

短繊維混合による応力鎖の変化に着目した短繊維補強メカニズム

補強土 短繊維 DEM

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○堀 智之  
名古屋工業大学 国際会員 前田 健一

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)を用いた短繊維補強土の2軸圧縮解析を行い、応力鎖の発達・消滅過程等の内部構造を観察した結果を報告する。

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(側圧一定条件)を行い、その変形・破壊挙動を解析した。短繊維は、直径  $d$  の円形粒子をボ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を Table1 に示す。

3. マクロ挙動

Fig.2 は、短繊維の長さを  $l_0=1500\text{mm}$  として短繊維の混合率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。混合率の上昇に伴ってピーク強度も増加する傾向がわかる。その中でも 0.6%以上混合した際に効果が著しく増加し、その後の補強効果は頭打ちとなる。なお、0.9%混合時に強度が若干低下しているのは解析が 2次元であり、補強材が供試体を分断してしまうためであると考えられる。この結果を受け、Fig3 では、混合率を 0.6%として短繊維の長さ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。短繊維の長さが  $l_0/2$  以上から  $l_0/4$  以下に変化した際に著しく強度が低下していることがわかる。このことから効果的に補強効果を発揮させるためには最低限必要となる短繊維の長さが存在するものと考えられる。この長さを決定する要因を、応力鎖と短繊維にかかる張力を観察することによって検討を行った。



Fig.1 DEMにおける短繊維のモデル化

Table 1 解析に用いた粒子特性値

Parameter	Unit	value
matrix(granular material)		
$\rho_s$	( $\text{t/m}^3$ )	2.65
grain shape		circle
$D_{max}$	(mm)	100
$D_{min}$	(mm)	50
$D_{50}$	(mm)	71
$U$	-	1.3
$U_c$	-	1.1
fiber		
$\rho_f$	( $\text{t/m}^3$ )	0.91
$d$	(mm)	$10(d/D_{max}=0.1)$
$l$	(mm)	1500(default)
$\lambda$	-	150(default)

$D_{max}$  = maximum grain size,  $D_{min}$  = minimum grain size,  $D_{50}$  = mean grain size,  $U_c$  = coefficient of uniformity ( $D_{60}/D_{10}$ ),  $U$  = coefficient of gradation ( $(D_{30})^2/D_{60} \cdot D_{10}$ ),  $\rho_s$  = density,  $d$  = diameter of fibre,  $l$  = length of fibre,  $\rho_f$  = density of fibre,  $\lambda$  = aspect ratio of fibre ( $\lambda=l/d$ ).

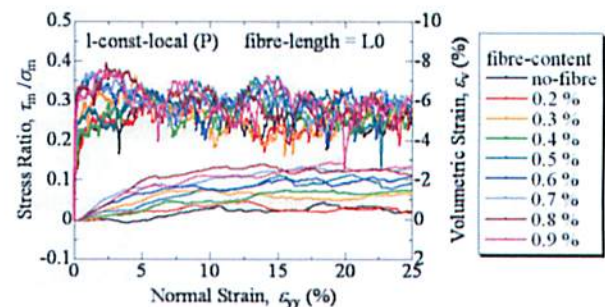


Fig.2 応力 - ひずみ関係 (混合率による変化)

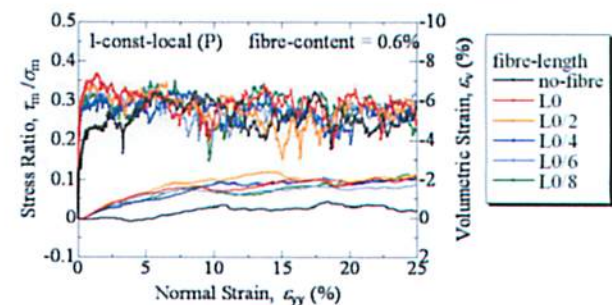


Fig.3 応力 - ひずみ関係 (短繊維の長さによる変化)

#### 4. 応力鎖と短繊維に作用する力の関係

Fig.4に、応力の伝達経路を表す応力鎖と短繊維にかかる張力を重ねて表した図を示す。応力鎖は伝わる力が強いほど太い線となる。また、短繊維の色は、引張側の力が働いている場合には赤く、圧縮側の力が働いている場合には青く表示されている。図を見ると、応力鎖と短繊維が交わる点で短繊維にかかる力が圧縮側となっていることがわかる。これを模式的に表したのがFig.5である。応力鎖を構成する柱状の粒子コラムを考えた時、短繊維は柱を繋ぐ梁の様に働くものと考えた。短繊維に接している粒子の動きが短繊維との摩擦によって抑制されることで柱の座屈長が短くなり、座屈しにくい強い構造となることが考えられる。また、供試体中央で最も引張力を受けていた短繊維1本に着目したものをFig.6に示す。 $\epsilon_{yy}$ の増加と共に短繊維に働く引張力が卓越し、圧縮力が働く部分が徐々に減っていく様子が確認できる。中でもピーク強度時 ( $\epsilon_{yy}=2.00\%$ ) の短繊維に着目すると両端部付近に圧縮力が存在し、その間の長さ  $l_0/2$  程の区間において連続して引張力が作用している。このことは第3項のFig.3で考えられた効率的な補強に最低限必要な長さとして少なくとも  $l_0/2$  程度の長さが必要であったことに繋がる。 $l_0/4$  以下の長さではピーク強度時に強い粒子コラム同士を結ぶことが出来ないため強度が増加しにくいと考えられる。

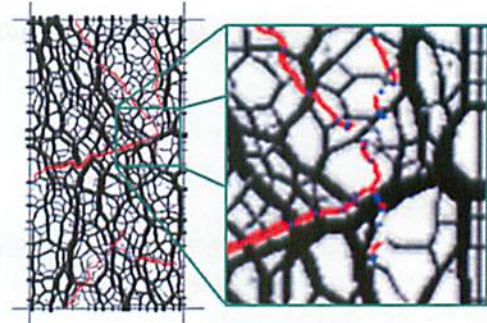


Fig.4 応力鎖と短繊維に作用する力の関係  
(短繊維の長さ:  $l_0$ , 短繊維混合率: 0.6%,  $\epsilon_{yy}$ : 2%)

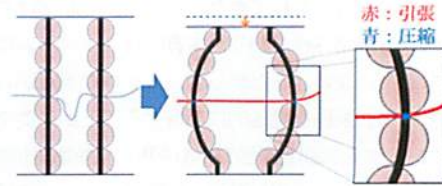


Fig.5 短繊維に働く力 (模式図)

#### 5. マトリックス粒子間の接点の相対変位

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.7(左)である。粒子回転を時計回り正として薄い印、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.7(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。

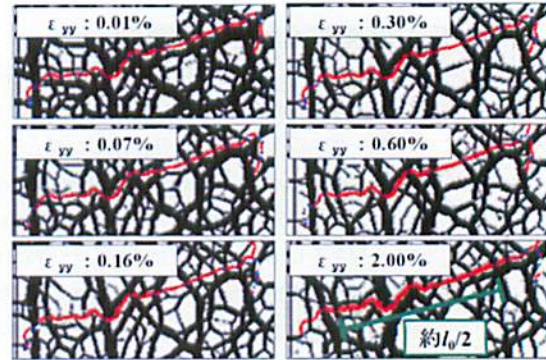


Fig.6 セン断進行に伴う短繊維1本にかかる力の変化

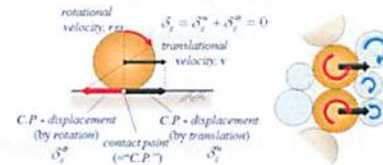


Fig.7 接点の相対変位を伴わない変形モード

Fig.8は相対変位を伴う接点の空間分布を示したものである。相対変位の小さなものを青、大きなものを赤で表している。短繊維の有無に関わらず、せん断の進行に伴って相対変位を伴う接点が増加しているが、ピーク強度時 ( $\epsilon_{yy}=2.00\%$ ) を比較すると短繊維が混合されたものの方がその数が多いことが確認できる。また、その位置は短繊維によって分断された領域に多く存在している。これは、分断された領域がせん断の進行に伴って扁平な形になっていく際、領域内の面積が変化しないとすれば周長が増加する必要があるが、周りに位置する短繊維がこれに抵抗することで領域を拘束するためであると考えられる。

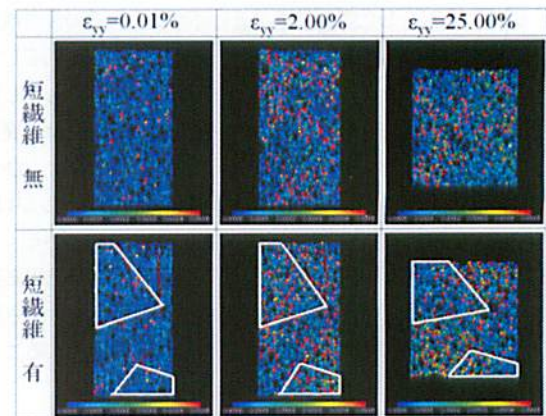


Fig.8 相対変位を伴う接点の空間分布

#### 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