

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学術院
システム情報工学研究群修士論文

ハイブリット繊維による積層型機能性 繊維補強セメント複合材料に関する研究

古場 匠

修士（工学）

（構造エネルギー工学学位プログラム）

指導教員 金久保利之

2022年 3月

論文概要

コンクリート自体の引張性能の改善を目的として、セメント系材料に長さ 10mm 程度の短繊維を体積混入率で数%混させた高靱性繊維補強セメント複合材料 DFRCC (Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites) は、ひび割れを跨ぐ繊維の架橋により優れた引張性能を有している。DFRCC の高い引張靱性を活かし構造部材へ適用することで、構造物の損傷の低減やひび割れ幅抑制効果が報告されている。しかしながら、実部材への適用例は少ない。

積層型機能性繊維補強セメント複合材料 FG-FRCC (Functionally Graded Fiber-Reinforced Cementitious Composite) は、DFRCC を層状に打設し、各層の繊維混入率や繊維種類を変化させることで DFRCC の曲げ強度や靱性能などの向上を図った材料である。

第 1 章では、本研究の背景について整理し、目的を明確にした。

第 2 章では、PVA 繊維およびアラミド繊維を用いた DFRCC の層状打設を行った。各層の厚さと組み合わせを変化させることで、DFRCC のひび割れ開口抑制効果や靱性能を制御することを目的とし、4 点曲げ試験を行った。引張側断面の 1/3 を PVA 繊維、圧縮側断面の 2/3 をアラミド繊維とした試験体の初期剛性は PVA 一体打ち試験体と差異はなく、かつ、最も高い靱性を示した。

第 3 章では、鋼繊維と PP 繊維を用いた DFRCC について、繊維の密度の違いによって繊維の分散を偏らせ、引張側により効果的に繊維を分散させることで、DFRCC の曲げ強度および靱性能を向上させることを目的とし、4 点曲げ試験を行った。増粘剤を 20g/30L 添加した試験体が、ひび割れを架橋する繊維が効率的に分散し、最も高い靱性を示した。

第 4 章では、本論文の結論を述べた。

目次

第1章 序論.....	2
1.1 研究背景.....	2
1.2 研究目的.....	3
第2章 PVA 繊維とアラミド繊維を用いた積層型機能性 DFRCC の曲げ性状.....	4
2.1 はじめに.....	4
2.2 実験概要.....	5
2.2.1 試験体概要.....	5
2.2.2 打設方法.....	6
2.2.3 使用材料.....	7
2.2.4 加力・計測方法.....	9
2.3 断面解析.....	10
2.3.1 架橋則モデル.....	10
2.3.2 解析結果.....	11
2.4 実験結果.....	12
2.4.1 加力後の試験体状況.....	12
2.4.2 曲げモーメントー曲率関係.....	15
2.5 まとめ.....	18
第3章 鋼繊維と PP 繊維を用いた機能性 DFRCC の曲げ性状.....	19
3.1 はじめに.....	19
3.2 実験概要.....	20
3.2.1 試験体概要.....	20
3.2.2 試し練り.....	21
3.2.3 使用材料.....	24
3.2.4 打設方法.....	26
3.2.5 加力・計測方法.....	27
3.3 実験結果.....	28
3.3.1 加力後の試験体状況.....	28
3.3.2 荷重ーたわみ関係.....	31
3.3.3 曲げモーメントー曲率関係.....	33
3.4 断面解析.....	34
3.4.1 架橋則モデル.....	34
3.4.2 解析結果.....	35
3.5 まとめ.....	36
第4章 結論.....	37
謝辞.....	38

参考文献.....	39
-----------	----

図表目次

図 1.1.1	FG-FRCC の概念	2
図 2.2.1	試験体断面（第 2 章）	5
図 2.2.2	打設状況	6
図 2.2.3	練混ぜバッチ一覧	6
図 2.2.4	繊維写真（第 2 章）	8
図 2.2.5	変位計設置位置（第 2 章）	9
図 2.3.1	架橋則モデル	10
図 2.3.2	断面解析結果（第 2 章）	11
図 2.4.1	加力後の試験体状況（第 2 章）	13
図 2.4.2	曲げモーメントー曲率関係（第 2 章）	16
図 2.4.3	基準化曲げモーメントー曲率関係	17
図 2.4.4	実験結果と解析結果の比較（P3A7）	17
図 3.2.1	試験体イメージ（第 3 章）	20
図 3.2.2	鋼繊維写真（試し練り用）	21
図 3.2.3	バイブレーター使用方法	21
図 3.2.4	試験体断面（試し練り 1）	22
図 3.2.5	ファイバーボール写真（試し練り 2）	23
図 3.2.6	試験体断面（試し練り 2）	23
図 3.2.7	繊維写真（第 3 章）	25
図 3.2.8	ファイバーボール写真	26
図 3.2.9	変位計設置位置（第 3 章）	27
図 3.3.1	試験体断面（第 3 章）	28
図 3.3.2	荷重ーたわみ関係（第 3 章）	31
図 3.3.3	荷重ーたわみ曲線に囲まれる面積	32
図 3.3.4	曲げモーメントー曲率関係（第 3 章）	33
表 2.2.1	モルタル調合計画（第 2 章）	7
表 2.2.2	圧縮試験結果（第 2 章）	7
表 2.2.3	繊維諸元（第 2 章）	7
表 2.3.1	架橋則モデルに使用した数値（第 2 章）	10
表 3.2.1	鋼繊維の物性値（試し練り）	21
表 3.2.2	モルタル調合計画（第 3 章）	24
表 3.2.3	フレッシュ性状および圧縮試験結果（第 3 章）	24
表 3.2.4	繊維の物性値（第 3 章）	24
表 3.3.1	繊維分布	30

表 3.3.2	繊維分布割合	30
表 3.3.3	最大荷重まとめ	32
表 3.3.4	荷重－たわみ曲線に囲まれる面積	32
表 3.4.1	見かけの鋼繊維混入率	34
表 3.4.2	実験結果と解析結果の最大曲げモーメント比較（第 3 章）	35

第1章 序論

1.1 研究背景

コンクリートは圧縮強度に比べ引張強度が極めて小さく、引張応力下において脆性的な性質を示す。通常のコンクリート構造物は、コンクリート中に鉄筋を配筋して鉄筋コンクリート構造とすることで、鉄筋が引張力を負担する。コンクリート自体の引張性能の改善を目的として、セメント系材料に長さ 10mm 程度の短繊維を体積混入率で数%混入した繊維補強セメント複合材料 FRCC (Fiber-Reinforced Cementitious Composites) の研究が長きに渡り行われている。ひび割れを繊維が架橋することで、繊維が引張力を負担し、靱性が向上する。使用する繊維も多岐にわたり、鋼繊維や PVA 繊維、PP 繊維等の有機繊維も用いられ、力学性能はもちろん、耐久性や耐腐食性、コスト等においてそれぞれ長所を有している。

FRCC の引張性能をさらに向上させた材料として、高靱性繊維補強セメント複合材料 DFRCC (Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites) がある^[1]。曲げ応力下において、初期ひび割れ発生後に応力上昇するたわみ硬化性状を発現し、複数ひび割れ特性を有する靱性の高い材料である。DFRCC の高い引張靱性を活かし構造部材へ適用することで、構造物の損傷の低減やひび割れ幅抑制効果が報告されており、構造物の軽量化や耐久性の向上、通常のコンクリート構造には不可能な構造形態の実現等が見込まれる。一方、DFRCC を構造部材に適用した例は少ない。

積層型機能性繊維補強セメント複合材料 FG-FRCC (Functionally Graded Fiber-Reinforced Cementitious Composite) は、DFRCC を層状に打設し、各層の繊維混入率や繊維種類を変化させることで DFRCC の曲げ強度や靱性能などの向上を図った材料である。これまでに、図 1.1.1 に示すように、曲げ応力下において引張応力の大きい下縁側により多くの繊維を混入させることで、同じ繊維混入率の DFRCC より最大荷重が増加することが確認されている^[2]。

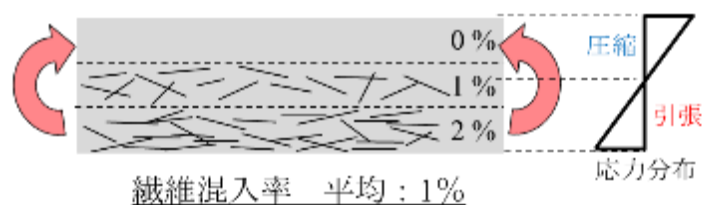


図 1.1.1 FG-FRCC の概念

1.2 研究目的

本研究では、DFRCC の更なる性能の向上を期待し、異なる種類の繊維を併せて利用するハイブリット繊維による機能性繊維補強セメント複合材料に着目して、新たな DFRCC の可能性を提案することを目的とする。

第 2 章では、PVA 繊維およびアラミド繊維を用いた DFRCC を繊維種類ごとに層状に打設することで、各繊維の持つ特性を併せ持つ DFRCC の作製を試みた。

第 3 章では、鋼繊維および PP 繊維を用いた DFRCC を、増粘剤の添加量によってマトリクスの流動性を変化させることで繊維の分散を偏らせることを試みた。

第2章 PVA 繊維とアラミド繊維を用いた積層型機能性 DFRCC の曲げ性状

2.1 はじめに

本章では、PVA 繊維およびアラミド繊維を用いた DFRCC の層状打設を行った。各層の厚さと組み合わせを変化させることで、DFRCC のひび割れ開口抑制効果や靱性能を制御することを目的とした。具体的には、PVA 繊維の持つひび割れ開口抑制効果と、アラミド繊維の持つ高靱性能を併せ持つ FG-FRCC の作製を目標とした。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体概要

試験体寸法は断面 100mm×100mm、長さ 400mm の角柱とした。本実験では DFRCC を PVA 及びアラミド繊維を用いる層の 2 層に分け、上下の層の組合わせ及び各層の厚さをコントロールすることで、PVA 繊維のひび割れ幅抑制効果とアラミド繊維の高い靱性能を合わせ持つ FG-FRCC の提案を目標とする。

実験の対象とする FG-FRCC の断面を図 2.2.1 に示す。実験に先立ち、後述する方法による断面解析を行い、引張側断面の 1/3 を PVA 繊維、圧縮側断面の 2/3 をアラミド繊維とした P3A7 試験体が、本実験で目標とする FG-FRCC に最も近い結果を得た。比較のために引張側断面の 2/3 を PVA 繊維とした P7A3 試験体、アラミド繊維 DFRCC をモルタルに置き換えた P3M7、P7M3 試験体も実験を行った。繊維混入率は全 DFRCC で 1%とし、比較のために各 DFRCC 一体打ちの試験体の実験も行った。試験体は FG-FRCC を各 5 体、一体打ちを各 3 体ずつ作製し、4 点曲げ試験を行った。

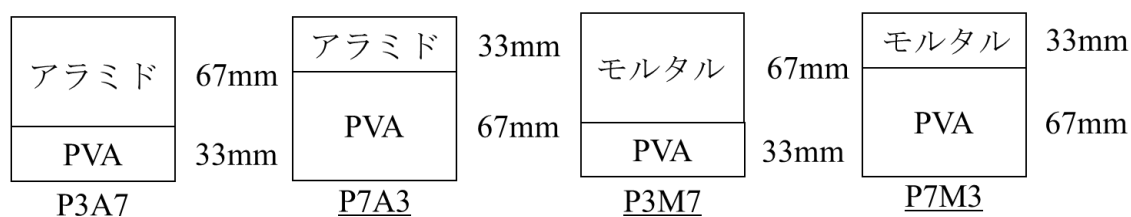


図 2.2.1 試験体断面（第 2 章）

2.2.2 打設方法

FG-FRCC では、型枠に目盛りを設置し、下層を打設し、その後、マトリクス凝結の始発時間を考慮して、1 時間の間隔を空けて上層の打設を行った。また、全 FG-FRCC の上層 DFRCC において、通常は型枠片側から流し込むが、打設間隔 1 時間では層界面が乱れてしまうため全体に均等に流し込んだ。打設時の状況を図 2.2.2 に示す。

試験体の作製は 4 バッチに分けて行った。練混ぜバッチと各 FG-FRCC の対応の一覧を図 2.2.3 に示す。

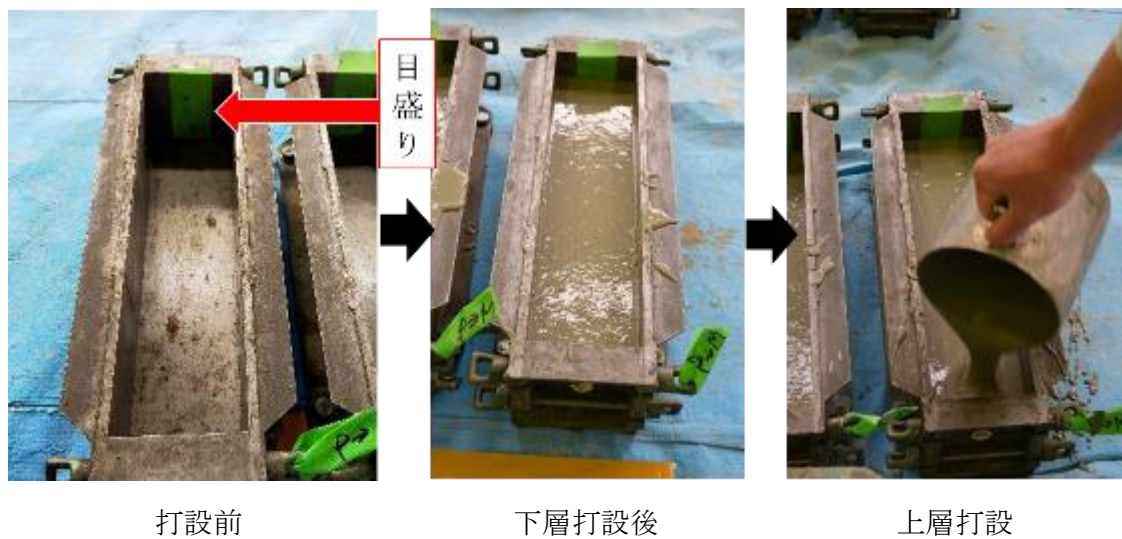


図 2.2.2 打設状況

バッチ数	④	アラミド	67mm	④	アラミド	33mm
	③	PVA	33mm	③	PVA	67mm
	②	モルタル	67mm	②	モルタル	33mm
	①	PVA	33mm	①	PVA	67mm

図 2.2.3 練混ぜバッチ一覧

2.2.3 使用材料

(1) モルタル

モルタルの調合計画を表 2.2.1 に、φ100-200mm シリンダーによる圧縮試験結果を表 2.2.2 に示す。

表 2.2.1 モルタル調合計画（第 2 章）

繊維種類	単位量[kg/m ³]							
	W	C	S	FA	F	SP	TH	SR
-	380	678	484	291	-	6	2	13.56
PVA					13			
アラミド					13.8			

C：早強ポルトランドセメント、FA：フライアッシュ JIS II 種、S：7 号珪砂、F：繊維、SP：高性能減水剤、TH：増粘剤、SR：収縮低減剤

表 2.2.2 圧縮試験結果（第 2 章）

試験体名 (バッチ)	圧縮強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]
PVA (1)	43.3	17.0
MT (2)	44.6	17.1
PVA (3)	41.8	16.2
アラミド (4)	43.2	16.0

(2) 繊維

使用した繊維の物性値を表 2.2.3 に、写真を図 2.2.4 に示す。

表 2.2.3 繊維諸元（第 2 章）

繊維種類	繊維径 [μm]	繊維長 [mm]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]
PVA	100	12	1200	28
アラミド	500	30	3432	73



PVA



アラミド

図 2.2.4 繊維写真（第2章）

2.2.4 加力・計測方法

2MN 万能試験機を用いて純曲げ区間を 100mm とした 4 点曲げ試験を行い、たわみ及び曲率を測定する。変位計取付け位置を図 2.2.5 に示す。一側面では純曲げ区間の上下に π 型変位計を取付け、軸方向変形を測定し、それらの歪から曲率を算出する。裏側面では変位計を 3 箇所設置し、载荷点たわみ及び純曲げ区間中央部たわみを測定する。荷重は万能試験機の出力を測定し、曲げモーメントを算出する。

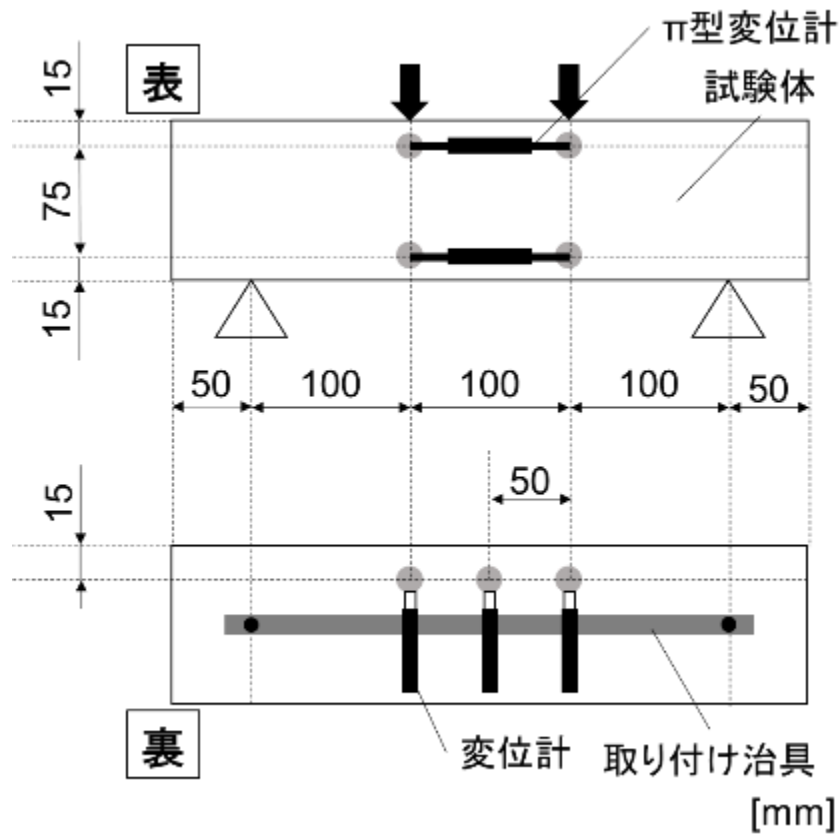


図 2.2.5 変位計設置位置 (第 2 章)

2.3 断面解析

2.3.1 架橋則モデル

対象試験体のファイバーモデルによる断面解析を行った。PVA 繊維を用いた DFRCC の架橋則にはトリリニアモデル^[3]、アラミド繊維にはバイリニアモデル^[4]を用いた。なお、圧縮側には放物線モデルを用いた。繊維混入率は 1%とし、繊維の配向強度は $k=6.5$ とした。モデルを図 2.3.1 に示す。また、解析に使用した数値を表 2.3.1 に示す。

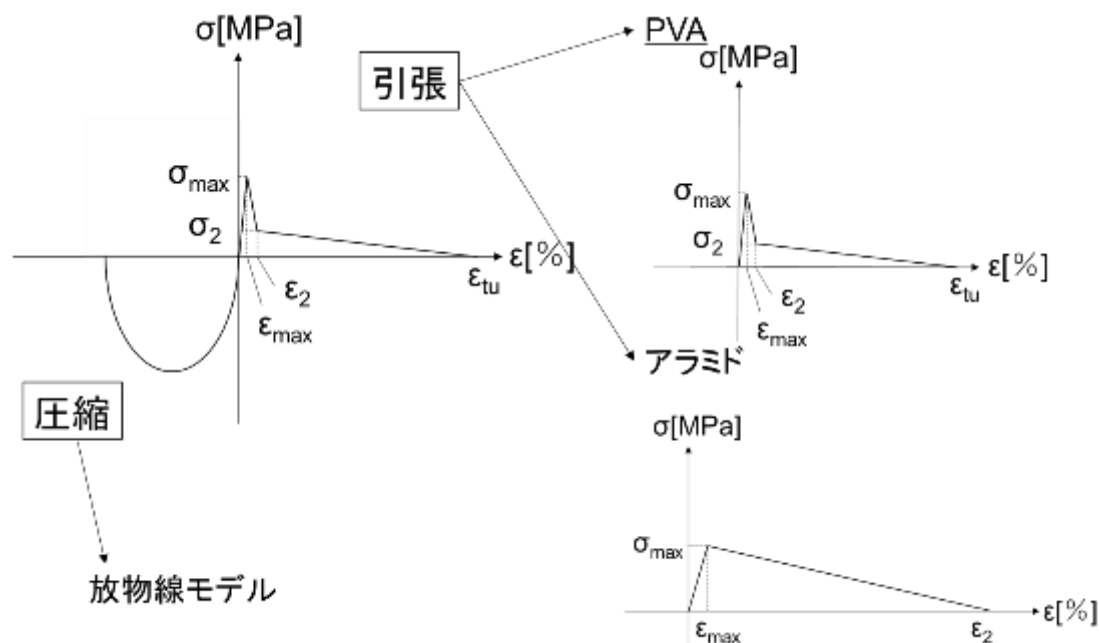


図 2.3.1 架橋則モデル

表 2.3.1 架橋則モデルに使用した数値（第 2 章）

繊維種類	$\sigma_{\max}$	σ_2	$\epsilon_{\max}$	ϵ_2	ϵ_{tu}
	[MPa]			[%]	
PVA	1	0.3	0.2	0.45	6
アラミド	1	-	0.6	-	9.3

2.3.2 解析結果

引張側を PVA 繊維、圧縮側をアラミド繊維とした断面解析による曲げモーメントー曲率関係を図 2.3.2 に示す。比較のために、全断面を PVA またはアラミド繊維とした一体打ち試験体の解析結果も示す。引張側の 1/3 を PVA 繊維、圧縮側の 2/3 をアラミド繊維とした P3A7 が、本研究で目標とする FG-FRCC に最も近い。

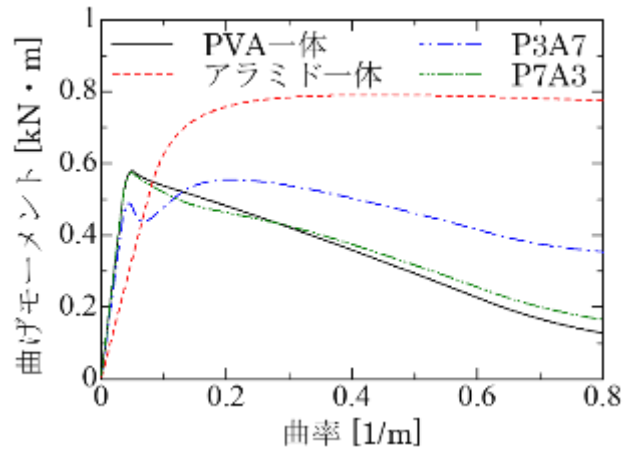


図 2.3.2 断面解析結果（第 2 章）

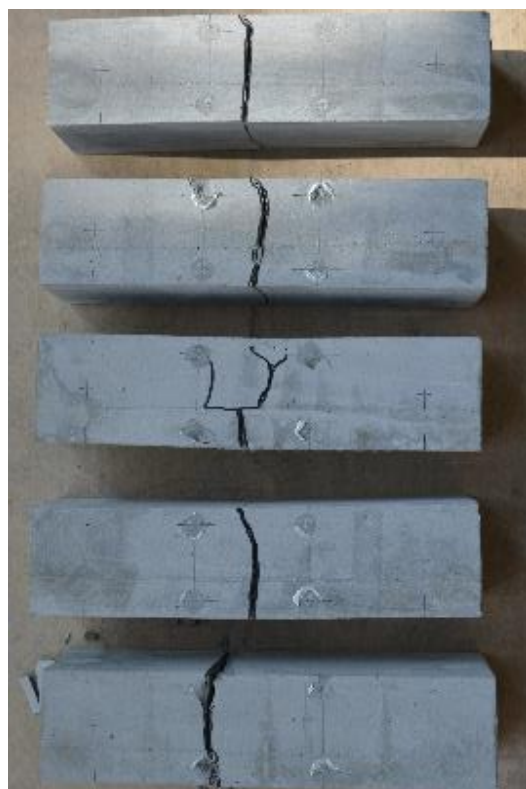
2.4 実験結果

2.4.1 加力後の試験体状況

各試験体の加力後のひび割れ状況を図 2.4.2 に示す。FG-FRCC 試験体では、層界面を確認できた。各層でのひび割れは断面の同一箇所に生じない場合があり、ひび割れが層界面方向へ進展した試験体が見られた。



P3A7



P3M7

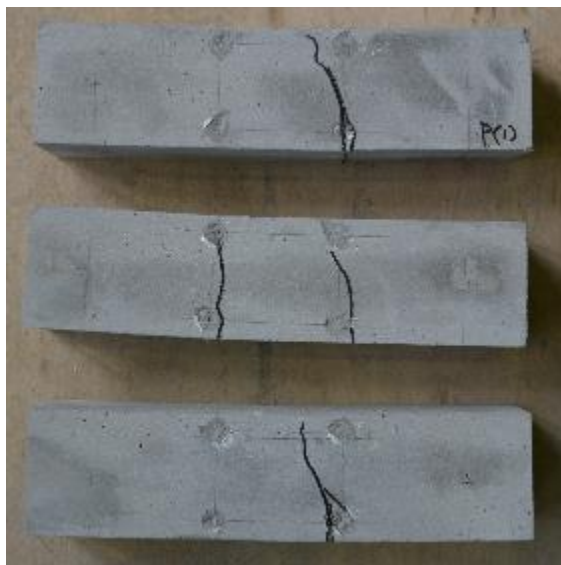


P7A3



P7M3

図 2.4.1 加力後の試験体状況 (第 2 章)



PVA 一体打ち

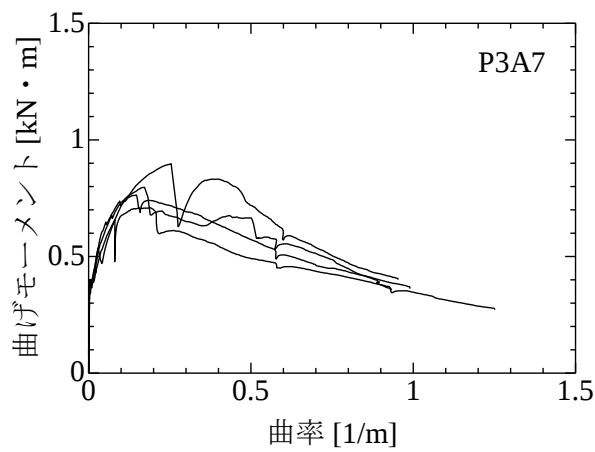


アラミド一体打ち

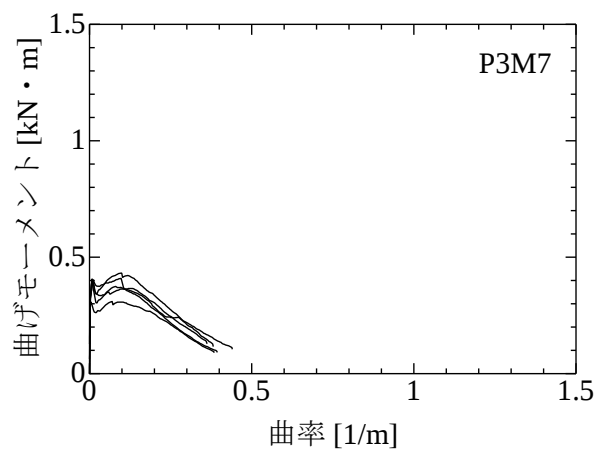
図 2.4.2 加力後の試験体状況（第 2 章）（続き）

2.4.2 曲げモーメントー曲率関係

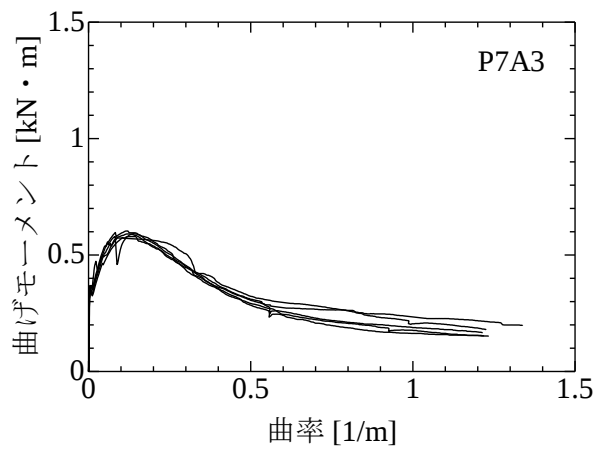
各試験体の曲げモーメントー曲率関係を図 2.4.3 に示す。P3A7 と P3M7 試験体及び P7A3 と P7M3 試験体をそれぞれ比較すると、アラミド繊維を用いることで強度と靱性能が向上していることが確認できた。断面解析では P7A3 試験体の最大曲げモーメントが P3A7 試験体より大きい、実験結果は P3A7 試験体の方が大きい。引張側にある PVA 繊維の層がアラミドの層のひび割れ開口を抑制し、アラミドの層の架橋強度を向上させた可能性がある。



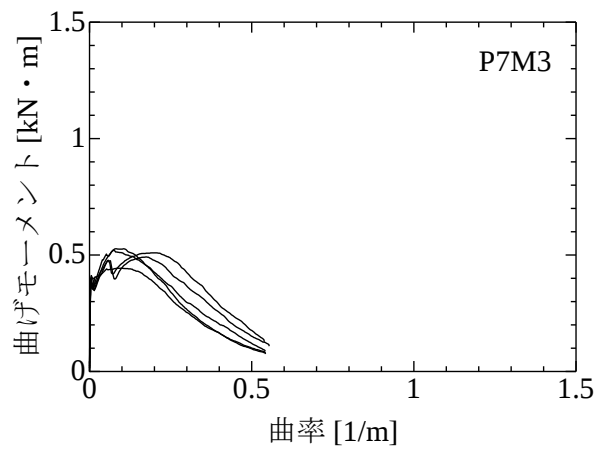
P3A7



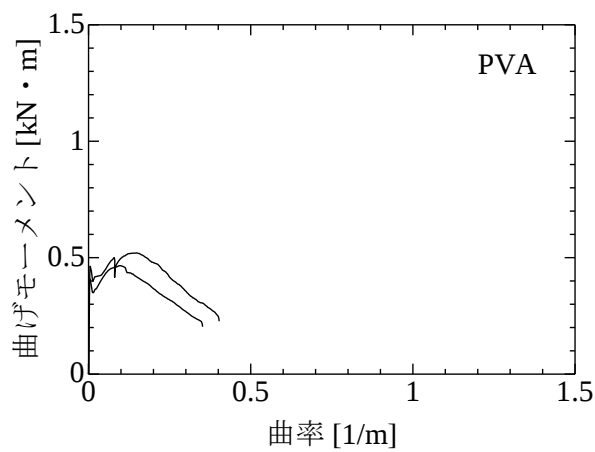
P3M7



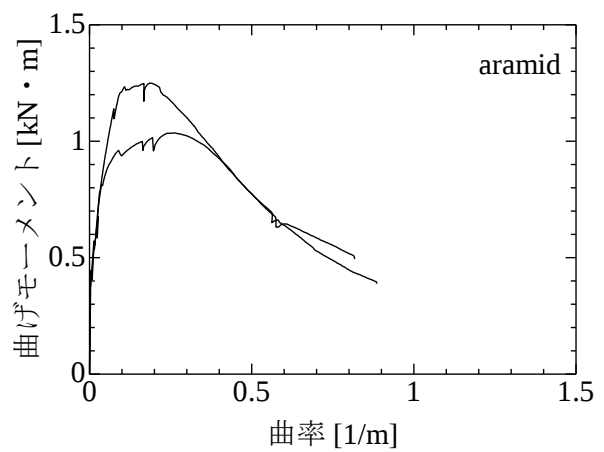
P7A3



P7M3



PVA 一体打ち



アラミド一体打ち

図 2.4.3 曲げモーメントー曲率関係 (第 2 章)

各試験体の最大曲げモーメントで基準化した曲げモーメントー曲率関係を図 2.4.4 に示す。全ての試験体において初期剛性に大きな違いはなく、さらに P3A7 試験体が最も高い靱性を示すことが確認できた。

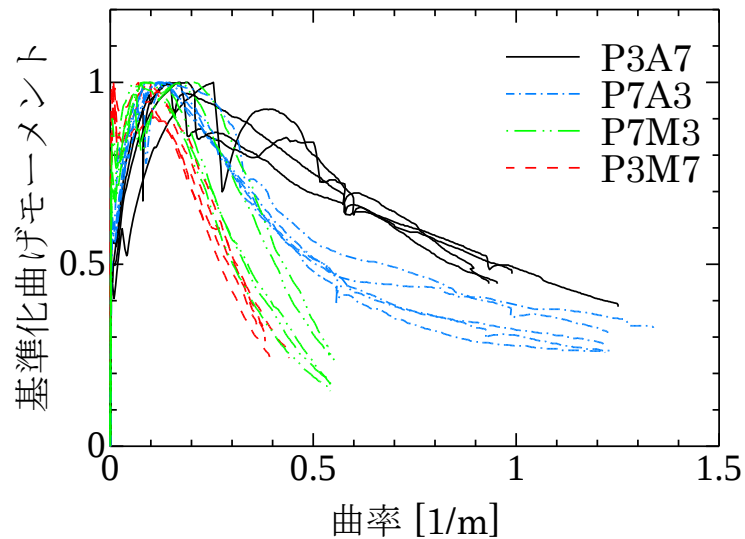


図 2.4.4 基準化曲げモーメントー曲率関係

P3A7 試験体のモーメントー曲率関係の実験結果と解析結果の比較を図 2.4.5 に示す。解析結果の第 1 ピーク時以降に実験結果が解析結果を上回っている。層界面でのひび割れ進展が見られた試験体もあったことから、各層からの相互作用によりひび割れ開口が拘束を受け、見かけ上の繊維の架橋性能が向上した可能性が考えられる。

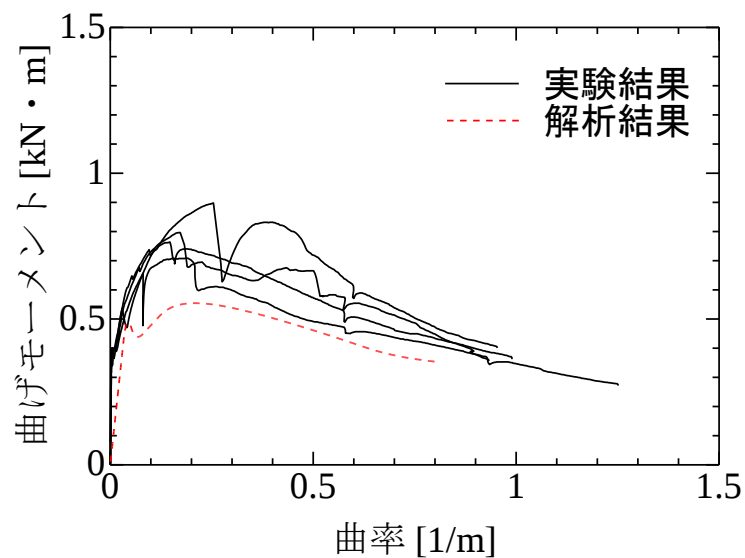


図 2.4.5 実験結果と解析結果の比較 (P3A7)

2.5 まとめ

PVA 繊維およびアラミド繊維を用いた DFRCC の層状打設を行った。各層の厚さと組み合わせを変化させることで、DFRCC のひび割れ開口抑制効果や靱性能を制御することを目的とした。4 点曲げ試験を行い、ファイバーモデルによる断面解析と結果を比較した。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 引張側断面の 1/3 を PVA 繊維、圧縮側断面の 2/3 をアラミド繊維とした試験体の初期剛性は PVA 一体打ち試験体と差異はなく、かつ、最も高い靱性を示した。
- ② 各層でのひび割れは断面の同一箇所には生じない場合があり、ひび割れが層界面方向へ進展した試験体が見られた。
- ③ 実験による曲げモーメントは解析結果を上回っており、層界面における相互作用を解析に考慮する必要があると考えられる。

第3章 鋼繊維と PP 繊維を用いた機能性 DFRCC の 曲げ性状

3.1 はじめに

本章では、鋼繊維と PP 繊維を用いた DFRCC について、繊維の密度の違いによって繊維の分散を偏らせ、引張側により効果的に繊維を分散させることで、DFRCC の曲げ強度および靱性能を向上させることを目的とした。マトリクスの増粘剤添加量を変化させ、J ロート試験における流下時間をパラメーターとすることで繊維の分散をコントロールした。

3.2 実験概要

3.2.1 試験体概要

試験体寸法は断面 100mm×100mm、長さ 400mm の角柱とした。本実験では、モルタルに鋼繊維（密度 7.85g/cm³）と PP 繊維（密度 0.91g/cm³）を練混ぜ、図 3.2.1 のように密度の違いによって分散を偏らせることを目標とした。増粘剤の添加量を変化させることでマトリクスの粘度をコントロールした。増粘剤が少なすぎると繊維が分散せずにファイバーボールが発生してしまうが、増粘剤が多すぎると密度の違いによる分離が起こらない。後述の試し練りから増粘剤添加量は、練混ぜ量 30L に対し、0g、20g、40g、60g（TH0、TH20、TH40、TH60）の 4 水準とした。試験体は各 5 体作製し、4 点曲げ試験を行った。

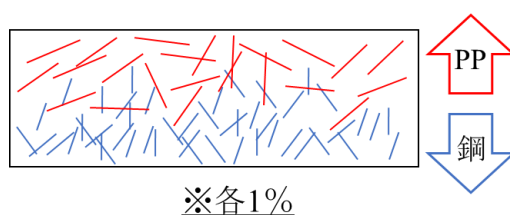


図 3.2.1 試験体イメージ（第 3 章）

3.2.2 試し練り

適切な増粘剤添加量を図るため試し練りを行った。試し練りで使用した鋼繊維の物性値を表 3.2.1 に、写真を図 3.2.2 に示す。

表 3.2.1 鋼繊維の物性値（試し練り）

繊維種類	繊維径 [μm]	繊維長 [mm]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	密度 [g/cm^3]
鋼繊維	160	13	2825	210	7.85



図 3.2.2 鋼繊維写真（試し練り用）

モルタルの配合および PP 繊維は、後述する実際の実験と同一のものを用いた。試し練りでは、増粘剤を 30g/30L を加えたものと増粘剤を加えないものを行った。試験体寸法は、断面 100mm×100mm、長さ 400mm の角柱とした。

(1) 試し練り 1（増粘剤添加量 30g/30L）

既往の研究^[9]を参考にして、図 3.2.3 のように打設後にバイブレーターを使用した試験体（V）と、通常通り打設を行う試験体（N）を各 3 体作製した。

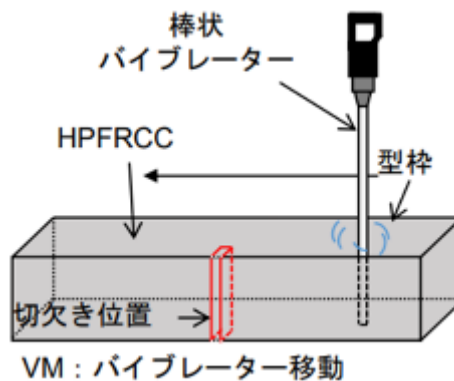


図 3.2.3 バイブレーター使用方法

各試験体の 4 点曲げ試験後の断面写真を図 3.2.4 に示す。打設面は写真上部である。増粘剤添加量 30g/30L では、繊維はほぼ均一に分散していた。

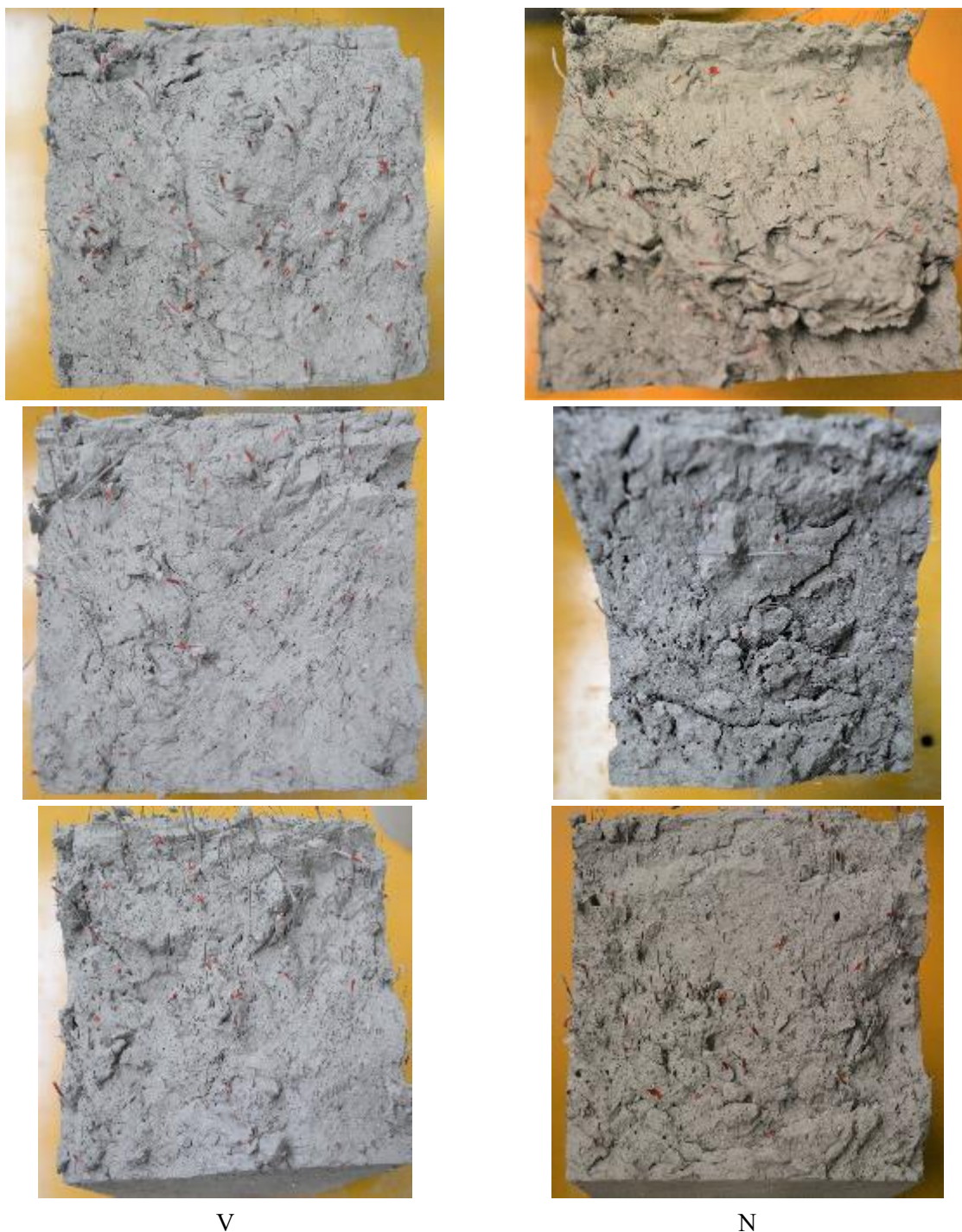


図 3.2.4 試験体断面（試し練り 1）

(2) 試し練り 2（増粘剤なし）

増粘剤を加えずに 2 体試験体を作製した。モルタルの粘性が低いためファイバーボールが発生した。（図 3.2.5）



図 3.2.5 ファイバーボール写真（試し練り 2）

試験体の断面写真を図 3.2.6 に示す。増粘剤を加えずに作製した試験体では、鋼繊維が下部に、PP 繊維が上部に偏って分散していた。

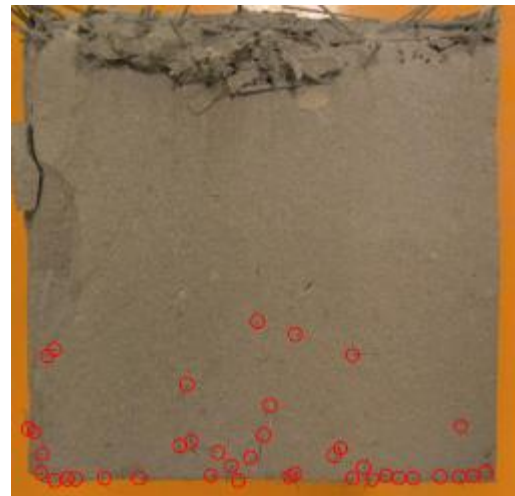
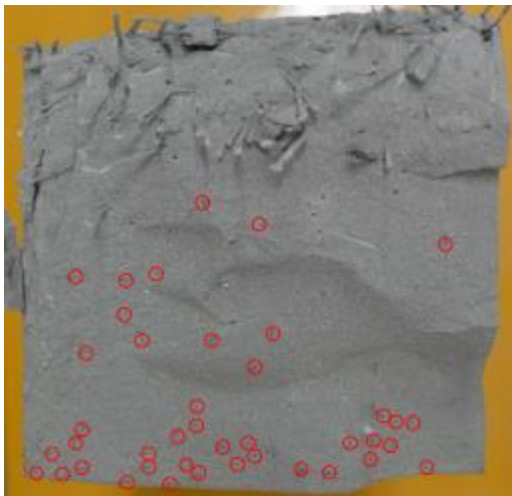


図 3.2.6 試験体断面（試し練り 2）

3.2.3 使用材料

(1) モルタル

モルタルの調合計画を表 3.2.2 に、フレッシュ性状およびφ100-200mm シリンダーによる圧縮試験結果を表 3.2.3 に示す。

表 3.2.2 モルタル調合計画（第 3 章）

繊維種類	単位量[kg/m ³]							
	W	C	S	FA	F	SP	TH	SR
PP 鋼	380	678	484	291	PP:9.1 鋼:78.5	6	0 0.67 1.33 2	13.56

C：早強ポルトランドセメント、FA：フライアッシュ JIS II 種、S：7 号珪砂、F：繊維、SP：高性能減水剤、TH：増粘剤、SR：収縮低減剤

表 3.2.3 フレッシュ性状および圧縮試験結果（第 3 章）

試験体	流下時間 [s]	温度 [°C]	圧縮強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]
TH0	24.3	16.5	45.8	17.3
TH20	31.9	17.3	42.6	16.7
TH40	69.2	18.5	38.8	17.0
TH60	※136.2	18.8	39.9	16.8

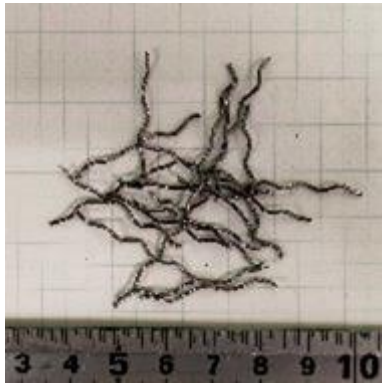
※TH60 の流下時間は、モルタルの粘度が高すぎることから、従来の J ロート試験の計測方法では計測できなかったため、J ロート内のモルタルがすべて流れ落ちる時間を計測した。

(2) 繊維

使用した繊維の物性値を表 3.2.4 に、写真を図 3.2.7 に示す。

表 3.2.4 繊維の物性値（第 3 章）

繊維種類	繊維径 [μm]	繊維長 [mm]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	密度 [g/cm ³]
鋼繊維	800	30	1000	210	7.85
PP	700	30	580	4.9	0.91



鋼繊維

(3次元立体波状形状スチールファイバー)



PP 繊維

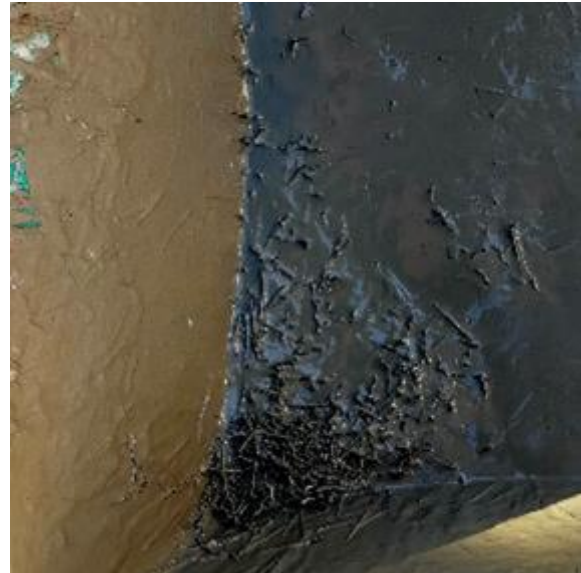
図 3.2.7 繊維写真 (第 3 章)

3.2.4 打設方法

TH0 および TH20 では図 3.2.8 のようにファイバーボールが発生した。モルタルを型枠に流し込む際にファイバーボールが容器底面に残ってしまうため、繊維の一部を人為的に型枠に入れた。



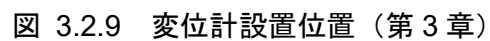
TH0



TH20

図 3.2.8 ファイバーボール写真

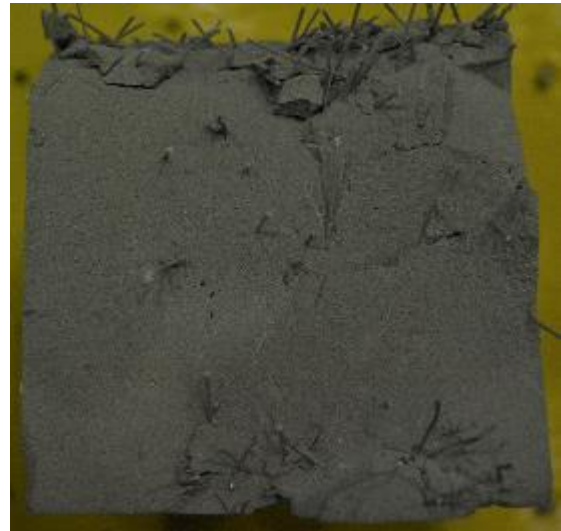
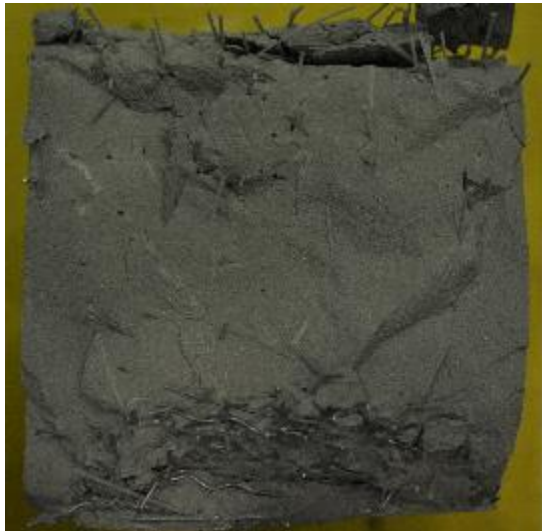
2MN 万能試験機を用いて純曲げ区間を 100mm とした 4 点曲げ試験を行い、たわみ及び曲率を測定する。変位計取付け位置を図 3.2.9 に示す。一側面では純曲げ区間の上下に π 型変位計を取付け、軸方向変形を測定し、それらの歪から曲率を算出する。裏側面では変位計を 3 箇所を設置し、載荷点たわみ及び純曲げ区間中央部たわみを測定する。荷重は万能試験機の出力を測定し、曲げモーメントを算出する。



3.3 実験結果

3.3.1 加力後の試験体状況

加力後の試験体の試験体断面の一部を図 3.3.2 に示す。

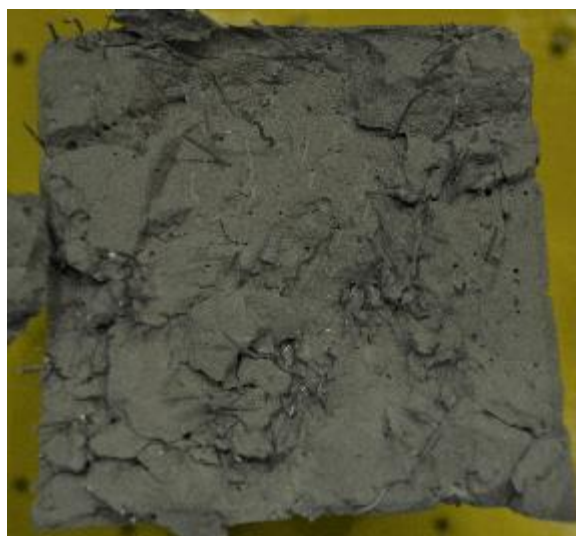
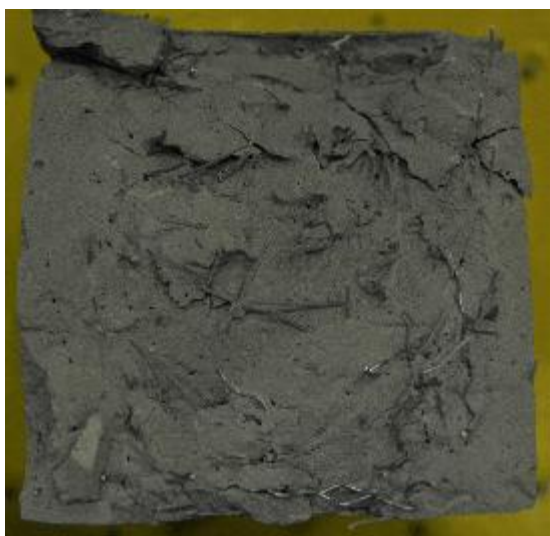


TH0



TH20

図 3.3.1 試験体断面（第 3 章）



TH40



TH60

図 3.3.2 試験体断面（第 3 章）（続き）

加力後の試験体断面における繊維分布を試験体ごとに平均したものを表 3.3.1 に示す。繊維分布の割合を表 3.3.2 に示す。繊維の分布は、打設面を上部として高さを 3 等分した区間ごとに計測した。全試験体で鋼繊維が下部に分散が偏っていた。増粘剤添加量が増えるごとに偏りが小さくなり、TH0、TH40、TH60 試験体では、上部になるほど鋼繊維量は減る傾向が見られた。TH20 試験体のみ上部にも分散していた。PP 繊維が鋼繊維の一部を持ち上げたと考えられる。PP 繊維は、TH0 試験体では上部に分散が偏っていた。増粘剤を加えた試験体ではほぼ均等に分散していた。

表 3.3.1 繊維分布

位置	TH0		TH20		TH40		TH60	
	鋼繊維	PP	鋼繊維	PP	鋼繊維	PP	鋼繊維	PP
上	0.2	101.4	20.8	68.8	10.2	39.2	9.2	39.0
中	2.0	28.6	5.0	57.8	24.0	43.4	26.6	45.8
下	52.6	26.0	44.4	59.4	40.6	45.6	50.2	43.0
計	54.8	156.0	70.2	186.0	74.8	128.2	86.0	127.8

単位：本

表 3.3.2 繊維分布割合

位置	TH0		TH20		TH40		TH60	
	鋼繊維	PP	鋼繊維	PP	鋼繊維	PP	鋼繊維	PP
上	0.3 (0.6)	64.6 (9.1)	29.1 (14.5)	37.1 (2.5)	13.6 (1.7)	29.4 (8.0)	10.7 (5.9)	30.5 (2.9)
中	3.5 (3.6)	18.1 (4.1)	7.7 (5.0)	31.5 (4.3)	31.8 (4.7)	33.8 (1.8)	31.0 (3.1)	35.5 (3.1)
下	96.2 (3.3)	17.3 (8.5)	63.2 (12.8)	31.4 (4.3)	54.6 (4.8)	36.8 (4.8)	58.3 (8.6)	34.0 (4.4)

単位：％、() 内は標準偏差

3.3.2 荷重－たわみ関係

各試験体の荷重－たわみ関係を図 3.3.3 に示す。() 内は流下時間を示す。たわみは載荷点たわみを平均したものである。各試験体の最大荷重を平均したものを表 3.3.3 に示す。TH0 試験体では、鋼繊維が下部に偏っていたためひび割れが進展すると大きく荷重が落ちる現象が見られた。いくつかの試験体でピーク後に荷重が小刻みに上下する現象が見られたが、波形状の鋼繊維による影響である可能性がある。

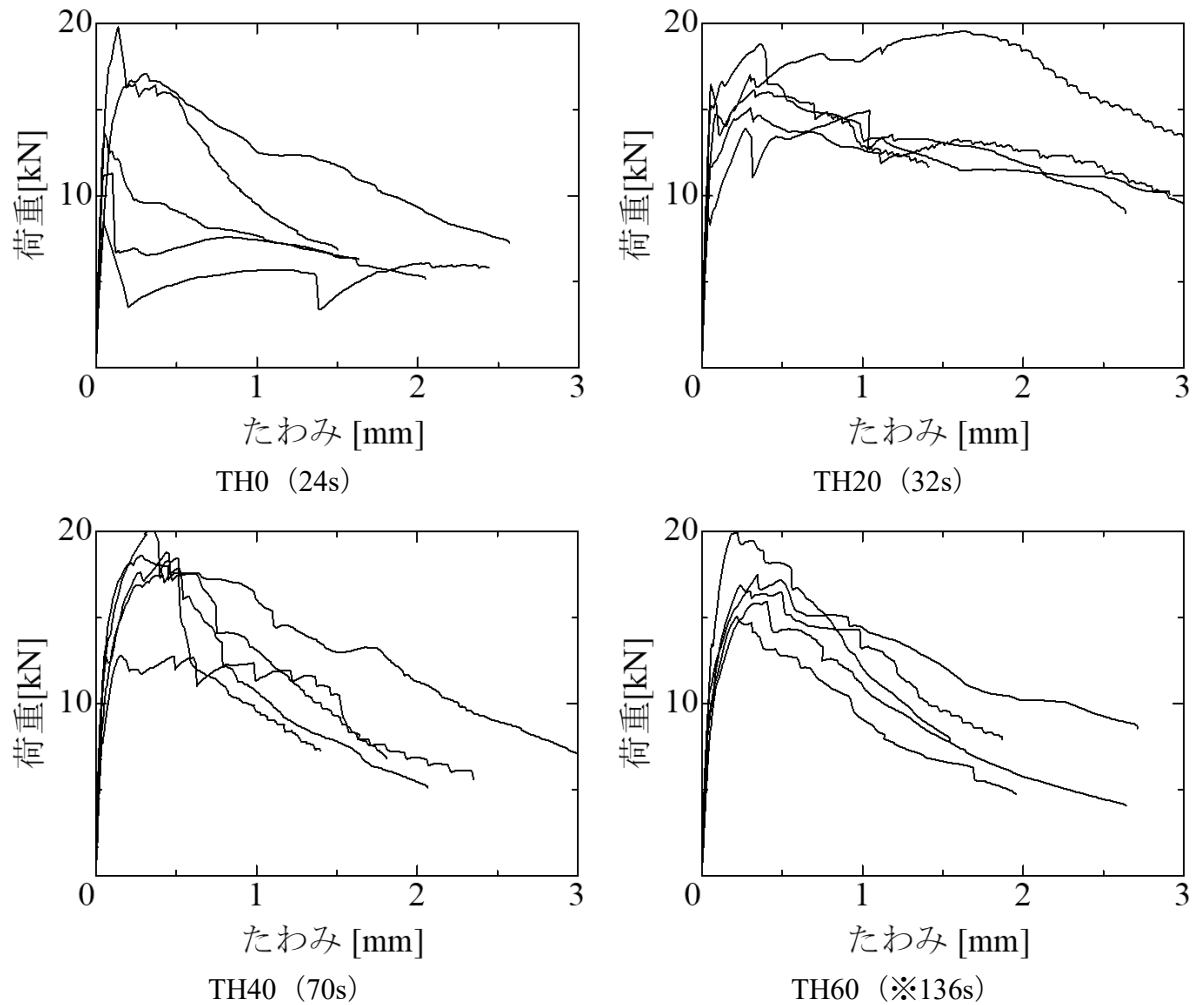


図 3.3.3 荷重－たわみ関係（第 3 章）

表 3.3.3 最大荷重まとめ

試験体名	最大荷重 [kN]
TH0	13.9
TH20	16.7
TH40	17.7
TH60	17.1

荷重－たわみ曲線に囲まれた面積をまとめたものを表 3.3.4 に、グラフ化したものを図 3.3.4 示す。TH0 試験体では、応力が大きく低下することから荷重－たわみ曲線に囲まれる面積は小さくなった。全試験体の中で TH20 試験体が最も高い靱性を示した。鋼繊維が適度に下部に偏って分散したため、効率的にひび割れを架橋したためであると考えられる。

表 3.3.4 荷重－たわみ曲線に囲まれる面積

試験体	荷重－載荷点たわみ曲線に 囲まれる面積[kN・mm]		
	～1mm	～1.5mm	～2.0mm
TH0	10.0 (3.7)	14.0 (4.8)	17.5 (6.7)
TH20	14.6 (1.3)	21.7 (2.6)	28.7 (3.9)
TH40	14.5 (1.6)	20.3 (2.3)	24.4 (3.8)
TH60	14.1 (1.4)	19.3 (2.2)	24.1 (3.0)

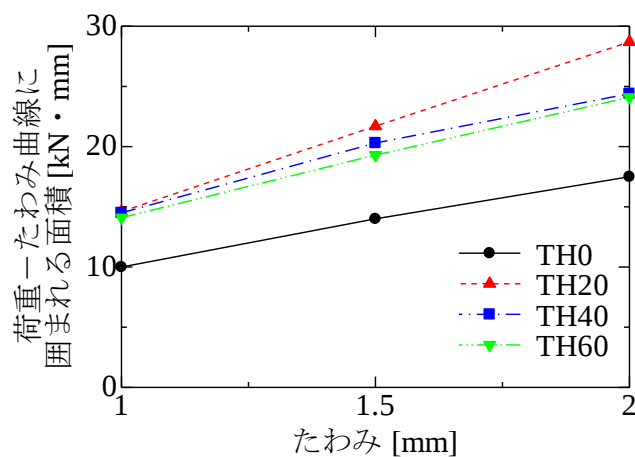


図 3.3.4 荷重－たわみ曲線に囲まれる面積

3.3.3 曲げモーメントー曲率関係

各試験体の曲げモーメントー曲率関係を図 3.3.5 に示す。TH20 試験体ではすべての試験体において変位計の測定範囲外でひび割れ開口が局所化したことから、表示していない。

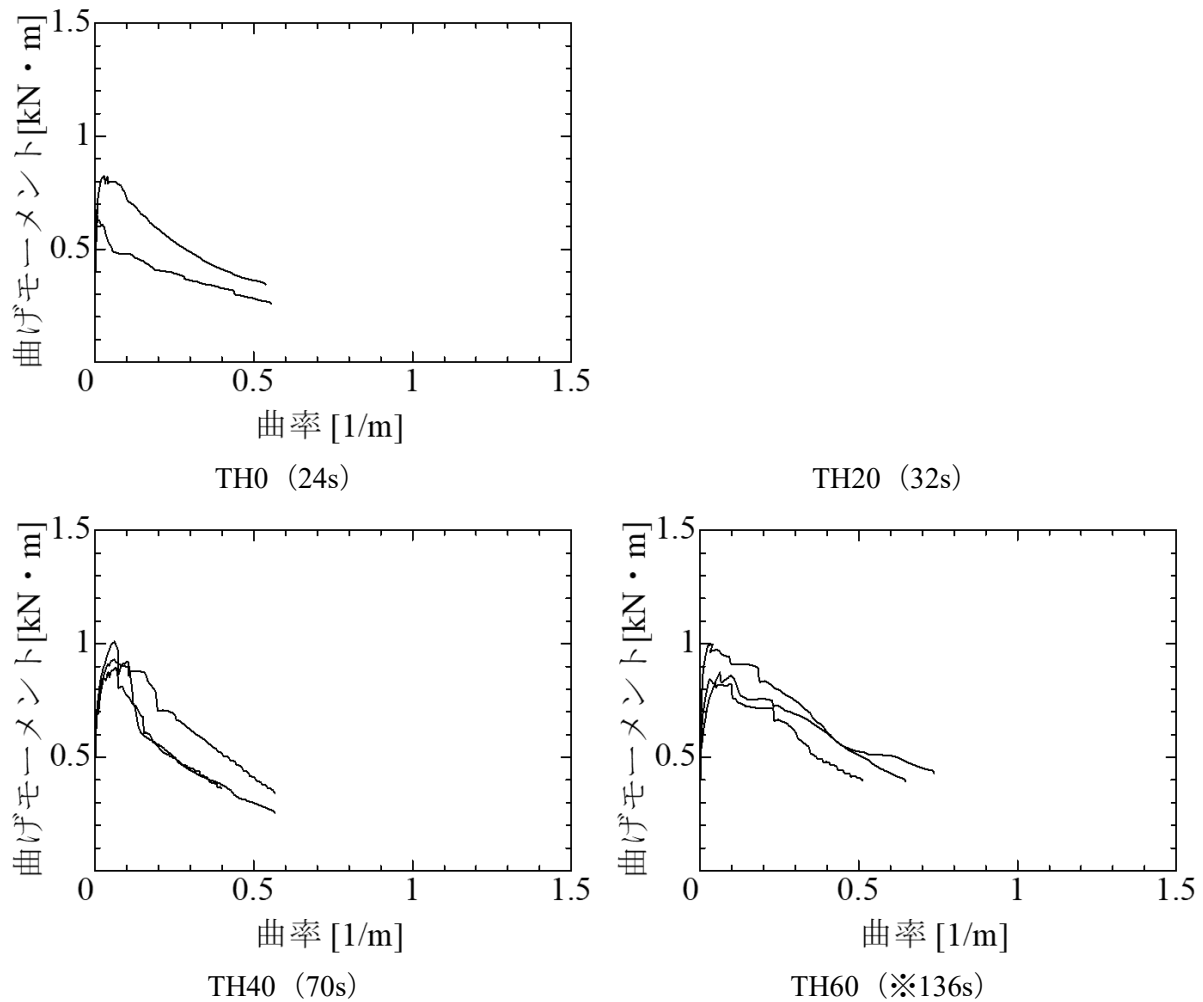


図 3.3.5 曲げモーメントー曲率関係 (第 3 章)

3.4 断面解析

3.4.1 架橋則モデル

対象試験体のファイバーモデルによる断面解析を行った。鋼繊維を用いた DFRCC の架橋則には既往の研究⁶⁾を参考にバイリニアモデルを用いた。圧縮側には放物線モデルを用いた。繊維の配向強度は $k=1$ とした。解析では、TH60 試験体の鋼繊維量を基準とし、断面位置ごとに見かけの繊維混入率を求めることで断面内の繊維分散を表現した。なお、PP 繊維の架橋効果は鋼繊維と比較して小さいため、PP 繊維は無視した。解析に用いた数値を表 3.4.1 に示す。

表 3.4.1 見かけの鋼繊維混入率

位置	TH0	TH20	TH40	TH60
上	0.022	2.261	1.109	1.000
中	0.075	0.188	0.902	1.000
下	1.048	0.884	0.809	1.000

単位：％

3.4.2 解析結果

解析によって得られた最大曲げモーメントと実験結果の比較を表 3.4.2 に示す。解析による曲げモーメントは実験結果を上回っていた。本解析では、断面を高さ方向に 3 等分することで繊維の分布を表現したが、実際の繊維の分布をより正確に解析に組み込む必要があると考えられる。

表 3.4.2 実験結果と解析結果の最大曲げモーメント比較（第 3 章）

試験体	最大曲げモーメント[kN・m]		実験結果/ 解析結果
	実験結果	解析結果	
TH0	0.697	0.854	0.82
TH20	0.836	0.954	0.88
TH40	0.883	1.084	0.81
TH60	0.853	1.252	0.68

3.5 まとめ

鋼繊維と PP 繊維を用いた DFRCC について、繊維の密度の違いによって繊維の分散を偏らせ、引張側により効果的に繊維を分散させることで、DFRCC の曲げ強度および靱性能を向上させることを目的とした。4 点曲げ試験を行い、ファイバーモデルによる断面解析と結果を比較した。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 増粘剤を 20g/30L 添加した試験体が、ひび割れを架橋する繊維が効率的に分散し、最も高い靱性を示した。
- ② 鋼繊維は、全試験体で下部に分散が偏っていた。増粘剤添加量が増えるごとに偏りが小さくなり、TH20 試験体のみ上部にも分散していた。
- ③ PP 繊維は、TH0 試験体では下部に分散が偏っていた。増粘剤を加えた試験体ではほぼ均等に分散していた。
- ④ 解析による曲げモーメントは実験結果を上回っており、繊維の分布をより正確に解析に組み込む必要があると考えられる。

第4章 結論

本研究では、DFRCC の更なる性能の向上を期待し、異なる種類の繊維を併せて利用するハイブリット繊維による機能性繊維補強セメント複合材料に着目して、新たな DFRCC の可能性を提案することを目的とした。PVA 繊維とアラミド繊維を用い、層状打設を行った DFRCC および鋼繊維と PP 繊維を用いた DFRCC について 4 点曲げ試験を行った。

PVA 繊維とアラミド繊維を用い、層状打設を行った DFRCC において、引張側断面の 1/3 を PVA 繊維、圧縮側断面の 2/3 をアラミド繊維とした試験体の初期剛性は PVA 一体打ち試験体と差異はなく、かつ、最も高い靱性を示した。実験による曲げモーメントは解析結果を上回っており、層界面における相互作用を解析に考慮する必要があると考えられる。

鋼繊維と PP 繊維を用いた DFRCC において、増粘剤を 20g/30L 添加した試験体がひび割れを架橋する繊維が効率的に分散し、最も高い靱性を示した。解析による曲げモーメントは実験結果を上回っており、繊維の分散をより正確に解析に組み込む必要があると考えられる。

ハイブリット繊維を用いた DFRCC において、各実験で目標とする試験体を製作することができたが、定量的な評価には至っておらず未解明な点が多い。打設の複雑さ等を考慮した上で、実際の構造物に適用するには、各繊維の特性と架橋力の関係性についての詳細な検討が必要であると考えられる。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導およびご協力を頂きました。

筑波大学システム情報工学系教授金久保利之先生には、本研究における相談から実験の実施、および論文推敲に至るまで終始親身にご指導を賜りました。筑波大学システム情報系准教授の八十島章先生には、研究に関する多くのご意見やご指導をいただきました。筑波大学技術専門職員の小島篤志氏には、実験時に試験体の製作、特殊な治具の製作および実験方法など多大なる便宜を図って頂きました。心より感謝いたします。

また、研究室の先輩である SYLLAMADOU SAKHIR 氏、山田恒平氏、浅山智氏、須永大揮氏、油野登梧氏、同期である藤原海氏、JIN WANG 氏、HAUHUI SHI 氏、後輩である小林寛弥氏、SELAMAWIT FTHANEGEST ABRHA 氏には実験の補助や論文指導など多くの支援を頂きました。皆様に心より感謝致します。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用方法研究委員会報告書、2012.9
- [2] 古場匠、山田恒平、金久保利之：PVA 繊維を用いた積層型機能性繊維補強セメント複合材料の曲げ性状、土木学会年次学術講演会講演概要集、部門V－255、2020.9
- [3] Ozu, Y., et al., Modeling of Bridging Law for PVA-FRCC Considering Fiber Orientation, Journal of Civil Engineering and Architecture, Volume12, Number 9, pp.651-661, 2018.9
- [4] Sunaga, D., et al., Modeling of Bridging Law for Bundled Aramid Fiber-Reinforced Cementitious Composite and its Adaptability in Crack Width Evaluation, Materials. Vol.14, No.1, 179, 2021
- [5] 宮口大、渡邊啓介、金久保利之：繊維配向性を考慮した棒状バイブレーターによるHPFRCC の打込み方法、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.1、pp.265～270、2015.7
- [6] 須永大揮、古場匠、金久保利之：繊維種類による架橋則の違いがDFRCC 部材のひび割れ幅に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.43、No.2、pp.775～780、2021.7