

(130) レーザー光シートを用いた3次元光弾性実験手法とその応用

ニカラグア大学 Daniel Jose Ortiz
東京大学生産技術研究所 小長井 一男
日本大学生産工学部 田村 重四郎

1. はじめに

フィルダムや複雑な形状の沖積地盤中の埋設構造物などマッシブな構造の耐震性を検討するうえで、模型実験は全体系の基本的な挙動を把握するための重要な手段であり、模型内部の全面にわたる応力、歪みの情報を把握するうえで光弾性実験法は大きな威力を発揮する。しかし光弾性実験法は本質的に2次元の応力解析手法であることから、これをマッシブな模型内の3次元の応力解析に用いるためには様々な工夫が必要となる。通常、3次元の応力状態の解析に広く用いられている応力凍結法は、エポキシなど硬質樹脂の供試体をガラス転移域を超える高温下で載荷し、これを再び冷却して応力を凍結し、スライスする過程をとることから、この手法を動的な実験に用いることは困難である。これに対して、光弾性感度の小さな供試体のなかにこれと比べて著しく感度の高い材料を挟み込むいわゆるサンドイッチ法は非破壊的に内部の応力を測定できる巧妙な方法であるが、多断面の情報を1つの模型から同時に得ることはできない。このほかに動的な3次元応力解析に応用できる光弾性実験法には、模型を光学的にスライスし、散乱光による干渉縞を解析する散乱光法がある。しかしいずれの手法も単独では3次元の応力状態を解析し得る完全な情報をもたらすものではない。ここで提案する手法は、従来模型を機械的に切断することによってしか得られなかつた情報をレーザー光シートによる光学的、非破壊的なスライスで容易に抽出し得るものである。

2. 手法の概要

光弾性実験法における最も単純な測定系は、供試体とこれをはさむ2枚の偏光板から構成される(図1)。光源側の偏光板は供試体に入射する光を平面偏光状態にするものであり、polarizerと呼ばれている。この平面偏光は供試体に入射した時点で2つの応力成分に分離され、互いに主応力差に応じた位相差を光路に沿って累積するかたちで供試体内を伝播し、再度偏光板(analyzer)で合成され干渉縞を生ずる。したがってこの最も単純な実験法では得られる干渉縞は、供試体内の主応力差を光路にそって積分した情報に相当し、模型が3次元応力状態にあった場合、内部の任意の点における情報を分離して得ることはできない。応力凍結法は供試体をスライスし、その両側に偏光板を置くことでこの課題に対処するものであるが、当然模型を破壊することになり動的応力解析などへの適用は困難である。

提案する手法では、機械的な切断に代わり、模型はレーザー光のシートにより光学的に切断される。模型の任意断面上で微細な粒子による光の散乱が発生するが、この散乱光は透過光の光軸と直行する方向に振動する平面偏光の状態になっている。したがってレーザーの透過する断面全体を、従来の手法のpolarizerを透過した光と全く同じ光を放射する光源として利用することができる。この場合analyzerに相当する光学系を模型内部に置くことはできないが、この点については模型内の互いに接近した2箇所に光シートを透過させ、得られた情報(縞次数)の差をとることで対処できる。図2は、この操作の概略を示したものである。まず模型のa断面に光シートをy方向に透過させる。この際、analyzerごしに得られる縞次数 N_a は以下のように与えられる。

$$N_a = \alpha \int_{x_a}^{x_0} (\sigma_2 - \sigma_3) dx \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 α =光弾性感度、 σ_2 、 σ_3 = x 軸に直交する面内の主応力である。次に Δx 離れた b 断面に光シートを透過させた場合の縞次数は以下のようになる。

$$N_b = \alpha \int_{x_b}^{x_0} (\sigma_2 - \sigma_3) dx \quad \dots\dots(2)$$

式(1)、(2)の差をとると

$$N_a - N_b = \alpha \int_{x_a}^{x_b} (\sigma_2 - \sigma_3) dx \quad \dots\dots(3)$$

となるが、式(3)右辺は Δx が十分小さければ σ_2 、 σ_3 の変化が小さく以下のように書き直すことができる。

$$\Delta N = \alpha \Delta x (\sigma_2 - \sigma_3) \quad \dots\dots(4)$$

この ΔN は通常の応力凍結法によって得られる情報と全く等しいものであり、以下一般の光弾性の干渉縞の解析手順によって内部の応力状態を検討することになる。この手法では上述の主応力差に依存する干渉縞(等色線)に加えて、レーザーシートの透過する模型断面および analyzer 側の表面の2面での主応力方向を示す等傾線が現れる。この等傾線を解析に活用する場合には、レーザーの入射方向と偏光板の偏光方向が互いになす角度を一定(0°または90°)に保つたままで両者を回転させる必要がある。

レーザー光シートを複雑な外形の模型の周りのあらゆる角度から模型内にまっすぐ透過させるためには模型を同じ屈折率の液体中に浸漬しておくことが効果的である。通常の樹脂を用いる場合には芳香族炭化水素系の液体の混合液が浸漬液として用いられる。しかしゼラチンを模型材料とした場合には、その屈折率が1.33~1.34であることから、浸漬液として水を使うことができる。

この手法で用いる光源は単色光源であることが望ましく、また散乱光を用いることから強度の大きい光シートを得ることが必要である。これらの観点からレーザーは本手法に最適な光源である。比較的大きな出力が得られる外部ミラー形式のレーザーは平面偏光を射出するが、このことは散乱光を偏光光源として利用する本手法では必ずしも必要な要件ではない。しかし入射する光シート自体が偏光状態になっていると、もう一つの3次元光弾性手法である散乱光法を適用することが可能で、光シートの入射方向に直交する面内の主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ とその方向を検出することができる。

本手法はレーザー光シートが模型内を透過する際発生する散乱光を、透過面に置いた光源として利用する方法である。したがって、2次元模型に本手法を用いた場合、analyzer に対して、反対側の模型端面に光シートを透過させると、従来の2次元光弾性と全く同じ干渉縞が現れるはずである。本手法の妥当性を検討するため従来の2次元光弾性手法との比較実験を行なった。実験に使用した供試体はゼラチンで作られた直方体(20cm×20cm×12.5cm)で、自重により生ずる縞を観測した。写真1(a)、(b)はそれぞれ従来の光弾性手法、および提案する手法によって得られたフリンジパターンである。供試体底面および隅角部で変形が拘束されているため縞は水平方向に平行には入らず、複雑な模様を示し、また供試体中央には十字に直交する等傾線が現れているが、(a)、(b)におけるこれらの模様は互いに一致し、提案する手法の理論的な正当性が確認された。

3. 応用例

写真2(a)~(c)は透明型枠内に打設された同寸法のゼラチン供試体(30cm×30cm×20cm)の上面中央に矩形の剛体基礎(3cm×12cm)を置いた場合のフリンジパターンである。図中 Δ は模型手前からの距離であり $\Delta=15$ cmが模型中央断面になる。レーザー光シートの位置を1cmおきに手前 analyzerの方向に近づけていくにつれ、縞の数が減少していく状況が明瞭に撮影されている。このフーチングの直下の鉛直線上での縞次数を図3に示す。縞次数の減少分がレーザー光シートの移動区間における主応力差に比例しフーチングから深くなるにつれ、主応力差が小さくなっていく様子が示されている。

この手法では主応力差あるいは主ひずみ差は既に述べた手順で容易に解析できるが、任意断面内の変位を求めることは困難である。このため透明度の高いゲル模型内部にアルミ粉を混ぜ、ここにレーザー光シートを透過させ、散乱光の軌跡を追跡する。写真3は写真2と同じ形状の地盤モデル(ポリアクリルアミドゲル)上に同じ寸法のフーチングを載せ段階的に荷重を加えていった様子を撮影したものである。レーザー光シートはフーチング中央直下を通過しておりこの断面で地盤模型の変形過程が明瞭に撮影されている。

4. まとめ

本研究で提案された手法の特長を整理すると以下ようになる。

- 1). 提案する手法は光シートの通過する断面における散乱光を新たな平面偏光光源とするもので、従来の2次元光弾性手法における解析方法を適用することができる。
- 2). 本手法はレーザー光シートによって光学的に切断された平行な2面間の応力情報を抽出するものであり、従来の物理的に供試体を切断する応力凍結法、サンドイッチ法と同じように3次元応力状態を得ることができる。本手法では光学的な切断であるため切断する方向と位置を任意に選ぶことができる。
- 3). 本手法において透明なゲルから造られた模型内部にトレーサーとしてアルミ粉末を混ぜることにより、任意断面での変位の測定が容易になる。

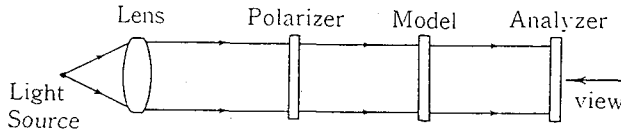


図1 二次元光弾性実験

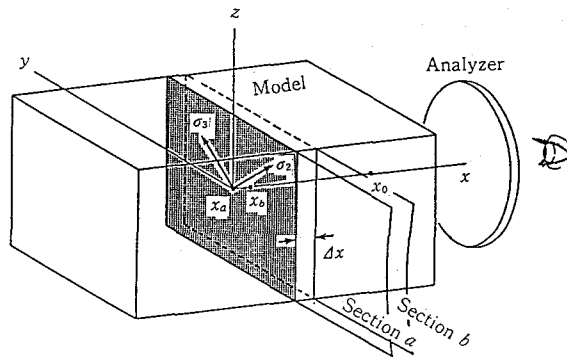


図2 提案する手法の概要

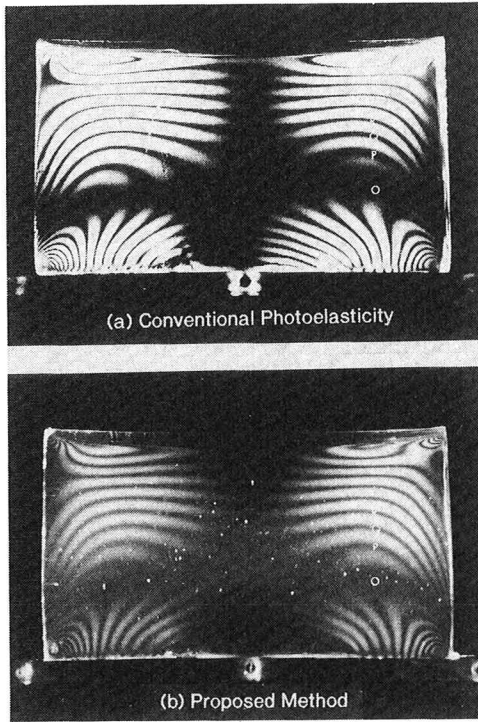


写真1 提案する手法と従来の手法によるフリンジパターンとの比較

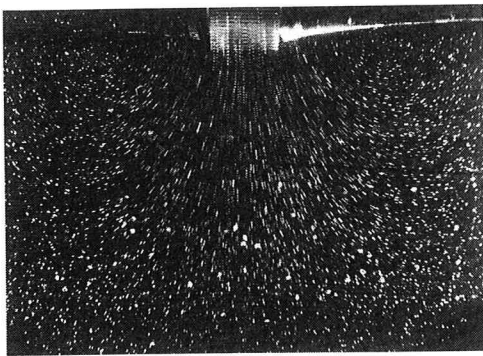


写真3 アルミ粉トレーサによる変位の可視化

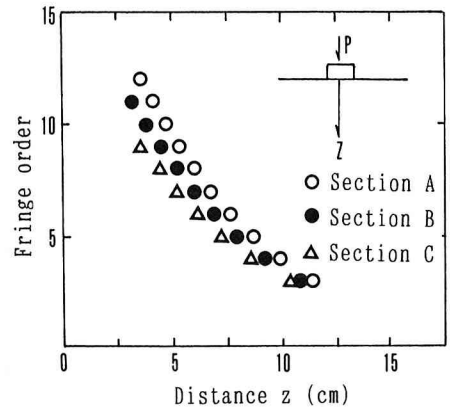


図3 帯状基礎模型載荷時の縞次数

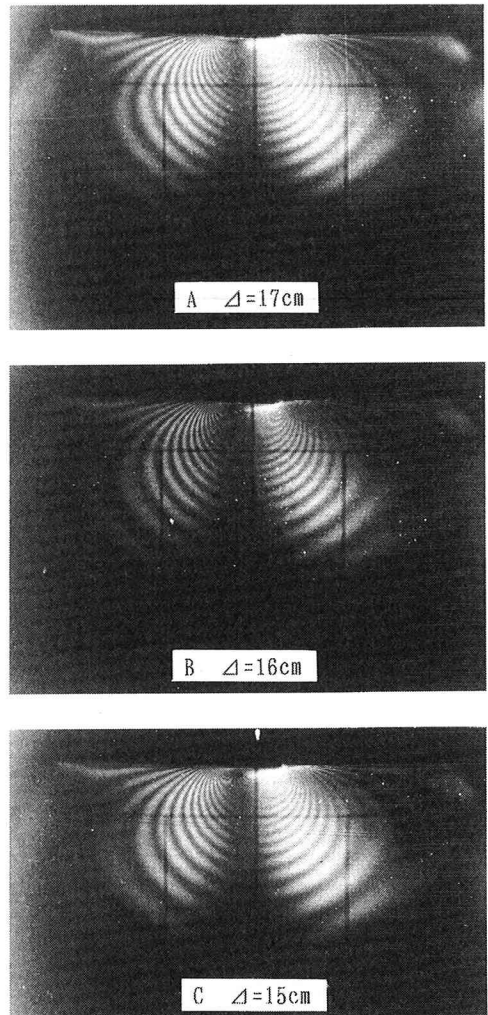


写真2 帯状基礎載荷時のフリンジパターン