

# 木製構造物（溪間工）の耐久性調査

2018年度～2020年度

石川敢太\*・上田耕大\*\*

## 要 旨

本県では木材の積極的な利用推進のため、治山事業で県産木材を利用した構造物を設置しているが、その中で溪間工について現状では耐用年数の目安となる基準等が確立されていない。本県の溪間工は近年防腐処理木材を利用して施工されているが、県内にある防腐処理木材により施工された溪間工の耐久性について統一的に調査した研究は見られない。そこで、1999年度から2017年度の間に設置された溪間工を調査対象とし、部材の劣化状況調査と現地における劣化状況調査を行った。部材の劣化状況調査では、溪間工の天端から部材を採取し、ピロディンによる測定・マイナスイオン法・プラスドライバー法により劣化状況調査を行ったあと、曲げ強度試験を行った。その結果から、各調査手法において、曲げ強度が許容曲げ応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ に達する貫入量をそれぞれ $34.7 \text{ mm} \cdot 31.4 \text{ mm} \cdot 22.7 \text{ mm}$ と推定した。また、現地における劣化状況調査では、各溪間工の横木を流水部と袖部に分けて貫入量を比較したところ、流水部の貫入量がわずかに大きかった。今回調査した溪間工の中で許容曲げ応力度を下回る部材はなく、中でも最も古い溪間工の経過年数から考えると、今回の調査では防腐処理木材の強度が20年は維持されることが分かった。

## I はじめに

本県では木材の積極的な利用を図るため、治山事業における県産木材利用を推進しており、床固工や流路工などの木製溪間工については1999年度から設置が始まっている（岩田 2010）。これらの木製構造物は、適宜補修を行うことによりその効果を長期的に発揮する必要があるが、現状では耐用年数の目安となる基準等が確立されていない。

前研究課題（釜田ら 2018）では、木製土留工を対象に調査したが、溪間工は土留工と違い溪流に施工されるため、劣化の進行に影響を及ぼす可能性がある。また、2014年度施行の愛知県木製治山構造物設置基準では「大型木製構造物及び修景を兼ねる木製構造物を設置する場合は、その効果を長期に発揮させるため防腐処理木材を使用するものとする」とされており、近年設置された木製構造物は防腐処理木材を利用して施工されている。木製床固工についての劣化状況については各地で

報告がある（石川ほか 2003、田淵ほか 2011、明石ほか 2015、和多田ほか 2015）ものの防腐処理木材で施工された溪間工について調査した研究は少なく（津島ら 2005、吉田ら 2015）、県内にある複数の溪間工を統一的に調査したものは見られない。

そこで、本研究では木製構造物（溪間工）の耐久性能を評価することを目的に、現場で実施できる簡易な部材の劣化状況調査を行うとともに、現地から採取した部材の曲げ強度試験を実施し、曲げ強度を推定するためのモデル式を作成した。この結果から、現在設置されている溪間工の中で劣化した部材の有無を部位ごとに確認し、劣化状況調査により構造物の劣化状況を推定する際の目安となる基準を作成した。

## II 方法

### 1. 部材の劣化状況調査および曲げ強度試験

Kanta ISHIKAWA, Koudai UEDA: Survey on durability of wooden soil saving dams at the waterside.

\*現新城設楽農林水産事務所

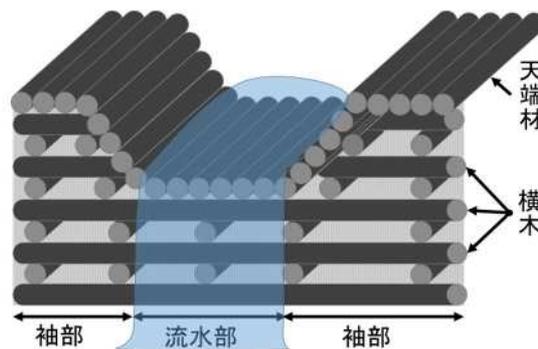
\*\*現豊田加茂農林水産事務所

県内に設置された木製溪間工（表－1、図－1）で、防腐処理木材で施工された溪間工5基（以下、経過年数により防腐2、防腐4、防腐7、防腐9、防腐21）のうち流路工の防腐21を除く4基と、非防腐木材で施工された溪間工2基（以下、経過年数により非防腐7、非防腐8）を対象に、部材の抜き取りによる劣化状況調査および強度試験を行った。防腐処理木材は全てO&Dウッド（株式会社コシイプ

レーザービング製・圧縮処理した木材に防腐剤マイトレックACQを加圧注入したもの）であった。部材の寸法は、防腐処理木材では直径12 cm、長さ150 cmの円柱形で、樹種は主にスギで、一部ヒノキも確認された。部材を抜き取る段階において、防腐処理木材は外観から樹種判別ができなかったため、無作為に抽出した。また、非防腐木材は太鼓挽き（円柱の両側を平行に二面切削したもの）で直径

表－1 調査地一覧

調査躯体名	設置場所	設置年度	経過年数	防腐処理	工種
非防腐7	東栄町大字川角	2011	7	無	床固工
非防腐8	〃（同一溪流内に設置）	2010	8	無	床固工
防腐2	新城市中宇利字福津地内	2017	2	有	谷止工
防腐4	岡崎市茅原沢	2015	4	有	床固工
防腐7	岡崎市石原	2012	7	有	谷止工
防腐9	〃	2010	9	有	谷止工
防腐21	豊川市平井町	1999	21	有	流路工



図－2 流水部と袖部および天端材と横木



図－1 本試験で調査した溪間工（防腐処理木材のもの）

（左上：防腐9・右上：防腐7・左下：防腐4・中央下：防腐2・右下：防腐21）

防腐9と防腐4のみ常水が見られる。防腐21は流路工で満潮時は最大で下から3段目までの部材が水没する。

は元口・末口の平均で18～24 cm、長さ約200 cmで、樹種は全てスギであった。これらの溪間工の部材について、防腐処理木材では天端材のうち流水部と袖部（図-2）から各3本、非防腐木材では天端材を流水部から2本、袖部から4本、横木を流水部から1本、袖部から2本抜き取り、それぞれ含水率が変化しないようにビニールシートに包んで森林・林業技術センターに持ち帰った。

その後、各部材で劣化状況調査を行った後、曲げ強度試験を行った。劣化状況調査には、以下の3手法を用いた。

#### ア ピロディンによる測定

打ち込みエネルギーが6.0 Jのピロディン（Proceq社製）を使用して、木材に垂直にピン（直径2.5 mm・長さ40 mm）を打ち込み、貫入量を読み取る手法。

#### イ マイナスドライバー法

直径3 mmのマイナスドライバーと荷重測定器（デジタルフォースゲージZTS-1000N、図-3）を組み合わせ、木材の繊維方向と平行な向きでマイナスドライバーを貫入し、荷重200 N（約20 kgf）時の貫入量を測定する手法。

#### ウ プラスドライバー法

マイナスドライバー法と同様の手法を直径3 mmのプラスドライバーを使用して行うもの。



図-3 デジタルフォースゲージ

以上の調査を、それぞれ各部材の12か所で行った（図-4）。

曲げ強度試験は、実大強度試験機（SHIMADZU UH-1000kN）を用いて、防腐処理木材はスパン1300

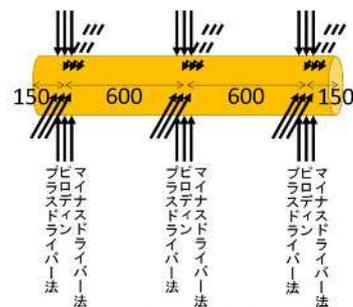


図-4 劣化状況調査を行った箇所

寸法は防腐処理木材のもので単位はmm

mm、非防腐木材はスパン1800 mmの中央集中荷荷により行った。部材の中で円形の部分を下にして曲げ強度試験を行う際は、転がらないように凹型の治具で固定した。荷重速度は5～10 mm/minとした。また、曲げ強度試験では材の下面に最も強い引っ張り応力が生じることから、各部材の中で表面が露出した部分（天端材の上面と横木の前面）が下面になるようにして行った。曲げ強度については以下の計算式により求めた。

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

$P_{\max}$  : 最大荷重 (N)、L : スパン (mm)、

Z : 断面係数 (mm<sup>3</sup>)

断面係数Zは、部材の断面形状や曲げ強度試験時の部材の向きによって異なり（図-5）、今回の試験では以下の3通りである。

#### ア 防腐処理木材（天端材）

断面形状は円のため、元口・末口の平均半径をr (mm)として以下の式で算出した。

$$Z = \frac{\pi}{4} r^3$$

#### イ 非防腐木材の天端材

断面形状は太鼓挽き（円の両側を平行に二面切削したもの）で、天端材では切削面が下になるように曲げ強度試験を行った。そのため、元口・末

口の平均半径を $r$  (mm)、切削面の間の距離を $H$  (mm)、斜辺 $r \cdot$ 底辺 $H/2$ の直角三角形の斜辺と底辺のなす角度を $\theta$  (rad)として以下の式で算出した。

$$Z = \frac{r^4(4\theta - \sin 4\theta)}{4H}$$

#### ウ 非防腐木材の横木

断面形状は天端材と同じだが、横木では切削面が真横になるように曲げ強度試験を行った。そのため、元口・末口の平均半径を $r$  (mm)、切削面の間の距離を $H$  (mm)、斜辺 $r \cdot$ 高さ $H/2$ の直角三角形の斜辺と底辺のなす角度を $\theta$  (rad)として以下の式で算出した。

$$Z = \frac{2r^2H(\sin \theta)^3}{3} + \frac{r^3\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \frac{1}{4}\sin 4\theta\right)}{2}$$

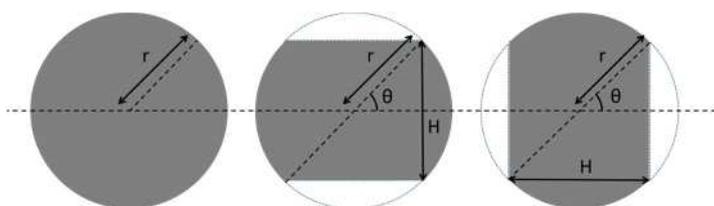


図-5 断面係数算出に用いた断面図

左から順に、ア 防腐処理木材（天端材）、イ 非防腐木材の天端材、ウ 非防腐木材の横木。

曲げ強度試験の結果は、「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」（林野庁 2016）に「木材の許容応力度等は、建築基準法施行令等に定める値を参考として適切な値を用いる」とあることから、建築基準法施行令に記載されている、スギの常時湿潤状態における長期荷重に対する許容応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ を下回る部材は劣化していると見なすこととした。

曲げ強度試験終了後、試験後の部材を両側から $200 \text{ mm}$ 程度の位置で厚さ $10 \text{ mm}$ 程度の板を採取し、全乾法により含水率を測定した。

以上の試験データを解析し、部材への劣化状況

調査の結果から曲げ強度を推定する式を作成した。

解析には統計解析ソフトR (version 3.6.2)と、そのパッケージのlme4 (ver.1.1.26)、car (ver.3.0.10)、MuMIn (ver.1.43.17)を使用した。説明変数を劣化状況調査の結果（貫入量 mm）、部材の経過年数、部材の位置（流水部、袖部）、含水率およびそれらの交互作用項とし、応答変数はスギの曲げ強度 ( $\text{N/mm}^2$ )、ランダム効果は部材ごとに付した番号、樹種（スギ、ヒノキ）、非防腐木材の天端材と横木として一般化線形混合モデル（GLMM）を作成した。なお、貫入量については部材ごとに複数箇所の測定値を平均した値を使用した。モデル作成にはパッケージlme4のglmer関数を使用し、応答変数の誤差構造はGamma分布でリンク関数をlogとした。これに、パッケージMuMInの dredge関数を用いて、AIC（赤池情報量規準）に基づく変数減少法によりモデル選択を行い、最もAICが小さいモデルを当てはまりの良いモデルとして曲げ強度の推定式を作成した。推定式の中で貫入量以外のパラメータ（経過年数、部材の位置、含水率）には今回の試験で得られた測定値の最大値と最小値を代入することにより、今回試験した条件範囲で曲げ強度が許容曲げ応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ に達し得る最小の貫入量を算出した。その後、パッケージggplot2 (ver.3.3.3)を用いて結果のグラフを作成した。

## 2. 現地における劣化状況調査

防腐処理木材の溪間工5基（防腐2、防腐4、防腐7、防腐9、防腐21）の横木について、劣化状況調査を3か所ずつ（図-6）行い、防腐2および防腐21については木材水分計HM-520を使用して含水率調査も行った。横木は抜き取りが困難で曲げ強度試験は行うことができなかったため、天端材の曲げ強度の値を参考にして、劣化状況調査の結果で評価した。その際に、天端材と横木の違いによる影

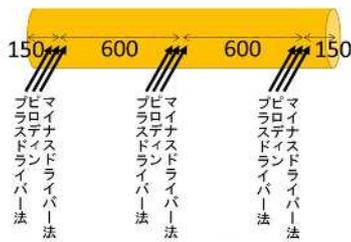


図-6 現地で劣化状況調査を行った箇所

寸法の単位はmm

響を考慮するため、部材の経過年数、部材の位置（流水部・袖部）、部材の位置（天端材・横木）を説明変数、貫入量を応答変数、ランダム効果を部材ごとに付した番号としてAICに基づく変数減少法によりモデル選択を行い、天端材・横木の間での貫入量の差を示した。

### Ⅲ 結果および考察

#### 1. 部材の劣化状況調査および曲げ強度試験

防腐処理木材では、曲げ強度試験の結果、許容曲げ応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ を下回る部材は見られなかった（表-2）。含水率は19.4~146.1%であり平均は67.1%であった。ピロディン・マイナスイラストライバー法・プラスドライバ法の値から曲げ強度の推定を行った結果は、以下のとおりである。

表-2 防腐処理木材の曲げ強度試験結果

調査躯体名	部材の位置	曲げ強度 ( $\text{N/mm}^2$ )		
		最大	平均	最小
防腐2	流水部	60.6	51.8	44.1
	袖部	52.1	45.2	34.2
防腐4	流水部	51.1	47.1	39.8
	袖部	52.2	48.3	43.3
防腐7	流水部	62.7	59	52.2
	袖部	63.1	47.7	39.8
防腐9	流水部	50.2	44.5	40.9
	袖部	56.5	52	46.5

#### ア ピロディンによる測定

説明変数に貫入量・経過年数・部材の位置（流水部・袖部）・含水率および貫入量と経過年数・含水率、部材の位置（流水部・袖部）と経過年数・含水率の交互作用項を組み込んだモデルがAICの

最も小さいモデル（AIC = -262.1）として選択された（表-3）。

表-3 ピロディンによる測定における説明変数と応答変数の関係（防腐処理木材）

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
	(Intercept)	4.5974960±0.4688003
曲げ強度	貫入量	-0.0444197±0.0227144
	経過年数	-0.1784921±0.1317870
	袖部	0.1193063±0.1445822
	含水率	0.0177526±0.0082822
	貫入量×経過年数	0.0084595±0.0063709
	貫入量×含水率	-0.0007529±0.0003837
	袖部×経過年数	0.0084426±0.0296841
	袖部×含水率	-0.0031685±0.0029140

#### イ マイナスイラストライバー法

説明変数に貫入量・経過年数・部材の位置（流水部・袖部）および部材の位置（流水部・袖部）と貫入量・経過年数との交互作用項を組み込んだモデルがAICの最も小さいモデル（AIC = -255.6）として選択された（表-4）。

表-4 マイナスイラストライバー法における説明変数と応答変数の関係（防腐処理木材）

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
	(Intercept)	4.577010±0.367866
曲げ強度	貫入量	-0.090941±0.043604
	経過年数	0.009742±0.013397
	袖部	-0.243308±0.420213
	袖部×貫入量	0.043109±0.053354
	袖部×経過年数	-0.029234±0.017939

#### ウ プラスドライバ法

説明変数に貫入量・経過年数・部材の位置（流水部・袖部）を組み込んだモデルがAICの最も小さいモデル（AIC = -256.2）として選択された（表-5）。

表-5 プラスドライバ法における説明変数と応答変数の関係（防腐処理木材）

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
	(Intercept)	4.492232±0.143859
曲げ強度	貫入量	-0.118347±0.028141
	経過年数	0.006067±0.009340
	袖部	-0.082701±0.049018

以上で選択したモデル式について、図-7に示し

た。今後も劣化が推定式に従って進行すると仮定すると、許容曲げ応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ に達しうる最小の貫入量は、ピロディンで $34.7 \text{ mm}$ （袖部、経過年数2年、含水率 $146.1\%$ のとき）、マイナスドライバー法で $31.4 \text{ mm}$ （流水部、経過年数2年のとき）、プラスドライバー法で $22.7 \text{ mm}$ （袖部、経過年数2年のとき）と推定された。ピロディンの貫入深さについては $35 \text{ mm}$ を越えるものが使用不能材と見なせる（飯島 1999）ため、今回の推定結果はこれを支持している。なお、経過年数が2年の条件が選ばれているのは、全体的に2年目の部材の方が9年目の部材より貫入量が小さい傾向があることから、許容曲げ応力度に達しうると評価される貫入量の値も2年目の部材の方が比較的小さく算出されるため、新しい部材の方が劣化しやすいという意味ではない。

一方、非防腐木材でも曲げ強度試験の結果、許容曲げ応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ を下回る部材は見られなかった（表-6）。含水率は $96.2\sim 270.7\%$ で平均は $167.7\%$ であった。

表-6 非防腐木材の曲げ強度試験結果

調査 躯体 名	部材の位置		曲げ強度 ( $\text{N/mm}^2$ )		
			最大	平均	最小
非 防 腐7	天端 材	流水部	20.5	20.2	19.9
		袖部	18.2	16.1	13.4
	横木	流水部	-	15.5	-
		袖部	16.1	14.1	12.1
非 防 腐8	天端 材	流水部	24.8	21.1	17.3
		袖部	24.0	21.2	18.8
	横木	流水部	-	9.0	-
		袖部	15.1	11.1	7.1

#### ア ピロディンによる測定

ピロディンの貫入量について、測定できる最大値の $40 \text{ mm}$ を越えるものが全データの $48\%$ を占めたが、曲げ強度の測定値が許容曲げ応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ を下回る部材は見られなかったため、ピロディンで測定できる範囲で部材の劣化を示すのは困難と考えられた。

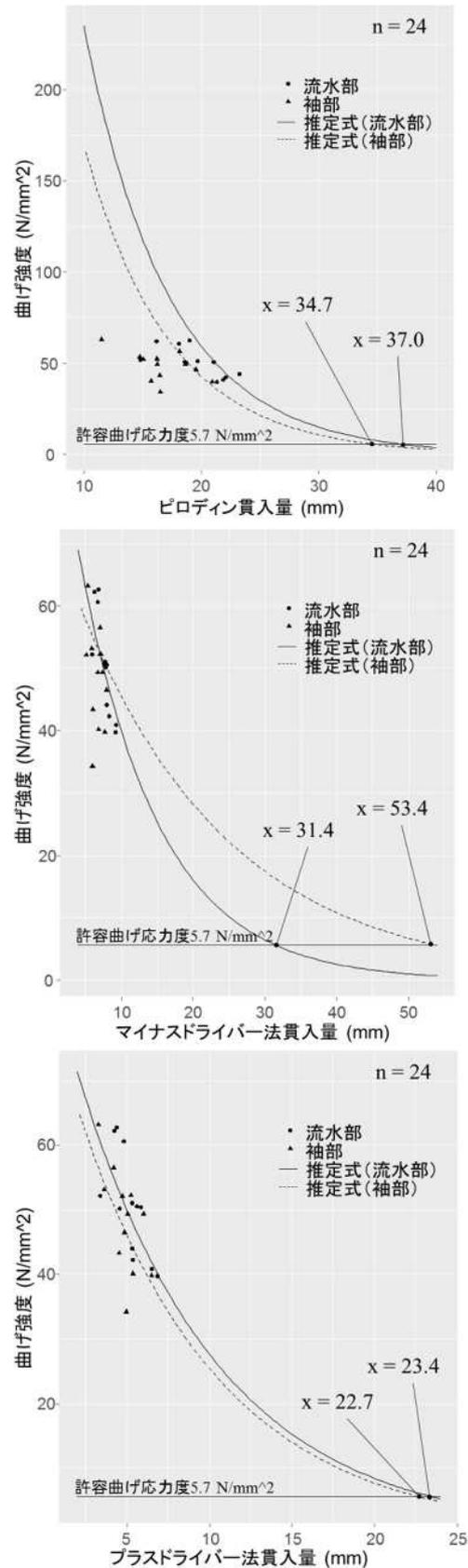


図-7 劣化状況調査の結果と曲げ強度の関係（防腐処理木材）

## イ マイナスドライバー法

説明変数に経過年数のみを組み込んだモデルがAICの最も小さいモデル (AIC = -207.7) として選択された (表-7)。

表-7 マイナスドライバー法における説明変数と応答変数の関係 (非防腐木材)

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
曲げ強度	(Intercept)	2.95367±0.92461
	経過年数	-0.03407±0.12262

## ウ プラスドライバー法

説明変数に貫入量・経過年数を組み込んだモデルがAICの最も小さいモデル (AIC = -217.0) として選択された (表-8)。

表-8 プラスドライバー法における説明変数と応答変数の関係 (非防腐木材)

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
曲げ強度	(Intercept)	2.143926±0.695872
	貫入量	-0.026892±0.008663
	経過年数	0.135277±0.097545

以上で選択したモデル式のうち、説明変数に貫入量が含まれているプラスドライバー法について、図-8に示した。今後も劣化が推定式に従って進行すると仮定すると許容曲げ応力度 $5.7 \text{ N/mm}^2$ に達しうる最小の貫入量は $50.2 \text{ mm}$  (経過年数7年のとき) となった。防腐処理木材の結果より大きな推定値となったのは、部材の直径が防腐処理木材より大きいことなどが影響していると考えられる。

## 2. 現地における劣化状況調査

横木の劣化状況調査での貫入量について、図-9に示す。いずれの試験においても、貫入量が最大となったのは設置後21年経過した流路工であった。

解析の結果、ピロディンによる測定では経過年数・部材の位置 (流水部・袖部)・部材の位置 (天端材・横木) および部材の位置 (流水部・袖部) と部材の位置 (天端材・横木) の交互作用項を組み込んだモデルがAICの最も小さいモデル (AIC = -3158.1) として選択された (表-9)。

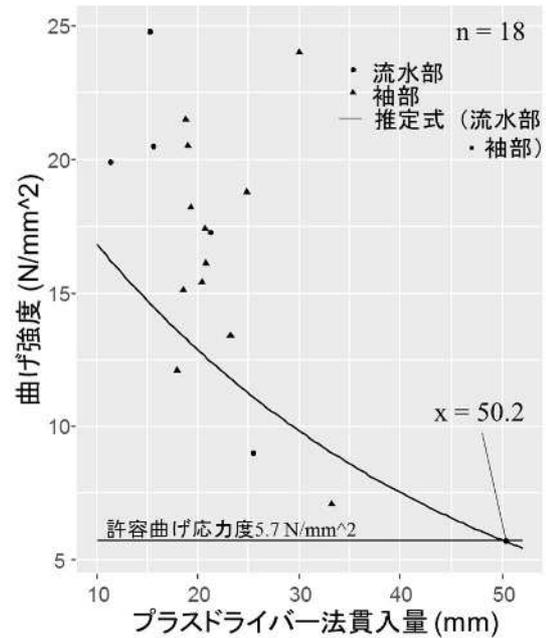


図-8 劣化状況調査の結果と曲げ強度の関係 (非防腐木材)

表-9 ピロディンによる測定における説明変数と応答変数の関係 (防腐処理木材の貫入量)

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
貫入量	(Intercept)	2.908752±0.052935
	経過年数	0.009996±0.002024
	袖部	-0.180657±0.073186
	横木	-0.106313±0.056324
	袖部×横木	0.097031±0.077586

マイナスドライバー法では、経過年数・部材の位置 (流水部・袖部)・部材の位置 (天端材・横木) および経過年数と部材の位置 (天端材・横木) の交互作用項を組み込んだモデルがAICの最も小さいモデル (AIC = -3606.1) として選択された (表-10)。

表-10 マイナスドライバー法における説明変数と応答変数の関係 (防腐処理木材の貫入量)

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
貫入量	(Intercept)	2.10616±0.09969
	経過年数	-0.03126±0.01611
	袖部	-0.10250±0.02882
	横木	-0.41131±0.10150
	経過年数×横木	0.05950±0.01629

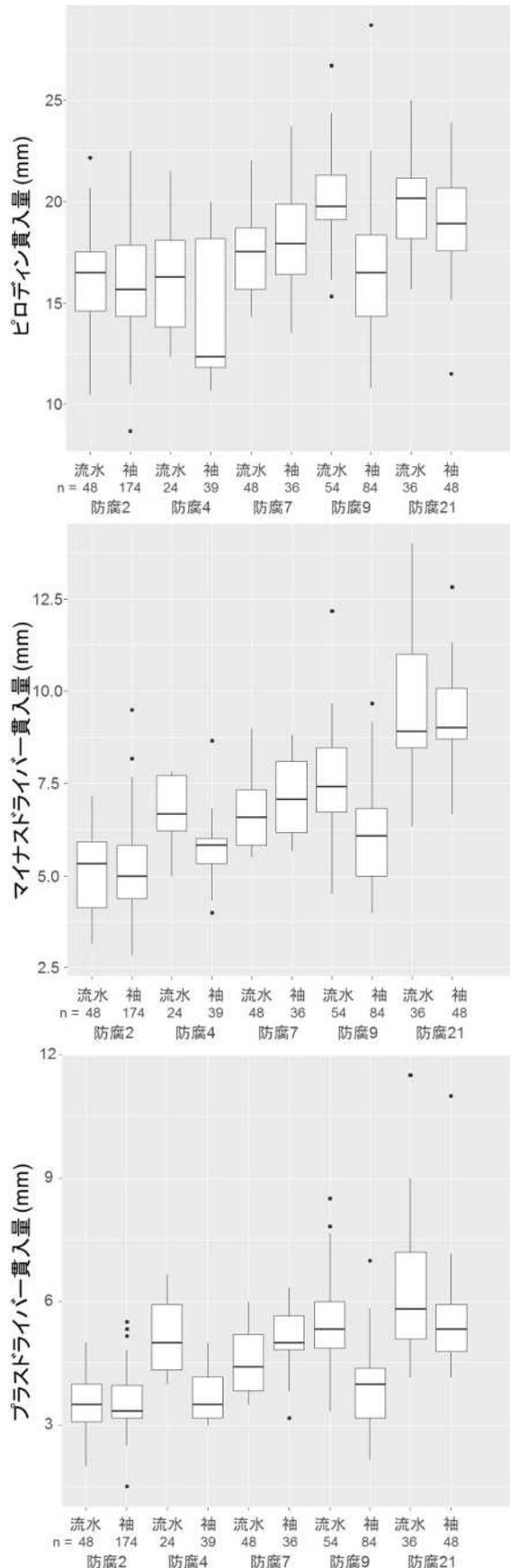


図-9 劣化状況調査の結果(防腐処理木材横木)

プラスドライバー法では、経過年数・部材の位置（流水部・袖部）・部材の位置（天端材・横木）およびそれらの交互作用項すべてを組み込んだモデルがAICの最も小さいモデル（AIC = -3785.5）として選択された（表-11）。

表-11 プラスドライバー法における説明変数と応答変数の関係（防腐処理木材の貫入量）

応答変数	説明変数	係数±標準偏差
貫入量	(Intercept)	1.596658±0.158752
	経過年数	0.018733±0.025924
	袖部	-0.144409±0.224508
	横木	-0.269576±0.165970
	経過年数×横木	0.008970±0.026331
	袖部×横木	0.034882±0.231709
	経過年数×袖部×横木	0.002875±0.037111

今回の結果から各条件での横木と天端材での貫入量の平均値の推定値は表-12のとおりとなった。

表-12 各条件での横木と天端材の貫入量の平均値の推定値（防腐処理木材）

手法	経過年数	部材の位置	貫入量 (mm)	
			横木	天端材
ピロディン	2	流水部	16.8	18.7
		袖部	15.4	15.5
	9	流水部	18.0	20.1
		袖部	16.5	16.6
		21	流水部	20.1
マイナスドライバー法	2	流水部	5.8	7.7
		袖部	5.2	7.0
	9	流水部	7.0	6.2
		袖部	6.3	5.6
		21	流水部	9.6
プラスドライバー法	2	流水部	4.0	5.1
		袖部	3.6	4.4
	9	流水部	4.8	5.8
		袖部	4.4	5.1
		21	流水部	6.6
		袖部	6.2	6.2

貫入量について、横木と天端材の違いにより生じる差はピロディンで-0.1 mmから-2.3 mm、マイナスドライバー法で+5.2 mmから-1.9 mm、プラスドライバー法で0 mmから-1.1 mmであった。劣化状況調査での貫入量と同じであれば曲げ強度は同じであると仮定すると、マイナスドライバー法

を除いて、横木はどの条件でも天端材より貫入量が小さかった。したがって、天端材の曲げ強度試験で全ての材が許容曲げ応力度より十分小さかったことから、横木についてもマイナスドライバー法以外では許容曲げ応力度に達しうる貫入量より十分小さく、健全な状態であると考えられる。また、マイナスドライバー法での貫入量の最大値(防腐21:14 mm)に横木により生じうる差5.2 mmを足しても、許容曲げ応力度に達しうる貫入量31.4 mmより十分小さいため、今回調査対象とした防腐処理木材による木製構造物はすべて健全な状態であることが示唆された。最も古い防腐21は1999年度に設置されていることから、今回の調査では防腐処理木材は設置後少なくとも20年は各部材の性能が維持されるものと考えられる。

また、部材の位置(流水部・袖部)による影響については、表-12から、流水部に比べて袖部で貫入量がピロディンで1.4~3.8 mm、マイナスドライバー法で0.4~1.0 mm、プラスドライバー法で0.4~1.0 mm少ないという結果になった。先行研究では、常水のある部分では腐朽が遅かった(秋田2014, 神原ら2017)が、圧縮加圧処理材においてレジストグラフを使用した事例では、常水の有無で劣化速度に有意な差が見られなかった(吉田ら2015)。今回の調査では流水部の方がわずかに貫入量が大きくなる傾向で、先行研究とは異なる結果であったが、その原因としては先行研究に比べて今回調査した堰堤の水量が少ないことが考えられ、空気との接触を遮断して腐朽を遅らせるほどの浸水になっていなかった可能性がある。また、木材の含水率の違いによる貫入量の変化を調査した研究(野田2018, 山田ら2017, 佐山ら2017)では、含水率が増加するほど貫入量の値が大きくなるという結果を示しているが、今回プラスドライバー法、マイナスドライバー法で許容曲げ応力度を推定する際に用いた推定式では含水率のパラメータ

は有意に働いておらず、推定に影響していなかった。以上より、今後、防腐処理材による溪間工の耐久性を評価する場合には、今回実施した劣化状況調査を行い、表-13に示す貫入量を上回らないことを確認することで、部材の曲げ強度が許容曲げ応力度5.7 N/mm<sup>2</sup>以上で健全な状態であると判断できることが示唆された。

表-13 許容曲げ応力度5.7 N/mm<sup>2</sup>に達しうる貫入量(防腐処理木材)

部位	許容曲げ応力度5.7 N/mm <sup>2</sup> に達しうる貫入量		
	ピロディン(mm)	マイナスドライバー法(mm)	プラスドライバー法(mm)
流水部	34.7	53.4	22.7
袖部	37.0	31.4	23.4

#### 謝辞

岡崎市に設置された谷止工2基については林野庁中部森林管理局愛知森林管理事務所、豊川市に設置された流路工については国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所にご協力いただいて試験を行った。ここに厚くお礼を申し上げる。

#### 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
- 秋田寛己(2014) 木製治山堰堤における腐朽の進行過程の解明と予測. 信州大学審査学位論文
- Douglas Bates, Martin Maechler, Ben Bolker, Steve Walker (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software, 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01.
- H. Wickham. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.
- 飯島泰男(1999) 土木用木質構造物の耐用年数評価について. 木材保存25-5: 209-218

- 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
- 岩田征子（2010）木製残置型枠の補修についての一考察. 第50回治山研究発表会論文集 : 53-58
- John Fox and Sanford Weisberg (2019). An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- 釜田淳志・鈴木祥仁（2018）木製建造物の耐久性調査. 愛知県森林セ報55 : 40-46
- Kamil Bartoń (2020). MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.43.17. <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>
- 神原広平・松永浩史・大村和香子・桃原郁夫・玉井幸治・明石浩和・山内仁人・藤田智郁・野田龍（2018）坪毛沢木製堰堤群の劣化現況調査～成長錐コアによる部材の含水率と全乾密度の測定結果～. 第34回公益社団法人日本木材保存協会年次大会研究発表論文集 : 114-115
- 野田龍（2018）荷重測定器を用いた腐朽劣化診断手法の基礎的実験. 木材保存44-4 : 226-234
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- 林野庁（2016）森林土木木製建造物設計等指針及び森林土木木製建造物設計等指針の解説等
- 佐山達哉・野田龍（2017）水分変動下におけるピン打ち込み抵抗特性. 第67回日本木材学会大会 : N18-P2-13
- 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・長谷川益男（2005）大分県における土木用木製建造物の劣化原因と耐用年数. 木材保存31-5 : 199-206
- 和多田友宏・臼田寿生・土肥基生（2018）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
- 山田昌郎・水谷羊介・沼田淳紀・吉田雅穂・末次大輔・原忠・三村佳織・中村克彦・森満範・野田龍（2017）木材の含水率がピロディンとドライバーの貫入深さに及ぼす影響に関する一斉試験. 土木学会第72回年次学術講演集 : 1167-1168
- 吉田宰・石川芳治・辻本吉寛・田次慶久（2015）木製治山・治水建造物に用いた圧縮・加圧注入処理木材の劣化速度と凍結融解の影響. 砂防学会誌68-3 : 11-20