

粒子回転に着目したファイバー混合土の補強メカニズム

DEM Fibre 粒子回転

名古屋工業大学 学生会員 ○山口 智世
名古屋工業大学 国際会員 前田 健一
ブリストル大学 E. Ibraim

1. 研究背景と目的

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である¹⁾。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。

ファイバーをはじめとする補強土工法では、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ず、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から挙動を観察し、土粒子とファイバーとの相互関係を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、ファイバー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、ファイバー混合土マトリクス粒子の回転変位速度に着目した強度発現メカニズムを提案する。

2. DEMを用いたファイバー混合土の二軸圧縮試験

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。本稿では、ファイバーの剛性、ファイバー粒子間の摩擦係数がせん断時の応力比-ひずみ関係(マクロ挙動)、ファイバーの平均張力(ミクロ挙動)について報告する。解析手法と解析に用いたパラメータ、ファイバーの長さ、配向、混合量がせん断挙動に与える影響²⁾に詳しい。

2.1 マクロ挙動

図-1は剛性の増加に伴う応力比-ひずみ関係の変化を表している。実際の施工においては剛性が $4 \times 10^8 \text{ N/m}$ 程度のファイバーが用いられている。これを基準とすると、剛性が増加、減少どちらの場合においても強度が増加していた。しかし、剛性が増加するとファイバー特有のフレキシブルさが失われることから剛性増加時は異なったメカニズムで補強されていると考えられる。図-2は、ファイバー粒子間の摩擦係数の上昇に伴う応力比-ひずみ関係の変化を表している。摩擦係数の上昇に伴って強度も増加しており、体積ひずみ量も増加傾向にあるようである。しかし、摩擦係数と比例して強度や体積ひずみ量が大幅に増加するわけではなく、微増程度にとどまっている。

2.2 ミクロ挙動

図-3は剛性増加時のファイバー内に生じている張力のせん断過程における変化を表している。剛性が高い場合、高い平均張力が観察されるものの、大幅な強度発現には至っていない。

図-4はファイバー粒子間の摩擦係数上昇時のファイバー内

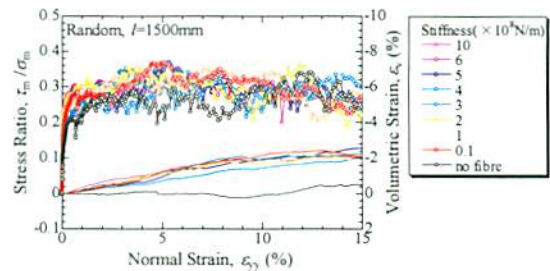


図-1 剛性の増加がせん断強度に与える影響

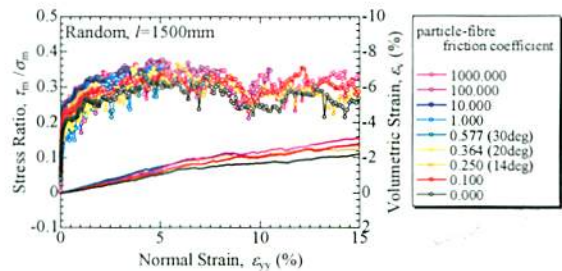


図-2 摩擦係数の上昇がせん断強度に与える影響

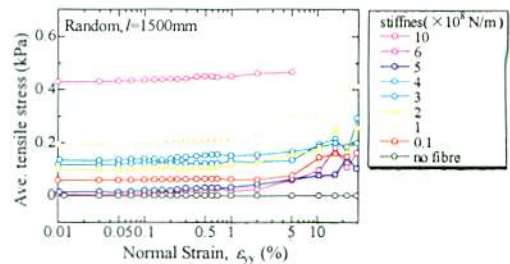


図-3 せん断過程の進行に伴う張力の変化(剛性)

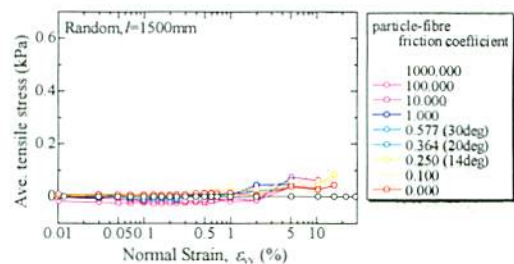


図-4 せん断過程の進行に伴う張力の変化(摩擦係数)

に生じている張力のせん断過程における変化を表している。摩擦係数が高くなるほど初期ひずみ時で平均張力は減少し、負(圧縮力)に転向している。しかしせん断の進行に伴って張力が発揮され、最終的には引張応力によって供試体が補強されている。

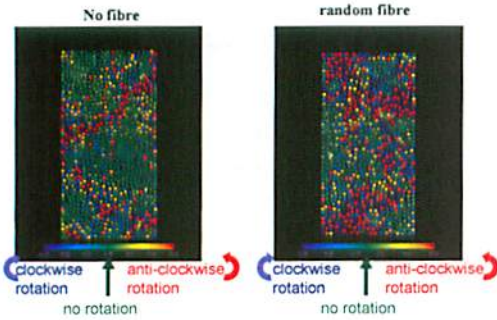


図-5 粒子回転速度分布($\epsilon_{yy}=0.7\%$)

図-5は、軸ひずみが0.7%のときのファイバーなしの供試体(左図)とファイバーあり(剛性: $4 \times 10^6 \text{ N/m}$, 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。ファイバーを混合した供試体では回転する粒子が増えていることから、粒子回転変位速度に着目してファイバー補強土の補強メカニズム考察を行った。

3. 粒子回転に着目した強度発現メカニズムの考察

2粒子間の接点の相対的な変位はせん断抵抗力の発生を意味し、2粒子の回転速度差と並進速度差から構成されている。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と並進速度差の関係を調べたものが図-6である。色の濃い点は、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。どちらの場合も右下がり45度線付近に分布が集中しており、ファイバーなしの場合、その傾向が顕著である。ここで、右下がり45度線上に分布している点の接点状況を考えると、接点で発生している回転速度差と並進速度差の値は等しいが、それぞれが作用する方向が180度異なることから接点変位速度は相殺され、接点変位することなく各運動をしていることになる(図-7)。この状態を、応力を伝達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、抵抗力を發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、それによって粒子構造の強度が増加することで構造として安定傾向となる。(b)図のファイバーありの場合では、分布の位置は45度線付近でありながらも周辺に広く分布していることから、せん断抵抗力が發揮されない粒子構造を支える役目を果たす安定な粒子構造が多く存在していると考えられる。

図-8は図-7をせん断過程ごとに表したものである。ファイバーなしの場合(a)図に着目すると、載荷直後の $\epsilon_{yy}=0.01\%$ では、ほとんどの点が中央に分布しているが、せん断過程が進行するにつれ45度線付近に分布し始め、終局状態の $\epsilon_{yy}=25\%$ では同線上に広く分布している様子が観察できる。一方、ファイバーありの場合(b)図では、同線付近に幅広く分布しているものの、せん断過程に伴う大きな変化はない。このことから、ファイバーなしの場合では、せん断過程の進行に伴って不安定状態の応力伝達粒子構造が多数発生するがそれらを支える粒子構造が存在しない

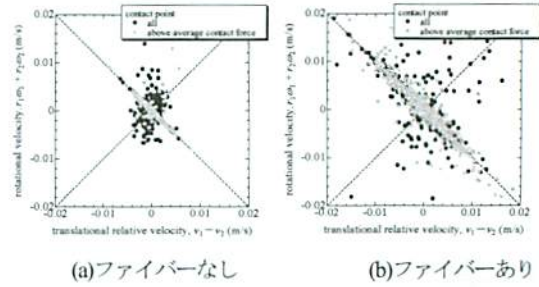


図-6 接点における回転・並進速度差の関係($\epsilon_{yy}=2\%$)

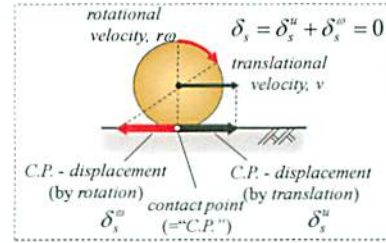


図-7 接点変位を伴わない粒子運動

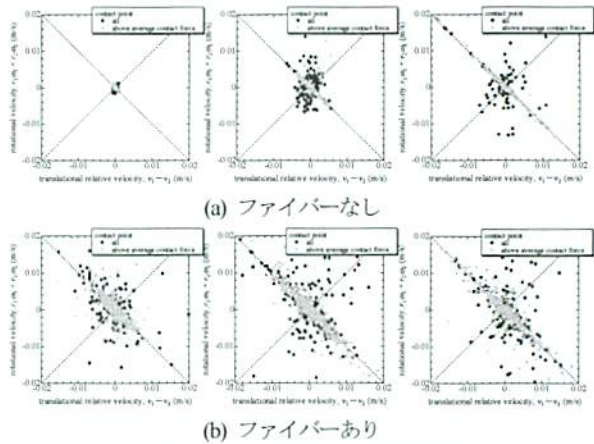


図-8 接点における回転・並進速度差の関係 ($\epsilon_{yy} = 0.01\%, 2\%, 25\%$)

め、粒子構造が簡単に崩壊してしまい終局状態に至ると考えられる。一方、ファイバーありの場合では、不安定状態の粒子構造は同様に多数存在しているが、その構造を支える粒子構造も多く存在しているため応力伝達経路が劣化せず、これがマクロな強度増加につながっているのではないかと考えられる。よって、粒子回転に着目したファイバーの補強メカニズムは、ファイバーを混合することで接点変位を伴わない粒子の回転、並進運動を抑制し粒子間にせん断力を発生させることで、応力を伝達している粒子構造を支える役目の粒子構造を生じさせているものと考えられる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所材料施工部土質研究室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利用技術マニュアル—,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.