

塩害環境に長期暴露した CFCC を用いた PC 桁の静的載荷試験

—新宮橋—

技術本部 技術部 メンテナンス技術グループ 青山敏幸
名古屋支店 金沢営業所 小林和弘

概要：飛来塩分による塩害対策として、世界で初めて炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Composite Cable（CFCC））を緊張材として使用したプレテンション方式単純床版橋の新宮橋（1988年竣工）にて、実橋と同寸法の PC 桁を約 30 年間暴露してきた。本研究では、暴露した PC 桁の静的曲げ載荷試験、伝達長試験および含有塩分量試験を実施した。その結果、耐荷力としては設計値を上回っており、構造的に問題ないこと、伝達長も 65φ よりも小さいことを確認した。

Key Words：CFCC, PC 桁, 塩害, 耐荷力, 耐久性

1. はじめに

能登半島の日本海に面した外海側の沿岸部では、冬期における北西からの季節風に乗った飛来塩分の影響による塩害が問題になっていたことから、石川県の新宮橋において塩害劣化した鉄筋コンクリート床版橋を、世界で初めて炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Composite Cable, 以下、CFCC）を緊張材として用いたプレテンション方式単純床版橋に 1988 年に架け替えた。この新宮橋では、CFCC を緊張材として用いた PC 桁の終局時の破壊挙動や破壊荷重を調べるために、同橋の施工時（1988 年）に実物と同じ主桁を作製して破壊試験¹⁾や、使用時の主桁のたわみや CFCC のひずみ挙動を把握するために、大型ダンプ 2 台を用いた載荷試験²⁾が行われ、使用性が検討された。さらに、対象橋梁では、長期的な品質を確認することを目的として作製された、実寸法の試験桁 2 本（山側、海側）を橋梁本体と横締めして一体構造として暴露しており、施工後 6 年経過した時（1994 年）に、そのうちの海側の試験桁に対して破壊試験を行い、施工時との破壊荷重の比較や CFCC 本体の耐久性を確認してきた³⁾。

本研究では、新宮橋において、約 30 年間、実際の塩害環境下で長期暴露してきた山側の PC 桁を取り出した後に実施した静的曲げ載荷試験、曲げ載荷試験後の伝達長試験およびコンクリート中の含有塩分量試験の結果について報告する。

2. 新宮橋の概要

新宮橋の一般図および断面図を図-1 に、主桁の断面図を図-2 にそれぞれ示す。

本橋は、石川県羽咋郡志賀町鹿頭に架設された橋長 6.1m、有効幅員は 7.0m のプレテンション方式単純床版橋である。当初は鉄筋コンクリート床版橋であったが、架設場所の厳しい塩害環境により、鋼材が著しく腐食し、コンクリートの剥落が見られたことから、1988 年 10 月に世界で初めて CFCC を緊張材として用い



青山敏幸



小林和弘

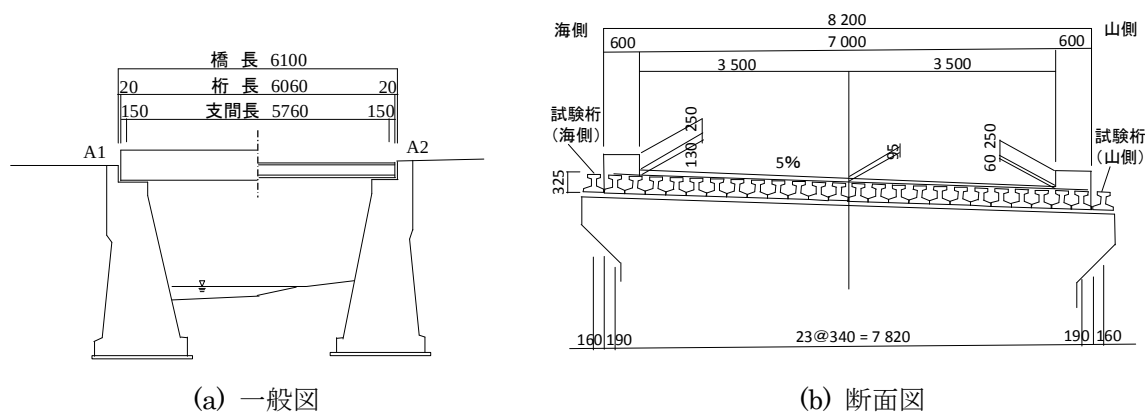


図-1 新宮橋の概要図

た橋梁に架け替えられた。主桁のスターラップ鉄筋には塩害対策として、D6のエポキシ塗装鉄筋を、緊張材としてφ12.5mm 7本より線のCFCCを8本用いてプレストレスを導入している。CFCCの表面はラッピング処理され、線条体の表面を粗面状としてコンクリートとの付着効果を高めている。

3. 実験概要

3.1 静的曲げ載荷試験

静的曲げ載荷試験は、施工時、施工から6年経過時と同様な方法で実施した。載荷方法を図-3に、測点配置を図-4にそれぞれ示す。試験は、支間5.76mに対して、等曲げ区間1.0mの2点載荷とした。測定項目は、支点変位、主桁変位、埋込みひずみ、コンクリート表面ひずみとした。

載荷方法は、最初に35.4kN（設計荷重35.3kN）まで載荷し、一旦0kNに戻した後、ひび割れ荷重まで載荷し、再度0kNに戻した後に、最終段階として破壊まで載荷した。

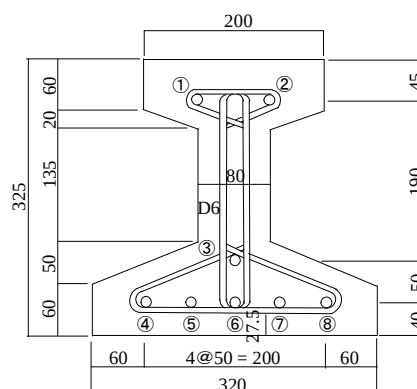


図-2 主桁断面図

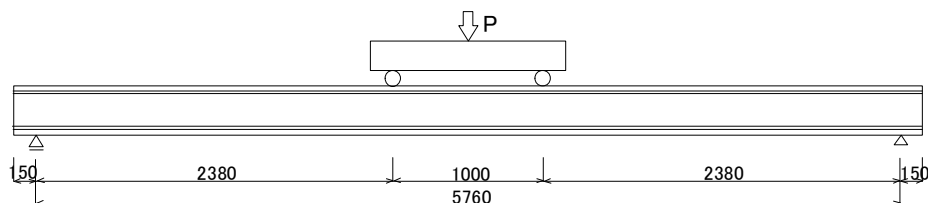


図-3 曲げ載荷試験の載荷方法

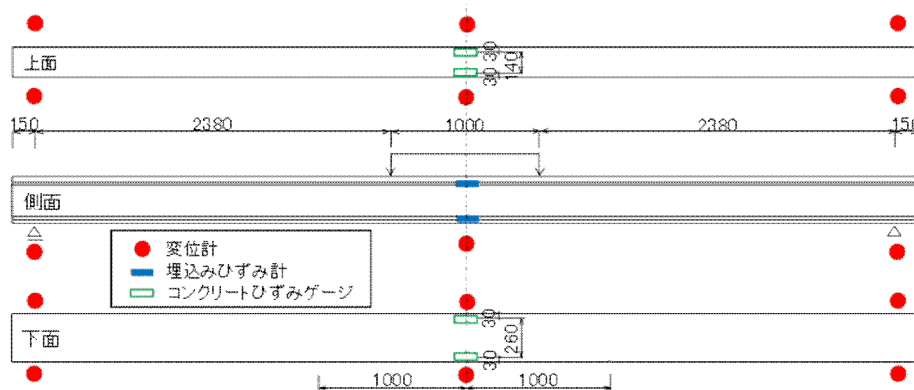


図-4 変位計およびひずみゲージ貼付位置図

3.2 伝達長試験

長期間の供用のなかで、CFCC とコンクリートとの付着力が低下し、緊張力の伝達長に変化が生じていないかを調べるために、伝達長試験を行った。本試験は、曲げ載荷試験後に主桁を支間中央で切断し、その片側半分を使用した。試験は、図-5 に示すように中立軸を中心として、桁端部から 50mm 間隔の位置にひずみゲージ (WFLM-60-11) を千鳥配置にて貼付した。次に、緊張材が配置されていない主桁ウェブのみを残して、同図の青線で示したウェブと下フランジ境界およびウェブと上フランジ境界をウォールソーで切断し、切断前後のウェブコンクリートのひずみ変化を測定することで伝達長を把握した。

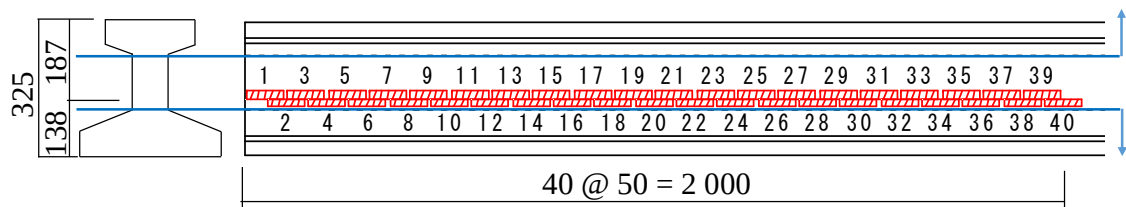


図-5 伝達長試験におけるひずみゲージ貼付位置図

3.3 含有塩分量試験

曲げ載荷試験後に桁のウェブ側面および下面位置にてコア削孔を行い、含有塩分量を測定した。コアは桁側面3箇所、桁下面1箇所の計4か所とした。

ウェブ側面については、桁端部から 1080mm, 1150mm, 1280mm の位置で約 $\phi 40\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ の貫通コアを3本採取し、10mm ごとの厚さにスライスした後、各スライスの含有塩分量を測定した。桁下面については、桁端部から 920mm の位置でコンクリート表面からスターラップ位置までの $L=$ 約 30mm のコアを採取した。採取したコアは 10mm 幅でスライスし、各々のスライス片に含まれる全塩化物イオン濃度を JIS A 1154 に準じて測定した。そして、塩化物イオン濃度の測定結果から各深さの全塩化物イオン濃度を Fick の拡散方程式の近似解を用いて、塩化物イオンの見かけの拡散係数 (D_c) と表面塩化物イオン濃度 (C_0) を推定した。

4. 実験結果と考察

4.1 静的曲げ載荷試験

静的曲げ載荷試験の荷重－変位の関係を図-6 に、載荷試験時のひび割れ図を図-7 にそれぞれ示す。また、今回の結果に加えて、ひび割れ発生荷重および破壊荷重の過去の実験値および設計値⁴⁾の結果を表-1 に、コンクリート圧壊後の PC 桁上縁部の状況を写真-1 に示す。

本載荷試験による破壊形態は、曲げひび割れ進展後、上縁コンクリートの圧壊であった。CFCC には降伏現象がないことから、CFCC が破断する前に上縁コンクリートが圧壊する破壊形態となるように設計されたものであり、設計通りの破壊であった。これは、施工時および施工後6年時の試験でも同じであった。

図-6 に示す荷重－変位の関係から、設計荷重およびひび割れ荷重まで載荷して荷重を除荷してもほ

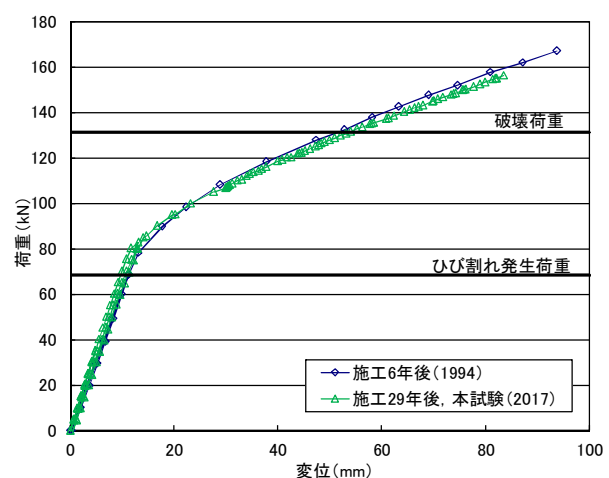


図-6 荷重－変位の関係

とんど残留変位は確認できなかった。また、本載荷試験と施工後6年時の結果は、ほぼ重なった結果であったが、施工後6年時に得られた結果に比べて破壊荷重は約6%低い値を示した。しかし、表-1に示すように施工時や設計値を上回っており、耐荷力としては問題ないと判断した。

また、写真-1に示す載荷試験後のCFCCの状況から、コンクリートの圧壊によって上縁側のCFCCがねじれて破断していることがわかった。下縁側のCFCCにおいては、引張によるCFCCの破断は確認できなかった。

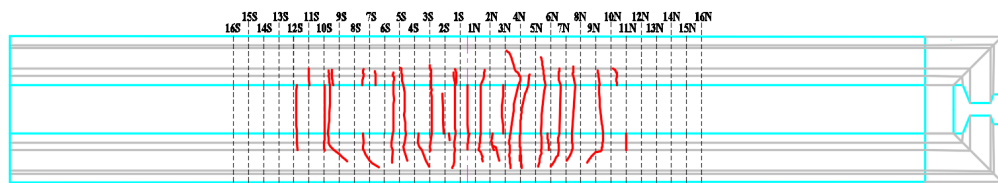


図-7 ひび割れ図（下面と側面の展開図、破線は100mm 間隔）

表-1 ひび割れ発生荷重と破壊荷重の比較

	ひび割れ 荷重 (kN)	破壊 荷重 (kN)
施工時(1988)	70.6	132.3
6年後(1994)	98.3	167.1
29年後(2017)	82.8	157.0
設計値	68.3	131.2



写真-1 圧壊時の PC 桁上縁部の状況

4.2 伝達長試験

下フランジ側を切断完了した時、上、下フランジを切断完了した時および上、下フランジを切断完了後16時間経過した時のそれぞれのひずみの変化を図-8に示す。道路橋示方書による伝達長は65φで定義されており、本橋の場合、812.5mmになる。それに対して、本試験の結果ではコンクリートひずみの値がほぼ一定となった400~500mmが伝達長と考えられ、65φよりも小さな値となっていた。施工後6年時に行った試験でも同じ結果を得ており、CFCCとコンクリートとの伝達長が変化していないことが明らかとなった。

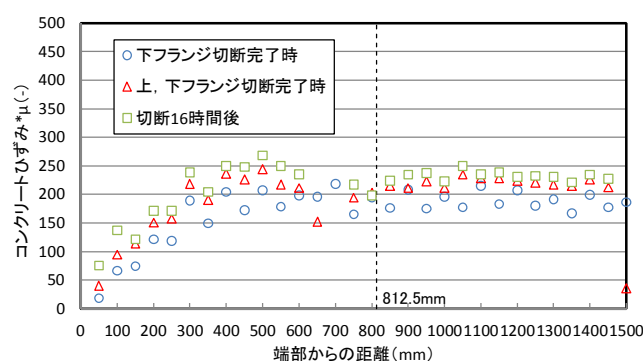


図-8 ウェブコンクリートにおける伝達長の変化

4.3 含有塩分量試験

主桁側面の塩化物イオンの測定結果を図-9に、主桁底面の塩化物イオンの測定結果を図-10にそれぞれ示す。また、比較として2012年に本試験桁の隣に位置する本体の山側桁のA1側とA2側の下面において、ドリル法にて調査した結果を比較として付記した。

下フランジ下面と桁のウェブ側面を比較すると、下面の方がウェブ側面に比べての塩化物イオン濃度が高い。これは、ウェブ側面は雨水の影響でコンクリート表面の塩分が洗い流されたことによるものと考えられる。ウェブ側面の結果をみると、山側からの塩分の浸透が顕著であり、間詰側からの塩分の浸透はほとんど無いことがわかった。また、表面塩化物イオン濃度の平均値は3.58kg/m³、塩化物イオンの見かけの拡散

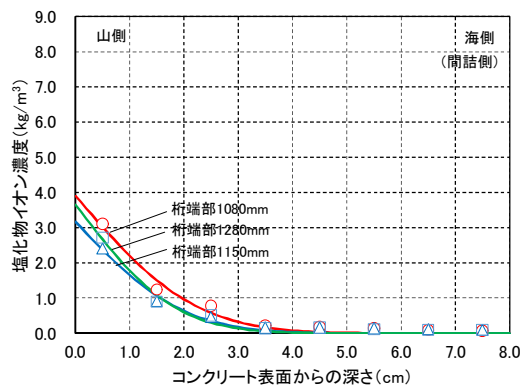


図-9 主桁側面の塩化物イオン濃度

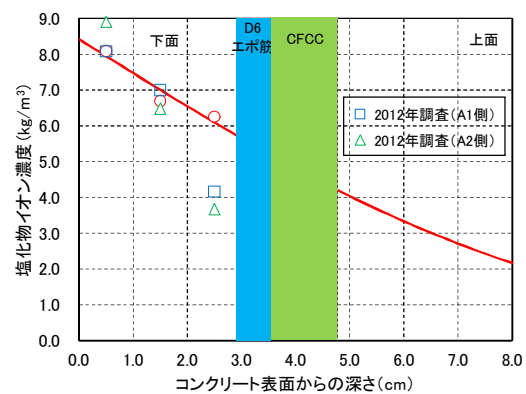


図-10 主桁下面の塩化物イオン濃度

係数の平均値は $0.04\text{cm}^2/\text{年}$ であった。

一方、下フランジ下面の結果をみると、表面塩化物イオン濃度は 8.42kg/m^3 、塩化物イオンの見かけの拡散係数は $0.83\text{cm}^2/\text{年}$ であった。また、2012年に測定した塩化物イオン濃度（ドリル法）と比較すると、コンクリート表面の $0\sim 2.0\text{cm}$ 程度の塩化物イオン濃度の増加は見られないが、表面から 3.0cm の位置における塩化物イオン濃度が増加していることが確認され、スターラップ鉄筋位置（かぶり 27.5mm ）では 6.0kg/m^3 程度の塩化物イオン濃度と推定される。これは、鋼材の腐食発生限界 1.2kg/m^3 を大きく超えており、一般的な鋼材を用いていれば腐食していた可能性が高いものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、約30年間、実際の塩害環境下で長期暴露してきたCFCCを緊張材として用いたPC桁を対象として、静的曲げ載荷試験、伝達長試験、含有塩分量試験を実施した。以下に結論を示す。

- (1) 載荷試験の荷重－変位の関係から、本試験と施工後6年時の結果はほぼ同等の結果であったが、施工後6年時の破壊荷重に比べて約6%低い値を示した。しかし、施工時や設計値を上回っており、耐荷力としては問題ないと判断した。
- (2) 伝達長試験の結果、PC桁の伝達長は 500mm となっており、 $65\phi(812.5\text{mm})$ よりも小さい値となっていた。また施工後6年時に実施した試験でも同様な結果となっており、CFCCとコンクリートの伝達長に変化は認められなかった。
- (3) 主桁下フランジ下面から採取したコアの含有塩分量を測定した結果、スターラップ鉄筋位置（かぶり 27.5mm ）では約 6kg/m^3 の塩化物イオン濃度と推定された。

謝辞

本研究は、戦略的イノベーション創造プログラム（研究開発課題：コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造的評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発、研究責任者 鳥居和之）の研究開発の一環として実施したものである。関係各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) 山下武秋, 木内武夫, 犬飼晴雄, 岩崎達彦: 新素材によるPC橋—新宮橋の建設—, プレストレストコンクリート, Vol.31, No.2, pp.71-78, 1989.
- 2) 二口俊郎, 駒田秀一, 木内武夫, 松本一昭: 新素材PC橋の実橋載荷試験, プレストレストコンクリート技術協会 第2回シンポジウム論文集, pp.307-310, 1991.
- 3) 神田博行, 木内武夫, 松本一昭: 新素材PC橋の実橋試験桁の載荷試験報告, プレストレストコンクリート技術協会 第5回シンポジウム論文集, pp.529-532, 1995.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋 編, 2002.