

論文 旧大森大橋におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋の劣化度について

田口 史雄^{*1}・嶋田 久俊^{*2}・萬 直樹^{*3}

要旨：台風の被災により施工後約 20 年経過した旧大森大橋を復旧する際、当時先駆的に導入されたエポキシ樹脂塗装鉄筋の配置計測・外観調査、ピンホール試験、付着強度試験、引張試験、曲げ試験、エポキシ樹脂塗膜の EPMA 試験、塗膜厚試験等を行い、力学特性や耐久性について評価した。その結果、エポキシ樹脂塗膜の追従性が約 20 年の間に低下したと推定されるが、経年によるエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食は認められず、鉄筋母材の力学的性能は確保されており健全であった。

キーワード：沿岸橋梁、塩害・凍害環境、エポキシ樹脂塗装鉄筋、劣化度調査

1. はじめに

一般国道 229 号 北海道 神恵内村 旧大森大橋（施工 1980～1986 年）は、海水と冬期の凍結融解作用を直接受ける極めて過酷な環境（写真－1 参照）に曝されていた PC 合成 I 桁である。このため施工当時、国内において先駆的に無塗装鉄筋・コンクリート塗装の組合せおよびエポキシ樹脂塗装鉄筋（以下、EP 鉄筋と称す）が導入された橋梁であった¹⁾。なお、PC 鋼材等腐食防止のため EP 鉄筋箇所においても約 15 年後にコンクリート塗装が行われた。2004 年 9 月 8 日の台風被災（写真－2 参照）²⁾に伴い復旧する際、被災橋梁桁を用いてコンクリート、塗装、鉄筋、PC 鋼材等について各種調査・試験を行った。本論文では、そのうち特に EP 鉄筋に着目して取り纏めた。

験、塗膜厚さ及び EPMA による EP 塗膜内への塩化物イオン拡散性状、はつりだし EP 鉄筋を用いた鋼材強度把握のため引張試験、付着力把握のための鉄筋付着強度試験などの力学特性や耐久性³⁾について行った。調査項目および調査試験法一覧を表－2 に示す^{4), 5)}。



写真－1 旧大森大橋架橋環境



写真－2 旧大森大橋被災状況

2. 調査・試験結果

調査を行った 2 つの流出 PC 合成 I 桁 (No.1, No.2) の構造緒元および使用材料・配合等、施工年度を表－1 に示す。調査は流出桁の外観調査、かぶり深さの実測、はつり採取した EP 鉄筋および無塗装普通鉄筋の外観腐食調査、塗膜劣化状況把握のためのピンホール試験、曲げ試

*1（独）土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員（正会員）

*2（独）土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 総括主任研究員（正会員）

*3 国土交通省 北海道開発局 小樽開発建設部 道路課長（非会員）

2.1 流出桁の外観調査

外観調査は近接目視により、ひび割れ、桁表面の剥離、欠損、破壊等を触診・打診して、損傷展開図、写真、調書を作成したうえで、被災直前の2004年9月に実施していた橋梁定期点検と比較して、被災による損傷か否かを区分した。

2.2 鉄筋の配置計測および外観観察

流出桁を現地ではつり、鉄筋の配置を計測した。調査箇所は表－3 の流出桁 3 カ所 1.5m×1.5m～1.0m×1.0mとした。また、はつりだした鉄筋の外観観察により鉄筋腐食状況および流出桁3箇所（海側側面、陸側側面）から採取したEP鉄筋と無塗装鉄筋の腐食状況比較を行った。海側採取位置は外観上、極力健全な位置を選定した。これは、流出時の損傷により海水が流入して鉄筋が腐食した部分と当初より腐食が進行していた部分とを区別するためである。なお、陸側採取位置は流出によって生じたひび割れ部においてEP鉄筋の塗膜にはく離が認められ、鉄筋が腐食している部分が観察されたため、その近傍から選定した。

鉄筋外観観察は、無塗装の普通鉄筋については土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕⁶⁾の腐食グレードで、EP鉄筋は塗膜剥離や変色状況と塗膜が剥離した鉄筋露出部については腐食グレードでも区分した。

かぶり分布の一例を図－1に示す。鉄筋径(D-13)、鉄筋間隔(125mm)は設計図とおりであり、

かぶり平均値は設計かぶりを満足していた。また、かぶりを正規分布と仮定すると、設計かぶり35mmを下回る実かぶりは横筋では零、縦筋のみで全体の約4%と非常に小さく、良好であった。

試験のため採取したEP鉄筋29本及び無塗装鉄筋13本の調査集計を表－4、5に示す。EP塗膜が剥離し鉄筋に腐食が見られる箇所（塗膜の状況1、2で腐食グレードII）は全体採取本数に占める本数も低く、主桁コンクリートが欠損した箇所のすぐ近傍であり、流出時および鉄筋採取時の損傷の影響と思われる。また、一部の黒色変色（塗膜の状況3）は溶剤でふき取ること

表－1 橋梁構造諸元および使用材料・施工年度

主桁	No.1	No.2
構造形式	2 径間連続 PC 合成 I 桁	
桁長	44.6m	34.6m
幅員	全幅員 8.2m, 有効幅員 7m	
設計荷重	TL-20	
使用材料・配合等	コンクリート 早強ポルトランドセメント 示方配合 Gmax: 25mm, W/C: 37%, S/A: 38.6% SL: 8±2.5 cm, Air: 4.5±1.5% C=427kg/m ³ , σ _{ck} =40N/mm ² (400kgf/cm ²)	
	鉄筋	主桁: EP 鉄筋 D13 (1984 年) 主桁: 無塗装鉄筋 D13 (1983 年)
	PC 鋼材	PC 鋼より線 12-T12.4
コンクリート塗装	EP 樹脂系 塗装(1998 年)	ビニルエステル系 塗装(1986 年) EP 樹脂系塗装塗替 (2000 年)

表－2 調査項目および調査試験法

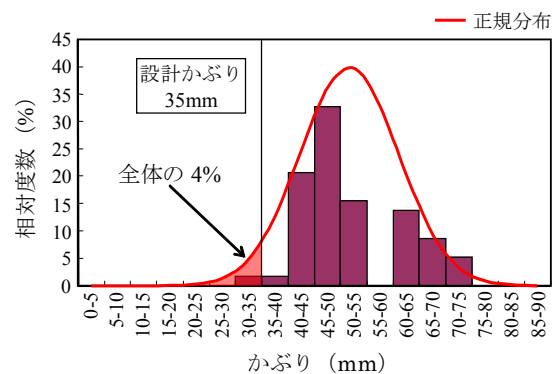
劣化度評価の項目		調査項目	調査・試験法	備 考
主桁	損傷状況の把握	流出桁の外観調査	目視, 写真撮影	・被災時損傷部, 被災前との比較
	EP鉄筋の劣化 状況	鉄筋配置計測	コンベックス, ノギス計測	・鉄筋配置計測後, 切断しサンプル採取
		外観腐食調査	目視, 写真撮影	・現地および流出桁から採取した鉄筋
		ピンホール試験	JSCE-E512-2003	・流出桁から採取した鉄筋
		付着強度試験	JSCE-E516-2003	
		引張試験	JIS Z 2241-1998	
		曲げ試験	JSCE-E515-2003	
		塗膜の塩分浸透試験	EPMA	・流出桁から採取した鉄筋 ・別調査のコンクリート塩化物イオン量との関連
		塗膜厚試験	JSCE-E513	・流出桁から採取した鉄筋

ができ、損傷ではなかった。この結果からは外観上 EP 鉄筋には経年劣化による割れや鉄筋腐食は認められず、健全であった。また目視上、塗装材の顕著な劣化は見受けられなかった。

なお、無塗装鉄筋の断面欠損（腐食グレード IV）はなく、全長の浮きさび（腐食グレード III）がはつり範囲 13 本のうち 1 本 1 箇所、部分的浮きさび（腐食グレード II）が 13 本のうち 5 本各 1 箇所、さびは生じているが薄い緻密なさびが全数全面に渡り発生していた。これより無塗装の普通鉄筋は部分的浮きさびを生じていたが軽微であり、塩化物イオンの浸透による腐食初期と想定される。なお腐食グレード I の全体的薄い緻密なさびは、鉄筋と接するコンクリート面にさびが腐食していないことから、現地飛沫滞域でののはつり出し鉄筋採取時およびそれ以降の飛来塩分により発錆したと推定される。

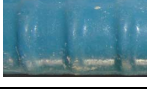
2.3 ピンホール試験

ピンホール試験は、鉄筋製造時の塗膜品質に起因する試験であるが、長時間コンクリート中で使用された場合、塗膜の劣化や腐食などの進行によりピンホール数が増加することも考えられた。そのため採取した EP 鉄筋のピンホール数を調査した。JSCE-E 512「エポキシ樹脂塗装鉄筋のピンホール試験方法」に準拠して、ホリデーディテクターおよび探端子を用いて静電粉体塗装により製造された EP 鉄筋塗装のピンホ

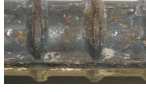


図－1 鉄筋のかぶり分布の一例（縦筋）

表－4 EP 鉄筋の外観調査結果

塗膜の状況	腐食グレード	エポキシ鉄筋の状況	全体採取本数に占める本数
1	II	塗膜の剥離 塗膜剥離部の浮きさび（流出時または鉄筋採取時の損傷の影響と想定される） 	29 本のうち 1 本で流出桁のコンクリート剥離部付近の 1 箇所
2	II	塗膜の局所的な剥離 塗膜剥離部の浮きさび（流出時または鉄筋採取時の損傷の影響と想定される） 	同上
3	—	塗膜リブ近傍の変色（黒色）溶剤で拭取り可能のため損傷等とは違う 	29 本のうち 1 本 1 箇所
4	—	腐食なし 	29 本のうち 26 本

表－5 無塗装鉄筋の外観調査結果

腐食グレード	無塗装鉄筋の腐食状況	全体採取本数に占める本数
I	黒皮の状態、またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。 	13 本の全て全面に渡り発生（採取後）
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。 	13 本のうち 5 本各 1 箇所
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。 	13 本のうち 1 本 1 箇所
IV	断面欠損が生じている。	該当無し

表－3 はつり箇所の外観

主 桁	はつり箇所の外観	はつり後の外観
No.1 海側側面		
No.1 陸側側面		
No.2 海側側面		

ール検出を行った。なお、はつりによる損傷はピンホールの数に含めないようにピックによる擦り傷等を目視によって区分して、1本あたり30cmの採取鉄筋から1m当りに換算して算出した。試験の結果、30cm当たり1～2個で、製作当時の品質規格である鉄筋径D19以下の場合においてm当たり5個以内とほぼ同程度と考えられ、製作時の品質と同等と考えられ、経年による塗装の劣化は認められなかった。

2.4 付着強度試験

流出桁の目視損傷状況において、無塗装鉄筋に比べ EP 鉄筋を使用した桁での鉄筋とコンクリートの剥離損傷が多く目立った。この主原因は、桁の流出、落下、横移動などに伴うものと考えられるが、付着強度の経年変化が懸念されたことから設計段階の土木学会旧規準（1986年）「塗装鉄筋の最大付着強度が無塗装鉄筋の80%以上」（現行基準は「85%以上」と比較のため、JSCE-E 516「エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度試験法」に準拠して確認した。流出桁の損傷の少ない箇所から D13mm のスターラップ（縦筋）を丁重にはつりだし試験を行った。コンクリート品質は、試験法の基準から粗骨材最

大寸法 20mm，スランプ $10 \pm 2.5\text{cm}$ ，圧縮強度 $30.0 \pm 3.0\text{N/mm}^2$ で計画した。なお本試験におけるコンクリート配合等は、普通ポルトランドセメント使用，W/C59%，単位セメント量 288kg，スランプ 10.5cm，空気量 5%，圧縮強度 $28.7 \sim 31\text{N/mm}^2$ である。

採取した無塗装および EP 鉄筋の付着応力度とすべり量の試験結果の一例を図-2, 3に示す。付着強度試験の結果、最大付着応力度は無塗装鉄筋と同程度であり、施工当時の規格値である無塗装鉄筋の80%以上の最大付着応力度および現行土木学会規準（85%以上）を満足していた。

2.5 引張試験

EP 鉄筋の強度に加えて鉄筋降伏以降の EP の挙動を確認することを目的としている。流出桁を観察すると、鉄筋母材と EP 樹脂とが剥離した現象が認められた。この現象は鉄筋の降伏後破断に至る伸びのため EP 樹脂が剥離したと考えられたことから傷の少ないはつりだし鉄筋を試験材とし、EP 樹脂塗膜の状況も観察しながら JIS G 3112「鉄筋コンクリート棒鋼」、JIS Z 2201「金属材料引張試験片」、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に準拠して引張試験を行った。

降伏強度および引張強度は SD295 規格（JIS

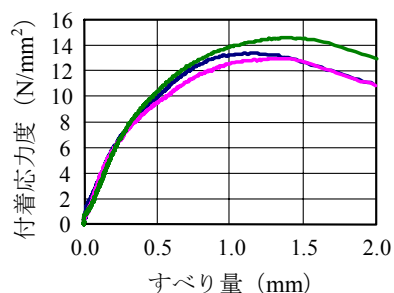


図-2 無塗装鉄筋の付着応力度－すべり量

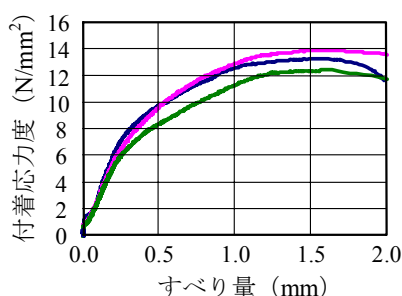
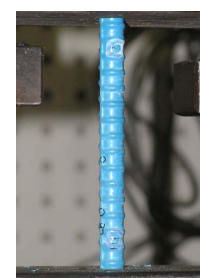


図-3 EP 鉄筋の付着応力度－すべり量



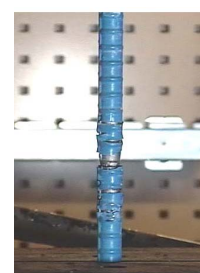
(a) 弾性範囲



(b) 鉄筋降伏直後



(c) 膜割れ



(d) 鉄筋破断直前

写真-3 EP 鉄筋の引張試験

G3112-1975) の 294 N/mm², 480～618 N/mm² をそれぞれ 375～385 N/mm², 543～554N/mm² と満足しており、鉄筋母材に強度特性の低下は認められなかった。また、引張試験時の EP 塗膜の変形性状について観察した結果、写真-3 に示すように鉄筋が降伏するまでは塗膜外観には剥離やひび割れなどの変化はなく、母材と同じ挙動を示している。鉄筋が降伏し、鉄筋の伸びが増加する段階では、塗膜に軸直角方向にひび割れが発生した。伸びが増加すると塗膜のひび割れ幅も拡大し、破断寸前には母材から剥離する傾向がみられた。

2.6 曲げ試験

建設当時の EP 鉄筋塗膜の品質管理では、5 本曲げ加工した後、クラック発生率が 20%以下であることが規定されていた。このことから JSCE-E 515 「エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験方法」に準拠して、採取した建設後 20 年経過の EP 鉄筋を曲げ加工して性能確認した。事前にピンホールおよびはつりだし時の損傷位置にマーキングを施し、常温で曲げ内半径を鉄筋公称径の 1.5 倍、180 度まで曲げを行い、目視により塗膜の曲げ外側および内側表面の微小割れ、開口割れ、はく離などの欠陥の数を調査した。表-6 に JSCE-E515 の図に示されている曲げ試験における割れ分類に基づいた試験結果を示す。塗膜のはがれや割れによるクラック発生率は 50% (3 本/6 本=50%) と施工当時の規格値 (20% 以内) を超過しており、EP 鉄筋塗膜の追従性が約 20 年の間に低下したと推定される。

2.7 EP 鉄筋塗膜の塩分浸透 (EPMA)

塗膜内への塩化物イオンの浸透は、採取した

鉄筋の塗膜内の塩化物イオンの有無を EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) で調査した (写真-4 参照)。別途調査した JISA1154 による塗膜表面位置でのコンクリート中の塩化物イオン含有量は、約 2kg/cm³ であったのに対して、EPMA 分析からは一部採取時に付着したと考えられる濃度の高い点が観られたが、塗膜表面の平均濃度 0.05Wt% (Wt:EP 樹脂重量) から算出した塗膜表面の塩化物イオン濃度は 0.7kg/cm³ であった。かつこの塗膜表面の塩化物イオン量は、材料中の塩化物イオン量 (0.05wt%) とほぼ一致していることから、EP 自体に内在する塩素有機化合物に起因する塩化物イオンと思われる。このことから EP 塗膜を透して塩化物イオンが鉄筋側へ浸透した形跡は認められなかった。

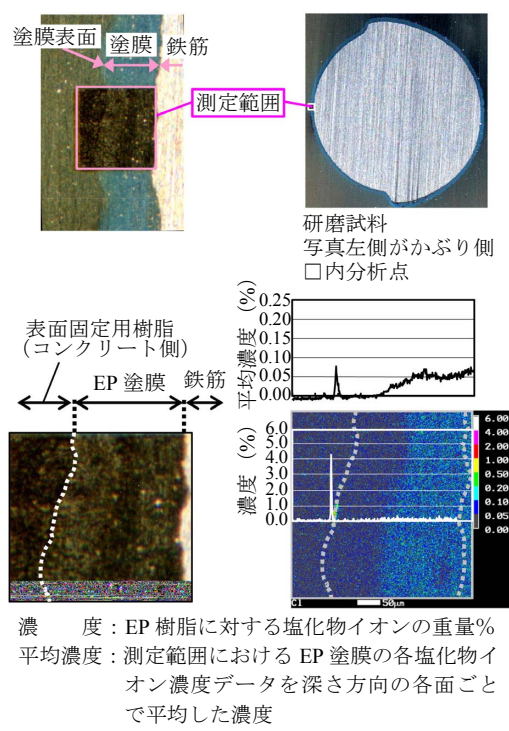


写真-4 EP 鉄筋塗膜内 EPMA 測定結果例

表-6 EP 鉄筋の曲げ試験結果

採取箇所	採取供試体 No.	ピンホール数 (個/15cm)	曲げ試験結果 (JSCE-E515 に基づく割れ分類)	
			外周面	内周面
主桁 No.1 海側側面	1	0	はがれ：C	無
	2	0	無	無
	3	0	無	無
主桁 No.1 陸側側面	4	1	無	無
	5	0	大きな割れ：A	無
	6	1	小さな割れ：B ピンホールの影響はない	無

一方、EP 塗膜内で表面側に向けて材料に含まれる塩化物イオン濃度が低下していたが、この範囲は炭素が少ない領域と一致していたことから、塗膜表面の固定用樹脂およびX線照射熱による変質の影響も考えられ、原因を特定するには至らなかった。

2.8 塗膜厚試験

塗膜厚試験は、電磁式膜厚測定器を用いて JSCE-E 513「エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜厚試験方法」に準拠し鉄筋径 D13 の節やリブ部を除いたほぼ中央で行った。

結果を図-4に示す。防食性能向上のためピンホール数の減少効果を加味した塗膜厚に JSCE-E102 の 2003 年改訂した「エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格」³⁾の $220 \pm 40 \mu\text{m}$ と比較すれば膜厚下限値未満が多いことになるが、施工当時の指針⁷⁾の $180 \pm 50 \mu\text{m}$ に対して約 82%が規定内、約 0.4%が下限値未満、約 17%が上限値超過であり、改訂前 1986 年制定 JSCE-E102 の品質規格 $200 \pm 50 \mu\text{m}$ とほぼ等しい品質であることから、適切な塗膜厚を確保していたと考えられる。

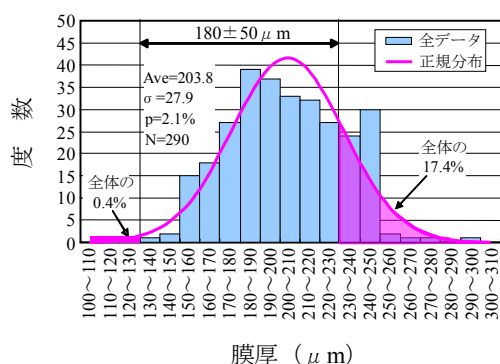


図-4 EP 塗膜厚分布

3. まとめ

本調査試験の結果は以下のとおりである。

1)本橋梁は過酷環境下における 20 年の経年にもかかわらず、EP 鉄筋の経年劣化による腐食は認められず健全であった。なお、無塗装の普通鉄筋は部分的な表面さびが認められ腐食開始の初期段階と判断される。

2)EP 鉄筋の降伏強度、引張強度は規格値を満足し、鉄筋母材の力学的性能は確保されていた。

3)曲げ試験により EP 塗膜の割れが観察され、塗膜の追従性が低下していると考えられるが、鉄筋のコンクリートとの最大付着応力度は無塗装の普通鉄筋と同程度であり、経年後も施工当時の規格値を満足していた。

4)ピンホールについては施工当時の規格値とほぼ同程度と考えられる。

5)EPMA 面分析から求めた塗膜の塩化物イオン分布およびコンクリート塩化物イオン量調査を比較した結果、塗膜を透して塩化物イオンが鉄筋側へ浸透した形跡は見られず 20 年間遮塩性を確保できていたことがわかった。

以上、20 年経過の試験から EP 塗装鉄筋は凍害・塩害の可能性が極めて高い過酷環境下でも十分な耐久性を有していたことが判明した。

参考文献

- 1) 船山健次, 真田達雄, 嶋田久俊, 山口光男, 朝倉啓仁: コンクリート道路橋の塩害劣化予測に関する一考察, 土木学会第 57 回年次学術講演会収縮に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.276, pp.551-552, 2002.9
- 2) Mitamura, H., Ishikawa, H.: Damage caused by typhoon Songda to Omori Bridge on National Highway 229 in Kamoenai Village. Hokkaido.Japan, 6thJapanese German Bridge Symposium, pp.49&CD-ROM, Aug.2005
- 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 [改訂版], 2003.11
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] JIS 規格集, 2005.3
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準, 2005.2
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編], p.92, 2001.1
- 7) 日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針 (案), 1986.2