

粒子間付着力を取り入れた個別要素法による二軸圧縮試験 シミュレーションと不飽和土の三軸圧縮試験の比較

Comparison of DEM simulation for biaxial compression test with results
of triaxial compression test for unsaturated soil

加藤正司*・山本修一**・野並 賢***

Shoji KATO・Shuichi YAMAMOTO・Satoshi NONAMI

*正会員 博士(工学) 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**正会員 博士(工学) (株)大林組土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

***正会員 修士(工学) 応用地質(株)西日本技術センター (〒564-0062 大阪府吹田市垂水町 2-36-27)

Biaxial compression test for two dimensional spherical granular material was simulated by the distinct element method which takes account of a constant adhesion force acting between particles at each contact points. The effects of adhesion force on the deformation and strength of the spherical granular material were studied. It is found that these effects are similar with the effects of suction observed in the triaxial compression test results for unsaturated soil.

Key Words: distinct element method, adhesion force, strength, deformation, unsaturated soil

1. 序論

1.1 サクションと粒子間付着力

不飽和状態にある土の間隙には、水と空気が存在している。そして、水の表面張力の影響により、間隙空気圧と間隙水圧には圧力差を生じている。この圧力差をサクションと呼び、次式で定義される。

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

ここに、 s : サクション、

u_a, u_w : 間隙空気圧および間隙水圧。

サクションと土中の水分量(含水比や飽和度)の関係は、水分特性曲線と呼ばれる。図-1はその概念図を示している。飽和状態にある土の水分量はサクションの増加とともに徐々に減少し始め、あるサクションの大きさを越えると急激に減少し、その後一定の水分量に漸近する。

飽和状態で間隙水は間隙を占めており、サクションが増加すると大きな間隙から排水し始める。そして、間隙から水が排水されると、間隙水はメニスカスの状態で間隙中に保持される。以後、間隙を占める間隙水をバルク水と呼び、メニスカスの状態で保持される間隙水をメニスカス水と呼ぶ¹⁾。不飽和状態では、バルク水とメニスカス水が存在しており、サクションが大きくなるほどメニスカス水の割合が多くなると考えられる。

図-2 は、等径の2球粒子の接点間にメニスカス水が存在している場合を示している。この時、粒子間にはサクションにより生じる、次式で与えられる粒子間付着力 F が粒子接平面に垂直に作用する²⁾。

$$F = \pi r_2^2 (u_a - u_w) + 2\pi r_2 T \quad (2)$$

ここに、 r_2 : メニスカス半径、

T : 水の表面張力。

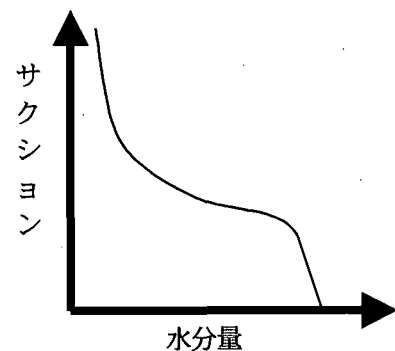


図-1 水分特性曲線の概念図

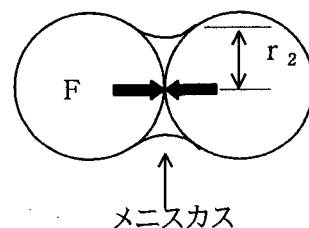
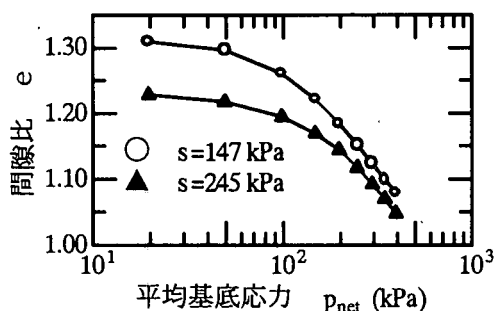


図-2 2球モデルにおける粒子間付着力

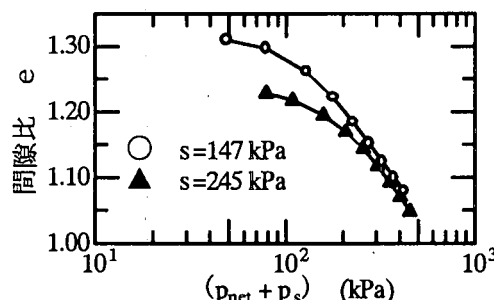
実際の土粒子は図-2 に示すような球型ではないが、不飽和状態でメニスカス水が存在している場合には、粒子接平面に垂直な方向に粒子間付着力が作用しているものと考えられる。この粒子間付着力のため、土粒子接点ではすべりに対する抵抗が増加する。このため粒子間付着力は、不飽和土の変形・強度特性に様々な影響を及ぼしている。

1.2 不飽和土の圧縮変形・せん断強度特性に及ぼす サクションの影響

不飽和土の変形・強度特性に関しては、現在まで



(a) 平均基底応力による整理方法



(b) サクシヨン応力を取り入れた整理方法

図-3 圧縮試験結果の整理方法

サクシヨンを制御した三軸圧縮試験により研究が進められてきた。そのデータ数は、次節に述べるような試験の難しさから飽和土に比べてかなり少ないのが現状である。本節ではその結果に基づき、圧縮特性およびせん断特性を表す土質定数に与えるサクシヨンの影響に関して、現在得られている知見について概説する。

(1) サクシヨン一定条件下における圧縮変形特性

図-3(a)はサクシヨン一定の等方圧縮試験で得られた間隙比と平均基底応力(式(4)に定義する)の関係の測定例³⁾を示している。不飽和状態において土粒子間に作用する粒子間付着力の影響により、土塊全体の土骨格剛性は高まる。よって、図に示すように、サクシヨンが高く粒子間付着力が大きい場合ほど、圧縮指数は小さくなる傾向を示す。

Alonso ら⁴⁾は、サクシヨン一定条件下の圧縮指数 $\lambda(s)$ は次式で与えられるとしている。

$$\lambda(s) = \lambda(0) [(1-r) \exp(-\beta s) + r] \quad (3)$$

ここに、 $\lambda(0)$: 飽和状態における圧縮指数、

r : 最大の圧縮剛性を規定する定数、

β : サクシヨン増加による圧縮指数の増加を支配する定数。

式(3)は、平均基底応力により間隙比を整理した場合、圧縮指数はサクシヨンの大きさにより異なるということを示している。

軽部ら⁵⁾はサクシヨン一定の等方圧縮試験結果を整理した結果に基づき、サクシヨン一定条件下において間隙比 e と平均基底応力 p_{net} ⁶⁾ の関係は次式で与えられるとしている。

$$e = e_0 + \lambda \ln [(p_{net} + p_s) / (p_{net0} + p_s)] \quad (4)$$

ここに、 e_0 : 基準間隙比、

λ : 圧縮指数、

$p_{net} = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3 - u_a$; 平均基底応力、
 σ_1, σ_3 : 全応力表示の最大および最小主応力、
 p_{net0} : 基準基底応力、
 p_s : サクシヨン応力。

式(4)は、図-3(b)に示すように平均基底応力とサクシヨン応力を加えた応力に基づき間隙比を整理すると、そのときの圧縮指数はサクシヨンの大きさによらず一定になるということを示している。

不飽和三軸試験における供試体体積変化の測定の難しさから、上に述べた2つの整理方法のどちらが、不飽和土に適したものであるのかは明らかにされていないのが現状である。

(2) サクシヨン一定条件下におけるせん断強度特性

粒子間付着力の影響により粒子接点でのすべりに対する抵抗が増大する。このため、不飽和土の強度は飽和状態に比べて大きくなる。Fredlund ら⁷⁾は、不飽和土の強度が次式で与えられるとしている。

$$\tau_f = c_{sat} + (\sigma - u_a) \tan \phi_{sat} + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (5)$$

ここに、 τ_f : 破壊面上のせん断応力、

σ : 全応力表示の破壊面上の垂直応力、

c_{sat} : 飽和状態における粘着力、

ϕ_{sat} : 飽和状態における内部摩擦角、

ϕ^b : サクシヨンの増加に伴うせん断強度の増加を表す定数。

上式は、サクシヨンが増加しても内部摩擦角は変化せず、サクシヨンの増加に伴い粘着力が増加することを意味している。

軽部ら⁵⁾は、サクシヨン一定条件下において締め固めた粘性土の三軸圧縮試験を行い、その結果に基づき、サクシヨンの増加に伴い内部摩擦角はわずかに増加し、粘着力も増加するとしている。

上に述べた Fredlund らと軽部らの例に示されるように、サクシヨンが不飽和土の強度に与える影響に関して、現状では異なる解釈がなされている。

1.3 不飽和土の三軸試験の問題点と本研究の目的

飽和土を用いた三軸圧縮試験の場合、試験時の供試体の体積変化は、排水量に基づいて求められる。不飽和土を用いる三軸試験の場合には、供試体内部に存在する間隙空気のため、排水量から供試体の体積変化を求めることはできない。このため、通常二重セル⁸⁾などの装置を用いて、供試体体積変化を排水量とは別途に求めている。

しかし、二重セルは側圧の変化に対して内セルの内体積が変化する。このため、内セルの内体積変化から供試体自身の体積変化を求めるには、側圧変化に対する補正を必要とする。この補正量は試験前に事前に求めておき、試験時に同じ補正量が適用できるものとして試験結果が整理される。実際には供試体設置時の影響があるため、再現性のある結果を得るためにはある程度の熟練を要するものと考えられる。

また、三軸圧縮試験時に供試体に与えるサクシヨンは、加圧板法で与えられることが多い。加圧板法の場合、与えることのできるサクシヨンの大きさはセラミックディスクの空気侵入値 (Air entry value, 以後 AEV と略す) の大きさに支配される。実用的には

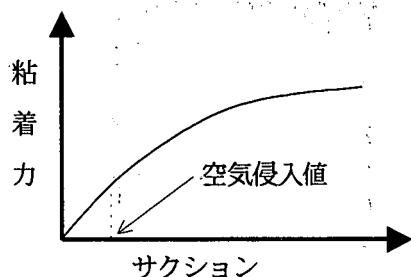


図-4 サクションと粘着力の関係の概念図

AEV=1500kPa 程度のセラミックディスクまで使用可能であるが、この場合、ディスクの透水性が低くなるために、通常 AEV=500kPa 程度のセラミックディスクが多く用いられる。よって、試験条件としては 0 から 500kPa 程度のサクションを供試体に与えることが多い。しかし、サクションの大きさと、粒子間に作用する粒子間付着力の大きさは対応しない。

三軸圧縮試験結果におけるサクションと粘着力の関係は、図-4 に示すような双曲線により近似されることが知られている⁷⁾。この図に示されるように、サクションが空気侵入値の大きさとなるまでは、粘着力はサクションの増加に対して比例的に増加する。そして、サクションの大きさが空気侵入値をこえると、サクションの増加に対し、粘着力はある値に漸近するように増加する。通常、不飽和土における空気侵入値の大きさは 100kPa 以下の場合が多く、500kPa 程度のサクションのもとでは、粘着力の増加割合はかなり減少している。そしてこの時、粘着力を生じさせている粒子間付着力のサクション増加に伴う増加割合はわずかであり、以後サクションを増加しても粒子間付着力はほとんど増加しないものと考えられる。よって、大きな粒子間付着力が作用する状態を三軸圧縮試験装置により再現することは難しく、粒子間付着力の影響を加圧法を用いた三軸圧縮試験により明らかにすることは限界がある。

また、土の強度や剛性に対しては、間隙比が影響する。よって、サクションが強度や剛性に与える影響を明らかにするには、間隙比が同じ状態でサクションのみがことなる条件下で試験することが望ましい。しかし、サクションが変化すると間隙比も変化するため、このような条件を整えるにはかなりの技術を必要とする。

以上述べたような問題点を現在の加圧法を用いた不飽和土の三軸圧縮試験は有している。このため試験そのものが難しく、飽和土に比べてデータも少ない。よって、前節で述べたようなサクションの影響に関しても実験的には明らかにされていない部分がある。

そこで、本研究では個別要素法解析により粒子間付着力を有した 2 次元粒状体の二軸圧縮せん断試験のシミュレーションを行った。この解析においては、供試体の体積変化は明確であり、作用する粒子間付着力の大きさも任意に設定できる。さらに、せん断試験前の供試体間隙比もほぼ同じにできるため、上に述べた不飽和土三軸圧縮試験における問題点はほぼ解消されるものと考えられる。

本研究では得られた結果に基づいて、粒子間付着力が変形・強度特性に与える影響について検討を行い、

不飽和土の三軸圧縮試験において現在得られている知見と比較検討した。解析状態は 2 次元であるが、本研究により得られた結果は、粒子間付着力を有する粒状材料としての不飽和土の研究において、サクションが変形・強度特性に与える影響に関する本質的な理解に対して、有力な示唆を与えるものと考えられる。

なお、本研究においては、サクション一定条件下の不飽和土の三軸圧縮試験結果と個別要素法による解析結果との比較検討を目的としている。よって、非排水条件下に見られるような、せん断中の体積変化に伴いサクションが変化するような挙動に関しては、本研究は対象としていない。

2. 解析方法および解析条件

2.1 粒子間付着力を取り入れた DEM 解析の概要

個別要素法 (Distinct Element Method, DEM と略す) は、Cundall⁸⁾によって提案された不連続体解析手法の 1 つである。有限要素法や境界要素法のような連続体解析とは異なり、粒状材料集合体の動的挙動を扱うのに適している。DEM では、要素を剛体と考え、要素間の接触点や接触面に簡単な力学モデル(一般的には Voigt モデルとクーロンの摩擦則⁹⁾)を導入している。そして、各要素ごとに独立な運動方程式を立てて時間領域で前進的に解き、要素同士の相互作用と要素集合体の運動・変形を追跡する。数値解析法であるので、境界条件等の設定や、応力、ひずみ、要素の回転角などの必要なデータの出力が容易であるという長所を持っている。

本研究では、粒状体個別要素解析システム (GRADIA)⁹⁾によって解析を行った。なお、不飽和土において見られるメニスカス水の影響は、以下に述べる方法により粒子間付着力を導入することにより表現した。

接触する粒子 i と j の間に作用する粒子間付着力

を P_{ij} とする。 P_{ij} の作用方向が粒子接平面の法線方

向であることを考慮すれば、時刻 t において粒子 i に作用する粒子間付着力の合力の x 方向成分、 y 方向成分およびモーメント成分は以下のように表される。

$$[F_x^P]_i = \sum_j P_{ij} \cos \alpha_{ij} \quad (6)$$

$$[F_y^P]_i = \sum_j P_{ij} \sin \alpha_{ij} \quad (7)$$

$$[M_i^P]_i = 0 \quad (8)$$

ここに、 $[F_x^P]_i, [F_y^P]_i, [M_i^P]_i$;

粒子間付着力の合力の x 方向成分、 y 方向成分およびモーメント成分、

α_{ij} ; 接点の法線方向が x 軸となす角度。

したがって、これらの粒子間付着力による各成分を粒子間付着力以外の粒子間力の総和の各成分から差し引くことにより、粒子間付着力を導入することができる。

解析は各粒子の運動方程式をオイラー法により時間積分して進めた。したがって、解は積分時間増分 Δt に関して条件付き安定となる。積分時間増分 Δt

表--1 解析に用いた材料定数

	粒子間	粒子～最荷板間
法線方向バネ定数	0.9×10^{10}	1.8×10^{10}
接線方向バネ定数	3.8×10^8	6.0×10^8
法線方向粘性定数	7.9×10^4	1.1×10^5
接線方向粘性定数	1.4×10^4	2.0×10^4
材料摩擦角(deg)	16	10
材料密度(kg/m ³)	2700	

注) バネ定数の単位は(N/m/m), 粘性定数の単位は(N/m/m)である.

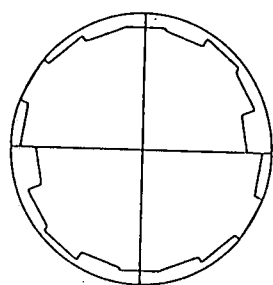


図--6 粒子間付着力導入後の全粒子接点角分布

に関して Cundall⁹⁾は次式を示した.

$$\Delta t < \Delta t_c = 2\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (9)$$

ここに, m は粒子の質量, k はバネ定数.

式(9)は 1 自由度系の運動方程式から導かれ条件であり, 実際にはこの式を目安に, 試行錯誤により積分時間増分を決定せざるを得ないが, 準静的な問題では $1/10 \Delta t_c$ 程度で十分な安定性と精度を確保できることが経験的にわかっている. 本シミュレーションでは $\Delta t = 1/10 \Delta t_c = 5 \times 10^{-5}$ sec. を用いた.

解析に必要な材料定数は, 粒子間の法線方向及び接線方向バネ定数と粘性定数, 粒子～載荷板間の法線方向及び接線方向バネ定数と粘性定数, 粒子間摩擦角, 粒子～載荷板間摩擦角および粒子の質量密度である. 山本⁹⁾はアルミ棒積層体の二軸圧縮試験結果に対して, 表--1 に示す材料定数を用いて, 試験時と同じ粒子配置に対してシミュレーションを行った. そして, 両者の巨視的な内部摩擦角が約 22~24 度の間でほぼ一致することを確認した. 本研究においても同じ材料定数を用いた.

解析モデルとしては, 直径 5mm, 及び 9mm の 2 種類の粒子を混合重量比 3:2 の割合でランダムに配置した供試体を用いた. 粒子数は, 直径 5mm の粒子 6372 個, 直径 9mm の粒子 1269 個, 合計 7641 個である. 供試

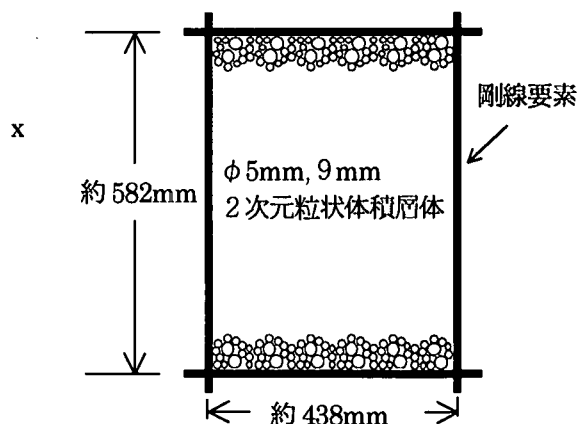


図--5 解析モデルの概要

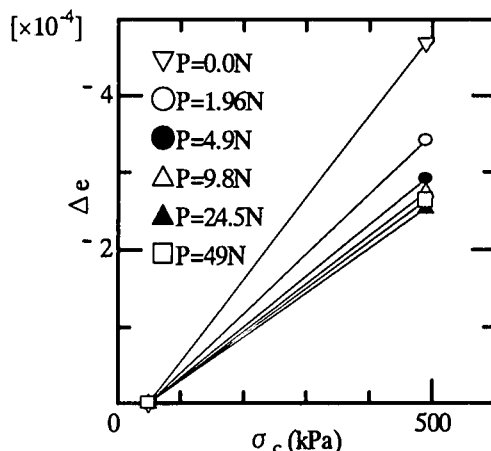


図--7 $\sigma_c=490$ kPa までの間隙比変化量 $\sim \log \sigma_c$ 関係

体は, 図--5 に示すような高さ約 582mm, 幅約 438mm の長方形をしており, 周りの 4 辺は載荷板を模した剛線要素により囲まれている. せん断時には, 横方向剛線要素の上下方向の移動を拘束して左右のみの移動を自由とし, 側方応力が一定となるように制御した. そして, 下側剛線要素は固定し, 上側剛線要素を 10cm/s の一定速度で垂直方向に下降させた.

本研究では粒子間付着力のない状態で, 等方圧縮応力 $\sigma_c=49$ kPa のもとで平衡状態になった後, 所定の粒子間付着力 (粒子間付着力 $P=0.0, 1.96, 4.9, 9.8, 24.5, 49$ N で, 圧縮およびせん断過程ともに粒子間付着力はすべての粒子接点で等しく一定) を各粒子接点に導入して平衡させた. その後, $\sigma_c=49$ kPa 一定の条件下でせん断試験をシミュレーションするか, あるいは $\sigma_c=490$ kPa の圧縮応力まで等方圧縮して, その後 $\sigma_c=490$ kPa 一定の条件下でせん断試験をシミュレーションした. なお, 圧縮過程での粒子間付着力の影響を見るために, 粒子間付着力 $P=0.0$ N, 9.8N および 49N の場合は, $\sigma_c=980$ kPa の圧縮応力までの等方圧縮試験をシミュレーションした.

3. 解析結果および考察

3.1 圧縮特性に及ぼす粒子間付着力の影響に関する検討

図--6 は粒子間付着力導入時の粒子接点角分布の例として, $\sigma_c=4.9$ kPa 下で $P=4.9$ N を導入し平衡した

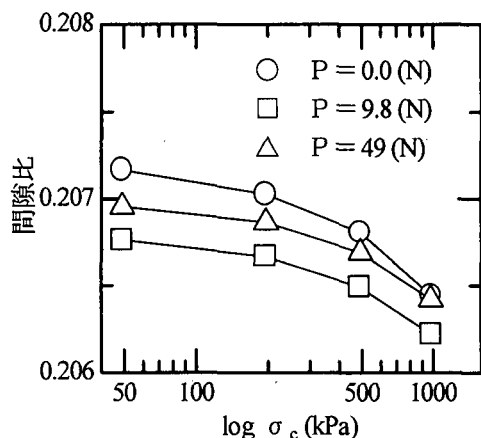


図-8 間隙比 $\sim\log\sigma_c$ 関係

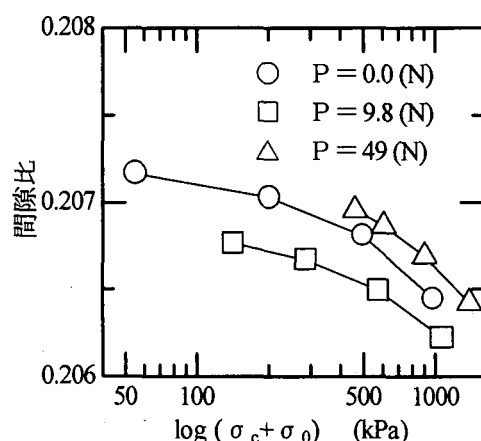


図-9 間隙比 $\sim\log(\sigma_c + \sigma_0)$ 関係

状態になった後の全粒子接点角分布を示したものである。粒子接点角分布は粒子間付着力導入後、ほぼ円形をしていることがわかる。導入前の全粒子接点角分布の形もほぼ円形の状態であった。よって、粒子間付着力は、粒子接点角分布の形状に対し大きな影響を与えないものと考えられる。

不飽和土のサクシオン一定条件下の等方圧縮過程において、圧縮時の間隙比変化はサクシオンが大きくなるほど小さくなる。これはサクシオンの増加により、土の骨格剛性が高まることを意味しており、その時の圧縮指数は小さくなる。図-7は、今回の解析結果をもとに $\sigma_c = 49\text{kPa}$ の場合の間隙比を基準に $\sigma_c = 490\text{kPa}$ までの間隙変化を粒子間付着力 P ごとにプロットしたものである。 P が大きいほど間隙変化量が小さくなることからわかる。粒子間付着力が大きいほどサクシオンが大きい状態に対応していると考えられるので、この結果はサクシオン一定の不飽和土の等方圧縮試験結果と同じ傾向を示していると考えられる。

軽部ら⁹⁾はサクシオンの影響をサクシオン応力として評価し、式(4)に基づいて等方圧縮時に生じる塑性体積ひずみが次式により与えられるとしている。

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{P_{net} + P_s}{P_{net_0} + P_s} \quad (10)$$

ここに、 ε_v^p ：塑性体積ひずみ、

κ ：膨潤指数、

e_0 ：基準間隙比、

P_{net_0} ：基準基底応力。

さらに加藤³⁾は、式(4)に基づいて、換算垂直応力を取り入れた次式を提案している。

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{P_{net} + \sigma_0}{P_{net_0} + \sigma_0} \quad (11)$$

ここに、 $\sigma_0 = c \cdot \cot \phi$ ；換算垂直応力、

c, ϕ ：サクシオン一定条件下の三軸圧縮試験より得られる破壊時のモール円の包絡線より決定される粘着力および内部摩擦角。

表-2 $\sigma_c = 490\text{kPa}$ から 980kPa 間の圧縮指数

粒子間付着力 P (N)	$\log \sigma_c$ による 圧縮指数	$\log(\sigma_c + \sigma_0)$ による圧縮指数
0.0	12.021×10^{-4}	12.134×10^{-4}
9.8	8.963×10^{-4}	10.192×10^{-4}
49	8.950×10^{-4}	14.303×10^{-4}

式(10)および式(11)の特徴は、塑性体積ひずみがサクシオンの大きさに依存しない一定の圧縮指数 λ および膨潤指数 κ により表されることである。今回の解析結果について、式(10)および式(11)に示されるような傾向、すなわち粒子間付着力(サクシオンの影響)の大きさにかかわらず一定の圧縮指数が表れるかどうかを検討した。図-8, 9は $P = 0.0\text{N}$, 9.8N および $P = 49\text{N}$ の場合について、間隙比と $\log \sigma_c$ および $\log(\sigma_c + \sigma_0)$ 関係についてそれぞれ整理したものである。また、表-2は、 $\sigma_c = 490\text{kPa}$ から 980kPa 間の間隙比変化に基づく圧縮指数を、粒子間付着力ごとに示したものである。表-2の結果において $P = 0.0\text{N}$ の場合と、 $P = 9.8\text{N}$ および 49N の場合の圧縮指数をそれぞれ比較すると、 $\log \sigma_c$ による整理の場合に比べて、 $\log(\sigma_c + \sigma_0)$ による整理の場合の方が、粒子間付着力による圧縮指数の大きさの差が小さくなる傾向を示していることがわかる。この結果は、式(10)および式(11)に示される関係と対応しているものと考えられる。

3.2 粒子間付着力一定状態のせん断時の 応力 $\sim$ ひずみ関係

図-10, 11は、 $\sigma_3 = 49\text{kPa}$ の場合の $\sigma_1/\sigma_3 \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係と $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_v$ 関係を、図-12, 13は、 $\sigma_3 = 490\text{kPa}$ の場合の $\sigma_1/\sigma_3 \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係と $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_v$ 関係をそれぞれ粒子間付着力ごとに示している。粒子間付着力が大きくなると、 $\sigma_1/\sigma_3 \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係は上にシフトし、破壊時強度が高くなる傾向を示している。また、粒子間付着力が高いほどせん断初期に主応力比が増大し、以後の主応力比の変化は少なくなっていることが特徴である。 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_v$ 関係については、粒子間付着力がない場合はせん断とともに圧縮後、膨張に転じており、他の場合は粒子間付着力の増大とともに、膨張側に体積ひずみが生じていることがわかる。これは、サクシオン一定の砂の直接せん断試験¹⁰⁾において、サクシオンが大きくなるとせん断時の体積膨張が増大する傾

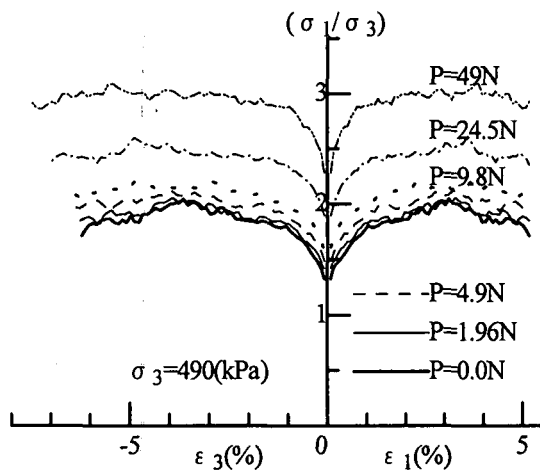


図--10 $\sigma_1/\sigma_3 \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係 ($\sigma_3=490\text{kPa}$)

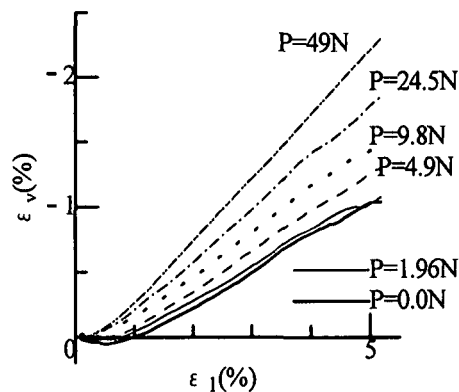


図--11 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_v$ 関係 ($\sigma_3=49\text{kPa}$)

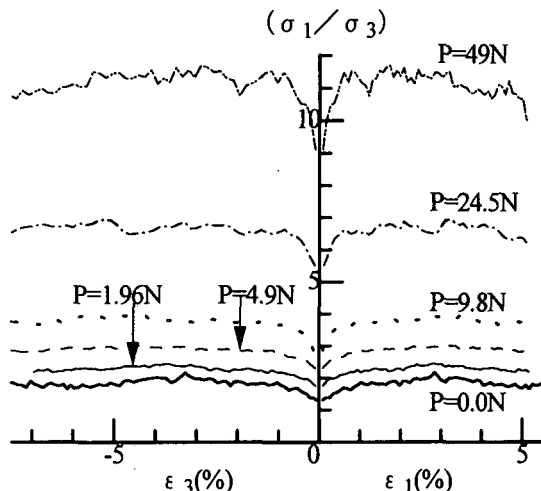


図--12 $\sigma_1/\sigma_3 \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係 ($\sigma_3=490\text{kPa}$)

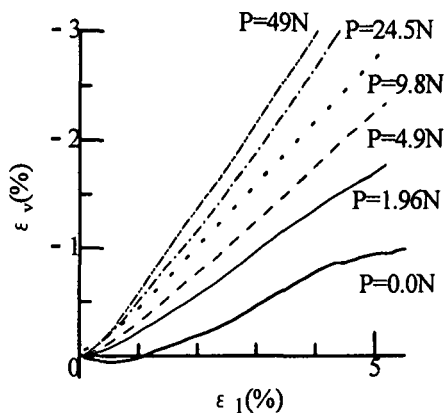


図--13 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_v$ 関係 ($\sigma_3=490\text{kPa}$)

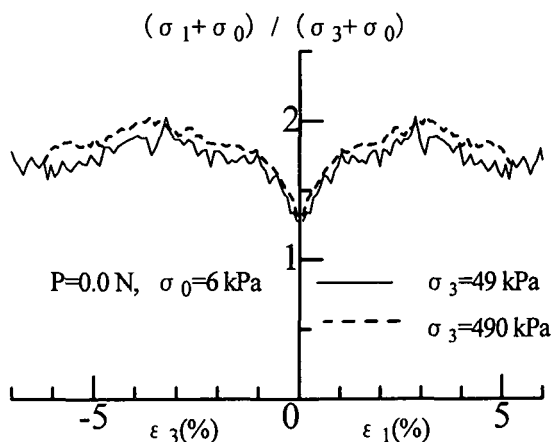


図--14 $(\sigma_1+\sigma_0)/(\sigma_3+\sigma_0) \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係 ($P=0.0\text{N}$)

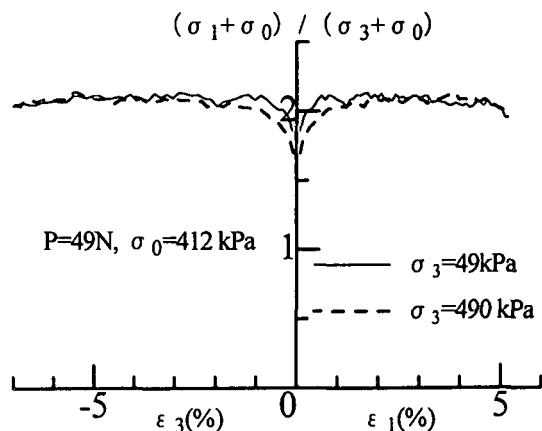


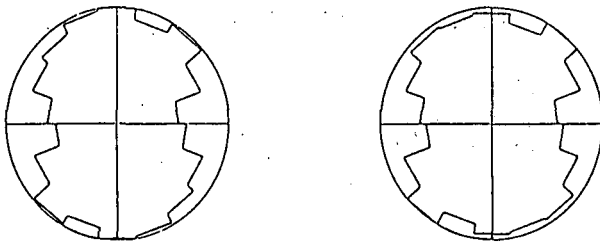
図--15 $(\sigma_1+\sigma_0)/(\sigma_3+\sigma_0) \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係 ($P=49\text{N}$)

向と対応する。

加藤³⁾は、締め固めた粘性土供試体を用いたサクシオン一定条件下の三軸圧縮試験結果において、 σ_0 一定条件下の $(\sigma_1+\sigma_0)/(\sigma_3+\sigma_0) \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係が拘束圧の大きさにかかわらずほぼ一致を示している。図--14 は $P=0.0\text{N}$ の場合($\sigma_0=0.0\text{kPa}$)の、図--15 は $P=49\text{N}$ の場合($\sigma_0=0.0\text{kPa}$)の $(\sigma_1+\sigma_0)/(\sigma_3+\sigma_0) \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係を示している。 $P=0.0\text{N}$ の場合では $(\sigma_1+\sigma_0)/(\sigma_3+\sigma_0) \sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係はせん断過程の全域においてほぼ一致する傾向を示すのに対し、 $P=49\text{N}$ の場合、せん断初期にずれを生じており、拘束圧が小さ

い場合の方が上側に来ていることがわかる。図--14 および図--15 に示されている $\sigma_3=49\text{kPa}$ と 490kPa の場合において、せん断前の間隙比はそれぞれほぼ等しく、間隙比の影響はほとんどないものと考えられる。よって、このような応力～ひずみ関係のずれは粒子間付着力の影響として存在していると考えられる。

図--16 は、 $\sigma_3=490\text{kPa}$ の場合で、 $P=0.0$ および 49N の条件でせん断を行ったケースについて、破壊時の全粒子接点角分布を比較している。せん断前には、全粒子接点角分布はほぼ円形をしていた。 $P=49\text{N}$ の場合の方が若干ではあるが、せん断にともなう全粒



(a) $P=0.0\text{N}$

(b) $P=49\text{N}$

図-16 破壊時の全粒子接点角分布の比較

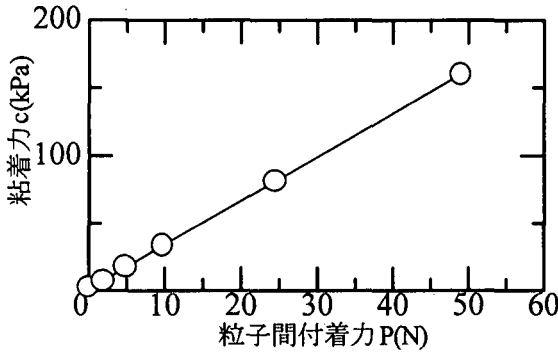


図-18 粘着力～粒子間付着力関係

子接点角分布の円形からの変化の割合が小さくなっている。粒子間付着力の影響により粒子再配列が抑制されているものと考えられる。

3.3 強度定数・ダイレイタンシー特性

図-17, 18 は、破壊時のモールの応力円から求めた内部摩擦角 ϕ および粘着力 c と粒子間付着力 P の関係を示している。図-17 より内部摩擦角 ϕ は粒子間付着力 P の増大とともに増加する傾向を示していることがわかる。また、図-18 より粘着力 c は粒子間付着力 P の増加とともに比例して増加していることがわかる。

不飽和土の三軸圧縮試験結果に基づいた研究において、強度定数とサクシジョンの関係に関しては1.2節で述べたように幾つかの解釈がある。Fredlund ら⁷⁾の考え方によると、内部摩擦角 ϕ はサクシジョンにかかわらず一定である。一方、軽部ら⁸⁾によると、サクシジョンの増加に伴い内部摩擦角はわずかに増加するとしている。今回の解析結果においては内部摩擦角 ϕ は粒子間付着力とともに増加する傾向にあり、これはFredlund らの主張とは異なっており、むしろ、軽部らの主張を支持している。

換算垂直応力は、図-19 に示すように粒子間付着力により生じる粘着力を $\sigma - u_a$ 軸上の等方応力成分としてとらえたものである。すなわち、内力である粒子間付着力の影響を外力による応力成分に換算したものである。

粒子間付着力を有する不飽和土においては、土要素に対する力の釣り合いとしては、外力による応力成分の平衡条件が問題となる。しかし、材料特性である構成関係には、内力である粒子間付着力が影響する。このため、その影響を何らかの形で評価し、構成関係に取り入れなければならない。換算垂直応力はその評

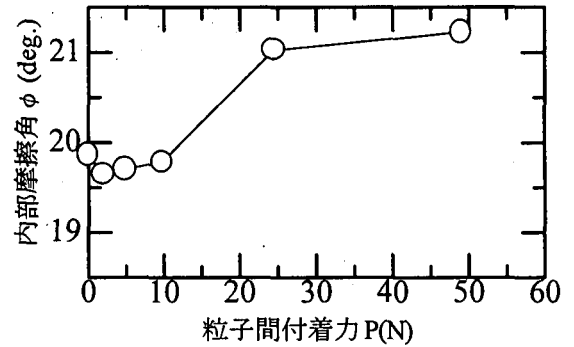


図-17 内部摩擦角～粒子間付着力関係

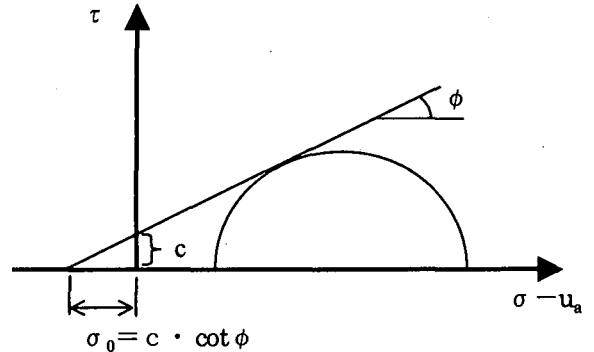


図-19 破壊時のモールの包絡線に基づく換算垂直応力の概念図

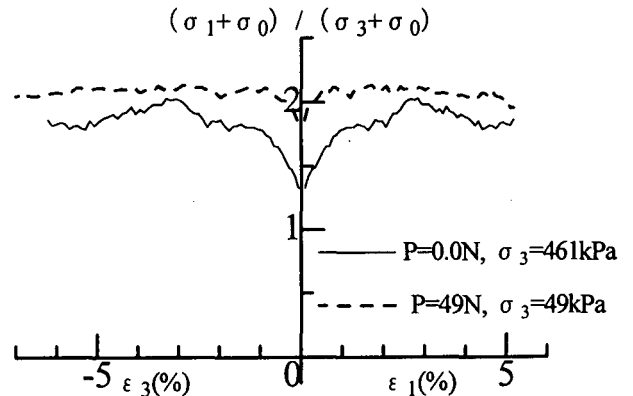


図-20 換算垂直応力を考慮した主応力比
～ $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ 関係

価方法の一つであると考えられる。

現在、換算垂直応力を応力成分としてとらえて、不飽和土⁹⁾やセメント改良土¹⁰⁾のせん断試験時の応力～ひずみ関係が整理されている。これらの整理方法は、ある換算垂直応力が作用している状態での挙動が、応力がその換算垂直応力と同じ大きさだけ増加して作用した状態の挙動と同じであるという解釈に基づいている。しかし、それらの実験結果においては、換算垂直応力の大きさが小さく、その様な解釈が粒子間付着力の大きさにかかわらず常に成り立つのかは確認されていない。そこで、ある換算垂直応力の大きさと同じだけ拘束圧を増加した状態と、その換算垂直応力が生じるような粒子間付着力が作用した場合で、せん断挙動が同じとなるかを今回の結果に基づいて検討する。図-20 は、拘束圧 $\sigma_3=49\text{kPa}$ で付着力 $P=49\text{N}$ の場合 ($\sigma_0=412\text{kPa}$, σ_0 と σ_3 の合計は 461kPa) と、

拘束圧 $\sigma_3 = 461$ kPa で付着力 $P = 0.0$ N の場合 ($\sigma_0 = 6$ kPa, σ_0 と σ_3 の合計は 467 kPa) の、換算垂直応力を考慮した主応力比 $\sim \varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 関係を示している。 σ_0 と σ_3 の合計がほぼ同じである 2 つの解析結果は、かなり異なる挙動を示している。この結果は、粒子間付着力に基づく換算垂直応力が作用している状態は、外力に基づく等方応力がその分増加して作用している状態とは異なることを意味しており、換算垂直応力を単純に外部応力に加えて評価する方法に、適用限界があることを示している。

サクシオンによる粒子間付着力は、粒子間に作用する力のうち粒子接平面に垂直な成分のみを増加させる。一方、換算垂直応力 σ_0 を拘束応力増分として外的に作用させた場合には、粒子間に作用する力は粒子接平面に垂直な成分だけでなく平行な成分（せん断成分）も増加する。この微視的な差異が上記で述べた巨視的なせん断挙動の違いの源である。この微視的な差異は既に述べたようにせん断特性に大きな影響をおよぼすが、圧縮特性にも少なからぬ影響があると思われる。今後、さらに微視的観点からの考察を進め、粒子間付着力が圧縮特性およびせん断特性におよぼす影響とそのメカニズムを明らかにする必要があると考えられる。

4. 結論

本研究では、2 次元粒状体に対して粒子間付着力を導入した DEM プログラムを用いて、粒子間付着力一定での二軸圧縮条件下における等方圧縮およびせん断試験のシミュレーションを行った。そして、粒子間付着力の変形と強度に与える影響を明らかにした。得られた結果は以下のようにまとめられる。以下の 1), 2), 3) の結果は、不飽和土のサクシオン一定の三軸圧縮試験結果で得られる傾向とほぼ一致している。

- 1) 粒子間付着力が増加すると、骨格剛性が増加する。このため、等方圧縮時の圧縮量は減少する傾向を示した。なお、その時の圧縮指数は換算垂直応力を拘束圧として取り入れて整理すると、一定の大きさとなる傾向を示した。
- 2) せん断時の主応力比 $\sim$ 主ひずみ $\sim$ 体積ひずみ関係は、粒子間付着力により異なる傾向を示した。同じ拘束圧のもとでは、粒子間付着力が大きいほど主応力比 $\sim$ 主ひずみ関係の立ち上がりが急となり、また、体積ひずみも膨張側に生じる傾向を示した。
- 3) 破壊時のモール円から決定された内部摩擦角は、粒子間付着力の増加とともに増大する傾向を示した。この結果は、軽部らの主張を支持している。また、粘着力は粒子間付着力の大きさに比例して増加する傾向を示した。
- 4) 換算垂直応力の大きさをそのまま拘束応力増分として取り入れてせん断時の変形挙動を整理しても、それと同じ大きさの拘束応力のもとで得られる挙動と同じ結果にならない。このことは、換算垂直応力を単純に外部応力に加えて評価する方法に、適用限界があることを示している。

- 5) 粒子間付着力は、粒子間に作用する力のうち粒子接平面に垂直な成分のみを増加させる。一方、換算垂直応力を拘束応力増分として外的に作用させた場合には、粒子間に作用する力は粒子接平面に垂直な成分だけでなく平行な成分（せん断成分）も増加する。この微視的な差異が上記 4) で述べた巨視的なせん断挙動の違いの源である。

謝辞 本論文を作成するにあたり御協力いただいた中元 修氏（現（株）銭高組）および寸田 亘氏（現神戸大学大学院自然科学研究科大学院生）に感謝いたします。また、日頃御助言いただいている神戸大学大学院自然科学研究科 軽部大蔵 教授および神戸大学工学部 飯塚 敦 助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識: 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No.535, pp.83-92, 1996.
- 2) 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, pp.222-225, 1979.
- 3) 加藤正司: 間隙水分布が不飽和土の変形・強度特性に与える影響とその評価方法に関する研究, 神戸大学博士論文, 1997.
- 4) Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A.: A Constitutive Model for Partially Saturated Soils, *Geotechnique*, Vol.40, No. 3, pp.405-430, 1990.
- 5) 軽部大蔵, 加藤正司, 勝山潤一: 不飽和カオリンの有効応力と力学定数, 土木学会論文集, No.370, pp.179-188, 1986.
- 6) 地盤工学会編: 新規制定地盤工学会基準・同解説 V 不飽和土の三軸圧縮試験方法, 1998.
- 7) Fredlund, D.G., Vanapalli, S.K., Xing, A. and Pufahl, D.E.: Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, *Proc. of 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol.1, pp.43-46, 1995.
- 8) Cundall, P.A.: A computer model for simulation progressive, large scale movement in blocky rock system, *Symp. ISRM*, Nancy, France, Proc.2, pp.129-136, 1971.
- 9) 山本修一: 個別要素法による粒状体の力学挙動に関する基礎的研究, 名古屋工業大学博士論文, 1995.
- 10) Shimada, K.: Effect of matric suction on shear characteristics of unsaturated Fraser river sand, *Jour. of Faculty Environmental Science and Technology*, Okayama Univ., Vol.3, No.1, pp.127-134, 1998.
- 11) 松岡 元・孫 徳安: 粘着成分を有する摩擦性材料の変形・強度特性の統一的解釈, 土木学会論文集, No.463, pp.163-172, 1993.

(1999 年 4 月 23 日受付)