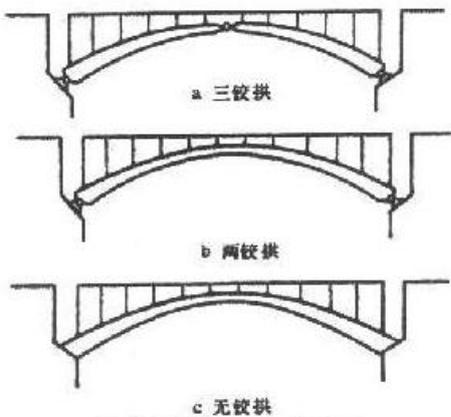


图1.2 按静力体系拱桥的分类

#### ■ 三铰拱

三铰拱是静定结构, 其基本特点是在竖向荷载作用下, 除产生竖向反力外, 还产生水平推力。推力对拱的内力产生重要的影响, 由于水平推力的存在, 故三铰拱各截面上的弯矩值, 小于与三铰拱相同跨度、相同荷载作用下的简支梁各对应截面上的弯矩值。因此, 拱与相应简支梁比较, 它的优点是用料比梁节省而自重较轻, 故能跨越较大的空间。此外, 由于拱主要承受轴向压力, 故建造时可以充分利用抗拉性能弱而抗压性能强的材料, 如砖、石、混凝土等。但是, 工程设计中很少采用三铰拱, 三铰拱只有在地质条件不良和跨径不大的情况下或在腹拱上才采用。目前大跨径拱桥一般不采用这种体系, 其原因有三:

- a、由于铰的存在, 使其构造复杂, 施工困难, 维护费用高; 同时由于推力的存在, 拱需要有较为坚固的基础或支承结构 (如墙、柱、墩、台等)。
- b、由于铰的存在, 降低了其抗震能力;
- c、拱的挠度曲线在顶较处有转折, 致使拱顶较处的桥面下沉, 当车辆通过时, 会发生较大的冲击, 对行车不利。

#### ■ 双铰拱

当拱桥的两个拱脚皆设为铰支座时称为两铰拱桥, 该桥属一次超静定结构。由于取消了拱顶铰, 使结构整体刚度较三铰拱大。由于铰的存在, 较之无铰拱可以减小基础位移, 温度变化, 混凝土收缩和徐变等引起的附加应力。在墩台基础可能发生位移的情况下使用。

#### ■ 无铰拱

无铰拱是钢筋混凝土斜拉杆式架拱桥结构的一部分, 拱圈两端固结于桥台 (墩), 结构最为刚劲, 变形小, 比有铰拱经济; 但桥台位移、温度变化或混凝土收缩等因素对拱的受力会产生不利影响, 因而修建无铰拱桥要求有坚实的地基基础。

#### (2) 组合体系拱桥

是将行车系结构与主拱按不同的构造方式构成一个整体, 以共同承受荷载。根据不同的组合方式和受力特点, 又分为无推力的和有推力的。

对于有推力拱桥, 拱的推力由系杆承受, 墩台不受水平推力。这种结构使用较为广泛, 具体如图1.3 (a) 所示。

对于无推力拱桥, 这种组合体系拱没有系杆, 有单独的梁和拱共同受力, 拱的水平推力由墩台承受, 具体如图1.3 (b) 所示。

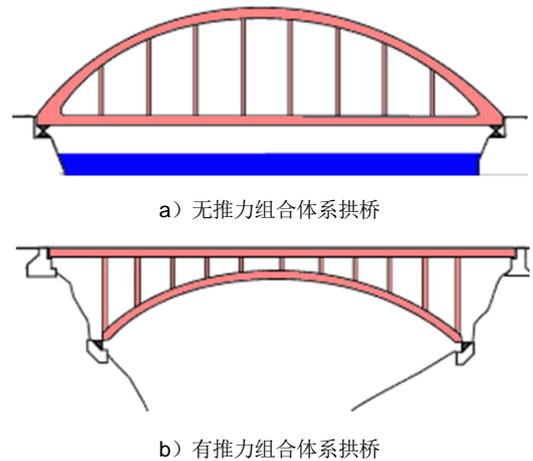


图1.3 按组合体系拱桥的分类

### 1.2 按照桥面所处空间位置拱桥分类

按照桥面所处的空间位置, 拱桥可分为上承式、中承式和下承式拱桥。具体如图1.4所示。

一般情况下, 拱桥多设计成上承式, 原因是桥面可最大程度地保护主体结构免遭阳光和雨水侵蚀; 但有时为了降低桥面高度, 缩短引桥长度, 又要照顾桥下通航净空高度的要求而采用中承式或下承式; 另外, 中、下承式拱桥还能达到增加城市景观的效果。

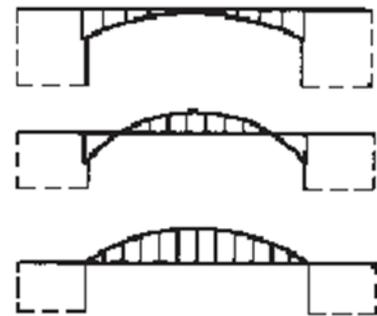


图1.4 按桥面空间位置的分类 (上承式、中承式、下承式)

### 1.3 主拱圈的截面形式分类

拱桥主拱圈的截面形式很多，但主要的有以下四种类型：

#### ■ 板式截面

其为实体矩形截面，构造简单，但抗弯刚度较小，且需采用有支架施工。如图1.5所示：

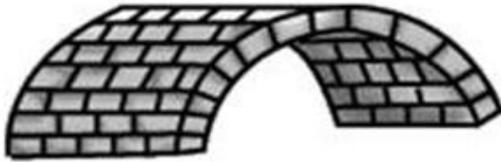


图1.5 板式截面示意图

#### ■ 拱肋式截面

拱肋式截面因截面高度增大而提高了截面的抵抗矩。另一方面，它需要沿桥轴线方向每隔一定间距增设一道横系梁，以提高结构受力的整体性和横向稳定性，因此在施工上较板式截面的拱桥复杂，拱肋截面有矩形、工字形、箱形等多种形式，具体如图1.6所示。



图1.6 拱肋式截面示意图

#### ■ 双曲拱截面

双曲拱是由拱肋、拱波、拱板和横向联系等几部分组成，其最大特点是将主拱圈以“化整为零”的方法先行预制，再按先后顺序进行吊装施工，然后“集零为整”组合成整体结构承重。它避免了在深水河流中搭设支架和中断航道进行施工困难，但施工程序较复杂，结构的整体性稍差。具体截面

如图1.7所示。

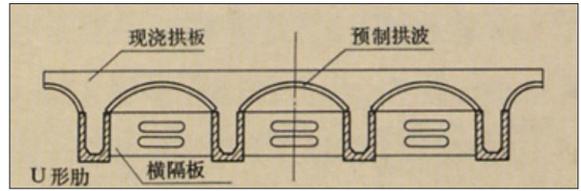


图1.7 双曲拱截面示意图

#### ■ 箱型截面

箱型截面与板拱、双曲拱截面相比，在相同的截面下，抵抗矩更大，且抗扭刚度大，因而截面经济，横向整体性强，稳定性好。但是箱形拱的制作要求高，施工时需要具有较大吊装能力的设备。截面如图1.8所示。

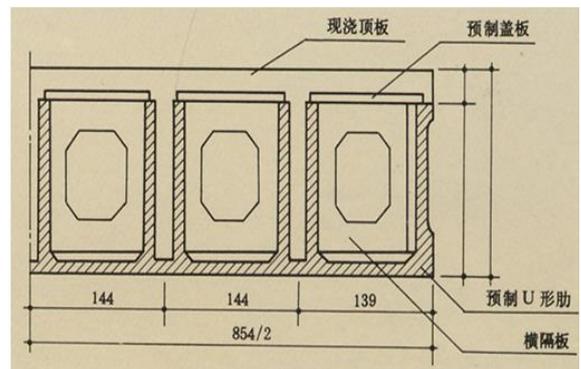
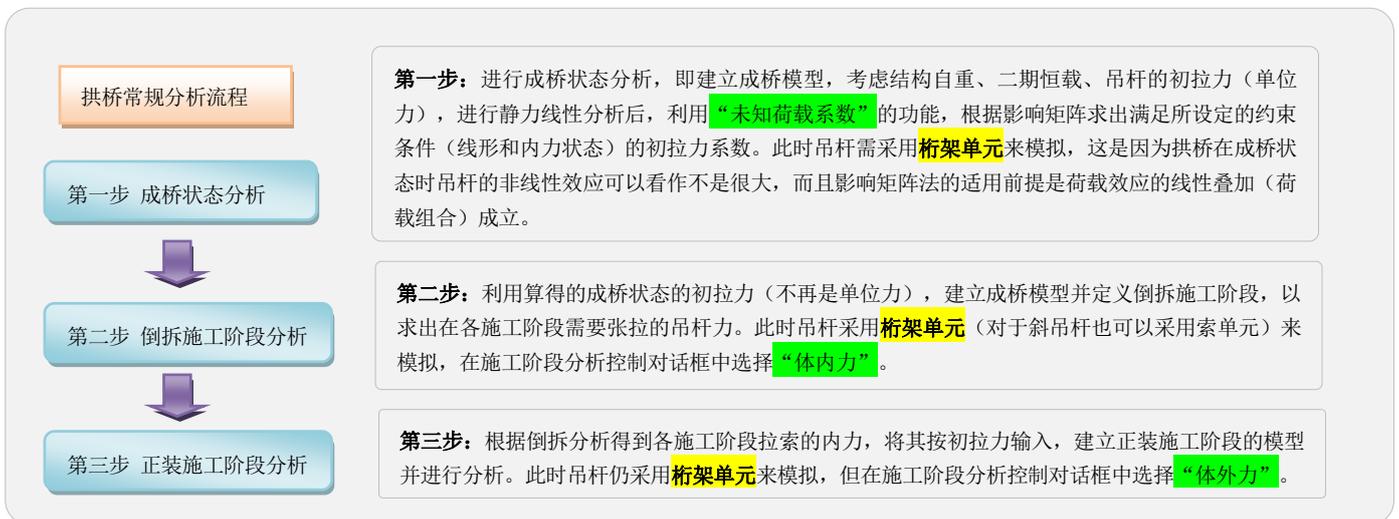


图1.8 箱型截面示意图

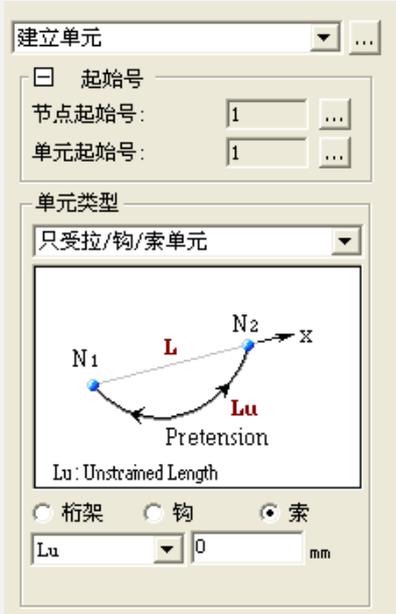
## 二. midas Civil 中的吊杆拱桥分析功能

吊杆拱桥的设计过程与一般梁式桥的设计过程有所不同。对于梁式桥梁结构，如果结构尺寸、材料、二期恒载都确定之后，结构的恒载内力也随之基本确定，无法进行较大的调整。但对于吊杆拱桥，由于其成桥线形和内力状态可以通过吊杆拉力的调整得到，因此吊杆拱桥的设计首先是确定其合理的成桥状态，即合理的线形和内力状态，其中起主要调整作用的就是吊杆的张拉力。

midas Civil 程序针对吊杆拱桥的张拉力确定、施工阶段分析等提供了多种解决方案，例如利用未知荷载系数法进行成桥状态分析，同时结合调索功能进行拱桥成桥状态调索；利用考虑施工阶段的未知荷载系数法进行施工阶段分析等等，下面就各分析功能作详细的说明。



2.1 拉索单元模拟



成桥状态荷载工况	不勾选“在PostCS...”	勾选“在PostCS...”	备注
移动荷载	按桁架单元考虑 (线性叠加)	考虑成桥状态的索单元 和梁单元的几何刚度	
支座沉降	同上	同上	
动力分析 (特征值分析等)	同上	同上	
温度荷载	按等效桁架单元考虑, 基于恩斯特公式进行 反复迭代计算	同上	
其它静力荷载	按等效桁架单元考虑, 基于恩斯特公式进行 反复迭代计算	同上	

几种索单元类型:

- 桁架单元
  - 只受拉桁架单元
  - 只受拉钩单元
  - 只受拉索单元
- (恩斯特公式修正的索单元、  
大变形的悬索单元)

不同结构中索单元的使用:

- ✦ 悬索桥的主缆和吊杆: 建议使用考虑大变形的悬索单元;
- ✦ 大跨斜拉桥的斜拉索: 对于近千米或者超过千米的斜拉桥建议使用考虑大变形的索单元;
- ✦ 中小跨斜拉桥的斜拉索: 建议使用考虑恩斯特公式修正的等效桁架单元;
- ✦ 拱桥的吊杆: 建议使用桁架单元或只受拉桁架单元;
- ✦ 系杆拱桥的系杆: 建议使用桁架单元;
- ✦ 体内预应力或体外预应力的钢索(钢束): 与索单元无关, 使用预应力荷载功能按荷载来模拟即可。
- ✦ 进行细部分析时, 对于预应力钢束可以按桁架单元来模拟;

5.1.3 拉索换算弹性模量按下式计算:

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{(\gamma S \cos \alpha)^2}{12\sigma^3}} \quad (5.1.3)$$

式中:  $E$ ——考虑垂度影响的拉索换算弹性模量(kPa);

$E_0$ ——拉索弹性模量(kPa);

$\gamma$ ——拉索换算容重(kN/m<sup>3</sup>),

$\gamma = \frac{\text{每米拉索及防护结构材料重力(kN/m)}}{\text{拉索截面积(m}^2\text{)}}$

$S$ ——拉索长度(m);

$\alpha$ ——拉索与水平线的夹角(°);

$\sigma$ ——拉索应力(kPa)。

恩斯特公式, 由德国著名学者 H.-J.Ernst 提出。公式表明: 选用高强度的材料, 提高拉索的工作应力, 采用轻而有效的拉索防护手段, 使拉索每延米的重量不致过多增加, 均有助于提高拉索刚度, 降低其非线性影响。

2.2 未知荷载系数法功能

**结果>未知荷载系数**

利用未知荷载系数功能，可以计算出最小误差范围内的能够满足特定约束条件的最佳荷载系数，利用这些荷载系数计算拉索初拉力。指定位移、反力、内力的“0”值以及最大最小值作为约束条件，拉索初拉力作为变量（未知数）来计算。

计算未知荷载系数适用于线性结构体系，为了计算出最佳的索力，必须要输入适当的约束条件。

- (1) 主梁的变形最小；
- (2) 索力不集中在几根拉索，而是均匀分布在每根拉索上。

### 未知荷载系数的详细内容

项目名称: 未知荷载系数

荷载组合: ULP

目标函数的类型:  线性  平方  最大绝对值

未知荷载系数的符号:  负  正负  正

约束条件: M1001, M1002, M1003, M1004, M1005, M1008, M1009, M1010, M1011

未知	荷载工况	系数	变量的系数
1	自重	1.000	
2	二恒	1.000	
3	T1	未知	1.00
4	T2	未知	1.00
5	T3	未知	1.00
6	T4	未知	1.00

### 未知荷载系数的约束条件

约束名称: M1001

约束类型: 梁单元内力

单元号: 1001

位置:  I-端  1/4  2/4  3/4  J-端

内力:  Fx  Fy  Fz  Mx  My  Mz

约束条件:  相等  不等

上限: 5000  
下限: -5000

### 约束表格

Name	Elem	Point	Compo.	Type	Value	(0)	Other	(U)	Upper	
1	M1001	1001	2/4 Pos	MY	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	5000	
2	M1002	1002	2/4 Pos	MY	Inequality	A	B	C	D	
3	M1003	1003	2/4 Pos	MY	Inequality	1	M1001	1001	2/4 Pos	MY
4	M1004	1004	2/4 Pos	MY	Inequality	2	M1002	1002	2/4 Pos	MY
5	M1005	1005	2/4 Pos	MY	Inequality	3	M1003	1003	2/4 Pos	MY
6	M1008	1008	2/4 Pos	MY	Inequality	4	M1004	1004	2/4 Pos	MY
7	M1009	1009	2/4 Pos	MY	Inequality	5	M1005	1005	2/4 Pos	MY
8	M1010	1010	2/4 Pos	MY	Inequality	6	M1008	1008	2/4 Pos	MY
9	M1011	1011	2/4 Pos	MY	Inequality	7	M1009	1009	2/4 Pos	MY
10	M1012	1012	2/4 Pos	MY	Inequality	8	M1010	1010	2/4 Pos	MY
10	M1012	1012	2/4 Pos	MY	Inequality	9	M1011	1011	2/4 Pos	MY
10	M1012	1012	2/4 Pos	MY	Inequality	10	M1012	1012	2/4 Pos	MY

**考虑施工阶段的未知荷载系数法:**

midas Civil还可考虑施工阶段，计算未知荷载系数。利用此功能可直接计算出，施工过程中每根拉索的拉索控制力。

- (1) 定义正装施工阶段模型。
- (2) 将每个施工阶段的拉索初拉力定义单位初拉力。（注：拉索过程必须单独定义施工阶段）
- (3) 运行分析后，通过未知荷载系数计算，求得符合约束条件的施工过程中的拉索控制力。

**注意:**

- 1、对于利用未知荷载系数法求解索力的时候，对于中小模型，可以把单位初拉力定义为1KN，但是对于大跨斜拉桥和拱桥，建议将初拉力定义为100KN；
- 2、对于考虑施工阶段的未知荷载系数法，拉索激活的阶段需要单独定义成施工阶段，同时该施工阶段只能有**拉索力激活**，不能包含其他作用；
- 3、表格数据可以与Excel的数据进行互换，因此可利用**表格的功能**，方便地修改约束条件。

### 2.3 索力调整功能

#### 结果>调整索力:

索力的计算非常复杂，过去是依靠设计人员判断以及参考实际经验值来确定拉索张力的。为了使设计人员可以更加便捷地计算拉索的初始张力，midas Civil 提供未知荷载系数功能。不过，由于未知荷载系数的功能提供的张力结果只是能够满足约束条件的解，所以有时无法完全满足技术人员的设计意图。

midas Civil2010中，为了改善未知荷载系数功能，并且使设计过程中的反复调整索力工作尽可能简便，特别开发和提供了索力调整功能。索力调整功能使设计人员可以直接调整索力，并且不需要任何重新分析即可实时查看主梁或者主塔的变形情况，因此可以非常便捷、快速地获得初始张力。



拉索的张力（或者荷载系数）可以利用输入窗口或柱状图进行微调来确定最优索

设计人员指定的范围（红线）

随拉索张力变换的效果（蓝线）

影响值（绿线）

在影响矩阵中确认对单元影响最大的张力后，使用搜索功能，确定最优索力；

#### 影响矩阵

	1009 C	1010 I	1010 C	1011 I	1011 C	1012 I	1012 C
结果	4999.999799	-523.287594	706.476843	-4522.000000	0.000000	0.000000	0.000000
自重	-10868.429512	-16543.356058	-15161.904760	-16035.000000	0.000000	0.000000	0.000000
二恒	-2172.704000	-3318.746396	-3043.064601	-3220.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T1	-0.202283	-0.244828	-0.231070	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T2	-0.039940	-0.063233	-0.062590	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T3	0.054048	0.030353	0.023167	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T4	0.108404	0.067163	0.054914	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T5	0.148284	0.078622	0.060044	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T6	0.159664	0.072483	0.050715	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T7	-0.423602	-0.112858	-0.060663	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T8	-1.988805	-0.863519	-0.558535	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T9	-1.246387	-2.394570	-1.605982	-0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
T10	0.280671	-0.181335	-0.726398	-1.271460	-0.873175	-0.474890	-0.237445
T11	0.957028	0.807068	0.451814	0.096559	-0.253304	-0.603167	-0.301583
T12	1.652449	1.811497	1.639009	1.466521	1.205083	0.943645	0.471822
配重	11332.753632	16602.174992	18092.665303	15833.155613	13360.109680	9949.563747	5443.531874

#### Search

chk	荷载工况	调整前	调整后	范围	adv	开始值	结束值	步数
1	自重	1.00	1.00	20.0		0.8	1.2	4
2	二恒	1.00	1.00	20.0		0.8	1.2	4
3	T1	1.02	6631.02	20.0		5304.8	7957.2	4
4	T2	820.91	8320.91	20.0		6656.7	9985.1	4
5	T3	6905.60	6905.60	20.0		5524.5	8286.7	4
6	T4	6414.08	6414.08	20.0		5131.3	7696.9	4
7	T5	4997.63	4997.63	20.0		3998.1	5997.2	4
8	T6	2190.89	2190.89	20.0		1752.7	2629.1	4
9	T7	1384.13	1384.13	20.0		1107.3	1661.0	4

chk	单元号(坐标)
1	1001 I
2	1001 C
3	1002 I
4	1002 C
5	1003 I
6	1003 C
7	1004 I
8	1004 C
9	1005 I
10	1005 C
11	1005 J

对象函数类型:  绝对值  平方

范围: 低值 0 高值 0

计算结果: 调整前: 55368.9050935189 调整后: 55368.9050935189

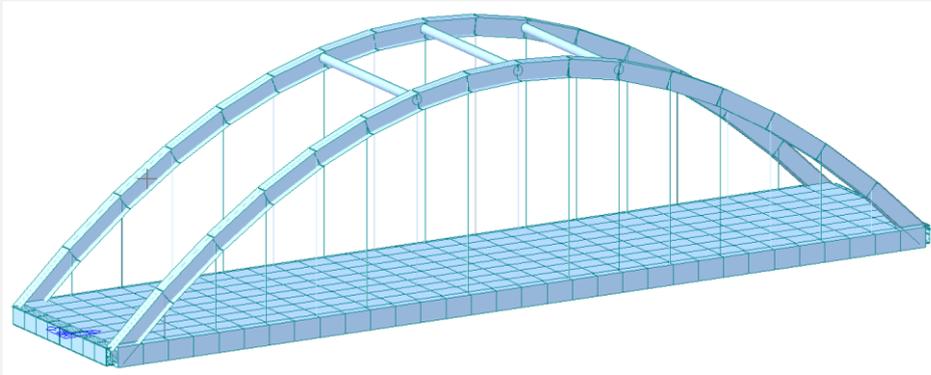
索力调整步骤



### 三. 拱桥实例分析

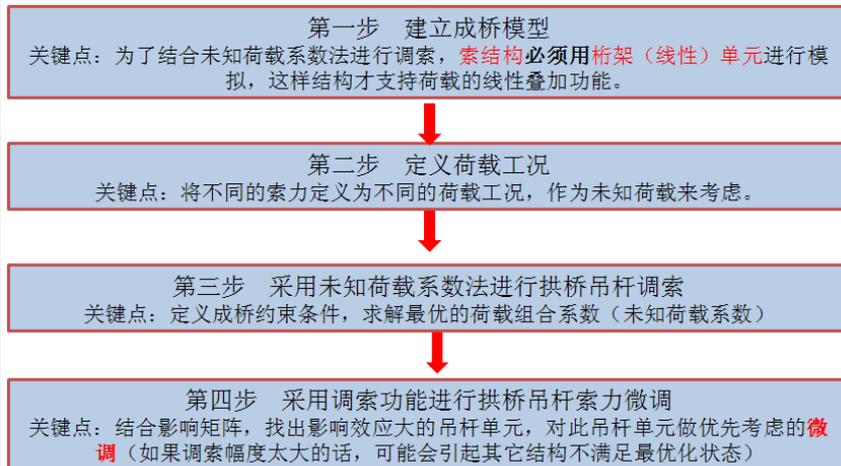
#### 3.1 系杆拱桥模型概况

本例题中的拱桥是一座80米跨径的系杆拱桥，桥梁外部为简支结构体系，桥梁内部为超静定结构体系。



#### 3.2 系杆拱桥成桥分析

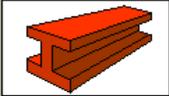
##### 系杆拱桥 成桥分析流程



结构材料特性:

**材料数据**

一般  
材料号: 1 名称: Q345

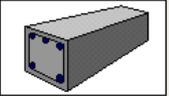
弹性数据  
设计类型: 钢材  
  
 钢材 规范: GB03 (S) 数据库: Q345  
 混凝土 规范: 数据库: 材料类型:  各向同性  各向异性

钢材  
弹性模量: 2.0600e+002 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0.3  
线膨胀系数: 1.2000e-005 1/[C]  
容重: 7.698e-008 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 7.85e-012 kN/mm<sup>3</sup>/g

混凝土  
弹性模量: 0.0000e+000 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0  
线膨胀系数: 0.0000e+000 1/[C]  
容重: 0 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 0 kN/mm<sup>3</sup>/g

**材料数据**

一般  
材料号: 2 名称: C50

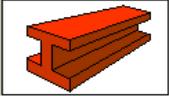
弹性数据  
设计类型: 混凝土  
  
 钢材 规范: 数据库: 混凝土 规范: JTG04 (RC) 数据库: C50 材料类型:  各向同性  各向异性

钢材  
弹性模量: 0.0000e+000 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0  
线膨胀系数: 0.0000e+000 1/[C]  
容重: 0 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 0 kN/mm<sup>3</sup>/g

混凝土  
弹性模量: 3.4500e+001 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0.2  
线膨胀系数: 1.0000e-005 1/[C]  
容重: 2.5e-008 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 2.549e-012 kN/mm<sup>3</sup>/g

**材料数据**

一般  
材料号: 4 名称: 吊杆

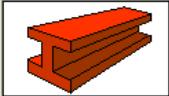
弹性数据  
设计类型: 钢材  
  
 钢材 规范: JTG04 (S) 数据库: Strand1860  
 混凝土 规范: 数据库: 材料类型:  各向同性  各向异性

钢材  
弹性模量: 1.9500e+002 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0.3  
线膨胀系数: 1.2000e-005 1/[C]  
容重: 7.85e-008 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 8.005e-012 kN/mm<sup>3</sup>/g

混凝土  
弹性模量: 0.0000e+000 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0  
线膨胀系数: 0.0000e+000 1/[C]  
容重: 0 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 0 kN/mm<sup>3</sup>/g

**材料数据**

一般  
材料号: 5 名称: 钢束

弹性数据  
设计类型: 钢材  
  
 钢材 规范: JTG04 (S) 数据库: Strand1860  
 混凝土 规范: 数据库: 材料类型:  各向同性  各向异性

钢材  
弹性模量: 1.9500e+002 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0.3  
线膨胀系数: 1.2000e-005 1/[C]  
容重: 7.85e-008 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 8.005e-012 kN/mm<sup>3</sup>/g

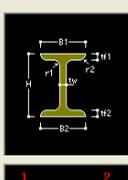
混凝土  
弹性模量: 0.0000e+000 kN/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0  
线膨胀系数: 0.0000e+000 1/[C]  
容重: 0 kN/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 0 kN/mm<sup>3</sup>/g

结构截面特性:

截面数据

数据库/用户 | 截面号: 1 | 工字形截面

名称: 拱柱 | 用户 | 数据库 | GB-YB

截面:   焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据  
数据库名称: GB-YB | 截面名称:

H: 1.6 m  
B1: 1.3 m  
tw: 0.7 m  
tf1: 0.275 m  
B2: 1.3 m  
tf2: 0.275 m  
r1: 0 m  
r2: 0 m

考虑剪切变形

偏心: 中心 | 修改偏心...

显示截面特性值... | 确认 | 取消 | 适用(A)

截面数据

数据库/用户 | 设计截面 | 截面号: 2 | 设计用数值截面

名称: 系杆 |  计算截面特性值网格尺寸: m

定义坐标...

截面数据

设计参数  
T1: 0.35 m  
T2: 0.35 m  
BT: 1.05 m  
HT: 1.45 m

验算扭转用厚度(最小)  
0.25 m | 自动

考虑剪切变形

剪切验算  
位置 | Qy | 自动 | 验算用厚度(所有) | 自动  
Z1: 1.45 m | 0.329875 m<sup>3</sup> |  | 0.499999999999 m |   
Z2: 质心 | 0.4055 m<sup>3</sup> |  | 0.5 m |   
Z3: 0.35 m | 0.329875 m<sup>3</sup> |  | 0.5 m |

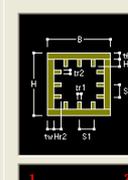
偏心: 中心 | 修改偏心... | 显示质心

显示截面特性值... | 确认 | 取消 | 适用(A)

截面数据

数据库/用户 | 截面号: 3 | 带肋箱型

名称: 侧模梁 | 用户 | 数据库 | GB-YB

截面:   焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据  
数据库名称: GB-YB | 截面名称:

H: 1.6 m  
B: 1.6 m  
tf: 0.05 m  
tw: 0.05 m  
S1: 0.35 m  
Hr1: 0.2 m  
tr1: 0.03 m  
S2: 0.4 m  
Hr2: 0.1 m  
tr2: 0.02 m

考虑剪切变形

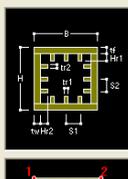
偏心: 中心 | 修改偏心...

显示截面特性值... | 确认 | 取消 | 适用(A)

截面数据

数据库/用户 | 截面号: 4 | 带肋箱型

名称: 中横梁 | 用户 | 数据库 | GB-YB

截面:   焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据  
数据库名称: GB-YB | 截面名称:

H: 1.6 m  
B: 1.2 m  
tf: 0.05 m  
tw: 0.05 m  
S1: 0.35 m  
Hr1: 0.2 m  
tr1: 0.03 m  
S2: 0.4 m  
Hr2: 0.1 m  
tr2: 0.02 m

考虑剪切变形

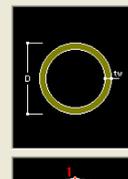
偏心: 中心 | 修改偏心...

显示截面特性值... | 确认 | 取消 | 适用(A)

截面数据

数据库/用户 | 截面号: 5 | 管型截面

名称: 风撑 | 用户 | 数据库 | GB-YB

截面:   焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据  
数据库名称: GB-YB | 截面名称:

D: 0.9 m  
tw: 0.01 m

考虑剪切变形

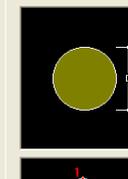
偏心: 中心 | 修改偏心...

显示截面特性值... | 确认 | 取消 | 适用(A)

截面数据

数据库/用户 | 截面号: 7 | 实腹圆形截面

名称: 中吊杆 | 用户 | 数据库 | GB-YB

截面:   焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据  
数据库名称: GB-YB | 截面名称:

D: 0.085 m

考虑剪切变形

偏心: 中心 | 修改偏心...

显示截面特性值... | 确认 | 取消 | 适用(A)

定义荷载工况及荷载组合

- 静力荷载
- + 静力荷载工况 1 [自重: ]
- + 静力荷载工况 2 [吊杆1: ]
- + 静力荷载工况 3 [吊杆2: ]
- + 静力荷载工况 4 [吊杆3: ]
- + 静力荷载工况 5 [吊杆4: ]
- + 静力荷载工况 6 [吊杆5: ]
- + 静力荷载工况 7 [吊杆6: ]
- + 静力荷载工况 8 [吊杆7: ]
- + 静力荷载工况 9 [吊杆8: ]
- + 静力荷载工况 10 [系杆力: ]

荷载组合

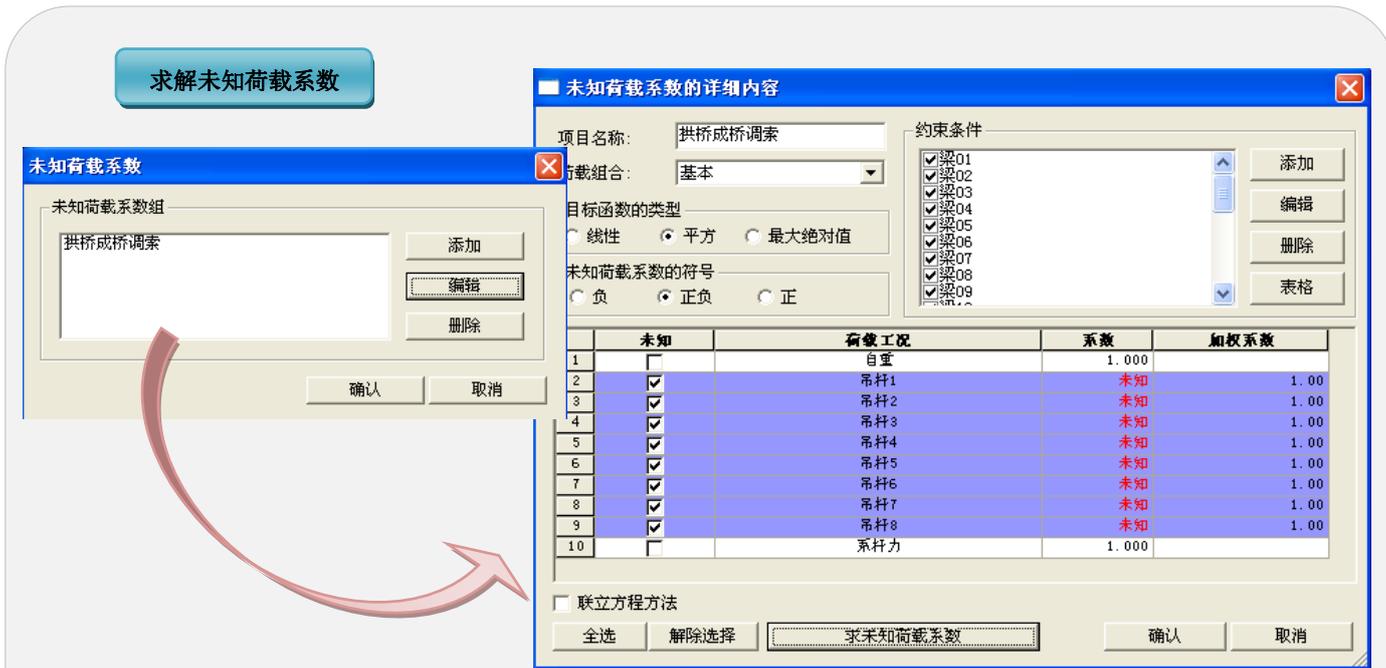
一般 | 钢结构设计 | 混凝土设计 | SRC设计 |

荷载组合列表

号	名称	激活	类型	说明
1	基本	激活	相加	
2	未知组合	激活	相加	

荷载工况和系数

荷载工况	系数
自重 (ST)	1.0000
吊杆1 (ST)	1.0000
吊杆2 (ST)	1.0000
吊杆3 (ST)	1.0000
吊杆4 (ST)	1.0000
吊杆5 (ST)	1.0000
吊杆6 (ST)	1.0000
吊杆7 (ST)	1.0000
吊杆8 (ST)	1.0000
系杆力 (ST)	1.0000



**注意：**

为了用优化技术计算未知荷载系数，需要首先对与未知荷载系数有关的荷载工况进行荷载组合，然后指定约束条件和目标函数。所有这些数据收集在一个唯一的且未知的荷载系数组内进行分析。

**1、荷载组合**

从先前在“结果> 荷载组合”中输入的荷载组合中选择某一荷载组合计算未知荷载系数。用于计算未知荷载系数的荷载组合必须包括要计算未知荷载系数的荷载工况。

程序每个荷载组合最多可以包含150个荷载工况，当要计算的未知荷载系数（即未知荷载工况）的数量大于150个时，可以定义两个荷载组合，然后将这两个荷载组合再进行荷载组合。在未知荷载系数对话框中选择使用荷载组合组合后的荷载组合。

**2、目标函数类型**

选择形成目标函数的方法，该函数由未知荷载系数组成。

- (1) 线性：（荷载系数绝对值×权重）的总和；
- (2) 平方：（荷载系数×权重）的平方的线性总和；
- (3) 最大绝对值：（荷载系数×权重）的绝对值的最大值；

**3、未知荷载数的符号**

指定要计算的未知荷载系数的正负号，对于吊杆调索若出现负值，说明有吊杆受压，需要重新求解计算。

- (1) 负：将计算值的范围限制在负数区内
- (2) 正负：不限制计算值的范围
- (3) 正：将计算值的范围限制在正数区内

**4、未知**

选中要得到未知荷载系数的荷载工况。即定义什么是变量，将荷载工况激活为未知荷载系数时，字符串“未知”即出现在相应荷载工况的系数区内。

**5、荷载工况：**作为未知荷载系数使用的荷载工况的名称。

**6、系数：**控制荷载工况在在目标函数中的相对重要性，自重的系数：自重的调整系数，一般取1即可。

**7、约束条件**

输入荷载组合结果要满足的约束，其中包括未知荷载系数。指定约束时，生成约束列表。可以有选择性地使用约束。对桁架或梁单元而言，约束类型是位移，反力及构件内力。对于大跨吊杆拱桥或者斜拉桥，在进行未知荷载系数调索时，可能会有很多个约束条件，建议用表格的方法进行约束条件的编辑，因为可以利用表格功能数据与Excel的数据进行互换，非常方便。

定义约束条件

约束表格

Reaction											
Displacement											
	Name	Node	Compo.	Type	Value	(0)	Other	(0)	Upper	(L)	Lower
1	位移03	3	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
2	位移05	5	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
3	位移07	7	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
4	位移09	9	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
5	位移11	11	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
6	位移13	13	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
7	位移15	15	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
8	位移17	17	DZ	Inequalit				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.01
9											

关闭

约束表格

Reaction												
Displacement												
Truss Force												
Beam Force												
	Name	Elem	Point	Compo.	Type	Value	(0)	Other	(0)	Upper	(L)	Lower
1	梁01	1	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
2	梁02	2	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
3	梁03	3	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
4	梁04	4	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
5	梁05	5	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
6	梁06	6	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
7	梁07	7	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
8	梁08	8	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
9	梁09	9	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
10	梁10	10	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
11	梁11	11	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
12	梁12	12	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
13	梁13	13	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
14	梁14	14	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
15	梁15	15	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
16	梁16	16	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
17	梁17	17	I-end	FX	Inequali				<input checked="" type="checkbox"/>	0		
18												

关闭

利用Excel表格功能快速方便地修改边界条件；复制、粘贴、拖拉这三个是经常用到的数据处理功能。

梁01	1	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁02	2	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁03	3	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁04	4	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁05	5	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁06	6	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁07	7	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁08	8	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁09	9	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁10	10	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁11	11	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁12	12	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁13	13	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁14	14	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁15	15	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁16	16	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0
梁17	17	I-end	FX	Inequality	0	1	0	0

位移03	3	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01
位移05	5	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01
位移07	7	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01
位移09	9	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01
位移11	11	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01
位移13	13	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01
位移15	15	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01
位移17	17	DZ	Inequality	0	1	0.01	1	-0.01

查看分析结果

求得的未知荷载系数

影响矩阵

未知荷载系数结果											
	吊杆1	吊杆2	吊杆3	吊杆4	吊杆5	吊杆6	吊杆7	吊杆8	系杆力		
系数	917.303	1003.452	948.079	1012.333	1045.501	1020.231	1078.021	1628.906	1.000		
约束条件	梁02	梁03	梁04	梁05	梁06	梁07	梁08	梁09	梁10	梁11	梁12
数值	-137.011	-242.475	-236.922	-217.759	-201.545	-196.721	-204.839	-210.044	-208.673	-202.052	-193.954
上限	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
下限											

未知荷载系数结果											
	约束条件	梁06	梁07	梁08	梁09	梁10	梁11	梁12	梁13	梁14	梁15
	上限	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	下限										
	数值	-201.545	-196.721	-204.839	-210.044	-208.673	-202.052	-193.954	-195.808	-206.087	-201.773
自重	1.000	4706.304334	4625.934067	4550.356750	4462.571147	4391.526622	4315.621375	4260.433617	4206.671347	4172.311791	4144.12639
吊杆1	917.303	0.028741	0.061578	0.092952	0.126426	0.145127	0.135470	0.093374	-0.029130	-0.191244	-0.469152
吊杆2	1003.452	0.079846	0.133999	0.177670	0.204917	0.196528	0.107837	-0.037425	-0.329487	-0.636843	-0.764707
吊杆3	948.079	0.123248	0.129758	0.106399	0.010813	-0.126316	-0.374698	-0.613327	-0.596393	-0.333851	-0.080763
吊杆4	1012.333	0.110499	0.004212	-0.147597	-0.419830	-0.680381	-0.682763	-0.424672	-0.140958	0.000000	0.171371
吊杆5	1045.501	-0.088419	-0.385613	-0.640674	-0.672451	-0.447021	-0.203418	-0.060417	0.056596	-0.108794	0.143880
吊杆6	1020.231	-0.546054	-0.594621	-0.391817	-0.178647	-0.062218	0.023749	0.051794	0.060996	0.054044	0.044016
吊杆7	1078.021	-0.311336	-0.132492	-0.037656	0.029990	0.048611	0.049043	0.035957	0.016387	0.000229	-0.014235
吊杆8	1628.906	-0.017680	0.020556	0.031825	0.033679	0.027831	0.018111	0.009339	-0.000004	-0.006147	-0.011199
系杆力	1.000	-4229.076592	-4042.642142	-3911.877490	-3781.335662	-3688.900937	-3597.459553	-3534.743870	-3475.964779	-3439.361071	-3410.514361

生成未知荷载系数组合

荷载组合列表					荷载工况和系数	
号	名称	激活	类型	说明	荷载工况	系数
1	基本	激活	相加		自重 (ST)	1.0000
2	未知组合	激活	相加		吊杆1 (ST)	917.2750
					吊杆2 (ST)	1003.5106
					吊杆3 (ST)	947.9867
					吊杆4 (ST)	1012.3929
					吊杆5 (ST)	1045.4850
					吊杆6 (ST)	1020.2338
					吊杆7 (ST)	1078.0216
					吊杆8 (ST)	1628.9088
					系杆力 (ST)	1.0000

**利用未知荷载系数法调索注意点:**

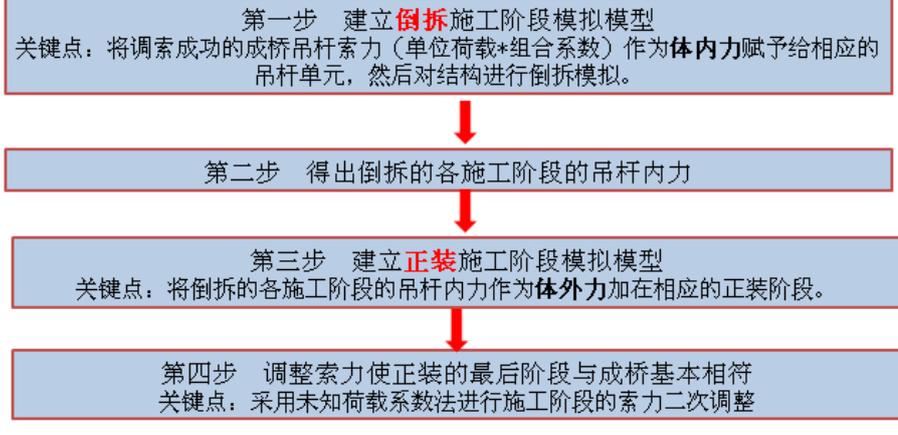
(1) 对于未知荷载系数法求解索力, 要善于利用表格的功能, 因为对于中小跨径的拱桥或者斜拉桥, 约束条件不多, 这时候一个一个修改起来还比较方便, 但是对于大跨径的拱桥或者斜拉桥, 约束条件少则几十个, 多则上百个, 这样再逐个修改约束条件, 会花费大量的时间, 这个尤其需要注意。

(2) 对于约束条件的设定, 针对吊杆拱桥的初始平衡状态分析, 一般比较关心主梁的节点的位移及吊杆的内力; 对于斜拉桥, 一般比较关心主塔的偏位及主梁的内力与位移, 即成桥线形。

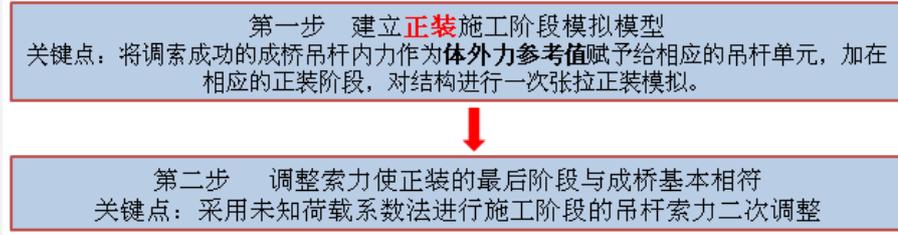
(3) 当用未知荷载系数求解出一组索力, 可以根据设计要求, 结合“调索索力”功能进行索力微调。

3.3 系杆拱桥施工阶段仿真模拟

拱桥 施工阶段仿真分析流程方法一



拱桥 施工阶段仿真分析流程方法二



倒拆分析

- 施工阶段: 10
- + 桥面铺装 [0 天(s)]
- + 拆铺装 [0 天(s)]
- + 拆吊杆8 [0 天(s)]
- + 拆吊杆7 [0 天(s)]
- + 拆吊杆6 [0 天(s)]
- + 拆吊杆5 [0 天(s)]
- + 拆吊杆4 [0 天(s)]
- + 拆吊杆3 [0 天(s)]
- + 拆吊杆2 [0 天(s)]
- + 拆吊杆1 [0 天(s)]

施工阶段持续时间为0, 不考虑收缩徐变;

正装分析结合二次调索



- [-] 施工阶段: 18
  - [+] 满堂施工 [30 天(s)]
  - [+] 吊杆1 [1 天(s)]
  - [+] 吊杆2 [1 天(s)]
  - [+] 吊杆3 [1 天(s)]
  - [+] 吊杆4 [1 天(s)]
  - [+] 吊杆5 [1 天(s)]
  - [+] 吊杆6 [1 天(s)]
  - [+] 吊杆7 [1 天(s)]
  - [+] 吊杆8 [1 天(s)]
  - [+] 桥面铺装 [30 天(s)]
  - [+] t1 [0 天(s)]
  - [+] t2 [0 天(s)]
  - [+] t3 [0 天(s)]
  - [+] t4 [0 天(s)]
  - [+] t5 [0 天(s)]
  - [+] t6 [0 天(s)]
  - [+] t7 [0 天(s)]
  - [+] t8 [0 天(s)]

定义单位索力

定义施工阶段分析控制数据

**施工阶段分析控制数据**

最终施工阶段:  最后施工阶段  其他施工阶段

设置施工阶段接继分析 选择重新开始的阶段...

**分析选项**

考虑非线性分析

独立模型  累加模型

包含平衡单元节点内力

只考虑P-Delta效应

考虑时间依存效果(累加模型)

**时间依存效果**

徐变和收缩

类型:  徐变  收缩  徐变和收缩

**徐变**

徐变分析时的收敛控制

迭代次数:  收敛误差:

使用用户定义的徐变系数

徐变分析加载时间步骤数

自动分割时间

T: 时间间隔	T>10	<input type="text" value="2"/>	T>100	<input type="text" value="5"/>
	T>1000	<input type="text" value="7"/>	T>5000	<input type="text" value="10"/>
	T>10000	<input type="text" value="20"/>		

钢束预应力损失(徐变和收缩)

考虑钢筋的约束效果

抗压强度的变化

钢束预应力损失(弹性收缩)

**非线性分析**

荷载步数:

每个荷载步内最大迭代次数:

收敛标准:  能量标准:   位移标准:   内力标准:

**索初拉力控制**

体内力  体外力

**杆系输出结果**

杆系内力最大值+同时发生的其他内力值

输出联合截面各位置的分析结果

从施工阶段分析结果的“CS-恒荷载”工况中分离出荷载工况(CS-施工荷载)

荷载工况:

分离出的“CS-施工荷载”的荷载类型:

**初始内力控制**

转换最终施工阶段构件内力为PostCS阶段的构件的几何刚度初始荷载

桁架单元  梁单元

在PostCS阶段将索单元转换为等效桁架单元

在施工阶段中适用初始内力

赋予各施工阶段中新激活构件初始切向位移

全部  组

未闭合配合力控制

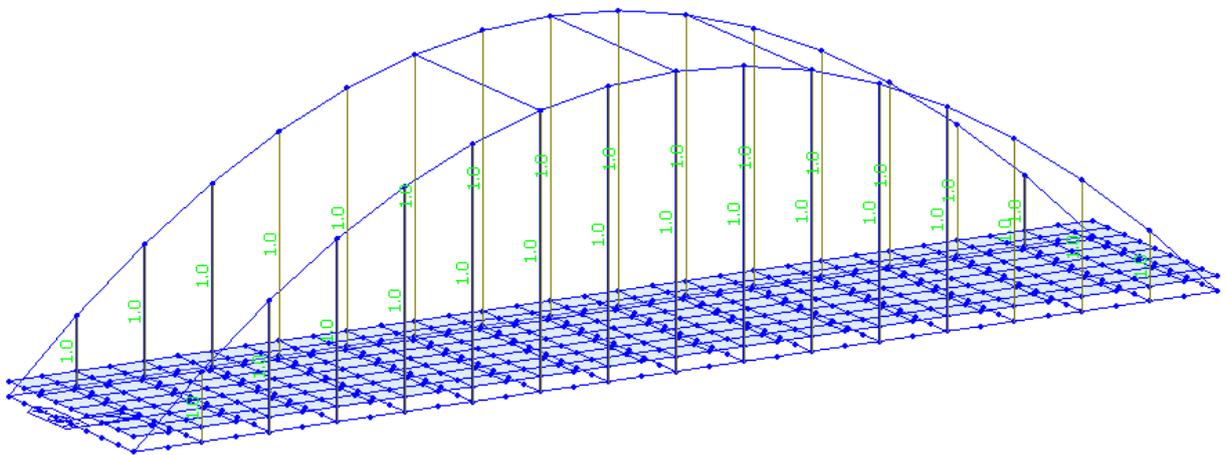
考虑后张法端部锚固区应力传递长度内局部应力变化

线性内面  常量: 应力 \*

**截面特性值变化**

常量  钢束引起的变化

保存当前阶段的结果(梁/桁架)



利用考虑施工阶段未知荷载系数进行二次调索:

- (1) 建立分析模型, 定义正装施工阶段, 在完成二期恒载的阶段定义后, 定义调索的施工阶段, 在此阶段中, **只激活相对应的单位索力**, 尤其需注意一点, 不能又任何其他荷载、结构、边界激活, 要不会影响未知荷载系数求解的结果。
- (2) 完成施工阶段分析控制数据, 需注意把索力定义成**体外力**。
- (3) 完成分析后, 在结果中定义未知荷载系数项目组, 选择**最终施工阶段**为目标状态, 而后选择未知变量, 及定义各种约束条件, 建议用表格功能进行定义。
- (4) 最后进行未知荷载系数的求解, 求出二次调索需要的调整索力大小。

定义约束条件:

**未知荷载系数详细**

项目名称: 施工阶段二次衬砌  
 步骤名称: t8

目标函数类型:  线性  平方  绝对最大  
 未知荷载系数符号:  负  正负  正

约束条件: 梁01, 梁02, 梁03, 梁04, 梁05, 梁06, 梁07, 梁08, 梁09

未知	阶段/步骤	系数	加权系数	DL	ER
<input type="checkbox"/>	系杆5/Last Step	1.000			
<input type="checkbox"/>	系杆6/Last Step	1.000			
<input type="checkbox"/>	系杆7/Last Step	1.000			
<input type="checkbox"/>	系杆8/Last Step	1.000			
<input type="checkbox"/>	断面偏压/Last Step	1.000			
<input checked="" type="checkbox"/>	t1/Last Step	未知	1.00		
<input checked="" type="checkbox"/>	t2/Last Step	未知	1.00		
<input checked="" type="checkbox"/>	t3/Last Step	未知	1.00		
<input checked="" type="checkbox"/>	t4/Last Step	未知	1.00		
<input checked="" type="checkbox"/>	t5/Last Step	未知	1.00		
<input checked="" type="checkbox"/>	t6/Last Step	未知	1.00		
<input checked="" type="checkbox"/>	t7/Last Step	未知	1.00		
<input checked="" type="checkbox"/>	t8/Last Step	未知	1.00		

操作按钮: 添加, 编辑, 删除, 表格

底部按钮: 全选, 解除选择, 求未知荷载系数, 确认

**约束表格**

Reaction	Displacement	Truss Force	Beam Force					
Name	Node	Compo.	Type	Value	(0)	Other	(U)	Upper
1	位移03	3 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
2	位移05	5 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
3	位移07	7 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
	位移09	9 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
	位移11	11 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
	位移13	13 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
7	位移15	15 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
8	位移17	17 DZ	Inequality				<input checked="" type="checkbox"/>	0.01
9							<input checked="" type="checkbox"/>	

**约束表格**

Reaction	Displacement	Truss Force	Beam Force						
Name	Elem	Point	Compo.	Type	Value	(0)	Other	(U)	Upper
1	梁01	1 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
2	梁02	2 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
3	梁03	3 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
4	梁04	4 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
5	梁05	5 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
6	梁06	6 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
7	梁07	7 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
8	梁08	8 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	
9	梁09	9 I-end	FX	Inequality			<input checked="" type="checkbox"/>	0	

查看分析结果

求得的未知荷载系数

影响矩阵

**未知荷载系数结果**

	t1/Last Step	t2/Last Step	t3/Last Step	t4/Last Step	t5/Last Step	t6/Last Step	t7/Last Step	t8/Last Step
系数	33.541	43.510	46.171	72.299	182.632	335.597	674.174	1179.219
约束条件	梁01	梁02	梁03	梁04	梁05	梁06	梁07	梁08
数值	-212.537	-812.487	-1362.399	-1537.393	-1584.430	-1505.267	-1387.331	-1293.03
上限	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
下限								

**未知荷载系数结果**

	约束条件	梁01	梁02	梁03	梁04	梁05	梁06	梁07
上限		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
下限								
数值		-212.537	-812.487	-1362.399	-1537.393	-1584.430	-1505.267	-1387.331
t1/Last Step	33.541	-0.007813	-0.016693	-0.018093	-0.010249	0.012161	0.040866	0.086455
t2/Last Step	43.510	-0.016062	-0.028272	-0.019271	0.008801	0.068150	0.134635	0.224625
t3/Last Step	46.171	-0.002671	0.009802	0.044548	0.085064	0.136722	0.173588	0.182481
t4/Last Step	72.299	0.028605	0.074796	0.135961	0.178770	0.189674	0.153304	0.005404
t5/Last Step	182.632	0.099269	0.175600	0.224419	0.211481	0.080445	-0.125342	-0.519166
t6/Last Step	335.597	0.219674	0.273769	0.194098	0.005344	-0.389051	-0.790237	-0.860973
t7/Last Step	674.174	0.339305	0.232082	-0.140358	-0.569564	-0.692553	-0.450808	-0.191865
t8/Last Step	1179.219	0.283257	-0.140687	-0.362952	-0.241313	-0.100687	-0.026024	0.029382

### 3.4 拱桥的稳定分析

#### 拱桥施工阶段的稳定分析:

因为屈曲和特征值分析只能在POSTCS阶段进行,因此当为了求解某个施工阶段状态下的结构稳定特性和自振周期特性时,可以通过指定施工阶段分析的截止阶段,然后进行屈曲分析或特征值分析数据即可。

如果要考虑施工阶段内力对结构刚度的影响,可以按以下步骤执行:

1) 施工阶段分析控制选择:



2) 选择某个施工阶段为分析的最终分析阶段;

3) 执行施工阶段分析完成后,选择某个终止的施工阶段然后使用文件)另存当前施工阶段,另存一个独立模型;

4) 打开荷载工具条,点击初始荷载>小位移>初始单元内力CS,将打开的表格数据复制,然后粘贴到另存的独立模型中的初始荷载>小位移>初始单元内力表格中,在此基础上就可以定义其它可变荷载的稳定分析。

#### 拱桥成桥阶段的稳定分析:

方法一:可以借鉴施工阶段的稳定分析,得到最后一个施工阶段的初始单元内力作为成桥的几何刚度,然后定义成桥的可变荷载进行屈曲分析。

方法二:直接以成桥模型为基础,对成桥结构进行可变荷载或者不变荷载的定义,然后对此状态做成桥的稳定分析。

### 3.5 混凝土拱桥模型模拟与设计关键点

混凝土拱桥设计时,一般混凝土拱圈是设计的重点,而拱上填料的传力模拟是否合理,又是混凝土拱桥模型模拟的关键点。拱上填料在整个结构中起到竖向传递桥面系荷载的作用,因此是否正确模拟拱上填料,是建模成败关键点。

拱上填料模拟方法一:采用弹性连接进行模拟,不考虑面外荷载效应,所以可以模拟成 $S_{ry}=0$ 的弹性连接,轴向刚度模拟时要合理;

拱上填料模拟方法二:采用立柱单元进行传力模拟,此单元用梁单元进行模拟,不考虑面外荷载效应,所以可采用释放梁端 $M_y$ 的约束进行等效传力模拟。

如果考虑面外荷载效应时,三维模型的等效上述方法就不可行,结构就得要另外处理了。

号	节点1	节点2	类型	角度 ([deg])	SDx (kN/m)	SDy (kN/m)	SDz (kN/m)	SRx (kN*m/[rad])	SRy (kN*m/[rad])	SRz (kN*m/[rad])
98	90	290	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00
99	91	291	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00
100	92	292	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00
101	93	293	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00
102	94	294	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00
103	95	295	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00
104	96	296	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00
105	97	297	一般	0.00	10000000.0	10000.0000	10000.0000	10000.00	0.00	10000.00

释放转动  
约束

