

繊維補強された粒状体の変形・破壊挙動

名古屋工業大学 大学院 学生会員 山口 智世
名古屋工業大学 国際会員 前田 健一
(株)NIPPO コーポレーション 正会員 松本 崇
ブリストル大学 Erdin Ibraim

1. はじめに

近年の化学繊維技術の発展に伴い、地盤分野においてもジオテキスタイルを用いた様々な補強土工法が導入されるようになった。これらの工法は、コンクリート壁のような剛体を築造するよりも安価である。また、工法によっては補強土構造物表面を固めないため、植生工が施せる。特に、毛髪のように細長く、曲げ剛性を持たない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広範囲に適用できるという特長を持つ。よって持続可能な工法として、今後のさらなる活用が期待されている。

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、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。ファイバー補強土工法的设计においても、強度増加は粘着力として反映されている¹⁾。図-1 は砂にファイバーを所定の質量比で混合した試料における直接せん断試験結果例である。無補強の供試体と比較すると、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ひずみ軟化過程での強度低下が抑制されていることがわかる。また、体積膨張傾向もファイバー混合率に伴って強くなっている。

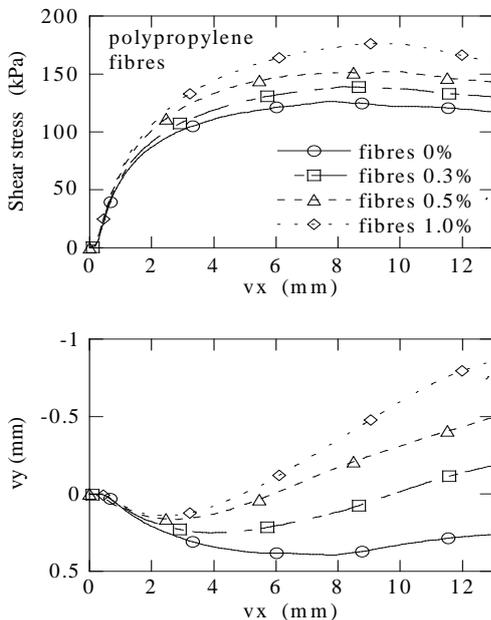


図-1 ファイバー補強土の直接せん断試験結果

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^{2),3)}もある。この相反する現象を説明しようとする場合、粘着力や摩擦力の効果のみに着目した考察では限界があると考えられる。

現在、ファイバーによる強度増加メカニズムを明らかにしようとする様々な研究が行われているが、ここでもその多数は効果はテンションによる粘着力の増加によるものとする方向性が強い。しかし、ファイバーの量や配向、長さが地盤の変形・破壊挙動に与える影響を、単なる粘着力増加として片付けることはできない。また、ファイバーによる補強効果は、ある程度変形することで発揮されるねばり効果が主であると考えられる。よって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重要である。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設計方法を検討することを目標としている^{4),5)}。

本論文ではまず、内部構造に着目した補強メカニズムについて検討する。粒子間の相互作用を考慮するミクロ領域まで視点を下げ、接点に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)⁶⁾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。次に、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 ボンド結合による粒状体の改良メカニズム

まず、粒子間摩擦係数 ($\tan\phi_p=0.25$; 粒子間摩擦角 ϕ_p) で接触する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 ($\sigma_c=500\text{kPa}$) の二軸圧縮試験を DEM 解析した結果を示す (図-3)。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する。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) $a_B=100\%$ のときの応力比 (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。ボンド強度 F_B を全く持たない場合 ($F_B=0$, $a_B=0$: 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た。 F_B が十分高い場合この変形形態が継続され、ファイバーによる補強とは明らかに異なっていることがわかる。

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り、膨張傾向に急激に遷移することが考えられる。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⁷⁾に一致している。ボンド強度 $F_B=0.5$, 5.0kN 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。ボンド強度 F_B が高くなるにつれ、線形弾性体の挙動に近づいている。

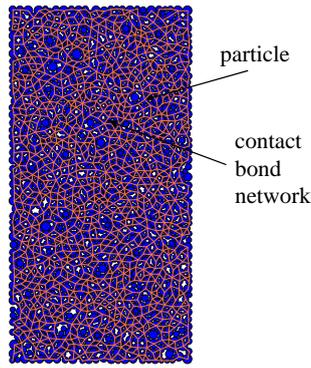


図-2 粒子間結合させた供試体

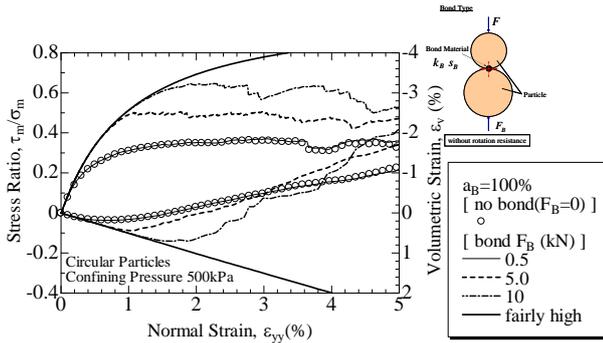


図-3 変形・破壊挙動に及ぼすボンド結合強度 F_B の影響に関する DEM 解析結果

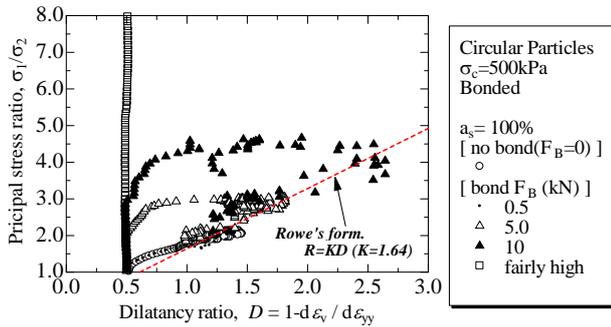


図-4 ストレスダイレイタンスー関係（流れ則）に及ぼすボンド結合強度 F_B の影響に関する DEM 解析結果

図-5、図-6 にボンド強度 $F_B=0.5\text{kN}$, 5.0kN 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 $\epsilon_{yy}=1.0\%$ で内部はブロック状の離散化が進み、 $\epsilon_{yy}=10.0\%$ 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、 $\epsilon_{yy}=1.0\%$ 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、 $\epsilon_{yy}=10.0\%$ 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。以上のことから、接点をボンドで結合された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しかなく、膨張するものと考えられる。

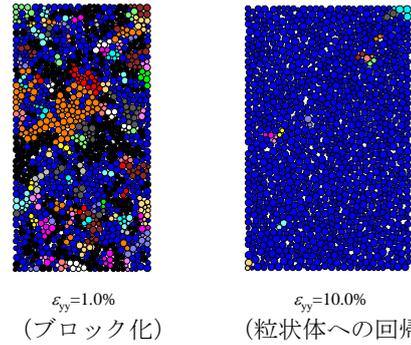


図-5 供試体内部のボンド結合破断とブロック化： $F_B=0.5\text{kN}$ の場合

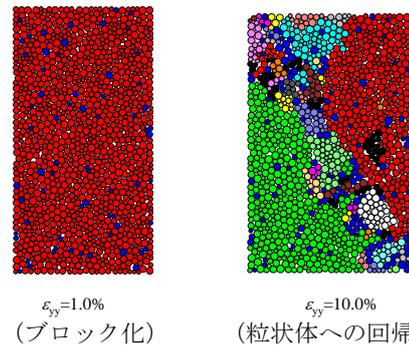


図-6 供試体内部のボンド結合破断とブロック化： $F_B=5.0\text{kN}$ の場合

2.2 粒子間摩擦増加による粒状体補強メカニズム

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 ($\tan\phi_\mu$) 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角 ϕ_i と粒子間摩擦角 ϕ_μ 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。非円形粒子の記号として結合した粒子数を " cl " の添えて示している。詳細は既報⁸⁾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。

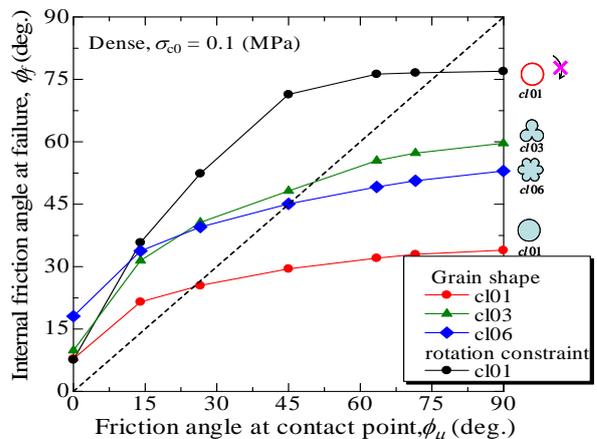


図-7 破壊内部摩擦角と粒子間摩擦角の関係に関する DEM 解析結果：非円形粒子、回転拘束した粒子も導入

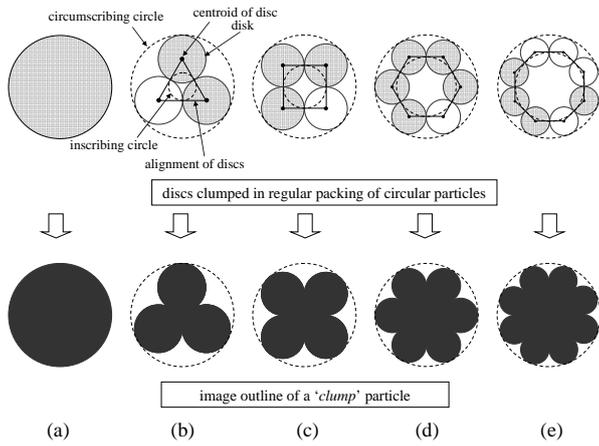


図-8 非円形粒子の導入：(a)cl01 (円形)；(b)cl03 (三角形配置)；(c)cl04 (四角形配置)；(d)cl061 (六角形配置)；(e)cl08 (八角形配置)

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 $\phi < \phi_\mu$ 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 $\phi < \phi_\mu$ の関係となり， ϕ は 35° 程度に収束する。また， ϕ 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 $\phi > \phi_\mu$ 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と言える。

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 との関係を調べた結果を図-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。円形の場合には $c_{lim} \equiv c \equiv 0$ なので横方向の荷荷によって直ぐに転がってしまうので不安定である。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る。正六角形，正方形，正三角形ではそれぞれ $\phi_\mu < 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 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。一要素のみの場合においても，たとえ粒子の摩擦が十分に大きい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。

DEMのアルゴリズムでは，接している円形粒子同士について，その運動が個々の粒子回転のみで，回転方向が異なる場合，接点に力を発生することなく相対運動をすることが可能である。しかし，非円形粒子では回転抵抗が生じ，図-10(b)右図のように回転方向によっては抵抗が大きい場合と小さい場合が考えられる。これが変形の自由度を増していると考えられる。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。

これらから，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，粒子回転抵抗に起因する座屈強度の増加の有無が重要であるといえる。

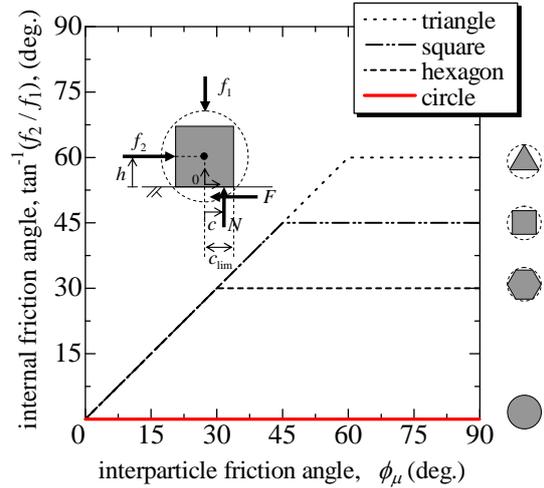


図-9 形状が異なる単体粒子の滑動と回転転倒に対する安定性に及ぼす摩擦特性の影響

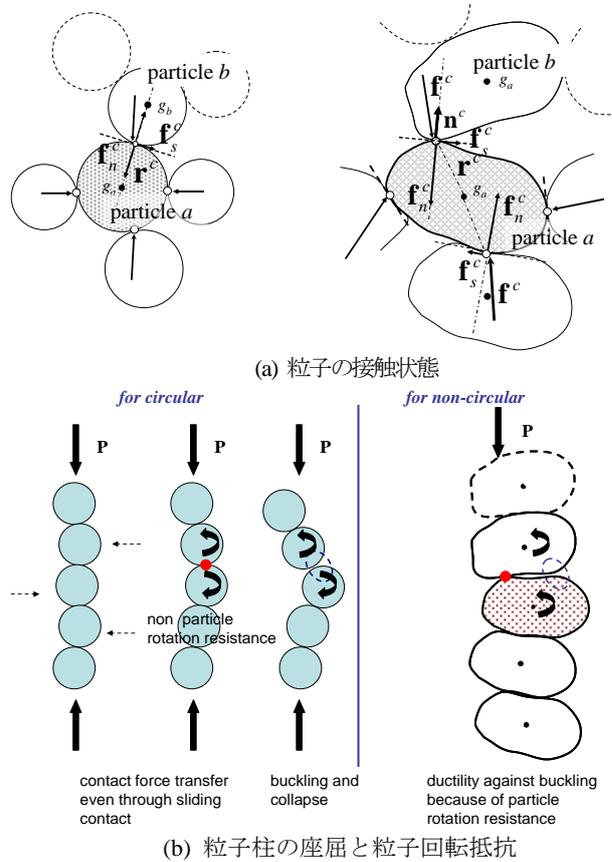


図-10 円形粒子同士と凹凸をもつ非円形粒子同士の接触状態と内部構造の座屈：(a) 粒子の接触状態；(b) 粒子柱の座屈と粒子回転抵抗

3. 解析手法：粒状体を用いたファイバー混合土の構築

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（図-11），基準長 l_0 を設定した。接点がヒンジとして働く設定とし，フレキシブルかつ破断しないものとした。粒状体部分（マトリックス部分）の粒子は円形で表現し，粒子間の相互作用は通常よく用いられるバネ，ダッシュボッド，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、内部構造はマクロな応力・ひずみにのみ依存するようにした。解析に用いたパラメータは表-1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、粒子間と粒子とファイバー間の摩擦係数を 0.25 とした。

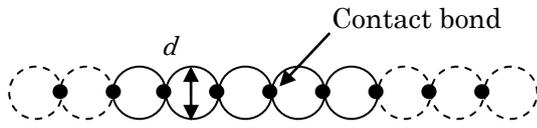


図-11 DEMによるファイバーのモデル化

表-1 解析に用いた粒子特性値

Parameter	Unit	value
fibre		
ρ_f	(t/m^3)	9.1
d	(mm)	1 ($d/D_{max} = 0.1$)
l_0	(mm)	1500
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
C_u	--	1.3
C_g	--	1.1

* d = diameter, l = length, λ = aspect ratio ($\lambda=l/d$).

* D_{max} = maximum grain size, D_{min} = minimum grain size, D_{50} = mean grain size, C_u = coefficient of uniformity (D_{60}/D_{10}), C_g = coefficient of gradation ($D_{30}/D_{60} * D_{10}$), ρ_s = density.

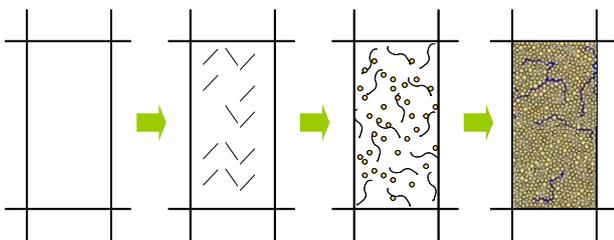


図-12 ファイバーの混合体の作成方法

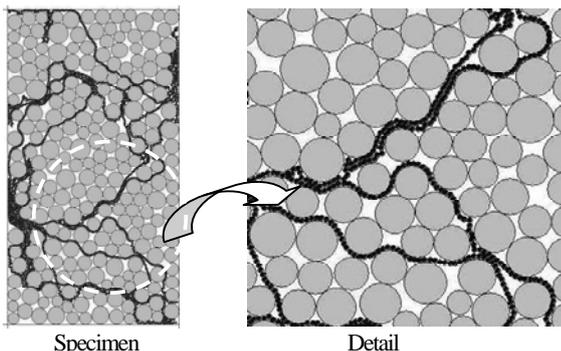


図-13 DEMによるファイバー混合体のモデル

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。ファイバーと粒状体からなるマトリックスをそれぞれランダムに発生させている。粒子は、はじめに目標粒径の1%の径で発生させ、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、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 $\epsilon_v (= \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})$, 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 0.232 (平均主応力 $\sigma_m=50kPa$) 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。

4. ファイバー混合土の解析結果および考察

供試体内に配置するファイバーについて、その混合量、配向、長さ、剛性による補強効果の違いを観察した。本章では、その結果を変形・破壊挙動に着目したマクロ視点からの考察と、ファイバーに作用する張力や粒子回転といった挙動に着目したマイクロ視点からの考察について報告する。

4.1 マクロ挙動

図-14は平均主応力一定下 ($\sigma_m=100kPa$) 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いる。図-15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 $\phi_\mu=25^\circ$ 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。

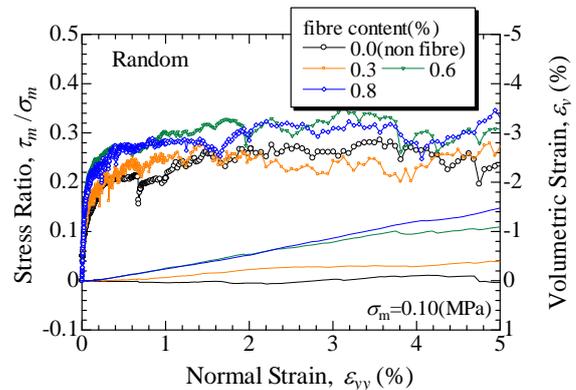


図-14 ファイバー混合土のせん断挙動

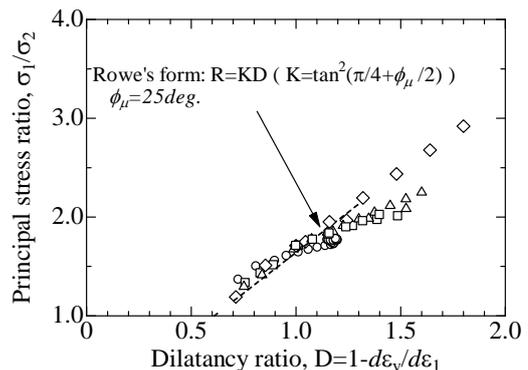


図-15 ファイバー混合土の流れ則

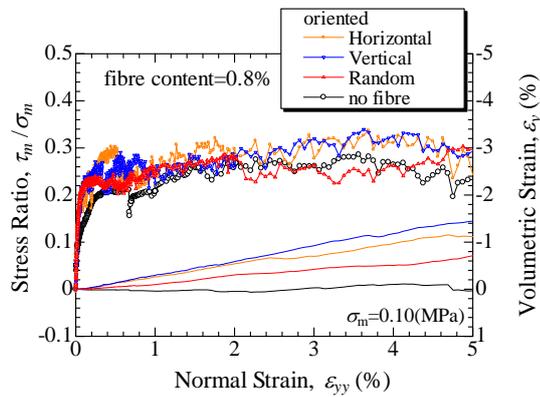
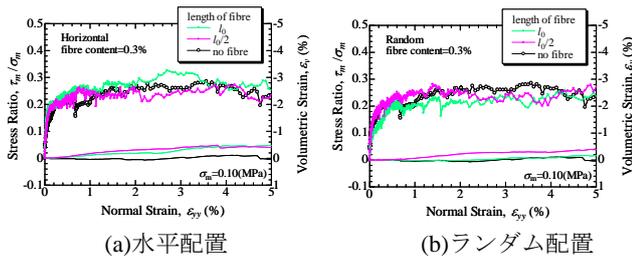


図-16 ファイバーの配向がせん断挙動に与える影響



(a)水平配置

(b)ランダム配置

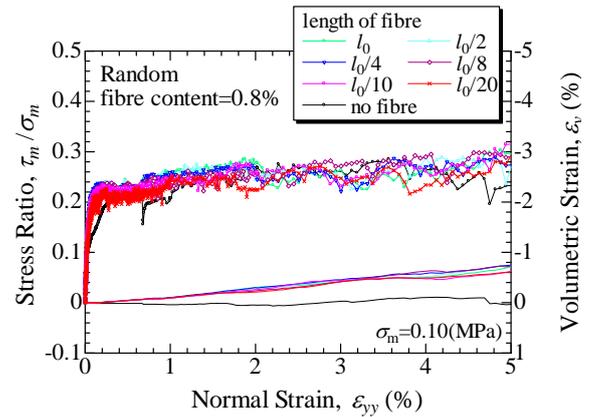
図-17 ファイバーの配向がせん断挙動に与える影響：長さを考慮した場合

図-16は、ファイバーの配向がせん断挙動に与える影響を示している。混合量・長さは一定で、配向は水平・垂直・ランダムに設定した。当初、水平・垂直配向は、異方性が極めて高いためせん断挙動に大きな影響を与えると予想されたが、それほど顕著な結果は得られなかった。水平に配置した場合に最大のピーク強度が得られるようだが、ひずみ軟化時の強度低下率については垂直に配置した場合の方が大きいようである。

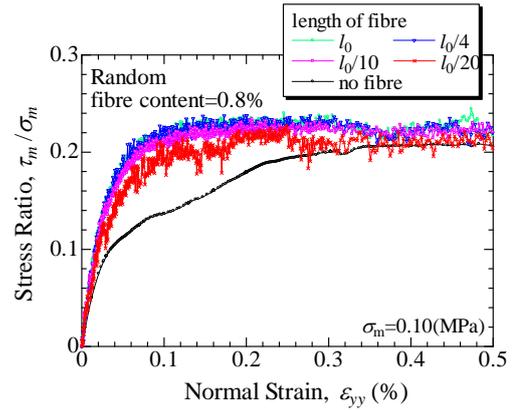
ここで、各配向で長さを変化させたときの影響を示す。図-17は、ファイバー混合率0.3%のときのファイバー長によるせん断挙動への影響を配向ごとに整理したものである。ファイバー長は基準長 l_0 とその半分の長さの $l_0/2$ に設定した。水平配置((a)図)では長いファイバーの方がピーク強度・残留強度ともに高くなる傾向があるが、ランダム配置((b)図)では、逆転するという結果を得た。

この結果を受け、ファイバーの長さのみが強度増加に与える影響について検証を行った(図-18)。混合量、配向に加え、ファイバーの配置場所や、マトリクス部の粒子情報の変化による影響を排除するため、同一の供試体を用いて試験を行った。ファイバーの長さは、基準長 l_0 のファイバーを等間隔に分割することで変化した。よってファイバーの混合率は一定で、分割回数が増えるほど短いファイバーが多数混合されていることになる。長さはそれぞれ $l_0/2$ 、 $l_0/4$ 、 $l_0/8$ 、 $l_0/10$ 、 $l_0/20$ とした。ファイバー長が減少するにつれ、わずかではあるが強度が低下していることが確認できる。最もファイバー長が短い $l_0/20$ のケースにおいては、基準長 l_0 と比較して明確な強度低下が確認でき、無補強時の挙動に近づいていることがわかる。このときのファイバー長を確認したところ、 D_{50} とほぼ同等であった。ファイバーが短くなるにつれ補強材としてではなくマトリクス粒子に近い存在に転換し、補強効果を発揮せず強度低下に至ったことが考えられる。

以上の結果より、ファイバー長と強度増加は比例関係にあり、図-17で見られた強度の差はファイバーの配向や、相互作用を受ける粒子(マトリクス部)の粒径、座標等の影響を受けたものであると考えられる。



(a)軸ひずみ：0~5%



(b)軸ひずみ：0~0.5%

図-18 ファイバーの長さがせん断挙動に与える影響：配置を考慮した場合

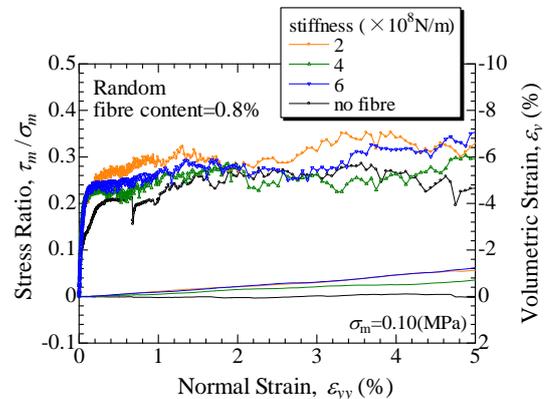


図-19 ファイバーの剛性がせん断挙動に与える影響

図-19は、ファイバーの剛性がせん断挙動に与える影響を示している。混合量・長さ・配向は一定で、剛性を2, 4, 6 $\times 10^8$ N/mと変化した。本研究では、剛性の値はファイバー補強土工法として実際に用いられているポリエステル強度を参考に決定しており、通常4 $\times 10^8$ N/mを用いている。しかし、その半分の剛性である2 $\times 10^8$ N/mのケースにおいて強度増加が最大であるという結果を得た。6 $\times 10^8$ N/mの場合においても4 $\times 10^8$ N/m時以上の強度増加が確認されたが、このケースにおいては剛性の上昇によってファイバー特有のフレキシブルさが失われ、補強のメカニズムが変化したことも考えられる。よって6 $\times 10^8$ N/mのケースについては、本論文では比較対象外とする。剛性の小さいケースが最大の補強効果を発揮した理由として、フレキシブルさの増加による拘束効果の発現が

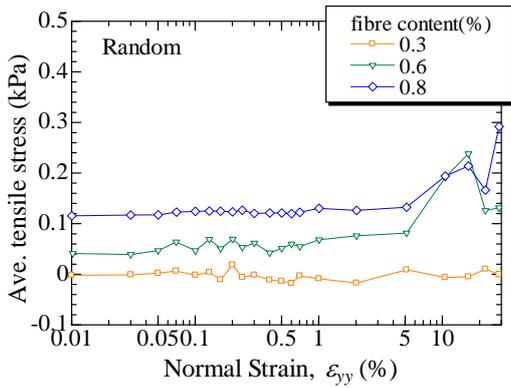


図-20 せん断時のファイバーの平均張力の挙動

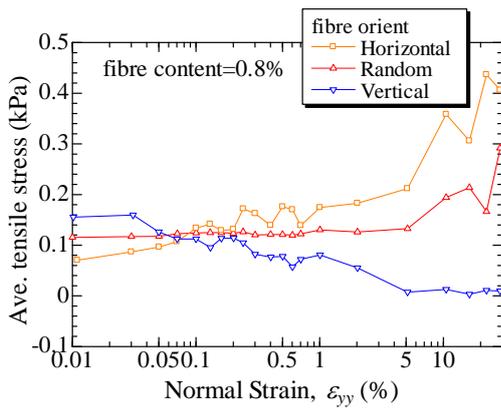


図-21 配向がファイバーの平均張力の挙動に与える影響

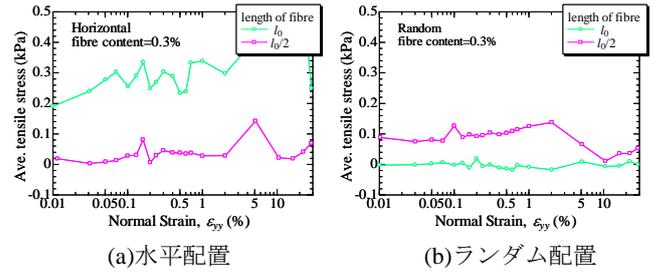


図-22 長さがファイバーの平均張力の挙動に与える影響: 長さを考慮した場合

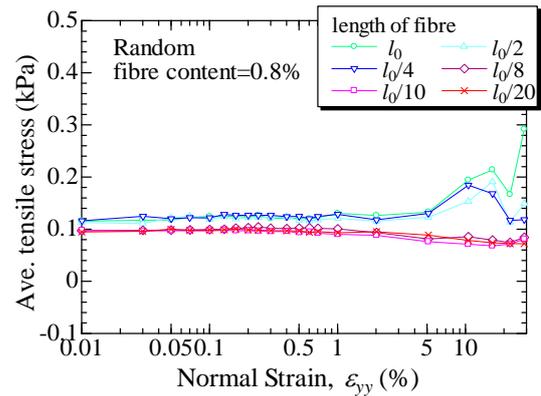


図-23 ファイバーの長さが平均張力の挙動に与える影響: 配置を考慮した場合

考えられる。この効果については、次節で説明する。しかしながら、剛性の小さいファイバーは実際には引張によって断裂するため、剛性が小さい程強度が増加すると結論付けるには現段階においては早計である。今後、断裂を視野に入れた剛性による影響を検討する必要があると考える。

4.2 ミクロ挙動

(1) ファイバーのパラメータが平均張力に与える影響

地盤材料が変形・破壊する際、内部では微小な土の移動によってせん断が発生している。そのせん断面を横切るようにファイバーが配置されている場合、ファイバー内部に張力が発生し、移動しようとする土が拘束されることで強度増加(強度低下の減少)が発生していると考えられている。よって、ファイバー内部に生じている張力について検討することは、とても重要である。

ファイバー内の平均張力とマクロな変形との関係を図-20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変動し始め徐々に増加している。この傾向はマクロ挙動(図-14)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。

図-21は、配向がせん断挙動に与える影響を示している。ファイバーのパラメータの設定は図-16で示したマクロ挙動と対応している。水平・ランダムに配置した場合は、せん断が進行するにつれ張力が増加しているが、垂直に配置した場合には張力が減少している。考えられる要因として、垂直方向は最大主応力方向と一致していることが挙げられる。せん断過程が進行するに従い、垂直方向の軸ひずみは圧縮側に進行する。それに伴い、ファイバーに発生する応力も引張から圧縮側へと転じ、張力が減少したのではないかと考えられる。

マクロ挙動の結果(図-17)を受け、ここでも配向に加え長さによる影響を検討することにした。図-22は、ファイバー混合率0.3%のときのファイバー長によるせん断挙動への影響を配向ごとに整理したものである。各パラメータの設定は図-17と対応している。マクロ挙動の結果と対応して、強度の高いケースにおいて張力がより発生していた。

ここで、4.1節と同様に、長さによる影響のみを検討した結果を図-23に示す。各パラメータ設定は図-18で示したマクロ挙動と対応している。せん断初期から中ひずみにかけては、ファイバー長 $l_0/4$ と $l_0/8$ を境目に、それぞれ概ね1つの線に収束している。しかし、大ひずみから破壊近傍にかけては、ファイバー長が短いケースの漸近線はほとんど変化しないのに対して、ファイバー長が長いケースの漸近線は急激に増加していることがわかる。これにより、ファイバー長が強度増加に寄与する場面は大ひずみから破壊近傍にかけてであるとと言える。

図-24は、剛性がせん断挙動に与える影響を示している。ファイバーのパラメータの設定は図-19で示したマクロ挙動と対応している。剛性が異なる場合でも、せん断の進行に伴う張力増加率の上昇・下降の程度はほぼ同程度であったが、 $2.4 \times 10^8 \text{ N/m}$ のケースと $6 \times 10^8 \text{ N/m}$ のケース間には大幅な張力差が生じていた。剛性の増加率に伴う張力の増加の関係は非線形である可能性が考えられる。加えて、先の節でも述べたように、剛性の上昇によって補強のメカニズムが変化したことも考えられる。図-25は、剛性が粒子の回転変位に与える影響を示しているが、 $6 \times 10^8 \text{ N/m}$ の場合のみ粒子の回転変位量が突出して大きいという結果を得た。よって、剛性に関しては、張力の増加率の比較のみではその効果を正確に捉えられない可能性が高い。剛性の結果と併せて、粒子一粒一粒の挙動に着目した考察と、現在の結果に加えて、いくつかの異なる条件下でのさらなる検証が必要であると考えられる。

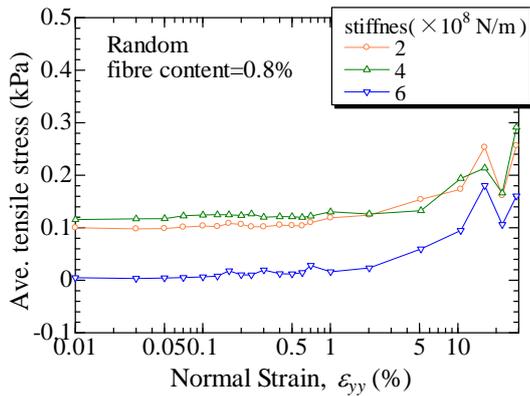


図-24 ファイバーの剛性が平均張力の挙動に与える影響

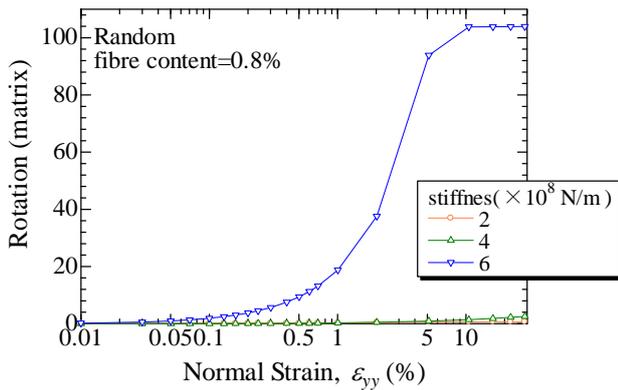


図-25 剛性が粒子の回転変位に与える影響

(2)内部構造に着目した補強メカニズム

(1)の結果より、ファイバーの配置条件、パラメータによって生じる強度の増減と、その傾向が明らかになった。しかし現段階では、どのパラメータが強度増減を支配しているのかを言及することはできない。そこで、せん断時のファイバー混合土の挙動を粒子単位で観察し、供試体内部で発生している現象を観察することでファイバーによる補強効果を検証することにした。ここでは、配向・長さ・剛性は一定で、混合量を変化させた条件での結果と考察について報告する。

まず、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-26)。 $N_c F_1$ 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ミクロ構造は強く、高いマクロの耐力を有することになる。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。よって、 F_1/F_2 の特徴は応力比によって決定付けられ、材料特性と試験条件とは独立関係にあることがわかっている。図に示されるように、無補強の場合、構造の強さは $N_c F_1$ はほとんど変化しないが、 $N_c F_2$ ともにマクロな変形に伴って減少している。最小主応力方向においては変形とともに平均配位数が減少し構造の強さが失われている。

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。

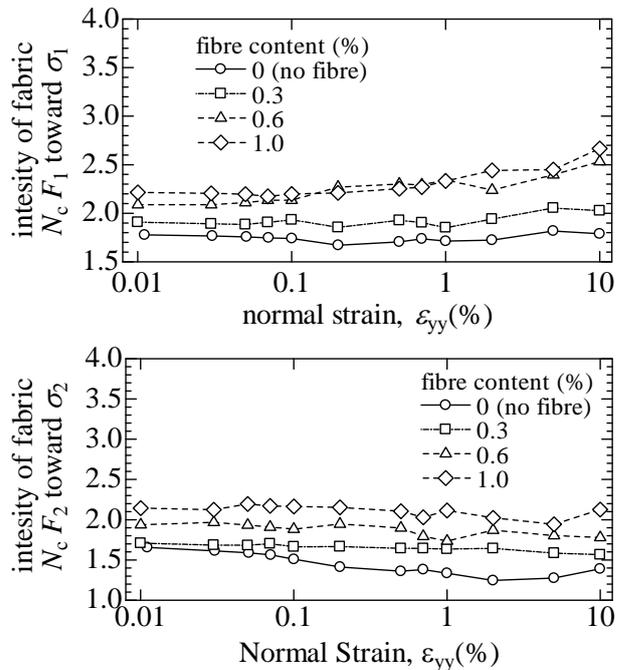
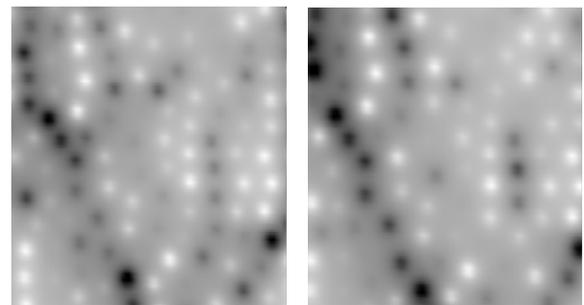
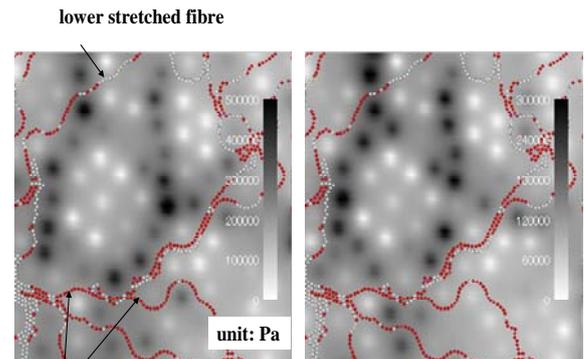


図-26 マトリックスの粒子構造強さのせん断による変化



(a) ファイバー混合率=0%の場合



(b) ファイバー混合率=0.6%の場合

図-27 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-27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ミ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

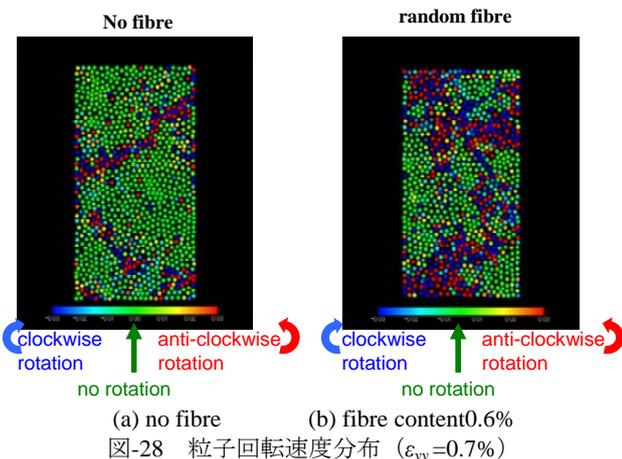


図-28 粒子回転速度分布 ($\epsilon_{yy}=0.7\%$)

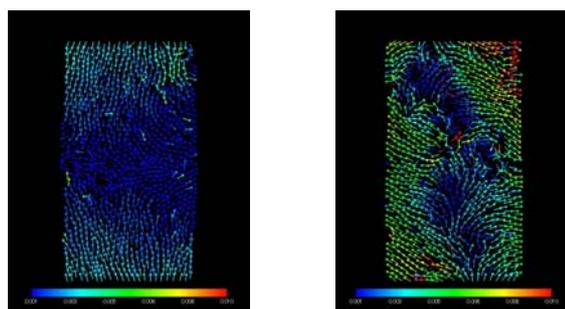


図-29 粒子並進速度分布 ($\epsilon_{yy}=0.7\%$)

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構造が壊れにくくなっていると考えられる。

また、供試体内の粒子の運動を詳細に調べるために、図-28、図-29 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有無で比較した結果を示す。先の 2 章で述べたように、円形粒子の場合には隣り合う要素がお互いに反対方向に回転しているとき、せん断の接点力を増加することなく運動可能であるため回転抵抗が発生しない。実際に、図-28(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存在することはない。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たまって存在している。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發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-29 では、無補強の場合（図(a)）は一様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、2.1 節で述べたようなファイバーによる拘束領域にブロック状に離散化され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、実際の三次元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、せん断時のファイバーのマイクロ挙

動も観察可能にしたといえる。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、配向、長さの増減が母材の圧縮性とダイレイタンス挙動に影響を与えており、マイクロ挙動の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、補強効果と連動していた。これより、ファイバーが粒状体中にマイクロな拘束効果を与えていることが確認できた。しかしながら、どのファイバー特性が強度に最も影響を与えるかは言及できなかったため、ファイバーの剛性をはじめ、さらなる条件下での検討が必要だろう。

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。この現象は、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、ファイバーによる補強は、ファイバーの張力によって拘束されたマイクロ領域に回転抵抗が發揮されることで応力鎖の座屈変形が抑制され構造劣化を防ぐことであると言える。

今後はファイバーの剛性が粒状体-ファイバー間の拘束効果に及ぼす影響を中心に、二次元における現象をさらに議論し、加えて粒子回転など、個々の粒子の挙動についても詳細に検討を進めたい。さらに実験による内部挙動の観察、三次元 DEM 解析を進め、ファイバーの各パラメータに起因する強度の増減を定量的に把握することで、マイクロメカニクスに着目した物理モデルの構築を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) ジオファイバー協会：ジオファイバー工法 設計・施工の手引き(第 5 版)、2004.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulation Progressive, Large Scale Movement in Blocky rock system, *Symp. ISRM*, Vol.2, pp. 129-136, 1972.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Gray, D.H. & Ohashi, H.: Mechanics of fibre re-inforcement in sand, *J. of Geotech. Eng.*, Vol.109, No.3, pp.335-353, 1983.
- 11) Gray, D.H. & Al-Refaei, T. O.: Behaviour of fabric - versus fiber-reinforced sand, *J. of Geotech. Eng.* Vol.112, No.8, pp.804-820, 1986.
- 12) Satake, M.: Fabric tensor in granular materials”, *IUTAM-Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*, pp.63-68, 1982.