



施工阶段 - 矮塔斜拉桥详细分析

1. 概要

通过矮塔斜拉桥的实体单元模型分析，查看支座反力的横向分布情况、腹板的剪力及加劲梁沿纵向的轴力分布情况。

矮塔斜拉桥的受力特点为：所有的荷载均通过斜拉索传递到主塔上。故主塔内部将出现应力集中现象，加劲梁的支座部分、斜拉索与加劲梁的连接部分均会出现应力集中现象。根据上述受力特点，对结构进行实体单元详细分析，查看如下详细分析结果。

- 支座反力的横向分布情况
- 腹板的剪应力分布情况
- 腹板以及顶板的轴力传递情况

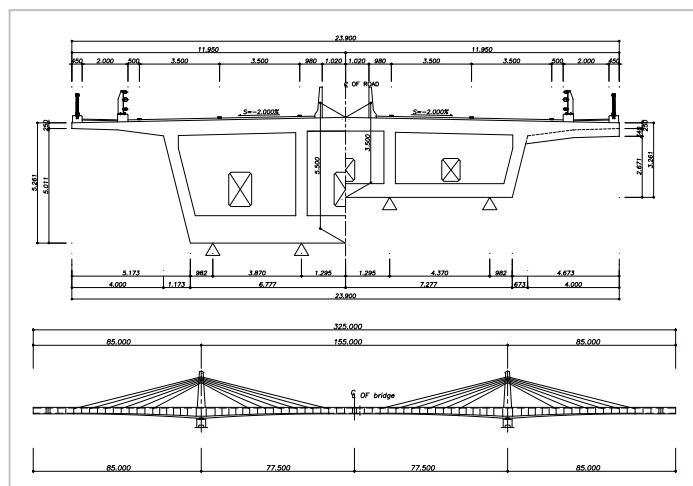
2. 桥梁信息

2.1 桥梁几何信息

(1) 本例题桥梁基本信息如下。

主梁类型：	三跨连续PSC箱梁
桥梁跨径：	$L = 85.0 + 155.0 + 85.0 = 325.0\text{ m}$
桥梁宽度：	$B = 23.900\text{ m}$
斜交角度：	90° (直桥)

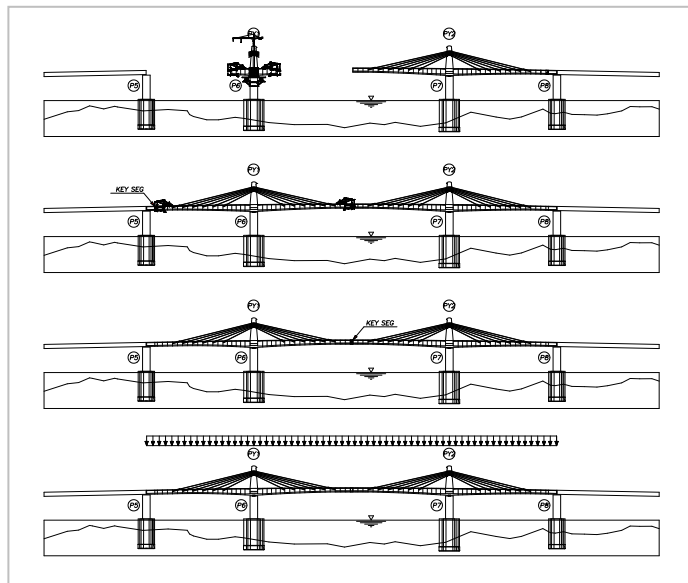
(2) 主梁截面为单箱三室截面，桥面宽度23.9m，主塔处以及边跨桥台处主梁横向布置四个支座（如下图所示）。主塔处内侧两支座为固定支座，边跨桥台处内侧两支座为纵向滑动支座，其余均为双向滑动支座。



[桥梁横、纵断面图]

2.2 施工方法

本例题桥梁的施工过程如下图所示，边跨两端采用FSM（满堂支架法）施工方法，其余主梁段采用FCM（悬臂法）施工方法。本例题简化了详细的施工过程，仅对主梁合拢段的合拢前、后阶段进行建模分析。



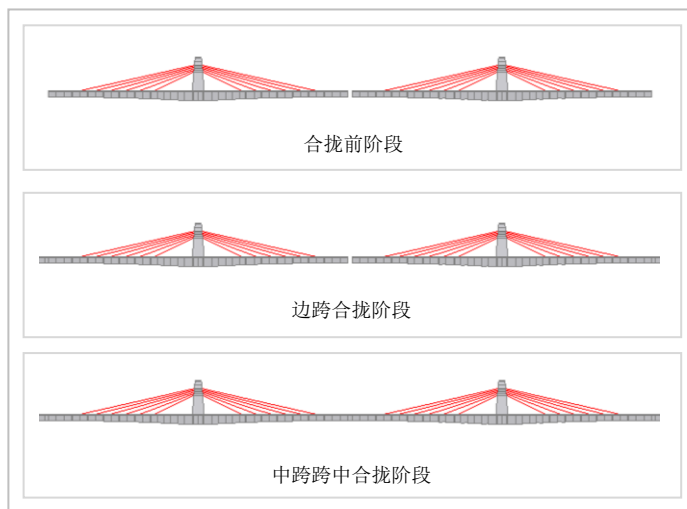
[施工过程]

3. 模型

对建模部分进行简要说明。

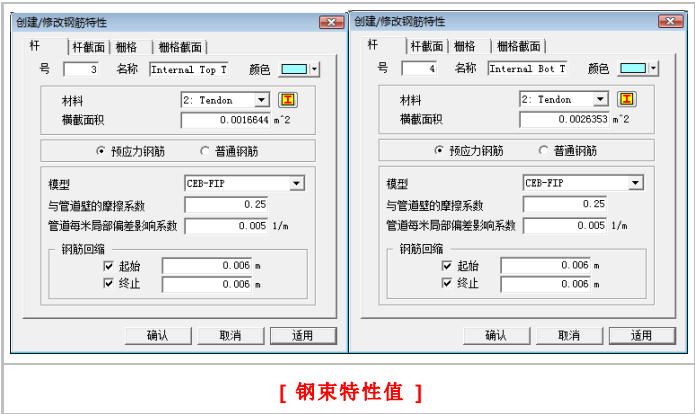
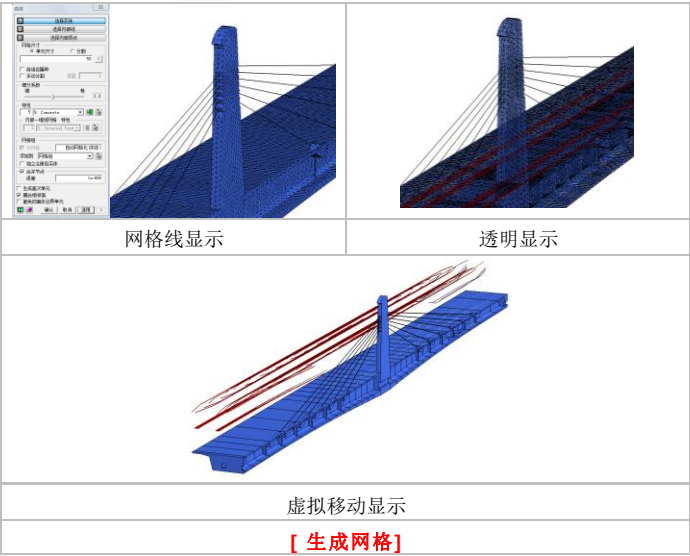
3.1 分析模型

(1) 本例题仅对主梁合拢前、后阶段的结构进行施工阶段分析。共分为三个施工阶段，合拢前阶段、边跨合拢阶段、中跨跨中合拢阶段。



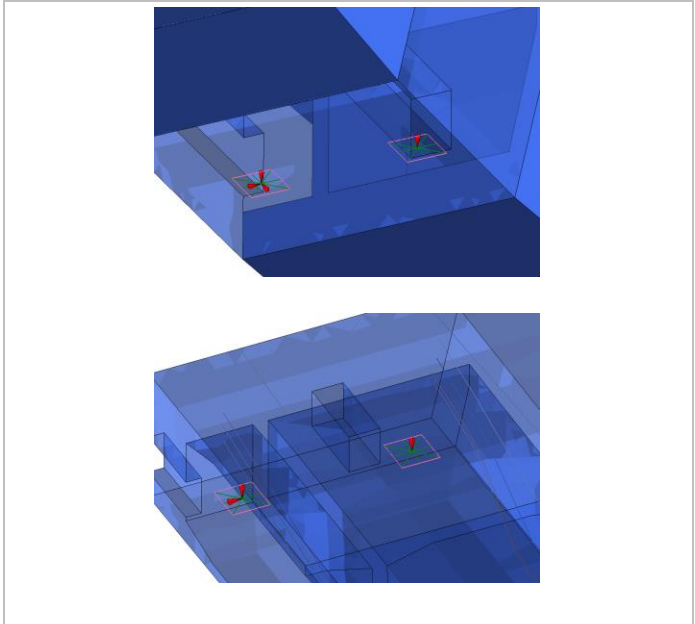
[施工阶段]

(2) 利用midas FEA程序中的几何建模功能以及自动网格划分功能建立模型。为了减少整体结构的分析时间，只建立全桥1/4的模型。混凝土部分采用四面体单元生成实体网格，斜拉索采用桁架单元，预应力钢束采用植入式钢筋模拟。

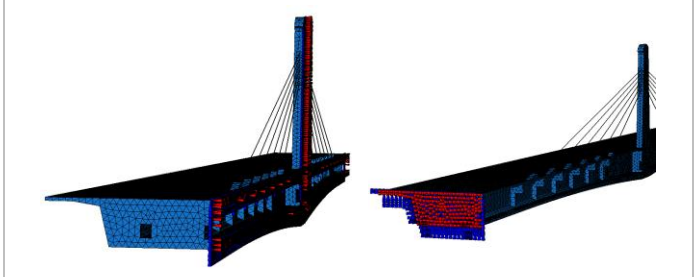


3.3 边界条件及荷载

模型边界条件如下图所示。主塔与桥台的支座尺寸范围内用刚性连接处理后，添加约束条件。因只建立了1/4的模型，在对称面上也应添加相应的边界条件。



桥梁支座处边界条件



1/4 结构对称面的边界处理

[边界条件]

(3) 预应力钢束考虑摩擦、锚具变形、徐变等预应力损失。

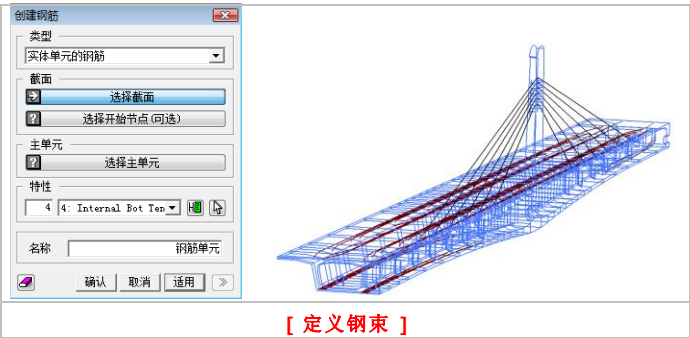
3.2 材料及截面特性

(1)混凝土、钢材的材料特性

名称	E(tonf/m ²)	γ(tonf/m ³)
混凝土(400kg/cm ²)	3,100,000	2.5
钢材(钢束)	20,000,000	7.85

(2)预应力钢筋的特性

名称	尺寸	根数	面积(cm ²)	张拉力(tonf)
顶板钢束	Φ 0.6 inch (15.2 mm)	12	237.2	237.2
底板钢束	Φ 0.6 inch (15.2 mm)	19	375.5	375.5



[定义钢束]

(3) 预应力损失具体参数

- ① 管道摩擦系数： $\mu=0.25$ (1/rad.)
- ② 局部偏差系数： $k=0.0050$ (1/m)
- ③ 锚具变形：6.0 (mm)

4. 分析结果

midas FEA 程序中提供了等值线、表格、图形、向量、图表等多种查看结果的功能。为了查看更详细的主应力、剪应力结果以及云图结果，本例题使用程序中“曲线图”功能与“查询结果”功能来查看结果。

4.1 分析结果

本例题桥梁使用的主要材料为混凝土材料，混凝土材料受拉时很容易出现裂缝。混凝土是否出现裂缝，需要通过主拉应力的方向与大小来判断，即查看最大主应力(LO-SOLID, 体-P1(V))分析结果。
实体单元应力可输出三个方向(X, Y, Z)的主应力结果。midas FEA 程序中的P1表示最大主拉应力，P3表示最大主压应力。下面应力成分中的前缀“LO”表示查看低次单元的应力结果，前缀用字母“HIGH”来表示时，查看的是高次单元的应力结果。

3D单元应力

LO-SOLID, 体-SPXX

LO-SOLID, 体-SPYY

LO-SOLID, 体-SPZZ

LO-SOLID, 体-SPXY

LO-SOLID, 体-SPYZ

LO-SOLID, 体-SPZX

LO-SOLID, 体-P 范梅塞斯

LO-SOLID, 体-最大剪切

LO-SOLID, 体-P P1 (V)

LO-SOLID, 体-P P2 (V)

LO-SOLID, 体-P P3 (V)

LO-SOLID, P1(V) : 最大主应力(最大拉应力)

LO-SOLID, P2(V)

LO-SOLID, P3(V) : 最小主应力(最大压应力)

[实体单元应力成分]

用桁架单元模拟斜拉索时，直接查看桁架单元的轴力以及轴应力即可。

1D Element Forces/Moments

LO-TRUSS, Nx

3D Element Strains

1D Element Stresses

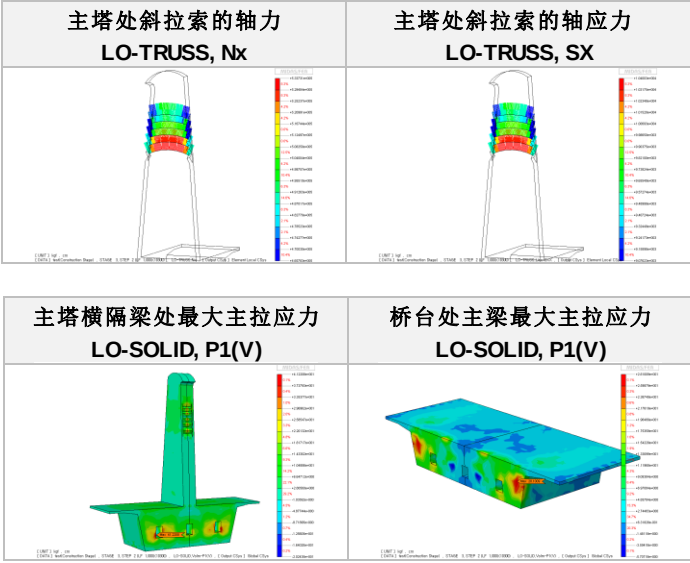
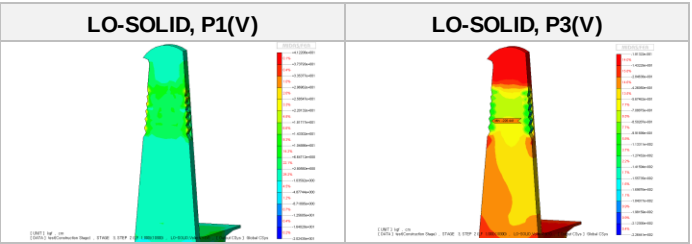
LO-TRUSS, SXX

LO-TRUSS, Nx : 桁架单元轴力

LO-TRUSS, SXX : 桁架单元的轴应力

[桁架单元应力成分]

从主塔的应力结果图中，不难看出与斜拉索连接部位的混凝土出现了应力集中现象，最大主应力为226.441kgf/cm²，需要进行强化处理。



主塔横隔板区域的应力结果（上图所示），开孔处周边的最大拉应力为41.2 2kgf/cm²，开孔边缘的局部范围发生了较大的拉应力，应增加配筋来加强处理。
边跨端部主梁的钢束锚固区的外侧腹板部分也出现了应力集中现象，也需要强化处理。钢束锚固处出现了较大的压应力，但横隔板周围发生了28.8kgf/cm²的拉应力。使用程序中的“查询结果”功能，标注了最大拉应力结果，需要强化处理。

预应力钢筋的应力结果输出以下三种内容。

1D钢筋单元应力/应变

REINFORCEMENT BAR, HIGH, 线-Sxx

REINFORCEMENT BAR, HIGH, 线-Exx

REINFORCEMENT BAR, HIGH, 线-SOxx

REINFORCEMENT BAR, LOW, SXX

考虑弹性变形损失后的钢束应力（同时考虑了摩擦、锚具变形等损失）

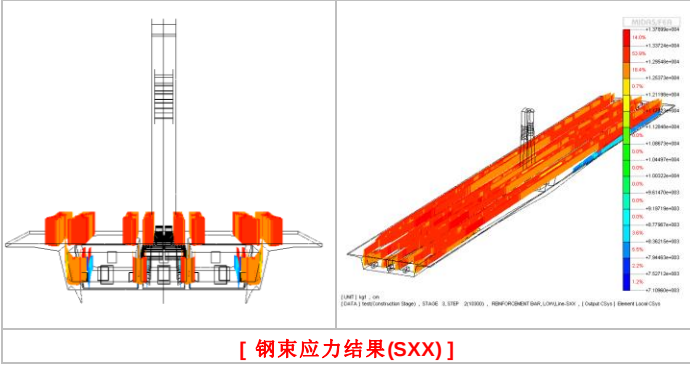
REINFORCEMENT BAR, LOW, EXX

考虑弹性变形损失后的钢束应变

REINFORCEMENT BAR, LOW, SOXX

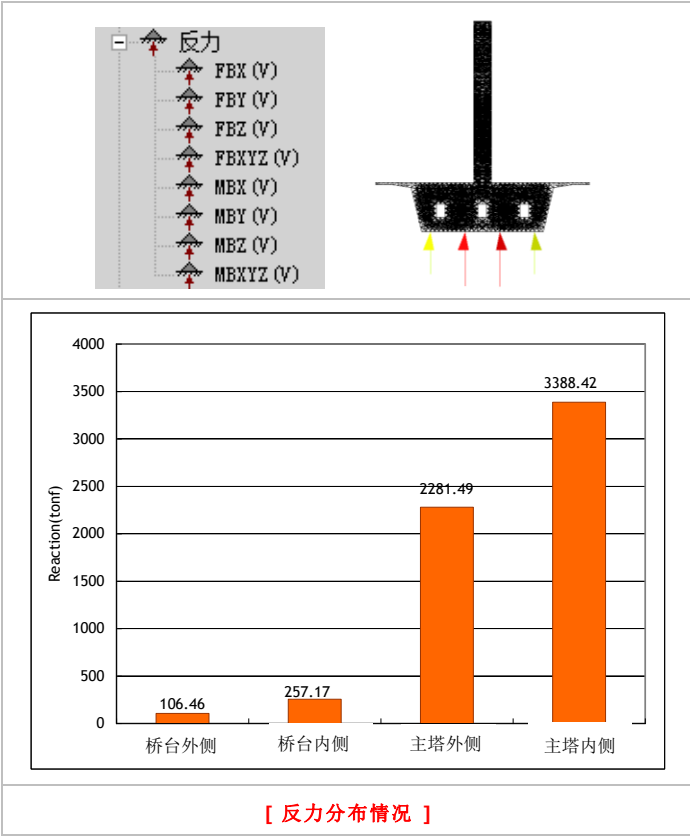
未考虑弹性变形损失的钢束应力（只考虑摩擦、锚具变形等损失）

从钢束应力结果图中可以看出，中跨合拢段的底板钢束应力相对较小。说明在合拢阶段外力对合拢段的钢束应力影响相对较小。



[钢束应力结果(SXX)]

查看主梁支座反力结果，内侧支座的反力是外侧支座反力的1.5倍左右，但线框架模型分析时内侧支座承担了更多的反力。与线框架模型分析相比，实体单元分析反映出更真实的情况。如果只进行线框架模型分析，可能会导致无法正确选择合适的支座，也有可能发生误以为支座发生了负反力、应力过分集中的现象。



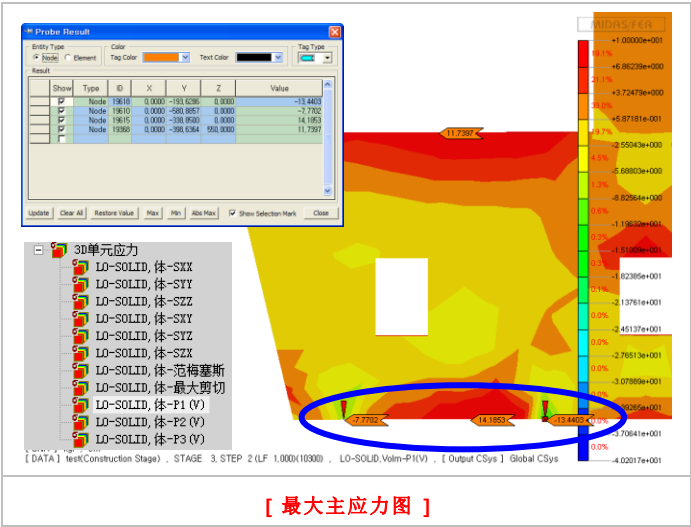
桥台支座		主塔支座	
外侧(%)	内侧(%)	外侧(%)	内侧(%)
29.3	70.7	29.3	70.7

4.2 主塔横隔板应力分布

所有的荷载将会通过主塔以及主塔横隔板传递至支座，有必要查看此部位的详细应力分布情况。

查看支座周边最大主应力的等值线图。图中可以看出支座处混凝土发生了很大压应力，但它的周边反而发生了较大的拉应力。可判断此区域可能会发生混凝土开裂现象。

横隔板顶端发生了拉应力，主梁支点负弯矩引起了拉应力。



[最大主应力图]

4.3 内、外侧腹板的剪应力分布

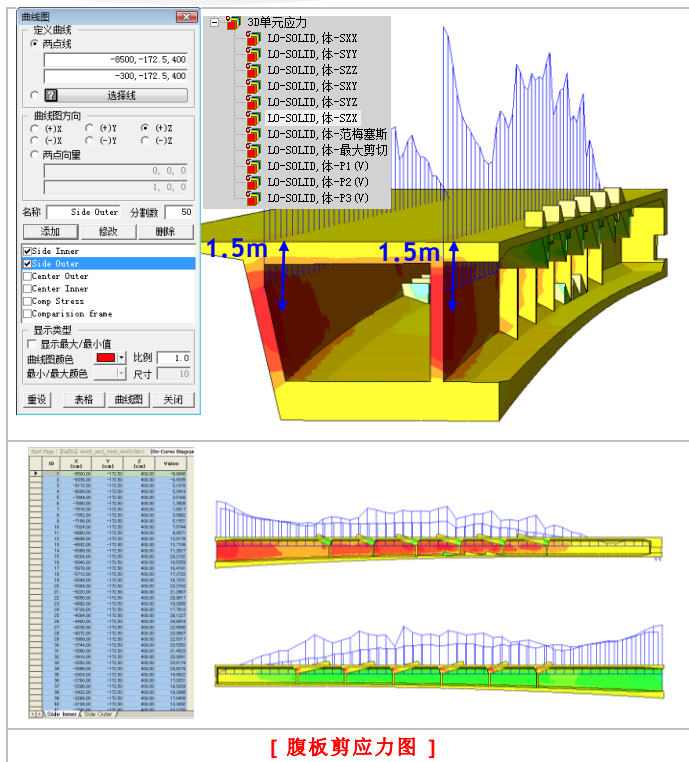
查看主梁腹板的剪应力分布情况。实体单元分析结果无法提供剪力（内力）结果，只提供剪应力结果。

查看桥梁纵向变化的腹板竖向剪应力结果，在程序中查看SZX(LO-Solid,体-SZX)应力成分。为了更好的了解桥梁的荷载分担情况，查看整跨的剪应力分布图。



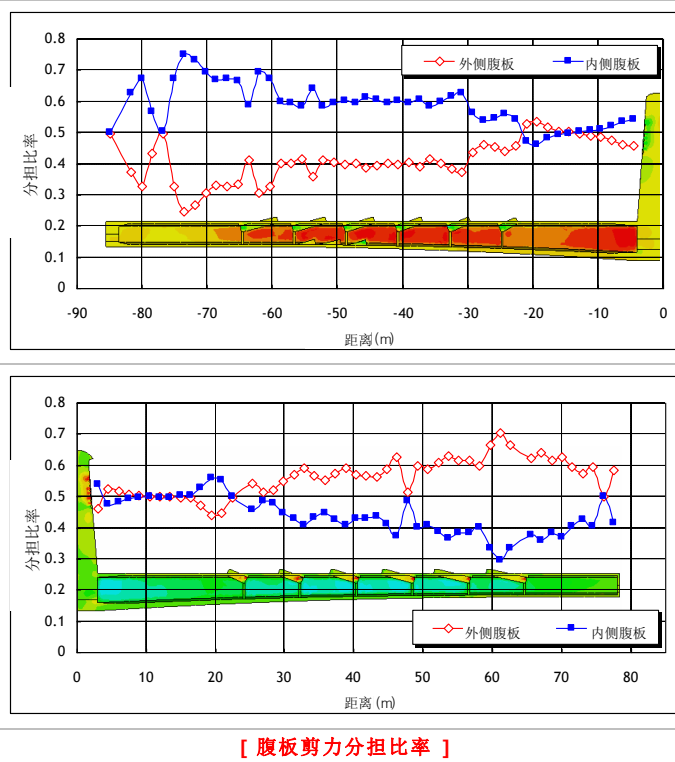
[实体单元剪应力成分]

利用midas FEA程序中的“曲线图”功能查看中、边跨内、外侧腹板的剪应力（SZX成分）图表结果和表格结果。查看顶板上端向下1.5m处的腹板剪应力结果。



[腹板剪应力图]

矮塔斜拉桥50%以上的荷载由斜拉索来承担，斜拉索在主梁截面内侧腹板上锚固。主梁截面共有四个腹板（如上图所示），内侧腹板与外侧腹板分担剪力的比率是不一样的。下图是内、外侧腹板各自分担剪力的比率图，利用剪应力结果计算出来的内侧腹板分担剪力的比率最大达到了80%左右。如果只进行线框架模型分析，是无法算出正确的分担比率的，其结果是平均分担给每个腹板的结果，设计验算的结果误差是非常大的。

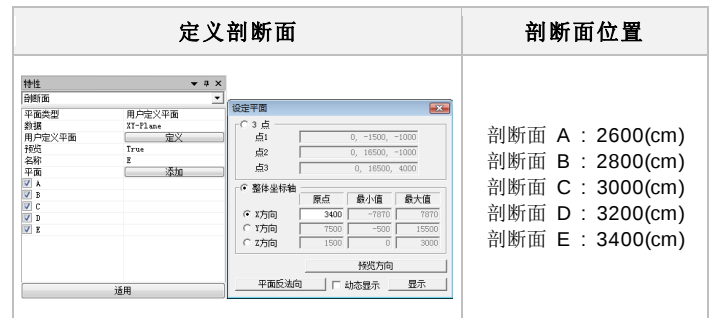


[腹板剪力分担比率]

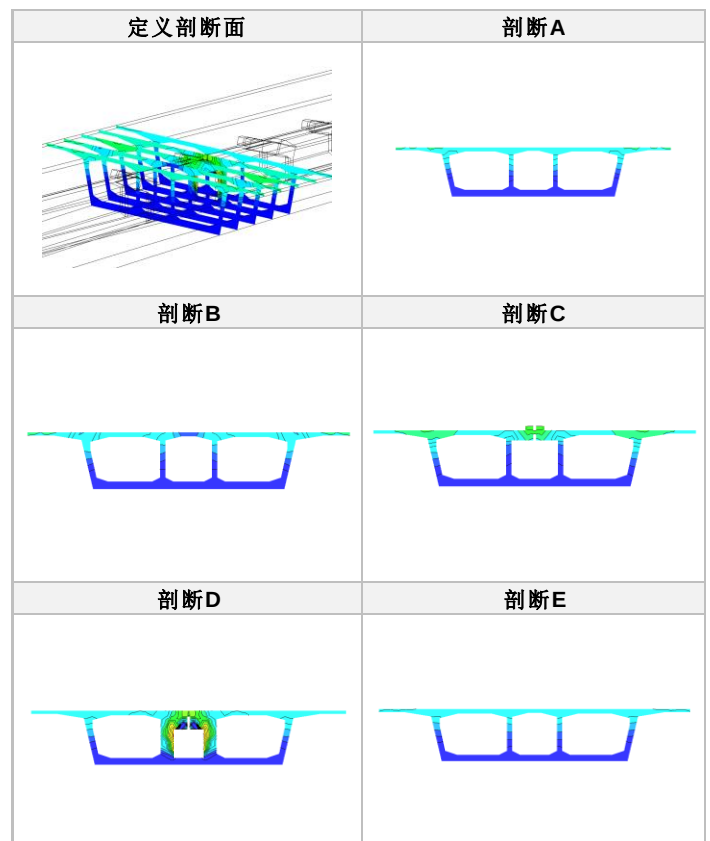
4.4 腹板及顶板的正应力和有效宽度

矮塔斜拉桥的斜拉索锚固在主梁的中心腹板处，纵向应力分布也是不均匀的。线框架模型分析时的应力是使用计算公式“ ”来计算的，其应力结果有可能比实际情况偏小。斜拉索连接处的局部应力可能会超过容许应力值，有必要进行实体单元的详细分析后，再进行应力验算。

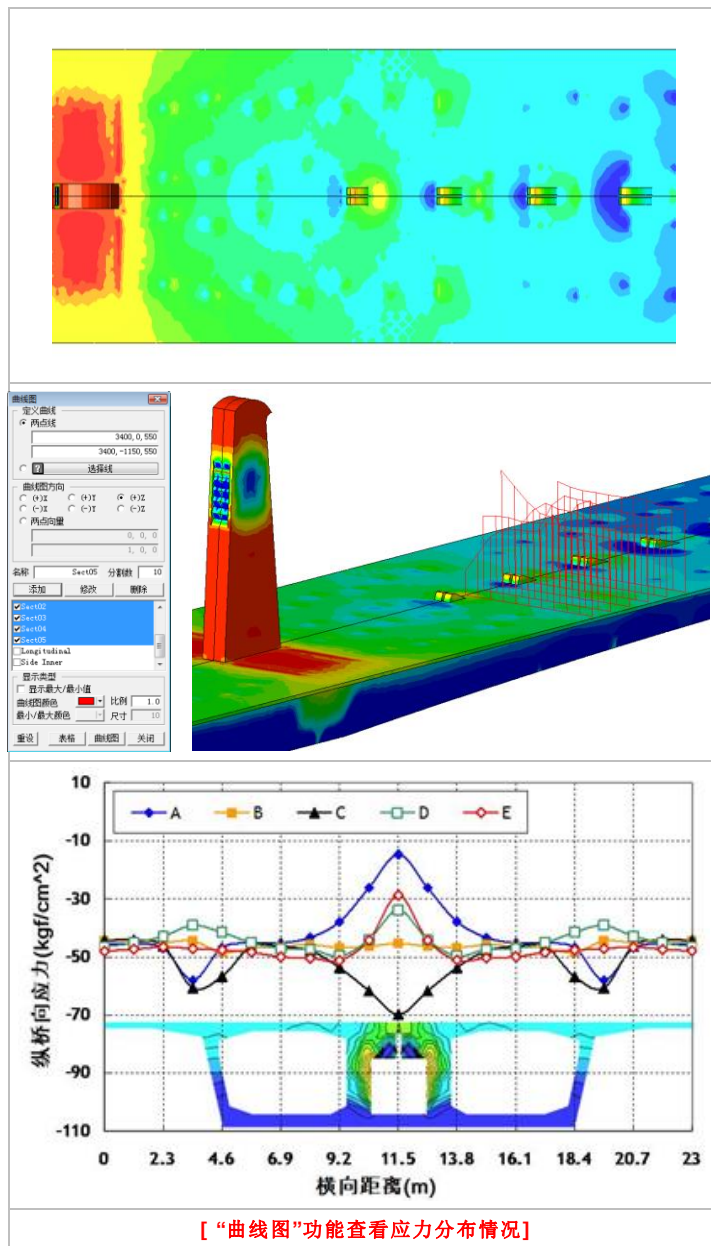
查看桥梁纵向X方向的应力分布情况，在程序中查看SXX(LO-Solid,体-SXX)应力成分。为了查看整个截面上的应力分布情况，使用程序中的“剖面图”功能来查看结果。



查看第一根索至第二根索范围的应力分布情况，等间距定义5个剖面（A~E）。



下面查看索张力引起的应力分布情况，利用程序中的“曲线图”功能、表格结果来查看。



查看上图中的五个剖面(A~E)的应力分布图，截面中心区域的应力的纵向变化是非常复杂的。因为斜拉索的拉力的影响第一根索后面(剖面A)的局部压应力由程序变小再逐渐变大，开始变小再变大(剖面C)，但在剖面C~E段的压应力是变小的趋势。只有剖面B的压应力是横向均匀分布的。