

粒子回転に着目したファイバー混合土の強度発現メカニズムの考察

A consideration of the strength development mechanism of a fiber-mixed soil based on particle rotation

山口智世*・近藤明彦*・前田健一**・Erdin Ibraim***

Tomoyo YAMAGUCHI, Akihiko KONDO, Kenichi MAEDA and Erdin Ibraim

*学生会員 工修 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)

**正会員 工博 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)

This study investigated the strength development mechanism of a granular material mixed with fibre based on the change in particle rotation behaviour by using the discrete element method. The effect of mixing granular material with fibre is usually understood to be an increase in adhesion. An analysis into which bond element was introduced could not explain why an increase in strength was accompanied by an increase in positive dilatancy, although the increase in positive dilatancy was observed in experimental results. In this study, the effects of the mixing ratio, length, orientation, rigidity, and friction of fibres with the surrounding particles on the macroscopic behaviours of fibre-mixed soil were analyzed. Consequently, the analytical results were qualitatively similar to the experimental results. In a granular material without fibre, when the strength developed, the rotations of the two contacting particles were opposite of each other, resulting in a high unstable deformation mode ratio with the “zero incremental shear force,” in which the contact displacement increment due to particle rotation, and that due to particle translational motion, were the same in magnitude but reverse in direction. This ratio was particularly high at a contact where a large force was transmitted. It was also revealed that the development of the unstable deformation mode could be inhibited by mixing with fibre, and that the ratio of contact structure, which could resist macroscopic deformation, increased.

Key Words: *particle rotation, bucking, space distribution, DEM, fibre mixed soil*

1. はじめに

ファイバー補強土工法は、曲げ剛性を持たない短繊維(ファイバー)で地盤を補強する工法^{1)~7)}である。施工が容易で安価なうえそのフレキシブルさから適用範囲が広く、今後のさらなる活用が期待されている。ファイバー補強土工法では、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。しかし、これらのメカニズムでは、本質的な挙動を説明することができないことも指摘されている^{5)~7)}。

ここで、DEMにおいてファイバー混合土の挙動を解析するにあたり、まずファイバー混合による効果を室内実験により確認した結果⁵⁾を記す。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密詰め試料(初期間隙比 $e_0=0.9$)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。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。

ファイバー補強土の特性に対して実験によるマクロ的变化からメカニズムの解明を行う研究も行われているが、ファイバー混入により、体積膨張が顕著になるという報告もあれば、逆に体積膨張が抑制されるとの報告もある^{5)~7)}。よって、マクロな挙動だけでなく、粒子レベルまで視点を掘り下げたミクロな視点^{5), 8)~10)}から挙動を観察し、土粒子とファイバーとの相互関係を統一的に理解する必要がある。そこで、本研究では、ファイバー混合土の補強効果について、マクロな応力-ひずみ関係だけでなく、粒子間接点力レベルのミクロな視点からの考察を行うことで強度発現メカニズムを解明することを目的としている。

本論文では、既報¹⁰⁾に加え、二次元個別要素法(DEM)を用いて、実地盤の挙動を記述する際に重要視されている摩擦力、粒子回転効果と粒子間粘着力が粒状体においてどのような役割を果たしているのか解析・考察を行い、粒子

回転が強度発揮に大きく関与していること、変形の進行過程において粒子間粘着力がどのように強度発現に関係するのかを明らかにする。これを受け、ファイバー混合土の二軸圧縮試験解析を行い、ファイバーの長さや剛性といった緒元のマクロな変形・破壊挙動に対する影響に加え、変形・破壊挙動を新たに粒子間接点の並進運動・回転運動による相対変位量とその空間分布から捉え、ファイバーによる補強メカニズムを考察する。

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 ($\lambda=l/d$).

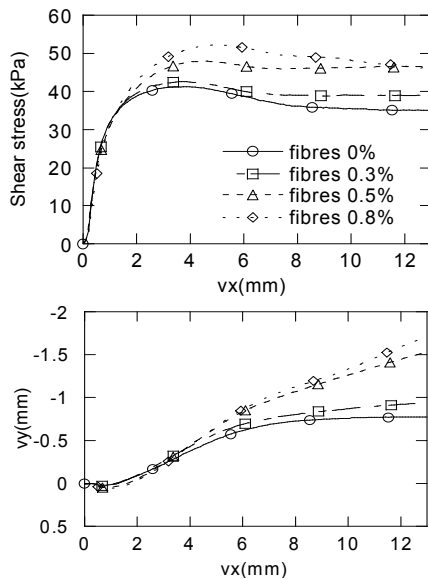


図-1 密詰のファイバー補強土直接せん断試験結果 (上：応力-ひずみ挙動, 下：ダイラタンシー挙動)

2. 粒状体における粒子特性の影響

2.1 DEM 解析における基本パラメータ

本章では、DEM¹¹⁾を用いて粒状体の側圧一定単調載荷試験の挙動に与える粒子の摩擦・形状・回転抵抗・粘着力といった基本的な粒子特性がマクロの変形・破壊挙動にどのように影響するのかを考察し、ファイバー補強効果の主なメカニズムを捉えることとする。特に、破壊強度にどのような因子が強く影響するのかを見極める。

粒子間接触モデルには一般的なフォークトモデルを使用し、供試体の応力やひずみは四方からの摩擦の無い壁要素の移動によって制御した。DEM の基本パラメータを表

2に示す。バネは線形とし、粘性係数は各接点で臨界減衰となるようにした。粒度分布は最大粒径 D_{max} 、最小粒径 D_{min} の間で質量に関する対数正規分布になるように乱数を用いて粒子を発生させた。分布の平均値は平均粒径 $D_{50} = \sqrt{D_{max} \times D_{min}}$ とし、分布形状が豊浦砂の粒度分布のような滑らかなS字曲線となるように標準偏差を $(\log D_{max} - \log D_{50}) / 2.5$ とした。発生させた粒子の内、最大と最小のものをそれぞれ選び、ちょうど D_{max} と D_{min} になるように修正した。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。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のみ依るものとした。解析に用いたパラメータは表-2に示す通りである。

さらに、粒子形状の影響を調べるために、ここでは、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た。詳細を既報⁸⁾に譲る。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、通常の円形粒子の場合には $cl03$ とし、三個の等径な円粒子を三角形に繋げて一つの非円形粒子としている場合には、この粒子を $cl03$ と呼ぶ。非円形粒子では円形粒子に比べて噛み合わせ方に応じて回転抵抗を発揮する。さらに、極端な場合として、粒子回転を全く生じさせず回転の自由度を除いた粒子回転拘束有りの場合についても計算している。この場合、通常の粒子回転拘束無しの解析とは異なり、粒子間の相対運動はすべりを伴う並進運動のみである。

表-2 DEM 解析における粒状体の基本パラメータ

Parameter	Unit	Value
Specimen size	m	3.0×1.5
matrix (granular material)		
D_{max}	mm	100
D_{min}	mm	50
ρ_s	kg/m^3	2650
D_{50}	(mm)	71
U_c	--	1.3
U_c'	--	1.1
Normal Spring coefficient	N/m/m	0.5×10^9
Tangential spring coefficient	N/m/m	0.125×10^9
Normal damping	-	critical
Tangential damping	-	critical
Resistant friction angle ϕ_i (deg.)	-	$\tan \phi_i = 0.25^*$
bond (contact bond type)		
Normal bond strength	Pa	0 to 1×10^{10}
Tangential bond strength	Pa	0 to 1×10^{10}
diameter of bond material	m	D_{min}

* : 標準値, 本論文中で $\tan \phi_i = 0-1000$ の間で変化

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 $\sigma_m (= (\alpha_{xx} + \alpha_{yy})/2)$ と最大せん断応力 τ_m を用い

て整理した。応力は全て有効応力である。なお、本論文においては縦方向を最大主応力方向とした。

2.2 強度に及ぼす粒子間摩擦、粒子形状の影響

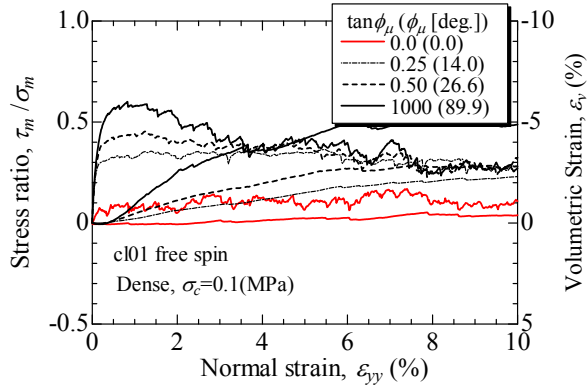


図-2 変形・破壊挙動に及ぼす粒子間摩擦の影響（粒子回転拘束無し）

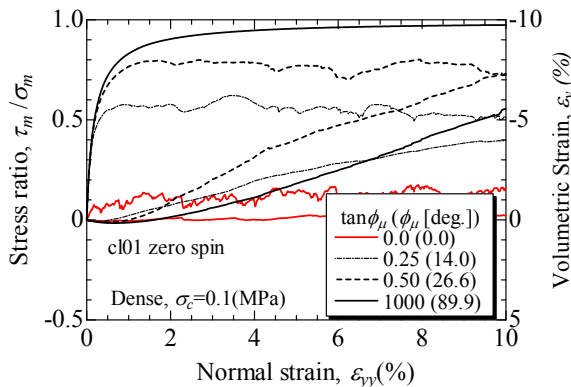


図-3 変形・破壊挙動に及ぼす粒子間摩擦の影響（粒子回転拘束有り）

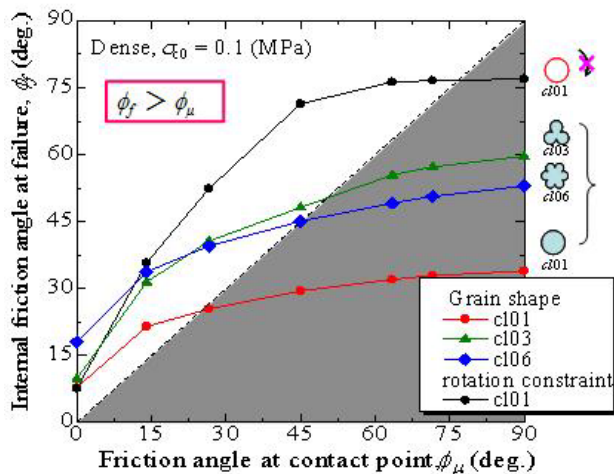


図-4 破壊内部摩擦角と粒子間摩擦角の関係

円形粒子 (c101) について、粒子回転に拘束がない（通常の DEM 解析）場合と粒子回転拘束有りの場合の解析結果をそれぞれ図-2、図-3 に示す。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 ε_{yy} (%), 体積ひずみ ε_v (%) の関係について示している。全ての試料のせん断直前の間隙比は同じである。拘束圧 $\sigma_c=0.1\text{MPa}$ である。いずれも, $\tan\phi_\mu$ が大きいほど破壊時の膨張度合いは高く強度も高い。また, $\tan\phi_\mu=0$ であっても低いながらも強度を有する。つぎに, 回転拘束の有無による差を観察する。回転拘束が無い場合 (図-2), 残留強度には ($\tan\phi_\mu=0$ 以外は) $\tan\phi_\mu$ の影響は見られない。また, 例え $\tan\phi_\mu=1000$ の場合では必ずしも強度は極端に大きいわけではない。一方, 回転拘束が有る場合 (図-3), $\tan\phi_\mu=1000$ の場合では, 応力比は 1.0 近く, 非常に高い強度を示している。

図-4 に破壊時の内部摩擦角 ϕ_f と粒子間摩擦角 ϕ_μ の関係を示す。図-2, 3 の結果以外にも, 回転拘束無しの場合の非円形粒子の結果も示す。図から, 同じ ϕ_μ に対して, 内部摩擦角 ϕ_f の大きさは, 回転拘束無しの場合の円形粒子, 回転拘束無しの場合の非円形粒子, 回転拘束有りの円形粒子の順に大きくなっている。破壊時の内部摩擦角 $\phi_f >$ 粒子間摩擦角 ϕ_μ となる左上部の白い三角形内は, ϕ_μ の上昇に伴い強度も高まっている。しかし, どのケースにおいても ϕ_μ を上昇させても破壊時の内部摩擦角は頭打ちの傾向となっている。それ以上に, 円形粒子でも回転拘束有りの場合の方が破壊時の内部摩擦角が格段に上昇している。よって, 粒状材料において, 強度の増加を摩擦角によってのみ記述するには限界があり, 強度増加には粒子間摩擦よりも粒子の回転の影響が大きいということが言える。

つぎに, 図-5 と図-6 に, 図-2 と図-3 に対する平均配位数 N_c と主応力比 σ_1/σ_2 の関係を示す。ここで, 平均配位数とは一粒子当たりの平均接点数であり, 接触構造の粗密度合いを示す指標である。供試体内部の粒子数を M , 接点数を N とすると, $N_c=2N/M$ となる。構造力学的考察によれば, 各接点で接点力 2 つ (法線方向とせん断方向の接点力) が未知量であり全未知数は $2N$, 条件式である釣合い式は 1 粒子あたりに 3 本 (x,y 方向の力と回転モーメント) で $3M$ となるので, $N_c=2N/M > 3$ のとき粒状体内部は不静定となり, 安定な構造状態にあるといえる。図から, N_c は 4 程度の値からせん断とともに減少しており, 回転拘束有りの場合 (図-6) の方が減少傾向はゆるやかで, ピーク強度時 (σ_1/σ_2 が減少する点) の配位数も回転拘束が無い場合に比べ, 低い値である。これは, 上述の N_c に関する考察に従うと, 回転拘束有りの場合には, 条件式である釣合い式は 1 粒子あたりに 2 本 (x,y 方向の力) となるので, 不静定な条件は, $N_c > 2$ となることから説明可能と考えられる。

ここで, 回転拘束無しの場合と有りの場合について, 粒子接触力の伝達経路である応力鎖を図-7 に示す (黒い線は接触力を示し, 強い力ほど太く表されている)。回転拘束有りの場合には最大主応力方向に明確な柱構造が発達していることが分かる。以上のことは, 粒状体のマクロな破壊は粒子間の滑り¹²⁾ だけでなく, 粒子回転によっても誘発され, 供試体内部を支える応力鎖の崩壊は粒子回転に拠るところが大きいことを示唆している。つまり, 応力鎖が構造として座屈的な変形をすることも考えられる。

ここで, 回転拘束無しの場合と有りの場合について, 粒子接触力の伝達経路である応力鎖を図-7 に示す (黒い線は接触力を示し, 強い力ほど太く表されている)。回転拘束有りの場合には最大主応力方向に明確な柱構造が発達していることが分かる。以上のことは, 粒状体のマクロな破壊は粒子間の滑り¹²⁾ だけでなく, 粒子回転によっても誘発され, 供試体内部を支える応力鎖の崩壊は粒子回転に拠るところが大きいことを示唆している。つまり, 応力鎖が構造として座屈的な変形をすることも考えられる。

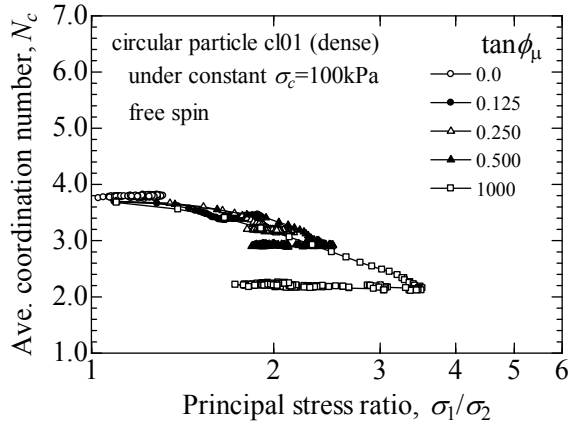


図-5 摩擦力変化による配位数挙動 (回転拘束無し)

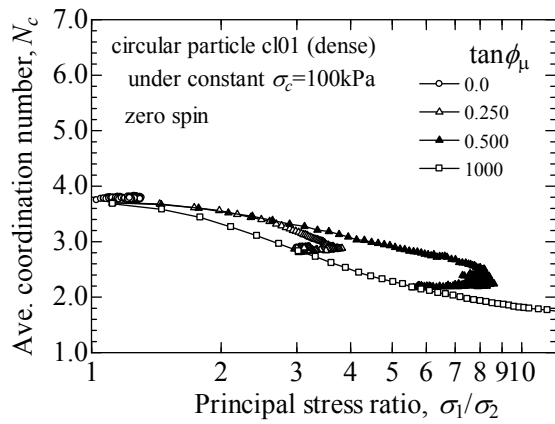


図-6 摩擦力変化による配位数挙動 (回転拘束有り)

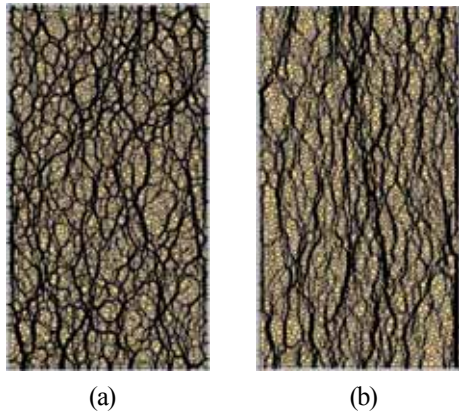


図-7 円形粒子を用いた DEM 供試体内部 ($\varepsilon_{yy}=3.0\%$ 時) の応力鎖の様子 ($\tan\phi_{\mu}=0.50$): (a)回転拘束無し; (b)回転拘束有り: 最大主応力方向は鉛直方向.

2.3 強度に及ぼす粒子間粘着力による影響

粒状体の強度を増加させる方法の一つとして、粒子間摩擦を増加させる他に粒子間粘着力の導入が考えられる。これは、セメントや溶液型の薬品を注入した改良土等を対象とした、その強度発現メカニズムとも考えることが出来る。

粒子間粘着力をモデル化し、DEM で解析するにあたって、接触している全粒子間を接触面法線方向・接線方向に

対して bond material で結合することで表現する (図-8)。これまで、既報¹⁰⁾ではボンド強度 F_B 法線方向・接線方向共に同じ強度で検討を行ったが、本論文では新たに方向別の強度 (法線方向: F_{BN} , 接線方向: F_{BS}) を用いて、その影響を調べる。結果の整理に関しては、全ての接点をボンドで結合させた場合のみを示す。ボンドの幅 D_B は D_{\min} とした。

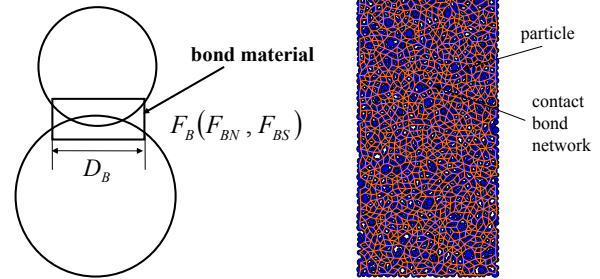


図-8 DEM におけるボンドモデルとボンド結合した供試体

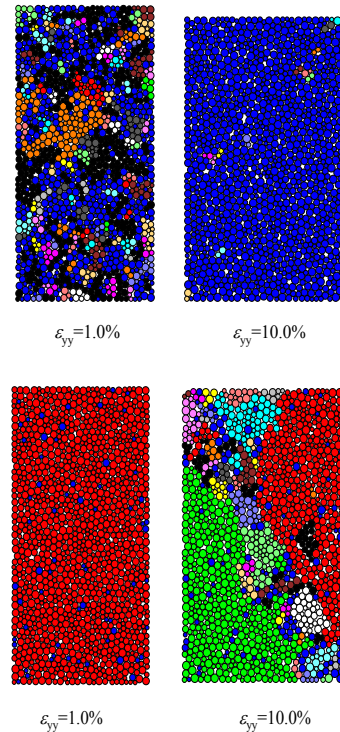


図-9 ボンド結合した供試体内部構造の変化

(ボンド強度: 上段: $F_{BN}=F_{BS}=5 \times 10^2 \text{Pa}$; 下段: $F_{BN}=F_{BS}=5 \times 10^3 \text{Pa}$)

図-9 に、異なるボンド強度の供試体の様子を、 $\varepsilon_{yy}=1.0\%$ 、 $\varepsilon_{yy}=10.0\%$ について示している。接点ボンドが破断せず繋がったままの塊 (クラスター) 毎に色分けしている (青色はボンド接合が全くない状態である)。ボンド接合された粒状体は、変形の過程でブロック状の離散化が発生し、ボンド強度が弱い場合は最終的に殆どの結合が失われて、元の完全にバラバラな粒状体に回帰している。図-10 は、 $F_{BN}=1 \times 10^{10} \text{Pa}$ にし、 $F_{BS}=1 \text{Pa}$ にした場合の載荷直後の供試体の様子を示している。接線方向のボンド強度 F_{BS} が 1Pa の場合のみ、載荷直後に全てのボンド

接合がなくなってしまっていることから、载荷直後の粒子間には接触面に平行なせん断方向の接点変位モードが卓越していることになる。

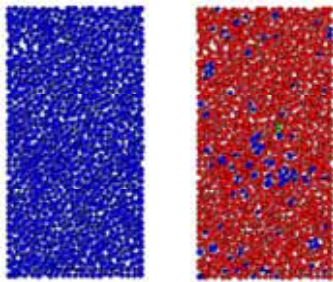


図-10 せん断方向のボンド強度が弱い場合における载荷直後の供試体のボンド破断状況(左: $F_{BS}=1\text{Pa}$, $F_{BN}=1\times 10^{10}\text{Pa}$, 右: $F_{BS}=1\times 10^{10}\text{Pa}$, $F_{BN}=1\text{Pa}$)

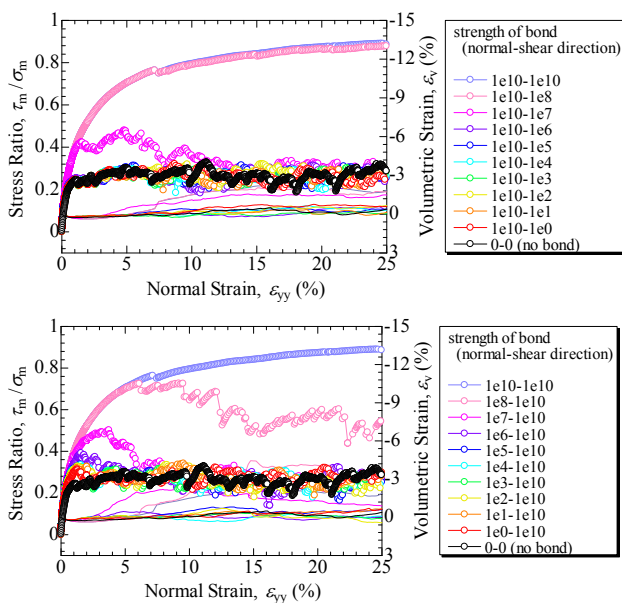


図-11 各方向ボンド強度変化によるマクロ挙動の変化: 凡例中の数字は、 F_{BN} と F_{BS} (上図: 接線方向を変化, 下図: 法線方向を変化)

図-11には、 F_{BN} と F_{BS} のそれぞれについて、一方のボンド強度を $1\times 10^{10}\text{Pa}$ に固定し、もう一方のボンド強度を $1\sim 1\times 10^{10}\text{Pa}$ の間で変化させた際の応力比ひずみ関係を表している。ボンドのせん断強さ F_{BS} を変化させた図-11上では、 F_{BS} が $1\times 10^7\text{Pa}$ を超えたあたりでピーク強度の顕著な増加が表れるが、 F_{BS} が $1\times 10^8\sim 10^{10}\text{Pa}$ ではほとんど変化しない。

一方、 $F_{BS}=1\times 10^{10}\text{Pa}$ に固定し、ボンド引張り強さ F_{BN} を変化させた図-11下では、例え F_{BN} の低い値からでもピーク強度の増加がみられるとともに、破壊後の強度低下が緩やかであり、ねばりの効果が確認された。以上の様な傾向は他の研究者^{13), 14)}によっても指摘されており、本結果は他の解析結果によっても支持されていることになる。

ボンド強度が方向別に発揮するメカニズムが異なるため、方向別のボンド強度とピーク強度の関係を

再整理したものを図-12に、方向別ボンド強度と残留強度の関係を図-13に示す。法線方向の強度が $1\times 10^8\text{Pa}$ の場合はピーク応力比が0.7程度となっている。接線方向のボンド強度が $1\times 10^{10}\text{Pa}$ の場合、法線方向のボンド強度を $1\times 10^{10}\text{Pa}$ へと変化させた場合、応力比は0.9まで上昇している。一方、 F_{BN} の値を固定して見てみると、 F_{BS} を大きくしても強度は変化しないことが図から読み取れる

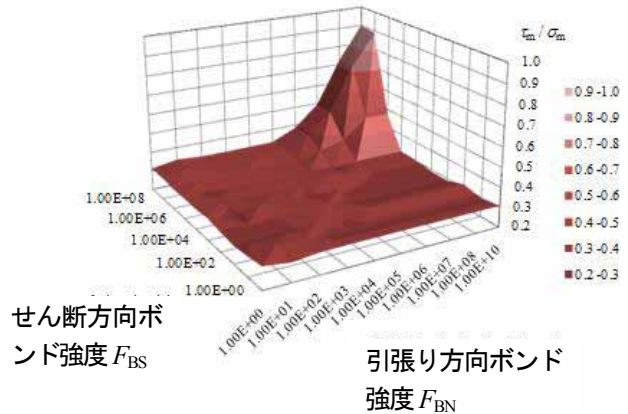


図-12 各方向ボンド強度 (F_{BN} と F_{BS}) とピーク残留強度の関係

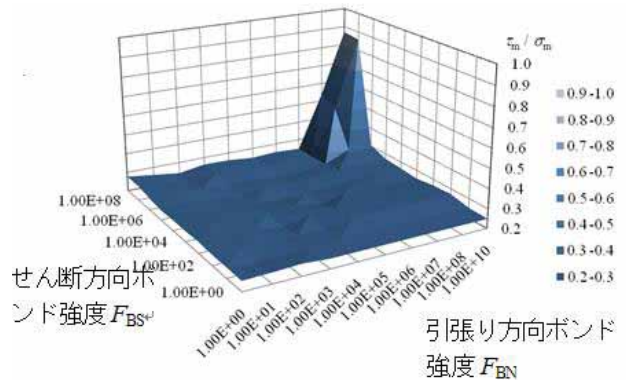


図-13 各方向ボンド強度 (F_{BN} と F_{BS}) と残留強度の関係

図-13の残留強度の結果でも同様のことが言え、ピーク強度と残留強度の増加に寄与しているのは法線方向の強度、つまり引張強度であると言える。よって、粒状集合体の内部では、ピーク強度以降は引張のモードが卓越しており、粒子間の引張強度によって供試体全体の強度が決まると言える。しかし、引張強度が発揮される状態になるには、接線方向のボンド強度、つまりせん断強度が必要である。

以上のことから、粒状体をボンドを用いて強くすることを考えると、载荷の初期段階では、粒子間の滑りといった接触面に平行なせん断方向の強度の補強が重要である。一方、ピーク強度の増加や破壊後の残留強度までの強度低下の抑制には、粒子間の引張強度の補強が効率的であると言える。このようなメカニズムをク強度が発現し、ピーク強度以降はせん断から引張のモードへと変化するため、それに耐えうる引張強度を持つ場合に残留強度の低下が抑制されると言える。

3. ファイバー混合土の変形・破壊挙動の解析

3.1 ファイバー混合土のモデル化及び解析条件

本論文では、ファイバー混合土の母材部分は、2章と同様のモデルおよび基本解析パラメータを用いた。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-14)。接点がヒンジとして働くよう設定しフレキシブルな材料を再現し、かつ、破断しないように十分なボンド強度を設定した。解析においては、ファイバーの直径 d の最大粒径 D_{max} に対する比 d / D_{max} を第1章で紹介した実験値と同一とした。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-3に示す通りである。

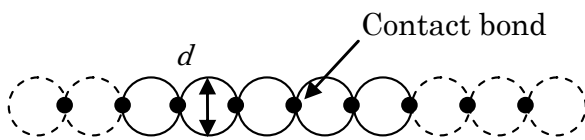


図-14 DEMによるファイバーのモデル化

表-3 解析に用いたファイバー粒子特性値

Parameter(fibre)	Unit	Value
Density ρ_f	(t/m ³)	0.91
Diameter d	(mm)	10($d / D_{max} = 0.1$)
Fundamental length l_0	(mm)	1500
Aspect ratio λ	--	150 (l_0/d)

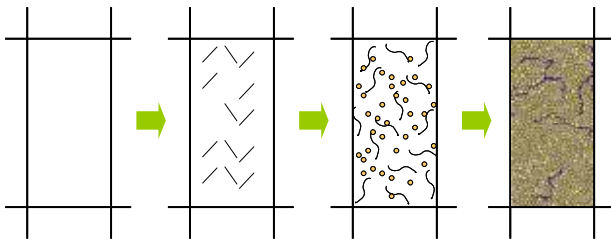


図-15 ファイバーの混合体の作成方法

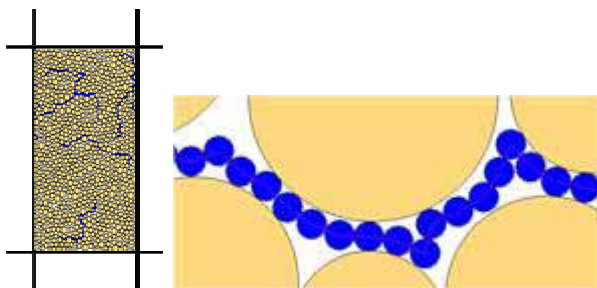


図-16 ファイバー混合模擬試料の一部

供試体の作成の様子を図-15に、作成された供試体の一部を図-16に示す。黄色の円は土粒子を、青い円

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、まずファイバーを作成し、粒状体からなる母材部分の粒子をそれぞれ発生させて供試体を作成する。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。供試体は、等方圧縮後、平均主応力一定のもと、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 $\sigma_m=50\text{kPa}$)に調整した($e_{max}=0.27, e_{min}=0.21$)。

3.2 ファイバーの特性のマクロ挙動に及ぼす影響

ファイバー混合土において、混合率、長さ、配向、剛性、母材との摩擦、ボンド強度との相互作用を特性として考え検討した。混合率はファイバー全質量の母材質量に対する質量比で表した。配向に関しては、水平配置(Horizontal)、鉛直配置(Vertical)、ランダム配置(Random)の3つを考えた。実際の施工例を踏まえ、通常配向をランダム配向とし、各ケースにつきファイバーを構成する粒子の接触面の法線方向の頻度分布がランダムであることを確認している。本論文では、ファイバー混合率以外の影響に関する検討においては、混合率0.8%の場合についてのみ示すこととする。

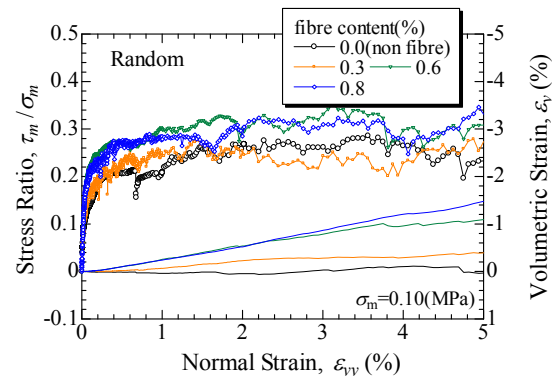


図-17 マクロ挙動に及ぼす混合率の影響

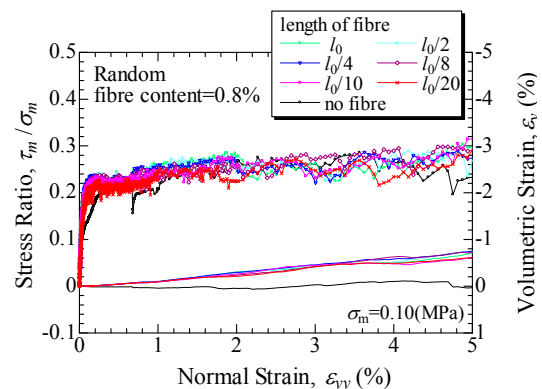


図-18 マクロ挙動に及ぼす長さの影響

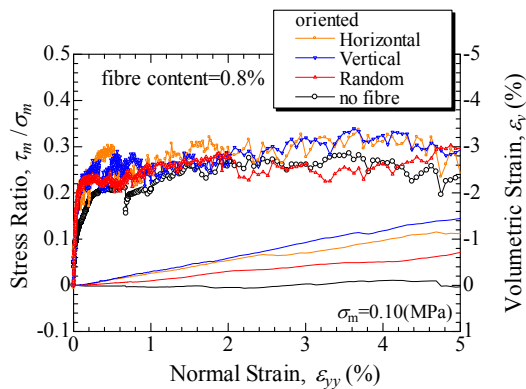


図-19 マクロ挙動に及ぼす配向の影響

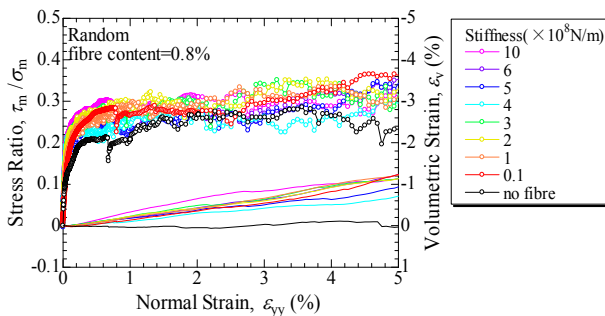


図-20 マクロ挙動に及ぼす軸剛性の影響

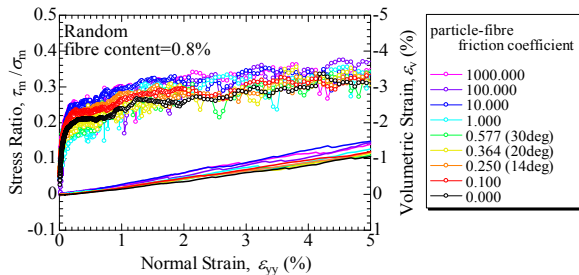


図-21 マクロ挙動に及ぼすファイバーと母材間の摩擦の影響

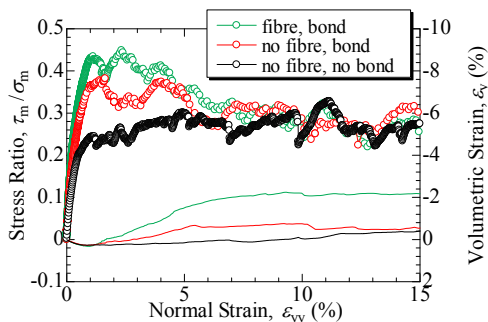


図-22 マクロ挙動に及ぼすファイバー混入とボンド導入の影響

図-17～図-22 より、ファイバーを混合させることによるマクロ挙動への効果は、実験同様にピーク強度と正のダイランシー特性を高めることであると言える。その他の特性に関しては、それぞれの変化量の増加に伴って若干の強度増加等を確認することが出来る。しかし、これらはファイバー混合率を0.8%で行った結果であり、最も影響が出やすい状態

での結果であるため、図-17と比較することで補強効果に最も影響を与えるのは混入率であると考えられる。特に、図-19に示すように、供試体内にファイバーの配向を変化させた場合、水平配置した場合がピーク強度が最も高い。水平配置を行うと、引張り力を持ちながら、せん断帯の発生を妨げるためと考えられる。ファイバーと母材間の摩擦係数を変化させた際のマクロな応力ひずみ挙動変化からは(図-21)、摩擦係数が大きくなることで、強度増加を見込むことが出来るが、 $\tan\phi_i=0.25\sim 0.577$ まででは逆に初期剛性の低下を引き起こしている。これは、二次元解析であることから、摩擦係数があまり高くない条件ではファイバーが潜在亀裂のような振る舞いをし、すべりを誘発するためと考えられる。

4. ファイバー混合土内の粒子回転挙動とマクロ挙動

4.1 粒子回転・並進速度に着目した内部構造変化

2 粒子間接点のせん断方向(接触面に平行)の速度 δ_s は、図-23, 24 に示すように2粒子の並進速度差 δ_s^u と回転速度差 δ_s^o とから成る ($\delta_s = \delta_s^u + \delta_s^o$)。並進速度差による接点速度 δ_s^u は隣接する粒子 1,2 のせん断方向の並進速度をそれぞれ v_1, v_2 とすると、 $\delta_s^u = v_1 - v_2$ となる。また、粒子回転による接点速度 δ_s^o は隣接する粒子 1,2 の半径および回転をそれぞれ r_1, r_2 および ω_1, ω_2 とすると、 $\delta_s^o = r_1\omega_1 + r_2\omega_2$ となる。滑っていない接点では δ_s^o に応じたせん断力(接触力のせん断成分)が増加し、マクロな強度に貢献することになる。

一方で、図-24の黒と赤の矢印(それぞれ、 δ_s^u と δ_s^o) のように、 $\delta_s = \delta_s^u + \delta_s^o = 0$ の関係にある場合には、せん断力が増加することなく、粒子の回転によって大きな変位が生じる不安定な状態といえる。このモードは、例えば、 $\delta_s^u = 0$ の時に、 $\delta_s^o = r_1\omega_1 + r_2\omega_2 = 0$ といった隣接する粒子が反対方向に回転する場合に発生し易くなる。したがって、粒状体では、粒子の並進と回転の両方の運動を観察する必要がある。

そこで、まず、供試体内の粒子の運動を詳細に調べるために、図-25, 図-26 にそれぞれ粒子回転速度分布、粒子の並進運動速度ベクトル分布をファイバー無しと有り(混合率0.6%)の場合を比較している。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、その場合には接点力のせん断成分の増加なく運動することも可能である。実際に、図-25 左(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連なって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-25 右)ではそれぞれの色の粒子の連なりがかたまっている。これは、円形粒子個々には回転抵抗をもつことはないが、ファイバーの存在によって粒子群として拘束され、応力鎖もあたかも梁部材の様に挙動している可能性を示唆している。また、

図-26 において、ファイバー無しの場合は供試体中心から遠い箇所ほど大きな速度を示し、対照的な分布をした一様な変形をしている (図-26(a))。ファイバーが混合されると (図-26(b))、並進速度ベクトルが不均質となり、供試体内で幾つかのブロックに分かれて動き、拘束領域が発生したと考えられる。

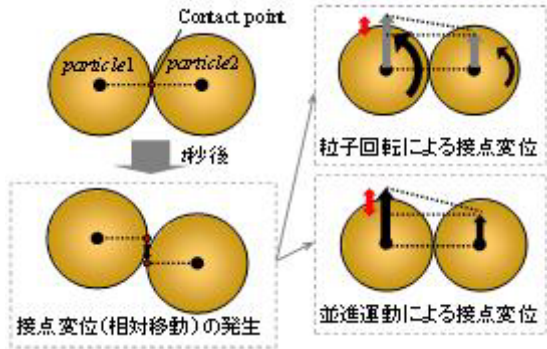


図-23 せん断方向の接点変位と粒子運動：並進運動と回転運動

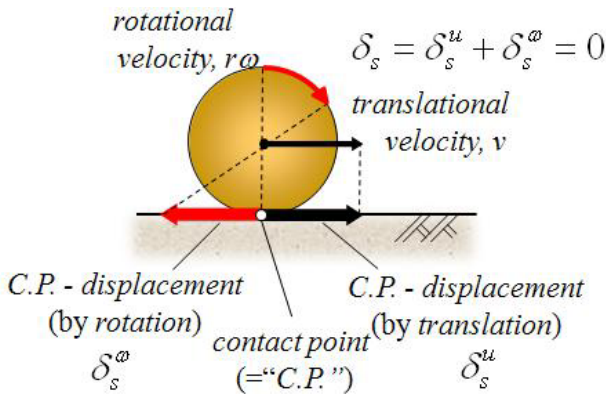


図-24 せん断力力の増加を伴わない (接点の相対速度の無い) 粒子の運動モード

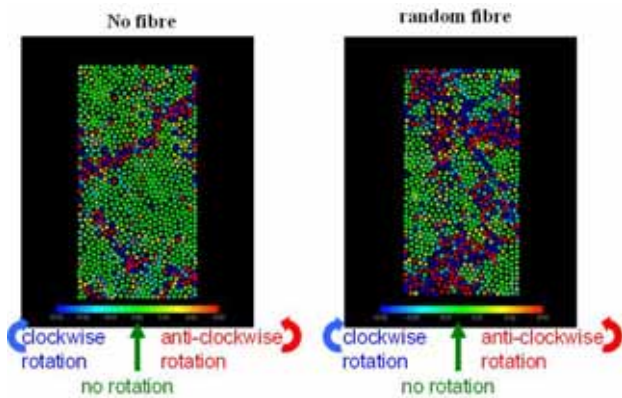


図-25 $\epsilon_{yy}=0.7\%$ における粒子回転速度分布 (左：フ

ファイバー無し, 右：ファイバー混合率 0.6%)

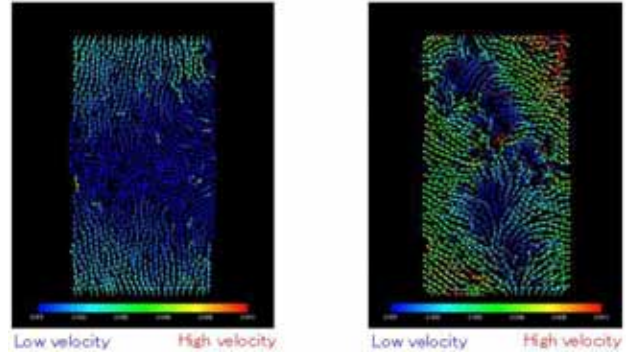


図-26 $\epsilon_{yy}=0.7\%$ における粒子並進速度分布 (左：ファイバーなし, 右：ファイバー混合率 0.6%)

4.2 接点における回転・並進速度差に着目した考察

供試体内の全接点について、その接点で生じている回転速度差 $\delta_s^\omega = r_1\omega_1 + r_2\omega_2$ と並進速度差 $\delta_s^u = v_1 - v_2$ の関係を、ひずみが $\epsilon_{yy}=0.01\%, 2.0\%, 25.0\%$ の場合について調べたものが、図-27 (ファイバー無し), 図-28 (ファイバー有り) である。黒色の点は供試体内全接点のうち、力を伝えている接点全てについて示しており、その中でも平均接触力以上の力を伝えている接点を赤色の点で表している。図中の右下がりの破線は、 $\delta_s = \delta_s^u + \delta_s^\omega = 0$ の関係を示しており、粒子接点でせん断力の増加ゼロのまま大きな変形をもたらす不安定状態を示す。一方、同線から垂直方向に離れれば離れるほど $|\delta_s|$ は大きくなり、せん断力の増加を伴う変形であるため、比較的小さな変位で釣合い状態に達することが期待できる接触状態と考えられる。マクロなせん断が進行した段階では、粒状体の内部構造の構造力学的安定性を示す配位数が低下するため、図で示されるような各接点の安定性がより重要なものとなる、と考えられる。

図-27 と図-28 の両ケースとも、右下がり 45 度線付近に分布が集中し、マクロなせん断が進行しひずみが大きくなるほど明確になる。また、ファイバーなしの場合においてはその傾向が顕著である。せん断初期においては、接点変位が $\delta_s^u = v_1 - v_2$ でなく $\delta_s^\omega = r_1\omega_1 + r_2\omega_2$ による粒子スピンの起因しているようである。図-28 のファイバー有りの場合は、分布の位置は 45 度線付近 ($\delta_s=0$) でありながらも周辺に広く分布していることから ($|\delta_s| > 0$)、マクロな作用を支える接触構造が多く存在すると考えることができる。粒子を切れないボンドで繋いでいるファイバーが引張材として機能した際には、せん断力の増加ゼロの不安定の変形を抑制していると言え、これがマクロな強度増加に寄与していると考えられる。

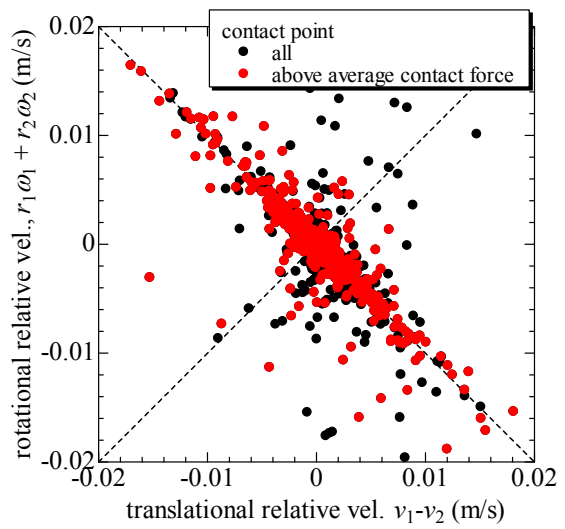
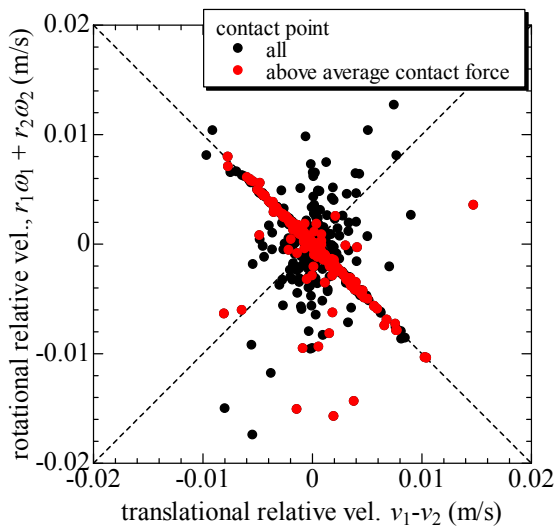
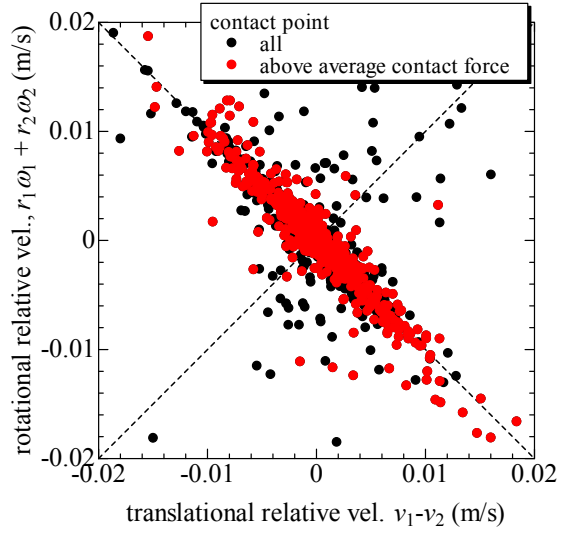
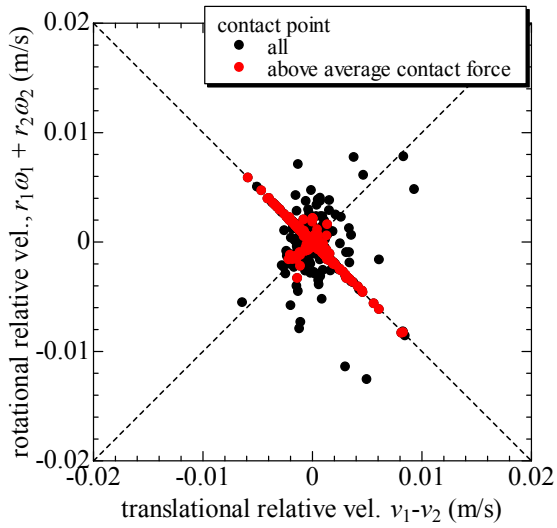
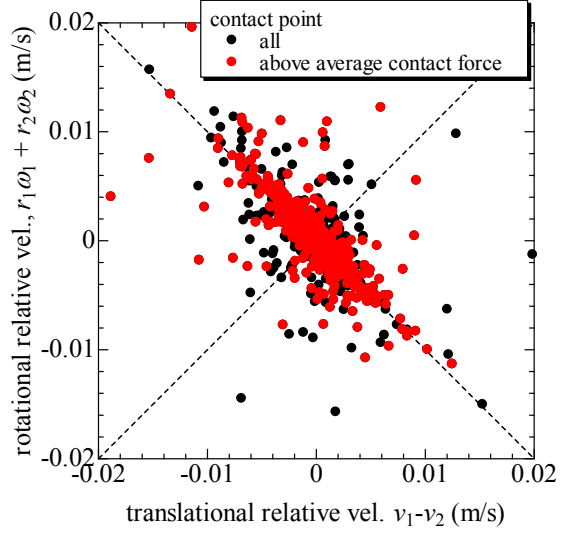
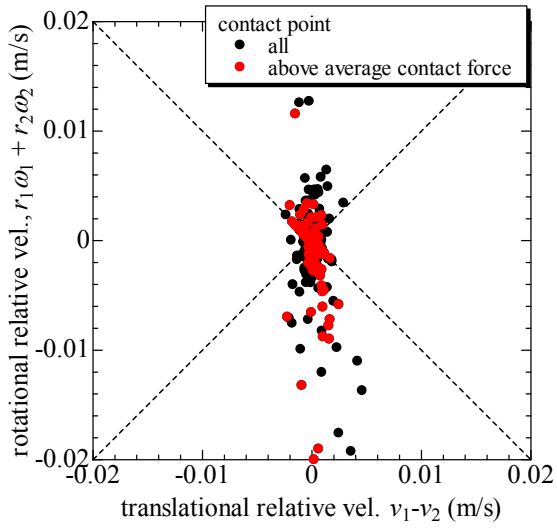


図27 粒状体（ファイバー無し）の接点における回転・並進速度差量の経時変化（上から $\varepsilon_{yy}=0.01\%, 2.0\%, 25.0\%$ ）

図28 ファイバー混合土の接点における回転・並進速度差の経時変化（上から $\varepsilon_{yy}=0.01\%, 2.0\%, 25.0\%$ ）

4.3 接点における回転・並進速度差の空間分布

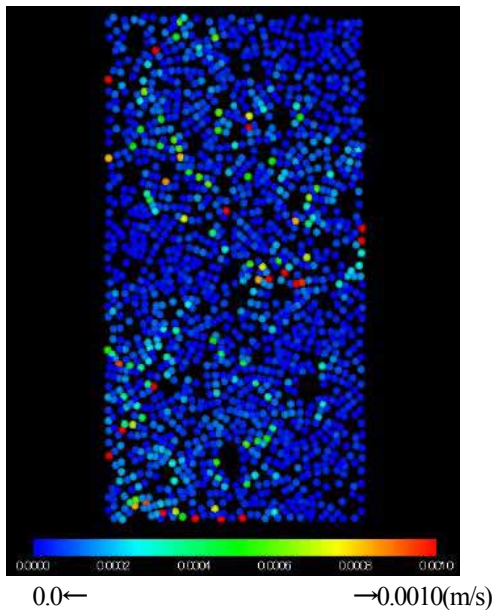


図-29 ファイバー無し供試体の全接点における回転・並進速度差の空間分布 ($\epsilon_{yy}=2.0\%$)

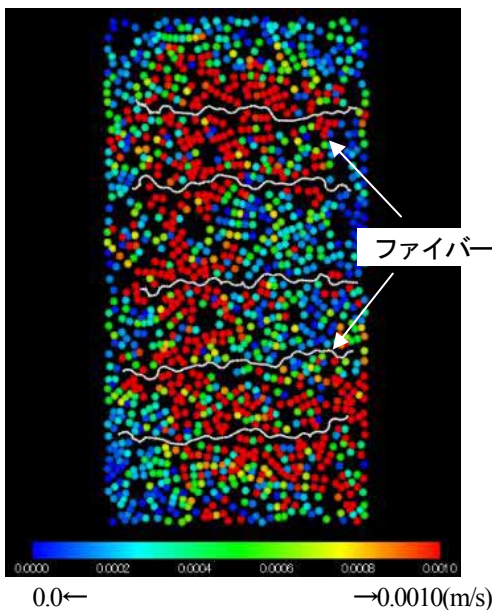


図-30 ファイバー有り供試体の全接点における回転・並進速度差の空間分布 ($\epsilon_{yy}=2.0\%$)

図-29 と図-30 には、図-27 と図-28 について右下がり 45 度線からの距離の絶対値 $|\delta_s|$ を空間分布で示したものである。図中の赤い丸は 45 度線から離れたせん断力の働く、動き難く比較的安定した粒子接点を示している。両図を比べると、ファイバー周辺に赤いプロットが多いことが分かる。つまり、ファイバーは周辺の粒子接点の相対変位を拘束することで、補強効果を発揮していると考えられる。

5. おわりに

二次元個別要素法を用いて、ファイバーを混合した粒状体の強度発現メカニズムについて、ファイバー混合による粒子回転挙動に変化に基づいて考察した。

従来は、ファイバー混入の効果を粘着力の増加として捉えていたが、解析においてボンド要素を導入した結果、強度増加は見られるものの実験結果に見られるような正のダイレイタンシーの増加を伴うことを説明できないことが分かった。また、せん断初期では、接触面に平行なせん断方向のボンド強度がある程度の値を確保しない場合には、ボンド強度を増加させてもピーク強度は高くない。一方で、せん断方向のボンド強度がある程度の値を確保した場合には、法線方向のボンド強度を増加させることでピーク強度は顕著に高くなり、ピーク後の強度低下も少ないことが確認された。粒子間の引っ張り抵抗は破壊時・破壊後に特に大きな影響を持つことが明らかになった。

ファイバーについて、その混合率、長さ、配向、剛性、周辺粒子との摩擦が混合土のマクロ挙動への影響を解析した。その結果、実験結果と解析結果の定性的な類似性を確認することができた。本論文の結果の中では、混合率が最も影響するようであった。一方、ファイバー無しの粒状体では、強度発現時に、接する二粒子の回転は互いに逆回転し、粒子回転による接点変位増分と粒子並進運動による接点変位増分が同じ大きさで逆方向という「せん断力増分がゼロ」という不安定な変形モード（釣合い状態を満たすには大きな変形を伴うと考えられるモード）を示すことが分かった。マクロなせん断が進行するほど、平均接触力以上の接触力を持つ接点ほど、上記の不安定モードが顕著に出現することが分かった。一方、ファイバーの混入によって、その不安定な変形モードの発現が抑えられ、マクロな変形に対して抵抗できる接触構造が増加することが分かった（概略図は図-31 のようになる）。

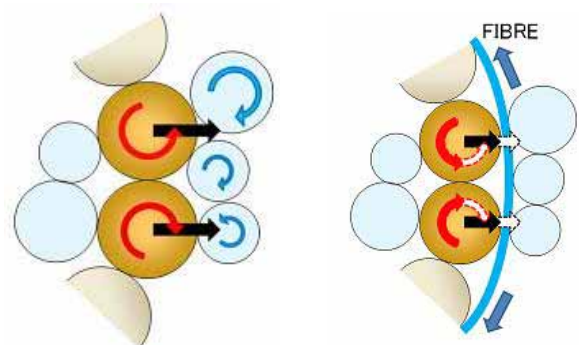


図-31 ファイバーによる補強メカニズム
(左：ファイバー無し，右：ファイバーによる補強)

今後は、応力鎖の発展・消滅過程の詳細、変形メカニズムの解明、それらに及ぼすファイバーの影響などについて、三次元 DEM 解析も含めを進めることで、マイクロメカニクスに着目した物理モデルの構築が必要と考える。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書-短繊維混合補強土工法マニュアル,1997.
- 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-Refaei, 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) 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) 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論文集，地盤工学会, pp.17-22, 2008.
- 10)山口智世・前田健一・松本 崇・E. Ibraim: ファイバーによる粒状体の補強効果に関する2次元DEM解析，土木学会応用力学論文集, Vol.12, pp.497-506, 2009.
- 11)Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulation Progressive, Large Scale Movement in Blocky rock system, *Symp. ISRM*, Vol.2, pp. 129-136, 1972.
- 12)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.
- 13)Cheng, Y.P., Nakata, Y.& Bolton, M. D.: Distinct element simulation of crushable soil, *Geotechnique*, Vol.53, No. 7, 633-641, 2003.
- 14)Nakata, Y., Hyodo, M. & Murata, H.: DEM loading simulation of a crushable grain sediment, *Proc. of Int. Sym. on Geomechanics and Geotechnics of Particulate media*, pp.261-266, 2006.

(2010年3月9日受付)