

木材の地中利用（環境パイル工法、LP-LiC工法の開発）

Underground Use of Wood

水谷 羊介*1、中村 博*2、三村 佳織*3

1. はじめに

近年では小規模構造物の地盤への要求性能が高まってきており、その地盤補強対策としては、鋼管杭やRC杭及びセメント系固化工材等を用いた工法が主流となっている。一方、「杭」と言えば古くは木杭であった。昭和初期までの構造物の軟弱地盤対策の殆どは木杭であり、現存するそれらの構造物の殆どは健全な状態を保っている。本報では、木杭の地中利用について使用されなくなった背景とその課題を紹介する。なお、本報における「杭」とは杭状地盤補強材のことを指す。

2. 木杭が解決すべき課題

木杭が使われなくなった歴史的背景には法律上の適用範囲の課題もあるが、そのほかに設計上の課題や耐久性に関する課題などがある。現在でも九州の一部の地域ではこのような伝統的な木杭工法が用いられている例もあるが、全国的に見てみると鋼材やセメント系固化工材などの人工材料の台頭により木杭が用いられることはほとんどなくなってきていた。一方で、最近になって再度木材の地中利用としての木杭が見直されつつあるのも事実である。そのきっかけを作ったのは1999年に実施された旧丸ビルの解体工事であると考えられる。丸ノ内ビルディング（旧丸ビル）は1923年（大正12年）に竣工した杭基礎形式の建物であった。杭材としてはアメリカから輸入されたベイマツが使用されており、1999年の解体時にはその多くが健全な状態で出土され、チップやベンチとして再利用された。

図-1に、木杭の地中利用（構造物の軟弱地盤対策や液

状化対策）として設計・施工する際の課題を樹形図で示す。木杭の地中利用に関する課題は物理的課題と化学的課題に大別できる。物理的課題としては常時荷重における構造物の不同沈下防止としての支持力機構の課題、地震時における液状化抑止策としての理論の解明がある。また、化学的課題としては木材を地中利用した時の耐久性の評価などがある。以下ではこれらの代表的な課題に対する筆者らが開発してきた工法に関して実施してきた研究とその成果について紹介する。

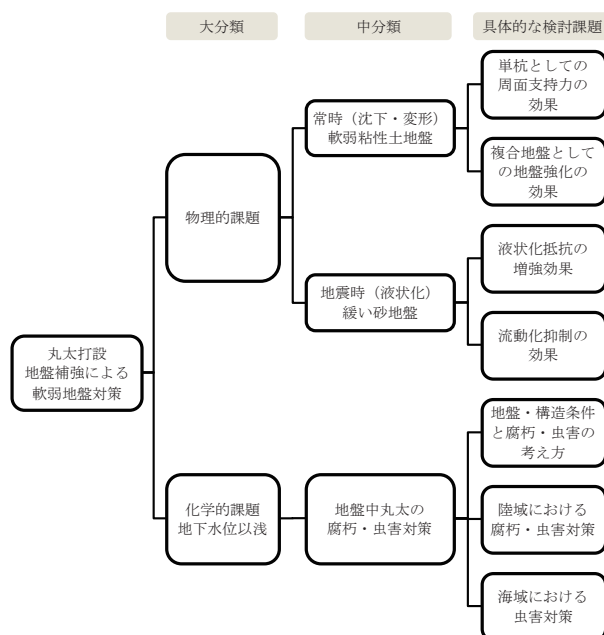


図-1 木杭の地中利用における課題

*1 MIZUTANI Yosuke：兼松日産農林株式会社 ジオテック事業部

*2 NAKAMURA Hiroshi：兼松日産農林株式会社 ジオテック事業部

*3 MIMURA Kaori：兼松日産農林株式会社 ジオテック事業部

3. 木杭の支持力機構（環境パイル工法）

木杭の鉛直支持力を評価するため複数の試験地において複数本の試験杭に対して載荷試験を実施してきた。木杭の支持力を評価する上で重要となってくるのがその独特の形状である。木材は地中に根を張り上へと伸び成長していくが、その過程において地中部に近い部分が太く先端に近づくにしたがって徐々に細くなる傾向にある。一般的に木杭の太い径の方を元口、細い径の方を末口などと呼んでいる。筆者らは木杭の支持力特性を評価するにあたり開発当初はできる限り不確定要素を取り除くため円柱状に成形加工した木杭を用いて載荷試験を実施し、その支持力特性を確認した。その後、円柱状に成形加工を施さない木杭についても円柱状に成形加工した木杭と同等以上の支持力性能を有していることを確認する試験を実施した。本章では、その試験結果の一部を紹介する。

3.1 試験概要

本試験地は福島県福島市松川郡に位置しており、地盤調査結果は図-2に示すとおりである。地盤調査としては標準貫入試験（以後、SPT）及びスウェーデン式サウンディング試験（以後、SWS）を実施した。表層から4m程度までは貫入抵抗値が小さく軟弱な層が分布していることがわかる。その下にわずかな砂質土層を介して、さらに1m程度の粘性土層の下部に貫入抵抗値が大きな礫層が存在する。上記試験地においてGL-5.0mに存在する砂質シルト層まで試験杭を施工する計画とした。試験杭は直径140mmの円柱状に成形加工したスギを使用した。

写真-1には円柱状に成形加工した木杭を示す。

施工重機を写真-2に示す。施工重機はリーダーを有し、鉛直性が確実に確保できるようになっており、重機サイズに対して圧入力の大きな重機である。

載荷試験は地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」に基づき、多サイクルの段階載荷方式で実施するものとし、測定時間は表-1に示すとおりとした。



写真-1 円柱状に成形加工した木杭

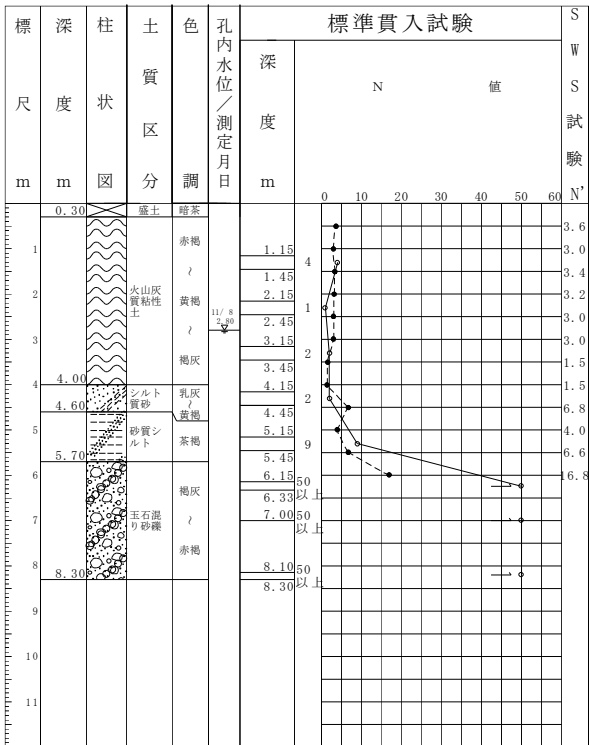


図-2 地盤調査結果



写真-2 施工重機

表-1 荷重-変位計測時間

計測項目	荷重区分	計測時間(分)
試験杭	新規荷重	0,1,2,5,10,15,30
	履歴内荷重	0,1,2
	0荷重	0,1,2,5,10,15



写真-3 載荷試験実施状況

表-2 サイクルと荷重段階

サイクル	最大荷重 (kN)	荷重段階(kN)
予備	8	0～8～0
1	30	0～15～30～15～0
2	60	0～30～45～60～45～30～0
3	90	0～30～60～75～90～75～60～30～0
4	220	0～30～60～90～105～120～135～150～165～180～200～220～200～180～150～120～90～60～30～0

—は新規荷重

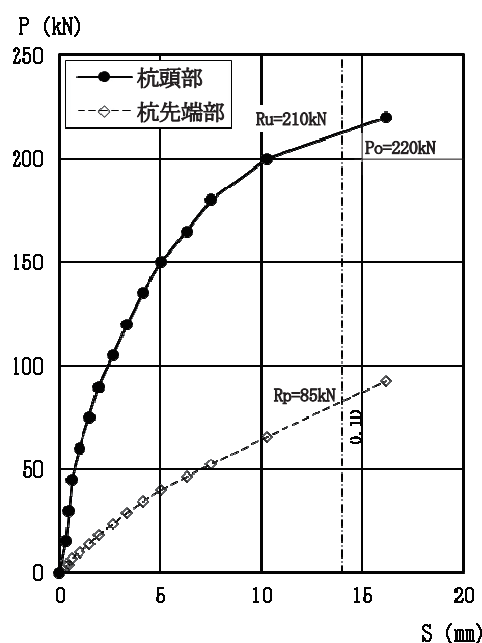


図-3 荷重-沈下量曲線

3.2 試験結果

写真-3には載荷試験実施状況を示す。表-2は試験を実施したサイクルと荷重段階を示したものである。載荷試験は4サイクルで行い、杭径の10% (14mm) 以上沈下させるまで実施した。最大荷重として220kNが得られた。図-3には試験における荷重-沈下量曲線を示す。荷重-沈

下量曲線より第二限界抵抗力（沈下量0.1Dで定義）を求めると210kNであることがわかった。また、先端部分の第二限界抵抗力も合わせて算出してみると85kNであることがわかった。木杭の利用分野としては荷重が大きい小規模建築物などを対象とすると考えられるが、上記試験結果からも小規模建築物の地盤補強としては十分に要求性能を満足できると考えられる。

3.3 既存工法との比較試験¹⁾

本試験では、木杭と既存の地盤補強工法を比較すると同時に様々な木杭に対して載荷試験を実施した。

試験杭は表-3および写真-4に示す通りであり、試験杭は既往の地盤補強工法としてコンクリート杭 (C1) 及び鋼管杭 (S1、先端閉塞ストレート杭)、木材を用いた地盤補強工法として、スギ (Wbtp)、マツ (Pbtp)、細いスギ (Wbtpn)、排水機能を有したスギ (Wbdr)、スギ杭の2箇所継ぎ (Wbjt)、テーパ状に定型化 (ロータリー加工) したスギ (Wrtp) 及び円柱状に定型化 (ロータリー加工) したスギ (Wrst) を施工した。

表-3 試験杭諸元

杭No.	形状	継ぎ	排水機能	加工	備考
C1	テーパ	なし	なし	-	RC杭
S1	ストレート	なし	なし	-	鋼管杭
Wbtp	テーパ	なし	なし	皮むき	スギ
Pbtp	テーパ	なし	なし	皮むき	マツ
Wbtpn	テーパ	なし	なし	皮むき	スギ、細径
Wbdr	テーパ	なし	あり	皮むき	スギ、排水
Wbjt	テーパ	2箇所継ぎ	なし	皮むき	スギ、継ぎ
Wrtp	テーパ	なし	なし	ロータリー	加工、テーパ
Wrst	ストレート	なし	なし	ロータリー	加工、ストレート



写真-4 試験杭

樹皮を剥いた原木状のまま使用する試験杭に関しては複数回の選定を行い、可能な限り均一な材料を選定した。選定状況を図-4に示す。一次選定として木杭の製造地において約2000本の木杭の中から無作為に200本程度を抽出し、二次選定として約200本の材料の中から「欠け」や「曲がり」の著しいものを除外し100本程度まで抽出し、三次選定として元口径及び末口径を計測し、条件に見合

う材料を40本程度抽出した。さらに、最終選定として加工所にて再度寸法を計測し使用材料を決定した。

写真-5には試験ヤードの全景を、図-5には試験杭の配置をそれぞれ示す。写真-6に代表的な試験杭の施工状況を示す。試験杭の施工は圧入専用の重機（通常時で90kN程度の圧入力）を用いて無回転圧入によりGL-4.0mまで貫入した。今回試験を行った土地の地盤が非常に軟弱であったため（図-6参照）、いずれの杭も最大圧入力

は20～30kN程度であった。杭の荷重試験は、静的荷重による杭の鉛直支持力特性を把握することを目的として実施した。杭の荷重試験方法は地盤工学会基準「杭の鉛直荷重試験方法・同解説」に従い、荷重を段階的に一定時間保持しながら増加させる段階荷重方式を採用し、基本的に3サイクル6段階とし、6段階以降の荷重に関しては除荷せず最大荷重を確認するまで試験を継続した。

各試験杭の第二限界抵抗力（杭頭の沈下量が末口径の10%に達した荷重）はC1が31.8kN、S1が30.3kN、Wbtnが42.5kN、Wrstが35.0kNとなった。本比較試験は既存工法と木杭の支持力を比較する目的として実施したが、既存工法と比較しても木杭は同等程度の支持力が得られることが確認できた。

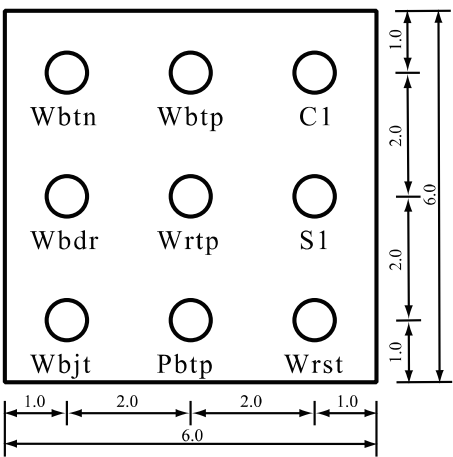


図-5 試験杭の配置（単位：m）



写真-6 Wbtp施工状況

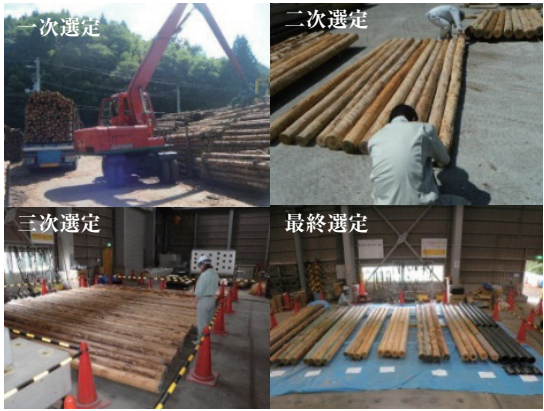


図-4 試験杭選定状況



写真-5 試験ヤード全景

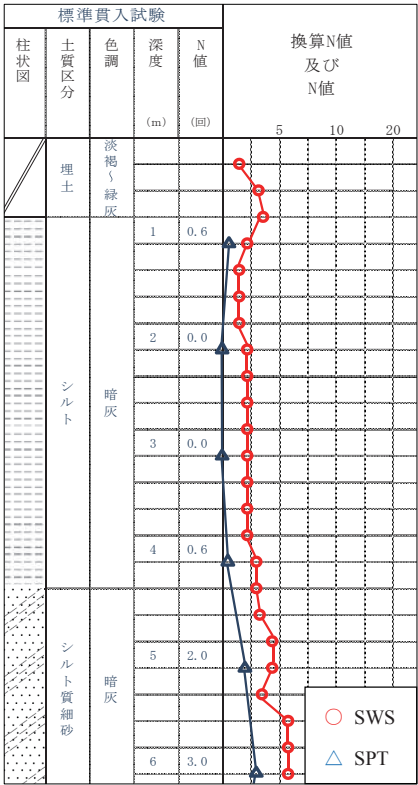


図-6 地盤調査結果

4. 丸太を用いた地盤の密度増大 (LP-LiC工法)

木材の地中利用として常時荷重における不同沈下防止対策の他に、地震時における液状化対策がある。

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北から関東地方の広範囲で液状化被害が生じた。来るべき南海トラフ地震では西日本一帯で強い揺れが予測されており、液状化による被害が懸念されている。液状化による被害を最小化するためには事前対策が有効であり、筆者らは丸太打設による密度増大工法を提案している。本開発では様々な室内実験、数値解析、実大現場実験などを行ったが、本章では室内実験の一部と実大現場実験の一部を紹介する。

4.1 室内実験²⁾

写真-7に模型地盤の全景を示す。振動実験は、内寸で幅5.7m×奥行き3.6m×高さ1.8mの土槽内に二枚の仕切り板を設置し、2ケースを同時に実験した。表-4に、実験ケースを、図-7に模型地盤の詳細を示す。

土槽1では、無対策のケース (NIP) と5D間隔 (D : 丸太末口径) に丸太を打設したケース (P5D)、土槽2では、密度増大を行ったケース (DNS) と4D間隔に丸太を打設したケース (P4D) の振動実験を実施した。模型地盤は、水中落下法により作製した。DNSについては、振動棒により地盤を締め固めた。

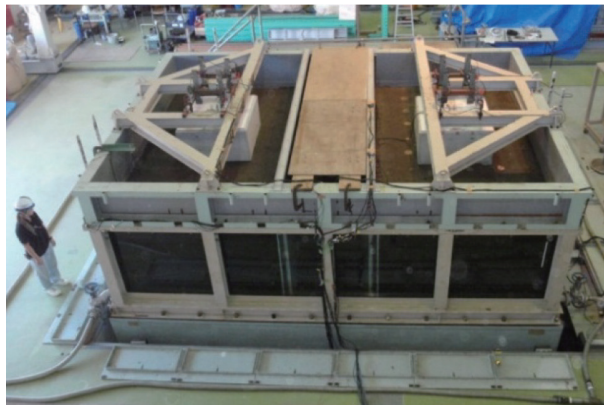


写真-7 模型地盤の全景

表-4 実験ケース

ケース	方法	土槽番号
NIP	無対策 ($D_r=48\%$)	土槽 1
P5D	丸太打設 (5D 間隔, $a_s=3.1\%$, $D_r=64\%$)	土槽 1
DNS	密度増大 ($D_r=91\%$)	土槽 2
P4D	丸太打設 (4D 間隔, $a_s=4.9\%$, $D_r=70\%$)	土槽 2

※原地盤の地盤密度は 49%(5D)と 54%(4D)

※※丸太打設時の D_r は、丸太間の値

※※※D は丸太径

※※※※ a_s は改良率(%)

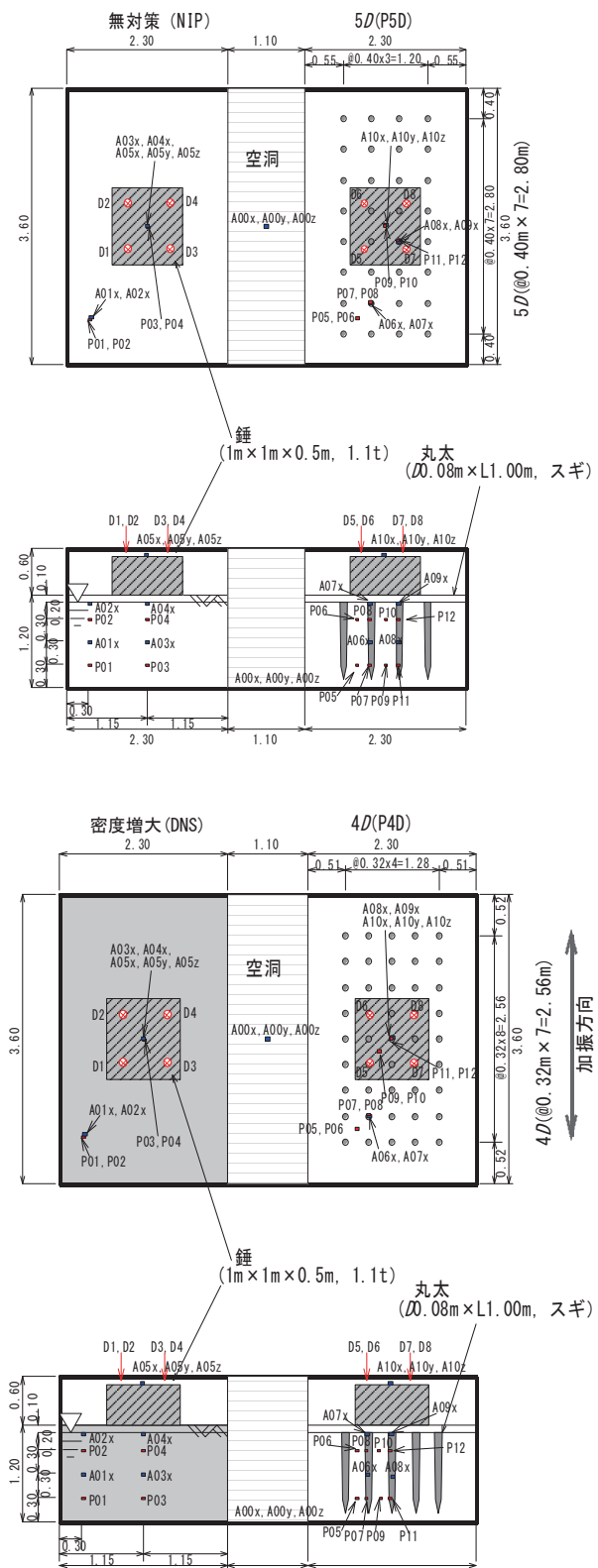


図-7 模型地盤と丸太位置図 (単位 : m)

水位は、GL-0.1mに設定し、地盤上部0.1mを非液状化層とした。初期の地盤密度は、相対密度 $Dr=48 \sim 54\%$ である。丸太は、下部に0.1mの未改良層を残し、静的圧入により打設した。丸太頭部は、碎石を詰めた粗い目の布の袋を入れて埋め戻した。地盤には、液状化による構造物被害を評価するために、木造2階建て住宅を想定した幅1m×奥行き1m×高さ0.5mで質量約1.1tのコンクリート製の錘を載せた。使用した丸太の樹種はスギで、末口径は80mm、長さ1mの皮を剥いただけの自然木を用いた。丸太先端は3面をカットし、ペンシル状とした。使用にあたっては、200本の中から使用する丸太に差異がないよう、末口径が80mmに近い77本を選び出した。その後、水中に静置させ、十分に飽和させた。

図-8に模型振動実験に用いた入力波形を示す。正弦波の一方向加振であり、主要動の前後にはテーパ波がついている。加振は約50galずつ振幅を増加させるステップ加振とした。

図-9に大型模型振動実験によって得られた入力加速度と模型構造物の累積沈下量の関係を示す。なお、沈下量は加振終了後一定状態に安定したときの残留沈下量である。地盤を密にすることで累積沈下量は低減するが、同様に丸太打設間隔が短くなるほど、累積沈下量が低減され、対策効果があることがわかる。

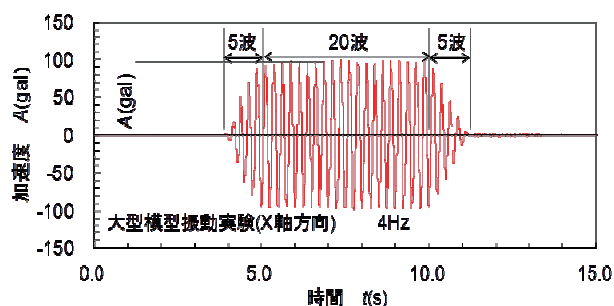


図-8 入力波形

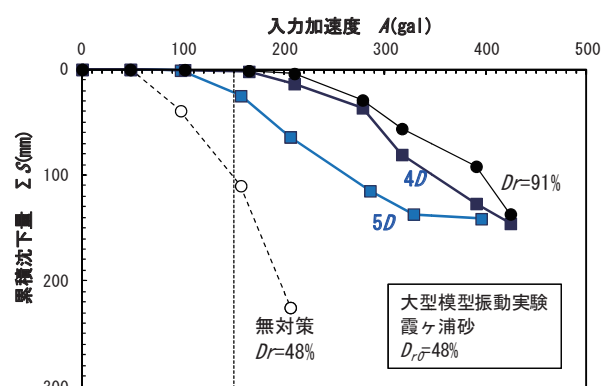


図-9 累積沈下量と入力加速度の関係

4.2 実大現場実験

丸太を用いた密度増大工法の改良効果を確認するため、丸太打設前後に以下に示す複数のサウンディング試験を実施した。

実験は浦安市内の現場にて実施した。この地点は、2011年東北地方太平洋沖地震で液状化が発生した地点で、2012年4月の実験実施時点においても液状化によって発生した噴砂が至る所で確認できた。この地点において、表土を約10cm剥ぎ取り、実験ヤードとした。施工には写真-8に示すリーダー式のオーガ併用杭打ち機を用い、無排土で鋼管による先行回転圧入を行った後、所定の深度まで丸太を無回転にて圧入した。

サウンディング試験はSPTとSWSを実施した。写真-9に使用した丸太を示す。平均した値について丸太打設前の原地盤と丸太打設後丸太間地盤の比較を行った。サウンディング試験の結果は、いずれも N 値に換算し、 N 値換算値（換算 N 値 N_1 とは異なる）として検討した。それぞれの換算式を、式(1)に示す。



写真-8 施工状況



写真-9 使用した丸太

$SWS^3) : N = 0.002 W_{sw} + 0.067 N_{sw}$ (砂・砂質土) (1)

ここで、 W_{sw} : 1000N 以下で貫入した場合の荷重 (N)、 N_{sw} : 回転により貫入させた時の貫入量1m当たりの半回転数 (回/m)

図-10に丸太打設前後の地盤調査位置図を示す。図中の白抜きが事前を、色付きが事後の調査位置を示している。丸太打設間隔は3D (D: 丸太末口径) とし、縦5.0m × 横5.0mの計100点に200本打設した。使用した丸太の樹種はスギとヒノキで、丸太末口径は160mm、長さは旧海底地盤に丸太先端部が届く長さで1点継ぎとし、4mと4mの全長8mである。丸太は、皮を剥いただけの生材で、下部丸太は先端部をペンシル状に尖らせた。なお、丸太打設は末口を下にして打設した。

図-11は丸太打設前後に実施したSPTとSWSの試験結果である。白抜きが打設前を、色付きが打設後の貫入抵抗値を示す。図中の網掛け部は砂質土 ($Fc \leq 50\%$) である。丸太を打設することで砂質土では大きな改良効果が得られ、打設後は打設前のN値およびN値換算値と比較して貫入抵抗値が増加していることを確認した。また、深度が深くなるほどN値およびN値換算値の増加は大きくなるのがわかる。これは側方だけでなく、施工時に土を下方にも締め固めているためだと考えられる。そのため、ペンシル状に加工した先端部においても丸太打設後のN値およびN値換算値の増加は大きくなっており、先端加工の影響は無視できると考えられる。

図-12にSPT、SWSより求められた原地盤のN値 (N_0)

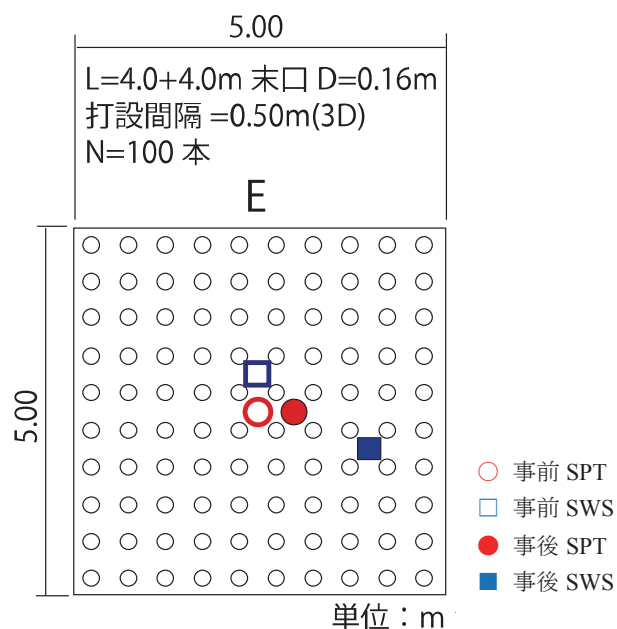


図-10 丸太打設前後の地盤調査位置図

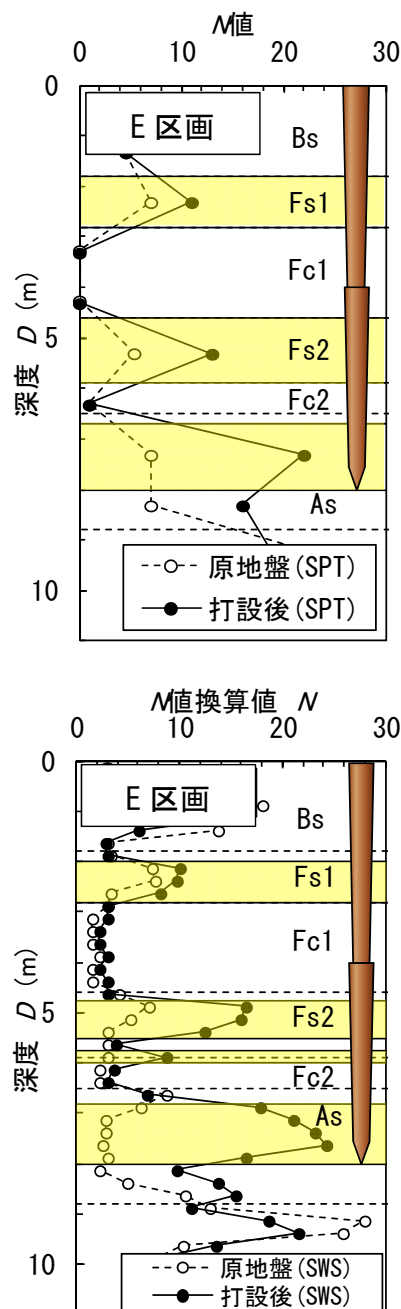


図-11 原地盤と丸太打設後丸太間地盤のN値

と丸太打設後丸太間地盤のN値 (N_2) との関係を示す。また、図中にサンドコンパクションパイル工法 (以後、SCP) のA法における設計法⁴⁾を参考にし、改良率 $a_s=0.10$ とした場合の経験的に得られた関係も併記した。丸太打設後のN値およびN値換算値がSCPの設計値と同等以上に大きくなるのがより明確にわかる。

なお、Fs1層のデータ (図中白抜き) が一部、原地盤の値よりも小さくなっているのは、Fs1層は表層近くで細粒分含有率が多い割にN値が大きいいため、丸太打設後のN値があまり増加しなかったものと考えられる。

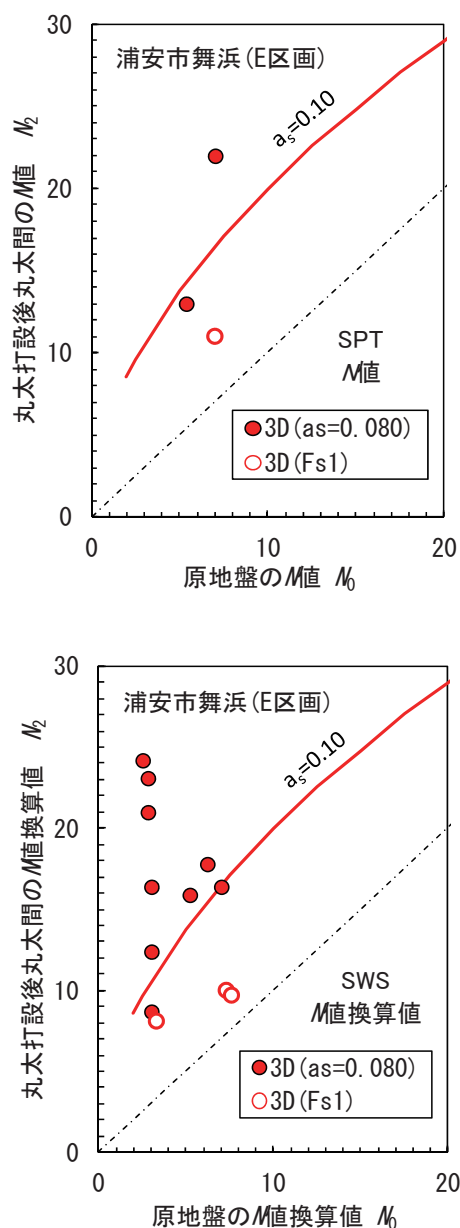


図-12 原地盤と丸太打設後丸太間地盤のN値の関係

本工法は、官民含めて実績が増えている。液状化の生じる地盤に丸太を打設する本工法は、丸太に長期間生物劣化を生じさせることなく、緩い砂地盤を密実化するので、恒久性・信頼性の高い液状化対策が実施できる。3に示したように、丸太は支持力機能を有しているので、想定外の地震に対しても靱性や冗長性が確保できる。さらに、本工法は、丸太を地盤中に打設することで炭素を長期間貯蔵する。この炭素量は、工事によって排出される二酸化炭素量よりもはるかに多いので、本工法を施工すること自体が地球温暖化緩和策となる。また、製造時エネルギーの大きなセメントや鋼材を用いることがないので省エネルギー効果が大い。

5. 木杭の耐久性⁵⁾

木材もコンクリートや鉄と同様に劣化する。木杭は適正な設計・施工を行ってれば耐久性の面ではコンクリート杭や鋼管杭より多くの実績と古くて長い歴史をもっている。本章では木材の耐久性について筆者らが行った曝露試験について紹介する。

木材は条件によっては耐久性が著しく低下することは広く認識されている。木材の耐久性を高めるポイントは腐朽菌や蟻害を発生させないような環境で使用するものである。一般的には海辺の貯木場などでの使用例からもわかる通り、木材自体が水中にあれば腐朽する可能性はほぼ皆無である。しかしながら、気中に暴露された状態にあり、風雨の影響を強く受けるような環境で、乾湿を繰り返すような場面では耐久性は著しく低下する。

一方、木杭として使用される場合は、気中に暴露される状況というのは考えがたいが、地下水等の変動により乾湿を繰り返す状況が発生することが懸念される。そこで筆者らは以前より杭材としての耐久性を確かめるため、実杭（未処理と防腐防蟻処理）の曝露試験を実施してきた。

5.1 曝露試験

写真-10には過去実施したJIS K 1571による試験の様子を示すが、JIS K 1571では試験片を30mm×30mm×600mmとして試験ヤードに半分を地中に貫入し、半分を気中に暴露させて試験を実施した。写真-11に試験状況を示す。概ね防腐が始まるのは土と気中の境目の地際部である。本試験結果についても未処理材については4年が経過した段階で地際部より腐朽が進行し、朽ち果てている様子が確認できた。しかしながら、防腐防蟻処理を施した試験片については、約13年が経過した後も健全な状態が維持されていた。

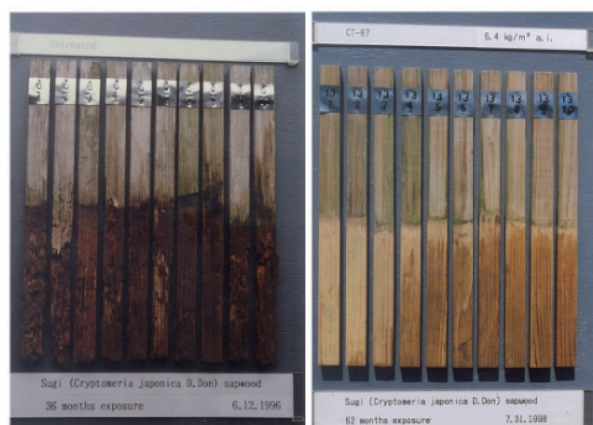


写真-10 曝露試験全景



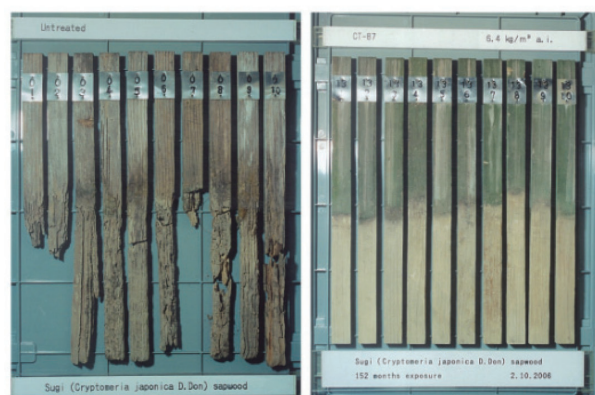
Before an experiment

Before an experiment



1 years after

5 years after



4 years after

Over 12 years after

(a) Untreated(未処理試験体) (b) Treated(処理試験体)

写真-11 JIS K 1571による試験状況

写真-12は鹿児島県日置市吹上浜国有林の暴露試験状況の一例を時系列に示したものである。未処理杭は劣化が進み倒木している杭があるのに対し、防腐防蟻処理を施した杭は健全な状態が維持されている状況が確認できた。表-5には暴露試験実施杭の詳細と評価結果を示す。個体名称の末尾の数値は薬剤の注入量であり、末尾番号1は 1.3kg/m^3 、2は 2.6kg/m^3 、3は 5.2kg/m^3 となっており、0は未処理材である。この結果からもわかる通り実杭の

試験においても未処理杭は条件によっては早く5年で倒木に至っており、倒木に至っていない未処理杭でもほとんどのものがB判定となった。また、未処理杭で倒木に至った杭は全てマツであった。マツはベイマツを使用したがいベイマツは径が大きいために芯持ち材ではなく、耐久性の低い辺材部のみで構成されているため、その影響を受けたものと推察される。一方、防腐防蟻処理を施した杭については、6年経過後も引き続き健全な状態を維持していることが確認できた。また、写真-13はそれぞれの杭の代表的な顕微鏡写真を示すが、防腐防蟻処理杭は木材の強度をつかさどる繊維が規則的に伸びている状況が確認できるが、未処理杭については繊維が腐朽菌により破壊され寸断されている状況が確認できた。



未処理杭 (2008年9月)



処理杭 (2008年9月)



未処理杭 (2011年6月)



処理杭 (2011年6月)



未処理杭 (2013年2月)



処理杭 (2013年2月)



未処理杭 (2014年1月)



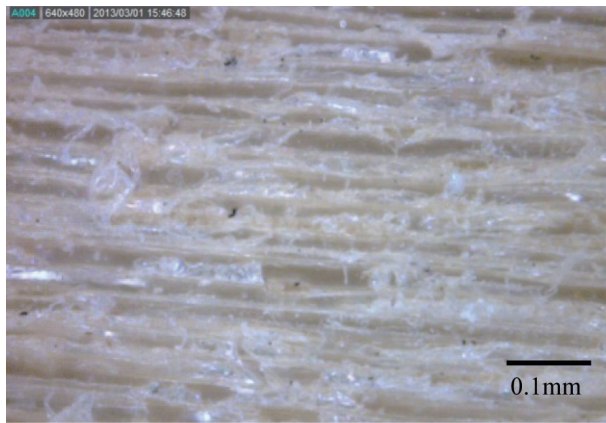
処理杭 (2014年1月)

写真-12 実大杭の評価状況 (マツ)

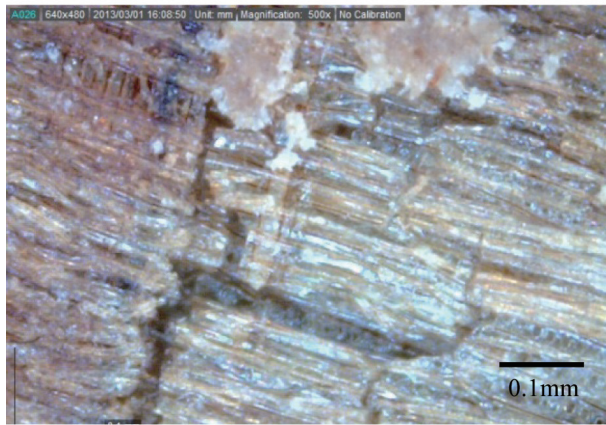
表-5 実杭の評価状況（6years after）

個体名称	NS-01	NS-1	NM-01	NM-1	NS-02	NS-2	NM-02	NM-2	NS-03	NS-3	NM-03	NM-3
樹種	スギ	スギ	マツ	マツ	スギ	スギ	マツ	マツ	スギ	スギ	マツ	マツ
防腐加工の有無	未処理	処理(N)	未処理	処理(N)	未処理	処理(N)	未処理	処理(N)	未処理	処理(N)	未処理	処理(N)
評価(2013.2)	B	A	A	A	A	A	B	A	B	A	B	A
評価(2014.1)	B	A	A	A	A	A	D	A	B	A	B	A
評価(2015.1)	B	A	C	A	D	A	-	A	C	A	D	A
腐朽範囲(GL+)(cm)	15	-	-	-	2015倒木 20	-	2014倒木 20	-	15	-	2015倒木 20	-
個体名称	DS-01	DS-1	DM-01	DM-1	DS-02	DS-2	DM-02	DM-2	DS-03	DS-3	DM-03	DM-3
樹種	スギ	スギ	マツ	マツ	スギ	スギ	マツ	マツ	スギ	スギ	マツ	マツ
防腐加工の有無	未処理	処理(D)	未処理	処理(D)	未処理	処理(D)	未処理	処理(D)	未処理	処理(D)	未処理	処理(D)
評価(2013.2)	B	A	D	A	B	A	D	A	B	A	D	A
評価(2014.1)	B	A	-	A	B	A	-	A	B	A	-	A
評価(2015.1)	D	A	-	A	B	A	-	A	C	A	-	A
腐朽範囲(GL+)(cm)	2015倒木 20	-	2013倒木 30	-	20	-	2013倒木 25	-	28	-	2013倒木 28	-

防腐加工； D：AAC系 N：銅系 樹種；S：スギ M：マツ
評価； A：腐朽なし健全 B：腐朽あり C：重度な腐朽 D：倒木



処理杭（5年後）



未処理杭（5年後）

写真-13 顕微鏡写真

6. おわりに

本報では、木材の地中利用事例として支持力対策及び密度増大工法の提案を行った。
宅地の防災に関する意識や技術は近年高まりつつあり、その技術開発も盛んにおこなわれている。一方、地球温暖化問題は社会経済活動と密接な関係があり、地球

温暖化問題を解決するためには、科学的なメカニズムを明らかにすることとともに、将来の社会経済のあり方を含めた議論（社会構造そのものを温暖化防止に資するものに転換する「低炭素社会LCS（Low Carbon Society）」の構築に向けた議論）が重要であると考えます。また、住宅地盤であろうとも温暖化対策の目標の設定や枠組を明らかにし、その効果を評価することは、温暖化対策を効率的かつ効果的に実施するうえで必要不可欠である。筆者らが開発した工法が少しでも温暖化対策の促進に貢献していければと考えている。

【参考文献】

1) 中村他：木杭の支持力機構について（その5），第47回地盤工学研究発表会，pp.1077-1078，2012。
2) 三村他：丸太打設液状化対策の大型振動実験結果，第12回木材利用研究発表会，pp.85-92，2013。
3) 地盤工学会：第4章スウェーデン式サウンディング試験，地盤調査の方法と解説，pp. 280-289，2004.6。
4) 地盤工学会：1.3サンドコンパクションパイル工法，地盤工学・実務シリーズ18，液状化対策工法，pp.233-253，2004。
5) 水谷他：木杭の支持力機構について（その8），日本建築学会全国大会（近畿），pp.553-554，2014。

【執筆者】



*1 水谷 羊介
(MIZUTANI Yosuke)



*2 中村 博
(NAKAMURA Hiroshi)



*3 三村 佳織
(MIMURA Kaori)