

公路桥梁 无损检测技术

(译文专辑)

交通部公路科学研究所

一九八六年四月

前 言

根据中英合作项目,英国运输部的运输和公路研究所 (TRRL) R. J. Woodward 博士于 1985 年 7 月间来我国访问,视察了我国的部分公路桥梁情况并就混凝土桥梁无损检测技术作了专题学术报告。所介绍的超声波、射线照像、内窥镜、加压抽气、纤维断裂等十余种技术,对我国公路桥梁的应用有重要的参考价值,其中有些技术相当成熟,在我国也已有应用,尚应通过实践吸取别国经验总结提高,以期普遍推广应用。另一些技术也可在试验室或试验性范围内试用,以便获得更多的经验,促进试验技术的发展。个别的一些技术如射线法尚存在使用管理上的一些问题,需加以解决。

本译文集主要根据 R. J. Woodward 博士的报告内容和论文编译而成,作为中英合作项目的初步材料,所用图表、照片多数按照 TRRL 幻灯片复制,从中可了解英国当前检测工作所取得的成果。另外参考国内外现有的技术文献介绍其它一些无损检测技术,供我国广泛开展公路桥梁无损检测工作时参考。

译文中不当和错误之处,请读者批评指正,并请函告交通部公路科学研究所桥涵设计研究室。

译者

1986 年 4 月

目 录

混凝土桥的检查	(1)
混凝土桥的无破损检测技术——中英合作项目的技术报导	(6)
评价现场混凝土强度——测试方法的研究	(17)
混凝土结构的检测	(26)
混凝土层离的快速无损检测系统的发展	(51)
桩的水平动力试验	(68)
TNO 基桩检测系统	(70)
打桩分析仪的原理和应用	(76)
热弹性应力分析	(84)
英制便携式超声波无破损数字显示测试仪	(88)
USL33 型低频超声仪	(94)
新型声波观测仪	(96)
混凝土保护层及钢筋测试仪	(98)
混凝土桥裂缝的声发射法检查	(107)
8000系列声发射检测系统及其应用	(110)

混凝土桥的检查

(Inspecting Concrete Bridges)

R. J. Woodward

本文根据 TRRL 桥梁室 (主任 G. P. Tilly 博士) 研究计划中一部分工作写成的, 提要如下:

混凝土桥是公路网的重要组成部分, 此类桥在联合王国约有五万座之多, 随着商业车辆在交通流量和最大容许车重两方面的增长, 这类结构承受着不断增加的荷载。此外, 在寒潮期间采用除冰盐类, 造成了腐蚀性的环境条件。因此需作桥梁的系统检查, 以便在桥病害的早期, 察看出磨损和破损的地点。业已采用了多项技术, 这些技术大多数是以本世纪以前所发展起来的经典物理学概念为基础的, 但在应用中采用了廿世纪的技术。本文介绍目前正在应用的和正在研制中的几项技术。

许多近代桥梁是用混凝土建造的, 联合王国的大约五万座混凝土桥中的最大多数是在过去 60 年中建成的。钢筋混凝土或预应力混凝土表现出非经常性的破损和破裂是不足为奇的。而系统的检查则是必要的, 以便在早期鉴别出桥梁损坏。

采用的方法应包括在原位评定混凝土强度和耐久性; 确定钢筋是否锈蚀或有无锈蚀的危险; 检测出不应有的裂缝和空隙以及测量预应力混凝土中的应力等等的技术。内部检查技术有 X 射线法和超声法等的应用。外部检查即为应变、裂缝宽度、应力和硬度等的测量。理想的是要求有几种监测技术能确定整体结构的完整性, 但是这一想法在实际工作中是难以执行的。

超声技术 (ultrasonics)

超声技术是工程材料缺陷检测中最常用的一种方法, 可惜它在混凝土中的应用受到几项严格的限制。普通的脉冲——回声技术由于三个原因而不能采用。首先, 不能区别发自裂隙的回声和发自骨料界面处的回声。其次, 超声脉冲的速度随着混凝土质量和组成的不同而有变化。再次, 由于高频脉冲 ($>1\text{MHz}$) 衰减剧烈, 因之不可能射出集中的超声脉冲束穿透混凝土。必须改用方向性弱的低频脉冲 ($20\sim150\text{Hz}$)。

但是, 可用另外一种超声技术来试验混凝土, 那就是脉冲透射法。从混凝土的一侧面

发出超声脉冲，测量记录该脉冲到达对侧表面的接收器所需的时间。脉冲速度 V 等于纵波速度，而纵波速度同混凝土的动弹性模量 E_d 、泊松比 ν 和质量 ρ 成如下的关系：

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

方程中决定性的一项是 E_d ，而 E_d 同强度紧密相关联。于是，脉冲速度可同强度联系起来。这两者的联系并非固定不变，而和混凝土的许多性质，如骨料的种类、级配、水泥用量、水灰比、养护条件和龄期等有关。所以，为了确定强度，必须从所检查的混凝土中切割出试件来做破损试验以求得所适用的相关曲线。这种测量的精度约为10~15%。

当获得一个结构中的脉冲速度的分布情况后，我们对该结构就有一个强度分布图的概念。可用它来查定出混凝土质量差的范围，也就是比结构的其他部分的脉冲速度低的范围。如果脉冲速度的值都在同样的数值区间内，则它们的变动范围就可作为强度的量变，即变动范围愈大，混凝土质量愈差。

脉冲速度的这种测量法有两个误差来源。平行于脉冲方向设置的钢筋的脉冲速度会偏高，因为钢中的声速（5500m/s）大于混凝土中的声速（3500~5000m/s）。相反，在脉冲路径中如果有空洞，脉冲的视速度就会降低。这一效应有时被用来检测大的空洞和裂缝。

目前正试图研制一种检测埋设在混凝土内的力筋断裂的超声技术。向单根钢绞线的一端发射高频脉冲（1.5MHz），然后用脉冲——回声法检测钢丝的断裂。但是，由于散向周围材料的能量损失很大，这一技术只适用于断裂距钢绞线端部不超过数米的情况。增大这一检测距离的研究，如超声透镜以及信号处理技术的改进等正在进行之中。

其他的内部检测技术

γ 射线法曾被用于桥梁测定混凝土中的钢筋位置和数量，并检测后张法管道中的空隙。 γ 射线源如 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 和 ^{192}Ir ，等同位素比高能X射线装置更便于携带应用，适合现场使用。但也有一些例外，如：Harwell无破损中心曾应用一种“便携式”线加速器来检验Hampshire的一座桥；法国工程师曾用一种便携式 β 子回旋加速器。这类X射线源可穿透厚度超过1米的混凝土，而用 γ 射线可能穿透的厚度仅达0.45米。

用了闪烁计数器代替照像胶片后，可用测量发出的幅射量的数值来确定混凝土密度。用了低能量 γ 射线源，因为这些射线源在介质的高衰减使它们对混凝土组成的变化很敏感。

在美国的一个新进展，是计算机用于混凝土层析X射线照像系统，其工作原理和医疗中的脑扫描原理相同。在目前，这一系统仅用在实验室，测直径时曾得到1毫米的空间分辨率。

被称为保护层厚度测定器的一种较简单的磁性装置，也可以用来加快混凝土中钢筋位置和大小的测量。用这类装置测量磁路中的磁阻，由安装在□形芯上的两组线圈组成的搜索单元被放在或靠近于混凝土表面，并在一组线圈中通交流电，然后测量另一组线圈中感应的电流。感应电流的量是搜索单元到钢筋的距离的函数。在有了适当的率定之后，就有可能确定

混凝土内的钢筋直径、方向和到表面的距离。现有的出售产品，据称在定位上的精度为 ± 3 毫米，最大的埋置深度可达 200 毫米。

为检测混凝土桥中先张和后张钢筋断裂，在美国研制中的另一种磁性技术已在试验性桥梁中应用。其中采用了一种平行于预应力筋方向的 Hall 效应探头以扫描梁的表面。在探测范围内测出的变化表示钢筋有断裂或不连续。但是，要把上述的毛病同其他原因如混凝土中的连系钢丝等引起的磁场干扰区分开来仍是有问题的。实验室试件的试验表明，位于混凝土表面以下 50~75 毫米深度范围内直径为 13 毫米钢绞线的断裂可被检查出来。

还用了许多其他技术检验混凝土结构。敲锤法能够检验出在钢筋密集处发生的水平分层或钢筋锈蚀生成物胀开保护层混凝土导致它同钢筋的脱离。在美国曾应用了一种能对质量差的混凝土发生的可听声频率作出反应的电子装置，而红外线温度计能检测某种大气条件下良好的和层离的混凝土的表面温差。湿度可用微波吸收器、中子散射器和电阻率测量等来测量。但是这后面一种在和电极电位测量结合时，通常是用来显示钢筋锈蚀危险。

众所周知，已有多种物理现象被用来“探看”混凝土桥内部。但是，有时需要更为直接的一些方法，在其他方法难以应用之处，用工业钻孔镜作目测检查。如果管道灌浆不饱满，可应用真空/压力技术来确定空隙的大小和范围。

表面检查

目前已有多种依靠应变、应力、裂缝宽度和硬度等表面测量的技术以表示结构物状态。应变和裂缝宽度通常用声响或 Demec 计来测量。音响计为张紧在两个固定于被测结构构件上的锚定点的钢弦，通常弦长 140 毫米，直径 25 微米。设在弦中点的电磁铁将钢弦激振并接收其反应，接通到记录装置。用下式由弦振动的谐振频率的变化计算出应变的变化：

$$\varepsilon(4l^2\rho/E)(f_1^2-f_2^2)$$

式中 ε 为应变的变化； l 为弦长； ρ 为质量密度； E 为静弹性模量； f_1 和 f_2 分别为钢弦的初始的和最终的谐振频率。这些振弦计的应变范围约为 0.3%，最大的应变分辨率为 0.5×10^{-6} 。其精度受该计的温度灵敏度（每摄氏 1 度的应变为 11×10^{-6} ）和钢弦、磁铁本身以及锚定点的缺陷等限定。

Demec 计有两个圆片固定于结构物上。两圆片之间的距离的变化用千分表和一些杠杆装置来测量。Demec 计可拆下装到另一测点再用。Demec 用铟钢制作主体，使温度的影响减为最小。典型的长度为 50 毫米和 100 毫米的 Demec 计分别有 20×10^{-6} 和 10×10^{-6} 的应变分辨率。

电阻应变片用得较少，因为把应变片粘贴到混凝土表面上是有困难的，而且混凝土要使用长标距应变片，长期测量还须保持应变不飘移等等都是困难的事。应变片通常用于桥中钢部件。

这几种应变测量是有用的，但是不一定能代表混凝土内部的应变，不能给出绝对应变值（除非在施工过程中就设置了应变片），并且难以转换成应力值。为了克服这些局限性，巴黎中央道桥试验所研制出一种应力直接测量法。方法是在混凝土中切成宽度为 4 毫米的一道槽（并按每 10 毫米为一级切深到 60 毫米），该槽的沿深度的剖面为直径 150 毫米的一段圆弧。在每 10 毫米的一次切深后，在槽中插入一只扁千斤顶（专门设计制作的），并测

量出恢复到沿槽周围的原来应变分布时所需的扁千斤顶压力。在某桥一根立柱所做的现场试验, 据称曾获得所施加应力精细到 0.2N/mm^2 以内的结果。

表面应力变化, 可用热弹性应力分析法测得。这个方法是测量固体在受到绝热拉伸或绝热压缩时所产生的微小的温度变化。Sira 公司研制这项技术并已获得温度灵敏度为 0.001°C (对钢材, 这一温度变化相当于施加 1N/mm^2 的应力), 空间分辨率为 0.5mm^2 的结果。在与钢桥桥面相同的那些焊接部件上, 通过实验室的成功试验后已进一步研究, 把它应用于混凝土和车辆荷载下的桥梁。

又研制了一种应用玻璃纤维的技术, 用它来检验裂缝的初生。方法是把玻璃纤维用化学剂浸蚀, 使其具有一定的断裂应变, 然后把它粘结于被检测的混凝土表面。在此纤维束的两端设置的光源和检测器, 可以指示出纤维束在混凝土裂缝形成时是否连续不断。这一技术如获得成功, 将成为桥梁或其结构物的危险区域的强有力的监测手段。目前正进行试验以确定其分辨率、重复性和可靠性。

在把表面硬度同强度联系起来的几种技术中, Schmidt 锤是应用最普遍的, 因为它费用省, 可由半熟练工人操作。它是用一根传力杆抵在混凝土表面, 在其另一端用带弹簧的质量块击打, 用传力杆的回弹程度来测量强度。另一个参数是混凝土表面对钢探头压入的阻力。这两种方法都不是很精确的 (误差 $15\% \sim 20\%$), 并且都需要有被测定的混凝土的率定曲线。但是, 这两种方式都可用来比较一个结构物不同部位的混凝土质量。

监测技术

当需要知道桥梁总体的状态时就有不少的问题, 上面所说的各种方法都只给出被测量地点的局部情况。缺陷同全座桥相比, 通常只是很小的部分, 缺陷的存在引起桥性状的变化不大。这些缺陷影响可能被其他一些因素如平均温差、温度的梯度、支座老化所增加的阻力、混凝土蠕变和收缩、恒载的变化 (因桥面重新铺装或多孔隙材料中滞留水分等引起) 以及墩台沉降等所掩盖。因此需要一种总体监测技术, 以便能够将上述因素同整座结构的质量降低所产生的那些因素区别开来。

当桥梁有质量降低时所预期会有改变的一个参数是其振动性状。测量桥梁对车辆运行以及风力引起的振动的反应, 能够以比较简单的方式确定其谐振频率、振型和阻尼常数; 但是, 用结构上的变化来作这些测量结果的解释则是困难的。这些结果对支座条件的变化是十分敏感的, 而且表面温度的变化会极大地影响桥的刚度。

当材料因塑性变形、裂缝产生和锈蚀而降低品质时, 一部分储存在内的弹性应变能被作为应力波而释放出来, 这种应力波可由安装在表面的传感器检测到。这种波的检测, 可用来监测在受到应力状态下的材料或结构, 但对发生这种发射的机理还未充分了解。这一技术曾被试用于少量钢筋混凝土桥, 但它受到两种严重的局限。首先, 它不可能把对结构有害的发射源同那些无害的发射源区分开来。其次, 发射同结构的先期荷载历史有关, 而桥梁的荷载历史通常是不知道的。

随着结构品质的降低, 可能会有对开始发生严重结构损坏事先给出警告的几何上的变化, 如同设计假定相反的位移、斜率和变形等的变化。光学技术可能最适合于此类移动的检测, 尽管大气折射引起光轴转向可能会产生一些问题。近来正进行一些可行性研究, 查明

能否将激光技术和摄影测量技术用于此目的，并确定可能得到的分辨率和精度。

结 论

实践中，监测技术是难以实行的。除了在各种监测和调查技术中已经着重举出的那些约束之外还有其他一些约束：公共安全问题、结构性损伤减为最小程度、运输的中断和费用等，更不用说设备对于振动、温度和温度变化等所能忍受的程度。所涉及的桥梁数目过多也使通常的外观检查成为仍须依赖的一种方法。常常通过各种技术的应用构成一幅总的损坏图像，确定所察看到的损坏的原因和范围。结构老化，耐久性问题可能变为更广泛的问题。本文中叙述的一些新方法将有助于满足鉴定和调查桥梁质量降低的日益增长的需要。

参 考 文 献

混凝土无破损试验 (Jones, R. 1962年剑桥大学出版社)。

硬化混凝土的试验一无破损方法 (Mathotra V. M 1976 年 ACI 专题论文 9 号)。

钢筋混凝土中锈蚀评价的现场试验概述 (Vassie P. R 1980 年 TRRL 报告 LR953 号)。

光学纤维作为验证塑性应变和裂缝检测的应用 (Hale K. F, Hockenhull B. S 和 Christodoulou, G. 1980 年, 杂志《应变》十月号)。

卢世深译 《英国物理学通报》35卷1984年

混凝土桥的无破损检测技术

——中英合作项目的技术报导

前 言

随着生产力的发展,公路运输愈来愈显示出它的优越性,受到人们的高度重视。桥梁是国家公路网的重要组成部分,在我国已拥有十三余万座之多。但是,由于以下原因,桥梁的质量不能得到保证,直接影响了交通运输的安全。

(1) 交通流量和个别车辆荷载的增加,桥梁承受的荷载不断增长。

(2) 由于施工管理不善而造成的缺陷,如混凝土空洞、疏松、蜂窝麻面、低强度区和施工不良等。

(3) 由于使用或环境条件的影响造成的开裂、化学侵蚀、冻融和烧伤等。在一些国家,路面上施用的除冰剂常是构成此项病害的原因。

鉴于桥梁常出现多种缺陷,因此需要一种评定其使用性能的方法,探测桥梁的品质降低情况,估计桥梁破坏的危险性,以便进行妥善的维修养护。这还可为桥梁管理数据提供信息。

一、桥梁无破损检测的内容

公路桥梁的评定,有静载试验、动载试验和无破损检测三种手段。无破损检测技术能通过材料检验和桥梁性状功能等的测定,参照探测的隐患和产生隐患的条件来评定桥梁的质量。检测的目的不仅要了解结构质量的现状,还应尽可能推测今后结构质量的发展趋势,以便采取预防措施。条件许可时,用无损检测得到的资料与动、静载测定桥梁承载能力的资料一起,进行综合分析研究,为全面评定桥梁提供依据。

无破损检测的内容主要包括:

- (1) 检测混凝土质量,包括混凝土强度、耐久性、局部缺陷和保护层厚度等;
- (2) 钢筋锈蚀和断裂;
- (3) 预应力管道的空洞;
- (4) 表面检测,包括探测裂缝、监视裂缝发展、测量在荷载作用下的桥梁构件应变等;
- (5) 桥梁性状的经常性监测。

二、无破损检测技术

交通部公路科学研究所承担中英合作项目，与英国 TRRL (Transport and Road Research Laboratory) 合作，引进桥梁无损检测仪器和技术。下面的材料是根据英国 TRRL 专家 R·J·Woodward 博士 1985 年 7 月来我国访问时所作的有关无破损检测技术学术报告整理而成，供进行此项工作的同志参考。

因为需要检查的桥梁数量很大，所以目测是最基本的一种手段。一般每 6 年（或 10 年）进行一次目测检查。对被检查出有病害的结构应进行更经常的外部检查。

目测可检查出晚期的裂缝和锈蚀、渗水和混凝土的碎裂或剥落。然而，更重要的是发现这些病害和其它缺陷的早期迹象，从而在需要较大的维修之前，就可能计划并采取补救措施。

无破损检测技术有多种，一些技术已成功地应用于桥梁，一些还不太成功，还有一些尚在研究阶段。常用的技术有：回弹技术、超声技术、电阻探测器技术、线性极化探测器技术、半电池电位测量技术、保护层厚度测定技术、内窥镜探测预应力管道空洞技术、加压/抽气法检测后张管道技术和其它一些技术。射线照像技术虽可应用但比较麻烦。正在研究的技术主要有：纤维断裂法、激光技术、声发射技术、射线测量技术、红外线技术和热弹性技术等。下面分别作简要介绍。

〈一〉回弹技术

回弹技术是用回弹仪测量混凝土表面硬度和均匀性。在确认混凝土表面与其内部质量相一致的情况下，还可用回弹测定结果确定混凝土强度。它的基本原理是：把一定重量的钢锤与一定刚度的弹簧相联结，并使其冲击一根弹击杆，以便把冲击能量传递给混凝土表面，根据钢锤的回弹测定混凝土表面硬度，据以推导结构混凝土的抗压强度。回弹测量受表面光洁度的影响，因此应在平滑表面上进行测量。回弹值与强度的关系受混凝土特性的影响，测量误差在 15% 左右。国外的回弹仪称为 Schmidt 锤。

在罗马尼亚，常用回弹法作为超声脉冲法的辅助方法以测定混凝土抗压强度，可以互相抵销测试误差。这两种方法的综合应用称为综合法，国内近年来也在推广综合法。

在这里，顺便说一说检测混凝土抗压强度的另一种技术——Windsor 探测器，它用一个定值的能量把一个钢测针压入混凝土内，然后测量压入混凝土中的测针外露长度，以三次测量值平均，得出结果。

〈二〉超声技术

超声波是机械振动产生的一种弹性波，频率高于 20KHz。用超声波检测混凝土的原理是：将电能通过发射探头转换成机械能，发出超声波穿透混凝土结构，然后经接收探头拾取而转换成微弱电信号。此信号经放大后的波形在示波管上显示，声波历时（声时）由数码显示器给出，并可打印数值。

超声波一般选用 20KHz~150KHz 的频率。过高的频率衰减剧烈，而过低频率的 方向性差，易发散。耦合剂通常采用的是黄油，探头同结构之间用黄油粘合。用超声波技术检测混凝土桥梁时，可确定其混凝土强度和探测结构内的空洞和裂缝。

向结构发射超声波后，测量记录该超声波脉冲到达接收探头的时间，由超声波所穿透的距离和声时可算出脉冲速度 V ，而 V 等于纵波速度，它同混凝土的动弹性模量 E_d 、泊松比 ν 和质量 ρ 成如下关系：

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

方程中决定性的一项是 E_d ，而 E_d 同强度密切相关，于是脉冲速度可同强度联系起来。但这两者的联系并非固定不变，其变化和混凝土的许多特性，如骨料种类、级配、水泥用量、水灰比、养护条件和龄期等有关（见图 1）。所以，为了确定混凝土强度，必须从所检查的混凝土中切割出试样进行破损试验，以求得所适用的相关曲线。这种技术的测量误差在 10%~15% 以内。

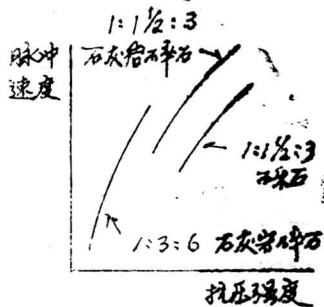


图1 混凝土成分对脉冲速度和抗压强度的影响

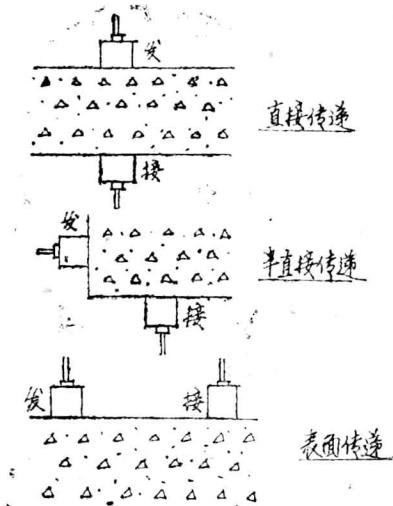


图2 应用超声波技术的不同测法

超声波测量通常有三种方法：直接传递法、半直接传递法和表面传递法（见图 2）。通常采用的是直接传递法，用来测出超声波在混凝土中传递的速度，但这样测出的速度有两个误差来源（见图 3），平行于脉冲方向设置的钢筋会使速度估计得过高，因为钢中的声速（5500米/秒）大于混凝土中的声速（3500~5000米/秒）。相反地，在脉冲路径中如果有空洞，脉冲的视速度就会降低，这种现象用来检测大的空洞和裂缝。

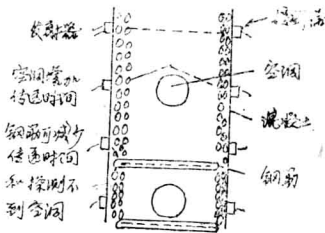


图3 混凝土应用超声波技术探测孔洞

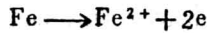
目前 TRRL 正在研制一种能检测埋设在混凝土内的力筋断裂的超声技术。方法是向单根钢绞线的一端发射高频脉冲（1.5MHz），然后沿钢绞线拾取反射波，由反射波的特性可判

断钢绞线的断裂点。但因钢绞线周围的灰浆要吸收一点能量，所以此法的测量范围受到限制。对于直径较大的钢筋，虽可通过调整频率来增加检测范围，但也只能适用于断裂距钢绞线端部不超过 5 米的情况。增加这一检测距离的研究，如超声透镜以及信号处理技术的改进等正在进行中。

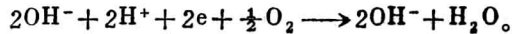
〈三〉半电池电位测量技术

钢筋由于含有不同的元素（碳和铁等），或者由于经过加工而引起内部应力，都会使钢筋各部位的电极电位不同而形成局部电池。

在阳极上，铁离子进入溶液，



在阴极上，水的氢离子得到电子而形成氢的分子，再和溶解在水中的氧化合成水



于是溶液中的 Fe^{2+} 和 2OH^- 结合成氢氧化亚铁，它对下面的铁就成为阴极，更进一步形成腐蚀。

半电池法是用来探测钢筋极电位并据此推断钢筋是否锈蚀的一种技术。其探测系统如图 4 所示。电路的一端是半电池，另一端连在被测钢筋的任选位置。用高阻抗的电压表测量钢筋和半电池间的电位差，从而得出钢筋的极电位。

半电池通常有两种：饱和氯化亚汞和饱和铜/硫酸铜电极，后者较持久，因而更适合工地条件。半电池是一已知的、并保持常量的基准电极。可将欲测定的混凝土区域划分成适当大小的网格，然后按次序在混凝土表面上移动半电池，测出各点的电位，最后可绘成等电位图（见图 5）。

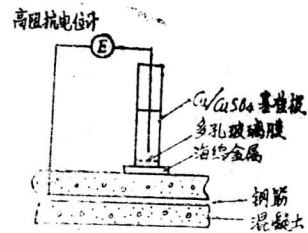


图 4 测量钢筋极电位的系统

混凝土中钢筋的极电位是锈蚀作用的标记，极电位表示电极处产生的某种电化学反应是否可能。表示锈蚀与不锈蚀的钢筋极电位值如下：

- $E < -0.35$ 伏 锈蚀可能性大于 95%；
- $E > -0.20$ 伏 锈蚀可能性小于 5%；
- $-0.20 \text{ 伏} > E > -0.35 \text{ 伏}$ 锈蚀可能性不明确。

半电池法是检验钢筋本身的一种方法，对于说明钢筋锈蚀的可能性，还有另外一些间接的检测方法，比如检测钢筋所处环境——混凝土的碳化度和导电率来推断钢筋是否锈蚀。有迹象表明，当混凝土 PH 值低于 11.0 时，其保护作用丧失，如果存在水份和氧气，则产生锈蚀。如果钢筋区也

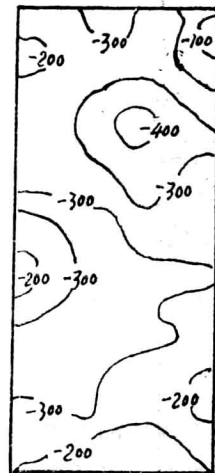


图 5 钢筋混凝土桥面的等电位图

存在氯化物，且氯化物的含量超过水泥重量的 35%，即使 PH 值在 12~13 的范围，钢筋也会锈蚀。另外，对于混凝土的电阻率，已经表明：电阻率大于 12,000 欧姆一厘米，锈蚀不可能发生；电阻率在 5,000~12,000 欧姆一厘米范围，锈蚀将可能发生；电阻率小于 5,000 欧姆一厘米，锈蚀几乎肯定发生。

〈四〉电阻探测器技术

钢筋锈蚀是由于发生电化学反应的结果。对任何化学或电化学反应，有两个决定发生反应的主要因素，即热力学的和动力学的。热力学的因素决定反应是否可能；动力学的因素决定在某给定条件下的反应速度。前面讲到的半电池法检测钢筋锈蚀，只能说明锈蚀的可能性，而这里将提到的电阻探测器技术，能检测钢筋的累计锈蚀率。

电阻探测器技术检测钢筋的累计锈蚀率，并不是直接检测钢筋本身，而是检测在施工时就预先埋入混凝土中的金属板。根据检测金属板的累计锈蚀率来判定被测钢筋的累计锈蚀率。故金属板应与被测钢筋具有同样的性质。金属板必须很薄，使在通常时间间隔中可引起较显著的金属锈蚀。金属板越薄，其寿命越短，但其灵敏度越高。一般选取在 50~500 微米范围内。把金属板粘贴在塑料制成的基板上，使其具有相当刚度。金属板连同连接导线须在混凝土灌筑施工时按指定位置埋在混凝土中。以后定期取读数，例如每 6 个月一次。

金属板由于锈蚀而逐渐变薄，因板的电阻与其厚度成反比，故其电阻因板变薄而增大。由于电阻的变化很小，不易测出，故采用了惠斯顿电桥（见图 6）。把金属板作为交流电桥的两臂，一臂涂以适当的防锈层，而另一臂暴露在混凝土中。用这样的方法，可相当简单地测量金属两臂的电阻比，从而计算出未涂防锈层一臂的厚度和锈蚀率。依据的方程式如下：

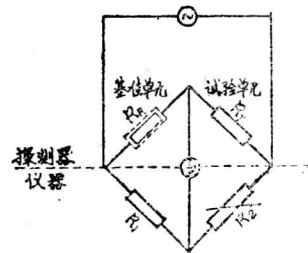


图 6 电阻探测器

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{W} \left(\frac{1}{t} \right) = \frac{K}{t}$$

式中：

R ——试件的电阻； A ——试件横截面面积；
 ρ ——试件的电阻率； t ——试件的厚度；
 l ——试件的长度； K ——常数。
 W ——试件的宽度；

$$\therefore \frac{R_T}{R_R} = \frac{K_T/t_T}{K_R/t_R} = \frac{K'}{t_T}$$

式中：

R_T ——暴露臂的电阻； t_R ——防护臂的厚度；
 R_R ——防护臂的电阻； K', K_T, K_R ——常数。

t_T ——暴露臂的厚度；

初始 $t_T = t_R$ 。

$\frac{t_T - t_T'}{a}$ ——暴露时间为 a 年时的锈蚀率，单位微米一年。

式中：

t_T —— $a=0$ 时探测器暴露臂的初始厚度；

t_T' ——暴露 a 年后暴露臂的厚度。

〈五〉线性极化探测器技术

线性极化探测器技术是检测钢筋瞬时锈蚀率的一种技术。瞬时锈蚀率就是钢筋在特定时间的锈蚀速度，此项指标为预估钢筋锈蚀的发展提供了依据。

用线性极化探测器技术检测钢筋的瞬时锈蚀率，不是直接检测钢筋本身，而是检测在施工时就预先放入混凝土中的金属板的锈蚀电流，进而推断钢筋的瞬时锈蚀率。图 7 示出了线性极化探测器技术的电路图，两极是由被测金属板制作，在两极间施加小量常电位差（小于 20 毫伏），测量极间通过的电流。而极间通过的电流与两极金属板的锈蚀电流有关，从而出了金属板的锈蚀电流。

此方法的局限性在于它仅能在导电介质中（最大电阻率 10^5 欧姆—厘米）应用。而通常混凝土的电阻率小于此值，检测能顺利进行。只有在含水量低时，混凝土的电阻率才可能超过此值，使此检测法失效。

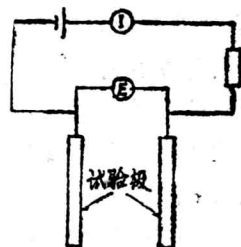


图 7 测量极化阻抗的两极系统

〈六〉保护层厚度测定技术

保护层厚度测定是用保护层厚度测定仪来完成的。保护层厚度测定仪是安装在「」形芯上的两组线圈组成的探头（搜索单元），将它放在或靠近被测混凝土表面，并在其中的一组线圈中通交流电，然后测量在另一组线圈中的感应电流量。感应电流量是探头到钢筋的距离的函数。在有了适当的率定之后，就有可能确定钢筋直径、方向和到混凝土表面的距离。现有的出售产品据称在定位上的精度为 ± 3 毫米，钢筋的最大埋置深度可达 200 毫米。

保护层厚度测定仪是一种磁性装置，不仅可以测定保护层的厚度、混凝土中钢筋的位置和大小，而且对于混凝土中氯化物的含量以及碳化深度等的说明也是很有用的。当结合考虑钢筋暴露的情况；混凝土的渗水性和防水层的存在等因素时，保护层厚度的测定是预测钢筋锈蚀与否的重要测量之一。

保护层厚度测定仪对 80 毫米以下的保护层厚度的测量是有效的，如在混凝土表面划分网格进行保护层厚度测量，则可建立保护层厚度等值线（见图 8），它可清楚地表示保护层厚度的变化及某些不满意之处的情况。

〈七〉内窥镜探测技术

内窥镜是用来探测预应力后张管道的一种装置（如图 9 所示），它包括刚性和柔性的检查管，能插入到钢和混凝土结构的孔洞或裂痕处。管道内部所需的亮度由外光源通过玻璃纤维传入，在刚性管中可使用三棱镜；柔性管中可使用光导纤维系统。设备可连在照像机上，对管道内部照像检查，很直观地反映出管道内部的空洞和缺陷。

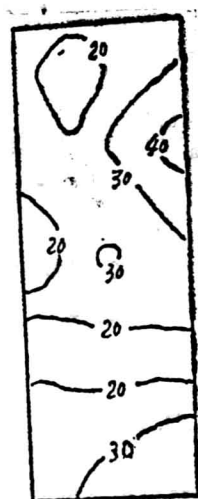


图 8 钢筋混凝土桥面的混凝土保护层厚度(毫米)

〈八〉加压/抽气法检查后张管道的技术

此技术需钻孔进入管道。TRRL 已在英国 12 座后张法桥梁中用此法检查管道。所采用的方法如下：

(1) 在管道顶部钻取直径 25 毫米的孔洞。管道根据施工图定位，钻洞时注意避免损伤力筋。当钻洞碰到管道的管壁时，应立即暂停，然后非常小心地继续钻进，直至有一段管道套管外露为止，接着凿开管道，接入仪器。探测一根管道需要孔洞约 2 个左右。

(2) 可能时，取出灌浆试样，供作化学分析。

(3) 通过某一孔洞抽空管道内气体，并测量其余孔洞的压力（真空度）。其检测装置如图 10 所示。

(4) 把经过抽空的那个孔洞连接在由一条泡在水中的有机玻璃管子做成的水表上，用这样的方法可测得存在的空洞体积。测量玻璃管中水面高度并计算空洞体积。误差来源有两个：

(a) 水通过裂缝和现浇与预制混凝土的接缝渗入管道；

(b) 部分灌浆的管道在抽空后，其压力不均。

这两个误差导致低估管道内的空洞体积。此外，由于每个管道仅能钻入有限的孔洞，故可能有未被发现的空洞。因此，所得空洞体积的值仅是近似的，总是比实际空洞值偏

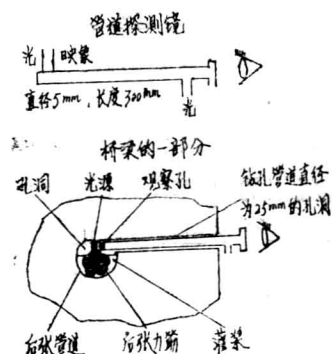


图 9 内窥镜探测后张管道

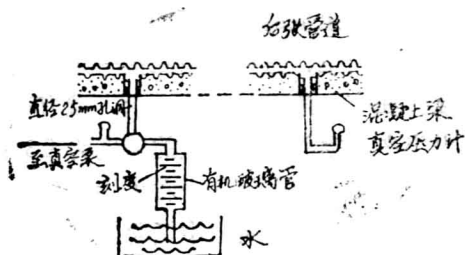


图 10 真空压力试验用的仪器示意图

低。

(5) 空气渗出管道的速度用这样的方法来测量：对气体加压（通常用氮气），测量维持高于大气压 17千牛/米^2 的压力时所需输入气流的速度。当测量到高的气流速度时，把肥皂溶液涂抹在混凝土的外部，在渗漏点可能有气泡显示。

此技术的局限性是：往往由于构件几何尺寸上的关系，在靠近锚头处不可能钻入管道，又如顶翼缘中或在梁与横隔板的交会处也不可能钻洞。即使没有这些情况，钢筋数量过多有时也使钻洞成为不可行。

〈九〉热弹技术

表面应力变化可用热弹性应力分析法测得，这个方法是测量固体在受到绝热拉伸或绝热压缩时所产生的微小的温度变化。Sira 公司研制这项技术并已获得温度灵敏度为 0.001°C （对钢材，这一温度变化相当于施加 1N/mm^2 的应力），空间分辨率为 0.5mm^2 的结果。在和钢桥桥面相同的那些焊接部件上在实验室试验成功，促使进一步研究，以便把它应用于混凝土和车辆荷载下的桥梁。

〈十〉测量应力和应变的技术

应力裂缝宽度通常用音响计或 Demec 计来测量。音响计为张紧在两个固定于被测结构构件上的锚定点的钢弦，通常弦长 140 毫米，直径 25 毫米，设在弦中点的电磁铁将钢弦激励，并接通到记录装置，可取得其反应。用下式由弦振动的谐振频率的变化计算出应变的变化：

$$\varepsilon = (4l^2\rho/E)(f_1^2 - f_2^2)$$

式中： ε 为应变， l 为弦长， ρ 为质量密度， E 为静弹性模量， f_1 和 f_2 分别为钢弦初始的和最终的谐振频率。这些振弦计的应变范围约为 0.3%，最大的应变分辨率为 0.5×10^{-6} 。其精度受该计的温度灵敏度（每摄氏 1 度应变为 11×10^{-6} ）和钢弦、磁铁本身以及锚定点的缺陷等限定。

Demec 计有两个圆片固定于结构物。两圆片之间的距离的变化用千分表和一些杠杆装置来测量。Demec 计可拆下装到另一测点再用。Demec 用钢钢制作主体，使温度的影响减为最小，典型的长度为 50 毫米和 100 毫米的 Demec 计分别有 20×10^{-6} 和 10×10^{-6} 的应变分辨率。

电阻应变片用得较少，因为把应变片粘贴到混凝土表面是比较困难的，而且对混凝土要使用长标距应变片，长期测量还须保持应变不飘移等等都是困难的事，应变片通常多用于钢部件。

这几种应变测量都很有用，但是不一定能代表混凝土内部的应变，不能给出绝对应变值（除非在施工过程中就设置了应变片），并且难于转换成应力值。为了克服这些局限性，法国巴黎中央道桥试验所研制出一种应力直接测量法。方法是在混凝土中切成厚度为 4 毫米

的一道槽。按每 10 毫米一级切深到 60 毫米，沿该槽深度的剖面为直径 150 毫米的一段圆弧。在每 10 毫米的一次切深后，在槽中插入一只扁千斤顶（专门设计制作的）并测量出恢复到沿槽周围的原来应变分布时所需的扁千斤顶压力。据称在某桥一根立柱所做的现场试验曾获得所施加应力精度到 0.2N/m^2 以内的结果。

〈十一〉纤维断裂法

纤维技术用于检验混凝土桥梁裂缝的初生。其原理是：在被检测的混凝土表面粘结玻璃纤维，裂缝扩展时，或在该部分发生塑性应变时，纤维是否拉断可通过设在纤维一端的光源，由另一端的探测器来探知。在被测区域内用几根经过化学处理以控制破坏时应变值的纤维，能监测结构的恶化率。目前能控制纤维破坏的应变范围为 $0.5\sim 4\%$ 。这一技术将成为桥梁或其它结构物在危险区域的强有力的监测手段。目前正在试验以确定其分辨率、重复性和可靠性。

〈十二〉激光测量技术

在桥梁中应用激光是为了测量桥梁结构变形。激光束是可见的平行光束，所以可用以定线，可以进行垂直的和侧向的间距测量。这种方法用于黑暗中检查，激光在晚上使用不阻碍交通，受到的干扰也很少。

需要注意的是，测量中不要改变激光束的位置（激光漂动、折射），否则应以适当的基准观测进行校验。接近地面的折射对测得的图示具有很大的影响。如果知道整个过程中的温度梯度、空气密度和温度的图示，则折射影响的评定基本上是可能的，然而在实用中，只能得出近似解，因为这是在适合大气条件（云、少风，折射和激光束基准位置少量改变）下，以及应用视力和反视力而得到的。

该技术的一个问题是激光支点的移动而引起的微小倾斜，这会起探测点的巨大移动。英国应用三点定向技术，已解决了这个问题。激光束射出后充满了聚焦单元的小孔，然后集中，在探测器上形成像点。当光源中心、聚焦单元和像点三部分连接在一个结构上时，这三点是在一直线上。当测距为几米时，焦距单元通常为弱的透镜，测距较长时为—Fresnel 波带片。如果许多点要进行定线，则可用非聚焦的图形绕射光栅。

〈十三〉声发射技术

当结构受到荷载作用时，材料发生变形可释放出应变能，并产生应力波，这种现象叫做声发射。应力波的频率为 20MHz 。声发射有几个来源，如裂缝产生、局部破碎、局部钢筋滑动和锈蚀等。在结构上放置几个传感器，可以接收应力波，判明发射源。

声发射技术主要用于均质材料，如钢材。而像混凝土这种多相材料则增加了测定结果的判读困难。这是一项高度专门的技术，所得资料可靠性在很大程度上取决于分析和说明结果的熟练水平。其所以用于桥梁，是试图监视裂缝的产生和发展，此技术还未被检验，不适于日常使用。