

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	繊維-粒子複合材料を対象とした繊維材料の変形挙動に関する実験的考察
Title(English)	Experimental Study on Deformation Property of Fibrous Material in Fiber Reinforced Granular Material
著者(和文)	宮本 慎太郎, 安福 規之, 石藏 良平, 笠間 清伸
Authors(English)	Shintaro Miyamoto, Noriyuki Yasufuku, Ryohei Ishikura, Kiyonobu Kasama
出典(和文)	ジオシンセティックス論文集, Vol. 30, , pp. 89-96
Citation(English)	Geosynthetics Engineering Journal, Vol. 30, , pp. 89-96
発行日 / Pub. date	2015, 12

# 繊維-粒子複合材料を対象とした 繊維材料の変形挙動に関する実験的考察

宮本慎太郎<sup>1</sup>・安福規之<sup>2</sup>・石藏良平<sup>3</sup>・笠間清伸<sup>4</sup>

繊維材料が粒状材料に混入された繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を評価することは、繊維材料の種類や含有率による影響の評価や、複合地盤としての変形性の予測を考える上で重要である。本研究では、このような立場から、複合則を用いた繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築を試みている。複合則では、繊維材料と粒状材料の挙動を明らかにし、各々の挙動の関連性を評価する必要がある。そこで本論文では、粒状材料内での繊維材料の変形挙動を明らかにした。また、実験結果を元に、繊維材料と粒状材料の挙動の関連性を考察した。結果より、繊維材料の変形挙動は弾完全塑性的な挙動に簡略化して評価できることを明らかにした。さらに繊維材料の変形は粒状材料の変形とひずみエネルギー増分が同等となるように進展することを考察した。

キーワード：繊維-粒子複合材料、変形・強度特性、複合則、中型一面せん断試験

## 1. はじめに

繊維材料のような引張りに対して強靱で、曲げやねじりに対しては柔軟である材料を、土などの粒状材料に混入することで、ピーク強度の向上や脆性的な挙動の改善などの補強効果が表れることが知られている<sup>1)</sup>。地盤工学において、このような繊維材料と粒状材料の複合材料(本研究では「繊維-粒子複合材料」と称する)を対象とした研究は数多く存在し、代表的な例としては、短繊維混合補強土による地盤補強技術の開発<sup>2)</sup>、廃プラスチック材の地盤材料としての有効利用法の検討<sup>3)</sup>などが挙げられる。その他にも、広義に考えれば、植物根による補強効果を考慮した地山斜面の安定性の検討<sup>4)</sup>や、埋立廃棄物の力学特性に関する研究<sup>5)</sup>なども含まれる。また、これらの研究では、繊維-粒子複合材料の力学特性を明らかにすることを目的とした実験的検討が数多く行われている。例えば、Hamidi and Hoorefsand<sup>6)</sup>は繊維材料の含有率を、Ahmad et al<sup>7)</sup>は繊維材料の長さを、Michalowski and Cermak<sup>8)</sup>や宮本ら<sup>9)</sup>は繊維配向角度を変化させて力学試験を実施した。これらによると、繊維材料の含有率や長さが増加するにつれて、ピーク強度や強度定数( $c, \phi$ )が増加する傾向にあることや、補強効果が最大になる繊維配向角度の存在することなどが明らかになっている。これらの実験的検討により、繊維材料の種類・体積含有率・長さや縦横比・繊維配向角度などの「繊維材料の特性」と複合材料の力学特性の関係を適切に評価することの重要性が示唆されたといえる。

一方、理論的アプローチによって、繊維材料の補強効果を考慮した複合材料の力学モデルもいくつか提案されている。例えば、Michalowski et al<sup>10,11)</sup>は、繊維配向角分布の影響を考慮した繊維材料の強度評価法を提案し、重ね合わせにより複合材料のせん断強度を評価した。また宮本ら<sup>12)</sup>は、繊維材料が多量に含まれる埋立廃棄物に対して大型引張試験を実施し、繊維材料の引張強度を加味した埋立廃棄物のせん断強度評価法を提案した。その他に、ごく少数ではあるが、繊維-粒子複合材料の構成モデルも提案されている。そのいずれも、複合則をベースとして、粒状材料と繊維材料の特性を重ね合わせることで応力・ひずみ関係を導出するものとなっている。例えば、Prisco and Nova<sup>13)</sup>は、粒状材料と繊維材料のひずみ増分が等価になると仮定して両者の特性を体積含有率に応じて複合化し、軸対称条件における応力・ひずみ関係を導出した。またDiambra et al<sup>14)</sup>は、Michalowski et al<sup>10,11)</sup>によって提案された繊維配向角分布の評価方法を応用し、Prisco and Nova<sup>13)</sup>に提案されたようなひずみ等価モデルに繊維配向角分布の評価を導入したモデルの構築を行った。このような構成モデルに関する研究は、繊維材料の種類や配合割合の影響をより詳細に評価することや、複合地盤としての変形性の予測を行うことを考える上で、非常に重要な知見を提示しているといえる。しかし、繊維材料の挙動は完全弾性体で近似して評価されており、適切な構成関係の評価が行えているかは疑問である。また、複合化するに当たって、粒状材料と繊維材料のひずみ増分を等価とするモデルが実現を十分に考慮していると

<sup>1</sup>学生会員、九州大学大学院 建設システム工学専攻、博士課程 JSPS特別研究員(DC1) (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

<sup>2</sup>正会員、九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門、教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

<sup>3</sup>正会員、九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門、助教 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

<sup>4</sup>正会員、九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門、准教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

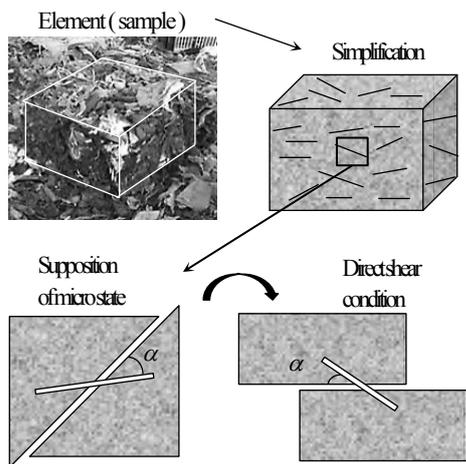


図-1 実験のイメージ

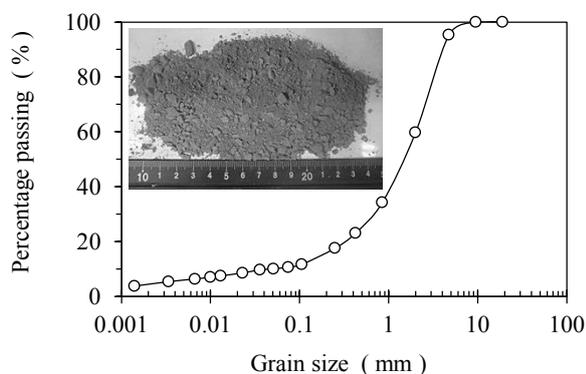


図-2 粒状材料の粒径加積曲線

は言い難い。これらのことを踏まえると、繊維材料の粒状材内での挙動、繊維材料と粒状材料の挙動の関連性を詳細に明らかにし、それらの特徴を構成モデルの中に適切に反映させる必要があるといえる。

本研究では、これらの課題を考慮した新たな繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築することを目的として、繊維材料が粒状材内では発揮する変形挙動を実験的に明らかにすることを試みた。具体的には、ポリエステル樹脂で構成されたひずみゲージを繊維材料と見立てて粒状材内に混入して一面せん断試験を行った。またこの時、繊維材料の配向方向とせん断面の角度を変化させて試験を行うことで、繊維配向角度による影響を検討した。さらに、それらの実験結果を元に、繊維材料と粒状材料の挙動の関連性に関する考察を行った。

## 2. 実験内容および使用した材料の概要

### (1) 実験内容

ポリエステル樹脂で構成されたひずみゲージそのものを繊維材料と見立てて実験を行うことで、複合材料がせん断変形を示す際の、繊維材料のひずみの発達傾向を把握した。実験のイメージは図-1に示すようであり、要素レベルの供試体から微視的な要素を抜き取った状態を

表-1 粒状材料の物理特性

Physical properties	
Soil particle density, $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.756
Maximum bulk density, $\rho_{\text{max}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.087
Minimum bulk density, $\rho_{\text{min}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.634
Effective grain size, $D_{10}$ (mm)	0.075
Mean grain size, $D_{50}$ (mm)	1.5
Coefficient of uniformity, $U_c$	26.7
Coefficient of curvature, $U'_c$	3.3

表-2 粒状材料の三軸圧縮試験結果 (CD条件)

Relative density, $D_r$	Consolidation stress, $\sigma_c$ (kPa)	Stress ratio, $q/p$ (max)	$c_d$ (kPa)	$\phi_d$ ( $^\circ$ )
40%	100	1.910	27.9	42.3
	200	1.865		
	300	1.795		
60%	100	1.912	23.0	43.0
	200	1.857		
	300	1.817		
80%	100	1.911	17.7	44.1
	200	1.896		
	300	1.848		

想定して実験を行うものとした。また通常、繊維材料は様々な角度を持って混入している。そのため、繊維の堆積方向とせん断面の角度(「繊維配向角度  $\alpha$ 」と定義)が異なる場合の繊維材料の挙動を把握することを考え、せん断面が固定できる一面せん断条件を選定した。

試験装置はせん断箱の寸法が幅 30 cm、奥行 30 cm、高さ 15 cm となる中型一面せん断試験装置を使用し<sup>15), 16)</sup>、繊維配向角度  $\alpha = 0, 30, 60, 90^\circ$  の条件において、それぞれ上載圧  $\sigma = 10, 15, 20 \text{ kN}/\text{m}^2$  時の挙動を把握した。今回の実験では、全条件において、せん断速度を  $1 \text{ mm}/\text{min}$  で一定とし、実験中は室内温度を  $20^\circ$  に保つようにした。

せん断試験用の供試体は、配向角度を有した繊維材料を正確に混入するために、せん断箱内において締め等を一切行わずに作製するものとした。この時の粒状材料の相対密度は  $D_r = 38\%$  で一定であった。また今回は、混入する繊維材料を 1 本のみとした検討結果を示すが、繊維材料を 3 本混入した条件での実験も実施しており、繊維材料同士の相互作用や粒状材料との応力分担の変化は見られないことを確認している。各実験ケースにおいて 3 回以上の実験を行い、再現性のあることを確認した上で、代表値を選んで議論することとした。

### (2) 粒状材料と繊維材料の特性

#### a) 粒状材料の概要

粒状材料には、図-2に示すような、粒径の広い礫質土を使用した。本試料の物理特性を表-1に、側圧一定の三軸圧縮試験 (CD条件) より得られた実験結果、相対

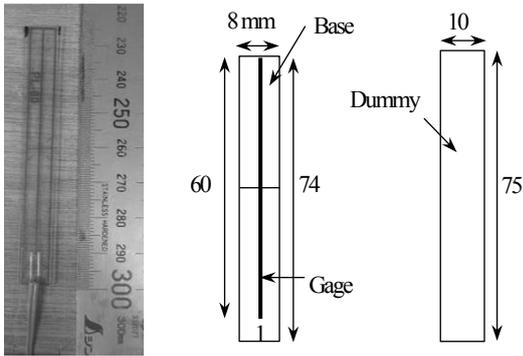


図-3 繊維材料の概要

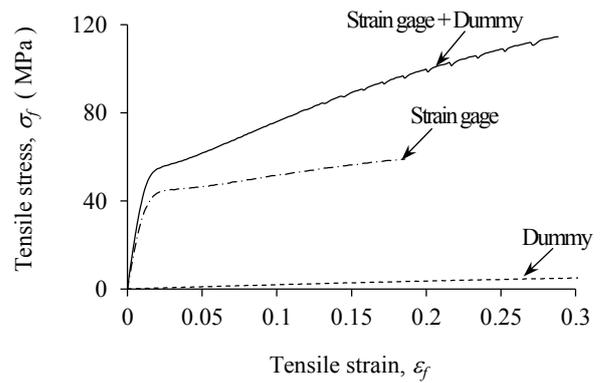


図-5 繊維材料の引張特性

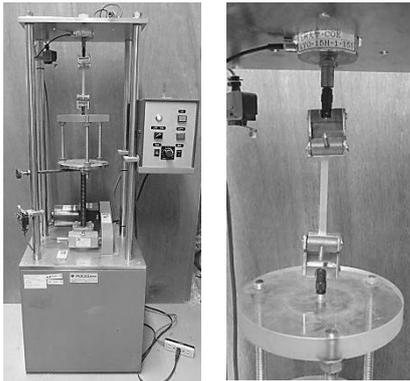


図-4 単繊維引張試験装置の概要

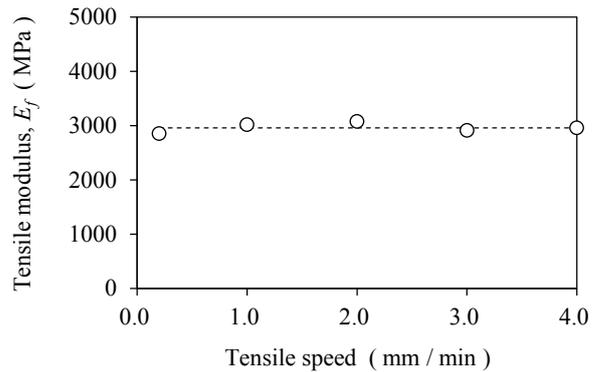


図-6 引張剛性と引張速度の関係

密度  $D_r=40, 60, 80\%$  時のせん断強度定数 ( $c_d, \phi_d$ ) を表-2 に示した。また本三軸圧縮試験により、本試料は、側圧  $\sigma_r = 300 \text{ kN/m}^2$  条件においても粒子破碎等のない材料であることが確認されている。

#### b) 繊維材料の概要

使用した繊維材料は、曲げ抵抗や圧縮抵抗が無視できるほど小さく、引張抵抗および粒状材料との摩擦抵抗のみが働くひずみゲージを選定した。ただし、ひずみゲージ単体では、規定した繊維配向角度で粒状材料内に混入することが難しかったため、ひずみゲージに比べて無視できるほど小さな引張剛性を有し、厚さが  $1 \text{ mm}$  となる高分子材料をダミー材料として使用した。そのダミー材料にひずみゲージを貼り付けたものを試験体とし、試験体の様子を図-3 に示した。試験体の寸法は、ひずみゲージは長さ  $74 \text{ mm}$ 、幅  $8 \text{ mm}$ 、厚さ  $0.15 \text{ mm}$ 、ダミー材料は長さ  $75 \text{ mm}$ 、幅  $10 \text{ mm}$ 、厚さ  $1 \text{ mm}$  である。繊維材料の引張特性は、図-4 に示す単繊維引張試験装置を用いて調べており、代表的な応力・ひずみ関係は図-5 のようであった。ひずみゲージ単体、ダミー材料、ダミー材料にひずみゲージを貼り付けた試験体の実験結果から明らかのように、ダミー材料の引張剛性は非常に小さく、試験体の初期剛性はひずみゲージ単体のそれとほとんど同等であることが確認される。また、引張剛性と引張速度の関係を示した図-6 より、引張速度に関係なく一定した剛性が発揮される材料であることも確認された。本来、粒状材料内で繊維材料が変形する速度を求めることは難しく、引張剛性が変形速度に強く依存する場合、せ

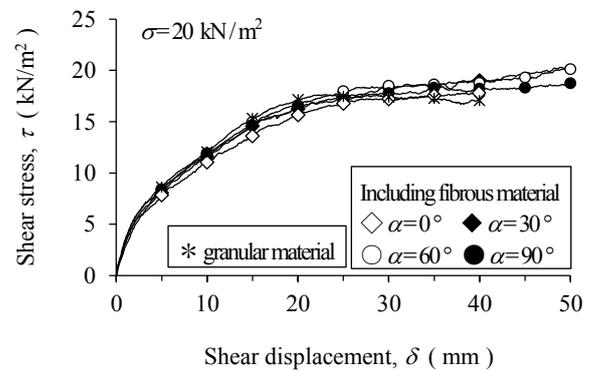
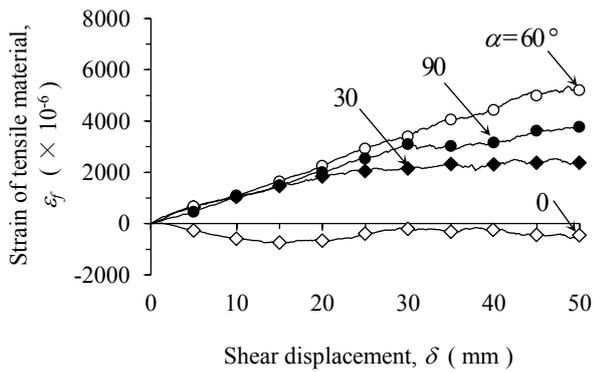


図-7 複合材料の応力・変形特性の例

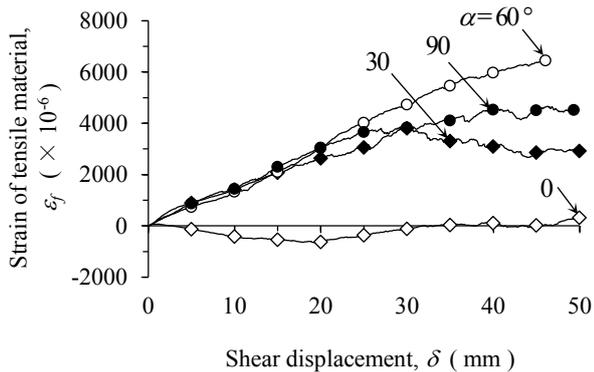
ん断中にどの程度の引張応力が発揮されているのかを定量的に把握することは不可能といえる。しかし、本試験で使用する繊維材料については、変形速度によらず一定の引張剛性が発揮されるため、繊維材料のひずみ値から、引張応力を直接算定して求めることとした。

### 3. 粒状材料内での繊維材料の変形挙動

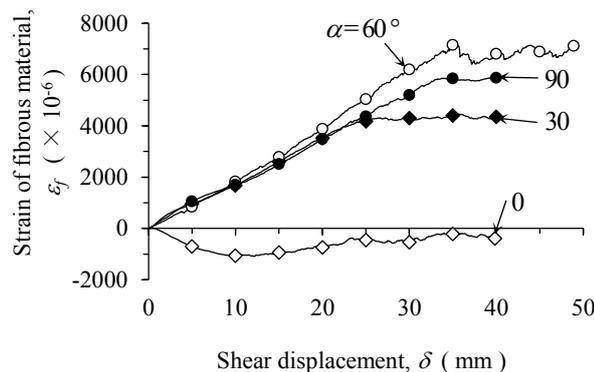
先に述べた一面せん断試験の実験結果を示すと共に、繊維材料が粒状材料内でどのような挙動を示すのかを考察した。まず、複合材料の平均的な応力・変形特性を図-7 に示した。ここでは、例として、 $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$  の結果のみを示しているが、 $\sigma = 10, 15 \text{ kN/m}^2$  の場合も同様の



(a)  $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$



(b)  $\sigma = 15 \text{ kN/m}^2$



(c)  $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$

図-8 粒状材料内での繊維材料の変形挙動

結果であった。繊維材料が 1 本しか混入しておらず、体積含有率も 0.005 % 程度のため、繊維材料が混入していることによる複合材料の応力・変形特性への影響はほとんどみられない。繊維配向角度の違いによらず、すべての条件において粒状材料のみの場合と同様の応力・変形特性が得られた。さらにこの時の、繊維材料の変形挙動を図-8に示した。本研究では、繊維材料の挙動を、繊維材料のひずみ値と複合材料のせん断変位の関係を用いて考察するものとし、繊維材料のひずみ値は、引張りを正值、圧縮を負値で表した。図-8には (a)  $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$ , (b)  $\sigma = 15 \text{ kN/m}^2$ , (c)  $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$  の結果をそれぞれ示した。すべての結果について、繊維配向角度  $\alpha = 0^\circ$  の場合にはせん断変位の増加に伴う繊維材料のひずみの発達は

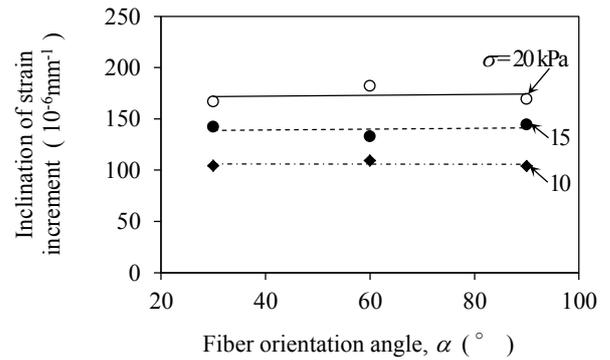


図-9 ひずみ増分勾配と繊維配向角度の関係

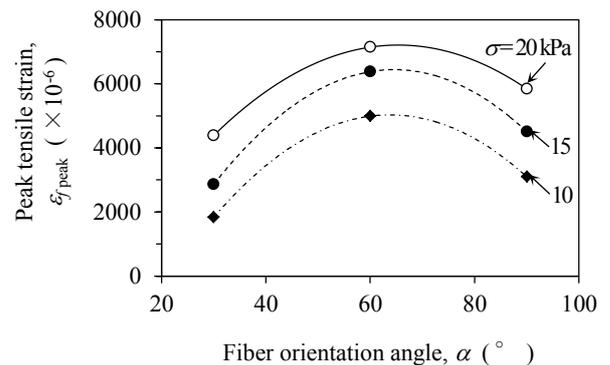


図-10 ピークひずみ値と繊維配向角度の関係

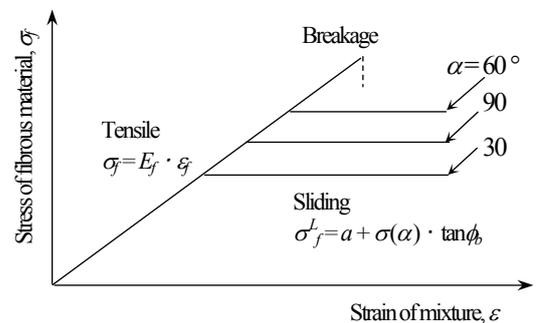


図-11 繊維材料の変形・強度特性(模式図)

認められない。しかし、繊維配向角度  $\alpha = 30, 60, 90^\circ$  の場合には、せん断変位の増加に伴って繊維材料の引張ひずみが発達していき、あるひずみ値を境にして一定値に収束する傾向を示した。これより、引張抵抗のみが卓越する繊維材料の粒状材料内での変形・強度特性を考えると、せん断初期には引張挙動を示し、繊維材料と粒状材料の界面摩擦強度を超える応力値を境にして引き抜け挙動を示すような、弾完全塑性的な挙動を有すると推察された。また、上載圧が大きいほど、発生する引張ひずみは大きく、引き抜け時の界面摩擦強度も大きくなることが示唆された。ここで、繊維配向角度  $\alpha = 0^\circ$  の場合には、引張られることなくせん断初期からせん断面上をすべっていたためにひずみの発達がなかったと考えられた。

次に繊維配向角度の違いによる影響を詳細に検討するために、図-8より、引張挙動時の傾きを繊維材料の

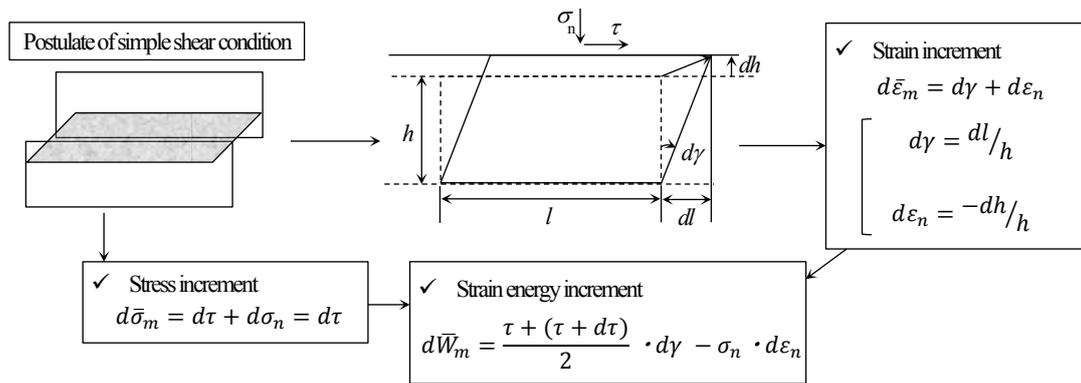


図-12 粒状材料の各増分値の算定方法

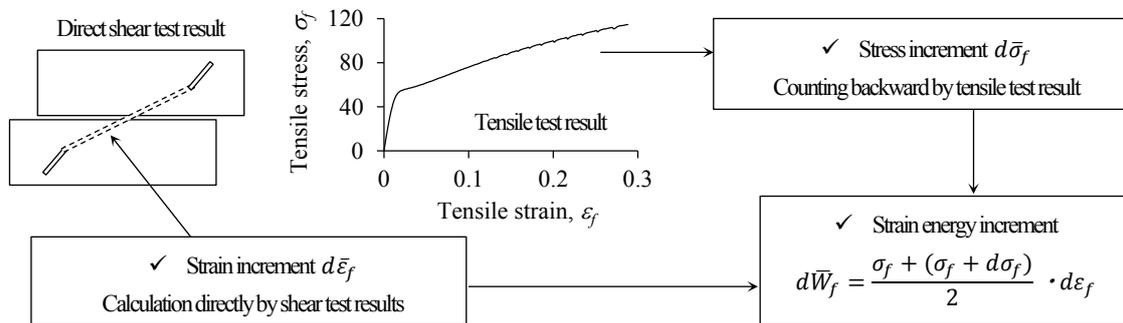


図-13 繊維材料の各増分値の算定方法

「ひずみ増加勾配」，引き抜け時のひずみ値を「ピークひずみ値」と定義し，それぞれの繊維配向角度との関係を図-9，10に整理した．ひずみ増加勾配は上載圧が大きくなることで増加する傾向を示すが，繊維配向角度の違いによる影響はほとんどみられない．しかし，ピークひずみ値は繊維配向角度の違いにより変化する傾向が認められ，上載圧の大きさに関わらず，繊維配向角度  $\alpha = 60^\circ$  の時に最大値を示した．これらの結果より，繊維配向角度の影響は引張挙動時には認められず，引き抜け時のひずみ値に顕著に表れることが明らかになった．ここで，引き抜け挙動時に繊維配向角度の影響が表れたのは，繊維配向角度の違いによって，繊維材料に働く拘束圧が異なるためと考えられる．本来，界面摩擦強度は材料同士の接触する角度には依存しない強度と考えられる．しかし，繊維配向角度が異なることで繊維材料に垂直に働く応力値は変化するため，結果として界面摩擦強度の大きさに違いが表れたと考える．以上の結果より，繊維-粒子複合材料の変形が進行する際に，繊維材料が粒状材料内で示す変形・強度特性（繊維材料の応力と複合材料のひずみの関係）は，模式的に図-11のような弾完全塑性的な挙動で評価することができると考えられた．せん断初期では繊維材料は線形的に応力が増加する引張挙動を示し，発揮される応力値  $\sigma_f$  は単繊維引張試験から求まるような引張剛性  $E_f$  に依存した値となる．さらに，複合材料の変形が進行していき，繊維材料と粒状材

料の界面強度が限界強度  $\sigma_f$  を超えた時，繊維材料は状材料内を滑るような挙動を示し，新たなひずみ増分は発生せずに応力値は一定値に収束するような挙動となる．

#### 4. 繊維材料と粒状材料の変形挙動の関連性

##### (1) 検討内容

先の一面せん断試験結果より，繊維材料と粒状材料の変形挙動の関連性に関する考察を行う．そこでまず，ここでいう関連性の定義を説明する．複合則を用いて複合材料の応力・ひずみ関係を定式化する場合，繊維材料と粒状材料の特性から複合材料の剛性マトリックスを導く必要がある．しかし，複合材料内部の微視的な応力/ひずみは，各材料の剛性や体積含有率および複合化の方法に依存し，応力分布は不明であるので，剛性マトリックスを厳密に決定するのは困難である<sup>17)</sup>．そこで，ある仮定の下に，剛性マトリックスを決定する種々の方法が複合材料の力学モデルとして提案されている．代表的な例としては，複合材料内部の繊維材料と粒状材料の応力増分を等価 ( $d\bar{\sigma} = d\bar{\sigma}_m = d\bar{\sigma}_f$ ) と仮定した Reuss model (直列モデル) や，ひずみ増分の等価性 ( $d\bar{\epsilon} = d\bar{\epsilon}_m = d\bar{\epsilon}_f$ ) を仮定した Voigt model (並列モデル) が挙げられる<sup>18)</sup>．これら2つのモデルは複合材料の初期剛性についての上下界値を与えることが知られている<sup>18)</sup>．また，大嶺はひず

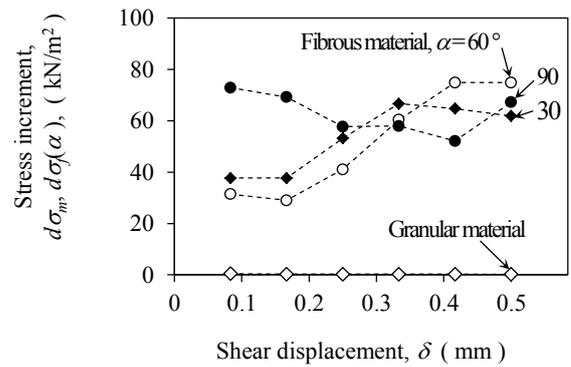
みエネルギー増分を等価 ( $d\bar{W} = d\bar{W}_m = d\bar{W}_f$ ) と仮定したモデルを開発し、上下界値の中間的な値を有する、より実際に近い値を表現できる手法を提案した<sup>19)</sup>。いずれの考え方にせよ、複合材料が応力を受けて変形する際に、内部の繊維材料と粒状材料の関連性を元に、繊維材料と粒状材料に発生する応力やひずみを算定している。この3つのモデルでは、粒状材料と繊維材料の変形挙動の関連性について、応力増分の等価性、ひずみ増分の等価性、ひずみエネルギー増分の等価性のいずれかを仮定することで、複合化を行っているということである。しかし、これらは主に2種類の弾性材料及び粒状材料から構成された複合材料に関する考察を元にした研究成果であり、本研究で対象としている繊維-粒子複合材料についても、繊維材料と粒状材料の応力・ひずみ関係の関連性の考察を行い、最適な仮定を導入する必要があるといえる。そこで本章では、一面せん断試験結果を元に、繊維材料と粒状材料の、応力増分 / ひずみ増分 / ひずみエネルギー増分の比較を行い、どのような仮定の下に複合化するのが適切なのかを考察した。

ここで、先の実験結果より、粒状材料内での繊維材料の挙動は、引張挙動から引き抜け挙動を示す、弾完全塑性的な挙動を示すことを明らかにしている。この場合、塑性領域は引き抜けを示す界面摩擦強度にのみ依存しているといえ、弾性領域の引張変形を有する際にのみ、粒状材料との関連性を評価すれば十分であるといえる。これより、今回は、繊維材料・粒状材料共に弾性領域と仮定できるような、微小領域(せん断変位0~0.5 mm)のみを対象として関連性を考察するものとした。

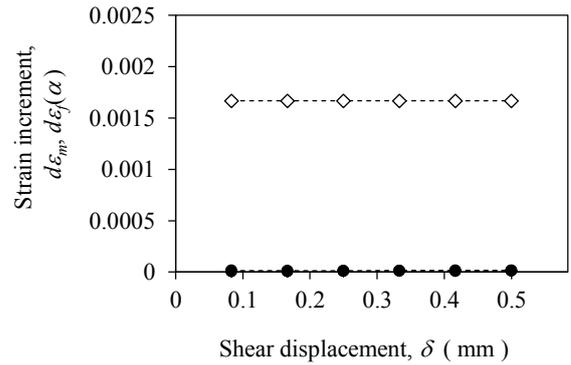
## (2) 検討方法

一面せん断試験から得られた結果より、繊維材料と粒状材料の応力増分 / ひずみ増分 / ひずみエネルギー増分を算定する方法を説明する。粒状材料については、繊維材料を含まない場合の結果(相対密度  $Dr = 38\%$ 、上載圧  $\sigma = 10, 15, 20 \text{ kN/m}^2$ )を用いて各増分値の計算を行った。ここで、一面せん断試験では直接的にひずみ量を求めることはできないため、単純せん断変形を仮定して、図-12に示すように各増分値を算定するものとした<sup>20)</sup>。単純せん断を仮定する際の高さ  $h$  は、大島らの研究成果を参考にして、供試体高さの1/3である  $h = 5 \text{ cm}$  とした<sup>21)</sup>。

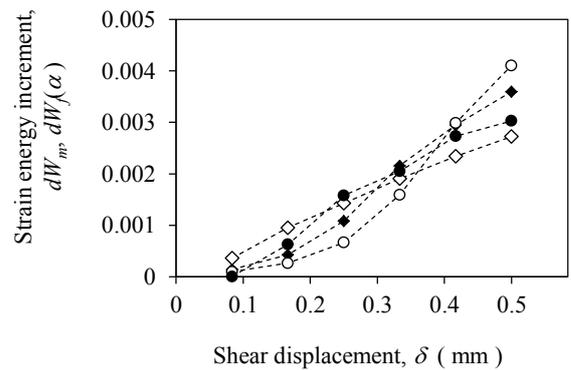
次に繊維材料については、図-8より得られたひずみ値を用いてひずみ増分を計算した。また応力増分については、図-8のひずみ値と単繊維引張試験から得られる図-5の応力・ひずみ関係を照らし合わせることで算定するものとした。最後に、ひずみエネルギー増分は、応力が増分する際の平均的な応力値とひずみ増分値を掛け合わせた値であり、図-5と図-8により算定される応力値とひずみ増分値を用いて算定するものとした。算定方法の概略と、その際のひずみエネルギー増分を求める計算式を合わせて図-13に示した。以上の方法により求まる繊維材料と粒状材料の各増分値を比較し、繊維材料と粒状材料の関連性を考察した。



(a) 応力増分



(b) ひずみ増分



(c) ひずみエネルギー増分

図-14 繊維材料と粒状材料の各増分値の比較 (一面せん断試験結果  $\sigma = 20 \text{ kPa}$  条件より計算)

## (3) 検討結果

上載圧  $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$  条件での一面せん断試験結果を用いて計算した、複合材料のせん断変位に対する繊維材料と粒状材料の (a) 応力 / (b) ひずみ / (c) ひずみエネルギー増分値を図-14に整理した。繊維材料については、繊維配向角度  $\alpha = 30, 60, 90^\circ$  の結果を示している。このような結果の整理をすることで、複合材料のせん断変形の進行に伴って、繊維材料と粒状材料の各増分値がどのように変化するか、また一致しているかを明確にすることができると考えた。結果より、応力増分やひずみ増分の値は繊維材料と粒状材料で大きく異なる値を示しており、

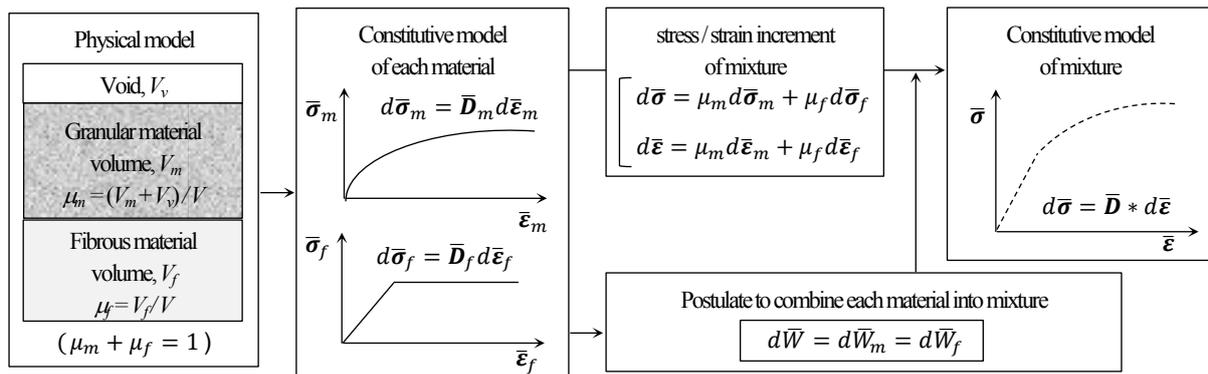


図-15 複合則を用いた繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係のモデル化のフロー

ほとんど一致しない。しかし、ひずみエネルギー増分値は繊維材料と粒状材料で良い一致が認められた。このような傾向は、上載圧  $\sigma = 10, 15 \text{ kN/m}^2$  における実験結果を用いて計算した場合でも同様であった。これより、繊維材料の引張変形は粒状材料とひずみエネルギー増分が同等になるように進展しているといえる。また、大嶺の研究に代表されるように、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分を等価と仮定することによって、構成モデルを構築できる可能性の高いことが検証された。

これらより、複合則を用いて繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築する上で、モデル化のおおまかなフローは図-15に示すようになると考えられた。まず、繊維材料と粒状材料の体積含有率を定義し、状態量を決定する。さらに、繊維材料と粒状材料の構成関係を評価する。ここで、繊維材料の構成関係は、変形初期に引張挙動を示し、粒状材料との界面摩擦強度によって決まる応力値を境に引き抜け挙動を示すような弾完全塑性挙動でモデル化する。次に、繊維材料と粒状材料の応力値/ひずみ値を各々の体積含有率に応じて重ね合わせて複合材料の応力値/ひずみ値を定義する。またここから、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分値の等価性を仮定して複合化を行い、応力とひずみの関係を定式化する。

今後は、実際に繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係の定式化を行うと共に、実験値との比較を行うことで本構成モデルの妥当性の検証を行っていく予定である。

## 5. おわりに

本論文では、複合則をベースとして繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係のモデル化を行うことを目標として、粒状材料内での繊維材料の変形挙動の解明を行った。さらに実験結果を元に、繊維材料と粒状材料の応力・ひずみ関係の関連性に関する考察を行った。得られた主要な知見を示すと以下のようであった。

- 1) 引張抵抗および粒状材料との摩擦抵抗のみが発生する繊維材料の粒状材料内での変形・強度特性は、複

合材料が初期変形を起こす際には引張挙動を示し、さらに変形が進行して繊維材料と粒状材料の界面摩擦強度を超える応力域に達すると引き抜け挙動を示すような、弾完全塑性的な挙動を有する。

- 2) 粒状材料内の繊維材料の挙動に及ぼす繊維配向角度の影響は、引張挙動時にはほとんど認められない。しかし、引き抜け挙動時には顕著な影響が認められ、繊維配向角度  $\alpha = 60^\circ$  の時に引き抜け時の応力値が最大になる傾向が得られた。これは、繊維配向角度の違いによって、繊維材料に働く拘束圧が異なるためと考えられた。繊維配向角度が異なることで繊維材料に垂直に働く応力値が変化し、結果として界面摩擦強度の大きさに違いが表れた。
- 3) 弾性領域における繊維材料と粒状材料の応力・ひずみ関係の関連性を、従来の研究成果を参考にして、応力増分/ひずみ増分/ひずみエネルギー増分を比較することで考察した。結果より、応力増分やひずみ増分は繊維材料と粒状材料で大きく異なる値を示すが、ひずみエネルギー増分で考えるとよい一致を示すことが明らかになった。これより、繊維材料の引張変形は粒状材料とひずみエネルギー増分が同等になるように進展していると考えられた。また、大嶺の研究に代表されるように、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分の等価性を仮定することによって、構成モデルを構築できる可能性の高いことが検証された。
- 4) 今回の実験結果を元に、複合則を用いた繊維-粒子複合材料の構成モデルの概念を提示した。ここでは、繊維材料の構成関係を弾完全挙動で考えること、繊維材料と粒状材料の関連性をひずみエネルギー増分の等価性を仮定して評価することでモデル化を行うのが適切であることをまとめとして示した。

**謝辞:** 本研究は、JSPS 特別研究員奨励費 (課題番号 26・4964) の支援を得て行われたものです。また本研究の遂行に当たり、長崎大学の大嶺聖教授、九州大学のハザリカ・ヘマンタ教授に御助言を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば, Ple, O. and Le T. N. H. : Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay, *Journal of Geotextile and Geomembranes*, Vol. 32, pp. 111-116, 2012.
- 2) 例えば, 三木博史, 藤井厚企, 小畑敬子, 藤木広一, 加津憲章, 増井仁 : 短繊維混合補強土の特性と現場適用事例, *ジオシンセティックス論文集*, 第13巻, pp. 337-345, 1998.
- 3) 例えば, 横田康行, 前田良刀, 落合英俊, 大嶺聖 : プラスチック片を混合したソイルセメント改良地盤の支持力特性, *土木学会論文集*, No.701, III-58, pp.87-97, 2002.
- 4) 例えば, 今井久 : 樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究, *ハザマ研究年報*, pp.34-52, 2008.
- 5) 例えば, Miyamoto, S., Yasufuku, N., Ishikura, R., Omine, K., Kawai, S., Yamawaki, A. : Shearing response and shear strength of solid waste material conducted by developed direct shear test apparatus, *Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, Session25-5*, 2014.
- 6) Hamidi, A. and Hoopesand, M. : Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand, *Journal of Geotextile and Geomembranes*, Vol. 36, pp. 1-9, 2013.
- 7) Ahmad, F., Bateni, F. and Azmi, M. : Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres, *Journal of Geotextile and Geomembranes*, Vol. 28, pp. 93-99, 2010.
- 8) Michalowski, R. L. and Cernak, J. : Strength anisotropy of fiber-reinforced sand, *Journal of Computers and Geotechnics*, Vol.29, pp.279-299, 2002.
- 9) 宮本慎太郎, 安福規之, 石藏良平, 大嶺聖, 山脇敦 : 堆積廃棄物のせん断強度特性へ及ぼす堆積方向の影響, *土木学会第68回年次学術講演会論文集(CD-ROM)*, pp.75-76, 2013.
- 10) Michalowski, R. L. and Zhao, Aigen. : FAILURE of FIBER-REINFORCED GRANULAR SOIL, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 3, pp.226-234, 1996.
- 11) Michalowski, R. L. : Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil, *Journal of Geotechnique*, Vol.58, No.6, pp.489-501, 2008.
- 12) 宮本慎太郎, 安福規之, 大嶺聖, 石藏良平, 山脇敦, 川井晴至 : 引張試験機による埋立廃棄物地盤の引張強度特性の解明と強度評価法の提案, *ジオシンセティックス論文集*, 第28巻, pp.229-236, 2013.
- 13) Prisco, C. and Nova, R. : A constitutive model for soil reinforced by continuous threads, *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.12, pp.161-178, 1993.
- 14) Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M. and Russell, A. R. : Fibre reinforced sands: Experiments and modelling, *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, pp.238-250, 2010.
- 15) Miyamoto, S., Yasufuku, N., Ishikura, R., Omine, K., Kawai, S. and Yamawaki, A. : In-situ shearing response and shear strength of various solid waste ground focused on fibrous materials composition, *Proceedings of the TC105 ISSMGE International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro*, Cambridge, UK, pp.1357-1362, 2014.
- 16) 宮本慎太郎, 安福規之, 大嶺聖, 石藏良平, 川井晴至, 山脇敦 : 組成割合の異なる埋立廃棄物の変形・強度特性, *土木学会論文集C分冊*, Vol.71, No.4, pp.278-291, 2015.
- 17) 東郷敬一郎 : 材料強度解析学, 第9章 複合材料の力学モデル, pp.193-216, 内田老鶴圃, 2004.
- 18) 高野直樹, 上辻靖智, 浅井光輝 : マイクロメカニクスシミュレーション, 2. マルチスケール法, pp.31-36, コロナ社, 2008.
- 19) 大嶺聖, 落合英俊 : 異なる弾性係数を持つ二種混合体の応力-ひずみ関係, *九州大学工学集報*, 第64巻, 第6号, 1991.
- 20) 落合英俊 : 砂の直接せん断試験における主応力の表示とその応用に関する研究, *九州大学*, 学位論文, 1977.
- 21) 例えば, 大島昭彦・高田直俊・池田靖宏 : 砂質土の定圧一面せん断試験における供試体高さや強度・変形特性, 第35回地盤工学研究発表会, pp.825-826, 2000.

## EXPERIMENTAL STUDY ON DEFORMATION PROPERTY OF FIBROUS MATERIAL IN FIBER REINFORCED GRANULAR MATERIAL

Shintaro MIYAMOTO, Noriyuki NAYASUFUKU,  
Ryohei ISHIKURA and Kiyonobu KASAMA

The contribution of fiber reinforcement to shear moduli and shear strength of granular material has been widely investigated by geotechnical engineering. A modelling approach for evaluating the constitutive behavior of fiber reinforced granular material has been required for predicting the deformability of fiber reinforced ground. In this study, the deformation property of fibrous material in fiber reinforced granular material is investigated for the purpose of fabricating a new constitutive model based on rule of mixture. Furthermore, the relevance of deformation property between fibrous material and granular material is considered from test results. The deformation property of fibrous material represents a tensile behavior on initial deformation, and finally pull-out behavior is observed. It is also considered that the deformation of fiber is progressed with equal to strain energy increment of granular material.

**KEYWORDS:** Fiber reinforced granular material, Deformation-strength property, Rule of mixture, Medium-sized direct shear test