

光弾性材料による遠隔応力測定システムの開発

STUDY ON REMOTE MEASURING SYSTEM OF STRESS BY PHOTOELASTIC MATERIAL

御手洗 良夫^{*} ・ 大嶋 孝二^{*}
Yoshio MITARASHI and Kohji OHSHIMA

A new stress measuring method, in which photoelastic material is used, is being developed in order to improve the shortcomings of paper strain gauges such as their sensitivity to moisture and complicated handling of wires between measuring points and apparatus when using a number of wires. Compressive tests were carried out to clarify the effectiveness of this method using concrete pieces on which both paper strain gauge and photoelastic gauge were stuck. Field tests were also performed to evaluate the durability of the photoelastic gauges and the reliability of the whole stress measuring system. As a result, it is concluded that this method can be put into practical use in field measurements. This paper describes the outline of our study on establishment of this method.

Keywords: remote photoelastic measurement, tunnel stress measurement, hue analysis, CCD camera

1. まえがき

従来、構造物に荷重が作用した場合、その発生歪みは構造物の表面にペーパーストレインゲージを貼り、その電氣的抵抗を測定し求めることが多かった。構造物が円形の場合には、構造物の内空変位を測定しひずみを算定した。

ペーパーストレインゲージは、測定ポイントから測定計器を設置している所までコードを這わせる必要があり、測定ポイントが多くなるとコードの管理が煩雑になる。特に、トンネル構造物のように狭い空間ではコードが施工に支障をきたすことも生じる。また、湿気に弱いという弱点がある。

こうした点を解消するために、光弾性材料を用いた遠隔応力測定システムの開発を行った。

光弾性材料による応力測定技術は、古くから研究され確立されており実験方法として多くの成果をあげている。しかし、光弾性材料を現場に適用している例は少なく、遠隔測定を行っていることはほとんどない。

研究は、まず基礎実験としてコンクリート供試体による圧縮試験、鋼材による引張試験を行い、この測定システムの有効性を検証した。次に、現場に適用出来るかどうかを確認するために、2つのトンネル覆工コンクリートに光弾性ゲージを貼り、現場実験を行った。

本報文は、光弾性材料による応力測定システム、実験結果、今後の研究について言及したものである。

2. 光弾性応力解析の原理¹⁾

平板に垂直すなわち σ_z 方向(図-1)の偏光を通過させると、複屈折によって生じる2光波の位相差が平板面内の主応力差に比例する(Brewsterの法則)というのが2次元光弾性の基礎をなす関係式(1)である。

*正会員 (株)熊谷組 技術開発本部

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} c t (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

δ : 複屈折された 2 光波の位相差

λ : 使用単色光の波長

c : 材料の光弾性定数

t : 板厚

位相差 δ の測定によって平板面内の $(\sigma_1 - \sigma_2)$ を知ることができるから、光弾性応力解析は δ の測定に帰結する。円偏光の場合は、光の強度 $I = A^2 \sin^2 (\delta/2)$ の関係があるので、光の強度 I を測定出来れば δ を知ることが出来る。 I は $\delta = 2\pi N$ の時、零となり暗くなり、暗い点が連なった線ができる。この線を等色線といい、 δ は等色線の次数 N を測定した求まるので (1) 式は、(2) 式で表される。

$$N = \beta t (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\beta = c / \delta \quad (\text{光弾性感度})$$

等色線は、最初の線を ($N=0$) を零次、次の線 ($N=1$) を 1 次、次を 2 次と順次呼ぶ。

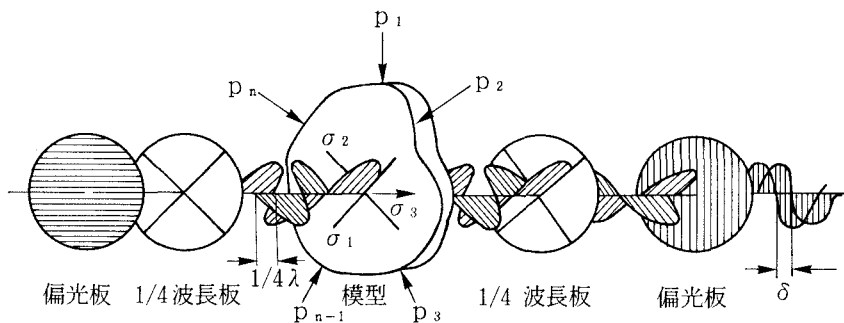


図-1 複屈折の位相差

今回の研究は、構造物の表面に光弾性ゲージを貼付して測定する光弾性皮膜法を採用するので (2) 式は次のようになる。

$$N = C d (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

C : 光弾性係数

d : 光路程 (垂直入射なら $d = 2t$ t : 皮膜厚さ)

図-1 中の模型より右側に示している部分が反射光となり、光弾性皮膜法ではその反射光を測定する。光源に白色光を用いた場合、応力が 0 から順次大きくなるにしたがって白色光の中から、各波長の光が順次消光してゆき、その結果の干渉色をとらえる。後述するが、測定は応力レベルによって変化する色をとらえ偏光板を回転させ、初期の色にあわせ、その時の偏光板の回転量で N を求める。

(3) 式よりひずみ ε は (4) 式で求まる。

$$\varepsilon = m \cdot N / (d \cdot \beta) \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$m = 1 + E_1 / E_2 \quad E_1 : \text{ゲージの弾性係数}$$

E_2 : 対象物の弾性係数

β : 光弾性感度

3. 光弾性応力測定システム

測定システムの概略図を図-2に示す。

遠隔測定を行えるように望遠機能付測定器を作成した。

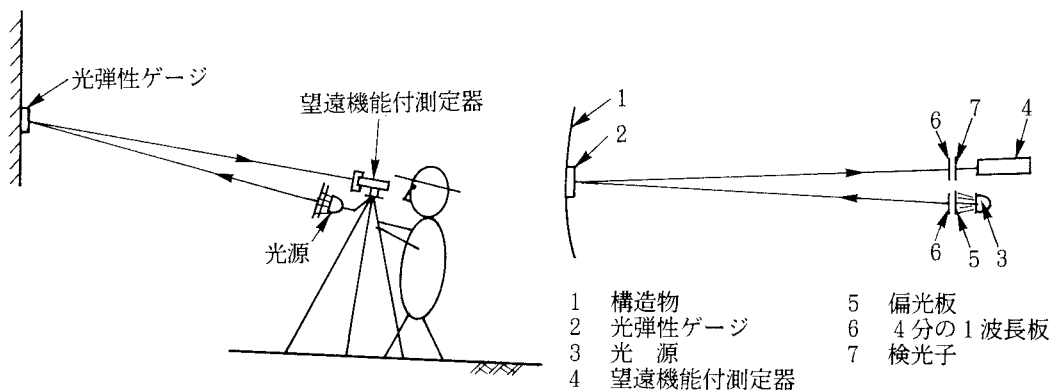


図-2 測定システム概略図

測定手順は次の通りである。

- ① 光弾性ゲージを測定したい方向に貼る。
- ② 装置の検光子（回転機構となっている）を回し、ゲージの中心の色が紫色（鋭敏色）となる位置にあわせ、その値を初期値とする。
- ③ 対象物に応力が作用した状態ではゲージの色が変化するので、検光子を回転させ紫色に合わせる。
その時の回転量の値がNであり、(4) 式よりひずみ ε を算定する。検光子は時計回りが引張ひずみ、反時計回りが圧縮ひずみとなる。

光弾性ゲージは、エポキシ樹脂材料で幅1 cm、長さ5 cm、厚さ5～6 mmの大きさで、応力凍結したものを使用した。今回のゲージの作成手順は ① 無歪み板の作成、② 光弾性ゲージの切り出し、③ 光弾性ゲージの応力凍結(130°で4時間放置、要求測定範囲・分解能に応じた加重、4℃/時間で徐冷)、④ 最終検査で行う。

4. 基礎実験

光弾性ゲージを用いた遠隔応力測定システムの精度を調べるために次の基礎実験を行った。

- (1) コンクリート供試体による一軸圧縮試験

- (2) 鋼材による引張試験

ここではコンクリート供試体の実験について述べる。

図-3に示す10×10×20cmのコンクリート供試体の前面と背面に、光弾性ゲージとペーパーゲージを供試体のセンターの左右に貼付し、圧縮試験を行った。コンクリートの一軸圧縮強度は約350kgf/cm²であったので、完全に弾性領域での測定を行うためにコンクリート最大応力が150kgf/cm²になるように載荷した。ペーパーゲージはデジタルひずみ測定器で、光弾性ゲージは望遠機能付測定器で、供試体からの距離が1.0 mと7.0 mの所から測定した。

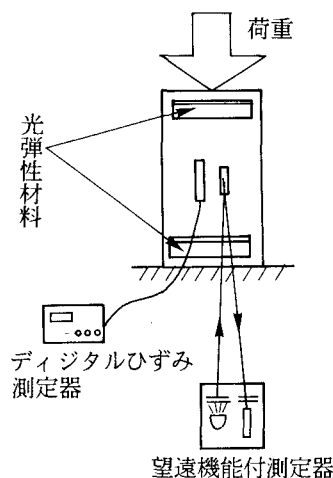
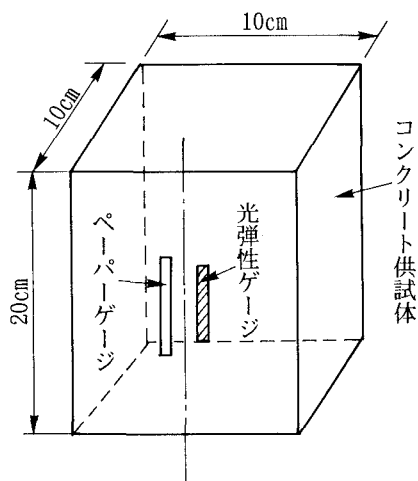


図-3 応力測定基礎実験

測定結果の一例を図-4に示す。

3者ともほぼ同じ値を示しているが、載荷重が大きくなるとひずみ値のかい離が大きくなり、ペーパーゲージと光弾性ゲージの誤差は約6%であった。この理由としては、①コンクリート供試体上面・下面は平行でないため、必ずしも等分布載荷とはなっていない ②コンクリート材料は均質ではない 等が挙げられる。

そこで、供試体前面の上部と下部の横方向に光弾性ゲージをはり、載荷分布状態を調べた。その結果、ペーパーゲージを貼った方の加重が大きかった。この載荷分布を作用させた一軸圧縮試験のシミュレーションをFEMで解析した結果によると、偏荷重が作用した時のペーパーゲージと光弾性ゲージを貼った位置でのひずみ値の差は6%となり、計測値と解析値は一致した。従って、遠隔から光弾性ゲージで測定しても十分な精度を得られ、有効であることが判明した。

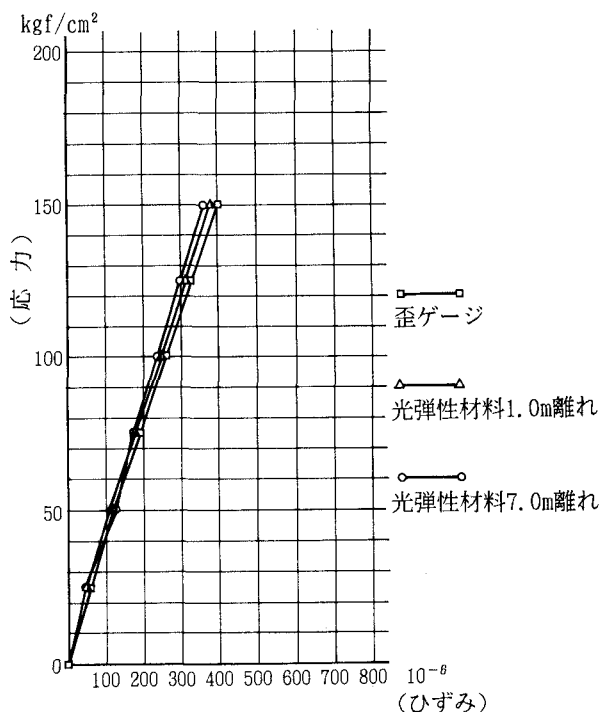


図-4 ひずみ測定結果

5. 現場実験

実験室での有効性は確認できたが、トンネル内での環境条件で使えるかを確認するために、現場実験を二つの現場で実施した。一つは近接施工するトンネルの掘削による影響を、既設トンネルの覆工に光弾性ゲージをはり測定した。もう一つはグラウトの覆工に対する影響を測定した。

図-5に近接施工の影響を測定した光弾性ゲージの設置例を示す。この場合は一断面に7枚のゲージを貼った。

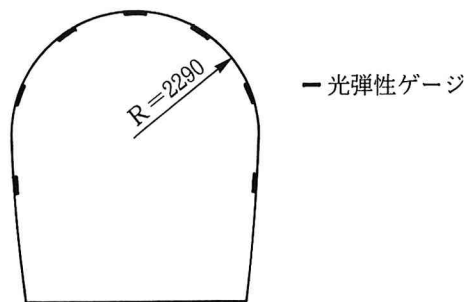


図-5 光弾性ゲージ配置図

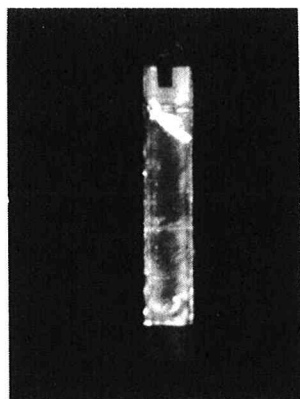


写真-1 光弾性ゲージ

ここでの試験項目は次の通りである。

- ① 現場における光弾性ゲージの取り付け方法
- ② 現場の環境での光弾性ゲージの耐久性
- ③ 湧水・湿気あるいは埃の影響
- ④ 温度変化の影響
- ⑤ 遠隔測定距離

ゲージの取り付けは、覆工表面をグラインダーで整形し、接着剤で固定した。湿気や水のある所ではドライヤーで乾かしてから作業した。当初、交通の影響でゲージが剥げるのではないかを懸念し、固定方法を種々考えたが、接着剤だけでも信頼性は得られるとの結論となり、補助的なことは行わなかった。ゲージ設置後5ヵ月経過しているが、今のところ測定には支障ない。

光弾性材料の温度変化による影響は実験結果、 $30 \sim 40 \mu / ^\circ\text{C}$ という値であった。現場測定の経時変化図によると、ほとんど影響ないようであるが、トンネル内ということと、時期的なものがあると考えられる。

基本的にはハンディタイプの赤外線温度計を用いた温度測定を行い、温度補正を行う。遠隔測定距離については、現在の測定器を用いればトンネル内では10m程度の離れは支障なく測定できる。

2つの現場実験の結果、以下の改善点が把握された。

- ① 色を判別するので個人差がでる。
- ② 光弾性ゲージの測定ひずみ領域を 400μ 程度としているため、発生ひずみ量によっては、圧縮と引張応力の判定が難しいこともある。

①については、6. で述べるような光学的自動応力解析の研究をすすめ、②については測定レンジを拡げたゲージを使用し、改善して行く。



写真-2 計測状況

6. 光学的応力解析システム

現在の測定方法は、人が色を判定し検光子の回転角に基づきひずみを算定する。この方法は、慣れないと個人的な誤差を生じることもある。物の色相を自動的に判定出来れば、この問題は解決できる。

色相は、光の三原色（赤(R)、緑(G)、青(B)）によって表されるので、CCD搭載の電子カメラで物体を撮り、RGB信号の各レベルを捉えれば、色の判定が出来る。偏光板（検光子）の回転角と光弾性ゲージの色相の関係が把握できれば、ある応力状態の光弾性ゲージを電子カメラでとらえ、そのアウトプットから色相を判定し、ひずみ値を求めることができる。

光学的応力解析システムの構成図を図-6に示す。偏光板の回転角度と色相解析結果の関係図の一例を図-7に示す。この結果、両者には明確な相関があり、光学的応力解析は実用化が可能である。

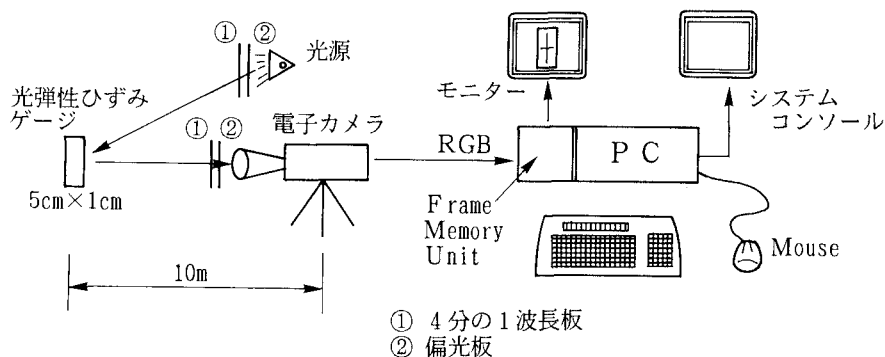


図-6 光学的応力測定システム構成図

7. あとがき

光弾性ゲージを用いた遠隔応力測定システムの開発を行ったが、現場適用のための改善点が明確になり、比較的容易に改善可能であった。今後、光学的応力解析システムを研究し、現場で簡単にかつ迅速に精度の高い測定解析ができるシステムを確立する。既設トンネルの覆工コンクリートのみならず、新設トンネルの吹付けコンクリートへも適用し、都市部の地下大空洞の施工時の支保の挙動などの把握に活用していく。

8. 参考文献

- 1) 辻 二郎：光弾性実験法，日刊工業新聞社，1970

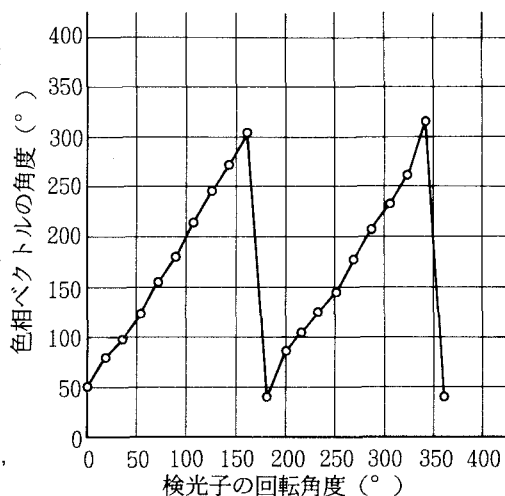


図-7 回転角度と色相解析結果