

# 砂の一面せん断試験における供試体作製と試験手順に関する考察

清水正喜・古澤慶祐

鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

## Methods of Preparing Specimens and Testiong Procedures for Direct Shear Box Test

Masayoshi SHIMIZU and Keisuke FURUSAWA

Department of Management of Social Systems and Civil Engineering

The Graduate School of Engineering, Tottori University

Tottori, 680-8552 Japan

Email: mshimizu@cv.tottoriu.ac.jp

**Abstract:** The objective of the study is to improve the method of conducting shear box tests on dry sand. An improved method of preparing specimens is proposed. By the method, specimens of a specified density can be prepared with high reproducibility. It is also discussed how the behavior of normal stresses are affected by the procedures, to be followed before shearing, for detaching one shear box from the other box and for fixing the detached box.

**Key Words:** Direct shear box test, Dry sand, Normal stress, Shear strength.

### 1. 序論

著者らは、不攪乱火山灰質粘性土や乾燥砂を対象として、加圧板側および反力板側で垂直応力を測定・制御できる一面せん断試験機を用いて、一面せん断試験に特有の供試体周面摩擦が強度特性に与える影響について考察してきた[1, 2, 3]。本研究では乾燥砂のせん断試験を実施する際に問題となる供試体の作製方法を改善すること、また試験機の機構に起因して生じる操作手順に関する問題を解決することを目的としている。

砂の一面せん断試験における供試体の作製方法について、地盤工学会基準[4]では、漏斗を用いて砂を自由落下させる方法が規定されている。即ち、先端を塞いだ状態で漏斗内に試料を入れ、所定の高さから試料を落下させる。次に、試料の上面を平らに仕上げ、締め用具などで試料上面から押さえて所定の密度になるように締める。緩詰め供試体は試料を一回の投下で作製するが、密な状態にするときには試料を2~3層に分けて行う。この方法では、特に密詰めの場合に、層に分けることで供試体の密度が均一でなくなることが懸念される。

著者らは、これまでの研究[2]において、1回の落下で試料をせん断箱に投入した後、手に持った

木槌で所定の距離からせん断箱を叩いて締め固めることにより供試体を作製した。この方法では、層に分けないので、層別締めめに起因する密度の不均一を抑えることができると思われるが、その反面、木槌で叩く力を一定にすることが困難なため、相対密度の高い再現性を期待できないという問題がある。

本報告では、空中落下法と打撃法を併用した供試体作製方法を新たに提案し、その方法によると再現性の高い供試体作製が可能であることを示す。また、上下せん断箱間の隙間の有無や、せん断前にせん断箱を固定する操作手順が垂直応力の挙動に及ぼす影響について考察する。

### 2. 試料および供試体作製方法

#### 2.1 試料

試料は豊浦砂である。土粒子密度  $2.637\text{g/cm}^3$ 、最大および最小間隙比はそれぞれ  $e_{\max}=0.990$ 、 $e_{\min}=0.605$  である。粒径加積曲線を図1に示す。

#### 2.2 空中落下法

空中落下法において、落下高さ、漏斗の形状お

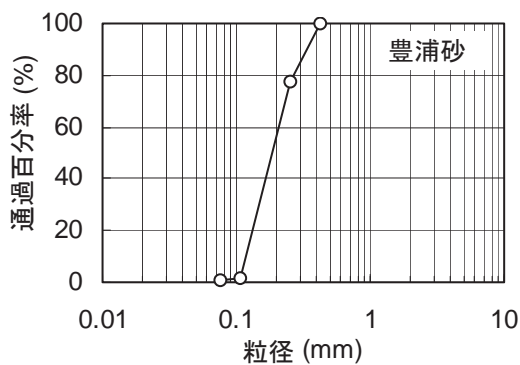


図1 試料の粒径加積曲線

よび漏斗口の口径による密度への影響を検証した。

(1) 漏斗形状の影響

試験には、図2に示す2種類の形状の漏斗を用いた。V型漏斗は紙製で JISA1224 および JGS0161 で規定されているものである。Y型漏斗はプラスチック製で、本体部分が円錐形で頂上部から管が伸びている。

落下高さは漏斗先端と試料上面の距離であり、試料の投下中、一定に保つ(図3)。

結果を図4(a)と(b)に示す。(a)はV型漏斗、(b)はY型漏斗を用いたときの結果である。漏斗の

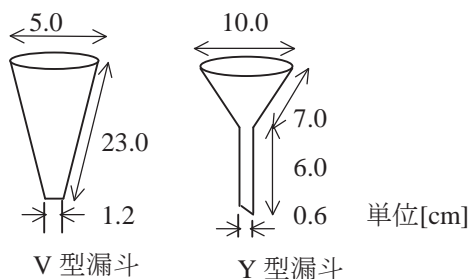


図2 漏斗

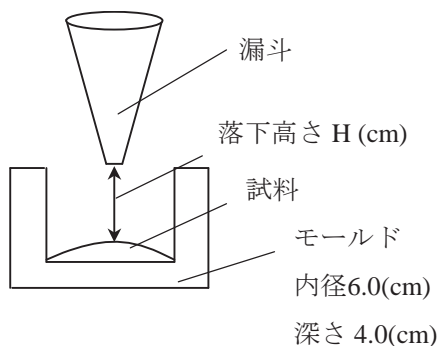
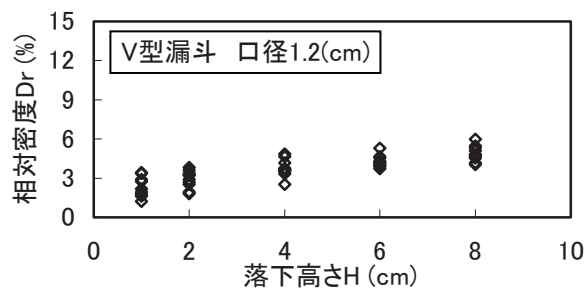
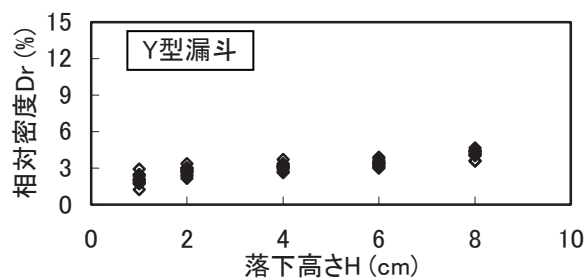


図3 空中落下法



(a) V型漏斗



(b) Y型漏斗

図4 落下高さ と 相対密度の関係 (漏斗形状の影響)

形状に依らず、落下高さを大きくすると相対密度は大きくなる傾向はあるが、最大落下高さでも相対密度10%を超えていないことがわかる。

このことから漏斗の形状に依らず落下高さを変えるだけで相対密度の幅広い調整は無理であると判断した。なお、落下高さは最大8cmとしたが、それ以上にすると試料がモールド外に落ちること、また落下高さを一定に保つことが困難であったためである。

(2) 漏斗口径の影響

V型漏斗を用いて口径を変化させて、口径による相対密度への影響を調べた。試験方法は上記と同



図5 落下高さ と 相対密度の関係 (口径の影響)

じで、試験結果を図5に示す。なお、図を見やすくするために同じ落下高さであっても口径ごとに横軸の位置を変えている。各落下高さにおいて、口径が大きくなると相対密度が低くなる傾向を認めることができる。しかし、同じ条件であっても、ばらつきも大きいので、この結果から口径による影響を明確に結論することは難しい。

### 2.3 空中落下と打撃による締固め

#### (1) 予備実験

木槌を用いて締固める場合、従来行っていたように手で叩く方法では供試体の再現性に乏しい。そこで、一定の打撃力を与える方法として柄の端を支点として自由に振り下ろして締固める方法を新たに考案した。この方法で安定した所定の密度を得られるか、また、広い範囲の密度の調整が可能かを検討した。

図6に示すような装置で落下高さと打撃回数を変えて試験を行った。容器は砂の最大・最小密度試験用のモールドである。

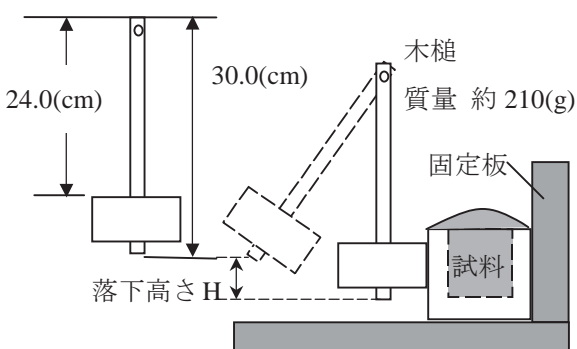


図6 木槌を用いた締固め装置

まず、地盤工学会基準[4]の緩詰め供試体作製方法に順じて空中落下させた。次に、試料を山盛りにした状態で木槌を落下させてモールドを打撃する。打撃方向を90度ずつ変えて計4方向から打撃した。以下、一つの方向で叩いた回数を打撃回数と言う。打撃後、余盛り分を直ナイフで除去して供試体表面を水平にした。各試験条件（木槌落下高さと打撃回数）で5回以上試験した。

結果を図7および図8に示す。

図7は、打撃回数を1回として木槌落下高さを変えた場合の結果である。この図より、落下高さに比例して相対密度が大きくなっているのがわかる。打撃回数1回では落下高さを最大10cmにして

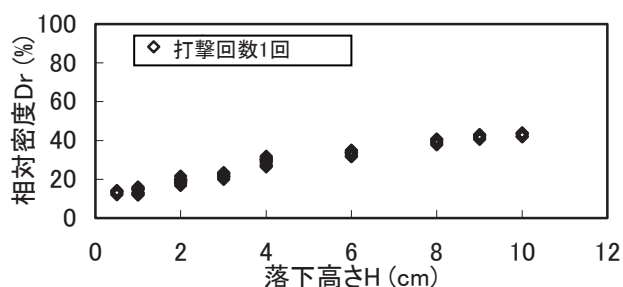


図7 打撃回数一定締固め試験

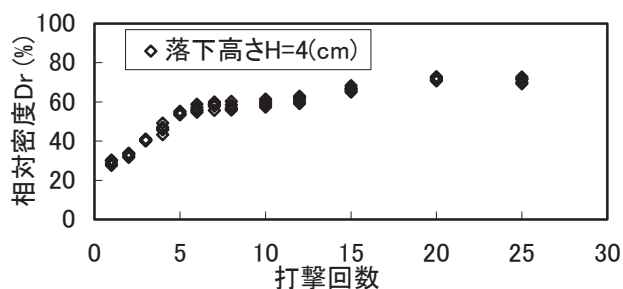


図8 落下高さ一定締固め試験

も得られる相対密度は高々40%である。

図8は、落下高さを4cmに固定し、打撃回数を変えた場合の結果である。この図より、打撃回数が多いほど相対密度が大きくなっていること、さらに、約20~80%の広い範囲の相対密度にできることがわかる。

また、両図より、試験条件が同じであれば、相対密度に高い再現性があることがわかる。落下高さは木槌の柄の長さ以上にはできないが、打撃回数には限界がない。よって本研究では打撃回数を変化させることによって、所定の密度の供試体を作製することにした。

#### (2) セン断箱での締固め

予備実験では、試料を山盛りにした状態で打撃して、余盛り分を直ナイフで除去することで供試体を水平にしたが、セン断箱ではその方法は使用できない。セン断箱の深さが供試体初期高さより深いからである。そこで、次の方法で締固めた。

所定量の試料を締固めた後、供試体の上面を水平にならしたのでは供試体表面部とそれ以外とで相対密度に差が生じてしまう恐れがある。よって供試体の上面を水平に保って締固める方法を考えた。即ち、図9に示すように、空中落下後上面を水平にならしておき、その上に押さえ板（約500g）を載せ、上面を水平に保ったまま締固めを

行った。なお、上面をならすのに、押さえ板を用いた。この過程で試料が締固められることになるが、そのときの相対密度は高々15~20%であった。

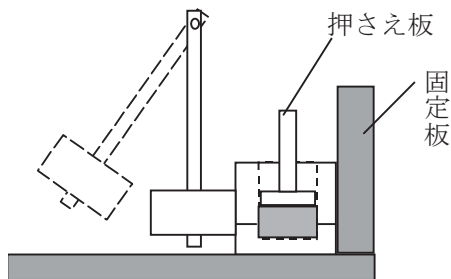


図9 せん断箱での締固め方法

この方法による結果を図10に示す。結果として図のように緩詰めから密詰めの広い範囲の相対密度の供試体が得られていることがわかる。また、同じ打撃回数であれば相対密度の変動も少ないので、供試体作製が高い再現性をもって行える。よってこの方法は有効であると判断した。次章で示すせん断試験の結果は、この方法で作製した供試体に対して行ったものである。

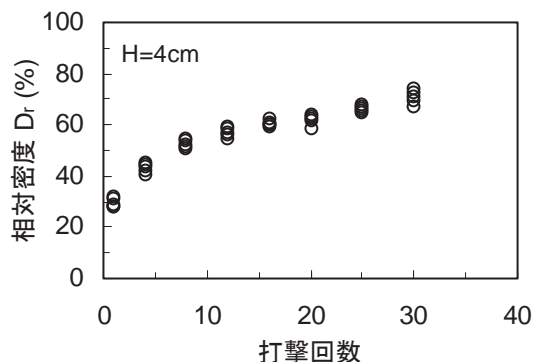


図10 せん断箱を用いた締固め

### 3. 一面せん断試験の操作手順の影響

#### 3.1 上せん断箱固定手順

一面せん断試験に使用した装置は上せん断箱固定、下せん断箱可動タイプである。図11にせん断箱の構造と作用荷重を模式的に示した。せん断中は上せん断箱が固定用反力板に固定されていなければならない。圧密過程の前に固定するか圧密後に固定するか、二通りの方法が考えられる。両方

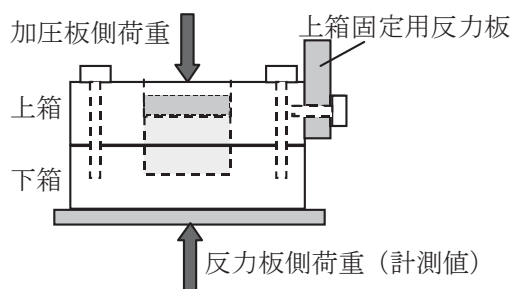
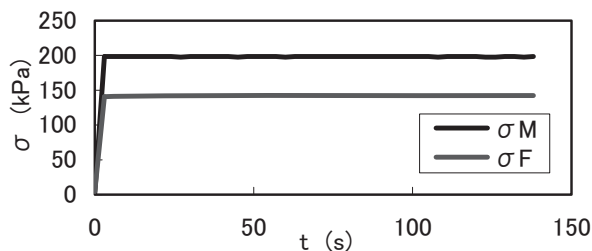


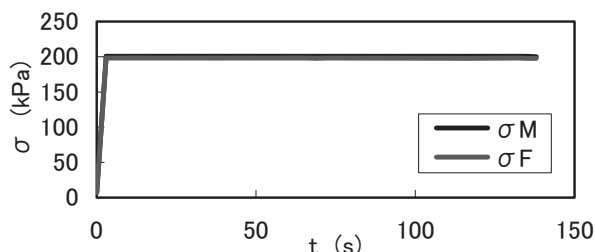
図11 せん断箱の構造と作用荷重

法で固定した場合の結果を比較する。

結果を図12(a)および(b)に示す。図(a)は圧密過程の前に上箱を固定した場合、(b)は固定しない場合である。図中、 $\sigma_M$ は加圧板側、 $\sigma_F$ は反力板側の垂直応力である。



(a) 固定



(b) 非固定

図12 圧密過程における上箱固定の影響

両図を比較すると、圧密過程に入る前に上箱を固定すると、 $\sigma_M$ と $\sigma_F$ の差が大きくなることがわかる。これは、せん断箱を固定した状態で圧密荷重(加圧板側の垂直荷重)を作用させると供試体とせん断箱周面との摩擦によって、作用荷重の一部が固定用反力板が受け持ってしまうからであると考えられる。結果として、反力板側の垂直荷重が作用荷重より小さくなる。

以上のことより、上せん断箱の固定は圧密過程終了後に行うほうが好ましいと言える。

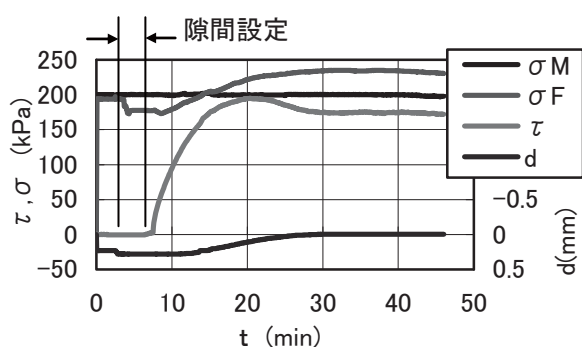
### 3.2 隙間設定操作の影響

上せん断箱と下せん断箱の隙間は、圧密過程終了後に隙間設定ネジで上せん断箱を持ち上げることによって設定する。供試体周面とせん断箱内周面との間に摩擦があるので供試体には上向きの力を与えることになる。この操作が垂直応力に与える影響について検討した。

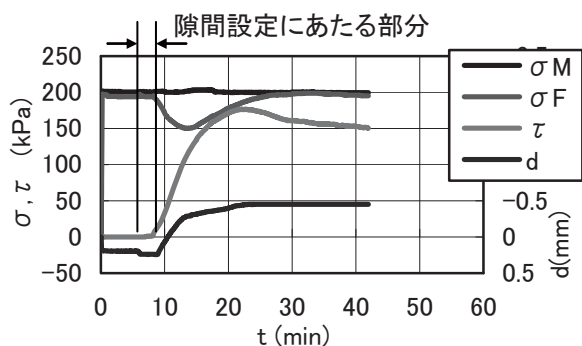
隙間を設定した場合としない場合について、圧密から（隙間設定および）せん断に至る過程で垂直荷重を連続的に計測した。密詰め供試体を対象にした。

圧密過程前に上箱は固定せず、せん断過程直前に固定した。即ち、隙間を設定した場合は隙間設定後に、隙間を設定しない場合は圧密直後に固定した。隙間を設けた場合は、せん断中に隙間が保たれるように堅固に固定したが、隙間を設けない場合には、固定によって上箱が下箱を過度に押しえつけることがないように上箱固定ねじを適度に締め付けた。

結果を図13(a)と(b)に示す。図中、 $\tau$ はせん断応



(a) 隙間あり



(b) 隙間無し

図13 隙間設定の影響

力、 $d$ は垂直変位である。垂直変位は正の値が供試体の収縮を表す。2本の縦線の間が隙間設定時である。

図13(a)より、隙間設定の初期において、垂直変位 $d$ がほぼ瞬時にわずかに増加（供試体圧縮）し、やや遅れて反力板側垂直応力 $\sigma_F$ が減少している。隙間を設定する前に、上下せん断箱締結用のネジ（4本）をはずさなければならないが、その操作によって $d$ に変化が生じたと思われる（隙間を設けない場合にも $d$ に同様の変化が生じた。図(b)参照）。一方、 $\sigma_F$ の減少は上せん断箱を持ち上げるという隙間設定の操作によって生じたと思われる。隙間を設けない場合には $\sigma_F$ は減少していないからである（図(b)参照）。

隙間を設定することによって反力板側垂直応力が低下すると、 $\sigma_F$ が圧密時とせん断開始時とで異なることになる。 $\sigma_F$ 一定の定圧せん断試験を行うときに注意しなければならない。

次にせん断過程での $\sigma_F$ の挙動について比較する。一般に、隙間を設定してせん断すると、供試体が膨張すると供試体には周面摩擦に起因する下向きの力が働いて、結果として反力板側垂直応力が増加する。実際、隙間を設定した試験ではそのような挙動を示している（図13(a)）。なお、体積膨張によって上せん断箱も下せん断箱も上向きの力を受けることになるが上せん断箱に作用する上向きの力は固定板が受け持つ。下せん断箱に働く上向きの力は供試体に働く下向きの摩擦力と相殺される。

一方、隙間を設定しない場合（図(b)）、先に触れたが、せん断前に、上下せん断箱締結用のネジを緩めたことによって $d$ がわずかに増加したが $\sigma_F$ は大きく減少していない。次に、せん断開始とともに急激に $d$ が減少（体積膨張）して $\sigma_F$ は急激に減少した。これは、体積膨張によってせん断箱内周面に上向きの力が働いたためである。下箱に働いた上向きの力も（恐らくその大部分が）固定板によって受け持たれたと考えられる。

これについては上箱の固定度も影響していると考えられる。隙間無しの場合に上箱の固定を緩くしたと先に述べたが、やはり上下方向に固定されていたのではないかと思われる。今後さらに検討しなければならない。

### 3.3 強度定数に対する隙間設定の影響

上下せん断箱間に隙間を設けた場合と設けない場合でせん断抵抗角を比較した。緩詰めと密詰めそれぞれの供試体に対して加圧板側定圧試験を実施した。せん断抵抗角 $\phi_d$ はせん断応力最大時のせん断応力と垂直応力の比から求めた。垂直応力として加圧板側垂直応力 $\sigma_M$ と反力板側垂直応力 $\sigma_F$ のそれぞれを用いて整理した。結果を表1に示す。

表1 試験条件別のせん断抵抗角

試験条件	緩詰め		密詰め	
	$\sigma_M$	$\sigma_F$	$\sigma_M$	$\sigma_F$
隙間有	37.4°	37.6°	46.2°	45.3°
隙間無	36.0°	38.4°	44.1°	44.2°

緩詰めの場合、 $\sigma_M$ で整理すると隙間を設けた方が $\phi_d$ が大きくなり、 $\sigma_F$ で整理すると隙間の有無による違いがほとんど生じなかった。

密詰めの場合、 $\sigma_M$ で整理しても $\sigma_F$ で整理しても $\phi_d$ は隙間を設けた方が大きくなった。

以上のことより、隙間を設定しないと上下せん断箱間に摩擦が発生してせん断抵抗角を大きく推定する、と安易に考えることが妥当でないことがわかる。

なお、反力板側定圧試験や定体積試験など、他の試験方法でも同様の結果が得られるかどうかは現時点では不明である。

### 4. 結論

本研究で考案した砂供試体作製方法によれば、木槌落下高さを一定にして打撃回数を変えることによって緩詰めから密詰めに至る供試体を高い再

現性をもって作製することができる。

一面せん断試験において、

- 1) 上下せん断箱間の隙間は圧密過程終了後に設けた方がよい。
- 2) 隙間を設ける操作によって、反力板側垂直応力が変化する。そのため、せん断開始時に、加圧板側垂直応力と反力板側垂直応力が異なる。
- 3) 隙間を設けずにせん断するとせん断箱を固定することの影響を評価することが困難になる。  
総合的に判断すると、垂直応力の変化を測定しつつ隙間を設けてせん断する方がよい。

### 謝辞

本研究の一部は第二著者の土木工学科卒業研究として実施された。ご指導を賜った土木工学講座榎明潔教授、技術部岩成敬介氏に謝意を表す。

### 参考文献

- [1] Shimizu, M. and Yamamoto, D.: Shear Strength and Suction Behavior of an Undisturbed Volcanic Soil, Proc. of the 13th Asian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 141-144, Kolkata, India, 2007.
- [2] 清水正喜, 山本大輔, 裕 博則: 定圧一面せん断試験に基づく砂の強度特性, 地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol. 24, No. 1, pp. 97-100, 2006
- [3] 清水正喜, 古澤慶祐: 一面せん断試験による砂の強度特性—周面摩擦の影響—, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, III-50, 2008
- [4] 地盤工学会: 「土質試験の方法と解説—第一回改定版—」, pp. 564-574, 2000.

(平成20年10月6日受理)