

第一座体外预应力桥的设计和建造

——渥达华拉港大桥

郑诗华 译

摘 要 本文从拉索的安全系数和疲劳设计, 鞍座的有限元分析设计等方面介绍了渥达华拉港大桥的设计和施工。

关键词 体外预应力 安全系数 疲劳设计 有限元分析

一、综述

渥达华拉港大桥是世界上第一座体外预应力砼桥。这种新型砼桥的特点更接近于普通的砼梁桥, 而不是拉索桥。尽管从外表看与拉索桥相似。此外, 从所用的砼和钢筋量, 以及费用方面来看, 体外预应力桥处于箱型梁桥和拉索桥之间。

渥达华拉港大桥的其中一个主要特点是拉索的安全系数。这座桥拉索的安全系数是 1.67, 而拉索桥采用的安全系数则为 2.5。这个安全系数与预应力钢筋放在砼梁内的安全系数相同。在采用这个安全系数之前, 进行了拉索的疲劳设计、拉索系统的弯曲疲劳试验以便证实拉索振动时可允许的振幅, 以及用于拉索的高缓冲橡胶缓冲器。本文介绍了疲劳设计并概述了施工。

二、拉索的安全系数

拉索桥中拉索的安全系数为 $2.5(0.4f_{pu})$, 如日本公路桥梁规范中作了上述规定。但是对 1M ($0.65f_{pu}$) 的体外预应力砼桥的拉索确定了一个安全系数。渥达华拉港大桥采用安全系数 1.67 ($0.6f_{pu}$, 105Kgf/mm^2), 相当于置于砼梁中预应力筋的安全系数。在该安全系数确定之前, 对拉索桥中拉索的应力变化作了比较, 同时也做了拉索的疲劳设计。

渥达华拉港大桥的拉索是 SWPRTA19 No. 15 绞索。表 1 列出了砼拉索桥的拉索中因活动荷载引起的应力变化。由表可见, 这类桥梁中应

力变化的范围在 $4-13\text{Kgf/mm}^2$ 。但是在渥达华拉港大桥, 其变化范围在 $1.5-3.8\text{Kgf/mm}^2$, 换言之, 只有拉索桥承受的 $1/4-1/3$ 水平。那主要是由于拉索的角度差异, 但是拉索和梁的刚度比率也认为是一个原因。这里疲劳设计按文献[2]进行。本文也列出了长度为 10m, 20m, 50m 和 100m 单梁的数据。但是因为此桥的中心跨度为 122m, 也因为主要目的在于确定应力变化数量级, 表示转化为相当于 2 百万次循环, 未做荷载模拟, 疲劳设计采用文献[2]摘引的循环转化图。

文献[2]引述了 TT43 和 L20 疲劳设计荷载。但得出的结论是按 TT43 车辆模型计算的转化重复循环荷载总体上比 L20 模型更适用, 这里必须考虑主、次荷载。BS5400: Part10 为计算疲劳设计规定了一个标准车辆。PTI 也为疲劳设计定出了 HS20 荷载。所以目前 TT-43 作为疲劳设计荷载, 转化成相当于 200 万次重复循环的应力变化是当单独一辆车一个方向通过桥梁时拉索中应力变化计算而得。表 2 给出了由一辆 TT43 车辆引起的拉索中应力变化。

表 1 砼拉索桥的拉索中应力变化

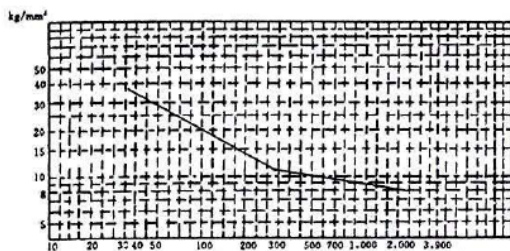
桥 名	跨度(米) ()=跨数	横固系统	安全系数	活荷载产生的应力变化(Kgf/mm ²)
Nishikioka Bridge	52.0(2)	Freyssinet	2.5	6.1
Bungo Ohashi	37.4(2)	SEEE	2.5	13.0
Shin-Ayabe Ohashi	110.0(3)	PC steel	3.0	5.2
Kamitsuma Bridge	103.0(1)	Freyssinet	2.5	11.1
Shiroya Bridge	124.3(2)	Freyssinet	2.5	4.4

桥名	跨度(米) (-)跨数	锚固系统	安全系数	活荷载产生的应力变化(Kgf/mm ²)
Shimamaruyama Bridge	113.4(2)	SEEE	2.5	8.1
Tohmei-Ashigara Bridge	185.0(3)	HiAm	2.5	12.8
Munich Bridge	106.9(2)	VSL	2.5	5.3
Twinharp Bridge	140.0(3)	Freysinet	2.5	9.6
Aomori Bridge	240.0(3)	Freysinet	2.5	13.2
Utsi Bridge	110.2(3)	NEW PWS	2.5	6.3
Haruta Bridge	108.1(2)	Freysinet	2.5	5.9
Chichibu-Koen Bridge	195.0(2)	SEEE	2.5	1.6
Minami-Osaka-Harbour, North Bridge	168.2(2)	HiAm	2.5	9.0

表2 一辆 TT-43 车辆引起的拉索应力变化

Tmax(tf)	Tmin(tf)	AP(mm ²)	Δf_{TT-43} (Kgf/mm ²)
2.84	-0.70	5270	0.67

拉索的 S-N 曲线采用文献[2]给出的 0.6f_{pu} 时钢绞束的 S-N 曲线(图 1)

图1 钢绞线(0.6f_{pu})的 S-N 曲线

设计应力范围 f_{rSK} 按下列公式计算:

$$f_{rSK} 10^{4.6} / N^{0.55} \quad (N < 3 \times 10^6)$$

$$f_{rSK} 10^{2.0} / N^{0.15} \quad (N < 3 \times 10^6) \quad (10)$$

式中: N = 重复次数。所以 200 万次循环的设计应力范围(f_{rSK})为 13.6Kgf/mm²

1985 年作的一次调查表明,到 1994 年通过渥达华拉港大桥的交通流量可达 13,700 辆/天。不同种类车辆的百分比列于表 3。

表3 以车辆种类计交通流量

汽车	货车(2轴)	货车(3轴)	拖车
61%	29%	9%	1%

表 4 则列出了文献[2]提供的 Tomei 和 Meishin 高速公路上交通量和组成。换算的重复循环就是在此基础上进行计算的。一般都同意,在渥达华拉港大桥交通流量和组成的预计数基础上,采用 Tomei 高速公路上 Yamato 和 Shiruoka 收费站的换算重复循环进行疲劳设计可以获得充

分的安全富余,当采用 Tohoku 高速公路上的 Iwatsuki 收费站时,则需乘上系数 2。表 5 列出了换算重复循环,计算按桥寿命 50 年为基础,表中“m”代表用 Miner 的求和法得到的 S-N 曲线的倒数。

二百万次循环的应力振幅按下式得到:

$$\frac{\Delta f_{cq}}{\Delta f_{TT-43}} = \frac{N_{TT-43}}{200 \times 10^4} \quad (2)$$

式中:

m = S-N 曲线斜率的倒数

Δf_{cq} = 二百万次循环的应力振幅(Kg/mm²)

Δf_{TT-43} = 一辆 TT-43 车辆通过时应力变化(Kg/mm²)

N_{TT-43} = 以 TT-43 换算的二百万次循环(50 年桥梁寿命)

表 6 列出了拉索二百万次循环的等效应力振幅,由此可见最大值为 1.44Kgf/mm²,或者说约等于由荷载 L 产生的 3.8Kgf/mm² 应力变化的 1/3。这大大低于 0.6f_{pu} 时设计应力范围,对活动荷载产生的疲劳仍具有适量的安全富余。但是,对拉索的防腐和拉索的振动应与拉索桥一样重视,因为拉索布置在箱形梁外部。

表4 按车种计试验地点交通流量

试验地点	车辆数/小时	车辆种类(%)					
		汽车送货车(2轴)	货车(2轴)	货车(3轴)	连接拖车(3,4轴)	连接拖车(5轴)	公共汽车(2轴)
Tomei Yamato	43,932	72.2	1.8	21.4	2.8	0.4	1.4
Tomei Tsuburano	21,633	47.1	5.1	35.7	9.5	1.2	1.4
Tomei Shizuoka	23,334	48.4	7.1	35.6	6.9	0.8	1.2
Meishin Kamiishizu	17,487	43.0	2.4	42.9	6.5	2.7	2.5
Meishin Sakurai	35,526	70.2	2.0	22.4	3.2	0.6	1.6
Tohoku Iwatsuki	10,683	77.9	2.3	15.4	2.8	0.6	1.0

表5 当量循环数(TT-4350 年)

m	Tomei Yamato	Tomei Shizuoka	Tohoku Iwatsuki
3	969	1,987	287 × 2 = 574
4	633	1,405	186 × 2 = 372
5	442	1,075	128 × 2 = 256

表6 拉索 200 万次循环的等效应力幅度

	Tomei Yamato			Tomei Shizuoka			Tohoku Iwatsuki		
m	3	4	5	3	4	5	3	4	5
NTT-43(×104)	969	633	442	1987	1405	1075	574	372	256
Δf_{TT-43} (Kg/mm ²)	Δf_{eq} (Kg/mm ²)								
0.67	1.13	0.89	0.79	1.44	1.09	0.94	0.95	0.78	0.70

设计计算

三、鞍座的设计

鞍座由双管结构组成,以满足拉索位移对结构的要求,同时又必须使拉索不发生滑动,而造成拉索任一端的不平衡张力。采用的解决办法是将拉索锚固在塔的外部,如图2所示,钢绞线束到锚固件的传递力决定于管中灰浆的粘结力。

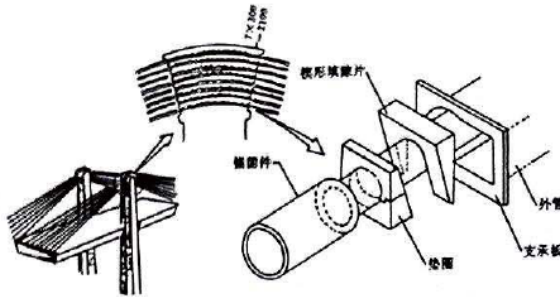


图2 鞍座详图

此外,因为拉索间距很窄,只有30cm,外管的组装用圆形和方形钢管结合起来,这样将来内管容易替换。

鞍座设计采用二维有限元分析。对预应力筋加力,力反作用到鞍座上,为了抗拉索 $0.6f_{pu}$ 的张力,砣的抗拉应力($f_{crk}=350\text{Kgf/cm}^2$)就不能超过允许应力。图3示出了有限元分析的结果。结果表明因为外管间砣构件作用于固定在两端的边梁,20~30Kgf/cm²抗拉应力出现在端点的顶部和中心截面的底部。拉索力的垂直分力也引起主应力靠近水平力朝向拉索底部。这样,如图4所示,施加水平和垂直预应力,以保持砣抗拉应力在允许应力之内。

四、施工

图5示出了渥达华拉港大桥建造顺序,和拉索桥顺序一样采用悬臂方法。在施工中和施工后不需要拉束力的调节,因为拉索上的所有力随徐变和收缩而逐步减少,就象当预应力钢筋放在砣梁内一样。拉索的锚固件与梁内预应力一致,不需要拉索力调节,并且活动荷载产生的应力变化较低。用来吸收拉索震动的高性能橡胶减震器安

装在管和拉索之间,这样减震器可藏于拉索覆盖物内。这种布置从审美角度看也有利。

五、结论

在渥达华拉港大桥,拉索的安全系数采用1.67,与砣梁中钢筋的安全系数一样。但是也必须考虑拉索因活动荷载、震动等产生的疲劳和拉索的防腐。可以预见超拱背预应力砣桥对跨度为100~200m的桥梁是一个经济的结构设计。

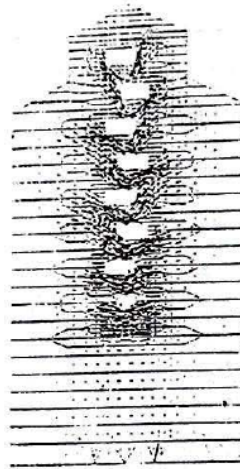


图3 有限元分析结果



图4 预应力筋的排列

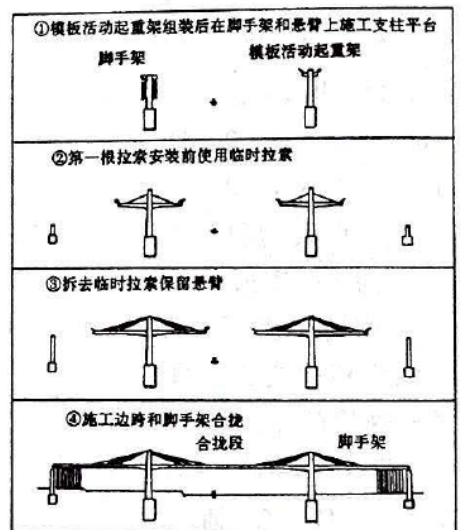


图5 施工顺序