

報告 セメント系高耐久繊維補強材料の配合および施工方法の検討

石関 嘉一*1・平田 隆祥*2・貫田 誠*3・中嶋 義則*4

要旨 現在我が国の社会資本ストックの多くは供用50年を超えて更新時期を迎えようとしている。特に塩害、中性化、凍結融解等による構造物の断面欠損等の不具合が顕著化している。現状の断面修復工法に使用している材料としてポリマーモルタルが挙げられるが、ライフサイクルコストの高騰や再劣化の危険性がある。そこで、筆者らは長寿命で再劣化の危険性が低い高耐久性繊維補修・補強材料の開発を行い、配合、施工性および硬化物性等について検討した。その結果、本材料は吹付け施工が可能で、高強度、耐久性を有していることを確認した。

キーワード：補修，補強，断面修復，吹付け，左官，耐久性，高強度

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは高度成長期に造られたものが多く、その大半が供用50年を超えて更新時期を迎えようとしている¹⁾。その中で、**写真-1**に示すような塩害、中性化、凍結融解などによる構造物の断面欠損等、大規模な断面修復工法による補修・補強をしなければならない構造物がかなりの数に上ると考える。このような状況下で環境への負荷を最小限に抑えながら防災性能強化などの機能拡張が求められている。これらに対して、効果的な補修・補強材料の研究開発を推進しなければならない。

現状、断面修復工法に使用する材料としてポリマーセメントモルタル（以下「PCM」と称す。）等が挙げられる。PCMは躯体との付着性能が高く、曲げおよび引張強度が大きいとされており、床版下面等のように、比較的薄層・大面積の断面修復が求められる現場で、着実に施工実績を増やしつつある。特に補修・補強工事では、桁下等、狭い場所での施工が要求されるケースが多いので、吹付け工法での使用は増加²⁾している。しかし、PCMはセメント系モルタル（以下「CM」と称す。）と比較して、ポリマーを多量に混入しているため、電気絶縁性が高く²⁾普通コンクリートとの間で電池が形成される。よって、補修・補強部のマクロセル腐食による再劣化の危険性があると考えられる。また、海岸構造物ではPCMを用いて劣化部の補修補強を行った場合、塩分浸透を防止する目的で補修部表面をエポキシ樹脂等で被覆することが一般的である。しかし、エポキシ樹脂等は10年程度で劣化し、再度被覆を行わなければならない³⁾。このためライフサイクルコスト（以下LCCと称す。）が増加し、構造物の管理者への負担が増大する。そこで、耐用年数が長く定期的な補修が不要になり、LCCが低下する材料を開発す



写真-1 劣化した構造物

る必要がある。現状では高耐久性材料として常温硬化型超高強度繊維補強コンクリート（以下「常温硬化型UFC」と称す。）が挙げられる。常温硬化型UFCは圧縮強度180N/mm²以上で耐用年数100年以上と著しく耐久性の高い材料⁴⁾である。しかし、この材料は施工時に型枠を設置して流し込んで施工する方法が一般的で、断面修復に用いる吹付け工法に適していない。そこで、筆者らはこれらの問題を解決する目的で、吹付け施工が可能な高耐久性繊維補修・補強材料（以下「高耐久性材料」と称す。）を開発した。

本報告は高耐久性材料の配合選定、施工性、硬化物性および耐久性について記載する。

2. 配合選定

2.1 使用材料および配合

高耐久性かつ高強度材料を開発する目的で、配合選定を実施した。材料および配合は高耐久性かつ高強度の常温硬化型UFCを基材として調整を行った。使用材料および配合を**表-1**および**表-2**に示す。また、補強材料として、有機繊維を外割で体積比2%添加した。

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工) (正会員)

*3 宇部興産(株) 技術開発研究所 建材開発部 グループリーダー

*4 宇部興産(株) 技術開発研究所 建材開発部 研究員

配合選定後、補強材料の有機繊維を選定する目的で、表-3 に示す繊維を用いて練混ぜを行い、曲げじん性を計測した。なお、練混ぜはプレミックス材、細骨材、高性能減水剤および収縮低減剤 I および II をミキサ内に投入し、30 秒間空練りした後、水を投入して3分間行った。ミキサ縁に付着した材料をかき落とした後、1 分間練混ぜた後に繊維を投入し、さらに1 分間練混ぜて調製した。

2.2 試験項目

試験項目および試験方法を表-4 に示す。試験は施工性、初期ひび割れ抵抗性および硬化物性について実施した。施工性として、熟練した作業員がこて塗りを行った際、最良と思われるものを「5」と評価する官能試験を実施した。初期ひび割れ抵抗性は硬化前の収縮を評価する目的で、渦電流式変位センサー法⁵⁾で練上がり直後からの試験体の収縮を測定した。硬化物性試験として圧縮強度試験を実施した。圧縮強度の基準値は高耐久性を担保するために 100N/mm² 以上とした。また、繊維選定において、曲げじん性試験を実施し、混入する繊維の評価を実施した。

2.3 配合試験結果

表-5 にこて塗り作業性および圧縮強度試験結果を示す。No.2 は No.1 の細骨材の添加量を 42% 増加しプレミックス材を 8% 低減することで、こて塗り作業性の評価

表-5 試験結果

No.	こて塗り 作業性	圧縮強度(N/mm ²)	
		7 日	28 日
1	2	83	117
2	3	102	138
3	3	90	120
4	4	83	106
5	4	87	113

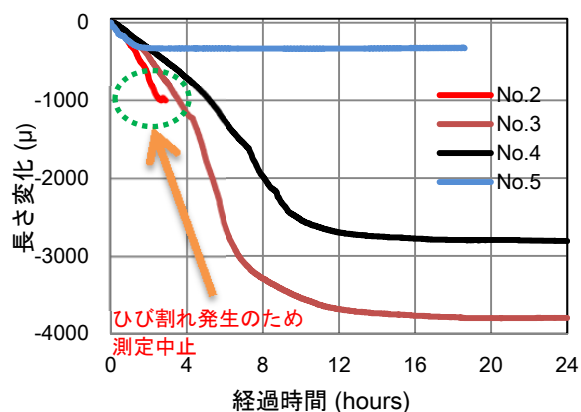


図-1 経過時間と長さ変化の関係

表-1 使用材料

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
プレミックス材	P	ポゾラン材含む粉体、密度 2.97g/cm ³
細骨材	S	砕砂、表乾密度 2.62g/cm ³
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
収縮低減剤 I	SRA	アルコール系
収縮低減剤 II	X	オキシカルボン酸系
繊維	PVA	ビニロン
	NY	ナイロン

表-2 配合

No.	単体量(kg/m ³)				SRA (kg)	X (kg)	PVA* (kg)
	W	P	S	SP			
1	307	1152	684	1	0	0	26
2	230	1061	968	1	0	0	26
3	230	1061	968	1	8	0	26
4	231	1069	975	1	8	0	26
5	231	1069	975	1	8	5	26

*: φ 0.1mm×12 mmの PVA 繊維

表-3 有機繊維の選定

No.	材質	比重	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	引張 強度 (MPa)
6	NY	1.14	0.28	15	850
7		1.14	0.28	30	850
8	PVA	1.30	0.40	12	1560
9		1.30	0.20	12	975
10		1.30	0.20	18	975
11		1.30	0.66	30	900

表-4 試験方法

試験項目		試験方法
施工性	こて塗り 作業性	熟練作業員の官能試験 (1~5 による 5 段階評価、5 が最良)
	初期ひ び割れ 抵抗性	渦電流式変位センサー法 40×40×160mm 試験体
硬化 物性	圧縮強度	JIS A 1108, φ50×100mm 材齢 28 日、標準水中養生
	曲げじん性	JSCE-G522 100×100×400mm 材齢 28 日、標準水中養生

が良好となった。さらに、No.4はNo.3(No.2)の細骨材を8%増加することで、より施工性が向上することが確認できた。また、材齢28日における圧縮強度は全ての配合で100N/mm²を満足する結果となった。図-1に経過時間と長さ変化の関係を示す。No.1は施工性が極めて悪く、試験体成型ができなかった。また、No.2は計測時経過時間3時間程度で著しいひび割れが発生し計測を中断した。No.3, 4は計測開始4時間から8時間程度で長さ変化が2000μを超え、最大3800μ程度の収縮が発生した。収縮を低減する目的で収縮低減剤IIを添加した結果、No.5の長さ変化は300μ程度とNo.4と比較して10%程度に低減した。

これらの実験の結果より施工性、初期ひび割れ抵抗および硬化物性が十分満足しているNo.5の配合を基準配合と決定した。この配合を用いて、有機繊維の選定試験を実施した。

有機繊維選定試験の圧縮強度試験結果および曲げじん性係数試験結果を図-2および図-3に示す。材齢28日における圧縮強度で基準値100N/mm²以上を満足する配合はNo.8, 9, 11であった。また、曲げじん性試験において、No.11は他の配合と比較して著しく高い結果となった。これらの結果より、No.11に使用したφ0.66mm、長さ30mmのPVA繊維を使用することに決定した。

3. 試験施工

3.1 試験施工の概要

今回開発した高耐久性材料の圧送性および施工性を評価する目的で、ボックスカルバートの壁面および天井面に吹付け施工実験を実施した。吹付け施工実験は通常断面修復工法に用いる施工機材を用いて実施した。

3.2 吹付け場所および使用機材

吹付け実験は写真-2に示す水路用ボックスカルバートを上下逆に設置し実施した。吹付け面は壁面と天井面とし、実際の施工を模擬して高耐久性材料とボックスカルバートの付着を向上する目的で、ボックスカルバート



写真-2 水路用ボックスカルバート

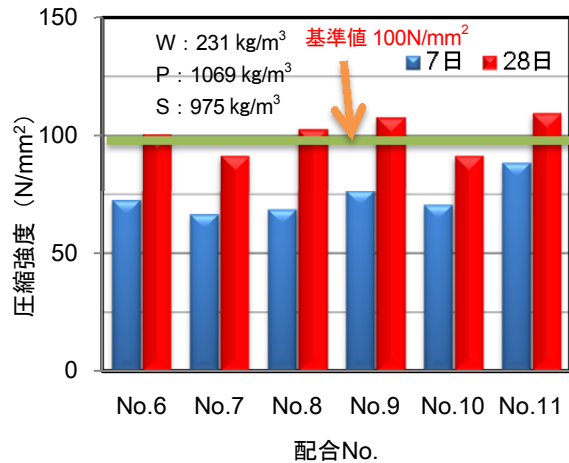


図-2 圧縮強度試験結果

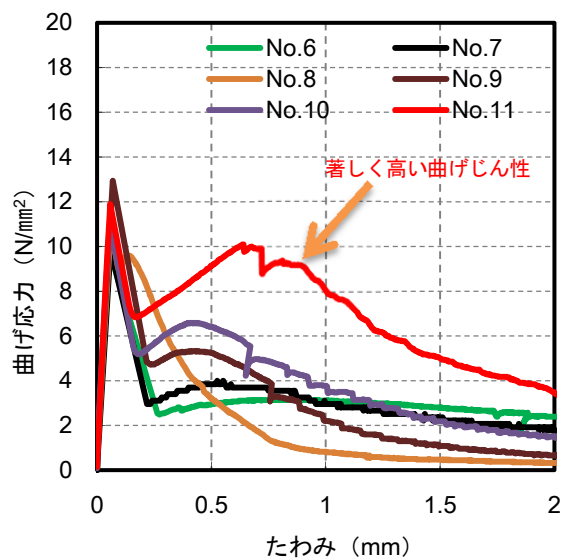


図-3 曲げじん性試験結果

表-6 使用機材

機器名称	備考
パン型ギヤードミキサー	容量180L、回転数40rpm
スクイズポンプ	15L/min、0.9m³/h
コンプレッサー	空気量3.5m³/min
吹付けノズル	リングガンφ40mm
圧送管	耐圧ゴムホースφ40mm×20m

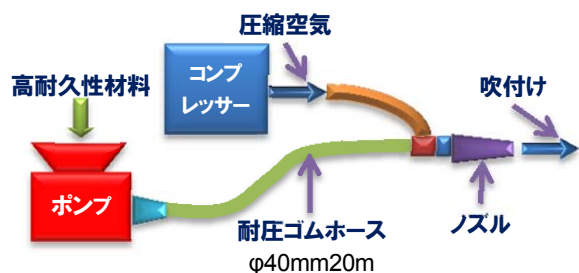


図-4 吹付けシステム概念図

表面をウォータージェットではつりモルタル分を除去し、骨材を露出させた。

吹付け施工に使用した機材を表-6 に示す。使用した機材は通常断面修復工法の吹付け施工に用いる一般的なものとし、市中で調達できるものとした。モルタルポンプはスクイズタイプとし、吐出量を 0.9m³/h とした。

吹付けシステムの概念図を図-4 に示す。高耐久性材料をミキサで練り混ぜたのち、ポンプに投入し耐圧ゴムホース内を圧送する。その後、ノズル先端のゴム管手前から圧縮空気を送入し、モルタルをほぐしながら吹付けを実施する。なお、吹付けノズルは写真-3 に示すリングガンを用いた。

3.3 試験項目

試験項目を表-7 に示す。試験は施工性の確認として吹付け性状試験と硬化物性試験を実施した。2面せん断試験、促進中性化試験および凍結融解試験は高耐久性材料をミキサで練り混ぜたのち、吹付けを行わず直接試験体を作製した。なお、2面せん断試験体は予め試験体長の半分を普通コンクリートで作成し端部目粗し処置を実施後、高耐久性材料を打設した。

4. 試験結果

4.1 吹付け性状

吹付け性状試験結果を表-8 に示す。吹付けにおいて、脈動およびダレ、はく離等は認められず、写真-4 に示す通り、閉塞等のトラブルも発生せず、定常的に吹付け施工が実施できた。しかし、今回の圧送距離は 20m と比較的短いため実際の施工を考慮して、今後は圧送距離を延長し施工能力及び吹付け性能を確認する必要がある。また、写真-5 に示すように吹付け厚さは壁面で 120mm 程度、天井面で 110mm 程度と当初目標としていた 100mm を充分満足する結果となった。なお、天井面の吹付けは 3 層程度に分けて吹付けを実施した。

吹付け試験体表面仕上げ状況を写真-6 に示す。吹付け後、可使時間が 1 時間程度あるので、金こてを用いて吹付け面を平滑に均し仕上げることができることを確認できた。天井面においても同様に仕上げ作業が行えることが確認できた。また、写真-7 に示す通り金こてで仕

表-8 吹付け性状試験結果

場所	壁面	天井面
試験項目		
脈動	無	無
付着状態 (ダレ, はく離)	良	良
吹付け厚さ	100mm 以上	100mm 以上

上げた表面は材齢 28 日においてひび割れが発生しないことを確認できた。これは配合選定において初期ひび割れを抑制することが、長期においてもひび割れ発生に影響しているものと考えられる。

充填性試験として写真-8 に示すように 500mm×500mm×50mm の箱に D19 鉄筋を 100mm ピッチの格子状に配置した試験体を天井面に設置し吹付け実験を行い、高耐久性材料の充填状況を確認した。その結果、写真-9 に示す通り、鉄筋裏まで十分に充填していることが確認できた。これらより、高耐久性材料は吹付け施工に適している材料であると考えられる。

4.2 硬化物性

1) 圧縮強度

図-5 に材齢 28 日における圧縮強度結果を示す。圧縮強度は吹付ける前に型枠に採取し標準養生を行った試験

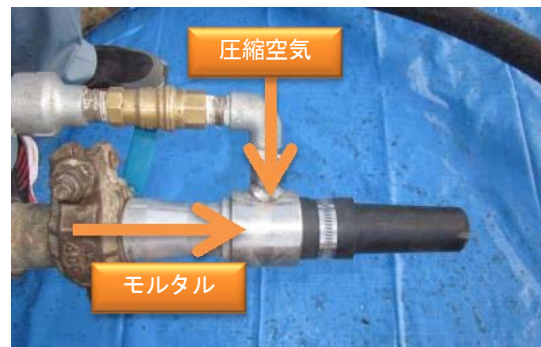


写真-3 吹付けノズルリングガン

表-7 試験項目

	試験項目	備考
吹 付 性 状	圧送性	目視 (脈動, 閉塞, 圧力計)
	付着性能	目視 (ダレ, はく離)
	吹付け厚さ	計測 (曲尺)
	ひび割れ発生の観察	目視およびクラックスケール (材齢 28 日)
	充填性試験	供試体を切断して目視観察する。(材齢 28 日)
硬 化 物 性	圧縮強度試験	JIS A 1108 JSCE-F 561-2005 標準水中養生 φ50×100mm (材齢 28 日) ・コア試験体気中養生 φ50×100mm (材齢 28 日)
	2面せん断試験	JSCE-G 553-2013
	付着強度試験	建研式引張試験機
	促進中性化試験	JIS A 1153 JSCE-F 562-2005
	凍結融解試験	JIS A 1148 JSCE-F 562-2005

体と写真-6 に示すコア箱で採取し気中養生を行った後所定の材齢でコア抜きを行った試験体で実施した。材齢7日および28日の圧縮強度はコア試験体および標準養生試験体とも80N/mm² および100N/mm²程度であった。吹き付ける事による圧縮強度の顕著な差は認められず、高耐久性材料は高強度材料であることが確認できた。

2) 2面せん断および付着強度

表-9 に2面せん断および付着強度試験結果を示す。見掛けの2面せん断および付着強度は16.1N/mm²および3.05 N/mm²であった。両試験とも写真-10, 11 に示す通り、破壊はすべて母材破壊であり、高耐久性材料と母材



写真-4 吹付け状況



写真-5 天井面吹付け厚さ検尺状況



写真-6 吹付け試験体表面仕上げ状況



写真-7 材齢28日表面状況

の界面における破壊は認められなかった。この試験結果より、高耐久性材料と母材との付着性能は良好であると考える。

3) 促進中性化

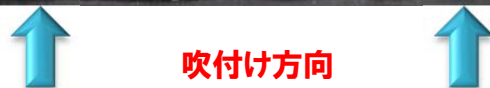
写真-12 に促進試験開始3か月後の中性化状況を示す。どの試験体においても試験断面がすべて赤色に着色しており、中性化は認められなかった。なお、試験は継続中であり、促進試験材齢1年まで実施する予定である。

4) 凍結融解抵抗性

図-6 に凍結融解抵抗性試験結果を示す。凍結融解サイクル数1000回においても相対動弾性係数の低下は認められなかった。また、質量減少率においても低下は認められなかった。今回試験を実施した高耐久性材料は圧縮強度が100N/mm²以上発現していることから、マトリ



写真-8 吹付け状況



吹付け方向

写真-9 鉄筋裏充填状況

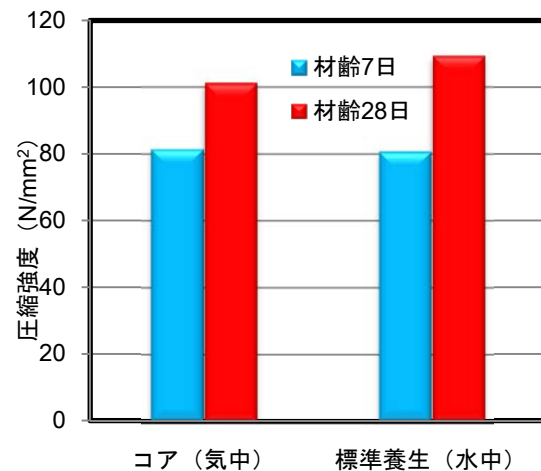


図-5 圧縮強度試験結果

表-9 2面せん断および付着強度試験結果

2面せん断		付着強度	
せん断強度 (N/mm ²)	破壊場所	付着強度 (N/mm ²)	破壊場所
16.1	母材	3.05	母材

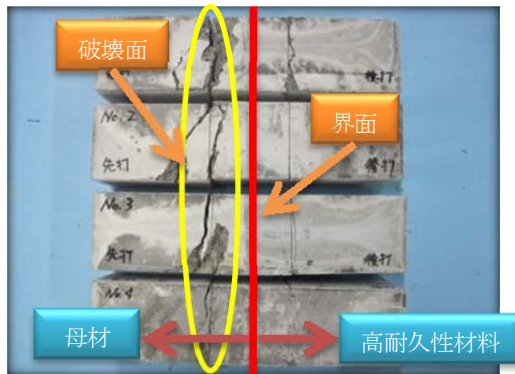


写真-10 2面せん断試験状況



写真-11 付着試験状況



写真-12 促進中性化試験状況

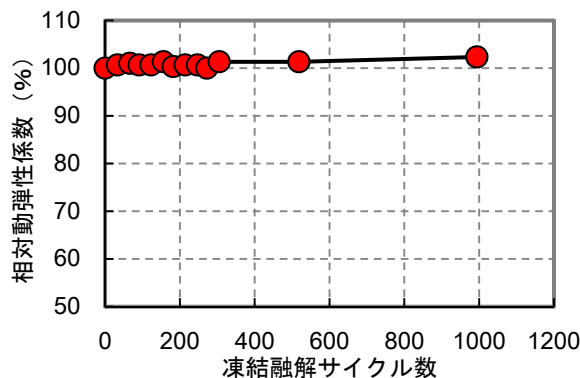


図-6 凍結融解抵抗性試験

ックスの構造が非常に緻密であることが推測される。それにより、二酸化炭素や水等の劣化因子が内部に侵入しないため、高い耐久性を有していると考ええる。また、吹き付ける事により、圧縮強度の顕著な低下は認められないため、吹付けた部材においても高い耐久性を有していると考ええる。今後は塩化物イオンの抵抗性についても検討を行う予定である。

5. まとめ

- (1) 収縮低減剤を添加することで、フレッシュ性状が改善し施工性が向上した。また、特殊混和剤を添加することで、長さ変化は10%程度に低減した。
- (2) 使用する繊維はφ0.66mm、長さ30mmのPVA繊維の採用により、圧縮強度100N/mm²以上および高い曲げ靱性が得られることが確認できた。
- (3) 吹付け厚さは壁面で120mm程度、天井面で110mm程度であり、脈動、ダレ、はく離および閉塞等のトラブルは認められず、安定的に吹付けが行えた。
- (4) 吹付け後、可使時間が1時間程度あるので、金こてを用いて吹付け面を平滑に均し仕上げられることが確認できた。
- (5) 金こてで仕上げた表面は材齢28日においてひび割れが発生していないことが確認できた。
- (6) 高耐久性材料は、鉄筋裏まで十分に充填していることが確認できた。
- (7) 材齢28日の圧縮強度はコア試験体および標準養生試験体とも100N/mm²程度であった。
- (8) 高耐久性材料と母材との付着性能は良好であると考ええる。
- (9) 高耐久性材料は高い耐久性を有していると考ええる。

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】，コンクリートライブラリー123，2005.7
- 2) 宮川豊章ほか：コンクリート補修・補強ハンドブック，朝倉書店，pp425-430，2011.6
- 3) 石関嘉一ほか：「スリムクリート®」の港湾構造物リニューアル工事への適用，大林組技術研究所報，No.75，2011.11
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.10，2012.3
- 5) 平野義信ほか：アルミナセメントーポルトランドセメントー無水セッコウ系セルフレベリング材の長さ変化，セメント・コンクリート論文集，No.58，pp.81-86，2005.2