特集：既設構造物の耐震補強技術

炭素繊維シートと鋼板によるRC橋脚の耐震補強とその効果

張　広鋒* 星隈順一** 堺　淳一***

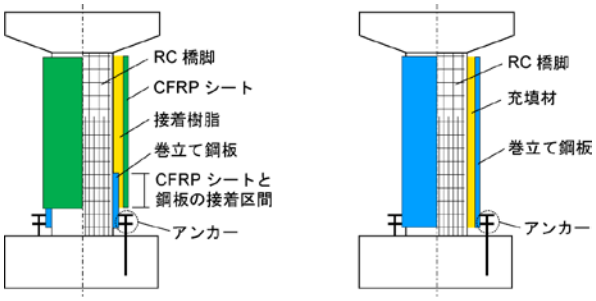
1. はじめに

既設道路橋の耐震補強において、炭素繊維シート（CFRPシート）を主要補強材とする補強工法は、補強による死荷重の増加が少なく、またハンドリングの面からも施工性に優れる等のメリットがあるため、施工空間や工期等の制約条件の多い現場への適用が期待できる。一方、CFRPシートは引張強度が高いものの、破断ひずみが小さく伸び性能が低いため、鉄筋コンクリート（RC）橋脚の基部のように高い変形性能が要求される部位に対する曲げ耐力補強には適していない。

そこで、土木研究所では、CFRPシートを主要補強材としつつ、地震時に塑性ヒンジとなる橋脚基部については鋼板巻立てを併用した工法を考案し、耐震補強技術構築のための検討を進めてきている[1)]。本文は、本提案工法における補強構造の基本コンセプトについて概説するとともに、CFRPシートと鋼板の付着性能を検討するための付着実験及び、橋脚の部材としての補強効果を検証するための正負交番載荷実験を行った結果を報告するものである。

2. 提案の耐震補強工法の概要

図-1(a) に、本文で対象とする補強工法のイメージ図を示す。この工法は、CFRPシートによる巻立て工法と図-1(b) に示す従来の鋼板巻立て工法を併用するものである（以後、CFRPシート・鋼板併用工法と呼ぶ）。本工法の考え方としては、軽量で施工しやすいCFRPシートによる巻立て工法を用いることが基本とするが、高い変形性能が要求される橋脚基部には、伸び性能が高くアンカーボルトによる定着も行いやすい鋼板巻立て工法を用いて補強を行う。ここで、鋼板とCFRPシートは、適切な長さをラップさせた上で樹脂により接着させる。これにより、補強用のアンカーボルトによる曲げ耐力の増加分をCFRPシートに伝達させ、橋脚全体としての曲げ耐力と変形性能を向上させる。また、本工法では、従来の鋼板巻立て工法と同様に巻立て鋼板下端部に塑性ヒンジを誘導し、鋼板とCFRPシートの接着接合部では塑性化させないように設計することを基本コンセプトとしている。



(a) CFRP シート・鋼板併用工法　(b) 鋼板巻立て工法

図-1　提案の工法と鋼板巻立て工法のイメージ図

この工法は、CFRPシートを主要補強材としているため、補強による死荷重の増加が少なく、狭隘な場所でも容易に施工可能等がメリットとして取り上げられる。この工法の適用が有利となる現場は、橋脚の補強による死荷重の増加が望ましくない場合、施工空間が狭く重機による作業ができない場合、また、立地条件等によって足場の組立が困難な場合、等が考えられる。

一方、本工法においては、地震により橋脚基部に塑性変形が生じた場合であっても、鋼板とCFRPシートの接着が適切に確保されることが重要なポイントとなる。

3. CFRPシート－鋼板付着実験

CFRPシートと鋼板の接着接合部の構造ディテールを確立するための基礎資料を得ることを目的として、CFRPシートと鋼板の付着性能を一方向引張実験により検討した。

図-2 に、CFRPシート－鋼板付着実験用供試体の概要を示す。供試体は、断面25×25mm のSS400圧延鋼材の両面に繊維目付 600g/m² の

Seismic retrofit of RC bridge columns using CFRP sheet and steel jacketing

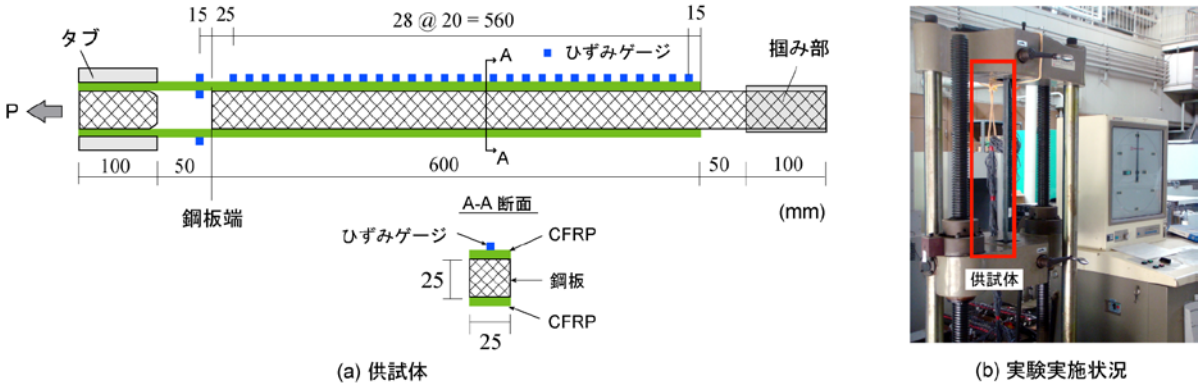


図-2　CFRPシート－鋼板付着実験用供試体の概要および実験実施状況

表-1　供試体の製作の詳細

作業内容	説明
鋼板の表面処理	表面の黒皮をすべて除去するまで、ディスクサンダーによるケレン処理
プライマーの塗布	・使用材料：２液混合常温硬化型エポキシ樹脂 ・使用量：0.2 kg/m²
CFRP シートの接着	・接着手順：片面に規定の層数を接着 → 硬化（半日） → 反対側面に規定の層数を接着 ・使用材料：２液混合常温硬化型エポキシ樹脂 ・使用量：1.2 kg/m²
仕上げ	タブの取り付け、バリ取り等 タブの材料：２方向アラミド繊維シート
養生	室温（夏季）、７日間

表-2　材料特性の一覧

材料	項目	実験値
CFRP シート	繊維目付（g/m²）	600
	設計厚さ（mm）	0.333
	弾性係数（N/mm²）	2.60×10⁵
	引張強度（N/mm²）	3,400
樹脂	弾性係数（N/mm²）	2.202×10³
	圧縮強度（N/mm²）	71.8
	引張強度（N/mm²）	47.0
	引張せん断強度（N/mm²）	17.6

CFRPシートを接着して製作したものである。付着性状を正確に把握するため、本実験では接着長を600 mm とした。表-1に、供試体の製作手順の詳細を示す。また、実験では、接着層数を1層～4層に変化させた 4 ケースを設定し、各ケースに対して同一の供試体を 3 体製作し実験を実施した。以下、これらの供試体を1層接着供試体～4層接着供試体と呼ぶ。表-2 に、CFRPシートと樹脂の材料特性の実験値を示す。

実験では、いずれの供試体に対しても両面の

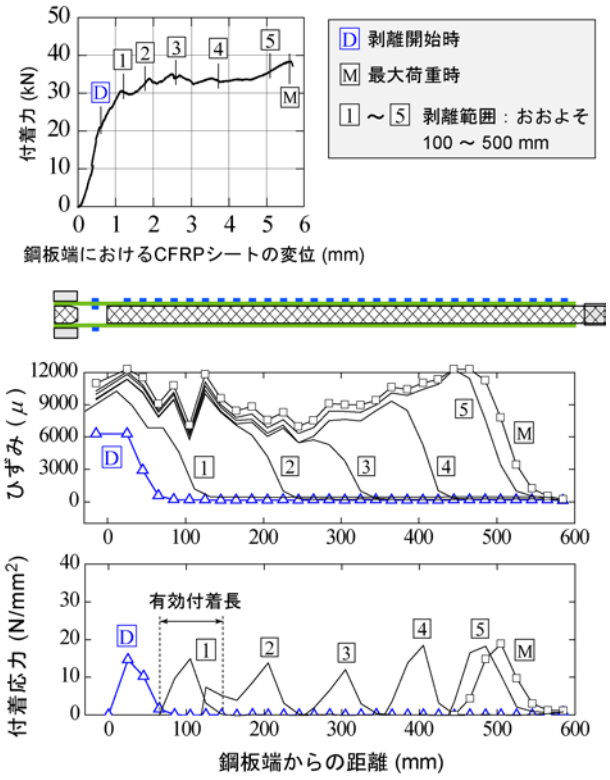


図-3　付着実験結果の一例（１層接着供試体）

CFRPシートが全面で剥離するまで載荷した。CFRPシートと鋼板間の付着挙動は、付着力と鋼板端におけるCFRPシートの変位の関係、CFRPシートのひずみ分布および界面の付着応力の分布の観点から検討を行った。図-3 に、一例として1層接着供試体の結果を示す。ここで、CFRPシートと鋼板の剥離進行状況に伴ってCFRPシートのひずみや付着応力の分布の変化を確認するために、剥離開始時、剥離が鋼板端からおおよそ100、200、300、400および500 mm まで進行した時点、および最大荷重時にそれぞれ着目して整理した。付着応力の分布を見ると、ある荷重レベルにおいて、付着抵抗に寄与する接着範囲は限定

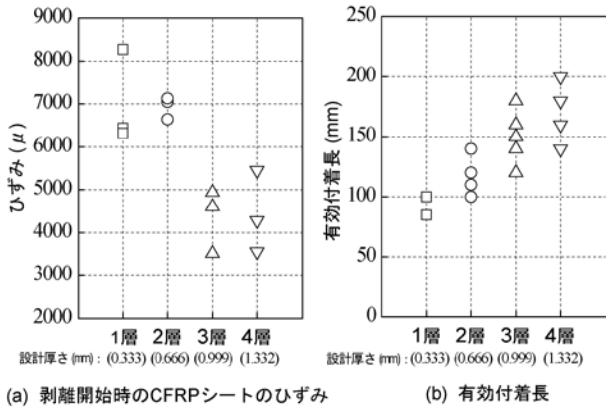


図-4　剥離開始時のCFRPシートのひずみと有効付着長

的であり、その範囲を超える接着部分は付着抵抗には寄与していないことが分かる。本研究では、この範囲の長さを有効付着長と定義して実験結果を整理した。図-4 に、各供試体における剥離開始時のCFRPシートのひずみおよび有効付着長の分布図を示す。

各供試体に関する考察結果は、以下の通りである。1) 付着界面に剥離が生じることによって付着力の変位に対する増加率が低下する。剥離がある程度の範囲まで進行すると荷重が増加しなくなる。2) 剥離開始時におけるCFRPシートのひずみ値は、接着層数が多いほど小さくなる傾向がある。3層接着の場合と4層接着の場合においては、最も低い値は3,500μ程度となっている。3) 有効付着長は、接着層数が多いほど長くなる傾向がある。本実験結果では、繊維目付600g/m² のCFRPを用いた場合、1層接着の場合で80～100mm、2層接着の場合で100～160mm、3層接着の場合で120～180mm、4層接着の場合で140～200mm程度となっている。

4. RC橋脚の正負交番載荷実験

本補強工法による補強効果を検証するために、RC橋脚模型を製作し、正負交番載荷実験を実施した。対象とした供試体は、主鉄筋段落し部の耐震補強が既に実施されているRC橋脚である。

図-5 に、供試体の寸法、段落し部に対する既存補強部およびCFRPシート・鋼板併用工法による補強部の概要を示す。供試体は、断面が600mm×600mm の正方形で、せん断支間比は

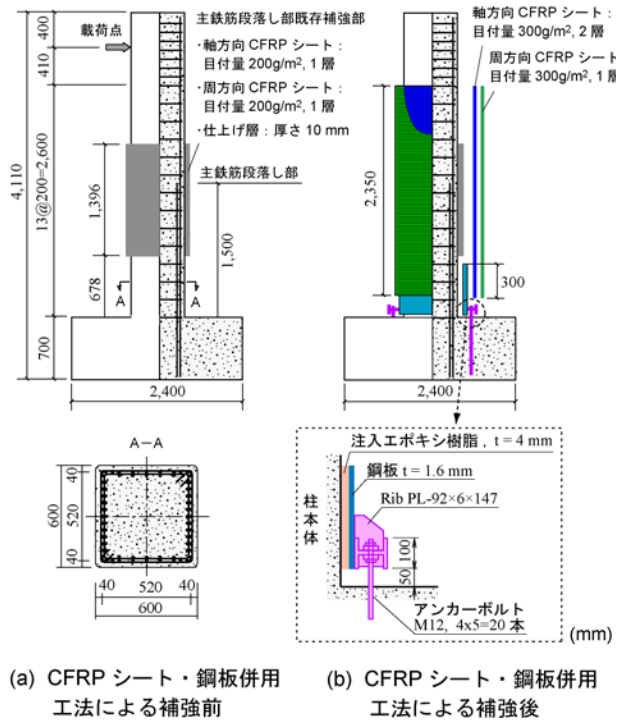


図-5　供試体概要図

5.0 である。軸方向鉄筋と横拘束筋には、それぞれ SD295 D10 とSD295 D6 を用いた。供試体は、まず、段落し部の既存補強部を再現するために、文献2) に基づき、基部で曲げ破壊となるようにCFRPシートの巻立てにより主鉄筋段落し部を補強した。その後、段落し部補強部の表面をディスクサンダーにより目荒らした後、本工法によって補強を行った。軸方向に対する補強量は、繊維目付300g/m² のCFRPシートを2 層とした。これは、設計厚さで評価すれば、前述の付着試験に用いた繊維目付600g/m² のCFRPシートの 1 層と等価となる。また、CFRPシートと鋼板間の接着長は300mmとした。これは、正負交番の繰り返し荷重下における接着部のCFRPシートのひずみ分布を適切に把握できるようにするため、前述の付着実験結果を踏まえて決めたものである。なお、補強に用いたCFRPシートと樹脂の材質、鋼板の表面処理方法、CFRPシートの接着手順等は、すべて付着実験の場合と同様である。

写真-1 に実験のセットアップ状況を示す。載荷は、正負交番繰り返し載荷とし、各載荷ステップの繰返し回数は 3 回とした。

図-6 に、水平荷重－水平変位の履歴曲線を示す。ここでは、過去に実施した鋼板巻立て供試体の正負交番載荷実験結果[3]を比較対象として示し

写真-1　RC橋脚の実験セットアップ状況

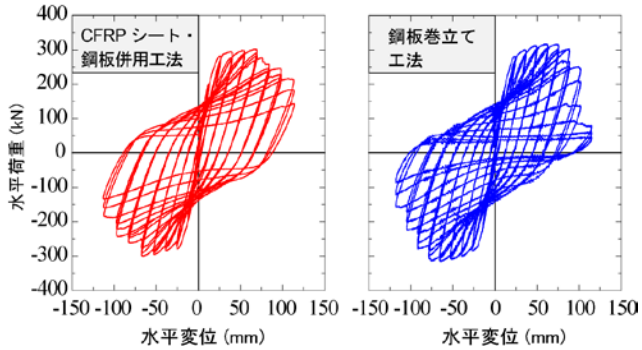


図-6　水平荷重－水平変位の履歴曲線

ている。鋼板巻立て供試体は、橋脚全高さに対して鋼板で巻立て、鋼板とアンカーボルトは今回の供試体と同様なスペックである。CFRPシート・鋼板併用工法を適用した供試体の最大荷重や変形性能は、鋼板巻立て供試体とおおむね同程度となっていることが確認される。また、損傷は鋼板下端の基部に生じ、最終的にはアンカーボルトと主鉄筋の破断により水平荷重が低下した。なお、各載荷ステップの終了後および実験終了後において、CFRPシートと鋼板の接着部、巻立て部上端面等の断面変化部を検査したが、損傷が鋼板下端の基部のみに生じたことにより、これらの部位でCFRPシートの変状や剥離等は特に認められなかった。これより、本実験におけるCFRPシートと鋼板の接着部は、正負交番荷重下でも、十分な付着性能を有していたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、CFRPシート・鋼板併用工法におけるCFRPシートと鋼板の付着性能の把握、補強効果の検証について実験的検討を行った。本研究で得られた知見を整理すると、以下のとおりである。

1. CFRPシートと鋼板の接着によって補強を行う場合には、接着層数に応じて有効付着長以上の接着長を確保する必要がある。また、接着層が多い場合は、剥離開始時のCFRPシートのひずみレベルが低いため、設計計算に見込むCFRPシートのひずみレベルを配慮する必要がある。
2. CFRPシートと鋼板の接着長を適切に確保すれば、提案のCFRPシート・鋼板併用工法は、橋脚全高さに対する鋼板巻立て工法と同程度の補強効果を得られることが確認できた。

参考文献

1) 張広鋒、運上茂樹：主鉄筋段落し部を有するRC橋脚の耐荷性能グレードアップ補強工法の一検討、第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.47-52、 2009.1
2) （財）海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集、平成17年4月
3) 川島一彦、大塚久哲、中野正則、星隈順一、長屋和宏：曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法による鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強、土木研究所資料第3444号、平成8年5月

張　広鋒*

独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター任期付研究員、博（工）
Dr. Guangfeng ZHANG

星隈順一**

独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター上席研究員、博（工）
Dr.Jun-ichi HOSHIKUMA

堺　淳一***

独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター主任研究員、博（工）
Dr. Junichi SAKAI