

レーザー援用トモグラフィーによる粒状体構造変形過程の可視化

Visualization of Change in the Fabric of Granular Assemblage by means of the Laser-Aided Tomography

小長井 一 男*

Kazuo KONAGAI

レーザー援用トモグラフィーは、粒状体構造模型内部のあらゆる断面の可視化を可能にする手法である。この手法で粗粒、細粒から成る構造や地盤の模型の破壊過程を観測した結果、粒子間のかみ合いが外れ配位が変化する過程で大きな体積変化が生じ、その結果破壊の開始条件に周波数への依存性が現れるなど興味深い現象が確認された。これらの現象が観測された実験例を紹介するとともに、その物理的意味、今後の課題などについて触れる。

1. はじめに

砕石や砂利を積んで造るダムや海底の基礎などの土木構造物、あるいはこれらを支える地盤の安定性を議論する上で、実物では許されない破壊にいたるまでの粒状体構造の変形過程を把握できる模型実験はきわめて有力な研究手段である。しかしながら、ばらばらの粒子を積んだだけの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に関する十分な情報を的確に得ることは必ずしも容易ではない。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。

粒状体の内部で進行する破壊や変形過程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X線透視画像の撮影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の動きを追跡したり、光弾性を観測する²⁾といった試みがなされている。これらは粒状体構造のマスとしての変形、応力の可視化には威力を発揮するが、粒子そのものの形状や動き、他の粒子との接触状況の変化まで可視化するものではない。

著者等はレーザー援用トモグラフィー (Laser-Aided Tomography: 以下LAT) という新たな可視化手法を開発し、これまでの粗粒、細粒からなるさまざまな粒状体構造の変形過程に関する実験、解析を進めてきた^{3)~5)}。ここではその手法の概要といくつかの適用例を紹介する。

2. 可視化手法

LATではまず、粉碎した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(SiO₂)を主成分とするガラスの破断面ではSi⁴⁺やO²⁻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。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測することができる(図1, 写真1)。

使用するガラス、液体は、屈折率を揃えるという条件を満たす範囲内でさまざまな組み合わせが可能であり、実験の目的に応じてこれらを使い分けることになる。ガラスは光学的に不均質な脈理や失透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、屈折率の低いガラスの方が一般に安価で、同じ屈折率を得るための液体も入手しやすい。一連の実験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。使用したガラスの514.5 nmの波長の光に対する屈折率は1.5204である。

浸漬液としては、これまでに①テトラリンとテレピン油、②酢酸ベンジルと安息香酸メチル、③機械油とシリコン油などガラスの屈折率に対して高低異なる屈折率の液体の組み合わせが用いられた。これらの液体を用いるにあたって、たとえば振動する物体に働く流体力を検討するなどReynolds数を大きくする必要がある場合には粘性の低いものを、また砂状粒子の液状化などの現象を時間軸を引き伸ばして観測する必要がある場合には逆に粘性の高いものを用いることが求められる。上記の液体の組み合わせで

*東京大学生産技術研究所 第1部

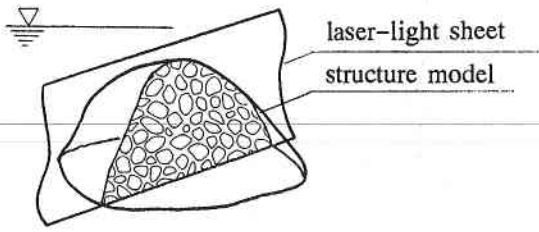


図1 レーザー援用トモグラフィー

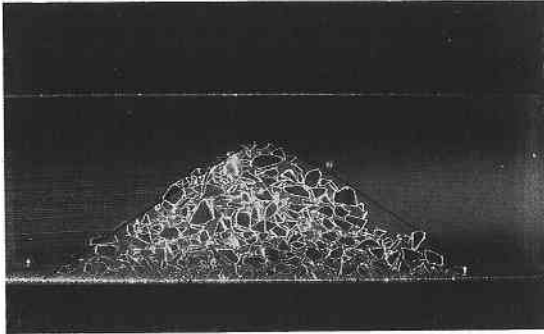


写真1 可視化された堤体模型断面

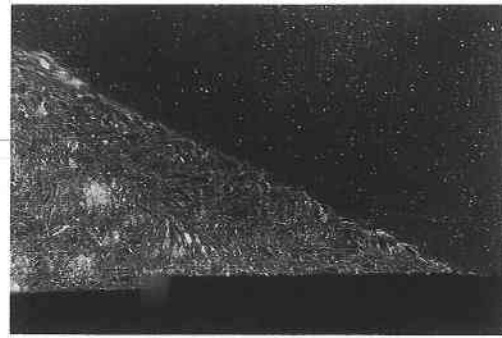
可能な粘性を補間する必要がある場合は、これら①～③の液体を互いに混ぜあわせたり、さらに流動パラフィンなどを添加してこれを調整することが可能である。

3. 応 用 事 例

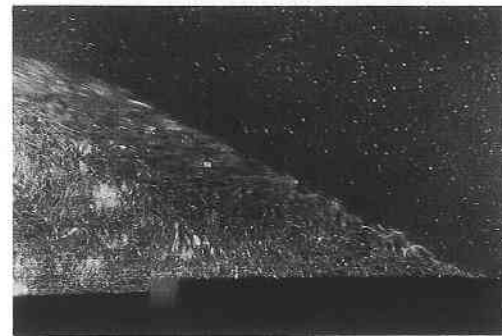
3.1 粗粒から成る堤体構造の動的破壊過程

現在ロックフィルダムなど粗粒からなる堤体構造の動的安定性は震度法により構造全体に同じ加速度を静的に作用させて評価しているものが多い。震度法は日本では1920年代後半から採用されており、この方法で設計されたダムが大きな被害を出したことはない。しかし、1984年の長野県西部地震や1987年の千葉県東方沖地震などにおいて、堤頂部で設計震度を越える大きな加速度が観測されており、堤頂付近の加速度が基礎岩盤の3倍を越える事例も見られる⁶⁾。そのため粗粒材料の強度の評価法など現行設計法のいくつかの問題点が指摘されている⁶⁾。粗粒から成る構造物の動的挙動に関する研究はさまざまな模型実験や数値解析を通して行われてきたが、粒状体構造の動的破壊については、粒径が大きいほど、また加振周波数が高いほど破壊しにくいことを指摘する研究例がある⁷⁾。

著者等はLATを用いて粗粒からなる斜面の動的破壊過程の検討を進めてきた。写真2は粒径2～5mmのガラス粒子を振動台に置かれた水槽中に二等辺三角形(高さ990mm, 勾配1:2)に積み上げ、徐々に振幅を増す正弦波(4Hz, 4.0 gal/s)を加えその破壊過程を観測したものである。加振後7sで斜面全体が厚みをもって急速に滑っている様子が撮影されているが、t=5s以前では顕著な変化は



(a) $t = 5s$, acceleration = 20gal



(b) $t = 7s$, acceleration = 28gal

写真2 堤体模型斜面の破壊(中央断面)

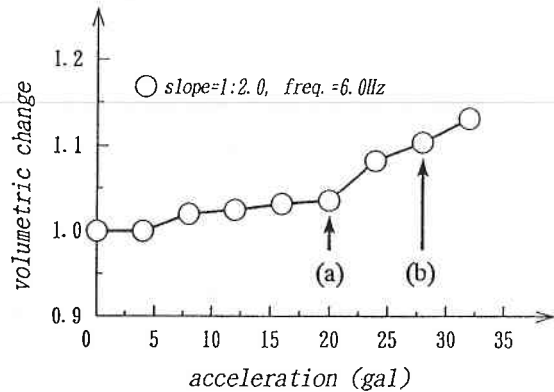


図2 加振加速度と堤体模型の体積変化

見られない。図2は加速度振幅を横軸にとったときの堤体体積の変化率を示している。図中の(a), (b)は写真2の(a), (b)に対応しており、斜面の破壊が体積膨張を伴いながら生じている様子がわかる。

このような顕著な体積膨張を考慮して、著者等は図3に示すような斜面のすべりの概念モデルを提示した⁸⁾。このモデルでは代表的な寸法 L の粒子上に質量 M の粒子塊が載っている。この粒子塊が摩擦を伴いながら、そのポテンシャルエネルギーを増し下の粒子を乗り越えることが斜面全体の破壊のきっかけを与える。粒子塊を載せる滑り面上の粒子は他の粒子とかみ合って、その状態によって回転の程度が左右されるが、この粒子の回転の有無にかかわらず、粒子塊 M の接点 o' は、点 o の周りに回転半径 L で回転し

$$M(\ddot{u} \sin \theta + \ddot{\phi} L \sin(\alpha - \theta))$$

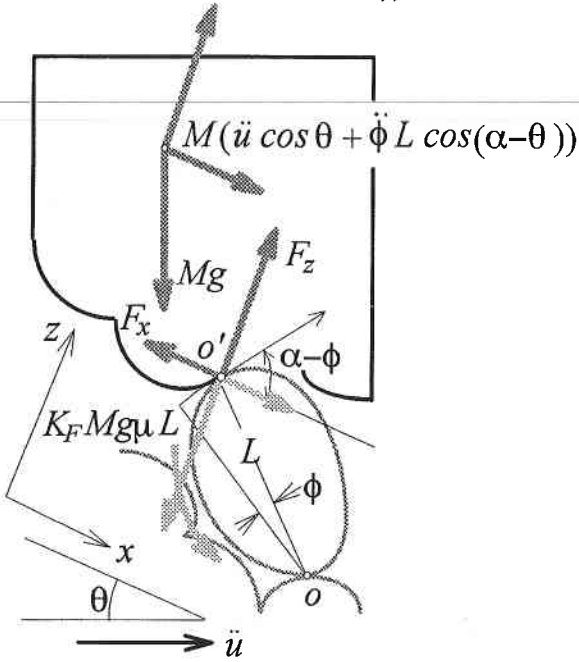


図3 斜面のすべりの概念モデル

ながら持ち上げられる。このときの回転角を ϕ ，斜面に対し持ち上げられる角度の初期値を α ，粒子塊を支える粒子が粒子塊から受ける接触力を F_x, F_z ，粒子塊以外の周辺粒子から受ける摩擦力による o 点まわりのモーメントを $K_F Mg \mu L$ ，斜面の勾配を θ ，滑り面下の堤体の加速度（基盤加速度）を \ddot{u} とする。これらの諸量のうち L や α などは実際には粒径や粒子形状，粒子の噛み合わせ具合に支配される統計量である。

上記の記号を用いて適宜簡略化を進めていくと，回転角 ϕ に関する以下の微分方程式を得る。

$$\phi - \frac{g}{L} \phi = \frac{g}{L} \left(\theta - \alpha - K_F \mu - \frac{\ddot{u}}{g} \right) \dots \dots \dots (1)$$

この微分方程式は Housner によって求められた矩形剛体ブロックの転倒の運動方程式とまったく同じ形である。Housner は基盤加速度に正弦半波を仮定してブロックの転倒に必要な加速度振幅を求めているが，同様の手順を経て，概念モデルが滑りを生ずる加速度振幅 a_c は以下のように与えられる。

$$a_c \cong g(\alpha + K_F \mu - \theta) \sqrt{1 + \frac{L}{g} \omega^2} \dots \dots \dots (2)$$

ここで $\phi = 0$ の静的な状態を考えると， $\theta = \alpha + K_F \mu$ で $a_c = 0$ となり斜面は自然に崩れてしまう。よって $\alpha + K_F \mu$ を斜面の静的安息角 θ_0 と置き換えることが可能で，式(2)は以下のように書き直される。

$$a_c = g(\theta_0 - \theta) \sqrt{1 + \frac{L}{g} \omega^2} \dots \dots \dots (3)$$

LATによる実験では堤体モデルが液体中にあり，液体からの抵抗と浮力を受けるが，これは重力加速度 g を以下に定義される g' で置き換えることで簡単に考慮できる。

$$g' = \frac{\gamma_g - \gamma_w}{\gamma_g + C_m \gamma_w} g \dots \dots \dots (4)$$

ここで γ_g, γ_w はそれぞれ，粒子，液体の比重， C_m は付加質量係数である。

写真2に示された実験で観測された加振周波数と破壊加

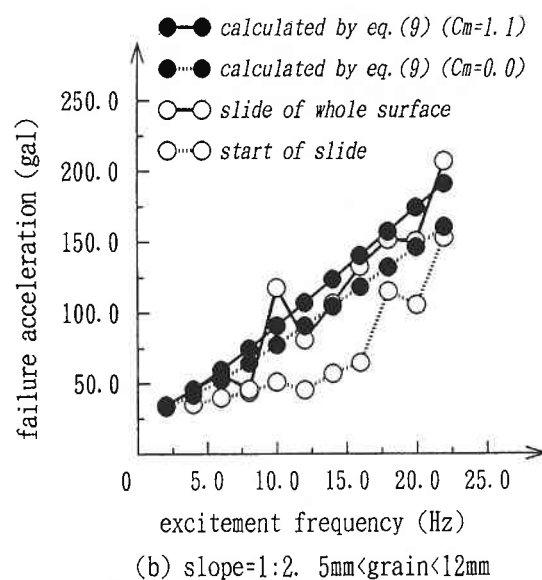
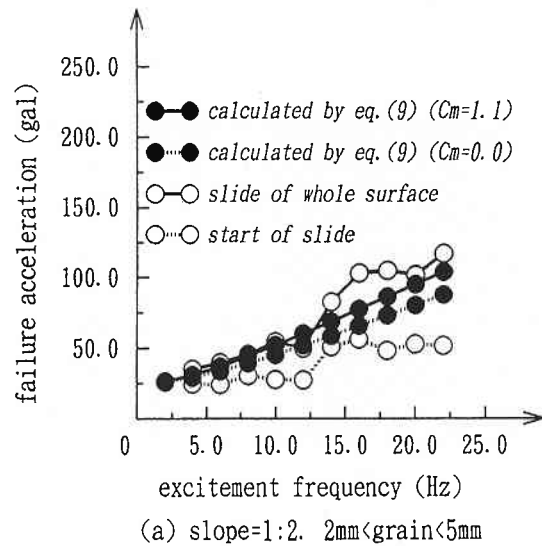


図4 斜面破壊加速度の周波数による変化

速度の関係を図14に示す。図中の黒丸●は式(3)の g を g' に置き換えて算出した値をプロットしたものである。付加質量係数 C_m についてはこれを 0.0 から 1.1 まで変化させたが計算結果はこの変化に鋭敏ではない。破壊のどの時点を計算値と対応させるか判断が難しいが、加振周波数が増すほど、また粒子が大きくなるほど破壊加速度が増す傾向は実験結果と整合している。

同じ粒子を積んでも積み方によってまったく異なる結果を得る場合もある。写真3は粒径5~12 mmの粒子を前述の実験と同じ勾配の堤体状に積んで破壊実験を行ったものである。この実験では前回のように下から順次粒子を積み上げたのではなく、図5に示すように斜面に該当する位置にあらかじめ板を固定し、ここに側方からガラス粒子を押し込んで観測側の斜面を整形した。同様の正弦波加振を行った結果、前回見られたような大きな体積膨張が起こらず、全体にじわじわと進行する破壊が生じた。破壊の開始



写真3 堤体模型 (粒径5~12 mm) 中央断面

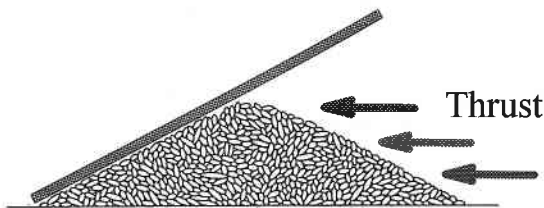


図5 模型の成形

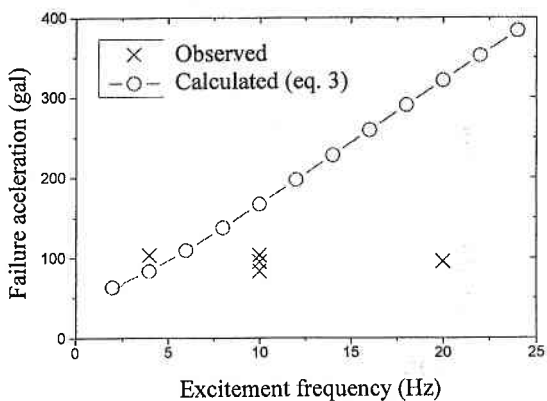


図6 堤体模型 (写真3) の斜面破壊加速度の周波数による変化

する加速度にも周波数依存性は認められなかった (図6)。

このように異なる現象の物理的意味を概念モデルによって検討してみる。破壊加速度に周波数依存性が現れない場合には破壊が急激に起こらず徐々に進行したことを考慮して、基盤加速度 i に振幅の徐々に増加する正弦波を忠実に入力し、モデルの粒子塊の応答を直接積分によって求めた。図7は回転角 ϕ の時刻歴である。ここで α は上に載った粒子塊の持ち上げられる角度の初期値であるが、物理的には粒子の噛み合の度合を示しており、いわゆるダイラタンシー角に相応する量とも考えられる。 α が小さくかみ合いが浅いときには粒子は stick-slip をくり返し回転角は累積的に増加していくのに対し、 α が大きく噛み合いが深いときは粒子はかみ合いが外れるまでロッキングをくり返しするといったまったく異なる挙動を示す。

図8は α を変化させたときの加振周波数と破壊加速度の関係である。 α が斜面勾配 θ より小さくかみ合いが浅いときは、破壊加速度に周波数依存性が見られないのに対し、 α が θ より大きくかみ合いが深いときは α が大きくなるほど周波数依存性も顕著になっている。これは、 α が

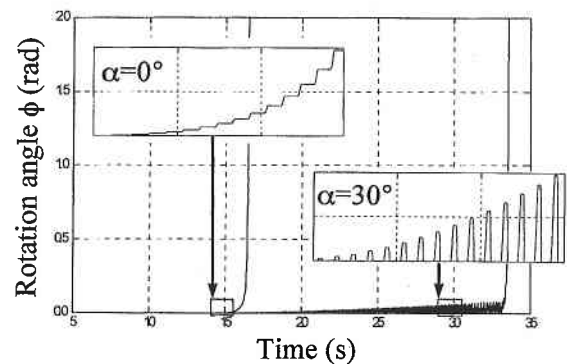


図7 回転角 ϕ の時刻歴

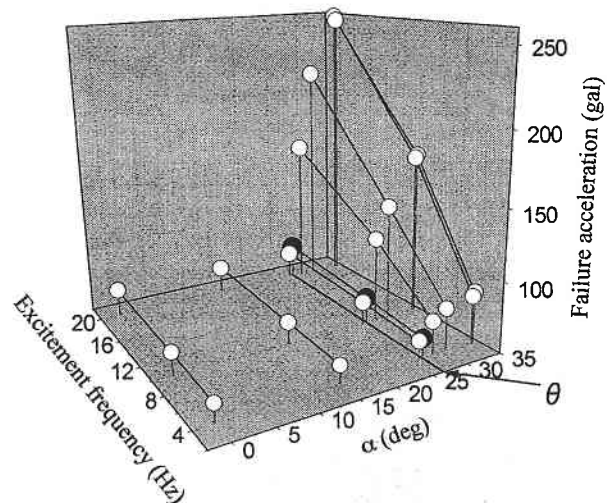


図8 α を変化させたときの加振周波数と破壊加速度

小さいときには静的安息角 $\theta_0 (= \alpha + K_f \mu)$ のうち摩擦に相当する $|K_f \mu|$ が大きく現象を支配するため、破壊加速度は加振周波数に依存しなくなる一方、 α が θ より大きくかみ合いが深いときはポテンシャルの変化が現象を支配するようになるため、破壊加速度の周波数依存性が現れるものと考えられる。

このように粗粒からなる斜面の破壊は粒子形状、サイズ、積みかたが密接に関連して異なった性状を示す。破壊加速度に周波数依存性が現れるという現象は従来の Coulomb 摩擦の概念に従うものではなく、このためこの種の構造の耐震設計を行う上で、これらの現象を適切に評価していくことが求められる。提案された概念モデルはこの現象の物理的意味について一つの簡明な解釈を与えているが、このモデルに現れる主要なパラメータがどのように計測され与えられるか具体的な方法論を提示することが、合理的な耐震設計に反映させる上で必要であろう。

3.2 細粒の堆積層への円柱基礎の貫入試験

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 4 は平均粒径がおおよそ 1 mm の粒子の拡大写真である。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に同心円状の rib mark と、破壊の開始点から放射状にのびる hackle mark と呼ばれる貝殻状の模様が現われるが、このような小さな粒子の破断面にもこれら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小さいほど密になり、破断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伺える。



写真 4 ガラス粒子 ($D_{50} = 1 \text{ mm}$) の拡大写真

表 1 地盤模型の使用したガラス粒子

Mean particle size	0.47 mm
Coefficient of uniformity	1.31
Specific gravity	2.52
Maximum void ratio	1.52
Minimum void ratio	0.881

表 1 に示すような平均粒径 0.47 mm のガラス粒子を水槽 (W300×D150×H300) に 161 mm の深さで積み上げ、ここに直径 70 mm のガラス円柱を 1 mm/min の速度で押し込んで支持力の変化を測定し、模型地盤内の様子を LAT で撮影した。粒子のサイズがこのように小さくなると個々の粒子を観測することは困難になる。そこで水槽内にガラス粒子を 18 mm 積みむごとにガラスの微粉末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 5～7 は円柱基礎を押し込んでいく過程で撮影された模型中央断面である。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て、変形の可視

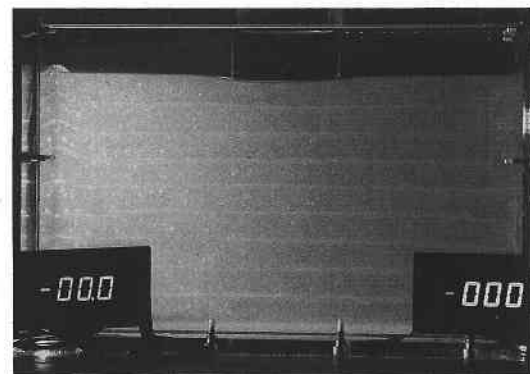


写真 5 地盤模型中央断面 ($S = 0 \text{ mm}$)

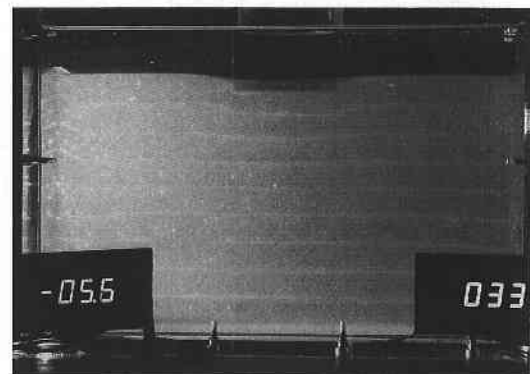


写真 6 地盤模型中央断面 ($S = 5.6 \text{ mm}$)

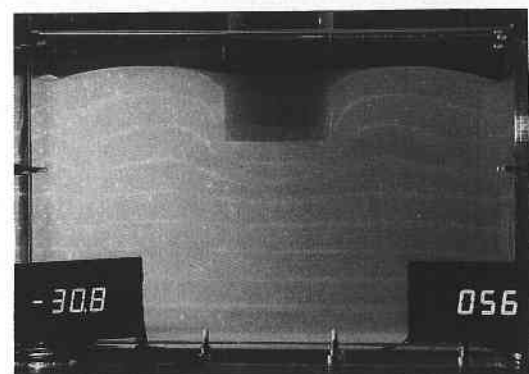


写真 7 地盤模型中央断面 ($S = 30.8 \text{ mm}$)

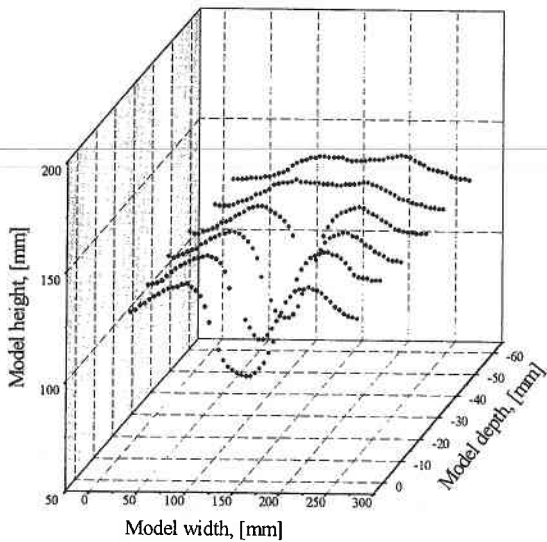


図9 ガラス微粉末の薄層(2層目と3層目の境界面)の変形

化に大きく役立っている様子が認められる。写真5~7の状態ではレーザー光シートを奥方向にずらしていくと、模型の変形を3次元的に把握することができる。図9はその一例として模型表面から2層目と3層目の境界面の変形を表示したものである。

図10は円柱の沈下に伴う支持力の変化(正規化されたフーチング荷重-沈下関係)を示したものである。図中には前述の写真5~7が撮影された時点点を併記してある。沈下量5.6mm前後(沈下量/円柱直径=0.07:写真6に対応)で支持力の増分が大きく変化するがフーチング荷重そのものに極大値は現れない。載荷重開始時(写真5)から荷重-沈下曲線の変曲点(写真6)にいたるまでは円柱基礎下方の楔状の部分が締め固められていく様子がガラス微粉末の縞の間隔の変化から確認できる。これに伴い楔周面でせん断ひずみが増加していくが、変曲点にいたるまでは周辺の堆積層には明瞭な変化は確認できない。ところが変

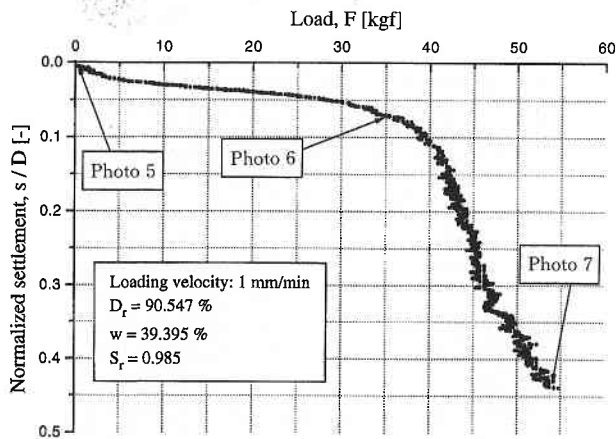


図10 正規化されたフーチング荷重沈下曲線

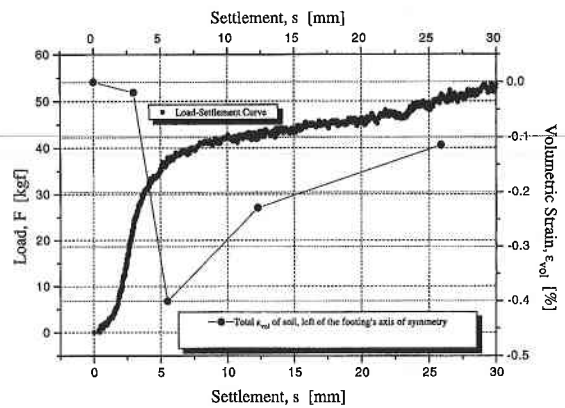


図11 中央断面での体積変化と荷重・沈下関係

曲点を過ぎると円柱側方でガラス微粉末層の間隔が急激に大きくなり模型表面が次第に膨れあがる。一方基礎先端部の楔の形状にはもはや大きな変化は現れない。そして正規化された沈下が44%に達した時点(写真7)で模型地盤表面から2番目, 3番目, 4番目のガラス微粉末の薄層にわずかな断差が生じ, 円柱基礎下から左右に進行したせん断面が模型地盤表面に到達している様子が確認できる。Vesic⁹⁾はこのように極大値が現れない場合の内部の破壊状況は punching shear であると推論しているが, 写真7は変形がかなり進行した段階で円柱基礎側方に塑性域が生じていることを示すものである。

図11は模型中央断面全体の断面積の変化を荷重沈下曲線に重ねて示したものである。断面積は, 円柱の沈下とともに円柱直下の部分が締め固められていくため次第に減少し, 変曲点のあたりで最小値に至るが, これを越えると逆に徐々に増加の傾向が認められる。これは変曲点を越えた辺りから円柱側方領域で大きな体積膨張が発生し始めたためであり, これはこの領域全体で粒子の配位に変化が生じたことを示している。左右へのせん断面の発生と進行がこれに遅れて現れる様子(写真7)は興味深い。

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, 粒子表面で起こる光の散乱を可視化に利用するものであり, 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の形状や移動の状況をも観測することを可能にする。ここでは粗粒から成る堤体の破壊過程の可視化, および細粒からなる地盤模型への円柱基礎の貫入状況の可視化とこれらの観測から得られた知見を紹介した。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課題も残されている。歪みに

については画像処理でこれを解析していくことが可能でそのためのシステムも整備されつつあるが、応力の計測については今後もさまざまな可能性を検討する必要がある。

なおこれら一連の研究の一部は特定研究費の補助を受けて行われたものである。 (1994年5月17日受理)

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, pp. 873-875 and 1009-1012, 1963.
- 2) Wakabayashi, T.: Photoelastic Method for Determination of Stress in Powdered Mass, Jour., Physical Society of Japan, Vol. 5, No. 5, 1950.
- 3) Konagai, K. and Tamura, C.: Visualization of Dynamic Change in configuration of Underwater Particle Assemblage, Structural Dynamics, Kräzig et al (eds), Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 837-841, 1991.
- 4) Konagai, K., Tamura, C., Rangelow, P. and Matsushima, T.: Laser-Aided Tomography: A Tool for Visualization of Changes in the Fabric of Granular Assemblage, Structural Engineering/Earthquake Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 193s-201s, JSCE (Proc. of JSCE No. 455/I-21), 1992.
- 5) Rangelow, P., K. Konagai, T. Matsushima and C-S Park: Visualization of Granular Material Deformation through Laser-Aided Tomography, Bull., Earthquake Resistant Structure Research Center, I.I.S., Univ. of Tokyo, No. 25, pp. 61-69, 1992.
- 6) ロックフィルダム耐震調査委員会：ロックフィルダムの耐震設計 (案), 1989.
- 7) 田村重四郎, 岡本舜三, 加藤勝行：ロックフィルダム模型の振動破壊実験—貯水のない場合—, 土質工学会誌, Vol. 20, No. 7, 1972.
- 8) Konagai, K., Matsushima, T. and Sato, T.: Dependence on Frequency of Dynamic Inter-Particle Dislocation within a Slope, Structural Engineering/Earthquake Engineering, (accepted for publication).
- 9) Vesic, A.S., Banks, D.C. and Woodard, J.M.: An Experimental Study of Dynamic Bearing Capacity of Footings on Sand, Proc., 6th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, Vol II, pp. 209~213, 1965.