

論文 各種繊維シート補強工法を適用した PC 梁の使用性能に関する実験的検討

竹上 浩史*1・稲熊 唯史*2・荒鹿 忠義*3・関 雅樹*4

要旨： 鉄道橋は荷重レベルの低い使用状態においても、たわみ量など使用性能に厳しい要求性能が求められる。しかし既往の研究の多くは、終局耐力の改善を目的としており、使用性能に着目した補強効果の検討例は少ない。そこで本論文では、予防保全として営業に供している鉄道 PC 橋にも適用可能な、アラミドおよび炭素繊維シートを接着した補強工法、および樹脂で固めた炭素繊維プレートに緊張力を与え定着する補強工法（アウトプレート工法）について、特に曲げ剛性などの使用性能の補強効果に着目して実験的に検討した。その結果、荷重レベルの低い使用状態においても、曲げ剛性など使用性能の補強効果が確認できた。

キーワード： PC, 補強工法, 使用性能, 予防保全, 炭素繊維シート, アラミド繊維シート, アウトプレート

1. はじめに

一般的に PC 構造は RC 構造と比較し、疲労破壊に対して強く、ひび割れを許容していないためたわみが小さい。そのため、これらの特性が求められる鉄道上部構造には、昭和 30 年代初期に国内で本格的に PC 橋が建設されて以来、現在まで PC 構造が数多く適用されてきた。

鉄道橋の桁の大きな特徴として、使用状態で厳しい要求性能があることが挙げられる。特に列車が高速で走行する新幹線は、桁のたわみが列車走行の安全性や乗り心地に大きく影響するため、鉄道構造物設計標準（変位制限）において厳しい制限値が設定されている¹⁾。そのため、終局耐力の確保よりも曲げ剛性（桁のたわみ量）の確保の方が設計上クリティカルとなる場合が多い。

一般に補強というと終局耐力の向上を意味し、これらを目的とした既往の研究や補強例は数多く存在する。しかし鉄道橋を補強の対象として考えると、曲げ剛性の低下の抑制といった使用性能の観点から補強方法を検討することが重要である。特に PC 桁においては、主ケーブルが破断しプレストレスが減少することで、ひび割れ発生モーメント（ M_{cr} ）が小さくなり、ひび割れが発生することで曲げ剛性が低下する可能性がある。

そこで本論文では、鉄道構造物としての PC 桁を対象とし、使用性能に着目した補強方法を検討するため、要素試験により基本的な特性の把握を行った。

2. 補強方法の検討

一般にコンクリート橋の補強工法は、道路橋も含め、鋼板接着工法や連続繊維シート接着工法、外ケーブル工

法が数多く採用されている。この中でも外ケーブル工法は、既存構造物にプレストレスを導入し、直接的に発生応力を改善するという観点から、既存構造物の耐力の向上に有効な工法である。特に道路橋では、活荷重の増加に対応するため、曲げモーメントが最大となるスパン中央付近のプレストレスを増加させる目的でこの工法が多く採用されている。

しかし、外ケーブル工法を耐力の回復を目的とした鉄道橋への適用を考えた場合、2つの問題点がある。

一つは施工性の問題点である。外ケーブル工法ではケーブル定着部と偏向部を主桁躯体に増設する必要があるため、横断方向に主桁を削孔して、PC 鋼棒により定着部を固定する構造が一般的である²⁾。図-1 はスパン 20m のポストテンション式鉄道 PC 桁において、11 本ある主ケーブルのうち 3 本が破断したと想定し、外ケーブル工法による補強方法を検討したものである。この図から、主ケーブル 3 本分に相当するプレストレスを外ケーブル工法で導入するには、主ケーブルが錯綜する主桁端部に、定着部を固定するための多くの孔を削孔する必要があることが分かる。また定着部の設置スペースや、外ケーブル緊張作業に必要とされるジャッキ挿入および作業スペースの確保からも、施工が困難なことが予想される。

もう一つは、緊張力の導入量の問題点である。主ケーブル破断により消失したプレストレスの補強量については、補強目標値を設定し、補強前の有効プレストレス量を把握する必要がある。

一般に PC 桁では設計荷重（使用限界状態）以下では、設計上コンクリートに発生する引張応力を許容してい

*1 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部研究員 工修（正会員）

*2 ジェイアール東海コンサルタンツ（株） 調査事業部開発技術部課長代理 博（工）（正会員）

*3 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部軌道・構造物チームマネージャー（正会員）

*4 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部部長 博（工）（正会員）

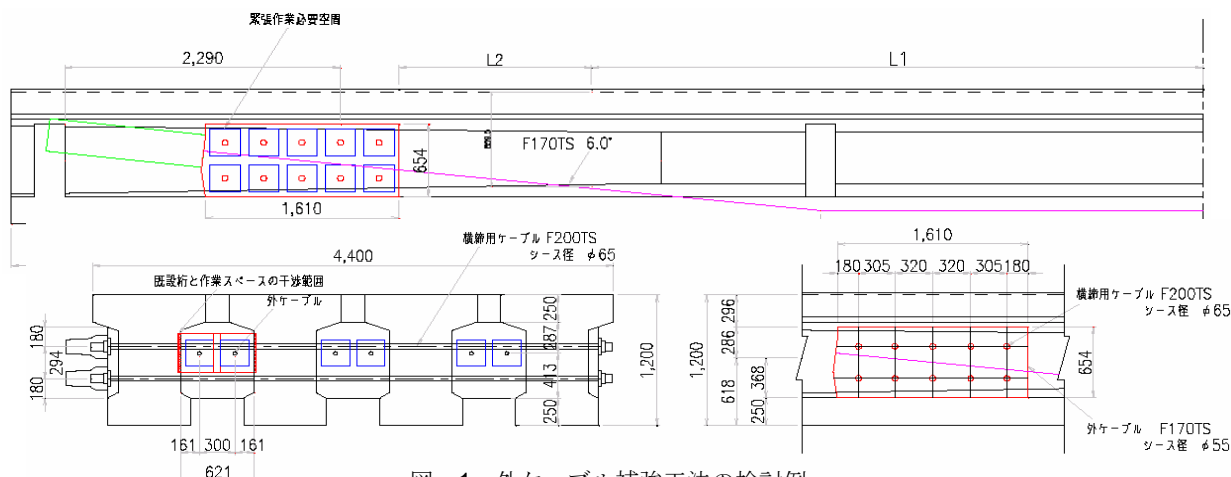


図-1 外ケーブル補強工法の検討例

ないため、全断面有効の状態では弾性体の挙動を示す。一方曲げひび割れが発生した状態は、コンクリートの引張強度を超えた応力が発生していることを示していることから、複数の主ケーブルの破断が進展し、耐力の低下が進行している状態だと判断できる。したがって、補強工法の詳細設計にあたっては、有効プレストレス量を直接的に把握するか、主ケーブル破断の有無を確認する手法が必要である。

しかし、桁の中に埋め込まれている主ケーブルの状態や、シース管内のグラウトの充填状態を確認することは一般的に困難である。これらの検査を行うため、これまで多くの非破壊検査手法が提案されているが、精度や適用範囲などに問題が残るため、実用的に使用されるまでには至っていない。

仮に破断位置が特定されたとしても、主ケーブルはグラウトにより躯体コンクリートとの付着があることから、ケーブル破断によりプレストレスが損失するのは破断部から付着破壊した範囲であり、破断位置から比較的遠方で付着が健全な範囲はプレストレスの減少量が少ないと考えられる。そのため、主ケーブルの破断によるプレストレスの減少量やプレストレスロス区間を適切に求めることは困難である。

また、予防保全の観点からプレストレスを付加的に与えることを仮定しても、プレストレス導入によって発生する桁中央上縁の引張応力や端部の圧縮応力度の制限から、外ケーブル導入量に上限があり、むやみに補強するとオーバープレストレスの問題が発生する。

このように、外ケーブル工法による補強は高い補強性能を有するがゆえに、定着部の施工の煩雑さや、緊張材の装置が大型のため適用条件の制約が厳しいなど、課題も残るといえる。また主ケーブルの破断は、グラウトの充填不良が生じやすい桁端部の主ケーブルで発生しやすいと考えられるが、桁端部の補強を外ケーブル工法で行うのは不可能であることも留意すべきである。

一方、連続繊維シートによる補強は施工性に優れているものの、今まで PC 桁への適用を検討した研究例は少なく、またひび割れの発生を許していない PC 桁に対して補強効果に疑問が残ることも確かである。

そこで本論文では、施工性に有利なアラミド繊維および炭素繊維の 2 種類の繊維シート接着による補強工法、および樹脂で固めた炭素繊維プレートに緊張力を与え小型のアンカーにより両端を定着する補強工法³⁾(以下、アウトプレート工法)について検討することとした。アウトプレート工法は小容量ながら構造物に追加プレストレスを導入することが可能なため、外ケーブル工法と同様な補強効果が発揮され、同時に施工性の問題も解消できると考えられる。

またこれらの工法は、施工による既存桁への損傷が少なく、補強によるオーバープレストレスの問題もないため、予防保全として損傷が発現していない桁へも施工が可能である。主ケーブルの検査手法が実用化されていない現在の状況や、長期的な構造物維持管理の適正化という観点からも、予防保全として適用可能な補強工法を検討することは大きな意義があると考えている。

部材下面に補強材を接着した構造では、ひび割れ発生以降に補強材の剥離を伴うことから、ひび割れ幅や曲げ剛性の評価を行うには、載荷試験による検証が有効だと考えられる。そこで、PC 梁供試体にアラミドおよび炭素繊維シートの接着、およびアウトプレート工法による補強をし、曲げ載荷試験によりその補強効果を検証した。

3. 載荷試験

3.1 供試体仕様

供試体の形状寸法、使用材料、配筋および PC 鋼材配置等は、東海道新幹線に使用されているスパン 20m の桁を参考として約 1/4 に縮小したものを想定し、さらに載荷装置の容量等を参考にして決定した。ただし、以下の点が実橋を 1/4 に縮小した物と異なる。

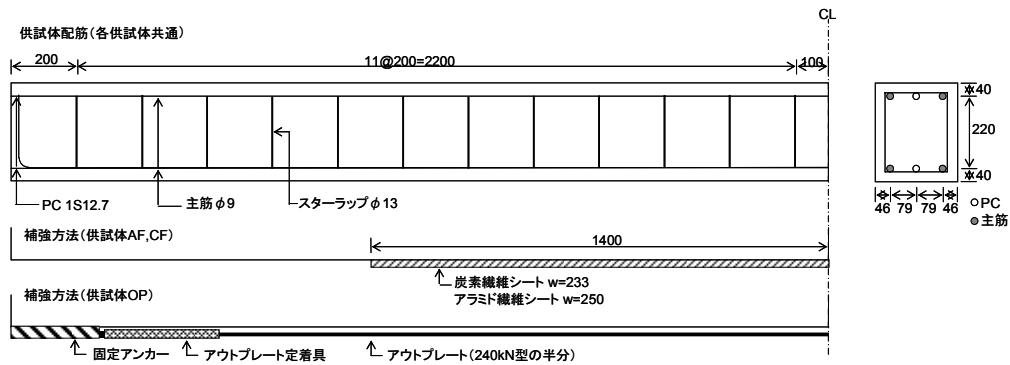


図-2 供試体の概要

表-1 供試体の仕様

種類	補強仕様
N	(補強なし)
AF	アラミド繊維シート接着補強 W=225mm 目付量 280g/m ² 引張強度 2060 N/mm ² 弾性係数 1.18×10 ⁵ N/mm ² 設計厚さ 0.193 mm
CF	炭素繊維シート接着補強 W=210mm 目付量 300g/m ² 引張強度 3400 N/mm ² 弾性係数 2.45×10 ⁵ N/mm ² 設計厚さ 0.167 mm
OP	アウトプレート補強 240kN 型アウトプレートの 1/2 目付量を使用 公称幅 50mm 公称厚さ 2.0mm 弾性係数 1.20×10 ⁵ N/mm ²

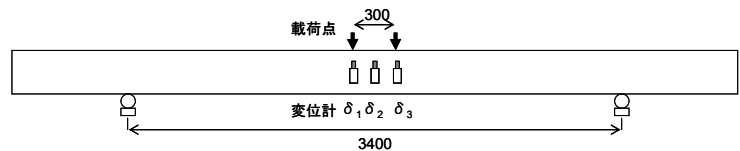


図-3 荷重試験方法

より接着し、さらに中間 2 箇所を定着体により固定化することで、炭素繊維シートと供試体を一体化させた。コンクリートは東海道新幹線建設時の配合を考慮し、呼び強度 40N/mm²、スランプ 8cm、最大骨材径 20mm の早強コンクリートとした。なお圧縮強度の実測値は 38.3N/mm²であった。

3.2 荷重試験方法および測定項目

荷重試験方法は図-3 に示すとおり、支点間距離 3,400mm、曲げスパン 300mm、せん断スパン有効高さ比 (a/d) 5.96 の対称 2 点集中荷重とした。計測項目は荷重荷重、供試体のたわみ変位、支点沈下量、および PC 鋼材、繊維シート、アウトプレートのひずみとした。

3.3 試験結果

(1) 曲げモーメントー曲率関係

各供試体の曲げモーメントと曲率の関係を図-4 に示す。なお、曲率は下式により、モーメントスパン内の 3 点の変位量から求めた平均曲率を用いている。

$$\phi = -\frac{4}{l^2}(2\delta_2 - \delta_1 - \delta_3) \quad (1)$$

ϕ : 曲率(1/mm)

l : 曲率を算出する範囲 (モーメントスパン) (mm)

δ_2 : 曲率を算出する範囲の中央の変位量(mm)

δ_1, δ_3 : 曲率を算出する範囲の両端の変位量(mm)

各供試体のひび割れ発生モーメント (Mcr)、降伏モーメント (My) および破壊モーメント (Mu) をまとめたものを図示したものを図-5 に示す。なお、ひび割れ発生モーメントは、供試体下面の π 型変位計から判断した。また降伏モーメントは、基準供試体の PC 鋼線ーひずみの関係のグラフの変曲点から降伏ひずみを求め (2,050 μ),

- ・補強後の供試体の曲げ耐力が高くなり過ぎないように、また補強効果が現れやすいように、PC 鋼材は 1S12.7 とし、プレテンション方式でプレストレスト導入した。
- ・オーバープレストレスを防ぐために圧縮側にも PC 鋼材を配置した。
- ・実橋は I 桁であるが、ひび割れ発生後は引張側のコンクリートは無視できることから、製作の簡便性を考慮して矩形とした。
- ・今回の試験は曲げ性状を観察することを目的としたため、補強供試体においてせん断破壊が先行しないように、せん断補強鉄筋比を約 0.53% と大きくした。

荷重試験に用いた供試体の概要を図-2 に、仕様を表-1 に示す。なお、PC 鋼線 1 本あたりの有効緊張力 σ_{pe} は 1,000 N/mm²、アウトプレートの有効緊張力 σ_{ef} は 1,425 N/mm² を目標とし、各材料に緊張力を導入した。また繊維シート補強では、供試体下面に接着する幅を調整して、炭素繊維及びアラミド繊維の目付量を同量とした。アウトプレート補強においては、設計上は両端に設置したアンカーのみで定着が確保できるが、実際の施工事例に従い炭素繊維プレートと供試体下面を接着剤に

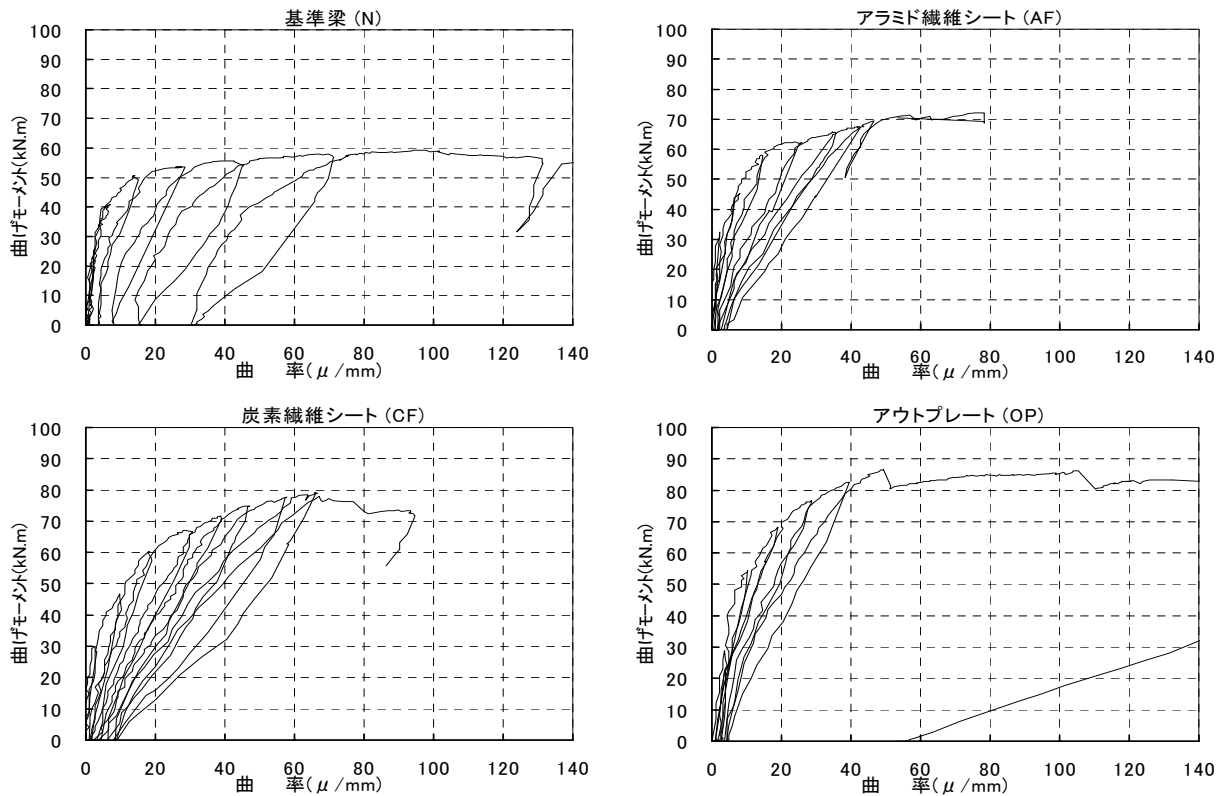


図-4 曲げモーメント-曲率関係

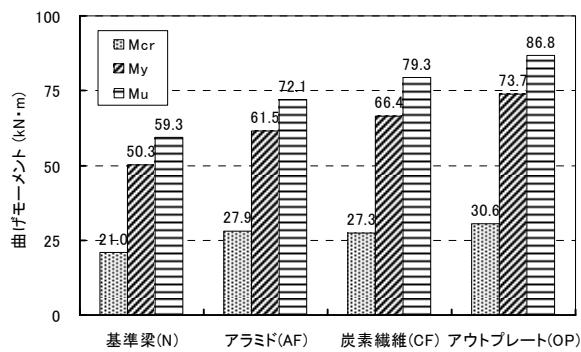


図-5 耐荷性能の比較

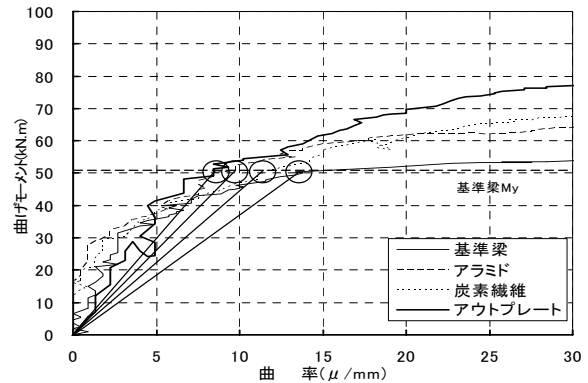


図-6 曲げ剛性比較

他の供試体においても PC 鋼材がこのひずみ値に達したときのモーメントとした。なお破壊形態は、アラミドおよび炭素繊維シート補強供試体はシート剥離後の曲げ破壊、アウトプレート補強供試体はアウトプレートが部分的に数箇所剥離した後の曲げ破壊であった。

基準供試体に対し、ひび割れ発生モーメント (M_{cr}) はシート補強で 22~34%、アウトプレート補強では 46% 向上していることから、使用状態における補強効果が確認できた。また降伏モーメント (M_y) も、それぞれ基準供試体に対して増加しており、補強により PC の主ケーブル破断が生じた際も、急激な剛性低下の開始が遅れると思われる。また、破壊モーメント (M_u) はシート補強で 22~34%、アウトプレート補強では 46% 増加しており、終局耐力についても補強効果が認められた。特にシート

補強では、引張弾性係数が高い炭素繊維シートの方がアラミドシートに比べて補強効果が高い結果となった。

(2) 曲げ剛性

前述したとおり、鉄道構造物として要求される使用性能の中で最も厳しいのが曲げ剛性である。そこで補強による曲げ剛性の変化を確認するため、曲率と曲げモーメントの関係のうち、荷重初期の段階の部分拡大したものを図-6 に示す。なおこの図においては、除荷過程を除き、処女荷重のみ記載している。

図中に示した基準供試体の降伏モーメント ($M_y(N)=50.3kN.m$) において、各々の供試体の曲率を基準供試体と比較することで曲げ剛性を評価した。いずれの供試体においても、基準供試体と比較して曲げ剛性 (EI) が増加しており、アラミド繊維シート補強で約 1.7

倍、炭素繊維シート補強で約 1.5 倍、アウトプレート補強で約 2.0 倍の曲げ剛性の増加となった。この結果から、各補強工法を適用することで曲げ剛性が向上することが分かった。

(3) ひび割れ幅

一般に通常の PC 桁は、設計荷重以下ではコンクリートに発生する引張応力を許容していないため、ひび割れが発生することはない。しかし予防保全として補強工法を施工した場合、将来的に主ケーブルの破断が生じたときには、PC 桁にひび割れが発生した状態で使用することを許容することとなる。ひび割れ幅の増大は曲げ剛性の低下に大きく影響することから、各補強工法を適用した際のひび割れ幅について検討を行った。ここでは π 型変位計で測定した変位量をひび割れ幅としているため、わずかではあるが π 型変位計の計測区間 (100mm) の弾性変形量も含んでいる。曲げモーメントとひび割れ幅の関係を図-7 に示す。

ひび割れ幅を同じモーメントで比較すると、いずれの補強供試体においても、基準供試体と比較して減少していることが分かる。たとえば、基準供試体においてひび割れ幅 0.2mm におけるモーメント (36kN.m) において、アラミドおよび炭素繊維シート補強では 0.07mm、アウトプレート補強においては 0.04mm となり、ひび割れ幅の抑制効果が認められた。

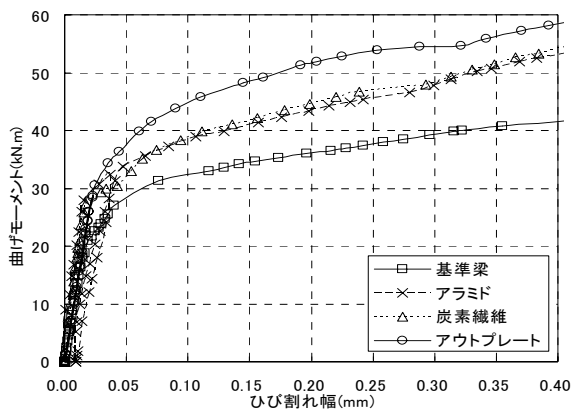


図-7 曲げモーメントーひび割れ幅関係

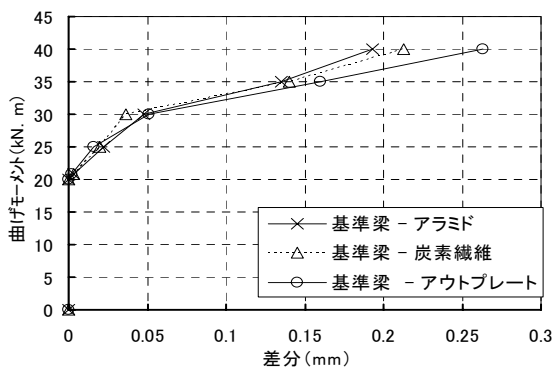


図-8 曲げモーメントー基準梁とのひび割れ幅差分関係

図-8 は各補強工法と基準供試体のひび割れの差分と曲げモーメントの関係を図に表したものである。

アラミドおよび炭素繊維シート補強は、ひび割れ発生モーメント以降、顕著に補強効果が現れていることが分かる。また、アウトプレート補強は追加プレストレスを導入しているため、補強効果がアラミド、炭素繊維シートより大きいことを期待したが、結果として降伏モーメント以下の使用状態においては、大きな差異はみられなかった。

(4) 補強材のひずみ分布

繊維シートおよびアウトプレートの補強効果と剥離状態を詳しく調べるため、各曲率において補強材に発生したひずみ分布を図-9 に示す。このグラフはスパン中央を X 軸の原点として、X 軸方向に供試体軸方向をあらわしている。なおアウトプレートのひずみは戴荷開始時点を 0 としており、プレストレスによるひずみは考慮されていない。この結果より、いずれの補強方法において

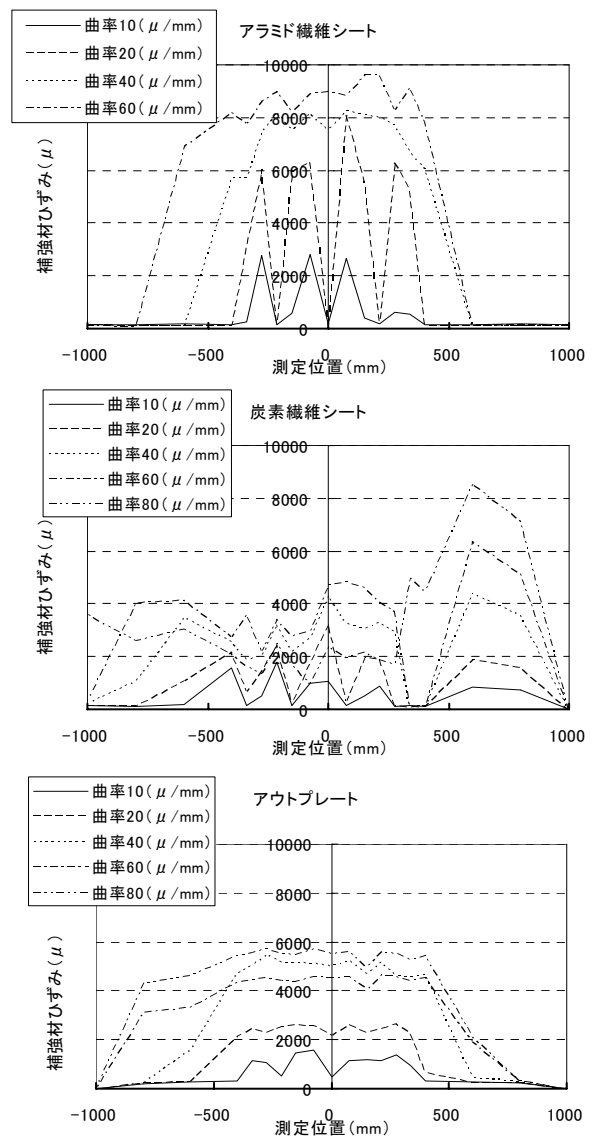


図-9 補強材のひずみ分布

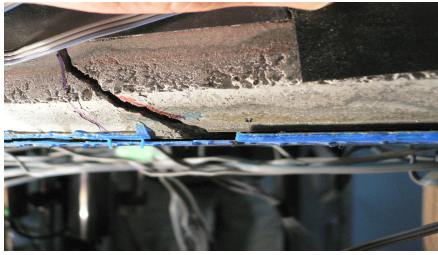


図-10 終局時における炭素繊維シートの剥離状態

も、曲率の増加によりひずみ勾配区間が供試体軸方向に移動することから、スパン中央部から両支点方向へ剥離が進展する状況が表れている。図-10に炭素繊維シート補強供試体の終局時の繊維シートの剥離状態を示す。

アラミド繊維シートの最大ひずみは約9,900 μ 、炭素繊維シートは約5,000 μ であり、これに弾性係数を考慮して繊維シートの引張応力を求めると、アラミド繊維シートで約1,366N/mm²、炭素繊維シートで約1,285N/mm²と、それぞれの引張強度に対して約30~40%程度の応力であると計算される。この結果より、繊維シートの引張特性が十分に発揮されておらず、接着界面の性能により補強効果の終局耐力が決定されていることが分かる。一方、使用状態におけるシートの状態を考えると、鉄筋降伏まで至っていない曲率20 μ /mm以下では部分的な剥離しか発生しておらず、繊維シートが供試体と一体となっているため、曲げ剛性の向上に寄与していると考えられる。このことから、使用性能の向上のみを考えるのであれば、繊維シート量を増やすことにより、さらに曲げ剛性を向上できる可能性があると考えられる。

また、炭素繊維シートはアラミド繊維シートと比較し約2倍の弾性係数があるため、同一モーメントにおける両者の補強供試体の曲げ剛性には差があると予想していたが、前述したとおり曲げ剛性はほぼ同等であった。この理由は、アラミド繊維シートと炭素繊維シートの付着特性の違いだと考えられる。一般に、ひび割れ部の補強シートひずみとひび割れ幅の間には下式が成立する。

$$w_c = l \times \varepsilon \quad (2)$$

w_c : ひび割れ幅

l : 補強シートの付着剥離長

ε : 補強シートのひずみ

ここで試験結果をみると、基準供試体の降伏モーメントにおけるひび割れ開口幅は、両者とも0.3mmと同等であったが、ひび割れ部分のアラミド繊維シートのひずみは2,800 μ 、炭素繊維シートのひずみは2,000 μ であった。この値を上式に適用すると、炭素繊維シートの方がひび割れ近傍の補強シートの付着剥離長が長いと推定される。

この結果より、比較的ひび割れ幅が小さい使用状態においても、補強材の弾性係数のみならず、補強材の付着特性も曲げ剛性に影響を与えるといえる。またこのことから、弾性係数が大きい補強材を用いても、付着特性とのバランスから桁の曲げ剛性が単純には増加しない場合もあると考えられる。

アウトプレートの最大ひずみは約5,500 μ であり、弾性係数およびプレストレスを考慮して引張張力を求めると、約2,400N/mm²となる。この値は引張強度の約78%であり、材料特性を十分に活かしていることが分かる。また曲率が小さい使用状態においては、繊維シートと同じく、補強材料に大きな剥離が生じていないことが分かる。一般的な外ケーブル工法では、コンクリートとの付着がないため、ひび割れ発生後のひび割れ幅の抑制効果は少ない。しかしアウトプレート工法は、使用状態を想定した曲率20 μ /mm以下ではひび割れ近傍での部材との付着が確保されているため、プレストレスの増加に加えて補強材の付着効果により、ひび割れ幅の抑制により効果的であるといえる。そのため、使用性能の向上という目的においては、有効な補強工法だといえる。

4. まとめ

本論文では、鉄道PC橋に予防保全として適用可能な繊維シートおよびアウトプレート補強工法の使用状態における補強効果を確認することを目的とし、曲げ戴荷試験により検討した。以下に得られた結果を示す。

- ・各補強により、荷重レベルの低い使用状態においても、曲げ剛性の向上、およびひび割れ幅の抑制など、使用性能の向上が確認できた。
- ・アウトプレート工法は、追加プレストレスを導入できる点において他の2工法より優位な点が認められた。

謝辞

本論文の実験の計画、実施および結果の評価においては、名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の国枝准教授にご指導を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，丸善，2006
- 2) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会編：外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル(案)，プレストレスト・コンクリート建設業協会，2007
- 3) 濱田 譲ほか：緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究，土木学会論文集，No.771，V-56，pp.27-44，2002.8