

論文 PVB-S 被覆鉄筋の鉄筋防錆効果に関する基礎検討

嶋田 祐人*1・審良 善和*2・石田 知子*3・太田 健司*4

要旨：現在，エポキシ樹脂塗装鉄筋に替わる防錆鉄筋として，伸び能力が高い PVB 樹脂で鉄筋を被覆し，珪砂を吹付けることでコンクリートとの付着向上を図った PVB-S 被覆鉄筋が開発されている。既往の研究¹⁾²⁾より，付着性能の改善や疲労耐久性の向上などが確認されている。しかし， PVB-S 被覆鉄筋の防錆効果については，施工環境を考慮したデータの収集が必要である。そこで，本研究では塗膜の塩化物イオン浸透性，耐候性に関する検討およびコンクリート中 PVB-S 被覆鉄筋の耐食性に関する検討を行った。その結果， PVB-S 被覆鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋と同等の塩化物イオン透過抵抗性をもつことが明らかとなった。

キーワード：防食鉄筋， PVB-S 被覆鉄筋， 塩化物イオン浸透抵抗性， 腐食

1. はじめに

特に厳しい塩害環境に曝される鉄筋コンクリート構造物では，耐久性の確保を目的として防食鉄筋が用いられる。防食鉄筋には，エポキシ樹脂塗装鉄筋が多く使用されているが，施工時や組み立て時に疵が付きやすいことや，普通鉄筋に比べコンクリートとの付着が低下することなどが問題点として挙げられている¹⁾²⁾³⁾。そこで，伸び能力が高いポリビニルブチラル樹脂（以下， PVB 樹脂と称す）で鉄筋を塗装し，コンクリートとの付着向上を目的として珪砂を塗布した，樹脂被覆鉄筋（以下， PVB-S 被覆鉄筋と称す）が開発されている。既往の研究により， PVB-S 被覆鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋と比較して，付着強度，施工性，疲労に対する耐久性に優れていることが確認された¹⁾²⁾。

PVB-S 被覆鉄筋の防錆効果については，土木学会「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」³⁾の要求性能を満足することを確認している。しかし，より現実的な防錆効果を把握するためには，施工環境を考慮したより詳細なデータを収集する必要がある。そこで，本研究では，塩化物イオンの浸透抵抗性の確認のため，塩化物イオン透過性試験を実施した。また，保

管時の日射による塗膜劣化の有無を確認するため，模擬日照試験を実施した。さらに，コンクリート中被覆鉄筋の耐食性を確認するため， PVB-S 被覆鉄筋を用いた鉄筋コンクリート供試体による暴露試験を実施し，防食鉄筋の防錆効果について検討を行った。

2. PVB-S 被覆鉄筋について

PVB-S 被覆鉄筋は，膜厚 $220 \pm 40 \mu\text{m}$ で PVB 樹脂を被覆した後に珪砂を吹付けることで，鉄筋防錆と付着性の向上を期待したものである。なお，珪砂吹付け後の膜厚は $300 \pm 100 \mu\text{m}$ となる。 PVB-S 被覆鉄筋の外観を写真-1 に示す。

表-1 に PVB 樹脂とエポキシ樹脂の代表的な物性値を示す。引張強さはエポキシ樹脂と同程度であるが，伸びはエポキシ樹脂に比べ非常に大きいことが分かる。このことから， PVB-S 被覆鉄筋は曲げ加工時などの伸びに対する追従性が高い材料となり，また，衝撃に対しても変形はするもののワレや剥離等の疵の発生に対する抵抗性が向上すると考えられる¹⁾。しかしながら，ガラス転移温度が低いことから，日射等の影響により高温状態になった時の樹脂の劣化が懸念される。

表-1 PVB 樹脂とエポキシ樹脂の物性対比

項目		PVB樹脂	エポキシ樹脂
機械的性質	引張強さ (kg/cm^2)	600~800	280~910
	伸び (%)	100~120	3~6
	引張弾性率 ($10^4 \text{kg}/\text{cm}^2$)	1.1~1.4	2~5
熱的性質	ガラス転移温度 ($^{\circ}\text{C}$)	69	116.1
	軟化点 ($^{\circ}\text{C}$)	160~175	



写真-1 PVB-S 被覆鉄筋の外観

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科工学専攻海洋土木工学プログラム (学生会員)

*2 鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 課長 博士 (工学) (正会員)

*4 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 修士 (工学) (正会員)

3. 被覆膜の塩化物イオン透過性

3.1 試験概要

図-1 に塗膜塩化物イオン透過性試験の試験体概要図を示す。試験は「エポキシ樹脂塗装鉄筋用塗料の塗膜塩化物イオン透過性試験方法」(JSCE-E 530-2003) に準拠して行った。

まず、塗膜試験片の作製方法について示す。予め離型剤を塗布した鋼板に試験に使用する樹脂を目標膜厚までスプレー塗装し硬化させた後、塗膜を必要な大きさに切断し鋼板から剥がし試験片とした。得られた塗膜試験片を内径 $\Phi 50\text{mm}$ 、容量 0.2L のガラス容器で挟むように設置した。塗膜表面側の容器(セル A)に 5%の塩化ナトリウム水溶液、塗膜裏面側の容器(セル B)に蒸留水を入れ、塩化物イオンを自然拡散させた。なお、試験は 20℃ 一定の室内で実施した。

表-2 に試験で使用した塗膜試験片の種類を示す。試験片の作製にあたり機械塗装ではなく、手吹き塗装であったため、膜厚にばらつきが生じた。試験に用いた塗膜は、PVB-S 膜、PVB 樹脂およびエポキシ樹脂の 3 種類とした。それぞれの目標膜厚は、PVB-S 膜が $300\pm 100\mu\text{m}$ 、PVB 樹脂およびエポキシ樹脂が $220\pm 40\mu\text{m}$ および

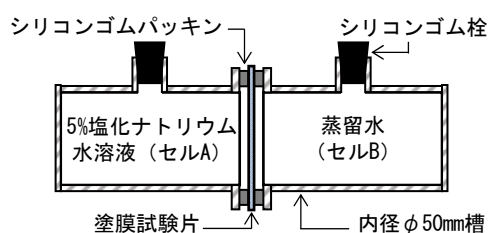


図-1 試験体の概要

表-2 塗膜試験片の種類

塗膜試験片の種類	目標膜厚 (μm)	衝撃疵	平均膜厚 (μm)		
			1	2	3
PVB-S膜	300 ± 100	無	245	258	
		有	248	253	
PVB樹脂	220 ± 40	無	170	177	198
		有	172	173	205
エポキシ樹脂	100 ± 30	無	129	119	135
		有	129	119	135
	220 ± 40	無	286	241	240
		有	192	220	260
エポキシ樹脂	100 ± 30	無	92	83	105
		有	92	83	105

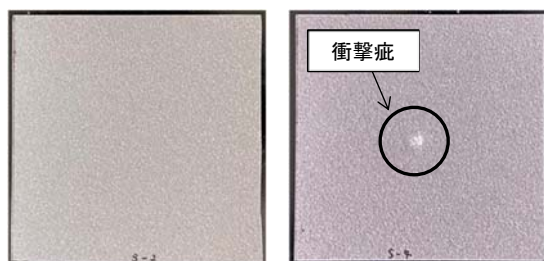
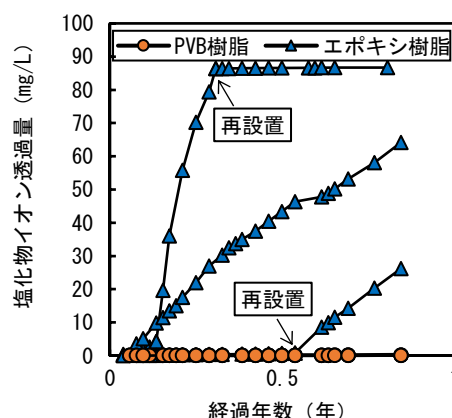


写真-2 塗膜試験片

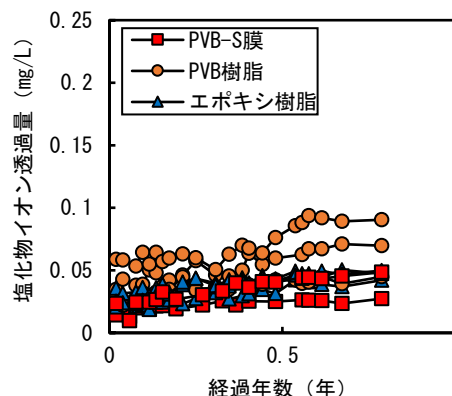
$100\pm 30\mu\text{m}$ とした。また、写真-2 に示すように目標膜厚 $300\pm 100\mu\text{m}$ および $220\pm 40\mu\text{m}$ の塗膜試験片に関しては、板厚 3mm の鋼板に塗装した状態で塗面に垂直にシュミットハンマーを設置し、一定の衝撃を与えることで、施工時に生じる可能性がある衝撃を模擬した損傷塗膜も試験に用いた。なお、シュミットハンマーにより与えられる応力は約 40N/mm^2 である。

3.2 測定方法

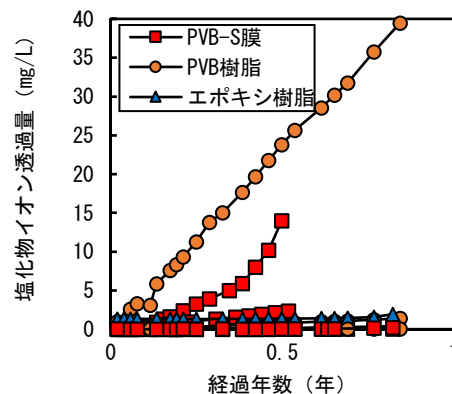
定期的に蒸留水側の溶液を採取し、濃度勾配により塩化ナトリウム水溶液側から蒸留水側に自然拡散する塩化物イオンをイオンクロマトグラフを用いて測定した。



(a) $100\pm 30\mu\text{m}$ 衝撃疵無



(b) $300\pm 100\mu\text{m}$, $220\pm 40\mu\text{m}$ 衝撃疵無



(c) $300\pm 100\mu\text{m}$, $220\pm 40\mu\text{m}$ 衝撃疵有

図-2 塩化物イオン透過量

3.3 結果および考察

(1) 塩化物イオン透過量

図-2 に各塗膜試験片の塩化物イオン透過量の経時変化を示す。なお、図-2 (a) 中の矢印は、エポキシ樹脂試験片を拡散セルから一度取り外し、再設置した時を示している。

図-2 (a) に着目すると、PVB 樹脂はエポキシ樹脂と比較して透過量が非常に小さいことが分かる。ただし、エポキシ樹脂の塩化物イオン透過量は一定ではなく、同じ試験片であっても透過速度が大きく異なる傾向を示した。これは、溶液交換に伴い塗膜試験片を再設置した時を境に急激に変化していることから、塗膜には目視およびピンホール試験 (1000V) では判定できない微細な欠陥が存在しており、再設置前後で試験面が若干ずれたため、試験面内の微細な欠陥の有無によって拡散の速度が変化したと考えられる。なお、エポキシ樹脂のように急激な塩化物イオンの透過が認められない場合であっても若干の透過は認められた。

次に、図-2 (b) に着目すると、いずれの塗膜試験片においても、若干量ではあるが塩化物イオンが透過している傾向にある。また、その透過量に大きな差はないことが確認された。図-2 (c) の衝撃疵ありの塗膜試験片については、PVB-S 膜および、PVB 樹脂は、それぞれの試験片において塩化物イオン透過量が大きくばらつく傾向を示した。これは衝撃による疵の大小が影響しているものと考えられる。一方で、エポキシ樹脂に関しては、いずれの塗膜試験片も同程度の透過量となっている。その平均透過量は 0.8 年時点で約 0.8mg/L であり、衝撃疵なしの塗膜試験片より少し大きくなる傾向にあった。このことから、同程度の疵が発生しているものと予想される。

(2) 塩化物イオン拡散係数

図-2 より、蒸留水側の塩化物イオン増加率を求め、これを用いて各塗膜試験片の拡散係数の算出を行った。なお、塩化物イオン拡散係数の算出には、式 (1) に示す Fick の第一法則を簡略化した式を用いた。

$$D_{cc} = \frac{V_{II} \cdot L}{S \cdot C_I} \cdot \frac{\Delta C_{II}}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 D_{cc} ：塩化物イオン拡散係数 (cm^2/y)、 V_{II} ：蒸留水側の容積 (L)、 L ：塗膜試験片厚さ (cm)、 S ：試験面積 (cm^2)、 C_I ：塩水側の塩化物イオン濃度 (mg/L)、 $\Delta C_{II}/\Delta t$ ：蒸留水側の塩化物イオン増加率 (mg/L/y) である。なお、目標膜厚 $100 \pm 30 \mu\text{m}$ のエポキシ樹脂に関しては、図-2 (a) で示したように、塩化物イオンの増加が小さい期間 (試験面の塗膜が健全と考えられる期間) と、塩化物イオンの増加が大きい期間 (試験面の塗膜に目視

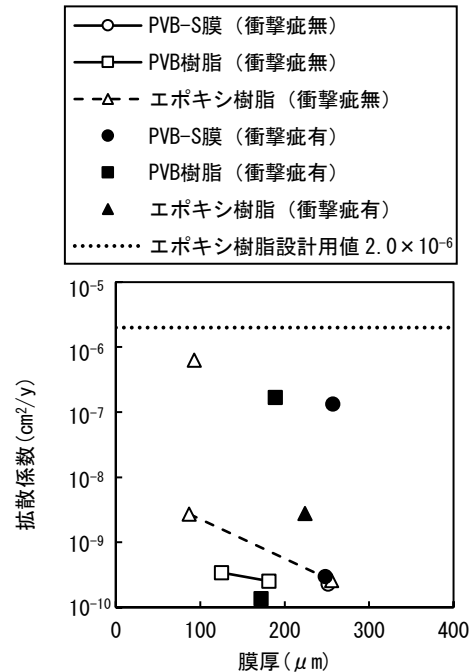


図-3 塩化物イオン拡散係数

できない微細な欠陥があると考えられる期間) に分けて塩化物イオン拡散係数を算出した。また、衝撃を与えた PVB-S 膜および PVB 樹脂は、衝撃による塩化物イオン増加量への影響の有無により分類し、塩化物イオンの拡散係数を算出している。

図-3 に各塗膜の拡散係数と膜厚の関係を示す。「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」では、設計上の安全性も考慮して構造物の供用期間中の耐久性を保証するための概念として、塗装欠陥や損傷部の影響あるいは長期的な塗装劣化の可能性を含めて考えたエポキシ樹脂内の塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設計用値は $2.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{y}$ とされている³⁾。いずれの塗膜も衝撃疵の有無に関わらず塩化物イオン拡散係数はエポキシ樹脂の設計用値を下回っていることが分かる。このことから、十分な塩化物イオン透過抵抗性を持っていることが分かる。なお、指針では、エポキシ樹脂の塩化物イオン拡散係数は $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{y}$ としても安全側であるという報告もある³⁾。ここで、衝撃を与えていない健全な塗膜の塩化物イオン拡散係数はいずれも同等の値を示しており、 $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{y}$ に近い値である。このことより、PVB-S 膜、PVB 樹脂はエポキシ樹脂と同等に非常に高い塩化物イオン透過抵抗性を持つことが考えられる。また、PVB 膜は膜厚に関わらず概ね一定の値を示した。一方、エポキシ樹脂の薄膜 (目標膜厚 $100 \pm 30 \mu\text{m}$) の結果をみると、健全と考えられた膜および微細な欠陥が発生していると思われる膜ともに PVB 樹脂に比べ塩化物イオン拡散係数は大きな値を示した。このことから、塗膜の均一性に関しては PVB 樹脂の方が優れていると予想

され、また、珪砂による影響は小さいと考えられる。

衝撃を与えた塗膜試験片の塩化物イオン拡散係数は、いずれの塗膜においても健全膜に比べ大きくなる傾向を示した。このことから、衝撃による疵の発生により拡散速度が著しく増加したと考えられる。図に示した拡散係数は試験面を供試面積として求めたものであり、欠陥部分の拡散係数は非常に大きいと予想される。このことから、PVB 樹脂は高い伸び性能により曲げ加工等による亀裂等の発生を抑えることは可能であると考えられる。また、現場での組み立て時に発生する衝撃に関しては、耐衝撃性試験 (JSCE-E 514-2003) より、樹脂の変形に対する追従性により損傷度合いはエポキシ樹脂塗装鉄筋と比べて軽微になることを確認している⁹⁾。ただし、40N/mm²程度の大きな衝撃が与えられた場合は、微細な欠陥が発生してしまう可能性が考えられる。よって、エポキシ樹脂と同様に目視で判別できる欠陥に関しては、補修することが必要であると考えられる。

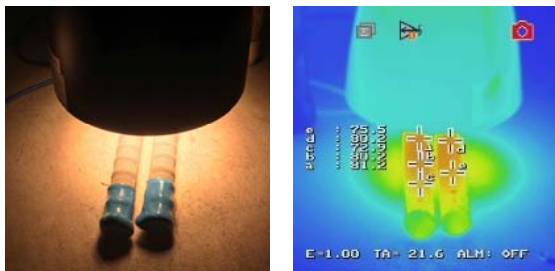


写真-3 試験状況

表-3 日射の熱量による日数の換算

照射時間 (日)	熱量 (MJ/m ²)	那覇市の全天日射量による 日数換算 (日)
0.5	170.0	11.7
1	339.9	23.4
2	679.8	46.8
4	1359.6	93.6
6	2039.4	140.4
20	6798.1	467.9
40	13596.3	935.7

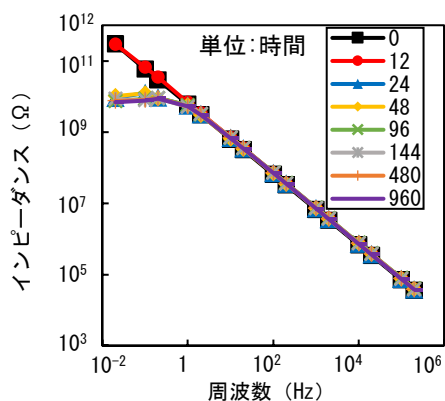


図-4 日射によるインピーダンスへの影響

4. 被覆膜の耐日射性

4.1 試験概要

PVB 樹脂の耐日射性の確認を目的として、模擬日照試験を行った。写真-3 に試験状況を示す。鉄筋径 D16、鉄筋長 15cm の PVB-S 被覆鉄筋を用い、片側端部にリード線を結線した後に、両端部をエポキシ樹脂で被覆することで絶縁処理を施したものを供試体とした。なお、試験面の長さは 10cm である。試験方法は、直射日光が照射した環境を模擬するために、太陽光と類似した波長スペクトルを持つメタルハライドランプを使用し、12, 24, 48, 96, 144, 480, 960 時間照射を行った。ここで、照射距離は塗膜表面がガラス転移温度である 69℃を超える約 80℃になるように調整し、6cm とした。メタルハライドランプの日射強度は約 3900W/m² である。この日射強度より、照射時間当たりの熱量の算出を行った。なお、国内でも比較的全日日射量が大きいとされている那覇市の 2010 年から 2019 年の 1 日当たりの全天日射量と今回の照射時間の関係は表-3 に示すとおりである。

所定の時間、照射した供試体を用いてインピーダンスの計測を行い塗膜の健全性を評価した。なお、インピーダンスの測定周波は 0.02~200000Hz、交流電圧を 5V とし計測した。

4.2 結果および考察

図-4 に各供試体の照射直後におけるインピーダンス特性を示す。ここで、塗膜鋼板のインピーダンス挙動について、健全な塗膜においては、高周波から低周波にかけて線形的にインピーダンスは増加する傾向を示す。しかし、塗膜の劣化に伴い塗膜抵抗が低下し始めると、低周波領域でのインピーダンスは低下する挙動を示すとされている⁴⁾。

照射を 12 時間行った供試体のインピーダンスは、照射前のインピーダンスと同程度であった。しかし、照射を 24 時間とした場合、低周波領域でのインピーダンスの低下が確認され、塗膜の劣化が進行したことが分かる。ただし、それ以降、照射時間を延ばしてもインピーダンスの低下は確認されず概ね一定の値となった。なお、本試験の照射 24 時間は那覇市の全天日射量で 11 日に相当する期間である。このことから、現場施工において、PVB-S 被覆鉄筋の屋外暴露 (保管) 時間が 10 日程度で塗膜に若干の劣化が生じる可能性がある。ただし、それ以降の時間の経過に関しては塗膜の劣化は進行せず一定の品質を保持するものと推察される。なお、このインピーダンスの低下 (品質の劣化) が防食性能に与える影響については明確になっておらず今後の課題とする。

5. コンクリート中被覆鉄筋の耐食性

5.1 試験概要

(1) 供試体の概要

コンクリート中の被覆鉄筋の耐食性を把握するため、暴露試験を実施している。図-5 に供試体形状を示す。供試体の形状は、10cm×10cm×40cm の角柱供試体とし、純かぶり 3cm となるように表-4 に示す鉄筋を配筋した。母材は SD345 D13 を使用しており、膜厚に関しては、PVB-S 被覆鉄筋は 300±100μm、エポキシ樹脂は 220±40μm である。また、供試体を暴露した際に両端からの塩分浸透による鉄筋の腐食を抑制するため、鉄筋およびコンクリート表面の両端部 7~8cm 程度の位置までエポキシ樹脂により塗装を行った。なお、両端部については、PVB-S 被覆鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋についても、条件を統一するため、既存の被覆の上にさらにエポキシ樹脂により塗装を施した。

コンクリート使用材料を表-5 に示す。また、コンクリートの配合を表-6 に示す。結合材には普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュを用い、練り混ぜ水には水道水または海水を使用した。供試体の種類は3種類である。結合材に普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート（以下、N(tw)）、結合材および細骨材の一部にフライアッシュを使用したFAコンクリート（以下、FA(tw)）、FAコンクリートの練混ぜ水に海水を使用した海水練りFAコンクリート（以下、FA(sw)）の3種類である。なお、フライアッシュの置換率は20%である。水セメント比（W/C）は50%程度とし、目標スランプを12±2.5cm、目標空気量を2.0±1.0%とした。コンクリートの設計基準強度はいずれも30N/mm²である。

(2) 暴露試験の概要

暴露試験は、平良港内（沖縄県宮古島市）防波堤上の海上大気中にて実施した。暴露の様子を写真-4 に示す。

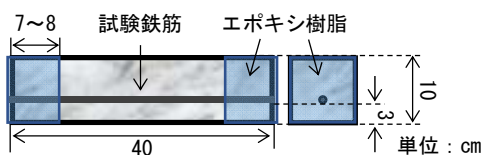


図-5 供試体概要

表-4 鉄筋の仕様

名称	記号	膜厚 (μm)	母材の仕様
PVB-S被覆鉄筋	S	300±100	SD345 D13
エポキシ樹脂塗装鉄筋	E	220±40	
普通鉄筋	N	なし	

(3) 調査内容

暴露期間 1.5 年の試験体において、インピーダンスの測定を行い塗膜の健全性を評価した。インピーダンスの測定周波は 0.02~200000Hz、交流電圧を 5V とした。

5.2 結果および考察

図-6 に暴露期間 1.5 年での各供試体中の被覆鉄筋におけるインピーダンス特性を示す。(a) は PVB-S 被覆鉄筋、(b) はエポキシ樹脂塗装鉄筋である。なお、図中には、別途測定した各塗膜の健全な状態（図中黒線）、腐食環境にある普通鉄筋（図中黄線）も併せて示す。PVB-S 被覆鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋の健全な塗膜のインピーダンス挙動は概ね一定であった。

PVB-S 被覆鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋ともに、低周波域においてインピーダンスの低下が確認された。このことから、いずれの樹脂塗装鉄筋に関してもコンクリート中に長期埋設された場合にはアルカリ性環境にあることや水分供給に伴う膨潤などの作用等によって塗膜劣化傾向になることが予想される。今回、1 回目の調査のため経年的な変化をとることができないが、今後、詳細な調査が必要であると考えている。ただし、現時点では 10MΩ 程度のインピーダンス値を維持しており、普通鉄筋と比較すると非常に高い抵抗値であることから防錆効果については維持されているものと推察される。

樹脂種の違いについては、PVB-S 被覆鉄筋の方がエポ

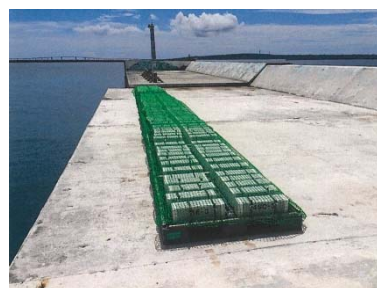


写真-4 暴露状況

表-5 コンクリートの使用材料

項目	種類	記号	密度 (g/cm ³)
水	真水	W	
	海水	SW	
結合材	普通ポルトランドセメント	C	3.16
	フライアッシュⅡ種	FA	2.43
細骨材	海砂	S1	2.62
	砕砂	S2	2.69
	フライアッシュⅡ種	FA	2.43
粗骨材	砕石	G	2.7
混和剤	AE減水剤	Ad	

表-6 コンクリートの配合

No.	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
			W	SW	B		S			G	Ad (C×%)
					C	FA	S1	S2	FA		
N(tw)	49.8	42.9	169	—	339	—	438	368	—	1192	0.8
FA(tw)	48.5	48.6	168	—	278	69	476	400	21	970	0.6
FA(sw)	48.5	48.6	—	168	278	69	476	400	21	970	1

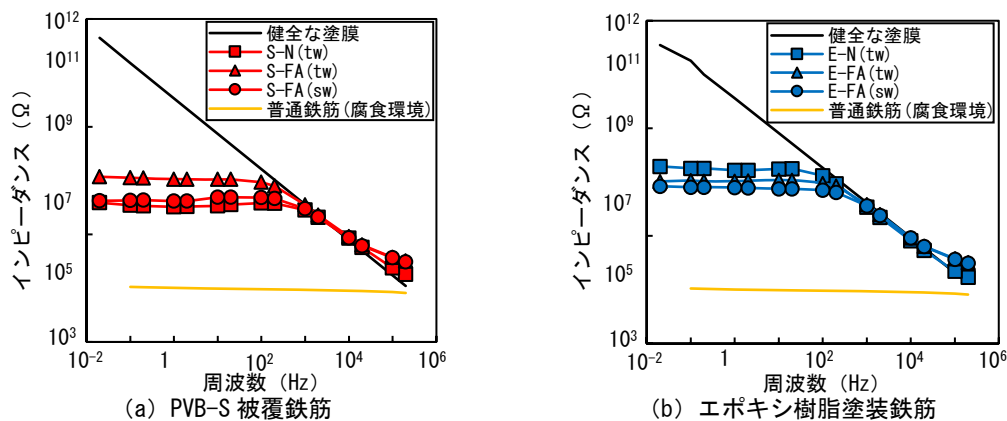


図-6 コンクリート中被覆鉄筋のインピーダンス

キシ樹脂塗装鉄筋に比べ若干低い値を示す傾向にある。また、コンクリートの種類によっても若干差が生じている。高低の傾向は鉄筋の種類によって異なっており、その影響因子については現時点では明確にできない。今後の課題とする。

いずれにしても、塗膜劣化が進行していることは明らかであり、4.2における日射による塗膜抵抗の低下と比較しても、コンクリート内部での塗膜劣化に対する影響は大きいと考えられる。

6. まとめ

塩化物イオンの浸透抵抗性の確認のため、塩化物イオン透過性試験を実施した。また、保管時の日射による塗膜劣化の有無を確認するため、模擬日照試験を実施した。さらに、コンクリート中被覆鉄筋の耐食性を確認するため、PVB-S被覆鉄筋を用いた鉄筋コンクリート供試体による暴露試験を実施し、防食鉄筋の防錆効果について検討を行った。試験結果により得られたことを以下に示す。

- (1) 被覆膜の塩化物イオン透過性における検討より、PVB-S 膜 ($300 \pm 100 \mu\text{m}$)、PVB 樹脂 ($220 \pm 40 \mu\text{m}$, $100 \pm 30 \mu\text{m}$) における、塩化物イオン拡散係数の算出を行った結果、エポキシ樹脂と同等の塩化物イオン透過抵抗性を持つことが確認された。また、PVB 樹脂は膜厚による塩化物拡散係数への影響は小さく、薄膜においても品質安定性が高いことに加え、珪砂の有無は塩化物イオン透過抵抗性に大きな影響を与えないと考えられる。
- (2) 被覆の耐日射性における検討より、PVB-S 被覆鉄筋の熱エネルギーによるインピーダンス挙動を確認した。その結果、現場施工において、PVB-S 被覆鉄筋の屋外暴露（保管）時間が 10 日程度で塗膜に若干の劣化が生じる可能性があることが確認された。ただし、それ以降の時間の経過に関しては塗膜の劣化は進行せず一定の品質を保持するものと推察された。なお、このインピーダンスの低下（品質の劣化）が防食性能に与える影響については明確になっておらず今後の課題とする。

- (3) コンクリート中被覆鉄筋の耐食性における検討より、PVB-S 被覆鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋の各種コンクリート中でのインピーダンスの測定を行った結果、ともに低周波域でインピーダンスが低下していることが確認された。また、コンクリート中に長期埋設された場合には、アルカリ性環境にあることや水分供給に伴う膨潤などの作用等によって塗膜が劣化傾向になると考える。

以上より、PVB-S 被覆膜はエポキシ樹脂と同等の塩化物イオン透過抵抗性を持つことから、高い防錆効果が期待できる。また、熱エネルギーやコンクリート中環境の影響により、被覆膜の劣化が生じる可能性が示唆された。ただし、腐食鉄筋に比べ十分な抵抗を持っていることから防錆効果については維持されていると予想される。要因分析と評価は今後の課題である。

謝辞

本論文は、株式会社大林組との共同研究の成果の一部であることをここに付記する。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片野 啓三郎, 竹田 宣典: PVB 樹脂および珪砂を用いた高性能被覆鉄筋の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017
- 2) 石田知子, 片野 啓三郎, 福永和生, 審良善和: PVB 樹脂および珪砂を用いた高性能被覆鉄筋の疲労に対する耐久性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー112 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 [改定版], 2003.11
- 4) 山路 徹, 与那嶺 一秀, 審良 善和, 安部 正美, 原田 典佳ほか: 長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の長期耐久性に関する研究 (30 年経過時の報告), 港湾航空技術研究所資料, No.1324, 2016