

## 炭素繊維プレートによる集成材の性能向上と橋梁への適用について

### CFRP reinforcement of glulam beams and its application to bridges

○平沢秀之\* 及川昭夫\*\* 小林朗\*\*\* 入江康孝\*\*\*\*

HIRASAWA Hideyuki, OIKAWA Akio, KOBAYASHI Akira and IRIE Yasutaka

\*博(工学) 北海道大学大学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\*北海道大学大学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\*\*工修 日鉄コンポジット(株) (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

\*\*\*\*伊藤組木材(株) (〒061-3244 石狩市新港南2丁目725番1)

**ABSTRACT** Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is one of the advanced composite material. It is often used as repair material for structures. This study deals with CFRP as the material which can improve the performance of glulam bridge from the beginning, not for repairing later. In this study, loading tests were carried out by using glulam beams with and without CFRP plates. As a result of tests, failure load of reinforced beam was increased to more than 1.7 times the beam without CFRP plates. On the basis of the test results, some glulam bridges reinforced by CFRP plates were designed. CFRP composite timber can lengthen the bridge span and reduce the girder height.

**Keywords** : CFRP、集成材、木橋、載荷実験

*CFRP, glued laminated timber, timber bridge, loading test*

### 1. はじめに

鋼橋やコンクリート橋が架けられる以前の時代においては、木材が橋梁建設のための重要な材料であった。最近では再び木材による橋梁が増加してきており、歩道橋ばかりでなく本格的な道路橋にも適用例が拡大している。古い時代の木橋と近代木橋の違いは主として材料であり、近代木橋では集成材が使用されている。集成材は製材と比較して強度が高く、品質が比較的安定しており、大断面の製作が可能であるなど橋梁に用いる上で有利な特徴をもっている。この集成材の力学的な性能がより高められれば、橋梁への適用が更に容易となり、木橋の架設事例の増加につながるものと考えられる。

橋梁の上部工や下部工の補修材料として、複合材料の一つである繊維強化プラスチック(FRP)が近年注目されている。Sherrill R.ら<sup>1)</sup>はコンクリートのチャンネル部材をFRPで補強し、載荷実験とFEM解析を行っている。渡邊ら<sup>2)</sup>はH形鋼の下フランジにFRP板を接着して載荷実験を行い、鋼橋への適用や設計について検討している。木材の補強に関しては、Martin Z. A.ら<sup>3)</sup>が木床版にFRP補強を行い、極限強度を実験的に求めている。これらの研究は、何れもFRPによる補強が構造物の強度を大幅に高めていることを示している。

本研究では、引張強度の非常に高い炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に注目し、木橋の長スパン化または桁高の低減を図るための検討を目的としている。既設橋の補修材としてではなく、設計の当初からCFRPにより集成材の耐荷力を向上させ、木橋に適用することを想定している。CFRPの補強効果は、種々の補強方法による供試体を作製し、曲げ載荷実験により確認する。実験結果に基づいて、CFRPで補強した集成材による格子桁橋の試設計を行い、支間長、桁高を算出して、設計の面からCFRPの効果を検討する。

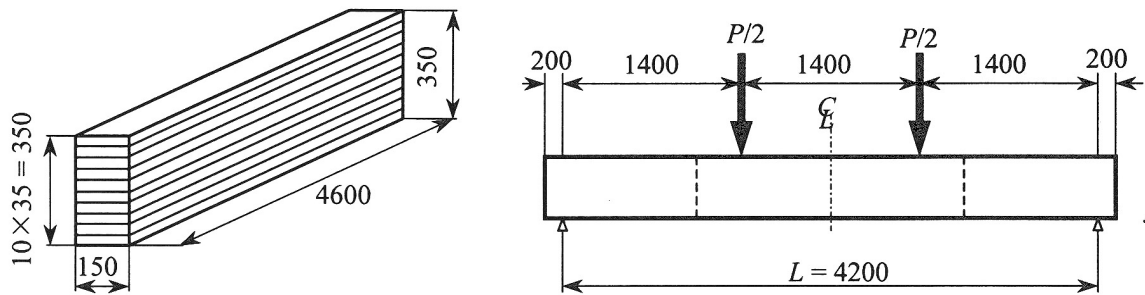


図-1 実験供試体概要図

## 2. 実験供試体

### 2.1 集成材の概要

図-1は実験供試体の寸法と荷重方法を表している。木材は北海道内産のカラマツを使用し、強度等級がE95-F270クラスの集成材として製作している。表-1にこの集成材のヤング係数 $E$ と曲げ引張強度 $\sigma_f$ を示す。桁断面は幅150[mm]、厚さ35[mm]のラミナ10層で構成されている。荷重は2点荷重とし、荷重点でめり込みが生じないように荷重面積の大きい板を介して、油圧ジャッキにより漸増荷重される。

### 2.2 CFRPによる補強

本実験で使用するCFRPは、炭素繊維を樹脂で硬化させてプレート状にしたものである。このプレート1枚の寸法は、幅50[mm]、厚さ1[mm]であり、長さは集成材桁の全長と等しくしている。写真-1にプレートの概要を示す。プレートのヤング係数と $E$ と引張強度 $\sigma_f$ は表-1の通りである。このプレートと集成材ラミナはエポキシ樹脂で接着し一体化される。

表-1 材料特性

	ヤング係数 $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 $\sigma_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]
集成材	9310	27
CFRP プレート	156000	2400



写真-1 CFRPプレート

プレートによる補強方法を図-2に示す。Type-Oは補強無し供試体である。Type-A, B, Cはプレート3枚を接着して補強した供試体である。Type-Aは最下端ラミナにプレートの片面だけを接着したものである。Type-Bはプレートの両面が接着されている。Type-Cはプレートを縦に配置して、プレート両面が木材と接着された構造となっている。

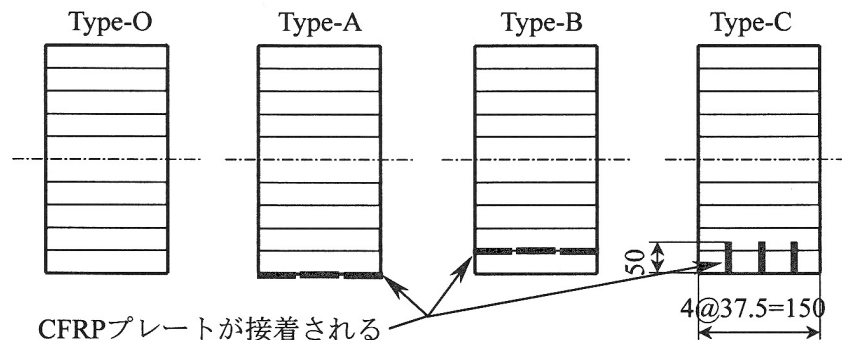


図-2 集成材桁の断面

### 2.3 供試体の断面諸元

集成材はヤング係数と曲げ強度で等級区分がなされているが、個々のラミナのヤング係数と強度はそれぞれ異なった値を有するため、必ずしも等級通りの値と一致しない。図-3はType-Oの供試体断面であり、個々のラミナのヤング係数を表している。中立軸付近にヤング係数の小さいラミナを配置し、外側に大きなラミナを配置する構成となっている。これらのヤング係数を考慮し

て断面2次モーメントを算出すると、 $I_a = 6.430 \times 10^8 [\text{mm}^4]$ となる。一方、桁断面の幅と高さから得られる断面2次モーメントは、 $I_b = 5.359 \times 10^8 [\text{mm}^4]$ である。従って、この場合ラミナ毎の違いを厳密に考慮して求めると、断面寸法から得られる断面2次モーメントの約1.2倍を有していることが分かる。表-

13720
8918
8820
6958
6762
8918
7350
7644
9898
13622

図-3 ラミナのヤング係数  $[\text{N}/\text{mm}^2]$

表-2 ラミナ毎のヤング係数を考慮した断面2次モーメント

	断面2次モーメント $I_a [\text{mm}^4]$
Type-O	$6.430 \times 10^8$
Type-A	$6.396 \times 10^8$
Type-B	$5.844 \times 10^8$
Type-C	$6.550 \times 10^8$

2は、その他の供試体についても、ラミナ及びCFRPプレートのヤング係数を考慮して計算した断面2次モーメントを表している。プレートで補強した供試体が必ずしも無補強の断面2次モーメントより大きくないが、これはラミナのヤング係数のばらつきが影響しているためである。

### 3. 集成材桁の載荷実験

#### 3.1 無補強の集成材

Type-Oの載荷実験より得られた荷重変位曲線を図-4に示す。実線は断面2次モーメント $I_a$ を用いて計算した荷重変位関係、点線は $I_b$ による計算値であり、白丸は実験値である。実験値は $I_a$ による計算値とよく一致していることが分かる。桁の終局荷重は114[kN]である。破壊直前の支間中央

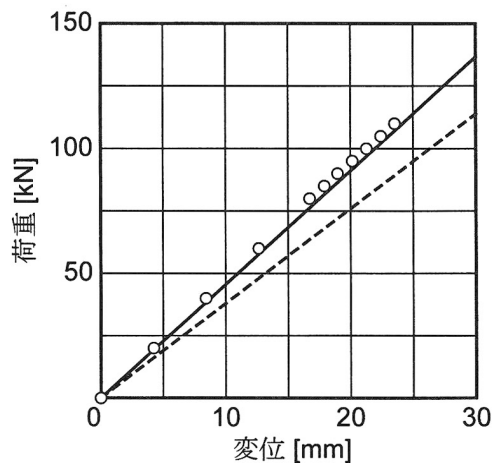


図-4 荷重変位曲線(Type-O)

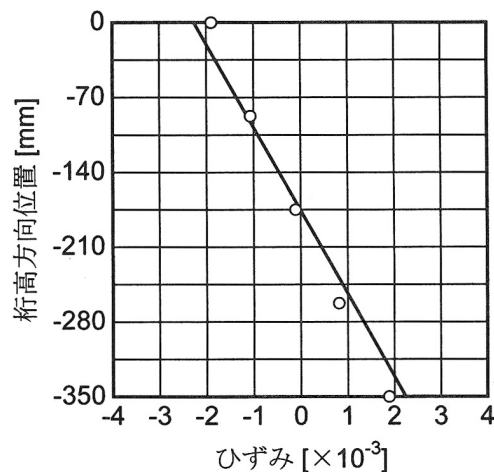


図-5 支間中央断面のひずみ分布

におけるひずみ分布を図-5に示す。実線及び白丸はそれぞれ計算値と実験値である。平面保持の仮定がほぼ満足していることが分かる。破壊の状況は、等曲げ区間のフィンガージョイント部の引張破断と、そこから断面内部へ伸びるひび割れが認められた。写真-2にフィンガージョイント部付近の破壊状況を示す。

#### 3.2 CFRPで補強した集成材

図-6はType-Aの支間中央における破壊に至るまでの荷重変位関係を表したものである。実線は計算値、白丸を実験値として表している。荷重の

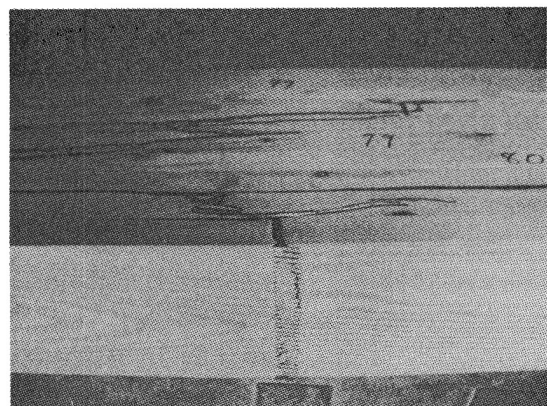


写真-2 破壊状況(Type-O)

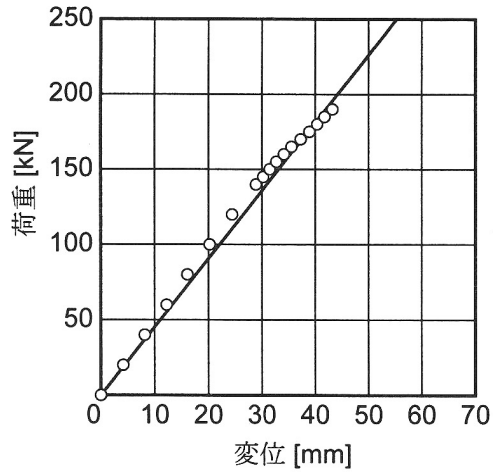


図-6 荷重変位曲線 (Type-A)

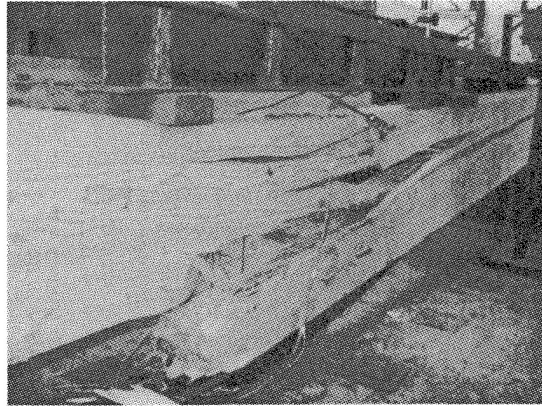
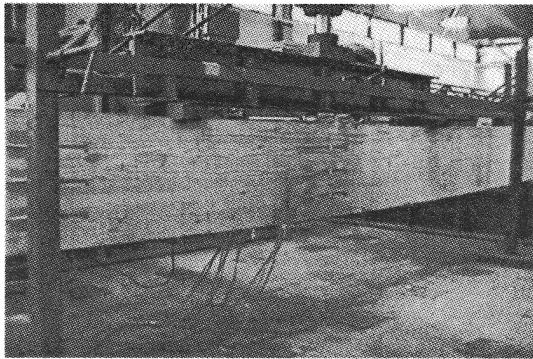
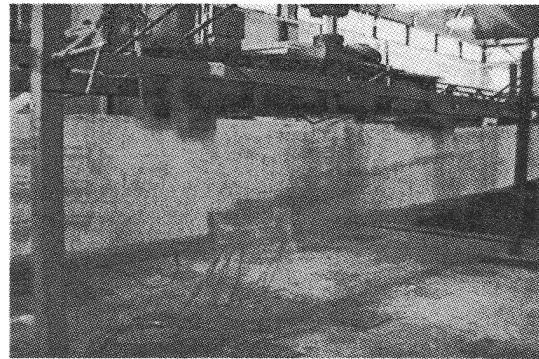


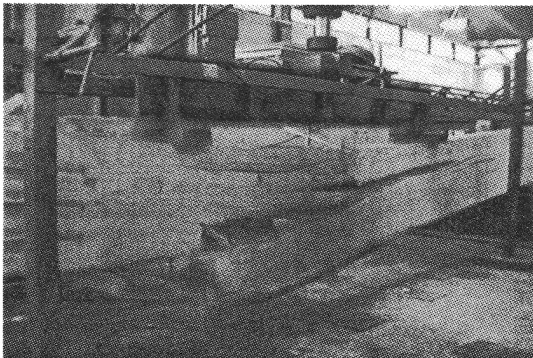
写真-3 破壊状況(Type-A)



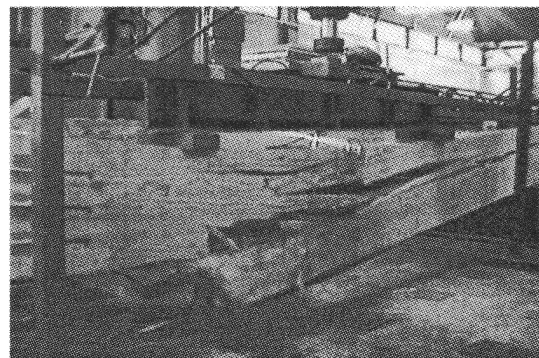
(a) 破壊直前(0.000秒)



(b) 0.033秒後

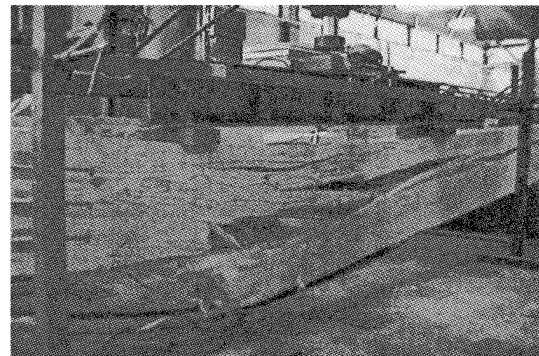


(c) 0.066秒後



(d) 0.100秒後

値が150[kN]付近から、やや非線形性を示しているが、脆性的な破壊であることが分かる。終局荷重は195[kN]である。写真-3は破壊直後の状況を表している。Type-Aは引張側のラミナの破断と共にプレートの剥離が生じ、桁全体にわたる壊滅的な破壊となっている。ひび割れが最下層ラミナのフィンガージョイント部から桁端部にまで走っている。写真-4は破壊の推移をビデオ撮影し、1フレーム毎に表した静止画である。フレーム間隔は約1/30秒である。破壊直後の0.033秒において、供



(e) 0.133秒後

写真-4 破壊の推移(Type-A)

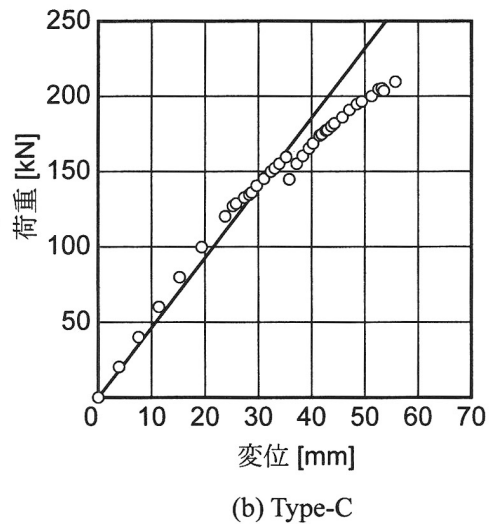
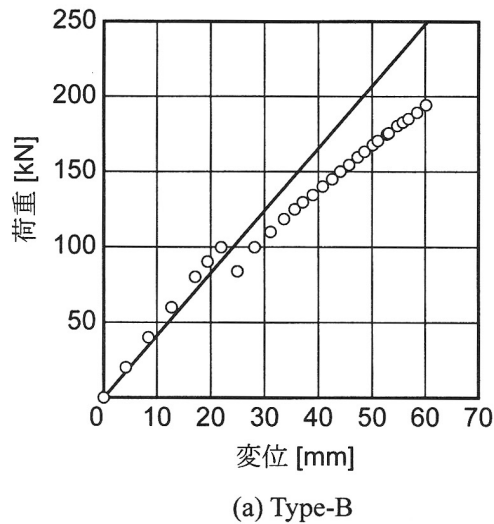
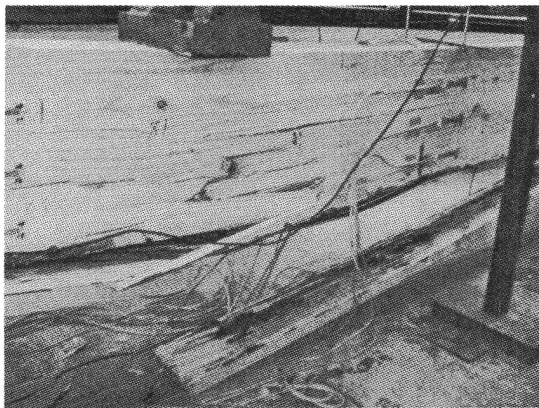
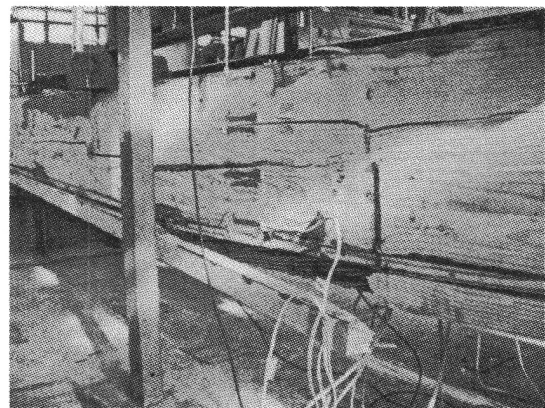


図-7 荷重変位曲線



(a) Type-B



(b) Type-C

写真-5 破壊状況

試体下部の引張破断と水平方向のひび割れが発生している。0.066秒後には広範囲に渡るプレートの剥離が見られると共に、破壊の大部分が終了している。

Type-B, Cの荷重変位曲線を図-7に、破壊状況を写真-5に示す。Type-Bでは、荷重が108[kN]に達したとき、最下層ラミナのみが引張破断し、一旦荷重が減少した。その後、耐力は保持したまま荷重の増加に抵抗し、194[kN]に達したとき、プレートの剥離と共に終局崩壊となった。Type-Cでは、荷重の上昇につれて桁内部の割れ又はプレートの剥離と思われる破壊音が発生し、210[kN]に達したとき、終局崩壊となった。プレートと木材の剥離及びフィンガージョイント部の破断が認められ、桁内部の水平方向ひび割れが多数観察された。無補強の供試体に対して、Type-Cは1.84倍、Type-A, Bはそれぞれ1.71倍及び1.70の耐力を有している結果を得た。

#### 4. 道路橋への適用

許容応力度設計法により集成材を使用した道路橋の試設計を行う。設計条件は図-8に示すように、幅員7[m]、主桁本数6本、主桁断面の幅220[mm]とする。床版にはRC床版を用い、合成桁として設計するものとする。集成材は強度等級E95-F270クラスを用いるものとする。活荷重は道路橋示方書に示されるA活荷重<sup>4)</sup>を適用する。

支間長 $L$ を17.5[m]と仮定して設計すると、CFRPプレートで補強しない場合、桁高 $H$ は1.5[m]必要となる。ここで、集成材の曲げ引張許容応力度を $9.9[\text{N}/\text{mm}^2]$ とし、これに寸法調整係数<sup>5)</sup>を考慮し

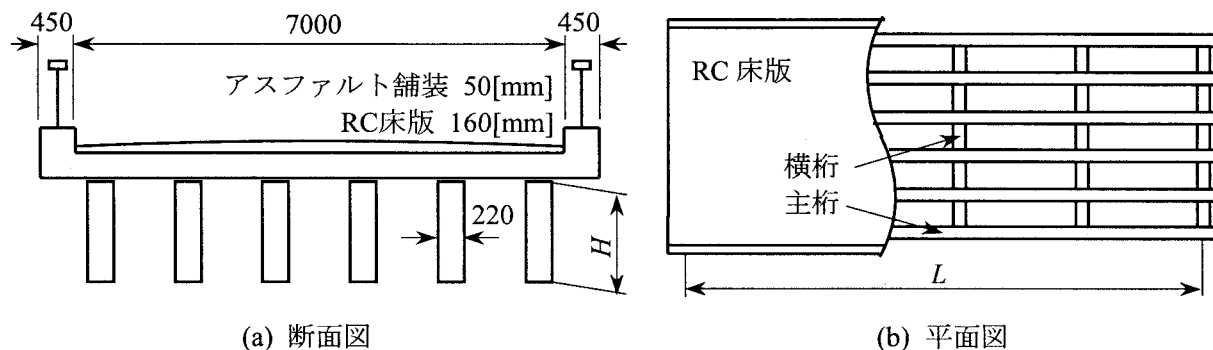


図-8 集成材桁橋の試設計

た値を用いている。CFRPプレートで補強した集成材の曲げ引張許容応力度を、実験結果に基づき、1.7倍の値にできると仮定して設計を行う。その結果、支間長 $L$ を17.5[m]とし、プレートで補強することによって桁高は1.1[m]まで低減化を図ることが可能となった。

また、桁高 $H$ を1.5[m]と仮定して設計すると、無補強の橋梁では $L = 17.5$ [m]であるのに対し、プレートで補強すると $L = 25$ [m]まで支間長を拡大させることが可能となる。これらの結果は図-9にまとめて表されている。

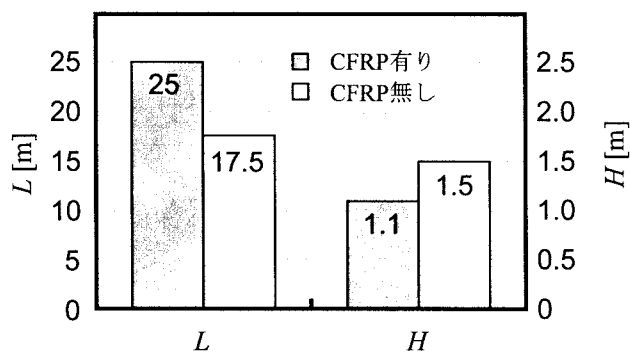


図-9 CFRPの効果

## 5. おわりに

集成材の耐荷力性能の向上を目的として、炭素繊維プレートで補強した集成材木桁の載荷実験を実施した。その結果、供試体の終局強度はプレートで補強させることによって大幅に高められ、無補強に対して最大1.84倍の性能向上を示した。プレートはラミナに平行に接着するよりも縦方向に配置させた方が高い耐荷力を示すことが判明した。

炭素繊維で補強した集成材は、許容応力度も高められると仮定して、木橋の試設計を行った。一定の設計条件の下で計算した結果、同一の支間長に対して、プレートで補強した集成材を使用した場合は無補強の場合よりも大幅に桁高を低減できることが示された。また、同一の桁高に対しては、プレートによる補強で支間長を拡大させることが可能となった。従って、木橋建設の際に桁高制限を受ける場合や、支間長を大きくしたい場合などには、炭素繊維による補強が非常に有効であると考えられる。

## 参考文献

- 1) Sherrill R., Andrew B., Martin J., Robert S., and Nemy B. : "Potential Retrofit Methods for Concrete Channel Beam Bridges Using Glass Fiber Reinforced Polymer", ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 66-74, 2004.
- 2) 渡邊憲市, 板垣一也, 鈴木博之: 炭素繊維強化樹脂板による鋼橋の補強, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp.679-682, 2000.
- 3) Martin Z. A., Stith J. K., and Tingley D. A., "Strength and Stiffness Performance of FRP Reinforced White Oak", WCTE 2000 Conference Proceedings, P53, 2000.
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説I共通編(平成14年3月), 丸善(株), 2002.
- 5) (社)日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 丸善(株), 1995.