

# Nagisa桥的施工及实桥荷载试验

## —PC斜拉桥与钢悬索桥的混合构造

刘显晖 谭柳芳 李居泽 译 黎海宁 黄芳玮 校

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

**摘要:** Nagisa桥是世界上首次应用预应力混凝土斜拉桥与钢筋箱梁悬索桥组合结构的混合式PC斜拉桥, 本文介绍其施工方法及完桥荷载实验情况。

**关键词:** 混合式PC斜拉桥 施工 荷载实验

### 前言

Nagisa桥位于日本青森县西津轻郡鲇泽町的海滨公园内, 是一座跨中村川的混合式PC斜拉桥形式的步行桥(图1)。



图1 Nagisa桥竣工图

混合式PC斜拉桥是指斜拉桥与悬索桥共用一个主塔, 靠近主塔附近的斜拉结构部分为预应力混凝土梁, 跨中部分的悬索结构为钢梁所构成的一种桥形结构。至今为止, 悬索结构和斜拉结构混合建成的桥有法国的Sannirupizu桥和阿尔及利亚的SidiM'Cid桥, 不管是哪座桥, 都采用钢结构来加强。本桥在跨径内采用预应力混凝土梁和钢梁接合的复合形式在世界上属首次试用。这种结构集斜拉桥和悬索桥之所长, 由刚性大的混凝土和重量轻的钢材组成。斜拉桥和悬索桥优点互补如下:

对于斜拉桥: 拉索减少, 主梁轴力减少, 压屈稳定性提高, 可以增大跨径; 减短了拉索的长度, 对索的架设和振动有利; 拉索减少, 主塔高可以降低。

对于悬索桥: 有了斜拉索, 弯曲刚度增大, 抗风稳定性提高; 主缆的拉力减少; 主缆的总重量减少; 可以减小锚碇的规模。

将来建造跨度2000m的超长大桥的可能性正在研究中。

本桥的结构形式选定的条件是: ①为了中村川(宽约100m)中的鱼类往上游移动, 避免在河中架设桥墩; ②同周边环境和设施相协调; ③作为鲇泽町的标志性建筑; ④经济性好, 便于维护管理。经过讨论, 采用满足跨径并具有景观特色的混合式PC斜拉桥。

本次为了确认混合式PC斜拉桥的静态特性、振动特性及分析手法的可靠性, 做了实桥荷载试验。

本文主要介绍Nagisa桥的施工和实桥荷载试验。

### 1. 桥梁概要

本桥的结构如图2~5, 主要材料见表1。

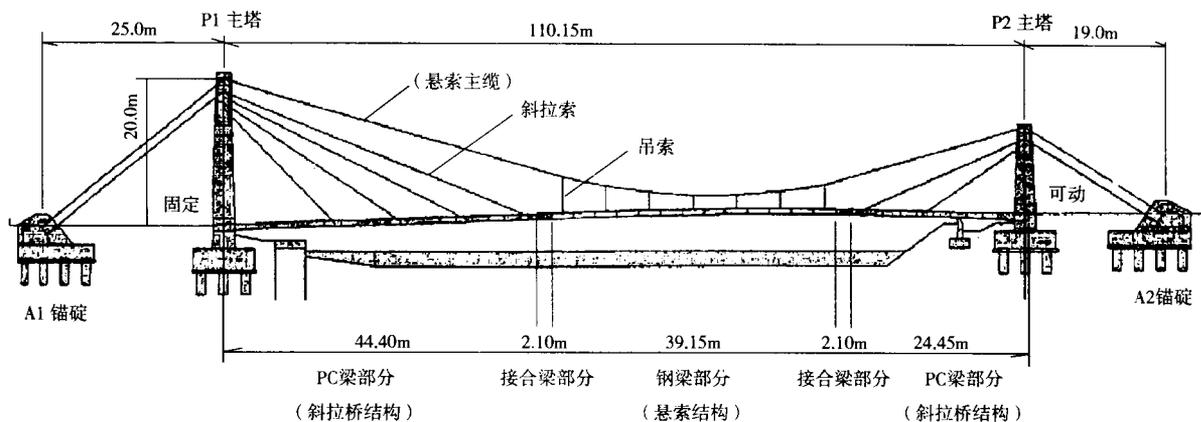


图2 Nagisa桥的总体布置图

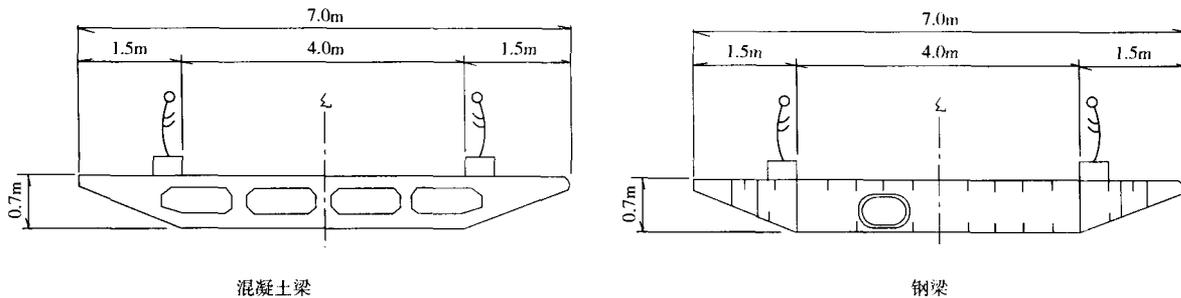


图3 主梁截面图

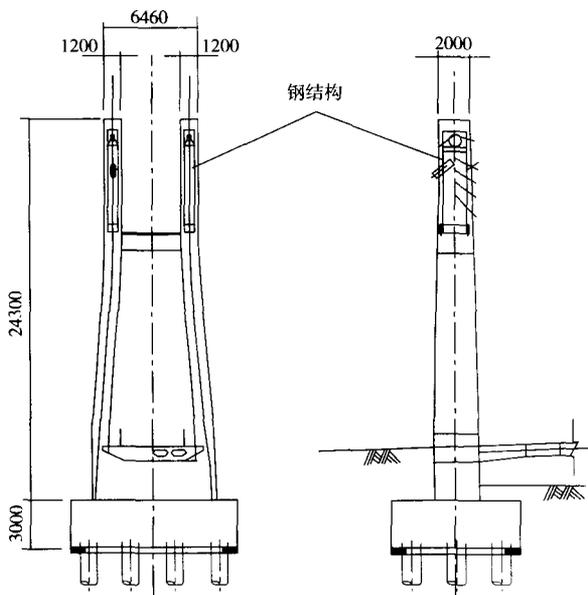


图4 主塔形状 (P1)

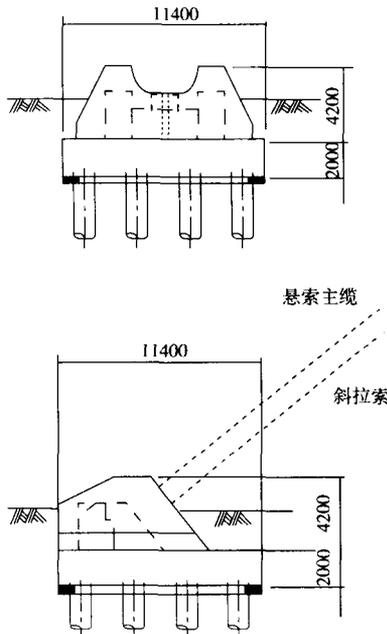


图5 锚碇区形状 (P1)

表1

|                |                                    |
|----------------|------------------------------------|
| 混凝土            | 主塔: $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$  |
|                | 锚碇区: $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ |
|                | 主梁: $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$  |
| 钢主梁            | SM400A, SM490YB                    |
| PC钢材<br>(主梁缆索) | PC钢绞线(1S19.3, 1S28.6)              |
|                | PC钢棒( $\Phi 23$ , $\Phi 32$ )      |
| 斜拉索材料          | SEEE工法/F-PH型                       |
| 悬索材料<br>(主缆)   | 索夹: E型 $\Phi 80$                   |
|                | 吊索: ST1570                         |

桥梁的各要素表示如下:

工程名称: 泽渔港海岸环境建设工程

结构形式: 单跨径混合式PC斜拉桥(步行桥)

工期: 2001年10月~2002年12月

桥长: 112.300m (PC梁部分44.400+24.450m, 钢梁部分39.150m, 接合梁部分 $2 \times 2.100\text{m}$ )

主塔间距: 110.150m

主梁断面: 高0.7m (PC4室箱梁, 钢箱梁)

总宽: 7.0m (有效宽度4.0m)

本桥的结构及施工的特征如下:

①跨度内采用斜拉结构与悬索结构的组合, 并且是预应力混凝土梁与钢梁结构的组合;

②强调象征性的主塔及左右非对称索的布置的独创设计;

③预应力混凝土梁是用长线法节段预制制作;

④接合梁采用后后面板方式;

⑤架设方法是混凝土梁采用450t起重机悬臂架设, 钢梁采用起重机垂直悬挂架设;

⑥主塔部的斜拉索固定部分及塔顶的鞍座部分, 采用钢结构;

⑦因架桥地点为强风地区，抗风稳定性按风洞实验加以确认；

⑧因架桥地点为强风寒冷地，并且在海岸线上，须实施以下提高耐久性的措施：

a. 混凝土的水灰比规定：预应力混凝土梁部分小于36%，主塔及锚固区部分小于43%。

b. 现场浇筑部分，全部采用环氧树脂涂装过的钢筋，混凝土覆盖层厚70mm。

c. 为了使外来盐分渗入最小，预应力混凝土梁在工场进行制作，最外层钢筋和需要连接的钢筋采用环氧树脂涂装，混凝土覆盖层厚50mm。

d. 主梁、主塔及锚固区实施长期防锈的C类涂装。

e. 主缆采用耐久性好的镀层钢丝。

f. 斜拉索采用无粘结钢绞线索。

## 2. 施工

### 2.1 施工概要

本桥的施工步骤如图6。首先是主塔及锚碇的建造，主塔钢结构的设置（步骤1）。其次是P1主塔侧，P2主塔侧PC梁按顺序节段拼装架设（步骤2）。主缆牵引，钢梁的架设（步骤3）后，P2临时支点拆除，钢结构部混凝土浇筑，进行桥面的施工（步骤4）。

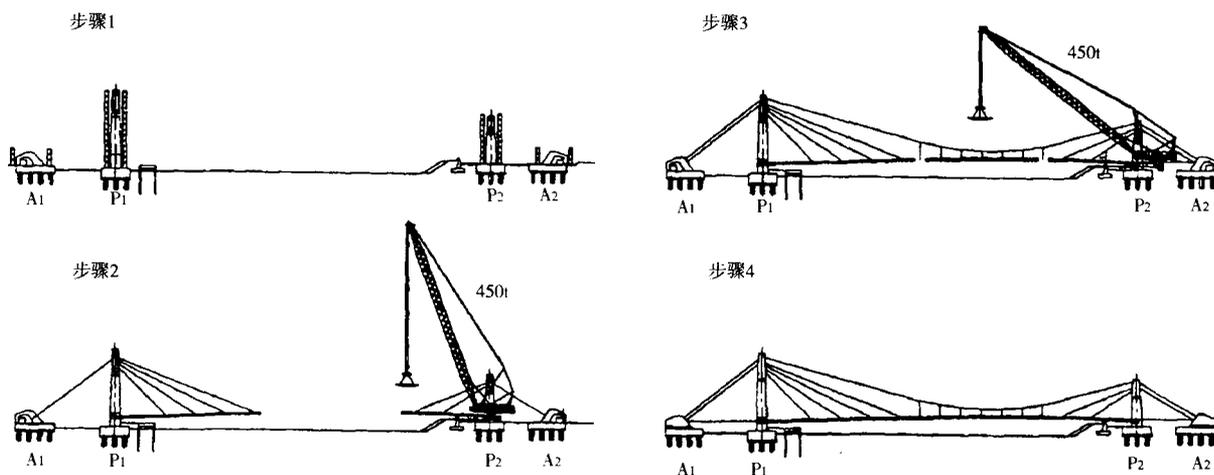


图6 施工步骤

## 2.2 主梁制作

### 2.2.1 预应力混凝土箱梁

等截面的预应力混凝土箱梁在工场采用长线法节段预制。钢筋为单元化的钢筋框，以减少在制作台上作业工期。为了使底板能充分密实，采用高流动度混凝土（塌落度55cm），节段制作周期标准节段为两天，斜拉索固定节段为3天。节段数P1侧17节段，P2侧9节段。另外，变截面部分，采用现场浇筑。

### 2.2.2 钢箱梁

钢梁采用钢板组合焊接的工法。焊接必须保证质量。节段总数为13节段。

### 2.2.3 接合段

为了使力在接合段处平缓地过渡，需考虑

钢梁的制作和混凝土的施工，采用公路桥梁使用的前后面板的形式（图7）。接合段①钢框架的制作；②框架内高流动混凝土的填充；③现浇方式制作混凝土梁部分；④按顺序施加预应力，施加预应力是为了防止混凝土凝固初期受钢梁的约束而产生温度裂缝。

### 2.3 主塔施工

主塔为钢筋混凝土构造的主塔本体部分及其上的钢结构部分（图8）。主塔本体部分P1主塔6段（2.41+1.78+3@3.55+2.12m）P2主塔5段（1.28+1.17+3.55+3.11+0.86m）分开施工。在其上部设置钢结构，钢结构基础部用混凝土打牢并通过螺杆与主塔本体进行连接。主桁架设完后，钢结构周围配置钢筋，浇筑混凝土。

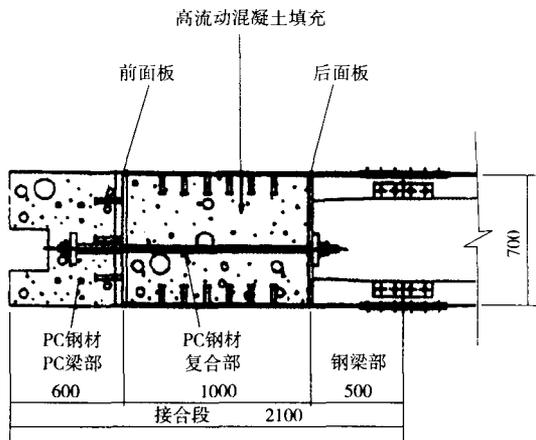


图7 接合段详图

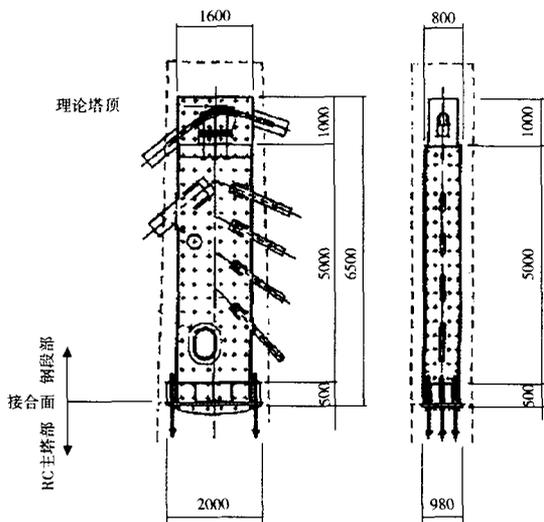


图8 钢结构部分

### 2.4 锚碇施工

锚碇部分的配筋非常密，为了达到设计的要求，采用自充填型高流动性混凝土（塌落度65cm）进行浇筑。混凝土体积 $A_1=175\text{m}^3$ ，

$A_2=162\text{m}^3$ 。

### 2.5 悬臂架设施工

考虑到经济性、施工性及周边环境的影响，采用节段拼装法用450t的吊机进行施工。斜拉索设置有4个节段，为了改善主梁的应力，使用了临时斜拉索。临时斜拉索在两个节段架设后进行设置，当本体斜拉索架设完成后将其拆除，这样反复施工直至完成。

斜拉索采用工场制作的成品索，在主塔及主梁侧进行张拉锚固。施工时，用起重机将拉索全长展开，用拉杆滑轮进行牵引。

### 2.6 钢箱梁的架设

斜拉索部分施工后，设置猫道进行主缆牵引。主缆牵引时，在锚碇 $A_1$ 和主塔 $P_1$ 间设置滑道，PC梁及猫道上设置滑道用的滚轮。在锚碇 $A_2$ 的后方设置卷扬机进行牵引。如果在塔顶鞍座处受阻时，则使用45t吊机进行辅助安装。

钢梁节段采用450t的起重吊机从中间往两边左右对称架设。

### 2.7 施工管理

本桥因主梁细长，所以刚性小，施工时弯曲变形大。另外，随着施工的进行，桥的构造系不断地进行变化。因此，弯曲变形的管理必要而又谨慎。主梁的变动要经常进行测量，与计算值比较，一边施工，一边要对斜拉索和主缆的力进行调整。还有，测量及张拉调整索力时，最好在受温度影响最小的早上进行。测量项目见表2。

表2

| 测量项目  |       | 测量时期            | 测量方法      |
|-------|-------|-----------------|-----------|
| 变位    | 主梁    | 各施工阶段           | 水平仪       |
|       | 主塔    | 斜拉索拉力调整后，钢梁架设后  | 三维光波测距测角仪 |
|       | 锚碇    | 主要施工阶段          | 三维光波测距测角仪 |
| 斜拉索拉力 | 前端侧   | 斜拉索拉力调整时        | 压力变换器及振动法 |
|       | 后端侧   | 斜拉索拉力调整时        | 压力变换器及传感器 |
| 主缆拉力  |       | 钢梁架设时           | 压力变换器     |
| 温度    | 主塔    | 斜拉索拉力调整时及主要施工阶段 | 热电对       |
|       | 主梁    | 斜拉索拉力调整时及主要施工阶段 | 热电对       |
|       | 斜拉索   | 斜拉索拉力调整时及主要施工阶段 | 热电对       |
|       | 外气温   | 斜拉索拉力调整时及主要施工阶段 |           |
| 应力    | 主梁混凝土 | 各施工阶段           | 形变仪       |

### 2.7.1 悬臂拼装架设时

悬臂拼装架设时的控制项目有①主梁的变形；②斜拉索拉力；③主梁应力。主要控制主梁变形及斜拉索张力，以主梁变形为目标值来决定拉力，进行斜拉索拉力的调整。主梁应力作为辅助，在施工时监测是否有不利的应力产生。

斜拉索拉力的调整是在第一根斜拉索设置后，架设第2节段时进行。斜拉索拉力调整作业的流程如图9所示。拉力调整的次数，P<sub>1</sub>侧8次，P<sub>2</sub>侧4次。斜拉索的调整，从主梁侧到锚固侧进行张拉。拉力测定在锚固处用压力变换器或压力传感器进行检测。主梁侧在千斤顶后设置压力变换器进行测量，千斤顶拆去后，采用振动法加速度计检测。

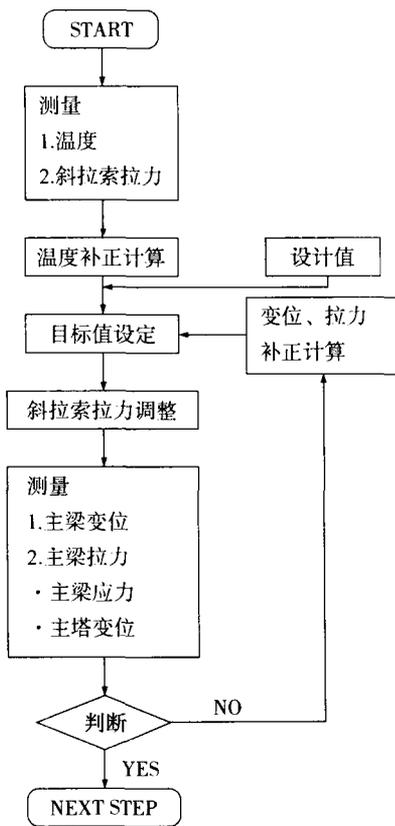


图9 斜拉索拉力调整程序

### 2.7.2 钢梁架设时

随着节段架设的进行，中跨侧的水平力增加，主塔鞍座部有不均等的水平力作用。此时，在主缆的后端部进行拉力调整。拉力测定

采用压力变换器。拉力调整，主缆牵引后进行第一次调整，3个节段架设后进行第二次调整，之后每两节段架设再进行调整，共调整六次。

PC梁与两端的钢梁节段合拢时，PC梁的施工误差（纵桥方向）能够进行调整，调整范围为±25mm/单侧。PC梁架设完成后，接口间距离测量结果与设计值比较+28mm，在调整范围内。

### 2.7.3 测量结果

P<sub>2</sub>支点临时固定释放后的主梁变形如图10所示。另外，在悬臂架设中，采用振动法所测定斜拉索（S<sub>201</sub>，S<sub>202</sub>）的拉力随时间变化如图11所示。PC梁处部分有25mm左右的变形误差产生，整体与设计值相接近。对于斜拉索的拉力调整大体上按设计的控制进行，在千斤顶拆除后采用振动法测定拉力，拉力的变化经常要精确地推定计算，在施工中与设计值有7%左右的误差。

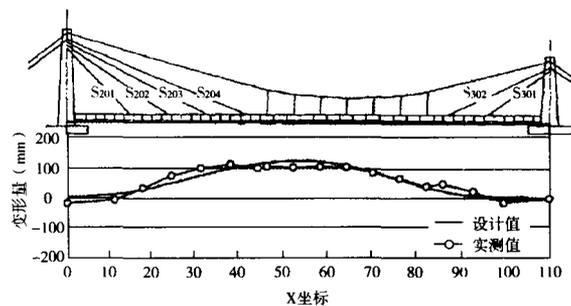


图10 主梁测定结果（临时固定释放后）

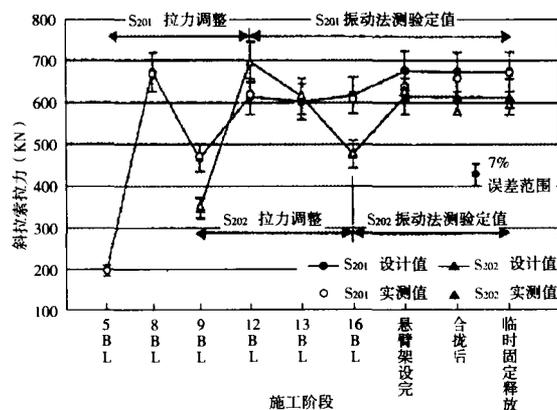


图11 斜拉索拉力变化

## 3. 实桥荷载试验

桥体完成后（桥面工作开始前），进行静

载及动载试验。本试验是为了掌握静载及振动特性，确认分析方法的正确性而实施的。

### 3.1 静载试验

#### 3.1.1 试验概要

静载试验采用荷重42kN/台的试验车辆，纵桥方向两台纵向排列（图12）。荷载位置，如图12所示，荷载点①~⑦共7个点。试验主要测量项目见表3，测量情况如图13所示。

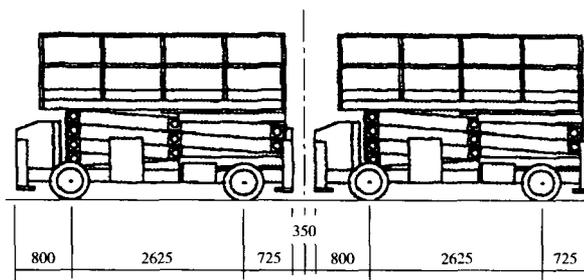


图12 试验车辆的形状(42kN/台)

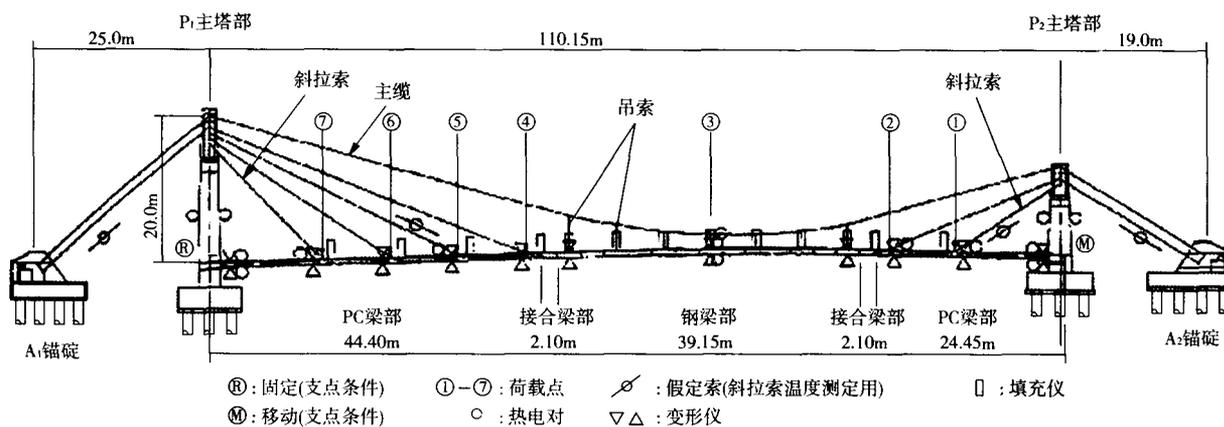


图13 荷载试验示意

表3

| 测量项目    | 测量位置      | 测量仪器        |
|---------|-----------|-------------|
| 主梁变位    | 吊点位置, 荷载点 | 水平仪、填充仪     |
| 混凝土表面变形 | PC梁上下缘    | 变形仪、数据仪     |
| 钢梁表面变形  | 钢梁上下缘     | 交换盒         |
| 材料温度    | 各部位       | 热电对、数据仪、交换盒 |

#### 3.1.2 试验结果

荷载点③（钢梁部中央）及荷载点④（P<sub>1</sub>侧PC梁前端斜拉索锚固位置）受荷载时的实验

结果及分析结果如图14、15所示。分析值是考虑拉索初期轴力，通过有限元分析得出的结果。主梁混凝土的弹性系数为28天龄期的试验值。通过一天的试验，试验值含了各材料的温度变化所带来的影响。因此，也在有温度的影响下进行分析。试验时外界温度日变化如图16。加载前的初始值测量时，荷载点③④各材料的温度变化量见表4。

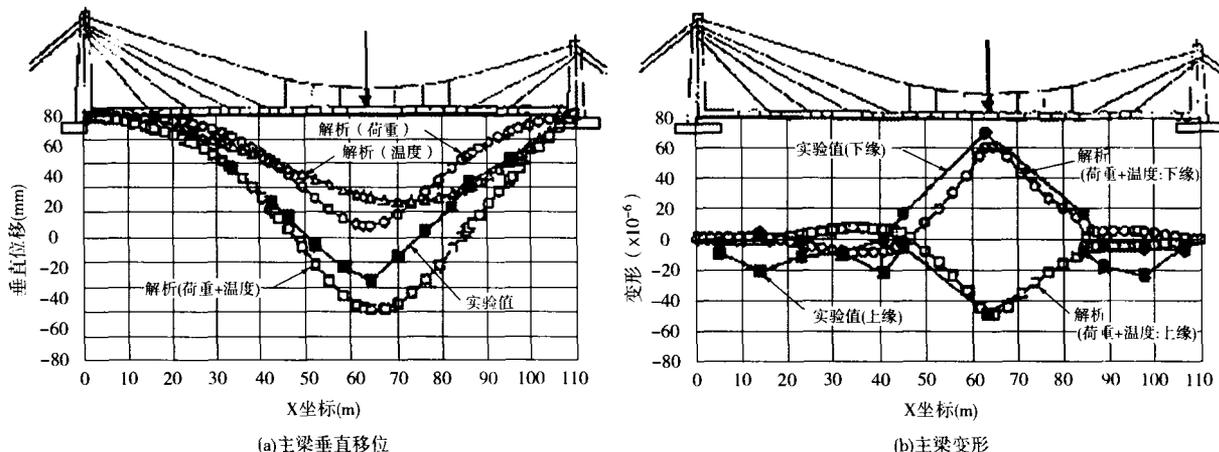


图14 静载试验结果（荷载点③）

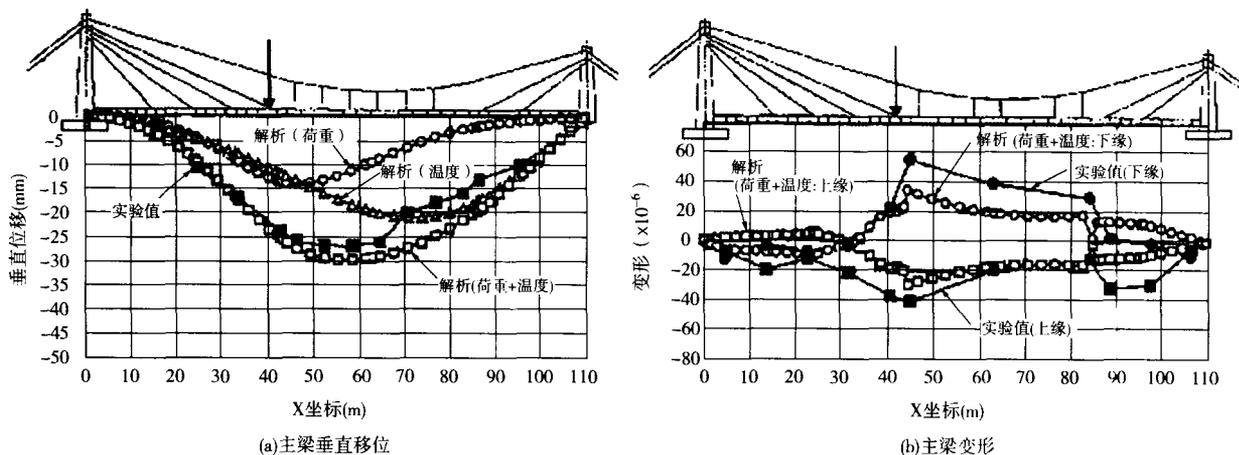


图15 静载试验结果(载荷点④)

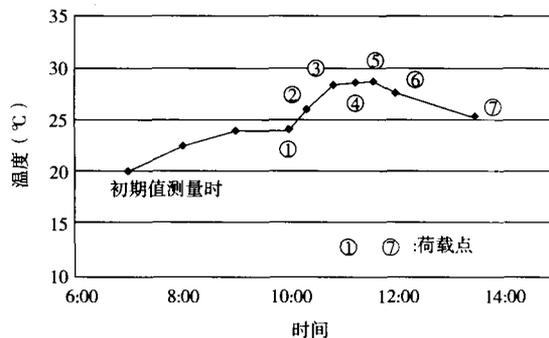


图16 室外气温的日变化

主梁的垂直移位 在钢箱梁中央附近开始到 P<sub>2</sub>主塔间的试验值比分析值稍大。造成这个差

别的原因是在分析时对温度的影响过大地加以考虑。分析时,同种材料的温度变化量假设为一定值,采用表4所示值。但实际各材料、各部位的温度变化是不一样的。另外,温度变化量一定计算出的主缆的钢梁部中央垂直移位对温度影响值是 -1.8mm/°C,这是在主缆的温度设定的影响大的情况下推算的。考虑到这一点,分析与试验结果得出的趋势大致吻合。另外,主梁的变形分布,PC梁部的一些差异等等,都可以说分析与试验大致吻合。

表4

|      | P1主塔 | P2主塔 | PC梁   |       |       |       | 钢梁  |     | 后侧  |     | 前侧  |     | 主缆吊索 |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|      |      |      | P1侧上缘 | P1侧下缘 | P2侧上缘 | P2侧下缘 | 上缘  | 下缘  | A1侧 | A2侧 | P1侧 | P2侧 |      |
| 载荷点③ | 3.5  | 3.8  | 5.0   | 2.5   | 4.9   | 1.8   | 7.0 | 4.1 | 6.9 | 5.9 | 6.6 | 5.1 | 5.8  |
| 载荷点④ | 3.9  | 4.5  | 5.2   | 2.7   | 5.0   | 2.3   | 7.9 | 4.7 | 8.1 | 6.8 | 7.6 | 6.3 | 7.1  |

### 3.2 振动试验

#### 3.2.1 试验概要

振动试验为试验车辆从一台阶上落下(过一个坎),对其产生冲击振动的影响。试验车辆(总重量42kN)从高9cm的原木上落下进行加

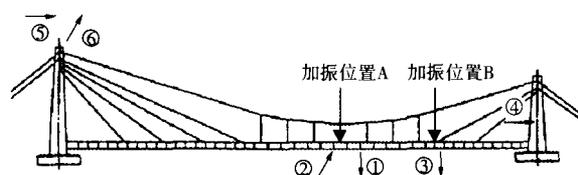


图17 加振位置及加速度计设置位置

振。加振位置如图17所表示A点及B点,测量位置(加速度计设置位置)在图17的6点。

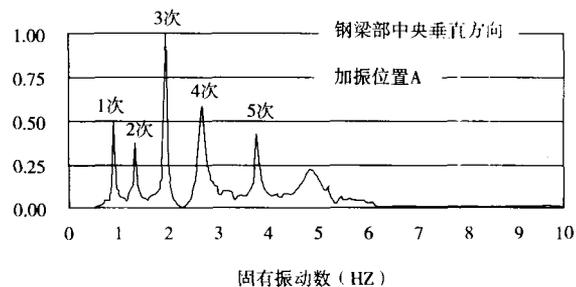


图18 傅立叶波形

表5

|      | 固有振动数 (Hz) |           | 衰减系数 (%) |
|------|------------|-----------|----------|
|      | 分析值        | 试验值       |          |
| 面内1次 | 0.85       | 0.92      | 3.51     |
| 面内2次 | 1.25       | 1.34      | 2.60     |
| 面内3次 | 1.92       | 1.95      | 2.19     |
| 面内4次 | 2.64       | 2.69~2.75 | 1.80     |
| 面内5次 | 3.81       | 3.78~3.85 | 1.23     |

### 3.2.2 试验结果

FFT分析和试验所得的固有振动数及半衰法求得的衰减系数见表5。另外,固有值分析的结果见表5及图19。还有,面外及扭力模型,本实验没有加以确认。

固有值分析采用三维模型,忽略拉索的弯曲刚性,仅考虑拉力的刚性。另外,拉索的质点也没有设置。

固有振动数从整体来说与分析模型的值一致。

试验衰减系数为1.2~3.5% (对数衰减率  $\delta = 0.08 \sim 0.22$ )。土木学会振动规范中关于衰减系数 $h$ 和距离 $L_m$ 的关系大致为 $h = 0.12/L^{1/2}$

本桥的主塔间距 $L = 110.15\text{m}$ ,代入得 $h = 1.14\%$ ,试验衰减系数比该值大。另外,道路桥抗风设计规范对悬索桥及斜拉桥构造衰减(对数衰减率 $\delta$ )规定为0.02。试验值( $\delta = 0.08 \sim 0.22$ )远大于该值,关于挠度及抗风稳定性问题,在这不用考虑,能够满足要求。

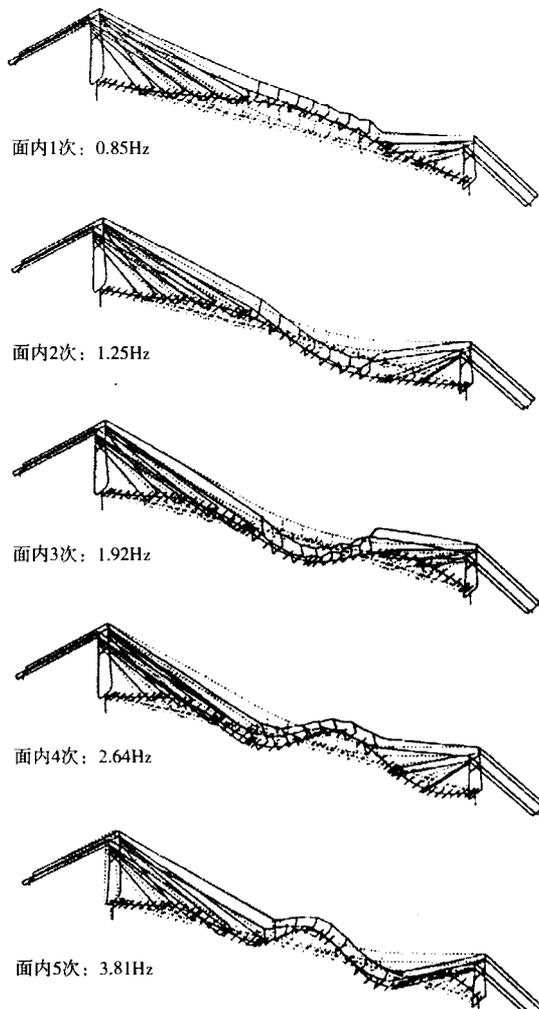


图19 固有振动模型

### 4. 结束语

本桥为预应力混凝土梁斜拉桥与钢箱梁悬索桥组合结构的桥梁,在世界上初次试用,尚有许多有待研究的课题。该桥于2002年12月胜利竣工。在本桥的设计、施工过程中,得到了大家的指导与支持,在此表示感谢!

### · 简讯 ·

## OVM产品挺进科威特

在OVM产品相继进入巴基斯坦、沙特阿拉伯等中东国家后,我们的产品又敲开了科威特的大门。

该工程位于科威特机场附近,系预应力楼板施工。工程面积约5000平方米,南北长80米,东西宽63米,分为地下和地面两个部分。地下室深10米,作为冷藏库;地面共两层,第一层作为零售商店,第二层则是办公室。我们的产品用于冷藏库的预应力楼板。

工程中所使用的OVM产品主要有BM15-4扁锚锚固体系,包括锚板、夹片、锚垫板、螺旋筋、波纹管等;ZB4-500油泵;YdC240QX-200千斤顶;YH3压花机;用于施工的JW180搅拌机和UBL3R螺杆泵等产品。

用户使用我们的产品后,认为OVM的锚具安全可靠;张拉设备体积小,操作简单。

(张峰)