

超高压下での粒状土の力学挙動に関する実験的研究

Experimental study on mechanical properties of granular soils under ultra-high pressures

おお 大	ひら 平	よし 至	のり 徳*	こ 木	ぐれ 暮	けい 敬	じ 二*
やま 山	ぐち 口	はれ 晴	ゆき 幸**	もり 森			しげる 茂***
すえ 末	よし 吉	けい 慶	ぞう 三****	やま 山	ね 根		きよし 清*****

1. はじめに

土木工学上、高压という圧力は不変的なものではなく、取り扱う地盤材料の力学的特性との関連において相対的尺度で定義されるものである。砂のような粒状土を対象とする場合には、通常、粒子の破碎現象が著しく現れるか否かによって、低压域と高压域とに区別される場合が多い。Vesic(ベシク)ら¹⁾は、土木工学で取り扱う土を対象として、圧力域を0~10 kgf/cm²を低压、10~100 kgf/cm²を中圧、100~1 000 kgf/cm²を高压、1 000~10 000 kgf/cm²を超高压域と区分している。

土木地質学や岩石工学の分野では、古くから数万 kgf/cm²に及ぶ極めて高い拘束圧下での材料の圧縮試験や三軸せん断試験が行われている^{2)~4)}。粒子破碎に関する機構やその物理的表示方法については、粉体工学の分野でかなり詳細に論じられ、理論的体系がなされている^{5),6)}。土木工学の分野では、高压下での砂の高压縮性がTerzaghi(テルツァーギ)⁷⁾らにより指摘され、構造物の大型化に伴う砂層杭の支持力問題、ロックフィル材料の破碎問題、地下深部の掘削問題等に関連して、1950年代後半から主に研究がなされている^{1),8)~13)}。我が国では、豊浦砂について、拘束圧500 kgf/cm²にわたる高压三軸試験結果から、破碎応力下での砂の力学特性の解明を試みた三浦ら^{14)~20)}の一連の研究がある。

土木工学の分野では、ほとんど砂を対象とした研究であるが、その砂を構成している主要構成鉱物の固さに注目して、破碎特性や破碎応力下で示す圧縮・せん断特性について論じた研究は非常に少ない。また、これらの研究による成果は、500~1 000 kgf/cm²に至る拘束圧下のもので、更に広範囲な圧力域まで延長され得るのかについては明確にされていないようである。

本研究では、堅固な石英鉱物を80%以上含んでいる豊浦砂と細かい火山ガラスを90%以上含んでいる火山灰土であるしらすという、主要構成鉱物の固さが極端に異なる2種類の粒状土を用いて行った、2 000 kgf/cm²までの各種の

拘束圧下での三軸圧縮試験と鉛直応力3 000 kgf/cm²までの一次元圧縮試験結果に基づき、高拘束圧下で示す豊浦砂としらすの力学特性を対比させながら考察を加えた。

2. 超高压三軸圧縮試験機の概要

本研究で使用した試験機は地盤材料の超高压拘束圧下での力学特性を解明するのに開発した三軸圧縮試験機である。試験機の主要部は最大常圧2 000 kgf/cm²の拘束圧の荷重が可能な特殊合金製の三軸室、許容荷重200 tfの軸力が発生できるアムスラーを取り付けた載荷台と2 000 kgf/cm²に及ぶ圧力範囲において長期に一定圧が供給できる側圧発生装置および軸圧発生装置から成る。側圧および軸圧の発生は油圧方式で制御される。軸圧発生装置からの油量の調節で、せん断速度は0.05~5 mm/minの範囲で選定できる。図-1に三軸室の詳細図を、各主要部の全景を口絵写真-1に示す。

3. 試料と実験

本実験では市販の豊浦標準砂と宮崎県えびの市八幡山付近から採取したしらすの2種類の試料を用いた。豊浦砂は297 μm、しらすは2 000 μmのふるいを用いて水中で水洗いし、通過試料を110℃で炉乾燥して実験試料とした。表-1にX線定量分析による鉱物組成と試料の代表的諸元を

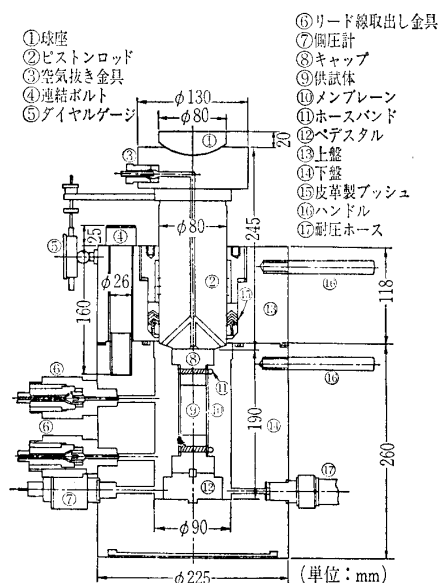


図-1 三軸室の詳細図

*防衛大学校教授 土木工学教室

**防衛大学校助教授 土木工学教室

***防衛大学校研究科学生 土木工学教室

****八千代エンジニアリング(株) (元研究科学生)

*****防衛施設庁 技官

示す。

豊浦砂としらすの乾燥試料を用いて直径 30 mm、高さ 70 mm の供試体を作製した。豊浦砂では密詰め供試体（初期間隙比 $e_i=0.64\sim0.66$ ）と緩詰め供試体（ $e_i=0.97\sim0.98$ ）を、しらすでは密詰め供試体（ $e_i=1.20\sim1.22$ ）を用いた。超高圧三軸試験機を用いた $2\,000\text{ kgf/cm}^2$ までの各種拘束圧下での等方圧縮試験と等方圧縮後拘束圧一定下でせん断する等方圧縮せん断試験のほかに、直径 (D) が 34 mm と 100 mm の 2 種類のステンレス製モールド（肉厚 30 mm）を用い、充てんする試料高さ (H) を調整して作製した各種の H/D 供試体に関する一次元圧縮・膨張試験を実施した。

等方圧縮下での拘束圧の載荷時間は 30 分と規定し、せん断速度を約 $0.5\%/min$ とした。なお、高圧下でのピンホールや破碎粒子によるメンブレンの破損防止のため、厚さ 2 mm の特殊合成ゴム製のメンブレンを使用した。試験後、ふるい分け試験と粒度試験結果から試料の粒子破碎の状況を観測した。またポロシメーター等により試料の密度測定²¹⁾を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 圧縮特性

両試料の等方および一次元応力下での圧縮特性を間隙比と鉛直応力との関係で図-2 に示す。 $2\,000\text{ kgf/cm}^2$ の圧力範囲での圧縮試験結果によると、間隙比が急変し始める応力状態が明りょうに現れ、粒状土でも粘土の圧密降伏応力に相当する応力が存在する。この応力付近を境として、一般に、粘土では顕著な土粒子の再配列が起こり土構造が急変し始める。粒状土では粒子破碎という現象が著しく起こり始め、粒度分布が大きく変化し始める。この応力（破碎圧と称されているが⁸⁾、ここでは、粘土の場合と同様に圧密降伏応力と呼ぶ）の大きさは粒状土を構成している鉱物の種類や初期の間隙比 (e_i) の状態と密接に関連している。豊浦砂では、 $100\sim500\text{ kgf/cm}^2$ 範囲に圧密降伏応力が見られるのに対し、しらすでは $10\sim50\text{ kgf/cm}^2$ 付近にあり、その大きさは豊浦砂の $1/10$ 程度である。これは、固い石英鉱物を主体とする豊浦砂と比較して、しらすを構成している鉱物の 90% 以上がもろい火山ガラスによっているため

表-1 試料の鉱物組成と物理的諸元

試料		豊浦標準砂	しらす
諸元			
比重		2.638	2.416
粒径範囲 $d(\text{mm})$		$0.074 < d < 0.297$	$d < 2.0$
50% 径 $d_{50}(\text{mm})$		0.20	0.16
10% 径 $d_{10}(\text{mm})$		0.16	0.026
均等係数 U_c		1.3	8.1
間隙比	$e_{\max}$	0.983	1.981
	$e_{\min}$	0.638	1.005
鉱物組成 (%)	火山ガラス	0	90.4
	石英	82.3	2.5
	曹長石	0	7.1
	カリ長石	8.3	0
	その他	9.4	0

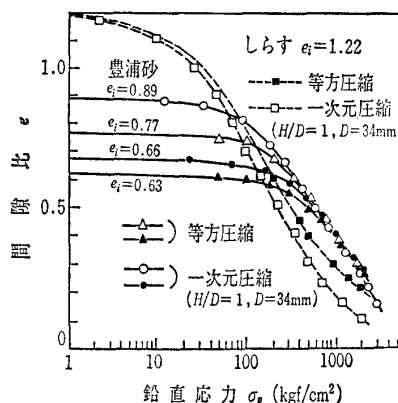


図-2 豊浦砂としらすの圧縮曲線

と言える。また、豊浦砂の結果から明らかなように、密詰め供試体は高い圧密降伏応力を示し、 $1\,000\text{ kgf/cm}^2$ 付近まで初期間隙比の相違が圧縮特性に影響を及ぼしている。圧密降伏応力より高い圧力域では、両試料の間隙比は圧力の対数にほぼ比例して減少する傾向を示し、粘土の処女圧縮域から求められる圧縮指数に相当するものが定義できる。このような圧力域で示す粒状土の高圧縮性は、粒子破碎と言う非可逆現象によっている（後述する図-13~15参照）。

図-3 は、砂の圧縮特性に関する研究の代表的なものを整理した三浦ら²²⁾の結果に、本結果と Vesic¹⁾らの結果等を加え再プロットしたものである。三浦ら²²⁾も指摘しているが、砂はかなりの圧力域まで初期の間隙比の状態をあまり変えずに付加応力に抵抗し、大略的には、各研究者による圧縮曲線の延長上に $30\,000\text{ kgf/cm}^2$ の下で石英砂を圧縮した Bridgman (ブリッジマン)²⁾の結果が位置していること、また彼の結果によると、 $30\,000\text{ kgf/cm}^2$ という想像を絶するような極端に高い圧力下でも砂の粒度配合の相違が消失せず現れ、圧縮特性に影響を及ぼしていることは非常に興味深い。

同図の著者らおよび三浦らや Vesic¹⁾らの結果は三軸試験機を用いた等方圧縮試験による結果であるが、ほかの研究者に

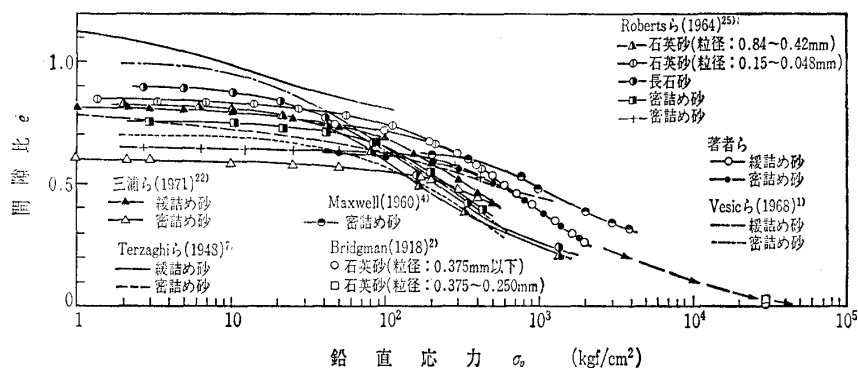


図-3 代表的研究者による砂の圧縮曲線

よるものはいずれもモールドを用い一次元的に圧縮した結果である。Maxwell (マックスウェル)⁷⁾ 自身も指摘しているが、ピストンやモールド壁面と砂との摩擦が一次元圧縮試験からの圧縮特性と重要なかわりを持つことは、当然、推測される。粉体工学の分野で Janssen (ジャンセン)⁸⁾ は、容器と粉体との壁面摩擦を深さ方向に一定として、粉体内部での微小要素についての力の釣合いから容器内の応力分布を求める式を提案した。図-4 はモールド内での微小要素の力の釣合いを示したもので、これより、高压下では試料の自重を無視すると次式が得られる。

$$\sigma_{vh} = \sigma_v \exp\left(-4\mu K \frac{h}{D}\right) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 D はモールド直径、 H は試料高さ、 μ は砂とモールドとの摩擦係数、 γ は砂の単位体積重量、 K は土圧係数、 σ_v は試料表面での鉛直応力、 σ_{vh} は試料深さ h での鉛直応力である。 σ_{vh} は h/D の関数となり、 h が増すほど減少する。したがって、試料厚さ H とモールド径 D との比 H/D が小さいほど圧縮時の摩擦効果は低減し、モールド内は均一な応力分布に近づくことになる。

図-5 は $D=34$ mm のステンレス製モールドを用いて、 $H/D=1$ とした豊浦砂の密詰め試料について、1350 kgf/cm² の鉛直応力下で圧縮した後、上、中、下層と3層に試料を分けてそれぞれ求めた粒径加積曲線の比較を示している。(1)式によるように、明らかに深さ方向において粒径分布に差異が見られ、摩擦効果が圧縮特性に影響を及ぼしている。そこで、一次元圧縮・膨張試験時の H/D 値によって圧縮・膨張曲線がどの程度変化するかを緩詰め試料についての3000 kgf/cm² にわたる試験結果から調べたのが図-6 である。 $D=34$ mm モールドを用いて、 H/D を1~4.7 と3種類に変えた結果によると、充てん厚さが薄い試料ほど圧縮および膨張量に富み、低い応力状態で圧密降伏応力がより明りょうに現れる。500 kgf/cm² < σ_v 域での圧縮時と最大 $\sigma_v=3000$ kgf/cm² からの膨張時での各 $e \sim \log \sigma_v$ 関係はいずれも直線として近似できるが、 $H/D=1$ での圧縮域での直線部の勾配は $H/D=4.7$ の場合の約1.7

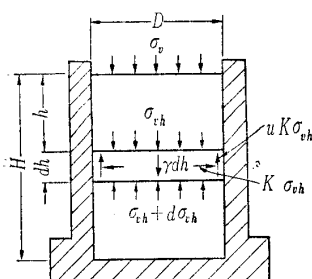


図-4 モールド内の微小要素の力の釣合い

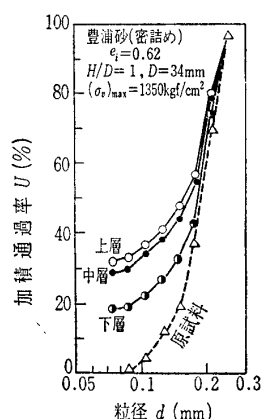


図-5 各層での粒径加積通過率曲線

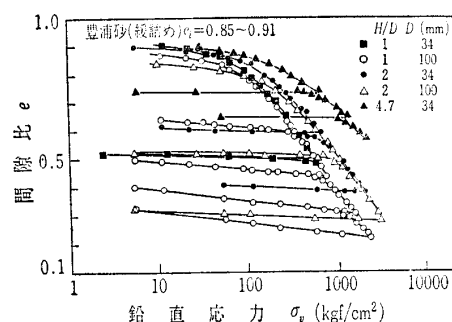


図-6 圧縮特性に及ぼす H/D の効果

倍の値となった。また、モールド径 ($D=34$ mm と 100 mm) が異なっても H/D (1 と 2 の場合) が同じであれば、圧縮および膨張時の $e \sim \log \sigma_v$ 曲線は互いにほぼ一致することが分かる。このことは、試料層内の鉛直応力が(1)で示した h/D の関数と見なせることを裏付けている。

ところで、図-2, 3で示したように、低圧から高压域に至る圧縮挙動が粘土の非処女 (unvergin) から処女圧縮域にわたる挙動と類似していること、また地球表層部に位置する各種の地盤材料は、風化・侵食作用等によって岩石→礫→砂→シルト→粘土→コロイドという形成過程の流れの下にあることなどから判断すると、各種の地盤材料間でその堆積年代や応力履歴および構成鉱物やその配列構造に差異があるにしても、巨視的には、類似性を持った何らかの法則の下に材料の圧縮が進行するものと想像される。そこで、高压下での粒状土の圧縮状況の位置づけを示すために、前述した豊浦砂としらすの結果を、泥炭や粘土等に関する著者らの既存資料に加え、ほかの研究者^{25)~27)}より報告された岩石や各種土質に関する圧縮試験結果を同一面上にプロットしたのが図-7 である。図より、自然間隙比の高いポーラスな泥炭のような材料は低圧域で急激な間隙比の減少を示す。しかし、各種材料間での間隙比の差異は圧縮応力の増大とともに加速度的に消失していく傾向が分かる。そこで、図-3 での 30000 kgf/cm² 下で間隙比が 0.02 ま

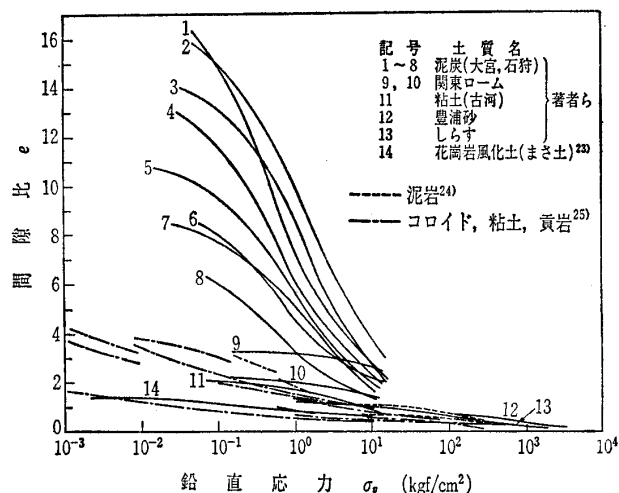


図-7 代表的な各種地盤材料の圧縮曲線

で減少した石英砂に関する Bridgman²⁾ の結果を加味すれば、各種地盤材料の間隙比は圧力の増大とともに限りなくゼロ値に向かって減少し続けることが予想される。

4.2 セン断特性

両密詰め試料について、非排気条件下で実施した 2 000 kgf/cm² にわたる各種拘束圧 (σ_{sc}) 下での等方圧縮せん断試験結果による軸差応力～軸ひずみ曲線を図-8(a)に、また(b)に豊浦砂についてのせん断過程での状態経路を $e \sim \log p$ 面上に示す。両試料では拘束圧が大きくなると、軸差応力の最大値が明りょうに現れる傾向を示し、軸ひずみが 20～30% とかなりのせん断変形を受けて破壊状態（軸差応力が最大の状態、サフィックス f を付す）に至る。また状態経路の軌跡から明らかなように、せん断過程での体積減少が著しく、特に、 $\sigma_{sc} > 1\,000$ kgf/cm² の供試体においては負のダイレイタンスを呈することが明りょうに分かる。

図-9 は Kondner (コンドナー)²⁶⁾ の双曲線近似法より初期変形係数 E_i を求め、せん断強さ $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ とプロットしたものである。本結果によると豊浦砂としらすの高压域での E_i と $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ との関係は両対数上で直線近似できる。

破壊時に動員される土のせん断抵抗角 ϕ_a はダイレイタ

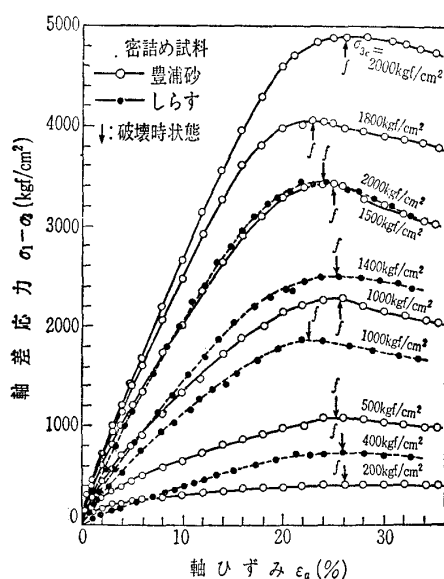


図-8(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

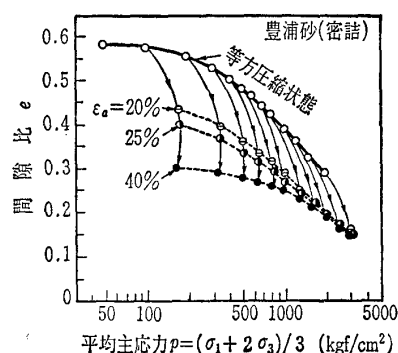


図-8(b) セン断過程での状態経路

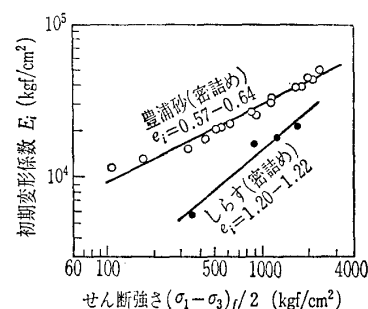


図-9 初期変形係数とせん断強さとの関係

ンシー挙動と密接に関連している。一般に、密詰め砂から緩詰め砂へと初期間隙比が大きくなると、砂においても負のダイレイタンス現象が現れることは周知のことである。三浦ら¹⁴⁾による豊浦砂について拘束圧が 500 kgf/cm² 以下の等方圧縮排水せん断試験結果によると、密詰め ($e_i = 0.60 \sim 0.62$) と緩詰め ($e_i = 0.82 \sim 0.84$) 両供試体での低压域の破壊包絡線は原点を通る直線となり、両 ϕ_a はそれぞれ 40.6° と 33.0° と報告している。一方、しらすについても包絡線の低下傾向は春山²⁷⁾ や三浦ら²⁸⁾ によって認められている。これによるとせん断抵抗角の減少し始める 45° 面上の垂直応力は 2 kgf/cm² 付近と豊浦砂の 10 kgf/cm² に比較してかなり低い。

ところで、上述の豊浦砂に関する三浦ら¹⁴⁾の結果によると、拘束圧 500 kgf/cm² 下での ϕ_a 値もまだ減少過程にあることが認められ、粒状土の ϕ_a は拘束圧とともに限りなく低下し続けるのか、あるいは一定値に収束していくのかについての報告は行われていないようである。そこで、図-10に豊浦砂としらすの密詰め供試体について、拘束圧 500～2 000 kgf/cm² と 400～2 000 kgf/cm² 範囲下での本実験による破壊時のモールの応力円と破壊包絡線を示す。各モールの応力円に対応するせん断開始時の応力状態は、図-2によれば圧密降伏応力より明確に高い状態にあり、粘土で言えば、正規圧密状態に相当している。このような圧力域では、各モールの応力円にほぼ接し、しかも直線として原点を通る破壊包絡線を引くことが可能である。この直線の勾配は豊浦砂で 32.6°、しらすで 25.5° となった。このことは、密詰め砂のダイレイタンスが高拘束圧域で正から負に変化することに留意すれば、負のダイレイタンスを呈する正規圧密粘土のせん断抵抗角が圧密圧力に依存しないことから示唆される。そこで、この結果と数百 kgf/cm² 付近での包絡線の低下を考慮すれば、低压域から広範囲な圧力域にわたる粒状土の包絡線は図-11のように図式化できる。拘束圧に伴うせん断抵抗角の変化は密詰め砂ほど緩詰め砂では現れないが、図-2に示したように、拘束圧の増加とともに圧縮特性に及ぼす初期間隙比の影響が消失することからすれば、緩詰め砂と密詰め砂のせん断抵抗角は高拘束圧下でかなり近い値を示すと言える。

両試料での拘束圧に伴うせん断抵抗角の変化を調べるた

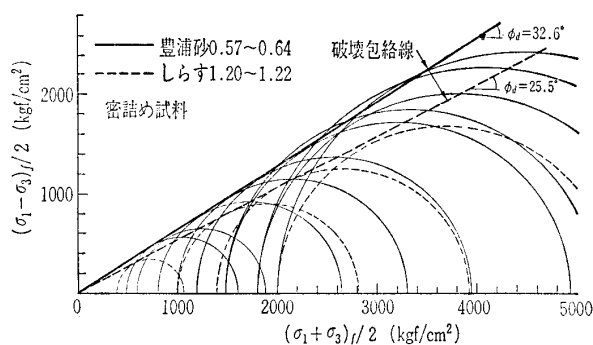


図-10 高拘束圧下での破壊包絡線とモールの応力円

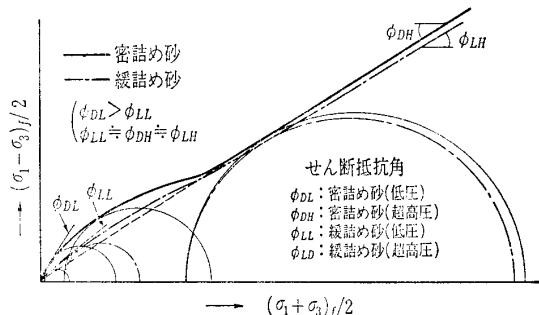


図-11 図式化した広範囲な圧力域にわたる破壊包絡線の形状とモールの応力円

めに、三浦ら¹⁴⁾と春山³⁹⁾による結果を併記して、各モールの応力円から求めたせん断抵抗角を拘束圧との関係で図-12にプロットしてある。100 kgf/cm² 付近までせん断抵抗角の急激な減少傾向が見られる。しかし、本試験結果から示唆されるように、この減少割合は拘束圧の増加とともに漸次低下し、各試料土のせん断抵抗角は定値を取ると考えられる。

4.3 破碎特性

ここでは、両試料の等方圧縮とせん断過程での粒子破碎状況を粒径加積曲線に基づいて検討する。

図-13は豊浦砂についての等方圧縮下での破碎特性に及ぼす初期間隙比の影響を示している。2000 kgf/cm² の拘束圧下でも初期間隙比の影響が見られ、各ふるいの加積通過率によると、粒径 $d < 0.149$ mm の粒子が緩詰め試料で数%高くなっている。これは、密詰め試料に比較して、間隙比の大きい緩詰め試料は密度が低く、当然、初期の粒子間接触点数が少ないため、作用応力下での粒子の相対的移動が大きくなり、粒子破碎がより促進されるためと言える。更に、300~500 kgf/cm² 付近で通過率が急激に増加している。この付近の応力は圧密降伏応力に相当している。

ところで、上述の密詰めと緩詰め試料の粒子破碎状況の相違が初期間隙比に起因する粒子間の相対的移動距離に依存しているとすれば、Bishop (ビショップ)¹¹⁾ら^{13), 14)}の結果のように、高拘束圧下でのせん断過程では、当然、著しい破碎現象が観測される。図-14と図-15には、豊浦砂としらすの密詰め試料について、せん断時の破碎状況を等方圧縮時の結果と併記して示してある。これらの図より、せ

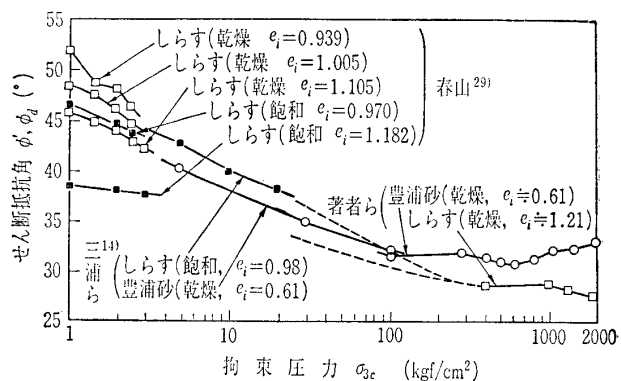


図-12 拘束圧に伴うせん断抵抗角の低下

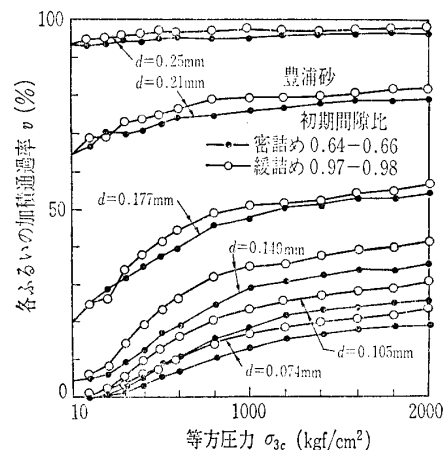
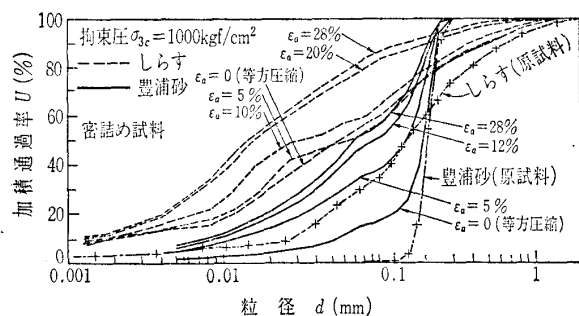


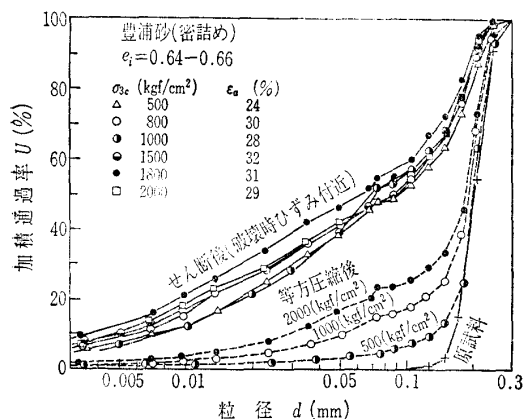
図-13 等方圧縮下での粒子破碎状況に及ぼす初期間隙比の影響

ん断過程では軸ひずみ(ϵ_a)の増大に伴って加積曲線に著しい変化が見られる。特に、豊浦砂では、図-14の結果より、軸ひずみ5%程度の変形初期過程で破碎現象は卓越し、軸ひずみ10%程度で破壊時ひずみ($\epsilon_a \approx 25\%$) 付近の破碎状況にかなり近くせん断変形に伴う破碎の鈍化傾向が認められる。同図に示すしらすでも同様の傾向が観測される。しかし、図-15(b)に示す等方圧縮下での破碎状況に着目すると、もろい鉱物で構成されているしらすの圧密降伏応力が10~50 kgf/cm² 付近(図-2参照)にあったことから推測されるように、むしろ、200 kgf/cm² 以下のかなり低い圧力域で粒子破碎が著しく、せん断開始時に、既に、小粒径の粒子群を主体とした粒径分布が形成されている。そのため、せん断過程での加積曲線の変化は豊浦砂ほどではない。また、図-15(a)と(b)より、破壊時ひずみ付近での各拘束圧下での加積曲線はほとんど一致する傾向を取る。これは、粒子破碎を生じる高拘束圧下では、破碎が応力レベルよりも摩擦作用が十分に発揮されるか否かという粒子間の相対的移動距離に起因することを裏付けている。

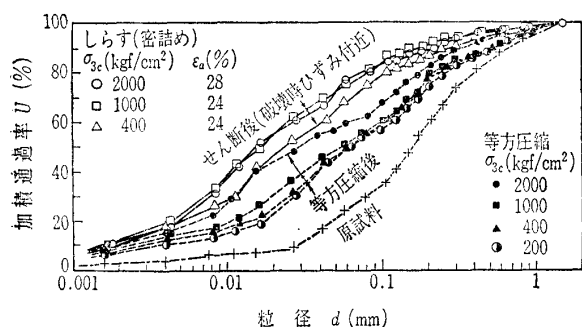
ところで、図-14, 15からも分かるように、大きなせん断変形を受けると非常に微細な粒径粒子から成る粒径分布が形成された³⁰⁾。豊浦砂としらすの試料は乾燥した粒状土にもかかわらず、この微細な粒子群を中心として十分に自立できる砂塊(コア)が観測された(写真-1)。この非常



図—14 せん断変形に伴う破碎状況の変化

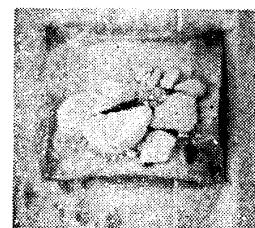


図—15(a) 各拘束圧下での破壊付近での破碎状況(豊浦砂)

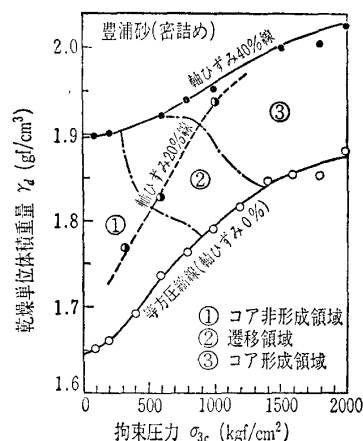


図—15(b) 各拘束圧下での破壊付近での破碎状況(しらす)

に硬く固結化したコアは、砂層に押し込まれた杭の載荷試験でも、杭先端下部に半球状に形成されることが確認されている^{31), 32)}。そこで、豊浦砂についての高圧三軸圧縮試験結果に基づき、コアの密度とコア形成時の応力・ひずみ条件を図—16に示す。拘束圧と軸ひずみレベルからほぼ三つの領域に区分される。③の領域では試料全体がほぼ完全にコアを形成している状態であり、等方圧縮下では約1400 kgf/cm²以上の拘束圧が要求される。①の領域では粒子破碎を伴うが、試験後試料は自立できず完全に粒状の状態にある。②の領域は①と③領域の遷移的領域で部分的にコアの形成が確認された。一方、しらすについても図—16と同様の傾向が観測された。当然、予想されることであるが、コアの形成される乾燥単位体積重量は約1.63 gf/cm³と豊浦砂の約1.84 gf/cm³の値に比較してかなり低く、等方圧縮下では、500 kgf/cm²付近から固結したコアが確認された。


豊浦砂
($\sigma_c = 1400 \text{ kgf/cm}^2$)

しらす
($\sigma_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$)

写真—1 コアの形成(等方圧縮)



図—16 コア形成時のひずみ・応力条件(豊浦砂)

4.4 比表面積と塑性仕事との関係

破碎現象は非可逆現象であり、破碎領域では弾性的エネルギーの蓄積よりも、音や摩擦熱等として消費されるエネルギーに富み、当然、塑性的エネルギーに卓越していると言える。粒子破碎状況を力学的パラメーターと関連づけて論じるために提案された破碎評価のための各種の指標が福本³³⁾により整理されている。ここでは、比表面積の変化量を用い、塑性仕事との関連について検討する。

比表面積の算定に際して、前節で示した加積通過曲線を対数正規分布型に近似すると、単位重量当たりの比表面積 $S_w(\text{cm}^2/\text{gf})$ は

$$S_w = \frac{\phi}{G_s \cdot d_{50}} \left\{ 0.5 \ln^2 \left(\frac{d_{84.13}}{d_{50}} \right) \right\} \dots \dots \dots (2)$$

となる⁵⁾。ここに、 ϕ は粒子の形状係数、 d_{50} と $d_{84.13}$ は通過率50%と84.13%での粒径、 G_s は比重である。なお、豊浦砂では、0.074 mmの粒径を境として二つの直線で近似した³⁴⁾。 S_w は、

$$S_w = S_{w1}(1 - \bar{U}(d < 0.074 \text{ mm})/100) + S_{w2}\bar{U}(d < 0.074 \text{ mm})/100 \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここで、 S_{w1} と S_{w2} はそれぞれ0.074 mm以上と以下の粒径による比表面積で、 $\bar{U}(d < 0.074 \text{ mm})$ は0.074 mm以下の粒子の全加積通過率を100%としたときの通過率である。なお、以下では $S_w(\text{cm}^2/\text{gf})$ を単位体積当たりの比表面積 $S_v(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ に換算して用いる。一方塑性仕事 W^p は

$$W^p = \int q d\varepsilon + \int p dv - \int p dv^e \dots\dots\dots (4)$$

より求める。ここに、 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 、 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 、 $\varepsilon = \varepsilon_a - \frac{1}{3}\nu$ 、 ν は全体積ひずみ、 ν^e は弾性的体積ひずみである。

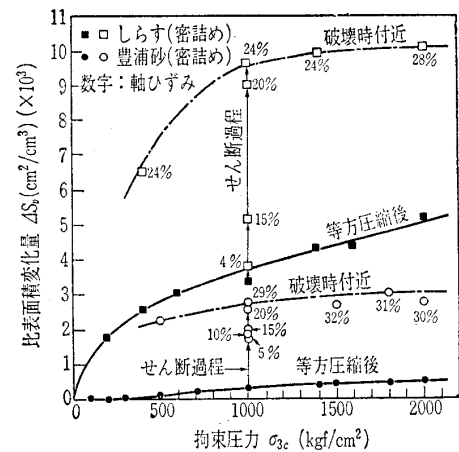
豊浦砂としらすでの拘束圧とせん断変形の増大に伴う比表面積の変化量 $\Delta S_v (=S_v - S_{v0})$ 、 S_{v0} は原試料の S_v を図—17に示す。拘束圧および軸ひずみレベルが高くなると破碎が著しくなり、当然 ΔS_v は増大する。図—15(a)と(b)からも推測されることであるが、両試料において破壊時ひずみ付近での ΔS_v 値は拘束圧にほとんど依存せず、収束値を取る傾向を示す。しらすの等方圧縮下での ΔS_v 値は豊浦砂のせん断過程での値より大きく、粒子が非常にもろく破碎しやすいことがうなずける。

図—18にはこの比表面積の変化量を塑性仕事 W^p との関係でプロットしてある。同図は図—17と呼応しており、 ΔS_v の増加割合は W^p の増大とともに急激に減少する。特に、この傾向はせん断過程で著しく、図—14で指摘した破碎の鈍化傾向が認められる。すなわち、両試験において、ほぼ 500 kgfcm/cm^3 の W^p 付近を境として、塑性仕事の増加が果たす役割が異なってくる。 500 kgfcm/cm^3 までの域では、 W^p の増大は破碎と密接に関連し破碎効果を促進させるが、しかし、それを越えると破碎効果は低減し塑性ひずみの助長に寄与する。

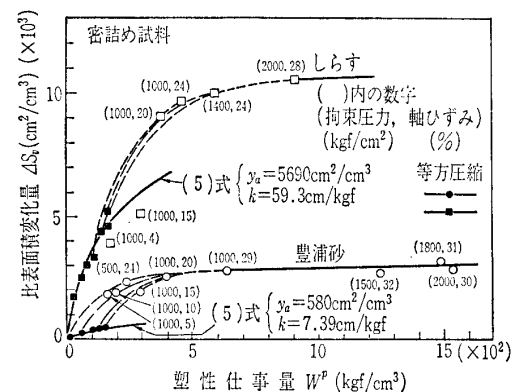
粉体工学の粉碎の分野では、Rittinger (リッチンガー)、Kick (キック) や田中ら⁵⁾ による $\Delta S_v \sim W^p$ 関係に関する経験式が提案されている。本結果は、 ΔS_v と W^p との間に比例関係が存在するとする Rittinger の式より、 W^p の増大とともに粉碎効果は低下し、 ΔS_v は限界値を持つとする田中らの式

$$\Delta S_v = \frac{1}{a} \left\{ 1 - \frac{1}{\exp(kW^p)} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

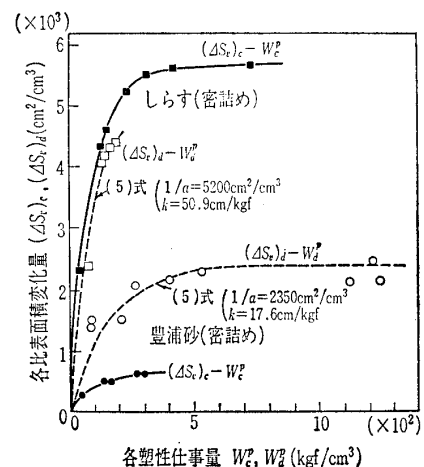
で評価できる。上式中の a 、 k は実験係数である。図—18で、等方圧縮試験結果について、両係数を定め(5)式を適用したのが実線で、実測値をよく近似できる。田中らの式の適用性は三浦ら¹⁸⁾ によっても報告されており、彼らは、更に、 $\Delta S_v \sim W^p$ 関係の初期間隙比の依存性も示している。図—19でのプロットは等方圧縮とせん断過程での両試験結果を組み合わせ、等方応力成分に起因する塑性仕事量 W_a^p と比表面積変化量 $(\Delta S_v)_a$ およびせん断応力成分に起因するそれら、 W_d^p と $(\Delta S_v)_d$ との関係にそれぞれ分離して示したものである。興味あることは、しらすでは $(\Delta S_v)_a \sim W_a^p$ 関係が $(\Delta S_v)_d \sim W_d^p$ 関係の上方に位置することである。この結果は、しらすは豊浦砂に比して破碎しやすいという事実に立てば、粒状土の破碎の難易性を定性的に表していると言える。また、同図の破線は $(\Delta S_v)_a \sim W_a^p$ 関係に(5)式を適用したもので、等方圧縮下の場合と同様、実測値に近似できる係数、 a 、 k を定めることができる。そこで、等方圧縮とせん断の両過程での破碎のメカニズムの違いと



図—17 せん断変形に伴う比表面積の増加状況



図—18 等方圧縮およびせん断過程での ΔS_v と W^p との関係



図—19 等方応力成分とせん断応力成分に起因する比表面積増加量と塑性仕事量との関係

(5)式が本来衝撃荷重による荷重落下法によっていることを考慮すれば、(5)式中の係数、 a 、 k は粒子破碎のメカニズムと関連する実験係数と言える。

5. あとがき

対象とする粒状土の粒子破碎の難易性は構成する各種鉱物の力学的性質に大きく依存するが、破碎と言う物理的現象が非可逆現象であることを踏まえれば、破碎効果は粒状土の力学的物性を塑性的性質に卓越させる役割を果たすと言える。また、この物性変化が正のダイレイタンスの低

減化としてせん断機構に跳ね返ることは粘土の過圧密効果に相当していることや粒状土の広範囲な圧力域から観測される圧縮特性や破壊時応力状態が粘土の挙動に非常に類似していること等から判断すると、高圧という応力条件は、各種地盤材料間で示す力学的物性の相違を対数スケールの縮小する役割を持っていると言える。

最後に、本研究の遂行に当たり、実験および写真撮影で、本学技官沼尻邦男氏に多大な協力を受けた。ここに記して深甚な謝意を表します。また、全学共同利用施設粉粒体物性測定室の超高圧三軸試験機を利用させていただき、便宜を計ってくれた関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Vesić, A.S. and Clough, G.W.: Behavior of granular materials under high stresses, Proc. ASCE, Vol. 94, No. SM3, pp. 661~688, 1968.
- 2) Bridgman, P.W.: The failure of cavities in crystals and rocks under pressures, Am., Jour. of Sci., Vol. 45, pp. 243~268, 1968.
- 3) Handin, J.: An application of high pressure in geophysics-experimental rock deformation, Trans. ASCE, Vol. 75, pp. 315~324, 1953.
- 4) Rock Deformation, Memoir 79, Geological Society of America, 1960.
- 5) 久保輝一・神保元二・水渡英二・高橋 浩・早川宗八郎：粉体理論と応用，丸善，1979.
- 6) 川北公夫・小石真純・種谷真一：粉体工学，基礎編，応用編，横書店，1974.
- 7) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York, pp. 57~61, 1948.
- 8) Rovert, J.E. and de Sourza, J.M.: The compressibility of sand, Proc. ASTM, Vol. 58, pp. 1269~1277, 1958.
- 9) Hall, E.B. and Gordon, B.B.: Triaxial testing with large-scale high pressure equipment, Laboratory shear testing of soils, STP, No. 361, ASTM, pp. 315~328, 1963.
- 10) Hirschfeld, R.C. and Poulos, S.J.: High pressure triaxial tests on a compacted sand and an undisturbed Silt, Laboratory shear testing of soils, STP, No. 361, ASTM, pp. 329~341, 1963.
- 11) Bishop, A.W.: The strength of soils as engineering materials, Geotech., Vol. 16, pp. 91~130, 1966.
- 12) Vesić, A.S. and Barksdale, R.D.: On shear strength of sand at very high pressures, Proc. Symposium on Laboratory shear testing of soils, STP, No. 361, ASTM, pp. 301~305, 1963.
- 13) Lo, K.Y. and Roy, M.: Response of particulate materials at high pressures, S & F, Vol. 13, No. 1, pp. 61~67, 1973.
- 14) 三浦哲彦・山内豊聡：高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について，土木学会論文報告集，No. 193, pp. 69~79, 1971.
- 15) 三浦哲彦・山内豊聡：高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について，土木学会論文報告集，No. 203, pp. 45~52, 1972.
- 16) Miura, N. and Yamanouchi, T.: Effect of water on the behavior of a quartz-rich-sand under high stresses, S & F, Vol. 15, No. 4, pp. 23~34, 1975.
- 17) 三浦哲彦・山本哲朗：砂の三軸圧縮試験の結果に及ぼす 2, 3 の要因について，土質工学会論文報告集，Vol. 16, No. 3, pp. 123~128, 1976.
- 18) 三浦哲彦・山内豊聡：砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響，土木学会論文報告集，No. 260, pp. 109~118, 1977.
- 19) 三浦哲彦：高圧下の砂の応力-ひずみ関係に関する一考察，土木学会論文報告集，No. 282, pp. 127~130, 1979.
- 20) 三浦哲彦・山本紀之：粒子破碎領域における砂の降伏曲線について，土木学会論文報告集，No. 326, pp. 83~90, 1982.
- 21) 大平至徳・木暮敬二・山口晴幸・末吉慶三：最大・最小乾燥密度の測定方法と破碎した砂粒子の密度変化について，砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集，pp. 54~64, 1981.
- 22) 三浦哲彦・山内豊聡：高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について，第6回土質工学研究発表会講演集，pp. 105~108, 1971.
- 23) 土質工学会編：日本の特殊土，p. 100, 1974.
- 24) 小宮康明・新城俊也：島尻層泥岩の圧密特性，第17回土質工学研究発表会講演集，pp. 585~588, 1982.
- 25) Lambe, T.W. and Whitman, R.V.: Soil mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 26) Kondner, R.L.: Hyperbolic stress-strain response, Cohesive soils, Proc. ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp. 115~143, 1963.
- 27) Haruyama, M.: Effect of water content on the shear characteristics of granular soils such as Shirasu, S & F, Vol. 9, No. 3, pp. 35~57, 1969.
- 28) 三浦哲彦・山内豊聡・井上 孝：砂質土のせん断特性におよぼす粒子破碎の影響，第10回土質工学研究発表会講演集，pp. 177~180, 1975.
- 29) 春山元寿： c と ϕ を考える，7. シラス：土と基礎，No. 23, Vol. 6, pp. 67~74, 1975.
- 30) 大平至徳・木暮敬二・山口晴幸・末吉慶三・沼尻邦男：高圧下における粒砂子の破碎について，第16回土質工学研究発表会論文集，pp. 517~520, 1981.
- 31) BCP 委員会：砂層に支持されるくいの支持力に関する実験的研究，1969.
- 32) 山本稜威夫：杭基礎の鉛直支持力を考える，土と基礎，Vol. 28, No. 2, pp. 77~82, 1980.
- 33) 福本武明：粒子破碎の程度を示す指標，土と基礎，Vol. 29, No. 12, pp. 64~65, 1981.
- 34) 大平至徳・山口晴幸・森 茂：破碎を伴う応力下での砂の塑性仕事と比表面積の関係，第10回土木学会関東支部年次研究発表会講演概要集，pp. 113~114, 1983.

(原稿受理 1983.11.1)