

木製防護柵の開発および実車衝突試験

DEVELOPMENT OF A WOODEN SAFETY GUARD, AND THE COLLISION EXPERIMENT OF ACTUAL CARS

久保田努*, 戸津勝彦**, 松葉美晴***, 柴田直明****, 佐藤信二*****, 安藤和彦*****

Tsutomu KUBOTA, Katsuhiko TOZU, Yoshiharu MATSUBA, Naoaki SHIBATA, Shinji SATO, Kazuhiko ANDO

- * 株式会社長野技研 (〒390-1241 長野県松本市新村 2326)
- ** 株式会社イーエムシー (〒380-0836 長野県長野市南県町 1041-3)
- *** 松葉デザイン事務所 (〒950-0124 新潟県中蒲原郡亀田町東町 1-6-35)
- **** 長野県林業総合センター (〒399-0711 長野県塩尻市片丘 5739)
- ***** (株) 間組 技術・環境本部技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市苅間 515-1)
- ***** (財) 土木研究センター 技術研究所 研究開発第2部 (〒300-2624 茨城県つくば市西沢 2-2)

キーワード: 間伐材, 木製防護柵, ガードレール, 衝突試験, 補助ビーム

(Thinned wood, Wooden safety guard, Guardrail, Collision experiment, Sub-beam)

1. はじめに

自然の循環サイクルを基調とした持続的に発展可能な社会の構築、間伐材の有効利用、地球温暖化防止などの観点から、最近では木製の土木構造物が多く開発されてきている。車両用防護柵への適用を目指した開発も各処で行われ、そのいくつかは既に実用化されている。

このような状況の中、筆者らは、基本構造を既存のガードレールに合わせ、これと互換性を有する車両用防護柵の鋼・木複合ビームを開発し、実車衝突試験を国土交通省国土技術政策総合研究所の実車衝突試験施設(つくば市)において行なった。結果は、車両用防護柵としての性能を十分に発揮するものであると確認され、木製防護柵として実用に供されることとなった。

ここでは、本木製防護柵の開発経緯、衝突試験の詳細とその結果を示し、そこから得られた知見を元に、コンクリート防護柵、鋼製防護柵との比較を行ないながら、今後の防護柵の課題を述べるものである。

2. 開発経緯

長野県では、従来から一部林道に用いられていた木製防護柵を一般の道路に適用するため、「信州型木

製ガードレール開発事業」を立ち上げ、信州型木製ガードレールを表-1に示すとおり定義した上で、共同開発する企業を公募した。

表-1 信州型木製ガードレールの定義

- | |
|--|
| <p>1 信州型木製ガードレールとは、構成する主たる部材にカラマツ等の県産間伐材を使用し、「防護柵設置基準」に定める性能を満足する防護柵とし、次の各号のいずれにも該当する特徴や工夫を有するものとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 地球温暖化防止対策に寄与するもの (2) 県産間伐材を使用するもの (3) 廃棄後のリサイクル等循環型社会構築に寄与するもの (4) 環境保全や景観改善に寄与するもの (5) 新たな県内産業の育成による雇用創出に寄与するもの <p>2 今回開発する「信州型木製ガードレール」は、支柱を土中に埋め込むタイプとする車両用防護柵で路側用C種とする。ただし、使用木材を主として装飾に利用し、既製の防護柵に付加するものは除くものとする。</p> |
|--|

車両用防護柵については平成 10 年の設置基準²⁾の性能規定化により、実車の衝突試験により性能が確認できれば、木製のものでも設置ができることとなった。逆に言えば、新たに開発する場合は、実車の衝突試験が必要条件となったということである。

長野県の支援は、衝突試験費用の一部を補助するという形をとり、一回の試験でクリアできるように、応募企業からの要請を受けての材料試験、シミュレーションなども県の研究機関で行なった。

3. 基本構造

ログガードの基本構造および参考とした鋼製ガードレール Gr-C-4E を図-1 に示す。

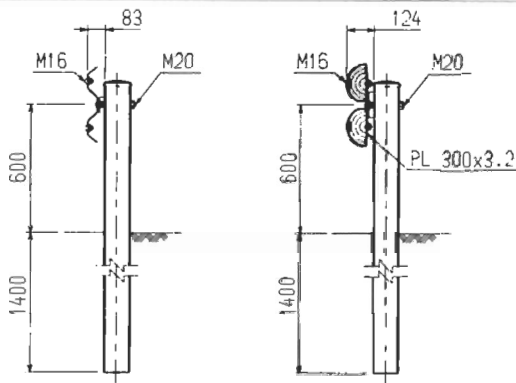


図-1 ガードレールとログガード

設計は、ガードレールの引張に関する性能は鋼板に、曲げに関する性能は木ビームにとらせることとし、設定した断面性能は表-2 に示すとおりである。

表-2 断面性能

	ガードレール Gr-C-4E	ログガード LG-C-4E
ヤング係数 (kN/mm ²)	200	4.8
断面二次モーメント (cm ⁴)	30	1,250
曲げ剛性 (kN・m ²)	60	60
降伏(基準)強度 (N/mm ²)	235	19.2
断面係数 (cm ³)	10	250
曲げ耐力 (kN・m)	2.4	4.8
鋼板厚 t (mm)	2.3	3.2
降伏強度 (kN/mm ²)	235	
鋼板断面積 (mm ²)	966	960
引張耐力 (kN)	227	226

ただし、性能は表中の数値の比ではなく、構造および断面性状の相異を考慮する必要がある。ガードレールが連続梁構造であるのに対し、ログガードは単純梁構造である。表-3はこの差異を示す指標として、支間中央に集中荷重を載荷したときの計算上のたわみと最大荷重を示したものであり、ログガードはガードレールに対して、表-2に示す曲げ剛性および曲げ耐力の比は実質的には小さくなる。

表-3 支間中央集中荷重

	ガードレール Gr-C-4E	ログガード LG-C-4E
梁構造	無限径間連続	単純
支間 (m)	4.0	
たわみ (mm/kN)	11.6	22.2
降伏(破壊)荷重 (kN)	3.5	4.8

一方、ガードレールは薄肉開断面であるため、変形が大きくなった場合、形状を保持し得ない。図-2は、木ビームの曲げ試験と同時に進めたガードレールの曲げ試験結果⁹⁾であるが、これに示すように、たわみと荷重の関係は線形ではなくなる。ゆえに、この影響は曲げ剛性に関して前記とは逆の傾向となり、荷重の最大値 3.8kN、その時のたわみ 145mm から計算されるみかけの剛性は 35kN・m²と小さく、構造の相異による差は縮小する。

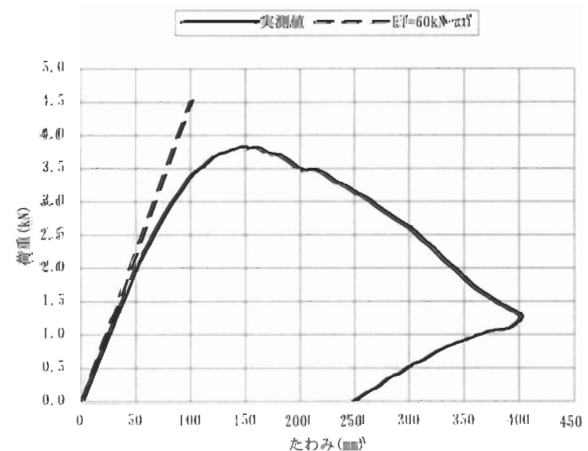


図-2 ガードレールビームの荷重-たわみ

引張耐力については、表-2に示す鋼板の断面積ではなく、連結ボルトが鋼板にめり込む支圧で決定されるため、ログガードの方が鋼板厚比倍の引張耐力

がある。ただし、連結ボルト M16×6 本の内、4 本は木材を介しての接合となるため、その影響を把握するために、連結部の FEM 解析⁸⁾および引張試験⁹⁾を行なった。

FEM 解析では、鋼板が降伏応力を超え破壊強度まで達した場合も、木材の応力は基準強度以下であった。

引張試験では、鋼板を直接接合したボルトは大きく傾き、ボルト孔が長孔であるため、最終的にはボルト頭が抜け出ると思われる現象が見られた。一方、木材を介したボルトは傾きが少なく良好な結果を示した。鋼板の厚さによる偏心モーメントに対し、木材によってボルトの軸方向の回転アームが大きくなったためと考えられる。

以上、ログガードの設計思想は、防護柵設置基準の改定時に性能の確認されている車両用防護柵として「車両用防護柵標準仕様」に示されているガードレールを構造的にコピーすれば衝突試験をクリアする可能性が高いであろう、というものである。

4. 衝突試験

4.1 衝突条件・性能

C種のたわみ性防護柵の衝突条件と満足すべき性能を表-4に示す。

表-4 土中用C種たわみ性防護柵の衝突条件および性能²⁾

区分	A (大型貨物車)	B (乗用車)
車両質量	25 トン	1 トン
衝突速度	26km/hr	60km/hr
衝突角度	15 度	20 度
衝撃度	45kJ 以上	
強度性能	突破されない	
変形性能	最大進入行程 1.1m 以下	
乗員の 安全性能		車両の受ける加速度 90m/s ² /10ms 未満
車両の 誘導性能	防護柵衝突後に横転などしないこと	
	離脱速度は、衝突速度の 6 割以上	
	離脱角度は、衝突角度の 6 割以下	
飛散防止 性能	車両衝突時に 構成部材が大きく飛散しないこと	

試験は衝突試験マニュアル⁵⁾により行なった。なお、大型貨物車衝突試験の車両重量は原則として 25 トンであるが、試験施設の都合上、通常は車両総重量 20 トンの大型貨物車を用い、速度を割増すことによって衝撃度 45kJ 以上となるように調整した。

4.2 大型貨物車衝突試験(A-1)

大型貨物車衝突試験については、実車衝突試験に先立ち、解析ソフト ANSYS/LS-DYNA によりシミュレーションを行ない⁸⁾、特に、最大進入行程が規定値内となるかを確認した後、試験に臨んだ。

大型貨物車の衝突試験結果を表-5に示す。

表-5 大型貨物車衝突試験結果¹⁰⁾

試験条件			
試験車両 質量(t)	衝突速度 (km/hr)	衝突角度 (度)	衝撃度 (kJ)
20.0	32.0	15.0	52.9
試験結果			
強度性能	突破しない強度を有する		
変形性能	最大進入行程 390mm		
車量挙動	横転などを生じない		
離脱速度	63.1%(20.2km/hr)		
離脱角度	27.7%(3.90 度)		
部材飛散	取り外れ飛散などなし		

大型貨物車の衝突状況は、先ず左側バンパー、フェンダーが防護柵に接触、直後に前輪が衝突し、フェンダーがビームに大きく食い込み、運転席部は防護柵側に若干傾きながら方向転換した後、その反動で道路側に傾くものの、直ぐ姿勢を復元し防護柵に沿って離脱した。写真-1は防護柵の残留変形状況を撮影したものであるが、タイヤ痕(軌跡)が示すよ



写真-1 防護柵の残留変形状況

うに、車輪が支柱に乗り上げており、方向転換は車体がビームと共に支柱を曲げ倒し、その支柱上に前輪が乗り上げるによりなされたと考えられる。

コンクリート製の剛性防護柵には、図-3 に示すように、基部に傾斜が付されているが、支柱を倒すことによってできる傾斜が同様の働きをし、方向転換に寄与していると思われる。ただし、支柱間隔が4.0mと大きいことから車両の挙動はパルス的であり、剛性防護柵のようになめらかではない。

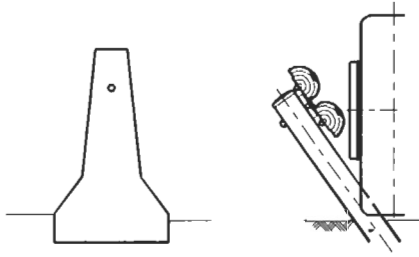


図-3 プレキャスト防護柵 Rp-SC-FE の断面と支柱への車輪の乗り上げ

4.3 乗用車衝突試験 (B-2)

乗用車衝突試験については、全部で3回行っている。ここでは、支柱に衝突した1回目について述べる。

衝突状況は、先ず左側バンパー、フェンダーが接触、直後に前輪が衝突、左側前車体がビームに食い込みながら下端部に潜るように進行した後、若干方向転換しかけた直後、左側前車体部が支柱に激突し、同衝突位置を基点として後方に反発され、最終的には反時計回りの状態で防護柵に近接し停車した。

車両の受けた最大加速度値は車両軸方向 (X 方向) が $137.8\text{m/s}^2/10\text{ms}$ 、車両軸直角方向 (Y 方向) が $54.4\text{m/s}^2/10\text{ms}$ 、合成値 (X, Y) は $145.5\text{m/s}^2/10\text{ms}$ であった。この時の原波形の最大加速度は、X 方向が



写真-2 車両の損傷状況

前輪衝突付近で 231.5m/s^2 、Y 方向は 148.2m/s^2 であった。

通常のビデオカメラで撮影された映像では、乗用車はビームが存在しないかのように、支柱に激突している。高速度カメラにより俯瞰撮影した映像では、車両が支柱間に衝突している状態ではビームが大きくたわみ、支柱の近傍になると、車体が大きく変形していた。その結果、地上の撮影では、ほとんど直進しているかのように見えたと思われる。写真-3 は連続撮影したものであり、上段は支柱間中央、下段は支柱衝突直後である。支柱との衝突点は、車両中心から約 50cm、前輪の内側であり、タイヤはバーストしていなかった。

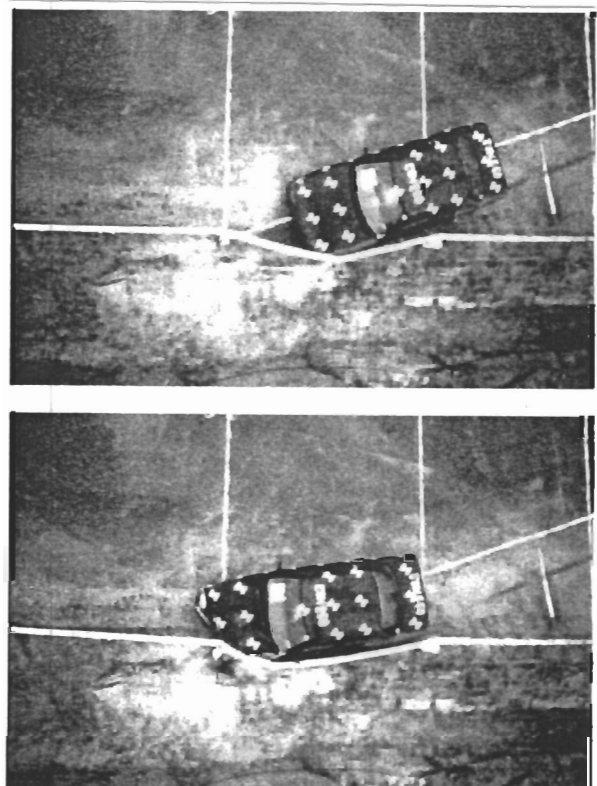


写真-3 ビームと車体の変形

中央部で想定以上に大きくたわむのは、木ビームの剛性の不足およびボルト孔が長孔であり、遊びが大きいため鋼板が引張材として有効に働かないためと考えられた。支柱近傍での現象からは、写真-2 のようにビームと衝突した車体の部分は大きく変形していることから車体は誘導対象とはならず、また、タイヤについてもバーストせずすり抜けていることから、これも誘導対象とならないと考えられる。

図-4 は、供試体とタイヤの寸法の関係を示したものであるが、タイヤも誘導対象とならないとすると、

ホイールを誘導する必要があるが、その高さ関係から本構造では容易に潜り込むことが判る。矩形断面で下端の高さ 450mm として行なった安藤らの研究⁹⁾でも同様の結果となっている。

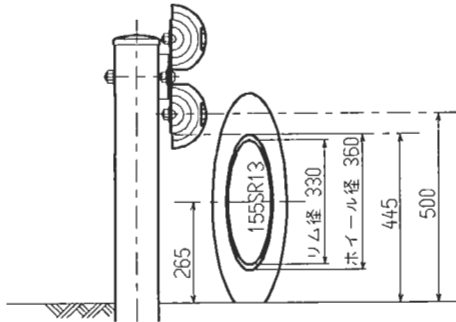


図-4 車輪との高さ関係

4.4 乗用車衝突試験(B-4)

乗用車衝突試験(B-4)の構造は図-5のとおりである。乗用車衝突試験(B-2)および(B-3)の結果を検討し改良したものであり、主ビームの下段、地上からの中心高 325mm の位置に、乗用車が潜り込み支柱に衝突するのを防止するための、補助ビームを付している。

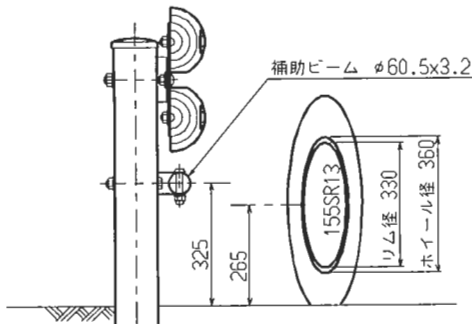


図-5 試験をクリアした構造と車輪

衝突状況は、先ず防護柵に左側バンパー、フェンダー、左前輪が順次接触し、フェンダーが複合ビームに食い込み、若干道路側に傾いた後、後輪および後部車体が接触し、車体は復元し、進行方向へ円滑に離脱した。(写真-4)

車両の損傷は全体に軽微であり、エンジンルーム、足回りの損傷、サスペンションの変形もなく、自力走行が可能であった。(写真-5)

表-6 に試験結果を示す。この時の原波形の最大加速度は、X方向が前輪衝突付近で 56.2m/s^2 、Y方向が 89.0m/s^2 であった。図-6 に加速度波形(XY合成)の原波形と 10ms 移動平均波形を示す。

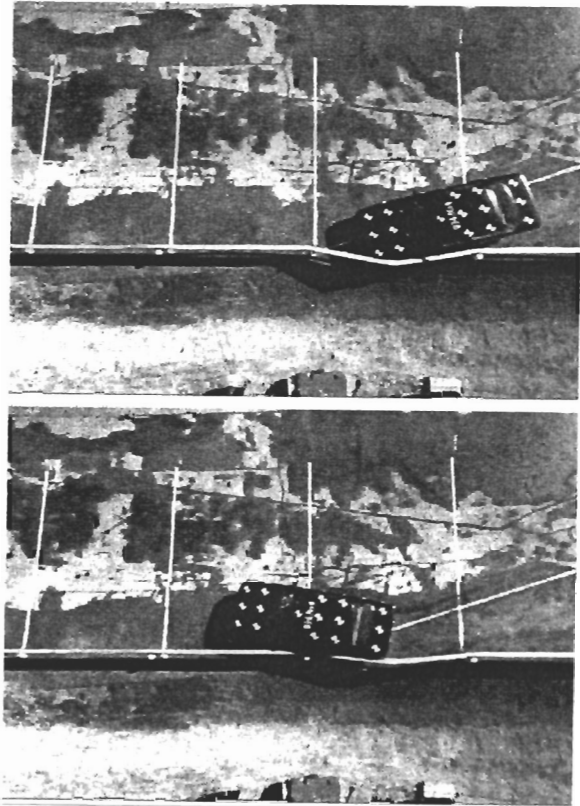


写真-4 乗用車の衝突と離脱状況

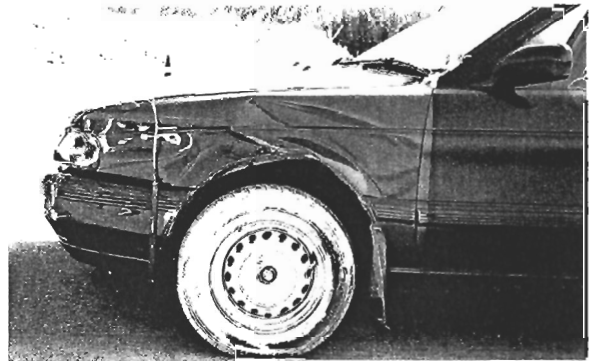


写真-5 車体の損傷状況

表-6 乗用車衝突試験結果¹⁰⁾

試験条件		
試験車両	衝突速度	衝突角度
質量(t)	(km/hr)	(度)
1.04	60.3	21.0
試験結果		
乗員の安全性能	90m/s ² /10ms 未満である X:28.5m/s ² /10ms Y:42.0m/s ² /10ms	
車両挙動	横転などを生じない	
離脱速度	83.7%(50.5km/hr)	
離脱角度	60.0%(12.6度)	
部材飛散	取り外れ飛散などなし	

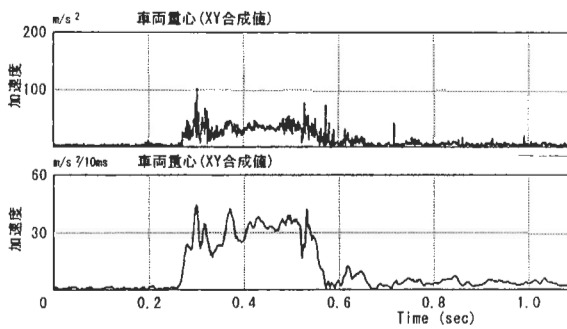


図-6 加速度波形

5. まとめ

本衝突試験は、原因を特定するためや確認のために計画され行なわれた「実験」ではなく、クリアすべき目標が設定された、ただ一回の「試験」である。このため、本試験の結果から普遍的な結論を導き出すことは難しいが、他の木製ガードレールの衝突試験の状況や鋼製防護柵および剛性防護柵の試験記録をも参考に、筆者らの考えを箇条書きで示す。

- ①大型貨物車の衝突については、シミュレーションの信頼性は高い。この時、大型貨物車は剛体としてモデル化しても問題ない。
- ②大型貨物車に対する支柱間隔および強度・剛度は、本ログガード程度が限界である。
- ③大型貨物車の車輪の支柱への衝突は、誘導に寄与することもあるが、乗用車については支柱に衝突させないことが必要条件である。
- ④乗用車については、車体は変形が大きく誘導対象とならず、またタイヤも同様である。ゆえに、誘導はホイールによらねばならない。
- ⑤乗用車を誘導するためのビームの高さを車輪の中心より下にすると、衝突時にタイヤがバーストしない場合は、車輪がビームに乗り上げる可能性がある。逆にタイヤがバーストした場合は、地面とビームとの隙間がホイール径より大きいと潜り込む可能性がある。
- ⑥乗用車の誘導を、剛性が小さくかつ鋼管等で行なう場合はタイヤがバーストせず、剛性が大きくかつ木ビームで行なう場合はタイヤがバーストする傾向にある。剛性と材料の何れが主因かは不明である。
- ⑦ログガードは支柱間隔 4.0m と大きく、ビームの剛性もガードレールと同様に小さいため、たわみ性防護柵と考えて問題ないが、他の一般的な木製防護柵は支柱間隔 2.0m と小さくかつ断面剛性が大きいため、車両および防護柵は、たわみ性防護

柵と剛性防護柵の中間の挙動および効果を示す。現行の規定では、木製防護柵は、たわみ性防護柵に区分され、たわみ性防護柵の条件を満足する必要があるが、木製防護柵や鋼製の壁構造の防護柵に対する「半剛性防護柵」というような区分および規定が必要と思われる。

6. おわりに

木製の車両用防護柵については、現在までに 6 タイプのものが実用化されている。また、平成 16 年 3 月に改訂された「防護柵設置基準」においても、その解説中にたわみ製防護柵の一形式として「主としてビームに木材を用いた防護柵であり、車両衝突時の衝撃に対して、木材ビームの剛性と金属製接続部や支柱基礎部の変形で抵抗する防護柵である。」と定義され、基準上も認知されている。

本報告が木製防護柵はもちろんのこと、木製に限らず安全な車両用防護柵の開発の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：防護柵設置要綱，昭和 47 年 10 月
- 2) 同：防護柵の設置基準・同解説，平成 10 年 11 月，平成 16 年 3 月
- 3) 建設省土木研究所：衝撃によるガードレールの性能試験報告書：昭和 43 年 12 月
- 4) 同：防護柵衝突実験結果報告書，平成 4 年 3 月
- 5) 同：衝突試験施設防護柵実車衝突試験マニュアル（案），平成 12 年 11 月
- 6) 安藤和彦，森望，若月健：木製車両用防護柵の実験・検討，土木技術資料 43-11，2001
- 7) 松葉美晴：剛性防護柵における衝突荷重の理論算出式について，第 3 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集，P59～65
- 8) 長野県工業試験場：信州型木製ガードレール開発事業 解析結果報告書，平成 15 年 10 月
- 9) 長野県林業総合センター：信州型木製ガードレール開発事業 材料試験結果報告書，平成 15 年 10 月
- 10) (財)土木研究センター：信州型木製ガードレール（ログガード）の性能確認のための衝突実験業務報告書，平成 16 年 3 月
- 11) 柴田直明：信州型木製ガードレールの開発，木材保存，Vol130-4，2004