

1. はじめに

一面せん断試験において、圧密とせん断過程において供試体が圧縮または膨張するとき、供試体周面に摩擦力が働くので、加圧板側と反力板側の垂直荷重の値に違いがある。したがって、定圧試験ではどちらの垂直応力を一定にするかによって、また、定体積試験も含めてどちらの垂直応力を用いるかによって強度パラメータの値が異なる。著者ら¹⁾は先に乾燥砂を用いて強度パラメータに対する試験方法と垂直応力の選択の影響を調べた。

先の研究で採用した供試体作製方法が客観性を欠くこと、また、2つの垂直応力でのみ試験したため、決定された強度パラメータの信頼性が高くないという問題があった。そこで本研究では、客観性のある供試体作製方法を確立し、その方法で作製した供試体を用いて、先の研究と同様の試験方法で3種類の垂直応力の下で試験を実施した。また、原理的には周面摩擦が小さくできると予想される定体積一面せん断試験も比較のために行った。

各試験から強度パラメータを決定する時の留意点について考察する。

2. 試料及び供試体作製方法

乾燥した豊浦砂を用いた。物理試験の結果は $\rho_s=2.637\text{g/cm}^3$ 、 $e_{\max}=0.990$ 、 $e_{\min}=0.605$ である。

先の研究では、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。しかし、同じ試験者であっても叩く力は一定しないので、この方法では高い再現性が期待できない。

本研究では、図-1に示すように、木槌が振り子のように落下する装置を用いて締め固めた。試験者に依らず、一定の力で打撃できる。さらに、落下高さと回数を変えることにより締め固めのエネルギー

を変えることができる。

最小密度試験の方法でせん断箱に入れ、上面に押さえ板を載せて試料が飛ばないようにした。押さえ板にはせん断試験機に加圧板を用いた。落下高さを4cmに固定し、打撃回数を変化させたときの締め固め試験の結果を図-2に示す。打撃回数はせん断箱の側面4箇所を1回ずつ計4回叩いたことを打撃回数1回としている。各打撃回数で5回試験をしたが、良い再現性が得られていることがわかる。

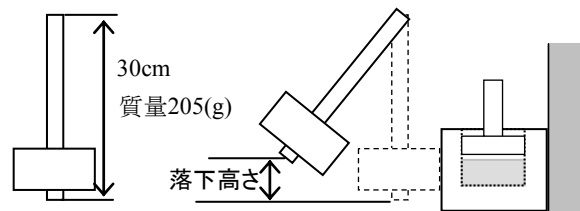


図-1 供試体作製方法

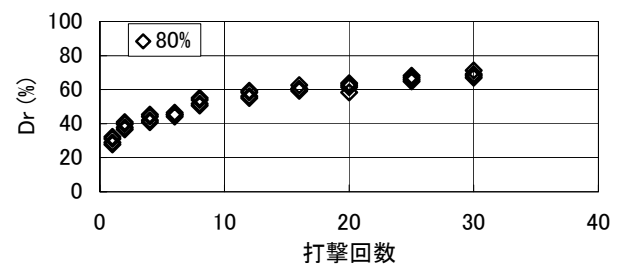


図-2 供試体作製方法の予備試験

3. 試験方法

図-3に示す試験機を用いて一面せん断試験を行った。上箱固定・下箱可動型である。上箱に加圧板があり、下箱は反力板になる。加圧板の上部と反力板の下にロードセルを設置して、加圧板側と反力板側の垂直荷重を測定した。本文ではそれぞれの垂直荷重を供試体断面積で割った値を加圧板側垂直応力(σ_M)および反力板側垂直応力(σ_F)と呼ぶ。垂直荷重は、圧密過程においては空圧シリンダーで載荷し、せん断過程では、定圧試験では空圧シリンダーで、定体積試験では手動ジャッキで載荷した。

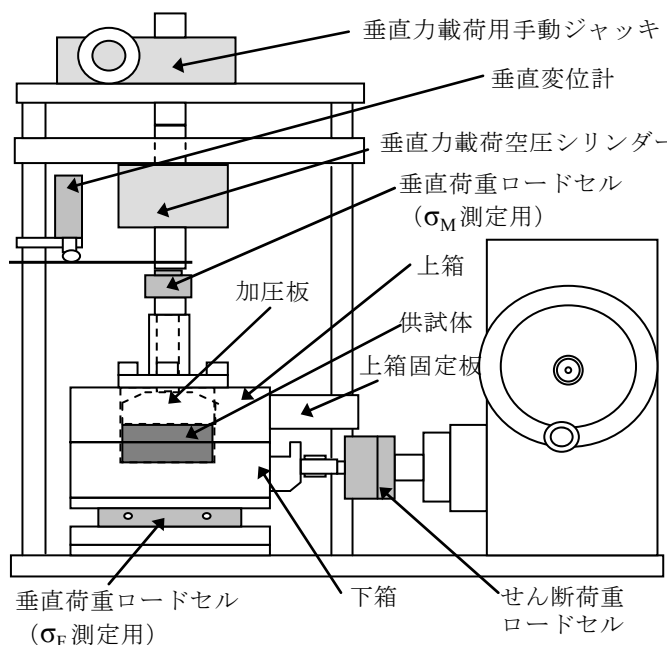


図-3 試験装置

表-1 供試体の相対密度 (%)

	緩詰め	中詰め	密詰め
圧密前	27.8～33.1	50.6～52.9	72.4～73.1
圧密後	32.3～36.2	53.2～57.4	75.7～79.8

3通りの詰まり方で供試体を作製した：緩詰め（相対密度 30%）、中詰め（50%）、および密詰め（75%）。供試体の相対密度の範囲を表-1 に示す。各相対密度の供試体に対して、圧密時の垂直応力を3通りに変えて試験した。相対密度と垂直応力の各組み合わせに対して、加圧板側垂直応力一定せん断試験、反力板側垂直応力一定せん断試験、及び定体積せん断試験を行った。

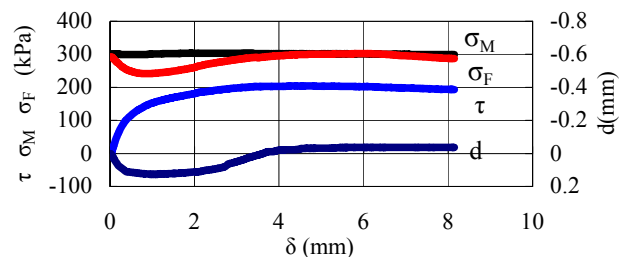
加圧板側定圧試験はせん断過程において、加圧板側の垂直荷重の値を一定に、反力板側定圧試験は反力板側の垂直荷重の値を一定にする試験である。定体積試験は、せん断中供試体の垂直変位を一定にする試験である。圧密過程ではどの試験でも加圧板側垂直応力を一定にした。

上下せん断箱間の隙間を 0.3 mm に設定した。せん断速度は 0.2 mm/min とした。

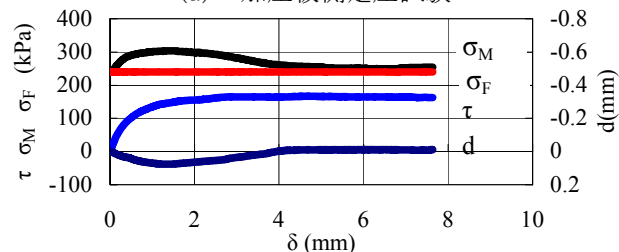
4. 結果と考察

4.1 ダイレタンシーと垂直応力

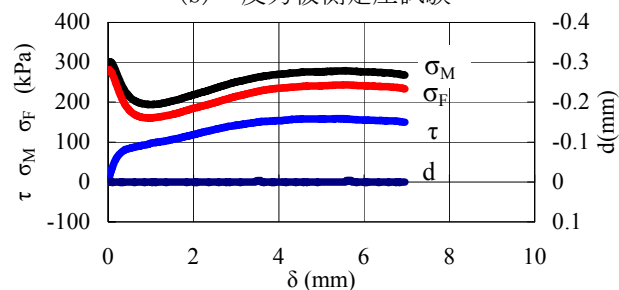
せん断時におけるせん断応力、垂直変位、加圧板



(a) 加圧板側定圧試験



(b) 反力板側定圧試験



(c) 定体積試験

図-4 試験結果（緩詰め）

側及び反力板側垂直応力の変化挙動をみる。例として緩詰め供試体の試験結果を図-4 に示す。垂直変位は正のとき供試体が収縮したことを示す。

加圧板側定圧試験では、せん断初期に供試体が収縮し、周面摩擦が上向きに発生したことにより σ_F が減少し、その後、供試体は膨張し、周面摩擦が下向きに変化したことにより σ_F は増加した。そのため垂直変位と反力板側垂直応力の変化挙動が似ている。

反力板側定圧試験では、 σ_F が一定で σ_M が変化しているが、 σ_M は加圧板側定圧試験の σ_F と逆の挙動をしている。これは加圧板側定圧試験のときと供試体の体積変化、したがって、周面摩擦の向きの変化も同じであるためである。

定体積試験では、初期に σ_M 及び σ_F 共に減少し、その後増加している。前述の定圧試験のダイレタンシー挙動を反映している。また、圧密過程で σ_M と σ_F の差が生じたがその差がせん断中に変化していな

いが、これは定体積試験では、周面摩擦の影響が定圧試験に比べて小さいことを表している。

4.2 応力経路と破壊包絡線

図-5~7 に、せん断中の応力経路（ $\tau - \sigma$ 関係）と破壊包絡線を示す。各試験において、 σ として σ_M または σ_F をとることによって、経路と破壊包絡線を 2 本引いた。 σ_M を○で σ_F を実線で表す。破壊包絡線は、せん断応力最大時の点（3 点）から最小二乗法によって求めたものである。実線が σ_M 、点線が σ_F に対応する破壊包絡線である。

(1) 緩詰め供試体（図-5）

どの試験でもせん断開始時に σ_M が σ_F より大きいのは圧密時の圧縮による周面摩擦の影響である。

反力板側定圧試験の $\sigma_0=170\text{kPa}$ の試験は初期の σ_M と σ_F の差が大きくなっているが、変動する側の σ_F の経路の形状は良く似ている。破壊包絡線が交差しており、 $\sigma_0=100\text{kPa}$ と $\sigma_0=300\text{kPa}$ におけるせん断応力最大時の σ_M と σ_F の大小が入れ替わったためである。

(2) 中詰め供試体（図-6）

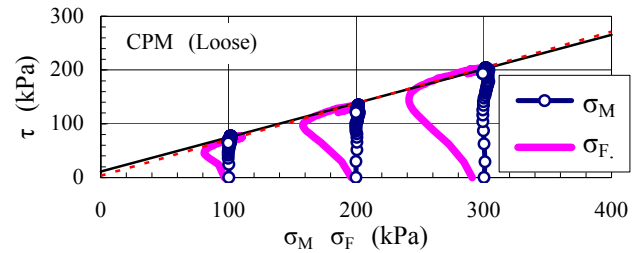
中詰めでの $\sigma_0=100\text{kPa}$ の応力経路は緩詰めでの $\sigma_0=100\text{kPa}$ と比べて変化が小さいが、 σ_0 の値が大きくなると応力経路が変化に富んだものとなった。

加圧板側定圧試験において、せん断応力最大時の σ_M と σ_F の差が σ_0 の値が大きくなるにつれて大きくなっており、破壊包絡線の傾きが異なっている。

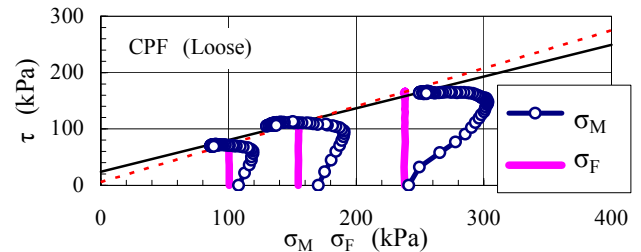
反力板側定圧試験ではせん断応力最大時の σ_M と σ_F の差はほとんどなく、破壊包絡線はほぼ同じである。

(3) 密詰め供試体（図-7）

両試験とも中詰めでの応力経路とよく似た形状をしている。また、 σ_M と σ_F によって引かれた破壊包絡線では、中詰めでの反力板側定圧試験と同じように傾きが異なっている。せん断応力最大時に σ_M と σ_F の差が σ_0 が大きくなるにしたがって大きくなったためである。これらは供試体の膨張による周面摩擦がせん断応力最大時に働いていたためである。

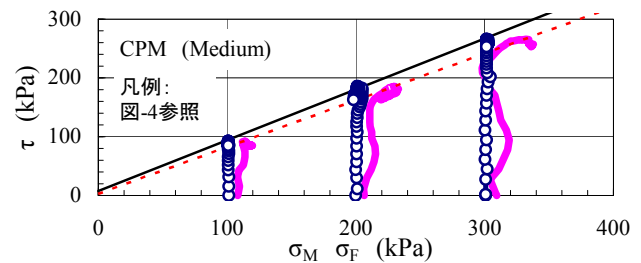


(a) 加圧板側垂直応力一定試験

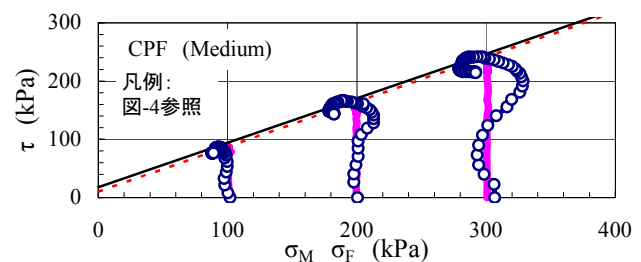


(b) 反力板側垂直応力一定試験

図-5 応力経路（緩詰め供試体）

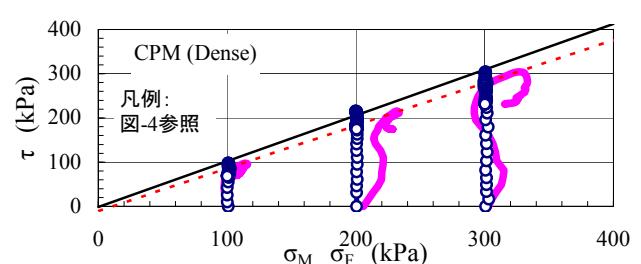


(a) 加圧板側垂直応力一定試験

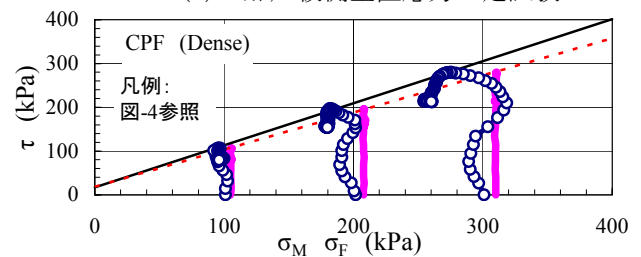


(b) 反力板側垂直応力一定試験

図-6 応力経路（中詰め供試体）



(a) 加圧板側垂直応力一定試験



(b) 反力板側垂直応力一定試験

図-7 応力経路（密詰め供試体）

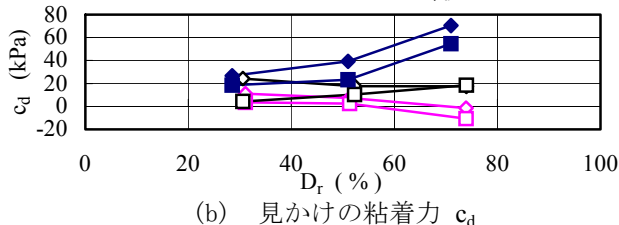
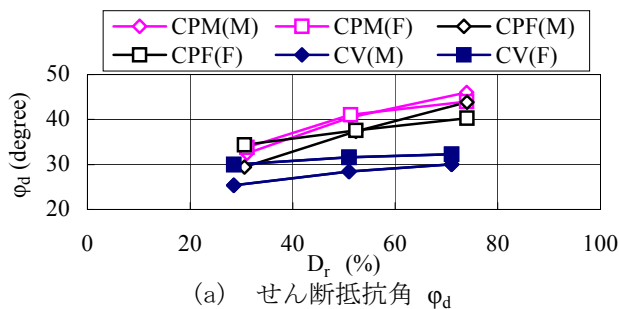


図-8 強度パラメータと相対密度の関係

4.3 強度パラメータ

図-5~7 の破壊包絡線から決定された強度パラメータを圧密終了時の供試体相対密度に対してプロットしたものを図-8 に示す。凡例において、CPM は加圧板側定圧試験、CPF は反力板側定圧試験、CV は定体積試験を示す。また、(M)は σ_M を用いて、(F)は σ_F を用いて決定したことを示している。

見かけの粘着力は、 σ_M を用いると σ_F を用いた場合に比べて大きくなる傾向がある。乾燥した砂試料において物理的に $c_d = 0$ となるという観点から、 σ_F を用いた場合の方が好ましいと考えられる。

せん断抵抗角 ϕ_d は、供試体の詰まり方で傾向が異なり、緩詰めの場合だと σ_M を用いると σ_F を用いた時よりも小さく評価され、密詰めではその逆になっている。中詰めにおいては、試験方法によって評価が異なり、CPM の方が CPF よりも大きく評価されている。

また、個々の試験において $c_d = 0$ として、最大せん断応力点での垂直応力とせん断応力との比によって ϕ_d を決定した。結果を図-9 に示した。供試体の詰め方ごとに、異なる垂直応力の結果の平均値を取った。

全体的に図-8(a)の ϕ_d に比べて図-9 による ϕ_d のばらつきが小さい。特に緩詰めの場合では σ_M を用いても σ_F を用いても ϕ_d に違いが見られない。

中詰めにおいては、図-8 では試験法で ϕ_d の大小

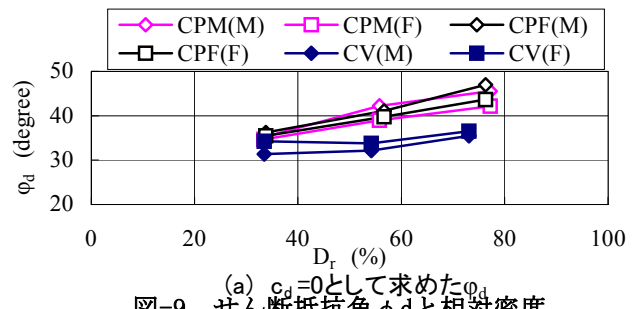


図-9 せん断抵抗角 ϕ_d と相対密度

が分かれていたが、この図では試験法ではなく σ_M を用いた方が大きな値になっている。

密詰めにおいては、図-8 と同じように σ_M で整理した方が σ_F で整理するよりも大きく評価されている。また、

中詰めと密詰めに対しては、どちらの ϕ_d の決定方法を用いても、CPM (加圧板側垂直応力一定試験) の結果を σ_M で整理すると求まる ϕ_d が大きな値をとる傾向にある。これより、簡易定圧試験 (加圧板側垂直応力一定でかつ σ_M で整理) でせん断抵抗角を決定すると過大評価になる恐れがあるといえる。

5. 結論

詰まり方を変えた乾燥砂試料で加圧板側または反力板側垂直応力を一定にする定圧一面せん断試験、およびに定体積試験を実施し、各試験結果に対して加圧板側垂直応力 σ_M および反力板側垂直応力 σ_F によって強度パラメータ決定した。

簡易定圧試験で σ_M しか計測を行えない場合において決定された強度パラメータを設計に用いる場合、緩詰めにおいては他の試験において中詰め・密詰めにおいては危険側と評価する。

定体積試験ではせん断過程において周面摩擦の影響はほとんどなかったが、圧密過程で生じた周面摩擦が継続するため、結果として σ_M と σ_F による ϕ_d の評価が異なる。

参考文献

- 1) 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定数，地盤工学会中国支部論文報告集，24-1，pp.97-100，2006。