

PVB 樹脂および珪砂から構成される防食鉄筋の開発

太田健司*¹・梶原尚平*²・審良善和*³・武若耕司*⁴

1. はじめに

港湾構造物や凍結防止剤を散布する地域の高速道路などの鉄筋コンクリートでは、主な劣化要因の一つとして塩害が挙げられる。塩害対策として、耐久性確保の観点からエポキシ樹脂塗装鉄筋などの防食鉄筋の適用が進められている。しかし、エポキシ樹脂塗装鉄筋は、保管時にシート養生を行うなど紫外線劣化への配慮が必要となり、コンクリートとの付着強度が普通鉄筋に比べて低下するなどの課題がある。そこで、著者らは、エポキシ樹脂よりも紫外線劣化が生じにくいポリビニルブチラル樹脂（以下、PVB 樹脂とする）を被覆した鉄筋に、コンクリートとの付着強度を向上させる目的で被覆鉄筋表面に珪砂を付着させた防食鉄筋（以下、PVB-S 被覆鉄筋とする）を開発した。

本稿では、PVB-S 被覆鉄筋の特長や性能、新設橋梁の壁高欄に適用した事例について紹介する。

なお、PVB-S 被覆鉄筋は、（一財）沿岸技術研究センターの「港湾関連民間技術の確認審査・評価事業」において評価を取得した¹⁾。

2. PVB-S 被覆鉄筋の概要

2.1 PVB 樹脂の特長

（1）紫外線劣化に対する抵抗性

PVB 樹脂は、強い接着性と紫外線劣化に対して優れた性質を有することから、自動車のフロントガラスの中間膜などに使用されている。PVB 樹脂およびエポキシ樹脂の促進耐候性試験結果を表-1 に示す。なお、これ以降の性能比較は PVB-S 被覆鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋に使用されている樹脂を用いて試験を行った。試験は、JIS K 5600-7-7（促進耐候性試験－キセノンランプ法）に準じて実施し、促進曝露期間 2000 時間後の色差（ ΔE^*ab ）により評価した。表-1 より、促進曝露期間 2000 時間後のエポキシ樹脂の色差は 22.5 であるのに対し、PVB 樹脂は 8.9 とエポキシ樹脂の 40% 程度であった。この結果か

表-1 PVB 樹脂とエポキシ樹脂の色差

	PVB 樹脂	エポキシ樹脂
色差（ ΔE^*ab ）	8.9	22.5

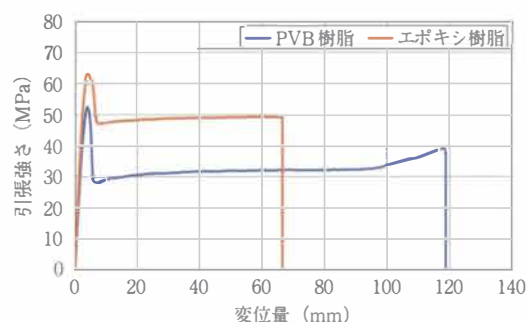


図-1 引張試験結果の一例

表-2 PVB 樹脂とエポキシ樹脂の引張試験結果

樹脂の種別	引張強さ（MPa）	伸び率（%）
PVB 樹脂	53.0	102
エポキシ樹脂	63.1	51

ら、PVB 樹脂はエポキシ樹脂に比べ、キセノンアークランプ照射前後での色の変化が少なく、紫外線劣化に対する抵抗性が高いと言える。

（2）伸び性能

PVB 樹脂とエポキシ樹脂の直接引張試験結果の一例を図-1 に、試験時の平均伸び率を表-2 に示す。試験は、JIS K 7161（プラスチック－引張特性の求め方）に準じて各 5 本の試験片を用いて実施した。図-1 および表-2 から、PVB 樹脂はエポキシ樹脂に比べ、最大引張強さは 80% 程度であるが、200% 程度の伸び率を示しており、高い変形性能を有していることが認められる。

2.2 PVB-S 被覆鉄筋の膜厚

PVB-S 被覆鉄筋は、PVB 樹脂被覆の膜厚が $220 \pm 40 \mu m$ となるように静電粉体塗装法により塗装を施し、鉄筋表面に珪砂吹付処理を施した防食鉄筋である。エポキシ樹脂は熱硬化性樹脂であるのに対し、PVB 樹脂は熱可塑性樹脂であるため、PVB 樹脂被覆後に比較的容易に珪砂を付着させることができる。なお、PVB-S 被覆鉄筋の膜厚は、PVB 樹脂被覆鉄筋に付着させた珪砂分を含めて $300 \pm 100 \mu m$ で管理している。

*1 おおた・けんじ／㈱大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部（正会員）

*2 かじわら・しょうへい／㈱大林組 東京本店 新東名中島高架橋工事事務所 工事長

*3 あきら・よしかず／鹿児島大学学術研究院 理工学域工学系 准教授（正会員）

*4 たけわか・こうじ／鹿児島大学 名誉教授（正会員）

3. PVB-S 被覆鉄筋の性質

3.1 PVB-S 被覆鉄筋の防食性

PVB-S 被覆鉄筋の膜厚以外の品質については「エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリート設計施工指針 [改訂版]²⁾」で定められた品質規準を満足しており、エポキシ樹脂塗装鉄筋と同等の防食性を有している。PVB-S 被覆鉄筋と普通鉄筋の外観を写真-1 に示す。

3.2 PVB-S 被覆鉄筋の耐衝撃性

PVB-S 被覆鉄筋塗膜の耐衝撃性を評価するため、JSCE-E514-2013 (エポキシ樹脂塗装鉄筋の耐衝撃性試験方法) に準じて試験を行った。試験は、PVB-S 被覆鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋について実施した。試験では、一回当たりの衝撃強度が $3.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ となるように調整し、同一箇所に複数回の衝撃を与えた。耐衝撃性試験後の被覆鉄筋の状況を写真-2 に示す。なお、() 内の回数は被覆鉄筋に衝撃を与えた回数を示している。写真-2 より、エポキシ樹脂塗装鉄筋においては、衝撃を 5 回与えた時点で塗膜が損傷し、鉄筋素地が露出している。一方で、PVB-S 被覆鉄筋は、衝撃により塗膜が潰れているものの、同一箇所に 10 回の衝撃を与えても鉄筋素地の露出は確認されなかった。これは、PVB 樹脂の伸び性能がエポキシ樹脂よりも高く (図-1 参照)、衝撃時の塗膜の変形に対しての追従性に優れているためと考えられる。したがって、PVB-S 被覆鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋よりも鉄筋の加工時や組立ての際に生じる損傷の発生を低減できると考えられる。

3.3 PVB-S 被覆鉄筋とコンクリートとの付着強度

(1) コンクリートとの付着強度

付着強度は、JSCE-E516-2010 [樹脂被覆鉄筋の付着強度試験方法] に準拠し、PVB-S 被覆鉄筋と普通鉄筋に

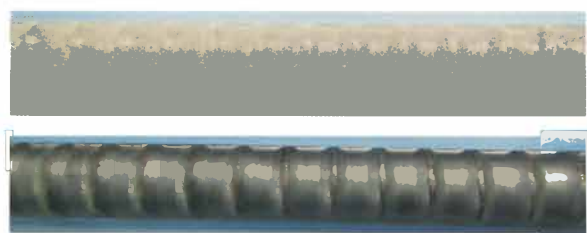


写真-1 PVB-S 被覆鉄筋と普通鉄筋の外観
(上: PVB-S 被覆鉄筋, 下: 普通鉄筋)

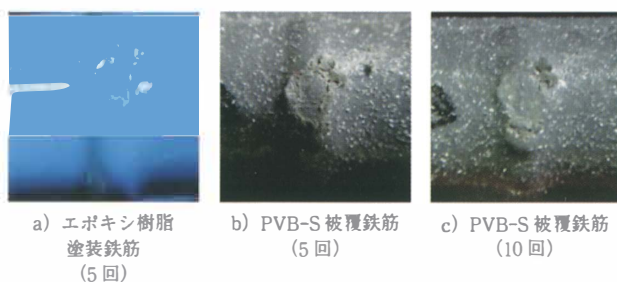


写真-2 耐衝撃性試験後の被覆鉄筋の状況

加え、比較対象として、珪砂を付着させていない PVB 樹脂塗装鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋についても試験を行った。鉄筋のすべり量が 0.04 mm 時点の付着応力度および最大付着応力度を図-2 に示す。

PVB-S 被覆鉄筋を使用した場合の最大付着応力度について、普通鉄筋の 1.2 倍以上の付着応力度を示している。一方で、すべり量 0.04 mm 時点で普通鉄筋よりも付着応力度が低い PVB 樹脂被覆鉄筋やエポキシ樹脂塗装鉄筋においても最大付着応力度は普通鉄筋と同等以上となった。これは、いずれの供試体も破壊形式がコンクリートの割裂破壊であり (一例を図-3 に示す)、最大付着応力度はコンクリート強度や鉄筋リブの機械的な抵抗の影響が大きいと考えられる。そのため、最大付着応力度ではコンクリートとの付着力の最大値を正しく評価できていないと考えられた。したがって、コンクリートとの付着強度はすべり量 0.04 mm 時点での付着応力度に着目して整理した。

すべり量 0.04 mm 時点での付着応力度は、PVB-S 被覆鉄筋を使用した場合において、普通鉄筋の 2 倍以上の付着応力度を示した。一方で、PVB 樹脂塗装鉄筋やエポキシ樹脂塗装鉄筋については、普通鉄筋よりも低い付着応力度を示している。したがって、PVB 樹脂塗装鉄筋表面に珪砂を付着させることで、すべり量が小さい領域においては鉄筋とコンクリートとの付着力を大幅に向上させることが可能であると考えられる。

(2) コンクリートの付着強度の特性値 f_{bok} における
PVB-S 被覆鉄筋のすべり量
PVB-S 被覆鉄筋を用いた場合のコンクリートとの付

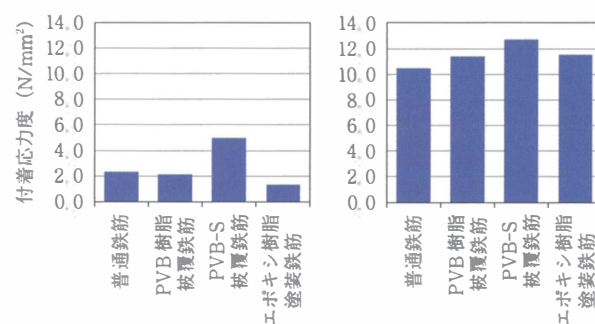


図-2 鉄筋種類と付着強度の関係
(左: すべり量 0.04 mm の時, 右: 最大付着応力度)

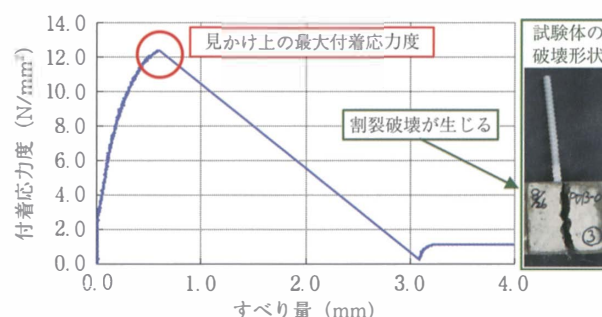


図-3 付着強度試験結果の一例

着力向上効果について、「コンクリート標準示方書〔設計編〕³⁾」に示されるコンクリートの付着強度の特性値 f_{bok} における鉄筋のすべり量で比較を行った。コンクリートの付着強度の特性値 f_{bok} は、式(1)により算出した。コンクリートの付着強度の特性値 f_{bok} におけるすべり量を表-3 および図-4 に示す。

$$f_{bok} = 0.28 f_{ck}'^{2/3} \quad (1)$$

ただし、 $f_{bok} \leq 4.2 \text{ N/mm}^2$
 ここに、 f_{ck}' ：コンクリートの圧縮強度の特性値（=31.5～32.5 N/mm^2 ：付着強度試験時の圧縮強度とした）

コンクリートの付着強度の特性値 f_{bok} における鉄筋のすべり量を比較すると、PVB 樹脂塗装鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋は普通鉄筋よりもすべり量が大きくなるのに対し、PVB-S 被覆鉄筋のすべり量は大幅に低減されている。また、珪砂の影響について比較すると、PVB-S 被覆鉄筋において PVB 樹脂被覆鉄筋よりもすべり量が大幅に低減されている。この結果から、PVB-S 被覆鉄筋の鉄筋表面に付着させた珪砂がコンクリートとの付着力向上に寄与していると推察される。

表-3 付着強度の特性値における鉄筋のすべり量

鉄筋種別	付着強度特性値 f_{bok} (N/mm^2)	f_{bok} における鉄筋のすべり量 (mm)
普通鉄筋	2.85	0.069
PVB 樹脂被覆鉄筋	2.85	0.074
PVB-S 被覆鉄筋	2.79	0.004
エポキシ樹脂塗装鉄筋	2.85	0.086

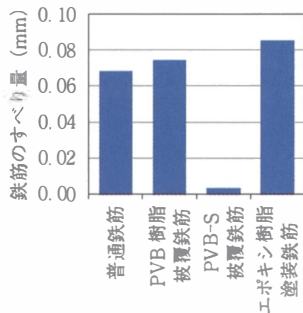


図-4 付着強度の特性値における鉄筋のすべり量

(3) PVB-S 被覆鉄筋表面の珪砂付着量がコンクリートとの付着強度に及ぼす影響

PVB-S 被覆鉄筋に付着させた珪砂付着量が鉄筋のすべり量 0.04 mm 時点における付着強度に及ぼす影響について試験により確認した。珪砂の付着量を製造時に 5 水準変化させた。付着強度試験結果および珪砂付着量の関係を図-5 に示す。

図-5 より、PVB-S 被覆鉄筋は珪砂付着量の増加に伴い、すべり量 0.04 mm 時点における付着強度も向上する結果が得られた。珪砂付着量と付着強度の間には、決定係数 $R^2=0.97$ と非常に高い相関性が認められ、普通鉄筋と同等の付着強度を得るために必要な珪砂付着量を算出すると 10.7 g/m^2 であった。PVB-S 被覆鉄筋の製造過程において、極少量の珪砂を付着させた場合でも珪砂付着量は 80 g/m^2 程度となった。したがって、PVB-S 被覆鉄筋の運搬や鉄筋の加工過程において、鉄筋表面に付着させた珪砂が脱落した場合を想定しても、10.7 g/m^2 以上の珪砂付着量は十分確保できると考えられる。

4. PVB-S 被覆鉄筋を使用した鉄筋コンクリートの構造性能

4.1 試験体の概要

PVB-S 被覆鉄筋を使用した鉄筋コンクリートの構造性能について確認するため、はりの試験体を作製し、曲げ試験および繰返し曲げ載荷試験を実施した。試験体の概要を図-6 に示す。

試験体は、曲げ破壊が生じるように載荷寸法を設定し、

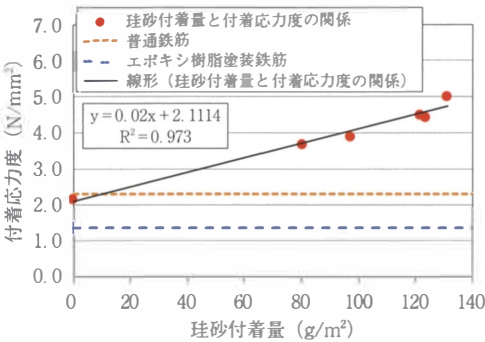


図-5 付着強度と珪砂付着量の関係

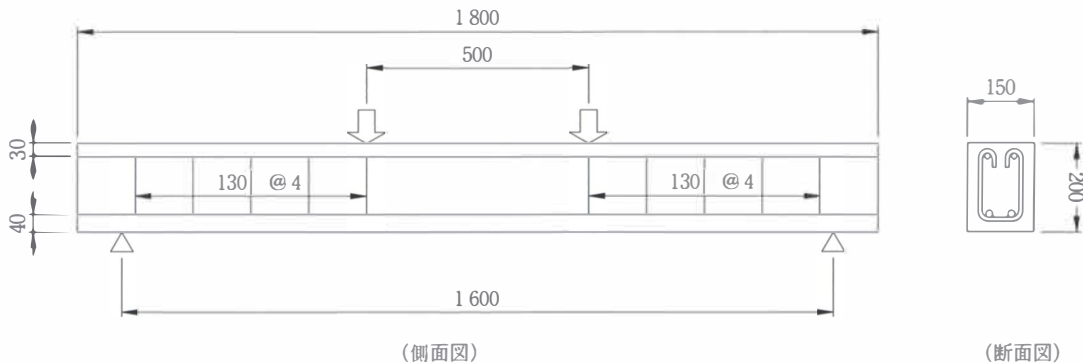


図-6 試験体の概要「単位：mm」

せん断スパンにはせん断補強筋を配置した。試験体を使用した鉄筋の母材はSD 345とし、引張側の主鉄筋にD 16、圧縮側の鉄筋にD 13、せん断補強筋にはD 10を使用した。このうち、引張側の主鉄筋に被覆鉄筋を用いた。PVB-S被覆鉄筋の他に、普通鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した試験体についても作製した。試験体の作製に用いたコンクリートの配(調)合を表-4に示す。

4.2 PVB-S被覆鉄筋の使用が静的載荷を受けた鉄筋コンクリートの構造性能に及ぼす影響

静的載荷試験では、載荷初期に異常な残留変位が生じないことを確認するため、主鉄筋の引張応力が許容引張応力度(200 N/mm²)となる39.1 kNを上限荷重として、3回繰返し載荷し、その後、破壊に至るまで静的載荷を行った。

静的載荷試験時のはり中央部における変位と荷重の関係を図-7に示す。図-7より、同一荷重における変位は、PVB-S被覆鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋ではほぼ同程度となった。また、最大荷重もいずれもほぼ同等となった。一方で、PVB-S被覆鉄筋やエポキシ樹脂塗装鉄筋は、普通鉄筋よりも同一荷重におけるはり中央部の変位が大きくなる傾向を示した。しかし、その差は小さく、この結果のみでは有意な差を認められなかった。

表-4 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
55.0	45.0	169	376	877	1 005

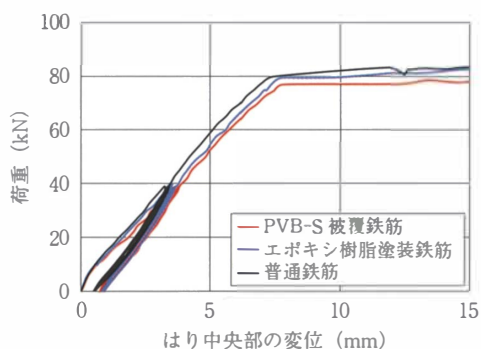


図-7 曲げ試験におけるはり中央部の変位と荷重の関係

4.3 PVB-S被覆鉄筋の使用が繰返し曲げ載荷を受けた鉄筋コンクリートの構造性能に及ぼす影響

繰返し曲げ載荷試験の載荷条件を表-5に示す。載荷荷重の上限は、主鉄筋の引張応力が許容応力度(200 N/mm²)となる39.1 kNとした。載荷開始時および載荷開始から5万回目、50万回目、100万回目、200万回目において静的載荷試験を実施し、スパン中央部の変位、等曲げモーメント区間のひび割れ幅の計測を行い、試験体に発生したひび割れ状況の観察を行った。繰返し載荷回数が100万回目までの静的載荷試験では、上限荷重39.1 kNまで載荷を行った。一方、繰返し載荷回数200万回目については、試験体が破壊に至るまで静的載荷を行った。

(1) 繰返し曲げ載荷によるはり中央部の変位と荷重の関係

繰返し曲げ載荷試験におけるはり中央部の変位と荷重の関係を図-8に示す。図-8より、どの種類の鉄筋においても、1回目の静的載荷でははり中央部は大きく変位し、繰返し載荷回数の増加に伴い、中央部の変位も増加する傾向を示した。繰返し曲げ載荷試験においても、はり中央部の変位は、PVB-S被覆鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋ではほぼ同等となり、普通鉄筋が最も小さくなった。しかし、曲げ試験と同様に、その差は小さく、明らかに有意な差は認められなかった。

(2) 繰返し曲げ載荷を受けた試験体のひび割れ幅およびひび割れ発生状況

繰返し曲げ載荷試験におけるはり中央部に生じたひび割れ(PVB-S被覆鉄筋：図-10 a)の④、エポキシ樹脂塗装鉄筋：図-10 b)の③、普通鉄筋：図-10 c)の③)のひび割れ幅と荷重の関係を図-9に示し、繰返し曲げ載荷試験後のひび割れ発生状況を図-10に示す。

表-5 載荷条件の一覧

上限荷重 (kN)	39.1
下限荷重 (kN)	16.1
載荷速度 (Hz)	3
繰返し載荷回数 (回)	200 万
静的載荷試験時の繰返し載荷回数 (回)	1, 5 万, 50 万, 100 万, 200 万

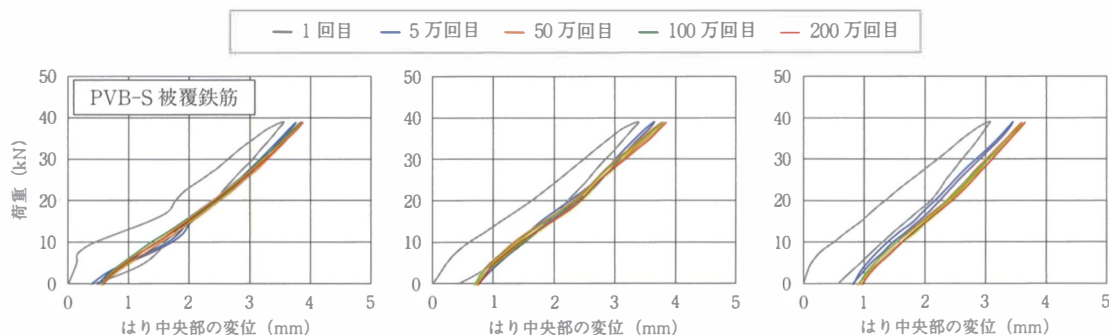


図-8 繰返し曲げ載荷試験におけるはり中央部の変位と荷重の関係

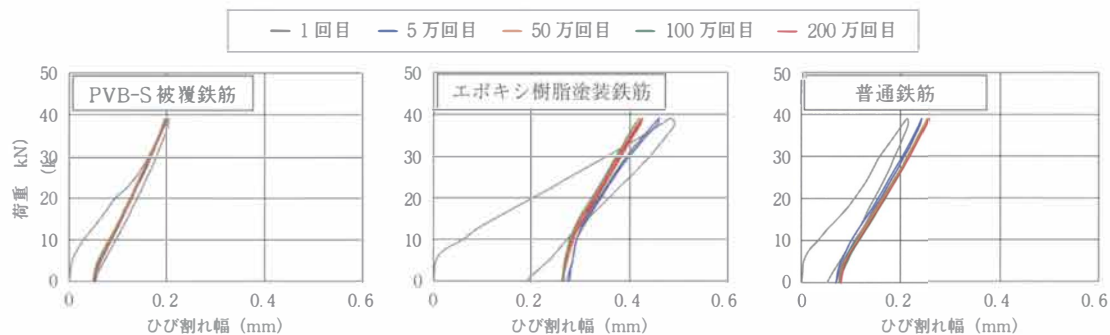


図-9 繰返し曲げ荷重試験におけるひび割れ幅と荷重の関係

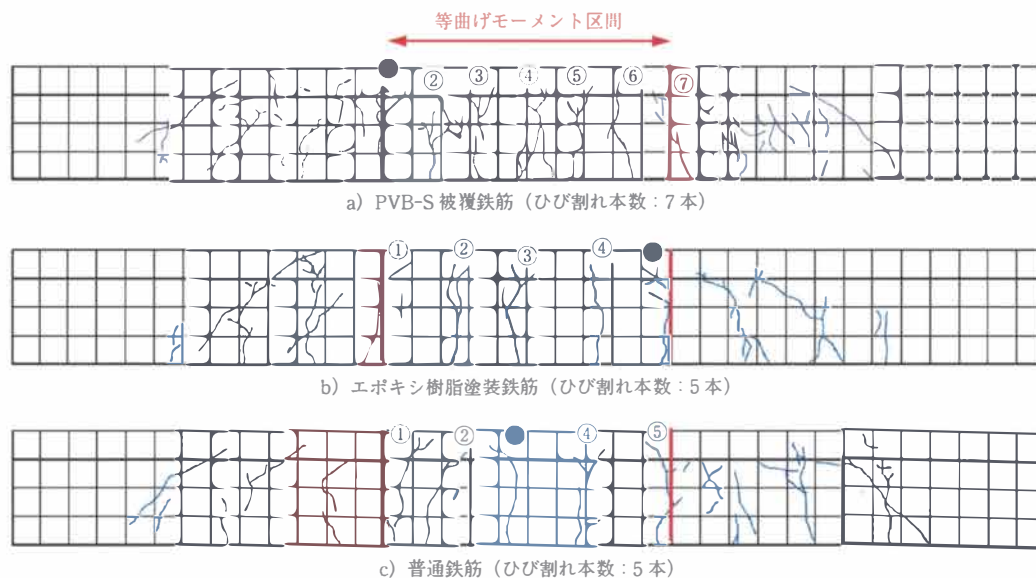


図-10 繰返し曲げ荷重試験後のひび割れ発生状況

図-9より、エポキシ樹脂塗装鉄筋や普通鉄筋は1回目に比べ、5万回荷重を行うと残留ひび割れ幅が増加する傾向が認められた。一方で、PVB-S被覆鉄筋は、200万回の繰返し荷重を受けた後においても残留ひび割れ幅の増加は確認されていない。

図-10に等曲げモーメント区間に生じたひび割れ発生状況を示す。発生したひび割れの本数は、エポキシ樹脂塗装鉄筋、普通鉄筋ともに5本であったのに対し、PVB-S被覆鉄筋は7本となり、ひび割れの発生間隔が小さくなっている。これは、3章で示したように、PVB-S被覆鉄筋とコンクリートとの付着強度が高いことが影響し、繰返し曲げ荷重を受けた際にひび割れの分散につながったと考えられる。そのため、PVB-S被覆鉄筋を用いた試験体においては、ひび割れが分散することで応力も分散され、図-9のように残留ひび割れ幅の増加が確認されなかったものと推察される。これに対し、コンクリートとの付着強度が小さいエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合、ひび割れ発生本数が少ないことから、ひび割れ発生個所に応力が集中することで残留ひび割れ幅の増加につながったものと考えられる。

表-6 工事概要

名 称	新東名高速道路中島高架橋工事
場 所	静岡県駿東郡
発 注 者	中日本高速道路(株)
工 期	2015年7月～2021年10月
施 工 者	(株)大林組
工事内容	・上部工：PC7径間連続ラーメン箱桁橋（上り線505m、下り線481m） ・下部工：橋脚工14基（最大橋脚高46m） ・切盛工事：6万8000m³ ・調整池：2カ所

5. PVB-S被覆鉄筋の橋梁壁高欄への適用事例

高速道路などの既設橋梁構造物において、凍結防止剤を散布する地域などでは、壁高欄などの部材で塩害の影響を受け、老朽化が進行している。そこで、中日本高速道路(株)においては、新東名高速道路新設橋梁の壁高欄の耐久性向上に向けて様々な取組みがなされている⁴⁾。その中で、新東名高速道路の伊勢原大山IC～御殿場JCTの一部の施工区間（中島高架橋）において、PVB-S被覆鉄筋が試行的に採用された。中島高架橋の工事概要を表-6に示す。また、PVB-S被覆鉄筋の壁高欄への配置状況を写真-3に示す。



写真-3 壁高欄に配置された PVB-S 被覆鉄筋

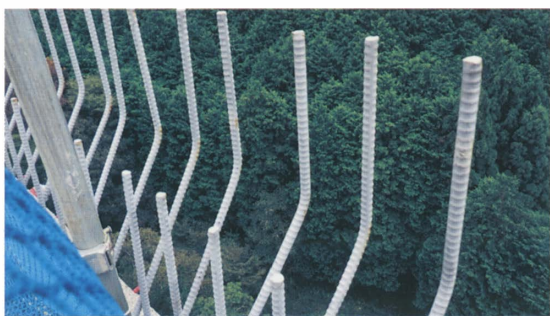


写真-4 1年以上経過した PVB-S 被覆鉄筋

PVB-S 被覆鉄筋の適用は、中島高架橋の壁高欄の他に、紫外線劣化に対して優れた性能を有している（表-1 参照）ことから、鉄筋が長期間曝露環境に曝される上部工の床版接合部にも適用された。エポキシ樹脂塗装鉄筋を配置し長期間曝露環境に曝される際には、紫外線劣化を抑制する目的で、シートなどにより鉄筋に養生を施さなければならない。一方、PVB-S 被覆鉄筋は、1 年以上曝露環

境に曝されるにも関わらず、シートなどによる鉄筋の養生は実施していない。写真-4 に示すように、1 年以上経過した後の PVB-S 被覆鉄筋の塗膜について、紫外線の影響により変色が認められるものの、PVB 樹脂塗膜の剥がれなどは確認されず、健全な状態が維持されていた。以上より、PVB-S 被覆鉄筋を使用することで、耐久性の向上につながるだけでなく、シート養生などの作業を省略できるため、生産性の向上にも寄与できると考えられる。

6. おわりに

PVB 樹脂および珪砂から構成される新規防食鉄筋を開発し、PVB-S 被覆鉄筋の性能および塩害環境に曝される橋梁の壁高欄への適用事例について紹介した。今後は、PVB-S 被覆鉄筋を使用した鉄筋コンクリートの長期耐久性に関する検討や機械式継手への適用性の検証など、コンクリート構造物の品質向上や生産性向上へ向けた取組みを進めていきたい。

参考文献

- 1) (一財)沿岸技術研究センター：ポリビニルブチラール樹脂を用いた被覆鉄筋「PVB-S 被覆鉄筋」、港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書、2016. 9
- 2) (公社)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 [改訂版]、コンクリートライブラリー第 112 号、2003. 11
- 3) (公社)土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]、2018. 3
- 4) 山口岳忠：新東名高速道路（厚木南 IC～御殿場 JCT）における壁高欄の耐久性向上の取組み、コンクリート工学、Vol.57, No.5, pp.370～375、2019. 5

《図書案内》

熊本地震に関する特別委員会報告書

2016 年 4 月に発生した熊本地震では、震度 7 の激震が一日において二度にわたり同じ地域を襲うなど、熊本県、大分県を中心として非常に大きな地震動が作用し、大きな被害が出ました。

日本コンクリート工学会では、九州支部の協力のもと、2016 年 6 月に「熊本地震に関する特別委員会（委員長：芳村学・首都大学東京名誉教授）」を会長直轄の特別委員会として設置し、建築構造物、土木構造物、そして生コンクリート、二次製品、骨材関係などの材料・製品関連施設へ今回の地震が及ぼした影響や、災害廃棄物（がれき）の処理について、2 年間にわたり調査を行いました。本報告書は、これらの調査結果と、2018 年 8 月に発表した 11 の提言と解説を収録したものとなります。

〔委員会報告〕

第一編：建築構造物に関する調査結果 第二編：土木構造物に関する調査結果 第三編：材料・製品関連施設に関する調査結果 第四編：災害がれきの処理に関する調査結果

〔日本コンクリート工学会からの提言〕

A. 建築構造物について B. 土木構造物について C. 材料・製品関連施設について D. 災害廃棄物（がれき）の処理について

A 4 判・228 ページ（2018 年刊行）／定価 5 500 円（税込）、会員価格 4 950 円（税込）／送料 460 円

●申込先：公益社団法人 日本コンクリート工学会「書籍販売」係

〒102-0083 東京都千代田区麹町 1-7 相互半蔵門ビル 12 階／電話 (03) 3263-1573