

# 日本斜拉桥的最先进技术

Shin NARUI

翻译: 韦华庆

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:**斜拉桥在过去几年间有了显著进步。计算机软件有了发展, 钢铁材料和施工方法也有了进步。据预测, 未来斜拉桥的建设数量将多于悬索桥。斜拉桥由许多组件组成(梁、塔和拉索)。塔和梁可以在现有的混凝土或钢结构基础上建设。但斜拉索的防腐和风振问题还没有彻底解决。本文介绍了效果显著的斜拉索防腐和抗风振技术的开发过程。

**关键词:**斜拉索 防腐 密度聚乙烯 彩色拉索 风振 高阻尼橡胶 碳纤维复合绞线

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2017.01.007

## 1 斜拉索材料的历史

很久以前日本就建造了吊桥, 它采用藤蔓植物(KAZURA)作为悬索的材料。这座桥采用了植物纤维而没有一根钢丝。这座桥现在仍作为人行桥使用(如图1)。



图1 藤蔓大桥

另一方面, 现代斜拉桥最早是由前西德的弗里茨·莱昂纳特(Fritz Leonhardt)教授设计的。他设计的第一座现代斜拉桥是特奥多尔-豪斯(Theodor-Heuss)大桥(如图2), 莱茵河上的斜拉桥大多是由他设计的。

成井信男 1948年生, 日本科学技术研究所代表, 德国斯图加特大学工学博士。世界最大跨度悬索桥日本明石海峡大桥技术总负责人。本州-四国大桥局前执行总工程师。主要研究方向: 1、完全填充防腐PC钢绞线, 2、高阻尼橡胶在长度大于300m斜拉索防风激振中的应用, 3、HDPE老化和褪色的研究, 4、碳纤维复合拉索

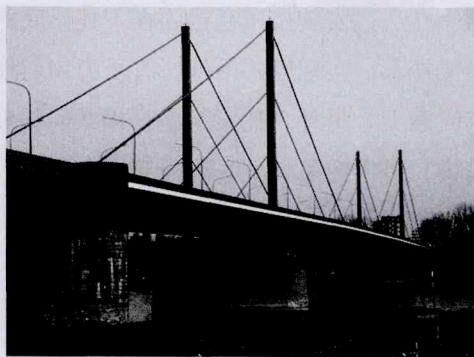
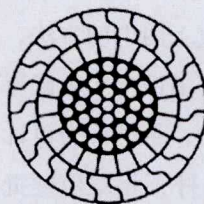


图2 特奥多尔-豪斯大桥

当时西德的钢丝绳生产技术十分先进, 斜拉索采用的是封闭式钢丝绳(如图3)。为了防水, 钢丝绳是紧密缠绕而成的。钢丝绳只采用镀锌和油脂进行防腐。

以后, 他应用预应力混凝土桥的技术, 开发了一种高疲劳强度锚(HiAm)(如图4), 设计中采用了环氧树脂、钢丸和半圆头锚。



Locked Coil Rope  
C Type

图3 封闭式钢丝绳

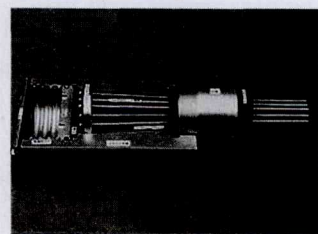


图4 HiAm 锚具

此外, 除了封闭式钢丝绳, 还有缠绕钢丝(钢绞线)和平行钢丝。PC桥或悬索桥的技术也被应用于斜拉索。



弗里茨·莱昂纳特 (Fritz Leonhardt) 注意到贝尔公司的高密度聚乙烯 (HDPE) 电话线耐久性好, 并将灌浆注入到钢丝和保护管之间的间隙。将油脂、丁基橡胶等其他材料注入以填充间隙。目前该解决方案系统简单, 它只需要将蜡涂到镀锌钢丝, 然后缠上胶带并插入HDPE管内。

## 2 斜拉索防腐技术的发展

一般来说, 拉索防锈采用的是镀锌和喷涂。

然而, 这些防腐方法处理后的拉索很快就会生锈。因此拉索需要增加保护管。自从采用了HDPE保护管, 拉索便得以迅速推广。但是由于退化的因素, 保护管的颜色只有黑色。通常, 尽管紫外线会造成塑性退化, 如果HDPE添加炭黑超过2%, 其耐候性能将会得到改善。HDPE耐候性可通过户外暴露试验和加速试验来检验 (如图5)。

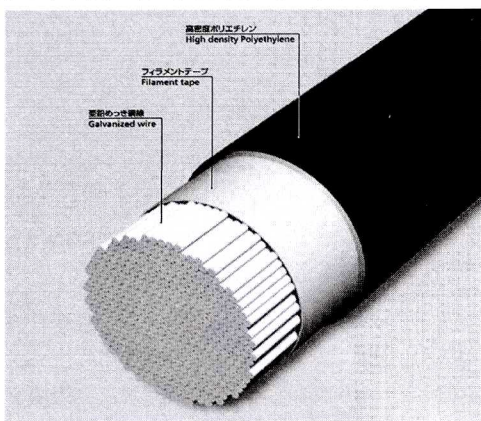


图5 被覆HDPE的平行钢丝拉索

尽管日本使用添加炭黑的HDPE拉索超过30年, 但还没有出现过开裂和褪色等材料退化现象。近年来, 由于桥梁景观和美观的需要, 拉索不仅仅需要黑色也需要彩色。黑色以外的彩色拉索, 由于塑料和色素无法避免紫外线造成的退化, 其耐候性变得更糟。然而, 像矮塔桥, 因为桥塔矮, 容易维修, 一直在增加彩色拉索的应用 (如图6)。

当时, 注入到管内的各种材料都经过了验证。采用镀锌钢丝喷蜡、HDPE套管证明是最简单和最充分的方法。

TiO<sub>2</sub>的彩色拉索的耐候时间为30年, 添加TiO<sub>2</sub>的白色拉索的耐候时间为50年, 最近应用的白色拉索, 已经添加了二氧化钛 (TiO<sub>2</sub>) (如图7)。



图6 矮塔大桥

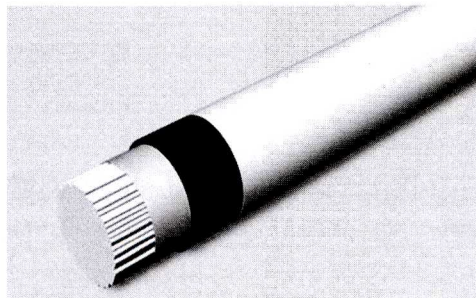


图7 被覆白色HDPE的平行钢丝拉索

## 3 斜拉索风振的对策

斜拉索的振动主要由尾流驰振和雨振引起的。这种振动现象表现为, 下游拉索受从前面拉索脱离的漩涡作用而引起上下振动。日本有几座斜拉桥就发生了这种振动。通过保护管突起的外形或连接钢丝两端的连接索可以控制这种类型的振荡 (如图8、图9)。

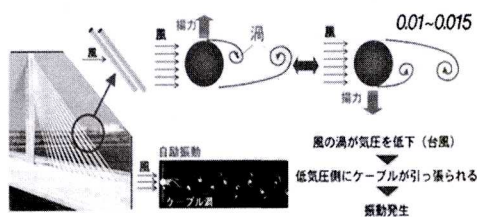


图8 风激尾流驰振

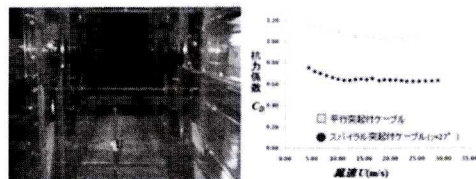
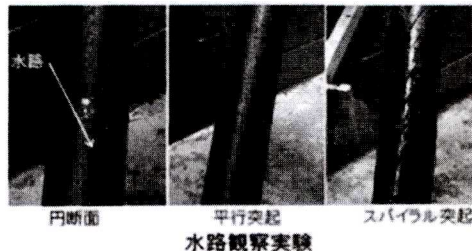


图9 雨振风洞试验



当时在名古屋的斜拉桥上发生了雨振。在大桥完工后不久，在大风和强降雨时拉索发生了强烈震动。通过风洞试验，雨振的预防方法已得到验证和确认。

#### 4 日本斜拉桥的最先进技术

日本的斜拉桥技术是从前西德引进的。通过应用悬索桥的平行钢丝拉索技术，开发了斜拉索技术。

##### 4.1 钢丝的防腐技术

通常钢绞线是采用镀锌进行防腐。先将钢绞线打散，喷涂静电环氧粉末，然后再捻合，进行钢绞线外层环氧喷涂。

环氧树脂涂层的缺点是针孔和厚度不均匀。这些问题通过环氧粉末材料和设备的技术发展而得到改善。环氧树脂绞线主要用于体外索、斜拉索和地锚等（如图10）。

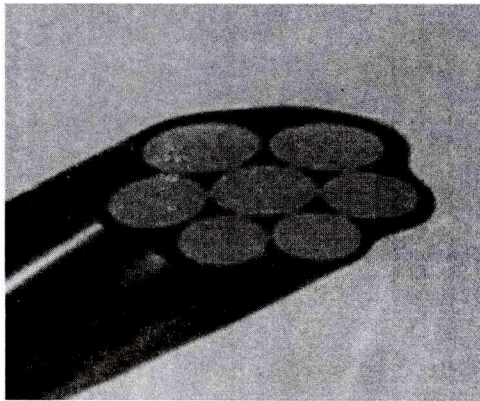


图10 环氧涂层钢绞线

至于聚乙烯涂层钢绞线，它只是外层被覆。然而，在钢绞线内部高压填充树脂的方法已经开发出来，且不需要退捻。对于近海受盐分影响的桥梁，采用内外部完全填充的钢绞线是非常有效的。

最近，一种内部非高压填充的防腐技术也开

发出来了，它在较低压力下即可完成填充。如果可以实现内部低压填充，那么设备会更便宜、维护会更少。

镀锌后，平行钢丝束喷蜡后缠绕缠包带，再用HDPE护套进行防腐（如图11）。

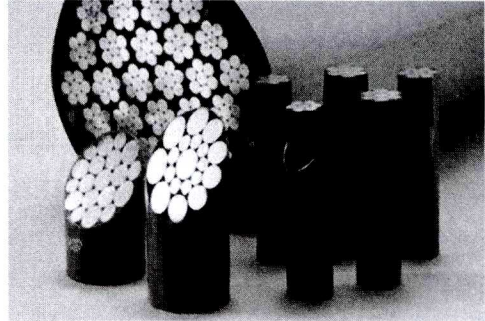


图11 完全填充防腐HDPE

尽管过去绞线和套管之间的间隙使用了各种填料（水泥灌浆、橡胶等），但可推断，没有填料也可达到满意的效果。

在HDPE管内加入炭黑粉后，保护管的耐候性将得到提高。在日本，尽管30年前斜拉索就用HDPE，但没出现材料退化的问题。

彩色拉索是景观设计的需要。虽然过去在HDPE管上喷漆和缠绕胶带，但由于脱落就不再使用了。最近开发出来了具有耐久性的白色HDPE管。白色拉索的应用在不断增加。

传统的悬索桥主缆的防腐体系，主要采用镀锌钢丝以及用膏、缠包带和喷涂方法防止雨水渗漏到拉索。然而，防水不充分，钢丝上仍发现有水和锈。这表明传统的拉索防腐手段不足以应对日本的高湿度、温度变化范围大的环境。后来，通过试验验证了一种防腐方法，即向主缆连续注入干风。这种防腐方法是有效的，特别是喷涂困难的时候。世界上大跨径悬索桥几乎都采用了主缆干风注入系统。在有保护管的斜拉索以及箱梁内，也可以注入干风（如图12）。

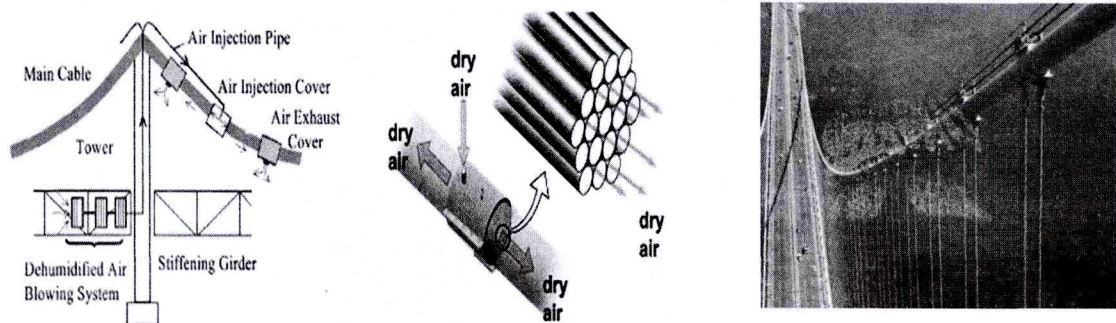


图12 干风注入系统



#### 4.2 斜拉索抗风振的对策

大约30年前，濑户的柜石-岩黑岛斜拉桥建成（1988年完成）。桥梁建成几年后，拉索发生了风

激尾流驰振。此外，名古屋的斜拉桥在建成后不久发生了雨振。由于这个原因，就开始了斜拉索抗风振对策的研究。斜拉索减振有以下方法（如图13）：

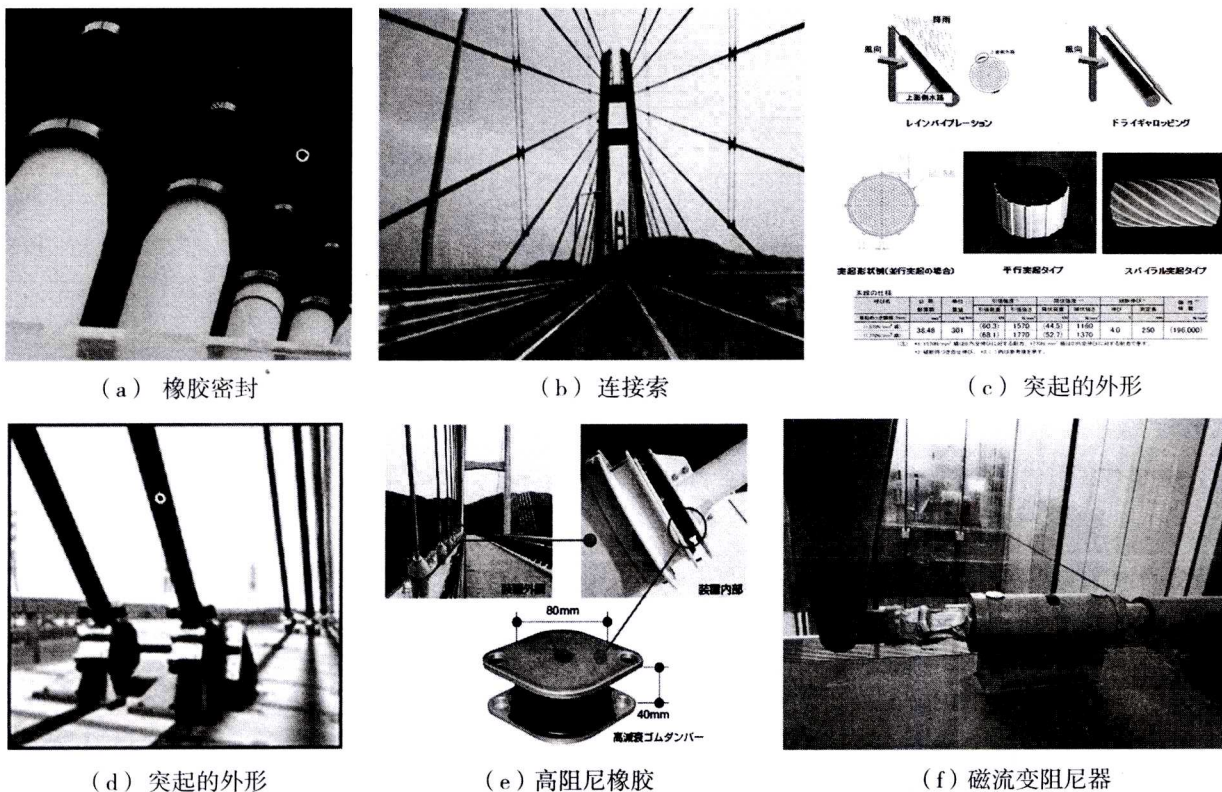


图13 斜拉索减振

- 锚具的橡胶阻尼器
- 连接索（平行的拉索之间用钢丝连接）
- 保护管的外形（螺旋筋等）
- 液体粘滞阻尼器
- 高阻尼橡胶
- 磁流变阻尼器

高阻尼橡胶是为了防止拉索的风激振动而制造。将硅粉添加到天然橡胶并均匀散布。作用于橡胶的剪切变形将动能转变成热能。我们利用橡胶的剪切变形可以获得极好的阻尼效果。

过去使用液体粘滞阻尼器，由于油液不可避免的会从密封处泄漏，这样维护也就必不可少。在日本几乎每天都发生地震，地震时如油液泄漏，粘滞阻尼器发挥不了阻尼作用，建筑物就会倒塌。由于这个原因，抗风振粘滞阻尼器在斜拉索上的应用减少了，最终结果是高阻尼橡胶的使用增加了。对于长度小于300米的斜拉索，高阻尼橡胶的减振效果经证实是有效的。

#### 4.3 高强度钢丝的开发

在建设濑户大桥时，平行钢丝的抗拉强度为1579 MPa。如果明石海峡悬索桥采用这个强度的钢丝，大桥每边则需要两条主缆。为获得更高强度的钢丝，我们在钢中添加了硅（Si），并成功开发了1770MPa钢丝（如图14），通过创新，建明石海峡悬索桥每边仅需要一条主缆。

对于斜拉索，如果钢丝的抗拉强度很低，索径就大，单位重量更重，挠度（下垂度）也更大。如果斜拉索的初始张力低，拉索很容易产生风振。这将成为恶性循环。目前日本所生产的平行钢丝的最大抗拉强度可以达到1960MPa。

碳纤维是日本发明的。它主要用于工业领域，如飞机和汽车行业等。碳纤维一般都被编织制成碳纤维板。当前正在进行碳纤维的开发，碳纤维绞线经过加工处理可应用于悬索桥和斜拉桥的拉索（如图15、图16）。目前碳纤维复合拉索仅用于行人的斜拉桥、尚未应用于公路大桥。碳





纤维绞线的抗拉强度是钢绞线的10倍以上，弹性模量是钢的5倍，且不用担心生锈。虽然成本高，但总有一天它将用于大跨度桥梁的拉索。碳纤维绞线可用于电力传输的芯线。对于高强度钢丝来说，1960MPa也许是一个极限。

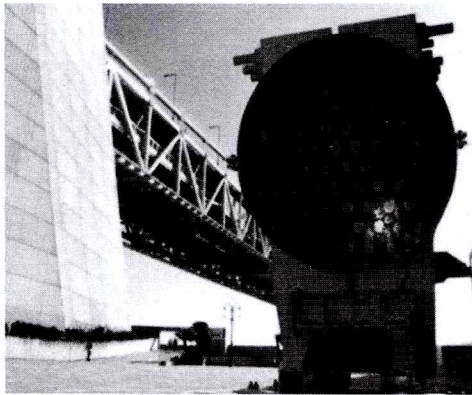


图14 钢强度钢丝

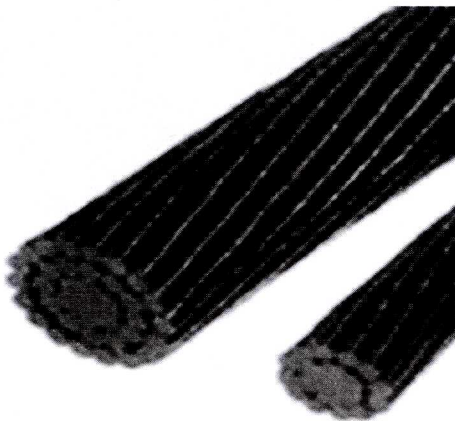


图15 碳纤维复合绞线

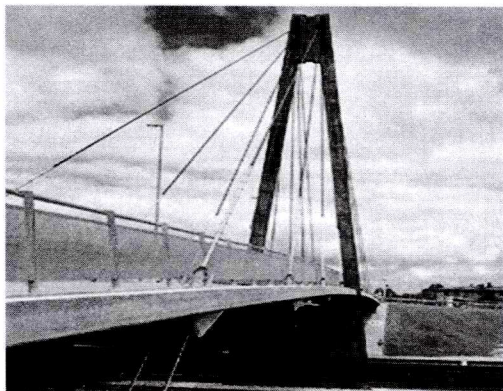


图16 碳纤维斜拉索

## 5 总结

有关日本斜拉索大桥的最先进技术如下：

(1) 新斜拉索体系：高强度钢绞线，完全填

充聚乙烯且被覆白色HDPE防护管和高阻尼橡胶（如图17）。

(2) 高强度钢丝（1770MPa）是开发明石海峡大桥主缆时掌握的技术。干风注入系统几乎应用到了世界上的大跨度悬索桥。

(3) 内部填充被覆绞线是改进生产机器和研发被覆材料的结果。

(4) 电环氧粉末涂层绞线的缺点是针孔和涂层厚度不均，但通过粉末材料和涂装设备的改进、以及质量控制技术的进步，这些问题大都解决了。

(5) 彩色拉索是化学公司和HDPE色素生产制造商技术发展的结果。

(6) 高阻尼橡胶技术源于易发地震的国家——日本。

(7) 碳纤维复合拉索未来将用于大跨度桥梁的拉索。

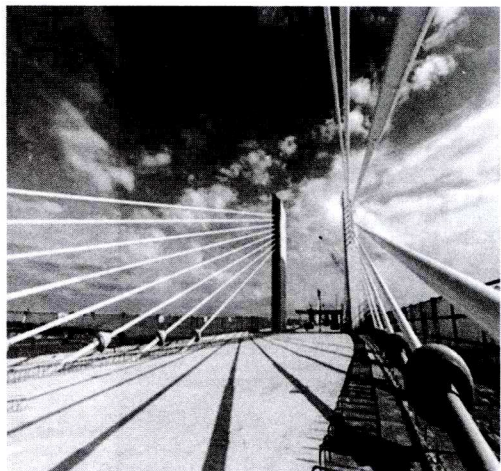


图17 配置高阻尼橡胶的白色拉索

日本50年前进入经济高速增长期，当时建造了大量基础设施。目前急需旧桥的修复技术，当前主要工作是修理旧的和损坏的桥梁。因此减少了对新型桥梁建设的研究。日本的道路法于2014年修订。日本的桥必须五年定期检查一次，全国有超过700000个旧桥梁需要检查。

目前，新型桥梁的施工技术已经传输到了中国，中国需要持续进行基础设施建设。我愿意将日本先进的桥梁技术介绍给欧维姆公司，并祝愿欧维姆公司的技术创新以及中华人民共和国在未来得到快速发展。