

論文 コンクリート中のエポキシ樹脂塗装被覆鉄筋における腐食損傷に関する実験的検討

渡邊 晋也*1・萩原 直樹*2・長谷 俊彦*3・小野 秀一*4

要旨：米国フロリダ州におけるエポキシ樹脂塗装被覆鉄筋（以下、EP筋と称す。）の腐食損傷事例では、厳しい塩害環境下と高温多湿の影響と言われているが、他方でEP筋の品質に問題があったとの指摘もある。本研究は、EP筋のコンクリート中における腐食損傷に対する抵抗性を把握することを目的に、我が国で製造されたEP筋を用いて、フロリダ州の環境と干満帯を模擬した乾湿繰返し試験による腐食促進試験を実施したものである。その結果、コンクリート中のEP筋に腐食が確認され、エポキシ樹脂塗装の損傷は大別して4つに分類できた。また、タッチアップ材による補修では、その腐食抑制効果は小さい結果を得た。

キーワード：エポキシ樹脂塗装被覆鉄筋、腐食、腐食促進試験、乾湿繰返し

1. はじめに

我が国においては、コンクリート構造物の塩害対策としてエポキシ樹脂塗装被覆鉄筋（以下、EP筋と称す。）が多用されている。エポキシ樹脂塗装被覆鉄筋の規準類については、1983年に日本コンクリート工学協会からの「海洋コンクリート構造物の防食指針（案）」に第2種防食方法の一つとして取り上げられたのが最初である。その後、1991年に改訂版が発刊された。土木学会からは1986年に「エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針（案）」が、2003年にはその改訂版が発刊されている。このように、EP筋の規準化が1980年代から進められてきており、現状では道路構造物をはじめ塩害対策としてEP筋の利用が一般的となっている。

一方で海外の状況は、1970年代からアメリカでは多くの道路橋床版にEP筋が採用され、1981年にASTMで規準化された。しかしながら、1990年代にフロリダ州キウエストにおいて、供用後10年程度でEP筋を利用した橋脚に腐食が生じる事象が確認された。詳細に調査を行った結果、EP筋の運搬時や施工時の塗膜損傷が発生したことやコンクリート中での塗膜剥離が生じていたことに加えて、フロリダ沿岸部に特有の高温多湿な環境条件が主要な原因であったとされている。これらの事例は、L.L. Smith et al.¹⁾が1993年に、田中ら²⁾が2006年に詳細に紹介している。

筆者らは、2008年にEP筋の使用状況についてフロリダ交通局（FDOT）にヒアリングや現地での調査を実施した結果、EP筋の使用は原則として禁止されていた。その上でEP筋の代替として腐食対策にはシリカフェーム等の混和材を用いる緻密性を向上させた高性能コンクリート

の使用やDual-Coated Steel Reinforcing Barを使用することが推奨されていた。Dual-Coated Steel Reinforcing Barとは、亜鉛めっき鉄筋にエポキシ樹脂塗装を行う二重保護したものであり、ASTMA 1055に規定されている。また、EP筋の使用を禁止している理由の一つには、EP筋を用いた場合、腐食が生じた際に電気防食等の対策が実施できないことが挙げられていた。一方で、寒冷地となるミシガン州などでは、EP筋が採用されていることが報告^{2,3)}されている。

上述したように、北米のほとんどでEP筋を使用しているにもかかわらず、フロリダ州でEP筋を禁止している理由として、フロリダ沿岸の厳しい塩分環境と高温多湿な環境があると言われている。一方で、エポキシ樹脂塗装前の処理が不十分で塗膜の密着性が低いなどの品質や施工までの管理および使用しているコンクリートの品質が悪いことなどを指摘しているものもある⁴⁾。

今回、これらの問題を確認するために、FDOTや米国連邦道路庁（FHWA）が指摘した厳しい塩害環境および高温多湿の状況を想定して、日本で流通しているEP筋を用いてコンクリート中の腐食について検討した。具体の試験として、本研究では、屋外暴露試験と室内における腐食促進試験を実施してEP筋の腐食調査をおこなっている。本論文では、室内における腐食促進試験の結果について報告する。

2. 試験概要

2.1 腐食促進試験

フロリダ州の事例では海洋環境に設置された橋脚に損傷が多く発生していることから、潮汐による乾湿の繰返

*1 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 主任研究員 博（工）（正会員）

*2 中日本高速道路株式会社 東京支社 秦野工事事務所 工事長（正会員）

*3 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 室長（正会員）

*4 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 部長 博（工）（正会員）

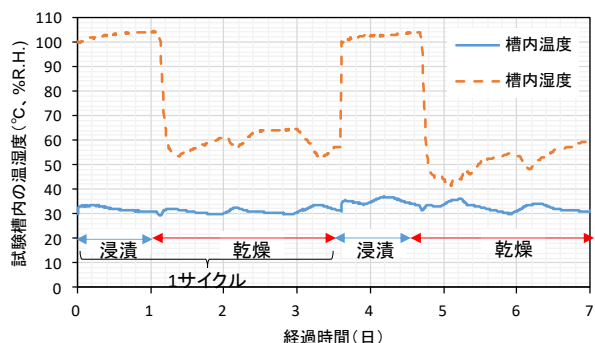


図-1 乾湿繰返し試験槽における温湿度

しに影響していると考えられる。したがって、腐食促進試験としては乾湿の繰返し負荷が必要と考え、乾湿繰返し試験を用いて試験を行った。温度についてはフロリダ州の高温状態を想定するとともに、温度変化による熱膨張係数の差を小さくするために、乾燥時および湿潤時も $40 \pm 10^\circ\text{C}$ となるようにした。湿潤（浸漬）に用いた水溶液は 5%NaCl 水溶液とした。既往の研究⁵⁾を参考にして、コンクリートの乾燥と湿潤が明確になるように浸漬時間 24 時間、乾燥時間 60 時間を 1 サイクルとして計 168 サイクル（588 日間）を実施した。実際の槽内の温湿度履歴を図-1 に示す。実測の結果、槽内の温度は平均 32.4°C （最大 37.06°C 、最低 29.17°C ）であった。湿度は、湿潤時は 100%R.H.となり、乾燥時に 40~60%R.H.になっていた。

2.2 使用材料

(1) 鉄筋

本研究では、国内に流通している塗膜性能試験およびエポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格（JSCE-E102-2013）を満足する結果を得ている D13 の EP 筋を用いた。本研究で使用した EP 筋の膜厚は平均で $259.9 \mu\text{m}$ であった。本試験では、上述の健全な EP 筋に加え、被覆の一部を人為的に損傷させた条件（以下、EP 筋-損傷と称す）と損傷後に専用補修材（以下、タッチアップ材と称す）で補修した条件（以下、EP 筋-補修と称す）を設定した。すなわち、本研究では表-1 に示す 3 ケースの試験体を用いている。EP 筋の人為的に損傷させた傷は $5 \times 13\text{mm}$ として、ASTMA 775 の許容値と同じ 65mm^2 と設定した。損傷部は 5cm に 1 ヶ所としたので、試験片の損傷面積率は 3.25%となり、ASTMA 775 の許容値である 2%を上回っている。したがって、ASTM に従うと補修を施さなければならない EP 筋となる。EP 筋の損傷状況とその補修状況を写真-1 に示す。また、比較として腐食が生じにくいステンレス鉄筋（以下、SUS と称す）も試験をした。SUS には JIS G 4322 に示されているとおり 3 種類のステンレス鋼があるが、本研究では、SUS の中で腐食が生じやすい SUS410 を用いた。

(2) コンクリート

本研究で用いたコンクリートは W/C : 54.5%の呼び強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 、スランプ 8cm の普通コンクリートとした。コンクリートの配合を表-2、コンクリートの諸性質を表-3 に示す。表-3 より、促進中性化係数は小さいものの、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は一般的なコンクリートと比較して若干大きい値となっていることがわかる。

表-1 コンクリートの配合

使用鉄筋	略称	適用
エポキシ樹脂塗装被覆	EP筋	既製品 (SD295) (膜厚：実測値平均 $259.9 \mu\text{m}$)
	EP筋-損傷	65mm^2 を5cmごとに損傷 (損傷面積率：3.25%)
	EP筋-補修	損傷部をタッチアップ材 で補修
ステンレス (比較)	SUS	SUS410-295 (クロム系)

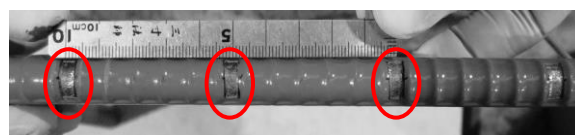
表-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m^3)					
(%)	(%)	W	C	S1	S2	G	Ad
54.5	47.0	155	285	529	353	1000	2.85

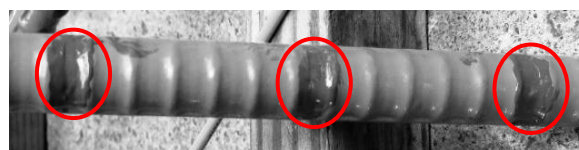
C：普通ポルトランドセメント、S1：富士川産川砂、S2：富士宮産山砂、G：富士川産川砂利、Ad：AE減水剤

表-3 使用したコンクリートの諸性質

試験項目	試験規格	結果
28日圧縮強度	JIS A 1108	$29.1\text{N}/\text{mm}^2$
促進中性化係数	JIS A 1153	$2.47\text{mm}/\text{week}^{1/2}$ (促進期間：26週)
塩化物イオンの見掛けの拡散係数	JSCE-G 572	$4.21\text{cm}^2/\text{year}$ (浸漬期間：632日)



1) 人工損傷状況 (○の箇所が損傷部)



2) 人工損傷の補修状況 (○の箇所が補修部)

写真-1 EP 筋の損傷状況とその補修状況

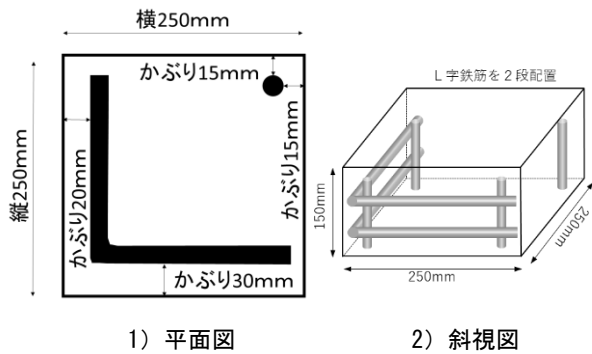


図-2 試験体の配筋および寸法

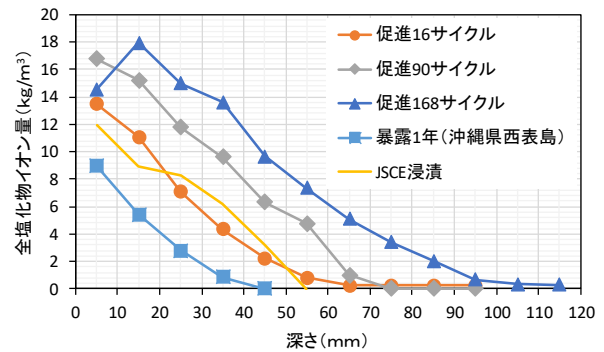


図-3 コンクリート中の塩化物イオン量

表-4 調査項目

	試験項目	試験方法	適用
(1)	ひび割れ観察	目視	経過観察
(2)	自然電位	銀塩化銀電極	
(3)	コンクリート中の塩化物イオン	電位差測定法	解体調査
(4)	鉄筋への付着塩分	イオンクロマト法	
(5)	鉄筋の腐食面積	JCI法	
(6)	鉄筋の腐食度	JCI法	

2.3 試験体寸法

本試験で用いた試験体は、縦 250mm×横 250mm×高さ 150mm として、L字型に曲げ加工した鉄筋を2本および単体の鉄筋1本を配置した。なお、EP筋の切断面はタッチアップ材で補修し、切断面から30mmの範囲は試験評価対象から除外している。コンクリートのかぶりは鉄筋の位置を調整することで15mm、20mm および30mmの3条件とした。試験体の上下面には塩化物イオンの浸透を防止するためにエポキシ樹脂塗装を施している。図-2に配筋状況を示す。

2.4 調査項目

表-4に示すように、試験中の経過観察として外観調査および自然電位の測定を4~8サイクルに1回実施している。解体調査は、試験体に外観変状が現れた後に実施しており、EP筋-損傷では、74サイクル時に腐食に伴うと考えられるひび割れが確認されたことを受け90サイクルで解体調査を行った。その後、EP筋のかぶり15mmにおいて腐食ひび割れが発生し、また、EP筋-損傷・EP筋-補修においても腐食ひび割れが多くなった168サイクルで解体調査を実施した。

3. 試験結果

3.1 コンクリート中の塩化物イオン量

腐食促進試験によるコンクリート中の塩化物イオン量の測定結果を図-3に示す。また、同一のコンクリート試験体を沖縄県西表島の飛沫帯(雨掛り無)に1年間

暴露した結果および標準試験で実施した浸漬法の塩化物測定結果(JSCE浸漬(632日間))も付記している。腐食促進試験の結果では、16サイクル(試験期間:56日)で沖縄県西表島の飛沫帯の2倍程度の塩化物イオン量が測定され、90サイクル(試験期間:315日)で、沖縄県西表島の飛沫帯の3.5倍程度の塩化物イオンが浸透している結果となった。168サイクル(試験期間:588日)では、表層で塩化物イオンの溶脱が見られたが、かぶり15mmで18kg/m³、かぶり30mmで14.5kg/m³程度の塩化物イオン量が確認された。この結果からEP筋は、腐食促進試験においては、非常に厳しい腐食環境に曝されることが言える。

3.2 鉄筋の外観状況

各サイクルの腐食促進試験後コンクリート中からEP筋を採取した結果、目視でEP筋に腐食が生じていることが確認できた。損傷状況を写真-2~写真-5に示す。EP筋の損傷状況はその特徴から大別して4種類に分類することができた。すなわち、a)リブ上のエポキシ樹脂が薄いと思われる箇所からのひび割れ(写真-2)、b)局所的な腐食に伴うEPの盛り上がり(写真-3)、c)損傷した箇所から生じた微細なひび割れ(写真-4)、d)タッチアップ材で補修をした箇所からの錆(写真-5)である。写真-3の箇所に変状が生じている箇所のエポキシ樹脂塗装を剥がすと、鉄素地に写真-6に示すとおり腐食が生じていた。このことからエポキシ樹脂塗装を劣化因子(水分や塩化物イオン)が透過し、素地を損傷させていることが考えられる。なお、SUSは一部に孔食が見られたが、全体的には点錆が生じている程度であった(写真-7)。

3.3 エポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食状況

コンクリート中のEP筋に腐食が生じていることを確認するために、EP筋の鉄素地について詳細な調査を実施した。

(1) エポキシ樹脂塗装の剥がれ率

鉄素地に腐食が生じている箇所については、簡単にエ

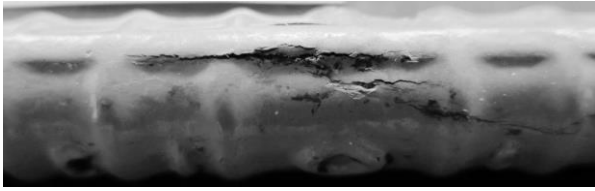


写真-2 リブに沿った EP 樹脂塗装のひび割れ

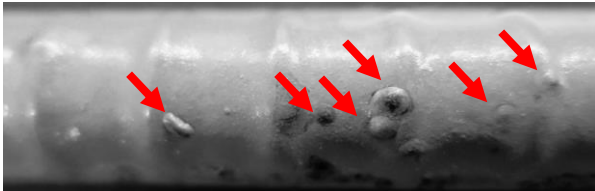


写真-3 EP 樹脂塗装の膨れ (矢印部)

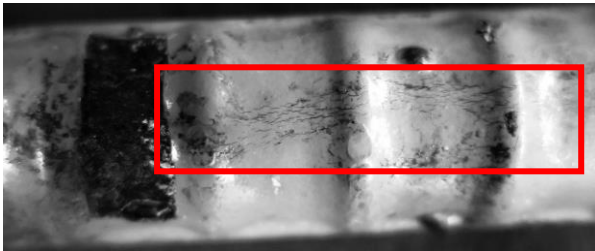


写真-4 損傷部から発生した EP 樹脂塗装の微細なひび割れ (枠部)

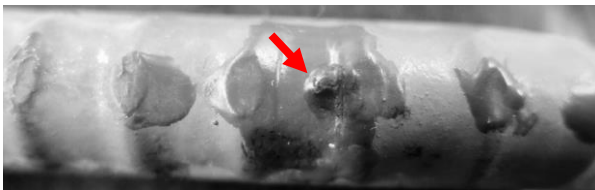


写真-5 補修部から発生した腐食 (矢印部)

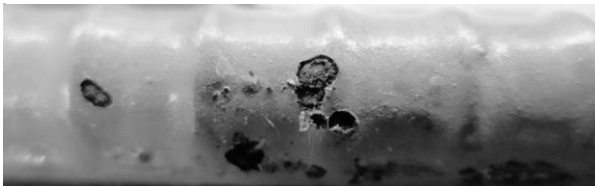


写真-6 EP 樹脂塗装の膨れが発生した箇所の鉄素地状況 (腐食が発生)



写真-7 SUS 筋の腐食状況 (孔食、点錆)

ポキシ樹脂塗装が剥がれたことから、エポキシ樹脂塗装と鉄素地との付着が著しく低下していることが確認された (図-4)。このように簡単にはがれた範囲を剥がれ率として図-5 に示す。その結果、EP 筋-損傷は、90 サイクルから全部剥がれていることが確認された。一方で、補修を施した EP-補修の場合、90 サイクルのかぶり 30mm で 95%の剥がれが生じ、168 サイクルでは全部剥がれる結果となった。したがって、損傷部のタッチアッ

プによる防錆効果は比較的小さいと考えられる。また、損傷を与えていない EP 筋の場合、かぶり 15mm では全部剥がれる結果となったが、損傷有と比較すると多少は腐食を抑制される結果となった。

(2) 腐食面積率

EP 筋の腐食面積は、図-6 に示す指標を定義して、黒錆と赤錆の面積を計測して全面積に占める割合を腐食面積率とした。腐食面積率を図-7 に示す。EP 筋では、90 サイクルから 168 サイクルで腐食が進行していることが確認できる。EP 筋-損傷と EP 筋-補修については、168 サイクルでは大きく変わらない腐食面積率である結果となった。また、90 サイクルの EP 筋においてかぶり 20mm の結果が極端に小さくなっている理由は、試験体のばら

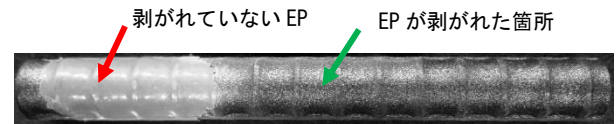


図-4 EP 樹脂の剥がれ状況 (EP 筋かぶり 30mm)

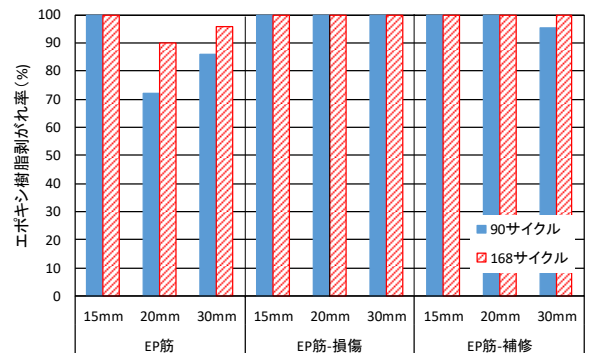


図-5 エポキシ樹脂塗装の剥がれ率



黄色：EP 樹脂が剥がれない箇所 (腐食が生じていない)
赤線：プラスト面 (腐食が生じていない)
その他：黒錆と赤錆 (剥がした初期は黒錆) (腐食が生じている)

図-6 エポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食定義

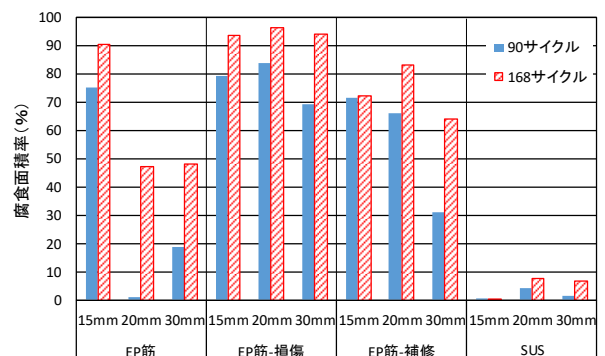


図-7 腐食面積率

つきの影響が考えられるが、詳細は不明である。

比較とした SUS は点錆が生じており、8%程度の腐食面積率であった。

(3) 質量減少率

クエン酸水素二アンモニウム水溶液を用いて除錆し、腐食生成物除去後質量から求めた質量減少率を図-8に示す。図より腐食面積率と同様に90サイクルから168サイクルで腐食が進展していることが確認できる。なお168サイクルでEP筋の質量減少率は平均1%程度であった。一方でEP筋-損傷およびEP筋-補修では168サイクルの質量減少率は平均2%程度となった。このことから、エポキシ樹脂塗装が一度損傷してしまうと、損傷していない場合と比較して2倍の腐食が生じることが判明した。

(4) 腐食度

腐食度を算出した結果、EP筋は168サイクルで平均4.54mdd、EP筋-損傷は10.66mddおよびEP筋-補修は10.22mddであった。損傷を有することで、腐食度は大きくなる結果となった。また、タッチアップ材による補修を施しても、腐食に対する抵抗性は高くないことが判明した。一方で、SUSは0.39mddとなり腐食に対する抵抗性は非常に高い結果となっている。

(5) 孔食の状況

EP筋の鉄素地に写真-8に示すような孔食が確認された。特に、エポキシ樹脂塗装が腐食により損傷している箇所で孔食が発生していることが多かった。一方で、人為的にEPを損傷させた箇所については写真-9に示すように孔食ではなく、面的な腐食になりその周辺に孔食が発生していた。このような孔食が生じた位置ではマクロセル腐食が生じていると考えられる。図-9に単位長さあたりの孔食数を示す。ここでは孔食の定義として直径2mm以上のものを対象としている。EP筋に比べてEP筋-損傷が孔食の数は多くなる傾向が得られた。この理由として上述したようにマクロセル腐食の影響が考えられる。一方で、EP筋-補修は、孔食数が少ない結果となった。このことから、防食にはタッチアップ材塗布の効果は少なかったが、孔食の抑制に対する効果は有すると言える。図-10に最大孔食深さの結果を示す。最大深さは、EP-損傷で3.44mmの孔食が確認された。平均孔食深さはEP筋で1.7mm、EP筋-損傷で2.8mmおよびEP筋-補修で2.2mmとEP筋-損傷が深くなる結果となった。孔食数と孔食深さの結果から、エポキシ樹脂塗装が損傷したままコンクリート中に設置された場合、孔食の発生リスクは大きくなり、鉄筋の破断等につながる可能性があると考えられる。

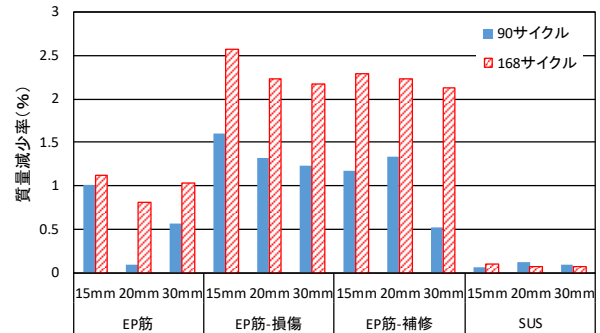


図-8 質量減少率



写真-8 EP筋の素地に発生した孔食状況

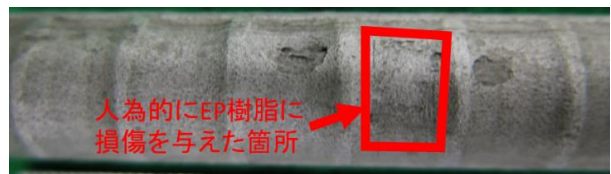


写真-9 EP筋-損傷に発生した孔食状況

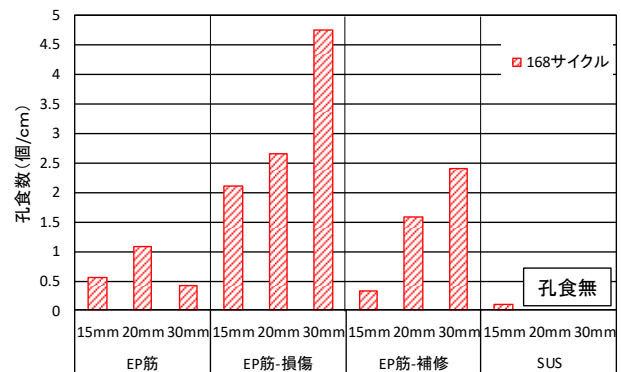


図-9 鉄素地に発生した孔食数

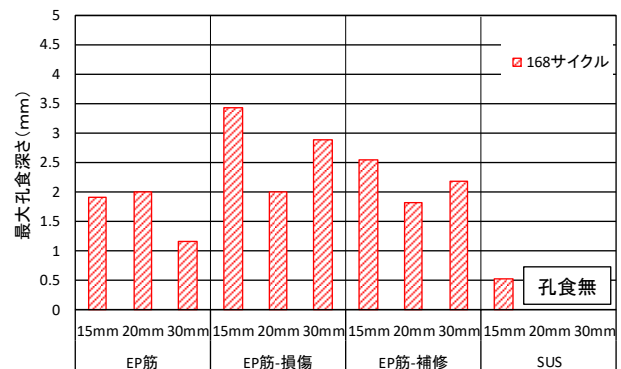


図-10 鉄素地に発生した最大孔食深さ

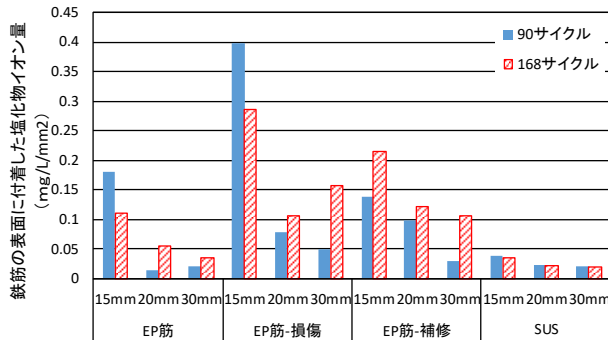


図-11 鉄筋表面に付着した塩化物イオン量

(6) 鉄筋素地の表面に付着した塩化物イオン量

本試験では、エポキシ樹脂塗装に損傷が生じていないエポキシ樹脂塗装鉄筋においても鉄筋素地に腐食が発生していることが確認された。これは、エポキシ樹脂塗装を外的因子（水分や塩化物イオン）が透過していることが示唆していると考えられる。一方、実際に使用した製品の品質評価試験では、JSCE E104-2003 の塗膜塩化物イオン透過性において塩化物イオンは透過しない結果となっていた。しかしながら、水蒸気透過性については、性能確認試験が規定されていないことから、水蒸気が透過するかどうかは不明である。そこで、本研究では塩化物イオンの透過性に着目して鉄筋素地の塩化物イオンの付着量を調査した。測定方法は、コンクリート中から鉄筋を採取し、エポキシ樹脂塗装を剥いだ後、所定の長さ（90mm～120mm）に切断した。その後、50℃の蒸留水に浸漬させ超音波振動を加えて塩化物イオンを抽出した。なお、液固比は一定（蒸留水：鉄筋表面積＝1ml：240mm²）としている。抽出液を液体イオンクロマトグラフにより塩化物イオンの測定を行い、単位面積当たりの塩素イオン量で評価を行った。基本的に錆部には塩化物イオンが集積する傾向があることから、塩化物イオンがあればエポキシ樹脂塗装を透過して錆が発生したと考えられる。ただし、腐食によりエポキシ樹脂塗装が損傷した場合は塩化物イオンが浸透して発錆したのか、損傷が生じて塩化物イオンが付着したのかが不明である。図-11 に測定結果を示す。EP筋ではかぶりが小さいほど、また、腐食が激しいほど鉄筋の表面に付着した塩化物イオン量が多くなる結果となった。したがって、エポキシ樹脂塗装を塩化物イオンが透過している可能性があることが示唆されたと言える。

4. まとめ

本研究では、エポキシ樹脂塗装鉄筋のコンクリート中に対する腐食損傷状況について調査を行った結果以下のことが判明した。

- (1) アメリカで問題となったフロリダ州の高温多湿環境を想定して、乾湿繰返し試験による腐食促進試験を行った結果、我が国に流通している一般的なEP筋でも90サイクルで腐食が生じる結果となり、サイクルが多くなることでEP筋の腐食が進展することが確認された。
- (2) エポキシ樹脂塗装には、4つの損傷に大別できた。特にリブなどのエポキシ樹脂塗装が薄くなる箇所については、腐食が激しい結果となった。また、全体にエポキシ樹脂塗装が膨らむ箇所が確認され、その直下にある鉄素地は腐食していることが確認された。この理由としては塩化物イオンが透過した可能性がある。ただし、詳細は不明である。
- (3) EP筋の腐食については、マクロセル腐食が発生し局部的な孔食が生じることが判明した。また、損傷部よりもその周辺に孔食が生じることも判明した。
- (4) タッチアップ材で損傷部を補修しても、腐食の抑制にはあまり効果が得られないが孔食の進行は抑えられる結果となった。

今後、どの程度の温湿度がEP筋の腐食発生に影響するのかについて、さらなる検討を実施するとともに、実環境下においても同様の腐食が生じるのかについては追跡調査を実施したいと考えている。

参考文献

- 1) L.L.Smith, R.J.Kessire, R.G.Powers : Corrosion of Epoxy coated Rebar in a Marine Environment, Transportation Research Circular, 403, 1993.3
- 2) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志 : 北米における実構造物コンクリート中のエポキシ樹脂塗装鉄筋の性能, 土木学会論文集E, Vol.62, No.4, pp.739-756, 2001.11
- 3) (社)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所: 2002 米国土木構造物補修・補強調査報告書, 2002.3
- 4) 丸屋剛 : エポキシ樹脂塗装鉄筋・ステンレス鉄筋, コンクリート工学, Vol.49, No.5, 2011.5
- 5) 中川祐之, 田中大博, 横田優, 松島学 : 塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集E, Vol.64, No.1, pp.110-121, 2008.2
- 6) 渡邊晋也, 萩原直樹, 小野秀一, 長谷俊彦 : コンクリート中の各種鉄筋腐食に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第19巻, pp.77-82, 2019.10