

模擬トンネルによる繊維混入モルタル吹付け工法の施工性確認試験

Corroboration Test of Shotcrete Lining Method With Short-fiber Mixed Mortar Using Simulated Tunnel

吉田 行* 田口 史雄** 栗橋 祐介***

Susumu YOSHIDA, Fumio TAGUCHI and Yusuke KURIHASHI

トンネルなど大規模なコンクリート構造物の補修・補強工事の工期短縮および工費縮減に資する工法として、ビニロン製の短繊維を混入したモルタルを吹き付ける新しい補修補強工法を提案した。本研究では、内空半径5m程度の大規模なコンクリート製模擬トンネルを製作し、アラミド繊維製のメッシュをコンクリート壁面に貼り付けて、本工法の吹付け施工性を検討した。その結果、本工法はトンネルなどの大型構造物の補修・補強工法として極めて有効な工法であることが明らかとなった。

《キーワード：繊維混入吹付けモルタル、補修・補強工法、ビニロン繊維、アラミドメッシュ》

In this study, in order to cut down the construction time and to reduce the construction cost for upgrading of large-scale existing RC structures such as tunnels, a new type of shotcrete lining method using Vinylon short-fiber mixed mortar was proposed and its applicability was investigated. As a result, this method turned out to be very effective for repairing and reinforcing tunnels and other large structures.

《**Keywords** : Short-fiber mixed Shotcrete, Repair and reinforcement method, Vinylon short-fiber, Aramid mesh》

1. はじめに

昨今、トンネルや高架橋からのコンクリート片の剥離、剥落事故が発生し、社会的な問題となっている。これらの事故は、直接的に構造物自体の安全性能や使用性能には影響を及ぼすものではないが、第3者に被害を及ぼす可能性が高いことから、早急な対策が求められている。また、現在の我が国の厳しい財政状況を考慮すると、既設土木構造物の適切な維持・補修による長寿命化が求められており、コンクリート構造物の補修や補強に関する技術開発が注目されている。

これらの技術開発は、近年各所で行われている^{1),2)}が、樹脂系モルタル使用によるコスト高の問題や、連続繊維シートを用いた場合、その固定に手間と時間を要するなどの課題がある。

そこで、本研究では、補修補強のコスト低減および工期短縮の観点から、アラミド連続繊維をメッシュ状に加工したものとその固定に比較的安価で簡易な短繊維混入吹付けモルタルを組み合わせた新しいコンクリートの補修補強工法の開発を目指し、補修補強材としての繊維混入吹付けモルタルの基本物性に関する試

験および、模擬トンネルによる吹付け施工性に関する試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料を、表-2、3に使用した短繊維および連続繊維メッシュの詳細を示す。短繊維は、親水性がありセメントとの付着が良好で化学的抵抗性も高く、近年その使用に関して多くの検討が行われている^{3),4)}ビニロン繊維を用いた。連続繊維メッシュには、耐震補強での使用実績も多いアラミドを用いた。アラミド繊維メッシュは、補修補強のレベルに応じて調整する必要があるため、耐力の異なるものを2種類用いた。また、吹付けモルタルに混入する短繊維長との組合せを考慮し、アラミド繊維メッシュの格子間隔を4水準とした。

2.2 短繊維混入吹付けモルタルの配合

表-4に短繊維混入吹付けモルタルの配合とフレッシュ性状を示す。モルタルはコスト抑制を考慮して無

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	苫小牧市樽前産海砂 (物性試験) 密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 1.04% (施工試験) 密度 2.68g/cm ³ , 吸水率 1.12%
高性能減水剤	ポリグリコールエステル誘導体 (SP)
減水剤	ポリオール複合体 (AD)

表-2 ビニロン短繊維の物性値

繊維長 L(mm)	直径 D(mm)	アスペクト比 L/D	弾性係数 (Gpa)	引張強度 (Gpa)	破断ひずみ (%)
6	0.10	60	25.0	1.10	—
12		120			
30	0.66	45.5	29.4	0.88	7.0

表-3 アラミド繊維メッシュの物性値

格子間隔 (mm)	保証耐力 (kN/m)	弾性係数 (Gpa)	引張強度 (Gpa)	破断ひずみ (%)
15	50	118	2.06	1.75
30				
40	100			
80				

表－４ 配合およびフレッシュ性状

配合	短繊維			W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			AD (C×%)	SP (C×%)	フロー 値	空気量 (%)
	材質	長さ (mm)	混入率 (vol%)		W	C	S				
プレーン	—	—	—	49	205	420	1680	—	—	142	5.5
6mm0.5%	ビニロン	6	0.5					0.25	—	130	5.6
6mm1.0%			1.0					0.35	—	118	6.0
6mm1.5%			1.5					—	0.5	115	6.8
12mm0.5%		12	0.5					0.35	—	127	5.6
12mm1.0%			1.0					—	1.0	118	5.6
12mm1.5%			1.5					—	1.0	111	5.3
30mm0.5%		30	0.5					—	—	138	5.0
30mm1.0%			1.0					0.25	—	136	4.7
30mm1.5%			1.5					0.25	—	127	4.7

機系モルタルとし、配合は、吹付けモルタルとして使用実績が多い配合を参考にして単位セメント量を420 kg/m³、セメントと細骨材の質量比を1：4とした。配合試験では、実際に吹付けを行い、吐出性状が良好となるように単位水量を調整して、まず繊維無混入のプレーンモルタル配合を決定した。繊維混入モルタルの配合は、プレーン配合に外割で各種繊維を混入し、実際に吹付けを行って吐出性状を確認し、脈動や材料分離などが起こらないよう混和剤のみでコンシステンシーを調整した。

2.3 モルタルの練混ぜおよび吹付け

物性試験用のモルタルは、容量0.2m³の強制練りミキサを用いて実験室内で練混ぜた。施工試験用モルタルは、模擬トンネルの近くに簡易プラントを設置して0.5m³の強制練りミキサを用いて練混ぜた。吹付けは、空気圧送式の吹付け機を用いて湿式方式で行った。吹付けには直径50mmのマテリアルホースを使用し、実験施設の配置状況を考慮して搬送距離は水平距離で40mとした。吹付けの圧送圧力は吐出状況等の施工性を見ながら適宜調整した。

2.4 供試体の作製

吹付けモルタルの圧縮強度試験用供試体は、JSCE－F561に準拠し⁵⁾ 60×60×30cmの下端を解放した木製型枠に吹付け、試験材齢にあわせて吹付け面から内部方向にφ10cmでコアリングし、コンクリートカッターでφ10×20cmに成形した。供試体の養生は、吹付け後、供試体全面をブルーシートで包み、翌日脱

型して試験材齢まで20℃の水中養生を行った。曲げ強度試験用の供試体は10×10×40cmの角柱とし、65×60×15cmの下端を解放した木製型枠に吹付け、圧縮強度試験用供試体と同様に養生を行い、試験材齢に応じてコンクリートカッターで切り出し成型した。

2.5 物性試験

2.5.1 圧縮強度および圧縮靱性試験

圧縮強度試験および圧縮靱性試験は、JSCE－G551に準拠して⁵⁾材齢7日および28日で試験を行った。

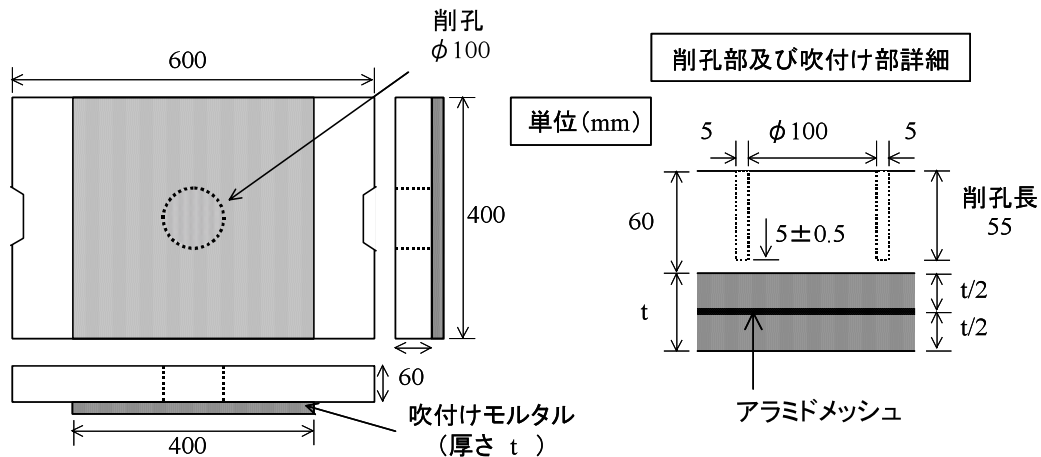
2.5.2 曲げ強度および曲げ靱性試験

曲げ強度および曲げ靱性試験はJSCE－G552に準拠して⁵⁾材齢28日で試験を行った。

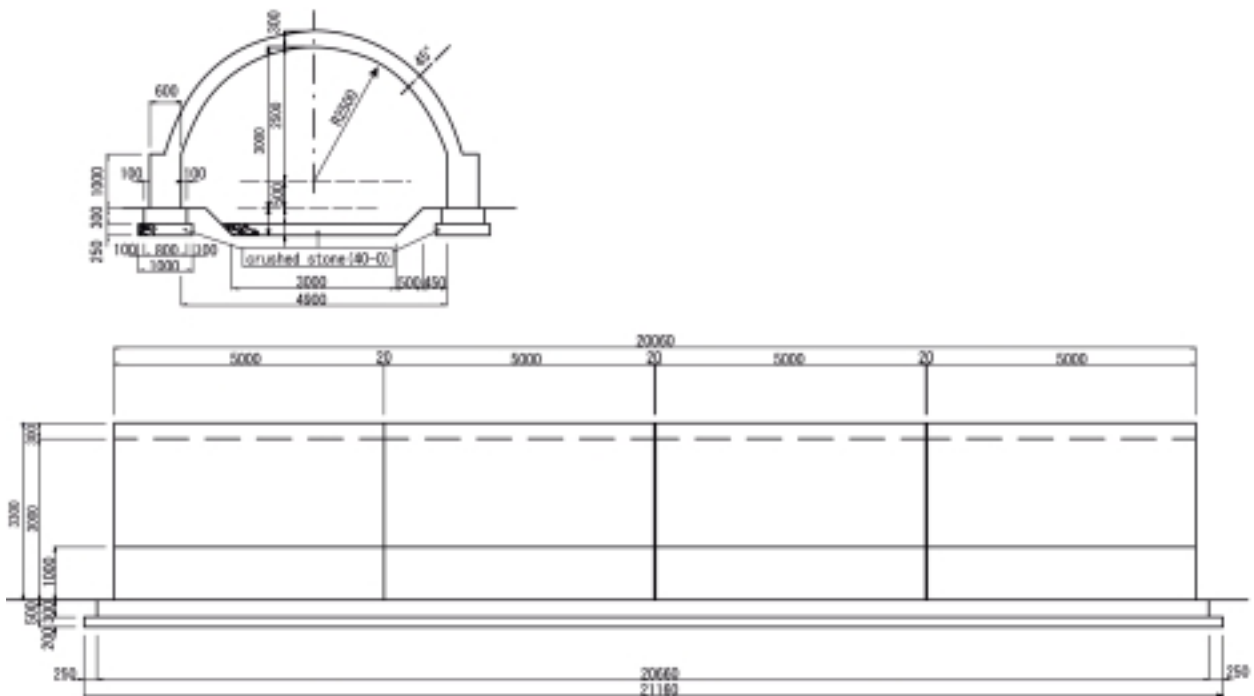
2.5.3 押し抜きピール試験

補修材に求められる性能として、それ自身の力学的性能や耐久性性能とともに、コンクリート片の剥落防止性能としての評価が重要となり、ひび割れの発生や鋼材の腐食膨張に伴う変形に追従し、かつ剥落しようとするコンクリート重量に抵抗できなければならない。本研究では、剥落防止性能を評価するために、日本道路公団試験研究所規格「連続繊維シート接着の押し抜き試験方法」に準拠して⁶⁾押し抜き試験を実施し、吹付け部が変位10mmで荷重1.5kN以上保持しているか否かを評価基準とした。

図－1に供試体の概要を示す。ここでは、吹付けモルタルのみの場合と、吹付けモルタル厚さの中間にアラミドメッシュを設置して吹付けモルタルとアラミド



図－１ 押し抜きピール試験用供試体



図－２ 模擬トンネルの概要

メッシュを組み合わせた場合の効果について検証を行った。なお、吹付けモルタルのみの場合は、吹付け厚さを20mmとして全ての配合について試験を行い、アラミドメッシュと組み合わせたケースについては、短繊維混入率0.5%と1.5%の配合でのみ吹付けを行った。また、吹付け厚さは10および20mmの2水準で試験を行った。

2.6 模擬トンネル施工試験

2.6.1 模擬トンネルの概要

図－２に模擬トンネルの概要を示す。トンネル内空断面は、幅5m、最大高さ2.5m、長さ20mで、吹付

け試験1ケースあたり半断面1m幅に区切り、各種条件を変えて試験を行った。

2.6.2 施工試験の概要

施工試験では、繊維混入吹付けモルタルの吐出性状、アラミドメッシュの仮留め方法および既設トンネルコンクリートと吹付けモルタルの付着性状について検討を行った。模擬トンネルへの吹付けは人力で行い、トンネル下部（GL～45°付近まで）への吹付けは地表面より、アーチ部（45°～天端まで）への吹付けは、高さ1m程度のステージ上から吹付けを行い、トンネル吹付け面との垂直と吹付け距離1.5m程度を

保持した。試験は大別して、アラミドメッシュの定着、保護およびコンクリート片の剥落防止を目的とした補修イメージの薄吹き試験（吹付け厚20mm以下）と、剥落防止に加えて吹付け繊維混入モルタルとアラミドメッシュの組合せによる耐力増加を目的とした補強イメージの厚吹き試験（吹付け厚30mm以上）の2パターン行った。薄吹き試験では吹付け厚さ等を考慮して、短繊維長6および12mmの2水準、繊維混入率を1.5%とし、さらにアラミドネット格子間隔を試験要因として検討を行った。厚吹き試験では、後述する物性試験結果を考慮して、最も力学特性の向上を期待できる繊維長30mmのみとし、繊維混入率、アラミドネットの格子間隔およびアラミドネットの枚数等を試験要因として検討を行った。なお、模擬トンネルの吹付け面は、附着性能を向上させるため、珪砂3号を1㎡当たり15kg使用し、粗骨材の頭が露出する程度にサンドブラスト処理を行った。

2.6.3 アラミドメッシュの仮留め方法

トンネル表面へのアラミドメッシュの仮留め（貼付）は、コンクリートネジとφ20mmの押さえプレー

トを用いて直接固定した。また、モルタル厚の中間へのアラミドメッシュの設置は、吹付け厚の1/2高さのスパーサーをトンネル表面にエポキシ系接着剤で貼り付け、その上にメッシュを設置しガス銃で釘を打ち込み固定した。メッシュの固定箇所数は、NATMの防災シートの固定仕様と同様、4カ所/㎡とした。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度および圧縮靱性

図-3および4に材齢7日および28日におけるモルタルの圧縮強度および圧縮靱性係数を示す。

圧縮強度は材齢の経過とともに増加しているが、繊維長30mmのケースを除くと繊維混入の有無および混入率による明確な差は、特に材齢28日ではあまり見られなかった。一方、繊維長30mmのケースでは、混入率の増加とともに強度が増加する傾向が見られ、特に混入率1.5%では強度が大きかった。

圧縮靱性は、繊維長12mmでは、圧縮強度と同様、混入率が多くなるほど低下する傾向が見られた。繊維長12mmの場合、モルタル練混ぜ時にファイバーボー

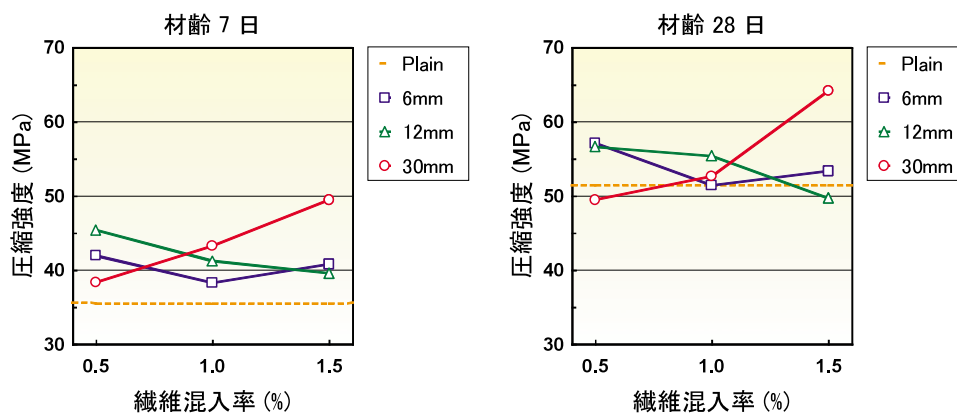


図-3 圧縮強度

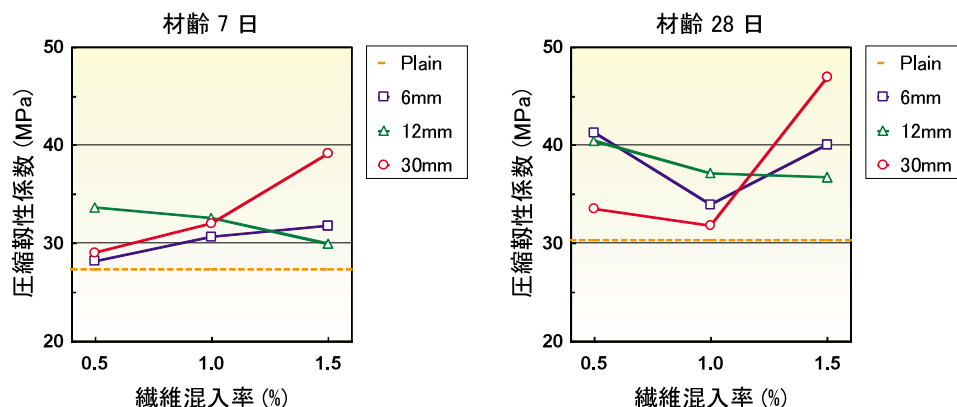


図-4 圧縮靱性係数

ルが生じやすい傾向もみられており、これらはアスペクト比が他のものよりも大きいことが影響しているとも考えられるが、原因の特定はできなかった。しかし、繊維長30mmでは、圧縮強度と同様に繊維混入率が高くなるほど圧縮靱性は増加しており、この繊維が諸特性の改善に有効であると考えられる。

3.2 曲げ強度および曲げ靱性

図-5に材齢28日におけるモルタルの曲げ強度および曲げ靱性係数を示す。

曲げ強度は、繊維を混入することでプレーンより増加した。また、繊維混入率が1.0%以下では繊維長の違いによる明確な差は見られなかったが、混入率を1.5%とすることにより、繊維長30mmのケースで強度が大きく向上した。

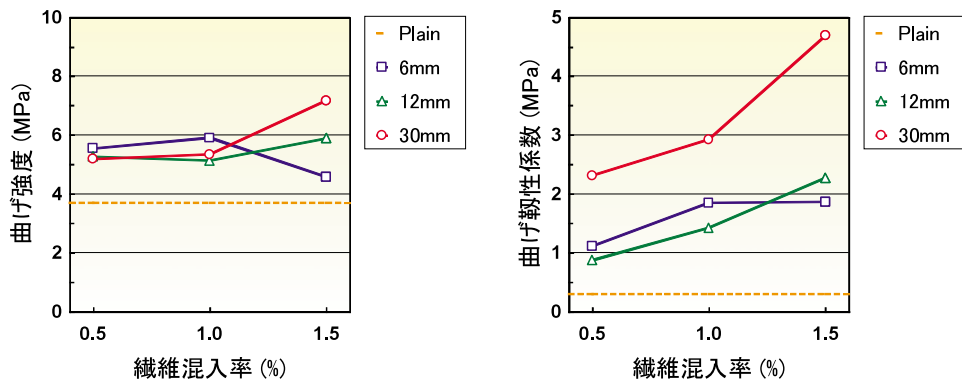


図-5 曲げ試験結果

3.3 押し抜きピール試験

本試験では、各種配合に対し吹付け厚さやアラミドメッシュの有無を試験要因として種々組み合わせて行ったが、結果として、①吹付けモルタル部が押し抜えずに母材と一体化して曲げ破壊するケース、②吹付けモルタルの全面あるいは一部が母材から剥離するケースおよび③吹付けモルタルがコーン状に押し抜けるケースの三通りとなった。これらの試験結果を表-

表-5 押し抜き試験結果

		アラミド無	アラミドあり					
吹付厚		20mm	10mm			20mm		
メッシュ格子間隔		-	15	30	40	15	30	40
Plain		①、①、③	-	-	-	-	-	-
繊維長	混入率							
6mm	0.5%	①、①、③	-	-	-	全②	全②	-
	1.0%	全①	-	-	-	-	-	-
	1.5%	全①	②、②、③	全③	-	②、③、③	全③	-
12mm	0.5%	全①	-	-	-	-	全②	②、②、③
	1.0%	①、②、②	-	-	-	-	-	-
	1.5%	①、①、②	②、③、③	②、②、③	全③	全③	②、③、③	全③
30mm	0.5%	①、①、③	-	-	-	-	-	-
	1.0%	②、③、③	-	-	-	-	-	-
	1.5%	全③	-	-	②、③、③-	-	-	②、②、③

※ 表中○数字は供試体破壊性状を示す ①吹付けモルタル部が押し抜えずに母材と一体化して曲げ破壊
(1 ケースあたり 3 供試体で試験) ②吹付けモルタル部全面あるいは一部が母材から剥離
③吹付けモルタル部がコーン状に押し抜け破壊

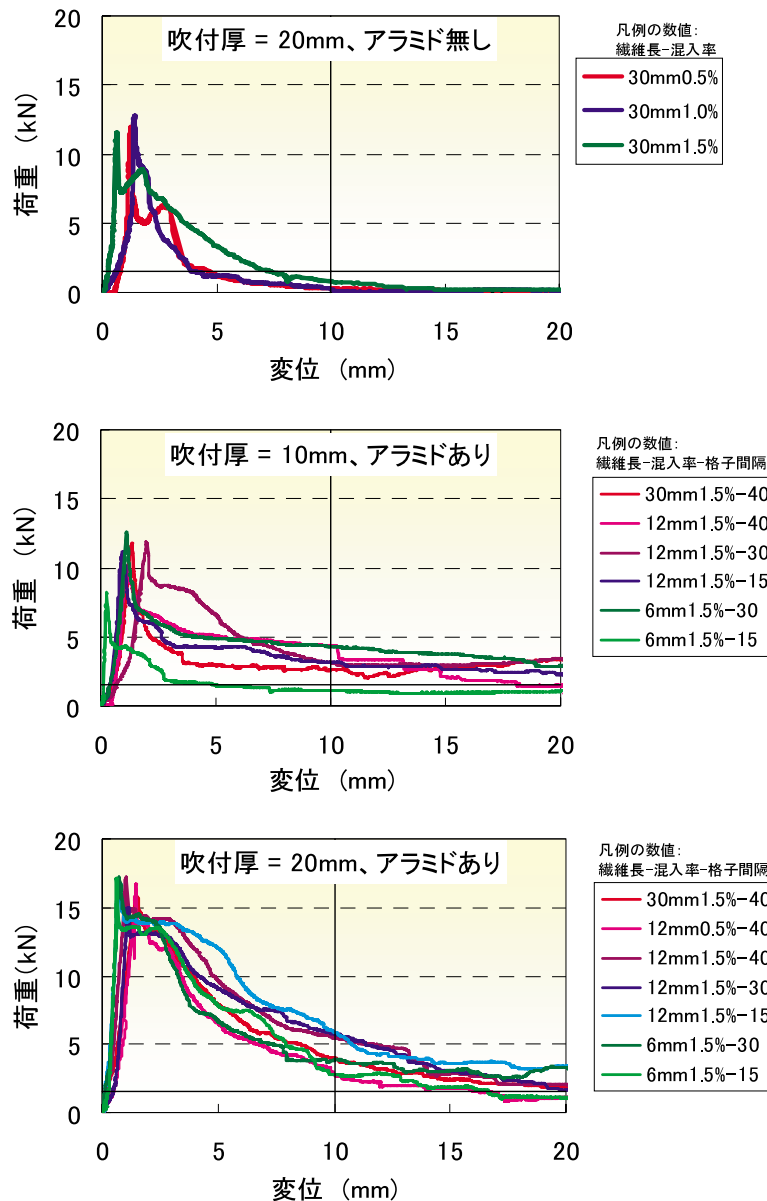


図-6 押し抜きピール試験結果

5に示す。また、図-6に押し抜けた場合の荷重変位曲線を示す。なお、試験は1ケース当たり供試体3体で試験を行ったが、複数本押し抜けたケースについては、代表的なもののみを表示した。また、図中の黒色実線は、評価基準である、変位10mm、荷重1.5kNを示している。

吹付けモルタルのみの場合（アラミドメッシュ無し）、プレーンおよび繊維長6mmのケースでは、その殆どが母材ごと曲げ破壊しており、一部押し抜けたケースについても明らかに異常値と考えられたことから評価対象から除いた。また、繊維長12mmでは押し抜けたケースが無く、母材ごと曲げ破壊するか、吹付けモルタルが母材から全面剥落する結果となった。これに対し、繊維長30mmでは、殆どのケースで吹付け

部がコーン状に押し抜かれる結果となり、混入率を1.5%程度とすることでそれ以下の混入率の場合よりも荷重保持力は若干増大したが、今回の実験では、剥落防止の評価基準値とした変位10mmにおける荷重は1.5kNを下回っていた。

一方、吹付けモルタルとアラミドメッシュを組み合わせたケースでは、混入率が0.5%の場合、繊維長12mmの1ケースを除き吹付け部のモルタルが全面あるいは一部が剥落する結果となった。しかし混入率1.5%の場合は多くのケースで吹付け部が押し抜けられる結果となり、吹付け厚さが厚くなるほど耐力が増大することがわかった。また、全体として、短繊維長およびアラミドメッシュの格子間隔の違いによる明確な傾向は見られず、これらは複雑に関係しているものと考え

表－６ 薄吹き試験結果

(繊維混入率 1.5%)

ビニロン 繊維長 (mm)	吹付厚 (mm)	メッシュ 格子間隔 (mm)	アラミドメッシュ 表面処理	評価
6mm	10	30	-	A
	20	15	-	A
		30	-	A
12mm	20	15	-	B
		30	-	B
			エポキシ樹脂で含浸	A

※ 評価基準 A：吹付け施工が良好

B：吹付けモルタルの一部が剥落

C：大規模な剥落

られるが、本試験の評価基準値である変位10mmにおける荷重1.5kNの保持はほぼ達成できており、アラミドメッシュを組み合わせることで、コンクリート片の剥落防止を期待できることが明らかとなった。

3.4 トンネル補修用薄吹き試験

薄吹き施工試験結果の一覧を表－6に示す。薄吹き試験の評価は3段階で行い、吹付け施工が良好となったものをA、吹付けモルタルの一部に剥落が見られたものをB、大規模な剥落が見られたものをCとした。

短繊維長6mmの場合、吹付け厚さおよびアラミドの格子間隔によらず吹付けモルタルの付着が良好だった。しかしながら、短繊維長12mmの場合、モルタル吹付け厚の中間に設置したアラミドメッシュの外側で部分的に吹付けモルタルが剥落した。これは、吹付けモルタルの自重により仮留めピンが外れてアラミドメッシュ自体がたるむことが主な原因であり、さらに、モルタルを吹き付ける際に、吹付けの圧力によるメッシュの振動が確認されており、このことがメッシュのたるみを助長し、さらに付着性能を低下させる結果となった。この結果を受けて、アラミドメッシュの樹脂含浸に加え、仮留め数を増やすなどして工夫しメッシュの振動を抑えた結果、モルタルの付着は良好となった。

3.5 トンネル補強用厚吹き試験

厚吹き試験に先立ち、本工法では、美観や耐久性の向上を考慮して最終的に吹付け面の表面仕上げを想定しており、吹付け時には急結剤を使用していないことから、吹付け厚さを決定する目的で、付着力が吹付け

直後のコンクリートの死荷重に耐え得る吹付け限界厚さに関する予備試験を行った。

予備試験では、吹付け限界厚さに及ぼすアラミドメッシュ設置の有無の影響についても検討を行うため、薄吹き試験で用いた短繊維長12mm、混入率1.5%のモルタルによる吹付け試験を行った。その結果、アラミドメッシュを模擬トンネル表面に設置することにより、最大吹付け厚さが100mm程度から80mm程度へと小さくなった。このことから、アラミドの存在はモルタルとトンネル壁面の吹付け圧力による付着力を分断することが確認され、メッシュの設置が吹付けモルタルの付着に影響を及ぼすことが明らかとなった。

次に、厚吹き試験で用いる短繊維長30mmのモルタルによる吹付け限界厚さの確認試験を行った。その結果、吹付け限界厚さは、繊維混入率が0.5および1.0%では、トンネル上方45°付近で80mm程度、トンネル天端で70～80mm程度であったのに対し、混入率が1.5%の場合には、トンネル上方45°付近で100mm程度、トンネル天端で80mm程度まで吹付けが可能となり、吹付けモルタルの繊維混入率が多いほど吹付け限界厚さは増加する傾向となった。

以上の予備試験による結果から、吹付け限界厚さとアラミドメッシュの設置の影響が明らかとなり、これらの結果と多少の余裕を考慮して厚吹き試験における設定吹付け厚さを、30および60mmの2水準とした。

厚吹き試験結果の一覧を表－7に示す。評価は薄吹き試験と同様に3段階で行った。

吹付け厚さ30mmの場合、アラミドメッシュの設置位置を吹付けモルタルの中間とした場合よりも、トンネル表面に直に設置した方が力学的には優位とは言えないが付着は良好となり、特に補強効果を高める目的

表－7 厚吹き試験結果

(短繊維長 30mm)

(応力域(圧縮) 50mm)					
吹付厚 (mm)	ビニロン 繊維混入率 (%)	メッシュ 格子間隔 (mm)	メッシュ 挿入枚数 (mm)	メッシュ 挿入位置	評価
30	0.5	40	1	吹付け厚さの 中間	C
			2		C
			1	トンネル表面	A
			2		A
	1.0		1	中間	A
			2		C
			1	表面	C
			2		A
	1.5		1	中間	A
			2		C
			1	表面	A
			2		A
		80	1	中間	A
				表面	A
60	0.5	40	1	中間	C
			2		C
			1	表面	C
			2		C
	1.5		1	中間	A
			2		A
			1	表面	B
			2		C
	0.5	80	1	中間	B
				表面	B

※ 評価基準 A：吹付け施工が良好

B：吹付けモルタルの一部が剥落

C：大規模な剥落

でアラミドメッシュを2枚重ねて中間に設置したケースでは全てのケースで剥落が見られた。しかしながら、短繊維の混入率やアラミドメッシュの格子間隔を大きくすることにより、付着は改善される傾向が見られた。

吹付け厚さ60mmの場合、繊維混入率が0.5%の場合には剥落しており、1.5%程度まで高めることにより付着は改善され、吹付け限界厚さ試験の結果と一致した。

また、メッシュの格子間隔を大きくすることで、繊維混入率が少ない場合でも付着は改善される傾向が見られた。これは、アラミドメッシュの格子間隔を繊維長よりも十分に大きくしないと、繊維がメッシュに遮られ、メッシュとトンネルの間に繊維混入モルタルが充填されにくくなるが、メッシュのクリアランスを大

きくすることで、繊維混入モルタルが間に充填されやすくなり、且つメッシュの裏側と表側のモルタルを短繊維が架橋し剥落抵抗性が増加したものと考えられる。しかしながら、メッシュのクリアランスが十分でも、繊維混入率が少ない場合には一部剥落も見られたことから、繊維混入率を高める必要があるものと思われる。また、吹付け厚さの中間にアラミドメッシュを設置した方が、トンネル表面にメッシュを設置した場合よりも付着が良好となったのは、吹付け厚さが60mmと厚くなることで、メッシュの設置位置が短繊維長と同じ30mmとなったことで、30mmの時よりもメッシュとトンネルの間にモルタルが充填されやすくなったためと考えられ、メッシュをコンクリート表面に設置した場合は、メッシュの表側にモルタルが60mm吹き付くこととなり、吹付け限界厚さになったこ

とが原因と考えられる。いずれにしても、補強を考慮した場合は、可能な限りアラミドメッシュを対象構造物から離れた位置に設置した方が有利となることから、実際の施工やアラミドメッシュの保護を考慮すると、吹付け厚さの中間に設置するのが良いものと思われる。

以上から、吹付けモルタルの付着に及ぼす各種要因の影響が明らかとなり、補修や補強の程度に応じて適切に組み合わせる必要があることが明らかとなった。

4. まとめ

- (1) 短繊維長30mmで混入率1.5%の材齢28日における圧縮靱性は、プレーンの1.4倍程度増加した。
- (2) 曲げ靱性は、繊維混入によりプレーンよりも増加し、全体として混入率が大きいほど向上した。
- (3) 繊維混入吹付けモルタルとアラミドメッシュを組み合わせることで、コンクリート片の剥落防止が期待できることが明らかとなった。
- (4) 吹付けモルタルの付着に及ぼす各種要因の影響が明らかとなり、補修や補強の程度に応じて適切に組み合わせる必要があることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 久部修弘, 手塚光晴, 谷木謙介, 佐藤正一: 高弾性CFRPロッドで補強されたコンクリート床版の曲げ特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 1413-1418, 2002.
- 2) 高瀬誠司, 小玉克巳, 栗原哲彦, 佐藤貢一: 補修・補強材料としてのポリマーセメントモルタルの付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 319-324, 2000.
- 3) 関田徹志, 小川敦久, 浜田敏裕: PVA繊維を用いたひずみ硬化型高靱性セメント複合材料の耐久性に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 219-226, 2002.
- 4) 南浩郎, 福永靖雄, 平石剛紀, 坂田昇: 剥落防止を目的とした繊維補強コンクリートの実橋への適用性検討, 第56回土木学会年次学術講演会概要集, V-518, pp. 1036-1037, 2001.
- 5) 土木学会: 【2002年制定】コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準
- 6) 日本道路公団: コンクリート片はく落防止対策マニュアル, 平成12年11月



吉田 行*

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
研究員



田口 史雄**

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
室長



栗橋 祐介***

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
研究員
博士(工学)