

不透明材料の粗い表面の変位測定に供し得る光弾性実験法

A PHOTOELASTIC METHOD FOR DISPLACEMENT MEASUREMENT ON ROUGH SURFACES OF OPAQUE MATERIALS

小長井一男*・池田俊雄**・北原正一***・松浦 隆****

By Kazuo KONAGAI, Toshio IKEDA, Shouichi KITAHARA and Takashi MATSUURA

A new photoelastic experimental method for displacement measurement on rough surfaces of opaque materials was developed. In the method, a surface of a test specimen, such as that made of weak rock, mortar or soil, is coated with photoelastic transparent polymer, and the surface of the polymer coating is fixed by a rigid transparent plate. Accordingly, displacement on the surface of the test specimen is transformed into shear strain in the photoelastic coating. The shear strain induced in the coating can be easily detected by analyzing dispersive photoelastic fringes which appear when a polarized laser beam parallel to the surface of the specimen passes through the coating. This method can be expected as one of the simplest and useful methods for detecting minute deformations of opaque specimens.

1. 緒 言

種々の荷重状態にある構造物などの応力，変形を検討するうえで，模型実験の果たす役割は大きい。これらの実験的解析手段の中でも，光弾性実験法は，弾性論では取扱いが困難な複雑な境界を有する物体内部の全体にわたる応力解析が可能であり，特に縞次数がそのまま主応力値を与える自由表面上での応力集中の状態を精密かつ容易に求められるという点では他法の追従を許さない¹⁾。しかしながら，一般的な光弾性実験法は，本質的には「実材料」でなく，透明なモデルを用いた応力測定実験法であることから，複雑な変形特性を有する，土，コンクリート等の材料を扱う土木工学の分野では，モデル材料の選定にあたり細心の注意を払う必要がある。

「実材料」に適用可能な特殊光弾性実験法として，光弾性被膜法²⁾は現在のところ唯一無二のものである。この方法は，測定しようとする物体の表面に光弾性材料の

被膜を接着して偏光を入射し，反射光を解析して得られる等色線次数が下地表面の主ひずみ差に比例することから下地表面のひずみ分布を求めるものである。この手法は実材料のひずみを被膜のひずみに変換してこれを検出する方法であるため，被膜の材料に大きなひずみを許容し得るゴム状弾性体を用いれば，弾性域のみならず塑性域にもわたるひずみを検出することができる。被膜法が塑性解析に用いられることは非常に優れた特長であり，この方法をきわめて魅力的なものとしている。しかし，この方法は反射光を用いて等色線縞次数を求めるものであることから，解析面が金属などのような鏡面を有するものでなければならず，取扱い可能な試験体が限定されてしまう。

著者らは，土，モルタル，軟岩のような実材料を用いて作製された粗い表面を有する模型の変形解析を容易かつ精密に行い得る光弾性実験法を考案した。この光弾性実験法を，散乱光弾性被膜実験法 (Dispersive Photoelastic Coating Method) と仮称し，その原理と実験方法および簡単な実験例について報告する。

2. 散乱光弾性被膜実験法の概要

(1) 原 理

この実験法は，実材料を用いて作製された実物試験体

* 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系 (〒949-54 長岡市上富岡町 1603-1)

** 正会員 理博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系 (同上)

*** 正会員 工博 (株)熊谷組専務取締役 (〒162 新宿区津久戸町 17-1)

**** 正会員 工修 (株)加賀田組 (〒950 新潟市八千代 1-5-32)

(下地材)の解析面に、光弾性感度が大きく、せん断剛性の小さい透明な被膜を接着して、さらにその被膜の表面変位を、透明で剛な平板(ガラスかアクリル)で拘束することで、下地材の解析面の変位 Δu_y を、被膜のせん断ひずみ γ に変換し、これを検出するものである (Fig.1).

この際、 Δu_y 、 γ および被膜の厚さ B の間には次なる関係式が成立する。

$$\Delta u_y = B \cdot \gamma \dots\dots\dots (1)$$

被膜内のせん断ひずみは、散乱光法を利用することでこれを容易に検出することができる。理論的な詳細は、成書^{1),2)}にゆずり、ここでは、検出法の概略を述べるにとどめる。

Fig.2 に示すように被膜の側面から、下地表面に沿って、平面偏光状態のレーザー光線を入射し、これを図中の視線方向から観測すると、せん断ひずみを有する被膜内を通過するレーザー光線は、明暗の連続する破線上の散乱光として認められる。散乱光の干渉縞を観測する場合、主応力方向と 45° 傾いた方向から、この縞を最も明瞭に視察し得る。もし、視線の方向が主応力方向と一致した場合、干渉縞は全く認められない。したがって、本実験手法のように被膜の一面を透明な剛板で拘束した場合、視線はこの板の法線方向にとればよいことになる。

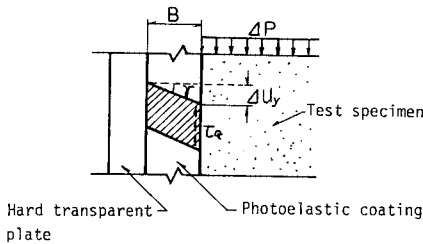


Fig.1 Transformation of displacement into shear strain in coating.

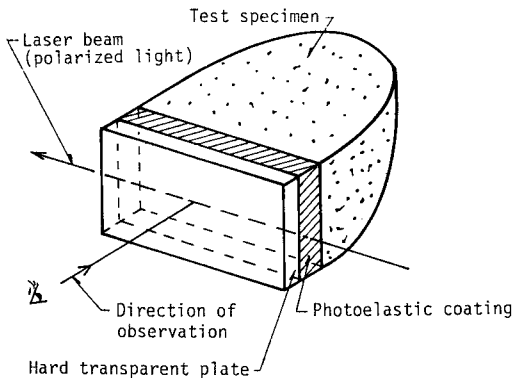


Fig.2 Photoelastic detection of shear strain in coating material.

入射点での明暗は、入射レーザー光線の偏光の軸の方向で決定される。偏光軸を鉛直にとった場合に、入射点での散乱光は暗くなり、以下明暗の繰返しパターンが続く。この入射点での暗部を $N=0$ とし、以下光軸 (z 軸) に沿って暗部に番号 N を付けていく。この N を縞次数と称する。縞の密度 (dN/dz) は、該当する地点において、レーザー光線 (z 軸) と直交する平面内の最大せん断ひずみ (γ) に比例する。

$$\gamma = \frac{1}{2G\alpha} \cdot \frac{dN}{dz} \dots\dots\dots (2)$$

α : 応力感度 (cm/kgf)

G : せん断弾性係数 (kgf/cm²)

したがって、式 (2) を式 (1) に代入することで、下地材の解析面の変位 Δu_y (cm) は

$$\Delta u_y = \frac{B}{2G\alpha} \cdot \frac{dN}{dz} \dots\dots\dots (3)$$

と求めることができる。さらにレーザー光線の入射方向を水平のみならず鉛直にもとり、これを走査することで下地材表面全体の鉛直、水平各方向の変位分布を算定することができる⁴⁾。

また $d^2N/dz \cdot dy$ を算定することで下地材のひずみ分布を求めることも可能である。ここで y 軸はレーザー光軸と直交し、下地解析面と平行にとられている。

本手法は、ターゲット、グリッドを模型表面に置き、この動きを可視光、非可視光 (X線) で撮影する、従来多用される方法と比較して、次の2つの特長を有する。第一に、観測面全面にわたる連続的な情報を抽出し得ること。第二に、被膜の光弾性感度、被膜厚、光源(波長、スペクトル形状等)を変更することで、大幅に分解能を可変調節し得ることである。特に第二の特長は、微小変形を精度よく検出するうえで重要な性質である。反面、本手法においては、供試体が予想を越えた大変形を生ずる場合、被膜貼付による補強効果の発現、被膜の剝離等が実験の阻害要因となる可能性がある。したがって、実験の目的、状況に応じ適切な被膜状況を設定することが必要となる。

(2) 被膜材料に要請される性質

先に述べた手法を適用するうえで、被膜材の選定は、

注1) 被膜にゴム状弾性体を用いた場合、被膜のポアソン比は0.5に近く、また被膜の解放面がきわめて少ないため下地材の被膜法線方向への変形は拘束され、Fig.1に示すような平面ひずみ状態に近い状態が生じていると考えられるが、もし被膜が柔らかく、かつポアソン比が0.5以下の場合には、下地のはらみ出しによるひずみの影響が重畳される。しかし、はらみ出しに伴う主ひずみの方向は、被膜法線方向とほぼ一致するため、Fig.2における視線方向から重畳分のひずみの影響は検出されない。よってこの場合も、式(3)による下地材解析面の変位評価は妥当である。

きわめて重要である。この被膜材に要請される性質は、根本的に通常の光弾性被膜法に関するそれと大差ない。すなわち、

- (1) 主屈折率差 Δn とせん断ひずみ γ の良好な比例関係
- (2) 高いひずみ感度 ($G \cdot \alpha$)
- (3) 大きい最大ひずみと小さいせん断剛性
- (4) 下地材との強い接着性
- (5) 良好なクリープ、応力緩和特性

などである。(1)は精密な変位測定を行ううえでの必須条件である。(2)の条件は、通常の光弾性被膜法ほど深刻な要件ではない。これは通常の光弾性被膜法が、反射光を用い、膜内を通過する光路長が、膜厚の2倍ときわめて短く高次の縞を得がたいのに対し、本手法では膜内を表面に沿うように長い光路をとれることによる。しかし、本手法でも光弾性ひずみ感度が高いほど縞は稠密になり、解析精度は向上する。(3)は下地材の塑性域におよぶ挙動を幅広くカバーするために必要であり、(4)が満たされないとこの方法そのものが成立しない。(5)も被膜による下地材への補強効果を緩和する意味で望まれる性質である。応力緩和は一般に被膜内の分子架橋の時間経過によるずれを伴うが、これが光弾性縞そのもののパターンを変化させるものであってはならない。(1)から(5)までの性質を常温で具備するものは、ゴム状弾性体に限定される。下地材が土質材料ならゼラチンのようなゲル状被膜が、下地材がモルタル、軟岩なら通常の被膜法に多用されるエポキシラバー(エポキシ・ポリサルファイド系共重合体の通称)が適切な被膜材料と考えられる。

3. 本手法の適用例

(1) 土質模型の変形測定

本手法は被膜の接着とこの被膜内に偏光を透過させるのみという単純な方法で模型解析面の全面にわたる連続的な微小変位分布を検出し得るため、従来不足しがちであった微小変位に関する情報の収集に寄与するものと期待されるが、これに伴い、相似則による模型の変位情報の解釈の必要性も、これまで以上に増してくると思われる。

地盤の模型材料としての砂、岩盤、コンクリートの模型材料として用いられる石膏など均質な材料については応力-ひずみ曲線の相似性、破壊ひずみ、ポアソン比、内部摩擦角の整合性等が詳細に検討され、自重場での実験結果の定量的な評価が可能とされている³¹⁻⁵⁾。しかし、間隙水の移動がその変形に大きな影響を及ぼす土については遠心力場における実験のみ相似則が成立し得るといのが一般的な評価であり、さらにこれらの材料の複合

Table 1 Index properties of Yoneyama clay.

Specific gravity of soil particles Gs (%)	2.82	Sieve analysis	
Liquid limit WL (%)	80	2.000~0.074 (%)	17
Plastic limit WP (%)	45	0.074~0.005 (%)	34
Plastic index IP	35	0.005~ (%)	49
Japanese unified soil classification			CH

した模型については、統一的な相似則は提案されていないのが現状である。

現段階では、本実験手法の妥当性の検討ならびに技術的な問題点の検討を主目的と考え、自重場での簡単な荷重載荷で、時間を追って複雑な変形を解析し得る粘土を下地材として選定し、半円孔を掘削したときの円孔中心軸に直交する断面内の変位の検出を行った。使用した粘土は米山産褐色粘土であり、この物理的特性を Table 1 に示す。

(2) 被膜材としてのゼラチンの性質

被膜材として採用したゼラチンゲルは、いわゆるゲル状材料の中ではきわめて光弾性ひずみ感度が大きい部類に属し、また湯煎後のゾルを下地材表面上に注ぐことで、下地材中に数 mm の厚さで浸透し接着性も強い。さらに弾性域が広く大きなひずみまで追従するなど、前に触れた被膜材として望ましい性質の(1)から(5)までをすべて満足する。さらに実験に使用するゼラチンゲル(10%)の薄板を2枚の亚克力平板の間にはさみ、一定ひずみの状態で24時間放置したのちも、散乱光の干渉による縞変化は認められなかった。すなわち、せん断ひずみ γ と縞密度 (dN/dz) は観測した時間内では応力緩和の影響を全く受けず、これにより時間経過をほとんど気にすることなく正確な変位測定を実施し得ることも裏づけられた。

ゼラチンゲルを使用するうえでの最大の問題点は、湯煎後のゾルが冷却しゲル化する際に入る熱ひずみをいかに除去するかにある。このためゼラチンの濃度、被膜の厚さに応じ室温を管理しゾル化の進行速度を調整するなど、細心の注意を払う必要がある。

数種類の濃度で打設されたゼラチンゲルの薄板を2枚の亚克力平板の間にはさみ、これを単純せん断して得られた、せん断ひずみ (γ) と散乱等色線縞密度 (dN/dz) の関係を Fig. 3 に示す。両者は広範なひずみ範囲で良好な比例関係にある。ひずみ感度は濃度に比例して増加し、20%のゼラチンゲルでは 2.46 cm^{-1} に達する。

また、ゼラチンゲルのせん断弾性定数は、濃度とほぼ指数関数的な比例関係にある (Fig. 4)。したがってゆるぎめの下地材を用いた場合には、大きなせん断ひずみが期待できるため、感度を落としても補強効果の小さい濃度の薄いゼラチンを用いた方が望ましい。しかし、この

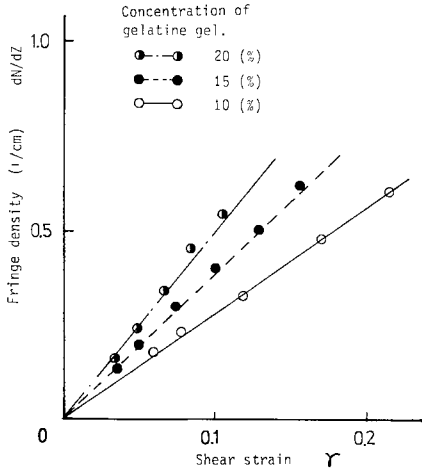


Fig. 3 Fringe density-shear strain relation of gelatine gel.

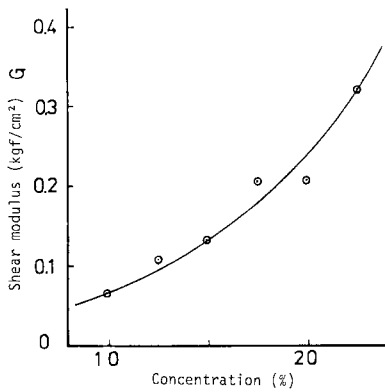


Fig. 4 Shear modulus-concentration relation of gelatine gel.

ときゼラチンゾルの粘性も小さくなり、下地材によっては油性ラッカーを吹き付け、ゼラチンの下地材への過剰浸透を防止しなければならない。

(3) 供試体の作製方法

Fig. 5 に供試体の作製手順を示す。

- ① 透明なアクリル板製の型枠（内寸法 300×200×250）を組み立てる（ボルト締め）。
- ② この型枠の観測面となる一面上にゼラチンゲルの薄板と同厚のスペーサー（透明板）を設置する。また、半断面トンネルに相当する半円筒型枠（三分割から成る）を型枠底部にスペーサーと半円筒断面が接するように設置する。
- ③ 所定の含水比に調整した土質材料を何層かに分けて、所定の高さおよび密度に均一に締め固める。
- ④ 下地材の作製後、観測面のアクリル板をはずしスペーサーを取り除く。そして、ゼラチンゲルの下地材への浸透防止として油性ラッカーを吹き付けた後に再びアクリル板を型枠に取り付ける。
- ⑤ スペーサーを取り除いた後の溝に、ゼラチンゾルを下地材と同じ高さまで静かに流し込む。
- ⑥ ゼラチンゾルの打設後静置し、ゼラチンゾルが完全にゲル化すれば、供試体の作製は終了する。

下地材の作製完了時の状態は、乾燥密度 $\rho_d = 0.91 \text{ t/m}^3$ （最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.3 \text{ t/m}^3$ ）、含水比 $w = 30\%$ （最適含水比 $w_{opt} = 38\%$ ）、間隙比 $e = 2.1$ である。土被り厚は、 $2d$ （ $d = 52 \text{ mm}$ ：トンネル直径）、ゼラチンゾルの濃度は、10% に調整している。

(4) 実験装置および実験手順

Fig. 6 に鉛直方向変位を測定する実験状況を示す。

光源は、出力 5 mW の He-Ne レーザーを使用してい

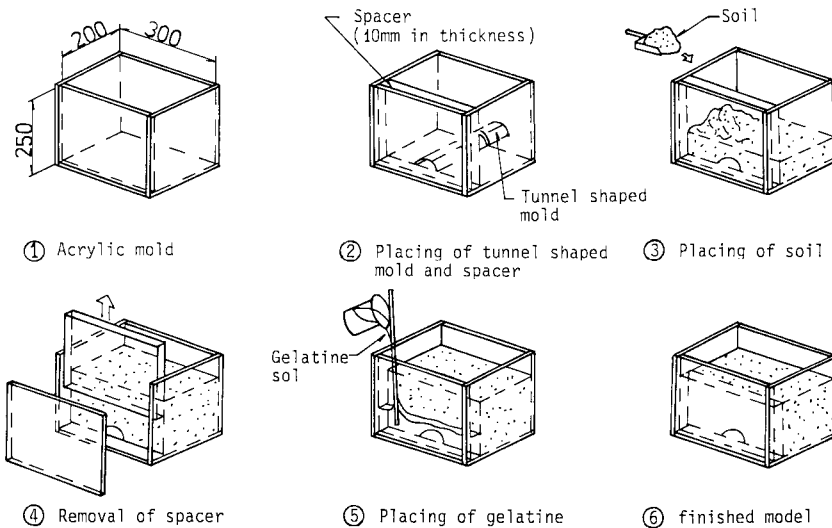


Fig. 5 Manufacturing process of soil model.

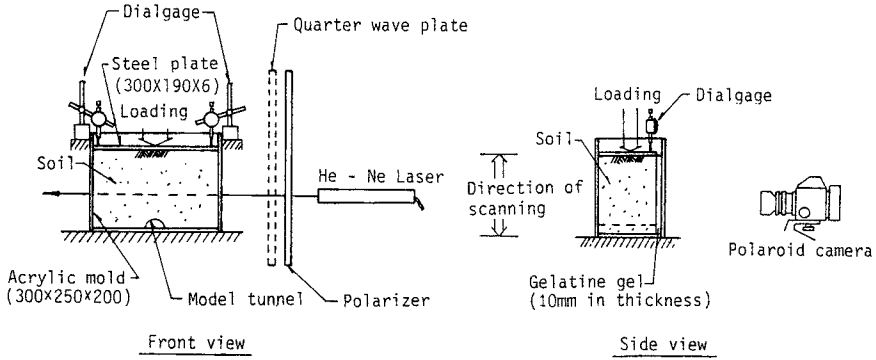


Fig. 6 System of test apparatus.

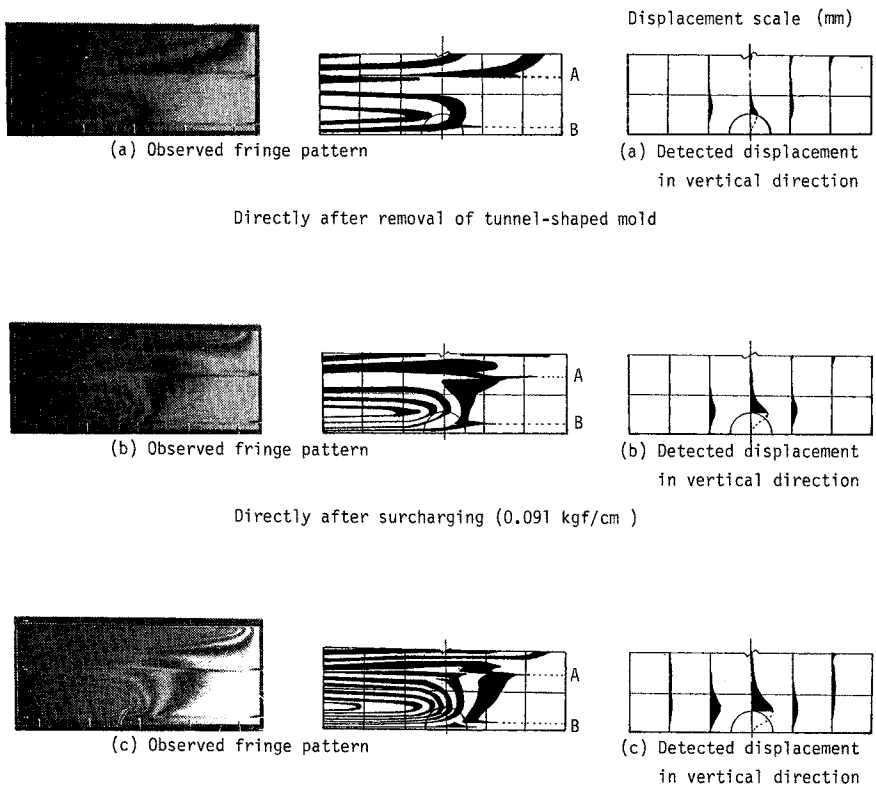


Fig. 7 Dispersive fringe pattern and vertical displacement of soil around tunnel.

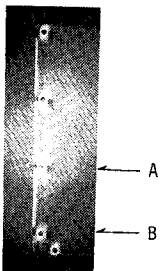


Fig. 8 Time edge effect.

Fig. 7中に現われた水平な直線状の光弾性縞の乱れ(同図スケッチの破線A, B)は、アクリル製枠側板のボルト穴(A, B)周辺に残留した加工ひずみによる光弾性縞次数のずれが重畳されたものである。Fig. 8にこの側板の光弾性写真を示す。ボルト穴穿孔により生じた熱ひずみがそのまま側板内に“凍結”されている様子(時間縁効果)が観測される。本来、このような加工ひずみの生じている場所を避けてレーザー光を入射するのが望ましい。このような加工ひずみの除去を強制的に行う場合は、恒温槽を用いて焼鈍しを行う必要がある。

る。このレーザーは定速可動装置に据え付けられており、自動的に上下動が可能である。光学系は、直径 42 cm の偏光板と同径の 1/4 波長板から構成されている。散乱縞の撮影にはポラロイドカメラを利用し、縞分布の状態を即座に把握するようにしている。さらに、荷重載荷時の表面沈下量を測定するために、ダイヤルゲージを Fig. 6 のように設置した。

これらの実験装置を使用して、まず供試体作製完了時の縞次数分布の初期状態を撮影しておく。この縞次数分布の写真撮影では、カメラのシャッターを開放状態にして、ゼラチンゲル薄板内を透過するレーザー光を走査させ、面としての連続的な散乱縞分布を得るようにしている。このとき、1 回の走査では光量不足のため明瞭な写真が得られないので、数回（3 往復程度）の走査によって重ね撮りを行い、できる限り明瞭な散乱等色線縞次数分布を得るように努めている。

この後、荷重載荷前あるいは載荷後にトンネル部に相当する三分割型枠を静かに除去し、応力を解放する。そのときに生じる散乱縞分布を同様の手順で撮影する。以後解析目的に応じて各荷重載荷段階あるいは各時間経過後（クリープ状態）の変化を撮影し、それらの写真を用いて式（3）より変位分布を求める。

（5）実験結果

レーザー光線入射軸方向を水平にとり、これを上下に平行移動して得られた散乱光の干渉縞写真を Fig. 7 (a) ~ (c) に示す。レーザー光線は図中右から左へ進行しており、偏光の軸は水平方向（明視野状態）に設定されている。Fig. 7 (a) は、約 0.005 kgf/cm² の荷重に相当する鉄板（Fig. 6 参照）を onboard した後にトンネル部の半円筒形型枠を除去した直後の状況である。トンネル状の型枠を取り除く前の段階では、鉄板の自重による表面沈下にとまらぬ光弾性縞が模型上部約 2.7 cm の幅に入ったもののこの影響は模型下部まで及ばず、トンネル部周辺の図中に示す領域内には何の縞も認められなかった。よって Fig. 7 (a) の縞は、レーザー光の入射方向が水平であることから、トンネル部応力解放によって瞬間的に生じた下地材の上下方向変位によるものである。すでに求めたゼラチンゲルのひずみ感度 $G\alpha = 1.41 \text{ cm}^{-1}$ （濃度 10%）を式（1）に代入し、これより算定された下地材の変位解析例を Fig. 7 (a') に示す。トンネル天端では、およそ 0.56 mm の沈下が生じている。Fig. 7 (b) はさらに onboard 荷重を 0.091 kgf/cm² まで増加した直後の縞写真である。レーザー入射方向に関する縞の密度が、トンネル近傍で急増する傾向が強まり、さらに広い領域に沈下が進行している様子が認められる（Fig. 7 (b')）。さらにこの状態で 5 時間放置した後の状況を Fig. 7 (c) に示す。トンネル天端の沈下は約 2.4 mm に達すると

もに、下地材両側面に近い領域まで沈下が進行している。下地材の最下部はすべての写真で縞次数の進行はなく、型枠の拘束により下地材が沈下しない状態を明確に示している。

本手法では、一般の光弾性手法と同様、変位（せん断ひずみ）の正負の判定を縞写真だけから下すことはできない。つまり縞密度 (dN/dz) が正值をとる場合、これを沈下と定めると、 dN/dz が負値をとる場合は、当然下地材の浮き上がりを意味することになるが、 dN/dz が正值をとる場合が沈下であるか否かを断定する根拠を写真だけに求めることはできない。ここで示した解析例のようにトンネル天端は沈下するものとわかっている場合には、下地全面の変位の正負は天端での縞の情報をもとに決定できるが、このような参照点の得られない場合は、解析結果の検討に注意を要する。

4. 結 論

本論文で提唱した散乱光弾性被膜実験法について得られた知見を以下にまとめる。

（1）本手法は、不透明な実材料の表面に柔らかい光弾性材料の被膜を貼付し、さらにこの被膜表面の変位を透明で剛な平板で拘束することで、下地材料注目面の変位を被膜のせん断ひずみに変換し、これを光弾性学的に検出するものである。

（2）この際、従来の光弾性被膜法のように被膜法線方向から偏光を入射し反射光の縞模様を解析するのではなく、被膜内に解析面に沿ってレーザー光線を入射し、その散乱光の干渉縞を解析するので、下地材の解析面がなめらかな鏡面状である必要がない。このため、土木工学の分野で扱うモルタル、土等の材料をも解析可能な下地材として選定することができるようになった。

（3）本手法を適用するうえで最も注意を払わなければならない点は、被膜材の選定と加工にある。被膜材は、透明度、光弾性感度ともに高く、接着性もよくなければならない。また、下地材の面内変形を拘束するものであってはならない。解析面法線方向の応力、ひずみ状態については、被膜のポアソン比が 0.5 に近く、被膜の解放面が少ないので、解放面の近傍以外では、ほぼ平面ひずみ状態に近いと考えてよいが、下地材と被膜材の選定いかんでは、むしろ平面応力状態に近い場合も考えられ、この点に対する考慮も解析結果を検討するうえで重要である。

（4）下地材に粘土、被膜材にゼラチンを用いた解析例では、トンネルに相当する半円形断面を引き抜いた状態での変位の進行状況を簡便かつ明瞭に視察することができた。この際、偏光の透過する透明な型枠に加工ひずみの残留することを避ける等、配慮すべき点のあること

も指摘された。

最後に、本研究を遂行するにあたり、長岡技術科学大学大学院、柳浦良行君には煩瑣な実験、データ整理に協力していただいた。また長岡技術科学大学、小川正二教授には理論的検討に参加していただいたのみならず、不備な原稿にも目を通していただいた。さらに、(株)熊谷組技術研究所第1部および(株)加賀田組の方々には、実地の体験をふまえた貴重なご意見を賜った。あわせて深謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 西田正孝：応力集中（増補版），森北出版，1981.
- 2) 辻 二郎・西田正孝・河田幸三：光弾性実験法，日刊工業新聞社，1965.
- 3) Rocha, M. : The Possibility of Solving Soil Mechanics Problems by the Use of Models, Proc. 4th I.C.-S.M.F.E., Vol.1, 1957.
- 4) 柴田 徹・太田秀樹：土質模型実験における相似則，土と基礎，Vol.28, No.5, 1980.
- 5) 林 正夫：アーチダムおよびその岩盤の破壊に関する模型実験方法についての考察，電力中央研究所 技術研究所報告（土木62004），1962.

(1985. 6. 7・受付)