

可視化実験用一面せん断実験装置の製作

飯高 稔

筑波大学システム情報工学等支援室
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻コンクリート研究室の依頼により製作した、「可視化実験用一面せん断実験装置」について報告する。

この装置を使用して、ガラス粒子を用いたガラス集合体の一面せん断実験を行った結果、LAT^[1]可視化手法によって粒子の三次元移動挙動を評価することが可能となった。LATとは Laser-Aided Tomography (レーザー援用トモグラフィ)の略で粒子体を構成する三次元的な微視構造をレーザーにより可視化する技術のことである。

キーワード：一面せん断実験、可視化、LAT

1. はじめに

コンクリート研究室では、フレッシュコンクリート(まだ固まらないコンクリート)を含水粒子集合体と見なして、粒子集合体のマクロな変形と個々の粒子の移動との関係や力学挙動を解明する理論的研究手法を開発している。研究室では微視的構造の粒状体性質を、コンクリートの粗骨材(おおむね 5 mm 以上の粒子)としてガラス粒子を用いたせん断試験を、可視化して検討することになった。可視化手法として LAT を用いる。せん断試験は、一般的に三軸圧縮試験が多く用いられる。この試験では最大せん断応力作用面が確定しにくく、せん断面上の粒子移動を測定することが難しい。そこで、せん断面の側面の観察が可能な一面せん断実験装置の製作を依頼された。

一面せん断試験^[2]は直接型せん断試験の一つで、土質試験で用いられる試験である。上下に分かれたせん断箱に供試体を納め、垂直応力を载荷した状態で、せん断箱の一方を他方に対して水平に移動させてせん断する試験で、原理的に分かりやすく、せん

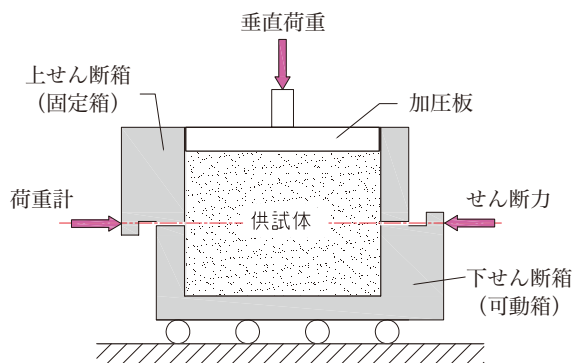


図 1. 定圧一面せん断試験の概略図

断面上の応力を直接測定できるためよく利用されている。一面せん断試験は、供試体の体積を一定に保ってせん断する定体積一面せん断試験と、せん断面上の垂直応力を一定にしてせん断する定圧一面せん断試験がある。今回製作したのは定圧で一面せん断を行う装置である。

2. LAT の概要

LAT は粒状体の内部を観察するために開発された実験手法である。粒状材料としてガラスブロックを粉砕して研磨したガラス粒子を用いる。これを水槽の中に入れ、ガラスと同じ屈折率を有する透明な液体で飽和させる。この状態でガラス粒子は見えなくなり、試料は透明になる。そこへシート状にしたレーザー光を通すと、ガラス粒子の表面で光が散乱することにより、レーザーの通った断面内の粒子の輪郭のみが浮き上がる。レーザーシートの通す位置を水平移動させ、試料を走査しながらカメラで断面撮影することにより、三次元的な粒子構造を取得することが可能となる。得られた画像からコンピュータでガラス粒子輪郭を抽出して三次元的に再構築してデータ化する。

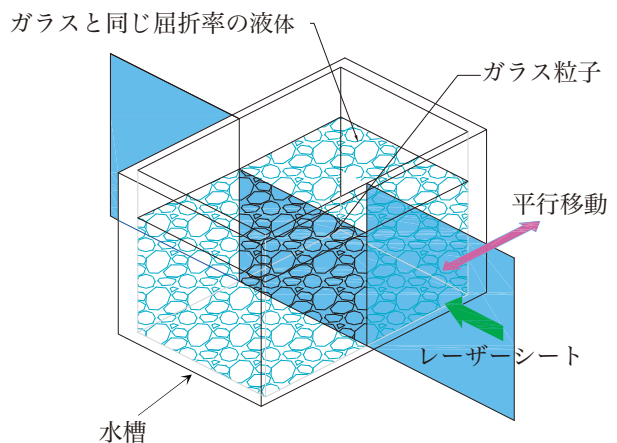


図 2. LAT の概要

3. 実験装置

依頼者から求められた実験装置の仕様は、せん断箱の断面は長方形で、内寸は試料の粒径とせん断箱の内面の周辺摩擦などから、長さ 150×高さ 100×奥行き 100 mm である。最大せん断変位量は試料の粒径などから 30 mm。せん断力はせん断箱の大きさや垂直荷重などから最大 1 kN 程度と見積もられた。

最初に、システム情報工学研究科地盤研究室で使用している一面せん断試験機(誠研舎 DT-10B)を利用して可視化実験が出来ないか検討した。この一

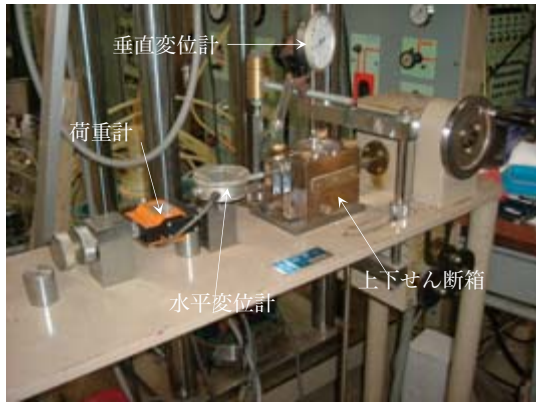


図 3. 既存の土質試験用一面せん断試験機

面せん断試験機は定圧式の土質用試験機で、供試体の寸法は直径 60 mm 高さ約 40 mm の円柱である。供試体として土粒子を用いる。下せん断箱にせん断力を加え水平に移動させ、せん断力は上せん断箱に当てた荷重計で測定する。

この一面せん断試験機の上下せん断箱を、アクリルなどの透明な箱で作製し、その中に試料を入れガラスと同じ屈折率を持つ液体で満たすと、上下のせん断箱の隙間から液体が漏れてしまう。液体が漏れても構わない様に、透明な水槽を作りその中にせん断箱を入れて、可視化一面せん断実験を行うことを考えたが、水槽の中のせん断箱に直接せん断力を加えるのは困難である。そこで、水槽の底に下せん断箱を固定して移動箱とし、その上に上せん断箱を載せて上せん断箱を固定箱として、水槽に固定した下せん断箱を水槽ごと载荷し移動させて、せん断を行うことにした。

LAT ではレーザーを照射する方向と、断面を観察する方向の 2 方向が透明で、直交している必要がある。また一面せん断試験では载荷面とその反対側に反力面が必要であり、垂直荷重を与える面も必要である。既存の試験装置では、レーザーを通過させる面がなく、せん断箱の大きさが土粒子用のせん断箱に比べてかなり大きいなど、装置を大幅に改造しなければならぬことから、底面からレーザーを照射し、正面を観察する装置を考案し、製作した。

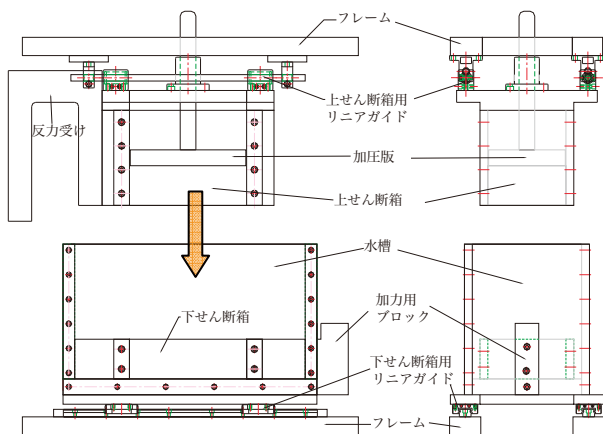


図 4. 上下せん断箱

せん断箱は加力面とその反対側の面にはジュラルミン A2017 を使用し、観測面 (撮影面) は厚さ 15 mm のアクリルを使用した。レーザーを透過させるせん断箱の底板は厚さ 20 mm のアクリルを使用し、垂直力が掛かっても耐えうるように、厚さ 10 mm の鉄板 SS400 をせん断箱の大きさの穴を開けてアクリルの下に取り付けてある。

反力受けは、回転モーメントが生じないように、せん断面の加力軸と反力軸を一致させるため水槽を跨ぐように取り付けた。材質は S45C である。

上下せん断箱ともせん断中にせん断箱間の隙間が一定に保持されるように、リニアスライドガイドを用いている。また垂直荷重用の加圧板も、せん断中に傾斜して供試体の体積変化を妨げないように、リニアブッシュを用いたガイドを設けて加圧板が傾かないようにした。

上下せん断箱間の隙間は外側フレームを上下させることによって隙間を変えることができる。今回の実験は隙間を 0.2 mm で行った。

定圧式ではせん断時の供試体の体積変化によって、供試体とせん断箱の内面との間に周面摩擦力が生じて、せん断面上の垂直応力に影響を与える。垂直力測定用の荷重計を反力側つまりせん断箱の底面に設置すれば、せん断面上の平均的な垂直力を直接測定できるが、せん断箱の底面に荷重計をつけるとレーザーを透過させる面がなくなってしまうので、簡便に加圧板に直接おもりを吊り下げて垂直荷重を与える方式とした。

せん断力の载荷は、オリエンタルモータ社製のラック・ピニオン機構のリニアヘッドに AC モータに変速ヘッドを組み合わせて減速し、速度制御回路を取り付けて構成した。最大推力は 1.5 kN である。

外側のフレームは主に、株式会社ミスミのアルミフレーム HFS8-4040 を組み合わせて使用した。

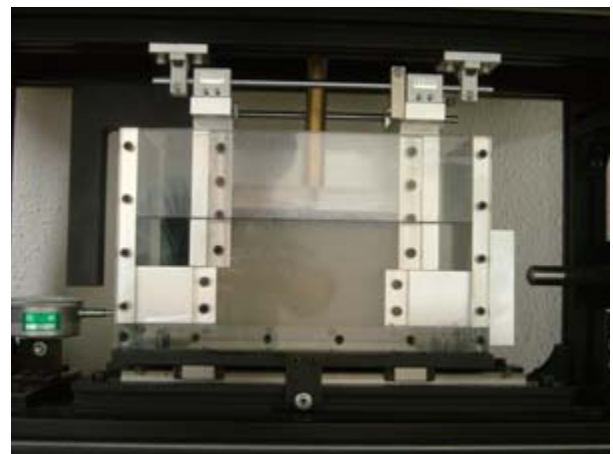
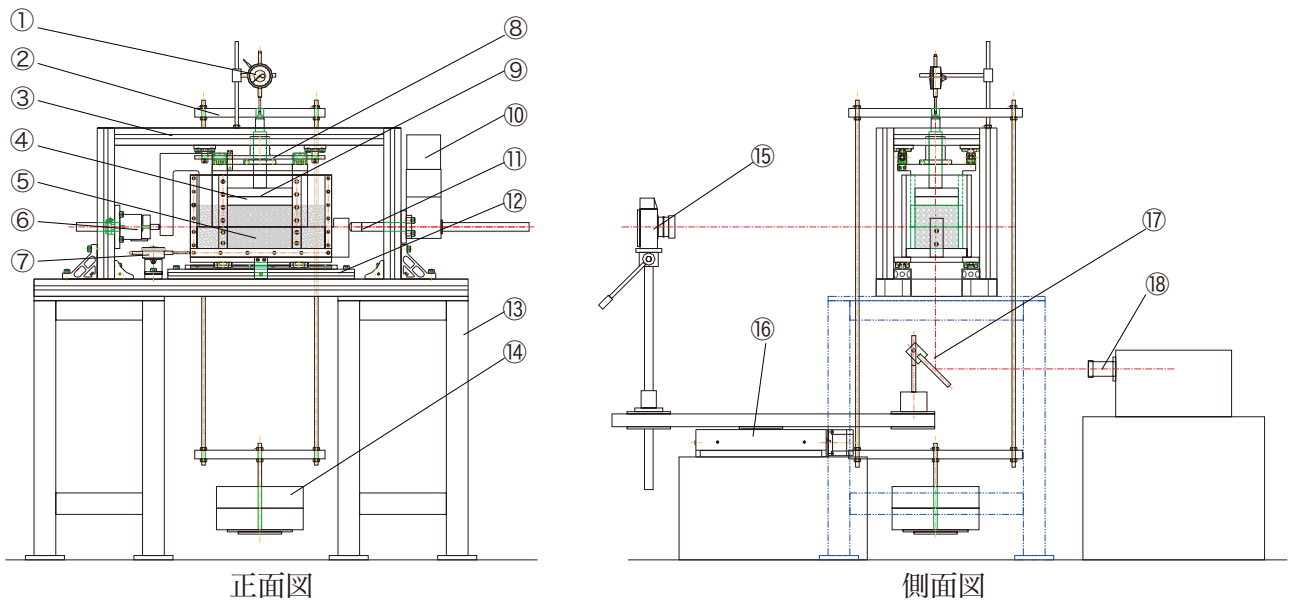


図 5. 作成した上下せん断箱

4. 実験方法の概略

実験方法は、一定の垂直荷重のもとで変位制御を行う。せん断変位速度を一定にしてせん断力を加えてせん断を行い、変位計によって水平変位と試料の上向きの垂直変位をそれぞれ測定する。せん断力は外側のフレームに固定した荷重計で測定する。せん断変位速度は、0.2 mm/min である。



- | | | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| ①変位計 (垂直変位用) | ②垂直力载荷用フレーム | ③フレーム | ④上せん断箱 |
| ⑤下せん断箱 | ⑥せん断力用荷重計 | ⑦変位計 (水平変位用) | ⑧上せん断箱ガイド装置 |
| ⑨加圧板 | ⑩せん断力载荷用モータ | ⑪加力軸 | ⑫下せん断箱ガイド装置 |
| ⑬架台 | ⑭垂直力载荷用錘 | ⑮デジタルカメラ | ⑯撮影用直動装置 |
| ⑰レーザー用ミラー | ⑱レーザー装置 | | |

図 6. 実験装置全体図

せん断力をモニターし、段階的にせん断を停止して LAT のためのカメラ撮影を行う。せん断面はせん断箱の水平変位の増加に伴って減少するため、せん断応力と垂直応力が共に増加する。せん断箱の両端付近にある粒子の移動は端面の影響で乱れているので、せん断箱の摺動面の中央 1/3 の部分にある粒子に注目して、各粒子の移動距離の水平と垂直成分を LAT 解析によって測定する。



図 8. 実験に使用したガラス粒子

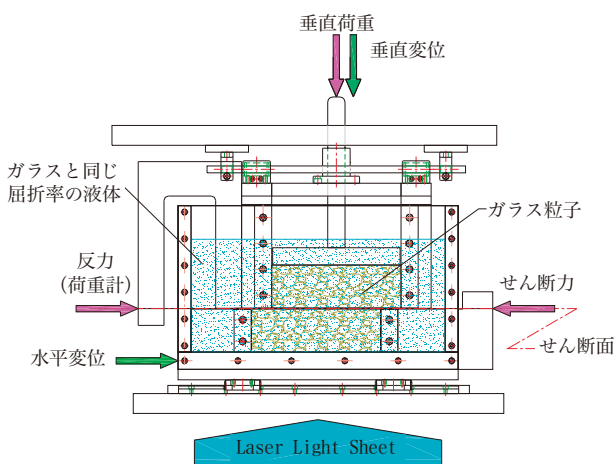


図 7. 実験図

ガラス粒子は光学ガラスをクラッシャーで粉碎してから、ボールミルを用いて角張りをとり、篩目 10 mm を通過し、5 mm に留まるものを使用している。

用いる液体は、ガラス粒子の屈折率よりも高い屈折率を持つ液体と低い屈折率を持つ液体を混合させて、ガラス粒子と同じ屈折率を実現しているが、研究室では活性度の低い 2 種類のシリコンオイルを混合して用いている。

レーザー装置にレーザーラインジェネレータレンズを取り付けて、シート状に形成したビームをレーザー用ミラーで反射させて、せん断箱の底面から試料内を透過させる。レーザーは MELLES GRIOT 社製の半導体励起固体レーザー、最大出力 2.5 W を用いた。

撮影はステップモータを使用した直動ステージの上にカメラとレーザー用ミラーを乗せ、等距離で同時に移動させスキャンし、ピントがずれないように撮影する。一回の移動距離は 0.2 mm である。画像の取得には Canon 製のデジタル 1 眼レフカメラを用いた。コンピュータを使って移動と撮影の繰り返しを自動で行う。

データの収録は、せん断荷重、水平変位、垂直変位とも動ひずみ計を介して AD 変換器でパソコンに取り込んだ。

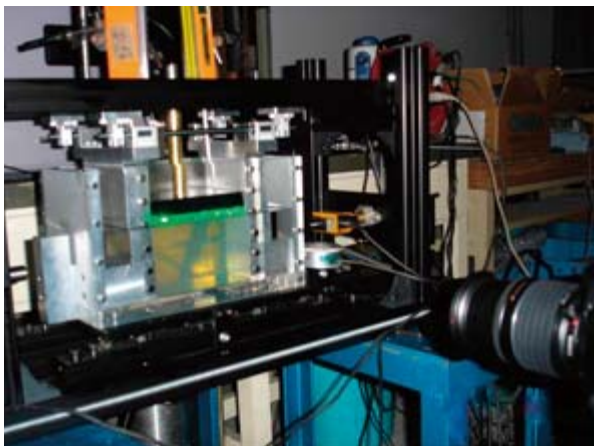


図 9. 実験の様子

5. 実験結果

図 10 はせん断前の試料である。図 11 はせん断変位 15 mm 時の試料である。垂直荷重はかけていない。

LAT 解析により、試料内部の粒子の移動方向の分布や粒子のミクロの挙動と、粒子全体のマクロなせん断挙動を観察することができた。

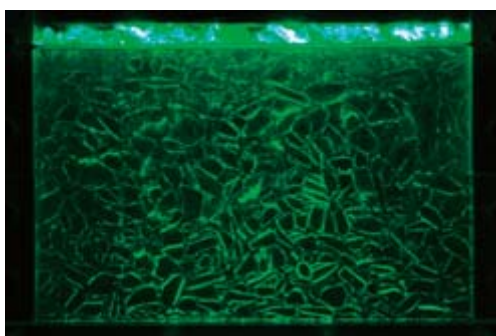


図 10. せん断前の試料

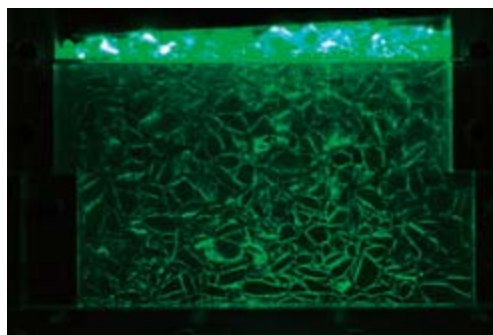


図 11. せん断変位量 15 mm 時の試料

6. まとめ

報告した装置はまだ試験的な段階である。垂直荷重は直接錘を載せて荷重をかけたが、錘では荷重に限界があるので空圧シリンダーなどを使用した載荷方法に変更し、垂直荷重の測定はせん断箱底面で行って、せん断面上の平均的な垂直力を直接測定できる方法に改良したいと思う。

謝辞

本報告にあたり、ご指導いただいたシステム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻松島巨志准教授、試料の提供などご協力いただいた山口大学工学部感性デザイン工学科李柱国准教授に感謝いたします。また、実験装置製作のアドバイスをいただいた装置開発班の中島孝技術専門官に感謝いたします。

参考文献

- [1] 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, 1992.
- [2] 土質試験の方法と解説（第一回改訂版）, 社団法人地盤工学会

Fabrication of box shear test equipment for visualization test

Minoru Iidaka

Academic Service Office for Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

A box shear test equipment using Laser-Aided Tomography (LAT) was fabricated for visualization of shear plane. Test samples were prepared using glass particles and silicon oil. The test showed that it was possible to assess 3-dimensional transfer behavior of glass particles using LAT.

Keywords: Box shear test; visualization; LAT