

河川低水護岸材に活用するための 間伐木材の腐朽特性実験

渡部 守義¹・神田 佳一²

¹正会員 明石工業高等専門学校准教授 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)
E-mail: mwata@akashi.ac.jp

²正会員 明石工業高等専門学校准教授 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)
E-mail: kanda@akashi.ac.jp

本研究では、間伐木材を河川低水護岸材料として利用するため、間伐木材の腐朽特性に関する基礎的知見を得ることを目的とした実験を2005年度より行っている。スギ、ヒノキ及びマツの3種類の木杭を異なる浸水条件下に置き貫入量、応力波伝播速度、含水率を測定し腐朽劣化の観察を数年に1度行った。スギについては表面に傷、皮付き、焼き、ヤシ油と銅イオンの加圧注入の5種類の比較を行っている。これまでの結果、樹種を問わず空気に触れている部分では貫入量と応力波伝播速度が他の部分より増加し腐朽が進行していた。浸水条件の水中部分では空気中あるいは空気と土壌や水との境界部分ほど貫入量に急激な変化はなかった。スギ材の表面加工では、皮付きの杉は、他の加工に比べ不朽の進行が速かった。これは皮によって保たれた水分が、腐朽菌の繁殖しやすい環境を作ったことが原因と考えられる。

Key Words : *revetment material, thinning pile, Cryptomeria japonica(SUGI), Chamaecyparis obtusa(HINOKI), Larix leptolepis(MATSU), decay characteristic*

1. はじめに

日本の国土面積 3,780 万 ha のうち森林面積が 2,508 万 ha と約 3 分の 2 を森林が占め、そのうち約 4 割に相当する 1,029 万 ha が人工林で、豊富な林産資源を有している。そして、国内の多くの人工林が主伐時期を迎えているが、人工林は年間成長量の 4 割以下しか活用できい状況である。国内木材自給率は平成 14(2002)年には約 19%まで落ち込んだものの平成 28 (2016)年には約 35%まで上昇している¹⁾。しかし森林所有者の多くは小規模零細経営で、林業従事者の高齢化問題を背景とし、産業としては依然と低迷しており、間伐あるいは主伐・再造林などの管理が行き届かない放置された森林が年々増加している。

一方で、森林の持つ地球温暖化防止や、災害防止・国土保全、水源涵養機能等の様々な公的機能の必要性は広く認識されており、適切な森林の整備を進めるため 2024 年には森林環境税(仮称)の設立も決定されている。また、これに先立ち、森林にける二酸化炭素の吸収源として森林の保全及び強化のため「森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法」が平成 20(2008)年に施行されている。この対策として平成 19 年度から 6 年間で 330 万 ha の間伐目標を掲げ、効率的かつ計画的な間伐を進ん

めて来た。また同法は平成 25(2013)年に改正され、平成 32(2020)年までの間に年間平均 53 万 ha の間伐目標を実施する²⁾ことを目標とした森林整備を進めている。

そしてこれらの実施に伴い発生する大量の間伐木材は、木材チップ、木造建築、工芸品や机、ベンチなどに利用されているが、より一層の有効利用の拡大・拡充が求められている。土木分野において木材は、建設資材として用いられている。特に 1990 年代以降、「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、間伐材が用いられているが、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³⁾⁴⁾は散見される程度である。

木材の細胞壁は、リグニンと呼ばれる難分解性高分子化合物が多糖類を防御する構造を持っているため、多くの生物は、木材中の多糖類を分解・代謝できない。一方、木材腐朽菌とは、木材細胞壁を分解し代謝する能力を備えた菌類の総称である。風などによって移動した腐朽菌の胞子が木材に付着し、木材を腐朽させていく⁵⁾。

本研究では、間伐材を河川低水護岸材料として利用するための腐朽特性に関する基礎的知見を得ることを目的

とした実験を2005年より行っている。本報告では実験開始より10年以上経過した木杭の腐朽状況について報告するものである。

2. 実験方法

(1) 実験木杭の概要

本研究ではスギ *Cryptomeria japonica*、ヒノキ *Chamaecyparis obtusa* およびカラマツ *Larix leptolepis* の3種類を対象とした。カラマツは以降マツと記す。これらの3種は日本の代表的な樹種で古くから各地で植林され、平成28年度の生産量はスギ1,185万 m^3 、ヒノキ246万 m^3 、マツ231万 m^3 と国産材の素材生産量2,066万 m^3 の約80%を占め、発生する間伐材多いことから選定した。スギ、ヒノキは加工性、耐久性に優れ柱、板などの建築材、家具などに使われてきた。マツは、ヤニを含んでいるため建築材として使う際には注意が必要であり、割れやすく建築材としてはほとんど用途はなく、杭用材として用いられていた。しかし、近年木材加工技術の進歩により合板材としての用途が広がってきている。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、ヤシ油と銅イオンを加圧注入し保存処理した5種類を準備し、木杭表面加工による違いを観測した。

(2) 木杭の設置条件

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。容器に木杭を横に倒し、常に浸水している状態である。

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(図-1)。

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。

(3) 評価指標

木材の表面を観察するとともに腐朽度合いを定量的に

表-1 木杭の寸法と表面加工

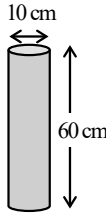
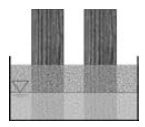
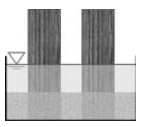
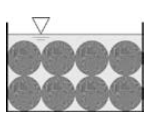
寸法	樹種	表面加工
	スギ	なし
		傷
		皮付き
		焼き
		ヤシ油
	ヒノキ	なし
	マツ	なし

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			

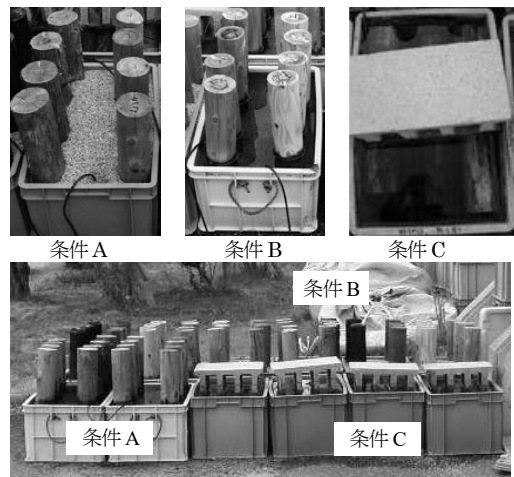


図-1 設置状況

示す指標として、木杭の直径、貫入量、応力波伝播速度、含水率を図-2に示す測定器を用いて測定した。

木材の貫入量は、木材貫入量測定機(先端の針を6 J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ある。貫入量が多いほど腐朽が進行していることを示す。木杭の貫入量は富士テック製木材貫入量測定機(ピロディン)

を用いて、図-3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箇所での測定を行った。さらに1つの条件につき4本の木杭を準備し、各部ごとの平均値を用いてデータを整理した。

応力波伝播速度は、木杭の対角線上に2本のピンを刺し、一方のピンにハンマーで衝撃を与え、もう一方のピンに衝撃が伝わるのに要した時間(μ s)を測定し、木杭の直径(mm)で除すことで算出する。打撃で生じた応力波の伝播経路は、木杭表面または内部に腐朽箇所があれば伝播経路は長くなり、応力波が他端に到達するまでの時間は健全な木杭に比べて長くなる。本研究では、腐朽劣化診断機FAKOPP Enterprise製木材試験機ファコップを用いて応力波の到達時間を測定した。応力波伝播速度の測定箇所は貫入量と同様とした。

木材に含まれる水分は木材腐朽菌の生存に関わっている。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。

各測定項目の実施状況を表-3に示す。木杭は2005年6月に設置を行い、腐朽・耐久性の観察を数年に1度の測定を行っている。なお、設置時の2005年には計測機器が整備されておらず、2009年に同等品質の木杭を測定し、初期の測定値とした。△は一部未測定の木杭があることをしている。これは2009年に同等品質の木材を入手できなかったもの、あるいは図-4の写真に示すように木杭の腐朽が進行し、割れ、樹皮の脱落等により測定できなかったものである。また、原材料が間伐材であることから木杭表面には‘ふし’や‘割れ’があり、測定値の大きなばらつきの原因となったと考えられる。

3 実験結果

(1) 樹種の比較

スギ、ヒノキ、マツの貫入量の平均値と標準偏差の推移を図-5に示す。貫入量は前述のとおり木杭の測定箇所の状態によりばらつきが大きいので、貫入量の平均値が減少したものもある。なお、ピロディンの貫入量の上限は40 mmであるため、これを超える場合は40 mmとした。また、2016年の条件Aのマツは中部は腐食の進行が激しく測定できなかった。

全てのケースにおいて貫入量は、年数の経過とともに増加している。完全浸水の条件Cにおける貫入量の増加割合は2009年以降、他の条件に比べ小さくなっている。また、いずれの設置条件においても水中に没している下部の貫入量は上部と中部に比べ比較的小さいと言える。



木材試験機
ピロディン 応力波速度測定器
ファコップ 含水率測定器
サーベイマスター

図-2 測定に使用した測定機器

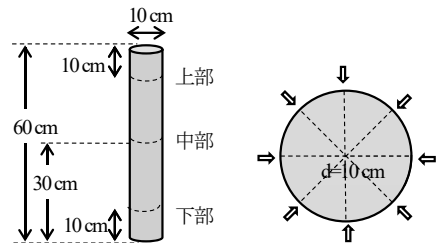


図-3 測定位置

表-3 測定年と測定項目および実施状況

測定年	2005*	2008	2009	2013	2016
直径	△	○	○	○	△
貫入量	△	○	○	○	△
含水率	△	○	○	○	○
応力波	△	○	○	○	×

*2009年に同等品を測定
○：実施、△：一部未測定、×：未測定

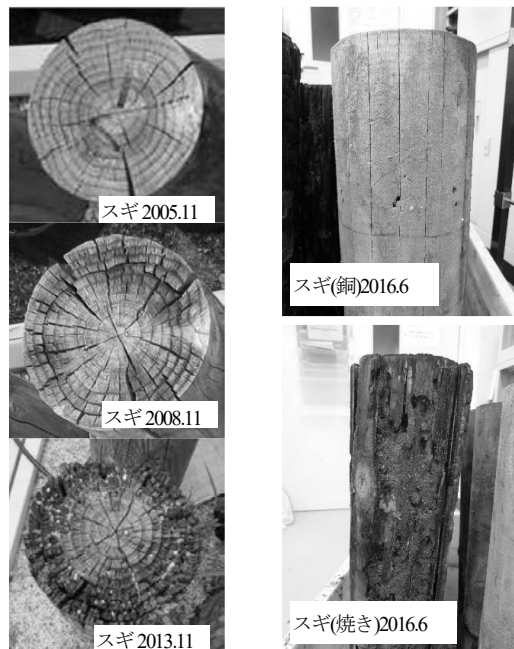


図-4 木杭の劣化状況

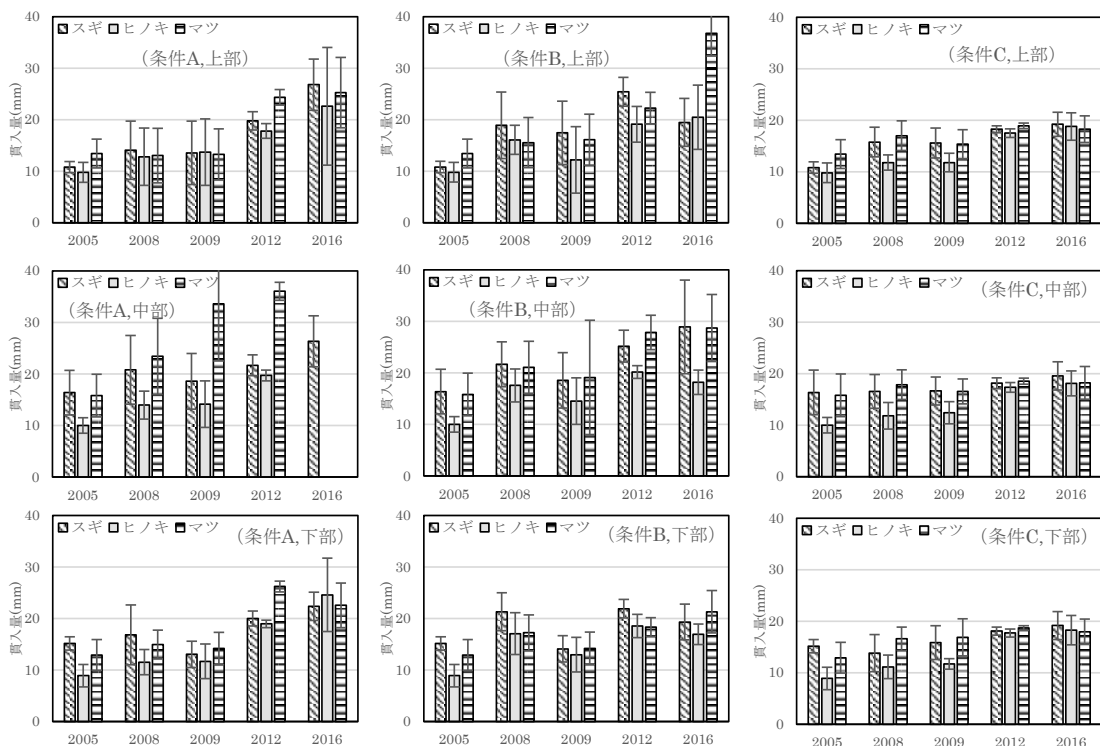


図-5 スギ、ヒノキとマツの貫入量の平均値と標準偏差の推移

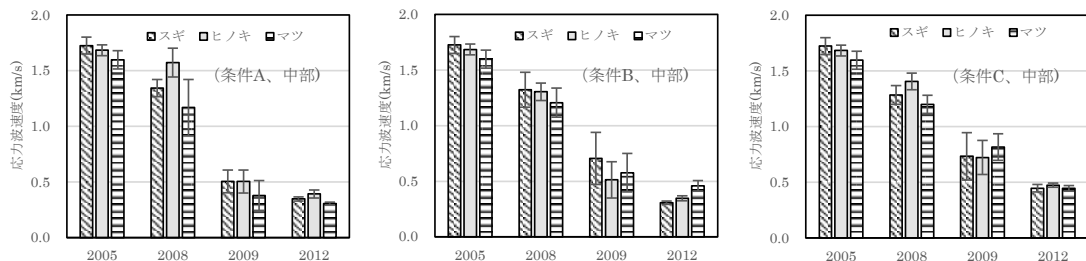


図-6 スギ、ヒノキとマツの応力波伝播速度の平均値と標準偏差の推移

特にヒノキは、2009年頃まで貫入量が小さくスギ、マツに比べ腐朽していなかったが、7年を経過した2012年以降は他の樹種と同程度となっている。また、すべての樹種の条件AとBの空気と接する上部、中部では貫入量は増加している。これは太陽光の紫外線、乾燥割れ、また割れた部分に雨水が入り込み腐朽を促進させるなどの劣化外力が強かったためであると考えられる。

図-6に各条件の中部の応力波伝播速度の平均値と標準偏差の変化を示す。いずれも時間の経過に伴い応力波伝播速度が小さくなっており、条件Bの空気と水の境界が最も早く、条件Cが最も遅くなっている。また、図-5, 6の貫入量のデータと比較すると応力波伝播速度の方が標準偏差が小さく、ばらつきが小さいことが分かる。しかし、貫入量に比べ樹種による腐朽劣化の差が分かりにくくなっている。

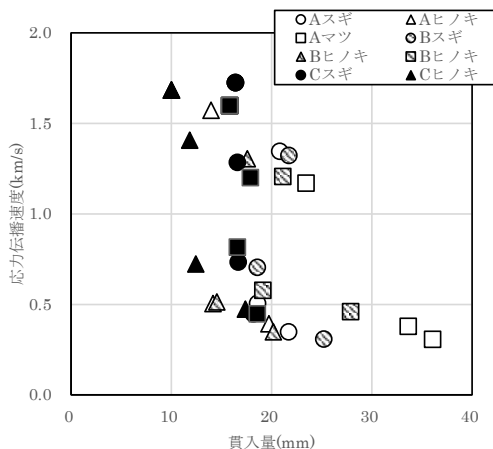


図-7 スギ、ヒノキとマツの貫入量と応力波伝播速度の関係

表-4 スギ表面加工の違いによる貫入量、応力伝播速度、含水率の変化

測定項目項目		貫入量(mm)					応力伝播速度(km/s)				含水率(%)					
設置条件		A					A				A		B		C	
測定年		2005	2008	2009	2012	2016	2005	2008	2009	2012	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
スギ	上部	108	141	136	198	268	1.69	1.45	0.77	0.42	29.7	15.0	28.4	22.4	38.0	11.9
	中部	164	208	186	21.7	263	1.72	1.34	0.51	0.35	86.8	50.9	45.8	18.3	39.8	10.5
	下部	152	168	131	200	224	1.54	1.3	0.54	0.36	31.9	36.7	44.2	8.7	43.3	8.1
スギ傷	上部	-	11.3	128	208	289	-	1.26	0.92	0.43	16.7	12.7	31.4	21.3	39.5	7.2
	中部	-	20.1	189	228	342	-	1.17	0.86	0.4	91.9	60.8	54.0	6.9	43.5	5.7
	下部	-	14.0	15.1	21.0	23.3	-	1.21	1.01	0.48	39.3	40.4	38.7	3.1	42.4	6.9
スギ皮付き	上部	12.9	22.8	33.9	32.3	37.9	1.77	1.05	0.33	0.23	24.2	22.1	40.9	31.6	54.1	22.6
	中部	13.5	29.0	34.1	35.3	40.0	1.66	1.14	0.34	0.23	40.6	58.2	72.6	33.3	53.7	20.1
	下部	11.2	29.5	23.3	31.2	39.8	1.7	1.16	0.25	0.24	34.1	60.8	67.9	30.6	52.4	19.4
スギ焼き	上部	12.3	14.2	16.8	19.7	34.0	1.56	1.44	0.51	0.41	35.6	25.0	31.0	18.0	38.1	15.9
	中部	13.5	16.5	17.8	23.8	36.8	1.55	1.37	0.61	0.33	52.8	43.7	43.1	22.1	34.9	10.4
	下部	13.0	15.8	14.8	22.0	29.1	1.53	1.35	0.6	0.43	43.7	35.6	37.9	17.1	39.1	15.7
スギヤシ油	上部	-	13.9	17.0	19.6	22.4	-	1.36	1.06	0.56	15.0	22.2	29.2	9.4	34.9	6.2
	中部	-	14.6	17.3	20.8	21.2	-	1.36	0.95	0.51	33.0	37.4	42.7	14.3	37.4	7.0
	下部	-	14.0	15.4	20.0	21.9	-	1.4	0.82	0.61	40.2	36.5	35.1	7.5	37.0	4.6
スギ銅	上部	-	13.5	14.3	19.2	21.1	-	1.37	0.69	0.45	31.5	19.1	38.5	23.1	40.9	6.7
	中部	-	15.4	15.7	20.6	20.1	-	1.36	0.59	0.42	39.7	30.7	44.3	10.9	44.0	3.2
	下部	-	16.0	15.6	21.4	20.0	-	1.32	0.52	0.44	32.2	33.8	37.7	10.5	41.2	5.8

図-7に貫入量と応力波伝播速度との関係を示す。貫入量の増加に伴い応力波伝播速度は減少する。応力波伝播速度応力波を用いた木材の非破壊腐蝕腐朽診断に関しては、多くの報告があり、野口ら⁷⁾によると健全木のヒノキの応力波伝播速度は1.3~1.7 km/sであり、0.9 km/sより低くなると100 %の正解率で樹幹断面の30 %以上が不朽していると判定できるとしている。またカラマツについては、健全木の応力波伝播速度は1.7~1.9 km/sにあり100 %の正解率で樹幹断面の30 %以上が不朽していると判断できる応力波伝播速度を1.4 km/sと報告している。実験に用いた木杭の半径は50 mmで貫入量15 mmが30 %に相当するので、貫入量が腐朽度合いを示す指標と考えると概ねヒノキ、マツとも野口らの報告に一致している。

(2) 表面加工の違いによる比較

表-4にスギの表面加工の異なる木杭の貫入量の平均値、応力伝播速度の平均値、及び含水率の平均値と標準偏差を示す。防腐効果を期待したヤシ油と銅イオンの貫入量は、実験開始から7年が経過した2012年までは未処理の木杭と同程度であるが、10年以上が経過した2016年でも貫入量が20 mm程度と未処理のスギに比べ防腐効果が現れていると言える。しかし、スギの応力伝播速度に関するデータがないため正しく比較できなが、ヒノキ、カラマツを参考にした場合、応力波伝播速度が2009年に1 km/sを大きく下回っており腐朽の進行が伺える。

同じく防腐効果を期待した焼き加工の木杭は3年経過した2008年までは未処理木杭と同程度であったが、2009

年以降腐食が進行していることがわかる。これは皮付きの木杭も同様であるが、目視観察では図-4の写真のように炭となった表面や皮と心材の間で湿度が保たれ、腐朽菌の活動に適した環境が作りだされ、柔らかくなった木材にアリやワラジムシ目などの昆虫が営巣を始めたことが原因であると考えられる。

実際の木杭利用においてどの程度までの貫入量あるいは応力波伝播速度を腐朽劣化の許容値とするのかにもよるが、特に完全浸水の条件Cでは、皮付きのスギ以外、腐朽劣化にほとんど差異がなかったことから、費用や手間などのコスト面を考えると必ずしも効果的な方法であるとは言えないと考えられる。

(3) 含水率

表-4の右にスギの表面加工の2005年から2016年の含水率と標準偏差の変化を示す。含水率は、木杭表面付近が測定されるため、測定日の天候や空気中の湿度の影響を受けバラつきが大きかったと考えられる。このため傷、皮付きのスギの含水率が高い以外に、特徴的な傾向はつかめなかった。ISO21887(2007)規格⁹⁾では、腐朽が進行しやすい環境について木材の使用環境を5区分し、それぞれの状態とその指標環境で木材を加害する生物種を提示している。この状態の一つに「湿る状態」とあるが、湿る状態とは、腐朽防止の観点からは、木材の含水率が約30%を目安にしている⁹⁾。本実験で想定する河川護岸材料としての使用条件下の含水率は30%を越えており腐朽菌の繁殖しやすい環境であったと言える。

4. おわりに

本研究では、間伐材を河川低水護岸材料として利用するための間伐木杭の腐朽特性に関する基礎的知見を得ることを目的とした実験を2005年度から継続している。これまでに得られた知見は以下のとおりである。

スギ、ヒノキとマツはいずれも条件AとBの空気と接する上部、中部では貫入量は増加している。これは生物が原因となる腐朽以外にも、太陽光の紫外線、乾燥割れ、また割れた部分に雨水が入り込み腐朽を促進させるなどの劣化外力が強かったことが原因であると考えられる。特に条件Bのように干出が繰り返される部分での腐朽が激しかった。ヒノキはスギ、マツに比べ貫入量は小さいが、5年以上経過すると他の樹種と同程度の貫入量となる。

表面加工の違いを観測した結果、防腐剤を加圧注入した木杭は、未処理の木杭と比較するとその効果は確認できたが、浸水条件下では未処理の木材とほとんど差がなかった。このことから使用条件によってはその効果が十分に発揮されない可能性がある。皮付き木杭は、皮と心材の間の湿度が保たれ、腐朽菌により木材の細胞壁が破壊され、アリやワラジムシ目などの昆虫の進出を許し、腐朽を促進させていた。

腐朽の程度を調べる場合、貫入量よりも応力波伝播速度の方が標準偏差が小さく、測定箇所を少なくすることができる。間伐材を原料とする木杭の表面は‘ふし’や‘割れ’があることに注意しなければならない。また、木杭の表面を測定した含水率は、測定時の条件に左右されるため、本実験においては腐朽との関連を見いだせなかった。今後木杭内部の含水率を正しく測定する必要がある。

本研究で想定する河川護岸材料としての木杭は、ISO21887(2007)規格の使用区分5に該当し、紫外線や河川の流水による物理的な劣化や、木材腐朽菌・シロアリ等による生物劣化にさらされている⁹⁾。使用状態により腐朽の進行度は大きく異なるため、多自然川づくりにおいて人が直接利用する親水護岸、生物に配慮した護岸木杭など利用目的に応じて、定期的な調査を行い、木杭保護処理法の検討、交換時期などの管理方法を定める必要がある。

参考文献

- 1) 林野庁：平成 29 年度森林・林業白書（Web 版平成），30 年 6 月 1 日公表。
- 2) 林野庁：森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法，<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/suisin/sotihou.htm>，2018 年 8 月 22 日取得。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 桃原 郁夫：木材腐朽のメカニズムとその防止，42(3)，pp.132-137，2016。
- 7) 野口 智史，小林 元，見尾 優[他 4 名]：応力波伝播速度測定によるヒノキ生立木の非破壊腐朽診断，Article Bull.Shinshu Univ.AFC，No.11，pp.5-9，2013。
- 8) 土居 修一：「ISO21887 木材及び木質製品の耐久性-使用環境区分」について，木材保存，Vol.34-5，pp.231-233，2008。

(2018.8.24受付)

EXPERIMENT STUDY ON DECAY CHARACTERISTIC OF THINNING PILE USED AS REVETMENT MATERIAL

Moriyoshi WATANABE , Keiichi KANDA

Thinning is necessary for forest conservation, and thinning woods must be used effectively. This research is to reveal fundamental knowledge on decay characteristic of thinning wood use as revetment material. We have been observing the decay and durability from since 2005 using 3 different species of wood (*Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa*, *Larix leptolepis*) and 4 types of surface processing method under different conditions. The measurement items are the wood pile diameter, penetration depth, moisture content, and stress wave velocity. The penetration depth and stress wave velocity of thinning pile in the air increased in all wood piles. In underwater condition, the penetration depth doesn't show great increase. Moreover, in the air there is an effect of surface processing such as preservative treatment, but no effect is seen in underwater condition. On the boundary between the air and water, the decay progressed by microorganism.