

連続繊維ネットと高靱性吹付けコンクリートの
組合せによる補修・補強工法の開発に関する研究

共同研究報告書

平成24年3月

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
国立大学法人室蘭工業大学
三井住友建設株式会社

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

連続繊維ネットと高靱性吹付けコンクリートの 組合せによる補修・補強工法の開発に関する研究 共同研究報告書

独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム

上席研究員 田口 史雄
元総括主任研究員 嶋田 久俊^{※1}
研究員 吉田 行
元研究員 栗橋 祐介^{※2}

国立大学法人室蘭工業大学 建設システム工学科 教授

岸 徳光

三井住友建設株式会社 技術研究所

主席研究員 三上 浩
主任研究員 谷口 秀明
主任研究員 篠崎 裕生
主任研究員 中島 規道

※1 現 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付寒地技術推進室

※2 現 国立大学法人室蘭工業大学 暮らし環境系領域

要旨

連続繊維ネットに高靱性コンクリートを吹付けることによってコンクリート構造物の耐力向上や剥離・剥落を防止する補修・補強方法について、材料および構造的観点から検討を行った。施工性試験および耐久性試験の結果から、ポリプロピレン(PP)短繊維を用いた吹付けコンクリートは、ポリビニルアルコール(PVA)短繊維を混入した場合と同様に、良好な施工性および耐久性が認められた。また、PP短繊維を用いた吹付けコンクリートの圧縮強度、引張強度および付着強度は、PVA短繊維を用いる場合とほぼ同程度となった。せん断補強 RC梁の静的載荷実験結果から、PP短繊維や炭素連続繊維(CFRP)ネットを用いる場合にも十分な補強効果が認められた。以上のことから、PVA短繊維およびアラミド連続繊維(AFRP)ネットを組み合わせた吹付けコンクリートと連続繊維ネットの補修・補強工法に、PP短繊維やCFRPネットも適用可能であることが確認された。

キーワード：吹付けコンクリート、連続繊維ネット、ポリプロピレン短繊維、
ポリビニルアルコール短繊維、RC梁のせん断耐力

目次

第 1 章 概要	1
1.1 共同研究の概要	1
1.2 試験概要	2
1.3 試験方法	3
1.4 使用材料および機器関係	7
第 2 章 配合試験	10
2.1 試験概要	10
2.2 試験目的	10
2.3 試験方法	10
2.4 PP短繊維の配合試験結果	11
2.5 CF短繊維の配合試験結果	12
2.6 まとめ	12
第 3 章 施工性試験	13
3.1 試験概要	13
3.2 斜め吹付け試験概要	13
3.3 斜め吹付け試験結果	15
3.4 上向き吹付け試験概要	17
3.5 上向き吹付け試験結果	20
3.6 まとめ	22
第 4 章 耐凍害性試験	23
4.1 試験概要	23
4.2 凍結融解試験方法	23
4.3 凍結融解試験結果	24
4.4 まとめ	25
第 5 章 収縮特性試験	26
5.1 試験概要	26
5.2 試験項目	27
5.3 寸法安定性試験	28
5.4 長さ変化試験	31
5.5 アングル吹付け試験	33
5.6 凍結融解試験	34
5.7 まとめ	35

第 6 章 力学性能試験.....	36
6.1 試験概要	36
6.2 試験項目	36
6.3 圧縮強度試験	37
6.4 一軸引張強度試験	39
6.5 付着強度試験	41
6.6 破壊エネルギー試験.....	43
6.7 まとめ.....	44
第 7 章 構造特性と構造部位への適用方法に関する検討.....	45
7.1 試験概要	45
7.2 実験供試体.....	45
7.3 試験方法	46
7.4 試験結果	47
7.5 せん断補強効果の分析	50
7.6 まとめ.....	52
第 8 章 総括.....	53

第1章 概要

1.1 共同研究の概要

(1) 目的

補強・補修性能に応じた連続繊維ネットに高靱性コンクリートを吹付け、コンクリート構造物の耐力向上や剥離・剥落を防止する補修・補強方法について材料のおよび構造的観点から検討を行う。

(2) 研究の実施場所

寒地土木研究所、三井住友建設株式会社技術研究所および室蘭工業大学

(3) 研究の内容および方法

連続繊維ネットと高靱性吹付けコンクリートの組合せによる補修・補強工法の開発に関する研究として、以下のことを行う。

- ・各構造物の補修・補強目的に応じた適切な施工方法に関する検討
- ・連続繊維ネットと高靱性吹付けコンクリートに関する各種材料実験および構造実験
- ・材料特性の評価
- ・構造特性の評価
- ・構造部位への適用方法に関する検討

(4) 参加した研究者

機 関 名	所 属 名	氏 名	役 職 名
寒地土木研究所	寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム	田口 史雄	上席研究員
		嶋田 久俊	元総括主任研究員
		吉田 行	研究員
		栗橋 祐介	元研究員
室蘭工業大学	建設システム工学科	岸 徳光	教 授
三井住友建設（株）	技術研究所 土木 PC 構造研究グループ	三上 浩	室長（主席研究員）
		谷口 秀明	主任研究員
		篠崎 裕生	主任研究員
		中島 規道	主任研究員

(5) 研究の実施期間

平成 18 年 10 月 2 日 ～ 平成 19 年 3 月 31 日

1.2 試験概要

(1) 配合試験

補修・補強用吹付けコンクリート工法のさらなる汎用化のため、ポリビニルアルコール短繊維(以下、PVA短繊維)以外の短繊維材料を用いた場合の適応性を確認することを目的に、2種類のポリプロピレン短繊維(以下、PP短繊維)および炭素短繊維(以下、CF短繊維)についてのフレッシュ性状試験を行った。また、耐久性、力学特性試験用の供試体作製も行った。

(2) 施工性試験

2種類のPP短繊維について施工性試験を行った。斜め、上向き吹付け時の圧送性状、吐出性、作業性、リバウンド、短繊維の残留率についてPVA短繊維と比較し吹付けコンクリートの要求性能を満たしているか検討を行った。

(3) 耐凍害性試験

2種類のPP短繊維について耐凍害性の検討として凍結融解試験を行った。

(4) 収縮特性試験

短繊維混入吹付けコンクリートのひび割れ特性を把握するため、寸法安定性試験、長さ変化試験、アングル吹付けを実施し、吹付けコンクリートの収縮特性について検討を行った。また、膨張剤を使用した配合については、その耐凍害性の確認のため凍結融解試験を行った。

(5) 力学特性試験

施工性・耐久性試験で選定した1種類のPP短繊維について圧縮強度試験、一軸引張試験、一軸引張による付着試験、破壊エネルギー試験を実施し、PVA短繊維の場合と比較して吹付けコンクリートの性能比較を行った。

(6) 構造特性と構造部位への適用方法に関する検討

短繊維材料、連続繊維材料を変化させた場合の補強RC部材のせん断耐力を把握するためPP短繊維やCFRPネットで補強したRC梁の静的載荷試験を行った。

1.3 試験方法

(1) ふるい分け試験（細骨材）

JIS A1102「骨材のふるい分け試験方法」に準拠した。

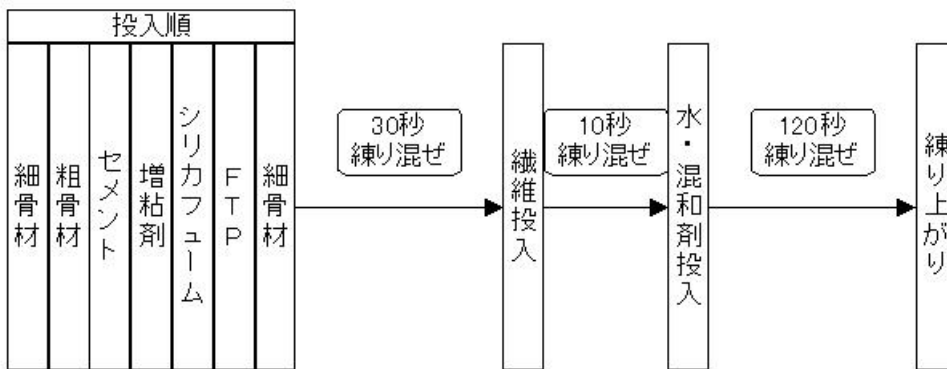
(2) 密度および吸水率試験（細骨材）

JIS A1109「細骨材の密度及び吸水率試験方法」に準拠した。

(3) 骨材の表面水率測定

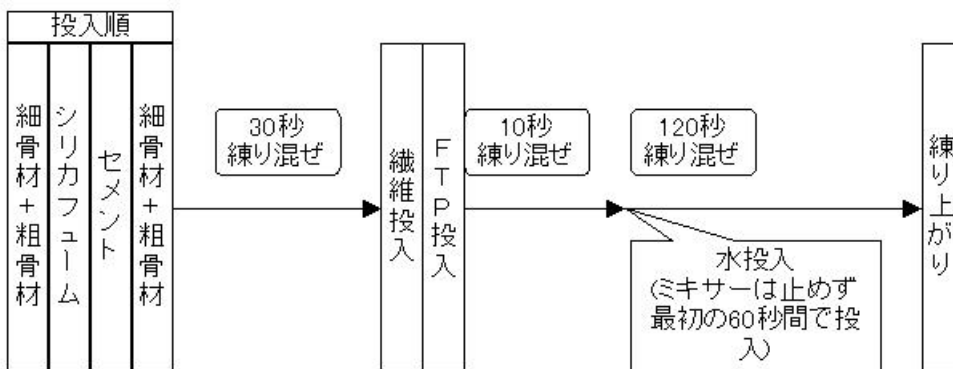
JIS A1125「骨材の含水率試験方法及び含水率に基づく表面水率の試験方法」に準拠した。

(4) コンクリート練り混ぜ(吹付けコンクリート)



※モルタルの場合骨材は細骨材のみ、また、使用しない材料と行程は省略

(5) プラント練り混ぜ(吹付けコンクリート)



※コンクリートの場合、細骨材・粗骨材・セメントは同時投入

※モルタルの場合、細骨材・セメントは同時投入 使用しない材料と工程は省略

(6) スランプ試験

JIS A1101「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠した。

(7) 空気量試験

JIS A1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」に準拠した。

(8) コンクリート吹付け

土木学会規準 JSCE-F565-2005「コンクリート(モルタル)の吹付け試験方法(案)」に準拠した。

(9) 吹付けコンクリートのリバウンド率測定

土木学会規準 JSCE-F563-2005「コンクリート(モルタル)のはね返り率試験方法(案)」に準拠した。試験は、吹付け小屋にリバウンドを回収しやすいように仕切りを設け、傾斜角度 60 度の吹き付け用パネルの下方にシートを敷き、跳ね返ったコンクリートを回収しリバウンド量の算出をした。

(10) 吹付けコンクリートの短繊維残留率測定

コンクリート吹付け後の付着材料内の短繊維残留率を測定した。コンクリート吹付け後に付着した材料を採取し、鋼製容器(モルタルエアメータの容器)に試料を詰め一定量とした後、水洗いによって細骨材、粗骨材、セメントペーストを洗い流し短繊維のみを取り出すことで繊維残存率測定を行った。

(11) コンクリート吹付け供試体

土木学会規準 JSCE-F561-2005「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度試験用供試体の作り方(案)」および、JSCE-F562-2005「吹付けコンクリート(モルタル)の耐久性試験用供試体の作り方(案)」、「補修・補強用吹付けコンクリート(モルタル)の付着強度試験用供試体の作り方(案)」に準じ、傾斜角度 60 度に設置された供試体切り取り用パネル型枠に吹付けを行った。なお、供試体は乾燥を防ぐため吹付け後はブルーシートを被せた。水中養生供試体については、翌日パネルを外し恒温水槽内で養生を行い、気中養生供試体については骨材準備室にて養生を行った。

(12) 圧縮強度試験、静弾性係数試験

JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」、土木学会規準 JSCE-G551「鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験方法」に準拠した。

(13) 凍結融解試験

土木学会規準 JSCE-G501「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠した。

(14) 動弾性係数測定

JIS A1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及動ポアソン比試験方法」に準拠した。

(15) 長さ変化試験

初期材令については、土木学会規準 JSCE-G564-2005「補修・補強用吹付けコンクリート(モルタル)の長さ変化試験方法(案)」、材令7日以降については JIS A1129-3「長さ変化試験」に準拠した。

(16) 寸法安定性試験

土木学会規準 JSCE-K561-2005「コンクリート構造物補修・補強用ポリマーセメント系充てん材の試験方法(案)」に準じ、JCI-SAS2「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」を参考に埋め込み型ひずみ計と熱伝対を用いて試験を行った。

(17) 一軸引張試験

寒地土木研究所所有の専用治具を用いてアムスラーにより载荷することで引張試験を行った。図-1.1に一軸引張試験の概要図を、試験時の外観および供試体を写真-1.1に示す。なお、载荷速度は0.01mm/sec程度としデータの測定は動的計測を行った。

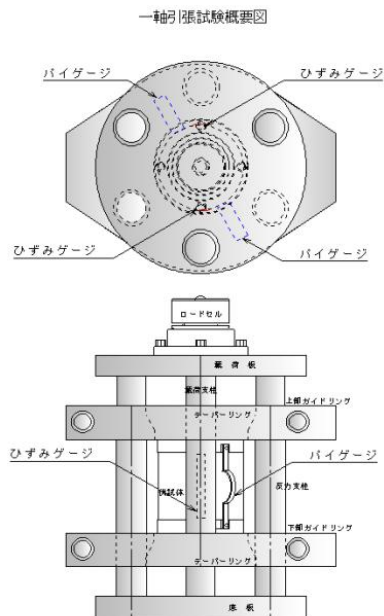


図-1.1 一軸引張試験概要図

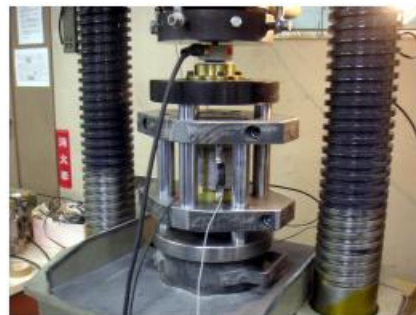


写真-1.1 実験時外観と供試体

(18) 破壊エネルギー試験

JCI-S-001-2003「切り欠けを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」および JCI-S-002-2003「切り欠けを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」に準拠して破壊エネルギー試験装置(写真-1.2)を使用し試験を行った。

荷重速度および変位測定箇所・点数・使用センサーを図-1.2 に示す。荷重速度については荷重開始時に 0.3mm/min とし、荷重最大値を超えて荷重が安定し始めてからは 0.5mm/min~1.0mm/min に速度を上げ、供試体が破壊する開口幅 5mm 程度まで荷重を続けた。



写真-1.2 破壊エネルギー試験装置

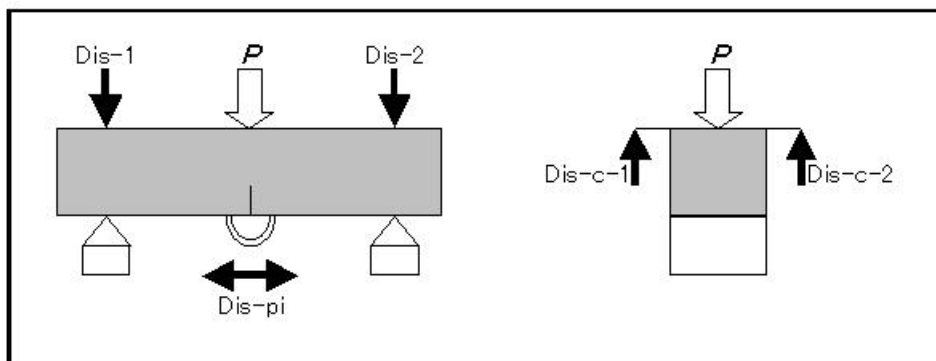


図-1.2 変位測定箇所

1.4 使用材料および機器関係

吹付けコンクリートに使用した材料を表-1.1～表-1.3 および写真-1.3 に、吹付け時に使用した機器を表-1.4 および図-1.3 に示す。

表-1.1 骨材、セメント、混入材料

使用材料	品名	メーカー
細骨材 吹付けコンクリート用	比重:2.68 吸水率:1.09	苫小牧市樽前産海砂
粗骨材 吹付けコンクリート用	比重:2.67 吸水率:1.69	小樽市見晴産碎石
セメント	普通ポルトランドセメント 比重:3.16 早強ポルトランドセメント 比重:3.14	太平洋セメント(株)
シリカフェーム	中国産 主成分: 二酸化珪素(85%)	
凍結融解劣化防止剤	中空セル(FTP):アクリル系粉末 密度:0.2g/cm ³	電気化学工業(株)
膨張剤	デンカパワーCSAタイプS 使用量:1m ³ 当たり20kg	電気化学工業(株)
湿式吹付けコンクリート用 高性能減水剤	NT-1000S 比重:1.03~1.06	(株)ポポリス物産
ポリビニルアルコール短繊維	REC100L×6D 6mm RF4000×30D 30mm 比重:1.3	(株)クラレレーディング
ポリプロピレン短繊維	BarChip M 繊維長:30mm 比重:0.91	萩原工業(株)
	STRUX85/50 繊維長:50mm 比重:0.92	グレースケミカルズ(株)
炭素繊維	DIALEAD K6611T 繊維長:18mm 比重:1.9	三菱化学産資(株)

表-1.2 混和剤特性

商品名	使用目的	主成分	外観	使用濃度	使用容積 比重	標準 使用量
ポポリス NT-1000S	湿式吹付けコンクリート用高性能減水剤 標準型(1種)	ポリアルキレングリコールエステル誘導体	暗褐色液体	原液	1.03~1.06	C×0.5%~3.0%

表-1.3 短繊維特性

短繊維種類	品名	材質	繊維長 l (mm)	繊維径 d (mm)	アスペクト比 l/d	引張強度 (MPa)	弾性係数 (Mpa)
PVA	RF4000	ポリビニル アルコール	30	0.66	45.5	880	28,000
PVA-S	REC100L		6	0.1	60.0	1100	25000
PP-A	BarchipM	ポリプロピレン	30	1.0	30.0	500	7000
PP-B	STRUX85/50		50	0.59	84.7	540	9500
CF	DIALEAD K6611T	炭素	18	-	-	1770	180,000

PVA



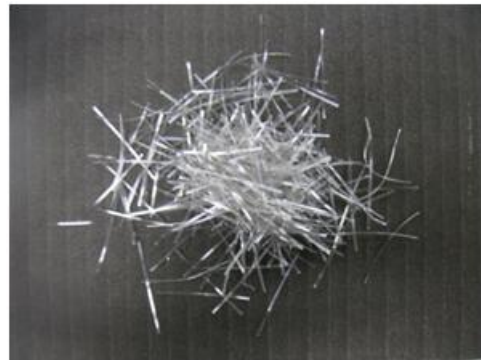
PVA-S



PP-A



PP-B



CF



写真-1.3 各種短繊維

表-1.4 使用機器

使用機器	形式・仕様
湿式吹付け機	アリバ 262 : 湿式吹付け限界 40m
コンクリートポンプ	油圧 2 ピストン式 SP-7M : 理論吐出量 1~7m ³ /h、最大骨材寸法 15mm 吐出管 2.5 ^B (65A)M 型口金、材料シリンダ内径 70mm×ストローク 550mm
コンクリートミキサー	ボルテックミキサー : 拡散容積 200ℓ、北川鉄工(株) 2 軸 W 型ミキサー : 拡散容積 100ℓ、太平洋機工(株)
コンプレッサー	エンジンコンプレッサー PDS655S : 吐出空気量 18.5m ³ /min、北越工業(株)
ノズル	2 インチ×40m、ハム型ノズル φ42A
マテリアルホース	2 インチ×40m、内径 φ42mm×20m
エアホース	2 インチ×20m、内径 φ38mm(1.5 インチ)×20m

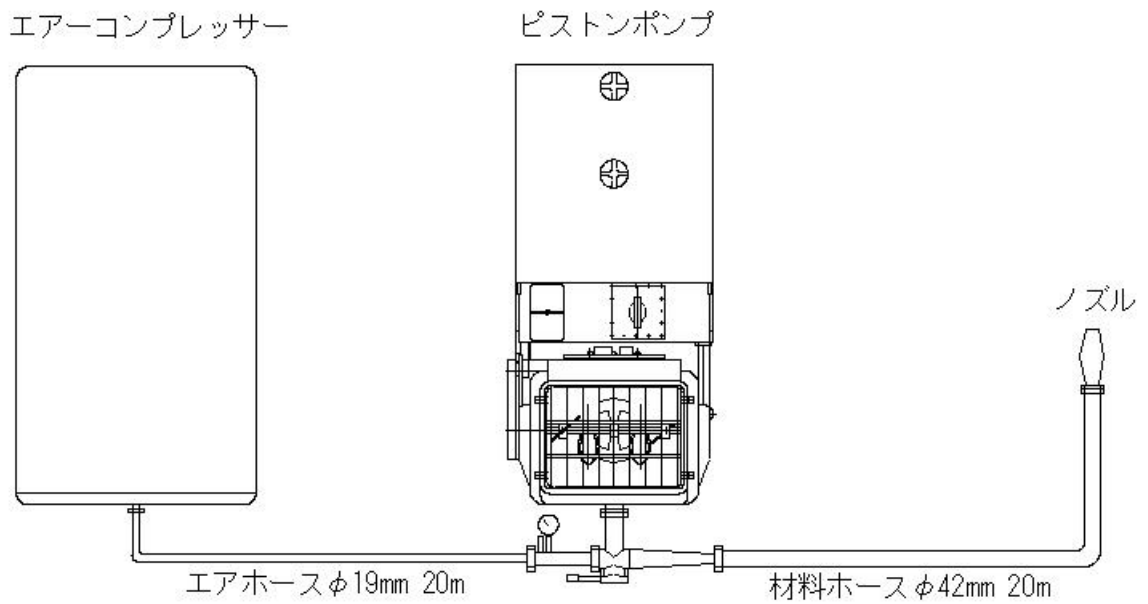


図-1.3 吹付けシステム概要図

第2章 配合試験

2.1 試験概要

本章では補修補強用吹付けコンクリート工法の使用材料の適用範囲拡大を目的として2種類のポリプロピレン短繊維(PP短繊維)および炭素繊維(CF短繊維)について配合検討を行った。使用した短繊維種類については、表-1.3の短繊維特性を参照されたい。

2.2 試験目的

配合試験では、短繊維混入吹付けコンクリートのスランプ値を適切な値(4~7cm)にするために必要な湿式吹付けコンクリート用高性能減水剤(NT-1000S)の使用量を確認する。

2.3 試験方法

実績のあるポリビニルアルコール短繊維(PVA短繊維)を混入した吹付けコンクリート配合(表-2.1)をベースに、PVA短繊維をPP短繊維、CF短繊維に置き換えコンクリートの練り混ぜを行う。各短繊維配合における練り混ぜ時の繊維分散性や練り上がり後の分離性状の確認、スランプ測定・空気量測定フレッシュコンクリート試験を行い、NT-1000Sの適正使用量を推測する。

表-2.1 配合条件

セメント 種類	短繊維	シリカフェーム 置換率	単位量				混和材	目標 スランプ (cm)
	vol× (%)	C×(%)	W	C	S	G	FTP vol×(%)	
早強	1.0	10	185	430	1365	340	3.0	4~7

2.4 PP短繊維の配合試験結果

図-2.1 に、PP 短繊維の練り混ぜ時のスランプと混和剤使用量の関係を示す。なお、参考値として PVA 短繊維を混入した吹付けコンクリートにおける試験結果も付記している。

PP 短繊維を混入した場合、PP-A 短繊維では混和剤使用量 0.6%、PP-B 短繊維では混和剤使用量 0.8%の配合で、吹付けコンクリートに適したスランプの目標値である 4.0~7.0%を満たしていることがわかる。なお、PP 短繊維を混入した場合も、繊維分散性、練り混ぜ性状は PVA 短繊維を混入した場合とほとんど変わらず、練り上がり後も材料分離は無く、性状良好であった。また、PP-B 短繊維の場合、PP-A 短繊維や PVA 短繊維を混入した場合に比べて、スランプが出にくい傾向となった。これは、PP-A 短繊維や PVA 短繊維に比べて、アスペクト比や繊維長が大きいことによるものと考えられる。

以上のことより、短繊維混入率 vol×1.0%の場合において、スランプ値を 4.0~7.0cm に調整するための NT-1000S 使用量は、PP-A 短繊維で 0.55~0.60%、PP-B 短繊維で 0.75~0.80%と考えられる。次章の施工試験および供試体作製では、上記の混和剤使用量を目安にコンクリート練り混ぜを行うこととした。

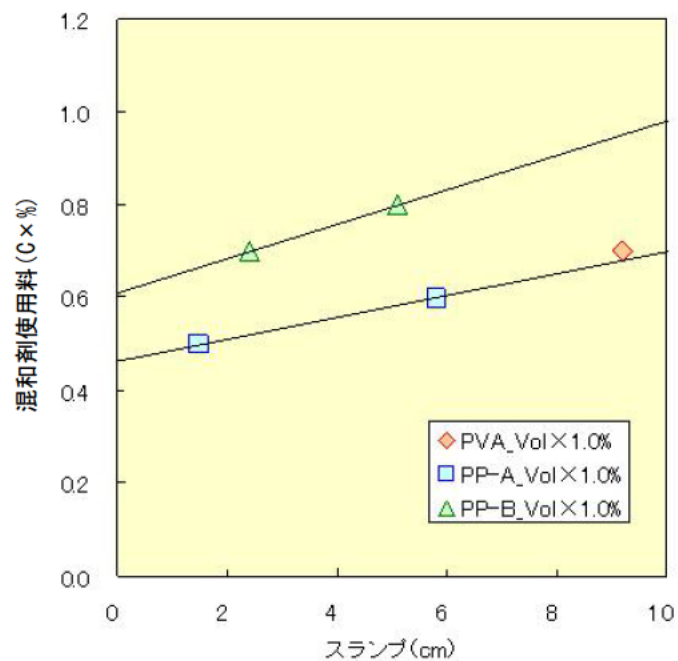


図-2.1 スランプと混和剤 (NT-1000S) 使用量の関係

2.5 CF短繊維の配合試験結果

図-2.2 に、CF 短繊維の練り混ぜ時のスランプと混和剤使用量の関係を示す。CF 短繊維は練り混ぜ時の繊維分散性は良好であったが、前述の PP 短繊維や PVA 短繊維を混入した場合よりもスランプが出にくく、目標スランプを得る混和剤使用量は 1.2%程度となった。CF 短繊維は、PP 短繊維や PVA 短繊維に比べて繊維径が極めて小さく、アスペクト比も大きいため、スランプが出にくいものと考えられる。

以上のことより、CF 短繊維を混入した吹付けコンクリートのスランプ値を 4.0~7.0cm にするためには、混和剤使用量を 1.0%以上にする必要があると推察される。ただし、混和剤使用量を 1.0%以上とした場合は吹付け時の材料分離や吹付け面の水分・ノロ分の増加が危惧され、良好な吹付け施工性が期待できない。このため、本研究で検討している補修・補強用吹付けコンクリート配合に関しては、CF 短繊維の適用は困難であると考えられる。

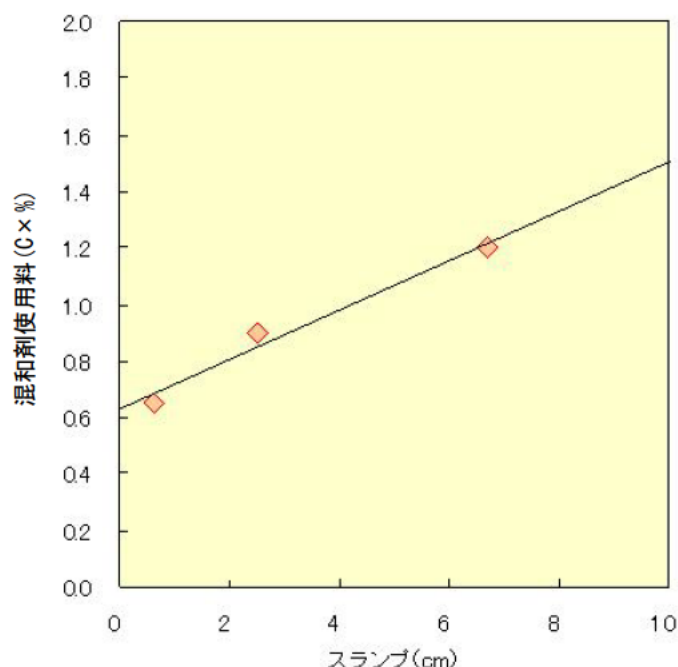


図-2.2 スランプと混和剤 (NT-1000S) 使用量の関係

2.6 まとめ

配合試験の結果より、本研究では PP 短繊維を混入した吹付けコンクリートを対象に検討を進めることとし、混和剤使用量は PP-A 短繊維の場合には 0.55~0.60%、PP-B 短繊維の場合には 0.75~0.80%を目安にすることとした。なお、CF 短繊維については、目標スランプを確保するために混和剤使用量が多くなり、良好な吹付け施工が期待できない可能性があることから、本研究では検討の対象外とする。

第3章 施工性試験

3.1 試験概要

補修・補強の現場を想定して PP 短繊維混入吹付けコンクリートの施工性に関する試験を行った。壁面を想定した斜め吹付け、版壁面やトンネル面を想定した上向き吹付けでの圧送性、吐出性、作業性、リバウンド、短繊維残留率について PVA 短繊維を用いた場合の施工性と比較検討を行った。なお、吹付けに使用したコンクリートポンプおよび吹付けシステムについては第 1 章を参照されたい。

3.2 斜め吹付け試験概要

(1) 試験方法

斜め吹付けは 1 m²の吹付け板を角度 60°に立てて吹付け距離 1.0~1.5m 程度とし、コンクリート吹付けを行った。施工条件は昨年度の PVA 短繊維による試験結果と比較するため吐出量 1.5 m³/h、背圧 0.4MPa とした。吹付け試験状況を写真-3.1 に示す。



写真-3.1 吹付け状況

(2) 吹付けコンクリートの配合

表-3.1 に試験ケースの一覧を示す。基本配合は実績のある PVA 短繊維を混入した吹付けコンクリートと同様に、セメント単体量 430kg/m³、シリカフェーム置換率 10% 配合とし、スランプは 5±1.5cm に調整した。PP 短繊維は 2 種類(PP-A 短繊維、PP-B 短繊維)の 2 ケースについて試験を行った。

表-3.1 試験ケース一覧

No.	短繊維		W/C	s/a	単体量(kg/m ³)				シリカフェーム置換率
	種類	vol×(%)			w	c	s	G	C×(%)
1	PP-A	1.5	43	80	185	430	1365	340	10
2	PP-B	1.5	43	80	185	430	1365	340	10

(3) 測定項目

・吹付け性状

圧送性状、吐出性状、吹付け面の状態・コテ均し易さの項目については主に目視で確認を行い 3 段階で評価した。評価基準の一覧を表-3.2 に示す。

表-3.2 吹付け性状に関する評価基準

評価	圧送性状	吐出性状	吹付け面の状態・コテ均し易さ
×	閉塞する	材料分離やノロ分のダレがある	付着しない コテ均し不能
△	閉塞は無いが、脈動が多少ある	材料分離は無いがノロ分のダレがある	付着しているが締め固めが弱い コテ均し困難
○	閉塞及び脈動がない	材料分離およびノロ分のダレがない	締め固まりが良い コテ均ししやすい

・リバウンド率

リバウンド測定用に仕切った吹付け室にて、跳ね返り材料を収集しやすいようシートで覆い吹付けた後、跳ね返り材料を採取しリバウンド率を算定した。

・繊維残留率

パネルに付着した材料を一定量採取し、水洗いによって短繊維のみを取り出し繊維残留率測定を行った。

3.3 斜め吹付け試験結果

(1) 吹付け性状

吹付け性状の目視観察結果を表-3.3 に、コテ均し後の表面状態を写真-3.2 に示す。圧送性状・吐出性状はPP-A 短繊維、PP-B 短繊維どちらのケースにおいても良好であった。吹付け面の状態は、PP-A 短繊維は良好な性状を示したのに対し、PP-B 短繊維は表面にノロ分が目立ち、締め固まりも緩い状態となった。また、PP-B 短繊維の場合には表面コテ均し時において短繊維が表面に突出する傾向が見られ、平滑な表面仕上げが困難であった。

表-3.3 目視観察結果

ケース	圧送性状	吐出性状	吹付け面の状態	表面コテ均し
PP-A	閉塞及び脈動が無く良好	材料分離やノロ分のダレが無い	良好	良好
PP-B			表面にノロ分が見られる	繊維が目立ち均しにくい



(a)PP-A 短繊維



(b)PP-B 短繊維

写真-3.2 コテ均し後の表面状態

(2) リバウンド率

図-3.1 にリバウンド率の測定結果を示す。図には参考として PVA 短繊維を混入した場合のリバウンド率も付記した。リバウンド率は PP-A 短繊維の場合で 13.3%、PP-B 短繊維の場合で 17.7% となった。PVA 短繊維と比較すると、PP-B 短繊維は同程度であるが、PP-A 短繊維の場合はややリバウンドが少ない結果となった。土木学会の吹付けコンクリート指針（案）によると、一般的ナリバウンド率は急結剤を用いた上向き吹付けで 10～20%、繊維補強乾式吹付けのモルタルで 20%、トンネル吹付けの実績で 20～30% 程度であるが、これらの値と比較すると試験結果はいずれの短繊維の場合においても同程度以下と良好な結果となった。

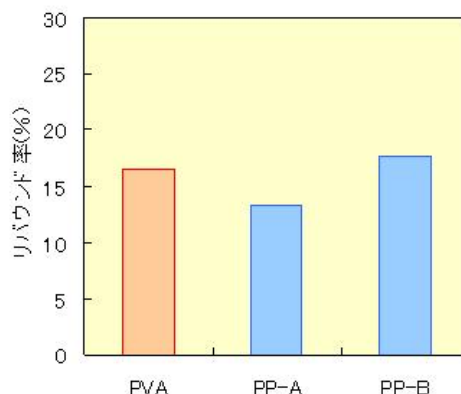


図-3.1 リバウンド率

(3) 繊維残留率

図-3.2 に繊維残留率の測定結果を示す。図には参考として PVA 短繊維を混入した場合のリバウンド率も付記した。繊維残留率は PP-A 短繊維の場合で 64%、PP-B 短繊維の場合で 43% であり、PVA 短繊維の場合と比較して少ない結果となった。「吹付けコンクリート指針(案)[補修・補強編](土木学会：2005.7)」では、超速硬セメント短繊維補強乾式吹付けの場合で 50% の事例が示されており、「吹付けコンクリート指針(案)[トンネル編](土木学会：2005.7)」では、急結剤を使用したトンネル吹付けで適切な配合吹付け機械、方法を選定した場合で 80～90% の事例が示されている。これらの事例と比較しても、PP 短繊維の繊維残留率は良好な結果とは言えず、残留率の改善策を含めて再度検討する必要があると考えられる。

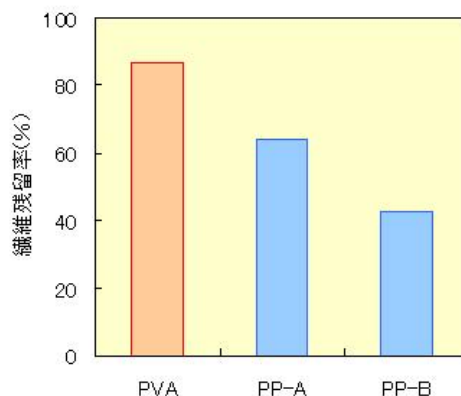


図-3.2 繊維残留率

3.4 上向き吹付け試験概要

(1) 試験方法

試験は1 m²の吹付け板を上面に設置して吹付け距離 1.0~1.5m 程度とし、上向き吹付けを行った。施工条件は斜め吹付け試験と同じ吐出量 1.5m³/h、背圧 0.4MPa とした。吹付け試験状況を写真-3.3 に示す。



写真-3.3 上向き吹付け状況

(2) 吹付けコンクリートの配合

表-3.4 に試験ケースの一覧を示す。基本配合は実績のある PVA 短繊維を混入した吹付けコンクリートと同様に、セメント単位量 430kg/m³、シリカフェーム置換率 10% 配合とし、スランプは 5±1.5cm に調整した。PP 短繊維は 2 種類(PP-A 短繊維、PP-B 短繊維)について試験を行った。

表-3.4 試験ケース一覧表

No.	短繊維		W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				シリカフェーム置換率
	種類	vol× (%)			w	c	s	g	C× (%)
1	PP-A	1.5	43	80	185	430	1365	340	10
2	PP-B	1.5	43	80	185	430	1365	340	10

(3) 測定項目

- ・吹付け性状

吹付け時の付着性、吹付け面の状態、吹付け厚さおよび表面コテ均しやすさについて、主に目視で確認を行った（表-3.5の評価基準による）。

- ・リバウンド率

リバウンド測定用に跳ね返り材料を収集しやすいようシートで周りを覆い、吹付け後に跳ね返り材料を採取しリバウンド率を算定した。

- ・繊維残留率

パネルに付着した材料を一定量採取し、水洗いによって短繊維のみを取り出し繊維残留率を測定した。

表-3.5 吹付け時の付着性状に関する評価基準





評価	付着性状		
×1	<p>60mm に達しない。 吹付け表面にノロ分が 多くつらら状になる。</p>		
×2	<p>吹付け時に剥落</p>		
△	<p>60~70mm 程度付着 するが、コテ均し時に剥 落</p>		
○	<p>60mm 以上付着</p>		

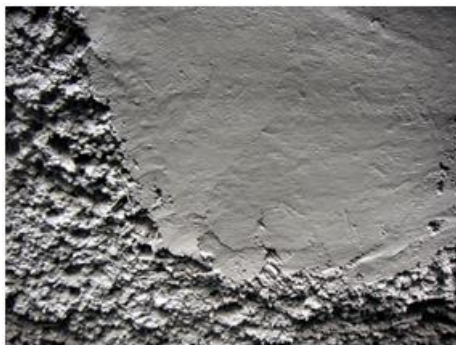
3.5 上向き吹付け試験結果

(1) 付着性状

表-3.6 に付着性状の目視観察結果を、写真-3.4 にコテ均し後の状態を示す。PP-A 短繊維、PP-B 短繊維の場合ともに吹付け時の剥落や表面コテ均し時の剥落は発生せず、厚さ 5.5~6.0cm 程度付着し、付着性状は良好であった。吹付け面の状態に関しても、PP-A 短繊維、PP-B 短繊維の場合ともに表面にノロ分の目立ちもなく良好な状態となった。表面コテ均し時においては、PP-B 短繊維の場合には斜め吹き時と同じく短繊維が表面に突出する傾向が見られ、平滑な表面仕上げが困難であった。

表-3.6 付着性状結果

ケース	付着性状		
PP-A	剥落なし ノロ分なし 付着厚さ 6.0cm		
PP-B	剥落なし ノロ分なし 付着厚さ 5.5cm		



(a)PP-A 短繊維



(b)PP-B 短繊維

写真-3.4 表面コテ均し後の状態

(2) リバウンド率

図-3.3にリバウンド率の測定結果を示す。図には参考としてPVA短繊維を混入した場合のリバウンド率も付記した。PP-A短繊維は、リバウンド率が23.1%とPVA短繊維の26.6%よりも若干少ない良好な結果となった。また、PP-B短繊維は30.9%とPVA短繊維の結果を上回った。一般的なりバウンド率は、急結剤を用いた上向き吹付けで10~20%、繊維補強乾式吹付けのモルタルで20%、トンネル吹付けの実績で20~30%程度であり、PP-A短繊維は上記の範囲内であるが、PP-B短繊維は若干上回る結果となった。

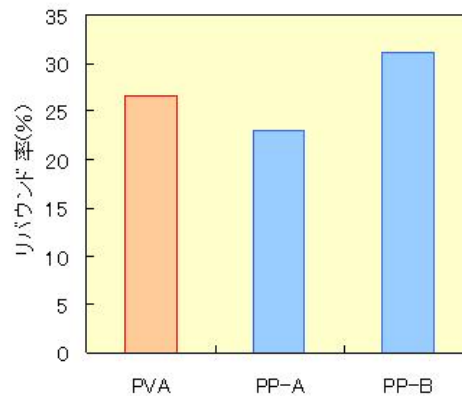


図-3.3 リバウンド率

(3) 繊維残留率

図-3.4に繊維残留率の測定結果を示す。図には参考としてPVA短繊維を混入した場合のリバウンド率も付記した。繊維残留率はPP-A短繊維は70%、PVA短繊維は71%と同程度の残留率であったが、PP-B短繊維は50%と低い値を示した。「吹付けコンクリート指針(案) [補強・補修編] (土木学会：2005.7)」では、超速硬セメント短繊維補強乾式吹付けの場合で50%の事例が示されており、また「吹付けコンクリート指針(案) [トンネル編] (土木学会：2005.7)」では、急結剤を使用したトンネル吹付けで適切な配合吹付け機械、方法を選定した場合で80~90%程度の事例が示されている。これらの事例と比較すると、PVA短繊維およびPP-A短繊維の結果は、ほぼ同様の上記の範囲内の性状を示している。

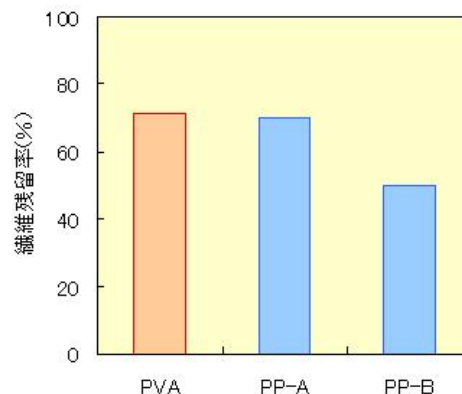


図-3.4 繊維残留率

3.6 まとめ

PP 短繊維の種類に関わらず、斜め吹付けおよび上向き吹付けの場合ともに、良好な付着性状が確認された。ただし、PP-B 短繊維の場合は、表面コテ均し時において短繊維が表面に突出する傾向が見られ、平滑な表面仕上げが困難であった。また、リバウンド率や繊維残留率に関しては、PP-A 短繊維は実績のある PVA 短繊維とほぼ同様の結果となった。一方、PP-B 短繊維は、PVA 短繊維の結果を下回った。これは、PP-A 短繊維のアスペクト比や繊維長が PVA 短繊維に近いためと考えられる(第 1 章参照)。短繊維混入吹付けコンクリートの施工性には、短繊維の形状等が大きな影響を及ぼすものと考えられる。

第4章 耐凍害性試験

4.1 試験概要

短繊維の種類が短繊維混入吹付けコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響について検討することを目的に、PP-A 短繊維および PP-B 短繊維、PVA 短繊維を混入した吹付けコンクリートの凍結融解試験を実施した。

4.2 凍結融解試験方法

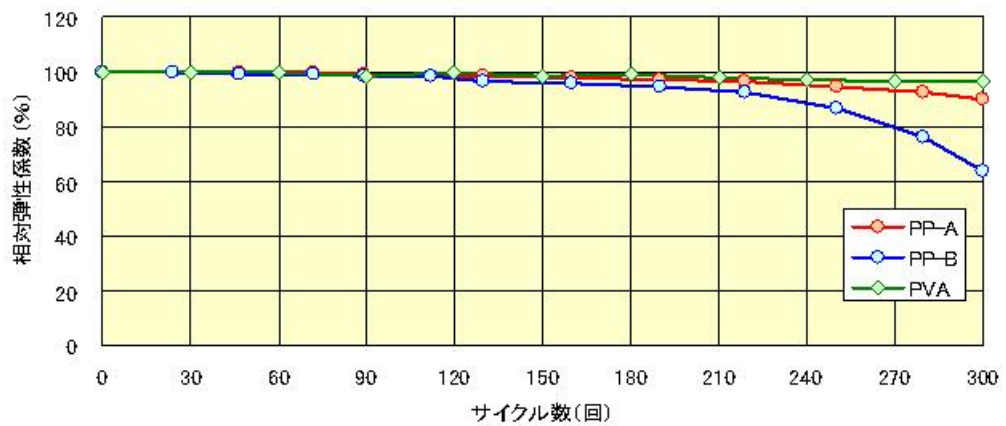
供試体は、傾斜 60 度に置いたパネル型枠に吹付けを行い、吹付け後はそのまま一日安置し、翌日パネル型枠を取り除き、恒温水槽にて水中養生を開始した。その後、コンクリートカッターにて $10 \times 40 \text{cm}$ に切削し、切削後は養生水槽にて材令 28 日まで水中養生を行った。凍結融解試験の試験方法は土木学会規準 JSCE-G501「コンクリートの凍結融解試験方法」に従って実施した。表-4.1 に検討配合およびフレッシュ性状の一覧を示す。

表-4.1 検討配合およびフレッシュ性状一覧表

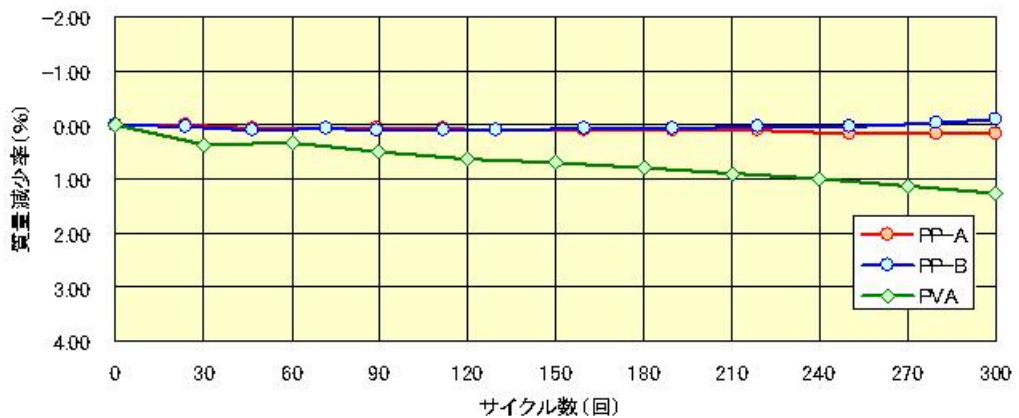
短繊維		セメント 種類	シリカ 置換率	中空 微少球	混和剤	スランプ (cm)	練り上がり時 空気量 (%)
種類	vol× (%)		C× (%)	FTP vol×(%)	NT-1000S C×(%)		
PP-A	1.0	早強	10	3.0	0.60	4.3	7.5
PP-B	1.0	早強	10	3.0	0.80	4.8	8.4
PVA	1.0	早強	10	3.0	0.55	5.6	8.4

4.3 凍結融解試験結果

図-4.1に各配合の凍結融解試験結果を示す。図より、PVA短繊維およびPP短繊維は、300サイクル終了時まで相対動弾性係数90%以上を確保し、良好な耐凍害性を示していることがわかる。これに対し、PP-B短繊維は200サイクル以降で相対動弾性係数が徐々に低下し、300サイクル時には60%程度となっている。質量減少率も同様の傾向を示している。これは前述の通り、PP-B短繊維の場合、PVAやPP-A短繊維を混入した吹付けコンクリートと比較して施工性に劣ることが明らかになっており、このことが耐久性にも影響を及ぼしたと考えられる。なお、耐凍害性指数DFは、PVA短繊維、PP-A短繊維およびPP-B短繊維で、それぞれ96.1,90.1,および63.5となっている。



(a)相対動弾性係数



(b)質量減少率

図-4.1 耐凍害性に及ぼす短繊維種類の影響

4.4 まとめ

PVA 短繊維、PP-A 短繊維および PP-B 短繊維を用いた凍結融解試験の結果、短繊維混入吹付けコンクリートの耐凍害性には、その施工性状が大きな影響を及ぼす可能性のあることが明らかになった。PVA および PP-A 短繊維は、耐久性指数 DF が 85 以上となっているので、コンクリート標準示方書の照査基準に準拠すると、厳しい凍害劣化環境下においても十分な耐久性が期待できる。一方で、PP-B 短繊維は、厳しい凍害劣化環境下への適用は困難であるものの、一般的な比較的環境作用が緩い部位には適用可能であると考えられる。第 3 章の施工性試験および本章の耐久性試験の結果を総合的に評価すると、PP-A 短繊維は PVA 短繊維と形状が類似していることから、PVA 短繊維と同様に良好な施工性および耐久性を示すことが明らかになった。

第5章 収縮特性試験

5.1 試験概要

吹付けコンクリートの要求性能の一つとしてひび割れ抵抗性があげられる。ひび割れは、吹付けコンクリートの自己収縮、乾燥収縮、線膨張係数、静弾性係数、既設コンクリートとの接着性等の吹付け材料自体の特性値と、荷重作用や施工の良否が相互に関連して発生すると考えられる。このため、施工性が良好であった吹付けコンクリートおよびモルタル配合を対象として、パネル型枠吹付け供試体を硬化後に切り出し、収縮特性に関する検討を行う。PVA 短繊維混入率(vol×0、0.5、1.0、1.5%)、膨張剤の使用(あり、なし)を変化させ、これらのパラメータがひび割れ抵抗性に及ぼす影響を寸法安定性試験(JSCE-K561)、長さ変化試験(JIS A1129 ダイヤルゲージ法)、アングル吹付けにより検討した。さらに、膨張剤を使用した配合の耐久性を確認する目的で凍結融解試験を行った。

5.2 試験項目

以下の項目および数量について試験を行った。

(1) 寸法安定性試験

吹付け材料	短繊維		W/C (%)	s/a (%)	セメント種類	シリカ置換率 C× (%)	混和材		数量 (回)
	種類	vol× (%)					FTP vol× (%)	膨張材 vol× (%) セメント置換	
コンクリート	—	0.0	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	0.5	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	1.0	43	80	早強	10	3.0	2.0	1
コンクリート	PVA	1.0	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	1.5	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	1.5	43	80	早強	10	3.0	0.0	1

(2) 長さ変化試験

吹付け材料	短繊維		W/C (%)	s/a (%)	セメント種類	シリカ置換率 C× (%)	混和材		数量 (組)
	種類	vol× (%)					FTP vol× (%)	膨張材 vol× (%) セメント置換	
コンクリート	—	0.0	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	0.5	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	1.0	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	1.5	43	80	早強	10	3.0	0.0	1
コンクリート	PVA	1.0	43	80	早強	10	3.0	2.0	1
モルタル	PVA-S	1.5	36	—	早強	10	0.0	0.0	1

(3) アングル吹付け

吹付け材料	短繊維		W/C (%)	s/a (%)	セメント種類	シリカ置換率 C× (%)	混和材		数量 (組)
	種類	vol× (%)					FTP vol× (%)	膨張材 vol× (%) セメント置換	
コンクリート	PVA	1.0	43	80	早強	10	3	2.0	1

配合は1種、表面養生方法3種(コテ均しのみ、封緘養生、養生仕上げ補助剤)の3ケース

(4) 凍結融解試験

吹付け材料	短繊維		W/C (%)	s/a (%)	セメント種類	シリカ置換率 C× (%)	混和材		数量 (組)
	種類	vol× (%)					FTP vol× (%)	膨張材 vol× (%) セメント置換	
コンクリート	PVA	1.0	43	80	早強	10	3	2.0	1

5.3 寸法安定性試験

(1) 供試体製作および試験方法

供試体製作は「コンクリート構造物用断面修復材の試験方法(案)」を参考にして行った。供試体製作時のフレッシュ性状を表-5.1に示す。PVA 短繊維混入率(vol×0%、0.5%、1.0%、1.5%)および PVA 短繊維混入率 vol×1.0%に膨張剤を使用し、各 2 種類の埋込型ひずみゲージ(KM、KMC)を用いて測定を行った。供試体概要図を図-5.1に、埋め込み型ひずみゲージ仕様を表-5.2に、ひずみゲージ外観を写真-5.1に示す。

吹付け・表面コテ均し後からひずみの測定を開始し、材令 1 日で型枠を脱型し、供試体をビニールで包み封をして恒温恒湿室（温度 20℃湿度 60%）へ移動した。測定の間隔は吹付け直後から材令 1 日までは 1 時間毎、それ以後材令 5 日までは 6 時間毎、その後 24 時間毎に材令 28 日まで測定を行った。

表-5.1 フレッシュ性状一覧

短繊維		膨張剤	実測値			
種類	vol× (%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	水温 (℃)	練り上がり 温度 (℃)
-	0.0	-	4.5	6.7	19.6	22.9
PVA	0.5	-	4.7	7.0	19.9	23.7
PVA	1.0	-	5.6	7.1	19.8	23.7
PVA	1.0	○	4.4	7.2	19.2	22.3
PVA	1.5	-	4.4	7.4	18.7	20.8

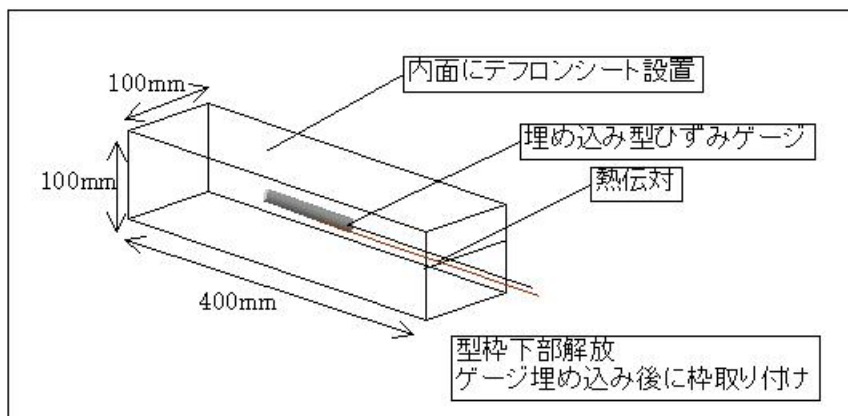


図-5.1 供試体概要図

表-5.2 埋め込み型ひずみゲージ仕様

名 称	材質		寸 法	適合 線膨張係数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	使用温度範囲	使用目的・特徴
	抵抗素子	ベース				
KM 埋込型ひずみゲージ	Cu-Ni系 合金	アクリル	120(長さ) × 15(幅) × 3(厚さ)	11	-10~70℃	モルタルやコンクリートなどの内部応力を測定する。 モルタルとの密着性を良くするため、 表面処理されている。
KMC コンクリート 埋込型ひずみゲージ	Cu-Ni系 合金線	シリコーン	80(長さ) × 10(幅) × 2(厚さ)	-	常温~70℃	セメント系材料の自己収縮・自己応力を測定する。 高強度・高流動コンクリートの打ち込み直後から測定が可能である。



(a)KM



(b)KMC

写真-5.1 埋め込み型ひずみゲージ外観

(2) 試験結果

材齢と供試体内温度の関係を図-5.2 に、材齢と供試体ひずみの関係を図-5.3 に示す。なお、ひずみ測定の原点は供試体の温度上昇時とした。供試体の温度は全てのケースにおいて恒温恒湿室へ移して1日後(材令2日)には収束し、その後温度変化は見られない。ひずみはゲージ種類によって値に若干の差があるものの、膨張剤を使用した配合のみ材令1日から3日にかけて膨張し材令4日以降、緩やかに収縮が進行している。膨張剤を使用していない配合は短繊維混入率に関わらず、材令1日の初期に約-100 μ まで急速に収縮が進展し、それ以後は膨張剤使用配合と同じく緩やかに収縮が進行している。

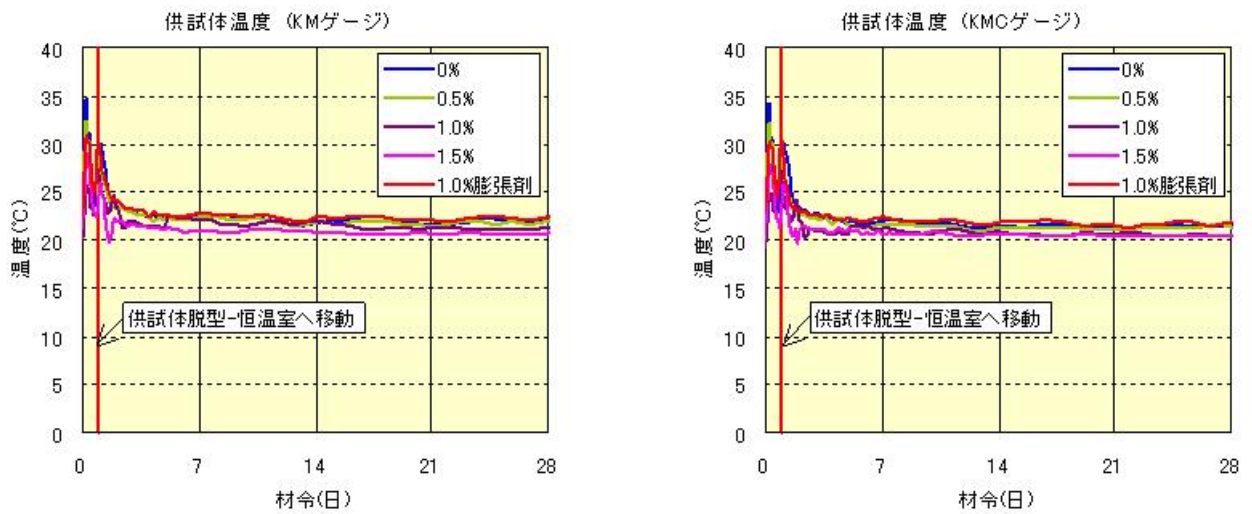


図-5.2 供試体内温度

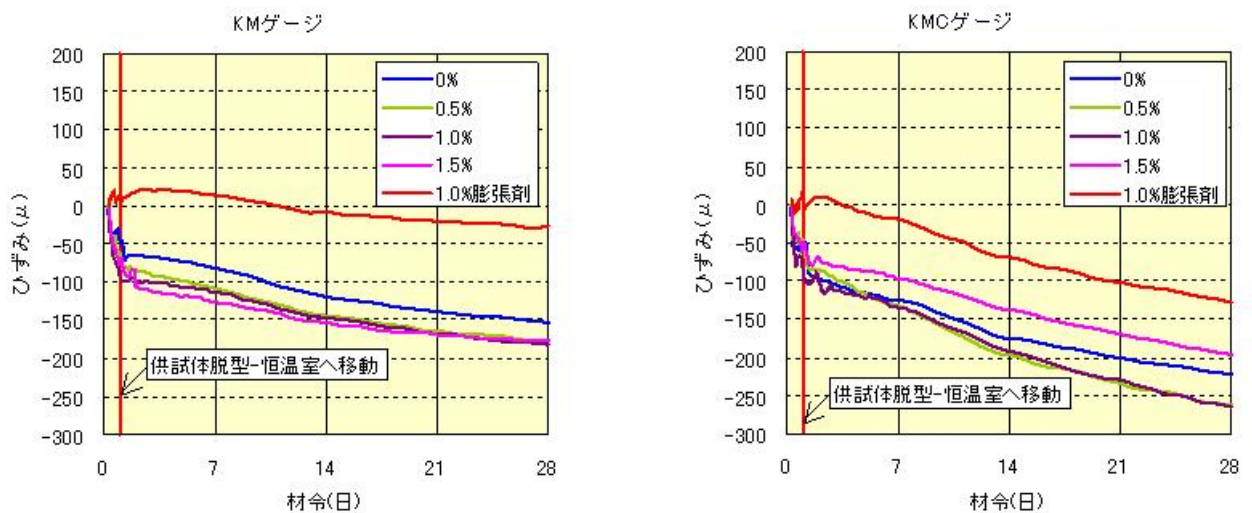


図-5.3 供試体ひずみ

5.4 長さ変化試験

(1) 供試体製作および試験方法

表-5.3 に供試体製作時のフレッシュ性状一覧を示す。長さ変化試験は、PVA 短繊維混入率(vol×0%、0.5%、1.0%、1.5%)、PVA 短繊維混入率 vol×1.0%で膨張剤を使用した配合のコンクリートおよび PVA-S 短繊維(繊維長 6mm)混入率 Vol×1.5%のモルタルの計 6 ケースについて、JSCE-F 564-2005 に準拠し、長さ変化試験用埋め込みゲージプラグを付けた鋼製型枠への直接吹付けで供試体を製作した。供試体は材令 1 日目に型枠を脱型し、恒温恒湿室(温度 20℃湿度 60%)に安置し、その後、JSCE-F 564-2005 および JIS A 1129(ダイヤルゲージ法)に準拠して長さ変化を測定した。

表-5.3 フレッシュ性状一覧

供試体名	短繊維		実測値				
	種類	Vol×%	スランプ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	水温 (°C)	練り上がり 温度(°C)
プレーンコンクリート	-	0.0	5.2		7.1	18.7	21.9
PVA0.5%コンクリート	PVA (30mm)	0.5	5.9		7.1	19.3	22.3
PVA1.0%コンクリート		1.0	4.4		7.2	19.2	22.3
PVA1.5%コンクリート		1.5	4.4		7.4	18.7	20.8
PVA1.0%膨張剤使用コンクリート		1.0	5.3		7.6	18.6	21.3
PVA-S1.5%モルタル	PVA (6mm)	1.5		151	4.9	18.7	21.9

(2) 試験結果

図-5.4 に試験結果を示す。図より、長さ変化率は吹付けコンクリート配合の短繊維混入率 vol \times 0~1.5% の場合、およびモルタル配合の短繊維混入率 vol \times 1.5% の場合でほぼ同様の性状を示しており、経過日数 84 日において、0.06~0.07%(600~700 μ)程度となっていることが分かる。また、膨張剤を混入した配合の場合、経過日数 84 日における長さ変化率は 0.05%(500 μ)程度となっており、他の配合よりも 0.01%(100 μ)程度小さい。土木学会の吹付けコンクリート指針(案)によると、コンクリートの収縮量の規格値は各機関によって異なり、西日本旅客鉄道では 0.15%以下、日本高速道路(旧日本道路公団)等では 0.05%以下、土木研究センター等では 0.2%以下と規定されている。これらの規格値と比較すると、本研究に用いた吹付けコンクリートの長さ変化率は極端に小さいものではないことから、施工に際しては十分な養生が必要であると考えられる。また、膨張剤を用いた場合には長さ変化率が低減されていることから、乾燥収縮等によるひび割れも低減できるものと考えられる。

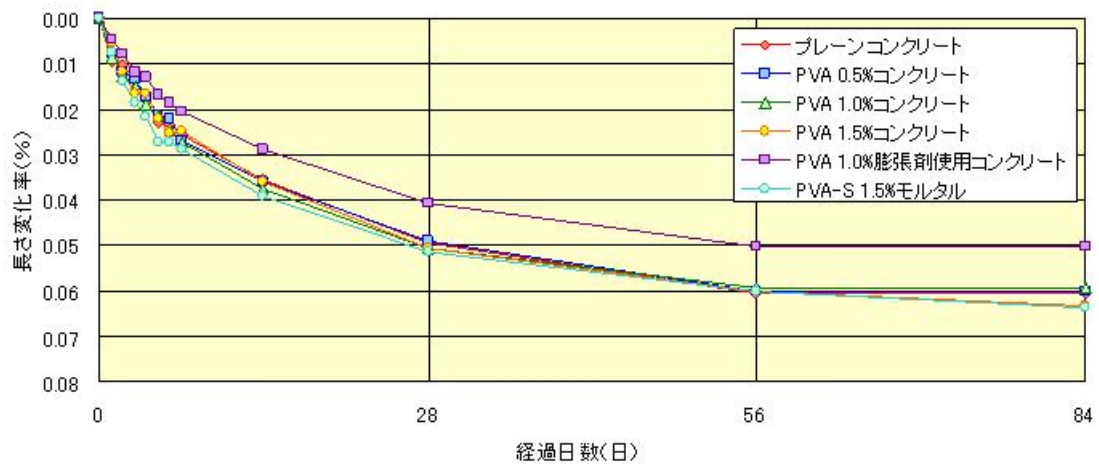


図-5.4 長さ変化率

5.5 アングル吹付け試験

(1) 供試体製作および試験方法

表-5.4 に供試体製作時のフレッシュ性状一覧を、図-5.5 に試験用アングルの概要図を示す。この試験アングルは L-75×75×6mm の L 型鋼に D13 の鉄筋を溶接したもので、これにコンクリートを吹付けて供試体を作製し、恒温恒湿室に放置して拘束ひび割れの進展状況について観察を行った。ここでは、膨張剤を混入した配合を対象に 1) コテ均しのみ、2) コテ均し後封緘養生、3) コテ均しおよび養生剤塗布、の全 3 ケースについて実施した。なお、ひび割れの進展状況は、吹付け後材齢 3 ヶ月まで目視確認にて観察した。

表-5.4 フレッシュ性状一覧

供試体名	短繊維		実測値				養生方法
	種類	Vol×(%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水温 (°C)	練り上がり 温度(°C)	
膨張剤	PVA	1.0	4.4	6.8	18.8	22	コテ均しのみ
							コテ均し後封緘養生
							コテ均し及び養生剤湿布

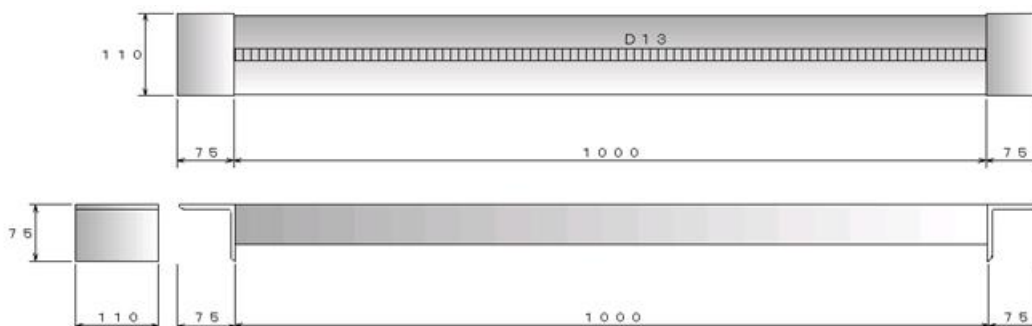


図-5.5 試験用アングル

(2) 試験結果

膨張剤を使用した配合では、吹付け後 3 ヶ月を経過しても 3 ケースともクラックの発生は認められず、膨張剤の混入による拘束ひび割れの抑制効果が確認できた。

5.6 凍結融解試験

(1) 供試体製作および試験方法

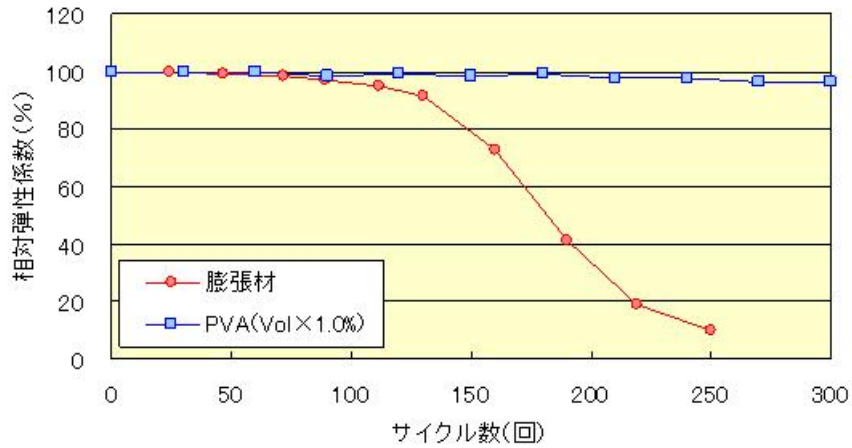
供試体製作時のフレッシュ性状一覧を表-5.5 に示す。凍結融解試験は、膨張剤を混入した配合を対象に実施した。試験は、JSCE-F 564-2005 に準拠して供試体を作製し、JSCE-G 501 に準拠して行った。

表-5.5 フレッシュ性状一覧

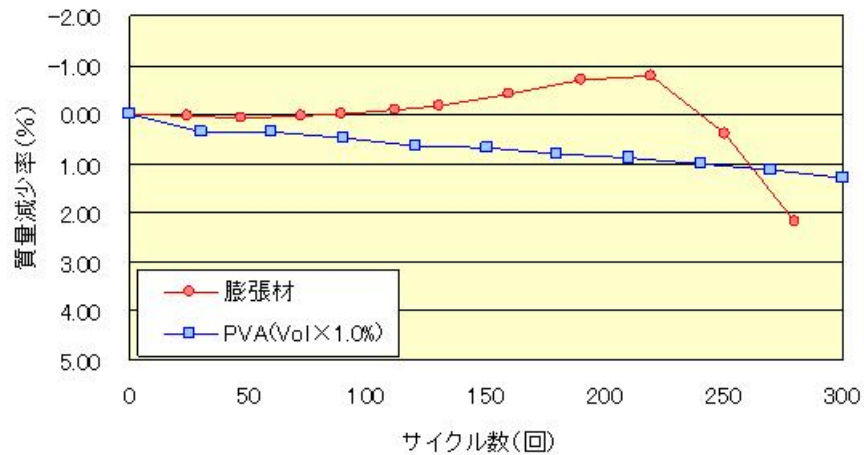
供試体名	短繊維		実測値			
	種類	vol× (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水温 (℃)	練り上がり 温度 (℃)
膨張剤	PVA	1.0	4.7	7.3	19.4	22.8

(2) 凍結融解試験結果

図-5.6 に凍結融解試験の結果を示す。なお、図には参考として膨張剤を混入させない配合の実験結果も付記している。膨張剤を混入しない配合(図中の PVA(vol×1.0%))では、相対動弾性係数の低下も認められず、十分な耐凍害性を有していることがわかる。一方で、膨張剤を添加した配合では 120 サイクルから急激に相対動弾性係数が低下し、耐凍害性指数 DF は 26 となり、耐凍害性能を満足させるには至らなかった。また、質量減少率も膨張剤を混入した場合には、120 サイクルから徐々に増加し、210 サイクルで急激に減少している。このことより、膨張剤の使用によって前述の拘束ひび割れの抑制効果は期待できるものの、耐凍害性を確保することが困難になることが明らかになった。



(a)相対動弾性係数



(b)質量減少率

図-5.6 耐凍害性に及ぼす膨張剤の影響

5.7 まとめ

寸法安定性試験および長さ変化試験の結果より、吹付けコンクリートの場合は短繊維混入率の影響が小さいことが明らかになった。また、吹付けモルタルの結果も吹付けコンクリートの場合と類似の性状を示していた。一方、膨張剤を混入する場合は、初期材齢時の急激なひずみの変化が抑制されていることを確認するとともに、長さ変化率も低減されることが明らかになった。

アングル吹付け試験の結果から、膨張剤を使用することにより、3ヶ月を経過してもひび割れは確認されず、拘束ひび割れの抑制に有効であることが明らかになった。

凍結融解試験結果では、膨張剤を使用する場合に十分な耐凍害性を確保するに至らなかった。今後は、膨張剤の使用量や種類について検討する必要があると考えられる。

第6章 力学性能試験

6.1 試験概要

吹付けコンクリートに要求される性能は、力学的性能、ひび割れ抵抗性、耐久性、剥落抵抗性および美観・景観である。施工性試験、耐久性試験で2種類のPP短繊維の性状を検討した結果、PP-A短繊維がPVA短繊維と同様の良好な性状を示した。従って、本章では短繊維としてPP-A短繊維を選定し力学性能試験を行うとともに、PVA短繊維の試験結果と比較検討を行った。配合条件および試験数量を以下に示す。なお、圧縮強度試験のみPP-B短繊維についても試験を実施している。

6.2 試験項目

(1) 圧縮強度試験

短繊維		W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				シリカフェーム置換率	中空微小球混入率%	試験数量(組)
種類	vol×(%)			W	C	S	G	C×(%)		
PP-A	1.0	43	80	185	430	1365	340	10	3	1
PP-B	1.0	43	80	185	430	1365	340	10	3	1

(2) 一軸引張試験

短繊維		W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				シリカフェーム置換率	中空微小球混入率%	試験数量(本)
種類	vol×(%)			W	C	S	G	C×(%)		
PP-A	1.0	43	80	185	430	1365	340	10	3	4

(3) 付着強度試験

短繊維		W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				シリカフェーム置換率	中空微小球混入率%	試験数量(本)
種類	vol×(%)			W	C	S	G	C×(%)		
PP-A	1.0	43	80	185	430	1365	340	10	3	4

(4) 破壊エネルギー試験

短繊維		W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				シリカフェーム置換率	中空微小球混入率%	試験数量(本)
種類	vol×(%)			W	C	S	G	C×(%)		
PP-A	1.0	43	80	185	430	1365	340	10	3	4

6.3 圧縮強度試験

表-6.1 に圧縮強度試験の結果一覧を示す。なお、参考として PVA 短繊維の場合の結果も付記している。

表-6.1 圧縮試験結果一覧

短繊維種類	施工方法	養生方法	材令	短繊維混入率 (%)	圧縮強度	圧縮靱性係数	静弾性係数
					(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
PP-A	吹付け	気中養生	28日	1	50.93	35.44	25886
PP-B				1	52.97	39.89	26681
PVA				0	62.03	15.55	28794
				0.5	61.07	34.93	32141
				1	55.73	35.06	27442
				1.5	59.10	40.03	24973

(1) 圧縮強度

図-6.1 に圧縮強度試験の結果を示す。図より、PP-A 短繊維、PP-B 短繊維ともに PVA 短繊維とほぼ同じ値を示しており、短繊維種類の違いによる圧縮強度の顕著な差は見られないことが分かる。

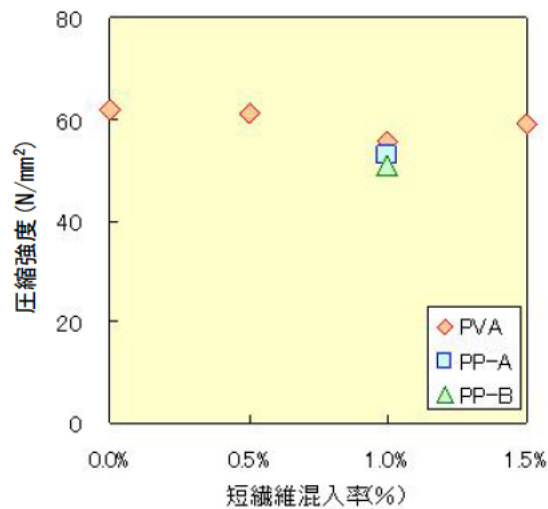


図-6.1 圧縮強度

(2) 圧縮靱性係数

図-6.2に圧縮靱性係数の結果を示す。図より、PP-A短繊維とPVA短繊維ではほぼ同じ値を示しており、短繊維種類の違いによる圧縮靱性係数の差は顕著ではないことがわかる。一方、PP-B短繊維はPVA短繊維の場合よりも若干大きく、短繊維混入率vol×1.5%の場合と同程度の圧縮靱性となっている。これはPVA短繊維の繊維長が30mmであるのに対し、PP-B短繊維の繊維長が50mmと長いことが圧縮靱性に表れたと推察される。

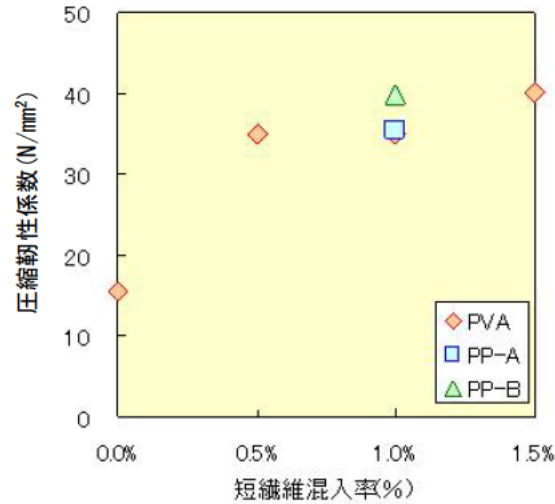


図-6.2 圧縮靱性係数

(3) 静弾性係数

図-6.3に静弾性係数の結果を示す。図より、PP-A短繊維、PP-B短繊維の場合ともにPVA短繊維とほぼ同じ値を示しており、短繊維種類の違いによる静弾性係数の顕著な差は見られない。

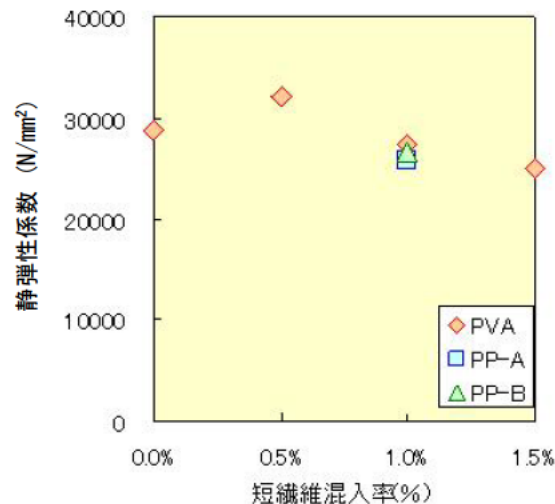


図-6.3 静弾性係数

前述の圧縮強度、圧縮靱性係数の結果を踏まえると、短繊維の種類が圧縮強度や静弾性係数に及ぼす影響は小さいものの、圧縮靱性係数は短繊維の長さに多少影響を受けることが明らかになった。

6.4 一軸引張強度試験

表-6.2 に一軸引張試験結果を示す。引張強度計算値は前節の圧縮強度から計算したものである。以下の考察では、PP 短繊維の試験結果を PVA 短繊維の試験結果と比較する形で検討する。

表-6.2 一軸引張試験結果

短繊維種類	施工方法	養生方法	材令	短繊維混入率 (%)	引張強度	残存強度	圧縮強度	引張強度計算値
					(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
PP-A	吹付け	気中養生	28日	1	3.24	0.15	50.93	3.16
PVA				0	1.67	0.00	62.03	3.60
				0.5	2.28	0.31	61.07	3.57
				1	2.51	0.45	55.73	3.36
				1.5	3.04	0.79	59.10	3.49

(1) 引張応力-変位関係

図-6.4 に一軸引張試験における応力-変位関係を示す。図より、PP-A 短繊維は、ひび割れ発生後引張応力が急激に低下し、引張応力レベルが 0 程度まで低下した後、再度載荷状態になり引張応力が増加する傾向にあることが分かる。変位が 2mm を越えた時点で引張応力が徐々に低下している PVA 短繊維の結果と比較すると、ひび割れ発生後の残存引張強度が小さいことがわかる。これは、PP-A 短繊維の引張強度や弾性係数が PVA 短繊維のそれに比較して小さいことや、短繊維の付着性能が小さいことなどに起因するものと考えられる。

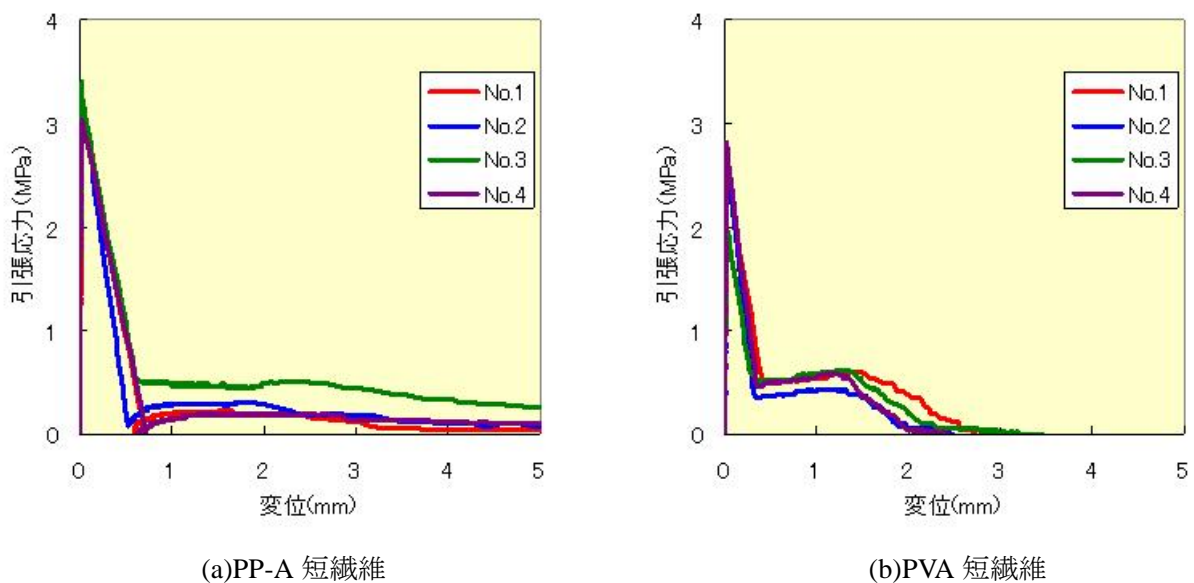


図-6.4 引張応力-変位関係

(2) 残存引張強度

図-6.5 に短繊維混入率と残存引張強度の関係を示す。図より、PP-A 短繊維の残存引張強度は PVA 短繊維の場合よりも小さいことが分かる。混入率に着目して比較すると、PVA 短繊維混入率 vol×0.5%の場合よりも小さい。従って、RC 部材の補強に用いる場合は、PVA 短繊維と同様の補強効果は期待できないと考えられる。

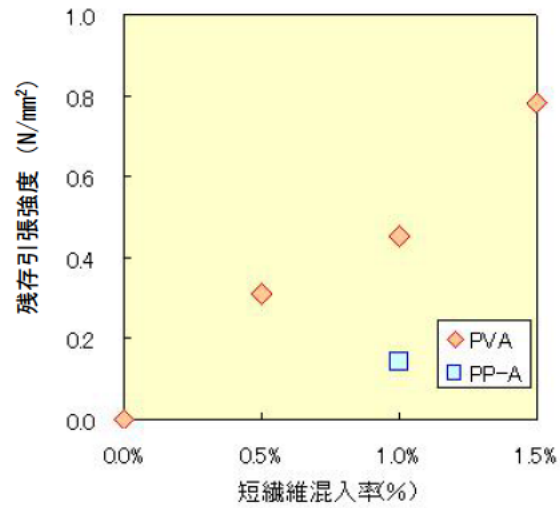


図-6.5 短繊維混入率・残存引張強度

6.5 付着強度試験

付着強度試験は、寒地土木研究所所有の一軸引張試験機を用いて行った。表-6.3 および図-6.6 に、付着試験結果を、写真-6.1 に破壊状況を示す。

試験の結果、4 本全ての供試体が母材側の骨材界面で破壊し、付着強度は 1.33N/mm^2 となった。この値は PVA 短繊維混入率 $\text{vol} \times 0.5\%$ 、 1.5% と同等の付着強度である。また、この時の母材の圧縮強度は 46.9N/mm^2 である。既設コンクリート面との一体性、剥落抵抗性について吹付けコンクリートを用いた補修・補強された構造物の要求性能を有しているか以下の式により照査した。

$$\gamma_P \frac{f_{bck}}{f_{bcp}} \leq 1.0 \quad \text{式(6.1)}$$

ここに

f_{bck} : 吹付けコンクリートの付着強度の設定値。一般に 1.0N/mm^2

f_{bcp} : 吹付けコンクリートの付着強度。試験により求めた値

γ_P : の精度に関する安全係数。一般に $1.0 \sim 1.3$

上式より、安全係数を考慮すると付着強度の規準値は、 $1.0 \sim 1.3\text{MPa}$ となる。いずれの結果も 1.3MPa を上回っていることにより、PP-A 短繊維は補修・補強用吹付けコンクリートとしての要求性能を有していると考えられる。

表-6.3 付着強度試験結果

短纖維種類	施工方法	養生方法	材令	短纖維混入率 (%)	付着強度
					(N/mm ²)
PP-A	吹付け	氮中養生	28日	1	1.33
PVA				0	1.31
				0.5	1.42
				1	1.79
				1.5	1.40

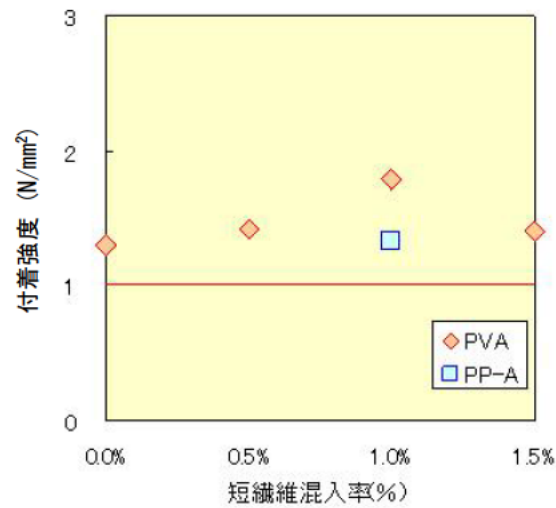


図-6.6 付着強度

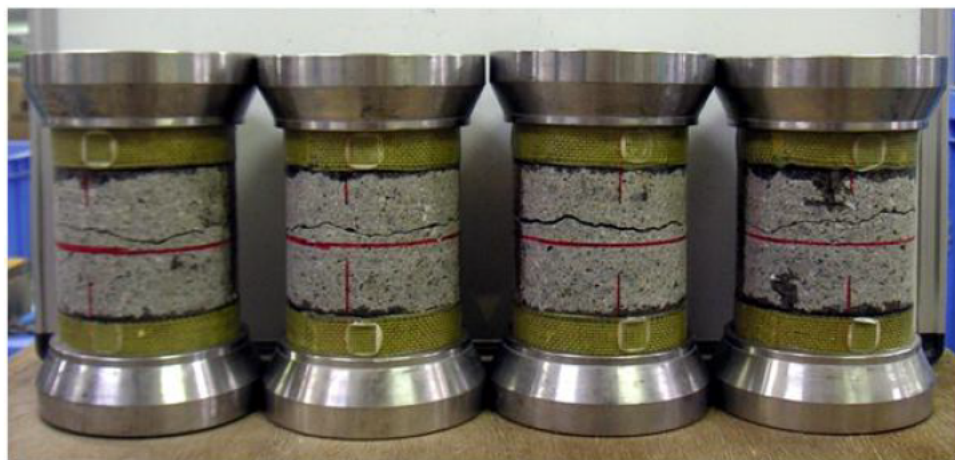


写真-6.1 付着強度試験破壊状況

6.6 破壊エネルギー試験

表-6.4 に破壊エネルギー試験結果を示す。以下の考察では、PP 短繊維の試験結果を PVA 短繊維の試験結果と比較する形で検討する。

表-6.4 破壊エネルギー試験結果

短繊維種類	施工方法	養生方法	材令	短繊維混入率 (%)	曲げ強度	破壊エネルギー
					(N/mm ²)	(N/mm)
PP-A	吹付け	気中養生	28日	1	5.68	0.81
PVA				0	4.14	0.13
				0.5	5.02	1.22
				1	4.97	1.70
				1.5	5.29	2.20

(1) 荷重-変位関係

図-6.7 に破壊エネルギー試験の結果を示す。図より、PP-A 短繊維はひび割れ発生後の荷重が PVA 短繊維の結果よりも小さいことがわかる。これは、一軸引張試験結果の場合と同様、PP-A 短繊維の引張強度や弾性係数が PVA 短繊維のそれに比較して小さいことや、短繊維の付着性能が小さいことなどに起因するものと考えられる。また、施工性試験結果を参考にすると、短繊維残留率が小さいことも1つの要因と考えられる。

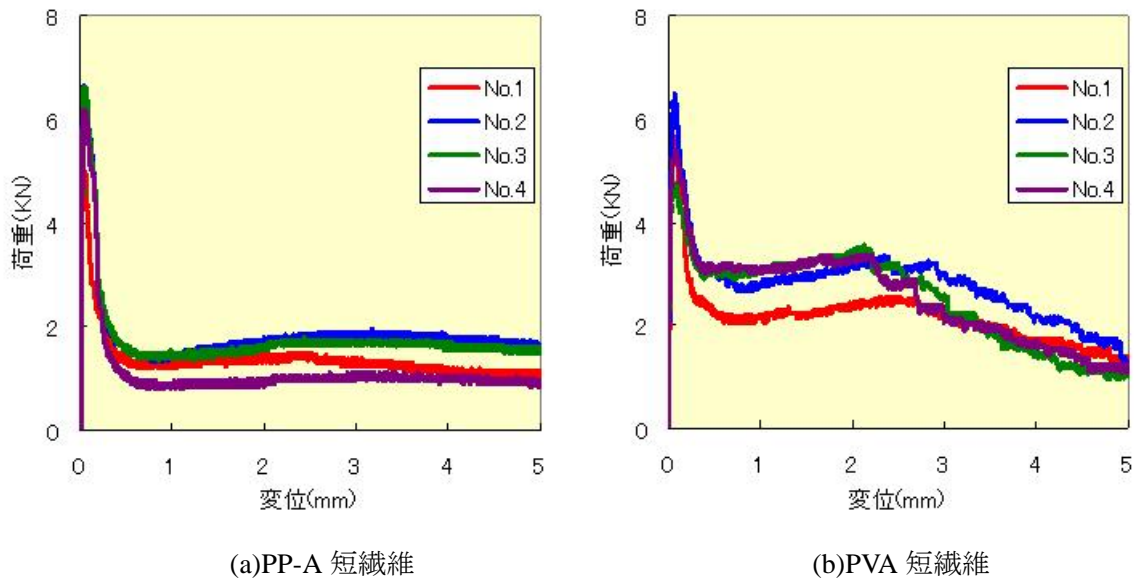


図-6.7 荷重-変位の関係

(2) 破壊エネルギー

図-6.8 に短繊維混入率と破壊エネルギーの関係を示す。図より、短繊維混入率混入率 vol×1.0% の場合、PP-A 短繊維の破壊エネルギーは PVA 短繊維の場合を下回っていることが分かる。また、PVA 短繊維を vol×0.5% 混入した場合の結果も下回っている。

供試体の破壊断面を観察すると、PVA 短繊維の断面は繊維長がおおむね 1cm 以下で切断されているのに対し、PP-A 短繊維の断面にはある程度長さのある繊維がいくつも見られた。このことから、PP-A 短繊維はコンクリートとの付着があまり芳しくなく、繊維の引き抜けが発生し破壊エネルギーが低下していると推測される。

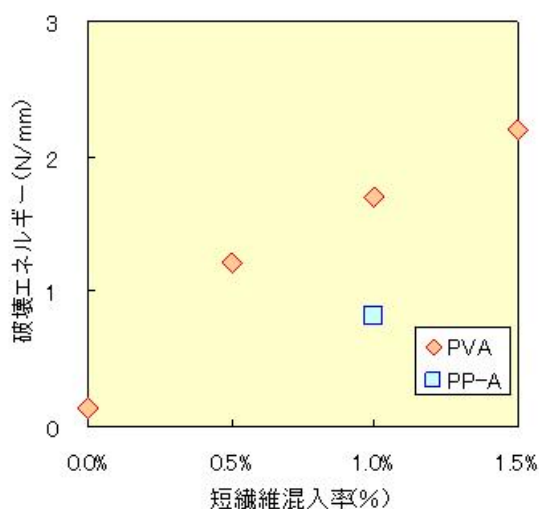


図-6.8 破壊エネルギー

6.7 まとめ

以上の結果より、PP-A 短繊維を用いた吹付けコンクリートの圧縮強度、引張強度および付着強度は、PVA 短繊維を用いる場合とほぼ同様であることが明らかになった。一方、圧縮靱性および引張靱性能に関しては、PP-A よりも PVA 短繊維の場合の方が高い性能を示す結果となった。これは、PP-A 短繊維は PVA 短繊維に比較して、1) 引張強度や弾性係数が小さいこと、2) 短繊維の付着性が小さいこと、3) 施工時のリバウンドが大きいこと等によるものと推察される。従って、PP 短繊維混入吹付けコンクリートを部材の補強に用いる場合は、PVA 短繊維と同等の補強効果を期待することは困難であると考えられる。

第7章 構造特性と構造部位への適用方法に関する検討

7.1 試験概要

寒地土木研究所では、PVA 短繊維と AFRP ネットと組み合わせた吹付け補強工法を提案している。本研究では短繊維材料に PP-A 短繊維、連続繊維ネットに CFRP ネットを組み合わせて補強した RC 梁のせん断耐荷性状の確認を目的として実験を行った。供試体は、両側面と下面を短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維ネットで補強した形状とした。さらに、本工法の構造部位(梁部材)への適用に向けて、短繊維および連続繊維ネットによるせん断耐力の増分の算出式に関する検討を行った。

7.2 実験供試体

表-7.1 に試験ケースの一覧を、図-7.1 に RC 梁の概要図を示す。用いた試験体は、断面寸法 20×45 cm、純スパン長 3.6 m の複鉄筋 RC 梁である。主鉄筋には SD345 D29 を 4 本用いている。なお、スターラップは配筋していない。

表-7.1 試験ケース一覧

試験体名	吹付け補強厚さ (mm)	短繊維		連続繊維メッシュ			数量 (体)
		種類	混入率 (vol×%)	種類	保証耐力 (KN/m)	格子間隔 (mm)	
S-F5-A10	30	PVA	0.5	AFRP	100	40	1
S-FP10-A10	30	PP-A	1.0	AFRP	100	40	1
S-F10-C10	30	PVA	1.0	CFRP	122	50	1
計							3

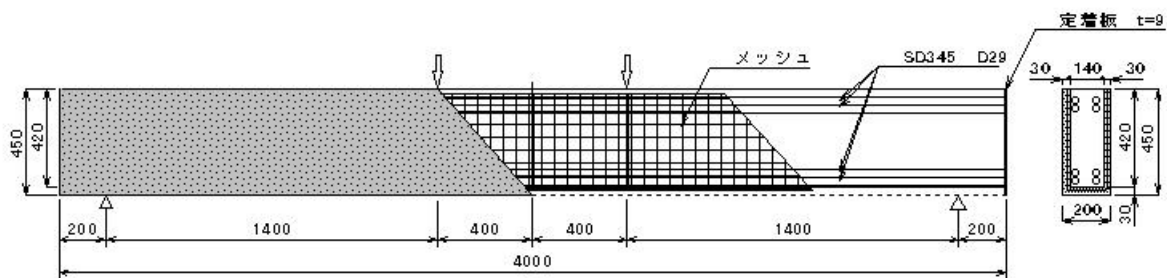


図-7.1 RC 供試体概要図

7.3 試験方法

試験装置概要図を図-7.2、試験状況を写真-7.1 に示す。荷重方法は単純梁によるスパン中央 2 点(荷重点距離中央より 40cm、支点距離 3.6m)の静的荷重とした。試験装置は 100t 油圧ジャッキを使用した。

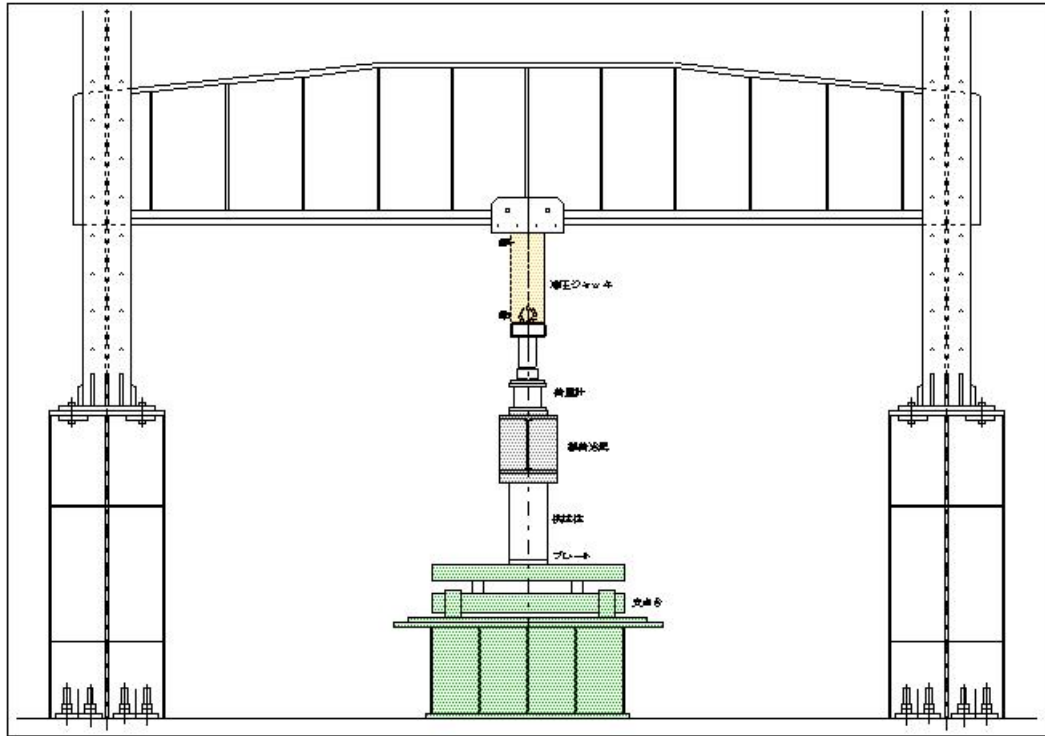


図-7.2 試験装置概要図



写真-7.1 試験状況

7.4 試験結果

図-7.3 に各試験体の荷重-変位曲線を示す。図より、いずれの試験体においても最大荷重到達後、荷重が急激に低下していることから、せん断破壊によって終局に至っていることがわかる。以下の考察では、過去の実験結果と比較する形で、短繊維材料や連続繊維ネットの違いがせん断補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼす影響について検討する。

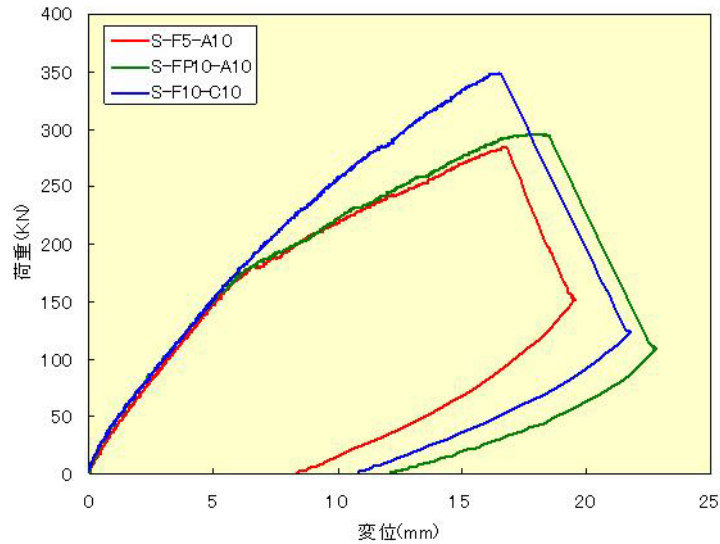


図-7.3 荷重変位曲線

(1) AFRP ネットの補強効果

図-7.4 に AFRP ネットによるせん断補強効果を検討するため、無補強、吹付けのみ、および吹付け+AFRP ネットを組み合わせるせん断補強した RC 梁の実験結果を付記して示す。図より、AFRP ネットを配置することによりせん断耐力が大きく向上し、補強効果が現れていることがわかる。

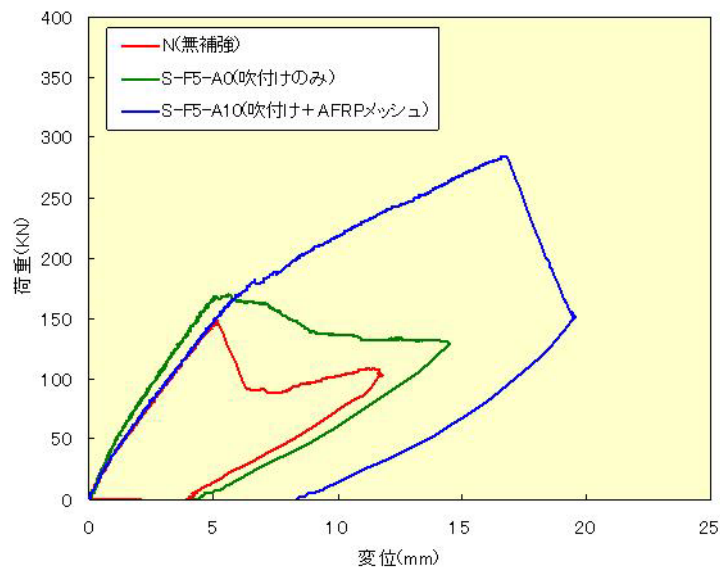


図-7.4 荷重-変位曲線 (AFRP ネットの補強効果)

(2) 短繊維の補強効果

図-7.5にPVA短繊維によるせん断補強効果を検討するため、無補強、短繊維混入率が異なる3種類の吹付けコンクリート(短繊維混入率vol×0、0.5、1.0%)とAFRPネットを組み合わせで補強したRC梁の荷重-変位曲線を示す。図より、吹付けコンクリートの短繊維混入率が大きい場合ほど最大荷重が大きくなる傾向にあることが分かる。このことより、吹付けコンクリートに混入している短繊維もRC梁のせん断耐力の向上に寄与していると考えられる。

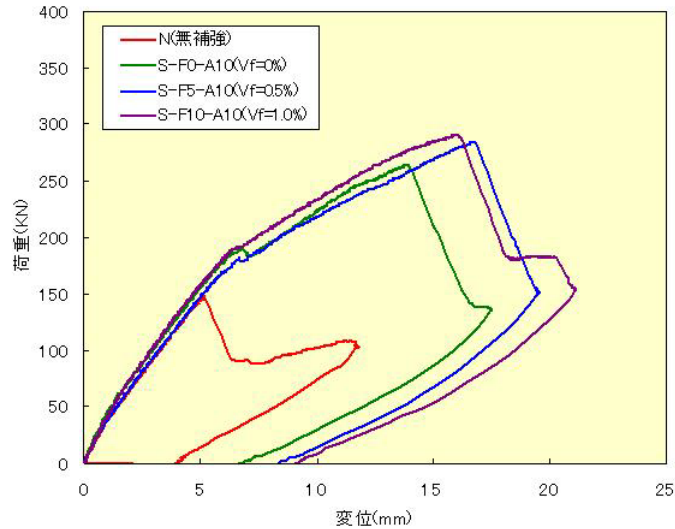


図-7.5 荷重-変位曲線 (PVA短繊維の補強効果)

(3) 短繊維種類の影響

図-7.6にせん断耐力向上効果に及ぼす短繊維種類の影響を検討するため、無補強および短繊維種類が異なる(PVA、PP-A)吹付けコンクリートを用いてせん断補強したRC梁の実験結果を比較して示す。図より、短繊維の混入率に関わらずほぼ同様の耐荷性状を示しているものの、斜めひび割れ発生後の第2勾配は、PVA短繊維よりもPP-A短繊維の場合の方が小さいことがわかる。これは、前述の一軸引張試験結果に見られたように、PVA短繊維よりもPP-A短繊維の場合の方が短繊維の架橋効果が小さいことによると考えられる。

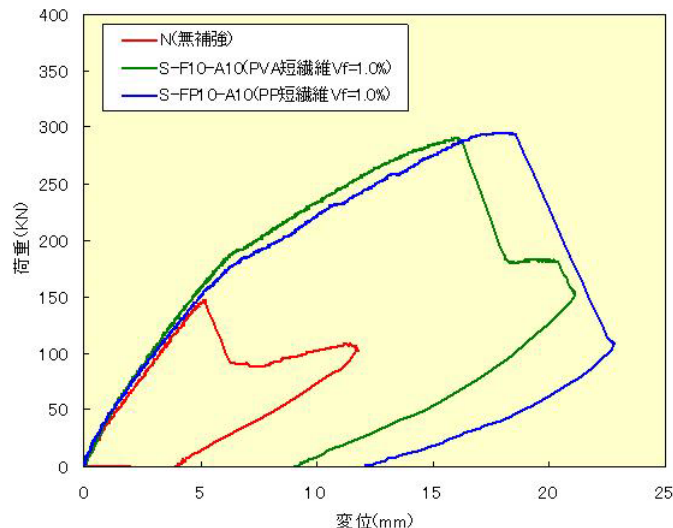


図-7.6 荷重-変位曲線 (短繊維材料の影響)

(4) 連続繊維ネット種類の影響

図-7.7 に提案工法のせん断耐力向上効果に及ぼす連続繊維ネットの種類の影響を検討するため、無補強および種類の異なる連続繊維ネット(AFRP、CFRP)と吹付けコンクリートを用いてせん断補強した RC 梁の実験結果を比較して示す。図より、AFRP ネットの場合には、斜めひび割れ発生後、勾配が多少小さくなる性状を示しているのに対し、CFRP ネットの場合には斜めひび割れ発生後においても、勾配の低下は見られないことがわかる。これは、CFRP ネットの保証耐力が AFRP ネットのそれよりも大きいことや、CFRP ネットの弾性係数が AFRP ネットのそれよりも大きいこと等によるものと考えられる。

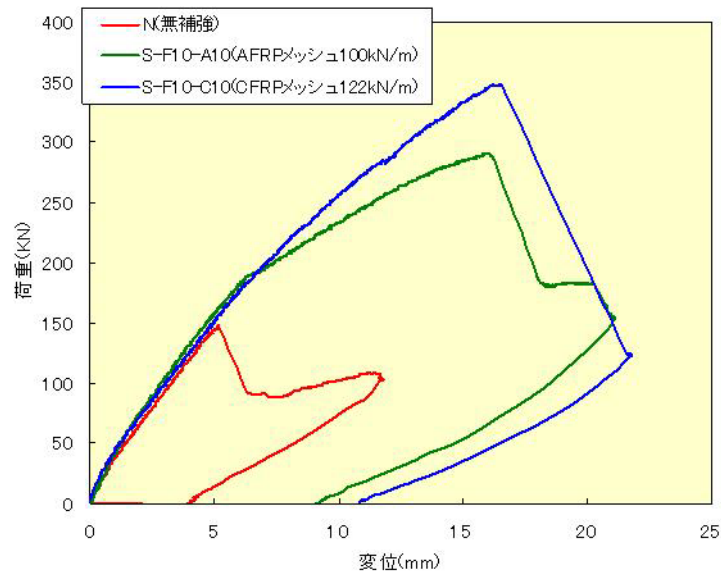


図-7.7 荷重-変位曲線 (連続繊維材料の影響)

7.5 せん断補強効果の分析

次に、短繊維および連続繊維ネットによるせん断補強効果の実験および計算結果を比較し、提案工法の実用化に向けた検討を行う。短繊維および連続繊維ネットによるせん断耐力の分担分は、コンクリート標準示方書によるせん断耐力算定式を参考に下式により算出した。

・連続繊維ネットによるせん断耐力分担分

$$V_M = 2 \times (t \times 2) \times (z / \tan \theta) \times f_m \quad (\text{両せん断スパン考慮の式}) \quad \text{式(7.1)}$$

・短繊維のせん断耐力分担分

$$V_F = 2 \times (b_s \times 2) \times (z / \tan \theta) \times f_v \quad (\text{両せん断スパン考慮の式}) \quad \text{式(7.2)}$$

ここに、

- t : 連続繊維ネットの換算厚さ
- z : アーム長 (=d/1.15)
- d : 有効高さ
- f_m : 連続繊維ネットの引張強度
- b_s : 吹付けコンクリートの厚さ
- f_v : 短繊維混入吹付けコンクリートの残存引張強度

表-7.2、表-7.3に本実験に用いたRC梁に対応した連続繊維ネットおよび短繊維によるせん断耐力分担の計算値を示す。

表-7.1 連続繊維ネットによるせん断耐力分担分

ネットの種類	保証耐力 (kN/m)	連続繊維ネットによる せん断耐力分担分 V_m (kN)
AFRP	100	75.9
CFRP	122	92.6

表-7.2 短繊維によるせん断耐力分担分

短繊維の種類	短繊維混入率 (%)	残存引張強度 (MPa)	短繊維による せん断耐力分担分 V_f (kN)
PP-A	1.0	0.15	5.7
PVA	0.5	0.31	11.9
	1.0	0.45	17.2

次に、表-7.4、表-7.5に、短繊維および連続繊維ネットによるせん断耐力分担分の実験および計算結果を示す。表より、短繊維材料や連続繊維材料が異なる場合においても、実験結果は計算結果を上回っていることがわかる。従って、使用材料が異なる場合においても、提案の設計式により安全側で設計可能であると考えられる。

表-7.3 せん断耐力の短繊維分担分に関する実験および計算結果の比較

試験体名	短繊維種類	短繊維混入率 V_f (%)	実測最大荷重 P_{ue} (kN)	実測増分耐力 ΔP (kN)	計算せん断耐力の短繊維分担分 V_F (kN)	$\Delta P / V_F$
S-F0-A10	なし	-	264			
S-F10-A10	PVA	1.0	291	27	17.2	1.57
S-FP10-A10	PP	1.0	296	32	5.7	5.60

表-7.4 せん断耐力の連続繊維分担分に関する実験および計算結果の比較

試験体名	連続繊維種類	保証耐力 (kN/m)	実測最大荷重 P_{ue} (kN)	実測増分耐力 ΔP (kN)	計算せん断耐力の連続繊維分担分 V_M (kN)	$\Delta P / V_M$
S-F10-A0	なし	-	179	-	-	-
S-F10-A10	AFRP	100	291	112	75.9	1.47
S-F10-C10	CFRP	122	348	169	92.6	1.83

7.6 まとめ

本章では、従来の PVA 短繊維や AFRP ネット以外の材料を用いる場合における補強効果の検証を行った。その結果、PP 短繊維や CFRP ネットを用いる場合においても、十分な補強効果を期待できることが明らかになった。また、構造部材に本工法を適用する際には、コンクリート標準示方書におけるトラス理論に基づくせん断耐力設計法を準用して、各材料による RC 梁のせん断耐力向上効果を安全側に評価可能であることが明らかになった。

第8章 総括

本研究では、高靱性吹付けコンクリートと連続繊維ネットを用いた補修・補強工法の適用範囲拡大のため、短繊維や連続繊維の材料種類を変化させた場合の施工性、材料特性、補修補強効果の確認を行った。

配合試験の結果から、短繊維のアスペクト比や繊維長がフレッシュ性状に大きな影響を及ぼすことが明らかになり、CF短繊維は混和剤使用量が多くなるため良好な施工性が出来ないものと判断し、施工性試験には2種類のPP短繊維を使用することとした。

施工性試験では、PP短繊維の種類に関わらず、圧送性や吐出性が良好な吹付け施工が可能であったが、PP-B短繊維の場合に、表面コテ均し時において短繊維が表面に突出する傾向が見られ、平滑な表面仕上げが困難であった。また、リバウンド率や繊維残留率に関しても、PP-B短繊維はPVA短繊維の結果を下回った。これは、PP-A短繊維のアスペクト比や繊維長はPVA短繊維に近いこと、良好な吹付け性状を示したものと考えられる。短繊維混入吹付けコンクリートの施工性には、短繊維の形状等が大きな影響を及ぼすことを考慮しなければならない。

耐凍害性試験では、PP-A短繊維を混入した吹付けコンクリートは厳しい凍害劣化環境下においても十分な耐久性が期待でき、PP-B短繊維の場合は厳しい凍害劣化環境下への適用は困難であり、一般的な比較的環境作用が緩い部位には適用可能であることが確認された。

収縮特性については、吹付けコンクリートの短繊維混入率の影響は小さく、吹付けモルタルの結果も吹付けコンクリートの場合と類似の性状を示した。収縮量については規格値を大きく下回らなかったが、施工際には十分な養生が必要である。膨張剤を混入した配合では、初期材齢時の急激なひずみの変化の抑制、長さ変化率の低減、拘束ひび割れ抑制に有効であることが確認されたが、十分な耐凍害性を確保するに至らなかったため、使用量や種類について今後検討する必要がある。

力学性能としては、PP-A短繊維を用いた吹付けコンクリートの圧縮強度、引張強度および付着強度は、PVA短繊維を用いる場合とほぼ同様であった。一方、圧縮靱性および引張靱性能に関してはPP-AよりもPVA短繊維の場合の方が高い性能を示す結果となった。これは、PP-A短繊維はPVA短繊維に比較して、引張強度や弾性係数が小さいこと、短繊維の付着性が小さいこと、施工時のリバウンドが大きいことの3つの要因によるものと推察される。

構造特性の評価を目的に実施したせん断補強RC梁の静的載荷実験では、従来のPVA短繊維やAFRPネット以外の材料を用いる場合の補強効果の検証を行ったところ、PP短繊維やCFRPネットを用いた場合においても、十分な補強効果が期待できる結果となった。また、構造部位(梁部材)に適用する際には、提案した短繊維および連続繊維ネットによるせん断耐力の分担分を考慮することで、せん断耐力向上効果を安全側に評価可能であることを確認した。

共同研究報告書

COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.

No.434 March 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所

寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046