

## 粒子回転に着目した短繊維補強土の強度発現メカニズム

### Reinforcement mechanism of fiber mixed soil with account for particle rotation

堀智之 (名工大) 山口智世 (名工大) 前田健一 (名工大)

Tomoyuki HORI, Tomoyo YAMAGUCHI, Kenichi MAEDA (Nagoya Institute of Technology)

FAX: 052-735-5497, E-mail: maeda.kenichi@nitech.ac.jp

The method of construction with soil reinforced with flexible fibres is easy and inexpensive. It is necessary to understand the interaction between the soil particles and fibers in micro scale. The particle rotation is focused, based on the results of two dimensional DEM biaxial compression simulations. It could be thought that the mixed fibres control the relation between particulate rotation and parallel movement with relative point of contact displacement: especially, zero shear increment mode in micro deformation. Fibres mixed, improve the shearing strength between particles, and they mobilized particulate structures that support particle structures propagate stress.

#### 1. 研究背景と目的

短繊維補強土工法は、曲げ剛性を持たない短繊維で地盤を補強する工法である<sup>1)</sup>。施工が容易で安価な上、適用範囲が広く、今後の研究・開発が期待されている。

本工法では、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、これだけでは説明できない現象も確認されており、本質的なメカニズムは未だに明らかになっていない。したがって、ミクロな視点から土粒子と短繊維との相互関係を理論的に理解することが必要である。本論文では、2次元個別要素法(DEM)を用いて、短繊維混合土の二軸圧縮試験解析を行い変形・破壊挙動を観察した結果を報告するとともに、短繊維混合土マトリックス粒子の相対的な回転・並進速度に着目した強度発現メカニズムを提案する。

#### 2. DEMを用いた短繊維混合土の二軸圧縮試験

DEMを用いて短繊維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。短繊維は、直径 $d$ の円形粒子をバンドで繋いで表現した(Fig.1)。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。短繊維の直径は、要素試験に基づき、砂の最大粒径と短繊維の直径の比 $d/D_{max}$ 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)は円形で表現し、粒度分布は粒径が50mmから100mmの間で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既報<sup>2)</sup>に詳しい。

##### 2.1 マクロ挙動

Fig.2は、混合率を0.8%として、短繊維の配向のみを変化させたときの応力-ひずみ関係の変化を表している。水平配置した場合が発揮されるピーク強度が最も高い。これは水平配置を行うと、引張り力を持ちながら、発生するせん断帯にかかる本数が多くなりやすいためと考えられる。他の特性がせん断挙動に与える影響に関しては既報<sup>2)</sup>に詳しい。

##### 2.2 ミクロ挙動

Fig.3は、軸ひずみが0.7%のときの短繊維なしの供試体(左図)と短繊維あり(剛性:  $4 \times 10^8 \text{ N/m}$ , 摩擦係数: 0.25)の供試体(右図)の内の回転している粒子の分布を表している。円形粒子の場合には回転抵抗が発生しないため、隣り合う要素はお互いに反対方向へ回転し、せん断の接点力を増加することなく運動可能である。短繊維を混合した供試体では回転する粒子が増えており、



Fig.1 Modeling of fibre (DEM)

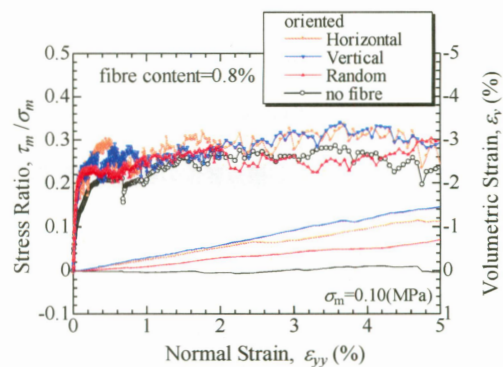


Fig.2 Macro deformation-failure behavior with a variation of fibre directions

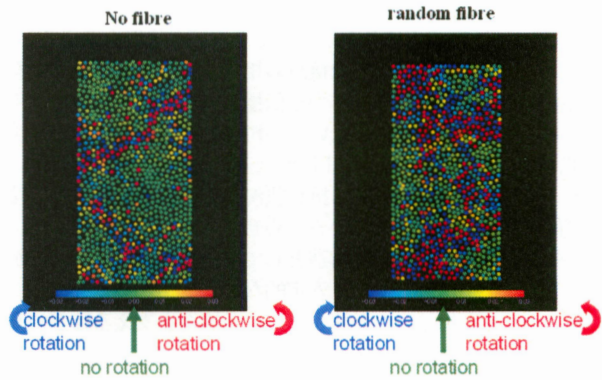


Fig.3 Distribution of rotational velocity of particles ( $\epsilon_{yy} = 0.7\%$ )

短繊維混合が供試体内の粒子回転に影響を与えていることがわかる。そこで、2粒子間での粒子回転と並進運動の速度差に着目することで接点の相対変位を考え、短繊維補強土の補強メカニズムの考察を行った。

#### 3. 接点における回転・並進速度差に着目した考察

本項では、短繊維を水平配向の条件で0.6%混合したものと短繊維なしの場合で比較を行った。

### 3.1 接点変位と粒子運動

2粒子間の接点の相対的な変位は、2粒子の回転速度差と並進速度差から構成される。簡単化のために粒子と固定された平面間の接点について回転速度差と並進速度差の関係を図示したものが Fig.4(左)である。粒子回転を時計回り正として薄い矢印、並進運動を進行方向正として濃い矢印で示している。また、それぞれの要因によって発生しうる変位を、接点を起点とする矢印によって各々示している。接点を起点とする2つのベクトルが釣り合う時、この接点は相対変位を生じない。これは、接点で発生している回転速度差と並進速度差の値が等しく、それぞれの作用する方向が180度異なることから接点変位速度が相殺され、接点変位することなく各運動をしていることを表している (Fig.4(右))。言い換えれば、回転速度差と並進速度差が相殺しないような接点においては接点変位が発生していることになる。

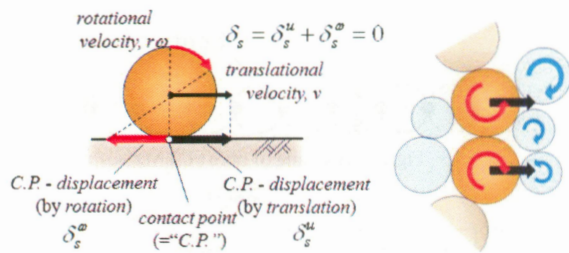


Fig.4 Deformation mode without relative contact point displacement

### 3.2 短繊維混合の有無による接点変位の空間分布変化

供試体内の接点変位を表したものが Fig.5, Fig.6 の上段である。グラフにおいて、プロットされた点は供試体内全接点のうち、力を伝えている接点を表しており、その中でも平均以上の力を伝えている接点を薄い色の点で表している。また、Fig.5, Fig.6 の下段では、グラフ上における右下がりの斜め45度線とプロットされた点の距離を空間上にプロットし、供試体内の分布を示した。色が濃い点ほどその距離が大きくなるものを表す。

グラフを比較すると短繊維ありの場合は短繊維なしの場合に比べて右下がりの斜め45度線から離れた点が多い。ここで右下がりの斜め45度線上に分布している点の接点状況を考えると、これは3.1節で述べたような接点の相対変位を伴わない運動を表している。この状態を、応力を伝播している粒子構造に適用して考えると、接点変位がないため粒子間にせん断応力が発生せず、抵抗力を発揮しないまま崩壊に至ることになる。反対に、同線から離れて分布している接点状況を含む粒子構造では、接点変位を伴う運動が生じているためせん断力が発生し、これにより強度を発揮するため、構造として安定傾向となる。したがって、短繊維ありの場合では、安定的な粒子構造が多く存在し、これらがせん断抵抗力を発揮しない粒子構造を支えることで高い強度を発揮したと考えられる。

Fig.7は $\epsilon_{yy}=2\%$ 時の応力鎖(上段)と接点変位(下段)の情報を比較したものである。上図では太い線ほど大きな応力の伝達を表している。また、下図では回転速度差と並進運動差がなかった接点上に十字印をプロットした。短繊維なしでは十字印が密集した塊状の部分などに大きな力が伝達されているのに対し、短繊維ありでは応力鎖1本あたりの太さは細く、せん断抵抗力を発揮しうる粒子群が力の伝達を分散して受け持っていることがわかる。後者の方が応力鎖がより密に存在することから、せん断に伴う応力伝達の変化が緩やかに行われるため、構造全体として安定した状態であると考えられる。

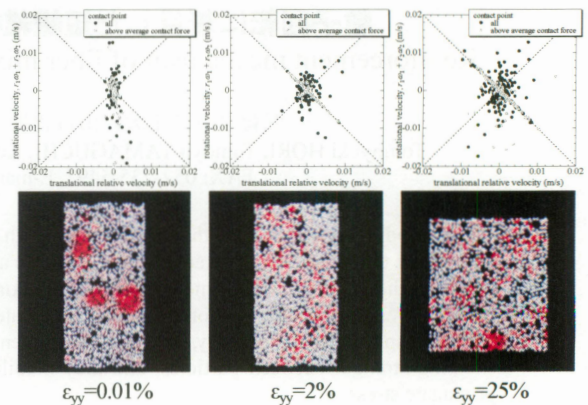


Fig.5 Distribution of relative contact point displacement (no fibre)

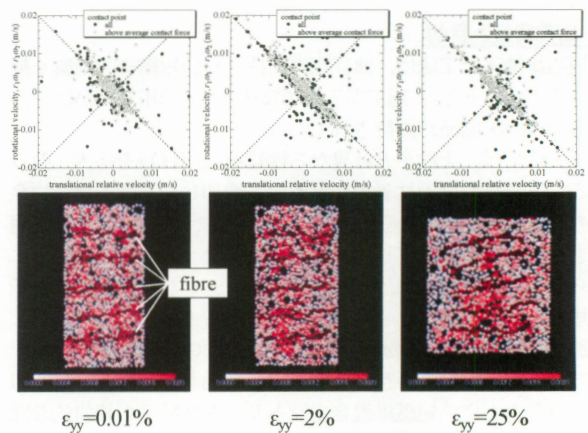


Fig.6 Distribution of relative contact point displacement (fibre content: 0.6%)

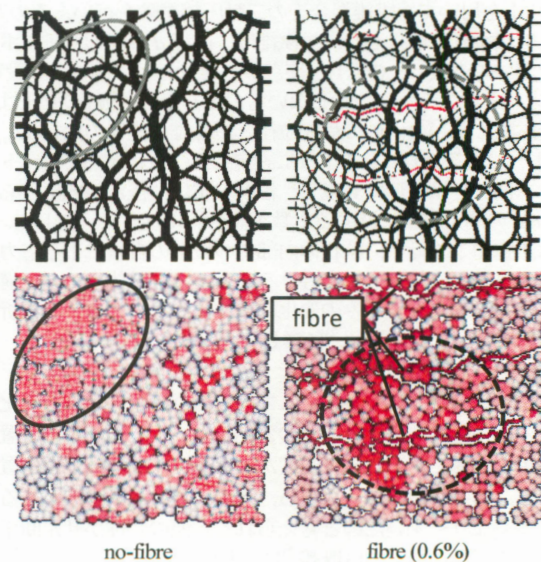


Fig.7 Relationship of stress chain relative contact point disp.

### 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) 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メカニクス」発表論文集, pp.17-22, 2008.