

再劣化防止に向けた補修補強対策の適用性評価技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平31～令3

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：新田弘之、富山禎仁、古賀裕久、
片平博、加藤祐哉

【要旨】

コンクリート構造物の補修に用いる吹付け工法は、広範囲の補修を要する際に効率的な施工を期待できるが、現場条件に適した施工法・材料の選定や品質確保に必要な条件、品質評価手法が十分明確ではない。また、鋼構造物の補修に用いる防食塗料は、十分な素地調整ができないような場合を想定した新たな材料が複数開発されているが、現場適用可否の判断のための知見が十分ではない。これらの課題を受け、補修材料・工法の品質評価項目を明確化し、適切な評価試験方法の構築と留意点の整理を目標に研究を実施した。吹付け工法については、従来の評価手法の適用性や、特有の留意点などが明らかとなった。また、鋼材補修用材料については評価試験の基礎となる腐食鋼板の作製方法等に関する知見を得るとともに、材料の適用条件や施工上の留意点を整理した。
キーワード：補修材料、補修工法、吹付け工法、鋼構造物、腐食、さび、塩分、素地調整、塗装

1. はじめに

コンクリート構造物の補修に用いる吹付け工法は、広範囲の補修を要する際に効率的な施工を期待でき、施工法や材料が複数開発されている。しかし、現場条件に適した施工法や材料の選定手法や品質確保に必要な条件、品質評価項目と評価手法が十分明確にならず、適切に工法や材料が選定されない場合が考えられる。また、鋼構造物の補修に用いる防食塗料については、施工条件が悪く十分な素地調整(さび落とし)ができないような場合でも防食性能を発揮し、再劣化を抑制できる可能性のある新しい材料が複数開発されているが、技術的知見が十分に蓄積されておらず、現場では適用可否の適切な判断ができていないのが現状である。

上記の要因により、補修後、早期に再劣化する場合のあることが問題となっている。本研究では、早期再劣化の防止を目的とし、補修材料や工法の品質評価項目を明確化し、適切な評価試験方法の構築と留意点の整理を実施した。

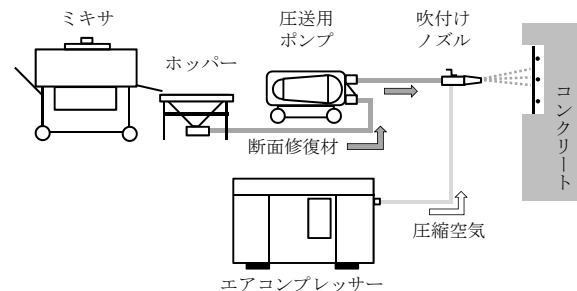


図-1 湿式吹付け工法の例

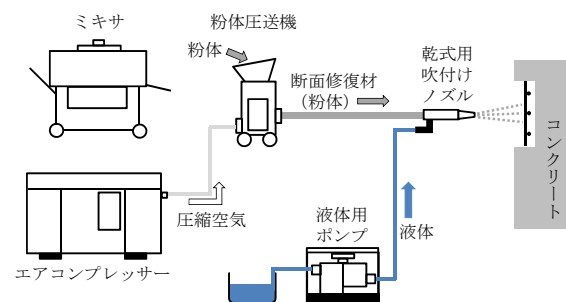


図-2 乾式吹付け工法の例

2. 吹付け工法の品質確保に関する検討

2.1 吹付け工法の概要と種類

塩害や凍害など、劣化したコンクリート構造物を補修する方法の1つに、劣化した部分のコンクリートを除去し、新たに補修材(断面修復材)で充填する断面修復工法がある。断面修復工法は、施工方法によって

左官工法、充填工法、吹付け工法に分類される。広範囲に断面修復を行う場合は、補修材の充填にモルタルを吹き付ける吹付け工法が効率的なため採用されることが多い。吹付け工法は、更にミキサで混合したモルタルをポンプ圧送して吹き付ける「湿式吹付け工法」

表-1 吹付け工法の品質評価項目と検討項目

品質評価項目		求められる品質	検討項目
施工時の品質	・施工性	・適切な施工が可能	品質評価方法
硬化後の断面修復材の品質	・凍結融解性 ・中性化抵抗性 ・塩分浸透抵抗性	・部材コンクリートと同等以上	供試体作製方法 品質評価方法
	・圧縮強度	・養生を終了してよい強度 (10N/mm ² 以上)	供試体作製方法 品質評価方法
付着界面の品質	・付着強度	・密着している (付着強度の平均値 1.5N/mm ² 、最低値 0.75N/mm ² 以上)	供試体作製方法 品質評価方法
施工後の品質	・充填性	・確実に充填されている	品質評価方法

※太字：既往の研究¹⁾で整理した項目

(図-1) と、粉体と液体を個別に圧送しノズル内で混合して吹き付ける「乾式吹付け工法」(図-2) に分類できる。補修材も各工法に応じたものが開発されている。

2.2 吹付け工法の課題

湿式吹付け工法は、施工装置が比較的小規模で済むが、ポンプ圧送に必要な流動性がモルタルに求められることから、モルタルを厚く施工するとだれが生じやすく、1回の施工厚さに限度があり、断面修復の厚さによっては複数回の施工が必要となる。一方、乾式吹付け工法は、粉体と液体を個別に圧送するため、長距離・高位置への圧送が可能で、また、吹付け後のモルタルは比較的硬い状態にできるため、1回の施工厚さを大きく(100~200mm程度)できる長所があるが、施工装置が比較的大規模となる。

このため、現場条件や規模、経済性を考慮して適した工法、材料を選定する必要がある。また、各工法に応じた、品質評価項目や品質確保のための留意点、評価手法などが十分明確になっていないのが現状である。

2.3 吹付け工法の品質評価項目と検討項目

断面修復材に一般的に求められる品質項目は、既往の研究で整理している¹⁾が、主として左官工法を想定して品質項目や評価方法などを検討していた。本研究では、吹付け工法に求められる品質評価項目や評価方法などについて、表-1に示すとおり整理し、検討を行った。ここで、太字は既往の研究で整理した項目で

表-2 検討に用いたモルタルの種類と配合

種類	記号	液体/粉体比 [※] (%)	備考
湿式用	a	17.2	標準配合
	b	14.4	標準配合
乾式用	c	12.1	硬い配合
	d	15.1	軟らかい配合

※湿式用：液体：水、粉体：プレミックス品

乾式用：液体：水+ポリマー、粉体：プレミックス品

ある。施工時、硬化後の断面修復材、付着界面の各品質については、工法や材料が異なっても求められる本質的な品質は不変と考えられる。一方で、施工方法の異なる吹付け工法、特に乾式吹付け工法は左官工法とは特性の異なる材料を用いるため、品質評価手法や供試体の作製方法がそのまま適用できるとは限らないと考えられる。また、左官工法とは異なり、補修面に直接触れずに施工することから、施工後の品質として、確実に充填されていることが求められる²⁾ため、これも検討項目とした。

2.3.1 検討に用いた吹付けモルタル

本研究では、断面修復材(モルタル)は、表-2に示す湿式吹付け工法用(以下、湿式用)と乾式吹付け工法用(以下、乾式用)を用いた。なお、湿式用は、こてを用いた左官工法による施工にも使用できる共用のものも多く、左官用と同様な方法で品質管理ができる可能性が高いことから、代表的な配合aの1種類とした。一方、乾式用は、施工時の品質管理状況に不明なところもあり、施工ができる範囲の品質変動であっても、材料特性が大きく異なることも懸念されたため、標準配合b、硬い配合c、軟らかい配合dの3種類を用いた。

2.4 施工時の品質(施工性)に関する検討

2.4.1 湿式用モルタル

用いた湿式用モルタルは、1回あたりの最大施工厚さが天井面で30mm、垂直面で40mmのものである。また、パンフレット等には、施工に適した流動性となるように標準配合が示されている。ただし、モルタルは現場の気温等によって流動性が変化すると考えられるため、吹付け工法特有の評価方法として、試し吹きを行って吐出状態が正常か目視確認し、施工性に問題が無いかを確認する必要があると考えられる。

本研究では、表-2に示す標準配合の湿式用モルタルaを用いて試し吹きによる吐出状態の確認を行った。その結果、吐出状態は安定し、吹付け後のモルタルは最大施工厚さ以下でだれが生じるような不具合は確認

表-3 湿式用モルタル a のフレッシュ性状

試料 採取位置	モルタル 温度	ミニス ランプ	フロー 値	空気 量
吹付け前	21.9℃	43mm	174mm	4.9%
吹付け後	18.3℃	35mm	170mm	3.3%

できなかった。また、吹付けの前後でフレッシュ性状が変化することが予想されたため、吹付け前と吹付け後の試料でミニスランプ (JIS A 1171) やフロー値 (JIS R 5201)、空気量 (JIS A 1171) を確認した。各フレッシュ性状を表-3 に示すが、吹付け後は、吹付け前よりもミニスランプとフロー値が低下し、流動性が低下する特徴があった。また、空気量も低下した。部材コンクリートに衝突したことで低下したと考えられる。

今回の検討結果より、湿式吹付け工法の施工性は、試し吹きによって吐出状態が正常か、最大施工厚さ以下でだれが生じないかを評価できると考えられる。

2.4.2 乾式用モルタル

乾式用モルタルについても、試し吹きで吐出状態が正常か目視確認し、施工性に問題がないかを評価する必要があると考えられる。なお、用いた乾式用モルタルは、ノズルから吐出された時点で硬質な状態のため、1回あたりの施工厚さが100～200mm程度と大きいが、湿式用モルタルのようにフレッシュ性状試験ができないため、確認しなかった。

パンフレット等には、適した施工性が得られるように標準配合 (液体と粉体の流量比率) が示されている。また、現場の気温等によって施工性が変化すると考えられるため、工法開発者では許容配合範囲を定めている場合がある。

そこで本研究では、表-2 に示す標準配合の乾式用モルタル b を用いて吐出状態の確認を行った。その結果、吐出状態は安定し、吹付け後のモルタルは厚さ 200mm～300mm 程度でもだれや落下は生じなかった。よって、乾式用モルタル b の施工性は良好と評価できた。

次に、施工可能な最も硬い配合 c と軟らかい配合 d を検討した。現場において試し吹きを繰り返した結果、ノズル内で適切にモルタルが混合され、吐出状態が安定する最も硬かった配合 c と、吐出状態が安定し、吹付け後のモルタルにだれが生じなかった最も軟らかかった配合 d は、表-2 に示すとおりであった。これらは許容配合範囲の最大、最小に近い値であり、許容配合範囲は妥当なことを確認した。

乾式吹付け工法の施工性についても、試し吹きに

よってノズル内の混合状況や吐出状態が正常か、本工法の長所である施工厚さ以下でだれが生じないかを評価することで評価できると考えられる。

2.5 硬化後の断面修復材の品質に関する検討

2.5.1 凍結融解抵抗性

(1) 現状と課題

寒冷地で断面修復を行う場合は、断面修復材自体に凍結融解抵抗性が求められる。凍結融解抵抗性を得る方法の1つに適切な量の微細空気泡の確保があるが、湿式吹付け工法は部材コンクリートにモルタルが衝突して空気量が低下するため、微細空気泡に頼らない場合がある。また、乾式吹付け工法は微細空気泡の量を現場で容易に測定することができない。そのため、断面修復材の凍結融解抵抗性はあらかじめ評価しておく必要があると考えられる。

(2) 評価試験方法と供試体作製方法

文献1)では、断面修復材の凍結融解抵抗性は、JIS A 1148 (A 法) で評価することを標準としている。なお、断面修復を行う現場には塩分が供給される環境も想定されること、淡水と比べて塩水はスケーリングを促進させるとの報告³⁾があることから、本研究では JIS A 1148 (A 法) に用いる淡水を濃度 3%の塩水に置き換えた促進試験で、吹付けモルタルの凍結融解抵抗性等を確認した。なお、内部劣化 (相対動弾性係数の低下) に関しては塩水を用いても淡水の結果と大きくは変わらないことが報告されている³⁾。

供試体の作製方法については、吹付け工法の場合、比較的大きなパネル型枠にモルタルを吹き付け、硬化後に所定の寸法の耐久性評価用供試体を切り出す方法 (JSCE-F 562) が標準である。本研究では前述の方法に加え、労力低減を目的に、既製の鋼製型枠 (100mm×100mm×400mmの角柱型枠) に直接吹き付ける方法でも供試体を作製した (配合 a、b のみ)。一般的なモルタルの供試体作製方法では、モルタルを鋼製型枠に詰めて締固めを行うが、吹付け工法を用いる JSCE-F 562 では締固めを行わない。そこで、鋼製型枠に直接吹き付けた場合に、湿式用モルタル a では吹付け後に型枠をゆすって締め固める行為 (タップ) の必要性を確認する目的で、タップ有り無しとの2通りで作製を行った。乾式用モルタルは硬質でタップによる締固めができる状態ではないため、行わなかった。

なお、湿式用モルタルはだれを生じさせないために、パネル型枠等を水平面に設置して下向きに吹付けた。乾式用モルタルは、はね返って一体化できなかったモルタル粒子をできるだけ除去するため、パネル型枠に

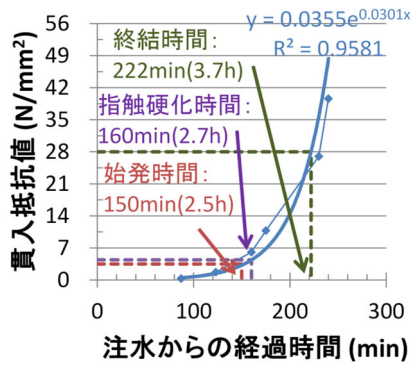
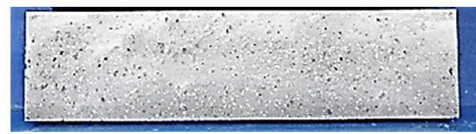


図-3 湿式モルタル a の凝結時間試験結果

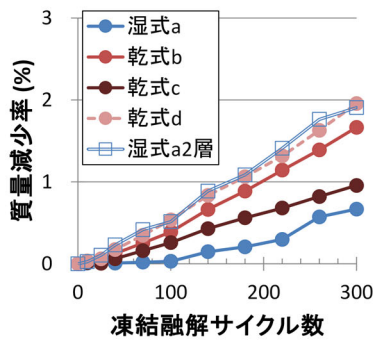


(A) 湿式用モルタル a

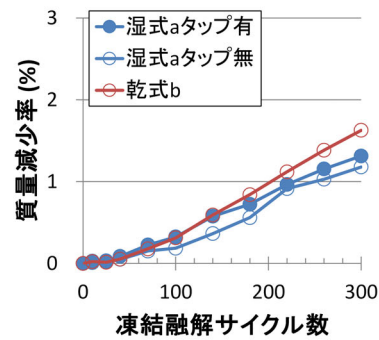


(B) 乾式用モルタル b

写真-1 切り出した角柱供試体 (100mm × 100mm × 400mm)



(A) JSCE-F 562 で作製した供試体



(B) 鋼製型枠に吹き付けて作製した供試体

図-4 塩水を用いた凍結融解試験結果 (質量減少率)

は落下用の穴を設け、鋼製型枠には穴は設けられなかったが、いずれも壁に立てかけて横向きに吹付けた。

また、湿式用モルタルは1回あたりの最大施工厚さが30~40mmのため、複数層施工した場合の凍結融解抵抗性を確認するために、JSCE-F 562の方法で2層構造の供試体を作製した。2層目の吹付けは、製造者の推奨する方法に従い、1層目の表面に指紋が残らない程度に凝結(指触硬化)してから行った。指触硬化時間の判断は、吹付けに熟練した技能者の判断により、注水後160minの時点とした。これは、図-3に示すように、凝結時間試験(JIS A 1147)で測定した始発時間(注水後150min)の10分後で、貫入抵抗値は4.4N/mm²であった。検討ケースを表-4に示す。

(3) 供試体の外観

作製した各供試体の外観を観察すると、いずれの方法においても、はね返ったモルタルによる豆板などの

表-4 塩水を用いた凍結融解試験の検討ケース

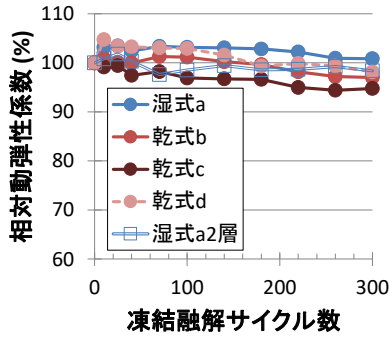
供試体 作製方法	種類	構造	タップの有無		
JSCE-F 562 の方法	湿式用	a	1層		
		a	2層		
	乾式用	b	1層	-	
		c			
鋼製型枠直 接吹付け	湿式用	a	1層		有
	乾式用	b	1層		無

不良箇所は確認されなかった。なお、JSCE-F 562の方法で作製した(切り出した)供試体の例を写真-1に示すが、乾式用モルタルbでは、最大寸法1~5mm程度の小さな空隙が点在している特徴があった。写真には示していないが、cとdも同様であった。湿式用モルタルaにはなかった。また、鋼製型枠に直接吹き付けて作製した供試体の表面には確認できなかった。この特徴は、他の検討に用いた供試体も同様であった。

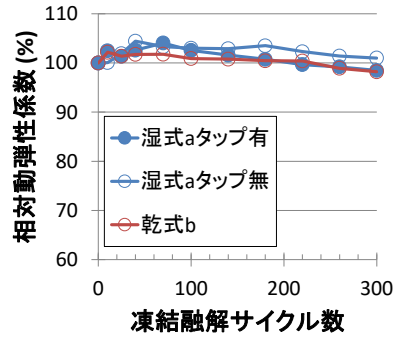
(4) 質量減少率の試験結果

各供試体の凍結融解300サイクルまでの質量減少率を図-4に示す。

湿式用モルタルaの質量減少率は、JSCE-F 562の方法で作製した供試体の方がやや小さかったが、顕著な差ではなく、いずれも1.3%以下と小さかった。乾式用モルタルbについては、供試体の作製方法の違いによる差はほとんどなかった。また、鋼製型枠に直接吹き



(A) JSCE-F 562 で作製した供試体



(B) 鋼製型枠に吹き付けて作製した供試体

図-5 塩水を用いた凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

付けて作製した湿式用モルタル a の供試体では、タップ有と無の差はほとんどなく、タップの必要性はないと考えられる。

2層構造の湿式用モルタル a については、1層構造のものよりも質量減少率が大きいが、外観を観察すると、層間の界面付近のスケーリングの度合いは、界面以外の箇所とほとんど変わらず、界面が弱点とはならなかった。

乾式用モルタルについては、液体/粉体比が大きいほど質量減少率が大きく、スケーリング抵抗性の観点からも許容配合範囲が妥当と確認された。

(5) 相対動弾性係数の試験結果

各供試体の凍結融解 300 サイクルまでの相対動弾性係数を図-5 に示す。いずれの供試体も 300 サイクルの相対動弾性係数は 95% 程度以上であり、凍結融解抵抗性を有すると評価された。乾式モルタルの許容配合範囲も凍結融解抵抗性の観点から、妥当と確認された。

供試体の作製方法の違いや、湿式用モルタル a の 1層・2層の違いについても、試験結果に大きな差はなかった。

(6) まとめ

今回は劣化促進のために塩水で試験を行ったが、いずれの供試体も凍結融解抵抗性を有すると評価された。標準の淡水で試験を行った場合は、凍結融解抵抗性を有することはもちろん、よりスケーリングの少ない結果が得られると考えられ、一般的な凍害環境での耐久性の確認であれば、左官工法と同様、JISA 1148 (A 法) で評価できると考えられる。また、本研究の範囲では、供試体の作製方法はどちらでも良く、タップは必要ない。

2.5.2 中性化抵抗性

(1) 評価試験方法と供試体作製方法

文献 1) では、断面修復材の中性化抵抗性は、JISA

表-5 促進中性化試験の検討ケース

供試体作製方法	種類	タップの有無	
JSCE-F 562 の方法	湿式用	a	-
		b	
	乾式用	c	
		d	
鋼製型枠直接吹付け	湿式用	a	有
		a	無
	乾式用	b	-

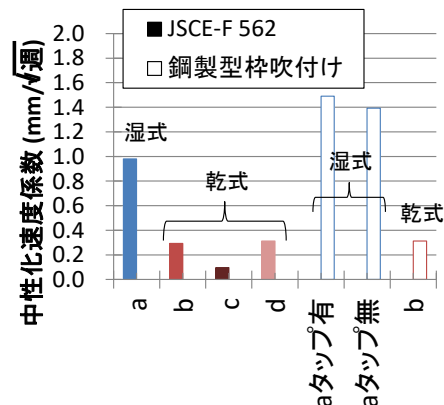


図-6 26 週間の中性化速度係数

1153 で評価することを標準としている。本研究では、この試験法に準拠し、100mm×100mm×400mmの角柱供試体の2側面以外をエポキシ樹脂でシールし、試験開始後1、4、8、13、26週ごとに供試体の中性化深さを測定して中性化速度係数を求め、吹付けモルタルの中性化抵抗性を確認した。

供試体の作製方法と試験ケースは、全て1層構造のみとした他は、2.5.1と同様とした。試験ケースを表-5に示す。

(2) 試験結果

各供試体の26週間の中性化速度係数を図-6に示す。

湿式用モルタル a では、JSCE-F 562 の方法で作製した供試体の方がやや小さかったが、顕著な差ではなく、いずれも $1.5\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$ 以下と小さかった。乾式用モルタル b については、供試体の作製方法の違いによる差はほとんどなかった。また、鋼製型枠に直接吹き付けて作製した湿式用モルタル a の供試体については、タップ有と無の差はほとんどなく、タップの必要性はないと考えられる。

乾式用モルタルについては、液体/粉体比が大きいほど中性化速度係数が大きく、許容配合範囲は中性化抵抗性の観点から妥当と確認された。

(3) まとめ

吹付けモルタルの中性化抵抗性は、左官工法と同様、JISA 1153 で評価できると考えられる。また、本研究の範囲では、供試体の作製方法はどちらでも良く、タップは必要性ない。

2.5.3 塩分浸透抵抗性

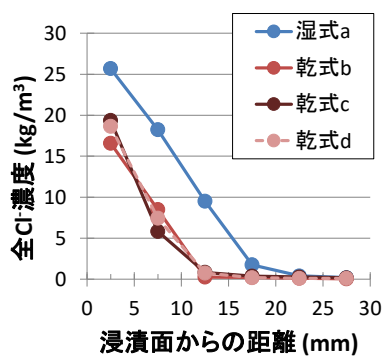
(1) 評価試験方法と供試体作製方法

文献 1) では、断面修復材の塩分浸透抵抗性は、JSCE-G 572 「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの

表-6 塩分浸漬試験の検討ケース

供試体作製方法	種類	タップの有無	
JSCE-F 562の方法	湿式用	a	
	乾式用	b	
		c	
		d	
鋼製型枠直接吹付け	湿式用	a	有
		b	無
	乾式用	a	有
		b	無

見掛けの拡散係数試験方法 (案) 」 (以下、塩分浸漬試験) で評価することを標準としている。本研究では、



(A) JSCE-F 562 で作製した供試体

$\phi 100\text{mm} \times 150\text{mm}$ の円柱供試体の断面 1 面以外をエポキシ樹脂でシールし、濃度 10% の塩水に約 12 ヶ月間浸漬し、浸漬面から厚さ 5mm に切り出した試験片の全塩化物イオン (Cl⁻) 濃度を JISA 1154 の電位差測定法により求めて、吹付けモルタルの塩分浸透抵抗性を確認した。

供試体の作製方法と試験ケースは、2.5.2 と同様とした。試験ケースを表-6 に示す。

(2) 試験結果

各供試体の浸漬面からの距離と全 Cl⁻濃度との関係を図-7 に示す。

湿式用モルタル a では、JSCE-F 562 の方法で作製した供試体の方が、鋼製型枠に直接吹き付けて作製した供試体よりも、やや表面から深い位置への Cl⁻ の侵入が確認されたが、顕著な差ではなかった。乾式用モルタル b についても、供試体の作製方法の違いによる差は顕著でなかった。また、鋼製型枠に直接吹き付けて作製した湿式用モルタル a の供試体については、タップ有と無の差はほとんどなく、タップの必要性はないと考えられる。

乾式用モルタルについては、配合 b、c、d いずれもほとんど変わらず、許容配合範囲は塩分浸透抵抗性の観点から妥当と確認された。

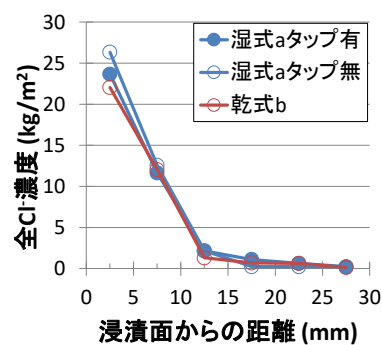
(3) まとめ

吹付けモルタルの塩分浸透抵抗性は、左官工法と同様、JSCE-G 572 で評価できると考えられる。また、本研究の範囲では、供試体の作製方法はどちらでも良く、タップは必要性ない。

2.5.4 圧縮強度

(1) 評価試験方法と供試体作製方法

文献 1) では、断面修復材の圧縮強度は、JIS R 5201 (40×40×160mm の角柱供試体の折片を用いる方法)、JSCE-G 505 ($\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用いる方



(B) 鋼製型枠に吹き付けて作製した供試体

図-7 浸漬面からの距離と全 Cl⁻濃度との関係

法)、JIS A 1108 (φ100×200mm の円柱供試体を用いる方法)のいずれを用いて評価しても良いとしている。なお、得られる圧縮強度は、JIS R 5201、JSCE-G 505、JIS A 1108 の順で値が小さくなる傾向がある^りため、JIS A 1108 で得られる圧縮強度値に換算して評価することを標準としている。本研究では JSCE-G 505 に準拠して試験を行い、文献1)に従って JIS A 1108 で得られる圧縮強度値に換算して圧縮強度の確認を行った。

供試体の作製方法については、吹付けモルタルで標準とされている、パネル型枠に吹き付けて硬化後に所定の寸法の強度評価用供試体を採取する方法 (JSCE-F 561) と、労力低減を目的とした既製の円柱型枠に直接吹き付ける方法の2通りとした。ここで既製の円柱型枠には缶タイプのもを用いたが、吐出力で型枠が飛散しないように固定して供試体を作製した。

(2) 供試体作製方法と圧縮強度の関係

JSCE-F 561 の方法で作製した供試体と、既製の円柱型枠に直接吹き付けて作製した供試体に差が生じるか確認を行った。試験ケースを表-7 に示す。

JSCE-F 561 の方法で作製したコア供試体の外観を写真-2 に示すが、写真-1 と同様に乾式用モルタル b には小さな空隙が点在する特徴があった。一方、円柱型枠に直接吹き付けて作製した供試体の外観写真を写真-3 に示すが、乾式用モルタル b の供試体の一部に、写真に示すような豆板が底部に確認された。この型枠は、内寸φ50×100mm のもので、開口部の大きさに対して深さが大きいことから、はね返りで一体化しなかったモルタル粒子の除去が困難で、底部に残存して不良箇所が生じたと考えられる。湿式用モルタル a の外観には、タップの有無にかかわらず、特に不良箇所は確認されなかった。

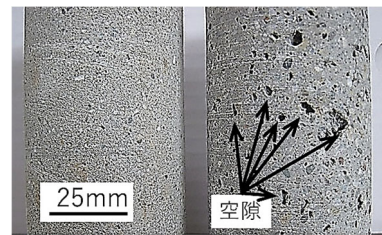
図-8 に、湿式用モルタル a と乾式用モルタル b の供試体作製方法と圧縮強度の関係を示す。なお、円柱型

枠に直接吹き付けて作製した乾式用モルタル b の供試体のみ6本で試験し、他は3本で試験した。

湿式用モルタル a については、円柱型枠に直接吹き

表-7 強度試験の検討ケース

供試体 作製方法	種類		タップの 有無
	種類	種類	
JSCE-F 561 の方法	湿式用	a	—
	乾式用	b	
型枠直接 吹付け	湿式用	a	有
		a	無
	乾式用	b	—



(A) 湿式用 a (B) 乾式用 b

写真-2 コア供試体の外観



(A) 湿式用 a (B) 乾式用 b (豆板の例)

写真-3 円柱型枠に直接吹き付けて作製した供試体の外観

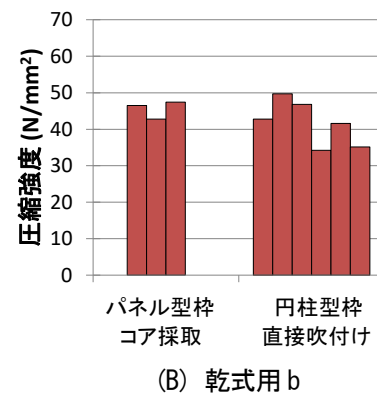
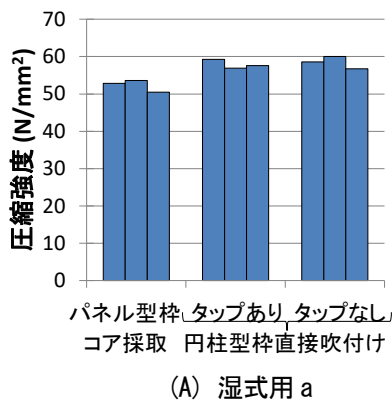


図-8 供試体作製方法と圧縮強度の関係

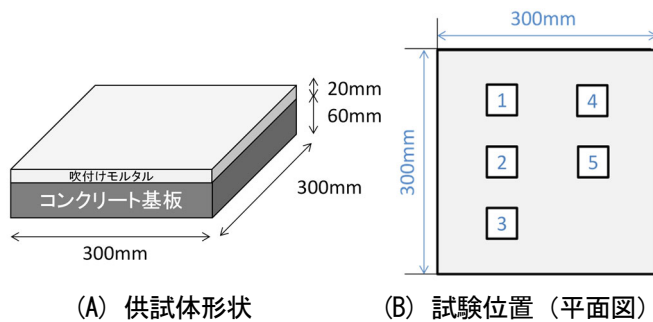


図-9 部材コンクリートとの付着試験用供試体

表-8 部材コンクリートとの付着試験の検討ケース

供試体 作製方法	種類	試験数
左官工法	湿式用	a 5
湿式吹付け工法		a 5
乾式吹付け工法	乾式用	b 5
		c 5
		d 5

付けて作製した供試体の方が圧縮強度の値が若干大きかったが、顕著な差ではなく、供試体間の値のばらつきは、いずれのケースも少なかった。タップ有と無の差はほとんどなく、タップの必要性はないと考えられる。

乾式用モルタルbについては、圧縮強度の値は供試体の作製方法による顕著な差は確認されなかった。また、円柱型枠に直接吹き付けて作製した供試体については、一部の供試体に豆板が確認されたため、供試体間の値にばらつきが見られた。JSCE-F 561の方法で作製した供試体ではあまりばらつきは確認されなかった。

(3) まとめ

吹付けモルタルの圧縮強度は、左官工法と同様、文献1)に示す方法で評価できると考えられる。

また、供試体の作製方法について、本研究の範囲では、乾式用モルタルで供試体を作製する場合は、はね返りで一体化しないモルタル粒子を適切に除去する必要があるが、既製型枠に直接吹き付けて作製する場合、特に開口部に対して深さのある円柱型枠についてはこのようなモルタル粒子の除去が困難なため適さず、JSCE-F 561の方法を用いた方がよいことが分かった。

湿式用モルタルでは、いずれの方法でも試験結果に問題はなく、既製の円柱型枠に直接吹き付けて作製しても良いことが分かった。なお、タップは必要ない。

2.6 付着界面の品質（付着強度）に関する検討

2.6.1 部材コンクリートとの付着強度

(1) 評価試験方法と供試体作製方法

文献1)では、断面修復材の部材コンクリートとの付着強度は、「断面修復材の付着強度用供試体の作り方(案)」¹⁾および「断面修復材の付着強度試験方法(案)」¹⁾によって、供試体の作製と付着強度の評価を行うことを標準としている。そこで、本研究ではこれらの方法に準拠して、供試体作製、付着強度の確認を行った。試験用基板は 300mm×300mm×60mm のコンクリート平板を用い、表面は細骨材の凹凸が確認できる砂目

の状態とした。アクリル樹脂を用いたポリマーディスバージョン系プライマーを 100g/m² 程度塗布し、指触硬化後に吹付けモルタルを各工法で 20mm 厚となるように施工した。付着試験に用いる治具は、40mm×40mm の矩形のものをを用いた。なお、湿式用モルタル a は比較用として左官工法の供試体も作製し、工法が異なる場合の結果の差を確認した。供試体の形状と試験位置を図-9 に、試験ケースを表-8 に示す。

(2) 試験結果

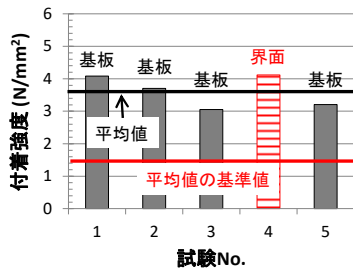
図-10 に各工法、材料の部材コンクリートとの付着試験結果を示す。グラフには、試験時の破壊位置（基板、界面など）を示している。図-13(E)の No.1 は、試験位置の半分が基板破壊でもう半分が界面破壊したことを示している。

文献1)では付着面に求める品質として、5箇所以上の平均付着強度が 1.5N/mm² 以上、最低付着強度を 0.75N/mm² としているが、今回の試験結果はいずれのケースにおいてもこれらを満足していた。また、5種類の供試体において、基板で破壊した箇所の付着強度（基板のプルオフ強度）の最小値は 2.8N/mm² であり、破壊位置によらず十分な付着が得られていたと考えられる。

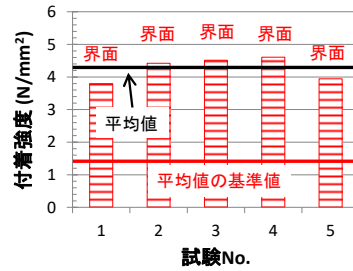
湿式用モルタル a の平均付着強度は、左官工法より湿式吹付け工法の方が若干大きく、値のばらつきも小さく安定していた。破壊位置については、湿式吹付け工法では5箇所全てが界面だったが、前述の理由から、十分な付着が得られていたと考えられる。

乾式用モルタルの平均付着強度は、液体/粉体比が小さいほど大きい傾向を示した。また、前述のとおり付着面に求める品質を全て満足していることから、許容配合範囲は付着強度の観点からも妥当と確認された。えられる。

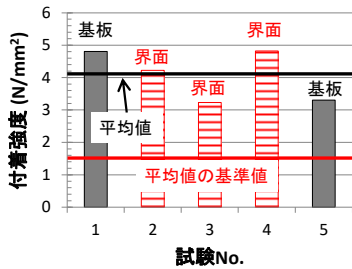
今回の試験結果からは、付着強度の評価に支障が出るような異常は確認されなかったことから、今回用いた試験方法は、吹付け工法においても付着強度の評価



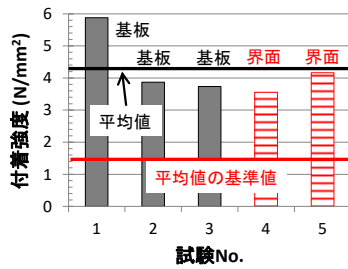
(A) 湿式用 a (左官工法)



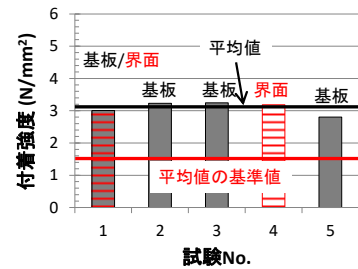
(B) 湿式用 a (湿式吹付け工法)



(C) 乾式用 b (乾式吹付け工法)



(D) 乾式用 c (乾式吹付け工法)



(E) 乾式用 d (乾式吹付け工法)

図-10 各工法、材料の部材コンクリートとの付着試験結果

に利用できると考えられる。

2.6.2 複数層の湿式用モルタル間の付着強度

(1) 重ね吹き方法と付着強度の関係

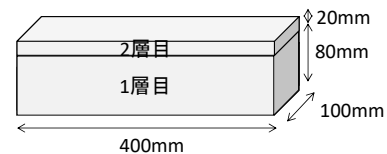
湿式吹付け工法や左官工法に用いるモルタルは、最大施工厚さが小さいことから、断面修復の規模によっては複数層の施工が必要である。

湿式吹付け工法で2層目以降を重ね吹きする場合は、1層目が指触硬化してから行う必要があるが、シートで覆うなどして直射日光や風に直接当てて表面を乾燥させないなど、適切な養生が必要とされている。また、工程の都合で重ね吹きが翌日以降となるなど、1層目表面の硬化が避けられない場合は、プライマーの塗布が推奨される場合がある。

本研究では、重ね吹き方法が適切な場合と不適切な場合について供試体を作製し、モルタル間の付着強度にどのような影響を及ぼすかを確認することとした。なお、乾式吹付け工法については、重ね吹きの必要がないため、検討は行わなかった。

(2) 評価試験方法と供試体作製方法

2層目以降を重ね吹きする場合、1層目の表面をこてを用いて平滑に仕上げることは、一般的に行われない。そこで供試体は、100mm×100mm×400mmの鋼製型枠に1層目を80mm程度吹き付け、表面をそのままの状態として、2層目を20mm程度吹き付けて作製した。2層目の表面については、こてで平滑に仕上げた。付着試験は、2.6.1(1)と同じ方法で行った。供試体の平



(A) 供試体形状



(B) 試験位置 (平面図)

図-11 モルタル同士の付着試験用供試体

表-9 モルタル同士の付着試験の検討ケース

供試体作製方法 (重ね吹き方法)	養生方法	試験数
指触硬化後2層目吹付け	シート養生 (適切養生)	5
翌日2層目吹付け (プライマー有)		5
翌日2層目吹付け (プライマー無)		5
翌日2層目吹付け (プライマー有)	40°C乾燥養生 (不適切養生)	5
翌日2層目吹付け (プライマー無)		5

面図と試験位置を図-11に示す。

試験ケースを表-9に示す。適切な養生を行ったケースでは、指触硬化後、翌日プライマー塗布後、翌日プ

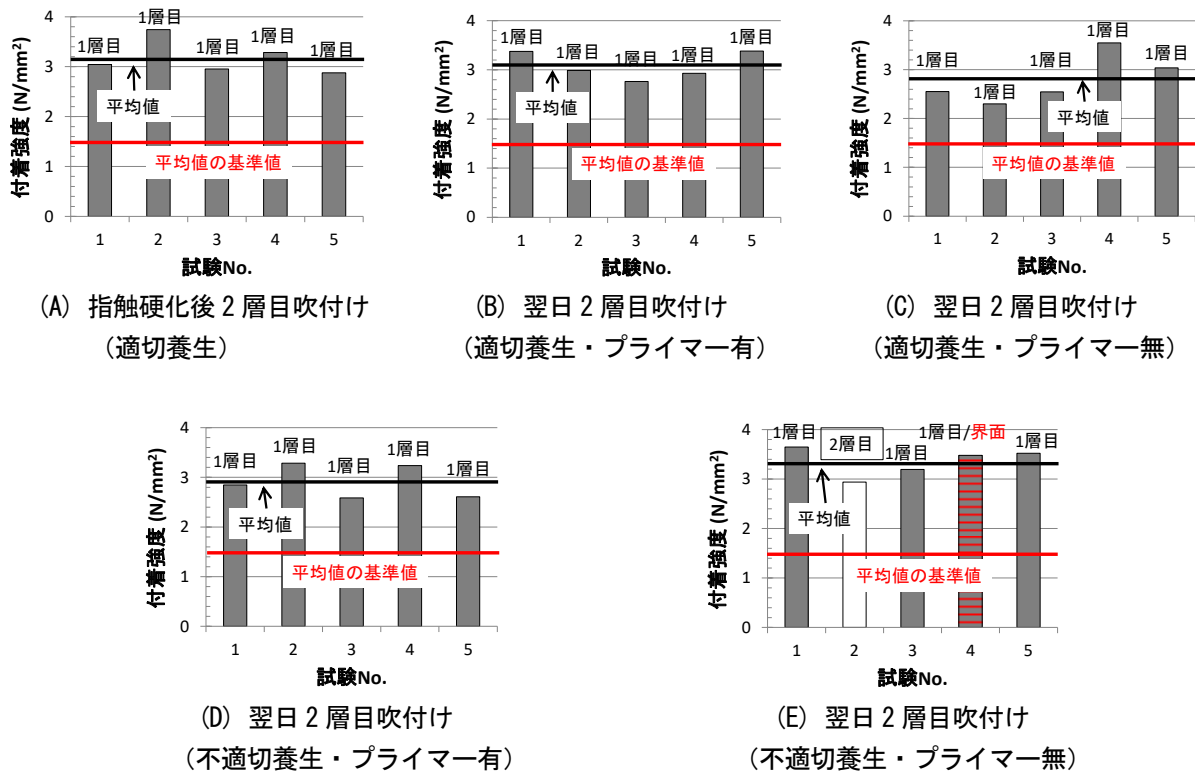


図-12 湿式用モルタル a のモルタル同士の付着試験結果

プライマー未塗布の状態の 3 種類、真夏に表面を乾燥させる不適切な養生を模擬した 40℃恒温室内養生を行ったケースでは、翌日プライマー塗布後、翌日プライマー未塗布の状態の 2 種類、計 5 種類のケースで重ね吹きを行った供試体を作製した。

(3) 試験結果

図-12 に湿式用モルタル a のモルタル同士の付着試験結果を示す。グラフには、試験時の破壊位置 (1 層目、界面) を示している。図-12 (E) のみ、養生方法が不適切でかつプライマー塗布もない供試体では、一部に 2 層目の位置で破壊した箇所、半分が 1 層目で破壊、もう半分が界面破壊した箇所が確認された。ただし、今回の試験結果はいずれのケースにおいても文献 1) で付着面に求める品質を満足しており、破壊位置によらず、付着は十分確保されていたと評価された。

これらの結果より、今回用いた湿式用モルタル a では、図-12 (A)、(B) のような適切な方法で重ね吹きを行うのが望ましいが、図-12 (C)、(D)、(E) のような不適切な方法で重ね吹きを行っても、十分な付着が得られ、結果に顕著な差は生じなかった。重ね吹き方法の適否を付着強度によって検討する場合は、不適切な養生方法をより厳しい条件にする必要があったと考えられる。

2.7 施工後の品質 (非破壊による充填不良箇所の確認方法) の検討

2.7.1 充填性確認に関する現状と課題

断面修復工法では、表-1 に示す品質項目の他に、劣化したコンクリートを鉄筋背面まではつきり取った場合は、鉄筋背面まで確実に充填させることが必要である²⁾。このため、吹付け工法では、吹付けノズルマン技能試験⁴⁾に合格した、熟練のノズルマンによる施工が求められている。しかし、補修の信頼性向上のためには、吹付けモルタルが確実に充填されているか、確認できる方法があることが望ましい。

そこで、電磁波レーダ法に着目し、非破壊で吹付け補修部の、特に鉄筋背面の充填状況を確認する手法に関する検討を行った。電磁波レーダ法は、近年、多段配筋の場合に表面側よりも深い位置の鉄筋が探査可能なものや、ソフトウェアで探査結果を 3 次元画像として表示可能なものなど、様々な機器が開発されている。本研究では、このような機能を有する装置を用いて、鉄筋背面の空隙探査に利用可能か、検討を行った。

2.7.2 検討方法

(1) 供試体の形状

空隙の探査を行う非破壊試験用供試体は、100mm×150mm 程度の電磁波レーダ装置による測定を考慮し、

に図-13 示す形状・寸法のものを作製した。内部には、D19 鉄筋を間隔 100mm、上側鉄筋のかぶりが 50mm となるように格子状に配置した。また、鉄筋背面の空隙を模擬するために、種々の寸法の発泡ポリスチレンを鉄筋背面に設置した。供試体の高さは、底面からの反射波の影響を受けないように、鉄筋や模擬空隙との距離を確保し、250mm とした。

(2) 供試体の種類と作製方法

供試体は、湿式吹付け工法（湿式用モルタル a を使用）で作製した供試体 a と、乾式吹付け工法（乾式用モルタル b を使用）で作製した供試体 b の 2 種類とした。吹付け後は吹付け面を平滑にこてで仕上げし、シート養生（適切養生）を屋外で約 1 週間行い、その後約 1 年間室内に保管して、乾燥した状態で非破壊試験を行うこととした。

(3) 電磁波レーダ法による探査

供試体内の模擬空隙の探査は、表-10 に示す 2 種類の装置を用いて行った。いずれも探査結果を附属ソフトウェアで透視平面画像や 3 次元画像に変換、表示できるものである。探査は、各装置の使用方法に従い、吹付け面、図-13 の平面図の横方向と縦方向に等間隔に装置を走査することで行った。

2.7.3 吹付け面からの探査結果

(1) 透視平面画像

吹付け面から探査を行い、吹付け面から深さ 200mm までの範囲の透視平面画像を供試体 a は図-14 に、供試体 b は図-15 に平面図とともに示す。

供試体 a、b とともに、格子状に配置した鉄筋が両方の装置による透視平面画像に明示された。供試体 b は写真-1(B) および写真-4(B) に示すような小さな空隙が内部に点在する可能性があるが、鉄筋の画像は供試体 a と同様であった。一方、鉄筋背面に隠れるように配置した模擬空隙は、透視平面画像には表示されなかった。

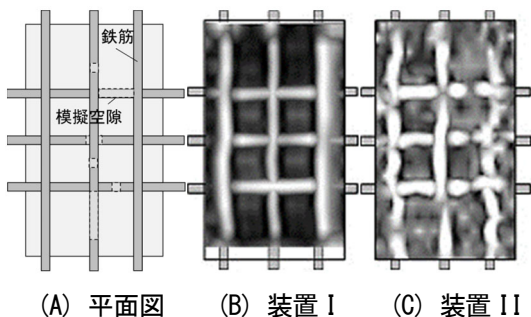


図-14 供試体 a の透視平面画像
(吹付け面から 200mm の範囲)

(2) 断面画像との観察

鉄筋背面の模擬空隙が捉えられているか確認するために、図-16 に示す、鉄筋のみ存在する断面 No.1、手前側鉄筋の下に模擬空隙のある断面 No.2、鉄筋交差部

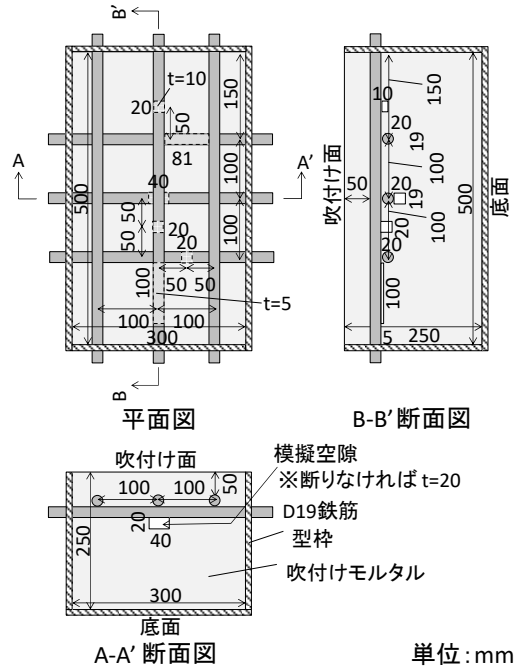


図-13 非破壊試験用供試体の形状と寸法

表-10 電磁波レーダ装置の性能等
(カタログより)

装置	種類	探査深度 (mm)	水平分解能 (鉄筋間隔識別限界)
I	シングルパス方式	～約 600	・かぶり：鉄筋間隔 = 1 : 0.14 以上
II	マルチパス方式	～約 300	・かぶり 75mm 未満：75mm 以下の鉄筋間隔測定可 ・かぶり 75mm 以上：かぶり以下の鉄筋間隔測定可

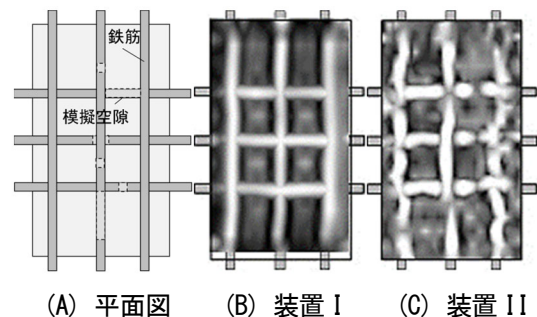


図-15 供試体 b の透視平面画像
(吹付け面から 200mm の範囲)

の下に模擬空隙のある断面 No.3 の各断面について、装置 I では B (Brightness、輝度) モード画像と図-16 の×印の位置で A (Amplitude、振幅) モード波形を、装置 II では、断面画像を確認した。表-11 に供試体 a、表-12 に供試体 b の断面観察結果を断面図とともに示す。ここで、装置 I の A モード波形は、モルタルより比誘電率の大きな金属の位置で波形が右側に、小さな模擬空隙の位置で左に振れるものである。

供試体 a、b ともに、断面 No.1 では鉄筋の位置において、装置 I では B モード画像の山形画像の頂点と A モード波形の右側への振れが、装置 II の断面画像には鉄筋の像が表示され、内部の鉄筋は正常に把握できることを確認した。しかし、装置 I、II ともに、断面 No.2 と断面 No.1 の各画像と波形に明確な差が認められず、断面 2 の模擬空隙は確認できなかった。同様に、断面 No.3 の断面画像等も断面 No.1、2 と明確な差が認められず、模擬空隙は確認できなかった。電磁波レーダ装

置で 2 段目以降の鉄筋等の位置を探索するためには、手前側 (1 段目) の鉄筋とある程度の間隔があることが必要とされている⁵⁾。今回の供試体は、模擬空隙を鉄筋に隠れるように、かつ接するように設置したため、今回用いた装置においても探査条件が厳しく、模擬空隙の確認ができなかったと考えられる。

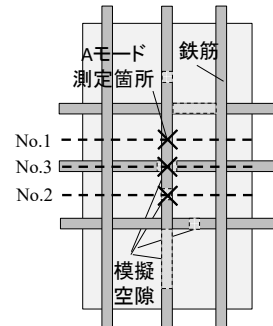


図-16 断面観察位置

表-11 供試体 a の断面観察結果

No.	断面図	装置 I		装置 II
		B モード	A モード	断面画像
1				
2				
3				

表-12 供試体 b の断面観察結果

No.	断面図	装置 I		装置 II
		B モード	A モード	断面画像
1				
2				
3				

(3) まとめ

吹付け工法において充填不良が生じ得るのは鉄筋の背面であることから、電磁波レーダ法による充填不良の確認は、現時点では困難な結果となった。

3. 鋼材補修用防食材料の品質確保に関する検討

3.1 概要

既設鋼構造物の補修においては、①新設時よりも現場の作業条件（施工時の気温・湿度、飛来塩、補修前の劣化状態、作業空間、工期等）に関する制約が大きく施工管理が難しい、②現場条件に適した工法・材料、施工方法が適切に選定・施工されていない、などの要因により早期に再劣化する可能性があることが課題となっている。この課題に対し、最近では、特に施工条件が悪く十分な素地調整（さび落とし）が出来ないような場合でも防食性能を発揮し、再劣化を抑制できる可能性のある新しい補修材料が開発され、一部の構造物では既に適用されている。しかし、これらの新しい材料については技術的知見が十分に蓄積されておらず、現場では適用可否の適切な判断ができていないのが現状である。

そこで、これらの新しい鋼材補修用防食材料を対象として、様々な現場条件や施工条件を踏まえた適用性評価手法の構築をめざし、各種の検討を行った。

3.2 鋼材補修用防食材料に関する調査

既設の鋼構造物の防食補修を行うに当たり、補修後

の再劣化までの期間を長くするには、発生している錆や付着塩分を十分に除去することが基本である。しかし、部材が輻輳している箇所や、複雑な形状の箇所、狭い箇所など、構造物の部位によっては必ずしも理想的な素地調整が行えない場合もある。このような箇所に適用しても腐食を抑制し、塗膜耐久性を確保することを目的とした機能性塗料（以下、「再劣化抑制塗料」と称す）が開発され、市販されている。そこで、日本国内で販売されているこれらの塗料に関する基本情報を収集するため、新技術情報提供システム（NETIS）の登録情報やJICST等のデータベース、インターネット等の公開情報を調査し、整理した。

調査の結果、20社、23製品の情報が得られた。これらのうち、13製品についてはNETIS登録されていることがわかった。製品の形態としてはプライマー・下塗りのみ販売されているもの（14製品）と、塗装システムとして販売されているもの（9製品）があった。

メーカーのカタログ掲載情報等をもとに、再劣化抑制機構により製品を分類し、表-13に示した。これらの機構については、科学的な検証が十分に行われているとは必ずしも言えないものや、検証結果が公開されていないものが含まれる。また、製品によっては複数の機構が示されているものもあるが、主だったもののみを対象に分類している。調査の結果から、現在市販されている再劣化抑制塗料は、化学的に不安定な錆を安定な錆に変化させる機能を持つ「錆転換型」の製品

表-13 再劣化抑制を目標とした鋼材補修用防食塗料の分類と概要

区分	概 要	該当する製品数*	
		NETIS 登録あり	NETIS 登録なし
錆転換型 (不安定な錆を安定な錆に変化させることで、錆が関与した腐食を抑制する)	ゲーサイト化：錆を熱力学的に最も安定なゲーサイト（ α -FeOOH）に変化させることで、錆が関与する腐食進行を抑制する。	1	—
	マグネタイト（黒錆）化：不安定な黄錆、赤錆を薬剤によってマグネタイト化することで、腐食の進行を抑制する。	7	3
反応制御型 (錆の反応性を抑制したり、腐食反応自体を抑制する)	キレート化：キレート剤が鉄錆を捕捉し、安定化させることで腐食反応を抑制する。	2	3
	アノード反応抑制：配合された特殊な防錆剤（錆の反応を抑える成分）が、錆の起点となるアノード領域の反応を抑えて錆の進行を抑える。	1	—
	腐食電流抑制：防錆顔料を錆層に浸透させ、腐食電流を抑制する。	—	1
その他	浸透緻密化：錆層に浸透しやすく、錆中の空隙を充填し緻密化するとともに、付着性を確保する。	—	2
	塩分固定：フリーな塩化物イオンを固定化することで、腐食速度を抑制する。	1	—
	油の作用：塗膜から長期にわたってオイル成分が染み出し、鉄表面を保護する。	1	1

※各製品の情報をもとに、最も主要と思われる再劣化抑制機構によって整理した。

と、錆の反応性を抑制したり、腐食反応自体を抑制する機能を持つ「反応抑制型」の製品が大半を占め、この他、錆を緻密化したり、塩化物イオンを固定化したりする機能を持った製品があることがわかった。

3.3 再劣化抑制塗料に対する性能評価項目の整理

「3.2 鋼材補修用防食材料に関する調査」で述べた通り、再劣化抑制塗料にはプライマーや下塗りのみ単体で販売されている製品と、下塗りから上塗りまでの塗装システムとして販売されている製品がある。しかし、塗装システムにおける中塗り、上塗りは下層の塗膜を保護することを主目的として適用されるものであり、従来の塗装システムにおけるそれらと要求性能は同じであると考えられる。再劣化抑制塗料の主体は、さびに直接作用させるために、従来のさび止め塗料(エポキシ樹脂下塗料など)の代替、あるいはさび止め塗料の下層に適用することを想定された材料であることから、その品質規格は、従来のプライマーや下塗り塗料の品質規格をベースに設定するのが妥当であると思われる。

そこで、「鋼道路橋防食便覧(日本道路協会、平成26年3月)」に掲載されているプライマーおよび下塗り塗料の品質規格(日本産業規格(JIS))に規定される品

質項目を整理し、表-14 にまとめた。再劣化抑制塗料の品質項目については、要求性能ごとに以下の考え方にに基づき設定することとした。

①施工性能

所定の仕様の材料を現場で確実に施工するために求められる性能である。再劣化抑制塗料は、素地調整後に残存したさびに塗付され、さびに浸透するなどして直接作用することを前提としている。よって、「厚塗り性」「たるみ性」「塗膜の外観」といった品質項目は不要と考えられる。

②力学性能

鋼材や異種塗膜と強固に付着し、一体化するために求められる性能である。「付着安定性」は、工場塗装と現場塗装との間隔が長くなる場合を想定した品質項目であり、現場での補修に使用することを目的とした材料である再劣化抑制塗料の品質規格には不要と考えられる。

③耐久性能

塗膜本来の性能を長期間にわたって維持させるために求められる性能である。再劣化抑制塗料は単体で用いられることはなく、必ず下塗りや上塗りといった保護性のある塗膜と組み合わせて使われる。よって、「耐ア

表-14 各種プライマー・下塗り塗料の品質規格に規定される品質項目

○：規定あり、×：規定なし、●：塗料の特性に応じて試験方法・条件の修正が必要

要求性能(鋼道路橋塗装に求められる性能)	塗料	長ばく形エッチングプライマー	無機ジंकリッチプライマー	鉛クロムフリーさび止めペイント	無機/有機ジंकリッチペイント	エポキシ樹脂変性エポキシ樹脂塗料下塗り	再劣化抑制塗料(案)	試験規格
		品質規格	JIS K5633 (2種)	JIS K5552 (1種)	JIS K5674 (1種)	JIS K5553 (1種/2種)		
○施工性能 (所定の仕様の材料を現場で施工できる)	容器の中での状態	○	○	○	○	○	○	JIS K 5600-1-1の4.1 (容器の中の状態)
	塗装作業性	○ はけ	○ スプレー	○ はけ	○ はけ	○ スプレー	●	JIS K 5600-1-1の4.2 (塗装作業性)
	(半) 硬化乾燥性	×	○	×	○	○	○	JIS K 5600-3-3 / JIS K 5600-1-10(4.3.5 b) (半硬化乾燥)
	ポットライフ	○	○	×	○	○	○	JIS K 5600-2-6
	たるみ性	×	×	×	×	○	×	塗料規格に定める方法
	厚塗り性	×	×	×	○	×	×	塗料規格に定める方法
	加熱残分 (%)	○	○	○	○	○	○	JIS K 5601-1-2
塗膜の外観	○	○	○	○	○	○	×	JIS K 5600-1-1の4.4 (塗膜の外観)
○力学性能 (鋼材や異種塗膜と強固に付着し、一体化できる)	付着性	×	×	×	×	○	●	JIS K 5600-5-6
	付着安定性	×	×	○	×	×	×	塗料規格に定める方法
	上塗り適合性	×	×	○	×	○	○	塗料規格に定める方法
○耐久性能 (本来の性能を長期間にわたって維持できる)	耐おり落下性	○ 500g・300mm	○ 500g・500mm	×	○ 500g・500mm	○ 300g・500mm	●	JIS K 5600-5-3
	耐屈曲性	○ 6mm	×	○ 6mm	×	×	×	JIS K 5600-5-1
	耐熱性	×	×	×	×	○ 0種のみ	●	塗料規格に定める方法
	耐アルカリ性	×	×	×	×	○ B種のみ	×	JIS K 5600-6-1の7. (浸漬法)
	耐揮発油性	×	×	×	×	○ B種のみ	×	JIS K 5600-6-1の7. (浸漬法)
	耐水性	×	×	×	○	×	×	JIS K 5600-6-1の7. (浸漬法)
	耐塩水性	○	×	×	×	×	×	JIS K 5600-6-1の7. (浸漬法)
	耐塩水噴霧性	×	○	×	○	×	×	JIS K 5600-7-1
屋外暴露耐候性	○ 3か月	○ 6か月	○ 2年	○ 2年	○ 2年	○	●	JIS K 5600-7-6
○防食性能 (腐食による鋼材の板厚減を生じさせない)	サイクル防食性	×	×	○ 36サイクル	×	○ 120サイクル	●	JIS K 5600-7-9
○環境・安全性能 (周辺環境への負荷、危険有害性が低い)	鉛の定量 (%)	×	×	○	×	○	○	塗料規格に定める方法
	クロムの定量 (%)	×	×	○	×	○	○	塗料規格に定める方法

ルカリ性」「耐揮発油性」「耐塩水性」などの品質項目は不要と考えた。一方で、鋼床版下面への適用は想定できることから、「耐熱性」の確認は必要と考えた。

④防食性能

腐食による鋼材の板厚減を生じさせないために求められる性能である。上述の通り、再劣化抑制塗料は単体で用いられることは無いため、上塗りまで塗装した状態での性能試験が妥当である。

⑤環境・安全性能

周辺環境への負荷や危険有害性を最小限にするために求められる性能である。エポキシ樹脂塗料等と同様に、「鉛の定量」「クロムの定量」は必須であると考えられる。

なお、塗料に対する従来の品質規格は、いずれも新設塗装（腐食していない鋼材への塗装）が前提となっており、塗替え（補修）塗装の際に問題となる塗装下地の状態の影響については考慮されていない。再劣化抑制塗料は、素地調整不足によって残存する腐食生成物（さび）や塩化物の影響を抑制する機能を持つ材料であり、これらの適用性を正しく把握するためには、実際の補修時を想定し、腐食劣化した鋼材を試験対象として用いた評価が不可欠となる。しかし、その様な腐食鋼材を作製するための標準的な方法は確立されていないのが現状である。

そこで、再劣化抑制塗料の品質規格の基礎となる、腐食試験片の標準的な作製方法や素地調整方法について検討することとした。

3.4 腐食試験片の作製方法の検討

3.4.1 概要

再現性が高く、さびの程度が安定した品質の腐食試験片は、制御された環境下で作製する必要がある。また、試験方法の標準化を図るためには、できるだけ効率的で迅速な方法が望ましい。これらのことから、促進腐食試験機を用いた腐食試験片の作製方法について検討することとした。

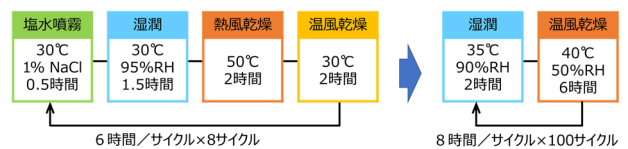
3.4.2 実験方法

(1) 腐食鋼板の作製

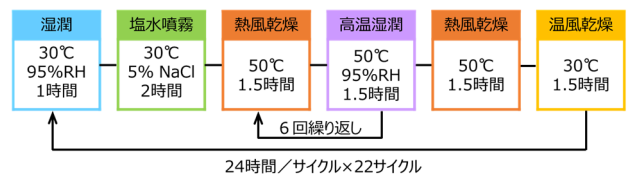
促進腐食試験機による腐食鋼板の作製には JIS G 3101 に規定される一般構造用圧延鋼材 SS400（寸法：150×70×6 mm）を用いた。表面処理はグリットブラストとし、除せい度 ISO Sa2 1/2、表面粗さ 50 μmRz_{JIS} に仕上げた。腐食レベルの異なる試験片を作製するため、以下に示す 2 種類の促進条件を用いることとした。

①軽度に腐食した鋼材の作製

内陸部の橋梁のように、塩分の影響が少なく、腐食が軽微な状態を再現するための促進条件は、(一財)日本ウエザリングテストセンターの試験規格である JWTCS 1001:2009 「1%塩水噴霧促進サイクル腐食試験方法」⁹⁾をもとに設定した。この規格における促進腐食試験は、鋼材表面に塩分を定着させる A サイクルと、腐食を進行させる B サイクルの 2 段階で構成される。これらのうち A サイクルは条件が一般的ではないことから、試験機の運用上の都合から JIS K 5600-7-9: 2006 「塗料一般試験方法-第 7 部一：塗膜の長期耐久性-第 9 節：サイクル腐食試験方法-塩水噴霧/乾燥/湿潤 附属書 1「サイクル D」の条件で代用することとした。JWTCS の A サイクルと噴霧塩分量を揃えるため、サイクル D は 8 サイクルとした (図-17 (a))。



(a) 軽度に腐食した鋼材の作製



(b) 重度に腐食した鋼材の作製

図-17 腐食試験片の作製に用いた促進条件

②重度に腐食した鋼材の作製

海浜環境や凍結防止剤散布地域等で塩分の影響を強く受け、著しく腐食した状態を再現するための促進条件は、図-17 (b)に示すものとした。これは土木研究所が独自に採用しているものであり、既往の研究により沖縄における暴露試験との相関が良好であること、促進倍率が比較的高いことが明らかとなっている³⁾。

(2) さび厚および腐食量の測定

促進腐食試験機により作製した腐食鋼板の腐食生成物の厚さ（さび厚）は、電磁誘導式膜厚計により測定した。また、腐食量は、JIS Z 2371 : 2015 「塩水噴霧試験方法」附属書 JB 「腐食生成物除去方法」にもとづき、くえん酸水素二アンモニウム水溶液を用いた電解処理により腐食生成物を除去した後、試験片の質量を測定し、腐食前の質量との差と SS400 鋼材の密度から求めた。

(3) 塩分量の測定

腐食鋼板のさび層に含まれる塩分には、鋼板の表面付近に緩やかに付着している塩分と、さびの深層に蓄積された塩分とがある。前者については、(株)サンコウ電子研究所製表面塩分計 SNA-3000 を使用し、測定セルを腐食鋼板に固定し、脱イオン水を注入用シリンジで試験器に注入後、3 分間かく拌した直後の電気伝導率から水可溶性塩分濃度を求めた。

一方、後者は以下の方法で求めた。腐食鋼板を約 50×70 mm に切り出し、試料とした。JIS Z 2371:2015 塩水噴霧試験方法の附属書 JB (参考) 腐食生成物の除去方法の表 JB.2-腐食生成物の電解による除去方法に準じ、くえん酸水素二アンモニウム水溶液中で、陽極には白金を用い、試料(腐食鋼板)を陰極処理し、腐食生成物を除去した。腐食生成物の電解による除去方法の模式図の例を図-18 に示す。電解後、さび除去液をろ過し、さび除去液に含まれる塩化物イオンをイオンクロマトグラフィーで分析し、全塩分量 (NaCl 換算) を求めた。

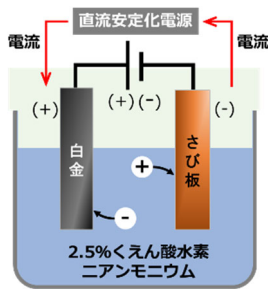
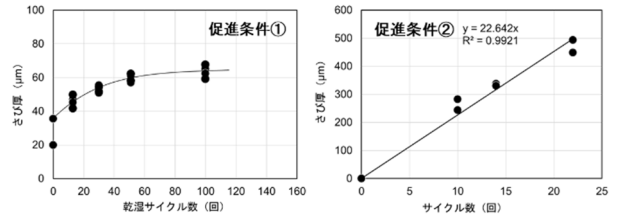


図-18 電解による腐食生成物の除去方法

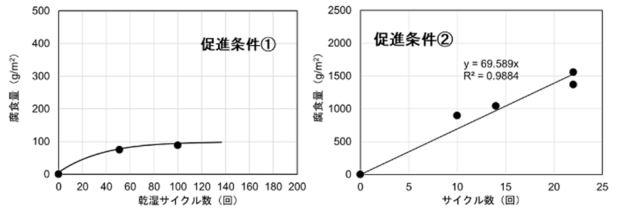
3.4.3 実験結果

(1) 促進腐食条件による鋼板のさび厚と腐食量

促進腐食試験機による腐食鋼板のさび厚および腐食量の変化を図-19 に示す。さび厚および腐食量のいずれも、②の促進条件の場合はサイクル数の増加に比例して増加するのに対し、①の場合は、徐々に変化が緩やかになることがわかった。既往の文献では、屋外暴露における炭素鋼の腐食量が示されている⁷⁾。これによると、①の促進条件では 34 日間 (JIS K 5600-7-9 サイクル D×2 日間→乾湿繰返し 32 日間) で茨城県つくば市の 6 か月間暴露に相当する腐食量 (100 g/m²) となり、②の促進条件で 22 日間で千葉県銚子市の 4 年間暴露に相当する腐食量 (1500 g/m²) となることがわかった。以降、前者を「軽度のさび」、後者を「重度のさび」と称することにする。



(a) さび厚の変化



(b) 腐食量の変化

図-19 促進腐食条件による鋼板のさび厚と腐食量の変化

(2) 促進腐食条件による鋼板の塩分量

JIS Z 2371 「腐食生成物の電解による除去方法」に規定されている方法 (以下、JIS 法と称す。) でさびの除去を行った結果、さびの除去は容易であったものの、さび除去後の電解液の粘度が顕著に上昇した。そのため、電解液中に溶解している塩分の定量は困難であると判断し、電解の条件を見直すことにした。

表-15 電解の条件を変えた場合の処理結果

電解液の濃度 (g/L)	電解時間 (分)	電流密度 (mA/m ²)	電解処理結果
10	5	100	JIS法さび除去は可、電解液の粘度が高い。塩化物イオンの分析不可。
5	30	200	さびが若干残る。
5	60	200	さび除去は可、電解液の粘度が高い。塩化物イオンの分析不可。
2.5	60	200	さびが若干残る。
2.5	90	200	さび除去は可、塩化物イオンの分析可。
1	120	200	さび除去は不可。

電解液: くえん酸水素二アンモニウム水溶液 / 陰極: 腐食鋼板 / 陽極: 白金

さび層に含まれる全塩分量の測定に適切な条件を見出すため、表-15 に示す通り電解液の濃度、電解時間および電流密度を変えて電解を行い、イオンクロマトグラフィーによる塩化物イオンの測定に適切な条件について検討した。なお、電解中は 15 分毎に真鍮ブラシを用いて腐食鋼板のさびを除去し、この操作を繰り返して行うことで全てのさびの除去を行っている。さび除去後の電解液の粘度を低下させるため、くえん酸水素二アンモニウム水溶液の濃度を低くしたところ、さびの除去が困難となった。そこで、電解時間を長くし、電流密度を高くすることでさびの除去を試みた結果、電解液濃度を 2.5 g/L とし、通電時間を 90 分で行なえ

ば、さびの除去が可能であり、かつ、イオンクロマトグラフィーによる分析も可能となることがわかった。以降、この条件でさびを除去し、さび除去液に含まれる全塩分量を求めるとした。

表-16 各種腐食鋼板の全塩分量の測定結果

腐食鋼板 作製条件	促進条件で作製		屋外暴露で作製	
	軽度	重度	千葉県旭市 (1年)	沖縄県大宜味村 (4年)
全塩分量 (mg/m ²)	454.3	11260.6	950	1944

設定した電解条件により腐食鋼板のさび層に含まれる全塩分量を測定した結果を表-16に示す。比較のため、屋外環境で暴露し作製した腐食鋼板（千葉県旭市（1年間）／沖縄県大宜味村（4年間））についても、同様に測定した。促進腐食試験機で作製した腐食鋼板と実環境で作製した腐食鋼板との全塩分量を比較すると、軽度のさび鋼板の全塩分量は、千葉県旭市（1年間）の約5倍、沖縄県大宜味村（4年間）の約2倍であった。一方、重度のさびに至っては旭市の約118倍、大宜味村の約58倍であり、促進腐食条件で作製した腐食鋼板には、屋外暴露よりも著しく多くの塩分が含まれることが明らかとなった。

表-17 各種腐食鋼板のさび厚の測定結果

腐食鋼板 作製条件	促進条件で作製		屋外暴露で作製	
	軽度	重度	千葉県旭市 (1年)	沖縄県大宜味村 (4年)
さび厚 (μm)	105.5	476.7	96.8	94.3

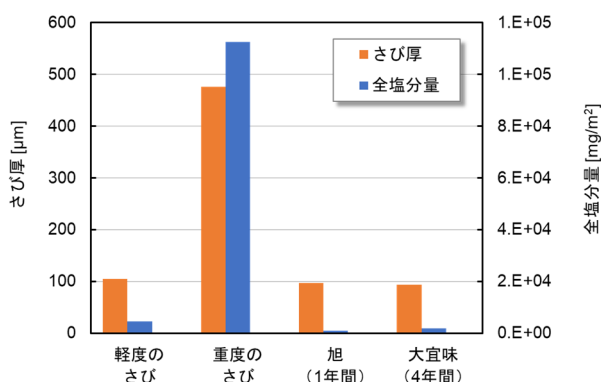


図-19 各種腐食鋼板のさび厚と全塩分量

さび厚の測定結果（表-17）では、「軽度のさび」は千葉県旭市（1年）と同程度、重度のさびは沖縄県大

宜味村（4年）の5倍程度であった。促進腐食条件と屋外暴露とでは、さび厚の違いに対し塩分量の違いが著しく大きく、さび厚と塩分量との間に明確な相関は見出せなかった（図-19）。屋外暴露により作製した腐食鋼板はさび厚が変わっても塩分量はさほど変化が認められなかった。屋外暴露においては、鋼板に付着した塩分が降雨により洗い流されることにより、腐食が進行しても塩分量は横ばいになったものと考えられる。

(3) さび除去後の鋼板外観

各種腐食鋼板のさび除去前後の外観写真を図-20に示す。さび除去前の腐食鋼板外観については、促進条件と屋外暴露とで大きな差異は認められなかった。一方、さびを除去した後の鋼板外観は、促進条件で作製した場合、比較的浅い孔食がほぼ一様に分布しているのに対し、屋外暴露で作製した鋼板については、深い孔食が不均一に分布していることが分かった。全塩分量の測定結果（表-16）では、促進条件で作製した腐食鋼板の塩分量は多かったものの、孔食はさほど進んでいない。一方で、屋外暴露で作製した腐食鋼板の塩分濃度は少ないが、孔食は進行していることがわかった。これらのことから、屋外暴露と同等の性状を持つ腐食鋼板を促進条件で作製するためには、今回の条件よりも塩化ナトリウム水溶液の濃度を低くし、塩水噴霧工程の時間を短くするなどして塩分付着量を抑制するとともに、塩分付着工程に対する乾湿繰り返しサイクル数を増やすなどして、孔食の進行を促進できるような促進試験条件が望ましいと考えられる。

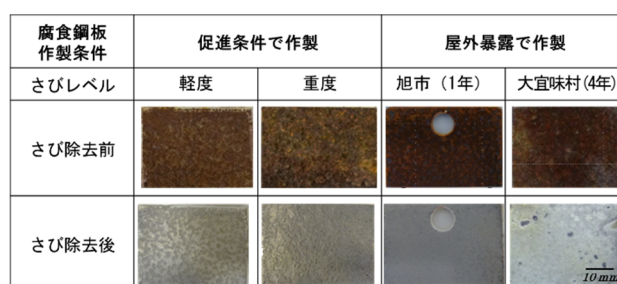


図-20 各種腐食鋼板のさび除去前後の外観

(4) 表面塩分量と全塩分量の関係

塗装時に、被塗面に塩分が付着したまま塗装してしまうと、塗膜の耐久性を大きく低下させるおそれがある。このため、塗替え塗装の現場では、素地調整した鋼材面の品質を管理するため、表面塩分量の測定が行われる場合がある。しかし、表面塩分量の測定で広く用いられている「電気伝導度法」は、原理的に測定対

表-18 各種腐食鋼板の表面塩分量と全塩分量の測定結果

さびレベル	軽度のさび			重度のさび					旭 1年間暴露	大宜味 4年間暴露
	調整前	簡易	St3	調整前	簡易	St2	St3	ブラスト	調整前	調整前
さび厚平均(μm)	106	25	6	477	31	11	9	0	97	94
さび減量(g/m ²)	181	129	44	744	186	125	87	6	379	475
全塩分量(mg/m ²)	4543	2318	791	112606	19025	10952	4604	954	950	1944
表面塩分量(mg/m ²) SNA-3000(回転式)	測定不可(上限)	1252	826	測定不可(上限)	測定不可(上限)	測定不可(上限)	測定不可(上限)	717	未測定	56
表面塩分量(mg/m ²) プレッセル法	1551	1012	520	測定不可(水漏)	11460	4610	1986	231	未測定	13
さび除去前										
さび除去後										

象の表面近傍の塩分しか測定できず、さびの深部に含まれる塩分については適正に評価できていない可能性がある。そこで、素地調整後の鋼材面を対象に、電気伝導度法による測定値と、全塩分量の関係について調べた。素地調整は「簡易」「St2」「St3」「ブラスト」の4段階とした。「簡易」はハンマーケレンのみ、「St2」「St3」はカップワイヤブラシあるいはディスクサンダでISO 8501に規定される素地調整程度まで仕上げたもの、「ブラスト」はアルミナ研削材を用いて処理した。測定結果を各種腐食鋼板の素地調整水準を表-4に示し、測定結果を表-5に示す。なお、表面塩分量については参考として、プレッセル法による測定も行っている。

測定の結果、「重度のさび」は、素地調整後においても多くの塩分が残っており、電気伝導度法での表面塩分量の測定はできなかった。一方、「軽度のさび」に簡易素地調整を施した鋼板の表面塩分量は約1200 mg/m²であったのに対し、全塩分量は倍の2300 mg/m²となった。また、沖縄県大宜味村で腐食(4年間)させた鋼板の表面塩分量は、素地調整後に現場における許容値として用いられることの多い50 mg/m²を下回る鋼板も存在したが、全塩分量と表面塩分量の結果はかけ離れており、表面塩分計では測定できない塩分が残存していることがわかった。

既往の研究でも報告⁹⁾されているように、塩分は鋼板の表面ではなく、さびの深部に水では容易に溶出しない多量の塩分が残存していることが知られている。以上の測定結果は、このことを裏付けるものとなった。今後、再劣化抑制塗料の試験方法の標準化にあたっては、腐食鋼板のさび厚だけでなく、さびの深層に蓄積された塩分量についても考慮し、条件設定を行っていく必要がある。

3.5 塗装鋼橋の早期再劣化事例に関する調査

3.5.1 塗装鋼橋の早期再劣化事例の収集

再劣化抑制塗料の効果的な活用について検討するため、実際の塗装鋼道路橋において塗替え塗装後の早期に再劣化した事例を収集し、塗装系や構造部位等により整理した。

既往の研究⁹⁾などから、塗装鋼道路橋における早期再劣化は海浜地域や積雪寒冷地域等、塩分による影響を受けやすい地域で特に多く見られることが知られている。このような地域では、橋梁の部材表面に多量の塩分(海塩や凍結防止剤に含まれる塩化物)が付着し、これらによって鋼材の腐食が促進され、生成される錆には多量の塩分が蓄積される。このような部材を塗装で補修する際に素地調整が不十分であると、塩分や塩分を蓄積した錆が被塗面に残存し、これらが塗膜付着力の低下や塗膜下腐食を引き起こすことが、早期再劣化の主要な要因の一つであると考えられる。

そこで、海浜地域および積雪寒冷地域の鋼道路橋を対象として、管理者からの聞き取りや点検調査書の調査、現地踏査を行い、過去20年程度の間日本国内で発生した「腐食箇所を補修(塗替え)塗装後、早期に再劣化した事例」に関する情報を収集した。早期再劣化の該非については、塗替え塗装から10年経過後までの期間に、腐食損傷が発生しているか否かで判断した。

3.5.2 収集した早期再劣化事例の整理

収集した早期再劣化事例について、腐食損傷が局部的なものや、比較的軽微なものについては除外し、直近の塗替え塗装系ごとに整理した結果を表-19に示す。この表では、同一の橋梁において、径間や上下線で塗替え塗装のタイミングや塗装系が異なる場合には、それぞれ分けて記載している。また、腐食損傷が生じた部位を①平面部(腹板や下フランジの上・下面等)、②

表-19 調査により収集した塗装鋼橋の早期再劣化事例

塗替塗装系による区分	橋梁番号	地域	海岸からの距離	塗替塗装系	塗装年	経過年数 (定期点検時)	損傷の部位と程度※					
							平面部	角部	添接部	支承部	伸縮装置	クランプ跡
Rc-I Rc-II	1	北陸	0.2	Rc-I	2014年	1年	○	▲	▲	○	▲	—
						6年	△	▲	▲	▲	▲	—
	2	山陰	0.2	Rc-I	2016年	1年	○	△	▲	▲	▲	—
						3年	○	△	▲	▲	○	—
	3	北海道	0.3	Rc-I	2012年	4年	○	△	▲	▲	○	—
						8年	○	△	○	▲	○	—
	4	九州	1	Rc-I	2012年	3年	○	△	○	▲	○	—
						8年	○	△	○	▲	○	—
	5 (側道橋)	北陸	1.7	Rc-I	2007年	4年	△	△	○	▲	▲	—
						9年	△	△	○	▲	▲	—
6	北海道	2.1	Rc-I	2007年	0年	○	○	○	○	○	—	
					10年	●	▲	▲	●	○	—	
7 (道路橋)	九州	5.4	Rc-I	2012年	5年	△	▲	○	○	○	—	
					9年	●	●	○	○	○	—	
7 (側道橋)	九州	5.4	Rc-I	2012年	3年	○	○	○	○	○	—	
					8年	○	▲	○	△	○	▲	
8 (下り)	北陸	6.5	Rc-I	2012年	3年	○	○	○	○	○	—	
					8年	○	▲	○	△	○	▲	
9	北海道	0.1	Rc-II	1997年	4年	○	△	△	▲	○	—	
					山陰	0.2	Rc-II	2017年	2年	△	△	△
Rc-III	9	北海道	0.1	Rc-III	2007年				5年	○	▲	▲
						10年	△	▲	▲	▲	○	—
	11	北海道	0.1	Rc-III	2006年	1年	○	▲	▲	▲	○	—
						6年	○	▲	▲	▲	○	—
	11	北海道	0.1	Rc-III	2006年	11年	△	●	▲	▲	○	—
						10年	▲	▲	▲	○	○	—
	12	九州	0.1	Rc-III	2002年	15年	▲	▲	▲	○	○	—
						19年	▲	●	▲	△	○	—
	10	山陰	0.2	Rc-III	2008年	1年	○	△	△	△	○	—
						6年	△	▲	●	△	○	—
13	北海道	0.3	Rc-III	1992年	16年	△	▲	▲	▲	○	—	
					2011年	1年	△	▲	▲	△	○	—
14 (上り)	九州	0.7	Rc-III	2000年	6年	▲	▲	▲	●	○	—	
					10年	△	▲	△	▲	○	—	
14 (下り)	九州	0.7	Rc-III	2000年	15年	△	▲	△	▲	○	—	
					20年	△	▲	▲	▲	○	—	
15	北陸	4.6	Rc-III	2004年	10年	○	△	○	△	○	—	
					8年	△	△	○	▲	○	—	
16	山陰	6.5	Rc-III	2015年	12年	△	△	○	—	—	○	
					1年	○	△	○	—	—	○	
17	九州	7.8	Rc-III	2012年	1年	○	▲	△	△	○	—	
					5年	○	▲	△	▲	○	—	
18	山陰	8.3	Rc-III	2009年	9年	△	▲	△	▲	○	—	
					7年	△	△	▲	▲	▲	—	
19	山陰	19.1	Rc-III	1994年	10年	△	▲	▲	▲	▲	—	
					6年	▲	▲	○	▲	○	—	
ウレタン系※※	10	山陰	0.2	ウレタン	1998年	5年	△	●	▲	▲	○	—
						3	北海道	0.3	ウレタン	2000年	6年	△
	20 (上り)	北海道	0.3	ウレタン	2003年	2年					○	○
						6年	○	△	△	△	○	—
	20 (下り)	北海道	0.3	ウレタン	2003年	11年	○	▲	▲	▲	○	—
						16年	○	▲	▲	▲	○	—
	21	北陸	4.5	ウレタン	1996年	2年	○	○	○	△	○	—
						6年	○	△	△	△	○	—
	22	北陸	4.7	ウレタン	2001年	11年	△	▲	●	▲	○	—
						7年	△	▲	●	▲	○	—
23	北海道	27.2	ウレタン	2003年	15年	△	▲	●	▲	▲	—	
					9年	△	▲	▲	▲	○	—	
24	北海道	30.2	ウレタン	1998年	14年	△	▲	▲	▲	○	—	
					19年	△	▲	△	▲	▲	●	
a-1 b-1	5 (道路橋)	北陸	1.7	a-1	1988年	18年	△	▲	△	▲	○	—
						4年	△	▲	△	△	○	—
	25	山陰	6.4	a-1	2006年	11年	▲	▲	▲	▲	○	—
						8	北陸	6.5	a-1	2000年	10年	○
	27	北陸	6.5	a-1	1999年	11年					▲	▲
	26					北海道	11.9	a-1	1994年	7年	△	▲
		10年	△	▲	▲					○	○	—
	33	山陰	20.4	a-1	1992年	15年	△	●	▲	△	○	—
14年						▲	▲	▲	●	○	—	
27	北海道	36.2	a-1	2005年	4年	▲	▲	△	▲	○	—	
					9年	△	▲	△	▲	○	—	
1	北陸	0.2	b-1	1989年	14年	△	▲	▲	▲	○	—	
					21年	○	●	▲	▲	▲	—	
再劣化抑制	8 (上り)	北陸	6.5	再劣化抑制	2012年	3年	△	▲	△	△	○	—
						8年	△	▲	△	△	○	—
	28	山陰	6.5	再劣化抑制	2015年	1年	○	▲	△	△	○	—
						1年	▲	○	○	○	○	—
	29	山陰	8.1	再劣化抑制	2012年	4年	△	△	△	▲	○	—
						7年	△	▲	△	▲	○	—
	30	山陰	18.3	再劣化抑制	2015年	2年	○	○	○	○	○	—
						1年	△	△	○	△	○	—
19	山陰	19.1	再劣化抑制	2014年	4年	△	△	△	▲	○	—	
					1年	△	△	○	△	○	—	
31	山陰	19.5	再劣化抑制	2015年	4年	△	●	▲	△	○	—	
					1年	△	△	▲	△	△	—	
32	山陰	20.4	再劣化抑制	2013年	5年	▲	▲	▲	▲	▲	—	

凍結防止剤散布地域

※腐食による損傷の程度 (○: 損傷なし、△: 軽微なさび、▲: さび、●: 減肉・断面欠損)
 ※※「ウレタン系」としたものは鋼道路橋塗装便覧(平成2年6月、日本道路協会編)のc-1塗装系を示す。

角部（フランジのコバ面等）、③添接部（添接板やボルト周辺）、④支承部（支承本体および周辺部材）、⑤伸縮装置（伸縮装置および周辺部材）、⑥クランプ跡（足場用吊りチェーンクランプ跡の補修部）に分類するとともに、腐食による損傷の程度を4段階（○：損傷なし、△：軽微なさび、▲：さび、●：減肉・断面欠損）で評価した（表-20）。なお、直近の塗替え塗装後に点検が複数回行われている場合には、それら全ての点検結果から情報を抽出し記載している。

表-20 腐食による損傷の程度（平面部）

腐食による損傷の程度	典型的な事例
△：軽微なさび	 (主桁下フランジ下面)
▲：さび	 (下横構下面)
●：減肉・断面欠損	 (主桁下フランジ上面)

情報収集の結果、再劣化事例の多くは、塗替え塗装から初回の点検時までの間に発生していることがわかった。定期点検は5年周期で行われていることから、塗装後5年に満たない早い段階で再劣化が生じていることになる。凍結防止剤を散布していない地域では、海からの距離が10 km以内の範囲に早期再劣化事例が集中しており、特に1 km以内の沿岸部での事例が半数を占めることがわかった。一方、内陸部においても凍結防止剤散布地域では事例が多く見られることから、海塩や凍結防止剤由来の塩分が、塗替え塗装後の早期再劣化に深く関わっていることが示唆される。

以下に、塗装系ごとの早期再劣化の傾向を示す。

①Rc- I、Rc- II 塗装系

これらは、防食下地として有機ジンクリッチペイントを用いる塗装系であり、塗替え塗装の際には、ブラスト処理や動力工具処理によって旧塗膜を全面的に除去して鋼素地を露出させ、塗装されるものである。

これらの塗装系では平面部の腐食損傷は比較的少なかったが、添接部、支承部では塗膜剥離が見られ、鋼材の腐食に進展している事例があった。また、伸縮装置部が漏水によって激しく腐食している事例や、塗替え塗装時のクランプ跡、部材の角部から腐食が生じている事例が確認された（図-21）。



図-21 Rc- I 塗装系で見られた典型的な早期劣化事例

ブラスト処理で素地調整をしている Rc- I 塗装系では、部材角部に早期再劣化はあるものの面的な劣化にまでは進展していないケースが多いのに対し、動力工具処理をしている Rc- II 塗装系の場合は面的な早期劣化が生じているケースがあり、同等の塗装系で塗替えを行っても、素地調整程度の違いによって早期再劣化の傾向が異なることがわかった。

②Rc-III 塗装系・ウレタン系

これらの塗装系は、さび、割れ、膨れなどの塗膜不良部や腐食部位は動力工具処理によって除去する一方で、健全な塗膜は残して、その上に塗装する塗替え塗装系である。塗装系としての耐久性は、Rc- I や Rc- II に比べて劣るとされている。

これらの塗装系では前述の Rc- I、Rc- II 塗装系と同様に、平面部の腐食損傷は比較的軽微であるケースが多く見られた。一方、添接部や支承部、部材角部、伸縮装置からの漏水が認められる箇所などでは腐食損傷が生じており、中には断面欠損にまで至っている事例もあった（図-22）。



図-22 Rc-III 塗装系で見られた典型的な早期劣化事例

③a-1、b-1 塗装系

これらの塗装系は鉛系さび止め塗料とフタル酸樹脂塗料あるいは塩化ゴム系塗料とを塗り重ねるものであり、前述の塗装系よりも膜厚は薄く、耐久性が低いとされている。

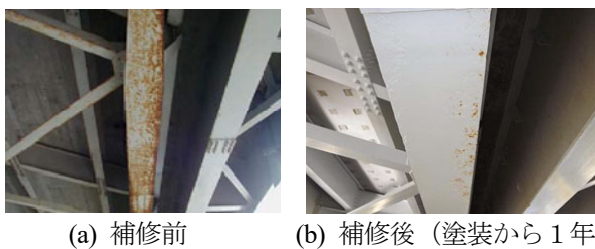
これらの塗装系の再劣化の特徴としては、塗替え後の早い段階では部材角部だけの腐食損傷であっても、時間の経過につれ、平面部にもさびが顕在化してくることがわかった。これは塗装系自体の環境遮断性が低いためであり、一般塗装系における典型的な塗膜変状の一つである（図-23）。



(a) 下フランジ下面 (b) 腹板および下フランジ
図-23 a-1 塗装系で見られた典型的な劣化事例

④再劣化抑制塗装系

再劣化抑制塗料を適用した塗装系で塗替え（補修）をしても、早期に再劣化する場合があることがわかった。特に、補修前に断面欠損に至る腐食を生じていた箇所や、漏水等により水が溜まりやすい箇所では、塗装後わずか1年程度で再劣化した事例もある。



(a) 補修前 (b) 補修後（塗装から1年）
図-24 再劣化抑制塗装系による補修塗装前後の部材状況（凍結防止剤散布地域）

再劣化抑制塗装系で補修する前後の、定期点検時の部材の状況を図-24 に示す。補修前には、部材の角部を中心に下フランジ全面にわたり腐食が発生している状況がわかる。一方、補修後は部材一般部（平面部）は健全であるものの、角部を起点として再び腐食が発生している。再劣化抑制塗装系による補修では、通常、動力工具処理による塗装前素地調整が行われるが、部材の角部のように腐食が過度に進行している部位では、動力工具でさびや塩分を十分に除去できず、これが早

期再劣化に繋がっているものと推察される。すなわち、再劣化抑制塗装系で補修する場合においても、塗装前素地調整の仕上がりを適切に管理する必要があると考えられる。

この他、塗装系に関わらず、早期再劣化には以下の傾向があることを把握した。

- ①沿岸部や凍結防止剤散布地域の橋梁では、塗装後に早期に再劣化している事例が多い。
- ②支承付近や添接部など、構造的に素地調整が難しい部位は、早期に腐食が再発している事例が特に多い。
- ③補修前に断面欠損が認められるほどの腐食状態で補修した場合、早期に再劣化している事例が多い。
- ④漏水箇所では腐食が著しく進行している事例が多く、塗替え時の漏水対策が重要であると言える。

今回の調査の結果から、再劣化抑制塗装系により補修した場合においても、早期に再劣化するケースがあることを把握した。このような機能性塗料を用いる場合においても、腐食が顕著になる前のできるだけ早い段階で補修に踏み切るとともに、塗装前にさびや塩分を極力除去し、塗装下地品質を向上させることが、塗膜耐久性確保のために重要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の補修、特に断面修復工法に用いる吹付け工法において、現場条件に適した施工法・材料の選定や品質確保に必要な条件、品質評価方法が十分明確ではないことから、他の断面修復工法と同様の品質評価手法の適用性や吹付け工法特有の留意点について検討した。鋼構造物の補修に用いる防食塗料については、施工条件が悪く十分な素地調整（さび落とし）ができないような場合でも防食性能を発揮し、再劣化を抑制できる可能性のある新しい材料が複数開発されているが、適用性評価方法が明確ではないことから、その基礎となる試験片作製方法の検討や適用上の留意点の整理等を行った。

その結果、以下のことが明らかとなった。

4.1 吹付け工法

- 1) 施工時の品質（施工性）については、湿式吹付け工法、乾式吹付け工法いずれにおいても、試し吹きにより吐出状態が正常か、異常なだれが生じないかを確認して評価する。
- 2) 硬化後の断面修復材の品質評価に用いる供試体の作製方法については、JSCE-F 561 および JSCE-F 562（パネル型枠を用いる方法）により作製することが標準とされているが、湿式吹付け工法では、既製の

鋼製型枠等に直接吹き付けて作製することも可能であった。ただし、乾式吹付け工法については、はね返りで一体化しなかったモルタル粒子を適切に除去する工夫が必要である。また、開口部の大きさに対して深さのある型枠のように、前述のモルタル粒子の除去が困難な形状のものは、豆板などの不良箇所が生じることがあるため、適さないことが分かった。

- 3) 硬化後の断面修復材の品質について、凍結融解抵抗性や中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性、圧縮強度の評価は、左官工法の場合と同様の方法が適用できる。
- 4) 付着界面の品質について、付着強度の評価は、左官工法の場合と同様の方法が適用できる。
- 5) 施工後の品質（充填性）については、吹付け工法において、鉄筋背面に生じた空隙（充填不良）を模擬した供試体を作製し、電磁波レーダ法で模擬空隙を探查できるか検討したが、現時点では困難であった。

4.2 鋼材補修用防食材料

- 1) 想定される適用形態を踏まえ、構造物用さび止め塗料等の既存の品質規格をもとに、たるみ性、耐アルカリ性、耐揮発油性等の不要な項目と、耐湿性等の追加すべき項目とを整理し、必要な性能評価項目を明確化した。
- 2) 促進条件による腐食鋼板試験片の作製方法について検討した。屋外暴露と同等の性状を持つ腐食鋼板を促進条件で作製するためには、塩分付着量を抑制するとともに、塩分付着工程に対する乾湿繰り返しサイクル数を増やすなどして、孔食の進行を促進できるような促進試験条件が望ましい。また、さび厚だけでなく、さび層に蓄積された塩分量についても考慮し、条件設定を行う必要がある。
- 3) 塗装鋼橋の早期再劣化事例は沿岸部や凍結防止剤散布地域に多く、特に、支承付近や添接部など、構造的に素地調整が難しい部位が多い。また、補修前に断面欠損が認められるほどの腐食状態から補修した場合や、漏水箇所では腐食が著しく進行している事例が多い。
- 4) 再劣化抑制塗装系で補修する場合においても、腐食が顕著になる前のできるだけ早い段階で補修に踏み切るとともに、塗装前にさびや塩分を極力除去し、塗装下地品質を向上させることが、塗膜耐久性確保のために重要である。

参考文献

- 1) 土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）、土木研究所資料第 4343 号、III 断面修復工法編、57p、2016.8
- 2) 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、pp.54-55、2005.6
- 3) 片平博・古賀裕久：振動締固めが凍結融解・スケーリング抵抗性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、pp.999-1004、2016.7
- 4) 谷倉泉・設楽和久・三浦康治：吹付けノズルマンの技能評価試験、建設機械施工、Vol.68、No.9、pp.110-113、2016.9
- 5) 日本非破壊検査協会：コンクリートの非破壊試験-鉄筋平面位置及びかぶり厚さの試験方法の種類とその選択、NDIS 3435:2015 附属書 A 電磁波レーダ試験、pp.3-7、2015.9
- 6) 筆者：タイトル、書名、巻号、頁、発行年月
- 7) 斉藤 誠、守屋 進：暴露試験と相関性の良い腐食促進試験方法に関する検討、防錆管理、Vol. 45、No. 11、pp. 395-401、2001 土研太郎：参考文献のページ数の書き方、1 頁引用は p.00、複数頁引用は pp.00-00、全頁引用は 000p.

RESEARCH ON EVALUATION METHOD FOR THE APPLICABILITY OF REPAIR AND REINFORCEMENT MEASURES TO PREVENT REDEGRADATION

(blank line)

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Material and Resources Research Group

Author: NITTA Hiroyuki, TOMIYAMA Tomonori,
KOGA Hirohisa, KATAHIRA Hiroshi,
KATO Yuya

(blank line)

Abstract: While the spraying mortar method is adopted when concrete structures are repaired over wide area, several methods and materials have been developed and their characteristics vary widely. It is therefore, test methods for the durability of splayed mortar and the procedure for the making appropriate specimens were investigated and proposed in this research.

.

In this abstract, please describe the research content and the outline of the research results in 50 to 80 words (in 3-5 lines). The font is Times New Roman 10pt. However, the item names “Abstract” and “Keywords” are Arial 10pt. Please insert one blank line before and after the abstract.

(blank line)

Keywords: Repair materials, Repair methods, Sprayed mortar methods, ○○, ○○List about 5 keywords within 2 lines.

<h2>成果報告書・英文書式</h2>
