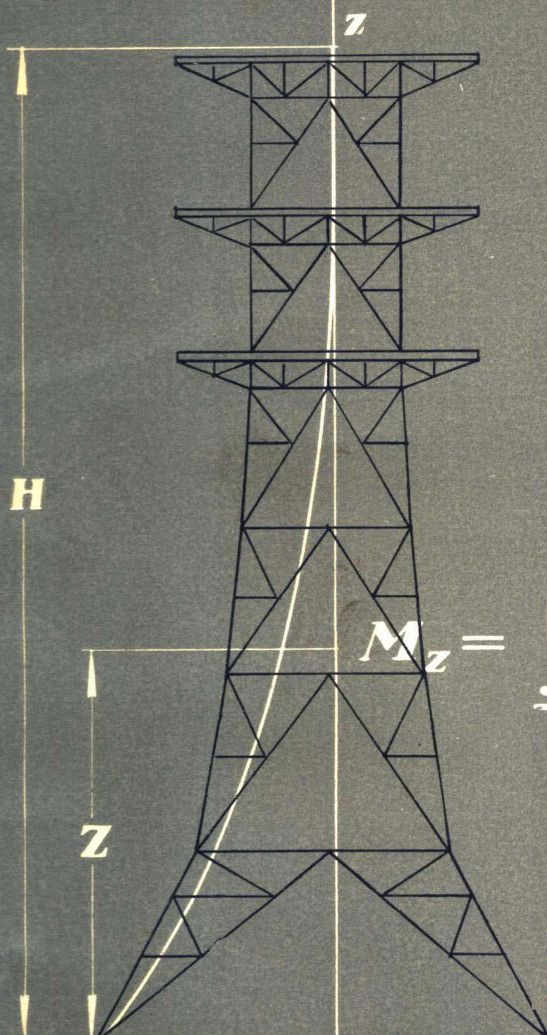


微波塔设计

· 译文 ·



$$M_z = \int_0^H q(z)(z-Z) dz$$

陕西省第二建筑设计院
邮电部第四研究所

编译

微波塔设计

(译文)

江苏工业学院图书馆
藏书章

陕西省第二建筑设计院 编 译
邮电部第四研究所

一九七四年五月

编 译 说 明

随着我国微波通讯事业的迅速发展，作为支承微波天线的拉线式微波塔已经得到应用，但自立式微波塔目前设计和建造的还很少。

微波塔的设计要求与其它各种结构有所不同。由于微波通讯所采用的抛物面天线直径较大，一个塔需要设置几个甚至几十个天线，每个天线具有 $8\sim 12\text{m}^2$ 的挡风面积，并且大量天线必须集中设置在塔顶附近，这样使得微波天线的风负荷较塔自身的风负荷大得多；由于微波通讯的方向性要求比较严格，因此对塔身位移和扭转变形的限制也不同于一般的塔桅结构。另外，随着庞大的天线必须设置较大的工作平台，有的达 100m^2 以上。……所有这些特点，都是微波塔设计中需要考虑的问题。

我们编译的三篇文章介绍了日本微波塔的发展，实验研究和美国对作用在抛物面天线上的风力研究成果，可供设计微波塔参考。

由于我们经验和水平有限，文中谬误之处在所难免，请读者批评指正。

一九七四年五月

目 录

一、微波塔的发展.....	1
二、微波塔的实验研究.....	10
三、作用在抛物面天线上的风力.....	31

微波塔的发展*

日本电报电话公司 (NTT) 微波天线铁塔的发展大体可以分成三个阶段。在第三个阶段中, 大型塔架已经采用了钢管构造和筒状钢板构造, 取代了传统的钢桁架构造。前者不论从美观上、或者从实用上都比后者好。

微波塔的设计要求与其它各种结构都不相同。为了促进塔的发展, NTT 进行了许多实验, 本文仅介绍其中的一些成果。

一、引言

微波传输系统在1954年首先被 NTT 用于其长途电话网的主要部分。从那时起, 该系统经过十三年, 迅速发展到了15000公里的总网长, 占全国长途电话网总长的50%。

东京、名古屋和大阪, 这三个日本最大的城市是用微波无线电中继系统互相联结起来的第一批城市。后来, 电话网又因为增加了日本南部地区的大阪——福冈线路和东北部地区的东京——仙台——札幌线路而得到了扩大, 几乎复盖了整个日本列岛。那时的规划仅限于用直接拨电话号码的46个设有市政建筑的城市。

但是, 随着电话装置的迅速增加, 电视设施的日益普及和为所有长途电话传呼服务的直接拨号系统的建立, 使得微波网得到不断的发展, 从而遍布了全国各地的中小城市。

为了适应微波技术的发展, NTT 的建筑工程师们不断地作出努力以改进用于微波天线的铁塔的新结构型式。

本文主要从设计角度来论述铁塔的发展。为了探索在构造方面的各种可能性, 而进行了一系列的实验, 其中有一部分在本文后半部分作了简要介绍。

二、微波天线铁塔的发展

NTT 微波天线铁塔的发展可大体分成三个阶段:

第一个阶段的发展开始于1954年。一般来说, 在这个阶段中建造的塔尺寸小, 触及到的技术和社会问题不多。

开始于1960年左右的第二阶段的塔架, 终于建在都市地区以支承日益增加的天线。在这个阶段中, 建造了高度可观的大型塔架。

第三阶段开始于1965年左右。这个阶段的塔变得更大, 并开始引起公众的注意。这时, 由于高层建筑的出现, 因此就提出了塔应高过这些建筑物的要求。在技术条件方面, 引进了如高强钢材和高强螺栓等新材料, 还采用了造船工业中得到发展的一种新的焊接方法。

* 原文 "Development of Towers for Microwave Antennas", 全译应为 "微波天线塔架的发表"。

1. 第一阶段的铁塔

这个阶段建造的塔用于连接相距很远的少数城市的微波网。这些塔是用来在二个方向架设天线的，有时还要在三个方向架设。

日本是一个多山的较为狭小的国家。因此，终端站在郊区附近的小山顶上，而中继站建在海拔300~1000米的山顶上，并且还要求不被遮挡，因而天线塔必须有10~20米高度，稍高于周围的树，这并不触及困难的工艺问题（见图1）。

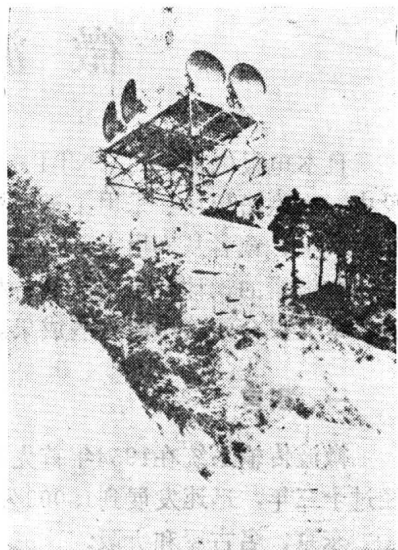


图1 无人值守无线电中继站

中继站楼层按标准化采用双向都是7米的柱距。由几个K形桁架单元组成的铁塔也按标准化采用7米肢距。从矩形立面来看分为四个高度——5、10、15和20米。

到目前为止，大约270座铁塔（包括待变更标准的）已经建成。

2. 第二阶段的铁塔

微波中继领域获得了出乎意料之外的技术发展。例如，初期微波系统所采用的频段只有4GHz，后来扩展到2GHz，6GHz，最后到11GHz，遍布全国的微波网业已完成。并且，从某种技术意义上来说，长途电话交换系统方面的技术革新已能使国内所有用户之间进行直接远距离地拨电话号码的通话，因此，大多数长途电话业务都是有赖于微波网的。

(1) 用于长途电话局的铁塔

把微波终端站合并到电话局，比把它们设在远离电话局的市郊小山顶上要优越得多。

长途电话局一般设在城市的中心区。在城市很大的情况下，还要在市中心的长途电话局下附设若干个转接局，但无论如何它们还必须建在城市高层商业建筑林立的最繁华拥挤的地方。

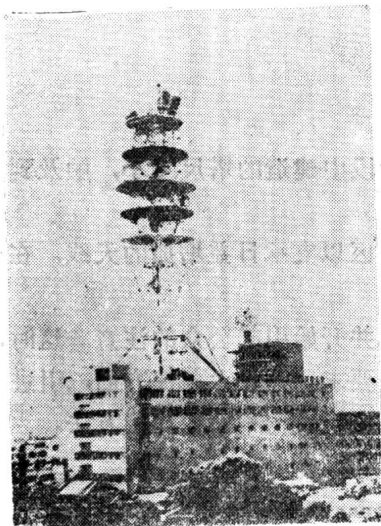


图2 福冈市长途电话局上的塔

另一方面，一种用于联系一个大城市和附近卫星城的新型微波系统得到了发展。由于这些情况，用于长途电话局的铁塔必须能够支持各种各样的许多天线。因此，从结构观点上讲，要求更大的肢距，矩形塔已经不再适用了。取而代之的是由K型钢桁架组成的四面为梯形的塔架，这是由于结构和经济上都较合理。其中大多数是设在30米高度的电话局建筑的屋顶上，本身高度约50~80米（见图2）。

(2) 用于小城市电话局的铁塔

目前，11GHz和2GHz频段的微波中继系统已被用于小城市之间的通信。在这种情况下，微波站也需要设在市中心，而且它们至少要高出地面50米。为此，这些塔采用了在第(1)节中提到的同类结构体系，只不过尺寸较小、桁架单元较少罢了。其中有许多是在20~

30米高的电话局建筑上再高出 30~50 米（见图 3）

（3）中继站铁塔

NTT 微波系统又从中继站分出许多路支线，从而形成了一个完整的网。由于支线往往和干线采用不同的频段以减少无线电干扰，所以中继站的塔要能支持许多方向的大量天线。况且在有些中继站还要采用空间分集系统、以减小无线电波的衰落影响，这就要在原有天线的垂直方向相隔几米的地方再附加天线，因而也使塔的高度增加。所以，目前的塔和长途电话局用的型式相同，只不过是塔肢较短而已（见图 4）。



图 3 位于一个山谷中的小城市的塔（諏访）

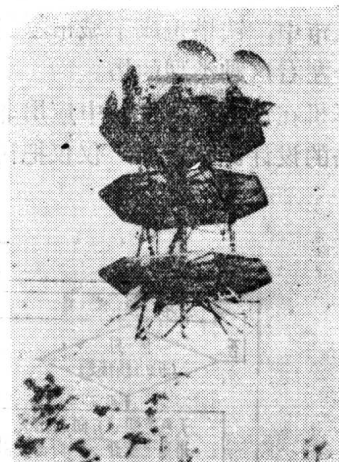


图 4 中继站一例（药师）

虽然塔变高了、系统的数目也增加了，但是中继站的建筑面积却保持不变，这是由于微波设备小型化了的缘故。

在许多情况下，如果建筑物还按常规的方法进行设计的话，则在水平风力作用时，塔基部分经受不住所产生的拉力。因此，对如何最大限度利用建筑物的重量来保证塔的安全进行了研究，在研究中考虑了各种建筑物和塔的组合型式，研究结果写进了“铁塔标准设计规范”里。

（4）第二阶段铁塔的特点

这些塔远高于周围的树和建筑物，集中在塔顶上的数量很多的天线，由于表面承受全部风荷载而使塔破坏。所以，设计中必须满足的要求与钢框架的建筑物和构筑物的要求有极大的区别。例如，它们必须能够经受比地震力（这种地震力在日本一般可以预计到的）大得多的风力。

NTT 在塔架设计中所采用的风压为 $120 \sqrt{h}$ ，且不大于 300 kg/m^2 。例如，在地面以上 15 米、150 米处两点的风速分别为 60 米/秒和 80 米/秒。

一个高出建筑物顶面 60 米，肢距为 18 米的常用尺寸的铁塔，当它设有 15 部左右抛物面天线时，基础所受拉力大约为 300^T 。

由于微波天线有严格的方向性要求，所以塔架必须按照地震力或风力作用下产生的最小

变形来进行设计。

在静力设计中，塔在垂直面内的临时性偏角不得大于 1° ；永久性偏角不得大于 $20'$ 。这就是说，微波塔的刚性要求比一般塔式结构更高。

最近，对许多塔架进行的实际调查表明：微波塔的刚度比同等高度的铁塔要大好几倍。

对于高度不超过 30 米、立面为矩形的铁塔，除极少数情况外，一般可以根据塔的两个主要参数：即塔高和需要架设的天线数量来进行塔的标准设计。但是，要对 40 米以上的塔的设计标准化是没有什么价值的，因为作用在高塔上的风压由于天线的外形、数量和方向不同有很大的变化。因此，这种规模的塔目前仍按不同的要求而分别进行设计。

在许多城市中，由于微波通讯的使用和规模的不断发展，铁塔就成为电话局的象征。在一些小城市中，铁塔也成了城市本身的特征，从而引起了公众的注意。到目前为止，已经建成 200 个左右这种类型的塔。

计算机在铁塔结构设计中应用非常必要。借助于计算机，按照某一个程序能作出有效和合理的塔的设计。按程序，仅仅把诸如天线的类型、方向和位置以及铁塔的类型、高度和肢

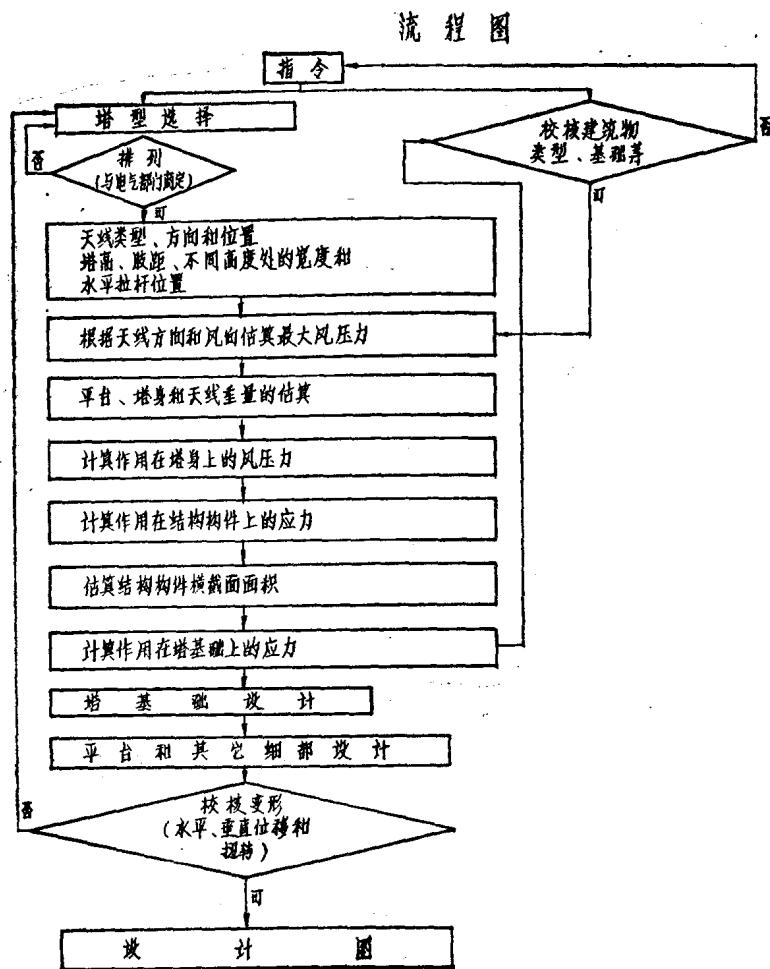


图 5

距等这样一些设计依据输入计算机内就可以求得塔的部件尺寸和其它一些必要的数 据。在这之前,计算机早已贮存了计算作用于顶部天线和塔身风压所需要的各种设计资料,如各种钢材的单位容许应力等。这些设计资料可以从过去许多塔架设计中所积累的大量经验中得到(见图5)。

3. 第三阶段的铁塔

在这个阶段中,微波技术方面取得了更进一步的发展,其特征就是在 4GHz 和 6GHz 的频段上分别能通 14400 和 6700 路电话的大通路,彩色电视广播已经普及,并设想出数据传输的各种方案。因此,微波由于得到广泛的应用在长途电话方面更加重要,特别是 2GHz 和 11GHz 两个频段的采用,迅速提高了在边远地区发展微波的必要性。

已经很有必要准备使用新的频段,由于采用了诸如带圆波导的喇叭(抛物面)天线、或者加大原有形式的天线等项措施以及采用了空间分集系统,使得大量的高质量通讯得到了实现。但是,所有这些都要对铁塔设计提出更严格、更复杂的要求。

在日本建筑法规里,建筑物的高度规定不得超过 31 米,到 1963 年重新修订时,取消了高度限制的部分。

从那以后,一些高度超过 31 米的建筑物在大城市中一个接一个地建起来了。但是,另一方面无线电法规也进行了部分修订,作出了保护微波传输的措施。据此,可能妨碍微波传输通道的高层建筑必须推迟到有确保一条代替的通道之后才能施工。

微波塔必须大大高于高层建筑,许多已建的天线塔架需要改建。

至于仅考虑塔架高得足以当作它们所在城市的标志、坚固得足以架设所需天线的数量还是不够的。它们还是影响都市风景的一个重要因素,因此向塔架设计师们提出了一个社会要求:在设计塔架时,应认真考虑它们对于城市面貌的美观作用。对 NTT 的建筑师工作来讲,其任务就是要把塔设计成既经济(这是公共通信设备所必需的),又能满足所希望的艺术美(因为这已成为现代城市的一个象征)。

直到现在,建筑物通常是由建筑师设计的,而建筑物顶上的塔架则是由工程师设计的。但是,如上所述,由于塔已经成为社会的标志,所以建筑物及其上的塔必须从审美和结构观点综合考虑来进行设计。最早的这种例子如图 6 所示。

照片中所示的是一个大城市的微波终端站,就是综合考虑结构和审美观点两方面来设计的。此例表明:需要支承大量的天线增加了设计的困难程度;同时,显而易见型钢构造从审美角度上来看有很大的局限性。因此,构造方法的现代化也是必须的了。

为了适应这些要求,出现了许多各种各样的结构体系。比较成功的是,已经发现筒形钢

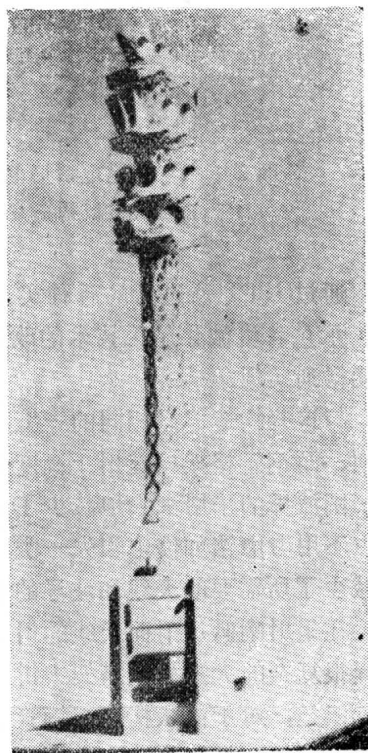


图 6 今宫终端站的缩小模型
(型钢桁架构造)

板构造和钢管格架构造效果很好（见图7和图8）。

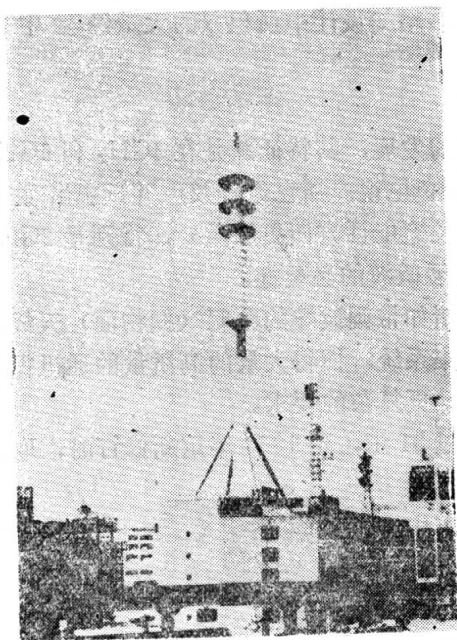


图7 东京长途电话局上的塔架
（筒状钢板构造）

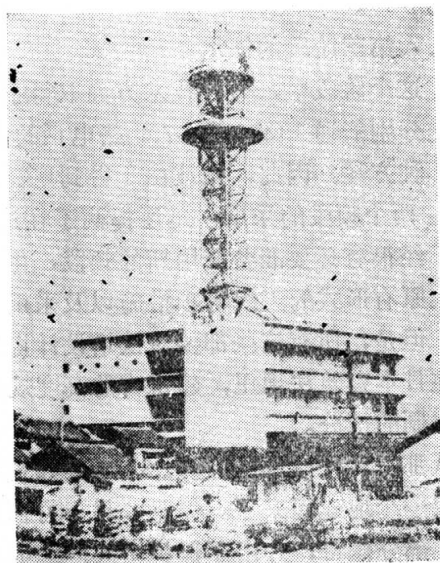


图8 奈良长途电话局上的塔架
（钢管格架构造）

通过 NTT 所进行的各种实验，高强钢材的广泛应用，大规模高空工地焊接技术的发展，承包者机械化施工技术的改进以及结构设计中计算机的使用，使得这些构造体系已经有可能得到实现。

与这些构造体系相同的一些塔架已经建成，筒状构造适用于高度为 100~200 米的大型塔架，而钢管格架构造用于高度 100 米左右的比较小的塔架较好。

圆波导的采用大大地减少了无线电波的馈电损失，故有可能在使用高于 100 米的塔架时一点不用考虑诸如馈电损失一类的问题。同时，采用喇叭反射面天线（4 和 6GHz 频段公用）也减少了所需要的天线和波导的数量（这已在一个经济的微波塔设计中做到）。

在采用喇叭反射面天线的情况下，要求波导从天线的上面直通下来。所以对于水平构件布置很复杂的大型型钢塔架来讲，综合应用喇叭天线和圆波导就相当困难了。

但是，对于筒状构造或钢管格架构造来讲，采用这种方法是很容易的。如筒状塔架，有些已经建成，见图7和图9所示。此外，对打算用于大城市的大型微波终端站的塔也作出了试验设计（见图10）

这个试验性设计的塔架能够支承用于地上机动电话设施的甚高频天线以及51部各种各样的微波天线（见图11）。塔的底部是一个容纳 4GHz 和 6GHz 无线电设备、电源设备和一个办公用房的建筑物，并设计为塔的基础；塔身中段突出部分是供 2GHz、11GHz 和其它频段用的机房；塔的上部的狭窄部分预作将来可能要配备各种机动设施用的甚高频天线的地方。

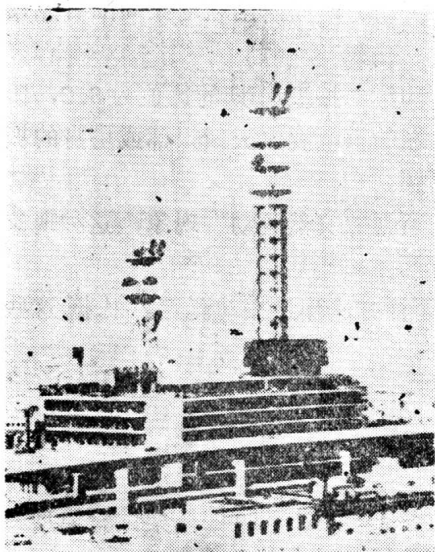


图9 大阪长途电话局上的塔架
(筒状钢板构造)

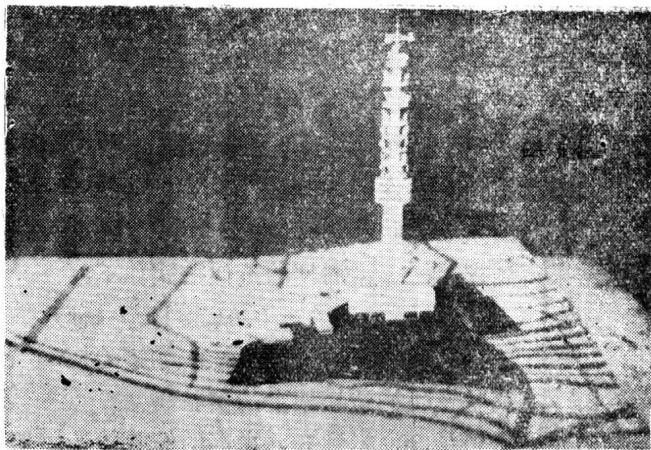


图10 试验设计塔架的缩小模型

三、塔架设计和实验分析

微波塔的设计要求与其它各种结构和建筑物相比较,有许多有待研究的问题。

(1) 塔架对其自身的重量而言,细长而又比较高。因此,由风或地震引起的横向力对塔架的影响是非常明显的。

(2) 外形最易招受风压的大量天线必须集中设置在塔顶附近,而塔身却是构架构造的。

(3) 风压对铁塔所引起的应力在各种不同的条件下的变化是不一样的,它随着结构的迎风面积、塔和天线的形状、风速、温度和其它条件的不同而变化。因此,必须用实验或实测来估计。

(4) 风的作用随着气候、地平面以上的高度和其它当地条件而有很大的变化。因此,对于风的特征分析需要进行各种各样的实际测定。

(5) 大型筒状构造体系的塔架在细部设计时需要很多实验资料,现还未作分析研究。

基于以上理由,对塔架结构及塔架与支承建筑物的连接、已经作了许多实验。其中一些介绍如下:

1. 型钢塔架的实验

从分析型钢塔架的动力特征的观点出发,对造在31米高电话局建筑物上的69米高度的

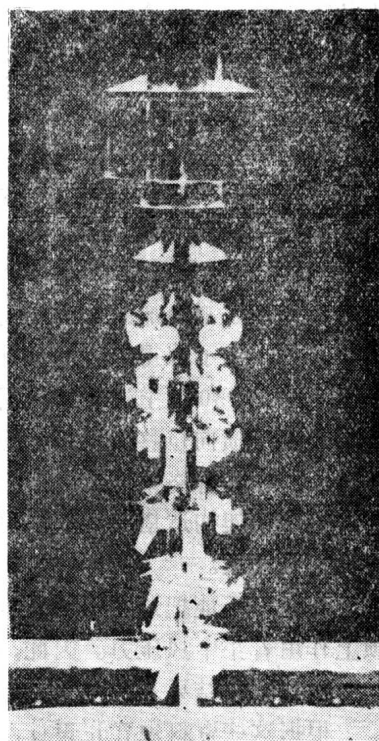


图11 试验设计塔架的细部

铁塔进行了振动试验。

振动发生器设在建筑物上或塔架上并给予它们以人为振动力，同时用在塔架周围各点设置振动仪的方法来进行量测。

结果发现，塔的第一振型的周期为 0.9 秒，第一振型和第二振型周期的比值为 3.2，阻尼比为 1 %。天线的振动也作了观察，可以看到在天线顶端的振幅要比天线根部或塔身的振幅大得多，这也就提出了进一步需要研究和有待解决的课题。

这个试验也弄清了在强大共振情况下塔所大量出现的所谓“突然跳动”现象，这种现象是所有塔状结构的共性。

还在范围从 30 到 90 米高度的 15 个铁塔上用前述的同样方法作过振动测定。根据这些实测结果得到求第一振型周期的近似公式如下：

$$T = 0.015 \times H \quad (\text{秒})$$

式中 H ——塔的高度 (米)

2. 在筒状钢板构造塔架上的实验

为了发展用于 200 米到 300 米高的筒状构造塔架，准备了一个 1:10 的塔架试验模型。这个模型直径为 2 米、高度为 5 米、用附有各种形状加劲肋的 3 毫米厚钢板作成。

针对基本设计资料的需要，在模型上进行了受弯、受压和压屈试验。例如，确定组成塔架主要结构部件的圆筒的局部单位压屈应力可用日本建筑协会 (AIJ) “钢结构设计标准”中的下列公式大略估计：

$$\sigma_{cr} = 0.2E \frac{t}{r}$$

式中： σ_{cr} ——容许局部单位压屈应力 (t/cm^2)

E ——扬氏弹性模量 (t/cm^2)

t ——钢板厚度 (cm)

r ——圆筒半径 (cm)

也弄清了具有加劲肋的圆筒的强度与没有肋但钢板较厚的圆筒的强度是一样的。

另外，为了取得风压的设计资料，在一个 150 米高塔架的缩小模型 (高度比为 1/150，重量比为 1/150²) 上进行了风洞试验。试验的主要目的是测出在强风作用下塔的横向位移，结果发现，横向位移所引起的应力不超过沿风的作用方向上风压引起的应力的 20%。

3. 在钢管格架构造塔架上的试验

钢管格架构造塔架的应用可以在日本输电线路塔架中看到。它的风洞试验所得出的基本资料已经发表。

但是，不能把这些资料完全套用于 NTT 所要的铁塔，因为后者尺寸大得多，而且在其顶上作用着集中风压力。因此，还要对 NTT 型塔进行风洞试验。

这些试验结果表明，大型塔架采用钢管格架构造来建造比型钢构造更为合适。

根据这些资料现在正设计的这种塔的一例如图 12 所示。(略)

4. 各种形式天线的风洞试验

实际应用的微波天线，按照各自用途的不同在形状上有很大的区别，诸如圆抛物面天线，喇叭反射面天线，对角喇叭天线等等，它们在尺寸上也不相同。

NTT 微波系统所应用的天线, 由于这些系统要求具有较高的传输质量, 因而一般采用大尺寸的。上述的各种类型和不同尺寸的天线是与实际采用的塔架设计紧密相关的, 因此在设计时取得精确的试验资料是十分必要的。当新型定型化天线出现之后, 其风压系数要通过实验来确定。

但是, 近几年来已经有一种塔的本身变得更大、天线数量更加集中的倾向, 这样就更不能忽视塔身和天线彼此间的影响。因此, 当要采用新型天线时, 要对风向和各种位置集中不同类型的天线作不同的组合来进行风洞试验。

四、结论

通过结构工程的研究和新材料、新构造方法的各种探讨, 微波塔一定会有卓越的发展, 这是肯定的。同时, 塔也必须不断更新, 以适应微波领域的技术发展和在整个通信技术领域微波工艺地位的不断提高, 并且它们还不得落后于最新微波技术的要求。

由于微波网的数量与复杂性的无限发展, 相应的微波塔将继续会是大型而复杂的。它们在城市生活和观瞻方面, 已成为非常重要的因素。因此, NTT 的建筑师们正面临着为不断改进微波塔设计而探索新材料和新构造的艰巨任务。

〔译自英文版《日本电气通信》(施設) 1968 年 10 卷 3 期第 188~192 页〕

邱志勇译 吴圭熊校 胡德彪整理

微波塔的实验研究^{*}

NTT 的微波塔是根据国外标准和日本建筑学会 (AIJ) 的建筑标准规定的静力计算方法来设计的。

但是,一般的静力方法对分析塔在风压和地震力作用下的动力性能是不能满足的。因此,为了便于采用动力方法设计经济安全的塔,NTT 作了一些关于塔的实验研究,本文简要地介绍这些成果。

一、引言

NTT 微波塔的结构设计和施工管理是由建筑工程局高层建筑工程办公室承担的。由于塔通常是建在电话局建筑物的顶上,所以作用在塔上的风压和地震力必然对支撑塔的建筑物结构设计带来很大的影响。

从设计和精确施工角度来看,必须特别注意塔的锚固部分,在那里塔的上拔力将成为压力传给建筑物,同时塔的结构设计和施工对此还有许多严格要求。因此,调查研究必须考虑到各个方面而不仅是设计标准中所规定的那些内容,而另一方面,在实际的设计和施工过程中必须遵守结构分析的原则。

例如,图 1 表示微波塔和建筑物结构设计的程序。

由于塔是轻重量结构,风压必然成为主要设计荷载。一个建筑物上加设一个塔的动力关系如图 2 所示。鉴于此系统如同一个地震力感应振动模型,塔必然还须承受很大的地震力,因此有必要使动力设计与静力设计一样具有同等的安全度。

在本文中,引用了一些关于在地震力作用下塔的性能的实验和分析结果。虽然许多关于风压作为动力因素的研究在我国已得到解决,而且其结果已公开,但还有许多问题有待进一步研究。

* 原文 "Experimental Studies of Steel Towers for Microwave Antennas", 全译应为 "微波天线用铁塔的实验研究"。

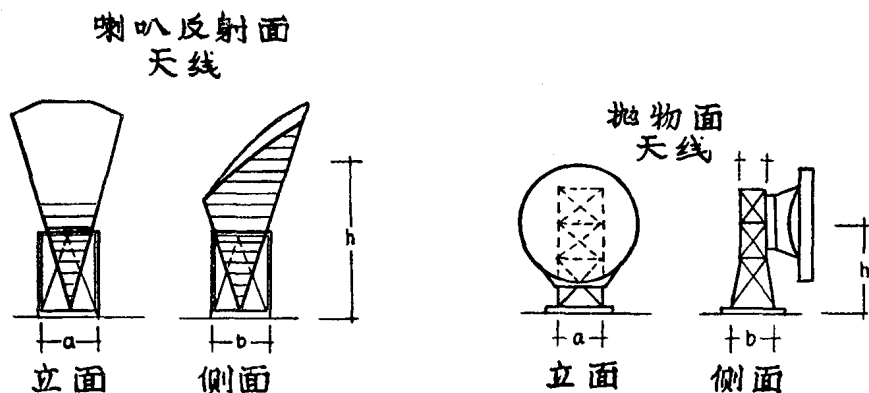


图2 塔和建筑物的振动模型

二、结构设计概念

在日本，塔的结构计算已经颁布的有 AIJ 的“铁塔结构设计标准”、“电力传输铁塔设计标准”和 JEC 的“电气公司无线电电信铁塔和钢桅杆的设计标准”。为 NTT 设计的微波塔主要是依据第一个标准并考虑一些应特别注意的其它因素作为结构计算标准而进行结构设计的。“铁塔结构设计标准”和 AIJ 的材料标准都已经在 JTR 中介绍过，是可供参考的。

下面介绍的铁塔设计方法是 NTT 的常用方法。

(1) 塔的结构计算中主要条件：

- (a) 塔的高度和建筑物的高度；
- (b) 塔底和塔顶标高；
- (c) 天线的尺寸和数量；
- (d) 天线的位置和方向；
- (e) 平台的尺寸和数量。

(2) 塔的近似计算：

- (a) 当风向 $Q = 0^\circ$ 时，作用在塔架主要构件上的风压；
- (b) 风压值的粗略估计，从塔顶开始对每米高度的风压可按下式计算。

$$P_1 = 0.02H + 1.20 \text{ (t/m)}$$

$$P_2 = 0.02H + 1.00 \text{ (t/m)}$$

式中： P_1 ——离顶 $\leq 7^m$ 时每单位长度的风压。

P_2 ——同上，离顶 $> 7^m$ 。

H ——离顶的距离 (m)

- (c) 当风向 $Q = 0^\circ$ 时，作用于平台的风压；

$$P = 0.3A \text{ (t)}$$

式中： A ——平台周边侧向投影面积 (m^2)

- (d) 当风向 $Q = 45^\circ$ 时，由于风压作用于塔架主要构件和平台所产生的塔底应力。

$$N_{45} = 1.84N。$$

式中: N_{45} ——当 $Q = 45^\circ$ 时的塔底应力;

N_0 ——当 $Q = 0^\circ$ 时的塔底应力。

$$hN_{45} = 1.30hN_0$$

式中: hN_{45} ——当 $Q = 45^\circ$ 时底部横向应力。

hN_0 ——当 $Q = 0^\circ$ 时底部横向应力。

(e) 作用于天线的风压。

i) 天线的尺寸 (表 1);

ii) 作用在天线上的风压力

$$P = q \cdot C \cdot A \text{ (t)}$$

式中: P —风压力 (t)

q —风压 $= 0.12\sqrt{h}$, $\leq 0.3 \text{ (t/m}^2\text{)}$

h —离地面的高度 (m)

c —风力系数 (图 3)

A —当 $Q = 0^\circ$ 时, 天线的投影面积 (m^2)

表 1 天线面积高度和重量

天线种类		频段	面积 $A(\text{m}^2)$	高度 $h(\text{m})$	重量 $w_p(\text{T})$
喇叭反射面天线		4GHz, 6GHz	15.5	5.5	3.0
抛物面天线	4.1m ϕ	4GHz, 6GHz, 11GHz	13.6	3.0	2.0
	3.4m ϕ	2GHz, 4GHz	9.3	2.5	1.5
	2.5m ϕ	2GHz, TVL	5.0	2.0	1.0
	1.9m ϕ	2GHz	2.9	1.7	0.5

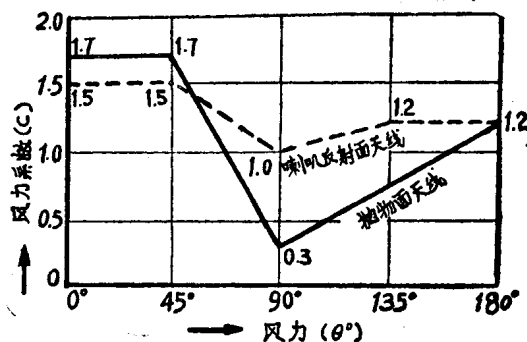


图 3 天线的风力系数

(f) 塔架主要构件的重量。

塔的单位高度的重量可以用下式粗略估算, 当天线为 5 个或更多时:

$$W_1 = 0.05H + 0.7 \text{ (t/m)}$$