

# 高性能防食鉄筋「サンドグリップバー®」の品質管理に向けた検討

石田 知子 太田 健司

## Examination of the Quality Control of High-Performance Anti-Corrosion Reinforcing Bar “Sand Grip Bar”

Tomoko Ishida Kenji Ota

### Abstract

Reinforced concrete used for coastal structures and road structures to which snow melting agents are applied must ensure durability against salt damage. Therefore, a high-performance anti-corrosion reinforcing bar, "Sand Grip Bar" was developed. It is coated with polyvinyl butyral resin with light resistance and high elongation to ensure anti-corrosion performance, and silica sand was added to improve adhesion to concrete. The quality control value of the adhesion of silica sand and the environmental temperature during bending were examined by adhesion and tensile tests. It was concluded that the adhesion amount of silica sand should be controlled at 120 g/m<sup>2</sup> or more and the environmental temperature at 5 °C or more.

### 概 要

海岸の近くに構築される沿岸構造物や融雪剤を散布する寒冷地の道路構造物に用いる鉄筋コンクリートは、塩害に対する耐久性の確保が重要な課題となる。そこで、鉄筋表面を耐候性に優れ伸び能力の高いポリビニルブチラル樹脂で被覆することで耐食性能を確保し、さらに珪砂を塗布することでコンクリートとの付着性能を付与した高性能防食鉄筋「サンドグリップバー」を開発した。サンドグリップバーを現場に適用するにあたり、量産時の品質安定性確保のため、製造時の品質管理項目として、珪砂の付着量および曲げ加工時の環境温度の管理値について、コンクリートとの付着試験およびポリビニルブチラル樹脂の引張試験により検討した。その結果、珪砂の付着量は120g/m<sup>2</sup>、曲げ加工時の環境温度は5°C以上で管理することとした。

### 1. はじめに

SDGsやサステナビリティに対する世界的な関心が高まるなか、持続可能な社会の実現に向けては、建設材料の長寿命化に関わる技術開発が必要不可欠である。

海岸の近くに構築される沿岸構造物や、融雪剤を塗布する寒冷地の道路構造物の長寿命化には、構造物を構成する鉄筋コンクリートの塩害に対する耐久性の確保が重要な課題となる。この課題に対する解決策の一つとして、鉄筋表面に樹脂を塗装することで防食を図った塗装鉄筋がある。現在は、エポキシ樹脂を塗装したエポキシ樹脂塗装鉄筋が一般的に使用されている。しかしながら、エポキシ樹脂塗装鉄筋に用いるエポキシ樹脂は、紫外線により劣化しやすい。このため、現場で長期暴露する場合は、紫外線対策として袋掛けをする等の作業が必要となる。また、エポキシ樹脂塗装鉄筋は、塗装をしていない通常の鉄筋（以下、「普通鉄筋」と称す。）に比べて、コンクリートとの付着力が劣る。そのため、重ね継手を用いる場合、その重ね合わせ長さを普通鉄筋の約1.18倍とする必要がある。

そこで、これらの課題を解決するため、エポキシ樹脂と同等の耐食性能を有し、またエポキシ樹脂に比べて紫外線劣化に対する抵抗性が高く、伸び能力に優れたポリビニルブチラル樹脂（以下、「PVB樹脂」と称す。）

を塗装し、さらに、コンクリートとの付着力向上のため、珪砂を塗布した高性能防食鉄筋「サンドグリップバー®」（以下、「SGB」と称す。）を株式会社川熱と共同で開発したり。

SGBは、2021年6月より岩手県内の塗装工場の生産ラインにより大量生産を行っている。現在、100~150t/月程度の生産が可能となっている。

SGBの大量生産を開始するに当たり、製造時の品質管理の一環として、普通鉄筋と同等のコンクリートとの付着性能を確保するために必要な鉄筋表面に付着させる珪砂の量（以下、「珪砂の付着量」と称す。）の管理値を設定する必要があった。

また、一般的にエポキシ樹脂やPVB樹脂のようなプラスチックは、低温時に樹脂の伸び能力が低下する<sup>2)</sup>。そのため、低温環境下での曲げ加工時にひび割れが発生しやすくなることが懸念される。そこで、エポキシ樹脂塗装鉄筋については、「エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針」<sup>3)</sup>において、実施工時の調査結果をもとに曲げ加工時の環境温度を5°C以上としている。SGBは今後融雪剤を散布する寒冷地への適用の増加が見込まれることから、エポキシ樹脂塗装鉄筋と同様に、ひび割れ防止の観点から曲げ加工時の環境温度の管理値を設定する必要があった。

そこで、SGBの大量生産および現場適用拡大に向けて、

その品質管理値の設定のため、①普通鉄筋と同等のコンクリートとの付着性能を確保するために必要な珪砂の付着量の管理値、および②寒冷地での施工を考慮した曲げ加工時における環境温度の管理値について検討した。本稿では、その検討内容および検討結果について示す。

## 2. サンドグリップバーの特徴

本技術は、一般財団法人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」に申請し、2016年に評価書を受領した<sup>4)</sup>。(Photo 1)

技術の確認審査・評価にあたっては、「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」<sup>3)</sup>に準拠した各種品質試験により確認したSGBの品質性能を評価対象とした。あわせて、RCはりを用いた曲げ載荷試験を行い、SGBを用いた鉄筋コンクリートの構造性能についても評価対象とした。

その結果、SGBが下記の3項目を満足していることを確認している。

- (1) SGBが、エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格を満足すること
- (2) SGBとコンクリートの付着強度が、無塗装鉄筋とコンクリートの付着強度と同等であること
- (3) 耐衝撃性試験ならびに曲げ試験において、樹脂塗膜の欠損がないこと

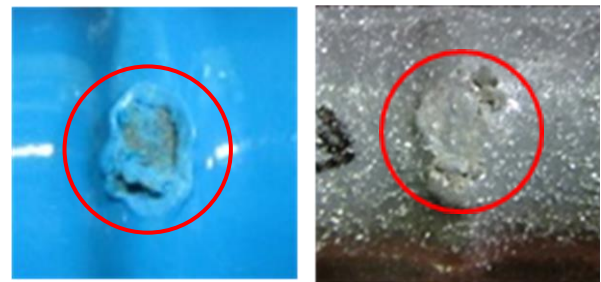
したがって、SGBはエポキシ樹脂塗装鉄筋と同等の耐食性能を有し、コンクリートとの付着性能は普通鉄筋と同等であると言える。そのため、重ね継手の重ね合わせ長さは普通鉄筋と同等にできる可能性が考えられる。その場合、エポキシ樹脂塗装鉄筋使用時に比べ、鉄筋の使用量を低減できる。

耐衝撃性試験(JSCE-E 514-2003)では、塗膜した鉄筋に一定の高さから1.8kgの重りを落下させ、落下後の塗膜の損傷程度を確認する。エポキシ樹脂塗装鉄筋とSGBに対して、重りを5回落下させた後の塗膜の損傷状況をPhoto 2に示す。エポキシ樹脂塗装鉄筋は、落下部分の塗装がはがれ素地が露出しているのに対し、SGBは塗膜の凹みは確認できるものの素地が見えるまでには至っていない。これは、SGBに使用しているPVB樹脂の伸び能力がエポキシ樹脂に比べ高いことが原因として考えられる。そのため、SGBは現場組立時の衝撃により発生する損傷がエポキシ樹脂塗装鉄筋に比べ少なく、現場でのタッチアップ作業を軽減できると考えられる。

評価書取得時の各種品質試験にあわせて、暴露試験も実施した。1年間屋外で暴露した普通鉄筋とSGBの状況をPhoto 3に示す。普通鉄筋は全面にわたり腐食が発生しているのに対し、SGBは、腐食が確認されず、普通鉄筋に比べ高い耐食性能を有することを確認した。さらに、比較用として同時期に暴露を開始したエポキシ樹脂塗装鉄筋は、紫外線劣化により塗膜の変色が確認されたのに対し、SGBでは塗膜の変色は確認されていない。

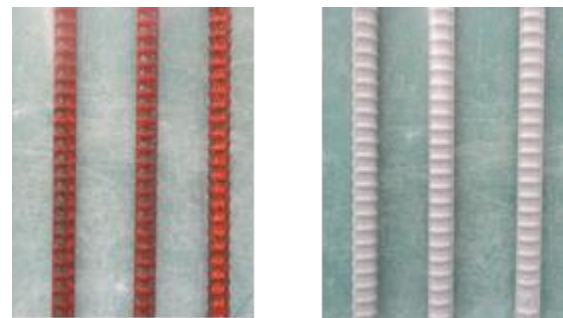


Photo 1 評価書  
Evaluation Documents



エポキシ樹脂塗装鉄筋 SGB

Photo 2 耐衝撃試験結果  
Results of Impact Resistance Test



普通鉄筋 SGB

Photo 3 1年間の暴露試験後の鉄筋の状況  
Reinforcing Bar Condition after a Year Exposure Test

## 3. 珪砂の付着量の設定

本検討では、珪砂の付着量をパラメータとしてコンクリートとの付着試験を実施した。

なお、付着試験は、JSCE-E 516-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度試験方法」<sup>3)</sup>に準拠し、鉄筋径はD19を用いた。

### 3.1 SGBの塗装方法

SGBの塗装工程の概略図をFig. 1に示す。ブラスト処理した鉄筋は搬送用ローラーにより回転しながら搬送される。「①静電粉体塗装装置」により粉体状のPVB樹脂を鉄筋表面に付着させ、次に「②高周波誘導加熱装置」により加熱することで、PVB樹脂を溶解させ鉄筋に付着させる。その後樹脂が柔らかい状態で「③骨材吹付装置」

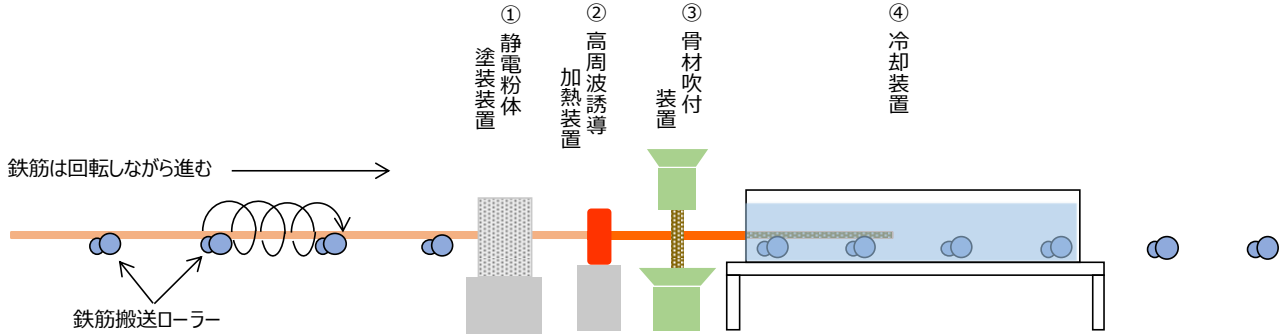
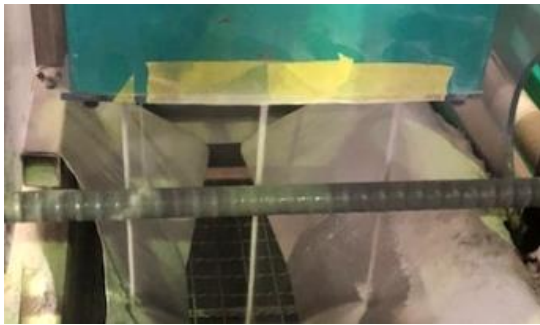


Fig. 1 SGBの塗装工程  
Painting Process of SGB



(a)落下量が最少の場合



(b)落下量が最大の場合

Photo 4 珪砂の落下状況  
Falling Situation of Silica Sand

により珪砂を付着させる。珪砂は一定量を自由落下させ、そこを鉄筋が回転しながら通ることで、鉄筋表面に珪砂が付着する。その後、PVB樹脂は熱可塑性の性質を有することから、「④冷却装置」により鉄筋の温度を低下させ、PVB樹脂を硬化させる。

### 3.2 珪砂の付着量の調整

珪砂の付着量の品質管理値を設定するため、珪砂の付着量をパラメータとする必要がある。そこで、「③骨材吹付装置」(Fig. 1) 下部の珪砂の落下量を制御するスリット部の穴の数を変えることで、落下量を5種類まで変化させた。落下量が最小の場合と最大の場合の珪砂の落下状況をPhoto 4に示す。

各スリットサイズでの珪砂の落下量をTable 1に示す。珪砂の落下量は、「③骨材吹付装置」から単位時間当た

Table 1 珪砂の落下量および付着量 (平均値)

Amount of Silica Sand Dropped and Adhered				
珪砂の相対的な量	記号	落下量 (g/min)	付着量 (g/m <sup>2</sup> )	付着量の標準偏差 (g/m <sup>2</sup> )
珪砂無し	PVB-0	—	—	—
極少量	D-Min	5	80	7.8
少量	D-Low	43	98	6.5
中間	D-Mid	63	122	5.8
標準	D-Std	353	131	10.0
大量	D-Max	416	123	12.2



Photo 5 珪砂の付着状況  
Silica Sand Adhesion Condition

り(1分間)に落下する珪砂の質量を計測した。

なお、本試験では、比較用として、珪砂を付着させない場合(PVB-0)についても付着試験を実施した。

珪砂の落下量を変化させた5種類のSGBの塗装後の鉄筋表面の状況をPhoto 5に示す。5種類のSGBのうち、珪砂の落下量の少ないD-MinとD-Lowでは、珪砂は鉄筋表面全面に付着しているのではなく、塗装時に回転しながら進む鉄筋の動きに合わせて、らせん状に付着していた。これに対して、D-Mid以降については、珪砂は鉄筋表面全面に付着していた。

Table 1およびPhoto 5で示した種類のうち、D-Stdが通常の製造時に落下させる珪砂の量となる。

### 3.3 珪砂の付着量の測定

コンクリートとの付着に寄与するのは、珪砂の落下量ではなく、塗装後に鉄筋に付着した珪砂の付着量であることから、これを測定する必要がある。そこで、PVB樹脂がイソプロピルアルコールに溶解する性質を利用して、SGBをイソプロピルアルコール溶液に一定時間浸漬し、その後その溶液をろ過することにより、溶液中に沈殿した珪砂の重量を測定した（以下、「溶解法」と称す。）。

珪砂の落下量が異なるそれぞれのSGBについて、鉄筋全長の各所から、切断により長さ50mmの標本を合計20本作製し、溶解法により珪砂の付着量を測定した。なお、珪砂の付着量は、鉄筋の公称直径を用いて算出した鉄筋の見かけの表面積を用い、その単位表面積あたりの珪砂の重量で表すこととする。

Table 1に各珪砂の落下量での20本の珪砂の付着量の平均値と標準偏差を併せて示す。なお、平均値および標準偏差の算出に当たり、試験方法等に起因した外れ値を検出するため、珪砂の付着量の測定値は正規分布するものと仮定し、スミルノフ・グラブス検定を行った。その結果外れ値は1標本のみであったことから、これを除外し、平均値および標準偏差を算出した。

珪砂の落下量が多いD-StdとD-Maxを比較した場合、D-MaxはD-Stdに比べて珪砂の落下量が多いにも関わらず、付着量が僅かではあるが少なくなる結果を示した。Photo 4(b)に示すように大量に珪砂を落下させると、柔らかい樹脂に付着した珪砂を新たに落下した珪砂が落とす可能性が考えられる。このため、標本によってばらつきが生じ、そのためD-Stdに比べてD-Maxの標準偏差が大きくなったと考えられる。

一方で、落下量の少ないD-MinからD-Midについては、珪砂の付着量が少なくなるに従い、標準偏差が大きくなる結果を示した。珪砂の落下量が少ないD-MinとD-Lowでは、珪砂はらせん状に付着していた。そのため、珪砂の付着状態が不均質であり、標本の切断位置によって珪砂の付着量がばらついたことが原因として考えられる。

以上より、均質に珪砂を付着させるためには、一定以上の落下量が必要となり、また、必要以上に大量に落下させると、付着量が減少する可能性が考えられることから、珪砂の落下量には最適範囲があると考えられる。

### 3.4 付着試験方法

コンクリートとの付着性能の評価は、JSCE-E 516-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度試験方法」<sup>3)</sup>に準拠した付着試験結果をもとに行った。付着試験の実施状況をPhoto 6に示す。試験は、珪砂の塗布量を変えたD19の5種類のSGBに加えて、比較用として、D19の普通鉄筋を用いた場合（普通鉄筋）と珪砂を付着せずPVB樹脂のみを塗装した場合（PVB-0）についても実施した。また、同条件における供試体数は、準拠した試験方法に従い3体とした。

試験用供試体の作製に用いたコンクリートの使用材料

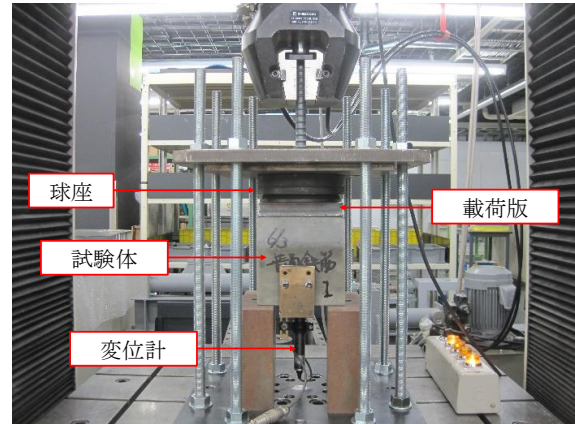


Photo 6 付着試験状況

#### Adhesion Test

Table 2 使用材料  
Use Materials

種類	項目	記号	摘要
水	上水道水	W	
セメント	早強ポルトランドセメント	C	密度3.14g/cm <sup>3</sup>
細骨材	陸砂	S	木更津産 表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	砕石2005	G1	青梅産 表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup>
	砕石1005	G2	青梅産 表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup>
混和剤	減水剤	WR	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE剤	AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

Table 3 コンクリートの配合  
Mixed Design of Concrete

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C×%)	
		W	C	S	G1	G2	WR	AE
59.0	45.8	165	280	835	608	405	0.25	0.004

および配合を、Table 2およびTable 3に示す。コンクリートは、材齢7日での目標圧縮強度を30N/mm<sup>2</sup>として水セメント比を設定し、目標スランプを10±2.5cm、目標空気量を4.5±1.5%とした。

試験用供試体は、コンクリート打込み後翌日に脱型し、材齢7日の付着試験まで水中養生とした。

### 3.5 付着試験結果

普通鉄筋とD-MidのSGBを使用した場合において、すべり量と付着応力度の関係をFig. 2に示す。普通鉄筋とD-Midを用いた場合の最大付着応力度は、ほぼ同程度となった。破壊形式はいずれもコンクリートの割裂破壊であったことから、最大付着応力度は鉄筋との付着ではなくコンクリートの強度に依存していると考えられる。そ

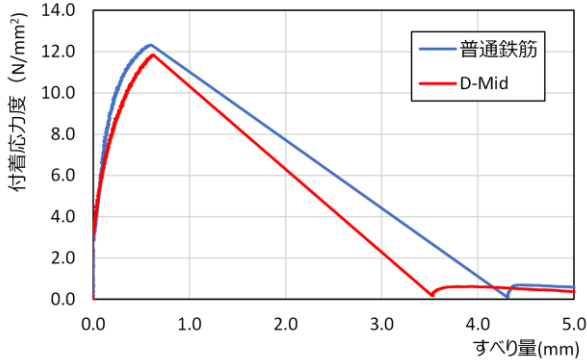


Fig. 2 すべり量と付着応力度の関係

Relationship between Slip Amount and Adhesive Stress

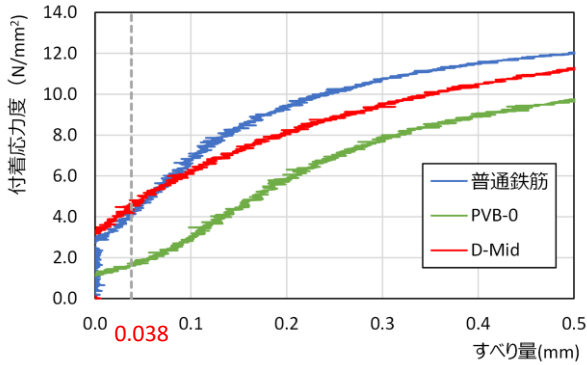


Fig. 3 初期のすべり量と付着応力度の関係

Relationship between Slip Amount and Adhesive Stress

のため、最大付着応力度を珪砂の付着量の設定の指標とするのは適切ではないと判断し、もう一つの着目点である初期のすべり量 (0.002D) における付着応力度を指標として用いることとした<sup>3)</sup>。

普通鉄筋とD-MidのSGBを使用した場合において、初期のすべり量 (0.002D=0.038mm) と付着応力度の関係をFig. 3に示す。なお、Fig. 3には比較用として珪砂を塗布していないPVB-0についても記載した。

すべり量を0.002Dとした時の各鉄筋における付着応力度をFig. 4に示す。なお、付着応力度は3体の平均値とした。

珪砂を付着させていないPVB-0は、普通鉄筋と比較し、初期のすべり量 (0.002D) における付着応力度は小さい値を示した。エポキシ樹脂塗装鉄筋と同様に、樹脂塗装のみでは、コンクリートとの付着応力度が普通鉄筋に比べて小さくなる傾向を示した。これに対し、珪砂を付着させた鉄筋については、砂の付着量に関わらず普通鉄筋より付着応力度が大きくなった。以上より、珪砂によるコンクリートとの付着性能の向上が確認された。

珪砂の付着量の平均値とすべり量0.002Dにおける付着応力度の関係をFig. 5に示す。珪砂の付着量と付着応力度の間には、強い相関関係が認められ、決定係数は0.97となった。図中の珪砂の付着量と付着応力度の関係を表す回帰直線を用いて、普通鉄筋と同等の付着応力度となる珪砂の付着量を算出すると、10.7g/m<sup>2</sup>となる。したがっ

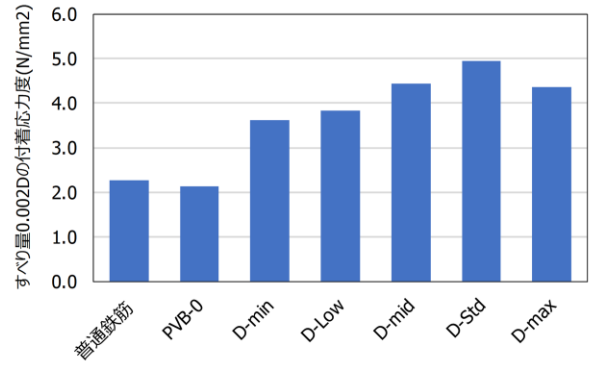


Fig. 4 付着応力度 (すべり量 : 0.002D)  
Adhesive Stress (Slip Amount : 0.002D)

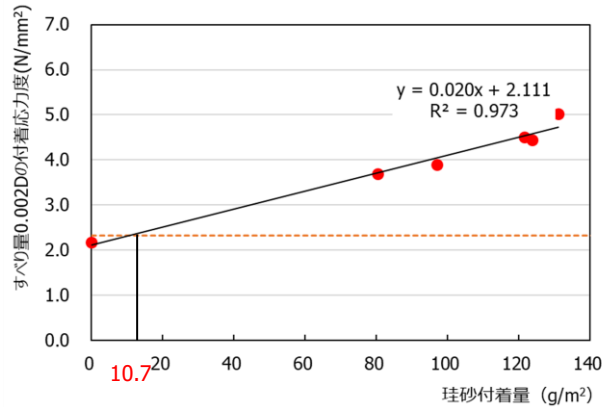


Fig. 5 珪砂の付着量と付着応力度の関係  
Relationship between Amount of Silica Sand  
and Adhesive Stress

て、少しでも珪砂が付着していれば、普通鉄筋の同等のコンクリートとの付着性能が確保できることが明らかとなった。

### 3.6 珪砂の付着量の品質管理値の設定

少量の珪砂の付着量があれば、普通鉄筋と同等の付着性能を得ることができる。しかし、珪砂の付着量が、80 g/m<sup>2</sup>のD-Minと98g/m<sup>2</sup>のD-Lowの場合、前述の通り珪砂はらせん状に付着し、付着状態が不均質となった。そのため、品質の均一性を考慮した場合、D-Mid程度の付着量を確保する必要があると考える。

そこで、普通鉄筋と同等以上のコンクリートとの付着性状を得るのに必要な珪砂の付着量 (11g/m<sup>2</sup>程度) と付着状態の均一性を得るための付着量 (120g/m<sup>2</sup>程度) の二つの観点を比較し、珪砂の付着量の品質管理値は、溶解法による付着量の平均値で120g/m<sup>2</sup>以上と設定した。

## 4. 温度管理値の設定

SGBは、塩害を受け易い沿岸構造物に加え、融雪剤の散布が必要な寒冷地での使用も対象としている。そこで、寒冷地での作業環境を考慮し、曲げ加工時に塗膜に発生しやすいひび割れへの環境温度による影響について検討

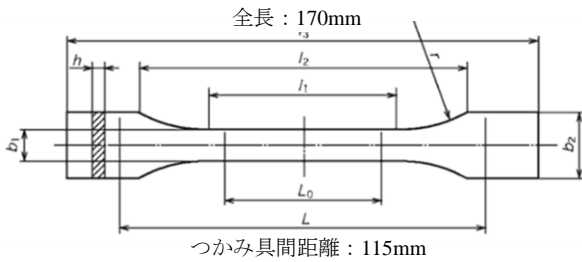


Fig. 6 ダンベル型の引張試験片  
Dumbbell Type Tensile Test Piece

Table 4 温度条件  
Temperature Conditions

No.	養生条件	試験時の雰囲気温度 (°C)
20-(23)	20°C環境	23 ± 1
20-(5)		5 ± 1
20-(0)		0 ± 1
20-(-5)		-5 ± 1
C-(23)	低温履歴	23 ± 1
F-(23)	凍結融解	23 ± 1

し、温度管理値を設定することとした。

曲げ加工時にひび割れが発生する事象は、SGBの塗装に用いたPVB樹脂の伸び能力の低下による影響と考えられる。そこで、PVB樹脂を用いてFig. 6に示す全長が170mmのダンベル型の試験片を作成し、各温度条件下において、引張試験を実施し伸び能力を確認した。

#### 4.1 温度条件

本検討で考慮した試験片の養生時および引張試験時の温度条件をTable 4に示す。

養生条件を20°C環境とした試験片については、曲げ加工時の環境温度を想定し、引張試験機の雰囲気温度を、標準の23°Cに加えて、低温の5°C、0°C、-5°Cとした。

養生条件のうち、低温履歴および凍結融解については、最低気温が-20°C程度になる厳寒地においてSGBを保管した場合を想定し、Fig. 7に示すように、繰り返し温度を変化させる環境とした。温度変化は、開始温度を0°Cとし、最低温度から最高温度に達した後、再び0°Cになるまでを1サイクルとし、計30サイクル繰り返した。低温履歴は、試験片をビニール袋に入れて吸水させない状態で温度履歴を与えた。一方、凍結融解については、試験片を水中に沈めた状態で温度履歴を与えることで、試験体中の水分が凍結融解作用を受ける条件とした。

#### 4.2 引張試験方法

引張試験は、JIS K 7161「プラスチックー引張特性の求め方ー第1部：通則」に準拠した。試験時の引張速度は5mm/minとし、試験片のつかみ具間距離を115mmとした (Fig. 6参照)。試験時に、荷重および変位 (試験機のストローク変位) を測定した。試験片は、各条件において

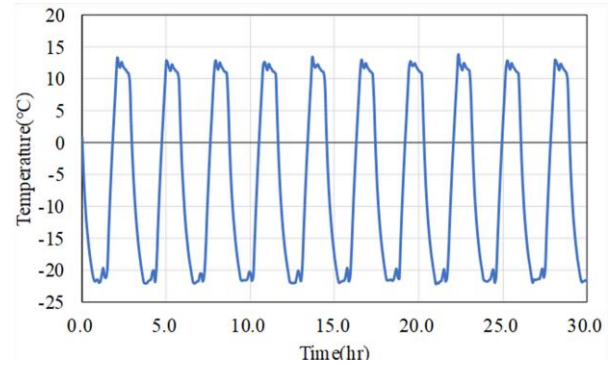


Fig. 7 温度履歴  
Temperature History

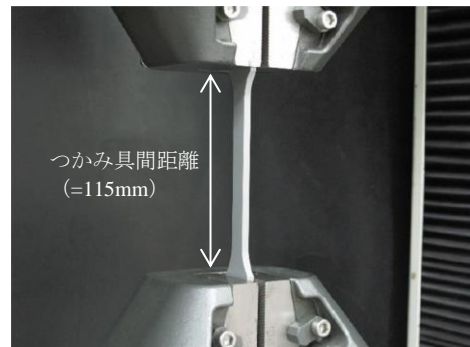


Photo 7 引張試験状況 (試験体設置時)  
Tensile Test (at installing the Test Piece)



Photo 8 低温環境下の試験状況  
Tensile Test in Low Temperature Environment

それぞれ5枚とした。20-(23)の引張試験の試験体設置時の状況をPhoto 7に示す。

なお、低温 (5°C以下) 環境下での試験は、Photo 8に示すように、試験治具を低温層内に設置し、低温層内の雰囲気温度を目標の温度に調整することで実施した。引張試験により得られた結果から引張強さ ( $\sigma$  (MPa)) を式 (1) により、また、試験片破断時のつかみ具間の伸び率 ( $E_c$  (%)) を式 (2) により算出した。

$$\sigma = P / (b \times t) \tag{1}$$

ここで、Pは最大荷重 (N)、bは試験片の幅 (mm)、tは試験片の厚さ (mm) とした。

$$E_c = Lc/L_0 \times 100 \tag{2}$$

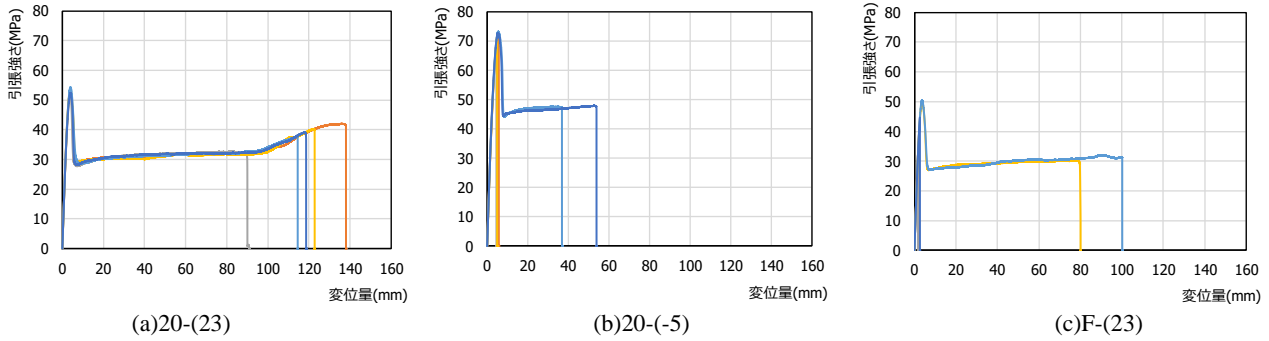


Fig. 8 変位量と引張強さの関係

Relationship between Displacement and Tensile Strength

ここで、 $L_0$ は試験開始時のつかみ具間距離 (=115mm) ,  $L_C$ は破断時のストローク変位量 (mm) とした。

### 4.3 引張試験結果

20°Cで養生し23°Cで試験を実施した20-(23) , -5°Cで試験をした20-(-5) , および凍結融解作用を与えたF-(23)について、変位量と引張強さの関係をFig. 8に示す。標準の20-(23)は、5本の試験片全てにおいて、変位量がおおよそ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、ある一定の荷重を維持したまま、変位量90~140mmで破断する結果を示した。これに対し、試験時の雰囲気温度を-5°Cとした20-(-5)では、20-(23)に比べ最大引張強さが大きくなる結果を示したものの3体の試験片が最大引張強さとなった直後に破断した。また、破断しなかった2体についても変位量は37mm、54mmと20-(23)に比べて小さくなる結果を示した。凍結融解作用を与えたF-(23)では、最大引張強さは20-(23)と比較すると小さくなる傾向を示し、20-(-5)と同様に3体の試験片で最大引張強さとなった直後に破断した。

各試験条件における試験片5体の平均引張強さと平均伸び率をTable 5に示す。

養生条件を20°Cとし、引張試験機の雰囲気温度を変更した試験片については、雰囲気温度を低くするほど、平均引張強さは大きくなる傾向を示した。一方で、平均伸び率は、雰囲気温度が低くなるほど小さくなった。したがって、養生条件に関わらず、曲げ加工時の環境温度が低くなるに従いPVB樹脂にひび割れが発生する可能性が高くなることが明らかとなった。

また、養生時に低温履歴を受けた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°C環境で養生をした20-(23)と同等の結果を示した。一方、水分を供給することで凍結融解作用を与えたF-(23)については、引張試験時の雰囲気温度を23°Cとしたにも関わらず、平均引張強さおよび平均伸び率ともに20-(23)より小さくなった。平均伸び率については、引張試験時の雰囲気温度を0°Cとした20-(0)とほぼ同等の結果を示した。

以上より、保管時に最低温度が-20°C程度まで下がる環境下に保管した場合でも、保管時に水分の供給がない条件であれば、20°C環境で保管した場合と同等の引張強さ

Table 5 平均引張強さと平均伸び率

Average Tensile Strength and Average Elongation				
No.	養生条件	試験時の 雰囲気温度 (°C)	平均 引張強さ (MPa)	平均 伸び率 (%)
20-(23)	20°C環境	23 ± 1	53.0	102
20-(5)		5 ± 1	64.6	38
20-(0)		0 ± 1	69.5	30
20-(-5)		-5 ± 1	72.1	18
C-(23)	低温履歴	23 ± 1	52.8	101
F-(23)	凍結融解	23 ± 1	43.2	33

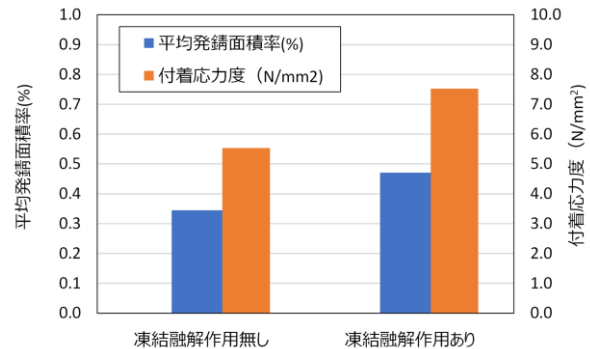


Fig. 9 平均発錆面積率と付着応力度  
Average Rust Area Ratio and Adhesive Stress

と伸び率を確保することができることが明らかとなった。一方で、水分が供給される条件の場合は、PVB樹脂の凍結融解作用により引張強さ・伸び率が低下することから、曲げ加工時には留意する必要がある。

### 4.4 凍結融解作用を受けたSGBの性能

SGBが保管時に凍結融解作用を受けた場合、曲げ加工性能以外の性能(耐食性・コンクリートとの付着性能)に及ぼす影響について確認した。

耐食性の試験は、JSCE-E 518-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の耐食性試験方法」<sup>3)</sup>に準拠して行った。本試験では、同一条件の3本の試験体に対して、1,000時間以上塩水噴霧を行い、塗膜にうきや発錆が確認された箇所周辺の塗膜を剥がし、鉄筋の発錆面積を測定する。1本あたりの発錆面積の合計を鉄筋の塗膜全面積で除した値を発錆面積

率とし、3本の平均を平均発錆面積率とする。「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」<sup>3)</sup>では、平均発錆面積率は0.5%以下と規定されている。そのため、エポキシ樹脂塗装鉄筋と同等の耐食性を確保するにはこの規定を満足する必要がある。

また、コンクリートとの付着性能については、2章に記載したJSCE-E 516-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着強度試験方法」<sup>3)</sup>に準拠した付着試験により確認した。

本試験では、耐食性試験、付着試験共に比較用として凍結融解作用を受けず20°Cの環境下で養生を行ったSGBについても試験を実施した。

平均発錆面積率と初期のすべり量(0.002D)の付着応力をFig. 9に示す。なお、付着応力度は3体の試験結果の平均値を用いた。

凍結融解作用を受けることで、平均発錆面積率は、受けのないものに対して若干大きくなる傾向を示した。しかし、その値は0.5%以下となり、「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」<sup>3)</sup>の規定を満足する結果となった。

また、初期のすべり量(0.002D)における付着応力度については、凍結融解作用を受けた場合、受けのない場合に比べて大きくなる結果を示した。

以上より、凍結融解作用を受けてもSGBの耐食性およびコンクリートとの付着性能については、問題ないことを確認した。

#### 4.5 温度管理値の設定

鉄筋の曲げ加工時の温度管理値の設定においては、曲げ加工によって生じる鉄筋外周部の伸び率に着目し、試験規格において伸び率が大きくなるD13の鉄筋に着目した。

JSCE-E 515-2003「エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験方法」<sup>3)</sup>に準拠した曲げ加工試験では、D13の曲げ内半径は、鉄筋公称直径の1.5倍(1.5φ)とされている。したがって、曲げ加工後の鉄筋外周の長さは式(3)により計算できる。これに対し、鉄筋中心の長さは式(4)となる。したがって、曲げ加工時に発生する鉄筋外周の伸び率は式(5)より25%となる。

$$\frac{2\pi(1.5+1)\phi}{2} = 2.5\pi\phi \quad (3)$$

$$\frac{2\pi(1.5+0.5)\phi}{2} = 2.0\pi\phi \quad (4)$$

$$\frac{2.5\pi\phi - 2.0\pi\phi}{2.0\pi\phi} \times 100 = 25(\%) \quad (5)$$

以上より、PVB樹脂の伸び率は、最低でも25%以上は確保する必要があると考えられる。Table 5の試験結果を考慮すると、曲げ加工時の環境温度は0°C以上とする必要がある。ただし、式(3)~(5)は鉄筋が同一断面であると仮定した場合であるため、異形鉄筋を用いる場合は、リ

ブの存在により断面位置により断面積が異なる。そのため、曲げ加工時にはリブ間の伸びが局所的により大きくなる可能性が想定される。そこで、曲げ加工時の環境温度の管理値を5°C以上とすることで、より安全側の設定とできる。

また、特に曲げ加工時においてひび割れが発錆しやすくなることから、温度が0°Cを下回る環境で保管を行う場合は、凍結融解作用を受けないよう梱包等により水分の供給を防止する必要がある。

#### 5. まとめ

SGBは、耐食性に優れ、エポキシ樹脂塗装鉄筋に比べて紫外線劣化に対する抵抗性が高い。また耐衝撃性に優れるため、現場組立時等に傷がつき難くタッチアップ作業の軽減にも寄与する。さらに珪砂を付着させることでコンクリートとの付着性能の向上を図っているなどの利点がある。

そのため、作業工程の関係から長期間暴露されることが多い道路橋の壁状高欄や融雪剤を散布する地域に建造される道路床板などに既に適用を始めており、今後も使用拡大が予想される。

そこで、SGB量産時の品質安定性確保のための品質管理に向けて、珪砂の付着量および曲げ加工時の温度管理値を実験により設定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 珪砂の付着量と初期のすべり量(0.002D)での付着応力度の間には強い相関関係があり、10.7g/m<sup>2</sup>程度の珪砂が付着していれば、普通鉄筋と同等の付着応力度が得られる。
- 2) 珪砂の付着性状の均質性を考慮し、珪砂の付着量の品質管理値は、溶解法による平均値で120g/m<sup>2</sup>以上とする。
- 3) 低温環境下での曲げ加工時のひび割れ発生を防止するため、曲げ加工時の環境温度は5°C以上とする。
- 4) 凍結融解による曲げ加工時のひび割れ防止のため、環境温度が0°Cを下回る場所での保管時には、梱包等により水分の供給を防止する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 片野, 竹田: 高性能な樹脂被覆鉄筋に関する研究, 大林組技術研究所報 No. 79, 2017
- 2) 大石, 成沢: プラスチック材料の寿命 耐久性と破壊, 1987
- 3) 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, 2003
- 4) 一般財団法人沿岸技術研究センター: 第16001号 ポリビニルブチラール樹脂を用いた被覆鉄筋「PVB-S被覆鉄筋」, 2016