

建設後28年が経過したアラミドFRP緊張材プレテンション桁の曲げ性状

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	工修	野並 優二
三井住友建設(株)	正会員		臺 哲義
三井住友建設(株)	正会員	博(工)	浅井 洋

Abstract : The pre-tension bridge which used an aramid FRP rod for a tendon was built 28 years ago. In order to confirm soundness, one of the main girders was cut and removed, and a bending loading test was carried out. As a result, the residual prestress of the aramid FRP tendon retained the tension as planned, that the flexural fracture strength was as calculated, the aramid FRP tendon had a predetermined tensile strength.

Key words : Aramid FRP rod , Prestress , Bending loading test

1. はじめに

1980年代に鉄筋やPC鋼材の腐食によるコンクリート構造物の劣化対策の一つとして、連続繊維補強材の研究が盛んに行われた。連続繊維補強材は、高張力の炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維をエポキシ樹脂などの繊維結合材で固着し、棒状や格子状に成形したものである。連続繊維補強材は、水分や酸素、塩化物イオンなどにより腐食しないことから、コンクリート構造物に用いることで耐久性に優れた構造物となることが考えられる。著者らは、連続繊維補強材を用いる高張力の繊維としてアラミド繊維に着目し、直径6mmに成形したアラミドFRPロッド(写真-1)を開発したのち、1990年にアラミドFRPロッドを緊張材(以下、アラミドFRP緊張材)に用いたプレテンション合成桁橋およびポストテンション箱桁橋を世界で初めて建設した(写真-2)。本橋は、コンクリート二次製品工場内のため池上に架橋されており、大型トレーラーの搬入出用として現在も供用されている。架橋位置の年間の気温は-10~38℃であり、冬季には氷点下になるが、凍結防止材を散布することはまれである。また、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環境下である。

著者らは、アラミドFRP緊張材として使用するアラミドFRPロッドの強度試験や耐久性試験による検討を行い、開発から実用化までの限られた期間において緊張材としての性能を確認した。しかしながら、コンクリート中で長期間の高張力を維持し続ける安定性を検証するまでには至らなかった。そこで、建設後約25年が経過したプレテンション合成桁橋の主桁の一部にスリットを設ける応力解放法による主桁応力度を推定した結果、計算通りの有効応力度が作用していることが明らかになった¹⁾。

今回、アラミドFRP緊張材の有効プレストレスおよび保有耐力を確認する目的でプレテンション合



写真-1 アラミドFRPロッド



写真-2 建設時のPC橋

成桁橋から主桁1本を切り出して曲げ載荷試験を行った。

2. アラミドFRP ロッド

プレテンション桁には緊張材として用いた直径6mmのφ6アラミドロッドと鉄筋代替として用いた直径8mmのφ8アラミドロッドを使用している。φ6アラミドFRPロッドは、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。帯鉄筋代替として使用したφ8アラミドFRPロッドは、異形加工したのち熱硬化の段階で半硬化させた状態で曲げ加工を行い、再度熱硬化を行って補強材の形状に成形したものである。アラミドFRPロッドの材料物性を表-1に示す。アラミドFRPロッドの保証耐力は、φ6で50.0kN、φ8で83.3kNであり、引張強度は1920N/mm²、弾性係数は53.0kN/mm²である。引張応力とひずみの関係は線形関係にあり、破断に至るまで降伏点を示さない(図-1)。

表-1 アラミドFRP ロッドの材料物性

繊維含有量 (%)		65
引張強度 (N/mm ²)		1920
引張弾性率 (N/mm ²)		53
引張破断伸度 (%)		3.5
リラクゼーション率 (%)		21

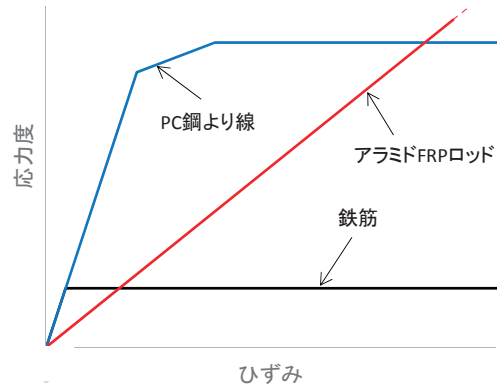


図-1 応力度とひずみの関係

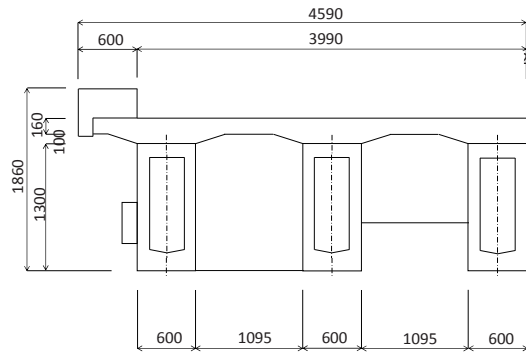


図-2 プレテンション合成桁

3. アラミドFRPプレテンション橋

アラミドFRPプレテンション橋梁は、3主桁からなるプレテンション合成桁橋である(図-2)。本試験では、プレテンション合成桁橋の主桁を1本撤去し、載荷試験を実施した。

主桁の構造を図-3に示す。桁長12.390m、桁高1.300m、桁幅0.600mの中空桁である。桁軸方向の端部から500mmと中央部の400mmの部分は、横桁に位置するため充実断面としている。主ケーブルは、

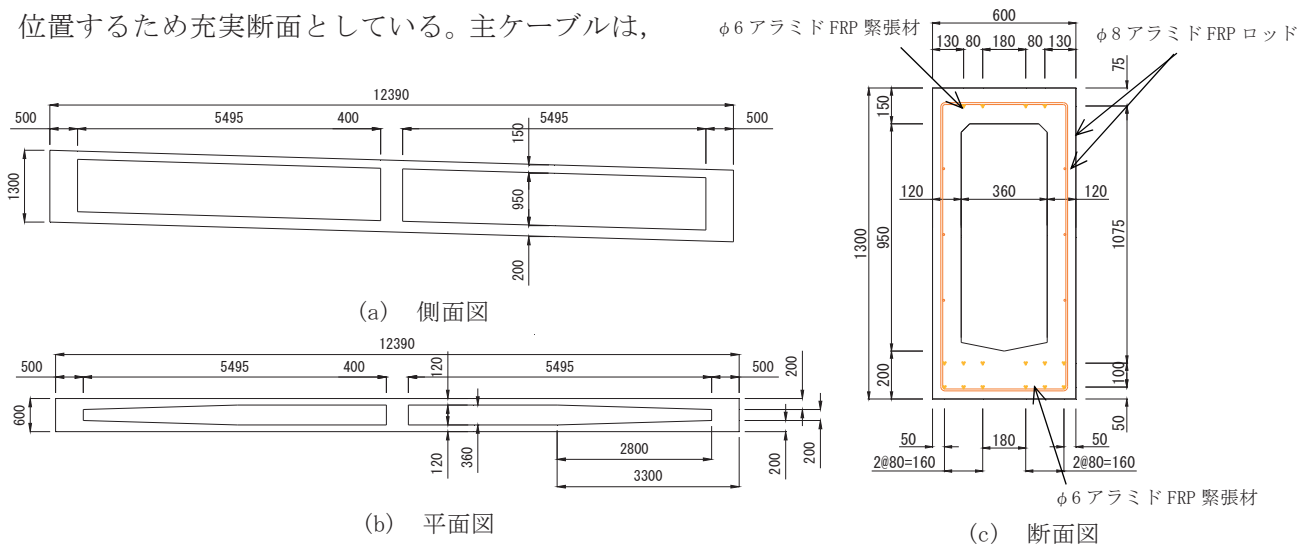


図-3 主桁構造

φ6アラミドFRPロッドを3本束ねた3φ6アラミドFRP緊張材を使用し、上段に4本、下段に12本を2段配置している。橋軸方向補強筋およびせん断補強材にφ8アラミドFRPロッドを用いており、せん断補強筋は300mm間隔で配置している。コンクリートの設計基準強度は50N/mm²である。

床版横締めにはポストテンション方式による3φ6アラミドFRP緊張材を用いており、補強筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用している。床版横締めを中間定着し、床版を切断して端部主桁を取り出し載荷試験に使用した。なお、主桁にひび割れは発生していない。

4. 試験方法

建設後28年経過したプレテンション桁のアラミドFRP緊張材の有効プレストレスおよび引張強度を確認することを目的に曲げ試験を行った(図-4、写真-3)。

試験は4点曲げ試験で行い、支点間距離を11.790m、載荷点間距離を1.500mとした。支点間距離は実橋の支間長と同じとしている。載荷装置は、2000kNの油圧ジャッキを使用した。計測項目は、載荷荷重、たわみ(支間中央、載荷点、せん断スパン中央)、コンクリートひずみ(載荷点間の上下面および側面)、軸方向の標点間変位(載荷点間の下面)、ひび割れ幅(載荷試験により発生)、アラミドFRP緊張材の端部のめり込み量とした。計測位置を図-5に示す。

アラミドFRP緊張材の有効プレストレスは、コンクリートの変形に比べてリラクセーションによる張力減少が大きい。既往の研究による緊張定着後の張力は式(1)で示される²⁾。

$$P = P_0(0.95 - 0.031 \times \log(t)) \quad (1)$$

ここに、P : t時間経過後の残存張力(kN)

P₀ : 初期緊張力(kN)

t : 経過時間 (hr)

建設当時の緊張管理図より3φ6アラミドFRP緊張材の導入緊張力は112.5kNであり、式(1)によって28年経過した緊張力は88.1kN(減少率0.783)と推定される。

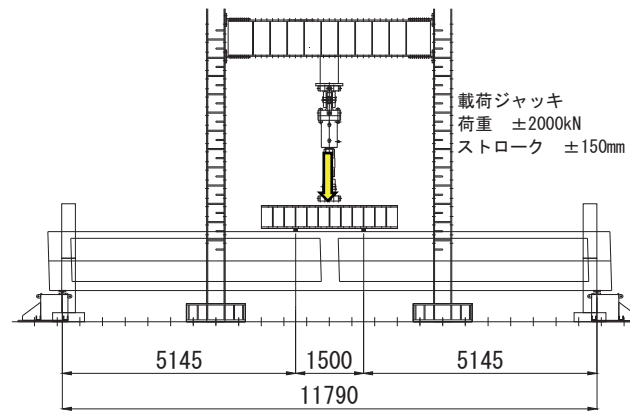
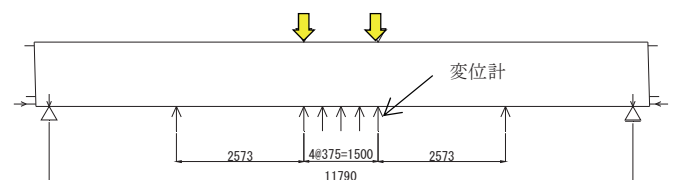


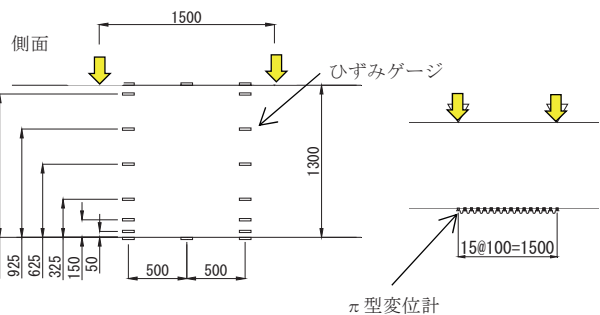
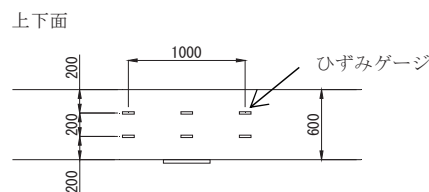
図-4 載荷方法



写真-3 載荷状況



(a) たわみ



(b) コンクリートひずみ

(c) 軸方向変位

図-5 計測位置図

曲げ試験では、有効プレストレスは、デコンプレッションモーメントを試験によって求め、断面分割法による計算方法（以下、断面計算）によってアラミドFRP緊張材に作用する張力を算出し、リラクセーションによる応力緩和式から推定した有効プレストレスと比較して検証する。

5. 試験結果

5.1 ひび割れ発生荷重

荷重試験後に採取したコア供試体の材料試験結果は、圧縮強度は 83.8N/mm^2 、弾性係数は 42.8kN/mm^2 であった。材料試験結果およびアラミドFRP緊張材の残存張力を用いて、プレテション桁のひび割れ発生荷重と曲げ破壊荷重を断面計算により算出した。ひび割れの発生荷重の計算値は 409.4kN であり、目視で確認したひび割れ発生荷重 471.1kN は若干大きな値であった。

5.2 有効プレストレス

荷重試験による残存張力の推定は、最初にデコンプレッションモーメントの測定を行った。曲げ荷重によって桁下縁から2段目のアラミドFRP緊張材を跨ぐ程度の曲げひび割れを発生させる。除荷すると曲げひび割れは、プレストレスによりひび割れが閉塞して圧縮力が作用する。再度、荷重荷重を増加させると、初期は弾性変形の挙動であるが、ひび割れが開口することで変位の増加量が大きくなる。このときの変化点が、アラミドFRP緊張材によって桁下縁に作用する応力度が荷重荷重と自重によって作用する応力度とつり合った状態である。ひび割れが開口を始める点は、ひび割れ発生箇所の π 型変位計の値によって判断した。図-6に π 型変位計による変位と荷重荷重の関係を示す。ひび割れが開口する前は弾性挙動を示しており、ひび割れの開口が始まると変位の増加が大きくなっており、このときの荷重荷重は 202.4kN である。断面計算により $3\phi 6$ アラミドFRP緊張材の有効プレストレスを算出すると 90.3kN であった。式(1)により算出した推定張力(88.1kN)と比較すると 1.02 であり、ほぼ同等程度であった。

式(1)によるアラミドFRP緊張材の張力推定値と実験値との関係を図-7に示す。図中には、建

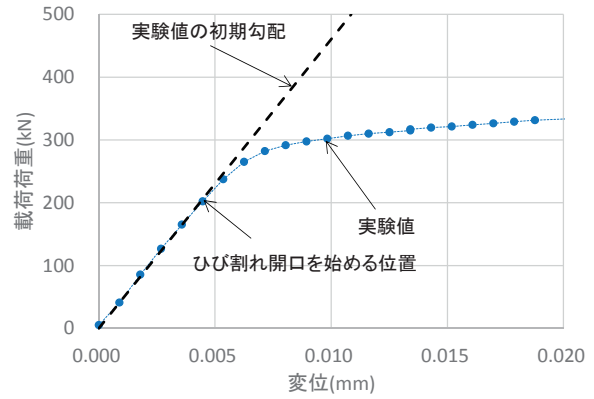


図-6 π 型変位計による変位

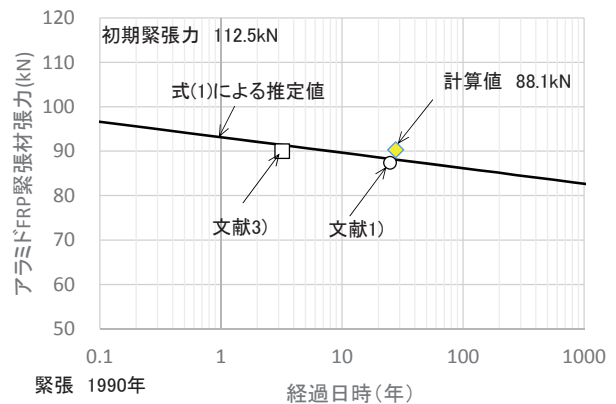


図-7 アラミドFRP緊張材張力

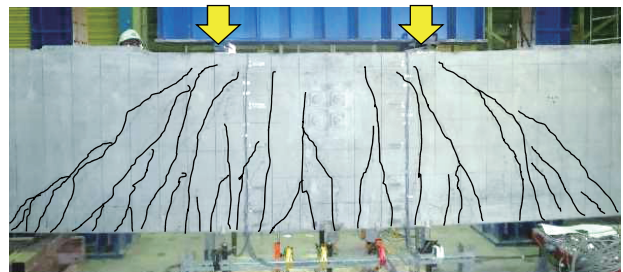


写真-4 ひび割れ状況



写真-5 アラミドFRP緊張材破断状況

設後約3.2年におけるポストテンション橋のリラクセーションから算出した結果³⁾と建設後約25年に主桁下縁のかぶり部分にスリットを設けた応力開放法によって測定した結果¹⁾を合わせて示した。この結果、式(1)はアラミドFRPロッドの残存張力をよく評価できることが明らかになった。

5.3 破壊状況

曲げひび割れは最初に支間中央付近に発生し、荷重の増加にともない上昇するとともに分散しはじた。そののち、さらにひび割れが分散しながらたわみが増加し、等曲げスパン内で下縁2段のアラミド緊張材がすべて同時に破断した。載荷点付近のひび割れ状況を写真-4、破壊状況を写真-5に示す。

載荷荷重と支間中央のたわみとの関係を図-8に示す。471.1kNで曲げひび割れが生じたのち、約600kNを越えるとたわみの増加が著しくなる。曲げ破壊耐力の計算値は782.5kNでアラミドFRP緊張材の保証耐力であり、実験値は910.4kNでアラミドFRP緊張材の破断であった。

支間中央から500mm離れた載荷スパン内の桁高方向のコンクリートひずみ分布を図-9に示す。断面のひずみ分布は、ひび割れが発生していない載荷荷重350kNおよび破壊前の載荷荷重750kNともに、計算値と実験値がよく一致していることがわかる。

載荷荷重と圧縮縁コンクリートひずみの関係を図-10に示す。弾性範囲から破壊に至るまで計算値と実験値はよく一致していることがわかる。

コンクリートのひずみ分布および上縁コンクリートひずみの結果から計算値は桁の挙動をとらえていると判断できる。

5.4 アラミドFRP緊張材の保有耐力

曲げ破壊の形態はアラミドFRP緊張材の破断によるものであったことから、アラミドFRP緊張材の保有耐力を算出した。実験値の最大荷重910.4kN時に3φ6アラミドFRP緊張材に作用した荷重は、断面計算により188.4kN (2197N/mm²)であり、保証耐力(150kN)の1.25倍である。アラミドFRP緊張材の保証する引張強度は前述したように1920N/mm²であるが、既往の研究⁴⁾による引張試

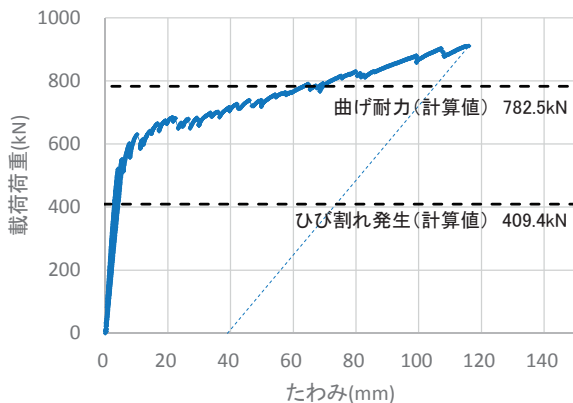
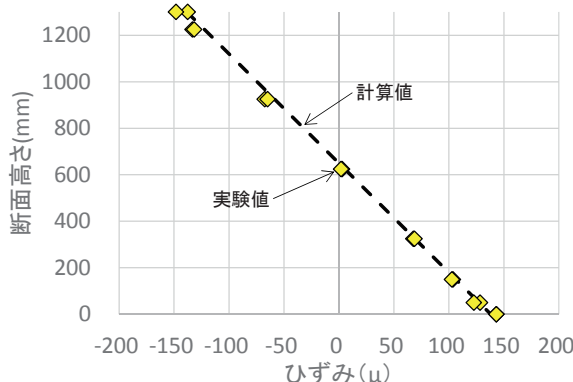
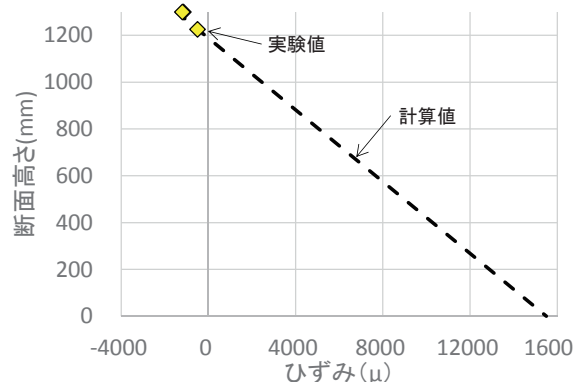


図-8 支間中央たわみ



(a) 載荷荷重 350kN



(b) 載荷荷重 750kN

図-9 コンクリート断面ひずみの断面分布

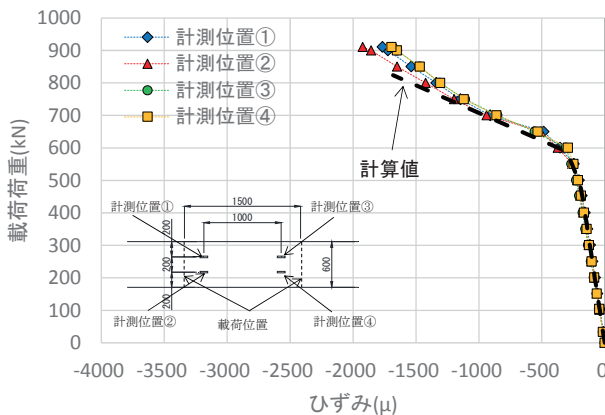


図-10 コンクリート上縁ひずみ

験では平均 $2136/\text{mm}^2$ の結果が得られていることから、同等以上の引張強度でありの28年後においても引張強度の低下は認められなかった。

6. まとめ

建設から28年経過したアラミドFRP緊張材を用いたプレテンション桁の曲げ載荷試験を実施し下記の知見が得られた。

- 1) プレテンション桁のアラミドFRP緊張材は、計算通りの緊張力を有しており、リラクセーションによる応力緩和算定に式（1）に示す提案式が適用できる。
- 2) アラミドFRP緊張材の引張強度は、建設当時の引張強度と同等以上であり強度低下は認められない。

参考文献

- 1) 三加，浅井，永元，藤原：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，第17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，2017. 11, pp189-188
- 2) 浅井，中井，迎，水谷：アラミド型FRPロッドの応力緩和特性，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集V，1991. 9, pp. 230-231
- 3) 中井，浅井，水谷，益子：アラミド実証橋の長期計測結果，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集V，1994. 9, pp. 954-955
- 4) 柿原，神吉，河崎：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム，土木学会，1992, pp. 79-82