

特別発表

林道橋における間伐材強化桁の開発について

ニツ井管林署 桐越 功
局森林整備課 佐藤 重和
大関千賀男
佐藤 誠

1. はじめに

戦後、拡大造林が積極的に導入され、今その造林地の間伐が喫緊の課題となっている中で、搬出コスト高に加え、間伐材は細い・曲がりやすい等の欠点から、間伐の遅れが目立っている現状にある。

また、最近では、自然指向への高まりから、木橋の良さが見直されつつあるが、強度等観点から、集成材、あるいは、非木質系による橋梁がほとんどとなっている。

この問題を解決するため、当管林局では、曲がりやすいという間伐材の劣性を逆手にとり、大荷重車輛の負荷に耐えられる桁として甦らせる方法を模索し、このほど、新しい構造の強化桁を考案・開発した。

この桁は、強度試験を経て、この程、現場へ導入（新橋梁として架設）し、実車輛走行試験をクリアしたので、これまでの一連の成果を報告する。

2. 間伐材強化桁の構造・性能と特徴

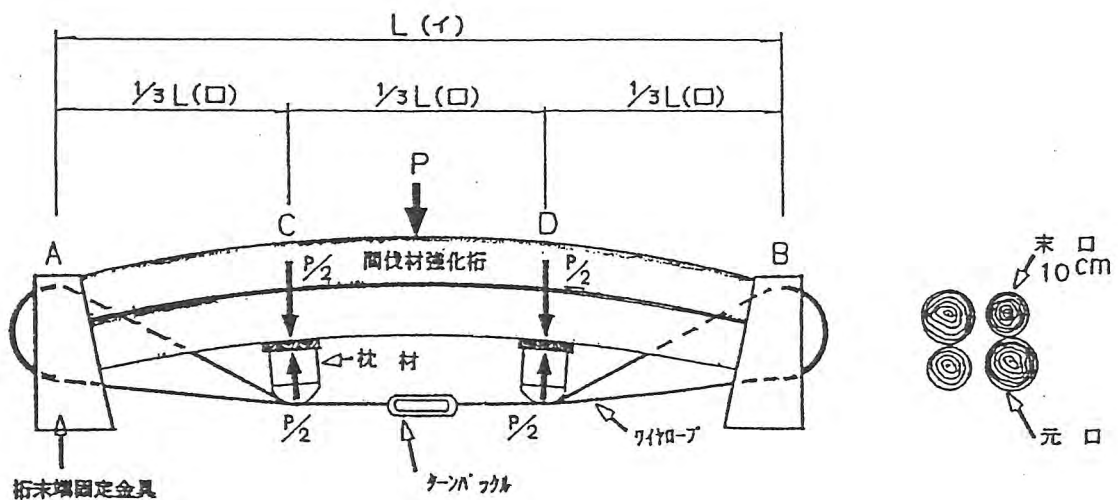
1) 構造・性能

この桁は、間伐材とワイヤロープの合成で成り立つ。原木は、元口と末口で太さが異なるので図-1のように、4本を交互に束ねることにより、全体を均等な太さに揃えて使用する。

桁の両端A、Bには、桁末端固定金具を被せ、その金具から、（桁の3等分点C、D下部に枕材を挟んで）ワイヤロープを掛け渡し、中央のターンバックルで締め、一定の「反り」（キャンバー）をつけて完成させる。

従って、この桁は、全長を1スパンとする性質（イ）と3区分の（連続桁ではないが、それに似た）短い独立スパンとしての性質（ロ）とを具備することになる。

図-1 間伐材強化桁の基本構造



(イ)では、例えば、中央に荷重P（2点C、Dには、P/2 ずつの分担荷重）がかかれば、枕材も一緒に押し下げられるようにするが、桁の反りが減少する分、索は弾性伸長して索張力が増大し、枕材を下から（それぞれ、P/2 ずつの力で）押し上げ、その「下支え」によって、荷重負担に耐えるようにするのが、この桁の基本原理である。

(ロ)では、(イ)の索張力のために、負荷時には、間伐材の軸方向に大きな圧縮力が作用して、太鼓橋に似た現象で、曲げられにくくなり、スパンの3分の1区分分割機能と相俟って、かなりの大荷重に耐えられる。（ただし、太鼓橋と違って、末端部がアバットに固定されているのではなく、索の伸長で変位可能な構造のため、荷重が過大になっても木材が過剰圧縮により、破壊される恐れはない）

2) 特徴

この桁は、小径間伐材の欠点とされる曲がり（撓み）易さを逆に利用して、ワイヤロープの抗張力を発生させるというアイデアで成り立つ。逆に言えば（ワイヤロープの出番を確保する上から）皮肉にも、従来の剛性志向の撓みにくい鋼材、コンクリートには、応用不向きな方法である。間伐材の利点があることにある。

従来から、吊り橋、斜張橋のように、ワイヤロープをパートナーとして橋梁に併用する例は珍しくないが、これらはすべて「上から吊る」方式であるのに対し、この新しい間伐材強化桁では、逆に「下から支える」という新しい発想に基づいているのである。

また、PC桁のように製造時に最大の強度が保証される桁と違って、この桁では、架設後、いつでもターンバックルのコントロールによって、自由に特性を調整維持できるところに、従来の剛性桁には見られなかった利点がある。

3. 間伐材強化桁の設計計算

別紙参照。

4. 間伐材強化桁の試作と強度試験

前項（別紙）の設計計算書に基づいて、次のような桁を試作した。

- ・全スパン長：6 m
- ・間伐材：平均末口径 11cm，元口径 18cm，中央径 14cm，弾性係数 $E:86,000 \text{ kg/cm}^2$ の1基4本構成桁とする。4本桁の断面係数 $Z:1,078\text{cm}^3$ 断面二次モーメント $I:7,543 \text{ cm}^4$
- ・枕材：直径 30 cm，高さ 35 cm（下部に炭素鋼キャップ，誘導板付き。上部に厚さ 5 cm の材板の袴を履かせる）
- ・桁末端固定金具：幅 200 mm，横 507 mm，縦 488mm，厚み 16~20 mm 一組の重量 90 kg シープ付。（当管林局特注）
- ・ワイヤロープ：6 x 19 ϕ 20 mm，メッキ種，構造用ストランドロープ使用，末端部フォークエンド加工
- ・ターンバックル：USA 型（破断荷重 49 トン用）
- ・桁中央の反り：4 %（12 cm）

【参考】 桁の作成順序

図 - 2

主桁を桁末端固定金具で固定

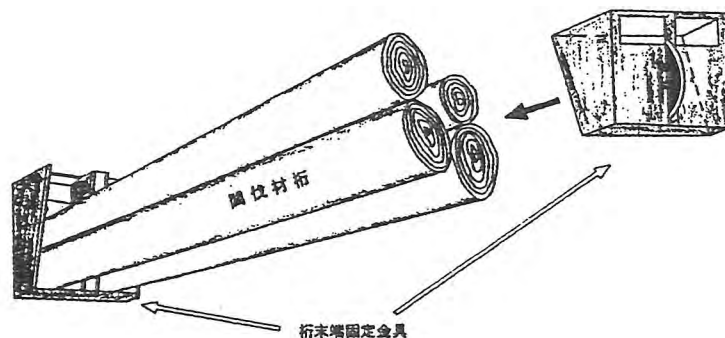


図 - 3

枕材の作製と取り付け

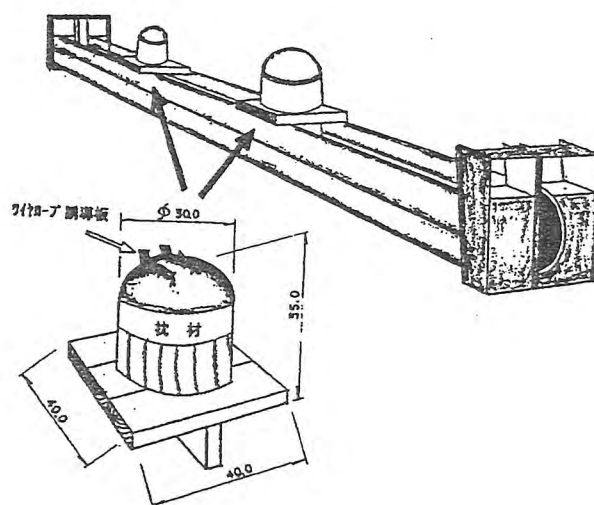


図 - 4

組立完成

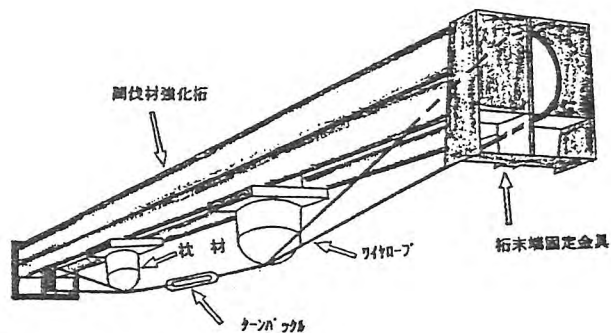
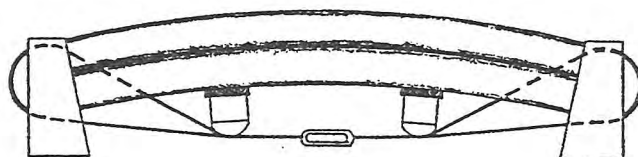


図 - 5

キャンバーを付けて完成



この桁は、秋田県立木材高度加工研究所（能代市）の100 トン試験機で実験した結果、次のような成果を得た。

1) 強度試験の条件

① 丸太材の弾性係数（調査方法：縦振動方法）表-1
（表-1）

N0	丸太の長さ m	未口径 cm	元口径 年輪 数	元口径年輪 幅 mm	単位重量 kg/m ³	弾性係数 Efr	備 考
1	6.295	10.5	22	3.342	772.1	9.134	
2	6.210	10.5	22	3.552	689.1	9.728	
3	6.120	11.8	23	3.889	610.2	6.665	
4	6.310	11.1	22	3.675	721.5	8.377	
平均		11.0		3.615	685.7	8.476	
故に、弾性係数は、 $8.476 / 9.8 \times 100 \times 1,000 = 86,000 \text{ kgf/cm}^2$							

②荷重の載過位置は、桁上のC、Dの2点荷重を採用することとした。

2) 試験結果

① 間伐材強化桁の場合 表-2
（表-2）

回数	最大荷重	変位	ワイヤロープの張力
1	147.0 KN	120.8 mm	28.215 t
2	141.5 KN	119.2 mm	27.027 t
平均	144.3 KN	120.0 mm	27.6212 t

※ トンに換算 $144.3 \text{ KN} \div 9.8 = 14.7 \text{ tf}$ （1基当たり）

② 丸太のみの場合 表-3
（表-3）

回数	最大荷重	変位
1	18.6 KN	120.4 mm
2	18.4 KN	120.8 mm
平均	18.5 KN	120.6 mm

※ トンに換算 $18.5 \text{ KN} \div 9.8 = 1.9 \text{ tf}$ （1基当たり）

なお、全荷重と反り減量（変位）との関係は、次の図-6、7のとおりである。

図-6

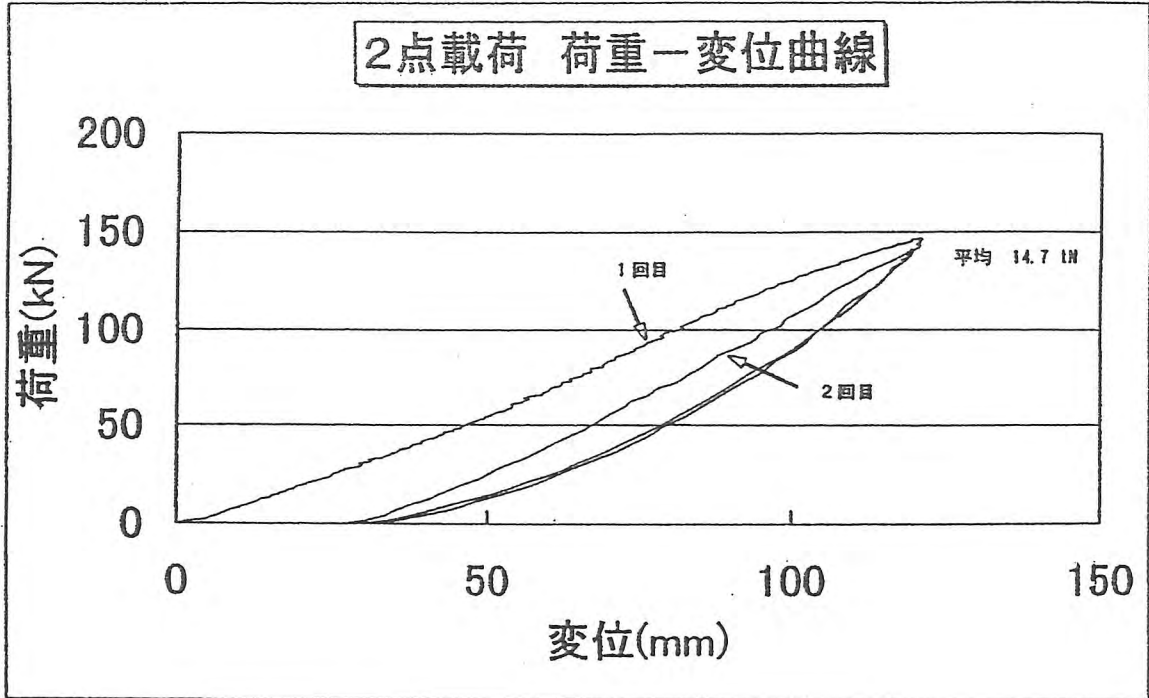
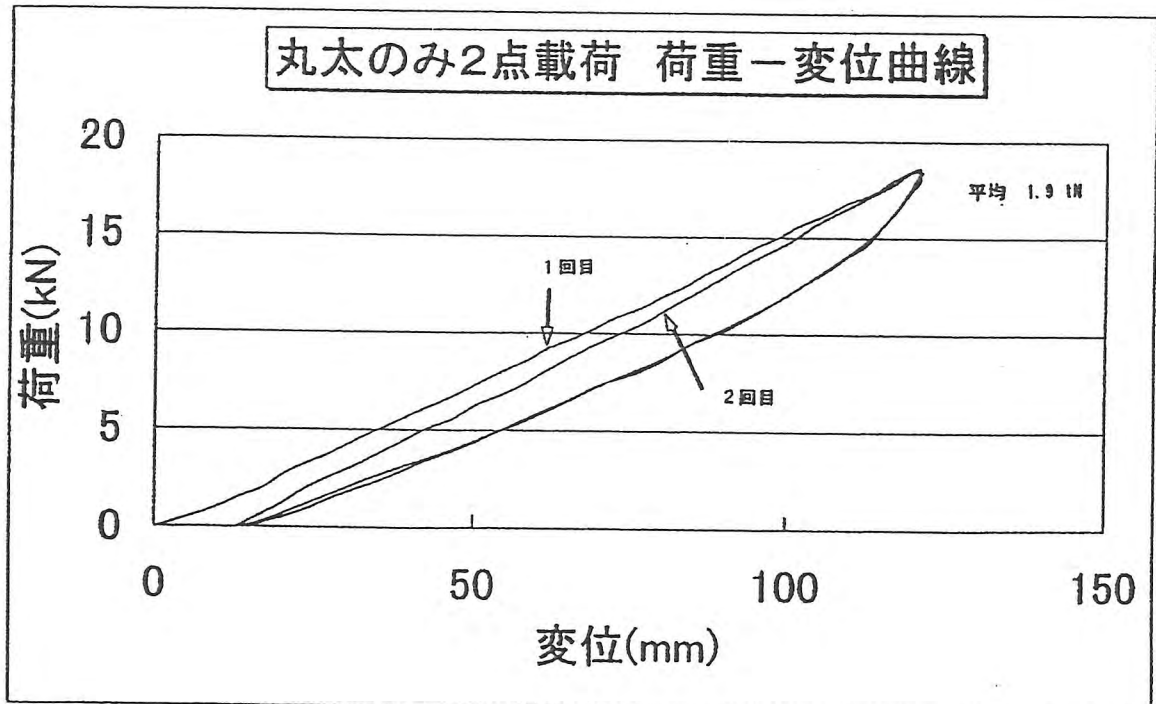


図-7



この桁は、C、Dの合計荷重と反り減量との間に、図-6のような関係が得られ、反りがなくなるまでの荷重（通常荷重）は14.7トン（二点には7.35トンずつの分散荷重になる）を上回ること、すなわち常用使用で、14.7トンという細い間伐材で信じ難いような大荷重に耐えられることが分かった。

もちろん、さらに荷重を増やせば、桁は水平を越えて「撓み」の領域に移行するが、木橋には、安全性ならびに乗り心地の面から、スパンの0.3%という撓み制限が設けられているので、この強化桁では、撓み領域は回避し、安全な反りの領域内（12~0 cm）で使われるよう常用荷重14.7トンを最大許容値とする。

また、同研究所の協力により、索の末端部にワイヤストレーンゲージを貼って、歪み計による索張力を測定した結果、表-2のように、平均索張力は、14.7トン負荷のとき27.6トンであった。

なお、参考までに、ワイヤロープを除去したときのカーブは、図-7のようであり、間伐材だけの（索無しでの）耐力が（八分の一に減少してしまい）、いかに小さいかを知ることができる。

この桁を4基並べて橋梁を架設すれば、総荷重58.8トンまで耐えられる単純計算になるが、実際の荷重は、静荷重ではなく、移動荷重であるばかりでなく、床版重量や冬季の雪荷重などの死荷重を含めれば、林道規程1級林道橋25トンの設計荷重に対し、この程度の余裕は必要であると考えられる。

5. 架設の実行と車輛の走行試験

1) 現場施工の説明

当営林局二ツ井営林署管内二番沢林道に架設してある旧木橋を解体撤去し、間伐材強化桁を使用し、新橋梁を架設した。

(1) 上部工

構造：間伐材4本構成桁を4基使用

載荷荷重：L - 25 tf

橋長：6.0 m

有効幅員：4.0 m

間伐材使用材積 表-4

(表-4)

名 称	規 格	本 数	単材積 ^{m³}	材 積 ^{m³}	備 考
主 桁	φ 10 cm L=6.00 m	16	0.073	1.168	
枕 材	φ 30 cm L=1.00 m	8	0.090	0.720	
横 床 版	φ 16 cm L=4.40 m	38	0.113	4.294	
縦 床 版	φ 16 cm L=3.60 m	70	0.092	6.440	
高 欄	φ 10 cm L=6.00 m	2	0.073	0.146	
水 縁 木	φ 18 cm L=3.60 m	1	0.117	0.117	
計		135		12.885	

(2) 下部工

橋台・土留：大型メッシュブロック籠使用（籠の規格 1.0 m×1.0 m×2.0 m）

橋座・橋壁：生コン使用（16 - 8 - 40）

図 - 8

二番沢橋構造図

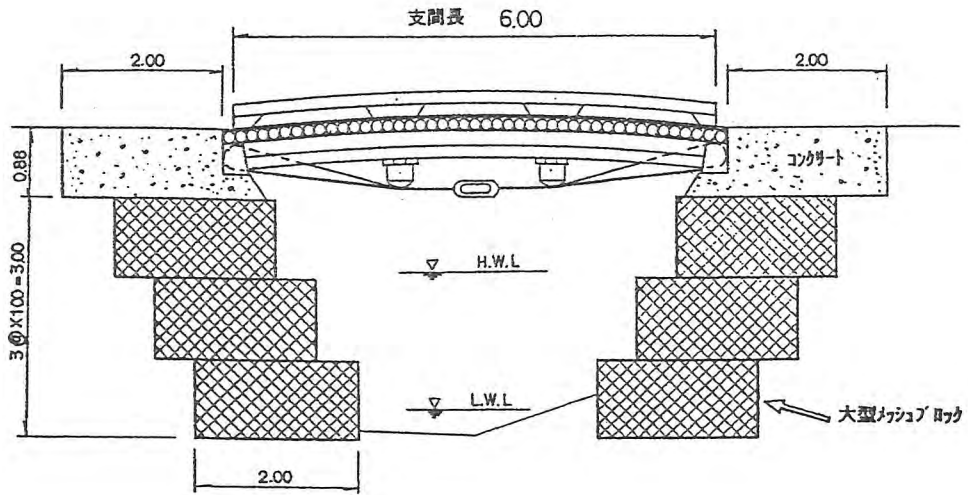
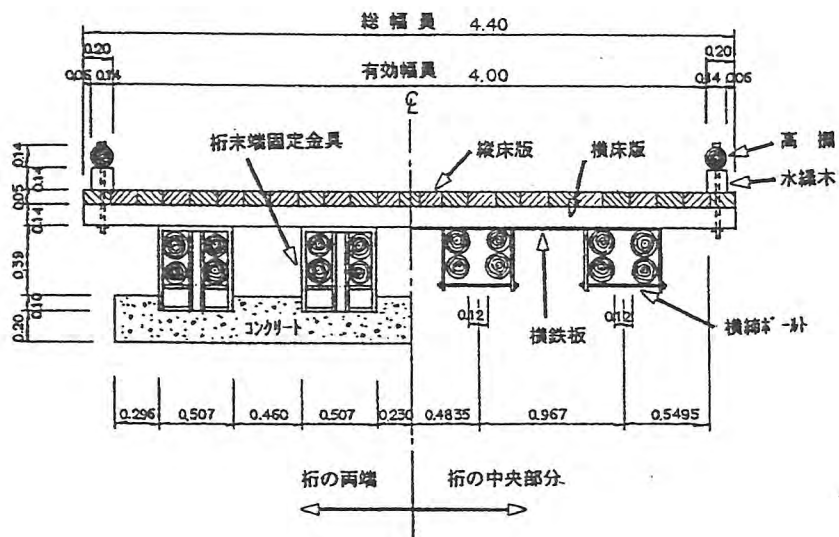


図 - 9

上部工



2) 架設の要領

- ①主桁の組立：主桁の間伐材は、害虫予防のため、予め皮を剥いだ後、4本をチェーンソーで切り揃えて組み合わせ、隣接の足場のよい広場で組み立てた後、クレーン車で吊り上げて、架設した。
- ②主桁の取り付けと間隔：車輛が必ずしも中央を走行するとは限らないので、4基の主桁は、これを考慮した間隔で配置した。
- ③横鋼板の取り付け：主桁と主桁の間隔が、スパンの途中で変わらないように、横振れ防止を兼ねて、幅10cm、厚さ6mm、の平鋼板に桁の動きを押さえる縦板を溶接して、スパンの2箇所配置し、その下端部をボルト締めした。
- ④横床版と主桁との結合：主桁の上に（主桁と直角方向に）隙間なく敷き詰める横床版は、本来は角材を用いるべきところであるが、ここでは、間伐材を太いものは太鼓落として用いた。主桁との結合は、主桁に穴をあけて強度低下を来さないようボルトや折れ釘の利用を回避し、強力なアラミド繊維のケブラーロープ（商品名）で締め上げ、ワンタッチグリップと称する止め金で、固定する方法を採った。
ただし、この方法では、締まりが不十分になり易い欠点が生じたので、次回からは、主桁の下部に宛板を挟んで、番線でねじり締めするようにな工夫が必要である。
- ⑤縦床版と横床版との結合：縦床版には、厚さ50mmの角材（製材品）を用い、横床版と直角方向（主桁の方向）に、隙間なく並べ、直径9mm、首下長125mmのスクリューボルトで縦床版と結合させた。このため、縦床版は、主桁の反り（キャンバー）に馴染まされ、車輛の走行にも支障ないものに仕上がった。
- ⑥水線木・高欄の取り付け：直径12mm、首下長360mmのボルトで、縦・横床版、水線木、高欄を取り付けた。

3) 車輛の走行試験

この橋梁に、小型及び大型ダンプカーを走行させた。

車輛の諸元は、次の表-5のとおりである。

(表-5)

車種	車体重量 t	軸距 (ホイールベース) m	輪距 m	碎石満載時の積載重量 t		
				総重量	前輪荷重	後輪荷重
小型(4t)ダンプ (日野KC-FC3JCAD) 後輪1軸	3.750	2.90	1.80	8.390	3.090	5.300
大型(10t)ダンプ (日野U-FS3FKBD) 後輪2軸	11.200	3.86	1.88	23.220	6.970	16.250

上記の車輛を時速 小型は、20 km、大型は、10 km で走行させて、荷重移動による桁の変形、動揺を観察するとともに、当該車輛の後輪中心が、桁の中央と6分の1の点に来た時の桁中心の変形量（反りの変化=減少量）と索張力（荷重による増加量）をそれぞれ、車輛を停止させて計測した。

また、橋梁の架設の直後、車輛の走行後のキャンバーをそれぞれ計測した。

桁の反り変化（歪み量）と索張力の測定結果は、次の表-6, 7, 8のとおりである。
 1) 小型（4t車）の場合で、左側の桁2基を測定（全重量 8.39 t）
 （表-6）

調査位置 静止・ 走行別 調査 項目		後輪を橋台側から 1mの位置に載せた 場合（全荷重）		後輪を桁長 中心の位置に 載せた場合		橋梁中央を 10km/h走行	
		桁の測定位置		桁の測定位置		桁の測定位置	
		左側から 1番目	左側から 2番目	左側から 1番目	左側から 2番目	左側 から 1番目	左側 から 2番目
橋梁の センターに 静止荷重	歪み量 mm	12.7	9.5				
	張力 tf	1.24	1.31				
橋梁の 左端桁に 静止荷重	歪み量 mm			14.3	21.4		
	張力 tf			1.41	1.49		
橋梁の センター 20km/h走行	歪み量 mm					11.9	11.8
	張力 tf					1.09	1.35

※ 歪み量は、ワイヤロープ1本当たりの数値である。

2) 大型（10t車）の場合で、左側の桁2基を測定 1回目（全重量 23.220 t）
 （表-7）

調査位置 静止・ 走行別 調査 項目		後輪を橋台側から 1mの位置に載せた 場合（全荷重）		後輪を桁長 中心の位置に 載せた場合		橋梁中央を 10km/h走行	
		桁の測定位置		桁の測定位置		桁の測定位置	
		左側から 1番目	左側から 2番目	左側から 1番目	左側から 2番目	左側 から 1番目	左側 から 2番目
橋梁の センターに 静止荷重	歪み量 mm	35.0	30.1				
	張力 tf	3.11	3.15				
橋梁の 左端桁に 静止荷重	歪み量 mm			50.1	47.6		
	張力 tf			4.28	4.36		
橋梁の センター 10km/h走行	歪み量 mm					29.3	42.3
	張力 tf					3.80	3.58

※ 歪み量は、ワイヤロープ1本当たりの数値である。

3) 大型 (10t車) の場合で、右側の桁2基を測定 2回目 (全重量 23.220 t)
(表-8)

調査位置 静止・ 走行別 調査 項目		後輪を橋台側から 1mの位置に載せた 場合 (全荷重)		後輪を桁長 中心の位置に 載せた場合		橋梁中央を 10km/h走行	
		桁の測定位置		桁の測定位置		桁の測定位置	
		左側から 3番目	左側から 4番目	左側から 3番目	左側から 4番目	左側 から 3番目	左側 から 4番目
橋梁の センターに 静止荷重	歪み量 mm	26.4	28.9				
	張力 tf	2.20	2.09				
橋梁の 右端桁に 静止荷重	歪み量 mm			35.1	43.3		
	張力 tf			3.37	3.50		
橋梁の センター 10km/h走行	歪み量 mm					25.2	17.7
	張力 tf					3.09	4.04

※ 歪み量は、ワイヤロープ1本当たりの数値である。

キャンパー測定の結果は、次の表-9のとおりである。
(表-9)

	桁, 架設時 cm			4tダンプカー 各種試験終了後 cm			10tダンプカーで 1回目の 各種試験終了後 cm			10tダンプカーで 2回目の 各種試験終了後 cm		
	左桁中間	橋梁センター	右桁中間	左桁中間	橋梁センター	右桁中間	左桁中間	橋梁センター	右桁中間	左桁中間	橋梁センター	右桁中間
キャン パー値	14.9	14.9	14.5	14.8	14.9	14.5	14.2	14.4	14.1	13.9	14.3	13.8
走行前 との差				-0.1	0	0	-0.7	-0.5	-0.4	-1.0	-0.6	-0.7
走行前 との差 平均値				- 0.03			- 0.53			- 0.77		

各調査の結果、移動荷重による桁の動揺、振動は、肉眼では全く認められず、安定しており、運転手の運転感触も普通と変わらないことが分かった。また、桁の中央変形(反り変化)は、小型ダンプでは、ほとんど起こらず(表-8, 最大 21 mmで)、大型ダンプでは、橋梁の左端桁上に静止状態で、後輪中心が桁の中央に来たときに、表-7のように、最大値 50 mm (スパン長 6.0 mの1.7%)を示した。この値は、先の基礎試験から換算すると若干大きいかも知れないが、轍の位置による影響が現れたものと考えられる。

なお、この 1.7% という反り変化が妥当であるかどうかは、よく分からないが、最大どこまで許されるかは今後、検討して行きたい。

また、索張力については、表一7のように、最大値が4.36 t であり、索張力の許容値をクリアしたので、安全上支障がないものとする。

キャンパー値については、従来の橋梁は、床版等の死荷重で、撓むのが普通であるが、この桁は、おそらく材のクリープによるものとみられ、製作時のキャンパー(12 cm)よりも、表一9のように、3 cm増大(15 cm)したものとする。

また、小型車輛の走行後は、ほとんど変化がなく、大型車輛の走行後は、2回目で0.8cm程度減少している。なお、架設した数日後、キャンパーを測定した結果、変化もなく安定している。

6. 上部工の経費

橋梁架設工及び資材費の内訳経費は、次の表一10のとおりである。

(表一10)

工種	名称	摘 要	数量	単位	単 価	金 額
上部工 架 設	枕木作成	8箇作成	2.0	人		
	桁 作 成	4基作成	3.0	人		
	桁 架 設	4基	1.5	人		
	縦床版取付	クリップル及びケブラーロープの取付を含む	4.0	人		
	横床版取付	スクリューボルトの締付を含む	3.0	人		
	高欄取付	水線木を含む	0.5	人		
	小 計		14.0	人	19,400	271,600
	トラッククレーン賃	4.8~4.9 t 桁架設及び床版取付に使用	1.0	日	29,500	29,500
	小 計					29,500
	計					301,100
資材費	資 材 費	別紙明細書のとおり	1	式		2,044,070
	計					2,044,070
合 計 (直接工事費)						2,345,170

その他の経費 表一11

(表一11)

工種	名称	摘 要	数量	単位	単 価	金 額
間伐材	木材価格		12.885	m ³	3,000	38,655
	木材賃挽料	横床版の太鼓落し、縦床版の賃挽で消費税を含む	4.685	m ³		78,860
計						117,515

資材費明細書 表-12
(表-12)

名 称	規 格 等	数 量	単 位	単 価	金 額
桁 末 端 固 定 金 具	鉄製7°(φ300mm)付き, 鋼板(t=16~20mm)溶接, 枕材用キヤップ 加工代含む 2個で1組	4	組	140,000	560,000
ワイヤロープ	6 × 19, φ 20 mm, メッキ種, 構造用ストランド7°使用, 末端部フォークエンド加工	8	本	140,000	1,120,000
ターンバックル	USA型, メッキ種, 1.1/2 × 12, 破断荷重 49トン用	4	本	35,000	140,000
焼 入 ボ ル ト	ターンバックル用ボルト, φ 35 × 175 特注, メッキ種	8	本	7,200	57,600
ワンタッチ・ グリップル	φ 5 mm 用	76	個	990	75,240
ケブラロープ	φ 5 mm 用 アラミト織	165	m	390	64,350
コーチスクリユー ボルト	φ 9 mm × 125	350	本	50	17,500
同上丸ワッシャー	φ 9 mm 用	350	枚	5	1,750
平 鋼 板	t = 6 mm × 100 mm × 5.5 m 1 枚当たり25.9 kg × 3 枚 = 78kg	78	kg	77	6,006
全ネジボルト	3/8 × 500 ナット付	8	本	68	544
全ネジボルト	高剛用, φ 12 mm × 360	8	本	135	1,080
計					2,044,070

この橋梁に使われた木材は、(表-11)約 13 m³, 12 万円程度に過ぎないが、その他に資材費を見積ると上記のように意外に膨らむことが分かった。しかし、今後は、ワイヤロープの種類を変えてプリテンション加工品を避け、さらに末端加工を別の方法(アイエンドから低廉なトヨロック)に変えるなどで、40万円程度のコスト削減は十分可能な見通しなので、これらを見込めば、PC橋の橋梁よりも、総じて、20%程度、有利になるのは確かと見られる。

7. 反省ならびに今後の検討事項

初めてのケースだったので、すべてに亘り苦労し、考え抜いて実行したつもりであったが、実際に現場で架設してみると、次のような反省点が生じた。

1) 横床板の取り付け：今回は、ケブラロープを用い、横床板と主桁を特殊な英国製ワンタッチクリップで縛ったが、緩みは避けられず、今後は、別の方法で臨みたい。現在、考えているのは、横床板に小さな穴をあけ、番線を用いて、主桁に当て板を挟み、ねじり固定させる改善方法である。これにより、経費も、14 万円程度節約できる見通しである。

2) ワイヤロープのプリテンションの省略：今回用いたワイヤロープは、予め、永久伸びを落とし

たプリテンション加工品を使用したが、工場内加工費が割高になるので、これからは、未加工状態で使用したい。この場合は、橋梁に重車輛を乗せて停止させ、反りが減退した分を、ターンバックルで、もとの反りに復元させるようにすれば（安定するまで繰り返す）解決できる。

8. まとめ

この研究では、間伐材強化桁の考案に始まり、試作と強度試験を経て、実際の橋梁に導入し、重車輛の走行を経て、遂に、成果を確認するところまでの「一連の開発シリーズ」を体験したことになる。これらを通じ、再度、この間伐材強化桁木橋の特徴を整理してみれば、

★第一に、従来の橋梁と違って、桁の資材が、容易に現場調達でき、その場で、切り揃えて、簡単に架設できる迅速さが最大の特徴と言える。そのため、工期も著しく短縮されるばかりでなく、将来、材料腐朽が起きて、交換が容易である。

★第二に、桁の重量が挙げられる。同じ強度（許容応力を満たす）の単純桁で較べてみると、矩形断面のスギ集成材や鋼材の、Iビームのおよそ80%、既製品PC桁の14%程度に過ぎない。桁の重量はクレーンで架設する現代では、施工上の優劣にはそれ程響かないであろうが、いずれにしても、軽量であるに越したことはない。

★第三に、桁の強度特性を、未永く調整・維持できる点が挙げられる。従来の剛性桁は、製造（架設）時に最大強度が保証されているのに対し、この間伐材強化桁では、ターンバックルの増し締めによって、未永く当初の強度を維持できるのである。また、製造過程における品質管理問題もなく、品質の信頼性に特別な気配りを要さない。

★第四に、経済性の問題が挙げられ、同じ木橋でも、従来の工場加工を不可避とした集成材桁に比べ、経済的なばかりでなく、PC桁橋に比べても、凡そ20%低廉になる。

★第五に、林業の見地からみた、間伐材の新しい用途開発の意義が挙げられる。人工林から多量に産出される間伐材の用途開発は、昨今の社会的問題になっている。量的にみれば、木橋に使われる木材量は僅かなので、間伐材の需要拡大に繋がるというわけにはいかないが、質的な意味で、木材（素材）利用の範囲が広がるのは林業行政上、喜ばしい限りである。特に、これまで、「細くて、柔らかくて、曲がり易い」劣性ばかりが強調されてきた間伐材が、その劣性を逆に長所として活かし、剛性桁にも勝る成果を得た意義は大きく、「災い転じて福となす」「柔よく剛を制す」の諺に繋がる感動を覚える。

★第六に、自然環境との調和性が挙げられよう。この橋は、豊富に木材（丸太素材）が使われていて、環境に優しく、風致的にも申し分ないように思われる。

以上、主な6点を挙げたが、この開発が、これからの林道計画に広く活かされ、自然環境との調和のもとに、普及するよう期待してやまない。

最後に、桁の強度試験で、種々、お世話になった木材高度加工研究所の諸先生、ならびに、現場の計測にご協力いただいた東京製綱の技術陣諸氏に対し、心から厚くお礼申し上げたい。

なお、この間伐材強化桁については、当管林局長から特許出願中である。