

1980年日本实验应力和应变分析述评

岛田平八

1 概 况

各种构件为了起到应有的作用,在进行工作时,不随负荷产生变形的情况是非常罕见的.换句话说,为了使构件起到应有的作用,对构件的力学状况的测定,可以说是不可缺少的.广义的构件,包括身体、衣服等物体在内,都需要进行实验应力和应变分析.由此可见,其范围不限于工程学,而是渗透与普及到医学等更广泛的领域.在各个领域中,要求的测定对象、力学量和测定环境,随时代和社会的变化而改变,如果实验应力和应变分析只满足于以前的手段,就不能适应新的要求.因此,研究和开发新的测试方法是必不可少的.预料在这种意义上,还要求NDI(非破坏检查协会)的各个分科会采取相应的措施,如互通情报、进行协作研究、以及第4分科会内的小委员会进行重新整编等等.事实上,从本会的春秋季节讲演会和各个小委员会的资料的内容来看,许多分科会和小委员会的讲演次数正在不断增加.可以预料,NDI第4分科会在承担新问题的研究、新技术的开发、实验应力和应变分析的普及工作,以及专业技术人员的培养等方面的责任,今后也将日趋加重.

2 研究的动向

从1980年在NDI的有关文献中发表的论文来看,明显的特点是关于应力、应变的分析手段,应用最普遍的是光学方法、应变电阻计法、超声波法和x射线法,而测试对象大多是各种形状的且与断裂力学有关的构件.

2.1 在恶劣环境下的应用

随着时代的发展,对于构件的使用条件要求越来越苛刻,因之相应的研究也很多.菅原^[1,2]对于采用陶瓷喷涂方法把自由丝栅应变计固定在被测物上的装高温应变计的专用喷枪装置进行了报道.这种方法有着以前的高温应变计安装法——粘接法和点焊法所没有的特点,并且如果丝栅的材质选取得当,可将使用温度提高到800—900°C,但是因需要配备特殊装置,在这一点上不甚理想.石附等^[3]提出的试验方法是,对于在600°C以内的温度范围中,由于高温引起的膜盒组式高温应变计的表观应变进行研究,根据应变计自由状态下的检验数据概算出实机安装后的表观应变.另外,菊池^[4]同样使用膜盒组式高温应变计,对于钢板浸入450°C的熔融锌溶液里时产生的热变形进行了测定,查找了熔融镀锌后残余的变形原因.上田等人^[5]对于陆地试航中的船用柴油发动机的油缸变形正在进行测试.由于油缸上部的温度在水压下(2—2.5kg/cm²)大约是100°C,因此需要选择适当的涂料.同时,因排气口部件的温度要升到400°C,所以必须使用高温应变计.这里使用的是点焊式应变计,其表观应变的值,根据同一组应变计进行估算.

对于高温变形的全场测定,多采用Moire法.青木^[6]等取得了飞机用耐热结构材料(在600°C以内)的热膨胀和高温强度的基本数据.伊达等^[7]用Moire条纹法对于510°C时的不

同种材料之间的焊缝变形, 和 900°C 时 HP 钢焊缝的变形进行了测定. 有间^[8]等用 x 射线应力测定法求出了镍铬铁耐热合金材料的弹性常数在 500°C 以下的变化量. 此外, 为了确定 LNG 容器这类构件在低温下的安全性, 目前正在对低温变形的测定方法进行研究. 由于低温时的变形很小, 所以只有用电阻应变计进行测量. 矢部等^[9]认为, 要想在现场施工时测定变形, 若用目前常用的加热硬化型粘接剂来粘贴低温应变计是很不方便的, 所以他研究了一种在 -180°C 以下使用的快干型粘接剂. 吉田^[10]在大型超导电磁铁的研制和运行监控中, 要求对超低温强磁场下的变形进行测定, 为此, 探讨了市场出售的在绝对温度 4.2°K 、磁场强度为 5 T 的低温用的应变计的各种特性. 目前, 随着各种工厂的大型化和高温高压化, 多层容器的使用逐渐增多起来. 池内等^[11]用应变计测定了装有喷嘴的多层容器模型在水压下的应力; 在 1500 kg/cm^2 的高压水下, 还成功地进行了零点飘移的研究和导线的涂料等方面的研究. 对于运转构件的变形进行长期的测定, 从设计上和对构件的监控上来看, 是非常重要的, 因而数据处理系统、应变计的保护等也随之变得重要起来. 末吉等^[12]对于在温度、湿度和振动不断变化, 同时有盐水冒出的恶劣环境下的地铁构件, 在还受到邻近其它工程的影响的情况下, 用应变计进行了连续 670 天的测定. 测得的数据总数是 132000 个, 在专用电子计算机上即时进行分析处理. 另外, 安田等^[13]用焊接式高温应变计在 130°C 的温度下, 对高温高压反应容器的支承侧缘焊缝处的动应力进行了连续九个月左右的测定. 测得的各种数据证实: 对于测定高温下反应容器的工作应力来说, 焊接式应变计是实用的.

2.2 在高速变形上的应用

随着各种机器的高速化, 研究高速变形下的应力、应变和断裂状态的必要性, 也就日趋增加了. 岩城^[14]、过^[15]等人用光弹性法和 Moiré 条纹法进行了非稳态热应力分析的研究. 这也可以看作是利用树脂的导热率小这一特点, 延长了时间的热冲击的研究. 松木等^[16]对于冲击载荷引起的力学行为的变化, 正在研究使用压电元件(电石)来直接测定冲击载荷的方法, 并就实验中存在的问题和压电元件的输出功率修正法写了试验报告. 中门等^[17]考虑到有关冲击疲劳的数据很少, 所以用圆盘进行了冲击疲劳的基础研究. 高桥等^[18]同时用全息照相法和动态光弹性法, 对行式打印机的锤工作在循环冲击负荷下的状态进行了分析. 关于全场应变测定法的研究, 也发表了数份试验报告. 河田等^[19]用多次频闪照相机的动态光弹性法, 研究了带有切口的板受动拉伸时的动应力集中. 其闪光间隔约是 $20\text{--}30\mu\text{s}$, 用拍出的等色线照片求出动应力集中系数, 再与静应力集中系数进行比较. 岛田等^[20]为了求得高速变形下的 K_I 值的变化, 采用了散焦法(caustics). 对于金属材料采用反射式散焦法, 从而推导出了以静态变形的结果为基础的高速变形修正法. 小幡等^[21]为了从应力分布的观点考察高速变形下的裂纹状态, 在高速变形的研究中应用了格子法, 证实了在延展性裂纹开始发生时, 与静变形相比虽然 K_{IC} 值不同, 但是 CTOD 是相同的.

2.3 残余应力的测定

残余应力引起的损害, 在工程学范围内是很普遍的. 残余应力测定的历史已经不短了, 但未解决的问题却很多, 目前这方面的研究很活跃. 与去年 5 月召开的第 4 次实验力学国际会议上的讲演内容相比, NDI 的有关组织对于残余应力的研究是很多的. 土肥等^[22]从用 x 射线测定法要求的应力值, 就是从 x 射线射入深度内的应力平均值这一结论着眼, 对于与 x 射线射入深度相关的残余应力的测定理论展开了讨论. 并且以这一方案为基础, 将这一理论运用到圆柱的残余应力测定、空心圆筒的残余应力测定、球的残余应力测定等情况中. 然后

分别将理论结果与实验结果相对比,进行讨论.西村^[26]用x射线法测定了与圆柱轴线垂直的平面上的轴对称残余应力.川越等^[27]用Sacke法测定了圆柱的轴对称残余应力,并通过实验确定了精度极限和分析方法的适用性.上田等^[28]根据以固有变形为媒介的残余应力测定原理,考察了在特别厚的焊缝处产生的三元残余应力,提出了在与焊缝方向一致的应力场适用的理论.

无损地测定残余应力,与其说对于研究室来说是必要的,勿宁说对于现场,即对于实机的检查更需要.因此研究x射线残余应力测定法在实机上的应用,具有重要的意义.永井等人认为,用 $\sin^2\psi$ 法测定焊缝圆角的残余应力是困难的,但是用 $\varphi-\sin^2\psi$ 法却比较简易,因此他们试制了 $\varphi-\sin^2\psi$ 法专用的可动式的焊缝圆角专用测角器.由于PSPC式x射线应力测定法在实验室里已被证明:采用它可将应力检测时间缩短到以前的1/10以下,在精度方面也很有效,所以吉岡等^[31]为了把PSPC法用于测定实机的残余应力,正在采用各种方法对这种装置进行改良,特别是对于试样定位采用了激光等方法.八代等^[33]根据以往 $\sin^2\varphi$ 法的基本假设,认为对于不符合各向异性的弹性理论的白树枝状晶体和结构组成的材料,用x射线法测定时,在现场应采用 φ 固定法.为此,他们试制了用微型马达控制的x射线发射器及计数器组成的驱动系统,并对其性能作了介绍.

除x射线法以外,以前还有利用磁性来测残余应力的方法.安福用自动平衡式电磁测头成功地测试了钢铁材料,同时还运用这种方法测试镍,证实得到的效果良好.

2.4 关于测试方法的基础研究

以提高测试精度,扩大应用范围等为目的的测试方法本身的研究,是第4分科会的一个大课题,研究活动进行得很活跃.测试方法的研究种类也是多种多样的.

关于应变电阻计,小岛对箔式电阻计的形状进行了一系列的研究.他用有限元法对于箔片粘在塑料上时的加强效应^[35]以及部分粘接后的箔式应变电阻计的状态作了分析.他证实当粘接区域超过某种程度时,被测材料的变形才能传递到电阻丝上.应用这一事实,高温电阻计的检验才有可能实现.

关于脆漆法,菅野、井上研究了这种方法的基础——脆漆膜的基本性质.已报道的有:关于脆漆中金属盐成分的研究^[37]、负压下的应变灵敏度特性^[38]、应力梯度对脆漆的应变灵敏度的影响^[39]和负荷时间对于脆漆开裂特性的影响^[40]等等.

在光弹性法方面,光弹法本身的基础性研究成果已在光弹性学会第2次研究发表讲演会上公布了.它们是:西田等^[41]提出在用光弹性法分析应力分量时,用极坐标图式微积分分析法的研究报告;久保等^[42]提出为了加强Aben方程的实用性,用Stockes参数进行变换,来考虑其物理意义的研究报告;守^[43]关于光弹贴片厚度影响是否符合平面应力弹性理论的研究报告;三木等^[44]对于光粘性流体的粘性流,考察了其主折射率和双折射效果,综合研究了其符号与浓度以及温度的依存关系等问题的研究报告.

沢等^[46]提出用在低于转换点的适当温度下冻结的方法,可以弥补冻结光弹性法的重大缺点之一——冻结模型的大量变形.如果采用这一方法,冻结法的质量系数要高出常规值,故冻结时可以避免大变形.

濑口等^[47]为了提高光弹性法的数据处理精度和简化处理过程,制出了一套采用光导摄像管照相机和显微摄影机的分析系统.

关于Moire条纹法,加藤等^[48]考虑了这样一个光学系统,即用环状光路的新的两光束

干涉法来增倍 Moire 条纹, 用增倍了的条纹求位移的一阶导数的等值线, 目前正在研究这一方法。

做为激光散斑的应用, 山口和町田^[49]用单元图象传感器检测的方法, 代替用摄影拍出激光散斑分布的变位的方法, 并且用微型计算机处理数据; 使实时的应变测定成为可能。另外, 岛田等^[50]根据散斑照相法能适用于粗糙面的特点, 研究了可能适用的粗面的粗糙度和离面位移的限度。岛田等^[51]为了提高散斑照相法测得的全场位移分布的精度, 改造了光学系统, 成功地得到比过去鲜明的等位移线照片, 同时还查明了散斑照相法在粗面上的应用限度。平田^[52]等为了在不能直接照射激光的情况下也能应用散斑条纹图来测塑性变形, 提出采用表面复制的方法, 扩大了应用范围。

用散焦法的研究也很多, 作为对该方法本身的研究, 清水等^[53]对于有光弹灵敏度的材料上用散焦法时存在的问题进行了考察, 用聚碳酸酯进行了探讨。清水等^[54]为了用散焦法测定 K_{II} 值, 从理论上分析了散焦图象和 K_{II} 的关系, 推导出两者间的计算关系式。佐佐木等^[55]将反射散焦法用于金属材料, 研究了求 K_{II} 值用的各种条件。

宫崎等^[56,57]提出了把热弹性效应用于测定应力的方案。这种方法是利用在绝热的情况下物体一发生微量的体积变化, 物体的温度就要改变这一热弹性效应, 来测定应力的。他根据热场测定温度的变化, 多方面探讨温度变化的特性, 确认了温度变化与主应力和成正比。

小泉^[58]对电磁效应的应用进行了研究。他根据带孔元件在磁场内一移动, 输出电压就发生变化这个特点, 研制出了反力小的应变测试传感器。森等^[59,60]研制了利用磁应变效应测定螺栓轴向力的装置, 并研究了影响精度的各种因素。

北冈等^[61]用镀铁代替镀铜法中的镀铜, 利用在该疲劳过程中产生的初期滑移线, 来测试高温下(250°C)的循环应力, 已发表了试验报告。

2.5 各种测试方法的研究

2.5.1 光弹性法 关于光弹性法的研究报告有: “关于滚动-滑移接触下的应力分析的光弹性研究”^[62]。 “光弹性实验的群抗效果”^[63]。 “用光弹性法进行匣形梁的三维应力分析(II)”^[64]。 “关于窗的配置和剪应力分布的研究”^[65]。 “用光弹性法进行土压测定的尝试”^[66]。 “有开口的防震壁的弹性实验分析”^[67]。 “PS 水泥梁的应力再分配分析”^[68]。 “钻头切削时被切削材料表面的静态光弹性实验”^[69]。 “带切口的 FRP 板的应力分析”^[70]。 “受到销面的压缩、拉伸力作用的正交各向异性板的光弹性和 FEM(线弹性断裂力学)应力分析”^[71]。 “受到弯曲力矩作用的斜弯圆柱的应力分析”^[72]。 “带台阶的圆筒在内压下的应力集中”^[73]。 “有加固环的带长孔平板的应力集中”(之三^[74]是承受剪切负荷作用的情况, 之四^[75]是承受弯曲力矩作用的情况, 之五^[76]是两侧的加固环高度不同的板的拉伸)。在以复合材料为对象的研究报告中, 有“二物体粘接问题的光弹性分析”^[77]。 “有圆形异物的高分子条板的拉伸状况”^[78]等等。

2.5.2 脆漆法 关于脆漆法的研究报告有: “关于等强度梁的等应力场的范围”^[79]。 “柴油机本体的侧壁对间壁的强度分配”^[80]。 “脆漆法在曲轴的弯曲试验中的应用”^[81]。 “柴油机本体的间壁和侧壁的强度相关性”^[82]等等。

2.5.3 应变电阻计法 有关的研究成果有: “螺栓螺纹根部的应变状态随拧紧力的变化”^[83]。 “关于辐流式扩展器的叶轮的应力测定”^[84]。 “高速船用齿轮的齿根应力的测试技

术及测试结果”^[85]。“用应变电阻计测定塑料的热膨胀系数”^[86]。

2.5.4 其它方法 有关的研究报告有：“土木、建筑机械用检测器的研究和制造”^[87]，“用 Moire 条纹法分析十字形碳纤维复合材料的应变”^[88]，“柱状晶体组织的机械性质”^[89]，“用微型电机的 CDDC 式复双轴(面内 4 根轴差动)拉伸试验机”^[90]等等。

2.6 关于断裂力学的研究

2.6.1 应力强度因子(K)的测定 目前,测定简单载荷条件下的 K 值的课题逐渐变少了,主要是测定沿板厚方向的负荷引起的 K_{II} 和 K_I 沿板厚方向的分布,考虑到板厚方向的影响,求断裂变形和双轴应力的关系。关于 K_{II} 测定的研究,清水^[54]用散焦理论重新推导了散焦图象和 K_{II} 的关系式,从而用散焦法求出了 K_{II} 的值,并发表了研究报告。永井等^[91]用光弹性应力冻结法求出了 K_{II} 值,也发表了研究报告。现在,还有不少人正致力于寻求沿板厚和沿三维裂纹前缘的 K_I 分布。在将光弹性应力冻结法用于求解三维断裂问题中,渡边等^[92]采用了粘接裂纹的制造方法和等色线条纹倍增法,并且运用以上方法,解得了半椭圆表面裂纹的 K_I 值分布^[93]。小幡等^[94]用原有的染色格子法,对于 CT 试样半圆缺口的 K_I 值分布进行了研究,尤其侧重探讨了表面 K_I 值的应力异常性。岛田等^[95]用散焦法研讨了板厚发生变化时散焦图象的变化,并研究了板厚变化时的 K_I 值的推断法。上述研究的三维问题,也可以说是板厚方向的变形约束引起的多轴应力问题。与研究多轴应力相似,还研究了作用在平面内的双轴应力及其断裂行为。为了避免双轴应力问题的最大疑难点——双轴应力场的应力确定,清水等^[96]用 K 的直接测定法——散焦法,对于与 K_{Ic} 相应的双轴应力的效果进行了研讨。

2.6.2 断裂韧性试验 在断裂韧性试验方面,如何测定开裂点,是最大的难题,尤其对延性材料更为困难。以前,多用 AE 法和电位差法进行测定。近几年来,用超声波法的研究逐渐盛行起来了,单在 1981 年,就发表了许多研究报告。在第 3 次泛太平洋无损试验会议上(1980 年 11 月 20 日—21 日在东京召开)也公布了若干份。伊达等考虑由于低强度高韧性材料的延性裂纹的发生极为缓慢,所以用以前提出的方法进行检查就比较困难,目前正在探讨用表面波的超声波方法。即首先,为了确定用表面波的超声波法的有效性,在带 R0.1 的缺口的三点弯曲试验中检验了该方法,得到了下述两点结果,即根据表面波的反射波的幅度变化,可以检测延伸性裂纹的萌生点;由其传播时间的变化,还可测定裂纹的钝化量^[97]。接着,将完全相同的方法用到 HT-60 钢、SUS304 不锈钢和 S15C 软钢的有疲劳裂纹的三点弯曲试样上,最后确定:它能以足够的高精度检测有相同切口的延性裂纹的萌生点,决定钝化量^[98]。平野等把测头以 Top-on 接触的纵波的超声波法用到 Cr-Mo 钢、A5-33-B-1 钢和 Ti 合金等金属的稳态开裂点的检测上,肯定了这种方法对于评价 J_{Ic} 来说是一种有效的方法。为了进一步提高精度,正在研究同时采用 Top-on 法和 End-on 法立体地测定裂纹的方法。另外,安中等^[102]五人,为了提高纵波的 Top-on 式的超声波法对于裂纹的检测精度,试制了在 30mm 深处集束成 3mm 直径的超声波点聚焦探头,并且用 HT-60 钢的 CT 试样,进行了弹性断裂韧性试验。试验证明:试制的探头可以很好地跟踪局部的变化,对 J_{Ic} 试验非常有效。但是,对于出现局部裂纹的情况,效果则不理想。

2.6.3 疲劳 在以断裂行为为中心的研究方面,平野等^[103]同时用 Top-on 法和 End-on 法的超声波法,求出了裂纹的开口比和应力集中系数与应力比的关系,并且探讨了得出的有效应力集中系数和裂纹发展速度的关系。大平等^[104]为了用 AE 法进行疲劳裂纹扩展

的监控, 采用 7649 Al 材料研究了疲劳裂纹的扩展和 AE 的关系, 确立了检测疲劳断裂的 AE 检测方法. 田中等^[105]和大平同样, 为了了解 AE 和疲劳的关系, 研究了软钢圆棒料的疲劳引起的塑性变形幅度和 AE 的关系. 长坂^[106,107]为了解释应用广泛的聚碳酸酯材料的低循环疲劳, 用光学显微镜和 SEM(扫描电子显微镜)研究了聚碳酸酯的疲劳裂纹的扩展机理. 他断定, 裂纹在扩展时, 一边把在裂纹尖端塑性区域形成的空孔连接起来, 一边穿透塑性区. 田丸^[108]对于应力腐蚀裂纹, 采用了 x 射线的推定法进行估算, 并对于该方法作了报导. 他证明: 氢氧化钠(NaOH) 对于含 C2% 以下的软钢的腐蚀时间和其强度半幅有密切的关系.

3 关于第 4 次实验力学 国际会议

1980 年 5 月 25 日—30 日, 在美国的波士顿市召开了第 4 次实验力学国际会议. 这次会议的详细情况由北川^[109]进行介绍, 关于应变电阻计由江川^[110]进行介绍. 北川把与主题论文——实验应力和应变分析有密切关系的论文进行了整理和分类, 在了解实验应力和应变分析的国际动向方面, 这些论文有一定的参考价值. 把在国际会议上讲演的论文内容和 NDI 的有关论文的内容加以比较, 列于附表.

附表: 第 4 次实验力学国际会议和 NDI 的论文情况的比较 (相应总论文数量的比率)

论文分类(北川 ^[109])	SESA (%)	NDI (%)
光弹性、光塑性、光粘弹性	13.9	8.8
全息法, 干涉法	6.0	2.1
应变计	5.5	10.4
荷重测试计、荷重测定	4.8	2.1
Moire 条纹	2.8	3.6
超声波、AE	2.0	5.7
x 射线	0.4	6.2
磁致伸缩、压电	0.8	2.1
涡流	0.4	0
脆漆	0.4	4.1
试样	0.4	0
数值分析	6.0	1.6
实验应力和应变分析	1.2	6.2
一般数据处理系统、测试系统	1.2	1.6
材料试验	2.0	3.1
裂纹、缺陷、断裂力学、断裂	14.3	10.9
冲击、波动、动载荷	8.7	2.1
构件分析、构件试验、设计	7.9	7.8
复合材料	6.0	2.1
疲劳、循环变形	5.5	3.6
高温变形、热变形、焊接	3.2	7.3
生物力学	2.8	0
残余应力	2.4	8.3
噪音	0.8	0
焊缝	0.8	0.5

译者后记

在编译本文的过程中, 曾得到一机部郑州机械研究所赖曾美同志的大力帮助, 特在此表示感谢.

参考文献(略)

邵韵琴译自: 非破坏检查(日文刊), 30, 6(1981): 397-403.