

# 不攪乱試料のせん断強度測定のための一面せん断試験機の開発

岐阜工業高等専門学校・環境都市工学科 国際会員 吉村 優治  
岐阜工業高等専門学校・機械工学科 稲葉 金正  
岐阜工業高等専門学校・建設工学専攻 1年 ○田中 麻里

## 1. はじめに

試料を室内で試験するためには、地盤内での状態をそのまま維持した不攪乱試料が必要である。また、森林地斜面のような植生を含むせん断強さを調べるためにも、不攪乱で採取した試料のせん断試験を行う必要がある。しかし、一般的なせん断試験機で使われる試料は、直径6.0cm、厚さ2.0cmの、小さな円筒型供試体<sup>1)</sup>を用いるため、原位置地盤の強度測定には適していない。

本研究では、原位置から不攪乱で供試体を採取することを前提とし、大口径であるため植生根などが混入していてもバラツキを包含した強度測定が可能な一面せん断試験機の開発を行った。本報では、開発した試験機の特徴と予備試験として行った豊浦砂の試験結果について紹介する。

## 2. 開発した一面せん断試験機について

### 2.1 試験機の構造

本研究で開発した一面せん断試験機は、原位置で直径10cm、高さ10~22cm程度の寸法でサンプリングした試料を不攪乱供試体として試験を行うことができる。試験機の全体概要図を図-1に示す。供試体直径が約100mmあるにもかかわらず、試験機本体の全長は670mm、質量約15kgであり、小型化、軽量化されており、一人でも持ち運びができるため、電源が確保できれば、本試験機を現場まで車等で運搬し、試験を行うことも可能である。写真-1が実際の一面せん断試験機の外観である。

図-2に試験機のせん断箱断面図を示す。せん断箱（試料入れ）は、内径104.6mm、肉厚4.7mm、高さ222mmである。このせん断箱は、「突固めによる土の締固め試験」<sup>2)</sup>のプロクター法において土供試体を作製する際に使用する内径100mm、高さ127.3mmのモールドを利用することも意識して設計したものである。せん断位置調整用の穴は、せん断面の下2.0cmの位置にあるほか、2.5cm刻みに、4.5cm、7.0cm、9.5cm、12.0cm、14.5cmにもあり、これらの位置でのせん断試験が可能である。また、せん断箱の下が空洞になっているため、試験終了後、土供試体をそのまま下方へ取り出すことができ、せん断面の観察を行うことができる。

### 2.2 試験方法

直径10cmのサンプラーやモールドから「突固めによる土の締固め試験」<sup>2)</sup>で使用する試料押し器により試料を押し出し、せん断箱にセットする。試験機には手回し用ハンドルが取り付けられており、これを回すことでせん断が開始する。試験では、ストップウォッチを見ながら所定のせん断速度でハンドル操作を行う必要がある。図-3のせん断箱横断面に示すように、試料は薄い鉄板の上に置かれており、その板を鉄の丸棒で支えている。せん断試験終了後、せん断位置を変化させる際は、せん断した供試体を元の位置に戻したことを確認し、せん断箱の下から手を入れ、供試体が載った鉄板を持ちながら、鉄の丸棒を①（せん断面から2.0cm）から抜き取り、順次2.5cm下の②（せん断面から4.5cm）、③、・・・と、静かに供試体を下方へ降ろし、上載荷重を変化させて最大で6種類の位置でせん断試験が行える仕組みになっている。

任意の地盤深さにおける供試体のせん断応力 $\tau$ 、また、垂直応力 $\sigma$ を変化させて試験を行えば、せん断強度定数（粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\phi$ ）を求めることができる。

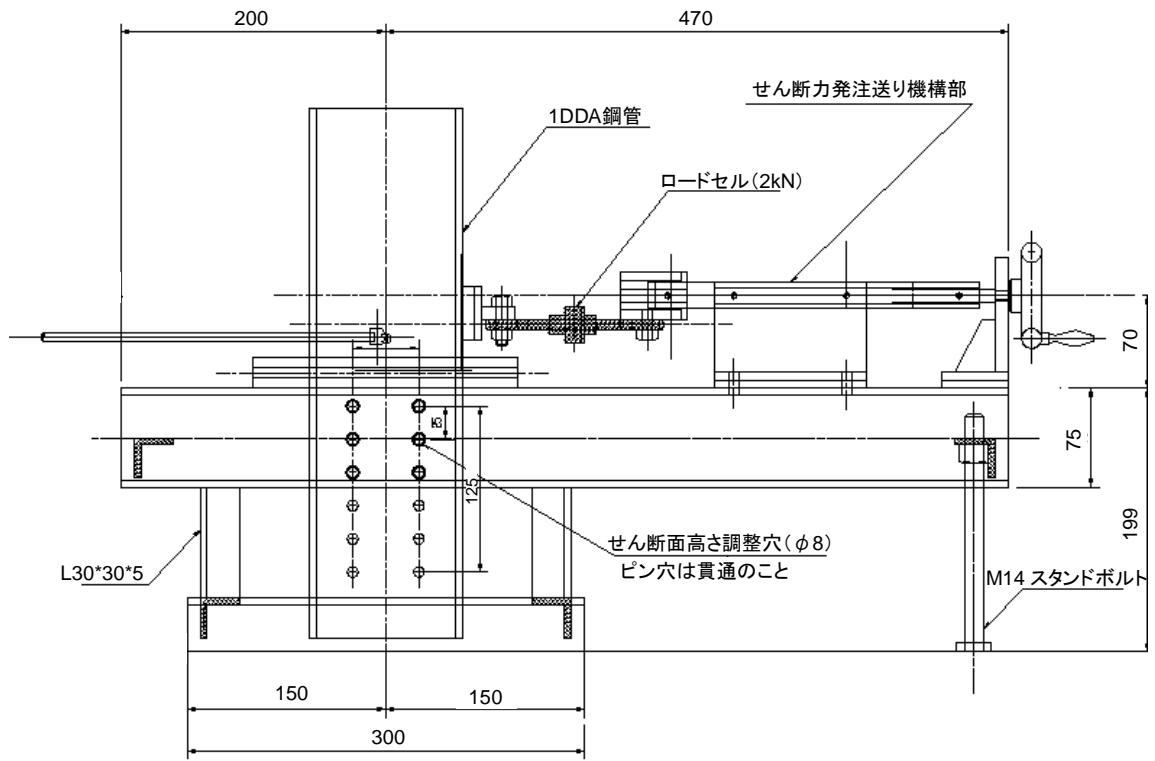


図-1 一面せん断試験機断面図(全体)

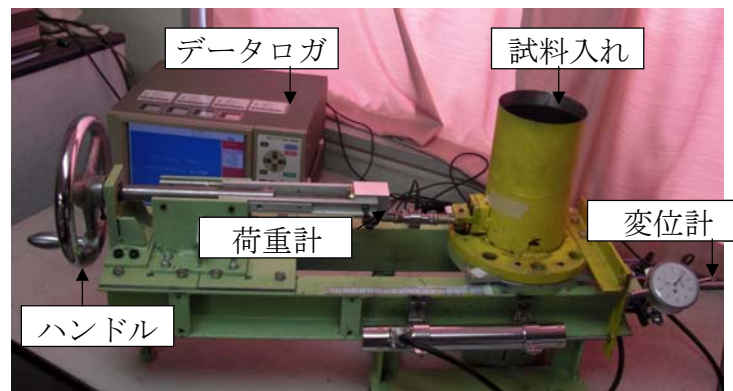


写真-1 一面せん断試験機の外観

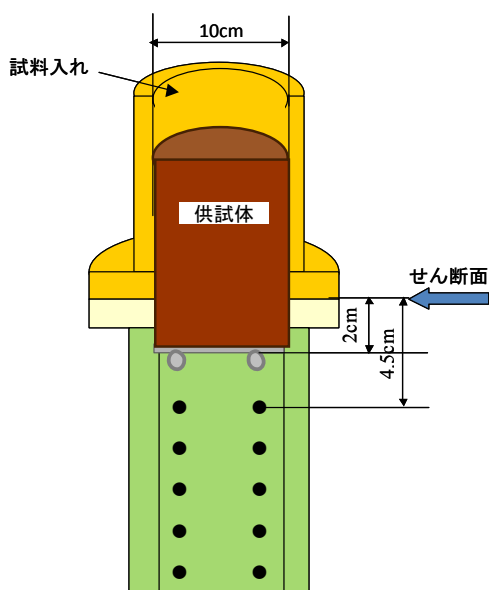


図-2 せん断箱断面図

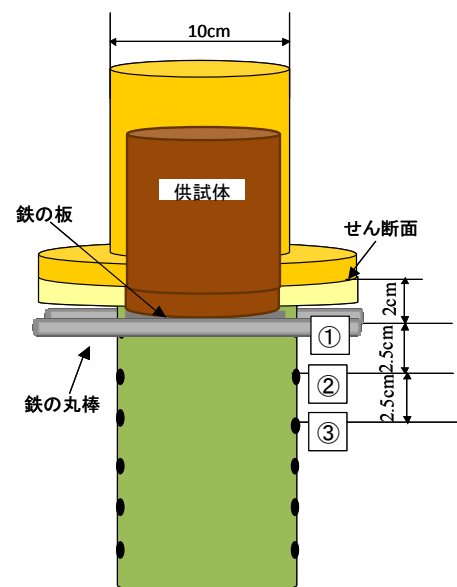


図-3 せん断箱横断面

### 2.3 せん断箱上下間に働く摩擦の検証

試験機の構造上、せん断力はロードセルによりせん断箱の外で測定しているため、もし、せん断箱上下の間に摩擦力が発生するならば、上載荷重に応じたせん断箱間の摩擦を減じなければならない。

そこで、せん断面箱間の摩擦の検証として、せん断箱に供試体を入れない状態で、上載荷重  $P$  を、荷重なし、荷重板×1 (25.77N)、荷重板×3 (77.32N)、荷重板×5 (128.87N)の4種類変化させ、せん断変位 20mm までせん断試験を行った。

図-4は、その4種類の上載荷重  $P$  に対する試験結果をまとめて示したものであり、この結果、せん断力  $S$  の値は、図に併記した豊浦砂の結果 (図-9 ( $Dr=34.6\%$ )), 図-10 ( $Dr=100\%$ )参照) と比較して極めて小さく、また上載荷重に無関係であることから、このせん断試験機のせん断箱上下間の摩擦力は無いものと見なした。

### 2.4 せん断中のせん断箱と土供試体との摩擦の検証

一面せん断試験では、せん断の進行に伴い、僅かではあるが土のせん断面積は減少する。さらに、今回、開発した試験機ではせん断の進行に伴い、図-5に示すように土とせん断箱の金属の接地面積が増加するという欠点がある。そこで、せん断の進行に伴い、土と金属部分との摩擦がどの程度増加するのかを検討した。

変位  $D$  が増えるほど、せん断面の金属部分に触れる土供試体の面積  $A$  が増える。図-6 (a)に示すように接地面積  $A$  は  $A_1$  と  $A_2$  を加えたものである。供試体の半径を  $r$  とすると、この接地面積  $A$  は、式-1で表すことができる。式-1の第1項は  $A_1$  を、第2項は  $A_2$  を示しており、この  $A_2$  を算出するには図-6 (b)に示す角度  $\alpha$  を求める必要がある。 $\alpha$  は変位  $D$  によって変化するため、式-2のように底辺と高さから角度を求めた。

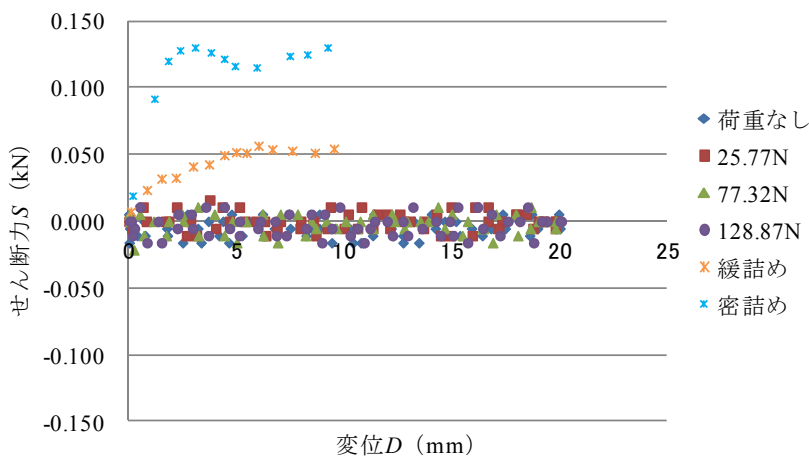


図-4 せん断面上下間の摩擦の検証

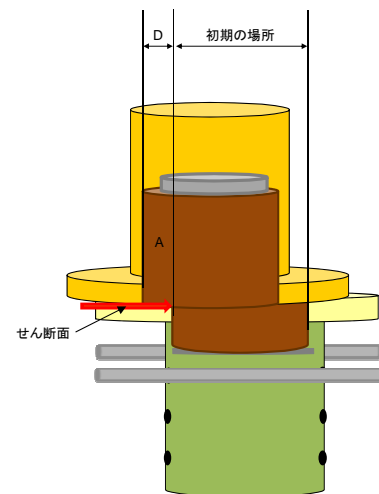


図-5 せん断の進行に伴う土とせん断箱の金属の接地面積

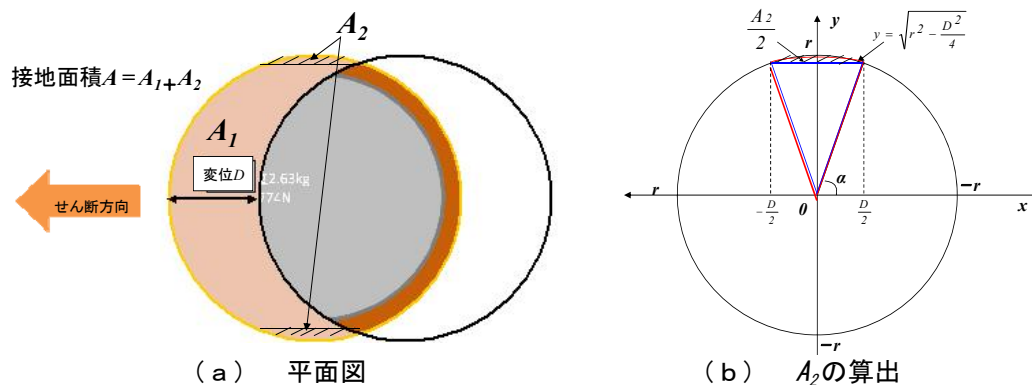


図-6 せん断の進行に伴う土とせん断箱の金属の接地面積  $A$

$$A = 2D\sqrt{r^2 - \frac{D^2}{4}} + 2\left(r^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - \frac{D}{2}\sqrt{r^2 - \frac{D^2}{4}}\right) \dots\dots(1)$$

$$\cos \alpha = \frac{D}{2r} \dots\dots(2)$$

図-7は、縦軸にせん断面の金属部分に触れる供試体の面積  $A$  と変位  $D$  の関係を示したものであり、せん断の進行に伴い変位  $D$  が大きくなると接地面積  $A$  はほぼ比例して増加することがわかる。

供試体の自重と上載荷重  $P$  の合計から面積  $A$  に載荷される垂直抗力  $N$  を求め、せん断面の金属部分と土の摩擦力  $F$  を求めた。摩擦係数を  $\mu$ 、垂直抗力を  $N$  とすると、摩擦力  $F$  は式-3 で表せる。垂直抗力  $N$  は、供試体の自重と上載荷重の合計である。

摩擦係数  $\mu$  が未知であるため、岐阜高専1号館南側中庭で採取した試料を用いて突固めて作製<sup>2)</sup>した供試体を鉄板(本来ならば、せん断面の金属と同じ材料の鉄板を使用すべきであるが、鉄板は既に組み込まれ、材料がなかったため鉄製のバットで代用した。)に載せて傾け、土が滑り出した時のバットの角度(摩擦角  $\theta$ )を、上載荷重  $P$  を3種類変えて測定した。測定結果が表-1であり、鉄と土の摩擦係数  $\mu$  は式-4を用いて算出した。摩擦角の平均  $\theta = 22.25^\circ$  のときの平均摩擦係数  $\mu = 0.41$  となった。

$$\text{摩擦力 } F = \mu \times N \dots\dots(3)$$

$$\text{摩擦係数 } \mu = \tan \theta \dots\dots(4)$$

上載荷重3種類に対して、せん断の進行に伴う変位  $D$  の場合の、土と金属の接地面積  $A$  を式-1で計算し、上載荷重が土部分、接地面積  $A$  の部分に均等にかかると仮定し、接地面積  $A$  にかかる垂直抗力  $N$  を算出する。

図-8は、この  $N$  と摩擦係数  $\mu = 0.41$  を式-3に代入して求めた摩擦力  $F$  を示したものである。この図から、上載荷重が大きいほど、せん断が進行して土と金属の接地面積  $A$  が大きくなるほど、土と金属の接地面に働く摩擦力  $F$  は大きくなる。しかし、その摩擦力  $F$  の値は、2.3で述べたせん断箱上下間に働く摩擦に比べても1オーダー小さく、また、3.で後述する実際のせん断試験ではせん断変位  $D$  が僅か数mmでせん断強度が決定していることを鑑み、せん断箱と土供試体との摩擦は考慮しなくてもよいと判断した。

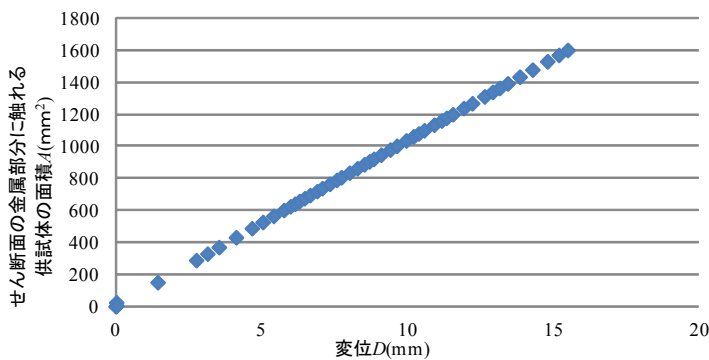


表-1 鉄と土の摩擦角  $\theta$  および摩擦係数  $\mu$

上載荷重 $P$ (N)	摩擦角 $\theta$ ( $^\circ$ )	摩擦係数 $\mu$
0	21	0.384
1.96	22	0.404
3.92	23	0.424
5.88	23	0.424
平均	22.25	0.409

図-7 せん断面の金属部分に触れる供試体の面積  $A$  と変位  $D$  の関係

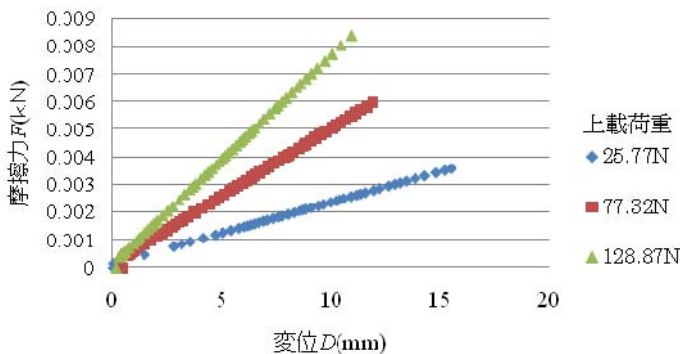


図-8 せん断の進行に伴う土と金属の接触面  $A$  に働く摩擦力  $F$  の変化

## 2.4 試験方法

試験は、写真-1のように、荷重計としてロードセル、変位計として電動ダイヤルゲージを一面せん断試験機に取り付け、これらをデータロガーに接続して、以下の手順で行った。

- ① データロガーを立ち上げ、測定チャンネルの設定を行い、サンプリング周期を1Hzに設定する。
- ② 試験機のせん断面がずれていないことを確認し、試料を試験箱に入れる※。
- ③ 試料の高さを測る。
- ④ 上載荷重（荷重板）を試料の上部に載せ、ダイヤルゲージを取り付ける。
- ⑤ データロガーのバランスを取り、初期値とする。
- ⑥ せん断開始。（本試験では、せん断速度1mm/分となるようハンドルを回す。）
- ⑦ データロガー画面でモニタリングしながら試験を行い、ピークを確認して試験を終了（ピーク値が得られない場合には $D \approx 20\text{mm}$ 程度で終了）し、データを保存する。
- ⑧ 供試体を元の位置（ $D \approx 0$ ）に戻し、図-3の鉄の丸棒を抜き取り、せん断位置を一段（.5cm刻み）下げ、上載荷重を加えて、次の試験を実施する。

※原位置地盤では、有効土被り圧は、地表面に近いほど小さく、地中深くなるほど大きくなることから、少しでも現地に近い状態で実験を行うため、せん断位置と上載荷重を考慮し、手順②で試料をせん断箱にセットする際、試料を上層が下向きになるように入れる。

## 3. 豊浦砂を用いた一面せん断試験

開発した一面せん断試験機の性能確認の目的で内部摩擦角が既知<sup>3)</sup>である豊浦砂を用いて予備試験を行った。

一面せん断試験は、上載荷重を荷重板×3（77.32N）に固定し、緩詰めと密詰めの2種類を、各3回行った。緩詰め供試体は漏斗を用いて落下高さ0とし静かに流し込んで作製し、密詰め供試体は砂を3層に分けて入れ、各層鉄棒で100回突いて作製した。

図-9に示した緩詰めの試験結果では、明確なピークが見られないS-D曲線を示した形になり、図-10に示した密詰めの試験結果では明瞭なピーク後、軟化するS-D曲線を示し、緩詰め、密詰めとも典型的なS-D（右軸 $\sigma-D$ ）曲線を示している。表-2、表-3は、各試験の初期相対密度 $D_r$ と内部摩擦角 $\phi$ の関係を一覧にしたものであり、図-11は、この結果を同じ豊浦砂を用いた既往の三軸圧縮試験結果（供試体は空中落下法で作製）<sup>3)</sup>に併記したものである。図-11から、今回の試験結果は、三軸圧縮試験結果と同等の結果を得たと判断でき、よって、今回開発した一面せん断試験から得られる結果は、十分に信頼性があると言える。

## 4. まとめ

森林地斜面は植生を含むため、せん断強さを調べるためには、不攪乱で採取した試料のせん断試験を行う必要がある。本研究では、植生を含むような土を想定し、原位置から不攪乱で採取した供試体の強度を測定できる一面せん断試験機の開発を行った。開発した一面せん断試験機のせん断箱の直径は約10cmと大口径であり、豊浦砂を用いた予備試験では、三軸圧縮試験結果とほぼ同等の結果が得られたことから、本試験機を用いれば原位置から採取した植生を含むような供試体に対して、十分に信頼性があるせん断強さを測定できると考えられる。

また、原位置地盤のサンプリングについても、写真-2に示すように直径10cm、高さ10cmの鉄筒を地面に置き、周囲をスコップで掘りながら、鉄筒の上部を埋め込むことで、不攪乱試料の採取が可能であることを確認している。今後は、原位置の不攪乱供試体を用いた一面せん断試験、さらには開発した一面せん断試験機のせん断箱は高さ14.5cm以上の不攪乱供試体の一つサンプリングできれば、上載荷重など6種類条件を変えて試験を行うことができるので、サンプリング方法についても検討する予定である。

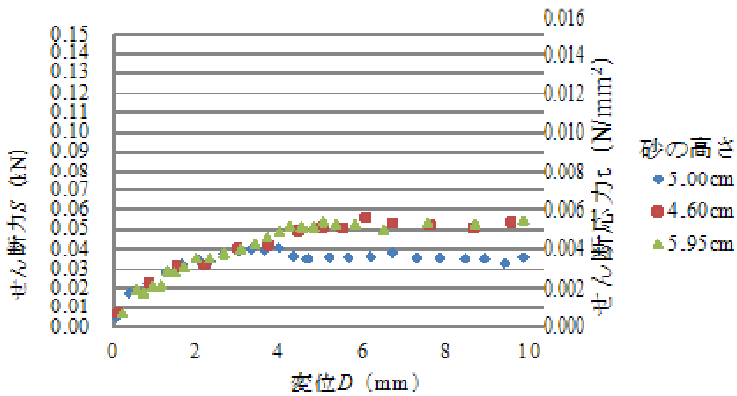


図-9 豊浦砂の緩詰め試験結果

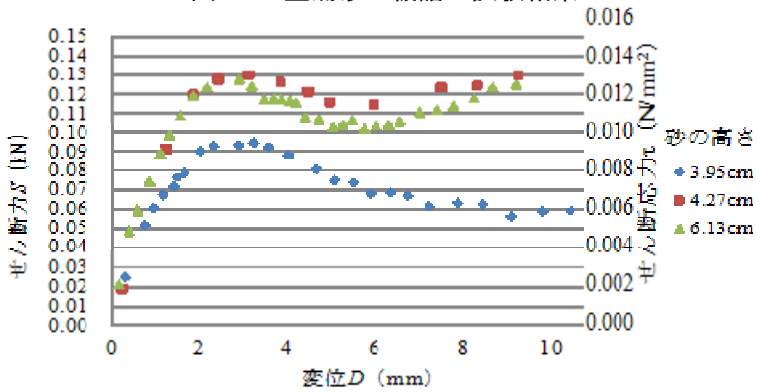


図-10 豊浦砂の密詰め試験結果

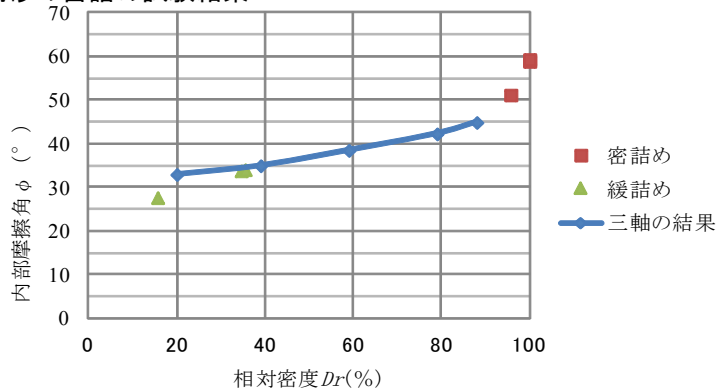


図-11 三軸圧縮試験との比較

表-2 豊浦砂の緩詰め試験結果一覧

緩詰め		
土の高さ (cm)	相対密度 $D_r$ (%)	$\phi$ (°)
5.00	15.63	27.69
4.60	34.58	33.82
5.95	35.49	34.09

表-3 豊浦砂の密詰め試験結果一覧

密詰め		
土の高さ (cm)	相対密度 $D_r$ (%)	$\phi$ (°)
3.95	95.71	51.19
4.27	100.00	58.90
6.13	100.00	59.31



(a) 採取前



(b) 不攪乱試料採取後

写真-2 鉄筒 (直径 10cm, 高さ 10cm) を用いた土の不攪乱供試体のサンプリング方法 (2012年1月24日撮影)

参考文献

- 1) 地盤工学会：土の一面せん断試験，地盤材料試験の方法と解説，pp.661～699，2009.11/25.
- 2) 前掲 1)，突固めによる土の締固め試験，pp.373～385.
- 3) 吉村優治：砂のような粒状体の粒子形状と一次性質，二次性質に関する研究，長岡技術科学大学博士（工学）学位論文，pp.64～73，1994.3.