

一面せん断試験による砂のせん断強度の一決定法

誌名	琉球大学農学部学術報告 = The science bulletin of the College of Agriculture, University of the Ryukyus
ISSN	03704246
著者名	新城,俊也 宮城,調勝 小宮,康明 永吉,功治
発行元	琉球大学農学部
巻/号	50号
巻号補足	
掲載ページ	p. 117-124
発行年月	2003年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



一面せん断試験による砂のせん断強度の一決定法

新城俊也*・宮城調勝*・小宮康明*・永吉功治**

Toshiya SHINJO*, Norikatsu MIYAGI*, Yasuaki KOMIYA* and Koji NAGAYOSHI**

A determination of shear strength for sand by direct shear box test

キーワード：一面せん断試験，周面摩擦，せん断強度，砂

Key words : Direct shear test, Skin friction, Shear strength, Sand

Summary

It is known that a skin friction between specimen and shear box wall in a conventional direct shear box apparatus affects the normal stress on the shear surface. To eliminate the effect of the skin friction on normal stress on shear surface, the conventional Mikasa's direct shear apparatus is improved to be able to measure the normal stress on shear surface. In this paper, to investigate the effect of the skin friction on the shear strength, constant pressure tests and constant volume tests are carried out on sands using the improved direct shear apparatus. Test results show that the skin friction between specimen and shear box wall influences the shear strength obtained from a conventional direct shear apparatus. It is necessary to determine the shear strength with normal stress on shear surface in both a constant pressure test and a constant volume test. The shear strength obtained from constant pressure test using the improved direct shear apparatus is consistent to those of the triaxial compression test.

緒 言

土のせん断強度を求めるために，一面せん断試験や三軸圧縮試験が実施されている。一面せん断試験は，三軸圧縮試験と比較して機構が単純で試験操作が容易であることから，広く用いられている。しかしながら，それら装置の機構上の違いから一面せん断試験によるせん断強度は三軸圧縮試験の結果と差のあることが知られている。

一面せん断試験装置の構造上の問題点として，せん断過程でのせん断箱の回転，供試体端部からの進行性破壊の発生，供試体とせん断箱内壁に生じる周面摩擦の影響等が指

摘されている¹⁾。これらの中でもせん断箱内壁と供試体とに生じる周面摩擦が一面せん断試験の結果に最も影響を与えるとされている。一面せん断試験装置は，下せん断箱可動タイプの Skempton-Bishop 型と上せん断箱可動タイプの三笠式に大別される。どのタイプも垂直応力を作用させる固定箱の内壁と供試体との間で周面摩擦が発生する。その対応策として，地盤工学会では装置としてせん断面上の垂直応力を測定可能な機構にすることを基準化している²⁾。それによると，定圧試験では，せん断面上の垂直応力を正確に測定するために垂直応力測定用の荷重計は必ず反力板側に設置することにしている。一方，供試体の体積を一定に保つ定体積試験では，供試体とせん断箱内壁の周面摩擦の影響が小さいとして，荷重計の設置は加圧側か反力板側のいずれでもよいとしている。

本研究では，既存の三笠式一面せん断試験装置をせん断面上で垂直応力が測定できるように改良を加えた。改良した一面せん断試験機を用いて砂についてせん断試験を実施し，せん断箱内壁と供試体との周面摩擦の影響を調べるとともに，改良前の在来型一面せん断試験結果との比較により，せん断強度に及ぼす周面摩擦の影響を検討した。また，改良した一面せん断試験によるせん断強度と三軸圧縮試験結果との比較を行い，一面せん断試験結果の妥当性を検討した。

実験装置

三笠式一面せん断試験装置³⁾は，下せん断箱固定，上せん断箱可動タイプであり，ローラー付きの上せん断箱ガイド装置によりせん断中の上せん断箱の回転を防止するとともに上せん断箱がスムーズに移動できる機構になっている。また，垂直応力は下せん断箱下方から，加圧板を介して供

*琉球大学農学部生産環境学科 **鹿児島大学大学院連合農学研究科（琉球大学）

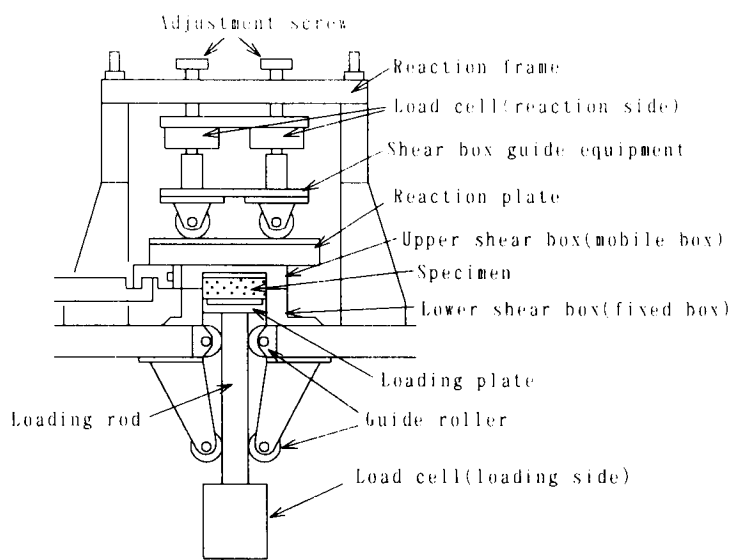


Fig. 1 Improved direct shear box apparatus

試体下方に作用させる機構になっている。

在来型装置では垂直応力作用時に下せん断箱内壁と供試体とに周面摩擦力が発生するので、この周面摩擦力を避けるため、本研究では三笠式の在来一面せん断試験装置を、ローラー付き上せん断箱ガイド装置と上方反力枠との間にロードセルを設置し、せん断面上での垂直応力が測定できるように改良した(Fig.1)⁴⁾。なお、反力測定用ロードセルを上せん断箱ガイド装置の前後のローラーの位置にそれぞれ設置することで、せん断中の上せん断箱の回転を最小限に抑えた。せん断面上の垂直応力はロードセルの反力に、上せん断箱、反力板およびガイド装置の総重量を加算し、それらの値から決定した。また、下せん断箱下方の加圧板側にもロードセルを設定し、加圧板側の垂直応力とせん断面上の垂直応力の測定を行い、それらの差から下せん断箱の周面摩擦力が測定できるようにした。

改良した試験装置では、せん断面上の垂直応力を一定に保つ定圧試験および供試体の体積を一定に保つ定体積試験が実施できる。また、加圧板側に一定の加重を作用させる在来型一面せん断試験も実施可能である。なお、本装置では定圧試験および定体積試験における加圧板の制御は手動で行っている。

実験方法

1. 試料

試料は、豊浦砂、石灰質砂および琉球石灰岩の砕砂の3種類の砂を用いた。石灰質砂および砕砂は、それぞれ粒度を2 mm から 0.25 mm に調整した。Table 1 と Fig.2 に、試料の物理的性質と粒度分布を示す。なお、石灰質砂および砕砂の炭酸カルシウム含有量はともに 90% 以上である。

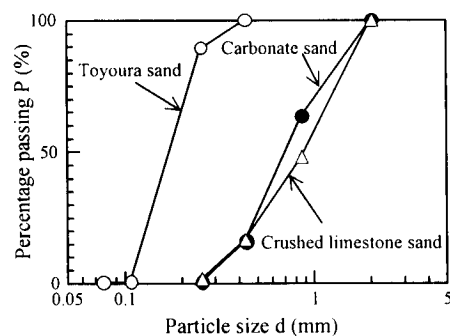


Fig. 2 Grading curves of samples

Table 1 Physical properties of sands

Sample		Toyoura sand	Carbonate sand	Crushed limestone sand
Density of soil particles	$\rho_s (\text{g/cm}^3)$	2.64	2.77	2.72
Maximum void ratio	$e_{\max}$	0.98	1.66	1.35
Minimum void ratio	$e_{\min}$	0.60	1.07	0.88
Carbonate content	(%)	—	96	95

Table 2 Series of tests

Sand type	Test type	Relative density (%)	Consolidation pressure (kPa)
Toyoura sand	Constant pressure test	65~75	100~700
	Conventional test	66~75	100~700
	Triaxial compression test	69~74	49~686
Carbonate sand	Constant pressure test	36~51	100~700
	Constant volume test	41~59	100~700
	Conventional test	54~64	100~700
	Triaxial compression test	40~52	49~686
Crushed limestone sand	Constant pressure test	60~74	100~700
	Constant volume test	57~68	100~700
	Conventional test	53~68	100~700
	Triaxial compression test	81~88	49~686

2. 試験方法

一面せん断試験の供試体の寸法は、直径 6cm、高さ 2cm である。供試体は乾燥試料を用いて空中落下法で作製した。供試体の相対密度 D_r は、標準砂で約 70%、石灰質砂で約 50%、石灰質砕砂で約 60% である。

一面せん断試験は、せん断面上の垂直応力を一定に保つ定圧試験および供試体の体積を一定に保つ定体積試験を実施した。また、周面摩擦力のせん断強度に及ぼす影響を調べるために、加圧板側に一定の垂直応力を作用させる在来型の一面せん断試験も実施した。

試験では、下せん断箱の下端面から水を注入して供試体を湿潤させた後圧密を行った。圧密圧力としてせん断面上に、6 段階の初期垂直応力 $\sigma_{N0}=100\text{kPa}$, 200kPa , 300kPa , 400kPa , 500kPa , 700kPa を作用させた。圧密時間は、5 分から 10 分以内で打ち切った。上せん断箱と下せん断箱のすき間は、豊浦砂で 0.2mm、石灰質砂と砕砂で 0.5mm に設定した。せん断は、せん断速度 0.5mm/min のもとで行い、せん断変位は 8mm まで作用させた。

一方、三軸圧縮試験では供試体の寸法は、直径 6.5cm、高さ 13cm である。供試体はタッピング法により作製し、密度はそれぞれの試料について一面せん断試験の密度に近づけるようにした。

三軸圧縮試験は、供試体を飽和させた後圧密排水せん断試験(CD 試験)を行った。側圧 49kPa, 98kPa, 294kPa, 490kPa, 686kPa の 5 段階に変化させてた。せん断速度 0.25mm/min で、軸ひずみ 20% までせん断を行った。なお、圧密過程およびせん断過程ともに背圧 49kPa を作用させた。Table 2 に、実施したせん断試験の実験条件を示す。

実験結果および考察

1. 定圧試験

Fig.3 には、豊浦砂、石灰質砂および砕砂についてそれぞれせん断垂直応力比 τ/σ_N —せん断変位 D 関係および垂直変位 ΔH —せん断変位 D 関係を示してある。せん断面上の

垂直応力 σ_N は、せん断中一定に保たれており、その値はせん断開始時の垂直応力 σ_{N0} と同じである。また、図中には、供試体とせん断箱内壁の周面摩擦力を加圧板側の垂直応力 σ_c とせん断面上の垂直応力 σ_N の応力比で示し、それぞれの試料について垂直応力比 σ_c/σ_N —せん断変位 D 関係を示してある。

Fig.3 に示す試験結果から次のことがわかる。

(1) 豊浦砂では、せん断垂直応力比 τ/σ_N は、圧密圧力 σ_{N0} に関わらずほぼ同じせん断変位でピークに達し、その後せん断変位の増加とともに徐々に減少して一定値に達している。一方、垂直変位 ΔH は、せん断開始後一旦圧縮するが、その後膨張に転じせん断変位 D の増加に伴い減少している。せん断垂直応力比 τ/σ_N が一定値に達すると垂直変位 ΔH も一定となつていいる。

(2) 石灰質砂と砕砂では、圧密圧力 σ_{N0} の増加に伴いピーク時の応力比 τ/σ_N は減少し、逆にピークに達するまでのせん断変位 D は増大している。一方、垂直変位 ΔH はせん断に伴って圧縮から膨張に転じているが、体積圧縮から膨張に転じるせん断変位は圧密圧力 σ_{N0} の増加とともに増大している。また、せん断に伴う体積膨張の程度は、圧密圧力 σ_{N0} の増加に伴い減少している。

(3) 豊浦砂の垂直応力比 σ_c/σ_N —せん断変位 D 関係では、せん断開始前の垂直応力比 σ_c/σ_N は、1 以上の値を示している。せん断開始後、圧密圧力に関わらず垂直応力比 σ_c/σ_N は体積圧縮に伴い一旦増加するが、体積が膨張に移行すると同時に応力比 σ_c/σ_N は減少に転じている。減少に転じた応力比 σ_c/σ_N は、せん断応力がピークに達する付近まで減少し、その後一定となっている。

(4) 石灰質砂と砕砂における垂直応力比 σ_c/σ_N —せん断変位 D 関係では、体積が圧縮から膨張に移行するせん断変位が圧密圧力によって異なるにも関わらず、垂直応力比 σ_c/σ_N は、それぞれの圧密圧力に対して圧縮から膨張に移行する時点で直ちに増加から減少に転じている。減少に転じた応力比 σ_c/σ_N は、せん断応力がピークを示すまで減少し、その後一定値に達している。

周面摩擦力は圧密とせん断の両過程において供試体の体積変化に伴って発生する。周面摩擦力の向きは、体積収縮時には下せん断箱の内壁に沿って下向きに、体積膨張時には上向きに発生する。従って、せん断中に供試体が圧縮から膨張に転じると同時に周面摩擦力の向きが逆転し、応力比 σ_d/σ_N は減少する。このことは体積変化に伴って周面摩擦力が直接的にせん断面上の垂直応力に関係することを示している。また、周面摩擦力は、供試体が体積膨張を継続している段階で一定値に至っており、このことから周面摩擦力は体積膨張に伴って増加するのではなく、周面摩擦力が発揮されるには限界の変位が存在することがわかる。な

お、本装置での周面摩擦力は、せん断面上の垂直応力に対して豊浦砂で約 20%、石灰質砂で約 25%、石灰質砕砂で約 30%である。

Fig.4 は、豊浦砂、石灰質砂ならびに砕砂の在来型試験の結果を示したものである。Fig.3 に示した定圧試験結果と比較すると、せん断応力 τ —せん断変位 D 関係では、下せん断箱と供試体の周面摩擦力により定圧試験結果に比べて在来型試験によるピーク強度に至るまでのせん断変位 D が増大している。また、垂直変位 ΔH —せん断変位 D 関係では、体積膨張により上向きの周面摩擦力が発生し、この周面摩擦力がその後の体積膨張をある程度拘束するため、定圧試

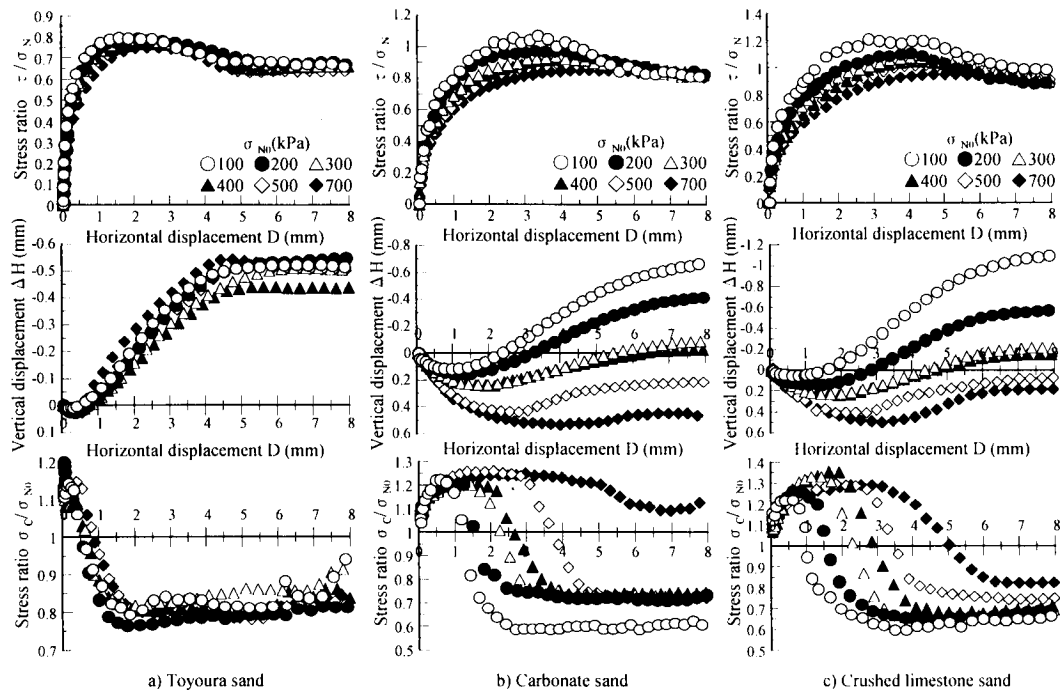


Fig. 3 Result of constant pressure test by using improved apparatus

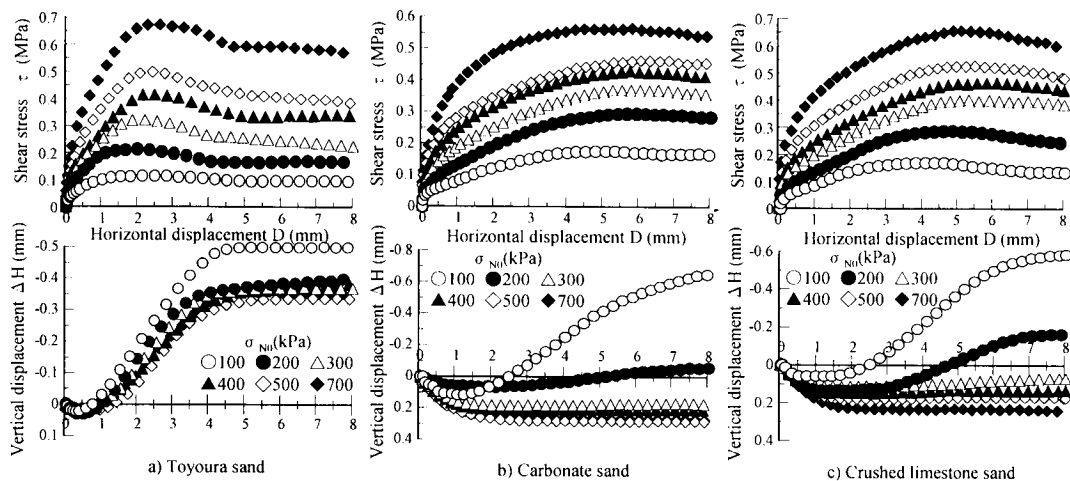


Fig. 4 Results of conventional direct shear test

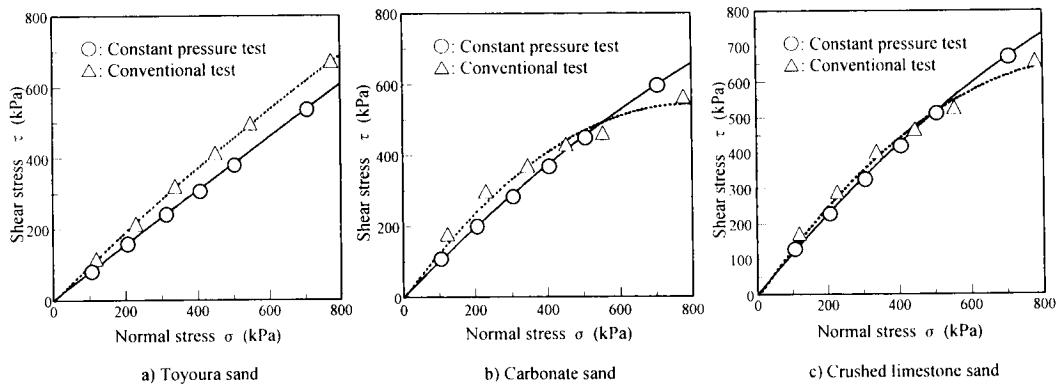


Fig.5 Effect of skin friction in shear box on shear strength in direct shear apparatus

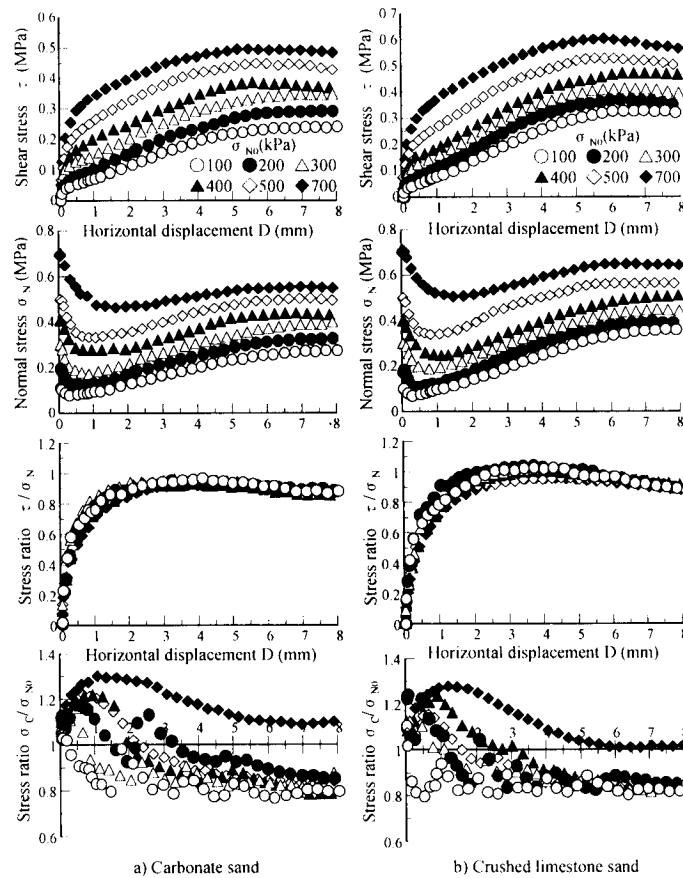


Fig.6 Results of constant volume test by using improved apparatus

験と比較して在来型試験の垂直変位が抑えられている。

以上のことから在来型試験では、周面摩擦力によりせん断応力 τ —せん断変位 D 関係、垂直変位 ΔH —せん断変位 D 関係が定圧試験結果と比較して異なることがわかる。

Fig.5 には、破壊線に及ぼす周面摩擦の影響を調べるために、定圧試験と在来型試験によるピーク強度時の垂直応力 σ とせん断応力 τ の関係をそれぞれプロットしたものを示す。ここでのせん断応力と垂直応力の関係は、定圧試験ではせん断面上の垂直応力 σ_N で、また在来型試験では加圧板

側の垂直応力 σ_c でそれぞれ整理してある。豊浦砂の場合、在来型試験では周面摩擦力の発生により、せん断面上の垂直応力が増加するため、定圧試験よりもピーク強度が増大する。そのため内部摩擦角 ϕ は定圧試験では 37.2° であるが、在来型試験では 42.0° となっている。一方、石灰質砂および砕砂では、定圧試験の破壊線は曲線関係を示している。在来型試験の場合、加圧板側の垂直応力 $\sigma_c=300\text{kPa}$ 以下では体積膨張によるせん断面上の垂直応力の増加により、ピーク強度が増大し、加圧板側の垂直応力 $\sigma_c=400\text{kPa}$ 以上では

体積圧縮によるせん断面上の垂直応力の減少により、ピーク強度が減少する。そのため、在来型試験による破壊線は、定圧試験の破壊線に比べて曲線の度合いが増大している。以上のことから、在来型試験ではせん断箱内壁と供試体との周面摩擦力により、せん断面上の垂直応力が変動するため、せん断強度を求めるにはせん断面上の垂直応力を一定に保つ定圧試験の方がより適切である。

2. 定体積試験

定体積試験は、石灰質砂と砕砂について垂直応力としてせん断面上の垂直応力 σ_N と加圧板側の垂直応力 σ_c を同時に測定した。Fig.6 に、せん断応力 τ —せん断変位 D 関係、垂直応力 σ_N —せん断変位 D 関係、せん断垂直応力比 τ/σ_N —せん断変位 D 関係、垂直応力比 σ_c/σ_N —せん断変位 D 関係をそれぞれ示す。

せん断応力 τ —せん断変位 D 関係および垂直応力 σ_N —せん断変位 D 関係は、圧密圧力 σ_{N0} によって異なっているが、応力比 τ/σ_N で整理するとほぼ一致している。垂直応力比 σ_c/σ_N —せん断変位 D 関係では、垂直応力比は、せん断に伴って増減を繰り返しながら変化し、加圧板側の垂直応力

σ_c とせん断面上の垂直応力 σ_N は一致しないことがわかる。しかも、垂直応力比 σ_c/σ_N は全体的にせん断変位の増加とともに減少傾向を示している。定体積試験では、垂直変位を拘束しているため、ダイレイタンスに起因してせん断面上の垂直応力が発生し、その値は加圧板に作用する垂直応力とは異なっている。

Fig.7 は、定体積試験によるせん断面上の垂直応力 σ_N とせん断応力 τ の応力経路および加圧板側の垂直応力 σ_c とせん断応力 τ の応力経路をそれぞれ示したものである。また、図中には比較のため定圧試験による応力経路も併せて示してある。加圧板側の垂直応力 σ_c はせん断面上の垂直応力 σ_N よりも小さくなっており、そのため応力経路が異なり、両者の破壊包絡線に差が生じている。それに対して、定体積試験のせん断面上の垂直応力 σ_N による応力経路から求まる破壊線は定圧試験の応力経路による破壊線とほぼ一致している。従って、定体積試験においても定圧試験と同様にせん断面上の垂直応力を用いてせん断強度を評価する必要がある。

3. 一面せん断試験と三軸圧縮試験との比較

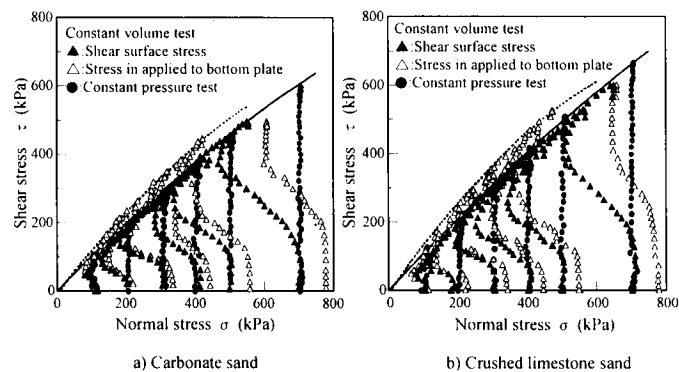


Fig.7 Comparison of stress path by shear surface stress and stress in applied to bottom plate

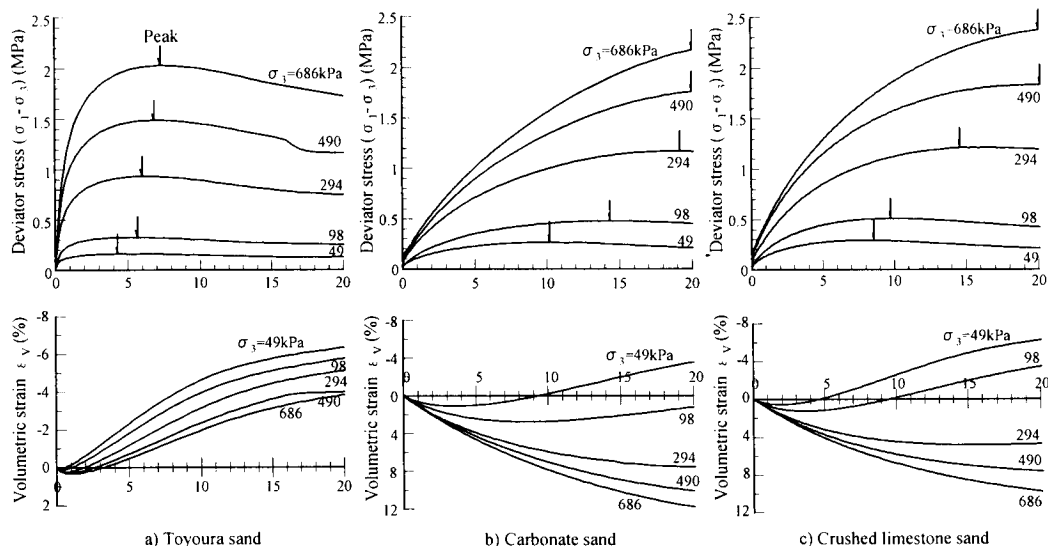


Fig.8 Results of triaxial compression test

Fig.8 に、豊浦砂、石灰質砂ならびに石灰質砕砂の三軸圧縮試験による主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$)—体積ひずみ ϵ_v —軸ひずみ ϵ_1 の関係をそれぞれ示す。豊浦砂では、せん断応力はピークを示した後、軸ひずみの増加とともに徐々に減少している。体積変化は、せん断開始後一旦収縮するがその後膨張に転じている。一方、石灰質砂および砕砂では、せん断応力は側圧 σ_3 の増加に伴い明確なピークを示さなくなる。体積変化は、側圧 σ_3 の増加に伴い膨張傾向から収縮傾向に移行している。

Fig.9 は、豊浦砂、石灰質砂および砕砂のそれぞれについて三軸圧縮試験によるピーク強度時のモールの応力円による破壊包絡線を示し、その図上に定圧試験のピーク強度時のせん断応力と垂直応力をプロットして示したものである。各試料ともに、定圧試験によるピーク強度は三軸圧縮試験の破壊包絡線上に分布しており、一面せん断試験による破壊包絡線と三軸圧縮試験による破壊包絡線はほぼ一致している。一面せん断試験ではせん断面上の垂直応力を用いることで三軸圧縮試験による結果とほぼ同程度のせん断強度定数を求めることができる。

ところで、一面せん断試験によるピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_D および三軸圧縮試験によるピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_p は次式により定義される。

$$\phi_D = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_f}{\sigma_N} \right)_{\max} \quad (1)$$

$$\phi_p = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_{\max} \quad (2)$$

Fig.10 は、定圧試験から求めたピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_D と側圧 σ_3 の関係を三軸圧縮試験におけるピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_p と側圧 σ_3 の関係に対して比較して示したものである。ここで、一面せん断試験では直接主応力状態を求めることはできないので、Fig.11 に示すように一面せん断試験のピーク強度が三軸圧縮試験による破壊包絡線に一致するとみなして、モールの応力円から最小主応力(側圧 σ_3)を求めた。

内部摩擦角 ϕ と側圧 σ_3 の関係は、各試料ともに定圧試験結果と三軸圧縮試験とではほぼ一致し、同程度の内部摩擦角を示している。また、内部摩擦角 ϕ —側圧 σ_3 関係には、側圧の増加に伴う内部摩擦角の減少の程度が示されている。

なお、豊浦砂については、定圧試験のせん断変位 8mm における内部摩擦角と三軸圧縮試験の軸ひずみ 20% における内部摩擦角をそれぞれ限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} とみなして、限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} についても側圧との関係で示してある。限界状態の内部摩擦角 ϕ_{cv} は側圧 σ_3 の大きさに関わらず、ほぼ一定の値を示し、定圧試験と三軸圧縮試験から求まる内部摩擦角 ϕ_{cv} はほぼ一致している。

摘 要

一面せん断試験の供試体とせん断箱内壁の周面摩擦の影響を調べために、せん断面上の垂直応力が測定できるように改良した一面せん断試験装置を用いて砂について定圧試験および定体積試験を実施した。また、改良前の在来型試験結果との比較により、せん断強度に及ぼす周面摩擦力の

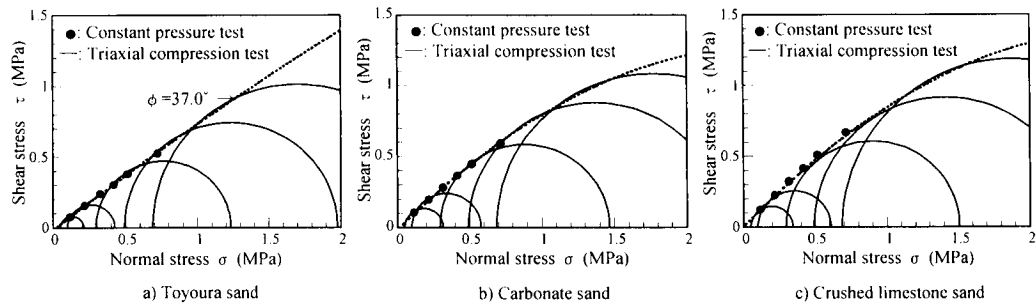


Fig.9 Comparison of failure envelope for direct shear test and triaxial compression test

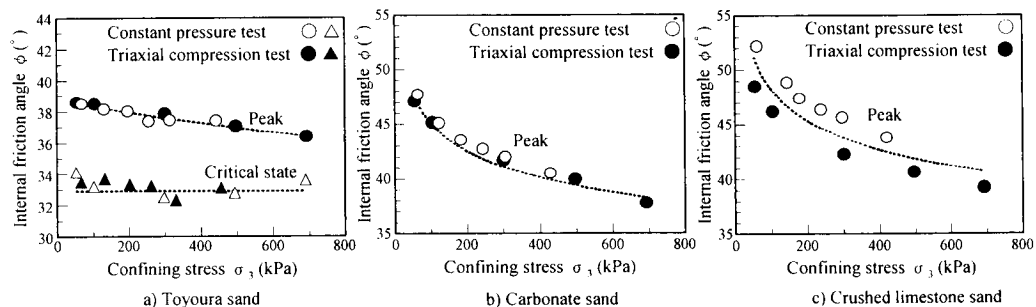


Fig.10 Relationship between internal angle and confined stress

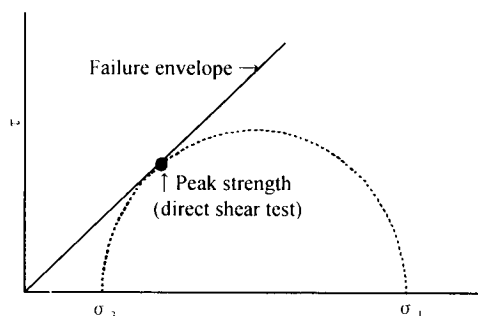


Fig. 11 Determination of principal stress for specimen of direct shear test

影響について調べた。さらに、定圧試験による内部摩擦角と三軸圧縮試験による結果と比較して一面せん断試験結果の評価を行った。得られた主な結果を以下に示す。

- 1) せん断箱内壁と供試体との周面摩擦力は、圧密過程およびせん断過程において体積変化に伴って発生し、せん断

面上の垂直応力に反映されている。

- 2) 周面摩擦力は、垂直応力に直接関与することから、せん断強度の決定にはせん断面上の垂直応力を用いる必要がある。
- 3) 定体積試験ではせん断面上の垂直応力で整理した破壊線は定圧試験による破壊線とほぼ一致する。
- 4) 定圧試験によって得られた強度定数は、三軸圧縮試験による結果とほぼ同程度である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp.458-465，1990
- 2) 地盤工学会：土質試験の方法と解説(第1回改訂版)，pp.563-600，2000
- 3) 土質工学会：土質試験法(第1回改訂版)，pp.361-389，1969
- 4) 新城俊也，瀬戸内秀規：さんご礁石灰質堆積物の鋼材との摩擦特性，土と基礎，Vol.49，No.8，pp.4-7，2001