

木製構造物の耐久性調査

2015 年度～2017 年度

釜田淳志・鈴木祥仁*

要 旨

愛知県内では 1997 年度から治山事業において木製土留工をはじめとした大型の木製構造物が設置されている。設置後 20 年近く経過するものもあり今後の維持管理を行っていくうえで、それらの劣化状況を把握し、木製構造物の耐久性を検討する必要がある。本研究では、愛知県内で設置数が最も多い木製土留工を対象とした。またその中でも防腐処理されたスギ材で組み立てられたウッドブロックを対象としてその劣化状況をレジストグラフ、ピロディン、マイナストライバー法による各種測定手法により調査するとともに、構造物の機能にとって重要である部材の曲げ強度を曲げ試験により求めた。またウッドブロック以外の木製土留工（防腐処理がなされていないものも含む）において劣化状況を各種測定手法により調査した。これらの調査から、木製土留工において使用されている部材の防腐加工の有無により劣化の状況が異なることがわかった。またウッドブロックについては建築基準法施行令で定められたスギ曲げ許容応力度（長期・湿潤） 5.7N/mm^2 を下回るものがなかったため、設置後約 19 年経過してもその構造としての機能は維持されており、防腐処理が部材の劣化に効果的に働いていることが示唆された。また、各種劣化状況測定手法と曲げ強度の関係から、曲げ強度の推定手法について提示した。

I はじめに

全国的に木材利用促進の一環として森林土木事業において各種木製構造物が設置されている。その設置目的および規模により、野外で長期間構造物としての機能を求められるものもある。そのような構造物においては腐朽等の劣化をどのように把握し評価をしていくかが課題となっている（木製治山構造物技術指針検討会 2016）。

木製構造物について腐朽等の劣化が進んでいくことを前提として、長期間において機能の発揮が期待されるものは定期点検を実施し、必要に応じて更新・補修などの措置をとり維持管理を行っていく指針が林野庁により定められている（林野庁 2004）。

愛知県の治山事業において木製土留工や木製床固工などの大型木製構造物は 1997 年度から設置されており、設置後 20 年経過しているものもある。

その工種も土留工、床固工、護岸工、落石防止柵と多岐にわたっている。とくに木製土留工については県内でこれまで 82 基（2017 年 3 月時点）設置されており各工種の中で最多である。

しかしながら、愛知県においてそれらの劣化状況について定量的に調査した事例は少ない（尾崎ほか 2010）。維持管理を適切に実施していくためには、劣化の実態を把握するとともに構造物の強度が十分確保されているか確認する手法の開発が求められる。これまで大型木製構造物の劣化状況については各地での報告があるが木製床固工を中心としたものであり（石川ほか 2003, 田淵ほか 2011, 明石ほか 2015, 和多田ほか 2015）、木製土留工を対象とした調査は少ない（津島ほか 2005）。

そこで、本研究では木製土留工を対象として、劣化の進行状況の実態を把握すること、設置後複数年経過した構造物について部材の強度が確保さ

れているか把握すること、また現地での劣化状況測定調査から強度を推定する手法を提示することを目的とした。

II 方法

1. ウッドブロック劣化状況調査および曲げ強度試験

愛知県内民有林で設置されている治山木製土留工は 2017 年 3 月末時点で 82 基設置されており、うち 52 基とその 6 割以上をウッドブロックが占めている。ウッドブロックとは、末口径 10~13cm 程度の間伐木を剥皮し三面挽きをおこなった材を井桁に組みボルト締めしたものを 1 ピースとして、これを敷設し積み重ねた後に背面に土砂や礫を埋め戻して土留とする土留構造物の 1 工法である（ウッドブロック普及協議会 2005）（写真-1、図-1）。2016 年 3~5 月に県内各地に設置されているウッドブロック 7 基（表-1）について現場で最上段の隣り合った 2~3 ピースを取り外し、含水率が変化しないようビニールシートに包み森林・林業技術センターまで持ち帰った。なお、取り外し後は新しいウッドブロック部材を設置した。また、参考として未使用材を、取り外し部材とともに試験の供試体とした。

その後、取り外した横木部材を対象としてレジスト



写真-1 ウッドブロック設置状況

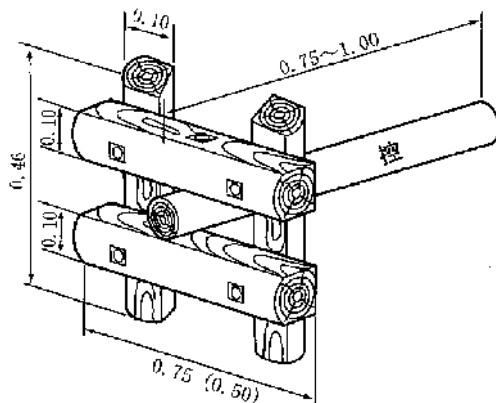


図-1 ウッドブロック単体図（単位:m）

表-1 ウッドブロック採取地概要と部材仕様

場所	施工年度	経過年数	部材採取本数	樹種	加工形態	防腐処理
瀬戸市岩屋町①	1997	19	6	スギ	三面挽き	有
瀬戸市岩屋町②	1998	18	6	スギ	三面挽き	有
春日井市廻間町	1999	17.5	6	スギ	三面挽き	有
小牧市野口町	2001	15	6	スギ	三面挽き	有
瀬戸市萩殿町	2004	12	6	スギ	三面挽き	有
瀬戸市上半田川町	2005	11	6	スギ	三面挽き	有
東浦町緒川	2008	8	4	スギ	丸棒加工	有
未使用材	-	0	4	スギ	三面挽き	有

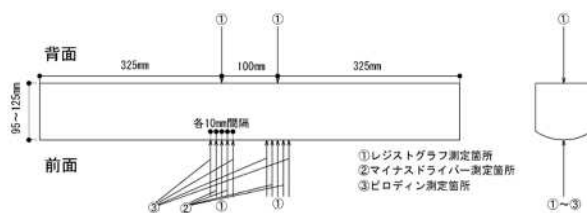


図-2 各劣化状況調査の測定位置

グラフ (IML 社製, RESI F500-SX, ニードル先端直径 3mm) による測定、打ち込みエネルギーが 6.0J のピロディン (Proceq 社製, 直径 2.5mm 長さ 40mm のピン) による測定、マイナスドライバー法での測定を行った。なおマイナスドライバー法とは、3mm 幅のマイナスドライバーと荷重測定器を組み合わせ、木材にマイナスドライバーを貫入し、荷重 200N (約 20kgf) 時の貫入深さを測定する簡便な劣化厚測定方法である (木製治山構造物技術指針検討会 2016)。

各調査法についての測定位置を図-2 に示す。維持管理の定期点検においては、現場で非破壊での部材の劣化状況を調査することが想定されるため、

測定は前面からとした。なお、石川ら（2003）において、レジストグラフは劣化厚を正確に精度良く測定することができ残存断面が推定できる方法とされていることから、レジストグラフにおいては前面および背面からの測定とし、後述する方法により部材健全厚を算出した。なお、各測定値については平均値を算出してその後の解析で取り扱った。

レジストグラフは、先端がバチ状に加工してあるニードルを回転させながら貫入し、その際の穿孔抵抗値の変化を波形で記録する機器である。ニードルを部材の半径程度まで貫入させ、記録紙におけるグラフの値が 1mm 未満の部分について強度が著しく低下している部分とみなし（石川ら 2003）、その長さを記録紙から 0.5mm 単位で読み取り劣化厚とした。

ピロディンの測定では、測定範囲を目視で読み取ることができる 43mm までとし、それを超えるものについては 44mm として記録した。また、ピロディン平均値が 43mm 以上のデータは結果から除外した。

曲げ強度試験は、実大強度試験機（SHIMADZU UH-1000kN）を用いて、スパン 550mm の中央集中荷法により行った。荷重速度は 10mm/min とし、部材に加わる土圧を想定し背面からの加力とした。曲げ強度についてはフリー断面計算ソフト（xPGetZ03）を用いて各部材の断面係数を算出し下記計算式により求めた。

なお、部材にはボルトを留めつけるための欠きこみおよびボルト穴があるが、これらについては断面の欠損が部分的であるため断面係数の算出については考慮していない。

$$\text{曲げ強度} = P_{\max} \cdot L / 4Z \quad (\text{N/mm}^2)$$

P_{\max} : 最大荷重 (N)、 L : スパン (mm)、

Z : 断面係数 (mm³)

曲げ試験終了後、試験後の部材について両側か

ら 200mm 程度の位置で厚さ 20mm 程度の板を採取し、全乾法により含水率を測定した。なお、含水率は 15.5～180.7%であり、平均は 71.6%であった。

2. 現地における木製土留工劣化状況調査

ウッドブロック以外の構造物を対象として、2015年11月から2016年1月に県内各地に設置されている8基(表-2)について現地でレジストグラフ、ピロディン、マイナスドライバー法によって劣化状況調査を行った。

測定については、各構造物においてそれぞれ 6～9 箇所で部材の前面から測定をおこなった。測定箇所については図-3のように4m程度の間隔でそれぞれ上段、中段、下段に1箇所ずつとし、それぞれの測点においてレジストグラフは1箇所測定をおこない、ピロディンとマイナスドライバー法については2箇所測定し平均値を算出した(図-4)。また劣化が進んでおり、断面の欠損が

表-2 木製土留工現場調査地概要と部材仕様

場所	施工年度	経過年数	測定箇所	樹種	加工形態	防腐処理
豊橋市石巻町	2014	1.5	9	スギ	圧縮加圧注入処理	有
岡崎市茅原沢町	2014	1.5	9	スギ	圧縮加圧注入処理	有
設楽町東納庫ナガ子	2013	2.5	6	スギ	圧縮加圧注入処理	有
春日井市廻間町	2007	8.5	9	スギ	皮剥ぎ丸太	有
豊根村古真立離山	2007	9	9	スギ	丸棒	無
設楽町三都橋	2006	10	9	スギ	丸棒	無
瀬戸市萩殿町	2004	11.5	9	スギ	皮付き丸太	無
設楽町津具油戸	2000	16	9	スギ	皮付き丸太	無

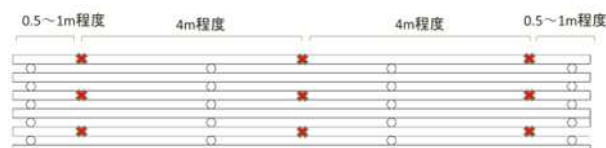


図-3 現地構造物の測定箇所イメージ



図-4 現地劣化状況調査の測定位置

ある部材については欠損厚を測定し、その厚みを各測定値に加算した。またピロディン平均値が43mm以上のデータは結果から除外した。

III 結果と考察

1. 経過年数と部材劣化の関係

部材劣化の状況を把握するため、ウッドブロックを含めた防腐加工をされている部材と防腐加工されていない部材についてカテゴリーを分けて、経過年数と各種劣化測定値との関係を調べた(図-5, 6, 7)。防腐加工なしの部材については、いずれの劣化測定値においても経過年数と有意な相関が認められた($p < 0.001$, ピロディン値のみ $p < 0.01$)。一方で、防腐加工ありの部材についてはレジストグラフでのみ有意な相関が認められた($p < 0.05$)。

防腐加工なしの部材について、経過年数が進むほど劣化が進行している傾向が認められた。また、11.5年以上経過した部材については各個体でのばらつきはあるものの総じて各種測定値で高い値を示しており強度の劣化が確認された。

一方で、防腐加工材については、部分的に劣化測定値が高いものもあるが、総じて防腐加工なしの部材より低い傾向がみられた。

レジストグラフ劣化厚のみ経過年数と有意であった理由としては、その測定原理の違いが影響している可能性が考えられる。つまり、レジストグラフでは著しく強度が低下している部分を判別し測定しているのに対し、ピロディンおよびマイナスドライバー法では劣化部だけでなく健全部に対してもピンあるいはマイナスドライバーを穿孔することから健全部の強度についても測定されるという違いである。10年を経過した部材については、どの測定手法においても防腐加工なし部材よりも劣化測定値が低い傾向がみとれることから、設置後10年以上経過し

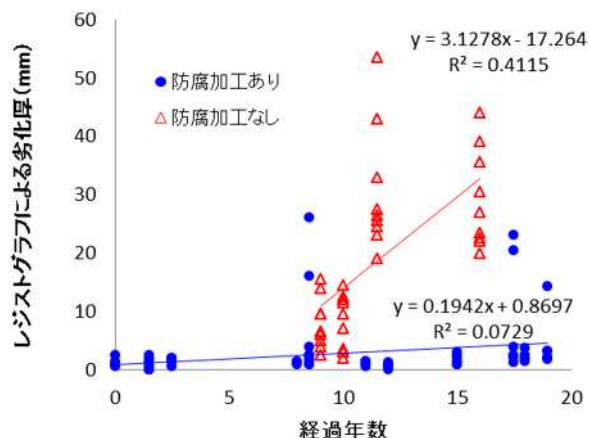


図-5 経過年数とレジストグラフによる劣化厚の関係

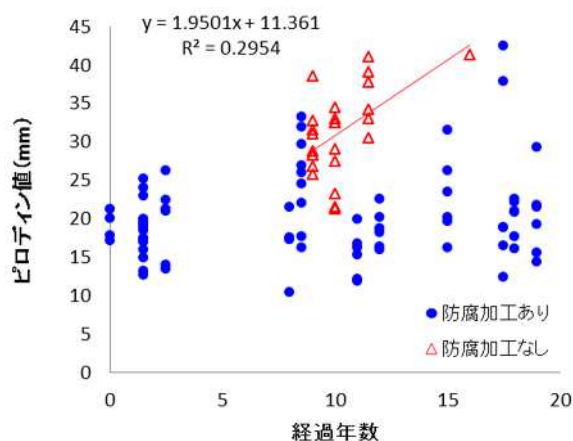


図-6 経過年数とピロディン値の関係

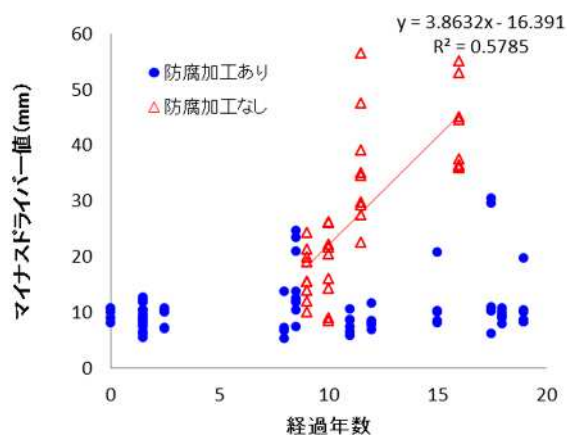


図-7 経過年数とマイナスドライバー値の関係

ても防腐処理材の効果が発揮されていると考えられる。

2. ウッドブロックにおける経過年数と曲げ強度の関係

石川ほか(2003)は、木製施設は基本的に木材の持つ許容応力度に基づいて設計され、特に重要なものは曲げ許容応力度であると述べている。木製土留構造物において土圧の影響が最も大きい部材は横木であると考えられるため、ウッドブロック(スギ、防腐加工あり)の横木部材の曲げ強度を算出し経過年数との関係を調べた(図-8)。

また、建築基準法施行令第89条に基づくスギ無等級材の許容曲げ応力度(長期、湿潤)は 5.7N/mm^2 であり、これを部材の耐用限界基準として設定した。

試験材の曲げ強度は $6.1\sim 53.5\text{N/mm}^2$ となった。これらはすべて許容曲げ応力度 5.7N/mm^2 以上であり、現状においては19年経過した構造物においても部材としての機能は維持されていることが確認された。

なお、施工後12年を経過したウッドブロック1基については、採取した部材6本中5本で背面からの強度の劣化が確認され、曲げ強度も他の部材に比べて著しく低かった。隣接する天端材からシロアリが確認

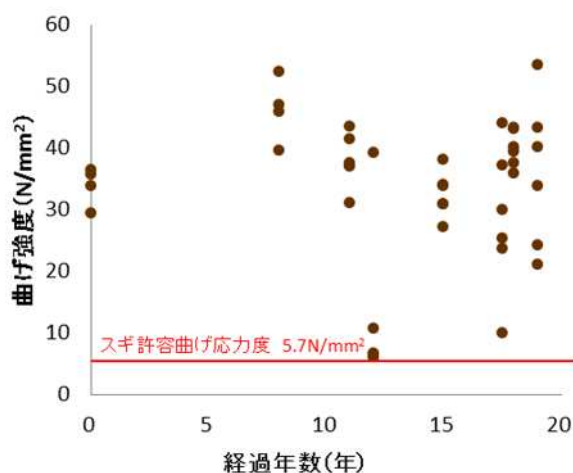


図-8 ウッドブロックにおける経過年数と曲げ強度の関係

されたことから、蟻害の影響を強く受けた可能性が高いと考えられる。

3. ウッドブロックにおける各劣化状況測定手法による曲げ強度推定について

(1) レジストグラフ

レジストグラフによる劣化厚と曲げ強度の関係を図-9に示す。これらには有意な相関が認められたことから ($p<0.001$)、劣化厚が大きくなると曲げ強度が指数関数的に減少することがわかった。

今回試験をおこなった部材は図-2に示すとおり断面幅が $95\sim 125\text{mm}$ であり、これらは各現場の部材ごとにばらつきがある。部材の曲げ強度を担保しているのは腐朽等の劣化が進んでいない健全な断面であると考えられる。したがって、曲げ強度の推定には、もともとの部材断面と劣化厚から健全な断面を推測し、その関係から求めるのが妥当であると考えられる。

そこで健全な断面として、全体の部材幅から前面からの劣化厚と背面からの劣化厚を差し引いた「健全厚」を算出し、健全厚と曲げ強度との関係を調べた(図-10)。その結果、有意な相関が認められた ($p<0.001$)。健全厚が小さくなると曲げ強度は指数関数的に減少することが示された。

このことから、レジストグラフにより健全厚を算出することで、曲げ強度の推定ができる可能性が示唆された。一方、部材の密度などの初期値や水分状況など個体差によるばらつきがあり、これらをどのように考慮していくかは今後の課題でもある。今回のレジストグラフ調査においては、測定の高確性を期して部材の前面と背面からおこなっているが、レジストグラフについては前面から部材を貫通させるようにその背面の劣化状況を把握することも可能だと考えられる。

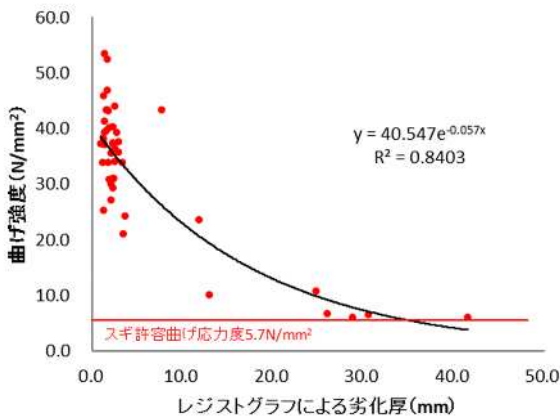


図-9 レジストグラフ劣化厚と曲げ強度の関係

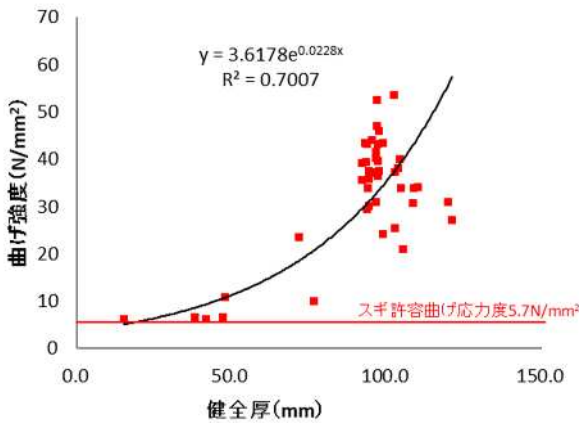


図-10 推定健全厚と曲げ強度の関係

(2) ピロディンおよびマイナスドライバー法

前述のレジストグラフでの測定では、曲げ強度との間に高い相関が得られた。一方で、レジストグラフは精密機械であるため高価で重量もあり現場で気軽に使用するのには難しいという点がある。

ピロディンおよびマイナスドライバー法については、機器自体もシンプルで測定も容易にでき携行性も良いという特徴がある。

ピロディンおよびマイナスドライバー法での測定値と曲げ強度の関係を図-11,12 に示す。ピロディン値およびマイナスドライバー値ともに曲げ強度と有意な相関が認められた ($p < 0.01$)。

維持管理において必要に応じて構造物の更新や

補修を実施することとなるが、その判断基準を定量的データから設定することが望ましい。そこで部材の耐用限界を許容曲げ応力度とし、得られたデータセットについて正規分布を仮定し、そのばらつきを考慮した上限下限 95%予測区間を求めた。下記にその算出式を記す。

$$SE = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\right) V_e}$$

$$\hat{y}_0 - t_{n-p-1} \left(\frac{1+0.95}{2}\right) SE \leq y_0$$

$$\leq \hat{y}_0 + t_{n-p-1} \left(\frac{1+0.95}{2}\right) SE$$

SE:標準誤差、 \bar{x} :説明変数 x の標本平均

V_e :残差の分散、 \hat{y}_0 : y_0 の点予測値

$t_{n-p-1}((1+0.95)/2)$:自由度 $n-p-1$ の t 分布の $(1+0.95)/2$ のパーセンタイル、 n は標本数、 p は説明変数の数

この 95%下限予測値を用いることによって、許容応力度を基準とした部材の更新や補修の判断ができると考えられる。例えば、ピロディンであれば 40mm 以上、マイナスドライバー法では 28.5mm 以上となると許容曲げ応力度 5.7N/mm²を下回る可能性が考えられるため、部材の更新をするといった維持管理上の運用に活用することができると考えられる。木製構造物の維持管理において、林野庁が制定している森林土木木製構造物設計等指針(2004)では、木製構造物の維持管理における詳細点検の定量的手法としてレジストグラフおよびピロディン等について言及がされているが、調査方法の紹介に留まっている。本研究のように現場での定量的なデータを蓄積することによって、実用に即した維持管理における基準を定量的に示すことができると考えられる。

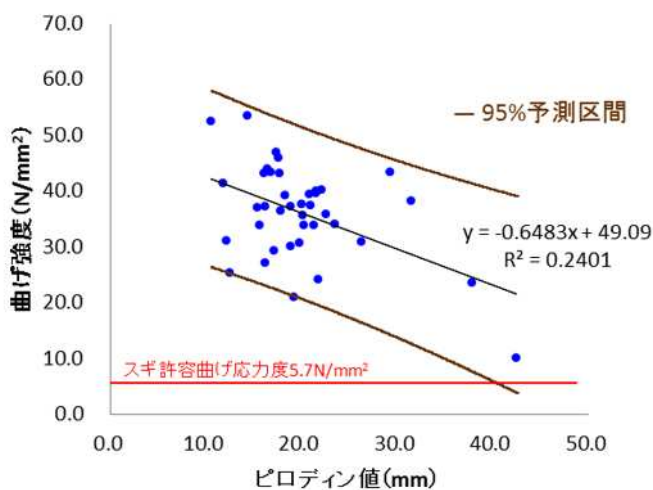


図-11 ピロディン値と曲げ強度の関係

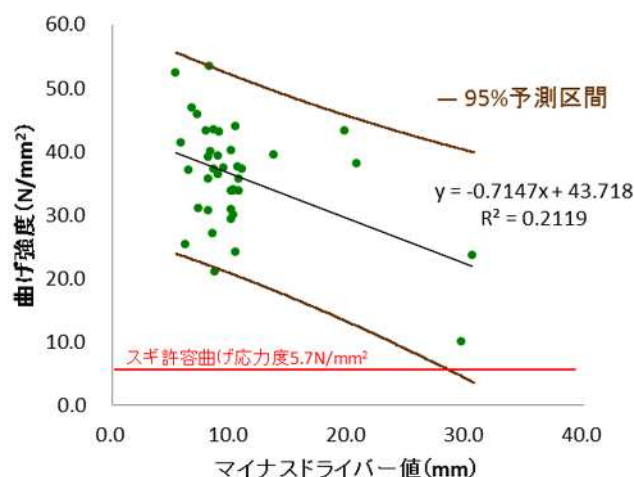


図-12 マイナスドライバー値と曲げ強度の関係

今回の調査では、一部の部材において背面からの激しい劣化が観察された。簡易な測定手法として提示したピロディン、マイナスドライバー法での現地調査では背面からの劣化状況を把握することが困難である。現地での劣化状況測定において部材中央や背面からの劣化についてはレジストグラフにおいて把握ができると考えられるため、可能であればこれら調査手法を併用していくことが望ましいと考えられる。

謝辞

本研究は、静岡県森林林業研究センターのご協力をいただき実施した。ここに謹んで謝意を示す。

引用文献

- 明石浩和・森拓郎・田淵敦士・三好岩生・宅間健人（2015）既設木製治山ダムの部材の曲げ強さ．材料 **64-5**：387-392
- 石川芳治・内藤洋司・落合博貴・上原勇（2003）各種試験に基づく木製施設の耐久性，腐朽度および曲げ強度評価法．砂防学会誌 **56-4**：21-31
- 木製治山構造物技術指針検討会（2016）木製治山構造物技術指針（案）（耐久性を期待する木製治山構造物の設計・施工・維持管理）．尾崎健一郎・鴨下直史・山本高也・大林育志（2010）山腹等における木製構造物の耐久性モニタリング調査．愛知林セ報 **47**：36-46
- 林野庁（2004）森林土木木製構造物設計等指針及び森林土木木製構造物設計等指針の解説等
- 田淵敦士・村田良浩・高奥信也・明石浩和（2011）木製治山ダム部材における曲げ強度の経年変化．材料 **60-4**：277-281
- 津島俊治・栗崎宏・長谷川益夫（2005）大分県における土木用木製構造物の劣化原因と耐用年数．木材保存 **31-5**：199-206
- ウッドブロック普及協議会（2005）ウッドブロック施工手引書．
- 和多田友宏・臼田寿生・土肥基生（2015）木製治山ダムの劣化に及ぼす諸要因の検討．岐阜県森林研報 **44**：11-16