

粒状要素解析による短繊維混合土の強度に対する最適混合率発現メカニズムの考察

八戸工業大学大学院 学生会員 ○野添 重晃
 八戸工業大学 学生会員 木村 孝一
 八戸工業大学 正会員 橋詰 豊・金子 賢治

1. はじめに

短繊維を地盤材料に混合することで、地盤材料の強度特性・洗掘特性・靱性等を改善する短繊維補強土工法という工法がある¹⁾。地盤材料に、長さ数mm～数cmの引張り抵抗を有するPEやPPなどのファイバー（短繊維）を混合させる工法である。これまでに著者らは、短繊維補強土の補強効果と短繊維混合率の関係に着目した研究²⁾や短繊維の混合率と粒径に着目した研究³⁾について三軸圧縮試験を行い実験的に検討してきた、これらの結果から、短繊維の混合率を増加させていくとせん断強度に対する強度が単調に増加するわけではなく、ある一定の混合率を超えると強度が低下することがわかっている。せん断強度の最大値を示す混合率を最適混合率と呼ぶ。本研究では、最適混合率発現メカニズムを検討するために、粒状要素法⁴⁾を用いた定性的な数値実験を実施して検討を行った。

2. モデル化および解析の概要

本研究では、2次元周期境界制御粒状要素法⁴⁾を用いる。ファイバーのモデル化は、粒子を繋げて粒子間に引張抵抗を与えることで表現する。図-1に粒子間の接触点法線方向の構成式の模式図を示す。粒子間の法線方向相対変位が引張になる場合、砂などの粒状体の通常モデル化においては、非接触と判定し粒子間の接触力は0とする。ファイバー粒子同士の場合には、ある程度の引張力（同図では c ）までは引張力を及ぼし合うこととし、これ以上の接触力が作用した場合には非接触と判定し粒子間接触力を0とする。それ以外のモデル化は通常粒状要素法と同様に設定した。また、ファイバーは非常に細い繊維であり、曲げ剛性をほとんど持たない。これを表すために、接線方向の仮想バネ剛性は法線方向と比べて非常に小さくすることとした。

本研究で用いた解析パラメータを表-1に示す。土粒子間のパラメータは文献3)におけるケイ砂4号の応力ひずみ関係を参考に定めた。ファイバー粒子については釣糸PEラインを想定し、法線バネ剛性は引張試験により得られた値を用いた。粒子間摩擦角については、表面の滑らかさや材質によって変化しファイバーについても種々の大きさが考えられる。また、一般にはファイバーの摩擦係数は土粒子の摩擦係数と比較して小さいと考えられ、これが最適混合率

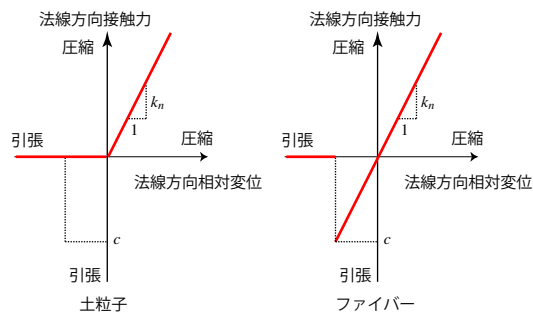


図-1 粒子間接触点法線方向の接触モデル

表-1 解析に用いたパラメータ

	土粒子	ファイバー
比重	2.59	0.93
k_n (kN/m)	80	24
k_t (kN/m)	32	2.4
ϕ (°)	27	5, 27

発現に大きな影響を与えると考えられるため、ここでは土粒子間の摩擦角と同様の場合と極端に小さい場合を用いることとした。土粒子とファイバー粒子間の各パラメータについては、それぞれの平均値を用いることとした。ファイバー粒子の引張強度を表す c については、三軸圧縮試験を実施した際に混合したファイバーがせん断中に切れるようなことが無いことを確認し、非常に大きな値500kNとした。

解析モデルとして、図-2に示す混合率の異なる7つのモデルを準備した。同図は、等方応力0.2MPaで初期状態を作成した状態である。モデル0は、ファイバーを混合しないモデルであり、約80mmの正方形領域内に粒径分布をケイ砂4号と同程度となるように0.2mm～1mmの粒子ランダムに発生させて5223個で作成している。モデル0を基準として、ファイバーを増加させ土粒子を減らすことでモデル1～5を作成するが、各モデルで間隙比はほぼ一定とした。ファイバーの方向を4種類設定（横・縦・右斜め45°・左斜め45°）して各モデル毎にファイバーが4本ずつ増加するようにしている。したがって、ファイバーを混合した各モデルでファイバーの異方性はほとんど無い。ファイバーは太さ0.5mm・長さ20mmのものを想定し、粒径0.52mmのファイバー粒子を41個繋げることでモデル化した。ファイバー混合率は、土粒子の質量 W_s とファイバーの質量 W_f の比 $W_f/W_s \times 100(\%)$ で算出した。

3. 解析結果

図-4に各モデルの粒子間摩擦角を5°と27°に変化させ

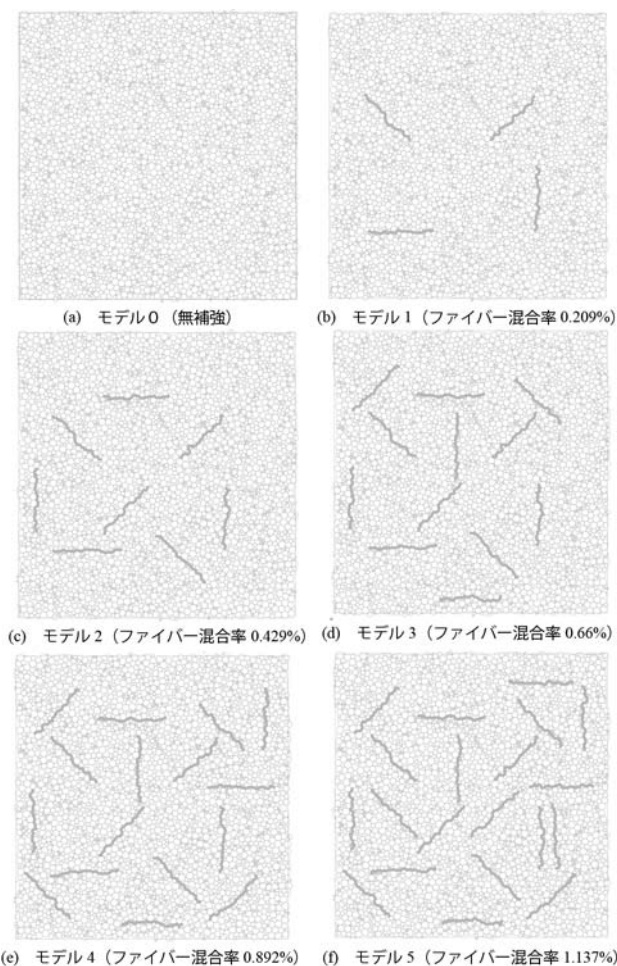


図-2 解析モデル

たファイバー混合率と最大主応力差の関係を示す。ファイバーの粒子間摩擦角を土粒子と同じ 27° とした場合には、いずれの混合率でもファイバーを混合しない場合と比較して最大主応力差が大きくなっており、混合率が増加しても最大主応力差はほとんど変わらない。ファイバーの粒子間摩擦角を 5° とした場合には、モデル3の結果をモデルエラーと見なした場合にもファイバー混合率が増加すると最大主応力差が低下する。ファイバーを混合して微視的に補強したファイバー混合補強土のせん断強度は、主にファイバーの張力による正の作用と土粒子とファイバー間の摩擦係数の低下による負の作用のバランスにより定まると考えられる。ファイバー粒子間の摩擦係数を小さくした場合には、ファイバーの増加に伴い摩擦係数の小さい接触点が増加することによるものと考えられる。ここでは、粒子間摩擦角による差が最も大きいモデル5 (混合率1.137%) の場合のせん断載荷に伴うファイバー張力の変化とファイバーと土粒子間のすべりが発生している接触点数の変化を調べ、図-4に示す。同図より、張力については、ファイバー粒子間摩擦角を変化させてもそれほど違いが見られず、ほぼ同様の張力が発生している。一方で、すべりが発生しているファイバーと土粒子間の接触点数については、ファイバー

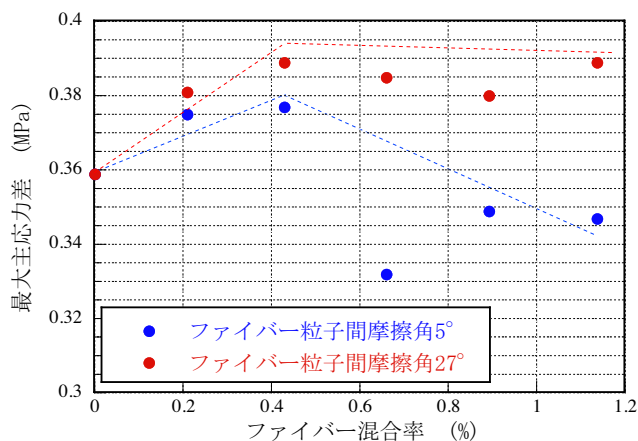


図-3 ファイバー混合率と最大主応力差

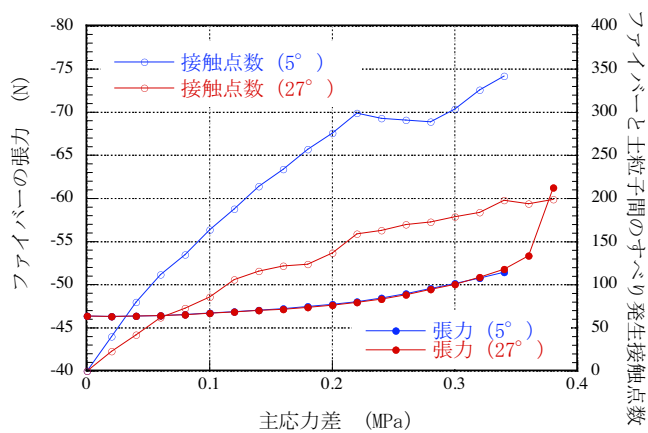


図-4 ファイバー張力とすべり発生状況 (モデル5)

粒子間摩擦角を小さくすると載荷初期からすべりが発生している接触点が非常に多いことがわかる。以上より、ファイバーを混合した粒状材料のせん断強さに対する最適混合率は、ファイバーを増加しすぎるとファイバーと土粒子境界でのすべりが発生しやすくなる負の作用が張力の発生による正の作用を上回るために現れると推察される。

4. おわりに

本研究では、粒状要素法を用いた数値実験により、ファイバーにより微視的に引張補強された粒状材料の最適混合率発生メカニズムについて考察した。主にファイバーの張力とファイバーと土粒子間の摩擦係数がせん断強さに影響するものと考えら得るが、粒度分布やファイバーの剛性・応力経路等、他の要因も考えられる。多くのパラメトリックスタディにより、最適混合率発生の要因やメカニズムについてももう少し詳細に検討を行うことが今後の課題である。

参考文献

- (財) 土木研究センター：発生土利用促進のための改良工法マニュアル, 1997.
- 野添重晃ほか：短繊維混合補強砂における混合率と強度変形特性の関係, ジオシンセティックス論文集, Vol. 27, pp.127-132, 2012.
- 野添重晃ほか：短繊維混合補強土の最適混合率に及ぼす粒径の影響, ジオシンセティックス論文集, Vol.28, pp.143-148, 2013.
- 金子ほか：非線形均質化理論に基づく粒状体マルチスケール解析法の開発とその応用, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp. 183-199, 2001.