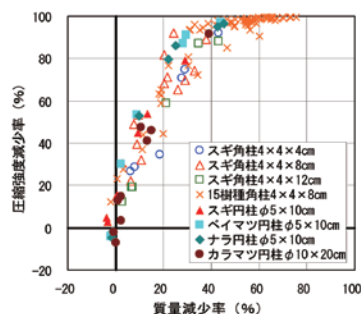
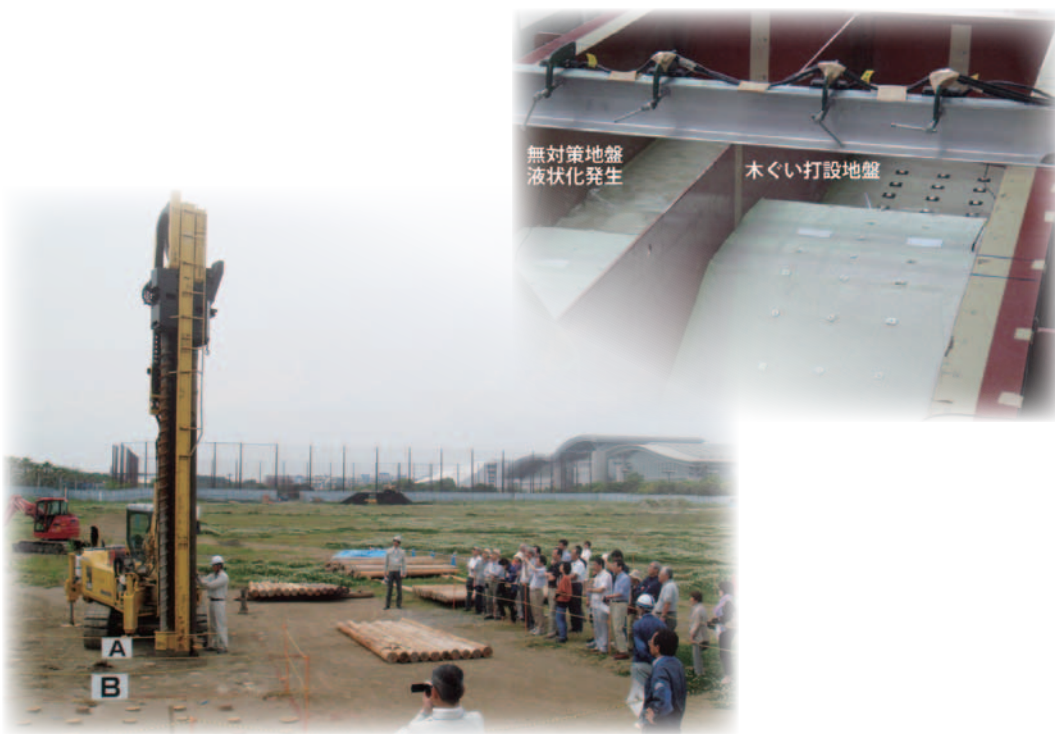


# 農林水産省 実用技術開発事業 「フロンティア環境における間伐材利用技術の開発」 成果報告書

—間伐材を地中および海洋で活用していくための指針作成に向けて—



独立行政法人 森林総合研究所  
Forestry and Forest Products Research Institute

## はじめに

わが国の森林・林業の活性化に向けて「森林・林業基本計画」が2011年に閣議決定され、総合的な行政的取り組みが実行されつつある。この基本計画を研究面からサポートするため、森林総合研究所では行政と連携しながら種々の開発研究に取り組んできたところである。

森林総合研究所が研究対象としている森林・林業・木材産業を川の流れに例えると、森林・林業分野は「川上」に、木材産業分野は最も「川下」に位置することになる。もし、川下で流れが滞ると、川全体に影響が及び、あちこちで氾濫さえ生じかねない。このため、川下側の川幅を広げて、木材利用の拡大を図ることが基本計画の推進のためにも強く求められている。

とはいえ、川幅を広げるためには、木造建築や木質バイオマスといった従来からの需要を拡大するだけでは不十分である。これまで木材が全く未利用であった分野や、他の材料に代替されてしまった分野においても、新たな木質製品や斬新な利用法を開発する必要がある。

このような未開拓分野の代表が、木材を屋外で利用する土木やエクステリア分野である。この分野では半世紀以上も前に決められた木材利用抑制の方針が未だに影響を持っていたり、強度や耐久性のデータ不足のために木材製品が使いづらくなっていたりといった問題が残されたままである。また、木材利用が全く考慮されていなかった用途も数多く残されたままである。

以上のような情勢の中で、森林総合研究所では、地中や海洋における間伐材等の利用促進を計るべく、平成21年度～23年度にわたり、飛島建設（株）、早稲田大学、（独）港湾空港技術研究所、（地独）北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場と共同研究を実施した（農林水産省実用技術開発事業予算「フロンティア環境における間伐材利用技術の開発」）。

この開発研究で得られた成果の中で、最も特筆すべきは、木杭を用いた地盤対策の利用技術が確立され、実際の液状化防止や軟弱地盤改良の施工に応用され始めたことである。これによって国産材の利用範囲が大きく広がる可能性が高まった。もちろん、コストの低減といった問題点はいくつか残されてはいるが、この成果がわが国の木材利用技術の歴史上、新たな第一歩となることは疑いないところであろう。

本研究成果資料集は、当該研究で得られた多くのデータと成果をコンパクトにまとめたものである。間伐材の土木利用研究の一層の発展に役立つことを祈念したい。

平成25年3月

独立行政法人 森林総合研究所

研究コーディネータ（木質資源利用研究担当）

林 知行

## 目次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| はじめに                            | i  |
| 第 1 章 間伐材等の地中利用技術               | 1  |
| 1.1 総則                          | 1  |
| 1.2 間伐材打設による液状化発生の低減            | 2  |
| (1) 一般                          | 2  |
| (2) 対象とする地盤                     | 8  |
| (3) 液状化の発生する可能性の検討              | 9  |
| (4) 目標とする液状化対策効果の設定             | 10 |
| (5) 間伐材打設による間伐材間地盤の液状化対策効果の推定方法 | 12 |
| (6) 間伐材打設による地盤密度と改良率の関係         | 14 |
| (7) 相対密度と $N$ 値との関係             | 15 |
| (8) 参考文献                        | 16 |
| 1.3 間伐材による建物・盛土の傾斜・変形抑制対策       | 17 |
| (1) 基本指針                        | 17 |
| (2) 間伐材による建物の傾斜抑制               | 18 |
| (3) 間伐材による盛土の沈下・変形抑制            | 19 |
| (4) 参考文献                        | 20 |
| 1.4 間伐材の強度特性と接合部の性能             | 21 |
| (1) 適用範囲                        | 21 |
| (2) 木材の品質と強度                    | 21 |
| (3) 木材の設計強度                     | 22 |
| (4) 接合部の仕様                      | 26 |
| (5) 継手の強度的性能                    | 27 |
| (6) 参考文献                        | 29 |
| 1.5 間伐材の保存処理（防腐・防蟻処理）           | 30 |
| (1) 一般                          | 30 |
| (2) 地中常水面上での防腐・防蟻対策             | 31 |
| (3) 保存処理の方法                     | 35 |
| (4) 保存処理前に行っておくべき処理             | 38 |
| (5) 保存処理木材の安全性と環境負荷             | 39 |
| (6) 参考文献                        | 41 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第2章 海洋における間伐材等利用技術     | 42 |
| 2.1 適用範囲               | 42 |
| 2.2 耐用年数               | 42 |
| 2.3 使用環境と劣化要因          | 43 |
| (1) 海水と常時接する環境         | 43 |
| (2) 干満帯                | 45 |
| (3) 飛沫帯                | 46 |
| (4) 海底土中               | 47 |
| (5) 参考文献               | 48 |
| 2.4 海虫害対策              | 50 |
| (1) 木材の素材耐久性           | 50 |
| (2) 薬剤処理               | 52 |
| (3) 樹脂処理・熱処理           | 53 |
| (4) 塗装および被覆処理          | 54 |
| (5) 参考文献               | 56 |
| 2.5 構造設計               | 57 |
| (1) 柵式係船岸              | 58 |
| (2) 栈橋                 | 59 |
| (3) ドルフィン              | 60 |
| (4) 参考文献               | 61 |
| 2.6 環境性能               | 62 |
| (1) 資源の持続可能性           | 62 |
| (2) 環境や人への影響           | 62 |
| (3) 廃棄処理               | 62 |
| 付録                     | 64 |
| (1) 丸太および円柱材の曲げ試験      | 64 |
| 丸太および円柱材の曲げ試験方法（案）     | 64 |
| (2) 研究実施体制および報告書執筆担当箇所 | 69 |
| (3) 発表資料等一覧            | 70 |
| (4) 図表等一覧              | 72 |
| (5) 索引                 | 74 |





## 第 1 章 間伐材等の地中利用技術

### 1.1 総則

#### 適用範囲

この章では、間伐材等の木材を木杭を含む「軟弱粘性土地盤対策」や「液状化対策」として地中で利用する際に参考となる技術情報として、

- a) 間伐材打設による液状化発生の低減手法の考え方
  - b) 間伐材による建築物・盛土の傾斜・変形抑制対策
  - c) 地中の湿った環境における木材強度
  - d) 短尺杭を接合して長尺杭として使う場合の設計方法
  - e) 保存処理（防腐・防蟻処理）の方法
- について示すものである。

間伐材等の木材を地中で活用する方法として様々な用途が想定されるが、本章では特に建築物および土木構造物の基礎に間伐材等を活用するための情報を記す。なお、ここでいう基礎での利用は、支持杭で使用する場合だけでなく、間伐材打設による地盤補強効果までを含めた利用方法を想定した。

本章の構成としては、まず a) 間伐材打設によって液状化被害を低減させる設計法や b) 間伐材打設によって地盤流動化被害を低減させる設計法の考え方を、その設計法を導く根拠となった基礎データと共に紹介する。

次いで、c) 木材を支持杭として用いる場合などに必要となる地中の湿った環境における基準強度や許容応力度、さらには d) 間伐材を接合する場合の考え方について示した。

また、e) 木材を常水面下で使用できない場合に必要となる保存処理に関する一般的な情報や、保存処理による環境負荷を少しでも減らすための方策について記した。

## 1.2 間伐材打設による液状化発生の低減

### (1) 一般

間伐材を地盤中に打設することで液状化対策効果が認められる。この効果は、主に間伐材を地盤に打設することで間伐材間の地盤の密度を増加させるものである。本工法は、このようなメカニズムで液状化発生の低減をはかる。本節では、その設計の考え方を示す。

地盤の液状化は、a) 緩い、b) 飽和した、c) 砂地盤に、d) 大きな地震外力が作用することで発生する現象で、この4つの条件の内ひとつ以上を取り除くことが液状化発生の低減策となる。本章では、間伐材を地盤に打設することで、主に間伐材間の地盤密度を増加させ、a) を取り去ることにより液状化発生の低減をはかるものである。

#### (a) 間伐材による液状化対策事例

液状化対策として間伐材を緩い砂地盤へ打設し、地震被害を免れた事例として、現存する現在の新潟駅が上げられる<sup>1)</sup>。図-1.2.1に、新潟駅の概要を示す。新潟駅は、主にRC造地下1階地上4階建ての本屋と、地上6階建ての支社からなる。これらの基礎は、手小荷物扱所が直接基礎、駅本屋が末口22.5cm長さ7.5m（杭間隔約1.5m）の松丸太基礎（改良率 $a_s=1.8\%$ に相当）、コンコース上の連絡建屋および支社が直径30cm長さ6mのPCコンクリート杭（2本継ぎ、杭間隔不明）であった。基礎の木杭は1956～1957年（昭和31～32年）頃に打設され、新潟駅本屋は1958年（昭和33年）に開業した。地下水位は、当時地下水のくみ上げ過ぎで地盤沈下が激しかったためちょうど規制ができ、GL-0.5m程度であった。本屋の基礎が松丸太となっているのは、当時専門技術者ですら液状化という現象を知らない時代であったが、液状化対策として緩い砂地盤に松丸太が打設されたものである。これを設計した斉藤は、当時松丸太基礎について次のように述べている、「・・・流砂現象のおそれは十分あり得ると言う結論に達した。それで基礎底面から-12mの支持層までゆるい砂層を締固めると共に、建物荷重を支持層に確実に伝達するために杭基礎とすることとし、末口22.5cm、長さ7.5mの松丸太745本（1.5m間隔程度）を打設した・・・。」

その後1964年新潟地震（マグニチュード7.5、震源深さ40km、最大震度VI（旧震度階））が発生した。この地震の特徴は、液状化現象が至るところで発生し、これに起因する被害が多かったことである。図-1.2.2に、地震後に新潟駅とその周辺の地盤に生じた永久変位を示す<sup>2)</sup>。新潟駅周辺では噴砂が多数確認され、1m以上の大きな永久変位が発生している。地震後の新潟駅では、ホー

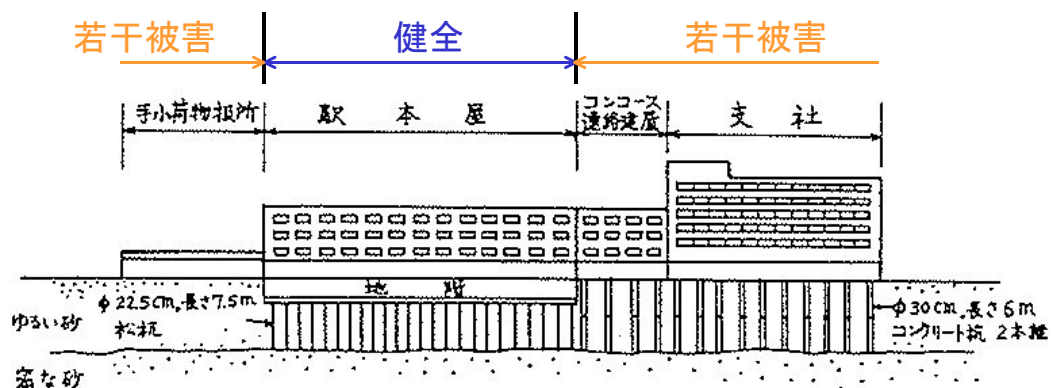


図-1.2.1 新潟駅正面建屋（文献1に加筆）

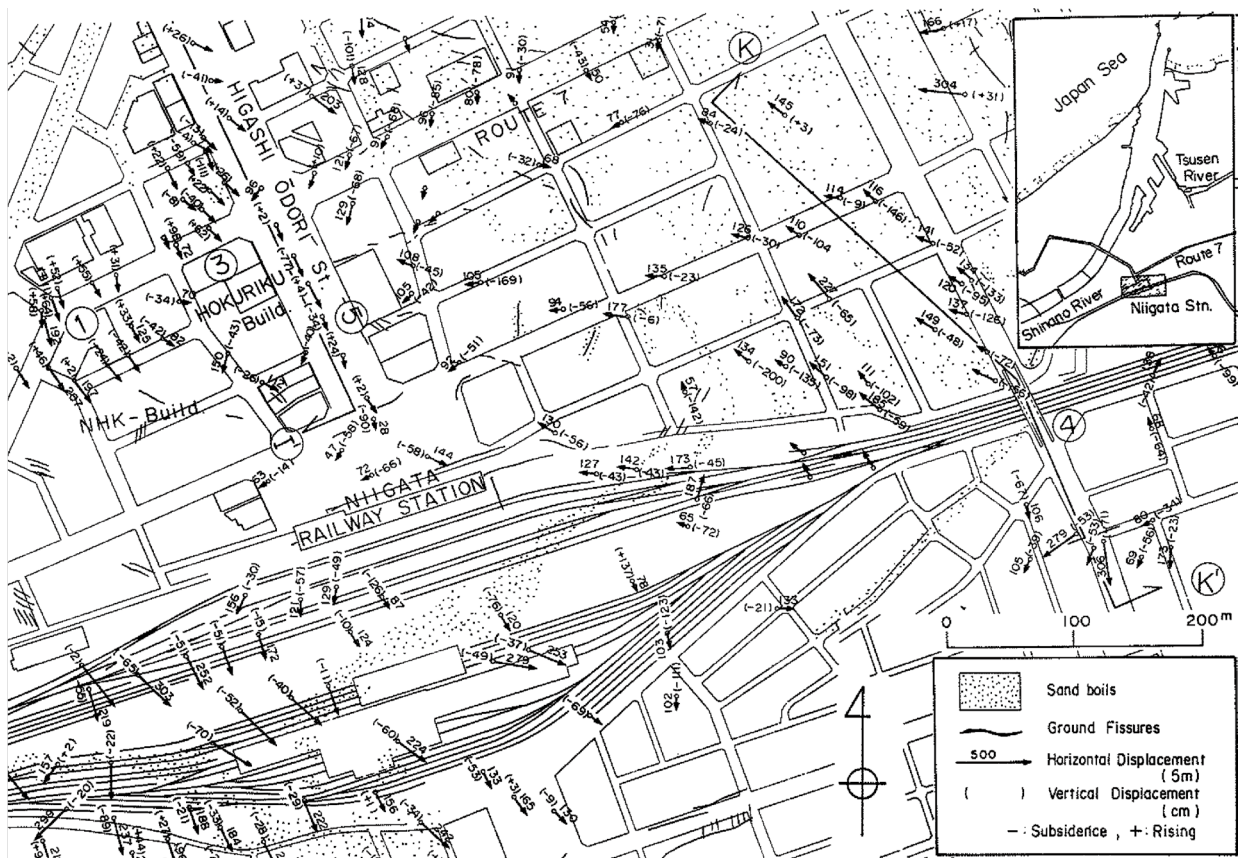


図-1.2.2 新潟駅とその周辺の地盤に生じた永久変位

ムへ渡る地下道は泥水で埋まり、アメのように曲がったレールや建造物の基礎周辺には噴砂が多数確認されている。これらより、新潟駅およびその周辺では激しい液状化が生じたことが明かである。このような状況下、新潟駅の支社は不同沈下が10cm程度生じ駅前広場側に0.55度、右側に0.40度傾斜し、左側の手小荷物扱所も被害を受けた。一方、松丸太で支えられた本屋は健全であった。支社側は、支持杭の本数としては設計上十分であったかもしれないが、本屋と比較すると杭本数は遥かに少なく杭間地盤の締固め効果が期待できなく、この差が本屋と支社の被害の差になったのであろうとされている<sup>3)</sup>。松丸太の打設により液状化の発生を防いだのか、地盤は液状化したが松丸太が駅舎を支えたのかのメカニズムの詳細は不明だが、松丸太が液状化対策として打設され、それが1964年新潟地震で機能し、50年以上経過した現在も健全に機能し新潟駅を支えていることは事実である<sup>4)</sup>。

その他の事例として、液状化対策を意図して木杭が打設されたわけではないが、木杭基礎の橋台や橋脚が1948年福井地震（マグニチュード7.1、震源深さはごく浅い、最大震度VI（旧震度階））による被害を免れたものもある<sup>5)</sup>。この橋梁は、福井市を流れる足羽川に架かる幸橋である。対象となる幸橋は、昭和8年（1933年）に、鉄筋コンクリート単純T桁橋（9連、橋長133m、幅員18.7m）として架け替えられたもので、昭和20年（1945年）の福井空襲、昭和23年（1948年）の福井地震、平成16年（2004年）の福井豪雨など度重なる災害に耐え、平成19年（2007年）に役目を終えた。撤去工事によって現れた木杭は、直径は末口17cm、元口18cmであり、長さは2.2mと2.7m、樹種はマツ科マツ属であった。74年間、河床地盤中に存在していたが、木杭は水位変動域以深では全く腐朽しておらず健全であった。地盤は、河床から5mまではN値10未満の礫質土



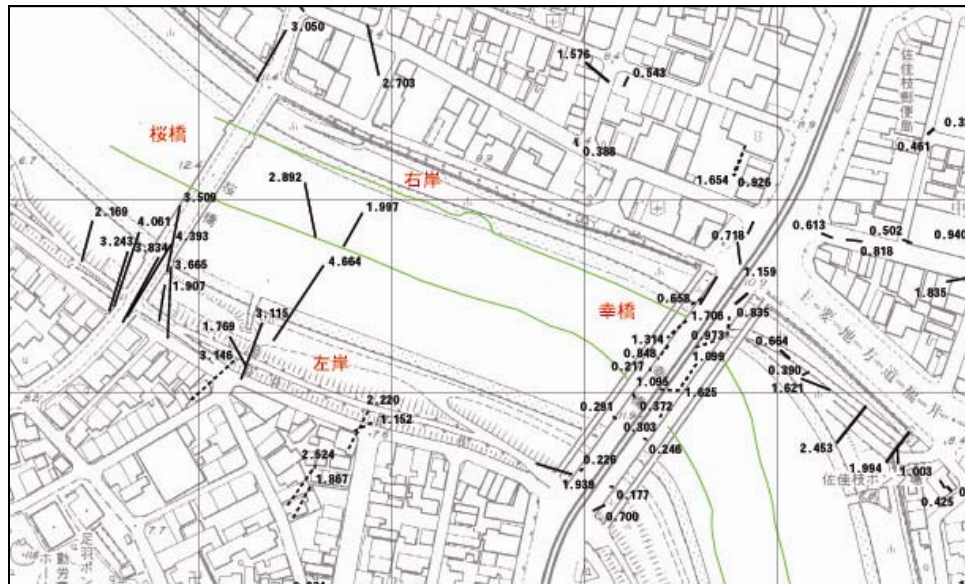


図-1.2.3 幸橋とその周辺の地盤に生じた永久変位

と礫混じり砂層が存在し、その下層は $N$ 値5程度のシルトとシルト混じり砂の互層となっており、福井地震の時に液状化が発生していた可能性は否定できない。図-1.2.3は、福井地震で発生した幸橋周辺の永久変位を示したものである<sup>5)</sup>。最大4.6mの大きな地盤変位が生じており、多くのベクトルが河道中心方向に変位していることがわかる。一方、幸橋周辺の橋取り付け部において左岸側で1.9m、右岸側で1.7mの地盤変位が発生している。幸橋の被害概要は、橋台の柱などに若干の被害が生じたが、橋脚や上部構造への被害はなかったことが示されている。このように、福井地震の震源域近くに存在していた木杭基礎を有する橋梁が、その周辺地盤で液状化に起因すると考えられる1mを超える側方流動が発生していたにも関わらず、顕著な構造被害は見られず、地震直後も橋梁としての機能を有していた。

これらに事例が示す通り、間伐材を地盤に打設することで、液状化対策効果を期待できる可能性が高く、また、このように打設された間伐材は、50年を優に超えて機能を発揮することがわかる。

## (b) 間伐材打設後の地盤特性

模型地盤に間伐材を打設した実験によれば、図-1.2.4に示すように、間伐材を地盤に打設するこ

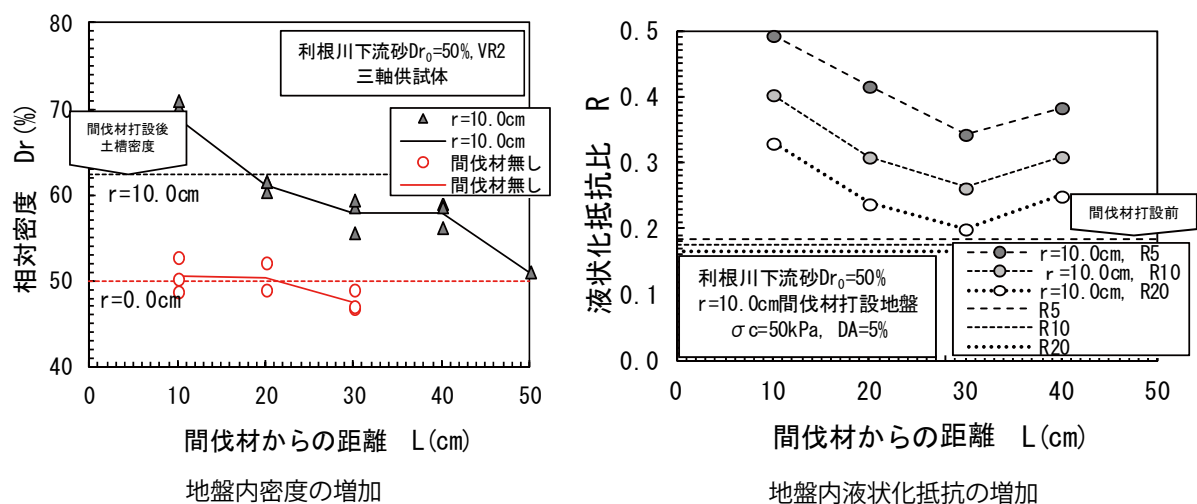


図-1.2.4 間伐材打設による地盤密と液状化抵抗の増加の一例

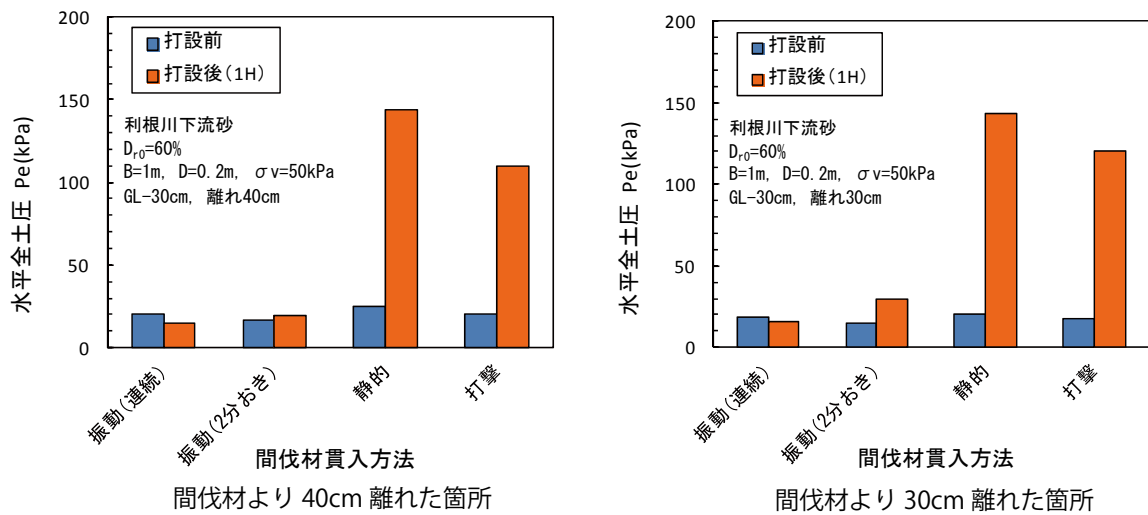


図-1.2.5 間伐材打設による想定相対密度と沈下量の関係の一例

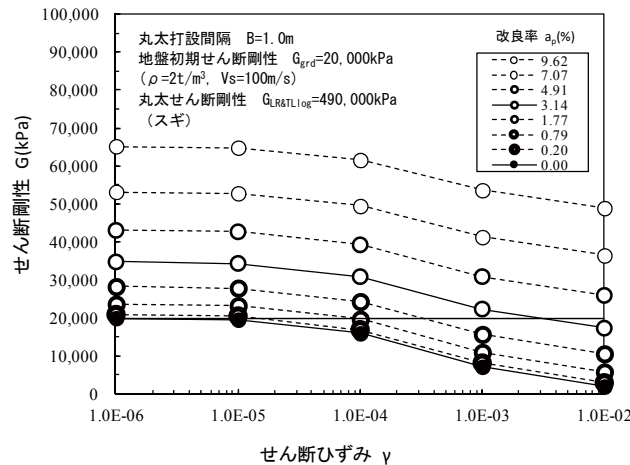


図-1.2.6 地盤と間伐材の複合地盤におけるせん断ひずみと合成のせん断剛性の関係

とで地盤密度が増加し、これにより液状化抵抗も増加することがわかる。ただし、その増加は模型地盤については地盤内で一様ではなく、打設された間伐材に近いほど増加が大きい。

図-1.2.5 は、間伐材打設による地盤内の間伐材から 30cm と 40cm 離れた地点における水平土圧である。地盤内土圧は、静的貫入や打撃貫入したときには打設前地盤の水平土圧に比べて、かなり大きく、この大きさは間伐材からの距離にあまり依存しないことがわかる。一方、振動を用いて間伐材を打設した場合には、水平土圧はほとんど打設前と変化しないことがわかる。

図-1.2.6 は、地盤と間伐材の複合地盤におけるせん断ひずみと理論的に合成したせん断剛性の関係の試算値である。地盤はせん断ひずみが大きくなるとせん断剛性が低下し、液状化時には 0 に近づく。一方、間伐材は例えば地盤が液状化してもせん断剛性を維持すると考えられるので、このひずみレベルの範囲では弾性状態であると仮定した。複合地盤になることで地盤全体としてのせん断剛性が大きくなることがわかる。

さらに、間伐材は杭基礎としても使われるように、間伐材先端部および周面が液状化しない限り支持力を有する。

以上より、間伐材を地盤に打設することで地盤を密に締め固め、これにより液状化抵抗が増加する。ただし、その増加量は、間伐材を打設する模型実験においては地盤内で均一ではないので、大

型実験や現場施工実験などでこの影響を確認する必要がある。

さらに、間伐材を静的または打撃により打設した場合には、間伐材間の水平土圧が増加し地盤の拘束圧が増加し液状化抵抗を高め、間伐材が地盤に打設されることで地盤全体としてのせん断剛性も増加し、先端または摩擦杭としての機能も発揮することができる。これらを設計に取り入れることで、合理的な液状化対策の設計が可能となる。

### (c) 振動実験

図-1.2.7 に示す土槽に地盤を作成し、間伐材として、直径 9mm、長さ 250mm、形状は先を尖らせたペンシル状であるスギを模型地盤に打設し振動実験を行った。図-1.2.8 に、加振装置を示す。また、図-1.2.9 に、加振波形を示す。

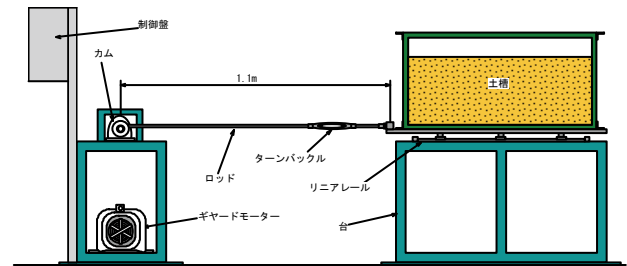
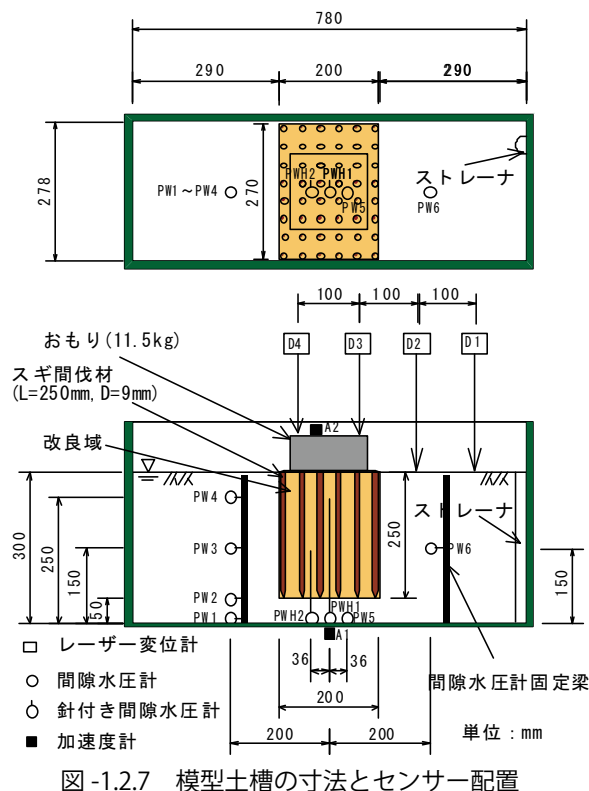


図-1.2.8 加振装置

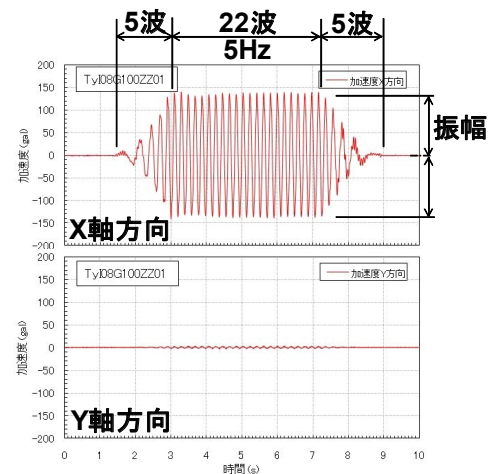


図-1.2.9 加振波形

図-1.2.10 に、最も施工実績の多い密度増大工法を模して、模型地盤を密にしたときの入力加速度と錘の累積沈下量の関係を示す。無対策では、入力加速度が 100gal になると大きな累積沈下を生じるが、相対密度が 60% になることで 100gal ではほとんど沈下が生じなくなることがわかる。さらに入力加速度が上がると相対密度が大きくなるほど累積沈下量が減少し、液状化対策効果が上がることがわかる。

図-1.2.11 に、間伐材を打設した時の錘と累積沈下量を示す。密度増大と同様に、8D 間隔 (D: 間伐材直径) で間伐材を打設すると、100gal ではほとんど沈下が生じなくなることが分かる。さらに、入力加速度が上がると、間伐材間隔が狭くなるほど累積沈下量が減少することが分かる。図中には、図-1.2.10 に示した相対密度  $Dr=90\%$  の結果を併記した。間伐材間隔が 5D や 4D でほぼ  $Dr=90\%$  と同等の液状化対策効果があり、3D ではそれ以上の対策効果があることがわかる。この

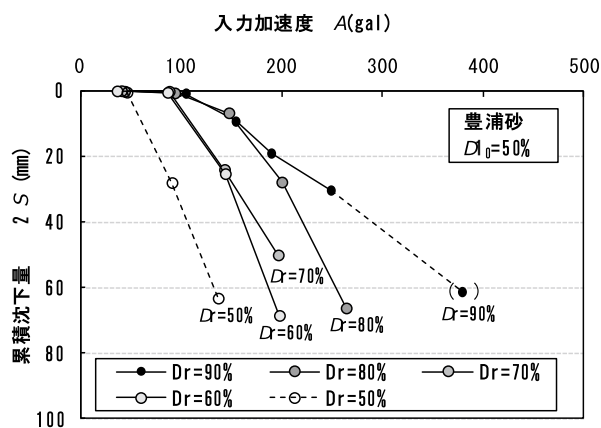


図-1.2.10 密度増大による対策の  
入力加速度と累積沈下量の関係

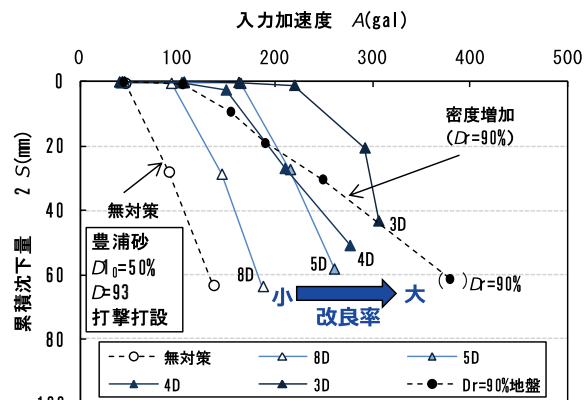


図-1.2.11 間伐材打設による対策の  
入力加速度と累積沈下量の関係

ように液状化対策効果があるのは、間伐材が地盤に打設されることで、間伐材間の地盤を密にするからであり、さらに前述の通り、間伐材間の拘束効果の増大、地盤全体のせん断剛性の増加、間伐材の支持力などが起因していると考えられる。

図-1.2.12 に、入力加速度 150gal に対する相対密度と錘の沈下量の関係を示す。間伐材打設による場合の地盤の相対密度は、間伐材が打設されることで砂粒子が水平方向のみに移動し、間伐材の体積分地盤の体積が減少したと仮定して求めたものである。密度増大によるよりも間伐材打設による方が、同じ相対密度同士で比較した場合に沈下量が少なく、液状化対策効果が高いことが分かる。図-1.2.13 は、同様の実験を自然の砂である利根川砂について実施したものである。豊浦砂と同様の傾向が得られている。

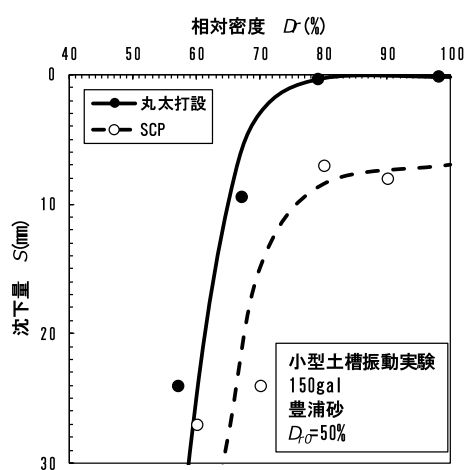


図-1.2.12 入力加速度 150gal の時の  
相対密度と沈下量の関係（豊浦砂）

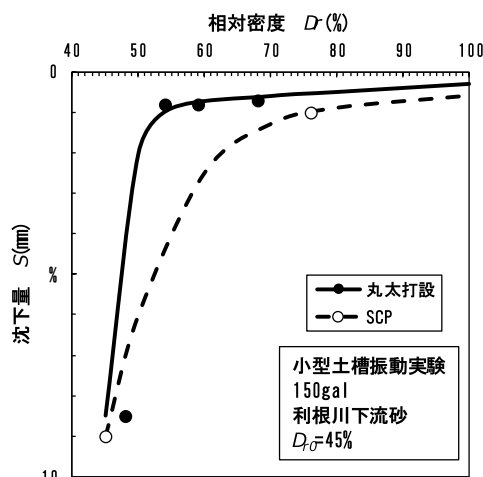


図-1.2.13 入力加速度 150gal の時の  
相対密度と沈下量の関係（利根川砂）

以上より、緩い砂地盤に間伐材を打設することで、地盤は密になり、間伐材間で想定される地盤密度による液状化対策効果以上に対策効果が上がる。大きな対策効果が得られるのは、間伐材打設による地盤の拘束圧の増大、地盤全体のせん断剛性の増加、間伐材の支持力に起因するものと考えらる。そこで、設計では、間伐材が打設されることで密になる間伐材間の地盤密度を想定し設計すれば、十分安全側の設計が可能である。



## (2) 対象とする地盤

地下水位が浅く、かつ、地震により液状化の発生する可能性のある地盤。

液状化対策として緩い砂地盤へ打設された間伐材は、体積を失わない限り、密にした地盤は密度を維持すると考えられる。したがって、間伐材は腐朽や虫害などの生物劣化を起こさない限り長期安定的に対策効果を発揮する。間伐材は地下水位以浅では生物劣化が進行する場合があるが、液状化の可能性のある地盤は飽和地盤であるので、液状化対策が必要な層では生物劣化は進行せず、生物劣化が進行する層では液状化は発生ににくいこととなる。しかしながら、長期安定的に機能を発揮させるには、打設した間伐材を生物劣化させないことが必要であり、毛管現象などにより実質地盤が飽和している場合や、間伐材に特殊な処理を施し生物劣化を防ぐ場合を除き、間伐材を地下水位以深に設置することが基本である。このために、地下水位が浅いことを対象条件に加えた。この深さは、施工性によるが、GL-2m 程度以浅が現実的な深さと考えられる。

液状化の発生する可能性のある地盤は、各基準類による。

道路橋示方書（日本道路協会）<sup>6)</sup>と建築基礎構造設計指針（日本建築学会）<sup>7)</sup>には、液状化判定を行うべき地盤をそれぞれ以下としている。

### (a) 道路橋示方書（日本道路協会）<sup>6)</sup>

- a) 沖積層の土層
- b) 地下水位が地表から 10m 以内にあり、かつ、地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層
- c) 細粒分含有率が  $FC$  が 35% 以下の土層、又は、 $FC$  が 35% を超えても塑性指数  $I_p$  が 15 以下の土層
- d) 50% 粒径が  $D_{50}$  が 10mm 以下で、かつ、10% 粒径  $D_{10}$  が 1mm 以下である土層

### (b) 建築基礎構造設計指針（日本建築学会）<sup>7)</sup>

- a) 飽和土で地表面から 20m 程度以浅の沖積層
- b) 細粒分含有率が 35% 以下。ただし、細粒分含有率が 35% 以上の低塑性シルトであっても、粘土分（0.005mm 以下の粒径を持つ土粒子）含有率が 10% 以下、または塑性指数が 15 以下の埋立あるいは盛土地盤
- c) 細粒土を含む礫や透水性の低い土層に囲まれた礫

### (3) 液状化の発生する可能性の検討

間伐材を打設する前と後の地盤の液状化発生の可能性は、地盤の $N$ 値、粒度組成、密度（湿潤密度、飽和密度、有効密度）を用い判定する簡易液状化判定法、数値解析や模型実験などにより適切に評価する。

間伐材を打設する前や、間伐材打設後の間伐材間の地盤については、既往の地盤の $N$ 値、粒度組成、密度（湿潤密度、飽和密度、有効密度）を用いた液状化判定法<sup>6,7)</sup>などにより、液状化の発生する可能性の検討を行う。本工法は、間伐材を緩い砂地盤中に打設することで間伐材間の地盤を密にし地盤の液状化抵抗を増加させるものであることから、間伐材間の地盤の液状化判定を行い、これが所定の値に達していればよい。

ただし、1.2(1)で示したように、間伐材は、液状化を生じず、地盤に発生するひずみレベルではせん断剛性の低下はほとんどないと考えらるが、間伐材間の地盤の評価のみではこれらの効果は反映されず安全側になる。これら进行评估し合理的な設計を行うには、数値解析や模型実験などを用いて適切な評価を行う。

#### (4) 目標とする液状化対策効果の設定

地震レベルと、許容できる被害程度に応じ、目標とする液状化対策効果を設定する。液状化対策効果については、液状化に対する抵抗率 $F_L$ や安全率 $F_l$ 、部分的に液状化を許容し評価する液状化指数 $P_L(m^2)$ や地表変位 $D_{cy}(cm)$ などを用いる。液状化指数 $P_L(m^2)$ は、式(1.2.1)より求める。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \quad (1.2.1)$$

ここで、 $F_L$ ：液状化に対する抵抗率。ただし $F_L \geq 1$ の場合には $F_L = 1$ とする  
 $x$ ：地表面からの深さ (m)

地表変位 $D_{cy}(cm)$ は、図-1.2.14<sup>7)</sup>より繰返しせん断ひずみ $\gamma_{cy}$ を読み取り、これを体積ひずみ $\varepsilon_y$ と読み換え、これに層厚を乗じて求める。

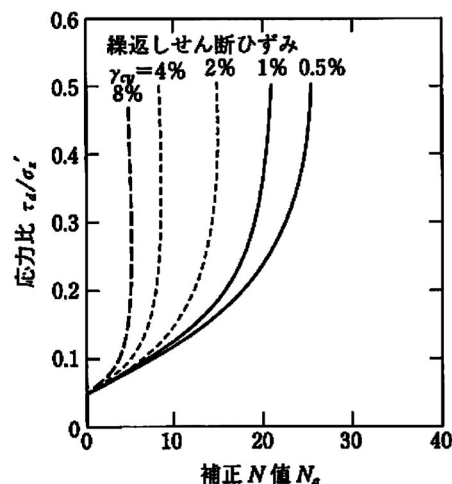


図-1.2.14 補正 $N$ 値と繰返しせん断ひずみの関係

上記では求められないような、変形量や沈下量を目標とした場合には、数値解析や模型実験などを用いて検討を行う。

液状化対策効果は、液状化に対する抵抗率 $F_L$ （道路橋示方書<sup>6)</sup>）や安全率 $F_l$ （建築基礎構造設計指針<sup>7)</sup>）により、いずれも1以上とすることで、間伐材間地盤の液状化発生をさせないことが一つの目標である。しかしながら、間伐材打設により地盤密度を上げようとしても、間伐材は形状が固定されているので、ある層のみ部分的に改良率を上げようとしても難しく、それ以浅の密な層についても間伐材が打設された分だけさらに地盤を密にすることとなる。このような場合には、液状化指数 $P_L(m^2)$ （道路橋示方書<sup>8)</sup>）や地表変位 $D_{cy}(cm)$ （建築基礎構造設計指針<sup>7)</sup>）などにより、部分的な液状化発生は許容し、地盤の深度方向全体としての評価を行う。

液状化指数 $P_L(m^2)$ の目標値としては、表-1.2.1<sup>8)</sup>や図-1.2.15<sup>9)</sup>などを参考にする。また、地表変位 $D_{cy}(cm)$ の目標値としては表-1.2.2<sup>7)</sup>などを参考にする。

表 -1.2.1 非液化化層中の流動力の補正係数  $C_{NL}$

| 液化化指数 $P_L$       | 補正係数 $C_{NL}$             |
|-------------------|---------------------------|
| $P_L \leq 5$      | 0 (液化化による流動力が発生しない状態)     |
| $5 < P_L \leq 20$ | $(0.2 P_L - 1)/3$         |
| $20 < P_L$        | 1 (地盤が液体状となり最大の流動力が生じる状態) |

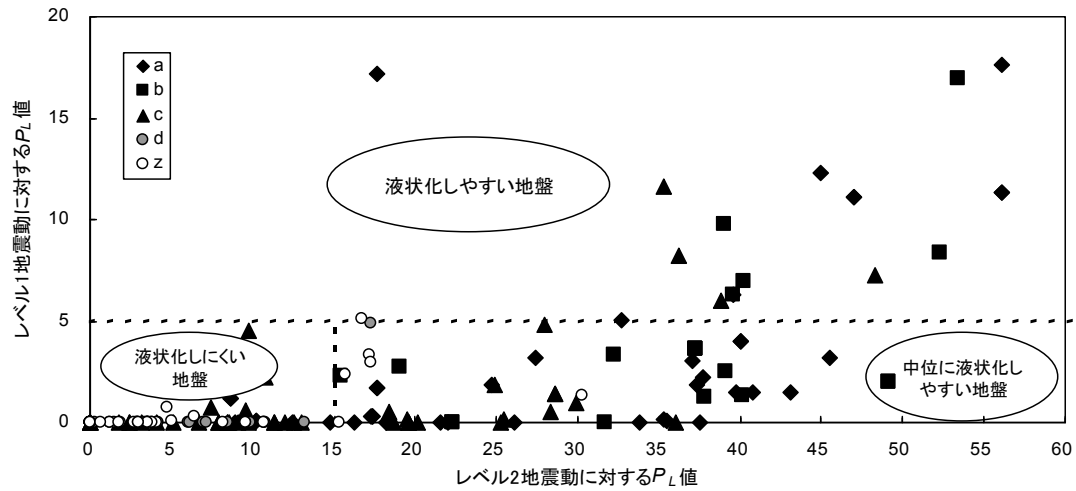


図 -1.2.15 レベル1 とレベル2 地震動に対する  $P_L$  値と液化化発生程度

表 -1.2.2  $D_{cy}$  と液化化の程度の関係

| $D_{cy}(\text{cm})$ | 液化化の程度 |
|---------------------|--------|
| 0                   | なし     |
| 0 - 5               | 軽微     |
| 5 - 10              | 小      |
| 10 - 20             | 中      |
| 20 - 40             | 大      |
| 40 -                | 甚大     |

(5) 間伐材打設による間伐材間地盤の液状化対策効果の推定方法

間伐材を緩い砂地盤に打設することで地盤の密度が増加するが、間伐材打設後に想定される液状化対策効果は、地盤の間隙比と間伐材の貫入による地盤の体積減少から想定される地盤の密度増加により理論的に求める方法や、地盤の  $N$  値と間伐材打設後の  $N$  値のデータからなる経験則などから求める。

緩い砂地盤に間伐材が打設された後の液状化対策効果は、間伐材打設により土粒子はほぼ水平に移動し密度を増加すると仮定すると、初期の地盤間隙比  $e_0$ 、間伐材の断面積  $A$ 、間伐材の打設間隔  $B$ 、対象地盤の土質の最大最小間隙比  $e_{\max}$ 、 $e_{\min}$ 、相対密度  $D_r$  と  $N$  値の関係が求められると理論的に間伐材打設後の  $N$  値を推定することができる。これを用いた間伐材打設間隔  $B$  の決定方法の一例を図-1.2.16 に示す。ここでは、液状化判定に道路橋示方書の方法を用いて液状化指数  $P_L$  を用いた。また、間伐材のテーパーを考慮した。

しかしながら、初期の地盤間隙比  $e_0$ 、対象地盤の土質の最大最小間隙比  $e_{\max}$ 、 $e_{\min}$  は、求めることが難しい場合が多い。このような場合には、経験的な方法が便利で実用的である。密度増大工法では、図-1.2.17 に示される経験的に得られた原地盤  $N$  値  $N_0$  と改良後パイル中間  $N$  値  $N_1$  が設計に用いられているが、本工法についてもこの図の適用性の検討や数多くの施工実績から同様の図を作成することで経験則による設計が可能になると考える。

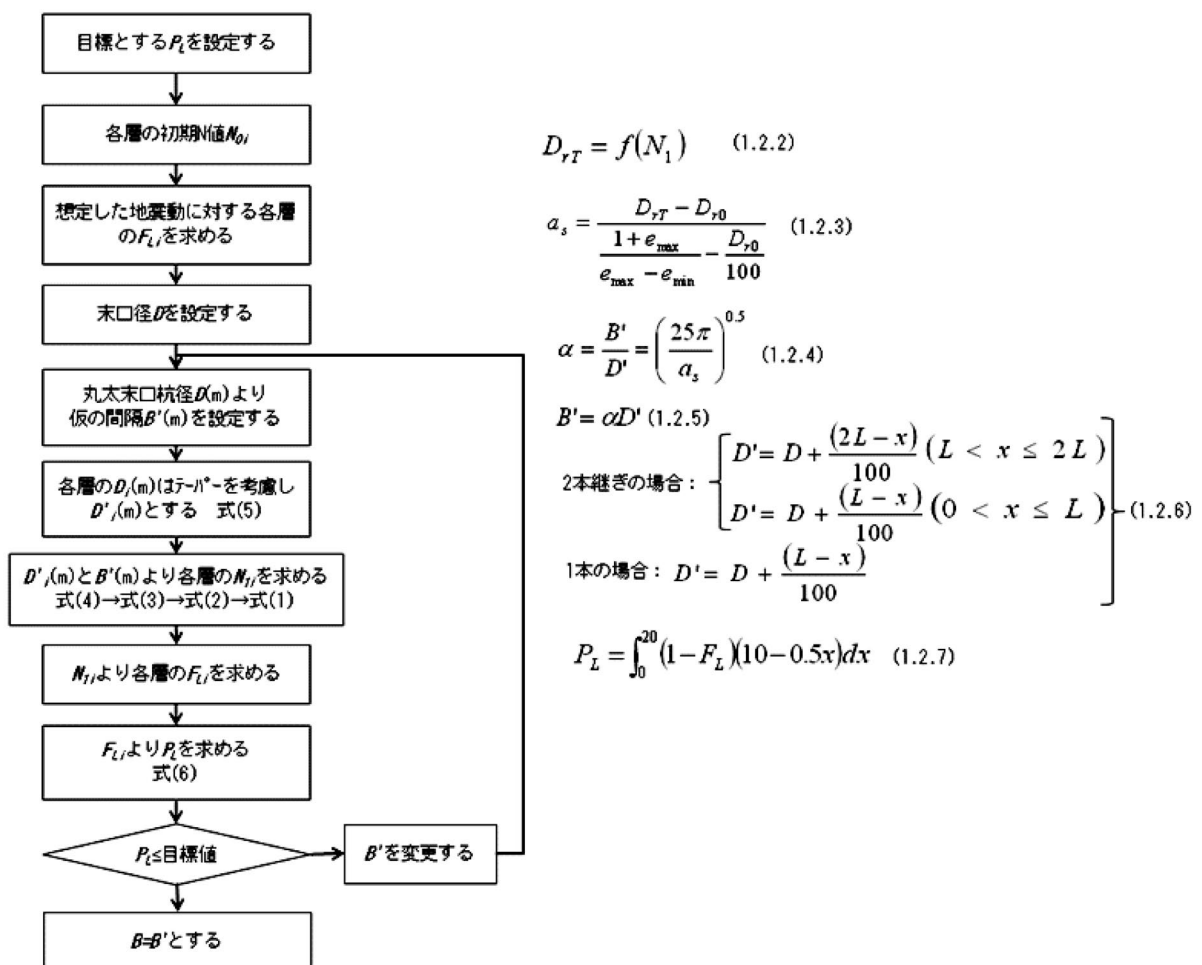


図-1.2.16 理論的な方法による間伐材打設間隔設定方法

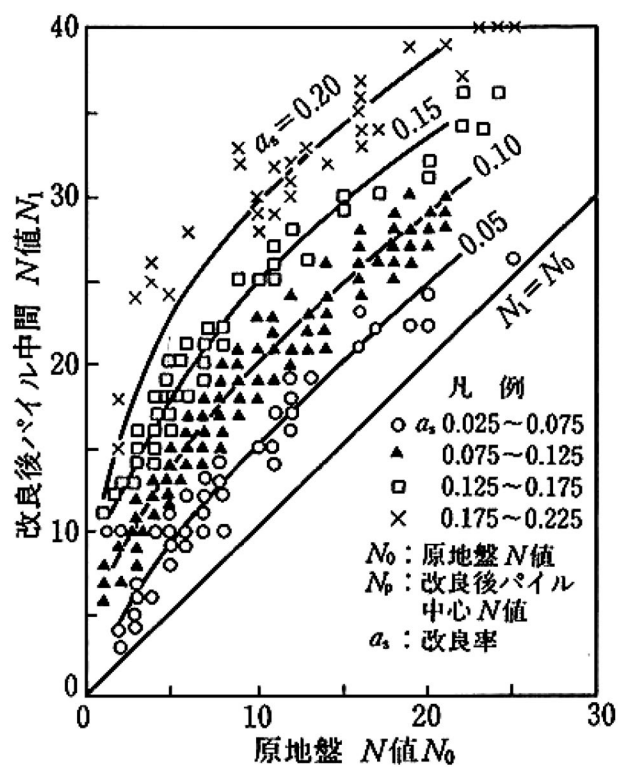


図 -1.2.17 密度増大工法に用いられる原地盤  $N$  値  $N_0$  と改良後パイル中間  $N$  値  $N_1$



(6) 間伐材打設による地盤密度と改良率の関係

間伐材が地盤に打設されることで地盤が密度増大し到達する相対密度  $D_{rT}$  は、間伐材断面積  $A$  と間伐材打設間隔  $B$  によって定義される改良率  $a_s$  により式 (1.2.8) の関係で示される。

$$a_s = \frac{D_{rT} - D_{r0}}{\frac{1 + e_{\max}}{e_{\max} - e_{\min}} - \frac{D_{r0}}{100}} \quad (1.2.8)$$

ここで、 $a_s$  : 改良率 (%) =  $100A/B^2$   
 $A$  : 間伐材の断面積 ( $m^2$ )  
 $B$  : 間伐材の打設間隔 (m)  
 $D_{rT}$  : 目標とする相対密度 (%)  
 $D_{r0}$  : 地盤の初期相対密度 (%)  
 $e_{\max}$  : 対象土質の最大間隙比  
 $e_{\min}$  : 対象土質の最小間隙比

地盤の初期相対密度と目標とする相対密度と改良率の関係式は、間伐材が打設されることにより地盤が水平方向に単純に押し広げられ、これにより地盤が密になると仮定し、式 (1.2.8) のように理論的に求められる。

図-1.2.18 は、実大スケールの地盤を平面的に 4 分割したことを想定した模型地盤に、実大の間伐材を同様に 4 分割した断面で打設貫入したときの間伐材の径と打設後の地盤の相対密度の関係である。間伐材打設後の相対密度は、ほぼ式 (1.2.8) の理論式と一致することがわかる。ただし、模型実験においては、地盤の間伐材打設後の相対密度は、相対密度 75 ～ 80% 程度で頭打ち状態になることがわかる。

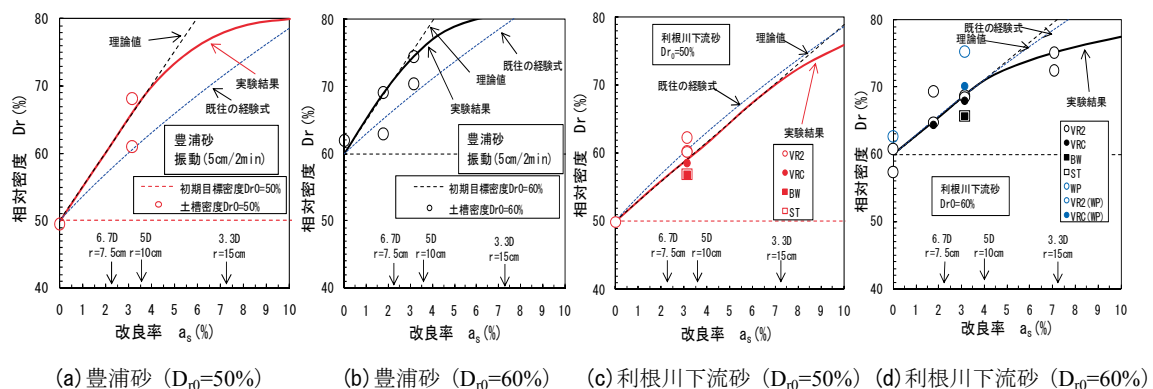


図-1.2.18 間伐材による改良率と間伐材打設後の地盤相対密度の関係

## (7) 相対密度と $N$ 値との関係

地盤の相対密度は、相対密度と  $N$  値の経験的な関係式を用いて  $N$  値より推定する。

間伐材打設後の間伐材間の地盤密度を理論的に求めて、既往の指針類<sup>6)7)</sup>を用いて液状化の可能性を評価しようとする場合、地盤の相対密度と  $N$  値の関係式が必要となる。

これらの関係式として、Meyerhof<sup>10)</sup>、Gibbs&Holtz<sup>11)</sup>の方法がある。図-1.2.19にこれらの関係を示す<sup>12)</sup>。Meyerhof<sup>10)</sup>とGibbs&Holtz<sup>11)</sup>の方法は、古くから用いられている方法である。図中のプロットは、液状化しやすい砂を用いて実験的に求めたもので、相対密度はJIS法によって求められた最小間隙比ではなく、突固めなどを行って得られた最小間隙比を用いるのが特徴である<sup>12)</sup>。

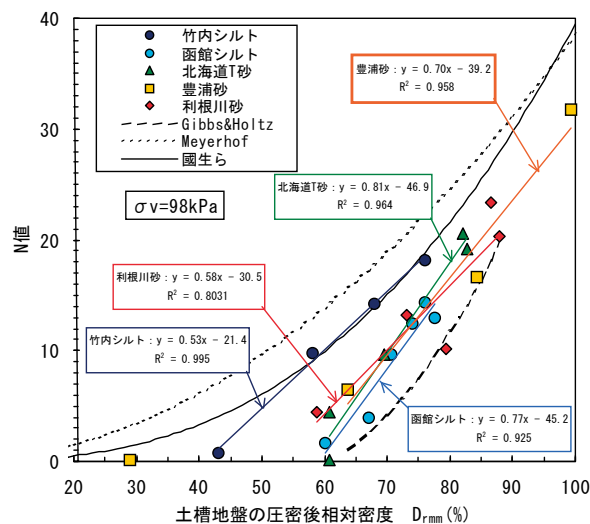


図-1.2.19 相対密度と  $N$  値の関係

### [課題]

以上は、主に室内実験結果に基づき、緩い地盤への間伐材打設による間伐材間の密度増加による液状化対策効果を基本にその設計の考え方を示した。今後、更に大型の模型実験による評価、実地盤による実証実験や地震観測などにより、特に詳細について改良されていくべきものである。

(8) 参考文献

- 1) 齊藤迪孝：新潟地震について，地震工学研究発表会講演概要，7:39-43 (1964)
- 2) Hamada, M. and O'Rourke, T. D. : Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes, Technical report NCEER-92-0001, 3-59 (1992)
- 3) 新潟地震調査報告，鉄道技術研究所報告，No.448 (1964)
- 4) 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，55:305-315 (2009)
- 5) 吉田雅穂，濱田政則，沼田淳紀，久保光：福井地震における地盤の側方流動が木杭基礎構造物に与えた影響に関する考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，65(CS5):49-50 (2010)
- 6) 橋に影響を与える液状化の判定，道路橋示方書・同解説・耐震設計編，134-141 (2012)
- 7) 地盤の液状化，建築基礎構造設計指針，61-72 (2001)
- 8) 流動力の算出方法，道路橋示方書・同解説・耐震設計編，146-149 (2012)
- 9) 建築，レベル 2 地震動による液状化（土木学会地震工学委員会レベル 2 地震動による液状化研究小委員会），100-109 (2003)
- 10) Meyerhof, G. G. : Discussion on soil properties and their measurement, Session 2, Proc.4th ICSMFE, Vol., p.110 (1957)
- 11) Gibbs, H. J. and Holtz, W. G. : Research on determining the density of sand by spoon penetration test, Proc. 4th ICSMFE, 35-39 (1957)
- 12) 沼田淳紀，嶋本栄治：N 値と相対密度を条件とした非塑性で細粒な土の液状化抵抗，土木学会論文集，764:287-305 (2004)

### 1.3 間伐材による建物・盛土の傾斜・変形抑制対策

#### (1) 基本指針

既往の地震の度に液状化により建物の傾斜および盛土等の沈下・変形が発生して来ている。本対策法は間伐材を建物および盛土の基礎地盤に適切な根入れ長と間隔をもって打設し、建物の傾斜および盛土の沈下と変形を抑制する方法である。

図-1.3.1 は 1964 年新潟地震における液状化による鉄筋コンクリート建物の被害を調査した結果である。直接基礎、木杭基礎、鉄筋コンクリート杭基礎毎の建物の被害状況の割合を示している。これによれば、直接基礎とくらべ、木杭基礎を鉄筋コンクリート杭基礎の被害なしの割合が多い。また、木杭基礎は鉄筋コンクリート杭基礎と建物の被害状況に大きな差は認められない。

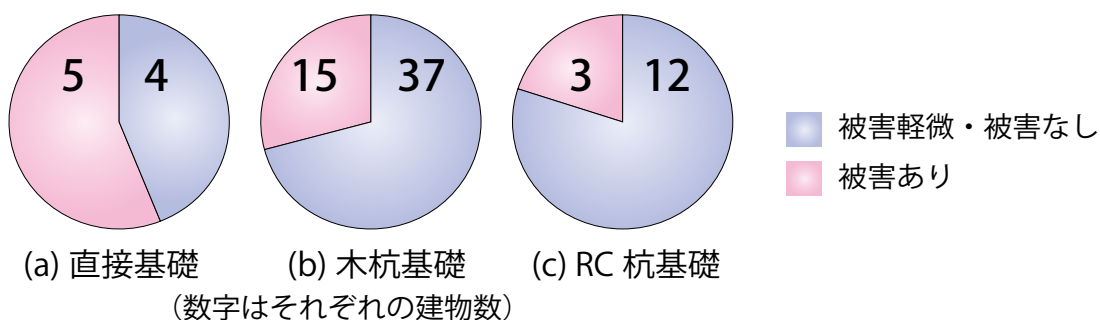


図-1.3.1 建物被害の有無と基礎形式の関係

木杭を建物の基礎地盤に打設することにより、建物の傾斜と沈下が抑制された要因は以下のように考えられる。図-1.3.2 に示すように建物の基礎地盤が液状化した場合、地盤の支持力が減少し、建物が沈下して傾斜を起こす。建物下の液状化土が側方流動を起こし、これにより建物の傾斜と沈下がさらに増大する。建物下に木杭を適切な根入れ長と間隔によって打設することにより、液状化土の側方流動が防止され、これによって、建物の沈下と傾斜が大きく抑制される。

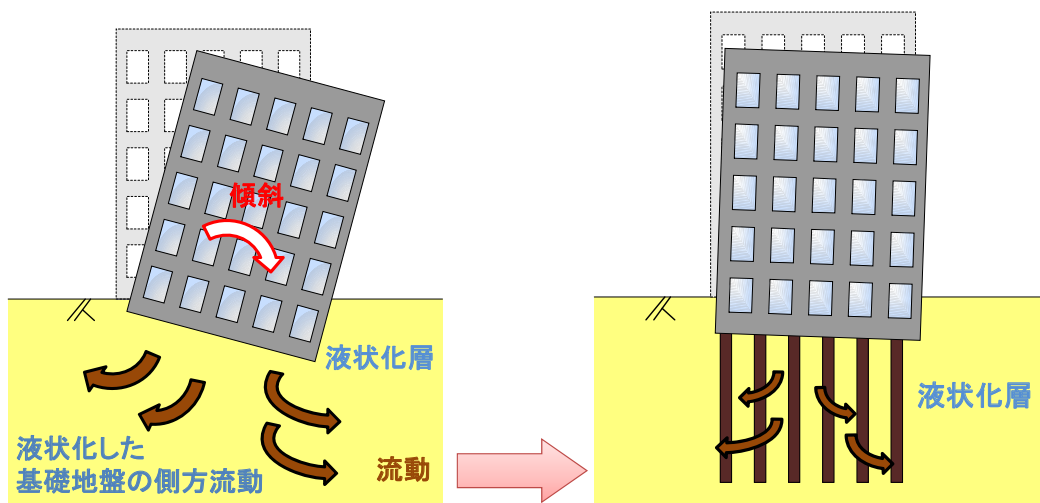


図-1.3.2 木杭打設による建物の沈下・傾斜抑制の考え方

## (2) 間伐材による建物の傾斜抑制

間伐材を液状化層へ適切な根入れ長と間隔で打設することにより、建物の傾斜を抑制することが可能である。ただし、杭の根入れ長および間隔は地盤条件、予測される液状化層の厚さおよび液状化の度合いに応じて、模型等を用いた実験あるいは数値解析等により決定する必要がある。

図 -1.3.3 に示す建物と木杭基礎の模型により、液状化層の厚さに対する木杭の根入れ深さと建物の沈下・傾斜の抑制効果の検証が重力場の模型実験（実験模型の縮尺：1/50）で行われている<sup>1)</sup>。

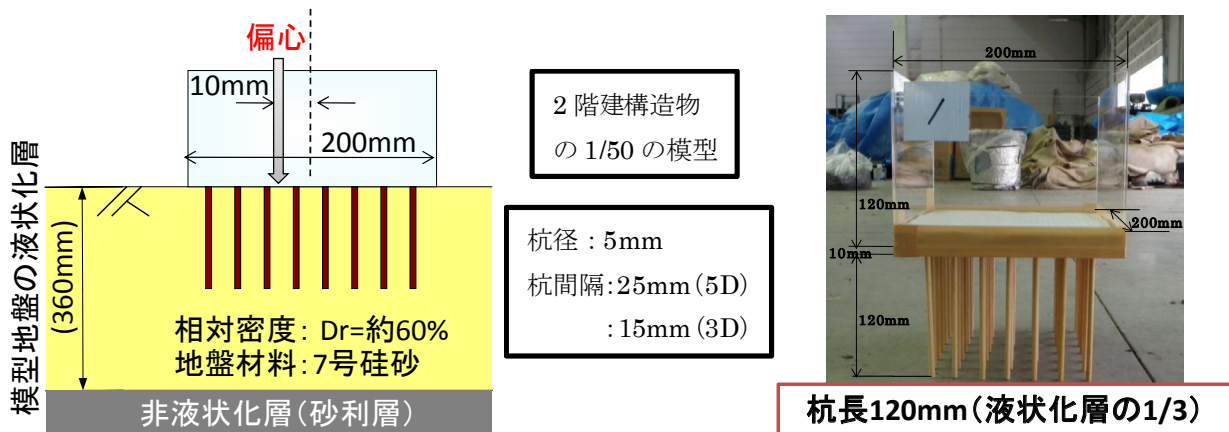
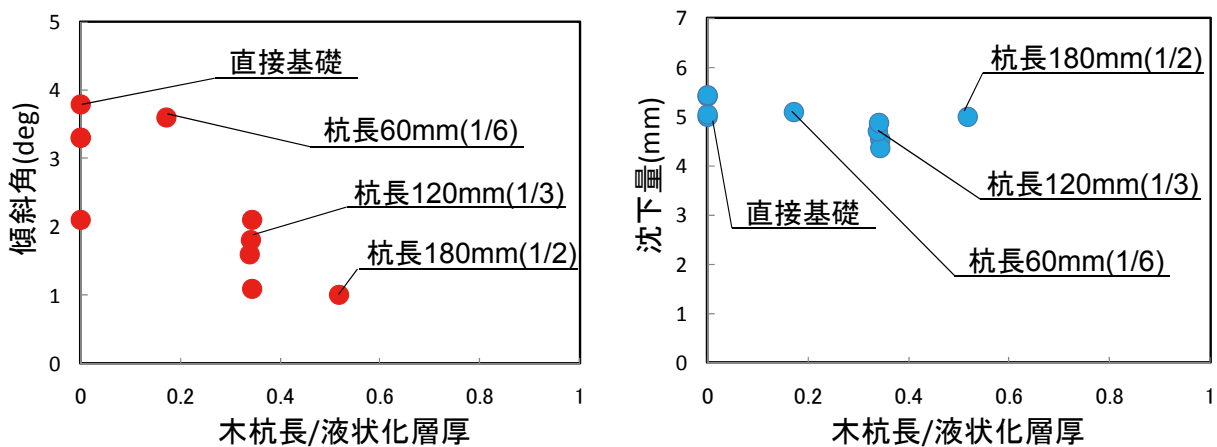


図 -1.3.3 木杭が建物の沈下と傾斜抑制に与える効果の検証模型

模型実験により、木杭の根入れ長が建物の傾斜に与える影響として、図 -1.3.4 が得られている。



( \* 液状化層厚 = 360mm, 括弧内は杭長/液状化層厚 )

図 -1.3.4 木杭の液状化層への根入れ長が建物の傾斜と沈下に与える影響

図示した結果によれば、木杭が液状化層の厚さの 1/3 以上根入れされていれば傾斜抑制効果が認められることがわかる。しかし、根入れ長の沈下抑制効果は顕著でない。これは木杭が支持層に到達しておらず、杭先端の地盤も液状化を生じたことによる。建物の傾斜抑制効果に関しては、木杭の根入れ長を地盤条件や各地層の液状化の度合いに応じて適切に定める必要がある。

木杭の打設間隔が建物の傾斜と沈下抑制に与える影響を図 -1.3.5 に示す。これによれば、杭の打設間隔が小さいほど建物の傾斜と沈下を抑制することがわかる。特に傾斜抑制効果は大きい。木杭の打設間隔に関しては地盤条件、液状化の度合いを考慮して適切に決定する必要がある。

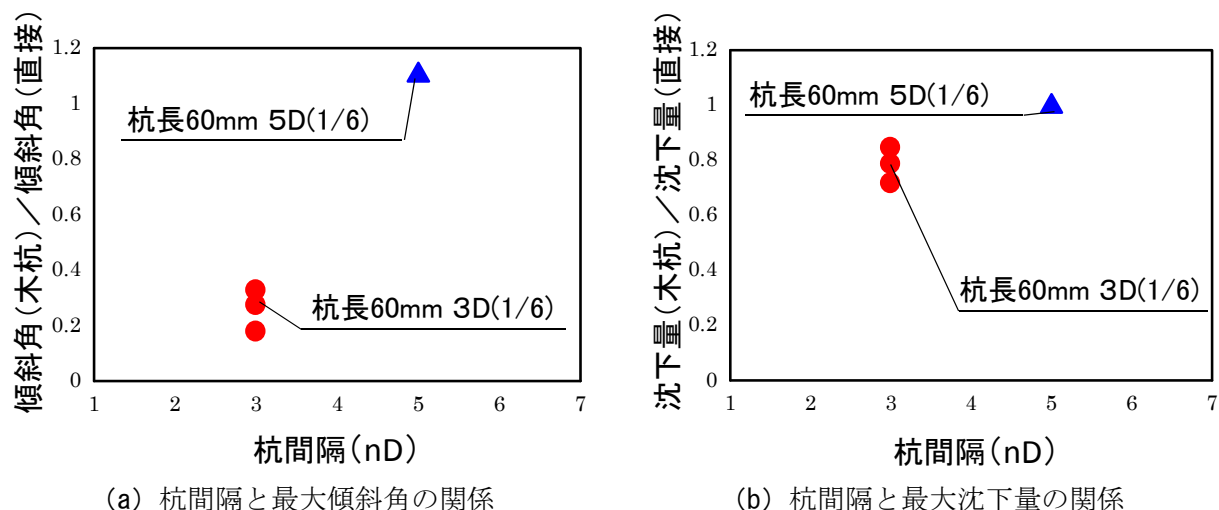


図 -1.3.5 木杭の打設間隔が建物の傾斜・沈下抑制効果に与える効果

### (3) 間伐材による盛土の沈下・変形抑制

間伐材を鉄道、道路等の盛土下の液状化地盤に適切な根入れ長で打設することにより、盛土の沈下と変形を抑制することが可能である。ただし、木杭の液状化層への根入れ長、打設間隔は地盤条件、液状化層の厚さに応じて模型実験や数値解析等により検証する必要がある。

図 -1.3.6 に示す模型（重力場：1/40 模型縮尺，50G 遠心載荷場：1/50 模型縮尺）を用いた液状化実験により、木杭の盛土の沈下・変形抑制に対する効果が検証されている<sup>2)</sup>。

重力場および 50G 遠心載荷場での模型実験により、液状化層に対する杭の根入れ長の比と盛土天端の沈下量の関係を図 -1.3.7 に示す。これによれば盛土基礎地盤に木杭を打設することにより盛土天端の沈下を抑制することが可能である。液状化層厚の 1/2 程度の杭長の木杭を打設すれば沈下量は約 1/2 程度に減少する。ただし、打設する木杭の長さ、間隔は地盤条件や盛土高さに応じて模型実験や数値解析で検証する必要がある。

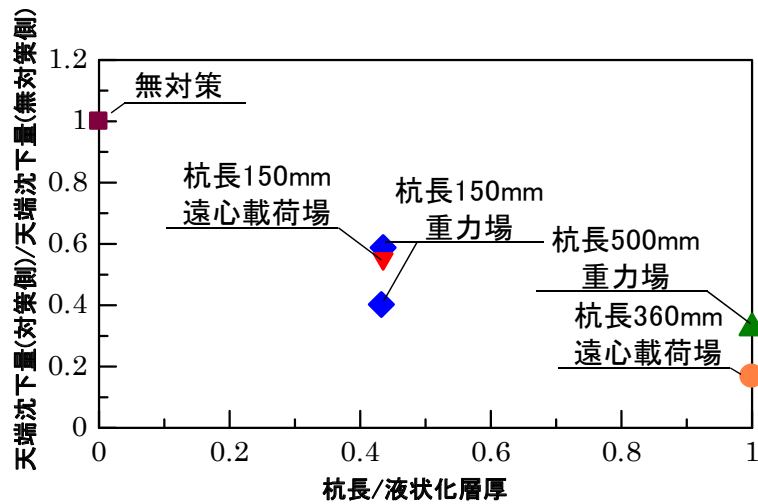
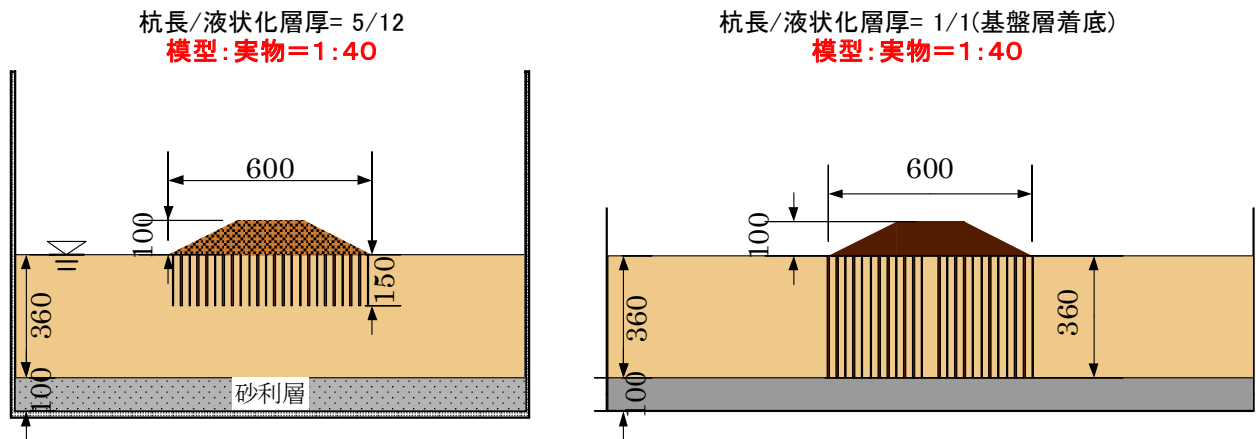


図-1.3.6 木杭が盛土の沈下・変形に与える効果の模型実験



(a) 重力場での実験模型 (単位 : mm)

(b) 50G 遠心载荷場での実験模型 (単位 : mm)

図-1.3.7 木杭の液状化層への根入れ長が盛土天端の沈下抑制に与える効果

#### (4) 参考文献

- 1) 堤圭司, 岸田健吾, 中谷史規, 濱田政則, 木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究 (1)—建物の対策法—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 65:CS5-021 (2010)
- 2) 中谷史規, 岸田健吾, 堤圭司, 濱田政則, 木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究 (2)—盛土の対策法—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 65:CS5-022 (2010)
- 3) 岸田健吾, 堤圭司, 濱田政則, 木杭基礎による構造物の液状化と地盤流動対策法に関する実験的研究, 土木学会全国大会年次学術講演会, 66:CS-13-011 (2011)



## 1.4 間伐材の強度特性と接合部の性能

### (1) 適用範囲

本章は、木杭として使用する木材（丸太、円柱材、製材）の設計用強度を規定する。

木杭として使用する間伐材（木材）は、その形状から丸太、円柱材、製材に分けられる。各材料の具体的形状及び特徴は以下のとおりである。

#### (a) 丸太

林木を伐採し、玉切りされたままの原木。したがって、両木口面の直径に違いがあり、その違いは丸太の長さや林木の成長速度等（特に、伸長成長）によって異なる。なお、構造物の部材として使用される場合には、一般に施工後の腐朽や虫害を防ぐため、リングバーカ等で剥皮された状態で用いられる。



図 -1.4.1 丸太の形状

#### (b) 円柱材

丸太をロータリー加工等して円柱の形状に仕上げた材料。したがって、木口の形状が正円であり、その直径が長さ方向で一定である。構造用製材の日本農林規格では「円柱類」として位置づけされており、スギ、ヒノキ、カラマツの強度は国土交通省告示において製材の各等級の強度と同等に取り扱われている。



図 -1.4.2 円柱材の形状

#### (c) 製材

丸太を製材加工して直方体の形状に仕上げられた材料。



図 -1.4.3 製材の形状

### (2) 木材の品質と強度

木材は林木から得られる生物材料であり、他の工業材料に比べて強度のバラツキをもつため、木杭としての要求性能を満足する品質のものを選定しなければならない。ただし、地盤の密度を上げる等によって液状化を防ぐなど、木杭に構造的な要求を必要としない場合はこの限りではない。

木材の品質は林木の生まれ持った特性や成長した環境条件がそのまま反映され、構造的利用を目的とした要求性能である強度に対して影響を与えることになる。例えば、樹種間ではもとより、同一樹種内においても、品種・クローンの違い（遺伝要因）、林木の育った環境や育て方の違い（環境要因）、さらに樹幹内での採材部位の違いによっても強度は異なってくる。また、木材の強度は、林木の成長過程で発生した節や繊維傾斜などの局所的な欠点に大きく影響を受ける。その結果、木材の強度に大きなバラツキを生じさせることになる。

そこで、構造用製材の強度のバラツキを抑える強度等級区分法として、日本農林規格では製材の強度を低減させる節や繊維傾斜等の欠点を外観から評価する目視等級区分法、および非破壊的に測定されるヤング係数によって仕分ける機械等級区分法が採用されている。なお、本規格では、前節のとおり、円柱材も構造用製材と同様の取り扱いができることになっている。

木杭についても、要求性能に応じて品質・強度は選択されるべきである。しかし、一般的に杭として使用される丸太は経済性や要求される強度の点から選別することなく利用されることが想定される。また、液状化対策としての木杭の打設は、a) 地盤密度を上げること、b) 水平応力を増加させ地盤の拘束力を上げること、c) 地盤に比べ相対的にせん断剛性が大きい丸太を地盤中に入れることで地盤全体として剛性を上げること、d) 丸太の鉛直支持力効果により上載荷重を支えることがある。c)、d) が強度的に要求されるのに対し、a)、b) は木杭の強度や剛性に対する要求は少なく、体積の確保が主目的である。したがって、本項の設計強度は、木杭の強度的に要求される場合のみ適用する。

### (3) 木材の設計強度

#### (a) 木杭の使用条件

木材は、その中に含まれる水分状態（含水率）によって強度が変化する特性をもつ。また、木杭の木材は地中内で常時湿潤条件下の状態で使用される場合が想定されるため、木材の設計用強度は生材状態の値として設定されるべきである。

木材が乾燥される、つまり含水率が低下するときは、まず細胞内部の空洞中の水分が抜け、この水分がなくなった後、細胞壁内の水分が抜けるという過程を示す。細胞壁内は水分で満たされているが、細胞内部の空洞には水分が存在しない状態の含水率を「繊維飽和点」といい、樹種によらず 28 ～ 30% 程度である。

木材の強度は、繊維飽和点以上の含水率では一定の値をとるが、繊維飽和点未満では、含水率が低下するにしたがってほぼ直線的に増加する。無欠点小試験体で得られた報告によると、含水率 1 % あたりの変化率は曲げ強度で 4 %、曲げヤング係数で 2 %、縦圧縮強度で 6 % とされている。しかし、近年、欠点をもった製材ではこれらと異なる結果が得られており、スギの製材についての報告例では、表 -1.4.1 に示したように、含水率 1 % あたりの曲げヤング係数や曲げ強度の変化率は無欠点小試験体の変化率のおおよそ 1/2 程度の結果が得られている。また、曲げ強度の変化率は、平角のように断面寸法が大きくなるとさらに小さくなっている。その他、スギ、カラマツ製材の縦引張り強度について、生材から気乾材に移行してもほとんど増加しないという報告もある。

表 -1.4.1 スギ製材の含水率 1% あたりの各強度の変化率

|       | スギ厚板<br>断面寸法 (mm)<br>35 × 200 | スギ正角<br>断面寸法 (mm)<br>105 × 105 | スギ平角<br>断面寸法 (mm)<br>120 × 240 |
|-------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 曲げ強度  | 1.85                          | 1.98                           | 0.77                           |
| 縦圧縮強度 | 5.77                          | 3.78                           | —                              |
| ヤング係数 | 0.95                          | 0.90                           | 1.06                           |

本プロジェクトで得られたスギ・カラマツ丸太の曲げ強度及び縦圧縮強度を含水率状態（生材、気乾材）で比較したグラフを図-1.4.4、図-1.4.5に示した。また、同様にスギ製材（断面寸法：105mm×105mm）によって得られた既存データから作成したグラフを図-1.4.6に示した。丸太の場合、製材に比べて曲げ強度の含水率による違いが小さいことが明らかであり、スギ丸太の気乾材（含水率15%換算）時の強度値を基準としたとき、スギ丸太の生材の強度低減率を算出すると、曲げヤング係数の平均値が約10%、曲げ強度の下限值（信頼水準75%における95%下側許容限界値、以下同様）が約0%、縦圧縮強度の下限值が28.5%となった。木造建築物を設計する際、常時湿潤状態の部材の強度は建築基準法施行令89条によって30%、弾性係数は木質構造設計規準・同解説によって15%低減することが規定されているが、丸太を常時湿潤状態で使用する場合、曲げ強度について含水率調整係数によって低減する必要はないと言える。

なお、丸太や円柱材の強度測定法については、日本農林規格や日本工業規格で定められていないため、今回の研究ではISOの試験法を参考に丸太および円柱材の強度試験を実施した。今後、丸太等の強度試験を実施する際の参考となるよう、巻末の付録に「丸太および円柱材の曲げ試験方法（案）」としてその試験法を記した。

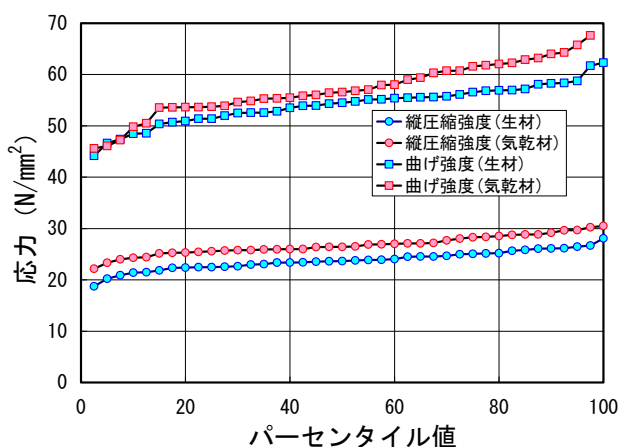


図-1.4.4 スギ丸太の曲げ・縦圧縮強度の含水率状態による比較

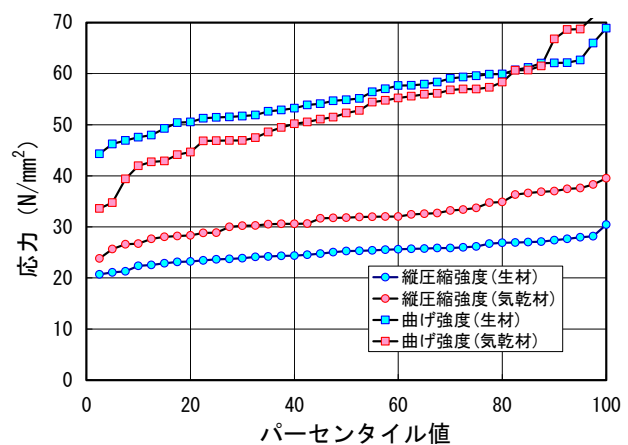


図-1.4.5 カラマツ丸太の曲げ・縦圧縮強度の含水率状態による比較

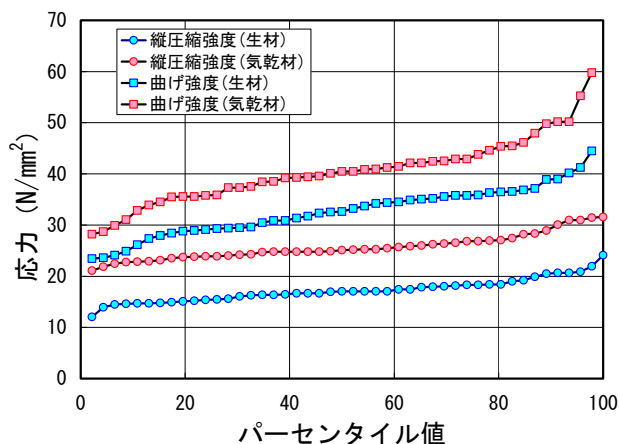


図-1.4.6 スギ製材の曲げ・縦圧縮強度の含水率状態による比較

(b) 木杭としての設計用強度（案）

木杭として木材を用いる際、それぞれの樹種・形状に対応した設計用の強度によって設計しなければならない。

建築物の許容応力度設計の際に使用される木材の強度（許容応力度）は、建築基準法施行令 89 条にしたがって算出される。すなわち、国土交通省が定める告示に示された基準強度に安全係数、荷重継続時間影響係数などを乗じることによって算出され、一般には長期許容応力度は基準強度に 1.1/3 を短期許容応力度は 2/3 を乗じることによって算出される。なお、基準強度は日本農林規格の等級ごと及びそれ以外の製品（無等級材）に与えられている。また、構造部材の変形や座屈強度等の計算に用いられる弾性係数は、建築基準法上の告示では示されていないため、通常、「木質構造設計規準・同解説（日本建築学会）」の設計資料にある普通構造材の基準弾性係数が用いられる。なお、前述した無等級材と普通構造材では各樹種群に割り当てられている樹種が若干異なるが、ここでは、普通構造材の樹種群にしたがって、針葉樹材の基準強度及び基準弾性係数を表 -1.4.2 に示した。

表 -1.4.2 普通構造材の基準強度

| 樹種          |                                                | 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |         |             | 基準弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-------------|------------------------------------------------|---------------------------|---------|-------------|---------------------------------|
|             |                                                | Fc (圧縮)                   | Fb (曲げ) | Fs<br>(せん断) |                                 |
| 針<br>葉<br>樹 | べいまつ,<br>ダフリカからまつ                              | 22.2                      | 28.2    | 2.4         | 10.0                            |
|             | ひば, ひのき, べいひ                                   | 20.7                      | 26.7    | 2.1         | 9.0                             |
|             | あかまつ, くろまつ,<br>からまつ, つが,<br>べいつが               | 19.2                      | 25.2    | 2.1         | 8.0                             |
|             | もみ, えぞまつ,<br>とどまつ, べにまつ,<br>すぎ, べいすぎ,<br>スプルース | 17.7                      | 22.2    | 1.8         | 7.0                             |

ただし、木杭として使用される木材は、主として製材以外の形状の材料、すなわち丸太や円柱材の形状で使用する。また、地中内での地下水の水位にもよるが、常時湿潤（生材）状態が望ましい。丸太は製材に比べて目切れがないため、製材よりも高い強度が得られると考えられ、既存の報告では丸太の強度分布の下限值は製材のそれに対して約 1.2 倍という結果が得られている。また、円柱材は丸太に比べて目切れは発生するものの、既存データから製材以上の強度が得られている。さらに、(3)(a) に示したように、丸太の場合、気乾材を基準としたとき、生材状態の強度の低下率は製材のそれと比較して小さい。

したがって、本指針では普通構造材の強度に基づいて木杭として使用される木材の長期許容応力度を以下の方法で算出し、表 -1.4.3 のとおりに設定する。なお、短期許容応力度は長期許容応力度の 2/1.1 倍とする。

$$f = F \times 2/3 \times 1.1/2 \times 0.7$$

$$E = E0 \times 0.85$$

ここで、 $f$ ：許容応力度、 $F$ ：基準強度、 $2/3$ ：安全係数、 $1.1/2$ ：荷重継続期間影響係数、  
 $0.7$ ：強度に関わる含水率影響係数 (丸太の曲げの場合は不要)、  
 $0.85$ ：弾性係数に関わる含水率影響係数、 $E$ ：設計用弾性係数、 $E0$  基準弾性係数

表 -1.4.3 木杭として使用される木材の許容応力度 (案)

| 樹種  |                                       | 長期許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) |                     |                      | 設計用弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|
|     |                                       | F <sub>c</sub> (圧縮)          | F <sub>b</sub> (曲げ) | F <sub>s</sub> (せん断) |                               |
| 針葉樹 | べいまつ, ダフリカからまつ                        | 5.7                          | 7.2 [10.3]          | 0.6                  | 8.5                           |
|     | ひば, ひのき, べいひ                          | 5.3                          | 6.9 [9.8]           | 0.5                  | 7.7                           |
|     | あかまつ, くろまつ, からまつ, つが, べいつが            | 4.9                          | 6.5 [9.2]           | 0.5                  | 6.8                           |
|     | もみ, えぞまつ, とどまつ, べにまつ, すぎ, べいすぎ, スプルース | 4.5                          | 5.7 [8.1]           | 0.5                  | 6.0                           |

※括弧内数値は木杭の形状が丸太の場合のみに適用する。  
 ※短期許容応力度は長期許容応力度 2/1.1 倍とする。

#### (4) 接合部の仕様

丸太等の木材を地盤補強に用いる際、木材を縦継ぎする場合は、地盤の性状を考慮し、目的とする地盤の補強方法に適合し、かつ、施工上の安全を確保できるような施工方法（接合部仕様）を選定しなければならない。

継手の加工（施工）においては、接合部材と木材との間、および、木材相互間にギャップが生じないように極力努めること。

地盤補強に使用する木材同士をつなぐための接合部の仕様は、打ち込む地盤の状態、材料の入手容易性等が現場によって異なることから種々のものが考えられ、標準的な仕様は存在しない。

ここでは、木杭における接合部の仕様として現場での作業性と材料の入手容易性の観点から選択した例を3種類紹介する（図-1.4.7）。なお、下記に示した仕様による継手試験体の曲げ載荷試験の結果を用いて後述の耐力および剛性の評価を行った。

##### 丸太

スギ生材：直径約 200mm，長さ 2000mm

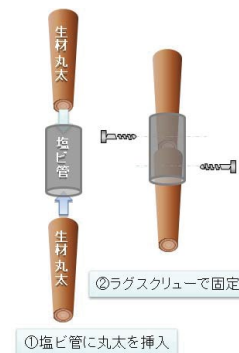
カラマツ生材：寸法は同上。

##### ジョイント材

硬質塩ビ管：VU，呼び径 200mm，最小肉厚 6.5mm，長さ 400mm，800mm

##### 接合具

ラグスクリュー：直径 12mm，長さ 75mm，50mm，片側 4 本，8 本打ち



施工例 1：塩ビ管をカップラーとするタイプ

##### 丸太

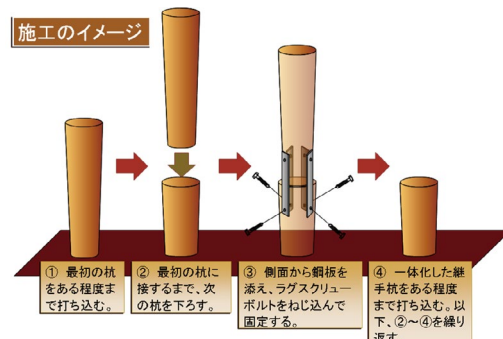
カラマツ気乾材：直径約 200mm，長さ 2000mm

##### ジョイント材

鋼板：長さ 400mm，800mm，幅 50mm，厚さ 3mm，6mm

##### 接合具

ラグスクリュー：直径 12mm，長さ 75mm，片側 4 本，8 本打ち



施工例 2：鋼板添え板タイプ

##### 丸太

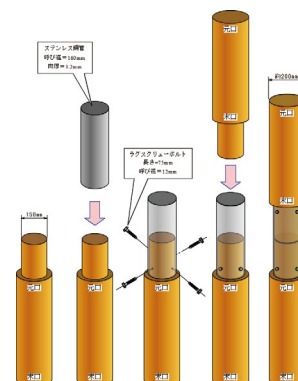
カラマツ気乾材：直径約 200mm，長さ 2000mm

##### ジョイント材

ステンレス鋼管：長さ 400mm，800mm，呼び径 160mm，肉厚 3.2mm

##### 接合具

ラグスクリュー：直径 12mm，長さ 75mm，片側 3 本，4 本，6 本，8 本打ち



施工例 3：鋼管タイプ

図-1.4.7 接合間伐杭の施工例

## (5) 継手の強度的性能

継手の設計においては、実際に施工する仕様に対する継手（接合部）の降伏耐力と剛性とを求め、対象とする地盤の改良方法及び目標とする性能に合致するように照査しなければならない。

### (a) 降伏耐力

継手の降伏耐力は、原則として、実際の施工の仕様と同じ試験体を用いて曲げおよび引張試験を行って求める。

木材同士をつなぐための接合部の仕様は、打ち込む地盤の状態、材料の入手容易性等が現場によって異なることから種々のものが考えられ、標準的な仕様は存在しない。従って、実際の打ち込みに用いる仕様で試験体を作成し、加力試験を行って降伏耐力を確認することが最善の方法である。試験方法も、設計条件に応じて選定することが望ましい。

しかしながら、継手の曲げや引張試験を行うことは実際には費用および工期との面から困難であることが多い。ここでは、継手を有する丸太杭に対する降伏耐力の参考値を求める方法を下記に示す。

地中に打ち込まれた継手に作用する外力として、圧縮、曲げ、および、引張を設定する。

圧縮については、丸太同士の初期のギャップは無視し、終局状態では丸太木口同士の面接触により伝達されると仮定し、使用する丸太の樹種に対する縦圧縮許容応力度を接合部の圧縮に対する設計値とする。

引張については、単体の接合具と木材との関係に着目すれば純粋なせん断力となるため、木質構造設計規準・同解説（以下、規準）<sup>1)</sup>における曲げ降伏型接合具を用いた接合部の単位接合部に対する降伏せん断耐力を下式より求める。なお、複数の接合具で構成される接合部を用いる場合は、上記規準における接合具の配置を遵守し、また、破壊モードも考慮した接合部全体での耐力評価を行う必要がある。

$$\sigma_y = C \times F_e$$

$$\text{ここに、}\sigma_y: \text{降伏せん断応力、} C = \min \left\{ 1, \sqrt{2 + 2/3 \times \gamma (d/l)^2} - 1, d/l \sqrt{2/3 \gamma} \right\}$$

$\gamma$ : 接合具の基準材料強度と丸太の基準支圧強度との比、 $d$ : 接合具直径、 $l$ : 接合具長さ

曲げについては、丸太の中心に対して対称位置にある接合部のペアによる偶力の総和と外力のモーメントが釣り合うとして降伏耐力を計算する。すなわち、上記施工例 1 の塩ビ管を用いた継手については接合部の形式を木材側材 1 面せん断、施工例 2 および 3 の鋼板添え板および鋼管タイプについては何れも鋼板添え板 1 面せん断型として接合部の降伏耐力を求め、この値と丸太の直径より偶力を求める。この方法によって求めた継手を有する丸太杭の降伏モーメント計算値と実験によって得られた継手を有する丸太杭の最大モーメントとの関係を図 -1.4.8 に示す。鋼板および鋼管タイプについては、計算値は安全側の評価となっており、上記の計算方法は参考値を求めるものとして有効である。



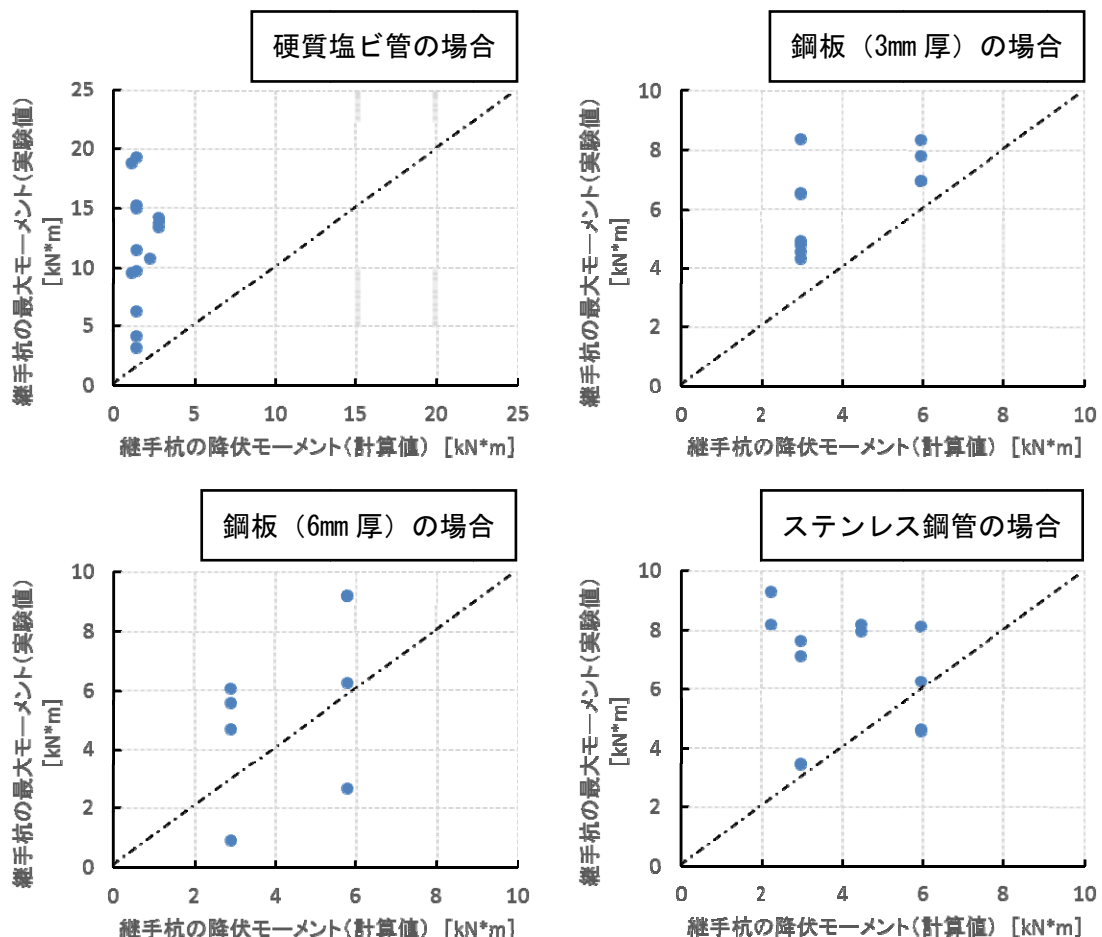


図 -1.4.8 実験によって得られた継手を有する杭の最大モーメントと計算値との比較

塩ビ管タイプについては、計算値は実験値に対して過小評価となった。これは、丸太が塩ビ管の内壁に押しつけられ、塩ビ管が局部的に伸びることによって最大モーメントが発現しているためであるが、経年変化による塩ビ管の劣化による脆性破壊も想定する必要があることから、塩ビ管を用いるタイプについても、同じ計算方法で曲げに対する降伏耐力の参考値は求められるものとする。

## (b) 剛性

木材をつないだ継手の剛性についても、前項と同様、実際の施工の仕様と同じ試験体を用いて曲げおよび引張試験を行って求めることが望ましい。

上述した (a) と同様に、木材同士をつなぐための接合部の仕様は、打ち込む地盤の状態、材料の入手容易性等が現場によって異なるため、継手についても実際の打ち込みに用いる仕様で試験体を作成し、加力試験を行って降伏耐力を確認することが最善の方法である。

しかしながら、継手の曲げや引張試験を行うことは実際には費用および工期との面から困難であることが多い。そこで、剛性についても、計算値によって参考値を求める方法を下記に示す。

前項および前々項で示した丸太の継手試験体の加力試験により種々の仕様に対する曲げ応力（引張側の最大応力）とたわみ角との関係を得、その直線域の勾配を剛性とした。剛性の計算に用いる直線の範囲は、原則としてたわみ角  $0.01\text{rad} \sim 0.03\text{rad}$  の範囲であったが、初期すべりが見られた一部の試験体については、 $0.03\text{rad} \sim 0.05\text{rad}$  の範囲を直線域とした。

実験によって得られた剛性について、ジョイント材の長さ、接合具本数、接合具の長さを従属変数とし、得られた剛性を目的変数とする最適なモデル式をジョイント材の種別毎に重回帰分析によって求めた。結果を表-1.4.4に示す。

なお、接合具長さについては、従属変数として有意ではなかった。また、寄与率の値からも明らかのように、本実験式の適合性はあまり高くない。従って、この式から求められる剛性の計算値（推定値）はあくまでも設計の際の参考値として用いるべきである。

表-1.4.4 丸太を用いた継手接合部の剛性に対する重回帰分析の結果

| ジョイント種別  | 偏回帰係数<br>(ジョイント材長さ) | 偏回帰係数<br>(接合具本数・両側) | 定数    | 寄与率   |
|----------|---------------------|---------------------|-------|-------|
| 硬質塩ビ管    | 0.391               | 42.0                | -215  | 0.448 |
| 鋼板 (3mm) | 0.426               | 59.3                | -263  | 0.710 |
| 鋼板 (6mm) | 0                   | 70.2                | -15.1 | 0.327 |
| 鋼管       | 0.277               | 0                   | -44.0 | 0.920 |

剛性の参考値を求めるための実験式は下記の通りである。

硬質塩ビ管の場合

$$(\text{剛性}) = 0.39 \times (\text{側材長さ}) + 42 \times (\text{打ち込み本数}) - 220$$

鋼板 (3mm 厚) の場合

$$(\text{剛性}) = 0.43 \times (\text{側材長さ}) + 59 \times (\text{打ち込み本数}) - 260$$

鋼板 (6mm 厚) の場合

$$(\text{剛性}) = 0.00 \times (\text{側材長さ}) + 70 \times (\text{打ち込み本数}) - 15$$

ステンレス鋼管の場合

$$(\text{剛性}) = 0.28 \times (\text{側材長さ}) + 0.00 \times (\text{打ち込み本数}) - 44$$

## (6) 参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法— (2006)
- 2) 日本建築学会：木質構造限界状態設計指針（案）・同解説 (2003)
- 3) 日本建築学会：木質構造基礎理論 (2010)
- 4) 製材の日本農林規格 (JAS)
- 5) 強度性能研究会：「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集 <7> (2005)
- 6) 中井孝：スギ丸太・たいこ材の実大曲げ強度性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，167-168 (1990)
- 7) 中井孝，長尾博文，田中俊成：スギ中目材丸太・たいこ材の実大曲げ強度性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，909-910 (1993)
- 8) 長尾博文：構造材の含水率と強度性能：木材工業，51(11):505-507 (1996)

## 1.5 間伐材の保存処理（防腐・防蟻処理）

### (1) 一般

本章では、木材を地中で使用する際の耐久性を確保するための基本的な考え方を示す。

- a) 木材は原則として常水面下で使用する。
- b) 木材を常水面上で使用する場合は、防腐・防蟻処理をした木材を使用しなければならない。

木材を腐食させる木材腐朽菌やシロアリは酸素が不足する常水面下では生育できないため、常水面下で使用する限り打設した木材は数十年以上にわたり使用可能であることが、過去の事例調査や木杭基礎で建てられた建築物等の現況調査から認められている。

木杭基礎によって支えられている工作物には以下の例があり、いずれも現在まで使用が継続されている<sup>1)</sup>。



新潟駅 1958 年



写真 -1.5.1 木杭基礎によって支えられている工作物の例  
宮崎県庁舎 1932 年



多摩川大橋 1939 年

また、以下に示す打設後数十年を経て掘り出された木材を調査した結果は、打設後数十年にわたり木材がほぼ健全な状態を保っていたことを示している。

- ・東京駅<sup>2)</sup>    ・旧名古屋駅<sup>3)</sup>    ・旧丸ビル<sup>4)</sup>
- ・学士会館<sup>5)</sup>    ・幸橋<sup>6)</sup>

このように木材を常水面下で使用する場合は腐朽や蟻害のおそれがなく、一方常水面上であっても必ず腐朽や蟻害が生じる訳ではない。しかし、特に常水面上では腐朽や蟻害が発生するおそれがあり、それに伴い木材の強度低下が引き起こされることから、木材を打設する地点の状況に応じ、保存処理を施す必要がある。また、ここでは紹介しないが、木材頂部が常水面下となるよう常水面以浅の部分をコンクリート等他材料で置き換えても良い。



写真 -1.5.2 学士会館地下より掘り出された木杭（1928 年竣工）

## (2) 地中常水面上での防腐・防蟻対策

常水面上で間伐材を使用する場合の品質は製材の日本農林規格の性能区分 K4 相当以上の防腐・防蟻処理を基本とする。

地盤補強や木杭基礎として用いる間伐材には上部構造を越える耐用年数が要求されるため、長期間防腐・防蟻性能を発揮できる処理が必要となる。また、場合によっては多量の木材を打設する必要があるため、安全性が確認された薬剤で処理された木材を使用する必要がある。

このような条件を満たす木材には製材の日本農林規格（JAS）の性能区分 K4 で処理された保存処理木材<sup>7)</sup>があり、その品質は表 -1.5.1、表 -1.5.2 及び図 -1.5.1 の通りである。また、より長期間にわたる耐久性が要求される箇所については JAS の性能区分 K5 で処理された保存処理木材（表 -1.5.3、表 -1.5.4）を使用するのが望ましい。

なお、K4 と K5 の違いは、木材表層に含まれる木材保存剤の濃度が K5 では K4 の 2 倍となることと、耐久性が高い樹種（耐久性 D<sub>1</sub> の樹種）の心材であっても材面から 20mm 以上（細い材では 15mm 以上）まで薬剤が浸潤していることが要求されることである。

表 -1.5.1 性能区分 K4 の品質を満足する吸収量の基準

| 種類                     | 吸収量 (kg/m <sup>3</sup> )                                                                                                                                    | 略号                             |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 第四級アンモニウム化合物系          | DDAC として 9.0kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                                                                            | AAC                            |
| 第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド系 | 第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド系として 5.0kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                                                           | SAAC                           |
| ほう素・第四級アンモニウム化合物系      | ほう素・第四級アンモニウム化合物系として 6.4kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                                                                | BAAC                           |
| 銅・第四級アンモニウム化合物系        | 銅・アルキルアンモニウム化合物として 5.2kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                                                                  | <b>ACQ</b>                     |
| 銅・アゾール化合物系             | 銅・シプロコナゾール化合物として 2.0kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                                                                    | <b>CUAZ</b>                    |
| アゾール・ネオニコチノイド化合物系      | アゾール・ネオニコチノイド化合物として 0.3kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                                                                 | AZN                            |
| 脂肪酸金属塩系                | 銅を主剤としたものにあつては、銅として 1.5kg/m <sup>3</sup> 以上<br>亜鉛を主剤としたものにあつては、亜鉛として 4.0kg/m <sup>3</sup> 以上<br>亜鉛およびペルメトリンを主剤としたものにあつては、これらの化合物として 5.0kg/m <sup>3</sup> 以上 | <b>NCU-E</b><br>NZN-E<br>VZN-E |
| ナフテン酸金属塩系              | 銅を主剤としたものにあつては、銅として 1.2kg/m <sup>3</sup> 以上<br>亜鉛を主剤としたものにあつては、亜鉛として 3.2kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                | <b>NCU-O</b><br>NZN-O          |
| クレオソート油                | クレオソート油として 80kg/m <sup>3</sup> 以上                                                                                                                           | <b>A</b>                       |

※ 1 太字は基礎杭の保存処理に適していると考えられる木材保存剤

※ 2 NCU-E, NZN-E, NCU-O, NZN-O, A については特有の強い臭気があるため、使用に際しては十分注意すること。

表 -1.5.2 性能区分 K4 の品質を満足する浸潤度の基準

| 樹種区分                   | 樹種名                                                                                                                        | 浸潤度の基準                                               |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 耐久性 D <sub>1</sub> の樹種 | ヒノキ, ヒバ, スギ, カラマツ, ベイヒ, ベイスギ, ベイヒバ, ベイマツ, ダフリカカラマツ, サイプレスパイン, ケヤキ, クリ, クヌギ, ミズナラ, カプール, セランガンバツ, アピトン, ケンパス, ボンゴシ, イペ, ジャラ | 辺材部の浸潤度が 80%以上で, かつ, 材面から深さ 10mm までの心材部分の浸潤度が 80%以上  |
| 耐久性 D <sub>2</sub> の樹種 | アカマツ, クロマツ, エゾマツ, トドマツ, ベイツガ, ラジアタパイン, スプルー等, 上記耐久性 D <sub>1</sub> の樹種以外の全ての樹種。                                            | 辺材部分の浸潤度が 80%以上で, かつ, 材面から深さ 20mm までの心材部分の浸潤度が 80%以上 |

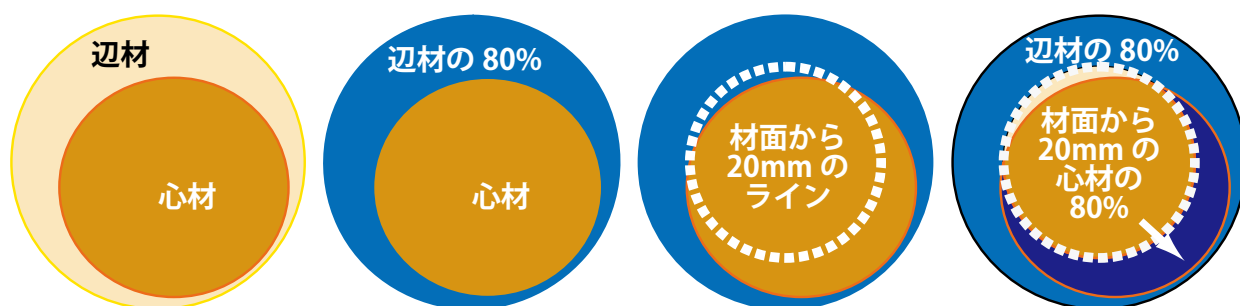


図 -1.5.1 性能区分 K4 の浸潤度の考え方（耐久性 D<sub>2</sub> の樹種の例）  
 辺材の 80% と材面から 20mm の範囲にある心材の 80% に薬剤が浸潤している必要がある。

表 -1.5.3 性能区分 K5 の品質を満足する吸収量の基準

| 種類              | 吸収量 (kg/m <sup>3</sup> )                     | 略号           |
|-----------------|----------------------------------------------|--------------|
| 銅・第四級アンモニウム化合物系 | 銅・アルキルアンモニウム化合物として 10.5kg/m <sup>3</sup> 以上  | <b>ACQ</b>   |
| 脂肪酸金属塩系         | 銅を主剤としたものにあつては, 銅として 2.3kg/m <sup>3</sup> 以上 | <b>NCU-E</b> |
| ナフテン酸金属塩系       | 銅を主剤としたものにあつては, 銅として 1.8kg/m <sup>3</sup> 以上 | <b>NCU-O</b> |
| クレオソート油         | クレオソート油として 170kg/m <sup>3</sup> 以上           | <b>A</b>     |

※ NCU-E, NCU-O, A は特有の強い臭気があるため, 使用に際しては十分注意すること。

表 -1.5.4 性能区分 K5 の品質を満足する浸潤度の基準

| 樹種区分                                    | 樹種名   | 浸潤度の基準                                                                                 |
|-----------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 耐久性 D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> の樹種 | 全ての樹種 | 辺材部分の浸潤度が 80% 以上で, かつ, 材面から深さ 15mm (木口の短辺が 90mm を超える製材にあつては, 20mm) までの心材部分の浸潤度が 80% 以上 |

日本農林規格の性能区分 K4 に準ずるものとして、財団法人 日本住宅・木材技術センターの優良木質建材等認証（AQ 認証）がある（表 -1.5.5、表 -1.5.6）<sup>8)</sup>。AQ 認証には JAS の K5 に相当する基準が無い場合、木杭として使用する場合は最低でも AQ 認証が規定する認証対象品目の内、屋外製品部材（B-3）の品質性能評価基準を満足する保存処理木材を用いるのが望ましい。また、写真 -1.5.3 にあるような、ボルト穴などの加工を施した後に保存処理された材料については、JAS で取り扱っていないことから、先端や頂部を加工する必要のある木杭については、AQ 認証材を用いるのが望ましい。

表 -1.5.5 性能区分 K4 に相当する AQ 認証材の品質（認証区分 1 種）

| 種類                             |           | AQ 表示         | 分析成分                             | 吸収量 (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|-----------|---------------|----------------------------------|--------------------------|
|                                |           |               |                                  | 認証区分 1 種                 |
| 第四級アンモニウム化合物系                  |           | AAC-1         | DDAC として                         | 9.0 以上                   |
|                                |           | AAC-2         | DMPAP として                        | 9.0 以上                   |
| 銅・第四級アンモニウム化合物系                |           | <b>ACQ</b>    | 酸化第二銅・BKC として                    | 5.2 以上                   |
| 銅・アゾール化合物系                     |           | CUAZ-1        | 酸化第二銅・ほう酸・<br>テブコナゾールとして         | 5.2 以上                   |
|                                |           | <b>CUAZ-2</b> | 酸化第二銅・<br>シプロコナゾールとして            | 2.0 以上                   |
|                                |           | <b>CUAZ-3</b> | 酸化第二銅・<br>シプロコナゾールとして            | 2.0 以上                   |
| ほう素・第四級アンモニウム化合物系              |           | BAAC          | DDAC・ほう酸として                      | 6.4 以上                   |
| 第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド化合物系      |           | SAAC          | DMPAP・シラフルオフエンとして                | 5.0 以上                   |
| アゾール・第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド化合物系 |           | AZAAC         | DMPAP・エトフェンブロックス・<br>シプロコナゾールとして | 5.0 以上                   |
| アゾール・第四級アンモニウム・ネオニコチノイド化合物系    |           | AZNA          | DDAC・テブコナゾール・<br>イミダクロプリドとして     | 4.8 以上                   |
| アゾール・非エステルピレスロイド化合物系           |           | AZE-2         | F-69 として                         | 0.24 以上                  |
|                                |           |               | エトフェンブロックスとして                    | 0.12 以上                  |
| 脂肪酸<br>金属塩系                    | ナフテン酸銅    | <b>NCU-E</b>  | 銅として                             | 1.5 以上                   |
|                                | ナフテン酸亜鉛   | NZN-E         | 亜鉛として                            | 4.0 以上                   |
|                                | バーサチック酸亜鉛 | VZN-E         | 亜鉛・ペルメトリンとして                     | 5.2 以上                   |
| ナフテン酸<br>金属塩系                  | ナフテン酸亜鉛   | NZN-O         | 亜鉛として                            | 3.2 以上                   |
| アゾール・ネオニコチノイド化合物系              |           | AZN           | シプロコナゾール・<br>イミダクロプリドとして         | 0.30 以上                  |
| アゾール・ピレスロイド化合物系                |           | AZBI          | ヘキサコナゾールとして                      | 0.22 以上                  |
|                                |           |               | ビフェントリンとして                       | 0.04 以上                  |
| プロパタンホス・アゾール化合物系               |           | AZP           | シプロコナゾール・<br>プロパタンホスとして          | 0.30 以上                  |
| リグニン・銅・ほう素化合物系                 |           | LCB           | 酸化第二銅・ほう酸として                     | 6.0 以上                   |
| クレオソート油                        |           | <b>A</b>      | クレオソートとして                        | 80 以上                    |

※ 1 太字は基礎杭の保存処理に適していると考えられる木材保存剤

※ 2 NCU-E, NZN-E, NZN-O, A については特有の強い臭気があるため、使用に際しては十分注意すること。



表 -1.5.6 AQ 認証材（1 種）の樹種区分と浸潤度の基準

| 区分              | 樹種                                                                                            | 浸潤度                                                |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 心材の耐久性が<br>大のもの | ヒノキ, ヒバ, ケヤキ, クリ, ベイヒ, ベイスギ,<br>ベイヒバ, レッドウッド, バンキライ, バラウ,<br>カプール, セランガンバツ                    | 辺材部分の 80%以上とする                                     |
| 心材の耐久性が<br>中のもの | スギ, カラマツ, クヌギ, ミズナラ, ベイマツ,<br>ダフリカカラマツ, ライトレッドメランチ,<br>イエローメランチ, クルイン, ケンパス                   | 辺材部分の 80%以上及び表面から<br>10mm 以内に存在する心材部分の<br>80%以上とする |
| 心材の耐久性が<br>小のもの | アカマツ, クロマツ, トドマツ, エゾマツ, ベイモミ,<br>ベイツガ, ラジアタパイン, スプルース,<br>ターミナリア, レッドラワン, アルストニア,<br>プライ, ラミン | 表面から 30mm 部分の 80%以上                                |



写真 -1.5.3 ボルト穴などへの加工を施した後に加圧式保存処理で薬剤を注入した例



### (3) 保存処理の方法

- a) 保存処理は、JAS 認定工場あるいは AQ 取得工場において、加圧式保存処理によって処理することを原則とする。
- b) 特に環境負荷を低減する必要がある地域に用いる場合の防腐・防蟻処理には、部分深浸潤処理または自然給水処理がある。
- c) 上記いずれの場合についても、適正な抜き取り検査等をおこない、品質が適切に維持されていることを常に確認する。

木杭の保存処理は常水面上の部分が、日本農林規格または AQ 認証の品質基準を満足する品質となる製造方法でおこなう必要がある。これらの品質を満たす製造方法の例として、加圧式保存処理、深浸潤処理、自然給水処理がある。

#### (a) 加圧式保存処理

加圧式保存処理は、処理する木材を薬剤を充満した加圧容器に浸し、圧力をかけながら木材保存剤を木材内部まで浸透させる処理法<sup>9)</sup>であり、保存処理 JAS 製材や AQ 認証材など通常の保存処理木材はこの方法で製造されている。

加圧式保存処理の工程は、木材の周囲や木材内部にある空気を吸い出す前排気工程、圧力をかけながら木材内部まで薬液を押し込む加圧工程、過剰に入った薬液を回収する後排気工程からなる（図-1.5.2）。

この処理では、処理に先立ち木材内部に含まれる空気を吸い出した後薬液を木材表面から圧力をかけながら注入するため、表面に薬剤を塗布した場合や木材を薬液に浸漬した場合と比べて、はるかに多くの薬剤を木材内部まで浸透させることが可能となる。その結果、木材表面から所定範囲の深さまで薬剤が確実に注入された処理木材を製造することができる（写真-1.5.4）。また、使用可能な木材保存剤の種類も限定されない。

なお、加圧式保存処理により防腐・防蟻処理をおこなう場合でも、次で説明するインサイジング処理を施すことにより、より確実な処理が期待できる。

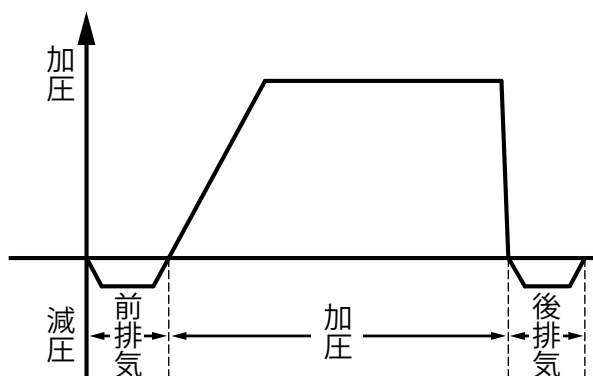


図-1.5.2 加圧式保存処理の圧力スケジュール

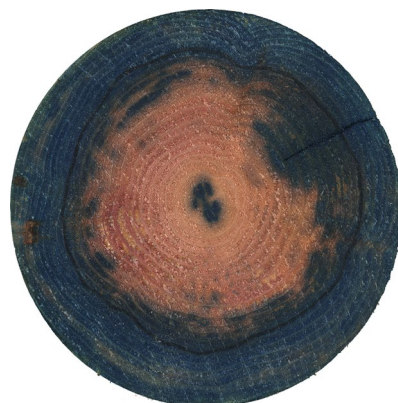


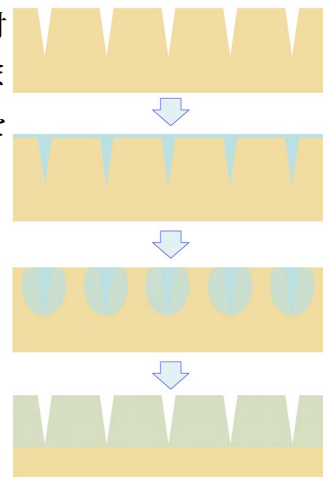
写真-1.5.4 加圧式保存処理で薬剤を注入した円柱材の切断面  
（青い部分が薬剤の浸潤箇所）

## (b) 部分深浸潤処理

深浸潤処理は、予め処理する木材にインサイジングと呼ばれる傷を付けた後、浸透性の良い薬剤を付着させ、それを空気圧により木材内部まで浸透させる処理法である<sup>10)</sup>。処理が必要な部分にのみ木材保存剤を付着させることで、任意の部分にのみ部分保存処理を施すことが可能となる。図-1.5.3に部分深浸潤処理のスキームを、写真-1.5.5に傷をつけた後の木材表面の例を示す。

- 0: 繊維飽和点（約 28%）以下まで乾燥させる
- 1: インサイジングにより表面に傷を付ける
- 2: 木材表面とインサイジング痕に薬剤を付ける
- 3: 薬剤が木材に染み込む
- 4: 空気圧により、薬剤を木材中に押しこむ
- 5: しばらく放置し、薬剤が広がるのを待つ

図-1.5.3 部分深浸潤処理のスキーム



部分深浸潤処理の効果を示す典型的な例を写真-1.5.6に示す。この実験では、円柱材の下端から 50cm までの部分を薬液に 2 分間浸漬した後円柱材を薬液から抜き出した。その後密閉容器に円柱材を移し、空気圧をかけながら薬液を木材に押し込む方法で、部分深浸潤処理を施した。次いで処理木材を下端から 2cm, 25cm, 50cm, 75cm の部分で切断し、薬剤の浸潤した範囲を呈色試薬を用いて確認した。写真から部分浸漬処理により薬剤を付着させた部分（端から 50cm まで）は適切な範囲に薬剤が浸潤していること、薬剤を付着させなかった端から 75cm の部分には薬剤がほとんど浸潤していないことが確認できる。

部分深浸潤処理は、上の写真が示すように必要な部分にのみ薬剤を注入できる方法であるが、処理前に木材を十分乾燥させる必要があることや、使用可能な薬剤が油性木材保存剤や油溶性木材保存剤（防腐・防蟻剤を溶剤に溶かして使用する木材保存剤）に限定される欠点がある。また、JAS や AQ 認証で規定された方法でないことを熟知しておくことが必要である。



写真-1.5.5 インサイジングによって表面を刺傷した円柱加工材  
上：針式インサイジング  
下：ナイフ式インサイジング

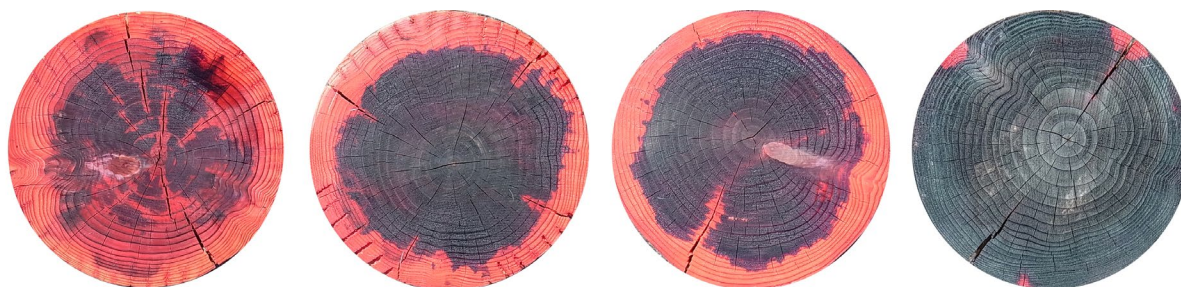


写真-1.5.6 部分深浸潤処理で薬剤を注入した円柱材への薬剤の浸潤状況  
左から、(1) 下端から 2cm, 25cm, 50cm, 75cm  
下端から 50cm の高さの表面までに薬剤を付着させて試験を実施



### (c) 自然給水処理

自然給水処理は、伐採直後で辺材部の含水率が高い生材状態の木材の部分保存処理に有効な処理方法である<sup>11)</sup>。

この処理法では、処理したい木材の一方の端部を薬剤に浸した状態で数週間放置するという簡易な方法により、一方の端部のみに保存処理することが可能である。その際、端部が処理されるメカニズムを図-1.5.4に示す。

写真-1.5.7は、今回の実験で実施した自然給水処理の様子である。この写真から

も分かる通り、本方法の優位な点は、特殊な設備や高額な装置が不要であるところにあり、薬液を入れる容器さえあればどこでも処理が可能である。

次に本方法で処理した試験体内部の状態を写真-1.5.8に示す。この試験は、円柱材を薬液に浸す時間が、薬液の上昇位置や、浸潤ムラにどのように影響するのかを確認する目的で実施した。同一の円柱材を高さを変えて4箇所で切断した際の切断面を、横に4枚並べて示している。この結果から、浸漬期間を長くすることによって、上部まで処理できること、心材部が大きい円柱材の上部には薬剤が適切に浸潤しないことなどが明らかとなった。

自然給水処理法はこのように簡単な処理であるにもかかわらず、適切に実施することにより辺材部を確実に処理できる方法であるが、木材が乾燥する際の水分移動力により薬剤処理の速度が左右されるため、処理する地域や季節によって処理に必要な日数が大きく左右される問題がある。さらに、自然給水処理は乾いた木材には効果がなく、心材部への薬剤の浸透性も期待できないため、JAS K4以上の品質を求める場合には辺材部の厚みが最低でも10mm以上(樹種や処理品質によっては20～30mm以上)ある材に処理する必要がある。

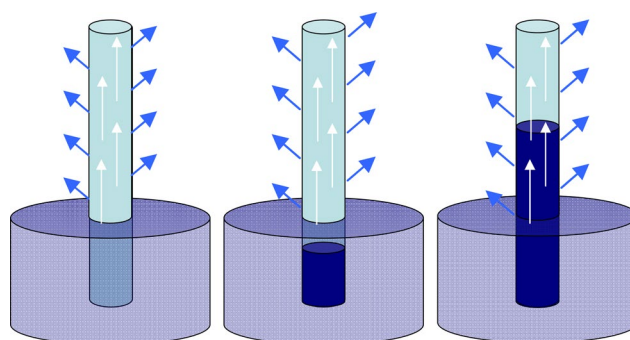


図-1.5.4 自然給水処理時の木材保存剤浸透機構

- 左から、  
①薬液に浸していない部分の水が蒸散し、  
木材中の水分が上に移動、  
②薬液に浸した部分から薬液が吸収され、  
③薬液が上部に移動



写真-1.5.7 自然給水処理の実験例

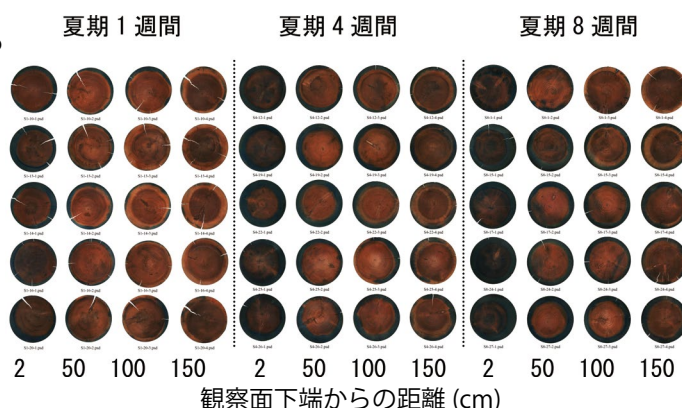


写真-1.5.8 自然給水処理の実験例

#### (4) 保存処理前に行っておくべき処理

保存処理を確実にこなうためには、保存処理の種類に応じて薬剤が内部まで浸透しやすい状態にしておく必要がある。

- a) 加圧式保存処理の前には、木材を繊維飽和点（含水率 28 ～ 30%）付近まで乾燥させる。その際、樹種によっては乾燥方法によって薬液の浸透性が低下することがあるので注意する。薬液の浸透性が悪い樹種についてはインサイジング機で木材表面に傷をつけておく。
- b) 深浸潤処理前には、木材を十分に乾燥させ（できれば含水率 20%程度）、さらにインサイジング機で木材表面に傷をつけておく。
- c) 自然給水処理をおこなう木材は、給水処理前に木材が乾燥することのないよう、伐採から剥皮、ロータリー加工、インサイジング、給水処理（薬剤処理）に至るまでの一連の操作を速やかにおこなう。

最も確実に木材保存剤を注入できる加圧式保存処理であっても一連の処理を適切に実施しなければ確実な処理は望めない。ここでは先に記した (a) から (c) の 3 つの方法で注入処理をおこなう前に実施しておくべき処理について説明する。

##### (a) 加圧式保存処理をおこなう前に実施すべき処理

加圧式保存処理では、木材内の空隙の空気を抜き、その部分に加圧しながら薬液を押し込むことで、木材内部まで薬液を行き渡らせる方法である。このため、含水率が高い木材（水を沢山含む木材）に処理しようとする、沢山ある水が邪魔をして薬液を内部まで押し込めず、結果として十分な薬液が木材内部まで行き渡らなくなる。そこで、加圧式保存処理の前には、処理したい部分の含水率を繊維飽和点近くまで下げておく必要がある。また、乾燥方法によって薬液の染み込み方が違うという報告もある<sup>12)</sup>ので、適切に薬剤が浸潤する乾燥方法で乾燥した材に処理する必要がある。

##### (b) 深浸潤処理をおこなう前に実施すべき処理

深浸潤処理は乾いた木材と親和性の良い油性あるいは油溶性の薬剤を使用することで、木材内部に薬剤を浸潤させる方法である。一方、これらの薬剤は含水率の高い木材の様に水で湿った状態の木材には、浸潤しにくい性質をもつ。そこで、深浸潤処理では処理前に木材を十分乾燥させ、処理したい部分の含水率を人工乾燥材程度まで下げておく必要がある<sup>13)</sup>。

##### (c) 自然給水をおこなう前に実施すべき処理

自然給水処理では、木材内部の水が移動する力を利用して処理をおこなうため、木材内に十分な水分があることが処理のポイントとなる。このため、適切に処理するためには、注入までの処理を木材が乾かないよう速やかに実施することが重要である。

## (5) 保存処理木材の安全性と環境負荷

- a) 保存処理 JAS 製材，AQ 認証材には，専門家により安全性が確認された木材保存剤が使用されている。
- b) 保存処理した木杭から溶脱してくる薬剤は微量である。
- c) 処理材からの溶脱は水に暴露した直後が最も多く，その後速やかに減少する。

上述した保存処理 JAS 製材や AQ 認証材が認めている木材保存剤は，以下の安全性に関するデータを農薬等の専門家が審査し，通常の使用法であれば安全性に問題ないと判断された木材保存剤であり<sup>14)</sup>，通常の使用であれば安全性等が問題になることはない。

### 【安全性審査時に要するデータの例】

- (1) 識別及び物理的・化学的特性に関する資料  
化学名（ISO 名，CAS 番号，化審法番号等），構造式，有効成分原体組成（純度，不純物）  
水溶解度，オクタノール／水分配係数，蒸気圧，解離定数等  
又は，農薬登録における農薬抄録の「物理化学的性状」の写し。
- (2) 人畜毒性に関する資料  
有効成分原体の変異原性，28 日間反復経口投与毒性，急性神経毒性  
有効成分原体及び製剤の急性経口毒性，急性経皮毒性，急性吸入毒性  
（又は，農薬登録における農薬抄録の「毒性試験一覧表」の写し  
及び製剤の眼一次刺激性，皮膚一次刺激性，皮膚感作性
- (3) 水産動物等に対する毒性に関する資料  
有効成分原体及び製剤のコイ，ミジンコに対する急性毒性  
有効成分原体の水生生物への蓄積性（生物濃縮性試験）に関する資料  
（原体については，農薬登録における農薬抄録の「有用動植物等に及ぼす影響」の写しでも可）
- (4) 動物及び土壌，水中における分解性，残留性に関する資料  
有効成分原体の土壌吸着性又は土壌溶脱性，加水分解速度（常温）等  
又は，農薬登録における農薬抄録の「動植物及び土壌等における代謝分解試験一覧表」  
および「物理的・化学的性状」の写し。

### (a) 市販パイルを用いた薬剤溶脱のモデル実験

50cm の長さに切断した市販の防腐・防蟻処理パイル（CUAZ 処理）を深さ 60cm の砂に埋めた後，地下水を加えて土壌を飽水状態とした。その後，降雨により雨水が砂地盤に浸入するのに伴い滲出してきた溶脱水を逐次回収し，その中に含まれる薬剤成分を定量した（写真 -1.5.9，図 -1.5.5）<sup>15)</sup>。

結果の図に示すとおり，検出された薬剤成分の濃度は暴露初期に一時的に高くなるもののその値はそれほど大きなものでなく，さらに時間経過と共にその値が速やかに低下することが認められた（図 -1.5.5）。

この実験で使用した地盤は東北珪砂 7 号を使用して作製したものであり，薬剤成分を吸着しにくい性質を持っている。土壌によっては溶脱してくる薬剤成分を吸着する性質を持つものもあるので，実際に溶脱してくる薬剤成分濃度はさらに低くなることが予想される。



写真 -1.5.9 市販パイルを用いた溶脱実験の様子  
直径 14cm、長さ 50cm の保存処理パイルを使用  
パイルの周囲及び上部は東北珪砂 7 号で覆った  
井戸水及び雨水の浸入によって容器から  
溢れ出てくる水を回収し、  
そこに含まれる薬剤量を測定した。

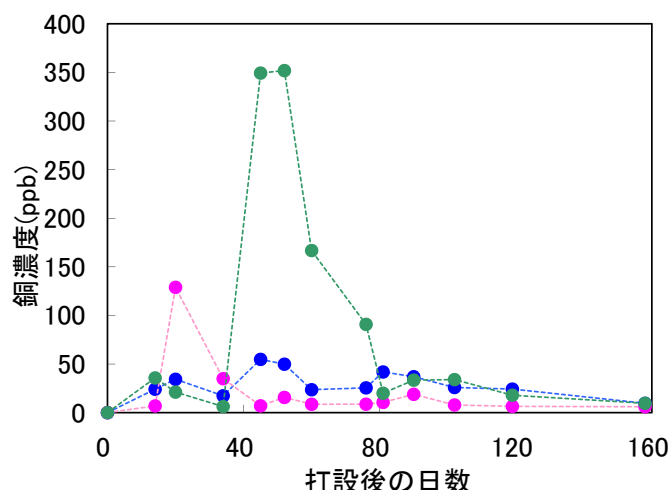


図 -1.5.5 保存処理杭から流れ出る水に含まれる薬剤量  
緑丸：底面の木口をシール、上面の木口は無処理  
赤丸：底面の木口をシール、上面は金属製キャップ保護  
青丸：底面、上面の両木口をシール

## (b) 小試験片を用いた薬剤溶脱のモデル実験

保存処理小試験片を流水中に浸し溶脱してくる木材保存剤濃度を測定した（図 -1.5.6）ところ、薬剤濃度は流水に浸した直後に一時的に高くなった後速やかに低下することが認められた（図 -1.5.7）。また、このモデル実験から、木杭端部の木口面から溶脱する薬剤の方が木杭側面から溶脱する薬剤と比べ、単位面積・時間あたりの溶脱量が多いことが認められた。

これら小試験片および市販パイルを用いた実験から、環境負荷を低減させたい場合には、木杭端部からの溶脱を抑えることが効果的であると考えられた。木杭端部にキャップを被せるなどすることで、木口面を塞ぐことで、環境負荷を低減できると考えられる。

また、通常の使用よりさらに環境負荷を低減させたい場合には、保存処理木材を短時間水に浸けるか、散水に曝すなどして、保存処理木杭表面に付着した溶脱しやすい木材保存剤を洗い流すことが効果的であると考えられる。

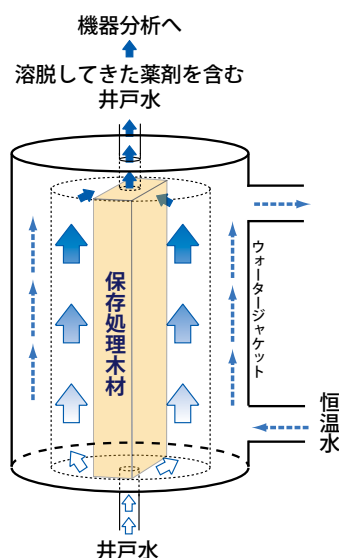


図 -1.5.6 薬剤溶脱速度測定用装置の概略図

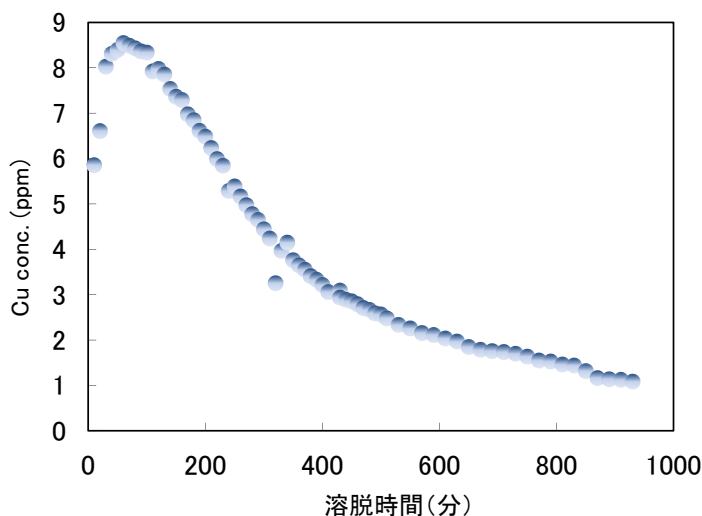


図 -1.5.7 小試験片から溶脱してくる薬剤量と溶脱時間との関係

## (6) 参考文献

- 1) 国内の構造物基礎における木材利用事例と設計方法の変遷, JSCE 木材利用ライブラリー 005, 公益社団法人土木学会 (2012)
- 2) 東京駅丸の内駅舎保存・復元工事, [http://www.kajima.co.jp/tech/tokyo\\_station/site\\_info/under/index-j.html](http://www.kajima.co.jp/tech/tokyo_station/site_info/under/index-j.html)
- 3) 木方洋二他:名古屋駅基礎木杭の50年間の変質に関する調査(第2報), 名大演報, 10:81 (1990)
- 4) 山田周平他:丸ノ内ビルヂング(旧丸ビル)の構造調査(8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1069 (2000)
- 5) 学士会百年史, 学士会 (1991)
- 6) 吉田雅穂他:福井地震を経験した木杭基礎構造物の調査, 日本自然災害学会学術講演会講演概要集, 29:129 (2010)
- 7) 製材の日本農林規格, 平成19年農林水産省告示第1083号
- 8) 優良木質建材等の品質性能評価基準, (財)日本住宅・木材技術センター (2012)
- 9) 木質材料の加圧式保存処理方法, 日本工業規格 JIS A9002<sup>2012</sup>
- 10) 木材保存学入門, 日本木材保存協会, p.132 (2012)
- 11) 桃原郁夫他:自然乾燥を利用した部分保存処理の試み, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 62:176 (2012)
- 12) Ikuo Momohara *et. al.*: Effect of drying method as a pretreatment on CUAZ preservative impregnation in Japanese cedar logs, J Wood Sci, 55:441 (2009)
- 13) 茂山知己他:深浸潤処理用薬剤ペンタキュア OP の開発とその実用化, 34:119 (2008)
- 14) 安全性に関する説明書記載要領, (財)日本住宅・木材技術センター (2012)
- 15) 桃原郁夫他:保存処理された住宅用基礎杭を打ち込んだモデル地盤からの流出水中に含まれる薬剤有効成分の定量, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 61:160 (2011)



## 第2章 海洋における間伐材等利用技術

### 2.1 適用範囲

この章では間伐材等の木材を海洋で利用する場合に耐久性等の性能を照査するための、基本的な考え方を示し、参考となる技術情報を紹介するものとする。

この章で対象とする木材の用途としては、主として港湾施設（例：栈橋）を想定した。ただし、狭義の港湾施設だけでなく、魚礁、船舶、洋上発電施設など広い意味での海洋用途においても、参考資料として使用されることを想定した。

### 2.2 耐用年数

木材の港湾施設への利用を考える際に、部材個々の耐用年数と施設全体の耐用年数を別個に考慮し、部材個々の目標耐用年数を交換・補修・補強の容易性に応じて設定するものとする。

部材の耐用年数は、物理的、化学的、もしくは生物学的な劣化現象によって決まり、技術的な事前評価の対象となる。一方、施設全体の耐用年数は、社会的、経済的に決まるものであり、多くの場合事後的に決まる。ある施設が社会的、経済的に必要とされる限りは、部材の交換や補修・補強を伴いつつ使用され続けるが、必要がなくなれば、部材が健全であっても使用が打ち切れ、解体・撤去等がなされる。

たとえば木製栈橋では、杭、桁、床版、防舷材など、個々の部材の耐用年数は、それぞれの置かれる環境、木の樹種、劣化対策などによって決まる。一方、施設全体の耐用年数は、栈橋として利用される年数であり、港湾計画が改訂されて栈橋が埋め立てられるといった社会的、経済的な状況の変化によって決まるのが一般的である。

コンクリートを主体とした近年の港湾施設では、部材の耐用年数は施設の耐用年数より長いか、またはどちらも50年程度であろうという暗黙の了解があった。ただし実際には部材の耐用年数が施設の耐用年数より短い場合もあり、この場合は交換・補修・補強が行われている。一方、木材には寿命が短いイメージがあるため、港湾施設に木材を利用することを提案すると、何年もつのかという話になり、50年と答えれば嘘だと疑われ、10年と答えればそれでは駄目だと言われる。本来、単純に何年もつのかなどという質問は無意味であり、条件をはっきりさせなくては答えようがないはずである。交換・補修・補強が容易な部材には無処理で耐用年数1年、容易でない部材には劣化対策を十分に施して耐用年数50年、といった木材の適材適所での使用は可能であり、これを提案すべきであろう。

## 2.3 使用環境と劣化要因

木材の海域における劣化要因は、使用環境（海水との接触状況）によって以下のように異なる。

- a) 海水と常時接触する環境では、海虫が主な劣化要因となる。
- b) 海水からの干出が生じる干満帯（潮間帯）では、海虫、ウェザリング（風化）、波浪作用が主な劣化要因となる。
- c) 海水の飛沫を受ける環境（飛沫帯）では、ウェザリング（風化）が主な劣化要因となる。
- d) 海底の土中では、一般に劣化を考慮しなくてよい。

### (1) 海水と常時接する環境

海虫とは木材に穿孔する性質のある海生生物のことである。海虫は軟体動物（貝類）に属するもの<sup>1,2)</sup>と、甲殻動物に属するもの<sup>3,4)</sup>に分けられる。フナクイムシ類（英語名 teredo, shipworm, pileworm）、ニオガイ類（英語名 pholad, piddock）は軟体動物に属する。一方、キクイムシ類（英語名 limnoria, gribble, wood-lice）、コツブムシ類（英語名 sphaeroma, pill-bug）は甲殻動物に属する。

フナクイムシ類の中では *Teredo navalis* が世界的に広く分布し、和名フナクイムシはこの種を指す。このほかヤツフナクイムシ（*Lyrodus pedicellatus*）や、オオフナクイムシ属（*Bankia*）なども日本沿岸に分布している<sup>5)</sup>。

フナクイムシ類の発生のタイプには卵生種と卵胎生種がある<sup>6)</sup>。卵生種では卵子と精子が海中で受精する。一方、卵胎生種では母体内で受精した後、幼生が海水中に放出される。幼生は20～30日でペディベリジャー幼生（pediveliger larva）期に到達すると木材に付着し、約0.3mmの微小な貝殻で穿孔し木材内部に侵入する。穿孔口が小さいため、木の中の食害の有無が外観からは判別しがたい。縞状の突起がある貝殻を開閉および回転することによって木を摩砕し穿孔する<sup>7)</sup>。切削した木粉を口から取り込み、セルロースを分解し栄養として利用している。木の繊維方向に穿孔する傾向があるが、木口に近づくとUターンするなど曲線的な孔道形成が可能である。水管を通じた海

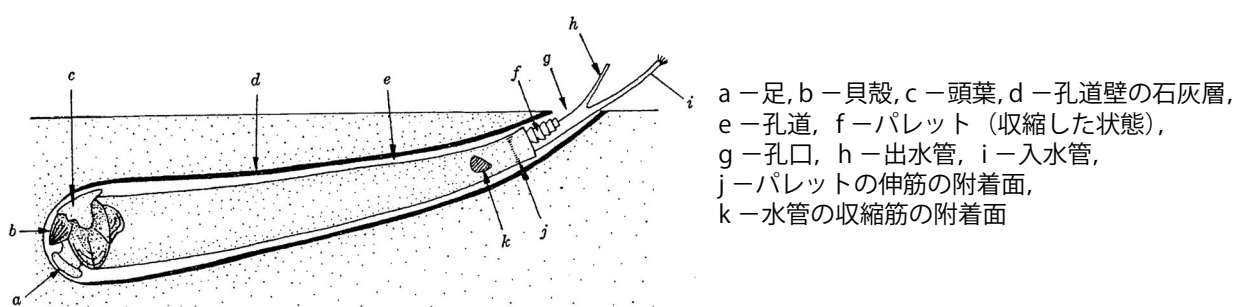


図-2.3.1 木材に穿孔中のオオフナクイムシの側面図<sup>1)</sup>

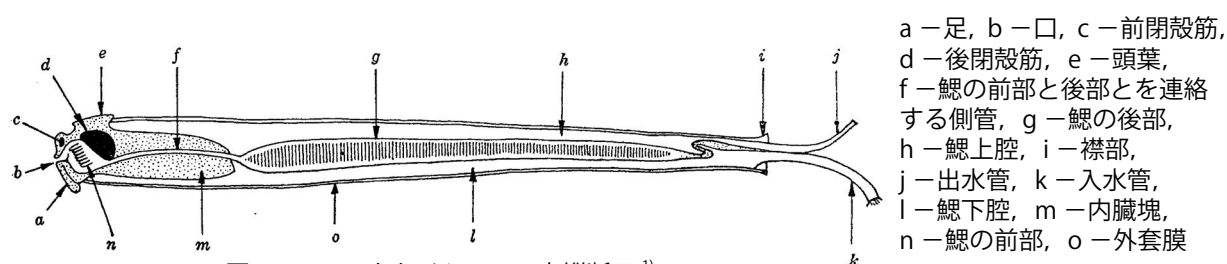


図-2.3.2 フナクイムシの正中縦断面図<sup>1)</sup>

水との物質交換の必要から尾部は穿孔口付近に留まり、図-2.3.1<sup>1)</sup>、図-2.3.2<sup>1)</sup>に示すように穿孔とともに軟体部が長く成長する(写真-2.3.1)。その際、孔道を裏打ちする石灰質



写真-2.3.1 木材から抽出したフナクイムシ

の棲管を形成する(写真-2.3.2)。フナクイムシの成体の貝殻(写真-2.3.4)のサイズは6mm程度で孔道直径もこの程度であるが(写真-2.3.5)、孔道の長さは数cmから数十cmにもなる。産卵期は夏から秋で、この時期は幼生の定着が多いため食害を受けやすい。寿命は半年～1年程度、成体の生存可能な塩分濃度は5～35‰、付着期の幼生は海面から海底に及ぶ全範囲の垂直移動が可能で食害の垂直分布パターンは一定していないとされる<sup>8)</sup>。



写真-2.3.2 フナクイムシの石灰質の棲管  
(木材内部に形成された棲管が甲殻類の食害によって露出したもの)

ニオガイ類はニオガイ科に属し、カモメガイ(英語名 Martesia)(図-2.3.3<sup>2)</sup>)などが主に熱帯、亜熱帯に分布している。フナクイムシ類とは異なり、ニオガイ類の軟体部の大部分は洋梨形の二枚貝の中に包まれている。水深にあまり関係なく<sup>9)</sup>、木材のほか柔らかい石、プラスチック、コンクリートなどの表面付近に卵状の空洞を



写真-2.3.3 フナクイムシ頭部



写真-2.3.4 フナクイムシ貝殻(片側)

作って生息する。体長7cm、直径2.5cm程度、穿孔口の大きさは6mm程度で、フナクイムシ類と異なり外観の目視で穿孔口が確認できる<sup>10)</sup>。

フナクイムシ科とニオガイ科は、ニオガイ上科というグループに属し、このグループは他にキクイガイ科とスズガイ科を含む。ニオガイ上科の木材食性は、三畳紀中期～ジュラ紀後期(約2億年前)に、系統派生後まもなく獲得された可能性が示唆されている<sup>11)</sup>。キクイガイ科のキクイガイは深海性で、沈木への穿孔が多く報告されている。その形態はフナクイムシ科に類似している。

一方、甲殻動物の海虫としては、等脚目(ワラジムシ目)キクイムシ科に属する *Limnoria lignorum* が寒帯から熱帯まで広く分布しており、和名キクイムシ(図-2.3.4<sup>4)</sup>)はこの種を指す。陸生の昆虫類のキクイムシ科(Scolytidae)との混



写真-2.3.5 フナクイムシの食害を受けた4cm角ブナ材の断面

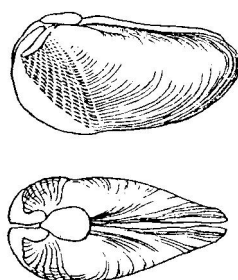
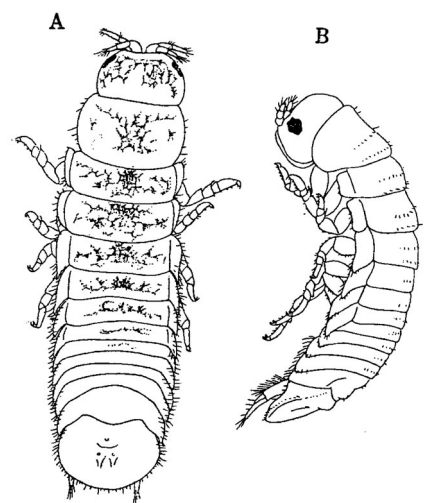


図-2.3.3 カモメガイ<sup>2)</sup>



A: 背面, B: 側面  
図-2.3.4 キクイムシ<sup>4)</sup>

同を避けるため「キクイシャコ」,「ウミキクイ」などと呼ばれることもある。また明治から昭和初期の港湾工学の教科書では「海虱」と記載されていた<sup>12,13)</sup>。

成体は長さ 3mm 程度, 幅 1mm 程度である(写真-2.3.6)。大顎で木材を磨碎し, 径 1mm 程度の孔道を掘る。共生細菌は確認されておらず, 内生する酵素<sup>14)</sup>でセルロー

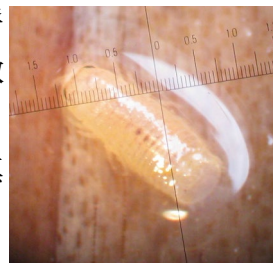


写真-2.3.6 キクイムシ (左:背面, 右:正面)

スを分解し栄養として利用している。孔道内で産卵し, 幼生は親が掘った孔道から分岐する孔道を掘る<sup>4)</sup>。孔道の中を自由に移動でき, 木から出て海水中を泳いで他の木に移動することもできる。孔道内の海水から酸素を得ているため, 木の内部深くまで穿孔することはなく, 木の表面付近に穿孔する。また, 孔道と木の表面の間に海水取り入れのための 0.2mm 程度の穴も開ける。軟らかい木を好み, 同じ木では早材(年輪のうち春期に形成される色の薄い密度の低い層)を晩材より先に食害する。穿孔口, 海水取入口ともに径約 1mm 以下と小さいため, 食害された木の外観は, 穴が開



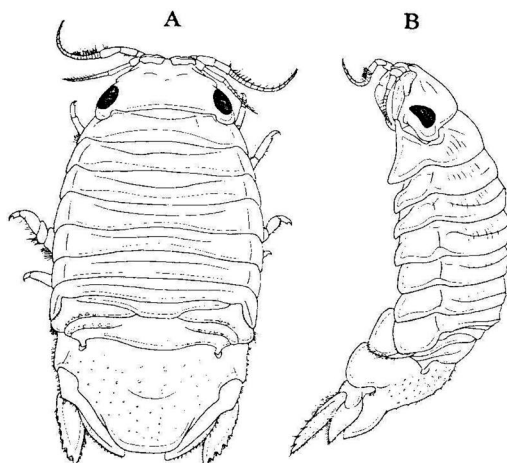
写真-2.3.7 キクイムシの食害を受けた 4cm 角スギ材の外観

いているというより, 削れた印象になる(写真-2.3.7)。食害が進むにつれて木の表層が崩れて, 木の寸法が減少していく。主に浅海性とされるが, 水深 200m の海底付近に設置したマツ科の試験板が軽微な食害を受けた例がある<sup>15)</sup>。低塩分濃度に対する抵抗性はフナクイムシほど大きくなく, 塩分濃度 16‰程度で活動度が半減するといわれる<sup>3)</sup>。

コツブムシ類は等脚目コツブムシ科に属する。潮間帯の石の下などに見られる。キクイムシよりも大きく体長 5 ~ 15mm 前後で, 低塩分の河口部などにも分布し, 木材や軟らかい岩に穿孔する。インド, オーストラリア, 米国東海岸及びフロリダなどで栈橋や橋脚の被害例がある。軟らかい材を好み, 食害された木材は蜂の巣状になる。木を栄養として利用せず巣穴としてのみ利用しているため, 薬剤処理した木材も食害する<sup>16)</sup>。日本沿岸では加賀大野川の橋杭をヨツバコツブムシ (*Sphaeroma retrolaervis*) が食害した事例<sup>17)</sup>や, 紀伊半島田辺湾とその周辺でシリケンウミセミ (*Dinoides dentisinus*), イワホリコツブムシ (*Sphaeroma wadai*), ナナツバコツブムシ (*Sphaeroma sieboldii*), トンダガワイソコツブムシ (*Gnorimosphaeroma tondaense*) の 4 種が砂岩や朽木に穿孔して生息していること<sup>18)</sup>などが報告されている。

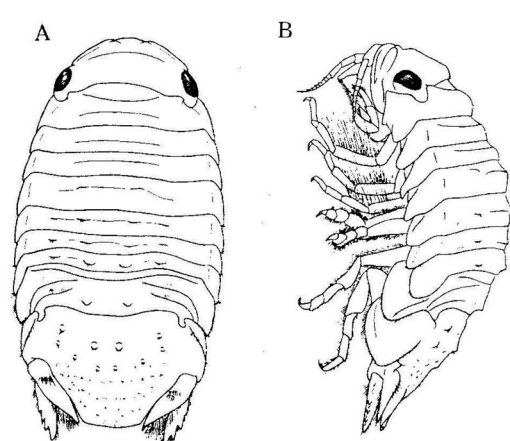
## (2) 干満帯

干満帯は海水中と同程度以上に劣化が進行しやすい環境とされる。たとえば米国 Maine 大学の



A: 背面, B: 側面

図-2.3.5 ナナツバコツブムシ<sup>4)</sup>



A: 背面, B: 側面

図-2.3.6 ヨツバコツブムシ<sup>4)</sup>



報告<sup>19)</sup>では、同大学や米軍の調査結果をまとめた海洋の木杭の海虫害の傾向が図-2.3.7のように表されており、干満帯 (Tidal Zone) で最も激しい劣化が生じるとしている。これは、干満帯は海面付近を浮遊する海虫類の付着が多い上に、波浪による浸食等を受けるためとされる。キクイムシやコツブムシに穿孔された木材表層部が波浪や潮の干満により崩壊すると、新たに現れた木材表面にこれらの海虫が付着し穿孔する。こうして食害が進行する結果、栈橋の杭などで潮間帯の部分だけが細くくびれて砂時計状を呈することもある。



写真-2.3.8 海虫の食害を受けた  
栈橋の木杭



写真-2.3.9 ウェザリング  
によって目やせが生  
じたスギ材の木口面

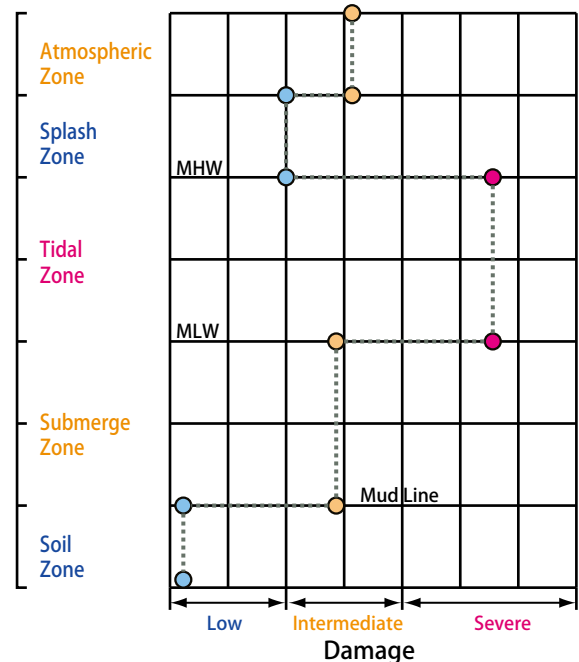


図-2.3.7 海の木杭の典型的な劣化傾向<sup>19)</sup>

### (3) 飛沫帯

一日のうち短時間でも海水中に没する環境であれば、フナクイムシ類の幼生やキクイムシ類が木材に付着する可能性がある。ただしこれらの海虫類は長期間海面上にある環境では生存できない海生生物であるため、常時海面上にある環境では海虫害の危険性はほとんどない。

海水飛沫を受ける飛沫帯は、鉄筋や鋼材の腐食に関しては最も厳しい環境であるが、木材では海虫害の危険性がほとんどなく、かつ塩分の影響により腐朽や蟻害が一般の陸上環境よりも比較的生じにくい。

飛沫帯の木材では、生物劣化よりも物理化学的なウェザリング（weathering, 風化）が主な劣化要因となる。ウェザリングは、木材成分のうちリグニンとヘミセルロースが紫外線によって分解され、降雨等によって洗い流されることにより生じる<sup>20)</sup>。年輪の現れている面がウェザリングを受けると、早材が晩材よりも速く浸食され凹凸（目やせ）が生じる（写真-2.3.9）。

ウェザリングの進行速度について、既往の研究では、米国でベイマツなどの針葉樹を8年間屋外暴露した結果<sup>21)</sup>から0.2～0.3インチ/100年（≒5～8mm/100年）、日本で築66年の木造校舎のスギ下見板を調査した結果<sup>22)</sup>から4～

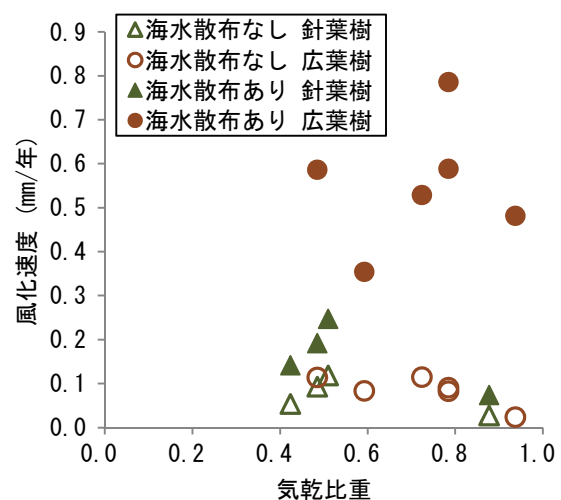


図-2.3.8 木材の暴露試験結果の一例<sup>23)</sup>

試験体初期寸法：2×2×38cm  
暴露場所：神奈川県横須賀市の海岸沿い  
海水散布量：約0.5m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>×2回/日  
暴露2年と4年で曲げ載荷により風化深さを求め、暴露期間との関係の回帰直線の傾きを風化速度とした。  
データ点は3試験体についての平均値

使用樹種  
針葉樹：スギ、ヒノキ、マツ、カラマツ  
広葉樹：クリ、クスノキ、ブナ、ケヤキ、ナラ、カシ

8mm/100 年の厚さ減少が報告されている。

一般的には比重（密度）が大きいほどウェザリングの進行は遅いといわれている。ただし水の影響を強く受ける環境では、比重によらず広葉樹の方が針葉樹よりもウェザリングが速く進行したことを示す実験結果もある（図 -2.3.8）<sup>23)</sup>。

#### (4) 海底土中

陸域の土中の地下水位面より下に位置する木杭は、木材腐朽菌の活動に必要な酸素が不足するため腐朽しないことが知られている。一方、海底地盤の土中の間隙は海水で飽和しているため、その中に位置する木材についても腐朽は生じないと考えられる。また、海虫類については、木材の周囲が土砂で覆われている場合、土中の間隙水を通じて海虫類の幼生や成体が木材表面に到達することは考えにくい。

明治～大正時代の港湾工学の教科書である廣井勇著「築港」<sup>12)</sup>には「木材ヲ海中ニ使用スルトキハ土中ニ埋設スルニ非ルヨリハ早晩侵蝕ヲ免レザルヲ以テ ...」との記述がある。すなわち海中であっても土中に埋設されていれば海虫類による侵食を免れることが示唆されている。また昭和初期の教科書である鈴木雅次著「港工学」<sup>13)</sup>には「(木材は) 地中に没するものは海蟲の害少き為、基礎杭として最も多く利用せらるゝ。」との記述がある。これらは実際の海洋工事で既設の木杭を引き抜いた際に土中部分が無被害であったという経験的な事例に基づくものであろう。

現地実験の事例としては、1942～43 年の京大の実験<sup>24)</sup>や、1962～63 年の運輸省の実験<sup>25)</sup>がある。前者は宇野港、後者は門司港において、スギ、マツ等の丸太杭の打設と回収が行われ、いずれも海水と接する部分は海虫害を受けたのに対し、地中部分はほとんど食害されておらず、門司港の実験では海底面上から侵入したフナクイムシの穿孔は海底面下 30～40cm 程度までで止まっていた。前掲の米国 Maine 大学のまとめ（図 -2.3.7）<sup>19)</sup>では、海底面下に位置する領域（Soil Zone）では酸素が極度に不足することが海虫類の生存を妨げるため、木杭は一般的に良好な状態にあるとされている。

このような木杭についての知見のほかに、海底に埋没した木造船や流木などが長期にわたり海虫害を受けなかったことを示す知見もある。たとえば 1281 年の弘安の役の際に暴風雨で沈没した元寇船が、長崎県松浦市の鷹島沖海底にほぼ原形をとどめた形で埋まっていることが、琉球大学などの研究チームによって確認された<sup>26)</sup>。この元寇船は水深 20～25m の海底で厚さ約 1m の泥の層に埋まって横たわった状態で見つかった。泥の層に覆われて保護されたため、潮の流れによる解体や腐食、劣化を抑えられたとされる<sup>27)</sup>。

また、2007 年新潟県中越沖地震により出雲崎沖海底に噴出したマツ属の古木についての調査結果<sup>28)</sup>では、古木の埋没年代が約 3000 年前であったのに対し、古木内部への食害が認められたフナクイムシは年代的に現代のものであった。すなわち 1964 年の新潟地震など現代の地震の際に海底に噴出した後に初めて食害を受けるまでは、約 3000 年にわたり食害を受けていなかったことが推定されている。

このように、既往の知見はいずれも海底地盤中では海虫害がほとんど生じないことを示唆している。最近実施された小試験体による実験の結果<sup>29)</sup>も既往の知見を支持しており、土砂で覆われた面には海虫が付着しないため、海底面下の木材における食害は海底面上で付着したフナクイムシの個体長までの範囲に限られると推測されている。



## (5) 参考文献

- 1) 岩佐正夫：フナクイムシに関する動物学的研究－総合抄録－，岡田要編，木船木材の蝕害とその防除，日本学術振興会，pp.1-42 (1958)
- 2) 滝巖，波部忠重：日本産ニオガイ超科の分類，岡田要編，木船木材の蝕害とその防除，日本学術振興会，pp.43-66 (1958)
- 3) 椎野季雄：穿孔性甲殻類概説，岡田要編，木船木材の蝕害とその防除，日本学術振興会，pp.135-152 (1958)
- 4) 椎野季雄：日本産木材穿孔性海産甲殻類，岡田要編，木船木材の蝕害とその防除，日本学術振興会，pp.153-161 (1958)
- 5) 角田邦夫，西本孝一：海面貯木場におけるフナクイムシの食害と防除（1）－フナクイムシの種類と分布－，木材工業 34(7):293-295 (1979)
- 6) 角田邦夫，西本孝一：海面貯木場におけるフナクイムシの食害と防除（2）－フナクイムシの生活史と飼育技術－，木材工業 34(12):540-542 (1979)
- 7) 角田邦夫，西本孝一：海面貯木場におけるフナクイムシの食害と防除（4）－フナクイムシの生長速度と木材への食害度－，木材工業 35(7):315-317 (1980)
- 8) 角田邦夫，西本孝一：海面貯木場におけるフナクイムシの食害と防除（3）－フナクイムシの定着期－，木材工業 35(4):166-168 (1980)
- 9) 角田邦夫：海中用材の虫害，in「保存・耐久性（海青社）」，pp.104-107 (1997)
- 10) Cassens D.L., Feist W.C., Johnson B.R. and De Groot R.C. : Selection and Use of Preservative-Treated Wood, Forest Products Society (1995)
- 11) 芳賀拓真，加瀬友喜：木材食性はいつ獲得されたか－ニオガイ上科二枚貝類の適応放散史，日本貝類学会大会研究発表要旨集，pp.10-11 (2011)
- 12) 廣井勇：再訂築港（丸善）(1913)
- 13) 鈴木雅次，港工学，(1932)
- 14) Dymond, J., Guille, M. J. and Cragg, S. M. : Isolation of a putative endogenous endo-s-1,4-glucanase (cellulase) from the midgut diverticulae of the wood-boring crustacean, *Limnoria quadripunctata*, IRG/WP03-10494 (2003)
- 15) Relini, G.: Fouling of different materials immersed at a depth of 200m in the Ligurian sea, Int. Congr. Marine Corrosion and Fouling, 4:431-443 (1976)
- 16) Johnson, B. R.: Protection of Timber Bulkheads from Marine Borers, Timber Bulkheads (ASCE Geotechnical Special Publication No.7), ASCE, pp.16-34 (1987)
- 17) 寺尾新：橋杭を食う等脚類，動物学雑誌，28:182 (1916)
- 18) 村田優子，和田恵次：潮間帯に生息するコツブムシ科穿孔性等脚類の分布に関係する要因，日本ベントス学会誌，55:25-33 (2000)
- 19) Lopez-Anido, R., Michael, A.P., Goodell, B., Sandford, T.C.: Assessment of wood pile deterioration due to marine organisms, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 130(2):70-76 (2004)
- 20) 公益社団法人日本木材保存協会：木材保存学入門（改訂 3 版）(2012)
- 21) Feist W. C. and Mraz E. A. : Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected

softwoods, Forest Products Journal, 28(3):38-43 (1978)

- 22) 山本幸一：スギ下見板のウエザリング，木材工業 46(2):78-80 (1991)
- 23) 山田昌郎，森満範：針葉樹材と広葉樹材の臨海部での風化速度，土木学会年次学術講演会概要集 CD-ROM, 67:CS12-006 (2012)
- 24) 近藤泰夫，石井文雄：松，杉，檜のフナクイムシ被害調査，岡田要編 木船木材蝕害とその防除，日本学術振興会，pp.175-182 (1958)
- 25) 鴛海浩，本田清：木材の海虫による蝕害及びその対策 (1),(2)，木材工業，19(8):370-373, 384, 19(9):416-420 (1964)
- 26) 朝日新聞 2011 年 10 月 21 日 元寇船 原形とどめ発見
- 27) 朝日新聞 2011 年 10 月 24 日夕刊 元寇船，泥に守られて
- 28) 成田廣枝，空閑重則，杉山淳司：2007 年新潟県中越沖地震により出雲崎沖海底に噴出した古木に関する研究，日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM, 60:M18-0900 (2010)
- 29) 山田昌郎，森満範：海底地盤に埋設される木材の海虫害に関する検討，木材利用研究論文報告集 11:61-66 (2012)

## 2.4 海虫害対策

海虫害対策は、以下のような方法によるものとする。

- a) 木材の素材耐久性に期待する方法
- b) 薬剤による保存処理
- c) 薬剤以外の保存処理
- d) 被覆・塗装などの物理的な方法

### (1) 木材の素材耐久性

木材の硬さや化学成分によって海虫害の受けやすさに違いがあることが知られている。たとえばキクイムシは比較的軟らかい木材を食害する傾向がある。図-2.4.1 と写真-2.4.1 に実験結果の一例を示す<sup>1)</sup>。図-2.4.1 では18樹種を左から右へ比重が大きくなるように並べており、比重の値は写真-2.4.1 に示している。図-2.4.1 ではヒバから左の樹種と比べてイチョウから右の樹種ではキクイムシ食害速度が小さいことが示されている。木材の比重と硬さの間には図-2.4.2 に示すような正の相関があり<sup>1)</sup>、図-2.4.1 のイチョウから右の樹種では材の硬さがキクイムシ食害の阻害に寄与していることが推測される。

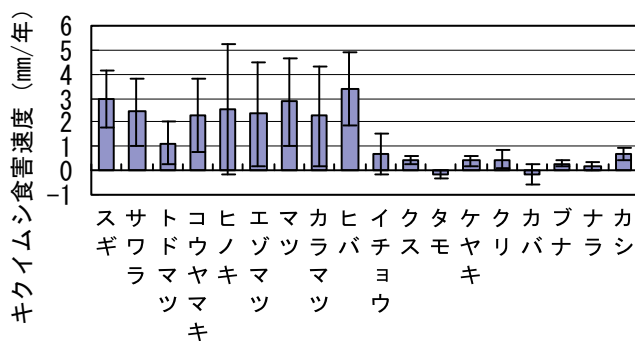


図-2.4.1 キクイムシによる食害速度の樹種による違い<sup>1)</sup>  
試験体初期寸法：4×4×8cm,  
暴露場所：神奈川県横須賀市の海水中、暴露期間：6か月、  
試験体数は各樹種につき5～10、誤差範囲は標準偏差  
キクイムシ食害速度は  
質量減少率とフナクイムシ穿孔面積から計算

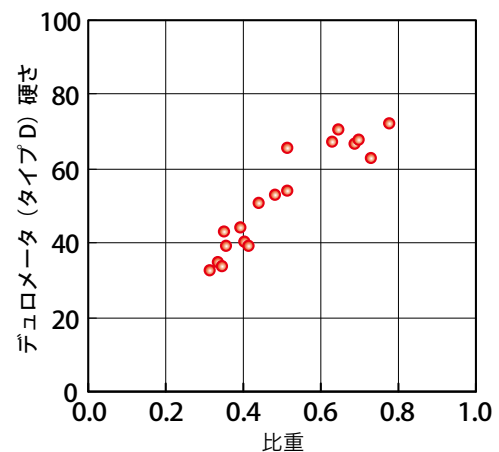


図-2.4.2 木材の比重と硬さの関係<sup>1)</sup>  
各点は図-2.4.1 に示した各樹種ごとの  
測定値を示す  
60℃で1～2日間乾燥後測定

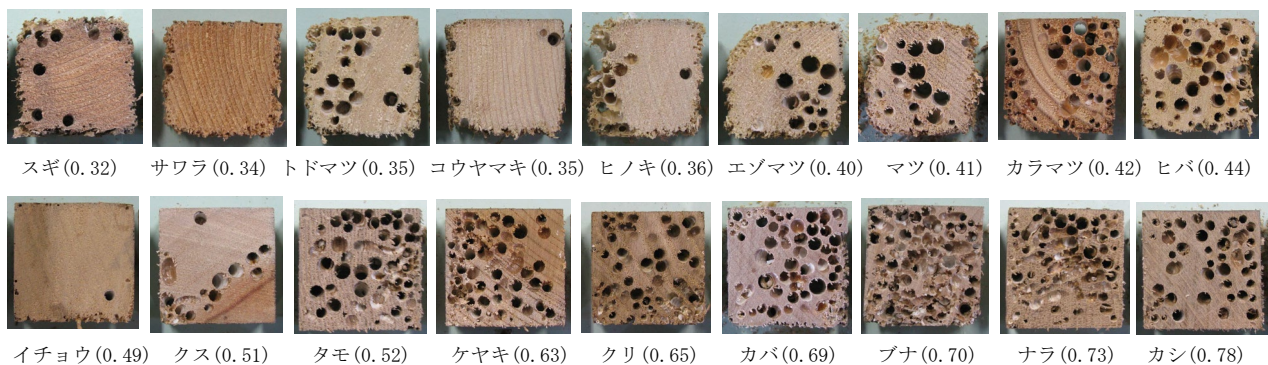


写真-2.4.1 樹種による海虫害の相違の例(1)<sup>1)</sup>

カッコ内数字は60℃乾燥後の比重、試験体初期寸法：4×4×8cm、  
暴露場所：神奈川県横須賀市の海水中、6か月浸漬後回収して切断

広葉樹材は針葉樹材よりも一般的に比重が大きく硬い樹種が多く、キクイムシ食害は受けにくいですが、写真-2.4.1と図-2.4.3に示すようにフナクイムシ食害（切断面に見られる円孔）は広葉樹材においてもはなはだしい。国産材で最も硬い樹種とされるカシ材でも、フナクイムシの貝殻による食害を受けた<sup>1)</sup>。

写真-2.4.1で比較的フナクイムシの穿孔が少なく見える樹種は、スギ、サワラ、コウヤマキ、ヒノキ、イチヨウ、クス（＝クスノキ）などである。これらの樹種はいずれも心材に抗菌性や抗蟻性を有する成分を含むことが知られており、そうした成分がフナクイムシにも効果を有していることが推測される。ただし心材成分の含有量には、樹木の個体差や同一個体内の心材内の部位による差が大きい。写真-2.4.2<sup>2)</sup>は15樹種について海虫害を試験した結果であり、内6樹種については例(1)（写真-2.4.1）で示した試験でも対象としたものであるが異なる個体から採取された試験体である。例(2)ではサワラ、スギ、ヒノキ、クスノキ、カヤは比較的フナクイムシ食害が少なかったが、イチヨウは例(1)と異なり激しく食害された。

輸入材では、海虫類の食害を受けにくい樹種として熱帯産のグリーンハートやボンゴシなどが古くから知られており、欧米で栈橋の杭などに使用されてきた。最近では、熱帯産のイペ、ウリン、セランガンバツ、オーストラリア産のジャラ、サイプレスパインなどが輸入され、臨海部のボードウォークや住宅のウッドデッキ材として使用されている。これらはウェザリングに対する耐久性に関しては多くの実績があるが、海水中の耐久性に関してはイペ、セランガンバツ、サイプレスパイン等の耐海虫性について若干のデータがある<sup>3,4)</sup>ものの、ほとんど未知数である。

フナクイムシ類の穿孔を阻害する可能性のある成分は心材に含まれるが、心材と辺材の色差が小さい樹種で心材だけを選択的に使用することは實際上難しい。また丸太杭では外周部の辺材を通常除去せずに使用しているため、心材が高耐久であったとしても辺材部分は食害される。食害の程度と強度低下の関係についての最近の実験によれば、圧縮・曲げともに、質量減少率に対して強度減少率が大きく、わずかな食害でも強度がかなり低下することが示唆されている（図-2.4.4, 2.4.5）<sup>5)</sup>。こうしたことから、心材の素材耐久性のみに期待して海虫害対策を施さずに重要な構造部材に用いるのは危険である。ただし、防舷材や航路標識など強度がさほど必要とされない用途では、素材耐久性を考慮して樹種を選択することによって、交換周期を長くできるなどの効用が得られる場合も

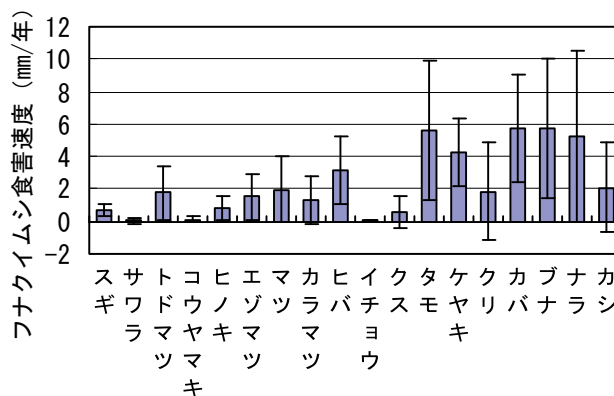


図-2.4.3 フナクイムシによる食害速度の樹種による違い<sup>1)</sup>  
 試験体初期寸法：4×4×8cm,  
 暴露場所：神奈川県横須賀市の海水中,  
 暴露期間：6か月、試験体数は各樹種につき5～10,  
 誤差範囲は標準偏差を示す  
 フナクイムシ食害速度は穿孔面積から計算

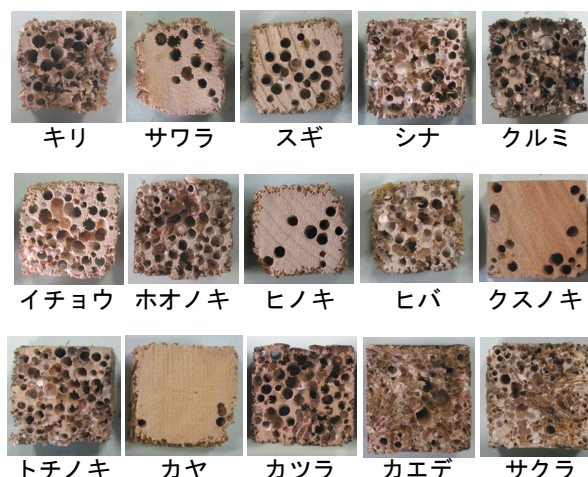


写真-2.4.2 樹種による海虫害の相違の例(2)<sup>2)</sup>  
 試験体初期寸法：4×4×8cm,  
 暴露場所：神奈川県横須賀市の海水中,  
 6か月浸漬後回収して切断



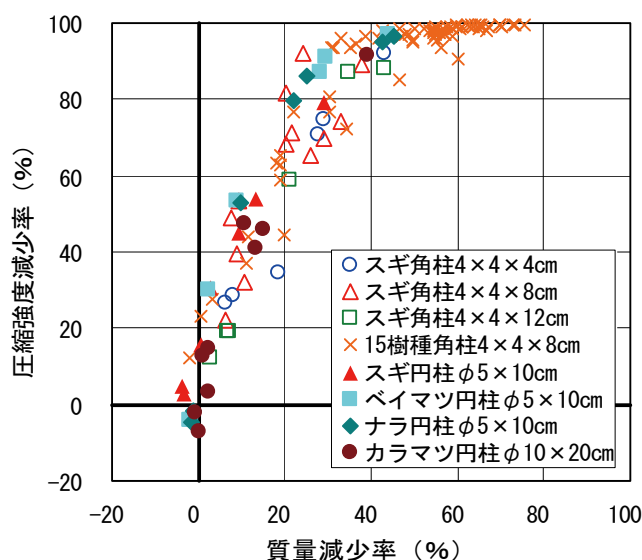


図-2.4.4 海虫の食害による質量減少率と圧縮強度減少率の関係<sup>5)</sup>

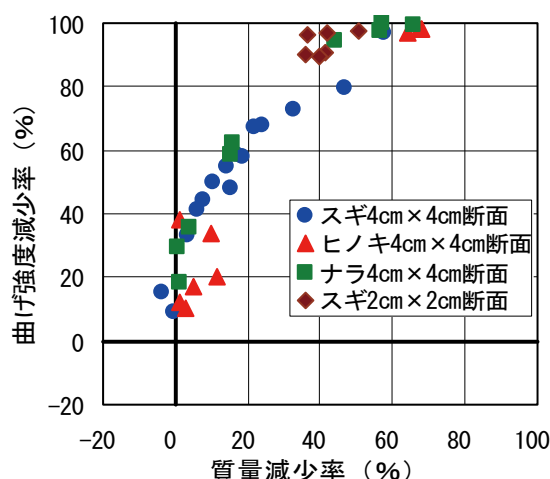


図-2.4.5 海虫の食害による質量減少率と曲げ強度減少率の関係<sup>5)</sup>

あろう。

## (2) 薬剤処理

海虫害を防除するため米国ではクレオソート油と CCA（クロム・銅・ヒ素化合物）が、単独または重複して（CCA 注入後さらにクレオソート油注入して）用いられた。これらの薬剤が辺材に加圧注入されたベイマツやサザンパインなどの針葉樹の杭が、栈橋や護岸に使用されてきた。日本では CCA 処理材は住宅の土台、クレオソート処理材は枕木や電柱に使用されてきたが、いずれも海洋用途ではほとんど使用されていない。

クレオソート油は家庭用品規制法により 2004 年に 3 成分が発がん物質として指定されたため、これらの成分を除去しクマロン・インデン共縮合樹脂を 5%以上添加した改良クレオソート油が開発された。この改良クレオソート油の防腐・防蟻性能は、試験の結果従来のクレオソート油と同様に性能基準を満たすことが確認されている<sup>6)</sup>が、耐海虫性についてはまだ確認されていない。

CCA についてはヒ素と六価クロムの排水基準の強化と廃棄物処理の問題により、AAC（第四級アンモニウム化合物）系や CUAZ（銅・アゾール化合物）系などの代替薬剤への移行が進められている。CUAZ で処理したスギ試験体の小樽での耐海虫性試験結果によると、初期吸収量約  $6\text{kg/m}^3$  で海虫による食害をごく軽微なものに抑えることができ、初期吸収量約  $11\text{kg/m}^3$  で 52 か月間高い海虫抵抗性を維持できた<sup>7)</sup>。また ACQ（銅・第四級アンモニウム化合物系）で処理した試験体の横須賀での耐海虫性試験結果によると、JAS の K4 程度の吸収量を付与した ACQ 処理カラマツは海中設置後 24 か月までほとんど食害を受けていなかったが 36 か月以降に食害が顕著となったのに対し、JAS の K5 程度の吸収量を付与した ACQ 処理カラマツおよびスギは、海中設置後 48 か月の時点では、木口などの試験体表



写真-2.4.3 厳島神社海上社殿廻廊根元材に使用された低分子フェノール樹脂処理木材

面に食害痕が認められたものの質量減少や強度低下は生じていなかった<sup>8)</sup>。

### (3) 樹脂処理・熱処理

木材保存剤を使用せずに高い防腐・防蟻性能を実現した処理法に、低分子フェノール樹脂処理や熱処理などがある<sup>9)</sup>。これらの処理木材は、供用中の薬剤の環境中への溶脱や、廃棄時・焼却時に有害物質の生成がないという長所を有する。

低分子フェノール樹脂処理木材は、メチロール化フェノールモノマーを主成分とする注入用樹脂を木材に減圧—加圧注入し、養生後乾燥—加熱硬化して得られる<sup>10)</sup>。モノマーが木材細胞壁に浸透した後で三次元架橋構造の高分子物質として硬化することにより、寸法安定性と生物劣化抵抗性が付与される。耐海虫性については横須賀で実験が継続されており、海水中および干満帯に設置後8年を経過した時点において、表面にキクイムシ食害痕が認められるものの、顕著な曲げ剛性の低下は生じていないことから、フナクイムシ食害は生じていないと考えられる<sup>11)</sup>。この結果に基づき、宮島の厳島神社の海上社殿廻廊根元材としても2010年6月から使用されている。この根元材は干満帯に位置し、これまで用いられてきたマツやヒノキの無処理材は海虫害を受け、短いものでは5年程度で交換されてきたが、低分子フェノール樹脂処理材の使用により交換周期を長くできることが期待されている。

熱処理材は木材を200℃前後の温度で加熱することにより寸法安定性などの性能向上を図った木材である。熱処理の技術としては近年様々なものが開発されている<sup>12)</sup>。例えば、窒素雰囲気下で180～220℃程度の温度で処理されるエステックウッドや、水蒸気存在下で180～240℃で処理されるサーモウッドが実用化されている。これらの耐朽性や耐蟻性についての検討もなされている<sup>13,14)</sup>。窒素雰囲気下で熱処理されたエステックウッドの耐海虫性については、200℃で処理されたスギ、ホワイトアッシュ、レッドオークが、横須賀の海中に設置後6年間を経過した時点において、表面にキクイムシ食害は見られるものの、曲げ剛性の顕著な低下がないことからフナクイムシ食害を受けていないと考えられている<sup>11)</sup>。また、水蒸気存在下で185℃～237.5℃の温度で熱処理したサーモウッド処理スギ材の横須賀での3年間の海中浸漬試験を行った結果<sup>15)</sup>、処理温度および処理時間が

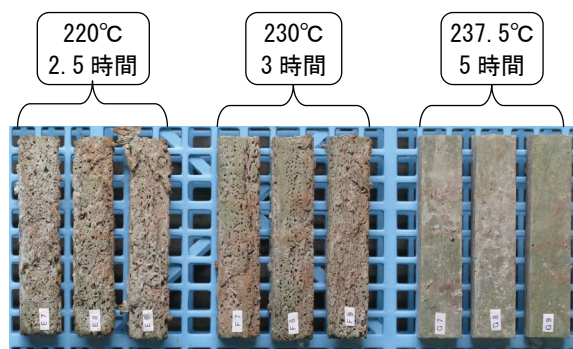


写真-2.4.4 水蒸気存在下で熱処理したスギ材の海中設置3年経過後の試験体<sup>15)</sup>

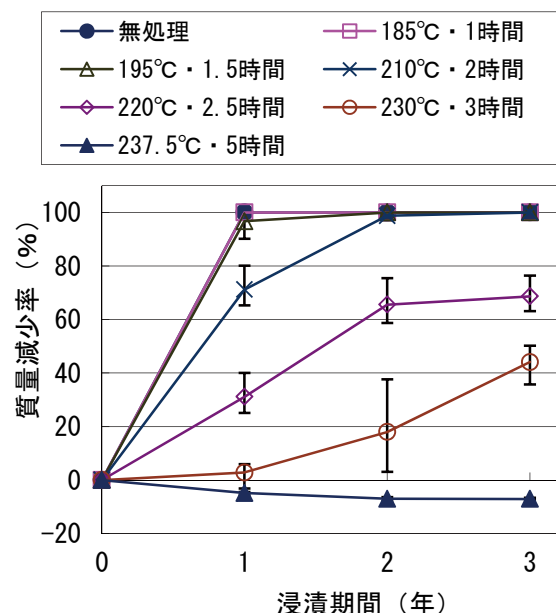


図-2.4.6 水蒸気存在下で熱処理したスギ試験体の海水設置後の質量減少率<sup>15)</sup>  
試験体寸法 2 × 2 × 10cm, 60℃乾燥質量を測定、データ点は3試験体の平均値、誤差範囲は最大値・最小値

増すほど海虫害が少なくなる傾向が見られた（図-2.4.6）。220℃・2.5時間処理材と230℃・3時間処理材では、早材部では食害が少なかったが晩材部がキクイムシによる食害を受け質量減少が生じたのに対し、237.5℃・5時間処理材では、いくつか小さな孔が見られたのみでほとんど無被



害であり、浸漬3年まで質量減少が生じなかった（写真-2.4.4）。

#### (4) 塗装および被覆処理

海虫害を被覆や塗装で防ぐ試みは、木造船では古くから行なわれてきた。木製包板は木造船の外側をもう一枚の板で包むものである。包板はスギなどの無処理材であり海虫の食害を受けるので頻繁に交換する必要があった。また包板と密着する船の本体に海虫が侵入することもあった<sup>16)</sup>。欧州の木製帆船では、銅や亜鉛などの金属製包板による被覆と、マツから抽出されたタール、タールを蒸留して得られる樹脂質のピッチ、獣脂、鯨油、硫黄などの塗装が用いられた<sup>17)</sup>。

栈橋などの木製橋脚の被覆ないし塗装材としては、銅、亜鉛などの金属やモルタルなどが用いられてきた<sup>18)</sup>。被覆材の耐用年数につ



写真-2.4.6 海中に8年間暴露した無処理のスギ材  
寸法：4cm × 4cm × 40cm、左：エポキシ樹脂を塗装した試験体、右：炭素繊維シートをエポキシ樹脂で接着した試験体（海水中設置8年後）

いて、厚さ0.03インチ（約0.76mm）の銅被覆の耐用年数を約15年とした報告がある<sup>19)</sup>。1950年代以降、PVC（塩化ビニル）、PU（ポリウレタン）、PE（ポリエチレン）などの合成樹脂やガラス繊維による被覆が米国などで試みられている<sup>19,20)</sup>。主に既設杭の補修に用いられ、新設杭への適用は比較的最近である。新設杭の場合、被覆の効果が少なくとも20年続くことが要求され、1本当たりのコストは、厚さ0.02-0.03インチ（約0.51-0.76mm）のPVCまたはPEによる被覆の場合で約400ドルという報告がある<sup>20)</sup>。厳島神社大鳥居の主柱下部（海水と接触する部分）にも、ガラス繊維被覆が1995年に施されている（写真-2.4.5）。

実験の一例として、無処理のスギ材（4cm × 4cm × 40cm）にエポキシ樹脂を塗装した試験体と、炭素繊維シート被覆（エポキシ樹脂で接着）した試験体を横須賀の海水中に設置し、1年ごとに観察と曲げ剛性試験をしたところ、エポキシ樹脂塗装試験体は設置後4年目から5年目にかけて曲げ剛性が大きく低下し、木口面の樹脂が剥離しフナクイムシ食害が露呈したのに対し、炭素繊維シート被覆試験体は設置後8年目までの時点では剛性の低下や外観の異状は生じていない（写真-2.4.6）<sup>11)</sup>。

また、無処理のスギ、ベイマツ、ナラの円柱材（φ5cm × 10cm）を、目開き0.143mm～0.760mmの6通りのPE製のメッシュで被覆（接着剤は使用せず）した試験体を、横須賀の海水中に16か月間設置したところ、目開き0.143mmと0.224mmのPEメッシュによる食害防除効果が認められた（写真-2.4.7、写真-2.4.8）<sup>21)</sup>。フナクイムシの幼生は直径約0.3mm、キクイムシは幅約1mmであるから、これらの大きさよりも目の細かいメッシュで被覆すれば海虫害を防げることが確かめられた。接着剤の不使用は、コスト縮減と廃棄時の分別容易性の向上を意図している。メッシュが透明であるため木材の外観が他の被覆工法のように損なわれないのも利点である。ただし実験でスギ材については目開き0.143mmと0.224mmのメッシュで被覆しても一部にキクイムシ食



写真-2.4.5 ガラス繊維が被覆されている厳島神社大鳥居主柱下部（2010年1月撮影）

害が生じており，特にキクイムシが好む針葉樹材においてはメッシュシート端部の隙間からのキクイムシの侵入を許さないような巻き付け方法が重要となる。

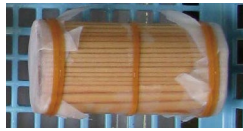


写真 -2.4.7 PE メッシュ被覆試験体の一例<sup>21)</sup>  
樹種スギ，メッシュ目開き 0.224mm

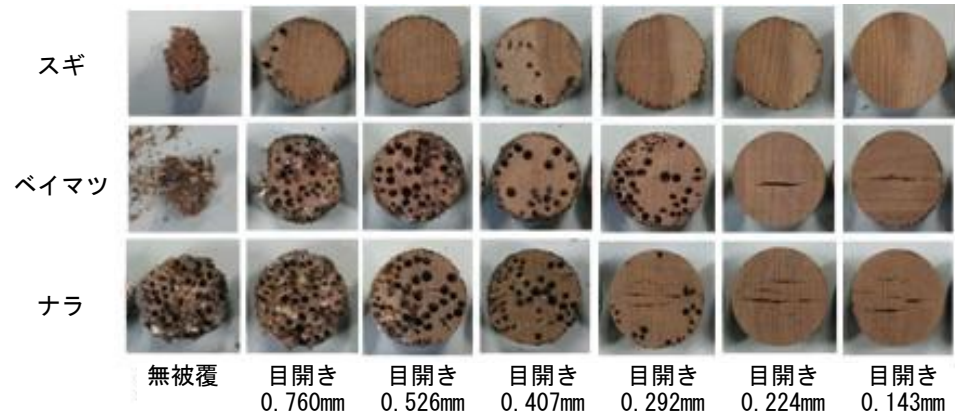


写真 -2.4.8 海中設置 16 か月経過時の PE メッシュ被覆試験体の切断面<sup>21)</sup>

(5) 参考文献

- 1) 山田昌郎：海虫による木材の食害速度と樹種の関係について，土木学会年次学術講演会概要集 (CD-ROM)，65(CS5-015):29-30 (2010)
- 2) 山田昌郎，森満範：海虫害を受けた 15 樹種の木材試験体の質量と強度の減少率，土木学会年次学術講演会概要集 (CD-ROM)，66(CS13-013):25-26 (2011)
- 3) 山田昌郎：無処理木材および木粉プラスチック複合材の海洋環境での耐久性試験（その 2），港湾空港技術研究所資料 No.1117 (2006)
- 4) 山田昌郎：無処理木材の東京湾沿岸での海虫類食害ならびに気中での物理的劣化に関する実験，港湾空港技術研究所資料 No.1208 (2010)
- 5) 山田昌郎，森満範：海虫害を受けた木材の質量減少と強度低下，木材利用研究論文報告集 10:124-129 (2011)
- 6) 酒井温子，岩本頼子，伊藤貴文，増田勝則，今村祐嗣，大藪芳樹，木戸徹，吉田善彦：家庭用品規制法に対応した改良クレオソート油の性能，木材保存 35:160-170 (2009)
- 7) 森満範，宮内輝久：北海道の海洋環境下における保存処理木材の海虫抵抗性，第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM (2010)
- 8) 森満範，宮内輝久，東智則，山田昌郎：海洋環境下における保存処理木材の耐久性 (2) ー横須賀市における暴露 48 か月間の結果ー，日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM，62:，(2012)
- 9) 桃原郁夫：保存処理について (6) その他の保存処理，住宅と木材，2012 年 3 月号，pp.4-5
- 10) 内倉清隆，鹿子島真由美：国産スギ間伐材の有効利用を目的とした高耐久性木材（エコアコーラウッド）の開発，日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集，20:10-11 (2002)
- 11) 山田昌郎：未発表資料
- 12) 桃原郁夫：熱処理と耐久性，木材保存，31:3-11 (2005)
- 13) 酒井温子，佐藤敬之，金沢吉昭：窒素雰囲気下で熱処理された木材の野外耐久性，木材保存，38:111-116 (2012)
- 14) 森田珠生，荘保伸一，山口秋生，今村祐嗣，桃原郁夫：熱処理木材の耐朽性，耐蟻性について，（社）日本木材保存協会年次大会論文集，25:2-7 (2009)
- 15) 山田昌郎：サーモウッド処理スギ材の耐海虫性，木材保存，38:255-258 (2012)
- 16) 馬渡静夫：海虫の被害とその防除，木材工業，14:359-363 (1959)
- 17) 寶田直之助：16 世紀 17 世紀の帆船ー慶長遣欧使節船の復元に困んでー（その 14），Techno Marine 日本造船学会誌，808:745-752 (1996)
- 18) Barnacle J. E.: Wood and its preservation in the sea - a resume, Proc. of the 4th International Congress on Marine Corrosion and Fouling, Juan-les-Prins, France; pp.57-66 (1976)
- 19) American Railway Engineering Association, Committee 7 - Protection of piling against marine organisms by means other than preservatives, Bulletin 721 - American Railway Engineering Association, pp.210-221 (1989)
- 20) Pendleton D. E.: Plastic coatings and wraps for new marine timber piling, Naval Civil Engineering Laboratory Technical Note N-1811, 1990
- 21) 山田昌郎，森満範：PE メッシュ被覆による木材の海虫害防除効果（その 2）ー横須賀での 16 ヶ月間の海水浸漬実験結果ー，日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM，62: (2012)

## 2.5 構造設計

荷重を負担する部材については、供用期間中に構造物が受ける荷重を想定し、荷重作用により部材が使用限界状態（過度の変形や振動などの使用上の不都合）または終局限界状態（破壊）に達することによって構造物の性能が要求水準を満たさなくなる確率が十分小さくなるように、部材の材料の等級や寸法等を決めるものとする。荷重の想定や構造物に要求される性能に関しては、その構造物を対象とする設計基準の規定に従うものとする。

海洋利用に特有の荷重として、波力、船舶の接岸エネルギー、係留船舶による牽引力などがある。この他、陸上施設と同様に、風力、土圧、地震時慣性力、自重等が作用する。これらの荷重の想定方法としては、港湾の施設の技術上の基準<sup>1)</sup>に下記項目について記載されている方法を適用するものとする。

- ・ 風（洋上での風速の特性値，風圧力，風力係数）
- ・ 潮位（潮位の定義，高潮，台風による潮位偏差，副振動（外界に通じた湾又は港の水に生じる一定周期の振動），異常潮位，平均水位の長期変動，設計潮位条件，地下水位と浸透）
- ・ 波浪（波浪推算（地形や気象データから波浪の諸元を推定すること），波浪の変形（屈折，回折，反射，浅水変形，碎波，打上げ高，越波，伝達波，平均水位の上昇，サーフビート），長周期波，静穏度，航走波，波圧及び波力（直立壁・海中部材及び孤立構造物・水面付近の構造物への作用），設計波浪条件，浮体の動揺）
- ・ 津波（波力，流速，数値計算，施設の性能照査の考え方）
- ・ 水の流れ等（海流，潮流，吹送流，密度流，海浜流，河口水理，漂砂，施設周辺の洗掘，海浜変形予測，流れに伴う流体力）
- ・ 地盤定数（土の物理的性質，土の力学的性質，動的解析）
- ・ 地震（施設の性能照査に用いる地震動，地盤－構造物系のモデル化と地震作用）
- ・ 土圧及び水圧（永続状態における土圧，地震時土圧，残留水圧，動水圧）
- ・ 地盤の液状化（液状化の予測・判定）
- ・ 地盤の沈下等
- ・ 船舶（対象船舶の諸元，船舶の接岸・動揺・牽引による作用）
- ・ 自重及び載荷重

また、港湾構造物の性能照査に関しては、同基準の以下のような施設・設備についての規定に準拠するものとする。

- ・ 共通事項（基礎，地盤改良工法等）
- ・ 外郭施設（防波堤，防砂堤，防潮堤，導流堤，水門，閘門，護岸，堤防，突堤，胸壁，埋没対策施設等）
- ・ 係留施設（岸壁，係船浮標，係船杭，栈橋，浮栈橋，物揚場，船揚場，附帯設備等）
- ・ その他の施設（臨港交通施設，荷さばき施設，保管施設，船舶役務用施設等）

材料については、同基準に木材についての規定があるので、これに準拠するものとする。この規

定では、「木材の強度の特性値の設定や部材としての耐力の照査は、日本建築学会木質構造限界状態設計指針（案）・同解説（以下、「指針（案）」と記す）に基づいて行うことができる。」とされているので、この指針（案）<sup>2)</sup>に準拠するものとする。

具体的な構造物の事例については、昭和 30 年代までの事例が多いので、この時代までの工事誌等を参照するのがよい。以下にいくつかの港湾施設について、文献<sup>3)</sup>から木材を使用した事例の概要を示す。

### (1) 柵式係船岸

施設名：衣浦港－ 3.5m 物揚場

管理者：愛知県

施工年度：昭和 31 ～ 36 年度

設計条件 水深：－ 3.50m， 天端高：＋ 3.20m， 延長：210.00m

H.W.L：＋ 2.30m， L.W.L：± 0.00m， 残留水位：＋ 1.00m

上載荷重：常時 1.0t/m<sup>2</sup>， 設計震度：0.2， 対象船舶：200t

矢板裏込土：砂（内部摩擦角 35°， 水中単位容積重量 1.0t/m<sup>3</sup>）

埋立（背後）土：シルト混り砂（内部摩擦角 10°， 水中単位容積重量 1.0t/m<sup>3</sup>）

矢板前面土：シルト混り砂（内部摩擦角 10°， 水中単位容積重量 1.0t/m<sup>3</sup>）

設計計算結果 矢板必要根入長：常時 2.2m， 地震時 4.4m

矢板最大曲げ応力度：常時 474kg/cm<sup>2</sup>， 地震時 633kg/cm<sup>2</sup>

基礎杭 押込力：常時 15.48t/ 本， 地震時 20.13t/ 本

引抜力：常時－ 6.28t/ 本， 地震時－ 19.11t/ 本

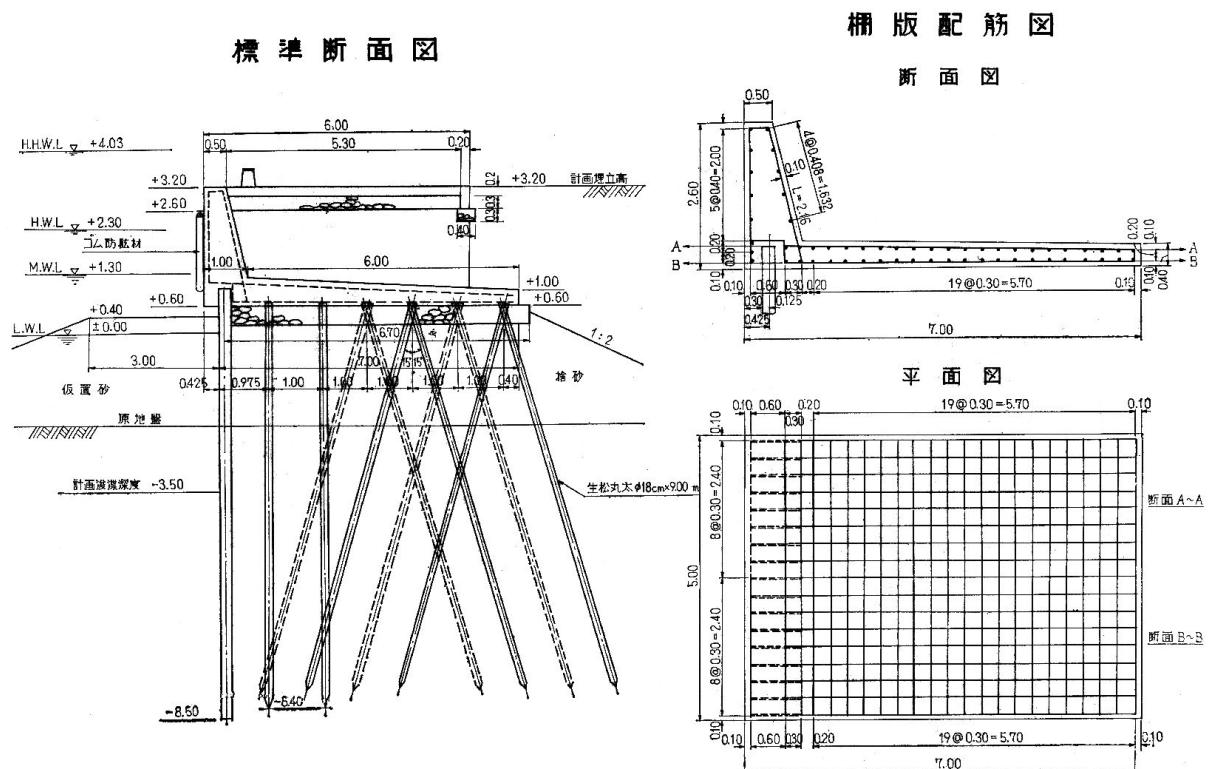


図 -2.5.1 柵式係船岸の例（衣浦港－ 3.5m 物揚場）

柵板 最大曲げモーメント：5.2t-m

矢板から柵に伝達される水平力：5.12t/m

構造 矢板 形式：Y.S.P—3， 断面係数：1.310cm<sup>3</sup>/m， 根入長：5.00m， 矢板長：9.50m

柵板 底部レベル：0.60m， 幅：7.00m， 底版の厚さ：0.50m

柵部基礎杭 種類：組杭・生松， 形状：φ 200 × 10.00m， 本数：5.1 本 / m，  
最大支持力：引抜力ー 20.9t/ 本， 押込力 22.1t/ 本

附属設備 防衝工 材料型式：中空円筒形ゴム， 形状寸法：φ 229 × 3.00m，  
取付方法：チェーン止め， 配置方法：10.0m 間隔

係船柱 直柱 材料：鉄筋コンクリート， 能力：10.0t/ 基， 基数：14 基 / バース

## (2) 栈橋

施設名：大牟田港木造栈橋

管理者：福岡県

施工年度：昭和 32 年度

設計条件 水深：+ 1.32m， 天端高：+ 6.50m， 延長：6.50m， 幅：7.92m

H.W.L：+ 5.08m， L.W.L：- 0.70m， 基準面：± 0.00m

構造 杭 材質：生松丸太， 形状：φ 150 × 7.00m， 根入長：6.27m

径間数：法線方向 4 径間， 法線直角方向 2 径間

杭間隔：法線方向 2.50m， 法線直角方向 1.50m

桁 材料形式：木造， 杉丸太径 24cm， 桁長（スパン）= 2.65m

床版 床版厚：敷板厚 6cm

取付栈橋 床版材料形式：鉄筋コンクリート， 床版厚 0.50m， 幅員 10.40m

附属設備 防衝工 材料型式：木材， 形状寸法：0.25 × 0.25 × 4.00m， 個数：5 個

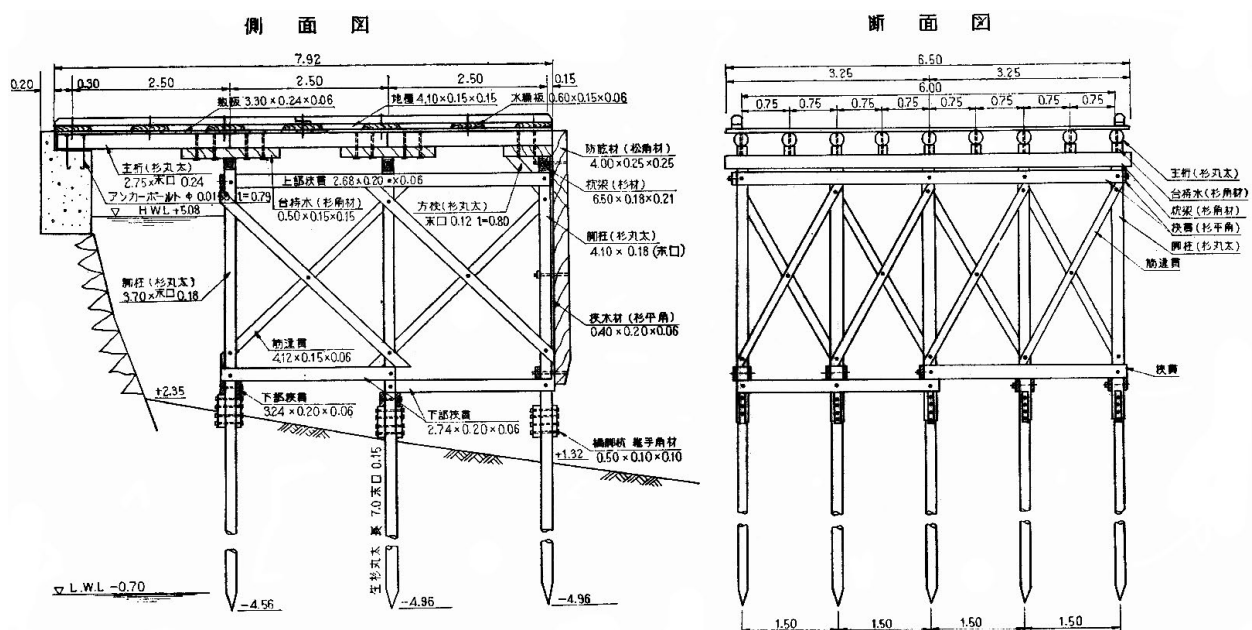


図 -2.5.2 木製栈橋の例（大牟田港）



### (3) ドルフィン

施設名：日本鉱業 K.K. 名古屋油槽所棧橋

管理者：日本鉱業 K.K. 名古屋油槽所

施工年度：不明

設計条件 水深：－ 4.50m（所定），

対象船舶：D/W 1,000 ～ 1,500T，

延長：20.00m，天端高：＋ 4.20m， H.W.L：＋ 2.70m， L.W.L：± 0.00m

構造 杭 材質：木材，

形状：末口 20cm × 17.00m

ブロック数：2 基 / バース，

杭本数：6 本 / 基，

杭先端深度：－ 10.80m

根入長：3.50 ～ 5.50m

径間数：法線方向 3 径間

打込角度：海側に＋ 4°，

陸側に－ 6 ～ 13°

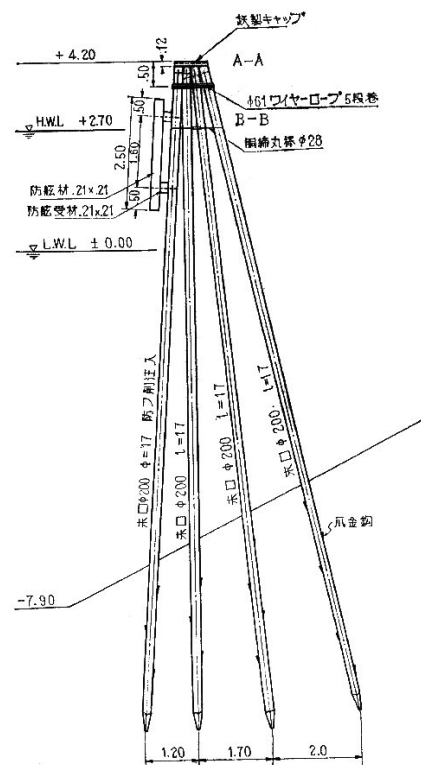
附属設備 防衝工 材料型式：松角，

形状寸法：0.21 × 0.21 × 2.50m， 個数：5 本 / 基

係船柱 直柱 材料：ガスパイプ鉄筋コンクリート中詰，

能力：30cm35t，

基数：4 基 / バース



木製ドルフィン構造図

杭1本に対する径間数 10ヶ

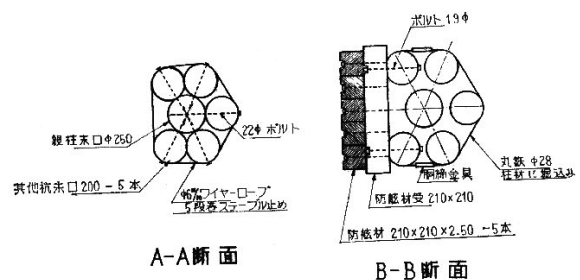


図-2.5.3 木製ドルフィンの例（名古屋港）

#### (4) 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007)
- 2) 日本建築学会：木質構造限界状態設計指針（案）・同解説 (2003)
- 3) 大島実，飯島昭美，中山種清，沢田源平，佐々木光兼：矢板式杭式繫船施設集覧，港湾技研資料 No.2 (1963)

## 2.6 環境性能

海洋において木材を用いる場合には、以下の環境性能についての検討を踏まえて、材料の調達先や海虫害対策を選択するものとする。

- a) 資源の持続可能性
- b) 海洋環境・生態系・人間の健康への影響
- c) 廃棄処理

### (1) 資源の持続可能性

木材は太陽エネルギーによる再生が可能な持続性の優れた材料ではあるが、消費速度が再生速度を上回れば全体としての森林資源量は減少していく。森林資源量の減少の主な原因は、森林の農地や宅地など多用途への転用（伐採後再植林が行われない）と、燃料としての木材の利用（消費に再生が追いつかない）である。木製品や土木・建築材は、数十年使用すれば再生が追いつくが、樹齢よりも短期間で交換されれば、基本的には再生が追いつかず全体としての森林資源量の減少に通じる。

海洋利用の場合、使用環境と海虫害対策の条件によっては、劣化により数年で交換の必要が生じる。このような場合に、海虫害対策を施して数十年使うようにするのも一つの方法であるが、現在の日本のように人工林の資源量に余裕があり木材利用促進が課題となっている状況では、数年で交換することを前提としての使用も考えられる。建築物等での利用に使用されない材質の低い木材や小径間伐材を、こうした短期間で交換される用途に活用することも考えられる。

一方、海虫害対策を施す場合や、飛沫帯や海底の土中での使用の場合には、数十年の使用に耐えることが見込まれるが、その場合にも木材をどの林地から調達するのか、その調達がその林地の保全にどのような影響を及ぼすのかを十分検討しなければならない。現在は公共工事においても市場原理に基づき可能な限り低価格で材料を調達することが一般には要求されるが、木材利用が本来環境側面から促進されていることを考慮し、短期的な経済性よりも長期的な環境性を重視して使用材料を選択すべきである。

### (2) 環境や人への影響

海虫害対策を検討する際には、木材に注入した薬剤の海中での溶脱率や、被覆に用いた樹脂の剥離率等を仮定し、これによって海中に拡散した物質の食物連鎖による魚介類の体内での濃縮、および海洋生態系と人間の健康への影響について想定しなければならない。この想定は実験データに基づき行うものとする。また、想定の妥当性について第三者が検証することが可能でなければならない。

### (3) 廃棄処理

海洋利用した木材の廃棄処理方法についても、あらかじめ想定しておく必要がある。部材としての再利用、細片化しての再利用、廃棄（焼却、埋め立て）等の可能性を検討し、その環境性、経済性等を評価しなければならない。



## 付録

### (1) 丸太および円柱材の曲げ試験

#### 丸太および円柱材の曲げ試験方法（案）

##### はじめに

この試験方法（案）は、ISO、ASTM、JIS（日本工業規格）、JAS（日本農林規格）を基に、国内における丸太および円柱材の曲げ強度特性評価に関する実情に反映させるため、技術的内容を変更して作成したものである。

#### 1 適用範囲

この試験方法（案）は、丸太および円柱材の曲げ試験方法について規定する。

注記 この試験方法（案）の対応規格を次に示す。

ISO 13059:2011, Round timber

Requirements for the measurement of dimensions and methods for the determination of volume

ISO/PRF 24294, Timber, Round and sawn timber, Vocabulary

ASTM D1036-99, Standard Test Methods of Static Tests of Wood Poles

JIS Z 2101:2009, 木材の試験方法（Methods of test for woods）

JAS 1052:2006, 素材の日本農林規格

#### 2 引用規格

次に掲げる規格は、この試験方法（案）に引用されることによって、この試験方法（案）の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

JIS Z 2101 木材の試験方法

JIS Z 8202-0 量及び単位—第0部：一般原則

JIS Z 8202-1 量及び単位—第1部：空間及び時間

JIS Z 8202-1 量及び単位—第3部：力学

JIS Z 8203 国際単位系 (SI) 及びその使い方

JIS Z 8703 試験場所の標準状態

#### 3 共通事項

##### 3.1 一般

ここでは、試験材サンプリング、調湿、試験体の作製、試験環境の設定、結果の計算及び表示、試験報告の方法について規定する。

##### 3.2 試験材

##### 3.2.1 試験材の選択

試験材は、ロットからそのロットを代表するように選択する。

### 3.3 試験材の調湿

試験材は、想定する使用環境下の含水率状態に近くなるように調湿する。なお、想定する使用環境下の含水率状態と同じ状態と認められる方法で、試験材を調湿してもよい。

### 3.4 試験体

#### 3.4.1 試験体の形状及び寸法

試験材から作製する試験体の形状及び寸法は、曲げ試験の目的に従って決定する。なお、試験材をそのまま曲げ試験に供試する場合は、試験材を試験体として読み替える。

#### 3.4.2 試験体の長軸

試験体の長軸は、両木口を結ぶ最短距離とする。ただし、両木口を結ぶ最短距離が測定できない場合は、両木口を結ぶ距離を材側面に沿って測定してもよい。

#### 3.4.3 試験体の断面形状

試験体の断面形状は、真円を仮定する。また、このときの直径は、外周長さから求める。

#### 3.4.4 寸法公差、寸法精度及び仕上げ

試験体の呼称寸法と実測寸法との公差は、 $\pm 1\text{mm}$  を超えないものとする。試験結果の計算に使わない部分の寸法は、試験結果に影響を及ぼさない精度を確保する。試験に影響する試験体の材面は、試験に差し支えないように仕上げなければならない。

### 3.5 試験体の数

試験体の数は、特別な定めがない限り、性能を評価するために適切な本数とする。あるいは、試験対象の曲げ強度特性値を必要な精度で決定するためには、統計的方法により試験体の数を決定する。

### 3.6 試験体の調湿

試験体は、想定する使用環境下の含水率状態を反映できるように調湿する。なお、想定する使用環境下の雰囲気ですべて調湿した状態と同じ状態と認められる方法で、試験体を調湿してもよい。

### 3.7 測定結果の計算方法及び表示は、次による。

- a) 木材の各性質の数値は、各項目で定められた式で計算する。計算に用いる数値は実寸法による。
- b) 計算結果は、各項目で定められた単位及び有効けた内で定められた精度で表示する。ただし、JIS Z 8202-0, JIS Z 8202-1, JIS Z 8202-1, JIS Z 8203 に従って表示してもよい。
- c) 試験結果の統計的評価は、JIS Z 2101 の 3.8 c) に従う。

### 3.8 試験報告

試験結果として、次の事項を報告する。

- a) 適用した規格の番号又は名称
- b) サンプルングの方法
- c) 樹種など試験材に関する情報
- d) 試験体の寸法、数量、密度、含水率
- e) 試験の内容及び結果
- f) 試験の実施日
- g) 試験場所の温度及び湿度



## h) 試験機関の名称及び試験者名

### 4 曲げ試験

#### 4.1 一般

ここでは、木材の曲げ強度、並びに曲げ比例限度応力及び見かけの曲げヤング係数の測定方法について規定する。

#### 4.2 測定概要

試験体に単調増加の曲げ荷重を加え、試験体が破壊するまで試験を行い、曲げ強度を測定する。また、試験中に試験体のたわみの測定を行い、曲げ比例限度応力、及び見かけの曲げヤング係数を求める。

#### 4.3 加力

##### 4.3.1 試験装置

試験体へ規定の荷重速度、又は変形速度で曲げ荷重を負荷することができ、最大荷重を1%の精度で測定できる試験機とする。

##### 4.3.2 加力方式

加力方式は、3等分点4点荷重方式、スパン $L$ は末口径または直径の18倍、荷重支点間距離は末口径または直径の6倍を標準条件とする（図-1）。ただし、特定の構造物や目的を対象としている場合、あるいは、材長に制限があるなどした場合は、この限りではない。また、試験の目的によっては、附録Aの3点荷重方式で曲げ試験を行ってもよい。

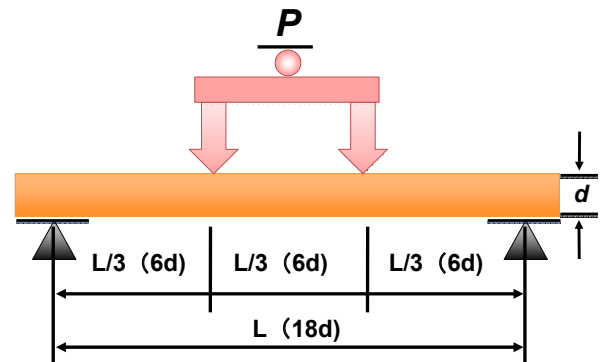


図-1 曲げ試験の方法（3等分点4点荷重）

##### 4.3.3 支点および荷重点

支点は、ナイフエッジの上に、長さや幅が試験体の末口径または直径の1.5倍以上の鋼板を載せたジグとする。また、試験体が支点にめり込みにくくするための工夫を施すようにする。荷重点は、曲げ破壊の形態に荷重点のめり込みの影響が生じないように形状を工夫したものを用いる。

##### 4.3.4 たわみ測定

中立軸のたわみを最大容量の0.5%の精度で測定できるものを用いる。また、支点部のめり込みの影響を取り除くため、ヨークを使用するか、もしくは、たわみから支点部のめり込み量を引いてたわみを測定する。

##### 4.3.5 寸法測定器

寸法を1mmの精度で測定できるものを用いる。

#### 4.4 試験手順

曲げ試験の手順は、次による。

- a) 試験体の外周をスパン中央部で、4.3.5で規定した寸法測定器を用いて測定し直径を求める。  
ただし、丸太の場合、末口側の荷重点や破壊が想定される箇所の曲げ強度を評価する場合は、その部分の外周を測定する。

b) 試験は、4.3.1 に規定した試験装置及び 4.3.3 に規定した支点および荷重点を用いて試験体が曲げ荷重負荷開始から 5±2 分で破壊するように一定の荷重速度，又は変形速度で曲げ荷重を付加する。破壊したときの荷重を測定し最大荷重 (Pm) とする。

c) 試験中に試験体のスパン中央部で 4.3.4 に規定したたわみ測定器を用いて，たわみを測定する。

#### 4.5 結果の計算及び表示

曲げ試験の測定結果の計算方法及び表示は，次による。

a) 曲げ強度  $\sigma_b$  は，次の式によって計算する。

$$\sigma_b = P_m a / 2Z$$

ここに， $\sigma_b$ ：曲げ強度， $P_m$ ：最大荷重， $a$ ：荷重支点間距離，  
 $Z$ ：断面係数 ( $Z=\pi d^3/32$ )， $d$ ：直径

b) たわみを測定した場合は，曲げ比例限度応力  $\sigma_{bp}$ ，及び見かけの曲げヤング係数  $E_{b-app}$  を次の式によって計算する。

$$\sigma_{bp} = P_p a / 2Z$$

$$E_{b-app} = (\Delta P a (3L^2 - 4a^2)) / (48 \Delta y I)$$

ここに， $\sigma_{bp}$ ：曲げ比例限度応力， $P_p$ ：比例限度荷重， $a$ ：荷重支点間距離，  
 $Z$ ：断面係数， $E_{b-app}$ ：見かけの曲げヤング係数，  
 $\Delta P$ ：比例限度領域内における上限荷重と下限荷重との差，  
 $L$ ：支点間距離， $\Delta y$ ： $\Delta P$  に対応するスパン中央部のたわみ，  
 $I$ ：断面 2 次モーメント ( $I=\pi d^4/64$ )， $d$ ：直径

c) 計算結果の表示は，曲げ強度，曲げ比例限度応力については，0.1N/mm<sup>2</sup> まで，見かけの曲げヤング係数については，0.01kN/mm<sup>2</sup> まで表示する。

#### 4.6 試験報告

試験報告は，3.8 によって報告する。また，3.8 e) には，1) 破壊の形態，2) 比例限度荷重及び比例限度領域内における上限荷重と下限荷重との差 ( $\Delta P$ ) の決定方法を追加する。

附録 A 3点荷重方式（中央集中荷重方式）による曲げ試験

スパン  $L$  は、末口径または直径の 14 倍を標準条件とする（図 -2）。ただし、特定の構造物や目的を対象としている場合、あるいは、材長に制限があるなどした場合は、この限りではない。

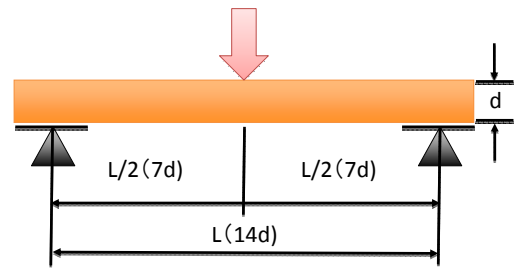


図 -2 曲げ試験の方法（3点荷重）

3点荷重方式による曲げ試験の測定結果の計算方法は、次による。

a) 曲げ強度  $\sigma_b$  は、次の式によって計算する。

$$\sigma_b = P_m L / 4 Z$$

ここに、 $\sigma_b$ ：曲げ強度、 $P_m$ ：最大荷重、 $L$ ：支点間距離、 $Z$ ：断面係数

$a$ ：荷重支点間距離

b) 曲げ比例限度応力  $\sigma_{bp}$ 、及び見かけの曲げヤング係数  $E_{b-app}$  を次の式によって計算する。

$$\sigma_{bp} = P_p L / 4 Z$$

$$E_{b-app} = (\Delta P L^3) / (48 \Delta y I)$$

ここに、 $\sigma_{bp}$ ：曲げ比例限度応力、 $E_{b-app}$ ：見かけの曲げヤング係数、

$P_p$ ：比例限度荷重、 $L$ ：支点間距離、 $I$ ：断面 2 次モーメント、

$\Delta P$ ：比例限度領域内における上限荷重と下限荷重との差、

$\Delta y$ ： $\Delta P$  に対応するスパン中央部のたわみ

(2) 研究実施体制および報告書執筆担当箇所

「フロンティア環境における間伐材利用技術の開発」

農林水産省実用技術開発事業予算（平成 21 年度～ 23 年度）

間伐材の地中利用技術の開発

間伐材打設による液状化発生の低減

飛鳥建設株式会社

沼田淳紀，本山寛

間伐材による建物・盛土の傾斜・変形抑制対策

早稲田大学理工学術院

濱田政則

間伐材の強度特性

独立行政法人 森林総合研究所

長尾博文，加藤英雄，井道裕史，三浦祥子

間伐材の接合部の性能評価

独立行政法人 森林総合研究所

原田真樹，宇京齊一郎

間伐材の保存処理

独立行政法人 森林総合研究所

桃原郁夫，大村和香子

間伐材の海洋利用技術の開発

海洋における木材利用技術の開発

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 林産試験場

森満範

独立行政法人 港湾空港技術研究所

山田昌郎

外部有識者

軟弱地盤研究所（佐賀大学名誉教授）

三浦哲彦

一般財団法人 建築研究協会（京都大学名誉教授）

今村祐嗣

福井工業高等専門学校

吉田雅穂

プログラム・オフィサー

農林水産技術情報協会

田崎清

注：所属は平成 24 年 3 月時点

### (3) 発表資料等一覧

#### 論文発表

Effect of drying method as a pretreatment on CUAZ preservative impregnation in Japanese cedar logs, Momohara I, Saito S, Ohmura W, Kiguchi M, Journal of Wood Science, 55, 441-445 (2009)

無処理木材の東京湾沿岸での海虫類食害ならびに気中での物理的劣化に関する実験, 山田昌郎, 港湾空港技術研究所資料, 1208:1-18(2010)

地盤改良杭としての利用を目指したスギ生材丸太および継手試験体の曲げ加力試験, 原田真樹, 長尾博文, 井道裕史, 他, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 60:D18-1530 (2010)

プロピルオレンジによる DDAC の定量, 桃原郁夫, 加藤厚, 西村健, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 60:N18-1015 (2010)

北海道の海洋環境下における保存処理木材の海虫抵抗性, 森満範, 宮内輝久, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 60:PN007 (2010)

木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究 (1):岸田健吾, 大澤修一, 中谷史規, 佐久間慶, 堤圭司, 濱田政則, 第 34 回地震工学・応用地学に関するシンポジウム, (2010)

木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究 (2):堤圭司, 大澤修一, 中谷史規, 岸田健吾, 佐久間慶, 濱田政則, 第 34 回地震工学・応用地学に関するシンポジウム, (2010)

砂地盤に対する間伐材貫入実験の概要, 沼田淳紀, 本山寛, 吉田雅穂, 他, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 65:CS5-023(2010)

砂地盤に対する間伐材貫入実験における液状化抵抗 (その 1), 本山寛, 沼田淳紀, 桃原郁夫, 長尾博文, 原田真樹, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, 2010 年 9 月

木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究 (1)—建物の対策法—, 堤圭司, 岸田健吾, 中谷史規, 他, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 65:CS5-021(2010)

木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究 (2)—盛土の対策法—, 中谷史規, 岸田健吾, 堤圭司, 他, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 65:CS5-022(2010)

海虫による木材の食害速度と樹種の関係について, 山田昌郎, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 65:CS5-015(2010)

間伐材打設による地盤の液状化抵抗の増加について, 沼田淳紀, 本山寛, 桃原郁夫, 他, 日本地震工学シンポジウム論文集 (CD-ROM), 13:G034-SAT-AM-11(2010)

天然乾燥木杭モデルへの木材保存剤の注入, 桃原郁夫, 木口実, 大村和香子, 松永浩史, 木材利用シンポジウム in 福井 概要集, 43-46 (2010)

地中における木材の耐久性について, 沼田淳紀, 久保光, 桃原郁夫, 吉田雅穂, 濱田政則, 本山寛, 木材利用シンポジウム in 福井 概要集, 25-32 (2010)

海洋環境における保存処理木材の耐久性, 森満範, 山田昌郎, 木材利用シンポジウム in 福井 概要集, 45-46 (2010)

Spectrophotometric assay of a wood preservative, didecyldimethylammonium chloride (DDAC), in aqueous solution. Momohara I, Kato A, Nishimura T, Journal of Wood Science, 56, 314-318 (2010)

海洋環境下における保存処理木材の耐久性—横須賀市における暴露 24 か月間の結果—, 森満範, 宮内輝久, 東智則, 他, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 61:N19-P-AM22(2011)

保存処理された住宅用基礎杭を打ち込んだモデル地盤からの流出水中に含まれる薬剤有効成分の定量, 桃原郁夫, 大村和香子, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 61:N19-P-AM14(2011)

地盤改良杭としての利用を目指したカラマツ生材丸太および継手試験体の曲げ加力試験, 宇京斉一郎, 原田真樹, 長尾博文, 他, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 61:D19-P-AM02(2011)

PPE メッシュ被覆による木材の海虫害防除効果—横須賀での 5 ケ月間の海水浸漬実験結果—, 山田昌郎, 森満範, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 61:N19-P-AM23(2011)

液状化対策における間伐材打設による地盤の密度増加, 沼田淳紀, 本山寛, 濱田政則, 他, 地盤工学研究発表会発表講演集 (CD-ROM), 46:1087(2011)

液状化対策における間伐材打設による水平土圧増加, 本山寛, 沼田淳紀, 濱田政則, 他, 地盤工学研究発表会発表講演集 (CD-ROM), 46:1086(2011)

間伐材打設による液状化対策の小型振動実験, 本山寛, 沼田淳紀, 桃原郁夫, 濱田政則, 木材利用研究論文報告集, 10:p43-49(2011)

海虫害を受けた木材の質量減少と強度低下, 土木学会木材利用研究発表会, 10:124-129 (2011)

間伐材打設による液状化対策の小型振動実験の方法, 沼田淳紀, 本山寛, 桃原郁夫, 他, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 66:CS13-009(2011)

木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究—盛土の対策法—: 岸田健吾, 堤圭司, 濱田政則, 土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月

海虫害を受けた 15 樹種の木材試験体の質量と強度の減少率, 山田昌郎, 森満範, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 66:CS13-013(2011)

小型振動実験による間伐材打設間隔と液状化対策効果, 本山寛, 沼田淳紀, 桃原郁夫, 他, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 66:CS13-010(2011)

鋼板添え板ラグスクリューボルト接合によるカラムツ丸太継手試験体の曲げ載荷試験, 原田真樹, 宇京斉一郎, 加藤英雄, 他, 日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集, 29:69-70(2011)

木材保存剤の木杭辺材部への注入性と乾燥方法との関係, 桃原郁夫, 谷川充, ESSIENCharles, 他, 日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集, 29:31-32(2011)

日本におけるフナクイムシ研究, 京都大学生存圏研究所 第 194 回生存圏シンポジウム, 2011 年 12 月

Spectrophotometric assay of a wood preservative, N,N-didecyl-N-methylpoly(oxyethyl) ammonium propionate (DMPAP), in aqueous solution, Momohara I. Ohmura W, Journal of Wood Science, 57, 166-169 (2011)

PE メッシュ被覆による木材の海虫害防除効果 (その 2)—横須賀での 16 ヶ月間の海水浸漬実験結果—, 山田昌郎, 森満範, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 62:N15-P-PM12(2012)

海洋環境下における保存処理木材の耐久性 (その 2)—横須賀市における暴露 48 か月間の結果—, 森満範, 宮内輝久, 東智則, 他, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 62:N15-P-PM13(2012)

生材状態におけるスギおよびカラムツ丸太の曲げおよび縦圧縮強度性能, 井道裕史, 長尾博文, 加藤英雄, 他, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 62:D15-P-AM05(2012)

自自然乾燥を利用した部分保存処理の試み, 桃原郁夫, 大村和香子, 谷川充, 日本木材学会大会研究発表要旨集 (完全版)(CD-ROM), 62:N15-P-PM11(2012)

2 種類の砂を用いた丸太打設液状化対策の振動実験, 沼田淳紀, 本山寛, 桃原郁夫, 他, 地盤工学研究発表会発表講演集 (CD-ROM), 47:794(2012)

丸太打設液状化対策の中型模型振動実験, 本山寛, 沼田淳紀, 濱田政則, 他, 地盤工学研究発表会発表講演集 (CD-ROM), 47:795(2012)

## 出版図書等

環境報告書 2009, 木材の土木的利用—木材を利用することで地球温暖化の抑制に貢献する—, 桃原郁夫 (無記名), 森林総合研究所, 2009 年 9 月

平成 22 年度独立行政法人 森林総合研究所 公開講演会+オープンラボ講演要旨集, 木材の土木分野での利用, 桃原郁夫, 森林総合研究所, 2009 年 10 月

丸太打設による軟弱地盤対策—木材利用による温室効果ガス削減効果—, 沼田淳紀, 建設機械 (日本工業出版), 2010 年 9 月

木材の土木利用拡大に向けた分野横断的取り組み, 桃原郁夫, 森林技術 (森林技術協会), 2011 年 7 月

国内における木材基礎の歴史的事例と設計方法の変遷, 沼田淳紀, 山田昌郎, 桃原郁夫, 他, 土木学会, 2012 年 3 月

注: 発表業績等は平成 24 年 3 月末時点での集計



#### (4) 図表等一覧

|           |                                                   |    |
|-----------|---------------------------------------------------|----|
| 写真 -1.5.1 | 木杭基礎によって支えられている工作物の例                              | 30 |
| 写真 -1.5.2 | 学士会館地下より掘り出された木杭（1928 年竣工）                        | 30 |
| 写真 -1.5.3 | ボルト穴などへの加工を施した後に加圧式保存処理で薬剤を注入した例                  | 34 |
| 写真 -1.5.4 | 加圧式保存処理で薬剤を注入した円柱材の切断面                            | 35 |
| 写真 -1.5.5 | インサイジングによって表面を刺傷した円柱加工材                           | 36 |
| 写真 -1.5.6 | 部分深浸潤処理で薬剤を注入した円柱材への薬剤の浸潤状況                       | 36 |
| 写真 -1.5.7 | 自然給水処理の実験例                                        | 37 |
| 写真 -1.5.8 | 自然給水処理の実験例                                        | 37 |
| 写真 -1.5.9 | 市販パイルを用いた溶脱実験の様子                                  | 40 |
| 写真 -2.3.1 | 木材から摘出したフナクイムシ                                    | 44 |
| 写真 -2.3.2 | フナクイムシの石灰質の棲管                                     | 44 |
| 写真 -2.3.3 | フナクイムシ頭部                                          | 44 |
| 写真 -2.3.4 | フナクイムシ貝殻（片側）                                      | 44 |
| 写真 -2.3.5 | フナクイムシの食害を受けた 4cm 角ブナ材の断面                         | 44 |
| 写真 -2.3.6 | キクイムシ（左：背面，右：正面）                                  | 45 |
| 写真 -2.3.7 | キクイムシの食害を受けた 4cm 角スギ材の外観                          | 45 |
| 写真 -2.3.8 | 海虫の食害を受けた栈橋の木杭                                    | 46 |
| 写真 -2.3.9 | ウェザリングによって目やせが生じたスギ材の木口面                          | 46 |
| 写真 -2.4.1 | 樹種による海虫害の相違の例 (1)                                 | 50 |
| 写真 -2.4.2 | 樹種による海虫害の相違の例 (2)                                 | 51 |
| 写真 -2.4.3 | 厳島神社海上社殿廻廊根元材に使用された低分子フェノール樹脂処理木材                 | 52 |
| 写真 -2.4.4 | 水蒸気存在下で熱処理したスギ材の海中設置 3 年経過後の試験体                   | 53 |
| 写真 -2.4.5 | ガラス繊維が被覆されている厳島神社大鳥居主柱下部（2010 年 1 月撮影）            | 54 |
| 写真 -2.4.6 | 海水中に 8 年間暴露した無処理のスギ材                              | 54 |
| 写真 -2.4.7 | PE メッシュ被覆試験体の一例                                   | 55 |
| 写真 -2.4.8 | 海中設置 16 か月経過時の PE メッシュ被覆試験体の切断面                   | 55 |
| 図 -1.2.1  | 新潟駅正面建屋（文献 1 に加筆）                                 | 2  |
| 図 -1.2.2  | 新潟駅とその周辺の地盤に生じた永久変位                               | 3  |
| 図 -1.2.3  | 幸橋とその周辺の地盤に生じた永久変位                                | 4  |
| 図 -1.2.4  | 間伐材打設による地盤密と液状化抵抗の増加の一例                           | 4  |
| 図 -1.2.5  | 間伐材打設による想定相対密度と沈下量の関係の一例                          | 5  |
| 図 -1.2.6  | 地盤と間伐材の複合地盤におけるせん断ひずみと合成のせん断剛性の関係                 | 5  |
| 図 -1.2.7  | 模型土槽の寸法とセンサー配置                                    | 6  |
| 図 -1.2.8  | 加振装置                                              | 6  |
| 図 -1.2.9  | 加振波形                                              | 6  |
| 図 -1.2.10 | 密度増大による対策の入力加速度と累積沈下量の関係                          | 7  |
| 図 -1.2.11 | 間伐材打設による対策の入力加速度と累積沈下量の関係                         | 7  |
| 図 -1.2.12 | 入力加速度 150gal の時の相対密度と沈下量の関係（豊浦砂）                  | 7  |
| 図 -1.2.13 | 入力加速度 150gal の時の相対密度と沈下量の関係（利根川砂）                 | 7  |
| 図 -1.2.14 | 補正 $N$ 値と繰返しせん断ひずみの関係                             | 10 |
| 図 -1.2.15 | レベル 1 とレベル 2 地震動に対する $P_L$ 値と液状化発生程度              | 11 |
| 図 -1.2.16 | 理論的な方法による間伐材打設間隔設定方法                              | 12 |
| 図 -1.2.17 | 密度増大工法に用いられる原地盤 $N$ 値 $N_0$ と改良後パイル中間 $N$ 値 $N_1$ | 13 |
| 図 -1.2.18 | 間伐材による改良率と間伐材打設後の地盤相対密度の関係                        | 14 |
| 図 -1.2.19 | 相対密度と $N$ 値の関係                                    | 15 |
| 図 -1.3.1  | 建物被害の有無と基礎形式の関係                                   | 17 |
| 図 -1.3.2  | 木杭打設による建物の沈下・傾斜抑制の考え方                             | 17 |
| 図 -1.3.3  | 木杭が建物の沈下と傾斜抑制に与える効果の検証模型                          | 18 |
| 図 -1.3.4  | 木杭の液状化層への根入れ長が建物の傾斜と沈下に与える影響                      | 18 |
| 図 -1.3.5  | 木杭の打設間隔が建物の傾斜・沈下抑制効果に与える効果                        | 19 |
| 図 -1.3.6  | 木杭が盛土の沈下・変形に与える効果の模型実験                            | 20 |
| 図 -1.3.7  | 木杭の液状化層への根入れ長が盛土天端の沈下抑制に与える効果                     | 20 |
| 図 -1.4.1  | 丸太の形状                                             | 21 |
| 図 -1.4.2  | 円柱材の形状                                            | 21 |
| 図 -1.4.3  | 製材の形状                                             | 21 |

|          |                                            |    |
|----------|--------------------------------------------|----|
| 図 -1.4.4 | スギ丸太の曲げ・縦圧縮強度の含水率状態による比較                   | 23 |
| 図 -1.4.5 | カラマツ丸太の曲げ・縦圧縮強度の含水率状態による比較                 | 23 |
| 図 -1.4.6 | スギ製材の曲げ・縦圧縮強度の含水率状態による比較                   | 23 |
| 図 -1.4.7 | 接合間伐杭の施工例                                  | 26 |
| 図 -1.4.8 | 実験によって得られた継手を有する杭の最大モーメントと計算値との比較          | 28 |
| 図 -1.5.1 | 性能区分 K4 の浸潤度の考え方（耐久性 D <sub>2</sub> の樹種の例） | 32 |
| 図 -1.5.2 | 加圧式保存処理の圧力スケジュール                           | 35 |
| 図 -1.5.3 | 部分深浸潤処理のスキーム                               | 36 |
| 図 -1.5.4 | 自然給水処理時の木材保存剤浸透機構                          | 37 |
| 図 -1.5.5 | 保存処理杭から流れ出る水に含まれる薬剤量                       | 40 |
| 図 -1.5.6 | 薬剤溶脱速度測定用装置の概略図                            | 40 |
| 図 -1.5.7 | 小試験片から溶脱してくる薬剤量と溶脱時間との関係                   | 40 |
| 図 -1     | 曲げ試験の方法（3 等分点 4 点荷重）                       | 66 |
| 図 -2.3.1 | 木材に穿孔中のオオフナクイムシの側面図                        | 43 |
| 図 -2.3.2 | フナクイムシの正中縦断面                               | 43 |
| 図 -2.3.3 | カモメガイ                                      | 44 |
| 図 -2.3.4 | キクイムシ                                      | 44 |
| 図 -2.3.5 | ナナツバコツブムシ                                  | 45 |
| 図 -2.3.6 | ヨツバコツブムシ                                   | 45 |
| 図 -2.3.7 | 海の木杭の典型的な劣化傾向                              | 46 |
| 図 -2.3.8 | 木材の暴露試験結果の一例                               | 46 |
| 図 -2.4.1 | キクイムシによる食害速度の樹種による違い                       | 50 |
| 図 -2.4.2 | 木材の比重と硬さの関係                                | 50 |
| 図 -2.4.3 | フナクイムシによる食害速度の樹種による違い                      | 51 |
| 図 -2.4.4 | 海虫の食害による質量減少率と圧縮強度減少率の関係                   | 52 |
| 図 -2.4.5 | 海虫の食害による質量減少率と曲げ強度減少率の関係                   | 52 |
| 図 -2.4.6 | 水蒸気存在下で熱処理したスギ試験体の海水設置後の質量減少率              | 53 |
| 図 -2.5.1 | 棚式係船岸の例（衣浦港－ 3.5m 物揚場）                     | 58 |
| 図 -2.5.2 | 木製栈橋の例（大牟田港）                               | 59 |
| 図 -2     | 曲げ試験の方法（3 点荷重）                             | 68 |
| 表 -1.2.1 | 非液状化層中の流動力の補正係数 $C_{NL}$                   | 11 |
| 表 -1.2.2 | $D_{cy}$ と液状化の程度の関係                        | 11 |
| 表 -1.4.1 | スギ製材の含水率 1% あたりの各強度の変化率                    | 22 |
| 表 -1.4.2 | 普通構造材の基準強度                                 | 24 |
| 表 -1.4.3 | 木杭として使用される木材の許容応力度（案）                      | 25 |
| 表 -1.4.4 | 丸太を用いた継手接合部の剛性に対する重回帰分析の結果                 | 29 |
| 表 -1.5.1 | 性能区分 K4 の品質を満足する吸収量の基準                     | 31 |
| 表 -1.5.2 | 性能区分 K4 の品質を満足する浸潤度の基準                     | 32 |
| 表 -1.5.3 | 性能区分 K5 の品質を満足する吸収量の基準                     | 32 |
| 表 -1.5.4 | 性能区分 K5 の品質を満足する浸潤度の基準                     | 32 |
| 表 -1.5.5 | 性能区分 K4 に相当する AQ 認証材の品質（認証区分 1 種）          | 33 |
| 表 -1.5.6 | AQ 認証材（1 種）の樹種区分と浸潤度の基準                    | 34 |

(5) 索引

- ISO 64  
圧縮 22, 23, 24, 25, 27  
安全係数 24, 25  
安全性 31, 39, 41  
安全率 10  
インサイジング 35, 36, 38  
ウェザリング 43, 46, 47  
ASTM 64  
AQ 取得工場 35  
AQ 認証 33, 34, 35, 36, 39  
ACQ 31, 32, 33  
ACQ 52  
液状化 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 4  
液状化指数 10, 11, 12  
液状化層の厚さ 18, 19  
液状化対策 1, 2, 3, 4, 6, 7  
液状化対策効果 10, 12, 15  
液状化抵抗 4, 5, 6  
液状化抵抗率 10  
液状化発生の可能性 9  
NCU 31, 32, 33  
N 値 10, 12, 15, 16  
遠心載荷場 19  
円柱材 21, 22, 23, 24, 64  
円柱類 21  
塩ビ管 26, 27, 28, 29  
屋外製品部材 33  
加圧式保存処理 34, 35, 38, 41  
海虫 43, 44, 46, 47, 49  
海虫害対策 50, 51, 62  
海虫抵抗性 52, 56  
海洋 42, 46, 47  
改良率 10, 14  
貝類 43, 48  
荷重継続期間影響係数 25  
荷重支点間距離 66, 67, 68  
荷重速度 66, 67  
加振装置 6  
カモメガイ 44  
ガラス繊維被覆 54  
環境負荷 35, 39, 40  
間隙比 12, 14, 15  
含水率 22, 23, 25, 29, 37, 38  
含水率影響係数 25  
含水率調整係数 23  
間伐材間隔 6  
間伐材打設 1, 2, 4, 5, 7  
間伐材断面積 14  
干満帯 43, 45, 46  
機械等級区分 22  
気乾材 22, 23, 24, 26  
木杭基礎建物の被害状況 17  
キクイムシ 43, 44, 45, 46  
基準強度 24, 25  
基準弾性係数 24, 25  
吸収量 31, 32, 33  
強度 1, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 53, 56, 58, 64, 65, 66, 67, 68  
強度減少率 51, 52  
強度等級区分 22  
強度特性 64, 65  
許容応力度 24, 25, 27, 29  
繰返しせん断ひずみ 10  
クレオソート油 31, 32, 33, 52, 56  
K5 31, 32, 33  
傾斜抑制効果 19  
K4 31, 32, 33, 37  
甲殻動物 43, 44  
剛性 22, 26, 27, 28, 29  
構造設計 57  
鋼板 26, 27, 29  
降伏せん断耐力 27  
降伏耐力 27, 28  
広葉樹材 51  
港湾の施設の技術上の基準 57  
コツブムシ 43, 45, 46, 48  
最小間隙比 12, 14, 15  
最大荷重 66, 67, 68  
最大間隙比 14  
最大最小間隙比 12  
細粒分含有率 8  
栈橋 59  
サンプリング 64, 65  
CCA 52  
CUAZ 31, 33, 39, 41, 52  
自然給水処理 35, 37, 38  
質量減少率 50, 51, 52, 53  
地盤改良効果 1  
地盤間隙比 12  
地盤拘束圧 7  
地盤特性 4  
地盤内土圧 5  
地盤の相対密度 14, 15  
地盤密度 2, 5, 7, 14, 15  
地盤密度の増加 12  
JAS 31, 33, 35, 36, 37, 39  
JAS 認定工場 35  
終局限界状態 57  
重力場 18, 19  
重力場の模型実験 18  
樹脂処理 52, 53  
ジョイント 26, 29  
使用環境 43  
使用限界状態 57  
シロアリ 30  
浸潤度 32, 34  
湿潤密度 9  
浸漬 35, 36, 37  
振動実験 6  
針葉樹材 51, 54

|                                |                                           |                                                |
|--------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 水分状態 22                        | 長期許容応力度 24, 25                            | 飽和土 8                                          |
| 水平土圧 5, 6                      | 調湿 64, 65                                 | 飽和密度 9                                         |
| ステンレス鋼管 26, 29                 | 沈下抑制効果 19                                 | 保存処理 1, 30, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 41, 50, 56 |
| 製材 21, 22, 23, 24, 29          | 沈下量 5, 6, 7                               | 曲げ 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29              |
| 静的貫入 5                         | 継手 26, 27, 28, 29                         | 曲げ応力 28                                        |
| 性能区分 31, 32, 33                | 継手の強度的性能 27                               | 曲げ荷重 66, 67                                    |
| 設計用強度 21, 22, 24               | 低分子フェノール樹脂 53                             | 曲げ強度 64, 65, 66, 67, 68                        |
| 設計用弾性係数 25                     | 銅・アゾール化合物 31, 33                          | 曲げ強度の変化率 22                                    |
| 繊維飽和点 22, 36, 38               | 銅・第四級アンモニウム化合物 31, 32, 33                 | 曲げ降伏型接合具 27                                    |
| 穿孔 43, 44, 45, 46, 47, 48      | 塗装 50, 54                                 | 曲げ試験 67                                        |
| せん断剛性 5, 6, 7                  | ドルフィン 60                                  | 曲げ比例限度応力 66, 67, 68                            |
| せん断ひずみ 5                       | ナフテン酸金属塩 31, 32, 33                       | 曲げヤング係数 66, 67, 68                             |
| 総則 1                           | 生材 22, 23, 24, 26                         | 曲げヤング係数の変化率 22                                 |
| 相対密度 5, 6, 7, 12, 14, 15, 16   | 生材の強度低減率 23                               | 摩擦杭 6                                          |
| 側方流動 17                        | 軟弱粘性土 1                                   | 丸太 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 64, 66  |
| 素材耐久性 50                       | 軟体動物 43                                   | 無欠点小試験体 22                                     |
| 塑性指数 8                         | ニオガイ 43, 44, 48                           | メッシュ被覆 54                                      |
| 対応規格 64                        | 日本住宅・木材技術センター 33, 41                      | 木材の試験方法 64                                     |
| 耐久性 31, 32, 34, 30, 50, 51, 56 | 日本農林規格 21, 22, 23, 24, 29, 31, 33, 35, 41 | 木材の品質 21                                       |
| 体積ひずみ 10                       | 根入れ長 17, 18, 19, 20                       | 木材腐朽菌 30                                       |
| 耐用年数 42                        | 熱処理 53, 56                                | 目視等級区分 22                                      |
| 打撃貫入 5                         | 破壊 66, 67                                 | 目標耐用年数 42                                      |
| 打設間隔 12, 14, 19                | 破壊モード 27                                  | 盛土の沈下変形抑制 19                                   |
| 縦圧縮強度 22, 23                   | 比重 50, 51                                 | 盛土の変形抑制 17                                     |
| 縦圧縮許容応力度 27                    | 引張 22, 27, 28                             | 薬剤 50, 52, 53, 62                              |
| 建物の傾斜抑制 17, 18                 | 被覆 50, 54, 55, 56, 62                     | ヤング係数 22, 23                                   |
| 棚式係船岸 58                       | 飛沫帯 43, 46                                | 有効密度 9                                         |
| たわみ 66, 67, 68                 | 品質性能評価基準 33, 41                           | 優良木質建材等認証 33                                   |
| たわみ角 28                        | 風化 43, 46, 49                             | 溶脱 39, 40                                      |
| 短期許容応力度 24, 25                 | フナクイムシ 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49         | ラグスクリーボルト 26                                   |
| 弾性係数 23, 24, 25                | 部分深浸潤処理 35, 36                            | 粒度組成 9                                         |
| 炭素繊維シート被覆 54                   | 防蟻処理 30, 31, 35, 39                       | 劣化要因 43, 46                                    |
| 断面形状 65                        | 防腐・防蟻処理 30, 31, 35, 39                    |                                                |
| 断面係数 67, 68                    | 飽和地盤 8                                    |                                                |
| 地下水位 8                         |                                           |                                                |
| 地表変位 10                        |                                           |                                                |
| 潮間帯 43, 45, 46, 48             |                                           |                                                |

独立行政法人 森林総合研究所  
URL: <http://www.ffpri.affrc.go.jp>

独立行政法人 森林総合研究所  
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

編集・発行 木材改質研究領域，構造利用研究領域

発行日 2013年3月3日

お問い合わせ先 編集刊行係

電話 029-829-8135

E-mail: [kanko@ffpri.affrc.go.jp](mailto:kanko@ffpri.affrc.go.jp)

本冊子の本文・写真・図・表の無断複製・転載を禁じます。

リサイクル適正の表示：紙へのリサイクル可