超高耐久橋梁の実用化に向けた実証橋の建設

西日本高速道路(株)　正会員　○福田　雅人
西日本高速道路(株)　正会員　芦塚　憲一郎
三井住友建設(株)　正会員　藤岡　泰輔
三井住友建設(株)　正会員　工修　三加　崇

キーワード：超高耐久橋梁, 高強度繊維補強コンクリート, AFRPロッド, 常時モニタリング

１．はじめに

日本経済を支える社会基盤として，道路橋は長期に渡りその要求性能を維持しなければならない。一方で，わが国では塩害などの影響で鋼材が腐食し，構造物の機能低下やコンクリート片のはく落による第三者被害が数多く報告されており，厳しい財務状況下で道路橋を維持管理することが喫緊の課題となっている。さらに，昨今のメンテナンス需要に対する技術者不足が道路管理者に大きな負担を強いており，これら諸問題を解決する技術開発が急務となっている。

このような時代背景を鑑み、著者らは鉄筋やPC鋼材など腐食劣化の原因となる鋼材を一切使用しないプレストレストコンクリート製の超高耐久橋梁（Dura-Bridge）を開発した[1), 2), 3)]。本稿では，種々の構造実験の検証と実挙動を把握する目的として建設した実証橋について概説するとともに，実証橋の車両載荷試験と常時モニタリングを報告し，超高耐久橋梁の高速道路への適用の実現性を示す。

２．超高耐久橋梁の概要

超高耐久橋梁とは，開発した設計基準強度80N/mm^{2}の高強度繊維補強コンクリートを用いたコンクリート構造である。曲げモーメントや軸引張力によって発生する引張応力に対しては，アラミドFRPロッド緊張材（以下，AFRPロッド）で補強し，PC鋼材や鉄筋を一切使用していない。せん断力に対しては，鋼短繊維をコンクリートに混入することでせん断強度を向上させ，せん断補強鉄筋を一切使用していない。箱桁構造を前提とする超高耐久橋梁のウェブには，蝶型のコンクリートパネルを用いたバタフライウェブを採用し，主桁の軽量化とせん断補強の合理化を図っている。超高耐久橋梁は，二次製品工場で製作したプレキャストセグメントを現場に搬入し接合することを前提とし，高品質化と現場作業の省力化を図っている。超高耐久橋梁の概念図を**図-1**に示す。

３．AFRPロッドの曲げ配置に関する検討

3.1　目的

外ケーブル構造としてAFRPロッドを曲げ配置した事例はこれまでになく，偏向部におけるAFRPロッドの疲労に関する安全性は明らとなっていない。そこで，偏向部を模擬してAFRPロッドを曲げ配置し緊張し，AFRPロッドに応力振幅を繰り返し与える繰り返し載荷試験を行い安全性の検証を行った。

3.2　試験条件

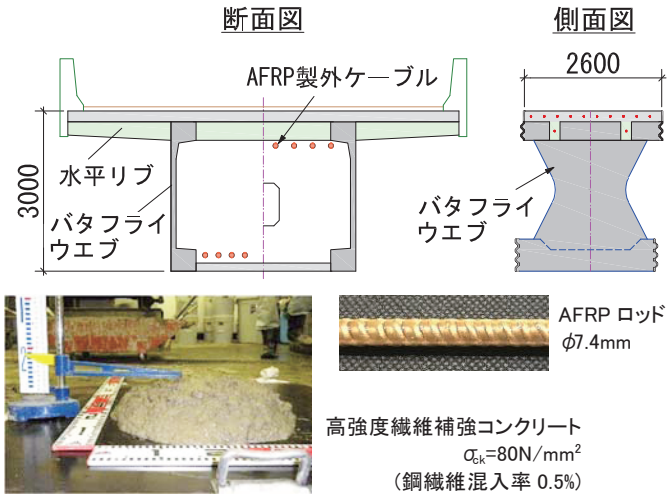

図-1　超高耐久橋梁の概念図

試験条件を**表-1**に，実験概要を**図-2**に示す。緊張材は，AFRPロッド（φ7.4mm）を9本1束で1ケーブルとして構成した。導入緊張力は，定着具の定着効率を考慮し，保証耐力(Pu)の0.7倍とした。AFRPロッドが偏向部を通過する部位には保護管(PE管)を設置し，静的な引張試験で保証耐力が確認された曲げ角度θ＝10度，曲げ半径R＝2.0mに設定した。

表-1　試験条件

項　目	試験条件
緊張システム	AFRPロッド　9φ7.4mm
導入緊張力	0.7Pu＝453kN※1
曲げ角度	θ＝10度
曲げ半径	R＝2.0m

※1　AFRPロッド　1本の引張強度　P=81.4kN
保証耐力Pu=9×81.4×0.883=647kN

3.3　試験方法

PC鋼材のフレッティング試験では，実橋で想定される応力振幅を50N/mm²に設定して確認する試験法が提案されている[4]。当該試験では，AFRPロッドの弾性係数がPC鋼材の1/4程度であることを考慮し，PC鋼材に50N/mm²の応力振幅を与えた際に発生する伸び量を基準としてAFRPロッドに作用させる応力振幅を定めた。すなわち，応力振幅は13.25N/mm²（5.1kN）で，300万回繰り返し作用させてAFRPロッドの疲労特性を確認した。その後，応力振幅を整数倍として4倍の53.0N/mm²まで繰り返し回数50万回ごとに漸増させ，合計450万回まで試験を実施した。

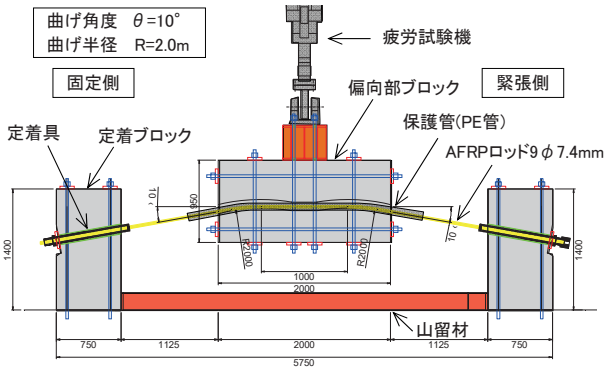

図-2　繰り返し載荷試験の実験概要

3.4　試験結果

応力振幅の繰り返し回数とAFRPロッドの張力変化の測定値，および本開発で定めたリラクセーションの計算式[5]で求めた計算張力を**図-3**に示す。AFRPロッドの張力低下は，300万回まではリラクセーションの計算値と概ね一致し，繰り返し載荷によるAFRPロッドの損傷による張力変動などはみられなかった。300万回以降では，応力振幅を増加させた影響でAFRPロッドのリラクセーションが一時的に進行し張力が低下したが，50万回ごとの応力振幅の繰り返しに対して極端な張力変化はみられなかった。450万回繰り返し後のAFRPロッドの損傷状況を**写真-1**に示す。外ケーブルを構成する9本のうち1本のAFRPロッドにリブのつぶれが確認されたが，母材の損傷はなく，偏向部の応力振幅に対する安全性が確認できた。

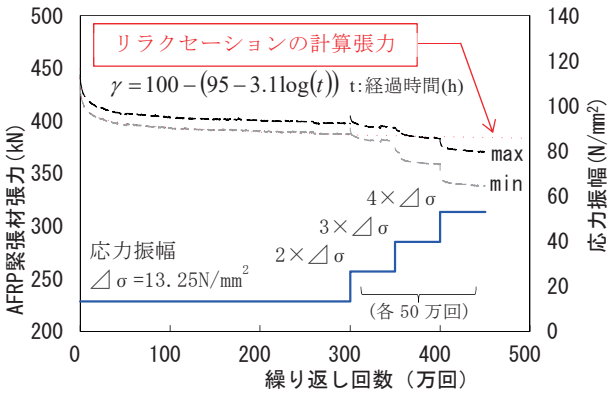

図-3　応力振幅の繰り返しによるAFRP ロッドの張力変化

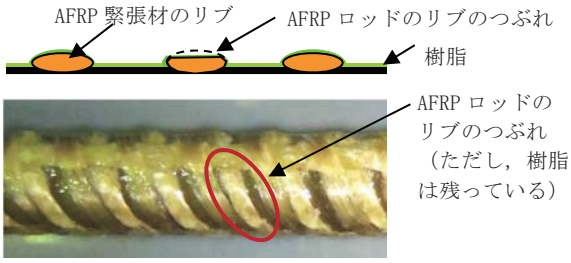

写真-1　AFRP ロッドの損傷状況

4．実用化に向けた実証橋建設

4.1　目的

実証橋は，超高耐久橋梁の実用化に向け，構造全体の安全性や設計施工の妥当性を包括的に検証することを目的として建設した。対象橋梁は，工事用道路の仮桟橋

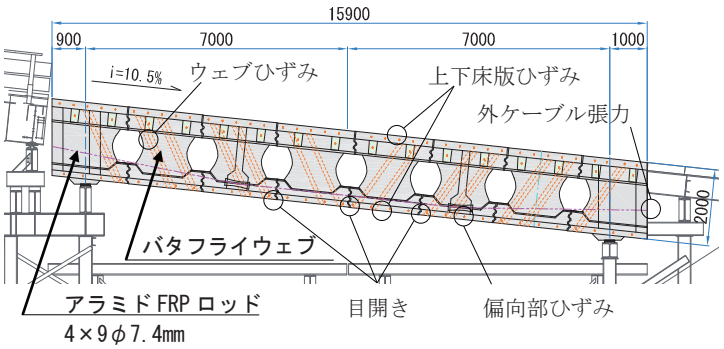

図-4　実証橋の概要図と計測項目

の一部を選定し，橋長15.9m，総幅員6.0m，桁高2.0mの単純桁である。実証橋には道路建設事業に伴いダンプトラックや総重量60t級の大型重機が往来し，その挙動や応答値の変化を2年間モニタリングした。実証橋の概要図および計測項目を**図-4**に示す。

写真-2　バタフライウェブ建込

写真-3　セグメント架設

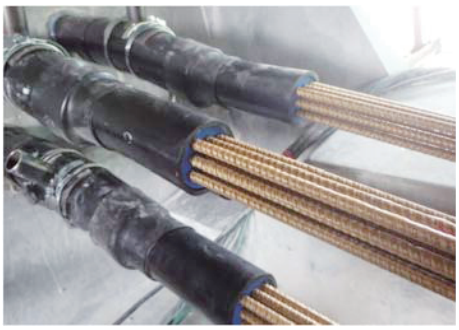

写真-4　横桁近傍の外ケーブル

写真-5　実証橋の外観

4.2　実証橋の建設

セグメントは，バタフライウェブを先行して製作し，上下床版と接合する製作手順とした（**写真-2**）。バタフライウェブと上下床版の接合部にはコンクリート製のせん断キーを設け，AFRPロッドで接合部にプレストレスを導入し一体化させた。架橋位置に輸送したセグメントは，220t吊りのトラッククレーンを用いて吊り上げ，固定式支保工上に架設した（**写真-3**）。各セグメント間は30mmの隙間をあけ、その間隙部は超高強度型無収縮モルタルを充填した。外ケーブルは，製造工場で長さ20mに切断したAFRPロッドを直径1.8mで巻き取り輸送し，現場で展開して9φ7.4mmに成形した。9φ7.4mmの1束あたりの重量は12kg程度と軽量であるため，人力で桁内に挿入し配置した。外ケーブルは，予め設けた端支点横桁内の通過孔へ挿入し，緊張力を導入した後に通過孔へ超速硬性無収縮モルタルを充填し付着定着させた（**写真-4**）。実証橋の外観を**写真-5**に示す。

4.3　実証橋の車両載荷試験

実証橋の供用前後において，設計の妥当性と構造全体系の安全性を検証する目的として，静的および動的載荷試験を実施した。実証橋への荷重載荷は，65tクレーンを使用した。

静的載荷試験における計測は，**図-4**に示すモニタリングの計測項目に支間中央の鉛直変位を追加し，車両後輪が各セグメント継目に載荷されるように段階的に実施した。支間中央の鉛直変位を**図-5**に示す。供用前後の鉛直変位は5%程度の差がみられたが，セグメント間の目開きや主桁部材のひずみ増加の挙動に変化はなかった。供用前後において同程度の変形性能を有していることから，実証橋の耐荷性能が保持されていることが確認できた。

動的載荷試験では，橋面に設けた段差から車両後輪を10cm程度落下させ，強制的に加振した際の応答を加速度計で計測した。支間中央位置で強制加振し

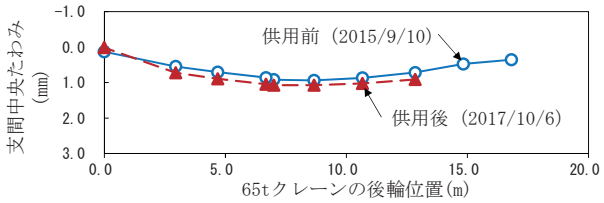

図-5　静的載荷試験の支間中央鉛直変位

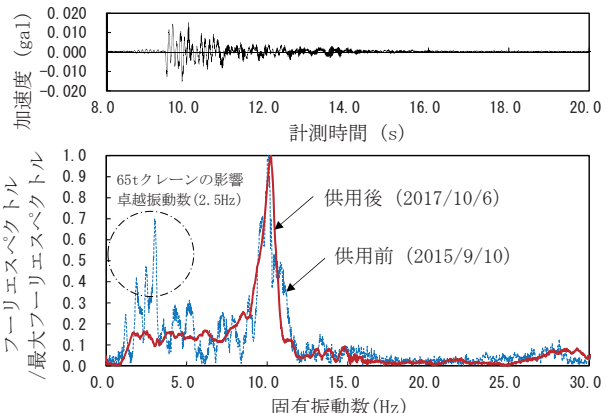

図-6　支間中央落下時の加速度応答とフーリエスペクトル比

た加速度応答とフーリエスペクトル解析で求めた固有振動数を**図-6**に示す。卓越振動数は，供用前10.08Hzに対して供用後10.22Hzで概ね一致しており，同程度の剛性を有していることが確認できた。

4.4　実証橋の常時モニタリングと詳細点検

実証橋の供用期間中，上下床版のひずみ，セグメント間の目開きや外ケーブル張力などを各種計測装置により常時モニタリングした。計測システムの概要を**図-7**に示す。本システムでは，インターネット回線を通じて計測値を閲覧できるほか，閾値を超過すると関係者に警報を発信する仕組みを導入した。さらに，1回/月程度の詳細点検を実施し，目視と打音検査による変状の追跡調査を行った。

常時モニタリングの結果，温度変化の影響は確認されたが，供用前後において有意な差はみられなかった。また詳細点検の結果，有害なひび割れなどの変状は確認されず，大型重機が往来する工事用道路としての厳しい使用条件下においても実証橋の安全性が確認された。

実証橋は2017年10月に工事用道路としての役割を終え，西日本高速道路㈱ならびに三井住友建設㈱施設内にそのセグメントの一部が保管され，今後も曝露試験体として定期的にモニタリングする予定である。

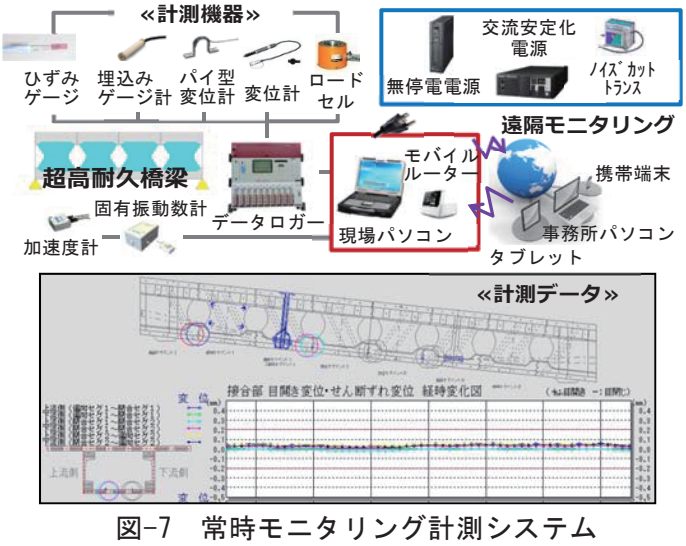

図-7　常時モニタリング計測システム

5．まとめ

本研究および実証橋建設で得られた知見を以下に示す。

1）外ケーブルとしてAFRPロッドを曲げ配置するため，AFRPロッドの曲げ疲労試験を実施した。ケーブルの曲げ角度を10度，曲げ半径を2.0mとして緊張し，応力振幅の繰り返しを450万回実施した。その結果，損傷に伴う張力変化は確認されず，AFRPロッドの曲げ配置に対する安全性が確認できた。

2）構造全体の安全性や設計施工の妥当性を包括的に検証するため，工事用道路の一部に超高耐久橋梁の実証橋を建設し車両載荷試験や常時モニタリングを実施した。大型重機が往来する工事用道路としての厳しい使用条件下においても実証橋の耐荷性能は保持できることが確認できた。

以上の成果より，超高耐久橋梁の設計施工の妥当性および構造全体系の安全性が確認できた。現在，橋梁付属物の仕様選定やメンテナンス技術に関する検討を行っている。今後は，これらの成果をマニュアルとして整備し，世界初となる超高耐久橋梁の高速道路への適用を目指す。

参考文献

1）永元直樹，大城壮司，松井隆行，春日昭夫：将来的な維持管理性の向上を目指した「超高耐久橋梁（Dura-Bridge）」の開発，土木学会第68 回年次学術講演会，CS7-013，2013年9月

2）三加崇，大城壮司，松井隆行，永元直樹：高強度繊維補強コンクリートとAFRP緊張材のPC床版の疲労特性に関する研究，第22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，pp.395-400，2013年10月

3）福田雅人，緒方辰男，　永元直樹，　浅井洋：超高耐久橋梁実証橋の施工と実橋載荷実験，土木学会第71 回年次学術講演会，CS6-017，2016年9月

4）土木学会基準（案）JSCE-E 734-2010，内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線試験法-フレッティング疲労試験-（案）

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，2012年，博士論文，pp.54-59