

ファイバーにより微視的に補強された粒状材料の粒状要素解析

八戸工業大学大学院 学生会員 ○野添 重晃
八戸工業大学 非会員 古川 航輔・橋詰 豊
八戸工業大学大学院 正会員 金子賢治・熊谷浩二
横浜国立大学大学院 正会員 松井和己

1. はじめに

長さ数 mm～数 10mm の比較的短いファイバーを地盤材料に混合し、材料としての引張強度を改善する工法が開発されており、短繊維（ファイバー）混合補強土工法などと呼ばれている¹⁾。本工法は、土あるいは安定処理土に引張抵抗を有するポリエチレンやポリプロピレンなどの短いファイバーを混合することで、微視的に補強し、強度や靱性などの力学的性質の改善を図るものである。また、浸食に対する抵抗性や耐洗掘性が向上するとされている。ファイバー混合補強土の力学的特性の改善効果については、粒度や粒子形状などの地盤材料特性に加えてファイバーの材質、長さ、太さ、混合率、剛性などの多くの要因が複雑に影響を及ぼし合う。したがって、実験的な検討（例えば、文献 2)) を中心としていくつかの数値解析的な検討（例えば、文献 3)) が行われているが、その改良メカニズムや改善効果の各要因の影響等について不明な点が多い。本研究では、粒状要素法⁴⁾を用いてファイバー混合粒状材料の微視スケールでのモデル化を行って、微視的に引張補強された粒状材料の強度特性について数値実験を行って検討する。特に、ファイバー混合率と強度に対する改善効果について検討する。

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 にファイバー粒子同士の接触モデルの模式図を示す。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。ファイバー同士の場合には、ある程度の引張力（同図では c ）までは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。また、接線方向については通常はクーロンの摩擦則に従ってすべりの判定を行うが、ファイバー粒子同士の場合にはすべりを発生する基準を $p_n \tan \phi + c$ とする。ここで、 p_n は粒子間法線方向接触力、 ϕ は粒子間摩擦角である。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。したがって、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。本研究では、接線方向仮想バネ剛性は、

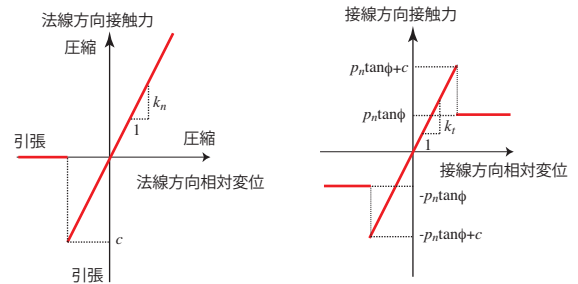


図-1 ファイバー粒子間の接触モデル

表-1 解析に用いたパラメータ

土粒子の比重	2.65
ファイバーの比重	0.95
法線バネ剛性 (土粒子-土粒子)	50 kN/m
(土粒子-ファイバー)	30 kN/m
(ファイバー-ファイバー)	10 kN/m
接線バネ剛性 (土粒子-土粒子)	35 kN/m
(土粒子-ファイバー)	17.52 kN/m
(ファイバー-ファイバー)	0.035 kN/m
粒子間摩擦角 (土粒子-土粒子)	25°
(土粒子-ファイバー)	20°
(ファイバー-ファイバー)	15°
ファイバー粒子の引張強度	5×10^6 kN

法線方向仮想バネ剛性の 1/1000 程度とした。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 4) を参考に定めた。ファイバーについては PE を想定し、土粒子の剛性より小さいため法線方向バネ剛性を土粒子の 1/5 とした。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が、ここでは土粒子間の摩擦角と比べて小さい値を選んだ。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、土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と考えられるため非常に大きな値 5×10^6 kN とした。

3. 解析結果

まず、図-2 に示すユニットセルモデルについて、ひずみ制御での等体積せん断試験シミュレーション（鉛直方向：圧縮、水平方向：引張）を行った。図-2(a) はファイバーを混合しない無補強のモデルであり、(b) はユニットセルの縦方向中央付近に横方向に 1 本のファイバーを混合した最も簡単なモデルである。同図は、初期状態として等方拘束圧 100kPa を作用させて静的つりあい状態を作成した図である。粒子数は、両モデルとも 2004 個、(b) ではそのうち

Key Words: 短繊維, 粒状材料, 粒状要素法, ファイバー混合率

〒 031-8501 青森県八戸市妙字大開 88-1・TEL 0178-25-8066

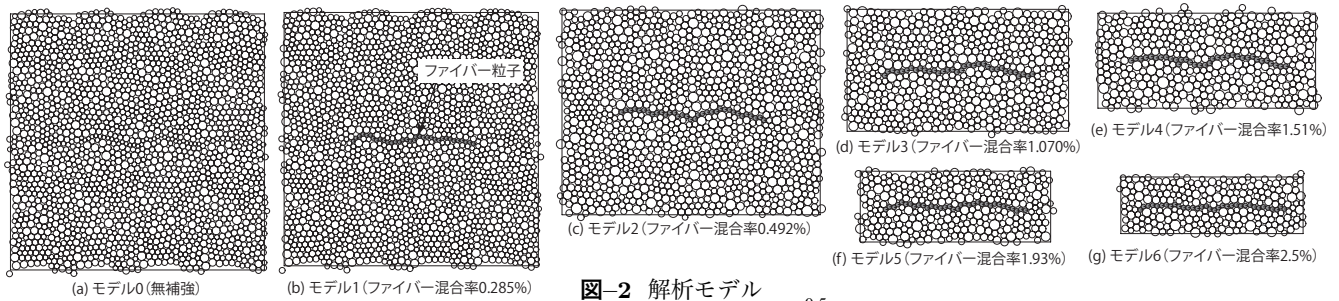


図-2 解析モデル

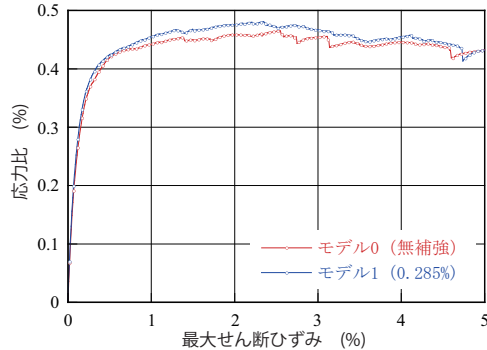


図-3 応力ひずみ曲線 (モデル 0, 1)

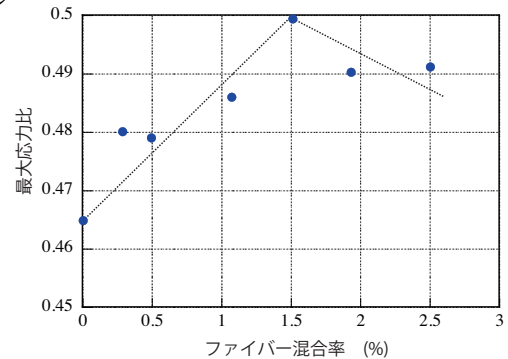


図-4 混合率と最大応力比の関係

ファイバー粒子が 34 個である。土粒子の粒径は 0.6mm～1.13mm の間に均等に分布しており、ファイバー粒子は直径約 0.5mm とした。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 $W_f/W_s \times 100(\%)$ で表しており、図-2(b) のモデルでは 0.28% 程度である。

図-3 にモデル 0 とモデル 1 の応力ひずみ曲線を示す。ファイバーを 1 本だけユニットセル内に配置した単純なモデルではあるが、引張りに抵抗するファイバーを混合することにより、最大応力比が大きくなっている。一般には粒子間の摩擦抵抗を大きくする程、最大応力比は大きくなるが、ファイバーと土粒子間の摩擦抵抗を小さくしているにも関わらず最大応力比は大きくなり、補強の効果が現れている。このことから、ファイバーの引張抵抗により巨視的な材料強度が向上するものと考えることができる。ファイバー混合により補強した粘性土について、ある混合率を超えて混合率を増加させると、強度が低下する結果の報告がある⁵⁾。砂質土についても、同様の結果も得られており⁶⁾、強度に対しての最適混合率が存在する可能性がある。混合率を増加させ過ぎると力学的に不利になるだけでなく、コスト的にも無駄が多くなる。したがって、最適混合率についてはその影響要因やメカニズムについて詳細に検討する必要がある。しかしながら、混合率の最適化について詳細な検討を行った例はない。本研究では、モデル 1 を基準として上下左右の領域の土粒子を削除して、ユニットセルのサイズを一定の割合で小さくしていくことで混合率の増加を表現し、混合率と強度の関係について検討を行った (図-2(c)-(g))。各モデルに対して等方拘束圧 100kPa で初期条件作成後、等体積ひずみ制御により 2 軸せん断試験シミュレーションを

行った。各モデルの混合率と最大応力比の関係を図-4 に示す。図-4 より、どの混合率の場合にもファイバーを混合した効果が現れており、無補強のモデル 0 より強度が増加している。また、混合率を増加させるに従って、最大応力比が増加しているが、質量混合率 1.5% 付近で最大となり、その後低下することがわかった。

4. おわりに

本研究では、粒状要素法を用いてファイバーにより微視的に引張補強された粒状材料の解析モデルを構築し、微視スケールにおける簡単な数値解析を行った。ファイバー混合により巨視的な強度が増加することが再現することができた。現状の解析では、最も単純なモデルでの検討であり、粒子数も少ないことから結果のばらつきの可能性もあるが、数値実験によってもファイバー混合補強粒状材料には強度に対する最適混合率が存在する可能性があることがわかった。モデルやパラメータの検討、载荷条件の影響などを検討しながら、最適混合率発生要因やメカニズムについて詳細に検討を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) (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.
- 2) A. Diambra, E. Ibraim, D.M. Wood, A.R. Russell: Fibre reinforced sands: Experiments and modelling, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28, pp.238-250, 2010.
- 3) 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二次元 DEM 解析, *応用力学論文集*, Vol. 12, pp. 497-506, 2009.
- 4) 金子, 寺田, 京谷, 岸野: 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.
- 5) 奥山, 峯岸, 巻内: 短繊維混合補強土における補強材混合量の影響, *ジオセンチックス論文集*, Vol.26, pp. 89-94, 2011.
- 6) 古川・野添・橋詰・金子・熊谷・松井: 短繊維混合補強土の補強効果と混合率の関係, 平成 24 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 投稿中, 2013.