

短繊維混入コンクリートの開発に関する研究

共同研究報告書

平成24年4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
株式会社構研エンジニアリング

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。

短繊維混入コンクリート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}

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
部長 植村 豊樹
副技術長 伊藤 雄二
主任技師 岡 宣克
技師 京田 英宏

株式会社構研エンジニアリング 橋梁部

※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

要旨

短繊維を混入したコンクリートの土木構造物への適用に向けて、材料的及び構造的観点から検討を行った。材料試験結果から、短繊維種別や混入率の違いによる圧縮強度、靱性係数、静弾性係数の違いは認められなかった。この一方で、短繊維混入率が 0.30%以上の場合には、剥落抑制に対して効果的な短繊維による残存引張強度(ひび割れ発生後の引張強度)が確認された。また、RC 柱の静的・衝撃載荷実験から、短繊維の混入によるせん断耐力および耐衝撃性の向上効果はスターラップを配した場合と同程度であり、短繊維の混入によって斜めひび割れ近傍の剥落が抑制されることが明らかになった。さらに、ポンプ圧送実験から、短繊維混入時のスランプロスや空気量の変化範囲を確認するとともに、短繊維がアジテータ車で均一に拡散されていることも確認した。

キーワード：高靱性コンクリート、短繊維、ポンプ圧送性、RC 部材の静的・衝撃実験、剥落抑制

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	9
第 2 章 材料特性の評価	12
2.1 試験概要	12
2.2 フレッシュ性状試験結果	14
2.3 圧縮強度試験結果	17
2.4 曲げ強度試験結果	19
2.5 まとめ	21
第 3 章 構造特性の評価	22
3.1 実験概要	22
3.2 実験結果	24
3.2.1 静的載荷実験	24
3.2.2 衝撃載荷実験	28
3.3 まとめ	36
第 4 章 コンクリート構造物への効率的な適用方法に関する検討	37
4.1 剥落抑制の検討	37
4.1.1 試験概要	37
4.1.2 小型 RC 梁載荷試験結果	38
4.1.3 小型 RC 版載荷試験結果	40
4.1.4 圧縮強度試験結果	42
4.1.5 一軸引張試験結果	43
4.1.6 まとめ	45
4.2 靱性能向上配合の検討	46
4.2.1 試験概要	46
4.2.2 小型 RC 梁載荷試験結果	47
4.2.3 圧縮強度試験結果	49
4.2.4 一軸引張試験結果	50
4.2.5 長さ変化試験結果	53
4.2.6 拘束ひび割れ試験結果	54

4.2.7	配向係数測定結果	55
4.2.8	まとめ	57
第 5 章	総括	58

第1章 概要

1.1 共同研究の概要

(1) 目的

短繊維を混入したコンクリートの土木構造物への適用について材料的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、構研エンジニアリングおよび室蘭工業大学で行った。

(3) 研究の内容および方法

短繊維混入コンクリートの開発に関する研究として、以下のことを行った。

- ・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
- ・コンクリート構造物への効率的な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
(株)構研エンジニアリング	橋梁部	植村 豊樹	部長
		伊藤 雄二	副技術長
		岡 宣克	主任技師
		京田 英宏	技師

(5) 研究の実施期間

平成 19 年 11 月 9 日 ～ 平成 20 年 3 月 31 日

1.2 試験概要

(1)材料特性の評価

ポリビニルアルコール短繊維(PVA 短繊維)、ポリプロピレン短繊維(PP 短繊維)、PET ボトル廃材を用いたポリエチレンテレフタレート短繊維(PET 短繊維)の3種類の短繊維について、アジテータトラックに積載されたレディーミクストコンクリートに短繊維を投入・攪拌することによって短繊維混入前後のスランプおよび空気量の変動、短繊維の分散性を検討した。また、短繊維混入後の材料について現地にて供試体製作を行い、圧縮および曲げ強度を測定した。

(2)構造特性の評価

短繊維混入コンクリートのRC部材への適用性について検討するため、普通および短繊維混入コンクリート製RC柱の静的・衝撃実験を行った。また、使用材料の力学特性試験供試体の試験を行った。

(3)剥離抑制の検討

トンネル覆工等においてコンクリート構造物からのコンクリート片の剥落による第三者被害を効率的に防止できる短繊維種類や混入率の検討を目的に、比較的低混入率の4配合について小型RC梁による載荷試験と小型RC版による押し抜き試験を実施した。また、これらの配合の力学特性の基礎である圧縮強度試験、一軸引張試験についても実施した。

(4)靱性能向上効果の検討

短繊維混入コンクリートの靱性能の向上を検討することを目的に、小型RC梁載荷試験を実施した。また、力学特性の基礎である圧縮強度試験、一軸引張試験、長さ変化試験と拘束ひび割れ試験を実施した。さらに、繊維の分散性を確認するため、コンクリート中の繊維の配向係数の測定も実施した。

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。

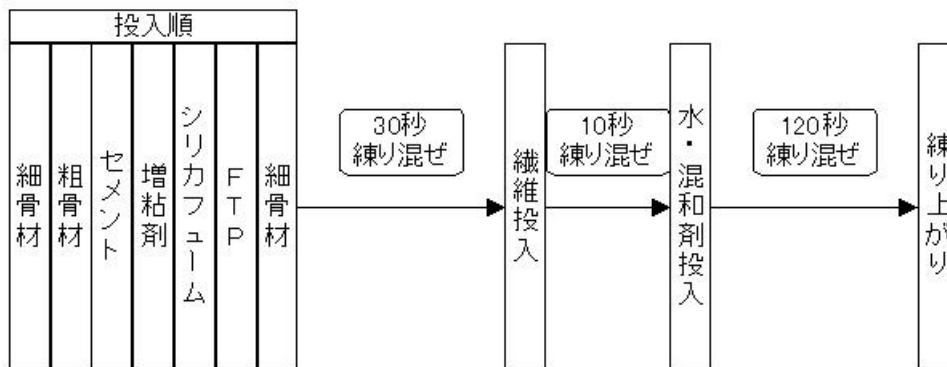
(2)密度および吸水率試験(細骨材)

JIS A1109「細骨材の密度および吸水率試験方法」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およ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



※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した。

(5)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。

(6)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。

(7) 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。

(8) 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。

(9) 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。

(10)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。

(11) 一軸引張試験

図-1.1 に一軸引張試験の実験装置概要を、写真-1.1 に実験概要を示す。寒地土木研究所所有の専用治具およびセンサーを用いてアムスラーにより载荷する事で引張試験を行った。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。

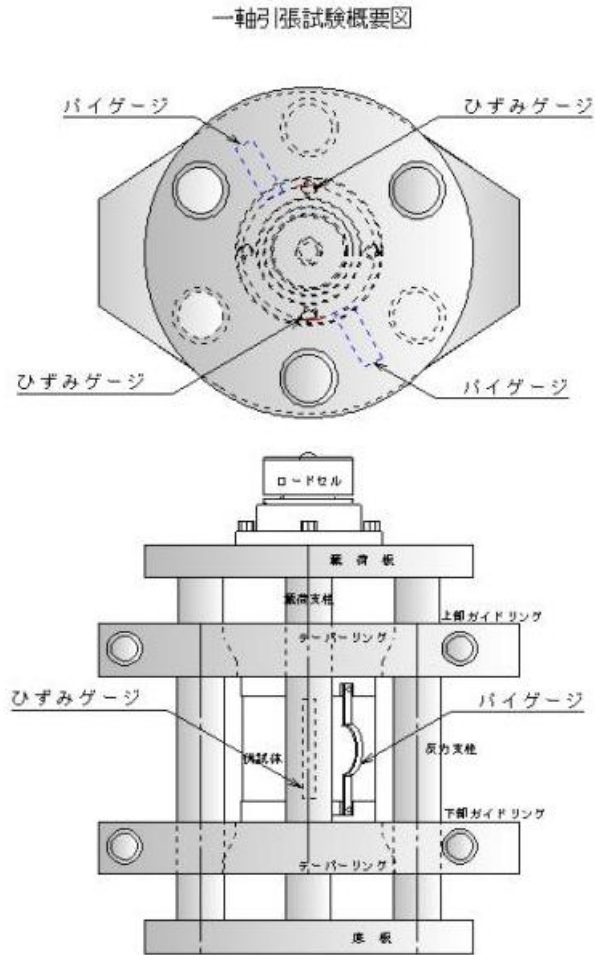


図-1.1 一軸引張試験概要図

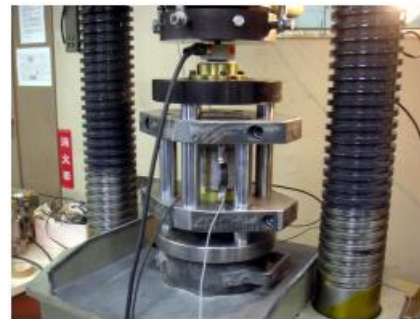


写真-1.1 実験時外観と供試体

(12) 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」を参考に、オートグラフを使用し試験を行った。写真-1.2に破壊エネルギー測定試験機を、図-1.2に変位計設置箇所を示す。

荷重速度および変位測定箇所、点数、使用センサーは調査員と協議し以下の様に決定した。荷重速度は、荷重開始時は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、供試体が破壊するまで荷重を続けた。データの測定は動的計測を行った。変位測定箇所は、荷重点 Dis-CL、Dis-CR は非接触式レーザー変位計、支点 Dis-FF、Dis-FR は接触型変位計を用いて測定を行った。



写真-1.2 破壊エネルギー試験装置

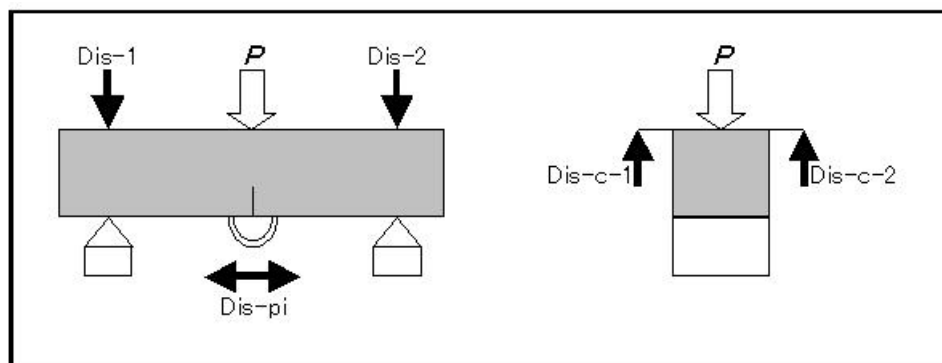


図-1.2 変位測定箇所

(13) 配向係数測定

1) 試料切削

図-1.3 に供試体の測定方向を示す。採取したコアから 35mm 立法体供試体を 8 個切削して図に示すような方向付けをした。

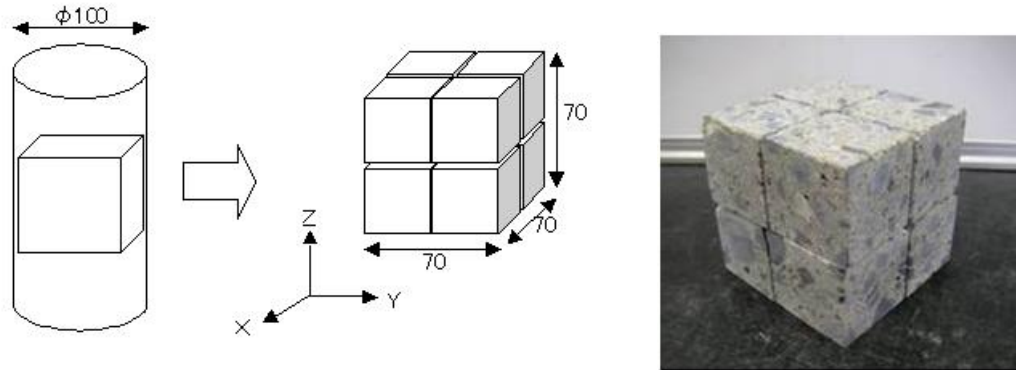


図-1.3 供試体の測定方向

2) 試験方法

図-1.4 に写真撮影から画像処理までの流れを示す。配向係数は硬化コンクリートの切断面における短繊維の断面形状を撮影・測定して短繊維の向きを特定する方法で実施した。まず、供試体をブラックライト照射装置内に設置し、PVA 短繊維を蛍光させて X・Y・Z の各 1 面をデジタルカメラにて撮影を行った。次にアドビシステムズ社製 AdobePhotoshop を用いて画像処理を施し、MEDIACYBERNETICS 社製 Image-ProPLUS を用いて短繊維の切断面の直径と面積を求め、配向係数を算出した。

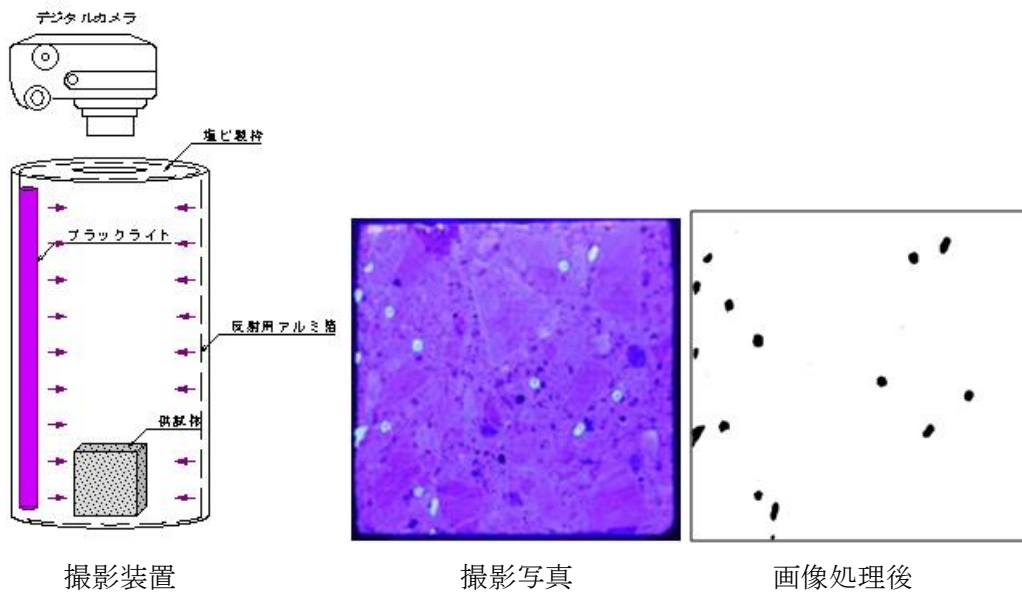


図-1.4 撮影方法と画像処理の流れ

3) 配向係数の算出方法

図-1.5 に切断面における繊維の断面積を示す。この断面積から繊維の傾き $\cos \theta$ を求めて式(1.3)から切断面における $\cos \theta$ の平均化を行い、切断面の配向係数(β)を求める。

断面積 $S = \frac{\pi}{4} \times \frac{d}{\cos \theta} \times d$ ——式(1.1)

$\cos \theta = \frac{\pi d^2}{4S}$ ——式(1.2)

配向係数 $\beta = \frac{1}{N} \sum \cos \theta$ ——式(1.3)

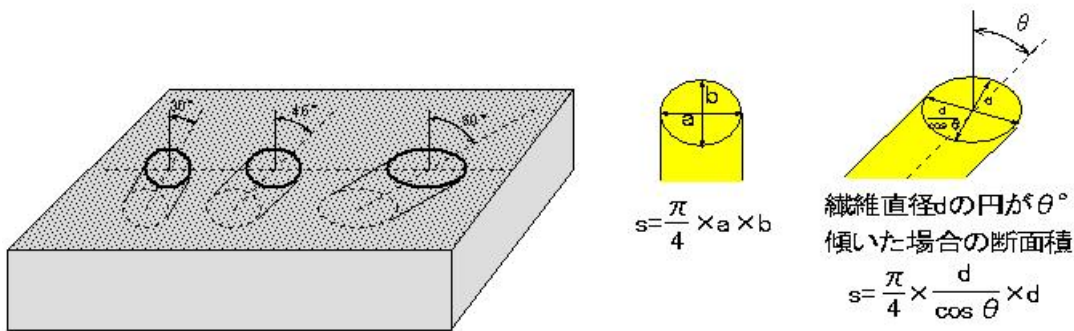


図-1.5 切断面における繊維の断面積

図-1.6 に繊維の傾きと配向係数の関係を示す。これと式(1.3)から、繊維が切断面に対して垂直に配されている場合の β は 1 となり、繊維が切断面に対して平行に配されている場合の β は 0 となる。

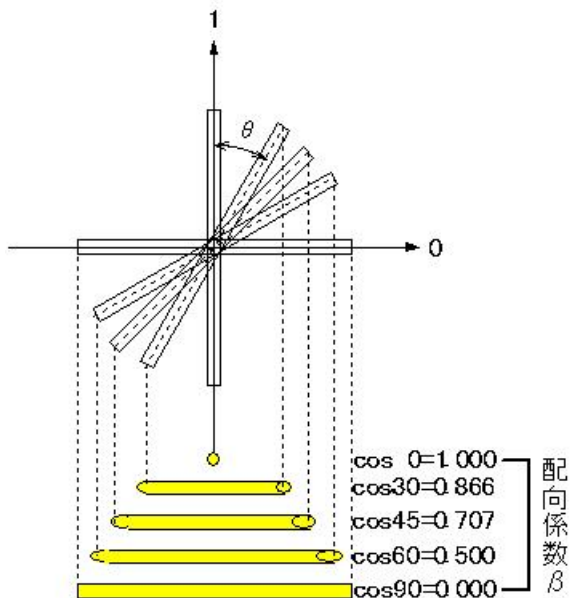


図-1.6 繊維の傾きと配向係数の関係

1.4 使用材料および機器関係

表-1.1 に使用材料の一覧を、表-1.2 に各混和剤の特性を、表-1.3 に各短繊維の特性を示す。また、写真-1.3 に有機系短繊維を示す。

表-1.1 使用材料一覧

使用材料	品名	メーカー
細骨材	比重:2.67 吸水率:1.08	苫小牧市樽前産海砂
粗骨材	比重:2.65 吸水率:1.81	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)
高性能AE減水剤	レオビルドSP8SV 比重:1.04~1.06 レオビルド8000S 比重:1.04~1.06	(株)ポゾリス物産
AE剤	マイクロエア101 比重:1.050~1.070	(株)ポゾリス物産
高流動コンクリート用分離低減剤	ヤマソービスコン:粉末 主成分:バイオポリサッカライド	山宗化学(株)
ポリビニルアルコール短繊維	クラテックRF4000×30 繊維長30mm クラテックRF4000×40 繊維長40mm 比重:1.3	(株)クラレ
ポリプロピレン短繊維	ポリウウェブJK 繊維長:48mm 比重:0.91	萩原工業(株)
ポリエチレンテレフタレート短繊維	テレフタロンAC 繊維長:40mm 比重:1.32	(株)サンゴ

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
ボゾリス NT-1000S	湿式吹付けコンクリート 用高性能減水剤 標準型(I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%
レオビルド SP8N	高性能AE減水剤 標準型(I種)	ポリカルボン酸 エーテル系の複合体	赤褐色 液体	原液	1.05	C×1.10%
レオビルド 8000S	コンクリート製品用 高性能減水剤	ポリカルボン酸 エーテル系化合物	赤褐色 液体	原液	1.05	C×0.9%
マイクロエア 101	AE剤(I種)	アルキルエーテル系 陰イオン界面活性剤	淡黄色 液体	1%	1.00	C× 0.001%

表－1.3 短繊維特性

短繊維 種類	商品名	材 質	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	アスペクト比
PVA30	RF4000×30	ポリビニルアルコール	0.66	30	45.5
PVA40	RF4000×40	ポリビニルアルコール	0.66	40	60.6
PP	ポリウエーブJK	ポリプロピレン	0.76	48	63.2
PP-FB	ファインバスタ	ポリプロピレン	0.027	19	703.7
PET	テレフタロンAC	ポリエチレンテレフタレート	0.70	40	57.1



PVA30



PVA40



PP



PP-FB



PET

写真-1.3 有機系短繊維

第2章 材料特性の評価

2.1 試験概要

ポリビニルアルコール短繊維(PVA 短繊維)、ポリプロピレン短繊維(PP 短繊維)、ポリエチレンテレフタレート短繊維(PET 短繊維)の3種類の短繊維について、アジテータトラックに積載されたレディーミクストコンクリートに短繊維を投入、攪拌することによって短繊維混入前後のスランプおよび空気量の変動、短繊維の分散性を測定した。また、この短繊維混入後の材料について現地にて供試体を製作し、圧縮および曲げ強度を測定した。表-2.1 にベースコンクリート配合を、表-2.2 に使用骨材を、表-2.3 に使用セメントを、表-2.4 に使用混和剤を示す。図-2.1 に現地試験フローを示す。

表-2.1 ベースコンクリート配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				混和材 C×(%)
		W	C	S	G	
44	51	155	352	953	913	0.7

表-2.2 使用骨材

	種類	産地	粒の大きさの 範囲	粗粒率または 実績率	密度(g/m ³)	
					絶乾	表乾
細骨材	普通	沙流川流域産	5	2.85	2.64	2.70
粗骨材	普通	沙流川流域産	25~5	61.0	2.71	2.75

表-2.3 使用セメント

セメント種類	密度(g/m ³)
高炉セメント	3.05

表-2.4 使用混和剤

種類	製品名
高性能AE減水剤(標準形1種)	フローリックSF500S

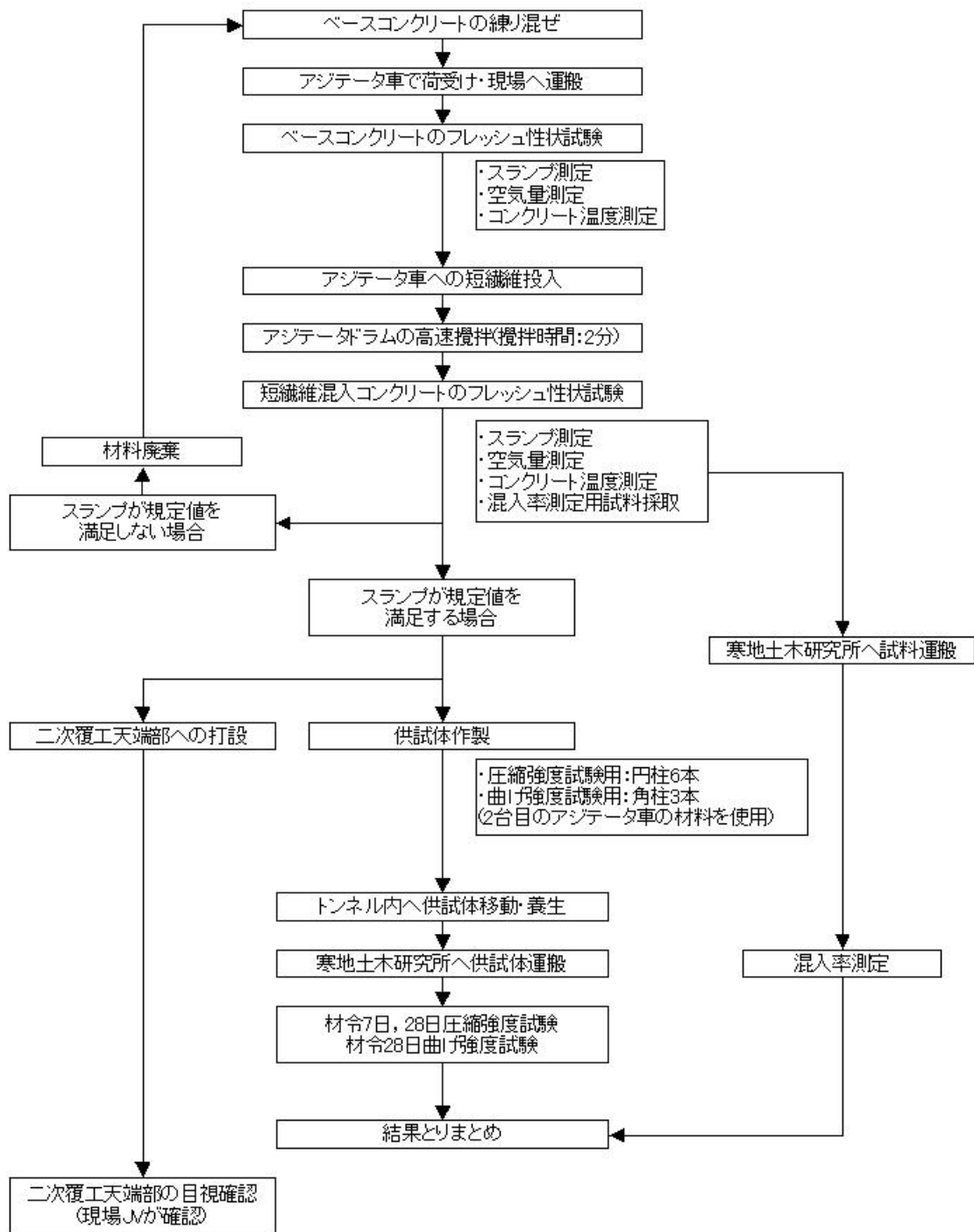


図-2.1 現地試験フロー

2.2 フレッシュ性状試験結果

短繊維混入前のベースコンクリートおよび各種短繊維混入コンクリートのスランプ、空気量、コンクリート温度の測定結果を表-2.5 に示す。また、短繊維混入前ベースコンクリートの現場到着時と短繊維投入、攪拌後のフレッシュ性状の推移については図-2.2 にスランプ、図-2.3 に空気量、図-2.4 にコンクリート温度として示す。

表-2.5 フレッシュ性状一覧表

短繊維			ベースコンクリート			短繊維混入後			備 考
種類	長さ (mm)	混入率 Vol× (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
PVA	40	0.3	20.5	2.5	11.5	19.5	4.9	10.7	アジテータ車1台目
			21.0	2.4	9.8	19.5	4.0	9.6	アジテータ車2台目
PP	48		19.0	4.0	11.0	18.5	4.3	11.2	アジテータ車1台目
			19.0	3.6	11.6	17.5	4.6	12.2	アジテータ車2台目
PET	40		20.0	2.8	9.9	18.0	3.5	9.1	アジテータ車1台目
			20.0	3.1	9.2	17.0	5.1	8.5	アジテータ車2台目

各短繊維のスランプロス は PVA 短繊維で 1.0cm~1.5cm、PP 短繊維で 1.5cm~2.5cm、PET 短繊維で 2.0~3.0cm と過年度の青葉トンネルの 3.0cm と同等かやや少ない結果となった。空気量は短繊維混入後に 1%~2% と若干増加する傾向にあり、それは 3 種類の短繊維すべて同程度であった。コンクリート温度は短繊維混入後も 3 種類の短繊維全てがほとんど変わらないことが明らかになった。

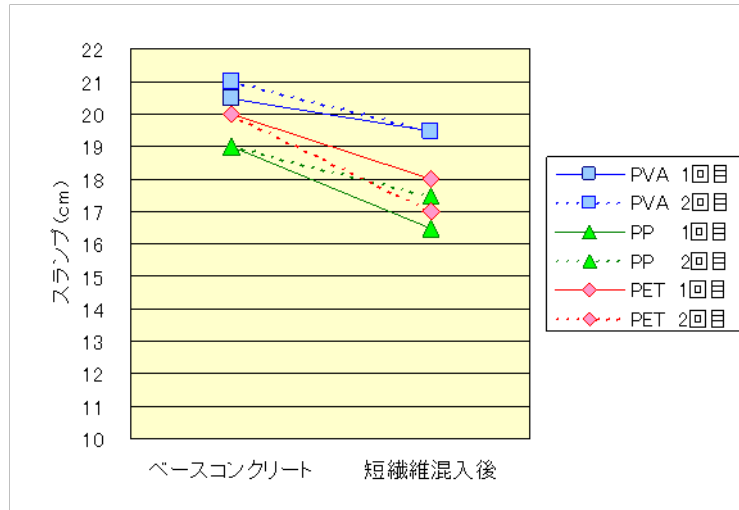


図-2.2 短繊維混入前後のスランプの推移

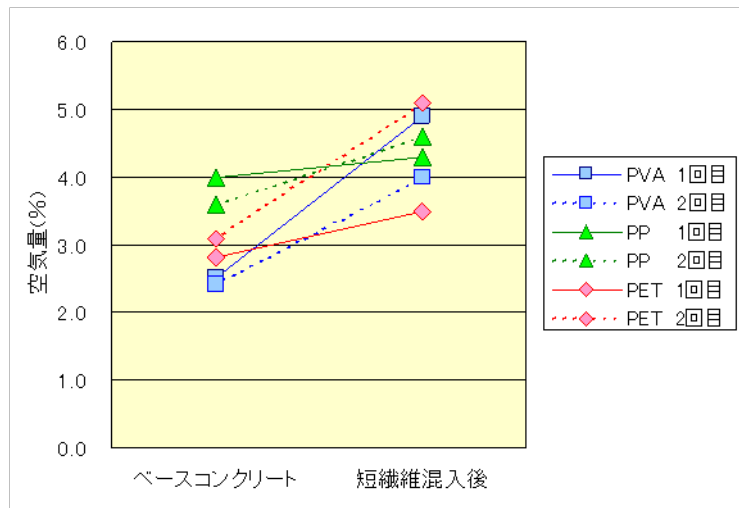


図-2.3 短繊維混入前後の空気量の推移

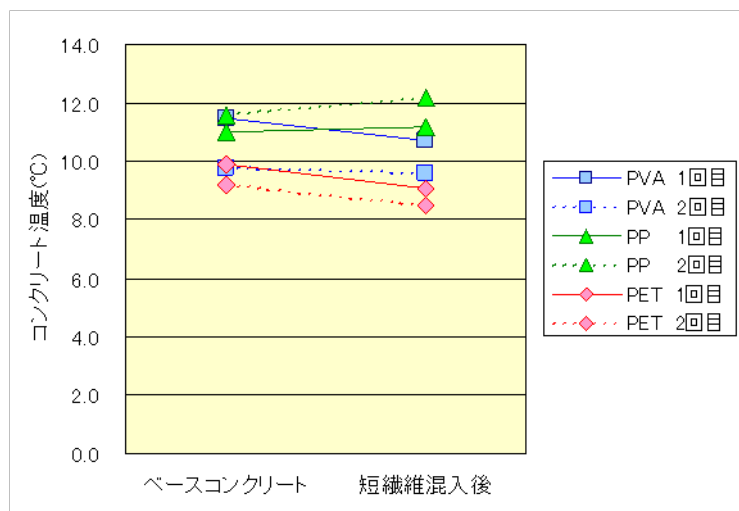


図-2.4 短繊維混入前後のコンクリート温度の推移

各短繊維混入コンクリートの混入測定結果を表-2.6 および図-2.5 に示す。短繊維の種類に関わらず実測混入率が 0.27%~0.28% となった。設定混入率に対して実測混入率にほとんど差がないことから、メーカー専用投入機(PET 短繊維のみ高所作業車を使用した直接投入)による短繊維の投入方法を用いアジテータ車の高速攪拌を 2 分間行うことによって均一に短繊維が分散されていることが確認できた。

表-2.6 混入率測定結果一覧表

短繊維			実測混入量 (g)	実測混入率 (%)	測定試料 (ml)
種類	長さ (mm)	混入率 Vol× (%)			
PVA	40	0.3	24.5	0.27	7000
PP	48	0.3	17.7	0.28	7000
PET	40	0.3	25.8	0.28	7000

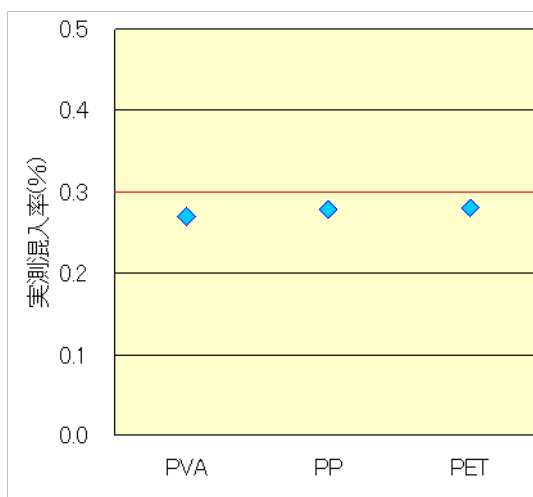


図-2.5 短繊維混入率

2.3 圧縮強度試験結果

現地試験にて作製した供試体について、材令7日および28日で圧縮強度試験を行った。表-2.7に圧縮強度試験の結果の一覧を示す。

表-2.7 圧縮強度試験結果一覧

短繊維			圧縮強度 (N/mm ²)		靱性係数 (N/mm ²)		静弾性係数 (N/mm ²)	
種類	長さ (mm)	混入率 Vol×(%)	材令07日	材令28日	材令07日	材令28日	材令07日	材令28日
PVA	40	0.3	14.47	18.16	11.13	13.27	16076	16026
PP	48	0.3	12.58	15.19	10.72	12.25	13831	11831
PET	40	0.3	9.08	11.00	7.51	8.69	11212	12232

(1)圧縮強度

図-2.6に圧縮強度の結果を示す。図より、PVA短繊維、PP短繊維、PET短繊維の順で強度が低くなっていることがわかる。PVA短繊維、PP短繊維は材令28日で15N/mm²を越えているが、PET短繊維は11N/mm²と大変強度が低い。PET短繊維のみ現場養生期間1日で運搬したため、強度発生に影響を及ぼした可能性が考えられる。

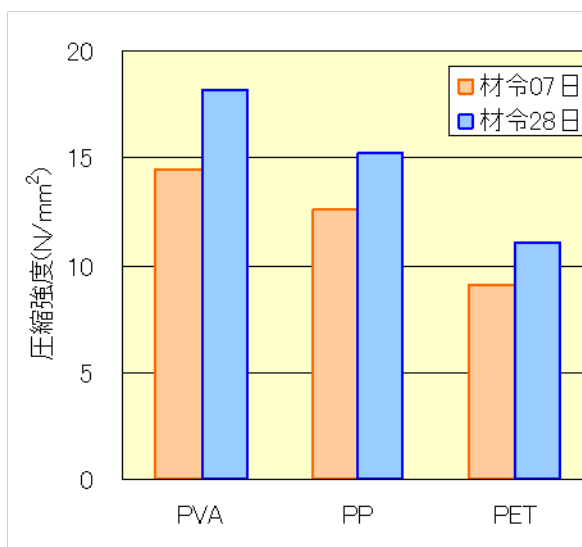


図-2.6 圧縮強度

(2) 圧縮靱性係数

図-2.7 に圧縮靱性係数の結果を示す。図より、PVA 短繊維、PP 短繊維は同程度であるが、PET 短繊維のみ圧縮靱性が低くなっていることがわかる。PVA 短繊維、PP 短繊維は材令 28 日で $10\text{N}/\text{mm}^2$ を越えているが、PET 短繊維は $8\text{N}/\text{mm}^2$ 程度と靱性が低い。PET 短繊維のみ現場養生期間 1 日で運搬したため、強度発生に影響を及ぼした可能性が考えられる。

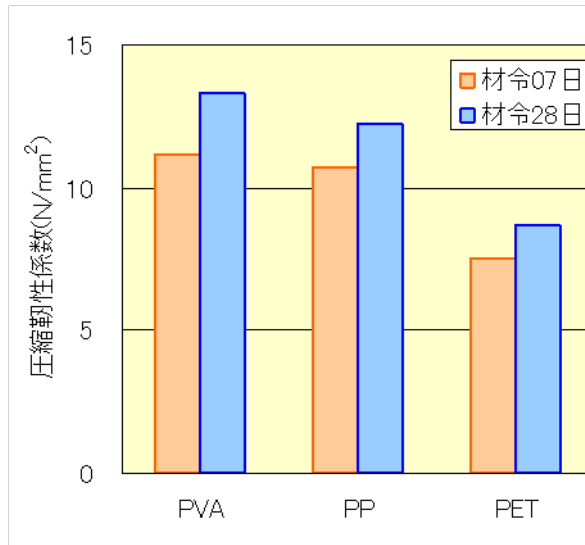


図-2.7 圧縮靱性係数

(3) 静弾性係数

図-2.8 に静弾性係数の結果を示す。図より、PVA 短繊維は $15,000\text{N}/\text{mm}^2$ 、PP 短繊維、PET 短繊維は $12,000\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の静弾性係数となっていることがわかる。PP 短繊維で材令 7 日より材令 28 日の静弾性係数が若干低下しているのは、圧縮時の破壊状況が影響を及ぼしたためと考えられる。

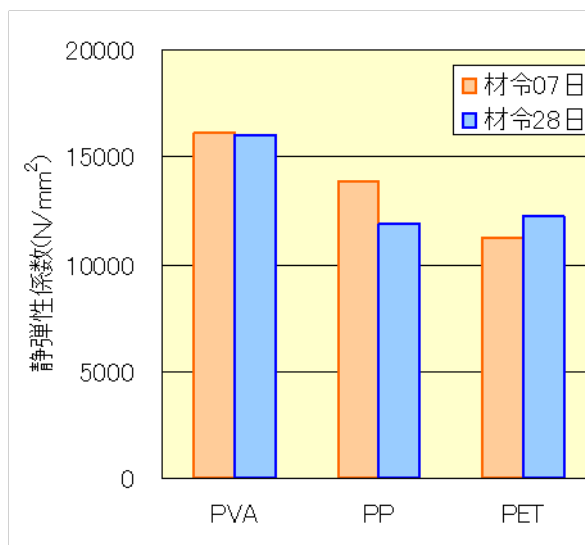


図-2.8 静弾性係数

2.4 曲げ強度試験結果

現地試験にて作製した供試体について、曲げ強度試験を行った。表-2.8 に曲げ強度試験結果の一覧を示す。

表-2.8 曲げ強度試験結果

短繊維			曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ靱性係数 (N/mm ²)
種類	長さ (mm)	混入率 Vol×(%)	材令28日	材令28日
PVA	40	0.3	2.70	1.20
PP	48	0.3	2.55	1.52
PET	40	0.3	1.96	0.88

(1)曲げ強度

図-2.9 に曲げ強度の結果を示す。図より、PVA 短繊維、PP 短繊維は同程度であるが、PET 短繊維のみ圧縮靱性が低くなっていることがわかる。PVA 短繊維、PP 短繊維は 2.5N/mm²を越えているが、PET 短繊維は 2N/mm²以下と曲げ強度が低い。圧縮供試体と同じく、PET 短繊維のみ現場養生期間 1 日で運搬したため、強度発生に影響を及ぼした可能性が考えられる。

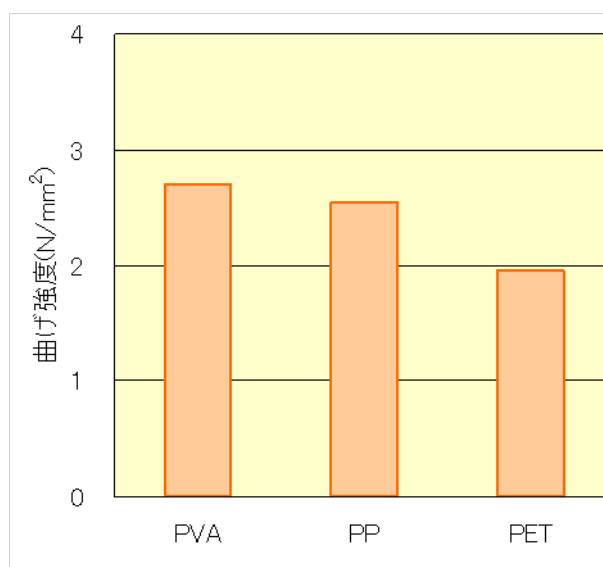


図-2.9 曲げ強度

(2) 曲げ靱性係数

図-2.10 に曲げ靱性係数の結果を、図-2.11 に荷重と変位の関係を示す。図より、PP 短繊維でクラック発生後の残存荷重が高く持続していることから、この3種の短繊維ではPP短繊維が最も曲げ靱性が高いことがわかる。PET短繊維の曲げ靱性が $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以下と著しく低いが、圧縮供試体と同じくPET短繊維のみ現場養生期間1日で運搬したため、強度発生に影響を及ぼした可能性が考えられる。

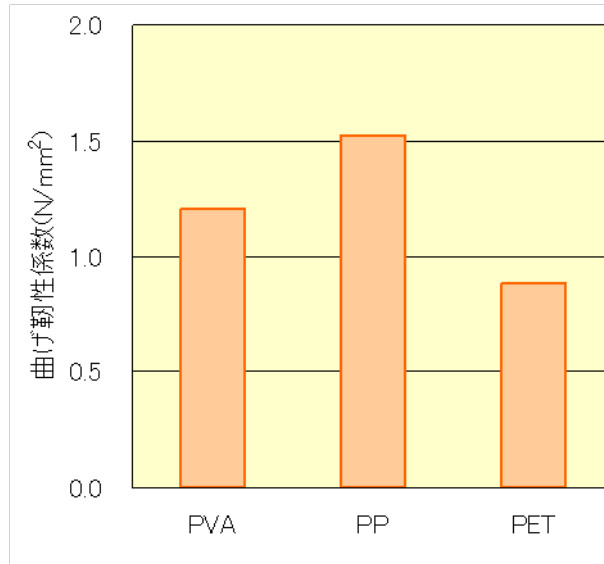


図-2.10 曲げ靱性係数

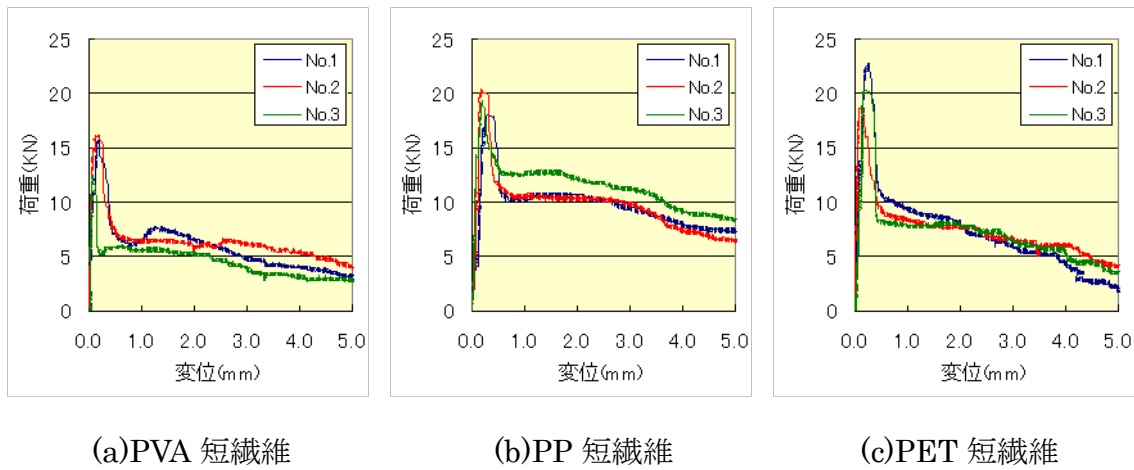


図-2.11 曲げ試験 荷重-変位曲線

2.5 まとめ

(1) フレッシュ性状について

ベースコンクリートに各短繊維を混入することによるフレッシュ性状は、スランプロスは3cm以内、空気量の変化は2%以内の増加、コンクリート温度にはほぼ変化がないことが分かった。これはPVA短繊維、PP短繊維、PET短繊維の3種全て同じである。また、繊維混入率は設定混入率0.3%に対する実測混入率の割合が90%以上という結果から、短繊維がアジテータ車で均一に拡散されていることが確認出来た。

(2) 力学特性について

圧縮強度試験では、圧縮強度、圧縮靱性係数でPET短繊維がPVA短繊維、PP短繊維よりも低い値を示した。現場配合では高炉セメントを使用しているが、高炉セメントは低温時に硬化が若干遅れる性質を持つ。PET短繊維のみ圧縮強度が低かったのは、現場養生期間1日で運搬したことにより、初期養生時の温度低下や運搬時の振動が強度発生に影響を及ぼした可能性が考えられる。曲げ強度試験では、曲げ靱性でPP短繊維がPVA短繊維、PET短繊維を上回る値を示した。しかしながら今回1ケースのみの結果であるため、トンネル打設に用いる配合にて今後も力学特性試験を行い、データの蓄積および検証をする必要があると考えられる。

第3章 構造特性の評価

3.1 実験概要

短繊維混入高靱性コンクリートの変位制限構造への適用を目的として、変位制限構造を模擬した RC 柱(片持ち梁)試験体による静的および衝撃荷重載荷実験を実施した。

表-3.1 に試験項目一覧を、表-3.2 に試験体材料配合および強度一覧を示す。試験体種類は短繊維混入の有無、スターラップの有無を変化させた4種類である。これに荷重方法を3種(静的・衝撃繰り返し・衝撃単一)として計12項目で実施した。

図-3.1(a)に試験体概要を示す。スターラップの有無による比較検討も行った。図-3.1(b)に実験状況を示す。実験は RC 柱を横倒しにした片持ち梁状態にして静荷重および衝撃荷重を行った。静荷重実験では荷重点に矩形の荷重板を用いた。

表-3.1 試験項目一覧

試験番号	試験体名	スターラップ	短繊維混入率 (Vol×%)	コンクリート強度 (N/mm ²)	荷重方法		衝突速度 (m/s)
No.1	F0-N	無し	0	43	静的		/
No.2	F0-S	有り	0	43	静的		
No.3	F1-N	無し	1	43	静的		
No.4	F1-S	有り	1	43	静的		
No.5	V0S0-II	無し	0	43	衝撃	繰り返し	1~4
No.6	V0S1-II	有り	0	43	衝撃	繰り返し	1~5
No.7	V1S0-II	無し	1	43	衝撃	繰り返し	1~5
No.8	V1S1-II	有り	1	43	衝撃	繰り返し	1~6
No.9	V0S0-IS	無し	0	43	衝撃	単一	5
No.10	V0S1-IS	有り	0	43	衝撃	単一	6
No.11	V1S0-IS	無し	1	43	衝撃	単一	6
No.12	V1S1-IS	有り	1	43	衝撃	単一	7

表-3.2 コンクリートの配合一覧

V _f (vol.%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				SP C× (%)	圧縮強度 (MPa)
		W	C	S	G		
0	48	162	337	887	1015	-	44.0
1.0	50	170	338	1150	729	1.13	53.1

SP: 高性能減水剤

表-3.3 に PVA 短繊維の寸法および材料特性値を示す。鉄筋の降伏強度は、SD295D6 および SD345D29 においてそれぞれ 369、393MPa であった。本実験における測定項目は、荷重、載荷点変位(以後、変位)および鉄筋ひずみであり、それぞれ静荷重測定用ロードセル、非接触式レーザ変位計およびひずみゲージにより測定している。なお、これらの計測機器からの出力データは、デジタルメモリに一括収録している。

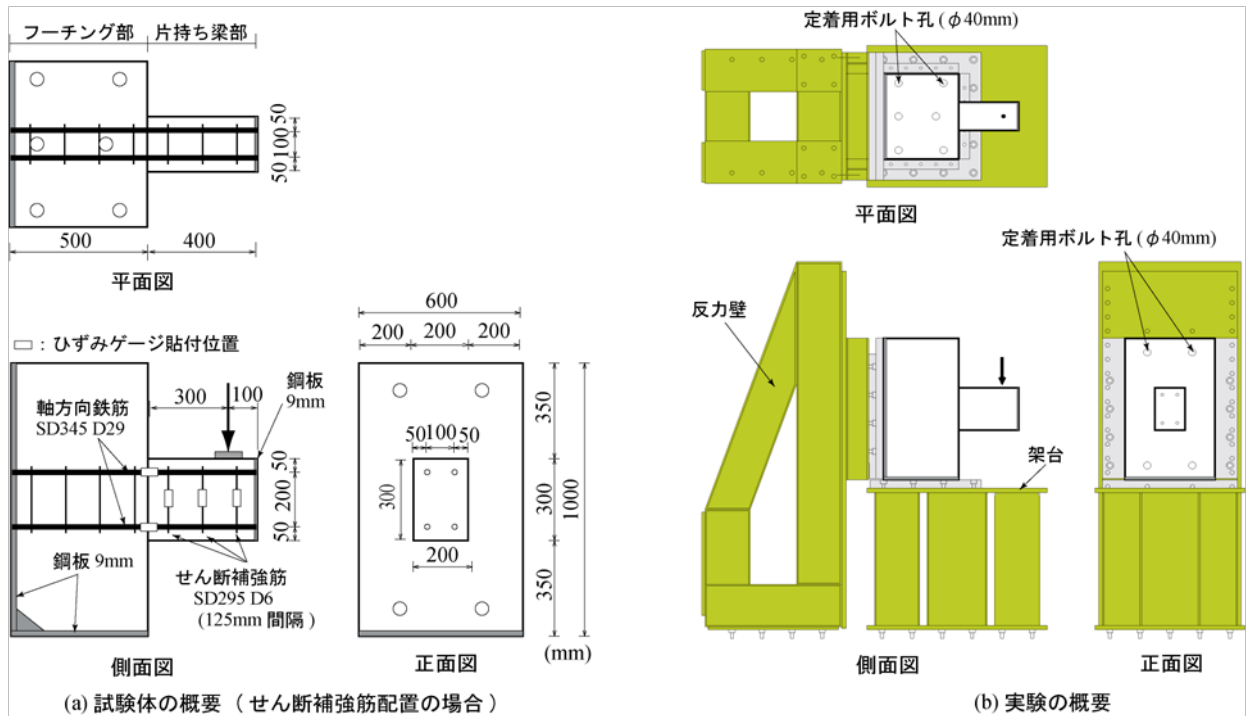


図-3.1 試験体の概要

表-3.3 PVA 短繊維の寸法および材料特性値

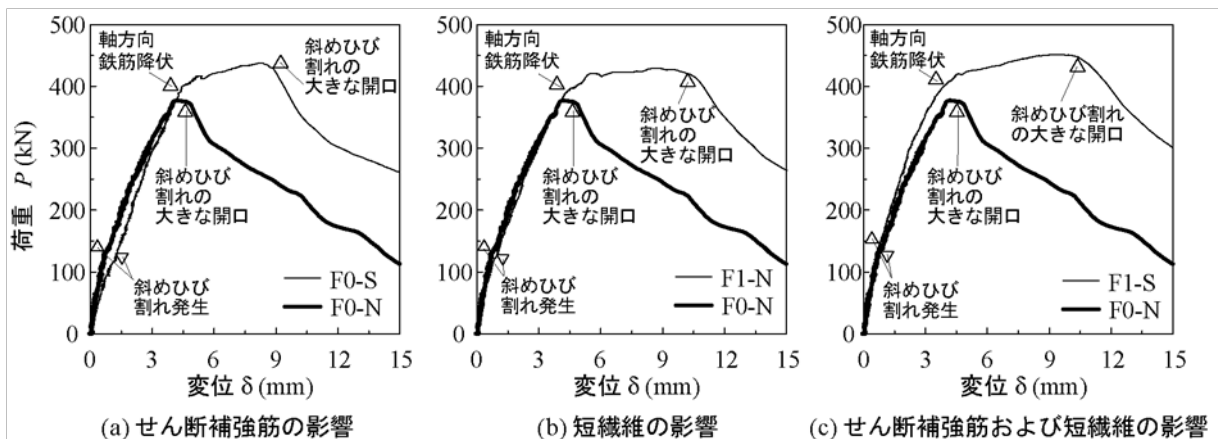
長さ l (mm)	直径 d (mm)	アスペクト比 l/d	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

3.2 実験結果

3.2.1 静的载荷実験

(1) 荷重－変位関係

図－3.2にRC片持ち梁の耐荷性状に及ぼすせん断補強筋およびPVA短繊維の影響を検討するため、F0-S、F1-NおよびF1-S試験体の荷重－変位関係をF0-N試験体の結果と比較して示す。図より、せん断補強筋や短繊維を用いていないF0-N試験体は、荷重 $P=130\text{kN}$ 程度で斜めひび割れが発生するものの、その後も荷重がほぼ線形的に増加していることがわかる。また、最大荷重到達後、荷重が急激に低下してせん断破壊に至っていることがわかる。これに対し、F0-S、F1-NおよびF1-S試験体は、F0-N試験体の場合と同様か若干大きい荷重レベルで斜めひび割れが発生し、その後 $P=400\text{kN}$ 程度で軸方向鉄筋の降伏により剛性勾配が大きく低下していることがわかる。また、軸方向鉄筋降伏後は荷重が漸増するものの、変位 $\delta=9\sim 11\text{mm}$ で斜めひび割れの大きな開口により急激に低下している。このことから、短繊維やせん断補強筋およびこれらの併用によってRC片持ち梁のせん断耐力が向上し、破壊モードが軸方向鉄筋の降伏を伴わないせん断破壊から、降伏後のせん断破壊に移行していることがわかる。



図－3.2 荷重－変位関係に及ぼすせん断補強筋およびPVA短繊維の影響

図-3.3 に各試験体の荷重-変位関係を示す。図より、せん断補強筋を用いた F0-S 試験体と PVA 短繊維を混入した F1-N 試験体は、変位 $\delta = 8 \text{ mm}$ 程度までほぼ同様の耐荷性状を示していることがわかる。その後、F0-S 試験体は荷重が急激に低下するのに対し、F1-N 試験体の場合は変位が $\delta = 11 \text{ mm}$ 程度に達した時点で荷重が低下している。このことから、最大耐力は短繊維混入率 $V_f = 1\%$ およびせん断補強筋比 $p_w = 0.25\%$ の場合でほぼ同様であり、変形性能は $V_f = 1\%$ の場合が $p_w = 0.25\%$ の場合よりも高いことが明らかになった。また、せん断補強筋と PVA 短繊維を併用した F1-S 試験体は、他の試験体よりも剛性が高く、かつ最大荷重も大きいことより、短繊維とせん断補強筋がともにせん断力を分担していることがわかる。

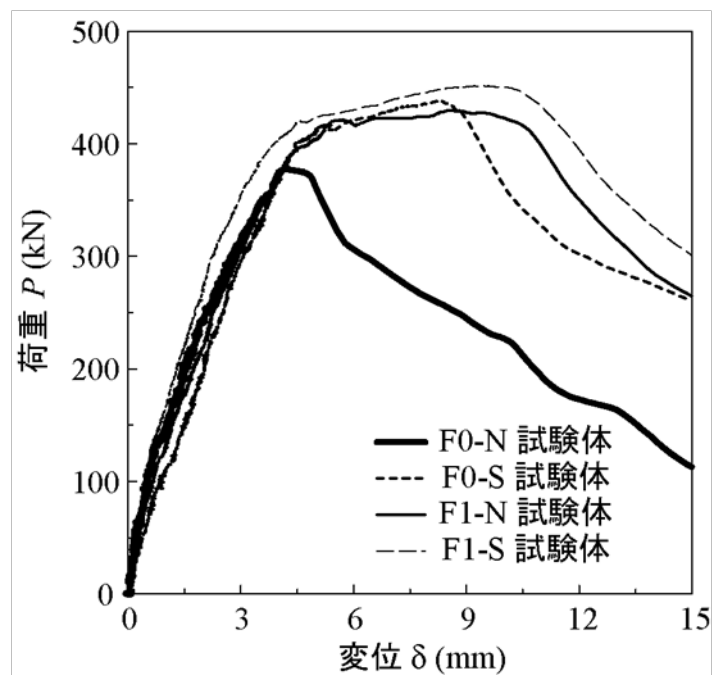
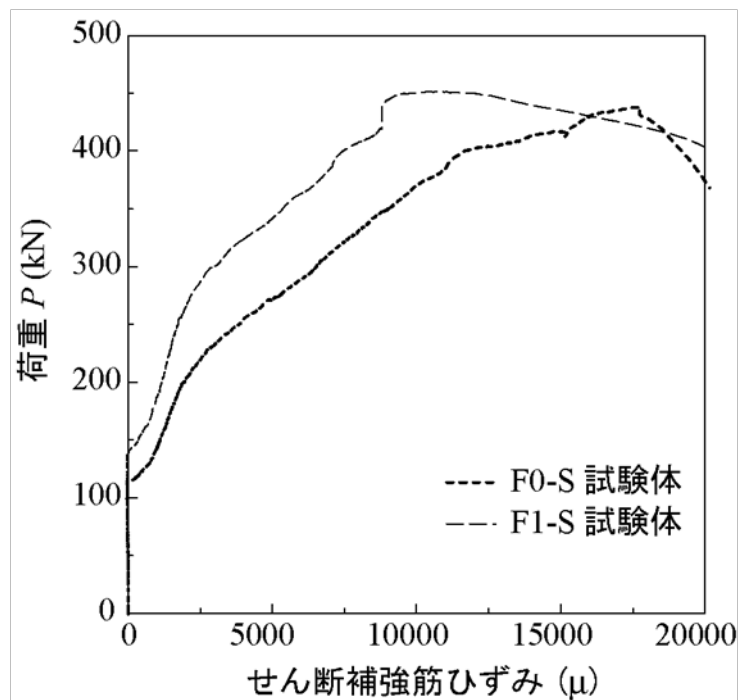


図-3.3 各試験体の荷重-変位関係の比較

(2)荷重－せん断補強筋ひずみ関係

図－3.4に、せん断補強筋を配置した F0/I-S 試験体に関する荷重－せん断補強筋ひずみ関係を示す。なお、実験では両試験体において、斜めひび割れが最もフーチング部に近い位置のせん断補強筋を横切っていることを確認していることより、ここでは同せん断補強筋の発生ひずみを対象に検討することとした。

図より、F0/I-S 試験体は、それぞれ荷重 P が 110kN および 140 kN 程度に至った時点でひずみを生じていることがわかる。このことから、短繊維を混入することにより斜めひび割れの発生荷重が増大していることがわかる。また、同一荷重時におけるせん断補強筋ひずみは、F0-S 試験体よりも F1-S 試験体の場合の方が小さい。これは、短繊維の架橋効果により斜めひび割れの開口が抑制されたためと考えられる。このような性状は、既往の鋼繊維を用いた RC 梁の載荷実験の場合と同様である。このことから、PVA 短繊維はせん断補強筋を併用する場合においても、その架橋効果により RC 片持ち梁のせん断力を分担することが期待できると考えられる。



図－3.4 荷重－せん断補強筋ひずみ関係の比較

(3)破壊性状

写真-3.1に各試験体の最大荷重時および終局時におけるひび割れ分布性状を示す。なお、F0-N 試験体は他の試験体よりも小さな荷重でせん断破壊により終局に至っていることから、F0-N 試験体の最大荷重時 ($P = 378 \text{ kN}$) における各試験体のひび割れ分布性状についても比較して示す。また、終局時としては、各試験体のひび割れの開口が顕著となる変位 15 mm 時の状況を示す。

写真より、F0-N 試験体の最大荷重時には、いずれの試験体においても荷重部の鋼製プレート端部からフーチング側に向かって斜めひび割れが発生していることがわかる。各試験体のひび割れ性状を比較すると、F0-N、F0-S、F1-N、F1-S 試験体の順に斜めひび割れの本数が多いことがわかる。次に、F0-S、F1-N および F1-S 試験体の最大荷重時のひび割れ性状を見ると、いずれの試験体においても F0-N 試験体の最大荷重時よりもひび割れ幅が大きく、斜めひび割れの本数も多くなっていることがわかる。なお、片持ち梁の固定端上部には曲げひび割れの開口も見られる。

終局時 (変位 15 mm) の結果より、F0-N 試験体の場合には、1本の斜めひび割れが大きく開口していることがわかる。F0-S 試験体は、比較的幅の広いひび割れが2~3本発生している。また、F1-N 試験体は、斜めひび割れの周辺に微細なひび割れが多数発生していることがわかる。F1-S 試験体は、比較的幅の広いひび割れと微細なひび割れが複合的に発生しており、短繊維とせん断補強筋がともにせん断力に抵抗していることが伺われる。

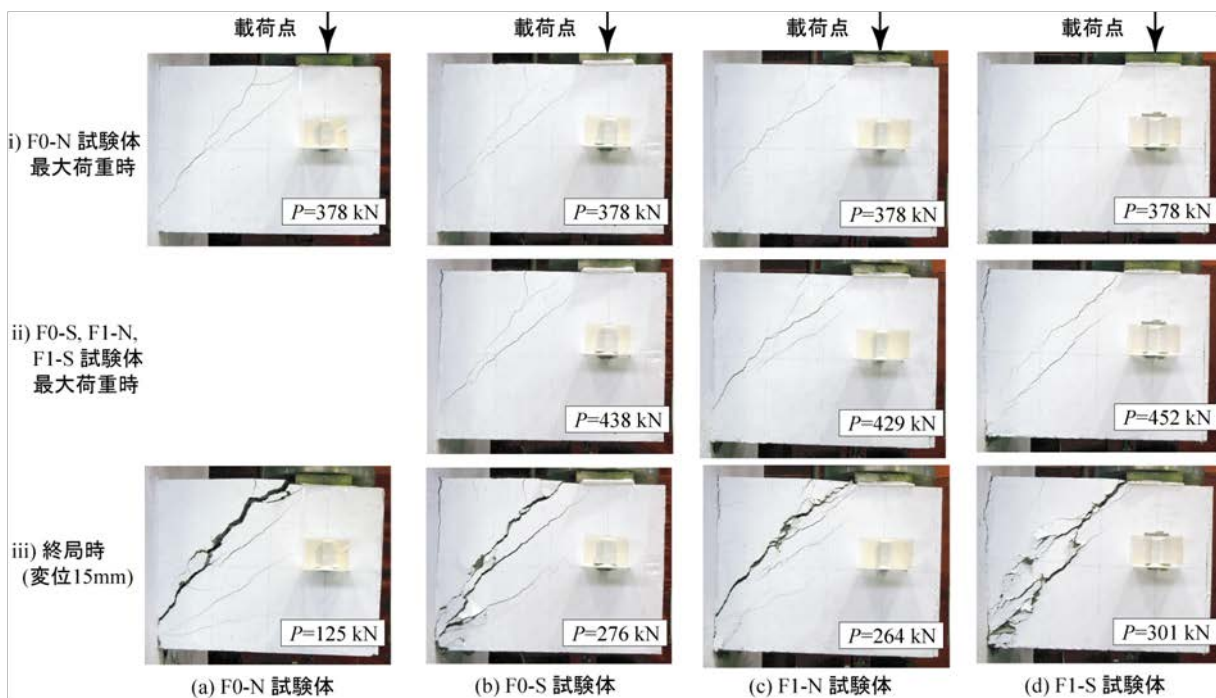


写真-3.1 各試験体のひび割れ進展状況

3.2.2 衝撃載荷実験

表-3.4 に衝撃載荷実験結果一覧を示す。また、この結果から作図した重錘衝撃荷重と衝突速度の関係を図-3.5 に、最大変位と衝突速度の関係を図-3.6 に示す。

繰り返し載荷では衝突速度を上げていき破壊性状から終局を判断しているが、各々の最大衝突速度において重錘衝撃力が頭打ちになってきているため、繰り返し載荷としての確な終局に至ったと考えられる。繰り返し載荷の包絡線を比較すると VOS0 の吸収エネルギーが一番低く、VOS1 と V1S0 で同程度となり、V1S1 で最も高い吸収エネルギーとなった。

繰り返し載荷では衝撃載荷を繰り返しているため、試験体への損傷も累積する。よって単一載荷にて試験体固有の耐衝撃性能の評価を行うが、単一載荷は繰り返し載荷の最大衝突速度より 1 m/s 上げて重錘衝撃力を作用させた。単一載荷の破壊性状についてもいずれの試験体も斜めひび割れが大きく開口してせん断破壊で終局に至ったことから、単一載荷においても吸収エネルギーの順位は繰り返し載荷と同様となった。VOS0 で衝突速度 V=5m/s、VOS1 と V1S0 で衝突速度 V=6m/s、V1S1 で衝突速度 V=7m/s であることから、耐衝撃性をポテンシャルエネルギーで比較すると、VOS0 に対して VOS1 と V1S0 で 1.4 倍、V1S1 では 2 倍程度向上する結果となった。

1

表-3.4 衝撃載荷実験結果一覧

短繊維混入率	載荷方法	試験体名	衝突速度	重錘	最大変位
			(m/s)	衝撃荷重 (kN)	
0	繰り返し	VOS0-II	1	293.85	0.70
			2	665.20	1.56
			3	1068.02	3.41
			4	1155.73	3.82
	単一	VOS0-IS	5	1792.50	14.64
1	繰り返し	V1S0-II	1	278.12	3.19
			2	686.80	5.46
			3	1048.90	8.35
			4	1276.62	12.41
	5	1269.44	19.95		
単一	V1S0-IS	6	1940.17	20.45	
0	繰り返し	VOS1-II	1	273.21	2.68
			2	558.27	4.68
			3	1056.40	8.27
			4	1330.93	12.23
	5	1206.59	25.00		
単一	VOS1-IS	6	1960.00	19.97	
1	繰り返し	V1S1-II	1	302.49	2.57
			2	690.63	4.44
			3	1002.59	7.03
			4	1292.91	11.46
			5	1513.48	16.61
			6	1326.65	27.30
	単一	V1S1-IS	7	2478.03	24.81

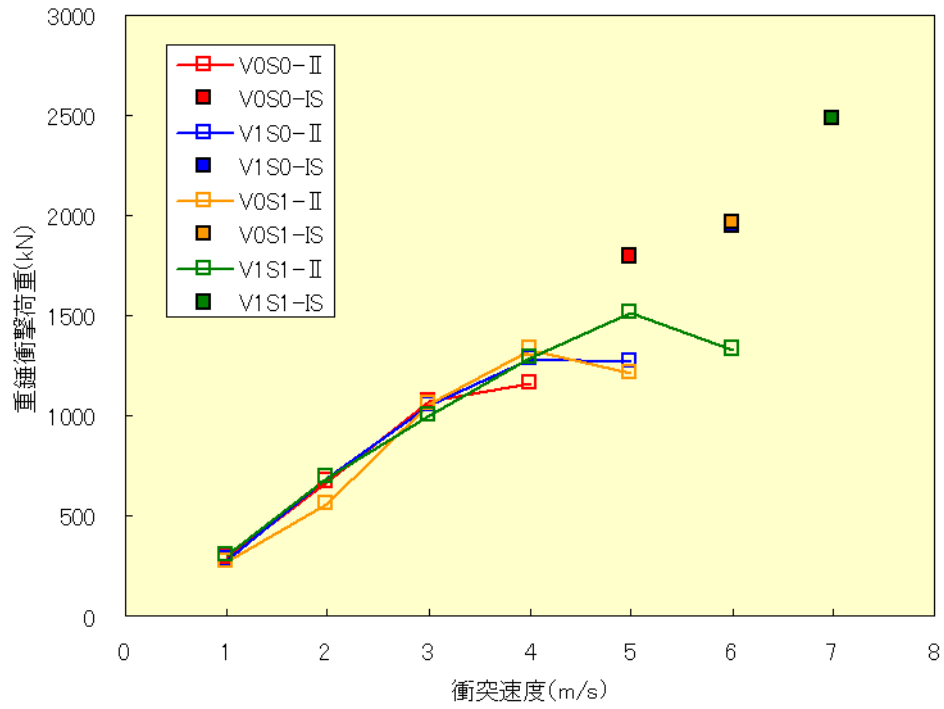


図-3.5 重錘衝擊荷重－衝突速度関係

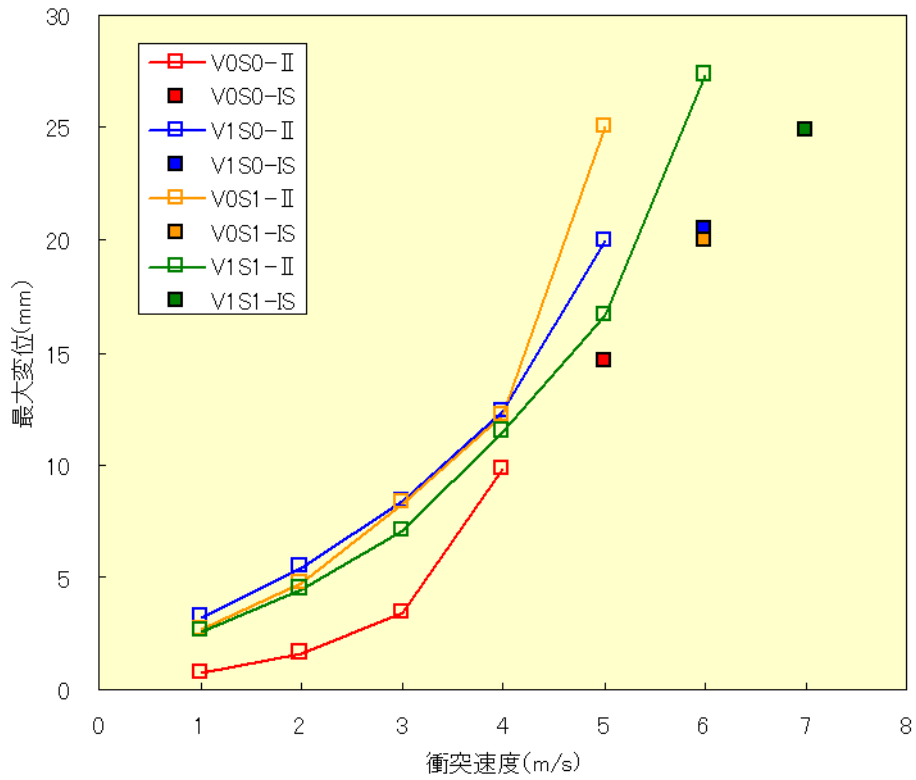
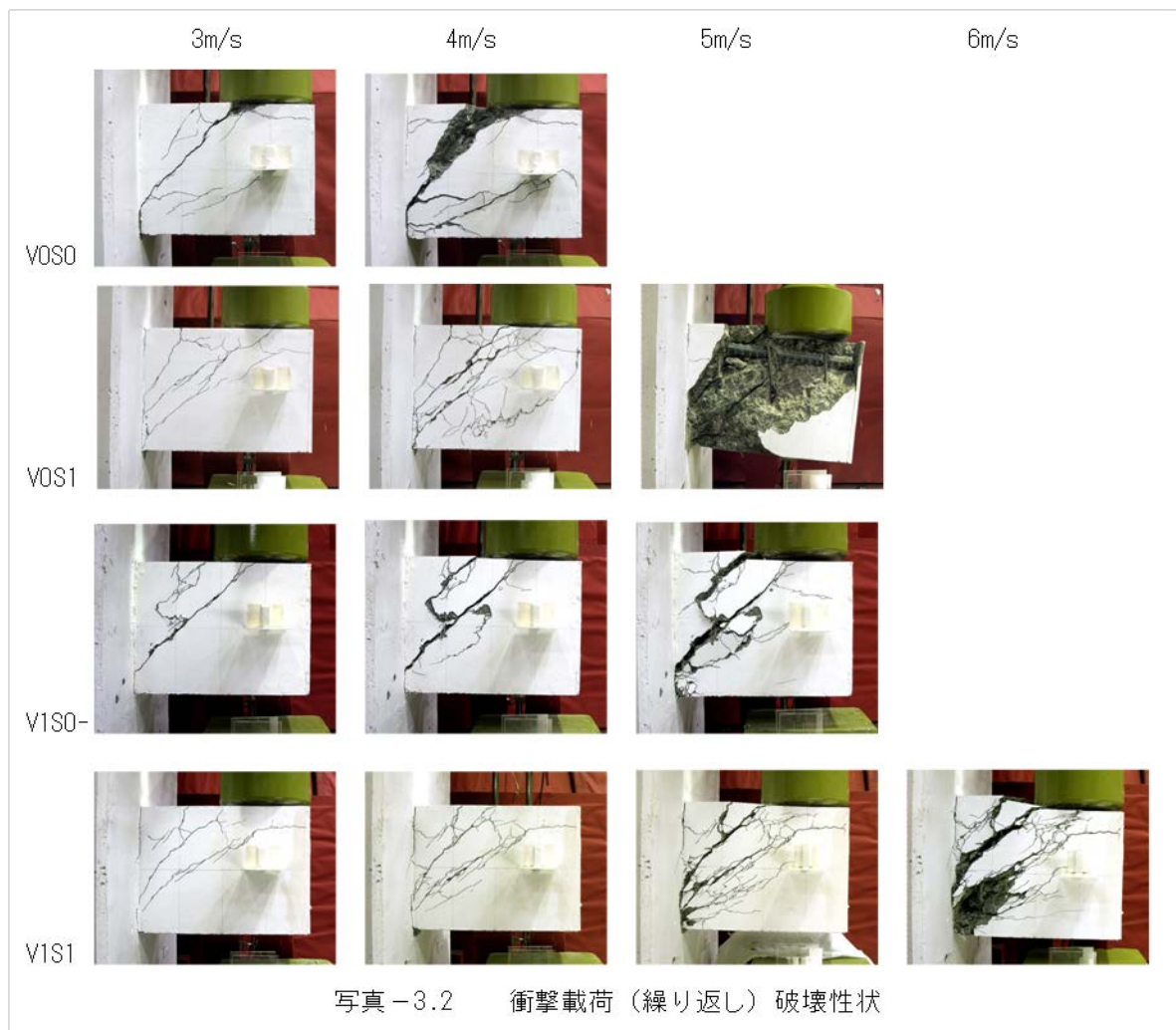


図-3.6 最大変位－衝突速度関係

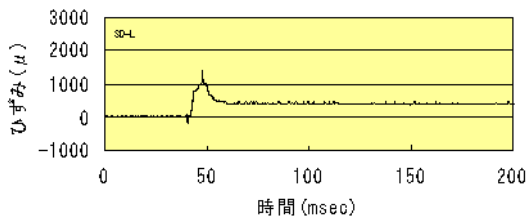
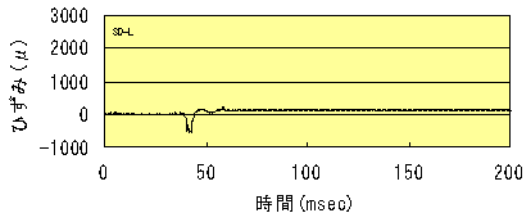
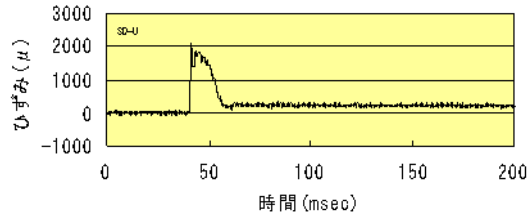
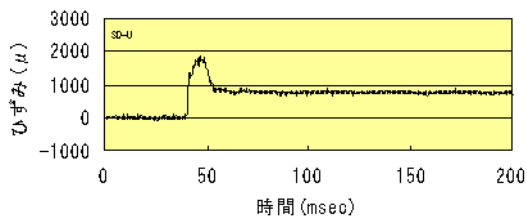
(1) 繰り返し载荷の破壊性状

写真-3.2 に衝突速度 3m/s 以降の繰り返し载荷の破壊性状を示す。いずれの試験体においても、せん断スパンに渡って斜めひび割れが大きく開口してせん断破壊にて終局に至っている。VOS0 試験体は衝突速度 4m/s で終局に至り、斜めひび割れの上縁部で剥落が発生している。VOS1 試験体は衝突速度 5m/s で終局に至り、斜めひび割れの全体に渡って大きく剥落している。これはスターラップを配したことでコンクリートの被り厚が減少したことが要因と考えられる。VIS0 試験体も衝突速度 5m/s で終局に至っているが、大きな剥落には至っていない。これはスターラップを配さずに短繊維を混入していることで、被り厚を確保しているとともに短繊維の架橋効果によるものと考えられる。VIS1 試験体は衝突速度 6m/s で終局に至っている。こちらは斜めひび割れ下縁部で剥落が発生している。これは短繊維が混入されているものの、スターラップを配していることで被り厚が減少しているためと考えられる。しかしながら VOS1 試験体と比較すると衝突速度が増加しているにもかかわらず、短繊維の架橋効果により飛躍的に剥落の度合いは減少している。



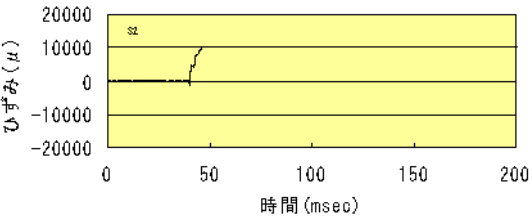
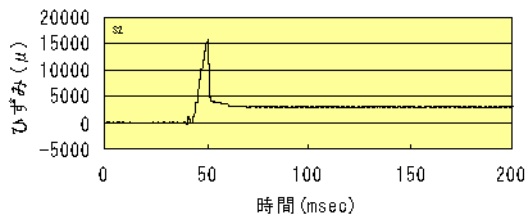
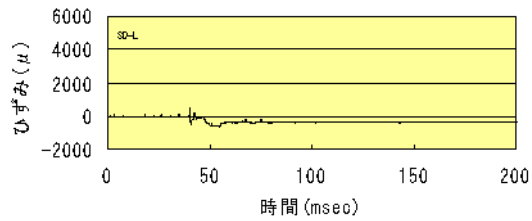
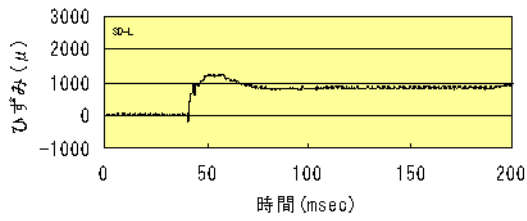
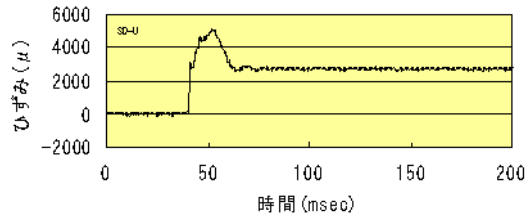
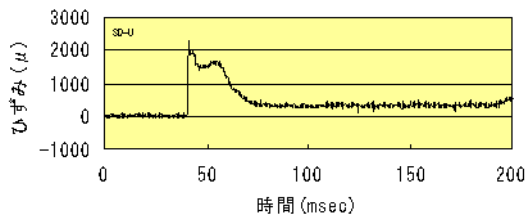
(2) 各種鉄筋の応答ひずみ波形

図-3.7に繰り返し载荷の終局における各種鉄筋の応答ひずみ波形を示す。V0S0 試験体は上側主鉄筋に強い引張力が生じて降伏ひずみ近くのひずみが発生しているが、その時間は極めて短く最終的には 1,000 μ 程度の残留ひずみとなっている。一方、下側主鉄筋には瞬間的に圧縮側に数 100 μ のひずみが発生している。このことから、破壊モードが曲げ破壊に近かったことが推察される。V1S0 試験体も上側主鉄筋に引張側の降伏ひずみ近くのひずみが発生しているが、その時間は極めて短く、最終的には 250 μ 程度の残留ひずみとなっている。下側主鉄筋には瞬間的に引張側に 1,400 μ のひずみが発生して 400 μ 程度の残留ひずみとなった。このことから破壊モードはせん断破壊が卓越して終局に至ったものと考えられる。V0S1 試験体も上側主鉄筋に引張側の降伏ひずみ近くのひずみが発生しているが、その時間は極めて短く、最終的には 300 μ 程度の残留ひずみとなった。また、下側主鉄筋には引張側に 1,000 μ 程度のひずみが発生してほぼそのまま残留している。スターラップにも大きな引張力が働いて降伏に至っていることから、破壊モードはせん断破壊が卓越して終局に至ったものと考えられる。V1S1 試験体は上側主鉄筋に大きな引張力が生じて降伏に至っている。一方、下側主鉄筋には圧縮側に 300 μ 程度のひずみが発生し、ほぼそのまま残留している。スターラップが降伏しているためせん断破壊が卓越して終局に至ったものと考えられるが、破壊モードは曲げ破壊に近かったことが推察される。



V0S0-4m/s

V1S0-5m/s



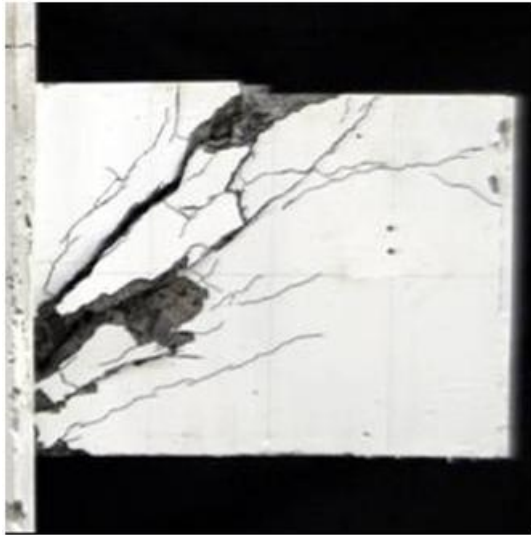
V0S1-5m/s

V1S1-6m/s

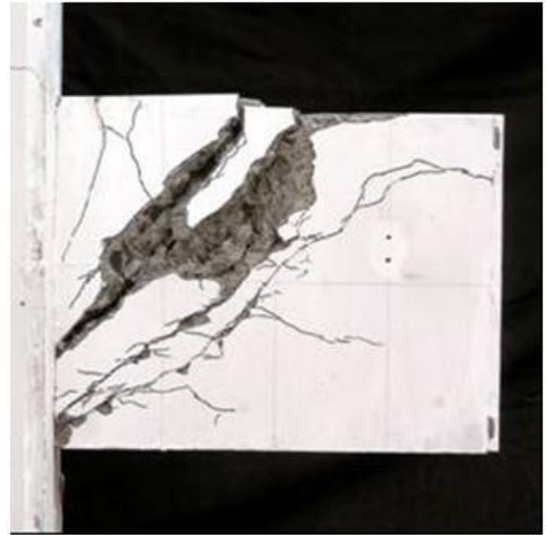
図-3.7 各種鉄筋のひずみ応答波形(繰り返し載荷終局)

(3) 単一載荷の破壊性状

写真-3.3 に単一衝撃載荷の破壊性状を示す。いずれの試験体も、せん断スパンに渡って斜めひび割れが大きく開口し、せん断破壊で終局に至っている。短繊維が混入されていない V0S0 と V0S1 試験体は斜めひび割れに沿って大きく剥落しているのに対し、短繊維が混入されている V1S0 と V1S1 試験体は短繊維の架橋効果により大きな剥落が発生していないことがわかる。



V0S0-5m/s



V0S1-6m/s



V1S0-6m/s

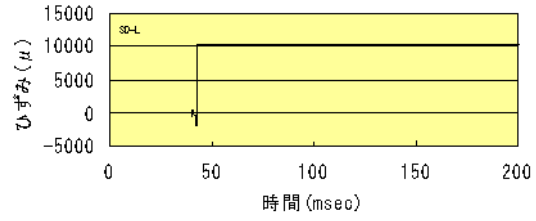
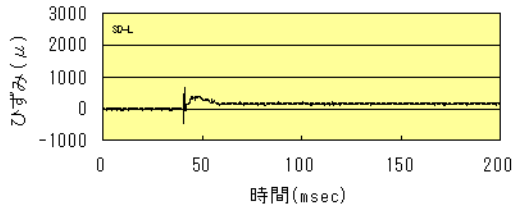
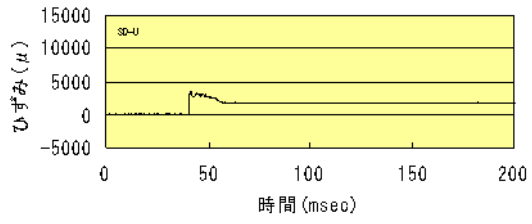
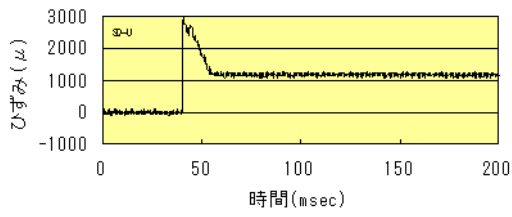


V1S1-7m/s

写真-3.3 衝撃載荷(単一)破壊性状

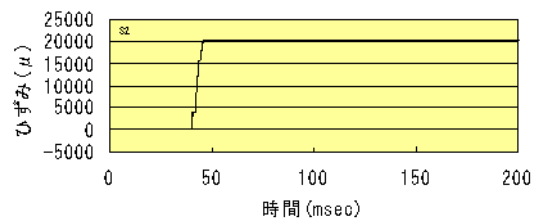
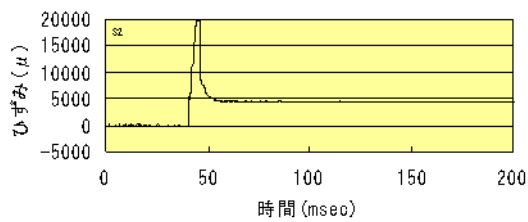
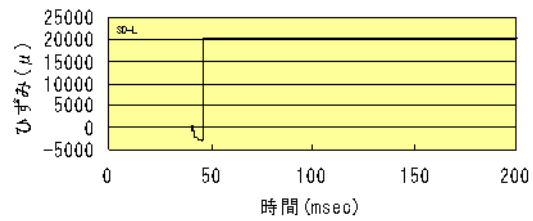
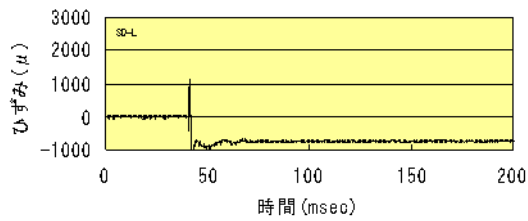
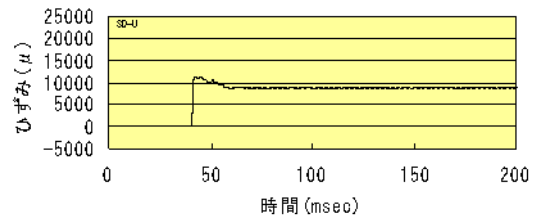
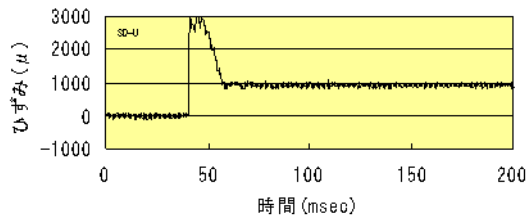
(4) 単一載荷の応答波形

図-3.8に単一載荷による各種鉄筋の応答ひずみ波形を示す。VOSO試験体では上側主鉄筋に降伏ひずみを越えるひずみが発生しているものの、その時間は短く主鉄筋の降伏には至らず、残留ひずみが $1,000\mu$ 程度となっている。このことからせん断破壊が卓越して終局に及んだものと考えられる。VOS1試験体ではスターラップに大きな引張力が発生していることから、せん断破壊が卓越して終局に至ったものと考えられるが、上側主鉄筋にも短時間内ではあるが降伏ひずみを越えるひずみが発生した。しかし残留ひずみが $1,000\mu$ 程度と、主鉄筋の降伏には至っていない。また、下側主鉄筋には圧縮力が発生して $1,000\mu$ 程度のひずみが生じて残留している。これらのことからスターラップによるせん断補強効果により破壊性状が曲げ破壊に近い傾向となったと考えられる。VISO試験体では上側主鉄筋と下側主鉄筋の両方が降伏している。また、上側主鉄筋と下側主鉄筋の両方ともに大きな引張力を受けているが、上側主鉄筋よりも下側主鉄筋の方が大きな引張力を受けている。このことからせん断破壊が卓越して終局に至ったものと考えられる。VIS1試験体でも上側主鉄筋と下側主鉄筋の両方が大きな引張力を受けて降伏に至っているが、下側主鉄筋の方が大きな引張力を受けている。また、スターラップも大きな引張力を受けて降伏していることから、せん断破壊が卓越して終局に至ったものと考えられる。



V0S0-5m/s

V1S0-6m/s



V0S1-6m/s

V1S1-7m/s

図-3.8 各種鉄筋の応答ひずみ波形(単一載荷)

3.3 まとめ

高靱性コンクリート製 RC 柱の静載荷実験についての所見を以下にまとめる。

- ・短繊維混入によるせん断耐力の向上効果はスターラップを配した場合と同程度にまで達する。
- ・短繊維混入とスターラップを同時に配した場合のせん断耐力は飛躍的に向上する。
- ・短繊維混入またはスターラップを配する事でせん断耐力が増加し曲げ破壊モードに近いせん断破壊で終局に至った。

高靱性コンクリート製 RC 柱の衝撃載荷実験についての所見を以下にまとめる

- ・短繊維混入による耐衝撃力の向上効果はスターラップを配した場合と同程度にまで達する。普通コンクリートと比較してポテンシャルエネルギーで評価すると 1.4 倍程度となる。
- ・短繊維混入とスターラップを同時に配した場合の耐衝撃性は、ポテンシャルエネルギーで比較すると 2 倍程度にまで向上する。
- ・短繊維混入により斜めひび割れ近傍の剥落が抑制される。

第4章 コンクリート構造物への効率的な適用方法に関する検討

4.1 剥落抑制の検討

4.1.1 試験概要

トンネル覆工等のコンクリート構造物からのコンクリート片の剥落による第三者被害を効率的に防止できる短繊維種類や混入率の検討を目的に、比較的low混入率の4配合について小型RC梁による載荷試験と小型RC版による押し抜き試験を実施した。表-4.1に配合一覧を、写真-4.1に試験状況を、図-4.1に試験体形状を示す。配合は実際のトンネルの二次覆工に試験施工した配合をベース配合とし、短繊維種類を2種類で混入率を0.15%と0.3%の2種類の計4ケースとした。また、これらの配合の力学特性の基礎である圧縮強度試験、一軸引張試験についても実施した。

表-4.1 配合一覧

短繊維		W/C	s/a	単位量				湿和剤		セメント種類	
種類	vol × (%)			W	C	S	G	空気量 C×(%)	水化促進剤 C×(%)		
RF4000	40mm	0.15	48	50	169	352	912	897	0.20	1A	普通ポルト
RF4000	40mm	0.30	48	50	169	352	912	897	0.20	1A	普通ポルト
ポリウエーブ	48mm	0.15	48	50	169	352	912	897	0.20	1A	普通ポルト
ポリウエーブ	48mm	0.30	48	50	169	352	912	897	0.20	1A	普通ポルト



写真-4.1 試験状況

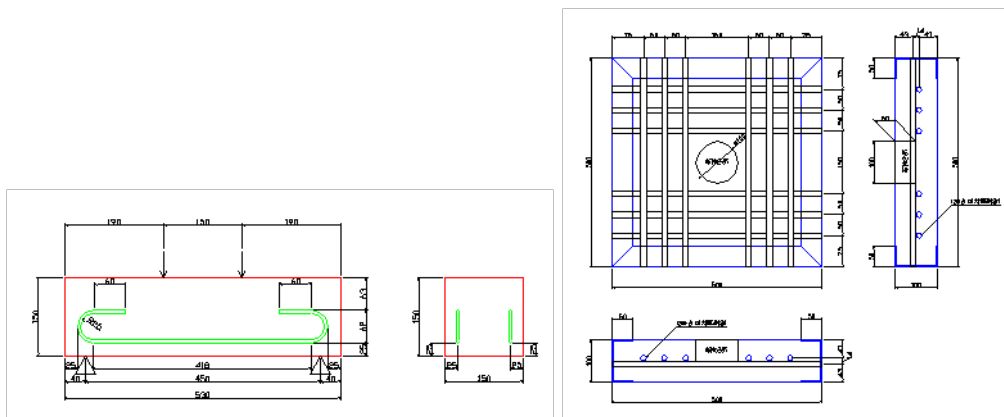


図-4.1 試験体形状

4.1.2 小型 RC 梁載荷試験結果

表-4.2 に曲げ試験結果を、図-4.2 に各ケースでの荷重-変位関係を示す。試験体にひび割れが発生し、鉄筋が降伏して荷重が安定し始める変位 5mm までの載荷荷重を比較した。結果は短繊維 2 種類ともに 0.15% 混入と比較して 0.3% 混入の方が若干高い値を示したが、短繊維種類別の差もほとんど無く、概ね 4 ケース間の差は少ない結果となっている。この試験結果から、低混入率での短繊維種類と混入率の差による曲げ耐力への影響は少ないと推測される。

表-4.2 試験結果一覧

配合名	短繊維			変位5mmのときの荷重(kN)			
	種類	長さ (mm)	混入率 (%)	1	2	3	平均
PVA-0.15	PVA	40	0.15	60.4	61.3	60.8	60.8
PVA-0.30	PVA	40	0.30	60.4	64.3	62.5	62.4
PP-0.15	PP	48	0.15	61.8	59.1	60.1	60.3
PP-0.30	PP	48	0.30	63.7	63.8	66.9	64.8

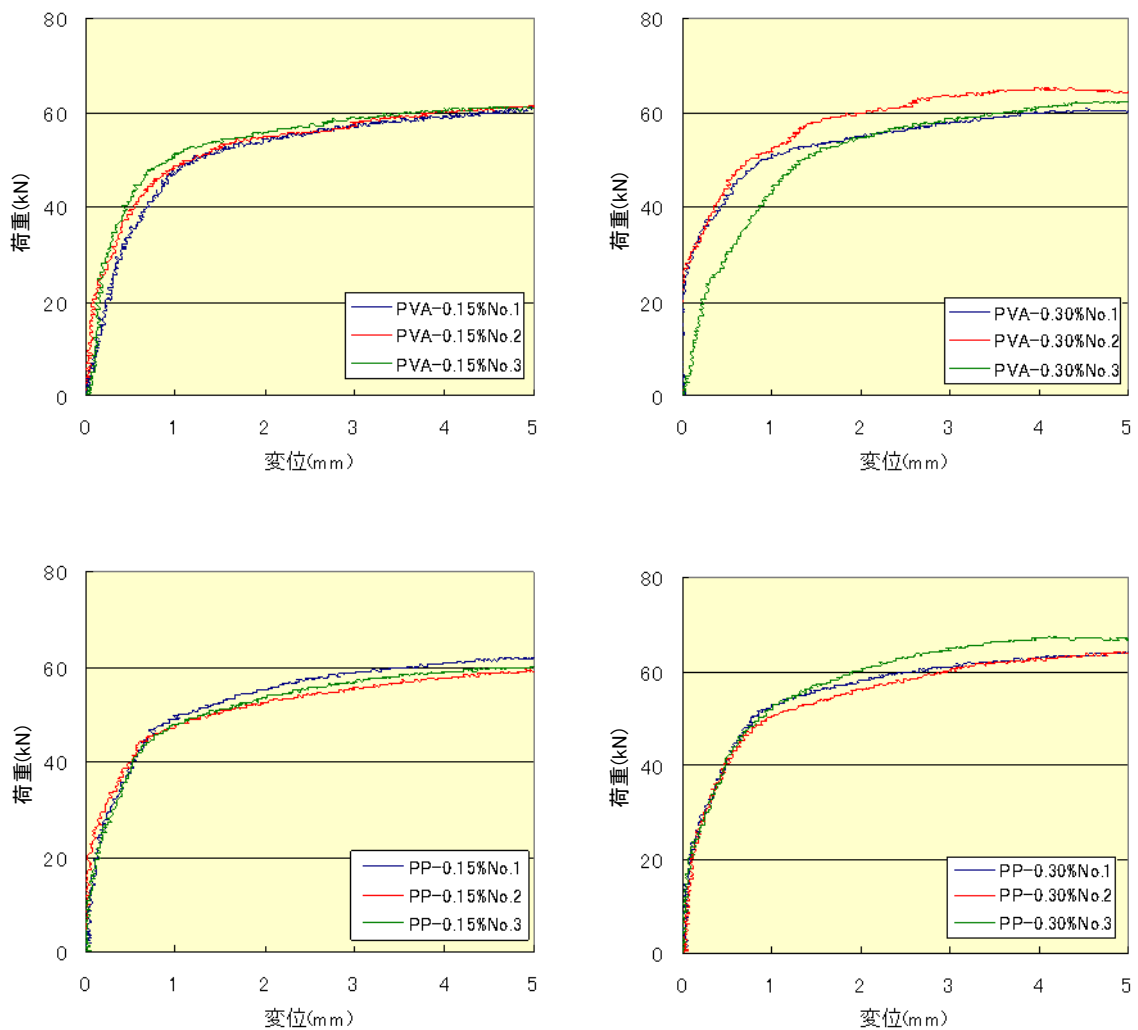


図-4.2 荷重-変位関係

写真-4.2 に各試験体の破壊性状を示す。いずれも曲げ破壊モードで終局を迎えている。短繊維混入率が低いケースではあったが、大きな剥離・剥落は発生せずに終局に至っている。

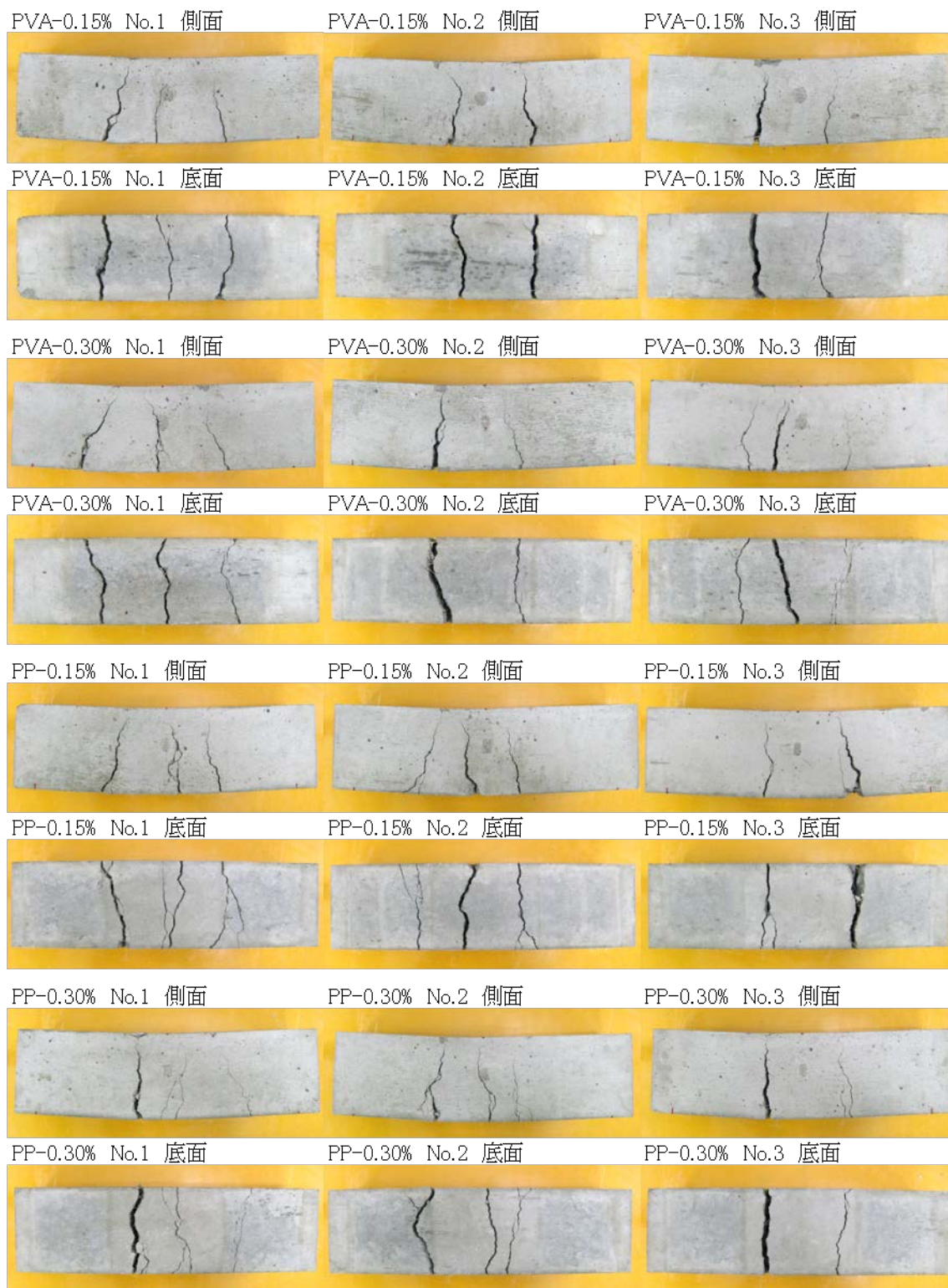


写真-4.2 破壊性状

4.1.3 小型 RC 版載荷試験結果

表-4.3 に試験結果一覧を、図-4.3 に荷重-変位関係を示す。耐荷力については、両方の短繊維共に繊維混入率 0.15%と比較して 0.30%の耐力が向上している。短繊維種別では PP と比較して PVA の耐力が高い結果となった。吸収エネルギーを比較すると PVA-0.30 が最も大きく、PP-0.30 が最も小さくなり、その他の 2 ケースが同程度となっている。PP-0.15 と PP-0.30 で吸収エネルギーの逆転が起きているが、これは後述の圧縮強度の微量なばらつきにより、PP-0.30 のせん断コーンが極端に小さくなったことが要因と考えられる。

表-4.3 試験結果一覧

配合名	短繊維		最大荷重 (kN)	供試体破壊状況
	種類	長さ (mm)		
PVA-0.15	PVA	40	35.6	実験後押し抜き部が剥落
PVA-0.30	PVA	40	42.0	剥落発生せず
PP-0.15	PP	48	33.6	実験後押し抜き部が剥落
PP-0.30	PP	48	36.0	剥落発生せず

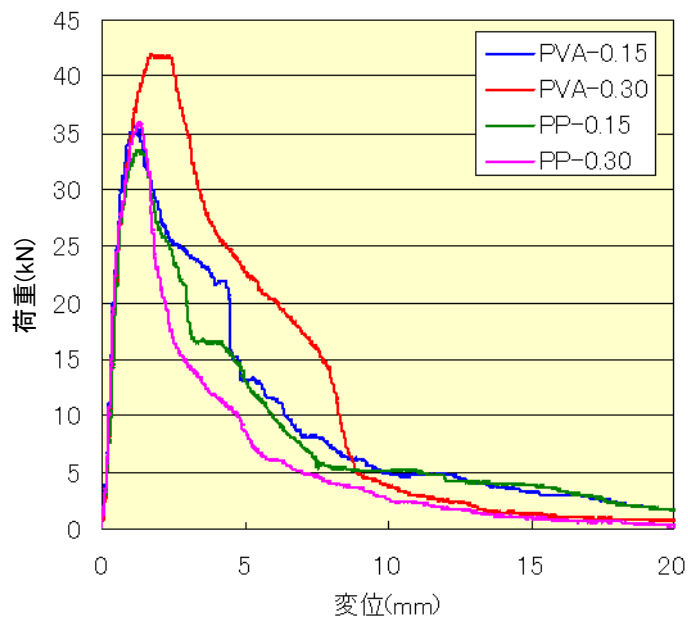


図-4.3 荷重-変位関係

写真-4.3 に変位 20mm における破壊性状を示す。PVA-0.15 と PP-0.15 の 2 ケースは、実験終了後の試験体撤去時にせん断コーン部の剥落が発生した。PVA-0.30 と PP-0.30 は終局時の載荷荷重がほとんど無いにも関わらず、せん断コーン部の剥落は発生していない。また、PP-0.30 を除いてせん断コーン部が鋼製枠にまで達しているため、今後は試験体を薄くするか押し抜き治具の径を細くする等の対策が必要と考えられる。

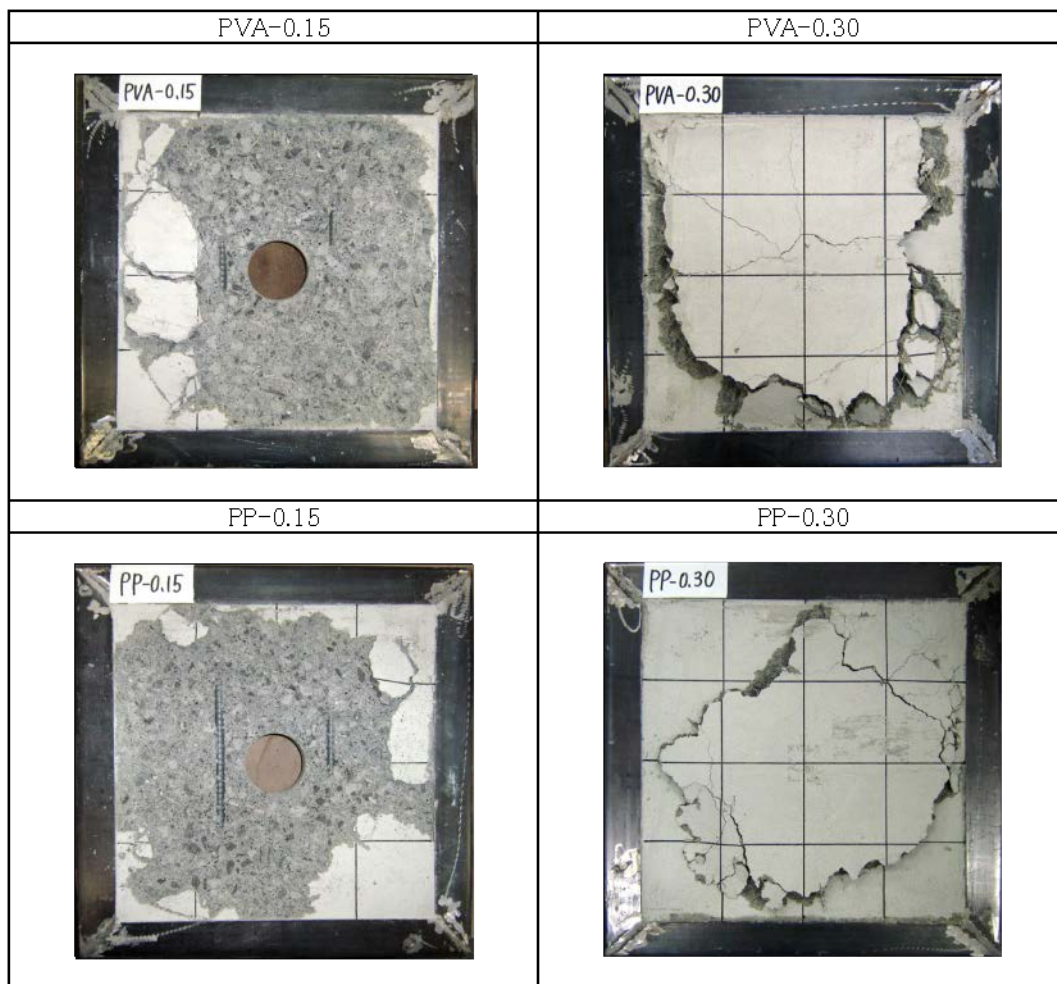


写真-4.3 破壊性状

4.1.4 圧縮強度試験結果

表-4.4に圧縮試験結果一覧を示す。また、図-4.4に圧縮試験結果の比較を示す。圧縮強度については4ケースで大きなばらつきではないが、強度差が発生している。これは、後述する高混入率のケースでは短繊維種別による圧縮強度の影響が少ないことから、短繊維種別や混入率の影響よりも短繊維の低混入率によって、練り混ぜバッチ毎の圧縮強度のばらつきが表面化したものと考えられる。靱性係数や静弾性係数についても4ケースでの大きな差は見られない結果となっている。

表-4.4 圧縮試験結果一覧

配合名	短繊維			養生方法	圧縮強度 (N/mm ²)				圧縮靱性係数 (N/mm ²)				静弾性係数 (N/mm ²)			
	種類	長さ (mm)	混入率 (%)		1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均
PVA-0.15	PVA	40	0.15	気中	29.5	27.7	26.6	27.9	20.1	20.8	10.8	17.2	22184	21905	21727	21939
PVA-0.30	PVA	40	0.30	気中	30.9	30.0	29.2	30.0	18.4	20.6	14.0	17.7	27710	24826	27655	26730
PP-0.15	PP	48	0.15	気中	23.7	25.2	26.6	25.2	13.1	16.5	11.1	13.6	24521	22170	25771	24154
PP-0.30	PP	48	0.30	気中	22.5	22.2	23.1	22.6	16.8	17.2	15.5	16.5	23478	22796	29356	25210

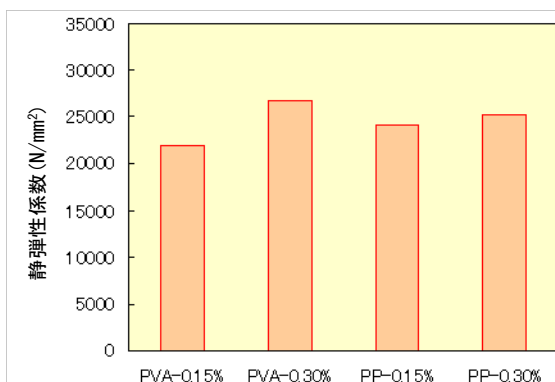
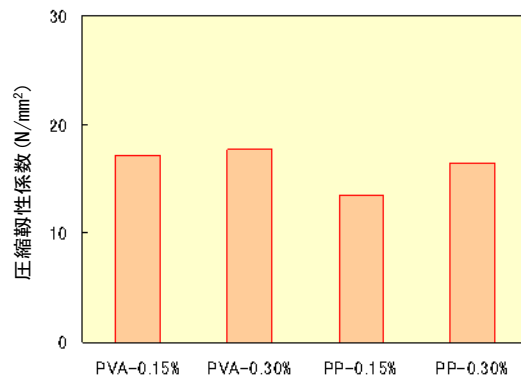
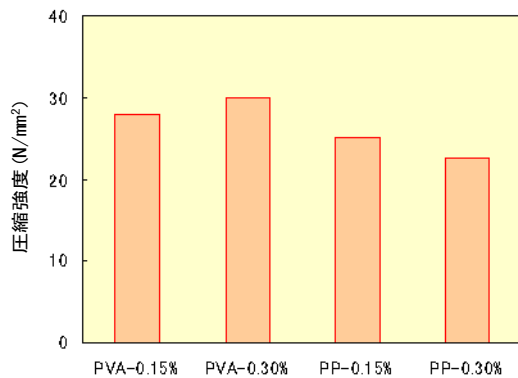


図-4.4 圧縮試験結果の比較

4.1.5 一軸引張試験結果

表-4.5に一軸引張試験結果一覧を、図-4.5に試験結果の比較を示す。また図-4.6に引張応力と変位の関係を示す。引張強度はPP-0.30を除いて1.7N/mm²~1.9N/mm²の間であった。PP-0.30が最も低い結果となったが、ここでも圧縮強度の微量な差が影響したと考えられる。引張残存強度は短繊維混入率0.15%の2ケースでほとんど無いのに対し、0.30%の2ケースではわずかではあるが引張残存強度が認められる。しかしながらRC版押し抜き試験においてせん断コーンが剥落していないため、剥落抑制効果的には短繊維混入率が0.3%でも十分有効であると判断される。

表-4.5 一軸引張試験結果一覧

配合名	短繊維			養生 方法	引張強度 (N/mm ²)					残存強度 (N/mm ²)				
	種類	長さ (mm)	混入率 (%)		1	2	3	4	平均	1	2	3	4	平均
PVA-0.15	PVA	30	0.15	気中	1.53	1.50	1.99	1.65	1.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVA-0.30	PVA	30	0.30	気中	1.46	1.92	1.91	1.84	1.78	0.04	0.04	0.00	0.11	0.05
PP-0.15	PP	48	0.15	気中	1.88	2.17	1.86	1.57	1.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PP-0.30	PP	48	0.30	気中	1.89	1.20	0.82	1.09	1.39	0.08	0.19	0.07	0.10	0.12

※PP-0.30のNo.3低減率は切り欠き部分で破壊していないため平均に含めない。

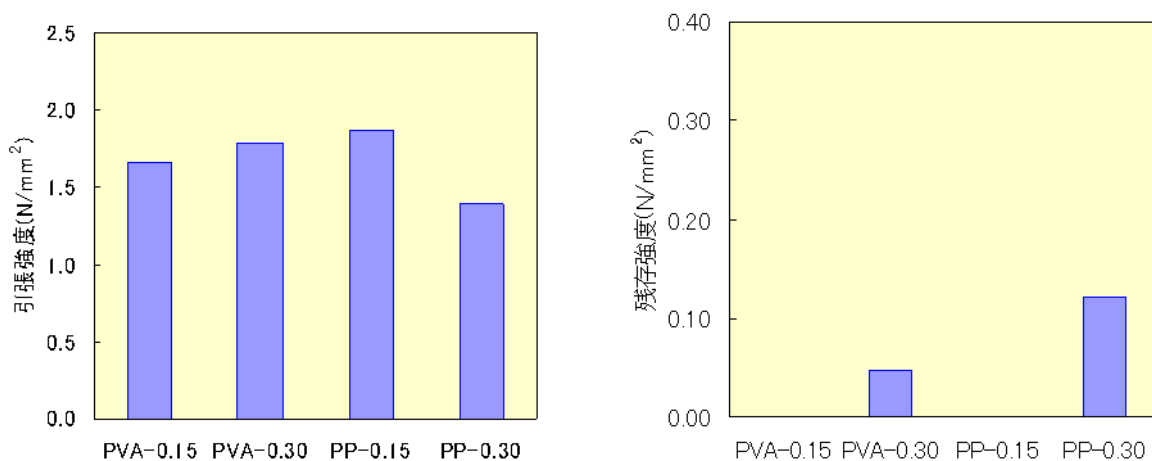


図-4.5 一軸引張試験結果の比較

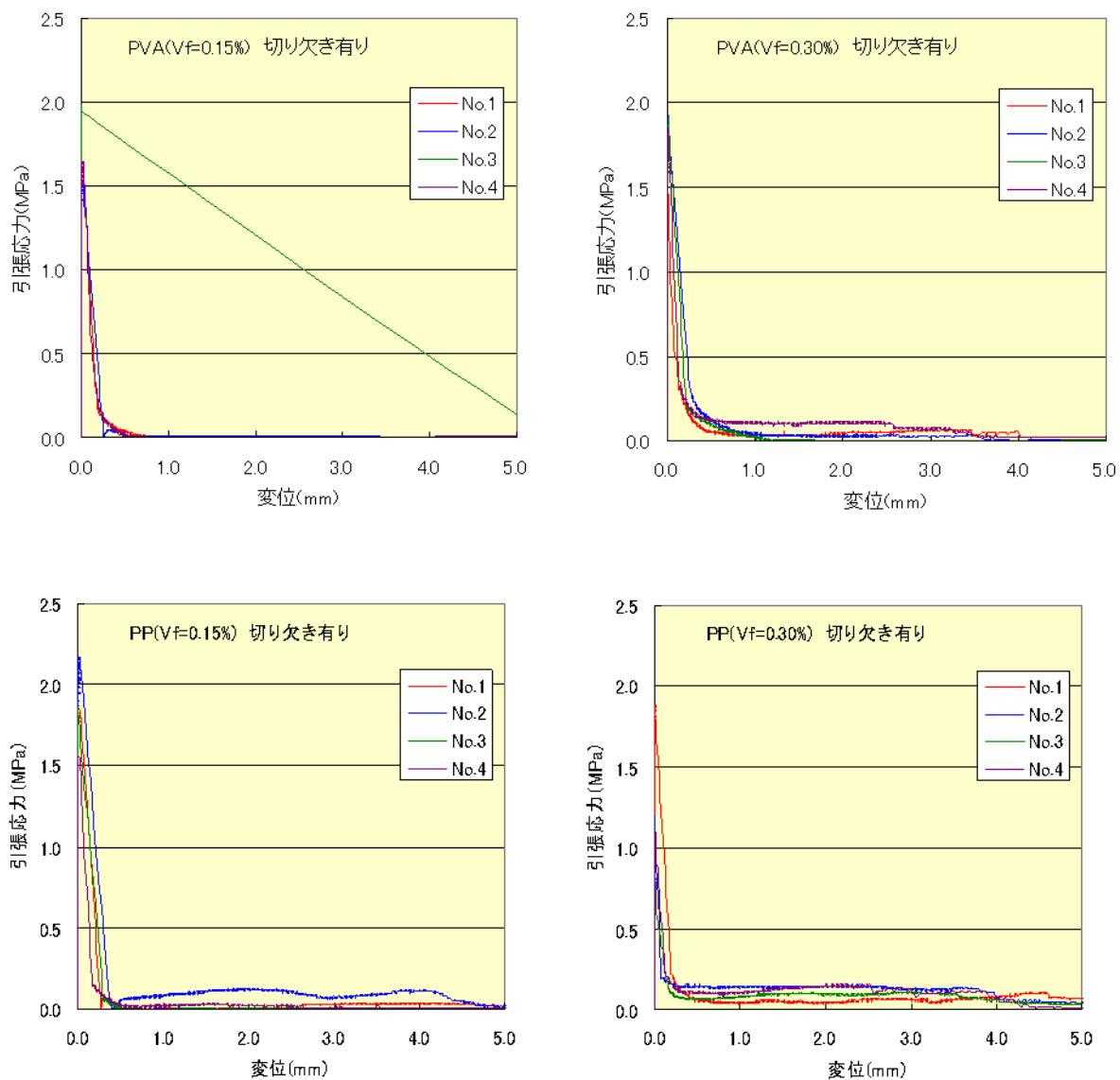


図-4.6 引張応力-変位関係

4.1.6 まとめ

剥落抑制の検討における各試験についての所見を以下にまとめる。

(1) 小型 RC 梁載荷試験について

短繊維の低混入率における曲げ耐力の差は少ない。

(2) 小型 RC 版載荷試験について

短繊維の低混入率における押し抜きせん断耐力の差は少ない。短繊維混入率が 0.15% では剥落抑制効果は期待出来ず、0.30% 以上の混入率が必要である。

(3) 圧縮強度試験について

短繊維種別や混入率による圧縮強度、靱性係数、静弾性係数の大きな違いは見られないが、短繊維の低混入率による練り混ぜバッチ毎の圧縮強度の微量なばらつきが見られ、他の試験へも影響した。

(4) 一軸引張試験について

短繊維混入率が 0.15% では残存引張強度は 0 に等しく、0.30% 以上でわずかではあるが剥落抑制には効果的な残存引張強度が発現される。

4.2 靱性能向上配合の検討

4.2.1 試験概要

短繊維混入コンクリートの靱性能の向上を検討する目的で、後述する4配合について小型RC梁載荷試験を実施した。写真-4.4に試験状況を、図-4.7に試験体形状を示す。試験体は10×10×40cmの角柱供試体の下部にSD295-D6異形鉄筋を2本配した。

表-4.6に配合一覧を示す。配合はこれまで検討を行ってきた高混入率の短繊維混入コンクリート2種類と、繊維長を変化させたものと繊維種類を変えた2種類である。また、これらの配合の力学特性の基礎である圧縮強度試験、一軸引張試験についても実施した。さらにPVA30-1では長さ変化試験と拘束ひび割れ試験を実施した。また、別途作製したPVA30-1のW/C45%のケースで繊維の配向係数の測定も実施した。

表-4.6 配合一覧

配合名	短繊維		W/C	s/a	単位量				増割 W(%)	混和剤			セメント 種類
	種類	vol× (%)			W	C	S	G		増割 C(%)	増割 C(%)	増割 C(%)	
PVA30-1	RF4000 30mm	1.0	50	60	170	340	1080	717	—		0.70	1A	早引鉄筋
PVA30-2	RF4000 30mm	2.0	50	63	190	378	1134	657	0.15	1.20			早引鉄筋
PVA40-1	RF4000 40mm	1.0	50	60	170	340	1080	717	—		0.80	1A	早引鉄筋
RF48-1	ポリフェーブ 48mm	1.0	50	60	170	340	1080	717	—		0.80	1A	早引鉄筋



写真-4.4 試験状況

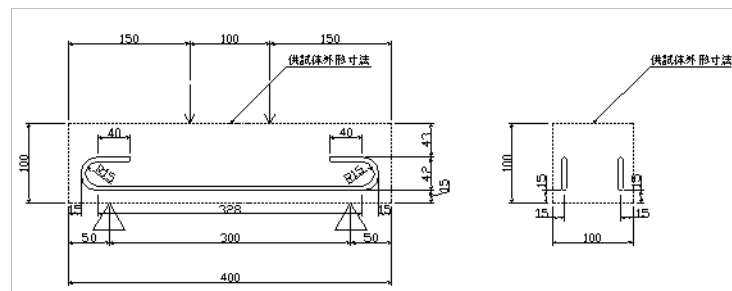


図-4.7 試験体形状

4.2.2 小型 RC 梁載荷試験結果

表-4.7 に試験結果を、図-4.8 に荷重-変位関係を示す。後述する破壊モードの違いから、試験体のたわみ変位 5mm までの載荷荷重を比較した。結果は PVA30-2 が最も耐力が高く、PVA30-1 と PVA40-1 は同じ耐力を示している。これにより繊維長の違いが曲げ耐力に与える影響は少ないことが判明した。PP48-1 については最も耐力が低くなったが、他の短繊維 1% 混入配合と比較しても大きな差は見られない結果となった。

表-4.7 試験結果一覧

配合名	短繊維			変位5mmのときの荷重(kN)			
	種類	長さ (mm)	混入率 (%)	1	2	3	平均
PVA30-1	PVA	30	1.0	62.3	66.7	66.5	65.2
PVA30-2	PVA	30	2.0	66.8	72.9	69.5	69.7
PVA40-1	PVA	40	1.0	65.4	65.4	23.0	65.4
PP48-1	PP	48	1.0	58.7	60.7	60.0	59.8

※PVA40-1のNo.3は破壊性状が異なるため平均値に含めない

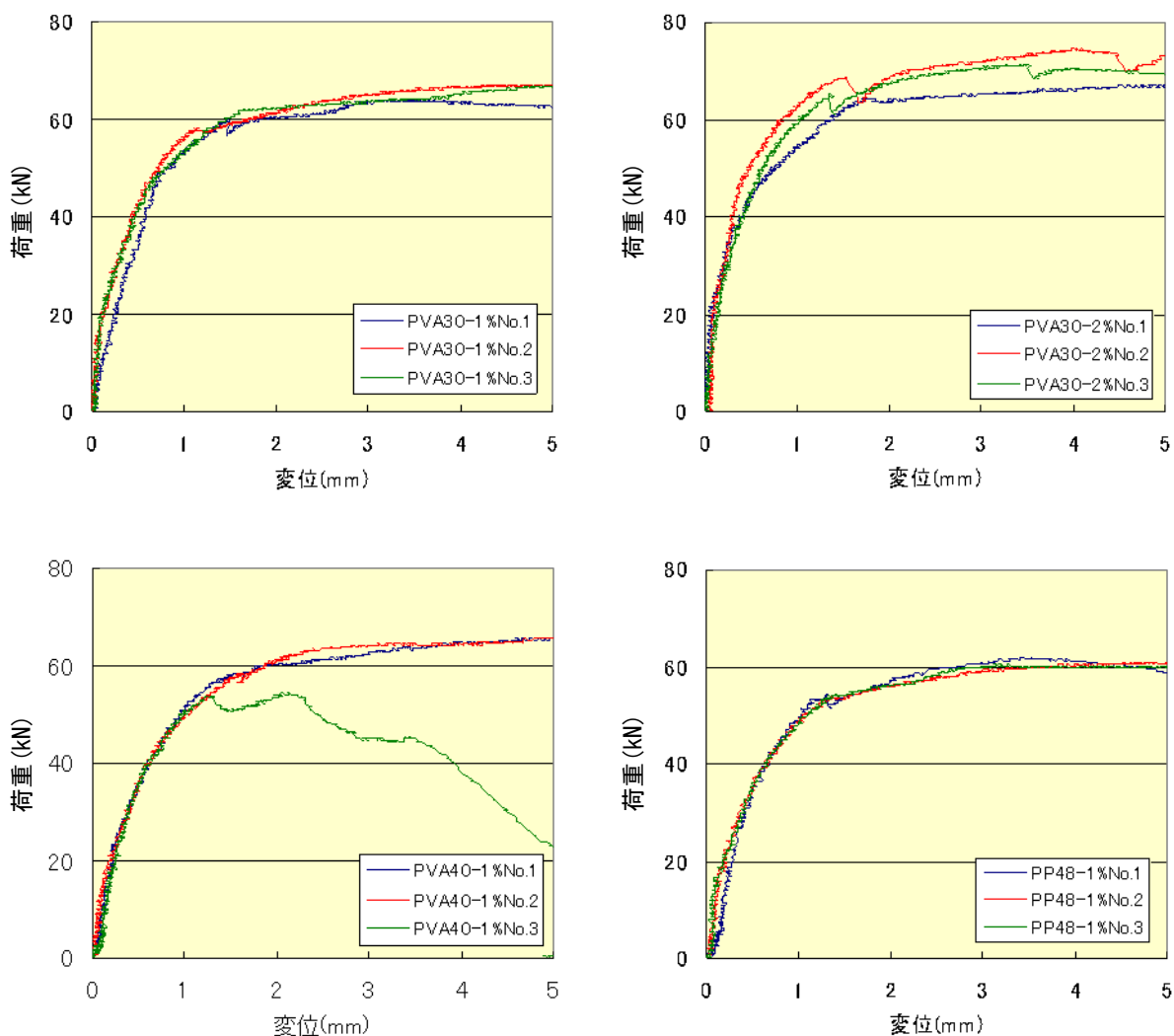


図-4.8 荷重-変位関係

写真-4.5に各試験体の破壊性状を示す。概ね曲げ破壊モードで終局を迎えているが、PVA30-2のNo.2やPVA40-1のNo.2については、最初に曲げ破壊が進行して最終的にはせん断破壊に至っている。また、PVA40-1のNo.3は完全にせん断破壊で終局を迎えている。このように破壊モードが一樣でない結果となったが、今後は供試体断面を扁平形状にする等で破壊モードを揃えた検討が必要と考えられる。

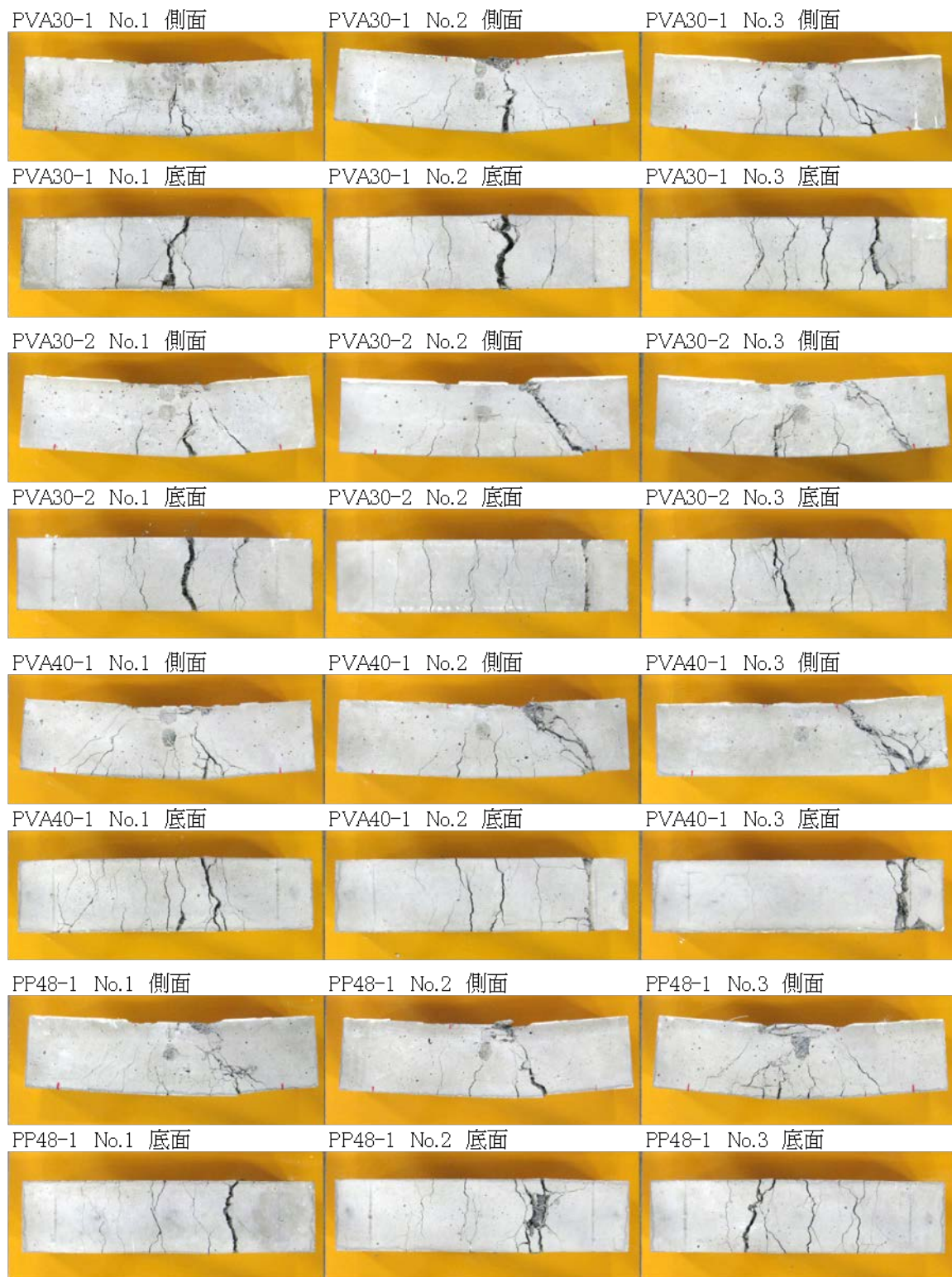


写真-4.5 破壊性状

4.2.3 圧縮強度試験結果

表-4.8 に圧縮試験結果一覧を、図-4.9 に圧縮試験結果の比較を示す。圧縮強度についてはベースコンクリートが同じ短繊維混入率 1%の 3 ケースで概ね揃う結果となった。これより短繊維の種類が圧縮強度に与える影響は少ない事が明らかになった。PVA30-2 はスランプとワーカビリティの調整を目的に、単位セメント量を多くした配合となっているため、圧縮強度が若干高くなっている。靱性係数については PVA30-2 が一番高いが、4 ケースでの差はそれほど大きいものとはなっていない。静弾性係数については 4 ケースでの差はほとんど見られない結果となった。

表-4.8 圧縮試験結果一覧

配合名	短繊維			養生方法	圧縮強度 (N/mm ²)				圧縮靱性係数 (N/mm ²)				静弾性係数 (N/mm ²)			
	種類	長さ (mm)	混入率 (%)		1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均
PVA30-1	FVA	30	1.0	水中	38.1	37.2	36.4	37.2	31.7	30.6	29.5	30.6	26074	25983	27931	26663
PVA30-2	FVA	30	2.0	水中	45.3	41.5	41.5	42.8	35.6	31.7	32.1	33.1	25480	25880	23897	25086
PVA40-1	FVA	40	1.0	水中	37.2	34.2	35.5	35.6	29.6	27.8	26.8	28.1	26121	27083	26540	26581
PP48-1	PP	48	1.0	水中	37.9	38.3	35.2	37.1	28.5	28.0	22.4	26.3	27374	30266	27193	28278

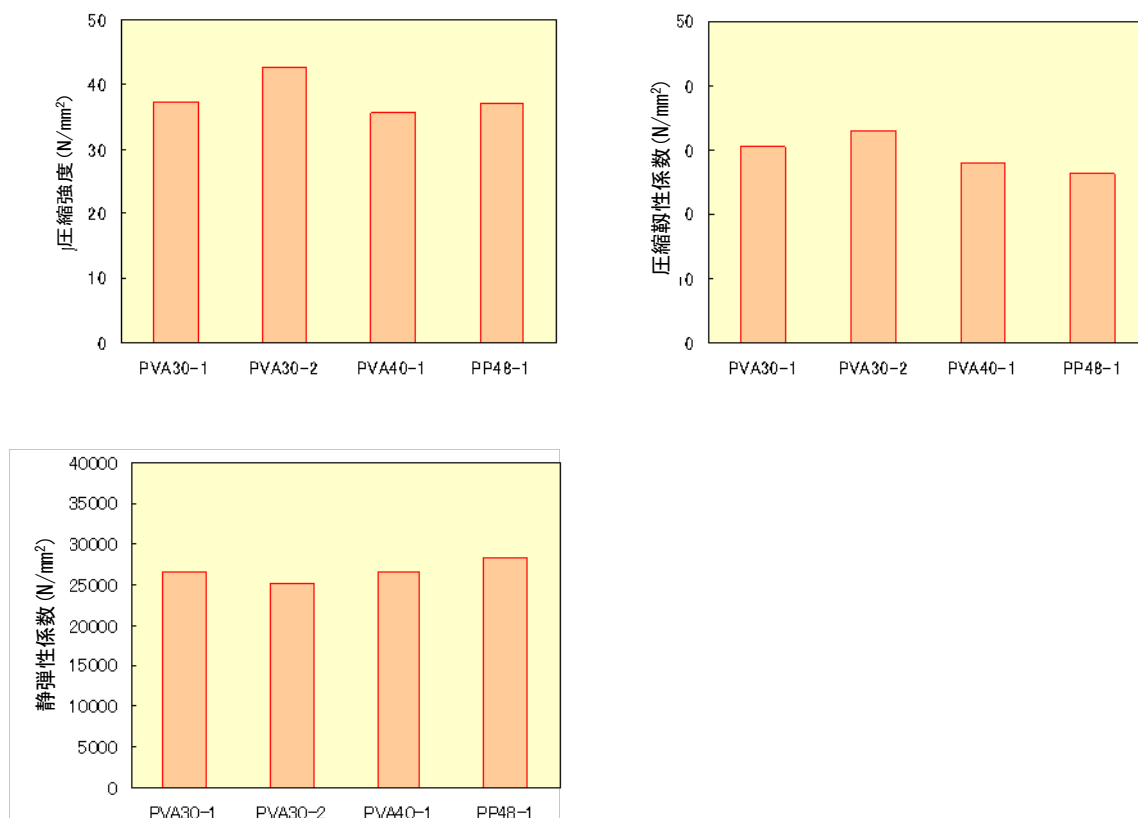


図-4.9 圧縮試験結果の比較

4.2.4 一軸引張試験結果

表-4.9に一軸引張試験結果一覧を、図-4.10に試験結果の比較を示す。また図-4.11に引張応力とたわみ変位の関係を示す。引張強度についてはPVA30-2が最も高い値を示している。他の3ケースは $1.8\text{N/mm}^2 \sim 2.1\text{N/mm}^2$ の間で大きな差は見られない。引張強度は圧縮強度の傾向とほぼ同じ結果となっている。引張残存強度についてもPVA30-2が短繊維混入率に付随して突出した高い値を示し、他の短繊維1%の3ケースでは同程度の結果となっている。各ケースで4体の試験を行っているが、引張強度は試験体毎の結果のばらつきが比較的少ないのに対し、引張残存強度は試験体毎のばらつきが目立つ結果となっている。これは引張強度はコンクリートの圧縮強度が支配的であるのに対し、引張残存強度は短繊維の引張強度に依存している事に起因するものと推察される。そこで、各試験体の破壊断面に露出している短繊維の数と引張残存強度との関係を検討した。

表-4.9 一軸引張試験結果一覧

配合名	短繊維			養生方法	引張強度 (N/mm ²)					残存強度 (N/mm ²)				
	種類	長さ (mm)	混入率 (%)		1	2	3	4	平均	1	2	3	4	平均
PVA30-1	PVA	30	1.0	気中	1.80	2.04	2.23	1.81	1.97	0.43	0.20	0.33	0.40	0.34
PVA30-2	PVA	30	2.0	気中	3.11	2.37	2.62	2.15	2.56	1.36	0.61	1.41	0.85	1.06
PVA40-1	PVA	40	1.0	気中	1.72	1.86	1.58	2.01	1.79	0.54	0.52	0.53	0.24	0.46
PP48-1	PP	48	1.0	気中	1.69	2.38	2.26	2.10	2.11	0.15	0.44	0.44	0.51	0.39

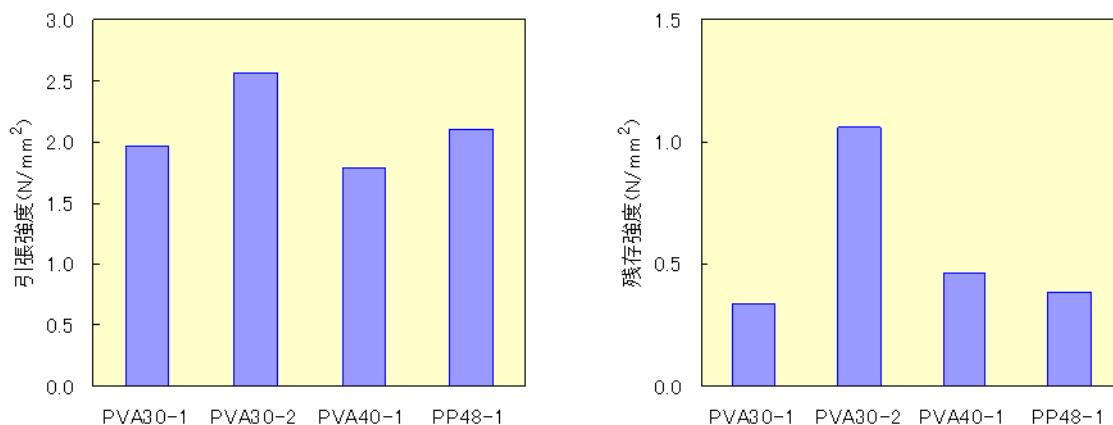


図-4.10 一軸引張試験結果の比較

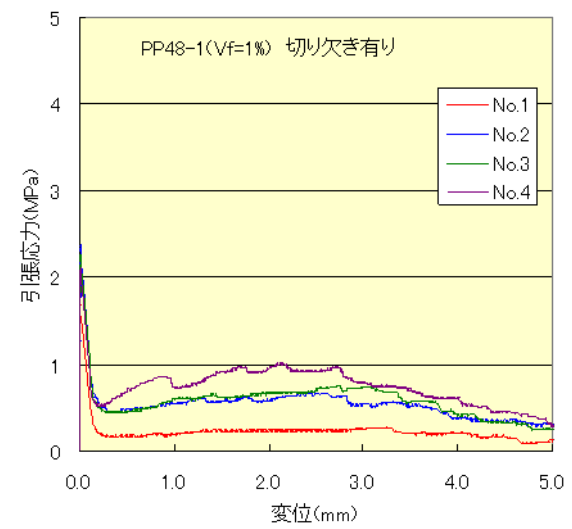
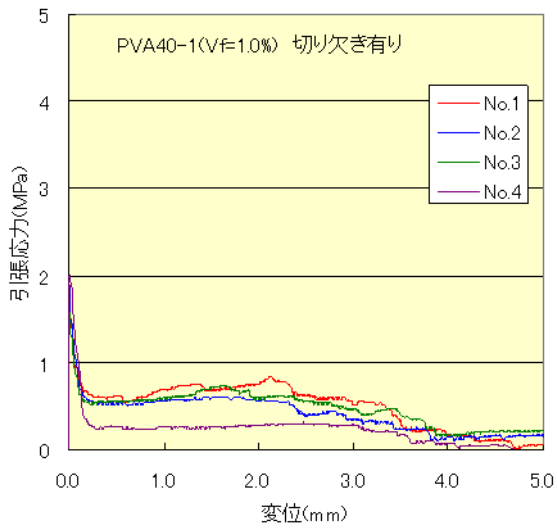
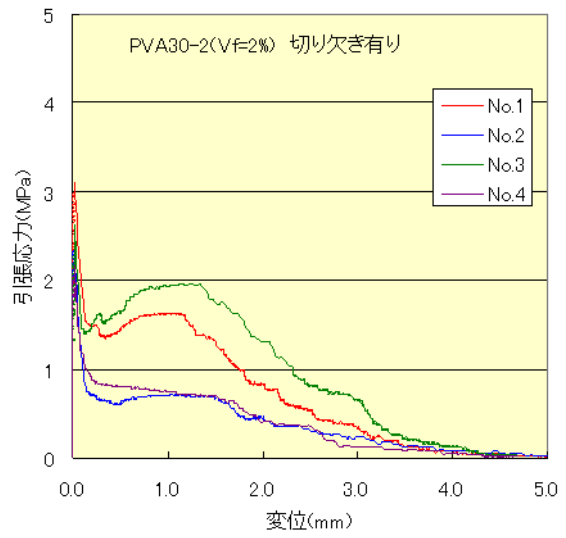
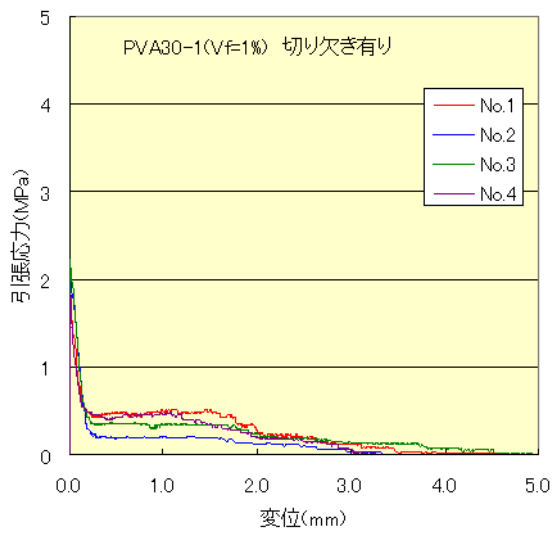


図-4.11 引張応力-変位関係

表-4.10 に破壊断面の短繊維数の測定結果を示す。図-4.12 に残存強度と短繊維数の比較を、図-4.13 には残存強度と短繊維数の関係を示す。これらの結果より、残存強度のばらつきは試験方法に起因しているのではなく、破壊断面の短繊維数のばらつきによるものである事が明らかになった。

表-4.10 破壊断面の短繊維数測定結果

配合名	短繊維			破壊断面の短繊維数(本)								残存強度 (N/mm ²)					
	種類	長さ (mm)	混入率 (%)	1		2		3		4		平均	1	2	3	4	平均
				上面	下面	上面	下面	上面	下面	上面	下面						
PVA30-1	PVA	30	1	22	23	35	19	21	29	25	15	47	0.43	0.20	0.33	0.40	0.34
				45		54		50		40							
PVA30-2	PVA	30	2	77	60	34	59	70	72	63	35	118	1.36	0.61	1.41	0.85	1.06
				137		93		142		98							
PVA40-1	PVA	40	1	40	27	51	35	30	47	21	21	68	0.54	0.52	0.53	0.24	0.46
				67		86		77		42							
PP48-1	PP	48	1	20	15	29	30	21	37	46	43	60	0.15	0.44	0.44	0.51	0.39
				35		59		58		89							

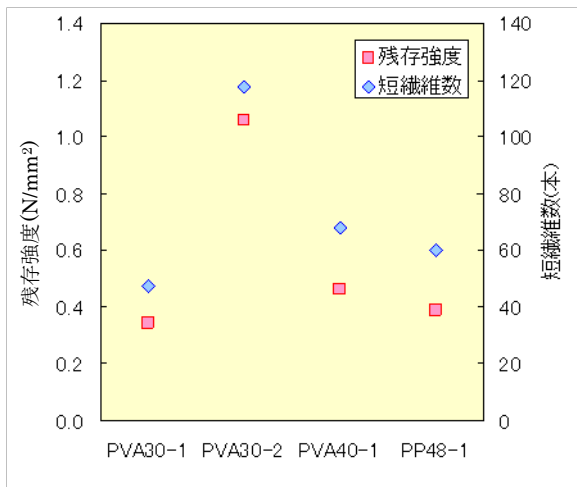


図-4.12 残存強度と短繊維数の比較

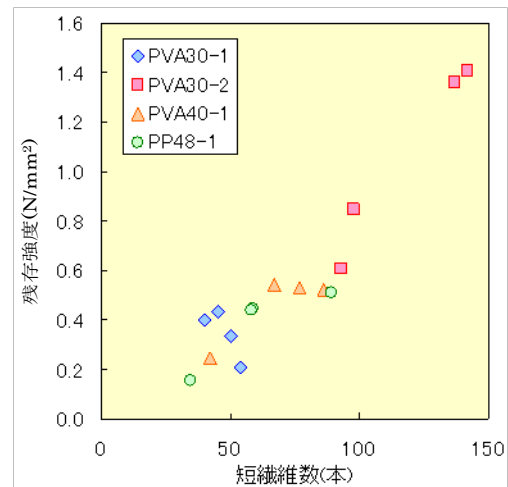
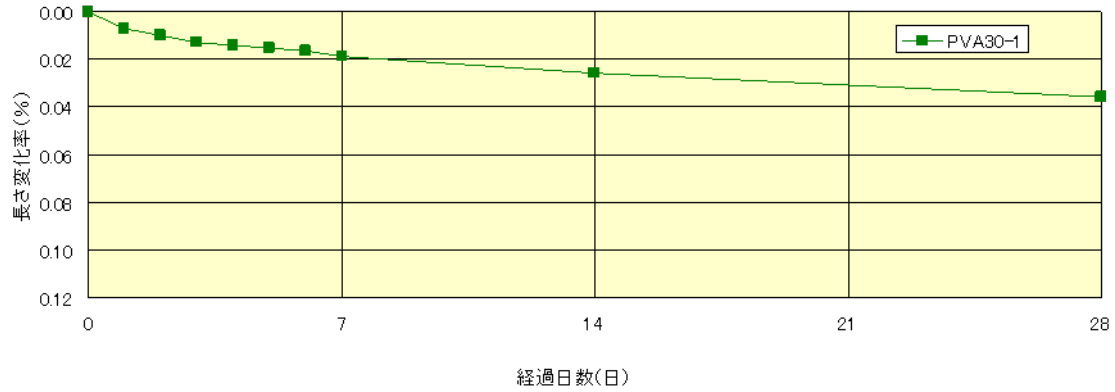


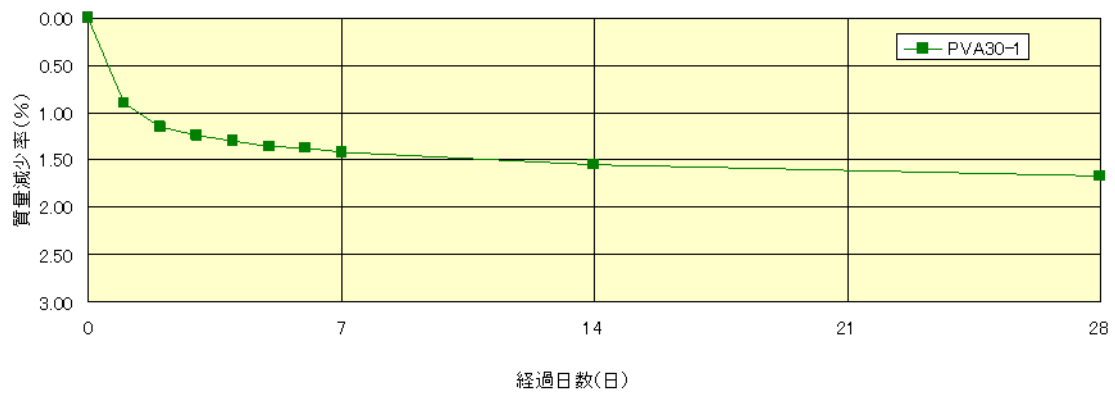
図-4.13 残存強度と短繊維数の関係

4.2.5 長さ変化試験結果

図-4.14 に長さ試験結果を示す。長さは比較的徐々に変化しているのに対し、質量は初期の変化が著しい結果となっている。現場施工に際しては初期養生に十分配慮が必要と考えられる。



(a)長さ変化率



(b)質量減少率

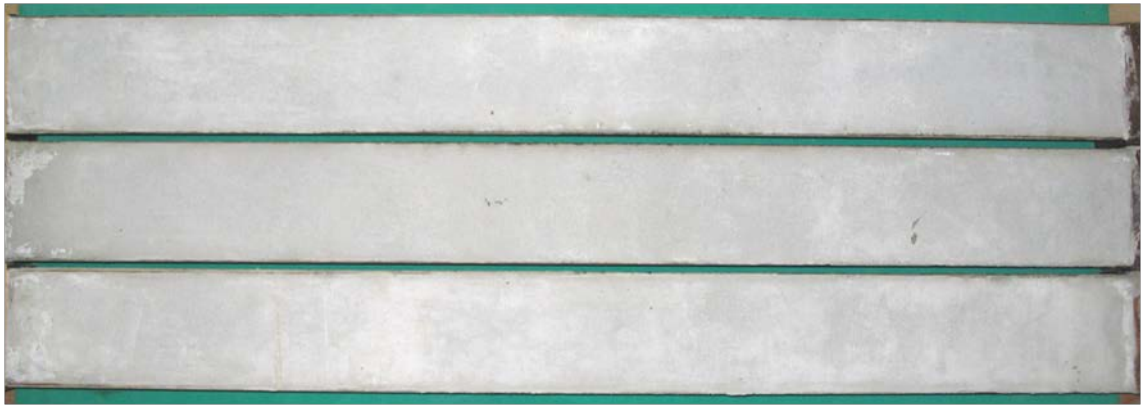
図-4.14 長さ試験結果

4.2.6 拘束ひび割れ試験結果

表-4.11 に試験体配合を、写真-4.6 に試験体の状況を示す。試験は PVA30-1 と合わせて、ひび割れ抑制に効果があるとされるポリプロピレン短繊維ファインバスタを 0.1% 混入したケースについても実施した。この 2 ケースのベース配合は同じである。試験結果は経過日数 28 日で共にひび割れは発生していない。

表-4.11 試験体配合

配合名	短繊維		W/C	s/a	単体量				増粘剤 W×(%)	混和剤		
	種類	vol× (%)			W	C	S	G		8000S C×(%)	SP8SV C×(%)	マイクロエ7101 C×(%)
PVA30-1	RF4000 30mm	1.0	50	60	170	340	1080	717	0.00		0.70	1A
PP-FB-0.1	ファインバスタ 19mm	0.1	50	60	170	340	1080	717	0.0		0.70	1A



PVA30-1



PP-FB-0.1

写真-4.6 試験体の状況

4.2.7 配向係数測定結果

表-4.12 に試験体配合を示す。配向係数測定は圧送性に優れた W/C45%のケースで実施した。写真-4.7 にコア抜き状況を示す。試験体は圧送後の硬化コンクリートの 1 m³塊中央からコア抜きし、中間部と下部から φ10cm×H20cm の円柱供試体を切り出して測定を行った。表-4.13 に試験体の各ブロックの配向係数を示す。中間部、下部共に各ブロックの X・Y・Z の配向係数(β)の平均は 0.5 付近とランダム配向係数といわれる 0.6 に近い値を示している。また、図-4.15 に配向係数の分布を示す。中間部においては配向係数(β)が X・Y・Z の 3 方向のいずれも 0.6 を中心とした分布となっているが、下部の場合は Z 方向で 0.4 を中心とした若干低い分布となっている。これは試験体の打設方法がバケットによる落とし込み打設であったため、材料が型枠に叩き付けられる下部では上下方向である Z 方向の短繊維が寝てしまう現象が起きたと考えられる。これに対して中間部ではそれまでに打設された材料が緩衝材となり、Z 方向の短繊維が寝ることを抑制されたと推察される。いずれにしてもポンプ圧送とバケットの組合せ打設による短繊維の分散性に問題がないことが明らかになった。

表-4.12 試験体配合

配合名	短繊維		W/C	s/a	単位量				増粘剤 W×(%)	混和剤			セメント 種類
	種類	vol× (%)			W	C	S	G		8000S C×(%)	SP8SV C×(%)	マイクロア7101 C×(%)	
PVA30-1-45	RF4000 30mm	1.0	45	60	170	378	1061	704	0.00		0.75		早強ポルト

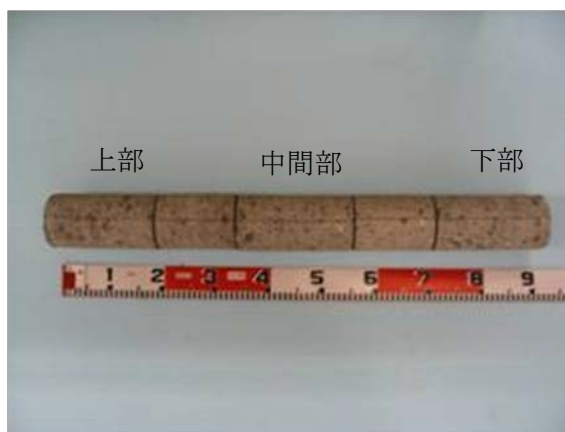


写真-4.7 コア抜き状況

表-4.13 各ブロックの配向係数

採取コア中間部				採取コア下部			
供試体	cos θ (配向係数)			供試体	cos θ (配向係数)		
	X面	Y面	Z面		X面	Y面	Z面
1	0.51	0.46	0.46	1	0.45	0.54	
2	0.47	0.42	0.52	2	0.47	0.52	0.44
3	0.46	0.55	0.39	3	0.52	0.54	0.46
4	0.49	0.49	0.54	4	0.53	0.52	0.42
5	0.51	0.54	0.49	5	0.46	0.52	0.48
6	0.54	0.49	0.53	6	0.47	0.57	0.41
7	0.50	0.49	0.59	7	0.45	0.56	0.45
8	0.52	0.50	0.54	8	0.48	0.54	0.53
平均	0.50	0.49	0.51	平均	0.48	0.54	0.46

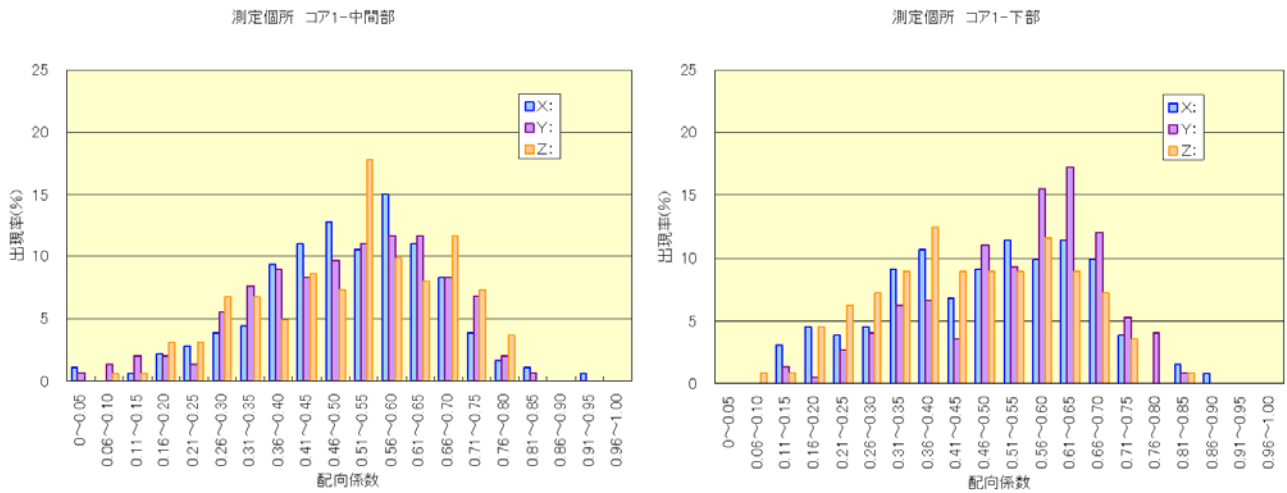


図-4.15 配向係数の分布

4.2.8 まとめ

靱性能向上の検討における各試験についての所見を以下にまとめる。

(1) 小型 RC 梁載荷試験について

短繊維種別や繊維長の違いが曲げ耐力に与える影響は少ない。破壊モードが揃わない試験体形状であったため、断面形状の検討が必要である。

(2) 圧縮強度試験について

短繊維種別や繊維長の違いが圧縮強度、圧縮靱性係数、静弾性係数に与える影響は少ない。

(3) 一軸引張試験について

引張強度、残存引張強度ともに短繊維混入率 2% が最も高く、他の短繊維混入率 1% の 3 ケースに大きな差は見られない。短繊維種別が引張強度、残存引張強度に与える影響は少ない。残存引張強度の試験体毎のばらつきは試験方法の問題ではなく、破壊断面に存在する短繊維の数のばらつきによるものである。

(4) 長さ変化試験について

経過日数 28 日の段階では収縮量は良好に推移している。質量減少率の初期の変化が急激なため、現場へ適用の際は初期養生への留意が必要である。

(5) 拘束ひび割れ試験について

経過日数 28 日の段階でも乾燥収縮によるひび割れは発生していない。

(6) 配向性係数測定について

中間部・下部ともに配向係数(β)は 0.5 でありポンプ圧送による短繊維の分散性に問題はない。

第5章 総括

(1)材料特性の評価

- ・短繊維混入によるスランプロスは3cm以内、空気量の変化は2%以内の増加、コンクリート温度はほぼ変化しないことが分かった。
- ・繊維混入率は設定混入率0.3%に対して実測混入率の割合は90%以上という結果から、短繊維がアジテータ車で均一に拡散されていることが確認出来た。
- ・圧縮強度試験においてPET短繊維がPVA短繊維、PP短繊維よりも圧縮強度、圧縮靱性係数で低い値を示した。
- ・曲げ強度試験ではPP短繊維が曲げ靱性でPVA短繊維、PET短繊維を上回る値を示した。

(2)構造特性の評価

- ・短繊維混入によるせん断耐力および耐衝撃性の向上効果はスターラップを配した場合と同程度となる。
- ・短繊維混入とスターラップを併用した場合のせん断耐力および耐衝撃性向上効果は、それぞれの効果を足し合わせたものと同程度となる。
- ・短繊維混入により斜めひび割れ近傍の剥落が抑制される。

(3)剥落抑制の検討

- ・小型RC梁載荷試験の結果、短繊維の低混入率における曲げ耐力の差は小さいことが分かった。
- ・小型RC版載荷試験の結果、短繊維の低混入率における押し抜きせん断耐力の差は小さいことが分かった。
- ・圧縮強度試験において、短繊維種別や混入率による圧縮強度、靱性係数、静弾性係数の大きな違いは見られなかった。
- ・一軸引張試験において、短繊維混入率が0.30%以上の場合で剥落抑制に対し効果的な残存引張強度が発現されることが確認された。

(4)靱性能向上効果の検討

- ・小型RC梁載荷試験により、短繊維種別や繊維長の違いが曲げ耐力に与える影響は小さいことが確認された。
- ・圧縮強度試験により、短繊維種別や繊維長の違いが圧縮強度、圧縮靱性係数、静弾性係数に与える影響は小さいことが確認された。
- ・一軸引張試験において、引張強度、残存引張強度ともに短繊維混入率2%が最も高かった。また、他の短繊維混入率1%の3ケースに大きな差は見られなかったことから、繊維種別が引張強度、残存引張強度に与える影響は小さいと考えられる。
- ・残存引張強度は破壊断面に存在する短繊維の数に大きく依存する。

- ・長さ変化試験において、収縮量は良好性状を示したが、質量減少率の初期に急激な変化が見られたため、現場へ適用の際は初期養生への留意が必要と考えられる。
- ・拘束ひび割れ試験において、経過日数 28 日で乾燥収縮によるひび割れは発生しなかった。
- ・配向性係数測定により、ポンプ圧送による短繊維の分散性に問題はないことを確認した。

共同研究報告書

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

No.435, April 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