

定圧一面せん断試験に基づく砂の強度特性

Strength Characteristics of Sand by Direct Shear Box Tests with Constant Normal Stress

清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学工学部)
山本大輔 Daisuke YAMAMOTO ((株)ウエスコ・島根支社)
裕 博則 Hironori SAKO (元鳥取大学工学部学生)

一面せん断試験ではせん断過程において供試体が収縮または膨張するときに供試体周面にせん断箱から摩擦力が働くので加圧板から作用する垂直荷重と反力板に作用する垂直荷重が等しくならない。詰まり方を変えた乾燥砂試料に対して、それらの垂直荷重の一方を一定に保つような二種類の定圧試験を行った。各試験結果に対して加圧板側および反力板側垂直応力を用いて強度パラメータ ϕ_d および c_d を決定した。決定された強度特性は試験方法と用いた垂直応力によって異なった。主な結論として、試験方法によらず、加圧板側垂直応力に基づいて強度を評価すると反力板側垂直応力に基づく場合に比べて、 ϕ_d は緩詰めでは高く密詰めでは低く評価されること、 c_d は詰まり方によらず過大に評価されること等を示した。

キーワード：砂，定圧一面せん断試験，周面摩擦，せん断抵抗角，見かけの粘着力（IGC：D06）

1. はじめに

一面せん断試験では圧密およびせん断過程において供試体が圧縮または膨張するときに供試体周面にせん断箱から摩擦力が働くので加圧板から作用する垂直荷重と反力板に作用する垂直荷重が等しくならない。地盤工学会の基準（JGS0561-2000）¹⁾では反力板側の垂直荷重を一定に保ってせん断する試験を定圧せん断試験と定めている。ただし、加圧板側の荷重を一定に保つ試験（「簡易」定圧試験と呼称¹⁾）も許容されているが、その場合でも反力板側での荷重を測定することが要求されている。

しかしながら、反力板側で荷重を測定できない形式の試験機もまだ多用されていると思われる。そのような試験機を用いて簡易定圧試験を実施して決定される強度は安全側であるのかそれとも危険側であるのか、その傾向を把握しておくことは工学的に重要である。

本研究の目的は、簡易定圧試験と基準で定められた定圧試験を行い、強度パラメータに対する試験法の影響を調べることである。特に、簡易定圧試験の結果に対して加圧板側の垂直応力に基づいて試料の強度を評価した場合の強度特性について考察する。

2. 試料と方法

2.1 試料および供試体作成方法

乾燥した豊浦砂を用いた。 $\rho_s=2.633\text{g/cm}^3$ ， $e_{\max}=0.970$ ， $e_{\min}=0.618$ である。供試体の密度は緩詰め，中詰めおよび密詰めに設定した。緩詰めは砂の最小密度試験の方法に

準じて、中詰めと密詰めは砂の最大密度試験におけるように供試体側面から打撃することによって締固めた。打撃方法と回数は予備試験によって定めた。結果として、相対密度は表-1に示すようになった。

供試体は円柱形である。直径はせん断箱内径に合わせて60mm，高さは20mmになるよう作成した。

表-1 供試体の相対密度 (%)

	緩詰め	中詰め	密詰め
圧密前	23.7~29.0	38.1~39.4	75.0~79.2
圧密後	32.8~36.0	43.5~46.9	79.7~82.6

2.2 装置および試験方法

図-1に示す一面せん断試験装置を用いた。上箱固定・下箱移動式で、上箱に加圧板があり、下箱が反力板になっている。加圧板上部と反力板底部にロードセルを設置し、加圧板側および反力板側の垂直荷重をそれぞれ測定した。本文ではそれぞれの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(ここに“M”はMovableの、“F”はFixedの意味で用いた)。垂直荷重は空圧シリンダーまたは手動ジャッキによって制御できる。

各相対密度の供試体に対して、二種類の圧密・定圧せん断試験を行った。圧密過程はどちらの試験法でも同じで、反力板側垂直応力を100または200(kPa)に設定して圧密した。せん断過程では、加圧板側垂直応力 σ_M を一定に制御してせん断する試験(加圧板側垂直応力一定試験またはCPM試験と呼ぶ)と反力板側垂直応力 σ_F を一定

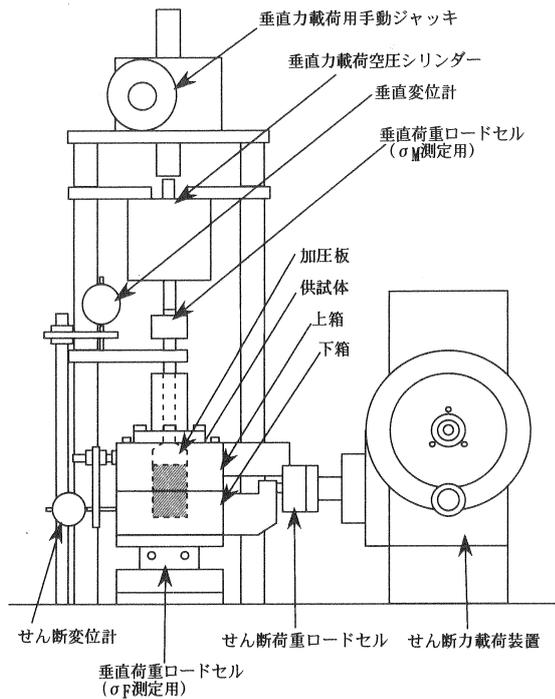


図-1 試験装置

に制御してせん断する試験（反力板側垂直応力一定試験または CPF 試験）を行った。垂直荷重は、圧密過程では空圧シリンダーで、せん断過程では、CPM 試験は空圧シリンダーで、CPF 試験は手動ジャッキで載荷・制御した。

せん断開始時の垂直応力は上述のように 100 または 200 (kPa) の 2 通りである。試料の豊浦砂は、本研究で対象とした応力レベルにおいては内部摩擦角が一定になると思われた¹⁾。そこで、強度パラメータの決定に必要な最小の数として 2 通りの垂直応力で試験した。

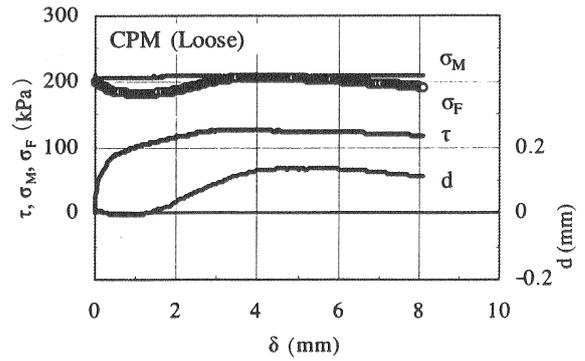
上下せん断箱の隙間は隙間ゲージで 0.2mm に設定した。せん断速度は 0.2mm/min である。

3. 結果及び考察

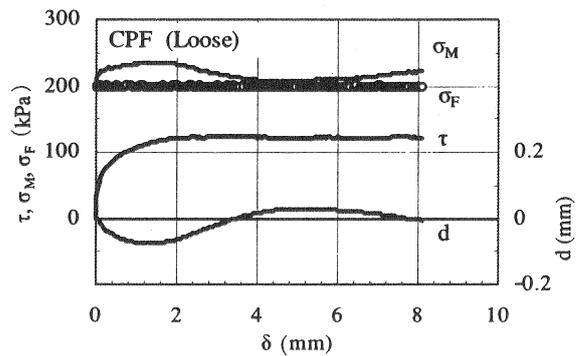
3.1 せん断中の垂直応力の挙動

緩詰め供試体の試験結果を例として、せん断過程におけるせん断応力、垂直変位、加圧板側および反力板側垂直応力の変化挙動を見る。以下の図において垂直変位 d は供試体が膨張するときに正になるように表示した。

加圧板側垂直応力一定試験の結果を図-2 (a) に示した。まず、せん断過程を通して加圧板側垂直応力 σ_M が一定に保たれていることがわかる。せん断開始からせん断変位 δ が 1mm 程度までの間に、供試体が収縮する傾向を示し、反力板側垂直応力 σ_F が減少した。これは上向きの周面摩擦力が供試体に働いたためである。その後供試体が膨張し始めるとともに周面摩擦力は下向きになってその結果として σ_F が増加に転じた。膨張は $\delta=5\text{mm}$ 付近で最大にな



(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-2 試験結果 (緩詰め, 圧密圧力 200kPa)。

りその後再び収縮する傾向を見せ、それとともに σ_F は再び減少している。

反力板側垂直応力一定試験の結果を図-2 (b) に示す。この試験においても、まず、反力板側垂直応力 σ_F がせん断過程を通して一定に制御できていることが確認できる。ダイレタンスの傾向は加圧板側垂直応力一定試験と変わらない、従って、周面摩擦力の向きの変化も同じである。周面摩擦力が上向きに働く時は周面摩擦力に対抗するように加圧板側垂直応力 σ_M が増加し、反対に周面摩擦力が下向きに働くときは σ_M が減少する。即ち、加圧板側垂直応力一定試験における σ_F と増減が逆になるように変化した。

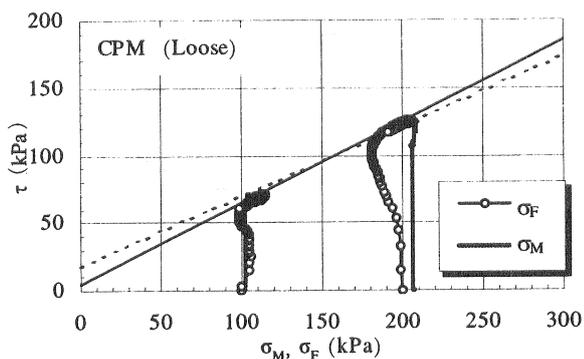
なお、せん断開始時に σ_M が σ_F よりわずかに大きい、これは圧密過程においては σ_F を一定に制御し、かつ供試体が圧縮したためである。

3.2 応力径路と破壊包絡線

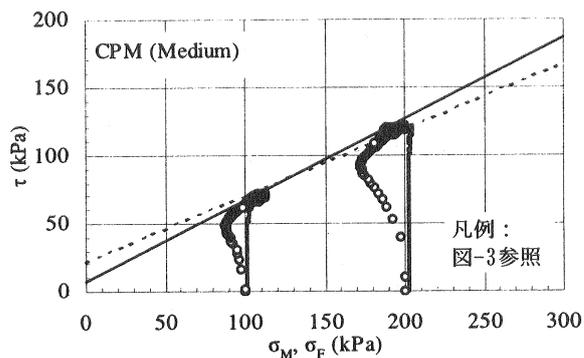
どの試験においても 2 種類の垂直応力を測定しているのでせん断応力と垂直応力の関係、即ち応力径路も 2 つできる。

はじめに緩詰めの場合について示す (図-3 (a) および (b))。図中、加圧板側の垂直応力 σ_M を実線で、反力板側の垂直応力 σ_F を \circ で示した。

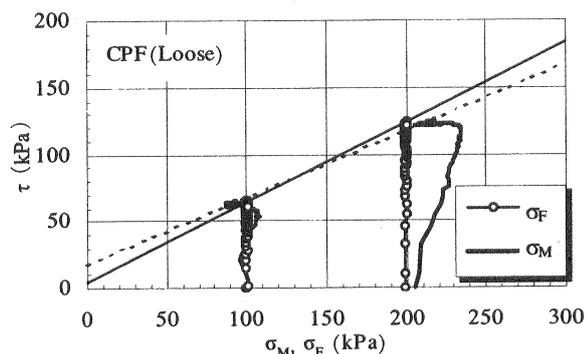
加圧板側垂直応力一定試験では反力板側垂直応力 σ_F が



(a) 加圧板側垂直応力一定試験

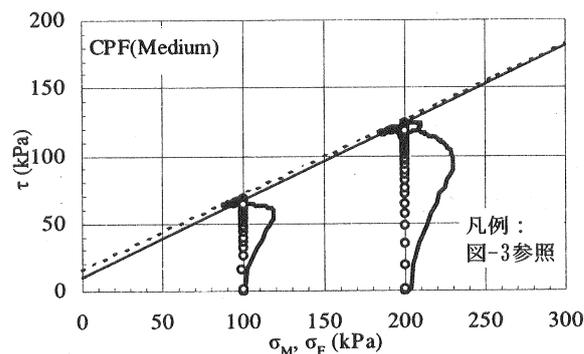


(a) 加圧板側垂直応力一定試験



(b) 反力板側垂直応力一定試験

図-3 応力径路 (緩詰め供試体)



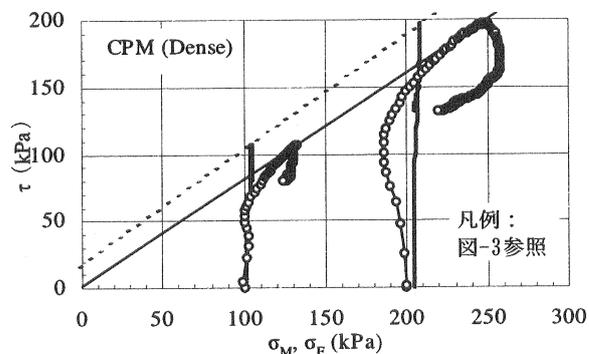
(b) 反力板側垂直応力一定試験

図-4 応力径路 (中詰供試体)

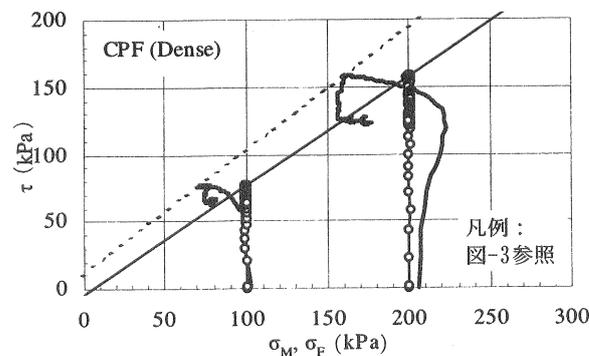
変化し (図-3 (a)), 反力板側垂直応力一定試験では加圧板側垂直応力 σ_M が変化 (同図 (b)). せん断応力のピーク時に着目すると, 二つの垂直応力の値が等しくならないので, 垂直応力として σ_M を用いるか, σ_F を用いるかによって破壊包絡線に大きな違いが見られる. 図に引いた破壊包絡線は τ のピークの点を機械的に結んだものである. 図-3 では, 試験方法によらず, 反力板側垂直応力 (σ_F) で整理した場合に破壊包絡線の傾き (せん断抵抗角 ϕ_d) が大きく, 切片 (見かけの粘着力 c_d) が小さい (ゼロに近い) ことがわかる.

なお, 図-3 (a) の $\sigma_M=100\text{kPa}$ の結果において, せん断初期の $\tau<50\text{kPa}$ の部分で $\sigma_F>\sigma_M$ となっている. これは周面摩擦の影響という観点からみると供試体が膨張したためと考えられる. 実際, 図は示していないが, この試験の垂直変位の挙動を詳細に見ると, $\tau<30\text{kPa}$ (せん断変位 $\delta<0.21\text{mm}$)の部分で最大で 0.014mm 膨張し, その後圧縮に転じた. また, 先に図-2 (a)に示した $\sigma_M=200\text{kPa}$ の試験においても, $\tau<53\text{kPa}$ (せん断変位 $\delta<0.10\text{mm}$)の部分で最大で 0.008mm 膨張した. 特に, 膨張量が相対的に大きかった $\sigma_M=100\text{kPa}$ の試験では図-3の応力径路にその影響が現れたようである. なお, このような微小な膨張の原因は特定できていない.

また, 図-3 (a) の $\sigma_M=100\text{kPa}$ の挙動は, 後述の中詰め結果 (図-4 (a))と比較すると, 緩いにも拘わらず圧縮傾



(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 応力径路 (密詰供試体)

向が小さいようである。一般に、緩詰めの場合供試体は比較的密な供試体に比べて作成が難しく、このような結果が生じたと考えられる。試験技術の限界を示しているともいえる。

中詰めおよび密詰めの場合を図-4 と 5 にそれぞれ示した。中詰めの場合、緩詰めの場合に見られた傾向とほとんど同じである。密詰めの場合、他の詰まり方に比べて破壊包絡線の違いが顕著である。また、加圧板側垂直応力から決定されるせん断抵抗角が大きくなったが、見かけの粘着力に関しては緩詰めおよび中詰めの場合と同じく反力板側垂直応力で整理した方がゼロに近くなっている。

なお、図-5 (b) で $c_d < 0$ になっているが、これは、先に述べたように、物理的な考察を加えずに破壊包絡線を機械的に引いたため、試験の誤差を表すものと考えられる。

3.3 強度パラメータ

図-6 に、すべての試験結果に基づいて決定した ϕ_d と c_d をそれぞれ試料の相対密度 D_r に対してプロットした。相対密度は各詰まり方における圧密後の値の平均値である。図中、“(M)”は垂直応力として σ_M を、“(F)”は σ_F を用いた場合である。

せん断抵抗角 ϕ_d は供試体の詰まり方、従ってダイレタンシーの程度によって傾向が異なっている、即ち、緩詰めの場合には試験法によらず σ_M を用いると ϕ_d が小さく評価され、密詰めの場合には逆に大きく評価される傾向がある。また、 σ_F で整理した場合は試験法の違いによる影響が小さい傾向があるようだ。

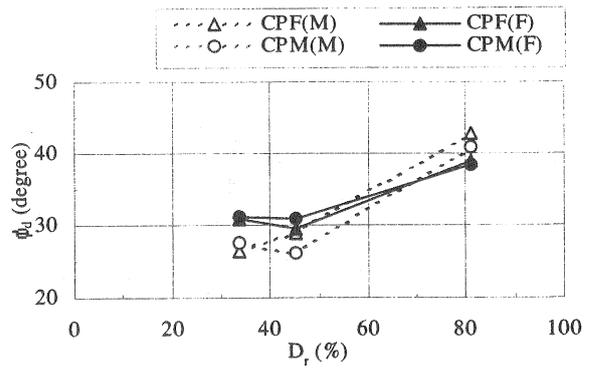
一方、 c_d は詰まり方と試験方法によらず σ_M を用いて整理すると過大に評価されるようである。せん断面上の垂直応力は σ_M と σ_F の間にあると思われるが、乾燥した砂試料では物理的に $c_d = 0$ となるべきであるという観点から判断すると、垂直応力として σ_F を用いる方が好ましいと考えられる。

なお、図-6 において密詰め CPF (F) の結果を除いて $c_d > 0$ である。これは本研究で採用した垂直応力が二種類であり破壊包絡線が非線形である可能性を考慮していないためではないか、という懸念が生じるかもしれない。しかし、試料の豊浦砂では、高だか 200kPa の垂直応力レベルではそのような非線形性は現れないようである¹⁾。

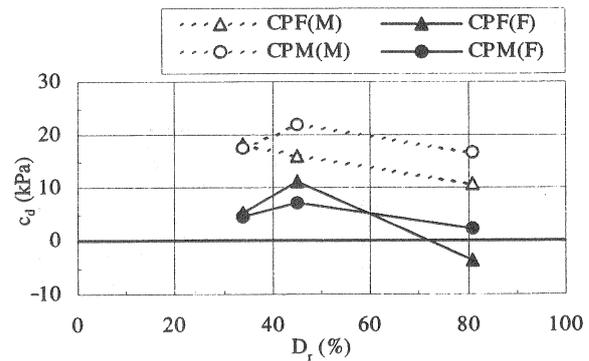
4. おわりに

詰まり方を変えた乾燥砂試料に対して加圧板側または反力板側垂直応力を一定にした定圧一面せん断試験を実施した。

一定に保たれない垂直応力は供試体のダイレタンシーの傾向に応じて変化した。その挙動は文献¹⁾解説で示さ



(a) せん断抵抗角



(b) 見かけの粘着力

図-6 強度パラメータ (ϕ_d および c_d) と相対密度の関係。

れた従来の知見と同様であった。

各試験結果に対して、加圧板側および反力板側垂直応力に基づいて強度パラメータを決定した。その結果、加圧板側または反力板側どちらの垂直応力を一定にしても、加圧板側の垂直応力に基づいて強度パラメータを決定すると、反力板側垂直応力に基づく場合に比べて、せん断抵抗角 ϕ_d については、緩詰めの場合に小さく、密詰めの場合は大きく評価され、見かけの粘着力 c_d については、詰まり方によらず過大に評価されることがわかった。

特に、 c_d が過大に評価されるという傾向は物理的に、また設計上も好ましくない。よって、反力板側の垂直応力を測定できないタイプの試験機を用いて強度を評価する場合には、その特性を十分考慮しなければならない。

最後に、本研究の一部は第二および第三著者がそれぞれ鳥取大学大学院工学研究科土木工学専攻および同工学部土木工学科に在籍中に実施したものであることを付記する。

参考文献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説（第1回改訂版）第7編第4章，pp. 563-600，2000。

(2006年6月30日 受付)