

連続繊維メッシュと短繊維混入
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

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。

連続繊維メッシュと短繊維混入 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

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
主任研究員
主任研究員
主任研究員

三上 浩
谷口 秀明
篠崎 裕生
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

連続繊維メッシュに短繊維混入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った。まず、短繊維吹付けコンクリートとして、ポリビニルアルコール(PVA)短繊維を混入する方法を提案し、施工性、各種強度、中空微小球を混入することによる耐凍害性の改善等の材料特性を明らかにした。次に、PVA短繊維吹付けコンクリートとアラミド連続繊維(AFRP)を組み合わせた補修・補強工法を適用した RC 部材に対して静的載荷実験を実施し、本工法による曲げおよびせん断補強効果を明らかにした。本報告書の最後には、本工法を既設構造物に適用するための石器施工の手引き(案)を示した。

キーワード：吹付けコンクリート、アラミド連続繊維、ポリビニルアルコール短繊維、RC 梁の曲げ耐力、RC 梁のせん断耐力

目次

第1章 共同研究の概要	1
1.1 研究課題	1
1.2 研究目的	1
1.3 研究内容および方法	1
1.4 研究の実施場所	1
1.5 研究の実施期間	1
1.6 研究項目の分担	2
1.7 参加する研究者	2
1.8 使用する主な施設および機械器具	3
第2章 短繊維混入吹付けコンクリートの施工性確認試験	4
2.1 はじめに	4
2.2 吹付け施工試験の概要	4
2.2.1 吹付けコンクリートの配合	5
2.2.2 使用材料	6
2.2.3 使用機械および施工試験の条件	7
2.3 適切な施工方法に関する事前検討	8
2.3.1 試験概要	8
2.3.2 評価方法	9
2.3.3 試験結果および考察	10
2.4 吹付け施工性に及ぼすコンクリート配合の影響	12
2.4.1 試験概要	12
2.4.2 評価方法	13
2.4.3 試験結果および考察	15
2.4.4 補修・補強部位に対応した吹付けコンクリート配合の選定	20
2.5 まとめ	22
第3章 連続繊維メッシュや短繊維混入吹付けコンクリートに関する各種材料試験および材料特性の評価	25
3.1 はじめに	25
3.2 試験概要	25
3.2.1 吹付けコンクリートの配合	25
3.2.2 使用材料	27
3.2.3 吹付けコンクリートの製造方法	28
3.2.4 吹付けシステムおよび使用機器	28
3.2.5 試験要因	30

3.2.6	試験項目	32
3.2.7	試験方法	33
3.3	耐久性に関する試験結果	36
3.3.1	凍結融解抵抗性	36
3.3.2	気泡分布特性	39
3.3.3	硬化後のコンクリートの空気量および気泡間隔係数と凍結融解抵抗性との関係	41
3.3.4	塩化物イオン浸透抵抗性	44
3.4	力学特性および収縮特性に関する試験結果	45
3.4.1	圧縮強度および引張強度	45
3.4.2	ひび割れ発生後の引張特性	46
3.4.3	付着性能	48
3.4.4	収縮特性	49
3.5	まとめ	50
第4章	構造特性の評価と既設構造物への適用に関する検討	52
4.1	RC版への適用	52
4.1.1	はじめに	52
4.1.2	実験概要	52
4.1.3	実験結果	55
4.1.4	まとめ	60
4.2	RC柱への適用	61
4.2.1	はじめに	61
4.2.2	試験体の概要	61
4.2.3	実験方法	65
4.2.4	実験結果	65
4.2.5	まとめ	69
4.3	RC梁への適用	70
4.3.1	はじめに	70
4.3.2	曲げ耐力向上効果の検討	70
4.3.3	まとめ	83
4.3.4	せん断耐力向上効果に関する検討	84
4.3.5	まとめ	91
第5章	設計施工の手引き(案).....	92

第1章 共同研究の概要

1.1 研究課題

連続繊維メッシュと短繊維混入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

1.2 研究目的

連続繊維メッシュに短繊維混入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。

1.3 研究内容および方法

連続繊維メッシュと短繊維混入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。

- ・ 短繊維混入吹付けコンクリートの施工性確認試験
- ・ 連続繊維メッシュや短繊維混入吹付けコンクリートに関する各種材料試験
- ・ 材料特性の評価
- ・ 構造特性の評価
- ・ 既設構造物への適用に関する検討

1.4 研究の実施場所

寒地土木研究所 耐寒材料チーム研究室および実験棟、三井住友建設株式会社技術研究所、室蘭工業大学

1.5 研究の実施期間

平成 19 年 11 月 9 日 ～ 平成 20 年 3 月 31 日

1.6 研究項目の分担

研究項目	研究細目	研究分担			備考
		A	B	C	
連続繊維メッシュと短繊維混入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	短繊維混入吹付けコンクリートの施工性確認試験	○	—	◎	
	連続繊維メッシュや短繊維混入吹付けコンクリートに関する各種材料試験	○	—	—	
	材料特性の評価	◎	○	○	
	構造特性の評価	○	○	○	
	既設構造物への適用に関する検討	◎	○	◎	

(寒地土木研究所；A、室蘭工業大学；B、三井住友建設株式会社；C)

1.7 参加する研究者

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	首席研究員
		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	首席研究員
		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

1.8 使用する主な施設および機械器具

機関名	主 な 施 設 および 機 械 器 具
寒地土木研究所	ボルテックスミキサ、吹付け機、凍結融解試験機、 パーソナルコンピュータ
室蘭工業大学	耐衝撃耐荷力評価実験装置、ワークステーション、 パーソナルコンピュータ、汎用構造解析コード DIANA
三井住友建設(株)	パーソナルコンピュータ

第2章 短繊維混入吹付けコンクリートの施工性確認試験

2.1 はじめに

近年、供用年数の経過に伴うコンクリートの劣化事例が数多く報告されている。1990年代にはトンネルや高架橋等のコンクリート片の剥落事故が頻発し、コンクリート構造物の維持管理の重要性が再認識された。また、阪神淡路大地震の発生や車両交通量の規制緩和に伴う道路橋示方書の改訂により、既設コンクリート構造物に新たな性能が求められるなど、その補修・補強が必要となっている。

コンクリート構造物の補修・補強工法としては、これまで、コンクリート増厚工法、鋼板および連続繊維シート接着工法が多く用いられてきた。一方で、施工箇所が面的に広範囲な場合には、型枠が不要で迅速な施工が可能である吹付けコンクリートが適用される事例も増えている。

現在のところ補修・補強用の吹付けコンクリートは、ほとんどがポリマーセメント系のプレミックスタイプであるため、使用材料の品質が安定しており、耐久性や付着性能にも優れている。一方で、各配合の構成材料は未公開の場合が多いため、その安全性を確認する必要があることや、材料コストが比較的高価になるなどの課題を有している。また、時間当たり施工能力(量)が比較的小さく、かつ一層当たりの吹付け厚さも薄い。従って、施工面積の広い箇所は勿論のこと、施工断面が厚い場合には多層吹きとなるため、工期短縮や経済性の面において未だ課題を有している。

このような背景から、本研究では、既設コンクリート構造物の補修・補強に適用可能な効率的かつ経済的な吹付けコンクリートの開発を目的に、親水性でコンクリートとの付着特性に優れているポリビニルアルコール短繊維(PVA 短繊維)を混入する工法を提案し、単位セメント量やシリカフェーム置換率および短繊維混入率を変化させた吹付けコンクリートの施工性に関する検討を行った。

2.2 吹付け施工試験の概要

一般に、吹付けコンクリートの施工性や品質は、施工条件、使用材料およびコンクリート配合等の影響が大きいことが知られている。そのため本研究では、事前に既存の研究成果や吹付けコンクリート指針(案)(以下吹付け指針) [補修・補強編]¹⁾ [トンネル編]²⁾ [のり面編]³⁾等を参考に、基本配合、使用材料および施工条件を限定し、その範囲内で試験を実施することとした。以下に、試験条件の概要について示す。

2.2.1 吹付けコンクリートの配合

本研究では、前述のとおり、急結剤やポリマー材料を用いないのり面用湿式吹付けコンクリートの配合を基本配合としている。これは、材料のコストを従来の補修・補強用吹付けコンクリートよりも低く抑えるとともに、吹付け後の平滑な表面仕上げを可能にするためである。

表-2.1 に吹付けコンクリートの基本配合を示す。表中、最上段の C360 配合は、寒冷地ののり面用吹付けコンクリートの配合として実績の多い配合であり、単位セメント量 $C = 360 \text{ kg/m}^3$ 程度、水セメント比 50%、セメント：細骨材：粗骨材の質量比が 1:4:1、細骨材率が 0.8% である。なお、空気量はこれまでの吹付けコンクリートの練り混ぜ実績を参考にして 4% と仮定している。

表-2.1 吹付けコンクリートの基本配合

配合名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)
		W	C	S	G	SP
C360	50	179	358	1431	358	0.4~1.3
C400	46	184	398	1391	348	0.3~1.1
C430	43	185	431	1368	341	0.2~1.3

本研究では、この配合を基本にして、吹付けコンクリートの施工性を既設コンクリート構造物の補修・補強に適用可能なものに改善するために、単位セメント量 C を 360 kg/m^3 程度から 400 および 430 kg/m^3 程度に変化させた配合についても検討を行った (以下、それぞれ $C = 360, 400, 430 \text{ kg/m}^3$ と表記)。単位セメント量の上限值は過去ののり面用吹付けコンクリートの施工実績等^{3), 4)}を参考にして設定した。なお、本試験ではコンシステンシーや別途実施した耐久性試験への影響を考慮して単位水量をほぼ一定としているため、水セメント比は各配合で 43~50% となっている。スランプは、空気圧送方式の標準的なのり面用吹付けコンクリートのスランプが 0~5 cm、ポンプ併用空気圧送方式の場合には 5~11 cm 程度であることや、著者らの既往の研究⁵⁾から、5 cm 程度 ($5 \pm 1.5 \text{ cm}$) を基本値として設定した。

後述の施工試験では、表-2.1 に示した単位セメント量が異なる 3 種類の配合を基本配合として、シリカフューム置換率 R_{sf} や短繊維混入率 V_f を変化させて、各パラメータの施工性に及ぼす影響について検討を行っている。なお、シリカフュームはセメント量の内割で置換して混入し、短繊維は吹付けコンクリート全量の外割で混入した。シリカフュームや短繊維の混入によるフレッシュ性状の変動は、高性能減水剤によりいずれの配合においても前述の基本スランプの範囲になるように調整している。

2.2.2 使用材料

表-2.2 に使用材料の一覧を示す。本研究では、短繊維材料として PVA 短繊維を用いている。短繊維材料の選定に当たっては、吹付け指針 [補修・補強編]などを参考にして、力学特性、コンクリートとの付着性、耐蝕性、耐アルカリ性、吹付け施工時の安全性、ブリーディングの抑制効果などを考慮して総合的に判断して決定した。また、短繊維の寸法には、粗骨材の最大寸法 G_{max} よりも十分に長く、吹付け施工への適用実績が比較的多い、長さ 30 mm、直径 0.66 mm を適用した。写真-2.1 には、本研究に用いた PVA 短繊維を示している。粗骨材の最大寸法 G_{max} は、吹付け指針 [のり面編]において、圧送性の観点から圧送管径の 1/3 程度以下が適切とされている。そのため、本研究では、 $G_{max} = 10$ mm と設定した。

表-2.2 使用材料の一覧

材料	記号	種類	物性および主成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 3.14 g/cm ³ , 比表面積 0.45 m ² /g
混和材	SF	中国産シリカフェーム	密度 2.20 g/cm ³ , 比表面積 19.1 m ² /g, 二酸化珪素 89.8%
細骨材	S	苫小牧産海砂	密度 2.68 g/cm ³ , 粗粒率 2.85, 吸水率 1.38%
粗骨材	G	小樽産碎石	密度 2.68 g/cm ³ , 最大寸法 10 mm, 吸水率 2.73 %
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリグリコールエステル誘導体
短繊維	VF	PVA 短繊維 (外割配合)	直径 0.66 mm, 長さ 30 mm, 弾性係数 29.4 GPa 引張強度 0.88 GPa, 破断歪 7%



写真-2.1 PVA 短繊維

短繊維混入率 V_f は、吹付け指針 [のり面編] では短繊維の架橋効果や吹付け施工性から 0.3 ~ 1.5 % 程度、吹付け指針 [トンネル編] では鋼繊維 (長さ 30 mm) を 0.5 ~ 1.5 % 程度混入する実績が多いとされている。また、曲げじん性係数は混入率が高いほど大きい。これらの実績を参考に、施工試験においては、短繊維混入による影響が最も大きく出現する場合を想定し、短繊維混入率 $V_f = 1.5 %$ として検討することとした。また、シリカフェームは、吹付け指針 [トンネル編] や土木学会のシリカフェームを用いた設計・施工指針(案)⁶⁾(以下、シリカフェーム指針とする)を参考に、吹付け性状や付着性状の改善、およびはね返り率の低減を期待して検討に加えた。また、シリカフェームの置換率 R_f は、既往の研究⁷⁾やシリカフェーム指針を参考に、増分割合を 5 % として 5 % から 15 % まで変化させて検討することとした。なお、本研究に用いたシリカフェームは、主成分である二酸化珪素およびその他の化学成分においても JIS の規格値を満たしている。

2.2.3 使用機械および施工試験の条件

図-2.1 に本試験における吹付けシステムを示す。また、表-2.3 にシステムを構成している各使用機器の仕様を示す。本試験では、高品質のり面吹付けにおける実績が多く、1) 圧送時の材料分離、はね返りが少ない、2) 連続施工が可能であることから、ポンプ併用空気圧送方式を採用した。吹付け距離は、1) のり面吹付けでは 1 ~ 1.5 m が良好であり、2) トンネルでの実績は 1 ~ 2 m が多いこと、および 3) 既存の文献の試験結果^{8), 9)}を参考に、本研究では 1.5 m とした。

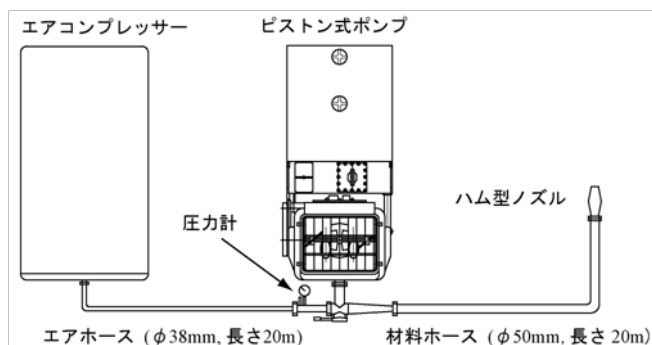


図-2.1 吹付けシステムの概要

表-2.3 使用機器の仕様

使用機器	仕様
ポンプ	ピストン式, 吐出量 1 ~ 7m ³ /h
ミキサー	ボルテックスミキサー, 容量 0.2m ³
コンプレッサー	容量 18.5m ³
発電機	75kVA

また、圧搾空気圧力(以下、圧送圧力とする)は、吹付け後における付着コンクリート(以下、付着コンクリートとする)の品質に及ぼす影響が大きいことが知られている^{2)、10)~13)}。しかしながら、これまで、トンネル吹付けを対象とした圧送圧力とはね返り率や締固め状況との関係に関する検討は行われているもの^{2)、14)}、補修・補強用吹付けを対象とした検討は未だ行われていない。補修・補強用吹付けの場合には、施工時の時間当たり吐出量(以下、吐出量とする)が、トンネル用吹付けの場合と大きく異なることから、本研究では事前試験を実施して、適切な吐出量と圧送圧力との関係を検討することとした。

なお、後述の施工試験において試験パラメータとして用いている圧送圧力は、のり面吹付けの場合の測定法³⁾を参考に図-2.1中の圧力計により計測して管理している。施工試験は、ノズルの距離、吐出量および圧送圧力を一定に保ち、極力ばらつきが生じないように配慮し、各ケース1回ずつ実施した。また、一連の試験は、豊富な吹付け経験を有する熟練のノズルマンが一貫して行っている。なお、試験においては、適切なノズルワークで良好な施工および充てん性が保証できるノズルマンを選定している。

2.3 適切な施工方法に関する事前検討

本章では、適切な圧送圧力および吐出量を特定するために実施した事前試験の概要および試験結果について述べる。

2.3.1 試験概要

表-2.4に試験ケースの一覧を示す。試験対象とした配合は、単位セメント量 C 、シリカフューム置換率 R_{sf} および短繊維混入率 V_f を変化させた全4配合である。試験ケース名の第1項目は単位セメント量 (kg/m^3)、第2項目はシリカフューム置換率 (%)、第3項目は短繊維混入率 (%) を示している。

表-2.4 適切な施工方法検討のための試験ケース一覧

配合名	単位セメント量 C (kg/m^3)	シリカフューム置換率 R_{sf} (%)	短繊維混入率 V_f (%)	時間当たり吐出量 q (m^3/h)	圧送圧力 p (MPa)
C360-SF0-V0	360	0	0.0	1.0	0.2, 0.3, 0.4, 0.5
				1.5	
				2.0	
C360-SF0-V1.5			1.5	1.0	
				1.5	
				2.0	
C430-SF0-V1.5	430	0	1.5	1.0	
				1.5	
				2.0	
C430-SF10-V1.5			10	1.5	1.0
					1.5
					2.0

試験では各配合において、吐出量 q を 3 種(1.0、1.5、2.0 m³/h)、圧送圧力 p を 4 種(0.2、0.3、0.4、0.5 MPa)に変化させた全 12 種類について検討を行った。なお、これらの試験は、吹付けコンクリート関連の土木学会規準¹⁰⁾(以下、吹付け規準とする)のコンクリート(モルタル)の吹付け試験方法(案)(JSCE-F 565-2005)を参考にして、斜め下向き吹付け(以下、斜め吹付けとする)により試験を行った。写真-2.2 に試験状況を示す。



写真-2.2 斜め吹付けの状況

2.3.2 評価方法

表-2.5 に本試験における施工性の評価項目を示す。ここでは、吹付けコンクリートがポンプから排出されて、対象物に付着するまでの過程を考慮し、1) ポンプからノズル先までの圧送性状、2) ノズル先の吐出性状、3) ノズルマンへの負担(作業性)、4) 付着したコンクリートの性状、と評価する箇所を客観的に区分し、それぞれの項目に対して評価を行った。施工性の総合評価は、既往の研究¹¹⁾等を参考に、各評価項目を 3 段階(0、1、2)に点数化しその総和として評価した(最高点 8 点)。各項目の評価点は、吹付けコンクリートの施工経験を十分に有する 3 名の評価員で協議して決定した。圧送および吐出性状、ダレの有無は目視確認、付着性状の締め固まりはコテ仕上げ時の感触、作業性はノズルマンからの聞き取りおよび目視により評価した。

表-2.5 施工性の評価項目および基準

評価点	圧送性状	吐出性状	ノズルマンの作業性	付着コンクリートの性状
0	閉塞	材料分離有り、ノロ分のダレ有り	吹付け圧の負担大、作業が極めて困難	非常に軟らかく付着しない、もしくは、非常に硬くコテ均し不能
1	閉塞無し、脈動多少有り	材料分離無し、ノロ分のダレ多少有り	吹付け圧の負担小、作業が多少困難	付着するものの軟らかい、もしくは、硬くコテ均し多少困難
2	閉塞無し、脈動無し	材料分離無し、ノロ分のダレ無し	吹付け圧の負担無し、作業が容易	適度に締め固まり、コテ均しも可能

2.3.3 試験結果および考察

図-2.2 に各吐出量および圧送圧力における評価点を配合ごとに示す。また、表-2.6 に施工評価点の一覧を示す。なお、C360-SF0-V1.5 配合は、ポンプからの吐出が不能であったため検討から除外した。これは、C360-SF0-V0 配合に短繊維を $V_f=1.5\%$ 混入した結果、フレッシュ時のコンクリートがこわばる性状を示したためである。図-2.2 より、C360-SF0-V0 配合の場合は、吐出量 $q=1.5, 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ において、圧送圧力の増大とともに評価点が高くなり、圧送圧力 $p=0.5 \text{ MPa}$ において低下する傾向を示していることがわかる。これは、 $p=0.5 \text{ MPa}$ までは、圧送圧力の増加に伴って脈動のないスムーズな吐出性状になるとともに、付着コンクリートの締め固まりも良好になるためである。一方、圧送圧力 $p=0.5 \text{ MPa}$ において評価点が下がるのは、ノズルマンへの負担が大きくなるとともに、付着コンクリートが強固に締め固められ、コテ均しが困難になるためである。また、この場合には、はね返りや粉じん量も多くなる傾向にあることを確認している。このような傾向は、C430-SF0-V1.5 および C430-SF10-V1.5 配合の場合においても同様であった。

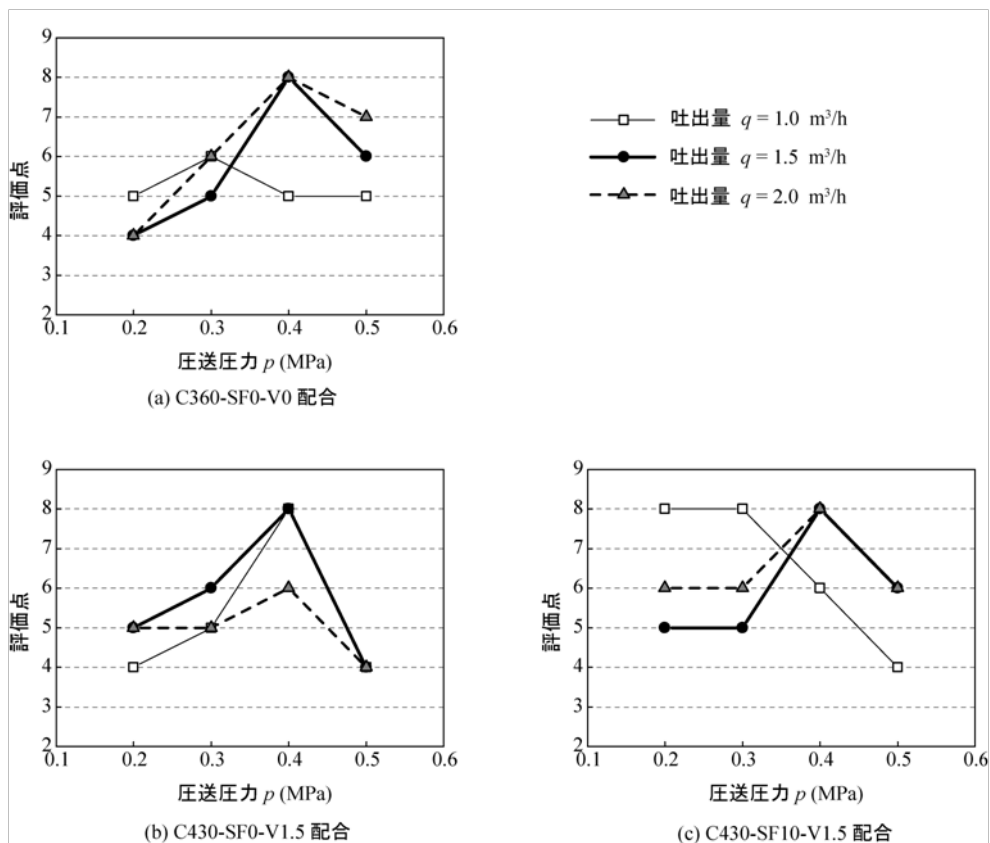


図-2.2 適切な吐出量および圧送圧力に関する施工試験結果

表-2.6 施工性評価点の一覧

	q (m ³ /h)	$p = 0.2$ MPa					$p = 0.3$ MPa					$p = 0.4$ MPa					$p = 0.5$ MPa				
		a	b	c	d	計	a	b	c	d	計	a	b	c	d	計	a	b	c	d	計
C360 -SF0 -V0	1.0	1	1	2	1	5	2	1	2	1	6	2	2	0	1	5	2	2	0	1	5
	1.5	1	1	2	0	4	1	1	2	1	5	2	2	2	2	8	2	2	1	1	6
	2.0	1	1	2	0	4	1	1	2	2	6	2	2	2	2	8	2	2	1	2	7
C430 -SF0 -V1.5	1.0	1	0	2	1	4	1	1	2	1	5	2	2	2	2	8	2	2	0	0	4
	1.5	1	1	2	1	5	1	1	2	2	6	2	2	2	2	8	2	2	0	0	4
	2.0	1	1	2	1	5	1	1	2	1	5	1	1	2	2	6	2	2	0	0	4
C430 -SF10 -V1.5	1.0	2	2	2	2	8	2	2	2	2	8	2	2	1	1	6	2	2	0	0	4
	1.5	1	1	2	1	5	1	1	2	1	5	2	2	2	2	8	2	2	0	2	6
	2.0	1	1	2	2	6	1	1	2	2	6	2	2	2	2	8	2	2	0	2	6

なお、吐出量 $q = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合には、C360-SF0-V0 および C430-SF10-V1.5 配合において、他のケースとは異なる性状を示している。C360-SF0-V0 配合の吐出量 $q = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合には、圧送圧力 $p = 0.3 \text{ MPa}$ までは p の増大とともに評価点が高くなるものの、その後低下している。これは、圧送圧力 $p = 0.4 \text{ MPa}$ 以降では、吐出量 q に対する圧送圧力 p が大きいため、結果として少量のコンクリートを多量の空気で吹き付ける形になりノズルマンへの負担が増大するとともに、付着コンクリートが非常に固いものになるためである。

また、C430-SF10-V1.5 配合の吐出量 $q = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合には、圧送圧力 $p = 0.2, 0.3 \text{ MPa}$ において、評価点が最も高く $p = 0.4 \text{ MPa}$ 以上において低下する性状を示している。これは、単位セメント量を増加させかつシリカフェームを用いることにより、フレッシュコンクリートの粘性が増加し施工性が改善されるものの、 $p = 0.4 \text{ MPa}$ 以上では、前述の C360-SF0-V0 配合の $q = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合と同様、ノズルマンへの負担が増大するためである。

各試験結果を総合的に評価すると、配合によって吹付け施工性の評価点に及ぼす吐出量 q や圧送圧力 p の影響は異なるものの、全体的には、吐出量 $q = 1.5, 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、圧送圧力 $p = 0.4 \text{ MPa}$ の場合において、評価点が高くなる傾向にあることがわかる。ただし、吐出量 $q = 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合には、一部の配合でノズルマンへの負担が大きく評価点の低い場合が見られたことから、本研究においては、以後、吐出量 $q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、圧送圧力 $p = 0.4 \text{ MPa}$ として吹付け施工試験を進めることとした。

2.4 吹付け施工性に及ぼすコンクリート配合の影響

2.4.1 試験概要

表-2.7 に試験ケースの一覧を示す。本試験では、吹付けコンクリートの施工性に及ぼす配合要因の影響を検討するために、単位セメント量を 3 種類、シリカフェーム置換率を 4 種類、短繊維混入率を 2 種類に変化させた全 14 ケースの吹付け施工試験を行った。なお、これらの吹付け施工試験では、斜め吹付けの他、上向き吹付けの場合についても検討を行っている。写真-2.3 に上向き吹付け時の試験状況を示す。各配合における施工性は、1) 付着性状、2) 吹付けコンクリートのはね返り率(以下、はね返り率とする)および 3) 吹付け後の短繊維残留率(以下、短繊維残留率とする)によって評価した。ここで、短繊維残留率は、吹付け前の短繊維混入率に対する吹付け後の付着コンクリート中の短繊維混入率の割合として算出した。なお、C360-SF0-V1.5 配合の場合には、前述の事前試験においてスランブを 5 cm 程度とすると、ポンプからの吐出が不能であったため、スランブを 8 cm 程度に高めた試験を行い、参考データとして記述している。

なお、圧送圧力および吐出量は、それぞれ、3 節に示す斜め吹付けによる事前試験において良好とされている 0.4 MPa、1.5 m³/h とした。また、これらの設定値を適用することにより、本章の斜めおよび上向き吹付け試験においても、脈動や閉塞等の性状は見られずノズルマンへの過大な負担も生じていないことを確認している。

表-2.7 各種配合による施工試験ケースの一覧

配合名	単位セメント量 C (kg/m ³)	シリカフェーム置換率 R_{sf} (%)	短繊維混入率 V_f (%)
C360-SF0-V0	360	0	0
C360-SF0-V1.5			1.5
C360-SF10-V0		10	0
C360-SF10-V1.5			1.5
C400-SF0-V0	400	0	0
C400-SF0-V1.5			1.5
C400-SF10-V0		10	0
C400-SF10-V1.5			1.5
C430-SF0-V0	430	0	0
C430-SF0-V1.5			1.5
C430-SF5-V1.5		5	1.5
C430-SF10-V0		10	0
C430-SF10-V1.5			1.5
C430-SF15-V1.5		15	1.5



写真－2.3 上向き吹付けの状況

2.4.2 評価方法

表－2.8 に、付着厚さの目標値を 7 cm として設定した場合の吹付けコンクリートの付着性状に関する評価基準を示す。表に示しているように、付着性状は、付着厚さおよび付着コンクリートの性状から 3 段階で評価することとした。なお、付着厚さの目標値を 7 cm と設定したのは、一般的な RC 構造物を断面修復する場合において、鉄筋背面から構造物表面までの厚さを 1 回の工程で施工することを想定したものである。写真－2.4 に、各評価に対応する吹付けコンクリートの付着状況の一例を上向き吹付けの場合について示す。なお、斜め吹付けの場合はいずれの配合においても付着性状は良好であり、付着厚さが 10 cm 以上であることを確認している。そのため、斜め吹付けの場合の付着性状の評価は全配合において「○」としている。写真－2.5 に、斜め吹付けの場合における吹付けコンクリートの付着状況の一例を示す。

はね返り率は、吹付け規準¹⁰⁾の吹付けコンクリート(モルタル)のはね返り率試験方法(案)(JSCE-F 563-2005)に準拠して測定し評価した。なお、本章の吹付け施工試験では、はね返り率を精度良く測定できるようにはね返り材料が飛散する範囲をシートで囲うこととしている。また、斜め吹付けの場合には、パネル型枠からずり落ちたコンクリートとはね返ったコンクリートを区別できるようにパネル型枠を地表より 10 cm 程度浮かせている。なお、試験時には吹付けコンクリートがずり落ちるような状況は認められておらず、はね返り材料が適切に測定されていることを確認している。短繊維残留率は、1) 吹付け後の付着コンクリートを約 2 リットル採取し、2) 水洗いにより短繊維を抽出して十分に乾燥させた後、3) 重量測定値を体積換算することにより算出した。

表-2.8 付着性状に関する評価基準

評価	付着性状
×	ツララ状のダレが生じ、付着厚さは7 cm 以下
△	ダレは生じないものの、付着厚さ7 cm 以下で部分的なはく落が生じる
○	7 cm 以上の吹付けが可能

(注) 付着厚さの目標値：7 cm



(a) 評価「×」の付着性状



(b) 評価「△」の付着性状



(c) 評価「○」の付着性状

写真-2.4 各評価点における吹付けコンクリートの付着状況



写真-2.5 斜め吹付け時の付着状況の一例 (C360-SF0-V0)

2.4.3 試験結果および考察

表-2.9 に、斜めおよび上向き吹付け時における付着性状、はね返り率、短繊維残留率の結果を示す。以下、各項目について考察する。

表-2.9 各種配合による施工試験の一覧

配合名	斜め吹付け				上向き吹付け				
	スランプ (cm)	付着 性状	はね返り 率 (%)	短繊維 残留率 (%)	スランプ (cm)	付着 性状	付着 厚さ (mm)	はね返り 率 (%)	短繊維 残留率 (%)
C360-SF0-V0	6	○	22.2	-	4.5	×	50	40.2	-
C360-SF0-V1.5	(7.1)	(○)	(27.7)	(37.3)	(9.3)	(×)	(45)	(44.1)	(30.7)
C360-SF10-V0	5.5	○	21.3	-	5.3	×	40~50	29.5	-
C360-SF10-V1.5	4.7	○	22.3	40.7	4.4	×	40~50	45.0	52.7
C400-SF0-V0	4.7	○	19.4	-	4.5	△	80	36.3	-
C400-SF0-V1.5	5.9	○	22.0	78.5	5.3	△	40~60	40.7	54.0
C400-SF10-V0	4.7	○	16.5	-	4.7	×	60	27.8	-
C400-SF10-V1.5	4.8	○	18.4	65.3	5.0	△	50	35.9	65.8
C430-SF0-V0	4.1	○	18.8	-	4.5	○	100	33.0	-
C430-SF0-V1.5	4.4	○	20.2	78.0	4.4	○	75	37.8	50.0
C430-SF5-V1.5	4.2	○	20.2	74.1	4.7	○	95	32.1	66.7
C430-SF10-V0	5.6	○	15.4	-	5.7	○	90	27.9	-
C430-SF10-V1.5	4.2	○	16.6	86.4	4.4	○	100	26.6	71.3
C430-SF15-V1.5	4.7	○	16.1	63.6	4.1	○	70	25.5	70.7

(1) 付着性状

斜め吹付けの場合には、前述の通り、いずれの配合においてもダレや剥落は見られず良好な付着性状を示している。上向き吹付けの場合には、単位セメント量 C が多い場合ほど良好な性状を示すことが明らかになった。特に、単位セメント量が少ない $C360$ 配合の場合には、付着コンクリートの表面に水分が多く見られ、また締固めが十分にされていない状況であったため、写真-2.4(a)に示されている場合のように、吹付けコンクリートの自重や吹付け圧による剥離が多発した。これは、 $C360$ 配合の場合には水セメント比が他の配合よりも大きいことによるものと推察される。また、 $C400$ 配合の場合には、 $C360$ 配合の場合に比較して付着性状が良好であるものの、付着厚さ 7 cm に到達する前に付着コンクリートの剥離が見られた。一方、 $C430$ 配合の場合には、シリカフューム置換率や短繊維混入率によらず、いずれの配合においても、付着コンクリートが十分に締め固まり、良好な付着性状を示した。これは、セメントペースト部分の粘性の増加により吹付けコンクリートの付着性が向上したためと考えられる。

以上のことより、壁面のような鉛直面に対しては、単位セメント量 $C = 360, 400\text{ kg/m}^3$ の場合においても $C = 430\text{ kg/m}^3$ と同様に良好な付着性状が期待できるが、上向き施工の場合は、単位セメント量 $C = 430\text{ kg/m}^3$ とすべきであることが明らかになった。また、これらの試験結果より、急結剤を用いない条件下においても、単位セメント量 $C = 430\text{ kg/m}^3$ とすることにより、吹付けコンクリートの付着厚さを $7 \sim 10\text{ cm}$ 程度まで改善可能であることが明らかになった。

(2) はね返り率

図-2.3 に、短繊維を混入しない場合における単位セメント量とはね返り率との関係を斜めおよび上向き吹付けの場合を対象に示す。図より、斜め吹付けの場合の方が上向き吹付けの場合よりも、はね返り率が小さくなる傾向にあることがわかる。また、吹付け方向やシリカフューム混入の有無に関わらず、単位セメント量が多い場合ほどはね返り率が小さい。さらに、シリカフュームを混入することによってはね返り率が低減されていることがわかる。また、この傾向は、上向き吹付けの場合において顕著である。

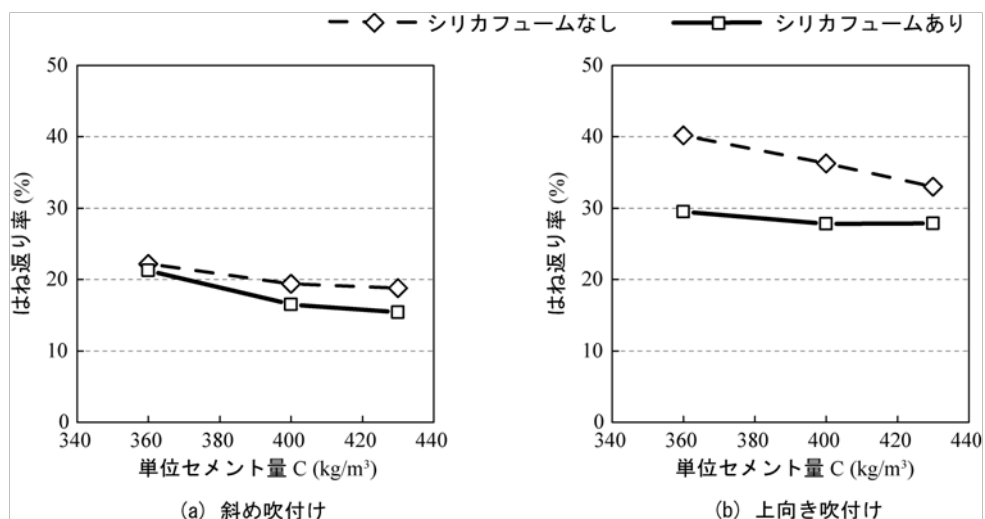


図-2.3 短繊維無混入の場合における単位セメント量とはね返り率との関係 (短繊維混入率 $V_f = 0\%$)

これらの結果は、単位セメント量の増加やシリカフュームを混入することにより、フレッシュコンクリートの粘性が増加し、はね返りが抑制されることによるものと考えられる。なお、このような傾向は、既往の文献^{6), 15)}においても同様なものとなっている。

図-2.4に、短繊維を混入した場合(短繊維混入率 $V_f = 1.5\%$)における単位セメント量とはね返り率との関係を吹付け方向ごとに示す。なお、C360-SF0-V1.5 配合の場合には、前述のように吹付け可能なスランプ値が8 cm 程度であり、基本スランプ (5 ± 1.5 cm) よりも大きいため参考値として示している。図より、1) 斜め吹付けの場合が上向き吹付けの場合よりもはね返り率が小さく、2) 単位セメント量が多い場合やシリカフュームを混入する場合において、はね返り率が小さくなる傾向を示していることがわかる。また、これらの傾向は、前述の短繊維を混入しない場合と同様である。

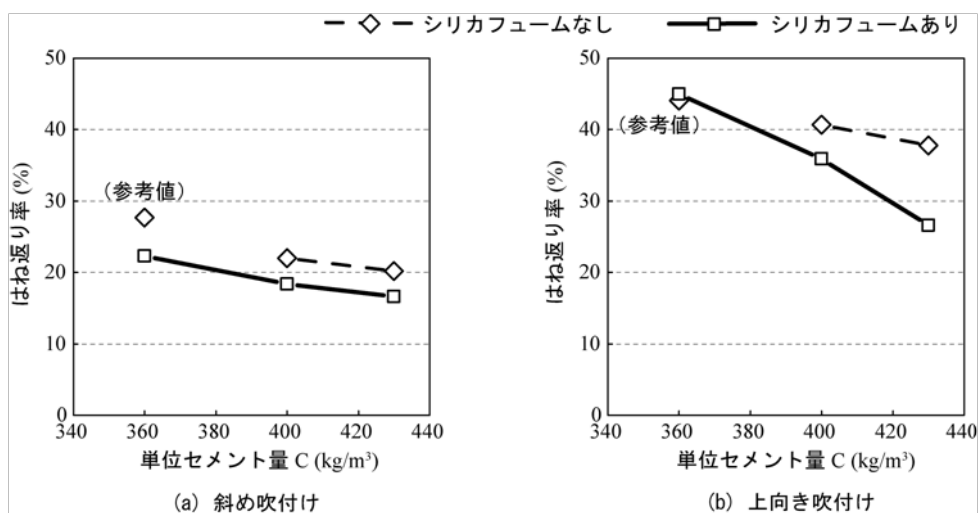


図-2.4 短繊維を混入した場合における単位セメント量とはね返り率との関係 (短繊維混入率 $V_f = 1.5\%$)

図-2.3 および図-2.4 を比較すると、単位セメント量小さい場合には、短繊維を混入する場合が混入しない場合よりもはね返り率が大きくなっていることがわかる。これは、短繊維とともにモルタル分もはね返っているためである。ただし、単位セメント量を増加させ、かつシリカフュームを混入することにより、短繊維を混入する場合においても短繊維を混入しない場合と同程度まではね返り率が低減されていることがわかる。

既存の資料によると、はね返り率は、湿式補修・補強用吹付けコンクリートの上向き施工の場合で 10 ~ 20 %¹⁾、鋼繊維補強乾式吹付けモルタルの横向き施工場合で 20 %¹⁾、トンネル吹付けの実績^{2), 12)}では概ね 20 ~ 30 % であることが明らかになっている。一方、本試験のうち短繊維を混入する場合には、C430-SF10-V1.5(単位セメント量 $C = 430\text{kg/m}^3$ 、シリカフューム置換率 $R_{sf} = 10\%$)配合のはね返り率が最も小さく、斜め吹付けおよび上向き吹付けの場合でそれぞれ、17 および 27 % 程度を示している。このことから、はね返り率は、急結剤を用いなくとも施工方法や配合を適切に設定することにより、従来の急結剤を用いる施工方法と同程度まで低減可能となることが明らかになった。

(3) 短繊維残留率

図-2.5 に、短繊維混入配合に関する単位セメント量と短繊維残留率との関係を示す。なお、前述の図-2.4 の場合と同様、C360-SF0-V1.5 配合 (スランプ 8 cm 程度の場合) の結果も参考値として示している。図より、短繊維残留率は、斜め吹付けの場合において上向き吹付けの場合よりも向上する傾向にあることがわかる。シリカフュームを混入しない場合の短繊維残留率は、吹付け向きによらず単位セメント量 $C = 400$ と 430 kg/m^3 の場合でほぼ同程度の結果を示している。一方、シリカフュームを混入した場合の短繊維残留率は、単位セメント量の増加とともに比例的に増加している。なお、シリカフュームの混入による短繊維残留率の改善効果は、上向き吹付けの場合において顕著に発揮されている。従って、上向き吹付けの場合において短繊維残留率を改善するためには、単位セメント量の増加のみならず、シリカフュームの混入を併用することが重要であるものと判断される。

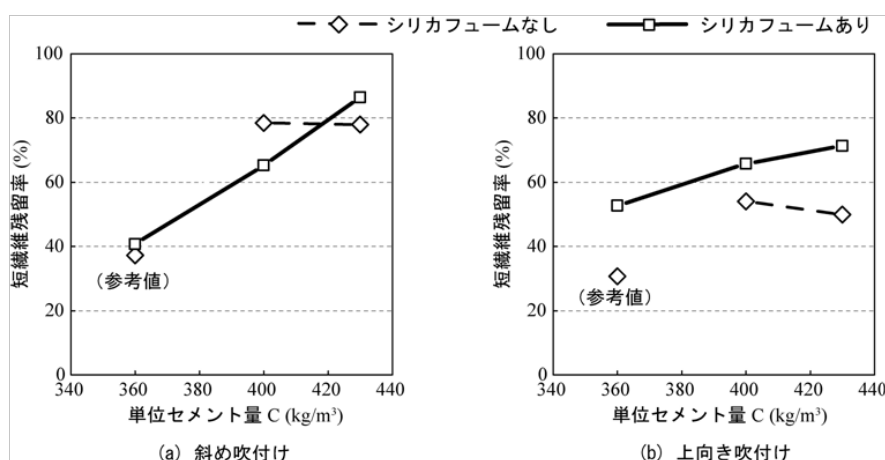


図-2.5 単位セメント量と短繊維残留率との関係 (Vf= 1.5 %)

吹付け指針 [補修・補強編]¹⁾ では、短繊維残留率は、超速硬セメントを用いた短繊維補強乾式吹付けコンクリートの横向き施工の場合で 50 % 程度、また吹付け指針 [トンネル編]²⁾ における急結剤使用時の吹付けコンクリートや既往の文献¹³⁾ では、80 ~ 90 % 程度との事例が報告されている。これらの実績を単位セメント量 $C = 400, 430 \text{ g/m}^3$ の場合の試験結果と比較すると、斜め吹付けの場合には上記の急結剤使用時におけるトンネル吹付けの場合と同程度、上向き吹付けの場合には前述の短繊維補強乾式吹付けの場合と同程度以上であることがわかる。

以上より、本研究において検討した補修・補強用吹付けコンクリートの短繊維残留率は、単位セメント量やシリカフューム置換率を適切に設定することにより、特殊セメントや急結剤を用いた過去の実績と同程度のレベルまで改善可能であることが明らかになった。また、本吹付けコンクリートでは、短繊維の混入により剥離・剥落の防止や引張靱性能の向上を期待していることより、実施工の際にはあらかじめ短繊維残留率を考慮して短繊維混入率 V_f を設定する必要があると考えられる。

なお、単位セメント量やシリカフューム置換率とセメントペーストの粘性との関係や、セメントペーストの粘性がはね返り率や短繊維残留率に及ぼす影響については、今後さらに検討していくことが必要であると判断される。

(4) シリカフューム置換率 R_{sf} の影響

ここでは、適切なシリカフューム置換率 R_{sf} を特定するために、単位セメント量 $C = 430 \text{ kg/m}^3$ 、短繊維混入率 $V_f = 1.5\%$ の配合を対象として、シリカフューム置換率 R_{sf} を 5 ~ 15% に変化させた場合のはね返り率や短繊維残留率について検討を行った。

図-2.6 に、はね返り率および短繊維残留率とシリカフューム置換率 R_{sf} との関係を示す。図より、はね返り率は、上向き吹付けの場合よりも斜め吹付けの場合の方が小さく、シリカフューム置換率 R_{sf} の増加とともに減少する傾向にあることがわかる。ただし、シリカフューム置換率 R_{sf} を 10% から 15% にすることによる効果は小さい。また、短繊維残留率は、斜め吹付けの場合では $R_{sf} = 10\%$ の場合で最も大きく、上向き吹付けの場合、シリカフューム置換率 $R_{sf} = 10, 15\%$ の場合で最大となっている。このように、シリカフュームを混入する場合において、短繊維残留率はシリカフューム置換率 R_{sf} が大きい場合ほど改善される傾向にあるものの、シリカフューム置換率 R_{sf} が 10% 以上の場合には改善効果が向上しないばかりか、逆に低下する場合もあることが明らかになった。

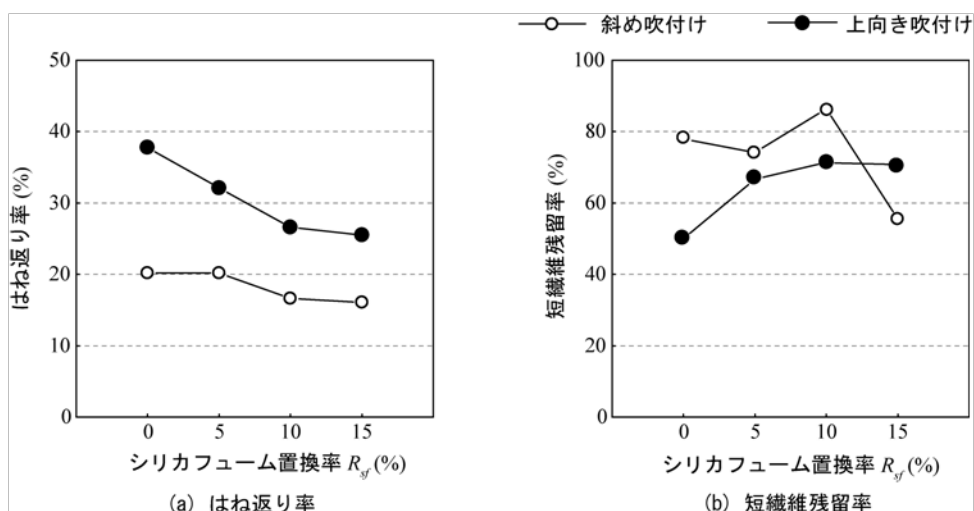


図-2.6 はね返り率および短繊維残留率に及ぼすシリカフューム置換率 R_{sf} の影響

なお、耐久性の観点からは、シリカフューム置換率 R_{sf} が 15% 程度を超える場合には良質な空気を連行したとしても凍結融解に対する抵抗性が低下する可能性があるため、厳しい気象作用を受ける場合にはシリカフュームを多量に使用することは好ましくないことが指摘されている⁶⁾。これより、本試験結果や上述の耐久性に関する既往の研究成果を基に総合的に判断すると、適切なシリカフューム置換率 R_{sf} は 10% 程度であると判断される。

2.4.4 補修・補強部位に対応した吹付けコンクリート配合の選定

本項では、前項までの試験結果をまとめて、既設コンクリート構造物の補修・補強部位に応じた適切な吹付けコンクリート配合について考察する。ここでは、各配合の付着性状、はね返り率および短繊維残留率を3段階(0、1、2)に点数化して、総合点で評価し考察を行うものとする(最高点6点)。表-2.10に、各項目の評価基準を示す。なお、これらの評価点は、本研究において対象とした吹付けコンクリートの施工性を簡易に評価するために設定したものである。付着性状の評価基準は、前述の表-2.8に示したものと同様である。

表-2.10 施工性に関する評価基準

評価点	付着性状	はね返り率	短繊維残留率
0	×	30%以上	50%以下
1	△	20～30%	50～70%
2	○	0～20%	70～100%

表-2.11に、短繊維を混入した配合に関する斜めおよび上向き吹付けの場合の評価点を示す。表より、斜め吹付けの場合には、C430-SF10-V1.5配合の評価点が最も高いことがわかる。次に、その他のC430配合およびC400配合の評価点が高い。一方、評価点が最も小さいのはC360配合であり、特に表-2.9を参照すると、短繊維残留率が40%程度と極めて小さいため、実施工への適用は困難であると考えられる。これらのことから、斜め吹付けの施工性は、単位セメント量が最も多くかつシリカフェーム置換率を10%としたC430-SF10-V1.5配合が最も良好であるが、上記の配合よりも単位セメント量が少なく、シリカフェームを混入しないC400-SF0-V1.5配合の使用も考えられる。ただし、配合選定においては、製造時のコンクリートの材料コストのみではなく、はね返り率による必要材料の増加やはね返り材の処理費用も必要になることからそれらを考慮して判断していく必要がある。また、適用に際して壁面や構造物側面のような鉛直面を施工する場合には、吹付け施工性を確認する必要があると考えられる。

表-2.11 短繊維混入配合における施工性評価点の一覧

配合名	斜め吹付け				上向き吹付け			
	付着 性状	はね返り 率	短繊維 残留率	総合点	付着 性状	はね返り 率	短繊維 残留率	総合点
C360-SF0-V1.5	2	1	0	3	0	0	0	0
C360-SF10-V1.5	2	1	0	3	0	0	1	1
C400-SF0-V1.5	2	1	2	5	1	0	1	2
C400-SF10-V1.5	2	2	1	5	1	0	1	2
C430-SF0-V1.5	2	1	2	5	2	0	1	3
C430-SF5-V1.5	2	1	2	5	2	0	1	3
C430-SF10-V1.5	2	2	2	6	2	1	2	5
C430-SF15-V1.5	2	2	1	5	2	1	2	5

上向き吹付けの場合は、全般的に斜め吹付けの場合よりも評価点が低いことがわかる。最も評価点が高い配合は、C430-SF10-V1.5 および C430-SF15-V1.5 配合である。ただし、これらの評価点は、シリカフェーム置換率 R_{sf} によらず同様であり、前述のとおり $R_{sf} = 15\%$ を超えると凍結融解抵抗性が低下する場合がある。このため、本試験の範囲内においては $R_{sf} = 10\%$ である C430-SF10-V1.5 配合が最も適切であるものと判断される。なお、その他の配合は評価点が低く、表-2.9 のはね返り率や短繊維残留率の結果を考慮すると、上向きの施工には適さないと考えられる。このことから、構造物の底面や裏面等に上向き施工する場合には、単位セメント量の増加のみならずシリカフェームを適切に併用することが重要であると考えられる。

さらに、吹付けコンクリートによる既設構造物の適切な補修・補強のためには、鉄筋背面やコンクリート橋脚・橋台の沓座周辺、および主桁間のような狭隘部や隅角部への充てん性の確保が重要となる。そのため、実施工にあたっては、各構造物に対する吹付け施工性を確認することや、部分的に施工方法を変更すること等が必要であると考えられる。また、吹付けコンクリートの品質にはノズルマンの技量が大きく影響するため、ノズルマンには吹付けコンクリート工法による補修・補強に関する技能を十分に有している者を選定する必要がある。今後は、ノズルマンの資格認定制度等についても検討することが重要であると考えられる。

2.5 まとめ

本研究では、既設コンクリート構造物の経済的な補修・補強用吹付けコンクリートの開発を目的に、比較的安価で急結剤やポリマー材料を用いないのり面用湿式吹付けコンクリートに、ポリビニルアルコール短繊維 (PVA 短繊維) を混入する方法を提案し、その施工性向上に関する検討を行った。試験は、単位セメント量やシリカフェーム置換率および短繊維混入率を変化させた施工試験により、適切な圧送圧力や吐出量などを選定して、その条件下において各パラメータがはね返り率や短繊維残留率に及ぼす影響について検討した。また、試験結果に基づいて各配合に対する施工性を総合評価し、補修・補強部位に対応した吹付けコンクリートの配合に関する検討を行った。

検討の結果、本試験研究の範囲内で得られた事項を整理すると、以下の通りである。

- 1) 吹付けコンクリートの配合によらず、圧送圧力 p が大きい程、施工性が良好になる傾向にある。これは、圧送圧力 p の増加に伴って、吐出性状が脈動のないスムーズなものになるとともに、付着コンクリートの締め固まりも良好になるためである。
- 2) 圧送圧力 $p = 0.5 \text{ MPa}$ 程度の場合には、ノズルマンへの負担が大きくなるとともに、付着コンクリートが強固に締め固められコテ均しが困難になるため施工性は低下する。
- 3) 本試験における、最適な吐出量 q および圧送圧力 p は、それぞれ、 $q = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $p = 0.4 \text{ MPa}$ であった。
- 4) 単位セメント量を増加させることにより、上向き吹付けの場合における付着性能が向上するとともに、はね返り率や短繊維残留率も改善される。
- 5) 単位セメント量の一部をシリカフェームで置換することにより、はね返り率の低下や短繊維残留率の向上が期待できる。この傾向は、上向き吹付けの場合に、より効果的に発揮される。また、最適なシリカフェーム置換率は、 $R_{sf} = 10\%$ であった。
- 6) 壁面や構造物側面のような鉛直面を施工する場合には、単位セメント量を 400 kg/m^3 程度としシリカフェームを混入しない配合の適用も考えられる。ただし、この場合には、コンクリート材料のコストの他、材料のはね返りによる影響も考慮して判断する必要がある。
- 7) 構造物の底面や裏面の補修・補強を効率的に行うためには、単位セメント量の増加のみならずシリカフェームの混入も適切に組み合わせることが重要である。

本章では、合理的な補修・補強用吹付けコンクリートの開発に向けて、その施工性に着目して検討を行ったが、圧送圧力、吐出量、単位セメント量、シリカフューム混入率および短繊維混入率などのパラメータは、吹付けコンクリートの硬化後の特性にも影響を及ぼすことが考えられる。これまでの著者らによる補修・補強用吹付けコンクリートの開発に向けた一連の試験では、良好な施工性が確認された配合について、力学特性や耐久性に関する検討も行っている。特に代表的な結果として、圧縮強度に関しては、通常の打込みコンクリートと同様、単位セメント量が多く 水セメント比 W/C が小さい場合やシリカフュームを使用する場合に圧縮強度が大きくなる傾向にあることを確認しており、いずれの配合においても 40 MPa 以上の強度を有していることを確認している。

参考文献

- 1) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案) [補修・補強編]，2005
- 2) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案) [トンネル編]，2005
- 3) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案) [のり面編]，2005
- 4) 土木学会：岩盤斜面保護用吹付けコンクリートー現状と今後の課題ー，コンクリート技術シリーズ 51，2003
- 5) 田口史雄，吉田行，栗橋祐介，石田積：ポリビニルアルコール短繊維を混入した吹付けコンクリートの耐久性に関する研究，第 4 回コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム，Vol.4，pp.245-252，2004
- 6) 土木学会：シリカフェームを用いた設計・施工指針(案)，1995
- 7) 石関嘉一，駒田憲司，西村次男，魚本健人：混和材が吹付けコンクリートの施工性およびリバウンドに及ぼす影響，第 55 回土木学会年次講演会講演概要集，第 5 部，pp.434-435，2000
- 8) 小林裕二，岡田蕃，保岡哲治，魚本健人：湿式吹付けコンクリートの壁面における衝撃力と品質の関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.1345-1350，2001
- 9) 安藤慎一郎，大野俊夫，伊藤正憲，魚本健人：吹付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹付け条件の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1351-1356，1999
- 10) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案) [補修・補強編]，吹付けコンクリート関連の土木学会規準，pp.81-133，2005
- 11) 荒木昭俊，平間昭信，伊東良浩，西村次男：各種配合要因の変化に伴う吹付けコンクリートのフレッシュ性及びリバウンド特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.1159-1164，1998
- 12) 荒木昭俊，西村次男，魚本健人：吹付けコンクリートの配合推定と吹付けメカニズム，コンクリート工学論文集，第 11 巻，第 2 号，pp.1-9，2000
- 13) 清水哲史，伊藤正憲，田中斉，魚本健人：繊維補強吹付けコンクリートの配合設計手法に関する一提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.1369-1374，2001
- 14) 谷口秀明，山本泰彦，牛島栄：高強度吹付けモルタルの品質に及ぼす吹付け条件の影響に関する研究，土木学会論文集，No.697/V-54，pp.117-130，2002
- 15) 石関嘉一，駒田憲司，西村次男，魚本健人：混和材が吹付けコンクリートの施工性およびリバウンドに及ぼす影響，第 55 回土木学会年次講演会講演概要集，第 5 部，pp.434-435，2000

第3章 連続繊維メッシュや短繊維混入吹付けコンクリートに関する各種材料試験 および材料特性の評価

3.1 はじめに

コンクリート構造物を効率的に管理するためには、定期的な点検調査が必要であることは勿論であるが、すでにコンクリートの劣化が生じている場合には適切な補修・補強等の対処が必要になる。これまで、コンクリート構造物の用途および建設されている条件や環境に応じて様々な補修・補強工法が開発され適用されてきた。特に最近では、鋼材や連続繊維等の補強材料とポリマーセメント吹付けモルタルを併用する工法も多く用いられている。しかしながら、ポリマーセメント吹付けモルタルの場合には、時間当たりの施工能力が比較的小さいことや材料コストの課題も指摘されている。一方、積雪寒冷地において実績が多いのり面用湿式吹付けコンクリートは、ポリマーや急結剤等の特殊な材料を使用せずに現場練混ぜにより製造するため、コストが比較的安くかつ施工能力も大きいという特徴を有している。従って、適切な配合および施工方法を設定することにより、経済的な補修・補強用吹付けコンクリートとして適用できる可能性があると考えられる。

このようなことから、本章では、合理的かつ経済的な補修・補強用吹付けコンクリートの開発を目的に、一般的なのり面用湿式吹付けコンクリートを基本とした配合に ポリビニルアルコール(以下 PVA とする) 短繊維を混入する方法を提案し、その実用化に向けて種々の耐久性および力学特性試験を実施した。特に、本試験では、吹付け施工によるコンクリートの凍結融解抵抗性の低下が見られたため、吹付けコンクリートの気泡分布測定を行い凍結融解抵抗性の低下要因の検討を行うとともに、中空微小球混入による凍結融解抵抗性の改善効果に関する検討を行った。また、PVA 短繊維の混入による吹付けコンクリートの引張特性の改善効果や、塩化物イオン浸透抵抗性、圧縮・引張強度、付着強度および長さ変化率の測定も行った。

なお、提案の吹付けコンクリートの施工能力は $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、従来の一般的な補修・補強用吹付けコンクリート¹⁾の場合($0.2 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$)と比較して、約 1.5 ～ 7 倍の時間当たり施工量となる。

3.2 試験概要

3.2.1 吹付けコンクリートの配合

表-3.1に吹付けコンクリートの基本配合を示す。この配合は、吹付け指針 [のり面編]²⁾を参考に、寒冷地において施工実績の多いのり面用湿式吹付けコンクリートの配合 ($C = 360 \text{ kg}/\text{m}^3$, $C:S:G = 1:4:1$) を基本配合として、単位セメント量やシリカフェーム置換率(単位セメント量に対する置換率)を変化させた施工試験結果に基づいて決定されたものである。配合決定にあたっては、経済性を考慮し、かつ吹付け後の表面仕上げを可能にするため、ポリマー材料や急結剤は使用しないこととしている。また、吹付けコンクリートの靱性能の向上を目的に、親水性を有しセメントマトリクスとの付着性能に優れている PVA 短繊維を混入することとした。

表-3.1 吹付けコンクリートの基本配合

W/B (%)	単位量(kg/m ³)				
	W	C	SF	S	G
43	185	387	43	1365	340

B=C+SF, SF: シリカフューム

図-3.1 に、配合決定のために実施した施工性に関する試験結果の一例を示す。試験は、一般的なのり面用吹付けコンクリートに適用されている単位セメント量 C の範囲を参考に、さらに吹付けコンクリートの上向き施工や耐久性向上も考慮して C=360 ~ 430 kg/m³ の場合について検討した。また、試験は 1 m 四方程度のコンクリート版に上向きに吹き付ける方法で行った。なお、図中の短繊維残留率は、吹付け前の短繊維混入率に対する吹付け後の付着コンクリート中の短繊維混入率の割合である。短繊維残留率の測定は、1) 吹付け後の付着コンクリートを約 2 リットル採取し、2) 水洗いにより短繊維を抽出して十分に乾燥させた後、3) 重量測定値を体積換算することにより行った。はね返り率は、吹付け標準の吹付けコンクリート(モルタル)のはね返り率試験方法(案)(JSCE-F 563-2005)に準拠して測定し評価した。

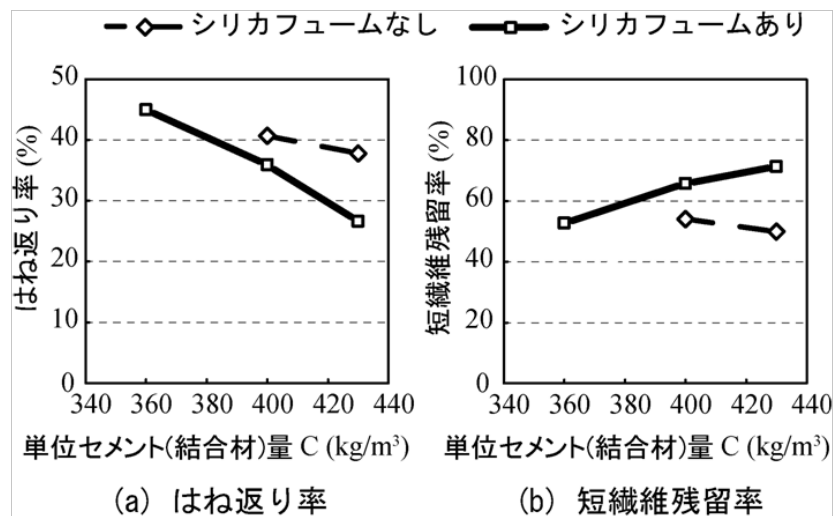


図-3.1 施工試験結果の一例（上向き施工の場合）

図-3.1 より、単位セメント量が多くかつシリカフュームを混入する場合において、最もはね返り率が小さく短繊維残留率が大きくなる傾向にあることがわかる。これは、単位セメント量の増加に加え、シリカフュームを混入することにより吹付けコンクリートの粘性が高くなったため³⁾と考えられる。このことから、本研究に用いた吹付けコンクリートの配合は、前述の一般的なのり面用吹付けコンクリート配合の範囲内においてセメント量を多くし、かつシリカフュームを混入することを基本としている。

3.2.2 使用材料

表-3.2 に使用材料の一覧を示す。補修・補強用の吹付けコンクリートには、早期の強度発現が求められる場合が多いため、本研究ではセメントに早強セメントを用いている。PVA 短繊維の長さ L は、短繊維の架橋効果を効率的に発揮させるため、粗骨材の最大寸法 $G_{max} = 10 \text{ mm}$ より長い $L = 30 \text{ mm}$ とした。なお、吹付けコンクリートは、吹付け時の圧力により、凍結融解抵抗性に有効な気泡が消失して耐久性が低下することが指摘されており^{4)~6)}、本研究においても同様の傾向が見られた。そのため、本研究では、吹付け施工時における気泡の消失を抑えることを目的として、直径 $50 \mu\text{m}$ 程度の微小な中空球体(以下、中空微小球とする)を混入し凍結融解抵抗性の改善を図るケースについても検討を行うこととした。写真-3.1、写真-3.2 に、それぞれ本研究で採用した PVA 短繊維および中空微小球を示す。

表-3.2 使用材料の一覧

材料	記号	種類	物性および主成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 3.14 g/cm^3 , 比表面積 $0.45 \text{ m}^2/\text{g}$
混和材	SF	中国産シリカフェーム	密度 2.20 g/cm^3 , 比表面積 $19.1 \text{ m}^2/\text{g}$
細骨材	S	苫小牧産海砂	密度 2.68 g/cm^3 , 粗粒率 2.85, 吸水率 1.38
粗骨材	G	小樽産碎石	密度 2.68 g/cm^3 , 最大寸法 10 mm , 吸水率 2.73
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリグリコールエステル誘導体
	AE	AE 剤	変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤
短繊維	VF	PVA 短繊維 (外割配合)	直径 0.66mm , 長さ 30mm , 弾性係数 29.4Gpa
			引張強度 0.88GPa , 破断歪 7%
中空微小球体	VS	塩化ビニルアクリロ ニトリル(外割配合)	密度: 0.037g/cm^3 , 直径: $50\mu\text{m}$ 程度



写真-3.1 PVA 短繊維

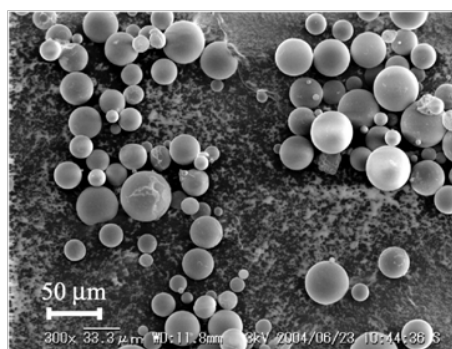


写真-3.2 中空微小球

3.2.3 吹付けコンクリートの製造方法

吹付けコンクリートの製造は、まず骨材、セメントおよび PVA 短繊維を投入して 30 秒間各材料を混ぜ合わせた後、水を投入して 2 分間練り混ぜることにより行った。なお、中空微小球を用いる場合には、水に溶解させて練り混ぜた。短繊維および中空微小球の計量は、各材料の密度により重量換算して行った。

3.2.4 吹付けシステムおよび使用機器

表-3.3 に吹付けコンクリートを施工するための使用機材の一覧を示す。また、図-3.2 に吹付けシステムの概要を示す。本研究では、のり面吹付け等において実績のあるスランプ 4 ~ 7 cm 程度の比較的硬練りのコンクリートをスムーズに圧送可能なピストン式ポンプを用いている。吹付けは、図に示しているように、エアコンプレッサーからの圧縮空気により、ポンプから吐出されたコンクリートをマテリアルホースで 20 m 圧送して行った。なお、コンクリートの時間当たり吐出量および吐出部付近の圧縮空気圧力は、2.3 で実施した事前検討に基づき、それぞれ $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 0.4 N/mm^2 とした。

表-3.3 吹付けコンクリート施工用機器の仕様

使用機器	仕様
ポンプ	ピストン式，吐出量 $1 \sim 7 \text{ m}^3/\text{h}$
ミキサー	ボルテックスミキサー，容量 0.2 m^3
コンプレッサー	容量 18.5 m^3
発電機	75kVA

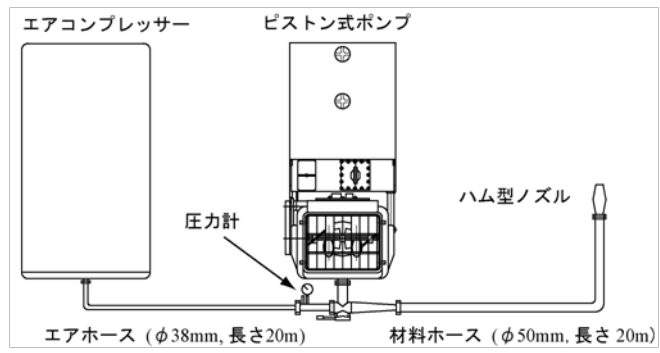


図-3.2 吹付けシステムの概要

3.2.5 試験要因

表-3.4 に試験ケースの一覧を示す。試験は、短繊維および中空微小球の混入率、施工方法を変化させた全 13 種類の供試体を対象に実施した。供試体名の第 1 項目の英文字 F に付随する数値は短繊維の体積混入率(以下、短繊維混入率とする) V_f (%) を示しており、第 2 項目の英文字 S に付随する数値は中空微小球の体積混入率(以下、中空微小球混入率とする) V_s (%) を示している。なお、第 2 項目の末尾に A、AH と示されている供試体は、中空微小球を混入しない場合において、AE 剤の添加により空気量がそれぞれ 7、11 % 程度になるように調整されていることを示している。ここで、空気量 7 % は、通常の打込み施工の場合において凍結融解抵抗性確保に必要とされる量の上限值として設定し、11 % はさらに凍結融解抵抗性の検討のために設定したものである。第 3 項目の英文字 C は、打込み施工により供試体を作製したことを示している。なお、打込み施工の供試体は、施工方法(吹付け、打込み)の違いが耐凍害性や気泡分布に及ぼす影響について検討するために作製したものである。

表-3.4 試験ケース一覧

供	短繊維 混入率 V_f (%)	中空 微小球 混入率 V_s (%)	施工 方法	耐久性試験			力学特性試験				長さ 変化 試験
				凍結 融解 試験	気泡 分布 測定	塩化物 イオン 浸透 試験	圧縮 強度 試験	割裂 引張 試験	一軸 引張 試験	付着 試験	
F0-S0A	0	0 ^{*1}	吹付け	○							
F1.5-S0	1.5	0		○	○	○	○				
F1.5-S0A		0 ^{*1}		○	○						
F1.5-S0AH		0 ^{*2}		○							
F1.5-S1.5		1.5		○	○	○	○				
F0-S3.0	0	3.0		○		○	○	○	○	○	○
F0.5-S3.0	0.5			○		○	○	○	○	○	○
F1.0-S3.0	1.0			○		○	○	○	○	○	○
F1.5-S3.0	1.5			○	○	○	○	○	○	○	○
F0-S0A-C	0	0 ^{*1}	打込み	○							
F1.5-S0A-C	1.5	0 ^{*1}		○	○						
F1.5-S1.5-C		1.5		○	○						
F1.5-S3.0-C		3.0		○	○						

*1: AE 剤を C×0.01% 使用, *2: AE 剤を C×0.04% 使用

参考として、表-3.5 に各配合における混和剤量、養生方法、スランプおよび空気量の一覧を示す。

表-3.5 各配合における混和剤量，養生方法およびフレッシュ性状の一覧

配合名	SP (C×%)	AE (C×%)	養生 方法	スランプ (cm)	空気量 (%)
凍結融解試験，気泡分布測定，塩化物イオン浸透試験					
F0-S0A	0.60	0.01	水中	5.1	7.4
F1.5-S0	0.65	-	水中	4.6	4.2
F1.5-S0A	0.65	0.01	水中	4.7	7.9
F1.5-S0AH	0.70	0.04	水中	5.9	11
F1.5-S1.5	0.65	-	水中	5.9	-
F0-S3.0	0.55	-	水中	4.3	-
F0.5-S3.0	0.65	-	水中	4.1	-
F1.0-S3.0	0.70	-	水中	5.6	-
F1.5-S3.0	0.70	-	水中	5.7	-
F0-S0A-C	0.60	0.01	水中	5.1	7.4
F1.5-S0A-C	0.65	0.01	水中	4.7	7.9
F1.5-S1.5-C	0.65	-	水中	5.9	-
F1.5-S3.0-C	0.70	-	水中	5.7	-
圧縮強度試験					
F1.5-S0	0.65	-	水中	4.3	4.6
F1.5-S1.5	0.65	-	水中	4.5	-
F0-S3.0	0.55	-	水/気中	4.1	-
F0.5-S3.0	0.65	-	水/気中	4.7	-
F1.0-S3.0	0.70	-	水/気中	4.2	-
F1.5-S3.0	0.70	-	水/気中	5.3	-
割裂引張試験，一軸引張試験，付着試験，長さ変化試験					
F0-S3.0	0.55	-	気中	4.1	-
F0.5-S3.0	0.65	-	気中	4.7	-
F1.0-S3.0	0.70	-	気中	4.2	-
F1.5-S3.0	0.70	-	気中	5.3	-

SP：性能減水剤，AE：AE 剤

3.2.6 試験項目

(1) 耐久性試験

耐久性試験は、主な検討項目である凍結融解試験および気泡分布測定に加えて塩化物イオン浸透試験を実施した。凍結融解試験は、吹付け施工による吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性の低下が懸念されたことから、施工方法や中空微小球および短繊維の混入率が吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検討するために実施した。気泡分布測定は、施工方法や中空微小球の混入が硬化コンクリートの気泡分布に及ぼす影響を検討するとともに、硬化後のコンクリートの空気量や気泡間隔係数と凍結融解抵抗性との関係を検討するために行った。また、塩化物イオン浸透試験は、吹付けコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす中空微小球や短繊維混入率の影響を確認するために行った。なお、耐久性試験用の供試体は、養生条件によるセメントの水和反応のばらつきを極力小さくするため、試験日まで全ての供試体を水中養生した。

(2) 力学特性試験および長さ変化試験

力学特性試験に関しては、主な検討項目である吹付けコンクリートの引張特性のほか、基本的な性能として圧縮強度および付着性能について検討を行った。また、収縮特性についても検討した。これらの試験は、いずれも短繊維混入率 V_f をパラメータとして実施した。

なお、中空微小球を混入する場合には、空気量の増加に伴う圧縮強度の低下が懸念されたことから、圧縮強度試験の場合のみ、中空微小球混入率が異なるケースについても検討を行った。力学特性試験用の供試体は、実構造物の補修・補強工事の環境を想定し、実状に近い条件で評価するために、試験日まで F1.5-S0 および F1.5-S1.5 を除く全ての供試体を気中養生した。なお、圧縮強度試験の場合には、全ての検討ケースにおいて水中養生する場合についても検討した。

3.2.7 試験方法

(1) 試験体の作製

吹付けコンクリート供試体は、吹付け指針¹⁾の吹付けコンクリート(モルタル)の力学および耐久性試験用供試体の作り方(案)(JSCE-F 562-2005)に準拠して作製した。すなわち、1) 吹付け面積 60×60 cm、深さ 50 cm 程度のパネル型枠を地表面から 70°傾斜させて設置し、2) コンクリートを吹き付けてパネル供試体を作製し、3) 硬化後、コアボーリングマシンやコンクリートカッターを用いて φ ~~100~~ 柱供試体もしくは 10×10×40 cm の角柱供試体を切り出すことにより作製した。なお、これらの供試体は、パネル供試体の各表面から 5cm 以上内部から切り出すこととしている。打込み供試体は、JIS A 1132 「コンクリート強度試験用供試体の作り方」に準拠して作製した。

養生期間は、水中および気中養生の場合ともに 28 日とした。なお、圧縮強度試験については、養生期間 7 日間での早期強度を確認するための供試体も作製した。気中養生の場合には、恒温恒湿室において、温度 20 ± 2 °C、湿度 60 ± 5 % の環境下で養生した。また、水中養生の場合には、コンクリートの切り出し作業時のみ養生槽からコンクリートを引き揚げることとし、各供試体作製後、再度所定の材齢まで水中養生している。養生温度は 20 ± 2 °C とした。

(2) 凍結融解試験および気泡分布測定

凍結融解試験は、パネル供試体から角柱供試体を切り出し、JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法-A 法(水中凍結融解試験方法)⁷⁾に準拠して行った。また、凍結融解抵抗性に及ぼす気泡分布の影響を検討するため、硬化後の空気量測定および気泡分布測定を行った。これらの測定は、ASTM C 457 のリニアトラバース法に準拠し、かつエントレインドエアに相当する直径 50 ~ 500 μm の気泡⁸⁾を対象に行った。

(3) 塩化物イオン浸透試験

塩化物イオン浸透抵抗性は、電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数試験法 (JSCE-G571-2003)⁷⁾により評価した。供試体は、パネル供試体よりコア抜きした円柱供試体の高さ方向の中央から上下 50 mm 厚の円盤状供試体を 2 個切り出して作製した。

(4) 圧縮強度および割裂引張試験

圧縮強度および割裂引張強度試験は、パネル供試体からコア抜きした円柱供試体を用い、それぞれ JIS A 1108 および JIS A 1113⁷⁾に準拠して行った。

(5) 一軸引張試験

一軸引張試験は、圧縮強度および割裂引張試験の場合と同様、パネル供試体からコア抜きした円柱供試体を用いて行った。なお、吹付け施工により、短繊維が施工面に対して平行に2次元的に配向する可能性が考えられたことから、吹付け方向と同じ方向および直角方向にコア抜きする2種類の供試体を作製した。試験は、**図-3.3** および**写真-3.3** に示しているような、圧縮力 P を載荷することで円柱供試体に簡易に引張力を作用させることが可能な鋼製治具を用いて行った。この治具は、載荷板に作用した圧縮力 P が下部ガイドリングを押し下げることにより、供試体に引張力を作用させる仕組みになっている。載荷は、万能試験機を用いて載荷速度 0.01 mm/s 程度で行った。測定項目は、荷重および変位であり、それぞれロードセルおよびパイゲージを用いて測定している。

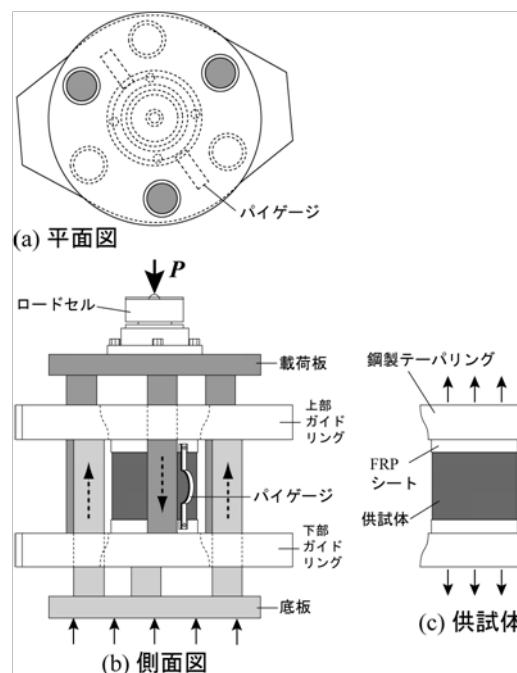


図-3.3 一軸引張試験の概要

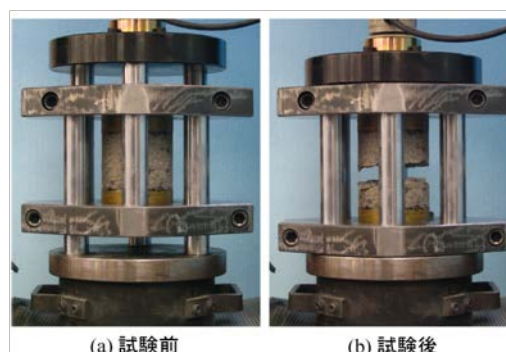


写真-3.3 一軸引張試験の状況

(6) 付着試験

付着試験は、中央部に普通コンクリートと吹付けコンクリートの界面を有する円柱供試体を用い、前項の一軸引張試験と同様の方法で供試体に引張力を作用させることにより実施した。供試体は、以下の手順により作製した。すなわち、1) パネル型枠の半分の高さまで普通コンクリートを打ち込み、2) 硬化後、バキュームブラスト工法によりコンクリート表面を処理深さ 1 mm 程度で目荒らしして、3) 残りの半分を吹付けコンクリートで施工し、4) 硬化後、円柱供試体をコア抜きして作製した。なお、普通コンクリートには、水セメント比 53 %、細骨材率 43 % のレディーミクストコンクリートを用いた。また、普通コンクリートの圧縮強度は、後述の試験結果にも示しているように材齢によって若干異なり 30~38 N/mm² である。

(7) 長さ変化試験

長さ変化試験は、ダイヤルゲージ法 (JIS A 1129-3)⁷⁾ により実施した。初期材齢における自己収縮を極力含む形で長さ変化量を測定するため、供試体は、吹付け指針¹⁾ の補修・補強用吹付けコンクリート (モルタル) の長さ変化試験法 (案)(JSCE-G 564) に準拠し、10 × 10 × 40 cm の鋼製型枠を 70° の角度に設置して直接吹き付ける形で作製した。測定は、吹付け施工を終了した 24 時間後に基長測定を行い、84 日 (12 週) まで継続した。

3.3 耐久性に関する試験結果

3.3.1 凍結融解抵抗性

図-3.4 に各試験体の凍結融解試験結果を示す。図には、吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす (a) 施工方法、(b) 吹付け前の空気量、(c) 中空微小球混入率 V_s および (d) 短繊維混入率 V_f の影響に着目した結果について示している。以下、吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす各パラメータの影響について考察する。

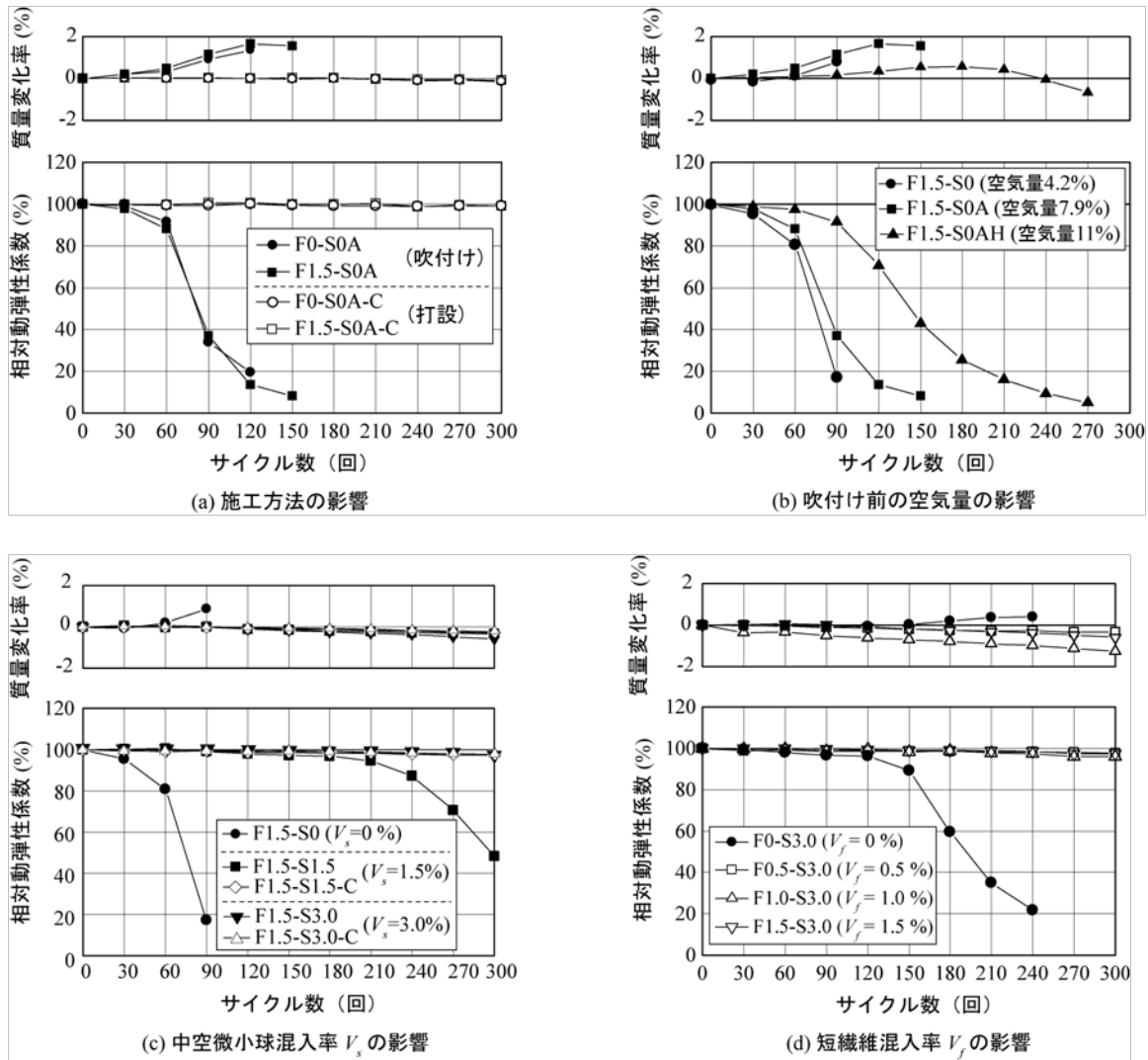


図-3.4 各試験体の凍結融解試験結果

(1) 施工方法の影響

図-3.4(a) に、施工方法が異なる場合に関する凍結融解試験結果を、短繊維混入率を $V_f = 0, 1.5\%$ としたケースについて示す。なお、空気量は AE 剤により 7~8% に調整している。

図より、短繊維混入率 V_f に関わらず、打込み施工する場合には相対動弾性係数が 300 サイクルまでほぼ 100% を確保していることがわかる。これに対し、吹付け施工する場合には、60 サイクル以降で相対動弾性係数が急激に低下している。これは、フレッシュコンクリートが凍結融解抵抗性に有効な気泡を有している場合においても、吹付け施工時に消失すること等によるものと推察される。

吹付けコンクリートの質量変化率は、相対動弾性係数の低下とともに大きくなっていることがわかる。これは、スケーリングによる質量減少よりも、凍結融解作用によって発生した微細ひび割れに水分が浸入することによる質量増加の影響の方が大きいと考えられる。このような傾向は、以降の凍結融解試験結果においても、吹付けコンクリートの相対動弾性係数が低下する場合に同様に見られる。

(2) 吹付け前のコンクリートの空気量の影響

上述の(1)では、吹付け施工により良質な気泡が消失し凍結融解抵抗性が低下することが推察された。そのため、ここでは吹付け前の空気量の増量による凍結融解抵抗性向上効果の検討を目的に、AE 剤量を調整して空気量を変化させた場合について検討した。

図-3.4(b) に吹付け前のコンクリートの空気量が異なる場合の結果を示す。図より、吹付け前のコンクリートの空気量を 11% 程度まで増加させることによって、相対動弾性係数が急激に低下するサイクル数が 60 から 90 サイクルに移行しているものの、十分な凍結融解抵抗性の改善には至っていないことがわかる。ここで、F1.5-S0 および F1.5-S0A の吹付け前のコンクリートの空気量は、それぞれ 4.2、7.9% であるが、硬化後には 0.9、1.3% と大きく減少していることを確認している。このことから、吹付け施工により空気量が大きく低下し、凍結融解抵抗性が低下したことがわかる。

(3) 中空微小球混入率 V_s の影響

図-3.4(c) に、短繊維混入率 $V_f = 1.5\%$ の条件下において、中空微小球を混入する場合に関する凍結融解試験結果を示す。また、打込み施工した F1.5-S1.5-C および F1.5-S3.0-C の結果もあわせて示す。図より、吹付けコンクリートの場合には中空微小球を混入することによって凍結融解抵抗性が向上し、特に中空微小球混入率が $V_s = 3.0\%$ の場合には、300 サイクルにおいても相対動弾性係数の低下が見られないことが確認できる。このことより、短繊維を混入した吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性は、中空微小球を混入することによって改善可能であることが明らかになった。これは、中空微小球は、AE 剤により連行された気泡と異なり被膜で形成されているため、吹付け施工後においても気泡が消失しにくいことによるものと考えられる。これより、本試験の範囲内では、中空微小球混入率を $V_s = 3.0\%$ とすることにより、300 サイクルまで相対動弾性係数の低下をほぼ抑制できることが明らかになった。なお、打込み施工した供試体の場合には、中空微小球混入率 V_s によらず、300 サイクルまで相対動弾性係数がほとんど低下していない。

(4) 短繊維混入率 V_f 影響

前述(3)の検討では、短繊維混入率 $V_f = 1.5\%$ の条件下において、中空微小球混入率を $V_s = 3.0\%$ とすることにより、300 サイクルまで相対動弾性係数がほとんど低下しないことが明らかになった。ここでは、中空微小球混入率を $V_s = 3.0\%$ として、短繊維混入率を $V_f = 1.5\%$ から 0% まで変化させた場合の凍結融解抵抗性について検討した。

図-3.4(d)には、中空微小球混入率 $V_s = 3.0\%$ の条件下、短繊維混入率を $V_f = 0, 0.5, 1.0, 1.5\%$ に変化させた場合の凍結融解試験結果を示している。図より、短繊維混入率 $V_f = 0\%$ である F0-S3.0 の相対動弾性係数は、中空微小球を混入せずに AE 剤を添加した F0-S0A の場合 (図-3.4(a) 参照) と比較して大きなサイクル数で低下しているものの、300 サイクル到達前に 20% 程度まで低下している。これに対し、 $V_f = 0.5\%$ 以上の場合には、いずれのケースにおいても、300 サイクルまで相対動弾性係数の低下はほとんど見られない。これは、文献 9) にも示されているように、コンクリート中の水分の凍結膨張に伴う微細クラックの発生・進展が、短繊維の混入によって抑制されたことによるものと考えられる。

これらのことから、短繊維が混入されていない場合においても、中空微小球の混入により凍結融解抵抗性が向上する傾向が見られたものの十分な抵抗性を確保するには至らず、さらに短繊維を併用することにより 300 サイクルまで相対動弾性係数の低下を抑制できることが明らかになった。

3.3.2 気泡分布特性

凍結融解試験結果では、吹付け施工することによりコンクリートの凍結融解抵抗性が低下することや、中空微小球の混入により短繊維混入吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性が改善されることが確認された。ここでは、施工方法、AE 剤使用の有無および中空微小球混入率 V_s を変化させた場合における気泡分布測定を行い、吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性と硬化後の空気量や気泡分布性状との関係について検討を行った。

図-3.5 に、施工方法が異なる場合の気泡分布測定結果を中空微小球混入率 V_s 毎に示す。なお、 $V_s = 0\%$ の場合には、AE 剤を用いて吹付け前のコンクリートの空気量を 7.9% としている。また、 $V_s = 1.5, 3.0\%$ の場合には、AE 剤を使用していない。

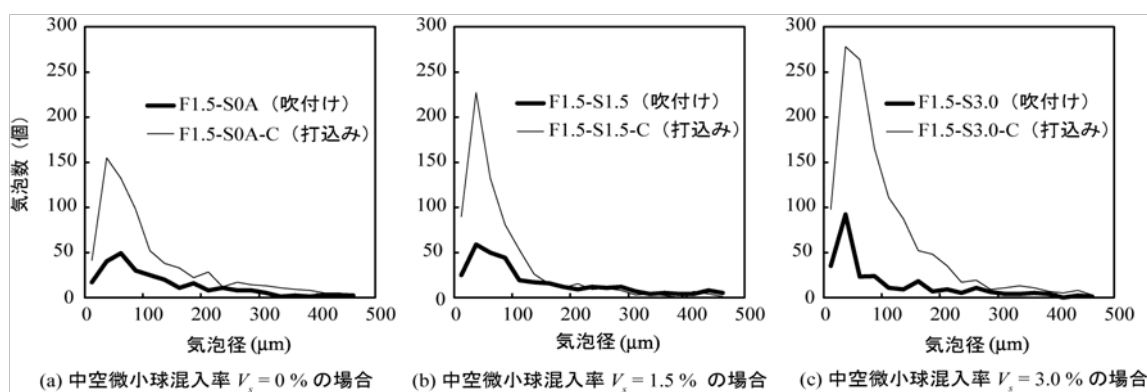


図-3.5 打込みおよび吹付けコンクリートの気泡分布測定結果

図より、打込み施工の場合には、いずれのケースにおいても直径 $100\ \mu\text{m}$ 程度以下の気泡数が多く、特に直径 $50\ \mu\text{m}$ 程度の気泡数が多く分布していることがわかる。この傾向は、中空微小球混入率 V_s が大きいほど顕著であり、中空微小球の直径が $50\ \mu\text{m}$ 程度であることと対応している。なお、文献 10)、11) 等によると、凍結融解抵抗性に有効な気泡の直径は $10 \sim 100\ \mu\text{m}$ 程度であるとされている。また、前述の凍結融解試験において、打込み施工した供試体の場合には、高い凍結融解抵抗性を示していることから、直径 $100\ \mu\text{m}$ 程度以下の気泡が凍結融解抵抗性の向上に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

吹付け施工の場合には、中空微小球混入率 V_s によらず、打込み施工の場合よりも気泡数が大きく減少している。これは、吹付け圧力による気泡の消失のほか、吹付け施工時における中空微小球の飛散、跳ね返りおよび損傷等によるものと推察される。ただし、中空微小球混入率が大きい場合ほど $100\ \mu\text{m}$ 以下の気泡数が多い傾向にあることがわかる。このことは、中空微小球の混入により吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性が向上する試験結果と対応している。

図-3.6 に、AE 剤使用の有無や中空微小球混入率 V_s を変化させた吹付けコンクリートの気泡分布測定結果を示す。なお、図-3.6(a) には中空微小球混入率 $V_s = 0\%$ の条件下で AE 剤の有無による比較を、図-3.6(b) に AE 剤を使用しない条件下で V_s が異なる場合の比較を示す。

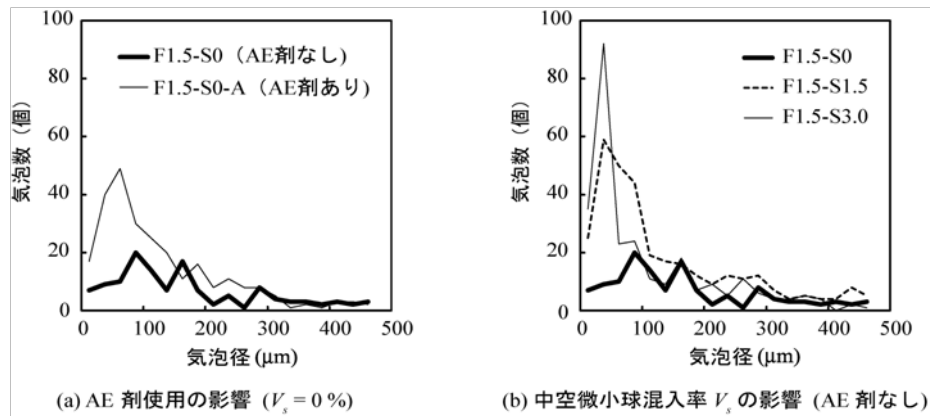


図-3.6 AE 剤量や中空微小球混入率 V_s を変化させた
吹付けコンクリートの気泡分布測定結果

図-3.6(a) より、AE 剤の使用によって直径 $100 \mu\text{m}$ 以下の気泡数が増大していることがわかる。しかしながら、前述の凍結融解試験結果では、凍結融解抵抗性の改善効果は十分発現していない。このことは、気泡分布が十分な凍結融解抵抗性を確保するほどまで改善されていないことを示唆している。

図-3.6(b) より、中空微小球混入率 V_s が大きい場合ほど直径 $100 \mu\text{m}$ 以下の気泡数が多く、その数は AE 剤を使用する場合よりも多いことがわかる。これは、直径が $50 \mu\text{m}$ 程度である中空微小球によるものと考えられる。また、前述の凍結融解試験結果では、中空微小球を混入することにより吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性が飛躍的に向上する結果となっている。これらのことより、中空微小球の混入による直径 $100 \mu\text{m}$ 以下の良好な気泡の増加が吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性の改善に大きく寄与していると考えられる。

3.3.3 硬化後のコンクリートの空気量および気泡間隔係数と凍結融解抵抗性との関係

前節までの検討結果より、吹付けコンクリートの気泡分布がその凍結融解抵抗性に密接に関連していることが明らかになった。本節では、気泡分布測定結果から得られる硬化後のコンクリートの空気量や気泡間隔係数と凍結融解試験結果から得られる耐久性指数 DF との関係について検討を行う。なお、耐久性指数 DF は、コンクリート標準示方書 [施工編]¹²⁾(以後、示方書 [施工編])を参考にして、下式 (3.1) により算出した。

$$DF = P \times N / M \quad \text{式(3.1)}$$

ここに、 DF は耐久性指数、 P は N サイクルのときの相対動弾性係数 (%)、 N は相対動弾性係数が 60 % 以下になるサイクル数もしくは 300 (サイクル) のうち小さい方、 M は 300 (サイクル) である。

(1) 硬化後のコンクリートの空気量

図-3.7に硬化後のコンクリートの空気量に関する試験結果を示す。図-3.7(a)に、硬化後のコンクリートの空気量に及ぼす中空微小球混入率 V_s の影響について示す。図より、中空微小球混入率 $V_s = 0\%$ の場合における硬化後の空気量は、吹付け施工の場合の方が打込み施工の場合より 2% 程度少ないことがわかる。このことから、吹付け施工によりエントレインドエアに相当する良質な気泡が消失していることがわかる。中空微小球混入率 $V_s = 1.5, 3.0\%$ の場合においても、吹付け施工の場合における硬化後の空気量は、打込み施工の場合に比較して少なくなっており、特に中空微小球混入率 $V_s = 3.0\%$ の場合において顕著である。

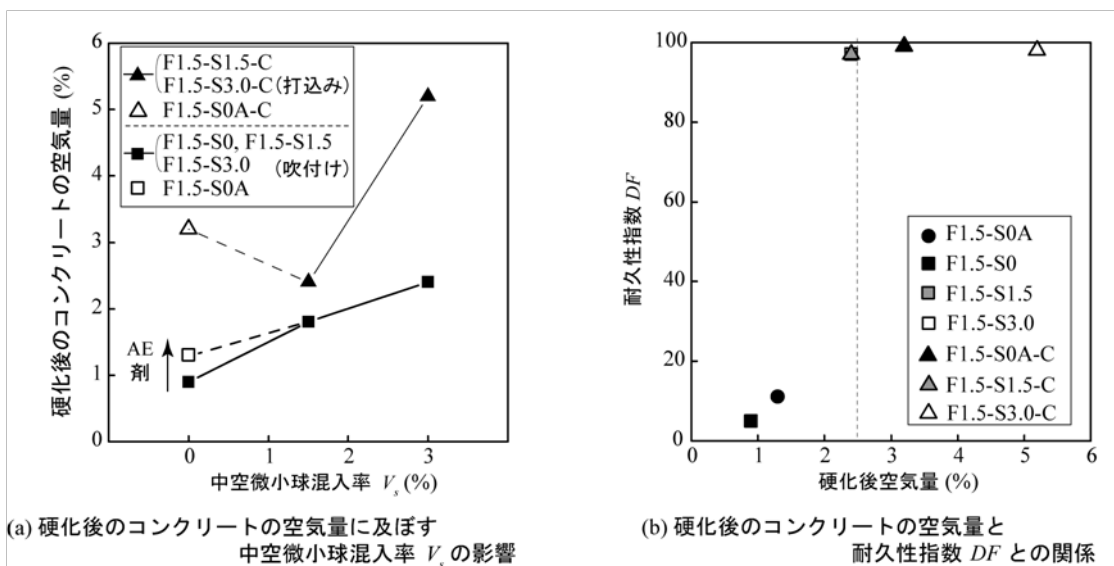


図-3.7 硬化後のコンクリートの空気量に関する試験結果

また、硬化後のコンクリートの空気量は、AE 剤の使用や中空微小球混入率の増加に伴って増加していることがわかる。これは、AE 剤や中空微小球の混和により気泡が増加することによるものと考えられる。

なお、本試験結果では、打込み施工した F1.5-S0A-C の場合においても、フレッシュ時に 7.9 % あった空気量が硬化後には 3.2 % と示されている。これは、本試験において硬化後の空気量の測定では、エントレインドエアに相当する気泡径を対象として直径 50 ~ 500 μm の気泡¹³⁾ を測定しており、それよりも大きな気泡や空隙については測定していないことによるものと考えられる。特に、本研究に用いたコンクリートは吹付け施工時における付着性を考慮してスランプを小さく設定しているため、エントラップドエアが多少混入されやすい傾向にあることが影響したと考えられる。また、供試体作製時の締め固め等により空気量が減少したこと¹³⁾ なども影響していると推察される。

図-3.7(b) に、硬化後のコンクリートの空気量と耐久性指数 DF との関係を示す。図より、硬化後のコンクリートの空気量が大きいほど耐久性指数 DF が向上する傾向にあり、硬化後のコンクリートの空気量が 2% 近傍になると DF が急激に向上していることがわかる。また、硬化後のコンクリートの空気量が 2.5% 程度以上の場合には、いずれの場合においても DF が 100 程度となっている。このことより、硬化後の空気量は凍結融解抵抗性と密接に関連していることがわかる。なお、このような傾向は、既往の普通コンクリートを対象とした場合の試験結果^{14)、15)} とも対応している。

(2) 気泡間隔係数

図-3.8 に気泡間隔係数に関する試験結果を示す。気泡間隔係数に及ぼす中空微小球混入率 V_s の影響について示している図-3.8(a) より、施工方法にかかわらず中空微小球混入率 V_s が大きいほど、気泡間隔係数が小さくなる傾向にあることがわかる。また、吹付け施工の場合は、AE 剤を混入することにより気泡間隔係数が小さくなっていることがわかる。これらは、硬化後のコンクリートの空気量の場合と同様、中空微小球や AE 剤の混入により、微細な気泡が増加したことによるものと考えられる。なお、中空微小球の径の方が AE 剤によって導入される気泡の径よりも小さいことから、中空微小球を混入する場合の方が気泡間隔係数を小さくする効果が顕著に現れていると考えられる¹⁵⁾。

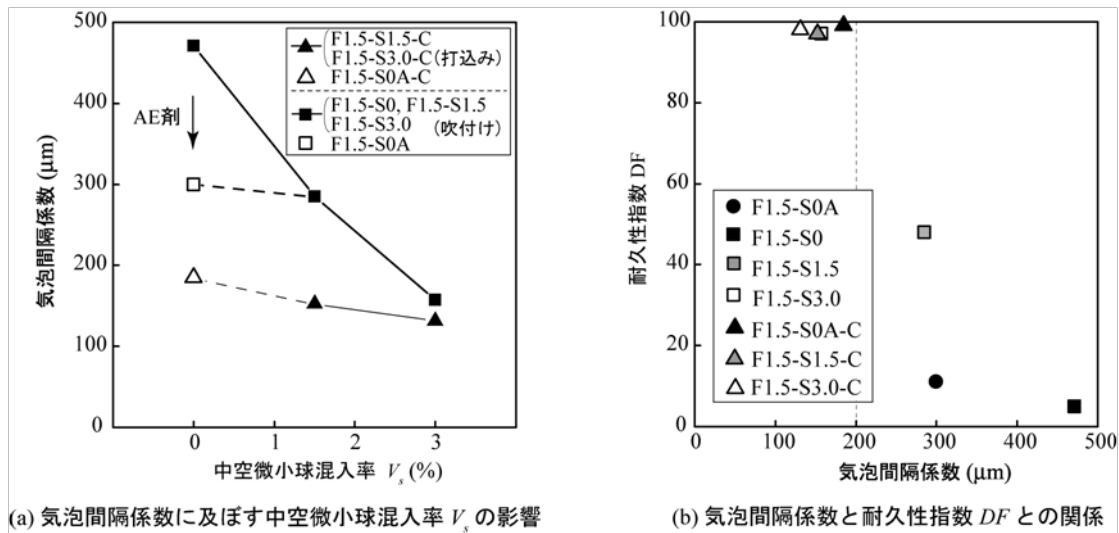


図-3.8 気泡間隔係数に関する試験結果

図-3.8 (b) に気泡間隔係数と耐久性指数 DF の関係を示す。図より、気泡間隔係数が小さいほど耐久性指数 DF が高くなることがわかる。また、気泡間隔係数が $200 \mu\text{m}$ 以下の場合には、いずれのケースとも耐久性指数 DF が $97 \sim 99$ に分布している。

既往の文献³⁾では、シリカフュームを混入する場合には、セメントマトリクスが緻密になり凍結圧力が大きくなる傾向にあることから、気泡間隔係数を普通コンクリートの場合よりも小さく、 $200 \mu\text{m}$ 以下とすることが望ましいとされている。本試験結果では、中空微小球混入率を $V_s = 3.0\%$ とすることにより、吹付けコンクリートの気泡間隔係数を $200 \mu\text{m}$ 程度まで小さくすることが可能となり、凍結融解抵抗性が改善されていることがわかる。

3.3.4 塩化物イオン浸透抵抗性

図-3.9 に、(a) 短繊維混入率 V_f および (b) 中空微小球混入率 V_s が異なる場合における吹付けコンクリートの実効拡散係数(以後、単に拡散係数)を示す。なお、示方書 [施工編]¹²⁾ には、高炉セメントやシリカフェームを使用する場合の拡散係数予測式の一例として、下式 (3.2) が示されている。

$$\log D_p = -3.0 (W/C)^2 + 5.4 (W/C) - 2.2 \quad \text{式(3.2)}$$

ここに、 D_p は拡散係数 (cm^2/year)、 W/C は水セメント比である。図には、本式を用いて算出した場合における吹付けコンクリートの拡散係数の予測値も併せて示す。なお、予測値と試験結果とを直接比較するため、予測値には安全係数 (1.2) を考慮していない。

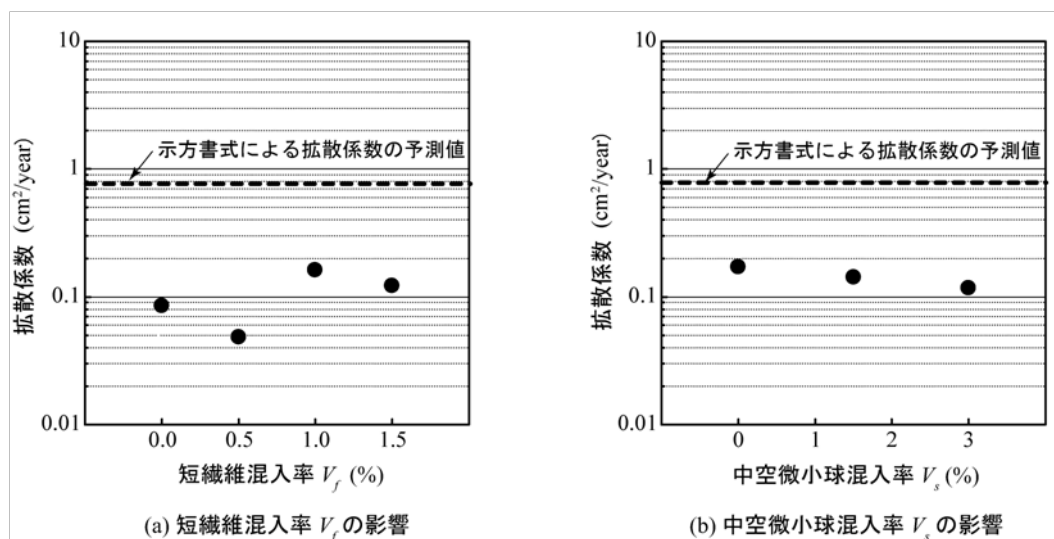


図-3.9 塩化物イオン浸透試験結果

図-3.9(a) より、吹付けコンクリートの拡散係数は、 $V_f = 0.5\%$ の場合を除き、短繊維の混入によって多少大きくなる傾向にあることがわかる。一方、図-3.9(b) を見ると、中空微小球混入率の増加に伴って、拡散係数がわずかに小さくなる傾向にあることがわかる。これは、短繊維混入の場合には、繊維長が 30 mm と粗骨材の最大寸法 $G_{\max}(=10\text{mm})$ よりも大きいため、コンクリートと短繊維との界面が塩化物イオンの浸透を助長する傾向を示したものと推察される。これに対し、中空微小球混入の場合には、直径が $50\ \mu\text{m}$ と極めて小さいため、多数の中空微小球が吹付けコンクリート中に分散して配置され、中空微小球の膜の周囲を塩化物イオンが迂回する形で移動するため、塩化物イオンの浸透が抑制される傾向になったことが要因の一つと推察される。ただし、これらの考察は、短繊維や中空微小球等の混和材とコンクリートの界面の影響や、各混和材の材質、形状寸法および混入率などにより異なることが考えられるため、今後詳細に検討する必要がある。

なお、本試験に用いた各供試体の実効拡散係数は、式 (3.2) によって求められる見掛けの拡散係数の 10 ~ 20% 程度の値となっており、 $0.05 \sim 0.19\ \text{cm}^2/\text{year}$ 程度の範囲に分布している。既往の文献によると、高炉

スラグ B 種を用いる場合において水セメント比が 40 ~ 45 % 程度のコンクリートの実効拡散係数は、0.27 ~ 2.21 cm²/year 程度であることから、本研究に用いた吹付けコンクリートの実効拡散係数は、上記コンクリートと同程度以下であることがわかる。これは、シリカフェームの混和によるセメントマトリクスの緻密化と吹付け施工による締め固め効果が作用したことによるものと推察される。

また、ここで示している拡散係数は実効拡散係数であることから、見かけの拡散係数は塩化物イオンのセメント水和物への固定化の影響などにより、さらにその値は小さくなるものと推察される。したがって、実環境下における各種吹付けコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性は、それぞれ図-3.9 の評価よりも高いと推察される。

3.4 力学特性および収縮特性に関する試験結果

本章では、吹付けコンクリートの力学特性や収縮特性に及ぼす中空微小球および短繊維混入率の影響について検証する。なお、吹付けコンクリートのひび割れ発生後における引張特性および既設コンクリートとの付着性能は一軸引張試験により評価した。

3.4.1 圧縮強度および引張強度

図-3.10 に、吹付けコンクリートの圧縮強度および割裂引張強度試験結果を示す。図-3.10(a) には、短繊維混入率一定 ($V_f = 1.5\%$) の条件下において中空微小球混入率 V_s が異なる場合の圧縮強度試験結果を示す。なお、ここでは材齢 7 日における試験結果も併せて示している。図より、材令 7 および 28 日の結果ともに、中空微小球混入率 V_s が大きい場合ほど圧縮強度が低下する傾向を示しており、 $V_s = 3\%$ の場合は $V_s = 0\%$ の場合と比較して圧縮強度が 20 N/mm² 程度低下している。これは、中空微小球混入率 V_s の増加に伴って、吹付けコンクリート内の空気量が増大していることが 1 つの要因になっていると考えられる。なお、材令 7 日の圧縮強度は、いずれの中空微小球混入率 V_s においても 40 N/mm² 以上となっているが、材令 28 日の場合よりも 15 N/mm² 程度小さい傾向にある。これらのことから、既設構造物への適用に際しては、吹付けコンクリートの圧縮強度が既設のコンクリートの設計基準強度以上であることを確認する必要がある¹⁾。

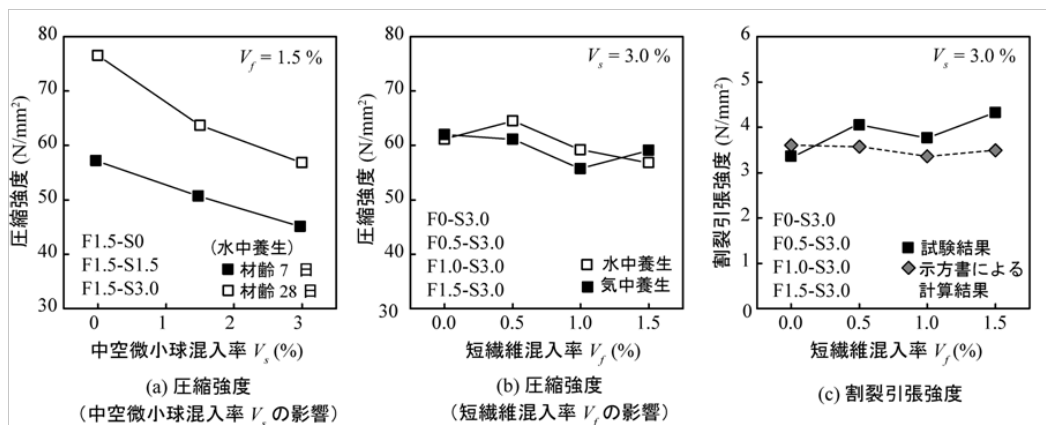


図-3.10 圧縮強度および割裂引張試験結果

図-3.10(c) に吹付けコンクリートの割裂引張強度試験結果を示す。また、図中には、コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]¹⁶⁾ (以後、示方書 [構造編]) を参考に、気中養生の場合における圧縮強度を用いて下式 (3.3) より算出した引張強度の計算値も併せて示す。

$$f_t = 0.23 f'_c{}^{2/3} \quad (3.3)$$

ここに、 f_t は示方書 [構造編] による計算引張強度、 f'_c は実測圧縮強度である。

図より、割裂引張強度は、 $3.0 \sim 4.5 \text{ N/mm}^2$ の範囲に分布しており、短繊維混入率 $V_f = 0\%$ の場合を除いて圧縮強度の差に対応する形で変動していることがわかる。また、気中養生した吹付けコンクリートの圧縮強度を用いて算出した引張強度の計算値は、試験結果とほぼ対応していることがわかる。従って、短繊維混入吹付けコンクリートの引張強度は、短繊維を混入しない普通コンクリートの場合と同様の方法で評価可能であると考えられる。また、これらの結果から、本試験に用いた PVA 短繊維の短繊維混入率 V_f が吹付けコンクリートの圧縮強度や引張強度に及ぼす影響は比較的小さいことが明らかになった。

3.4.2 ひび割れ発生後の引張特性

本研究では、短繊維混入吹付けコンクリートのひび割れ発生後の引張特性を検討するため、短繊維混入率 V_f を $0 \sim 1.5\%$ とする場合の一軸引張試験を実施した。図-3.11 に各吹付けコンクリートの一軸引張試験結果を示す。なお、これらの結果はパネル供試体から吹付け方向と吹付け直角方向にコア抜きした供試体(以後、吹付け直角方向供試体)に関する結果である。

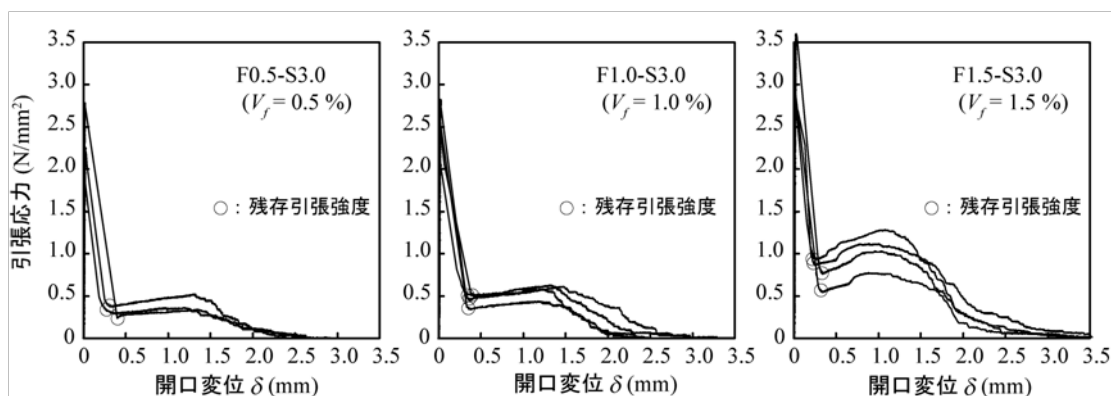


図-3.11 吹付け直角方向供試体の一軸引張試験結果

図より、いずれの供試体においても引張応力が最大値に到達した直後、ひび割れの発生により急激に低下していることがわかる。しかしながら、引張応力は 0 レベルまでは低下せず、再度緩やかに増加してピークを向かえた後、ひび割れの開口変位 (以後、単に開口変位) $\delta = 1.0 \text{ mm}$ 程度以降において徐々に低下している。これは、ひび割れ発生後、短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制され、その後開口変位の増大に伴って短繊維が破断もしくは引き抜けることにより、引張破壊に至ったことを示している。

本研究では、ひび割れ発生直後の応力値 (図-3.11 の○印部分) を、短繊維の架橋効果による残存引張強度 f_v と定義して評価することとした。なお、著者らの既往の研究では、残存引張強度 f_v を用いることによって、PVA 短繊維混入による RC 部材の耐力向上効果を概ね評価可能であることを明らかにしている^{17), 18)}。

図-3.12 に残存引張強度 f_v と短繊維混入率 V_f との関係を示す。図より、吹付け直角方向供試体の場合には、短繊維混入率の増加に伴って残存引張強度 f_v がほぼ線形的に増大する傾向にあることがわかる。このような傾向は、著者らによる既往の打込み施工した短繊維混入コンクリートに関する試験結果^{17), 18)}と同様である。ただし、残存引張強度 f_v は、既往の打込み施工の場合の試験結果よりも $0.1 \sim 0.2 \text{ N/mm}^2$ 程度小さい。これは、吹付け施工時における短繊維のはね返りにより、実際の短繊維混入率が減少していることが 1 つの要因になっていると推察される。

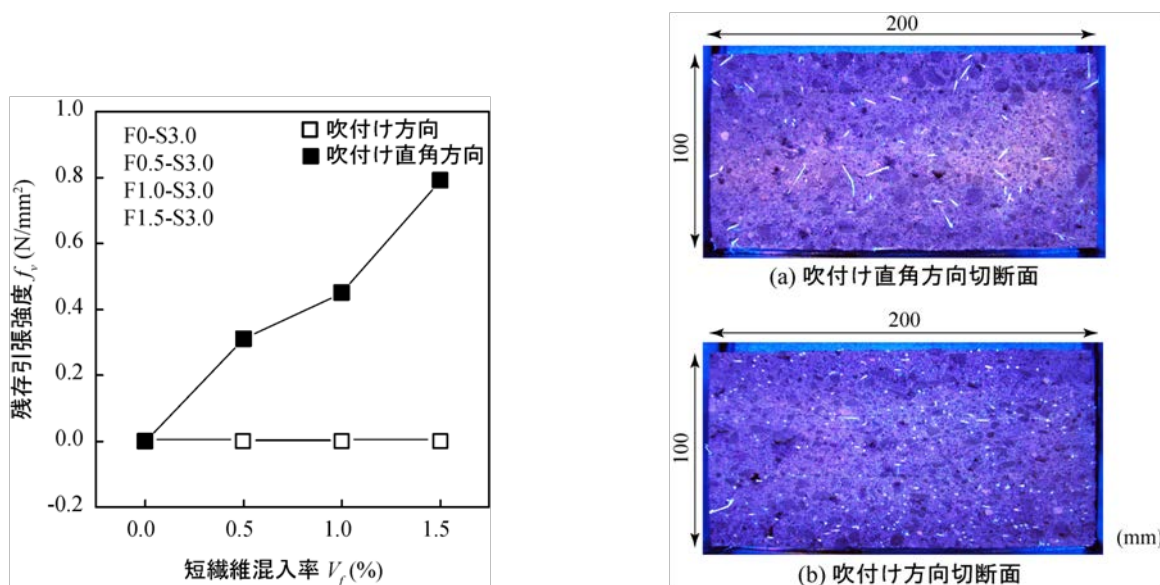


図-3.12 残存引張強度と短繊維混入率との関係 写真-3.4 吹付けコンクリートの切断面の一例 ($V_f = 1 \%$)

一方、吹付け方向にコア抜きした供試体(以下、吹付け方向供試体とする)の場合には、短繊維混入率 V_f の変化に関わらず残存引張強度 f_v が 0 である。これは、吹付け施工する場合には、吹付け方向により短繊維の配向性が異なることを示唆している⁹⁾。

写真-3.4 に吹付け方向供試体の切断面の一例を示す。写真は、文献 19) を参考に PVA 短繊維が近紫外線に対して蛍光する特徴を利用し、ブラックライトを照射して撮影したものである。写真中の白く見える部分が PVA 短繊維の断面であり、短繊維が切断面に平行して配向するほど細長い線状に撮影される。写真-3.4(a) より、吹付け直角方向切断面においては、短繊維が切断面と平行に配向しているのに対し、写真-3.4(b) の吹付け方向切断面においては、短繊維が切断面と直角に配向する傾向にあることがわかる。このことから、短繊維は吹付け施工面に平行して 2 次的に配向していることがわかる。

従って、短繊維混入吹付けコンクリートの残存引張強度 f_v を考慮した補強設計を行う場合には、荷重の作用によって部材断面に発生する引張応力の向きと短繊維の配向との関係に留意する必要がある。すなわち、短繊維の残存引張強度 f_v は、吹付け施工面と平行な向きに対してのみ考慮できるものと判断される。

3.4.3 付着性能

図-3.13 に付着試験結果を示す。図中には、母材コンクリートの圧縮強度および材齢、吹付け指針¹⁾を参考に安全係数を考慮した付着強度の照査値も併せて示す。付着試験では、全ての供試体において母材コンクリート部分において引張破壊している。図より、各供試体の付着強度は、1.3 ~ 1.7 N/mm²の範囲に分布しており、ほぼ母材コンクリートの圧縮強度の違いに対応する傾向にあることがわかる。なお、本実験では、母材コンクリートの圧縮強度が一定ではなく、かついずれの場合も母材コンクリートが引張により破壊に至っているため、短繊維混入率が吹付けコンクリートの付着強度に及ぼす影響について考察することは困難である。ただし、本試験結果からは、吹付けコンクリートの付着強度は短繊維混入率によらず、ほぼ吹付け指針¹⁾の照査値以上であることが明らかになった。なお、実施工では従来の吹付けコンクリートと同様に、既設コンクリートの表面を適切な方法ではつる等の表面処理を施すとともに、はつり面の清掃および乾燥防止等を施すことも重要である。また、実構造物への適用にあたっては、使用環境や補修・補強目的に対応した実験等によりその付着性能を確認することが望ましいと考えられる。

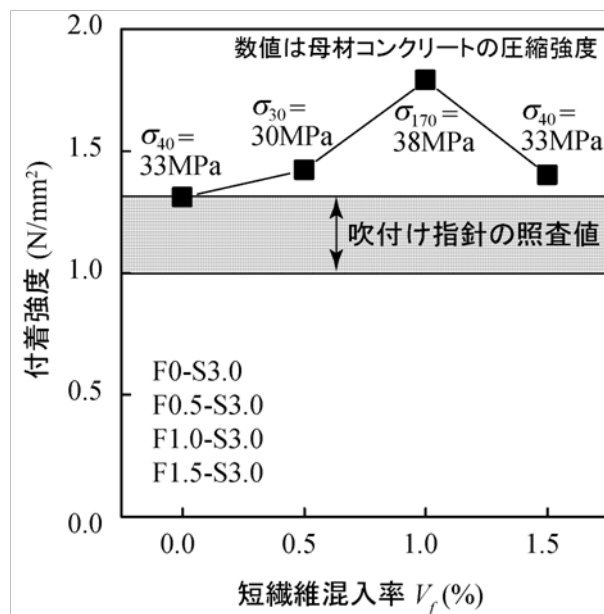


図-3.13 付着試験結果

3.4.4 収縮特性

図-3.14に吹付けコンクリートの長さ変化試験の結果を示す。図より、経過日数の増加とともに、長さ変化率の絶対値が対数関数的に増大する傾向にあり、短繊維混入率 V_f による有意な差は見られないことがわかる。このことより、本研究で使用した短繊維の混入率 V_f が吹付けコンクリートの収縮特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、経過日数 84 日における長さ変化率は、いずれの配合においても 0.065 (650 μ) 程度である。なお、吹付け指針¹⁾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 % 以下の規定が示されている。

このため、本研究に用いた吹付けコンクリートは、吹付け時に水分が逸散していると考えられるが²⁰⁾、フレッシュ時の単位水量も一般のコンクリートの場合より多いため、乾燥収縮量が大きくなる可能性があると考えられる。また、単位セメント量が比較的多い配合のため、自己収縮の傾向が大きくなることも考えられる。

前述の各機関の規格値と比較すると、本試験結果における収縮量は極端に小さいものではないことから、実施工への適用に際しては、環境条件や構造部位を考慮した試験等により、ひび割れ抵抗性を検証するのが望ましいと考えられる。また、収縮量を低減する対策としては収縮低減剤や膨張材の適用が考えられるが、その場合には吹付けコンクリートの耐久性や力学特性についても十分に検討して適用していく必要がある。

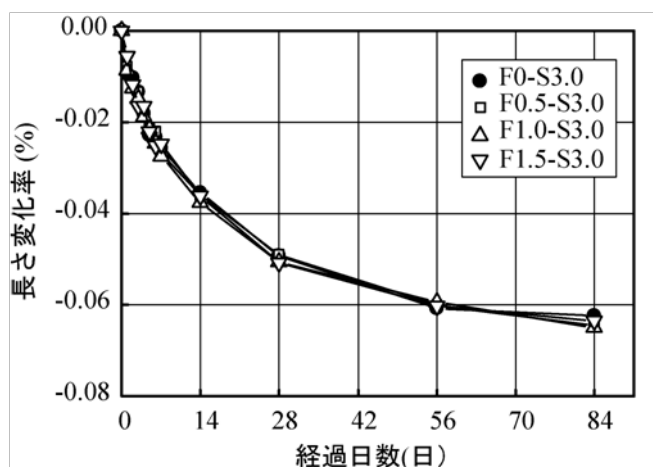


図-3.14 長さ変化試験結果

3.5 まとめ

本章では、合理的かつ経済的な補修・補強用吹付けコンクリートの開発を目的に、一般的なのり面用湿式吹付けコンクリートの配合を基本として、PVA 短繊維や中空微小球を混入する方法を提案し、その実用化に向けて種々の耐久性および力学特性試験を実施した。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、下記のとおりである。

- 1) 本試験に用いた吹付けコンクリートは、吹付け施工によりエントレインドエアに相当する気泡が消失し凍結融解抵抗性が低下する。また、短繊維混入吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性は、中空微小球を混入することにより改善可能である。
- 2) 本吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性は、硬化コンクリート中の気泡分布特性に密接に関連しており、本試験の場合には気泡間隔係数が $200 \mu\text{m}$ 以下、硬化コンクリートの空気量が 2.5% 以上の場合において、耐久性指数が 97 以上となった。
- 3) 本吹付けコンクリートに混入した PVA 短繊維は吹付け施工面に平行して 2 次元的に配向するため、短繊維の架橋効果は吹付け方向では発揮されず、吹付け直角方向において発揮される。
- 4) 吹付け直角方向における吹付けコンクリートの残存引張強度（ひび割れ発生後の引張強度）は、短繊維混入率の増加に伴いほぼ線形的に増大する。
- 5) 本試験に用いた吹付けコンクリートは、一般的に用いられている普通コンクリートよりも塩化物イオン浸透抵抗性が高いことが確認された。また、圧縮強度は 40 N/mm^2 以上を確保しているが、実施工にあたっては補修・補強対象となる構造物のコンクリートの設計基準強度よりも大きいことを確認する必要がある。付着強度は、吹付け指針の照査値以上を確保している。なお、長さ変化率は、各機関の規格値と比較して極端に小さいものではないことから、適用にあたっては留意する必要がある。

以上の結果から、一般的なのり面用吹付けコンクリート配合を基本とした配合に、PVA 短繊維および中空微小球を混入することにより凍結融解抵抗性が改善され、従来よりも経済的な補修・補強用吹付けコンクリートとして適用可能であることが明らかになった。なお、付着強度や収縮特性については補修・補強の要求性能に応じて、対象構造物の部位および環境条件を考慮した試験等によりその適用性を照査する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案) [補修・補強編]，2005
- 2) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案) [のり面編]，2005
- 3) 土木学会：シリカフェームを用いた設計・施工指針(案)，1995
- 4) 坂本淳，入内島克明，浅野篤，魚本健人：吹付けコンクリートの耐久性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1363-1368，1999.
- 5) 松浦誠司，坂本淳，加藤佳孝，魚本健人：使用材料が吹付けコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1375-1380，2000.
- 6) 安藤慎一郎，大野俊夫，伊藤正憲，魚本健人：吹付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹付け条件の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1351-1356，1999.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編]，2002
- 8) 林正道，鮎田耕一：コンクリート工学 耐久性・寒中コンクリート詳説，山海堂，1993
- 9) 小林一輔：繊維補強コンクリートー特性と応用ー，オーム社，1981
- 10) セメント協会：わかりやすいセメント科学，pp.102，1993
- 11) 小林正凡：コンクリートの凍結融解作用による劣化に関する 2，3 の考察，コンクリートジャーナル，Vol7，1969
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，2002
- 13) 高橋和雄：コンクリート製品の凍害，岩手大学農学部農業造構学講座，pp.83-84，1990
- 14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 '01，2001
- 15) Jochen Stark and Bernd Wicht (太田利隆，下林清一，佐伯昇訳)：コンクリートの耐久性第2版，セメント協会，2003
- 16) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002
- 17) 栗橋祐介，岸徳光，田口史雄，三上浩：PVA 短繊維を混入した RC 梁の曲げ耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.277-282，2005
- 18) 田口史雄，岸徳光，三上浩，栗橋祐介：PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.283-288，2005
- 19) 馬場弘二，伊藤哲男，松本健次，鳥越信一，吉武勇，中川浩二：コンクリート中におけるプラスチック系繊維の配向状態の評価方法，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.173-180，2004
- 20) 荒木昭俊，西村次男，魚本健人：吹付けコンクリートの配合推定と吹付けメカニズム，コンクリート工学論文集，第11巻，第2号，pp.1-9，2000

第4章 構造特性の評価と既設構造物への適用に関する検討

4.1 RC版への適用

4.1.1 はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化対策や種々の設計指針の改定に伴う補修補強工事が盛んに行われている。従来これらの補強工法としては、鋼板および連続繊維(FRP)シートの接着工法や、ポリマーセメントモルタル吹き付け工法などが多く採用されている。しかしながら、これらの工法の場合、1)補強材として鋼材を用いる場合には定期的な防錆処理の必要があること、2)FRPシート接着工法の場合には前処理としてエポキシ系パテ等による不陸修正やプライマー塗布などの表面処理工程が必要となること、3)FRPシート接着に用いる含浸接着材やポリマーセメントモルタルが比較的高価であること等が課題となっている。そのため、より施工性、経済性および耐久性に優れた補修・補強工法の確立が強く望まれる。

本章では、連続繊維メッシュと短繊維混入吹き付けコンクリートの組合せによる補修・補強工法をRC版に適用することを目的に、耐荷性能の向上効果について実験的に検討した。

4.1.2 実験概要

表-4.1 に本実験に用いた試験体の一覧を示す。試験体は無補強を含め、短繊維混入の有無やアラミド連続繊維(以下、AFRPとする)メッシュの層数を変化させた全5体の単鉄筋RC版である。試験体名のうち、第1項目は吹き付け増し厚補強の有無(N:無補強,S:補強)を示し、第2項目はAFRPメッシュの層数を示している。なお、特別な場合として吹き付けコンクリートに短繊維を混入しない場合についても検討することとし、第1項目の末尾にNと付記している。

表-4.1 試験体の一覧

試験体名	吹き付けコンクリートの種類	AFRPメッシュ (保有耐力)
N	-	-
SN-0	普通	-
S-0	短繊維混入	-
S-1		1層(200kN/m)
S-2		1層(400kN/m)

図-4.1 に本実験に用いた試験体の形状寸法および配筋状況を示す。RC 版の寸法は、 $2,000 \times 2,000 \times 150\text{mm}$ である。鉄筋には D16(SD345)を用い、 120mm 間隔で格子状に配置している。また、版の端部には、溝型鋼を配置し鉄筋を溶接固定している。実験は純スパン長 1.8m の 4 辺単純支持の下、RC 版の中央部に直径 60mm 、高さ 200mm の鋼製円柱を設置し、油圧ジャッキを用いて加圧することにより行った。実験時におけるコンクリートの材令は 48 日、圧縮強度は 24.3MPa である。また、鉄筋の降伏強度は、 392MPa である。本実験の測定項目は、載荷荷重 P 、載荷点変位(以下、単に変位 δ)である。また、実験終了後には RC 版中央部を切断し、切断面のひび割れ状況を観察している。

各試験体の補強は、図-4.2 に示されているように、1)母材コンクリート表面の脆弱部の除去および吹付け材の付着力の向上を目的として、吹付け施工面にブラスト処理(深さ $1 \sim 2\text{mm}$)を施し、2)AFRP メッシュを設定吹付け厚の $1/2$ の位置にモルタル製スペーサを介して配置し、3)コンクリートを吹付けてコテ仕上げすることにより行っている。なお、補強範囲は、いずれの試験体の場合も版中央部から各支点の 10cm 手前までの範囲としている。また、コンクリートの吹付けは、土木学会コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準に準拠して行った。表-4.2、表-4.3 に、それぞれ吹付けコンクリートの配合および力学的特性値の一覧を示す。また、表-4.4、表-4.5 には、それぞれポリビニルアルコール短繊維(以下、PVA 短繊維とする)および AFRP メッシュの材料特性値の一覧を示す。

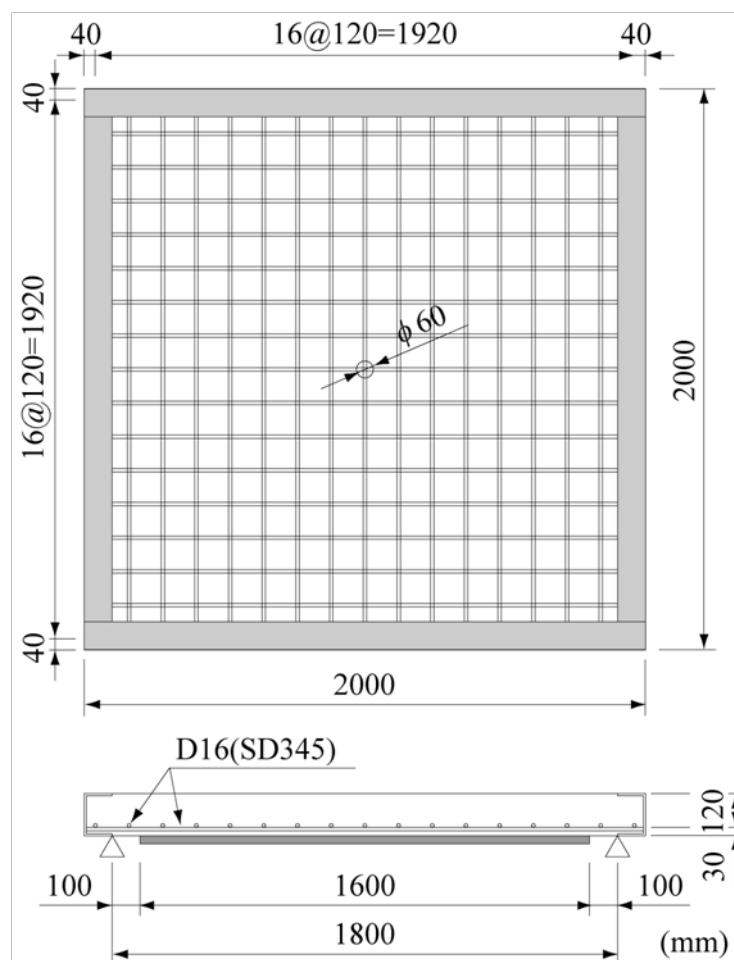


図-4.1 試験体の形状寸法および配筋状況

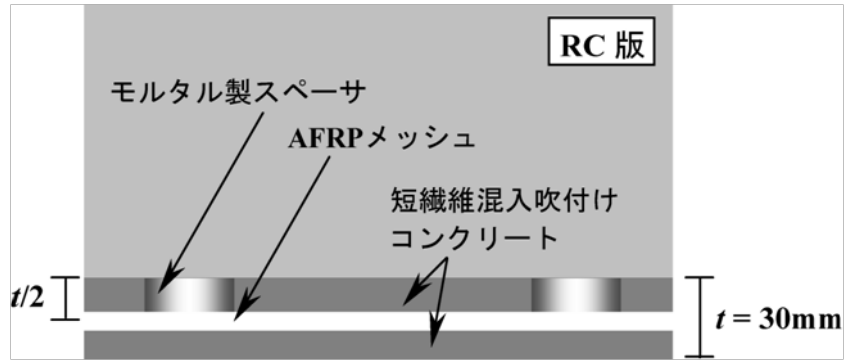


図-4.2 補強工法の概念図

表-4.2 吹付けコンクリートの配合

V_f (vol.%)	G_{max} (mm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	SF	S	G			
0	10	43	80	185	387	43	1365	340	0.5	3.6	6.5
1.5									2.0	5.8	6.0

B=C+SF, V_f : 短繊維混入率, G_{max} : 粗骨材の最大寸法, SP: 高性能減水剤

表-4.3 吹付けコンクリートの力学特性

V_f (%)	圧縮 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	曲げ 強度 (MPa)	曲げ靱 性係数 (MPa)
0	76.1	36.6	7.9	0.2
1.5	95.8	36.6	8.4	2.6

表-4.4 PVA 短繊維の材料特性値

直径 (mm)	長さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪み (%)
0.66	30	29.4	0.88	7.0

表-4.5 AFRP メッシュの材料特性値

保証耐力 (kN/m)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
100,200	118	2.06	1.75

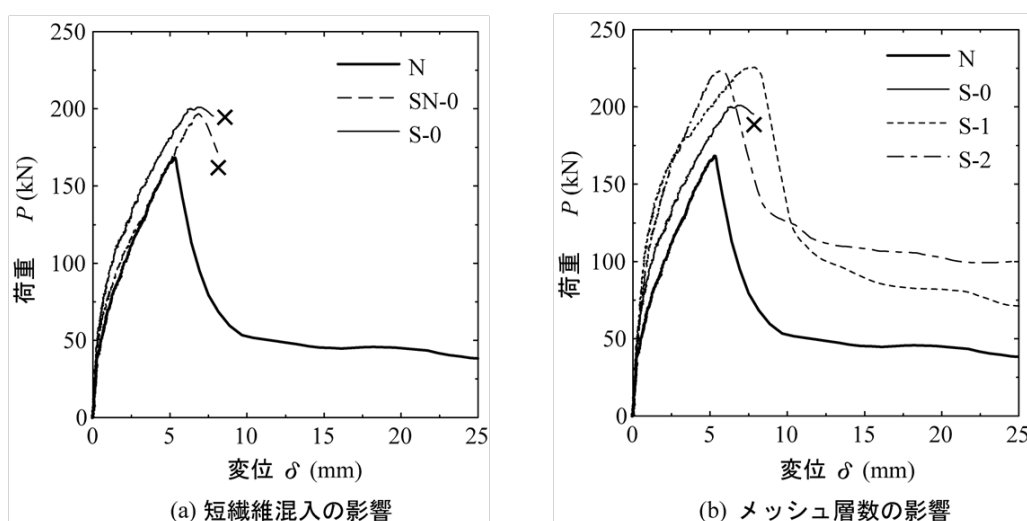
4.1.3 実験結果

(1) 荷重－変位関係

図－4.3 に、RC 版の耐荷性状に及ぼす(a)短繊維混入の有無や、(b)メッシュ補強量の影響について検討するため、各補強試験体の荷重－変位関係の実験結果を無補強試験体の結果と比較して示す。なお、SN-0 および S-0 試験体の場合には、最大荷重到達後、吹付けコンクリート部が剥落して変位の測定が不能となったため、最大荷重到達直後までの結果を示す。図－4.3(a)より、N 試験体は、 $P=50\text{kN}$ 程度でひび割れの発生による剛性勾配の低下を示した後、ほぼ線形に荷重が増大し、 $P=160\text{kN}$ 程度で荷重が急激に低下して終局に至っていることがわかる。普通コンクリート吹付けのみを施した SN-0 試験体は、 $P=160\text{kN}$ 程度まで N 試験体とほぼ同様の耐荷性状を示した後、さらに荷重が増加して $P=200\text{kN}$ 程度で終局に至っている。

短繊維混入コンクリート吹付けのみを施した S-0 試験体は、 $P=50\text{kN}$ 時においても剛性勾配の低下は見られず、 $P=80\text{kN}$ 程度で徐々に勾配が低下し始め、 $P=100\text{kN}$ 以降からは N や SN-0 試験体と同様の勾配でほぼ線形に荷重が増大していることがわかる。その後、SN-0 試験体よりも若干大きな荷重で終局に至っている。これらのことより、コンクリートの吹付けによって RC 版の耐力が向上し、さらに短繊維を混入する場合には、ひび割れ発生荷重および最大荷重が増大する傾向にあることがわかる。

図－4.3(b)より、メッシュを1層配置した S-1 試験体の結果を見ると、 $P=130\text{kN}$ 程度までは剛性勾配の低下は見られず、その後徐々に勾配が低下し始め $P=220\text{kN}$ で終局に至っている。一方、メッシュを2層配置した S-2 試験体は、初期の剛性勾配は S-1 試験体よりも若干小さいものの、剛性勾配の低下は顕著ではなく、最終的に S-1 試験体の最大荷重を若干下回る荷重で終局に至っている。これらのことより、メッシュを配置することにより、ひび割れの発生による剛性勾配の低下が抑制され、かつ押し抜きせん断耐力も向上することが明らかになった。ただし、本実験においては、メッシュの増加による耐力の向上効果は見られない。従って、本工法による RC 版の押し抜きせん断耐力の向上効果には、上限があると考えられる。



図－4.3 各試験体の荷重－変位関係

(2) 破壊性状

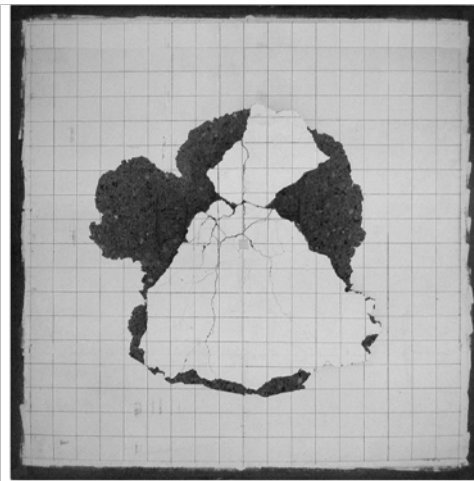
写真-4.1 に実験終了後における RC 版裏面の破壊性状を示す。写真より、N 試験体の場合には、版中央部のコンクリートがほぼ円形状に押し抜かれ、かぶりコンクリートが部分的に剥落していることがわかる。SN-0 試験体の場合においても、N 試験体と同様、版中央部の吹付けコンクリートおよび RC 版のコンクリートがほぼ円形状に押し抜かれている。ただし、RC 版の押し抜きせん断ひび割れが吹付けコンクリート内部にも進展しているため、N 試験体よりも剥落範囲が大きく示されている。

S-0 試験体は、吹付けコンクリートが RC 版のコンクリートとともに広範囲に剥落している。このことより、吹付けコンクリートと RC 版コンクリート間の付着は、コンクリートの引張強度以上に大きいと考えられる。なお実験時に、押し抜きせん断コーンの形成により荷重が急激に低下した後、吹付けコンクリートが RC 版のコンクリートとともに剥落していることを確認している。これは、短繊維の架橋効果により、吹付けコンクリート部のせん断耐力が増大し、RC 版に発生した押し抜きせん断ひび割れが吹付けコンクリート内部に進展せず、RC 版下縁部で水平方向に進展したことによるものと考えられる。

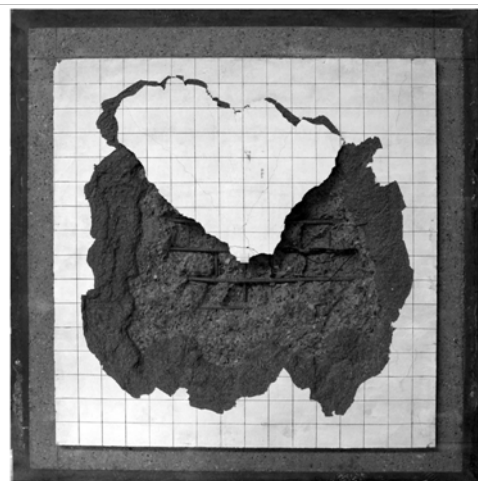
一方、S-1 および S-2 試験体は、版中央部の吹付けコンクリートに微細なひび割れが多数発生し、かつ版中央部を中心とした円形状のひび割れが発生していることがわかる。しかしながら、コンクリートの剥落は全く見られない。このことより、短繊維混入コンクリートと AFRP メッシュを併用することにより、押し抜きせん断破壊後においてもコンクリートの剥落を抑制可能であることが明らかになった。

写真-4.2 に、版中央部切断面のひび割れ状況を示す。また、写真の下側には、RC 版に発生した押し抜きせん断コーンの形成範囲も示している。写真より、N 試験体は載荷点から両支点側に向かって押し抜きせん断ひび割れが発生し、一部でかぶりコンクリートの剥落が見られる。また、SN-0 試験体は、RC 版から吹付けコンクリート部にかけて押し抜きせん断コーンが連続的に形成されており、その部分が大きく剥落している。S-0 試験体は、コーンの形成範囲は、SN-0 試験体とほぼ同様であるものの、吹付けコンクリートは押し抜けずに広範囲に剥落していることがわかる。

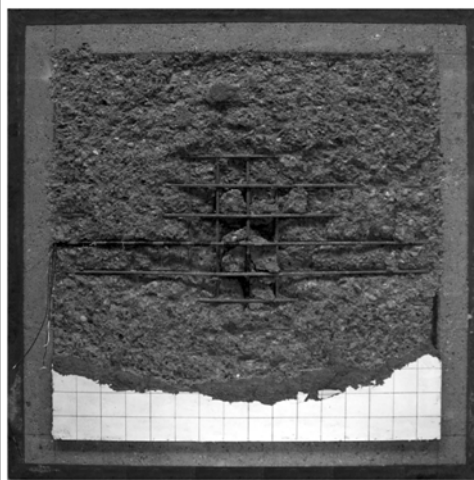
一方、S-1 および S-2 試験体は、RC 版に押し抜きせん断コーンの形成が見られるものの、吹付けコンクリートと AFRP メッシュ(以下、これらを合わせて補強材とする)は剥落していない。また、押し抜きせん断コーンの形成範囲は、N や SN-0、S-0 試験体よりも小さく示されている。これは、メッシュの配置により RC 版の曲げ剛性が向上したため、押し抜きせん断コーンの形成される角度が大きくなったことによるものと考えられる。このような性状は、FRP シート下面補強 RC 版の静載荷実験でも同様にみられた 2)。また、補強材の全面的な剥離は、コーンの形成範囲が小さくなったために生じなかったものと考えられる。



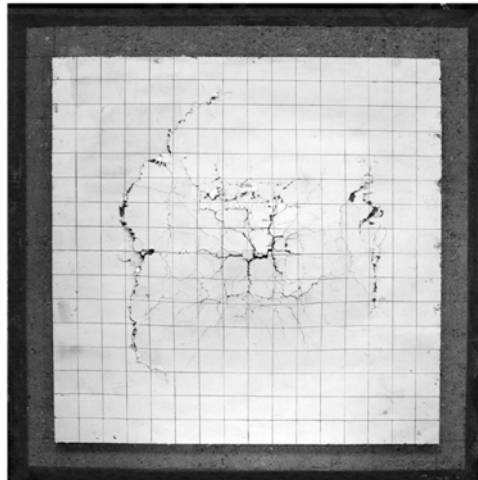
(a) N 試験体



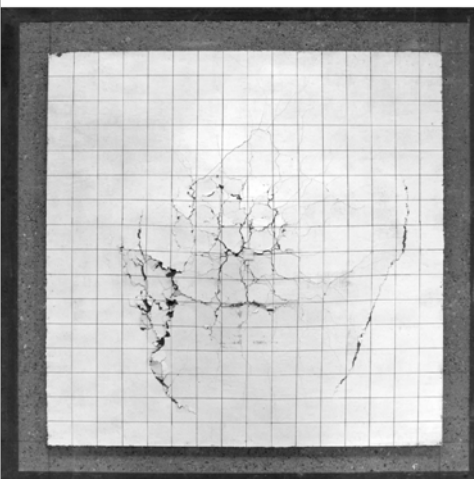
(b) SN-0 試験体



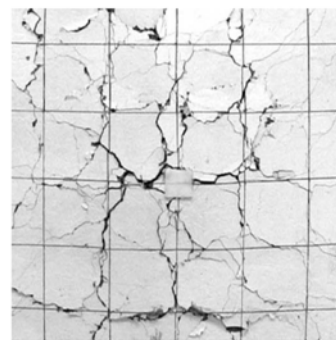
(c) S-0 試験体



(d) S-1 試験体



(e) S-2 試験体



版中央部の拡大写真
(S-2 試験体)

写真-4.1 実験終了後におけるRC版裏面の破壊性状

RC 版内部の押し抜きせん断コーン形成範囲

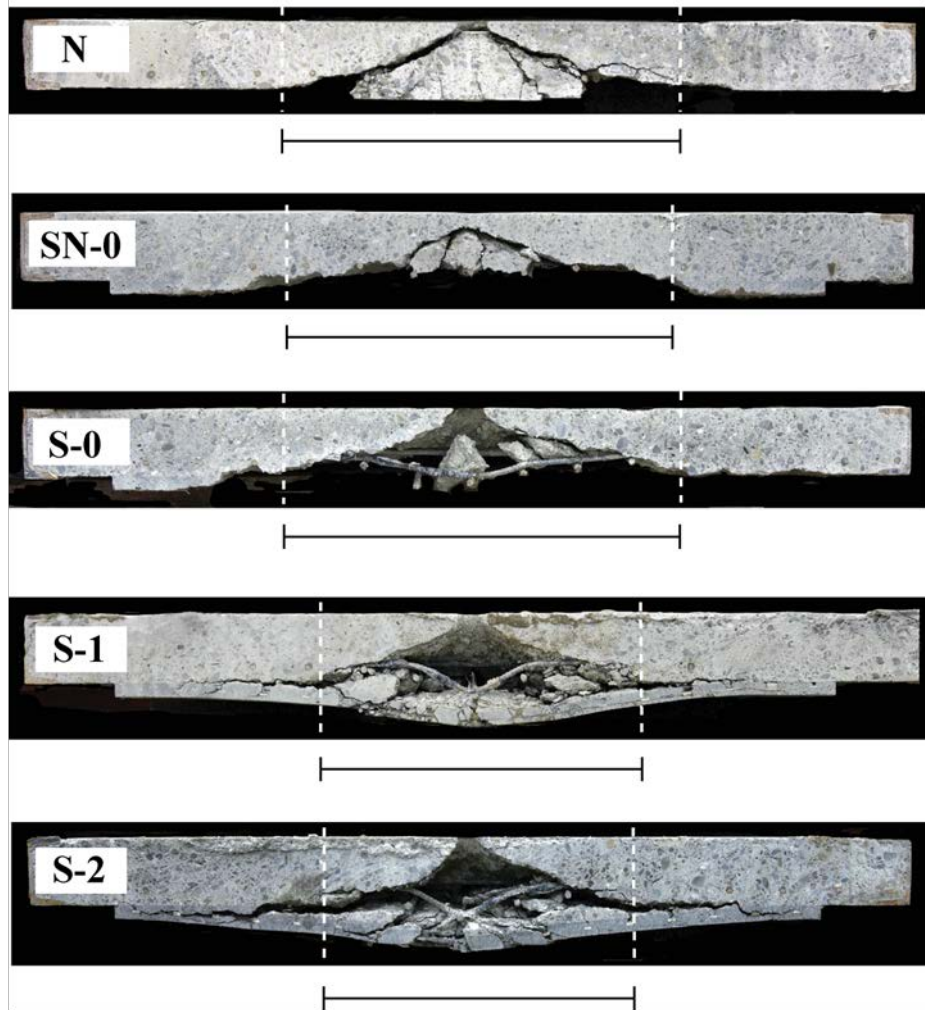


写真-4.2 切断面のひび割れ状況

(3) 押し抜きせん断耐力向上効果

前述のように、AFRP メッシュを配置した場合には、終局時においても RC 版のかぶりコンクリート部や吹付けコンクリート部が剥落していない。従って、両コンクリート部はメッシュの設置によって構造要素として機能し、押し抜きせん断耐力を分担していると考えられる。著者らの FRP シート下面補強 RC 版に関する研究においても同様の現象が示され、かぶりコンクリート部の耐力寄与分(以下、耐力増分とする)の算定式を提案している。ここでは、提案の算定式を準用して本工法による耐力増分を算出することとする。

すなわち、

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad \text{式(4.1)}$$

ここで、 f_{pcd} : コンクリートの圧縮強度、 u : 載荷面の周長、 u_p : 設計断面の周長、 d : 鉄筋からメッシュまでの距離、 $\beta_d = (1/d)^{1/4}$ 、 $\beta_p = (100p)^{1/3}$ 、 $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$ 、 $p (= n_f A_f / (bd))$: 補強筋比、 A_f : AFRP メッシュの断面積、 $n_f (= E_f / E_s)$: 弾性係数比(メッシュ/鉄筋)である。

これは、図-4.4 に示しているように、1) $\alpha 1 = 45^\circ$ の角度で鉄筋位置までひび割れが進展した際の周長を載荷面の周長(u)とし、2) 実験結果より得られるかぶりコンクリート部のひび割れ角度($\alpha 2$)で、かぶり部に押し抜きせん断面が形成されるものと仮定して設計断面の周長(u_p)を求め、3) RC 版の押し抜きせん断耐力算定式と同様の考え方で耐力増分を評価するものである。なお、版下面の AFRP メッシュは、鉄筋との弾性係数比を用いて補強筋比として考慮している。

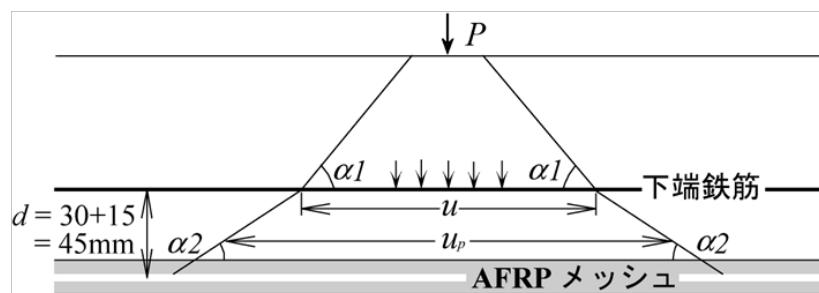


図-4.4 押し抜きせん断性状のモデル化

表-4.6 に、N および S-1、S-2 試験体の増分耐力と押し抜きせん断耐力の実験値および計算値の一覧を示す。なお、表中の押し抜きせん断耐力の計算値(iv)は、示方書によるかぶり部を無視した RC 版の計算値に AFRP メッシュとかぶりコンクリートおよび吹付けコンクリートによる増分耐力の計算値(ii)を加えて算定したものである。

表より、S-1 試験体は、耐力増分および押し抜きせん断耐力の計算値がともに実測値と良く対応していることがわかる。また、S-2 試験体は、計算値が実測値よりも若干大きく示されている。これは、S-2 試験体が、RC 版の耐力向上効果の上限に近い補強レベルに達しているためと推察される。なお、式(4.1)のように、本補強法による RC 版の押し抜きせん断耐力向上のメカニズムは、かぶり部および吹付けコンクリート部がメッシュの配置によって押し抜きせん断力に抵抗することによるものである。従って、補強効果の上限はかぶり部および吹付けコンクリート部の厚さと強度に大きく依存すると考えられる。

以上の結果より、本工法により下面補強した RC 版の押し抜きせん断耐力は、FRP シート下面補強 RC 版の場合と同様の算定式を用いることにより推定可能であることが明らかになった。

表-4.6 ひび割れ角度とかぶり部の耐力負担および押し抜きせん断耐力

試験体名	ひび割れ角度		耐力増分		(i)/(ii)	押し抜きせん断耐力		(iii)/(iv)
	$\alpha 1$ (度)	$\alpha 2$ (度)	実測値(i) (kN)	計算値(ii) (kN)		実測値(iii) (kN)	計算値(iv) (kN)	
N	26	10	-	-	-	168.3	161.3	1.04
S-1	26	17	57.4	53.7	1.07	225.7	215.0	1.05
S-2	29	19	55.7	65.1	0.86	224.0	226.4	0.99

4.1.4 まとめ

本研究では、短繊維混入吹付けコンクリートと AFRP メッシュを併用する補強工法による RC 版の耐荷性能向上効果を検討することを目的に、本工法により下面補強した RC 版の静載荷実験を行った。本実験で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本工法を適用することにより、RC 版の押し抜きせん断耐力が向上するとともに、かぶりコンクリートの剥落が抑制される。
- 2) 本実験に用いた吹付けコンクリートと RC 版コンクリート表面との付着強度は、コンクリートの引張強度以上に大きい。
- 3) 補強後の RC 版の押し抜きせん断耐力は、FRP シート下面補強 RC 版の耐力算定法を準用することで大略推定可能である。

4.2 RC 柱への適用

4.2.1 はじめに

本研究では、AFRP メッシュとポリビニルアルコール短繊維を混入した高靱性吹付けモルタルを組み合わせる工法を RC 橋脚段落し部の曲げ補強に適用する場合を想定して、段落し部を有する RC 柱模型の正負交番載荷実験を実施し、その補強効果を検証した。検討項目は、RC 柱の水平荷重一載荷点変位(以下、変位とする)関係、主鉄筋ひずみ一変位関係および破壊性状であり、これらの性状に及ぼす AFRP メッシュの配置およびポリビニルアルコール短繊維を混入した高靱性モルタル吹付けの影響について検討を行った。

4.2.2 試験体の概要

(1) RC 柱試験体

表-4.7 に本実験に用いた試験体の一覧を示す。表中の試験体名のうち、N は無補強試験体、A-N/F は AFRP メッシュにより曲げ補強した試験体であることを示す。さらに、A-N/F において N および F は、吹付けモルタルとしてそれぞれ普通モルタルおよびポリビニルアルコール短繊維を混入した高靱性モルタルを用いていることを意味している。

表-4.7 試験体の一覧

試験体名	AFRP メッシュ (単位幅当りの保証耐力)	吹付け モルタル
N	-	-
A-N	1 層	普通
A-F	(200 kN/m)	高靱性

図-4.5 に試験体の形状寸法、配筋状況およびひずみゲージ貼付位置を示す。試験体は断面寸法が 25 × 25 cm、柱部の高さが 195 cm の単一 RC 柱である。主鉄筋の段落し位置は、基部より 100 cm 上方の位置に設定し、その位置で主鉄筋を 16 本から 8 本に減少させている。主鉄筋には D16 (SD345) を用い、試験体の上端、下端に設置した定着版に溶接固定している。また、帯鉄筋には D10 (SD295) を用いて試験体下端から上方に 10 cm 間隔で配筋した。実験時におけるコンクリートの材令は 64 日、圧縮強度は 32.3 MPa である。また、鉄筋の降伏強度は 377 MPa である。

なお、本試験体は昭和 55 年以前の道路橋示方書(以下、示方書とする)に準拠して設計された RC 橋脚段落し部を対象として、その曲げ補強する場合を想定して作成している。そのため、段落し部における主鉄筋の定着長は考慮せず、実段落し位置の降伏曲げ耐力が基部の降伏曲げ耐力と同程度になるように設計している。従って、無補強試験体の場合には、段落し部が先行して破壊することが予想される。

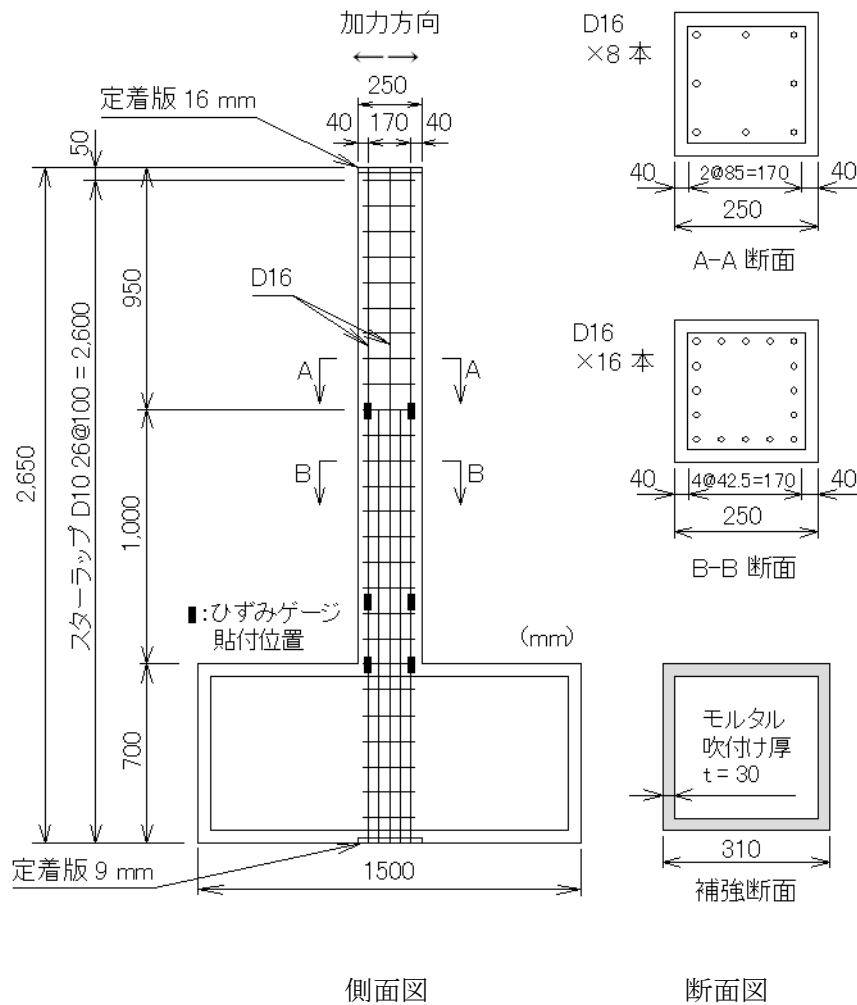


図-4.5 試験体の形状寸法および配筋状況

(2) 段落し部の曲げ補強設計

段落し部の曲げ補強設計は、アラミド補強研究会の「AFRP シートによる RC 橋脚の補強設計要領」(以下、要領とする)の考え方に基づいて行った。すなわち、モルタル吹付けによる各断面の断面増加に起因する抵抗曲げモーメントの増分を考慮した上で、曲げ補強後の段落し部曲げ耐力が基部降伏荷重の 1.2 倍以上となるように AFRP メッシュの補強量を決定した。なお、本実験では、AFRP メッシュのフーチング部への定着等の処理は行っていないため、AFRP メッシュによる基部断面の耐力増加はないものとして計算している。また、本曲げ補強設計は、要領に準拠して、主鉄筋の定着長を考慮した照査段落し部の曲げ耐力に対して行うこととしている。なお、AFRP メッシュの許容ひずみは、 $10,000 \mu$ としている。

曲げ耐力の算定は、各材料の力学的特性値を考慮して平面保持仮定の下に断面分割法により算定した。ここで、各材料の力学特性値は、コンクリート、鉄筋および吹付けモルタルに関しては材料試験値を、AFRP メッシュに関しては公称値を用いることとした。なお、本研究では、吹付けモルタルの剥落を抑制するためにポリビニルアルコール短繊維を混入していることより、短繊維を混入する場合の力学特性に関しては普通モルタルと同様であると仮定している。

(3) 強概要および補強材料

1)補強方法

RC 柱の補強は 図-4.6 のように、AFRP メッシュがモルタル吹付け厚さの中央部に配置されるようにモルタル製スペーサを用いて固定した。RC 柱の吹付け施工面には、吹付けモルタルの付着性能を向上させるためショットブラスト処理を施している。また、AFRP メッシュは、図に示しているように、RC 柱の正面および裏面から U 字状に巻付けて柱側面で重ね合わせる形で設置している。また、メッシュの継ぎ手長は、前述の要領に準じて 100 mm 程度とした。

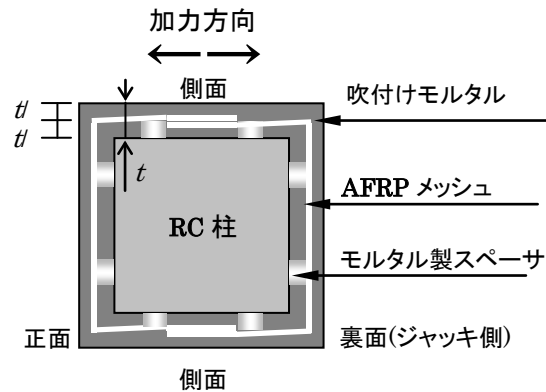


図-4.1 補強概要

2)AFRP メッシュ

表-4.8 に AFRP メッシュの材料特性値を示す。本実験に用いた AFRP メッシュは、幅 8 mm 程度の帯状の繊維を格子状に織り込んだ 2 方向メッシュである。メッシュの格子間隔は、モルタルに混入したポリビニルアルコール短繊維の長さ (30 mm) を考慮して 40 mm としている。なお、前述の補強設計法に基づき、メッシュには単位幅当たりの保証引張耐力が 200 kN/m 程度の目付量を有する AFRP 素材を用いることとした。写真-4.3 に、本実験に用いた AFRP メッシュを示す。

表-4.8 AFRP メッシュの材料特性値

単位幅当たりの保証耐力 (kN/m)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
200	118	2.06	1.75

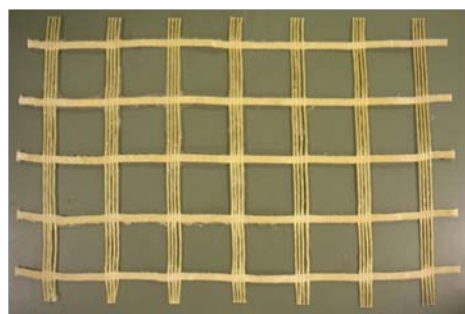


写真-4.3 AFRP メッシュ

3)高靱性吹付けモルタル

高靱性吹付けモルタルの配合は、材料コストの抑制を考慮し、かつ使用実績の多い配合を参考にして決定した。すなわち、単位セメント量 $C = 420 \text{ kg/m}^3$ 、セメントと細骨材の質量比 $C : S = 1 : 4$ を基本配合として、配合試験および吹付け試験を行い配合を決定した。高靱性モルタルへの短繊維の体積混入率（以下、短繊維混入率 V_f とする）は、鋼繊維補強吹付けコンクリートに関する過去の施工実績を参考にし、その上限値である 1.5 % とした。表-4.9 に使用したポリビニルアルコール短繊維の寸法および材料特性値の一覧を示す。また、表-4.10 に普通および高靱性モルタルの配合の一覧を示す。

表-4.11 に普通および高靱性吹付けモルタルの圧縮および曲げ試験結果を示す。なお、表中の圧縮および曲げ靱性係数は、土木学会コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準に示されている鋼繊維補強コンクリートに関する評価方法に基づいて算出したものである。表より、吹付けモルタルの種類に関わらず、圧縮強度や弾性係数はほぼ同程度であることがわかる。これに対し高靱性吹付けモルタルの曲げ強度および曲げ靱性係数は、普通吹付けモルタルの結果を大きく上回っている。この傾向は、曲げ靱性係数の場合で特に顕著である。これは、ひび割れ発生後におけるポリビニルアルコール短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制され、モルタルの靱性能が向上したことによるものである。

表-4.9 ポリビニルアルコール短繊維の材料特性値

直径 (mm)	長さ (mm)	弾性 係数 (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 歪み (%)
0.66	30	29.4	0.88	7.0

表-4.10 モルタル配合の一覧

吹付け モルタル	V_f (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			減水剤 (C×%)
			W	C	S	
普通	0	49	205	420	1,680	0
高靱性	1.5					0.25

表-4.11 吹付けモルタルの力学性能

吹付け モルタル	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	圧縮靱性係数 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げ靱性係数 (MPa)
普通	51.4	31.7	30.3	3.71	0.30
高靱性	64.2	33.5	46.9	7.17	4.69

4.2.3 実験方法

実験は、容量 750 kN のスクリージャッキ式繰り返し載荷装置を用いて行った。RC 柱とジャッキは、柱頭部から 30.5 cm (フーチング上面から 225.5 cm) 上方の位置でスイベルによりピン結合されている。また、スイベル部には、橋梁の死荷重を模擬した鉛直荷重 20.6 kN (応力レベルで 0.33 MPa) を作用させている。載荷実験は、段落し部もしくは基部の主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点における載荷点変位 δ_y を決定し、その δ_y を基準にして $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$...と振幅を正負方向に漸増させる水平交番載荷により行った。なお、各変位振幅におけるサイクル数は3サイクルとした。また、載荷は荷重が主鉄筋降伏時の荷重 P_y を下回るまで行うこととした。

4.2.4 実験結果

(1) 荷重－変位関係

図-4.7 に各試験体の荷重－変位履歴曲線を示す。図中に、断面分割法により算出した計算降伏荷重 P_{yc} および計算終局荷重 P_{uc} を併せて示す。

無補強の N 試験体に関する実験結果より、載荷荷重は $2\delta_y$ から $3\delta_y$ 時にかけてピーク値に至り、その後減少傾向を示し、 $5\delta_y$ の1サイクル目において P_y を下回っていることがわかる。実験では、 $3\delta_y$ 時から段落し部のひび割れが顕在化し、 $4\delta_y$ 時にかぶりコンクリートが剥落し、最終的に段落し部の主鉄筋が座屈して終局に至ったことを確認している。

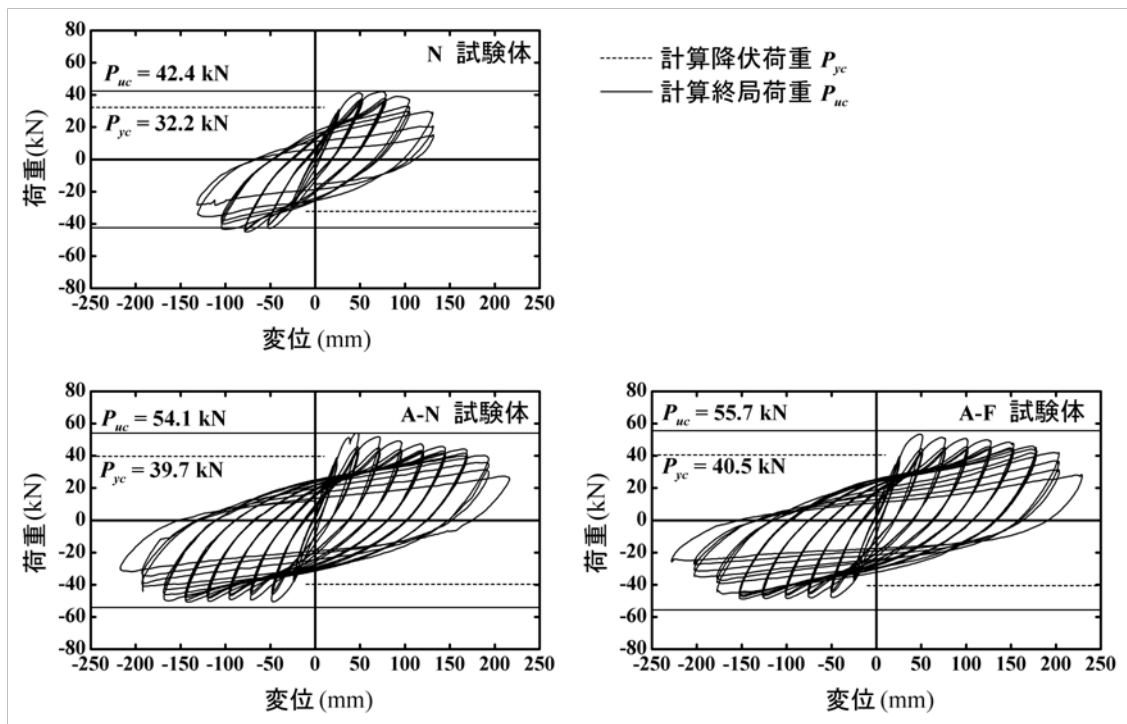


図-4.7 荷重－変位履歴曲線

一方、曲げ補強を施した A-N/F 試験体の場合には、ともに $2\delta_y$ 時の荷重が N 試験体の最大荷重よりも大きく、それ以降の荷重は徐々に低下する傾向にあるものの、 $7\delta_y$ 程度まで P_y 以上の耐荷性能を有していることがわかる。その後、 $8\delta_y$ の 2~3 サイクルにおいて基部の AFRP メッシュが破断するとともに主鉄筋が座屈して終局に至っている。

このように提案の曲げ補強工法を施すことによって、段落しを有する RC 柱の損傷位置が段落し部から基部に移行し、それに伴って耐荷性能および靱性能が向上していることがわかる。このことから、前述した補強設計法に基づき断面分割法を用いた補強設計を行うことにより、提案の補強工法を適用した RC 柱段落し部の曲げ補強設計が可能であることがわかる。なお、A-F 試験体は、短繊維を混入した高靱性吹付けモルタルを適用しているにも関わらず、その荷重-変位履歴曲線は、普通モルタルを吹付けた A-N 試験体とほぼ同様の性状を示している。これは、吹付け厚さが 30 mm と薄いこと、および両試験体の破壊モードが基部破壊型であることから、高靱性吹付けモルタルの優れた引張靱性能が十分に発揮されていないためと考えられる。なお、後述の破壊性状に示しているように、吹付けモルタルの著しいひび割れの開口や剥落は、短繊維の混入により効果的に抑制されていることを確認している。

また、各試験体の実験結果を計算結果と比較すると、降伏荷重および最大荷重ともにほぼ対応していることがわかる。ただし、A-N/F 試験体の負荷荷時における最大荷重の絶対値は、正載荷時のそれに比べて小さく、かつ計算最大荷重を下回っている。これは、正載荷時における載荷履歴の影響により、基部の曲げ耐力が正載荷時よりも低下したことによると考えられる。

表-4.12 に、各試験体の主鉄筋降伏時の荷重 P_y および変位 δ_y 、終局時の荷重 P_u および変位 δ_u 、最大荷重 P_{max} 、終局塑性率 μ の一覧を示す。表より、提案の曲げ補強法を施すことにより、耐荷性能および靱性能が、それぞれ 1.1、1.8 倍程度向上していることがわかる。

また、N 試験体の降伏荷重時における剛性を比較すると、提案の補強工法を適用することにより剛性を無補強の場合に比較して 1.5 倍程度に向上可能であることがわかる。このことから、地震被害によってひび割れが生じた構造物の剛性回復の観点からも本補強法は有効な方法であると考えられる。

表-4.12 実験結果の一覧

試験体名	降伏時			終局時*2		最大荷重 P_{max} (kN)	終局塑性率 μ ($=\delta_u/\delta_y$)
	荷重 P_y (kN)	変位 δ_y (mm)	剛性*1 (kN/mm)	荷重 P_u (kN)	変位 δ_u (mm)		
N	29.8	26.2	1.14	39.8	105	42.1	3.99
A-N	38.4	24.0	1.74	44.7	168	54.1	7.01
A-F	38.6	25.4	1.72	44.2	178	53.4	6.99

*1: N 試験体の降伏荷重時における剛性, *2: 本実験で定義した終局変位振幅時の結果

(2) 主鉄筋ひずみ－変位関係

図-4.8 に、N および A-F 試験体の各位置における主鉄筋ひずみ－変位関係を示す。ここでは、段落し部および基部近傍（基部より 25 cm 上方）の正載荷時に引張となる主鉄筋に着目して整理している。なお、図には、N および A-F 試験体に対して、それぞれ 4 および 7 δ_y までの結果が示されている。これは、変位振幅の大きい領域では、ひずみゲージやコンクリート内部のケーブルが損傷してひずみが測定不能となったためである。

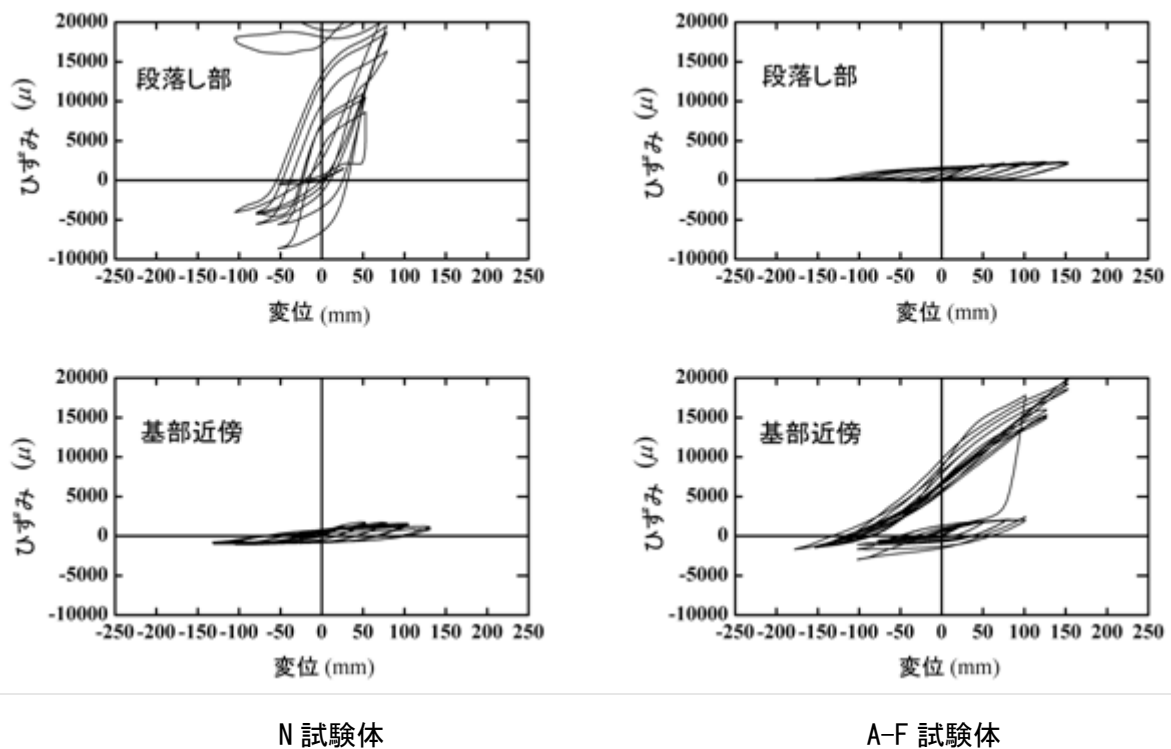


図-4.8 主鉄筋ひずみ－変位履歴曲線

図より、無補強の N 試験体は段落し部のひずみが変位振幅の増大とともに著しく増加し、最終的に 20,000 μ を越えた状態で終局に至っている。これに対し、基部近傍のひずみは最大で 2,000 μ 程度であることから、この部分の損傷が段落し部に比較して極めて軽微であることがわかる。これは、 δ_y 時点までは段落し部と基部において同程度のひずみが発生するものの、荷重の増加とともに段落し部に損傷が集中してヒンジ状態に近い状態に至るため、基部の作用モーメントも増加せず、従って基部の損傷も軽微になったものと考えられる。

一方、提案の補強工法を施した A-F 試験体は段落し部の主鉄筋ひずみが最大でも 2,300 μ 程度に抑制されているのに対し、基部では 20,000 μ 程度の大きなひずみが発生しており、この部分が著しく損傷していることがわかる。これは、段落し部を AFRP メッシュで曲げ補強したことにより、段落し部の曲げ耐力が向上し、荷重の増加とともに基部に損傷が集中しヒンジに近い状態に至ったためと考えられる。

これらの結果より、提案の補強工法を施すことによって、段落し部が十分に曲げ補強され、損傷を完全に基部に移行できることが明らかになった。

(3) 破壊性状

図-4.9 に実験終了後における RC 柱のひび割れ分布性状を示す。図より、N 試験体は、段落し部から上下に $1.0 D$ (D : 断面高さ) 程度の領域で断面が著しく損傷しており、かぶりコンクリートが剥落し、主鉄筋および帯鉄筋が露出しヒンジに近い状態に至っていることが確認できる。一方、基部近傍には著しい損傷は見られない。

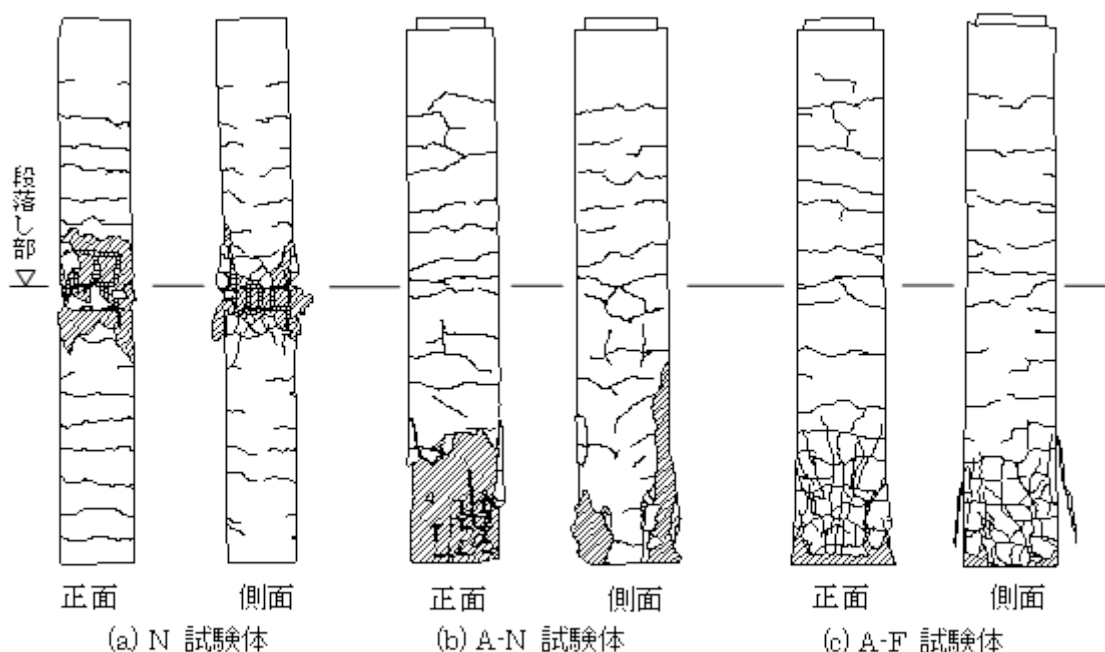


図-4.9 ひび割れ性状

AFRP メッシュと普通吹付けモルタルを用いて補強した A-N 試験体は、段落し部側面に曲げおよび斜めひび割れの発生が確認できるものの、著しい損傷は見られない。一方、基部では吹付けモルタルが大きく剥落し、その範囲は段落し近傍にまで至っている。実験では吹付けモルタルの剥落により内部の AFRP メッシュが露出し破断していることを確認している。また、基部はヒンジに近い状態に至っているものと推察されるが、AFRP メッシュの効果により損傷の程度が無補強の段落し部の損傷に比較して軽微であることが確認できる。AFRP メッシュと高靱性吹付けモルタルを用いて補強した A-F 試験体は、A-N 試験体の場合と同様、段落し部における著しい損傷は見られず、この部分が十分に曲げ補強されていることがわかる。一方、基部では、吹付けモルタルのひび割れが部分的に大きく開口しているものの、A-N 試験体に見られたモルタルが剥落する等の著しい損傷は認められない。また、高靱性吹付けモルタルには多数のひび割れが分散して発生していることがわかる。これは、ひび割れ発生後におけるポリビニルアルコール短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制されるとともに微細なひび割れが多数分散して発生し、モルタルの剥落が抑制されたためである。以上のことより、ポリビニルアルコール短繊維を混入することにより、繰り返し荷重作用下における吹付けモルタルの剥落が効果的に抑制可能であることが明らかになった。

4.2.5 まとめ

本研究では、コンクリート構造物の新しい補修・補強法として、AFRP メッシュとポリビニルアルコール短繊維を混入した高靱性吹付けモルタルを組み合わせる工法を提案し、その補強効果を水平交番載荷実験により検証した。本研究により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 提案の工法を適用することによって、段落し部の曲げ破壊を確実に抑制することができ、損傷位置を基部に移行させることが可能である。
- (2) AFRP メッシュの曲げ補強量は、AFRP シート補強を用いる場合の補強設計法に準拠することにより、適切に算定可能である。
- (3) 吹付けモルタルにポリビニルアルコール短繊維を混入することにより、繰り返し荷重作用下における基部の吹付けモルタルの剥落を効率よく抑制することが可能になる。

4.3 RC 梁への適用

4.3.1 はじめに

本研究では、ポリビニルアルコール短繊維混入吹付けコンクリートと AFRP メッシュを組み合わせた補強工法における RC 梁の曲げおよびせん断耐力に対する向上効果を検討することを目的として、RC 梁を用いた静載荷実験を実施した。

4.3.2 曲げ耐力向上効果の検討

本節では、提案の工法を RC 部材に適用した場合の曲げ補強効果と曲げ載荷時における補強材の剥離性状を明らかにすることを目的に、本工法を適用した曲げ補強 RC 梁に関する静載荷実験を行った。

(1) 実験概要

1) 試験体の概要

表-4.13 に本実験に用いた試験体の一覧を示す。試験体数は、吹付け材としてモルタルおよびコンクリートを用いる場合に対して、AFRP メッシュ補強量を 4 種類に変化させた全 8 体である。試験体名のうち、第 1 項目の M および C はそれぞれ吹付け材としてモルタルおよびコンクリートを用いたことを示しており、それに付随する数値は、吹付け厚さ $t(\text{mm})$ を示している。また、第 2 項目は AFRP メッシュの補強量を意味しており、保証耐力(kN/m)の 1/100 の数値を示している。なお、吹付け厚さは、モルタルおよびコンクリートを用いる場合に対して、それらの最小厚さとしてそれぞれ $t=10, 30\text{mm}$ と設定している。

表-4.13 試験体の一覧

試験体名	吹付け材			AFRP メッシュ			計算曲げ 耐力 (kN)	計算せん断 耐力 (kN)	せん断 余裕度 α
	種類	短繊維長 (mm)	吹付け厚 (mm)	保証耐力 (kN/m)	格子間隔 (mm)	層数			
M10-0	モルタル	6	10	-	-	-	86.0	181.5	2.11
M10-0.5				50	30	1	92.8		1.96
M10-1				100	30	1	100.0		1.82
M10-2				200	40	1	114.3		1.59
C30-0	コンク リート	30	30	-	-	-	86.0	181.5	2.11
C30-2				200	80	1	115.7		1.57
C30-4				200	80	2	145.4		1.25
C30-6				200	80	3	171.8		1.06

なお、本実験は、RC 梁の曲げ補強効果に関する検討を行うことを目的としている。そのため、RC 梁の設計は、曲げ補強後においてもせん断破壊しないように、計算せん断耐力 V_{uc} が計算曲げ耐力 P_{uc} よりも大きくなるように行っている。表には、各試験体のせん断余裕度 $\alpha (=V_{uc}/P_{uc})$ を示している。ここで、計算せん断耐力 V_{uc} は、補強材の剛性を無視してコンクリート標準示方書[設計編]に準拠して算出している。また、計算曲げ耐力 P_{uc} は、補強材の完全付着および平面保持を仮定して、断面分割法により算出している。

P_{uc} の算出におけるコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は、後述の材料試験値を用い、コンクリート標準示方書[設計編]に準拠して仮定した。また、AFRP メッシュに関しては、アラミド補強研究会の AFRP シート補強に関する指針に準拠して、AFRP シートと同様にメッシュが破断するまで引張応力が線形的に増大するものと仮定している。なお、本工法では吹付けモルタルおよびコンクリートの剥落を抑制することを目的としてポリビニルアルコール短繊維を混入していることより、吹付け材に混入した短繊維の引張性能は計算上考慮していない。

図-4.10 に本実験に用いた RC 梁の形状寸法および配筋状況を示す。試験体は、梁高 20cm、ウェブ幅 32cm、フランジ厚 10cm およびフランジ幅が 50cm の複鉄筋 T 型 RC 梁であり、純スパン長は 2m である。軸方向鉄筋には、D13(SD295A)を用い、またスターラップには D6(SD295)を用いて 80mm 間隔で配置している。実験は、載荷点間隔 40cm の 2 点載荷により行っているため、せん断スパン比は 5.0 となっている。

実験におけるコンクリートの材令は 48 日、圧縮強度は 24.3MPa である。また、鉄筋の降伏強度は D6 および D13 でそれぞれ 402、392MPa である。

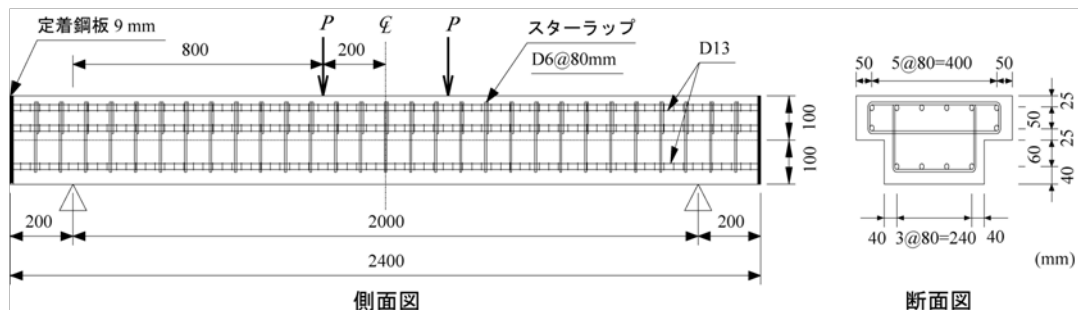


図-4.10 試験体の概要

2) 補強概要

各試験体の補強は、1)まず母材コンクリート表面の脆弱部の除去および吹付け材の付着性の向上を目的として、吹付け施工面にブラスト処理を施し、2)AFRPメッシュを設定吹付け厚 t の1/2の位置にモルタル製スペーサを介して配置し、3)短繊維混入モルタルもしくはコンクリートを所定の厚さに吹付け、コテ仕上げすることにより行っている。なお、本実験では、吹付け施工に伴う各試験体のばらつきを極力小さくするために、モルタルおよびコンクリートの吹付けは、RC梁を90度回転させて梁底面を鉛直面とし施工しやすい条件下で実施することとした。また、実験終了後には補強を施した各RC梁の底面をコア抜きし、吹付け材がAFRPメッシュの裏側まで十分に充填されていることを確認している。

図-4.11に梁底面における補強概要を示す。補強範囲は、いずれの試験体の場合も梁中央部から両支点の10cm手前までの範囲としている。また、AFRPメッシュとして、モルタル吹付けの場合には、保証耐力50~200kN/m、格子間隔30~40mmのものを、コンクリート吹付けの場合には、保証耐力200kN/m、格子間隔80mmのものを1~3層用いた。

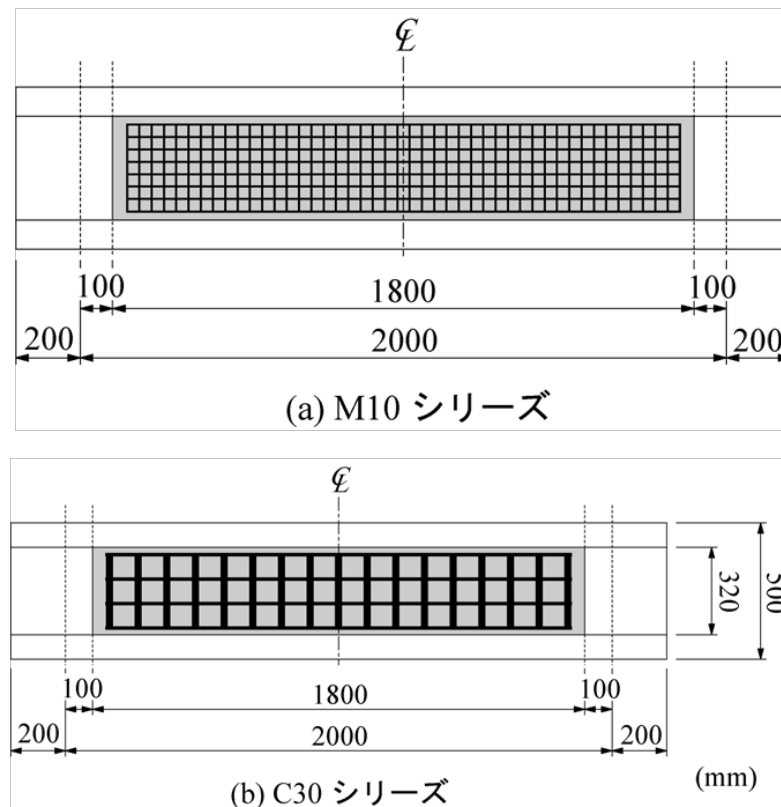


図-4.11 梁底面の補強概要

3) 吹付け材の配合および力学性能

表-4.14 に吹付けモルタルおよびコンクリートに用いた材料の一覧を示す。また、表-4.15 に吹付けモルタルおよびコンクリートの配合を示す。モルタルおよびコンクリートの配合は、それぞれスクイズ式および空気圧送式吹付け機を用いて施工することを前提に決定している。そのため、これらの配合は、実際に吹付け試験を行って吐出性状を確認するとともに、コンクリートへの付着性および補強材として耐凍害性および耐塩分浸透性が十分なものとなるように決定した。なお、これらの吹付けモルタルおよびコンクリートは、別途実施した凍結融解試験および急速塩分浸透試験により十分な耐凍害性および耐塩分浸透性を有していることを確認している。また、本補強工法では、吹付け後における表面仕上げを可能にするため、急結材は使用していない。

表-4.14 吹付け材に使用した材料の一覧

材料	記号	種類	物性および主成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	比重：3.14, 比表面積：0.45m ² /g
細骨材	S	苫小牧産海砂	比重：2.68, 粗粒率：2.85
粗骨材	G	小樽産碎石	比重：2.68, 最大寸法：10mm
混和剤	SF	中国産シリカフューム	比重：2.20, 比表面積：19.1m ² /g
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリグリコールエステル誘導体
	AE	AE 剤	変性ロジン酸配合物系陰イオン界面活性剤
短繊維	V _f	ポリビニルアルコール短繊維 (外割配合)	

表-4.15 吹付け材の配合一覧

吹付け材の種類	V _f (vol.%)	W/B (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (C×%)		フロー 値	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	SF	SP	AE			
モルタル	1.5	39	225	655	1310	-	-	0.5	0.002	180	-	5.2
コンクリート		43	185	387	1365	340	43	2.5	-	-	5.8	6.0

表-4.16 に短繊維混入モルタルおよびコンクリートの力学的特性値を示す。これらの試験に用いる供試体は、土木学会規準(JSCE-F561-1999)に準拠した吹付けコンクリート供試体製作用パネル(500×500mm、深さ300mm、以下、パネルとする)に吹付けたモルタルおよびコンクリートを、硬化後に切り出して製作した。供試体製作用パネルの深さは、上述のとおり 300mm であり、吹付け材の RC 梁への吹付け厚(10 もしくは 30mm)よりも著しく大きい。理想的には梁製作時と同様の姿勢の下にパネルへの吹付けを実施すべきである。しかしながら、吹付けノズルを水平にし、かつパネルを直立させて 300mm 厚のブロックを製作することは、材料の自重による下方流動を伴うため困難である。従って本研究では、モルタルの場合にはパネルを地表面に設置してノズルを下向きに、またコンクリートの場合には、パネルを地表面に対して 60 度に傾斜させてノズルを斜め下向きにして吹付けを実施することとした。

表-4.16 吹付け材の力学的特性値

吹付け材の種類	材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	圧縮靱性係数 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げ靱性係数 (MPa)
モルタル	33	62.3	29.9	49.3	5.6	2.9
コンクリート	27	95.8	36.6	46.1	8.4	2.6

4) 各種補強材料の形状寸法と材料特性値

表-4.17、表-4.18 に、それぞれポリビニルアルコール短繊維および AFRP メッシュの形状寸法と材料特性値の一覧を示す。なお、ポリビニルアルコール短繊維には、市販されている汎用的なものを用いることとした。また、その長さはモルタルおよびコンクリートの吹付け厚さを考慮して、それぞれ 6.30mm と設定した。AFRP メッシュの格子間隔は、使用するポリビニルアルコール短繊維よりも十分に大きくなるように表-4.18 のように設定した。

表-4.17 ポリビニルアルコール短繊維の形状寸法と材料特性値

吹付け材の種類	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)	破断歪み (%)
モルタル	6	0.10	60	29.4	0.88	7.0
コンクリート	30	0.66	45			

表-4.18 AFRP メッシュの形状寸法と材料特性値

吹付け材の種類	保証耐力 (kN/m)	格子間隔 (mm)	弾性係数 (Gpa)	引張強度 (GPa)	破断歪み (%)
モルタル	50	30	118	2.06	1.75
	100	30			
	200	40			
コンクリート	200	80			

(2) 実験結果

1) 荷重-変位曲線

図-4.12 に各試験体の荷重-変位曲線に関する実験結果を吹付け材の種類毎に示す。図-4.12(a)の吹付けモルタルを用いた M10 シリーズの結果より、AFRP メッシュを配置していない M10-0 試験体は、主鉄筋降伏後も顕著な荷重増加は見られないことがわかる。メッシュを配置した M10-0.5/1/2 試験体の場合には、曲げひび割れ発生後から主鉄筋降伏前までの剛性勾配(以下、第 2 勾配とする)が、いずれの試験体もほぼ同様の性状を示しているものの、主鉄筋降伏後の剛性勾配(以下、第 3 勾配とする)や最大荷重および最大荷重時変位は、メッシュ補強量の増加に伴って大きくなる傾向にあることがわかる。

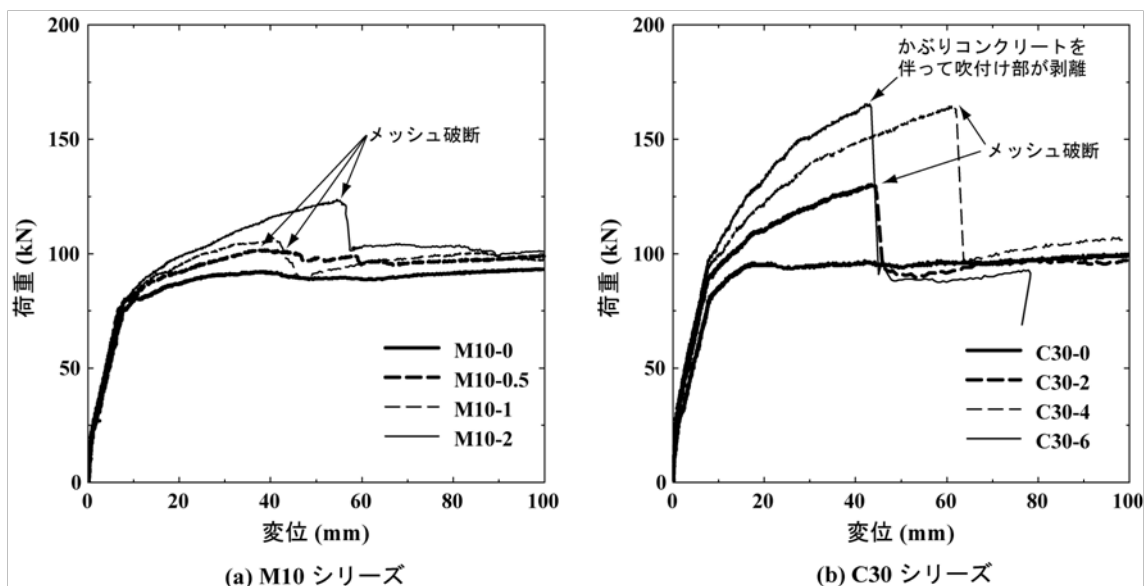


図-4.12 荷重-変位曲線(メッシュ補強量の影響)

実験時において、M10-0.5 試験体は、最大荷重到達後スパン中央部近傍の AFRP メッシュが梁幅方向に段階的に破断して荷重が徐々に低下し、変位 70mm 程度で全幅に渡って完全に破断した。なお、AFRP メッシュが破断する場合には常に軸方向繊維のみが破断していることより、以下ではこれらの状況を単に「メッシュの破断」として簡略化して記述することとする。M10-1 試験体は、最大荷重到達後、変位 50mm 程度でメッシュが全幅に渡って完全に破断している。一方、M10-2 試験体は、最大荷重到達後、荷重が急激に 25kN 程度低下するものの、メッシュは完全には破断に至らず、その後メッシュが段階的に破断するとともに荷重が徐々に低下し、変位 90mm 程度で完全に破断した。

なお、上記補強試験体の結果より、AFRP メッシュ補強量が大きい場合ほど荷重が急激に低下する傾向が強く現れている。これは、メッシュ補強量が小さい場合(M10-0.5/1 試験体)は、上縁コンクリート圧壊後、等曲げ区間における曲げひび割れの大きな開口に伴って複数の位置で軸方向繊維が逐次的に破断するため徐々に荷重が低下する性状を示しているのに対し、メッシュ補強量が大きい場合(M10-2 試験体)は、曲げ補強量が大きいことにより梁が大きく曲げ変形するものの、やがて等曲げ区間のメッシュが破断ひずみに至り荷重が急激に低下したためと考えられる。このような傾向は、M10-2 試験体に比較してメッシュ補強量が同等以上である C30-2/4/6 試験体の場合においても同様である。

図-4.12 (b)の吹付けコンクリートを用いた C30 シリーズの結果より、メッシュを配置していない C30-0 試験体は、前述の M10-0 試験体と同様、主鉄筋降伏後における顕著な荷重増加は示されていないことがわかる。メッシュを配置した C30-2/4/6 試験体は、第 2 勾配が C30-0 試験体よりも若干大きくなっているものの、メッシュ補強量による違いは顕著ではない。また、第 3 勾配および最大荷重は M10 シリーズの場合と同様、メッシュ補強量の増加に伴って大きくなる傾向にあることがわかる。しかしながら、最大荷重時変位はメッシュ補強量が最も大きい C30-6 試験体の場合が最も小さくなっている。さらに、メッシュ補強量の増加による最大荷重の増分も小さい。これは、後述の破壊性状にも示されているように、C30-2/4 試験体は、最大荷重時にメッシュが全幅に渡って完全に破断して終局に至ったのに対し、C30-6 試験体は、吹付けコンクリート部がかぶりコンクリートを付着させた状態で端部から剥離したため、メッシュの引張耐力が十分に発揮されなかったことによると考えられる。

ここで、各試験体の主鉄筋降伏後の第 3 勾配に着目すると、C30-4/6 試験体のように補強量が大きい場合ほど主鉄筋降伏後の勾配は大きく示されているものの、その後変位 30mm 程度において勾配が低下している。これは、補強材と RC 梁のコンクリート表面との付着界面が部分的な剥離を生じていることを暗示している。従って以下の考察では、各試験体の荷重-変位曲線の第 3 勾配に着目し、補強材の完全付着を仮定した断面分割法による計算結果と比較することにより、主鉄筋降伏後における補強材の付着状況を検討することとする。

図-4.13 に各試験体の荷重-変位曲線に関する実験結果を計算結果と比較して示す。ここで、図に示している荷重および変位の結果は、実験および計算結果における主鉄筋の降伏荷重 P_{ye} 、 P_{yc} 、降伏変位 δ_{ye} 、 δ_{yc} で除して無次元化して示されている。これは、主鉄筋降伏後における AFRP メッシュの曲げ補強効果に関する実験結果を計算結果と比較しやすくするためである。表-4.19 に各試験体の実験および計算結果の一覧を示す。なお、計算ではいずれの試験体も AFRP メッシュの破断により終局に至っている。表より、実験結果

の降伏荷重および降伏変位は、いずれも計算結果を上回っていることがわかる。そのため、実験結果は無次元化することによって計算結果よりも小さく評価される。従って、無次元化後における実験結果の計算結果に対する比較は、設計的に安全側の評価を与えるものと考えられる。

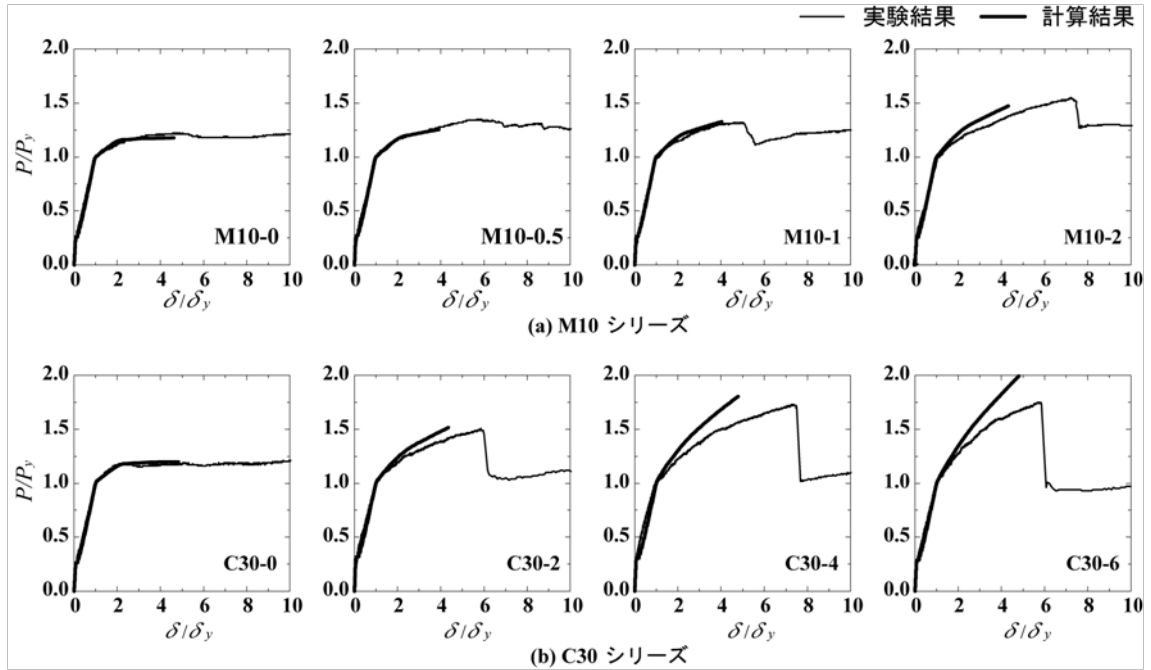


図-4.13 荷重-変位曲線に関する実験および計算結果の比較

表-4.19 実験および計算結果の一覧

試験 体名	実験結果						計算結果					
	荷重			変位			荷重			変位		
	降伏 P_{ye} (kN)	終局 P_{ue} (kN)	P_{ue}/P_{ye}	降伏 δ_{ye} (mm)	終局 δ_{ue} (mm)	δ_{ue}/δ_{ye}	降伏 P_{yc} (kN)	終局 P_{uc} (kN)	P_{uc}/P_{yc}	降伏 δ_{yc} (mm)	終局 δ_{uc} (mm)	δ_{uc}/δ_{yc}
M10-0	75.5	93.6	1.24	7.94	101.4	12.8	73.1	86.0	1.18	6.7	30.9	4.60
M10-0.5	75.5	101.7	1.35	6.80	40.00	5.88	74.1	92.8	1.25	6.7	26.0	3.90
M10-1	80.0	105.6	1.32	8.28	41.38	5.00	75.4	100.0	1.33	6.8	27.2	4.02
M10-2	79.9	123.6	1.6	7.6	54.6	7.23	77.7	114.3	1.47	6.8	29.3	4.31
C30-0	81.2	100.4	1.23	8.34	103.4	12.40	73.1	86.0	1.18	6.7	30.9	4.60
C30-2	86.7	130.6	1.51	7.43	43.5	5.86	76.4	115.7	1.52	6.4	28.0	4.36
C30-4	94.8	164.5	1.73	8.28	61.1	7.38	80.5	145.4	1.80	6.4	30.8	4.79
C30-6	94.3	165.5	1.75	7.42	43.1	5.81	86.3	171.8	2.00	6.6	31.6	4.80

図より、メッシュを配置していない M10/C30-0 試験体は、ともに計算結果と同様の性状を示していることがわかる。また、メッシュを配置した試験体のうち、補強量の小さい M10-0.5/1 試験体は、計算最大荷重時まで実験および計算結果が良く対応している。これは、両試験体に吹付けたモルタルがメッシュ破断時までほぼ完全付着状態にあることを示している。また、メッシュ補強量が同等である M10/C30-2 試験体の結果を見ると、実験結果の第 3 勾配が、 $\delta / \delta_y = 2 \sim 3$ 程度以降で計算結果のそれを若干下回る傾向にあることがわかる。一方、M10/C30-2 試験体よりも補強量が多い C30-4/6 試験体は、 $\delta / \delta_y = 2$ 程度までは、実験結果の第 3 勾配が計算結果のそれとほぼ対応しているものの、それ以降は徐々に実験結果が計算結果を下回る傾向にあることがわかる。また、両試験体ともに、計算最大荷重到達前に終局に至っている。これらは、RC 梁のコンクリート表面と吹付けモルタル/コンクリートとの付着界面が部分剥離に至っていることによるものと推察される。以上のことより、メッシュ補強量が同等の場合には、吹付け材の種類によらずほぼ同様の耐荷性状を示すことが明らかになった。また、メッシュ補強量が大きい場合ほど、実験結果の第 3 勾配が計算結果のそれを下回る傾向が強く現れることが明らかになった。

2) ひび割れ分布性状

図-4.14 に各試験体の実験終了後におけるひび割れ分布性状を示す。また、図には、計算最大荷重時における主鉄筋降伏範囲を示す。なお、等せん断力区間の主鉄筋の降伏範囲 L_{yu} は、下式によって算定した。

$$L_{yu} = a (1 - M_y / M_u) \quad \text{式(4.2)}$$

ここに、 a : せん断スパン長、 M_y : 断面分割法による主鉄筋降伏曲げモーメント、 M_u : 断面分割法による終局曲げモーメントである。

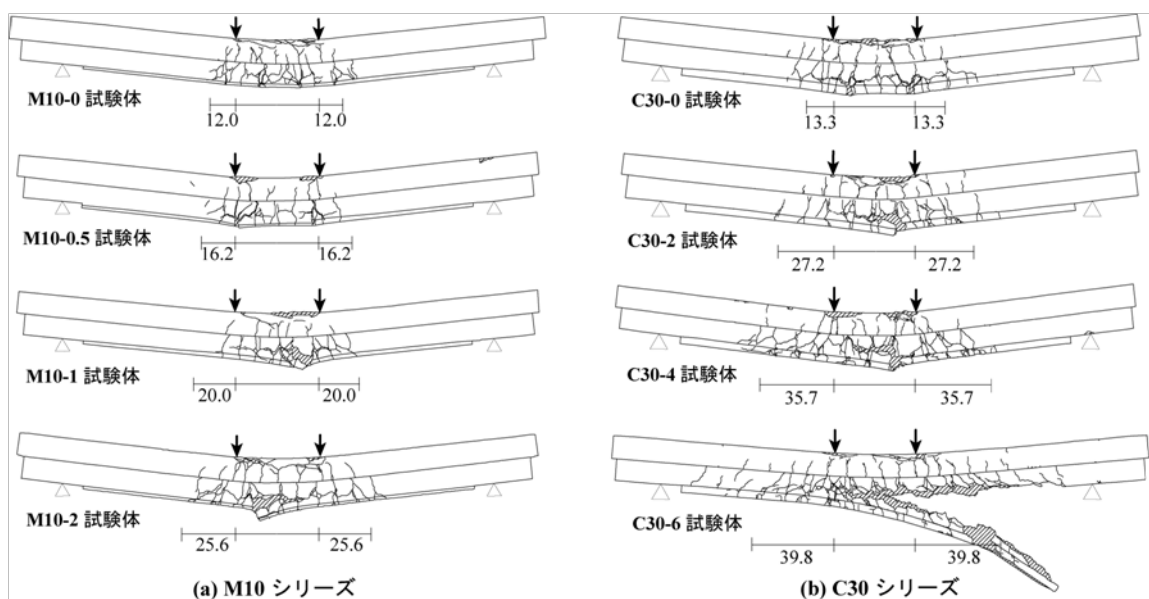


図-4.14 ひび割れ分布比較図

図より、M10/C30-0 試験体は、主に曲げひび割れが発生しており、等曲げ区間ではそのひび割れが大きく開口していることがわかる。M10-0.5/1 試験体も、M10/C30-0 試験体と同様、曲げひび割れの発生が多く見られ、いずれも等曲げ区間に曲げひび割れの大きな開口が見られる。また、メッシュ補強量が同等の M10/C30-2 試験体は、ひび割れの発生範囲がほぼ同様であり曲げひび割れの他、等せん断力区間には斜めひび割れの発生が見られる。ただし、両試験体ともに、メッシュの破断により終局に至っているため、等曲げ区間において大きなひび割れの開口が見られる。

C30-4 試験体は、C30-2 試験体よりも等せん断力区間における斜めひび割れの発生範囲が支点側に拡大していることがわかる。なお、実験では、等せん断力区間に数本の斜めひび割れが開口した後、吹付け部界面近傍において水平方向にひび割れが進展していることを確認している。また、等曲げ区間にはメッシュの破断に伴うひび割れの開口が見られる。

C30-6 試験体の結果を見ると、他の試験体とは大きく異なり、右側スパンにおいて、主鉄筋配置位置を境に吹付けコンクリートが下縁かぶりコンクリートとともに剥離していることがわかる。これは、C30-6 試験体のメッシュ補強量が最も大きいことから、最大荷重時にひび割れ発生範囲が補強範囲の端部まで拡大し、結果的に端部に発生した曲げひび割れに起因して補強材が引き剥がされるピーリング作用により剥離がスパン中央部に進展したためと考えられる。このことから、本実験に用いた吹付けコンクリートの付着性能は、母材コンクリートの引張強度以上に大きいことが推察される。

一方、各試験体の主鉄筋降伏範囲は、メッシュ補強量が大きい場合ほど広く示されており、ひび割れの発生範囲もほぼ同様の傾向を示していることがわかる。特に、等せん断力区間では、梁下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れと曲げひび割れが交差してコンクリートブロックが形成されていることがわかる。なお、C30-6 試験体は、他の試験体と異なり、ひび割れが主鉄筋降伏範囲よりも広い範囲に分布する傾向が強く現れている。これは、C30-6 試験体の場合は、吹付けコンクリートがピーリング作用により梁のかぶりコンクリートを引き剥がす形で終局に至っているためと考えられる。

3) 吹付け材の剥離メカニズム

写真-4.4 に、吹付け材の剥離に影響を及ぼすひび割れを詳細に検討するために、最大荷重時近傍における等せん断力区間のひび割れ分布性状を C30 シリーズについて示す。写真より、C30-0 試験体は、等曲げ区間において曲げひび割れが大きく開口しているものの、等せん断力区間には著しいひび割れの発生は見られない。C30-2 試験体は、等曲げ区間のみならず等せん断力区間にもひび割れが発生している。なお、これらのひび割れは吹付けコンクリート部から梁底面にかけて連続的に進展していることより、吹付けコンクリートの付着は確保されているものと判断される。

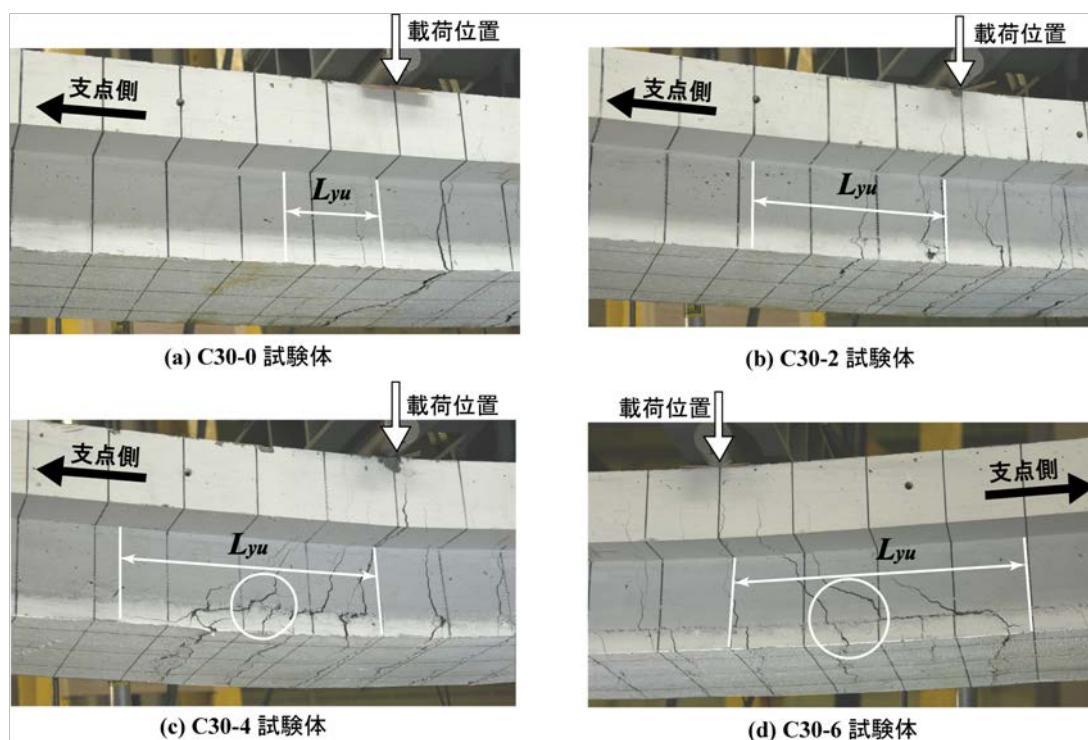


写真-4.4 最大荷重時近傍のひび割れ性状

これらに対し、C30-4/6 試験体は、等せん断力区間において斜めひび割れが多く発生し、かつ梁底面と吹付けコンクリートの界面には、部分的な剥離が生じていることがわかる。また、その範囲は主鉄筋降伏範囲 L_{yu} とほぼ対応している。また、実験時には梁下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロック(写真中、○印)が、吹付けコンクリートを押し出す形で部分剥離を生じさせていることを確認している。このような補強材の剥離挙動は、FRP シート曲げ補強 RC 梁の静載荷実験で見られるピーリング作用と同様なものであると考えられる。なお、写真からもわかるように、部分剥離先端部では、吹付け界面近傍の水平ひび割れが吹付けコンクリート部の斜めひび割れに進展しており、FRP シート接着工法の場合のように部分剥離範囲が支点側に急激に進展する剥離性状は見られない。これは、AFRP メッシュの曲げ剛性が小さく撓化性があるため、ピーリング作用によるメッシュを介しての支点方向への力の伝達が緩和されたことによるものと推察される。このことより、部分剥離発生後における全面剥離に対する抵抗性は、本工法が FRP シート接着工法よりも優れていると考えられる。

以上のことから、前述の荷重－変位曲線に見られた第3勾配の低下は、等せん断力区間における吹付けコンクリートの部分剥離によるものであることが明らかになった。また、この部分剥離には、主鉄筋降伏範囲の梁下縁かぶり部に形成されるコンクリートブロックによるピーリング作用が大きな影響を及ぼしているものと推察される。さらに、ピーリング作用の要因となる下縁かぶりコンクリート部の斜めひび割れは、主鉄筋降伏範囲内に発生することから、吹付けコンクリート部の剥離には、FRPシート接着工法による曲げ補強の場合と同様、主鉄筋の降伏範囲が大きく影響しているものと推察される。

(3) 曲げ補強後の RC 梁の破壊形式の予測

本実験結果では、**図-4.13**の荷重－変位曲線からもわかるように、メッシュ補強量の違いによって無次元化後の実測耐力が計算耐力を十分に満足する場合と実測耐力が計算耐力を下回る場合が見られた。前者の場合には、断面分割法に基づいた数値計算により最大荷重を評価可能であるが、後者の場合には、計算結果が実測値を過大に評価し危険側の設計になる可能性がある。

一方、FRPシート曲げ補強 RC 梁の破壊形式を、1)計算終局時までシートが剥離せずに実測耐力が計算耐力を上回った後上縁コンクリートが圧壊して終局に至る「曲げ圧壊型」と、2)計算終局時到達前にシートが剥離して実測耐力が計算耐力を下回って終局に至る「剥離破壊型」に分類して、シートの剥離が計算終局時における等せん断力区間の主鉄筋降伏領域 L_{yu} と深く関連していることに着目して、以下のような L_{yu} とせん断スパン長 a を用いた破壊形式予測式を提案する。

曲げ圧壊型の場合は、

$$L_{yu} / a < 0.30 \quad \text{式(4.3)}$$

剥離破壊型の場合は、

$$L_{yu} / a > 0.35 \quad \text{式(4.4)}$$

また、式(4.3)、(4.4)は、前述の式(4.2)を用いると、計算降伏曲げモーメント M_y および計算終局曲げモーメント M_u を用いて下式のように変形できる。

曲げ圧壊型の場合は、

$$M_y / M_u > 0.70 \quad \text{式(4.5)}$$

剥離破壊型の場合は、

$$M_y / M_u < 0.65 \quad \text{式(4.6)}$$

図-4.15 に、上記の破壊形式予測式の本実験結果への適用性について検討するため、各補強試験体の M_y / M_u 値と、実験結果の破壊形式を区別して示す。図より、メッシュ補強量が少ない M10-0.5/1 試験体の場合には、曲げ圧壊型と判定され、かつ実験結果も曲げ圧壊型で終局に至っていることがわかる。

一方、メッシュ補強量が多い C30-4/6 試験体は、剥離破壊型と判定されている。実験結果も、計算耐力到達前にピーリング作用による吹付け材の部分剥離により主鉄筋降伏後の第3勾配が計算結果を大きく下回り補強材の破断もしくは剥離により終局に至っている。

M10/C30-2 試験体の場合には、ともに両破壊形式の遷移領域に位置している。実験時には、計算終局耐力を確保しているものの、実験結果の第3勾配が計算結果のそれを若干下回る傾向にあり、予測式と同様曲げ圧壊型と剥離破壊型の間隔的な性状を示していることがわかる。なお、図中では設計的に安全側の評価を与えるように剥離破壊型として分類している。

以上より、本工法は FRP シート接着工法と同程度の曲げ補強効果を有しており、かつその破壊形式の予測式は、本工法にも適用可能であることが明らかになった。

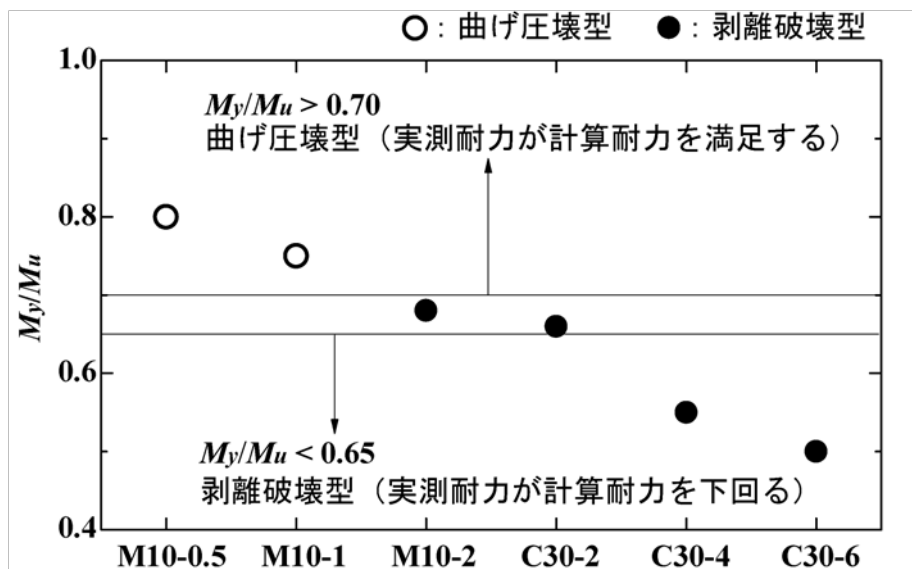


図-4.15 各試験体の M_y / M_u

4.3.3 まとめ

本研究では、RC 部材の引張部を AFRP メッシュとポリビニルアルコール短繊維混入吹付けモルタル/コンクリートを併用して補強した場合における曲げ補強効果や補強材の剥離性状を明らかにすることを目的として、本工法を適用した曲げ補強 RC 梁に関する静載荷実験を行った。本実験では、吹付け材として短繊維混入モルタルもしくはコンクリートを用いる場合について、AFRP メッシュの補強量が RC 梁の曲げ耐荷性状に及ぼす影響や、補強材の剥離と RC 梁の曲げ耐荷性状との関係について検討を行った。本研究で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 本工法による、AFRP メッシュの RC はりの曲げ補強効果は、FRP シート接着の場合とほぼ同等である。
- 2) メッシュ補強量が同等の場合には、吹付け材の種類によらずほぼ同様の耐荷性状を示す。また、メッシュ補強量が多い場合ほど、吹付け材の部分剥離が顕在化し主鉄筋降伏後の荷重-スパン中央部変位勾配が計算結果のそれを下回る傾向が強く現れる。
- 3) 補強材の剥離は、FRP シート接着の場合と同様、主鉄筋降伏範囲の下縁かぶりコンクリート部に形成されるコンクリートブロックが吹付け材を押し出して引き剥がすピーリング作用によって発生する。ただし、部分剥離発生後における全面剥離に対する抵抗性は、本工法の方が FRP シート接着工法よりも優れている。
- 4) 補強材の剥離挙動は、曲げ補強 FRP シートの場合と類似していることより、本工法で曲げ補強した RC 梁の破壊性状は、既往の FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測式により、大略予測可能である。

4.3.4 せん断耐力向上効果に関する検討

本節では、本工法によるせん断補強設計法の確立に向けて、実験によりせん断耐力向上効果を補強設計要領による計算せん断耐力と比較する形で評価検討を行った。

(1) 実験概要

表-4.20 に本実験に用いた試験体の一覧を示す。試験体数は、無補強試験体および AFRP メッシュの保証耐力を変化させた全 4 体である。試験体名の N は、無補強試験体であることを意味している。また、補強試験体の場合には、英文字の M とメッシュの保証耐力 (kN/m) を 100 で除した数字の組み合わせにより示している。試験体は無補強時においてせん断破壊によって終局に至るように、せん断余裕度 (せん断耐力 / 曲げ耐力) が 1.0 以下になるように設計している。

表-4.20 試験体の一覧

試験体名	コンクリート吹付け厚さ (mm)	メッシュ保証耐力 (kN/m)
N	-	-
M0	30	-
M1		100
M2		200

図-4.16 に試験体の形状寸法および配筋状況を示す。用いた試験体は、断面形状(縦×横)が 30×15 cm、純スパン長が 2.6 m の複鉄筋 RC 梁である。上下端鉄筋には、それぞれ D29(SD345) および $\phi = 23$ mm の総ネジ PC 鋼棒を 2 本ずつ用いている。せん断補強筋には D6(SD295A) を用い、130 mm 間隔で配置している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度および弾性係数は、それぞれ 34.8 MPa、26.0 GPa であった。また、上下端鉄筋の降伏強度は、それぞれ 380、1020 MPa であった。

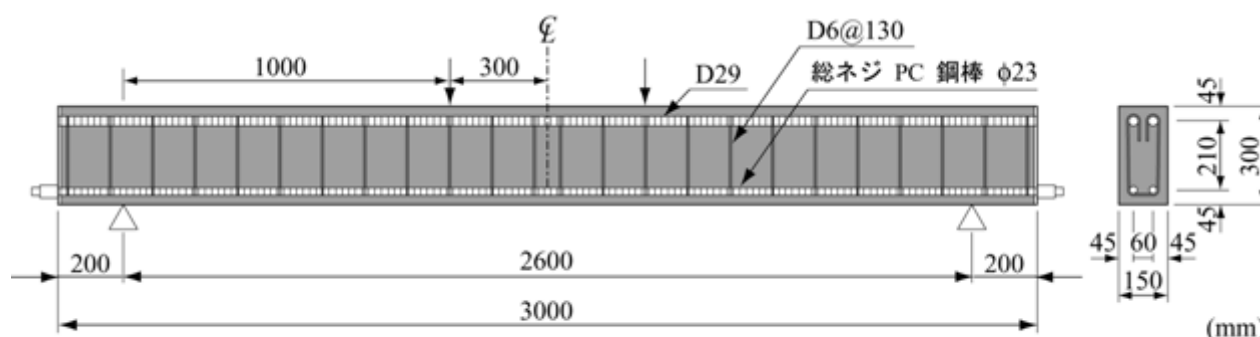


図-4.16 試験体の形状寸法および配筋状況

図-4.17 に補強概要図を示す。図に示しているように、せん断補強のために梁の両側面および底面を覆うように U 字型に補強を施している。また、部材軸方向の補強範囲は梁中央部から両支点の 50 mm 手前までとしている。コンクリートの吹付け厚は 30 mm とし、AFRP メッシュは吹付け厚の 1/2 の位置に配置している。試験体の補強は、1) 吹付け補強する RC 梁の表面にブラスト処理を施した後、2) モルタル製スペーサを介して AFRP メッシュを配置し、3) ポリビニルアルコール短繊維混入コンクリートを吹付けることにより実施している。表-4.21、表-4.22 に、それぞれ短繊維混入吹付けコンクリートの配合および力学性能試験結果の一覧を示す。表-4.23、表-4.24 に、それぞれポリビニルアルコール短繊維および AFRP メッシュの材料特性値の一覧を示す。また、写真-4.5、写真-4.6 には、用いたポリビニルアルコール短繊維および AFRP メッシュを示す。

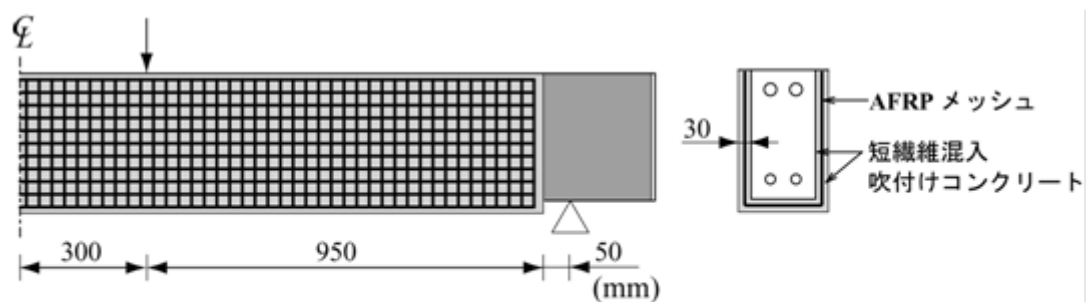


図-4.17 補強概要

表-4.21 吹付けコンクリートの配合

Vf (vol. %)	W/B (%)	単用量 (kg/m ³)					SP (C × %)	スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	SF	S	G			
1.5	43	185	387	43	1365	340	0.8	5.8	5.2

B = C + SF、SF: シリカフェーム、Vf: 短繊維混入率、SP: 高性能減水剤

表-4.22 吹付けコンクリートの力学特性値

圧縮 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	曲げ 強度 (MPa)	曲げ靱 性係数 (MPa)
73.9	33.8	2.0	1.0

表-4.23 ポリビニルアルコール短繊維の材料特性値

直径 (mm)	長さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
0.66	30	29.4	0.88	7.0

表-4.24 AFRP メッシュの材料特性値

保証耐力 (kN/m)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
100, 200	118	2.06	1.75



写真-4.5 ポリビニルアルコール短繊維

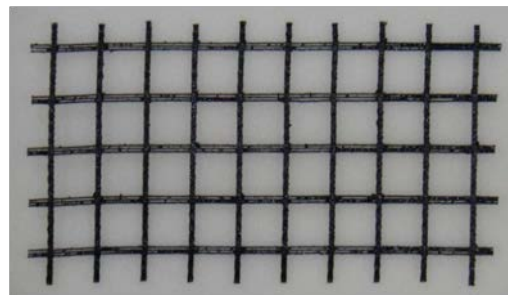
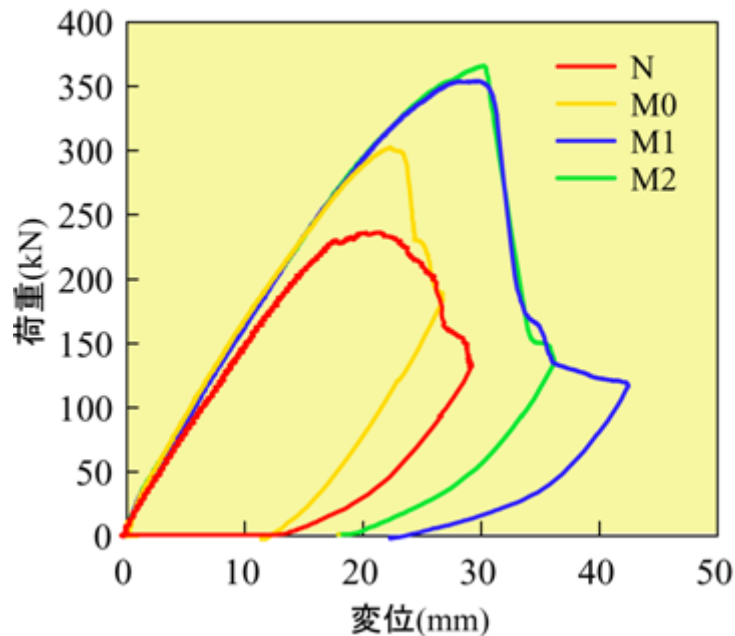


写真-4.6 AFRP メッシュ

(2) 実験結果

1) 荷重－変位関係

図－4.18 に各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果を示す。図より、いずれの試験体も最大荷重到達後荷重が急激に低下して終局に至っていることがわかる。M0 試験体の結果を見ると、短繊維混入コンクリートの吹付けによって初期剛性および耐力が無補強の場合よりも増大していることがわかる。これは、コンクリートの吹付けによって梁の断面積が増大するとともに、吹付けコンクリートに混入されているポリビニルアルコール短繊維の架橋効果が発揮されたことによるものと推察される。また、メッシュを配置した M1、M2 試験体は、初期剛性は M0 試験体とほぼ同様であるものの、最大荷重は M0 試験体よりも大きく示されていることがわかる。ただし、メッシュの保証耐力を 100 kN/m から 200 kN/m としたことによる耐力向上効果は小さい。これは、後述の破壊性状においても示しているように、M1、M2 試験体ともに AFRP メッシュが破断する前に等せん断力区間における RC 梁側面のかぶりコンクリートが吹付けコンクリートと一体となって剥落し、終局に至ったためと考えられる。



図－4.18 各試験体の荷重－変位関係の比較

2) 破壊性状

図-4.19 に実験終了後における各試験体のひび割れ分布性状を示す。無補強の N 試験体は、右側等せん断力区間において、荷重点位置から支点側に向かって斜めひび割れが進展し、かつ下端鉄筋に沿う割裂ひび割れも発生している。また、上端鉄筋に沿った割裂ひび割れも発生しており、荷重点近傍ではかぶりコンクリートの剥落が見られる。一方、短繊維混入コンクリートを吹付けた M0 試験体は、左側等せん断力区間において2本の斜めひび割れが大きく開口している。ただし、N 試験体に見られるようなかぶりコンクリートの著しい剥落は見られない。これは、短繊維の架橋効果によりコンクリートの剥落が抑制されたためと考えられる。

M1 試験体は、それぞれ左側および右側等せん断力区間において多数の微細なひび割れが発生していることがわかる。実験時には、メッシュが破断する前に梁側面かぶりコンクリートが剥離・剥落し、吹付けコンクリートとともに梁から分離する形で終局に至っていることを確認している。

写真-4.7 に M1 試験体の支点近傍部の破壊状況を示す。写真より、梁上縁部では上端鉄筋が露出し、側面では吹付けコンクリートがかぶりコンクリートを伴って引き剥がされていることがわかる。

M2 試験体は、M1 試験体とほぼ同様のひび割れ分布性状を示している。また、前述のように M1 試験体よりもメッシュ補強量が多いにもかかわらず、それと同程度の耐力増加となっているのは、写真-4.7 と同様、梁部コンクリートの剥離・剥落により終局に至ったためと考えられる。

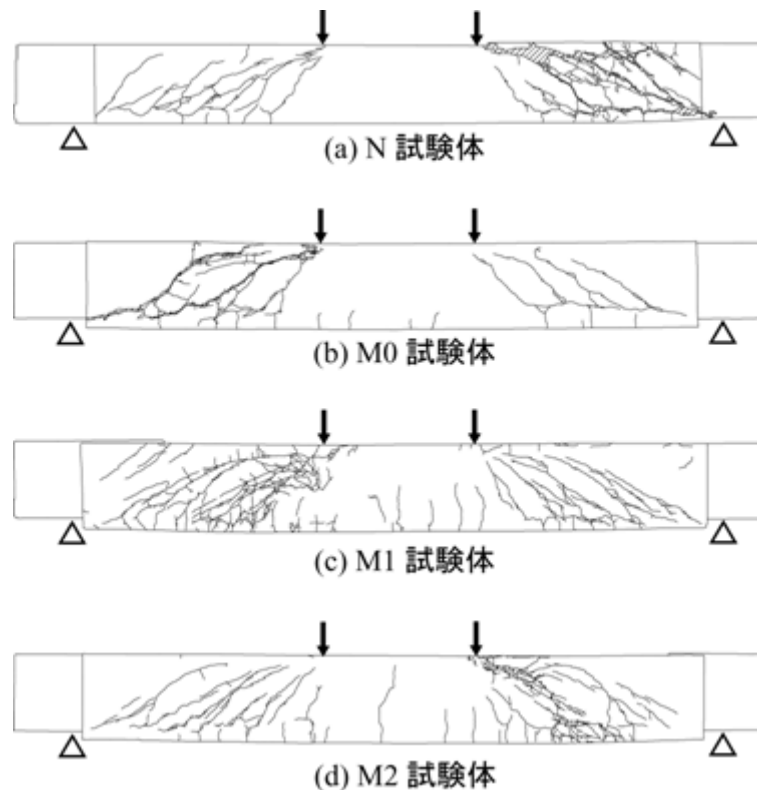


図-4.19 実験終了後におけるひび割れ性状

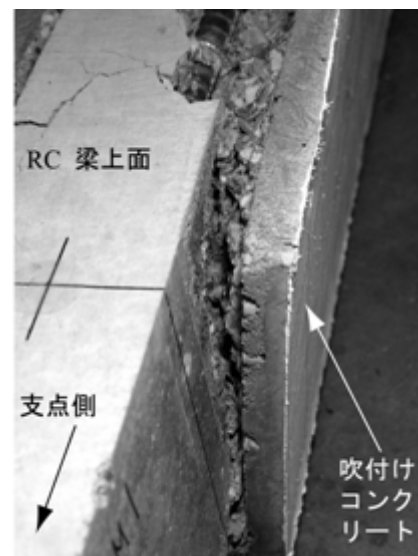


写真-4.7 M1 試験体の支点部近傍の破壊状況

(3) AFRP メッシュによるせん断耐力増分の評価

表-4.25 に、各補強試験体の最大荷重および AFRP メッシュによる耐力増分の実験結果と計算結果の一覧を示す。なお、メッシュによる耐力増分の計算値は、FRP シート巻付補強の場合と同様、図-4.20 に示しているモデル図のようにせん断補強筋が分担する設計せん断耐力の算定法7)を準用して下式により算出した。すなわち、

$$V_{fd} = \alpha \cdot [A_f \cdot f_{fu} (\sin \theta_f + \cos \theta_f) / s_f] \cdot z \quad \text{式(4.7)}$$

ここに、

α : せん断補強に対する AFRP メッシュの補強効率 (以下、補強効率とする)

s_f : メッシュの格子間隔

A_f : メッシュ 1 本当たりの断面積

f_{fu} : AFRP メッシュの設計引張強度

θ_f : メッシュの上下方向成分が部材軸となす角度

z : モーメントアーム長(= $d/1.15$)

d : 有効高さ

である。

なお、本研究では前述の設計せん断耐力の算定法と同様、斜めひび割れが $\theta_f = 45^\circ$ に発生するものと仮定して V_{fd} を算出することとした。また、補強効率 α は、補強設計要領を参考にして 0.6 と設定した。

表-4.25 AFRP メッシュによるせん断耐力増分の評価

試験体名	実測耐力 (kN)	M0 に対する耐力増分 (kN) (1)	メッシュによる耐力増分の計算値 V_{fd} (kN) (2)	(1)/(2)	破壊形式
M0	302	-	-	-	せん断破壊
M1	355	53	51	1.04	かぶり部剥落
M2	366	64	102	0.63	かぶり部剥落

表より、M1 試験体は、メッシュによる耐力増分の実測値は計算値と同程度となっていることがわかる。ただし、これらの試験体は、いずれも RC 梁のかぶりコンクリートの損傷が起因となって終局に至っているため、AFRP メッシュの有するせん断耐力向上効果は、本実験により得られた結果よりも大きいものと推察される。一方、M2 試験体は、耐力増分の実測値は計算値を大きく下回っている。これは、M2 試験体は、他の補強試験体よりもメッシュ補強量が多いにもかかわらず M1 試験体と同様に梁側面のかぶりコンクリートが剥落して、それと同程度の荷重レベルで終局に至っているためである。

以上より、本実験において、梁側面のかぶりコンクリートの剥落が顕在化しない場合には、梁上部を閉合せずに U 字型に補強する場合においても、FRP シートにより巻付補強する場合の設計値と同等以上のせん断耐力向上効果が期待できることが明らかになった。

今後は、より合理的な設計法の確立に向けて、吹付けコンクリートの増厚による効果や短繊維の混入による効果に関する定量的な検討を行う必要があると考えられる。

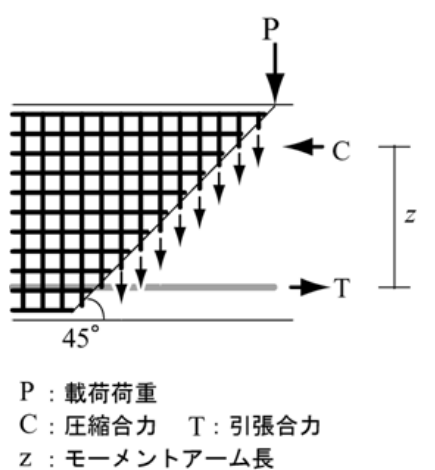


図-4.20 せん断補強設計のモデル図

4.3.5 まとめ

本項では、AFRP メッシュと短繊維混入吹付けコンクリートを併用した補強工法による RC 梁のせん断耐力向上効果を検討することを目的として、本工法によりせん断補強した RC 梁の静載荷実験を実施した。本実験で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本実験に用いた吹付けコンクリートと RC 梁部コンクリート間の付着は極めて良好であり、既設コンクリートの引張強度と同程度以上の性能を有している。
- 2) 本実験の範囲内において、梁側面のかぶりコンクリートの剥落が顕在化しない場合には、本工法 を用いることにより梁上部を閉合せずに U 字型に補強する場合においても、シートを用いて巻付補強する場合の設計値と同等以上のせん断耐力向上効果が期待できる。

第5章 設計施工の手引き(案)

本章では、本共同研究の総括として試験研究結果をもとに短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維メッシュの併用による既設コンクリート構造物の補修・補強工法の設計施工に関する手引き（案）を作成した。

1. 総則

1.1 適用範囲

本手引きは、短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維メッシュを併用した既設コンクリート構造物の補修・補強工法に関する設計および施工に適用するものである。

- 1) ポリビニルアルコール短繊維(PVA 短繊維)混入吹付けコンクリートには、のり面吹付けコンクリート配合を基本として、ポリマー材料や急結剤を用いない配合を用いることとする。
- 2) 連続繊維メッシュには、既設コンクリート構造物の補強実績があり、格子状に編まれたものを用いることとする。
- 3) 本補修補強工法の適用範囲は、断面修復による既設コンクリート構造物の補修、コンクリート部材の曲げおよびせん断補強とする。
- 4) 本手引き書に記載されていない事項については、関連する規準および指針に準ずるものとする。

【解説】

PVA 短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維メッシュを併用した補修・補強工法 (以後、本工法とする) は、既設コンクリート構造物の合理的な補修・補強工法として開発されたものであり、本手引きでは、これまでの試験研究により得られている結果に基づき、使用材料、補修・補強設計および施工についてとりまとめている。

1) について

吹付けコンクリートの材料コスト縮減のため、のり面吹付けコンクリート配合を基本に、ポリマー材料や急結剤を用いない配合によって補修補強することを基本とする。

2) について

連続繊維メッシュは、引張補強材として用いるため、既設コンクリート構造物の補強実績があり、格子状に編まれたものを用いることを基本とする。

3) について

本手引きに記載されていない事項については、以下の規準および指針等に準ずるものとする。

- 1) コンクリート標準示方書〔施工編〕，土木学会，2002.
- 2) コンクリート標準示方書〔規準編〕，土木学会，2002.
- 3) コンクリート標準示方書〔構造性能照査設計編〕，土木学会，2002.
- 4) 道路橋示方書〔共通編〕，日本道路協会，2002
- 5) 道路橋示方書〔コンクリート橋編〕，日本道路協会，2002
- 6) コンクリート構造物の補強指針（案），コンクリートライブラリー 95，土木学会，1999.
- 7) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー 101，土木学会，2000.
- 8) 吹付けコンクリート指針（案）〔補修・補強編〕，コンクリートライブラリー 123，土木学会，2005.
- 9) 吹付けコンクリート指針（案）〔のり面編〕，コンクリートライブラリー 123，土木学会，2005.
- 10) 吹付けコンクリート指針（案）〔トンネル編〕，コンクリートライブラリー 123，土木学会，2005.
- 11) 連続繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案），アラミド補強研究会，1998.
- 12) 北海道開発局道路設計要領，北海道開発局

1.2 工法の概要

本工法は、既設コンクリート構造物の表面に連続繊維メッシュを配置し、その上から PVA 短繊維混入コンクリートを吹き付ける補修・補強工法である。

【解説】

本工法は、補強材である連続繊維メッシュを PVA 短繊維混入吹付けコンクリートにより、既設コンクリートと一体化させる方法である (図-1.1参照)。そのため、既設コンクリート表面と吹付けコンクリートとの付着が重要となることから、既設コンクリート表面の処理を適切に実施するとともに、吹付けコンクリートを確実に付着させることが重要である。図-1.2には、施工手順の概要を示している。

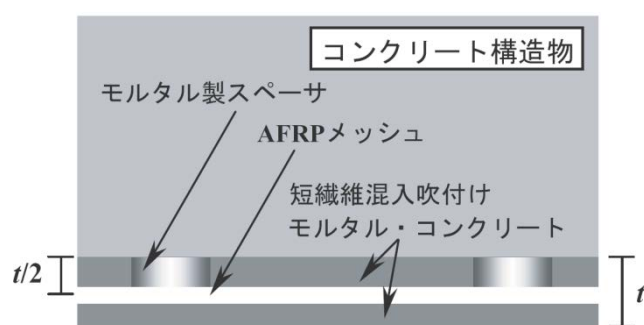


図-1.1 補修・補強工法の概要

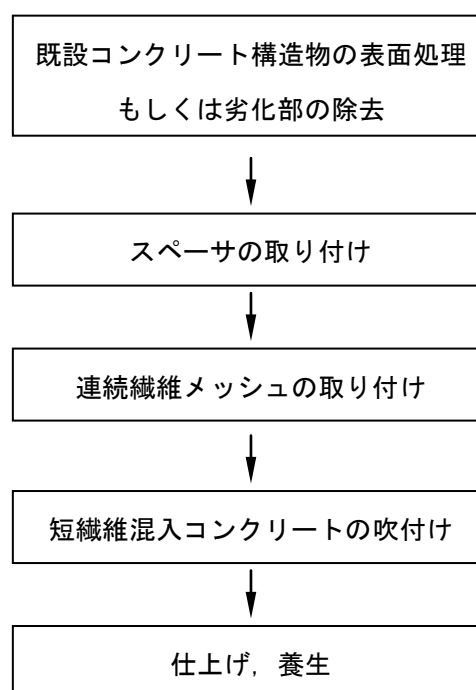


図-1.2 施工手順の概要

なお、本工法は、1) 連続繊維シート接着工法のように施工面の平滑化やプライマー塗布の必要がなく表面処理工程を簡略化できること、2) 有機系材料の使用量が少ないため施工後に仕上げ材料で被覆する必要がないこと、3) 鋼材を一切使用していないため、防錆処理の必要がないこと、4) 材料費が比較的安価であること、などの特長を有していることから、工期の短縮および工費の縮減が期待できる補修補強工法の1つになるものと考えられる。

1.3 用語の定義

吹付けコンクリート：圧縮空気によりコンクリートを既設コンクリート面に吹付けるコンクリート。本手引きでは、吹付けコンクリートおよび吹付けモルタルを総称して、吹付けコンクリートと呼ぶこととしている。

吹付け施工性：圧送作業時において脈動および閉塞が生じず、また、吹付け作業時においてもはね返りと粉じんが少なく、かつ吹き付けられた材料が吹付け対象と良好に付着するなど、吹付けコンクリートの施工が確実にできる程度。

はね返り：吹付けコンクリートが吹付け対象に付着せずにはね返ること。

粉じん：吹付け作業時のはね返りやノズルからの飛散によって空気中に浮遊している固体状の粒子。

はく落抵抗性：吹き付けたコンクリートが振動や自重等により剥がれ落ちない性能。

ノズルマン：コンクリートを吹付け面に吹き付ける人。

下地処理：ブラスト処理等によるレイタンス除去のように、母材コンクリートと吹付けコンクリートとの付着性を阻害する要因を除去すること。

2. 使用材料

2.1 概要

本工法に用いる材料は、使用目的に応じて施工性、耐久性、力学特性および補修補強性能などの要求性能を満足するものでなければならない。

【解説】

本工法に用いられる材料には、連続繊維メッシュおよび吹付けコンクリートの構成材料であるセメント、水、骨材、各種混和材料がある。これらの材料は、既設コンクリート構造物の補修・補強工法に求められる施工性、耐久性、力学特性および補修補強性能などの要求性能を満足することを試験により確認されたものを用いなければならない。

2.2 PVA 短繊維混入吹付けコンクリート

吹付けコンクリートには、既設コンクリート構造物との一体化を確実に確保できるものを用いなければならない。また、吹付けコンクリートは、補修・補強対象となるコンクリート構造物の形状、劣化状況、および周辺環境等に応じた、施工性、耐久性、力学特性を有するものでなければならない。

なお、吹付けコンクリートの要求性能および性能照査は、吹付けコンクリート指針（案）〔補修・補強編〕の2章「要求性能」および3章「性能照査」によるものとする。

【解説】

吹付けコンクリートの役割は、補強材である連続繊維メッシュを既設コンクリート構造物と確実に一体化させることである。そのためには、既設コンクリート表面の適切な下地処理は勿論のこと、吹付けコンクリートが適切に施工され十分な付着性能を確保している必要がある。また、吹付けコンクリートは、既設コンクリートの補修・補強に要求される耐久性および力学特性を満足するものでなければならない。なお、本手引きで対象としている吹付けコンクリートの要求性能および性能照査は、吹付けコンクリート指針（案）〔補修・補強編〕によるものとした。

過去の試験結果では吹付けコンクリートの施工性、耐久性、力学性能に関する試験を行っており、積雪寒冷地においても適用可能な吹付けコンクリート配合を提案している。表-2.1に、吹付けコンクリートの配合例を示す。また、表-2.2に吹付けコンクリートの管理規準値の一覧を示す。この場合、吹付け厚さが30mm以下の場合にはモルタル配合、30mm以上の場合にはコンクリート配合を適用するとよい。なお、本手引きでは、モルタルおよびコンクリート配合の場合ともに吹付けコンクリートと呼ぶこととする。

表-2.1 吹付けコンクリートの配合例

吹付け材 の種類	短繊維 混入率 (vol. %)	中空 微小球 混入率 (vol. %)	W/B (%)	単体量 (kg/m ³)					SP (C×%)
				W	C	SF	S	G	
モルタル	0.5～	-	39	255	622	33	1310	-	0.5
コンクリート	1.5	3.0	43	185	387	43	1365	340	0.8

B = C + SF, SF: シリカフューム, SP: 高性能減水剤

表-2.2 吹付けコンクリートの管理規準値の例

項目	モルタル	コンクリート	供試体作製	試験方法
スランプ (cm)	-	4~7	-	JIS A 1101
フロー	130~160	-	-	JIS R 5201
空気量 (%) *	4~7		-	JIS A1118
初期塩化物 イオン量 (kg/m ³)	0.3 以下		-	JIS A 1144
圧縮強度 (N/mm ²)	既設コンクリートの強度以上		JSCE-F562-2005	JIS A1108
付着強度 (N/mm ²)	1.3 以上もしくは母材コンクリート破壊		既設および吹付けコンクリートの界面を有する供試体を作製	一軸引張試験もしくは建研式引張試験

*: 中空微小球を用いる場合には、規準値を設定しない。

ただし、事前に所要の凍結融解抵抗性を有していることを確認する必要がある。

2.2.1セメント

セメントには、対象構造物の供用状況や補修補強目的に対応した適切なものを選定しなければならない。

【解説】

過去の試験結果に基づき、セメントには普通ポルトランドセメントを用いることを基本とするが、道路橋の桁および床版下面へ施工する場合のように車両交通を解放した状態で施工する場合や、複数層に重ねて吹き付ける場合など、早期の強度発現が必要となる場合には、早強ポルトランドセメントを用いても良い。

2.2.2骨材

骨材には、良好な吹付け施工性および付着コンクリートの品質が確保されるものを用いなければならない。

【解説】

過去の試験結果より、細骨材は、吹付けコンクリート施工時における脈動に影響を及ぼすことが明らかになっている。良好な吹付け施工のためには、粗粒率が 2.80 ~ 2.90 程度の良質な川砂を用いるのが望ましい。なお、砕砂は、脈動の原因になることが明らかになっているため使用してはならない。

また、粗骨材は、吹付け施工面の平坦性に及ぼす影響や凍結融解抵抗性に関する試験結果から、最大粒径が 10 mm 程度のものを使用するのが望ましい。

2.2.3混和材料

- (1) 吹付け施工性の向上やはね返り率の低減対策として、シリカフューム等の混和材を用いてもよい。
- (2) 混和剤には、吹付けコンクリートのコンシステンシーを適切に調整可能で、かつ良好な吹付け施工性を確保できるものを選定しなければならない。
- (3) 凍害劣化の厳しい環境に用いる場合には、凍結融解抵抗性向上のため中空微小球を混入してもよい。

【解説】

(1) について

シリカフュームを吹付けコンクリートに用いることにより、1) ボールベアリング効果による吹付け施工性の向上、2) 粘性向上による付着性能の向上、はね返り率の低減および 3) ポズラン反応によるセメント硬化体の緻密化、などの効果を発揮することが知られている。過去の試験において効果が確認されているシリカフュームの材料物性値を参考にすると、比表面積が 20 m²/g 程度、主成分である SiO₂の割合が 85 % 以上で、かつ JIS A 6207 に適合するものを用いるのが望ましい。

(2) について

本工法は、要求性能に応じて混和材料や短繊維の量が増加するとともに、現場により骨材の粒度分布が異なるため、吹付けコンクリートのコンシステンシーも変化する。そのため、混和剤には、吹付けコンクリートのコンシステンシーを規準値に調整可能で、かつ適切な吹付け施工性を確保できる性能が求められる。過去の試験結果では、主成分がポリグリコールエステル誘導体である高性能減水剤を用いることにより、良好な施工が可能であることを確認している。

(3) について

本工法に用いる吹付けコンクリートは、高い圧力で吹き付けるためコンクリートが締め固められ、緻密で高い付着強度を有するコンクリートを施工できる。一方、その圧力によりエントレインドエアが消失し、凍結融解抵抗性が低下する傾向にある。従って、凍害劣化の厳しい環境下にあるコンクリート構造物に用いる場合には、中空微小球の混入により凍結融解抵抗性を改善する必要がある。過去の試験結果では、中空微小球を体積割合で 3 % 程度混入することにより、吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性を改善可能であることを確認している。

なお、写真-2.1 には、中空微小球に関する走査電子顕微鏡写真を示している。中空微小球は、直径 50 μm の中空球体であり、その材質はポリビニルアクリロニトリルである。また、図-2.1 には、中空微小球混入率が異なる吹付けコンクリートの水中凍結融解試験結果を示している。

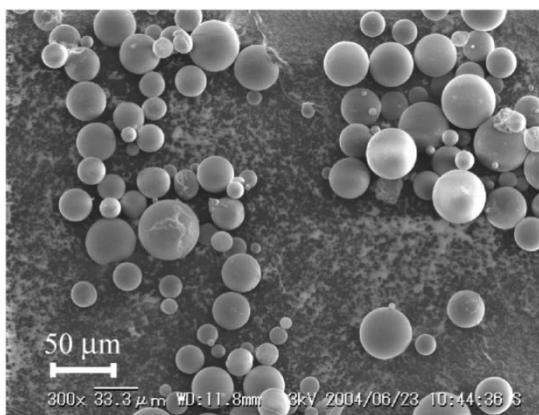


写真-2.1 中空微小球

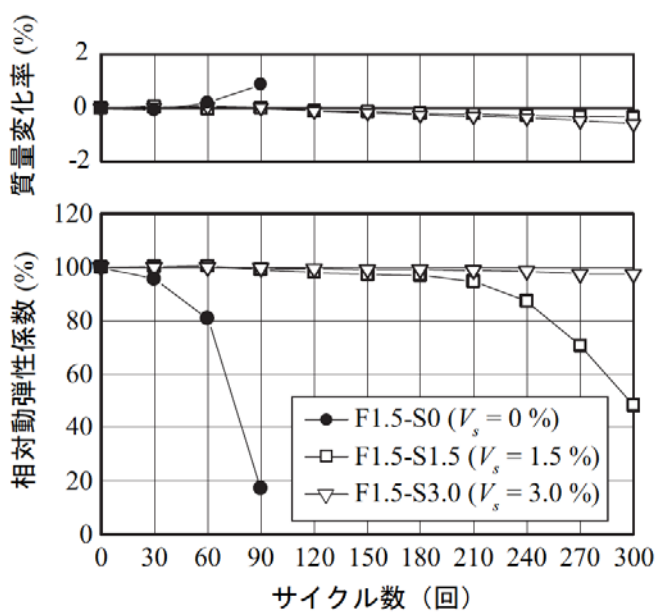


図-2.1 水中凍結融解試験結果（中空微小球混入率 V_s の影響）

2.2.4 短繊維材料

短繊維には、セメントマトリクスとの付着性に優れ、かつ力学的性質に優れた PVA 短繊維を用いることとする。

【解説】

短繊維は、吹付けコンクリートのはく落抵抗性および靱性能の向上を目的に混入するものである。短繊維材料としては、これまでの試験結果および現場施工実績に基づき PVA 短繊維を用いることを標準とする。なお、モルタル配合の場合には、直径 0.1 mm、長さ 6 mm のものを、コンクリート配合の場合には、直径 0.66 mm、長さ 30 mm のものを用いることとする。表-2.3 には、PVA 短繊維の寸法および材料特性値を示している。また、写真-2.2 には、PVA 短繊維を示している。

表-2.3 PVA 短繊維の寸法および材料特性値

吹付け材の基本配合	直径 (mm)	長さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪み (%)
モルタル	0.1	6	29.4	0.88	7.0
コンクリート	0.66	30			



写真-2.2 PVA 短繊維 (直径 0.66 mm、長さ 30 mm)

また、吹付けコンクリートに混入される PVA 短繊維は、吹付けコンクリートにひび割れが発生した後、その架橋効果によりひび割れ幅の抑制効果を発揮する。これまでの研究では、PVA 短繊維の架橋効果を定量的に評価するため、吹付けコンクリート供試体の一軸引張試験を行っている。また、一連の研究では、ひび割れ発生後において短繊維が受け持つ引張強度を残存引張強度と定義することとし、短繊維の架橋効果を定量的に評価する指標としている。

過去の試験結果では、1) PVA 短繊維は吹付け施工面と平行して2次的に配向するため、吹付け施工面に平行な向きには架橋効果を発揮するものの、施工面に直角の向きにはその効果を発揮しないことや、2) 残存引張強度は短繊維混入率が高い場合ほど大きくなる傾向にあることなどが明らかになっている。

図-2.2 には、吹付けコンクリート供試体に関する吹付け施工面に平行方向の一軸引張試験結果を示している。また、図-2.3 には、PVA 短繊維の残存引張強度と短繊維混入率との関係を示している。なお、これらの試験は、前述の表-2.1 とほぼ同様の配合の吹付けコンクリートによるものである。

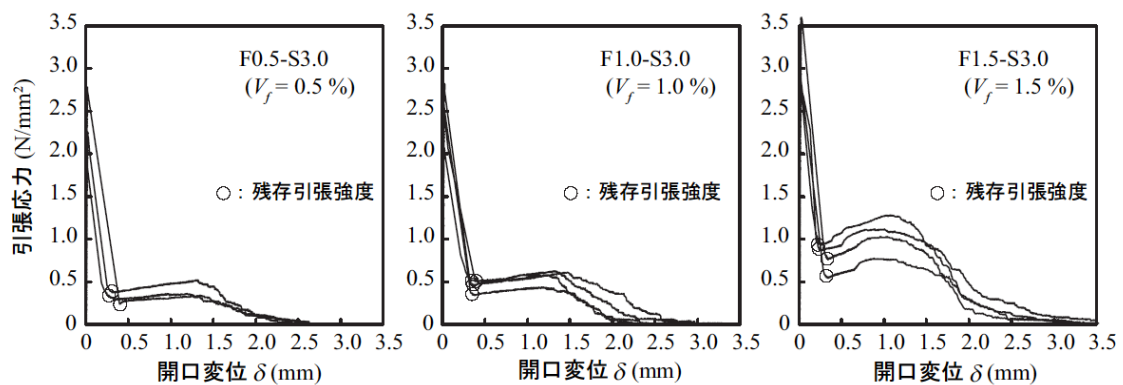


図-2.2 吹付け施工面に平行方向の一軸引張試験結果

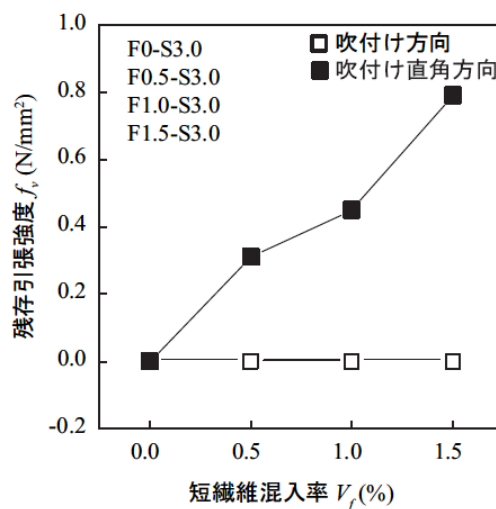


図-2.3 残存引張強度と短繊維混入率との関係

2.3連続繊維メッシュ

- (1) 連続繊維メッシュは、既設コンクリート構造物の補強に要求される力学性能を満足するものでなければならない。また、耐久性に優れるものでなければならない。
- (2) 連続繊維メッシュの保証耐力と格子間隔は、補強効果と吹付け施工性を考慮して決定するものとする。

【解説】

(1) について

連続繊維メッシュは、本工法の主補強材として機能するものであることより、材料試験によりその力学特性および耐久性が確認されているものを用いる必要がある。表-2.4 には、各種 RC 部材の載荷実験により補強効果が確認されている連続繊維メッシュの材料特性値を示している。また、写真-2.3 には、連続繊維メッシュを示している。

表-2.4 連続繊維メッシュの材料特性値

弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
118	2.06	1.75

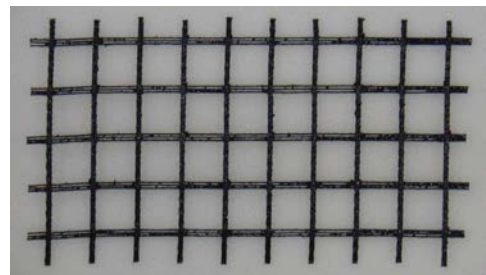


写真-2.3 アラミド連続繊維メッシュ

(2) について

連続繊維メッシュの形状は、短繊維混入吹付けコンクリートの施工性に大きな影響を及ぼすことより、補強効果と施工性の両側面から適切なものを選定する必要がある。特に、メッシュの格子間隔は、吹付けコンクリートに混入する短繊維の長さよりも十分に広いことが必要となる。表-2.5 には、試験および現地施工において実績のある連続繊維メッシュの保証耐力および格子間隔の一覧を示している。

表-2.5 保証耐力および格子間隔

吹付け材の種類	保証耐力 (kN/m)	格子間隔 (mm)
モルタル	50	30
	100	30
	200	40
コンクリート	150	60

3. 補修・補強されたコンクリート構造物の性能照査

3.1 概要

本工法により補修補強されたコンクリート構造物の性能照査は、既設コンクリート構造物の性能を評価し、かつ補修補強効果を適切に評価して行わなければならない。

各性能の照査においては、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針の6章「補修補強されたコンクリート構造物の性能照査」を参考にする。

【解説】

既設コンクリート構造物の補修補強設計を行う場合には、既設コンクリート構造物および補修補強効果を適切に評価しなければならない。なお、各性能の照査においては、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針の6章「補修補強されたコンクリート構造物の性能照査」を参考にすることとする。ただし、本手引きの1.1「適用範囲」にも述べたように、本工法では既設コンクリート構造物の断面修復による補修、コンクリート部材の曲げおよびせん断補強を対象としている。

3.2 既設構造物の評価

連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針 6.2「既設構造物中の材料の設計強度」によるものとする。

【解説】

補修・補強の対象となる構造物は、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針のものと同様であることから、同指針によるものとした。

3.3 安全係数

連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針 6.3「安全係数」によるものとする。

【解説】

本工法において、補強材として用いる連続繊維メッシュは、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修・補強指針に対応するものであることから、同指針によるものとした。

3.4 安全性の照査

3.4.1 設計曲げ耐力

本工法により、曲げ補強された RC 部材の設計曲げ耐力は、補強部の剥離の有無を考慮した適切な方法で求めなければならない。

【解説】

本工法により補強されたコンクリート部材の設計曲げ耐力は、連続繊維シート接着工法の場合と同様、RCの曲げ理論に基づいて算定することができる。ただし、曲げ補強する場合には、補強部が剥離する場合も考えられることから、その剥離の有無を考慮した適切な方法で求めなければならない。

過去の研究から、補強された RC 部材の降伏曲げモーメント M_y と終局曲げモーメント M_u の比を用いた式(解 3.1)により、補強部の剥離を判定できることが明らかになっている。

$$M_y/M_u > 0.7 \dots\dots\dots (解 3.1)$$

なお、補強設計に当たっては、事前に部材実験等により、その補強効果を確認するのが望ましい。

3.4.2 棒部材の設計せん断耐力

本工法により補修補強された棒部材の設計せん断耐力 V_{yd} は、式 (3.2) により求めてよい。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} + V_{sfd} \cdots \cdots (3.2)$$

ここに、

V_{cd} : せん断補強筋等の補強材を有しない RC 棒部材のせん断耐力で、コンクリート標準示方書 [構造型能照査編] に準拠する。

V_{sd} : せん断補強筋が受け持つせん断耐力でコンクリート標準示方書 [構造型能照査編] に準拠する。

V_{fd} : 連続繊維メッシュが受け持つせん断耐力で、以下の式による。

$$V_{fd} = \alpha \cdot [A_f \cdot f_{fu} (\sin \theta_f + \cos \theta_f) / s_f] \cdot z / \gamma_b \cdots \cdots (3.3)$$

α : 連続繊維メッシュのせん断補強効率 (= 0.6)

s_f : メッシュの格子間隔

A_f : メッシュ 1 本当たりの断面積

f_{fu} : AFRP メッシュの設計引張強度

θ_f : メッシュの上下方向成分が部材軸となす角度

z : 圧縮合力作用位置から主鉄筋の図心までの距離、 $d/1.15$ としてよい。

d : 有効高さ

γ_b : 部材係数 1.25

V_{sfd} : 吹付けコンクリートに含まれる短繊維が受け持つせん断耐力で、以下の式による。

$$V_{sfd} = b \cdot (z / \tan \theta) \cdot f_r / \gamma_b \cdots \cdots (3.4)$$

b : ウェブ幅

θ : ひび割れ角度(45° と仮定)

f_r : 短繊維混入コンクリートの残存引張強度

γ_b : 部材係数 1.3

【解説】

過去の実験で、本工法によりせん断補強した RC 梁の静載荷実験の結果、短繊維混入吹付けコンクリートにおける短繊維の架橋効果と連続繊維メッシュの引張強度を加算して、せん断補強効果を評価可能であることを確認している。

本工法により補強したコンクリート部材の設計せん断耐力は、連続繊維シート接着工法の場合と同様、既設部材のせん断耐力に連続繊維メッシュの補強効果を加算する形で算定するものとした。また、吹付けコンクリートに含まれる短繊維の残存引張強度が確認されている場合には、短繊維による補強効果を加算してもよいこととした。

3.5 使用性の照査

本工法により補修補強されたコンクリート構造物の使用性の照査は，連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針 6.5「使用性の照査」を参考にしてよい。ただし，ひび割れ幅については，連続繊維メッシュの影響を考慮しないこととする。

【解説】

本工法により補修補強されたコンクリート構造物の使用性は，連続繊維シートによる補修補強の場合に対応するものであることより，連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針の 6.5「使用性の照査」を参考にしてよいこととした。

ただし，連続繊維メッシュによるひび割れ幅の抑制効果に関しては，未だ十分な検討がされていないことより，連続繊維メッシュの影響は考慮しないこととした。この場合，コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕7.4「ひび割れに対する検討」を参考にするとよい。

4. 施工

4.1 概要

本工法は、補修・補強の対象となる構造物の形状、劣化状況、供用状況および周辺環境等に応じて適切な方法で施工しなければならない。

【解説】

本工法は、補修・補強の対象となる構造物の形状、劣化状況、供用状況および周辺環境等に関する事前調査に基づいた施工計画の下に、効率の良い適切な方法で施工する必要がある。なお、吹付けコンクリートの品質には、ノズルマンの技能が大きく影響することから、本工法を熟知したノズルマンにより施工するものとする。

写真-4.1には、吹付け施工試験および付着コンクリートの状況を示している。



(a) 斜め下向き吹付け



(b) 上向き吹付け

写真-4.1 吹付け施工試験および付着コンクリートの状況

4.2 使用機器

使用機械および設備は、使用材料、施工規模、および施工条件等を考慮して、本工法を適切に施工できることが確認されているものを選定しなければならない。

【解説】

使用機械および設備は、使用材料、施工規模、および施工条件等を考慮して、本工法を適切に施工できることが確認されているものを選定する必要がある。図-4.1 には、吹付けシステムの一例を示している。

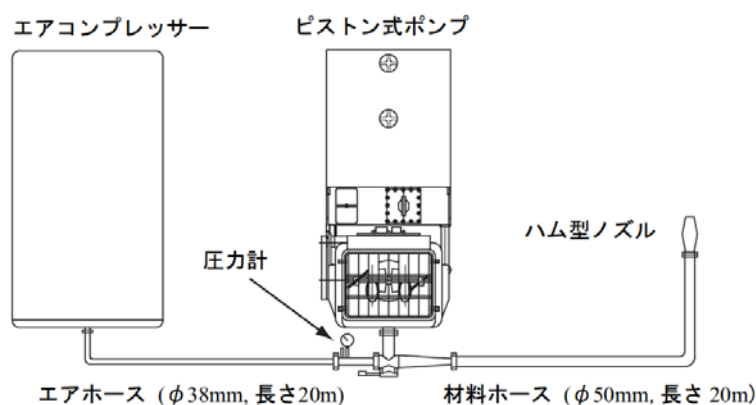


図-4.1 吹付けシステム

表-4.1 使用機器の仕様

使用機器	仕様
ポンプ	ピストン式, 吐出量 1~7 m ³ /h
ミキサー	二軸ミキサー, 容量 0.5 m ³
コンプレッサー	容量 18.5 m ³
発電機	75 kVA

4.3下地処理

既設コンクリート構造物の下地処理は、短繊維混入吹付けコンクリートのとの良好な付着を確保できる適切な方法で実施しなければならない。また、かぶりコンクリートの劣化が著しい場合には、既設コンクリートに有害なひび割れを残さない方法で、劣化部を除去しなければならない。

【解説】

一般的な補修・補強の場合と同様、既設コンクリート構造物の表面は、短繊維混入吹付けコンクリートとの良好な付着を確保できるように、レイタンス等の脆弱部を除去する必要がある。

また、かぶりコンクリートの劣化が著しく、劣化部を除去する場合には、ウォータージェット工法等により、既設コンクリート構造物に有害なひび割れが発生しない方法で実施する必要がある。

4.4スペーサ取り付け

スペーサにはモルタル製のものを使用することとする。また、固定用のネジおよび座金には、耐食性に優れるステンレス製のものを使用することとする。

【解説】

本工法では、発錆が懸念される鋼材等の材料を一切使用しないこととしているため、スペーサにはモルタル製のものを、固定ネジおよび座金にはステンレス製のものをを用いることとする。

4.5連続繊維メッシュ取り付け

連続繊維メッシュは、ゆるみやたるみがないように取り付けなければならない。

【解説】

連続繊維メッシュのゆるみやたるみは、コンクリート吹付け時におけるメッシュの振動を誘発し、吹付けコンクリートのはく落の要因になる。また、連続繊維メッシュにゆるみやたるみがある状態で吹付けコンクリートが硬化すると、連続繊維メッシュの補強効果が適切に発揮されない可能性があるものと考えられる。従って、連続繊維メッシュは、ゆるみやたるみがないように取り付ける必要がある。

4.6コンクリート練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、本工法に用いる吹付けコンクリートの練り混ぜが確実に行われることが確認されているミキサーを用いなければならない。

【解説】

本工法に用いる吹付けコンクリートでは、ポリマーや急結剤を用いずに既設コンクリートとの付着性を確保するために、比較的硬練りの配合となっている（スランプ値で 4～7 cm 程度）。また、シリカフェームの混和により粘性が高く、かつ力学性能や耐久性向上のために PVA 短繊維および中空微小球が混入される場合もあるため、コンクリートの練り混ぜは、十分な練り混ぜ性能が確認されているミキサーを用いる必要がある。

4.7コンクリート吹付け

- 1) 吹付け施工時における圧縮空気圧力および時間当たり吐出量は、吹付けコンクリートの配合や使用機器に応じて良好な施工および品質を確保可能な値に設定しなければならない。
- 2) 1層当たりの最大吹付け厚さは、吹付けられたコンクリートがはく落しない厚さを設定しなければならない。
- 3) 多層吹付け施工を行う場合には、前層の吹付けコンクリートが凝結してから、次層を施工しなければならない。
- 4) ノズルマンには吹付け施工の経験が豊富な熟練の技能者を選定しなければならない。

【解説】

1) について

吹付けコンクリートの施工には、i) 脈動や閉塞のない圧送性状、ii) 材料分離やダレのない吐出性状、iii) ノズルマンの作業負担が少ないこと、iv) 付着コンクリートの十分に締固められ、かつコテならしが容易であること、などが求められる。これまでの研究では、吹付け施工時において背圧 (図-4.1 の圧力計における測定値) を 0.4 MPa、時間当たり吐出量を 1.5 m³/h とすることにより、良好な施工が可能であることを明らかにしている。

2) について

過去の吹付けコンクリートの施工試験では、上記 1) の条件で吹付けることにより、上向き吹付けの場合において最大 100 mm 程度の厚さまで吹付け可能であることが明らかになっている。実施工においては、安全性を考慮して、80 mm を最大吹付け厚として設定するのが望ましい。

3) について

吹付け施工の厚さが 80 mm 以上の場合は、吹付け施工の回数を複数回に分けて施工する必要がある。ただし、前層の吹付けコンクリートが硬化する前に次層の吹付け施工を行うと、吹付けコンクリートが剥落する可能性がある。従って、多層に渡って吹付け施工を行う場合には、前層の吹付けコンクリートの凝結を確認してから、次層の施工を行うこととした。なお、試験等により凝結を確認しない場合には、1日程度の養生期間を設けるのが望ましい。

4) について

吹付けコンクリートの品質は、ノズルマンの技術に大きく依存することが知られている。そのため、ノズルマンの選定は、慎重に行わなければならない。特に、鉄筋および連続繊維メッシュの背面への吹付けを適切に施工できることなどを事前に確認しておく必要がある。

4.8仕上げ

吹付けコンクリートの施工面は、木ごてや金ごてなどにより、平滑にするものとする。また、仕上げ後は、ひび割れなどが生じないように適切な方法で養生しなければならない。

【解説】

吹付けコンクリートの施工面は、木ごてでならした後、金ごてで最終仕上げを行うのが望ましい。また、仕上げ後は、乾燥等によるひび割れが生じないように適切な方法で養生する必要がある。

なお、養生のみでひび割れの発生を抑制できない可能性がある場合には、収縮低減剤等の混和剤の使用を検討する。ただし、この場合には、吹付けコンクリートの施工性、力学特性および耐久性について、十分な性能が確保されていることを確認する必要がある。

4.9 リバウンド処理

- 1) 吹付けコンクリート施工時に生じるリバウンド材は、適切な方法で処理しなければならない。
- 2) 河川や住宅付近において吹付けコンクリート施工を行う場合には、リバウンドのみならず粉じんや短繊維の飛散防止に十分配慮しなければならない。

【解説】

1) について

吹付けコンクリートの施工により、リバウンドが発生するため、適切に処理する必要がある。特に、リバウンド材は一定の時間が経過すると硬化を開始することより、速やかに足場上から撤去する必要がある。

2) について

補修・補強の対象となるコンクリート構造物が橋梁等の場合には、河川上や住宅付近における施工を余儀なくされるケースが多い。その場合には、吹付けコンクリートのリバウンドのみならず、粉じんや短繊維の飛散防止に十分配慮する必要がある。

共同研究報告書

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

No.437, 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