

## 11.3 積雪寒冷地におけるコンクリートの耐久性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（重点）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：吉田行、遠藤裕丈、栗橋祐介

### 【要旨】

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物は、凍害および凍害と塩害の複合劣化を受け耐久性は著しく低下する。そのため、コンクリート構造物の耐久性を向上するための種々の対策が必要となっている。本研究では、新設構造物の耐久性向上として、改質セメントコンクリートの各種試験の実施および表面含浸工法の試験施工による検証を行った。また、補修補強工法の開発のため、短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維メッシュ併用した工法の、種々の短繊維および連続繊維を用いる場合の性能確認試験を行った。その結果、改質セメントによる高耐久化および表面含浸工法の新設構造物への有効性が確認された。また、吹付けコンクリートの耐久性および本補修補強工法の適用性が確認された。

キーワード：改質セメント、表面含浸材、補修補強、耐久性向上

### 1. はじめに

積雪寒冷地のコンクリート構造物は、凍害単独および塩害との複合劣化の被害を受けやすい厳しい環境下に曝されている。凍害は、劣化予測が難しい理由から、コンクリート標準示方書の維持管理編では性能低下の度合いに応じて対策工を検討する事後保全型の維持管理に位置づけられている。一方、2025年には新設構造物への投資が減少し、構造物の維持管理・更新費がこれを上回ることが予想されている<sup>1)</sup>。厳しい財政事情下において、コンクリート構造物を全て更新することは極めて難しい。

このような中、近年、土木学会コンクリート標準示方書や道路橋示方書が性能規定型に改訂され、コンクリート構造物の新規建設にあたっては、経年劣化に対して十分な耐久性が長期的に確保されるように設計段階から照査する形式となった。これにより、特に、凍害および塩害などを複合的に受ける積雪寒冷地のコンクリート構造物は、その耐久性を長期にわたり確保することが、ライフサイクルコスト縮減の観点からも極めて重要な課題となり、そのための対策が必要な状況にある。

他方、既設コンクリート構造物の経年劣化によるコンクリート片のはく落や耐力の低下が問題となっており、早急な対応が求められている。供用後 50 年以上の長期材齢となる構造物が今後増大することを考慮すると、より経済的かつ効果的で、凍害や塩害などの複

合劣化に対しても十分な耐久性を有する補修補強工法の確立が必要となる。また、補修補強を要する構造物は、構造形式、劣化度、立地条件等が多種多様であることから、種々の条件に対応できる補修補強設計施工法の確立が必要である。

このような背景に基づき、本研究では、主に凍害および凍害と塩害の複合劣化に対する対策について検討を行い、新設構造物の耐久性向上対策として、改良セメントの各種試験の実施および表面含浸工法の試験施工による検証を行った。なお、表面含浸工法の検証においては、新設だけでなく既設構造物の耐久性向上についても検討を行っている。また、補修補強工法の開発のため、短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維メッシュ併用工法の、種々の短繊維および連続繊維を用いる場合の性能確認試験を行った。以下に各研究の成果を報告する。

### 2. 改質セメントによるコンクリートの高耐久化に関する研究

#### 2.1 研究概要

コンクリート構造物の凍害および凍害と塩害の複合劣化に対する耐久性を向上する手法は種々存在するが、コンクリートの緻密化等によりコンクリート自体の耐久性を向上することは最も基本的な対策であり、コンクリートの長期的な耐久性が確保できれば効率的にライフサイクルコストを縮減できる可能性がある。

本研究では、セメントの改質および産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の各種混和材を利用することで、コンクリートの緻密化等によるコンクリート自体の高耐久化を図り、凍害および複合劣化に対する耐久性の向上等、高耐久コンクリートの配合設計法を確立することを目的としている。

これまでの研究により、プレストレストコンクリート(PC)構造物への適用性を検討した結果、用いる混和材の種類により強度発現特性は異なるものの、強度の観点からは十分適用可能であること、また、塩害や凍害に対しても混和材を環境に応じて適切に選定することにより、コンクリートの高耐久化が可能であることが明らかとなっている。

平成 19 年度は、実構造物への適用を図る上で重要となる収縮特性や、凍害と塩害の複合劣化を想定したスケーリング抵抗性など、物性や耐久性に関する試験を継続し、高耐久コンクリートの配合設計法の確立に向けた検討を行った。

## 2.2 研究の手法

### 2.2.1 使用材料

表 - 2.1 に使用材料を示す。ベースセメントは、PC で一般的な早強ポルトランドセメントを用いた。混和材にはそれぞれの JIS 規格値を満足する、比表面積 6000 クラスの高炉スラグ微粉末(以下スラグと表記)、フライアッシュ 種、およびシリカフュームを用いた。高性能 AE 減水剤は、結合材の分散性に応じて 2 種類用い、空気量を調節するため AE 助剤と消泡剤を併用した。

コンクリートの配合を表 - 2.2 に示す。強度や耐久性を考慮した配合設計法の検討を行うため、水結合材比(W/B)は、一般的なPCの水セメント比がプレキャストを含めると 35~45%程度であることから、35、40、45%の 3 種類設定した。各混和材の早強セメントに対する置換率は、コンクリートの強度発現および耐久性への影響を考慮して、スラグおよびフライアッシュに関しては高炉セメントおよびフライアッシュセメントの B 種相当置換率の上限値とし、それぞれ 60%および 20%とした。また、シリカフュームの置換率は一般に 5~15%が採用されており、本研究では国内外での使用実績が多い 10%とした<sup>2)</sup>。なお、目標スランプは、W/B=35%は施工性を考慮して 18±2.5cm、その他のW/Bは土木構造物で一般的な 8±2.5cmとし、目標空気量はいずれも 4.5±1%とした。

### 2.2.2 試験項目および試験概要

本研究で行った各実験概要を以下に示す。なお、供

表 - 2.1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント(HP) 4770、 密度 3.15g/cm <sup>3</sup>
混和材	高炉スラグ微粉末(S6) 6020、密度 2.89 g/cm <sup>3</sup> フライアッシュ 種(F) 3710、密度 2.11 g/cm <sup>3</sup> シリカフューム(SF) 130000、密度 2.20 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	登別産陸砂 密度 2.70g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 1.50%
粗骨材	白老産碎石 密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 1.91%
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
A E 剤	ロジン系
消泡剤	ポリエーテル系

比表面積 (cm<sup>2</sup>/g)

表 - 2.2 コンクリートの配合

セメントの種類	混和材	混和材置換率 (%)	W/B (%)	空気量 (%)	S P の種類	S P 添加量 (B×%)	s/a (%)	コンクリート単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
								W	B	S	G	SP	AE助剤 (B×%)	消泡剤 (B×%)	
HP	-	-	35	4.5	A	0.65	45	135	386	845	1029	2.51	0.0050	0.0015	
	S6	60			A	0.60		128	329	768	1039	2.20	0.0075	0.0015	
	SF	10			B	0.70	138	355	748	1013	2.76	0.0100	0.0075		
	Fill	20			A	0.60	131	337	760	1029	2.24	0.0080	0.0015		
	-	-			A	0.65	135	304	794	1032	2.20	0.0040	0.0015		
	-	-			A	0.60	124	279	810	1052	1.86	0.0030	0.0015		
	S6	60	40	4.5	B	0.70	46	136	306	787	1023	2.38	0.0050	0.0075	
	SF	10			A	0.60		126	284	805	1046	1.89	0.0080	0.0015	
	Fill	20			A	0.60	135	270	825	1030	1.80	0.0040	0.0015		
	-	-			A	0.55	129	258	831	1037	1.58	0.0035	0.0015		
	S6	60			B	0.70	131	262	828	1034	2.04	0.0090	0.0075		
	SF	10			A	0.60	130	260	827	1033	1.73	0.0080	0.0015		
Fill	20	45	4.5	A	0.60	47	129	258	831	1037	1.58	0.0035	0.0015		
S6	60			B	0.70		131	262	828	1034	2.04	0.0090	0.0075		
SF	10			A	0.60	130	260	827	1033	1.73	0.0080	0.0015			

B:結合材(セメント+混和材)、SP:高性能AE減水剤(分散性)・A:B)

試体の養生は、作製後 1 日湿気養生し、翌日脱型の後所定の材齢まで 20 水中養生を行った。

力学特性として、圧縮強度試験を行った。なお、養生温度は 20 と 5 の 2 水準とし、試験は JIS A 1108 に準拠して、20 養生は材齢 1、3、7、28、91 日の 5 材齢で、5 養生は材齢 1 日を除く 4 材齢で行った。また、試験時には JIS A 1149 に準拠して、コンプレッソメータによる静弾性係数の測定も行った。

収縮特性として、乾燥収縮試験を行った。乾燥収縮ひずみの測定は、供試体作製時に供試体中央に設置した埋め込み型のひずみゲージにより行った。供試体は、10×10×40cm の角柱供試体を使用し、供試体の養生は材齢 7 日まで温度 20 で水中養生を行い、その後温度 20±2、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室に静置してデータロガーを用いてひずみの計測を開始した。測定項目は、収縮ひずみと供試体の質量変化とした。

耐久性試験として、塩分浸透抵抗性と凍結融解抵抗性に関する試験を行った。塩分浸透抵抗性は、電気泳動によるコンクリート中の実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G571-2003)<sup>3)</sup>に準拠して塩化物イオンの実効拡散係数を求め、実効拡散係数により評価を行った。なお、供試体は、養生による影響を考慮して材齢 91 日まで水中養生した 10×20cm の円柱供試体の中央部を、厚さ 5cm の円盤状になるように切断したものを

用いた。凍結融解抵抗性に関する試験として、JIS A 1148 のA法に準拠した水中凍結融解試験と、ASTM C672 に準拠したスケーリング試験(一面凍結融解試験)<sup>4)</sup>を行った。

## 2.3 力学特性

### 2.3.1 圧縮強度と材齢の関係

図 - 2.1 に各コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示す。図中実線は 20 で水中養生を行った場合の圧縮強度を、破線は 5 で水中養生を行った場合の圧縮強度を示している。結合材の違いでは、シリカフュームを用いた HPSF(10)は材齢初期の強度が最も大きく、早強セメント単体の HP を上回り、長期的にも強度は最も大きかった。フライアッシュを用いた HPF (20)は HP よりも初期の強度が小さく、材齢 91 日の長期強度も全結合材の中で最も小さかった。スラグを用いた HPS6(60)は材齢初期の強度が全結合材の中で最も小さかったが、材齢の進行に伴う強度の増加割合は大きく、材齢 28 日以降では HP と同程度以上となった。このように、結合材の種類により強度発現は大きく異なった。水結合材比の影響をみると、材齢初期の強度発現が小さい HPF (20)や HPS6(60)は、W/B=45%と 40%では各材齢における強度差が小さかったが、W/B=35%では強度の増加が大きく、水結合材比の低減による強度の改善効果が大きかった。これに対し、材齢初期の強度発現が大きかった HPSF(10)は、W/B=35%と 40%の強度差は小さいものの、W/B=45%では強度の低下が比較的大きい傾向がみられた。また、HP は水結合材比の低減によりほぼ同程度の幅で強度が増加する傾向がみられた。このように、水結合材比が圧縮強度に及ぼす影響は結合材の種類により異なる傾向がみられたが、水結合材比が異なる場合でも各材齢における強度発現の傾向は概ね同様の傾向を示した。養生温度の影響をみると、いずれの結合材も材齢初期は低温養生の方が強度は小さかったが、HP は材齢 28 日以降 20 養生よりも強度が大きくなり、HPF (20)は材齢 28 日以降 20 養生と強度はほぼ同程度となった。他方、HPSF(10)と HPS6(60)は、材齢の進行に伴い 5 養生と 20 養生の強度差は小さくなるものの、いずれの材齢においても低温養生の方が強度は小さく、特に HPS6(60)は初期強度発現が小さい傾向がみられ、積算温度で評価した場合でも圧縮強度は小さい傾向がみられた。これらのことから、冬期施工時には各結合材の特性を考慮して、結合材の種類を適切に選定する必要がある。

図 - 2.2 に圧縮強度と結合材水比 (B/W) の関係を示

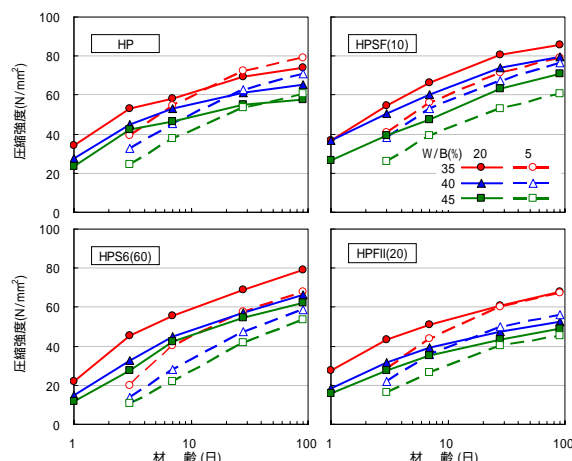


図 - 2.1 圧縮強度と材齢の関係

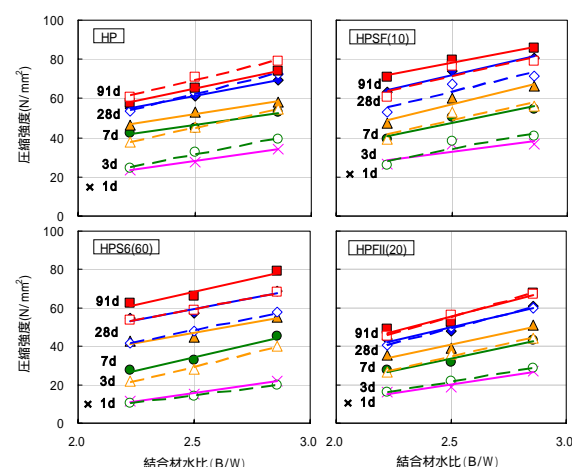


図 - 2.2 圧縮強度と結合材水比の関係

す。図中実線は 20 水中養生の圧縮強度と B/W の回帰直線を、破線は 5 養生の圧縮強度と B/W の回帰直線を示している。結合材の種類、養生温度により強度発現および材齢の進行に伴う強度の増加傾向は異なるものの、B/W が大きくなるほど(水結合材比が小さくなるほど)強度は直線的に増加する傾向がみられた。これらの回帰直線を用いることにより、各結合材を用いた場合の圧縮強度の推定が可能となり、圧縮強度は次式により推定することができる。

$$= a X + b$$

ここに、 $Y$  : 各材齢における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $X$  : 結合材水比 (B/W)、 $a$ 、 $b$  : 各回帰直線から定まる定数  
表 - 2.3 に各回帰直線から定まる定数  $a$ 、 $b$  を示す。

### 2.3.2 圧縮強度と引張強度の関係

図 - 2.3 に圧縮強度と引張強度の関係を示す。図には土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]<sup>5)</sup>に示されている式より算出した引張強度と圧縮強度の関係も併記した。引張強度はW/B=40%のみの結果

であるが両者には良い相関がみられ、いずれの結合材を用いた場合でも、概ね土木学会式と一致していることから、設計上の引張強度は土木学会式を用いるのが妥当と思われる。

表 - 2.3 B/W と圧縮強度の回帰直線から定まる定数 (a, b)

配合番号	20									
	1d		3d		7d		28d		91d	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
HP	16.913	-14.162	16.997	3.960	18.547	5.845	22.691	4.442	25.446	1.449
HPS6(60)	16.528	-25.555	27.755	-34.884	20.587	-4.376	22.682	2.931	26.932	1.195
HPSF(10)	15.657	-6.322	24.149	-12.909	29.013	-15.462	27.164	3.974	23.143	20.300
HPF (20)	19.479	-26.945	25.398	-30.064	24.948	-21.326	27.532	-18.856	30.534	-20.807

配合番号	5							
	3d		7d		28d		91d	
	a	b	a	b	a	b	a	b
HP	23.449	-27.106	26.575	-21.337	29.931	-12.582	28.750	-2.331
HPS6(60)	14.733	-22.387	28.741	-42.443	24.864	-13.748	23.297	1.210
HPSF(10)	22.388	-21.558	25.469	-14.710	27.675	-5.817	27.519	2.477
HPF (20)	18.100	-25.094	27.509	-34.031	30.584	-27.098	34.481	-30.948

### 2.3.3 静弾性係数と圧縮強度の関係

図 - 2.4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図には土木学会コンクリート標準示方書[構造型能照査編]<sup>5)</sup>に示されている静弾性係数と圧縮強度の関係も併記した。全体としては、結合材の種類によらず、静弾性係数と圧縮強度には良い関係がみられたが、一部を除いて示方書に示されている静弾性係数よりも若干小さい傾向がみられ、示方書に示されている静弾性係数の 90%ラインであればほぼ全体を包括できていることから、設計上は示方書の 90%値を採用するのが妥当と思われる。

### 2.4 収縮特性

図 - 2.5 にW/C=40%における乾燥収縮ひずみと乾燥材齢の関係を示す。なお、早強セメント単体(HP)のコンクリートの乾燥収縮ひずみ測定は実施しなかったため、図には参考として、別途実施した普通ポルトランドセメント(W/B=40%、単位水量:138kg/m<sup>3</sup>、以下普通セメントと記述)と高炉セメントB種(W/B=40%、単位水量:136kg/m<sup>3</sup>、以下高炉Bと記述)の試験結果を併記した。一般に、乾燥収縮ひずみの限界値は500~700μ程度としてよいことが2002年制定土木学会コンクリート標準示方書施工編<sup>6)</sup>に示されているが、併記した普通セメントや高炉Bの測定値はこの範囲より若干大きめの値となっている。

図より、シリカフュームを用いたHPSF(10)は、乾燥材齢50日程度までは普通セメントよりも収縮ひずみが大きかったが、その後逆転しフライアッシュを用いたHPF(20)と同程度となった。スラグを用いたHPBS(60)は、いずれの材齢においても最も収縮ひずみが小さかった。既往の研究によると、スラグの比表面積および置換率が大きいほど、乾燥日数3週間程度までの乾燥初期段階における乾燥収縮量はやや増加傾向にあることが報告されているが<sup>7)</sup>、本研究の範囲内ではそのような傾向は見られなかった。このように、いずれの混和材を用いた配合においても、一般的なセメントである普通セメントや高炉Bよりも収縮ひずみは小さい結果であった。

図 - 2.6 に乾燥材齢と供試体の質量変化率の関係を

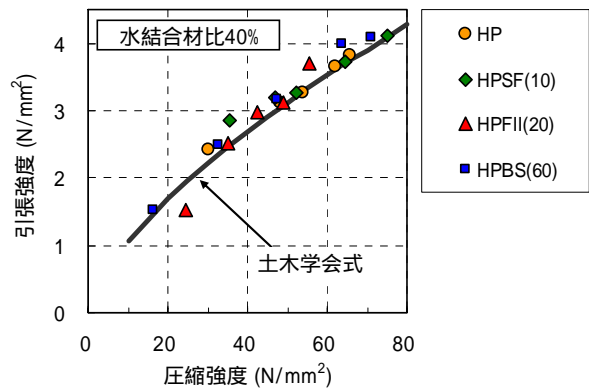


図 - 2.3 引張強度と圧縮強度の関係

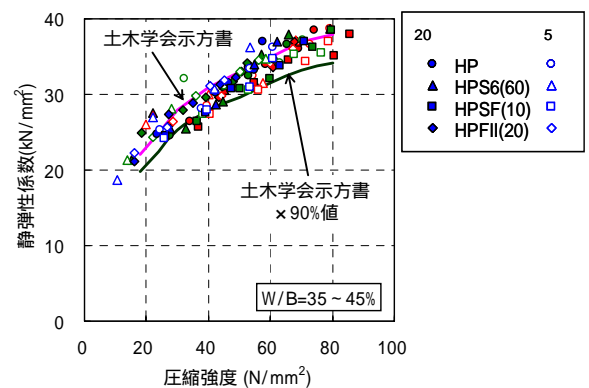


図 - 2.4 静弾性係数と圧縮強度の関係

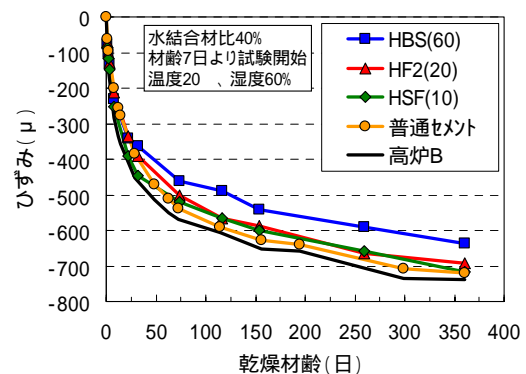


図 - 2.5 乾燥収縮ひずみと乾燥材齢の関係

示す。収縮ひずみが最も小さかったHPBS(60)は、質量変化が最も小さく、以下HPSF(10)、HPF(20)の順となり、質量変化率は結合材の種類により異なった。以上のことから、収縮ひずみは供試体の質量減少に伴い増大するが、収縮の程度は結合材の種類により異なることがわかった。また、いずれの混和材を用いた場合でも、一般的なセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと同程度以下であり、実構造物への適用性があると考えられる。ただし、これらの傾向は、コンクリートの単位水量や乾燥開始材齢、適用される環境条件などにより異なると考えられるため、配合条件や使用条件を考慮して選択することが重要と考えられる。

## 2.5 耐久性

### 2.5.1 塩分浸透抵抗性

電気泳動法を用いた塩分浸透試験により得られた各コンクリートの実効拡散係数を図-2.7に示す。HPF(20)を除くと、水結合材比が小さいほど実効拡散係数は概ね小さくなる傾向がみられた。しかしながら、 $W/B=40\%$ と $W/B=45\%$ における差は小さく、結合材の種類が塩化物イオンの実効拡散係数に及ぼす影響が大きいことが示され、特にHPS6(60)は実効拡散係数が小さかった。なお、実効拡散係数は通常耐塩害設計で用いられている見かけの拡散係数とは異なり、イオンの電気泳動のしやすさを表す係数であるが、通常の拡散による塩分浸透の場合、塩分の固定化や吸着などの影響が含まれることから、実効拡散係数は安全側で評価できると考えられる。

一方、JSCC-G571-2003で提案されている試験法では、試験開始材齢として28日を標準としているが、材料の種類によって適宜変更する必要があることが付記されている<sup>3)</sup>。本試験では混和材を用いており、試験開始材齢の影響が大きいと考えられる。そこで、図-2.8に実効拡散係数に及ぼす試験開始材齢の影響として、材齢28日および91日より開始した場合の各実効拡散係数を示す。HPは試験開始材齢による影響が無いが、混和材を用いたケースではいずれも材齢28日より試験を開始したケースの方が実効拡散係数は大きいことがわかる。これは、結合材の水和に伴うコンクリートの組織構造の緻密化の程度に起因していると考えられる。このため、用いる材料特性および実構造物における使用条件や環境条件に応じてデータを取得し評価する必要がある。なお、HPF(20)は試験開始材齢によりHPと逆転する現象がみられるものの、結合材の種類による実効拡散係数の大小は概ね同様の傾向を示しており、

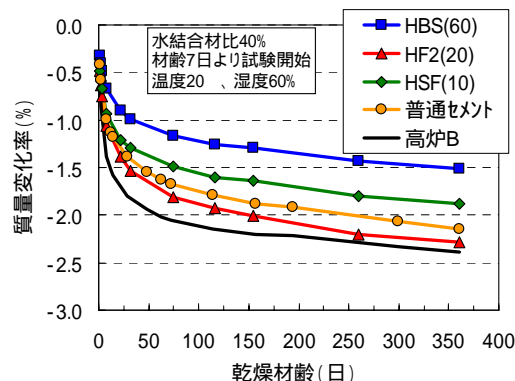


図-2.6 質量変化率と乾燥材齢の関係

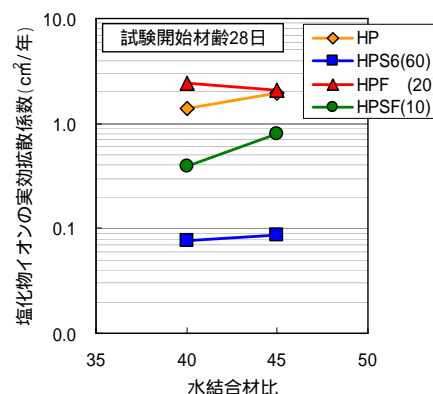


図-2.7 塩化物イオン実効拡散係数とW/Bの関係

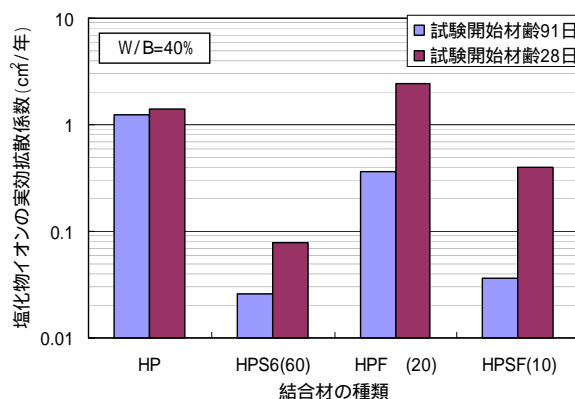


図-2.8 実効拡散係数に及ぼす試験開始材齢の影響

塩害に対する耐久性が要求される場合には、結合材の種類(混和材の種類)を適切に選択することが重要である。

### 2.5.2 凍結融解抵抗性(水中凍結融解試験)

図-2.9に水中凍結融解試験結果より得られた耐久性指数と水結合材比の関係を示す。図中実線は試験水として真水を用いた場合、破線は試験水として3%NaCl水溶液を用いた場合の試験結果を示している。水結合材比の低減により耐久性指数は向上することがわかるが、塩水が作用する環境下において高い耐久性

を確保するには、適切な結合材の選定が必要不可欠であることがわかる。このことから、真水による凍結融解作用に対しては、いずれの結合材を用いた場合でも、W/B=45%以下で空気量を4.5%程度確保することにより、凍結融解抵抗性は十分に確保できると考えられる。しかし、例えば海水や凍結防止剤の影響を受けやすい環境において高い耐凍害性を確保するには、水結合材比の低減や空気量の確保だけでなく、結合材の選定も重要と考えられる。

### 2.5.3 凍結融解抵抗性（スケーリング試験）

図-2.10にW/B=40%におけるスケーリング試験結果を示す。混和材を用いた場合、早強セメント単体よりもスケーリング量は抑制された。混和材の違いでは、シリカフェームを用いたHPSF(10)は75サイクル以降スケーリング量が増加する傾向がみられ大きくなったが、スラグを用いたHPBS(60)はスケーリング量が漸増したもののその量は小さかった。また、フライアッシュを用いたHPF(20)は、スケーリングが大きく抑制された。このように、スケーリング量は結合材の種類により異なる傾向がみられた。

図-2.11にW/B=35、45%におけるスケーリング試験結果を示す。凍結融解サイクルは未だ50サイクルしか進行していないが、W/B=35%では何れの結合材も殆どスケーリング劣化はみられなかった。W/B=45%ではHPS6(60)が50サイクルで0.16g/cm<sup>2</sup>と他の結合材よりも多かったが、劣化の程度としては1であり<sup>4)</sup>、それ以外の結合材はW/B=35%と大差なかった。

以上、W/B=35、45%については試験の継続が必要であるが、現在までの結果から、塩分が作用する環境下でスケーリング抵抗性を確保するには、水結合材比の低下とともに結合材の種類を適切に選定する必要があることが明らかとなった。

### 2.6 総合評価

以上の試験結果から、結合材の種類（混和材の種類）や水結合材比の設定により種々の性能を有するコンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。表-2.4に各試験結果から判定された各コンクリート性能の一覧を示す。なお、カッコ書きの評価は、試験は未実施であるが既往の研究を基に行ったものである。

実際の配合設計にあたっては、この表を参考にして、要求される強度や耐久性に応じた適切な結合材（混和材）や水結合材比を選定し、最終的にはライフサイクルコストも考慮して配合を決定する必要がある。

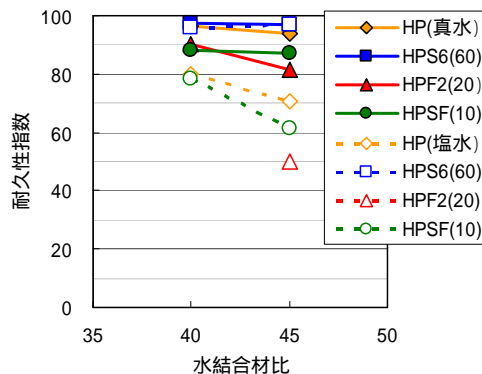


図-2.9 耐久性指数と水結合材比の関係

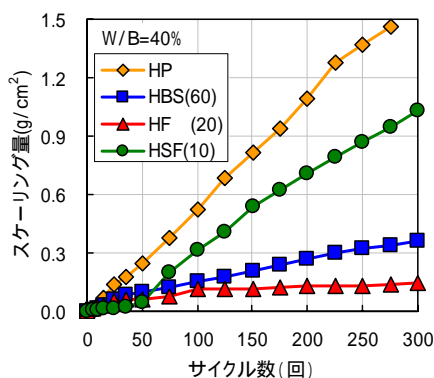


図-2.10 スケーリング試験結果 (W/B=40%)

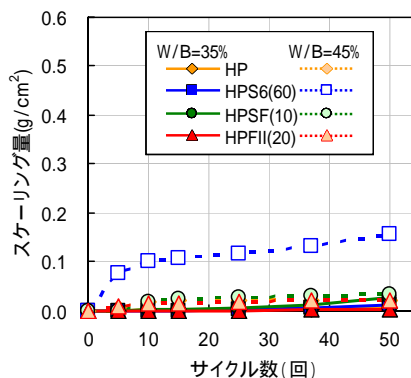


図-2.11 スケーリング試験結果 (W/B=35、45%)

表-2.4 改質セメントコンクリートの性能比較一覧

対象構造物 (用途)	セメントの種類	強度発現特性			断熱 温度	収縮特性			耐久性						スケーリング 抵抗性 (W/B40) 未実施	化学的 抵抗性 未実施	その他 特記事項
		初期	中・長期強度	自己 収縮		乾燥収縮	中性化	塩害	凍害 (真水)		凍害 (塩水)						
		1~7	7~28						91以降	未実施	W/B 35%	W/B 40%	W/B 45%	W/B 40以下			
PC構造物 や 早期施工	早強ポルトランドセメント				x	-		( )							x	(x)	
	早強+高炉スラグ6000					-		( )								( )	低温時の強度発現に注意
	早強+シリカフェーム					-		( )								( )	
	早強+フライアッシュ					-		( )						x	( )		

( ) : 極めて良好、 : 良好、 : 適用環境や要求性能による判断が必要、x : 別途対策が必要、 : 検出中、- : 未実施

### 3. 表面含浸工法による凍害・塩害抑制対策に関する研究

#### 3.1 研究概要

凍害、塩害は、コンクリート表面からの水や塩化物イオンの浸透が主な原因である。そのため、劣化因子の浸透を抑えることで劣化の発生・進行を遅延化させることができると考えられる。その方法の一つに表面含浸材によるコンクリート表層の改質が考えられる。この工法は、材料・施工といった初期コストが比較的安価で、工期が短く、施工後も構造物の質感を変化させない等の長所を有する。

近年は、寒冷地においても部材の性能保持・持続を期待し、道路橋の地覆等に表面含浸材が施工される事例が増えている。表面含浸材は現在 100 種類以上の製品が市販されている。しかし、合理的な製品の選定方法や寒冷環境下での効果の持続性については明確になっておらず、設計施工法の確立が求められる。

このような背景をふまえ、寒冷地での表面含浸材の効果の持続性を明らかにすることを目的に、北海道開発局の協力を得て、北海道内の道路橋の地覆コンクリートにおいて試験施工を行い、効果の持続性の検証に関する追跡調査を実施している。なお、表面含浸材は、既往の実験<sup>9)</sup>で使用された 28 種類の製品から、含浸性と撥水性が良好な 5 種類を選定している。

本報では、北海道の道東地方に位置する A 橋（打換え）と B 橋（既設）で行っている追跡調査の 3 年目までの評価を述べる。

#### 3.2 試験概要

##### 3.2.1 現地の概要

A、B 橋とも、年間の最低気温が約 -25 で、冬期は凍結防止剤が散布される地域に位置し、複合作用を受ける厳しい環境下に曝されている。施工部位は、2 橋ともに日射面である。

地覆コンクリートの配合は表-3.1 の通りである。コンクリートの空気量は A 橋が 4.5% で B 橋が 5.0%、粗骨材の最大寸法は A 橋が 40mm で B 橋が 25mm である。A 橋の地覆コンクリートは、試験施工（2004 年 10 月 28 日）の 14 日前に打換えられており、先行劣化は受けていない。B 橋の地覆コンクリートは、打換え後 2 冬が経過しており、軽微なスケーリング（ASTM 評価<sup>4)</sup>で 1 程度）が生じている。

##### 3.2.2 試験施工の概要

表面含浸材は、良好な撥水及び浸透性が期待される 5 種類を選定した。ここでは、材料名を No.1~5 と表

表-3.1 地覆コンクリートの配合

橋	セメント種類	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材
A	普通	145	252	30	713	1144
B	早強	138	267	30	778	1111



写真-3.1 試験施工状況 (A 橋)

記する。No.1~3 は水系、No.4 は溶剤系、No.5 は無溶剤系である。

試験施工区間は、地覆を 6 区間に分け（うち 1 区間は無塗布区間）、1 材料 1 区間とした。なお、ここでは材料単独ではなく施工法を含む工法として評価する理由から、施工は各社の独自仕様に基づいて行った（写真-3.1）。各々の材料の塗布量は 200~400g/m<sup>2</sup>である。

##### 3.2.3 調査概要

調査は、スケーリング面積率、超音波伝播速度、表面水分率の測定を行った。

スケーリング面積率は、スケーリング箇所をチョークで囲ってトレース後、画像処理により面積を求めた。なお、ここでは、施工面積に占めるスケーリング箇所の面積の割合をスケーリング面積率と定義する。

超音波伝播速度は、コンクリート表面に 20×20cm 間隔のメッシュをチョークで描き、メッシュ交点に発・受信子を設置（距離は 20cm）して表層を伝播する超音波の速度を 1 区間につき 100~120 点測定した。表面水分率は、写真-3.2 に示す高周波式（20MHz）コンクリート水分計を使用し、深さ 1cm（本計測器で測



写真-3.2 高周波コンクリート水分計

定が可能な最も浅い位置)の水分率を調べた。

### 3.3 試験結果・考察

#### 3.3.1 A橋

図-3.1は地覆のトレース図を示している。塗り潰しの部分はスケーリング箇所を表している。スケーリングは、地覆の垂直面に多く発生している。これは、凍結防止剤を含む融雪水が地覆垂直面に沿って流れていることと凍結融解を受けていることの相乗作用によるものと推測できる。

以下、ここでは、凍結防止剤の影響を最も受けていた垂直面の調査結果について述べる(B橋も同様)。

図-3.2にA橋のスケーリング面積率の経年変化を示す。施工3年後の面積率は、無塗布区間が43%に対し、No.2の塗布区間が28%、それ以外は8~15%で、面積率は無塗布の約1/5~3/5倍となっており、3年経過後もスケーリングを低く抑制する効果が持続されていることを確認した。

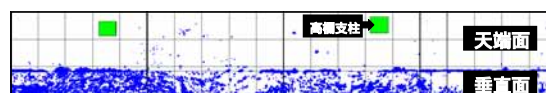
図-3.3にA橋の超音波伝播速度の経年変化を示す。速度は区間内の全ての測定値の平均である。施工直後は、いずれの区間もほぼ同じ値であったが、施工1年後には塗布区間の速度が無塗布区間を下回り、施工2、3年後においては、No.3とNo.5でこの傾向がより明瞭に表れていた。

図-3.4に3年目の深さ1cmの表面水分率と超音波伝播速度の結果を示す。超音波伝播速度は、表面水分率が小さい区間において遅い傾向にあることが読み取れる。このことから、表面含浸材による吸水抑制効果で、コンクリートの含水率が低下したために、超音波伝播速度が遅くなったものと推察される。

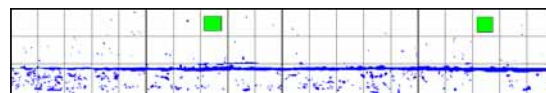
#### 3.3.2 B橋

スケーリング面積率の経年変化を図-3.5に示す。B橋の地覆は、試験施工前から先行劣化を受けているため、スケーリング面積率の初期値は区間により異なる。そのため、ここでは測定値から初期値を差し引いてス

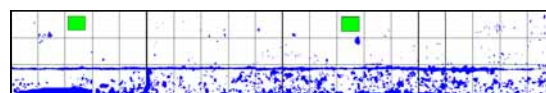
#### 1)無塗布区間 (43%)



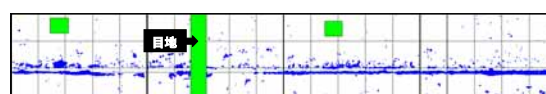
#### 2)No.1 塗布区間 (15%)



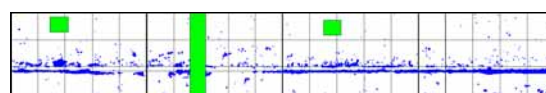
#### 3)No.2 塗布区間 (28%)



#### 4)No.3 塗布区間 (11%)



#### 5)No.4 塗布区間 (8%)



#### 6)No.5 塗布区間 (9%)

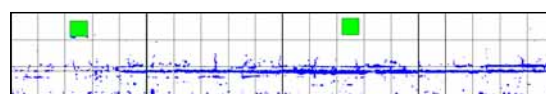


図-3.1 地覆コンクリートのトレース (A橋)  
カッコは垂直面のスケーリング面積率

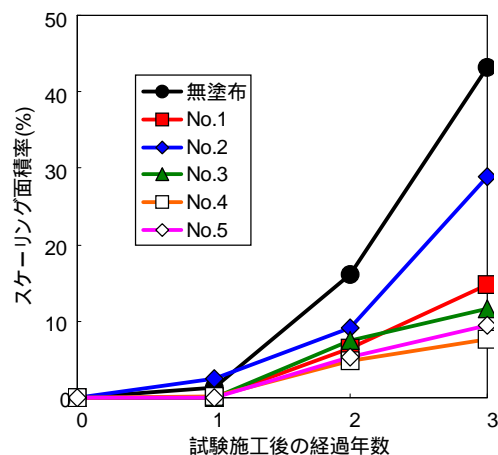


図-3.2 スケーリング面積率の経年変化 (A橋)

ケーリング面積率の増加量で整理している。3年目の調査において、塗布区間の一部にやや大きなスケーリングが認められた。



11.3 積雪寒冷地におけるコンクリートの耐久性向上に関する研究

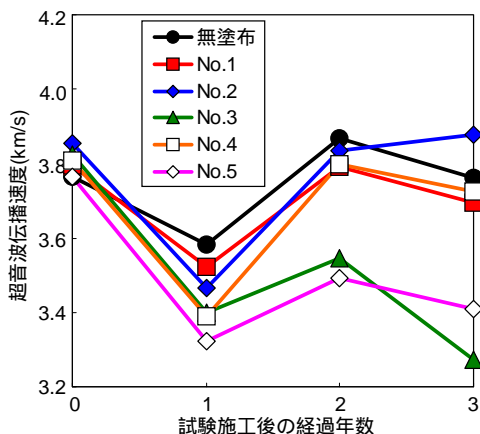


図-3.3 超音波伝播速度の経年変化 (A 橋)

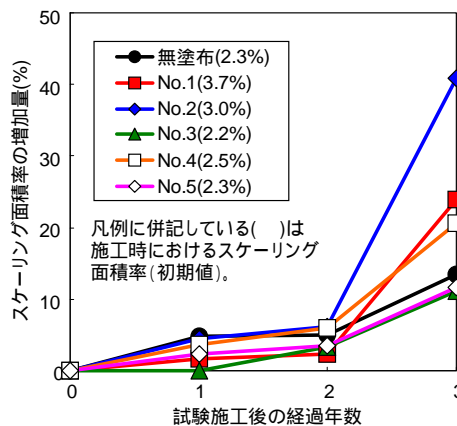


図-3.5 スケーリング面積率の経年変化 (B 橋)

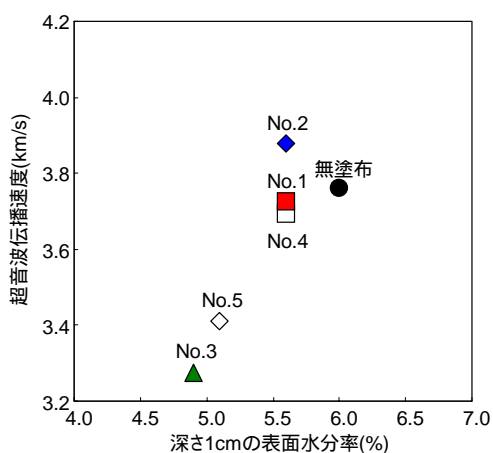


図-3.4 深さ1cmの表面水分率と超音波伝播速度の経年変化 (A 橋)

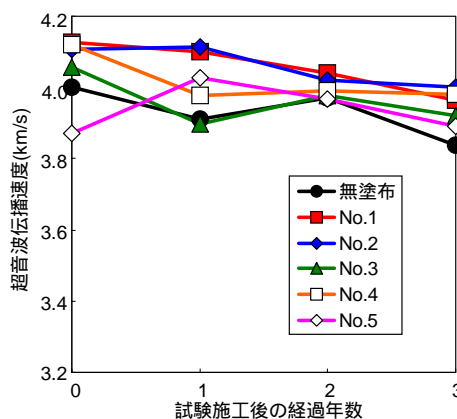


図-3.6 超音波伝播速度の経年変化 (B 橋)

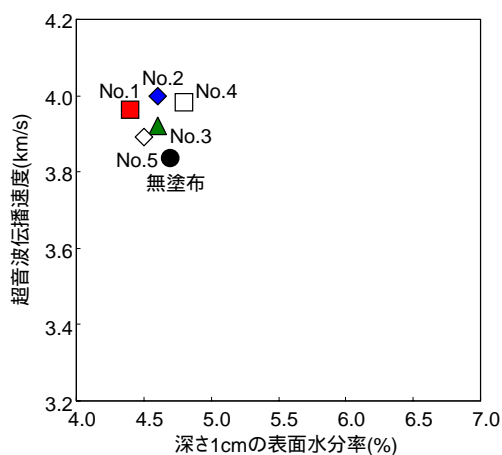


図-3.7 深さ1cmの表面水分率と超音波伝播速度の経年変化 (B 橋)

超音波伝播速度の経年変化を図-3.6に示す。A橋でみられた塗布区間の超音波伝播速度が無塗布区間を下回る傾向がB橋の地覆では見受けられなかった。図-3.7は深さ1cmの表面水分率と超音波伝播速度を示している。図-3.4と比較すると、同一の表面水分率でも超音波伝播速度には違いが生じているが、これは、セメントの種類や使用骨材などが同一ではないことが結果に関与していると思われる。無塗布との差は小さいことから、吸水抑制効果の発現に至らなかったひびわれ箇所から無塗布と同程度の水分が浸透していることが考えられる。なお、表面含浸材によって表層組織は疎水化されているため、組織内での凍結余剰水の流動抵抗性が増大し、これに伴って大きな水圧が表層に作用したためにスケーリングに至ったプロセスが推察される。

このことから、既設部材に対しては、施工を行う前にコンクリートの劣化状況を調査した上で、適用の可

否を検討する必要があると思われる。なお、劣化速度は各々の初期値によっても異なると考えられ、先行劣化の程度に応じた効果については今後も追跡調査も継続して検証を行う必要がある。

## 4. 短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維メッシュによる補修補強工法に関する試験

### 4.1 概要

本研究は、既設コンクリート構造物の経済的かつ合理的な補修補強工法として、PVA 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工法 (図 - 4.1) を提案して、種々の性能試験を行い、その実用化に向けた検討を行うものである。これまでの研究では、吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性向上のための中空微小球や PVA 短繊維の影響について、施工性、耐久性、および力学特性の観点から検討を行ってきた<sup>9)</sup>。

ここでは、提案工法の適用範囲の拡大を目的に、吹付けコンクリートの収縮特性とその抑制方法、凍・塩害による複合劣化抵抗性および短繊維や連続繊維メッシュを用いる場合における RC 部材の補強効果について検討した。また、試験施工を実施した構造物の追跡調査を昨年度より継続的に行い、現地における本工法の安定性について検証した。



図 - 4.1 補修補強工法の概要

### 4.2 吹付けコンクリート試験

#### 4.2.1 試験概要

補修補強用吹付けコンクリートの収縮特性を検討するため、従来配合および収縮低減剤を使用した配合に関する長さ変化試験を実施した。なお、既往の研究では、収縮低減剤の使用により、凍結融解抵抗性が低下する場合のあることが明らかになっていることから、水中凍結融解試験も実施した。併せて、施工性および力学特性に関する試験を行った。さらに、吹付けコンクリートの凍・塩害複合劣化抵抗性を検証するため、淡水および塩水をコンクリート表面に張った一面凍結融解試験を実施した。

表 - 4.1、4.2 には、それぞれ、短繊維および連続繊維メッシュの材料特性の一覧を示している。

表 - 4.1 短繊維の材料特性

短繊維種類	繊維長 / (mm)	繊維径 $d$ (mm)	アスペクト比 // $d$	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (MPa)
PVA	30	0.66	45	880	29,400

表 - 4.2 連続繊維の材料特性

連続繊維種類	メッシュ格子間隔 (mm)	弾性係数* (GPa)	保証耐力 (kN/m)
AFRP	40	118	100

\*: 樹脂を除いた繊維束の値

表 - 4.3 吹付けコンクリートの力学試験結果

収縮低減剤	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	残存引張強度 (MPa)	付着強度 (MPa)
0 %	58.9	25.0	0.79	1.40
2 %	53.0	26.0	-	-
4 %	51.5	27.9	0.70	1.73

\*: 単位水量 // に対する割合

#### 4.2.2 吹付けコンクリート試験の結果

試験の結果、吹付けコンクリートは、収縮低減剤を使用する場合においても良好な施工性を確保し、かつ収縮低減剤を用いない場合とほぼ同様の力学特性を有していることが明らかになった (表 - 4.3)。特に、付着強度に関しては、吹付けコンクリート指針 (案) [補修・補強編]<sup>10)</sup> に示されている規準値 (1.0~1.3 MPa) を上回っている。

図 - 4.2 には、長さ変化試験の結果を示している。図より、長さ変化率は、収縮低減剤の使用によって低減可能であり、その使用量が多い場合ほど低減効果が高いことが明らかになった。ただし、使用量が 2、4 % の場合においては、その効果に大きな差がないことより、使用量としては 2 % が妥当であると考えられる。

図 - 4.3 には、凍結融解試験結果を示している。図より、収縮低減剤の有無によらず、凍結融解 300 サイクル後においても相対動弾性係数の低下は見られない。これは、吹付けコンクリートに使用している中空微小球の効果が発揮されていることによるものと考えられる。

図 - 4.4 には、一面凍結融解試験結果を示している。図より、凍結融解 50 サイクルの時点において短繊維混入吹付けコンクリートは、塩水を張っている場合においても、ほとんどスケールを生じていないこと

が明らかになった。

これらの結果より、吹付けコンクリートの収縮量を抑制するためには収縮低減剤が有効であり、かつ吹付けコンクリートの凍・塩害の複合劣化に対する抵抗性は極めて高いことが明らかになった。

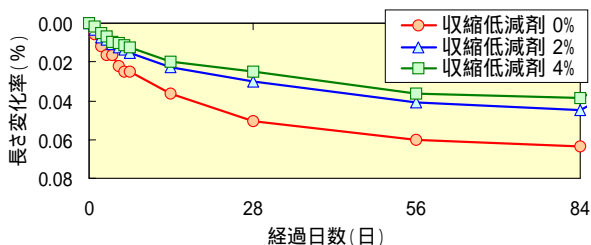


図 - 4.2 長さ変化試験結果

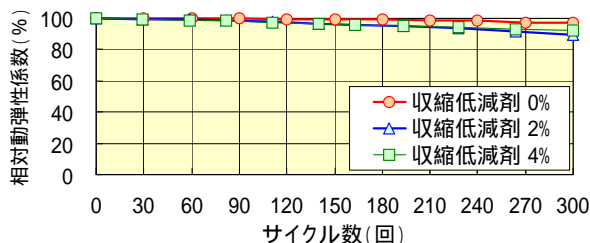


図 - 4.3 凍結融解試験結果

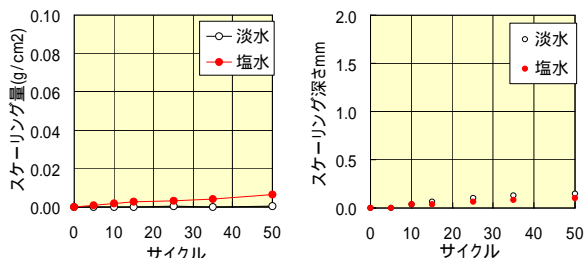


図 - 4.4 一面凍結融解試験結果

#### 4.2.3 せん断補強 RC 部材の荷重実験結果

図 - 4.5 には、無補強およびせん断補強 RC 梁の荷重 - 変位関係を示している。PVA 短繊維および AFRP メッシュを組み合わせて補強を行ったものは、無補強に比べて剛性勾配および最大荷重が大きく、本工法によるせん断補強効果が確認された。

#### 4.3 試験施工後における追跡調査の一例

##### 4.3.1 調査概要

過年度までの研究では、RC 桁のせん断補強や床版の下面増し厚およびトンネルの内面補強等を対象に試験施工を実施している。ここでは、トンネル内面補強後における追跡結果の一例を示す。

図 - 4.6 には、試験施工を行ったトンネルのひび割れ状況、試験フィールド範囲および覆工ひずみの測定位置を示している。本トンネルは、在来工法で建設されたものであり、覆工背面の空洞、覆工コンクリートの厚さ不足および多数のひび割れの発生が指摘されていた。そのため、背面空洞の裏込め注入に先立ち覆工コンクリートの内面補強を行った。補強設計では、裏

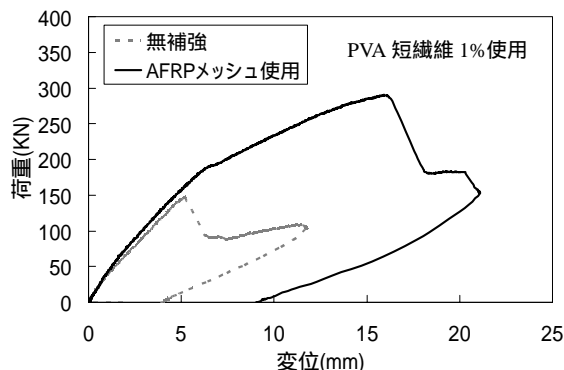


図 - 4.5 荷重 変位関係

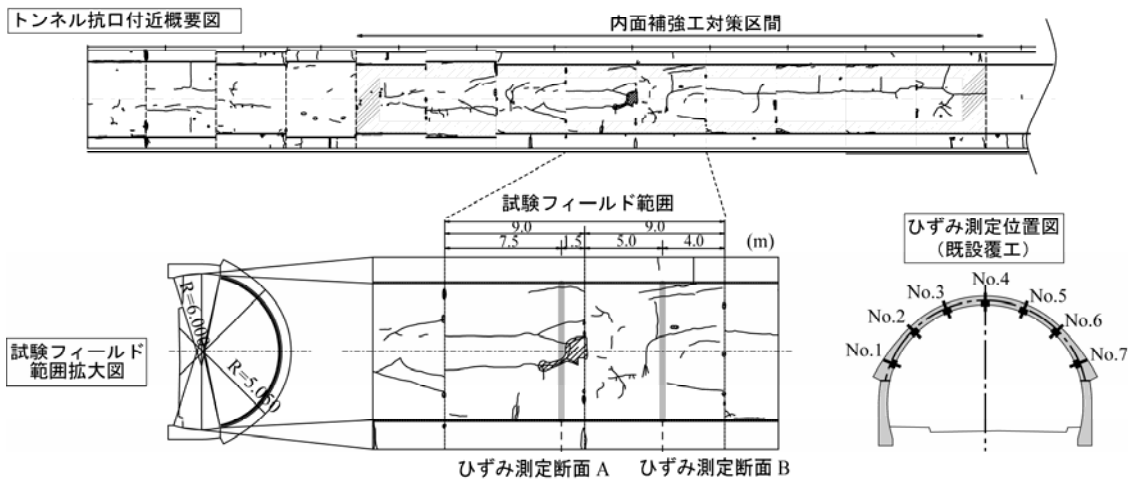


図 - 4.6 T トンネルの概要

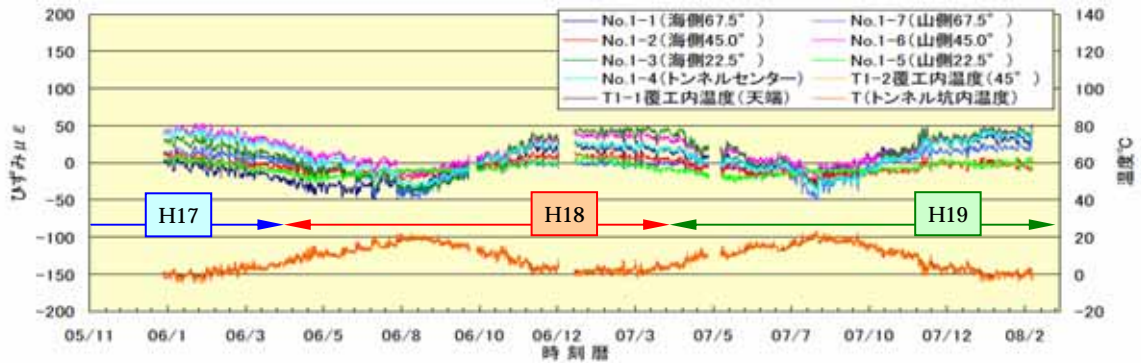


図 - 4.7 ひずみの経時変化 (ひずみ測定断面 A)

込め注入により発生する応力に対して曲げ補強する形で補強量を決定した。また、裏込め注入時には、発生応力が許容応力を十分に下回っていることを確認している。

本追跡調査では、施工後2年4ヶ月の覆工ひずみのモニタリングおよび1ヶ月に1度の頻度で補強部の外観調査を行った。なお、ひずみの測定は、ひずみゲージを貼り付けたPC鋼棒を覆工表面に設けた切り欠き部に埋設する形で行った。

#### 4.3.2 調査結果

図 - 4.7 には、ひずみの経時変化の一例を示している。図より、試験フィールド箇所における年周期の覆工の温度変化は、0~20 程度であることが分かる。また、各測定点によりばらつきがあるものの、覆工の温度変化に連動する形でひずみ値が変動する傾向は H19 年度においても同様であることが分かる。

図 - 4.8 には、発生ひずみと覆工温度との関係の一例を H18 および H19 年度について示している。図より、両測定点ともに、年周期の覆工温度の上昇および下降に伴ってひずみの絶対値が大きくなる傾向にあることが分かる。これは、覆工温度の上昇/下降に伴ってひずみゲージを貼付しているPC鋼棒や覆工コンクリートが膨張/収縮し、圧縮/引張応力が生じることによるものと考えられる。また、覆工ひずみと覆工温度は比例関係にあり、かつ H18 および H19 年度ともにほぼ同様の履歴ループを描いていることから、覆工ひずみの変動の主要因は外気温の変化であり、補強された覆工は現在においても安定した状態にあるものと考えられる。

外観調査の結果からは、ひび割れ幅 0.2 mm 以下の微細なひび割れが多少見られているものの、有意なひび割れや表面剥離および漏水などは発生していないことを確認している。従って、本トンネルに適用した補

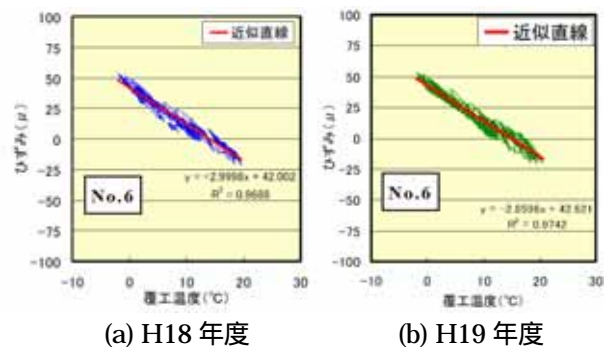


図 - 4.8 発生ひずみと覆工温度との関係

強工法は、施工後2年以上を経過した現在（平成20年3月）においても有意な変状は見られず、十分な性能を保持しているものと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、新設構造物の耐久性向上対策として、改良セメントおよび表面含浸材に関する検討を行うとともに、合理的な補修補強工法の開発を目的として、種々の短繊維と連続繊維を用いた補修補強工法に関する検討を行った。これらの成果をまとめると以下のようになる。

改良セメントについては、高耐久コンクリートの配合設計法の確立に向け、各種混和材を用いたコンクリートの物性および耐久性に関する試験を行った結果、用いる混和材の種類により種々の性能を有するコンクリートの製造が可能であることが明らかとなり、高耐久コンクリートの配合設計が可能となる基礎資料が得られた。

今後は、高耐久コンクリートの実用化を図るため、コンクリート工場製品への適用性に関する検討を行うとともに、実構造物での試験施工を実施し、耐久性等の検証を行う必要がある。

### 11.3 積雪寒冷地におけるコンクリートの耐久性向上に関する研究

表面含浸材については、施工後3年までの評価をまとめると、新設・打換え部材に対しては、劣化を低く抑制する効果の持続が期待されること、一方、既設部材については施工に着手する前に適用の可否を詳細に検討する必要があることが明らかとなった。

平成20年度以降は、効果の持続性を評価するためのデータの充実を図るために、引き続き追跡調査を継続するとともに、塩化物イオン量などコンクリート内部の健全性の評価も行う。さらに、凍害・塩害による複合劣化の進行を抑制する対策として含浸性防錆材を適用・併用した場合の効果について検討を進める。

短繊維混入吹付けコンクリートと連続繊維メッシュによる補修補強工法については、試験の結果、吹付けコンクリートの収縮量の低減には収縮低減剤が有効であることや、吹付けコンクリートの凍・塩害の複合劣化に対する抵抗性は極めて高いことが明らかになった。また、提案工法によりせん断補強したRC部材の載荷実験の結果、本工法の補強効果が確認された。さらに、過年度に試験施工を行った構造物の追跡調査の結果、本工法の補修補強効果が十分に保持されていることを確認した。

今後は、使用材料や施工方法を検討してさらなるコストの縮減に向けた検討を行うとともに、本工法によるRC構造物の補修補強設計施工法の確立および適用方法を取りまとめる必要がある。

#### 参考文献

1) 北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き

(案)、北海道土木技術会コンクリート研究委員会コンクリート維持管理小委員会報告書、2006.3

2) 土木学会：シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー第80号、pp.5-9、1995.10

3) 土木学会：2005年制定コンクリート標準示方書[規準編] 土木学会規準および関連規準、pp.267-274、2005.3

4) Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals : American Society for Testing and Materials C 672

5) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[構造的能照査編] pp.21-29、2002.3

6) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[施工編] p.54、2002.3

7) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針、コンクリートライブラリー第86号、pp.95-98、1996.6

8) 林大介、守屋進、杉田好春：各種浸透性コンクリート保護材の性能に関する実験的検討、土木学会コンクリートの表面被覆および表面含浸に関するシンポジウム論文集、pp.45-54、2004.2

9) 栗橋 祐介、田口 史雄、岸 徳光、三上 浩：短繊維混入吹付けモルタルと連続繊維メッシュによる道路トンネルの内面補強、第6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論文報告集 第6巻、pp.327-334、2006

10) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案)[補修・補強編]、2005

## IMPROVING THE DURABILITY OF CONCRETE IN COLD, SNOWY REGIONS

**Abstract** : In cold, snowy regions, the durability of concrete structures decreases markedly as a result of exposure to frost action and combined deterioration caused by frost and salt damage. A variety of measures are therefore necessary to improve the durability of such structures. In this study, various tests on modified cement concrete and test application of the surface penetrant materials were conducted toward improving the durability of new structures. Additionally, for the purpose of developing a repair and reinforcement method, performance confirmation tests were conducted for short-fiber-mixed shotcrete and concrete reinforced with continuous fiber mesh. The results confirmed that the use of modified cement was effective in improving durability and that the surface penetrant materials were useful in new structures. The durability of shotcrete, and the applicability of this repair/reinforcement method were also confirmed.

**Key words**: modified cement, surface penetrant materials, repair and strengthening, improving a durability