

論文 低温環境が PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工性に及ぼす影響

太田 健司*1・石田 知子*2・審良 善和*3・嶋田 祐人*4

要旨：著者らは、エポキシ樹脂塗装鉄筋と同等以上の防食性を有し、曲げ加工性やコンクリートとの付着力に優れた防食鉄筋 PVB-S 被覆鉄筋を開発した。本鉄筋は、融雪剤などを散布する寒冷地の道路構造物などへの適用性拡大が見込まれることから、低温環境下での施工性を確認する必要がある。そこで、低温環境が PVB 樹脂の伸び率や PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工性に及ぼす影響について検討した。その結果、鉄筋加工時に塗膜に割れを生じさせないために必要とされる PVB 樹脂の伸び率は 25%以上であり、雰囲気温度を 5℃以上に管理することで PVB 樹脂の伸び率を確保でき、割れを生じることなく曲げ加工できることを確認した。

キーワード：防食鉄筋, PVB 樹脂, PVB-S 被覆鉄筋, エポキシ樹脂, 樹脂の伸び率, 曲げ加工性

1. はじめに

塩害環境に曝される港湾構造物や凍結防止剤を散布する地域の道路構造物などでは、鉄筋コンクリートの塩害に対する長期耐久性確保の観点から防食鉄筋の適用が進められている。防食鉄筋の代表例として、エポキシ樹脂塗装鉄筋が挙げられる。エポキシ樹脂塗装鉄筋は、高い防食性能を有し、既に実構造物への適用事例も多い。一方で、普通鉄筋と比較した場合、コンクリートとの付着強度が低下する。そのため、工事現場で鉄筋組立時に重ね継手を採用する場合、鉄筋同士の重ね合わせ長さを普通鉄筋よりも約 1.18 倍程度、長くする必要があるなど設計上の配慮が求められる¹⁾。また、塗膜に使用されるエポキシ樹脂は、紫外線の影響を受けて劣化しやすい。このため、工事現場などで鉄筋を保管する際や打継部などの長期間屋外環境に曝される場合には、シート養生や鉄筋の袋掛けなど紫外線劣化への配慮が必要となり、施工上の手間が多くなる。

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ール樹脂（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周囲に珪砂を塗布した高性能防食鉄筋（以下、PVB-S 被覆鉄筋）を開発した²⁾。また、PVB 樹脂は、エポキシ樹脂よりも高い伸び能力を有しているため、鉄筋の曲げ加工性にも優れている³⁾。しかし、一般的にエポキシ樹脂や PVB 樹脂などのプラスチック材料は、温度条件によって樹脂の硬さや伸び率などの機械的性質は変化する⁴⁾。特に、冬季などの低温環境下では樹脂の伸び率低下に伴い、鉄筋の曲げ加工時に塗膜に割れやはく離が生じやすくなるなど、作業性の低下が懸念される。

PVB-S 被覆鉄筋は、凍結防止剤の散布が必要となるよ

うな寒冷地の鉄筋コンクリート構造物において、既に適用が進められている⁵⁾。今後、さらに厳しい寒冷地での適用が期待できることから、低温環境が PVB 樹脂の伸び率や PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工性に及ぼす影響および管理方法について検討した。

2. PVB-S 被覆鉄筋の概要

PVB-S 被覆鉄筋は、静電粉体塗装法により PVB 樹脂被膜の膜厚が $220 \pm 40 \mu\text{m}$ となるように塗装し、PVB 樹脂被覆後の鉄筋表面に珪砂吹付処理を施した防食鉄筋である。PVB-S 被覆鉄筋は、珪砂吹付処理後の膜厚で管理しており、PVB 樹脂被覆から鉄筋表面に付着させた珪砂分を含めて $300 \pm 100 \mu\text{m}$ としている。

PVB-S 被覆鉄筋は、「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〕¹⁾」で定められた品質規格を満足しており、エポキシ樹脂塗装鉄筋と同等以上の性能を有している³⁾。なかでも、PVB 樹脂の伸び率はエポキシ樹脂よりも高く、樹脂の変形性に優れる。このことから、衝撃時に生じる塗膜の変形に対する追従性にも優れており、PVB-S 被覆鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋よりも曲げ加工時の割れの発生や鉄筋組立による損傷の発生を低減できる。加えて、鉄筋周囲に吹付けた珪砂の効果により、コンクリートとの付着力はエポキシ樹脂塗装鉄筋よりも高く、普通鉄筋と同等の付着強度を有している⁵⁾。

3. PVB 樹脂の特長

3.1 紫外線劣化に対する抵抗性⁵⁾

PVB 樹脂の促進耐候性試験結果を表-1 に示す。比較対象として、エポキシ樹脂の促進試験結果も示す。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

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副部長 博士(工学) (正会員)

*3 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)

*4 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)

じ、紫外線劣化に対する抵抗性の評価は、促進試験開始前と 2000 時間の促進試験後の色差 (ΔE^*_{ab}) を用いて評価した。表-1 より、促進試験期間 2000 時間後のエポキシ樹脂の色差が 22.5 であったのに対し、PVB 樹脂は 8.9 とエポキシ樹脂と比較して 40% 程度の色差に低減された。色差の変化が大きいほど、塗料の変色、変質が大きいことを示し、塗膜性能の低下が懸念される。したがって、PVB 樹脂はエポキシ樹脂よりも紫外線劣化に対する抵抗性が高いと考えられる。

3.2 PVB 樹脂の伸び能力⁵⁾

PVB 樹脂およびエポキシ樹脂の直接引張試験結果を表-2 に示す。また、直接引張試験の引張強さと変位量の関係を示した一例を図-1 に示す。試験は、JIS K 7161 (プラスチック-引張特性の求め方) に準じて実施した。PVB 樹脂はエポキシ樹脂と比較して、引張強さは 0.8 倍程度にとどまるものの、2 倍程度の伸び率を示している。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、鉄筋の曲げ加工性に優れると考えられる。

3.3 PVB 樹脂被膜の塩化物イオン透過性⁶⁾

PVB 樹脂およびエポキシ樹脂により作製した被覆膜を用いて実施した塗膜塩化物イオン透過性試験結果を図-2 および図-3 に、イオン透過性試験から算出した拡散係数を図-4 に示す。試験は、JSCE-E 503-2003 (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) に準じて実施した。被膜は、目標膜厚を $220 \pm 40 \mu\text{m}$ (図-2 参照) および $100 \pm 30 \mu\text{m}$ (図-3 参照) として作製した

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

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

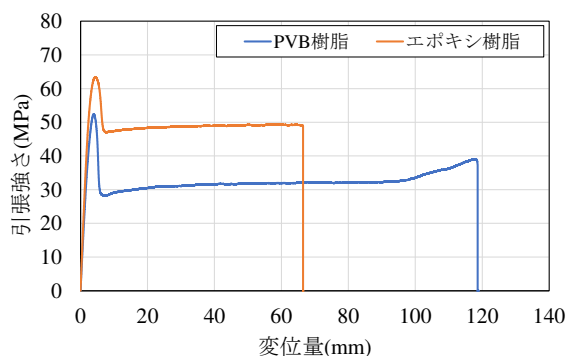


図-1 PVB 樹脂とエポキシ樹脂の伸び性能の違い

ものを試験に使用した。ここで、図-2 より、PVB 樹脂の方が若干ではあるが、塩化物イオン透過量が大きくなっている。これは、試験に使用した被膜の膜厚がエポキシ樹脂と比較して薄いことが影響したと考えられる。つぎに、目標膜厚を $100 \mu\text{m}$ とした場合のエポキシ樹脂の塩化物イオン透過量は、PVB 樹脂に比べ非常に高い。これは、試験時の溶液交換に伴う試験片の再設置などの影響で、試験片の脱着時にエポキシ樹脂被膜に微細な損傷を生じさせた可能性や、再設置とともに試験片の設置位置が若干ずれたことにより、試験片作製時に存在していたピンホールがセルの内部側に位置した影響などが考えられる。一方で、PVB 樹脂は伸び率が高く、樹脂の変形性にも優れることから、試験片の脱着時にも被膜への損傷

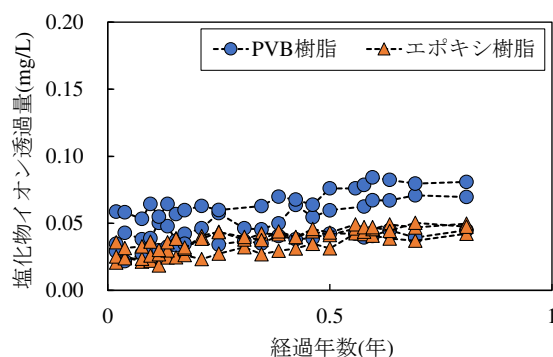


図-2 塩化物イオン透過量(目標膜厚 $220 \mu\text{m}$)

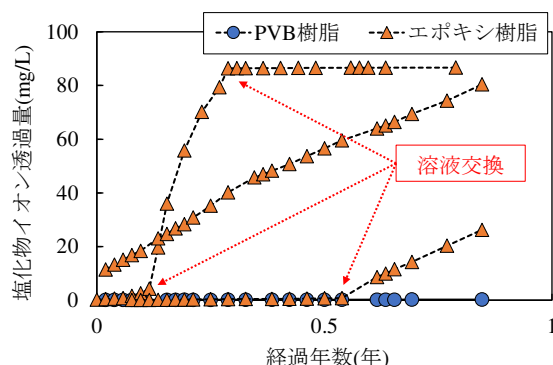


図-3 塩化物イオン透過量(目標膜厚 $100 \mu\text{m}$)

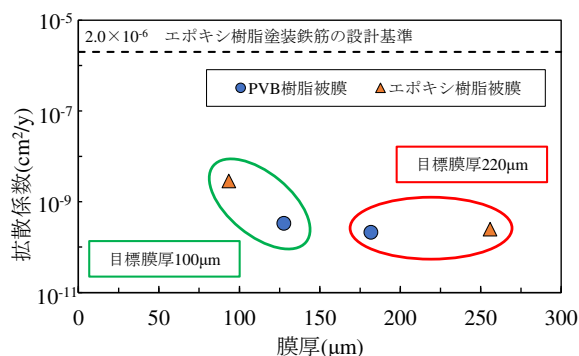


図-4 塩化物イオンの拡散係数

が生じにくいと考えられ、溶液交換に伴う塩化物イオン透過量の大幅な増加は確認されなかった。このことから、PVB-S被覆鉄筋においても曲げ加工や鉄筋組立に伴う変形により発生する損傷をエポキシ樹脂塗装鉄筋よりも低減できると考えられる。

塩化物イオンの拡散係数については、被膜厚に関わらず PVB 樹脂およびエポキシ樹脂のどちらにおいても、「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]¹⁾」で定められている樹脂被膜内の塩化物イオンの見かけの拡散係数の設計値 ($2.0 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{y}$) を十分満足している。したがって、防食鉄筋の塗膜として PVB 樹脂を使用した場合でも、塩化物イオン透過性に対して十分な抵抗性を有していることがわかる。さらに、膜厚が $100 \mu\text{m}$ 程度の場合でも、塩化物イオンの見かけの拡散係数は設計値を十分に下回っている。損傷部分に補修を施す際には刷毛塗りなど手作業によるところが多いが、塗りムラなどが生じた場合においても、最小膜厚を $100 \mu\text{m}$ 以上確保することで、十分な耐食性を付与できる可能性が示唆される。

4. 低温環境における PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工性

4.1 温度環境が PVB 樹脂の伸び率に及ぼす影響

4.1.1 試験片の概要

試験片は、JIS K 7161-2 (プラスチック - 引張特性の求め方 - 第2部：型成形、押出成形及び注型プラスチックの試験条件) に準拠して作製した。試験片は、最初に PVB 樹脂の平板サンプルを作製し、平板サンプルから試験片の形状 (JIS K 7161-2 1A 形) に合わせて切削することで作製した。試験片の形状および寸法を図-5 および表-3 に示す。試験片の外観を写真-1 に示す。

4.1.2 試験時の雰囲気温度および試験片の養生条件

樹脂の引張試験における養生条件および引張試験時の雰囲気温度を表-4 に示す。引張試験時の雰囲気温度について、試験時の一般的な温度環境 (23°C) に加え、温度環境が PVB 樹脂の伸び率へ及ぼす影響を確認するため、低温環境も検討した。「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]¹⁾」を参考にとすると、曲げ加工は原則 5°C 以上の雰囲気温度で行うことと定められていることから、 5°C 環境とした場合について検討を行った。さらに、より厳しい温度環境も想定し、 0°C および -5°C 環境についても試験を行った。

また、試験片の前養生としては、試験まで 20°C 環境にて静置した条件と、特に厳しい低温環境下に曝されるような工事現場などを想定し、繰返し低温環境に曝された条件の2水準を設定した。試験片に繰返し低温環境を作用させた際の温度履歴を図-6 に示す。温度履歴は、開始温度を 0°C として、最低温度から最高温度に達し、再度

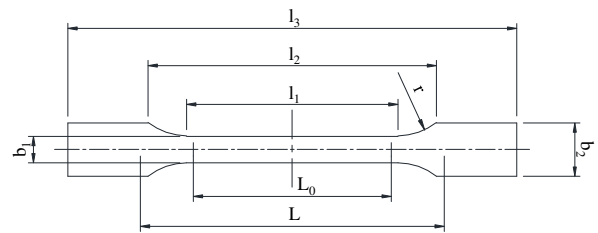


図-5 引張試験片の形状

表-3 試験片の寸法 (JIS K 7161-2 1A 形)

項目		寸法 (mm)
l_3	全長	170
l_1	幅の狭い平行部分の長さ	80 ± 2
r	半径	24 ± 1
l_2	幅の広い平行部分までの間隔	109.3 ± 3.2
b_2	エッジ部の幅	20 ± 0.2
b_1	狭い部分の幅	10 ± 0.2
h	推奨厚さ	4.0 ± 0.2
L_0	標線間距離	75 ± 0.5
L	つかみ具間距離	115 ± 1



写真-1 試験片の外観

表-4 養生条件および試験時の雰囲気温度

試験片種別	養生条件	試験時の雰囲気温度 ($^\circ\text{C}$)
20-(23)	20 $^\circ\text{C}$ 環境	23 ± 1
20-(5)		5 ± 1
20-(0)		0 ± 1
20-(-5)		-5 ± 1
C-(23)	繰返し低温環境	23 ± 1

※試験片種別は最初に養生条件 (20 $^\circ\text{C}$ 環境もしくは繰返し低温環境) を示し、() 内は試験時の温度を示す。

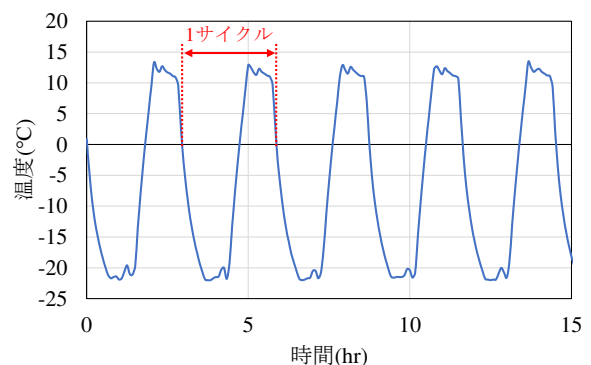


図-6 繰返し低温環境を作用させた際の温度履歴

0℃に戻った時点をも 1 サイクルとした。鉄筋の加工工場および工事現場で 1 か月程度、低温環境下で保管した場合を想定して、合計 30 サイクルまで降温および昇温を繰り返した。温度履歴の条件は、JISA 1148（コンクリートの凍結融解試験方法）を参考にした。

4.1.3 引張試験方法

試験は、JIS K 7161（プラスチック引張特性の求め方—第 1 部：通則）に準じて実施した。試験時の引張速度は 5mm/min とし、試験片のつかみ具間距離は 115mm とした。測定項目は、荷重および変位（試験機のストローク変位）とした。試験片は、試験結果のばらつきを考慮して各条件においてそれぞれ 5 体とした。引張試験の試験状況（試験時の雰囲気温度 23 ± 1℃の場合）を写真-2 に示す。また、試験時の雰囲気温度が 5℃以下となる条件では、写真-3 に示すように、試験機に温度管理が可能な低温槽を設置し、目標温度に設定した低温槽内に試験治具および試験片を入れた状態で試験した。

引張試験により得られた結果から、引張強さ σ を式(1)、試験片破断時のつかみ具間の伸び率 Ec を式(2)により算出した。

$$\sigma = P / (b_l \cdot h) \quad (1)$$

ここで、 P は最大荷重(N)、 b_l は試験片の幅(mm)、 h は試験片の厚さ(mm)である。



写真-2 引張試験状況



写真-3 低温環境での引張試験状況

$$Ec = Lc / L \cdot 100 \quad (2)$$

ここで、 Lc は破断時のストローク変位量(mm)、 L は試験開始時のつかみ具間距離(=115mm)である。

4.1.4 引張試験結果

各環境条件で実施した平均引張強さと平均伸び率を表-5 に、各 5 体の試験で得られた変位量と引張強さの関係を図-7 に示す。

標準環境下で試験した試験片 20- (23) において、変位量が 4mm 程度で最大引張強さを示した。その後、荷重は低下するものの、一定の値を維持し、変位量 90～140mm で試験片が破断した。なお、変位量が 90mm を越えた付近から、再度、引張強さの増加が確認された。これは、PVB 樹脂の伸び率が高く、図-5 中の l_1 区間のみでは試験片が破断に至らず、試験片の幅が広がっている区間まで伸びた後に破断に至ったため（断面積が増加したことによる荷重の増加）である。試験時の雰囲気温度が PVB 樹脂の伸び率に及ぼす影響について確認すると、温度が低くなるにつれ最大引張強さは増加している。これは、プラスチックなどの樹脂は温度依存性を有し⁴⁾、温度が低くなるにつれて、樹脂も硬くなる性質が現れたためと考えられる。一方で、試験片の変位量は小さくなっており、それに伴って平均伸び率も 20-(23)の 102%に対し、20-(5)で 38%、20-(0)で 30%、20-(-5)で 18%と低下している。試験時の雰囲気温度が低くなると最大引張強さを示した直後に破断する試験片が認められ、特に、-5℃環境においては、5 体の試験片のうち 3 体が脆性破壊により破断した。このことから、PVB-S 被覆鉄筋において、鉄筋曲げ加工時の雰囲気温度が低くなるにつれ、PVB 樹脂被膜に割れ等の損傷が発生しやすくなると考えられる。これは、プラスチックなどの樹脂は温度依存性を有している⁴⁾ことや、「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]¹⁾」においても曲げ加工時の環境温度を 5℃以上と定められており、エポキシ樹脂塗装鉄筋でも同様に生じる現象と考えられる。

一方で、前養生として試験片に繰返し低温環境を与えた C-(23)については、平均引張強さおよび平均伸び率ともに 20-(23)と同等の結果となった。したがって、雰囲気温度の低下とともに樹脂が硬くなることで変位量（伸び率）が低下するものの、環境温度の上昇に伴い、低温環境に曝される前の状態に近い領域まで機械的性質が回復すると考えられる。

4.1.5 樹脂の伸び率と曲げ加工の関係

PVB 樹脂の伸び率が PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工時に生じる損傷への抵抗性に及ぼす影響について検討した。被覆鉄筋の曲げ加工時には、鉄筋外周部の樹脂の伸びが鉄筋内周部に比べて大きくなる。そのため、鉄筋外周部に必要とされる PVB 樹脂の伸び率について検討した。JSCE 515-2003（エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験方法）¹⁾で

は、D16 以下の鉄筋において曲げ内半径が鉄筋公称断面積の 1.5 倍と定められており、曲げ加工時の被覆樹脂に求められる伸び率が最も厳しい条件となる。以上より、鉄筋の曲げ内半径を 1.5 倍とした場合の鉄筋外周部における PVB 樹脂に必要な伸び率を算出した。

まず、曲げ加工後の鉄筋外周部の長さを式(3)に示し、鉄筋中心部の曲げ加工後の長さを式(4)に示す。式(3)および式(4)より、曲げ加工時に必要とされる鉄筋外周の伸び率を式(5)により算出した。

$$2\pi(1.5+1.0)\varphi / 2 = 2.5\pi\varphi \quad (3)$$

$$2\pi(1.5+0.5)\varphi / 2 = 2.0\pi\varphi \quad (4)$$

$$(2.5\pi\varphi - 2.0\pi\varphi) / 2.0\pi\varphi \cdot 100 = 25(\%) \quad (5)$$

ここで、 φ は鉄筋公称直径である。

以上より、鉄筋加工時における PVB 樹脂の伸び率を 25%以上確保する必要がある。表-5 より、PVB 樹脂の伸び率 25%を確保するために必要な PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工時の環境温度は 0℃以上となる。ただし、式(3)～(5)では、鉄筋が同一断面であると仮定して計算しており、PVB-S 被覆鉄筋製造時に品質のばらつきも生じる。これらを考慮すると、「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]¹⁾」に定められている曲げ加工時の雰囲気温度と同様に、5℃以上の環境温度にて曲げ加工をすることが望ましいと考えられる。

4.2 低温環境における PVB-S 被覆鉄筋の曲げ試験

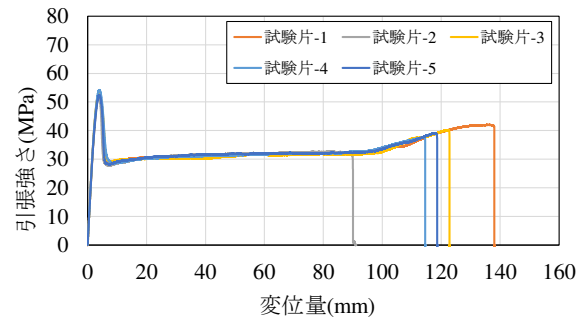
4.2.1 試験概要

鉄筋の曲げ内半径を 1.5 倍とした場合の PVB 樹脂に必要なとされる伸び率を算出し、その結果、PVB 樹脂の伸び率を 25%以上確保する必要があると算出した。そこで、式(3)～(5)における計算結果の妥当性を検証するため、JSCE 515-2003（エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験方法）¹⁾に準拠して、PVB-S 被覆鉄筋の曲げ試験を実施した。曲げ試験に使用した母材は、SD345 の D13 および D16 と

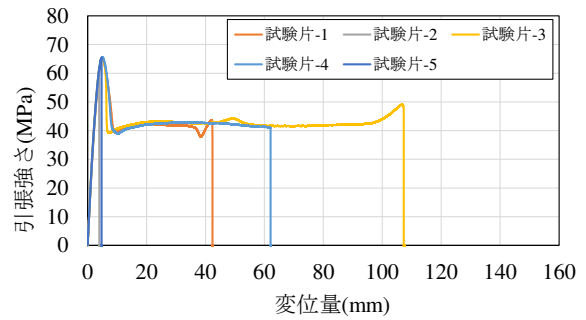
表-5 各条件における平均引張強さと平均伸び率

試験片 種別	平均引張強さ (MPa)	平均伸び率 (%)
20-(23)	53.0	102
20-(5)	64.6	38
20-(0)	69.5	30
20-(-5)	72.1	18
C-(23)	52.8	101

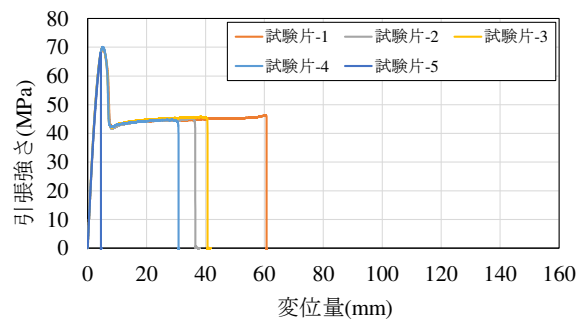
※試験片種別は最初に養生条件（20℃環境もしくは繰返し低温環境）を示し、() 内は試験時の温度を示す。



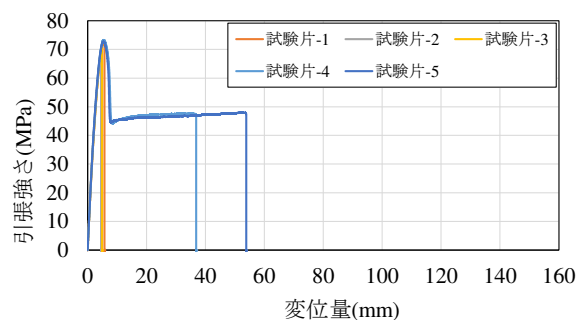
a) 20-(23)



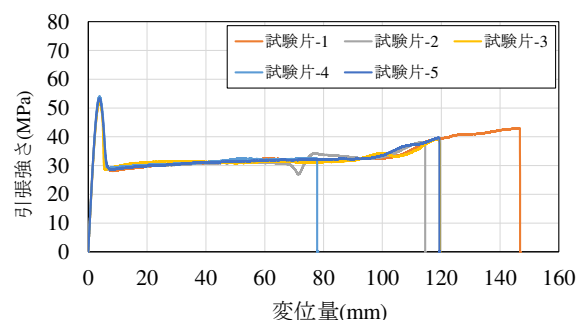
b) 20-(5)



c) 20-(0)



d) 20-(-5)



e) C-(23)

図-7 変位量と引張強さの関係

表-6 PVB-S 被覆鉄筋の曲げ試験結果

試験時の 雰囲気温度	割れ発生率(%)	
	D13	D16
20℃	0	0
5℃	0	0
-5℃	80	80

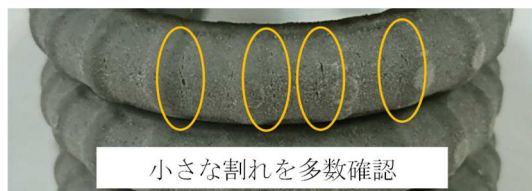


写真-4 -5℃環境における曲げ試験後の PVB-S 被覆鉄筋

した。曲げ試験の温度条件は、試験方法に記載されている 20℃および 5℃、-5℃とした。-5℃の曲げ試験については、ドライアイスを用いて PVB-S 被覆鉄筋の表面温度を強制的に-5℃まで低下させ、直ちに曲げ試験を実施した。鉄筋の曲げ内半径は、温度環境に関わらず 1.5ϕ (ϕ : 鉄筋公称直径) で実施した。

曲げ試験後の PVB-S 被覆鉄筋を観察し、次の式(6)により、割れ発生率を求めた。

$$P = A / N \cdot 100 \quad (6)$$

ここで、 P は割れ発生確率(%), A は割れの発生した供試体数, N は全測定数(=5)である。

4.2.2 曲げ試験結果

各温度における曲げ試験の結果を表-6 に示す。その結果、曲げ試験時の雰囲気温度が 5℃以上の条件では、鉄筋径に関わらず全ての試験片で割れなどの損傷は確認されなかった。一方で、雰囲気温度-5℃の条件では、写真-4 に示すように、鉄筋の外周部に小さな割れなどの欠陥が多数発生した。発生した欠陥の種類は、JSCE 515-2003 (エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験方法)¹⁾ に示される 2～5mm 程度の小さな割れや 1～2mm 程度の微小割れが多くを占めた。曲げ試験の割れ発生率は D13 および D16 とともに 80%を示した。ここで、表-5 から-5℃環境における PVB 樹脂の平均伸び率は 18%であり、式(3)～(5)により算出した結果と曲げ試験の結果が良く一致していると言える。

以上の結果からも、低温環境下における PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工時の雰囲気温度は 5℃以上に管理することが妥当であると考えられる。

5. まとめ

PVB 樹脂はエポキシ樹脂と比較して、樹脂被膜におけ

る塩化物イオンの見かけの拡散係数は同程度であり、塩化物イオン透過性に対して十分な抵抗性を有している。また、エポキシ樹脂よりも紫外線劣化に対する抵抗性が高く、樹脂の伸び率も 2 倍程度高く、曲げ加工性や耐衝撃性にも優れると考えられる。

しかし、樹脂などのプラスチック材料は温度依存性が高く、特に低温環境においては樹脂が硬くなることや、脆くなることが懸念された。そこで、低温環境が PVB 樹脂の伸び率や PVB-S 被覆鉄筋の曲げ加工性に及ぼす影響について、PVB 樹脂の直接引張試験および PVB-S 被覆鉄筋の曲げ試験により確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 低温環境下における PVB 樹脂の伸び率は、試験時の雰囲気温度が低くなるにつれ、最大引張強さは増加するものの、平均伸び率は低下する。
- 2) 事前に低温環境に曝された場合でも、環境温度が上昇することで、低温環境に曝される前の状態と同程度の引張強さや伸び率を示した。この結果、雰囲気温度の上昇に伴い、PVB 樹脂の機械的性質は回復するものと考えられる。
- 3) 鉄筋加工時に塗膜に割れを生じさせないために最低限必要とされる PVB 樹脂の伸び率は 25%以上である。
- 4) 低温環境下での曲げ加工時には、雰囲気温度を 5℃以上とすることで塗膜に生じる割れを抑制できると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー112 号 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
 - 2) 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, pp.949-954, 2017
 - 3) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：第 16001 号 ポリビニルブチラル樹脂を用いた被覆鉄筋「PVB-S 被覆鉄筋」, 2021.9
 - 4) 大石 不二夫, 成沢 郁夫：プラスチック材料の寿命 - 耐久性と破壊, 1987.1
 - 5) 太田 健司, 梶原 尚平, 審良 善和, 武若 耕司：PVB 樹脂および珪砂から構成される防食鉄筋の開発, コンクリート工学, Vol.59, No.5, pp.434-439, 2021.5
- 嶋田 祐人, 審良 善和, 石田 知子, 太田 健司：PVB-S 被覆鉄筋の鉄筋防錆効果に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.682-687, 2021