

高強度かつ高耐久性のセメント系補修・補強材料 「タフショットクリート®」

川西 貴士 石関 嘉一
平田 隆祥 富井 孝喜
(本社土木本部)

Development of the “Tough-Shotcrete®” Cement-Based Repair and Reinforcement Material with High Compressive Strength and High Durability

Takashi Kawanishi Yoshikazu Ishizeki
Takayoshi Hirata Takayoshi Tomii

Abstract

To efficiently maintain large-scale social infrastructure stock that was developed and built during the period of high economic growth, repair and retrofit materials that have high durability and can reduce life cycle cost are required. Accordingly, the “Tough-shotcrete®” non-polymer cement-based repair and reinforcement material was developed. It is characterized by high strength and durability. In experimental confirmation of the quality of this material, we established that (1) the compressive strength of the material is secured at 100 N/mm² or more, (2) it has high durability against neutralization, chloride penetration, and freeze-thawing action, and (3) it has explosive spalling resistance against the ISO standard heating curve. In addition, it was confirmed that this material could be applied to repair works on the existing structures.

概要

高度経済成長期に整備・建設された大規模な社会基盤ストックを維持していくためには、効率的な維持管理が必要となる。そのため、構造物の補修や補強においては、耐久性が高く、ライフサイクルコストを低減できる材料が求められている。そこで、ポリマーを添加することなく、高強度で高耐久なセメント系繊維補強材料「タフショットクリート®」を開発した。この材料の品質確認実験を行った結果、次のことがわかった。(1) 圧縮強度 100N/mm²以上確保できる。(2) 中性化、塩分浸透、凍結融解作用に対して高い耐久性を有する。(3) ISO標準加熱に対する爆裂抵抗性を有する。また、この材料を実際の構造物の補修に適用した結果、スラブ下面や壁面の吹付け断面修復に適用できることが分かった。

1. はじめに

我が国の社会基盤ストックは、高度経済成長期に整備・建設されたものが多く、今後10~20年の間に一斉に建設から50年を超えるため、大規模な補修や補強を必要とする構造物が増大している¹⁾。社会基盤ストックを維持していくためには、効率的な維持管理が必要となる。そのため、構造物の補修や補強においては、耐久性が高く、ライフサイクルコスト(以下、LCCと呼称)を低減できる材料が求められている。

劣化したコンクリート構造物の部分断面修復用の材料として、躯体との付着性の向上や曲げ強度および引張強度の向上の観点から、ポリマーを混入したセメントモルタル(以下、PCMと呼称)が一般に使用されており、近年施工実績が増加している²⁾。しかし、PCMはポリマーが混入されているため、電気抵抗が高く、ポリマーが混入されていない普通のコンクリートとの間の電位差が増大する。そのため、特に塩害や中性化による劣化の起こりや

すい海岸などの特殊な環境下では、断面修復部の周辺にマクロセル腐食による再劣化が発生する可能性があることが指摘されている³⁾。

また、海岸の構造物は、PCMを用いて劣化部の断面修復を行った後、塩分浸透を防止するために、表面被覆工として塗装する場合が多い⁴⁾。しかし、表面被覆工は、有機系の材料を使用することが多いため、比較的劣化が早く、10年程度で再塗装を施す必要があり、足場設置費等も含めるとLCCが増加する。また、PCM自体の耐用年数も30年程度と比較的短い。

このような背景から、構造物の劣化部の補修・補強材料として、ポリマーの添加されていない高耐久な補修・補強材料が求められている。このニーズに応えるべく、ノンポリマーで、従来のPCMよりも高強度かつ高耐久性(圧縮強度100N/mm²以上、耐用年数50年以上)のセメント系繊維補強材料「タフショットクリート®」を開発した。従来のPCMと比較してコストは同等で、優れた性能を有する材料であり、部材の厚さを低減できるとともに、LCC

も低減でき、吹付け・左官の両方に使用できる(Table 1, Fig. 1)。本稿では、このタフショットクリートの概要、品質確認実験結果および施工事例について報告する。

2. タフショットクリートの概要

2.1 タフショットクリートの特長

1) 一般のPCMは、圧縮強度が40N/mm²程度であるのに対し、タフショットクリートは、長期的に100N/mm²以上の圧縮強度を確保できる材料を目指した。高強度の材料とすることで、一般のPCMより小断面で同じ荷重を負担することができ、部材の厚さを低減が可能となる。

2) 一般のPCMの耐用年数は30年程度であるが、タフショットクリートは50年以上の耐用年数の確保を目標とした。そのために、強度を高め、組織を緻密化するとともに、二酸化炭素、塩分および水等を浸透しにくくし、中性化、塩害および凍害に対して高い抵抗性を付与できるよう配(調)合または構成材料を調整した。高い耐久性を付与することにより、LCCの低減を可能とした。

3) コンクリート構造物の補修・補強を行う場合、従来は、施工規模の大小に応じて、吹付け工法と左官工法とを使い分けていた。そのため、それぞれの施工方法に応じて別々の種類のPCMを使う必要があり、作業が煩雑になりがちであった。そこで、チキソトロピー性を改善するとともに、練混ぜ水量を調整することで、吹付け工法と左官工法のどちらの工法にも使用できるよう、構成材料および配(調)合を調整した。建築構造物など比較的狭い場所での施工から、栈橋の補修など土木構造物の広範囲の施工に至るまで、一種類の材料で対応することができるようにした。

4) 吹き付けた後でも、容易にこて仕上げを施すことができ、表面を平滑に処理できるように調整した。高強度の材料とすることで、付着性が高くなり、厚付けが可能となり、吹付け回数の低減により工期短縮を目指した。

2.2 材料の構成

タフショットクリートの結合材には、高強度用の特殊セメント系材料を使用することとした。補強用の有機短繊維は、ビニロン短繊維、ナイロン短繊維あるいはポリプロピレン短繊維を混入することとした。曲げ靱性の向上、ひび割れ低減および耐火性の付与など、目的に応じて補強用の有機短繊維を使用した。現場での生産性を向上させるために、荷姿は混和剤等を内添した25kgのプレミックスタイプの袋体とした。

2.3 吹付け方法

吹付けに使用する機械は、Photo 1およびPhoto 2に示すとおり、汎用のモルタルミキサ、ホッパー、スクイズポンプおよびコンプレッサーを使用したシステムとした。

Table 1 一般のPCMとの性能比較
Comparison of Performance with General PCM

項目	一般のPCM	タフショットクリート
圧縮強度	40N/mm ²	100N/mm ²
同じかぶりにおける耐用年数	30年	50年
1回の施工で可能な吹付け厚さ	20mm	40mm

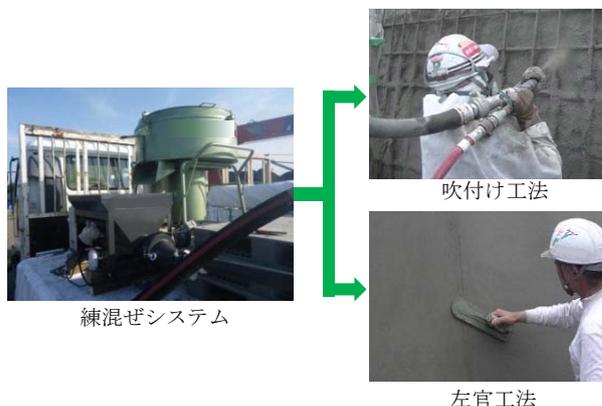


Fig. 1 吹付け工法・左官工法併用のイメージ
Image of Shotcrete and Plastering Method



Photo 1 モルタルミキサおよびホッパー
Mortar Mixer and Hopper



Photo 2 スクイズポンプ
Squeeze Pump

また、延長の長い工事や施工範囲の広い工事に対応するために、容易に吹付け機械を移動することができるように、機械を構成した。Fig. 2に示すように、これらの使用機械をトラックへ積載することも可能とした。

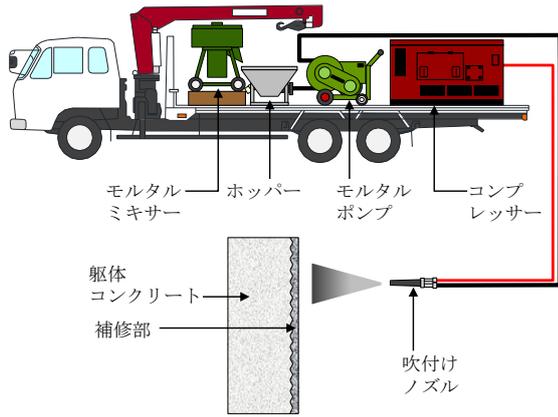


Fig. 2 車載型の吹付けシステム
Mobile System of Shotcrete



Photo 3 モルタルの練混ぜ状況
Mixing of Mortar

3. 品質の確認実験

3.1 フレッシュモルタルの品質確認結果

2章で示した材料を用いて品質試験を行った。練混ぜの状況をPhoto 3に示す。圧送性、吹付け性や仕上げの施工性の観点からチキソトロピー性を高めてある。モルタルの練混ぜ方法は、プレミックス粉体と練混ぜ水をモルタルミキサに投入して3分間練り混ぜた後、ビニロン短繊維を投入し、さらに1分間練り混ぜた。練り上がったフレッシュモルタルの品質は、JIS A 1171に準拠し、小型のスランプコーンを用いたスランプ試験により確認した。スランプ試験の状況をPhoto 4に示す。スランプは45mmであった。

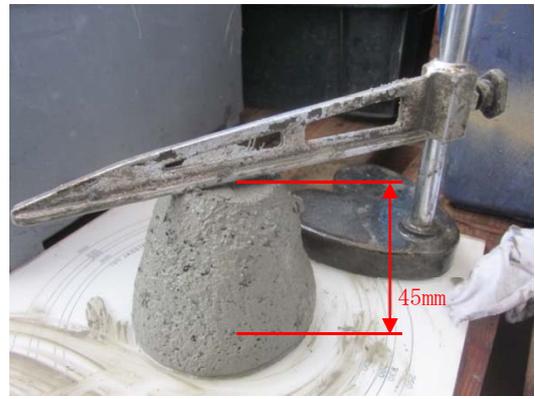


Photo 4 スランプ試験の状況
Test for Slump

3.2 硬化モルタルの品質確認結果

硬化後のモルタルの品質として、各種強度試験結果、中性化に対する抵抗性、遮塩性および凍結融解抵抗性について確認した。実験結果を以下に示す。

標準養生における材齢28日における各種強度試験結果をTable 2に示す。また、圧縮強度については、練上り温度5°Cの環境下においても試験を行っており、材齢91日で圧縮強度100N/mm²が確保できることを別途確認した。

中性化に対する抵抗性は、促進中性化試験方法であるJIS A 1153に準拠した試験により確認した。温度20°C、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%の環境下で1年間促進した結果、紫色を呈していない部分はほとんど認められず、中性化はほとんど進行しないことを確認した。中性化深さの状況をPhoto 5に示す。

遮塩性は、JSCE-G 572に準拠した浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験により確認した。温度20°Cで濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に試験体を浸せきし、浸せき期間6か月および12か月の段階で、塩化物イオン濃度をJSCE-G 574に準拠したEPMA法により測定した。EPMA法より求めた塩化物イオンの濃度分布および見掛けの拡散係数の算出結果をFig. 3に示す。浸せき期間12か月の結果から、見掛けの拡

Table 2 各種強度試験結果
Results of Various Strength Tests

項目	単位	試験値	試験規格
圧縮強度	N/mm ²	127	JIS A 1108
静弾性係数	N/mm ²	3.6×10 ⁴	JIS A 1149
曲げ強度	N/mm ²	10.7	JSCE-G 552
割裂引張強度	N/mm ²	7.6	JIS A 1113
付着強度	N/mm ²	2.4	JSCE-K 561

※1 試験材齢28日（標準養生）

※2 ビニロン短繊維を使用

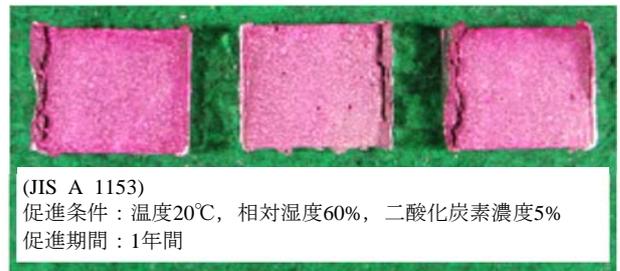


Photo 5 促進中性化試験結果
Result of Accelerated Carbonation Test

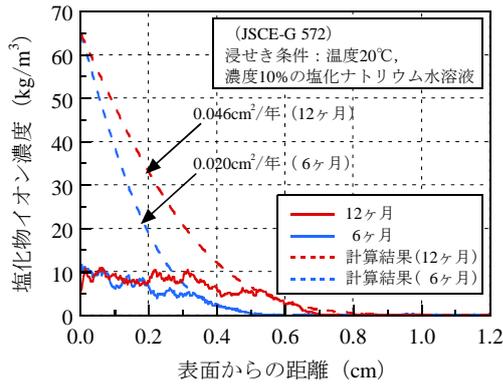


Fig. 3 塩分浸せき試験結果
Result of Test for Chloride Ion by Submergence in Salt Water

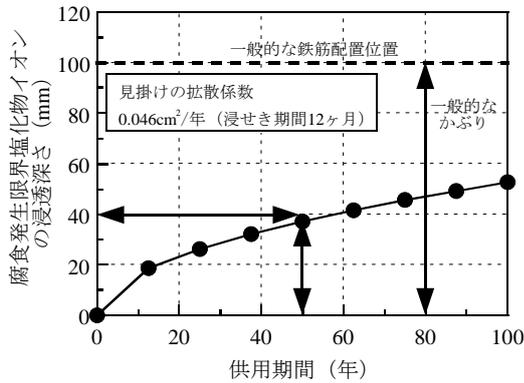


Fig. 4 塩分浸せき試験結果
Result of Penetration Depth of Chloride Ion on Threshold Value of Corrosion

散係数は $0.046\text{cm}^2/\text{年}$ であった。鋼材の塩化物イオンによる腐食発生限界濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合の供用期間と塩化物イオンの浸透深さの関係をFig. 4に示す。かぶり40mmで耐用年数50年を確保できることを確認した。

凍結融解抵抗性は、JIS A 1148に準拠した凍結融解試験のA法により確認した。凍結融解試験結果をFig. 5に示す。凍結融解サイクル1000回の段階でも相対動弾性係数は低下せず100%を維持しており、高い凍結融解抵抗性を有する材料であることを確認した。

3.3 耐火性の確認結果

建築分野への適用を想定して、耐火性の確認を行った。縦1100mm×横1100mm×厚さ120mmのベースの試験体の表面に、タフショットクリートを厚さ30mm吹き付けた。ベース試験体の表面にはアンカーを設置し、剥落防止用の金網を設置した。爆裂防止用として、ナイロン繊維(NYと略す)を容積比で0.2~0.5%混入した。繊維の混入率毎に断面を4分割して吹き付けた。

耐火試験には水平炉を使用し、試験体表面の縦900mm×横900mmの範囲を加熱した。建築分野へ適用を想定し、加熱曲線はISO標準曲線とし、加熱時間は180分間とした。試験の結果、表面に爆裂は発生しなかった。加熱後の試験体表面の状況をPhoto 6に示す。ナイロン繊維

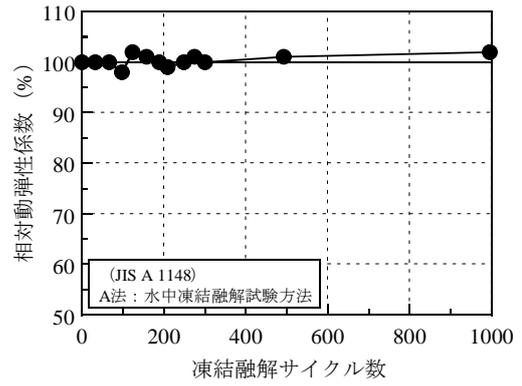


Fig. 5 凍結融解試験結果
Result of Test for Resistance to Freezing and Thawing

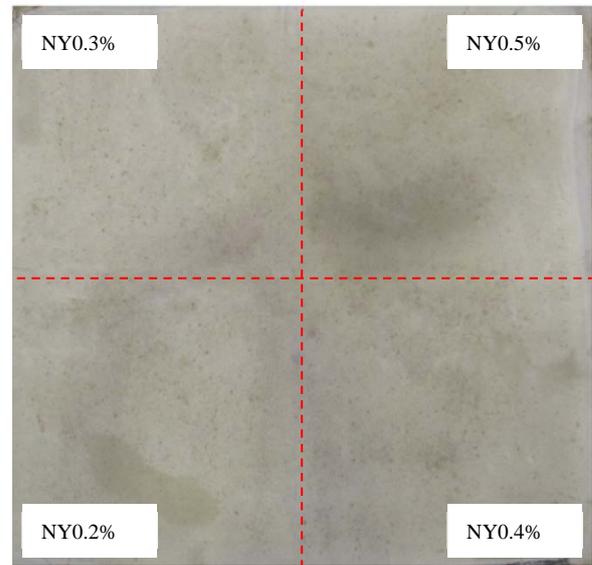


Photo 6 耐火試験後の試験体表面の状況
Situation of Surface of Specimen after Fire Resistance Test

を0.2%以上混入することで十分な爆裂抵抗性を確保できることを確認した。

4. 実施工への適用結果

4.1 標準施工手順

タフショットクリートによる補修は、標準的には以下の手順で行う。最初にテストハンマー等により劣化範囲を調査し、浮きや剥離・剥落の認められる部位や塩分が浸透したコンクリートをすべて除去する。除去後、吹付け面に微粉等が残らないよう圧縮空気等によりきれいに掃除し、鉄筋の断面が腐食などで欠損している場合は代替鉄筋で補強を行い、Photo 7に示すように、鉄筋に防錆剤を塗布する。次にPhoto 8に示すように、吹付け面にはプライマーを塗布する。吹付け機械の準備をした後、モルタルの練混ぜを行い、吹付けを行う。吹付け完了後、棧木や定規等で粗仕上げを行い、最後に金ごてにより平滑に仕上げ、十分硬化した後、養生剤を塗布する。



Photo 7 防錆剤の塗布状況
Coating of Anti-Corrosive Agent



Photo 10 吹付け前の状況(床版下面)
Situation before Shotcrete (Slab Undersurface)



Photo 8 プライマーの塗布状況
Coating of Primer



Photo 11 吹付けの状況(床版下面)
Situation of Shotcrete (Slab Undersurface)

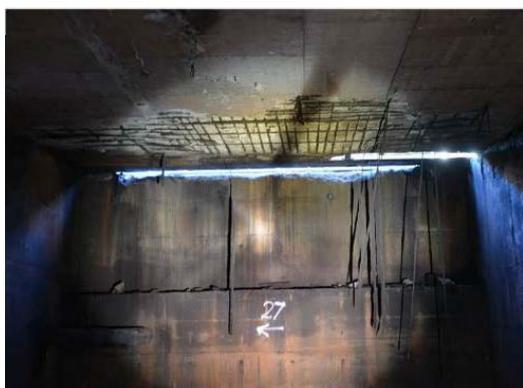


Photo 9 栈橋のスラブ下面の劣化状況
Deterioration of Slab Undersurface for Pier



Photo 12 金ごて仕上げの状況(床版下面)
Situation of Finishing using Metal Trowel
(Slab Undersurface)

4.2 栈橋構造物の床版下面への適用例

海岸線に構築されている大型船が接岸する栈橋構造物が、塩害により著しく劣化していた。この栈橋構造物は、鋼管杭を基礎にしたSRC造の梁上部にRC床版を設置した構造で建設から約45年が経過し、梁や床版のかぶり部分のコンクリートの一部が剥離・剥落している状態であった。補修にあたり、耐久性の高い材料による補修が求められ、本工法が採用された。劣化の状況をPhoto 9に示す。事前に床版断面の塩化物含有量を調査し、塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以上に達する高濃度の塩分浸透部分を除去した。腐食により断面が欠損した鉄筋は交換し、露出した鉄筋全体に防錆材を塗布した。

床版下面の施工状況をPhoto 10～Photo 12に示す。断面修復の厚さは130mm程度であった。1層あたりの吹付け厚さは40mm程度とし、4層目の吹付けが完了した後に仕上げを行った。圧送距離は約40mであり、 $\phi 50\text{mm}$ の耐圧ホースとフレキシブルホースを繋いで使用した。施工速度は約 $0.3\sim 0.5\text{m}^3/\text{h}$ であった。水結合材比が30%と小さく、高粘性の材料であるが、ポンプの圧力は平均で 1.0MPa 程度で圧送でき、施工の状況は良好であった。夏季と冬季の両方施工を行ったが、圧縮強度はいずれも材齢91日で $100\text{N}/\text{mm}^2$ を満足した。計画通りの施工ができ、目標とする性能も満足できた。



Photo 13 材料貯蔵設備の壁面の劣化状況
Deterioration of Wall of Material Storage Facility



Photo 15 吹付けの状況(壁面)
Situation of Shotcrete (Wall)



Photo 14 吹付け前の状況(壁面)
Situation before Shotcrete (Wall)



Photo 16 金ごて仕上げの状況(壁面)
Situation of Finishing using Metal Trowel (Wall)

4.3 材料貯蔵設備の壁部材への適用例

鉱石等を保管するRC造の貯蔵設備の壁面が、大量の鉱石等を投入する際の衝撃や摩耗等により、部材にひび割れを生じ、かぶり部分の剥離等が発生し、さらに鋼材腐食により剥落が生じていた。これまでは、鉄板と普通のコンクリートの増厚により補修していたが、鉄板の摩耗や剥がれによる再劣化が発生した。補修にあたり、長期耐久性と摩耗に強い材料が求められたことと、短い工期の中で施工を完了する必要があり、本工法が採用された。劣化の状況をPhoto 13に示す。浮きが認められるコンクリートをすべてはつり取った後、腐食により断面が欠損した鉄筋は交換し、防錆剤を塗布した。

壁面の施工状況をPhoto 14～Photo 16に示す。断面修復の厚さは80mm程度であり、1層あたりの吹付け厚さは50mm程度とした。圧送距離は約25mで、φ50mmの耐圧ホースとフレキシブルホースを繋いで使用した。施工速度は0.8m³/h程度であり、ポンプの圧力は1.0MPa程度であった。壁面への吹付けにおいても施工の状況は良好であることを確認した。所要の性能を満足することができ、工期内に施工を完了することができた。

5. まとめ

ポリマーを添加することなく、100N/mm²以上の圧縮強度を有し、耐用年数50年以上確保できる高強度で長期

耐久性に優れた補修・補強材料「タフショットクリート®」を開発した。この工法を用いることで、ライフサイクルコストを低減でき、生産性の向上を図ることが期待できる。今後、増大するコンクリート構造物のリニューアル工事に積極的に適用、展開し、社会インフラ等の効率的な維持管理に貢献していく予定である。

謝辞

共同で開発を進めるにあたり、材料の選定、材料の製造・供給、データの測定等、多大な協力をいただいた共同開発者である宇部興産株式会社の関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書，2016.7
- 2) 宮川豊章，他：コンクリート補修・補強ハンドブック，朝倉書院，pp.425-430，2011.6
- 3) 渡部正，他：部分断面修復工法で補修した鉄筋コンクリート部材の鉄筋腐食性状に関する研究，土木学会論文集，E2(材料・コンクリート構造)，Vol. 69，No. 3，pp.281-294，2013.7
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'16 [基礎編]，2016.2