

# 論文 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

石田 知子\*1・片野 啓三郎\*2・福永 和生\*3・審良 善和\*4

**要旨**：冬期に凍結防止剤が散布されるコンクリート道路床版では、塩害による鋼材腐食を防止するために被覆鉄筋（エポキシ樹脂塗装鉄筋）を使用する事例が増えている。本論文では、エポキシ樹脂塗装鉄筋に替わる防食鉄筋として、耐候性に優れ、伸び能力が高い PVB 樹脂で被覆し、さらに珪砂の塗布によりコンクリートとの付着向上を図った高性能被覆鉄筋（PVB-S 被覆鉄筋）のコンクリート道路床版への適用を目的として、PVB-S 被覆鉄筋を使用した鉄筋コンクリートはり試験体を用いて、繰返し曲げ載荷試験を行い、PVB-S 被覆鉄筋を用いた場合の疲労に対する耐久性について検討した結果について述べる。

**キーワード**：被覆鉄筋, エポキシ樹脂塗装鉄筋, PVB 樹脂, PVB-S 被覆鉄筋, 付着強度, 疲労

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物においては、厳しい塩害環境に曝される場合、耐久性の確保を目的として防食鉄筋が用いられる。厳しい塩害環境に曝される構造物には、海水の影響を受ける沿岸および海洋構造物のほか、凍結防止剤が散布されるコンクリート道路床版<sup>1)</sup>が挙げられる。

防食鉄筋には、亜鉛めっき鉄筋やステンレス鉄筋などがあるが、現在は経済性および耐食性の観点からエポキシ樹脂塗装鉄筋が多く使用されている。

著者らは、エポキシ樹脂と比較し金属との密着性が高く、耐候性が高い等の特徴があり、接着剤やプライマーに広く使用されているポリビニルブチラル樹脂（以下、PVB 樹脂と称する）に着目し、PVB 樹脂と珪砂を用いた防食鉄筋（以下、PVB-S 被覆鉄筋と称する）を開発した<sup>2),3)</sup>。PVB-S 被覆鉄筋と普通鉄筋の外観の比較を写真-1に示す。PVB-S 被覆鉄筋は、鉄筋を PVB 樹脂で被覆することによりエポキシ樹脂塗装鉄筋と同等の防食性を確保し、さらに珪砂を付着させることでコンクリートとの付着強度を向上させた鉄筋である。

凍結防止剤を使用するコンクリート道路床版は、繰返し走行する輪荷重を受けることから、交通による繰返し

荷重に対する長期耐久性の確保が課題となる。そこで、エポキシ樹脂塗装鉄筋に替わる防食鉄筋として PVB-S 被覆鉄筋をコンクリート道路床版に適用することを目的に、PVB-S 被覆鉄筋を用いた試験体による繰返し曲げ載荷試験を行い、輪荷重による疲労に対する耐久性について検討した。あわせてエポキシ樹脂塗装鉄筋および被覆をしていない鉄筋（以下、普通鉄筋と称する）を用いた場合との比較を行った。

本稿では、その試験内容および結果について述べる。

## 2. PVB-S 被覆鉄筋の概要

PVB-S 被覆鉄筋は、 $220 \pm 40 \mu\text{m}$  の膜厚で PVB 樹脂による被覆を施し、珪砂吹付処理を施した後の膜厚が  $300 \pm 100 \mu\text{m}$  となるように製作した被覆鉄筋である。PVB-S 被覆鉄筋に用いられる PVB 樹脂と、エポキシ樹脂塗装鉄筋に用いられるエポキシ樹脂の代表的な物性の対比を表-1に示す。PVB 樹脂はエポキシ樹脂と比較して伸びが大きく、変形に対する追従性があることから、鉄筋の曲げ加工や衝撃を受けた際の塗膜の損傷が生じにくいことが期待できる。また、PVB 樹脂はエポキシ樹脂よりも耐候性が高いことも特徴のひとつである。耐候性が高いこ



写真-1 PVB-S鉄筋と普通鉄筋の外観の比較

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 <sup>2</sup> )                  | 600 ~ 800 | 280 ~ 910 |
|       | 伸び(%)                                      | 100 ~ 120 | 3 ~ 6     |
|       | 引張弾性率(10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) | 1.1 ~ 1.4 | 2 ~ 5     |
|       | 軟化点(°C)                                    | 160 ~ 175 | —         |
| 耐候性   | JIS K 5600-7-7による促進暴露処理2000時間後の色差 ΔE*ab    | 8.9       | 22.5      |

\*1 大林組 技術研究所生産技術研究部 課長 博士 (工学) (正会員)

\*2 大林組 技術研究所生産技術研究部 主任 修士 (工学) (正会員)

\*3 鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻 (学生会員)

\*4 鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

とにより、打継ぎ面等で鉄筋が露出した状態で暴露する場合での耐久性の確保にも利点があると考えられる。

また、PVB-S 被覆鉄筋は、コンクリートとの付着強度を向上させることを目的に、PVB 樹脂によって被覆した鉄筋の周囲に珪砂吹付処理を施してある。

D19 を用いた付着強度試験 (JSCE-E 516-2003) によりコンクリートとの付着応力度を算出した結果<sup>2)</sup>、PVB-S 被覆鉄筋は、特にすべり量が小さい初期の段階での付着応力度が、エポキシ樹脂塗装鉄筋および普通鉄筋の場合より大きく、すべり量 0.002D (D: 鉄筋径=19mm) における付着応力度は普通鉄筋のおよそ 2.8 倍となる結果を示した。また、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合の最大付着応力度は、普通鉄筋に比べ小さくなったのに対し、PVB-S 被覆鉄筋の場合は、普通鉄筋のおよそ 1.1 倍と大きくなった。以上より、PVB-S 被覆鉄筋は普通鉄筋と同等以上のコンクリートとの付着特性を有すると考えられる。

### 3. 繰返し曲げ荷試験の試験概要

#### 3.1 試験体

繰返し曲げ荷試験に用いた試験体の概要を図-1 に示す。試験体は、曲げ引張破壊するように荷重寸法を設定した。せん断スパンにはせん断補強筋を配した。

試験体は、同条件で鉄筋種類ごとに 2 体作製した。

#### 3.2 材料

鉄筋は、PVB-S 被覆鉄筋に加え、比較用としてエポキシ樹脂塗装鉄筋および普通鉄筋の 3 種類とした。試験に使用した鉄筋の仕様を表-2 に示す。鉄筋母材は SD345 とし、引張側の主鉄筋には D16 を用いた。圧縮側鉄筋およびせん断補強筋には、D13 および D10 を使用した。

試験体作製に用いたコンクリートの材料および示方配合を表-3 および表-4 に示す。試験体作製時のコンクリートのフレッシュ性状は、スランプ 15.5~17.5cm、空気量 4.2~4.6% であった。また、材齢 91 日の圧縮強度は 49.5N/mm<sup>2</sup> となった。

### 3.3 荷重および測定

繰返し曲げ荷試験の条件を表-5 に示す。繰返し曲げ荷重の上限荷重は、主鉄筋の引張応力が許容引張応力度 (200Nmm<sup>2</sup>) となる計算上の荷重 (39.1kN) とした。試験開始時および荷重回数が 5 万、50 万、100 万回に達した時点で繰返し荷重を一旦停止し、上限荷重の 39.1kN まで静的荷重試験を行った。静的荷重試験時には、(1) スパン中央部の変位、(2) 等曲げモーメント区間のひび割れ幅を計測し、(3) 試験体のひび割れ状況を観察した。いずれの試験体も 200 万回で破壊に至らなかったため、200 万回荷重後は試験体が破壊するまで静的荷重を行った。

変位の測定は、スパン中央部と荷重点はレーザー変位

表-2 鉄筋の仕様

| 種類         | 鉄筋母材の仕様 | 被覆材         | 被覆膜厚 (μm) |
|------------|---------|-------------|-----------|
| PVB-S 被覆鉄筋 | SD345   | PVB 樹脂および珪砂 | 300±100   |
| エポキシ樹脂塗装鉄筋 |         | エポキシ樹脂      | 220±40    |
| 普通鉄筋       |         | 被覆なし        | —         |

表-3 コンクリートの材料

| 分類   | 種類           | 記号 | 摘要                       |
|------|--------------|----|--------------------------|
| 練混ぜ水 | 水道水          | W  |                          |
| セメント | 普通ポルトランドセメント | C  | 密度 3.16g/cm <sup>3</sup> |
| 細骨材  | 陸砂           | S  | 密度 2.61g/cm <sup>3</sup> |
| 粗骨材  | 碎石 2005      | G  | 密度 2.65g/cm <sup>3</sup> |
| 混和剤  | AE 減水剤       | WR |                          |
|      | AE 剤         | AE |                          |

表-4 コンクリートの示方配合

| W/C (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      | 添加量 (C%) |       |
|---------|----------|--------------------------|-----|-----|------|----------|-------|
|         |          | W                        | C   | S1  | G    | WR       | AE    |
| 55.0    | 45.0     | 169                      | 376 | 877 | 1005 | 0.25     | 0.001 |

表-5 繰返し曲げ荷試験の条件

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| 上限荷重 (kN) | 39.1                           |
| 下限荷重 (kN) | 16.1                           |
| 荷重速度 (Hz) | 3                              |
| 上限回数      | 200 万回                         |
| 計測時期      | 1, 5 万, 50 万, 100 万および 200 万回, |

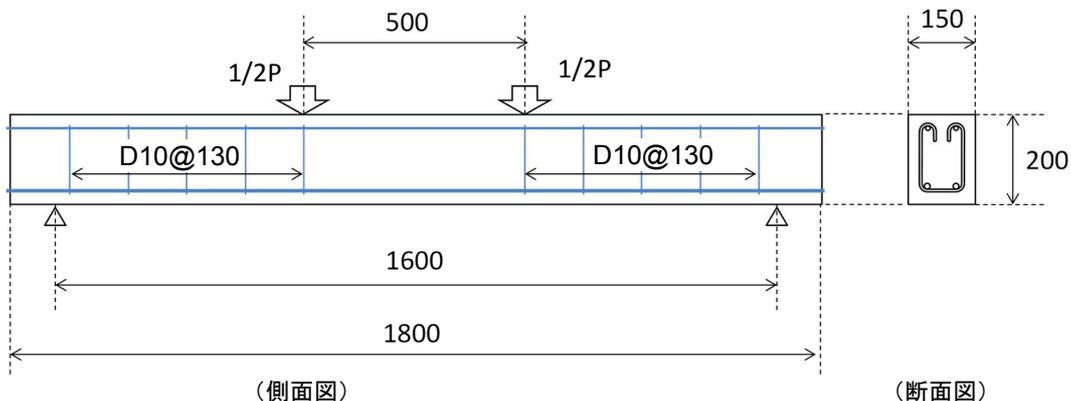


図-1 試験体の形状と寸法 (単位: mm)

計を、支点部はダイヤルゲージを用いて行った。等曲げモーメント区間(はり中央±250mm)のひび割れ幅の測定は、試験体底面に50mm間隔で設置したπゲージにより行った。図-2 および図-3 に試験時の測定器設置位置を示す。なお、本稿では、はりの変位、ひび割れの発生状況およびひび割れ幅の計測結果について述べる。

同様の試験体において、別途静的荷重による曲げ試験を行い比較対象とした。静的荷重試験においては、初期の異常な残留変位がないことを確認するために、はじめに繰返し荷重の上限荷重(39.1kN)まで3回繰返し荷重を行い、その後静的荷重により試験体を破壊し、その状況を観察した。

#### 4. 静的荷重試験結果

図-4 に静的荷重試験後の試験体のひび割れの状況を示す。いずれも破壊形式は曲げ引張破壊であった。等曲げモーメント区間のひび割れ本数は、いずれの鉄筋を用

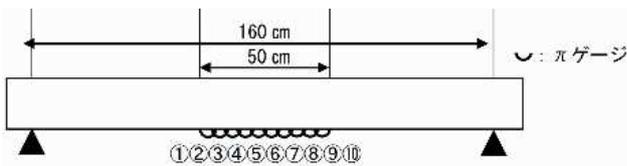


図-2 ひび割れ測定用πゲージ設置位置

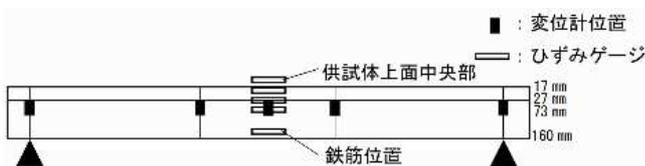


図-3 ひずみゲージ及び変位計設置位置

いた場合も6本で、ひび割れ間隔は同程度であった。

静的荷重試験時のはり中央部における変位と荷重の関係を図-5 に示す。同じ荷重における変位は、PVB-S被覆鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合はほぼ同等となり、普通鉄筋を用いた場合よりわずかに大きくなる結果を示した。しかし、その差は小さく、鉄筋の違いによる明らかに有意といえるほどの変位の差は認められなかった。普通鉄筋に比べ、被覆を施したPVB-S被覆鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたはりの変位が同一荷重で大きくなった原因として、鉄筋周りの剛性が小さい被覆層が影響していると考えられる。被覆層の変位への影響の詳細なメカニズムについては今後検討する予定である。

#### 5. 繰返し曲げ荷重試験結果

##### 5.1 荷重後の変位と荷重の関係

200万回の荷重終了後の試験体を用いて静的荷重試験を実施した際の変位と荷重の関係を図-6 に示す。最大荷重はすべての試験体でほぼ同等であった。同じ荷重における変位は、静的荷重試験結果と同様に、PVB-S被覆

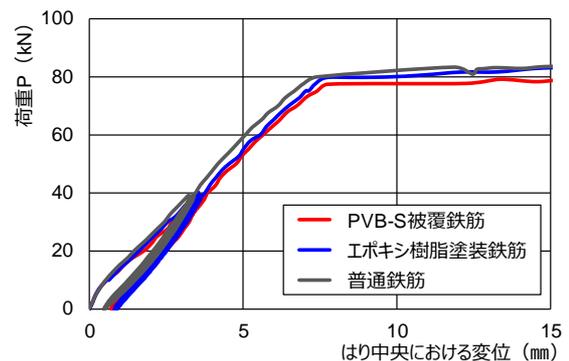
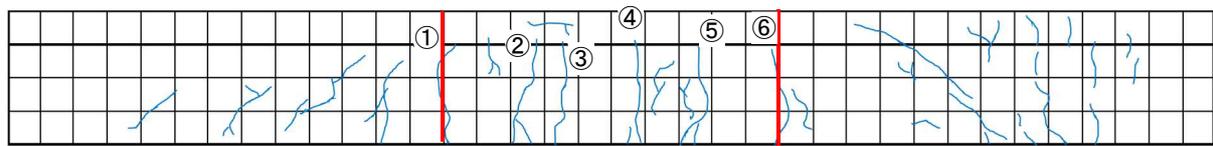
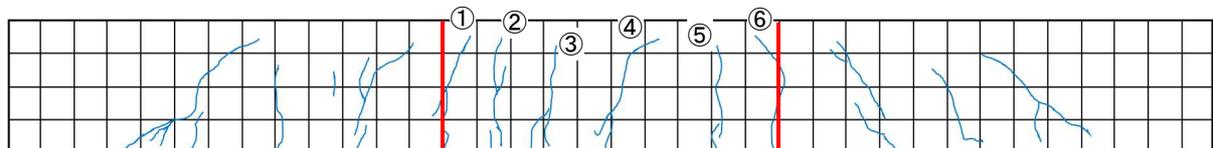


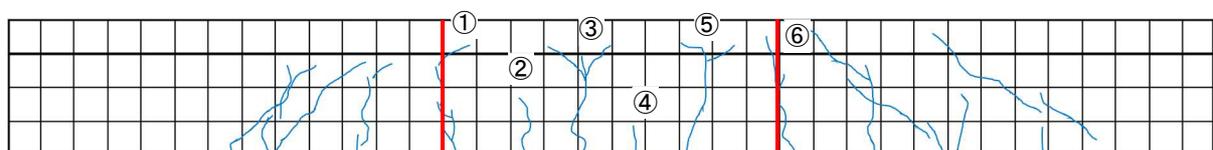
図-5 静的荷重における変位と荷重の関係



(a) PVB-S 被覆鉄筋 (ひび割れ 6 本)



(b) エポキシ樹脂塗装鉄筋 (ひび割れ 6 本)



(c) 普通鉄筋 (ひび割れ 6 本)

図-4 静的荷重試験後のひび割れの状況

鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合はほぼ同等となり、普通鉄筋を用いた場合より大きくなる結果を示した。しかし、その差は小さく、最大で0.5mm程度であった。

PVB-S被覆鉄筋を用いた場合において、静的載荷試験と200万回の繰返し曲げ載荷試験終了後の静的載荷試験の試験体中央の変位と荷重の関係について比較した結果を図-7に示す。静的載荷試験と200万回の繰返し曲げ載荷試験を実施した後の静的載荷試験との結果はほぼ同等の挙動を示しており、PVB-S被覆鉄筋を用いた場合において疲労による耐荷力の低下は認められなかった。

### 5.2 載荷中の変位と荷重の関係

載荷回数ごとの試験体中央の変位と荷重の関係を図-8に示す。いずれの試験体においても、1回目の載荷で大きく変位し、その後載荷回数を重ねるごとに少しずつ上限荷重時の変位が大きくなる傾向が見取れる。同じ載荷回数における変位の大きさは、普通鉄筋が最も小さく、PVB-S被覆鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋は同程度であった。しかし、その差は小さく、明らかに有意といえるほどの差は認められなかった。被覆層のあるPVB-S被覆鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋の変位が普通鉄筋に比べて大きくなった原因としては、静的載荷試験結果と同様に鉄筋周りの剛性が小さい被覆層が影響しているものと考えられる。

また、普通鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合は、1回目の載荷における残留変位に対し、その後載荷

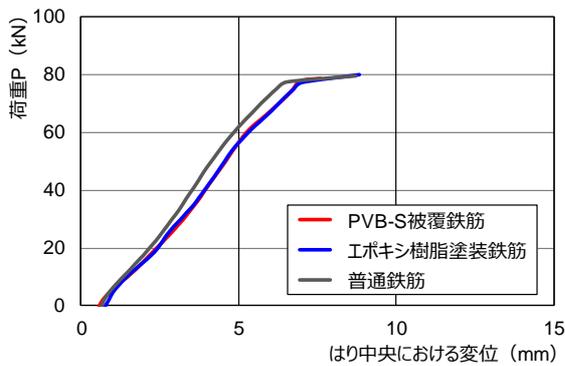


図-6 繰返し曲げ載荷終了後の変位と荷重の関係

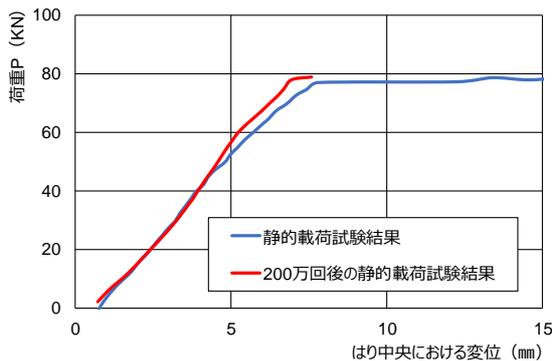


図-7 PVB被覆鉄筋の変位と荷重の関係

回数の増加に伴い残留変位が増加しているのに対し、PVB-S被覆鉄筋では増加が認められなかった。本挙動については、後述するひび割れの分散の影響が寄与していると考えられる。

### 5.3 繰返し載荷によるひび割れの状況

200万回の繰返し曲げ試験後の試験体のひび割れ状況を図-9に示す。等曲げモーメント区間に発生したひび割れの本数は、普通鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合は5本だったのに対し、PVB-S被覆鉄筋を用いた場合は7本となり、他の2種類の鉄筋を用いた場合に比べ本数が増加し、ひび割れ間隔が小さくなった。また、普通鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合は、図-9の等曲げモーメント区間に発生した全てのひび割れが1回目の載荷時に発生し、載荷回数が進むにつれてそのひび割れが徐々に進展したのに対し、PVB-S被覆鉄筋を用いた場合は、図-9(a)の②のひび割れは、5万回の載荷時に新たに確認された。これは、PVB-S被覆鉄筋は、エポキシ樹脂塗装鉄筋や普通鉄筋に比べ、特にすべり量が小さい低荷重でのコンクリートとの付着応力度が大きくなる特徴を有することから、本試験条件のように

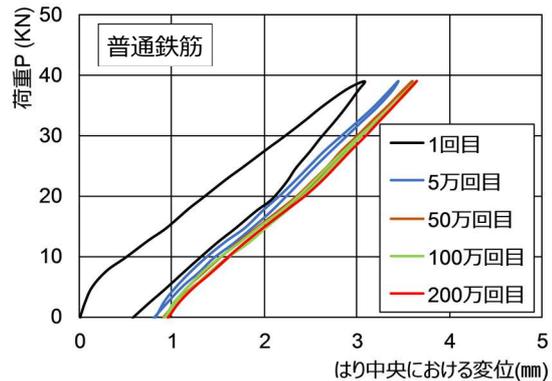
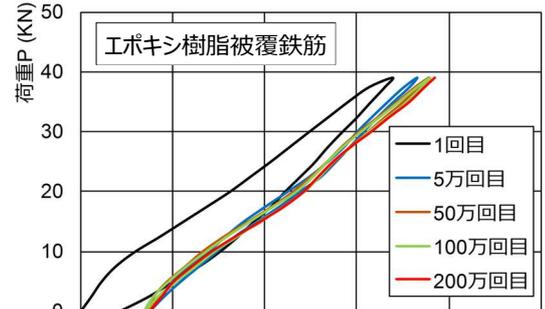
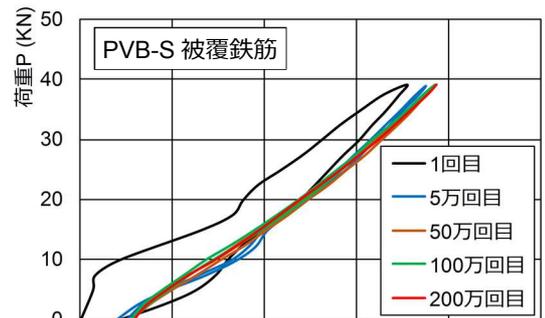


図-8 載荷回数ごとの変位と荷重の関係

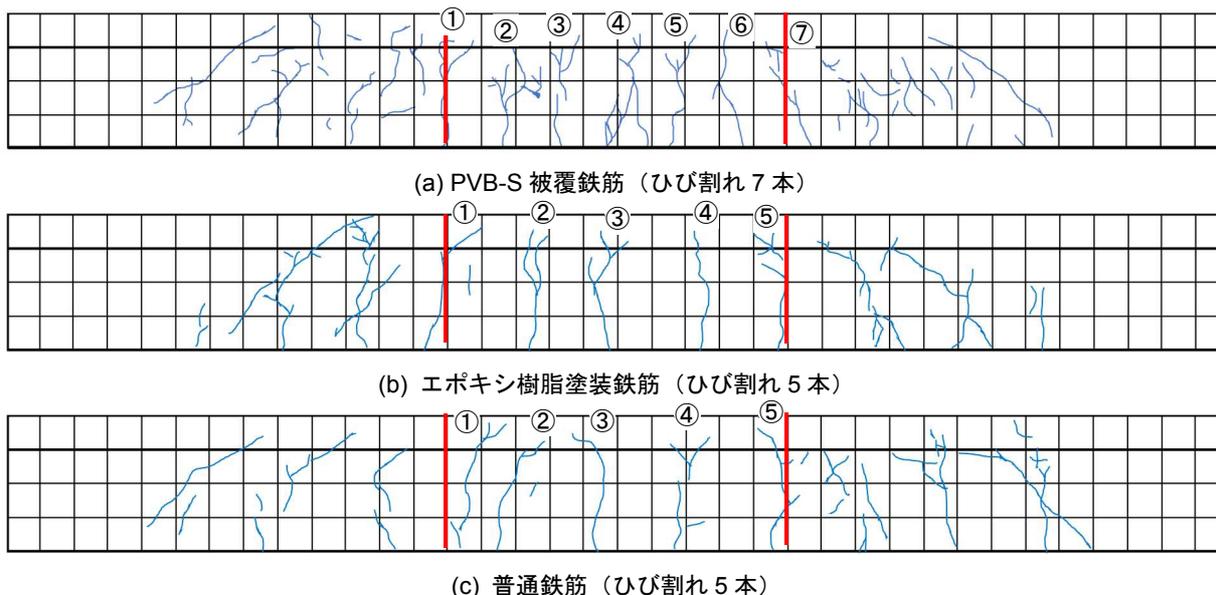


図-9 繰返し曲げ載荷後のひび割れの状況

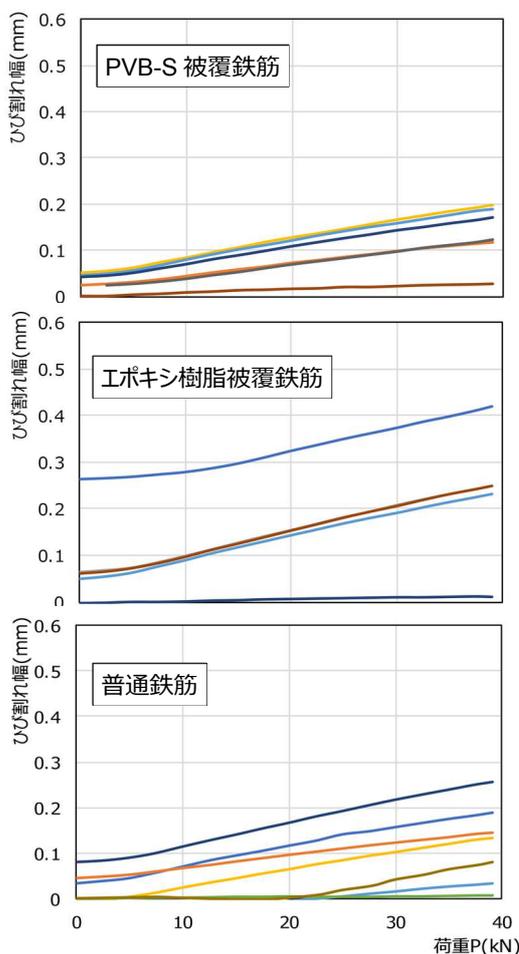


図-10 200 万回載荷時のひび割れ幅と荷重の関係

比較的低荷重での繰返し載荷を行う場合、PVB-S 被覆鉄筋を使用したよりは、他の鉄筋に比べひび割れの本数が増加したのと考えられる。

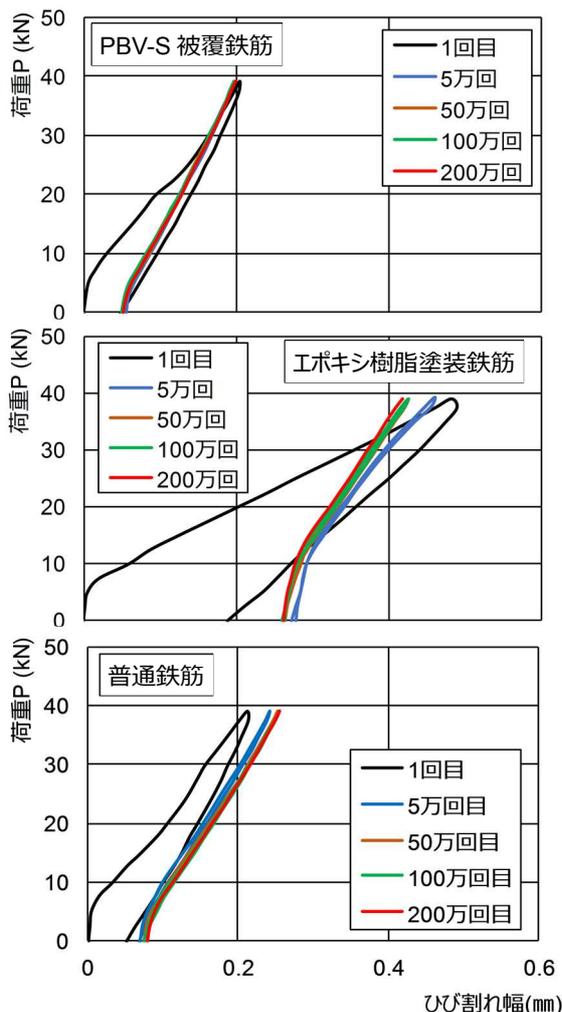
繰返し載荷 200 万回目での等曲げモーメント区間に設置した  $\pi$  ゲージの値と荷重との関係を図-10 に示す。最

大ひび割れ幅は、PVB-S 被覆鉄筋<普通鉄筋<エポキシ樹脂塗装鉄筋の順で大きくなっている。このうち、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合は、他の  $\pi$  ゲージに比べ 3 箇所でのひび割れ幅の増加が認められ、特に 1 箇所のひび割れ幅が他に比べ大きな値を示していることから、ひび割れが集中して発生していると考えられる。

載荷回数ごとのひび割れ幅と荷重の関係を図-11 に示す。ひび割れ幅は、試験体に設置した  $\pi$  ゲージのうち最大を示したものの値を示している。最大ひび割れ幅を示したひび割れは、図-9 に示したひび割れ状況で、PVB-S 鉄筋は③、エポキシ樹脂塗装鉄筋は①、普通鉄筋は④であった。ひび割れ幅と荷重の関係では、PVB-S 被覆鉄筋と普通鉄筋を用いた場合、1 回目で発生した残留ひび割れ幅は、載荷回数が増加してもほとんど変わらないのに対し、エポキシ樹脂塗装鉄筋や普通鉄筋を用いた場合は、残留ひび割れ幅が大きくなる結果を示した。これは、エポキシ樹脂塗装鉄筋や普通鉄筋を用いた場合、載荷回数が増加しても 1 回目の載荷時に発生したひび割れのみが進展したのに対し、PVB-S 鉄筋を使用した場合は、1 回目の載荷以降にも新たにひび割れが発生し、ひび割れが分散したためと考えられる。

繰返し載荷回数と上限荷重時の最大ひび割れ幅の関係を図-12 に示す。載荷回数に関わらず、最大ひび割れ幅は、PVB-S 被覆鉄筋を用いた場合が最も小さく、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合は、1 回目の載荷の時点で PVB-S 被覆鉄筋を用いた場合の約 2.5 倍の大きなひび割れが発生する結果を示した。

PVB-S 被覆鉄筋を用いた場合は、珪砂によるコンクリートとの特にひび割れ発生前の初期荷重での付着応力度の増加により繰返し載荷中もひび割れが増加し、ひび割



図一十一 荷重回数ごとのひび割れ幅と荷重の関係

れが分散することで1本あたりのひび割れ幅が小さくなったと考えられる。これに対し、コンクリートとの付着応力度が小さいエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合は、1回目の荷重で発生したひび割れ幅が大きく、繰返し荷重中のひび割れの増加は認められなかったことから、1本あたりのひび割れに応力が集中したと考えられる。

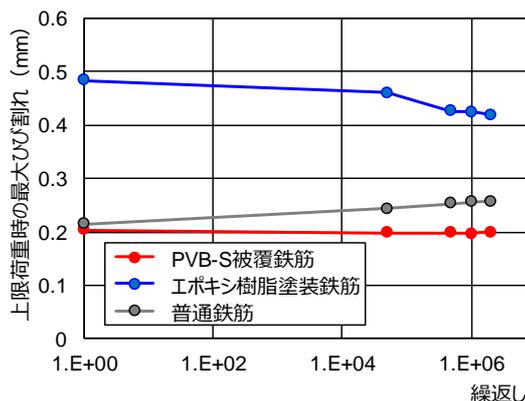
また、いずれの鉄筋種類においても、同条件での2つ試験体の繰返し曲げ荷重試験の結果はほぼ同様であった。

## 6. まとめ

PVB樹脂および珪砂を用いた高性能被覆鉄筋のコンクリート道路床版への適用を目的に、鉄筋コンクリートはり試験体を用いて200万回までの繰返し曲げ荷重による疲労試験を実施した。また、比較用として、エポキシ樹脂塗装鉄筋、普通鉄筋を用いた場合についても試験を行った。

その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 引張側鉄筋が許容応力度となる荷重を上限とした繰返し曲げ荷重試験の結果、すべての試験体において、200万回までの繰返し曲げ荷重を行っても破壊



図一十二 荷重回数と上限荷重時の最大ひび割れ幅の関係

されなかった。また、PVB-S被覆鉄筋を用いたはりの200万回の繰返し曲げ荷重終了後に実施した静的荷重試験の結果は、別途実施した静的荷重試験の結果と比較するとほぼ同等の耐力を有することから、PVB-S被覆鉄筋を用いた場合において疲労に対する耐久性が確認された。

- (2) 200万回の繰返し曲げ荷重終了後に実施した静的荷重試験では、PVB-S被覆鉄筋は普通鉄筋およびエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合と最大荷重は同等であり、PVB-S被覆鉄筋を用いることによる耐荷力の低下はなかった。PVB-S被覆鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合は普通鉄筋を用いた場合と比較して同じ荷重における試験体中央の変位が大きくなる傾向にあったが、その差は最大で0.5mm程度であった。
- (3) 等曲げモーメント区間に発生する曲げひび割れは、PVB-S被覆鉄筋を用いた場合、他の2種類の鉄筋を用いた場合に比べ本数が増加した。また、最大ひび割れ幅は、PVB-S被覆鉄筋を用いた場合が最も小さく、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた場合の半分以下まで小さくなる結果を示した。これは、珪砂の付着によるPVB-S被覆鉄筋とコンクリートとの付着応力度の増加が、曲げひび割れの分散性の向上に寄与したためであると考えられる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局，東北地方におけるコンクリート構造物の耐久性向上検討委員会：東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン（案），2009.3
- 2) 片野啓三郎，竹田宣典：高性能防食鉄筋「サンドグリップバー®」の重ね継手の性能に関する研究，大林組研究所報，No. 81，2017.12
- 3) 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. 1，2017.7