

## 25年経過したアラミドFRPロッドを緊張材に用いたPC橋の調査報告

|           |     |      |       |
|-----------|-----|------|-------|
| 三井住友建設(株) | 正会員 | 工修   | ○三加 崇 |
| 三井住友建設(株) | 正会員 | 博(工) | 浅井 洋  |
| 三井住友建設(株) | 正会員 | 博(工) | 永元 直樹 |
| 三井住友建設(株) | 正会員 |      | 藤原 保久 |

キーワード：アラミドFRPロッド，アラミドFRP緊張材，張力測定

### 1. はじめに

コンクリート構造物は、長期耐久性に優れているが、鋼材の腐食する環境下においては、早期に耐久性が損なわれる場合がある。そこで、鋼材に代わって腐食しないアラミド連続繊維FRPロッド（以下、アラミドFRPロッド）を開発した<sup>(1)</sup>。

約25年前にアラミドFRPロッドをプレストレストコンクリート用緊張材に用いたポストテンション箱桁橋（橋長25m）<sup>(2)</sup>とプレテンション合成桁橋（橋長12.5m）<sup>(3)</sup>を建設した。緊張材には、φ6mmのアラミドFRPロッドを3本、7本、または19本に束ねたアラミドFRP緊張材を用いている。これらの橋梁では、アラミドFRP緊張材の力学的性能と長期耐久性、および橋梁の健全性を実証することを目的としている。

建設から25年が経過したおのおのの橋梁について、健全性を確認するために、アラミドFRP緊張材の張力測定および車両載荷試験によるたわみ測定を実施した。

### 2. アラミドFRPロッド

アラミドFRPロッド（写真-2）は、アラミド繊維を引き揃えながらビニルエステル樹脂によりφ6mmに成形し、熱硬化させたものである。表面は、アラミド繊維を巻き付けて異形化することでコンクリートとの付着性能を向上させている。アラミドFRPロッドの材料物性を表-1に示す。アラミドFRPロッドの引張強度は1920N/mm<sup>2</sup>で弾性係数は53.0kN/mm<sup>2</sup>である。引張応力とひずみの関係は直線であり、降伏点を示さず破断する材料である。

### 3. PC橋の構造

ポストテンション橋およびプレテンション橋の形状を図-1に示す。ポストテンション橋は、橋長25.0m、支間長24.1m、桁幅4.44mのPC箱桁橋、プレテンション橋は、橋長12.5m、支間長11.79m、桁幅4.44mの中空プレテンション単純合成桁橋である。

#### 3.1 ポストテンション橋

ポストテンション橋の主ケーブルは、2種類の緊張材を使用した。配置図を図-2に示す。内ケーブルとしてウェブ内に配置した19φ6mmのアラミドFRP緊張材が10本、外ケーブルとして7φ6mmのアラミドFRP緊張材を6本を直線配置している。鉄筋には、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した。内ケーブル（19φ6mm）の定着体は、鋼管内にアラミドFRPロッドを配置してモルタルを充填した定着体（付着定着



写真-1 建設当時のPC橋



写真-2 アラミドロッド（φ6mm）

表-1 アラミドFRPロッドの材料物性

|           |                       |      |
|-----------|-----------------------|------|
| 直径        | (mm)                  | 6    |
| 繊維含有量     | (%)                   | 65   |
| 引張強度      | (N/mm <sup>2</sup> )  | 1920 |
| 引張弾性率     | (kN/mm <sup>2</sup> ) | 53.0 |
| 引張破断伸度    | (%)                   | 3.5  |
| リラクゼーション率 | (%)                   | 21   |

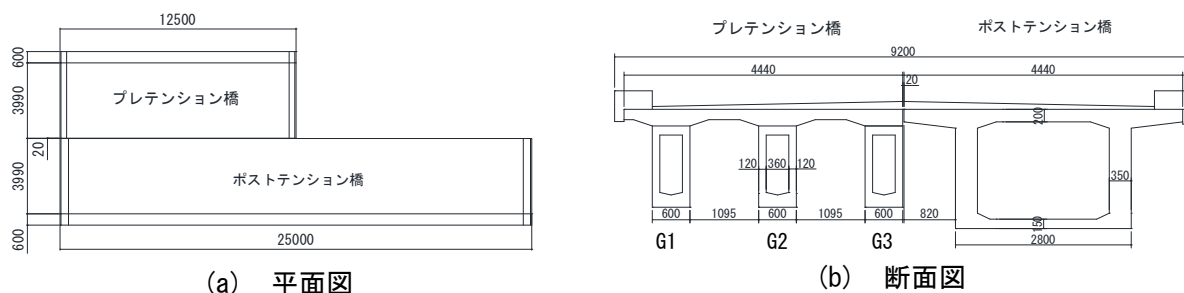


図-1 ポストテンション橋およびプレテンション橋

体) を使用した。シースには硬質のポリエチレン管を使用し、内部はグラウトで充填している。外ケーブル(7φ6mm)は、GFRP(ガラスファイバー補強プラスチック)製の付着定着体を使用し、箱桁内の下部に直線配置している。定着部は、後に端部横桁部分に充填したグラウトの付着定着を併用している。アラミドFRP緊張材の初期緊張力は、内ケーブルと外ケーブルともに0.7Pu(Pu:引張荷重)である。

ポストテンション橋の環境条件は、側面および上面は直射日光を受ける環境にある。架橋位置は、内陸部に位置しており、海からの飛来塩分の影響は受けない。年間の気温が-10~38℃であり、氷点下に下がることはほとんどない。

### 3.2 プレテンション橋

プレテンション桁の断面図を図-3に示す。3φ6mmのアラミドFRP緊張材を16本使用している。せん断補強として、φ8mmのアラミドFRPロッドを使用しており、鉄筋を使用していない。プレテンション橋は3主桁であり、床版にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した。床版の横締めには、3φ6mmのアラミドFRP緊張材を使用している。アラミドFRP緊張材の初期緊張力は、0.7Puである。プレテンション橋は、ポストテンション橋と並んで建設されており、環境条件はポストテンション橋と同じであるが、北側に位置するため主桁には直射日光はあたらない。

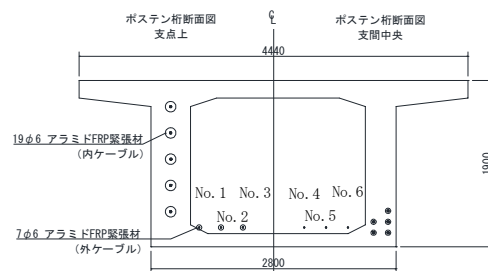


図-2 ポストテンション桁の断面図

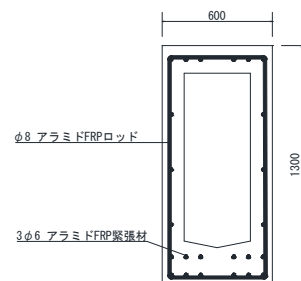


図-3 プレテンション桁の断面図

## 4. 調査方法

### 4.1 外ケーブルの張力測定

ポストテンション橋の外ケーブルは、端部横桁間に直線で配置しており、中間には緊張材を拘束するものがないことから、外ケーブルの固有振動数を測定して外ケーブルの張力を推定した。調査方法は、7本のアラミドFRPロッドをバンドで結束して一体化させた。アラミドFRPロッドを木槌で打撃して振動を与えて、このときの外ケーブルの加速度を測定した。加速度計(定格容量±9.807m/s<sup>2</sup>)は、外ケーブルの端部定着間の距離(21.9m)に対して端部から定着間の3/8(端部から8.2m)に設置した(写真-3)。試験は3回実施して、測定した加速度波形からFFT(高速フーリエ変換)によって固有振動数を算出した。

外ケーブルの張力は、固有振動数を用いて、式(1)により算出することができる。外ケーブルの長さは、端部横桁間とした。

$$T = 4wL^2 f^2 / g \quad (1)$$

ただし、 $T$ :外ケーブルの張力(kN)、 $f_1$ :次の固有振動数(Hz)、 $L$ :外ケーブルの長さ(m)、 $g$ :外ケーブルの単位長さ当りの重量(kN/m)、 $w$ :重力加速度(m/s<sup>2</sup>)

アラミド FRP 緊張材は、鋼材と比較して弾性係数が小さいため伸びが大きい。外ケーブルとしての重量が小さく、伸びによって重量が減少する影響が顕著であると考えられることから、緊張による伸びの影響を考慮した見かけの重量として式(2)により算出することとした。

$$T = 4w'L^2 f^2 / g \quad (2)$$

ただし、 $w'$  : ケーブルの単位長さ当りの見かけの重量 (kN/m)  
 $w' = (1 - T/A_f E_f) w$

$A_f$  : アラミド FRP ロッドの総断面積 (mm<sup>2</sup>) ,  $E_f$  : アラミド FRP ロッドの弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

測定の対象箇所は、外ケーブルのアラミド FRP 緊張材が 6本のうち3本を実施した。

#### 4.2 内ケーブルの張力測定

内ケーブルの残存張力を確認するために、プレテンション桁の下縁に作用するコンクリートの応力度を測定した。測定位置は、死荷重(自重)の影響が少ない桁端から 2.62m ~ 2.72m とした。調査方法は、コンクリート下縁にスリットを切削し、前後のひずみ変化から、コンクリートに作用していた応力度を推定する方法(以下、スリット応力解放法)で実施した。ひずみの測定には、光学的非接触全視野計測法を用いた<sup>(4)</sup>(写真-4)。

#### 4.3 車両載荷試験

橋梁のたわみ性状を確認することを目的として、ラフタークレーン(26.5t)による静的載荷試験を実施した。ラフタークレーンの前輪を載荷位置として、ポストテンション橋は 3m 間隔、プレテンション橋は 1m 間隔で載荷した(図-4)。

### 5. 調査結果

#### 5.1 外ケーブルの張力測定結果

支間中央部のアラミド FRP 緊張材を打撃により振動させたときの振動波形を図-5、振動波形から FFT により周波数分析を行った結果を図-6、全測定結果を表-2 示す。外ケーブルの固有振動数の3回の平均値で 18.398Hz ~ 18.888Hz であり、このときの推定される残存張力は 181.9kN ~ 191.7kN であった。

アラミド FRP ロッドのリラクセーションによる応力残存率を、式(3)で推定した<sup>(5)</sup>。

$$\alpha'(t) = 0.95 - 0.031 \log(t) \quad (3)$$

ただし、 $t$  : 経過時間(hr)

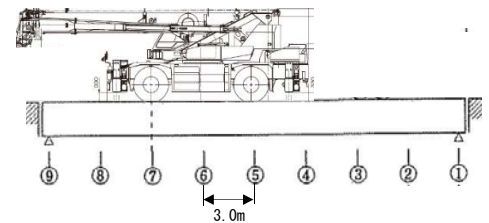
初期緊張力 247kN に対して残存張力の計算値は 193.9kN であり、張力測定時における応力残存率は、0.785 であった。振動測定による張力は、計算値と比較して 0.94 倍 ~ 0.99 倍であり、おおむね計算通りの張力が保持されていることが分かった。



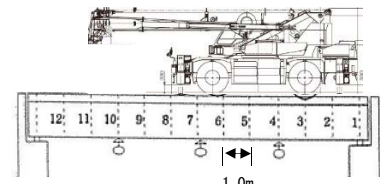
写真-3 加速度計配置状況



写真-4 光学的非接触全視野計測状況



(a) ポストテンション橋



(b) プレテンション橋

図-4 車両載荷位置図

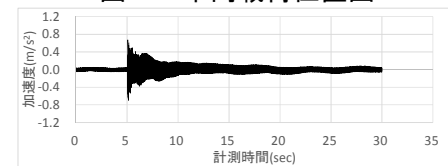


図-5 外ケーブル加速度波形

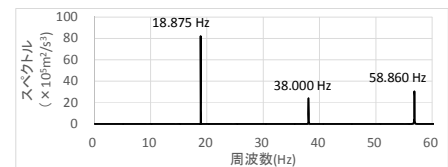


図-6 周波数分析結果

表-2 外ケーブル張力測定結果

| ケーブル番号 | 固有振動数 (Hz) | 推定張力 (kN) | 計算張力 (kN) | 推定張力 / 計算張力 |
|--------|------------|-----------|-----------|-------------|
| No.1   | 1          | 183.9     | 193.9     | 0.954       |
|        | 2          |           |           |             |
|        | 3          |           |           |             |
|        | 平均         |           |           |             |
| No.3   | 1          | 191.7     | 193.9     | 0.995       |
|        | 2          |           |           |             |
|        | 3          |           |           |             |
|        | average    |           |           |             |
| No.5   | 1          | 181.9     | 193.9     | 0.943       |
|        | 2          |           |           |             |
|        | 3          |           |           |             |
|        | average    |           |           |             |

5.2 応力測定結果

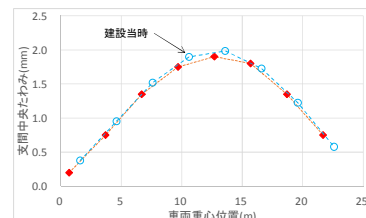
プレテンション橋の主桁下縁に発生するコンクリート応力度分布の計算値とスリット応力解放法により測定値を表-3に示す。計算値は、内ケーブルのアラミド FRP 緊張材がリラクセーションによる張力損失を生じ、自重を作用している時の応力度である。測定位置における応力度の計算値は 3.33N/mm<sup>2</sup>~3.59N/mm<sup>2</sup>、スリット応力解放法により測定された応力度は 3.64N/mm<sup>2</sup>~4.00N/mm<sup>2</sup> であり、計算値に対して 105~120%の値と推測された。外ケーブルと同様に、ほぼ計算通りの張力が保持されていることが分かった。

5.3 たわみ測定結果

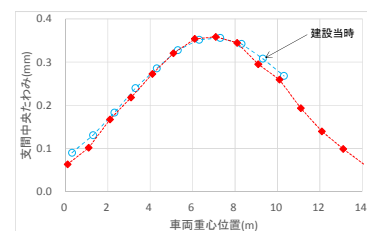
車両の重心位置と支間中央のたわみの関係を図-7に示す。建設当時はダンプトラック(前輪 6t, 後輪 16t, 合計 22t)による载荷を行った結果である。今回の試験では、ラフタークレーン(前輪 13.25t, 後輪 13.25t, 合計 26.5t)を使用しており、载荷重量が異なっている。建設当時と比較するために、今回測定したたわみを重量比 0.83 (=22/26.5) を考慮したたわみを示している。支間中央のたわみは、ポストテンション橋およびプレテンション橋で、建設当時とほぼ同じ挙動をしめしており、25年経過した後もプレストレスが有効に作用していることが確認された。

表-3 応力度測定結果

|                          | G1桁   | G2桁   | G3桁   |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| 計測位置<br>桁端から (m)         | 2.720 | 2.620 | 2.680 |
| 計算値 (N/mm <sup>2</sup> ) | 3.46  | 3.33  | 3.59  |
| 測定値 (N/mm <sup>2</sup> ) | 3.64  | 4.00  | 4.05  |
|                          | ±0.13 | ±0.13 | ±0.13 |
| 測定値/計算値                  | 1.052 | 1.201 | 1.128 |



(a) ポストテンション橋



(b) プレテンション橋

図-7 支間中央のたわみ

6. おわりに

各種試験を実施した結果を以下に示す。

- ・ポストテンション橋のアラミド FRP 緊張材を使用した外ケーブルの張力は、振動測定により計算張力が保持されていることが確認された。
- ・プレテンション橋の下縁に発生している応力度は、スリット応力解放法によりコンクリート応力度が、計算値と同等もしくは若干高い値が測定され、アラミド FRP 緊張材を使用した内ケーブルの張力は、計算通りの張力を保持されていることが確認された。
- ・ポストテンション橋およびプレテンション橋の車両载荷によるたわみ挙動は、建設当時とほぼ同じであることから、プレストレスが有効に作用していることが確認された。

アラミド FRP 緊張材は、25年に亘り所定の緊張力を保持し続けており、それぞれの橋梁が健全であることが明らかになった。今後も定期的に調査を実施し、長期的に健全性を確認していく。

<参考文献>

- (1) 則武, 中井, 熊谷, 水谷: アラミドFRP緊張材の使用特性, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 1990. 10, pp257~260
- (2) 則武, 板井, 新井, 益子: アラミドFRPプレテン橋の設計と施工, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 1990. 10, pp261~264
- (3) 水谷, 則武, 益子, 中井: アラミドFRP緊張材の使用特性, 第2回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 1991. 11, pp311~314
- (4) 出水, 松田, 伊東, 内野, 肥田, 岡本: 光学的全視野ひずみ計測法を用いた応力解放法によるプレテンションPC桁の現有作用応力測定, 実験力学, Vol. 11, No. 3, 2011. 9, pp209~214
- (5) 浅井洋: 付着定着によるアラミド繊維緊張材・補強材の実用化に関する研究, 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部博士論文, 2012