

学位論文全文に代わる要約 Extended Summary in Lieu of Dissertation

氏名： 三村 佳織
Name

学位論文題目： 丸太による液状化対策工法の地盤改良効果と生物劣化に関する研究
Title of Dissertation

学位論文要約：
Dissertation Summary

2011 年に宮城県沖を震源として発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけての広範囲で液状化の被害が発生し、大量の噴砂、道路や上下水道、電気、ガスなどのライフライン寸断、建物周辺の不同沈下、護岸堤防のはらみ出しなど各地に深刻な被害をもたらした。関東地方では 1 都 6 県で液状化の被害が確認されており、中でも千葉県浦安市の被害は震央距離が大きいにも関わらず甚大で、住宅被害件数は約 8,700 件にも及んだとされる。浦安市は、総面積のうち約 8 割が 1965～1980 年の間に東京湾岸の干潟や海を造成した埋立地であり、本地震によりほぼ全域が液状化した。2016 年に発生した熊本地震では、熊本県内 18 市町村で前震により約 1,300 箇所、本震で約 5,400 箇所に及ぶ甚大な液状化被害が確認された。

発生確率が高いとされる南海トラフ地震では、西日本一帯で人口が集中する軟弱な沖積地域などで、継続時間の長い強地震動による液状化被害が予測されており、約 11.5～13.4 万棟の建物が沈下被害を受けると想定されている。本地震は地震発生から数分で津波が沿岸に到達することが特徴とされ、高知県黒潮町では最大クラスの 34m が到来すると予想されている。人口や産業が密集する高知平野で、液状化による地盤の変形と地震後の地盤沈降による広範囲での浸水が考えられ、津波来襲時には高知市内の浸水高は最大 5.0m に及ぶと報告されている。液状化が起こることで道路の損傷、避難困難などにより津波被害の拡大にもつながるほか、上部構造物が不同沈下により傾斜し復興が長期化するなどの問題を引き起こす。

一方、2013 年に IPCC が発表した第 5 次評価報告書では科学的な根拠に基づき、「地球が温暖化していることはもはや疑う余地が無い」という見解が発表された。地球温暖化は人類が産業革命以降の極めて短期間に化石燃料を使用し、大気中に二酸化炭素などの温室効果ガスを大量に放出したことが要因とされる。その要因と影響が地球規模に及ぶことから、地球温暖化は人類の生存基盤に関わる最も重要な課題とされ、早期解決には温室効果ガス排出量の大幅かつ持続可能な削減が求められている。

樹木は大気中の二酸化炭素を吸収し、光合成により炭素を体内に固定化し貯蔵する機能を有するため、温室効果ガス削減効果が期待できる。このような地球環境保全機能を含めた森林の有する多面的機能を持続的に発揮させるためには、適切な間伐や効率的かつ安定的な林業経営の育成により、森林を適正に整備し保全することが重要である。現在、国内の森林は終戦直後と高度成長期の伐採跡地に

植えられた多くの人工林資源が成熟し、本格的な利用期を迎えているが、木材が安定的に供給できていない状況もあり、国内での木材自給率は3割程度にとどまっている。そのため、製品を低コストで安定供給するためのシステムの構築や新規需要先の創出などが求められている。木材を地盤改良材として用いる場合には、品質や形状は重要ではなく、また、一度に大量に使用することができるので、新規需要先として土木・建築分野への木材の地中利用が期待されている。

前述した地震による液状化被害軽減と地球温暖化緩和を両立させる対策として、写真-1 に示す木材を緩い砂地盤に打設し、丸太間地盤の密度を増大させる工法が開発され実用化に至っている。今までに数地点で実大施工試験を行い、打設後の杭間 N 値の増加から地盤改良効果を確認している。しかし、設計面では、地盤の密度増大以外に水平方向の拘束圧増加の寄与などが推測されているが、実際に液状化強度を検証した事例は少なく、有効な設計法の提案まで至っていない。施工面では、自然素材であるがゆえの生物劣化の影響が懸念されており、その腐朽対策方法は数多く存在しているが気中における対策方法が主であり、地中での木材利用を目的とした対策は見当たらない。

さらに、持続可能な社会形成のためには限りある資源の有効利用が重要であることから、解体工事で発生する建設発生木材の再利用も重要な課題となっている。現在、解体時に発生した建設発生木材の再資源化率は61%で、再生チップやコンポスト、炭などに加工されているが、具体的な利用先や方法が規準化されていないことなどから、全国で発生した建設発生木材の約半分が焼却処分されている。再利用にも燃料や電力などのエネルギーを過剰投資している場合があり、今後は環境面での調和を図りながら行える再利用法が求められている。木材を地中利用する際は加工を行わない丸太の状態を使用するため、時間や費用面からも有利と考えられるが、建設発生木材の性状は解体工事前に把握できない場合が多く、発生時に再利用が可能な材かどうかを現地で判断するのは困難である。

今後、工法の発展および普及を図り、更なる木材の地中利用拡大を目指すには、以下の項目に対する検討が必要である。

- (1) 実大施工試験と大型振動実験を行い、打設前後に各種地盤調査を実施し、杭間 N 値増加により地盤改良効果を検証する。さらに、大型振動実験で得られた結果から液状化強度を算出し、既往工法との液状化強度の比較を行う。
- (2) 木材固有の課題である生物劣化は地下水位変動の影響を受けやすいため、腐朽菌や害虫が生息する水位変動域で、実際に長期間使用された地中利用木材を対象として、現地調査および室内試験を行い、健全性や強度性能を評価する。
- (3) 本研究で得られた結果を現場での実務に生かすため、木材を地中利用した後、供用期間を終えて建設発生木材となった木材の再利用の可否を現場で簡易に判断できる判別法を提案する。



写真-1 丸太による液状化対策工法の施工全景（千葉県浦安市内、2014年11月7日撮影）

本論文は上記に示す目的を持つ研究の方法、結果、考察、結論等をまとめたものであり、その内容は以下のように構成されている。図-1に本論文の構成をフローで示す。

第2章では、既往の液状化対策工法の中での丸太による液状化対策工法の位置付けを示す他、地中利用木材の健全性と強度性能に関する既往の研究について述べる。

第3章では、液状化に対する抑制効果を定量的に把握するため、大型土槽を用いた大型振動実験および液状化が懸念される地盤での原位置試験を行い、本工法の地盤改良効果を検証する。

第4章では、材種や設置環境、水位などの違いが生物劣化に及ぼす影響を検証するため、実際に土木構造物として長期間地中利用された木材を対象に、劣化度を評価する試験とヤング係数を求める試験により、健全性と強度性能を評価する。

第5章では、長期間地中に打設された繊維飽和点以上の高含水率木材の健全性や強度性能を評価し、現場で簡易に建設発生木材の再利用の可否が判断できる判別法を提案する。

第6章では、本研究全体で得られた結論が述べられている。

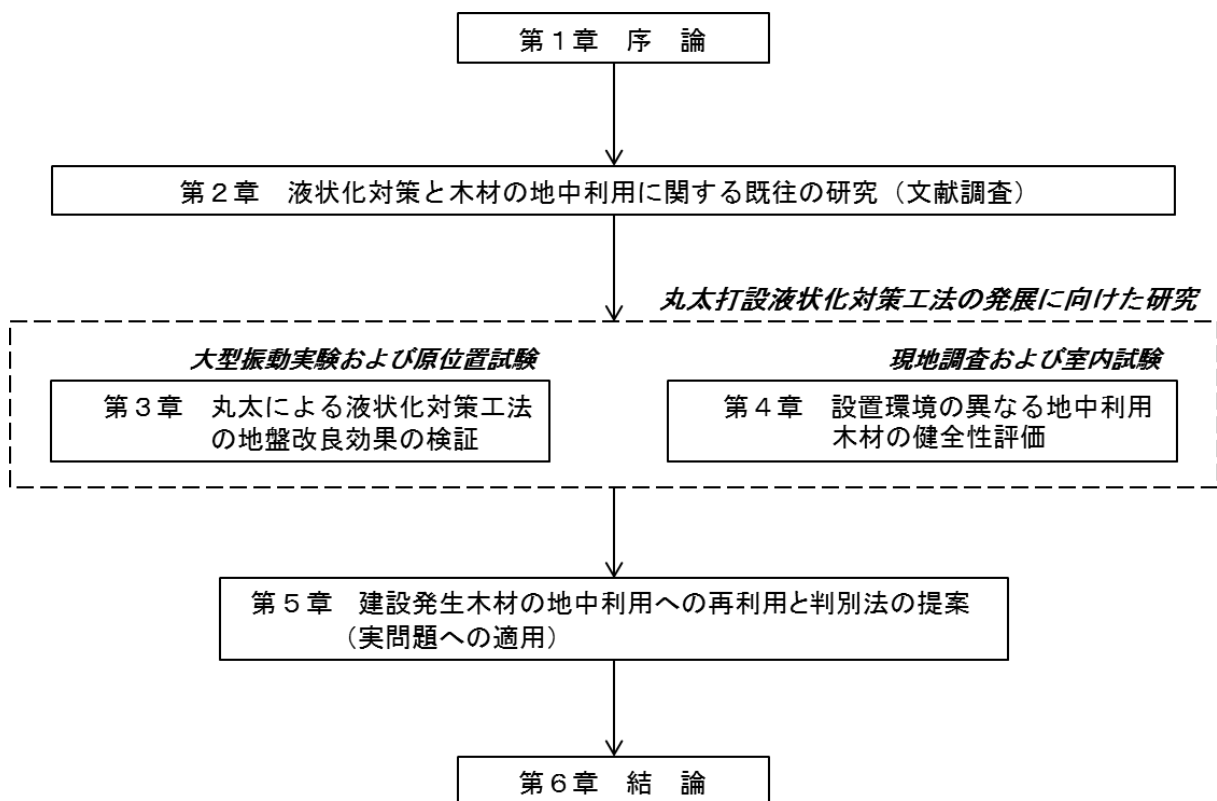


図-1 本論文の構成

第3章 丸太による液状化対策工法の地盤改良効果の検証

本実験では、内寸縦3.6m、横5.7m、高さ1.8mの大型土槽を使用した。土槽内に仕切り板を設置し、2ケースを同時に実験した。地盤には、液状化による建築構造物の被害を評価するために、木造2階建て住宅を想定した縦1.0m、横1.0m、高さ0.5mで質量約1.1tのコンクリート製の荷重を載せた。模型の縮尺は約1/20である。表-1に実験ケースの詳細を、写真-2に大型土槽の全景を示す。

地盤は茨城県霞ヶ浦市の川砂を用いた。図-2に霞ヶ浦砂の粒度組成を示す。無対策（NIP）の土槽は、川砂を水中落下させることで作製した。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。丸太打設の土槽（P4D、P5D）は無対策の土槽と同様の手順で作製した後、所定の場所に丸太を静的に圧入した。丸太頭部上部は、現場施工と同様に碎石で充填した。密度増大（DNS）の土槽は、無対策の土槽と同様の手順で作製した後に、所定の密度まで締固めを行い作製した。

表-1 実験ケースの詳細

ケース	方法	土槽番号
NIP	無対策 $D_{\text{mm}}=48\%$	土槽 1
P5D	丸太打設（5D 間隔） $a_s=3.1\%$, $D_{\text{mm}}=64\%$, $D_{\text{mm}0}=49\%$	土槽 1
P4D	丸太打設（4D 間隔） $a_s=4.9\%$, $D_{\text{mm}}=70\%$, $D_{\text{mm}0}=54\%$	土槽 2
DNS	密度増大 $D_{\text{mm}}=91\%$	土槽 2

※ D ：末口径， a_s ：改良率（％）， D_{mm} ：相対密度（最小法）（％）， $D_{\text{mm}0}$ ：丸太打設前の初期相対密度（最小法）（％）



写真-2 加振前の大型土槽全景

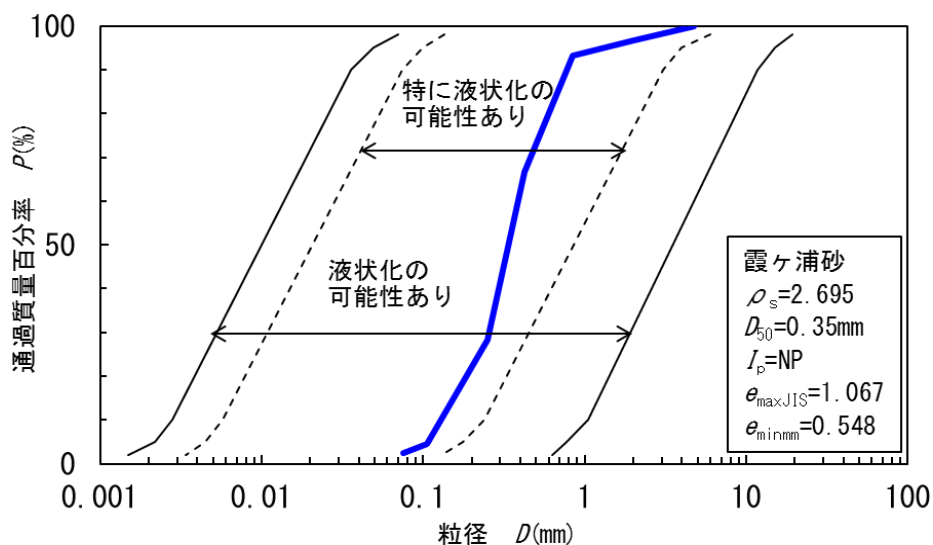
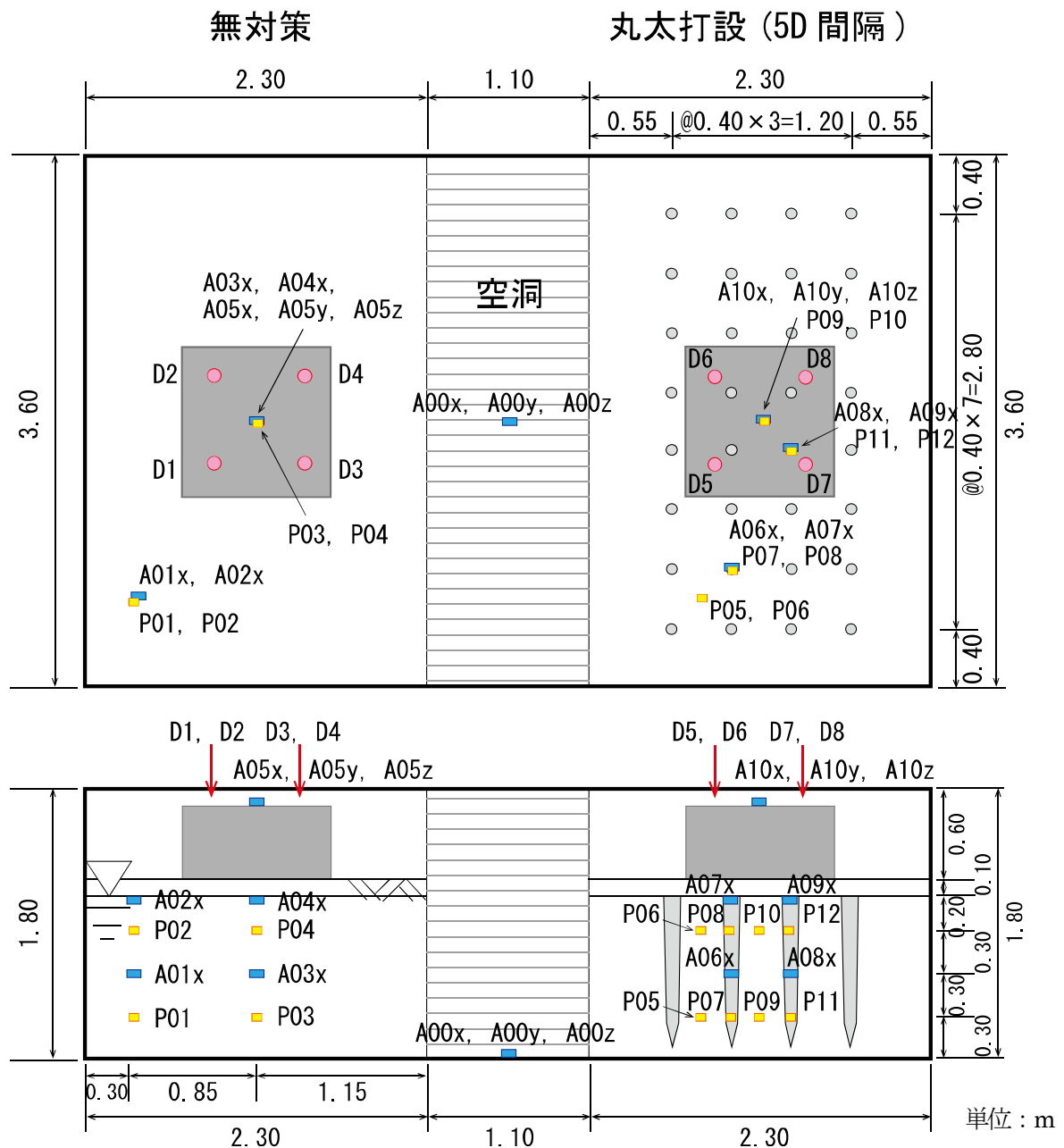


図-2 川砂の粒度組成

使用したセンサーは、レーザー変位計、加速度計、間隙水圧計である。図-3 に計測器の設置位置一例を示す。

使用した丸太の樹種はスギで、末口径 $D_T=8.0(\text{cm})$ 、長さ $L=1.0(\text{m})$ 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。元口平均径は 8.69cm であり、末口平均径より平均で 0.65cm 太い形状をしていた。写真-3 に使用した丸太の全景を示す。

図-4 に、加振波形を示す。加振波の主要部は 4Hz で 20 波の正弦波であり、前後に 5 波ずつの立ち上がり部と収束部を設けた。加振は、振幅を約 50Gal ずつ増やすステップ加振とした。



※D: レーザー変位計, A: 加速度計, P: 間隙水圧計

図-3 計測器の設置位置一例



写真-3 大型振動実験に使用した丸太の全景

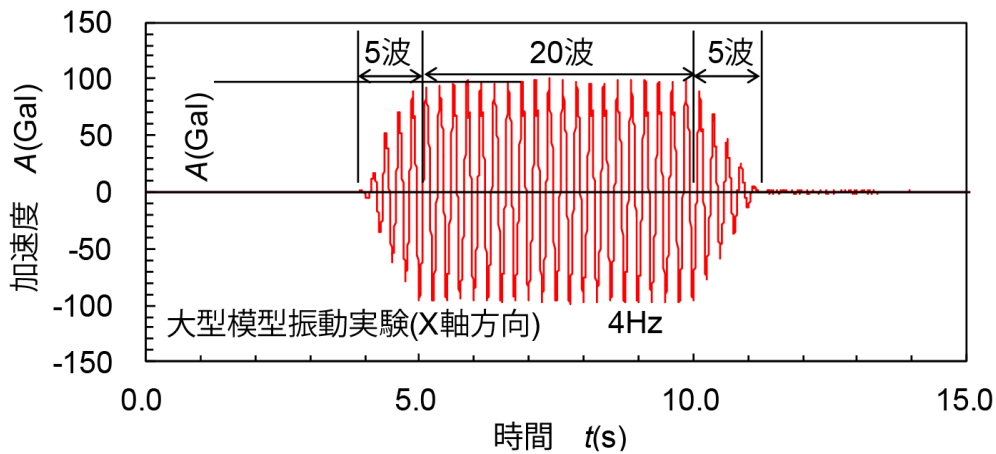


図-4 加振波形

図-5 に実験から得られた入力加速度と地盤上に設置したコンクリート製荷重の累積沈下量の関係を示す。対策を施した場合はいずれも NIP に比べ沈下量が小さく、地盤改良効果が確認できる。また、丸太打設の間隔が 5D より 4D と小さいほど沈下量が小さく、P4D はかなり密締めにした地盤 (DNS) と同程度の対策効果があることがわかる。丸太打設の場合、特に P5D に示されるように大きな加速度レベルでも沈下量はある程度以上で頭打ちとなる。これは、錘が沈下することで下部の丸太も沈下し、土槽底板に到達した時点で、非液状化の支持層 (底板) に支えられることで杭のような機能を発揮するためと考えられる。

図-6 に相対密度と繰返し抵抗の関係を示す。NIP と DNS は、繰返し非排水三軸試験結果のばらつきの範囲内に入り、要素試験より得られた繰返し抵抗と一致している。丸太打設による関係は、繰返し非排水三軸試験で得られた密度と繰返し抵抗との関係を比較すると、ばらつきの範囲より相対密度が 60% 以上になると 2 倍以上繰返し抵抗が大きく、丸太打設した地盤の繰返し抵抗が、純粋に密度増加させた地盤と比較して大きくなることが明らかである。

これらから、丸太打設は地盤を密実化する効果に加え、丸太間地盤が密になることにより剛性低下が生じず、沈下が抑制されるとの結論が得られた。相対密度と液状化抵抗の関係を整理し、既存の密度増大工法との地盤改良効果の違いを比較した結果、丸太打設した地盤の繰返し抵抗は、密度増加させた地盤に比べ大きくなることが明らかになった。

丸太打設により液状化対策効果が得られる理由としては、①丸太間地盤の応力ひずみ関係や有効応力経路から地盤が密になった挙動が認められることや、②サウンディング結果より地盤の強度が増加し

ていることが認められること, ③土圧の計測結果から水平土圧の増加が認められること, という密度増大工法と同様の理由が挙げられる. さらに, 丸太打設された地盤の繰返し抵抗が密度増加以上に増加する理由として, ①丸太打設による水平土圧の増加, ②地盤と丸太の複合地盤としてのせん断剛性の増加, ③丸太の杭機能による地盤補強効果の増加, ④丸太打設による地盤内土質の構造的な強化などが考えられる.

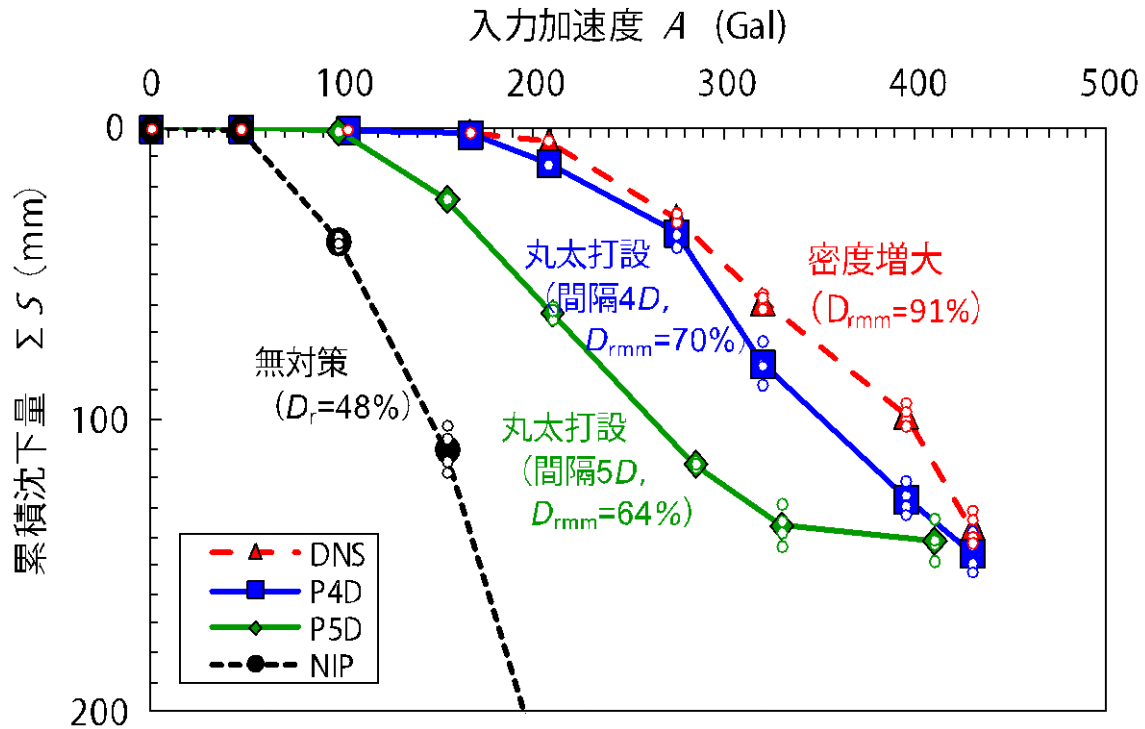


図-5 入力加速度と累積沈下量の関係

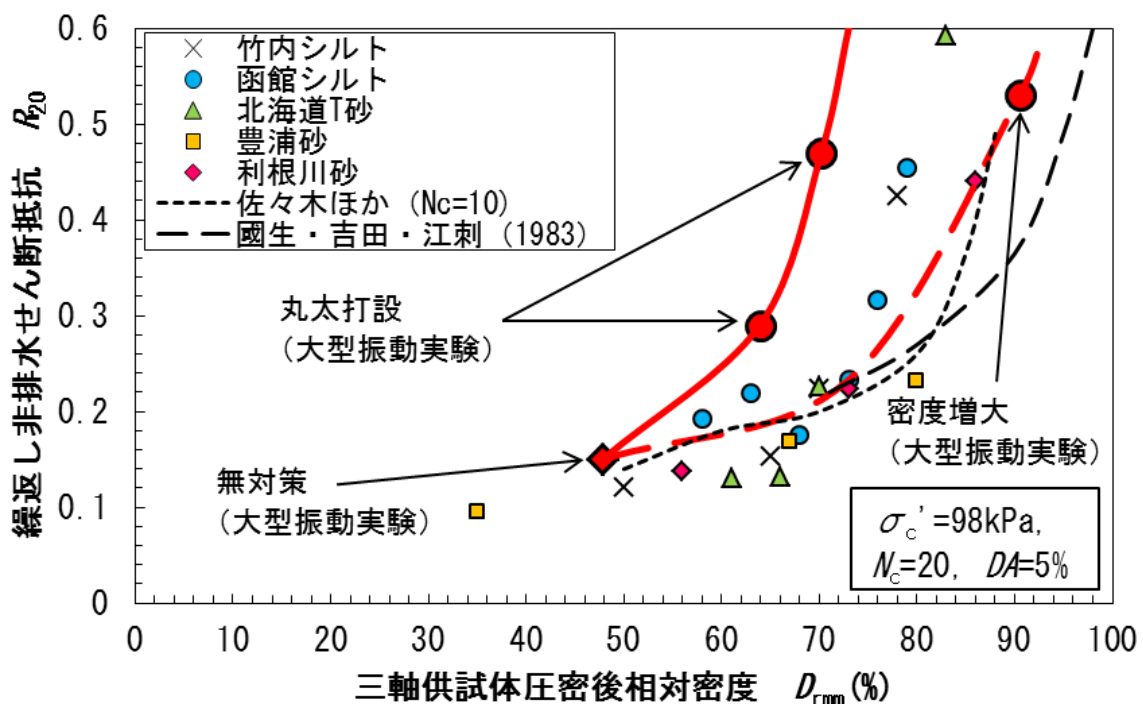


図-6 相対密度と繰返し抵抗

第4章 設置環境の異なる地中利用木材の健全性評価

本研究では、地中利用木材の生物劣化による影響評価を目的として、実際に土木資材として用いられた木材を回収し、各種試験を行った。表-2 に回収した丸太の諸元を示す。対象とした丸太は設置当時の状況を把握するため、できるだけ文献が残っている箇所を選定した。設置期間や施工環境、樹種などが腐朽にどのような影響を与えるか検討するため、それぞれ異なる丸太を対象としている。

表-3 に行った各種計測および試験の一覧を示す。丸太回収前に水位を把握するため、丸太表面の水位面位置にテープを貼り、地表面および丸太頭部から水位面までの距離を測定した。近くに水位観測所がある場合には過去のデータから平均水位面と最低水位面を算出した。周辺の堆積土を採取し乾燥させた後、JIS A 1204 にしたがって粒度試験を行った。丸太は周囲の土を掘削した後、可能な限り表面に傷がつかないようにワイヤーをかけ、バックホーにて一本ずつ丁寧に引き抜いた。写真-4 に丸太の回収状況を、写真-5 に回収丸太の全景を示す。

丸太回収後、現地にて1本につき頭部と中間部、先端部の3箇所の周長、丸太長さ、曲りおよび重量を計測した。含水率測定は、全乾燥重量を測定する全乾法にて算出した。目視判定はJIS K 1571：2010の野外試験で定められている被害度判定に基づき判断した。判定箇所は、供試体の頭部から0.5m区間ごととし、9人の判定者の結果を統合し判定結果として整理した。ピロディン試験は、エフティエフ社製のPILODYN, 6J（ピン直径2.5mm、測定範囲0～40mm）を用い、試験器から一定のエネルギーで打ち込まれたピンの貫入量を読み取った。その後、回収した丸太の中で、ふしや傷の少ない部分を選び、木口面がそれぞれ平行となるように注意して0.5～1.0m程度の長さに切断し、供試体を作製した。縦圧縮試験は、ひずみ制御にて荷重条件がストローク変位一定0.5mm/sで実施し、軸変位計は上下のL型アングルで囲まれた区間（約50cm）での変位を計測した。ヤング係数は得られた応力-ひずみ関係を原点補正し、供試体毎の値を求めた。縦振動法は、供試体を台に静置後、片方の木口面をハンマーで打撃し縦振動の1次の固有振動数を求め、ヤング係数を算出した。

表-2 回収した丸太の諸元

回収地点	使用目的	樹種	最低水位面	経過年数
高知県高知市鏡川	杭出し水制工	アカマツ	丸太頭部から1.2m以深	約20年
高知県高知市新川川	乱杭工	スギ	丸太頭部から1.0m以深	約15年

表-3 各種計測および試験の一覧

各種計測および試験名		目的
環境条件把握	水位計測	回収時の水位面の把握
	粒度試験	土の基本性状の把握
回収時の丸太状態把握	形状計測	周長、長さ、曲りの計測
	重量計測	密度の算出
	含水率測定	回収時の含水率の把握
健全性評価	目視判定	木材の腐朽による劣化状態の判定
	ピロディン試験	木材の腐朽状況の調査
強度性能評価	供試体作製	縦圧縮試験で用いる供試体の作製
	縦圧縮試験	縦圧縮ヤング係数の算出
	縦振動法	動的ヤング係数の算出



写真-4 丸太の回収状況



(a)高知県高知市鏡川地点

(b)高知県高知市新川川地点

写真-5 回収丸太の全景

図-7 に各地点の目視判定およびピロディン試験結果を示す。なお、目視判定の被害度評価と圧縮強度減少率との関係では、被害度 3 で 30～50%の強度減少率がみられることから、被害度の平均値が 2.5 になったときを耐用年数と定めている。まず、鏡川地点から回収した丸太は、頭部から 0.0～0.5m, 1.0～1.5m および 1.5m 以深は被害度の平均値が 2.5 以下となるため健全と判定した。頭部から 0.5～1.0m では部分的に激しい腐朽や虫害が見られ、被害度 3 以上の評価が全体の約 80%を占めていたことから不健全と判定した。他の深度と比較しても丸太表面に無数の穴が開いている様子が確認され、回収地点は腐朽と虫害の両方の影響がある場所であり、中でも 0.5～1.0m では虫害による被害が深刻であったと考えられる。ピロディン打込み深さも目視判定と同様に 0.5～1.0m で値がバラツいている様子が確認できる。次に、新川川地点から回収した丸太は、頭部からの距離が 0.0～0.5m の範囲で、被害度 5 の評価が全体の約 70%となっており、「腐朽又はぎ害によって形が崩れる」程度の生物劣化がみられた。ピロディン打込み深さも同範囲において、30mm 以上と値が増加しており、激しく腐朽していることがわかった。頭部からの距離が 1.5～2.0m の範囲では被害度 2 以下の評価が全体の 50%を超え、ピロディン打込み深さも 20～30mm の範囲内にあり、健全であった。

(様式5) (Style5)

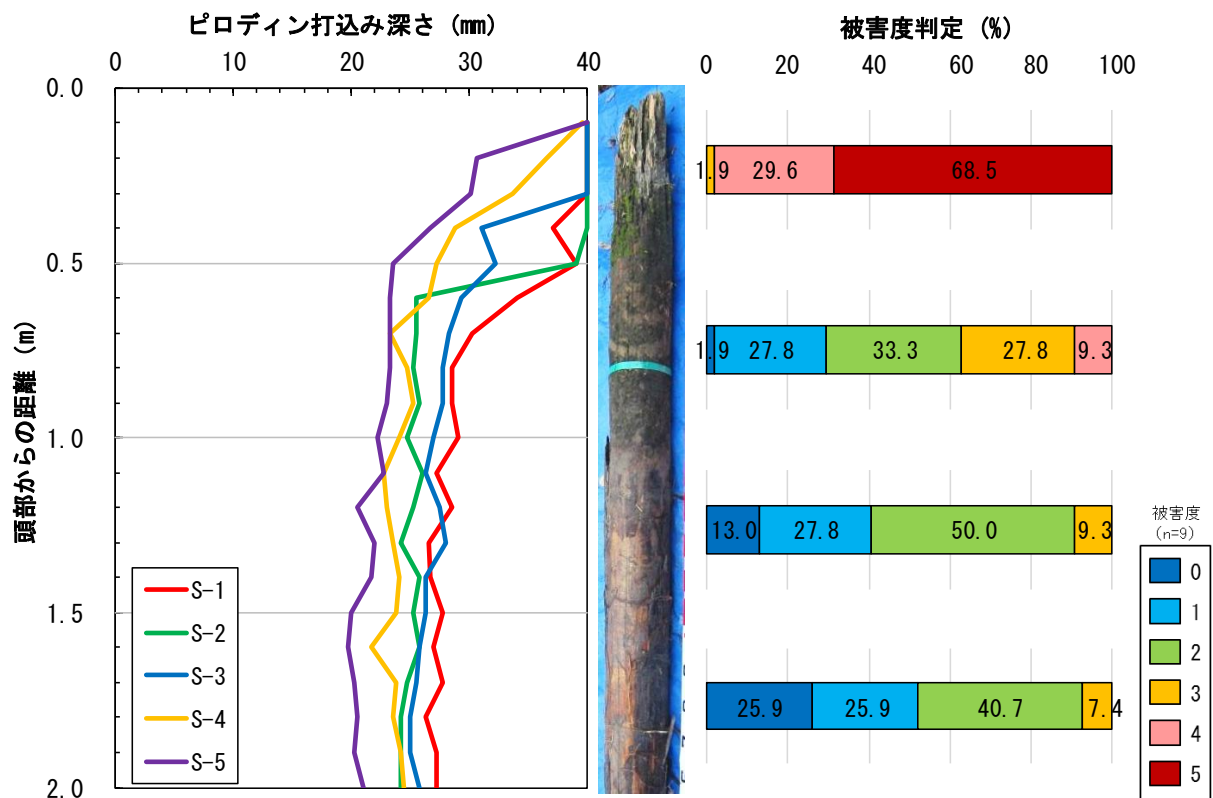
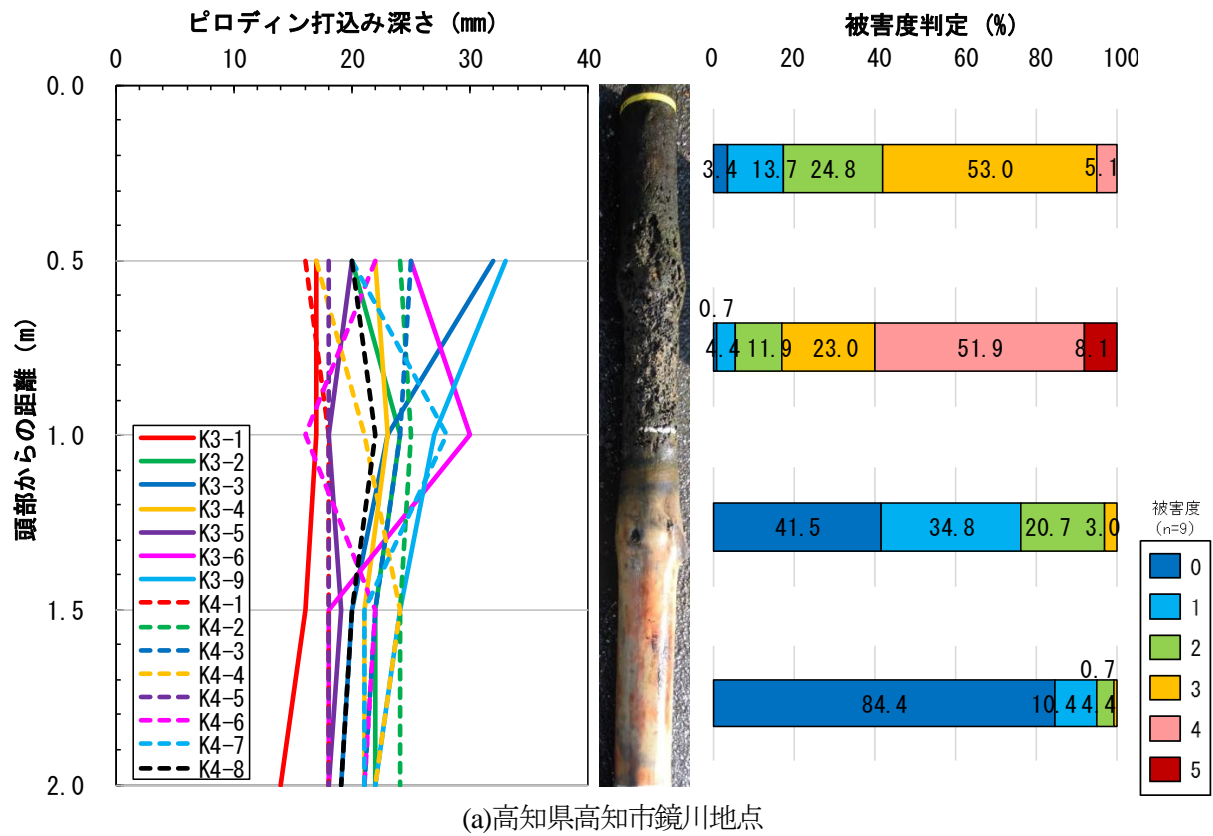


図-7 目視判定およびピロディン試験結果

鏡川地点から回収した丸太では、健全部と比較して腐朽部の縦圧縮ヤング係数は約 60%まで低下していた。断面を観察してみると周囲から約 20mm は生物劣化により所々欠損している様子がみられた。そこで、最も腐朽していた材を虫害の影響が及んでいない、直径が約 10cm となるようにロータリー加工した後、縦 3.0cm、横 3.0cm、高さ 9.0cm の供試体を作製し JIS A 1216 : 2009 の一軸試験機を用いて縦圧縮試験を行った。その結果、 10.3kN/mm^2 とマツのヤング係数全国平均値である $9.0\sim 11.0\text{kN/mm}^2$ の範囲内となり、腐朽部の周囲は劣化して欠損している箇所もみられたが、中心部のみで比較してみると健全部と変わらず長期耐久性を保持していることがわかった。

設置環境による生物劣化の違いについて検討するため、鏡川地点より回収した丸太の中から任意に 3 本を選定し、より詳細なピロディン試験を行った。試験の際には数日間丸太を浸水させ、回収時の含水率と同程度になるよう調整した。試験箇所は頭部から 0.1m 間隔で 1.5m までの 15 箇所である。場所によるばらつきを考慮するため、それぞれの箇所の円周上において 90° ごとに計 4 回試験を行った。図-8 に水位変動とピロディン打込み深さとの関係を示す。図中の実線が年間平均潮位と干潮位を、一点鎖線が水制工設置当時の地表面を、点線が丸太回収時の地表面を示す。本回収地点の木材が置かれていた環境条件を整理すると①頭部を基準として 0.0~0.7m の水中・気中、②0.7~1.3m の水中・気中・土中、③1.3m 以深の水中・土中の 3 つに分けられる。まず、③は常時水面下に存在していたため、ピロディン打込み深さは平均値で 16~22mm となり、健全であることが確認された。次に、①は丸太が曝露した範囲であり、虫が生息できることから全面的に激しい虫害が発生していた。最後に、②は頭部から 0.7~0.9m でピロディン打込み深さは平均値で 20~32mm となっていたが、1.0m 以深では平均値で 16~23mm と非常に小さく健全であった。水位変動域においても常時水面下とほぼ同等の健全性を保持している箇所が確認された。

以下では、設置環境条件との関係を整理するため、各丸太のピロディン打込み深さの最小値で正規化した結果を図-9 に示す。図中には設置当時の地表面と干潮位も併記した。3 本のピロディン試験結果は同様の傾向を示しており、特に設置当時の地表面である頭部から 0.9m 以深より徐々にバラツキが小さくなっていることがわかる。

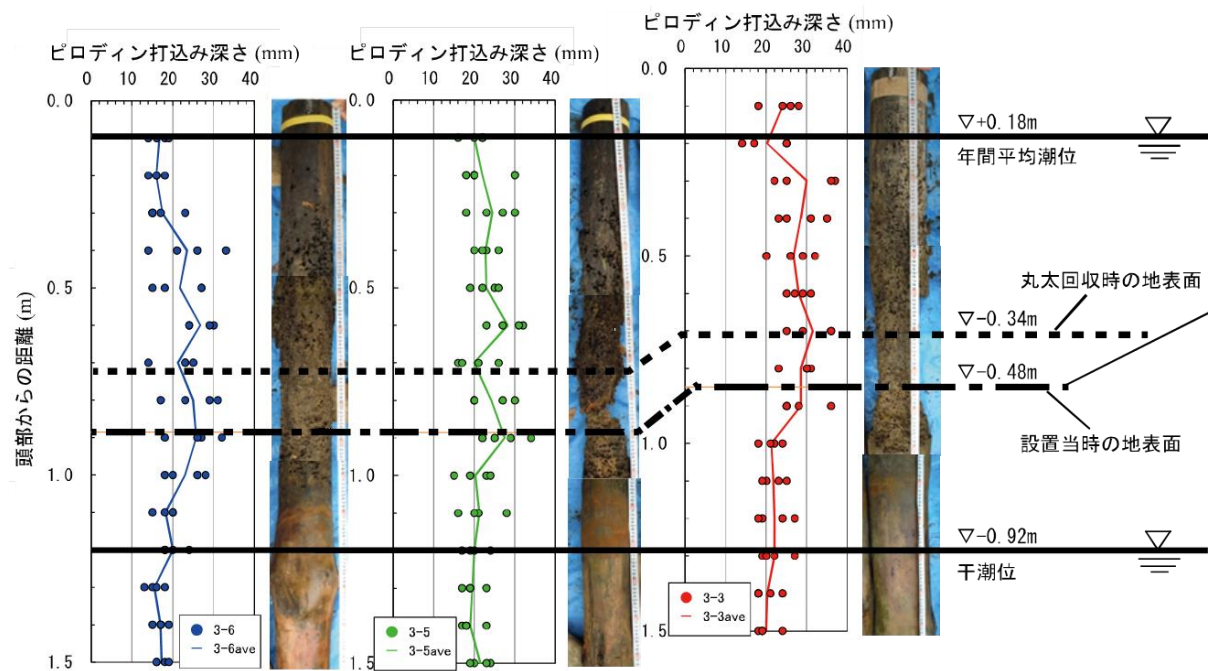


図-8 水位変動とピロディン打込み深さとの関係

毛管現象は地下水が表面張力の作用により土粒子の隙間を縫って上昇する現象で、土粒子の隙間が地下水で満たされた飽和時の毛管水頭を限界毛管水頭という。本回収地点の土質は砂礫であることから、表-4 に示す種々の土質の限界毛管水頭より、標準砂よりも粒径の粗い砂礫は干潮位である頭部から約 1.3m より上位 0.2~0.3m 程度は高含水率状態にあったと推察される。そのため、水位変動域であっても空気が供給されないので、頭部から 1.1~1.3m の範囲は腐朽や虫害の影響を受けなかったと推察される。したがって、水位変動域であっても、土質の毛管現象によって地盤が高含水率状態を保持できる場合には、常時水面下と同等の条件となり生物劣化の影響を受けず健全であることがわかった。

これらから、①水位変動域では生物劣化が生じ、健全性や強度性能が低下していた、②強度性能が低下していた範囲でも内部のヤング係数は生木と同等であり、腐朽と虫害が生じる劣悪な環境条件下においても水制工としての機能を有していた、③水位変動域で透水性の高い土質では、土中であっても生物劣化が生じていた。一方、毛管水頭により高含水率状態にあった範囲では常時水面下と同等の環境条件となることから腐朽や虫害の影響を受けず健全であることがわかった。

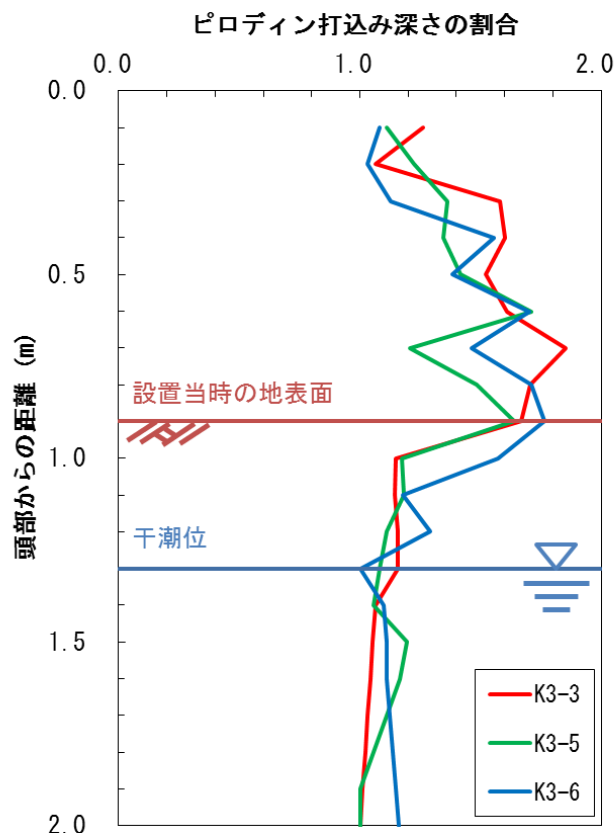


図-9 水位変動と正規化したピロディン打込み深さとの関係

表-4 種々の土質の限界毛管水頭

土質の種類 Soil types	限界毛管水頭 Ψ_{cr} (m) Critical capillary head (m)
標準砂 Standard sand	0.20~0.30
ローム Loam	0.25~0.30
砂岩 Sandstone	0.60~0.70
まさ土 Decomposed granite soil	0.80~1.00
泥岩 Stone	2.00~2.50

第5章 建設発生木材の地中利用への再利用と判別法の提案

供用期間を終えた建設発生木材の再利用判別法を提案するための試験を行った。表-5 に回収地点ごとの丸太の諸元を示す。回収地点は熊本県八代市荒瀬ダム、青森県八戸市八戸漁港、高知県高知市鏡川の3地点である。

土木・建築利用事例に基づき、末口径 0.12～0.18m、矢高が末口径の 40%以下、長さ 2.0～6.0m の丸太を任意に選別し、健全性と強度性能を評価した。目視判定結果から、熊本県材は全ての丸太、高知県材は頭部から 1.0m 以深、青森県材は頭部から 0.5m 以深で、被害度の平均値が 2.5 より小さくなっていた。高知県材は被害度が 2.5 以上の頭部付近で丸太表面に無数の穴と抜け殻が確認され、腐朽とともに激しい虫害が発生していた。青森県材は解体作業時に発生した破損部の変色が腐朽と判断された可能性がある。

図-10にピロディン試験結果を示す。同図中には平均値と全体平均の68%信頼区間 ($\pm\sigma$) を併記した。全丸太のピロディン打込み深さは14～35mm、平均値(標準偏差)は21.6 (± 4.2) mmであった。熊本県材は丸太ごとのばらつきがみられ、高知県材は頭部付近で値が高くなるが頭部から1.0m以深では20mm前後の値が得られた。青森県材はピロディン打込み深さが全深度において20mm以下となっており、破損部の変色は表面上の問題であり内部は健全であった。その結果、目視判定の被害度が2以下、ピロディン打込み深さが30mm以下では基準弾性係数と同等のヤング係数を有し、強度面も問題がないことが確認された。

図-11 に静的加力による縦圧縮ヤング係数と縦振動法によるヤング係数との関係を示す。同図中には実線で示す最小二乗法により求めた近似線と、点線で示す全体平均の 68%信頼区間 ($\pm\sigma$) を併記した。各丸太より得られたヤング係数のばらつきはいずれも 68%信頼区間 ($\pm\sigma$) 内に収まっていた。静的ヤング係数と動的ヤング係数との間には相関が認められるが、設置後約 20～60 年が経過した建設発生木材においてもその関係性が認められることが明らかとなった。

試験を行った丸太の中から、条件の最も厳しい末口径 123.5mm、ヤング係数が 7.58kN/mm² の熊本県材の結果を用いて $L=6.0$ (m)で算出した結果、座屈荷重は 94.9kN となった。戸建住宅での打設施工を想定した場合、一般的に使用される木杭打設機の圧入力は約 70.0kN であるので、室内試験を行った丸太は全て打設中の座屈は生じにくいことが確認された。すなわち、基準のヤング係数以上のヤング係数を保持していれば、長期間使用された建設発生木材においても打設時の圧入力に耐えうる座屈荷重を有していることが明らかとなった。

表-5 回収地点ごとの丸太の諸元

項目	丸太長さ (mm)	末口径 (mm)	元口径 (mm)	平均直径 (mm)	含水率 (%)	使用目的 (場所)	樹種	設置状況	経過年数
No.	22	22	22	22	7				
熊本県材	最小平均値	3286	35	94	28	96	牛柰工 (荒瀬ダム)	スギ	常時水面下 約60年
	平均値	5276	209	171	39	175			
	最大平均値	9902	357	333	50	259			
	標準偏差	1753	90	59	16	69			
	変動係数(%)	33.2	43.1	34.7	39.9	39.6			
No.	14	14	14	14	4				
高知県材	最小平均値	1820	144	150	-	104	杭出し水制工 (鏡川)	アカマツ	常時水面下 (1.5m以深) 約20年
	平均値	2693	168	172	-	137			
	最大平均値	3095	191	207	-	166			
	標準偏差	312	16	18	-	30			
	変動係数(%)	11.6	9.5	10.5	-	21.9			
No.	1	1	1	1	2				
青森県材	最小平均値	-	-	-	-	114.0	木杭基礎 (八戸漁港)	マツ	常時水面下 約50年
	平均値	3933	162	201	-	124.9			
	最大平均値	-	-	-	-	135.8			
	標準偏差	-	-	-	-	15.4			
	変動係数(%)	-	-	-	-	12.4			

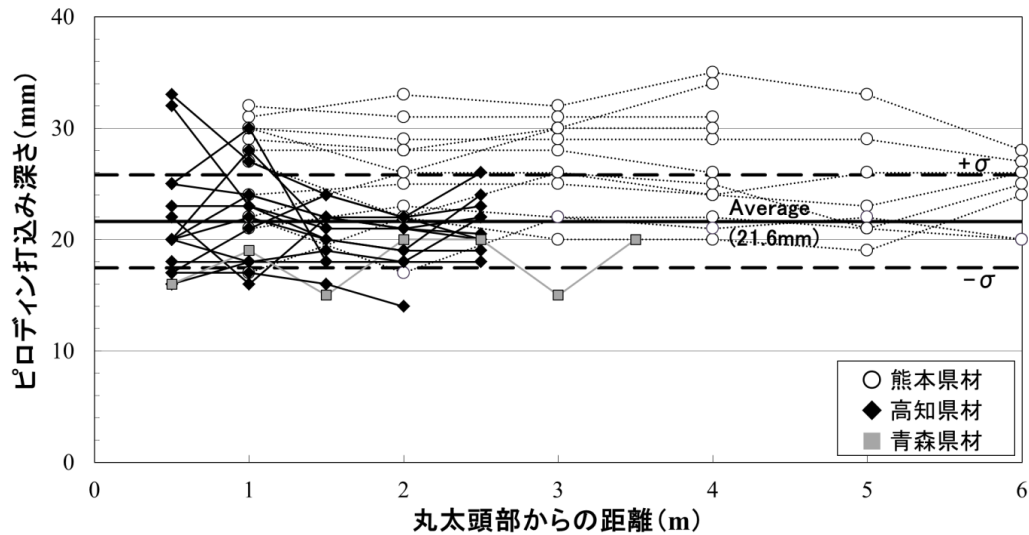


図-10 ピロディン試験結果

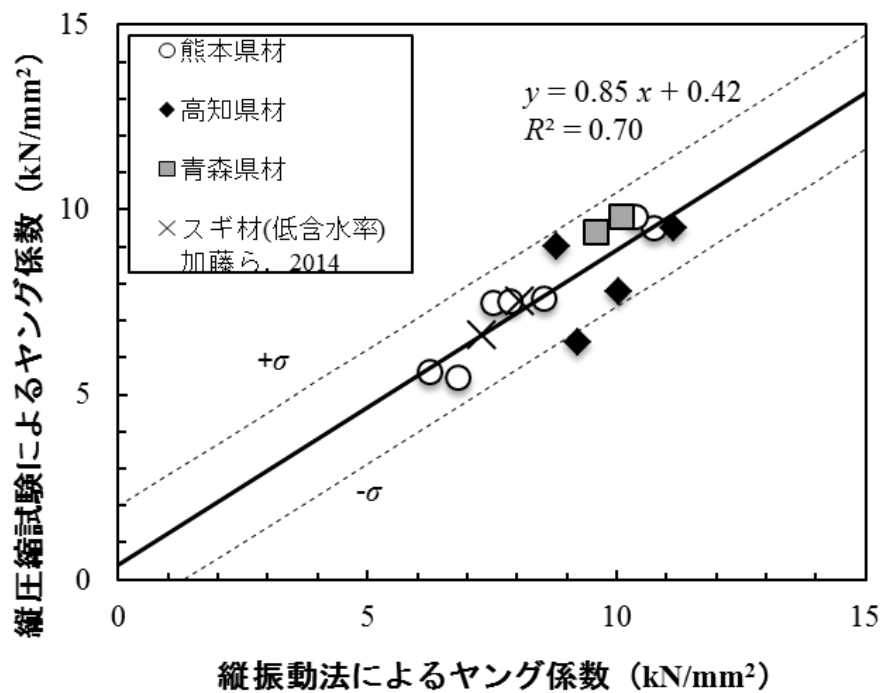


図-11 縦圧縮試験によるヤング係数と縦振動法によるヤング係数との関係

本実験結果に基づき、再利用が可能な建設発生木材を現場に居ながら判定するための簡易な判別法を提案する。図-12に再利用判別フローを示す。まず、①既存資料から樹種や常時水面などの設置環境に関する情報を入手する。次に、②丸太の寸法を計測し、地中利用可能な形状の木材を選定する。この際、現場に含水率測定器がない場合には、常時水面下に設置されていた丸太は繊維飽和点以上の高含水率であると判断してもよい。続いて、③目視判定とピロディン試験から健全度を評価する。被害度の平均値は2.5が基準であるが、被害度が3の「部分的に激しい虫害または腐朽」があった箇所に打設時に荷重が集中し座屈する危険性が想定されるため、被害度の平均値は2に定める。さらに、④縦振動法により現地で動的ヤング係数を測定し、図-11に示す関係から縦圧縮ヤング係数を推定する。最後に、⑤推定されたヤング係数と①で判断した樹種の平均的なヤング係数を比較し、現地の結果が既往のヤング係数以上となることを確認する。以上の①～⑤の条件を満たした建設発生木材は、地中利用に再利用できると判定する。

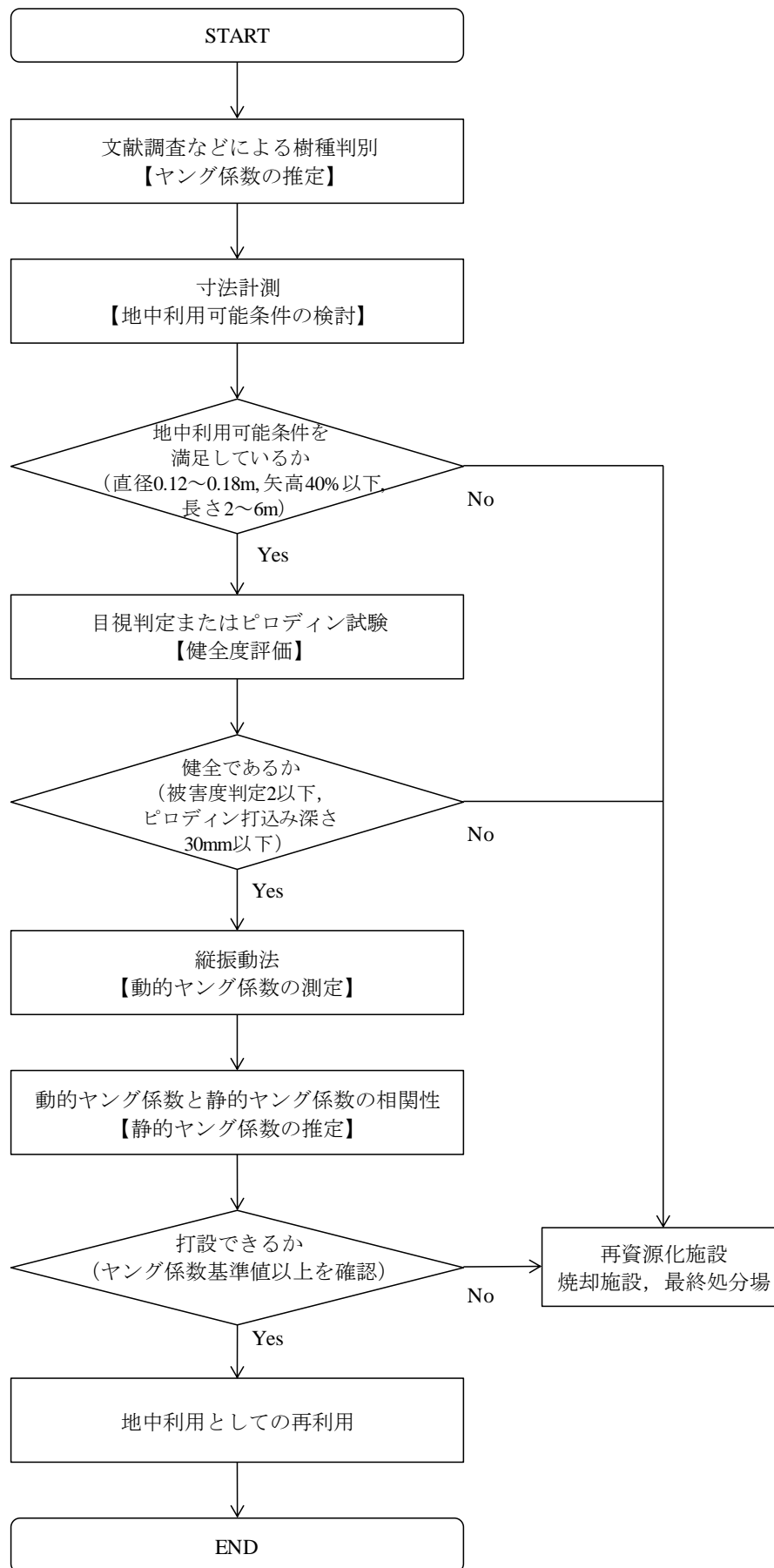


図-12 現地での建設発生木材の地中利用判別フロー

以下に本研究の結論を示す。本研究では、下記の 3 項目について検討を行った。

1. 液状化対策工法としての地盤改良効果の検証

大型土槽を用いた大型振動実験を行い、丸太を打設した地盤の改良効果を検証した。液状化対策効果を相対密度と液状化抵抗で整理し既存の密度増大工法との地盤改良効果の違いを評価した。

2. 地中利用木材の長期健全性に関する評価

水位変動域で約 20 年前に施工された木製水制工などの高含水率丸太を対象に、設置期間や施工環境、水位などの観点から健全性及び強度性能を評価した。

3. 再利用の可否を現場で判断できる判別法の提案

力学的性状が不明瞭とされる解体時に出土した建設発生木材を対象に、現場で簡易に実施が可能な試験を行い、再利用の可否が判断できる判別法を提案した。

まず、第 3 章より得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 丸太打設することで錘の沈下が抑制され、地盤改良効果があることがわかった。また、この効果は丸太打設間隔が小さい方が大きく、丸太打設間隔が丸太直径の 4 倍の場合には、相対密度 91% の地盤とほぼ同じ傾向を示した。
- (2) 丸太打設により錘の沈下を抑制する理由は、丸太が錘を直接支えるのではなく、丸太打設された地盤が密になり繰返し荷重に対して液状化を抑制し、地盤の剛性が低下しにくくなるためである。
- (3) 大型振動実験で実施した無対策と密度増加させた地盤の結果は、繰返し非排水三軸試験より得られた相対密度と繰返し抵抗の関係とよく一致した。一方、大型振動実験で丸太打設した地盤の繰返し抵抗は、繰返し非排水三軸試験の相対密度と繰返し抵抗の関係と比較すると、相対密度が 60% 以上の範囲で数倍以上に大きくなり、丸太打設による液状化対策効果が密度増加のみによるものよりも大きくなることを明らかにした。

次に、第 4 章より得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 約 20 年間水位変動域に設置された水制工による結果では、干潮位以深では目視判定結果から被害度は全体で 2 以下と判定され、ピロディン試験結果は貫入量の多くが 20~30mm 程度の範囲内であり、健全と判断した。水位変動域では部分的に激しい腐朽や虫害が見られ不健全と判断した。
- (2) 水位変動域では腐朽部の周囲は劣化して欠損しヤング係数は約 60% まで低下していたが、中心部は生木と変わらず、長期間経過後も設置環境や使用用途、樹種の違いによらず健全であることを明らかにした。
- (3) 水位変動域では透水性の高い地盤である場合、地中においても腐朽や虫害の影響を受ける可能性があるが、この範囲内であっても土質の毛管現象によって地盤が高含水率状態を保持できる場合には常時水面下と同等の環境条件となり、腐朽や虫害の影響を受けず健全であることがわかった。
- (4) 本研究結果に基づけば、木材を地中利用する際には地際部よりも地下水位と土質の毛管現象の深度によって、打設深度を検討できることを示した。

最後に、第 5 章より得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 寸法計測の結果から、全回収量の約半数が地中利用に可能な、末口径が 0.12~0.18m、矢高が末口径の 40% 以下、長さが 2.0~6.0m の形状を有していることがわかった。
- (2) 健全性が確認され生木と同等のヤング係数を示す建設発生木材は、一般的な木杭打設機の圧入力よりも大きな座屈荷重を有することから、地中への丸太打設が可能と判断した。適切に評価された建設発生木材は、地中利用へ再利用できる可能性が示唆された。
- (3) 得られた建設発生木材の強度や健全性を再評価することで、再利用が可能な建設発生木材を現場に居ながら判定できる簡易な判別法を提案した。