

構造に関する測定

高田 孝信*

1. ま え が き

構造物を合理的に設計、施工し、かつ管理して行くためには構造物の実態を十分把握しておく必要がある。設計にあたってまず第一に考慮すべきことは、設計せんとする構造物にいかにして十分な機能を発揮させ、かつ経済的にして安全なものにするかということである。構造物を構成する上に特に重要なのは、その力学的条件であり、力学的条件としては外的条件としての各種の荷重、内的条件としては材料や構造法に基づく応力や変位、変形状態などである。これらの諸条件を設計の時限において適確に把握することは、その周辺条件が一般に余りに複雑なため困難な場合が多いが、できるだけ安全にして経済的な設計条件を打立てることは、構造物設計者の常に心がけねばならないことであり、したがって、われわれはまず構造物の実態を十分認識し適確に把握するようにせねばならぬ。そのためには、計画、調査、施工、および管理の各段階において、できるだけ各種の測定を行

* 正会員 工博 東洋大学教授

■ 講座「測定」の発足にあたって

最近土木工事を主体とした建設事業の発展はめざましく、その内容もきわめて多岐にわたり、技術的にかなりの難問題をかかえ、量的にもますます工事の合理化が要求されている。しかし、土木技術の歴史はきわめて古く、したがって深い経験に基づく抜くべからざる古い伝統を有している。このことは一面きわめて好ましい現象であるとともに、他面日進月歩の技術に反する面なきにしもあらずである。しかし、近年新技術に対する認識は従来の経験を主体としたものから、工事の実態に基づく現象を主体に考えるようになってきた。ここに、各種の工事などに対する数量の表現が重視され、実態に対する観測、測定が要望されてきたわけである。このときに当り、土木学会誌編集委員会が「測定」に対する講座の開設を企画されたことは、真に時期に適したもので、土木技術者に対して測定に対する認識を深めてもらう点においてきわめて有意義なことと思われる。

なるべきであろう。

構造物に関して測定すべきものとしてまず考えられるのは、荷重状態とそれに対する構造物の挙動である。荷重状態としては社会現象として生ずるもの、たとえば橋梁における活荷重のごときものと、自然現象として生ずるもの、たとえば地震や風による荷重、水圧、土圧などのごときものであり、構造物の挙動としては、施工および完成後における応力状態や、変位、変形状態であり、それらは構造物の特性に大きく左右される。荷重条件については、従来からの観測に基づく経験や解析による計算によりきめられ、構造物の状態については解析を基にして、さらに必要に応じ各種の測定が行なわれている。しかし、土木構造物は一般に構成材料、荷重条件および支持条件がきわめて複雑、かつそれらの設定も万善を期しがたく、その実態を解析的に求めることは困難な場合が多く、施工過程や完成後の実態に対する把握も不完全であった。このことは設計に当ってなされたかなり高度の解析計算に対してそぐわないものであるが、測定法の未発達な時代にはやむを得ないことであった。しかし、現在ではそれらの難点を除去するため、各種の観測や測定法が開発され、漸次現場にも適用されつつあるので、今後構造物の設計、施工および管理はますます合理化されるものと思う。かつては応力や振動測定のような構造物の重要な特性に対する測定も、一部学者や研究者の専有物視された時代もあったが、これらの測定をさらに技術の向上発展に資するためには、あらゆる分野の適用に役立てて始めて十分な役目は果たしたものといえよう。本講座では、構造物に対する測定として応力および振動の測定を主題として取扱おうことにしたが、これらの測定法には浩瀚な M. Hetenyi 編さんの“Handbook of Experimental Stress Analysis”があり、日本でもそれを参考とした応力測定技術研究会編“応力測定法”があ

ただ、土木技術はきわめて広範囲で、測定技術もまたきわめて多岐にわたるので、限られた紙数でその内容を十分読者に納得してもらうことはきわめて至難な業(わざ)で、はからずも本講座の執筆を引き受けることになったが、われわれ浅学非才の弱輩のとうていよくなしうることではない。この点は、今後読者においても十分ご了解ご承を前もって願います。

今回から発足する講座「測定」の内容(現在では企画であるが)は、基礎編と応用編にわかれ、基礎編では比較的基礎的知識として必要な、しかも応用編に共通的に必要と思われる事項を取り上げることにしたが、紙数の関係で文献紹介にも重点をおくことにした。掲載項目と回数は構造関係2回、コンクリート関係1回、土関係1回、水関係2回として、大体記述の順序に掲載し、基礎編が終ってから応用編として

道路、トンネル、橋梁、ダム、河川、海岸港湾、上下水道、鉄道、空港、砂防地すべり、空気・水の汚染などの各項目について約12回にわたって掲載の予定である。

(高田・記)

り、これらはきわめて多岐にわたり詳細な内容をもったものである。

しかし、応力や振動などの測定法は日進月歩であり、測定対象物の状況に応じてその要求も変化して行く。その要求に応じたものとして、アメリカでは“Proceeding of the Society for Experimental Stress Analysis”が季刊として刊行されている。しかし、これらは構造物全般を対称としてはいるが、土木構造物に対する適用性にかける点なきにしもあらずである。本文では限られた紙数で、われわれ土木技術者に必要な構造物に対する測定技術について、それらの現状、原理および適用性について概略的なことを述べ、詳細な文献を例示することにした。

2. 応力の測定

(1) 応力測定法の現状

現在構造物の応力測定に用いられている方法は多種多様で、おのおのそれぞれの特長を有するので、一概に優劣を断定することは困難で、構造物の種類、荷重状態、周囲の状況に応じて適当に取捨選択せねばならぬ。

一方、構造物が大型化または設計に対する要求がきびしくなるについて、構造物の形態も複雑となり、周辺条件が複雑なだけに従来のような弾性数理論解析のみによってははもはや解決できない場合が多くなってきた。したがって、この困難を打解するために種々の応力測定法が研究され、数理論解析の困難点をつぎつぎに克服してきた。

土木構造物はその使用材料の種類により、鋼、コンクリートおよび土構造物の3種類に大別できるが、これらに対する応力状態を決定せんとする場合、概括的にいつぎのようなことが考えられる。

① 数理論解析法：この場合には境界条件の設定、解析、数値計算。この方法は境界条件の設定が適確に行なわれれば、計算法の進歩によりきわめて効果的である。

② 応力測定法：方法の選択、計器に対する知識、取扱法の習熟、データの整理法に対する知識などが必要。計測値の精度、信頼性は最近ますます向上しつつある。

③ 測定法の適用性：測定対象物に対する考慮、表面か内部か、静的現象か動的現象か、長期か短期、ひずみか応力そのものか、直視可能か遠隔操作を必要とするか、実物か模型によるものかなどを考慮、計器の特性に応じて測定法をきめる。なお、鋼構造物に対してはひずみ計、コンクリート構造物に対してはひずみ計または応力計、土構造物に対しては応力計（または土圧計）のようにひずみ計と応力計が使用されている。

鋼構造物のように荷重条件として外荷重が主なものに対しては、他の一般構造物同様のひずみ計が利用され、表面応力の測定に対しては、電気抵抗線ひずみ計のような接着式ひずみ計が採用されている。

コンクリートや土構造物のような重量構造物では、自重による応力が大きな要素となるので、これらの構造物に対しては応力測定法そのものにも特別な考慮が必要となる。これらの構造物では、施工の過程においてすでに相当大きな応力を生ずるので（その構成材料の破壊応力に比べて）、施工の段階から応力測定を始めておかねば、最終段階における応力状態を把握することはできない。したがって、このような構造物に対しては長期観測用の測定器が必要となる。

応力測定法の原理は物体内部に生じている応力を直接測定するいわゆる応力計によるものと、いったんひずみ量を測定してから応力に換算する方法とがあるが、後者では通常適当な距離 L をへだてた2点を考え、その微小な相対変位 ΔL を適当に拡大して測定し、その結果から平均ひずみ $\epsilon = \Delta L/L$ を求めようとするものである。したがって、物体内部における測定方向の応力状態が一様かまたは比較的に一様に近い場合には、測定値に対する拡大率は小さくすみ、測定機構も簡単なものでよいが、応力分布の変化がいちじるしい所では、測定区間 L を小さく取らねばならず、したがって拡大率も大きくせねばならないので、測定器の機構は複雑となる。応力測定とは大抵の場合前記 ϵ または ΔL を求めるひずみ測定を指している。 ϵ または ΔL はきわめて微小なものであるから、それを求めるにはそれらを拡大せねばならないが、その拡大方法によりいくつかの形式がある。つぎに拡大率の取り得る値の限度と、測定値の誤差や感度、精度などとの関係について考えて見よう。

いまひずみの拡大率を α 、測定しうるべき最小応力を σ_{\min} 、目盛の上で読み取り得る変位の最小値を δ_{\min} とすれば、 $\delta_{\min} = \alpha \cdot \sigma_{\min} \cdot L/E$ (E は測定物体のヤング係数) すなわち σ_{\min} と L とが小さくなるほど、大きな拡大率 α を要求される。

つぎに、ひずみ測定の精度と感度とについて考えて見るに、実際のひずみ量を ϵ_p 、ひずみの目盛から読みとれる量を ϵ_r とすれば、誤差 e は $e = \epsilon_p - \epsilon_r$ で表わされる。つぎに、感度とは有効数字をもって読み取りうる最小の量をもって示される。したがってこの感度は、

④ 最大誤差 e_{\max} が読みとり可能な最小ひずみ量 $\epsilon_{r\min}$ より大きいときは e_{\max} で与えられる。

⑤ e_{\max} が $\epsilon_{r\min}$ より小さいときは、 $\epsilon_{r\min}$ で与えられる。普通は $\epsilon_{r\min}$ は最小目盛間隔の $1/5 \sim 1/2$ 程度である。

つぎに、 u を $\epsilon_{r\min}$ または e_{\max} のいずれかの最大値

とすれば、精度(%)は $100 u/\epsilon_p$ で与えられる。したがって、ひずみ計としては ϵ_{rmin} および e_{max} を小さくするとともに、この両者が大体等しくつりあいのとれたものがよい。拡大率を大きくすれば ϵ_{rmin} は小さくなるが、 e_{max} が増し、拡大率を小さくすれば ϵ_{rmin} は大きくなるが、 e_{max} は減ずる傾向になるので、精度を無視して無暗に拡大率を大きくすることは無意味である。

つぎに土木構造物に対する応力測定法を機能的な見地から分類すれば、現在つぎのようなものがある。

① 機械的方法：本方法では構造物の測定部に2個の標点を設定し、そのひずみ量を機械的に拡大して読み取るもので、方法としては原始的であるが、温度、湿度などの自然条件の影響を受けることが少なく、測定精度は良好である。しかし、取扱いが不便なため、最近あまり利用されなくなった。本方法は鋼構造物やコンクリート構造物の静的な表面応力測定に適する。

② 電気的方法：この方法にはつぎの3形式がある。

(a) 電気抵抗線形、(b) 容量形、(c) インダクタンス形

これらの測定器には、ひずみを直接取り出すピックアップ(ひずみゲージ)と、そのひずみ量を拡大させる部、ひずみ量を示す指示計の3要素からなり、さらに動の場合にはひずみ量を記録するオシログラフとが必要となる。ひずみゲージの取付法からいえば、(a)には接着式と埋設式とがあり、接着式は静的、動的な表面応力の測定に適し、現在最も一般化された応力測定法である。埋設式とここはカールソン形があり、コンクリートや土構造物に埋設し、これらに対する長期観測用として利用されている。本形式は構造物の内部応力の測定に適し、静的およびあまり高速でない動的応力の測定にも利用されている。測定範囲は大体 $\epsilon = 2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-2}$ 程度である。

(b)の容量形は、ひずみ量の測定範囲が抵抗線にくらべて大きいので、そのような大ひずみ量測定に便利である。また本法は静的、動的いずれにも利用できる。

(c)の方法に属するものとして電磁形があるが、これは測定感度の点で前の2者に劣るが、温度や湿度などの影響を受けることが少なく、長期間安定を保つので長期応力の測定に適している。

③ 光学的方法：本方法の代表的なものは、光弾性による方法である。光弾性実験は従来実験室内の暗室で行なわれていたが、最近実験材料や観測器械の開発により明るい所でも利用できるようになり、現場実験用としての道も開かれた。本方法にも接着式と埋設式とがあり、微小ひずみの測定には適さないが、主応力方向を簡単に知ることができる。

④ X線利用による方法：鋼構造物の応力測定に一部

利用されているが、現在測定感度の点に不満足である。しかし、鋼橋に対する自重応力、溶接により誘起される残留応力などの測定法として注目されている。

以上の他細線の振動数変化を利用した Maihak 形、主応力方向や破壊箇所の探知に便利な応力塗料の利用、弾塑やクリープの状態を測定する De Forest の引掻き式や、バーニヤ式などそれぞれの状態に応じたさまざまな形式が考えられている。詳細は文献 1), 2) などを参照されたい。

(2) 測定されたひずみ量と応力との関係

既述のように、応力測定法にはひずみ量の測定による場合が多い。一般に固体ではひずみと応力との間には $\sigma = f(\epsilon)$ なる関係があり、その関係式がわかっておれば、ひずみ量 ϵ を求めることにより応力 σ を決めることができる。今物体内の任意の点に直角座標 x, y, z を取れば、その点における3軸方向の垂直応力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は一般化された Hooke の法則として、つぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2G \left(\epsilon_x + \frac{\Delta}{m-2} \right), \quad \sigma_y = 2G \left(\epsilon_y + \frac{\Delta}{m-2} \right), \\ \sigma_z &= 2G \left(\epsilon_z + \frac{\Delta}{m-2} \right) \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ただし G :せん断剛性率, m :ポアソン数,

$$\Delta: \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

最も簡単な場合は1軸応力状態で、しかもその方向がわかっておればその方向のひずみを測定すれば、応力は簡単に求められる。しかし2軸応力状態にあり、さらにその主応力方向がわかっていない場合には、簡単に応力状態は決められない。その場合には、まずつぎのようなことを考えておく必要がある。

a) 平面応力状態

一つの平面に平行な界面での応力が零の場合をいい、この平面内に直角座標 x, y を取れば、この平面に垂直な界面での応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_z$ はある値を有するが、 $\sigma_z = \tau_x = \tau_y = 0$ となる。しかるときは式(1)より、

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{m^2 E}{m^2 - 1} (\epsilon_x + \epsilon_y/m), \quad \sigma_y = \frac{m^2 E}{m^2 - 1} (\epsilon_y + \epsilon_x/m) \\ &\dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

また、 $\tau_z = G \tau_x, \tau_x = \tau_y = 0$

となる。平板における応力状態およびある程度大きな物体の表面における状態が、その場合に相当する。

b) 平面ひずみ状態

一つの平面に垂直な方向の変位が至るところ一定値にして、

$$\epsilon_z = \tau_x = \tau_y = 0$$

のような状態をいう。その場合には、

$$\epsilon_x = \frac{m+1}{m^2 E} [(m-1)\sigma_x - \sigma_y],$$

$$\epsilon_y = \frac{m+1}{m^2 E} [(m-1)\sigma_y - \sigma_x]$$

$$\sigma_z = (\sigma_x + \sigma_y)/m, \tau_z = \tau_x/G, \tau_x = \tau_y = 0$$

となる。したがって、平面応力と平面ひずみとは $\sigma_x + \sigma_y = 0$ とならぬ限り、一般には両立しない。

応力測定では平面応力状態にある表面ひずみを測定する機会が多い。その場合には、さらにつぎのような特性を考慮しておく必要がある。二つの主応力 σ_1, σ_2 は、

$$\sigma_1, \sigma_2 = (\sigma_x + \sigma_y)/2 \pm \sqrt{\{(\sigma_x - \sigma_y)/2\}^2 + \tau_x^2} \dots (3)$$

であり、主応力軸から逆時計回りに θ だけ回転したのが x, y 軸であるとすれば、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta, \sigma_y = \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta \\ \tau_x &= -(\sigma_1 - \sigma_2) \cos \theta \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

または、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= (\sigma_1 + \sigma_2)/2 + (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \cdot \cos 2\theta \\ \tau_x &= -(\sigma_1 - \sigma_2)/2 \cdot \cos 2\theta \end{aligned} \right\} \dots (4)'$$

二つの主ひずみを ϵ_1, ϵ_2 とすれば、

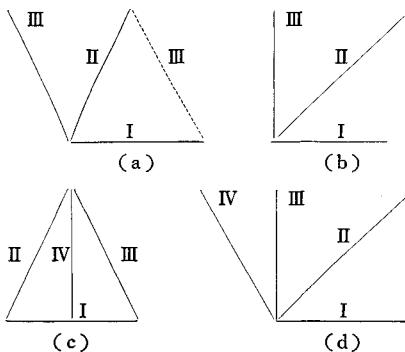
$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2)/2 \cdot \cos 2\theta \\ \tau_x/2 &= -(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2 \cdot \sin 2\theta, \epsilon_x + \epsilon_y = \epsilon_1 + \epsilon_2 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

なる関係がある。

既述のように、物体内のある点でのある界面に作用する応力は、その界面の方向により異なってくる。その関係の表示法としては、極線図、応力円、応力二次曲線、ラントの円、モールの円などがあるが、最もわれわれに関係深いのはモールの応力円である。

以上のような理論は、弾性論に詳述されているが、平面応力を測定するには三つの垂直ひずみを測定すればよい。平面問題で一つの点のひずみ成分は3個(たとえば $\sigma_x, \sigma_y, \tau_x$)であるから、それがわかればひずみ状態は定まり、応力成分も決定できる。しかし、応力測定では垂直ひずみは求めやすいが、せん断ひずみの測定は困難である。それで3方向の線分について垂直ひずみを測定して、主ひずみと主ひずみ軸とも決定することにしてある。もちろん任意の3方向(全部の交角が直角の整数倍の場合を除く)の垂直ひずみが求められると、主ひずみ軸をも決定することができるが、ここでは実用的な方向の場合

図一 1 ひずみ測定方向の組合わせ方式



について考えるとつぎの4つがある。

① 等角形：3方向が図一(a)のように60°の方向の垂直ひずみを測定する。② 直角形：図一(b)のように直角方向とそれを等分する方向との垂直ひずみを測定する。

このほかに4方向を同時に計測する4ゲージ形のものもある。それらの測定方法にはつぎの2方法がある。

③ Tデルタ形：図一(c)のように等角形に、さらにその一辺に垂直方向を追加したもの。④ 二重直角形：図一(d)のように直角形にさらに一方向を追加したものの。

いま測定ひずみと応力のきめ方を一例として等角形について示せば、つぎようになる。詳細は文献2),3)など参照されたい。いま $(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2 = A, (\epsilon_1 - \epsilon_2)/2 = B$ とおけば、式(5)の第2式より、

$$\epsilon_x = A + B \cos 2\theta$$

したがって、図一(a)にてI, II, III 3方向の測定ひずみ量を $\epsilon_I, \epsilon_{II}, \epsilon_{III}$ とし、一つの主ひずみ方向Iから逆時計方向にI, II, III 方向までの角度を $\theta_{1I}, \theta_{1II}, \theta_{1III}$ とすれば、つぎの式が得られる。

$$\epsilon_I = A + B \cos \theta_{1I}$$

$$\epsilon_{II} = A + B \cos \theta_{1II} = A - \frac{B}{2} (\cos 2\theta_{1I} + \sqrt{3} \sin 2\theta_{1I})$$

$$\epsilon_{III} = A + B \cos \theta_{1III} = A - \frac{B}{2} (\cos 2\theta_{1I} - \sqrt{3} \sin 2\theta_{1I})$$

以上の3式より、

$$A = (\epsilon_I + \epsilon_{II} + \epsilon_{III})/3$$

$$B \sin 2\theta_{1I} = (\epsilon_{III} - \epsilon_{II})/\sqrt{3}$$

$$B \cos 2\theta_{1I} = (2\epsilon_I - \epsilon_{II} - \epsilon_{III})/\sqrt{3}$$

が得られ、さらに、

$$B = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_I - \epsilon_{II})^2 + (\epsilon_{III} - \epsilon_{II})^2 + (\epsilon_I - \epsilon_{III})^2}$$

$$\tan 2\theta_{1I} = \frac{\sqrt{3}(\epsilon_{III} - \epsilon_{II})}{2\epsilon_I - \epsilon_{II} - \epsilon_{III}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(\epsilon_{III} - \epsilon_{II})}{(\epsilon_I - A)}$$

この $2\theta_{1I}$ をいずれの象限に選ぶかが問題であるが、もし $\epsilon_I > \epsilon_{II}, \epsilon_I > \epsilon_{III}$ であるとすれば、 θ_{1I} はIの方向から $\pm 45^\circ$ の間にあることになる。しかし、実際は $\pm 30^\circ$ の間に θ_{1I} は定められることになる。このことはモールのひずみ円からわかる。この角度 $2\theta_{1I}$ は図式により求められるが、詳細は文献2), または3)などを参照されたい。

以上により主ひずみ ϵ_1, ϵ_2 およびその方向 θ がきまると、既述の諸式(3),(4),(5)などより所要方向のひずみおよび応力を定めることができる。

このような表面ひずみから応力を測定する場合、なお留意すべき点は、抵抗線ひずみ計に対してはゲージに対する横感度の影響、角部や切欠部のような応力集中発生箇所付近における応力の変動の影響などである。この影

響をできるだけ少なくするには、ゲージ長の小さいものを用いねばならぬ。

以上は、二次元的な平面応力の場合であるが、ダムのようなソリッドな構造物の場合には、式(1)を基にした三次元的な取扱いをせねばならぬ。そしてひずみの測定に対しては、一つの主応力方向がわかっている場合には、その方向とそれに垂直な平面内に4ゲージ、計5ゲージを設置し、全然未知の場合には、一般的に9ゲージを設置する。その理論的根拠については、文献6)を参照されたい。

(3) 測定計器とその特性、適用性

現在、土木構造物の応力測定に用いられている主なる方法については(1)の項で略述したが、本項では比較的使用度の高いと思われるものにつき、その特長、性能、適用性および取扱かい上の注意事項を方法別に述べよう。

a) 機械的ひずみ測定法の特性とその適用性

電気抵抗線ひずみ計以外のひずみ計は2つの標点で測定物体に取りつけ、2つの標点を結ぶ方向の標点間の相対変位 ΔL を測定して、ひずみおよび応力を求めるもので、ひずみ計の大きさの関係から一つの測定点には、1個のひずみ計を取付けることになっているので、(2)の項で述べたような弾性論的な根拠にかける点があり、一般的にいて、測定感度とともに精度の点にも問題があるが、工学的実用性には差しつかえない。2つの標点に取りつけられたひずみ計は、測定物体の伸縮により生じた相対変位 ΔL をてこ、ダイヤルゲージまたはこれら両者の組合せにより拡大して読み取るもので、てこ式としては、標点距離 L の比較的小さい(5~25mm程度)HuggenbergerやOkhuizen形などがあり、大きいものではダイヤルゲージ式のWhittmore形($L=50\sim 250$ mm)、てこダイヤルゲージを組合せたBerry形($L=250$ mm)などがある。

測定可能な最小ひずみ量は L の大小により、また拡大率 α により異なるが、 $L=10$ mm、目盛の最小読みを0.2mmとすれば、Huggenberger形では $\alpha=2000$ であるから、

$$\epsilon_{r\min}=0.2/L\cdot\alpha=1\times 10^{-5}$$

したがって、鋼構造物における測定可能な最小応力は、

$$\sigma_{\min}=E\epsilon_{r\min}=0.21\text{ kg/mm}^2=21\text{ kg/cm}^2$$

となる。なお、

Whittmore形のひずみ測定範囲は

$$\epsilon=1\times 10^{-2}\sim 1\times 10^{-5}$$

Berry形のひずみ測定範囲は

$$\epsilon=1\times 10^{-2}\sim 5\times 10^{-5}$$

である。なお、機械的ひずみ計は標点に対する接点状況

が測定精度に影響を与えるので実施上この点に注意を要する。特に“Contact Strain Gauge”の一種であるWhittmore形では、この傾向が大きい。しかし、この形はあらかじめ標点を設置しておけば、任意のときに測定可能で、実構造物の長期間測定用として利用できるが、設置状況には個人差を生じやすく、また測定値にむらが生じやすいので注意を要する。その他の形式については、文献1), 2), 3)などを参照されたい。

機械的ひずみ計は測定感度の点に多少不満足な点があるが、機構が簡単にして自然現象の影響も余り受けないので、測定結果にはかなりの信頼性がある。したがって、本形式は鋼構造物やコンクリート構造物の静的な表面応力測定に適している。しかし同時多点測定が困難、動的ひずみや遠隔観測が不可能である。

b) 電気的測定法の特性とその適用性

電気的測定法には、一部既述のように応力またはひずみを測定するのに、まず適当なピックアップによって測定せんとする量を電気量に変換する。この種のピックアップには数種の形式があるが、この原理は応力またはひずみ量の変化を電気抵抗、容量またはインダクタンスなどの変化に対応させて取り出さんとするもので、そのほかピエゾ効果を利用して力を測定する方法や、光電管を用いて微小変位を測定する方法もある。これらの方法にはそれぞれ一長一短があり、利用にあたっては測定対象物の状況により適当に取捨選択せねばならぬ。

① 抵抗形ひずみ計：本形式ひずみ計の原理についてはかなり古く、19世紀中葉Lord Kelvinが力の測定に試みたことがあるといわれている。この形式にはまた電気抵抗の状況により接触抵抗形、流体抵抗形、金属抵抗線形の3種があるが、ここには金属抵抗線形についてのみ述べることにする。この形式では金属の電気抵抗がきわめてわずかながら作用応力により変化することを利用したもので、歴史的にはかなり古く、長い間の研究の結果、電気抵抗の増大、応力-抵抗変化の直線性を有する材料や微小抵抗変化に対する増幅器の開発などにより第二次大戦中アメリカにて実用化に成功し、その後急速に一般に普及したもので、いまや応力測定における最高の地歩を占めるに至った。

抵抗線には普通抵抗の大きい細い針金を使用しているが、最近では金属箔も用いられている。ひずみ計のピックアップ(普通ひずみゲージといっている)には、1軸用、3軸用、4軸用とがあるが、つぎのような特色を有している。

- (1) 標点距離 L をかなり広範囲に取れる。市販品では $L=3\sim 70$ mm、特殊のものでは1.5~200mmとなっている
- (2) ゲージの質量および容積が小さい

- (3) 被測定体の応力状態を乱さずに測定することができる
- (4) ゲージさえ接着できればかなりせまい場所でも測定できる
- (5) 遠隔操作が容易である
- (6) 多数点を短時間または同時観測ができる
- (7) 静的、動的いずれにも使用できる

なお、ひずみと電気抵抗変化との間には、つぎのような関係がある。すなわち、

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta R}{R}, \quad \alpha = 1 + 2/m$$

ただし、 $R = \rho L/A =$ 電気抵抗、 ρ ：比抵抗、 A ：抵抗線の断面積

通常抵抗線には直径 0.025 mm の金属線を用いているが、これはできるだけ短くして大きな抵抗を持たせること、発生熱量の発散をよくして温度上昇を起こさせないこと、接着性をよくして被測定体と同じひずみを起こさせることなどのためである。なお、ゲージは所要の長さにした金属細線（または箔）を 2 枚の良質な薄い台紙ではり合せたもので、これをペーパーゲージといっているが、最近長期間絶縁性に耐えるものとしてポリエステルやベークライトゲージなどがつくられている。また、高感度用としては半導体ゲージがある。なお、市販のゲージでは R 、 α および許容電流を示してあり、 R は（普通 120 Ω であるが）5~1 000 Ω 特に高速の衝撃応力測定用としては 10 k Ω のものもある。また $\alpha = 1 + 2/m$ をゲージ率、またはひずみ感度係数といっているが、弾性論的にいえば $\alpha = 1.6$ であるのに対して、ゲージに対して測定すれば約 2.0 となる。 α は金属線の材料やゲージの寸法により異なり、この値はゲージ表に記載されている。

抵抗線にはニッケル系の合金が用いられているが、その一例アドバンス線の特性は直径 0.025 mm に対して、

$$R = 9.6 \Omega/\text{cm}, \text{ 抵抗温度係数 } 20 \times 10^{-6} (10^\circ\text{C に対して})$$

$$\text{銅に対する起電力 } 43 \mu\text{V}/^\circ\text{C}, \alpha = 2.0 \sim 2.1$$

である。なお、抵抗線ひずみ計では、温度変化の影響を受けやすいが、それは、

- ① 熱起電力の発生
- ② 線の抵抗が温度により変化する
- ③ 被測定体自身が熱応力を起こすので、そのひずみがゲージにひずみを起こさせる

などのためである。したがって、①、②の影響除去には、測定装置内に温度補償装置を入れることにしている。測定装置には、直流および交流用の電橋が考えられるが、直流的な極微電気抵抗→電圧変化の増幅には技術的に問題があり、静的応力または毎秒数百サイクルまでの動的応力には交換ブリッジの方法を取っている。なお、この

方式によるひずみの最小測定量は 10^{-6} 程度である。測定装置の詳細については文献 1), 2), 7) などを参照されたい。

抵抗線ひずみ計の使用上特に問題となるのは、接着時におけるゲージの絶縁性で、防水には万善の措置を考えねばならぬ。それらに対する対策については文献 8) を参照されたい。

動的装置関係については、次回の振動測定の前で言及する予定である。また容量形およびインダクタンス形、振動線形などの詳細については文献 1), 2), 3) などを参照されたい。

c) 光弾性利用による応力測定法の特性と適用性

本測定法には、既述のように暗室内で行なう実験室向きと、実構造物に貼付または埋設の 2 方法がある。実験室内で行なう光弾性実験では、エポキシ樹脂のような均質等方性の樹脂でしかも光弾性感度の高いものを模型材料に用い、測定せんとする構造物と幾何学的に相似の模型に所要の負荷を与え、それに偏光を投射して偏光の干渉状態から応力の分布状態を求めようとするもので、光の干渉により生ずる光弾性の縞次数 n は次式で示すように二つの主応力差に比例するという原理を用いたものである。

すなわち、

$$n = \alpha t (\sigma_1 - \sigma_2)$$

ここに、 α ：模型材料の光弾性感度 ($\text{kg}^{-1} \cdot \text{mm}$)

t ：模型材料の板厚 (mm)

である。この方法では二次元的な応力状態のみならず、三次元的な応力状態も求められる(文献 9) 参照)。三次元実験には普通応力（またはひずみ）凍結法を用いている。本方法では自重による応力も測定することができる。

① 接着（または貼付）式による方法：本方法は一種の皮膜法である。皮膜法とは被測定物の表面に薄面をもたせ、それに光弾性感度の高い薄い ($t=1 \text{ mm}$ 程度) 皮膜をはり付け、これに偏光を投射して皮膜の光弾性縞の模様を調べ、それより母体の表面応力を求めんとするもので、測定装置としては反射式が必要となる(文献 9) の 3. 参照)。本方法を実用化したのは Zandman で、アメリカではすでに皮膜材料とともに市販されている。本方法では $\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)$ や主応力の方向を探知するのに便利であるが、応力の分離は困難であり感度もあまりよくない。

接着式の第二の方法として Oppel の方法がある。本方法には 1 軸用 (Photoelastic Strain Gauge) と 2 軸用 (Photoelastic Strain Compass) の 2 種が市販されている。

これらの利点は、(1) 小型で丈夫、しかも取付けが簡単であること

大きさは Gauge で

$$\frac{1}{4}'' \times \frac{1}{2}'' \times \frac{1}{10}'' , \quad 2\frac{1}{2}'' \times \frac{1}{2}'' \times \frac{1}{10}'' \text{ の 2 種}$$

大きさは Compass で

$$\left(\text{直径 } 9/16'' \right) \times \left(\text{厚さ } 1/10'' \right) , \quad \left(\text{直径 } 1\frac{1}{4}'' \right) \times \left(\text{厚さ } 1/10'' \right)$$

の 2 種

(2) 増幅器, 指示計などを用いずに直接読み取ることができること

などで, ゲージ内に 1 面反射面の光弾性材料 (ゲージ板は厚さ 2 mm のエポキシ樹脂) と偏光板とを入れてある。しかし測定範囲は $50 \times 10^{-6} \sim 15000 \times 10^{-6}$ で, 最小測定応力はコンクリートで約 10.5 kg/cm^2 , 鋼で約 1.05 kg/mm^2 , Huggenberger 形と同程度で, 感度の点では電気抵抗線形にかなり劣る。しかし, 取扱いがきわめて簡単にして長期かつ任意の時に観測できるという利点を有している。詳細は文献 8) または 3) を参照されたい。

② 埋設法による方法: 本方法は円筒形硝子をコンクリート構造物の表面に埋設して, その部分の応力を測定せんとするもので, 埋設法に注意すればかなりの信頼性がある。ただし感度は,

$$\sigma_c = 5 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$$

である。詳細は文献 9) の 6. を参照されたい。

d) 残留応力の測定法

残留応力の測定は, 溶接後の構造物強度判定や実構造物の死荷重による応力測定などに対して重要な問題であるが, 現在なお不満足な状態である。現在採用されている方法としては, X線やアイソトープ利用による直接法と, Gunnert 法や Mathar 法のような測定箇所を溝や孔を開けて応力解析を行なって調べる間接法とがある。原則としては非破壊的な意味において前者が好ましいが, 現在ではなお感度が不十分である。詳細は文献 1), 2),

3) および 10) を参照されたい。

参考文献

- 1) M. Hetenyi 編: Handbook of Experimental Stress Analysis.
- 2) 応力測定技術研究会編: 応力測定法.
- 3) 高田・大久保: 現場における応力の測定, 最新土木施工法講座 25 巻
- 4) Proceeding of the Society for Experimental Stress Analysis.
- 5) 西田正孝: 応力測定法.
- 6) 3次元関係
 1. Tölke: Wasserkraftanlagen S. 388~417
 2. 既出 3) II 編
- 7) 抵抗線ひずみ計関係
 1. 三宅・加藤: 電気抵抗線ひずみ計
 2. 既出 2)
- 8) 抵抗線ひずみ計の防水, 防湿処理関係
 1. 富田忠二: 抵抗線ひずみ計の防湿について, 非破壊検査, 7巻3号.
 2. 山口・今政: 抵抗線ひずみ計の加圧水中でのひずみ計測について, 非破壊検査, 7巻5号.
 3. 高橋幸伯: 抵抗線ひずみ計の耐水処理, 非破壊検査, 10巻3号.
- 9) 光弾性関係
 1. M.M. Frocht: Photoelasticity I, II
 2. 既出 2)
 3. 辻・西田・河田: 光弾性実験法.
 4. G.U. Oppel: Photoelastic Strain Gages. Proceeding of the Society for E.S.A. Vol. XVIII No. 1, 1961.
 5. Joseph Schwaighofer: Application of Photoelastic Strain Gages. Proc. of the S.E.S.A., Vol. XVIII, No. 2, 1961.
 6. 高田・湯田: 光弾性を利用した重量構造物の応力測定について, 土木研究所報告, 89号.
- 10) 残留応力測定法関係
 1. 既出 1)
 2. 西田正孝: 西田式応力測定法について, 非破壊検査, 9巻5号.
 3. 井崎陸夫: 最近の非破かい検査法について, 非破壊検査, 3巻1号.

構造工学における最近の諸問題

内容: 最近のコンクリート舗装 / 伊東茂富 ■ 軽量コンクリートの諸問題 / 後藤幸正 ■ 高張力異形鉄筋について / 国分正胤 ■ 最近の支保工および型わく / 上前行孝 ■ 最近のコンクリート混和材料 / 三浦一郎 ■ 最近の注入工法における諸問題 / 樋口芳朗 ■ 最近の鋼構造の継手 / 小西一郎 ■ 高張力鋼使用上の問題点 / 村上永一 ■ 薄板構造の設計施工における諸問題 / 奥村敏恵 ■ 鋼杭基礎における諸問題 / 石井靖丸 ■ 鋼橋架設上の問題点 / 田中五郎 ■ 構造物の耐震設計および工法 / 久保慶三郎 ■

体 裁: B 5 判 本文 8 ポー一段組 303 ページ

定 価: 1 500 円 会員 特 価: 1 200 円 送 料: 150 円