

# 日本的索结构设计规程和应用

陈志华 王小盾

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘 要** 本文介绍了日本索结构设计规程,按章节顺序分别为:总则、结构体系、索材料、荷载、结构设计、结构分析、节点构造和支承结构等八部分。在应用部分重点介绍了工程中结构体系的图示分类、荷载组合、安全率、分析理论、模型实验、节点和锚固实例等。

**关键词** 索结构 材料 分析设计 实验 构造

## 一 日本的索结构设计规程(索构造设计指针 1994)

### 1 总则

#### 1.1 一般

本规程是在建筑物的结构设计中使用索作为结构构件,应该考虑的必要的安全性和确保功能要求的基本规定。

#### 1.2 适用范围

本规程适用于结构构件采用索结构的建筑物的索及周边部分的设计。

### 2 结构设计

在结构设计中,考虑索所具有的材料特性,对于预先设定的所有荷载,应该具有足够的强度和刚度。另外,索的作用和运动特性随着结构形式的不同而变化的特点在设计中应该充分注意。

### 3 索材料

#### 3.1 索的品质和种类

索材料是使用适合于 JIS G 3506(硬钢线材)或 JIS G 3502(高碳钢线材)的线材进行冷加工所得的钢绞线为原则,以下的种类作为标准。

- (a) 结构用钢丝绳
- (b) 结构用钢绞线
- (c) 结构用密封钢丝绳
- (d) 平行钢丝束
- (e) 带护层平行钢丝束
- (f) 预应力钢绞线

#### 3.2 机械性能

##### 3.2.1 破坏荷载

索材料的破坏荷载采用以下任何一种方法求出。

- (1) 利用日本钢结构协会“结构用索材料规格”进行计算。然而对于预应力混凝土预应力钢绞线来说是利用 JIS G 3536 来计算。
- (2) 根据下式计算出索材料的破坏荷载  $F_b$ 。

$$F_b = A_s \times (1 - \alpha) \times \sigma_b$$

其中,  $A_s$ : 与索材料具有相同外轮廓断面图形的面积  
: 空隙系数

：绞合效率  
b：钢丝的公称抗拉强度（表 2）

表 1 空隙系数 和绞合效率

索材料		
结构用钢丝绳（同心形）	0.39	0.87
结构用钢丝绳（CFRC 形）	0.34	0.83
结构用钢绞线	0.24	0.88
结构用密封钢丝绳	0.18	0.90
平行钢丝束	0.10	1.0
带护层平行钢丝束	0.19	
预应力钢绞线(7 根绞合)	0.23	
预应力钢绞线（19 根绞合）	0.16	

表 2 公称抗拉强度 b

索材料	类别	公称抗拉强度 kgf/mm2(N/mm2)
结构用 钢丝绳及结构用 钢绞线	ST1470	150 (1470)
	ST1570	160 (1570)
	ST1670	170 (1670)
结构用密封钢丝绳	-	150 ( 1470 )
平行钢丝束	ST1570	160 (1570)
	ST1771	180 (1770)
带包裹平行钢丝束	-	160 (1570)
预应力钢绞线(7 根绞合)	A 种	175 ( 1720 )
	B 种	190 ( 1860 )
预应力钢绞线（19 根绞合）	-	185 ( 1810 )

3.2.2 初期变形  
索材料在施加预应力后的初始变形的大小以表 3 所示的值为标准。

表 3 预张拉后的初始变形

索材料	初始伸长率（%）
结构用钢丝绳	0.1—0.2
结构用钢绞线 结构用密封钢丝绳	0.05—0.1
平行钢丝束 带包裹平行钢丝束 预应力钢绞线(7 根绞合 19 根绞合)	0

不需要预张拉。

3.2.3 弹性模量

索材料的弹性模量原则上根据试验求得。如果不进行试验的情况下，索材料在施加预应力后的弹性模量可以如表 4 所示进行假定。

表 4 预张拉后的弹性模量

索材料	弹性模量 kgf/mm <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
结构用钢丝绳	14000 (140000)
结构用钢绞线 结构用密封钢丝绳	16000 (160000)
平行钢丝束 带护层平行钢丝束	20000 (200000)
预应力钢绞线(7 根绞合 19 根绞合)	19000 (190000)

不需要预张拉。

3.24 徐变

索材料的徐变变形以表 5 所示值为标准。

表 5 索材料的徐变变形

索材料	徐变变形(%)	应力水平
结构用钢丝绳	0.025	长期允许拉力以下
结构用钢绞线 结构用密封钢丝绳	0.015	
平行钢丝束 带包裹平行钢丝束 预应力钢绞线	0.007	

3.2.55 线膨胀系数

索材料的线膨胀系数以  $12 \times 10^{-6}/$  为标准计算。

4 荷载

在索结构的设计中考虑的荷载，以《建筑基准法施行令》和日本建筑学会《建筑物荷载指针》所示内容为标准进行计算。与索结构的形式、构法、施工法相关的特殊的荷载，根据实际情况适当地进行考虑。

5 结构设计

5.1 允许拉力

5.1.1 长期允许拉力

索材料的长期允许拉力采用破坏荷载的 1/3 为标准进行计算。

5.1.2 短期允许拉力

索材料的短期允许拉力采用长期允许拉力乘以 1.35 所得的值进行计算。

5.2 形状的设定

在索结构中，各个索的初期张力应确保结构物具有必要的刚度，同时不会因为索的张力

丧失而产生不稳定现象为前提设定索的初期张力值。

### 5.3 初期张力的设定

在索结构中,各个索的初期张力应确保结构物具有必要的刚度,同时不会因为索的张力丧失而产生不稳定现象为前提设定索的初期张力值。

### 5.4 对于变形的考虑

应该考虑到由于外力或支点移动等产生的索的变形,使结构物的使用性和安全性不会受到损害。

### 5.5 对施工方法的考虑

在索结构中,根据需要进行考虑施工方法和施工顺序的设计。特别是对于张力导入方法、导入顺序,考虑结构物的性状进行充分的研究和探讨,根据实际情况适当地设计方法和措施。

### 5.6 在设计时必须注意的事项

在索结构的设计时,根据实际情况应进行以下项目的探讨。

- (1) 由于风荷载产生的振动
- (2) 索构件和锚固构件的徐变、松弛的影响。
- (3) 疲劳

## 6 结构解析

### 6.1 索构件在解析计算上的假定

索构件原则上假定为只抵抗拉力的线性弹性构件。

### 6.2 结构模型

结构解析应恰当确定包括边界条件的结构模型。

### 6.3 解析计算的内容、方法等

解析计算的内容、方法等应考虑结构形式、构法、施工方法,根据实际情况进行设定。

### 6.4 初始形状解析

结构物的形状与索的张力分布有很深的关系,应进行初始形状分析。

## 7 细部设计

### 7.1 索的终端部

索的终端部,插口固定、压缩固定和相互压缩固定为标准,索的张力在边界区域或索接合区域能够准确顺畅地进行传递。

### 7.2 索的交差部

索的交差部应采用恰当的交点锚具进行连接,在交差部产生的力,不会对所有损伤,并且能够相互准确顺畅传递内力。

### 7.3 索的屈曲部

索的屈曲部,是考虑到由于索受弯、测压而使强度下降,利用具有适当曲率的金属锚具进行支承。

### 7.4 锚固部

锚固部是能够顺畅而准确地把索的张力传递到支承结构的构造,能够充分对应索的变形。并且二次应力、索的架设、张力的导入方法等应充分考虑。

### 7.5 装饰材料的安装

在索上安装装饰建筑做法的情况下的安装锚具的构造,应能够把施加在建筑做法材料上的外力顺畅且准确地传递到索中,同时建筑材料及安装金属锚具不阻碍索的变形而能够跟随其变形,并且是一种对索没有任何损伤的构造。

### 7.6 索的防腐和保护

在索及细部的设计中,关于防腐的方法应进行充分的研究。另外当索有可能受到损伤的情况下要进行特别的保护。

7.7 耐火包裹

索材料及接合部锚具等有可能直接暴露在火焰中的情况下,应充分考虑这些材料在高温时的特性并进行耐火包裹。

8 支承结构

支承结构是能够把索内的张力顺畅且准确地进行处理的结构,能够确保其具有恰当的强度和刚度。另外对索结构和支承结构之间的相互影响充分注意。

二 日本索结构设计规程的应用

1 结构分类

1.1 结构体系中索的使用方法

索结构的结构形式即索的作用和举动,如果只用一种见解进行总括的说明和分类是很困难的,但从多种多样的视角进行分类。例如:用空间构成和其他的结构要素相组合的方法,从这个视角出发,可以进行如下分类(图1):

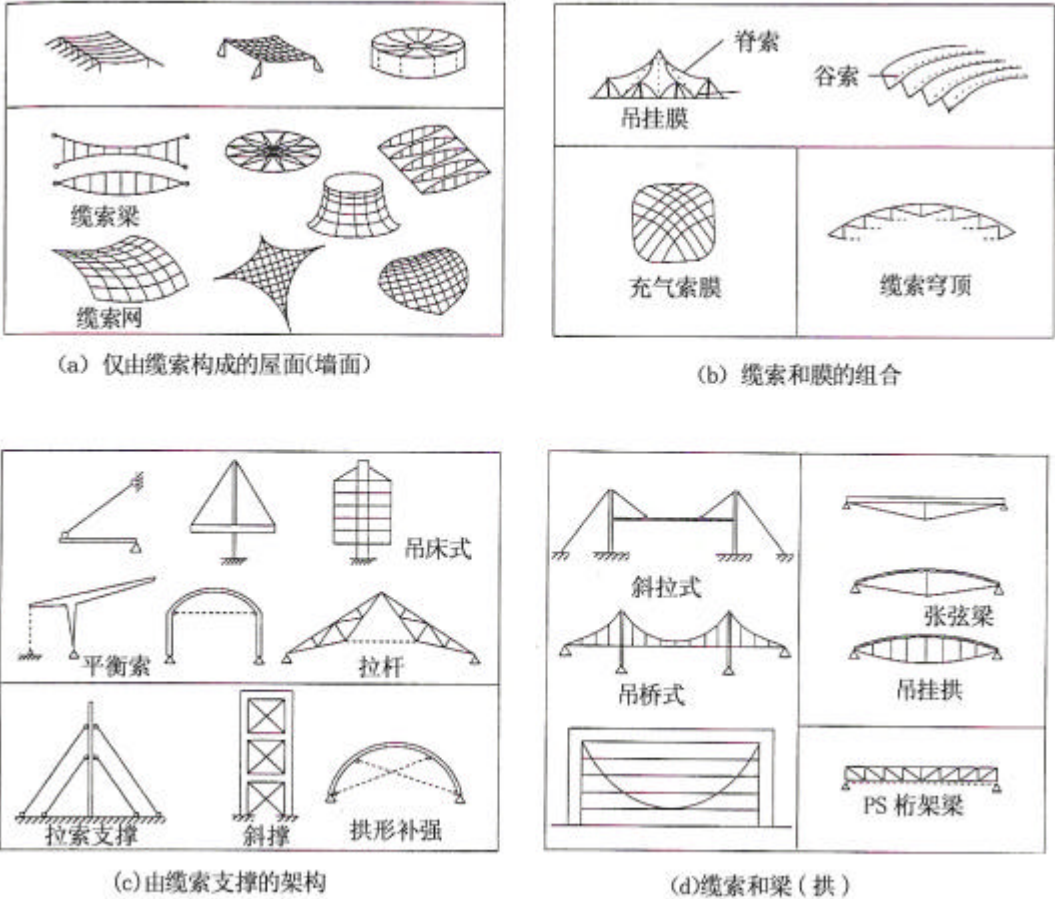


图1 按索的功能分类

(1) 仅使用索建造屋顶(墙壁)面(轻型、重型吊装屋顶):单方向吊装屋顶,索大

梁，索网等。

- (2) 索和膜的组合：悬挂膜结构（脊索·谷索），索增强空气膜，索张拉结构穹顶（索桁架+膜）
- (3) 索支承架构：固定荷载支承型（悬吊式楼板、悬吊式屋顶、后拉索、拱形连杆）附加荷载支承型（柱支撑、架构支撑、拱形增强）等
- (4) 主梁（扁平拱）的组合：斜拉式·吊桥式悬吊屋顶、悬拱、张弦梁、PS 桁架梁等。

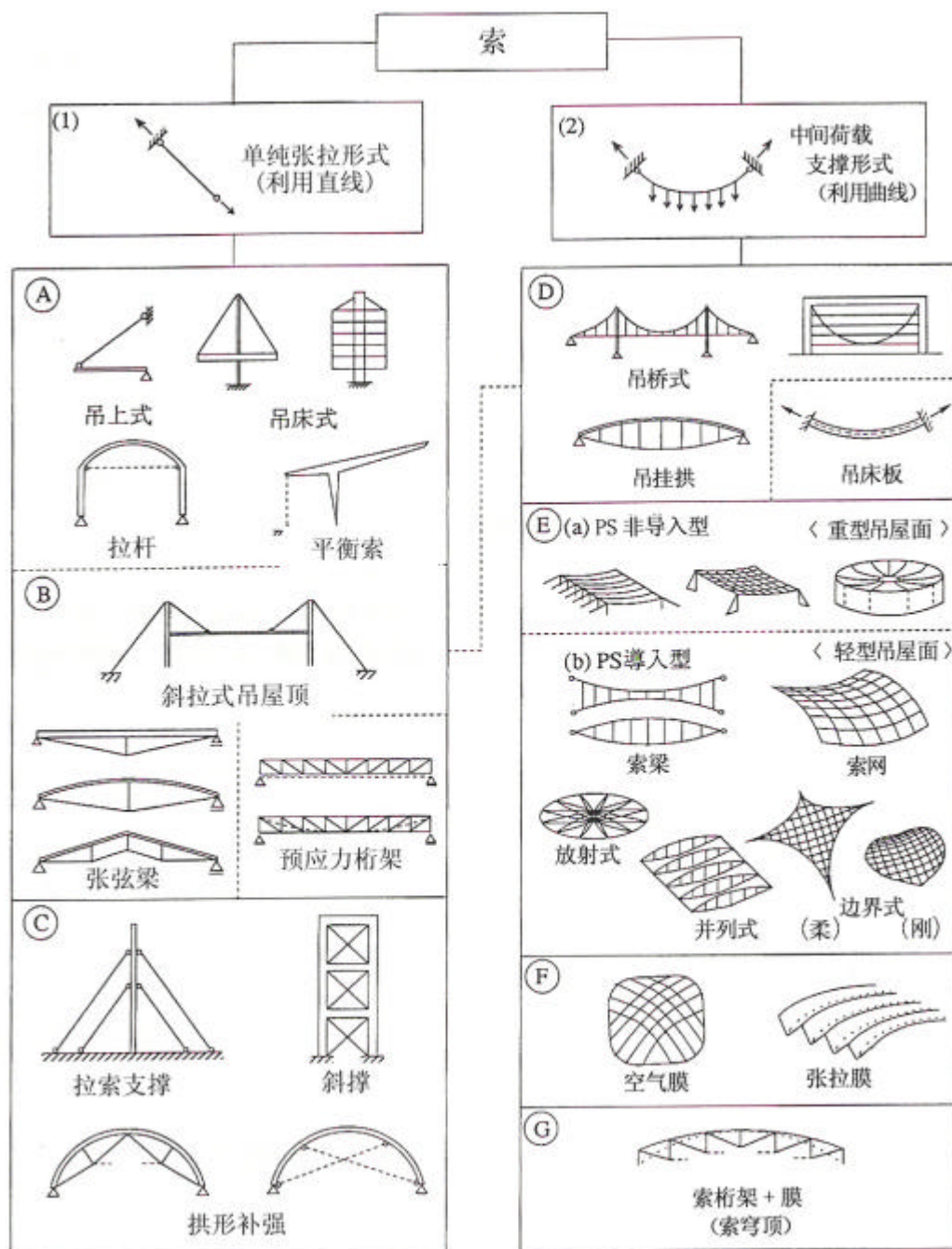


图 2 按荷载分类

## 1.2 按照荷载形式进行的索结构分类

索结构，从其运用方法，即一根索所传导的荷载种类来看的时候，可以分为以下 2 种形

式(图2):

(1) 单纯张拉形式

(2) 中间荷载支承形式

当然,还存在介于以上两者之间的其他形式。

2 荷载组合

荷载组合如表6所示。

表6 荷载组合

允许应力度设计用荷载组合		
	通常时	$D+L+H$
	积雪时	$D+L+H+S$
	强风时	$D+L+H+\gamma S+W$
	地震时	$D+L+H+\gamma S+E$
	温度变化时	$D+L+H+\gamma S+T$
其中: $D$ :由固定荷载计算得到的荷载效果值 $L$ :由恒荷载计算得到的荷载效果 $H$ :由土压和水压计算得到的荷载效果值 $S$ :由积雪荷载计算得到的荷载效果值 $W$ :由风荷载计算得到的荷载效果值 $E$ :由地震荷载计算得到的荷载效果值 $T$ :由温度荷载计算得到的荷载效果值		
极限状态设计用荷载的组合		
终局极限状态	恒荷载时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H$
	积雪时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S$
	强风时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_W W$
	地震时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_E E$
	温度变化时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_T T$
使用极限状态	恒荷载时	$\gamma_D D + S \gamma_L L + \gamma_H H$
	积雪时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + S \gamma_S S$
	强风时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + S \gamma_W W$
	地震时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + S \gamma_E E$
	温度变化时	$\gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + S \gamma_T T$

3 安全率

索和张拉构件的安全率如表7所示。

表7 索的安全率

部 件		安全率
索	吊 桥	3.0
	斜拉桥	2.5
吊 杆	直线部	3.5
	曲线部	4.0

4 分析方法

按照日本土木学会“钢结构物设计指针”(1987)“第14章 索结构物”的“14.5 结构解析 14.5.1 解析法”的规定,运用有限变位理论的静态弹性解析按照规程进行,在确认必要的情况下,要进行塑性解析以及动态解析等,对于电子计算程序的适应性要加以充分的考虑。作为运用有限变位理论的理由,对索结构物比较大的变形、以及向索导入较高张拉力等



进行深入分析。

## 5 模型试验

调模型试验是必要的。特别是形成索网结构的曲面形状的情况下，只从图纸上要把握其形态是非常困难的。模型制作试验，可以明确地显示出预想形状的可实现性，加深施工方和业主对此建筑的理解，这种手段是非常有效的。模型试验就相当于初期形状解析，通过其获得的具体感触来把握建筑物的结构特性，可以得到关于索结构的形式，构法，施工法等大量的理性感受，所以特别推荐。

## 6 节点和锚固实例

节点实例如图 3、4、5 所示，锚固实例如图 6 所示。

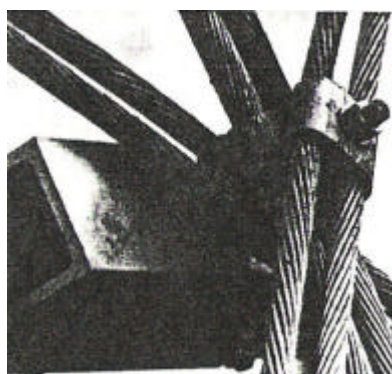


图 3 节点实例 1



图 4 节点实例 2

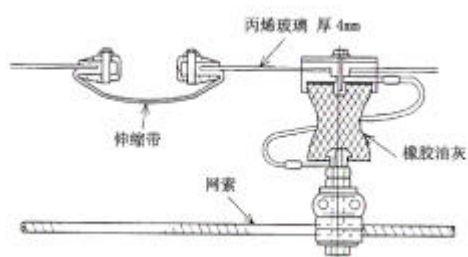


图 5 节点实例 3



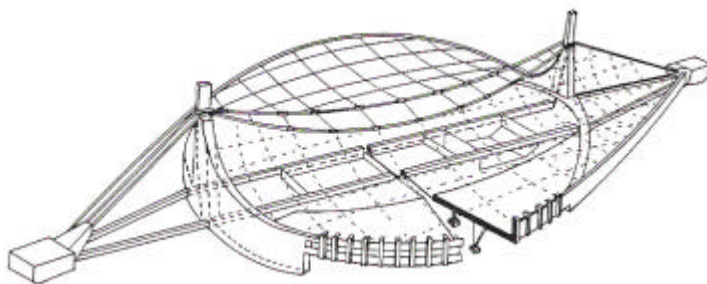


图 6 锚固实例（代代木体育场结构体系）

### 三 结束语

本文介绍了日本索结构设计规程（1994）中的总则、结构体系、索材料、荷载、结构设计、结构分析、节点构造和支承结构等八部分并分析了工程应用中结构体系的图示分类、荷载组合、安全率、分析理论、模型实验、节点和锚固实例，可为我国预应力钢结构所参考。

### 参考文献

1. 川口卫等. 日本索结构设计规程及说明，日本建筑学会，1994