

CFRPシートで補強した道南スギ集成材の破壊性状について

Failure condition of glulam beams of Donan cedar reinforced by CFRP sheet

○平沢秀之* 佐藤正登** 小林朗***

HIRASAWA Hideyuki, SATO Masato and KOBAYASHI Akira

*博(工学) 函館高専 環境都市工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町14-1)

**準学士 ショーボンド建設(株) (〒136-0076 東京都江東区南砂2-2-17)

***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)

ABSTRACT From the loading tests, the failure condition of glued laminated timber beams with CFRP reinforcement are discussed. The CFRP (carbon fiber reinforced plastics) is the advanced material that is often used in concrete pier for the protection from earthquake. The CFRP sheet is attached around the finger joint of bottom surface in glulam beams in this study, because the past study with respect to the CFRP reinforcement showed that the tension failure occurred at the finger joint in almost all test specimens. In this study, twelve glulam beams with different length of sheets were tested. As a result of tests, the CFRP sheet without full length of the beam can improve the load carrying capacity of glulam beams effectively.

Keywords: 集成材、道南スギ、フィンガージョイント、炭素繊維
glued laminated timber, Donan cedar, finger joint, CFRP

1. はじめに

北海道はその広大な面積により我が国で最も木材生産量が多く、針葉樹と広葉樹を合わせた国産材の約20パーセントを生産する(平成18年)。道内で生産される木材のほとんどは、カラマツ、エゾマツ、トドマツであり、カラマツは全国の78パーセント、エゾマツ・トドマツは全国のほぼ100パーセントを生産している。一方、日本国内で生産される木材の中では、スギが最も多く、全樹種のうちの約50パーセントを占めている。スギの主要産地は宮崎県を筆頭に秋田県、大分県等であり、国内の広い地域で生産されている¹⁾。

スギについてみると、北海道でも僅かながら生産されている(全国の0.5パーセント)²⁾。北海道におけるスギの生産地は道南地方の渡島管内と桧山管内にほぼ限定され、一般に道南スギとして道内外へ出荷している。道南スギ資源の状況は、間伐を必要とする若い林分から伐採期を迎える林分まで幅広い齢級構成となっているが、林業低迷による手入れの放棄、間伐材の放置等、資源の有効利用が活発に図られていない状況にある。道南スギの利用を促進し、停滞している森林整備を進めるため、自治体による地材地消の取り組みが行われている。

道南スギの活用例として、工事標識や建設用仮設資材、椅子・テーブル等の家具、住宅用建材などがあり、最近では集成材にして建築用構造材として利用する事例も見られる。道南スギに関する研究では、材料に関する基礎的な特性の検討^{3),4)}のほか、構造用パーティクルボードの製造技術に関するもの⁵⁾等いくつか見られるが、橋梁への適用を前提とした研究はまだなされていないようである。本研究は道南スギの一層の利用促進を図るため、橋梁の桁部材として使用することを想定し、道南スギ集成材の耐荷力実験について報告するものである。

カラマツ集成材を対象とし、橋梁への適用を前提とした著者らの実験^{6),7)}では、炭素繊維プレート及び炭素繊維シートによる補強は有効であり、耐荷力性能を向上させる結果が得られている。また、このような補強集成材を用いて車道橋を試設計すると、補強しない場合と比較して桁高の低減あるいは支間長の延長が可能になることを示した。耐荷力実験の結果から、炭素繊維による補強無しの場合では、破壊は常に最下層ラミナのフィンガージョイント部に生じており、補強

した集成材でもフィンガージョイント部が破壊に大きく関係していることが判明している。そこで本研究では、炭素繊維シートによる補強箇所をフィンガージョイント部周辺のみとした場合の補強効果を検討し、炭素繊維シートの使用量を節約できるかについて実験的に調べることにする。補強量を減少してコストを下げ、且つ耐荷力の向上が果たせられれば、道南スギの適用範囲が広がり、利用促進が図れるものと期待できる。

2. 実験供試体

2.1 使用材料

本実験で使用する集成材は、道南スギを用いたE65-F225の強度等級を有する異等級対称構成構造用集成材である。図-1に供試体寸法を示す。桁断面は幅120[mm]、厚さ20[mm]のラミナ8層で構成されている。供試体は全12体製作し、全て同一の寸法、強度等級を有している。

炭素繊維(CFRP)はヤング係数と引張強度が非常に高い先端複合材料の一つであり、シート状のものやロッド状のものなど各種製品が開発されている。本実験では繊維を敷き詰めて布状にした約0.2[mm]厚の炭素繊維シートを補強材料として使用する。幅は集成材の寸法に合わせて120[mm]に切断して用いるものとする。表-1に炭素繊維シートの材料試験によるヤング係数と引張強度を示す。

炭素繊維シートを集成材に補強するには、エポキシ樹脂による接着を行う。写真-1のように樹脂を塗布し、炭素繊維シートを敷いて重りを負荷し圧縮する。写真-2は集成材に接着された炭素繊維シートを表している。

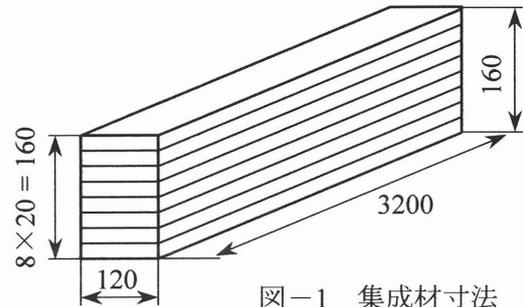


図-1 集成材寸法

表-1 材料定数

	ヤング係数 E [N/mm ²]	強度 σ_f [N/mm ²]
CFRPシート	264000	4076
集成材	6500	22.2

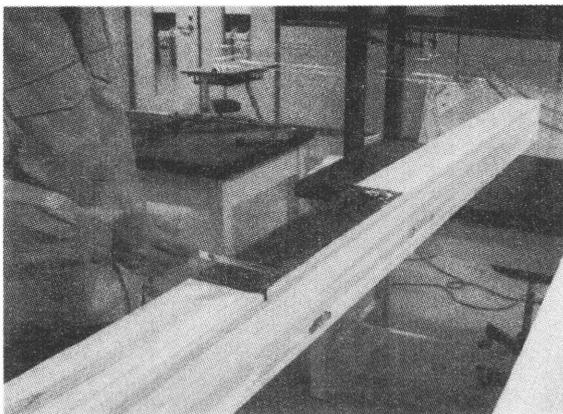


写真-1 エポキシ樹脂接着

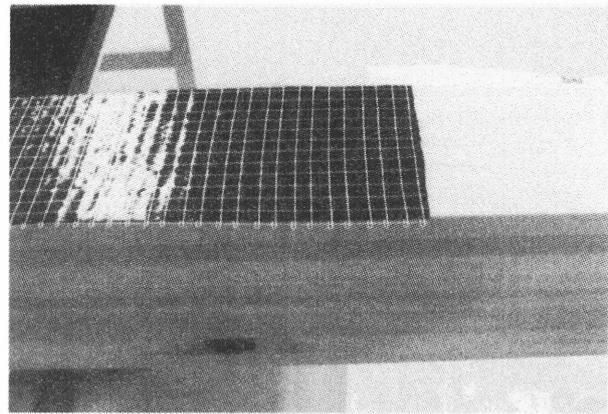


写真-2 CFRPシートを接着した集成材

2.2 炭素繊維シートによる補強

桁長が3.2[m]程度であれば、ラミナを縦継ぎすることなく集成材を製作することが可能である。本実験ではラミナのフィンガージョイント部の破壊に着目しているため、支間中央断面の最下層のラミナにフィンガージョイントを設けた集成材を製作した。このフィンガージョイント部を炭素繊維で補強し、耐荷力に及ぼす効果を検討する。

実験供試体は図-2に示すように、3通りの補強方法(Type-1, 2, 3)及び補強無し(Type-0)の4種類であり、それぞれのタイプをA, B, Cの3本とする全12体を製作した。Type-1は炭素繊維シートの長さを300[mm]とした⁸⁾。Type-2では600[mm]、Type-3では集成材と同じ長さのシートで補強した。

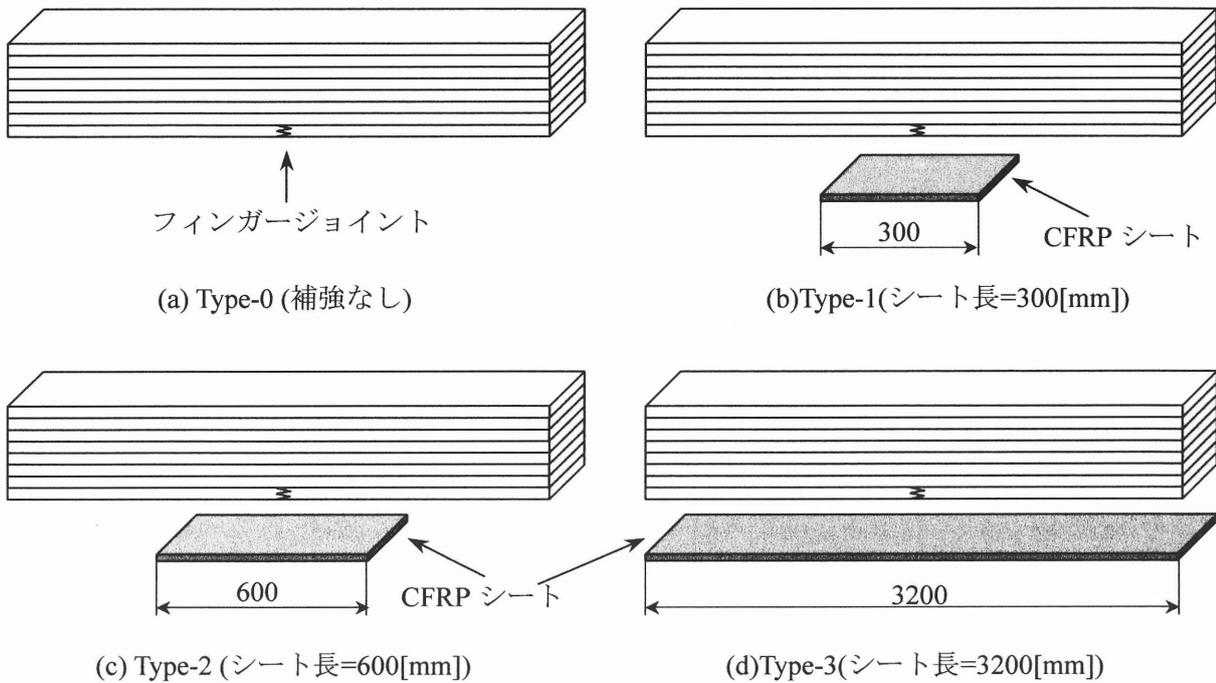


図-2 補強方法

2.3 集成材の断面諸元

集成材の等級区分は曲げヤング係数と曲げ強度により決定されている⁹⁾。また、その等級区分を満たすための各ラミナに必要なヤング係数(L値)が規定されている。実際に製作される集成材のラミナは、いろいろな値を取り得るため、断面諸元を精度良く算出するためには、1枚1枚のラミナのヤング係数を考慮する必要がある。図-3は一例としてType-0Aの断面図を示したものであり、数値は各ラミナのヤング係数を表している。これらの値はグレーディングマシンによる測定結果である。このラミナ構成は大きめの値であるが、E65-F225の集成材として出荷されたものである。各ラミナのヤング係数比より換算断面積を算出し、桁断面の断面2次モーメントを算出すると $I_a = 5.317 \times 10^7 [\text{mm}^4]$ 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、 $I_b = 4.096 \times 10^7 [\text{mm}^4]$ である。従って、この供試体の断面2次モーメントは、断面寸法から得られる計算値の約1.3倍を有していることが分かる。表-2は各供試体の断面2次モーメントを表している。Type-1, 2は炭素繊維シートで補強したものであるが、補強箇所は断面の一部であるため断面2次モーメントの算出にはシートを考慮していない。Type-3の断面2次モーメントはシートが考慮されている。

7840
6860
5880
5880
6860
7840
8820

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

表-2 断面2次モーメント

		$I_a [\text{mm}^4]$
Type-0	A	5.317×10^7
	B	5.307×10^7
	C	5.317×10^7
Type-1	A	5.317×10^7
	B	5.317×10^7
	C	5.317×10^7
Type-2	A	5.317×10^7
	B	5.317×10^7
	C	5.051×10^7
Type-3	A	5.730×10^7
	B	5.542×10^7
	C	5.810×10^7

3. 載荷実験

3.1 実験方法

曲げ破壊を生じさせるため、図-4に示すように剛なH形鋼を介して2点載荷させる実験を行う。変位計はストロークの制約上変位の大きくない位置に設置した。ひずみゲージは支間中央断面の

上下面と側面に貼付した。荷重点と支点においてめり込みが生じないように、接触面積の大きい鋼板を設置した。荷重は1.0[mm/分]の変位制御による漸増荷重を作用させ、破壊現象が生じるまで荷重を続けるものとする。

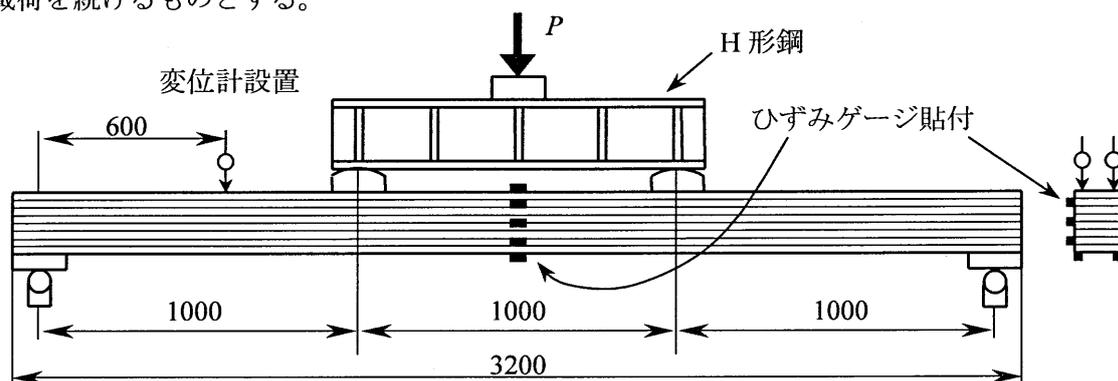


図-4 荷重実験概要図

3.2 変位及び破壊荷重の推定値

梁理論によれば、2点荷重単純梁の鉛直変位 δ は、 $L =$ 支間長、 $P =$ 2点荷重の合計荷重、 $E =$ 集成材の強度等級で表されるヤング係数、 $I_a =$ ラミナ毎のヤング係数の違いを考慮した集成材の断面2次モーメント、とおくと次式により求められる。

$$\delta_{x=L/5} = \frac{(P/2)L^3}{6EI_a} \left\{ 3 \cdot \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3} \right) \cdot \frac{1}{5} - \left(\frac{1}{5} \right)^3 \right\} = \frac{47PL^3}{4500EI_a} \quad (1)$$

ここで、 $x = L/5$ は変位計設置位置である。

集成材の破壊は、曲げ引張りによる最下層ラミナの破断により生じるものと仮定すると、無補強の桁の破壊荷重は次のようにして推定することができる。集成材の曲げひずみ ϵ は、等曲げ区間(荷重点間)に作用する曲げモーメントを M 、中立軸から最下縁までの距離を y とおくと、次式で表される。

$$\epsilon = \frac{M}{EI_a} y \quad (2)$$

最下縁での垂直応力 σ (引張応力)は、最下層ラミナのヤング係数を E_8 とおくと、次式で表される。

$$\sigma = \epsilon E_8 \quad (3)$$

式(2)、(3)及び、 $M = PL/6$ を用いて P について整理すると、次式が得られる。

$$P = \frac{6EI_a}{E_8 Ly} \sigma \quad (4)$$

式(4)の σ に曲げ強度を代入すると、破壊荷重 P を求めることができる。

3.3 無補強集成材の破壊性状

図-5はType-0Bの実験により得られた荷重変位曲線である。実線と点線は断面2次モーメント I_a を用いて計算した荷重変位曲線、一点鎖線は I_b による荷重変位曲線である。白丸は実験値である。実験値は I_a による計算値に非常に良く一致していることが分かる。破壊荷重を推定するために式(4)において、文献10)で与えられる基準強度特性値 $\sigma = 22.2[\text{N}/\text{mm}^2]$ を代入すると、 $P = 21.7[\text{kN}]$ が得られる。これに対し終局破壊荷重の実験値は39.49[kN]であり、計算値の1.8倍となった。曲げ強度 $\sigma = 22.2[\text{N}/\text{mm}^2]$ は5%下限値であるため、変動係数0.15の正規分布と仮定した50%値を仮定する

と、曲げ強度は $29.5[\text{N}/\text{mm}^2]$ となり、破壊荷重は $P = 28.8[\text{kN}]$ と計算される。この場合、実験値は約1.4倍となり、本供試体はかなり耐荷力の強い集成材であったと考えられる。

図-6は $P = 20[\text{kN}]$ のときの支間中央断面におけるひずみ分布を表している。実線は弾性計算による計算値、白丸は実験値であり、平面保持の仮定が満たされている。 $P = 35[\text{kN}]$ の上端ひずみは、以下に示す座屈のため実験値が小さくなっている。

破壊は、最下層ラミナのフィンガージョイントが引張破断し、その上部のラミナにおいては木目や節の周りに沿ってひび割れが支点方向に進行して発生している。荷重が約 $30[\text{kN}]$ を過ぎてから徐々に剛性を低下させ、集成材内部の繊維の破壊音と思われる音が生じていた。写真-3は破壊状況を表している。破壊は桁下部の引張破壊の他、圧縮縁において表面が部分的に盛り上がった座屈現象も生じている。

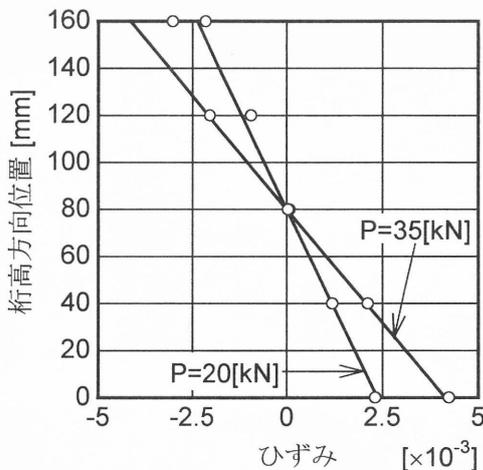


図-6 ひずみ分布(Type-0B)

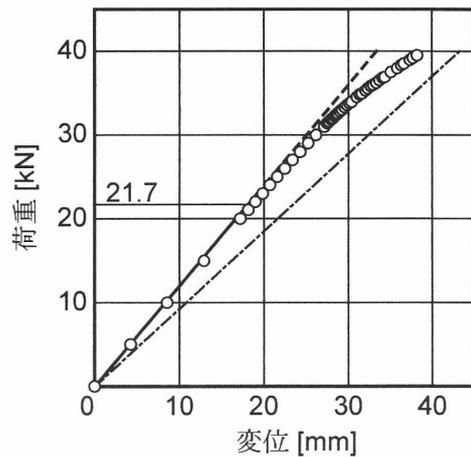
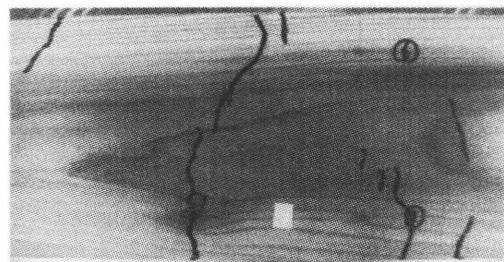
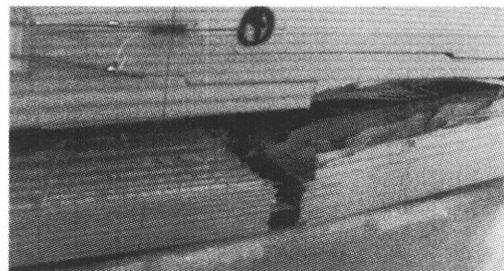


図-5 荷重変位曲線(Type-0B)



(a) 桁上面の破壊



(b) 桁下部の破壊

写真-3 破壊状況(Type-0B)

3.4 CFRPによる補強集成材の破壊性状

(1) Type-1の実験結果

図-7は炭素繊維シートの全長を $300[\text{mm}]$ としたType-1Cの荷重変位曲線を表している。実験値(白丸)と計算値(実線)は非常に良く一致しているが、ラミナのヤング係数を考慮しない一点鎖線のグラフとはかなり離れている。この供試体では、破壊に至るまで非線形挙動を示さず、 $P = 38.94 [\text{kN}]$ において終局崩壊した。荷重が $25[\text{kN}]$ を超えてから、炭素繊維シートと集成材の接着部分と思われる箇所からパチパチと弾けるような音が発生し、接着剤の割れまたは剥離が徐々に進行したものと考えられるが、剛性が低下するほどの内部の破壊は起きていなかったと推定できる。

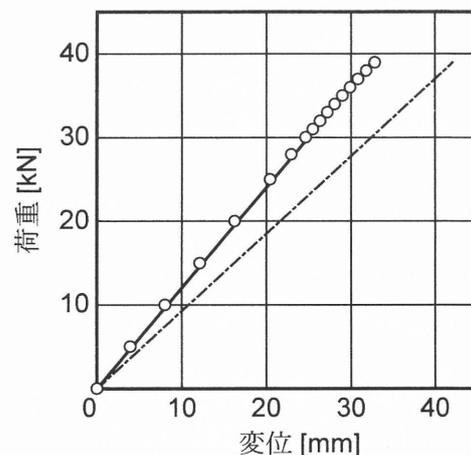


図-7 荷重変位曲線(Type-1C)

写真-4はType-1Cの破壊状況を表している。最下層ラミナがフィンガージョイント部で破断し、補強した炭素繊維シートが剥離している。最下層より上部のラミナでは木目に沿って支点方向に割れが発生している。これはラミナとラミナの境界ではなく、ラミナの内部で裂けたものである。炭素繊維シートの剥離は、写真で示す通り、接着剤の接着面ではなく、木材の内部での剥離であることが分かる。このことから、炭素繊維シートの接着補強は十分な強度が発揮されたと考えられる。また、桁上面においては局部的に座屈が起きた箇所もあった。

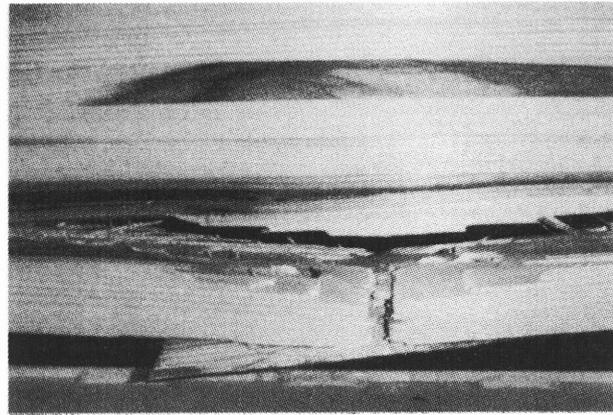


写真-4 破壊状況(Type-1C)

(2) Type-2の実験結果

図-8は炭素繊維シートの全長を600[mm]としたType-2Aの荷重変位曲線である。線形挙動を示す40[kN]付近までは計算値(実線)よりやや剛性が高い。Type-1Cよりも明確な非弾性領域が見られ、集成材内部での破壊と桁上面での座屈が進行したと考えられる。終局荷重は45.49[kN]であった。

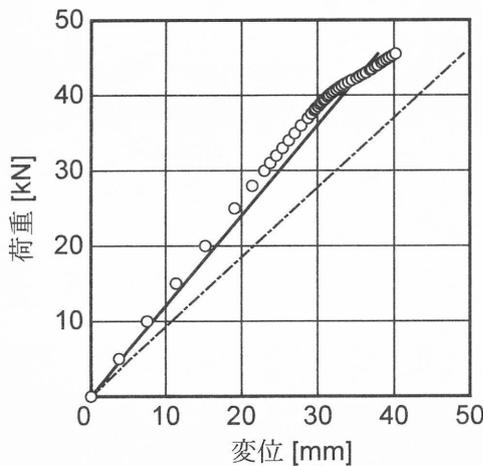


図-8 荷重変位曲線(Type-2A)

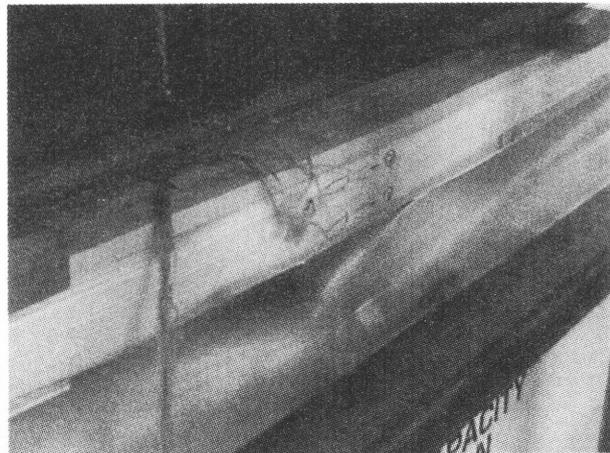


写真-5 破壊の瞬間(Type-2A)

写真-5は破壊直後から1/30秒以内の状況を示したものである。桁高の約3分の1が下方に落下している動きが認められる。支間中央部付近を頂点とする逆三角形の非常に大きな割れが生じている。この頂点はフィンガージョイントの位置である。頂点の右側には(黒い部分)、剥離した炭素繊維シートが認められる。約1/30秒以内の瞬間に、フィンガージョイントの破断、桁下部の落下、炭素繊維シートの剥離がほぼ同時に起きていることが分かる。桁下部の落下については、写真-5の瞬間では非常に大きな

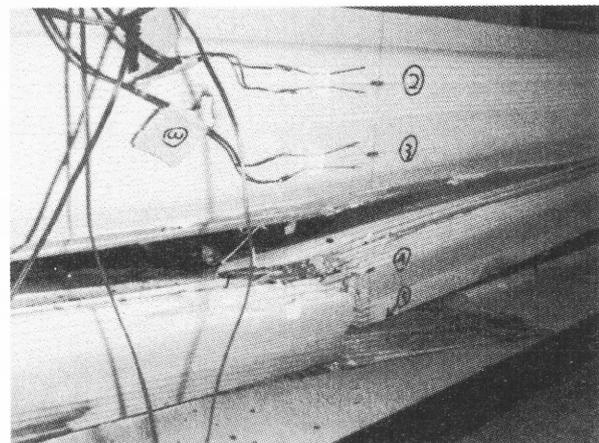


写真-6 破壊状況(Type-2A)

落下幅(ひび割れ幅)が認められるが、この1/30秒後及び2/30秒後には落下幅は小さくなり、ひび割れが戻ろうとする動きが確認できた。

写真-6は破壊の瞬間から十分時間が経過した後の状況である。引張破断は、下から第1層目、第2層目のラミナ及び第3層目の一部の同一断面で、すなわちフィンガージョイントのある断面で発生している。第3層目の内部には、支間中央から約200[mm]以内の範囲に節が存在し、節周辺部には腐朽が認められた。フィンガージョイントを基点とする破断面の延長線上にこの節があり、節が強度的に弱点になっていたものと考えられる。

また、水平ひび割れはほぼ支間全長に渡って発生しており、破壊は曲げ破壊とせん断破壊の複合要因によるものと考えられる。

(3) Type-3の実験結果

Type-3は桁の全長に渡って炭素繊維シートを接着補強したものである。図-9にType-3Cの荷重変位曲線を示す。白丸の実験値はラミナのヤング係数を考慮した計算値と弾性域内において非常に良く一致している。荷重が30[kN]を超えたところから剛性が低下し、非弾性領域に移行している。しかしながら、23[kN]以降から接着剤の割れまたは剥離と思われる破壊音が発生し始め、僅かな剛性低下が起こっていたものと推測できる。終局破壊荷重は35.8[kN]であった。

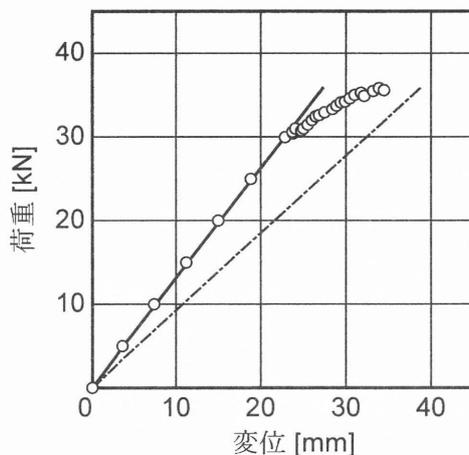


図-9 荷重変位曲線(Type-3C)



写真-7 破壊状況(Type-3C)

写真-7はType-3Cの破壊後の状況を表している。他のTypeと比較して破壊の状態が明確ではないが、支間中央断面から360[mm]離れた位置にフィンガージョイントが設けられており、ここで引張破断が生じている。また、フィンガージョイント周辺部において炭素繊維シートの剥離が見られるが、橋軸直角方向全長に渡って剥離しておらず、両端部付近で剥離し、中央部ではまだ接着状態にあった。このため、ひび割れ幅が小さく、桁の下部が大きく落下するまでには至っていない。この供試体では、炭素繊維が破壊荷重を向上させる効果を果たさなかったものの、終局時において桁が崩壊するのを回避させることができ、安全性の面で効果的であることが示された。

(4) Type別破壊荷重

表-3はType-0～Type-3の全ての供試体の破壊荷重をまとめたものである。Type-0では無補強にも関わらず、非常に耐荷力の大きい集成材であった。破壊荷重の平均値は、寸法の等しいE95-F270クラスのカラマツ集成材⁷⁾と同程度の値を示している。Type-1は無補強と比較して6%程度、耐荷力が向上した。Type-2では更に効果が高く、無補強に対して約20%の耐荷力向上を示した。しかしながら、全面補強を行ったType-3では無補強よりも耐荷力が小さい結果となった。この原因は、

集成材の内部に存在する節などの欠陥やラミナ自体の強度不足、あるいは炭素繊維シートの接着力不足が考えられる。シートを接着するためには、桁全長に渡って圧縮しなければならないが、均一な圧力を長時間作用させることが容易ではなく、特にType-3Bの供試体では、シートが橋軸直角方向にずれが生じて接着された。このことが原因で破壊荷重が低い結果になったと考えられる。

表-3 破壊荷重 [kN]

		破壊荷重	平均値
Type-0 補強無し	A	32.55	37.02
	B	39.49	
	C	39.03	
Type-1 補強300mm	A	35.96	39.15
	B	42.56	
	C	38.94	
Type-2 補強600mm	A	45.49	44.15
	B	46.99	
	C	39.96	
Type-3 補強全面	A	40.89	35.98
	B	31.24	
	C	35.80	

4. おわりに

集成材の樹種として道南スギを採用し、フィンガージョイント部の補強に先端複合材料の一つである炭素繊維を使用した木桁の曲げ破壊実験を実施した。道南スギは耐寒性に富むこと、葉や樹皮の形に違いがあることなど、樹種特性に特徴が見られるが、構造材として使用するには他地域のスギと特に異なる点はなく、JASの強度等級を満たす集成材を製造することが可能である。

炭素繊維シートの長さによる影響を調べるため、(1)無補強、(2)シート長300[mm]、(3)シート長600[mm]、(4)全面補強の4通りの供試体を検討した。その結果、シート長600[mm]の補強方法で最大の破壊荷重を示し、無補強に対して約20%の耐荷力向上を示した。このことからシートを全面に補強しなくても集成材の強度を高められることが判明した。今回の実験では、無補強の供試体が高強度であり、カラマツ集成材と同程度の強度を保持していたため、炭素繊維シートの補強効果が顕著に現れなかった。したがって、供試体数を増やして実験を行えば、補強効果が高まるものと考えられる。全面補強の供試体が最も低い破壊荷重を示す結果となったが、破壊状況は、フィンガージョイント部の破断が生じても桁の崩壊には至らず、安全面では効果的な補強法であると言える。

参考文献

- 1) 農林水産省： <http://www.maff.go.jp/www/info/bunrui/bun05.html>
- 2) 北海道水産林務部：平成17年度北海道林業統計，2006.
- 3) 山本宏：渡島地方産スギ造林木の材質試験，木材の研究と普及，8月号，1974.
- 4) 滝沢忠昭：道南スギの材質，日本木材学会北海道支部講演集，22号，1990.
- 5) 松本章：道南スギで造った構造用ボード，林産試だより，8月号，1983.
- 6) 平沢秀之，及川昭夫，小林朗，入江康孝：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，第3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.155-160，2004.
- 7) 平沢秀之，三河友人，及川昭夫，小林朗：炭素繊維で補強したカラマツ集成材の耐荷力試験，第5回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.83-86，2006.
- 8) 柳川靖夫：繊維材料による縦つぎラミナの部分的補強，奈良県林試木材加工資料，No.25，pp.28-32，1996.
- 9) 構造用集成材の日本農林規格：平成15年2月27日農林水産省告示第235号.
- 10) 日本建築学会：木質構造限界状態設計指針(案)・同解説，2003.