

〈資料〉

強化LVLを用いた木製歩行者自転車用柵の曲げ試験

中田欣作・園田良一*¹

スギ、ヒノキ間伐材の土木分野への需要拡大を目的として、円柱加工材の支柱と横木を強化LVL製の接合ピンと接合板で接合した木製歩行者自転車用柵を考案した。強化LVL製の接合ピンのみを用いて接合した木柵の場合、垂直荷重による曲げ試験では接合ピンが曲げ破壊し、水平荷重では横木が端部で割裂破壊あるいはスパン中央部で曲げ破壊した。強化LVL製の接合ピンと接合板を用いた木柵の場合、垂直荷重では横木がスパン中央部で曲げ破壊し、水平荷重では横木が端部で割裂破壊あるいはスパン中央部で曲げ破壊した。強化LVL製の接合板と金物あるいは金物のみを用いて接合した木柵では、垂直荷重および水平荷重で横木がスパン中央部で曲げ破壊した。すべての木柵の強度は、歩行者自転車用柵の種別Pにおける垂直および水平荷重の設計強度を上回り、種別SPにおける垂直荷重の設計強度を上回ったが水平荷重の設計強度を下回った。円柱材の横木、強化LVL接合ピンおよび接合板の耐力を予測した結果、それらの耐力の計算値は実験で発生した破壊形態を良く説明しており、木柵としての耐力の計算値は実験値と概ね一致した。

1. はじめに

近年、景観に配慮した防護柵の整備が求められている中で、車両用防護柵としての木製ガードレール¹⁾³⁾が注目され奈良県内でも試験的に施工されている。車両用防護柵では実車の衝突試験による評価が必要であるが、歩行者自転車用柵では静的な強度試験で評価が行えるので、後者においてはスギ、ヒノキ間伐材を用いた新たな商品開発の可能性が高いといえる。

歩行者自転車用柵では、従来は鉄パイプの柵が一般的であり、景観を重視する場所では偽木の柵が多いが、最近では木製の柵が少しずつ増えてきている。しかし、横木の円柱加工材（以下、円柱材と略す。）を支柱の円柱材に直接挿入するタイプでは施工性が悪く、接合部分に金具を用いるタイプでは、金具との接触部分に結露が発生し木材の腐朽が促進される危険性がある。

そこで、円柱材の支柱と横木を強化LVL製の接合ピンと接合板で接合した木製歩行者自転車用柵（以下、木柵と略す。）を考案した。強化LVL製の接合具を使用した木柵はオール木製であり結露の発生要因がないので、木材の本来持つ耐久性を損なうことが少ないと考えられる。また、デザイン的にもこれまでの柵にはない斬新なものとなっているため、商品として有望である。

本研究では、当センターで考案した木柵について垂直および水平方向からの荷重による曲げ試験を行い、必要強度を満たしているかの検討を行った。

なお、本試験は奈良県森林組合連合会からの受託研究として行ったものである。

2. 材料と方法

2.1 供試材料

図1および図2に木柵の部材と接合具の詳細を示す。スギ丸太から作製した円柱材を支柱と横木に用いて以下に示すA～Fタイプの木柵を作製した。

Aタイプは強化LVL⁴⁾製の接合ピンのみを用いて接合した木柵であり、支柱の側面および横木の木口面に直径20mmの穴をあけ、そこに直径20mmの強化LVL接合ピンを挿入して支柱と横木を接合した。支柱には直径120、100および80mmの円柱材を、横木には直径80および60mmの円柱材を組み合わせて用いた。以下、支柱の直径と横木の直径でA120/80タイプの様に略す。

Bタイプは強化LVL製の接合ピンと接合板を用いて接合した木柵であり、支柱の側面と横木の木口面に幅11mmのスリットを切り込み、そこに厚さ10mmの強化LVL接合板を挿入し、円柱材と強化LVL接合板に予めあけた直径20mmの穴に直径20mmの強化LVL接合ピンを挿入して支柱と横木を接合した。Aタイプと同様に、支柱には直径120、100および80mmの円柱材を、横木には直径80および60mmの円柱材を組み合わせて用いた。

CおよびDタイプは、支柱に直径80mmの円柱材の半割り材を2枚合わせて用い、横木に直径60mmの円柱材を用

*¹：奈良県森林組合連合会

いた木柵であり、支柱の半割り材には溝加工を施して厚さ10mmの強化LVL接合板をボルト止めした。Cタイプでは、横木の木口面に幅11mmのスリットを切り込み、円柱材と強化LVL接合板に予めあけた直径12mmの穴に直径12mmの強化LVL接合ピンを挿入して強化LVL接合板と横木を接合した。Dタイプでは、横木の木口面に金具を木ねじ止めし、金具と強化LVL接合板をボルト止めた。

EおよびFタイプは支柱に金物を取り付けた木柵であ

り、支柱には直径80mmの円柱材を、横木には直径60mmの円柱材を用いた。EおよびFタイプでは、それぞれ金具を支柱にボルトおよびコーチボルト止めした。これらの金具と横木に木ねじ止めした金具とをボルト止めて支柱と横木を接合した。

2.2 曲げ試験の方法

図3に示す通り、東京衡機製造所製実大木材試験機を用いて、スパン2000mmの中央集中荷重により曲げ試験を行い、最大荷重およびスパン中央の変位を求めた。ただ

タイプ		A	B	C	D	E	F
支柱	材料	円柱材	←	半割り円柱材	←	円柱材	←
	直径	120, 100, 80mm	←	80mm	←	←	←
	接合具	強化LVL接合ピンφ20	強化LVL接合板厚さ10mm	←	←	金具A	金具B
横木	材料	円柱材	←	←	←	←	←
	直径	80, 60mm	←	60mm	←	←	←
	接合具	←	←	←	金具C	金具D	金具D
			強化LVL接合ピンφ20	強化LVL接合ピンφ12	ボルトM8×25 木ねじ3.8×32	←	←

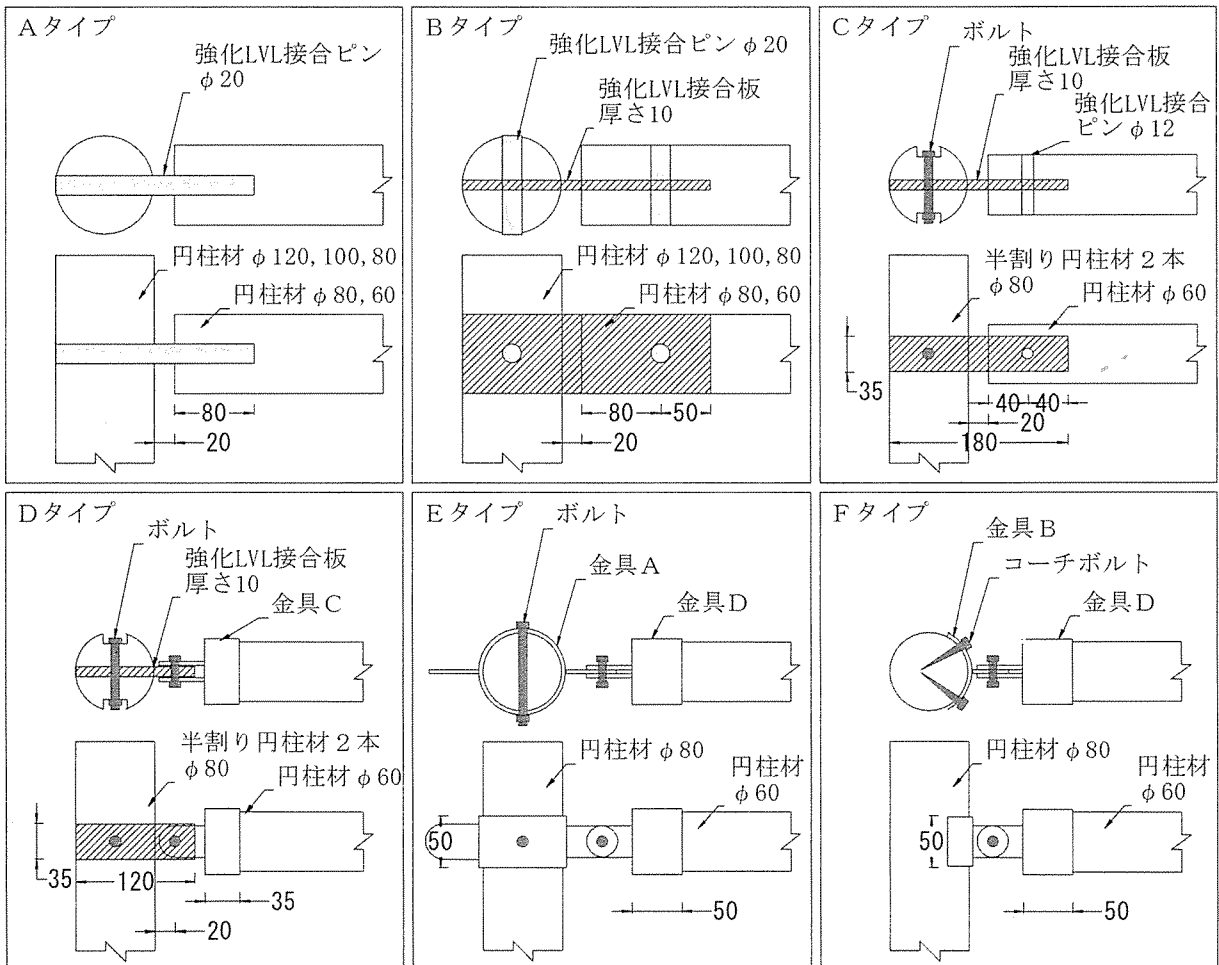


図1 木製歩行者自転車用柵の部材および接合具

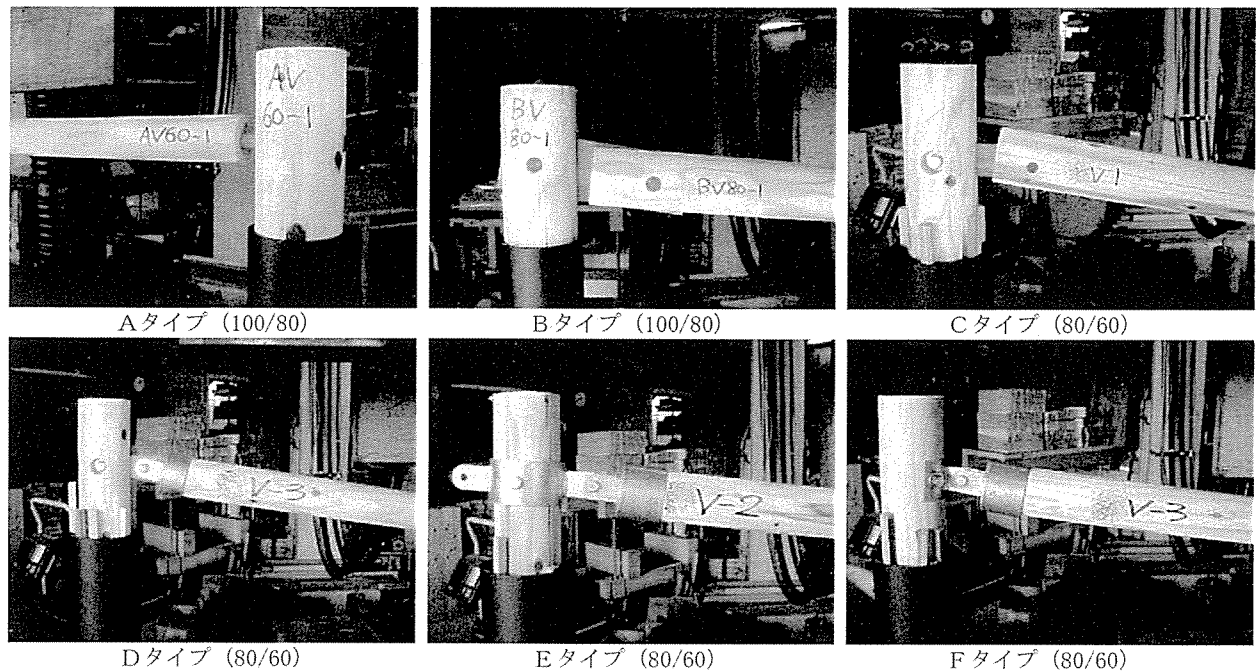


図2 試験中の各タイプの木製歩行者自転車用柵

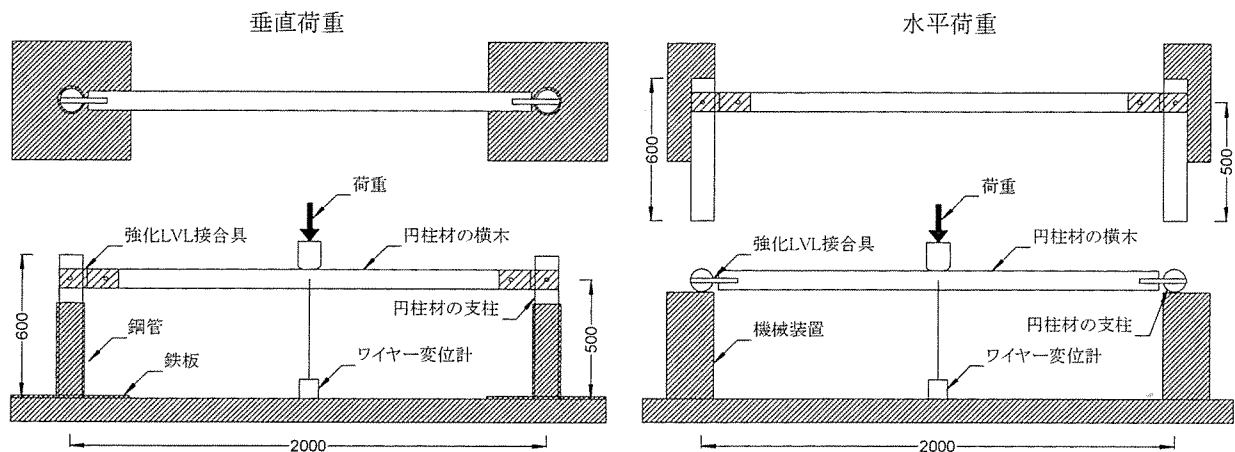


図3 曲げ試験の方法

し、A120/80およびB120/80タイプではスパンを1500mmとした。荷重方向は、垂直荷重および水平荷重とした。試験体は各3体としたが、A120/80およびB120/80タイプではそれぞれ1体で垂直荷重のみを行い、DおよびEタイプの水平荷重では2体とした。

また、後述する木柵の耐力推定において必要となる横木の曲げ強さを求めるために、直径80mm、長さ2500mmの円柱材3本について、横木単体の曲げ試験をスパン2000mmの中央集中荷重により行った。なお、円柱材の密度および含水率はそれぞれ0.58g/cm³および61.3%であり、曲げヤング係数および曲げ強さはそれぞれ8.10kN/mm²および55.8N/mm²であった。

3. 結果と考察

3.1 曲げ試験の結果

図4に曲げ試験における各タイプの破壊形態を、図5～7に荷重-変位曲線を示す。

Aタイプの垂直荷重による曲げ試験では、強化LVL接合ピンが支柱と横木の間で曲げ破壊した。また、横木が端部で割裂破壊する場合があった。水平荷重による曲げ試験では、横木の端部が割裂破壊あるいはスパン中央部で曲げ破壊した。強化LVL接合ピンに破壊は認められなかった。

Bタイプの垂直荷重では、横木がスパン中央部で曲げ

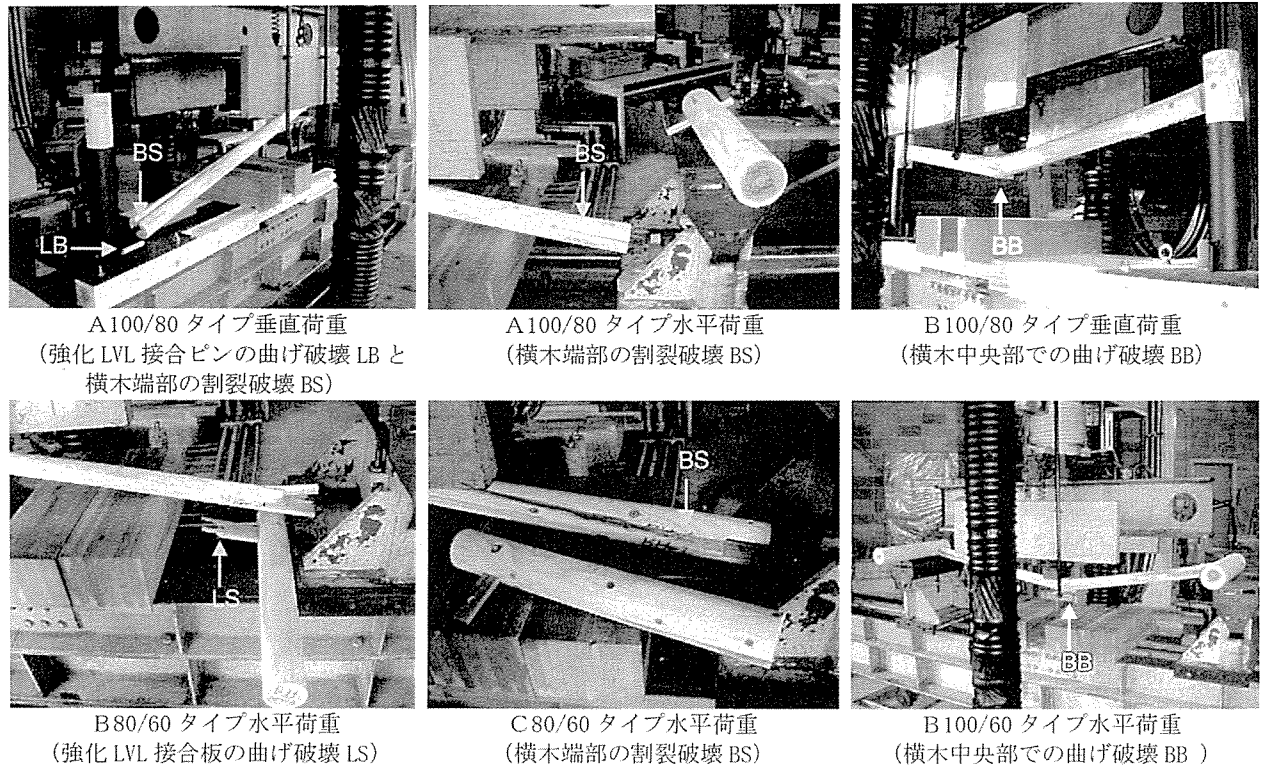


図4 曲げ試験での各タイプの破壊形態

破壊した。80/60タイプの1体では支柱の端部が破壊した。水平荷重では、100/80タイプは横木が端部で割裂破壊したが、100/60および80/60タイプでは横木がスパン中央部で曲げ破壊した。強化LVL接合板および強化LVL接合ピンは、B80/60タイプの水平荷重における1試験体を除いて破壊は認められなかった。

C、D、EおよびFタイプの垂直および水平荷重では、ほとんどの試験体で横木がスパン中央部で曲げ破壊した。Cタイプの水平荷重では、横木が端部で割裂破壊するとともに1体では強化LVL接合板が曲げ破壊した。Eタイプの水平荷重では、金具が大きく変形した。

表1に垂直および水平荷重における木柵の強度特性を示す。

歩行者自転車用柵には、歩行者の転落防止および横断防止のために一般的に設置される種別Pと主として橋梁、高架における転落防止のために設置される種別SPがある⁵⁾。これらの設計強度は垂直荷重および水平荷重において、種別Pではそれぞれ590N/mおよび390N/m、種別SPではそれぞれ980N/mおよび2500N/mである。本研究ではスパン2mの曲げ試験を行っているため設計強度は種別Pではそれぞれ1.18kNおよび0.78kN、種別SPではそれぞれ1.96kNおよび5.00kNとなる。すべての木柵の垂直および水平荷重での最大荷重の平均値は、それぞれ

2.79~9.37kNおよび1.83~4.55kNであり、種別Pの垂直および水平荷重の設計強度を上回った。しかし、種別SPに関しては、垂直荷重の設計強度を上回ったが水平荷重の設計強度を下回った。

3.2 木柵の耐力の推定

本研究における木柵では、タイプあるいは荷重方向の違いにより破壊形態および耐力が異なるため、単純な曲げ試験のように横木に作用する曲げモーメントを求めるだけでは木柵全体の耐力を推定することができない。そこで、木柵の構成部材である横木、強化LVL接合ピンおよび接合板のそれぞれの耐力を推定し、それらの耐力の大小関係から破壊形態を予測することにより木柵全体の耐力を推定することとした。

垂直荷重における横木の曲げ耐力を推定するためにスパン ℓ 2000mm、高さ h 500mm、柱脚が固定、柱頭がピン接合および剛接合の2種類の門型ラーメンのモデルを作成した。

ピン接合の場合、門型ラーメンの横木のスパン中央部に試験における最大荷重 P を加えたときにスパン中央部に発生する曲げモーメント M_B は式(1)を用いて求めた。水平荷重における曲げモーメントも同式を用いて求めた。これは、ピン支持の曲げ試験における曲げモーメントと同じである。

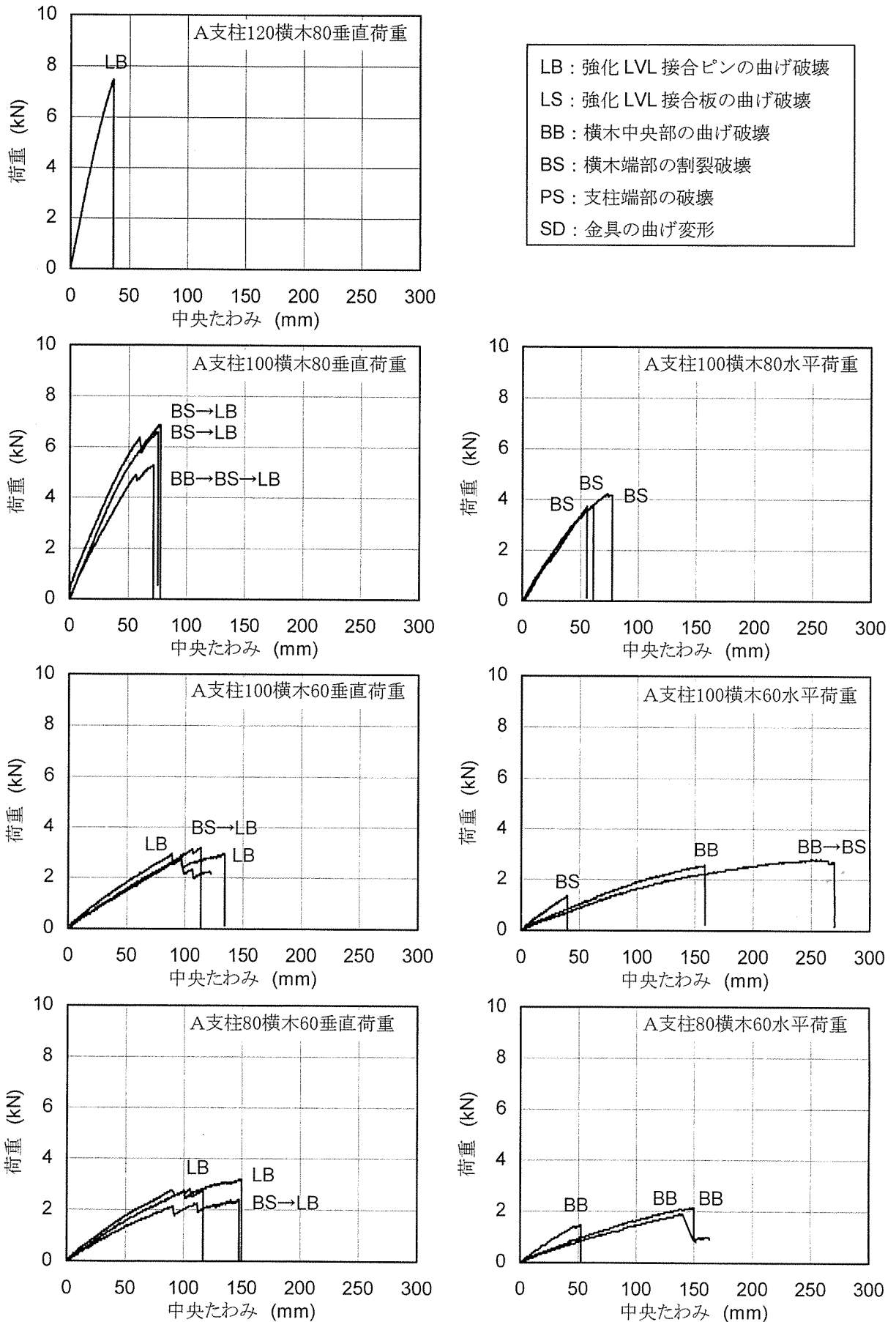


図5 Aタイプの木柵の荷重-たわみ曲線

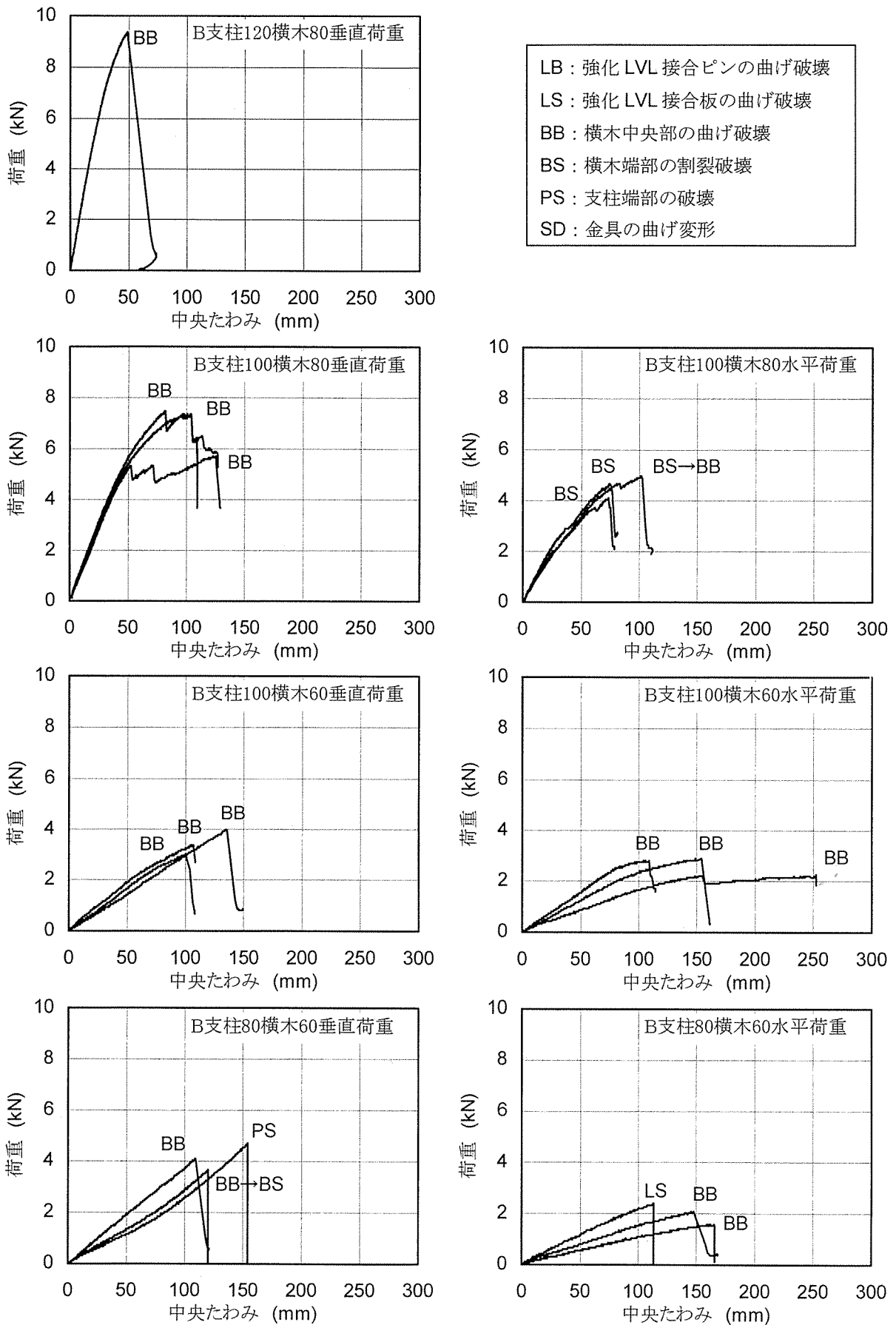


図6 Bタイプの木柵の荷重-たわみ曲線

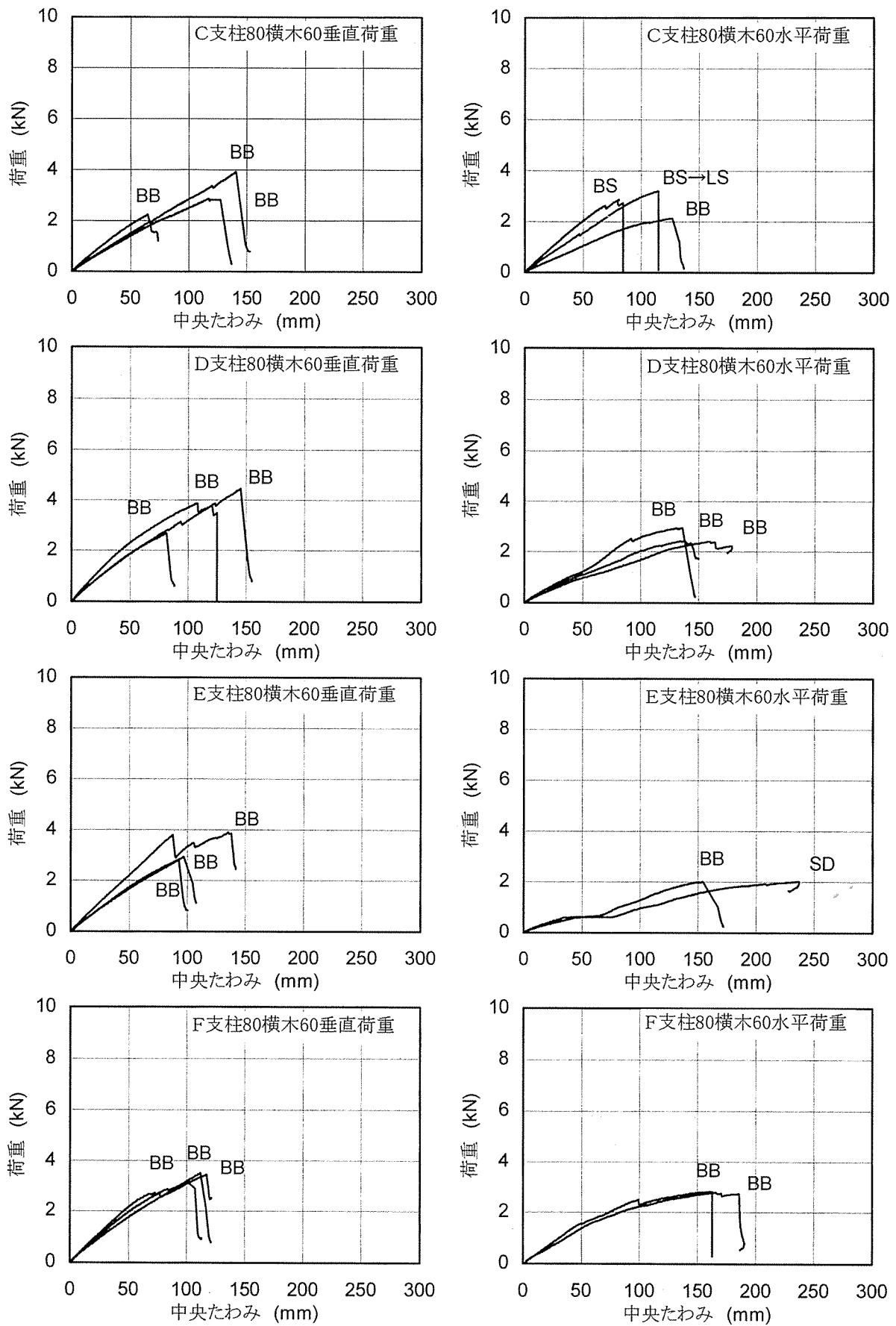


図7 C～Fタイプの木柵の荷重－たわみ曲線

LS, BB, BS, SD : 図4および5参照

$$M_B = \frac{P\ell}{4} \quad (1)$$

剛接合の場合の曲げモーメントは式(2)⁶⁾を用いて求めた。

$$M_B = \frac{P\ell}{4} - 2 \left(\frac{1}{2+k} \cdot \frac{P\ell}{8} \right), \quad k = \frac{\frac{I_B}{\ell}}{\frac{I_P}{h}} \quad (2)$$

ただし、 k ：横木の支柱に対する剛比、 I_B ：横木の断面2次モーメント、 I_P ：支柱の断面2次モーメント
横木の耐力 P_B は式(3)を用いて求めた。

$$P_B = P \cdot \frac{\sigma_{B0}}{\sigma_B}, \quad \sigma_B = \frac{M_B}{Z_B} \quad (3)$$

表1 木柵の強度特性

垂直荷重

タイプ	条件	実験値					計算値			
		支柱/横木 (mm/mm)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm)	主な破壊 ^{a)}	横木 ^{b)} (kN)	横木 ^{c)} (kN)	接合ピン (kN)
A	120/80	0.38	19.0	7.47 ^{d)}	37 ^{d)}	LB	7.48 ^{d)}	14.50 ^{d)}	6.91	-
	100/80	0.49	23.8	6.28	75	LB	5.61	10.70	6.91	-
	100/60	0.49	28.5	2.91	115	LB	2.37	4.66	4.15 ^{e)}	-
	80/60	0.43	14.3	2.79	134	LB	2.37	4.56	4.15 ^{e)}	-
B	120/80	0.40	20.0	9.37 ^{d)}	49 ^{d)}	BB	7.48 ^{d)}	14.50 ^{d)}	-	40.32
	100/80	0.49	33.7	6.80	104	BB	5.61	10.70	-	40.32
	100/60	0.47	28.7	3.44	114	BB	2.37	4.66	-	22.68
	80/60	0.41	13.8	4.15	128	BB	2.37	4.56	-	22.68
C	80/60	0.43	22.7	3.01	108	BB	2.37	4.56	-	12.86
D	80/60	0.50	20.8	3.68	111	BB	2.37	4.56	-	38.59
E	80/60	0.44	18.0	3.20	108	BB	2.37	4.56	-	-
F	80/60	0.45	18.7	3.35	110	BB	2.37	4.56	-	-

水平タイプ

タイプ	条件	実験値					計算値			
		支柱/横木 (mm/mm)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm)	主な破壊 ^{a)}	横木 ^{b)} (kN)	横木 ^{c)} (kN)	接合ピン (kN)
A	120/80	-	-	-	-	-	5.61	-	6.91	-
	100/80	0.54	33.0	3.87	64	BS	5.61	-	6.91	-
	100/60	0.45	18.7	2.32	154	BB	2.37	-	4.15	-
	80/60	0.42	13.8	1.83	114	BB	2.37	-	4.15	-
B	120/80	-	-	-	-	-	5.61	-	-	5.04
	100/80	0.44	30.2	4.55	84	BS	5.61	-	-	5.04
	100/60	0.47	20.8	2.63	139	BB	2.37	-	-	3.78
	80/60	0.40	13.8	1.97	142	BB	2.37	-	-	3.78
C	80/60	0.49	26.3	2.74	108	BS	2.37	-	-	3.68
D	80/60	0.45	20.0	2.57	144	BB	2.37	-	-	11.03
E	80/60	0.45	32.8	1.99	196	BB	2.37	-	-	-
F	80/60	0.46	19.5	2.80	164	BB	2.37	-	-	-
CT ^{f)}	0/80	0.58	61.3	5.61	77	BB				

^{a)} 図4参照、^{b)} ピン接合による門型ラーメン、^{c)} 剛接合による門型ラーメン、^{d)} スパン1500mm、その他はスパン2000mm、

^{e)} $\ell_L=100\text{mm}$ とした計算値、^{f)} 横木単体の曲げ試験。タイプは図1参照。

太字は破壊した部位の計算値。試験体数は3体。ただし、A120/80は1体、DおよびFタイプの水平荷重は2体。

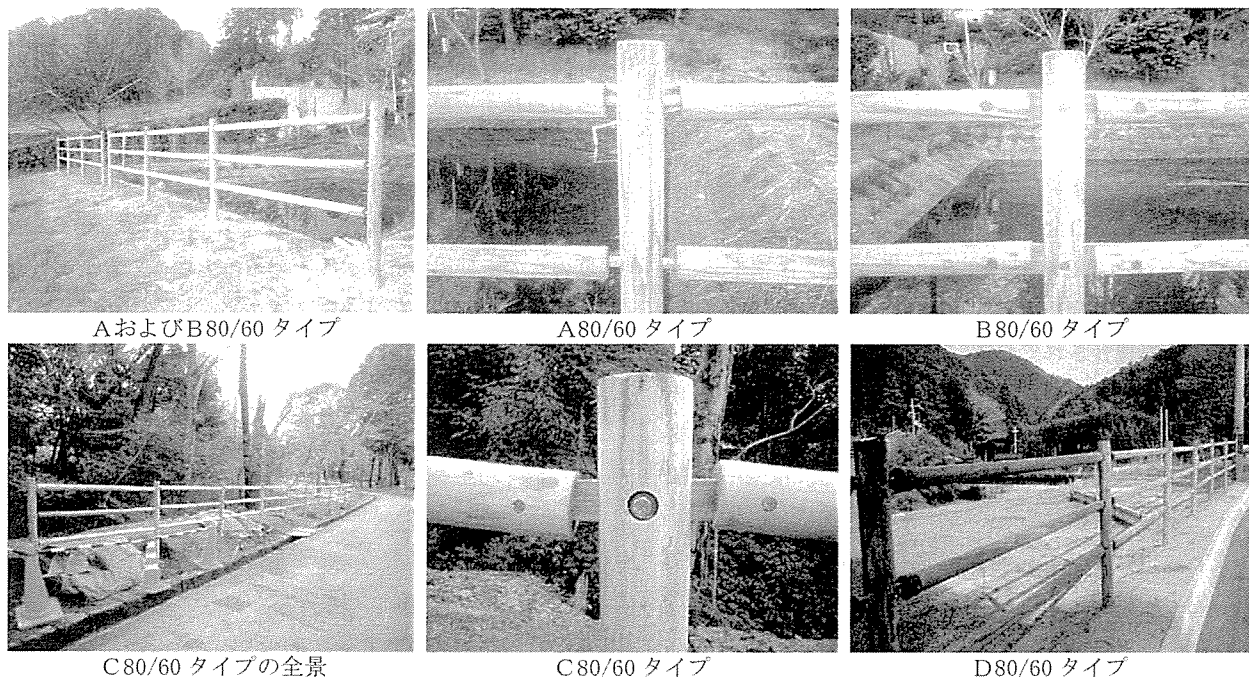


図8 各タイプの木製歩行者自転車用柵の敷設状況

ただし、 σ_{B0} :横木の曲げ強さの実験値 (=55.8N/mm²)、 σ_B :横木に発生する曲げ応力、 Z_B :横木の断面係数

Aタイプの強化LVL接合ピンおよびB、CおよびDタイプの強化LVL接合板は支柱に対する片持ち梁であり、前者では横木に挿入された接合ピンに総荷重 $P/2$ の等分布荷重が作用し、後者では横木の接合ピン位置に $P/2$ の集中荷重が作用すると仮定した。両者に発生する曲げモーメント M_L は式(4)を用いて求めた。

$$M_L = \frac{P\ell_L}{2} \tag{4}$$

ただし、 ℓ_L : Aタイプでは支柱の側面と横木に挿入された接合ピンの中心との距離 (=60mm)、B、CおよびDタイプでは支柱の側面と横木の接合ピンとの距離 (=100、60および20mm)

強化LVL接合ピンおよび接合板の耐力 P_L は式(5)を用いて求めた。

$$P_L = P \cdot \frac{\sigma_{L0}}{\sigma_L}, \quad \sigma_L = \frac{M_L}{Z_L} \tag{5}$$

ただし、 σ_{L0} :強化LVL接合ピンおよび接合板の曲げ強さ (=264および189N/mm²)⁴⁾、 σ_L :強化LVL接合ピンおよび接合板に発生する曲げ応力、 Z_L :強化LVL接合ピンおよび接合板の断面係数

垂直荷重における実験値と計算値を比較すると、Aタイプでは接合ピンが破壊しており、120/80および100/80タイプでは実験値と接合ピンの計算値が良く一致したが、100/60および80/60タイプでは計算値が過大となっ

た。これは、加力に伴ってたわみが増加すると横木は接合ピンから引き抜けていくため、接合ピンに作用する力の作用点距離 ℓ_L が大きくなるためと考えられる。そこで、100/60および80/60タイプでは $\ell_L=100$ mmとして計算すると実験値と計算値との差が小さくなった。耐力の計算値はピン接合の横木、接合ピン、剛接合の横木の順に高くなるが、実際の破壊形態から推察すると接合ピンよりも横木の耐力が高いと予想されるため、Aタイプの解析モデルには剛接合が適していると考えられる。

Bタイプでは横木が曲げ破壊しており、実験値はピン接合の計算値と剛接合の計算値の間であった。これは、支柱および横木は接合板とピン接合されているが、たわみの増加とともに相互に接触するために、ピン接合から半剛接合に移行すると考えられる。推定値としては安全側であるピン接合の計算値が適しているといえる。なお、接合板の計算値は横木の計算値より大きく、その耐力には余裕があるといえる。C、D、EおよびFタイプも同様に実験値はピン接合の計算値よりやや大きくなった。

水平荷重ではほぼすべてのタイプにおいて横木が曲げ破壊しており、横木の計算値は実験値と良く一致していた。接合ピンおよび接合板の計算値は横木の計算値より大きく、その耐力には余裕があるといえる。

以上より、横木と接合ピンあるいは接合板の耐力の計算値の低い値が木柵の実験値と良く一致した。本研究では実際に試験を行った条件について耐力の推定を行ったが、支柱の高さや横木のスペンが異なる条件においても

同様の計算を行うことにより、木柵全体の破壊形態の予測と耐力の推定が行えるといえる。

3.3 木柵の敷設

図8に試験的に敷設したA、B、CおよびDタイプの木柵を示す。AおよびBタイプは、横木が2および3段で支柱間隔2mの全長6mで敷設した。Cタイプは横木3段で支柱間隔2mの全長30m、Dタイプは横木3段で支柱間隔2mの全長40mで敷設した。Aタイプは支柱と横木が剛に接合されており、支柱に対する横木の自由度がほとんどないため、平らな場所以外では敷設が難しいと考えられる。これに対してB、CおよびDタイプは支柱に対する横木の自由度がAタイプより高いため、敷設地の上下の変動に対応することができた。しかし、木柵が左右に折れ曲がる方向での自由度が低いため、そのような場合にはコーナー部に支柱を追加する必要がある。

4. 結論

スギ、ヒノキ間伐材の土木分野への需要拡大を目的として、円柱加工材の支柱と横木を強化LVL製の接合ピンと接合板で接合した木製歩行者自転車用柵を考案した。垂直および水平荷重による曲げ試験を行った結果、すべてのタイプにおいて歩行者自転車用柵の種別Pにおける垂直および水平荷重の設計強度を上回る耐力が得られた。その中でもAタイプは接合具および接合方法が最も単純であるのでコストも安価であり、平らな場所での木

柵として有望であると考えられる。平らな場所以外では、設置の自由度が高いBあるいはCタイプが適していると考えられる。種別Pでは、強度的には支柱および横木の直径は最も小さな80/60タイプで十分である。種別SPについては、すべてのタイプにおいて水平荷重に対する耐力が不足しているが、Bタイプでは横木に直径100mm程度のもを使用すれば必要とする耐力が得られると考えられる。

引用文献

- 1) 金丸和生：木製車両用防護柵。木材工業 58 (11), 562-565 (2003).
- 2) 神谷文夫：木製ガードレールと木製遮音壁の動向。住宅と木材 28 (2), 32-35 (2005).
- 3) 柴田直明：信州型木製ガードレールの開発と県道等への設置。木材工業 61 (12), 604-607 (2006)
- 4) 中田欣作：アルコール可溶性および水溶性フェノール樹脂を用いて工場生産された強化LVLの性質。奈良県森林セ研報 36, 1-11 (2007).
- 5) 日本道路協会：“防護柵の設置基準・同解説”，東京，丸善，2004，p.62-63.
- 6) 二見秀雄：“構造力学 改訂版”，東京，市ヶ谷出版社，1977，p.199-120.

(2009年1月9日受理)