



夏天,除了酷暑难耐的高温,还会有破坏力极强的台风。风灾是常见的破坏性巨大的自然灾害之一,对交通设施及运输安全性的影响极为明显。

浙江有“万桥之省”之美誉,近年来的世界级大桥建设更是让浙江迈进了“桥梁强省”的行列。桥梁对于风是敏感的,而人们对于桥梁的抗风性的认识,也在不断增强。本期《圆桌会》,就来探讨下——

# 对桥梁抗风认识的探索

本期 丰月华

嘉宾 浙江公路水运工程咨询有限责任公司副总工程师、总工程师办公室主任

## 桥梁设计在抗风认识中不断进步

### 初识风力静荷载

人类开始认识到风会对桥梁造成严重威胁,始于泰桥事故。泰桥是苏格兰第一座跨河铁路桥,也是当时世界上最长的铁路桥,于1878年6月1日正式通车。工程耗时近7年,耗资30万英镑,全长3.5千米,采用桁架结构,主设计师是当时英国著名的铁路工程师汤姆·波克,他也因此受封爵士爵位。

1879年12月28日晚,泰河周边刮起大风,风速达到40米/秒,正在过桥的火车连同大桥中部的梁跨,突然坠入泰河,车上75名乘客和司乘人员全部遇难。

事后展开的调查发现,设计者曾经对55米长的桁架大梁进行过风力荷载评估,结论是无需考虑风力影响,之后设计方案发生了变更,大梁长度调整到了75米,但他却自信地认为风力对变更后的设计不会构成影响。据分析,事发当时风速40米/秒的情况下,风压为188千克/平方米,可是设计师预定的数值仅为47千克/平方米。再根据每个大桥拱里风力作用的面积等数值来计算推倒大桥的推力矩,发现115千克/平方米的风便足以推倒大桥。

这起事故之后很长一段时间,人们都把风对桥梁结构的作用看成是一种风压形成的静力作用,主要是风力在桥梁上受到抵抗后,在桥梁构件上形成的侧向荷载。说是静荷载,但实际上风的形态是不断运动变化的,“静”的含义是指作用在某个结构上一段时间内的平均风力荷载。

### 再识风力动荷载

1940年11月7日,位于美国华盛顿州、建成才四个月的悬索桥塔科马海峡吊桥,在风速19米/秒的情况下发生了强烈振动。大桥先是桥面整体呈现正弦波形态,共有5个波峰4个波谷,周期为一分钟36次。这种振动持续了将近一小时后,忽然转变为以桥面中心为对称轴,两侧各自沿着道路中心线的扭转,周期为一分钟14次。扭转在短时间内给桥梁的承重部件造成了极为严重的毁损。最终,大桥很快从波动幅度最大的四分之一桥面处发生断裂,坠入大海。

塔科马海峡吊桥风毁后四个月,当地政府组成了有著名桥梁工程师、流体力学家参加的委员会。该委员会提出了五卷详细报告,其中包括最早的节段模型试验,它重现了塔科马海峡吊桥的扭转发散,向建造方说明了风力造成大桥共振的可能机理,并要求建造方提出的新方案必须经过风洞测试才能考虑开工建造。

重建之后的塔科马海峡吊桥一直通车到现在,新设计解决了共振问题,被当地居民称为“强健的格蒂”。

塔科马海峡吊桥事故开启了人们对于风力动荷载的研究。所谓动荷载主要是风力和桥梁结构间的共振作用导致。动荷载有很多种类,如抖振、涡振、驰振、扭转颤振、经典耦合颤振等,涡振是其中主要作用之一。

一般而言,相比梁式桥、拱桥、刚构桥,悬索桥和斜拉桥对风力动荷载更加敏感,因此不宜作为重型铁路桥梁。但是它们在跨越能力、桥下通行空间、施工便捷性和适应能力等方面也具有不可比拟的优势,尤其是跨越能力,按照主跨长度进行排列,全世界前五十大桥被悬索桥和斜拉桥包揽,其中悬索桥45座、斜拉桥5座。

悬索桥是一种“柔韧”结构,在大风情况下需要暂时关闭,但这绝非是桥梁质量问题,而是晃动起伏的桥面可能对行车安全造成一定的影响。

### 西堠门大桥——超强抗风设计标杆

从1995年底广东汕头海湾大桥建成主跨452米的预应力混凝土加劲梁悬索桥开始,揭开了我国现代长大悬索桥建设的序幕。其中的佼佼者正是我省的舟山西堠门大桥,主跨1650米,位居悬索桥世界第二、中国第一,其中钢箱梁全长在悬索桥中居世界第一。设计通航等级3万吨、通航净高49.5米,使用年限100年。

西堠门大桥所处的海洋环境中,风场紊流强度很高,风强度大,且缺乏规律,灾害性天气频发,每年都要经历几场大台风,比如2019年的“利奇马”登陆时中心附近最大风力16级(52米/秒)。西堠门大桥从头到脚都采用了抗风能力最强的设计,由于它的跨度特别大,因此其设计风速也特别的高,达到了78.4米/秒,创造了当时世界上所有已经建造的桥梁抗风的纪录。

为了抵御风力动荷载,它在抗风设计上做了诸多创新。除了常规的风嘴、隔板板等以外,还采用了能够极大降低颤振的分体式钢箱加劲梁,这在世界上尚属首次。

这种设计相当于在原来的整体箱梁中间开一个槽,使它变成一个分体的箱梁。这种设计最大的好处,是可以将“涡振”引起共振的临界响应风速提高到现实环境不可能达到的高度,从而抑制风力动荷载。通过“风洞试验”证明,中间槽的宽度6米和10.6米都能满足要求,最后西堠门大桥选择了比较经济的中间6米槽宽的分体式的钢箱梁,解决了抗风的问题。这项技术在2013年又被韩国的李舜臣大桥所采用,最近丹麦有一座跨海桥梁也将采用这项技术。

另外,西堠门大桥塔柱断面的角点部位也设置了凹槽,它应用的是空气力学原理,既然在某些部位可能产生涡流,那么在这些地方设置凹槽等结构,就可以对气流的流向进行有效控制,从而减弱或者消除涡流造成的周期力。

### 结语

风力与桥梁之间的复杂作用曾经给人类带来了巨大的损失,但是也促进了人类对于桥梁抗风认识的不断加深。随着我国科技水平的整体提高,我们还将在未来的桥梁抗风设计中不断进步。

本期 李煦阳

嘉宾 浙江省交通设计院检测科技公司养护技术室副主任  
中国科学技术大学工程安全与防护技术专业博士

## 涡振与涡振现象的产生

### 有限振幅的共振是难以避免的

涡振,也叫涡激共振。当横向气流经过桥梁主梁时会产生分离,在周围形成周期性的交替脱落旋涡,而脱落旋涡会对桥梁施加连续不断的周期性气动力,当气动力的激励频率接近于桥梁结构的某些固有频率时,就会形成涡振。

涡振可看作是一种特殊的桥梁共振现象。通常一座桥梁会有多个固有频率,当外部激励频率接近于其中某个固有频率时,桥梁会更加容易吸收外部激励作用的能量,进而表现出结构能量和振幅显著增大的现象,即桥梁共振。

对于地处复杂气候环境中的大跨度桥梁来说,涡振几乎是难以避免的。例如,西堠门大桥地处沿海环境,周围气候复杂多变,长年累月千变万化的横风所产生的旋涡激励频率也在不断变化,这就使其更加容易接近桥梁固有频率继而引发涡振。

另外,涡振的过程也是气流与结构相互影响、相互耦合的过程。旋涡脱落可以激励桥梁产生共振,同时桥梁的振动也会反过来影响旋涡脱落。当某一固定频率的涡振发生时,即便风速有一定变化,旋涡脱落频率在结构振动的影响下仍可继续保持为桥梁的固有频率。

这种在一定风速范围内气流和结构互相控制,进而导致涡振频率不随风速变化的现象称为“锁定”现象,对应的风速范围称为“锁定区间”。

风速在“锁定区间”内变化时,结构振动和旋涡脱落将保持为固有频率,风速离开“锁定区间”,结构振动逐渐消失。大跨度桥梁的固有频率往往较低,因此涡振通常只会在风速不大的情况下发生。

### 涡振对桥梁结构和交通安全的影响

通常,涡振不会危及桥梁的结构安全和耐久性。但是,涡振的发生却能直接影响交通行车的舒适度,将不可避免地司乘人员造成心理恐慌;另外桥梁在相对较大幅度的周期振动过程中也会加剧主梁、支座、主缆、吊索等部位的疲劳损伤。因此,虽然短期内桥梁是相对安全可控的,我们仍需注意交通行车安全,并保持和加强对桥梁的长期监测。

一般在桥梁的设计阶段,工程师们会充分考虑运营期可能发生的涡振现象,并依据相关规范进行针对性的抗风设计,尽可能地降低涡振对结构安全以及行车舒适度的不利影响。



西堠门大桥——超强抗风设计标杆