

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

FRCC におけるアラミド太径単繊維の 拔出し挙動に関する研究

越前 沙紀

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保 利之

2020年 3月

概要

繊維補強セメント複合材料（FRCC）とは、セメント系マトリクスに短繊維を数パーセント混ぜ込んだ複合材料で、ひび割れ発生時に繊維がひび割れを架橋することで引張靱性能が向上する。既往の研究において、FRCCの引張性能の評価方法として架橋則が提案されている。架橋則は単繊維の拔出し挙動から構築され、単繊維の拔出し挙動は繊維—マトリクス間の付着性状および繊維の配向角に影響されと考えられている。本研究では太径のアラミド繊維を対象として、二種類の配向角のつけ方を模擬した引抜き試験を行い、両者における拔出し挙動の違いを検討することを目的とする。

アラミド太径繊維を対象として、配向角が生じる要因として考えられる、埋込み角と設置角の2通りを模擬した引抜き試験を行った。試験体厚さと繊維配向角をパラメータとして試験体を作製し、引抜き試験を行った。引抜き試験の結果から、付着長を考慮した上で2つの配向角の付き方それぞれにおける配向角と引抜き荷重の関係について考察した。考察から単繊維の架橋モデルの構築を行い、架橋則を計算した。さらに、配向強度が架橋則に及ぼす影響を検討した。

引抜き試験では、配向角の有無や付き方に関わらず、付着長に比例して最大引抜き荷重が大きくなる傾向が見られた。配向角を設けた試験体では繊維の破断やマトリクスの剥離が見られ、特に埋込み角によって配向角を有する試験体で多く見られた。単位付着長あたりの最大荷重と配向角の関係を検討した結果、埋込み角による試験体、設置角による試験体どちらにおいてもスナビング効果を確認できなかった。配向強度を変化させた架橋則の計算では、繊維有効率の増加とほぼ同一の割合で引張応力も増大することを確認した。

目次

第 1 章	はじめに	4
1.1	繊維補強セメント複合材料	4
1.2	架橋則による FRCC の引張性能評価	5
1.2.1	架橋則の概要	5
1.2.2	単繊維の拔出し挙動について	6
1.2.3	配向角について	7
1.3	研究目的	8
第 2 章	実験概要	9
2.1	使用材料	9
2.2	試験体概要	10
2.3	加力方法	12
第 3 章	実験結果	13
3.1	単繊維引張試験	13
3.2	単繊維引抜き試験	15
第 4 章	引抜き荷重－すべり量関係のモデル化	30
4.1	バイリニアモデルによるモデル化	30
4.2	配向角 0 度の試験体	31
4.3	配向角を有する試験体	32
4.4	スナビング効果	35
4.5	引抜き荷重－すべり量関係のバイリニアモデル	36
第 5 章	架橋則の計算	37
5.1	単繊維の架橋モデルと架橋則の計算方法	37
5.2	見かけの繊維破断強度	39
5.3	繊維配向性が架橋則に及ぼす影響	40
第 6 章	結論	41
謝辞		42
参考文献		43

表目次

表 2.1.1	使用材料物性（メーカー試験値）	9
表 2.1.2	マトリクスの調合計画	9
表 2.2.1	試験体一覧	11
表 5.3.1	架橋モデルへの入力値	40

図目次

図 1.2.1	FRCC を用いた構造部材の性能評価の流れ ^[2]	5
図 1.2.2	繊維のマトリクスからの引抜き抵抗機構	6
図 1.2.3	配向角が生じる要因	7
図 2.1.1	実験に使用したアラミド繊維	9
図 2.2.1	試験体および型枠形状	10
図 2.2.2	型枠の断面図（左：埋込み角無し，右：埋込み角有り）	10
図 2.3.1	加力方法	12
図 2.3.2	鋼板に貼り付けた試験体	12
図 3.1.1	単繊維引張試験の加力状況	13
図 3.1.2	引張試験結果一覧	14
図 3.2.1	加力中破断した繊維	15
図 3.2.2	繊維埋込み口のマトリクスの剥離	15
図 3.2.3	90%信頼限界の片側検定棄却	16
図 3.2.4	配向角 0 度の試験体の引抜き荷重－すべり量関係	17
図 3.2.5	配向角 0 度の試験体の引抜き荷重－すべり量関係の平均化曲線	20
図 3.2.6	埋込み角による試験体の引抜き荷重－すべり量関係	22
図 3.2.7	設置角による試験体の引抜き荷重－すべり量関係	25
図 3.2.8	配向角を有する試験体の引抜き荷重－すべり量関係の平均化曲線	29
図 4.1.1	バイリニアモデル	30
図 4.1.2	最大荷重時すべり量の求め方	30
図 4.2.1	最大荷重と付着長の関係	31
図 4.2.2	最大荷重時補正すべり量と付着長の関係	31
図 4.3.1	最大荷重・最大荷重時すべり量と付着長の関係（埋込み角）	33
図 4.3.2	最大荷重・最大荷重時すべり量と付着長の関係（設置角）	34
図 4.4.1	単位付着長あたりの最大荷重と配向角の関係（左：埋込み角，右：設置角）	35
図 5.2.1	配向角による繊維強度の低減	39
図 5.3.1	引張応力－ひび割れ幅関係と繊維有効率－ひび割れ幅関係	40

第1章 はじめに

1.1 繊維補強セメント複合材料

コンクリートの特性として、圧縮強度に比べて引張強度が極めて小さく、脆性的な性状を示すことがあげられる。実構造物ではコンクリートが圧縮力を負担し、鉄筋が引張力を負担するように設計されている。コンクリートそのものの引張靱性を改善するため、セメント系材料に短繊維を混入したものが繊維補強セメント複合材料（Fiber-Reinforced Cementitious Composites, 以下 FRCC）である。FRCC では、ひび割れの発生に伴って繊維がひび割れを架橋することで引張力を負担し、靱性が向上する。FRCC に用いられる繊維の種類は多数存在するが、代表的なものは鋼繊維やアラミド繊維、ポリビニルアルコール（PVA）繊維やポリプロピレン（PP）繊維などである。

FRCC を構造部材に適用することにより、そのひび割れ発生抑制の効果や引張性能から建築物の耐久性の向上や高寿命化が見込まれる。しかし FRCC の性能評価の難しさから、その適用例は少ない。FRCC の引張性能を直接把握する方法として一軸引張試験があげられるが、明確な一軸引張試験方法は確立されていない。そのため基礎的性状に関するデータが不足しており、性能の定量的な評価は困難なものとなっている。

1.2 架橋則による FRCC の引張性能評価

1.2.1 架橋則の概要

FRCC を適用した構造部材の評価は、構造部材における巨視的な材料挙動に、FRCC の引張性能を適用することで行われる。FRCC の引張性能評価方法として提案されているのが、架橋応力を開口変位の関数でモデル化した架橋則である^[1]。架橋則は実験的に得られた単繊維の引抜き挙動をひび割れ面に架橋する多数の繊維分総和することで算出される。架橋則を用いることで、繊維とマトリックスの付着性状や繊維の破断強度などの材料構成要素から FRCC 引張性状を評価することが可能である。架橋則によって FRCC を用いた構造部材の性能評価を行ったときの流れ^[2]を図 1.2.1 に示す。

架橋則において単繊維の引抜き挙動は最も基本となるものであることから、より精確な評価が求められる。また、引抜き挙動は繊維の種類やマトリックスの種類によって大きく異なるため、対象となる FRCC に対してそれぞれ架橋則を構築する必要がある。

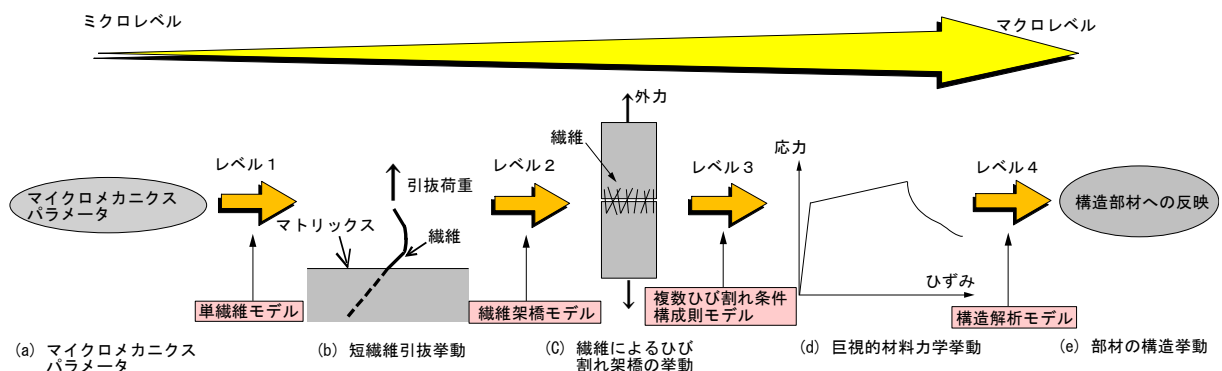


図 1.2.1 FRCC を用いた構造部材の性能評価の流れ^[2]

1.2.2 単繊維の拔出し挙動について

実際の FRCC 内部では繊維はさまざまな方向に配向しており、ひび割れが生じた際繊維は角度を持ってひび割れを架橋することが容易に想像できる。このときの繊維の角度を配向角と呼ぶ。単繊維の拔出し挙動については繊維—マトリクス間の付着性状をベースとして、この繊維配向角の影響が考えられる。

通常繊維が配向角を持つ場合、繊維の埋込み口でのマトリクスからの反力により引抜き力が向上する。このような配向角を有する際の引抜き力の増大はスナビング効果と呼ばれ、配向角が大きいほど増大するとされている^[3]。スナビング効果は最大荷重について増加の程度を示す指標としてスナビング係数を用いて式(1.2.1)のように表現される。

$$P = P_0 \cdot e^{f \cdot \psi} \quad (1.2.1)$$

ここで、 P ：引抜き荷重、 P_0 ：配向角 0° の場合の引抜き荷重、 ψ ：繊維配向角

さらに、柔らかい繊維では繊維表面が荒らされることにより見かけの繊維破断強度が低下する現象が既往の研究^[4]により確認されている。この現象は繊維強度低減効果と呼ばれ、繊維強度低減係数 f' を用いて以下の式(1.2.2)により表される。

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^n \cdot e^{-f' \cdot \psi} \quad (1.2.2)$$

ここで、 σ_{fu} ：見かけの繊維強度、 σ_{fu}^n ：配向角 0° の場合の見かけの繊維強度

スナビング係数 f および繊維強度低減係数 f' は、単繊維引抜き実験の結果より算出される。図 1.2.2 に示すように、配向角 ψ が増大するとスナビング効果により引抜き荷重が増大するが、配向角 ψ がさらに増大すると繊維が破断する^[5]。

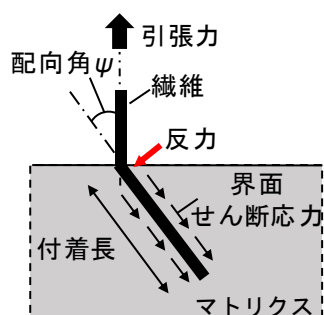


図 1.2.2 繊維のマトリクスからの引抜き抵抗機構

1.2.3 配向角について

FRCC 部材にひび割れが発生したとき、ひび割れを架橋する繊維に対して引抜き力が生じる。繊維が配向角を有するとき、角度の付き方はひび割れ面に対して引抜き力が角度を有することで生じる配向角と、ひび割れ面の法線方向に対して繊維自体が角度を有することで生じる配向角の二通りに分けることができる（図 1.2.3）。前者を設置角、後者を埋込み角と呼ぶことにする。

既往の研究¹⁵⁾では、設置角によって配向角を有する単繊維の引抜き試験から、せん断ひび割れ面における架橋則の計算を行っている。この研究では、繊維に引張力とせん断力が同時に作用した場合の評価を、ひび割れによって生じたひび割れ角度と繊維がもともと持つ配向角を足し合わせ架橋則を構築し計算し、良好な対応関係を得ている。ここでは、埋込み角と設置角による配向角の違いについては考慮されていない。

一方、鋼繊維を対象とした単繊維の引抜き試験では、設置角のみによる配向角と埋込み角のみによる配向角によって生じるスナビング効果の違いについて研究がなされている¹⁶⁾。埋込み角と設置角では設置角によって配向角をつけた方がスナビング効果の影響を受け架橋則の計算結果の引張応力が大きくなることが報告されている。これは、繊維の埋込み口において反力に関わるマトリクスの量も変わるためとされている。

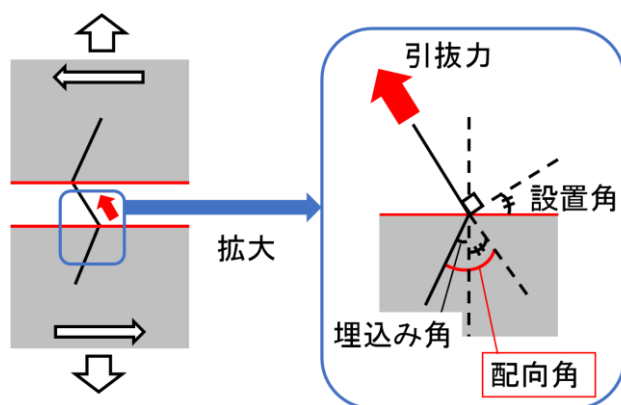


図 1.2.3 配向角が生じる要因

1.3 研究目的

FRCC を構造部材に適用するためには FRCC の引張性能評価方法の確立が必要である。評価方法として期待される架橋則は単繊維－マトリクス間の拔出し挙動から成り立つことから、より精確に行われる必要がある。そのためには、実部材として FRCC が用いられたときに繊維がひび割れを架橋した状態を精査し検討する必要がある。さらに、拔出し挙動は繊維の種類やマトリクスの種類により異なることから、FRCC に用いられうるそれぞれの繊維に対して、正確なデータを蓄積することが求められる。

前節で述べたように、鋼繊維では埋込み角と設置角において架橋則の計算結果が変化することに対し、PVA 繊維では両者の違いを考慮せずともせん断ひび割れ面における架橋則の計算において良好な対応関係を得ている。このように、配向角の付き方による影響は繊維の種類にもよると考えられる。

本研究では太径のアラミド繊維を対象として、二種類の配向角のつけ方を模擬した引抜き試験を行い、両者における拔出し挙動の違いを検討することを目的とする。さらに、太径アラミド単繊維の引抜き荷重－すべり量関係をバイリニアモデルでモデル化して架橋則を計算し、繊維の配向性が架橋則に及ぼす影響を検討する。

第2章 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用したアラミド繊維の物性を表 2.1.1 に、写真を図 2.1.1 に示す。使用したアラミド繊維は細い繊維を収束させたもので、表中の引張強度と弾性係数の値は収束前の原糸物性値である。

マトリクスの調合計画を表 2.1.2 に示す。

表 2.1.1 使用材料物性（メーカー試験値）

繊維種類	繊維径 (mm)	引張強度* (MPa)	弾性係数* (GPa)
アラミド	0.5	3432	73

*収束前の原糸物性値

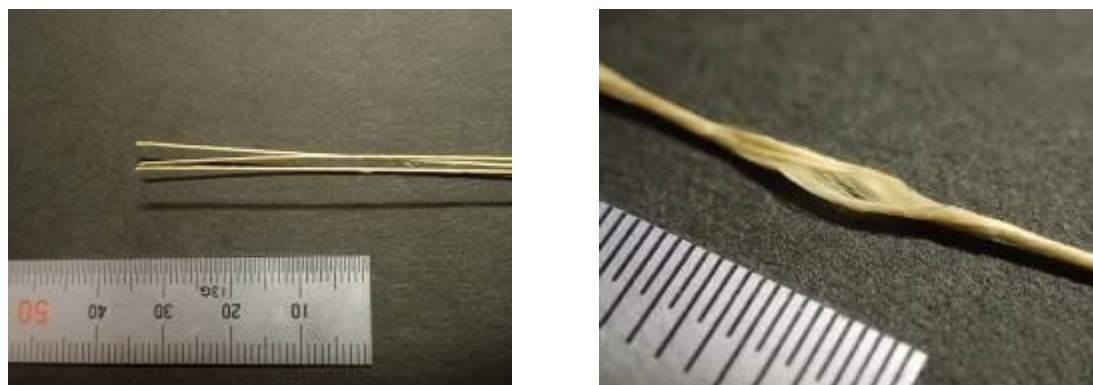


図 2.1.1 実験に使用したアラミド繊維

表 2.1.2 マトリクスの調合計画

W/C	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	FA	Ad	増粘剤
56.0	380	678	484	291	6	2

W：水道水 C：早強ポルトランドセメント

S：7号珪砂 FA：フライアッシュ II 種

Ad：高性能減水剤

2.2 試験体概要

試験体および型枠形状を図 2.2.1 に示す。50mm 角の亚克力板 2 枚でゴム板 3 枚を挟み、それらをねじで締め、ゴム板および亚克力板の中心にあけた穴に繊維を貫通させることで型枠を作製した。埋込み角は繊維を通す穴の位置によって調節した（図 2.2.2）。

実験因子は試験体厚さ（2, 4, 6, 8, 12mm）、繊維配向角（0, 15, 30, 45, 60 度）および配向角のつけ方（設置角, 埋込み角）である。試験体は同一実験因子で各 5 体ずつ作製した。繊維の付着長は、埋込み角を θ として、試験体厚さを $\cos\theta$ で除すことで求めた。

繊維配向角ごとに実験を行い、そのたびに比較として配向角 0 度の試験体を作製し都度実験を行ったため、繊維配向角 0 度の試験体の数は他の配向角よりも多くなっている。試験体一覧を表 2.2.1 に示す。

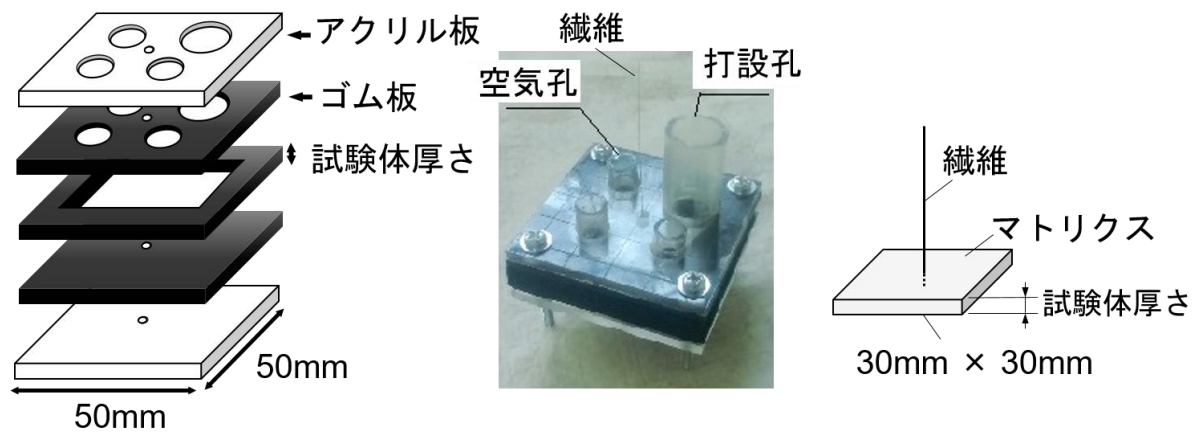


図 2.2.1 試験体および型枠形状

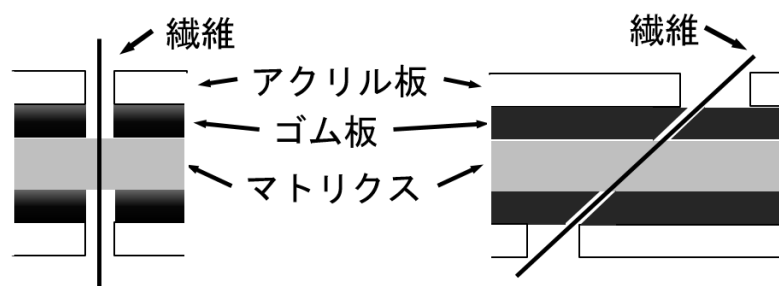


図 2.2.2 型枠の断面図（左：埋込み角無し，右：埋込み角有り）

表 2.2.1 試験体一覧

試験体 シリーズ	試験 体厚 さ (mm)	配向 角 (°)	配向角 のつけ 方	試験 体数 (体)	試験体 シリーズ	試験 体厚 さ (mm)	配向 角 (°)	配向角 のつけ 方	試験 体数 (体)
15 度 シリーズ	2	0		5	45 度 シリーズ	2	0		5
		15	埋込み 設置				45	埋込み 設置	
	4	0				4	0		
		15	埋込み 設置				45	埋込み 設置	
	6	0				6	0		
		15	埋込み 設置				45	埋込み 設置	
	8	0				8	0		
		15	埋込み 設置				45	埋込み 設置	
	12	0				12	0		
		15	埋込み 設置				45	埋込み 設置	
30 度 シリーズ	2	0			60 度 シリーズ	2	0		
		30	埋込み 設置				60	埋込み 設置	
	4	0				4	0		
		30	埋込み 設置				60	埋込み 設置	
	6	0				6	0		
		30	埋込み 設置				60	埋込み 設置	
	8	0				8	0		
		30	埋込み 設置				60	埋込み 設置	
	12	0				12	0		
		30	埋込み 設置				60	埋込み 設置	

2.3 加力方法

加力方法を図 2.3.1 に示す。加力には万能ネジ式卓上試験機を用い、変位制御による単調引張载荷を行った。作製した試験体は図 2.3.2 に示すように鋼板に接着剤によって貼り付け、ネジによって試験台に固定した。設置角をつける試験体は図 2.3.1 の左図のように、埋込み角をつけた試験体は図 2.3.1 の右図のように加力した。計測項目は引抜き荷重およびヘッド間変位である。

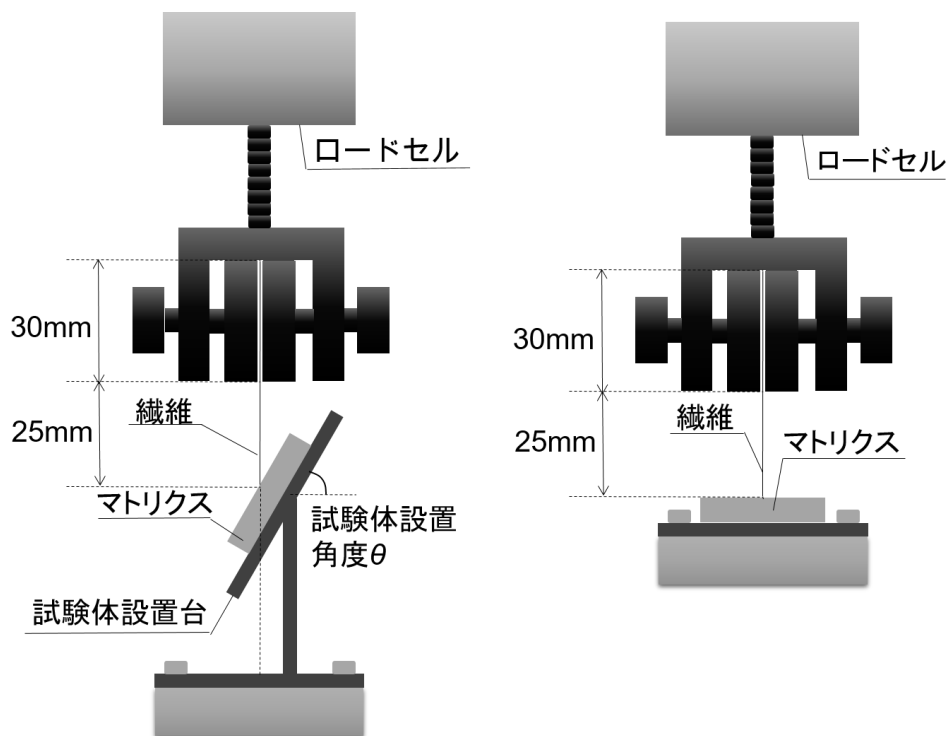


図 2.3.1 加力方法



図 2.3.2 鋼板に貼り付けた試験体

第3章 実験結果

3.1 単繊維引張試験

単繊維の引抜き試験に先立って、加力装置ヘッド変位から繊維埋込み領域外における変形を差し引いてすべり量を算出するために、予備試験として太径アラミド単繊維の引張試験を行った。使用した繊維は引抜き試験で用いる繊維と同一で、試験本数は9本である。

加力には万能ネジ式卓上試験機を使用し、加力装置の治具で直接アラミド単繊維をつかみ変位制御によって単調引張载荷を行った。試験長さは110mmとし、これは繊維引抜き試験の繊維区間外の長さの2倍である。载荷速度は毎分1.0mmとした。加力状況を図3.1.1に示す。

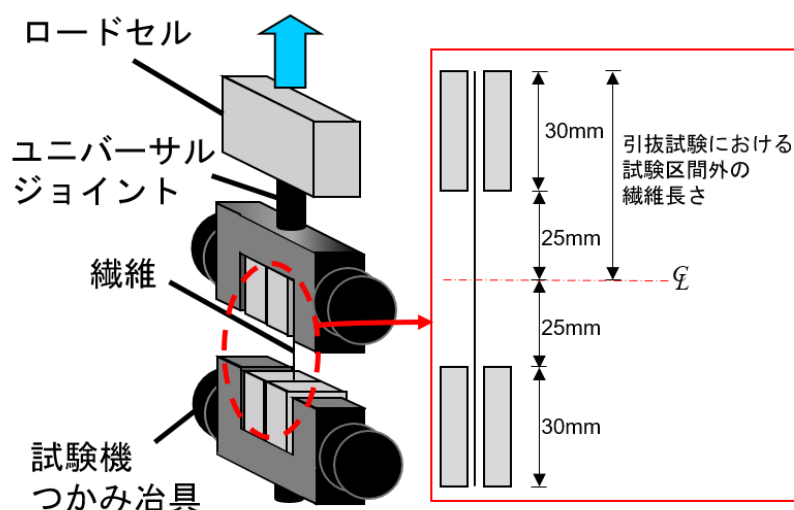


図 3.1.1 単繊維引張試験の加力状況

引張試験の結果を図3.1.2に示す。それぞれの試験結果の最大荷重までの引張荷重－ヘッド変位関係の近似式を最小二乗法によって得た。図中の破線が試験結果、実線がそれぞれの試験体における近似式を示している。これらの式の係数の平均値を係数として得られた式を式(3.1.1)に示す。この式で算出される値の1/2を引抜き試験における埋込み領域外における変形とし、計測したヘッド間変位から差し引いてマトリクスと繊維の相対変位に補正した(式(3.1.2))。

$$\delta = 7.43 \times 10^{-8} P^3 + 1.16 \times 10^{-6} P^2 + 0.0913 P \quad (3.1.1)$$

$$s = x - \delta / 2 \quad (3.1.2)$$

ここで、 s ：すべり量、 x ：ヘッド間変位、 P ：引抜き荷重

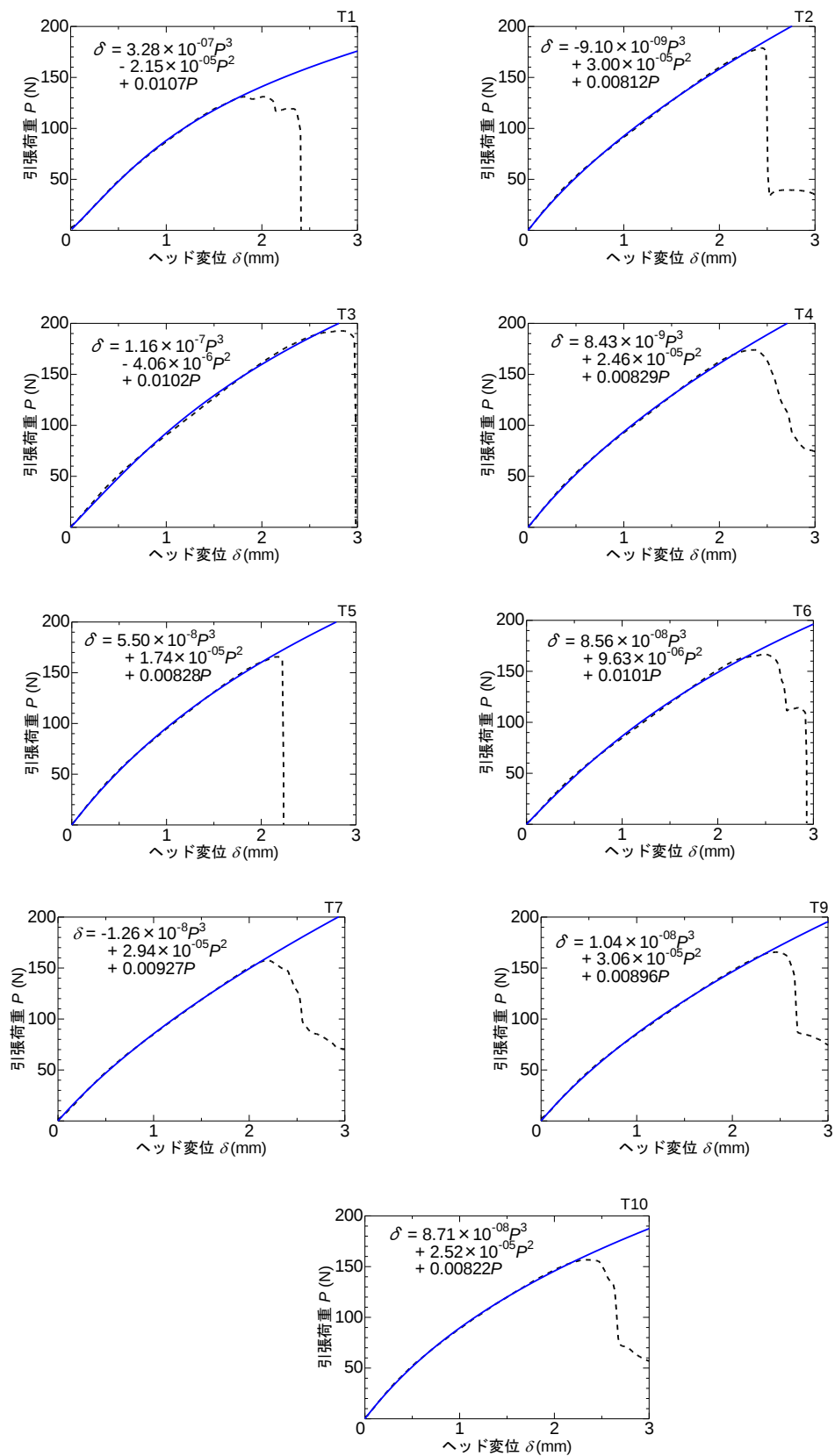


図 3.1.2 引張試験結果一覧

3.2 単繊維引抜き試験

配向角 0 度の試験体では繊維やマトリクスの損傷は見られず、繊維がマトリクスから完全に引き抜かれて加力を終了した。配向角を設けた試験体では、繊維やマトリクスに損傷が確認された試験体が見られた。特に付着長の長い試験体では損傷が顕著であった。

加力中、繊維の破断が見られた試験体を図 3.2.1 に示す。繊維が破断する際は、最大荷重を迎えた後、繊維が引き抜けながら収束された一本一本の繊維が各個に破断し、引きちぎれる形で破断した。

繊維の埋込口においてマトリクスが剥離する様子を図 3.2.2 に示す。引き抜かれる繊維が、付着したマトリクスを伴いながら表面のマトリクスを破壊している様子が分かる。この現象は設置角の試験体でも確認されたが、特に埋込み角によって配向角をつけた試験体で多く確認された。

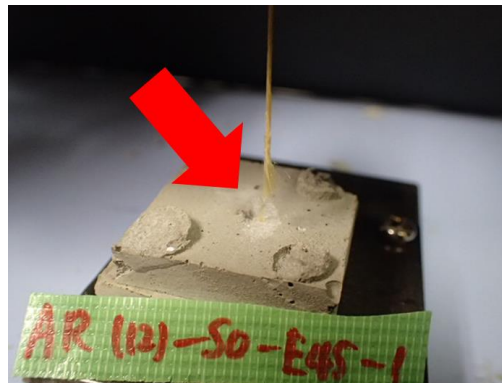


図 3.2.1 加力中破断した繊維

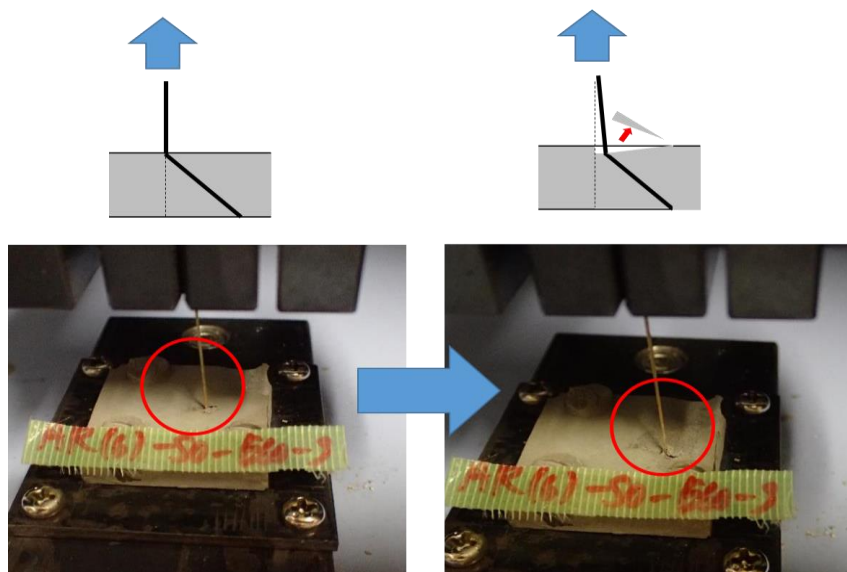


図 3.2.2 繊維埋込み口のマトリクスの剥離

引抜き荷重－すべり量関係を報告する。すべり量は個々の試験体の加力によって得られた引抜き荷重－加力装置ヘッド変位から、前節で述べた方法によりすべり量を算出した。さらに、データのばらつきを考慮し、各シリーズ同一因子試験体の最大荷重に関して 90%信頼限界を下回る試験体のデータを省き（図 3.2.3）、引抜き荷重－すべり量関係の平均化曲線（同一のすべり量に関して各試験体の引抜き荷重の補間値を平均した曲線）を得た。

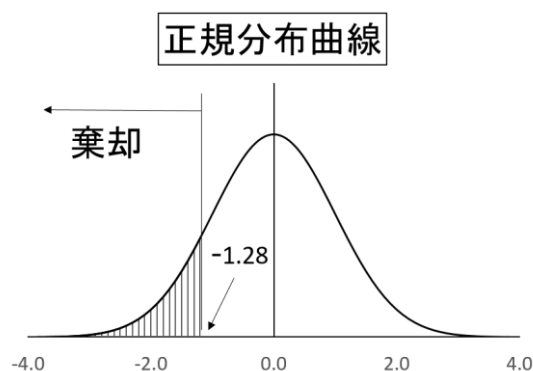


図 3.2.3 90%信頼限界の片側検定棄却

各シリーズの配向角 0 度の試験体の引抜き荷重－すべり量関係を図 3.2.4 に示す。細緑線が各試験体の実験結果を示しており、右上に対応する試験体番号が示されている。黒点線が 90%信頼限界により平均化曲線の計算から省いた試験体の結果を、太線が平均化曲線を示している。試験体厚さに関わらず、多くの試験体で線形的に荷重が上がった後、徐々に繊維が引き抜けていくにつれ荷重が低下する挙動を示し、引き抜けたのちは荷重が 0 になった。荷重が 0 になる時のすべり量は、おおむね各試験体の厚さに対応している。

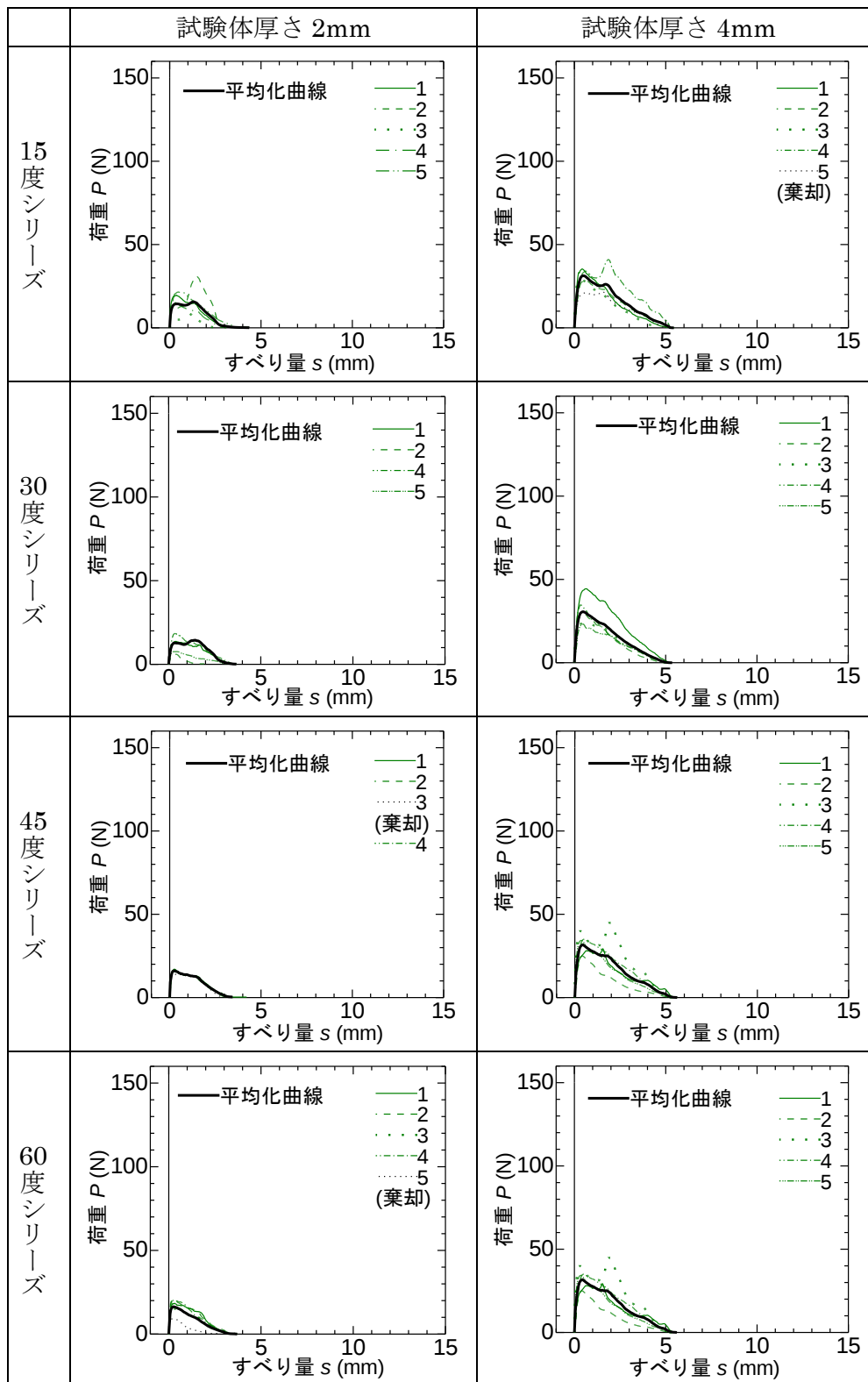


図 3.2.4 配向角 0 度の試験体の引抜き荷重—すべり量関係

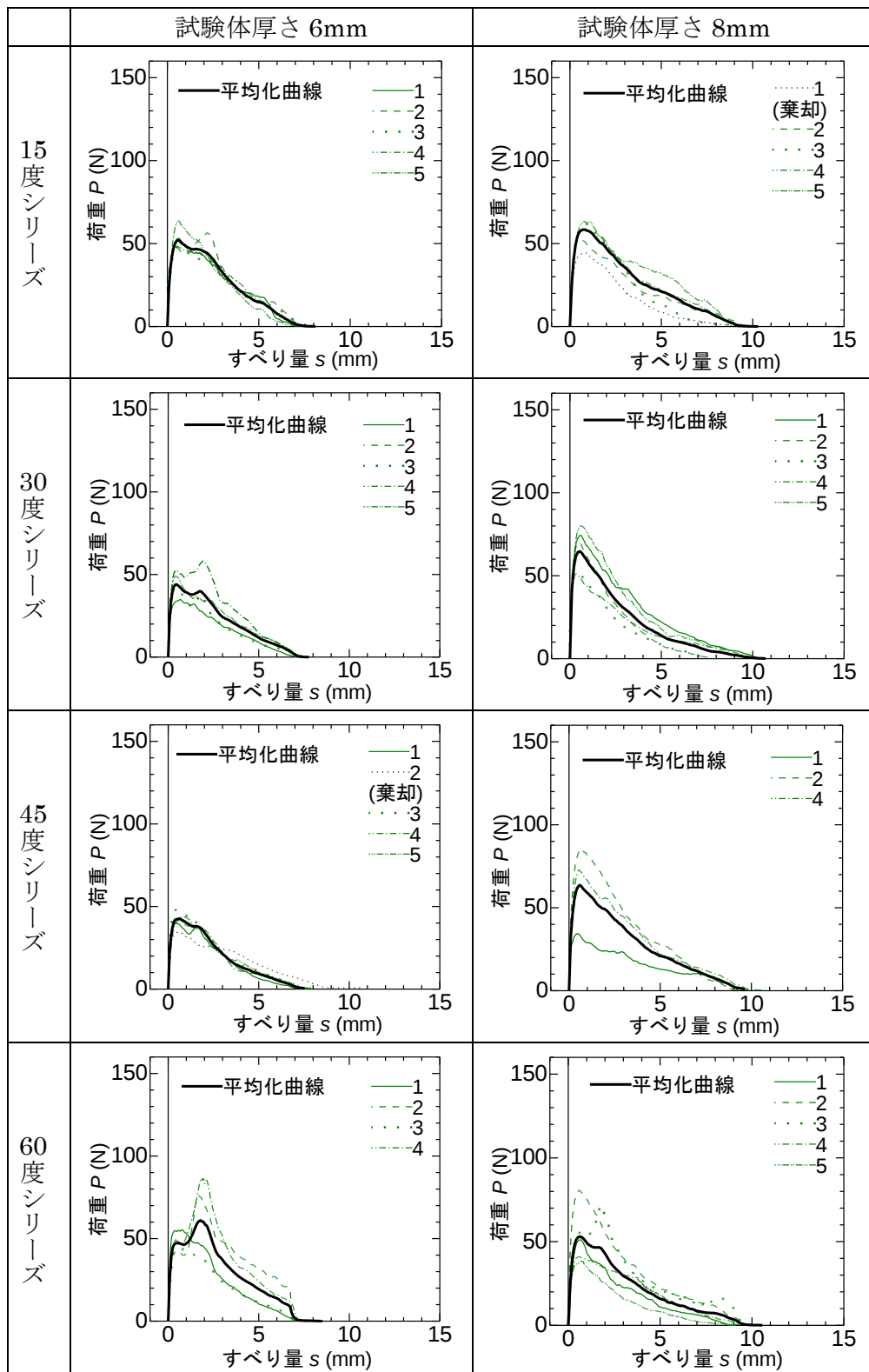


図 3.2.4 配向角 0 度の試験体の引抜き荷重—すべり量関係 (続き)

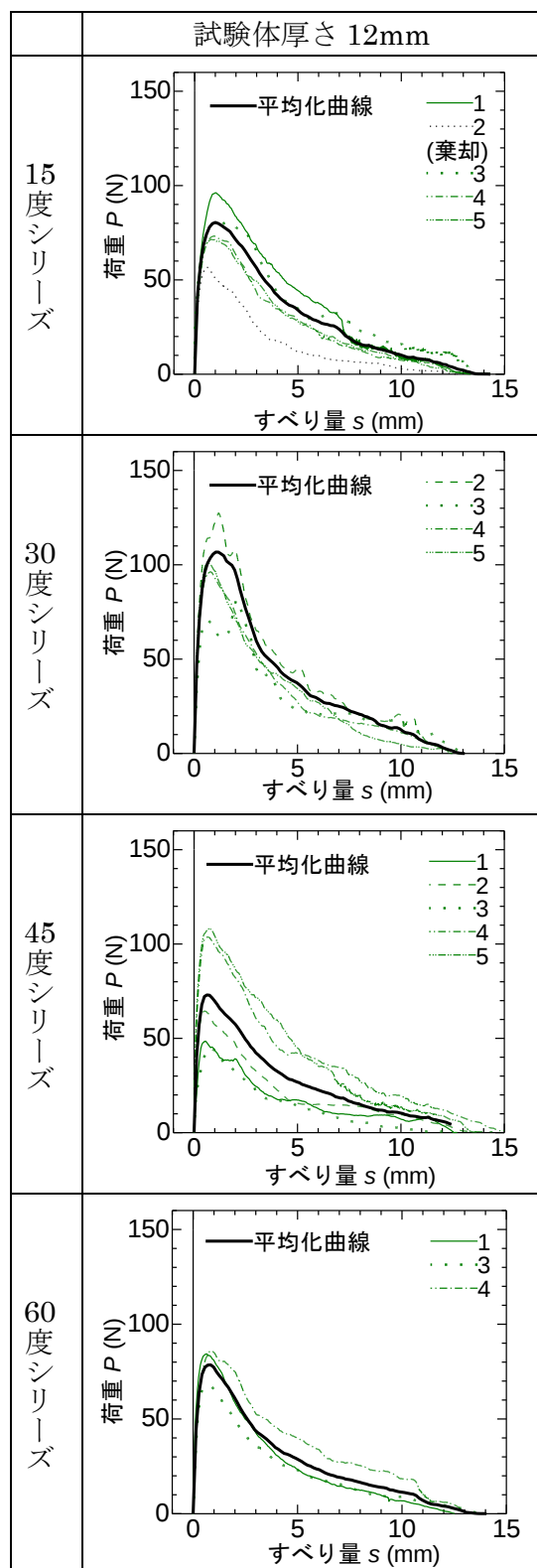


図 3.2.4 配向角 0 度の試験体の引抜き荷重—すべり量関係 (続き)

図 3.2.4 に示した各シリーズの配向角 0 度試験体の平均化曲線を、試験体厚さごとにさらに平均化した引抜き荷重—すべり量関係を図 3.2.5 に示す。実線以外が各シリーズ試験体の平均化曲線を、実線がさらにそれらを平均化した曲線を示している。各シリーズの試験体の練混ぜバッチは異なるが、各シリーズ間での明瞭な傾向は見いだせず、それぞれの試験体厚さにおける各シリーズの平均化曲線のばらつきも小さいことから、各シリーズの平均化曲線をさらに平均化した曲線を用いて次章以降の考察に用いることとする。また、配向角を有する試験体においてもシリーズごとに練混ぜバッチは異なるが、配向角 0 度の試験体と同様に、バッチの違いは考慮せずに検討する。

試験体厚さごとの平均化曲線から、試験体厚さが増大するほど、つまり付着長が増大するほど引抜き荷重も増大する傾向が見られた。

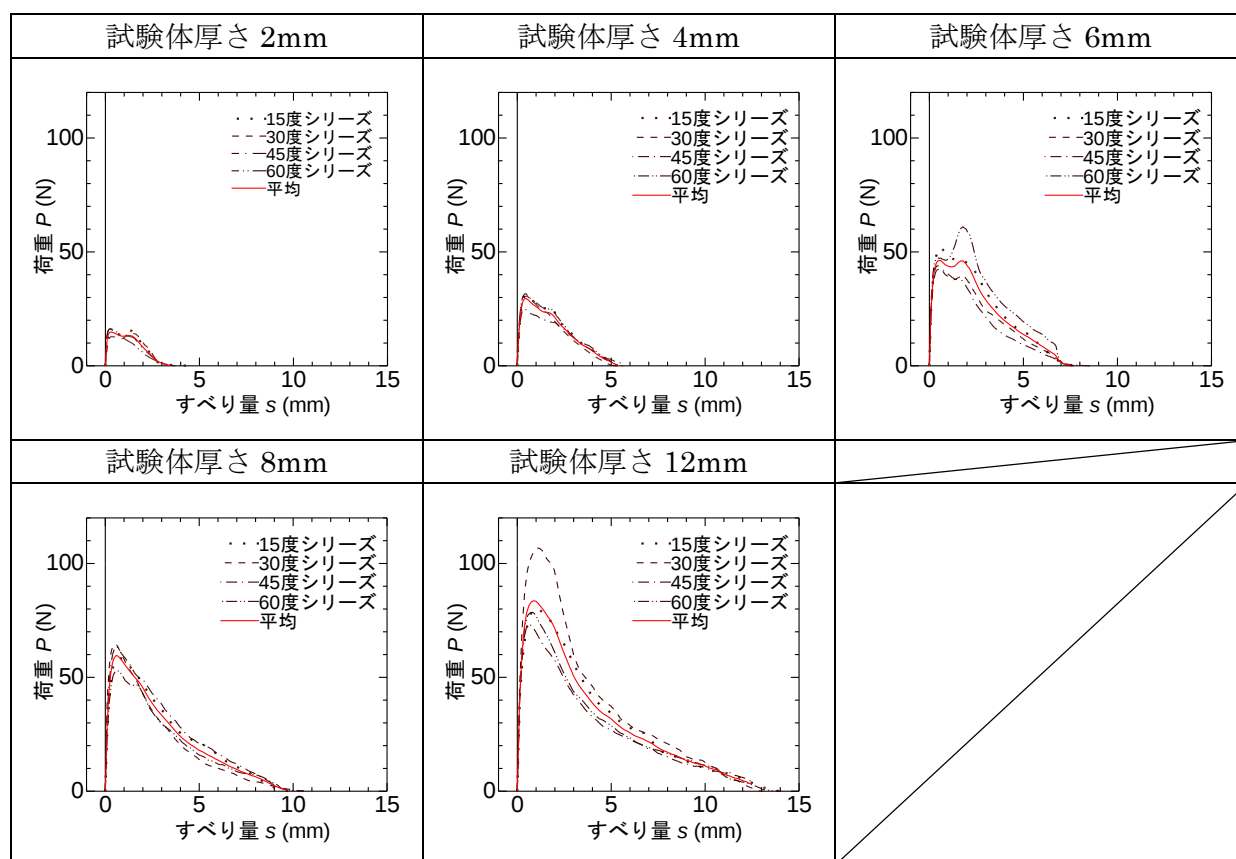


図 3.2.5 配向角 0 度の試験体の引抜き荷重—すべり量関係の平均化曲線

各シリーズの配向角を有する試験体の引抜き荷重－すべり量関係を、埋込み角によるシリーズを図 3.2.6 に、設置角によるシリーズを図 3.2.7 に示す。埋込み角においては細青線が、設置角においては細赤線が各試験体の実験結果を示しており、さらに黒点線が 90%信頼限界により平均化曲線の計算から省いた試験体の結果を、太線が平均化曲線を示している。なお、引抜き試験中、目視により繊維の損傷や破断が観察された試験体は試験体名称の右に破断と記した。繊維に破断が生じた試験体を含む平均化曲線は、その時点までの曲線である。

配向角を有する試験体の中には繊維が破断したものもあるが、最大荷重を迎えた後引き抜ける途中で破断したことから、破断の無い試験体と同一に扱い平均化した。なお、加力時の不具合（鋼板の接着不足、チャックでの繊維の拔出し）により、一部データの無い試験体がある。

配向角を設けた試験体では、配向角 0 度の試験体と比較して曲線の形状が異なる試験体が見られた。埋込み角によって角度を設けた試験体では、荷重が増減を繰り返しながら最大荷重を迎えたのち緩やかに荷重が減少し引き抜ける挙動が見られた。繊維埋込み口のマトリクスの剥離と対応するものと考えられる。特に埋込み角が大きい試験体では、すべり量が増大した後に最大荷重に達する試験体も見られた。設置角を設けた試験体では、線形的に荷重が上がったのち、緩やかに荷重が減少しその後急激に荷重が低下するような挙動が見られた。配向角が小さく付着長も小さい試験体では配向角 0° の試験体とよく似た挙動を示した。

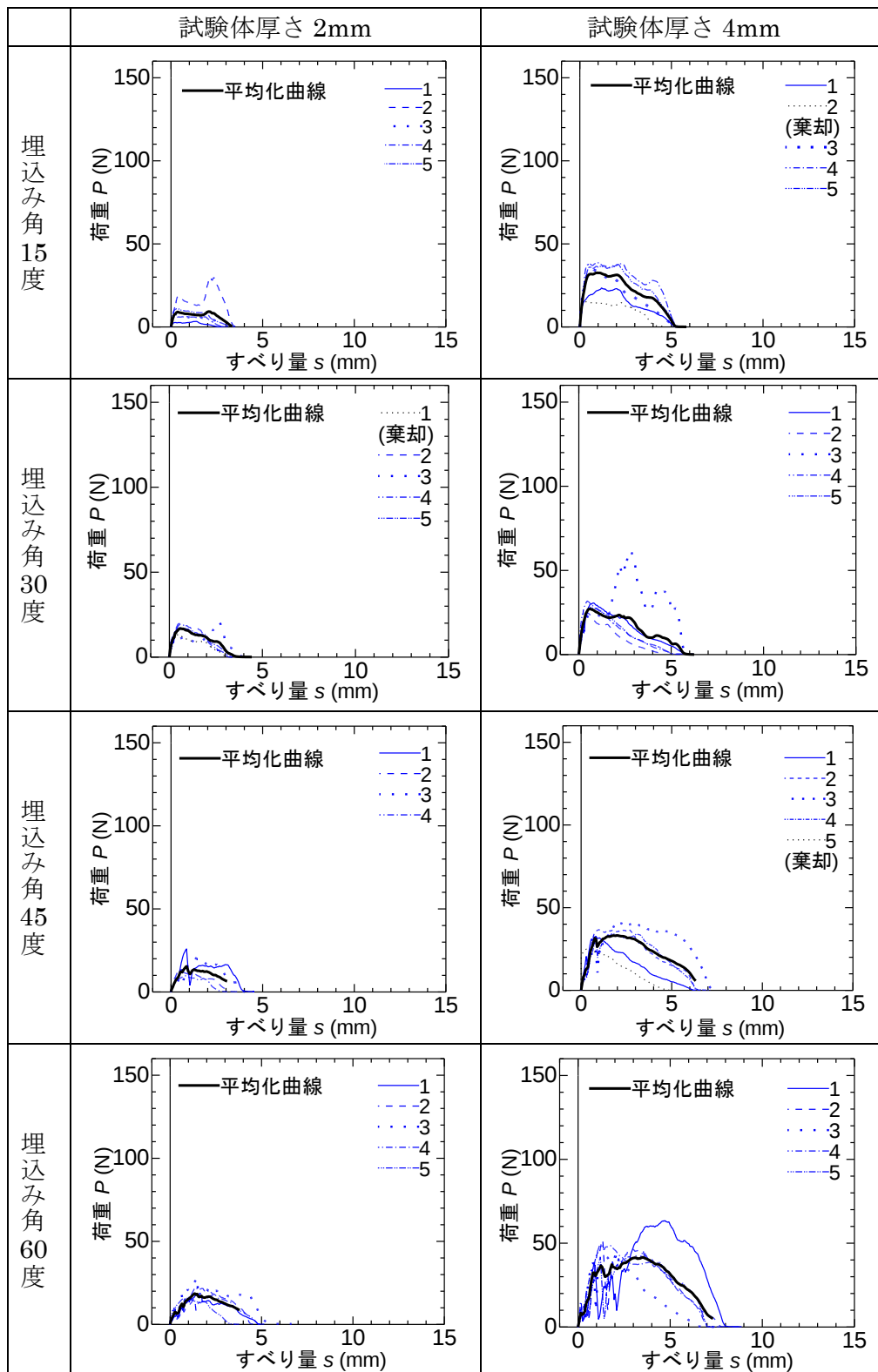


図 3.2.6 埋込み角による試験体の引抜き荷重－すべり量関係

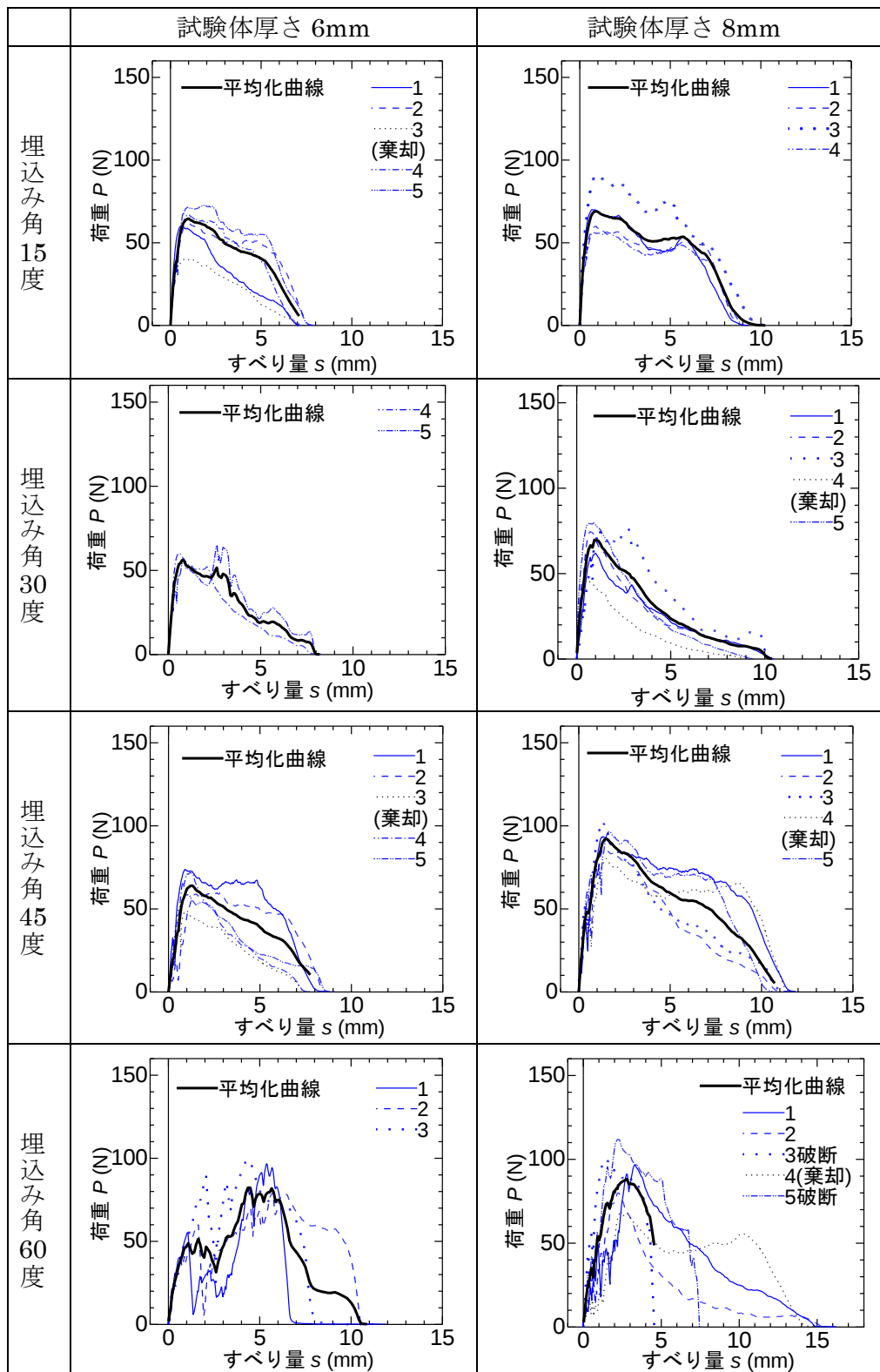


図 3.2.6 埋込み角による試験体の引抜き荷重－すべり量関係（続き）

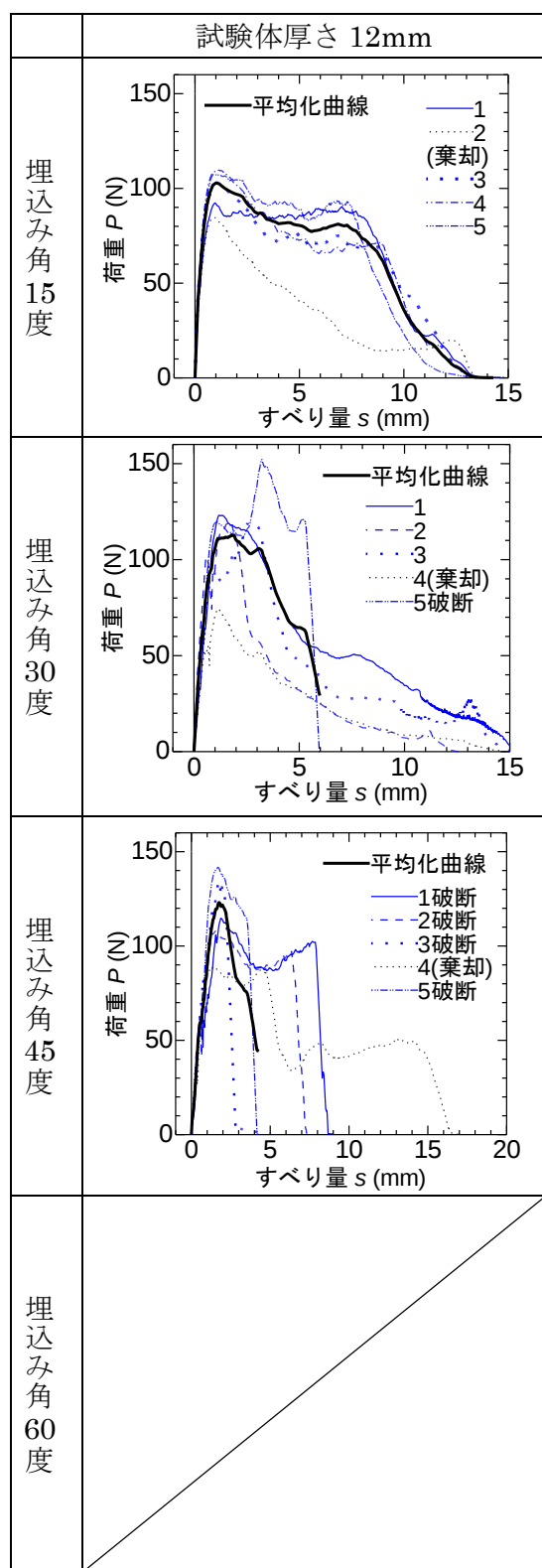


図 3.2.6 埋込み角による試験体の引抜き荷重－すべり量関係（続き）

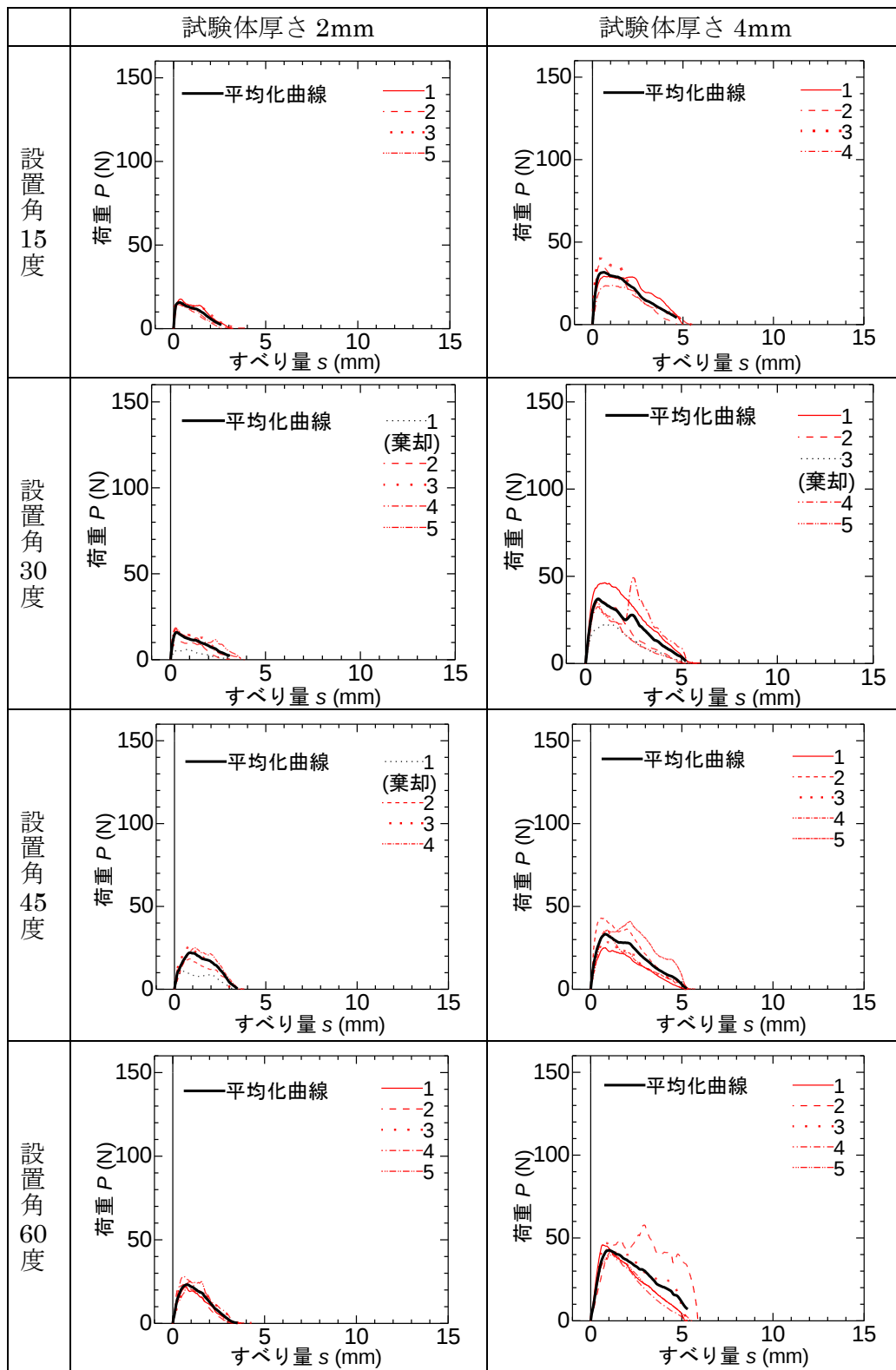


図 3.2.7 設置角による試験体の引抜き荷重—すべり量関係

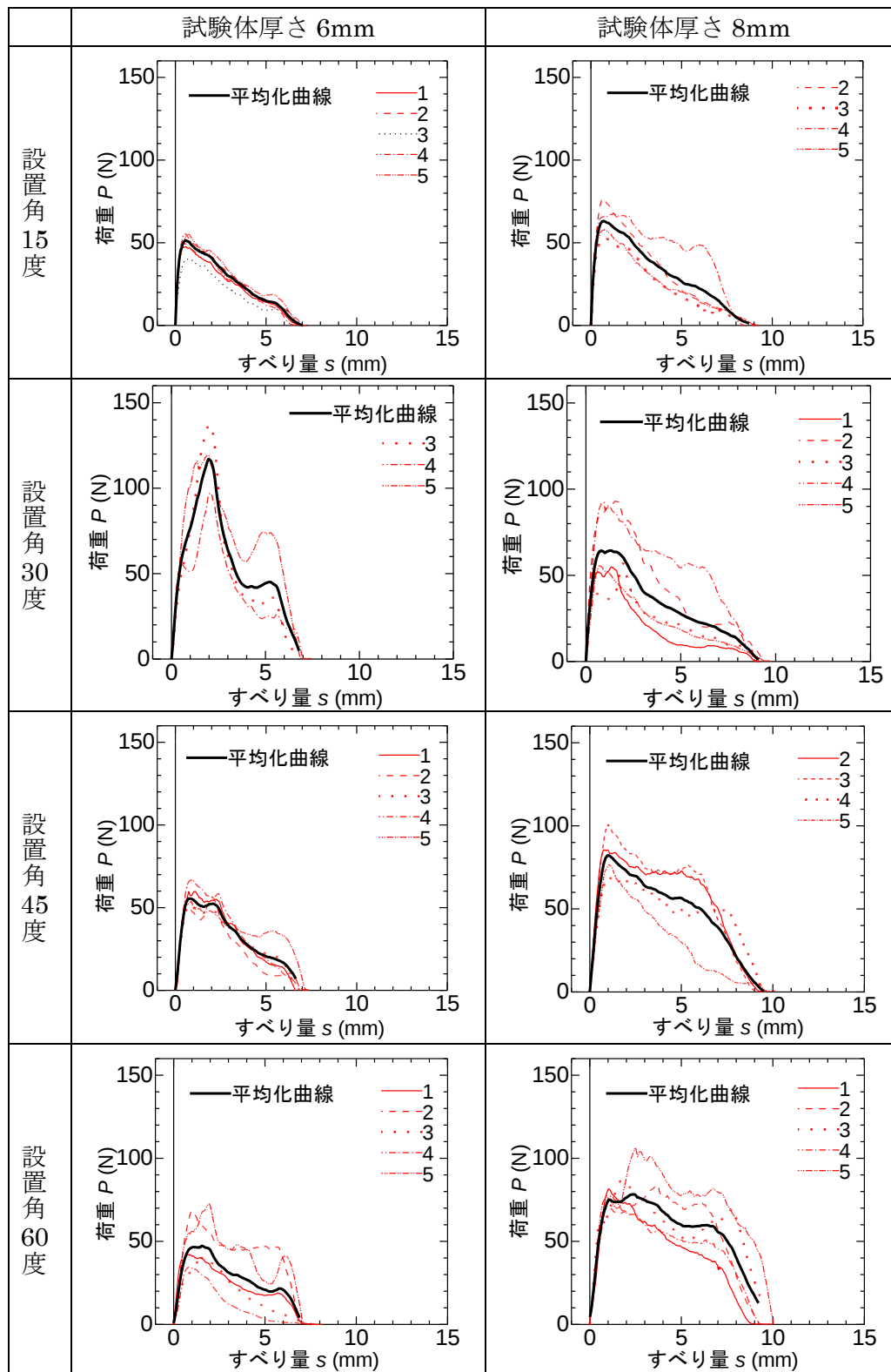


図 3.2.7 設置角による試験体の引抜き荷重—すべり量関係（続き）

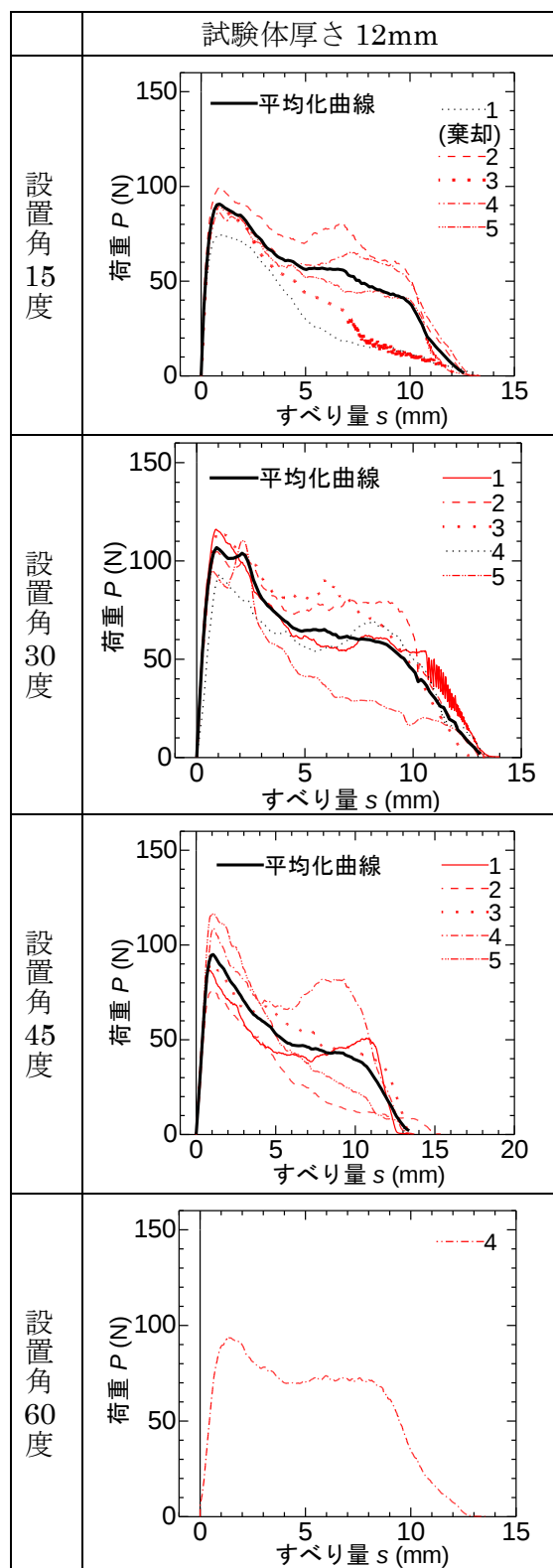


図 3.2.7 設置角による試験体の引抜き荷重—すべり量関係 (続き)

図 3.2.6 および図 3.2.7 に示した各シリーズの平均化曲線を一覧にして図 3.2.8 に示す。同じ配向角でも埋込み角によって配向角を有する試験体の方が付着長が長いため、設置角によって配向角を有する試験体よりも荷重が大きくなる傾向が見られる。また、埋込み角によって配向角を有する試験体の方が最大荷重時のすべり量が大きくなる傾向が見られる。

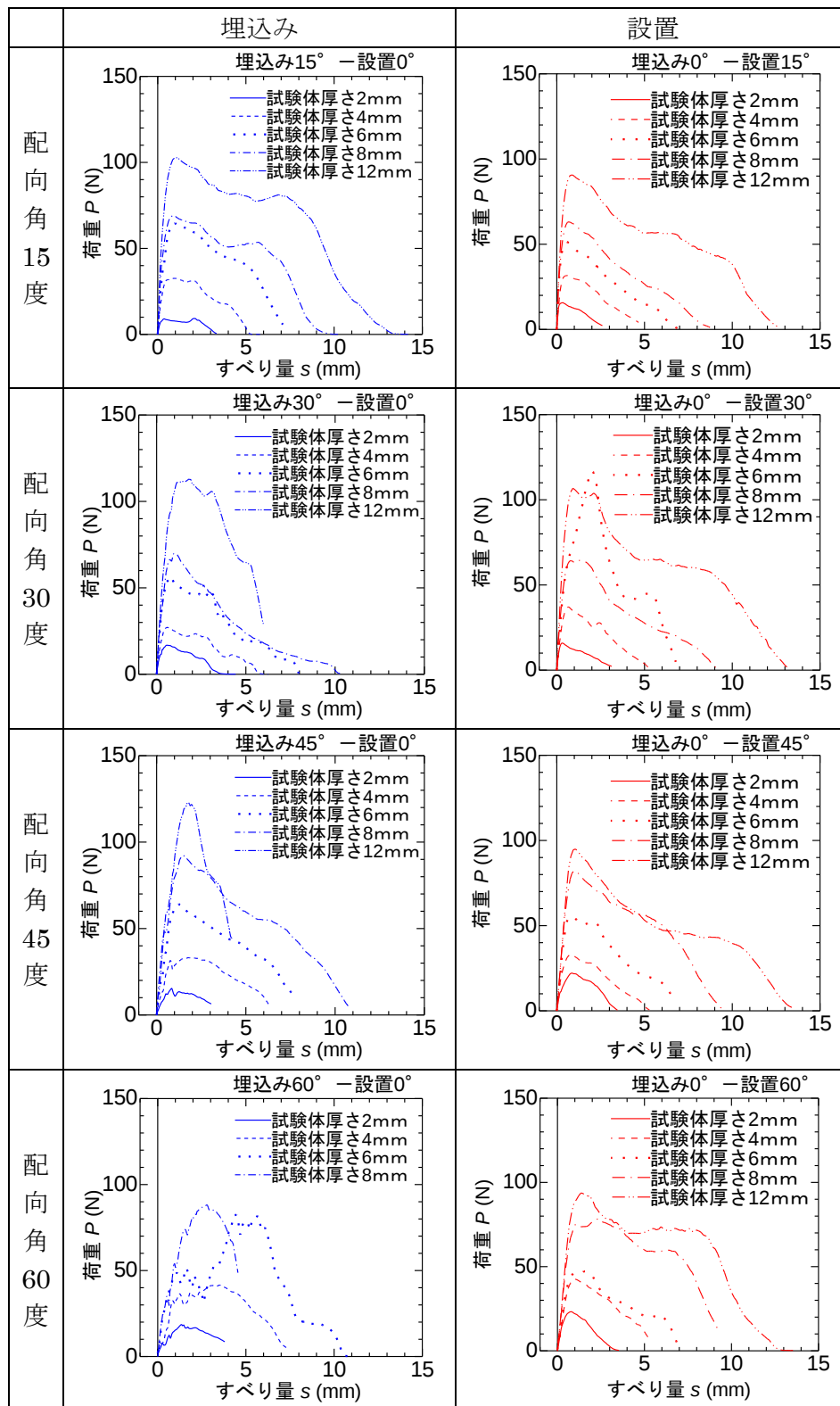


図 3.2.8 配向角を有する試験体の引抜き荷重－すべり量関係の平均化曲線

第4章 引抜き荷重－すべり量関係のモデル化

4.1 バイリニアモデルによるモデル化

前章の実験結果より，最大荷重までは剛性が大きく直線的に引抜き荷重が増大し，その後緩やかに軟化する引抜き荷重－すべり量関係が得られた。したがって，アラミド太径単繊維の引抜き荷重－すべり量関係を図4.1.1に示すバイリニアモデルでモデル化することとする。バイリニアモデルの特性値は，最大荷重点，最大荷重時のすべり量および軟化後の荷重が0となる点のすべり量である。このうち，軟化後の荷重が0となる点のすべり量は，付着領域の繊維がすべてマトリクスから拔出したときに荷重が0になると考えられるため，繊維の付着長とする。

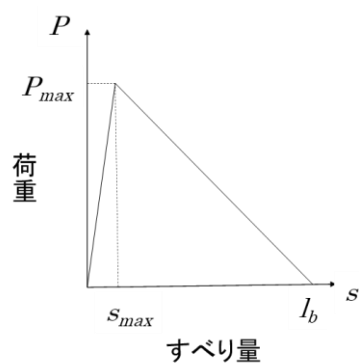


図 4.1.1 バイリニアモデル

最大荷重については実験値からそのままモデル化することし，最大荷重時のすべり量については，最大荷重付近で剛性が低下してすべり量が急激に増大することから，図4.1.2に示すように，コンプリメンタリーエネルギーが等価となる直線上で最大荷重に至るすべり量（最大荷重時補正すべり量） $s_{c,max}$ とした。

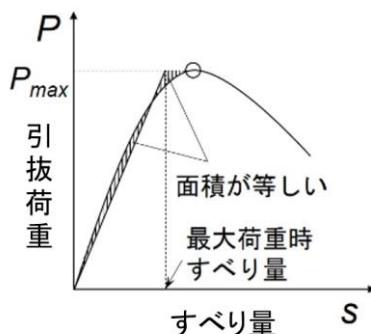


図 4.1.2 最大荷重時すべり量の求め方

4.2 配向角 0 度の試験体

配向角 0 度の試験体の平均化曲線に関して、最大荷重と付着長を関数を図 4.2.1 に、最大荷重時補正すべり量と付着長の関係を図 4.2.2 に示す。プロットからそれぞれ最小二乗法によって近似線を求め、その式を図中に示している。最大荷重と付着長には線形関係が、最大荷重時補正すべり量と付着長にはべき乗関係があると考えられる。ここで、最大荷重と付着長の関係を示す比例係数を単位付着長あたりの最大荷重と呼び、角度 θ における単位付着長あたりの最大荷重を $P_{max,\theta}$ で表すこととする。

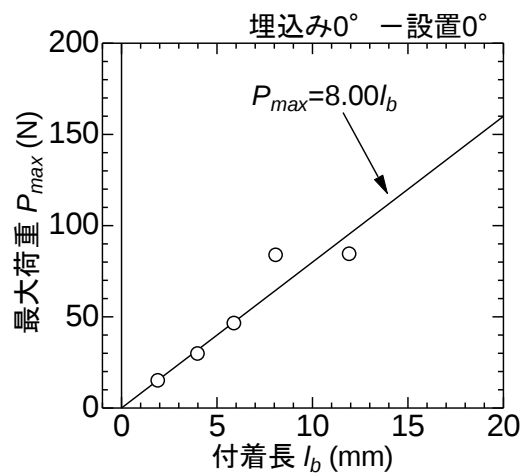


図 4.2.1 最大荷重と付着長の関係

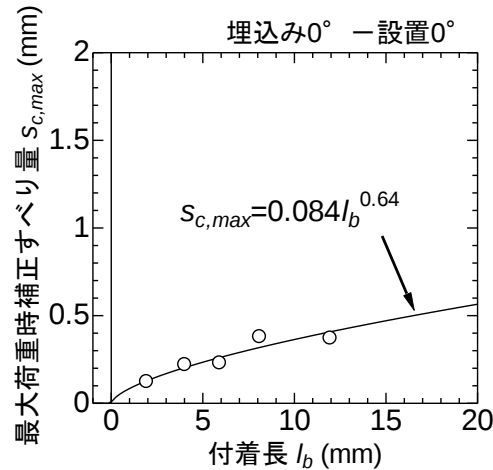


図 4.2.2 最大荷重時補正すべり量と付着長の関係

4.3 配向角を有する試験体

配向角を有する試験体の平均化曲線に関して、最大荷重と付着長の関係および最大荷重時補正すべり量と付着長の関係を、埋込み角による試験体について図 4.3.1 に、設置角による試験体について図 4.3.2 に示す。最大荷重に関しては、どちらの配向角の試験体においても線形関係が見られたため、最小二乗法によって近似式を求めて図中に破線で表記している。最大荷重時補正すべり量と付着長の関係に関しては、どの配向角においても付着長が大きくなると増大する傾向が見られるが、付着長 5mm 程度からその増分が小さくなるようなべき乗関係が見られた。配向角が大きくなると、埋込み角による試験体の場合同一付着長における最大荷重時補正すべり量が増大する傾向が見られたが、設置角による試験体の場合配向角の増大に伴う最大荷重時補正すべり量の増大は明確に確認できなかった。

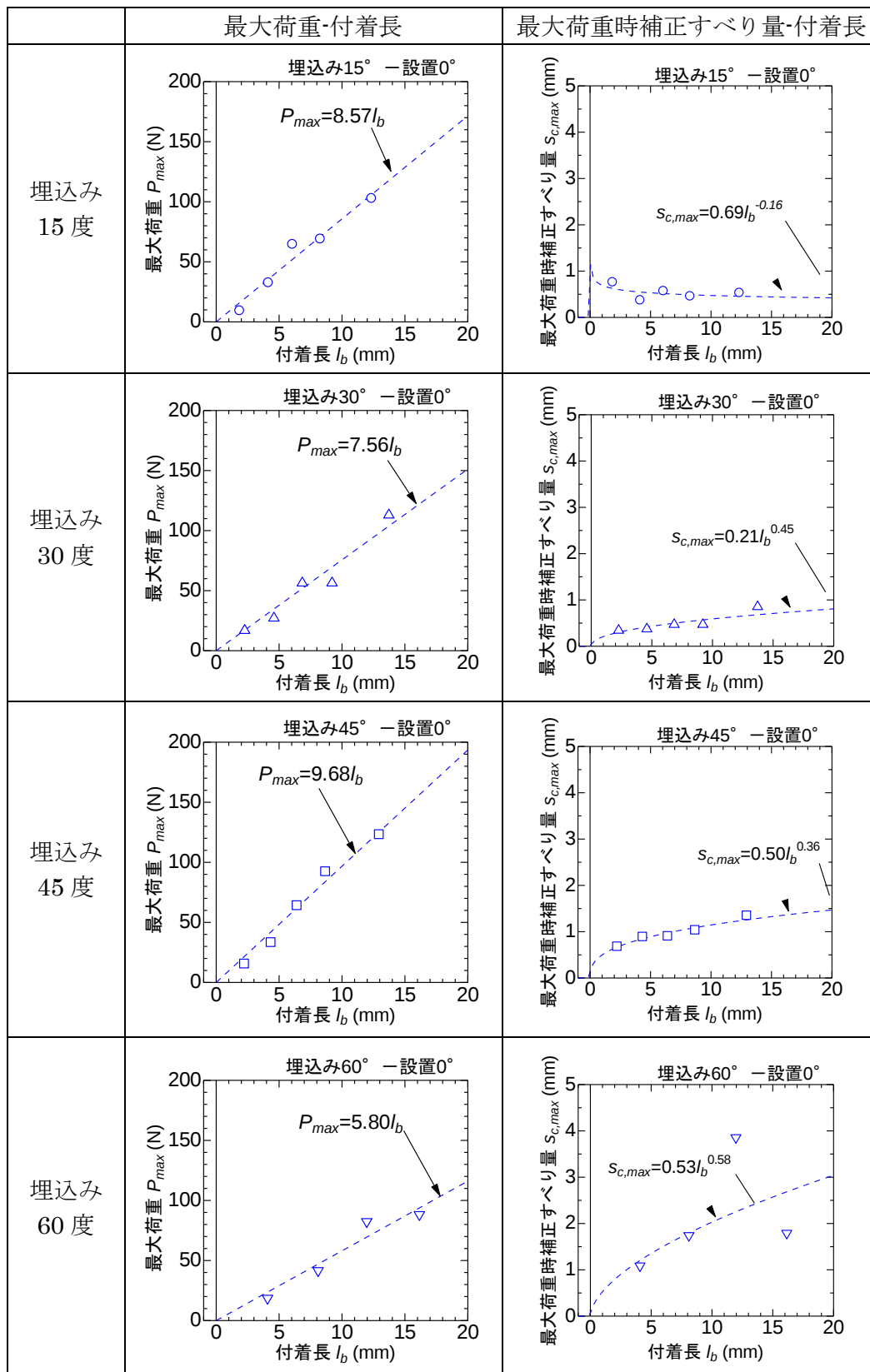


図 4.3.1 最大荷重・最大荷重時すべり量と付着長の関係（埋込み角）

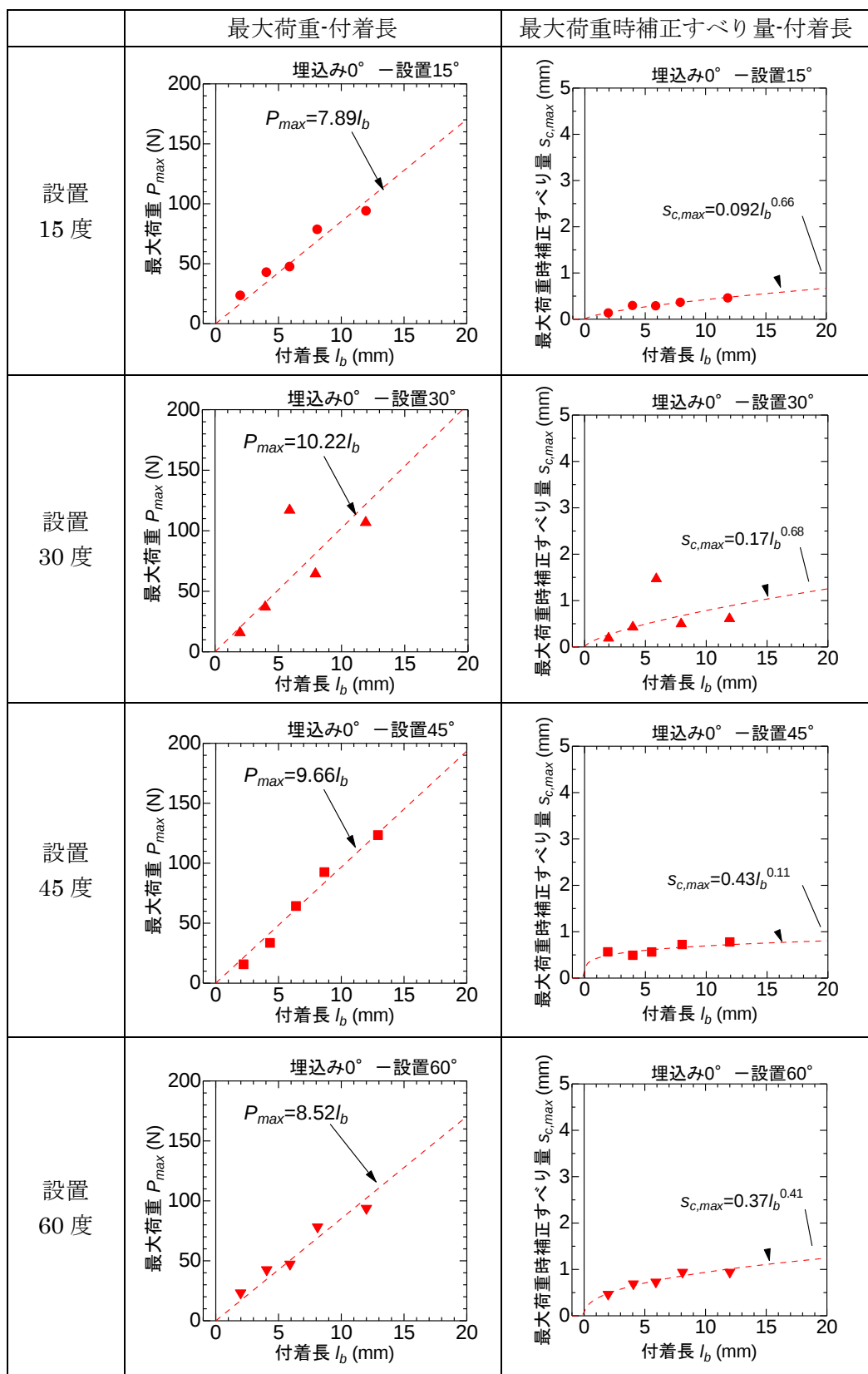


図 4.3.2 最大荷重・最大荷重時すべり量と付着長の関係（設置角）

4.4 スナビング効果

単位付着長あたりの最大荷重と配向角の関係を図 4.4.1 に示す。左図が埋込み角によるもの、右図が設置角によるものを示している。両者において、単位付着長あたりの最大荷重と配向角に明確な関係は確認できず、スナビング効果を確認することはできなかった。埋込み角により配向角を有する試験体では、 30° および 60° の試験体において単位付着長あたりの最大荷重が配向角 0 度の試験体よりも小さくなった。加力中に埋込み口の反力によってマトリクスが剥がれ繊維が暴露する状況が見られ、最大荷重時には付着長が埋込み長よりも小さくなったためと考えられる。この現象は設置角による試験体においても確認されており、配向角が大きい試験体ではスナビング効果が確認できなかったと考えられる。

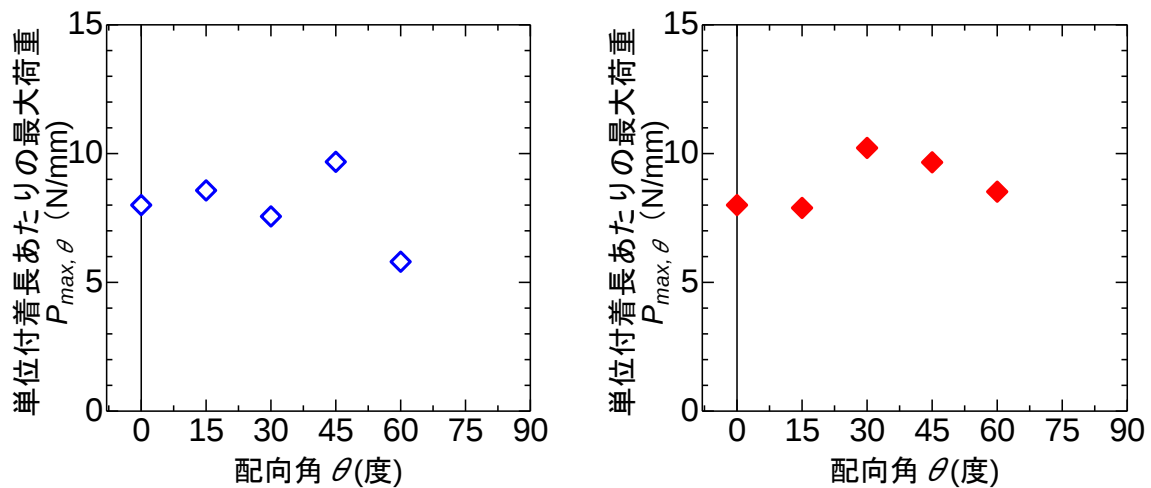


図 4.4.1 単位付着長あたりの最大荷重と配向角の関係（左：埋込み角，右：設置角）

4.5 引抜き荷重－すべり量関係のバイリニアモデル

配向角 0° における最大引抜き荷重 $P_{\max,0}$ は図 3.3.2 から式 (4.5.1) に示す付着長 l_b の式で定義する。

$$P_{\max,0} = 8.00l_b \quad (4.5.1)$$

ここで、前節の検討からスナビング効果は確認されなかったため、任意の配向角における最大荷重 $P_{\max}$ を式 (4.5.2) で与える。

$$P_{\max} = P_{\max,0} = 8.00l_b \quad (4.5.2)$$

最大荷重時のすべり量については付着長の増大に伴い大きくなるものの、配向角による明瞭な傾向が見られないため、図 3.3.2 から得られた近似式を用いて式 (4.5.3) で表す。

$$s_{c,\max} = 0.084l_b^{0.64} \quad (4.5.3)$$

また、荷重が 0 となる点のすべり量は繊維の付着長とする。以上より、アラミド太径単繊維の引抜き荷重－すべり量関係のバイリニアモデルの特性値を決定する。

第5章 架橋則の計算

5.1 単繊維の架橋モデルと架橋則の計算方法

本章では，既往の研究^[7]と同様に，単繊維の引抜き荷重－すべり量モデルを元にした架橋モデルを用い，架橋則の計算を行う。

架橋モデルにおけるひび割れ幅は，既往の研究^[7]と同様に，ひび割れ面を架橋する繊維はひび割れ面に対する埋込長が短い側から引抜かれるものとし，最大引抜き荷重時すべり量の1.5倍を最大引抜き荷重時ひび割れ幅とし，式（5.1.1）で表す。

$$\delta_{\max} = 1.5s_{c,\max} = 0.13l_b^{0.64} \quad (5.1.1)$$

$P_{\max}$ と $\delta_{\max}$ を用い，付着長の影響を考慮した単繊維の架橋モデルの式を以下に示す。

$\delta \leq \delta_{\max}$ のとき

$$P_{i,j}(\delta, l_b) = \frac{P_{\max}}{\delta_{\max}} \cdot \delta \quad (5.1.2)$$

$\delta_{\max} < \delta$ のとき

$$P_{i,j}(\delta, l_b) = P_{\max} - \frac{P_{\max}}{l_b - \delta_{\max}} \cdot (\delta - \delta_{\max}) \quad (5.1.3)$$

架橋則の計算は既往の研究^[7]と同様に行う。ひび割れ幅 δ における架橋力は単繊維の引抜き荷重の総和とされ、式(5.1.4)で表される。

$$P(\delta) = \sum_h \sum_j \sum_i \{N_f \cdot P_{ij}(\delta, l_b) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_j) \cdot p_x(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot \Delta A\} \quad (5.1.4)$$

$$N_f = V_f \cdot A_m / A_f \quad (5.1.5)$$

$$p(\theta) = \frac{\sqrt{k}}{\pi} \cdot \frac{C}{\cos^2 \theta + A \sin \theta \cos \theta + B \sin^2 \theta} \quad (5.1.6)$$

$$A = \frac{(1-k) \sin 2\theta_r}{1 + (k-1) \sin^2 \theta_r} \quad (5.1.7)$$

$$B = \frac{k - (k-1) \sin^2 \theta_r}{1 + (k-1) \sin^2 \theta_r} \quad (5.1.8)$$

$$C = \frac{1}{1 + (k-1) \sin^2 \theta_r} \quad (5.1.9)$$

ここで、 N_f ：繊維本数、 V_f ：繊維混入率、 A_m ：試験体断面積、 A_f ：繊維断面積、 $P_{ij}(\delta, l_b)$ ：単繊維の引抜き荷重、 $p(\theta_i), p(\phi_j)$ ：繊維配向角分布を与える確率密度関数、 $p_x(y_h, z_h)$ ：単繊維の軸方向の分布性状を示す確率密度関数（一様分布）、 k ：配向強度、 θ_r ：主配向角

5.2 見かけの繊維破断強度

有機繊維では繊維表面が荒らされることにより見かけの繊維破断強度が低下する現象が既往の研究^[4]により確認されており，繊維強度低減係数 f を用いて次式で表されている。

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^n \cdot e^{-f \cdot \psi} \quad (5.2.1)$$

ここで， σ_{fu} ：見かけの繊維強度， σ_{fu}^n ：配向角 0° の場合の見かけの繊維強度， ψ ：繊維配向角

本研究の引抜き試験においても，一部の試験体において繊維の破断が確認された。繊維の破断が確認された試験体の最大引抜き荷重を繊維断面積で除した破断強度と配向角の関係を図 5.2.1 に示す。近似曲線を図中に実線で示す。近似式の切片である 1077MPa を配向角 0 度における見かけの繊維強度 σ_{fu}^n ，係数 0.667 を繊維強度低減係数 f とした。

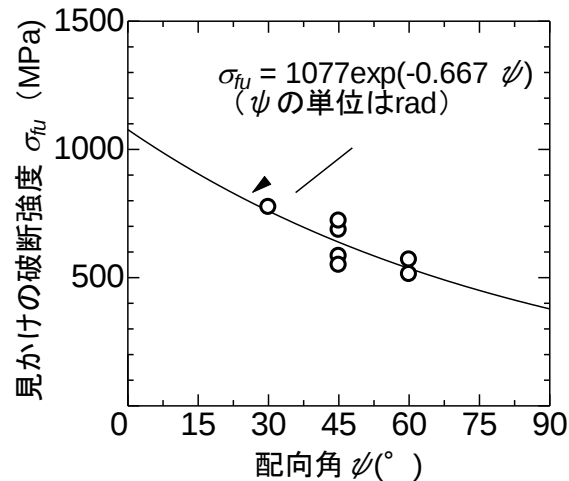


図 5.2.1 配向角による繊維強度の低減

5.3 繊維配向性が架橋則に及ぼす影響

本節では、繊維の配向性が架橋則に及ぼす影響について、架橋則の計算により確認する。配向強度以外の架橋則モデルへの入力値を表 5.3.1 に再掲する。繊維混入率は 1.0% とした。主配向角は、試験体軸方向に対して平行な 2 平面に対して、主たる配向が試験体軸方向にあるものとして $\theta_r=0$ とする。

架橋則の計算結果を図 5.3.1 左図に、繊維有効率 N_{fb}/N_f とひび割れ幅の関係を図 5.3.1 右図に示す。繊維有効率とは、ひび割れ面においてマトリクスから抜出しておらず、破断もせずに架橋力を担っている繊維（有効架橋繊維）の本数 N_{fb} の、単位体積に含まれる理論上の繊維本数 N_f に対する比である。

配向強度が増大すると引張応力も増大する。右図の繊維有効率を見ると、0.5~1.0mm 程度の範囲で繊維有効率の負勾配が変化しており、これは繊維の破断によるものである。スナッピング効果は無いものとしているため、配向強度が増大すると軸方向に配向する繊維が増え、ひび割れを架橋する繊維が単純に増加するため、繊維有効率の増加とほぼ同一の割合で引張応力も増大する。

表 5.3.1 架橋モデルへの入力値

入力項目		入力値
繊維断面積 A_m (mm ²)		0.196
繊維長 l_f (mm)		30
配向角 0°における単位付着長当たりのピーク時荷重 $P_{max,0}$ (N/mm)		8
配向角 0°におけるひび割れ幅関数 $\delta_{max} = A l_b^B$ (mm)	A	0.13
	B	0.64
繊維混入率 V_f (%)		1.0
配向角 0°における繊維破断強度 σ_{fu} (MPa)		1077
繊維強度低減係数 f'		0.667
主配向角 θ_r (°)		0

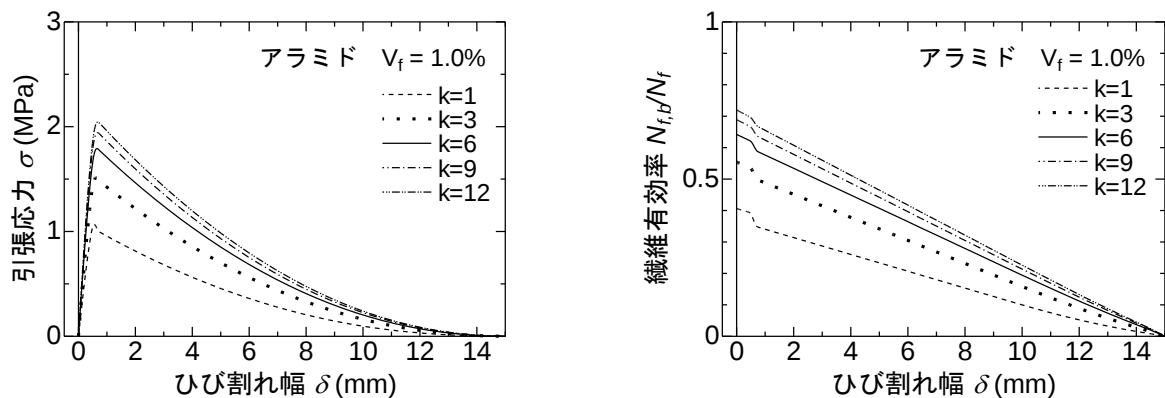


図 5.3.1 引張応力－ひび割れ幅関係と繊維有効率－ひび割れ幅関係

第6章 結論

単繊維の引抜き試験における配向角の付き方の影響を検討するために、アラミド太径単繊維の引抜き試験を行った。引抜き試験は設置角と埋込み角の二つの配向角のつけ方で行い、アラミド太径繊維の拔出し挙動の違いを検討した。検討の結果、以下の知見を得た。

- (1) 配向角の有無やつけ方に関わらず、付着長に比例して最大引抜き荷重が大きくなる傾向が見られた。最大荷重時すべり量に関しては、付着長とべき乗関係である傾向が見られた。
- (2) 配向角を有する試験体の実験では、繊維の破断やマトリクス剥離が見られた。この現象は特に埋込み角によって配向角を有する試験体に多く見られた。
- (3) 実験結果から単位付着長あたりの最大荷重と配向角の関係を検討した。埋込み角による試験体、設置角による試験体どちらにおいてもスナビング効果を確認できなかった。
- (4) 実験結果からモデル化した単繊維の架橋モデルを用いて配向強度を変化させた架橋則の計算を行い、繊維有効率の増加とほぼ同一の割合で引張応力も増大することを確認した。

謝辞

本論文を作成するにあたり，多くの方々のご指導とご協力をいただきました。指導教員であります筑波大学教授 金久保利之先生には，実験準備から論文作成に至るまで，終始懇切丁寧にご指導ご鞭撻を賜りました。この場をお借りして，心より御礼申し上げます。副指導教員であります筑波大学准教授 八十島章先生には，研究活動全般において的確なご教唆とご助言をいただきました。同じく副指導教員であります筑波大学教授 松島亘志先生には，研究に対する有益なご意見をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。筑波大学技術職員 小島篤志氏には，試験体製作等において多大なご助力をいただきましたことを厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり，筑波大学 金久保・八十島研究室の多くの方々に研究のご協力をいただきました。実験準備から論文執筆に至るまでご助言とご協力をくださった，同期や同じ研究グループの先輩，後輩に深く御礼申し上げますと共に，今後のご活躍を期待しております。

最後に，私事ではございますが，6年間の大学，大学院生活で出会ったすべての方々，そして家族に，深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 浅野浩平：高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性と架橋則に関する研究，筑波大学大学院博士論文，2014.3
- [2] 関田徹志：高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状，コンクリート工学，vol.38，No.6，pp，9-16，2000.6
- [3] Li, V.C. et al. : Effect of Inclining Angle, Bundling, and Surface Treatment on Synthetic Fiber Pull-out from a Cement Matrix, Composites, Vol.21, No.2, pp.132-140, 1990
- [4] Kanda, T., Li, V.C. : Interface Property and Apparent Strength of a High Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.10, No.1, pp.5-13, 1998
- [5] 大圖友梨子：架橋則に基づく DFRCC のせん断架橋性能の評価，筑波大学大学院修士論文，2018.3
- [6] 越前沙紀：鋼繊維のマトリクスからの拔出し挙動に関する検討，筑波大学卒業論文，2017.3
- [7] Kanakubo, T., Miyaguchi, M., Asano, K., Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Materials Journal, American Concrete Institute, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016.3