

ファイバーによる粒状体の補強効果に関する二次元 DEM 解析

2D DEM analysis on reinforcement effect in granular material using fibre

山口智世*・前田健一**・松本 崇*・Erdin Ibraim***

Tomoyo YAMAGUCHI, Kenichi MAEDA, Takashi MATSUMOTO and Erdin Ibraim

*大学院生 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**博士 (工学) 名古屋工業大学 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

***PhD University of Bristol (University Walk, Bristol UK BS8 1TR)

Laboratory experimental tests of sand reinforced with discrete random flexible fibres show that fibre reinforcement could be an effective technique for improving their strength and deformation characteristics. The behavior of fibre reinforced sand is influenced by many factors such as density and stress level, fibre type, content and orientation. A two dimensional DEM (Distinct Element Method) biaxial compression simulation of mixtures of sand and fibres is applied to understand how randomly distributed flexible fibres generate a bond within the soil and affect the kinematics of the granular matrix. Sand particles are modeled by rigid disks with conventional contact elements in DEM. The fibre element is modelled by connecting small circular particles with a bond contact algorithm, where the strength of the bond is fairly high. The specimens have been reinforced with different fibre fractions. The effect of fibre reinforcement is discussed.

Key Words: particle rotation, interlocking, interparticle friction, bucking

1. はじめに

粒状体の力学現象の非線形性はその粒子特性や内部に形成・消滅する内部構造の観察によって理解され記述されるべきである。粒状体のマクロな強度の発現は粒子間のミクロなすべり現象に支配されるとされてきたが、様々な実験や数値解析によって粒子回転などの影響が着目されるようになってきている¹⁾。強度発現のメカニズムを理解することは、いかに粒状体を効率的に改良したり補強したりするかを知るために重要な手掛りとなる。

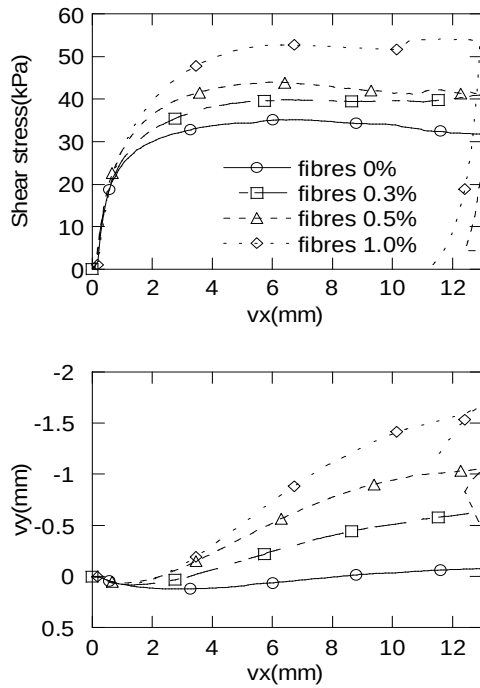
特に、近代から今日にかけて、様々な補強土工法が考案されてきた。テールアルメ工法や、ジオテキスタイルを用いた工法がその代表である。これら補強土工法では、土中に土粒子とは異なる性質をもつ材料を挿入・敷設することで、見かけの粘着力や摩擦力が増加し、補強土構造物全体の強度が増すと考えられてきた。さらに近年では化学繊維技術の発展により、毛髪のように曲げ剛性を持たないファイバー(短繊維材)で地盤を補強する工法も多く用いられている²⁾⁷⁾。ファイバーを用いた補強土工法は、そのフレキシブルさから補強の適用範囲が広く表面に植生工を導入することができ、今後の研究・開発が期待されている。

ここに、表-1 に示す特性を持つ砂とファイバーを所定の質量比で混合した試料を用いて行った直接せん断試験の結果を図-1 に示す。水平方向の変位量を v_x 、鉛直方向の供試体の高さの変化を v_y としている。緩詰め・密詰めのいずれの場合も無補強に比べ、ファイバーの混入によって、せん断初期には補強効果が見られないものの破壊強度は高くなっていることがわかる。また、ピーク強度後の応力の低下が抑制されており、体積膨張傾向もファイバー混合率に伴って強くなるという特徴を持つことがわかる。

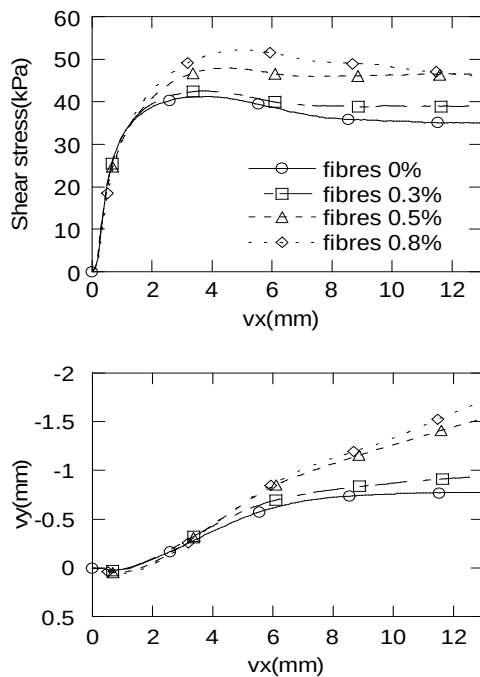
表-1 直接せん断試験で用いた材料の特性値

Hostun RF(S28) sand						
Parameter	D_{max}	D_{min}	D_{50}	U_c	U_c'	ρ_s
Unit	(mm)	(mm)	(mm)	--	--	(t/m ³)
value	0.825	0.075	0.32	1.7	1.1	2.65
fibre						
Parameter	d		l	ρ_f	λ	
Unit	(mm)		(mm)	(t/m ³)	--	
value	0.1 ($d/D_{max} = 0.1$)		35	0.91	350	

D_{max} = maximum grain size, D_{min} = minimum grain size, D_{50} = mean grain size, U_c = coefficient of uniformity (D_{60}/D_{10}), U_c' = coefficient of gradation ($((D_{30})^2/D_{60} \cdot D_{10})$), ρ_s = density, d = diameter of fibre, l = length of fibre, ρ_f = density of fibre, λ = aspect ratio of fibre ($\lambda=l/d$).



(a) 緩詰め時の変形・破壊挙動：初期間隙比 $e_0=1.0$



(b) 密詰め時の変形・破壊挙動：初期間隙比 $e_0=0.9$

図-1 ファイバー補強土の直接せん断試験結果：緩詰め時，密詰め時

しかし、その一方で、ファイバー補強土の三軸圧縮試験においてはファイバーを混合することによって体積膨張が抑制されるとの報告^{6,7)}もある。この相反する現象を説明しようとする場合、みかけの粘着力の増加による補強効果といったマクロ視点のみでとらえるには限界があると考えられる。

また、ファイバーによる補強効果は、補強土構造

物がある程度変形した場合に発揮されるねばり効果が主であり、そのメカニズムの解明には補強土の内部構造を観察し、土粒子とファイバーの相互作用原理を理解することが有用であると考えられる。

本研究では、補強効果についてマクロな応力-ひずみ-強度関係だけでなく、ミクロの視点から補強メカニズムを明らかにし、その基本原理を反映させた使用方法とその設計方法を検討することを目指としている^{5),8)}。本論文では、既報⁸⁾に計算結果や考察を加えた結果をまとめて報告する。まず、内部構造に着目した補強メカニズムについて検討する。ミクロ領域である接点に粒子間のボンド結合や摩擦の増加といった作用を導入した場合、マクロ挙動への影響について2次元個別要素法 (DEM)⁹⁾を用いて解析し粒状体の強度発現メカニズムについて考察する。つぎに、内部構造の変化を観察した結果から、ファイバーが供試体内部に拘束領域を作成し、内部構造の劣化を遅延することでねばりの効果をもたらしていることを示す。

2. ミクロな接点力増加によるマクロな強度の変化

2.1 ボンド接合のマクロな強度への影響

粒子間摩擦係数 $\tan \phi_\mu$ ($\tan \phi_\mu=0.25$; 粒子間摩擦角 ϕ_μ) を持つ粒子の集合体からなる供試体について考える。この供試体において、接触している全粒子間を接触面法線・接線の両方向を同強度のボンドで結合し(図-2)、このミクロな粘着力の導入が供試体内のマクロな変形挙動に与える影響について、側圧一定の二軸圧縮試験を DEM 解析した結果を図-3に示す。これは、粒状体にセメントや溶液型の薬品を注入した改良土に対応しており、応力比 (τ_m/σ_m ; τ_m :最大せん断応力, σ_m :平均主応力) と軸ひずみ、体積ひずみ関係について示している。ここで、初期ボンド結合割合 (全接点数に対してボンド結合した接点数の割合) a_B とボンド強度 F_B をというパラメータを導入した。なお、今回はこの土を杭先端付近に用いることを想定していたため通常よりも大きな側圧 σ_c は 500kPa を用いた。本論文ではボンド結合がない場合 ($a_B=0$) とケース全ての接点をボンドで結合させた場合 ($a_B=100\%$) についてのみ報告する。

ボンド強度 F_B を全く持たない場合 ($a_B=0$, $F_B=0$) で通常の円形粒子供試体は、せん断初期から非線形性を示しダイレイタンスーが観察されるが、ボンド強度 F_B を有する場合にはせん断応力は単純に増加し体積変化も線形的な圧縮挙動を示し、 F_B が十分高い場合にはこの変形形態が継続される。ファイバーによる補強とは明らかに異なっている。一方、中ひずみ領域あたりからボンド結合の破断割合が高くなることが考えられるが、膨張傾向に急激に遷移する。図-4 にストレスダイレイタンスー関係を示す。ボンド結合がないもとの粒状体は圧縮域から膨張域に転じる際に、図中に示された Rowe の流れ則¹⁰⁾に一

致している。ボンド強度 $F_B=0.5, 5.0\text{kN}$ の試料では大ひずみ領域ではほぼ Rowe の流れ則に漸近しているようである。

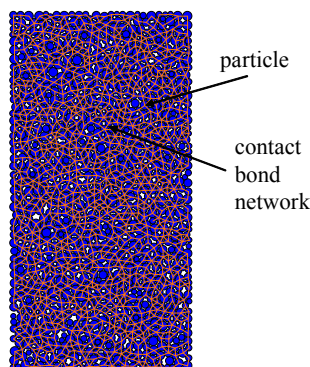


図-2 粒子間結合させた供試体

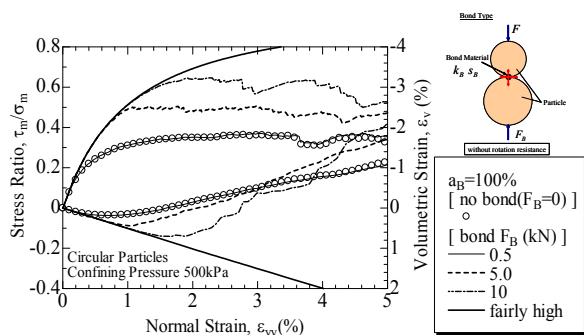


図-3 変形・破壊挙動に及ぼすボンド結合強度 F_B の影響に関する DEM 解析結果

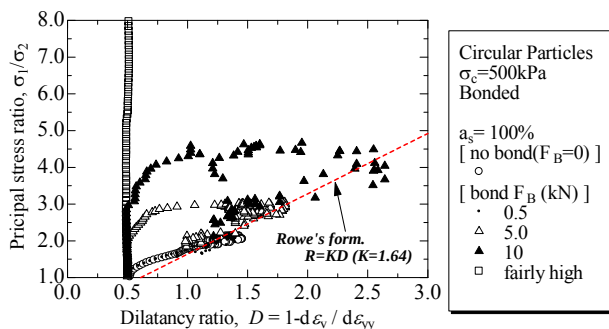


図-4 ストレスダイレイタンスー関係（流れ則）に及ぼすボンド結合強度 F_B の影響に関する DEM 解析結果

図-5, 図-6 に $F_B=0.5\text{kN}, 5.0\text{kN}$ の場合の供試体内部の様子を示す。接点ボンドが破断せず繋がっているクラスター毎に色分けされている。ボンド強度が低い場合（図-5）には、体積ひずみが圧縮から膨張へと転じるひずみ $\varepsilon_{yy}=1.0\%$ で内部はブロック状の離散化が進み、 $\varepsilon_{yy}=10.0\%$ ではほとんどのボンド結合が切られもとの粒状体にもどっていることがわかる。ボンド強度が高い場合（図-6）には、 $\varepsilon_{yy}=1.0\%$ では

ボンド結合が切れた接点があるもののあまり変化しないが、 $\varepsilon_{yy}=10.0\%$ では供試体の対角線を中心にブロック状の離散化が進んでいることがわかる。

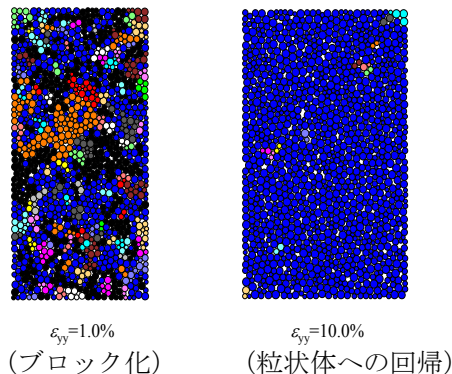


図-5 供試体内部のボンド結合破断とブロック化: $F_B=0.5\text{kN}$ の場合

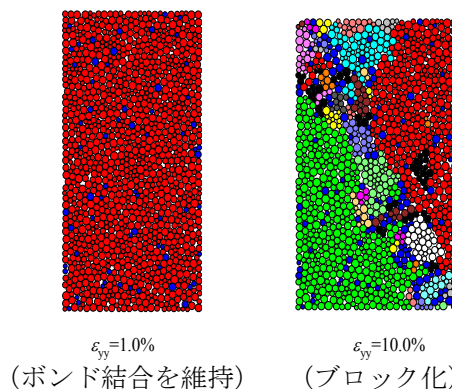


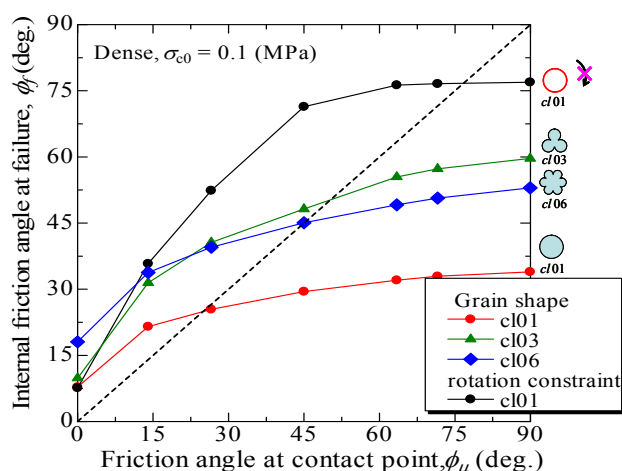
図-6 供試体内部のボンド結合破断とブロック化: $F_B=5.0\text{kN}$ の場合

以上のことから、接点をボンドで結合され改良された粒状体はボンドの結合が破断すると内部にブロック状の離散化（小さな粒子が集まって形成する大きな不規則形状の粒子）が進みそれらはかなり噛み合った状態（ブロックの回転抵抗が發揮された状態）にある。さらに大きく変形するには、それらのブロックの回転やブロック間が広がる相対運動するではなく、膨張するものと考えられる。

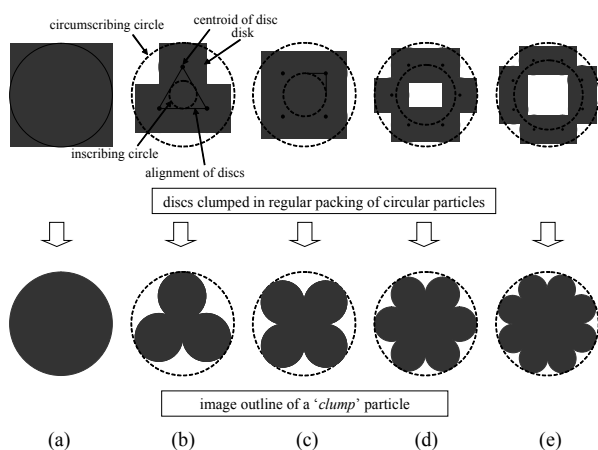
2.2 粒子間摩擦のマクロな強度への影響

一般的に言われているように、粒状体を摩擦性材料とするならば、粒子間摩擦係数 ($\tan\phi_p$) は最も重要な因子となるはずである。二軸試験の破壊時の内部摩擦 ϕ_i と粒子間摩擦角 ϕ_p の関係を図-7 に示す。ここでは、図-8 に示すように複数の等粒径の円形粒子を結合し凹凸を有する一つの非円形粒子を作成し用いている。非円形粒子の形状を現す記号として結合した粒子数に“ cl ”を添えて示している。例えば、図-8(b)の場合には3個の等径な円粒子を繋げて一

つの非円形粒子としているので、この粒子を *cI03* と呼ぶ。詳細は既報¹⁾に詳しい。また、図中には回転を擬似的に拘束し、粒子間の相対運動はすべりを伴う並進運動のみとした場合の円形粒子の結果についても示している。



図－7 破壊内部摩擦角と粒子間摩擦角の関数に関する DEM 解析結果：非円形粒子、回転拘束した粒子も導入



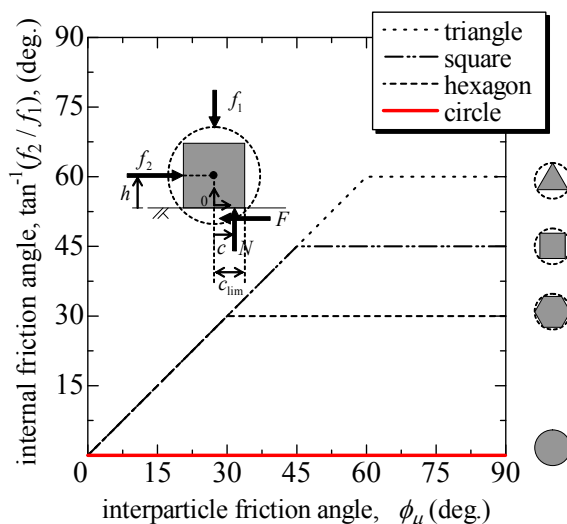
図－8 非円形粒子の導入：(a)cI01（円形）；(b)cI03（三角形配置）；(c)cI04（四角形配置）；(d)cI06（六角形配置）；(e)cI08（八角形配置）

砂のような粒状体（回転を拘束しない円形粒子）の場合（赤丸印）、 $\phi_\mu < 30^\circ$ では $\phi_f > \phi_\mu$ と一般的に言われているような結果になる。しかし、 $\phi_\mu > 30^\circ$ では $\phi_f < \phi_\mu$ の関係となり、 ϕ_f は 35° 程度に収束する。また、 ϕ_f の増加率の低下程度は、回転抵抗が発揮される非円形粒子では低く、円形であっても粒子自体の回転が拘束される場合（黒丸印）にはほとんどの ϕ_μ で $\phi_f > \phi_\mu$ となっている。このことから、粒状体の破壊には、粒子間すべりの影響よりも粒子回転の効果が大きく、回転の拘束が強度を大きく増加させることが言える。

この現象を簡単に理解するために、粒状体の変

形・破壊を粒子間の相対変位の累積によるものと考え、図－9 の挿入絵のような問題を考える。板の上に形状の異なる要素を置き真上から f_1 で押さえ真横から f_2 を作用させ、物体が動き出すときのマクロな摩擦角を $\tan^{-1}(f_2/f_1)$ とし、物質と板との摩擦角 ϕ_μ との関係調べた結果を図－9 に示す。円状要素と正三角形、正方形、正六角形について、滑動 ($\tan \phi_\mu \leq F/N$ ： N と F は要素に作用する垂直抗力と摩擦力) と回転転倒 ($c_{lim} \leq c$ ： c は N の作用点と重心との水平距離) の両方の安定性について検討した。ここでは、外力の作用点が要素重心を通った場合を考える。円形の場合、垂直抗力の作用点と物体の重心が水平方向において一致しているため、 c はゼロである。そのため回転に対する抵抗がなく、横方向の荷重によってすぐに転がってしまい不安定である。非円形要素では転がりにくくなるために、転がりが生じるまでは要素の運動は滑動によって生じることになり、正六角形、正方形、正三角形ではそれぞれ $\phi_\mu < 30^\circ$ 、 45° 、 60° では滑動によって安定を失い、マクロな摩擦角は $\tan^{-1}(f_2/f_1) = \phi_\mu$ となる。

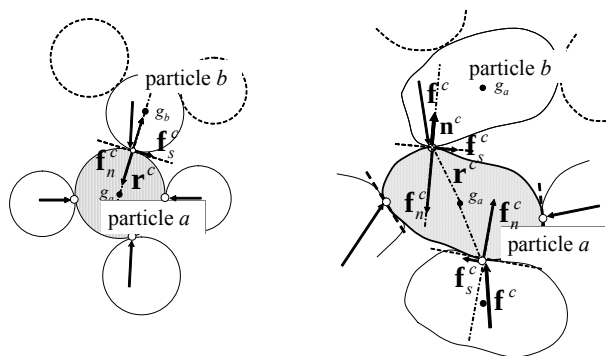
しかし、上記の値よりも ϕ_μ が大きい場合には、要素の安定性は転倒の安定性で決まってしまうので f_2/f_1 は ϕ_μ に対して上限値をもつことになる。一要素のみにおいても、たとえ粒子の摩擦が十分に大きくても要素の安定性には限界があることになる。つまり粒状体の強度に影響を与える粒子要素の安定性には粒子回転抵抗が重要な役割を担っているといえる。



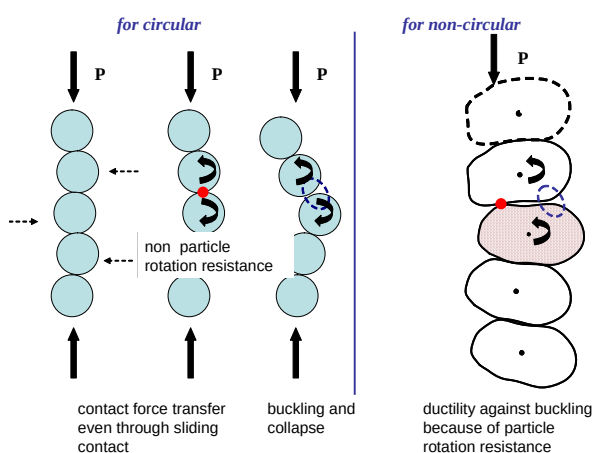
図－9 形状が異なる単体粒子の滑動と回転転倒に対する安定性に及ぼす摩擦特性の影響

また、DEM のアルゴリズムを考えると円形粒子同士では、接する粒子が反対方向に回転のみする場合に接点に力を発生することなく相対運動することが可能である。一方で、非円形粒子では図－10(a)(右)のように回転方向によっては回転抵抗が大きい場合と小さい場合が考えられる。例えば図中の粒子 b が

左回転する場合と右回転する場合では回転抵抗は異なることが想像できる．図-10(b)に示したような複数の粒子からなる粒子の柱（実際には応力を伝播する応力鎖）の安定性においては，粒子回転抵抗に起因する座屈強度の増加が重要といえる．



(a) 粒子の接触状態



(b) 粒子柱の座屈と粒子回転抵抗

図-10 円形粒子同士と凹凸をもつ非円形粒子同士の接触状態と内部構造の座屈：(a) 粒子の接触状態；(b) 粒子柱の座屈と粒子回転抵抗

3. 解析手法： ファイバー混合土のモデリング

DEM を用いてファイバー混合土の二軸圧縮試験を行い，その変形・破壊挙動を解析した．ファイバーは，直径 d の円形粒子をボンドで繋いで表現した（図-11）．接点がヒンジとして働くよう設定し，フレキシブルかつ破断しないものとした．ファイバーの直径は，図-1 で示した実験に基づき，砂の最大粒径とファイバーの直径の比 $d / D_{\max}$ が同一（およそ 0.1）になるように設定した．

粒状体部分（マトリックス部分）は円で表現し，粒子間の相互作用は通常よく用いられるバネ，ダッシュポッド，スライダーによってモデル化した．粒度分布は質量に関する対数正規分布に従うようにし

た．解析は無重力下で行い，粒状体内部での粒子の自重による応力分布の発生や構造体の形成を避けることで，供試体内の内部構造はマクロな応力とひずみの変化にのみ依るものとした．解析に用いたパラメータは表-2 の通りであり，力学パラメータは接触面法線方向・せん断方向のバネ定数をそれぞれ $k_n=5.0 \times 10^8$, $k_s=1.25 \times 10^8$ ，粘性係数は臨界減衰に設定し，粒子間と粒子-ファイバー間の摩擦係数は 0.25（摩擦角で 14° ）でありアルミ棒の内部摩擦角相当とし，鉱物としても比較的摩擦係数が小さい値とした．図-7 の結果を鑑みると本計算は $\phi > \phi_\mu$ となり，いわゆる良く実験で得られる関係が保持される条件に設定した．

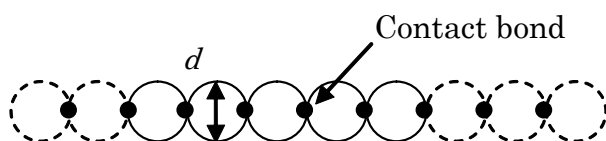


図-11 DEM によるファイバーのモデル化

表-2 解析に用いた粒子特性値

Parameter	Unit	value
matrix (granular material)		
ρ_s	(t/m ³)	2.65
grain shape	--	circle
$D_{\max}$	(mm)	100
$D_{\min}$	(mm)	50
D_{50}	(mm)	71
U_c	--	1.3
U_c'	--	1.1
fibre		
ρ_f	(t/m ³)	0.91
d	(mm)	10 ($d / D_{\max} = 0.1$)
l	(mm)	750, 1500
λ	--	75, 150

$D_{\max}$ = maximum grain size, $D_{\min}$ = minimum grain size, D_{50} = mean grain size, U_c = coefficient of uniformity (D_{60}/D_{10}), U_c' = coefficient of gradation ($(D_{30})^2/D_{60} \cdot D_{10}$), ρ_s = density, d = diameter of fibre, l = length of fibre, ρ_f = density of fibre, λ = aspect ratio of fibre ($\lambda=l/d$).

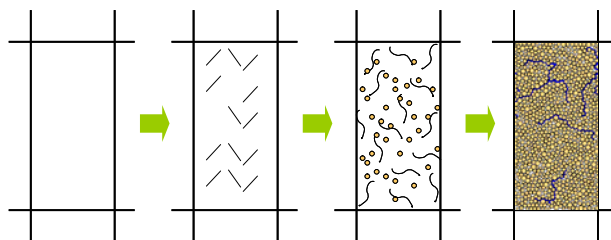


図-12 ファイバーの混合体の作成方法

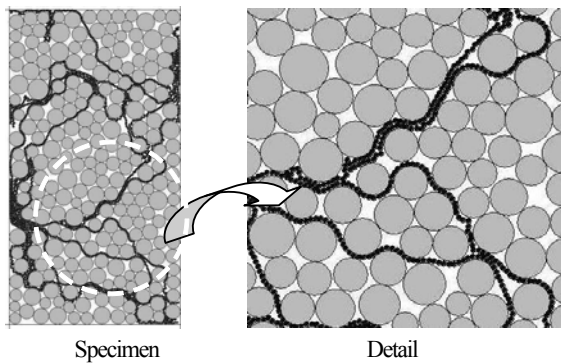


図-13 DEMによるファイバー混合体のモデル

供試体の作成の様子を図-12に、作成された供試体の一部を図-13に示す。灰色の円は土粒子を、黒い円はファイバーを表している。縦3m横1.5mの大きさの枠内に、ファイバーと粒状体からなるマトリックスとをそれぞれランダムに発生させて供試体としている。粒子ははじめに目標粒径の1%の径で小さく発生させ、その後、半径を等方的に徐々に増加させ所定値を得た。応力状態は供試体を囲む4つの壁の位置を変化させ、等方圧縮後、側圧一定もしくは平均主応力一定のもと、軸方向のひずみ速度一定でせん断させた。最大主応力方向をy方向とし、直ひずみ ε_{xx} と ε_{yy} 、体積ひずみ $\varepsilon_v(=\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy})$ 、平均主応力 $\sigma_m(=(\sigma_{xx}+\sigma_{yy})/2)$ と最大せん断応力 τ_m を用いて整理した。マトリックスの初期間隙比はファイバーの混合量に関係なく0.24(平均主応力 $\sigma_m=50\text{kPa}$)に調整した($e_{\max}=0.27, e_{\min}=0.21$)。なお、本論文においては縦方向を最大主応力方向とした。また、ファイバーの配向は水平や鉛直配向についても検討を行ったが、本論文ではランダム配向のみを取り扱う。ファイバーを構成する粒子のファブリックテンソルを計算し、主値がおよそ0.5であったことから、初期配向がランダムであることを確認した。

4. ファイバー混合土の解析結果および考察

4.1 マクロ挙動

図-14は、ファイバー混合率(マトリックスに対する質量比)が異なる場合における等方圧縮下における間隙比の変化を表している。0.5MPaまではほとんど同じ挙動を示すが、その後はファイバーの混合率が高いものほど圧縮性が低くなっている。

図-15は平均主応力一定下($\sigma_m=100\text{kPa}$)における二軸圧縮試験による変形・破壊挙動を示している。ファイバーを混合することによって中ひずみあたりから補強効果が発現し、混合率の上昇に伴ってピーク強度も増加している。最大圧縮後の体積ひずみはファイバーの混合によって膨張傾向が強くなっており、図-1の実験結果で示されたような強度増加やダイレイタンス特性が一致していることがわかる。図-16は主応力比とダイレイタンス比(主ひずみ増分比)の流れ則の関係で再整理したものである。図中には粒子間摩擦角 $\phi_k=25^\circ$ に相当するRoweの流

れ則も示した。無補強の場合は、Roweの式に概ね収斂しているが、ファイバーを混合した場合、Roweの式から外れており同じ応力比で比較すると、同じ粒子間摩擦係数であっても混合率の上昇に伴って発生するダイレイタンス比は低くなっている。

4.2 ミクロ挙動

(1) 等方圧縮時

図-17は、ファイバー混合率を変化させた場合のファイバーの平均張力の挙動を表している。平均張力は、ファイバーを構成する粒子各々に作用している法線方向の応力を合計し、ファイバーの粒径 d で除したもので、1粒径あたりに作用している張力を示している。混合率の違いによる平均張力への大きな影響はみられないものの、若干ではあるが混合率が高いものほど平均張力も高くなっている。また、拘束圧が高くなると平均張力も増加する傾向が見られ、等方圧縮下にあっても、ファイバー内には張力が発達していることがわかった。平均張力は拘束圧の増加とともに発達し、引張抵抗が比較的弱いファイバーは限界引張力に到達し破断に至ると考えられる。実際、ファイバーは破断することが観察されていることから、今後はファイバーの配置場所によっては引張力によって破断が生じることも考慮し、解析を行っていく必要があるといえる。

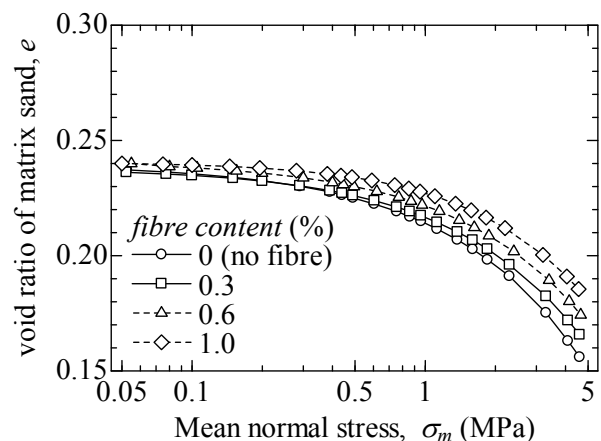


図-14 等方圧縮時のマトリックス部の挙動

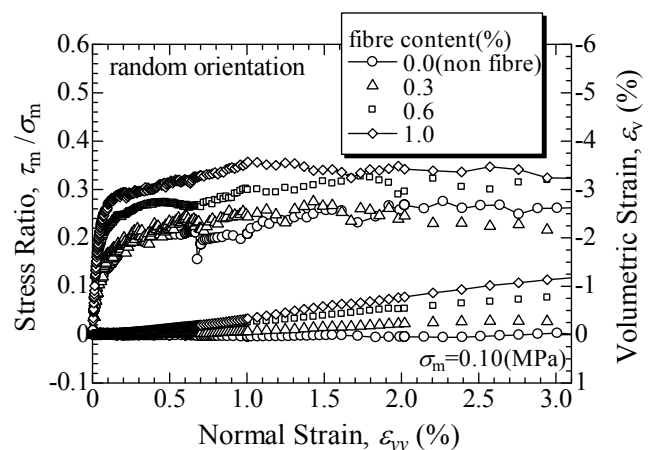


図-15 ファイバー混合土のせん断挙動

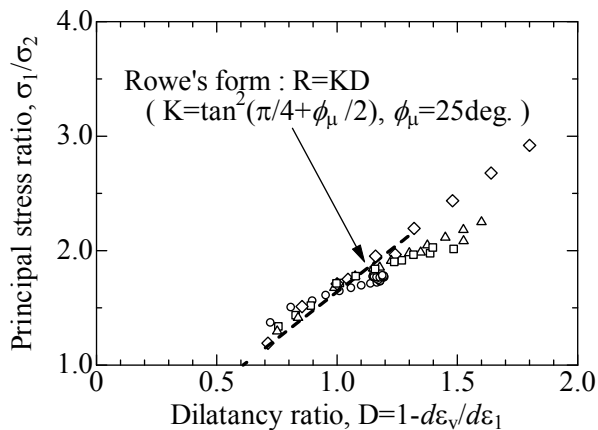


図-16 ファイバー混合土の流れ則

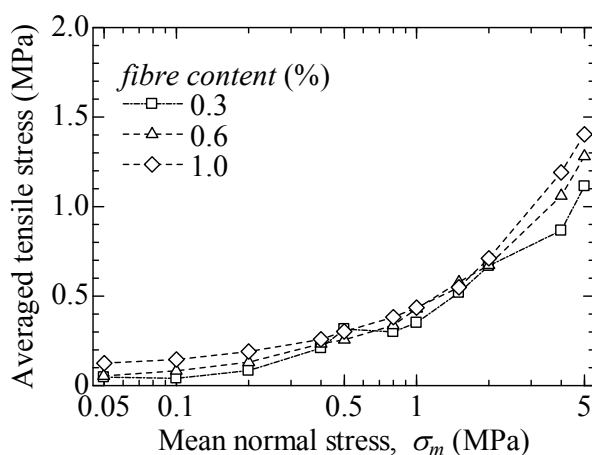


図-17 等方圧縮時のファイバーの平均張力

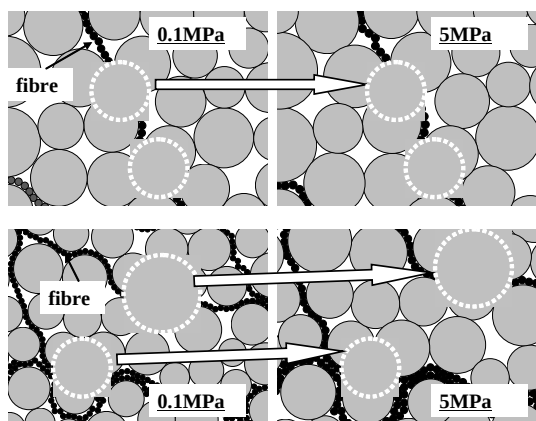


図-18 等方圧縮時のファイバーの形状変化

図-18は、圧縮によるファイバーの形状変化を示している。初期の低圧状態では、母材の粒子配置状態は十分密ではなく、ファイバーも著しい変形には至っていない。しかし、高圧縮状態では粒子の移動が生じるため、その影響を受けファイバーは変形し張力が生じている。ファイバー張力の空間分布について確認したところ、供試体全体で見ると張力は不

均一に発生しており、強い方向性は見られなかった。また、高い張力の発生が見られる箇所はファイバーの初期曲率が高い箇所や曲率変化が大きい箇所であり、密に混入されているほどその傾向が強いようであった。

(2) セン断時

ファイバー内の平均張力とマクロな変形との関係を図-19に示す。せん断初期段階では、平均張力は変化していないが、0.2%を超えたあたりから増加し始めている。この傾向はマクロ挙動（図-15）である体積ひずみが圧縮から体積膨張への遷移地点と一致しているようである。張力はピーク強度を超えても増加し続け、ファイバーの最大張力はファイバー混合率とともに高くなっている。ファイバー張力の空間分布について確認したところ、供試体全体で見ると張力は不均一に発生しており、ファイバー全てに張力が生じているわけではなかった。一方で、局所的に見ると最大張力は最小主ひずみ方向に発達していた。これらから、分布するファイバーの位置やその配向によってせん断時に構造の変化が局所的に生じると考えられ、これには母材-ファイバー間の相互作用メカニズムが影響を及ぼしていると考えられる。

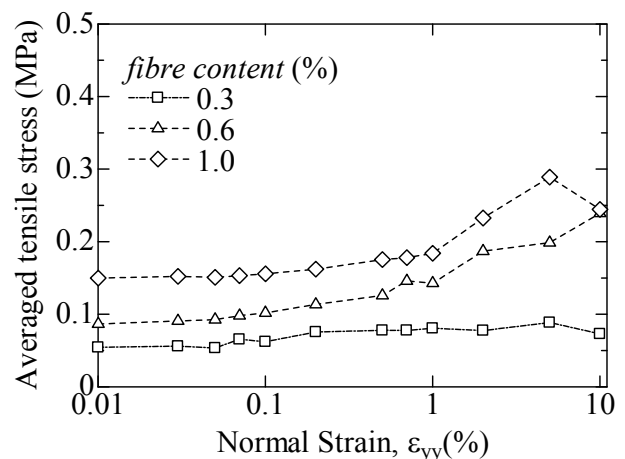


図-19 セン断時のファイバーの平均張力の挙動

つぎに、変形過程における母材の内部構造の変化を評価するために、構造の指標である $N_c F_1$ と $N_c F_2$ を導入し、結果を整理した（図-20）。 $N_c F_1$ と $N_c F_2$ は最大・最小主応力方向の構造の強さの変化を示しており、この値が大きいほどその方向のマイクロ構造は強く、高いマクロの耐力を有することになる¹⁾。ここで、 N_c は平均配位数、 F_1 と F_2 はそれぞれファブリックテンソルの最大・最小主値方向を表している。また、 F_1 と F_2 の比 F_1/F_2 は異方性の強さを表し、最大、最小主応力方向と F_1 , F_2 方向は一致することが知られている。さらに、 F_1/F_2 と主応力比の関係はべき関数で表され、粒子形状や粒度の材料特性と応力の大きさや密度に無関係であることがわかっている¹⁾。

無補強の構造の強さに着目すると、最大主応力方向の構造の強さ $N_c F_1$ はほとんど変化していない。しかし、最小主応力方向の構造の強さ $N_c F_2$ は変形・破壊挙動に伴って減少しており、平均配位数の減少に伴って構造の強さが失われていると考えられる。

一方、ファイバーで補強された場合においては、最大主応力方向の $N_c F_1$ は中ひずみあたりからわずかに増加し、最小主応力方向の $N_c F_2$ は混合率の上昇とともに減少の程度が弱まっている。これより、ファイバーが最小主応力方向の構造の劣化を抑制し、混合率が構造指標に大きな影響を与えていると言える。マクロスケールでの強度増加を内部構造の強さに着目して説明できる可能性があると考えられる。

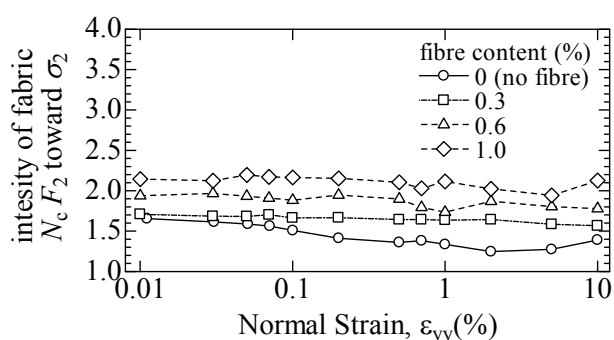
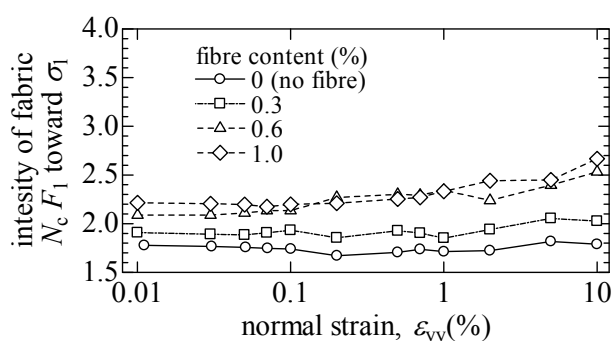


図-20 マトリックスの粒子構造強さのせん断による変化

図-21 は、ファイバー混合率が 0% (a) 図と 0.6% (b) 図，軸ひずみが 2% のときの供試体内の平均主応力と偏差応力の分布を示している。粒子に作用する接点力を粒子の占める空間で平均化することでマイクロゾーンの応力を算定している。図からわかるように最大主応力方向（図の縦方向）に分布する応力鎖を確認することができる。ファイバー混合率が 0.6% の場合、無補強の場合と比較すると応力鎖が縦方向により密に発生していることが確認できる。ここで、2 章で取り上げた座屈強度と粒子回転抵抗との関係に対する検討と合わせて考えると、ファイバーが混入されることで柱構造を支える効果が生じ、応力鎖の座屈変形が抑制されるため構造が壊れにくくなっていると考えられる。

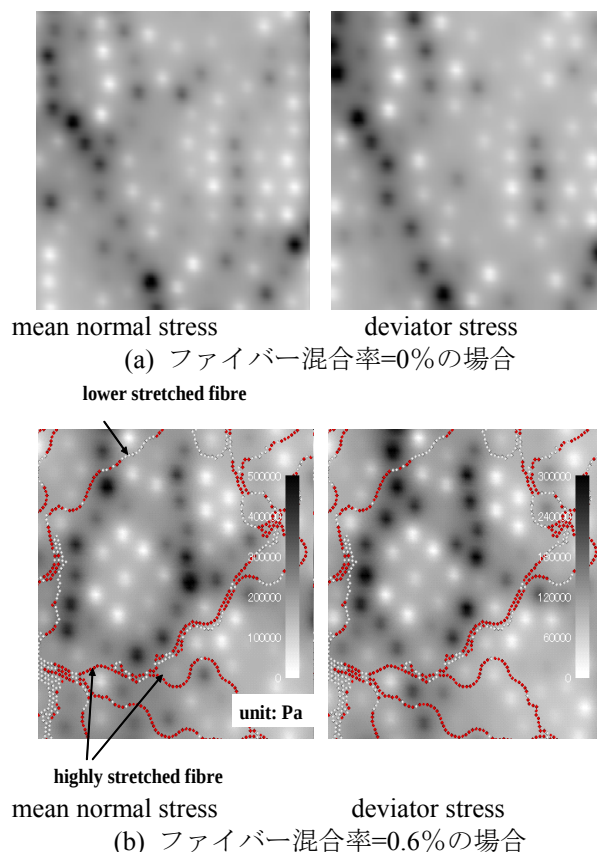


図-21 ミクロ領域における平均主応力と偏差応力の分布： $\epsilon_{yy} = 2.0\%$

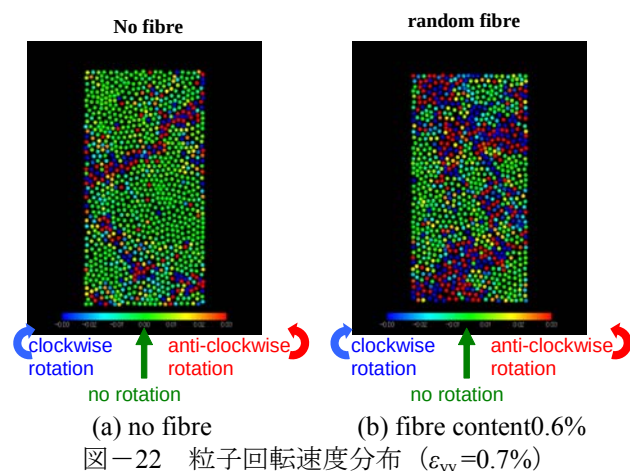


図-22 粒子回転速度分布 ($\epsilon_{yy} = 0.7\%$)

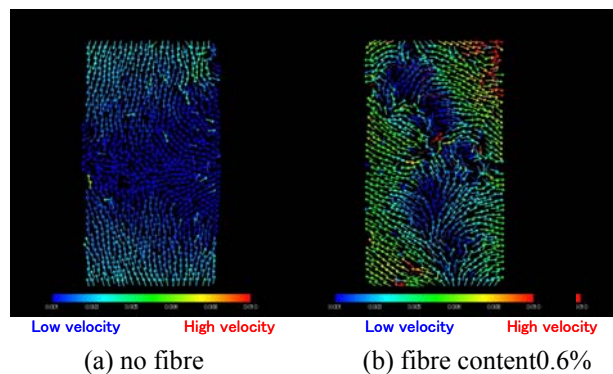


図-23 粒子並進速度分布 ($\epsilon_{yy} = 0.7\%$)

供試体内の粒子の運動を詳細に調べるために、図-22、図-23 にそれぞれ粒子回転速度分布、粒子並進運動速度分布をファイバーの無しと有りの場合を比較している。先の2章で述べたように、円形粒子の場合には回転抵抗が発生しないので隣り合う要素はお互いに反対方向に回転しその場合にはせん断の接点力を増加することなく運動可能である。実際に、図-22(a)では青色粒子（時計回り）と赤色粒子（反時計回り）とは隣接しどちらかの色の粒子がかたまっていることはない。しかし、ファイバーで補強されている供試体内（図(b)）ではそれぞれの色の粒子がつかなりかたまっている。これは、円形粒子個々には回転抵抗をもつことはないが、ファイバーによって粒子群として拘束され、それらが回転抵抗を発揮していることを示唆している。つまり応力鎖が座屈しにくく発達しやすい条件にあるといえる。また、図-23 では、無補強の場合（図(a)）は一樣な変形をしているが、ファイバーで補強されると（図(b)）、変位ベクトルが不均質な変形を示唆する分布となっている。これは、ファイバーの介在によって供試体内部に拘束領域が発生し、2.1 節で述べたようなブロック状の離散化が起きた結果と考えられる。

5. おわりに

ここでは二次元解析していることから、ファイバーが粒子同士の接触を離してしまうなどの実際は三次元の問題との相違点はあるものの、DEM 解析結果は実験で観察されるようなファイバーによる強度増加やダイレイタンス特性の変化をよく表現できている。また、等方圧縮またはせん断時のファイバーのミクロ挙動も観察可能であるといえる。したがって、二次元解析においてもファイバー補強のメカニズムの主要なものを明らかにできることが期待される。

マクロ挙動の解析結果では、ファイバー混合率が母材部分（マトリックス部分）の体積ひずみ挙動に影響を与えており、混合率の上昇に伴って等方圧縮性が低下し、せん断時の正のダイレイタンス特性が増加した。ミクロ挙動の観察結果ではファイバー内の張力がひずみレベルとともに増加し補強効果と連動するとともに、最大張力は最小主ひずみ方向へ発達していた。また、ファイバー混合率の上昇とともにファイバー内に発生する張力も増加していた。これより、粒子構造はせん断時のみならず等方圧縮時でもファイバーの影響を受けて変化し、張力が粒状体中にミクロな拘束効果を与えているといえる。

さらに、構造の強さ（平均接点数）を最大・最小主応力方向に分けて考察すると、無補強土では最小主応力方向に構造の強さが失われやすいことが示された。この現象によって、応力が伝達する経路である応力鎖に着目した場合、その座屈挙動がマクロの強度に大きな影響を与えているであろうことが示された。したがって、粒子間のすべり抵抗だけでなく、

粒子回転抵抗が付加的な強度をもたらすことが明らかになった。また、この際には正のダイレイタンス特性も大きくなるといえる。粒子回転の観察からファイバーが混入された場合にはそれによって拘束された粒子群に回転抵抗が発生していることが示唆された。

よって、ファイバーは、ファイバーの張力によってファイバー近傍の粒子が拘束されることで粒子の回転抵抗が発揮され、これが応力鎖の座屈変形の抑制をもたらす構造劣化を防いでいると言える。

今後はファイバーの長さ、剛性、配向が、粒状体の拘束効果に及ぼす影響について議論していきたい。特に、粒子回転について詳細に検討し、さらに実験による内部挙動の観察、三次元 DEM 解析を進めることで、マイクロメカニクスに着目した物理モデルの構築が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Maeda, K. & Hirabayashi, H.: Influence of Grain Properties on Macro Mechanical Behaviors of Granular Media by DEM, Journal of Appl. Mech., JSCE, pp.623-630, 2006.
- 2) 安福規之・落合英俊・金重正浩・河村隆：ジオグリッド補強土のダイレイタンス特性を考慮した拘束効果と設計への導入，ジオシンセティックス学会論文集 第20巻，pp.279-286，2005.
- 3) Gray, D.H. & Ohashi, H.: Mechanics of fibre re-inforcement in sand, J. of Geotech. Eng., Vol.109, No.3, pp.335-353, 1983.
- 4) Gray, D.H. & Al-Refai, T. O.: Behaviour of fabric - versus fiber-reinforced sand, J. of Geotech. Eng. Vol.112, No.8, pp.804-820, 1986.
- 5) Ibraim, E., Wood, D. M., Maeda, K. & Hirabayashi, H., Fibre-reinforced granular soils behaviour, International Symposium on Geotechnics of Particulate Media, pp.443-448, 2006.
- 6) Diambra A., Russell A.R., Ibraim E. & Muir Wood D.: Determination of fibre orientation distribution in reinforced sand, Geotechnique, Vol.57, No.77, pp.623-628, 2007.
- 7) Heineck, K.S., Coop, M.R. & Consoli, N.C. (2005). Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains, J. of Geotech. and Geoenv. Eng. 131, Vol.8, pp.1024-1033., 2005.
- 8) 山口智世・前田健一・E. Ibraim・松本 崇：マクロミクロの視点から見た砂の短繊維補強メカニズム，「実務利用を目指すマイクロジオメカニクス」発表論文集，pp.17-22，2008.
- 9) Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulation of Progressive, Large Scale Movement in Blocky rock system, Symp. ISRM, Vol.2, pp. 129-136, 1972.
- 10) Rowe, P.W. : The stress dilatancy relation for static

equilibrium of an assembly of particles in contact,
Proc. R. Soc. London, Ser. A., Vol.269, pp.500-527,
1962.

- 11) Satake, M.: Fabric tensor in granular materials”,
IUTAM-Conference on Deformation and Failure of
Granular Materials, pp.63-68, 1982.

(2009年4月9日 受付)