

論文 エポキシ樹脂塗装鉄筋と含浸材を併用した吹付けコンクリート部材の長期耐久性に関する研究

吉田 誠^{*1}・武若 耕司^{*2}・山口 明伸^{*3}・三田 和朗^{*4}

要旨：本研究は、100年以上の長期にわたり耐久性を維持するために開発されたエポキシ樹脂塗装鉄筋と含浸材を併用した補強土工法の吹付け部モルタル部材について、酸性雨と炭酸化の複合劣化環境における耐久性について実験的に検討を行った。その結果、想定曝露年数 75 年では、僅かながら鉄筋腐食が認められたが、コンクリート表面にひび割れやはく離は確認されず、また、エポキシ樹脂塗装鉄筋と含浸材の高い耐久性を確認した。

キーワード：エポキシ樹脂塗装鉄筋, 表面含浸材, 酸性雨, 炭酸化, 吹付けコンクリート

1. はじめに

切土した斜面の安定化を図るために用いられる補強土工法には長期耐久性が求められるが、地上部がコンクリート製の場合、海岸や温泉地盤などの特殊な環境を除いては、これまで特に耐久性上の考慮はなされていなかった。しかし、近年、雨水の酸性化や二酸化炭素の増加など地球環境の悪化が深刻化していく中で、一般環境であっても初期の性能を長期間維持することができない状況も予想されるようになってきた。そこで本研究では、地上部を吹付けコンクリートで施工する補強土工法の一つで、100 年以上耐久性を確保するためにエポキシ樹脂塗装鉄筋（以下；EP 鉄筋と称す）と表面含浸材を併用した工法を取り上げ、この工法の酸性雨と炭酸化の複合劣化環境における耐久性について実験的に検討を行った。

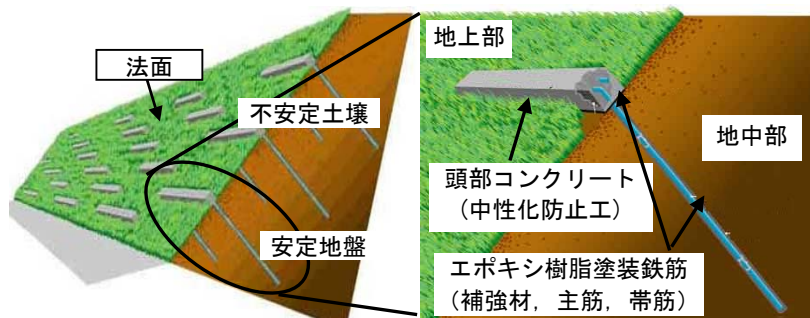
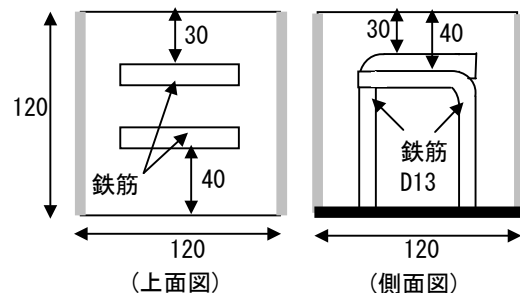


図-1 本試験で検討した補強土工法概要



(■ エポキシ, ■ タールエポキシ被覆, 単位: mm)

図-2 供試体形状

2. 本補強土工法の特徴

本補強土工法の概要図を図-1に示す。本工法は、斜面の小規模な崩壊の抑止や法面を急勾配にする場合、あるいは斜面に植生をする場合等に適用できる。また、吹付け法枠を簡素化しているため僅かながら抑止力は低減するが、従来の工法とほぼ同等の抑止力を持ちながら経済性を高めている。また、地上部の頭部コンクリート部材および地盤の補強部材に高耐久性の EP 鉄筋を用い、頭部コンクリートには表面含浸材で表面処理を施しており、金網型枠はステンレス製とすることで材料の劣化を防ぎ 100 年以上の耐久性が期待されている。

表-1 吹付けモルタルの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			設計基準強度 (N/mm ²)
	W	C	S	
55	231	420	1615	24.0

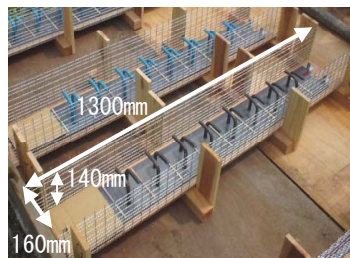


写真-1 吹付けモルタル型枠



写真-2 供試体作製状況

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 准教授 工博 (正会員)

*4(株)日本地下技術 (非会員)

表-2 要因と水準

要因	水準
鉄筋種類	エポキシ樹脂塗装鉄筋 普通鉄筋
表面処理種類	シラン・シロキサン系含浸材 ^{a)} ケイ酸ナトリウム系表面含浸材A ^{b)} ケイ酸ナトリウム系表面含浸材B ^{c)} 無塗布
測定項目	表面劣化性状 中性化深さ 鉄筋自然電位 鉄筋腐食面積率 化学分析 圧縮強度

(a), b), c) を以下；撥水材，含浸材 A，含浸材 B と称す)

3. 試験概要

3.1 実験供試体

供試体作製方法は、写真-1 に示す 1300×160×140mm の型枠に、L 字型に折り曲げたエポキシ樹脂塗装鉄筋（以下、EP 鉄筋と称す）あるいは比較用の異形鉄筋をそれぞれ 2 本ずつ、それぞれ、かぶり 30mm および 40mm となるよう配置し、写真-2 のように垂直下向きで表-1 に示す配合のモルタルを湿式吹付けにより打設し、14 日間、型枠ごと供試体を濡れ簾で覆う湿空養生を行った後に、図-2 に示すような 120×120×120mm の立方供試体となるよう型枠内モルタルから 8 体ずつ、計 104 体切り出した。その後、立方供試体については、供試体中鉄筋端部に自然電位用測定用のコードを取り付け、試験面（打設上面および 2 側面）以外の側面および底面に、それぞれエポキシ樹脂とタールエポキシ樹脂による表面被覆を施し、その後、表-2 に示した要因と水準による表面処理を行った。なお、使用した各表面処理材は、表-3 に示す、2 種類のケイ酸質系表面含浸材（以下、含浸材 A、B と称す）およびシラン・シロキサン系表面含浸材（以下、撥水材と称す）であり、比較用として用いた無塗布供試体と合わせた計 4 種類の表面処理状態について検討を行った。また、立方供試体を切り出す際に、促進試験による強度低下を検討するために φ50×100mm の圧縮強度試験用供試体もコア抜きにより作成し、立方供試体と同様な表面処理を施した。

3.2 促進試験方法

一般環境を考えるとコンクリートの劣化は、降雨時における弱酸性の雨による劣化と、降雨時以外における CO₂ による炭酸화가複合作用して劣化すると位置づけられる。このため、今回の長期耐久性試験では、乾湿繰り返しによる酸性雨劣化および炭酸化による複合劣化促進試験を実施した（以下、促進試験と称す）。促進条件は、表-4 に示す。この促進条件は、1 サイクル 96 時間を 1 年と想定し、1 サイクルで 1 年間に相当する中性化が進行するように CO₂ 濃度の調整を行っている¹⁾。ま

表-3 含浸材の組成および物性値

含浸材種類	含浸材A	含浸材B
成分比 (%)	Na	34.9
	Si	64.9
pH	11.23	11.21
比重 (g/cm ³)	1.1	1.23
粘度 (mPa・s)	4.5	6.5
不揮発性物質質量 (%)	16.32	26.22

表-4 促進条件

1サイクルの想定年数	1年
1サイクル	乾燥時間
	74 h
	散布時間
	22 h
CO ₂ 濃度	5%
温度	30℃
湿度	70~100%
散布量	2250mm
散布溶液	酸性溶液 (pH3.0)

表-5 酸性雨溶液の組成

	HCl	H ₂ SO ₄	HNO ₃
pH3.0	6.0	34.0	8.0

単位：mg/l



写真-3 酸性雨劣化促進試験装置

た、酸性雨の成分および散布条件は、火山性酸性雨環境下である鹿児島県桜島の 1 年間の降雨日数および降雨量を考慮して散布時間、散布量を設定し、表-5 に示す火山性酸性雨を模擬した酸性雨溶液（以下、酸性溶液）を、写真-3 に示す著者らが開発した酸性雨劣化促進試験装置を用いて雨滴散布した²⁾。なお、本試験では、促進試験を 100 サイクルまで実地し、25 サイクルごとに、表-2 に示す測定を行う予定である。なお促進試験は現在も継続中であり、本論文では促進試験 75 サイクルまでの結果について報告する。

4. 結果および考察

4.1 表面劣化性状

促進試験 25 サイクルごとに目視やデジタルカメラによる表面の変色や侵食の有無などの確認した。一例として写真-4、写真-5 にそれぞれ 0 サイクル、75 サイクルにおける各種表面処理を施した供試体上面（酸性溶液散布面）および側面の外観状況を示した。なお、写真中

の点線で囲まれている部分が特に赤褐色化が顕著に現れた箇所である。表面処理の種類にかかわらず、時間の経過と共に表面が赤褐色化し、上面(酸性溶液散布面)に比べ側面の赤褐色化が目立つ傾向があった。コンクリートの表面の赤褐色化は、一般に作用した酸性溶液中の酸によって溶解した表層部のセメント成分中の鉄分が表面に酸化析出したことによると考えられる³⁾。供試体上面は、酸性雨の影響を直接受ける面ではあるが、その一方で、雨水による洗い流しの影響を受けるため、析出物が定着しなかった可能性が高い。これに対して側面では、上面から伝わって落ちる雨水の影響で鉄分の酸化が起こり、洗い流しの影響も少ないために、雨水が側面を流れ落ちる道筋に沿って析出物が堆積し、時間とともに赤褐色化が進んだものと考えられた。なお、この赤褐色化は、50 サイクルまでは、無塗布供試体に比べ、表面処理を施した供試体では、その程度は小さい状況にあった。ただし、75 サイクル経過時では、撥水材塗布供試体では、依然として赤褐色化を抑えている状況が確認されたものの、含浸材 A、B を塗布した供試体表面の赤褐色化の傾向は、無塗布供試体と差があまり認められなくなった。

目視観察の結果によると、無塗布供試体では 50 サイクル経過後から、上面および側面に侵食も認められるようになり、試験サイクルの増加にしたがってその程度も大きくなる傾向が認められた。これに対して、表面処理を行った供試体については、いずれも 50 サイクルの時点では侵食はわずかであり、75 サイクル目から、上面ならびに側面に侵食の後が認められるようになったが、それでも、無塗布供試体に比べるとその程度はいずれも少なく、明らかに表面侵食は抑制されていた。

このように表面処理の有無で表面劣化状況に差が認められた理由としては、ケイ酸質系の含浸材を塗布した場合、供試体内部の Ca^{2+} と反応し、C-S-H 結晶を生成することで、コンクリート表面を緻密化し⁴⁾、酸によるカルシウムの溶出を抑制したことが大きな理由と考えられ、また、撥水材を塗布した供試体では、供試体表面に形成された撥水層によって酸性溶液のモルタル表面からの浸透を妨げることににより赤褐色化や侵食が抑制されたものと考えられる。

4.2 中性化状況

25 サイクルでの中性化深さは、供試体の鉄筋付近を乾式のコンクリートカッターによって切断し、その切り口面を測定面としたが、50、75 サイクルでは、油圧式圧縮試験機により供試体を割裂破壊し、その割裂面を測定面とした。なおいずれも 1% フェノールフタレイン溶液による変色領域によって中性化領域を判定した。

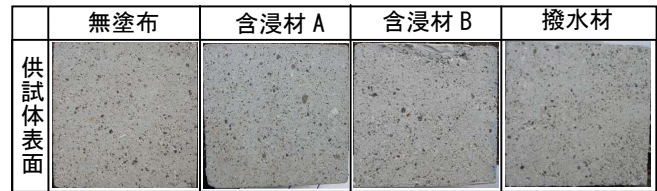


写真-4 試験開始前の供試体表面の状況

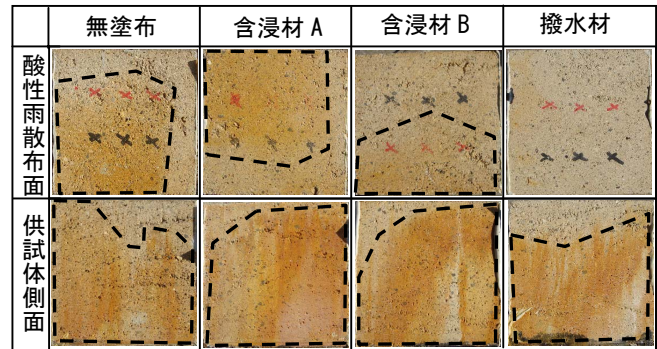


写真-5 75 サイクル終了時の供試体表面の状況

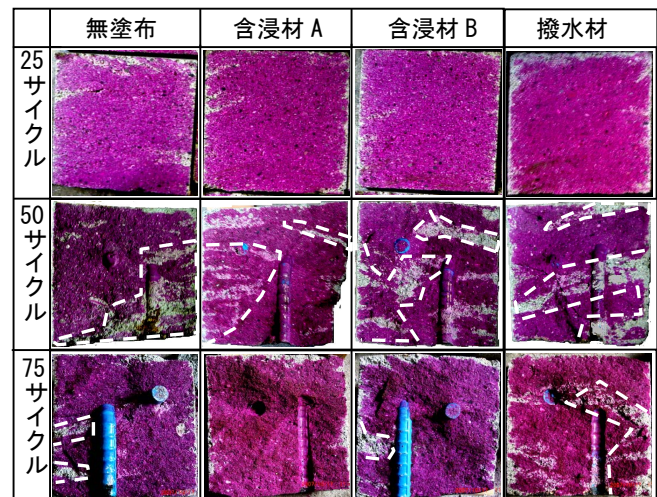


写真-6 中性化状況

25、50、75 サイクルにおける中性化状況を写真-6 に示す。25 サイクルにおける中性化状況は、上面および側面ともにほぼ均等に進行していたが、50、75 サイクルにおける中性化状況は、写真-6 の点線で示すような供試体側面から局所的に中性化が進行している傾向が確認された。これは、吹付けモルタル打設時に充填不足であった部分の中性化が急激に進んだためと推察される。供試体を作製する際に型枠の鉄筋間隔が実際の頭部コンクリートよりも過密だったことも一因と考えられ、吹付けモルタルの施工性あるいは充填性についても再度検討する必要があると考えられる。

次に局所的な中性化の進行がない供試体上面の中性化深さを 12mm 間隔で 10 カ所測定し、平均した値の経時変化を図-3 に示した。いずれのサイクルにおいても撥水材塗布供試体の中性化深さは、無塗布、含浸材 A、B に比べ中性化深さが大きくなるという傾向は共通しており、この理由としては、撥水材を塗布することで、

コンクリート表面からの水分の浸透を抑制し、一方で、気体の出入りにはあまり影響しないという特徴から、外部からの二酸化炭素の浸入や供試体内部からの水蒸気の散逸が、他の含浸材に比べて生じ易く、その結果として中性化進行が促進されたものと考えられた。また、25サイクルまでは、含浸材 A、B を塗布した供試体は中性化を抑制する傾向を示したが、50、75 サイクルでの中性化深さは、含浸材 A、B と無塗布の差は確認されなかった。それでも、75 サイクル経過時においても、吹付けコンクリートが健全に吹付けられた箇所での中性化深さは、2～4mm 程度と鉄筋かぶりに比べて小さい結果となった。

また、各解体サイクル時に供試体の酸性雨散布面から深さ方向に 10mm まで 2mm 間隔、それ以降 4mm 間隔でドリルサンプリングし、pH の測定を行った。一例として図-4 に 75 サイクル後の各表面処理の pH 分布を示した。測定結果にある程度ばらつきが認められるが、無塗布あるいは、撥水材塗布供試体では表面深さ 15～20mm 程度までの範囲で明確な pH 低下が認められるのに対して、含浸材 A、B 塗布供試体では、表面から 10mm 程度までの範囲に抑制されており、特に含浸材 A 塗布の場合には、表面より 5mm より深い位置では、ほとんど pH の変化は認められず、CO₂ の侵入に対して高い抑制効果を発揮していることが確認できる。

4.3 化学分析

酸性雨中の各種イオンのうちコンクリートの劣化ならびに内部鋼材の腐食に対して特に影響が大きいと考えられる SO₄²⁻および Cl⁻のコンクリート中への浸透状況について、pH と同様の粉末試料を用いイオンクロマトグラフによる測定を行った。一例として 75 サイクル終了時の供試体表面深さごとの SO₄²⁻量および Cl⁻量を図-5 に示した。SO₄²⁻量については、含浸材 A、B を塗布した供試体において、特に表面付近 2mm 程度までの範囲で無塗布供試体と同等かそれ以上の含有量を示す状況も認められたが、それ以降では、撥水材塗布の場合を含めて、表面処理を行った供試体では無塗布のものに比べて SO₄²⁻量は少なく、内部への SO₄²⁻の浸透が抑制されている状況が認められた。

一方、Cl⁻については、無塗布と含浸材 A、B を塗布した供試体においては、中性化フロント付近に Cl⁻の濃縮減少が認められたが、全体としては、いずれの含浸材塗布の場合においても Cl⁻の浸透量は無塗布に比べて抑制されている状況にあった。また、撥水材を塗布した供試体では、中性化フロント部分における濃縮現象は確認されず、表面付近ではかえって他の供試体に比べ Cl⁻量が大きくなる傾向も認められたが、供試体中の浸透量は、含浸材と同様に無塗布よりも少ない状況にあった。

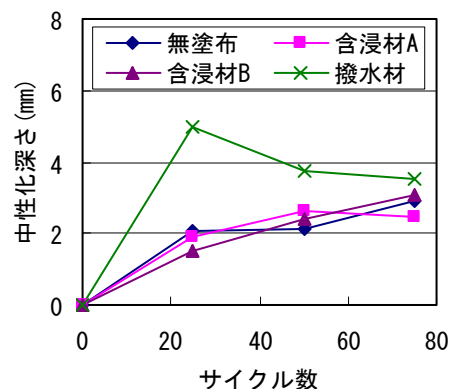


図-3 各表面処理を施した供試体の中性化深さ

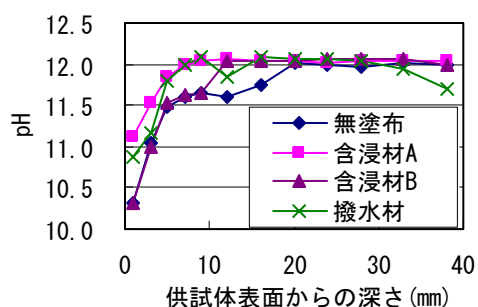


図-4 75 サイクル終了時の pH 分布

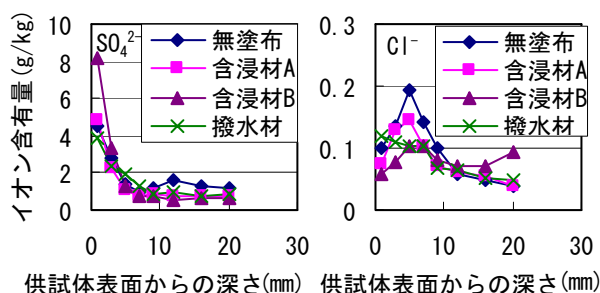


図-5 75 サイクル終了時の表面深さごとの SO₄²⁻、Cl⁻量

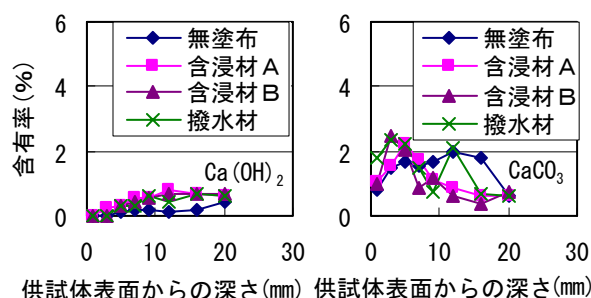


図-6 75 サイクル終了時の表面深さごとの Ca(OH)₂、CaCO₃ 量

また、コンクリートの中性化に対する酸性雨の影響としては、CO₂ との反応によって生成された CaCO₃ を酸性雨中の酸が分解して新たに CO₂ を生成するためにコンクリート内部の CO₂ 濃度が増すことで、コンクリート中における中性化が促進されるといわれている⁵⁾。そこで、この点に関して表面処理の有無や処理材料の違いによる中性化促進程度の差を検討するために、コンクリート

表層部における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ならびに CaCO_3 量の測定を 4.2 で作成した粉末試料を用い、示差熱重量分析にて行った。

一例として 75 サイクル時の供試体表面深さごとの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 量を図-6 に示す。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は、いずれの供試体においても、表面からの深さ 3mm 程度までの領域でほとんど存在していなかったが、それ以深では、表面処理を行った供試体の場合には徐々にその量が増加し、10mm より深い位置では、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が安定する状況が認められたのに対して、無塗布供試体の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は、表面から 20mm 程度まで極めて少ない状況が続き、中性化がより内部まで進行していると思われる状況が確認できた。一方、 CaCO_3 量のコンクリート表層部の分布については、いずれの供試体においても表面の CaCO_3 量が明らかに減少している結果となった。この位置での $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は上記のようにいずれの供試体においても極めて少なく、この部分の中性化の進行は、明らかであることから、この供試体表面の CaCO_3 量の減少は、 CO_2 によって一旦生成された CaCO_3 が酸性溶液中の酸によって分解されたことによるものと考えられる。また、表面処理を行った供試体においては、処理材の種類にかかわらず表面から 5mm 程度の深さで CaCO_3 が濃縮する現象が明確に表れており、このことから、表面付近で酸により CaCO_3 が分解されて生成した CO_2 が外部から侵入した CO_2 とともにこの深さの位置でより多くの CaCO_3 を生成させた結果であると予想された。これに対して無塗布供試体は、表面深さ 4~16mm 程度までのより広い範囲で CaCO_3 の濃縮が認められ、また、その量のピークは深さ 15mm 程度の位置と、表面処理供試体に比べるとより深い位置で確認された。これは、無塗布供試体は、表面処理供試体に比べて酸性雨の影響がより内部まで進んでいることを示す結果であると考えられる。

4.4 圧縮強度

材齢 28 日、促進試験開始直前、25、50 サイクル時に圧縮強度を測定し、その経時変化を図-7 に示した。この結果、表面処理の有無にかかわらず、50 サイクル経過時の供試体においても、設計基準強度と同等の強度を示していた。また、25 サイクルまでは、強度は増加する傾向にあったが、その後、強度は徐々に低下する傾向が認められた。次に表面処理の有無による違いについてみると、まず、25 サイクルでは、含浸材 A、B 塗布供試体の圧縮強度は、無塗布供試体や撥水材を塗布した供試体に比べて低い値となっていたが、その後は、25 サイクルから 50 サイクルまでの間、強度低下が含浸材塗布供試体の方が無塗布に比べ小さく、結果的に 50 サイクルでは含浸材塗布供試体の方が無塗布に比べて強度は大きい状況が認められた。このことより表面処理による強度低下の抑制も期待できることが確認された。

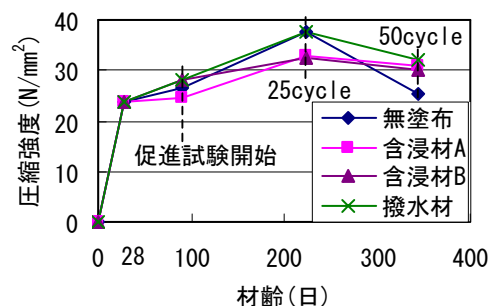


図-7 圧縮強度の経時変化

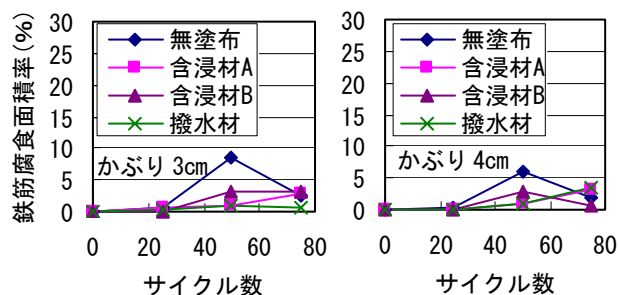


図-8 異形鉄筋の腐食面積率の経時変化

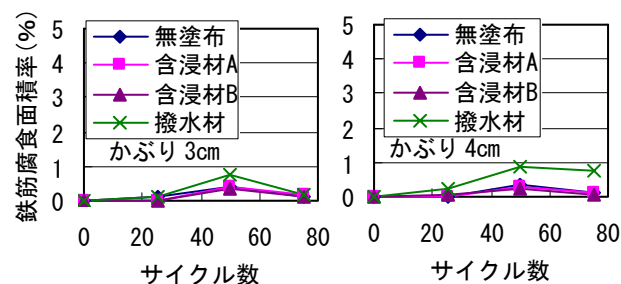


図-9 EP 鉄筋の腐食面積率の経時変化

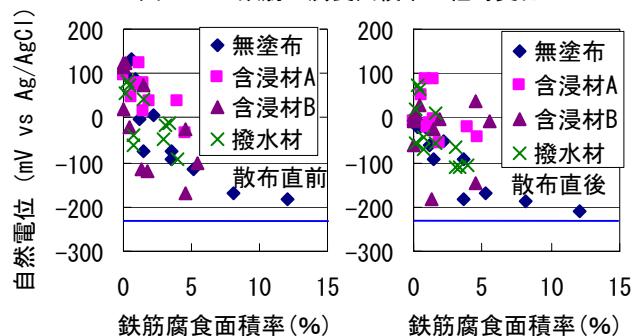


図-10 散布直前、直後のそれぞれの表面処理における自然電位と異形鉄筋の腐食面積率の関係

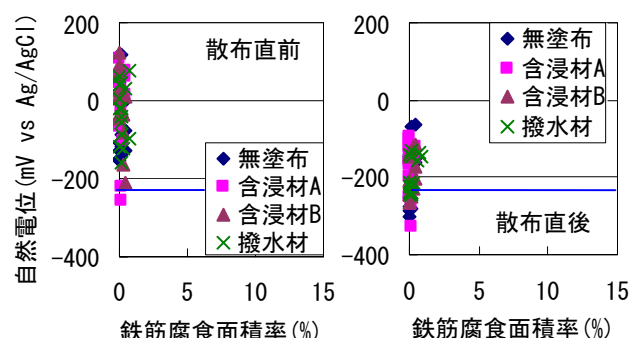


図-11 散布直前、直後のそれぞれ表面処理における自然電位と EP 鉄筋の腐食面積率の関係

4.5 鉄筋腐食状況

4.5.1 鉄筋腐食面積率

鉄筋種類および表面処理の違いによる鉄筋腐食の進行状況について検討を行った。図-8に異形鉄筋の腐食面積率の経時変化を示した。鉄筋腐食量の経時変化にかなりのばらつきも見られるが、鉄筋かぶり 3cm および 4cm のいずれの場合においても、表面処理を施すことにより腐食の進行を抑制する傾向にあることが確認できた。なお、今回の腐食量の測定結果において、かぶりの大小による腐食程度の違いが明確に表れていないことや、促進試験の経過に伴ってかえって腐食量が小さくなる傾向が認められた理由の一つとしては、先に中性化深さの測定結果でも示した様に、吹付けの施工上の問題と思われるコンクリート品質のばらつきが大きかったことが考えられる。

一方、EP 鉄筋の腐食面積率の経時変化を図-9に示した。EP 鉄筋の腐食は、表面処理の有無や種類、サイクル数に関係なくほとんど確認されず、EP 鉄筋の高い防食性能が確認された。

4.5.2 鉄筋自然電位

各解体サイクル時において酸性溶液を散布する直前と散布終了直後にそれぞれ、異形鉄筋および EP 鉄筋の自然電位の測定を行った。その結果とその電位測定直後に測定した鉄筋腐食面積率の関係を図-10、11 に示した。散布直前における異形鉄筋の自然電位は、表面処理有無や種類に拘らず腐食が進行するに伴い、 -230mV (vs 飽和 Ag/AgCl 電極基準：以下同じ) 付近に収束するように分布しており、腐食の有無の判定は、判定基準である -230mV とある程度の相関がある結果となった⁶⁾。また、散布終了直後の自然電位においても同様な傾向が確認されたが、散布直前の場合に比べて自然電位の値に多少ではあるがばらつきが見られた。

一方、EP 鉄筋における腐食量と自然電位の関係について見てみると、鉄筋に腐食が発生していないにもかかわらず自然電位の値が -230mV 以下を示す供試体もあった。この傾向は、特に散布直後の測定で顕著であり、EP 鉄筋の腐食は、従来の自然電位の基準で判定できない結果となった。

5. まとめ

本研究では、一般環境で 100 年以上の耐久性を維持するために開発された EP 鉄筋と含浸材を併用した補強土工法の吹付けモルタル部材の酸性雨と炭酸化の複合劣化環境における耐久性について実験的に検討を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 酸性雨による吹付けコンクリートの表面劣化は、コンクリート表面に含浸材や撥水材を塗布すること

で、表面の変色発生を遅らせることができるとともにセメントの溶質を抑制することが確認された。

- (2) 中性化深さは、無塗布供試体および含浸材 A あるいは B を塗布した供試体では同程度となったが、コンクリート中の pH 分布を測定した結果では、表面処理を施したもののほうがコンクリート内部の pH は高くなり、より中性化がしにくい状況であることが確認された。一方、撥水材を塗布した供試体では、中性化深さは他の供試体に比べて大きくなった。
- (3) 酸性雨によるコンクリートの中性化やその他の劣化促進作用に対しても、ケイ酸塩系含浸材や撥水材をコンクリート表面に塗布した場合には、ある程度の劣化抑制効果を比較的長期にわたって発揮する
- (4) 吹付けコンクリートにおいては、コンクリート中に施工に起因すると思われる品質のばらつきが生じる可能性が通常のコンクリートに比べ高い。この品質のばらつきが耐久性に及ぼす影響は、今回の促進試験では 25 までは明確には現れていなかったが、50 サイクル以上経過すると、顕著に現れるようになってくる。
- (5) 圧縮強度は、促進試験の経過に伴って低下するが、その低下の速度は、含浸材や撥水材を塗布することで遅くなる。なお、いずれの供試体も促進試験 50 サイクル終了時点でも設計基準強度である $24.0\text{N}/\text{mm}^2$ を上回っていた。
- (6) EP 鉄筋の腐食面積率は、全解体サイクルにおいては、コンクリートの表面処理の有無にかかわらず 1.0%未満とわずかであり、EP 鉄筋の高い防食効果が確認された。

謝辞：本研究は、鹿児島大学と(株)日本地下技術との共同研究であり、関係者各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 松元淳一ほか：塩害と中性化が複合した場合の鉄筋腐食と鉄筋自然電位，土木学会年次学術論文集，5-210，pp.417-418，2004
- 2) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設研究所出版部，1963
- 3) 審良善和ほか：コンクリート構造物の酸性雨劣化機構に関する研究，土木学会論文集 5-65，pp.73-82，2004
- 4) 土木学会：119 コンクリートライブラリー表面保護工法，設計施工指針(案) 工種別マニュアル編，pp.150-151，2005
- 5) 小林一輔ほか：酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機関する基礎的研究，土木学会論文集，5-35，pp.243-251，1997
- 6) 小林一輔編集：鉄筋腐食の診断，森北出版，1993