

# 天津富民桥可转动索夹的性能研究

张日亮 彭春阳 黄家珍

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

**摘要:**天津富民桥是我国第一座空间缆索自锚式悬索桥。其主缆线形是空间的,吊索也是空间的,其成桥线形的确定方法与平面缆索悬索桥有很大的不同。空间缆索悬索桥的索夹在体系转换时需要与吊索一起在空中进行转动,因此设计了一种新型的可转动的索夹结构形式。天津富民桥可转动索夹的研究为今后空间缆索悬索桥的建设提供了有益的探索,积累了不少经验。

**关键词:**天津富民桥 可转动索夹 抗滑力 抗滑性能 机械性能

## 1 概述

天津富民桥工程修筑起点为富民路,终点至洞庭路,横跨海河。全桥总长340.3米,主桥为单塔空间索面自锚式悬索桥。主跨157.081米,一跨跨越海河,边跨86.4米,跨越城市主干道,两岸引桥为预应力混凝土箱梁,图1为缆索立面布置图。

主跨主缆锚于主梁的两侧,边跨主缆锚于地锚,形成一个稳定的机构体系。主跨主缆采用三维空间线形,在立面及平面皆为抛物线,边跨采用一组不加竖向吊索的缆索形式。在设计成桥状态下,主缆锚固于主跨锚面体系两端;边跨直接锚固于重力式地锚上。主缆采用PPWS(预制平行钢丝索股)法编制,每根主缆由37股预制平行钢丝索组成,每根索股含有127根直径为5.2毫米的镀锌钢丝,紧缆后的理论直径为393.64毫米。单根主缆的设计拉力4000吨,安全系数K为4.0。

天津富民桥是我国第一座空间缆索自锚式悬索桥,因此设计了一种新型可转动的索夹结构形

式(图2)。本次研究需要按常规做索夹抗滑试验以外,还需要做索夹转动体的强度及索夹转动体与索夹体之间的配合尺寸试验。索夹的抗滑性能是影响悬索桥主缆使用的一个主要因素,目前国内外多采用经验数据进行抗滑力的估算,本文简要介绍天津富民桥主缆索股和可转动索夹的抗滑性能的试验研究情况,供设计及建设单位参考。

## 2 试件的基本参数

(1)本次研究中所测试的索夹(图2)是整座桥中吊杆设计拉力( $N_b = 2038\text{kN}$ )最大、安装倾角( $\varphi = 34.66^\circ$ )最大的索夹。该索夹的结构形式包括索夹体、索夹转动体和高强螺栓副,索夹体内径为 $\Phi 392\text{mm}$ ,其中间圆柱体外径为 $\Phi 472\text{mm}$ ,索夹体上下两片折线开口间距为20mm;索夹转动体内径为 $\Phi 475\text{mm}$ 。索夹体与索夹转动体都是用铸钢材料铸造而成,该材料的弹性模量 $E = 2.02 \times 10^5\text{MPa}$ , $\sigma_s = 345\text{MPa}$ 。

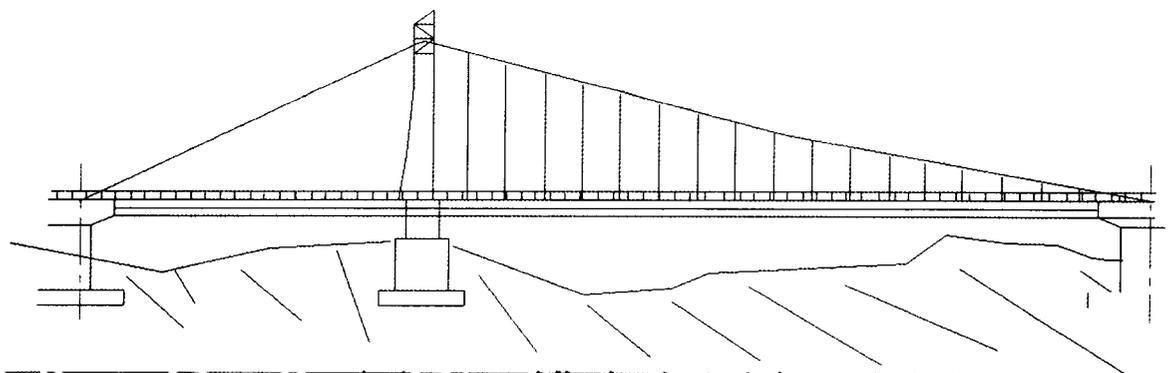


图1 缆索立面布置图

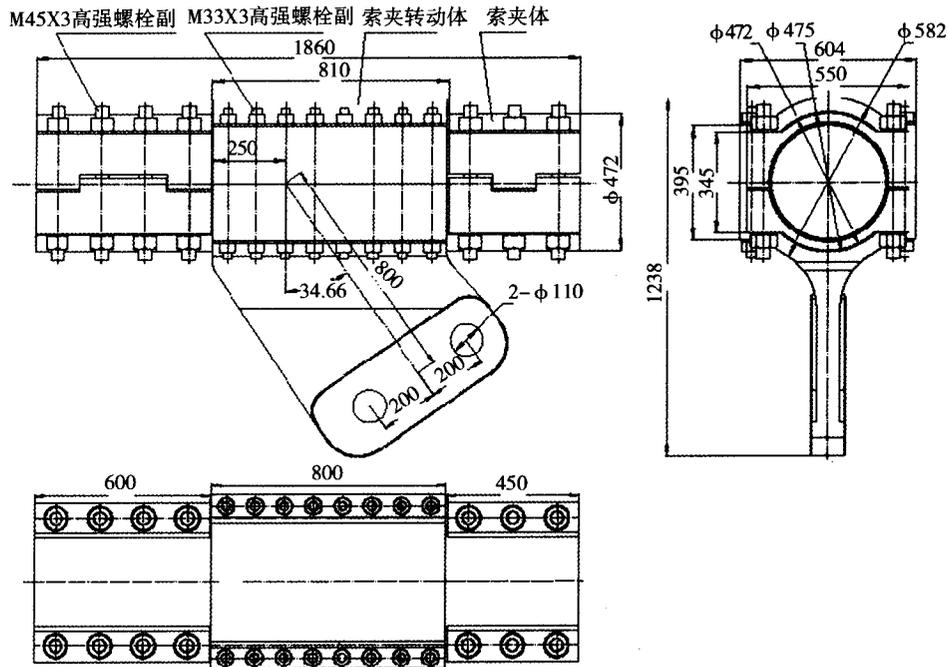


图2 索夹构造图

(2) 测试中，所用的主缆和天津富民桥所使用的主缆一致，由37股127-Φ5.2预制平行钢丝索股组成。

(3) 测试用的索夹转动试验架，芯轴外径为Φ472，倾角34.66°，用于模拟检测索夹转动体的机械性能。

### 3 测试依据

(1) 参照《公路悬索桥设计规范》(报批

稿)中的“索夹”设计要求；

(2) 参照《天津富民桥索夹试验方案》。

### 4 试验装置的布置

试验场地在柳州欧维姆机械股份有限公司的技术中心试验室，按图3索夹抗滑试验安装示意图安装和图4索夹转动体机械性能试验安装示意图进行安装布置。

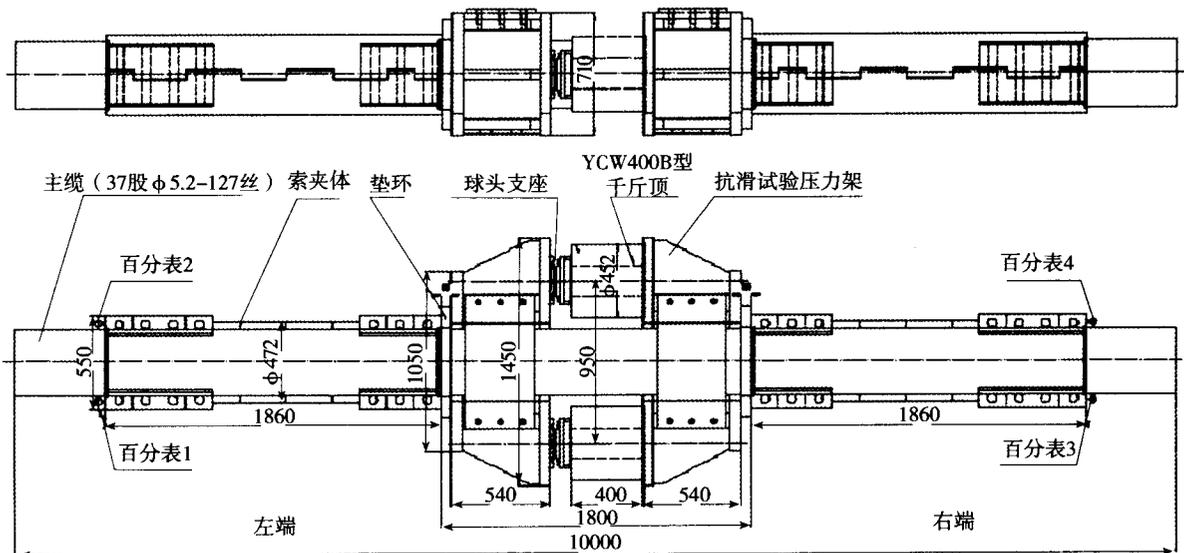


图3 索夹抗滑试验安装示意图

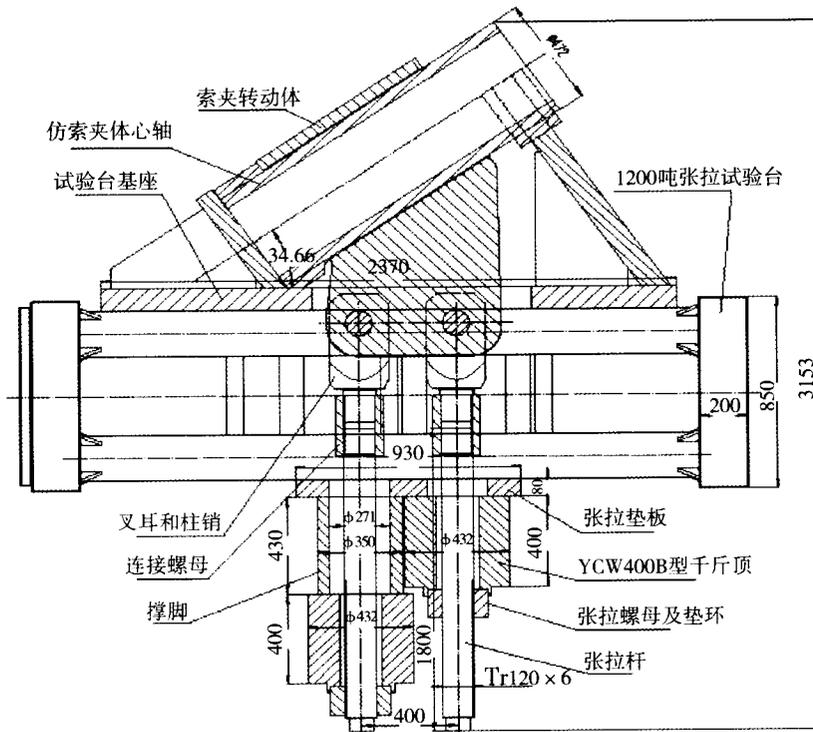


图4 索夹转动体机械性能试验安装示意图

## 5 试验项目

### 5.1 主缆紧缆试验

索股编排成主缆后用紧缆箍和钢带打包机箍紧主缆，再将最外圈索股的缠包带割开除掉，整成圆形（图5）。

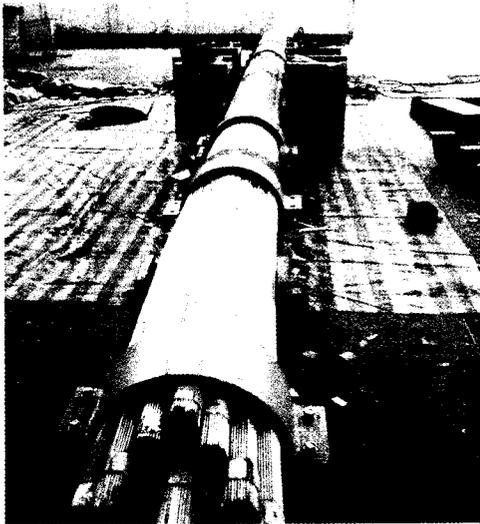


图5 主缆成型图

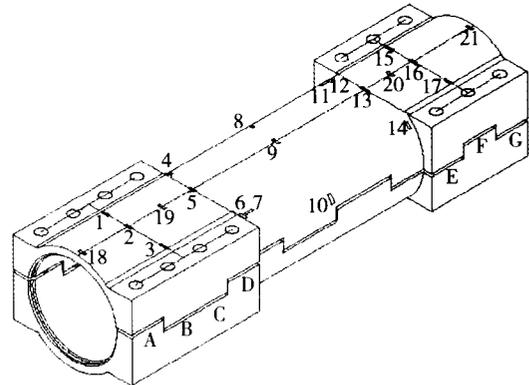


图6 索夹体贴应变片位置示意图

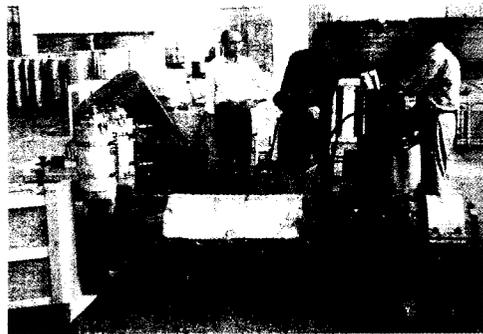


图7 张拉紧固索夹体螺柱副

### 5.2 索夹体机械性能试验

按图6粘贴应变片，用两台YCW100B型千斤顶配合索夹试验用紧固件在索夹体对称的前后螺柱同时进行张拉紧固（见图7），每个螺柱紧固到850kN。

### 5.3 索夹体抗滑试验

使用2台400吨千斤顶施加推力，通过百分表观察索夹的位移情况。

5.4 索夹转动体机械性能试验

按图8在索夹转动体的危险截面粘贴应变片，用螺柱紧固千斤顶将索夹转动体的螺柱副逐个张拉至约400kN后拧紧；按图4所示，通过2台400吨千斤顶施加推力，观察索夹转动体应变量的变化情况。

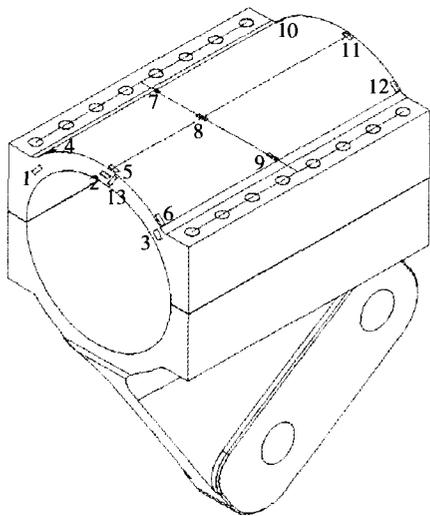


图8 索夹转动体应变片位置示意图

6 试验结果分析

6.1 主缆紧缆试验

表1 紧缆数据

测试项目	实测值	计算直径	备注
主缆紧缆后外径 $d_c$	周长为1240mm	$d_c=1240/3.14=\Phi 395\text{mm}$	

主缆一般位置的空隙率 $V_c$

$$V_c = 1 - \frac{d_w^2 \times n_{tot}}{d_c^2} = 1 - \frac{5.1^2 \times 127 \times 37}{395^2} = 21.7\%$$

可见，空隙率 $V_c$ 在技术要求规定的空隙率范围 $20\% \pm 2\%$ 之内。

6.2 索夹体机械性能试验

6.2.1 索夹体螺柱紧固至850kN后索夹体圆柱处直

径测量值（见表2）

表2 索夹体圆柱处测量值（单位：mm）

测量次数	左边索夹体			右边索夹体		
	上半部份 横向尺寸	下半部份 横向尺寸	纵向尺寸	上半部份 横向尺寸	下半部份 横向尺寸	纵向尺寸
1	473.60	473.65	463.24	470.41	471.69	460.05
2	473.00	473.75	463.41	471.92	473.39	461.80
3	473.01	472.45	462.00	473.66	472.65	461.32
4	472.50	471.60	462.30	473.62	471.10	461.01

从表中可以看出，索夹体紧固后，索夹体圆柱体外径最大：473.75mm，最小：460.05mm。所以索夹体安装紧固后其圆柱体外径尺寸小于索夹转动体孔内径 $\Phi 475\text{mm}$ ，索夹转动体可安装，且可顺利转动。

6.2.2 索夹体上下两片之间的距离测量值（见表3）

表3 上下半索夹间隙测量值（单位：mm）

	左边索夹体测量点（见图6）							平均值
	A	B	C	D	E	F	G	
索夹体前	6.4	7.3	7.7	7.6	9.0	7.1	6.2	7.3
索夹体后	5.6	7.2	8.2	8.4	7.7	6.2	5.3	6.9

索夹体上下两片之间的距离平均为7.1mm。

索夹处主缆外径 $d_c$

$$d_c = \frac{392 \times \pi - 2 \times (20 - 7.1)}{\pi} = 383.8\text{mm}$$

主缆在索夹处的空隙率 $V_c$

$$V_c = 1 - \frac{d_w^2 \times n_{tot}}{d_c^2} = 1 - \frac{5.1^2 \times 127 \times 37}{383.8^2} = 17\%$$

可见，空隙率 $V_c$ 在技术要求规定的空隙率范围 $18\% \pm 2\%$ 之内。

6.2.3 索夹体机械性能试验测量的应变数据情况（见表4、表5）

表4 索夹体机械性能试验测量的应变值（ $\mu \epsilon$ ）（左端索夹体）

压力 (MPa)	荷载 (kN)	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点7	测点8	测点9	测点10	测点11	测点12	测点13	测点14	测点15	测点16	测点17	测点18	测点19	测点20	测点21
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.6	50	60	51	28	-2	-12	1	-41	2	-10	0	-46	10	23	5	0	9	33	-8	28	-99	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
41.9	800	591	448	坏	990	74	411	-64	-11	-368	-10	89	99	-250	122	45	-37	213	247	-131	91	649
44.5	850	982	629	坏	1327	192	803	-434	10	-528	-26	-11	230	-222	358	521	96	704	472	-15	285	983

表5 索夹体机械性能试验测量的应变值(με)(右端索夹体)

压力(MPa)	荷载(kN)	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点7	测点8	测点9	测点10	测点11	测点12	测点13	测点14	测点15	测点16	测点17
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.6	50	60	51	28	-2	-12	1	-41	2	-10	0	-46	0	70	25	50	80	38
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
41.9	800	591	448	坏	990	74	411	-64	-11	-368	-10	89	336	674	145	726	921	365
44.5	850	982	629	坏	1327	192	803	-434	10	-528	-26	-11	565	530	234	1025	1367	496

(注:1个微应变(με)等于百万分之一延伸,如果钢的弹性模量E=2.02×10<sup>5</sup>MPa,那么与之对应的产生1个微应变(με)延伸的应力为:0.202MPa。)

由表4、5可见索夹体最大应变值在右端索夹体测点16处,它有1367个微应变(με),因此计算的应力为:

$$\sigma_{\text{最大}} = \mu\epsilon \times E = 1367 \times 0.202\text{MPa} = 276\text{MPa} \leq \sigma_s = 345\text{MPa}$$

由试验结果得出,索夹体危险截面最大应力不超过索夹材料的屈服强度σ<sub>s</sub>,索夹体未被破坏和发生塑性变形,索夹体机械性能符合设计要求。

### 6.3 索夹体抗滑试验

索夹体抗滑试验记录情况见表6

表6 索夹体抗滑试验百分表测量值

压力表(MPa)	顶推荷载(kN)	活塞前百分表读数		活塞后百分表读数		备注
		百分表1	百分表2	百分表3	百分表4	
10(预紧)						
15.0	2242	0	0	0	0	
20.0	3015	0	0	3	0	
25.0	3788	0	0	5	4	
30.0	4561	2.5	5	6	4	
32.7	4978	2.5	5	6	4	保压5分钟
39.0	5952					开始滑移

∴ 实测索夹体最大抗滑力F<sub>fc</sub>=5952kN

∴ 实测索夹体抗滑力安全系数K<sub>fc</sub>

$$K_{fc} = \frac{F_{fc}}{N_c} = \frac{F_{fc}}{N_h \times \sin\phi} = \frac{5952}{2038 \times \sin 34.66^\circ} = 5.1 \geq 4.3$$

索夹体与主缆之间摩擦系数μ

$$\mu = \frac{F_{fc}}{kP_{tot}} = \frac{5952}{2.8 \times 850 \times 14} = 0.179$$

### 6.4 索夹转动体的机械性能试验

索夹转动体机械性能试验测量的应变数据情况见表7:

表7 索夹转动体机械性能试验测量的应变值(με)

压力(MPa)	荷载(kN)	测点4	测点5	测点6	测点7	测点8	测点9	测点10	测点11	测点12
5MPa	708	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10MPa	1475	1	93	163	192	95	65	162	3	-28
20MPa	3011	158	303	493	600	316	331	341	148	-17
30MPa	4546	333	400	625	701	402	458	376	195	0
40MPa持荷4min	6082	715	617	938	953	680	845	521	363	365
40MPa持荷5min	6082	714	617	937	950	682	843	520	370	367

(注:端面测点1、2、3和13应变值较小,未做记录。)

由表7可见索夹转动体最大应变值在索夹转动体测点7处,它有953个微应变(με),因此计算的应力为:

$$\sigma_{\text{最大}} = \mu\epsilon \times E = 953 \times 0.202\text{MPa} = 193\text{MPa} \leq \sigma_s = 345\text{MPa}$$

那么,索夹转动体危险截面最大应力不超过索夹材料的屈服强度σ<sub>s</sub>,索夹转动体未被破坏和发生塑性变形,索夹转动体机械性能符合设计要求。

### 7 结语

(1) 通过主缆紧缆试验,确认索夹体的主缆孔直径为Φ392mm时,可达到主缆设计空隙率要求。

(2) 通过索夹体机械性能试验,确定在高压螺柱副在施加设定的紧固力P<sub>b</sub>=850kN时,索夹体机械性能满足使用要求,索夹体危险截面没有出现塑性变形;索夹体顺利安装,索夹体安

装紧固后其圆柱体外径尺寸，可以确保索夹转动体安装，且索夹转动体可转动。

(3) 通过索夹体抗滑试验，测定出索夹高强度螺柱副在加载850kN的紧固力后，主缆与索夹的摩擦力为5952kN，大于该索夹要求的最小抗滑力4980kN，主缆与索夹之间的摩擦系数为0.179（设计时取值0.15）。

(4) 索夹转动体的机械性能试验，通过模

拟对索夹转动体与索夹体配合安装后，给索夹转动体加载3倍吊杆拉力时，索夹转动体没有发生塑性变形。

参考文献

- [1] 天津富民桥设计技术规范
- [2] 雷俊卿等. 悬索桥设计. 人民交通出版社, 2002
- [3] 柳州市建筑机械总厂技术中心. 苏州竹园大桥索夹试验报告, 2002年11月

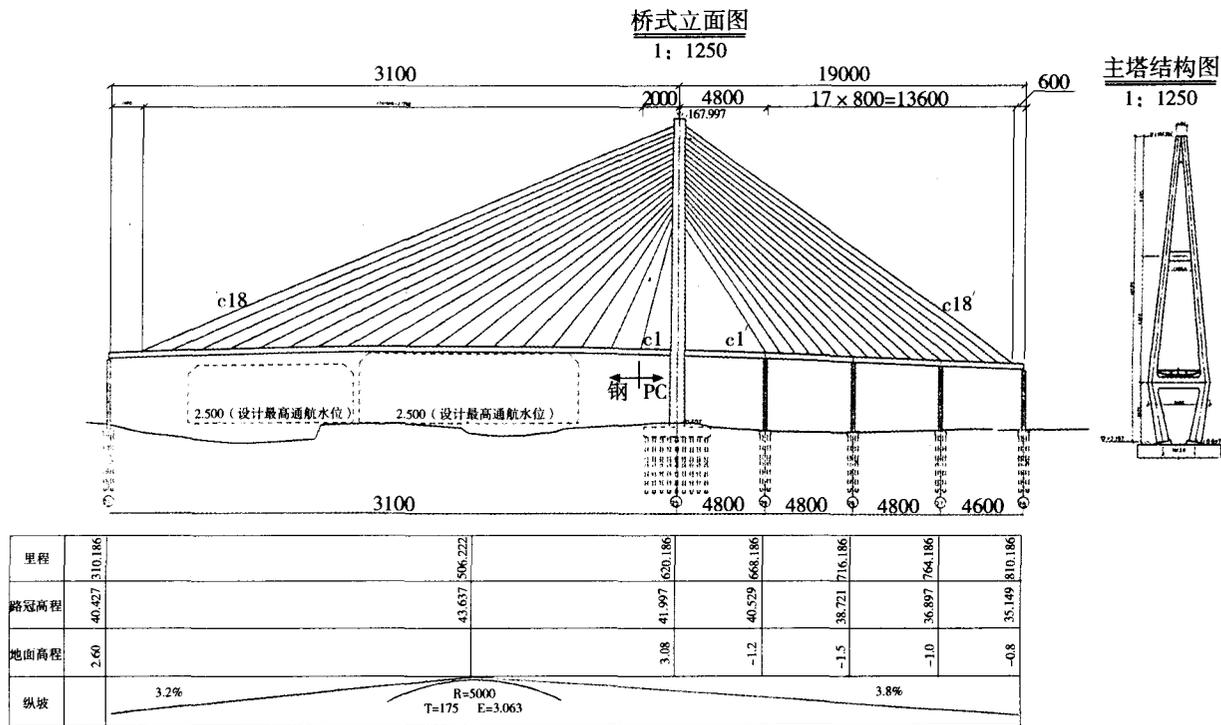
读者反馈

读者杨进同志来信指出，上期刊登的文章《我国独塔斜拉桥》中的天津塘沽海河大桥的结构设计已发生变更，该桥于1999年后改由中铁大桥勘测设计院设计，在总体尺度不变的重要条件下，独塔斜拉桥的结构布局及体系均有所改变，

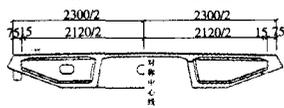
其约束在纵向，为塔与梁绞结。

编辑部感谢杨进读者的关怀和指导，并对其严谨的学术作风表示钦佩！

附：设计变更后的天津塘沽海河大桥结构示意图

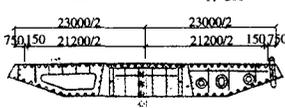


1/2混凝土梁断面（有横梁）  
1: 200



1/2混凝土梁断面  
1: 200

1/2钢梁断面（普通横梁）  
1: 200



1/2钢梁断面（主横梁）  
1: 200

附注：1. 本图尺寸高程及里程以米计，钢梁断面以毫米计，其余均以厘米计。

- 2. 铺装层恒定为6cm.
- 3. 工程数量另见详图.