

3年経過後の地盤中の木材腐朽実験結果

Experimental Results on Wood Decay in the Ground after 3 Years

沼田 淳 紀^{*1} 本 山 寛^{*1}
Atsunori Numata Hiroshi Motoyama
桃 原 郁 夫^{*2} 久 保 光^{*3}
Ikuo Momohara Hikaru Kubo

【要旨】

木材の利用は、地球温暖化防止対策に寄与し、かつ、林業再生にもつながり、持続可能な社会実現に向けた現実的な施策となる。土木事業におけるこの具体的な方法として、筆者らは軟弱粘性土地盤対策や液状化対策などの地中における木材利用を考えている。しかしながら木材は腐朽することから、これを理由に使用時には敬遠されることが多い。木材の腐朽に関する研究は多くあるが、地中における木材の腐朽に関する研究はほとんど見当たらない。そこで、地中における木材の耐久性に与える地盤条件を明らかにする目的で、大型と中型土槽に模型地盤を作製し、木材の腐朽促進試験を実施した。ここでは、3年経過後の木材の腐朽状況と縦圧縮強さを示し、木材が地下水位変動域の下限以深にある場合は高い耐久性を持つこと、地下水位変動域での木材の腐朽進行速度は上限以浅に比べてはるかに遅いこと、粘性土で覆われた木材は高い耐久性を有することを示す。

【キーワード】 木材 軟弱地盤対策 耐久性 地中 模型実験

1. はじめに

筆者らは、木材利用が、地球温暖化防止対策に寄与すること、また、これが林業再生につながり、持続可能な社会実現に向けた現実的な施策となることから、土木事業における木材利用拡大を提案している。この具体的な方法として、軟弱粘性土地盤対策や液状化対策などの地中における利用を考えている。しかしながら、木材は条件がそろえば腐朽することから、土木材料として使用する場合には、これが大きな障害となる場合が多く、地中における木材腐朽に対する設計方法を確立する必要がある。

木材の腐朽対策は、木材の分野では多くの研究が行われ保存処理技術が確立されてきているが、そのほとんどが住宅など気中を対象としたもので、地中における木材腐朽に関する研究はほとんど見当たらない。地中は、気中とは風雪雨、太陽光、気温、空気量、土壌などの環境が明らかに異なる。地中で木材利用は、古くからの歴史があるが、最近ではほとんど使用されていない。このような地中における木材の腐朽対策については、古い新しい木材利用先として、気中で用いられていた考えをそのまま使用するのではなく、古くからの考え方や実績も取り入れながら新しい技術と融合させる必要がある。さらに、木材利用の大きな利点の一つが環境的な優位性

であり、地中における利用については十分これを考慮する必要がある。

このような背景から、筆者らは過去に打設された木杭などの掘出し調査や文献での事例調査を数多く実施してきた¹⁾²⁾³⁾。この結果、地下水位は変動し、その変動域下限以深では100年を超える長期耐久性があること、変動域以浅では腐朽する場合もあるが腐朽しない事例も多く存在することを明らかにした。特に、地盤が地下水位以浅で酸化状態にあるにもかかわらず80年以上経過した木杭がほぼ健全な状態で見つけられた事例もあり、地下水変動域以浅においても地盤条件によっては長期耐久性がある可能性が大きいことがわかった。

そこで、地中における木材の耐久性を維持する環境条件を明らかにする目的で、大型と中型土槽に模型地盤を作製し、そこに木材を設置し腐朽促進試験を実施してきた⁴⁾。ここでは3年経過後の木材の腐朽状況と縦圧縮強さについて示し、地下水位、土質特性と木材の耐久性について述べる。

なお、土木分野における用語と、木材分野における用語では表現が異なる場合も多い。そこで、本稿では、土木分野で用いられている用語を基本として用いた。

1. 建設事業本部 技術研究所 第三研究室 2. 独立行政法人森林総合研究所 3. 福井県雪対策・建設技術研究所

2. 本研究の目的

本研究では、以下を目的に、大型と中型の土槽に、腐朽を促進する土壌を投入し、地下水変動可能な模型地盤を作製し、そこに木材を設置し、その腐朽状況の観察および力学的試験を実施した。

- ①変動する地下水位と木材の耐久性の関係
- ②木材周囲の土質と木材の耐久性の関係
- ③木材の地山への打設と埋戻し地盤への打設における耐久性の相違

3. 地中木材の腐朽実験の方法

実験のフローを図-1に示す。実験にあたって、木材腐朽促進試験を実施するための土壌、木材周囲を覆う土質、腐朽実験を行う木材を準備した。それぞれの材料は各物性試験を実施後、内寸幅4m×奥行1m×高さ1.2mの大型土槽と内寸幅2m×奥行0.5m×高さ1.2mの中型土槽に土壌を投入し、地下水水位変動の設定が可能な模型地盤を作製し、木材腐朽促進試験を実施した。大型土槽では、主に木材周囲の土質と木材腐朽の関係を明らかにする目的で、木材の周囲を樹脂、粘性土、密な砂、緩い砂で覆った木材と無対策の木材を設置した。樹脂と粘性土で覆った木材は、事前に木材をこれらで覆い土槽内に設置後、土壌を投入し模型地盤を作製した。密な砂と緩い砂で覆った木材は、木材を設置し、木材の周囲を5cmずつ所定の密度となるように砂層を設置しながら順次土壌を投入し模型地盤を作製した。大型土槽では、このように木材を設置後、土壌を投入し埋戻し地盤を作製した。中型土槽では、このような埋戻し地盤と実際の地山地盤の比較を行うために、密な地盤と緩い地盤を作製し、その後木材を打撃にて地盤に貫入した。地盤作製後、地盤下部より水を供給し地下水水位を設定した。なお、使用した水は中水である。これを初期状態とし、地下水を30cmの幅で変動させた。変動は、当初9ヶ月間は1周期1日であったが、途中から1周期6ヶ月に変更した。このような条件下に木材を置き、所定の期間経過後に木材を掘り出し、観察と各種試験を実施した。

掘り出した木材は、最初に洗浄し、腐朽度の評価（JIS K1571:2004）を実施後、所定の長さに切断し、一部は乾燥炉に入れ含水比（含水率）を計測しその供試体は標本とした。もう一部は、飽和化⁹⁾を行い飽和後ピロディン貫入試験と縦圧縮試験（JIS Z 2101）を実施した。ここで、木材の飽和化を行ったのは、地中における木材はその大部分が地下水水位以深に位置し飽和状態になると考えられるためであり、これで試験条件を統一させた。

模型地盤に用いた腐朽促進試験用の土壌は、腐朽促進試験となり、かつ、一般的な地盤ともかけ離れないことを考えた。土壌は、ファンガスセラー試験に関する事例¹⁰⁾

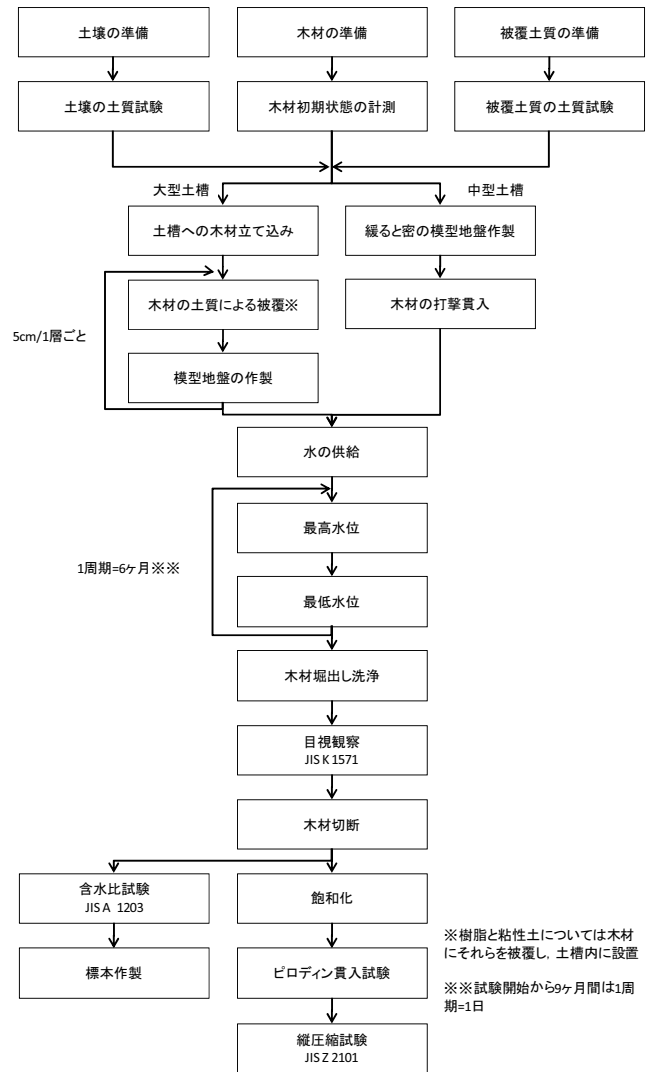


図-1 地中木材の腐朽実験のフロー

を参考に、容積比で黒土6：鹿沼土2：バーミキュライト2（乾燥質量比では、60：20：6）の割合で配合し、さらに腐朽した木片を含んだ腐朽菌が活性化していると考えられる土壌を混合した。この土壌は、まず腐朽菌を培養するために腐朽した木材を採集し、前述の土壌を入れ腐朽菌の生育に好適な環境下で腐朽菌を2ヶ月間活性化させたものである。

木材を被覆するための土質には、粘性土と砂を用いた。粘性土は、木材の周囲に厚さ1cmで貼り付けた。砂は、緩く覆うものと密締めで覆うものの2通りを行った。砂の場合は、木材の周囲6cmを覆った。用いた土壌と土質の物性と粒度組成を表-1と図-2に示す。作製された模型地盤の透水係数は、大型土槽と中型土槽の緩い地盤が $k=8 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 、中型土槽の密地盤が $k=2 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ である。粘性土の透水係数は $k=7.5 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ で模型地盤より2オーダー透水係数が小さい。なお、砂については、締固め時の含水比と締固め密度により大きく透水係数が異なるが、ここでは木材周囲の値を求めることができなかったため、表には突固め試験より得られた透水係数を参考と

表-1 模型地盤の土壌と木材被覆に用いた土質の物性

項目	土 壌			被覆土質		
	大型土槽		中型土槽	砂		粘土
	緩	密	緩	密	緩	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.37			2.74		2.63
目標乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.45 D≒75%	0.56 D≒95%	0.45 D≒75%	1.58 D≒95%	1.25 D≒75%	—
含水比 w (%)	133			17.5		42.4
最大粒径 D_{max} (mm)	2.00			4.75		2
50%粒径 D_{50} (mm)	0.086			0.126		0.013
細粒分含有率 P_f (%)	49			34		95
粘土分含有率 P_c (%)	12			6		30
均等係数 U_c	95			8.2		35.4
強熱減量 L_i (%)	21 (4h)			—		—
透水係数の目安 k (cm/s)	8×10^{-5}	2×10^{-5}	8×10^{-5}	$2 \sim 8 \times 10^{-6}$ ※		7.5×10^{-7}

※含水比w=10~25%の試料を1E_cで突固めた時の材料特性としての透水係数

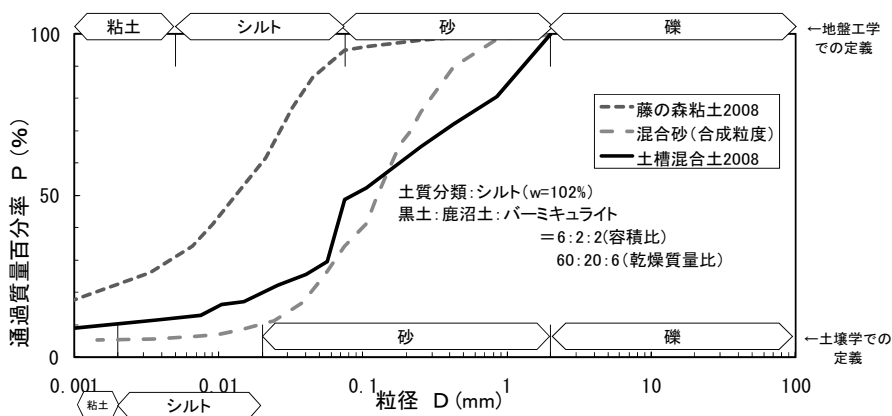


図-2 模型地盤の土壌と木材被覆に用いた土質の粒度組成

表-2 木材の初期物性

樹 種	スギ	カラマツ
含水比 w (%)	15.9	13.9
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)※	0.37	0.43
飽和時(湿潤時)平均縦圧縮強さ σ_c (MPa) ※※	18.7	19.2
気乾時平均縦圧縮強さ σ_c (MPa) ※※	30.0	37.1
平均ピロディン貫入量 (mm) ※	14.3	12.6
平均年輪幅 (mm)	5.5	4.2

※気乾状態
※※n=16の平均値

して示した。

使用した木材は、スギとカラマツで、それぞれ直径8cm×長さ1mの心材を含む円柱状に加工されたもので、それぞれ含水比(含水率)16%と14%の気乾状態である。これら木材の初期の物性を表-2に示す。

大型土槽と中型土槽における木材の配置を図-3に示す。大型土槽については、樹脂被覆、粘性土被覆、密砂被覆、緩砂被覆、無対策の5種類をそれぞれスギとカラマツに実施し、これを4セット準備した。土槽の側面は透明の亚克力となっており、ここに半割の木材を貼り付け、側面からの観察も行えるようにした。中型土槽は、緩い

地盤と密な地山地盤を想定し、締固め度D=75% ($\rho_d=0.45t/m^3$)とD=95% ($\rho_d=0.56t/m^3$)の地盤をそれぞれ土槽の半分ずつ作製した。地盤作製後、無対策の木材を打撃にて貫入した。貫入した木材は、緩い地盤と密地盤ともそれぞれスギ10本、カラマツ5本ずつである。

大型土槽における木材の配置断面を図-4に示す。木材は、土槽下部の厚さ7cmのドレーン槽の上に設置した。水位は、土槽下端より50cmと80cmの幅30cm間を上下するように設定した。土質などによる木材への被覆は、杭頭部より70cmの範囲に実施した。なお、被覆部の下端位置は、水位変動下限より13cm下に位置する。

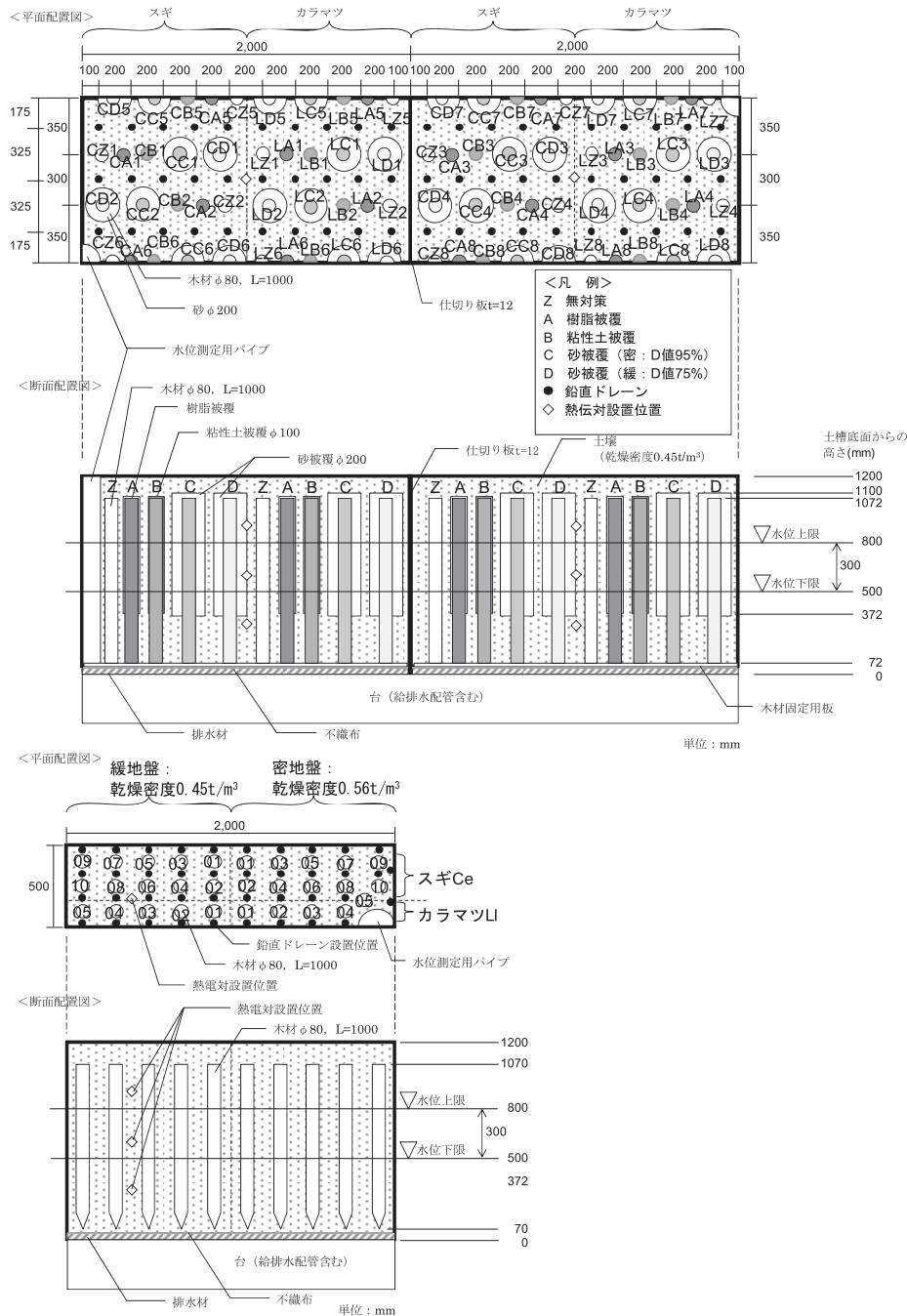


図-3 大型土槽と中型土槽における木材の配置図

4. 3年経過後の目視観察結果

写真-1に、3.2年経過後の木材の断面写真を示す。この断面位置は、木材下端から79cmであり、水位変動の上限より6cm高い。3年以上経過したが、いずれにおいても木材全体の体積が失われるような状態には至っていない。特に、粘性土で覆ったもの、密と緩い地盤の断面は劣化が少なかった。一方、スギにおいてもカラマツにおいても、緩砂で覆ったものは、断面にスポンジ状の「す」ができており、腐朽が進んでいた。これらの腐朽度判定 (JIS K 1571: 目視により0~5に判定されるもので、0が健全で、5が腐朽によって形が崩れる状態) は、スギの頭部付近が最も大きく、6人で判定した結果で最大値が4で平均は2.4であった。

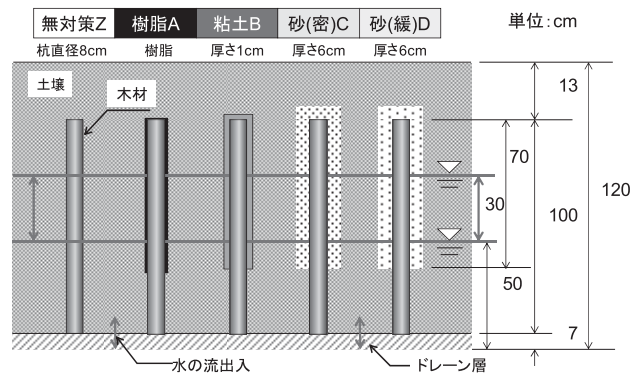


図-4 大型土槽における杭の配置断面

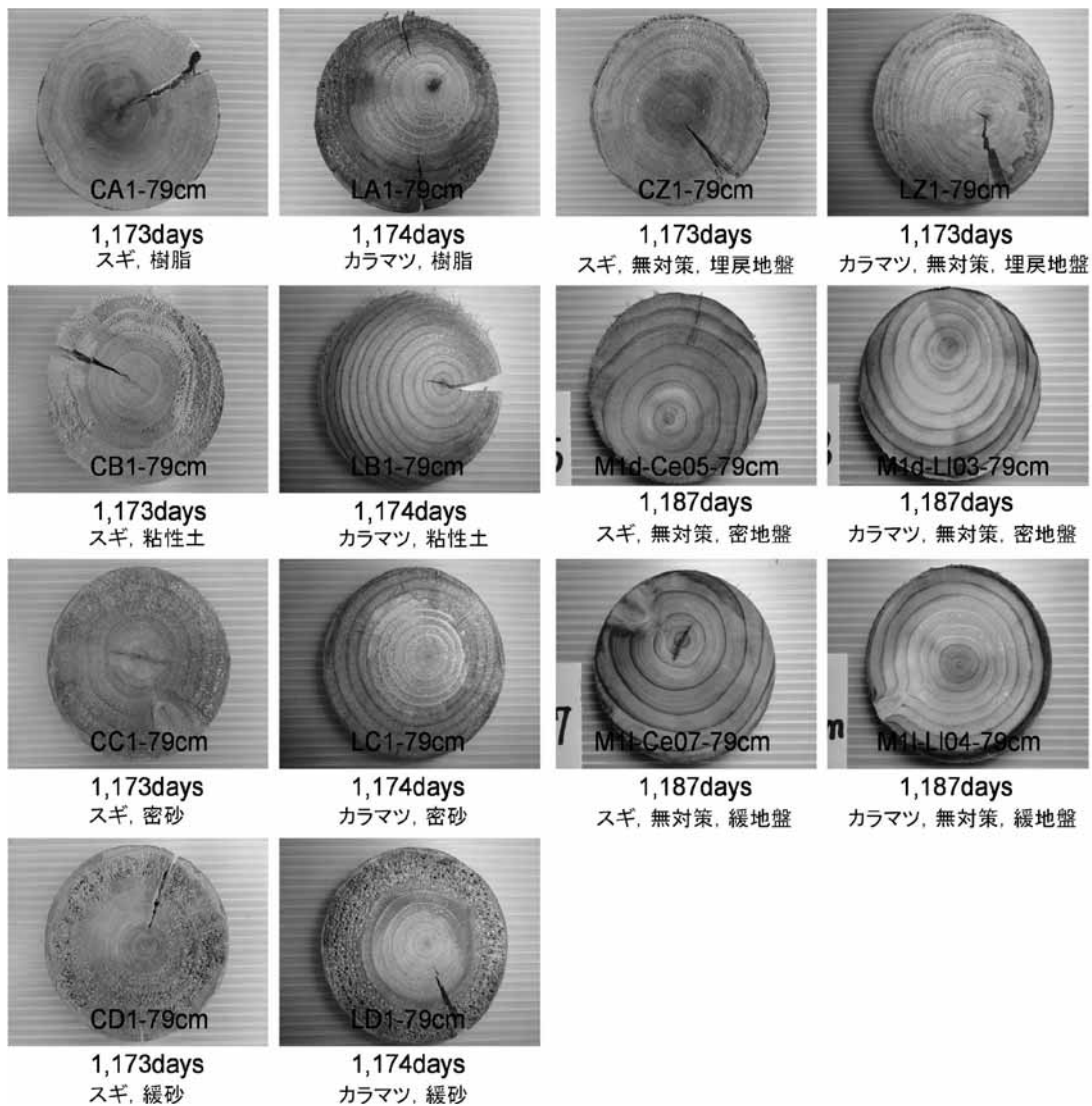


写真-1 3.2年経過後の79cm位置における木材の断面写真

5. 縦圧縮試験結果

腐朽の程度を定量的に把握するために、縦圧縮試験を実施した。図-5に、2年経過後と3.2年経過後の各位置における木材の縦圧縮強さを示す。なお、ここで示す縦圧縮強さは、いずれも飽和状態（湿潤状態）における強さである。図中には、水位変動の上限と下限、スギとカラマツの湿潤状態における許容応力度⁷⁾と気乾状態における平均的な強さ⁸⁾、それぞれの初期状態における表-2に示した縦圧縮強さも併記した。

いずれについても湿潤状態における許容応力度を下回るものは認められないが、上限以浅で強度が低いものが目立つ。一方、3.2年目のスギを除けば、下限以深では初期強さに近いものが多く、地下水位以深では木材は腐朽せず長期耐久性を有するという既往の結果と整合する。また、粘性土で被覆したものは、同様に3.2年目のスギを除けば、いずれの部位においても3年以上経過しても初期強さに近い。3.2年目のスギの強度が全体的に低いのは、

この範囲における腐朽度判定はいずれも0であり、ピロデイン貫入試験結果もいずれも30mmより小さく腐朽は考えられず、木材の持つばらつきの影響だと考えられる。

図-6に、埋戻し地盤を想定した大型土槽における結果に、地山を想定した密地盤と緩地盤における無対策木材の3.2年経過後の縦圧縮強さを合わせて示す。スギにおける埋戻し地盤と密地盤の一部の強さが低いものの、初期強さに近いものが多いことがわかる。一方、埋戻し地盤におけるものは、スギもカラマツも上限以浅における強度低下が大きい。

一般に木材の強度のばらつきは大きいですが、1本の丸太内では強さは均一と仮定し、健全な状態における強さとの比を求める目的で、長期耐久性があると考えられる地下水位変動域下限以深の強さ (σ_{ULL}) と、それぞれの位置における強さ (σ) との比を強度比 (σ/σ_{ULL}) と定義した。この値が低いほど、ある位置における強度が相対的に低く、劣化が進んでいると考えられる。

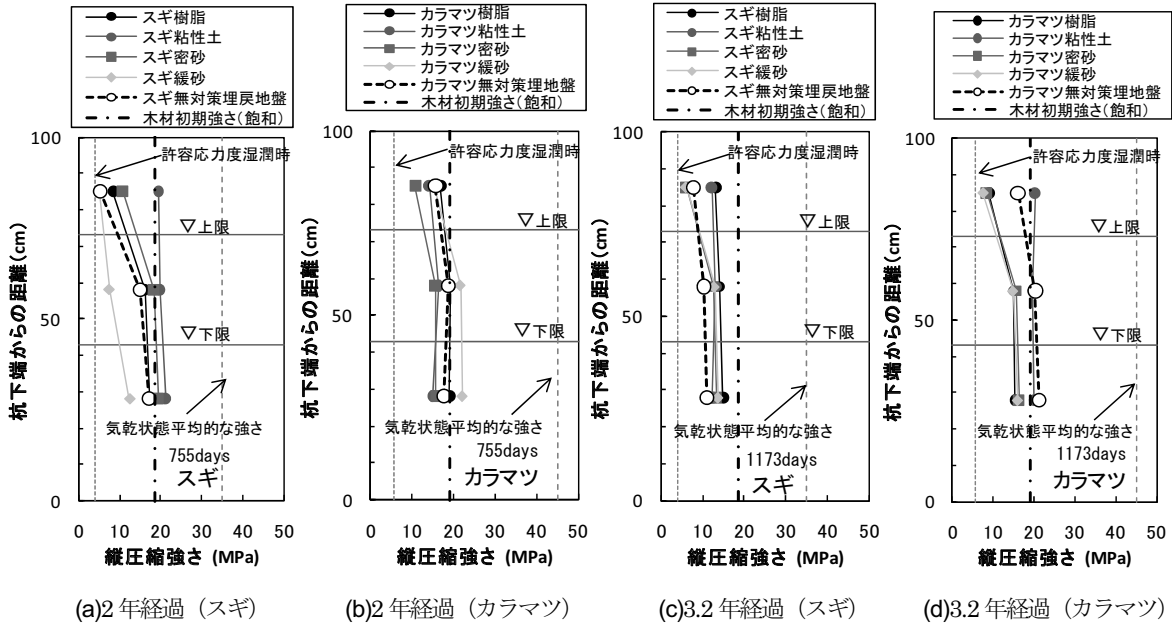


図-5 2年(755日)経過後と3.2年(1,173~1,187日)経過後の各位置における木材の縦圧縮強さ

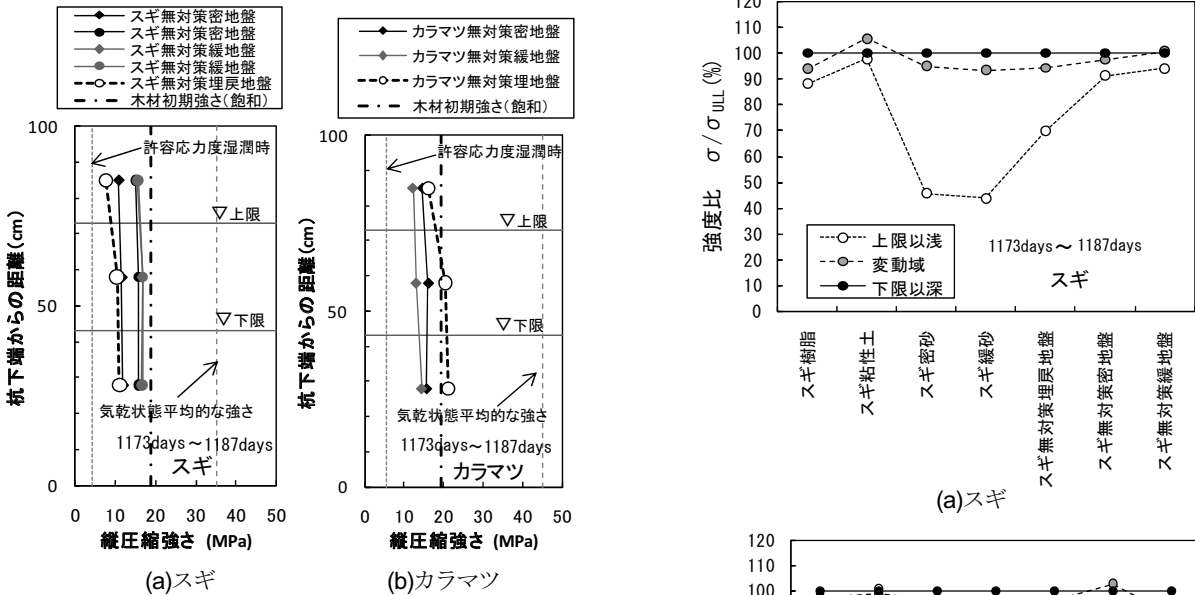


図-6 無対策木材の3.2年(1,173~1,187日)経過後の圧縮強さ

図-7に、3.2年経過後の各条件における強度比を示す。変動域については、スギもカラマツも下限以深と類似の傾向で若干強度低下が認められるものの、その強度比はいずれも90%以上であり、変動域における強度低下は僅かであることがわかる。土槽側面からの観察結果によれば、水位低下時に腐朽菌(白色腐朽菌と考えられる白い菌)が繁殖する場合があるが、水位が再び上昇ししばらくすると菌は消滅し、再度水位低下した時には、菌が再び繁殖するのに長い時間を要するか、場合によっては再び繁殖しない場合も多かった。このように、水位上昇時には、繁殖した腐朽菌も一度死滅してしまい、再度水位が低下した時にその死滅した菌が以前からの状態から継

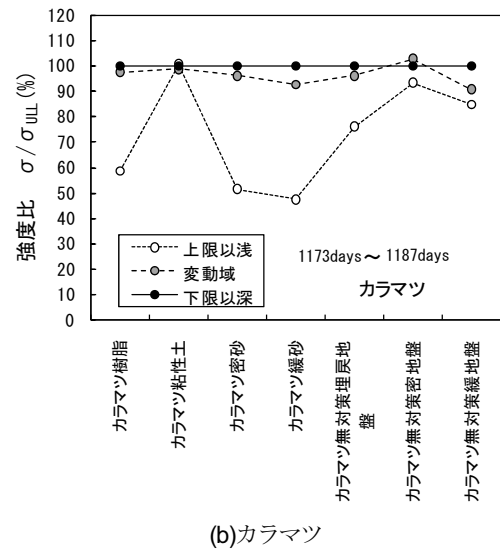


図-7 3年以上(1,173~1,187日)経過後の各条件における強度比

続し繁殖を始める訳ではないので、変動域では腐朽の進行が著しく遅くなるものと考えられる。したがって、実際の地下水位は日変動もしているため、このような短い周期の変動であれば変動域の範囲内で毎日一度は地下水以下に没することから、下限以深と同様に木材は長期耐久性を有するものと推察される。

変動域上限以浅では、スギもカラマツも密と緩の砂で覆った場合の強度は変動域よりも遥かに低下が大きく、3.2年経過後には強度は下限以深と比べ半分以下になった。埋戻し地盤の無対策は、むしろこれらより低下量が少なく70~80%程度であった。一方、粘性土で覆ったものの強度低下はほとんど認められず、また、地山を想定した密地盤と緩地盤でも低下量は僅かであった。樹脂で覆ったものは、カラマツにおいて低下量が多い。このように、埋戻し地盤において砂や樹脂で覆ったものの強度の低下量が無対策のものよりも大きいのは、砂や樹脂による被覆部に小さな亀裂ができていたり、そもそもこれらの亀裂の生じた樹脂や砂が土壌による模型地盤より通気性または通水性が高く腐朽菌が繁殖しやすかった可能性などが考えられる。なお、樹脂による被覆は、当初より含浸が十分ではなく亀裂が生じているものが多く、これが強度低下の生じた原因だと考えられる。

粘性土で覆ったものは、強度の低下は認められなかった。今回の実験における被覆厚さは1cmであるが、実際の地盤ではさらに厚い地盤に覆われていることから、粘性土地盤中では地下水位の位置に依存せず木材は長期耐久性を有すると考えられる。また、木材を立て込んだ後に地盤を埋戻した地盤と、地山を想定し密地盤と緩地盤を最初に作製後に木材を打設したものでは、後者の方が強度の低下量が小さかった。これは、密地盤については地盤が密なため空気量が少なく腐朽菌が息できる環境が整いにくいこと、緩地盤については、地山に木材を打撃貫入することで、木材周囲の地山を締め、これに木材が覆われることで通気性が悪くなり腐朽菌が繁殖しにくくなるためだと考えられる。

6. まとめ

- ①木材は、地下水変動域下限以深では長期耐久性がある。
- ②木材は、地下水変動域において僅かに強度低下が認められたが、その程度は地下水変動域上限以浅よりも遥かに小さく、3.2年経過した時点における強度は健全な状態の90%以上であった。
- ③粘性土で覆われた木材は、地下水位位置に関係なく3.2年経過後も強度の低下は認められず、粘性土地盤中にある木材は長期耐久性があると考えられる。
- ④木材を砂で覆った場合には、強度低下量が大きく、3.2年経過した時点での強度は50%以下になった。

- ⑤地山のような地盤に打撃貫入された木材は、木材の周囲を埋戻した地盤に比べ、長期耐久性を有する。

謝辞：本研究を実施するにあたり、早稲田大学の濱田政則教授、(株)地域環境研究所の中村裕昭氏、福井工業高等専門学校の吉田雅穂教授、渡辺雄大氏に御協力戴いた。本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会の科研費(20246078)の助成を得たものである。ここに記して感謝申し上げます。

なお、本論文は、第10回木材利用研究発表会(土木学会木材工学特別委員会, 2011.8.)へ投稿した原稿を一部修正したものである。

【参考文献】

- 1) 沼田淳紀, 桃原郁夫, 久保光, 本山寛: 地中における木材腐朽に対する一考察, 第61回日本木材学会大会, N20-07-1130, 2011.3.
- 2) 沼田淳紀, 吉田雅穂, 濱田政則: 木材による1964年新潟地震における液状化対策事例, 木材学会誌, Vol.55, No.5, pp.305-315, 2009
- 3) 中村裕昭, 濱田政則, 本山寛, 沼田淳紀: 80年前に施工された木杭の健全性調査, 第44回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1791-1792, 2009.8.
- 4) 沼田淳紀, 上杉章雄, 向谷常松, 勝山義史, 坂梨和哉, 直井義政, 鈴木忠好: 地盤中の木材腐朽実験, とびしま技報, No.57, pp.92-103, 2008.
- 5) 沼田淳紀, 上杉章雄: 掘り出した木杭の腐朽評価の試み, 第56回日本木材学会大会研究発表要旨集, T09-1315, 2006.8.
- 6) 長野行紘: 腐朽性評価方法としてのファンガスセラ法について, 木材保存, Vol.26-2, pp.22-32, 2000.
- 7) 日本建築学会: 建築基礎構造設計基準・同解説, p.285, 1974.11.
- 8) 森林総合研究所監修: 木材工学ハンドブック改訂4版, 丸善, p.194, 2004.

Summary The authors consider log piling into the soft ground as countermeasures for soft ground and liquefiable sandy ground as a new way of using wood. One of the weak points of wood is decay and there is almost no study about wood decay in the ground. For this reason, large and middle scale model grounds where the groundwater level can be variable up and down were prepared, woods that were covered with some kinds of soils were set up in them, and damage by decay has been investigating for three years. As a result, this paper shows wood has high durability as long as the wood is under the lowest groundwater level, the speed of decay of wood between the highest and lowest groundwater level is far slower than that above the highest groundwater level, and wood covered with clayey soil has high durability.

Key Words : *Wood, Countermeasure for Soft Ground, Durability, Underground, Model Test*