

(128) 三次元粒状体構造模型内部の動的挙動の可視化

東京大学生産技術研究所 小長井一男

東京大学生産技術研究所 田村重四郎

1. はじめに

粒状体からなる構造物の挙動を把握するため、今までに実験、統計理論、数値解析などにより研究が試みられているが、模型実験はその挙動を支配する主要な機構についての情報を得る手段として重要である。しかし複雑な形状の模型の内部で進行する現象を三次元的に、さらに動的に観測することは極めて困難であり、このことがこの種の研究を推進する上での大きな障害となっていた。著者らは、間隙が水で飽和した粒状体構造について、模型内部の動的挙動の可視化手法を開発したので^{1), 2)}、ここにその概要を紹介する。

2. 手法の概要

模型はガラス製の水槽の中にガラス粒子を積み上げたもので、ガラスと等しい屈折率の液体中に浸漬される。これは光弾性などの分野で液浸法と呼ばれている実験方法であり、単色光源下で屈折率を完全に同調させた状態のもとでは、液中のガラス模型の存在は容易に視認できない。しかし粒子形成直後の新しいガラスの表面には、クラック進行時の歪が残留し、また周辺の気体や液体中のさまざまな成分が化学的に吸着することで、極めて薄い、光学的にやや異質な薄膜が形成されている。通常の液浸法ではこの膜は視認し難いが、ここに強い単色光をシート状にして透過させると光シートがガラス表面を横切るところで光の散乱が明瞭に認められるようになり、模型の任意断面で鮮やかな輝線に縁取られた粒子の動きを観測できるようになる。

この手法で用いる浸漬液については「無色透明で光の透過率が極めて高いこと」、「液体が化学的に安定で、揮発しにくく長期にわたり光学的性質に変化のないこと」、「屈折率の温度依存性が小さいこと」、「大量に使用するため安価で毒性、危険性の少ないこと」などの条件を具備していることが必要であるが、これに加えて浮力、流体力の相似性に関わる液体の性質も充分検討しておく必要がある。浮力の相似性を保つためには水と等しい1前後の比重の液体を用いなければならない。物体の運動による流体力には、物体の加速度に比例するいわゆる付加質量項と、速度の二乗に比例する項の寄与がある。前者の後者に対する比は一般の構造の耐震性を論ずる場合きわめて大きく、通常付加質量項の寄与のみが考慮されている。付加質量項のみを考慮すればよいことは、重力場で模型を実地震と同じレベルの加速度で加振しなければならない状況で好都合である。しかし縮小された模型の実験で、しかも間隙の大きい粗粒の挙動を検討する場合には、速度の二乗に比例する項の寄与も無視できない。このような状況下の実験では、Reynolds数を1000以上に保てば抗力係数の変動が少なく、流体力の相似則を考慮しやすくなるので、使用する浸漬液の粘度は水を大幅にこえないことが望まれる。以上の要件を満たす浸漬液として著者らはテトラリンとテレピン油の混合液を用いた。両者の物理化学的性質を表1に示す。これらは共に無色透明で、常温で水の1.3~2倍程度の粘性を持つ、揮発しにくい有機溶剤である。テトラリンはテレピン油に較べて屈折率が高く、これらを混合することで、両者の間のあらゆる屈折率の液体を得ることができる。2液の混合液体の屈折率は次式を用いてきわめて正確に求め得る。

$$\frac{1}{\rho} \frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{(1-c)}{\rho_1} \frac{n_1^2-1}{n_1^2+2} + \frac{c}{\rho_2} \frac{n_2^2-1}{n_2^2+2}$$

ここに、 n 、 ρ : 混合液の屈折率、密度

n_1 、 ρ_1 : テトラリンの屈折率、密度

n_2 、 ρ_2 :テレピン油の屈折率、密度
 c :テレピン油の重量比

式中の屈折率および密度は温度に依存して変化するため、液体の温度管理には細心の注意を払う必要がある。

テトラリンとテレピン油を混ぜて浸漬液とするので、ガラス材料としては屈折率が両者の間にあるものを自由に選び得る。著者らはこの範囲で脈理や泡など不均質な部分をほとんど含まないBK-7と呼ばれる光学ガラスを採用した。使用したガラスブロックの屈折率は波長によって図1に示すように変化する。この図には波長514.5nmでガラスと屈折率の等しい浸漬液の屈折率変化も示されている。両者の屈折率の分散性が異なることから、本手法ではレーザーのような単色光源を用いることが必須の条件となる。ガラスブロックは鉄製容器内の浸漬液中でハンマーの打撃により粉碎される。液中で粉碎することでガラス破断面上の微細なクラックにも浸漬液が浸透し、模型全体の透明度を大幅に向上することができる。

表1 テトラリンとテレピン油の物性

	Tetralin	Turpentine oil
Boiling point	207.6°c	153~175°c
Specific gravity (0~40°c)	0.960~0.996	0.815~0.850
Refractive index (514.5nm)	1.546~1.557	1.481~1.491
Coef. of viscosity	2.02cps (20°c) 1.30cps (50°c)	1.257cps (25°c)
Surface tension	36.3dyn/cm (13.3°c)	
Specific heat	0.403cal/g deg	0.453cal/g deg

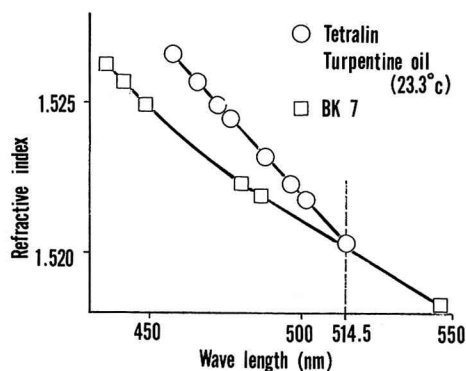


図1 浸漬液と光学ガラスの屈折率の分散

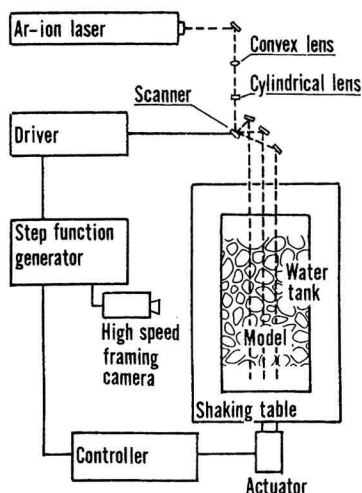


図2 実験系

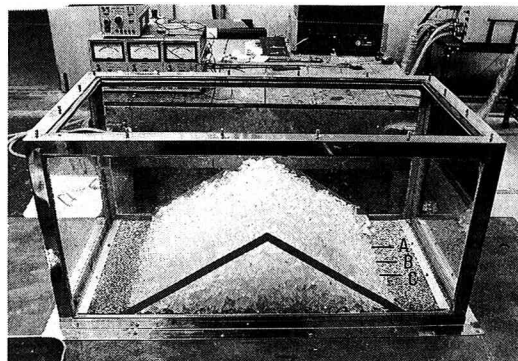


写真1 堤体模型

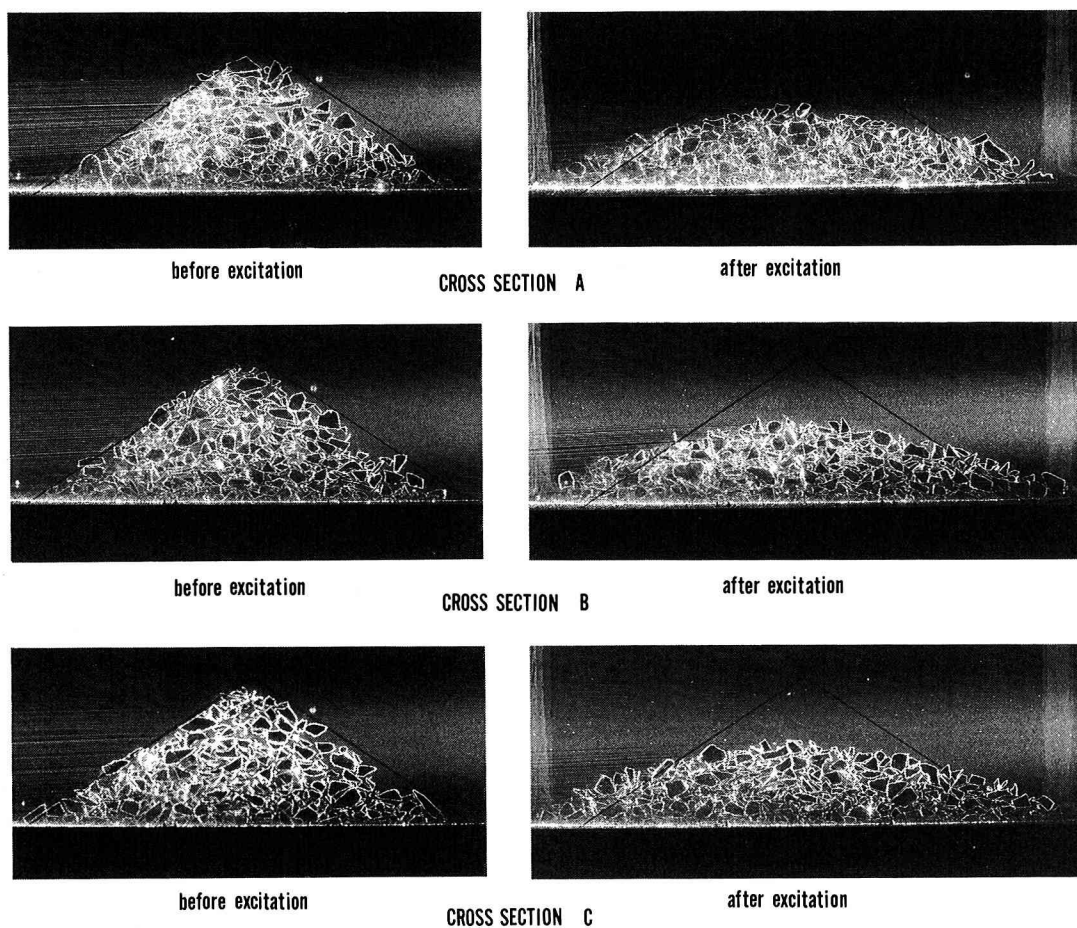


写真2 堤体模型断面

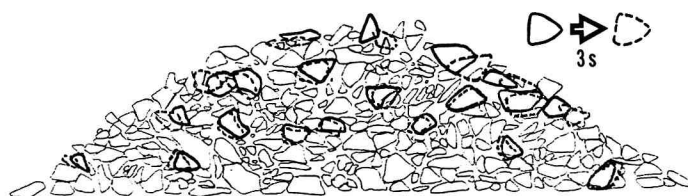


図3 堤体模型内部の粒子の移動

3. 模型実験

実験装置の概要を図2に示す。実験系は発光源であるArイオンレーザー、この光をシート状に広げるための光学系、光シートを模型任意断面に高速で移動させるためのスキャナー、模型を浸漬する水槽(44cm*87cm*40cm)、そしてスキャナーに同期信号を送り多断面の撮影を行う高速度カメラなどの撮影機器からなる。レーザーは514.5nm、488nmなど緑から青、近紫外域にいたる離散的な波長の光を内臓プリズムの調整で単独に放射させることができ、514.5nmの波長では1.7W以上の出力が得られる。光学系を構成するレンズにはすべて誘電体多層膜減反射コーティングが施されており、514.5nmでの反射率は入射角0~15°の範囲で0.4%を超えない。

水槽の中には写真1に示すように発泡アルミニウム板を敷き、この上に平均粒径1cm~2cmのガラス粒子を用いて高さ20cm、勾配1:1.5の堤体を作製した。この模型のさらに5cm上まで浸漬液を満し、これを振動台上で堤軸直角方向に加振した。加振に先立ち堤体内の3断面(写真1 A,B,C)にレーザー光シートを透過させ、内部の様子を撮影したものを写真2 A,B,C(左側)に示す。緑色の輝線に縁取られた粒子の中には他のどの粒子とも接触せず浮き上がって見えるものもあるが、当然これは粒子がレーザー光シート面外の点で支えられていることを示している。

模型は、5Hzの正弦波で加振された。振動台の加速度は3分の間に0から300galまで上昇させ、このなかの150gal以降の破壊過程を高速度カメラ(Photo-sonic 16mm 1W)、及び連写式のカメラを用いて撮影した。図3は連写式のカメラで撮影されたものの中から、目だった粒子の3秒間のうごきを追跡してみたものである。堤体内の粒子は加速度の上昇にともない表面に近いものほど徐々にその配列を変えていく。天端近くでは全体に沈下が目立ち、天端から中腹にかけての表面上の粒子の多くは次第に斜面上を滑落していく。また表面近くに埋もれた粒子の中には徐々に表面に押し上げられていくものもあり、これが滑落するのをきっかけに比較的大きな崩壊が発生する。

振動台を停止した後の3つの断面の様子を、写真2 A,B,C(右側)に示す。大きく左右に広がった堤体内は加振前と較べて、特に中心部から底部にかけて細粒分が混入し全体として密度が増しているのがわかる。

4. まとめ

ここでは粒状体構造模型内部で進行する挙動の可視化について新たな実験手法を提案した。この手法によれば3次元模型の任意断面の複雑な粒子の動きを散乱光の輝線に縁取られた図形の動きとして明瞭に把握し得るのみならず、このレーザー光のシートを前後に走査すれば、複雑な粒子形状を凹部も含めて計測することができ、多方面での応用が期待される。なお実験を行うにあたって、大学院学生、Jose Daniel Ortiz 君、平田一穂君の協力を得た。

参考文献

- 1) 小長井一男、田村重四郎：粒状体構造模型の動的挙動の可視化、生産研究、第40巻、第11号、1988。
- 2) K. Konagai and C. Tamura: Visualization of Dynamic Behavior of Particle Assemblage in Underwater Granular Structure Models, Bul., ERS, No.22, 1989.