

河川護岸修景用木材の腐朽劣化特性に関する研究

渡部 守義* 神田 佳一* 是川 悠介** 椿野 翔平**

Study on the putrefaction deterioration characteristics of wood used as a material for landscape revetment

Moriyoshi WATANABE, Keichi KANDA, Yuusuke KOREKAWA, Shohei TSUBAKINO.

ABSTRACT

This study aims to reveal timber's putrefaction and deterioration characteristics when used as a landscape revetment material. Since 2005 our laboratory has been observing the putrefaction and deterioration process of 3 different species of wood (*Cryptomeria Japonica* (SUGI), *Chamaecyparis Obtusa* (HINOKI), *Larix Leptolepis* (MATSU)), and 4 types of surface processing methods installed in different environments. We focused on the Pilodyn test to clarify the difference in the installation environment. The results showed that wood putrefaction is likely to occur at the boundary between wood and soil and between wood and water. However, the wood installed underwater did not suffer damage by putrefaction or insects and maintained a good condition for a long time. Under the same conditions, *Larix Leptolepis* was the weakest type of wood, and *Chamaecyparis Obtusa* was the strongest wood. Furthermore, this study observed that wood, installed in rivers in 2005, was underwater for half a year and dried for half a year prior to its installation, which is why the deterioration by putrefaction was small.

KEY WORDS: wood, revetment material, decay deterioration,

1. はじめに

土木分野において木材は、建設資材として用いられており、特に 1990 年代以降は「多自然川づくり」の取組において景観と河川環境に配慮した材料として用いられている。しかし、長期間使用の腐朽劣化が問題となっている。木材の腐朽に関しては菌類との関係、建築分野において強度や耐久性との関連の文献は多くあるが、河川空間の様々な環境条件下の木材の腐朽特性について実証した実験¹⁾²⁾は散見される程度である。

明石高専河川研究室と環境工学研究室では、間伐木杭の腐朽特性に関する基礎的な知見を得ること

を目的とした実験を 2005 年から 2019 年までの 15 年間に腐朽劣化の測定を実施⁴⁾⁵⁾してきた。しかし測定した年度により測定した木杭の本数、測定箇所数が異なっていたためデータの取り扱い方により結果が異なる可能性がある。

そこで本研究では、既往の木杭腐朽劣化実験のデータを見直し異なる 2 つの方法で樹種、表面加工による腐朽劣化の違いを評価する。さらに 2005 年に播磨町を流れる喜瀬川に設置された木杭の腐朽劣化状態の観測を行い腐朽劣化実験結果と比較を行った。

*都市システム工学科、**明石高専卒業生

表1 木杭の寸法と表面加工

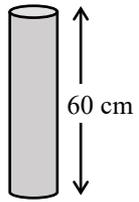
寸法	樹種	表面加工
	スギ	なし
		傷
		皮付き
		焼き
		ヤシ油
	銅	
	ヒノキ	なし
マツ	なし	



写真1 貫入量測定機 Pilodyn

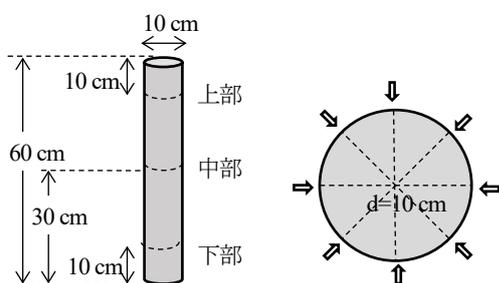


図1 測定位置

表2 木杭の設置条件

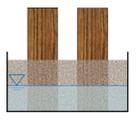
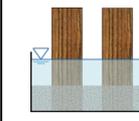
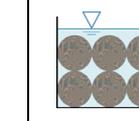
条件	条件A	条件B	条件C
状態	1/2 土中・ 1/4 浸水	1/4 土中・ 1/2 浸水	完全浸水
想定	高水敷上	低水護岸	完全水没
概略			



写真2 設置状況

2. 方法

2-1 腐朽劣化実験の概要

実験に用いたのはスギ、ヒノキおよびカラマツ（以降マツと記す）の3種類である。実験用木杭は表1に示すよう皮を除去し、直径10 cm、高さ60 cmに加工されたものを用いた。スギについてはこれ以外に、表面を電動ドリルで数 mm の傷を付けたもの、皮付きのもの、表面を焼きつけた焼き加工、ヤシ油、銅イオンを加圧注入し防腐処理した5種類を準備し、表面加工による違いを調べた。

腐朽劣化の評価指標は木杭の直径、貫入量、含水率である。木杭の貫入量は写真1の富士テック製木材貫入量測定機（ピロディン）を用いて、図1に示すよう杭の両端から10 cmの位置の上部、下部および中部の3箇所の木杭円周上8箇所、一本の木杭につき計24箇所測定を行った。貫入量はピロディンの先端の針を6Jの貫入エネルギーで木材に打ち込み、その針の貫入量によって木材の状態を相対的に評価するもので、貫入量が多いほど腐朽が進行していることを示す。

木材に含まれる水分は木材腐朽菌の生存に関わる指標である。木材建築用のProtimeter製サーベイマスター水分計は計測器先端の2本の電極針を木杭に刺すこと

により、刺した個所の木杭の含水率(%)を測定することができる。測定箇所は木杭の上部、中部、下部の3箇所とした。初期の実験用木杭の含水率はスギ約20%、ヒノキ約16%、マツ約15%であった。

河川護岸材料として使用される木杭設置状態を実験で再現するため、表2と写真2に示す3つの設置条件を設定した。条件Aは高水敷上での使用を想定し、木杭の上部1/2は空气中、下部は1/2が砂中で、さらに下部の1/4は地下水を想定し水で浸水させた。条件Bは低水護岸での使用を想定し、木杭の1/2は空气中、下部は1/2が水中、内1/4が砂中にある状態とした。条件Cは常時、木杭全体が完全に水没した状態での使用を想定した条件である。実験容器として縦60 cm×横40 cm×高さ30 cmのコンテナボックスを用い、各条件の水位を保つよう水道水の給水を常時行った。これらの木杭を1つの環境条件につき4本を準備し、表3に示す測定年と測定項目のように腐朽劣化の度合いを観察してきた。実験後は極力設置条件と同じ状態になるように木杭を容器に戻した。

なお本研究で想定する河川護岸材料としての木杭は、生態系や景観の保全・創出に配慮し、最小限の護岸の侵食防止機能を有しているものであり、流水に対する力学的な安定性の検討は行っていない。

2.2 貫入量データの整理法と腐朽判定

腐朽判定や耐用年数の推定方法はさまざまあるが、目視やピロディンが多く用いられている。目視による被害度判定は雨宮⁶⁾により提案されたもので、被害度を0~6階級に分け評価するものである。目視による被害度判定とピロディンによる貫入量との関係については多くの報告があるが、その関係は使用条件や気候に左右されることが指摘されている⁷⁸⁾。本研究では、これらの知見を参考に、客観的に得られる貫入量のみから腐朽判定を行う。

一般的に、木杭の貫入量が35mmを超えると使用不能材と定義⁷⁸⁾されている。そこで式(1)のように直径10cmの外周位置から測定できた個所の貫入量の合計値を測定箇所数で除した平均値が35mmを超えるか否かで行った。以降、貫入量法と記す。

$$\frac{\text{測定できた箇所の貫入量の合計}}{\text{測定箇所数}} \geq 35 \text{ mm} \quad (1)$$

本研究で過去に実施した腐朽判定⁴⁵⁾は、基本的に式(1)を用いた貫入量法である。ピロディンは仕様上40mmまでしか測定できないため、貫入量は40mmとして整理するか、測定不能箇所としてデータから省く場合があった。しかし、この方法は測定者の判断に依存し、腐朽が激しく測定できなかった箇所についてもデータから省くのではなく40mmとしてデータを整理した可能性を否定できない。いずれにしても式(1)を用いると貫入量は小さく見積もられてしまう。さらに表3のように測定年によって測定木杭本数が異なると、本数が少ない場合は平均的な値を得ることができていない可能性がある。

飯島ら⁷⁾は貫入量が35mmを超える木杭の出現率を用いて耐用年数を推定している。本研究では河川護岸

表3 測定年と測定項目

測定年	2005	2008	2009	2013	2016	2019
測定した木杭本数	1	4	2	1	4	4
部位ごとの測定箇所数	直径	1	4	2	-	4
	貫入量	8	32	16	8	32
	含水率	1	4	2	1	4

測定箇所数の表示があっても、不朽によりすべての箇所数を測定できていない場合がある。

の修景目的であることを考慮し、35mmを超える部位の出現率が30%を超えた場合、使用不可であると判定する。この考えに基づき貫入量が35mmを超える測定の箇所数に基づいた腐朽判定の式(2)を用いた腐朽割合から、腐朽判定を行う。以降、腐朽割合法と記す。

$$\frac{\text{貫入量35mm以上の箇所数} + \text{測定不可の箇所数}}{1 \text{ 円周上の測定箇所数} \times \text{測定本数}} \geq 30\% \quad (2)$$

本論では貫入量法と腐朽割合法による結果を比較し、より適切に腐朽度の判定を行える方法について考察を行う。

3. 結果

3.1 外観からの考察

設置から14年が経過した2019年におけるスギ(無加工)の条件A、B、Cの腐朽状況を写真3に示す。そもそも木材の劣化は、紫外線、風、収縮などによる劣化と腐朽菌による劣化に大別できる。条件AとBの上部はいずれも空気中にあり、特に杭頭部では乾燥収縮に伴うひび割れの劣化が顕著であった。一方、腐朽菌の生育環境には、適度な水分、十分な空気、栄養分、好適な温度が必要とされており、一つでもかけると生育はできないが、全て満足すると急速に腐朽が進む⁹⁾。条件

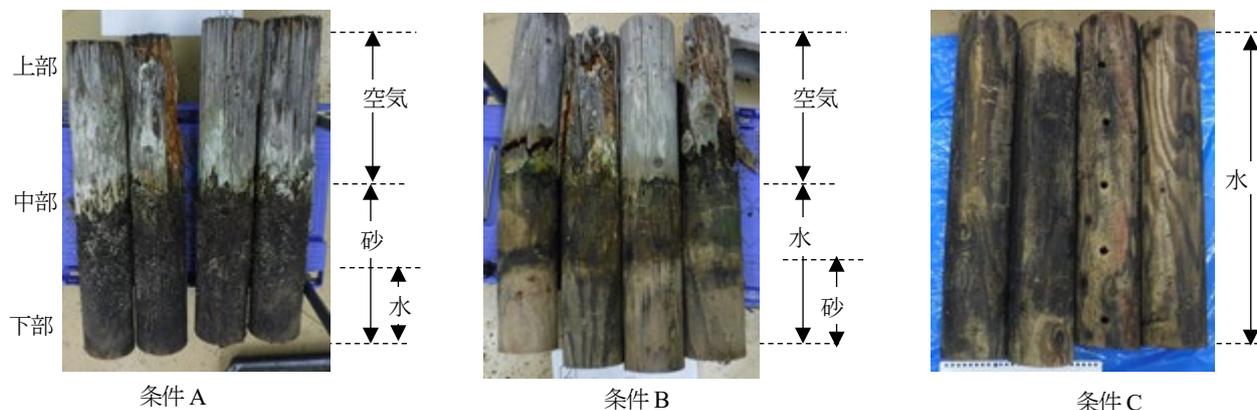


写真3 スギ(無加工)の劣化状況(2019)

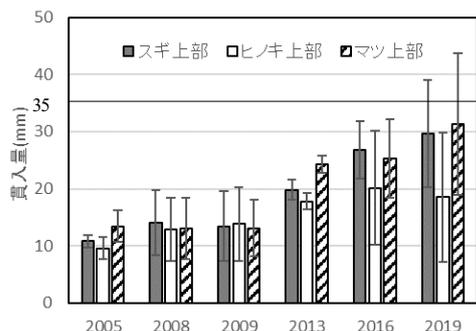


図2 条件A 上部における樹種の違い (貫入量法)

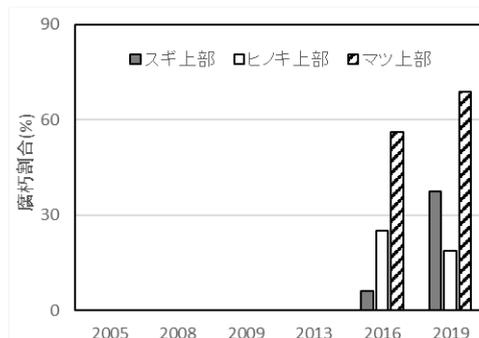


図3 条件A 上部における樹種の違い (腐朽割合法)

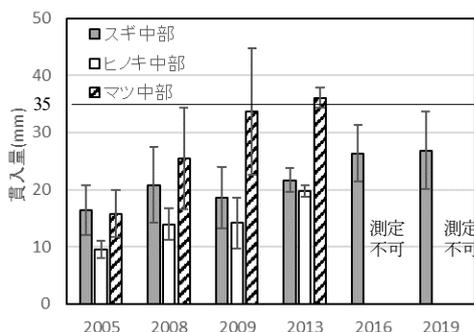


図4 条件A 中部における樹種の違い (貫入量法)

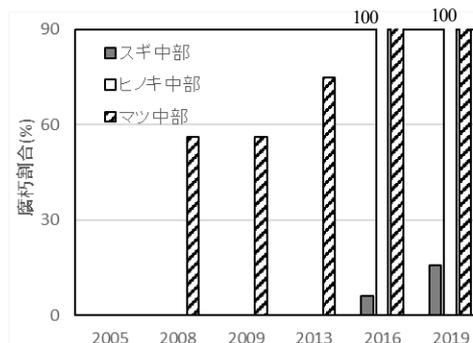


図5 条件A 中部における樹種の違い (腐朽割合法)

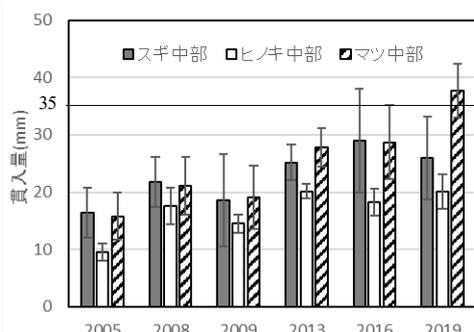


図6 条件B 中部における樹種の違い (貫入量法)

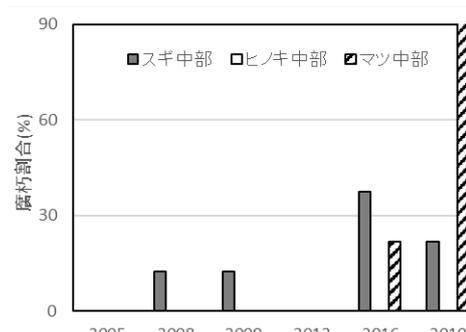


図7 条件B 中部における樹種の違い (腐朽割合法)

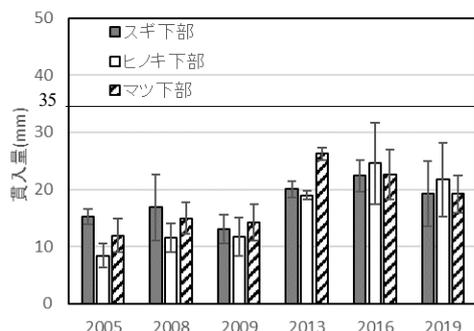


図8 条件A 下部における樹種の違い (貫入量法)

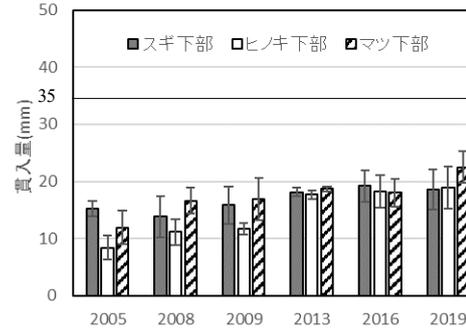


図9 条件C 下部における樹種の違い (貫入量法)

A と B の中部では、この条件が適度に整っており腐朽菌による腐朽が進んだと考えてよい。下部及び条件 C では、顕著な腐朽劣化は見られなかった、これは水

中であるため十分な空気がなく腐朽菌の生育には不適であったことが原因である。

3・2 貫入量法と不朽割合法

図 2 に条件 A の木杭上部の貫入量を示す。木杭表面には‘ふし’や‘割れ’があり、測定値のばらつきが原因となり時間経過に伴い貫入量が減少して見える年度もあるが、図中に示す標準偏差から概ね貫入量が増大していることがわかる。3 樹種とも 14 年経過しても貫入量の平均値は使用不能となる 35mm を超えることはなく健全な状態と保っていると評価できるが、実際には写真 3 の条件 A の左から 2 本目、条件 B の左から 2 本目と 4 本目の木杭のように劣化は明らかである。貫入量法では測定できた箇所のみデータを用いるため健全と評価されてしまう。一方、図 3 に示す腐朽割合法では、貫入量が 35 mm を超えた箇所、あるいは腐朽による割裂、樹皮の脱落等により測定できなかったものの割合が 11 年後の 2016 年以降急激に増加し 30% を超え使用不可と評価できる。よって写真 3 の外観の状況を反映するのは腐朽割合法が適していると言える。

貫入量は測定値の上限が 40mm という制約があるため平均値が小さく見積もられ、外観を説明するには情報が不足している。他方、貫入量と木材密度の間には相関関係があることが知られており、貫入量 40mm 以下の劣化状況を表す物理指標として重要であると考えられる。本研究では劣化の経年変化を考察する際は貫入量に着目し、使用限界の評価には不朽割合に着目するのが適切であると考えた。

3・3 条件による劣化の違い

図 3 から図 9 に各条件の貫入量と不朽割合の主な結果を示す。

空気中の条件である条件 A と B の上部の劣化は、紫外線、風、収縮などが主な原因であると考えられる。図 2 から 3 樹種とも時間が経過するに従い貫入量が増加している。また写真 3 条件 B のように木杭の一部では割裂した部分に雨水が入り込み腐朽を促進させていた。

腐朽菌生育の条件の整っている図 4、6 の中部は、空気中の条件の上部よりも、より早く貫入量が大きくなり腐朽している。木杭が土と空気の接する条件 A の方が、空気と水の接する条件 B よりも貫入量が大きくなっている。腐朽菌の生育に必要な要因のうち栄養分と温度は同条件であるので、条件による違いは水分と空気である。条件 A の中部は水には接していないが、下方に存在する水が毛管現象により中部に供給される。一方、条件 B の中部は水中に空気が充分にないことから腐朽菌の活動が条件 A の中部より弱かったことが理由として考えられる。

水中の条件である図 8、図 9 は、3 樹種ともわずかな

貫入量の増加は見られるものの、貫入量は 20mm 程度である。水中ではほとんど空気が存在せず、腐朽菌が活動できないため腐朽による劣化がほとんどなかったことが要因である。

以上のことから水中に完全に没する条件、土壌中で空気か少ない条件下部では短期間における急激な腐朽劣化は生じない。適度な水分と十分な空気の条件が整う条件 A の方が条件 B よりも木材の腐朽を促進することが分かった。

3・4 樹種による劣化の違いと使用可能年数

前節と同様に図 2 から図 9 に各条件の貫入量と不朽割合の主な結果を用いて考察を行う。

空気中の条件の図 2 から 3 樹種とも上部は時間が経過するに従い貫入量が増加し、2019 年には標準偏差を考慮するとヒノキ以外は使用不可の目安である 35 mm を超えている。図 3 の腐朽割合から、マツは 2013 年以降、スギは 2019 年以降使用不可と評価できる。

腐朽菌生育の条件の整っている中部でもマツが最も腐朽しやすく、3 年後の 2008 年から腐朽割合が 30% を大幅に超え使用不可となっている。ヒノキは最も腐朽しにくいだが、条件 A では 8 年経過すると急激に腐朽が進んでいる。これは木杭の設置環境にもよるが、割裂が発生すると降雨時に水が供給され腐朽菌の活動条件が整い急激に腐朽劣化が進行することが原因として考えられる。顕著な割裂が生じていなかった条件 B では 14 年経過した 2019 年の段階でも貫入量は 20 mm 程度であった。

水中に没している条件では樹種による劣化の違いは見られなかった。

以上から、腐朽以外の紫外線、風化による劣化は樹種の特徴と関連が強いが、腐朽劣化には腐朽菌の生育条件が整うか否かが最も深く関係していることが分かった。

3・5 スギの表面化工法による劣化の違い

木杭中部の腐朽劣化が最も進行しやすい条件 A の中部における表面加工ごとの貫入量の変化を図 10 に、不朽割合の変化を図 11 に示す。皮付き木杭は、腐朽劣化が早く進み、3 年後の 2008 年には貫入量、腐朽割合とも使用不可と判定できる状態であった。外観を観察するとアリやワラジムシ目などの昆虫による食害が見られた。これは皮と心材の間の湿度が保たれたことにより腐朽菌が活発に活動し細胞壁が破壊され、昆虫の進出を許したためだと考えられる。同様に傷加工と焼き加工は 8 年を経過した後、皮付き木杭と同様に昆

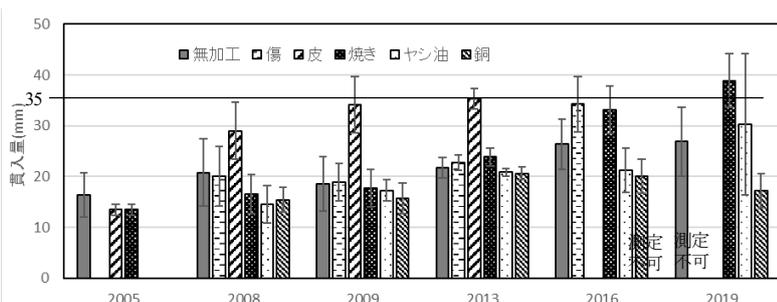


図 10 条件 A 中部におけるスギ材表面加工ごとの貫入量の変化

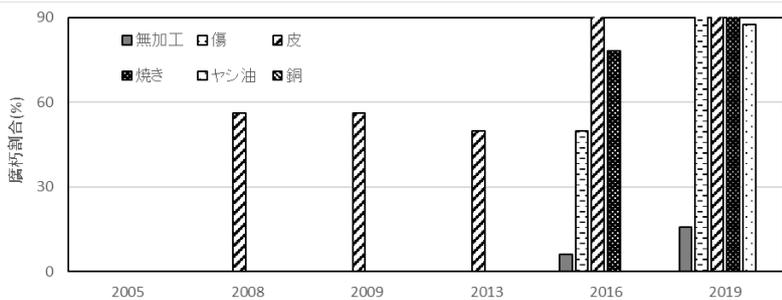


図 11 条件 A 中部におけるスギ材表面加工ごとの腐朽割合の変化

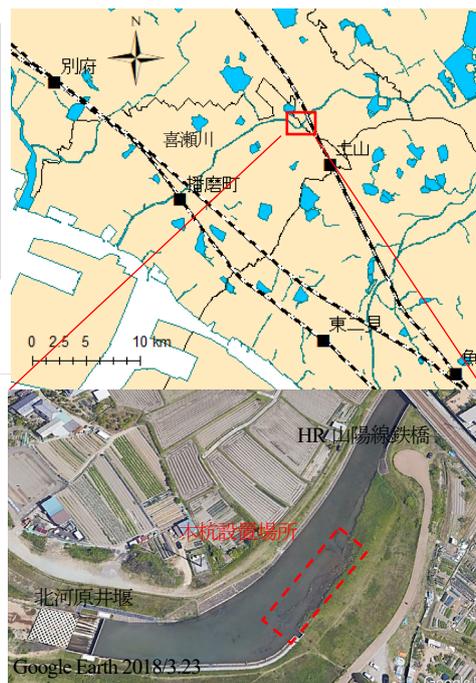


図 12 喜瀬川と木杭設置場所

虫の食害が身らえるようになった。

防腐剤を加圧注入した木杭は、11 年が経過した 2016 年の無加工の木杭に比べ劣化が少なく、効果が確認できる。ヤシ油はその後、急激に劣化が進んでいるが銅イオン加工の貫入量はほとんど変化しておらず、14 年経過した時点でも使用可能であった。これらの傾向は空気中の上部でも同様であった。また、浸水条件下では未処理の木材とほとんど差がないことから、水中で使う場合の表面加工は不要であることが分かった。

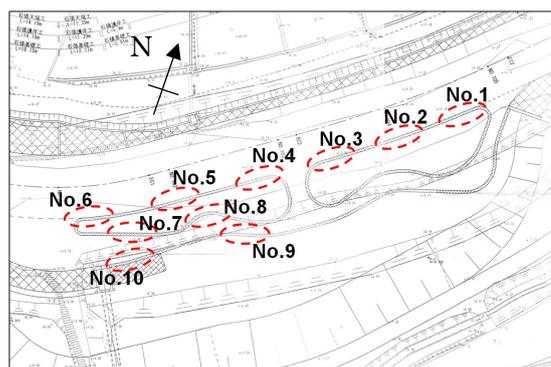


図 13 喜瀬川と木杭設置場所

4. 喜瀬川に設置されている木杭の観測

4.1 木杭の設置状況の概要

喜瀬川は、播磨町中央部を南西に貫流し播磨灘に注ぐ河川延長 8,380m、流域面積 19.8 km²の支流を持たない二級河川である。木杭が設置されているのは、図 12 の下の写真に示す北河原井堰と JR 山陽本線鉄橋に挟まれた区間である。周辺は野添北公園があり河川は遊歩道、植栽が整備され市民の憩いの場となっている。木杭は環境形成を目的として 2005 年に図 13、写真 4 のように河川左岸側に、腐朽劣化実験で用いたものと同じスギ材の無加工、焼き加工、皮付きのものがランダムに設置されている。北河原井堰は転倒式可動堰で 4 月～9 月は農業用水取水のため堰が起立し、写真 5 の上の写真のように湛水し、木杭は浸水している。秋季



写真 4 木杭の設置状況(2020 年 10 月 28 日)



写真 5 北河原井堰上流側の起立時(上)と転倒時(下)の様子

表 4 喜瀬川に設置された木杭の観測結果

位置	樹種	直径 (cm)	含水率 (%)	貫入量(mm)					
				部位	測定値			平均	
No.7	無加工	11.6	8.0	上部	10.0	10.0	12.0	14.0	11.5
				中部	17.0	14.0	18.0	15.0	16.0
	皮付き	11.2	19.8	上部	32.0	18.0	20.0	20.0	22.5
				中部	18.5	17.0			17.8
	焼き	11.6	13.2	上部	25.5	25.5	26.0		25.7
				中部	27.0	29.0			28.0
No.5	無加工	11.7	6.0	上部	16.0	8.0	16.0	13.0	13.3
				中部	測定不可				
	皮付き	12.5	33.0	上部	18.0	26.0	22.0	24.0	22.5
				中部	測定不可				
	焼き	11.4	19.6	上部	23.0	11.0	20.0	15.0	17.3
				中部	測定不可				

と冬季は堰が転倒し写真 4、写真 5 の下の写真のように木杭が露出する環境となっている。

喜瀬川に設置された木杭は明石高専河川工学研究室の山口¹⁰⁾、中川¹¹⁾、中田¹²⁾、泉¹³⁾、小野¹⁴⁾により観測がされていたが、2013 年以降は実施されていない。なお図 1 3 と写真 4 の No は堰転倒時に No.1~No.6 までが腐朽劣化実験条件 B、No.7~No.10 は条件 A、4 月~9 月堰起立時は条件 C に相当するものとして設定されたものである。しかし設置条件 A と B では水位が河川流量により変化するため、厳密に条件による差がない。

4・2 観測状況

2020 年 10 月 28 日に喜瀬川に設置された木杭の直径、貫入量、含水率の観測を行った。設置から 15 年が経過した木杭表面は、劣化のため焼き加工、皮付きの区別が難しかったが、わずかに残された焼け跡や木の皮を手掛かりに、確信の持てる木杭の選び出し、上部および中部の測定を行った。なお、中部の一部、下部は埋没しており測定することができなかった。

観測結果を表 4 に示す。測定可能であった箇所における貫入量はすべて 35 mm 以下であった。外観からは一部割裂などのある木杭は見れたが腐朽劣化実験と比べるとほとんどの木杭は健全な状態を保っていた。理由としては 4 月から 9 月の浸水となり空気がないため腐朽劣化が生じず、それ以外の期間は空気中に露出し、風通しがよく比較的乾燥していることから含水率が低くたまため腐朽菌の活動には適さなかったことが考えられる。また、腐朽劣化実験では皮付きは水分を保持

するため腐朽が進行しやすいと考察しているが、現地では流水等の作用により木杭の川は剥離したため無加工の木杭と同じ状況になったため腐朽が生じにくかった。

5. おわりに

本研究では、木杭腐朽劣化実験を 2005 年から実施し貫入量データに基づく腐朽劣化の評価を実施するとともに、喜瀬川に設置された木杭の腐朽劣化状態の観測を行い、腐朽劣化実験結果と比較を行った。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

(1)貫入量に基づく腐朽劣化の評価

貫入量は測定値の上限が 40 mm という制約があるため情報が不足しているが、木材密度との間には相関関係があり、貫入量 40 mm 以下の経年劣化を表す物理指標として重要である。また、腐朽劣化の外観との関係や使用可能年数を評価する場合には腐朽割合に着目するのが適切である。

(2)条件(設置環境)の違いによる比較

腐朽菌の生育環境には、適度な水分、十分な空気、栄養分、好適な温度が必要である。条件の違いが最も現れる中部において、条件 A (空気と土)、条件 B (空気と水)、条件 C (水) を比較すると、条件 A が最も腐朽劣化が進行し、条件 C は腐朽劣化が生じないことが分かった。条件 A は土が下方に存在する水分を中部に供給することで腐朽を促進する。条件 B は水中の酸素が不足していることで条件 A と比べ腐朽がすくなくかった。

条件Cは水中であることから腐朽が生じなかった。

(3) 樹種による違いによる比較

腐朽菌に起因する劣化は、樹種の違いよりも腐朽菌の生育条件が整うか否かが最も深く関係していることが分かった。腐朽菌以外の紫外線、風化等の要因による劣化に対してはマツが最も弱く、ヒノキが最も強かった。

(4) 表面加工による違いによる比較

皮付き木杭は、樹皮と木部の間の湿度が保たれたことにより腐朽菌が活発に活動し細胞壁が破壊され、昆虫の進出を許したため劣化が最も早く進行した。防腐剤を加圧注入した木杭は、11年経過した時点では無加工の木杭に比べ劣化が少なく、その効果が確認できる。浸水条件下では未処理の木材とほとんど差がないことから、水中で使う場合の表面加工は不要であることが分かった。

(5) 喜瀬川に設置された木杭と腐朽劣化実験との比較

喜瀬川に設置された木杭の外観は、一部割裂などの劣化が見れたものの腐朽劣化実験と比べると健全な状態を保っていた。浸水状態が半年以上継続すること、空気中に露出している期間は乾燥状態を保つことで腐朽劣化が生じにくかったことが原因と考えられる。また、皮付き加工の木杭は、流水等の作用により皮が剥離したため腐朽劣化実験のような急速な腐朽劣化はなかった。

木材を河川護岸修景材として用いる場合、腐朽劣化は木材と土と空気、水と空気と接する部分で生じやすいため、防腐処理をすることが望ましい。また常時浸水条件下では防腐処理を必要としない。使用可能年数は、設置条件や環境により腐朽劣化が異なるため定期的な観測が必要である。

参考文献

1) 岡田豊、那須隆一、飯村豊：水中に設置したスギ

- 材の含水率に関する調査、Wood preservation、33(6)、pp.281-284 (2007)
- 2) 安田淳一、須貝与志明、北田正司 [他]：保存処理した木柵の野外暴露試験メンテナンスによる耐久性向上効果の検証、Wood preservation、38(1)、pp.14-20 (2012)
 - 3) 土居修一、富樫巖、山田敦：防腐処理カラマツ丸太の野外暴露19年目の結果、木材保存、Vol.14-6、pp.23-26 (1988)
 - 4) 木村直裕、渡部守義、神田佳一：護岸材料に用いるための間伐木杭腐朽特性に関する研究、明石工業高等専門学校研究紀要、Vol.60、pp.9-14 (2018)
 - 5) 渡部守義、神田佳一：河川低水護岸に活用するための間伐木材の腐朽特性実験、環境システム研究論文発表会講演集、Vol.60、pp.207-212 (2018)
 - 6) 雨宮昭二：浅川実験林苗畑の杭試験(1)杭の被害程度を評価する方法、林業試験場研究報告書、Vol.150、pp.143-156、(1963)
 - 7) 飯島泰男：土木用木質構造物の耐用年数評価について、木材保存、Vol.25、No.5、pp.209-218 (1999)
 - 8) 大橋一雄、多田野修：ピロディン及び目視被害度を用いたカラマツ杭材の耐用年数評価、岩手林技セ研報、No.13、pp.35-40 (2005)
 - 9) 桃原郁夫：木材腐朽のメカニズムとその防止、Vol.42、No.3、pp.132-137 (2016)
 - 10) 山口知恵：木杭を用いた多自然型護岸周辺の流れと河床変動促成に関する研究、平成18年度明石工業高等専門学校都市システム工学科卒業研究 (2007)
 - 11) 中川明紀：間伐材を用いた多自然型護岸・水制工主変の流れと河床変動に関する研究、平成19年度明石工業高等専門学校都市システム工学科卒業研究 (2008)
 - 12) 中田有美：間伐材を用いた木杭護岸の不朽特性に関する実験的研究、平成20年度明石工業高等専門学校都市システム工学科卒業研究 (2009)
 - 13) 泉佳甫：間伐材を用いた木杭護岸の腐朽特性とその抑制に関する実験的研究、平成21年度明石工業高等専門学校都市システム工学科卒業研究 (2010)
 - 14) 小野元毅：間伐材を用いた木杭護岸の不朽特性に関する実験的研究、平成25年度明石工業高等専門学校都市システム工学科卒業研究 (2014)