

繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築とその埋立廃棄物への適用に関する研究

宮本, 慎太郎

<https://doi.org/10.15017/1654853>

出版情報：九州大学, 2015, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済



2015 年度（平成 27 年度）

博士論文

繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築と
その埋立廃棄物への適用に関する研究

宮 本 慎 太 郎

繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築と その埋立廃棄物への適用に関する研究

<目次>

第 1 章 序論.....	1
1.1 概説.....	1
1.2 繊維-粒子複合材料に関する既往の研究の概観.....	4
1.2.1 繊維混合補強土の応力・ひずみ関係に関する実験的研究.....	4
1.2.2 繊維混合補強土の力学モデルに関する研究の現状.....	5
1.2.3 埋立廃棄物の変形・強度特性に関する研究の要約.....	6
1.3 既往の研究の課題点と本研究の着眼点.....	8
1.3.1 繊維-粒子複合材料の構成モデルに関する研究の課題点.....	8
1.3.2 埋立廃棄物の変形・強度特性に関する研究の課題点.....	9
1.3.3 本研究の検討事項とその着眼点.....	10
1.4 本論文の構成とその内容.....	11
参考文献.....	14
第 2 章 繊維材料の変形挙動とその粒状材料との関連性.....	19
2.1 概説.....	19
2.2 可視化と数量化による繊維材料の変形挙動の把握.....	20
2.2.1 実験のイメージとねらい.....	20
2.2.2 可視化を目的とした一面せん断試験の概要.....	21
2.2.3 数量化を目的とした一面せん断試験の概要.....	22
2.3 粒状材料内での繊維材料の変形挙動.....	25
2.3.1 圧縮過程での繊維材料の変形挙動.....	26
2.3.2 せん断過程での繊維材料の変形挙動.....	27
2.4 繊維材料と粒状材料の変形挙動の関連性.....	32
2.4.1 関連性の意味および検討内容.....	32
2.4.2 応力/ひずみ/ひずみエネルギー増分値の導出方法.....	33

2.4.3	繊維材料と粒状材料の関連性の考察	35
2.5	本章の要約	37
	参考文献	38
第 3 章	繊維材料と粒状材料の関連性を考慮した繊維-粒子複合材料の構成モデル	40
3.1	概説	40
3.2	複合則をベースとした繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係	42
3.2.1	軸対称条件における応力 / ひずみパラメーター	42
3.2.2	巨視的均質性を仮定した応力 / ひずみの評価	42
3.2.3	応力分担テンソルの導入による均質化	44
3.2.4	ひずみエネルギー増分の等価性を仮定した応力分担テンソルの評価	45
3.3	構成材料の応力・ひずみ関係	46
3.3.1.	粒状材料の応力・ひずみ関係	47
3.3.2.	繊維材料の微視的な応力・ひずみ関係	49
3.3.3.	繊維配向角分布の評価	51
3.3.4.	繊維材料に引張ひずみが発生する条件式の導入	52
3.3.5.	繊維材料の巨視的な応力・ひずみ関係	54
3.3.6.	繊維材料の引き抜け挙動を規定する判定式の導入	55
3.3.7.	本モデルの解析フローおよび材料パラメーターの整理	57
3.4	繊維材料の特性に着目した繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係	59
3.4.1	体積含有率の影響	60
3.4.2	引張剛性の影響	61
3.4.3	繊維配向角分布の影響	62
3.4.4	繊維材料と粒状材料の界面強度の影響	63
3.5	実験結果との比較による構成モデルの有用性の検証	65
3.5.1	中型三軸試験装置の概要と実験条件	65
3.5.2	繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係とモデル解析結果との比較	67
3.5.3	既往の実験成果への適用	71
3.6	本章の要約	74
	参考文献	77
第 4 章	繊維廃材の影響に着目した埋立廃棄物の変形・強度特性	80
4.1	概説	80

4.2	現地踏査による埋立廃棄物地盤の実際および物理的性質	81
4.2.1	国内の産業廃棄物不法投棄等現場の整理と分類	81
4.2.2	本研究で対象とした廃棄物地盤の性状と物理的性質	84
4.3	原位置・室内両用型一面せん断試験装置の概要と実験方法	86
4.4	埋立廃棄物の変形・強度特性と初期状態量の影響	88
4.4.1	拘束圧の影響	89
4.4.2	初期乾燥密度の影響	90
4.4.3	応力履歴の影響	95
4.4.4	繊維廃材の配向性の影響	98
4.5	組成割合の異なる埋立廃棄物の原位置せん断特性	101
4.5.1	原位置せん断特性	101
4.5.2	原位置実験と室内実験の比較	106
4.5.3	原位置せん断強度	107
4.6	本章の要約	110
	参考文献	112
第 5 章	繊維-粒子複合材料としての埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価	115
5.1	概説	115
5.2	三軸圧縮試験による埋立廃棄物の応力・ひずみ関係	116
5.2.1	試料の概要	116
5.2.2	実験の概要と実験条件	119
5.2.3	応力・ひずみ関係の実際	119
5.3	モデル解析に必要な材料パラメーターの決定方法	122
5.3.1	繊維廃材の材料パラメーター	123
5.3.2	粒状廃材の材料パラメーター	128
5.3.3	提案した方法による材料パラメーターの妥当性の検証	128
5.4	提案した構成モデルによる埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価	131
5.5	本章の要約	134
	参考文献	135
第 6 章	総括	137
	謝辞	142

説明記号

$\mathbf{b}$	応力分担テンソル
c	粘着力
c_e	Hvorslev の規準による有効粘着力
c_{fg}	繊維材料と粒状材料の界面粘着力
c_T	大型引張試験結果から求まる引張粘着力
$\bar{\mathbf{D}}_f$	繊維材料の剛性マトリックス
$\bar{\mathbf{D}}_m, \bar{\mathbf{D}}_m^{ep}$	粒状材料の (弾塑性) 剛性マトリックス
D_r	相対密度
E_f	繊維材料のヤング率もしくは引張剛性
E_m	粒状材料のヤング率
E_T	大型引張試験による初期剛性
G	せん断弾性係数
h	一面せん断試験における垂直変位
h_T	大型引張試験による垂直変位
$\mathbf{I}$	単位行列
K	体積圧縮係数
k	透水係数
p	平均主応力
$\bar{p}$	複合材料の巨視的な平均主応力
$\bar{p}_f$	繊維材料の巨視的な平均主応力
p_f^*	繊維材料の微視的な平均主応力
$\bar{p}_m$	粒状材料の巨視的な平均主応力
q	軸差応力
$\bar{q}$	複合材料の巨視的な軸差応力
$\bar{q}_f$	繊維材料の巨視的な軸差応力
q_f^*	繊維材料の微視的な軸差応力
$\bar{q}_m$	粒状材料の巨視的な軸差応力
V_f	繊維材料の体積
V_m	粒状材料の体積
V_v	間隙の体積

$\bar{W}$	複合材料のひずみエネルギー
$\bar{W}_f$	繊維材料のひずみエネルギー
$\bar{W}_m$	粒状材料のひずみエネルギー
w	含水比
w_{opt}	最適含水比
w_f	繊維材料の重量含有率
α	繊維材料の配向とせん断面の角度(繊維-せん断面角度)
δ	一面せん断試験におけるせん断変位
δ_T	大型引張試験による引張変位
ε_a	軸方向のひずみ
ε_r	側方向のひずみ
ε_p	体積ひずみ
ε_q	軸差ひずみ
$\bar{\varepsilon}$	複合材料の巨視的なひずみ
$\bar{\varepsilon}_q$	複合材料の巨視的な軸差ひずみ
$\bar{\varepsilon}_p$	複合材料の巨視的な体積ひずみ
ε_f	繊維材料のひずみ
$\bar{\varepsilon}_f$	繊維材料の巨視的なひずみ
$\bar{\varepsilon}_{fq}$	繊維材料の巨視的な軸差ひずみ
$\bar{\varepsilon}_{fp}$	繊維材料の巨視的な体積ひずみ
ε_f^*	繊維材料の微視的なひずみ
ε_{fa}^*	繊維材料の微視的な軸方向のひずみ
ε_{fr}^*	繊維材料の微視的な側方向のひずみ
ε_{fp}^*	繊維材料の微視的な体積ひずみ
ε_{fq}^*	繊維材料の微視的な軸差ひずみ
$\bar{\varepsilon}_m$	粒状材料の巨視的なひずみ
$\bar{\varepsilon}_{mp}^e$	粒状材料の巨視的な体積ひずみ(弾性領域)
$\bar{\varepsilon}_{mp}^p$	粒状材料の巨視的な体積ひずみ(塑性領域)
$\bar{\varepsilon}_{mq}^e$	粒状材料の巨視的な軸差ひずみ(弾性領域)
$\bar{\varepsilon}_{mq}^p$	粒状材料の巨視的な軸差ひずみ(塑性領域)
ε_m^*	粒状材料の微視的なひずみ
ϕ	内部摩擦角
ϕ_s	セカントアングル

ϕ_e	Hvorslev の規準による有効摩擦角
ϕ_{fg}	繊維材料と粒状材料の界面摩擦角
ϕ_m	粒状材料の内部摩擦角
ϕ_T	大型引張試験結果から求まる引張摩擦角
μ_f	繊維材料の体積含有率
μ_m	粒状材料の体積含有率
ν_m	粒状材料のポアソン比
θ	繊維材料の配向角度
ρ_d	乾燥密度
ρ_{di}	初期乾燥密度
ρ_{dmax}	最大乾燥密度
ρ_t	湿潤密度
σ, σ_n	上載圧もしくは垂直応力
σ_a	軸方向の応力
σ_r	側方向の応力
σ_θ	角度 θ 方向の応力
$\bar{\sigma}$	複合材料の巨視的な応力
σ_f	繊維材料の応力
$\bar{\sigma}_f$	繊維材料の巨視的な応力
σ_f^*	繊維材料の微視的な応力
σ_{fa}^*	繊維材料の微視的な軸方向の応力
σ_{fr}^*	繊維材料の微視的な側方向の応力
$\bar{\sigma}_m$	粒状材料の巨視的な応力
$\bar{\sigma}_{mr}$	粒状材料の巨視的な側方向の応力
$\bar{\sigma}_{ma}$	粒状材料の巨視的な軸方向の応力
σ_m^*	粒状材料の微視的な応力
σ_c^*	先行圧縮応力
σ_T	大型引張試験による引張応力
τ	せん断応力
τ_f	せん断強度
τ_θ	角度 θ 方向のせん断応力
τ_{fg}	繊維材料と粒状材料の界面強度
ψ_m	粒状材料のダイレイタンシー角

第1章 序論

1.1 概説

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が、土などの粒状材料に混入することで、強度・靱性などの力学的性質の向上、降雨・流水などに対する耐洗掘性の向上などの補強効果が表れることが知られている¹⁾。地盤工学において、このような繊維材料の補強効果に着目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²⁾、高性能・高靱性の繊維補強セメント系複合材料の開発³⁾、廃棄系繊維材料(廃プラスチック材、竹チップ・竹繊維、木片系廃材等)の有効利用法の検討⁴⁾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⁵⁾や、埋立廃棄物の変形・強度特性に関する研究⁶⁾なども含まれるといえる。

特に近年では、土構造物の粘り強さや被災時の復旧の簡便さ、および長寿命化などを考慮する上で、このような繊維材料と粒状材料の複合材料(本研究では広義な意味で「繊維-粒子複合材料」と称する)を用いた補強技術が注目を浴びている⁷⁾。繊維-粒子複合材料は、繊維材料の種類・寸法や縦横比・含有率・剛性・強度などによって、力学特性が様々に変化する材料であり、今後、利用目的や用途に応じた補強効果のコントロールを可能にすることで、より広くより高度に活用できる補強技術になり得ることが期待されている。またその際には、従来にも増して、繊維-粒子複合材料の変形・強度特性の精度の良い評価や、繊維補強技術を用いた地盤の変形性・安定性の予測、および合理的な設計法の確立が求められてくるものと考ええる。しかし、後述するように、繊維-粒子複合材料に関する研究は、繊維材料の特性や粒状材料の特性、および複合材料の状態量を変化させた際の応力・ひずみ関係を実験的に把握しているものがそのほとんどを占めている。このことから、繊維-粒子複合材料の強度評価や応力・ひずみ関係の予測に主眼を置いた理論的な研究のさらなる発展が強く求められているのが現状である。

同時に、近年の地球温暖化による集中豪雨の頻発や、地殻の活動期による大型地震・大型津波の発生など、自然環境はますます凶暴化してきており、繊維-粒子複合材料の劣化現象の多様化やその促進の影響が懸念されている⁸⁾。さらに、土構造物の設計は、安全率を用いる設計法から信頼性をベースとした限界状態設計法へと移行しており^{9) 10)}、繊維補強土構造物においても材料のばらつきや施工時における不確実性を確率的に取り扱うことが必要不可欠になってくると考える。

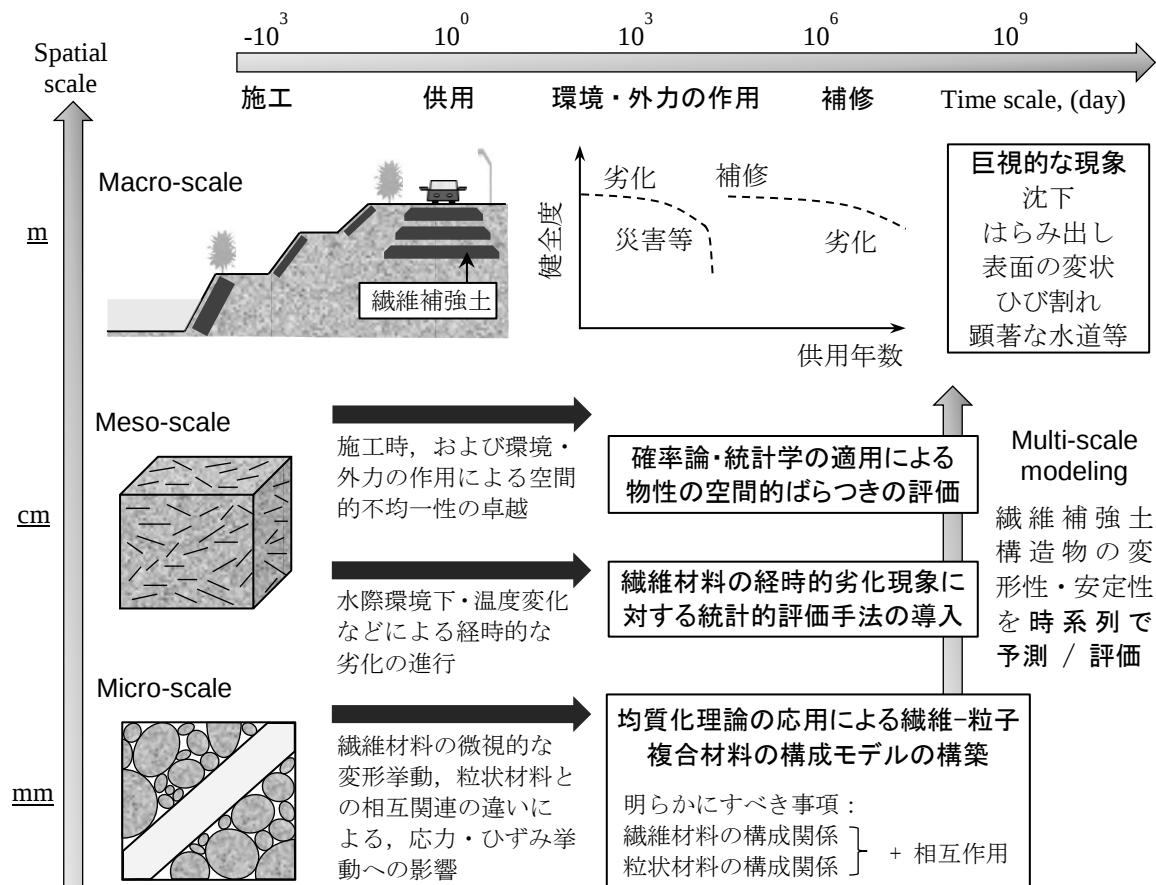


図-1.1 時間・空間的不均一性を考慮した繊維-粒子複合材料の力学モデルの概要

本研究では、このような背景の下、繊維材料の時間・空間的な不均一性の評価を導入した繊維-粒子複合材料の力学モデルの構築を目指した取り組みを行っている。提案する本モデルの概要は、図-1.1 に示す通りであり、まず初めに、均質化理論を応用して要素レベルでの繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築する。さらに、繊維材料の経時的な劣化現象を統計的に評価する手法を開発し、その評価法を先の構成モデルに導入する。また要素レベルから実スケールに評価を拡張する際には、確率論・統計学を援用して繊維材料の空間的なばらつきを評価することで、繊維-粒子複合材料を使用した補強土構造物の変形性・安定性を時間・空間スケールに応じて予測 / 評価することを考えている。このような理論的な解釈に基づいた力学モデルの構築によって、供用年数や施工時の不可避な空間的なばらつきを考慮した繊維材料の種類・含有率の決定や設計における構造形式の合理化が可能になるといえる。さらに劣化や補修を考慮した構造物の維持管理システムの構築へもつながり、繊維補強土構造物の設計・維持管理・補修・長寿命化までを見通したライフサイクルの高度化へと寄与できると考える。本研究は、土などの粒状材料の力学体系と、繊維材料などの複合材料の力学体系を時間・空間的なスケールを考慮して結びつける興味深い研究領域であり、実用的立場に加え、学問的興味からもその発展が強く望まれている。

一方で、廃棄物処理・処分施設の不足や、それに伴う処分費用の高騰によって、産業廃棄物の不法投棄や処分場の不適切管理（以下、「不法投棄等」と称する）が多数発生しており、重大な社会環境問題となっている¹¹⁾。不法投棄等は、主に中間処理施設や最終処分場において許可容量以上の廃棄物を受け入れて残置することにより発生する。そのため、膨大な量の廃棄物が急勾配で堆積している現場が多く、廃棄物の崩落や斜面の崩壊などの力学的な問題が深刻化している¹²⁾。しかし、廃棄物に関する既往の研究は、環境影響評価や処分技術、遮水技術に関するものが主であり、力学的な性質に着目した研究はあまり多くないのが現状である¹³⁾。近年では、処分場の崩壊に触発されて、力学的安定性に関する調査や実験的研究が行われてきているが、安定性評価手法の確立や、崩壊・支障等に対する対策工の選定に関する基準の確立には至っていない。そのため、廃棄物の力学特性を明らかにし、適切な評価手法の提示を目指した研究の進展が強く求められている¹⁴⁾。また既往の研究により、埋立廃棄物の力学特性は、繊維廃材の影響により延性的な挙動が卓越することが報告されており¹⁵⁾、広義に考えれば、繊維-粒子複合材料として取り扱える可能性がある。そこで本研究では、埋立廃棄物の力学特性を把握すると共に、本モデルの適用によってその力学特性を評価することを考えた。廃棄物地盤は現場によって廃材の種類や割合（以下、「組成割合」と称する）が異なる非常に複雑な構造を有しており、かつ時間による劣化現象や空間的なばらつきの卓越した地盤であるといえる。そのため、本モデルを適用することで、繊維材料に着目して廃棄物地盤の変形性・安定性を簡便に予測することができれば、廃棄物の空間資源としての社会還元へも繋がり、循環型社会の構築へと大きく貢献できると考える。

本論文では、以上のような点に鑑み、第一に繊維-粒子複合材料の力学モデルの構築を目的とし、その適用性の拡大として、埋立廃棄物の力学特性の把握と本モデルの適用を試みたものである。ここで、図-1.1に示した力学モデルの概要の中で、本論文では特に構成モデルに関する研究成果を取りまとめるものとした。まず、均質化理論を応用して繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築を行い、次に埋立廃棄物の変形・強度特性の解明、および本モデルの埋立廃棄物への適用を行った結果を記した。また、時間・空間的な不均一性の評価については今後の課題とした。

本論文の具体的な内容は以下のようなものである。まず、微視的な要素を想定して繊維材料の粒状材料内での変形挙動を実験的に明らかにし、さらに繊維材料と粒状材料の変形挙動の関連性についても考察を行った。また、これらの実験成果を元に、均質化理論を応用した繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築し、繊維材料の特性である含有率・剛性・配向性・界面強度の影響を予測できることを実験結果との比較により検証した。次に、国内の産業廃棄物不法投棄等現場を対象として、埋立廃棄物の力学特性を原位置試験と室内試験により把握し、繊維材料の挙動や含有率に着目することで、その力学特性を包括的に解釈できることを実験的に示した。最後に、繊維-粒子複合材料の構成モデルを廃棄物の応力・ひずみ関係の評価へ適用し、その有用性の検証を行った。

まず本章では、繊維-粒子複合材料の中でも、特に繊維混合補強土と埋立廃棄物に焦点を当てて

既往の研究成果を概観するものとした。繊維混合補強土については、力学特性を実験的に把握した研究成果を要約し、さらに力学モデルに関する研究の流れと現状の把握を行った。埋立廃棄物については、変形・強度特性に関する研究成果を整理した。これより、これら既往の研究の現状とその課題点を示すと共に、本研究の主たる検討事項と着眼点を明確なものにした。さらにそれらを踏まえて、本論文の構成とその内容について言及するものとした。

1.2 繊維-粒子複合材料の力学特性に関する既往の研究の概観

1.2.1 繊維混合補強土の変形・強度特性に関する実験的研究

繊維混合補強土を対象とした研究成果の多くは、補強技術の実用化を目指して力学特性の把握を行った実験的研究である。このような研究では、繊維材料や粒状材料およびその状態量をパラメトリックに変化させて力学実験、主に三軸圧縮試験を実施し、その際の繊維混合補強土の変形・強度特性を調べている。それらによると、繊維混合補強土の力学特性は、図-1.2 に示すように、「繊維材料の特性」・「粒状材料の特性」・「複合材料の状態量」に影響を受けることが明らかになっている。その中でも特に、繊維材料の種類・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」に着目した実験成果が最も多く、その影響も大きいようであった。そのため、ここでは繊維材料の特性に着目した実験成果をいくつか紹介する。例えば、Hamidi and Hooresfand¹⁶⁾ は繊維材料の含有率を重量比で 0~1% まで変化させて三軸圧縮試験を行った。その結果、繊維含有率が増加することで、初期剛性は低下するものの、降伏時の応力値やひずみ値は増加するような延性的な挙動を示すことを明らかにした。さらにこの時のピーク応力値からせん断強度定数(粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ) を求めた結果、繊維含有率の増加は特に粘着力の向上につながることを考察している。繊維材料の長さや寸法に着目した成果としては、例えば Ahmad et al¹⁷⁾ が挙げられる。Ahmad et al は、繊維の長さを 15, 30, 45 mm と変化させて三軸圧縮試験を行った。それによると、繊維長の変化による初期剛性への影響はあまり認められないようであった。しかし、ピーク強度やせん断強度定数には違いが見られ、繊維長が増加するに伴って粘着力は徐々に増加するような傾向を示し、内部摩擦角は繊維長 30 mm の時に最大になる傾向を示した。また Diambra et al¹⁸⁾ は、繊維材料の種類(寸法や形状、引張剛性など)が異なる 3 種類の繊維材料を用いて三軸圧縮試験を行っている。それによると、繊維含有率が同等の場合でも、繊維材料の種類の違いによる影響は大きいようであった。特に引張剛性の違いや繊維材料と粒状材料の界面での摩擦強度の違いに依存にして補強効果の変化することが考察されている。また Michalowski and Cermak¹⁹⁾ は、繊維材料がほぼ水平に堆積した状態・ほぼ垂直に堆積した状態・ランダムに堆積し

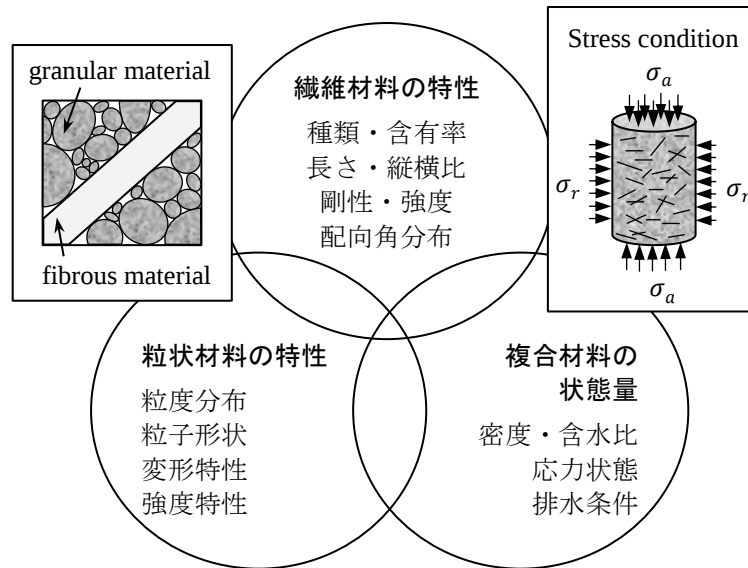


図-1.2 繊維混合補強土の変形・強度特性に及ぼす影響因子(既往の実験成果より考察)

た状態について三軸圧縮試験を実施し、応力・ひずみ関係に及ぼす繊維配向角度の影響を調べた。繊維配向角度の初期剛性への影響はほとんど認められないものの、靱性に関して繊維配向角度が垂直 < ランダム < 水平の関係で補強効果が顕著に表れることが明らかになっている。繊維配向角度とせん断面の方向の違いによって異方性が表れることは多くの研究者によって指摘されている。しかし、繊維配向角度の影響を実際に調べた例は多くなく、Michalowski and Cermak による実験結果は、繊維材料による異方性の影響を考察する上での重要な研究成果であるといえる。

以上のように、ここでは特に繊維材料の特性に着目した実験成果を紹介した。これらの実験的研究によると、繊維材料の含有率や長さ、引張剛性および界面摩擦強度などの増加、および繊維配向角度の違いにより、繊維材料の影響が卓越するケースにおいて、基本的に繊維混合補強土は延性的な挙動を示すようになり、初期剛性は少し低下するもののピーク強度が大幅に増加する傾向にあることが判断できる。しかし、そのほとんどの成果が、ある特定の条件下での力学試験結果であるため、一般性にはやや欠けるといえる。また各実験をみると、供試体レベルの大きさを想定して応力・ひずみ関係を把握しているものがほとんどであり、複合材料が変形する際に、繊維材料はどのような状態にあり、どのような補強効果が発揮されているのかが判断できない状況にある。本来、繊維材料の特性とその補強効果への影響を解明するためには、複合材料が変形する際の繊維材料の変形挙動を詳細に把握し、補強効果の実際を考察する必要があると考える。

1.2.2 繊維混合補強土の力学モデルに関する研究の現状

繊維混合補強土の変形・強度特性を評価することや、先の実験成果に見られたような、繊維混合補強土の変形・強度特性に及ぼす繊維材料の影響を一般化した考察を与えることを目的として、

いくつかの力学モデルが提案されている。その中でも、繊維材料による補強効果を加味したせん断強度評価法を提案している研究成果が最も一般的であるといえる。

例えば、Zornberge²⁰⁾ は、粒状材料と繊維材料の強度の重ね合わせにより、繊維混合補強土のせん断強度を評価する方法を提案している。また Michalowski²¹⁾ は、繊維配向角度を変化させて三軸圧縮試験を行った結果を元に、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、Zornberge のように粒状材料の強度にその繊維材料の強度を重ね合わせることでせん断強度を評価する方法を提案した。繊維混合補強土のせん断強度評価は、上述のように、繊維材料が含有することによる付加的な強度を引張強度などで別途定義し、粒状材料の強度に重ね合わせることで評価する方法が一般的であるといえる。また Michalowski により、繊維材料の配向角分布を適切に評価することの重要性も示唆された。

その他に、少数ではあるが、繊維混合補強土の構成モデルも提案されている。その多くが、均質化理論をベースとして、粒状材料と繊維材料の特性を均質化することで応力・ひずみ関係を導出するものとなっている。例えば、Prisco and Nova²²⁾ 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均質化し、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 al²³⁾ は、Mikalowski²¹⁾ 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 Nova²²⁾ に提案されたようなひずみ増分を等価とする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ている。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。しかしながら、繊維材料が補強効果を発揮する条件があいまいなものが多く、補強メカニズムを適切に評価できていない可能性が示唆された。また、均質化するに当たって、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象を十分に考慮しているとは言い難い。これらのことを踏まえると、繊維材料の変形挙動、補強効果が発揮される条件、繊維材料と粒状材料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考える。

1.2.3 埋立廃棄物の変形・強度特性に関する研究の要約

7 割以上の廃棄物が焼却処分されている日本では、不法投棄等廃棄物のような直接投棄された埋立廃棄物の力学特性に焦点を当てた研究例は非常に少ない。しかし最終処分場の跡地利用を目的として一般廃棄物の変形・強度特性を実験的に調べた Towhata et al^{24),25),26)} の研究が参考になる。Towhata et al は、東京湾の廃棄物処分場から持ち帰った一般廃棄物の圧縮性、せん断特性、地震時変形特性を大型三軸圧縮試験により調べている。一般廃棄物の変形・強度特性は、有効応力の影響を初めとして土の挙動と類似する傾向を示し、土質力学の概念が適用可能であることを考察した。さらに廃棄物の特徴として、プラスチック等の繊維廃材の影響により、土地盤に比べて初

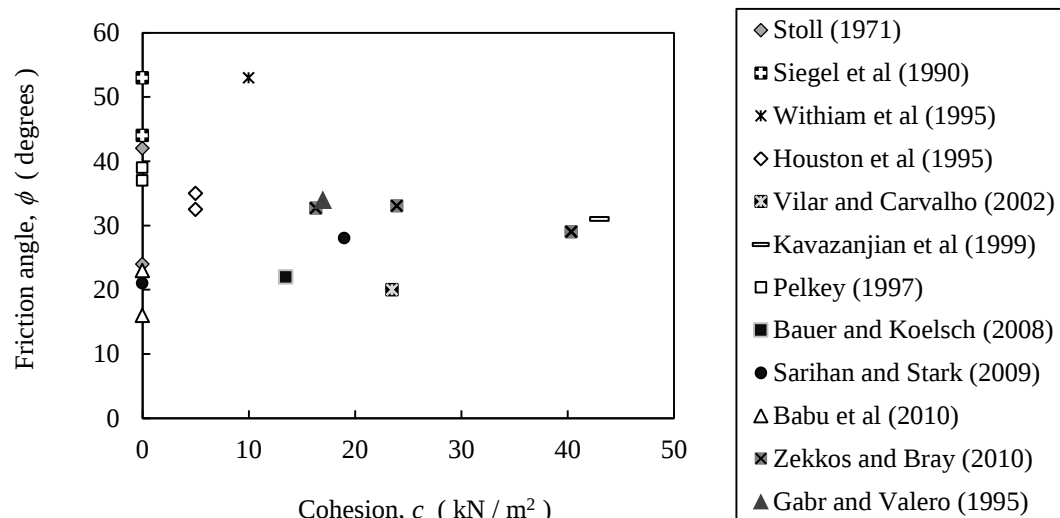


図-1.3 種々の埋立廃棄物のせん断強度定数(既往の研究成果^{18),22)~32)}より整理)

期剛性が低いことや、拘束圧の増加による密度増加が大きく、強度の拘束圧依存性が高いことなどを明らかにしている。

海外では、日本とは異なり 7 割以上を直接投棄により処分している国が多く存在し、都市固形ごみの力学特性に関する研究が行われている。Kavazanjian et al²⁷⁾ は三軸圧縮試験結果から、廃棄物のせん断特性に繊維廃材による補強効果が発現することを指摘し、せん断試験では廃棄物の強度を過小評価していることを考察した。また Zekkos and Bray et al^{28),29),30),31)} はサンフランシスコ湾の処分場より採取した廃棄物を用いて大型一面せん断試験、三軸圧縮試験、単純せん断試験を行った。実験結果より、繊維廃材の補強効果によりせん断強度の異方性が卓越することを明らかにした。強度異方性は廃棄物の堆積構造とせん断面の関係によって発生するものである。このことから、堆積方向とせん断面の角度が 0° に近くなる一面せん断試験が廃棄物のせん断強度の評価には最も適していることを考察した。ここで参考のために、廃棄物のせん断強度定数を算定した既往の研究成果を図-1.3 に整理した^{28),32)~42)}。本図はせん断強度定数である粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の関係を表している。それぞれの研究で用いた廃棄物の種類や、試験法によつての強度定数のばらつきが大きく、粘着力は $c = 0 \sim 40 \text{ kN/m}^2$ 程度、内部摩擦角は $\phi = 15 \sim 55^\circ$ 程度であった。しかし、ばらつきは非常に大きいものの、廃棄物のせん断強度は土と同程度といえる。

上述の実験的研究は、埋立廃棄物の力学特性を明らかにし、その力学特性が繊維廃材の影響を大きく受けることなどを定性的に示した貴重な成果といえる。しかし廃棄物の強度評価を行うには繊維廃材の影響を定量的に示すことが重要となる。このような立場から、Koelsch^{43),44),45)} はせん断試験の他に、開発した大型引張試験機を用いて廃棄物の引張強度特性を求めており、せん断強度に認められた補強効果は、繊維廃材に起因する引張強度によって発現することを実験結果と理論的解釈により考察している。さらに引張強度を考慮した斜面安定解析法を提示し、廃棄物の斜

面安定性は一般的な砂質土 ($\phi = 30^\circ$ 程度) のそれと比べて高いことを指摘している。Koelsch による埋立廃棄物の引張強度特性に関する研究は、繊維廃材の補強効果を考慮して強度特性を考察する上で、非常に重要な知見を提示しているといえる。

埋立廃棄物の力学特性に及ぼす影響としては、繊維廃材等の材料が及ぼす影響の他に、時間による効果も指摘されている。Singh and Fleming⁴⁶⁾ らは廃棄物処分場での簡易原位置試験により、廃棄物の剛性が年代とともに向上することを指摘した。Koelsch も同様に、廃棄物によっては分解作用により、時間の経過とともに力学特性が変化することを指摘している。この他にも、逆解析により堆積廃棄物の粘着力、内部摩擦角の標準的な値を提案している文献や廃棄物地盤の深さごとの密度の求め方の提案、処分場の物理・化学特性の整理を行っている文献等も存在する^{47)~50)}。

これら既往の研究は、本研究で対象としている産業廃棄物とは異なるものの、実際の廃棄物の力学特性に関する希少な知見を与えている。また廃棄物の種類が異なるにも関わらず、共通して繊維廃材の影響を指摘している点も興味深い。しかし、処分場から採取した 1 種類の廃棄物に関する検討が多く、廃棄物地盤を構成する廃材の種類や割合 (以下、「組成割合」と称する) を十分に考慮していないため、相対的に比較・検討することは難しい。また、室内試験が主に行われていることから、原位置での力学特性の把握が課題となっている。

1.3 既往の研究の課題点と本研究の着眼点

1.3.1 繊維-粒子複合材料の構成モデルに関する研究の課題点

ここでは、先に述べた繊維混合補強土の変形・強度特性を把握した実験成果、およびその力学モデルに関する従来の研究成果より、繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築に関して、今後検討されるべき課題点を整理した。以下に、それらの課題点をまとめて示した。

- 1) 「繊維材料の特性」・「粒状材料の特性」・「複合材料の状態量」の影響が繊維-粒子複合材料の変形・強度特性に与える影響は多くの研究者によって調べられており、繊維材料の影響が顕著になる条件下において、強度や靱性の増加などの補強効果が卓越することが一般的に知られている。しかしながら、繊維材料がどのような状態・挙動を示すことで補強効果が発揮されているのかはまだ不明な点も多く、補強メカニズムの実際は明らかになっていない。そのため、複合材料内で繊維材料がどのような変形挙動を示すのかを詳細に把握し、真に補強効果の増加に寄与する繊維材料の特性を明確にする必要がある。
- 2) 繊維-粒子複合材料は、繊維材料が様々な配向角度で混入していることによって不均質性や異方性を示すことが材料力学的に特異な特性であるといえる。実際、繊維配向角度の違いが力

学特性に与える影響の大きいことが、既往の研究により考察されている。しかし現状では、繊維配向角度やそのばらつきに着目した実験結果や、その影響を理論的に説明している研究成果はまだ少ない。これより、繊維配向角度の違いが繊維材料によって発揮される補強メカニズムに与える影響を明らかにすることは非常に重要である。さらに繊維配向角の影響を評価する手法を、力学モデルへ導入するための検討が十分になされるべきである。

- 3) 均質化理論は、不均質性を有する複合材料の力学特性をモデル化する上で、有用な手段であることが知られている。繊維混合補強土についても、均質化理論をベースとした構成モデルの提案がいくつかなされており、既往の研究成果によってその有用性が検証されている。しかしながら、多くの場合、繊維材料の応力・ひずみ関係は単純な弾性挙動と仮定されており、さらに補強効果が発揮される条件があいまいなものが多い。また、繊維材料と粒状材料をひとつの材料として均質化するに当たって、粒状材料と繊維材料の関連性が十分に考慮されているとは言い難い。これより、繊維材料の変形挙動の実際と補強効果が発揮される条件を明らかにし、繊維材料と粒状材料の応力・ひずみ関係の関連性を十分に考察した上で、それらの特徴を構成モデルの中に反映させることが求められている。

本論文では、この中の 1), 2) を実験的に明らかにし、均質化理論をベースとして繊維-粒子複合材料の構成モデルを定式化する際に、3) の内容を明確に記述するものとした。

1.3.2 埋立廃棄物の変形・強度特性に関する研究の課題点

ここでは、先に述べた埋立廃棄物の変形・強度特性に関する研究成果より、埋立廃棄物の力学特性の解明とその評価に関して、今後検討されるべき課題点を示した。

- 1) 既往の研究では、1 種類の廃棄物を用いた実験結果が主であり、廃棄物の組成割合が明確でないものが多い。廃棄物の組成割合は各国の生活水準や社会経済、及び処理方法の違いや処理技術の進展によって変化するものである。つまり現場によって組成割合が大きく異なることが廃棄物地盤の特徴といえる。種々の廃棄物地盤を適切に評価することを考えると、組成割合の異なる廃棄物の変形・強度特性を明確にすると共に、力学特性に影響を及ぼす支配的要因を明らかにする必要がある。
- 2) 廃棄物地盤は時間の経過と共に生物分解の進行や、カルシウム分の固結化が地盤内部で起こる特異な堆積構造を有している。これより、時間経過によって廃棄物の堆積構造や力学特性は変化すると考えられ、堆積構造が乱された攪乱試料を使用する通常の室内試験では実地盤における力学特性を再現できない可能性が高い。つまり、廃棄物地盤の実際の力学特性を明らかにするには、原位置において乱さない供試体の力学特性の解明が必要である。さらに、原位置で不攪乱試料の力学特性を把握すると共に、室内の攪乱試料との力学特性の違いが十分に考察されるべきである。

- 3) 廃棄物を用いた種々の実験成果が報告されているが、特定の実験条件での結果であり、まだまだ一般性には欠けている。廃棄物の状態量（例えば、密度・含水比・堆積構造等）や繊維材料の影響の違いが、変形・強度特性に与える影響を詳細に明らかにすると共に、その力学特性に理論的な解釈を与えるような研究の進展が求められている。

本論文では、以上の 3 点に着目して、埋立廃棄物の変形・強度特性を把握した上で、繊維-粒子複合材料としての構成モデルの適用に関する検討を行うものとする。

1.3.3 本研究の検討事項とその着眼点

本論文の主要な目的は、繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築とその埋立廃棄物への適用であること、はすでに述べた。このような目的の中で、これまでの研究の現状やその課題点を考慮した上での、本研究の検討事項とその着眼点を以下に整理した。

- 1) 要素スケールでの繊維-粒子複合材料の変形・強度特性を把握するのみでは、繊維材料による補強効果の実際を把握するのは難しい。そこで本論文では、複合材料の微視的な領域に着目して、複合材料に応力が加わり変形する際の粒状材料内での繊維材料の変形挙動を実験的に明らかにすることを試みた。また繊維材料の配向角度を適切に評価することの重要性が既往の研究成果により考察されていることから、繊維材料の配向角度の違いが繊維材料の変形挙動に及ぼす影響についても考察した。さらに、これらの実験結果を元に、粒状材料と繊維材料の変形挙動の関連性を考察し、均質化理論によって繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築を図る上で、考慮されるべき繊維材料の補強メカニズムの実際を明らかにした。
- 2) 繊維材料の変形挙動を明らかにした本実験成果を元に、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を評価する構成モデルの構築を行った。ここでは特に、繊維材料と粒状材料の特性を均質化する方法、および繊維材料と粒状材料の各々の応力・ひずみ関係を評価する方法を考察した。その中で、繊維材料については、微視的な特性から巨視的な特性を評価する際に、繊維配向角分布の影響を考慮するものとし、繊維材料の不均質性の影響を評価できるものとした。さらに、繊維材料に引張ひずみが発生する条件や繊維材料が引き抜け挙動を示す条件を、繊維配向角分布と関連付けて評価する方法を導入することで、繊維材料により補強効果が発揮される条件を明確にするものとした。
- 3) 埋立廃棄物の力学特性を明らかにする上で、廃棄物の組成割合の影響や原位置での不攪乱試料の力学特性を把握しておく必要がある。そこで本論文では、組成割合の異なる国内不法投棄等現場 2 ヶ所と海外の埋立処分場 2 ヶ所を含めた計 4 ヶ所の廃棄物地盤を対象として、室内と原位置で力学試験を実施し、組成割合と力学特性の関係、および原位置での力学特性を明らかにするための検討を行うものとした。一方で、原位置実験では、拘束圧や密度などの初期状態量の影響が及ぼす影響を詳細に把握することができないため、廃棄物 1 種類を使

用して広範な条件下で室内力学実験を実施し、廃棄物の基本的な変形・強度特性の把握を行うと共に、その力学特性に及ぼす支配的な要因を詳細に議論した。

- 4) 提案する繊維-粒子複合材料の構成モデルを埋立廃棄物の評価へ適用することで、埋立廃棄物の応力・ひずみ関係に理論的な解釈を施すことを目指した。ここでは特に、本モデルを適用する上でのパラメーターの設定方法や、その適用条件を明らかにするものとした。また実験結果との比較により有用性を検証すると共に、現状での課題点を明確にした。

本論文で取り扱うこのような実験的あるいは理論的研究の成果は、繊維-粒子複合材料の変形・強度特性をよりよく理解する上で、重要な知見を提供し、また実際の問題に力学モデルを適用する上での有益な情報を与え得るものである。

1.4 本論文の構成とその内容

本論文は、序論と総括を含めて次の 6 つの章から構成されている。

第 1 章 序論

第 2 章 繊維材料の変形挙動とその粒状材料との関連性

第 3 章 繊維材料と粒状材料の関連性を考慮した繊維-粒子複合材料の構成モデル

第 4 章 繊維廃材の影響に着目した埋立廃棄物の変形・強度特性

第 5 章 繊維-粒子複合材料としての埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価

第 6 章 総括

本論文の内容を各章ごとに以下に示すと共に、論文の構成を図-1.4 に示した。

第 1 章では、まず、本研究の背景と目的を示した。さらに既往の研究成果を概観し、繊維補強土の力学特性とその構成モデルに関する研究の現状、および埋立廃棄物の変形・強度特性に関する研究の要約を行った。本論文で対象とする繊維-粒子複合材料に関する研究の現状の把握と課題点の抽出を行うと共に、本研究の検討事項やその着眼点を明確にした。

第 2 章では、繊維-粒子複合材料において、繊維材料の変形挙動と補強メカニズムの実際を把握するための実験的な検討を行った。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料内に混入して一面せん断試験を行うことで、繊維材料が粒状材料内でどのような変形挙動を示すのかを明らかにした。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実験を行うことで、繊維配向角度による影響を検討した。さらに、これらの実験結果を元に、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と共に、均質化

第 1 章 序論

- ◆ 繊維-粒子複合材料の力学特性に関する既往の研究の概観
- ◆ 問題点 / 検討事項と着眼点の整理

繊維-粒子複合材料の
構成モデルの構築に関する検討

埋立廃棄物の力学特性と
本モデルの適用に関する検討

第 2 章 繊維材料の変形挙動とその 粒状材料との関連性

- ◆ モデル化の概要と課題点
- ◆ 実験条件と方法
- ◆ 粒状材料内での繊維材料の変形挙動
(圧縮過程, せん断過程)
- ◆ 粒状材料と繊維材料の関連性
- ◆ 応力/ひずみ/ひずみエネルギー増分値
の導出方法とそれぞれの比較
- ◆ モデル化の方法と着眼点の整理

第 3 章 繊維材料と粒状材料の関連性 を考慮した繊維-粒子複合材 料の構成モデル

- ◆ 応力分担テンソルの導入による応力・
ひずみ関係の定式化
- ◆ 粒状材料の応力・ひずみ関係
- ◆ 繊維材料の微視的な応力・ひずみ関係
- ◆ 繊維配向角分布の導入
- ◆ 引張ひずみが発生する条件式の導入
- ◆ 繊維材料の巨視的な応力・ひずみ関係
- ◆ 引き抜け挙動を規定する判定式の導入
- ◆ 実験結果との比較による有用性の検証

第 4 章 繊維廃材に着目した埋立廃棄 物の変形・強度特性

- ◆ 廃棄物地盤の実際と物理的性質(国内
不法投棄等現場 2 ヲ所 / 海外処分場 2
ヶ所での現地踏査)
- ◆ 原位置・室内両用型一面せん断試験装
置の開発(実験装置の概要 / 実験方法)
- ◆ 廃棄物の基本的な変形・強度特性とせ
ん断強度評価(初期状態量の影響)
- ◆ 組成割合の異なる埋立廃棄物の原位置
せん断特性(繊維廃材含有率と原位置
せん断特性の関係)
- ◆ 原位置せん断強度とその評価

第 5 章 繊維-粒子複合材料としての 埋立廃棄物の応力・ひずみ関 係の評価

- ◆ 軸対称条件における廃棄物の応力・ひ
ずみ関係 (一面せん断条件との比較)
- ◆ 本構成モデルを使用する際の埋立廃棄
物のパラメーターの設定方法
- ◆ 実験結果との比較による有用性の検証
/ 課題点の考察

第 7 章 総括

- ◆ 第 5 章までのまとめと今後の課題 / 展望

図-1.4 本論文の構成

理論を用いて構成モデルを構築する上での、本モデルの着眼点や特色を明確にした。ここで明らかになる事項は、繊維-粒子複合材料の補強効果に関する基礎的な情報を提供するばかりでなく、第 3 章における均質化理論による構成モデルの構築において、有益な知見を与えることとなる。

ここで、本章の一部は、例えば、参考文献 51), 52) で公表された内容であることを追記しておく。

第 3 章では、先の実験結果を元に、実際に繊維-粒子複合材料の構成関係を定式化する方法を示した。具体的には、繊維材料と粒状材料の特性を均質化する際に、ひずみエネルギー増分の等価性を仮定することにより決定される応力分担テンソルを導入し、応力・ひずみ関係を導出した。また粒状材料と繊維材料の応力・ひずみ関係は、いずれも実験結果や既往の研究を元に、その挙動を定式化した。繊維材料については、繊維材料の微視的特性から巨視的特性を評価する際に、繊維材料の配向角度のばらつきを評価する確率分布関数を導入し、繊維材料の不均質性が応力・ひずみ関係に与える影響を考慮するものとした。さらに引張ひずみが発生する条件と繊維材料が引き抜ける条件を繊維配向角度に関連付けて評価し、補強効果が発揮される条件を明確にした。最後に、実験結果との比較により本モデルの有用性の検証を行い、繊維材料の特性である含有率・引張剛性・繊維配向角分布・界面強度の影響を十分に評価できることを確認した。また本章の一部は、例えば、参考文献 53) で公表された内容となっている。

第 4 章では、埋立廃棄物の原位置での力学特性、およびその力学特性と組成割合との関係を明らかにするために、組成割合の異なる国内不法投棄等現場 2 ヶ所と海外の埋立処分場 2 ヶ所を含めた計 4 ヶ所の廃棄物地盤を対象として、室内と原位置において一面せん断試験を実施した。まず、国内不法投棄等現場 1 ヶ所より採取した廃棄物を用いて、広範な条件下での室内試験を実施し、廃棄物の変形・強度特性に与える初期状態量の影響を明らかにすると共に、土質力学をベースとしたせん断強度評価の適用性に関する考察を述べた。次いで、廃棄物地盤 4 ヶ所で実施した原位置一面せん断試験結果を示し、埋立廃棄物の原位置での力学特性を明らかにすると共に、組成割合、特に繊維廃材含有率との関連性を考察した。さらにここでは、室内試験との比較結果についても触れ、室内試験の妥当性や原位置試験の重要性についての考察も行った。本章の一部は、例えば、参考文献 54), 55), 56) 等で公表された内容である。

第 5 章では、本論文で提案された繊維-粒子複合材料の構成モデルを、埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価に適用することを試みた。ここでは、本モデルを適用する上での、パラメータの求め方や設定方法を明確にした。廃棄物は様々な種類・剛性・形状を有する繊維廃材を含んでいる特殊な繊維-粒子複合材料であるため、特に、繊維廃材に重点を置いて考察するものとした。さらに、本モデルによる解析結果を実験結果と比較することによりその有用性を検証すると共に、現状における課題点についても議論するものとした。本章の一部は、例えば、参考文献 57), 58) 等で公表された内容であることを追記しておく。

第 6 章では、第 1 章から第 5 章までの結果を要約して総括すると共に、今後の研究の課題や展望を示すものとした。

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, 日本コンクリート工学会 : 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書「高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う」, 2002.
- 4) 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 C (地圏工学), No.701, III-58, pp.87-97, 2002.
- 5) 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.
- 6) 例えば, Stark, T. D. and Sarihan, N. H. : Shear strength of municipal solid waste for stability analyses, Environmental Geology, Springer, Vol.57, pp.1911-1923, 2009.
- 7) 例えば, 平川大貴, 宮田喜壽 : 再生路盤材料の工学的特性と短繊維混合による変形抑制効果, ジオシンセティックス論文集, 第 30 巻, pp. 111-118, 2015.
- 8) 例えば, 原田高志, 今泉繁良, 西崎到, 高橋雅人, 柏木哲也 : 遮水シートの紫外線劣化と 10 年後の遮水性能保護による延命効果の確認, ジオシンセティックス論文集, 第 19 巻, pp. 113-120, 2004.
- 9) 例えば, 本城勇介, 大竹雄, 加藤栄和 : 地盤パラメータ局所平均の空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.1, pp.41-55, 2012.
- 10) 例えば, 宮田喜壽, 小野寺誠一, 石原雅規, 福田直三, 中根淳, 間昭徳 : 諸外国における補強土壁の限界状態設計法に関する比較・検討, ジオシンセティックス論文集, 第 19 巻, pp. 15-20, 2004.
- 11) 嘉門雅史, 大嶺聖, 勝見武 : 地盤環境工学, 第 1 章 地盤環境工学のあらまし, pp.1-12, 2010.
- 12) 山脇敦, 島岡隆行, 勝見武, 大嶺聖, 川寄幹生, 土居洋一, 柴暁利, 小原孝之 : 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価, 平成 22 年度循環型社会形成推進科学研究補助金 研究報告書, 2011.
- 13) 国際ジオシンセティックス学会日本支部, ジオメンブレン技術委員会 : ごみ埋立地の設計施工ハンドブック, 第 8 章 廃棄物の地盤工学, pp.187-200, 2000.
- 14) 山脇敦, 島岡隆行, 勝見武, 大嶺聖, 川寄幹生, 土居洋一, 柴暁利, 小原孝之 : 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価, 平成 23 年度循環型社会形成推進科学研究補助金 研究報告書, 2012.
- 15) 例えば, Zhan, T., Chen, Y. M. and Ling, W. A. : Shear strength characterization of municipal solid

- waste at the Suzhou landfill, China, *Journal of Engineering Geology*, Vol.97, pp.97-111, 2008.
- 16) Hamidi, A. and Hooresfand, M. : Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand, *Journal of Geotextile and Geomembranes*, Vol. 36, pp. 1-9, 2013.
 - 17) 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.
 - 18) Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M. and Russell, A. R. : Fibre reinforced sands: from experiments to modelling and beyond, *International Journal for Numerical Analytical Methods in Geotechnics*, Vol. 37, pp.2427-2455. 2012.
 - 19) Michaloeski, R. L. and Cermak, J. : Strength anisotropy of fiber-reinforced sand, *Journal of Computers and Geotechnics*, Vol.29, pp.279-299, 2002.
 - 20) Zornberg, J. G. : Descrete framework for limit equilibrium analysis of fiber-reinforced soil, *Journal of Geotechnique*, Vol.52, No.8, pp.593-604, 2002.
 - 21) Michalowski, R. L. : Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil, *Journal of Geotechnique*, Vol.58, No.6, pp.489-501, 2008.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) Towhata, I., Kawano, Y., Yonai, Y. and Koelsch, F. : Laboratory tests on dynamic properties of municipal waste, *Proc. the 11th Int. Conf Soil Dynamics and Earthquake Engineering and the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Berkeley, Vol.1, pp.688-693, 2004.
 - 25) Towhata, I. and Uno, M. : Laboratory Tests on Creep and Shear Behavior of Municipal Solid Waste and Mitigation of Its Long-Term Subsidence, *Proc. GeoCongress 2008*, GeoInstitute of ASCE, New Orleans, pp.152-159, 2008.
 - 26) 東畑郁生, 鶴野雅明, 河野有司, 亀田真加, 喜多祐介, 米内祐史, F. Kolsch : 一般廃棄物の力学的性質に関する研究, *土木学会論文集 C*, Vol.66, No.3, pp.631-644, 2010.
 - 27) Kavazanjian, Jr. E., Matasovic, N., Bonaparte, R. and Schmertmann, G. R. : Evaluation of MSW properties for seismic analysis, *Geotechnical Special Publication*, Vol.46, pp. 1126-1141, 1995.
 - 28) Zekkos, D., Athanasopoulos, G. A., Bray, J. D., Grizi, A. and Theodoratos, A. : Large-scale direct shear testing of municipal solid waste, *Journal of Waste Management*, Vol.30, pp.1544-1555, 2010.
 - 29) Zekkos, D., Bray, J. D., Stokoe, K., Kavazanjian, E., Rathje, E., Athanasopoulos, G. A., Riemer, M., Matasovic, N., Lee, J. J. and Seos, B. : Recent Findings on the Static and Dynamic Properties of

- Municipal Solid Waste, Proc. GeoCongress 2008, GeoInstitute of ASCE, New Orleans, pp.176-183, 2008.
- 30) Zekkos, D., Bray, J. D., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E., Riemer, M. and Stokoe, K. H. : Framework for the estimation of MSW unit weight profile, Proc. Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy, 2005.
 - 31) Bray, J. D., Zekkos, D., Kavazanjian, E., Athanasopoulos, G. A. and Riemer, M. F. : Shear Strength of Municipal Solid Waste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pp.709-722, 2009.
 - 32) Stoll, O. W. : Mechanical properties of milled refuse, National Water Resources Engineering Meeting, ASCE, Arizona, January 11-15, 1971.
 - 33) Siegel, R. A., Robertson, R. J. and Anderson, D. G. : Slope stability investigations at a landfill in southern California, ASTM Special Technical Publication, STP 1070, pp.259-284, 1990.
 - 34) Withiam, J. L., Tarvin, P. A., Bushell, T. D., Snow, R. E. and German, H. W. : Prediction and Performance of municipal landfill slope, Proc. International Conference the Geoenvironment, ASCE GSP No.46, pp.1005-1019. 1995.
 - 35) Houston, W. N., Houston, S. L., Liu, J. W., Elsayed, A. and Sanders, C. O. : In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills, ASCE Geotechnical Special Publication, No.54, pp.73-82, 1995.
 - 36) Vilar, O. M. and Carvalho, M. F. : Shear strength properties of municipal solid waste, Proc. The Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol.1, pp.59-64, 2002.
 - 37) Kavazanjian, Jr. E. : Seismic design of solid waste containment facilities, Proc. The Eighth Canadian Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, pp.51-89, 1999.
 - 38) Pelky, S. G. : Geotechnical properties of municipal solid waste, Thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree of Masters of Science in Engineering, The University of New Brunswick, 1997.
 - 39) Bauer, J., Koelsch, F. and Borgatto, A. V. A. : Stability analysis according to different shear strength concepts exemplified by two case studies, Proc. APLAS Sapporo 2008, The Fifth Asian-Pacific Landfill Symposium, Japan, October 22-24, 2008.
 - 40) Sarihan, N. S. and Stark, T. D. : Back-analyses of landfill slope failures, Proc. sixth International conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, August 11-16, 2008.
 - 41) Babu, G. L. S., Reddy, K. R. and Chouksey, S. K. : Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation induced compression, Journal of Waste

- Management, Vol.30, pp.11-22, 2010.
- 42) Gabr, M. A. and Valero, S. N. : Geotechnical properties of municipal solid waste, Geotechnical Testing Journal 18, pp.241-254, 1995.
 - 43) Koelsch, F. : Der Einfluss der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Doctoral Thesis, Technische Universität Braunschweig, 1996.
 - 44) Koelsch, F. : Toolkit Landfill Technology Chapter4.6 Static Stability of Landfills, Technical Committee on Geotechnics of Landfill Engineering, German Geotechnical Society (DGGT), 2009.
 - 45) Koelsch, F. : Shear Strength of waste, Proc. the Third International Workshop " Hydro-Physico-Mechanics of Landfills ", Braunschweig Germany, 2009.
 - 46) Singh, M. K. and Fleming, I. R. : Estimation of the mechanical properties of MSW during degradation in a laboratory compression cell, Proc. GeoCongress 2008, New Orleans, ASCE Geotechnical Special Publication No.177, pp.200-207, 2008.
 - 47) 例えば, Dixon, N. and Langer, U. : Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties, Journal of Waste Management, Vol.26, pp.220-232, 2006.
 - 48) 例えば, Dixon, N. and Jones, D. R. V. : Engineering properties of municipal solid waste, Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol.23, pp.205-233, 2005.
 - 49) 例えば, Choudhury, D. and Savoikar, P. : Simplified method to characterize municipal solid waste properties under seismic condition, Journal of Waste Management, Vol.29, pp.924-933, 2009.
 - 50) SHIRALIPOUR, A., MCCONNELL, D. B. and SMITH, W. : PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS AS AFFECTED BY MUNICIPAL SOLID WASTE COMPOST APPLICATION, Journal of Biomass and Bioenergy, Vol.3, pp. 261-266, 1992.
 - 51) 宮本慎太郎, 安福規之, 石蔵良平, 笠間清伸 : 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, ジオシンセティックス論文集, 第 30 巻, pp.89-96, 2015.
 - 52) 宮本慎太郎, 安福規之, 石蔵良平, 笠間清伸, 大嶺聖 : 繊維-粒子複合材料における繊維材料の変形・強度特性に関する考察, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 第 11 巻, pp.207-212, 2015.
 - 53) 宮本慎太郎, 安福規之, 笠間清伸, 石蔵良平 : 繊維材料と粒状材料の関連性を考慮した繊維-粒子複合材料の構成モデル, 土木学会論文集 A2 分冊(応用力学)特集号, 2015. (印刷中)
 - 54) 宮本慎太郎, 安福規之, 大嶺聖, 石蔵良平, 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.
 - 55) Miyamoto, S., Yasufuku, N., Ishikura, R., Omine, K., Kawai, S. and 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.

- 56) 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.
- 57) Miyamoto, S. and Omine, K. : Strength evaluation of solid waste material included various fibrous materials, Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, JPN-067, 2015.
- 58) 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.

第 2 章 繊維材料の変形挙動と その粒状材料との関連性

2.1 概説

繊維-粒子複合材料に外力が作用した際、試料内部では、粒状材料と繊維材料の両方で外力に相当する応力を受け持つことになる。この時の内部の応力分布は、両材料の応力・ひずみ関係、およびその相互作用により決定し、その程度に応じて変形が進行する¹⁾。つまり、繊維-粒子複合材料の変形挙動や強度発現メカニズムを解明する上で、粒状材料と繊維材料の各々の応力・ひずみ関係、およびその両者の関連性を明らかにすることは必要不可欠であるといえる。特に、繊維材料の応力・ひずみ関係は、繊維-粒子複合材料の変形・強度特性に認められる靱性や強度の増加などの補強効果に直接関係すると考えられる重要な要因である^{2),3),4)}。一般的に、繊維材料は曲げや圧縮にはほとんど抵抗せずに引張抵抗のみを有するものが使用されることが多く、このことから、引張側での単純な弾性変形のみが想定される場合が多い^{5),6),7)}。しかし、粒状材料内で繊維材料がどのような変形挙動を示すのかを詳細に明らかにした研究はあまり見受けられず、このような単純な仮定には疑問が残る。また粒状材料内に混入した繊維材料は、通常、様々な配向角度を有していることから^{8),9)}、配向角度の違いによる変形挙動への影響を検討することも重要である。

本章では、このような観点から、複合材料が変形する際の繊維材料の変形挙動、およびその粒状材料の変形挙動との関連性を明らかにするための 2 種類の力学実験を行った。いずれも、要素レベルの繊維-粒子複合材料から微視的な要素を抜き取った状態を想定して、繊維材料 1 本の変形挙動を把握したものであり、ひとつは目視による挙動の観察を目的とした「可視化一面せん断試験(本研究で定義)」、もうひとつは実際に発生するひずみ量を計測することを目的とした「数量化一面せん断試験(本研究で定義)」である。またそれらの実験結果を元に、繊維材料の応力・ひずみ関係における知見の提示、およびその粒状材料の応力・ひずみ関係との関連性に関する考察を加えた。さらに、既往の研究成果より重要性が指摘されている、繊維配向角度の影響についても検討するものとし、繊維配向角度が異なる場合の粒状材料内での繊維材料の応力・ひずみ関係についても言及した。最後にそれらの知見を整理して、均質化理論の応用によって構成モデルを構築する上での、着眼点や特色を明確なものにした。ここで明らかにされる事項は、繊維-粒子複合

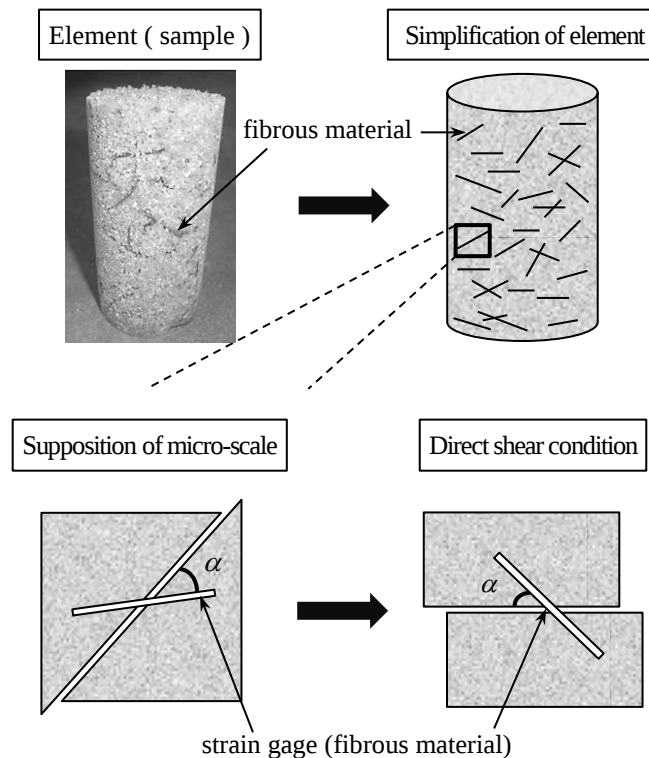


図-2.1 実験のイメージ (写真は野添ら¹⁰⁾による凍結試料の様子)

材料の力学特性に関する基礎的な情報を提供するばかりでなく、第 3 章における均質化理論による構成モデルの構築において、有益な知見を与えることとなる。

以下、節に従って本章の概要を述べる。まず、第 2 節では、本実験の内容、実験装置の概要と実験の方法、使用した試料の特性を提示した。次に、第 3 節では、微視的な要素を想定した一面せん断試験を実施し、複合材料が変形する際の、繊維材料の粒状材料内での変形挙動を明らかにした。また繊維配向角度の違いが繊維材料の変形挙動に与える影響についても議論した。そして、第 4 節では、先の実験結果に基づいて、粒状材料と繊維材料の変形挙動の関連性について検討し、その特性を考察した。またこれらの結果を元に、均質化理論によって構成モデルを構築する上での着眼点や特色を示した。最後に、第 5 節では、以上の成果を要約し、まとめた。

2.2 可視化と数量化による繊維材料の変形挙動の把握

2.2.1 実験のイメージとねらい

本実験のイメージは図-2.1 に示すようであり、先述したように、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想定してせん断試験を行うことで、繊維材料の微視的な変形の様子

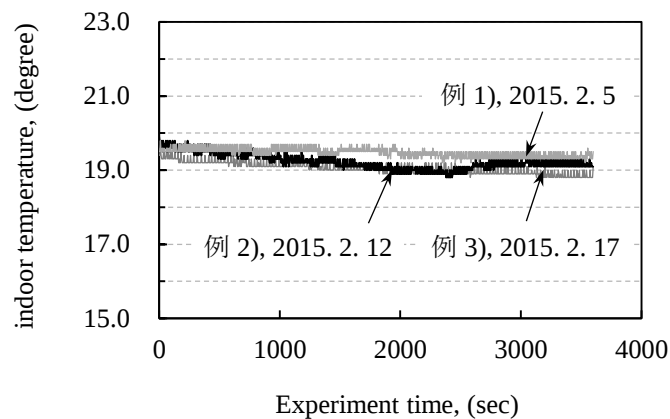


図-2.2 数量化一面せん断試験時の室内温度管理状況の一例

を把握できるものと考えた。また通常、繊維材料は様々な角度を持って粒状材料内に混入しているため、繊維配向のせん断面との角度（「繊維-せん断面角度 α 」と定義）が異なる場合の繊維材料の変形挙動を把握し、繊維配向角度の影響を考察することとした。そのため、繊維-せん断面角度 α を明確に規定できるように、せん断面が固定されている一面せん断条件を選定した。

実験は、繊維材料の変形の様子を目視により観察するものと、繊維材料の変形挙動を定量的に把握するものの2種類を行うものとし、前者を「可視化一面せん断試験（および可視化試験）」、後者を「数量化一面せん断試験（数量化試験）」と称して区別するものとした。また基本的には数量化一面せん断試験の結果を中心に繊維材料の変形挙動や粒状材料との関連性を議論するものとし、内容の理解や正当性の確認として可視化試験の結果を追記して議論することとした。

ここで、繊維材料は温度変化による剛性や強度への影響が懸念される材料であることが知られている^{11), 12)}。そのため、すべての実験において室内温度を $18 \sim 20^{\circ}$ 程度に保つように心がけた。参考のために、数量化一面せん断試験時の室内温度の管理状況を図-2.2に示した。

2.2.2 可視化を目的とした一面せん断試験の概要

繊維-粒子複合材料の微視的な要素が変形する際に、繊維材料がどのような変形挙動を示すのかを目視により観察することを目的として、図-2.3に示すような、一面せん断試験装置を作製した。主な材料はアクリル板であり、大きな応力を与えることや、装置自体の摩擦を完全に遮断することはできないものの、内部の様子が目視可能な装置となっている。せん断箱は、寸法が幅 15 cm、奥行 2 cm、高さ 7 cm の矩形となっており、繊維材料の奥行方向への変形を抑制した平面ひずみ条件を想定した。使用した材料は、粒状材料として均一粒径 3.0 mm のガラスビーズ、繊維材料として幅 20 mm、長さ 50 mm、厚さ 1 mm の高分子材料であり、繊維-せん断面角度 $\alpha = 0, 30, 60, 90^{\circ}$ になるように締固め等を行わずに供試体を作製した。また供試体を作製した後は、上載圧を $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$ で載荷し、圧縮の終了を確認して、せん断速度 1 mm/min でせん断を行った。

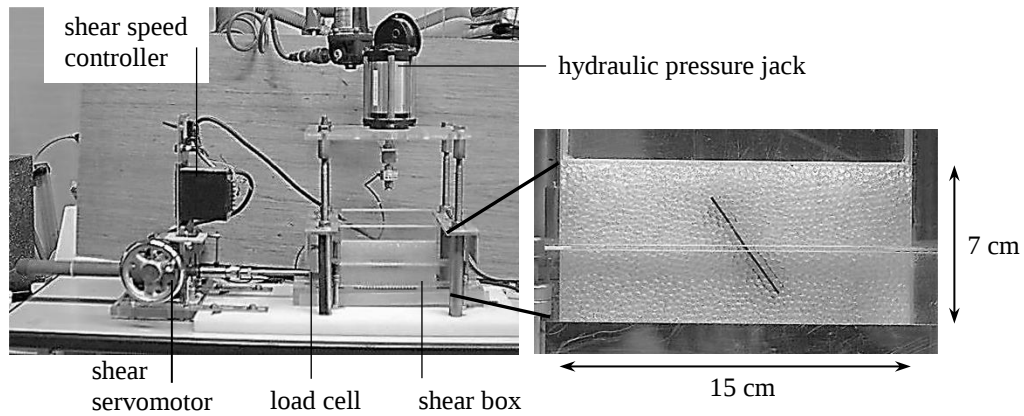


図-2.3 可視化一面せん断試験装置の概要

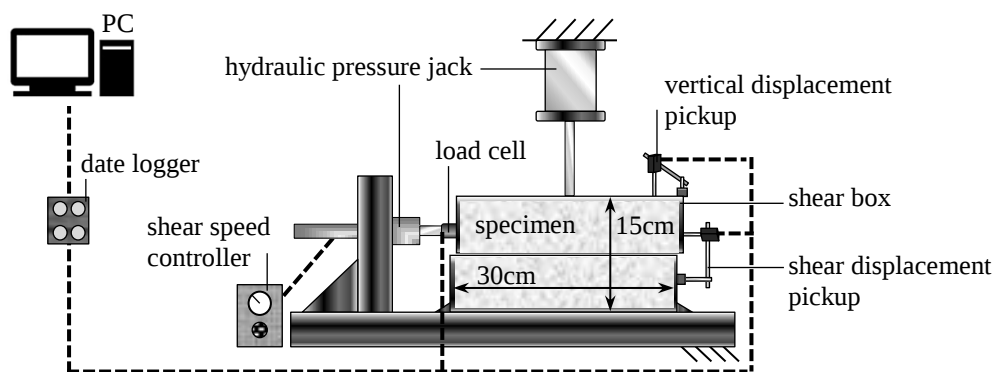


図-2.4 数値化一面せん断試験に使用した中型一面せん断試験装置の概要
(原位置・室内両用型一面せん断試験装置の室内使用型)

2.2.3 数量化を目的とした一面せん断試験の概要

(a) 実験の概要と実験装置

本実験では、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せん断試験を行うことで、複合材料がせん断変形を示す際の、繊維材料のひずみの進展傾向を数量的に把握することを目的とした。実験装置は、図-2.4 に示すような、せん断箱の寸法が幅 30 cm、奥行 30 cm、高さ 15 cm の矩形である中型一面せん断試験装置を使用した。本実験装置は、第 4 章で詳しく説明する原位置・室内両用型一面せん断試験装置の室内使用型であり、上載圧やせん断速度等を変化させた定圧せん断試験を行うことが可能である。今回は、繊維-せん断面角度 $\alpha = 0, 30, 60, 90^\circ$ の条件において、それぞれ上載圧 $\sigma = 10, 15, 20 \text{ kN/m}^2$ 、せん断速度 1 mm/min で実験を行った。せん断試験用の供試体は、繊維-せん断面角度を規定して繊維材料を混入するため、せん断箱内において締固め等を一切行わずに作製するものとし、この時の粒状材料の相対密度は $Dr = 38\%$ であった。また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、代表値を選んで結果を議論することとした。

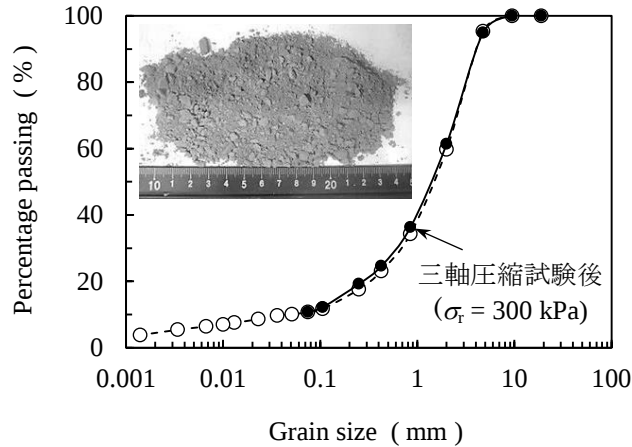


図-2.5 粒状材料の粒度加積曲線

表-2.1 粒状材料の物理特性

Physical properties	value
Soil particle density, ρ_s (g/cm ³)	2.756
Maximum bulk density, $\rho_{\max}$ (g/cm ³)	2.087
Minimum bulk density, $\rho_{\min}$ (g/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-2.2 粒状材料の三軸圧縮試験結果 (CD 条件)

Relative density, D_r (%)	Consolidation stress, σ_r (kPa)	Stress ratio, $(q/p)_{\max}$	c_d (kPa)	ϕ_d (°)
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		

(b) 粒状材料の概要と物理・力学特性

粒状材料には、図-2.5 に示すような、粒径の広い礫質土を使用した。本試料の物理特性は礫質土の土粒子密度試験，最大最小密度試験，および粒度試験により把握しており，その結果を表-2.1 に整理した。また基本的な力学特性の把握を目的として，側圧一定の三軸圧縮試験 (CD 条件) を行っており，表-2.2 に相対密度 $D_r = 40, 60, 80\%$ 時のせん断強度定数を整理した。本試料の粒子破碎性の確認も同時に行っており，三軸圧縮試験前と試験後の粒度加積曲線を比較することで，側圧 $\sigma_r = 300 \text{ kN/m}^2$ 下においても粒子破碎等のない材料であることを確認している。参考として，側圧 $\sigma_r = 300 \text{ kN/m}^2$ 条件における実験後の粒度加積曲線を図-2.5 に併記した。

(c) 繊維材料の概要と物理・力学特性

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

表-2.3 繊維材料(試験体)の寸法

Strain gage	
gage width (mm)	1.0
gage length (mm)	60.0
Base width (mm)	8.0
Base length (mm)	74.0
Base thickness (mm)	0.15
Dummy (polymer)	
Dummy width (mm)	10.0
Dummy length (mm)	75.0
Dummy thickness (mm)	1.0

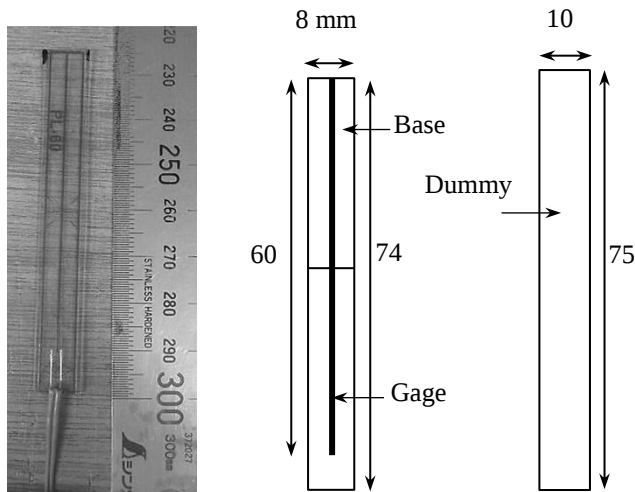


図-2.6 繊維材料(試験体)の概要

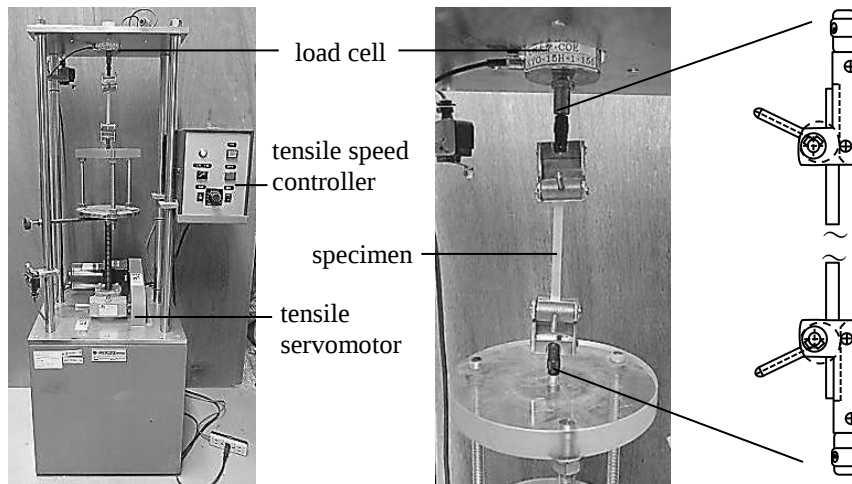


図-2.7 単繊維引張試験装置の概要

ど小さな引張剛性を有し、厚さが 1 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-2.6 に示した。試験体の寸法の詳細は、表-2.3 に整理した通りであり、ひずみゲージは長さ 74 mm、幅 8 mm、厚さ 0.15 mm、ダミー材料は長さ 75 mm、幅 10 mm、厚さ 1 mm のものを使用した。

繊維材料の引張特性は、図-2.7 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-2.8 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なように、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。後述するように、繊維材料に発生するひずみは微小であるため、初期剛性が同等であれば同様の力学特性を有する材料とみなせるものとする。また、引張剛性と引張速度の関係を示した図-2.9 より、

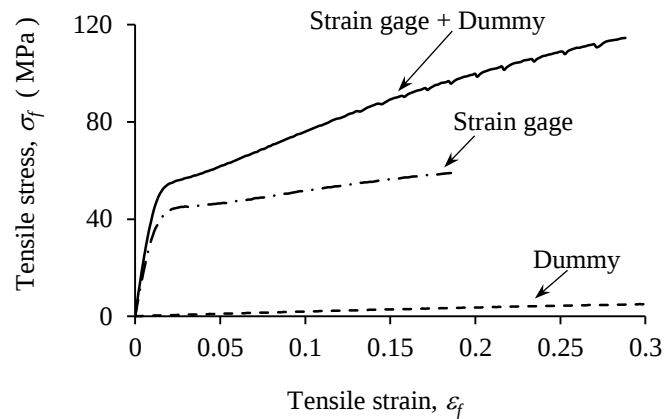


図-2.8 繊維材料の引張特性

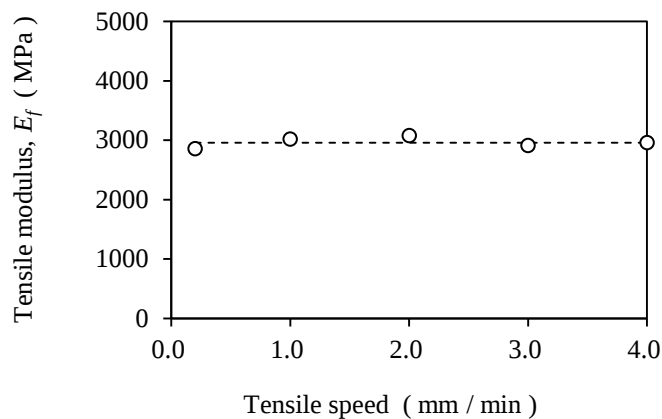


図-2.9 引張剛性と引張速度の関係

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。

2.3 粒状材料内での繊維材料の変形挙動

本節では、一面せん断試験から得られた実験結果を示すと共に、繊維材料の粒状材料内での変形挙動に関する考察を行った。先に述べたように、数量化一面せん断試験結果を中心に議論を進めるものとし、必要に応じて可視化一面せん断試験の実験結果を紹介した。可視化試験結果は定性的であるものの、現象の理解や考察を行う上で、重要な知見を与えるものとなっている。

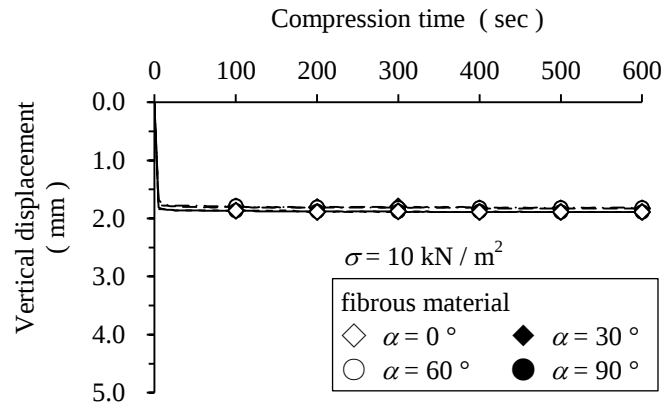


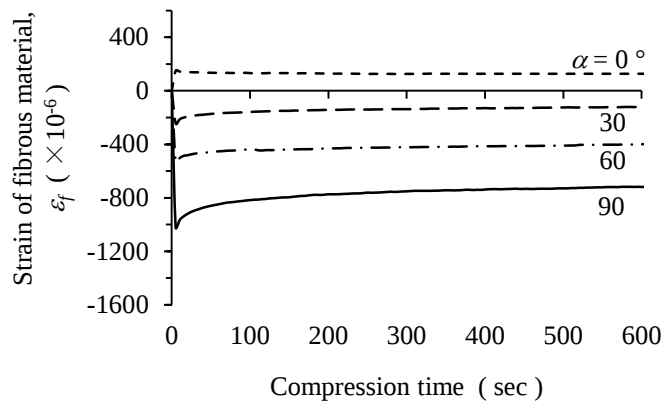
図-2.10 複合材料の鉛直変位と圧縮時間の関係 (圧縮過程, $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$)

2.3.1 圧縮過程での繊維材料の変形挙動

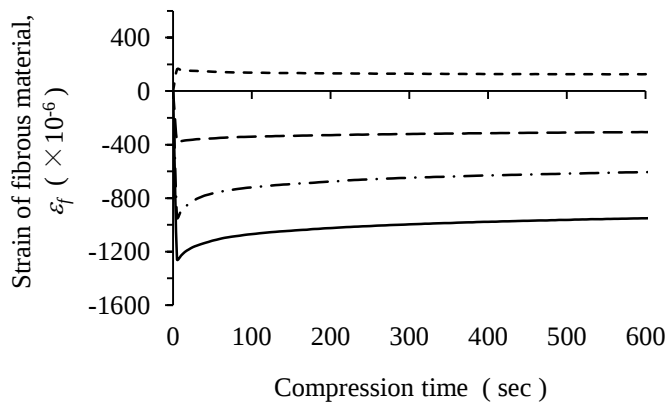
一面せん断試験における圧縮過程での結果を示すことで、複合材料が単純な一次元圧縮変形を示す際に、粒状材料内の繊維材料にどのようなひずみの進展傾向があるのかを考察した。まず、図-2.10 に圧縮過程での複合材料の鉛直変位と圧縮時間の関係を示した。ここでは参考として、上載圧 $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$ の結果のみを示しているが、 $\sigma = 15, 20 \text{ kN/m}^2$ の場合も同様の結果であった。繊維材料が 1 本しか混入しておらず、体積含有率も 0.005 % 程度のため、繊維材料が混入していることによる複合材料の圧縮特性への影響はほとんどみられなかった。ここで、この時の繊維材料のひずみ値と圧縮時間を示したのが図-2.11 となる。本図(a)~(c) では、上載圧 $\sigma = 10, 15, 20 \text{ kN/m}^2$ の各条件において、繊維-せん断面角度 $\alpha = 0, 30, 60, 90^\circ$ すべての繊維材料のひずみ値を示しており、引張りを正值、圧縮を負値で表している。

実験結果より、繊維-せん断面角度 $\alpha = 0^\circ$ の場合には上載圧を載荷することで、引張り側に微小なひずみの発達が認められる。しかし、繊維-せん断面角度 $\alpha = 30, 60, 90^\circ$ の場合には、圧縮側のひずみの発達がみられ、上載圧や繊維-せん断面角度が大きい程、ひずみ値が大きくなる結果となった。これは繊維材料の配向と上載圧の載荷方向との関係を考えれば当然のことと考えられ、繊維-せん断面角度が大きいほど圧縮側への変形が進行する挙動を示す。しかしながら、発生しているひずみ量は、どの実験ケースをみても非常に微小であるといえ、可視化試験結果の例を示した図-2.12 からほとんど変形のないことが伺える。本図では、参考のために、繊維-せん断面角度 $\alpha = 60, 90^\circ$ の場合を示しているが、当然、角度 $\alpha = 0, 30^\circ$ の場合も同様であった。

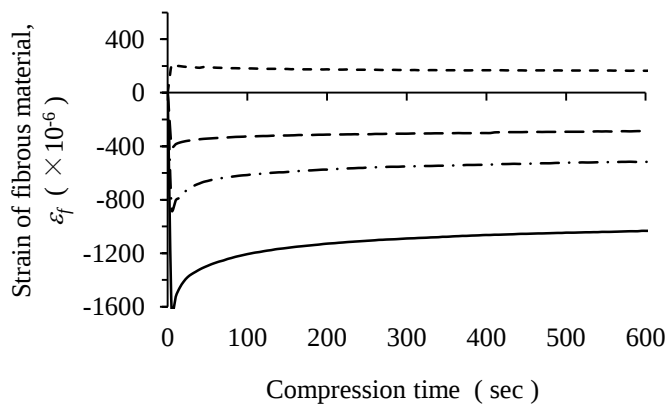
今回は、上載圧が小さい範囲でしか実験を行っていないため、確かなことはいえないが、次に説明するせん断過程での結果と比べても、圧縮時の繊維材料の変形はほとんどないものであった。これは、応力状態の影響によるものであり、今回の一次元圧縮や、三軸圧縮試験における等方圧縮条件等の割と均一な応力状態下では繊維材料のひずみはあまり進展しないものと考えられた。



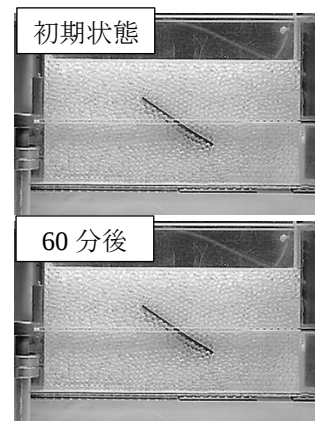
(a) $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$



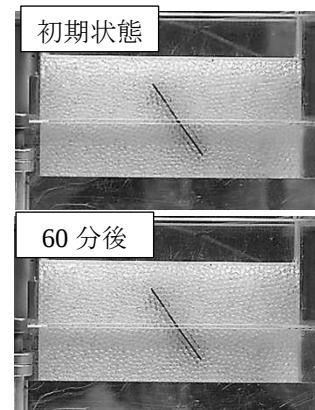
(b) $\sigma = 15 \text{ kN/m}^2$



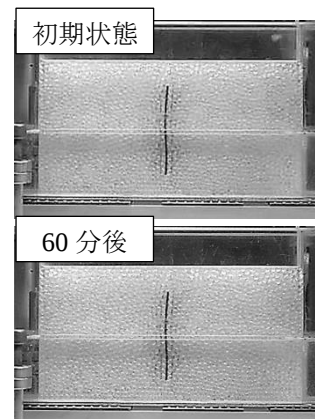
(c) $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$



(a) $\alpha = 30^\circ$



(b) $\alpha = 60^\circ$



(c) $\alpha = 90^\circ$

図-2.11 繊維材料のひずみ値と圧縮時間の関係

図-2.12 可視化試験の結果(圧縮過程)

2.3.2 せん断過程での繊維材料の変形挙動

複合材料の平均的な応力・変形特性を図-2.13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, $\sigma = 10, 15 \text{ kN/m}^2$ の場合も同様の結果であった. 圧縮過程と同様に, 繊維材料が 1 本しか混入していないため, 繊維材料が混入していることによる複合材料の応力・

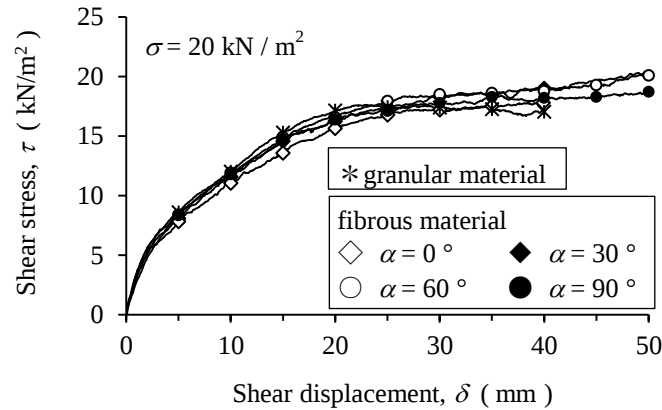
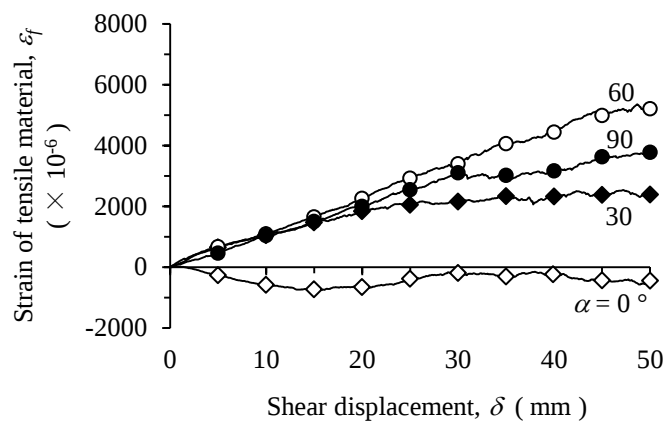


図-2.13 複合材料の応力・変形特性の例(せん断過程, $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$)

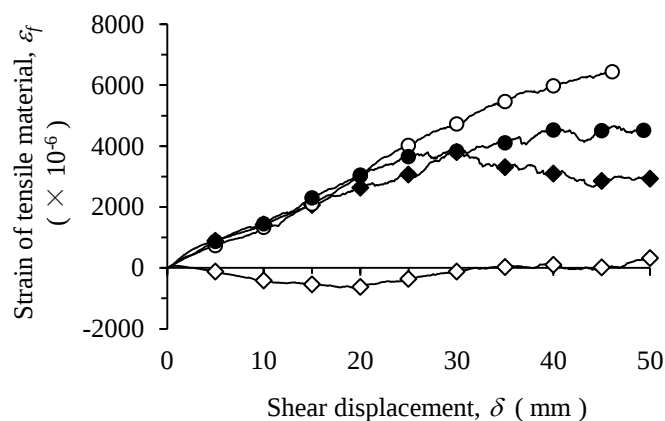
変形特性への影響はほとんどみられず、繊維-せん断面角度の違いによらずにすべての条件において粒状材料のみの場合と同様の応力・変形特性を示していることが確認される。さらにこの時の、繊維材料の粒状材料内でのひずみの進展傾向を図-2.14に示した。本図では (a) $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$, (b) $\sigma = 15 \text{ kN/m}^2$, (c) $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$ の結果をそれぞれ示している。本研究では、繊維材料の変形挙動を、繊維材料のひずみ値と複合材料のせん断変位の関係を用いて考察するものとし、繊維材料のひずみ値は、引張りを正值、圧縮を負値で表した。また、可視化試験の結果として、繊維-せん断面角度 $\alpha = 30, 60, 90^\circ$ のせん断過程の様子を図-2.15, 16, 17に合わせて示した。

これらの結果より、すべての条件において、繊維-せん断面角度 $\alpha = 0^\circ$ 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進展は認められない。しかし、繊維-せん断面角度 $\alpha = 30, 60, 90^\circ$ 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進展していき、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。実際、可視化試験結果からも、せん断初期では引っ張られるような挙動を示し、ある程度のせん断変位量を境にして引き抜け挙動が卓越している様子が確認できる。以上の結果より、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、引き抜け時の界面強度も大きくなることが示唆された。ここで、繊維-せん断面角度 $\alpha = 0^\circ$ の場合には、引っ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。

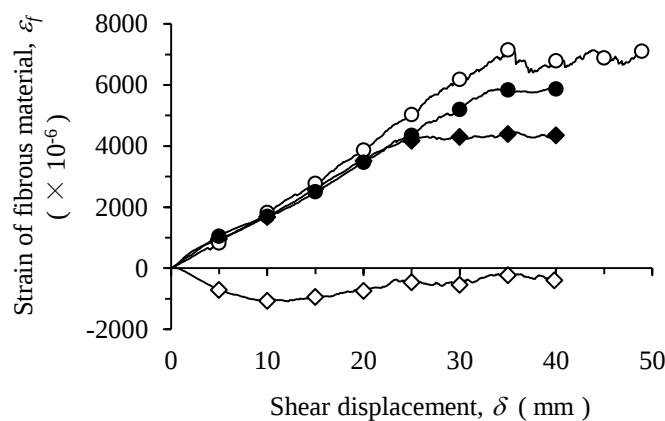
次に繊維配向角度の違いによる影響を詳細に検討するために、図-2.14より、引張挙動時の傾きを繊維材料の「ひずみ増加勾配」、引き抜け時のひずみ値を「ピークひずみ値」と定義し、それぞれの繊維-せん断面角度との関係を図-2.18, 2.19に整理した。両図より、ひずみ増加勾配は上載圧が大きくなることで増加する傾向を示すが、繊維配向角度の違いによる影響はほとんどみられない。しかし、ピークひずみ値は繊維配向角度の違いにより変化する傾向が認められ、上載圧



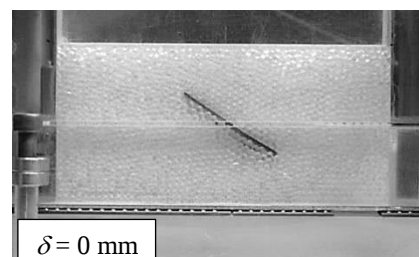
(a) $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$



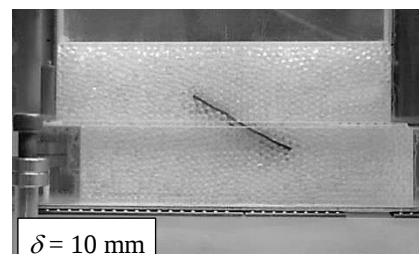
(b) $\sigma = 15 \text{ kN/m}^2$



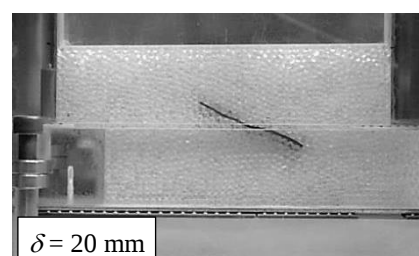
(c) $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$



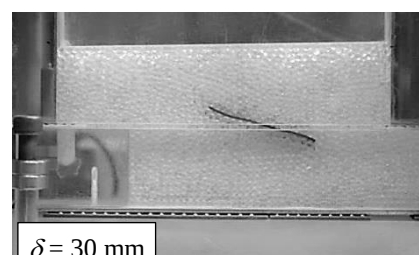
$\delta = 0 \text{ mm}$



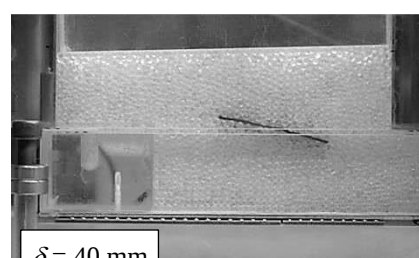
$\delta = 10 \text{ mm}$



$\delta = 20 \text{ mm}$



$\delta = 30 \text{ mm}$



$\delta = 40 \text{ mm}$

図-2.15 可視化試験の結果
(せん断過程, $\alpha = 30^\circ$)

図-2.14 粒状材料内での繊維材料のひずみの進展傾向

の大きさに関わらず、繊維-せん断面角度 $\alpha = 60^\circ$ 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理由としては、繊維-せん断面角度の違いによって、繊維材料に働く拘束圧が異なったためと考えられる。本来、界面強度は材料同士の接触する角度には依存しない強度である。しかし、繊維-

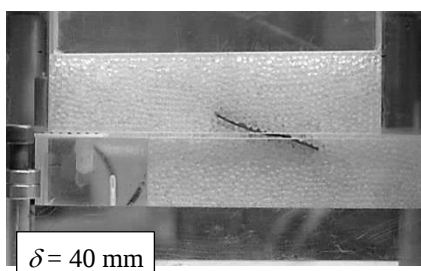
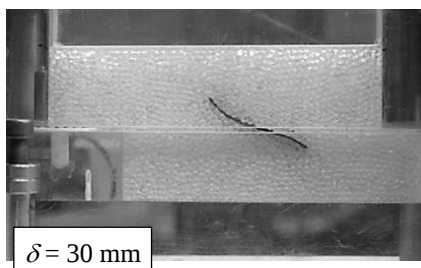
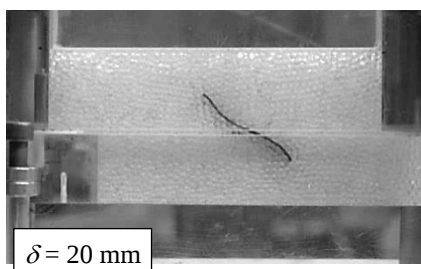
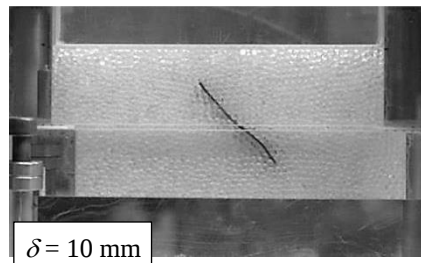
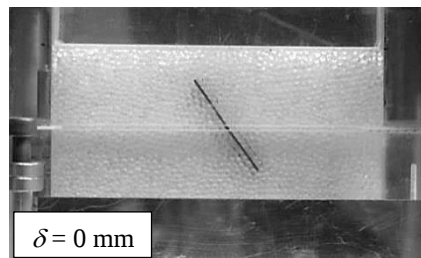


図-2.16 可視化試験の結果
(せん断過程, $\alpha = 60^\circ$)

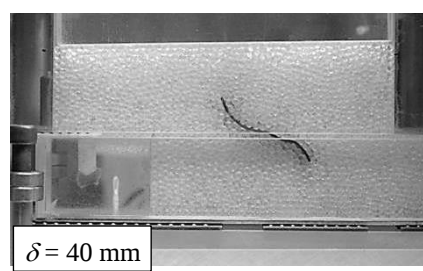
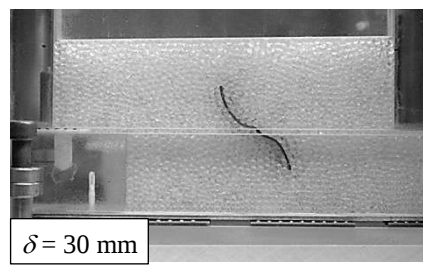
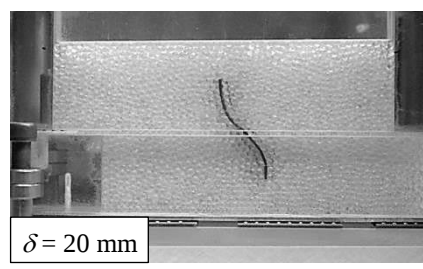
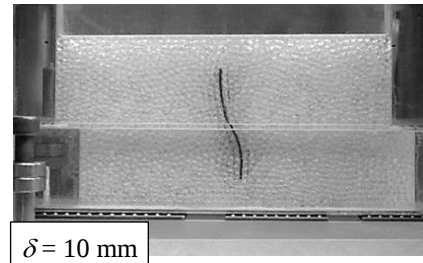
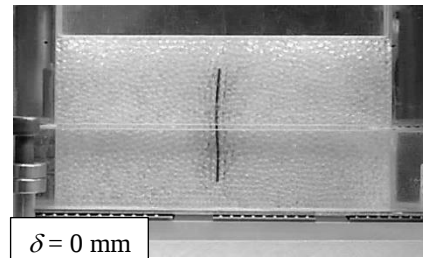


図-2.17 可視化試験の結果
(せん断過程, $\alpha = 90^\circ$)

せん断面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、結果として引き抜け時の界面強度の大きさに違いが表れた。

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ひずみの進展傾向（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-2.20のような弾完全塑性的な挙動を示す傾向のあることが明らかになった。せん断初期では繊維材料は線形的に応力

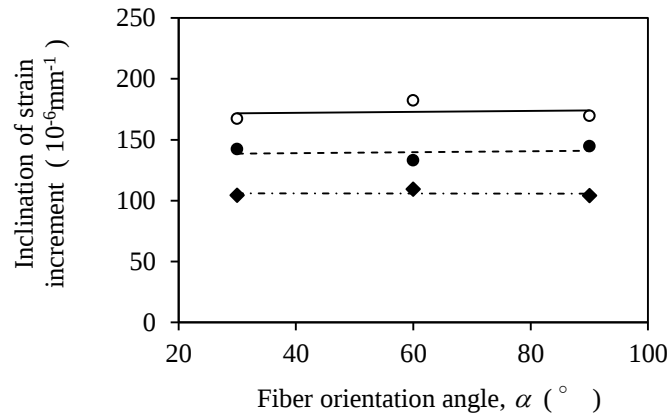


図-2.18 ひずみ増分勾配と繊維配向角度の関係

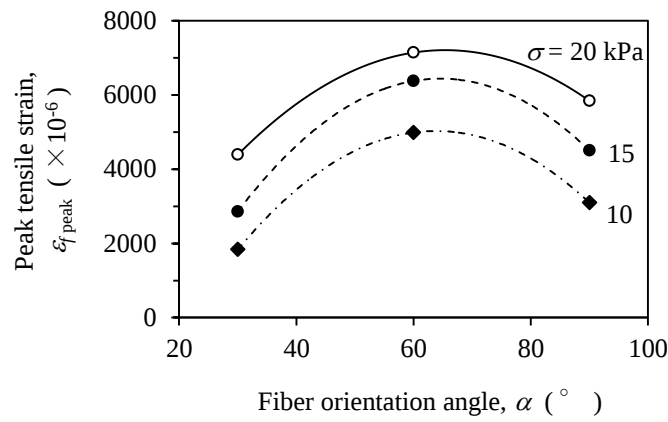


図-2.19 ピークひずみ値と繊維配向角度の関係

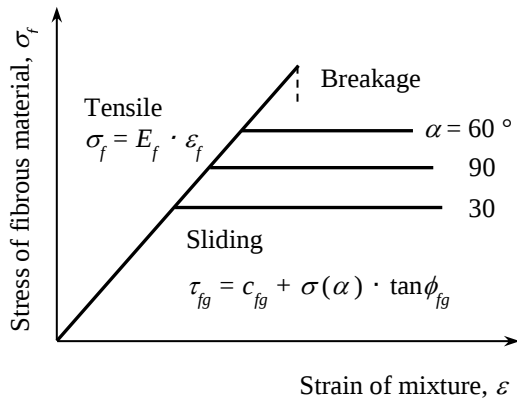


図-2.20 繊維材料のひずみの進展傾向

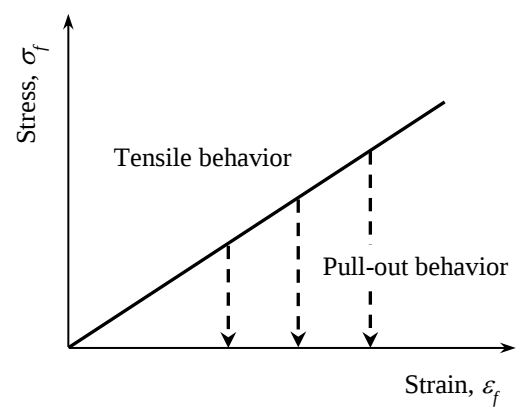


図-2.21 繊維材料の応力・ひずみ関係

が増加する弾性的な引張挙動を示し、発揮される応力値 σ_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 τ_{fg} を超えると、繊維材粒は状材料内を滑るような引き抜け挙動を示し、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。

本論文では、以上の実験的考察から、第 3 章で提案する構成モデルに用いるための、繊維材料

の応力・ひずみ関係を、図-2.21 に示すように、繊維材料の表面に界面強度に相当する応力が働くまでは引張挙動を、それ以上の応力状態においては引き抜け挙動を示し、引き抜け挙動時には繊維材料の補強効果はなくなるものとしてモデル化するものとした。具体的な定式化方法については、第 3 章で説明するが、繊維材料と粒状材料の界面強度によって繊維材料が引張挙動から引き抜け挙動に転じる際の条件式を導出し、この条件式を考慮することによって、繊維材料の引張挙動と引き抜け挙動の応力・ひずみ関係を区別するものとした。

2.4 繊維材料と粒状材料の変形挙動の関連性

2.4.1 関連性の意味および検討内容

繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を考える上で、粒状材料と繊維材料の応力・ひずみ関係、および両材料の相互作用が重要であることは先に述べた。特に、複合材料に発生する応力を、粒状材料と繊維材料がどのような関係性を持って受け持っているのかを明らかにすることが、後の均質化理論によるモデル化において重要であるといえる^{13), 14)}。均質化理論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均質化の方法に依存し、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¹⁾。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¹³⁾。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。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ている^{15), 16)}。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するものである。これら 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、均質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。

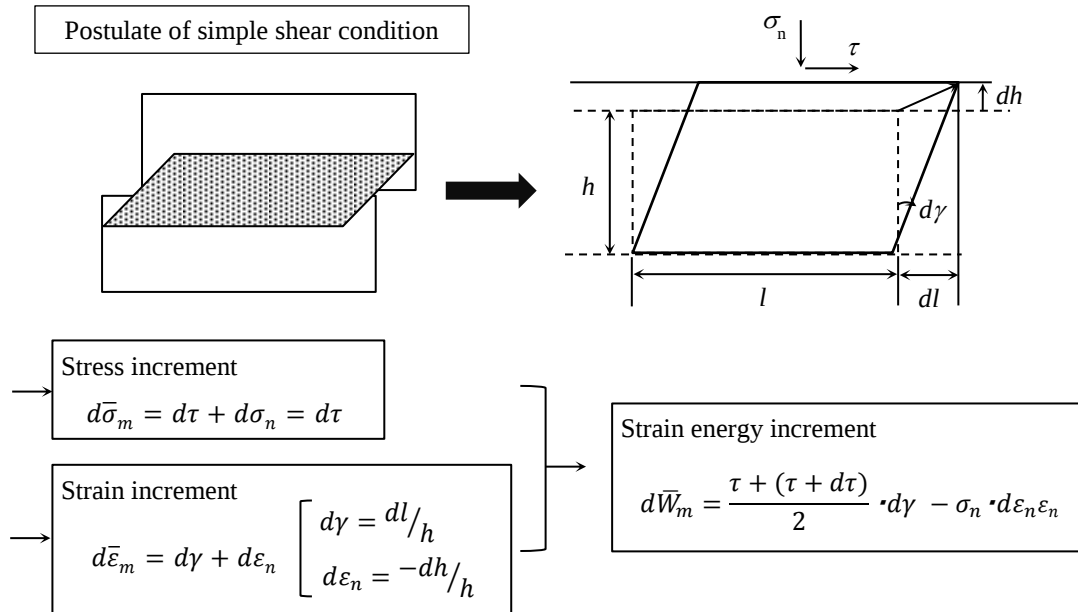


図-2.22 粒状材料の各増分値の導出方法の概略

そこで本節では、数量化試験結果を元に、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均質化を行うのが適切かを考察した。

ここで、先の一面せん断試験結果より、粒状材料内での繊維材料の変形挙動は、引張挙動から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ことを明らかにしている。またこの際、引き抜け挙動は界面強度にのみ依存して発現すると考えられており、引張挙動を示す弾性領域でのみ、繊維材料と粒状材料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、繊維材料と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、両材料の関連性を考察するものとした。

2.4.2 応力/ひずみ/ひずみエネルギー増分値の導出方法

数量化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 $D_r = 38\%$ ，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、一面せん断条件では、変形モードの力学的な意味が不十分であるため、直接的にひずみを求めることはできない。そのため、ここでは最も簡易な方法として知られている、単純せん断変形を仮定することによるひずみ値の算定方法を採用した¹⁷⁾。また、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¹⁸⁾。数量化一面せん断試験結果より、単純せん断変形を仮定して、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の概略は図-2.22 に示す通りである。応力増分 $d\bar{\sigma}_m$ は、

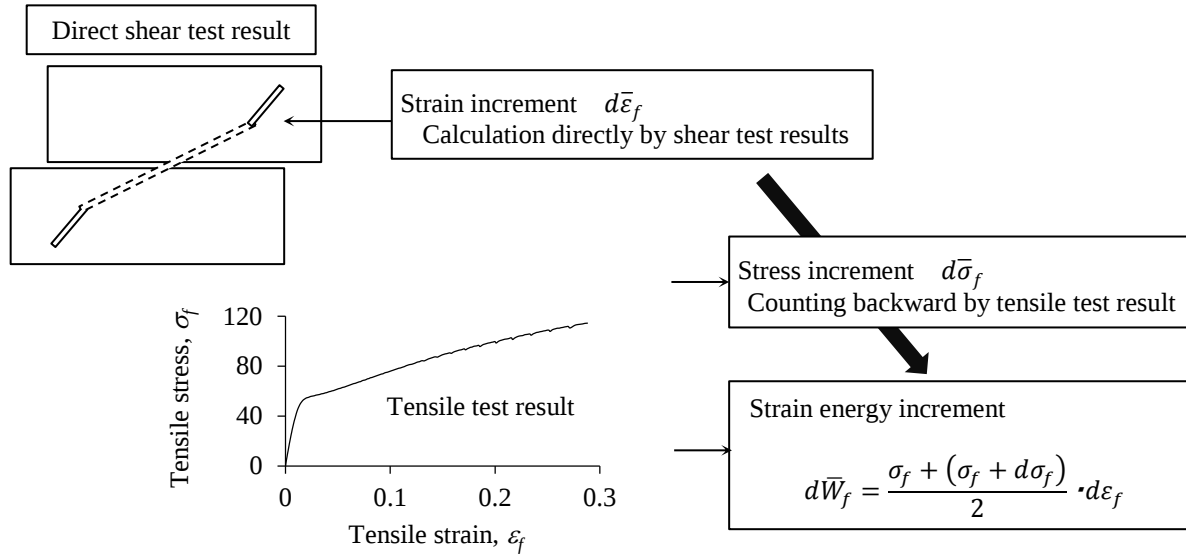


図-2.23 繊維材料の各増分値の導出方法の概略

数値化一面せん断試験より得られる応力値をそのまま使用して以下の式により導出する。

$$d\bar{\sigma}_m = d\tau + d\sigma_n = d\tau \quad (2.1)$$

ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_m$ は、単純せん断変形を仮定して、導出されるせん断ひずみ $d\gamma$ と圧縮ひずみ $d\epsilon_n$ の合計として以下の式により算出される¹⁷⁾。

$$d\bar{\epsilon}_m = d\gamma + d\epsilon_n \quad , \quad d\gamma = dl/h, \quad d\epsilon_n = -dh/h \quad (2.2)$$

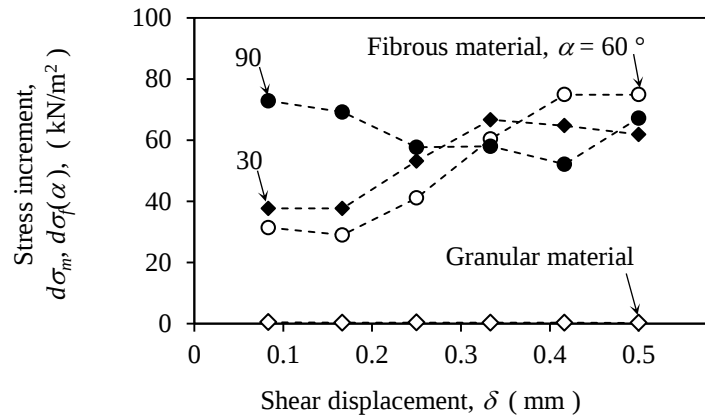
また、応力増分とひずみ増分を用いて、以下の式によりひずみエネルギー増分値を計算した¹⁹⁾。

$$d\bar{W}_m = \frac{\tau + (\tau + d\tau)}{2} \cdot d\gamma - \sigma_n \cdot d\epsilon_n \quad (2.3)$$

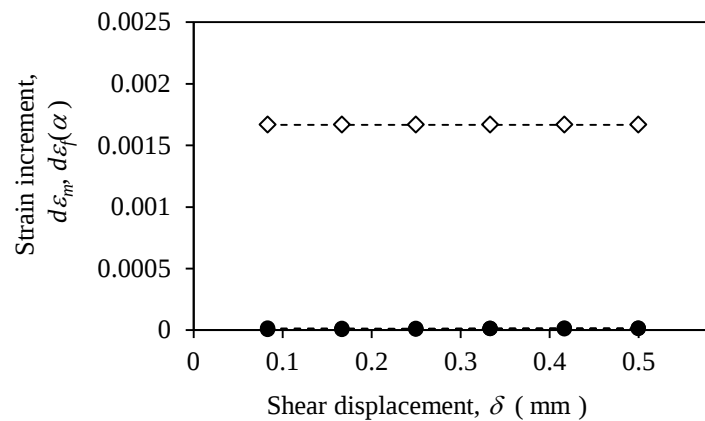
次に、繊維材料については、図-2.23 に示した方法によって、各増分値を算出するものとした。まず、図-2.14 に示した数量化試験結果の繊維材料のひずみ値をそのまま用いて、その増分値を計算する。また応力増分については、図-2.14 のひずみ値に対応する応力値を、単繊維引張試験から得られる図-2.8 の応力・ひずみ関係から逆算して導出した。最後に、ひずみエネルギー増分は、応力が増分する際の平均的な応力値とひずみ増分値を掛け合わせた値であり、図-2.8 と図-2.14 により算定される応力値とひずみ増分値を用いて以下の式により算出するものとした。

$$d\bar{W}_f = \frac{\sigma_f + (\sigma_f + d\sigma_f)}{2} \cdot d\epsilon_f \quad (2.4)$$

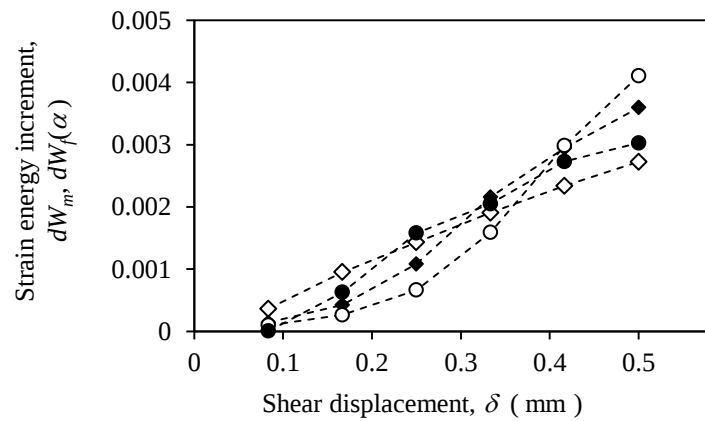
以上の方法により求まる粒状材料と繊維材料の各増分値を比較し、両材料の関連性を考察した。



(a) 応力増分



(b) ひずみ増分



(c) ひずみエネルギー増分

図-2.24 繊維材料と粒状材料の各増分値の比較
(数値化一面せん断試験結果, $\sigma = 20 \text{ kPa}$ 条件より計算)

2.4.3 繊維材料と粒状材料の関連性の考察

上載圧 $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$ 条件での数値化一面せん断試験結果を用いて、図-2.24に (a) 応力 / (b) ひずみ / (c) ひずみエネルギー増分値を計算した結果を整理した。また結果として得られる

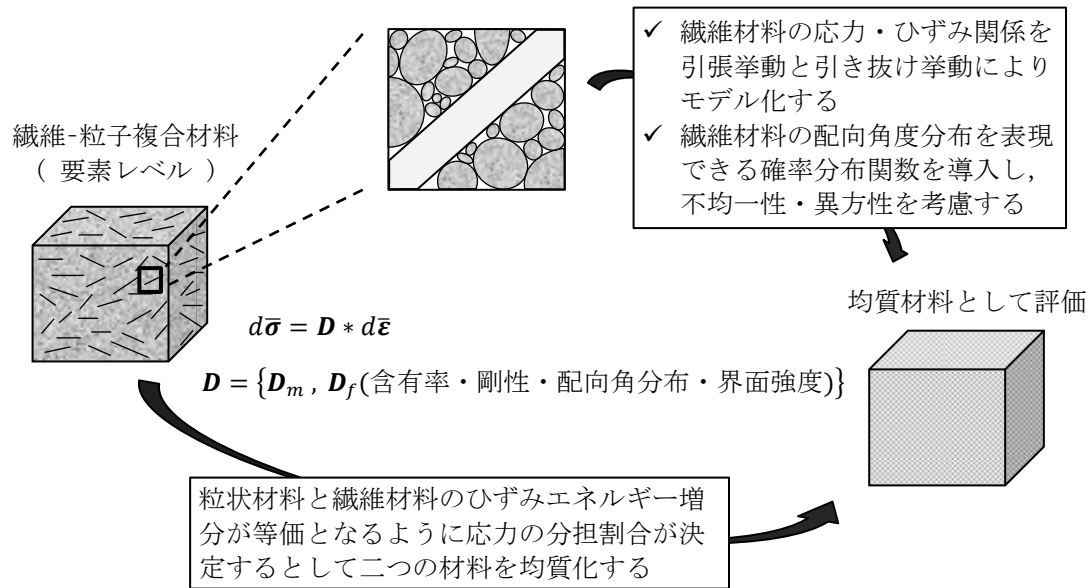


図-2.25 均質化理論を用いた構成モデルの概略

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。ここで本図では、複合材料のせん断変位に対応する繊維材料と粒状材料の各増分値の計算結果を示しており、繊維材料については、繊維-せん断面角度 $\alpha = 30, 60, 90^\circ$ の結果を同時に示した。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、ほとんど一致しないことが確認された。しかし、ひずみエネルギー増分値を比較すると、繊維-せん断面角度の違いによらずに繊維材料と粒状材料で良い一致が認められており、粒状材料内での繊維材料の変形挙動は、粒状材料の変形挙動とひずみエネルギー増分が等価となるように進展していくことが明らかになった。このようにひずみエネルギー増分値が粒状材料と繊維材料で一致する理由としては、実際には 1 本の繊維材料の中でも、極端に引張ひずみが発生している箇所や引張ひずみが発生しない箇所などの不均一性が存在していることによるものと考えられた。繊維材料に発生するひずみ増分や応力増分に不均一性が生じていることによって、これらの値は粒状材料のひずみ増分や応力増分値とは一致しない。しかし、ひずみ増分と応力増分の掛け合わせで評価されるひずみエネルギー増分値では、お互いの不均一性の影響を打ち消し合うようなかたちとなり、粒状材料と一致するパラメーターになり得たということである。以上の結果から、大嶺の研究^{15), 16)}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で、粒状材料との相互作用によって発生する繊維材料の局所的な不均一性を考慮した適切な均質化が行えるものと考えられた。

以上の実験的考察より、均質化理論によって繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築する上での、モデル化のおおまかな概要を図-2.25に示した。本モデルでは、微視的な要素から巨視的な挙動を評価する際には、複合材料分野の研究成果等を参考にして、微視的挙動の体積平均によって巨視的挙動を評価することとした。また、粒状材料と繊維材料の応力・ひずみ関係については、本章の実験結果をベースとして構成関係を導入するものとし、特に繊維材料については、粒状材料との界面強度を境にして引張挙動から引き抜け挙動を示す特性を、繊維配向角分布に関連付けて評価するモデル化を行うものとした。さらに、繊維材料と粒状材料を一つの材料として均質化する際には、両材料のひずみエネルギー増分が等価となるように材料内部の応力分担が決定するという条件式を導入して均質化を行うものとした。具体的な定式化方法や構成モデルについては次章で詳しく説明するが、本実験の知見をベースにすることで、繊維材料の応力・ひずみ関係の考え方やその繊維配向角分布との関係性の評価、および繊維材料と粒状材料とのひずみエネルギー増分の等価性を仮定した均質化方法の導入など、既往の研究では考慮されていなかった繊維材料の変形挙動の実際を導入した新しい構成モデルの構築が行えることを示した。

2.5 本章の要約

本章では、繊維-粒子複合材料が変形する際の、繊維材料の変形挙動およびその粒状材料の変形挙動との関連性を明らかにすることを目的として、要素レベルの繊維-粒子複合材料から微視的な要素を抜き取った状態を想定した2種類のせん断試験を行った。ひとつは、繊維材料の変形挙動を目視により観察する「可視化一面せん断試験」であり、もうひとつは、ひずみゲージによって繊維材料の変形挙動を数量的に把握する「数量化一面せん断試験」である。この際、既往の研究成果より、重要性が指摘されている繊維配向角度についても検討するものとし、繊維配向とせん断面の角度（繊維-せん断面角度）が $\alpha = 0, 30, 60, 90^\circ$ の場合の繊維材料の変形挙動の把握を行った。以上の実験的研究により、得られた主要な成果を要約すると以下ようになる。

- 1) 引張抵抗および粒状材料との摩擦抵抗のみが発揮される繊維材料の粒状材料内での変形挙動は、繊維材料と粒状材料の境界で発揮される界面強度を境にして、それ以下の応力状態では引張挙動を示し、界面強度を超える応力状態では引き抜け挙動を示すような、弾完全塑性的な挙動を示すことを明らかにした。
- 2) 粒状材料内の繊維材料の変形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。その結果より、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を明らかにした。これは、実際には 1 本の繊維材料の中でも、極端に引張ひずみが発生している箇所や引張ひずみが発生しない箇所などの不均一性が存在しているためであり、繊維材料に発生するひずみ増分や応力増分は不均一性により粒状材料のそれとは等価とはなり得ないものの、その掛け合わせで評価されるひずみエネルギー増分では等価になり得たと考えられた。これより、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、粒状材料との相互作用によって発生する繊維材料の局所的な不均一性を考慮した適切な均質化が行えることが検証された。
- 4) 均質化理論によって繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築する上での、本研究の着眼点や特色を提示した。本研究では、本章の実験成果をベースとして、繊維材料の応力・ひずみ関係を、引張挙動と引き抜け挙動によってモデル化するものとした。さらに、微視的な特性から巨視的な特性を評価する際には、繊維材料の配向角度のばらつきを評価する確率密度関数を導入するものとし、引張挙動と引き抜け挙動を繊維配向角分布と関連付けて評価する手法を提示するものとした。また、繊維材料と粒状材料を一つの材料として均質化する際には、両材料のひずみエネルギー増分が等価となるように材料内部の応力分担が決定するという条件式を導入して均質化を行うものとした。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 例えば，Zornberg, J. G. : Discrete framework for limit equilibrium analysis of fiber-reinforced soil, *Journal of Geotechnique*, Vol.52, No.8, pp.593-604, 2002.
- 3) 例えば，Hamidi, A. and Hooresfand, M. : Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand, *Journal of Geotextile and Geomembranes*, Vol. 36, pp. 1-9, 2013.
- 4) 例えば，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.

- 5) Michalowski, R. L. : Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil, *Jornal of Geotechnique*, Vol.58, No.6, pp.489-501, 2008.
- 6) Prisco, C. and Nova, R. : A constitutive model for soil reinforced by continuous threads, *Jornal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.12, pp.161-178, 1993.
- 7) Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M. and Russell, A. R. : Fibre reinforced sands: Experiments and modelling, *Jornal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, pp.238-250, 2010.
- 8) Michalowski, R. L. and Cermak, J. : Strength anisotropy of fiber-reinforced sand, *Jornal of Computers and Geotechnics*, Vol.29, pp.279-299, 2002.
- 9) Michalowski, R. L. and Zhao, Aigen. : FAILURE of FIBER-REINFORCED GRANULAR SOIL, *Jornal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 3, pp.226-234, 1996.
- 10) 野添重晃, 橋詰豊, 金子賢治, 熊谷浩二, 堀江征信 : 短繊維混合補強土の最低含有率に及ぼす粒径の影響, *ジオシンセティックス論文集*, 第 28 巻, pp.143-148, 2013.
- 11) 大澤善次郎 : 高分子劣化・長寿命化ハンドブック, 第 2 章 おもな要因による劣化, pp.21-100, 丸善出版, 2011.
- 12) 金野克美, 可児浩, 吉田昌充, 吉田光則 : 高分子材料の耐候性試験と劣化予測, *北海道立工業試験場報告*, No.304, pp.63-69.
- 13) 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.
- 14) 豊田政男 : 不均質材料の力学 (その 2) 不均質材の変形の力学的取扱い, *溶接学会誌*, 第 58 巻, 第 4 号, 連載講義, pp.24-30, 1989.
- 15) 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.
- 16) Omine, K., Ochiai, H. and Bolton, M : A Generated Two-Phase Mixture Model and its Application to Composite Ground, *Memories of The Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol.51, No.2, 1998.
- 17) 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.
- 18) 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・強度・変形特性, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.825-826, 2000.
- 19) Atkinson, J. H. : An introduction to THE MECHANICS OF SOILS AND FOUNDATIONS, Chapter 18, Stability of soils structures using bound methods, pp.215-239, McGRAW-HILL Book Company Europe, 1993.

第3章 繊維材料と粒状材料の関連性を考慮した 繊維-粒子複合材料の構成モデル

3.1 概説

2 種以上の異なる素材が組み合わさることによって、単一では発揮できない特性を有する材料を、一般的に複合材料と呼ぶ。このような材料を対象とした研究分野では、均質化理論を応用することにより、その応力・ひずみ関係をモデル化する試みが古くからなされている¹⁾。均質化理論は、複合材料のように不均質な材料に対して、微視的には不均質な構造を有しながらも、巨視的には均質な特性を有すると仮定することで、複雑な挙動を単純化して評価することを可能にする²⁾。微視的な構造 (不均質) をどのように巨視的な挙動 (均質) に結び付けるかが重要であり、これまでに様々な考え方や解析手法が開発されてきている。古典的な手法としては、複合則 (rule of mixture) が有名であり、複合材料の平均的な物性値 (応力/ひずみなど) を構成材料の体積分率で評価する比較的単純なものである³⁾。その中で、複合材料の平均的な応力とひずみから剛性マトリックスを導出する方法が提案されており、代表的な例として、構成材料間での応力増分の等価性を仮定した Reuss model やひずみ増分の等価性を仮定した Voigt model などが挙げられる⁴⁾。その他にも、Eshelby による等価介在物法⁵⁾や、森・田中による平均場の理論⁶⁾などは、均質化理論の原点といえる重要な研究成果である。現在では、これらの研究成果を基盤としながら、マルチスケール有限要素解析^{7), 8)}などの解析手法が提案されており、材料の成形法の影響を考慮したモデリングや、部材に発生するき裂・損傷の進展シミュレーションなども可能になってきている。

土質力学の分野においても、均質化理論を適用した研究成果が報告されており、例えば、粒状材料としての不均質性を考慮した応力・ひずみ関係のモデル化^{9), 10)}や、砂と粘土が混ざった中間土の圧縮・せん断特性の評価¹¹⁾、セメント改良土や補強土構造物の変形性の評価^{12), 13), 14)}などが挙げられる。また、繊維-粒子複合材料を対象とした研究として、複合則を用いた構成モデルもいくつか見受けられる。例えば、Prisco and Nova¹⁵⁾ 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 Voigt model を適用し、軸対称条件における応力・ひずみ関係を導出している。さらに Diambra et al¹⁶⁾ は、Prisco and Nova¹⁵⁾ に提案されたようなひずみ増分を等価とする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ている。これらの研究成果より、土質力学

の分野においては、土粒子や間隙径の不均質性の評価や異種材料の混入による影響を評価する場合などにおいて、均質化理論は非常に有用な手段であることが伺える。

本章では、このような観点から、均質化理論を応用して繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を評価 / 予測するための構成モデルを構築することを考えた。ここで、先述した繊維-粒子複合材料の既往の構成モデルは、繊維材料の変形挙動を詳細に明らかにした研究がこれまでほとんどなかったことから、繊維材料の変形挙動に起因した補強効果の評価や、複合則による均質化の方法などについて、実現象を反映できていない部分が見受けられている。そこで本モデルでは、先の第 2 章における実験成果である、繊維材料は引張挙動と引き抜け挙動による弾完全塑性的な挙動を示すこと、繊維材料が引張挙動を示す際に補強効果が発揮されること、繊維材料の変形は粒状材料とひずみエネルギー増分が等価となるように進行することなどを考慮することで、より実現象に近い新たな構成モデルの構築が行えると考えた。具体的には、複合則により繊維材料と粒状材料の特性を複合化する際に、ひずみエネルギー増分の等価性を仮定することにより決定される応力分担テンソルを導入し、応力・ひずみ関係を導出した。また、繊維材料については、微視的特性から巨視的特性を評価する際に、繊維材料の配向角度のばらつきを評価する確率分布関数を導入し、繊維材料の不均質性が応力・ひずみ関係に与える影響を考慮するものとした。さらに引張ひずみが発生する条件と繊維材料が引き抜ける条件を繊維配向角度に関連付けて評価し、補強効果が発揮される条件を明確にした。また、本モデルの有用性の検証を目的として、三軸圧縮試験を実施し、実験結果とモデル解析結果の比較を行った。ここで、既往の研究成果においても、三軸圧縮試験が実施されているケースが多いことから、本モデルでは軸対称条件に限定して定式化の方法を紹介した。しかし、*Omine et al*¹²⁾ によって示されているように、一般応力状態に本モデルを拡張することは可能である。また本モデルでは、完全飽和および完全乾燥状態を想定するものとし、全応力と有効応力の表記上での区別をしていないことを先に断わっておく。

以下、節に従って本章の概要を述べる。まず、第 2 節では、複合則をベースとして、新たに応力分担テンソルを導入する方法を提示し、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を定式化した。次に、第 3 節では、粒状材料と繊維材料の応力・ひずみ関係を示した。本モデルでは、繊維材料の特性に着目したモデル化を行うため、粒状材料の構成関係は弾完全塑性挙動として簡略化して評価するものとした。また、繊維材料の応力・ひずみ関係については、まず引張挙動に着目して微視的な応力・ひずみ関係を定式化し、さらに微視的な挙動から巨視的な挙動を評価する際に、繊維材料の配向角分布の評価、引張挙動および引き抜け挙動を規定する条件式の導入を行った。そして、第 4 節では、繊維材料の特性をパラメトリックに変化させたモデル解析を実施し、繊維材料の特性の違いが繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に及ぼす影響を解析的に考察した。第 5 節では、繊維-粒子複合材料の三軸圧縮試験結果との比較によって、本モデルの有用性の検証を行った。最後の第 6 節では、以上の成果を要約し、まとめとした。

3.2 複合則をベースとした繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係

繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係のモデル化の流れや、明確にしておく必要のある評価項目を図-3.1に整理した。2. 構成材料の応力・ひずみ関係の評価については、後で詳しく説明するものとし、ここでは、1. 巨視的均質性を仮定した応力 / ひずみの評価、3. 複合化による応力・ひずみ関係の定式化について説明する。

3.2.1 軸対称条件における応力 / ひずみパラメーター

本モデルでは、三軸圧縮試験を想定して応力とひずみの関係を定式化する。そこでまず、使用する応力 / ひずみパラメーターを定義した。三軸圧縮試験で円柱供試体に作用する応力とひずみは、軸方向の応力 σ_a とひずみ ε_a 、側方向の応力 σ_r とひずみ ε_r である。本モデルでは、一般的に使用される応力 / ひずみパラメーターとして、以下で定義される、平均主応力 p と軸差応力 q 、体積ひずみ ε_p と軸差ひずみ ε_q を使用するものとした¹⁷⁾。

$$p = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3}, \quad q = \sigma_a - \sigma_r \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r, \quad \varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r) \quad (3.2)$$

また、応力とひずみを簡略的に表記する場合には、 $\boldsymbol{\sigma} (= [p \quad q]^T)$, $\boldsymbol{\varepsilon} (= [\varepsilon_p \quad \varepsilon_q]^T)$ と記述した。

3.2.2 巨視的均質性を仮定した応力 / ひずみの評価

繊維-粒子複合材料は、微視的に観察すると構成材料の相互作用による不均質性を内在した複合構造を有しており、その微視的構造によって巨視的特性が決定される¹⁸⁾。本モデルでは、均質化理論の古典解法である複合則が成り立つと仮定することで、複合材料内に不均質に分布する微視的応力 / ひずみから、巨視的には均質体とみなすことにより導出される巨視的応力 / ひずみを評価するものとした。いま、複合材料に巨視的応力 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ / ひずみ $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ が作用しているとき、粒状材料と繊維材料に微視的応力 / ひずみ、 $\boldsymbol{\sigma}_m^* / \boldsymbol{\varepsilon}_m^*$, $\boldsymbol{\sigma}_f^* / \boldsymbol{\varepsilon}_f^*$ が生じるとする。このとき、複合則を用いることで、複合材料の巨視的応力 / ひずみは、粒状材料と繊維材料の微視的な応力 / ひずみの体積平均として以下のように表すことができる¹⁸⁾。

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{1}{V} \int_V \{\boldsymbol{\sigma}_m^* + \boldsymbol{\sigma}_f^*\} dV \quad (3.3)$$

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{V} \int_V \{\boldsymbol{\varepsilon}_m^* + \boldsymbol{\varepsilon}_f^*\} dV \quad (3.4)$$

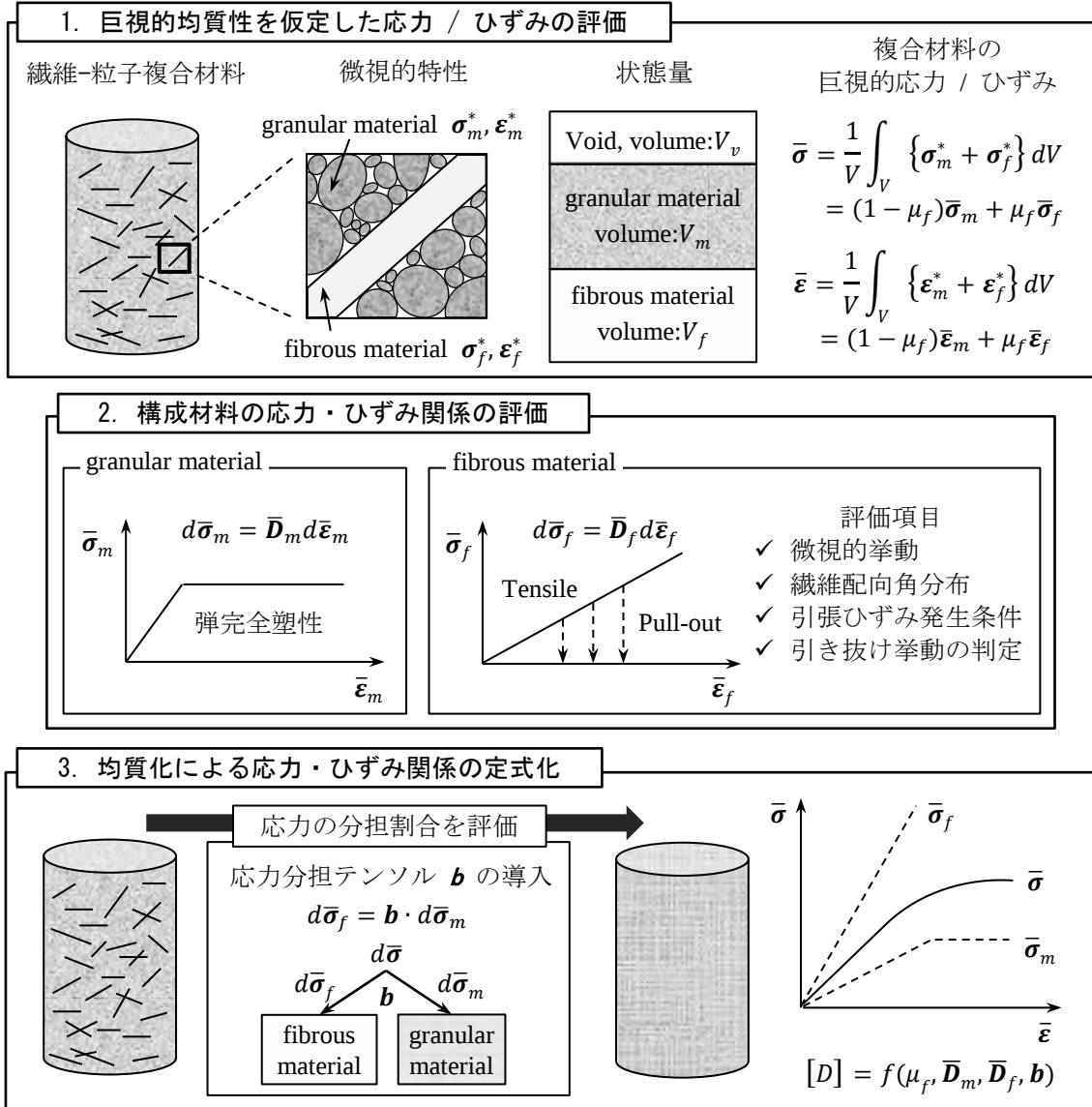


図-3.1 複合則をベースとした繊維-粒子複合材料の構成モデルの簡単な流れと評価項目

また、上式と同様に体積平均で定義される粒状材料と繊維材料の平均的な応力 / ひずみをそれぞれ $\bar{\sigma}_m / \bar{\epsilon}_m$, $\bar{\sigma}_f / \bar{\epsilon}_f$ とすると、式(3.3), (3.4)は以下のように表される。

$$\bar{\sigma} = \mu_m \bar{\sigma}_m + \mu_f \bar{\sigma}_f = (1 - \mu_f) \bar{\sigma}_m + \mu_f \bar{\sigma}_f \quad (3.5)$$

$$\bar{\epsilon} = \mu_m \bar{\epsilon}_m + \mu_f \bar{\epsilon}_f = (1 - \mu_f) \bar{\epsilon}_m + \mu_f \bar{\epsilon}_f \quad (3.6)$$

ここで、 μ_m と μ_f は粒状材料と繊維材料の体積含有率を表しており、粒状材料の体積 V_m 、繊維材料の体積 V_f 、間隙の体積 V_v を用いて以下で定義される。

$$\mu_m = \frac{V_m + V_v}{V}, \quad \mu_f = \frac{V_f}{V} \quad \text{and} \quad \mu_m + \mu_f = 1 \quad (3.7)$$

ここで、通常、粒状材料や繊維材料の体積含有率は複合材料が圧縮もしくは膨張すれば変化する状態量である。しかし、本モデルでは、簡単のためにこれらを一定の材料パラメーターとみなして解析することとした。以上のように、複合則をベースとして、複合材料の巨視的応力 / ひずみを各構成材料の平均的な応力 / ひずみとそれぞれの体積含有率の重ね合わせにより評価した。

3.2.3 応力分担テンソルの導入による均質化

式(3.5), (3.6)に示した複合材料の巨視的応力 / ひずみをひとつの構成モデルとして定式化する場合、構成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応力 / ひずみは、構成材料の剛性や体積含有率および均質化の方法に依存し、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¹⁸⁾。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、複合材料内部で巨視的な応力増分を等価 ($d\bar{\sigma} = d\bar{\sigma}_m = d\bar{\sigma}_f$) と仮定した Reuss model や、巨視的なひずみ増分を等価 ($d\bar{\epsilon} = d\bar{\epsilon}_m = d\bar{\epsilon}_f$) と仮定した Voigt model などが挙げられる。しかし、一般的に応力増分は $d\bar{\sigma} \neq d\bar{\sigma}_m \neq d\bar{\sigma}_f$ 、ひずみ増分は $d\bar{\epsilon} \neq d\bar{\epsilon}_m \neq d\bar{\epsilon}_f$ であることから、これらのモデルで実際の挙動を適切に評価することは難しい。そこで本モデルでは、複合材料に巨視的応力が作用した際に、繊維材料と粒状材料に分担される応力の割合を評価する応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を導入し、繊維-粒子複合材料の剛性マトリックスを決定する方法を提案する。この方法は、2 種弾性体の複合材料に対して、マトリックスと介在物に分担される応力の割合を評価する応力分担パラメーター $\mathbf{b}$ を導入し、複合材料のヤング率を誘導した大嶺ら¹⁹⁾の研究を参考にしたものである。まず、粒状材料と繊維材料の各々の応力・ひずみ増分関係は、それぞれ以下の式で表されるとして説明を進めていく。

$$d\bar{\sigma}_m = \bar{\mathbf{D}}_m d\bar{\epsilon}_m, \quad \begin{bmatrix} d\bar{p}_m \\ d\bar{q}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{D}_{m1} & \bar{D}_{m2} \\ \bar{D}_{m3} & \bar{D}_{m4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\bar{\epsilon}_{mp} \\ d\bar{\epsilon}_{mq} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$d\bar{\sigma}_f = \bar{\mathbf{D}}_f d\bar{\epsilon}_f, \quad \begin{bmatrix} d\bar{p}_f \\ d\bar{q}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{D}_{f1} & \bar{D}_{f2} \\ \bar{D}_{f3} & \bar{D}_{f4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\bar{\epsilon}_{fp} \\ d\bar{\epsilon}_{fq} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{D}}_m$ と $\bar{\mathbf{D}}_f$ は粒状材料と繊維材料の平均的な剛性マトリックスである。

式(3.5) ~ (3.9)の関係式を用いて複合材料の応力・ひずみ関係を定式化する場合、粒状材料と繊維材料に働く応力を算定する必要がある。複合材料の応力増分は、式(3.5)に示されるように、粒状材料と繊維材料によって分担される。そのため、応力増分の分担割合を求めるために、応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を導入し、粒状材料と繊維材料の応力の分担関係を以下で定義する。

$$d\bar{\sigma}_f = \mathbf{b} \cdot d\bar{\sigma}_m, \quad \begin{bmatrix} d\bar{p}_f \\ d\bar{q}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\bar{p}_m \\ d\bar{q}_m \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

このとき、式(3.5), (3.7), (3.10)より、粒状材料および繊維材料の応力増分は、複合材料の応力増分を用いてそれぞれ以下の式で表される。

$$\begin{bmatrix} d\bar{p}_m \\ d\bar{q}_m \end{bmatrix} = [(1 - \mu_f)\mathbf{I} + \mu_f \mathbf{b}]^{-1} \begin{bmatrix} d\bar{p} \\ d\bar{q} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} d\bar{p}_f \\ d\bar{q}_f \end{bmatrix} = \mathbf{b}[(1 - \mu_f)\mathbf{I} + \mu_f \mathbf{b}]^{-1} \begin{bmatrix} d\bar{p} \\ d\bar{q} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ は 2×2 の単位行列である。また、式(3.11), (3.12)を式(3.8), (3.9)に代入することで、複合材料に応力増分が生じた場合の、粒状材料および繊維材料に発生するひずみは、それぞれ以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_{mp} \\ d\bar{\varepsilon}_{mq} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{D}}_m^{-1} [(1 - \mu_f)\mathbf{I} + \mu_f \mathbf{b}]^{-1} \begin{bmatrix} d\bar{p} \\ d\bar{q} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_{fp} \\ d\bar{\varepsilon}_{fq} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{D}}_f^{-1} \mathbf{b} [(1 - \mu_f)\mathbf{I} + \mu_f \mathbf{b}]^{-1} \begin{bmatrix} d\bar{p} \\ d\bar{q} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

以上より、式(3.6)を増分形に書き改めたものに式(3.13), (3.14)を代入することにより、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ増分関係は、粒子材料と繊維材料の特性、繊維材料の体積含有率および応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を用いて以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_p \\ d\bar{\varepsilon}_q \end{bmatrix} = [(1 - \mu_f)\bar{\mathbf{D}}_m^{-1} + \mu_f \bar{\mathbf{D}}_f^{-1} \mathbf{b}] [(1 - \mu_f)\mathbf{I} + \mu_f \mathbf{b}]^{-1} \begin{bmatrix} d\bar{p} \\ d\bar{q} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

当然、式(3.15)は繊維材料の体積含有率が $\mu_f = 0$ (粒状材料のみ), $\mu_f = 1$ (繊維材料のみ) の場合には、式(3.8), (3.9)と同等となる。また、応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を評価することにより、複合材料の剛性マトリックスを直接的に求めることができることが理解される。この応力分担テンソル $\mathbf{b}$ の評価方法については以下で説明する。

3.2.4 ひずみエネルギー増分の等価性を仮定した応力分担テンソルの評価

先に述べたように、第2章に示した実験結果から、複合材料が変形する際に、粒状材料とひずみエネルギー増分が等価となるように繊維材料の変形が進行することが明らかになっている。これより、本モデルでは、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分が等価となるように複合材料に作用する応力が分担されていると仮定して応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を決定するものとした。

まず、粒状材料と繊維材料のひずみエネルギー増分は、式(3.8), (3.9)を用いて計算することによって、次のように定義されるものである。

$$d\bar{W}_m = d\bar{\epsilon}_m \cdot d\bar{\sigma}_m = \bar{D}_m^{-1} \cdot d\bar{\sigma}_m^2 \quad (3.16)$$

$$d\bar{W}_f = d\bar{\epsilon}_f \cdot d\bar{\sigma}_f = \bar{D}_f^{-1} \cdot d\bar{\sigma}_f^2 \quad (3.17)$$

これより，式(3.16), (3.17)を同等 ($d\bar{W}_m = d\bar{W}_f$) と仮定し，式(3.10)を代入することで，応力分担テンソル $\mathbf{b}$ は以下のように，粒状材料と繊維材料の平均的な剛性マトリックスにより決定される．

$$\mathbf{b} = \{\bar{D}_f \cdot \bar{D}_m^{-1}\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

以上より，式(3.18)を式(3.15)に導入することで，複合材料の応力・ひずみ関係の評価を行うことが可能である．また，式(3.18)および式(3.15)の計算に必要な粒状材料と繊維材料の剛性マトリックスの算定方法については，後の章で詳しく説明する．

3.3 構成材料の応力・ひずみ関係

本節では，図-3.1 に示した 2. 構成材料(粒状材料・繊維材料)の応力・ひずみ関係の評価について詳しく説明を行っていく．本構成モデルは，先に説明したように，粒状材料および繊維材料の平均的な剛性マトリックス $\bar{D}_m$ と $\bar{D}_f$ によって，応力分担テンソルや複合材料の応力・ひずみ関係の評価できるようになっている．ここで，各々の材料の応力・ひずみ関係は，弾性・弾完全塑性・弾塑性モデルのいずれでも式(3.18)や式(3.15)の計算は可能である．しかし，先に述べたように，本モデルでは繊維材料の特性の評価に重点を置いて議論を行っていくことを主眼としている．また後の展開として，時間・空間的な不均一性の評価を本構成モデルへ導入することを考慮に入れると，塑性硬化や軟化を表現できる弾塑性モデルによって粒状材料の応力・ひずみ関係の評価を行った場合，計算に必要なパラメーターが多くなり解析が煩雑になりすぎると考える．そのため，粒状材料の応力・ひずみ関係は，弾完全塑性モデルを用いた簡略的な評価を行うものとした．

次に，繊維材料の応力・ひずみ関係については，先の章の実験成果を元に，繊維材料の表面に界面摩擦強度に相当する応力が働くまでは引張挙動を，それ以上の応力状態においては引き抜け挙動を示し，引き抜け挙動時には繊維材料の補強効果はなくなるものとしてモデル化した．まず，微視的な領域における引張挙動時の応力・ひずみ関係を定式化し，それを巨視的な応力・ひずみ関係へと展開する流れでモデル化の内容を説明する．微視的な挙動から巨視的な挙動を評価する際には，繊維配向角分布を確率分布関数で評価するものとし，さらに繊維配向角に応じた引張ひずみの発生条件式を導入するものとした．また最後に，界面摩擦強度の導入によって，繊維材料

が引張挙動から引き抜け挙動に転じる際の判定式を導出し、この判定式を別途考慮することによって、繊維材料の引張挙動と引き抜け挙動の応力・ひずみ関係を表現するものとした。

さらに本節の最後に、本モデルによる解析フローと解析に必要なパラメーターを整理した。

3.3.1 粒状材料の応力・ひずみ関係

粒状材料の応力・ひずみ関係は、土質力学の分野において研究がさかんに行われており、様々なモデルが開発されている^{17), 20), 21), 22)}。本モデルでは、その中でも最も初歩的な構成モデルの一つといえる、Elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb model (以下、「MC model」と称する)を用いて粒状材料の応力・ひずみ関係の評価を行うものとした。以下にその概要を説明するように、MC model は、Mohr-Coulomb の破壊規準から導かれる降伏関数を境にして、応力・ひずみ関係における弾性領域と完全塑性領域を規定する比較的単純な弾完全塑性モデルである。またここで説明を省略した詳細な内容については、例えば Wood²⁰⁾などを参考にされたい。

まず、弾性領域における軸対称条件での応力増分・ひずみ増分関係は、等方弾性体を仮定した次の式で表されるものとする。

$$\begin{bmatrix} d\bar{p}_m \\ d\bar{q}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_{mp}^e \\ d\bar{\varepsilon}_{mq}^e \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

ここで、体積圧縮係数 K とせん断弾性係数 G は、ヤング率 E_m とポアソン比 ν_m を用いて以下で定義される係数である。

$$K = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad \text{and} \quad G = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (3.20)$$

次に、Mohr-Coulomb の破壊規準 ($c \approx 0$ を仮定) から、平均主応力 $\bar{p}_m$ と軸差応力 $\bar{q}_m$ によって降伏関数を導く方法を述べる。通常、Mohr-Coulomb の破壊規準は、主応力である軸応力 $\bar{\sigma}_{ma}$ と側応力 $\bar{\sigma}_{mr}$ によって次のように表される。

$$(\bar{\sigma}_{ma} - \bar{\sigma}_{mr}) - (\bar{\sigma}_{ma} + \bar{\sigma}_{mr})\sin\phi_m = 0 \quad (3.21)$$

ここで、 ϕ_m は内部摩擦角を意味する。また式(3.1)より、軸応力 $\bar{\sigma}_{ma}$ と側応力 $\bar{\sigma}_{mr}$ を平均主応力 $\bar{p}_m$ と軸差応力 $\bar{q}_m$ で表すと次のようになるため、

$$\bar{\sigma}_{ma} = \frac{3\bar{p}_m + 2\bar{q}_m}{3}, \quad \bar{\sigma}_{mr} = \frac{3\bar{p}_m - \bar{q}_m}{3} \quad (3.22)$$

式(3.21)に式(3.22)を代入し、平均主応力 $\bar{p}_m$ と軸差応力 $\bar{q}_m$ で式(3.21)を表示すると次の式(3.23)のように表される。

$$\bar{q}_m - \frac{6\sin\phi_m}{3 - \sin\phi_m} \cdot \bar{p}_m = 0 \quad (3.23)$$

以上より、MC model の軸対称条件での降伏関数 $f(\sigma)$ は以下の式で定義される。

$$f(\sigma) = f(\bar{p}_m, \bar{q}_m) = \bar{q}_m - M\bar{p}_m = 0 \quad (3.24)$$

$$M = \frac{6\sin\phi_m}{3 - \sin\phi_m} \quad (3.25)$$

当然、 $f(\sigma) < 0$ の応力状態では弾性挙動を、 $f(\sigma) = 0$ の応力状態では塑性挙動を示す。

さらに、ここでは、非関連流れ則を適用するものとし、その際の塑性ポテンシャル関数 $g(\sigma)$ は以下で定義するものとした。

$$g(\sigma) = \bar{q}_m - M'\bar{p}_m + k = 0 \quad (3.26)$$

ここで、 k は任意の係数であり、 M' は三軸圧縮試験の結果より求められるダイレイタンシー角 ψ_m を用いて評価される係数とした。また以下に M' とダイレイタンシー角 ψ_m の定義を示した。

$$M' = \frac{3\tan\psi_m}{3 + \tan\psi_m} \quad (3.27)$$

$$\tan\psi_m = -\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_a^p} \approx -\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} \quad (3.28)$$

以上より、硬化関数を $d\lambda$ としたとき、塑性ポテンシャル関数 $g(\sigma)$ によって、塑性ひずみ増分は以下の式で定義されるものになる。

$$\begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_{mp}^p \\ d\bar{\varepsilon}_{mq}^p \end{bmatrix} = d\lambda \cdot \begin{bmatrix} \partial g / \partial \bar{p}_m \\ \partial g / \partial \bar{q}_m \end{bmatrix} = d\lambda \cdot \begin{bmatrix} -M' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

ここで、プラガーの適合条件 ($df(\sigma) = 0$) より、塑性領域において以下の関係が成り立つため、

$$df(\sigma) = \frac{\partial f}{\partial \bar{p}_m} d\bar{p}_m + \frac{\partial f}{\partial \bar{q}_m} d\bar{q}_m = 0 \quad (3.30)$$

式(3.30)に式(3.19)および式(3.29)を代入することで、硬化関数 $d\lambda$ は以下で評価される。

$$d\lambda = \frac{-MKd\bar{\varepsilon}_{mp} + 3Gd\bar{\varepsilon}_{mq}}{MM'K + 3G} \quad (3.31)$$

これより、式(3.19)に式(3.29)、(3.31)を代入することで、粒状材料の応力・ひずみ関係として、最終的に次の式(3.32)が導かれる。

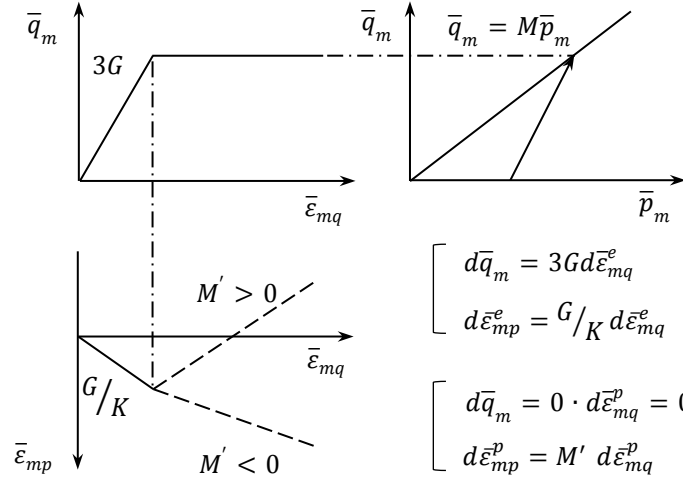


図-3.2 粒状材料の応力・ひずみ関係(Elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb model)

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} d\bar{p}_m \\ d\bar{q}_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\bar{\epsilon}_{mp} - d\bar{\epsilon}_{mp}^p \\ d\bar{\epsilon}_{mq} - d\bar{\epsilon}_{mq}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\bar{\epsilon}_{mp} \\ d\bar{\epsilon}_{mq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} d\lambda \begin{bmatrix} -M' \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\bar{\epsilon}_{mp} \\ d\bar{\epsilon}_{mq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -M' \\ 1 \end{bmatrix} \frac{[-MK \quad 3G]}{MM'K + 3G} \begin{bmatrix} d\bar{\epsilon}_{mp} \\ d\bar{\epsilon}_{mq} \end{bmatrix} \\
 &= \left[\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} - \frac{1}{KMM' + 3G} \begin{bmatrix} MM'K^2 & -3M'GK \\ -3MGK & 9G^2 \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} d\bar{\epsilon}_{mp} \\ d\bar{\epsilon}_{mq} \end{bmatrix} \quad (3.32)
 \end{aligned}$$

式(3.32)より，MC model による粒状材料の弾塑性剛性マトリックス $\bar{\mathbf{D}}_m^{ep}$ は以下で表される．

$$\bar{\mathbf{D}}_m^{ep} = \left[\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} - \frac{1}{KMM' + 3G} \begin{bmatrix} MM'K^2 & -3M'GK \\ -3MGK & 9G^2 \end{bmatrix} \right] \quad (3.33)$$

式(3.33)において，弾性領域では左項のみ，塑性領域では全項が粒状材料の剛性マトリックス $\bar{\mathbf{D}}_m$ を意味する．また，参考として，MC model (式(3.32)) により評価される粒状材料の応力・ひずみ関係を図-3.2に示した．図-3.2より，弾性領域では，軸差ひずみ $\bar{\epsilon}_{mq}^e$ の増加に伴って，軸差応力 $\bar{q}_m$ はせん断弾性係数 G に比例して増加し，体積ひずみ $\bar{\epsilon}_{mp}^e$ はせん断弾性係数と体積圧縮係数の比 G/K に比例して収縮していく．また， M によって決定される降伏点を境に塑性領域に移り，軸差応力 $\bar{q}_m$ は一定値を示す．このとき，塑性体積ひずみ $\bar{\epsilon}_{mp}^p$ は M' が正の場合には膨張挙動を，負の場合には収縮挙動を示すような特性を有することが確認される．

3.3.2 繊維材料の微視的な応力・ひずみ関係

複合材料分野における Cox et al²³⁾ の研究や，土質力学分野の Diambra et al¹⁶⁾ の研究を参考に，繊維材料が引張挙動を示す際の微視的な応力・ひずみ関係を導出した．また，先の実験成果より，繊維材料の粒状材料内での引張挙動は非常に微小であったことから，本モデルでは，繊

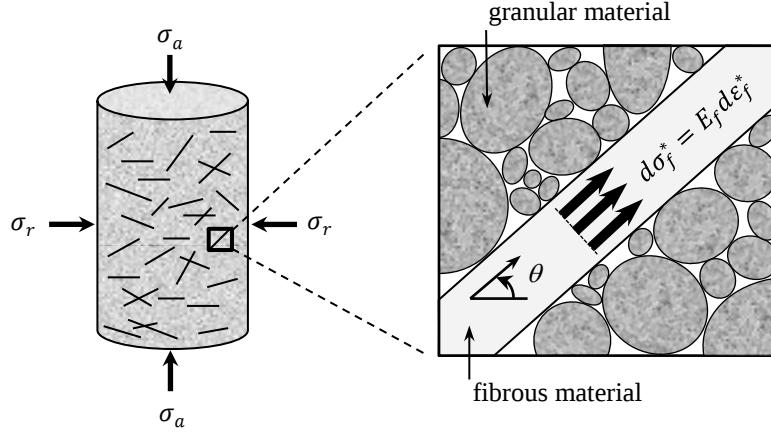


図-3.3 微視的要素で想定される繊維材料の応力状態

維材料自身の体積変化やポアソン効果の影響は考慮しないものとした。

微視的な要素として、図-3.3 に示すような、繊維材料が水平面に対して角度 θ で堆積しており、その方向に引張応力 ($d\sigma_f^* = E_f d\varepsilon_f^*$ (E_f : 繊維材料のヤング率)) が発生している状態を想定する。このとき、引張応力増分を軸対称条件における軸方向応力増分 $d\sigma_{fa}^*$ と側方向応力増分 $d\sigma_{fr}^*$ に分解すると、以下のように表される。

$$d\sigma_{fa}^* = d\sigma_f^* \sin^2 \theta = E_f \sin^2 \theta \cdot d\varepsilon_f^* \quad (3.34)$$

$$d\sigma_{fr}^* = \frac{1}{2} d\sigma_f^* \cos^2 \theta = \frac{1}{2} E_f \cos^2 \theta \cdot d\varepsilon_f^* \quad (3.35)$$

さらにここで、引張ひずみ増分 $d\varepsilon_f^*$ は軸方向と側方向のひずみ増分 $d\varepsilon_{fa}^*$ と $d\varepsilon_{fr}^*$ により、以下のように表される。

$$d\varepsilon_f^* = d\varepsilon_{fa}^* \sin^2 \theta + d\varepsilon_{fr}^* \cos^2 \theta \quad (3.36)$$

これより、式(3.36)を式(3.34), (3.35)に代入して整理すると、微視的要素における、繊維材料の軸方向と側方向の応力・ひずみ増分関係として以下の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} d\sigma_{fa}^* \\ d\sigma_{fr}^* \end{bmatrix} = \frac{E_f}{2} \begin{bmatrix} 2\sin^4 \theta & 2\sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ \sin^2 \theta \cos^2 \theta & \cos^4 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_{fa}^* \\ d\varepsilon_{fr}^* \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

さらに、式(3.1), (3.2)の関係を用いて、式(3.37)を $[p \ q]^T$ と $[\varepsilon_p \ \varepsilon_q]^T$ の関係で表すと以下のようになり、この式が微視的要素における、繊維材料の引張挙動時の応力・ひずみ関係となる。

$$\begin{bmatrix} dp_f^* \\ dq_f^* \end{bmatrix} = E_f \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{6}(2 - 3\cos^2 \theta) \\ \frac{1}{6}(2 - 3\cos^2 \theta) & \frac{1}{4}(2 - 3\cos^2 \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_{fp}^* \\ d\varepsilon_{fq}^* \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

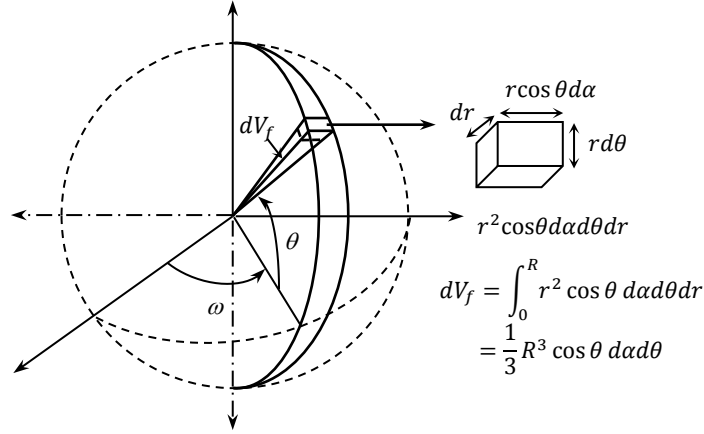


図-3.4 繊維配向角分布を定義する球座標系

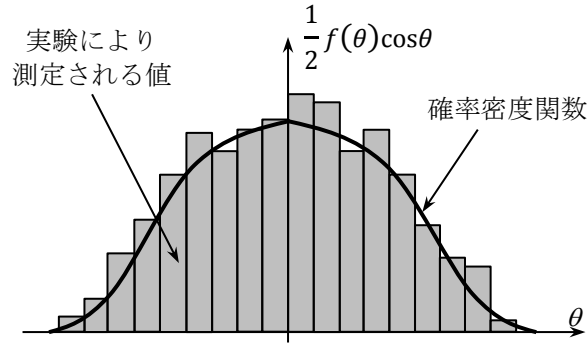


図-3.5 実際の繊維配向角分布とそれを評価する確率密度関数の関係(概念図)

3.3.3 繊維配向角分布の評価

式(3.38)で表される微視的な応力・ひずみ関係から、巨視的な応力・ひずみ関係の評価する際に、繊維配向角度分布の影響を考慮する方法を述べる。この手法は複合材料の分野で開発された理論であり、地盤工学の分野では Michalowski et al^{(24), (25)} や Diambra et al⁽²⁶⁾ によって応用されている。いま、複合材料内に分布する繊維材料の体積 V_f が、図-3.4 に示すような球で表されるとする。このとき、球の半径を R とすると微小体積 dV_f は以下の式で表される。

$$dV_f = \int_0^R r^2 \cos \theta d\theta d\omega dr = \frac{1}{3} R^3 \cos \theta d\theta d\omega \quad (3.39)$$

このとき、角度 θ , ω 方向に対する繊維材料の配向角度のばらつきがそれぞれ $f(\theta)$, $f(\omega)$ なる分布を有すると考えると、以下の関係が成立する。

$$\frac{1}{4/3 \pi R^3} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} f(\theta) f(\omega) \frac{R^3}{3} \cos \theta d\omega d\theta = 1 \quad (3.40)$$

表-3.1 既往の研究によって提案されている $f(\theta)$

	$f(\theta)$	parameters
Michalowski et al (2002)	$A + C \cos^n \theta $	$A = 0$ $C = 2.04$ $n = 5$
Diambra et al (2007)	$\frac{2ab^2 \cos(\theta) }{\cos(\theta)^2(b^2 - a^2) + a^2}$	$a = 1.02$ $b = 0.46$

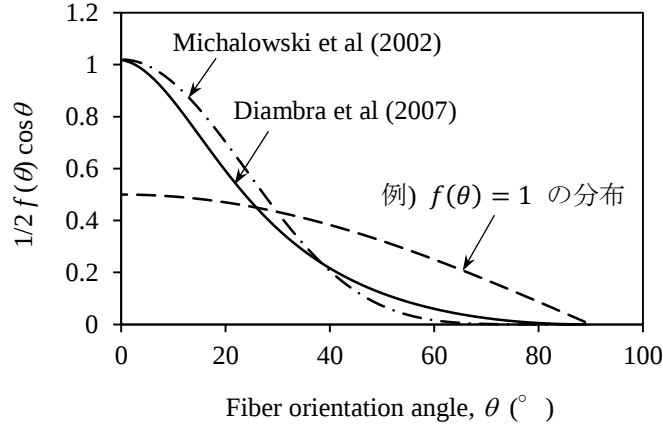


図-3.6 既往の研究によって提案されている $f(\theta)$ による繊維配向角分布

ここで，本モデルでは軸対称条件を想定しているため，側方向である角度 ω 方向のばらつきを考慮しないとすると，式(3.40)は以下のように計算される．

$$\frac{1}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\theta) \cos \theta d\theta = 1 \quad (3.41)$$

上式(3.41)は，繊維配向角度 θ に関する確率分布関数を表している．これより，実際の繊維材料の配向角分布を再現できる $1/2 f(\theta) \cos \theta$ を評価することで，式(3.41)により繊維配向角分布の影響を考慮するものとした (図-3.5 参照)．ここで参考として，既往の研究によって提案されている $f(\theta)$ を表-3.1 に示した．また図-3.6 には，既往の研究による $f(\theta)$ の式(3.41)により表現される分布形を示している (本図は繊維配向角度 $\theta = 0 \sim 90^\circ$ の範囲の分布のみを示しているが，いずれも軸対称な分布形であるため， $\theta = -90 \sim 0^\circ$ に関しても同様の分布である)．

3.3.4 繊維材料に引張ひずみが発生する条件式の導入

繊維材料は引張ひずみが発生して初めて引張応力 $d\sigma_f^* = E_f d\varepsilon_f^*$ が働く材料である．先に示したように，巨視的な応力・ひずみ関係を評価する際には，繊維配向角分布を考慮することを考えているが，実際には繊維配向角度によって圧縮ひずみが卓越して発生している繊維材料も存在する．

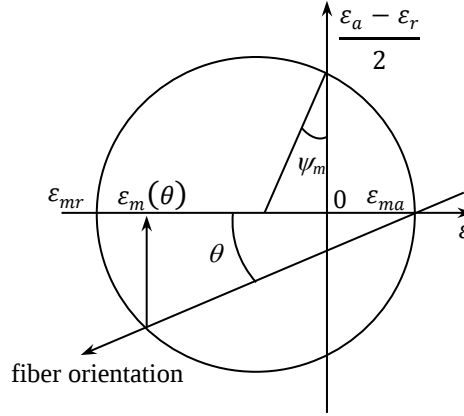


図-3.7 ひずみモール円による角度 θ 方向のひずみ $\varepsilon_m(\theta)$

つまり，繊維配向角度 θ で堆積している繊維材料に発生するひずみが，圧縮ひずみか引張ひずみかを適切に判定する必要がある．そこで本モデルでは，粒状材料内に引張ひずみが発生することによって，繊維材料にも同様に引張ひずみが発生すると仮定して条件式を導入するものとした．

軸対称条件において粒状材料に軸方向のひずみ ε_{ma} と側方向のひずみ ε_{mr} が発生する際に，角度 θ 方向に発生するひずみ $\varepsilon_m(\theta)$ は，ひずみモール円上で図-3.7のように表すことができる．ここで，ひずみモール円の幾何学的特性から，角度 θ 方向のひずみ $\varepsilon_m(\theta)$ と側方向のひずみ ε_{mr} の比は，以下の式で表される²⁷⁾．

$$g(\theta) = \frac{\varepsilon_m(\theta)}{\varepsilon_{mr}} = \frac{2\cos^2\theta - (1 - \sin\psi_m)}{1 + \sin\psi_m} \quad (3.42)$$

粒状材料内において，最大の引張ひずみが生じるのは側方向のひずみ ε_{mr} であるので，式(3.42)で表される $g(\theta)$ が正の場合には $\varepsilon_m(\theta)$ には引張ひずみが生じており， $g(\theta)$ が負の場合には $\varepsilon_m(\theta)$ には圧縮ひずみが生じていることを意味する．これより，繊維配向角度 θ で堆積している繊維材料の応力増分とひずみ増分の関係を以下のように表現することができる．

$$d\sigma_f^* = E_f \cdot g(\theta) \cdot d\varepsilon_f^* \quad (3.43)$$

$$g(\theta) > 0 \text{ のとき } g(\theta) = 1$$

$$g(\theta) \leq 0 \text{ のとき } g(\theta) = 0$$

例えば，ダイレイタンシー角 $\psi_m = 0^\circ$ の条件で $g(\theta)$ を計算したとき， $-45^\circ < \theta < 45^\circ$ の条件で $g(\theta) > 0$ となる (図-3.8参照)．この場合， -45° から 45° の範囲で混入している繊維材料が引張挙動を示すことを意味する．ここでは参考として，図-3.9に，繊維材料の引張 / 圧縮挙動を区別する境界の繊維配向角度 ($\theta > 0$ の値のみを記載，ただし負値も同様の値となる) とダイレイタンシー角の関係を示した．これより，ダイレイタンシー角の増加に伴って，繊維材料が引張挙動を示す配向角度の範囲が線形的に増加することが理解できる．

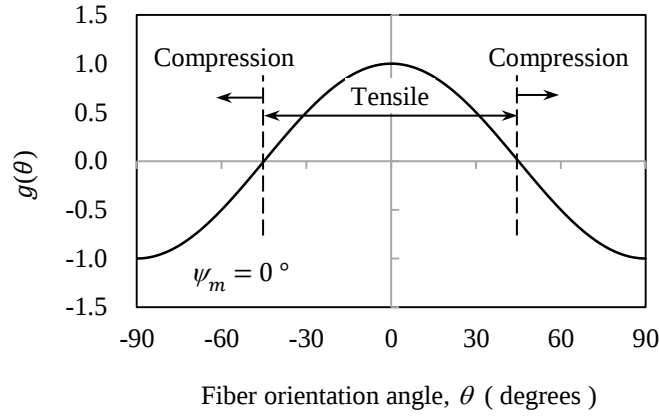


図-3.8 引張ひずみ発生条件 $g(\theta)$ と繊維配向角度の関係

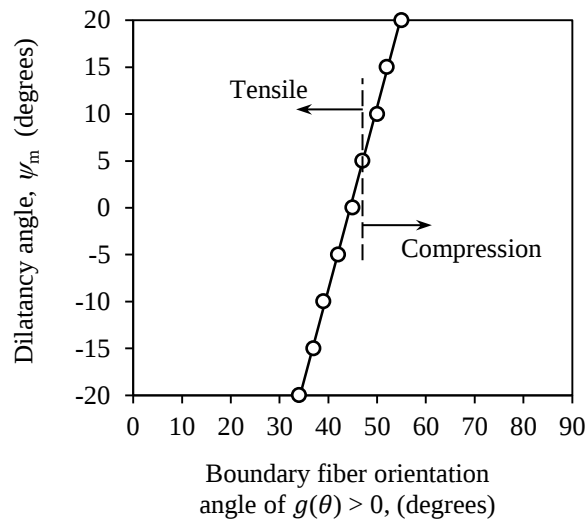


図-3.9 繊維材料が引張挙動を示す境界の繊維配向角度とダイレイタンシー角度の関係

3.3.5 繊維材料の巨視的な応力・ひずみ関係

繊維材料の微視的な応力・ひずみ関係 (式(3.38)) に、繊維配向角分布 (式(3.41)) および引張ひずみの発生条件式 (式(3.43)) を導入して、巨視的な応力・ひずみ関係を導出する方法を述べる。まず、繊維配向角分布と引張ひずみ発生条件式を導入して、微視的な応力の体積平均として巨視的な応力を表すと以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} d\bar{p}_f \\ d\bar{q}_f \end{bmatrix} = \frac{1}{2V_f} \int_{V_f} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\theta) g(\theta) \cos \theta \begin{bmatrix} dp_f^* \\ dq_f^* \end{bmatrix} d\theta dV_f \quad (3.44)$$

また、繊維材料の微視的なひずみと巨視的なひずみの関係は、体積平均を用いて以下で表される。

$$\begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_{fp} \\ d\bar{\varepsilon}_{fq} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \begin{bmatrix} d\varepsilon_{fp}^* \\ d\varepsilon_{fq}^* \end{bmatrix} dV_f \quad (3.45)$$

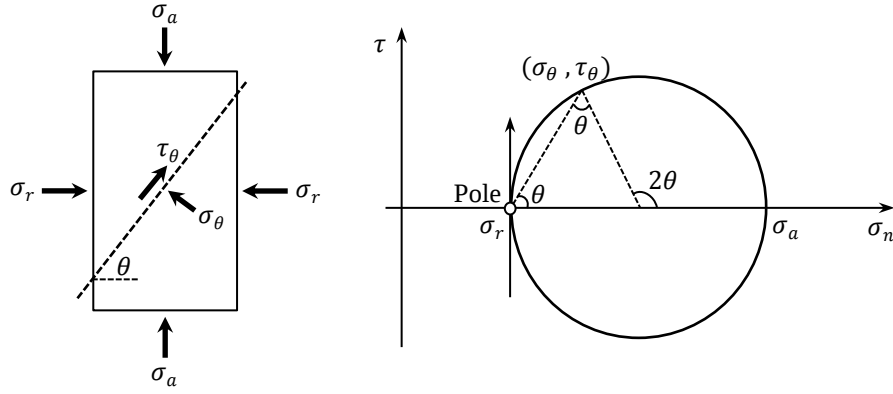


図-3.10 要素の応力状態とモールの応力円

以上より、微視的な応力・ひずみ関係 (式(3.38)) を式(3.44)に代入し、さらにこれに式(3.45)を代入して整理することで、繊維材料の巨視的な応力・ひずみ関係として以下の式が誘導される。

$$\begin{bmatrix} d\bar{p}_f \\ d\bar{q}_f \end{bmatrix} = \frac{E_f}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\theta)g(\theta)\cos\theta \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{6}(2-3\cos^2\theta) \\ \frac{1}{6}(2-3\cos^2\theta) & \frac{1}{4}(2-3\cos^2\theta) \end{bmatrix} d\theta \begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_{fp} \\ d\bar{\varepsilon}_{fq} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

3.3.6 繊維材料の引き抜け挙動を規定する判定式の導入

先に説明したように、繊維材料は、粒状材料との界面強度を境にして引き抜け挙動を示す。そこでここでは、複合材料の応力状態と繊維材料の引き抜け挙動の関係性を定式化し、繊維材料が引張挙動から引き抜け挙動に転じる際の判定式の導入を試みた。

まず、繊維材料と粒状材料の界面強度 τ_{fg} は、両材料間での界面粘着力 c_{fg} と界面摩擦角 ϕ_{fg} , 繊維材料の表面に作用する垂直応力 σ_n によって、以下の式で定義されるものとする²⁸⁾。

$$\tau_{fg} = c_{fg} + \sigma_n \cdot \tan\phi_{fg} \quad (3.47)$$

ここで、図-3.3のように、繊維配向角度 θ で堆積した繊維材料を考えると、複合材料内部の応力状態より、角度 θ 方向には垂直応力 σ_θ とせん断応力 τ_θ が働く。この時、図-3.10に示した要素の応力状態とモールの応力円による幾何学的関係から、複合材料内部の角度 θ 方向に働く垂直応力 σ_θ とせん断応力 τ_θ は以下のように表される²⁹⁾。

$$\sigma_\theta = \sigma_a \cos^2\theta + \sigma_r \sin^2\theta = \frac{\sigma_a + \sigma_r}{2} + \frac{\sigma_a - \sigma_r}{2} \cos 2\theta \quad (3.48)$$

$$\tau_\theta = \sigma_a \sin\theta \cos\theta + \sigma_r \sin\theta \cos\theta = \frac{\sigma_a - \sigma_r}{2} \sin 2\theta \quad (3.49)$$

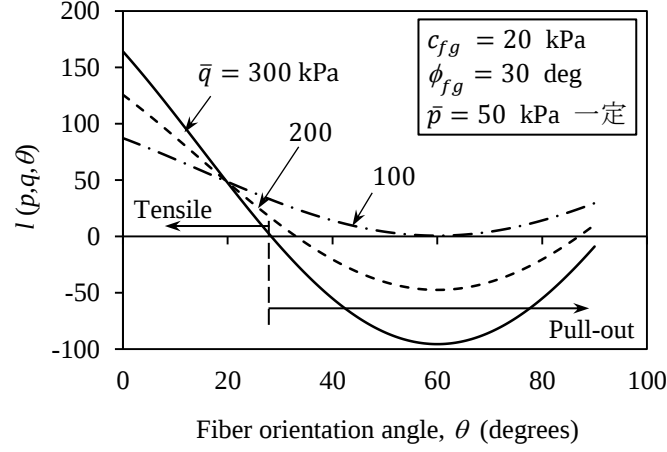


図-3.11 $l(\bar{p}, \bar{q}, \theta)$ と繊維配向角度 θ の関係の一例

また，式(3.48), (3.49)を平均主応力 $\bar{p}$ と軸差応力 $\bar{q}$ により表示すると次のようになる．

$$\sigma_{\theta} = \bar{p} + \frac{1}{6}\bar{q} + \frac{\bar{q}}{2}\cos 2\theta \quad (3.50)$$

$$\tau_{\theta} = \frac{\bar{q}}{2}\sin 2\theta \quad (3.51)$$

ここで，繊維配向角度 θ で堆積した繊維材料が引き抜け挙動を示すかどうかは，垂直応力 σ_{θ} が働いた際の界面強度 τ_{fg} が，せん断応力 τ_{θ} よりも大きい小さいかで判断される．これより，本モデルでは，繊維配向角度 θ で堆積した繊維材料が引張挙動と引き抜け挙動のどちらを示すのかを以下の式により判断するものとした．

$$l(\bar{p}, \bar{q}, \theta) = \tau_{fg} - \tau_{\theta} = \left\{ c_{fg} + \left(\bar{p} + \frac{1}{6}\bar{q} + \frac{\bar{q}}{2}\cos 2\theta \right) \cdot \tan \phi_{fg} \right\} - \frac{\bar{q}}{2}\sin 2\theta \quad (3.52)$$

$l(\bar{p}, \bar{q}, \theta) > 0$ のとき：引張挙動

$l(\bar{p}, \bar{q}, \theta) \leq 0$ のとき：引き抜け挙動

参考として，界面強度が $c_{fg} = 20 \text{ kPa}$ ， $\phi_{fg} = 30^{\circ}$ の条件において，複合材料の応力状態が $\bar{p} = 50 \text{ kPa}$ 一定のまま $\bar{q}$ が増加した際の $l(\bar{p}, \bar{q}, \theta)$ を計算し，計算結果と繊維配向角度 θ ($0 \sim 90^{\circ}$) との関係を図-3.11 に示した．本図では， $l(\bar{p}, \bar{q}, \theta) \leq 0$ となる繊維配向角度の範囲で堆積している繊維材料は，すでに引き抜け挙動に転じていると判断される．例えば $\bar{p} = 50 \text{ kPa}$ ， $\bar{q} = 300 \text{ kPa}$ の場合には， $28^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$ ($-28^{\circ} < \theta < -90^{\circ}$ も同様) の範囲に堆積する繊維材料は引き抜け挙動を示していることを意味する．また本図より，複合材料の応力状態の変化によって繊維材料が引き抜ける繊維配向角度の範囲が徐々に増加していることも確認される．次に，図-3.12 に界面強度の強度定数をパラメトリックに変化させた際の， $l(\bar{p}, \bar{q}, \theta) > 0$ となる境界の繊維摩擦

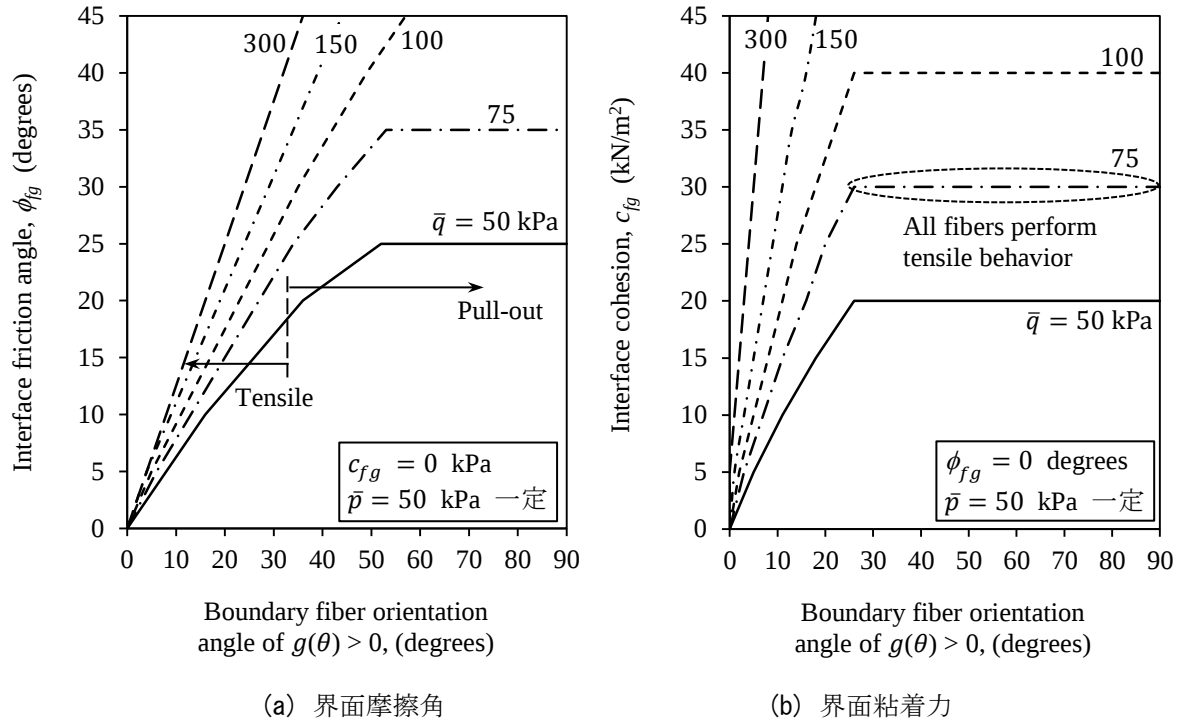


図-3.12 繊維材料が引張挙動を示す境界の繊維配向角度と界面強度の関係

角を整理した．引き抜け挙動を示す繊維配向角の範囲は，複合材料の応力状態のみでなく界面強度の強度定数に大きく依存することが確認できる．特に複合材料の応力状態が大きい範囲では，界面摩擦角の影響は大きく，界面粘着力のみではほとんどの繊維材料が引き抜けてしまうことが理解できる．本モデルでは，複合材料の応力状態と繊維材料の界面強度の関係を示す $l(\bar{p}, \bar{q}, \theta)$ を導入することで，引張挙動と引き抜け挙動を示している繊維配向角度の範囲を明確にする．さらにその繊維配向角度の範囲に応じて巨視的な応力・ひずみ関係 (式(3.46)) を再計算することで，繊維材料が引き抜け挙動を示すことによる影響を考慮できるものとした．

3.3.7 本モデルの解析フローおよび材料パラメーターの整理

以上に示したように，本モデルでは，本節で明らかにした粒状材料と繊維材料の応力・ひずみ関係を用いて，第2節に示した繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を評価するものとなっている．そこで最後に，本モデルの解析フローと解析に必要な材料パラメーターを整理した．

本モデルによる繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係の解析フローは図-3.13に示す通りである．まず，粒状材料の応力・ひずみ関係 (式(3.32)) と繊維材料の応力・ひずみ関係 (式(3.46)) を評価し，それを元に応力分担テンソル (式(3.18)) を計算する．さらにそれらより，複合材料の応力・ひずみ関係 (式(3.15)) を評価する．ここで，各応力状態について繊維材料の引き抜け挙動の判定式 (式(3.52)) を別途計算し，それに応じて繊維材料の応力・ひずみ関係 (式(3.46)) および複

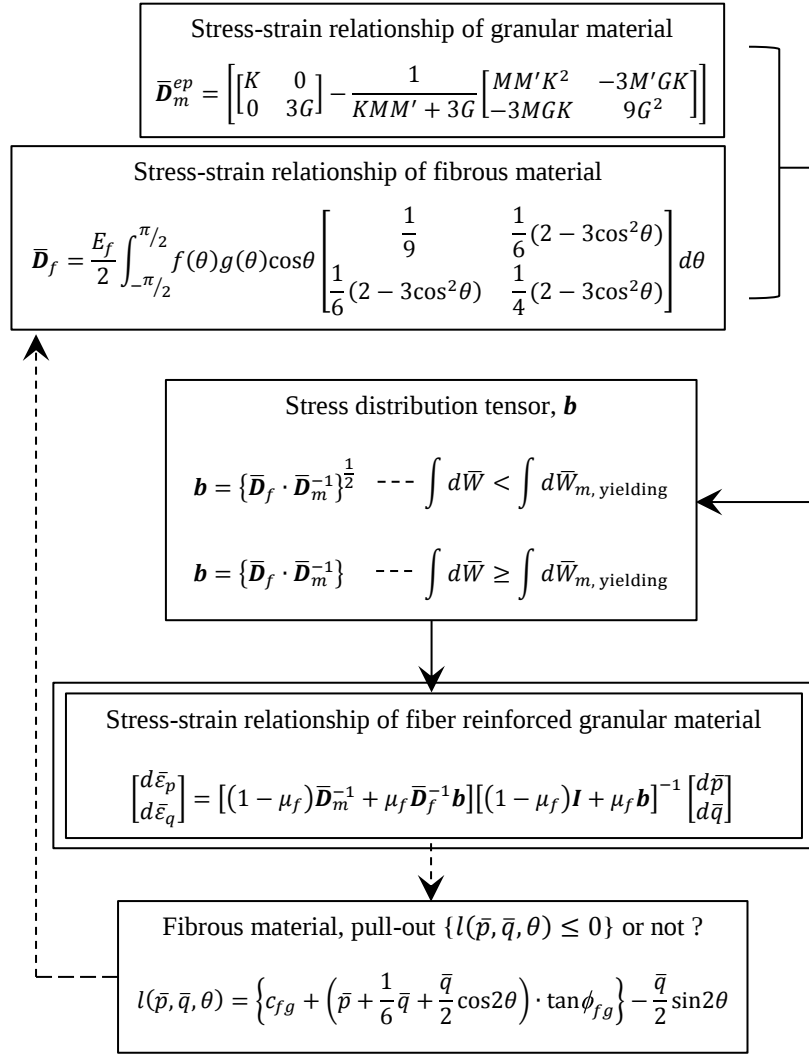


図-3.13 本モデルの解析フローと各項目の関連性

合材料の応力・ひずみ関係 (式(3.15)) を再計算していく。

モデル解析に必要なパラメーターは、表-3.2に示すように、粒状材料のポアソン比 ν_m ，ヤング率 E_m ，内部摩擦角 ϕ_m ，ダイレイタンシー角 ψ_m ，繊維材料の体積含有率 μ_f ，ヤング率 E_f ，界面強度を規定する界面粘着力 c_{fg} と界面摩擦角 ϕ_{fg} である。粒状材料のパラメーターは三軸圧縮試験から，繊維材料のパラメーターは単繊維引張試験と繊維材料の引抜き試験³⁰⁾もしくは粒状材料と繊維材料の一面せん断試験³¹⁾から比較的容易に求まるものである。また繊維配向角分布を表す $f(\theta)$ は，実験条件や既往の研究等を参考にして適宜設定するパラメーターとなる。

ここで，図-3.2に示したように，粒状材料の構成関係は弾完全塑性挙動を想定している。このとき，塑性領域では， $d\bar{\sigma}_m = 0$ ， $d\bar{\epsilon}_m \neq 0$ ， $d\bar{W}_m \approx 0$ であり，ひずみエネルギー増分を等価として応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を求めることは現実的でないといえる。そこで本モデルでは，粒状材料が塑性領域に到達した後は，すべての応力増分を繊維材料が負担し，さらに粒状材料には繊維材料と同等のひずみ増分が発生すると仮定して応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を導出した。このときの応力分

表-3.2 モデル解析に必要な材料パラメーターの一覧

Parameters for granular material	ν_m Poisson ratio	E_m (kPa)	ϕ_m (degree)	ψ_m (degree)	
Recommended standard test	三軸圧縮試験 (粒状材料のみ)				
Parameters for fibrous material	μ_f	E_f (kPa)	c_{fg} (kPa)	ϕ_{fg} (degree)	$f(\theta)$
Recommended standard test		単繊維引張試験	土とジオシンセティックスの一面せん断試験 ジオシンセティックスの土中引抜き試験		

担テンソル $\mathbf{b}$ は、式(3.13), (3.14)を同等とすることにより以下で評価される.

$$\mathbf{b} = \{\bar{\mathbf{D}}_f \cdot \bar{\mathbf{D}}_m^{-1}\} \quad (3.53)$$

また、粒状材料の状態が弾性領域か塑性領域かは以下の方法で判別した. 本モデルでは、粒状材料と繊維材料のひずみエネルギー増分が等価であることを仮定しており、当然、 $d\bar{W} = d\bar{W}_m = d\bar{W}_f$ である. そのため、ひずみエネルギー量に関して、 $\int d\bar{W} = \int d\bar{W}_m = \int d\bar{W}_f$ が成り立つ. これより、粒状材料が降伏するまでに蓄積するひずみエネルギー量 $\int d\bar{W}_{m, \text{yielding}}$ を用いて、粒状材料の状態を以下で定義した.

$$\begin{aligned} \int d\bar{W} &< \int d\bar{W}_{m, \text{yielding}} && \text{弾性領域} \\ \int d\bar{W} &\geq \int d\bar{W}_{m, \text{yielding}} && \text{塑性領域} \end{aligned} \quad (3.54)$$

これより、本モデルによって繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係 (式(3.15)) を予測 / 評価する際には、粒状材料が弾性領域の場合には式(3.18)、粒状材料が塑性領域の場合には式(3.54)によって評価される応力分担テンソル $\mathbf{b}$ を用いて計算を行うものとした.

3.4 繊維材料の特性に着目した繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係

提案した構成モデルを用いて、三軸圧縮試験の圧密・排水条件を想定して繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係の予測 / 評価を行った. 既往の研究より、繊維材料の特性に着目した実験結果の多いことから、本モデルについても、繊維材料の特性を変化させた際の応力・ひずみ関係をパ

表-3.3 解析条件と解析パラメーターの一覧

	Focus point	Parameters of granular material				Parameters of fibrous material				
		v_m	E_m	ϕ_m	ψ_m	μ_f	E_f	$f(\theta)$	ϕ_{fg}	c_{fg}
Case 1	Volume fraction	0.25	2000	30	7	0, 1, 3, 6	$300 (\times 10^3)$	Random	15	5
Case2	Tensile modulus					3	100, 300, 600 ($\times 10^3$)	Random	15	5
Case3	Fiber orientation					3	$300 (\times 10^3)$	Random Horizontal Vertical	15	5
Case4	Interface friction					3	$300 (\times 10^3)$	Random	0, 5, 15, 30	5
Case5	Interface cohesion					3	$300 (\times 10^3)$	Random	0	5, 25, 50

*単位は、 v_m は無次元量、 μ_f は％、 $E_m \cdot E_f \cdot c_{fg}$ は kPa、 $\phi_m \cdot \psi_m \cdot \phi_{fg}$ は degrees で表示している

ラメトリックに求めた。具体的には、表-3.3 に示している条件およびパラメーターを用いてモデル解析を実施した。粒状材料のパラメーターはすべての Case で同様とし、繊維材料のパラメーターである体積含有率、ヤング率、繊維配向角分布、界面摩擦強度を変化させてモデル解析を行うことで、繊維材料の (1) 体積含有率、(2) 引張剛性、(3) 繊維配向角分布、(4) 粒状材料と繊維材料の界面摩擦強度の違いが応力・ひずみ関係に与える影響を解析的に検討するものとした。

3.4.1 体積含有率の影響

表-3.3 に示した Case 1 のパラメーターを使用してモデル解析を行い、繊維材料の体積含有率の違いが繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に与える影響を評価した。

図-3.14 に繊維材料の体積含有率 $\mu_f = 0, 0.01, 0.03, 0.06$ ，側圧 $\sigma_r = 100$ kPa 一定の圧密・排水条件における応力・ひずみ関係をまとめて示した。また今回のモデル解析では、簡単のために繊維配向角分布はランダム分布 $1/2 f(\theta) \cos \theta = 1/\pi$ を用いた。

解析結果より、今回の解析で考慮した繊維材料の体積含有率 $\mu_f = 0 \sim 0.06$ の範囲では、軸差応力と軸差ひずみの関係において、繊維材料の体積含有率の変化によらず、初期剛性はほぼ同程度の挙動を示すことが確認された。また、粒状材料が塑性変形を示す範囲で、繊維材料の補強効果の影響が顕著に表れ、体積含有率の増加に伴って靱性が著しく増加する傾向が認められた。例えば、軸差ひずみ $\varepsilon_q = 0.25$ での軸差応力を比較すると、繊維材料の体積含有率が 6 % の場合には、粒状材料のみの場合と比べて約 2.4 倍もの応力増加が認められた。次に、体積ひずみと軸差ひずみの関係では、繊維材料が増加することで体積収縮挙動が大きくなる傾向のあることが確

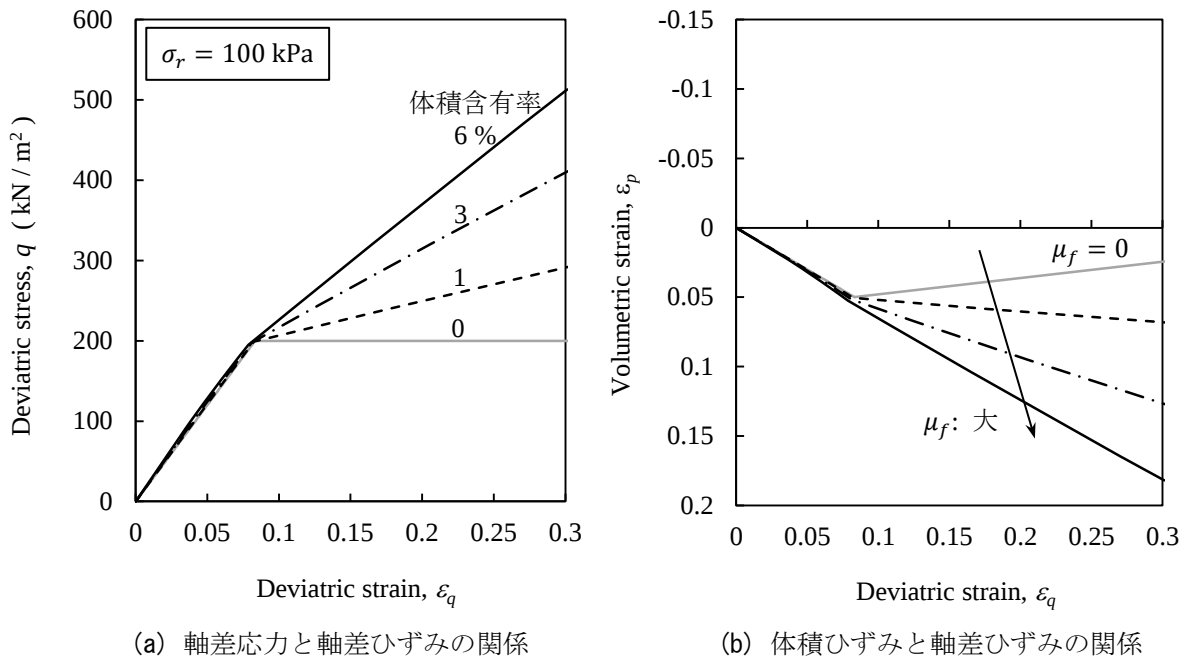


図-3.14 繊維含有率の違いが応力・ひずみ関係に与える影響

認められる。せん断時の体積変化挙動に関しては、既往の研究により膨張や圧縮などいろいろな傾向を示す実験データが報告されており、一概に適切な評価が行えているとは断言できない。しかし、軸差応力と軸差ひずみの関係に関しては、例えば、繊維材料の体積含有率を変化させて三軸圧縮試験を行った Hamidi et al³²⁾ や Ahmad et al³³⁾ に示された実験結果の傾向である、繊維材料の含有率の増加によって靱性が増加する特性などを定性的に表現できていることが確認された。

3.4.2 引張剛性の影響

繊維材料の引張剛性、つまりヤング率が異なる場合に、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係にどのような違いが表れるのかを解析的に把握した。ここでは、粒状材料と繊維材料のヤング率の比が 50, 150, 300 倍の場合の応力・ひずみ関係を求めた。また先ほどと同様に、側圧 $\sigma_r = 100$ kPa 一定での圧密・排水条件の三軸圧縮試験を想定するものとし、繊維材料の体積含有率は 3%、繊維配向角分布はランダム分布によるモデル解析の結果を示した。

解析結果は図-3.15に示すようであり、繊維材料と粒状材料のヤング率の比が大きくなると、靱性の増加などの顕著な補強効果が認められた。また、体積ひずみと軸差ひずみの関係では、繊維材料の引張剛性が大きくなることで体積収縮挙動が増加する傾向が確認された。繊維材料の初期剛性に着目した既往の実験成果があまり見当たらないため、解析結果の有用性は保証されない。しかし、図-3.15に示した挙動は、先の繊維材料の含有率に依存する挙動と似通っていることが確認できる。これより、繊維材料のヤング率が増加することによって、繊維含有率の増加と同様に、特に靱性への補強効果が顕著になると考えられた。

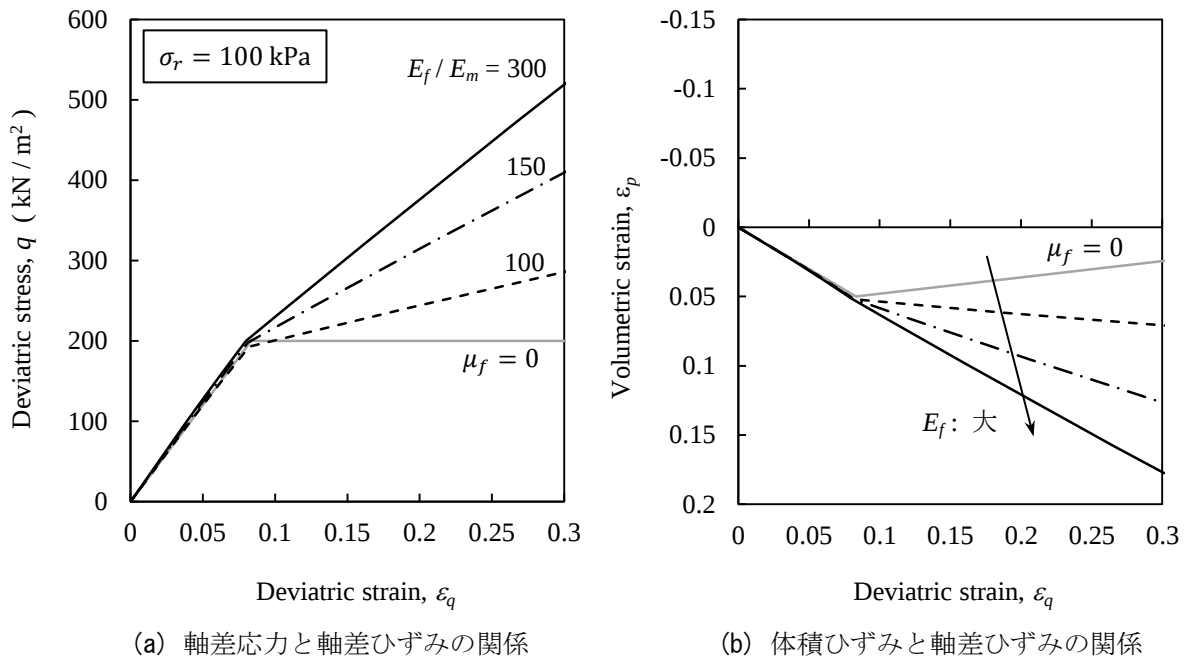


図-3.15 引張剛性の違いが応力・ひずみ関係に与える影響

3.4.3 繊維配向角分布の影響

Michalowski et al.²⁴⁾ は、繊維材料がほぼ水平に堆積した状態・ほぼ垂直に堆積した状態・ランダムに堆積した状態について三軸圧縮試験を実施し、応力・ひずみ関係に及ぼす繊維配向角度の影響を調べている。これによると、軸差ひずみの大きい領域での軸差応力値に関して、繊維配向角度が垂直 < ランダム < 水平の関係で補強効果が顕著に表れることが明らかになっている。そこでここでは、水平が最も多い・垂直が最も多い・ランダムという繊維配向角度の条件に対して、図-3.16に示すような単純な 3 つの分布を用いてモデル解析を実施し、Michalowski et al. の実験結果を定性的に表現できるかどうかを検証するものとした。

表-3.3の Case 3 に示したパラメーターを使用して、側圧 $\sigma_r = 100$ kPa 一定の圧密・排水条件でモデル解析を行った結果を図-3.17に示した。また、本図には粒状材料のみの結果 ($\mu_f = 0$) も含めて示している。解析結果より、繊維材料の含有率や剛性が同じ場合でも、繊維配向角度が異なることで応力・ひずみ関係に発現する補強効果が大きく変化することが確認され、繊維配向角度分布を適切に評価することの重要性が確認された。特に、水平に堆積する繊維材料の割合が多くなることで、繊維材料の補強効果が増加する傾向にあり、靱性や体積収縮挙動が増加することが確認された。また、垂直に堆積する繊維材料の割合が多い場合には、補強効果はほとんど発揮されずに、初期剛性および軸差応力値が減少する傾向も認められた。これは、圧縮ひずみや引き抜け挙動を示す繊維材料が増加することによる影響が大きいためであり、引張挙動を示す繊維材料の割合が顕著に減少する場合には力学的な脆弱化を招くおそれのあることも検証された。

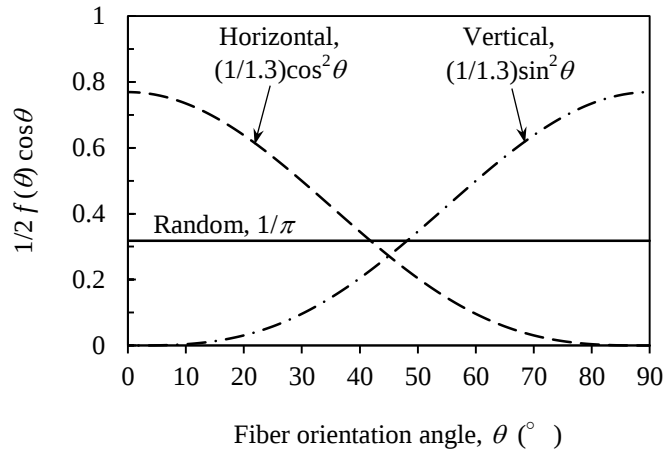
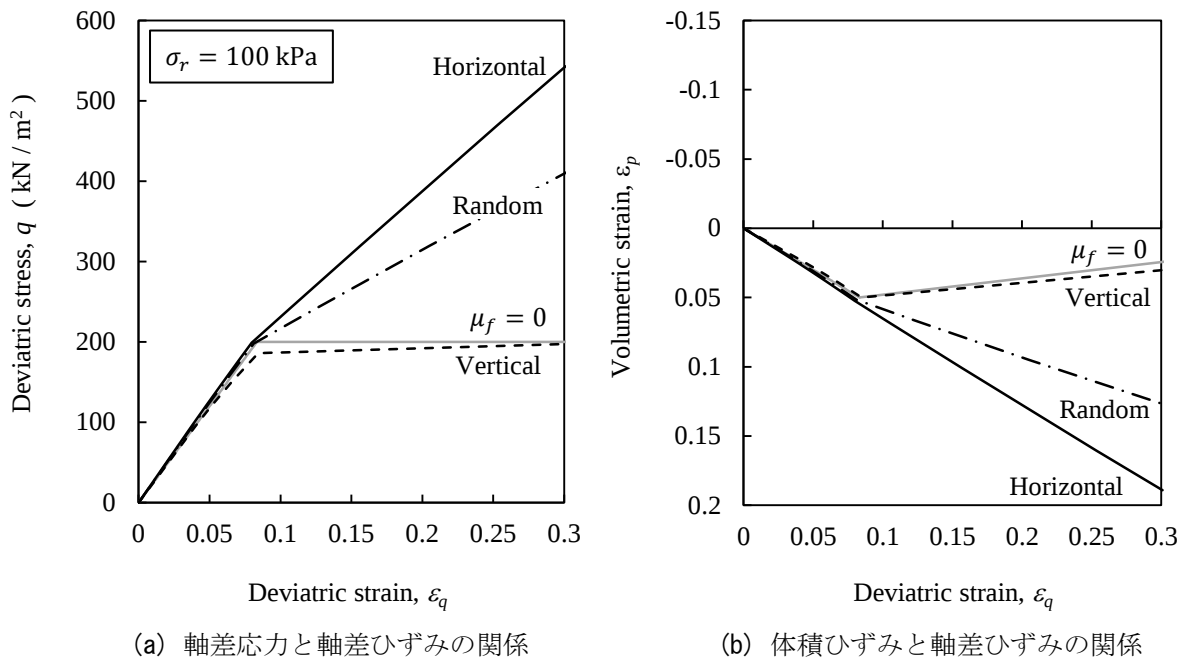


図-3.16 モデル解析に使用した繊維配向角分布



(a) 軸差応力と軸差ひずみの関係

(b) 体積ひずみと軸差ひずみの関係

図-3.17 繊維配向角分布の違いが応力・ひずみ関係に与える影響

今回の解析結果では、Michalowski et al²⁴⁾ の実験結果と同様に、繊維配向角分布が垂直 < ランダム < 水平の順で、靱性の増加などの補強効果が顕著に表れることも確認された。以上の結果を考えると、本モデルにおいて繊維配向角分布を適切に評価することで、繊維材料の不均質性や異方性が繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に与える影響を十分に考慮できることが伺えた。

3.4.4 繊維材料と粒状材料の界面強度の影響

(a) 界面摩擦角の影響

繊維材料の引き抜けの影響が繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に及ぼす影響を解析的に把

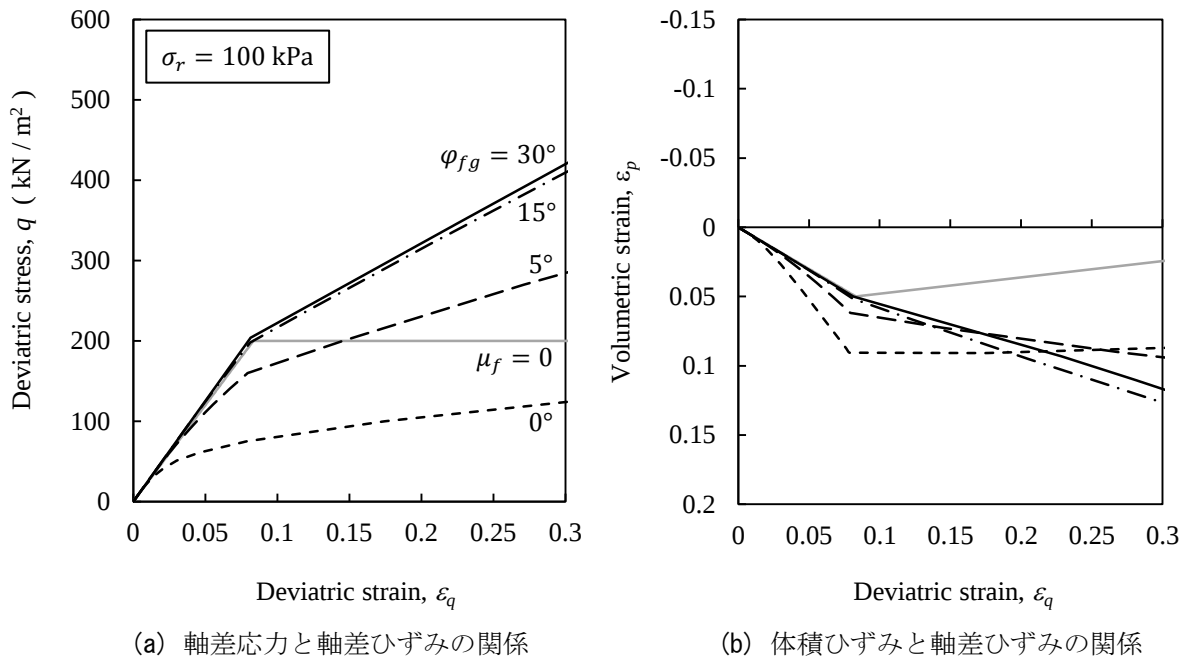


図-3.18 界面摩擦角の違いが応力・ひずみ関係に与える影響

握した．ここでは特に，界面摩擦角度の影響に着目し，界面粘着力 $c_{fg} = 5$ kPa 一定の条件で，界面摩擦角度を $\phi_{fg} = 0 \sim 30^\circ$ まで変化させた際の応力・ひずみ関係をパラメトリックに求めた．表-3.3 に示した Case4 の解析条件について，側圧 $\sigma_r = 100$ kPa 一定の圧密・排水条件における三軸圧縮試験を想定して解析を行った結果は図-3.18 に示すようである．解析結果より，界面摩擦角度が $\phi_{fg} = 15^\circ$ より小さい条件では，繊維材料の引き抜けの影響が顕著であり，軸差応力と軸差ひずみの関係において，応力状態が小さい範囲においても剛性の低下が認められる．特に界面摩擦角度が $\phi_{fg} = 0^\circ$ の場合では，軸差ひずみ $\epsilon_q = 0 \sim 0.3$ の範囲において，常に粒状材料よりも軸差応力が小さくなる結果であった．また体積ひずみと軸差ひずみの関係についても，界面摩擦角が小さい場合には，せん断初期で顕著な体積収縮が認められ，粒状材料が降伏すると体積膨張に転じるような傾向がみられた．反対に，界面摩擦角が $\phi_{fg} = 30^\circ$ より大きい条件では，ほとんどの繊維材料は引き抜けずに引張挙動を示すことが確認されており，界面摩擦角によらず，応力・ひずみ関係はほぼ同等になることも明らかになっている．

(a) 界面粘着力の影響

Case5 の条件によりモデル解析を行うことで，界面粘着力が繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に与える影響を検証した．ここでは，界面摩擦角を $\phi_{fg} = 0^\circ$ で一定とし，界面粘着力を $c_{fg} = 5, 25, 50$ kPa と変化させて解析を実施した．解析はこれまでと同様に，側圧 $\sigma_r = 100$ kPa 一定の圧密・排水条件における三軸圧縮試験を想定している．解析結果は，図-3.19 に示す通りであり，界面粘着力が小さい範囲では，繊維材料の引き抜けによる影響により，剛性が顕著に低下していることが確認される．また今回の解析では，界面摩擦角を $\phi_{fg} = 0^\circ$ としているため，

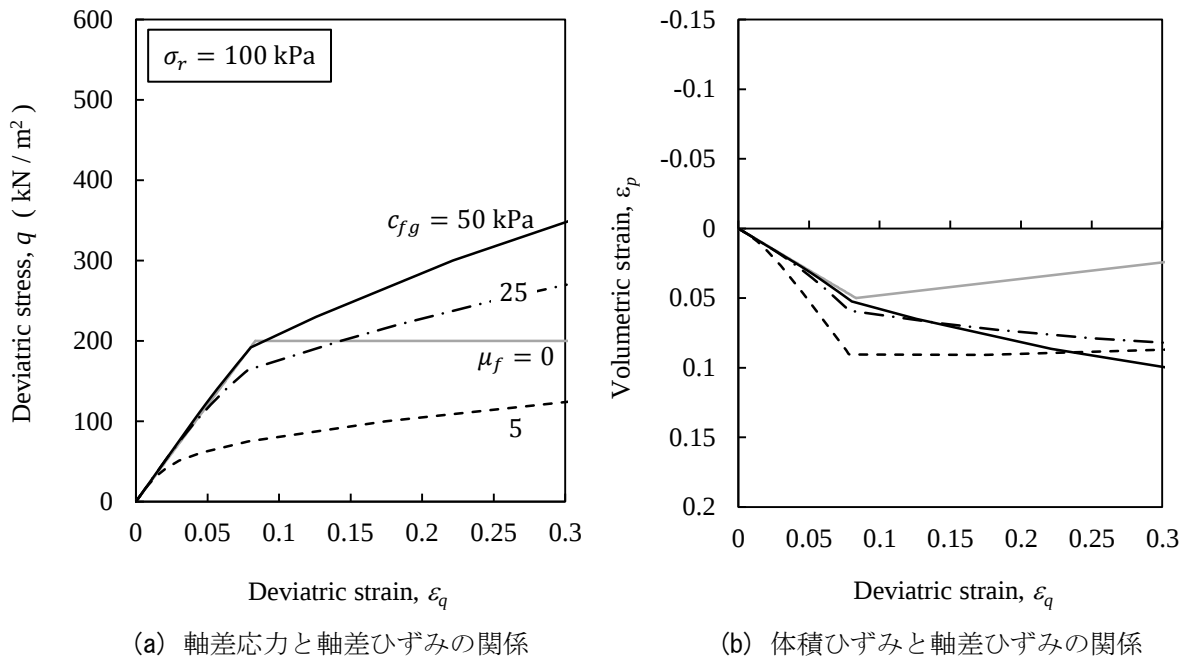


図-3.19 界面粘着力の違いが応力・ひずみ関係に与える影響

界面粘着力が比較的大きい $c_{fg} = 50$ kPa の条件においても、軸差応力が大きい範囲では、徐々に剛性が低下する傾向が認められた。図-3.12 に示したように、応力状態の大きい範囲について繊維材料の引き抜けを規定する上では、界面摩擦角の大きさが重要な要因となるようである。

ここで実際に考えると、粒状材料と繊維材料の間である程度の界面強度が担保されているといえる。そのため、既往の研究等で界面強度に着目した議論はあまりなされていない。しかし、本解析結果にみられるように、繊維材料の界面強度、特に界面摩擦角が小さくなる場合には繊維材料が引き抜けることによる影響を無視できないことが明らかになった。

3.5 実験結果との比較による構成モデルの有用性の検証

本節では、繊維-粒子複合材料を対象とした、三軸圧縮試験を実施し、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を考察すると共に、本モデルによる解析結果との比較を行った。さらに既往の実験成果へ本モデルを適用し、簡単な比較を行うことで、今回の実験で考慮できなかった条件についての適用性の検証も行った。

3.5.1 中型三軸圧縮試験装置の概要と実験条件

繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を把握することを目的として、図-3.20 に示す中型三軸

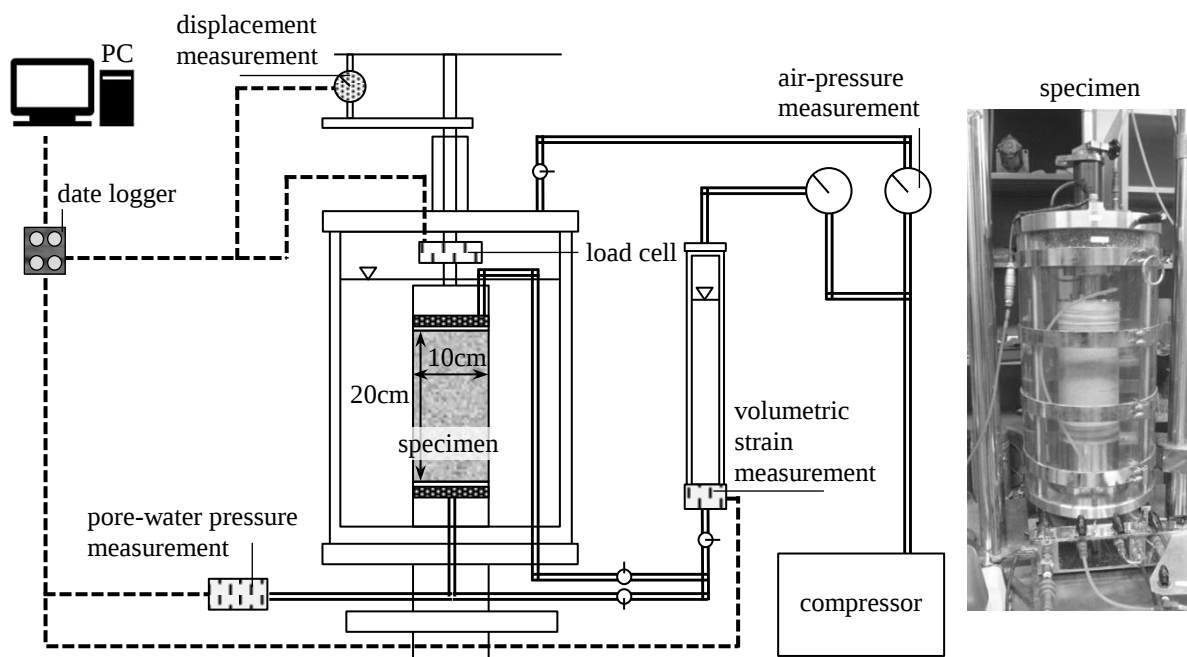


図-3.20 中型三軸圧縮試験装置の概要

表-3.4 中型三軸圧縮試験の実験条件

Granular material	Fibrous material	Fiber fraction (weight), w_f (%)	Radius stress σ_r (kPa)	Shearing condition
Decomposed granite soil, ($D_r=90\%$)	Size: W:10mm,H:50mm,T:1mm Specific gravity: 1.244 g/cm ³ Elastic modulus: 30000 kPa Interface strength: $c_{fg} = 0$ kPa , $\phi_{fg} = 35$ degrees	0	50	• CD condition
		3		
		5		
		7		
		0	100	• Back pressure: 200 kPa
		3		
		5		
		7		
		0	150	• Shearing rate: 0.2 %/min
		3		
		5		
		7		

圧縮試験装置により，側圧一定の圧密・排水条件による実験を行った．ここでは，粒状材料として真砂土を使用し，繊維材料は幅 10 mm，長さ 50 mm，厚さ 1 mm の高分子材料を使用した．繊維材料の重量含有率 $w_f = 0, 3, 5, 7\%$ の条件において，側圧 $\sigma_r = 50, 100, 150$ kPa の三種類で実験を実施した．表-3.4 に繊維材料の特性と詳しい実験条件を合わせて示している．

今回の実験では，供試体は標準サイズの 2 倍である直径 10 cm，高さ 20 cm とした．供試体作製は，1/6 層毎にランマーによる締固めを行うものとし，粒状材料のみの相対密度を基準とし

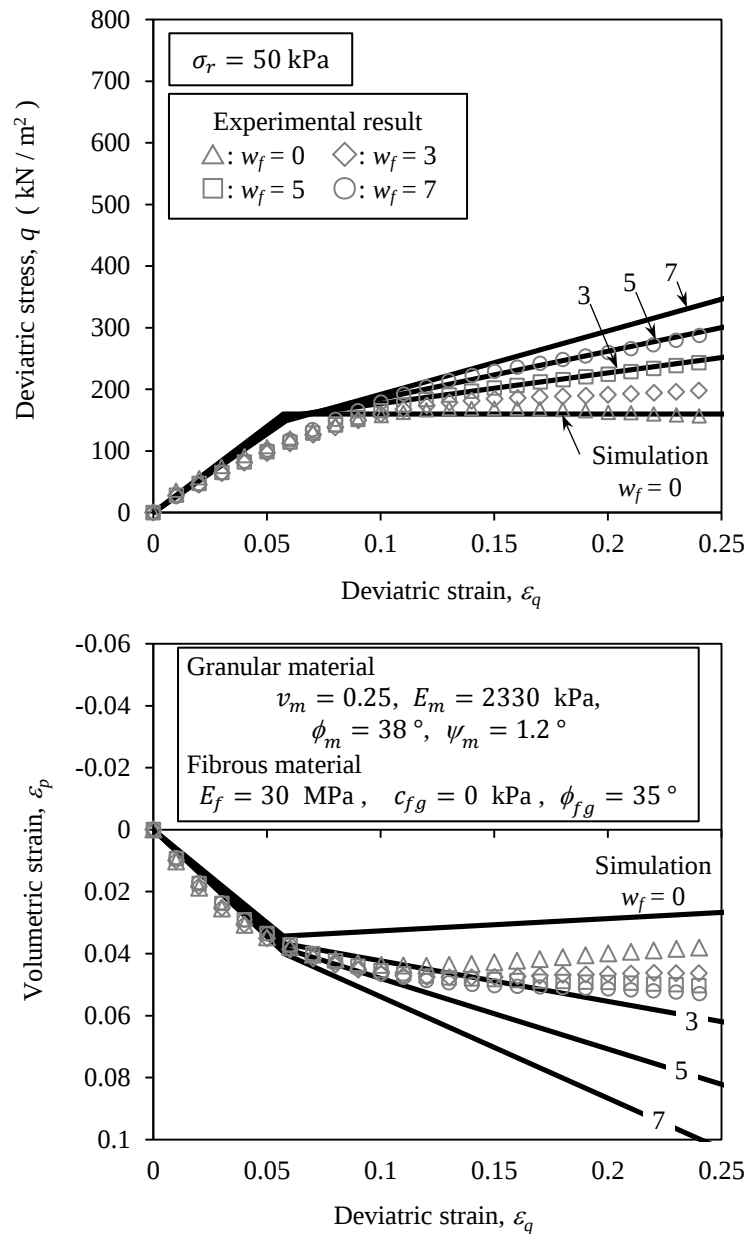


図-3.21 三軸圧縮試験 ($\sigma_r = 50 \text{ kPa}$) の結果と解析結果の比較

た締固めエネルギーを各層毎に与えるように突き固め回数を決定した。また供試体作製後は、二酸化炭素を通気させた後で供試体を飽和させるものとし、 B 値が 0.95 以上となるように飽和状態を管理した³⁴⁾。圧密時には側圧を $\sigma_r = 50 \sim 150 \text{ kPa}$ の範囲で載荷し、背圧は 200 kPa 与えるものとした。圧密終了後にせん断過程に入り、この際のせん断速度は、せん断中に間隙水圧の上昇がないことを確認した上で、軸差ひずみ $0.2 \% / \text{min}$ に決定した。

3.5.2 繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係とモデル解析結果との比較

中型三軸圧縮試験の実験結果より、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を考察すると共に、本モデルによる解析結果との比較を行った。まず、側圧 $\sigma_r = 50, 100, 150 \text{ kPa}$ のすべての実験結

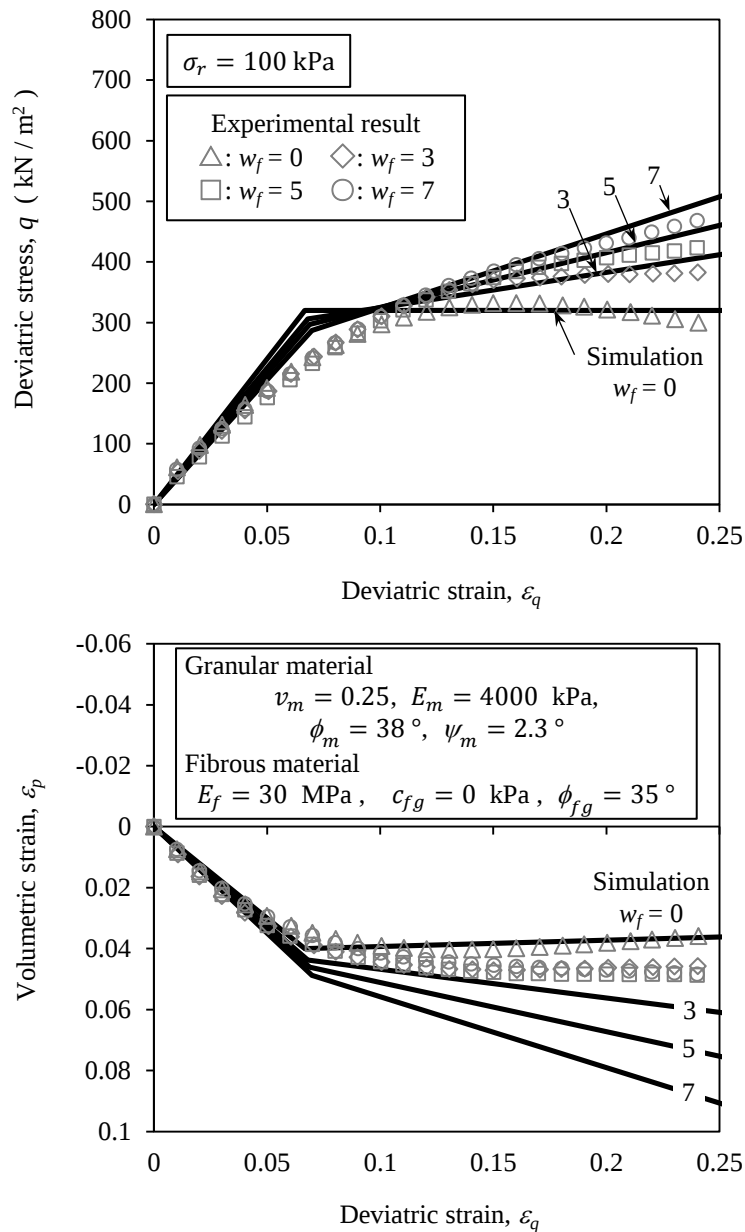


図-3.22 三軸圧縮試験 ($\sigma_r = 100 \text{ kPa}$) の結果と解析結果の比較

果より，軸差応力と軸差ひずみの関係，および体積ひずみと軸差ひずみの関係を図-3.21～3.23 におのおの整理した．本図では，繊維材料の重量含有率の異なる結果をまとめて示すものとし，さらに図内に示すパラメーターを用いて実施したモデル解析の結果も同様に記載した．解析パラメーターは，粒状材料については，粒状材料のみの三軸圧縮試験結果より，ポアソン比 ν_m ，ヤング率 E_m ，内部摩擦角 ϕ_m ，ダイレイタンシー角 ψ_m を求めた．繊維材料については，単繊維引張試験からヤング率 E_f を，粒状材料と繊維材料の一面せん断試験から界面粘着力 c_{fg} と界面摩擦角 ϕ_{fg} を求めた．また繊維配向角分布 $f(\theta)$ については，表-3.1 に示した Diambra et al (2007) により提案されている分布を使用するものとした．

図-3.21～3.23 の実験結果より，すべての実験ケースで，軸差応力と軸差ひずみの関係におい

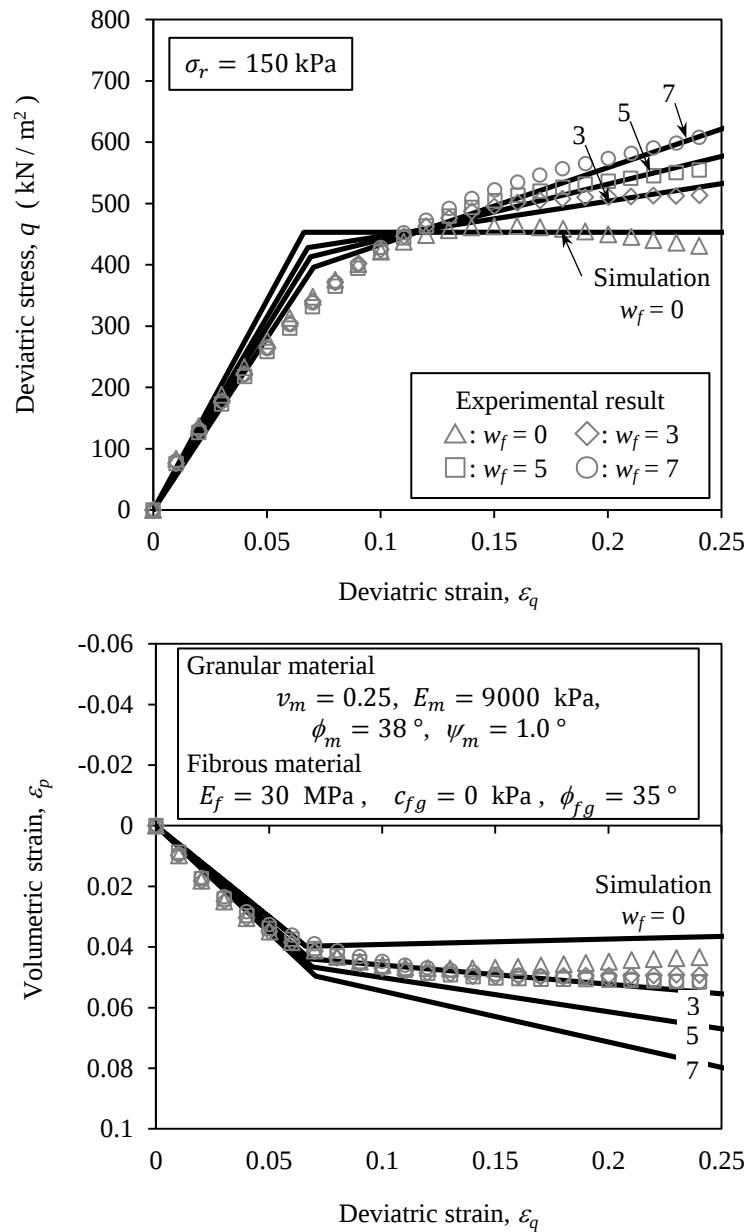


図-3.23 三軸圧縮試験 ($\sigma_r = 150 \text{ kPa}$) の結果と解析結果の比較

て、繊維含有率の増加に伴って、初期剛性が少し減少する傾向がみられた。さらに粒状材料が塑性挙動を示している軸差ひずみの領域においては、繊維含有率に依存して顕著な靱性の増加が認められた。体積ひずみと軸差ひずみの関係では、繊維含有率が増加することによって、体積圧縮が増加する傾向が認められた。しかし、繊維含有率の違いによる顕著な影響は認められず、粒状材料が塑性挙動を示す軸差ひずみの領域での体積変化はほぼ同程度であった。これらの結果は、既往の研究にもみられた傾向であり、3.5 節にも述べたように、繊維材料が混入することによる影響は、粒状材料が塑性挙動を示す領域において顕著に認められることが明らかになっている。

次に、実験結果と解析結果を比較すると、軸差応力と軸差ひずみの関係において、解析結果が実験結果の傾向をおおよそ再現できていることが確認できる。特に、粒状材料が塑性領域に到達

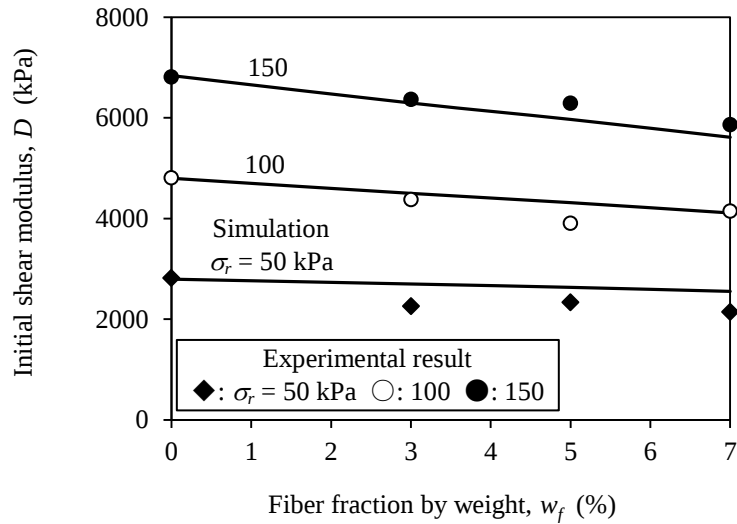


図-3.24 初期剛性と繊維材料の重量含有率の関係

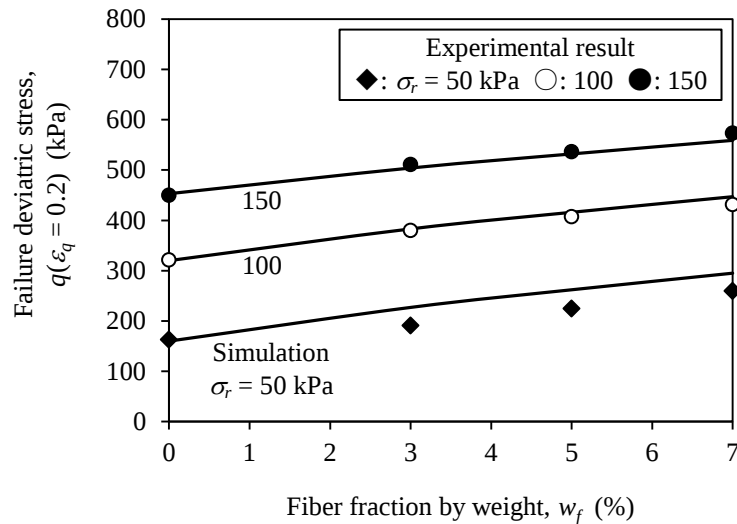


図-3.25 破壊応力と繊維材料の重量含有率の関係

した後の繊維材料の補強効果が発揮される挙動を比較的良く再現しており、本モデルの有用性が伺えた。しかし、軸差ひずみ $\epsilon_q = 0.2$ 以上となる大きなひずみ領域では解析精度が少し落ちるようであった。これについては、繊維材料の引き抜けによる影響を正確に評価できていない可能性のあること、および要素試験としての実験精度の問題による影響が考えられた。

また、体積ひずみと軸差ひずみの関係においては、解析結果は繊維含有率に依存して体積圧縮が増加していく挙動を過剰に評価しており、実験結果を正確に再現しているとはいえない結果であった。体積変化挙動の評価には、繊維配向角分布の影響が大きいことが考えられており、より詳細な分布形の提案が必要になるといえる。特に、今回使用した表-3.1に示した既往の分布形は、応力状態の変化による影響が考慮されていないことが大きな課題として挙げられる。粒状材料の

表-3.5 三軸圧縮試験結果 (Diambra et al. 2012²⁴) の Table III より抜粋)

Fiber type	Series	σ_r (kPa)	w_f (%)	$(q / p)_{serv}, (\varepsilon_q=0.2)$
Fiber (1)	L	100	0	1.36
			0.3	1.74
			0.6	1.98
			0.9	2.26
	M		0	1.44
			0.3	1.78
			0.6	2.05
	D		0	1.47
0.3			1.95	
Fiber (2)	L		0	1.36
			0.3	2.01
			0.45	2.24
		0.6	1.35	

ような圧縮性の高い材料の中に繊維材料がある場合、粒状材料の変形に伴って繊維材料の配向角分布も変化している可能性の高いことが考えられる。繊維材料の影響を精度良く評価するためには、応力状態や粒状材料の変形性を考慮した繊維配向角分布が今後必要になるといえる。

ここで、繊維材料が応力・ひずみ関係に与える影響をより詳細に検討するために、軸差ひずみ $\varepsilon_q = 0.02$ を基準として算出した剛性を初期剛性、軸差ひずみ $\varepsilon_q = 0.2$ における軸差応力を破壊応力と定義して、それぞれの繊維含有率との関係を図-3.24, 3.25 に整理した。本図では、図-3.21 ~ 3.23 に示した解析結果についても同様の手順により導出した結果を合わせて示している。

図-3.24, 3.25 より、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係において、繊維含有率の増加の影響は初期剛性の減少および破壊応力値の増加に表れることがより明確に判断できる。さらに本モデルでの解析結果は、それらの傾向をよく評価できていることが確認できる。

3.5.3 既往の実験成果への適用

先の実験結果と解析結果の比較は、粒状材料と繊維材料はともに一種類での検討結果を示したものである。そこでここでは、既往の実験成果へ本モデルを適用することで、その他の条件、特に繊維材料と粒状材料の組み合わせが違ふ場合の、本モデルの有用性の検証を行った。

実験結果は、Diambra et al³⁵⁾ により報告されている成果を用いるものとした。Diambra et al³⁵⁾ では、繊維材料の種類や含有率、および粒状材料の相対密度を適宜変化させた三軸圧縮試験を多数実施している。今回、その中からいくつかの実験結果を選定し、本モデルを適用した。本論文で取り上げなかった実験結果や、詳細な実験内容については、Diambra et al, 2008³⁶⁾, 2010¹⁶⁾, 2012²⁵⁾などを参照されたい。またモデル解析結果との比較として、Diambra et al³⁵⁾ において Serviceability

表-3.6 構成材料の特性 (Diambra et al. 2012²⁴⁾ の Table II より抜粋)

Granular material (HOSTUN RF SAND)				
Specific gravity	Mean grain size, D_{50}	Uniformity, D_{60} / D_{10}	Maximum and Minimum voids ratio	
2.65	0.32 mm	1.70	Max : 1.00 , Min : 0.630	
Fiber				
Fiber type	Specific gravity	Aspect ratio	Young moduli	Tensile strength
Fiber (1)	0.91	350	900 MPa	22.5 MPa
Fiber (2)	0.91	667	2600 MPa	58.0 MPa

表-3.7 モデル解析に使用したパラメーター (Diambra et al. 2012³⁵⁾ 実験結果より設定分)

Series	v_m	E_m (kPa)	ϕ_m (degrees)	ψ_m (degrees)	c_{fg} (kPa)	ϕ_{fg} (degrees)
L	0.25	10000	33.5	1.5	5	30
M	0.25	20000	35.5	3.5	5	30
D	0.25	30000	36.0	16.0	5	30

failure point として整理されている $\varepsilon_q = 0.2$ 時の応力比 $(q/p)_{\text{serv}}$ を使用するものとした。

モデルの適用を行うために選定した実験条件とその結果を表-3.5 に、実験に使用された粒状材料と繊維材料の特性を表-3.6 に整理した。表-3.5 に示している Series は、粒状材料の相対密度の違いを意味しており、L は非常に緩い状態 $D_r \approx 0\%$ 、M は緩い状態 $D_r \approx 30\%$ 、D は比較的密な状態 $D_r \approx 60\%$ である。混入する繊維材料は、粒状材料との質量比 w_f で管理されており、質量比の範囲は $w_f = 0 \sim 0.9\%$ である。ここでは、繊維材料 2 種類、圧密・せん断時の側圧 $\sigma_r = 100 \text{ kPa}$ 一定条件での圧密・排水 (CD) 実験結果を用いるものとした。また、表-3.6 に示されていない粒状材料のポアソン比 v_m 、ヤング率 E_m 、内部摩擦角 ϕ_m 、ダイレイタンシー角 ψ_m 、繊維材料の界面粘着力 c_{fg} 、界面摩擦角 ϕ_{fg} については、Diambra et al³⁵⁾ に明確な記載がないため、実験結果から適切な値を設定するものとし、それらのパラメーター値を表-3.7 に整理した。さらに、繊維配向角分布は、表-3.1 に紹介した Diambra et al²⁶⁾ の分布形を使用した。

図-3.26 に繊維材料 (1) を用いて、粒状材料の相対密度 3 種類 (L, D, M) で行った実験結果と本モデルによる解析結果を比較した。また、図-3.27 に繊維材料 (1), (2) を使用した Series L の実験結果と解析結果を比較した。両図は、共に応力比 $(q/p)_{\text{serv}}$ と繊維材料の重量含有率 $w_f(\%)$ の関係を示している。まず図-3.26 より、本モデルによる解析結果は、粒状材料の相対密度が小さい場合には、実験結果とおおよそ同等の結果を示すことが確認される。しかし、粒状材料の相

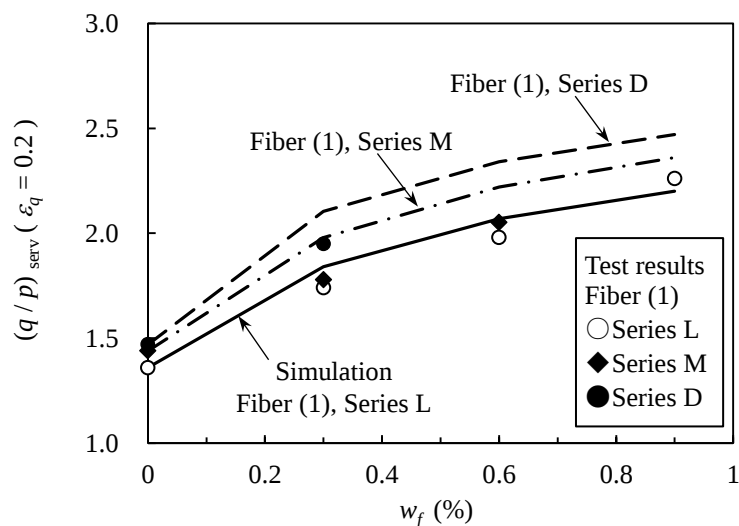


図-3.26 応力比と繊維材料の重量含有率の関係，粒状材料の相対密度の影響
(実験データ: Diambra et al 2012³⁵)

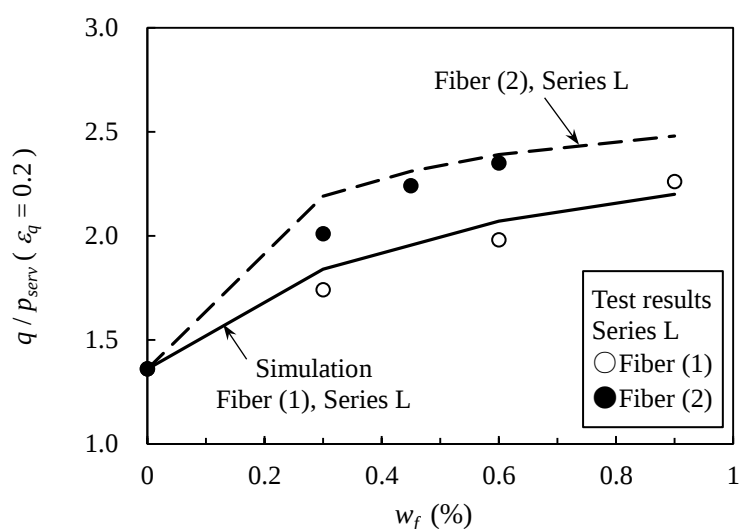


図-3.27 応力比と繊維材料の重量含有率の関係，繊維材料の種類の影響
(実験データ: Diambra et al 2012³⁵)

対密度が大きくなると応力比を過大に評価する傾向のあることが確認された。

次に図-3.27 より，繊維材料の種類や体積含有率の違いによる応力比への影響については，およそ実験結果と同等の値が得られる結果となった。本研究により提案された構成モデルは，粒状材料の応力・ひずみ関係を弾完全塑性挙動と簡略化して評価したため，粒状材料の塑性硬化や軟化の影響を再現することはできていない。そのため，粒状材料の特性の違いが繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に及ぼす影響を詳細に評価することは難しい。しかし，本節での種々の実験結果との比較により，繊維材料の特性の違いによる影響を比較的良く評価できていたといえる。

繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係には繊維材料の影響が最も支配的であるため、本モデルにより繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を予測 / 評価することは有意義であると考える。

3.6 本章の要約

本章では、均質化理論をベースとした理論的なアプローチにより、軸対称条件を想定した繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築を試みた。本モデルでは、先の章の実験成果を受けて、繊維材料の応力・ひずみ関係を引張挙動と引き抜け挙動による弾完全塑性的な挙動で評価している点、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分が等価となるように均質化を行っている点、などが主な特徴となっている。また、繊維含有率を変化させた三軸圧縮試験を実施し、実験結果と本モデルによる解析結果を比較することで、モデルの有用性の検証を行った。本構成モデルの特徴や得られた主要な成果を要約すると以下のものであった。

- 1) 繊維-粒子複合材料が応力を受けて変形する際に、繊維材料と粒状材料に分担される応力の割合を評価する応力分担テンソルを導入して、繊維材料と粒状材料の特性を均質化する方法を示した。また、先の章の実験成果に基づいて、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分を等価として応力分担テンソルを導出することで、式(3.18)に示したように繊維材料と粒状材料の剛性マトリックスにより応力分担テンソルが決定されることを示した。
- 2) 粒状材料の応力・ひずみ関係を Mohr-Coulomb の弾完全塑性モデルにより評価するものとし、そのモデルの概要を示した。本モデルでは繊維材料の特性の評価に重点を置いて議論を行っていくことを主眼としており、さらに後の展開として、時間・空間的な不均一性の評価を本構成モデルへ導入することを考えている。そこで、解析に必要なパラメーターが多くなり煩雑になりすぎないように、粒状材料の応力・ひずみ関係を弾完全塑性モデルによって簡略的に評価するものとした。しかし、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に及ぼす影響としては、繊維材料の特性が支配的であり、粒状材料の挙動を単純化した本構成モデルによっても十分に有用性のあることを確認している。
- 3) 繊維材料の引張挙動による応力・ひずみ関係を評価する方法を示した。本モデルでは、まず繊維材料が配向角度 θ で堆積した微視的な要素を想定し、軸対称条件における微視的な応力・ひずみ関係を導出した。また、微視的な特性から巨視的な特性を評価する際に、繊維配向角分布を確率分布関数 $f(\theta)$ で表現し、さらに繊維配向角度の違いによる引張ひずみの発生条件式 $g(\theta)$ を導入した。繊維配向角分布は Michalowski et al や Diambra et al の研究を参

考にして確率分布関数を導出し、引張ひずみの発生条件は粒状材料に引張ひずみが発生する領域内で繊維材料にも引張ひずみが発生すると仮定して、ひずみモジュールにより条件式を導出している。これによって繊維配向角度の違いによる不均質性や異方性の影響、および繊維配向角度に応じた補強効果の有無を考慮できるものとした。

- 4) 繊維-粒子複合材料の応力状態と繊維材料の引き抜け挙動の関係性を定式化し、繊維材料の挙動が引張挙動か引き抜け挙動かを判定する判定式 $l(\bar{p}, \bar{q}, \theta)$ を導入した。この判定式は、複合材料内部の角度 θ 方向に発生する応力状態と、繊維材料と粒状材料の界面強度の大小を判定することで、繊維材料が引き抜け挙動を示す繊維配向角度の範囲を算定できるものになっている。複合材料の各応力状態について、判定式 $l(\bar{p}, \bar{q}, \theta)$ を計算することによって、引き抜け挙動に転じた繊維配向角度の範囲を算定し、その範囲について繊維材料の引張挙動による応力・ひずみ関係式を再計算することで、引き抜けによる影響を考慮するものとした。
- 5) 本モデルによる繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係の解析フロー、および解析に必要なパラメーターを明確にした。まず、粒状材料の応力・ひずみ関係 (式(3.32)) と繊維材料の応力・ひずみ関係 (式(3.46)) を評価する。さらに、それを元に応力分担テンソル (式(3.18))、および複合材料の応力・ひずみ関係 (式(3.15)) を評価する。また、複合材料の各応力状態について繊維材料の引き抜け挙動の判定式 (式(3.52)) を別途計算し、それに応じて繊維材料の応力・ひずみ関係 (式(3.46)) および複合材料の応力・ひずみ関係 (式(3.15)) を再計算するものとした。モデル解析に必要なパラメーターは、粒状材料のポアソン比 ν_m 、ヤング率 E_m 、内部摩擦角 ϕ_m 、ダイレイタンシー角 ψ_m 、繊維材料の体積含有率 μ_f 、ヤング率 E_f 、界面強度を規定する界面粘着力 c_{fg} と界面摩擦角 ϕ_{fg} となっている。これらは、粒状材料の三軸圧縮試験、繊維材料の単繊維引張試験、粒状材料と繊維材料の一面せん断試験から比較的容易に求まるものである。
- 6) 繊維材料の特性、含有率・引張剛性・配向角分布・界面強度に着目して、本構成モデルにより評価 / 予測される繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を考察した。これによると、繊維材料の体積含有率や引張剛性が大きくなるほど、繊維材料の補強効果が大きく発現する傾向を示した。またこの時、複合材料の靱性や体積収縮性が増加する傾向にあることが確認された。繊維配向角分布の影響を考えると、水平に堆積している繊維材料の割合が多くなる繊維配向角分布の条件で、複合材料の靱性の向上や体積収縮挙動の卓越などの特性が顕著に表れる傾向を示した。繊維配向角度分布の違いによる補強効果への影響は非常に大きいと考えられ、繊維配向角度分布を適切に評価することの重要性を示した。界面強度については、界面摩擦角の影響が大きいことが明らかになった。界面摩擦角が小さい場合には、複合材料の応力状態が大きくなるにつれて繊維材料の引き抜け挙動が卓越し、粒状材料よりも剛性や強度が著しく小さくなるケースも存在した。実際には、粒状材料と繊維材料の間である程度の界

面強度が担保されており、既往の研究等で界面強度に着目した議論はあまりなされていない。しかし、本モデルによる解析結果から、界面摩擦角が小さくなる場合には繊維材料の引き抜けの影響を無視できないことが考えられた。

- 7) 本モデルによる解析結果と三軸圧縮試験による実験結果の比較を行い、モデルの有用性の検証を行った。その結果、軸差応力と軸差ひずみの関係において、解析結果が実験結果の傾向をおおよそ再現できることが確認された。特に、粒状材料が塑性領域に到達した後の繊維材料の補強効果が発揮される挙動を比較的良く再現できており、本モデルの有用性が伺えた。しかし、体積ひずみと軸差ひずみの関係においては、解析結果は繊維含有率に依存して体積圧縮が増加していく挙動を過剰に評価しており、実験結果を正確に再現しているとはいえない結果であった。これより、本モデルでは、繊維材料の引き抜けによる影響や繊維配向角分布を正確に評価できていない可能性のあることが考察された。特に、繊維配向角分布については、応力状態の変化による影響が考慮されていないことが大きな課題として挙げられる。粒状材料のような圧縮性の高い材料に繊維材料が混入している場合、粒状材料の変形に伴って繊維材料の配向角分布も変化している可能性が高く、精度の良い評価のためには、応力状態を考慮した繊維配向角分布が必要になると考えられた。
- 8) 本構成モデルを既往の実験成果 (Diambra et al, 2012) へ適用した。ここでは、本実験で考慮できなかった、繊維材料の種類や粒状材料の相対密度が異なる条件について、本モデルの有用性の確認を行った。結果より、本モデルでは、粒状材料の応力・ひずみ関係を弾完全塑性挙動と簡略化して評価したため、粒状材料の塑性硬化や軟化の影響を詳細に評価することは難しいようであった。しかし、繊維材料の特性の違いによる影響については、比較的良く評価できており、十分な有用性が検証された。特に、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係には繊維材料の影響が最も支配的であるため、本モデルにより繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を予測 / 評価することは有意義であると考えられる。

今回提案した繊維-粒子複合材料の構成モデルでは、均質化理論をベースとすることで、特に繊維材料の含有率・引張剛性・配向角度分布・界面強度に着目した定式化を行った。しかし実際は、繊維材料の長さやアスペクト比などの形状の影響を無視できないと考える。そこで今後の展開として、繊維材料の形状を考慮した繊維配向角分布を新たに提案することで、形状の影響を見込むことを考えている。また、先に説明したように、応力状態が変化する際の繊維配向角分布への影響についても検討したい。加えて、本論文では、三軸圧縮試験を想定した軸対称条件による定式化を行っている。そこで今後、本モデルに時間・空間的な不均一性を考慮して、種々の境界値問題を解いていく上で、一般的な応力状態を想定したモデルの拡張を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 菊池昇 : 均質化法入門, 付録 均質化小史, pp.149-154, 丸善株式会社, 2003.
- 2) Gudes, J. M. and Kikuchi, N. : Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element method, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 83-2, pp.143-198, 1990.
- 3) 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.
- 4) 関根英樹, 丹野顯, 近藤俊美, 小沢喜仁 : 複合材の巨視的物性に関する複合則, *素材物性学雑誌*, 第4巻, 第2号, pp.94-127, 1991.
- 5) Eshelby, J.D. : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 241, pp.376-396. 1957.
- 6) Mori, T. and Tanaka, K. : Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions, *Acta Metallurgica*, Vol.21, pp.571-574, 1973.
- 7) 例えば, 高野直樹 : 均質化法による新しい数値シミュレーション, *日本複合材料学会誌*, 第27巻, pp.4-11, 2001.
- 8) 例えば, Takano, N., Uetsuji, Y., Kashiwagi, Y. and Zako, M. : Hierarchical modelling of textile composite materials and structures by the homogenization method, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol.7, pp.207-231, 1999.
- 9) 例えば, 金子賢治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 岸野佑次 : 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.
- 10) 例えば, Tsutsumi, S., Kaneko, K., Toyosada, M., Hashiguchi, K. and Kishino, Y. : Non-coaxial constitutive response of idealized 3D granular assemblies to rotation of principal stress axes, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.8, pp.565-571, 2005.
- 11) 大嶺聖 : 中間土の圧縮および強度特性に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 1992.
- 12) Omine, K., Ochiai, H. and Bolton, M : A Generated Two-Phase Mixture Model and its Application to Composite Ground, *Memories of The Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol.51, No.2, 1998.
- 13) 大嶺聖, 落合英俊 : 不均質材料に対する力学モデルの考え方とセメント改良土への適用, セメント及びセメント系固化材を用いた固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム発表論文集, pp.313-318, 2005.
- 14) 例えば, Hosseininia, E. S. and Farzaneh, O. : Development and Validation of a Two-Phase Model for Reinforced Soil by Considering Nonlinear Behavior of Matrix, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.136, No.6, pp.721-735, 2010.

- 15) Prisco, C. and Nova, R. : A constitutive model for soil reinforced by continuous threads, *Jornal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.12, pp.161-178, 1993.
- 16) Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M. and Russell, A. R. : Fibre reinforced sands: Experiments and modelling, *Jornal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, pp.238-250, 2010.
- 17) Wood, D. M. : *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*, pp.37-45, Cambridge University Press, 1990.
- 18) 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.
- 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) Wood, D. M. : *geotechnical modelling*, 3. Constitutive modelling, pp.117-124, Spon press, 2004.
- 21) Yasufuku, N. and Ochiai, H. : Anisotropic Hardening Model for Sandy Soils over a Wide Stress Region, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol.51, No.2, pp.81-118, 1991.
- 22) Yasufuku, N., Murata, H. and Hyodo, M. : Yield Characteristics of Anisotropically Consolidated Sand under Low and High Stress, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.95-109, 1991.
- 23) 藤井太一, 座古勝 : 複合材料の破壊と力学, 2.4 網目理論, pp.14-16, 実教出版株式会社, 1978.
- 24) Michaloeski, R. L. and Cermak, J. : Strength anisotropy of fiber-reinforced sand, *Jornal of Computers and Geotechnics*, Vol.29, pp.279-299, 2002.
- 25) Michalowski, R. L. : Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil, *Jornal of Geotechnique*, Vol.58, No.6, pp.489-501, 2008.
- 26) Diambra, A., Russell, A. R., Ibraim, E. and Wood, D. M. : Determination of fibre orientation distribution in reinforced sands, *Jornal of Geotechnique*, Vol.57, No.7, pp.623-628, 2007.
- 27) 地盤工学会 : 入門シリーズ 24, 補強土入門, 第 1 章, pp5-11, 1999.
- 28) Zornberg, J. G. : Descrete framework for limit equilibrium analysis of fiber-reinforced sail, *Jornal of Geotechnique*, Vol.52, No.8, pp.593-604, 2002.
- 29) 松岡元 : 土質力学, 5 章 土のせん断, pp.128-178, 森北出版株式会社, 1999.
- 30) 社団法人地盤工学会 : 地盤材料試験の方法と解説, 第 9 編 ジオシンセティックス, 第 6 章 ジオシンセティックスの土中引抜き試験方法, pp.1058-1068, 2009.
- 31) 社団法人地盤工学会 : 地盤材料試験の方法と解説, 第 9 編 ジオシンセティックス, 第 5 章 土とジオシンセティックスの一面せん断試験, pp.1048-1057, 2009.
- 32) Hamidi, A. and Hooresfand, M. : Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand, *Journal of Geotextile and Geomembranes*, Vol. 36, pp. 1-9, 2013.

- 33) 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.
- 34) 社団法人地盤工学会 : 地盤材料試験の方法と解説, 第 7 編 変形・強度試験, 第 3 章 三軸圧縮試験, pp.552-643, 2009.
- 35) Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M. and Russell, A. R. : Fibre reinforced sands: from experiments to modelling and beyond, *International Journal for Numerical Analytical Methods in Geotechnics*, Vol. 37, pp.2427-2455. 2012.
- 36) Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M. and Russell, A. R. : Shear tests on fibre reinforced sand, *Proceedings of New Horizons in Earth Reinforcement*, pp.329-334, 2008.

第4章 繊維廃材の影響に着目した

埋立廃棄物の変形・強度特性

4.1 概説

膨大な量の廃棄物が急勾配で堆積している埋立廃棄物地盤が多数存在しており、廃棄物の崩落や斜面の崩壊などの力学的な支障が報告されている^{1),2)}。実際、産業廃棄物の不法投棄等は平成24年度末時点で1800万t近く確認されており、その中の9割を超える廃棄物が総量5000t以上の大型現場に残存している(図-4.1参照)³⁾。また100件以上の現場で力学的な問題があると判断されており、早急な対応が望まれている⁴⁾。しかし日本では、廃棄物の約7割が焼却処分されて処分場に投棄されるため、本研究で対象としている不法投棄等廃棄物などの埋立廃棄物に関する知見が不足しているのが現状である^{5),6)}。海外では、同様の廃棄物とみられる都市固形ごみを対象とした研究が行われているが、先にも述べたように、処分場から採取した1種類の廃棄物に関する検討が多く、廃棄物地盤を構成する廃材の種類や割合(以下、「組成割合」と称する)が十分に考慮されていない⁷⁾⁻¹¹⁾。廃棄物の組成割合は生活水準や社会経済、及び処理方法の違いや処理技術の進展によって変化するものであり、同一の廃棄物地盤は存在しない。そのため、種々の廃棄物を相対的に比較・検討することを考えると、組成割合と力学特性の関係を明らかにすることは必要不可欠であるといえる。さらに、廃棄物の中には、時間の経過とともに生物分解が進行する廃材や¹²⁾、カルシウム分によって固結化を引き起こす廃材も存在しており¹³⁾、一度堆積構造を乱してしまうと、変形・強度特性が大きく変化してしまうことが考えられる¹⁴⁾。しかし、既往の研究では、主に室内試験が行われており、原位置での力学特性の把握が重要な課題となっている。

本章では、これらのことに鑑み、組成割合の異なる国内不法投棄等現場2ヵ所と海外の埋立処分場2ヵ所を含めた計4ヵ所の廃棄物地盤を対象として、室内と原位置で力学試験を実施した。まず、国内不法投棄等現場1ヵ所より採取した廃棄物を用いた室内試験結果を示し、廃棄物の基本的な変形・強度特性、およびせん断強度評価に関する考察を述べた。次に、4ヵ所の廃棄物地盤で実施した原位置一面せん断試験結果を示し、原位置での力学特性を明らかにすると共に、組成割合との関連性を考察した。ここでは特に、既往の研究成果にも指摘されている、繊維廃材の影響について重点を置いて議論するものとし、廃棄物を繊維-粒子複合材料の一つとして取り扱う

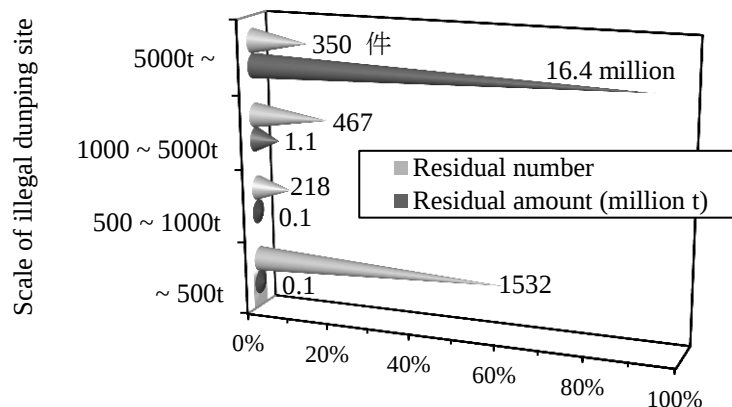


図-4.1 規模別不法投棄等廃棄物の残存件数と残存量 (環境省, 2014)²⁾

ことにより，組成割合の異なる廃棄物を相対的に評価することを目指した．

以下，節に従って本章の概要を述べる．まず，第 2 節では，本研究で対象とする廃棄物地盤について現地踏査によりその実際と物理的性質を把握した．次に，第 3 節では，原位置と室内において廃棄物の変形・強度特性を把握することを目的として開発した，原位置・室内両用型一面せん断試験装置の概要と実験方法を説明した．さらに，第 4 節では，国内不法投棄等現場 1 ヲ所から採取した廃棄物を用いて，種々の条件における室内一面せん断試験を実施し，廃棄物の基本的な変形・強度特性を明らかにした．また，第 5 節では，国内不法投棄等現場 2 ヲ所と海外埋立処分場 2 ヲ所で実施した原位置一面せん断試験結果を示し，原位置せん断特性を明らかにすると共に，組成割合，特に繊維廃材との関係性を明らかにした．さらにここでは，室内試験との比較結果についても触れ，室内試験の妥当性や原位置試験の重要性についての考察も行った．最後に，第 6 節では，以上の成果を要約し，まとめとした．

4.2 現地踏査による埋立廃棄物地盤の実際および物理的性質

4.2.1 国内の産業廃棄物不法投棄等現場の整理と分類

ここではまず，山脇ら¹⁵⁾によって報告されている国内の産業廃棄物不法投棄等現場の概要とその力学的支障等に関する研究成果を元に，崩壊等のおそれのあった産業廃棄物不法投棄等現場の整理を行った．さらに，山脇らによって提案されている「投棄の特性や廃棄物の種類に着目した不法投棄等現場の分類方法」を紹介し，本研究で対象とする廃棄物地盤の種類を明確にした．まず，表-4.1 に斜面崩壊のおそれ等が指摘された 21 件の産業廃棄物不法投棄等現場について，投

表-4.1 崩壊のおそれ等のあった国内不法投棄等現場の一覧 (山脇ら, 2014 より抜粋)¹⁵⁾

事 案	地形	主な廃棄物種類 (重量比)	廃棄物の サイズ	繊維 廃材 等の 有無※	堆積 高さ (m)	斜面勾 配(°)	投棄量 (m ³)	備 考
関東・ H22	平地	建設混合廃棄物	粗(無破碎 等が主)	○	5	45	1,650	
関東・ H23	平地	がれき類, 土砂類, プラスチック類	中(粗大物 もあり)	○	18	30~45	不明	
関東・ H12	平地	プラスチック類, 燃 えがら	中(一次破 碎物等)	○	16	35	13,000	
近畿・ H12	平地	がれき類・土砂 90%, プラスチック類 10%	中(一次破 碎物等)	○	8	30~40	9,600	
四国・ H16	平地	プラスチック類 80%, 金属くず 11%	中(一次破 碎物等)	○	9	20~55	3,400	
中部・ H17	平地	土砂等 41%, がれき 類 22%, プラ類 21%	中(一次破 碎物等)	○	17	35~45	123,000	
関東・ H20	ほぼ 平地	プラ類 49%, 汚泥 13%, がれき類 10%	中(一次破 碎物等)	○	50	30~45	910,000	
関東・ H22	平地	木くず, 繊維くず, 金属くず	中(一次破 碎物等)	○	20	31~38	50,000	
関東・ H23	平地	礫・陶磁器 46%, 砂 類 28%, プラ類 16%	中(一次破 碎物等)	○	18	40~90	54,000	直壁部で1m 厚表面崩れ
中部・ H24	平地	プラ類 6%, 木くず 3%, がれき類 50%, 土砂等 35%	中(一次破 碎物等)	○	11	40~60	9,100	60° 斜面法 肩にクラッ ク
関東・ H22	平地	木くず, 繊維くず, 残土等	細	●	10	40~41	13,000	
関東・ H22	平地	建設混合廃棄物(木 くず, プラ), 残土	細	●	7	40	11,250	
関東・ H22	平地	建設混合廃棄物(木 くず, プラ, 残土)	細	●	8	35~55	11,250	
関東・ H22	平地	建設混合廃棄物(残 土がれき類, 木くず)	細(篩い下 等)	●	6	45	2,500	流出防止用 万能塀が傾 斜
関東・ H23	平地	土砂・燃え殻等 85%, がれき類 12%, プラ 2%	細(土砂様 分主体)	×	40	30	1,070,000	
中部・ H15	傾斜 地	木くず, がれき, プ ラ	中(一次破 碎物等)	○	60	20~30	18,000 (谷上か ら投棄)	大規模崩壊 (多量降雨時)
中部・ H16	傾斜 地	プラ類, 廃タイヤ	中(一次破 碎物等)	○	30	40~70	130,000 (谷上か ら投棄)	(落石発生)
中部・ H24	谷~平 地	(容積比)プラ類 48%, 木くず・紙類 37%	中~粗(長 繊維物多)	○	30	24~25	530,000	
関東・ H17	傾斜 地	木くず 81%, 金属く ず 19%, がれき類	粗(無破碎 等が主)	×	10	60~70	7,000	表面くずれ 発生
北陸・ H17	傾斜 地	木くず 75%, 燃え殻 25%	粗(解体角 材等)	×	13	30~50	18,600	
九州・ H23	傾斜 地	がれき類・土砂 100%	細(土砂分 主体)	×	40	30~40	110,000 (谷上か ら投棄)	急勾配の一 部斜面表層 崩壊(周辺は 地滑り地帯)

注)「繊維廃材等の 有無※」 凡例 ○:10cm 以上のプラ等あり ●プラ等はあるが 10cm 以上ほとんどなし × ほぼ無し

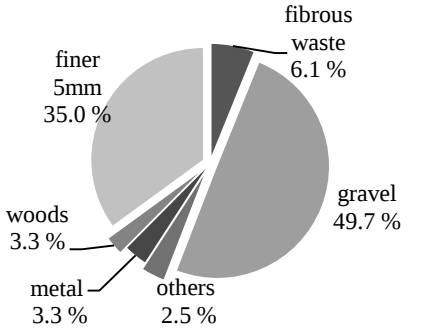
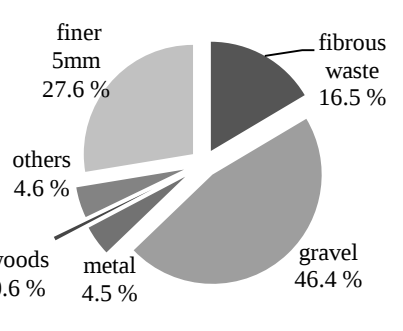
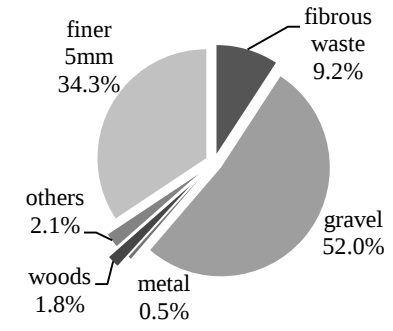
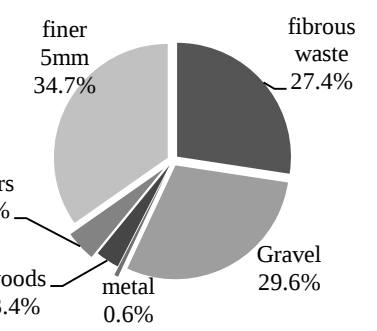
表-4.2 廃棄物種類や形状に着目した国内不法投棄等現場の分類

廃棄物の種類や形状	現場特性	事案件数 []内：崩壊数		
		平地	傾斜地	計
① 大型がれき主体 角材等の粗大物等	小規模不法投棄，最大 堆積高 10m 程度	1	2 [1]	3
② 多種廃材主体，繊維廃材 等多い，(粗大物少)	急傾斜大規模不法投棄 になり得る	8	2 [1]	10
③ 細粒分主体（繊維類，木 くず等あり）	小規模不法投棄，最大 堆積高 10 m 程度	4	0	4
④ 土砂・がれき等の建設廃 材主体	土砂特性。燃え殻等で 固結化の場合あり	1	1 [1]	2
計		14	5 [3]	19

棄地形，廃棄物の種類や形状，堆積高さ，斜面勾配，投棄量，及び崩壊・クラックの発生状況を整理した。投棄地地形別にみると，平地での投棄事例は 15 件あるが，表層崩壊やクラックが発生したのは 2 件のみで，うち 1 件は直壁（90°）での表面くずれ，1 件は 60° 斜面上でのクラックの発生であり，大規模崩壊は発生していない。これに対し，傾斜地上での投棄事例は全 6 件で，うち大規模崩壊，表層崩壊，表面くずれが発生した事案は半数の 3 件であり，廃棄物の性状や斜面の勾配に関係なく，大規模崩壊を含めて発生している。このような崩壊事例に鑑みると，国内の不法投棄等現場では，谷上から投棄を行っている現場では，締固めが不十分になることから，斜面安定性が低くなると考えられた。特に，大雨や降雨時にはその危険性が高くなるであろう。また，廃棄物の種類に着目すると，土砂類・がれき類・プラスチック類等の多種類の廃材を含む廃棄物が投棄された現場がそのほとんどを占めていた。

ここで 21 件の現地踏査結果から，山脇らによって提案されている「投棄の特性や廃棄物の種類に着目した不法投棄等現場を分類分け」を 表-4.2 に整理した¹⁵⁾。山脇らによると，産業廃棄物の不法投棄等は，投棄の特性上，建設解体現場等の発生源からの直送物，一次破碎物，選別残渣に分けられるため，このような大別が可能になるとしている^{16),17), 18)}。表-4.2 より，産業廃棄物の不法投棄等現場は，①大型がれき主体 ②多種廃材主体 ③細粒分主体 ④土砂・がれき等の建設廃材主体の 4 つの廃棄物地盤に分類される。その中で，②の多種類の廃材が混在している廃棄物地盤が最も数も多く，大規模不法投棄にもなり得るということが明らかになった。これより，本研究では，多種廃材が混入している埋立廃棄物を対象として力学特性の把握，および提案した構成モデルの適用を行うものとした。埋立廃棄物地盤は，主に国内の産業廃棄物不法投棄等現場を選定するものとし，さらに海外の都市固形ごみとの比較も兼ねて，海外の埋立処分場においても実験を実施するものとした。

表-4.3 原位置試験を行った廃棄物地盤 4 ヲ所の概要

	Site A (中部地方, 不法投棄等現場)	Site B (関東地方, 不法投棄等現場)
General view		
Composition ratio (mass ratio)		
Wet density Water content	$\rho_t = 1.18 \text{ g / cm}^3$ $w = 20.7 \%$	$\rho_t = 1.20 \text{ g / cm}^3$ $w = 30.5 \%$
	Site C, D (中国, 老港廃棄物処分場)	
General view		
Composition ratio (mass ratio)		
Wet density Water content	C : $\rho_t = 1.21 \text{ g / cm}^3$ $w = 31.3 \%$	D : $\rho_t = 1.06 \text{ g / cm}^3$ $w = 27.1 \%$

4.2.2 本研究で対象とした廃棄物地盤の性状と物理的性質

多種廃材が混入している埋立廃棄物地盤を対象として、現状の把握、物理・力学特性の解明を行うために、表-4.3に示した、国内の不法投棄等現場 2 ヲ所、海外の廃棄物処分場における組成

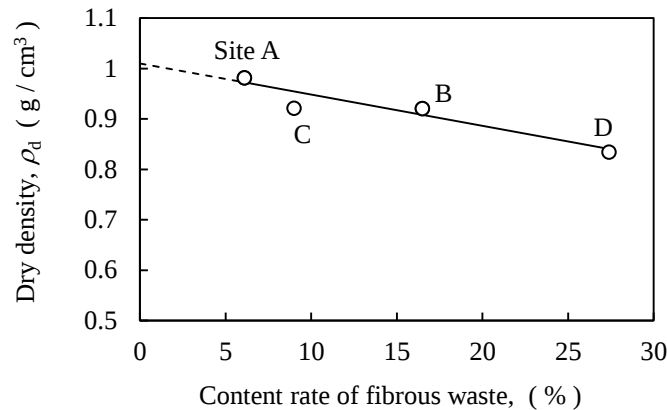


図-4.2 廃棄物の乾燥密度と繊維廃材含有率の関係

割合の異なる地点 2 カ所の計 4 カ所を実験現場として選定した。表-4.3では、実験現場の全体図、廃棄物の組成割合、原位置密度試験より求めた湿潤密度と含水比を示している。

Site A は産業廃棄物中間処理施設に保管基準を大きく上回る廃棄物が残置された現場である。投棄量はおおよそ 9100 m^3 であり、原地盤からの堆積高さは 11 m 程度であった。斜面勾配は 60° 程度になり、クラックの発生も確認された。Site B は産業廃棄物中間処理施設に保管基準を大きく上回る約 54000 m^3 もの廃棄物が残置された現場である。全体図からも分かるように約 90° の著しい急勾配斜面が存在し、堆積高さは 18 m 程度となる。表層くずれの発生が報告されている非常に危険な現場であった。Site C, D は中華人民共和国の上海市老港廃棄物処分場であり、直接投棄による埋立処分が行われている。海外の都市固形ゴミの力学特性も合わせて把握することを目的として選定した。また、各試験現場において地表面を 2 m 程度掘削し、投棄されてから一定時間が経過した廃棄物層を対象として原位置試験を実施するものとした。

廃棄物の組成割合は、廃材の種類とその質量含有率を表したものである。分類項目は実際の状況や既往の研究等を参考として、繊維廃材（主にプラスチック類）、礫・陶磁器類、金属類、木類、ふるい 5 mm 以下廃材、その他、の計 7 項目とした^{19), 20)}。1 現場に対して 5 kg 分の廃棄物の分類を 3 回以上行い、平均した値を示している。産業廃棄物と都市固形ゴミでの明確な違いは認められず、礫類や 5 mm 以下廃材などの粒状廃材が $70 \sim 90 \%$ 、繊維廃材が $5 \sim 30 \%$ 、その他の廃材の合計が $5 \sim 10 \%$ 程度の範囲で混入していることが確認される。廃棄物地盤は礫などの粒状廃材を主体として、その中に主として繊維廃材が混入している構造を有していた。また、繊維廃材は比重が小さく、重量に対して体積の大きい材料であるため、各廃棄物地盤で繊維廃材含有率の大きく異なることが、重要な物理的特徴であると考えられた。

現場の密度と含水比は、現場密度試験を実施することにより把握した。試験は地盤工学会基準「水置換による土の密度試験方法」(IGS1612-2003)²¹⁾ に準じて実施した。一般に砂置換法が粒径 53 mm 以下の土が対象であるのに対し、水置換法では粒径 150 mm 以上の材料にも適用可能であ

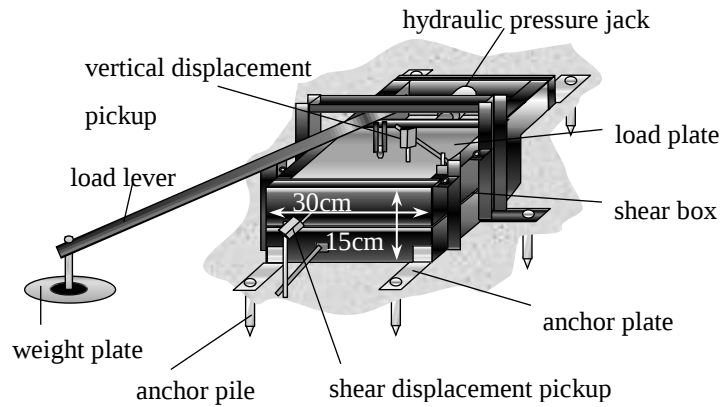
る。廃棄物地盤は大小様々な材料を含み、間隙も大きいため水置換法を採用した。結果より、比重の小さな繊維廃材の影響が大きいため、湿潤密度は全ての廃棄物地盤で $\rho_t = 1.0 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ 程度の小さな値を示すことが明らかになった。ここで、全廃棄物地盤の乾燥密度と繊維廃材含有率の関係を整理すると、図-4.2に示すように繊維廃材含有率の増加に伴って乾燥密度は線形的に減少する傾向を示した。各廃棄物地盤で廃材の大きさや形状が異なるため、繊維廃材の影響のみが支配的であると判断することは難しい。しかし、繊維廃材含有率に着目することで組成割合の異なる廃棄物の乾燥密度を相対的に評価できる可能性が示唆された。

4.3 原位置・室内両用型一面せん断試験装置の概要と実験方法

原位置と室内で廃棄物の変形・強度特性を把握するために、図-4.3に示した原位置・室内両用型一面せん断試験装置を開発した。せん断箱は、幅 30 cm、奥行 30 cm、高さ 15 cm の矩形であり、载荷装置を変更することで原位置と室内の両方で試験を行うことが可能である。なお、室内試験装置の概要は、第 2 章の図-2.2と同様である。本実験装置では、各部にベアリングを取り付けることで、摩擦の生じない工夫を施している。豊浦砂を用いた室内試験により性能を検証しており、一般的な一面せん断試験装置 (直径 6 cm) と同等の結果が得られることを確認している。

原位置試験時は、素早く試験準備が行えること、電力を使用せずに試験が行えることを重要視して、シンプルかつコンパクトな試験装置とした (図-4.3(a)(b)参照)。そのため、せん断箱や载荷装置などは簡単に取り外しができるようになっている。実験手順としては、供試体を作製した後、せん断箱を設置し、载荷装置や変位計、ロードセルを取り付けて実験を開始する。

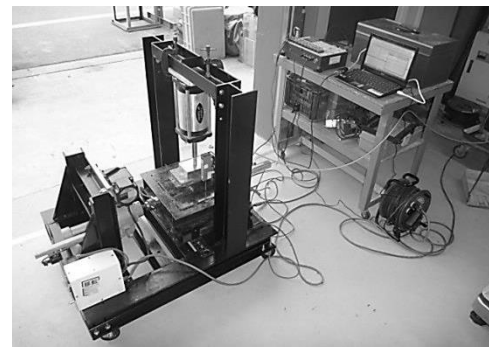
原位置での供試体作製の手順は図-4.4に示すようであり、堆積構造を乱さない不攪乱試料を作製することが重要なポイントとなる。本研究では、簡易に供試体を作製するために、せん断箱と同じ大きさの供試体枠を使用した。まず、試験位置を選定し、供試体枠を地盤上に設置する。供試体枠直下の廃棄物を供試体として切り出していくため、供試体枠より少し広い範囲を残して周りの廃材を除去していく。このとき、掘削する深さは供試体高さの 15 cm 程度を基準とし、試験装置の大きさや作業のし易さを考慮して、供試体枠の周り 2 m 程度を除去した (図-4.4(a)参照)。次に、供試体枠を上から被せていく要領で、順次はみ出している部分を取り除きながら、大きさを整えていく。供試体の内部構造を乱さないために、はみ出している繊維廃材等は引き抜いたりせずにグラインダーやカッターなどで少しずつ切断するものとした (図-4.4(b)参照)。廃棄物が供試体枠に収まったら、供試体枠を慎重に取り外し、せん断箱を上から被せる。最後に、载荷フレームを設置し、反力杭を打ちつけて供試体の完成となる (図-4.4(c)参照)。ここで、反力杭はスク



(a) 原位置試験装置の概要



(b) 原位置実験の様子



(c) 室内実験の様子

図-4.3 原位置・室内一面せん断試験装置の概要と実験時の様子

リュー型となっており、直径 2.5 cm、長さ 22 cm の杭を 6 本使用することとした。供試体作製後は、載荷フレームに載荷棒と荷重板を設置し、荷重板に実荷重を載せて試験を開始する（図-4.4(d) 参照）。載荷棒を用いることで、この原理により荷重板に載せた実荷重の 10 倍の荷重がせん断箱に載荷される仕組みになっている。反力がとれる範囲での載荷となるため、廃棄物地盤で載荷可能な最大の上載圧は 20 kN/m^2 程度であった。上載圧を載荷して垂直変位が収束したらせん断過程に移る。せん断は油圧ジャッキを用いて手動で行うものとし、油圧ジャッキ付近に設置したダイヤルゲージを確認することで、せん断速度の調整が可能となっている。

室内試験時の様子は図-4.3(c) のようであり、人為的ミスを軽減させるために自動で載荷を行うものとした。供試体はせん断箱内で作製し、密度を一樣にするために三層に分けて締固めを行った。廃棄物は破碎性の大きい廃材が多いことから、ランマーではなくエアシリンダーにより上載圧を載荷する静的な締固めを行うこととした。

供試体作製後の実験方法は原位置・室内共に同様とし、土の定圧一面せん断試験方法（JGS 0561-2009）²²⁾ を参考に決定した。圧縮過程では所定の上載圧を載荷し、10 min 経過しても垂直変

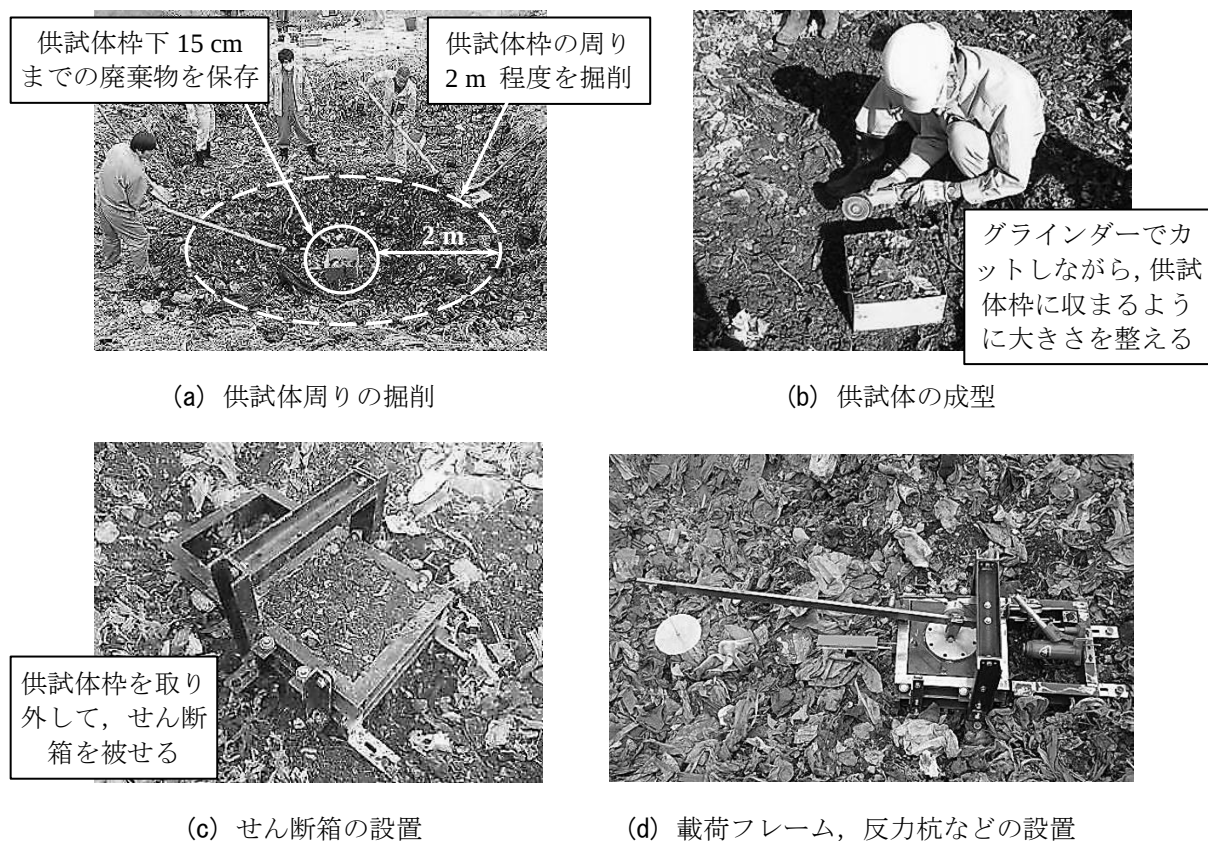


図-4.4 原位置一面せん断試験時の供試体作製手順

位置量が落ち着かない場合は、圧縮を打ち切ってせん断過程に移る．今回の試験では、すべての試験条件においてせん断速度は 1 mm/min に設定した．せん断過程ではせん断変位 40 mm までせん断を行い、特に断りがない場合にはせん断変位 35 mm でのせん断応力をせん断強度 τ_f と定義した．なお本論文では、圧縮及びせん断時に実際に載荷する応力を「上載圧」と称し、その結果として供試体に作用する平均的な応力を「拘束圧」と定義することとした．特に、圧縮・せん断特性を考察する際には、拘束圧という記述を用いて説明した．

4.4 埋立廃棄物の変形・強度特性と初期状態量の影響

原位置一面せん断試験では上載圧の制限や不攪乱試料を対象としていることもあり、拘束圧や初期密度などの状態量を変化させた広範な条件下での変形・強度特性を把握することは難しい．そこでまず、先に示した Site B から採取した廃棄物を用いて、拘束圧・初期乾燥密度・応力履歴・繊維廃材の配向性の違いに着目した室内一面せん断試験を実施し、廃棄物の変形・強度特性に及

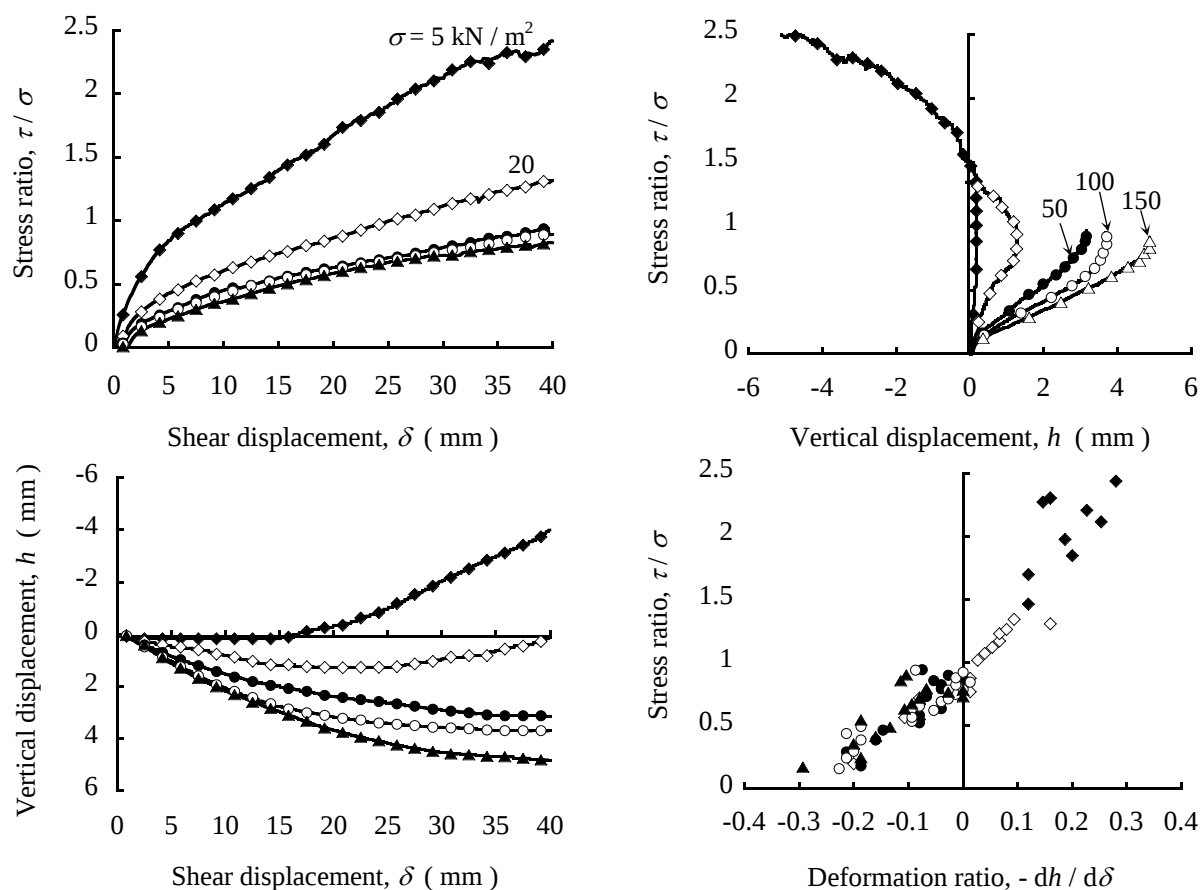


図-4.5 拘束圧がせん断特性に与える影響
($\tau/\sigma - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

ぼす初期状態量の影響を把握した。さらに実験結果より、繊維廃材に着目してその特性を議論すると共に、土質力学をベースとしたせん断強度評価の適用性に関する考察を加えた。

4.4.1 拘束圧の影響

初期乾燥密度 $\rho_{di} = 0.9 \text{ g/cm}^3$ 、含水比 $w = 20\%$ で作製した供試体に対して、上載圧を $\sigma = 5 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ と変化させて一面せん断試験を行った。拘束圧の異なる廃棄物のせん断特性として、図-4.5に、応力比 τ/σ とせん断変位 δ の関係、応力比 τ/σ と垂直変位 h の関係、垂直変位 h とせん断変位 δ の関係、応力比 τ/σ と変形比 $-dh/d\delta$ の関係をまとめて整理した。

結果より、応力比とせん断変位の関係において、上載圧の増加と共に応力比が低下する傾向が認められる。特に、上載圧 $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ 程度までは顕著に応力比が低下し、それ以上の上載圧 $\sigma = 50 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ではほぼ同等の応力比を示すことが確認される。また垂直変位とせん断変位の関係では、上載圧が小さいほど膨張特性が卓越し、上載圧が大きくなると収縮特性を示すような拘束圧依存性が認められた。さらにこれより、応力比と変形比の関係では、応力比の増加に伴って圧縮特性から膨張特性に推移する傾向が認められている。通常、このような拘束圧に依存した

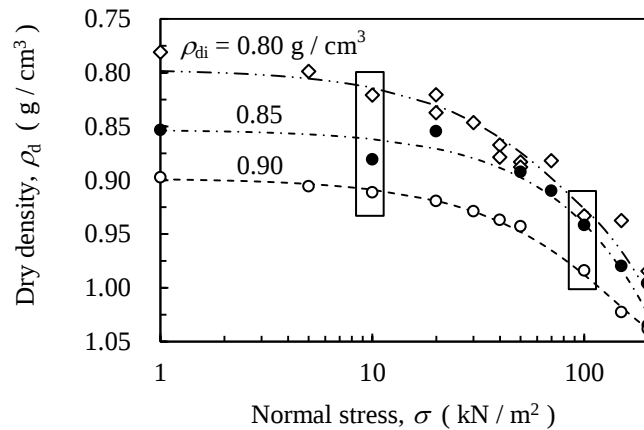


図-4.6 一次元圧縮特性，乾燥密度と上載圧の関係

特性は粒子破砕が卓越する材料において，非常に高い拘束圧下（例えば，宇部まさ土では 1×10^4 kN/m^2 程度）でみられる傾向である^{23), 24)}．高い拘束圧による圧縮によって粒子が破砕して急激な密度増加が起こり，せん断時には応力比が低下することが知られている．実際，圧縮過程での廃棄物の乾燥密度と上載圧の関係を示した図-4.6によると，すべての初期乾燥密度の条件で，上載圧が $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ を超える領域において急激な密度増加が認められた．ここで，廃棄物が上載圧 $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ 程度の低拘束圧下で急激な密度変化を示す理由としては，(1) 廃棄物に含まれる陶磁器やレンガ等は破砕しやすい材料のため，実際に粒子破砕が発生する (2) 繊維廃材は非常に圧縮性が高い材料であるため，ある上載圧を境にして急激な密度増加が生じる，などが考えられた．以上より，廃棄物は低拘束圧下において，顕著な拘束圧への依存性を示す材料であり，変形特性の深さ方向の変化を適切に評価することが重要であるといえる．

4.4.2 初期乾燥密度の影響

含水比 $w = 20\%$ ，初期乾燥密度 $\rho_{di} = 0.70, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95 \text{ g/cm}^3$ にて供試体を作製し，上載圧 $\sigma = 5 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ の条件で実験を行った．ここで図-4.6より，圧縮過程での初期乾燥密度の影響は低拘束圧下で顕著に表れ，急激な密度増加が生じる応力値を境にして小さくなることが確認される．これより，その応力値を基準として，それよりも低い拘束圧下と高い拘束圧下において，初期密度の違いがせん断特性に及ぼす影響を考察することとした．

上載圧 $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$ のせん断特性を図-4.7に，上載圧 $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ のせん断特性を図-4.8に示した．両図共に，応力比とせん断変位の関係，応力比と垂直変位の関係，垂直変位とせん断変位の関係，応力比と変形比の関係をまとめて整理した．実験結果より，低拘束圧下では初期乾燥密度が大きい程，応力比は増加する傾向を示し，体積変化挙動もそれに依存して膨張傾向が顕著に表れる．また応力比と変形比の関係についても，応力比の大きい範囲において初期密度の影響が顕著に表れている．このような初期密度に依存した挙動は，砂質土や粘性土にも認められる

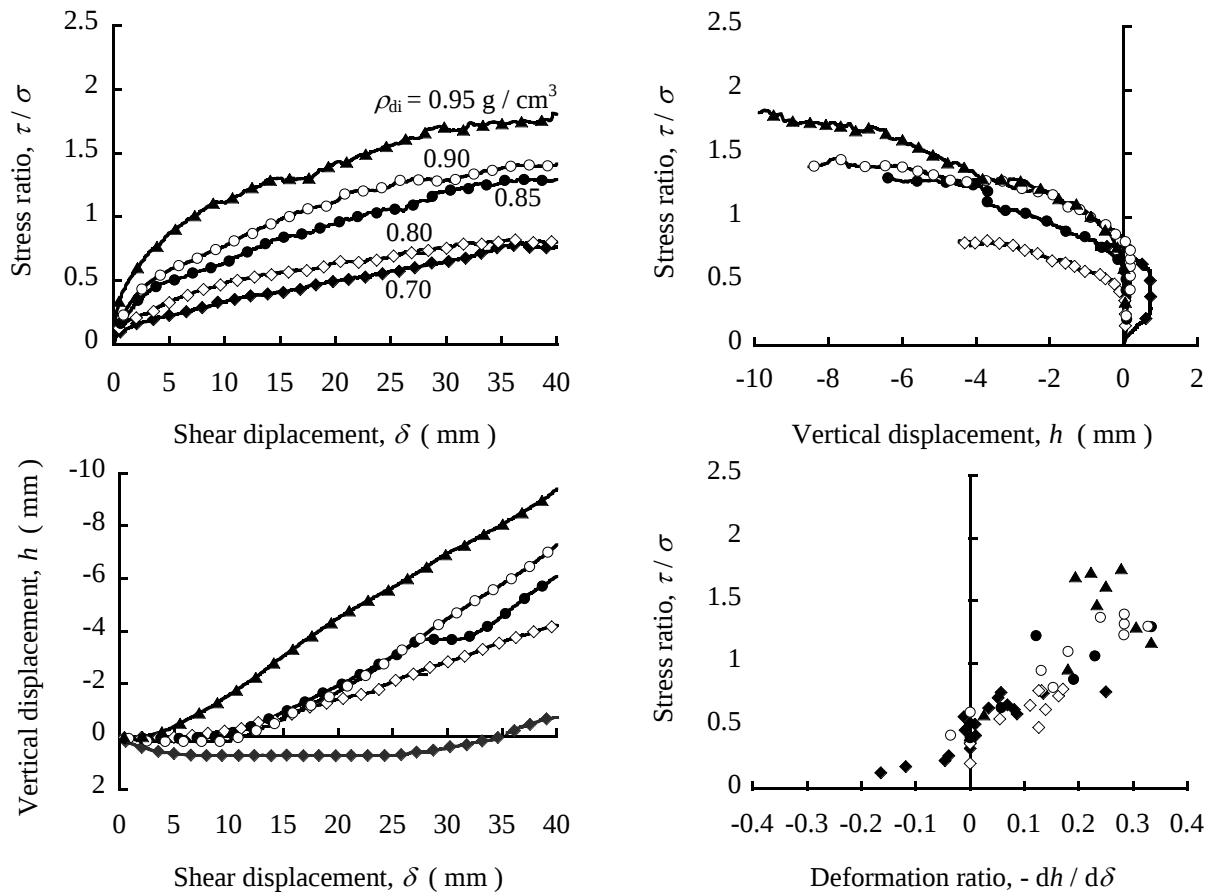


図-4.7 初期乾燥密度がせん断特性に与える影響 (低拘束圧下, $\sigma = 10 \text{ kN/m}^2$)
($\tau/\sigma - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

傾向であり、初期密度が大きいほど粒子が隣の粒子を乗り越えるような挙動が卓越し、体積が膨張する²⁵⁾。廃棄物には多量の粒状廃材が含まれるため、このような初期密度依存性が認められたと考える。しかし、一方の高拘束圧下では、初期密度の違いによらず、応力比はほぼ同程度の値を示し、体積変化挙動にも明確な違いは認められないことが確認される。このような傾向を示すのは、先の拘束圧の影響にみられたように、粒子破碎や繊維廃材の高い圧縮性によって密度が急激に増加することで、初期密度の影響がほとんどなくなるためと考えられた。

以上より、圧縮特性と同様にせん断特性でも、初期乾燥密度の違いは低拘束圧下でよく表れ、高拘束圧下になるほど影響は小さくなるといえる。これより、低拘束圧下での挙動を考える場合には、原位置での密度のばらつきを正確に把握することが重要であると考えられる。

次に、初期乾燥密度 $\rho_{di} = 0.80, 0.85, 0.90 \text{ g/cm}^3$ 、上載圧 $\sigma = 1 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ の実験結果を用いて、Coulomb の規準による強度評価を行った²⁶⁾。先の結果より、廃棄物の変形特性に拘束圧の影響が認められたことから、特に Coulomb の規準により評価する際の拘束圧の影響を考察した。

図-4.9に強度定数 (粘着力 c ・内部摩擦角 ϕ) と強度定数を算定する際に用いる上載圧の最大値の関係を整理した。例えば、 $\sigma_{\max} = 50 \text{ kN/m}^2$ のプロット点は、上載圧 $\sigma = 1 \sim 50 \text{ kN/m}^2$ まで

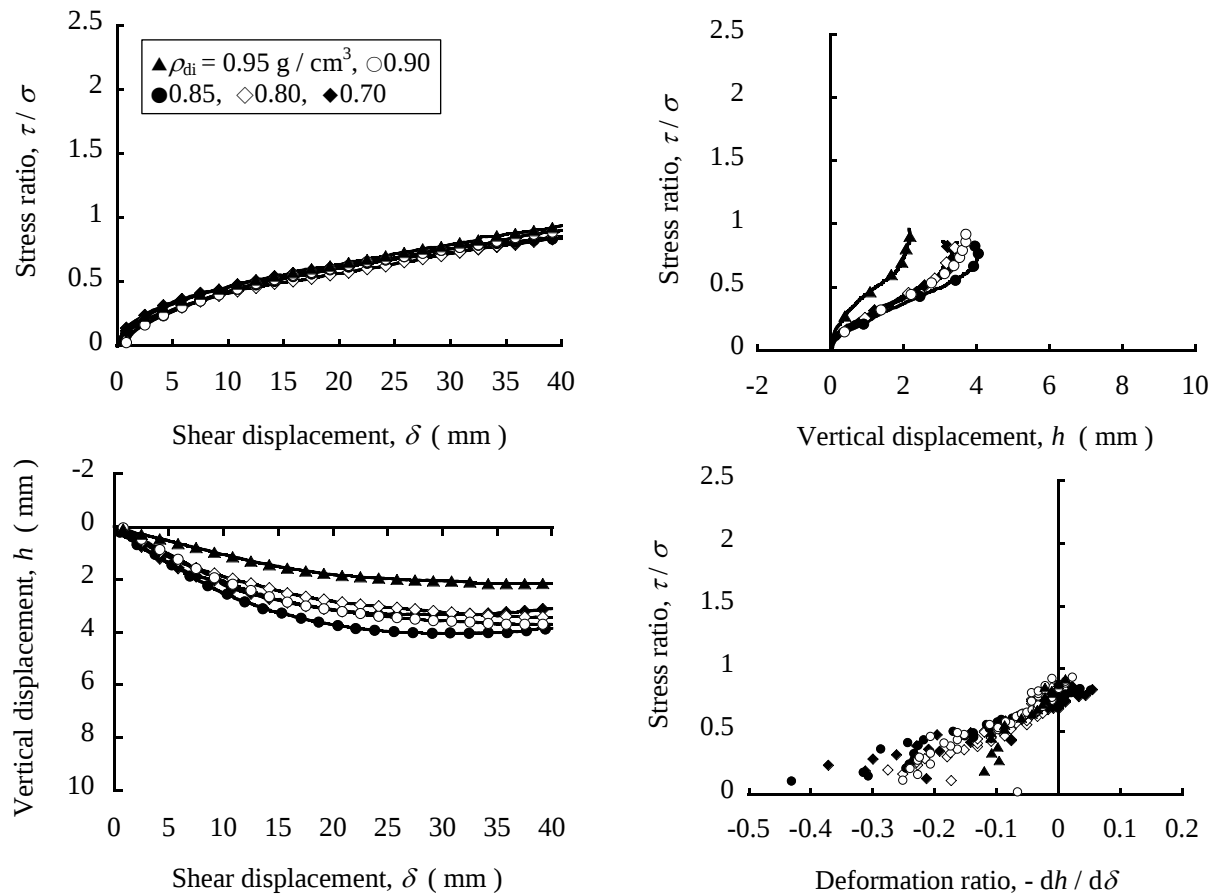


図-4.8 初期乾燥密度がせん断特性に与える影響 (低拘束圧下, $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$)
($\tau/\sigma - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

のせん断強度を用いてせん断強度定数を算定した結果を意味し、せん断強度を評価する上載圧の範囲に応じて、強度定数がどのように変化するのかを把握した。図-4.9より、上載圧が $\sigma_{\max} = 50 \text{ kN/m}^2$ 程度までは、内部摩擦角は減少し、粘着力は増加する傾向を示した。しかし、上載圧がそれより大きい範囲では、内部摩擦角、粘着力共に一定値に収束した。これは、先の圧縮特性 (図-4.6) やせん断特性 (図-4.7, 4.8) にみられたような材料特性が変化する拘束圧 ($\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ 程度) を境にして強度特性が変化することを意味している。これより、せん断強度と上載圧の関係では、材料特性が変化する上載圧より小さい範囲 σ_L のみを考慮する場合と、大きい範囲 σ_H までは考慮する場合とで、図-4.10に示すように、破壊包絡線による評価は異なるものになるといえる。Coulomb の規準では、拘束圧の異なるせん断強度を直線的な破壊包絡線で評価するため、力学特性が変化する拘束圧を含む広範囲の応力条件での廃棄物のせん断強度を議論する場合には、この規準による評価は適切ではないことが示唆される。そこで、拘束圧の影響を考慮できると考えられているセカントアングルや Hvorslev の規準による強度特性の考察を加えるものとした。

セカントアングル ϕ_s とは、各上載圧 σ におけるせん断強度 τ_f から、 $\phi_s = \tan^{-1}(\tau_f/\sigma)$ の関係式により、破壊時に発揮されるせん断強度を摩擦成分として算定する評価手法である²⁷⁾。各拘束

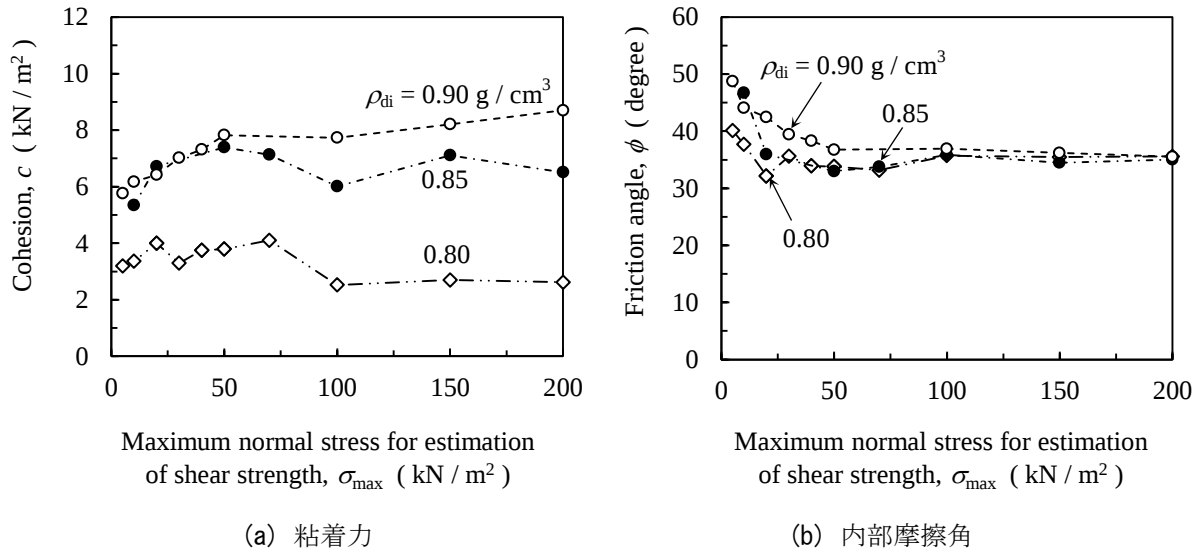


図-4.9 せん断強度に及ぼす拘束圧の影響

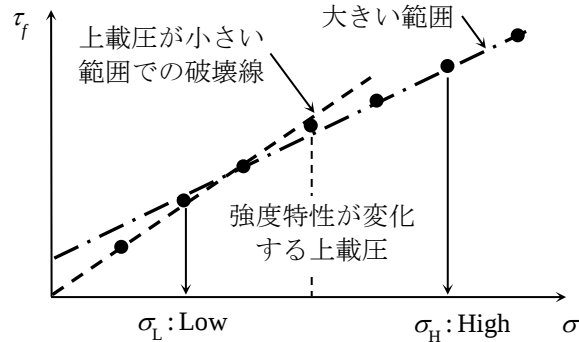


図-4.10 せん断強度と上載圧の関係(模式図)

圧状態においてセカントアングルを定義するため、拘束圧レベルを考慮した強度評価であるといえる。セカントアングルによって廃棄物の強度評価を行った結果として、図-4.11にセカントアングルと上載圧の関係を示した。上載圧が $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ 以下の小さい範囲では、上載圧の増加に伴うセカントアングルの減少は大きく、 $\phi_s = 80 \sim 40^\circ$ 程度まで強度が低下する傾向を示した。しかし、それ以上の上載圧下での強度低下は小さくなり、 $\sigma = 50 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ の範囲で $\phi_s = 40 \sim 35^\circ$ 程度の減少に留まった。また初期密度の影響は、上載圧 $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ 以下の低拘束圧でよく表れることも確認できる。これらは前述の図-4.5～4.8の結果とよく対応しており、拘束圧の異なる廃棄物の強度特性を評価する上で、セカントアングルによる評価の有用性は高いと判断できる。

次に、Hvorslev の規準により廃棄物の強度特性を考察した。Hvorslev の規準では、初期状態から圧縮及び破壊に至るまでの体積変化の経路に関係なく、破壊時の密度が同一のものを同破壊規準上で評価し、強度定数 (有効粘着力 c_e 、有効摩擦角 ϕ_e) を算定する²⁸⁾。実用性には乏しいが、初期密度ではなく破壊時の密度を基準とした破壊規準であるため、圧縮・せん断・強度特性に大

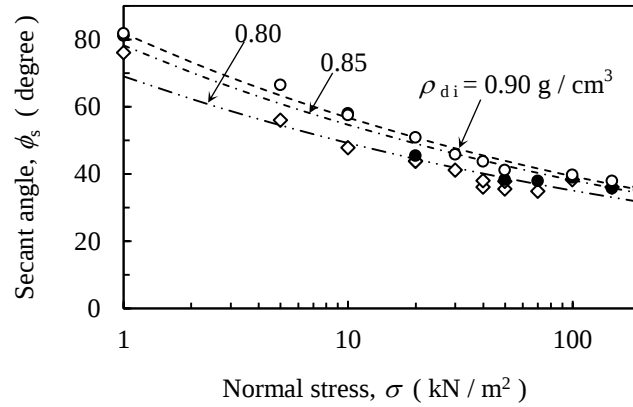


図-4.11 セカントアングルと上載圧の関係

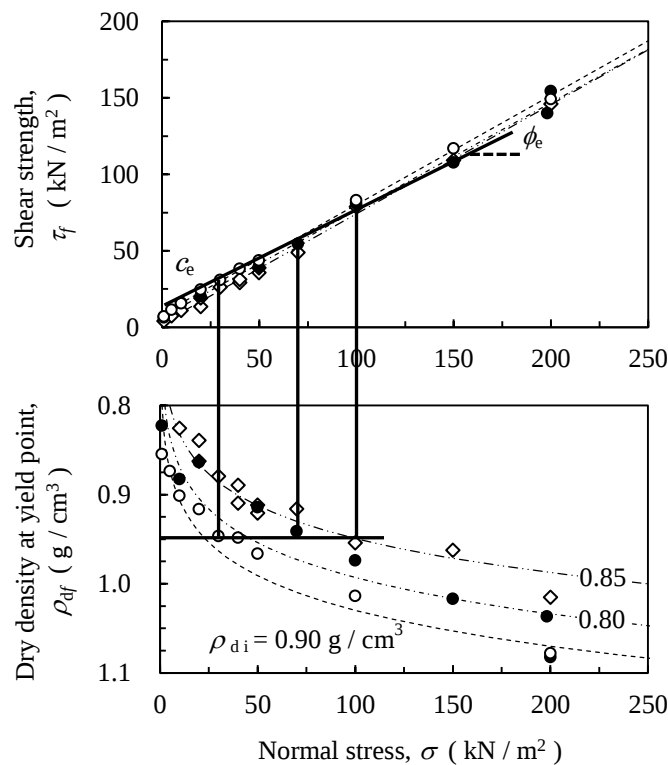


図-4.12 破壊時の応力状態と乾燥密度の関係

きな拘束圧依存性を示す廃棄物に適する評価方法であると考えられる。

破壊時の乾燥密度が同一の条件でのせん断強度と上載圧の関係を算定するために、まず図-4.12に破壊時の応力状態と乾燥密度の関係を整理した。図の実線に示すように、破壊時の乾燥密度が同等となるせん断強度と上載圧を選定し、せん断強度と上載圧の関係を描いてせん断強度定数を算定する。算定結果として、破壊時の乾燥密度と有効粘着力・有効摩擦角の関係を図-4.13に示した。参考として初期乾燥密度と Coulomb の規準 (上載圧 $\sigma = 5 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ の範囲で算定) による粘着力・内部摩擦角の関係も合わせて示している。Coulomb の規準では初期密度の違いによらずに内部摩擦角は $\phi = 37^\circ$ 程度の一定値を示し、粘着力のみ 5 kN/m^2 程度増加した。しかし

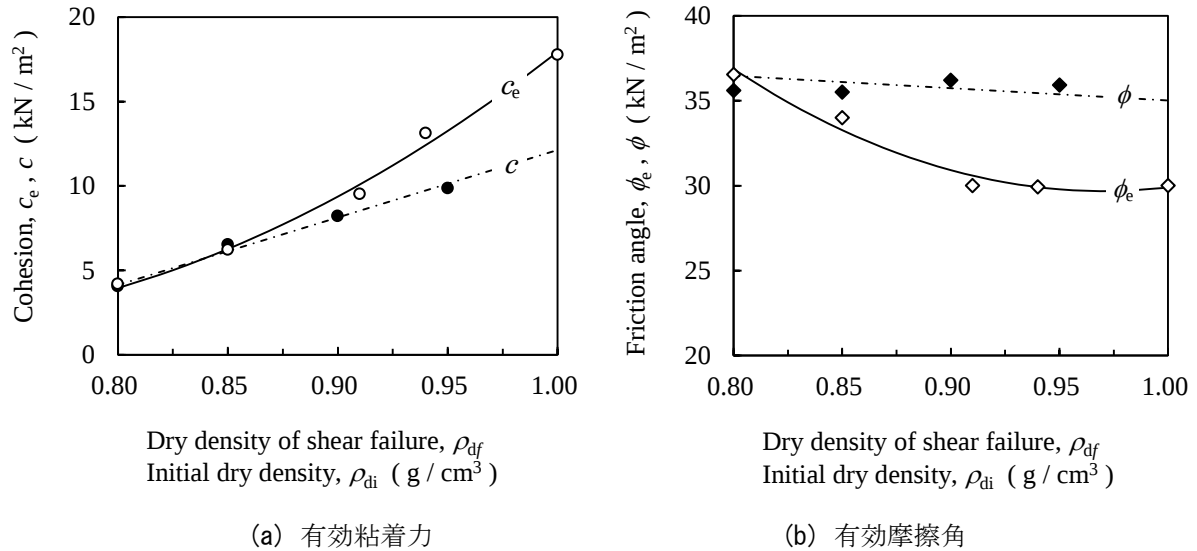


図-4.13 Hvorslev の規準により算定した強度定数と破壊時の乾燥密度の関係

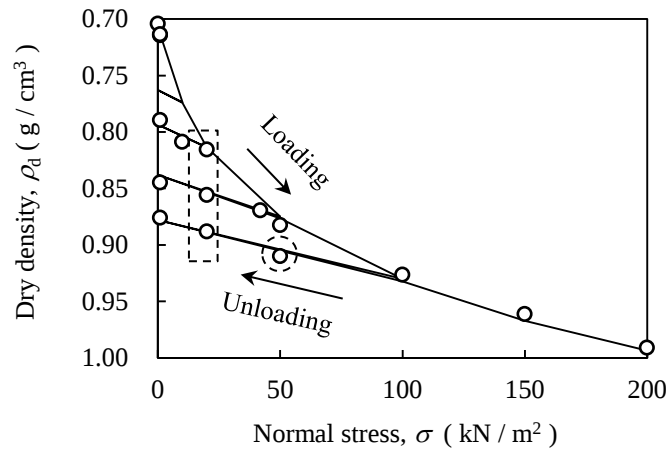


図-4.14 圧縮過程で与えた応力履歴，乾燥密度と上載圧の関係

Hvorslev の規準では，破壊時の乾燥密度が増加することで有効摩擦角は 7° 程度減少し，有効粘着力は 10 kN/m^2 以上増加する傾向を示した．これは拘束圧に応じて密度が増加することで，繊維廃材と粒状廃材の噛み合わせが強くなり，繊維廃材の引張変形が卓越し，補強効果のような影響が表れたためと考えられる．破壊時の密度を基準とした評価を行うことで，その補強効果の影響が摩擦力の低下と粘着力の増加という形で現れることが確認された．

4.4.3 応力履歴の影響

せん断前の圧縮過程において，除荷や再載荷を行うことにより供試体に所定の応力履歴を与え，その履歴の違いがせん断特性に及ぼす影響を明らかにした．ここでは，廃棄物の含水比を 20% で一定とし，締固め等を行わずに初期乾燥密度 $\rho_{di} = 0.70 \text{ g/cm}^3$ として供試体を作製した．まず，圧縮過程において応力履歴を与えた状態の乾燥密度 ρ_d と上載圧 σ の関係を図-4.14 に示した．

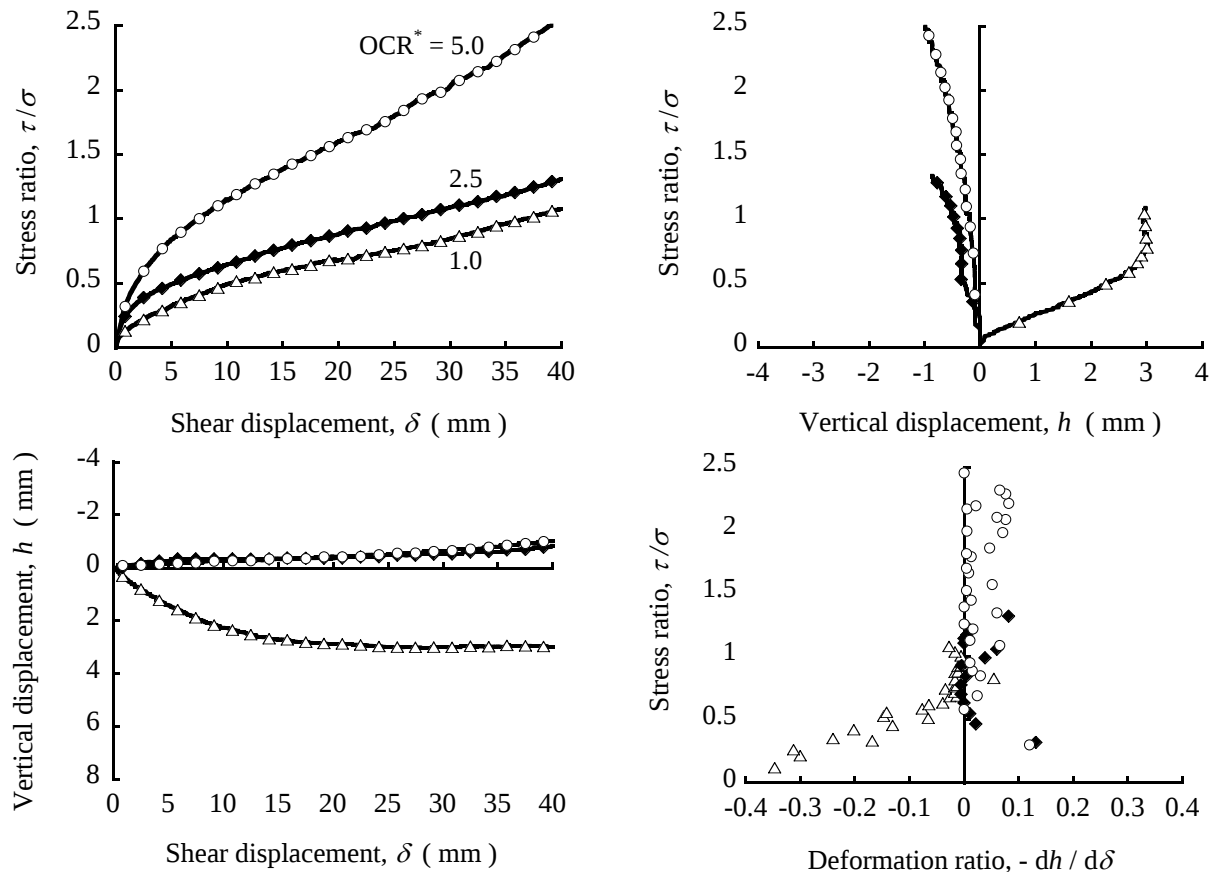


図-4.15 応力履歴がせん断特性に与える影響 ($\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$)
($\tau/\sigma - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

ここでは、載荷のみから得られる状態を「正規圧縮状態」、除荷・再載荷過程で得られる状態を「過圧縮状態」と定義し、過圧縮状態において最大の履歴を受けていた応力を「先行圧縮応力 σ_c^* 」と定義した。今回の試験では $\sigma_c^* = 20, 50, 100 \text{ kN/m}^2$ で圧縮を行い、適宜除荷・再載荷を行っている。また、応力履歴の違いを、現時点で受けている応力と先行圧縮応力を用いて「過圧縮比 $OCR^* (= \sigma_c^* / \sigma)$ 」で表現するものとし、図-4.14 にプロット点で示した状態にある廃棄物を、上載圧一定の条件でせん断することで、応力履歴の影響を把握した。例えば、図-4.14 の丸破線で囲ったプロット点では、初期状態から上載圧 $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ まで載荷を行い、 $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ まで上載圧を除荷した後にせん断を行っている。結果の一例として、 $OCR^* = 1.0, 2.5, 5.0$ の3条件 (図-4.14 の四角破線で囲ったプロット点) について、応力履歴を与えた後に、上載圧 $\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$ でせん断を行った結果を比較するものとし、図-4.15 に OCR^* の異なる廃棄物のせん断特性を示した。本図では、応力比とせん断変位の関係、応力比と垂直変位の関係、垂直変位とせん断変位の関係、応力比と変形比の関係をまとめて整理している。

図-4.15より、せん断応力とせん断変位の関係では、 OCR^* の増加に伴って応力比が増加する傾向にあり、特に $OCR^* = 5.0$ の条件では、明確なピーク強度を示さずに靱性が増加するような傾向

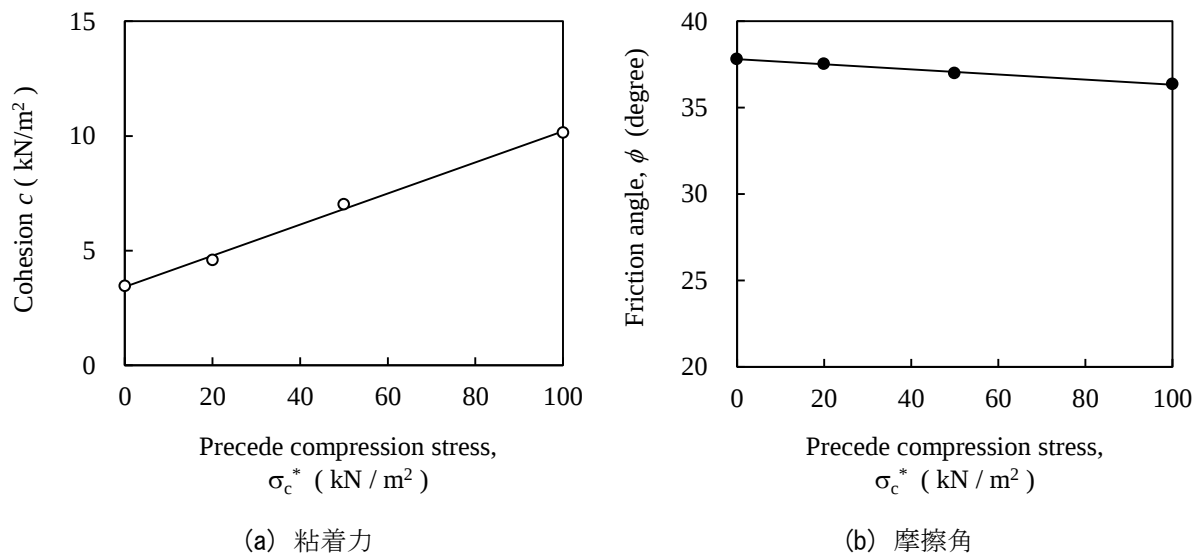


図-4.16 Coulomb の規準により算定した強度定数と先行圧縮応力の関係

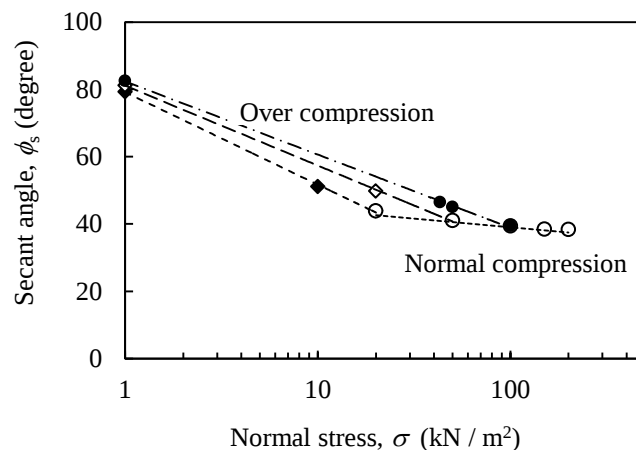


図-4.17 応力履歴の異なる条件でのセカントアングルと上載圧の関係

が認められた。次に、応力比と垂直変位の関係では、 OCR^* が大きくなるに従って、圧縮性の卓越した特性から、膨張性の卓越したものへと変化する傾向が認められた。これらより、応力比と変形比の関係では、 $OCR^* = 1.0$ の正規圧縮状態の廃棄物では、応力比の増加に伴って変形比も増加していく傾向を示した。しかし、 $OCR^* = 2.5, 5.0$ の過圧縮状態では、応力比が増加すると変形比は一定値に収束する傾向が認められた。このような傾向は粒状材料にはみられない傾向であり²⁹⁾、せん断変形が大きい範囲において、応力増分や変形増分に依存しない弾性的な挙動が卓越したといえる。これより、 OCR^* が大きくなることで、繊維廃材と粒状廃材の噛み合わせや相互作用が強くなり、繊維廃材の補強効果が顕著に発揮されたと考える。

次に、応力履歴が強度特性に及ぼす影響を把握するために、まず Coulomb の規準により算定した強度定数と先行圧縮応力との関係を図-4.16に示した。本図では、図-4.14に示している一連

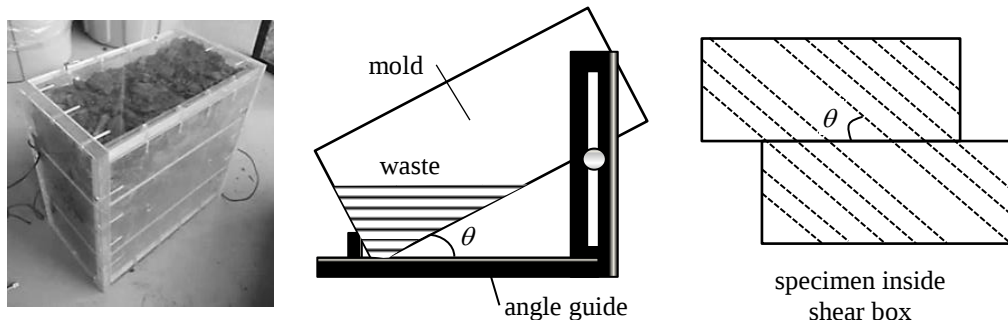


図-4.18 廃棄物の配向方向を規定するために使用したモールドとアングルガイド

の除荷・再載荷過程におけるせん断応力により強度定数を算定しており，先行圧縮応力を基準として，それ以上の上載圧では正規圧縮状態でのせん断応力を，それ以下の上載圧では過圧縮状態でのせん断応力を用いて強度定数を算定した結果を表している．つまり，横軸の先行圧縮応力が大きい条件程，過圧縮比の大きい条件を含んだ強度定数を意味していることになる．また除荷過程のない正規圧縮状態のみの強度定数は $\sigma_c^* = 0 \text{ kN/m}^2$ とした．結果より，先行圧縮応力が増加するほど，粘着力が増加していき，内部摩擦角は減少する傾向にあることが確認される．これは，先のせん断特性にも認められたように，過圧縮状態の方が正規圧縮状態に比べて繊維廃材の影響が大きいためであり，先ほどの Hvorslev の規準による有効粘着力と有効摩擦角の関係にみられたように，繊維廃材の補強効果の影響が粘着力の増加と摩擦角の減少に表れたものと考えられる．

次に，図-4.14に示した各プロット点における，セカントアングルと上載圧の関係を図-4.17に整理した．本図より，上載圧が同等の場合にも，過圧縮比が大きくなる条件においてセカントアングルも大きくなることが確認される．また，過圧縮領域では，先行圧縮応力に到達するまでは線形的にセカントアングルが減少する傾向を示し，正規圧縮領域ではセカントアングルの減少傾向が緩やかになる傾向が認められた．過圧縮比が増加して繊維廃材の変形性が増加することによって，摩擦特性を表すセカントアングルは急激に減少する傾向を示したものと考えられる．以上の結果より，応力履歴に依存して繊維廃材の変形性が変化する可能性が示唆されており，実地盤における廃棄物の投棄や除去の影響を適切に評価することの重要性が確認された．

4.4.4 繊維廃材の配向性の影響

廃棄物を構成している廃材の中には，繊維廃材に代表されるように，扁平な材料も多く混入している．このような材料では，第2章や第3章で論じた繊維-粒子複合材料のように，構成材料の形状に依存して力学的な異方性を持つことが知られている^{30), 31), 32)}．そのためここでは，特に繊維廃材に着目し，その配向角度の違いがせん断特性に及ぼす影響を検証した．供試体は，含水比 $w = 20\%$ ，初期乾燥密度 $\rho_{di} = 0.80 \text{ g/cm}^3$ として，図-4.18に示すようなモールドとアングルガイドを用いて，繊維廃材の配向方向とせん断面のなす角度 α が $\alpha = 0, 30, 45, 60, 90^\circ$ となるように作

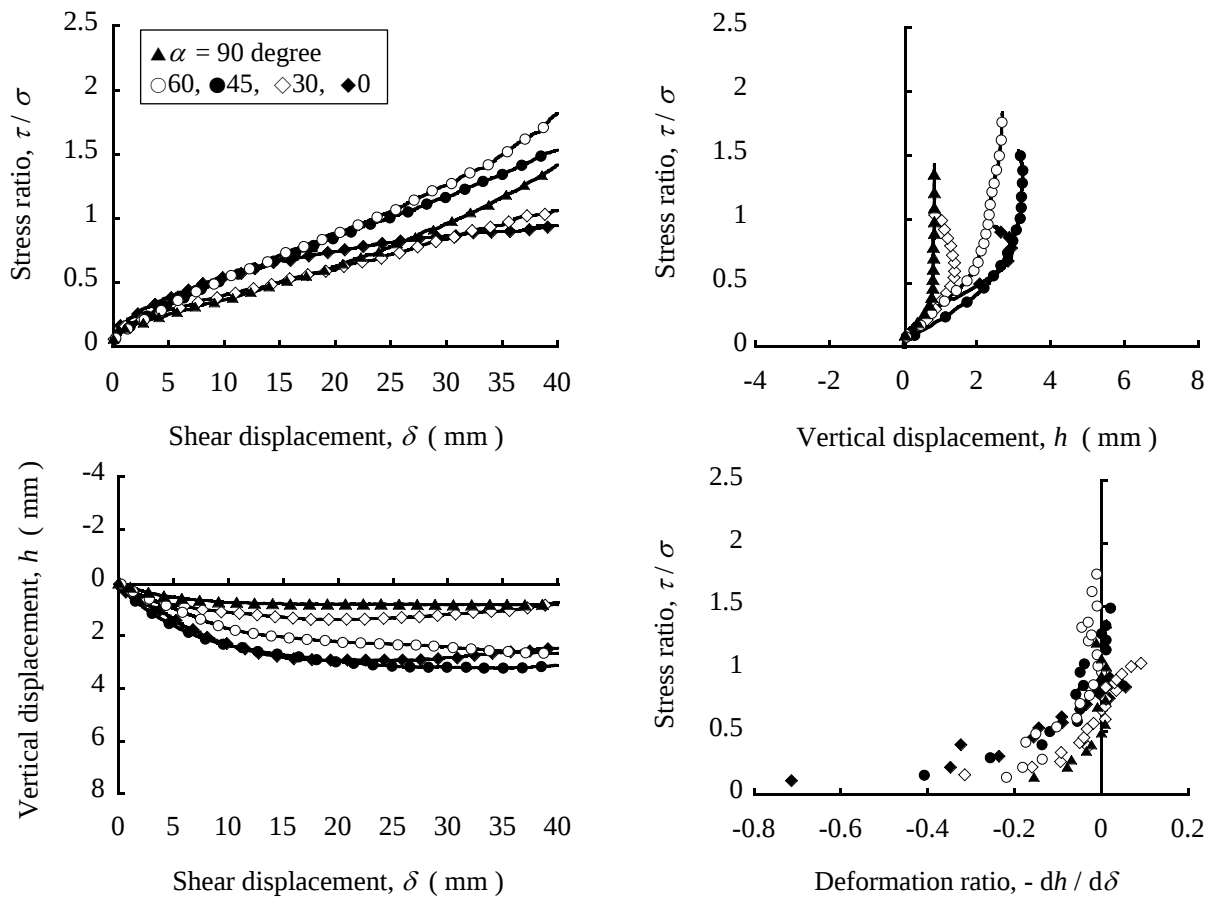


図-4.19 繊維廃材の配向性がせん断特性に与える影響 ($\sigma = 20 \text{ kN/m}^2$)
($\tau/\sigma - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

製した。モールドはせん断箱と同サイズ (幅30 cm, 奥行30 cm, 高さ15 cm) であり, アングルガイドによって角度 α 傾いた状態のモールド内に廃棄物を投入して締固めることで, 廃棄物の配向方向を調整した供試体を作製できるものとなっている。結果より, 図-4.19に上載圧 $\sigma = 25 \text{ kN/m}^2$ 条件での, 応力比とせん断変位の関係, 応力比と垂直変位の関係, 垂直変位とせん断変位の関係, 応力比と変形比の関係をまとめて整理した。応力比とせん断変位の関係より, 角度 α が大きくなることで, 応力比が線形的に増加する傾向を示すようになり, 繊維廃材による補強効果が顕著に発揮されることが明らかになった。ここで, せん断変位 $\delta = 35 \text{ mm}$ での応力比を $\alpha = 0^\circ$ の応力比で正規化した値と角度 α の関係を表した図-4.20からも明らかのように, 角度 $\alpha = 60^\circ$ の条件で応力比が最も大きくなり, 角度 $\alpha = 0^\circ$ の場合と比べて 1.5 倍以上の補強効果が発揮されていることが確認される。また, 応力比と変形比の関係では, 先の応力履歴が大きい場合と同様に, 角度 $\alpha = 30, 45, 60, 90^\circ$ の条件について, 変形比が一定値に収束している傾向が認められ, 繊維廃材の影響により弾力的な挙動が卓越していることが確認できる。以上の結果より, 繊維廃材の配向性に依存した補強効果の異方性が確認され, さらに補強効果が顕著に発揮される条件における挙動は, 繊維-粒子複合材料のそれと似通った傾向を示すことが明らかになった。

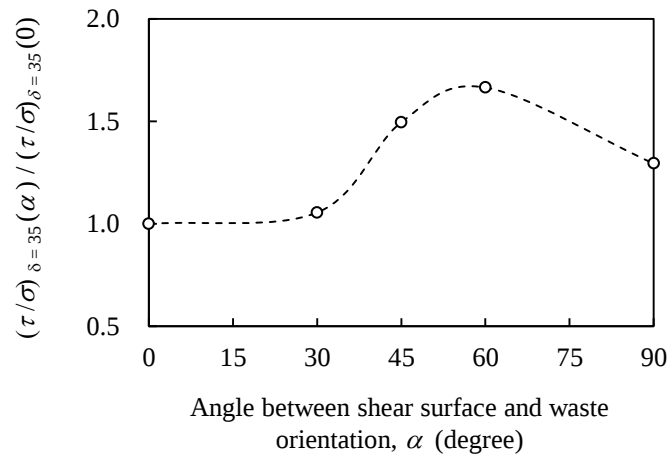


図-4.20 正規化した応力比($\delta = 35$ mm)と繊維廃材の配向角度の関係

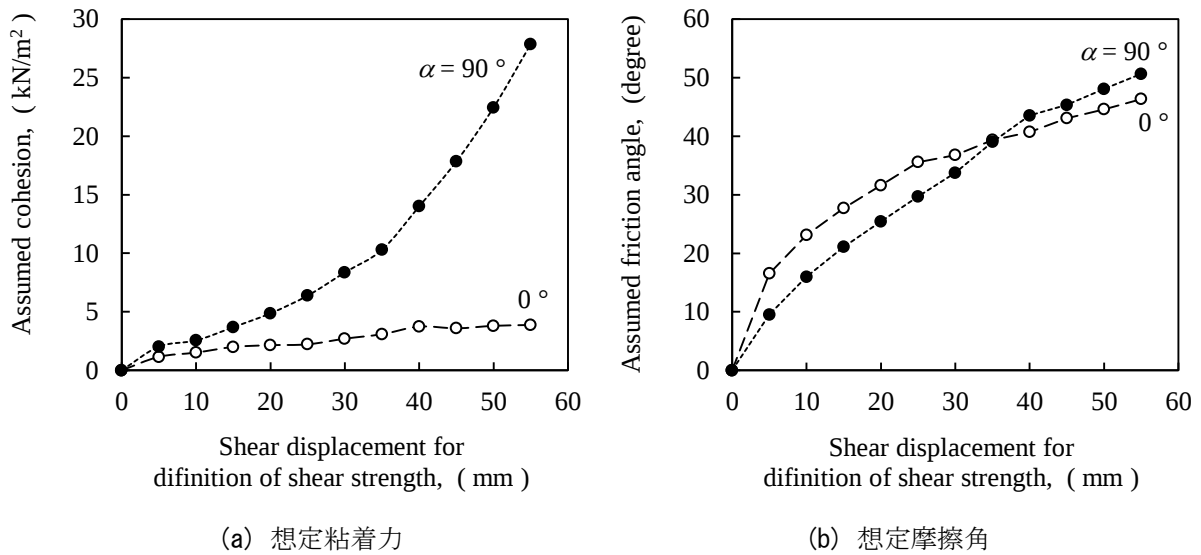


図-4.21 繊維廃材の配向性がせん断特性に与える影響 ($\sigma = 20$ kN / m²)

次に、角度 $\alpha = 0, 90^\circ$ の条件に着目して、繊維廃材の配向に依存した異方性の影響が強度特性に与える影響について議論する。まず、Coulomb の規準により算定される強度定数と繊維廃材の配向性の関係を図-4.21に示した。本図の横軸はせん断強度を定義したせん断変位を意味しており、それより算出される強度定数を想定粘着力 c^* ・想定内部摩擦角 ϕ^* と定義して縦軸に表した。例えば、横軸 30 mm でのプロット点はせん断変位 30 mm でのせん断応力をせん断強度と定義して算出した想定粘着力 c^* と想定内部摩擦角 ϕ^* を表している。このような整理をすることで、せん断変位の増加に伴って、粘着成分と摩擦成分のどちらが卓越しているのかを評価できると考えた。

結果より、角度 $\alpha = 0^\circ$ の場合には、せん断変位の増加に伴って想定粘着力 c^* と想定内部摩擦角 ϕ^* 共に一定値に収束していく傾向が認められた。しかし、角度 $\alpha = 90^\circ$ の場合には、角度 $\alpha = 0^\circ$ と比べて想定内部摩擦角 ϕ^* は変わらないものの、想定粘着力 c^* は収束せずに終始増加し続け

る傾向を示しており、せん断変位の増加に伴って粘着成分が急激に増加することが理解できる。これまでの強度特性に関する結果と同様に、繊維廃材の変形性が増加し補強効果が卓越する条件においては、強度特性において粘着力が増加する傾向にあることが確認された。

以上に示した室内一面せん断試験の結果より、廃棄物に繊維廃材が多量に含まれている影響として、低拘束圧下において急激な密度増加を示し、高拘束圧下では応力比が減少する傾向にあること、さらにこのような拘束圧依存性によって低拘束圧下で初期密度の影響が顕著になることが明らかになった。またこれにより、拘束圧の影響を考慮できるセカントアングルや Hvorslev の規準による強度評価が適していることを確認した。次に、繊維廃材の影響によって補強効果が発揮される条件としては、応力履歴によって過圧縮比が大きくなることで粒状廃材と繊維廃材の相互作用が大きくなる場合や、繊維廃材の配向がせん断面よりも大きくなることで繊維材料の引張挙動が卓越する場合などが考えられた。またこの際には、応力比の増加や靱性の増加、弾性的な挙動の発現などの影響が表れることが明らかになった。さらに強度特性については、粘着成分の増加と摩擦成分の減少という形で繊維廃材の補強効果の影響が表れることを確認した。以上より、様々な材料を含む廃棄物においても、要素レベルでの挙動を把握する場合には、土質力学をベースとした変形・強度特性の評価が適用できると考える。しかし、適切な評価を行う上で、繊維廃材を多量に含んでいることによる影響を十分に考慮する必要することが重要であるといえる。

4.5 組成割合の異なる埋立廃棄物の原位置せん断特性

本節では、前述の表-4.3に示した、国内の不法投棄等現場 2 ヶ所、海外の埋立処分場 2 ヶ所の計 4 ヶ所の廃棄物地盤で実施した原位置一面せん断試験の結果を示し、廃棄物の原位置せん断強度特性を議論する。また原位置実験結果と室内実験結果との比較も行い、原位置試験の重要性を考察した。特にここでは、繊維廃材の含有率や挙動に着目して変形・強度特性を考察することにより、組成割合の異なる廃棄物を比較・検討する上での重要な知見の提示を目指した。

4.5.1 原位置せん断特性

廃棄物地盤 4 ヶ所で実施した原位置一面せん断試験の実験条件とその結果は、表-4.4に示す通りであり、各廃棄物地盤において異なる上載圧 3 条件下で実験を行った。まず、図-4.22~4.25 に Site A ~ D におけるそれぞれの原位置せん断特性を示した。本図では、せん断応力 τ とせん断変位 δ の関係、応力比 τ/σ と垂直変位 h の関係、垂直変位 h とせん断変位 δ の関係、応力比 τ/σ と変形比 $-dh/d\delta$ の関係をまとめて整理している。

表-4.4 原位置一面せん断試験の実験条件と結果

Site	Normal stress, σ (kN / m^2)	Shear strength, τ_f (kN / m^2)	Cohesion, c (kN / m^2)	Friction angle, ϕ (degrees)	Secant angle, ϕ_s (degrees)
A	8.2	14.5	3.9	50.6	60.6
	13.6	19.0			54.3
	19.1	27.8			53.0
B	8.2	11.8	2.9	46.2	55.4
	13.6	16.4			50.2
	19.1	23.2			50.6
C	7.5	10.5	3.5	42.5	54.4
	13.6	15.7			48.9
	19.1	21.1			47.8
D	7.5	10.7	6.0	32.6	54.9
	16.9	17.0			45.2
	22.3	20.2			42.1

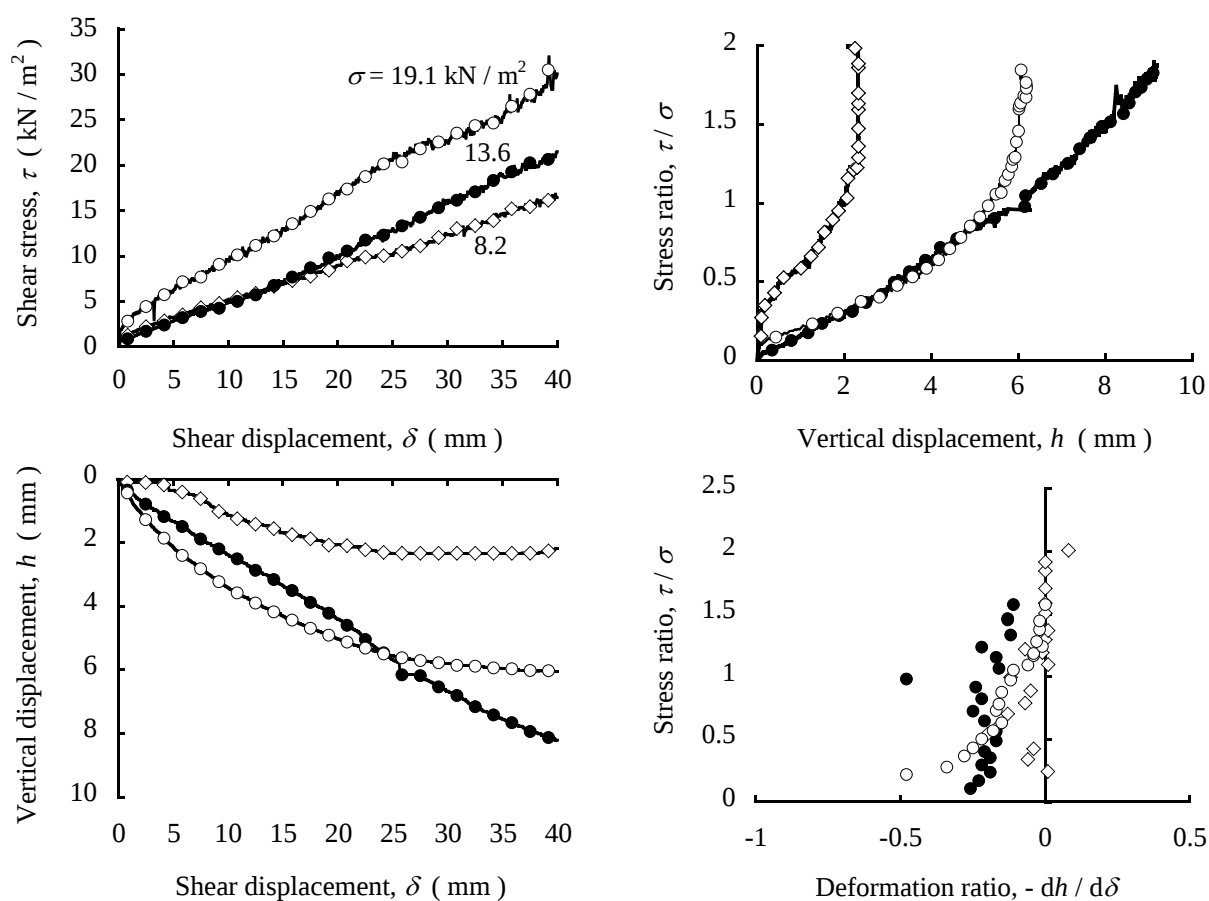


図-4.22 Site A 廃棄物の原位置せん断特性
($\tau - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

まず、せん断応力とせん断変位の関係より、すべての廃棄物で、せん断変位の増加に伴いせん断応力が線形的に増加し、せん断変位 40 mm 以内でのせん断応力のピーク値や限界状態等の収

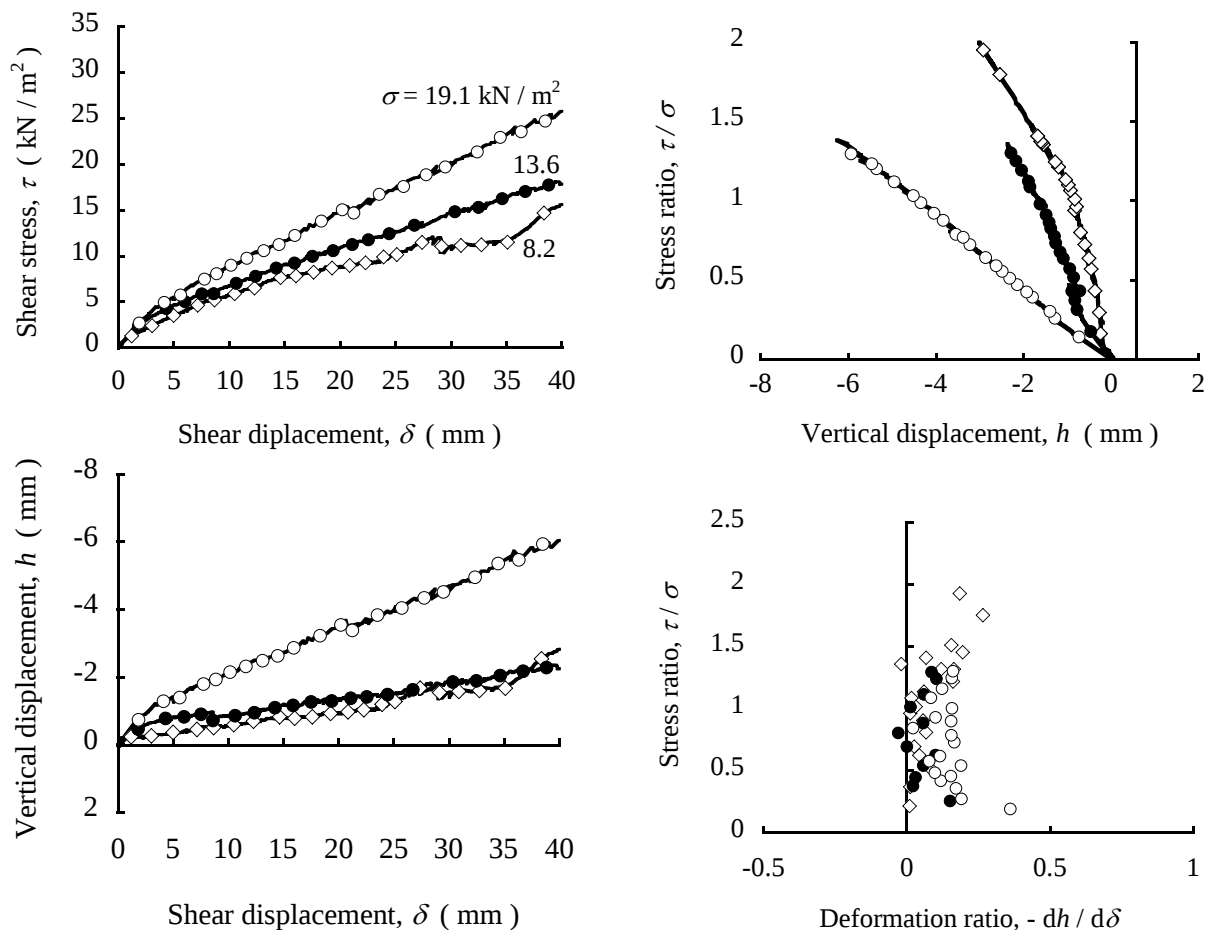


図-4.23 Site B 廃棄物の原位置せん断特性
($\tau - \delta$ 関係, $\tau / \sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau / \sigma - dh / d\delta$ 関係)

束値は存在しないことが確認される。これはせん断変位の増加に伴ってせん断応力の増加率が減少していく粒状材料の一般的な弾塑性挙動とは大きく異なっているといえる。このような特性は、既往の研究成果にも認められており、繊維廃材の引張変形による補強効果が発揮され、このような延性的な挙動が卓越したと考えられる。

次に、応力比と垂直変位の関係では、繊維廃材含有率に依存して挙動が変化する傾向が認められた。最も繊維廃材含有率の小さい Site A の結果では、体積が収縮しながら応力比が増加していく傾向が認められ、徐々に体積変化は一定値に収束し、応力比のみが増加していく特性を示した。しかし一方で、繊維廃材含有率の大きい他の Site B ~ D の結果では、体積の膨張によって応力比が増加していく特性を示しており、体積変化に収束する傾向は認められなかった。

同様に、垂直変位とせん断変位の関係においても、繊維廃材含有率に応じて変形経路が変化していることが確認できる。繊維廃材含有率の小さい Site A では、せん断変形の増加に伴って体積が収縮する傾向を示している。これは、先のせん断応力とせん断変位の関係においてピーク値や限界状態を示さないことを考えれば粒状材料と同様の傾向であるといえる。しかし、繊維廃材含

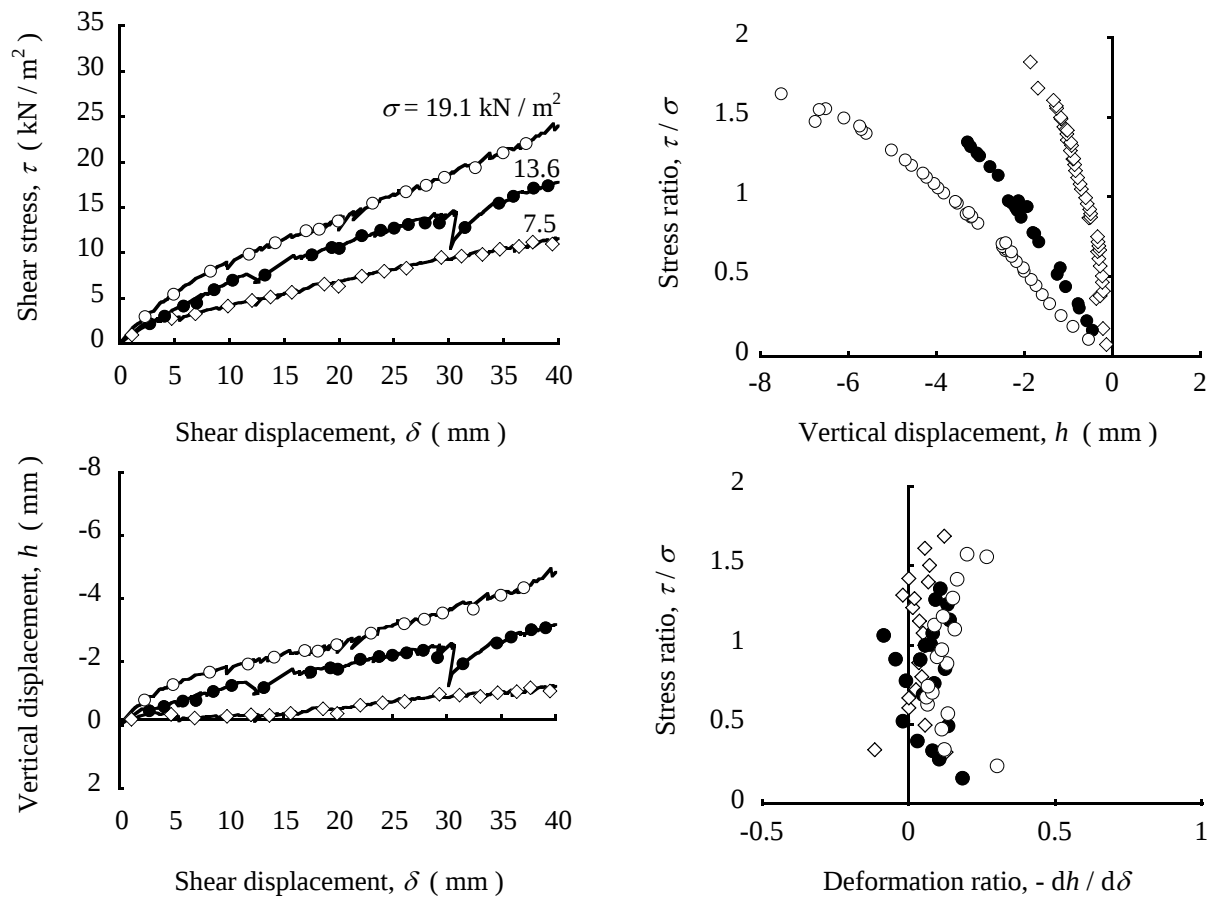


図-4.24 Site C 廃棄物の原位置せん断特性
($\tau - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

有率の大きい他の Site B～D の結果では、せん断初期から終始体積が膨張する特性を示しており、さらに上載圧が大きいほど体積膨張が大きくなるようであった。このような体積変化挙動は、粒状材料にはみられないものであり、繊維廃材の影響が卓越した廃棄物特有のものと考えられた。

さらに、応力比と変形比の関係では、繊維廃材含有率の小さい Site A では応力比の増加に伴って変形比が増加していく傾向を示し、繊維廃材含有率の大きい他の Site B～D では応力比の増加に伴って変形比が減少していく傾向を示した。しかし、応力比がある程度まで増加すると、繊維廃材含有率に関わらず、変形比は一定値に収束していることが確認できる。これより、繊維廃材含有率の大きさに応じた廃棄物の応力比と変形比の関係を模式的に表現すると図-4.26のようになると考えられ、せん断初期においては繊維廃材含有率に応じて体積が変化する方向（収縮側・膨張側）が異なる傾向を示し、せん断変形が大きくなると繊維廃材含有率によらずに応力増分や変形増分に依存しない弾性的な挙動が卓越する特性を有すると考えられた。

以上より、組成割合の異なる廃棄物の原位置せん断特性を把握したところ、繊維廃材による影響によって、せん断応力が線形的に増加してピーク強度を示さない延性的な挙動を示すことや、せん断変形が大きい領域では弾性的な挙動が卓越することが明らかになった。また繊維廃材含有

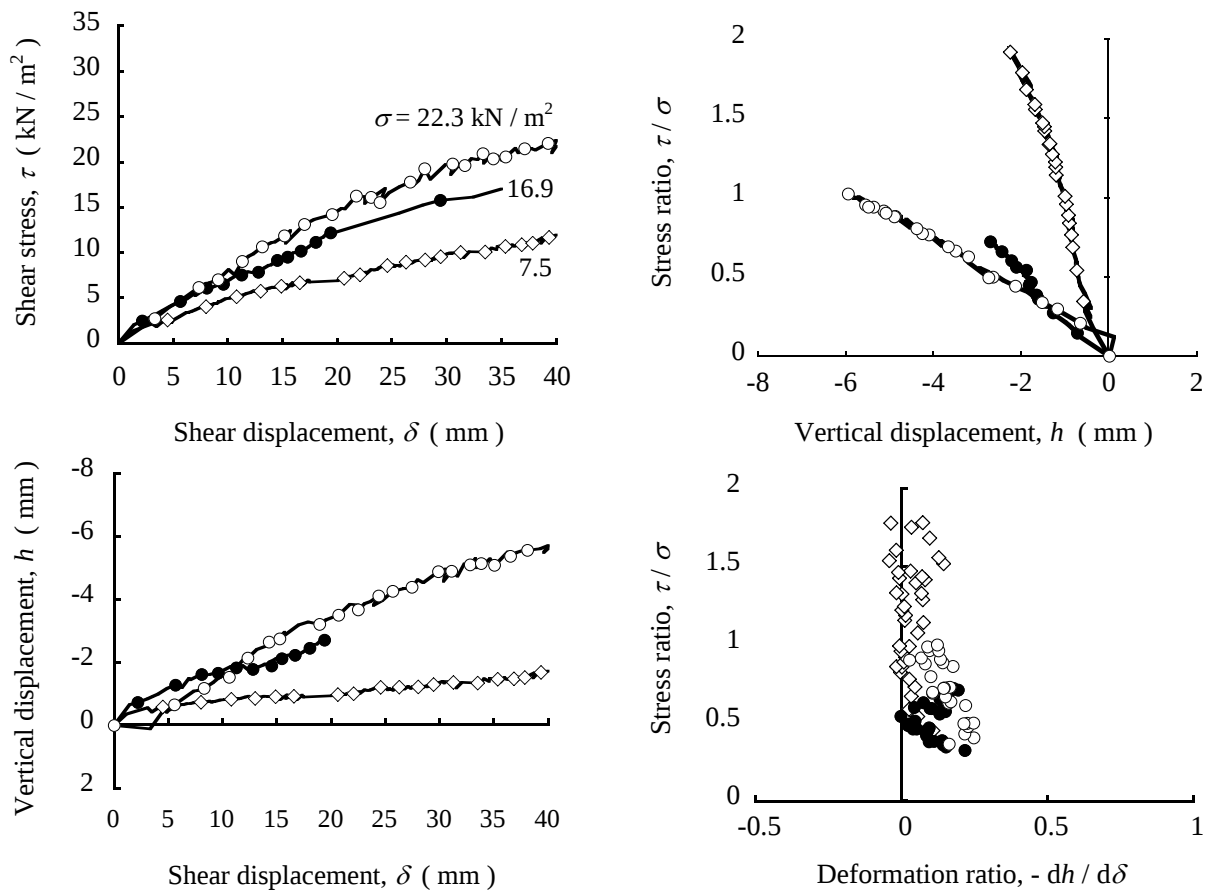


図-4.25 Site D 廃棄物の原位置せん断特性
($\tau - \delta$ 関係, $\tau / \sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau / \sigma - dh / d\delta$ 関係)

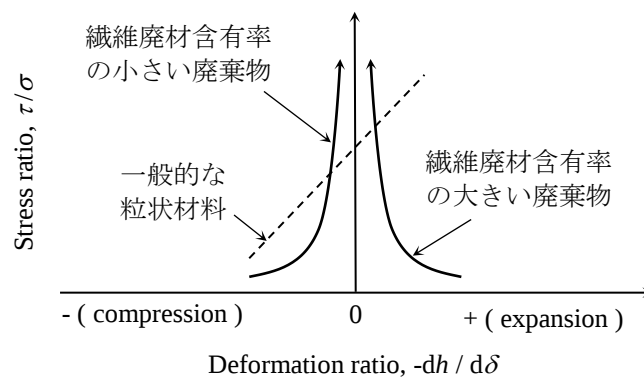


図-4.26 原位置せん断特性における応力比と変形の関係(模式図)

率の影響は、特に体積変化挙動に表れるようであり、繊維廃材含有率の大きい廃棄物では、せん断変形に伴って体積が膨張する特性を有することが明らかになった。

これらの特性は、先の節で紹介した室内実験結果と比較すると、繊維廃材による補強効果などに似通っている部分も認められた。しかし、せん断に伴って体積が膨張する特性などは過圧縮状態でしか認められておらず、堆積構造が乱されたことによる影響は大きいと考えられる。そこで、

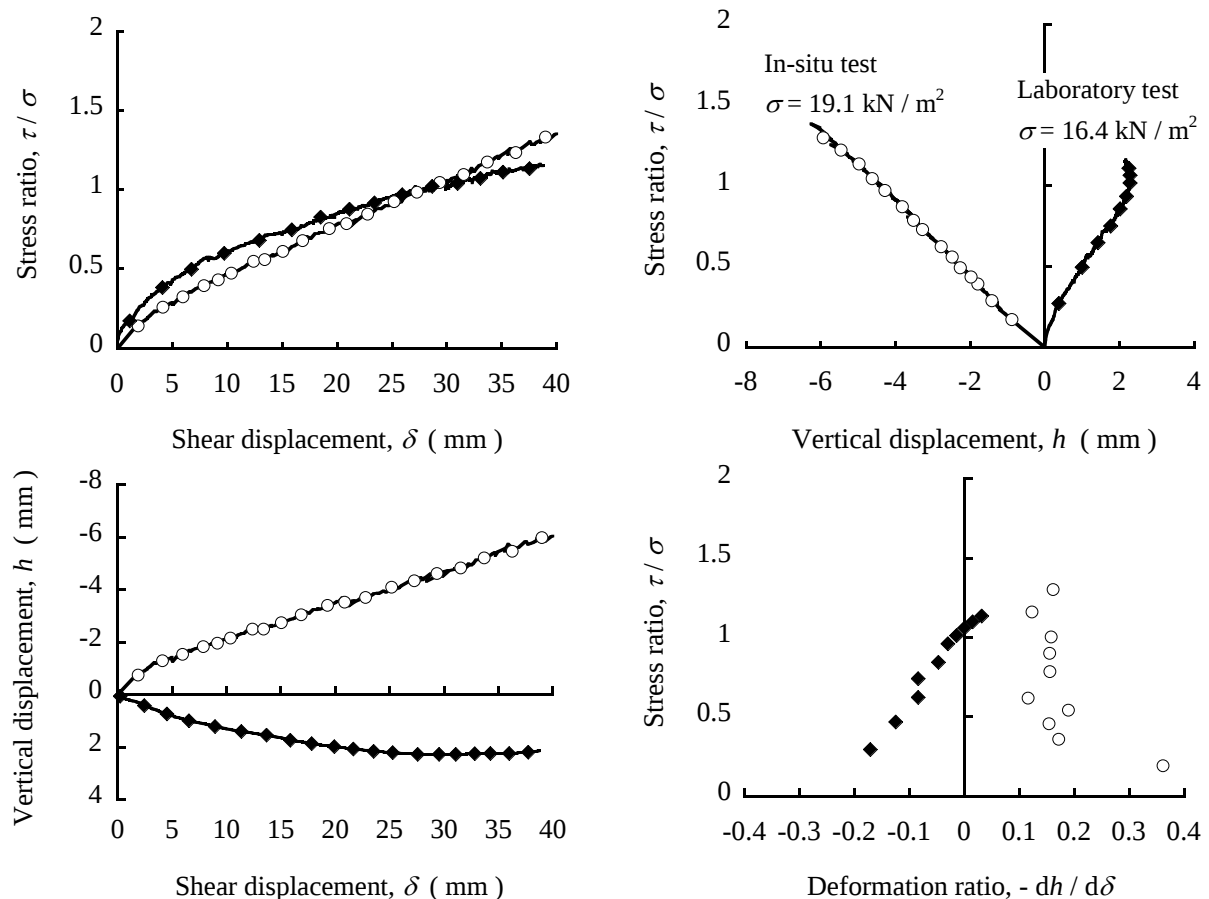


図-4.27 原位置実験と室内実験のせん断特性の比較(Site B 廃棄物)
($\tau/\sigma - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - h$ 関係, $h - \delta$ 関係, $\tau/\sigma - dh/d\delta$ 関係)

以下では, Site B で実際に原位置実験を行った廃棄物を採取して室内に持ち帰り, 密度や含水比, 上載圧を原位置実験と同程度に調整して室内実験を実施した. これより, 原位置実験結果との比較を行うことで, 原位置実験の重要性和室内実験の再現性を検証した.

4.5.2 原位置実験と室内実験の比較

ここでは, 前述のように, Site B における原位置実験終了後にせん断箱内の廃棄物を持ち帰り, 室内において原位置と同様の含水比 $w = 30.5\%$, 湿潤密度 $\rho_t = 1.20 \text{ g/cm}^3$, になるように供試体を作製し, 上載圧 $\sigma = 5, 10, 16 \text{ kN/m}^2$ の 3 条件下で実験を実施した. 室内実験と原位置実験の結果の比較を行うことで, 堆積構造が乱れることによる影響を検証した.

図-4.27に上載圧 1 種類での原位置と室内での実験結果を比較した. 本図では, 応力比とせん断変位の関係, 応力比と垂直変位の関係, 垂直変位とせん断変位の関係, 応力比と変形比の関係をまとめて示している. 原位置実験と室内実験の結果を比較すると, 応力比とせん断変位の関係では, 両者共に明確なピーク値は認められず, 応力比の値についても大きな差はない. せん断強度と上載圧の関係を比較した図-4.28からも, ほぼ同等の強度定数が得られることが確認される.

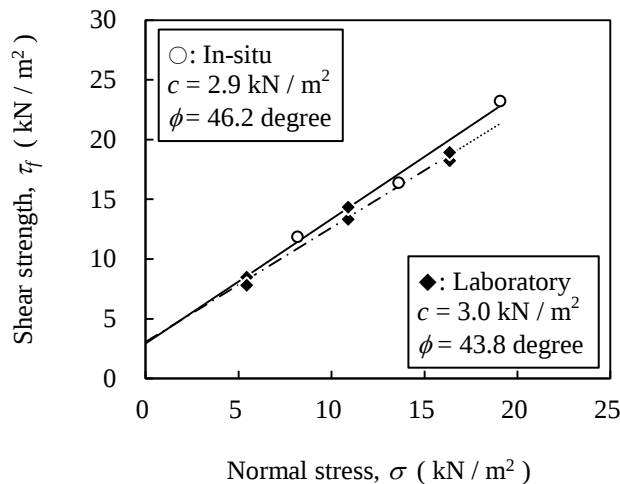


図-4.28 原位置実験と室内実験のせん断強度の比較(Site B 廃棄物)

しかし、原位置試験では応力比が線形的に増加するのに対して、室内試験ではなだらかに応力比は増加し、その接線勾配はせん断変位の増加に伴って減少する傾向が認められた。さらに応力比と垂直変位の関係では、原位置試験ではせん断に伴って体積膨張を示すのに対して、室内試験では体積収縮する特性がみられた。垂直変位とせん断変位の関係でも、両者の変形経路に同様の違いが認められ、応力比と変形比の関係は、原位置試験では応力比の増加に伴って変形比が一定値に収束するのに対して、室内試験では体積は収縮から膨張へと移行していく特性を示している。

ここで、原位置と室内でこのような変形特性の違いが表れた理由を、先の節の室内実験結果を元に考察すると以下のことが考えられた。(1) 原位置では実験場所の確保のために、少し地盤を掘削してから供試体を作製しているため、応力履歴の影響により応力増加の線形性や体積膨張などの特性がみられた。(2) 室内において供試体を作製する際には、上載圧を載荷して締固めを行っているため、繊維廃材がせん断面と水平に堆積している可能性が高く、これにより応力増加の非線形が卓越した。実際、応力履歴や繊維廃材の配向性の影響を検証した室内結果からは、原位置結果と似通った特性も認められており、これらの影響が卓越していることによって原位置せん断特性には繊維廃材の影響が顕著に発揮されたと考えられる。

以上の結果から、試料を攪乱することによる影響は変形特性に顕著に表れることが明らかになった。これより、廃棄物地盤の安定性を論じる場合には、室内試験の結果を代用することで十分なように判断できる。しかし、変形特性を議論する場合には、原位置でのせん断特性も合わせて把握しておくことが重要であると考える。

4.5.3 原位置せん断強度

廃棄物地盤 4 ヲ所での原位置一面せん断試験結果より、原位置せん断強度の評価を行った。さらに、繊維廃材含有率に着目してせん断強度を整理することで、繊維廃材が強度特性に与える影

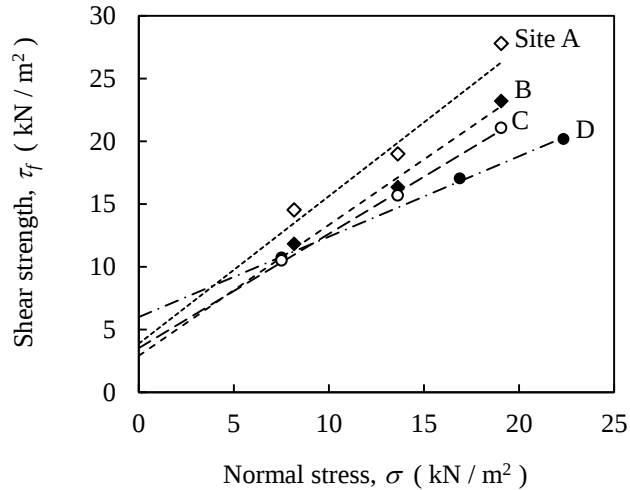


図-4.29 原位置せん断強度と上載圧の関係

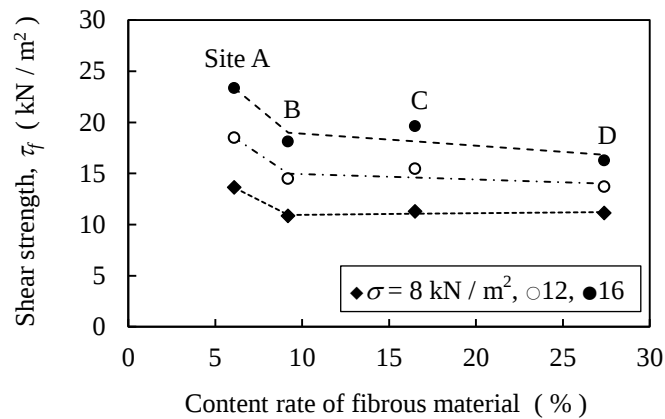
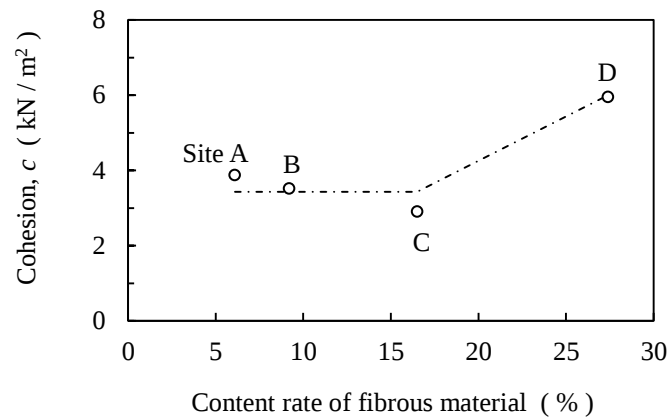


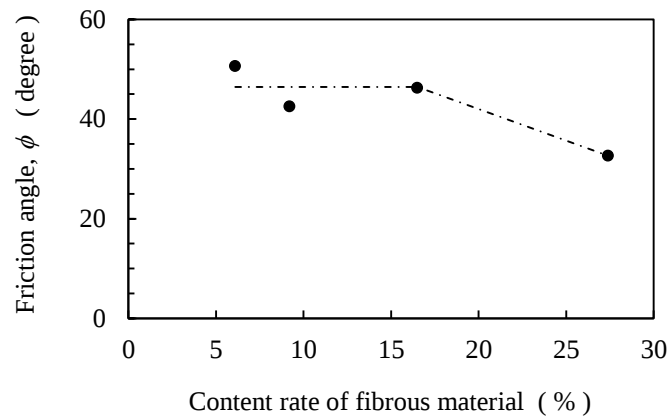
図-4.30 原位置せん断強度と繊維廃材含有率の関係

響を中心に考察を加えた。まず、全廃棄物地盤における原位置せん断強度と上載圧の関係を図-4.29に整理した。原位置実験で求まる拘束圧の小さい範囲でのせん断強度は、全ての廃棄物で、上載圧と比例関係を示すことが確認される。これより、まずはせん断強度と繊維廃材含有率の関係を図-4.30に整理した。本図では上載圧 $\sigma = 8, 12, 16 \text{ kN/m}^2$ の結果を示している。廃棄物の原位置せん断強度は、繊維廃材含有率 6～9% 程度の範囲で急激に減少し、それ以上の含有率ではほぼ同等のせん断強度が発揮される傾向を示すことが確認される。先の原位置せん断特性を示した結果より、繊維廃材含有率が 6% の Site A の廃棄物とそれ以外の Site B～D の廃棄物では、繊維材料の影響により変形特性に違いが表れていたように、繊維廃材含有率が 6% 以上になることの影響が強度特性にも表れることが明らかになった。

また図-4.29より、Coulomb の規準によってせん断強度定数の評価を行い、繊維廃材含有率との関係を図-4.31に整理した。繊維廃材含有率が約 20% 以内の範囲では、繊維廃材の含有率によらず、粘着力 $c = 3.5 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 45.2^\circ$ 程度の一定値を示した。しかし、さらに繊維



(a) 粘着力



(b) 内部摩擦角

図-4.31 Coulomb の規準による原位置強度定数と繊維廃材含有率の関係

廃材含有率が増加すると、内部摩擦角は減少していき、粘着力は増加するような傾向を示した。先の室内試験結果から、応力履歴や繊維廃材の配向性が大きくなると摩擦力が減少して粘着力が増加したように、繊維廃材含有率が増加する場合についても、繊維廃材による影響によって同様の補強効果が発揮されたと考える。

次に、セカントアングルによって原位置せん断強度の評価を行った結果として、セカントアングルと上載圧の関係を図-4.32に示した。原位置せん断強度をセカントアングルによって評価した場合についても、すべての廃棄物で、セカントアングルは上載圧の増加に伴い、減少する傾向がみられた。そこで、図-4.32の上載圧 $\sigma = 8, 12, 16 \text{ kN/m}^2$ におけるセカントアングルを用いて繊維廃材含有率との関係を図-4.33に整理した。せん断強度と繊維廃材含有率の関係と同様に、繊維廃材含有率が 6~9% 程度の間セカントアングルは急激に減少し、それ以上の含有率では、繊維廃材含有率によらず、ほぼ同等のせん断強度を示した。繊維廃材含有率が増加することで、せん断強度自体、もしくはその摩擦成分に関しては、強度低下を示す傾向にあることが確認された。

以上の検討結果より、廃棄物の原位置せん断強度やその強度定数の評価を行う上で、急激に強度特性の変化する繊維廃材含有率が存在することが明らかになった。今回の実験結果では、強度

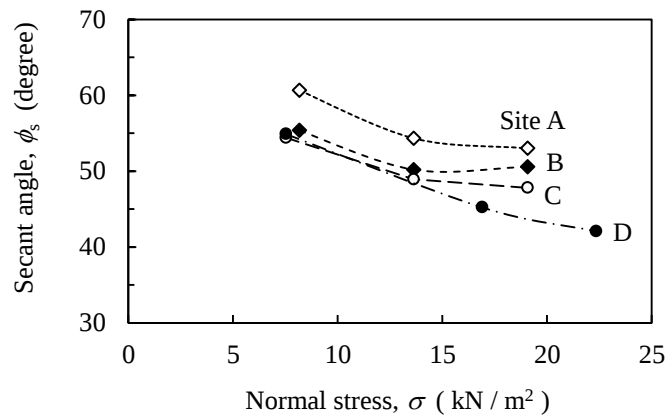


図-4.32 セカントアングルと上載圧の関係

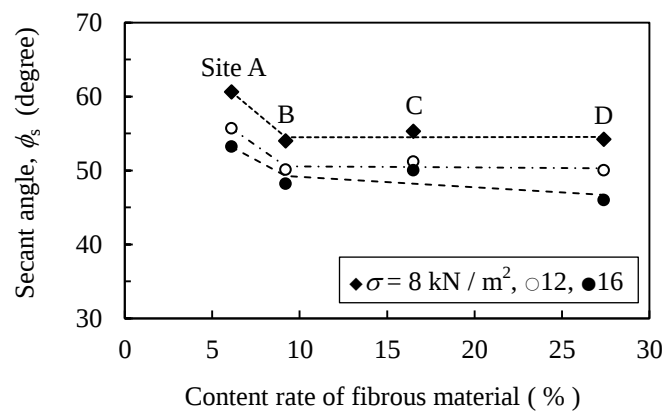


図-4.33 セカントアングルと繊維廃材含有率の関係

定数に変化する明確な閾値を表すデータは得られていないため、さらなるデータの蓄積が必要である。しかし、繊維廃材の含有率に着目することで、組成割合の異なる廃棄物のせん断強度を包括的に評価できる可能性が示唆された。

4.6 本章の要約

本章では、国内不法投棄等現場 2 ヲ所、海外処分場内 2 ヲ所の計 4 ヲ所の廃棄物地盤を対象として、室内と原位置で一面せん断試験を行い、埋立廃棄物の変形・強度特性の把握を行った。さらにここでは、特に既往の研究成果にも指摘されている、繊維廃材の影響について重点を置いて議論するものとし、廃棄物を繊維-粒子複合材料の一つとして取り扱うことにより、組成割合の異なる廃棄物を包括的に評価することを考えた。まず、国内不法投棄等現場 1 ヲ所から採取した廃棄物を用いた室内実験結果を示し、初期状態量の違いが変形・強度特性に与える影響を検証す

ると共に、土質力学をベースとしたせん断強度評価の適用性を確認した。さらに、4 ヶ所の廃棄物地盤で行った原位置実験結果を示し、原位置での変形・強度特性を明確にすると共に、繊維廃材による影響を考察した。本章により得られた主要な成果を要約すると以下のようであった。

- 1) 国内外の廃棄物地盤 4 ヶ所の組成割合を比較することで、礫類や 5 mm 以下廃材が 70 ~ 90 %, 繊維廃材が 5 ~ 30 %, その他の廃材の合計が 5 ~ 10 % 程度の範囲で混入していることを示した。多種廃材が混在している廃棄物では、礫などのような粒状材料を主体として、その中に繊維材料が混入しているような構造を有していることを明らかにした。特に繊維廃材は比重が小さく、重量に対して体積の大きい材料であるため、各廃棄物地盤で繊維廃材含有率の大きく異なることが、重要な物理的特徴であると考えられた。
- 2) 今回対象とした廃棄物は、比重の小さな繊維廃材を多く含むため、原位置での湿潤密度は $\rho_t = 1.0 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ 程度の小さな値を有していた。原位置での乾燥密度を繊維廃材含有率で整理すると、線形的な関係が認められ、繊維廃材含有率に着目することで組成割合の異なる廃棄物地盤の乾燥密度を相対的に評価できることを示した。
- 3) 廃棄物に繊維廃材が多量に含まれている影響として、低拘束圧下において急激な密度増加を示し、高拘束圧下では応力比が減少する傾向にあること、さらにこのような拘束圧依存性によって低拘束圧下で初期密度の影響が顕著になることを明らかにした。また、土質力学をベースとしたせん断強度評価には、このような拘束圧に依存する特性を考慮できるセカントアングルや Hvorslev の規準による強度評価が適していることを確認した。
- 4) 応力履歴によって過圧縮比が大きくなる場合や、繊維廃材の配向がせん断面よりも大きくなる場合において、繊維廃材の補強効果が顕著に発揮されることを明らかにした。またこの際には、応力比の増加や靱性の増加、弾性的な挙動の発現などの特性が表れることを示した。さらに強度特性に及ぼす繊維廃材の補強効果の影響は、粘着成分の増加と摩擦成分の減少という形で表れることを確認した。
- 5) 廃棄物の原位置せん断特性は、繊維廃材含有率が大きくなると、砂質土にはみられない廃棄物特有の挙動を示した。せん断応力とせん断変位の関係では、繊維廃材による補強効果により、せん断応力が線形的に増加してピーク値や限界状態などの収束値を示さない延性的な挙動を示した。さらにせん断時の体積変化挙動では、繊維廃材含有率が 6 % 以下の廃棄物では体積収縮を、繊維廃材含有率が 9 % 以上の廃棄物では線形的に体積が膨張する傾向を示した。
- 6) 試料を攪乱して供試体を作製する室内実験では、せん断強度は原位置のそれと同等であるが、原位置せん断特性にみられた、せん断応力の線形的な増加傾向やその際の体積膨張傾向を再現できないことを示した。これは、原位置での応力履歴や繊維廃材の配向性を室内にて再現できないことの影響が大きいためであり、廃棄物地盤の安定性を論じる場合には、室内試験

の結果を代用することで十分であるが、変形性を議論する場合には原位置のせん断特性を把握しておくことが望ましいと考えられた。

- 7) 廃棄物の原位置せん断強度は、繊維廃材含有率 6 ~ 9 % 程度の範囲で急激に減少し、それ以上の含有率ではほぼ同等の強度が発揮される傾向を示した。せん断強度を粘着力と内部摩擦角で評価すると、繊維廃材含有率が約 20 % 以内の範囲では、繊維廃材の含有率によらず、粘着力 $c = 3.5 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 45.2^\circ$ の一定値を示し、さらに繊維廃材含有率が増加すると、内部摩擦角は減少し、粘着力は増加する傾向を示した。さらにセカントアングルで評価した場合には、せん断強度と繊維廃材含有率の関係と同様に、繊維廃材含有率が 6 ~ 9 % 程度でセカントアングルは急激に減少し、それ以上の含有率では同等の値を示した。廃棄物のせん断強度は繊維廃材含有率に大きく依存すると判断でき、繊維廃材含有率を把握することで、組成割合の異なる廃棄物のせん断強度を包括的に評価できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 財団法人産業廃棄物処理振興財団：不法投棄等及び不適正処理現場の対策と技術，第 1 章 不法投棄等と調査・対策の概要，pp.3-43，2010.
- 2) 山脇敦，島岡隆行，勝見武，大嶺聖，川寄幹生，土居洋一，柴曉利，川井晴至，坂口伸也：不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価，平成 24 年度循環型社会形成推進科学研究補助金 研究報告書，2013.
- 3) 環境省：環境統計集，4.25 規模別不法投棄等の残存件数と残存量，http://www.env.go.jp/doc/toukei/data/2014_4.25.xls，(参照 2014-11-24).
- 4) 環境省：環境統計集，4.23 不法投棄等の支障等の状況及び都道府県等の対応方針（残存事案），http://www.env.go.jp/doc/toukei/data/2014_4.24.xls，(参照 2014-11-24).
- 5) 国際ジオシンセティックス学会日本支部，ジオメンブレン技術委員会：ごみ埋立地の設計施工ハンドブック，第 8 章 廃棄物の地盤工学，pp.187-200，2000.
- 6) 東畑郁生，鶴野雅明，河野有司，亀田真加，喜多祐介，米内祐史，F. Kolsch：一般廃棄物の力学的性質に関する研究，土木学会論文集 C，Vol.66，No.3，pp.631-644，2010.
- 7) Kavazanjian, Jr. E., Matasovic, N., Bonaparte, R., Schmertmann, G. R. : Evaluation of MSW properties for seismic analysis, Geotechnical Special Publication, Vol.46, pp. 1126-1141, 1995.
- 8) Zekkos, D., Bray, J. D., Stokoe, K., Kavazanjian, E., Rathje, E., Athanasopoulos, G. A., Riemer, M., Matasovic, N., Lee, J. J., Seos, B. : Recent Findings on the Static and Dynamic Properties of Municipal Solid Waste, Proc. GeoCongress, GeoInstitute of ASCE, New Orleans, pp.176-183, 2008.
- 9) Bray, J. D., Zekkos, D., Kavazanjian, E., Athanasopoulos, G. A. and Riemer, M. F. : Shear Strength

- of Municipal Solid Waste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pp.709-722, 2009.
- 10) Koelsch, F. : Shear Strength of waste, Proc. the Third International Workshop ” Hydro-Physico-Mechanics of Landfills ”, Braunschweig Germany, 2009.
 - 11) Vilar, O. M., Carvalho, M. F. : Shear strength properties of municipal solid waste, Proc. The Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil, Vol.1, pp.59-64, 2002.
 - 12) 米谷正 : 微生物による有機性廃棄物の分解処理, 不二越技報, Vol.54, No.2, 通巻 117 号, pp.2-6.
 - 13) 花嶋正孝, 山崎惟義, 松尾康司 : 廃棄物埋立構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 310 号, pp.69-76, 1980.
 - 14) 土質工学会 : 土の強さと地盤の破壊入門, 第 3 章 原位置での土の強度をどう求めるか, pp.175-265, 1987.
 - 15) 不法投棄等の斜面安定性評価研究グループ(山脇敦, 島岡隆行, 大嶺聖, 勝見武, 土居洋一, 川寄幹生, 柴曉利, 川井晴至, 坂口伸也, 小原孝之) : 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価方法, 解説編 1. 堆積廃棄物の斜面崩壊状況, pp.51-54, 大成出版, 2013.
 - 16) 環境法, 廃棄物の処理及び清掃に関する法律, 昭和 45 年 12 月 25 日法律第 137 号, 2008.
 - 17) 環境法, 循環型社会形成推進基本法, 平成 12 年法律第 110 号, 2000.
 - 18) 現行法, 産業廃棄物の処理に係る特定施設の整備の促進に関する法律, 平成 4 年 5 月 27 日法律第 62 号, 1992.
 - 19) 例えば, 山内一生, 長野修治 : 廃棄物掘削勾配に関する報告, 第 15 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.1227-1229, 2004.
 - 20) 例えば, Dixon, N. and Jones, D. R. V. : Engineering properties of municipal solid waste, *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 23, pp. 205-233, 2005.
 - 21) 社団法人地盤工学会 : 地盤調査の方法と解説, 第 9 編 現場密度試験, pp.579-586, 2004.
 - 22) 社団法人地盤工学会 : 地盤材料試験の方法と解説, 第 7 編 変形・強度試験, 第 4 章 土の一面せん断試験, pp.661-691, 2009.
 - 23) 安福規之 : 広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究, 第 3 章 広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性, 九州大学博士論文, pp.65-100, 1990.
 - 24) Yasufuku, N. and Ochiai, H. : Anisotropic Hardening Model for Sandy Soils over a Wide Stress Region, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol.51, No.2, pp.81-118, 1991.
 - 25) 土質工学会 : 土の強さと地盤の破壊入門, 第 2 章 土の要素のせん断強度, pp.27-154, 1987.
 - 26) 最上武雄 : 土質力学, 第 5 章 土のせん断, pp.479-618, 技報堂, 1969.
 - 27) 例えば, 三浦哲彦, 山内豊聡 : 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告

- 集, 第 260 号, pp.109-118, 1978.
- 28) Hvorslev, M. J : Physical components of the shear strength of saturated clays, *Res. Conf. Shear Strength of Cohesive Soils*, Colorado, pp. 125-144, 1960.
- 29) 例えば, 富永哲男, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖, 大野司郎 : 初期応力履歴が粘土の非排水せん断特性に及ぼす影響, 九州大学工学集報, 第 68 巻, 第 6 号, 1995.
- 30) 例えば, Michaloeski, R. L. and Cermak, J. : Strength anisotropy of fiber-reinforced sand, *Jornal of Computers and Geotechnics*, Vol.29, pp.279-299, 2002.
- 31) 例えば, Zekkos, D., Athanasopoulos, G. A., Bray, J. D., Grizi, A., Theodoratos, A. : Large-scale direct shear testing of municipal solid waste, *Journal of Waste Management*, Vol.30, pp.1544-1555, 2010.
- 32) 例えば, 三浦均也, 土岐祥介, 島屋進 : 砂の変形・強度特性に及ぼす生得異方性と誘導異方性の影響, 北海道大学工学部研究報告, Vol.141, pp.1-17, 1988.

第5章 繊維-粒子複合材料としての埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価

5.1 概説

前章では、埋立廃棄物の変形・強度特性の把握を目的とした実験的な検討を行い、その結果として、廃棄物のせん断特性には繊維廃材の影響が支配的であることを明らかにし、繊維廃材の含有率や挙動に着目することで組成割合の異なる廃棄物の変形・強度特性を包括的に評価できる可能性のあることを示した。廃棄物地盤は様々な廃材が混在する複雑な構造を有しているため、繊維廃材に着目することで、簡便に廃棄物地盤の変形性・安定性を予測 / 評価するができれば、工学的に非常に有益である。実際、埋立廃棄物の力学的な安全性を制御することによって、不法投棄等現場の安定性の確保や、処分場の合理的な設計・施工法、処分場跡地の高度利用等に関する新たな課題解決策の提示へと繋がり、循環型社会の構築に大きく貢献できると考える^{1)~5)}。

本章では、埋立廃棄物を、繊維廃材とその他の廃材 (以下、「粒状廃材」と定義) から構成される複合材料と単純化して考え、第3章で提案した繊維-粒子複合材料の構成モデルを適用することにより、その応力・ひずみ関係を評価することを目的とした。そこでここでは、前章で取り上げた Site B 廃棄物を対象として、中型三軸圧縮試験装置によって軸対称条件での応力ひずみ関係の把握を行い、さらに本モデルの適用を試みた。具体的には、まず中型三軸圧縮試験により Site B 廃棄物の応力・ひずみ関係を把握した結果を示し、先の原位置・室内での一面せん断試験結果と対比しながら考察を加えることで、三軸圧縮試験により評価される応力・ひずみ関係の力学的意味を明確にした。次に、提案した構成モデルを適用する上での、粒状廃材と繊維廃材の材料パラメーターの決定方法を議論した。廃棄物は様々な種類・剛性・形状を有する繊維廃材を含んでいる特殊な繊維-粒子複合材料であるため、特に、繊維廃材に重点を置いて考察するものとし、ここでは、大型引張試験装置を用いたパラメーターの決定方法を提案した。そして最後に、実験により求まる廃棄物の応力・ひずみ関係と本モデルによる解析結果の比較を行い、本モデルの適用性の検証を行うと共に、現状での課題点や今後の展望についても議論するものとした。

以下、節に従って本章の概要を述べる。まず、第2節では、実験に使用した Site B 廃棄物の物理特性や力学特性の特徴を明確にし、三軸圧縮試験における応力・ひずみ関係の力学的意味を

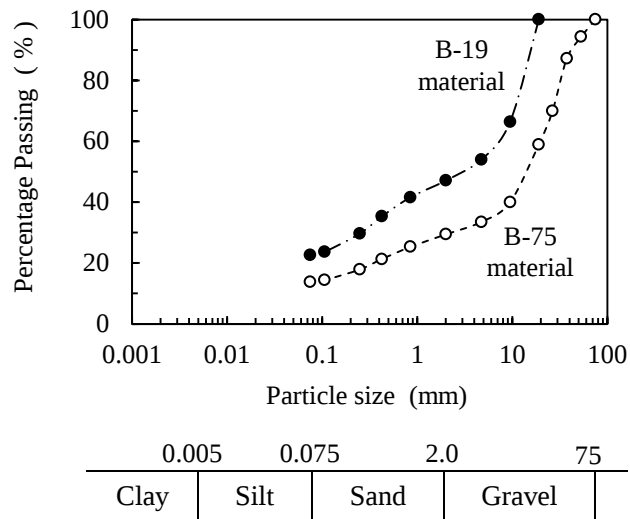


図-5.1 B-75, B-19 試料の粒径加積曲線

考察した。次に、第 3 節では、粒状材料と繊維廃材のパラメーターの決定方法を提案した。特に繊維廃材については、開発した大型引張試験装置により求まるパラメーターを使用する方法を提案しており、そのパラメーターの力学的な意味や妥当性について検証した結果を示した。さらに、第 4 節では、実際に本モデルを廃棄物の応力・ひずみ関係の評価へ適用し、その有用性の検証を行った。最後に、第 5 節では、全体のまとめを示し、要約とした。

5.2 三軸圧縮試験による埋立廃棄物の応力・ひずみ関係

5.2.1 試料の概要

ここでは、第 3.5 節に示した中型三軸圧縮試験装置 (供試体: 直径 10 cm, 高さ 20 cm) を使用して、Site B 廃棄物の応力・ひずみ関係の把握を行った。この時、供試体サイズの関係により、粒径の大きな廃材は使用できないため、Site B 廃棄物の中で、ふるい分け 19 mm 以下の廃材 (以下、「B-19 試料」と称する) を用いて実験を行うものとした⁶⁾。そこでまず、B-19 試料の物理・力学特性を Site B 廃棄物 (以下、「B-75 試料」と称する) と比較し、粒径を小さく調整したことによる影響を明確にした。

(a) 物理特性

図-5.1 に B-75 試料と B-19 試料の粒径加積曲線を示した。本図では、ふるい分析により求まる 0.075 mm 以上の粒径分布を示している。0.075 mm 以下に対して行われる沈降分析については、粒径と比重の関係を決定することができないため、測定不能として今回は実施されなかった⁷⁾。

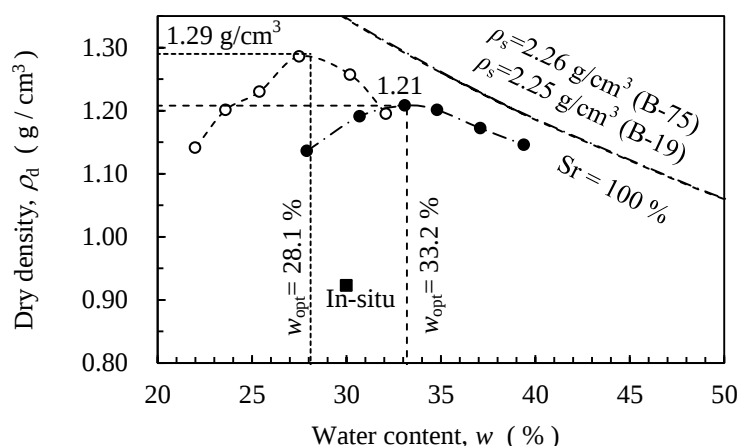


図-5.2 B-75, B-19 試料の締固め曲線

表-5.1 B-75, B-19 試料の物理特性のまとめ (川井^{10), 11), 12)}を参照)

試験項目		B-75 試料	B-19 試料	準拠規格	備考
一般	土粒子の密度: ρ_s	2.260	2.255	JIS A 1202	
	自然含水比: w_n	21.4	26.7	JIS A 1203	
粒度	礫分	70.6	52.9	JIS A 1204	
	砂分	15.6	24.5		
	シルト、粘土分	13.8	22.6		
締固め	試験方法	B-c	B-c	JIS A 1210	モールド内径 15cm、 高さ 12.5cm
	最大乾燥密度 ρ_{dmax}	1.291	1.208		
	最適含水比 w_{opt}	28.1	33.2		
透水	透水試験方法	定水位	定水位	JIS A 1218	透水円筒内径 15cm、 長さ 12.5cm
	透水係数 k	1.17E-03	3.01E-04		

両者を比較すると、最大粒径は 75 mm から 19 mm になっているものの、ほぼ相似形といえる粒度分布を有していることが確認できる。次に、突き固めによる土の締固め試験方法 (JIS A 1210 : 2009)⁸⁾により、両者の締固め特性を把握し、締固め曲線を図-5.2 に示した。本図には Site B の原位置での乾燥密度と含水比も合わせて示している。結果より、廃棄物においても粒状材料と同様に凸型の傾向を示し、締固め時の乾燥密度が最大となる最適含水比の存在することが確認される。また、B-75 試料では、最適含水比 $w_{opt} = 28.1\%$ のときに最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.29 \text{ g/cm}^3$ を示し、B-19 試料では、最適含水比 $w_{opt} = 33.2\%$ で最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.21 \text{ g/cm}^3$ であった。粒径が小さくなることで、最大乾燥密度は 0.07 g/cm^3 小さくなり、最適含水比は 5.1% 増加した。

最後に、土の透水試験方法 (JIS A 1218 : 2009)⁹⁾を基準にして、定水位透水試験を行い、両試料の透水性を把握した。両材料共に、締固め度 90% の乾燥密度で実験を行っており、この時、B-75 試料は透水係数 $k = 1.17 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、B-19 試料では透水係数 $k = 3.01 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ であった。粒径を小さく調整することで、細粒分含有率が増加するため、若干の透水係数の減少が認められた。また、以上に示した物理特性を表-5.1 に整理している^{10), 11), 12)}。

表-5.2 B-75, B-19 試料の一面せん断試験結果

Material	Dry density ρ_d (g / cm ³)	Normal stress σ (kN / m ²)	Shear strength τ_f (kN / m ²)	Secant angle ϕ_s (degree)
B-75 material	0.95	20	13.4	31.5
	0.94	30	20.1	
	0.95	50	29.1	
B-19 material	1.02	20	12.4	30.5
	1.00	30	17.4	
	1.03	50	29.4	

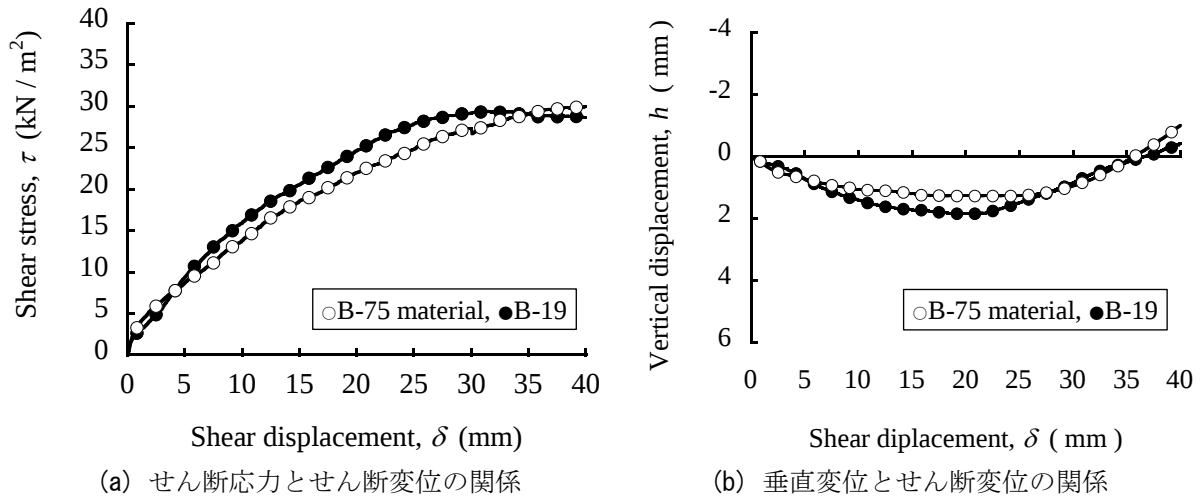
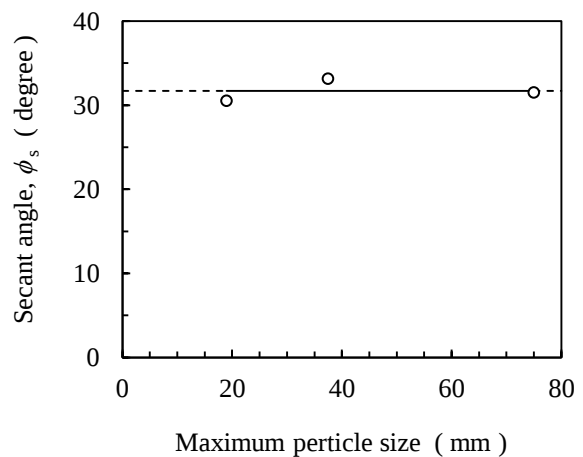
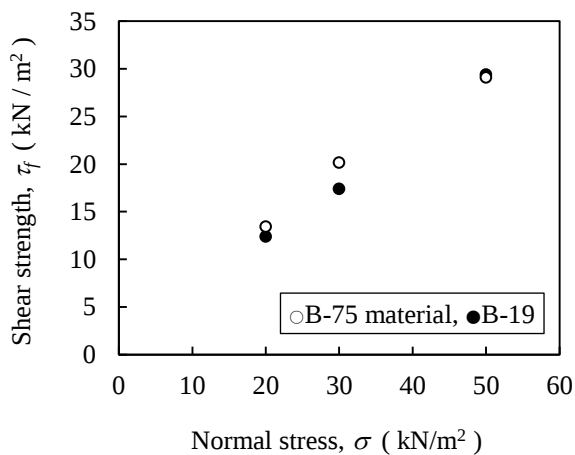


図-5.3 B-75, B-19 試料のせん断特性



(b) 力学特性

第 4.3 節に説明した原位置・室内両用型一面せん断試験装置を用いて、B-75 試料と B-19 試料の変形・強度特性を比較した。供試体は、乾燥状態の両試料を、同様の締固めエネルギーで締固めて作製するものとし、上載圧 3 種類でせん断試験を実施した。実験条件とその結果は表-5.2 に整理している通りである。まず、図-5.3 に、上載圧 $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ でのせん断特性を比較した

表-5.3 中型三軸圧縮試験の実験条件と結果

Material	Radius stress, σ_r (kN/m ²)	Initial dry density, ρ_{di} (g/cm ³)	Dry density after consolidation, ρ_{dc} (g/cm ³)	Initial modulus, $D(\varepsilon_q = 0.01)$	$q/p(\varepsilon_q = 0.15)$
B-19 material	20	1.08	1.09	1.09	1.09
	50	1.08	1.12	1.12	1.12
	100	1.00	1.12	1.12	1.12
Decomposed granite soil	20	1.35	1.35	1.35	1.35
	50	1.38	1.40	1.40	1.40
	100	1.38	1.46	1.46	1.46

結果を示した。これより、両者でほぼ同様のせん断特性を示していることが確認され、粒径の違いの影響はほぼないと考えられた。また、せん断強度と上載圧を比較した図-5.4、セカントアングルと最大粒径の関係を示した図-5.5からもほぼ同様の強度特性を有していることが確認できる。

以上より、B-75 試料と B-19 試料の物理・力学特性を比較したところ、物理特性では若干の差は認められたものの、力学特性にはほとんど違いはみられなかった。これより、粒径を調整した影響はほとんどないものとして、以下に示す三軸圧縮試験の結果を考察するものとした。

5.2.2 実験の概要と実験条件

B-19 試料を使用して、側圧一定の圧密・排水条件における廃棄物の応力・ひずみ関係を求めた。供試体は、乾燥状態の試料を用いて負圧法により作製するものとし、ペDESTAL上 に設置したモールドに負圧 20 kN/m² を載荷した状態で、試料を詰めて締固めを行っていく⁶⁾。今回は、供試体を 3 層に分けて作製し、1 層毎に所定の締固めを行った。供試体作製後は、二酸化炭素を通した後に、供試体直下からゆっくり水を通過させていき、すべての実験ケースで B 値が 0.95 以上になるように飽和させるものとした。その後、所定の側圧を載荷して圧密を行い、圧密終了後に、軸ひずみ 0.2 % / min でせん断を行った。今回は、側圧 3 種類 $\sigma_r = 20, 50, 100$ kN/m² の条件で実験を行うものとし、さらに比較のために、同様の締固めにより作製した真砂土の実験も合わせて実施した。実験条件とその結果は表-5.3 に整理している通りである。

5.2.3 応力・ひずみ関係の実験

中型三軸圧縮試験の結果より、軸差応力 q と軸差ひずみ ε_q の関係、応力比 q/p と軸差ひずみ ε_q の関係、体積ひずみ ε_p と軸差ひずみ ε_q の関係、応力比 q/p とひずみ比 $-\varepsilon_p/\varepsilon_q$ の関係(ストレスーダイレイタンスー関係)を、図-5.6 にまとめて整理した。本図では、廃棄物 (B-19 試料) と真砂土の結果を合わせて示しており、プロット点が廃棄物を、線が真砂土を表している。

図-5.6 より、軸差応力と軸差ひずみの関係において、これまでの繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係や廃棄物の原位置せん断特性に認められたように、軸差ひずみの増加に伴って軸差応

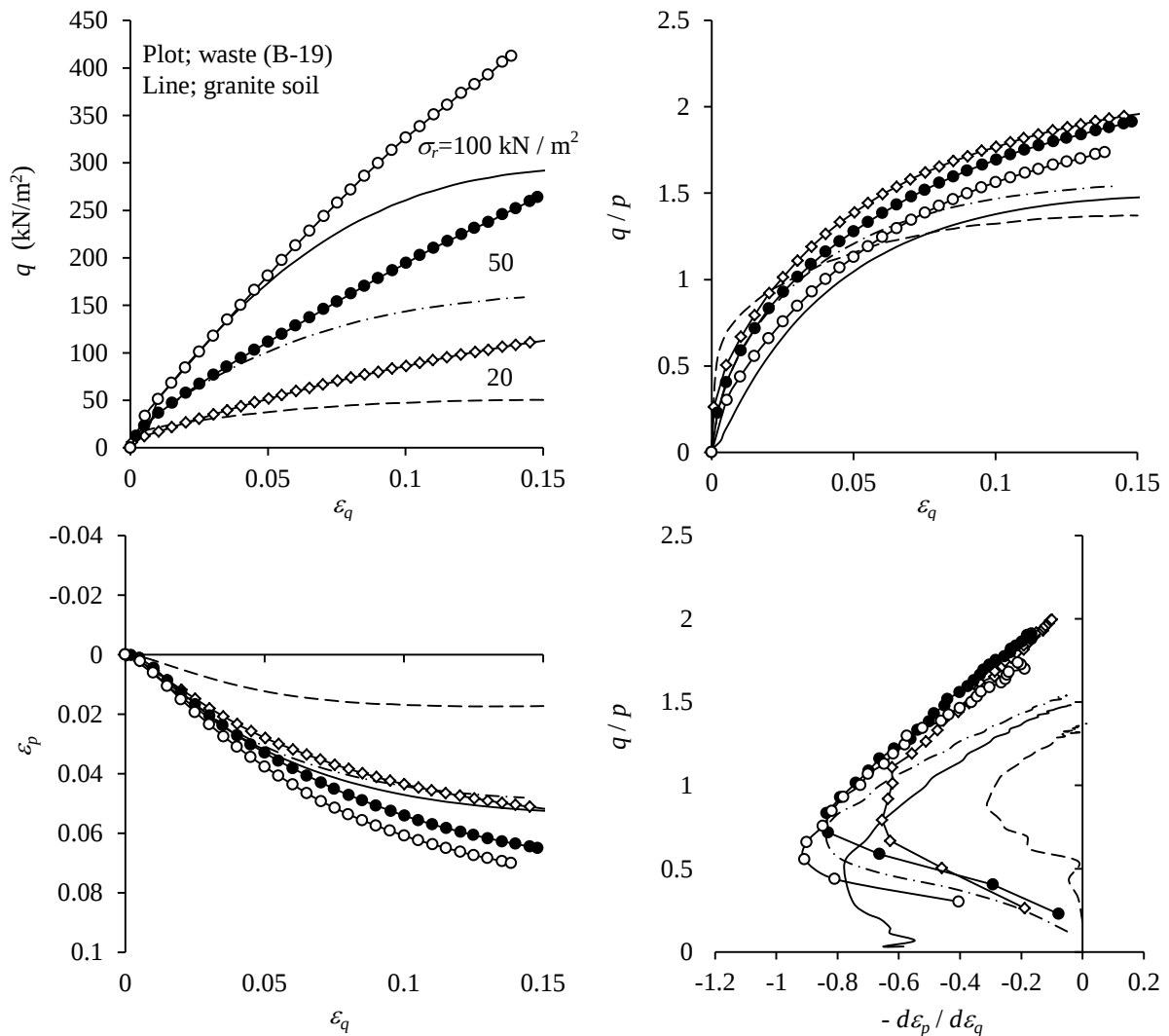


図-5.6 廃棄物(B-19 試料)の応力・ひずみ関係
($q - \varepsilon_q$ 関係, $q/p - \varepsilon_q$ 関係, $\varepsilon_p - \varepsilon_q$ 関係, $q/p - d\varepsilon_p/d\varepsilon_q$ 関係)

力が線形的に増加しつづける傾向を示した。真砂土と比較すると、初期剛性はほとんど同様であるが、真砂土が塑性領域に達している部分でも接線剛性の低下はほとんどみられないことが確認される。また、応力比と軸差ひずみの関係では、拘束圧が増加することによって、応力比が低下する傾向を示しており、さらに垂直応力と軸差ひずみの関係についても、拘束圧の増加によって圧縮特性が卓越することが確認される。しかし、ストレス・ダイレイタンス関係では、拘束圧による顕著な影響は認められず、真砂土と同様に、応力比が小さい範囲では急激に圧縮特性が増加し、その後は応力比の増加に伴って膨張特性へ推移していく特性を示した。

またここでは、特に軸差応力の増加傾向に着目して、接線剛性と軸差ひずみの関係を図-5.7に、軸差ひずみ $\varepsilon_q = 0.15$ 時の軸差応力と平均主応力 p の関係を図-5.8に示した。図-5.7より、廃棄物では、軸差ひずみの増加に伴う接線剛性の低下はあまりみられず、真砂土と比較して靱性の大きな材料であることは明確である。さらに図-5.8より、軸差応力と平均主応力の関係においても、

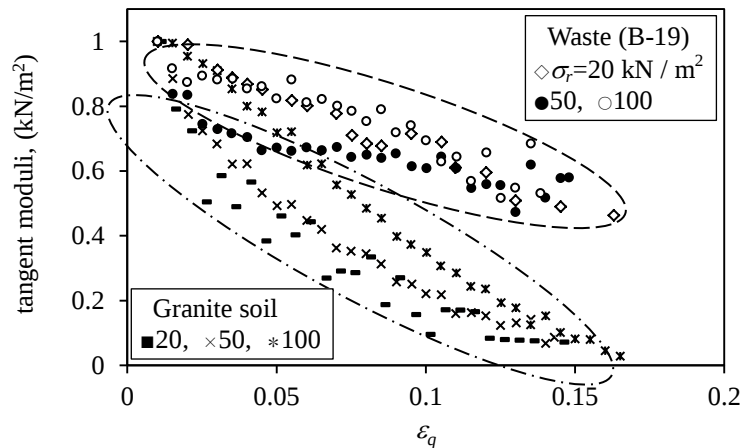


図-5.7 接線剛性と軸差ひずみの関係

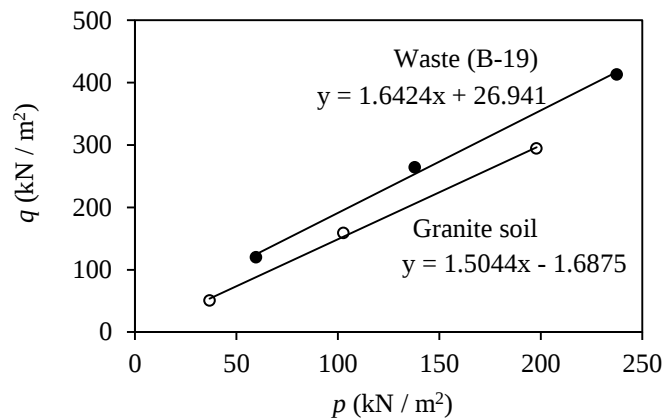


図-5.8 軸差応力($\epsilon_q = 0.15$) と平均主応力の関係

廃棄物が比較的大きな強度を有していることが確認でき、特に粘着成分が大きいようであった。

以上の結果より、軸対称条件における廃棄物の応力・ひずみ関係は、前章に示した室内一面せん断試験結果と比較して、ほぼほぼ同様の特性を示すことが確認された。しかし、実験条件は室内一面せん断試験とほぼ同等であるといえるが、図-5.6のような、線形的な応力の増加傾向は認められていない。これは一面せん断試験と三軸圧縮試験において、繊維廃材の配向とせん断面の角度が異なるためと考えられる。室内実験では、締固めにより供試体を作製するため、たいていの繊維廃材は水平面と同様の角度で配向しているといえる。そのため、一面せん断試験では繊維廃材の配向とせん断面が一致している可能性が高い。しかし、三軸圧縮試験では、粒状材料では、せん断面は $45 + \phi/2^\circ$ となる角度に卓越することが知られており、廃棄物においても繊維廃材の配向とせん断面の角度が 0° 以上になっていることが考えられる。そのため、実験条件としては、繊維廃材の配向性を変化させた一面せん断試験結果 (第 4.4.4 項) に近いものになるといえ、繊維廃材の配向とせん断面にある程度の角度がある場合の一面せん断試験結果をみると、三軸圧縮試験結果とほぼ同様になっていることが確認できる。厳密に考えると、三軸圧縮試験と一面せん断

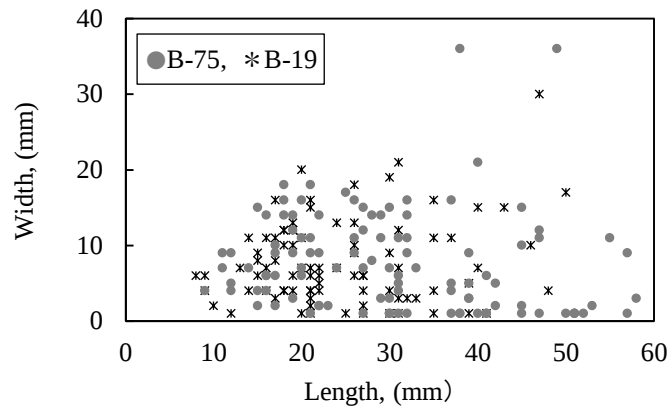
試験では、応力の載荷条件や主応力方向の回転などの違いのあることが知られており、土質力学において両試験の違いや関連性を考察した研究は数多く認められる^{13), 14)}。しかし、単純な材料による影響としては、粒子形状による異方性の影響の大きいことが知られており、繊維廃材のような扁平形状を有する廃棄物では、その影響が大きいようであった。

ここで、今回の三軸圧縮試験の結果についても、原位置せん断特性に認められたような、せん断に伴う体積の膨張特性は認められなかった。これは、供試体を攪乱した影響が大きいためであり、廃棄物が投棄されて経過した時間や、その際の応力履歴を再現することでしか同様の特性は得られないものと考えられる。土質力学的な視点においても、いかにして、原位置の特性を室内実験で再現するかは興味深い点であり、今後の課題といえる。とはいえ、体積変化挙動以外は、原位置せん断特性とほぼ同様の特性を示しており、室内実験の結果を、本モデルにより評価することで十分に有益な情報が提示できると考える。これより、以下では、提案した構成モデルを用いて、三軸圧縮試験により求まる廃棄物の応力・ひずみ関係の評価を行った。

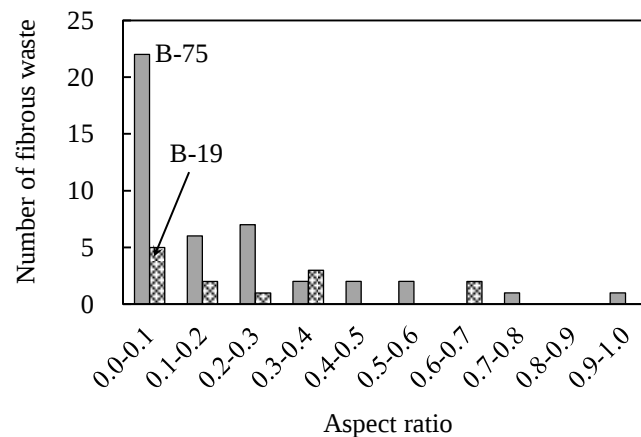
5.3 モデル解析に必要な材料パラメータの決定方法

第3章で提案した繊維-粒子複合材料の構成モデルでは、繊維材料と粒状材料の各々の応力・ひずみ関係を評価する剛性マトリックスを算定する必要がある。そのため、その際に必要な解析パラメータは、それぞれの材料特性を個別の実験により決定することとなる。粒状材料として土を、繊維材料として高分子材料を用意して、それらを混ぜ合わせることによって供試体を作製する場合には、モデル解析に必要なパラメータを決定するのは比較的容易であるといえる。しかし、廃棄物の場合には、始めから様々な廃材が混在した状態になっているため、その中から粒状廃材と繊維廃材を取り分けるのには多大な時間が必要となる。特に、廃棄物の中に混入している繊維廃材は、いろいろな種類や形状を有しており、そのひとつひとつの特性を測定してパラメータを決定するのは、現実的ではない。実際、川井ら¹⁰⁾によって、B-19 試料と B-75 試料に含まれる繊維廃材の幅と長さが調べられており、図-5.9 に示すように、繊維廃材の種類や形状はばらばらであり、単繊維引張試験により引張剛性を把握することもままならない状況であった。

ここでは、このような現状に鑑み、廃棄物そのものをそのまま使用して測定される平均的な材料パラメータを、本モデルの解析パラメータとして代用することを考えた。具体的には、繊維廃材のパラメータである、引張剛性・界面粘着力・界面摩擦角を、大型引張試験により得られる結果から導出する方法を示した。また、粒状廃材のパラメータである、内部摩擦角については、繊維廃材の配向とせん断面が一致する条件の一面せん断試験結果より得られるパラメータ



(a) 幅と長さの関係



(b) 繊維廃材の数と縦横比の関係

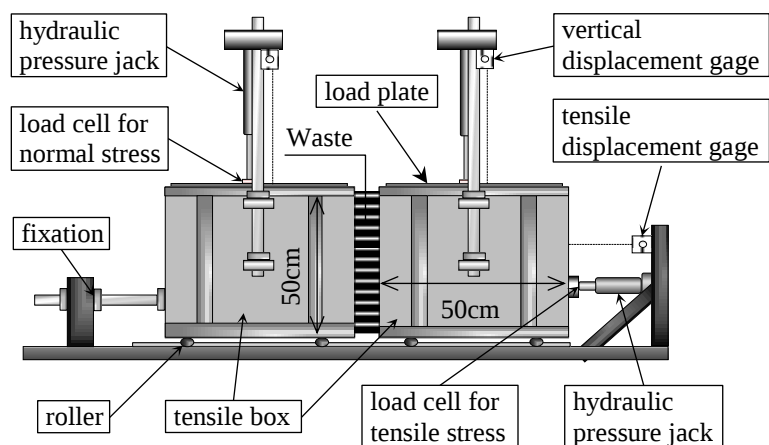
図-5.9 Site B 廃棄物, B-75, B-19 試料に含まれる繊維廃材のばらつき (川井らより参照)

ーを用いるものとした。さらに、これらのパラメーターを使用して、簡単な理論展開により、繊維配向角度の異なる廃棄物のせん断強度の評価を行うことで、本材料パラメーターの力学的な意味およびその妥当性を考察した。

5.3.1 繊維廃材の材料パラメーター

廃棄物の中から、繊維廃材の影響のみを取り出すような実験を行い、そこから得られるパラメーターを解析パラメーターとして代用することを考えた。これより、ブラウンシュヴァイク工科大学の Koelsch (2009)¹⁵⁾により考案された大型引張試験装置を参考にして、図-5.10 に示すような大型引張試験装置を作製した。本実験装置は廃棄物そのものを引っ張ることで、繊維廃材によって発揮される引張応力、および粒状廃材との界面強度を同時に考慮できる装置になっている。

実験装置は、幅 50 cm、奥行 50 cm、高さ 50 cm となる 2 つの引張箱を連結させたものとなる (図-5.10(b) 参照)。片方の箱はアンカーで固定されており (図-5.10(c) 参照)、もう片方の箱を油圧ジャッキ (以下、「引張ジャッキ」と称する) により引っ張ることで廃棄物の引張特性を把



(a) 実験装置の全体図



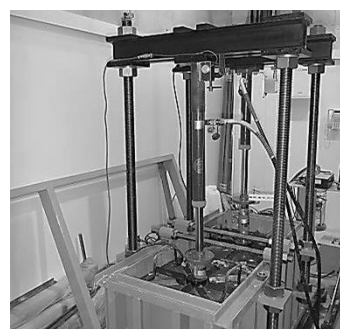
(b) 引張箱の様子



(c) アンカーによる引張箱の固定



(d) 引張ジャッキの連結部



(e) 上載圧の载荷

図-5.10 大型引張試験装置の概要

握する (図-5.10(c) 参照). 引張箱の上部には载荷枠が連結されており, 载荷枠に設置された油圧ジャッキ (「载荷ジャッキ」と称する) により上載圧を载荷できる仕組みになっている (図-5.10(e) 参照). 载荷枠の強度と引張箱を固定するアンカーの固定力より, 上載圧 200 kN/m^2 程度までの载荷が可能であることを確認している.

本実験は, 図-5.11 に示すように, 供試体作製過程, 圧縮過程, 引張過程の 3 工程により実施される. 供試体作製過程では, 1/3 層ごとに締固めを行って供試体を作製する (図-5.11(a) 参照). この時の締固め方法は, 上載圧を载荷していく静的な締固めを行うものとし, 繊維廃材は水平面と同様の角度になるように堆積させる. 圧縮過程では, 载荷ジャッキを用いて, 所定の上載圧ま



図-5.11 大型引張試験の工程とその様子

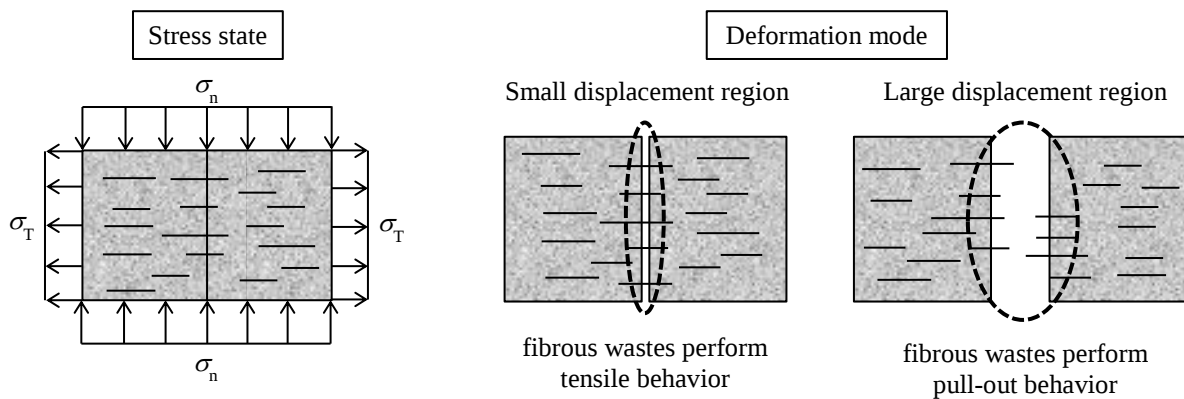


図-5.12 引張試験時の応力状態と変形モード

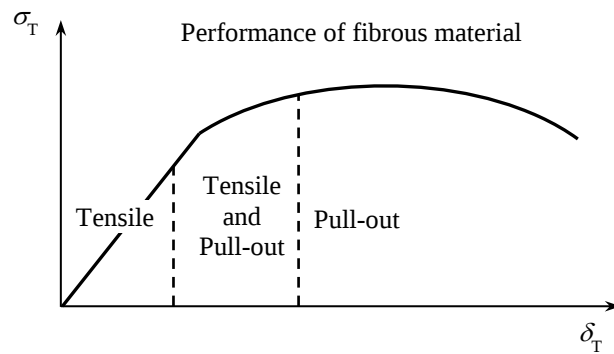


図-5.13 引張応力と引張変位の関係(模式図)

で载荷を行い (図-5.11 (b) 参照), 鉛直沈下量が収束するか, 収束しない場合は 20 分を目安として圧縮を打ち切るものとした。圧縮時には, 圧縮時間, 鉛直沈下量, 鉛直・引張ジャッキに取り付けた両ロードセルの値を測定した。引張過程では, 引張ジャッキを連結させた箱を, アンカーで固定した箱から, 引張り速度 1 mm/min の一定速度で引き離しき (図-5.11 (c) 参照), この際には, 引張変位, 鉛直沈下量, 引張ジャッキのロードセルの値を測定した。

実験で想定される応力状態と変形モードは図-5.12 に示すようであり, 引張初期では繊維廃材自体の引張変形が卓越した挙動を示し, 引張変位が大きくなると繊維廃材と粒状廃材の界面強度

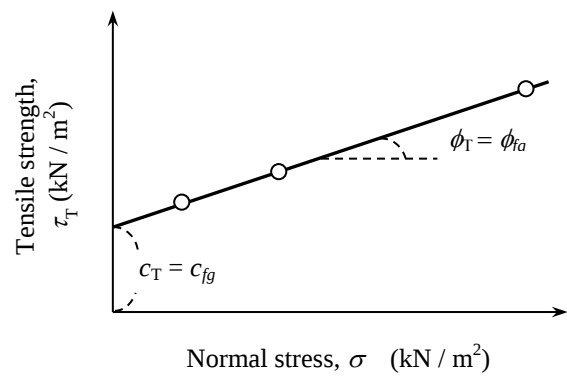
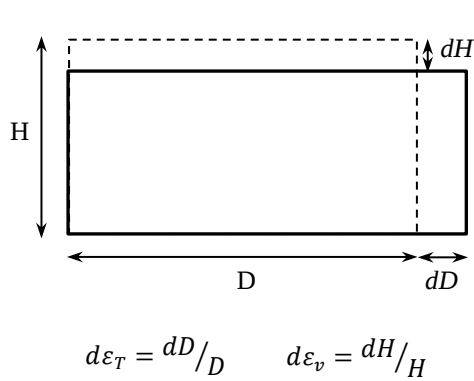


図-5.14 微小領域で仮定する変形モード

図-5.15 引張応力と上載圧の関係(模式図)

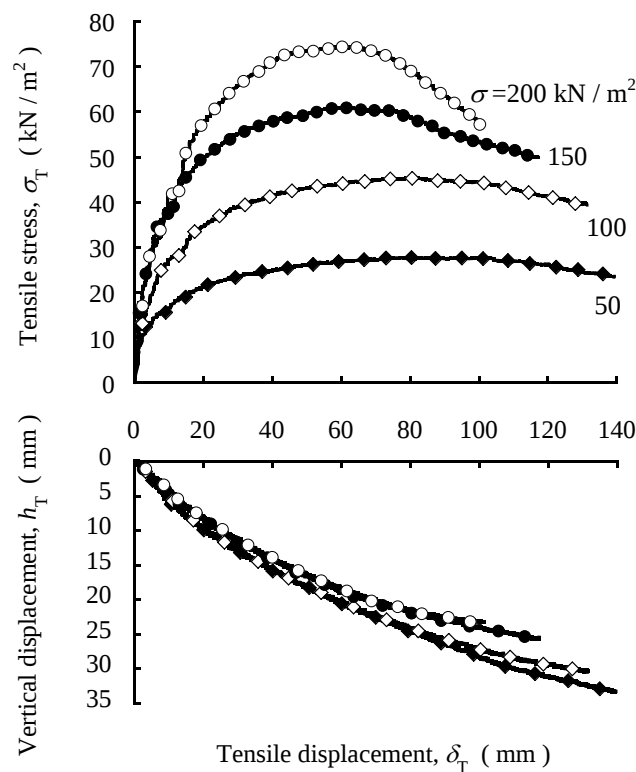


図-5.16 引張応力・垂直変位の引張変位との関係(Site B 廃棄物)

の影響が卓越した挙動を示すと考えられる。これより、実験結果として得られる、図-5.13 に示すような引張応力と引張変位の関係では、引張変位の微小な領域では繊維廃材は引張挙動を示し、引張変位が大きくなると引張挙動と引き抜け挙動が同時に発現し、それよりも引張変位が大きくなるとほとんどの繊維材料が引き抜け、ピーク値が発現するといえる。本研究では、上載圧を変化させて行った実験結果から、以下に示すような方法により解析パラメーターを導出した。

まず、繊維廃材の引張挙動に依存する引張初期の微小変形領域を対象として、図-5.14 に示すような変形モードを仮定する。これより、引張変位から引張ひずみを算定し、引張応力と引張ひ

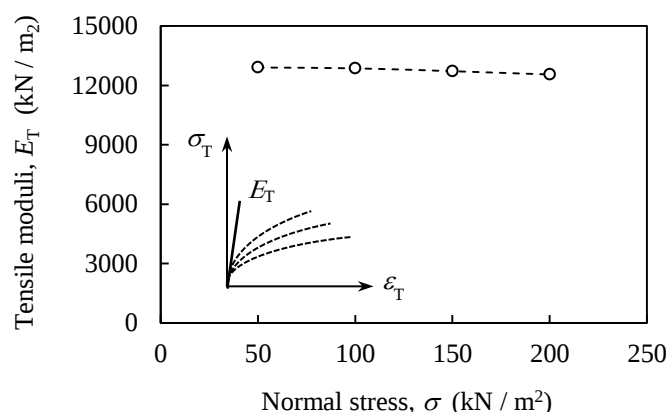


図-5.17 引張剛性と上載圧の関係

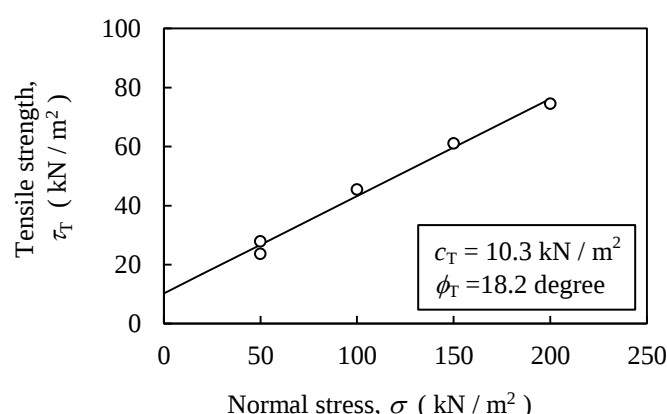


図-5.18 引張強度と上載圧の関係

ずみの関係から得られる初期剛性 E_T を繊維廃材の引張剛性 E_f として代用するものとした。さらに、上載圧を変化させた実験結果から得られる、図-5.15 に示すような、引張応力の最大値 (以下、「引張強度 τ_T 」と定義) と上載圧の関係より、その切片である拘束圧に依存しない引張粘着力 c_T と拘束圧に依存する引張摩擦角 ϕ_T が得られる。そこでここでは、引張試験から求まる引張強度 τ_T を繊維廃材と粒状廃材の界面強度 τ_{fg} と同等と考え、引張粘着力 c_T を界面粘着力 c_{fg} として、引張摩擦角 ϕ_T を界面摩擦角 ϕ_{fg} として代用するものとした。

以下に実際の実験から得られる結果を紹介する。ここでは、Site B 廃棄物を使用して、含水比 $w = 20\%$ 、初期乾燥密度 $\rho_{di} = 0.80 \text{ g/cm}^3$ で供試体を作製し、上載圧 $\sigma = 50, 100, 150, 200 \text{ kN/m}^2$ の条件で実施した実験結果を示した。まず、図-5.16 に、引張応力 σ_T と引張変位 δ_T の関係、および垂直変位 h_T と引張変位 δ_T の関係をまとめて整理した。引張応力と引張変位の関係より、引張初期において、上載圧の大きさに関わらずにほぼ同等の初期剛性を示すことが確認される。これは、引張初期には繊維廃材の引張挙動による影響が卓越していることの表れであり、繊維廃材のみの剛性が上載圧に依存せずに発揮されていると考えられる。さらに変形が進行すると、引張応力にピーク値が認められ、引き抜けを表す明確な界面強度が発現する様子が確認できる。こ

ここでは、上載圧が大きいほど、引張応力は大きくなり、変形の小さな範囲で明確な引張応力のピーク値を示すようになる傾向が認められた。これは、引き抜け挙動には上載圧の影響が大きいことの表れであり、上載圧が大きくなることで、繊維廃材と粒状廃材の界面摩擦力が卓越するためである。また、垂直変位と引張変位の関係では、すべての条件で、体積の圧縮する特性が認められており、さらに上載圧が大きいほど圧縮特性が減少する傾向がみられた。これは、繊維廃材と粒状廃材の界面強度が大きくなることで、繊維廃材が引き抜けずに引張挙動を示す領域が大きくなるためであり、繊維廃材が引っ張られることによって周りの廃材が持ち上がることにより圧縮特性が抑えられたと考える。以上より、前述したように、大型引張試験によって、繊維廃材の引張挙動と引き抜け挙動の特性を連動的に考慮できる結果が得られることが確認された。

次に、微小領域において図-5.14 による変形モードを仮定することにより、初期剛性を導出した結果を図-5.17 に示した。これより、初期剛性は上載圧に依存せずに、ほぼ一定値を示しており、今回の実験では、引張剛性として $E_T = 13000 \text{ kN/m}^2$ 程度が得られた。さらに、引張強度と上載圧の関係を示した図-5.18 より、引張応力と上載圧の関係は比例関係を示すことが確認され、引張粘着力 $c_T = 10.3 \text{ kN/m}^2$ と引張摩擦角 $\phi_T = 18.2^\circ$ の得られることが検証された。

5.3.2 粒状廃材の材料パラメーター

粒状廃材の材料パラメーターは、本来、廃棄物の中から繊維廃材を取り除いた試料を対象とした三軸圧縮試験により求まるヤング率や内部摩擦角により決定される。三軸圧縮試験に必要な供試体のみから繊維廃材を取り除くのにはあまり多くの時間は要しないため、基本的には、粒状廃材のみの三軸圧縮試験により材料パラメーターを決定することを推奨する。しかし、繊維廃材を取り除いた試料を作製することが難しい場合には、ここで示すような、繊維廃材の影響をできるだけ少なくした実験を行い、その結果より得られるパラメーターを代用することも可能である。本研究では、少し強引ではあるが、繊維廃材をせん断面と同方向に堆積させた条件での一面せん断試験により、粒状廃材のヤング率と内部摩擦角を求めるものとした。詳しくは、次の項にて説明するが、例えば、微視的な要素を想定した繊維材料の一面せん断試験結果 (2.3.2 項) や、繊維廃材の配向性を変化させた一面せん断試験結果 (4.4.4 項) にもみられたように、繊維廃材とせん断面が同方向の場合には、繊維廃材には引張変形は発生しないため、繊維廃材の影響を受けないせん断特性が求められるといえる。これより、繊維廃材を水平に堆積させた条件の一面せん断試験より得られる結果から、単純せん断変形を想定してヤング率を求め、さらにピーク強度から内部摩擦角を求めることで、その値を解析パラメーターとして代用するものとした¹⁶⁾。

5.3.3 提案した方法による材料パラメーターの妥当性の検証

本項では、前述した、大型引張試験から求まる繊維廃材のパラメーターと、一面せん断試験か

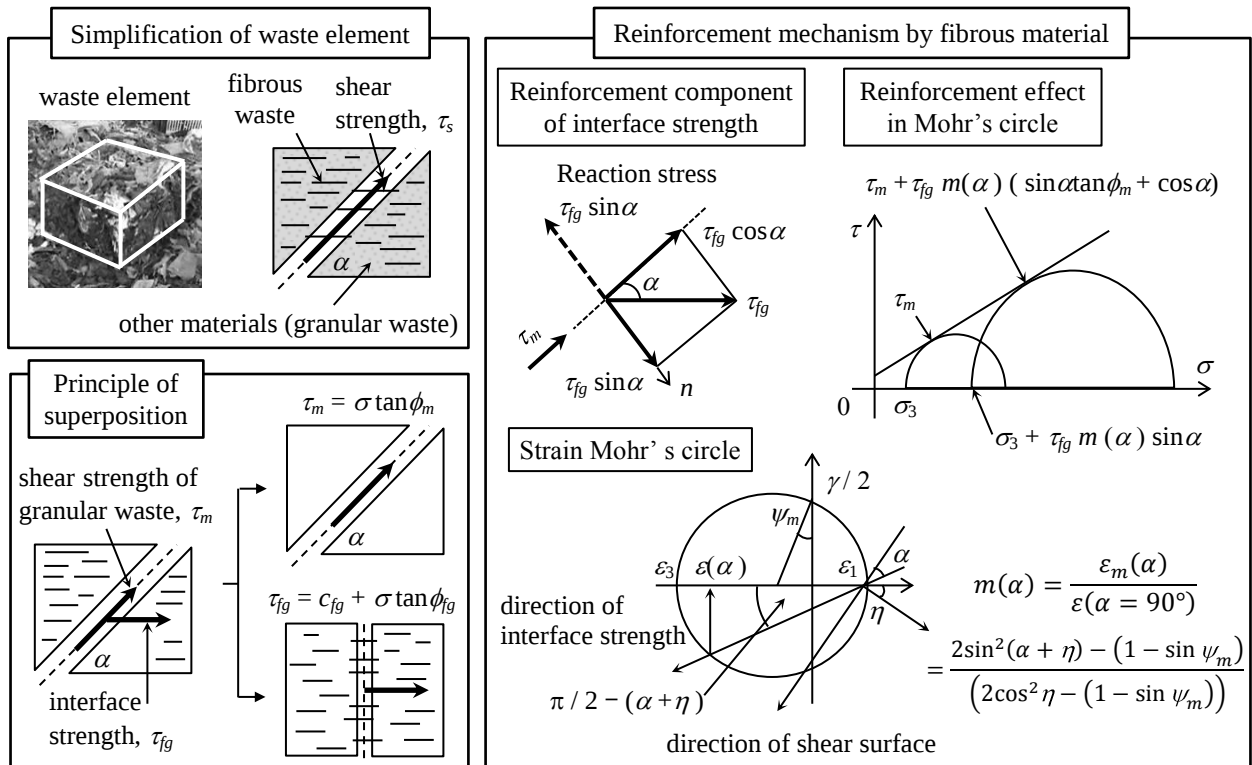


図-5.19 粒状廃材のせん断強度と繊維廃材の界面強度による廃棄物のせん断強度評価の流れ

ら求まる粒状廃材のパラメーターを用いて、簡単な理論展開により廃棄物のせん断強度の評価を行い、パラメーターの力学的な意味、およびその妥当性を明確にした。ここでは、廃棄物のせん断強度 τ_s が粒状廃材のせん断強度 $\tau_m (= \sigma \tan \phi_m)$ と繊維廃材の界面強度 $\tau_{fg} (= c_{fg} + \sigma \tan \phi_{fg})$ の重ね合わせにより評価されるとして、繊維廃材の配向とせん断面の角度が異なる場合のせん断強度を表現することを考えた¹⁷⁾。まず前提条件として、図-5.19 に示すように、繊維廃材はすべて水平に堆積しており、せん断面は角度 α で発生するものとする。またこの時、粒状廃材のせん断強度はせん断面方向と一致し、繊維廃材の界面強度の方向は繊維廃材の配向方向と同様になると考える。これより、廃棄物のせん断面上では、繊維廃材の界面強度により、せん断面方向成分として $\tau_{fg} \cos \alpha$ 分強度が増加する。さらに繊維廃材の法線方向成分 $\tau_{fg} \sin \alpha$ の反力によって拘束圧が $\tau_{fg} \sin \alpha$ 増加する。これより、廃棄物のせん断面上では、以下の関係が成り立つ。

$$\tau_s = \tau_m + \tau_{fg} (\sin \alpha \cdot \tan \phi_m + \cos \alpha) \quad (5.1)$$

ここで、実際の界面強度は、地盤の変形によって繊維廃材が変形して初めて発揮される受働的なメカニズムを有しており、せん断面の角度 α によっては、引張変形は発生せずに界面強度は生じないのが現実である¹⁴⁾。そこでここでは、第3章に示した構成モデル内での考え方と同様に、粒状廃材に引張ひずみが発生する場合に、繊維廃材も変形して引き抜けに至ると考える。このとき、引張試験の性質より、繊維廃材の配向と引張面の角度は $\alpha = 90^\circ$ であるため、図-5.19 のひ

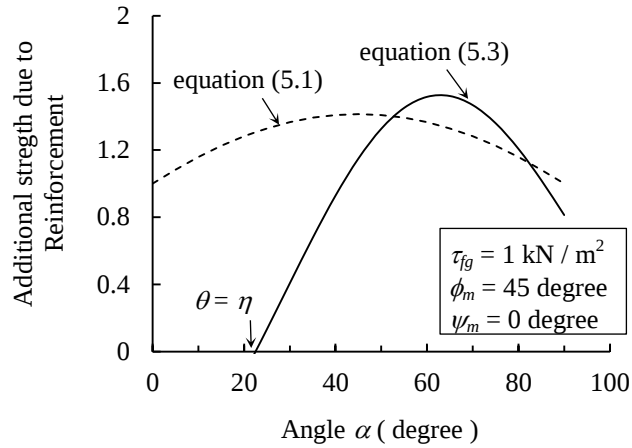


図-5.20 繊維廃材による実質的な補強効果

ずみモール円の幾何学的関係より，以下の関係式が成立する．ここで，式(5.2)中の ψ_m は粒状廃材のダイレイタンシー角を意味している．

$$m(\alpha) = \frac{\varepsilon_m(\alpha)}{\varepsilon(\alpha = 90^\circ)} = \frac{2\sin^2(\alpha + \eta) - (1 - \sin \psi_m)}{(2\cos^2 \eta - (1 - \sin \psi_m))} \quad (5.2)$$

式(5.2)は，繊維廃材に発生する引張変形の大きさを規定するものであり，式(5.2)を式(5.1)に適用することで，廃棄物のせん断強度は以下に示した式(5.3)で表されることとなる．

$$\tau_s = \tau_m + \tau_{fg} \times m(\alpha) \times (\sin \alpha \tan \phi_m + \cos \alpha) \quad (5.3)$$

式(5.3)内の第2項が繊維廃材の引張強度による実質的な補強効果を表しており，その角度 α との関係は図-5.20に示すようになる．本図より，繊維廃材の伸び縮みのない方向と一致する $\alpha = \eta = 45 - \phi_m / 2$ 以下では，補強効果は発揮されず， $\alpha = 45 + \phi_m / 2$ で最も補強効果が顕著に表れることが確認される．つまりこれは，繊維廃材が $\alpha = \eta = 45 - \phi_m / 2$ 以下の配向で堆積している条件では，繊維廃材の影響のない，粒状廃材のみに依存したせん断強度が発揮されていることを意味している．これより，繊維廃材の配向をせん断面の方向とほぼ同等に設定した一面せん断試験を行うことで，繊維廃材の影響を比較的少なくした粒状廃材のパラメーターを抽出できるものと考えた．

ここで，以上に示した式(5.3)によって，繊維廃材の配向とせん断面の角度を変化させた実験結果（第4.4.4項参照）を評価し，その再現性を確認した．ここで用いる材料パラメーターは，先にも述べたように，大型引張試験より求まる引張粘着力 c_T と引張摩擦角 ϕ_T を繊維廃材の界面強度のパラメーターとして使用し，繊維廃材を水平に堆積させた一面せん断試験結果より内部摩擦角を設定した．計算に使用した条件とパラメーターは表-5.4に示す通りである．

実験結果と計算結果の比較として，繊維廃材の配向とせん断面の角度が $\alpha = 0, 30, 45, 60, 90^\circ$ となる一面せん断試験結果より，廃棄物のせん断強度と角度 α の関係を図-5.21に示した．本図

表-5.4 廃棄物のせん断強度評価に使用したパラメーターの一覧

	Initial state of waste			
Parameters	Collected site	Dry density ρ_{di} (g / cm ³)	Water content w (%)	Normal stress σ (kN / m ²)
Values	Site B	0.80	20.0	25.0

	Granular waste		Fibrous waste	
Parameters	Friction angle ϕ_m (degree)	Dilatancy angle ψ_m (degree)	Interface cohesion c_{fg} (kN / m ²)	Interface friction angle ϕ_{fg} (degree)
Values	44.0	0	10.3	18.2

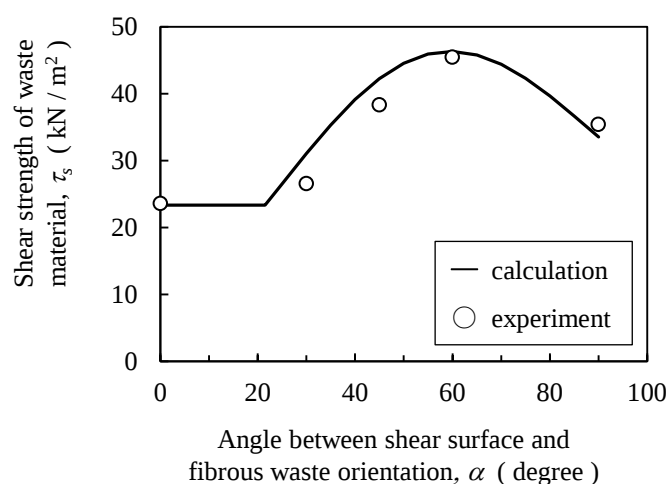


図-5.21 廃棄物のせん断強度と角度 α の関係

では、第 4.4.4 項の実験結果と式(5.3)より計算される計算結果を同時に示している。結果より、計算結果は実験結果をよく表現できており、計算に使用したパラメーターの有用性が伺える。

今回提案した、粒状廃材と繊維廃材の材料パラメーターは、廃棄物そのものを用いた実験により求まる平均的な値ではあるものの、本来の解析パラメーターと比較して力学的な意味を大きく逸脱するものではなく、それなりの妥当性も保障されている。さらに、粒状廃材と繊維廃材の両方について、本来の方法によってパラメーターを決定する場合に比べて、格段に設定しやすいパラメーターになっていることが工学的に非常に重要な意味を持つものである。

5.4 提案した構成モデルによる埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価

本節では、第 3 章で提案した繊維-粒子複合材料の構成モデルによって、三軸圧縮試験より求まる埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価を行い、廃棄物の力学特性を理論的に解釈することを

表-5.5 解析条件と解析パラメーターの一覧

Radius stress σ_r (kN / m ²)	Shearing condition	Parameters of granular waste				Parameters of fibrous waste				
		ν_m	E_m	ϕ_m	ψ_m	μ_f	E_f	$f(\theta)$	ϕ_{fg}	c_{fg}
20	•CD condition •Back pressure: 200 kPa •B value > 0.95 •Shearing rate: 0.2 %/min	0.25	1200	44	11	16.5	13000	Diambra (2007)	18.2	10.3
50		0.25	3000	44	11					
100		0.25	6000	44	11					

*単位は、 ν_m は無次元量、 μ_f は%, $E_m \cdot E_f \cdot c_{fg}$ は kN/m², $\phi_m \cdot \psi_m \cdot \phi_{fg}$ は degree で表示している

目指した。またその結果より、本モデルの適用性や現状の課題について考察した。ここでは、第 3 節で紹介した粒状廃材と繊維廃材の材料パラメーターを使用してモデル解析を実施し、第 2 節に示した実験結果との比較を行うものとした。モデル解析に使用した材料パラメーターは表-5.5 に示す通りである。先に述べたように、繊維廃材のパラメーターは大型引張試験より求まる実験結果より、引張剛性・界面粘着力・界面摩擦角を算定した。またここで、繊維廃材の体積含有率については、詳細な値を求めることができないため、繊維廃材の平均的な比重を 1.00 g / cm³ と仮定することで、重量含有率 16.5 % と同様の値を使用するものとした。この値の妥当性は証明することはできないが、繊維材料の多くは比重 1.0 g / cm³ 程度であるため、平均的にはこの程度の値に収束するとして考えることで問題ないとする^{18), 19)}。また、繊維配向角分布は、Diambra et al²⁰⁾ によって提案されている分布を使用した(第 3 章、図-3.6 参照)。粒状廃材のパラメーターについては、繊維廃材の配向とせん断面の方向を同一とした一面せん断試験結果により設定した。

図-5.22 に、B-19 試料を使用した三軸圧縮試験結果と、表-5.5 に示した材料パラメーターを使用してモデル解析を行った結果を同時に示した。本図では、軸差応力 q と軸差ひずみ ε_q の関係、および体積ひずみ ε_p と軸差ひずみ ε_q の関係をまとめて示している。結果より、軸差応力と軸差ひずみの関係では、軸差ひずみの小さな領域において、すべての条件で、モデル解析結果が実験結果をよく表現できていることが確認される。しかし、粒状廃材が塑性領域に至るような軸差ひずみの大きな範囲において、拘束圧の大きな条件では、モデル解析結果により算定される軸差応力は実験結果を少し下回る結果となった。また、体積ひずみと軸差ひずみの関係においても、軸差ひずみの小さな領域では、モデル解析結果は実験結果を良く表現できているといえる。しかし、第 3 章に示した繊維-粒子複合材料との比較結果と同様に、モデル解析結果は、体積の圧縮する卓性を過大に評価する傾向が認められた。このように、軸差ひずみの大きな領域や、拘束圧の大きな条件でモデル解析結果が実験結果を再現できない理由としては、本モデル解析において、繊維廃材の体積含有率と繊維配向角分布を初期状態のまま固定していることによる影響が大きいためと考えられた。第 4 章で示したように、繊維廃材を多く含む廃棄物は、拘束圧の増加によって

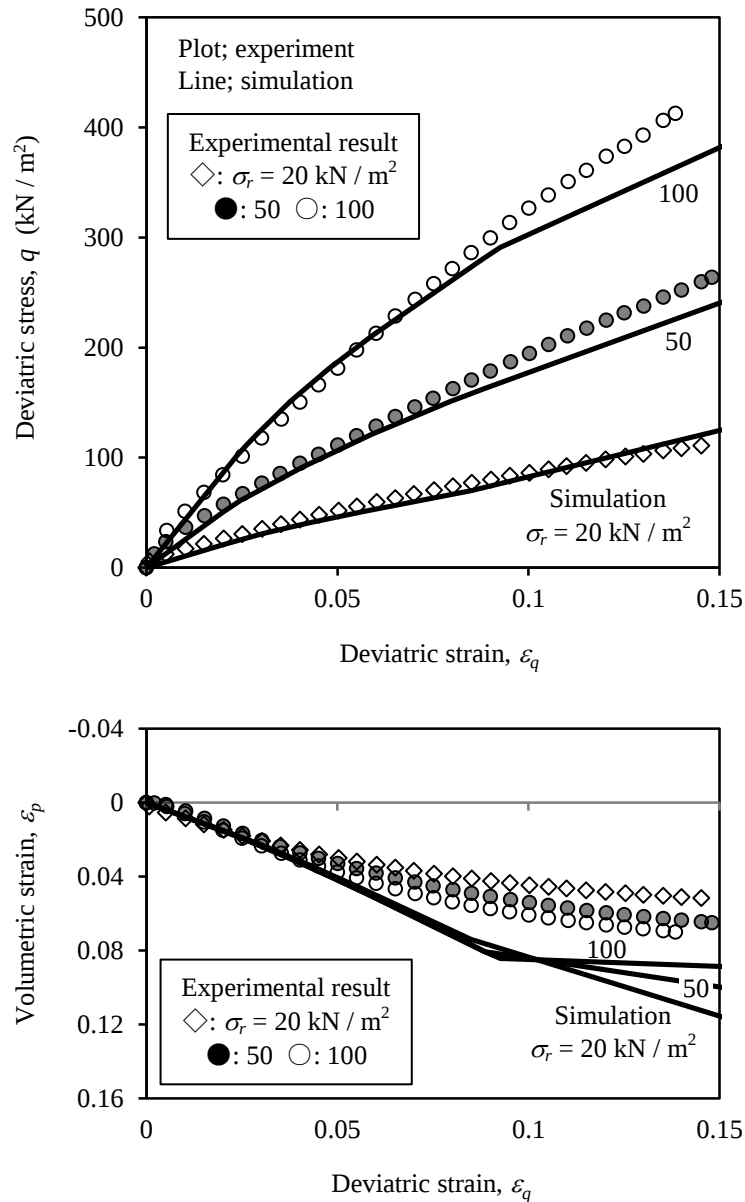


図-5.22 廃棄物(B-19 試料)の三軸圧縮試験結果と解析結果の比較

急激な密度増加を示すような、圧縮特性の卓越した材料であることが明らかになっている。そのため、側圧を固定した三軸圧縮試験では、軸差ひずみの増加と共に拘束圧も増加するため、繊維含有率や繊維配向角分布が大きく変動している可能性が高いといえる。これより、軸差ひずみの増加に伴って、それらの影響が顕著に表れ、モデル解析結果の再現性が低くなったと考える。第3章にも述べたように、拘束圧の影響を考慮した繊維配向角分布の評価は、繊維-粒子複合材料の力学特性を考える上でも重要な課題であり、今後、本研究で取り組んでいきたいと考えている。

以上の結果より、廃棄物を繊維-粒子複合材料として単純化して考えることで、その応力・ひずみ関係を理論的に解釈できる可能性が示唆されたと考える。厳密な評価を行う上では、廃棄物の卓越した圧縮特性を上手く表現することが重要な課題であることは先に述べた通りである。しか

し、提案した構成モデルによる考え方を適用することで、様々な廃材を含む廃棄物の力学特性を、繊維廃材に着目して比較的簡単に評価できることが検証された。

5.5 本章の要約

本章では、第 3 章で提案した繊維-粒子複合材料の構成モデルを、埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価へ適用することを目的として、第 4 章に示した Site B 廃棄物を用いて三軸圧縮試験を実施し、モデル解析結果との比較を行った。ここでは特に、三軸圧縮試験により求まる埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の力学的意味を考察すること、様々な廃材を含む廃棄物から解析に必要な材料パラメーターを決定する方法を提案すること、本モデルの埋立廃棄物への適用性を検証すること、に主眼を置いて議論を進めた。以上、本章により得られた主要な成果を要約すると以下のようであった。

- 1) Site B 廃棄物 (B-75 試料) と 19 mm 以下に粒度調整した試料 (B-19 試料) の物理・力学特性を比較した。その結果、締固め特性や透水特性などに若干の差は認められたものの、一面せん断試験より求まるせん断特性にはほとんど違いはみられなかった。これより、試料の粒径を調整することの影響はないとして、B-19 試料を用いて中型三軸圧縮試験を実施するものとし、Site B 廃棄物の代表的な応力・ひずみ関係を表現しているとして考察を加えた。
- 2) B-19 試料を用いた圧密・排水条件の三軸圧縮試験結果から、これまでの繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係や廃棄物の原位置せん断特性に認められたように、軸差ひずみの増加に伴って軸差応力が線形的に増加しつづけ、粒状材料にみられるような接線剛性の低下はほとんど認められなかった。また、応力比と軸差ひずみの関係では、拘束圧が増加することによって、応力比が低下する傾向を示し、さらに垂直応力と軸差ひずみの関係についても、拘束圧の増加によって圧縮特性が卓越することが確認された。また、三軸圧縮試と一面せん断試験の結果を比較すると、繊維廃材の配向とせん断面の方向の関係が両者で異なることが、せん断特性に最も影響を与えるようであり、繊維廃材の配向とせん断面の角度が大きくなる三軸圧縮試験の方が一面せん断試験に比べて応力の増加傾向が大きくなる傾向を示した。
- 3) 本モデルを埋立廃棄物へ適用する上で、解析に必要な材料パラメーターの決定方法を提案した。廃棄物は様々な種類や形状を有する繊維廃材を含んでおり、そのひとつひとつの特性を解析に反映させることは難しいと考えられた。そこでここでは、廃棄物そのものを使用した実験により平均的な物性値を材料パラメーターとして代用する方法を提示した。繊維廃材に

については、繊維廃材の引張挙動と引き抜け挙動を同時に考慮できる引張試験を提案し、本試験より求まる初期剛性・引張粘着力・引張摩擦角を解析に必要な繊維廃材の引張剛性・界面粘着力・界面摩擦角として代用することとした。粒状材料については、繊維廃材の影響を無視できる繊維配向を水平とした一面せん断試験を提案し、これより求まる初期剛性と内部摩擦角を解析に使用するものとした。今回提案した、粒状廃材と繊維廃材の材料パラメーターを使用して廃棄物の強度評価を行うことで、本来の解析パラメーターと比較して力学的な意味を損なわないことを検証した。ここで、粒状廃材と繊維廃材の両方について、本来の方法によってパラメーターを決定する場合に比べて、格段に設定しやすいパラメーターであることが工学的に非常に重要な意味を持っている。

- 4) Site B 廃棄物 (B-19 試料) の三軸圧縮試験結果と本モデルによる解析結果を比較し、有用性の検証を行った。その結果、軸差ひずみの小さな領域において、モデル解析結果が実験結果をよく表現できていることが確認された。しかし、粒状廃材が塑性領域に至るような軸差ひずみの大きな範囲において、特に拘束圧の大きな条件では、モデル解析結果により算定される軸差応力は実験結果を少し下回る結果となり、体積ひずみと軸差ひずみの関係においても体積の圧縮する卓性を過大に評価する傾向が認められた。このように、軸差ひずみの大きな領域や、拘束圧の大きな条件でモデル解析結果が実験結果を再現できない理由としては、本モデル解析において、繊維廃材の体積含有率と繊維配向角分布を初期状態のまま固定していることによる影響が大きいと考えられた。第4章で示したように、繊維廃材を多く含む廃棄物は、拘束圧の増加によって急激な密度増加を示すような、圧縮特性の卓越した材料であることが明らかになっており、軸差ひずみの増加に伴って、それらの影響が顕著に表れ、モデル解析結果の再現性が低くなったと考えられた。しかし、提案した構成モデルによる考え方を適用することで、様々な廃材を含む廃棄物の力学特性を、繊維廃材に着目して比較的簡単に評価できることが検証され、廃棄物を繊維-粒子複合材料として単純化して考えることで、その応力・ひずみ関係を理論的に解釈できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 嘉門雅史, 大嶺聖, 勝見武: 地盤環境工学, 第1章 地盤環境工学のあらまし, pp.1-12, 2010.
- 2) 不法投棄等の斜面安定性評価研究グループ(山脇敦, 島岡隆行, 大嶺聖, 勝見武, 土居洋一, 川寄幹生, 柴暁利, 川井晴至, 坂口伸也, 小原孝之): 不法投棄等現場の堆積廃棄物の斜面安定性評価方法, (4) 概略評価方法, pp.12-34, 大成出版, 2013.
- 3) 東畑郁生, 鵜野雅明, 河野有司, 亀田真加, 喜多祐介, 米内祐史, F. Kolsch : 一般廃棄物の力学的性質に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.3, pp.631-644, 2010.

- 4) 国際ジオシンセティックス学会日本支部, ジオメンブレン技術委員会: ごみ埋立地の設計施工ハンドブック, 第 8 章 廃棄物の地盤工学, pp.187-200, 2000.
- 5) Zekkos, D., Athanasopoulos, G. A., Bray, J. D., Grizi, A., Theodoratos, A. : Large-scale direct shear testing of municipal solid waste, *Journal of Waste Management*, Vol.30, pp.1544-1555, 2010.
- 6) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 第 7 編 変形・強度試験, 第 3 章 三軸圧縮試験, pp.552-643, 2009.
- 7) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 第 3 編 物理試験, 第 4 章 粒度試験, pp.115-136, 2009.
- 8) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 第 5 編 安定化試験, 第 2 章 突固めによる土の締固め試験, pp.373-385, 2009.
- 9) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 第 6 編 透水試験・圧密試験, 第 2 章 土の透水試験, pp.449-461, 2009.
- 10) 川井晴至, 島岡隆行, 山脇敦, 大嶺聖, 川寄幹生, 土居洋一, 勝見武, 梨暁利, 坂口伸也, 宮本慎太郎: 廃棄物埋立地盤中の紐状プラスチックに発生する引張りずみに関する考察
- 11) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也, 山脇敦: 廃棄物埋立地盤中の軟プラスチックが有する補強効果に関する基礎的研究, *ジオシンセティックス論文集*, 第 29 巻, pp169-176, 2015.
- 12) 川井晴至, 島岡隆行, 坂口伸也: 廃棄物埋立地盤中の軟プラスチックが有する補強効果に関する基礎的研究 2, *ジオシンセティックス論文集*, 第 30 巻, pp125-132, 2015.
- 13) 例えば, 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.
- 14) 例えば, 土質工学会: 土の強さと地盤の破壊入門, 第 2 章 土の要素のせん断強度(材料力学), pp.27-154, 1987.
- 15) Koelsch, F. : Toolkit Landfill Technology Chapter4.6 Static Stability of Landfills, Technical Committee on Geotechnics of Landfill Engineering, German Geotechnical Society (DGGT), 2009.
- 16) 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と強度・変形特性, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.825-826, 2000.
- 17) 地盤工学会: 入門シリーズ 24, 補強土入門, 第 1 章, pp5-11, 1999.
- 18) 華陽物産株式会社: プラスチック物性一覧表 (熱可塑性), プラスチック/樹脂の材質一覧, http://www.kayo-corp.co.jp/tech/plastic_list01.html, (参照 2013-8-19)
- 19) 華陽物産株式会社: プラスチック物性一覧表 (熱硬化性), プラスチック/樹脂の材質一覧, http://www.kayo-corp.co.jp/tech/plastic_list02.html, (参照 2013-8-19)
- 20) Diambra, A., Russell, A. R., Ibraim, E. and Wood, D. M. : Determination of fibre orientation distribution in reinforced sands, *Jornal of Geotechnique*, Vol.57, No.7, pp.623-628, 2007.

第6章 総括

本論文では、繊維-粒子複合材料を対象として、複合材料内での繊維材料の変形挙動とその粒状材料との関連性を実験的に明らかにし、それら実験結果から得られる実現象を反映した構成モデルの構築を行った。さらに、本モデルの適用性の拡大として、埋立廃棄物の力学特性の評価に着目し、原位置と室内において繊維廃材の影響に着目して埋立廃棄物の力学特性を広範に把握すると共に、実験結果と本モデルによる解析結果を比較することで、その有用性の検証を行った。以下に、本論文で得られた各章ごとの成果を要約し、総括すると共に、今後の課題や展望を記した。

第1章 序論

本章では、繊維-粒子複合材料の中でも、特に繊維混合補強土と埋立廃棄物に焦点を当てて既往の研究成果を概観した。繊維混合補強土については、力学特性を実験的に把握した研究成果を要約し、さらに力学モデルに関する研究の流れと現状の把握を行った。これより、粒状材料内での繊維材料の変形挙動を繊維配向角度に着目して明らかにすることの重要性を示した。また、埋立廃棄物については、変形・強度特性に関する研究成果を整理することで、組成割合の影響と力学特性の関係性を明確にすることの必要性を述べた。最後に、これらを踏まえて、本論文の目的や構成、およびその内容を簡単に紹介した。

第2章 繊維材料の変形挙動とその粒状材料との関連性

本章では、繊維-粒子複合材料が変形する際の、繊維材料の変形挙動およびその粒状材料との関連性を明らかにすることを目的として、要素レベルの繊維-粒子複合材料から微視的な要素を抜き取った状態を想定した2種類のせん断試験を行った。ひとつは、繊維材料の変形挙動を目視により観察する「可視化一面せん断試験」であり、もうひとつは、ひずみゲージによって繊維材料の変形挙動を定量的に把握する「数量化一面せん断試験」である。この際、既往の研究成果より、重要性が指摘されている繊維配向角度についても検討するものとし、繊維配向とせん断面の角度(繊維-せん断面角度)が $\alpha = 0, 30, 60, 90^\circ$ の場合の繊維材料の変形挙動の把握を行った。実験結果より、粒状材料内での繊維材料の変形挙動は、複合材料の変形に伴ってまず引張挙動を示し、さらに繊維材料と粒状材料の界面強度を超える応力状態に達すると、引き抜け挙動を示すような

弾完全塑性的な挙動を示した。さらに、繊維材料と粒状材料の関連性を、応力増分 / ひずみ増分 / ひずみエネルギー増分の比較によって検証することで、繊維材料の引張挙動は粒状材料とひずみエネルギー増分が等価となるように進展していることを明らかにした。また、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ず、引き抜け挙動時に顕著に表れることを示した。これは配向角度に応じて繊維材料に働く拘束圧が変化するためであり、引き抜けが発生する条件を繊維配向角度と複合材料の応力状態から評価する必要があることを言及した。以上より、均質化理論をベースとして繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築する際には、繊維材料の応力・ひずみ関係を、繊維配向角分布と関連付けて繊維材料の引張挙動と引き抜け挙動を区別する手法を開発することで、繊維材料が補強効果を発揮する条件を明確に表現できるものとした。さら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で、粒状材料との相互作用によって発生する繊維材料の局所的な不均一性を考慮した適切な均質化が行えることを考察した。

第 3 章 繊維材料と粒状材料の関連性を考慮した繊維-粒子複合材料の構成モデル

本章では、均質化理論をベースとした理論的なアプローチにより、軸対称条件を想定した繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築を試みた。まず、繊維材料と粒状材料に分担される応力の割合を評価する応力分担テンソルを導入して、繊維材料と粒状材料の特性を均質化する方法を示した。ここでは、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分を等価として応力分担テンソルを導出することで、繊維材料と粒状材料の剛性マトリックスにより応力分担テンソルが決定されることを示した。さらに、粒状材料と繊維材料の応力・ひずみ関係の評価方法を提示した。粒状材料については、既往の研究を参考にして、弾完全塑性モデルにより評価するものとした。繊維材料については、まず繊維材料が配向角度 θ で堆積した微視的な要素を想定し、軸対称条件における微視的な応力・ひずみ関係を導出した。また、微視的な特性から巨視的な特性を評価する際に、繊維配向角分布を確率分布関数で表現し、繊維材料の不均質性の影響を考慮できるものとした。さらに、繊維材料に引張ひずみが発生する条件式と繊維材料が引き抜け挙動を示す判定式を、繊維配向角分布と関連付けて評価することで、繊維材料の引張挙動と引き抜け挙動を規定すると共に、補強効果が発揮される条件を明確なものにした。最後に、本モデルによる解析結果と三軸圧縮試験による実験結果の比較を行い、モデルの有用性の検証を行った。その結果より、本モデルによって繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を考えることで、繊維材料の特性の違いによる補強効果の影響を適切に評価できることを示した。ここで、粒状材料の応力・ひずみ関係を弾完全塑性挙動と簡略化して評価したため、粒状材料の特性の違いを詳細に評価することは難しいようであった。しかし、特に、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係には繊維材料の影響が最も支配的であるため、本モデルにより繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を予測 / 評価することは有意義であると考えられた。

第 4 章 繊維廃材の影響に着目した埋立廃棄物の変形・強度特性

本章では、国内不法投棄等現場 2 ヶ所、海外処分場内 2 ヶ所の計 4 ヶ所の廃棄物地盤を対象として、室内と原位置で一面せん断試験を行い、埋立廃棄物の変形・強度特性の把握を行った。さらにここでは、既往の研究成果にも指摘されている、繊維廃材の影響について重点を置いて議論するものとし、廃棄物を繊維-粒子複合材料の一つとして取り扱うことにより、組成割合の違いによる影響を評価することを考えた。まず、国内不法投棄等現場 1 ヶ所から採取した廃棄物を用いた室内実験結果を示し、初期状態量の違いが変形・強度特性に与える影響を検証すると共に、土質力学をベースとしたせん断強度評価の適用性を確認した。さらに、4 ヶ所の廃棄物地盤で行った原位置実験結果を示し、原位置での変形・強度特性を明確にすると共に、繊維廃材による影響を考察した。室内試験結果より、廃棄物に繊維廃材が多量に含まれている影響として、低拘束圧下において急激な密度増加を示し、高拘束圧下では応力比が減少する傾向にあること、さらにこのような拘束圧依存性によって低拘束圧下で初期密度の影響が顕著になることを明らかにした。また、土質力学をベースとしたせん断強度評価には、このような拘束圧に依存する特性を考慮できるセカントアングルや Hvorslev の規準による強度評価が適していることを確認した。次に、原位置試験結果より、廃棄物の原位置せん断特性は、繊維廃材含有率が大きくなると、繊維廃材による補強効果により、せん断応力が線形的に増加してピーク値や限界状態などの収束値を示さない延性的な挙動を示すことを明らかにした。さらに廃棄物の原位置せん断強度と繊維含有率の関係を考察すると、繊維含有率に依存して急激に強度が増加もしくは低下する傾向が認められた。以上の結果より、廃棄物の変形・強度特性は繊維廃材の含有率や挙動に大きく依存することが明らかになり、繊維廃材の影響に着目することで、組成割合の異なる廃棄物を包括的に評価できる可能性のあることを実験的に検証した。

第 5 章 繊維-粒子複合材料としての埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価

本章では、第 3 章で提案した繊維-粒子複合材料の構成モデルを、埋立廃棄物の応力・ひずみ関係の評価へ適用することを目的として、第 4 章に示した Site B 廃棄物を用いて三軸圧縮試験を実施し、モデル解析結果との比較を行った。その中で、まず本モデルを埋立廃棄物へ適用する上での、解析に必要な材料パラメーターの決定方法を提案した。廃棄物は様々な種類や形状を有する繊維廃材を含んでおり、そのひとつひとつの特性を解析に反映させることは現実的でないため、ここでは、廃棄物そのものを使用した実験により平均的な物性値を材料パラメーターとして代用する方法を提示した。繊維廃材については、繊維廃材の引張挙動と引き抜け挙動を同時に考慮できる引張試験から初期剛性・引張粘着力・引張摩擦角を解析に必要な繊維廃材の引張剛性・界面粘着力・界面摩擦角を求めることを提案した。さらに粒状材料については、繊維廃材の影響を無視できる繊維配向を水平とした一面せん断試験より求まるヤング率と内部摩擦角を解析に使

用することを提案した。また今回提案した、粒状廃材と繊維廃材の材料パラメーターを使用して廃棄物の強度評価を行い、本来の解析パラメーターと比較して力学的な意味を損なわないことを検証した。次に、Site B 廃棄物 (B-19 試料) の三軸圧縮試験結果と本モデルによる解析結果を比較し、有用性の検証を行った。その結果、軸差ひずみの小さな領域において、モデル解析結果が実験結果をよく表現できていることが確認された。しかし、粒状廃材が塑性領域に至るような軸差ひずみの大きな範囲において、特に拘束圧の大きな条件では、モデル解析結果により算定される軸差応力は実験結果を少し下回る結果となり、体積ひずみと軸差ひずみの関係においても体積の圧縮する卓性を過大に評価する傾向が認められた。第 4 章で明らかになったように、繊維廃材を多く含む廃棄物は圧縮特性の卓越する材料であるため、圧縮による繊維材料の体積含有率や配向角分布の変化を適切に評価する必要があることが考察された。しかし、様々な廃材を含む廃棄物の力学特性についても、提案した構成モデルによる考え方に基づいて繊維廃材の特性に着目した理論的解釈を施すことで、廃棄物特有の延性的な挙動などを適切に評価できる可能性のあることが示唆された。

以上が本論文の主要な成果であり、繊維材料の応力・ひずみ関係と粒状材料との関連性の実際を考慮することで、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を適切に評価できることが検証された。また、埋立廃棄物についても、本モデルによって繊維廃材に着目して力学特性を評価することで、種々の廃棄物地盤を包括的かつ理論的に解釈できる可能性が示唆された。しかし、本構成モデルでは、各種解析に必要なパラメーターを初期状態により決定しているため、変形に伴って変化する繊維材料の体積含有率や配向角分布による影響を適切に評価できていないことが考えられた。また本モデルでは、繊維材料の長さや縦横比などの寸法・形状の影響を考慮しておらず、その部分に疑問が残るのも事実である。さらに今後の展開として、提案した構成モデルに、繊維廃材の経時的な劣化特性の評価、および空間的な不均一性の評価を付与することで、繊維補強土構造物の変形性・安定性を時系列的に予測/評価することを目指している。以下では、これらのような課題点を受けて、今後実施することを考えている課題解決の方法やその展望について述べた。

今回提案した構成モデルに関する課題の解決としては、第一に、繊維材料の配向角分布の評価に着目した検討を行う予定である。ここでは、拘束圧レベルや粒状材料の変形の影響はもちろんのこと、繊維材料の形状による影響を考慮した新たな繊維配向角分布の評価方法を提案することを考えている。具体的には、X 線 CT スキャン装置を用いて複合材料内に混入している繊維材料を可視化することで、拘束圧の異なる場合や繊維材料の形状が異なる場合の繊維配向角分布を実際に把握し、それらの影響を評価できる確率密度関数の設定方法を検討する予定である。これにより、拘束圧の影響はもちろんのこと、本論文で考慮していない繊維材料の形状による影響を構成モデルに反映できるものと考えている。また種々の境界値問題に本モデルを適用することを見

越して、一般的な三次元応力状態を想定したモデルの拡張を行っていく予定である。

繊維材料の劣化特性を経時的に評価する手法については、粒状材料内の繊維材料の劣化に及ぼす影響として温度変化と加水分解に着目し、まず実験的にそれらの影響と劣化特性の関係を把握する。また繊維材料の劣化と複合材料の応力・ひずみ関係の関連性を把握しておく必要のあるため、意図的に劣化度を変化させた供試体を用いて三軸圧縮試験を実施し、劣化による複合材料への影響を定量的に把握する。これらの実験結果を元に、「確率過程」をベースとした理論展開によって、時間と劣化の関係および劣化と複合材料の応力・ひずみ関係を評価することで、時間の経過と共に変化する繊維-粒子複合材料の力学特性をモデル化していく予定である。

繊維材料の空間的ばらつきの評価については、確率・統計的に不均一性をコントロールした繊維補強土構造物を作製し、それに荷重や水力などの外力を与えた際の構造物の挙動を実験的に把握することで、空間的不均一性と構造物の変形性 / 安定性の関係を定量的に評価することを考えている。さらに、実際に実構造物の空間的不均一性を評価する上で、不均一性を表す指標を比較的簡易に測定できる原位置地盤調査ツールの開発にも取り組みたいと考えている。

将来的には、本研究によって得られた知見を、浸食や風化などによる材料劣化の分野へと発展させることを考えている。異種複合材料の力学特性の評価や時系列劣化特性の解明、空間的ばらつきの評価は土木工学における主要な課題であり、本研究プロセスや開発される力学モデルをもとに、様々な分野に拡張可能な学際的知見を提示できるものと考えている。

謝辞

本論文は、平成 23 年 4 月に卒業研究として地盤工学を専攻して以来、地盤工学研究室のテクニカルスタッフとして 1 年間、大学院修士課程の 2 年間、博士課程（日本学術振興会特別研究員 (DC1)）の 2 年間において行ってきた一連の研究成果をとりまとめたものである。このような学位申請論文をまとめることができるまでには、多くの方々にお世話になり、暖かい御指導ならびに御援助を頂きました。

九州大学大学院教授 安福規之先生には、筆者の研究者としての道を開いて頂いたばかりでなく、日頃から幅広く心温まる励ましと、終始変わらぬ丁寧な御指導と御鞭撻を頂きました。筆者が研究者の道を志すきっかけを与えて下さったのが先生であり、地盤工学研究室のテクニカルスタッフとしての 1 年間、修士・博士課程および日本学術振興会特別研究員としての 4 年間があったのは、ひとえに先生の御指導と御助力あつてのことでした。ご多忙な毎日の中、貴重な時間を割いて丁寧な御指導を頂いたこと深く感謝しております。先生との議論は筆者にとって大変刺激的であり、研究に関することはもちろんのこと、人として、研究者としての心構えやものの考え方について多くのことを学ばせて頂きました。先生の研究に対する情熱的かつ遊び心にあふれる姿勢は、筆者の憧れであり目標とするところです。本研究における時間・空間的な不均一性の評価を構成モデルに導入するという発想は、先生の閃きがきっかけでスタートしたものであります。本論文でその内容をとりまとめるまでには至りませんでした。先生がよく口にされるように「やり抜くこと」を大切に、今後もより一層の研鑽を積んでいきたいと思ひます。

九州大学大学院教授 園田佳巨先生ならびに同島岡隆行先生には、本論文をまとめるにあたり、副査を引き受けて頂き、本論文の内容について御指導を頂くとともに、不備な事項について大変貴重な御指摘を頂きました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

長崎大学大学院教授(前 九州大学大学院准教授) 大嶺聖先生には、卒業研究以来、直接的あるいは間接的に心温かい御指導と御援助を頂きました。先生は、研究における筆者の初めての指導教員であります。無学な筆者の至らない話を辛抱強く聞いて頂き、納得するまで議論に付き合っ頂いたこと大変感謝しております。また本論文の複合材料の応力・ひずみ関係の定式化は、先生の学位論文の内容を参考にして考えられたものであり、地盤工学における理論や実験の知識など、先生との議論から数多くのことを学ばせて頂きました。先生の研究に対する真摯な姿勢や教育熱心なところは、筆者が見習うべき手本だと思ひております。

九州大学大学院教授 ハザリカヘマンタ先生には、日頃から暖かい励ましのお言葉を頂いており、筆者を元気づけて下さいました。また検討会や学会発表の際には的確な御指摘を頂きました。先生の国際性豊かな研究スタイルは筆者が学ぶべき点であります。

九州大学大学院技官 中島通夫氏には、実験装置の取扱い方や実験方法をはじめ、数多くのことを教えて頂き、筆者にとって非常に頼もしい存在でした。中島さんの実験に対する辛口の厳しい意見や助言は、筆者を大いに奮い立たせて下さいました。中島さんの実験に対する厳しい姿勢と、普段の温かくて気さくなところは筆者の憧れであります。また、本研究で開発した原位置・室内両用型一面せん断試験装置や、大型引張試験装置などは中島さんに作製して頂いたものです。中島さんなくして、実験を行うことはできませんでした。ここに記して感謝の意を表します。

九州大学大学院助教 石蔵良平先生には、研究で行き詰った際や疑問な点がある際に、よく相談に乗って頂き、親切な御指導を頂きました。時として発散しがちな筆者の話を聞いて下さり、辛抱強く御指導頂いたこと大変感謝しております。また先生には、研究のみでなく、公私にわたっていろいろなことをご教示頂きました。先生の研究に対する内に秘めた情熱的な姿勢や普段の気さくな雰囲気は、筆者の見習うべきところであり、手本であります。

九州大学大学院准教授 笠間清伸先生には、日頃から暖かい励ましと丁寧な御指導と御援助を頂きました。特に筆者が博士課程に進学してからは、勉強会を通して確率論・統計学の基礎を教えて頂きました。先生に教えて頂いた知識は、今後の時間・空間的な不均一性に関する研究において、筆者を大きく助けてくれるものと感じております。また公私にわたっていろいろと相談に乗って頂いたこと大変感謝しております。先生の温かいところや着実に成果をあげる研究への真摯な取り組み方は、筆者の手本とすべきところであり目標であります。

福井大学大学院准教授(前 九州大学大学院助教) 小林泰三先生には、進路のことや研究のことなど幅広く相談に乗って頂き、その度に的確なアドバイスを頂きました。先生との議論や雑談は、筆者にとって大変新鮮であり、新しい知恵が生まれることもよくありました。先生の研究に対する情熱や厳しい姿勢は、筆者にとって今も目標とするところであります。

山梨大学大学院助教(前 九州大学大学院特任助教) 荒木功平先生には、勉強会を通して不飽和土の力学を教えて頂きました。また日頃から暖かい励ましのお言葉を頂き、大変感謝しております。先生の優しい雰囲気は、筆者の学ぶべきところであります。

九州大学大学院助教 古川全太郎先生には、主に同研究室の博士課程の先輩として、日頃から暖かい励ましのお言葉を頂きました。また同年代ということもあり、公私にわたって気軽に相談に乗って頂くことも多く、大変感謝しております。先生のふんわりとした優しい雰囲気は、特に筆者が見習うべきところであります。

本研究を進めるに当たり、不法投棄等の斜面安定性評価研究グループの皆様にご支援を頂きました。産業廃棄物処理事業振興財団 山脇敦氏には、日頃から暖かい励ましのお言葉を頂

きました。また、研究計画やその内容など丁寧な御指導を頂きました。山脇さんの物腰柔らかな対応と温かい雰囲気のおかげで円滑に研究が進んでいきました。前田建設工業株式会社(前 九州大学東アジア環境研究機構特任助教) 川井晴至先生には、日頃から暖かい励ましのお言葉を頂いたり、時には実験をお手伝いして頂いたり、幅広く御指導頂きました。同じような課題に対する研究を行っているため、研究で行き詰った際には、いろいろとご相談させて頂きました。先生との議論の中で、頭が整理されていくことも多くあり、大変感謝しております。埼玉県環境科学国際センター 川寄幹生先生には、日頃から暖かい励ましのお言葉を頂いたり、現場実験をお手伝いして頂いたりと非常にお世話になりました。筆者とは研究分野や研究機関が異なるにも関わらず、熱心で温かいご指導を頂きまして非常に感謝しております。長野県立大学教授 土居洋一先生には、心温まる励ましと丁寧な御指導を頂きました。特に、現場実験の際には、手際の悪い筆者に対して厳しい御意見や御助言を下さいました。先生の明るい冗談やお話しのおかげで、現場実験を楽しく進めることができました。

さらに、伊東亜紀事務員をはじめ九州大学地盤工学研究室の皆様には多大な御援助を頂きました。伊藤さんには、日頃から研究に専念できる環境を整えて頂き、いつも優しく見守って下さったこと、大変感謝しております。また、卒業生、修了生並びに在校生には惜しみない協力を頂きました。ここに記して厚く謝意を表します。

最後に、8年間に及ぶ長い学生生活を、これまで変わることなく、暖かく見守りそして健康に気遣い励ましてくれた両親と弟妹に心からの感謝を捧げ、本論文の結びとさせていただきます。