展望・解説

粗粒からなる土木構造物の劣化機構の可視化*

小長井 一男**

Visualization of Changes in Configuration of Coarse Particle Assemblages making up Civil Engineering Structures

Kazuo KONAGAI

1. はじめに

碎石や砂利などを積んでつくるダムや海底の基礎、人工島などの土木構造物の内部で進行する劣化や破壊現象を検討するうえで、実物では許されない大規模な破壊に至るまでの構造全体の変形過程を追跡することができる模型実験はきわめて有力な手段である。しかしながら、ばらばらの粒子からなる構造は決して連続体のように挙動しないので、粒状体構造模型内部で進行する変形の局所化などの十分な情報を的確に得ることは必ずしも容易でない。可視化手法はこのような観点からきわめて優れた観測手段である。

粒状体構造の内部で進行する破壊や劣化現象を可視化する試みは決して新しいものではない。X線による透視画像の撮影¹⁾や、ガラス粒子を同じ屈折率の液体に沈めたうえで、内部に入れたマーカーを追跡したり^{2), 3)}、光弾性を観測する^{4), 5)}といった試み(浸漬法)がなされている。これらはマッヅンな材料内部の変形、応力の可視化に威力を発揮するが、粒子そのものの形状や他の粒子との3次元的な接触状況の変化まで可視化するものではない。著者らはこの目的のために新たな可視化手法を開発している(Laser-Aided Tomography)^{6)~9)}。ここではこの手法の概要とその応用例を紹介する。

2. 可視化手法

提案する手法では、浸漬法と同様、ガラス粒子

を同じ屈折率の液体中に積んで模型を作製する。ガラスと液体の屈折率がほぼ同じ状態で、この模型はほぼ透明となる。しかしシリカ(SiO_2)を主成分とするガラスの破断面では Si^{4+} や O^{2-} などの原子価が満足されずに残るため化学的にきわめて不安定な状態であり、このため割れたガラスの表面には、周辺環境のさまざまな不純物が吸着し、これがガラスの表面物性を変化させている¹⁰⁾。したがってここにレーザー光をシート状にして透過させると、シートの横切ったガラス粒子の表面で光が散乱し、散乱光に縁取られた粒子の輪郭を明瞭に観察することができる(図1)。

使用するガラスは光学的に不均質な脈理や失透などの少ない光学ガラスが適している。さまざまなガラスが使用できるが、屈折率が低いガラスのほうが安価で、同じ屈折率を得るための液体も入手しやすい。ここではホウ珪酸ガラスで通称BK7と呼ばれる光学ガラスを粉碎して用いている。使用したガラスカレットの514.5 nmの波長の光に対する屈折率は1.5204である。ガラスの破断面には、破壊時に破断面が振動しながら進行することによって、破壊の開始点を中心とする同心円状のrib markと、破壊の開始点から放射状にのびるhackle markと呼ばれる貝がら状の模様が現わ

図1 可視化手法 (Laser-Aided Tomography)

*原稿受付 1992年8月12日

**東京大学生産技術研究所

れる。写真1はこのうち hackle mark の顕微鏡写真である。表面に破断時の応力が残留していることも光学的物性が表面で異なることの要因である。ガラス粒子の形状は集合体の挙動に大きな影響を与えるが、現状では均質様な光学ガラスのカレットを粉碎して用いているため角張った粒子が大半をしめる。ガラスの種類によっても割れ方は異なる。使用したBK7は薄片状に割れやすく、また大きな衝撃をかけて割らないと亀裂の進行が粒子内部で止まってしまうこともある。薄片状の粒子が混入する場合には、実験に先立ちこれらを選別し、除去しておくことが必要になる。屈折率の高いF2というガラスや強化ガラスは比較的丸みを帯びた形状(subangular)に割れるので、この形状の粒子を必要とする場合にはこれらのガラスを用いることができる。角のまったくない丸い粒子を必要とする場合には、機械的な攪拌等によって徐々に角を取っていくのが現状で最も確実な方法と思われる。溶融したガラスの滴を水中に落として作ったさまざまな粒径のガラスビーズが市販されているが、これは表面の物性変化や失透が著しく、また内部に気泡、脈理などを含むため使いものにならない。

2液を混合して液浸に使用する液体をつくる場合、いずれの液体も、(1)無色透明であること、(2)特定の成分だけが揮発したりせず長期にわたり安定であること、(3)2液が容易に混合し分離しないこと、(4)毒性や引火性がなく安全であること、などが必要条件として求められる。動的な現象の実験で Reynolds 数を大きくしなければならない場合には、(5)粘性が小さいことをさらに考慮する

必要がある。さまざまな液体の組み合わせが可能であるが、著者らは安価で入手しやすい溶剤であるテトラリンとテレピン油を用いている。テトラリンは使用した光学ガラスに比べて屈折率が高く、一方テレピン油は低い。両者の物性を表1に、屈折率の温度依存性を図2に示す。図2から2液の混合比を変えるだけでなく、温度の調整によって屈折率の微妙な調整が可能であることがわかる。これらの液体の粘性は表1に示すように水の2倍程度であり、他の有機溶剤に比べて比較的小さく、動的な破壊実験などにも用いることができる反面、溶剤であるために液体を扱う環境や、模型を浸漬する水槽の材質などに注意が必要である。アクリル、エポキシなどの硬質樹脂であれば1年にも及ぶ比較的長期間の使用に耐えるが、柔らかいゴムは浸した直後に膨潤する。液体の粘性

表1 テトラリンとテレピン油の物性

	Turpentine oil	Tetralin
Boiling point	153~175°C	207.6°C
Specific gravity (0~40°C)	0.815~0.850	0.960~0.996
Refractive index (514.5 nm)	1.481~1.491	1.546~1.557
Coefficient of viscosity	1.257 cps(25°C)	2.02 cps (20°C) 1.30 cps (50°C)
Surface tension	—	36.30 dyn/cm(13.3°C) 33.63 dyn/cm(36.7°C)
Specific heat	0.453 cal/g·deg	0.403 cal/g·deg

写真1 ガラス破断面のハックルマーク (Hackle mark)

図2 テトラリンとテレピン油の屈折率の温度変化

を上げても構わない場合には、シリコン油とマシンオイルといった化学的に不活性な油を混合して浸漬液とし、このなかで軟質ゴムを用いることができることを実験で確認している。また使用したガラス粒子を長期間溶剤内に漬けておくと、溶剤の酸化した成分が表面に吸着して褐色味を帯びてくるので、時々新しい溶剤内に移すか洗浄を行う必要があるが、洗浄の過程で水や洗剤を用いると表面に新たに吸着した成分のため、著しくガラス表面の透明性を損なうことがある。

液体の屈折率とガラスの屈折率は共に光の波長によっても変化する。図3はテトラリンとテレピン油の混合液の屈折率とガラス (BK7) の屈折率の分散を示したものである。両者の変化は一致せず、したがって光源に単色光を用いる必要がある。レーザーは、その出力ビームを円柱レンズあるいはスキャナーで容易にシート状に広げることができる優れた単色光源である。単色の可視光を出すものであれば、どのようなレーザーでも用いることができるが、直接光でなく散乱光を可視化に用いるので、高速の現象を撮影する場合には高出力のレーザーが必要になる。著者らは総合出力4Wのアルゴンイオンレーザーを用いている。このレーザーは内蔵プリズムの角度の調整で緑(514.5nm)から紫(456nm)の波長域でいくつかの異なる単色光を発振することが可能である。最も出力が大きいのは514.5nmの緑の光であり、最大で1.5~1.7Wに達する。

この手法の有用性を確認するため、粒径1~2cmのガラス粒子を水槽内に高さ20cm, 勾配1:1.5の三角形に盛りあげて堤体模型を作製した

図3 浸漬液とガラスの屈折率の分散

(写真2(a))。水槽底面には摩擦を大きくするために一面に5mm~1cmの発泡痕のある発泡アルミニウム板を敷いている。水槽をテトラリンとテレピン油の混合液で満たしたのち、写真のA, B, Cの位置にレーザー光シートを透過させて、断面を撮影した(写真2(b)~(d))。おのおのの断面で粒子の断面形状や他の粒子との接触状況が明瞭に観測できる。粒子の輪郭が他の粒子のものと接触していないものがあるが、これは明らかにレーザー光シート面外で粒子が支えられているためである。

(a) Embankment model

(b) Cross section A

(c) Cross section B

(d) Cross section C

写真2 堤体模型の断面の可視化

図4 振動実験装置 (ブロックダイアグラム)

写真3 振動実験装置 (全景)

3. 破壊, 劣化過程の可視化事例

(1) 堤体構造の動的破壊過程の可視化

ロックフィルダムや海底のマウンドなどの水中の粒状体構造の耐震性を検討するため、いくつかの基礎実験を行っている^{6)~8)}。これら水中の粒状体構造模型の破壊の進行過程を振動台を用いた実験で観測するためには、構造を載せる水槽底面を直接加振する必要があるが、水槽そのものを加振したのでは、水槽側壁の影響でスロッシングが起これ、これが実験結果に悪影響を与えると予測される。そこで図4、写真3に示すように、水槽は振動台をまたぐテーブル上に置き、振動台に固定した鉄製フレームから発泡アルミニウム板を底板とするバスケットを水槽内につり下げ、このバスケットを液体中で加振するようにしている。バスケットの前後はガラス板が取り付けられているが、側面には振動台の揺れる方向に液体の出入りを許すよう、壁を設けていない。振動台には鉄製フレームの他、平面鏡を加振方向に対し45°傾けて固定し、この鏡に映る模型の像を振動台から離して置かれたカメラで撮影することになっている。この方法によればカメラを振動台上に固定したと同様の撮影が可能で、シャッター開放時の破壊に伴う粒子の移動だけをぶれとして撮影することができる。バスケット上に粒径2mm~5mmのガラス粒子を二等辺三角柱(高さ90mm、勾配1:2.72)

状に盛りあげて、これを水平に正弦波で徐々に振幅を上げながら加速した。加振の振幅とカメラのコントロールは、D/A変換ボードを内蔵した16bitのパーソナルコンピュータで行った。

模型中央断面の破壊の進行過程を観測したものを写真4に示す。シャッターを1秒間開放したので、斜面の滑りがぶれとして明瞭に撮影されている。

(a) Exciting frequency=4Hz
Base acceleration=51.2~54.0 gal

(b) Exciting frequency=22Hz
Base acceleration=152.4~162.3 gal

写真4 堤体斜面の滑落

る。加振振動数が増加すると、滑り落ちる表層の全体の厚さが増加し、あたかも粒子に見かけの粘性が付与されたような挙動を示す(図5)。破壊が開始する加速度および速度の周波数による変化をそれぞれ図6、図7に示す。周波数の増加とともに破壊加速度も次第に増加していくが、破壊の開始速度の分布はそれほど大きくなく、0.5~2.0 kine の間に分布している。乾性摩擦を滑り面上で考え、表層が一体となって滑るとするのでは、滑りが開始する加速度にこのような周波数依存性は現れるとは考えられず、今後より詳細な検討を加える必要のある興味深い現象である。

図5 滑落する斜面表層の厚さの周波数依存性

図6 破壊加速度の周波数依存性

図7 破壊速度の周波数依存性

(2) 砂状地盤模型への円筒基礎の押し込み

この手法で用いる粒子の大きさが小さくなればなるほど、手法の適用範囲は大きく広がる。写真5は平均粒径がおおよそ1 mmの粒子の拡大写真である。このような小さな粒子の表面にもすでに述べた rib mark と hackle mark が明瞭に認められる。このマークは粒子のサイズが小さければより密になり、破壊面の進行の揺れが破碎された粒子の大きさに関連している様子がうかがえる。この粒子を水槽に9 cmの深さで積んで模型地盤を作製し、直径5 cmのガラス円柱の押し込み時の模型地盤の変形の可視化を試みた⁹⁾。粒子が小さいのでレーザー光シートを透過させて、粒子の輪郭そのものをつぶさに観測することは困難である。そこでガラス粒子を1 cm積むごとにガラスの微粉末(0.05 mm程度)の薄層を敷いてこれを可視化のターゲットとして用いることにした。写真6は円柱を5 mm押し込むごとに撮影した模型地盤中央断面の変形の模様である。表面積の割合の大きいガラス微粉末の薄層がより強くレーザー光を散乱し、変形の可視化に大きく役立っている様子が認められる。円柱を押し込まれた模型は、大きな体積変化を起こし、表面近くが盛り上がってくるが、平均粒径が円柱の直径や、模型地盤の深さに比べて相対的にさほど小さくないことから、地盤内部に明瞭なせん断層の形成は見られない。

(3) 細粒の層内に置かれた粗粒の振動による浮き上がりの可視化

粒径1~2 mmのガラス粒子をガラス水槽(15 cm×15 cm×15 cm)中に7 cmの厚さに積んで、この中に大粒のガラス粒子を埋めておき、これを水槽ごと片振幅2 Gの正弦波で加振した。途

写真5 ガラス粒子($D_{50}=1$ mm)の拡大写真

(a) $\Delta=0$ (b) $\Delta=5\text{ mm}$ (c) $\Delta=10\text{ mm}$ Δ : Settlement of cylinder

写真6 成層地盤模型への円柱の押し込み

中、振動台を止めながら、粒子の位置を撮影したものを写真7に示す。次第に大きな粒子が浮き上がってくる様子が撮影されている。この現象は土石流の先端部に巨礫が浮き上がるのと同様の機構によるもので、乾燥した粒状体を振動させても同様の現象が見られる。この実験では粒状体内部に大きな粒子が尖った方を下に向けて次第に浮き上がってくる過程がつぶさに観測できる。水に浮かぶ比重0.5の角柱が必ず角を下に向けて安定するのと類似している。地震時に液状化を起こした地盤での地中構造物の安定は、液状化した比重の大きな砂混じりの水の中での浮力の大小関係から論じられているが、構造物の形状が安定性に与える影響も検討すべき重要な課題である。

4. ま と め

ここで紹介した手法は、ガラス粒子のような透明な素材を液浸して透明にしたうえで、レーザー光シートを透過させ、粒子表面で起こる散乱光を可視化に用いるものであり、粒状体構造物模型全体の変形のみならず、これを構成する粒子そのものの形状や他の粒子との噛み合い、移動の情報をも得ることができる。ここでは堤体構造の動的破壊の進行過程とその周波数依存性、円筒基礎の押し込みにとりなう地盤変形、振動を受ける粒状体内部の粗粒の浮き上がりなどに関連した可視化実験例を示しこの手法の有用性を示した。しかしながら均質透明な粒子を同じ屈折率の液体に浸すことを前提とするための制約とこれに伴う技術的課題も残されており、今後より広範な地盤と粒状体構造物の相互作用とそれに起因する劣化問題や破壊過程の解明に適用するためこれらの課題の検討を進めている。

写真7 細粒中の粗粒の振動による浮き上がり

参考文献

- 1) Roscoe, K. H., Bassett, R. H. and Cole, E. R. L.: The Determination of Strains in Solids by an X-ray Method, *Civil Engineering and Public Works Reviews*, Vol. 58, (1963) 873-875 and 1009-1012
- 2) 浦環, 坂巻 隆: 粉粒状体の三次元切削に関する研究, 日本機学会論文集, 第 467 号 C 編, (1985) 1876-1884
- 3) Allersma, H. G. B.: Photo-elastic Stress Analysis and Strain in Simple Shear, "Deformation and Failure of Granular Materials", IUTAM Conf., Rotterdam, (1982) 345-353
- 4) Wakabayashi, T.: Photoelastic Method for Determination of Stress in Powdered Mass., *Jour., Physical Society of Japan*, Vol. 5, No. 5, (1950)
- 5) Dantu, P.: Contribution a l'etude Mecanique et Geometrique des Milieux Pulverulents, *Proc., Int. Conf. Soil Mech. and Foundation Eng.*, London, Vol. 1, (1957) 144-148
- 6) Konagai, K. and Tamura, C.: Visualization of Dynamic Behavior of Particle Assemblage in Underwater Granular Structure Models, *Bul., E. R. S., Inst. Industrial Scienc. Univ. of Tokyo*, No.22, (1989) 3-12
- 7) Konagai, K. and Tamura, C.: Visualization of Dynamic Change in Configuration of Under water Particle Assemblage, *Structural Dynamics*, Krázig et al. (eds), Vol. 2, (1991) 837-841, Balkema, Rotterdam
- 8) 小長井一男, 田村重四郎: レーザートモグラフィによる粒状体構造模型内部の動的破壊過程の可視化, *ダム工学*, No. 5, (1992) 5-12
- 9) Konagai, K., Tamura, C., Rangelow, P. and Matsushima, T.: Laser-Aided Tomography: A Tool for Visualization of Changes in the Fadric of Particle Assemblage, (submitted for possible publication), *Proc., Japan Soc. of Civil Engineers*.
- 10) 土橋正二: ガラス表面の物理化学, (1987) 講談社