



预应力混凝土斜拉桥内 力优化与加固

同济大学桥梁工程系

肖汝诚



预应力混凝土斜拉桥内力优化与加固

内容简介

一.

工程背景

二.

既有预应力混凝土斜拉桥内力调整的理论基础

三.

内力调整施工方案的实施

四.

观测方法的评价与调索后结构内力状态评估

五.

总结与展望

工程背景（续）

● 预应力混凝土斜拉桥内力调整的现状和工程实例

➤ 委内瑞拉马拉开波（Maracaibo）桥



➤ 英国的Wye桥



工程背景（续）

● 预应力混凝土斜拉桥内力调整的现状和工程实例

➤ 上海新五桥



➤ 广州海印桥





工程背景（续）

预应力混凝土斜拉桥内力调整的现状和工程实例

当前该领域还需解决的问题：

- 采用的模型与实际结构不符，造成的误差；
- 缺乏对结构内力状态的一整套评估方法，以及是否进行内力调整的决策系统；
- 已有的调整理论过于复杂，不易操作。

工程背景（续）

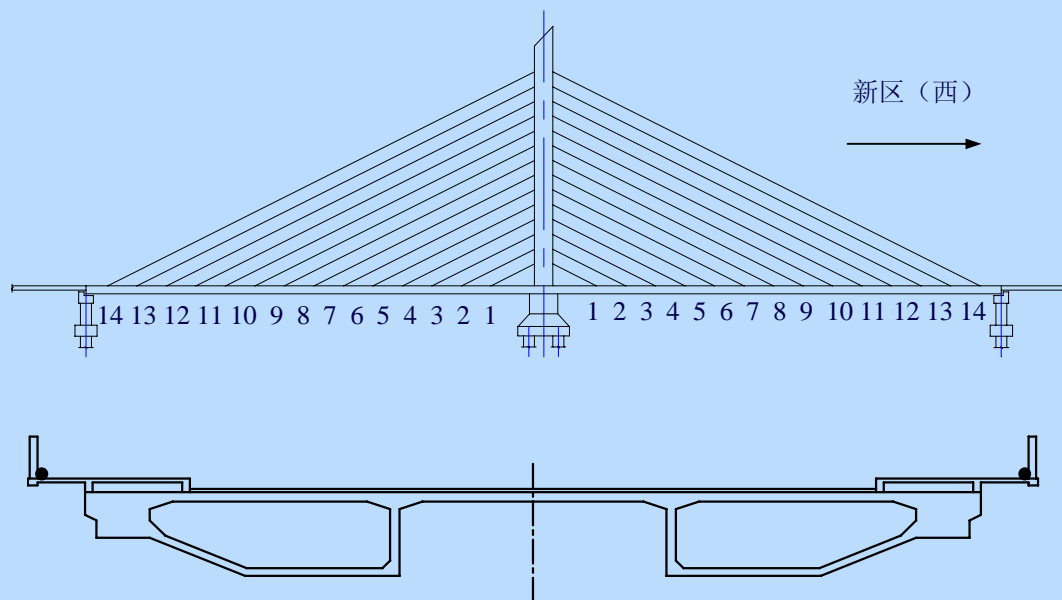
背景工程桥梁



上虞市人民大桥

工程背景（续）

背景工程桥梁



上虞市人民大桥结构简图

工程背景（续）

背景工程桥梁

检测后发现人民大桥主要存在的问题：

- 结构形态与设计存在较大偏差；
- 与设计相比，拉索有卸载现象，而且卸载量不平衡；
- 静载试验中，箱梁内裂缝有继续发展的趋势。





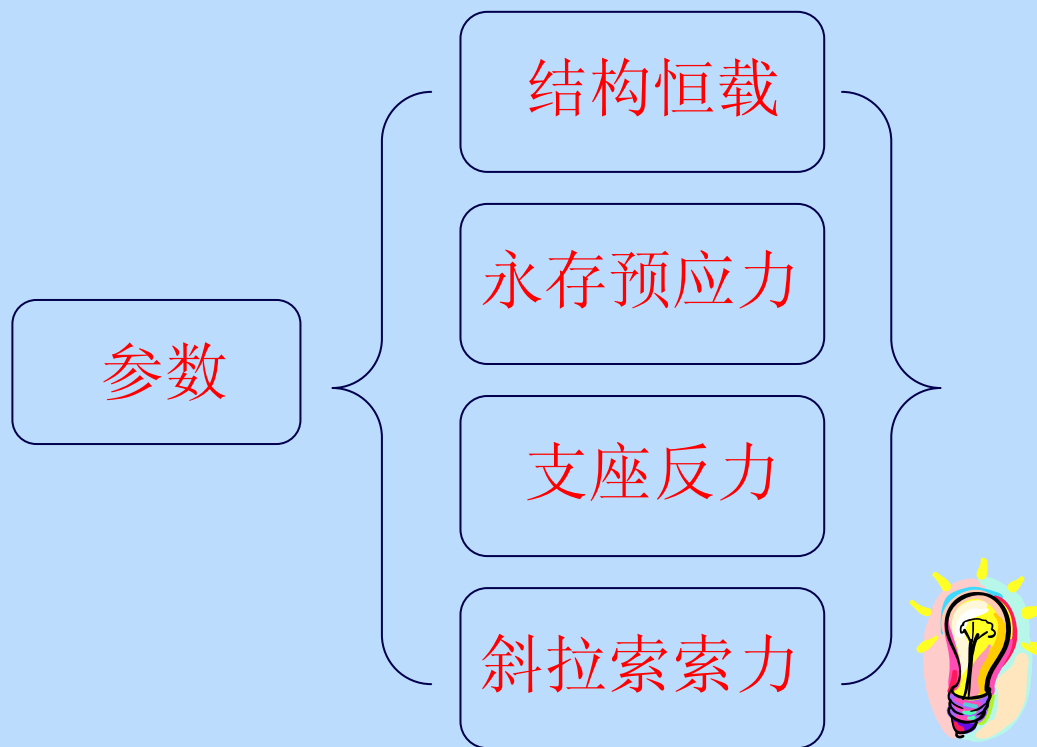
工程背景（续）

工作内容

- 对结构检测数据进行整理分析，识别既有桥梁的结构参数；
- 评估当前结构内力，以确定是否对结构内力进行调整；
- 确定既有桥梁内力调整的合理目标内力状态；
- 从理论上解决从当前结构的内力状态到调整的目标内力状态的具体实用调整方法；
- 解决内力调整施工中的具体问题；
- 对内力调整后的结构状态进一步评估。

预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

预应力混凝土斜拉桥结构参数的识别





预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础（续）

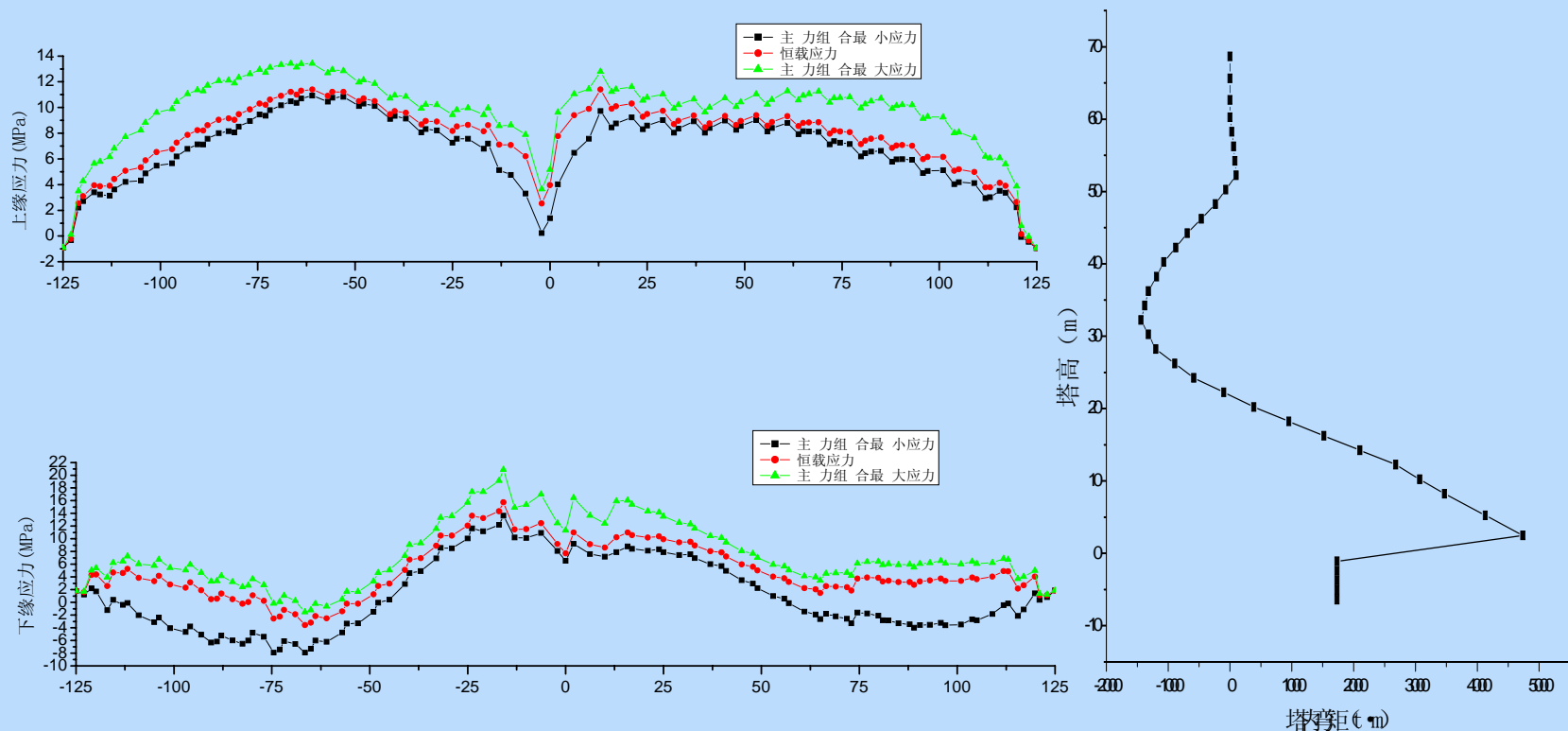
预应力混凝土斜拉桥结构参数的识别

参数识别中遵循：

- ✦ 尽可能真实地模拟当时的施工情况（包括施工方案、节段重量、施工中拉索索力、定位标高、桥面线形等）
- ✦ 模拟从施工到运营至今桥梁发生的收缩徐变情况

预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

结构当前受力状态的确定与评估

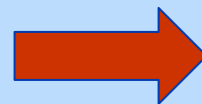


预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

1、已有的斜拉索索力优化方法:

- ✧ 指定受力状态的索力优化法
- ✧ 斜拉索索力的无约束优化法
- ✧ 斜拉索索力的有约束优化法



针对桥梁
设计

2、针对既有混凝土斜拉桥索力优化方法

目标：通过调索使主梁上若干点标高满足设计要求

控制条件：实际内力逼近设计内力

解决思路：建立设计内力和调索后实际内力差值的余能表达式，以差值最小作控制条件求满足达到指定标高时索力增量，与原索力叠加得优化后的拉索索力



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础（续）

合理目标内力状态的确定

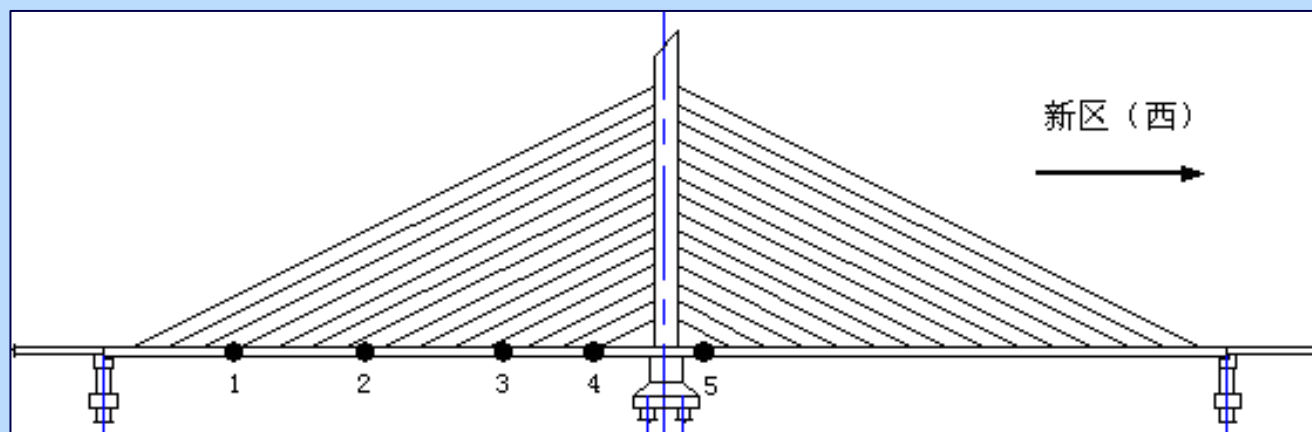
确定目标状态的原则：

- 使主梁、主塔内应力较小，且比较均匀
- 应力峰值应得到控制：控制正应力和主应力，满足规范要求
- 为防止裂缝进一步开展，限制裂缝处应力
- 以当前实测索力变化较小为原则，尽量减小当前索力调整的工作量，避免对结构产生过大的扰动，并达到结构内力合理为目标
- 边墩支座反力得到控制
- 调整后结构内力满足承载能力的要求
- 桥面线形得到改善

预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

灵敏度分析：找到不同拉索对主梁内应力影响程度

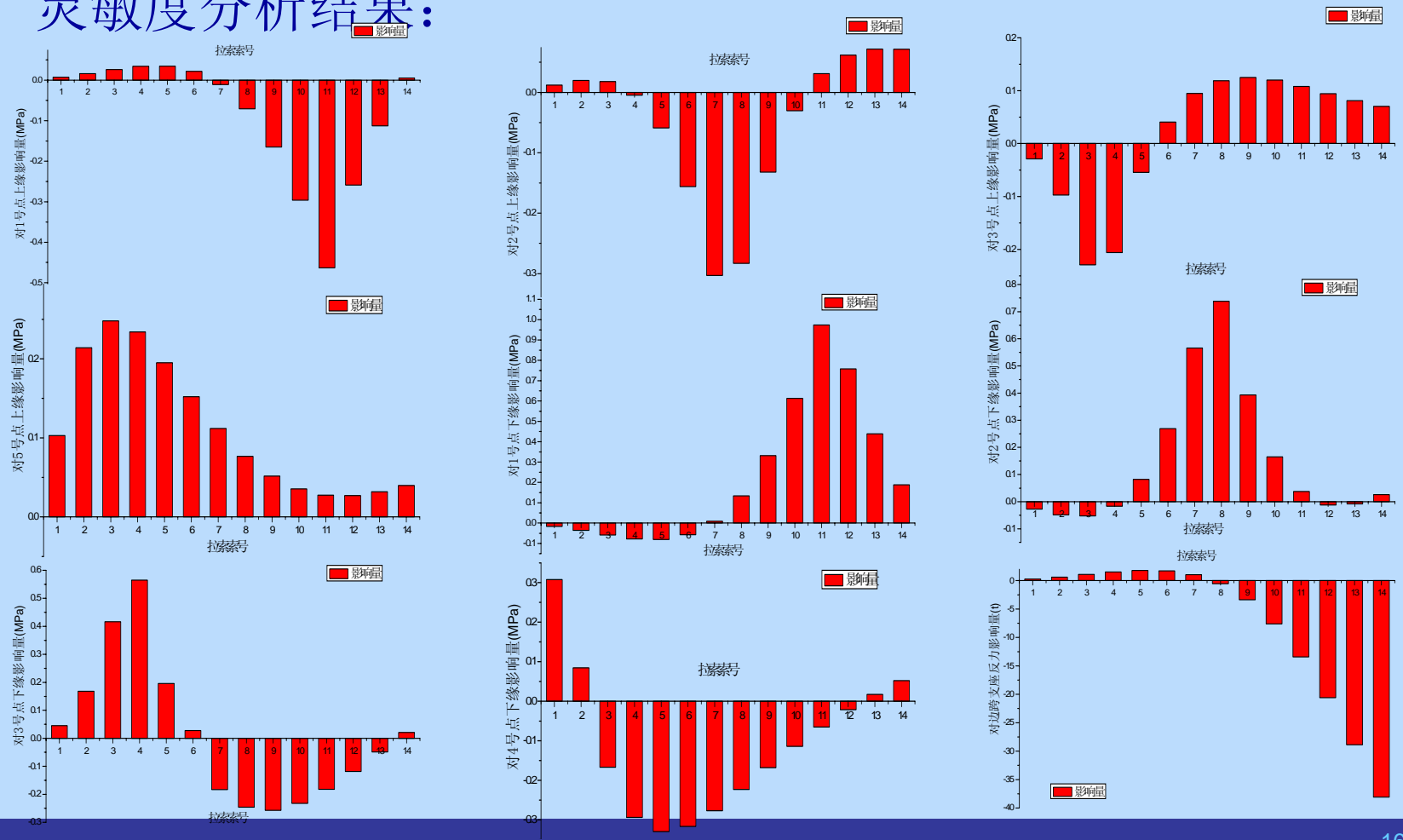


选定如上图的几个关键点进行研究。同时了解索力变化对支座反力的影响

预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

灵敏度分析结果:



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

✧ 恒载作用下主梁响应的可行域:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma} &= S_G + S_Q \\ S_{\Sigma} &\in S_{\text{lim}} \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad S_G \in S_{\text{lim}} - S_Q$$

✧ 恒载作用下主梁正应力的可行域:

$$\sigma_{\Sigma} \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}] \quad \longrightarrow \quad \sigma_{\min} \leq \sigma_G + \sigma_Q \leq \sigma_{\max}$$

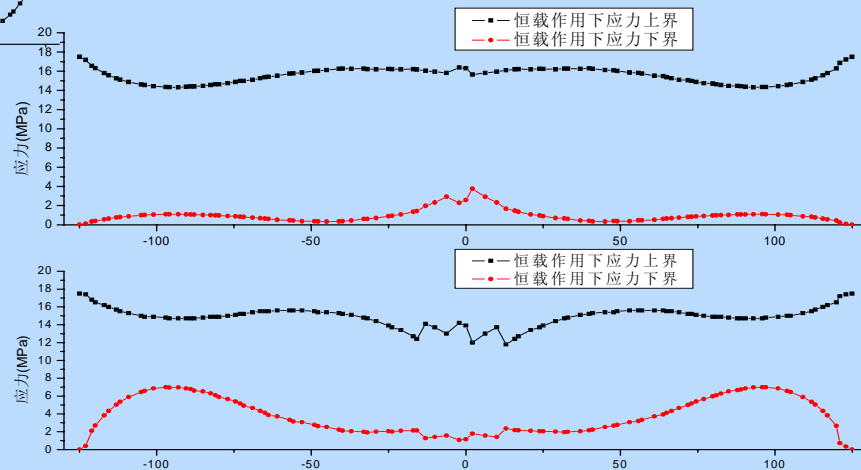
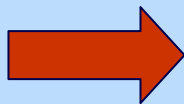
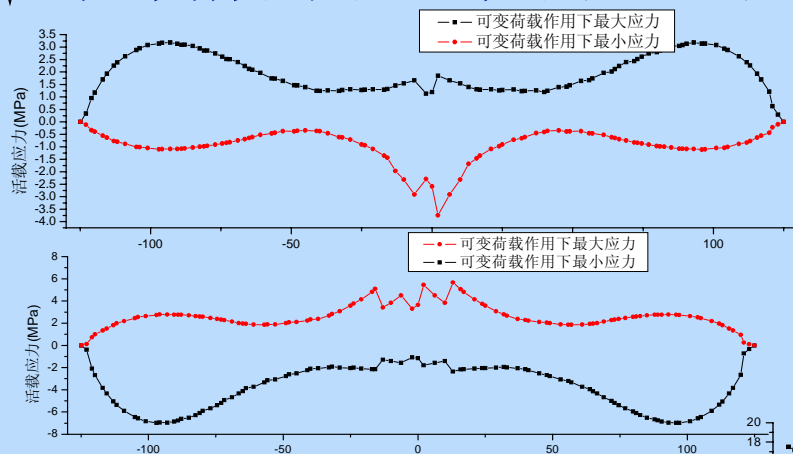
$$\longrightarrow \quad \sigma_{\min} - \sigma_Q \leq \sigma_G \leq \sigma_{\max} - \sigma_Q$$

$$\sigma_Q \in [\sigma_{Q\min}, \sigma_{Q\max}] \quad \longrightarrow \quad \sigma_{\min} - \sigma_{Q\max} \leq \sigma_G \leq \sigma_{\max} - \sigma_{Q\min}$$

预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

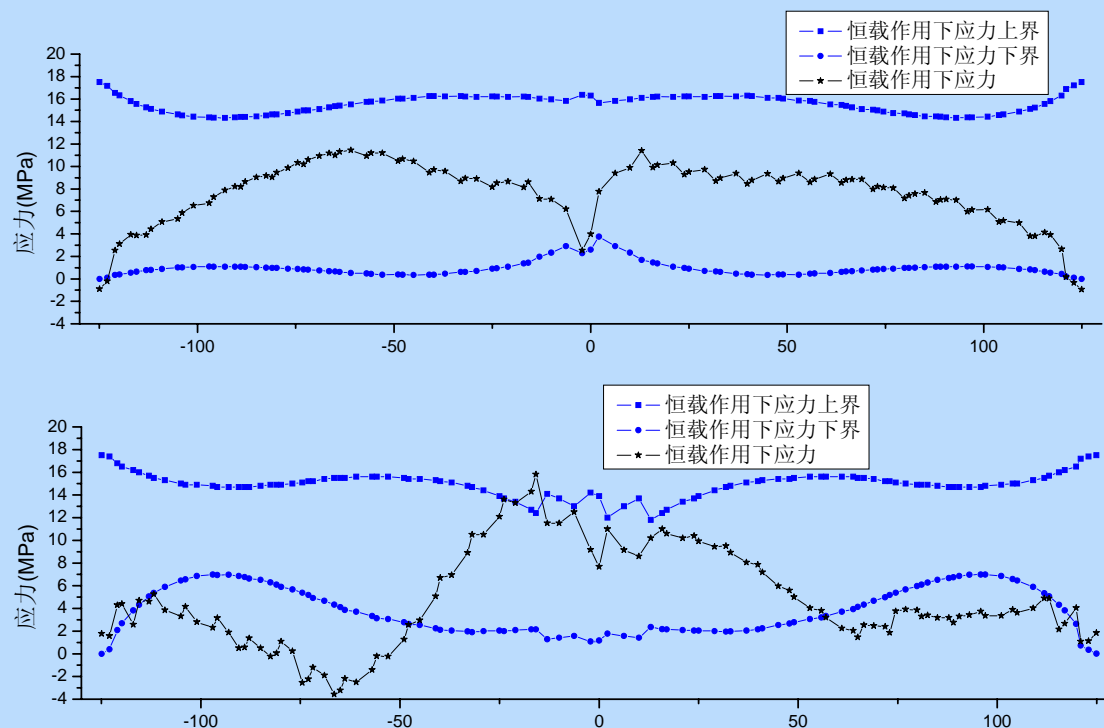
★ 恒载作用下主梁响应(正应力)的可行域:



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

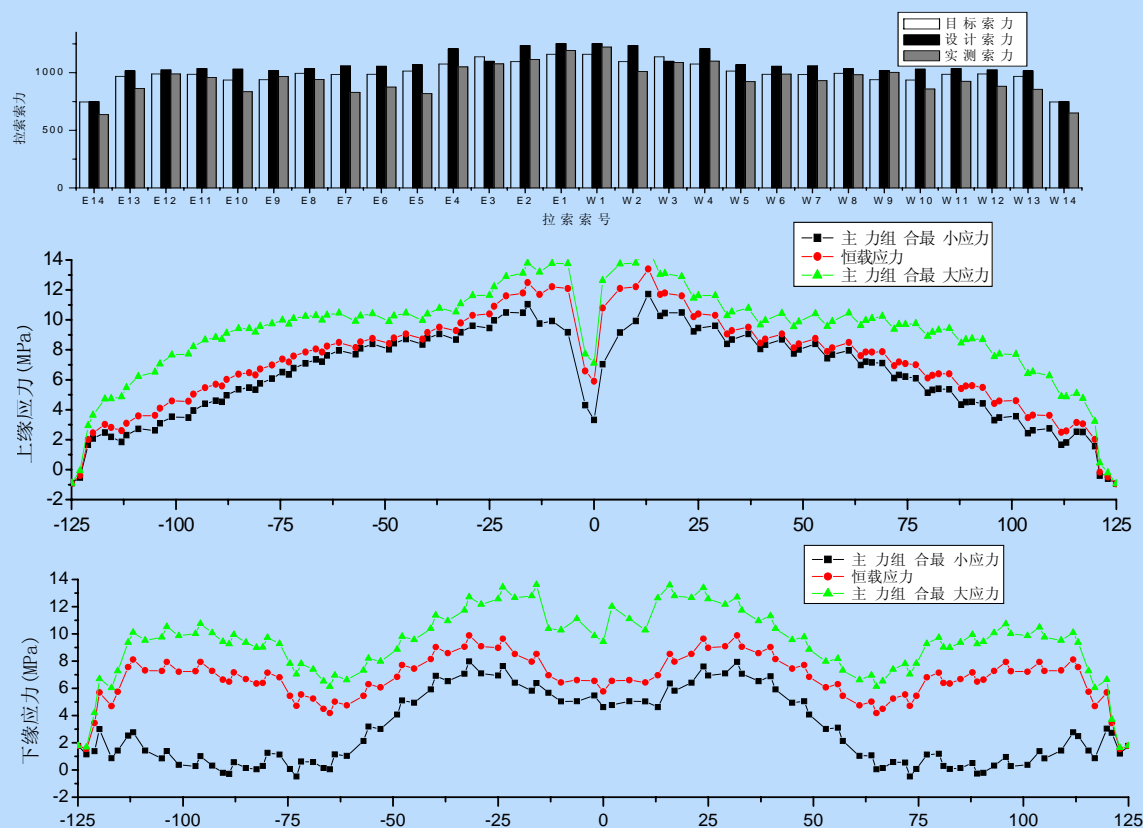
✧ 恒载作用下主梁响应(正应力)的可行域:



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

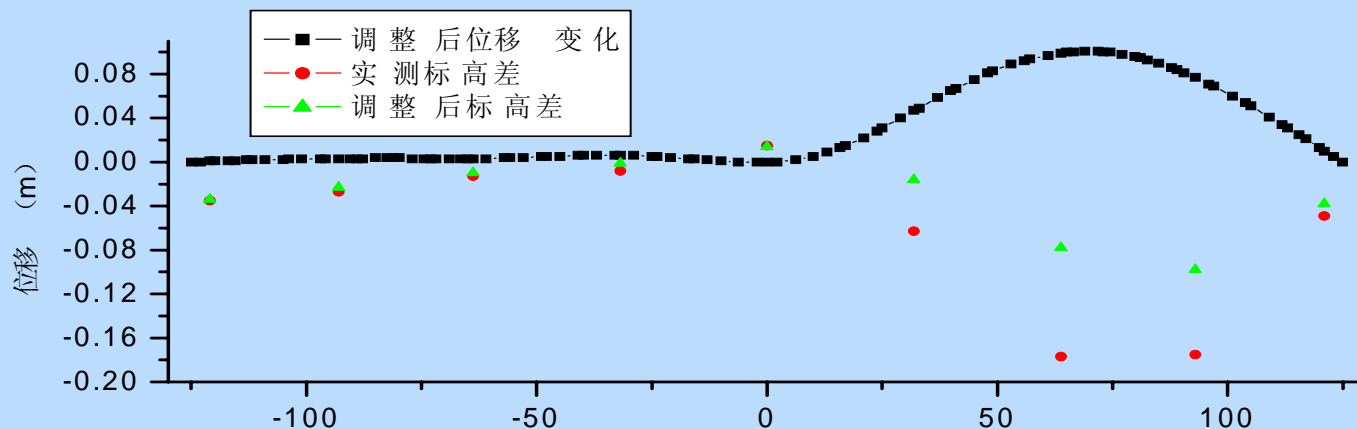
★ 确定结构合理内力状态及所对应的拉索索力:



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

合理目标内力状态的确定

✧ 确定结构合理内力状态及所对应的桥面标高:





预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础（续）

实现合理目标内力的施工分析

✧ 问题的理论解决：

- 斜拉桥是高次超静定结构，要达到相同的调整目标，施工中的拉索索力与调整顺序有关！
- 现有的调整理论过于繁复，而且也有不合理的地方。
- 解决方法——拉索的目标索力确定，那么拉索长度改变量是一定的，索力增量也是一定的，与调整顺序无关。



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础（续）

● 实现合理目标内力的施工分析

✧ 调索施工方案的限制条件：

- 1 施工方案尽可能简单易行，通过一次调索就可达到目标，且调索顺序要便于施工；
- 2 由于受到现场施工条件的制约，不适合大吨位千斤顶工作，因此每步调索值要限制在千斤顶最大张拉吨位内

以上要求若不满足，须更改施工方案（如张拉顺序等），或改变目标索力值，然后重新计算，直到满足要求为止。

预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础（续）

● 实现合理目标内力的施工分析

✧ 不同拉索调整方案的比较：

方案A：从长索依次调整到短索

方案B：从短索依次调整到长索

~~其他调整~~方案：增加工作量

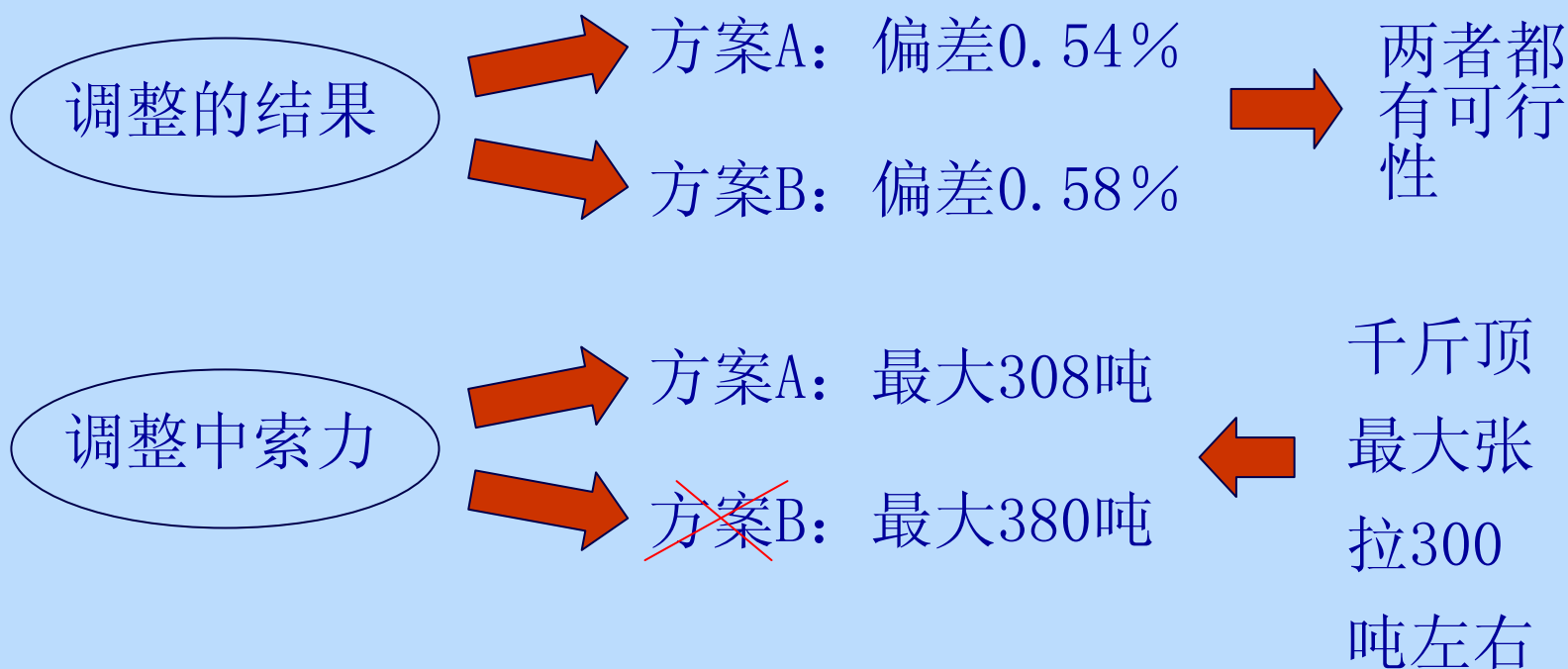
索力

增加调索施工中拉索

预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

实现合理目标内力的施工分析

✦ 不同拉索调整方案的比较:



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

实现合理目标内力的施工分析

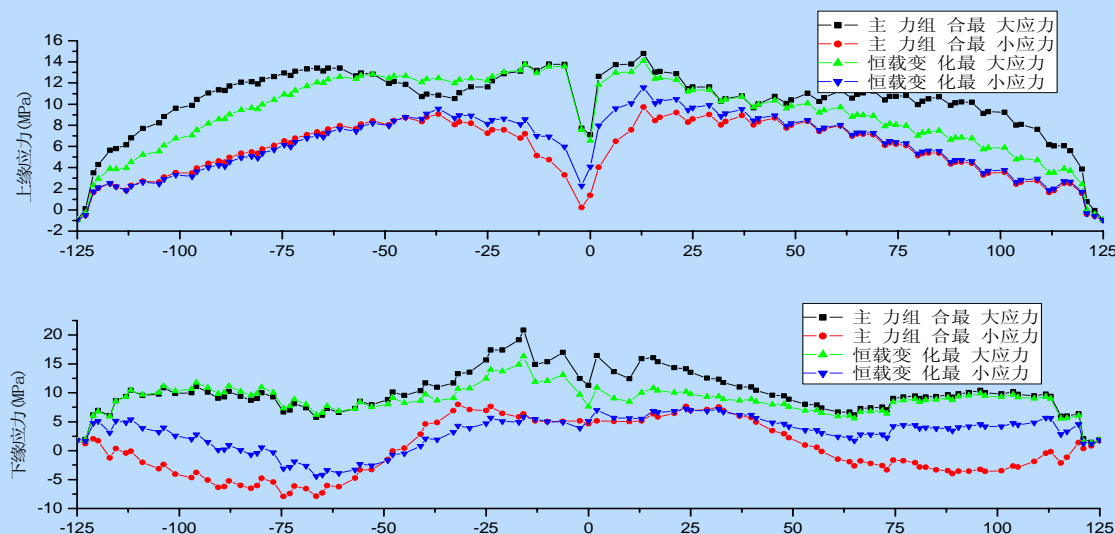
★ 验算并确定索力调整方案:

(1) 调索结束后计算索力与目标索力的比较

最大相差5.37t, 占该索总力的百分比不足0.6%

(2) 索力调整过程中结构内力的验算

主梁内应力



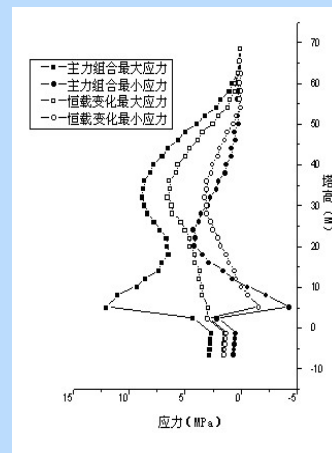
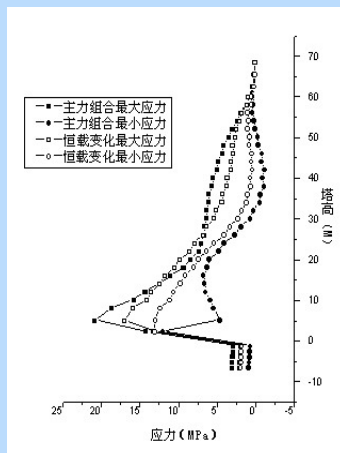
预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础 (续)

实现合理目标内力的施工分析

★ 验算并确定索力调整方案:

(2) 索力调整过程中结构内力的验算

主塔内应力



索内应力

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
西	462	512.6	540.8	518.8	537.9	533.3	534.8	570.5	540.7	533.6	559.9	554.1	532.9	390.8
东	461.9	521.5	555.5	549.9	588.1	601.6	617.9	662.9	632.6	620.9	639.5	622	585.2	444.5



预应力混凝土斜拉桥内力优化调整的理论基础（续）

● 实现合理目标内力的施工分析

✧ 小结：

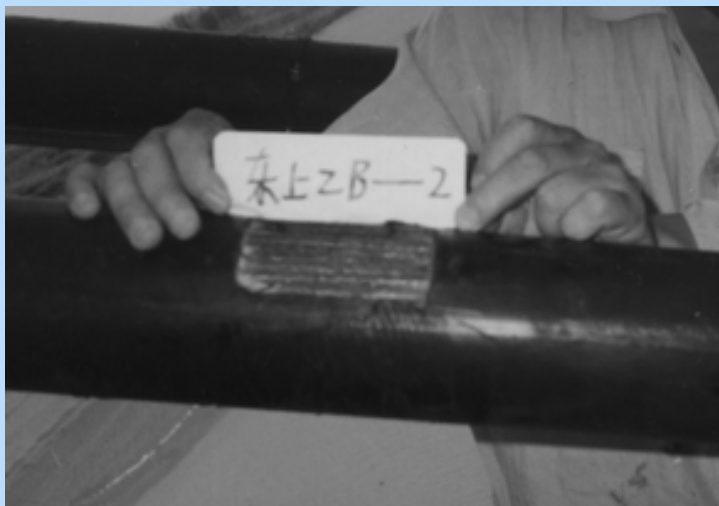
- 识别了当前桥梁的结构参数，并建立相应的计算模型
- 计算当前结构的内力状态，找到内力调整的“起始内力状态”；
- 根据既有预应力混凝土斜拉桥的自身特点，确定内力调整的“目标内力状态”；
- 解决了从“起始内力状态”到“目标内力状态”的理论施工方法。

三

内力调整施工方案的具体实施

结构的检查与修复

➤拉索



➤锚具与锚箱

➤减震器



三

内力调整施工方案的具体实施

拉索的更换

➤ 更换方案

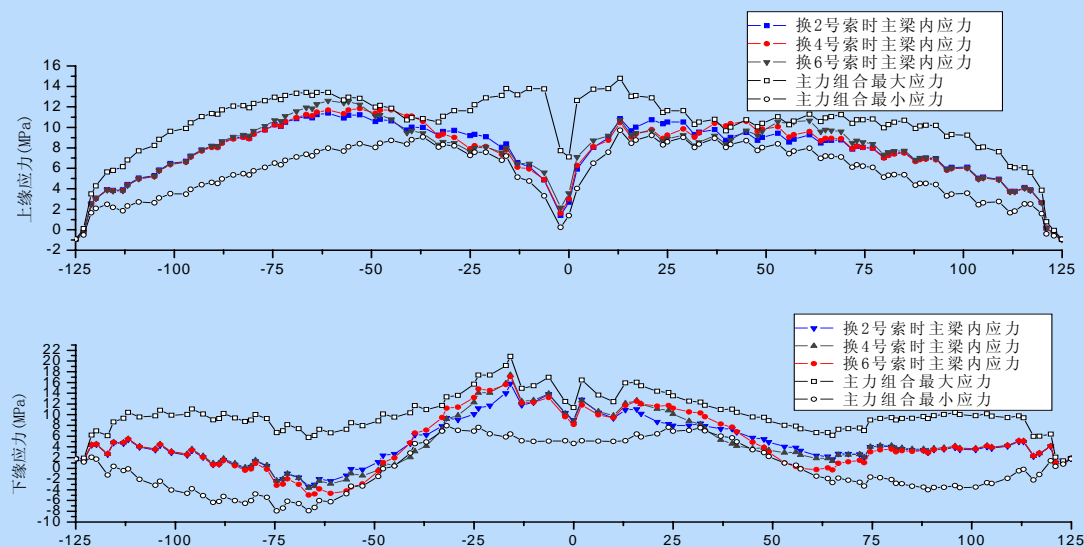
➤ 换索的测量

- 1、换索卸载后对临近拉索索力的影响
- 2、拉索精确张拉阶段的索力监测
- 3、换索后对临近拉索索力进行测量

内力调整施工方案的具体实施

拉索的更换

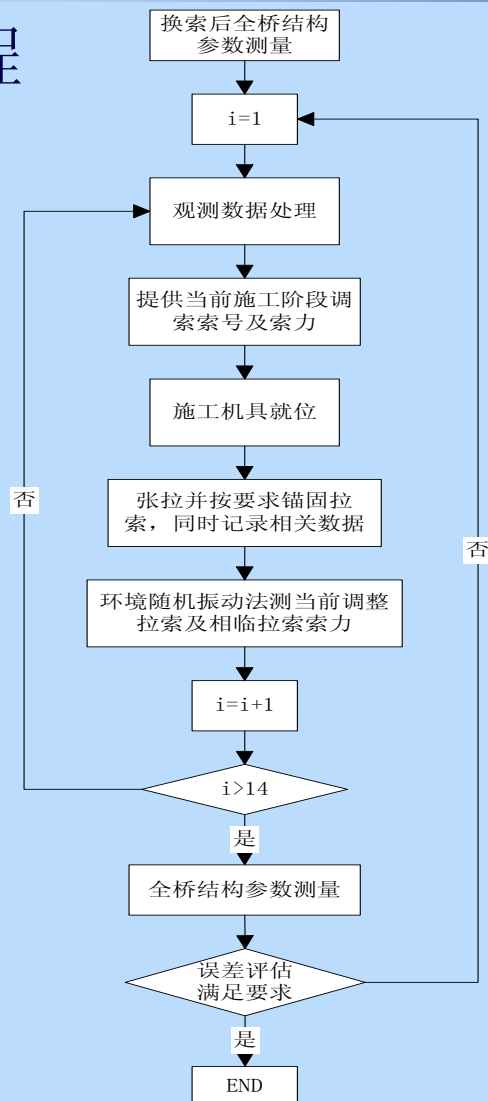
►理论验算



施工阶段应力小于最不利组合应力

内力调整施工方案的具体实施

调索施工中的流程



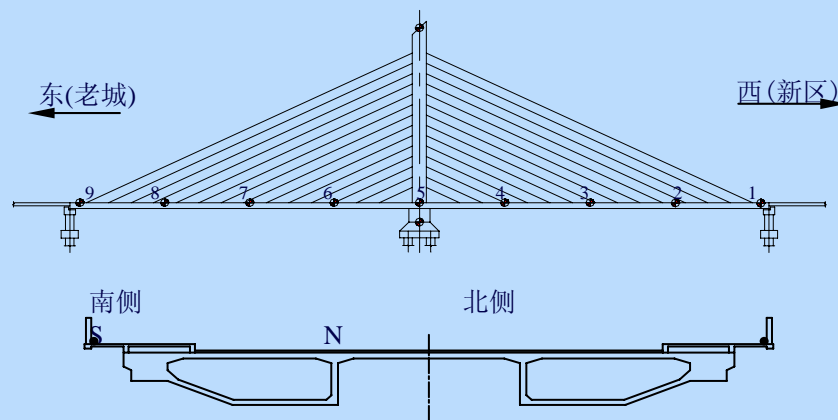
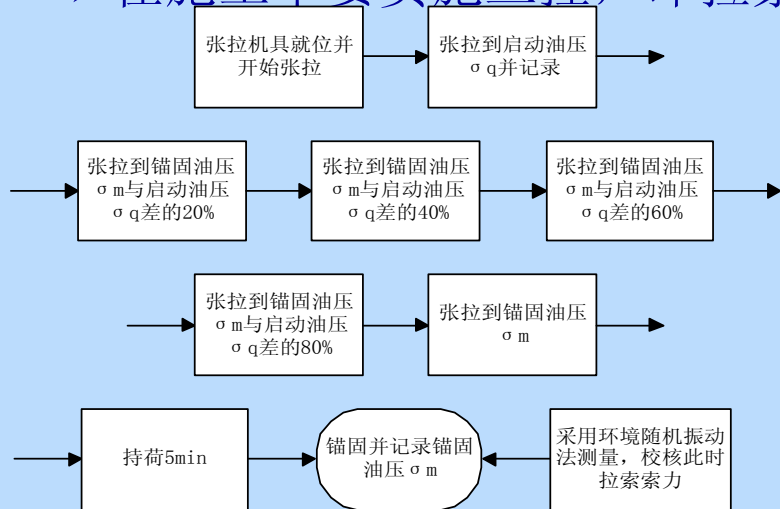
内力调整施工方案的具体实施

调索施工中的实施细则

➤在调索施工中采用YZ-300液压千斤顶，并在张拉调整工作前对千斤顶油压表进行了标定，以保证张拉索力达到设计要求

➤在张拉和锚固拉索中，要求相同索号的8个千斤顶同步均衡进行，并且要缓慢分级张拉，以避免主塔单向受力过大或动载对结构内力有不利影响

➤在施工中要实施三控，即拉索索力，伸长量和桥面标高





三

内力调整施工方案的具体实施

调索施工中的实施细则

- 施工过程中加强观测，若出现异常情况及时停止施工，并由多方单位共同评估找到解决办法后再进行下一步施工
- 除上述要求外，在调整索力的全过程中都严格按照相关规范、规程施工，以确保施工的顺利进行。



三

内力调整施工方案的具体实施

小结

- 索力调整的过程也是在基本理论的基础上不断摸索，不断实践的过程。只有在实践中发现、解决问题才能使理论逐步完善
- 从既有预应力混凝土斜拉桥内力调整的施工角度，阐述了其中面临的主要问题，并着手解决。从中可以看到，按照前面的方法进行调索，具有可操作性



四

观测方法评价与调索后结构内力状态的评估

● 索力测量方法的评价

✧ 索力测量方法的综述

➤ 油压表读数法

➤ 传感器读数法

➤ 频率法

1、拉索抗弯刚度对振动频率的影响

2、拉索垂度的影响

3、减振器的影响

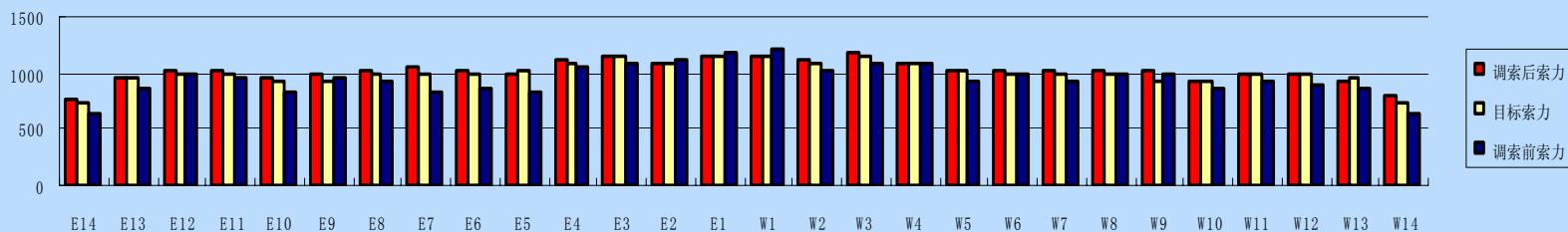
● 桥面标高变化监控测量的评价

四

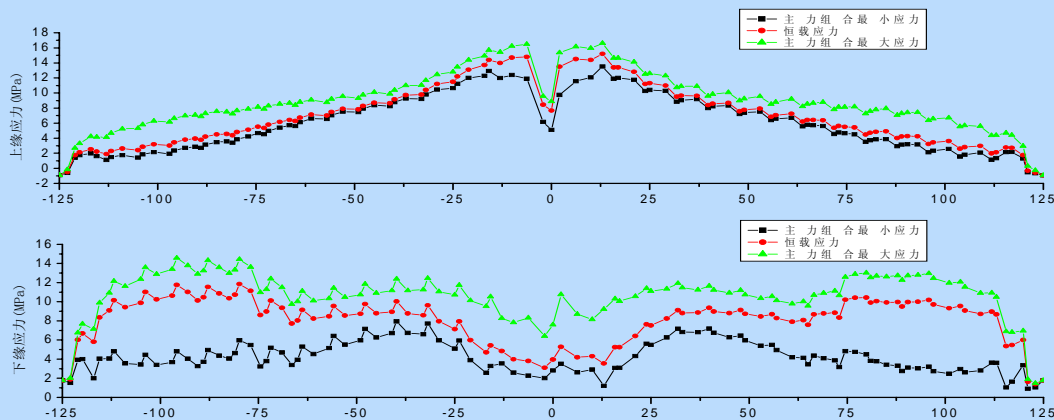
观测方法评价与调索后结构内力状态的评估

观测数据的分析与此时结构内力状态的评估

★ 调索后索力分析



★ 主梁内应力分析



四

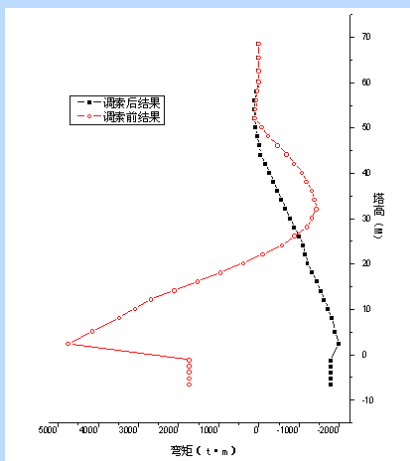
观测方法评价与调索后结构内力状态的评估

观测数据的分析与此时结构内力状态的评估

★ 主梁标高变化分析

测点	1		2		3		4		5	6		7		8		9	
项目	南	北	南	北	南	北	南	北	塔根部	南	北	南	北	南	北	南	北
调索后实测标	11	3	41	31	37	31	13	11		37	35	106	101	92	130	4	6
理论标高变化	17		78		77		32			68		162		133		29	

★ 主塔内力与边跨支座反力分析



➤ 主塔弯矩从4740t·m降到1990t·m，降幅达到58%

➤ 边墩支座承受226t，在其承载能力范围之内

四

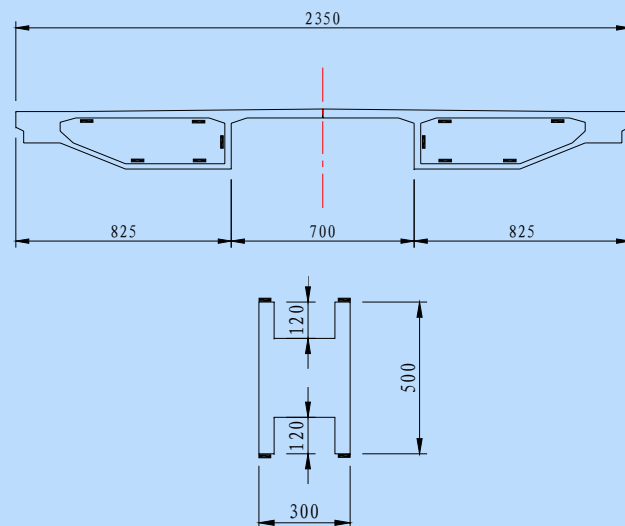
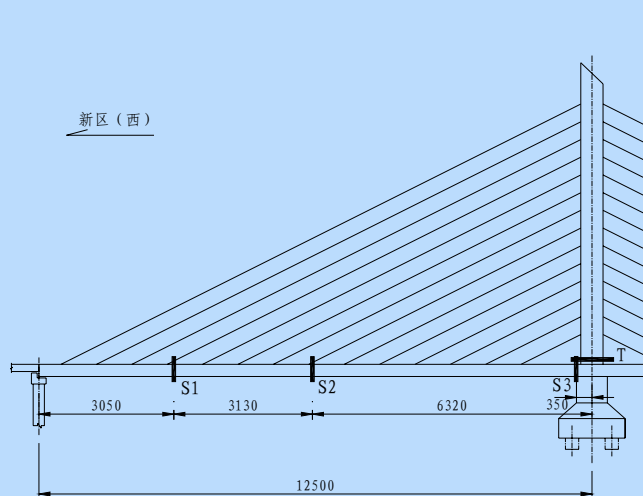
观测方法评价与调索后结构内力状态的评估

观测数据的分析与此时结构内力状态的评估

★ 荷载试验

按各测试断面控制内力最不利位置布载，测量：

- ①主梁和主塔结构挠度和位移；
- ②主梁3个断面和主塔1个断面的混凝土应变；
- ③拉索的活载索力。

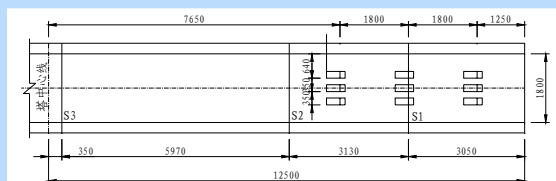


四

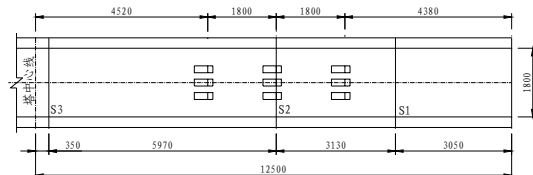
观测方法评价与调索后结构内力状态的评估

观测数据的分析与此时结构内力状态的评估

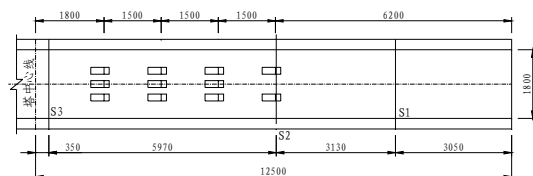
★ 荷载试验 —— 加载工况



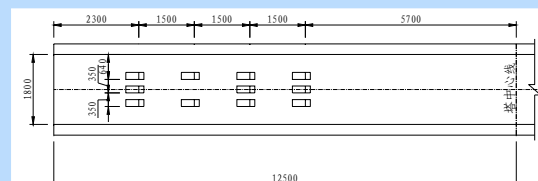
工况1 S1截面正弯矩加载



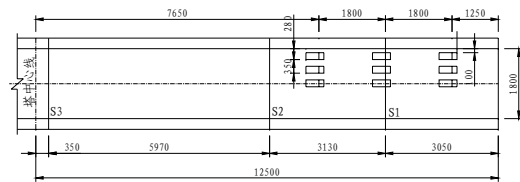
工况2 S2截面正弯矩加载



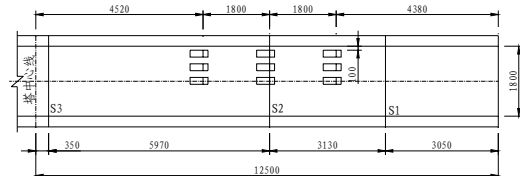
工况3 S3截面负弯矩加载



工况4 T截面最大弯矩加载



工况5 S1截面正弯矩加载



工况6 S2截面正弯矩加载



四

观测方法评价与调索后结构内力状态的评估

● 观测数据的分析与此时结构内力状态的评估

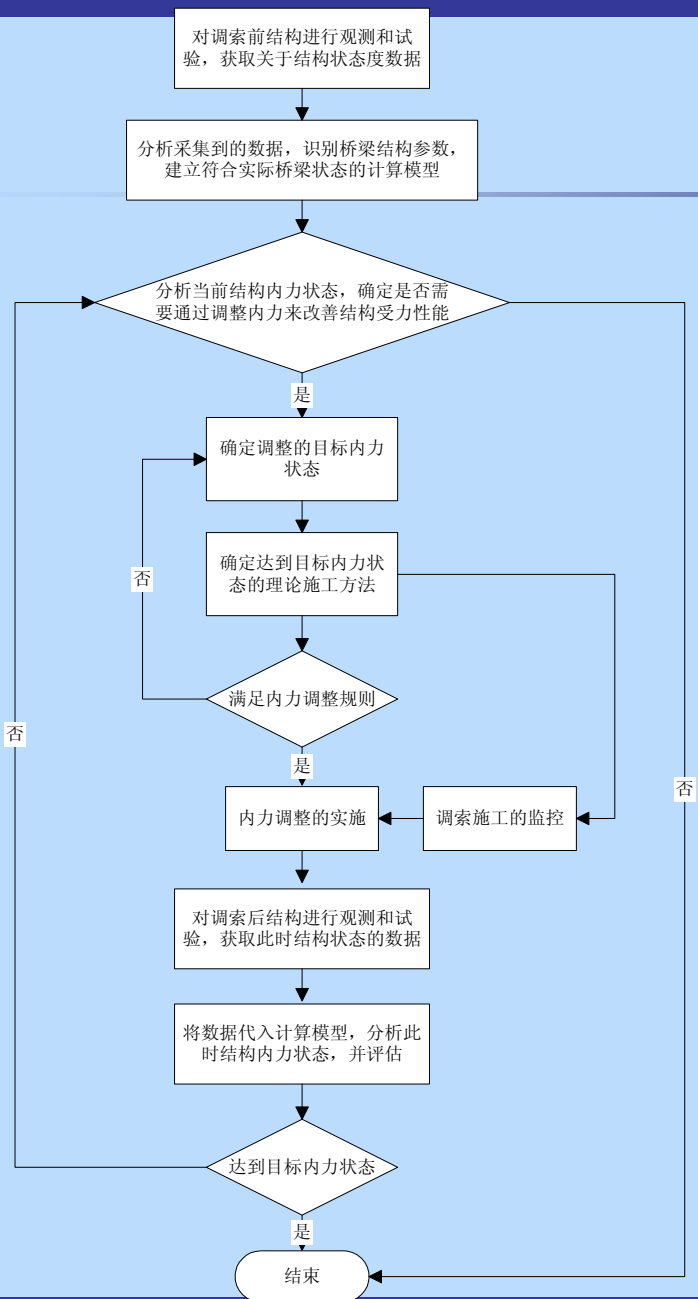
★ 荷载试验 —— 结论

- 1 施工调索达到原设计要求，拉索应力增加，桥面标高抬高；
- 2 荷载试验表明控制断面主梁和主塔的位移变化均小于计算值，说明结构刚度大于计算模型，结构工作正常；
- 3 荷载试验表明控制断面主梁和主塔应力变化均小于计算值，说明结构在活载作用下，强度满足设计要求；
- 4 荷载试验的效率系数到达了设计荷载的0.9倍以上，而且整个试验过程并未发现裂缝发展，主桥结构基本满足原设计使用要求。



五

预应力混凝土斜拉桥内力调整的过程





图片

