

鋼製ピンを用いた静的貫入試験による木材腐朽厚の簡易測定法

2022.3

東京農工大学大学院

連合農学研究科

環境資源共生科学専攻

宝音阿日毕吉胡

目次

第 I 章 序論.....	3
I-1 研究の背景及び目的.....	3
I-1-1 日本の森林・林業の状況.....	3
I-1-2 木製治山治水構造物の現状と課題.....	4
I-1-3 木製治山治水構造物の腐朽特性.....	4
I-1-4 木製治山治水構造物の腐朽を測定する器械について.....	5
I-2 本研究の目的と構成.....	8
I-2-1 本研究の目的.....	8
I-2-2 本研究の構成.....	8
第 II 章 鋼製貫入ピンの貫入力の検討及び腐朽厚測定精度の分析.....	13
II-1 はじめに.....	13
II-2 既存の腐朽厚・腐朽度測定装置の特徴と欠点.....	14
II-2-1 レジストグラフ.....	14
II-2-2 ピロディン.....	15
II-2-3 荷重測定器（フォースゲージ）とドライバーピンを組み合わせた測定器具.....	15
II-2-4 電動静的貫入試験機の製作及び測定収録機器・ソフト.....	17
II-2-5 簡易静的貫入試験器の試作.....	21
II-2-6 静的貫入試験に用いた鋼製貫入ピンの形状.....	23
II-2-7 試験に用いた木材供試体.....	25
II-3 試験方法.....	26
II-3-1 試験実施の詳細な流れ.....	26
II-3-2 電動静的貫入試験機による腐朽厚測定試験方法と精度検討方法.....	32
II-3-3 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定方法と精度検討方法.....	33
II-4 試験結果.....	34
II-4-1 木材供試体の腐朽厚判定.....	34
II-4-2 各鋼製貫入ピンにおける腐朽境界貫入力の判定.....	34
II-4-3 電動静的貫入試験機による各鋼製貫入ピンの腐朽厚測定結果と測定精度の検討結果..	46
II-4-4 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定試験結果と測定精度検討結果.....	49
II-4-5 ピロディンによる貫入深測定値.....	54
II-5 考察.....	57
II-5-1 電動静的貫入試験機と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の差.....	57
II-5-2 ピロディンによる貫入深測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の差.....	58
II-5-3 鋼製貫入ピンの座屈.....	59
II-5-4 腐朽厚測定に適する鋼製貫入ピン.....	60
II-5-5 まとめ.....	60

第 III 章 簡易静的貫入試験器を用いた木材の腐朽厚測定における含水率の影響.....	61
III-1 はじめに.....	61
III-2 腐朽厚測定試験.....	61
III-2-1 採取地.....	61
III-2-2 供試体.....	62
III-2-3 試験方法.....	69
III-3 結果.....	72
III-3-1 スギ材の供試体における試験結果.....	72
III-3-1-1 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定の結果.....	72
III-3-1-2 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果.....	80
III-3-1-3 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果との比較.....	84
III-3-2 ヒノキ材の供試体における試験.....	86
III-3-2-1 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定の結果.....	86
III-3-2-2 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果.....	93
III-3-2-3 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果との比較.....	97
III-4 まとめ.....	99
III-4-1 スギ材の供試体における試験.....	99
III-4-2 ヒノキ材の供試体における試験.....	99
第 IV 章 簡易静的貫入試験器を用いた林内に残置された間伐材の腐朽厚実態調査.....	101
IV-1 はじめに.....	101
IV-2 調査地及び調査対象間伐材.....	101
IV-3 試験方法.....	102
IV-4 試験結果.....	103
IV-5 まとめ.....	106
IV-6 終わりに.....	106
第 V 章 まとめ.....	107
V-1 各章のまとめ.....	107
V-2 総括.....	110
V-2-1. 簡易静的貫入試験器に最適な貫入ピンおよび精度について.....	110
V-2-2. 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定における含水率の影響について.....	110
V-2-3. 野外における調査.....	111
V-2-4. 総括.....	111
謝辞.....	113
引用文献.....	115
図一覧.....	119
表一覧.....	123

第 I 章 序論

I-1 研究の背景及び目的

I-1-1 日本の森林・林業の状況

第二次世界大戦後の復興や燃料革命により、戦後木材需要が急増し、さらに戦中の乱伐によるや森林荒廃や自然災害の影響も重なり、木材が不足し値段が高騰した。このようなことがあり、戦後国は大量に森林を伐採してスギ、ヒノキ、カラマツ、アカマツ等の人工林を拡大させた。このため、国土面積の約 7 割（66%）を占める森林は過去 40 年間で森林蓄積が 2.7 倍以上に増えた。日本の森林面積の 4 割が人工林で、その内半数以上が一般的な主伐期である 50 年生を超え、本格的な利用期を迎えている。一方、最近日本の木材自給率は 40%程に増加してきているが、戦後造林された人工林を中心に本格的な利用期を迎え、どのようにしてさらなる利用拡大を図っていくかが問われている。

このような背景から、木材の有効な活用について様々な対策が行われてきている。平成 28（2016）年 4 月に改定された「新農林水産省木材利用推進計画 - 公共建築物等木材利用促進法に基づく計画 -」では、国自らが率先して木材利用を推進するとともに、低コストでの木造公共建築物等の整備に対する支援等を行うとしている。建築物等で木材の利用が促進されることによって、間伐や主伐によりの森林の適正な整備や更新が進み、森林の多面的機能の発揮につながるという考えに基づくものである。この公共建築物等における木材の利用の推進とともに、森林土木構造物においても木材使用が推進されてきている。森林土木構造物での木材利用の推進は、間伐材の有効利用のみならず、コンクリート製に比べ建設する際の CO₂排出量が少なく済む、山地溪流の景観や生態系の保全につながるなどの利点がある（林野庁, 2005 ; 石川ら, 2010）。

I-1-2 木製治山治水構造物の現状と課題

最近では、木製治山治水構造物の設置が全国的に進んでいる。これらの木製治山治水構造物の中でも、耐久性を期待される比較的大きな構造物として木製治山ダム、木製土留工、木製護岸工、木工沈床等がある（石川ら, 2010; 正条, 2018）。例えば、木製治山ダムは平成25（2013）年度末で全国に1,166基あると報告されている（秋田, 2015）。これらの木製治山治水構造物は、一般的に用いられているコンクリート製の治山治水構造物と比べると腐朽や摩耗に弱いといった特徴がある。特に腐朽は野外で木材を利用する上では避けることのできない現象である（秋田ら, 2006, 2011; Akita et al., 2014; Dang et al., 2008; 石川ら, 2003, 2010; 吉田ら, 2015）。従って、木製治山治水構造物を設置し維持管理する場合には、腐朽を前提として適切な点検、維持管理を行う必要がある。

国土交通省や林野庁が管理しているインフラについては点検・診断を実施し、予防保全型維持管理が行われている。このことにより施設の安全性を維持し、施設の長寿命化を図るとともにトータルコストの縮減を図ることとされている（林野庁, 2014）。さらにこの長寿命化計画を実施するために個別の施設毎に長寿命化計画を策定することとしている。このようなことから、耐久性を期待される比較的大きな構造物である木製治山ダム、木製土留工、木製護岸工、木工沈床等についても長寿命化計画に従って定期的・臨時的点検・診断を適切に行い、適切な維持管理・更新を行うことが必要とされている。さらに、効率的で精度の良い点検を行うためには新技術の開発・導入を進めていく必要がある（林野庁, 2014）。

I-1-3 木製治山治水構造物の腐朽特性

既往の木製治山治水構造物の腐朽に関する研究により、木製部材の腐朽は構造物の全

体で一様に進行するのではなく、部位により大きく異なることが報告されている（石川ら, 2003; Dang et al., 2008; 秋田ら, 2011）。このような部位により腐朽速度に差が見られるのは主として流水等の影響によるものと考えられている（石川ら, 2003; Dang et al., 2008; 秋田ら, 2011）。また、木製構造物に使用されている木材の強度は木材の腐朽に伴い低下する（藤平ら, 1997）が、腐朽厚を測定することにより木材の強度を推定することが可能であることが報告されている（石川ら, 2003; Dang et al., 2008）。このようなことから、木製治山治水構造物を適切に管理するためには部位による腐朽厚の違いを考慮する必要があり、点検時には木製治山治水構造物の各部位の木材の腐朽厚を測定することが必要となる。また、水中や流水に触れている部材の腐朽厚の測定も極めて重要であるといえる。

I-1-4 木製治山治水構造物の腐朽を測定する器械について

木製治山治水構造物は野外の過酷な環境に置かれており、一部は地中・水中に埋まれている場合もある。このため、構造物全体の腐朽度を測定し、劣化度を把握することは相当に困難で時間と工夫を要する。一方、木製治山治水構造物はコストが安いことがメリットであり、その維持管理にも簡易性、経済性が求められ、何等かの簡易な非破壊型の測定手段の開発が求められている。すなわち、木製治山治水構造物の維持管理には、全体の腐朽状況を迅速かつ簡便に測定することが非常に重要である。しかしながら、既存の腐朽厚測定器においては選択肢が少ないのが現状である。

現在、一般的に木材の腐朽厚・腐朽度を測定するための機器としては、レジストグラフ（図-1 (a)、(b)、RINNTECH 社製 IMLRESI F300S 型）およびピロディン（図-2、PROCEQ 製 pilodyn 6J）が使用されている（石川ら, 2003, 2010; 秋田ら, 2006, 2011; Dang et al., 2008; Akita et al., 2014; 吉田ら, 2015; 正条, 2018）。しかしながらこれらの機器

を野外に設置されている木製構造物に用いようとする、それらの機器の構造から、雨天時や水中では使用できないなどの欠点を抱えており、さらにレジストグラフは高価で重いなどの欠点を有している。

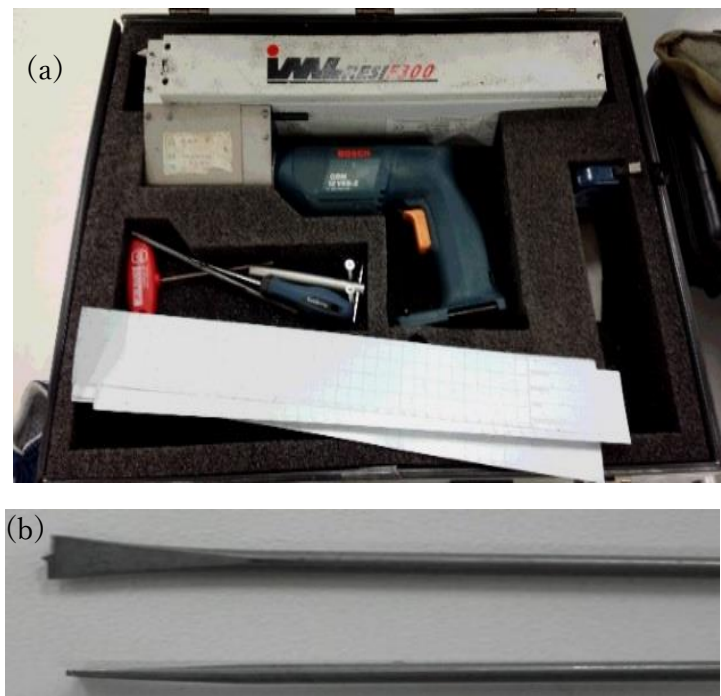


図-1 レジストグラフと貫入針

(a) レジストグラフ (RINNTECH 社製 IMLRESI F300S 型)

(b) レジストグラフ貫入針の先端形状



図-2 PROCEQ 製ピロディン

このため、雨天時や水中でも使用することができ、既存の測定機器と比較し、安価で軽量、さらに十分な測定精度があり、操作しやすい特徴を持つ測定機器を開発することが必要とされている。

近年このようなニーズを背景に荷重計にドライバーのような鋼製ピンを取り付けて簡易に腐朽厚を測定する機器の検討がおこなわれてきており、150N の貫入力でプラスドライバーを木材に挿入する方法で得られる貫入深（腐朽厚）がピロディンの値と相関性が高く、代替え可能だという報告がされている（野田、2018）。しかし、用いた供試体は未使用の健全な角材であり、腐朽材であるとどのような状況になるかは検討されていない。この研究では、プラス・マイナスドライバーの2種類の貫入ピンの形状に対応した貫入力を検討する際に、野外において不安定な体勢でも無理なく押し込むことができる150N・200Nの2つの貫入力でそれぞれ貫入ピンを供試体に貫入させた。そこから得られた貫入深の値をピロディン等の値と比較して検討し、木材の含水率を変化させても、比較的高い相関性があることが確認されたが、貫入力についての検討はなされていない。

I-2 本研究の目的と構成

I-2-1 本研究の目的

本研究では野外に設置されている木製治山治水構造物の腐朽厚を現場で簡便かつ精度よく測定可能な機器の測定手法を提示することを目的にした。具体的には、荷重計と鋼製貫入ピンを組み合わせた機器により、人が容易に鋼製貫入ピンを押し込んで、その貫入深から腐朽厚を測定できる器具に用いる鋼製貫入ピンの先端形状の提案を作り、その貫入ピンに最適な押し込み荷重を明らかにすることが目的である。

I-2-2 本研究の構成

第 I 章では、研究背景として日本の木材の利用状況及び木材利用に関する国の政策を紹介した。また、木製治山治水構造物の腐朽特性について述べ、必要とされている腐朽厚測定機器に関する条件について述べた。

さらに、研究目的を述べた。本論文の構成を図 - 3 に示す。

第 II 章では電動静的貫入試験機を用いて各種の鋼製ピンによる腐朽部および健全部に対応する貫入力を調べた。次に電動静的貫入試験機とレジストグラフによる試験により各種の鋼製貫入ピンの腐朽厚測定値（腐朽厚）と貫入力の関係を検討した。さらにレジストグラフと簡易静的貫入試験器により貫入力と貫入深の関係を検討した。これらの結果を基に、簡易静的貫入試験器における最適の鋼製貫入ピン貫入力を選定した。

II - 1 では、既往の腐朽厚・腐朽度の測定において一般的に用いているレジストグラフ、ピロディン及び荷重測定器についてレビューを行った。また、本研究において製作した電動静的貫入試験機および測定収録器具・ソフトについて述べた。また、本研究で開発した

簡易静的貫入試験器について説明した。さらに、試験に用いた 20 個の腐朽したスギ材の供試体および本研究において試作した各種の鋼製貫入ピンについて述べた。

II - 2 では、試験方法及び測定精度評価方法について述べた。まず、電動静的貫入試験機を用いて各種の鋼製貫入ピンの貫入力と貫入深の関係を調べるための試験方法を説明した。次に、レジストグラフによる腐朽厚と比較することにより腐朽厚の測定に必要な貫入力を求める方法を説明した。その調査結果より貫入力を決定した方法及び腐朽厚測定を行った方法、各腐朽厚測定機器の測定精度比較検討方法を説明した。次に、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定において、測定精度、安全性・安定性などの各面で各鋼製貫入ピンを比較する方法について述べた。

II - 3 では、各種試験結果と比較分析結果を取りまとめた。まずは、全供試体のレジストグラフによる腐朽厚測定値を取りまとめ、本研究の腐朽厚測定値の基準とした。また、電動静的貫入試験機による貫入試験における各種の鋼製貫入ピンの貫入力と貫入深の関係をまとめた。この貫入力と貫入深を基に腐朽境界貫入力（平均貫入力）を求めこれを用いて、電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値を求めた。さらに、レジストグラフによる腐朽測定値（基準値）と電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値の相対誤差について比較した結果を示した。また、レジストグラフによる腐朽厚測定値と電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値の相関を示す単回帰分析の結果を提示した。

次に、簡易静的貫入試験器による腐朽境界貫入力をを用いた腐朽厚測定値を取りまとめた。レジストグラフによる腐朽測定値（基準値）と簡易静的貫入試験機による腐朽厚測定値の相対誤差について比較した結果を示した。また、レジストグラフによる腐朽厚測定値と簡易静的貫入試験機による腐朽厚測定値の相関を示す単回帰分析の結果を提示した。

最後に、ピロディンによるピン貫入深測定値を取りまとめた。レジストグラフによる腐朽測定値（基準値）とピロディンによるピン貫入深測定値について比較した結果を示した。同時に、ピロディンによるピン貫入深測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値

について比較した結果を示した。また、ピロディンによるピン貫入深測定値と簡易静的貫入試験機による腐朽厚測定値の相関を示す単回帰分析の結果を提示した。

II - 4 では、これまでの結果をもとに、総合的に考察を行った。まず、電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値をそれぞれレジストグラフによる腐朽測定値と比較して得られた相対誤差、決定係数の結果の相違について原因分析した。その中で、各鋼製貫入ピンの貫入特性および両腐朽厚測定機器の測定作業の特性等の視点から各種の鋼製ピンの腐朽厚測定作業における測定結果の傾向を明らかにした。

また、測定作業中の鋼製貫入ピンの座屈回数の相違について分析した。電動静的貫入試験機および簡易静的貫入試験器において、各鋼製貫入ピンを貫入させるメカニズムや供試体自体の特性などの面から解析した。

上記の解析を取りまとめ、電動静的貫入試験機および簡易静的貫入試験器による腐朽厚の測定に適した鋼製貫入ピンの特徴としては、貫入力小さく、決定係数が大きく、相対誤差が小さく、また座屈しにくい鋼製貫入ピンを選定した。このような検討結果から、電動静的貫入試験機および簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定には、楔形の軸の直径が 3 mm の鋼製貫入ピンが最適であることが分かった。

第 III 章では、レジストグラフ及び簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）を用いて、スギ材、ヒノキ材の供試体について腐朽厚測定試験を行い、木材腐朽厚測定における含水率の影響について調べた。主に、供試体の含水率を約 15%、70%、150%、190% の 4 段階に変化させて、含水率の変化による腐朽厚測定値の変動幅を定量に評価することで含水率の影響を評価した。

III - 1 では、日本の森林蓄積の中で大きい割合を占めるスギとヒノキにおける含水率の腐朽厚測定値への影響を調べた。腐朽厚測定とはレジストグラフおよび簡易静的貫入試験器を用いた。なお、簡易静的貫入試験器に用いた鋼製貫入ピンは楔形の軸の直径が 3

mmの鋼製貫入ピンである。

III - 2 では、供試体の長さ、半径、体積、全乾密度を示した。また、試験方法と分析方法を述べた。腐朽厚が異なるスギ・ヒノキ材の供試体を新たに採取し、それぞれ各供試体の含水率を約 15%、70%、150%、190%の 4 段階に変化させ、腐朽厚測定を行った。その結果をもとに、含水率が腐朽厚測定に与える影響を評価し、分析した。

III - 3 では、簡易静的貫入試験器及びレジストグラフによる腐朽厚測定試験の結果を分析した。スギ材とヒノキ材の供試体について異なる含水率の状態における腐朽厚測定値の相違を定量的に評価し、含水率の影響を比較検討した。

III - 4 では、スギ材の供試体及びヒノキ材の供試体における腐朽厚測定試験の結果をもとに、含水率が腐朽厚測定値に与える影響を評価した。

第 IV 章では、簡易静的貫入試験器の野外における木材の腐朽厚測定の適用について検討するため、林内に残置された間伐材における腐朽厚測定を行い、間伐材の経過年数と腐朽速度の関係、経過年数と腐朽厚の関係、経過年数と全乾密度の関係を評価し、既往の研究と比較分析を行った。

第 V 章では以上の研究結果のまとめを行った。

まず、研究背景を要約し、研究目的を述べた。野外に設置された木製治山治水構造物の腐朽厚を現場で簡便かつ精度よく測定する機器として簡易静的貫入試験器を提案した。簡易静的貫入試験器に最適とされる鋼製貫入ピンは楔 3 mm であり、その貫入力は 100N であることが分かった。

また、スギ材ヒノキ材の供試体についてレジストグラフ及び簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）を用いて腐朽厚試験を行い、腐朽厚測定値への含水率の影響を分析した。

さらに、野外においてレジストグラフ及び簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定を行い、間伐材の経過年数と腐朽速度及び腐朽進行状況を分析し、まとめた。

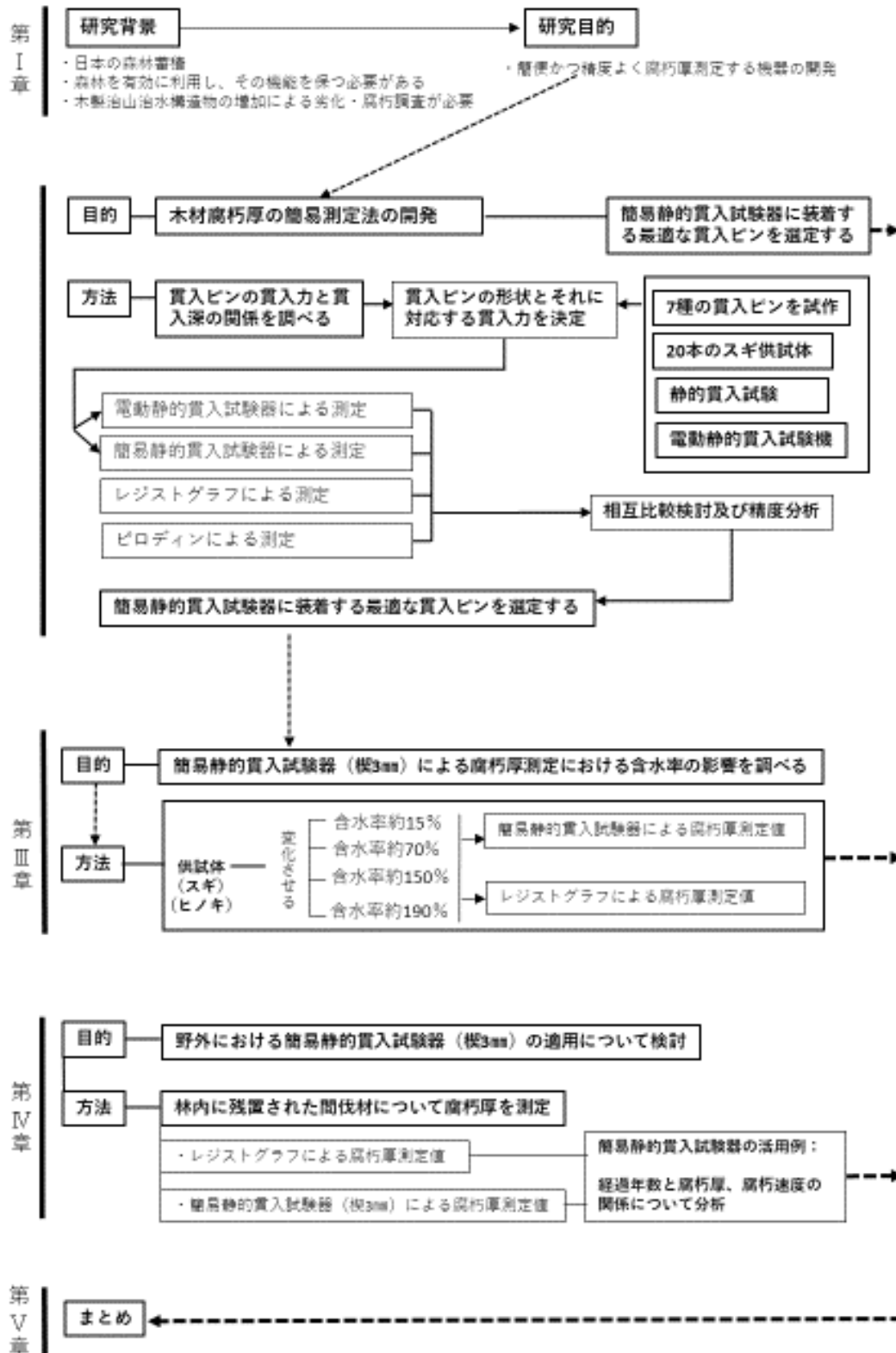


図 - 3 本論文の構成

第 II 章 鋼製貫入ピンの貫入力の詳細及び腐朽厚測定精度の分析

II-1 はじめに

本章では、現在用いられている金属製のドリルやピンを木材内部に挿入することで腐朽厚や腐朽度を評価しようとする機器についてレビューを行った。その上で、新規に簡易で雨天時や水中でも利用可能な測定装置を提示した。合わせて、種々の形状を持つ鋼製貫入ピンを試作し、それらの静的貫入時の荷重（貫入力）と腐朽部と健全部の境界の貫入深（腐朽厚）の関係について詳細な測定及び分析を行った。また、その分析結果をもとに、各種腐朽厚測定値の精度評価を行い、木材腐朽厚を簡易に測定できる測定機器を提示した。

II-2 既存の腐朽厚・腐朽度測定装置の特徴と欠点

II-2-1 レジストグラフ

レジストグラフは先端直径 3 mm のドリルを高速で回転させながら木材に貫入させ、その際の穿孔抵抗を用紙に記録する機器であり、記録された穿孔抵抗値から腐朽厚を判断することができる（図-4）。

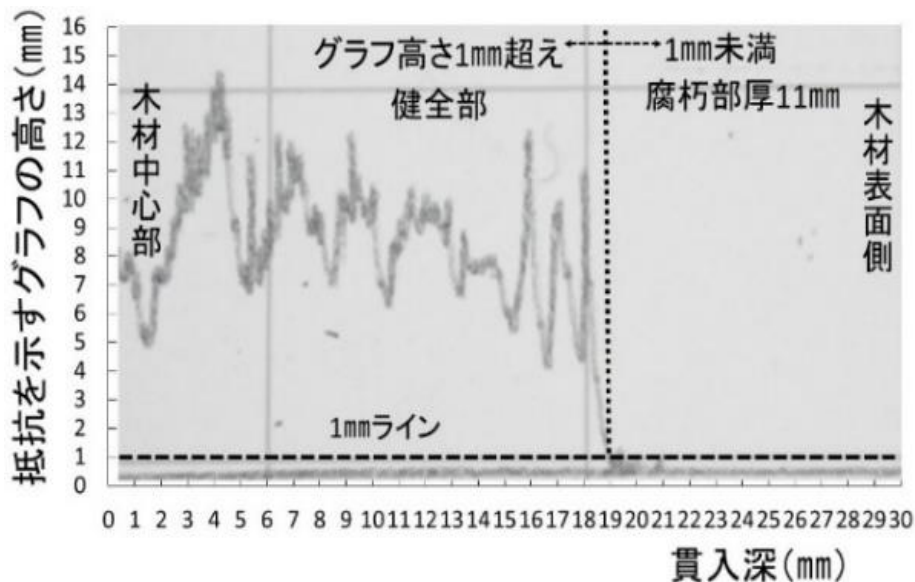


図-4 レジストグラフで測定した穿孔抵抗による腐朽部の判定

既往研究（石川ら，2003，2010；吉田ら，2015）ではレジストグラフによる測定において、記録紙上の穿孔抵抗値を表すグラフの高さが 1 mm 未満の部分を腐朽部としている。一方高さ 1 mm 以上の部分は健全部とみなす（図-4 参照）としている。レジストグラフは、腐朽厚の測定に関しては、他の機器（超音波式試験器、ピロディン、応力波試験器）と比較して、精度が良い（石川ら，2003）とされている。

レジストグラフは大変高価（120～180万円）であり、また質量が4kgと山中や高所では扱いづらい。加えて、精密機械であるために雨天時の使用は困難であり、水中での使用はできない。また、バッテリーで駆動するので連続稼働時間に制限がある。

II-2-2 ピロディン

ピロディンは内蔵されているバネによって鋼製ピン（ストライカーピン pilodyn 6Jでは直径2.5mm、長さ40mmの円柱状）を木材に貫入させる機器である。鋼製ピンが打ち込まれた深さを貫入深とする。軽量で扱いやすいといった利点がある（図-2）。

ピロディンは一般的に使用されてはいるものの、やや高価（40万円程）であり、内部がさびてしまうため、水中や雨天時には使用を避ける必要がある。貫入ピンの木材への貫入はバネの持つ一定のエネルギー（6J）に依存するため、腐朽していない木材でも15～30mm程度の貫入深が生じてしまい（飯島, 1999）、貫入深と腐朽厚は一致しない。すなわち、ピロディンは木材の相対的な腐朽度しか測定できないという欠点がある。この点に関して、小椋ら（2015）は鋼製貫入ピンを静的に貫入した時のエネルギーとピロディン（6J）による打込み深さを比較することにより、同一のエネルギーに対する貫入深を比較した実験を行い、両者に高い相関関係があることを示した。しかしながら、木材の劣化深さと鋼製貫入ピンの貫入時の荷重（貫入力）の関係については検討が行われていない。

また、図-2に示した pilodyn 6J の場合、貫入ピンの長さが最大40mmであるため、これよりも深く腐朽している木材には使用できない。

II-2-3 荷重測定器（フォースゲージ）とドライバーピンを組み合わせた測定器具

最近、入手が容易で簡便に取り扱いができ、かつ安価な試験機として、荷重測定器（フ

ォースゲージ) にドライバーピンを取り付けた測定器具による劣化度および腐朽度の評価(内藤ら, 2015; 明石ら, 2016; 木製治山構造物技術指針検討会, 2016; 佐山ら, 2017; 野田ら, 2017; 山田ら, 2017; 野田, 2018) が行われてきている。荷重測定器としては最大 500N ~1000N を測定できるデジタルフォースゲージが用いられており、これに治具を介して、市販のマイナスあるいはプラスドライバーを装着して測定器具としている。この測定器具を用いて人力により荷重 150N~200N 程度でゆっくりとドライバーピンを木材表面から内部に向かって押し込み、その時のドライバーピンの貫入深さを測定し、対象とする木材の劣化度や腐朽厚を測定しようとするものである。これらの既往の研究は測定対象の木材として既設の木製治山ダムの腐朽した部材について、測定器具のドライバーピンの貫入深とレジストグラフの腐朽厚との関係(内藤ら, 2015, 明石ら, 2016) を研究した場合と腐朽していない健全な木材を対象として、測定器具のドライバーピンの貫入深およびピロディンの貫入深と含水率の関係(佐山ら, 2017; 野田ら, 2017; 山田ら, 2017; 野田, 2018) およびドライバーピンの貫入深とピロディンの貫入深との関係(野田ら, 2017; 野田, 2018) を研究した場合に大別できる。腐朽木材を用いた前者の研究の結果としては、ドライバー貫入深とレジストグラフによる腐朽厚測定値には比較的強い相関がある(内藤ら, 2015, 明石ら, 2016) ことが報告されている。健全な木材を用いた後者の研究の結果としては、ドライバーピンの貫入深およびピロディンの貫入深と含水率には比較的強い相関がある(佐山ら, 2017; 野田ら, 2017; 山田ら, 2017; 野田, 2018) ことおよびドライバーピンの貫入深とピロディンの貫入深とにも比較的強い相関がある(野田ら, 2017; 野田, 2018) ことが報告されている。これらの既往の研究に共通する課題としては、既往の研究では貫入ピンとしてはマイナスドライバーあるいはプラスドライバーを使用しているが、ピンの形状(先端形状、軸径)や押し込み荷重を変えることにより、ピンの貫入深さとレジストグラフ腐朽厚測定値の相関が良くなる可能性があること、また、腐朽厚を精度良く測定するための押し込み荷重の設定手法が明確でないことがあげられる。さらに使用されている

デジタルフォースゲージは精密機器であり、雨天や水中では使用できないことも課題である。

II-2-4 電動静的貫入試験機の製作及び測定収録機器・ソフト

様々の形状を持つ鋼製貫入ピンの静的貫入力と貫入深（腐朽厚）の関係を精度良く計測し記録するために電動静的貫入試験機（図-5、図 - 6）を製作した。

この電動静的貫入試験機には後で述べる 7 種類の鋼製貫入ピンを交換して取り付けることができる。本試験機では電動モーターにより極めて微小な一定速度 (0.14 mm/s) で、鋼製貫入ピンを回転させることなしに静的に木材に押し込むことができる。本試験機には鋼製貫入ピンの貫入深を測定するための変位計が鋼製貫入ピンの保持部に取り付けてある。図 - 7 に示したように、変位計が鋼製貫入ピンの貫入量を測定できる仕組みである。同時に、貫入ピンに作用する荷重の変化は、供試体（木材）の下に設置した荷重計により計測できる（図 - 5、 - 6）。装置は変位計、変位変換器 (DT-50D M150)、小型圧縮型ロードセル (LCX-A-1KN-ID)、ワンタッチロック式ブリッジボックス (DB-120V-4)、コンパクトレコーディングシステムひずみ測定ユニット (EDX-11A)、コンパクトレコーディングシステム制御ユニット (EDX-10A) とから構成されており、いずれも KYOWA（共和電業）製である。

試験の測定データの記録、解析には DCS-100A (ダイナミックデータ集録ソフトウェア、KYOWA 社製) を用いた。鋼製貫入ピンの貫入深と貫入力データのデータは毎秒 20 回の頻度で計測し、データを記録した。試験装置と作業の安全性の面から試験中の各鋼製貫入ピンが座屈等により曲がったり折れたりしないかについても記録した。

なお、本論文では電動により静的貫入試験を行う機械として本装置を「試験機」と表現している。

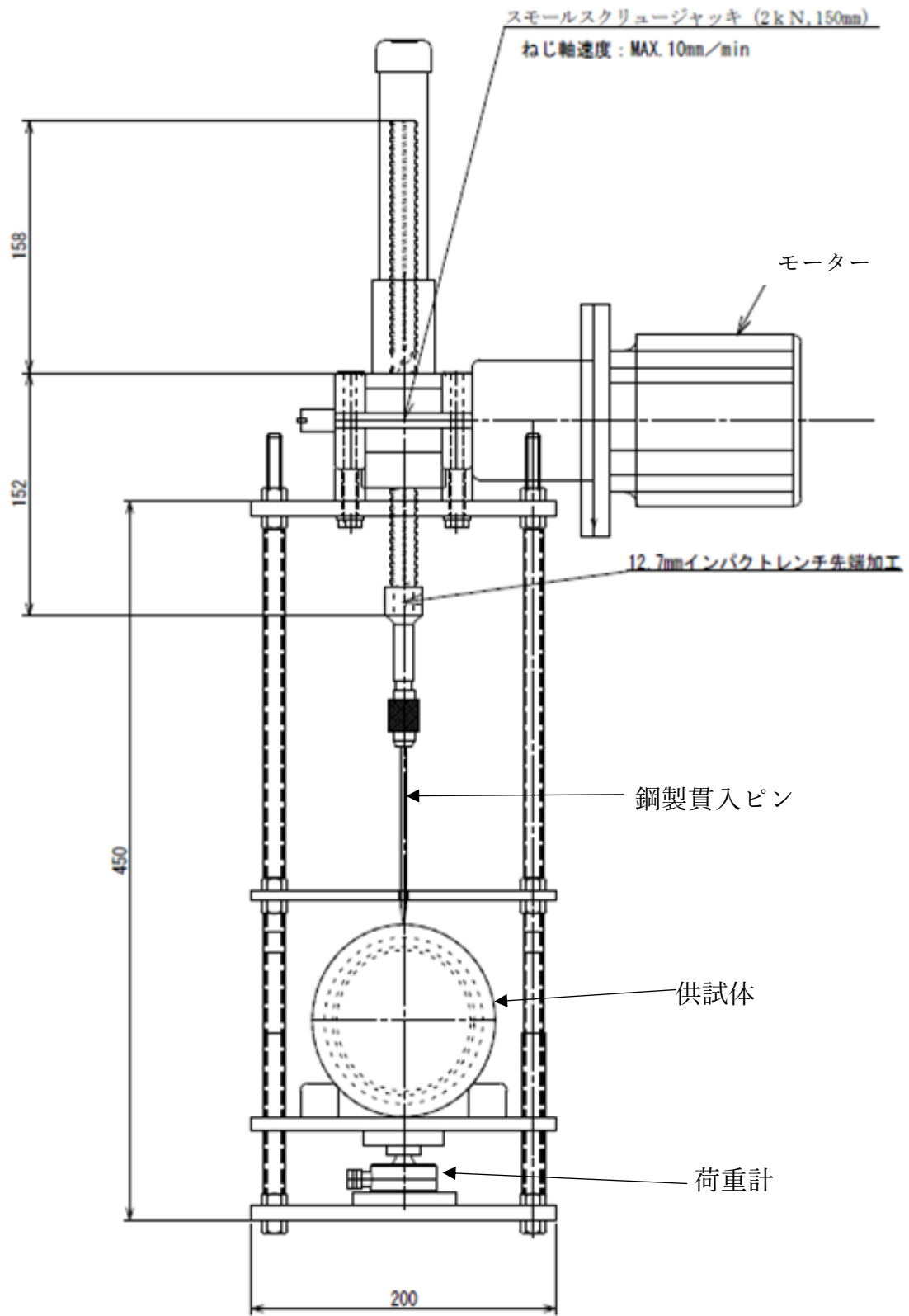


図 - 5 電動静的貫入試験機的设计図



図 - 6 電動静的貫入試験機の写真

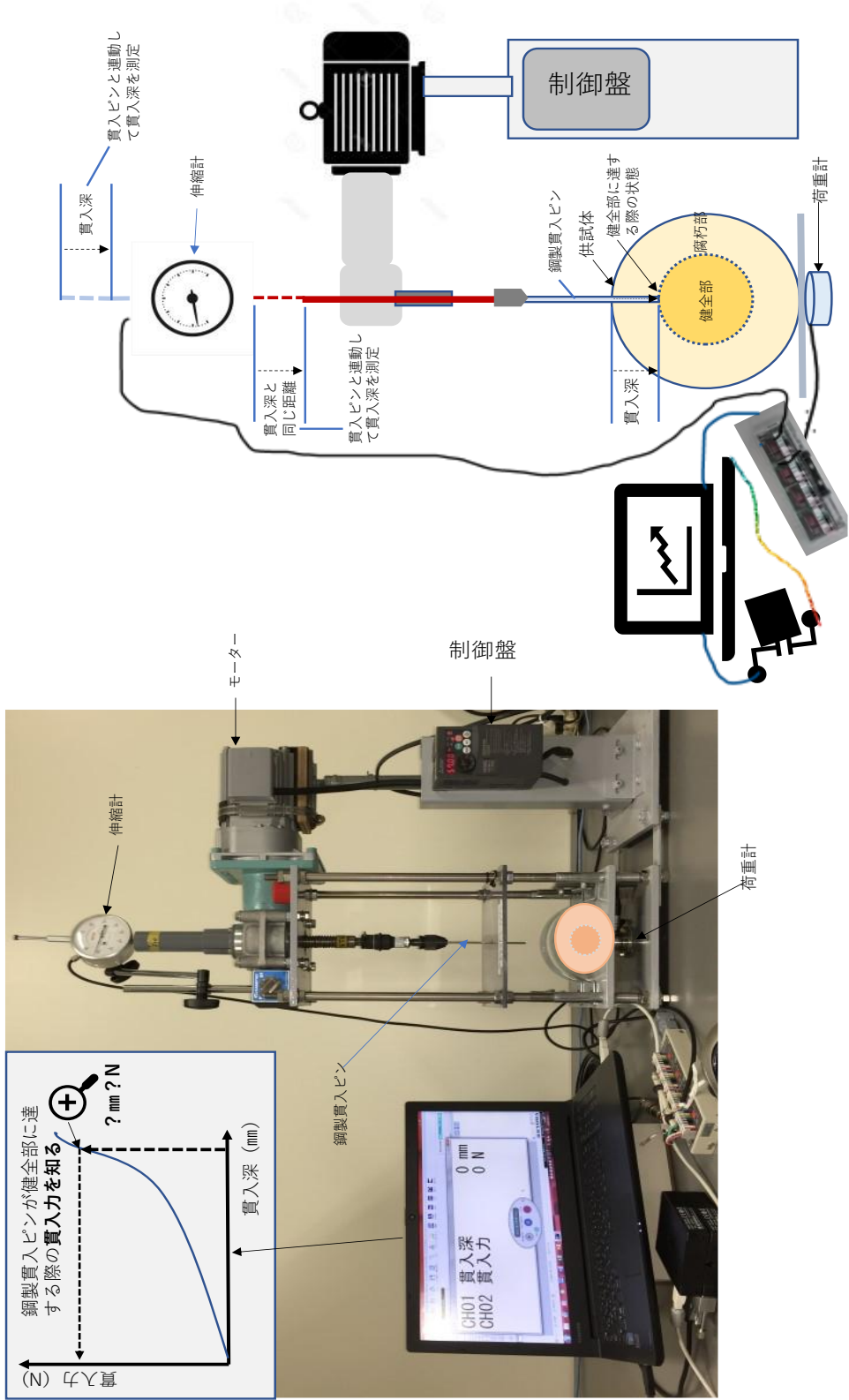


図 - 7 電動静的貫入試験機及び貫入深と貫入力を同時に計測・記録

II-2-5 簡易静的貫入試験器の試作

野外において雨天時や水中でも木材の腐朽厚を簡便に測定できる機器として鋼製貫入ピンを回転無しで木材に貫入させ、その貫入力と貫入深（腐朽厚）を測定することが可能な簡易静的貫入試験器を試作した（図 - 8、図 - 9）。

本試験器では、鋼製貫入ピンを人の力で貫入させるが、その貫入力はプルービングリングにより測定し、貫入力を読み取ることができる目盛りが付いている。プルービングリングとは弾力性のある金属製の環状物体で、荷重計の一種であり、作用する外力に応じて変形する事により、その変形量を荷重に変換して表示する装置である。また、貫入深を測定するために、鋼製貫入ピンと並行して自由に移動（スライド）することができる金属棒と金属ワイヤーが取り付けられており、鋼製貫入ピンが木材に貫入した深さを mm 単位で読み取ることができる貫入深測定器が付いている。本研究で実際に試験を行っているわけではないが、装置の構造上、水中においても動作に異常が生じる要因はない。

なお、簡易静的貫入試験器の貫入力目盛は 100 N と 150 N の印をつけた（図 - 8）。簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定試験を行う際に、電動静的貫入試験機による試験から得られた腐朽境界貫入力から、100 N もしくは 150 N の貫入力で荷重をかけることを想定している。

なお、本論文では簡易的に静的貫入試験を行う器具として本装置を「試験器」と表現している。

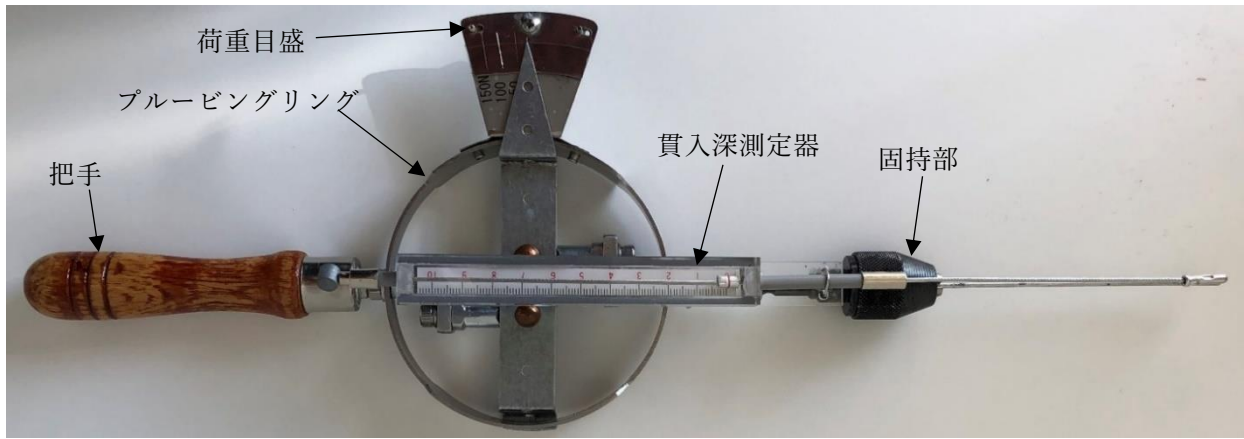


図 - 8 簡易静的貫入試験器上からの写真

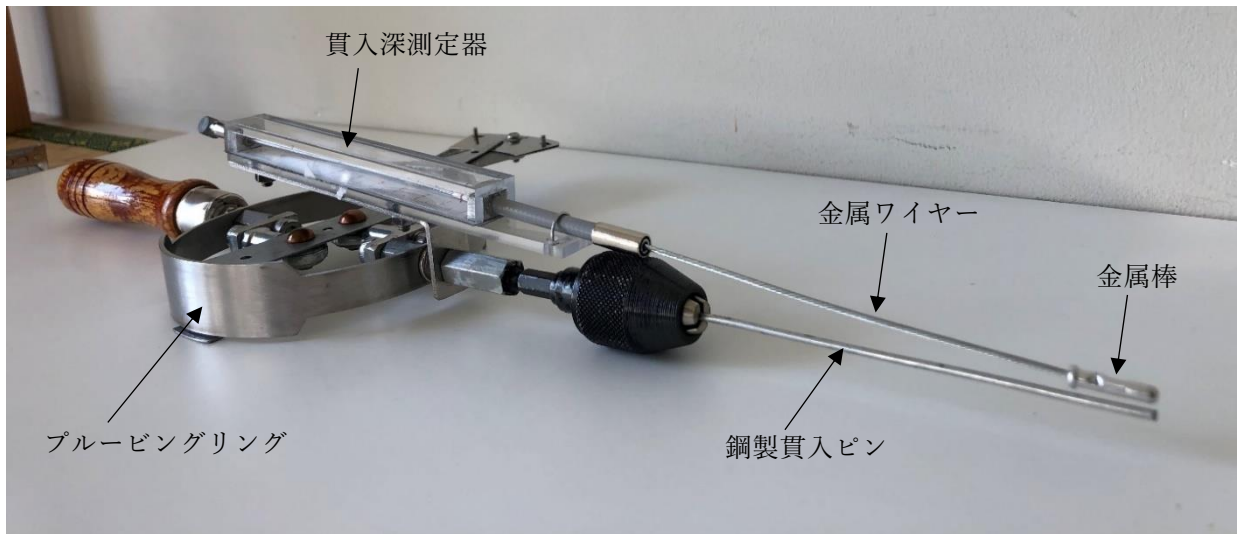


図 - 9 簡易静的貫入試験器側面からの写真

II-2-6 静的貫入試験に用いた鋼製貫入ピンの形状

電動静的貫入試験機および簡易静的貫入試験器を用いて静的貫入試験を実施する際の課題は、試験に適する鋼製貫入ピンの形状を決めることである。さらに、使用する鋼製貫入ピンの貫入力と貫入深（腐朽厚）との関係を明らかにすることである（図-7）。すなわち、どのような形状の鋼製貫入ピンをどの程度の貫入力で貫入させると腐朽深（腐朽厚）を精度良く測定できるかを明らかにすることが重要なポイントとなる。具体的には、①最適な鋼製貫入ピンの先端および軸の形状、②鋼製貫入ピンを実際の腐朽厚の深さまで貫入させるための最適な貫入力を求めることである。既往の荷重測定器にドライバーピンを取り付けた測定器を用いた貫入試験においては、人力により押し込んだ荷重は150Nあるいは200Nを用いている事例が多い（内藤ら, 2015；明石ら, 2016；木製治山構造物技術指針検討会, 2016；佐山ら, 2017；野田ら, 2017；山田ら, 2017；野田, 2018）。なお、事前に木製治山ダムを対象として荷重測定器にドライバーピンを取り付けた測定器具による腐朽厚の調査を行った経験では、足場の良い木製治山ダムの下流面下部や袖部の天端では200Nで押し込むことは可能であるが、足場の悪い下流面上部などでは梯子等に登って試験を行うため200Nで押し込むことは困難であった。このような理由により通常の間人が簡易静的貫入試験器を用いて無理なく、連続的に多数回測定できる貫入力は約150N（約15kgf）以下であると推定された。

本研究では鋼製貫入ピンの形状として、7種類の鋼製貫入ピンを試作した（図-10、-11）。円柱型の鋼製貫入ピンは最も単純（シンプル）な形状であり、ピロディンにも用いられている。直径はピロディンでも用いられている2mm、2.5mm、3mmの3種類とした。楔型は荷重測定器と組み合わせて用いられているマイナスドライバー（内藤ら, 2015；明石ら, 2016；木製治山構造物技術指針検討会, 2016；佐山ら, 2017；野田ら, 2017；山田ら, 2017；野田, 2018）に近似させた形状であり、直径は2mmと3mmの2種類とした。テーパーは

楔型に類似しているが、楔型との違いは先端部の幅と軸径が異なる点である。先端幅が 3 mm と軸径 2 mm よりも大きいため、先端部が木材に貫入した後は軸部と木材の接触が少なく、軸部での摩擦抵抗を少なくできると想定して用いた。先太は円柱型と類似しているが、先端部の直径を 3 mm、軸径を 2 mm とすることにより、先端部が木材に貫入した後は軸部と木材の接触が少なくなり、軸部が受ける摩擦抵抗が少なくなると想定して用いた。

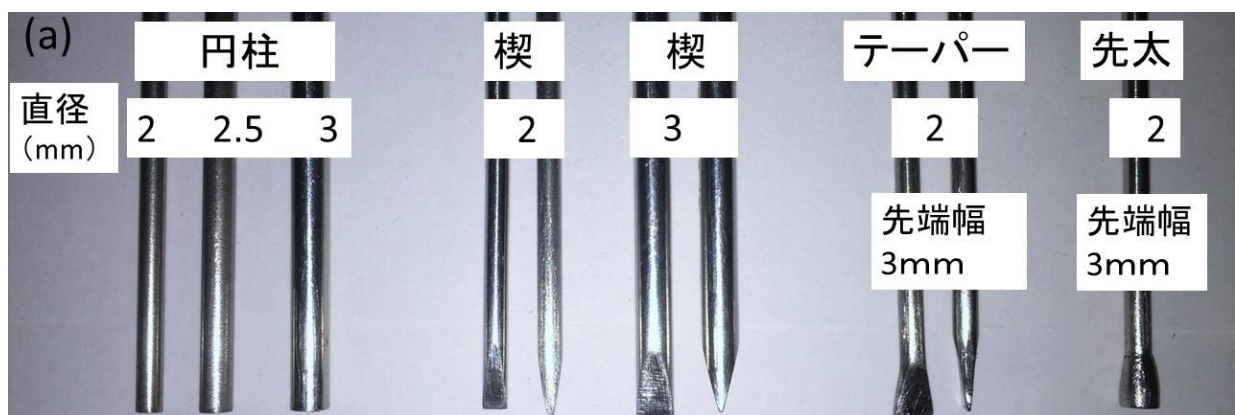


図 - 10 試作した 7 種の鋼製貫入ピン

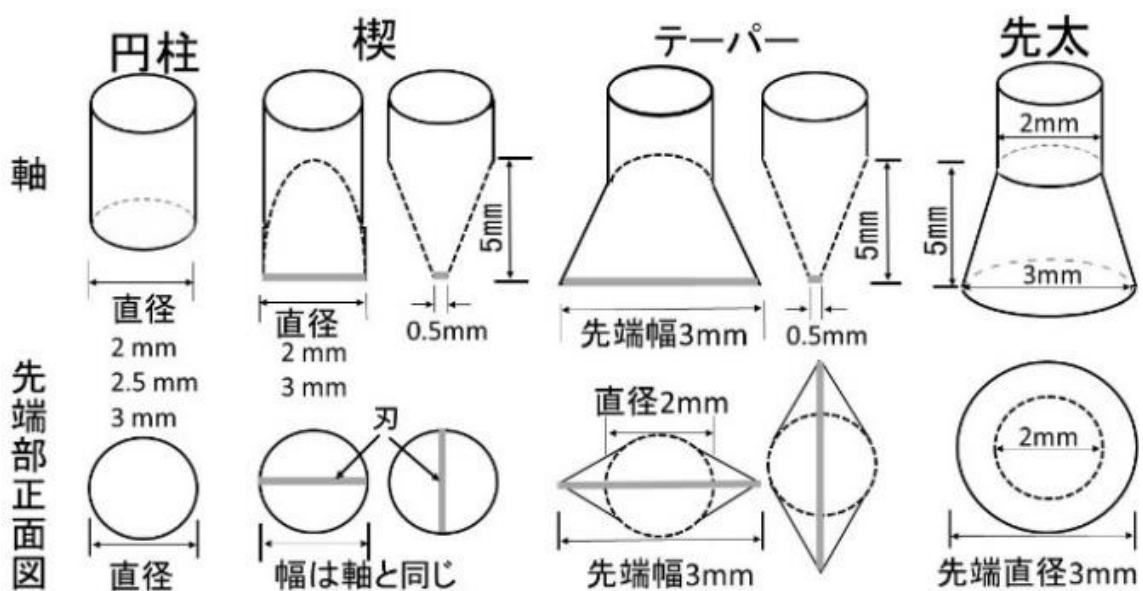


図 - 11 鋼製貫入ピン規格図

II-2-7 試験に用いた木材供試体

試験に用いた腐朽木材の供試体は、神奈川県相模原市に位置するスギ、ヒノキ人工林の貝沢流域（北緯 35° 37'，東経 139° 10'）に残置され腐朽が進んでいた 20 本の異なるスギの間伐材からそれぞれ丸太の直径約 10cm、長さ 20cm で 1 個ずつ、計 20 個採取した（表 - 1）。採取した木材供試体は大学の実験室内に運び、樹皮を剥がした上で、風通しの良い場所に約 6 ヶ月間置いて自然乾燥させ、その上で約 2 週間をかけてレジストグラフを用いた試験、電動静的貫入試験、および簡易静的貫入試験を行った。試験実施時の供試体はほぼ気乾状態にあり、試験開始時の乾量基準含水率は 10.7 %～13.0 %であった。また、供試体の腐朽部の厚さは後に述べる試験結果の方のレジストグラフによる腐朽厚測定値のまとめとなる表 - 1 に示す。本研究では供試体の腐朽厚の基準値はレジストグラフによる腐朽厚測定である。今回採取した供試体はレジストグラフによる腐朽厚測定値が 6.3mm～35 mm で、腐朽厚測定値順に 1 から 20 の番号を付けた。図-12 に供試体例を示す。

表 - 1 供試体のレジストグラフによる腐朽厚測定値及び含水率

供試体番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
腐朽厚測定値 (mm)	6.3	6.3	10.0	10.1	11.0	12.7	13.0	13.6	14.7	14.7
含水率 (%)	12.1	10.7	11.5	12.5	12.7	10.9	11.5	13.0	12.4	12.2
供試体番号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
腐朽厚測定値 (mm)	16.6	16.7	18.6	19.3	20.9	22.4	23.7	25.6	27.7	35.0
含水率 (%)	12.9	12.8	12.5	12.6	11.9	11.8	12.2	12.9	13.0	12.9



図 - 12 供試体例

II-3 試験方法

II-3-1 試験実施の詳細な流れ

最初に、レジストグラフを用いて供試体の腐朽厚を測定した。20 個の供試体について 3 回の測定を行い、その平均値を取り、供試体の腐朽厚とした（表 - 1）。以下ではレジストグラフ腐朽厚と称す。以下の検討で、各供試体の腐朽厚の基準値としてレジストグラフにより測定した腐朽厚を用いている。なお、レジストグラフによる腐朽厚測定値が低いものから順に供試体に 1 から 20 の番号を付けた。また、ピロディンによる貫入深測定も行った。

次に、下記の 2 種類の試験を実施することにより、製作した簡易静的貫入試験器と 7 種の鋼製貫入ピンによる腐朽厚測定の精度と実用性を検討することとした。

第一の試験として、载荷速度を一定にでき、载荷荷重と貫入深を精度良く測定できる電

動静的貫入試験機を用いた試験を行い、7種類の鋼製貫入ピンを用いて20個の木材供試体について各3回の測定を行い、鋼製貫入ピンの貫入力と貫入深の関係を示すデータを得た(図-13)。そして、3回の平均値をとり、レジストグラフによる腐朽厚測定値の貫入深までの腐朽厚を測定するために必要だった電動貫入試験機による貫入力を見いだした(図-14)。これまでに得られた貫入深と貫入力の関係を示すデータにおいて、すでに見出した貫入力を基準にし、電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値を求め、電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値と称した(図-15)。これらの各鋼製貫入ピンに対応した貫入力を現場で測定作業する際に、便利なように簡易静的貫入試験器の荷重目盛で確認しやすい数値に丸めた(図-14)。

第二の試験として、現場で用いるための簡易静的貫入試験器による7種類の鋼製貫入ピンを用いた場合の腐朽厚の測定精度を検討した。この簡易静的貫入試験器では人間が押す力により貫入力を与えているため貫入力は試験中に多少変動し、さらに個人差も生じることが予想される。このため、測定する人間による測定結果のバラツキを知るために、3人の測定者(A, B, C)により腐朽厚の測定を行った(図-16)。測定者Aは年齢22歳の女性であり、測定者Bは年齢22歳の男性であり、測定者Cは年齢30歳の男性である。3人による試験の結果をもとに、7種類の鋼製貫入ピン毎に測定者による個人差について検討した。

以上の結果を総合的に判断して、測定精度が高く、簡易静的貫入試験器に適した実用性が高い鋼製貫入ピンを検討した。図-16に示したように、各種腐朽厚測定機器を用いて腐朽厚測定をし、その結果を相互に比較分析した。主に、レジストグラフによる腐朽厚測定値と精度の比較分析を行った。また、その他測定機器の相互比較分析を行い、相関性などを明らかにした。特に、簡易静的貫入試験器を用いた場合、各鋼製貫入ピンによる測定作業中の座屈割合、その他実用性に関わる特徴の観察などを加えて総合的に最も良い評価となった鋼製ピンを選定した。

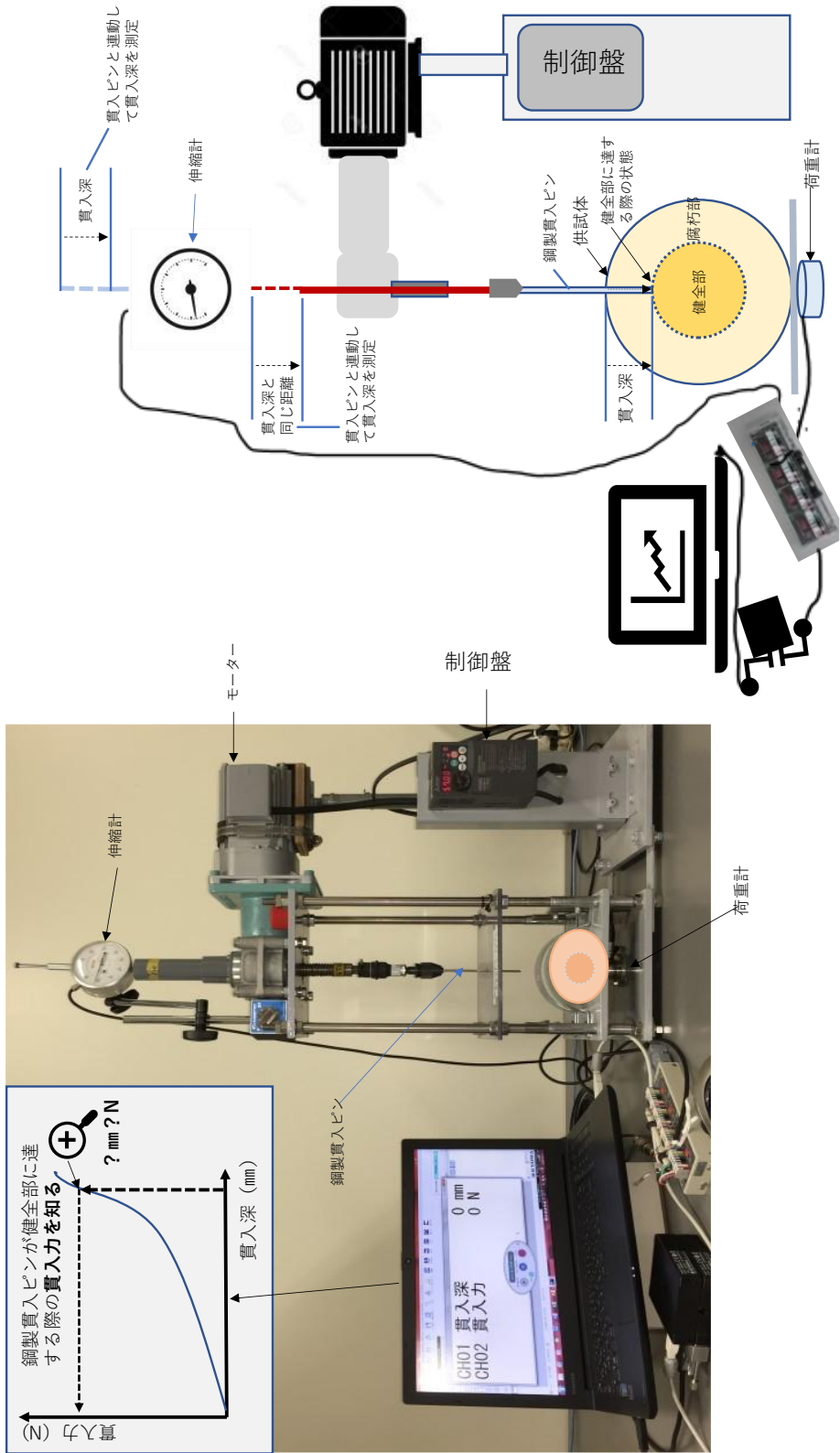


図 - 13 電動静的貫入試験機による静的貫入試験の説明図

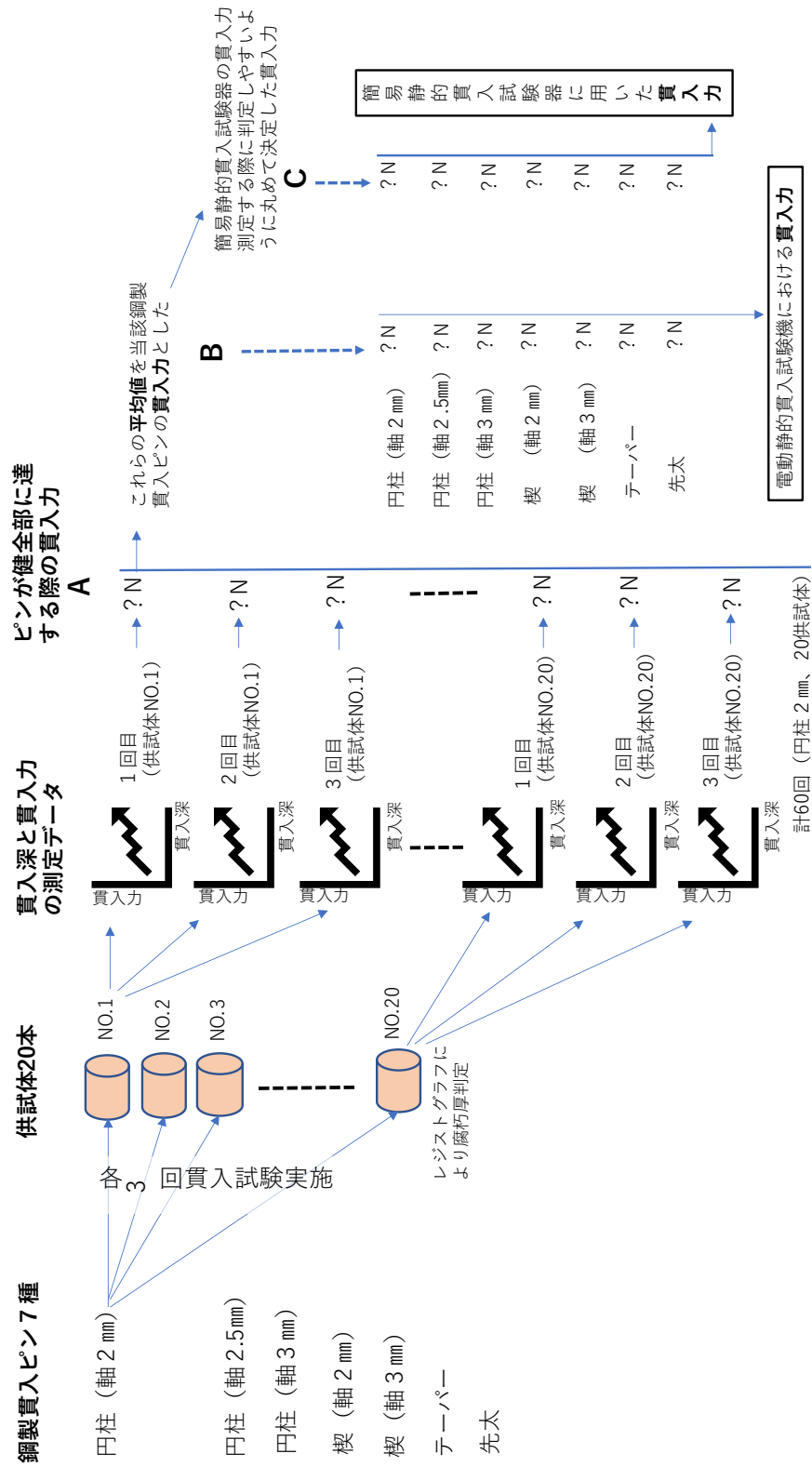
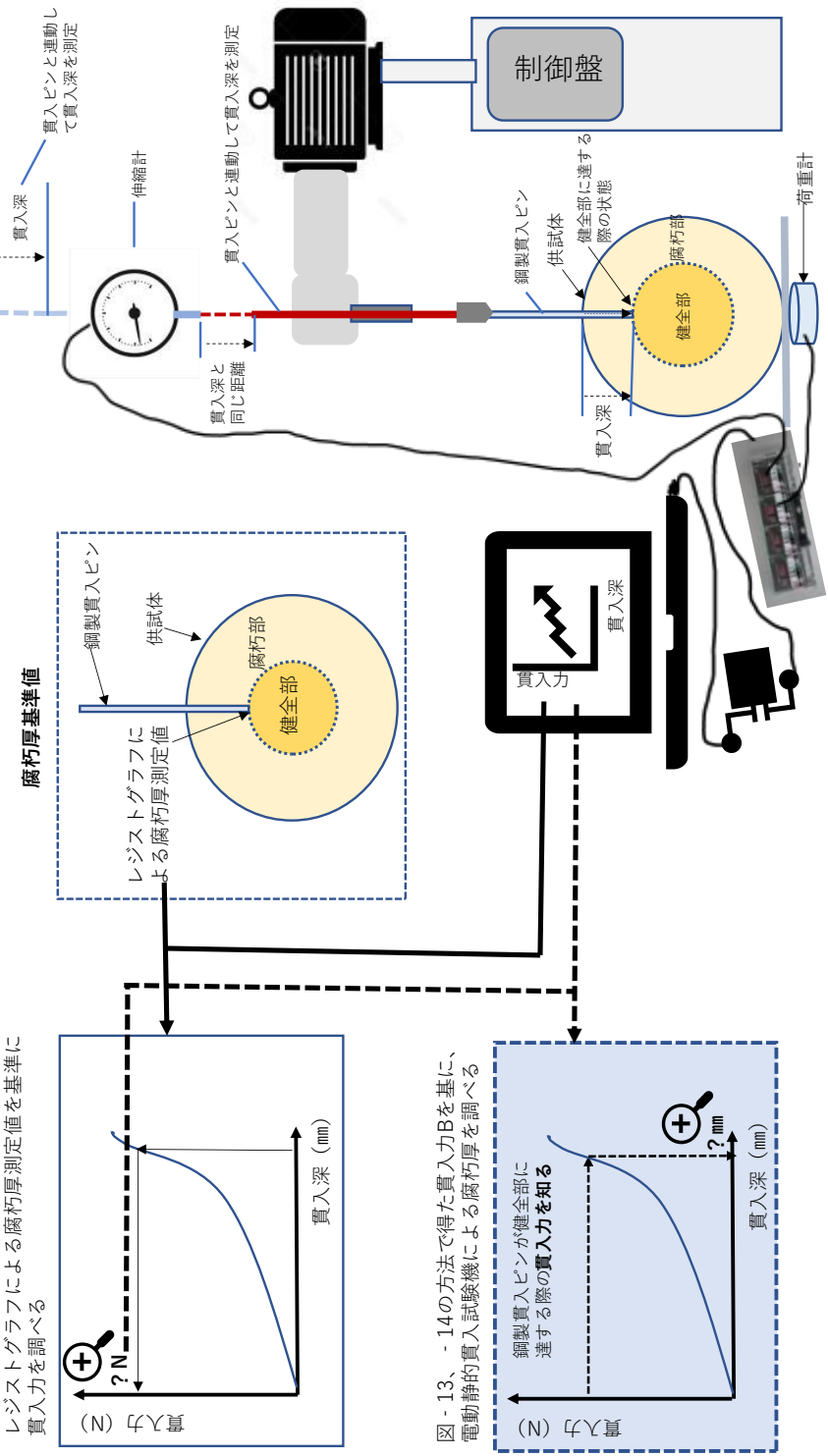


図 - 14 電動静的貫入試験機による静的貫入試験の全体の流れ貫入力の説明図



電動静的貫入試験機による貫入力

電動静的貫入試験機による腐蝕厚測定値

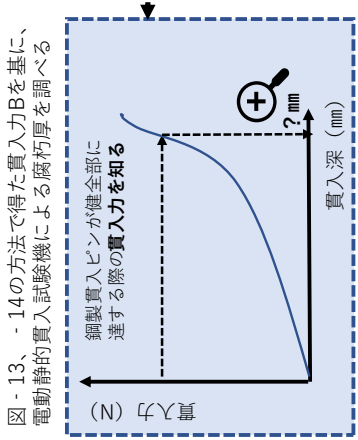
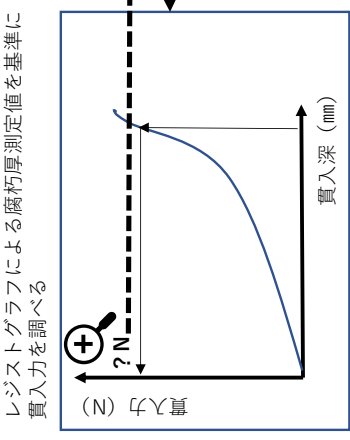


図 - 15 電動静的貫入試験機による腐蝕厚測定値の求め方

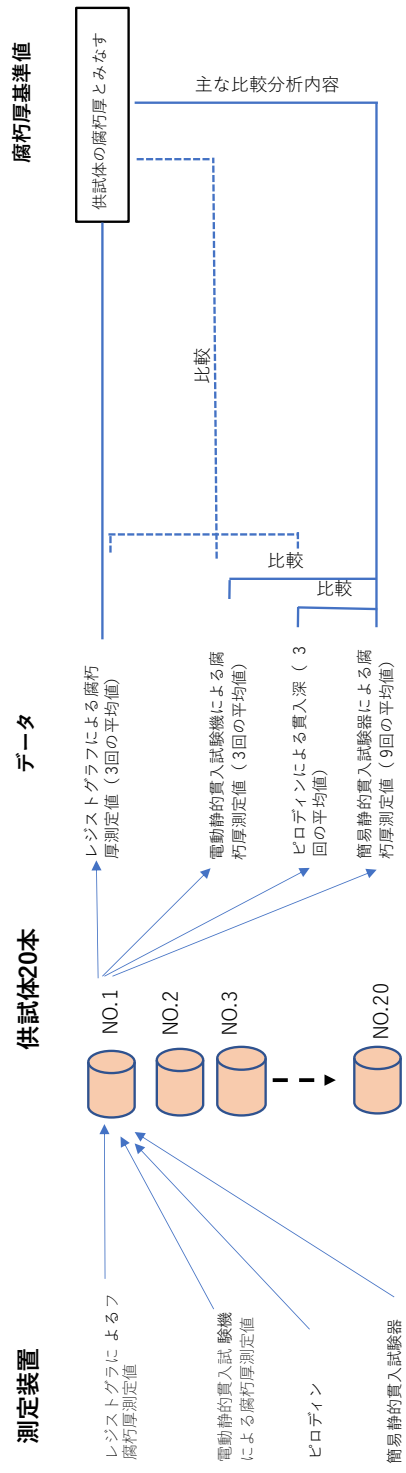


図 - 16 各腐朽厚測定機器による測定精度比較検討内容図解

II-3-2 電動静的貫入試験機による腐朽厚測定試験方法と精度検討方法

電動静的貫入試験機を用いた貫入試験は 7 種の鋼製貫入ピンを用いて、20 個の木材供試体についてそれぞれ 3 回行った。それらの測定から得られた貫入深と貫入力の関係のデータを用いて、レジストグラフ腐朽厚に対応する貫入力を求めた (図 - 15)。このように得られた貫入力の鋼製貫入ピンごとの平均値を各鋼製貫入ピンの腐朽厚を測定するための貫入力とした (図 - 15)。なお、このようにして得られたレジストグラフ腐朽厚に対応する貫入力を以下では腐朽境界貫入力と呼ぶこととする (図 - 15)。

電動静的貫入試験機における貫入力と貫入深の関係のデータを用いて、各鋼製貫入ピンの腐朽境界貫入力 (3 回の平均値) に対応した貫入深 (腐朽厚) を調べた。これを電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値と称す (図 - 15)。そのようにして得られた電動静的貫入試験機による腐朽厚と II-4-1 で示すレジストグラフによる腐朽厚測定値 (基準値) との相対誤差を計算し、精度の検討を行った。相対誤差は式(1)より計算した。

$$\text{相対誤差} = (|R - E|) / R \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、R：レジストグラフによる腐朽厚測定値 (基準値)

E：電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値

また、レジストグラフによる腐朽厚測定値と電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値の全体の相関を知るために、20 個の木材供試体の測定結果について単回帰分析を行い、測定精度の評価を行った。

II-3-3 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定方法と精度検討方法

簡易静的貫入試験器に各鋼製貫入ピンを取り付け、人間によるほぼ一定の押す力で鋼製貫入ピンを木材供試体に貫入させて、指定した腐朽境界貫入力となる貫入深を記録し、その値を簡易静的貫入試験機による腐朽厚とする試験を行った。それを以降で簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値と称す。

次に、各鋼製貫入ピンを簡易静的貫入試験器に取り付け、図-14 に示す各鋼製貫入ピンにおける腐朽境界貫入力の丸めた値を用いて 20 個の供試体の貫入深（腐朽厚）を 3 人により測定した。なお、供試体ごとに 1 人が 3 回測定を行い、その測定結果の平均値をその測定者の腐朽厚測定値とし、測定精度検討と個人差の分析に用いた。また、3 人の腐朽厚測定結果をさらに平均し、簡易静的貫入試験器の精度検討に用いた。簡易静的貫入試験器において、3 人の測定者の計 9 回の測定による腐朽厚値の平均値とレジストグラフによる腐朽厚測定値（基準値）を用いて、式（2）により相対誤差を計算して、測定精度を検討する。

$$\text{相対誤差}=(|R-S|)/R \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、R：レジストグラフによる腐朽厚測定値（基準値）

S：簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値

レジストグラフによる腐朽厚測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の全体の相関を知るために、20 個の供試体の測定結果について単回帰分析を行い、測定精度の評価を行った。

II-4 試験結果

II-4-1 木材供試体の腐朽厚判定

II-2-7 に示した表-1 の供試体腐朽厚の列に、木材供試体ごとのレジストグラフによる腐朽厚測定値を示す。ここで、腐朽厚測定値とは木材供試体の表面から測定した腐朽部の厚さを意味する。

II-4-2 各鋼製貫入ピンにおける腐朽境界貫入力の判定

電動静的貫入試験機を用いて、7 種類の鋼製貫入ピンが供試体に貫入する際の貫入深と貫入力の関係を示すデータを得ることができた。測定例として、楔 3 mm の鋼製貫入ピンを取り付け、供試体 1～20 に対して行った腐朽厚測定の 3 回の測定結果を図-17～36 に示す。

図-27 から、供試体腐朽部においては 25 N に満たない微小な貫入力で鋼製貫入ピンが供試体に貫入していることがわかる。また、レジストグラフで腐朽部の境界と判断した箇所付近で貫入力が増加していることが分かり腐朽部と腐朽していない部分（健全部）を分けることができる。この例では、レジストグラフによる腐朽厚である 16.6 mm の貫入深に対応する貫入力は 102、70、180 N（表-2 参照）であることが分かる。同様にして、全 7 種の鋼製貫入ピンを用いた場合の腐朽境界貫入力平均値を表-3 に示した。後述する簡易静的貫入試験器で用いる概略貫入力値も示してある。

図 - 17～-36 における貫入深と貫入力関係を示すデータを全体的にみると、鋼製ピンが供試体の腐朽部において比較的にかさい貫入力で貫通し、健全部に達する貫入力が急激に上昇することが分かった。

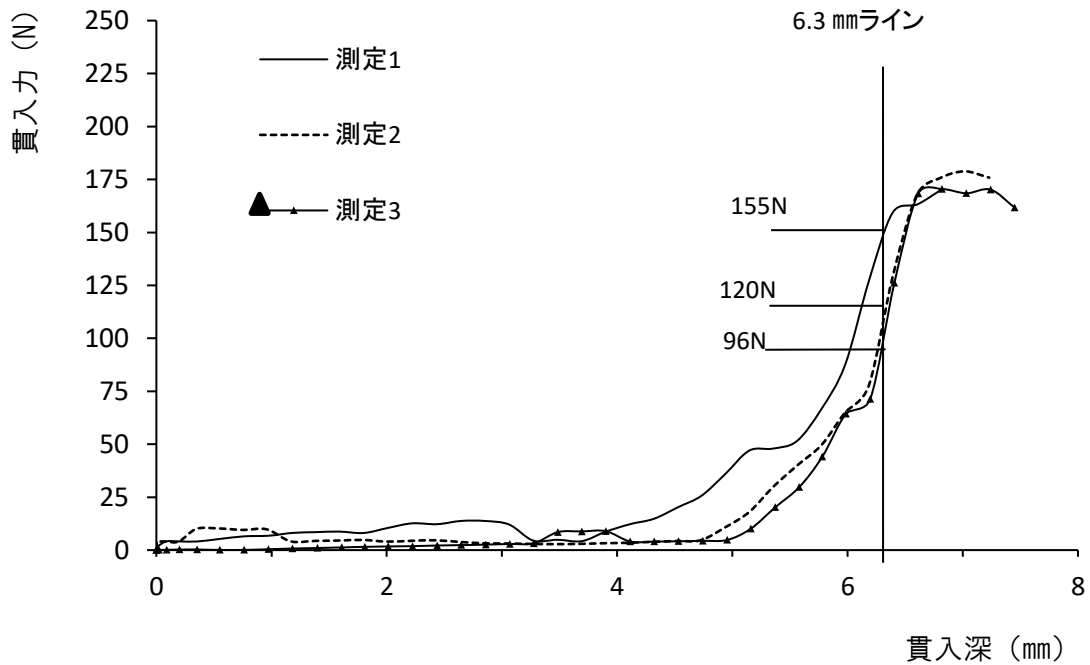


図 - 17 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 1 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

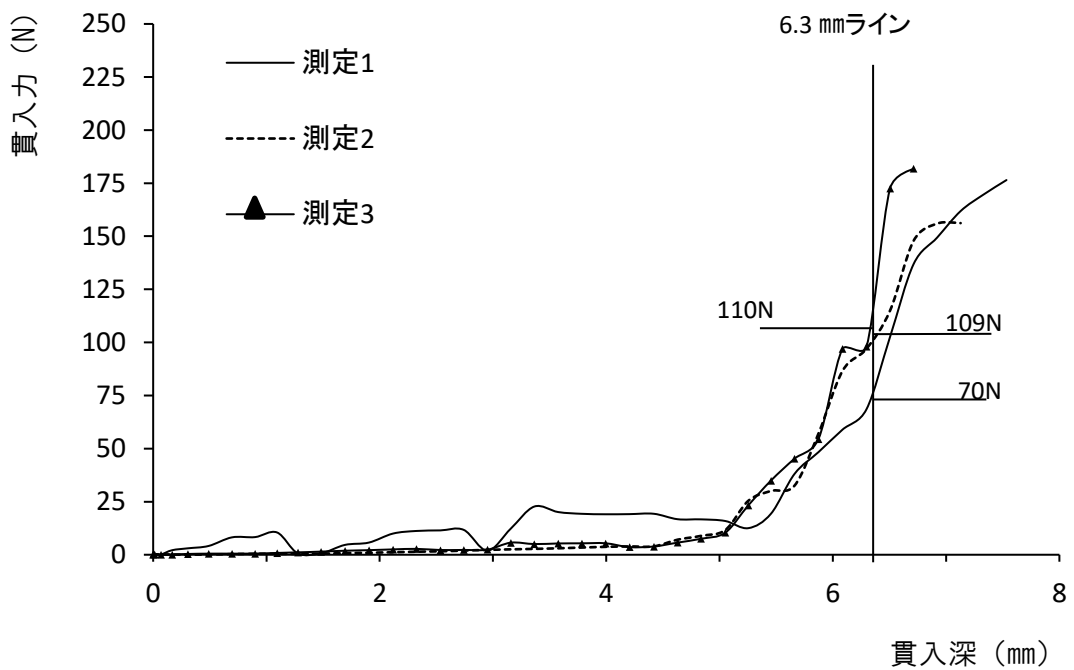


図 - 18 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 2 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

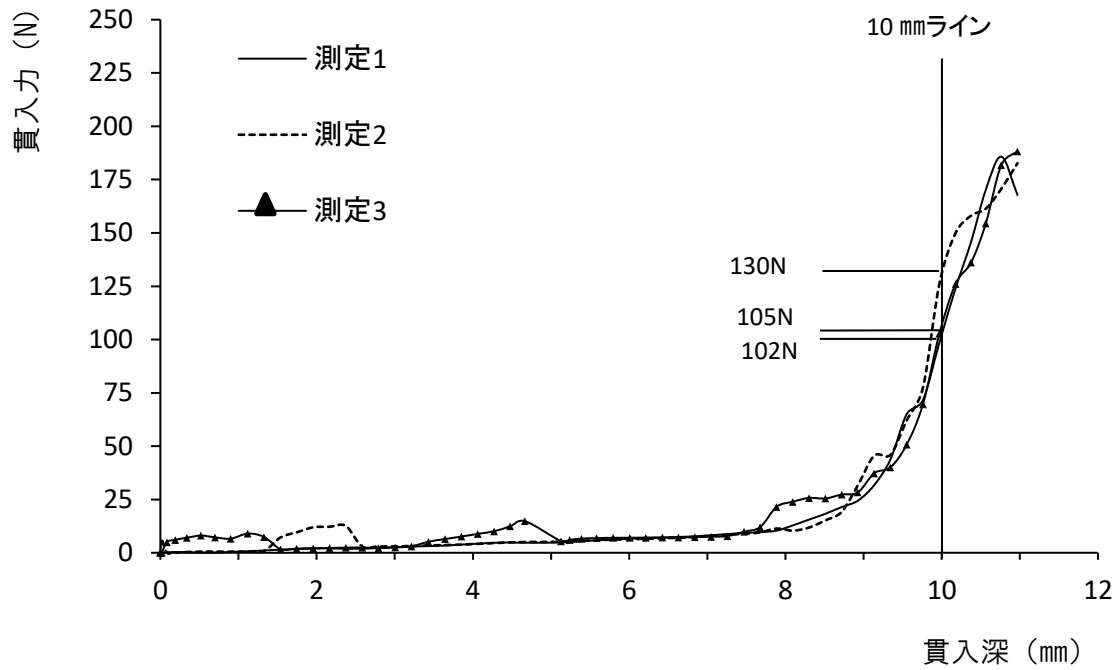


図 - 19 電動静的試験機による貫入深と貫入力 of 測定 (供試体 3 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

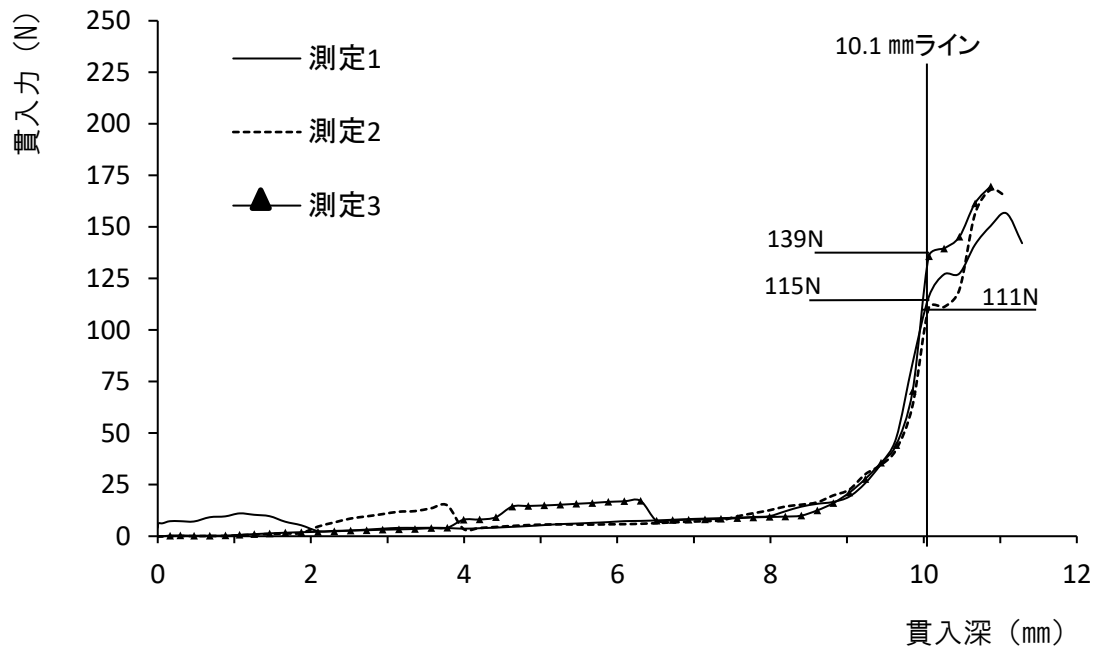


図 - 20 電動静的試験機による貫入深と貫入力 of 測定 (供試体 4 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

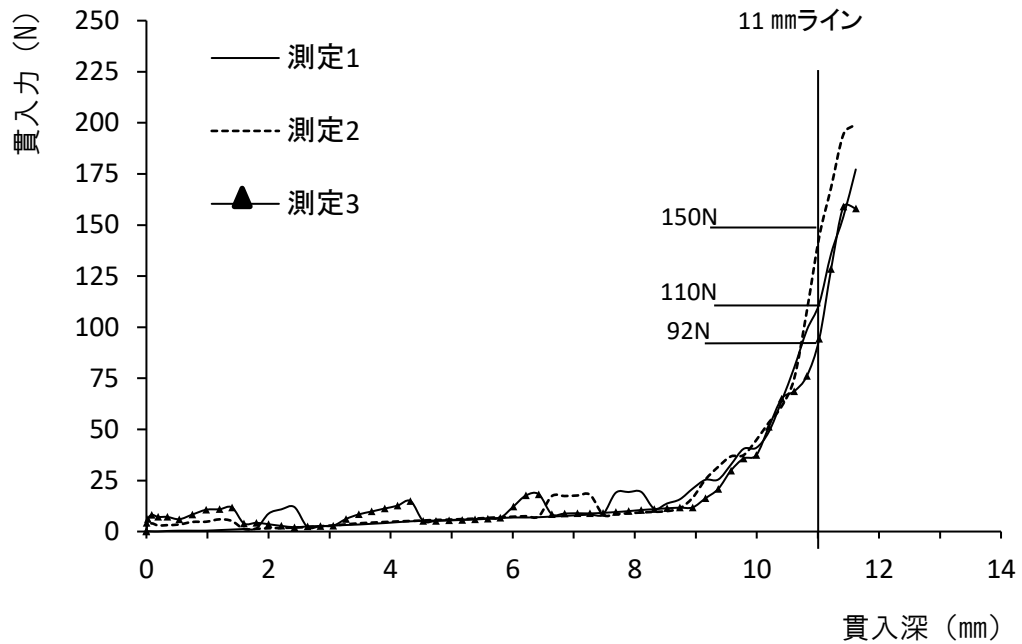


図 - 21 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定 (供試体 5 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

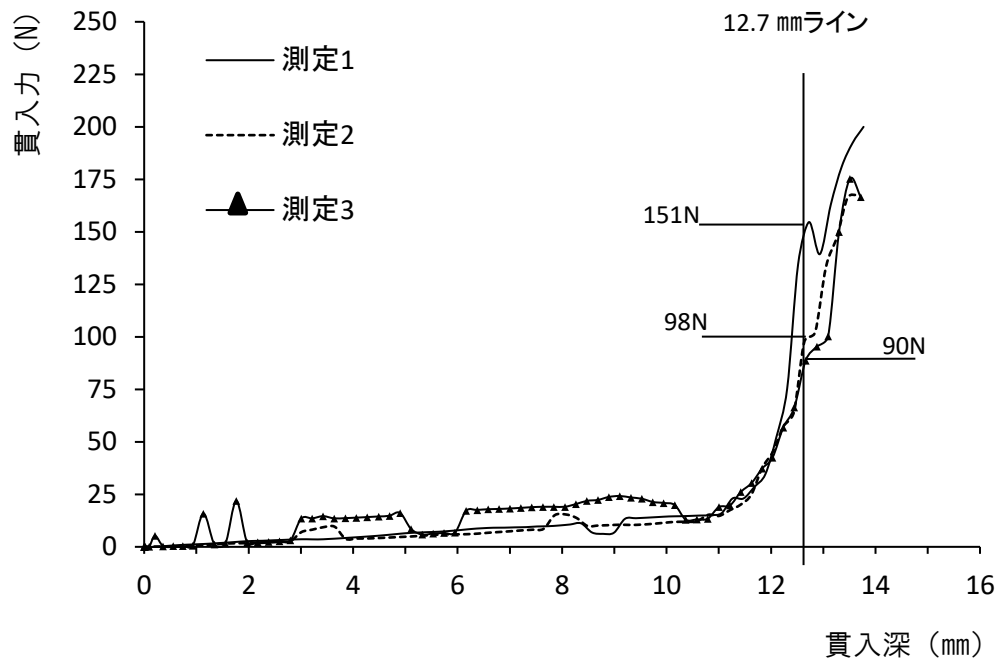


図 - 22 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定 (供試体 6 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

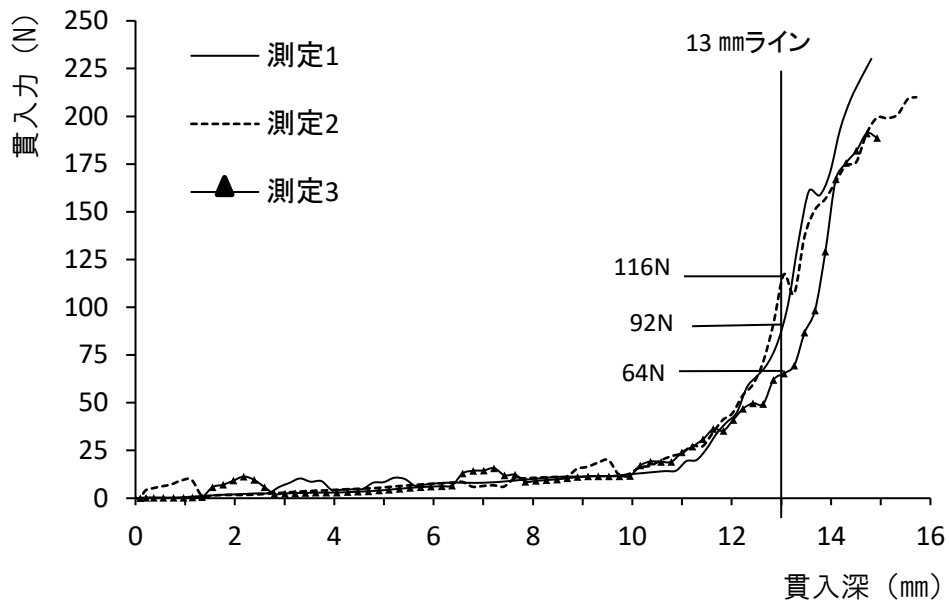


図 - 23 電動静的試験機による貫入深と貫入力への測定 (供試体 7 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

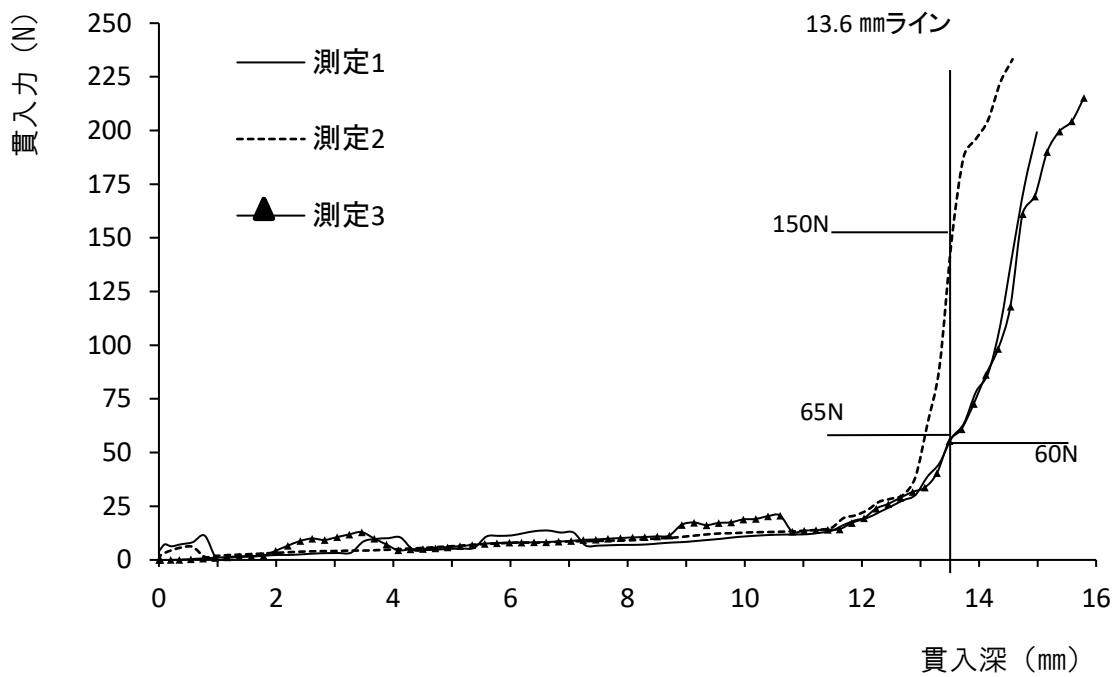


図 - 24 電動静的試験機による貫入深と貫入力への測定 (供試体 8 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

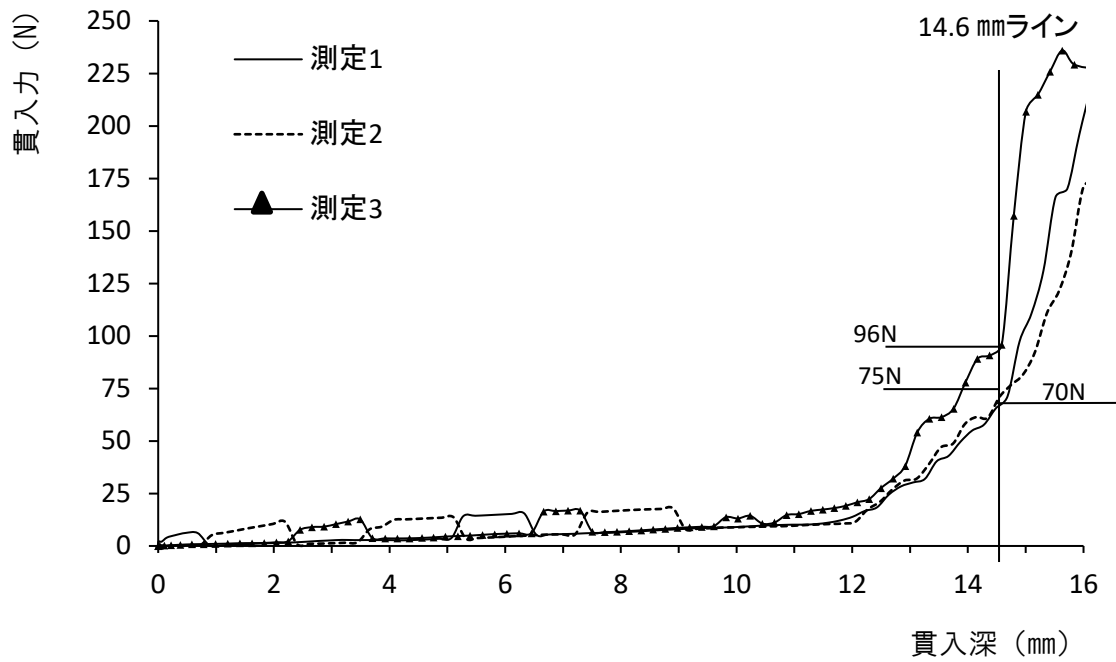


図 - 25 電動静的試験機による貫入深と貫入力への測定 (供試体 9 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

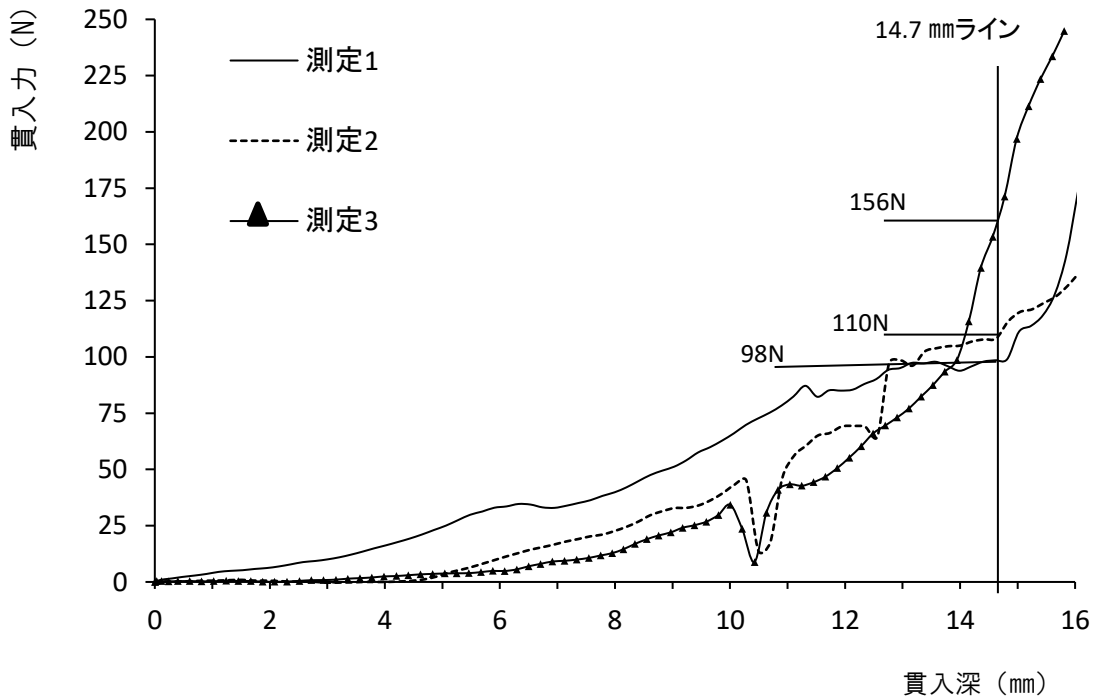


図 - 26 電動静的試験機による貫入深と貫入力への測定 (供試体 10 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

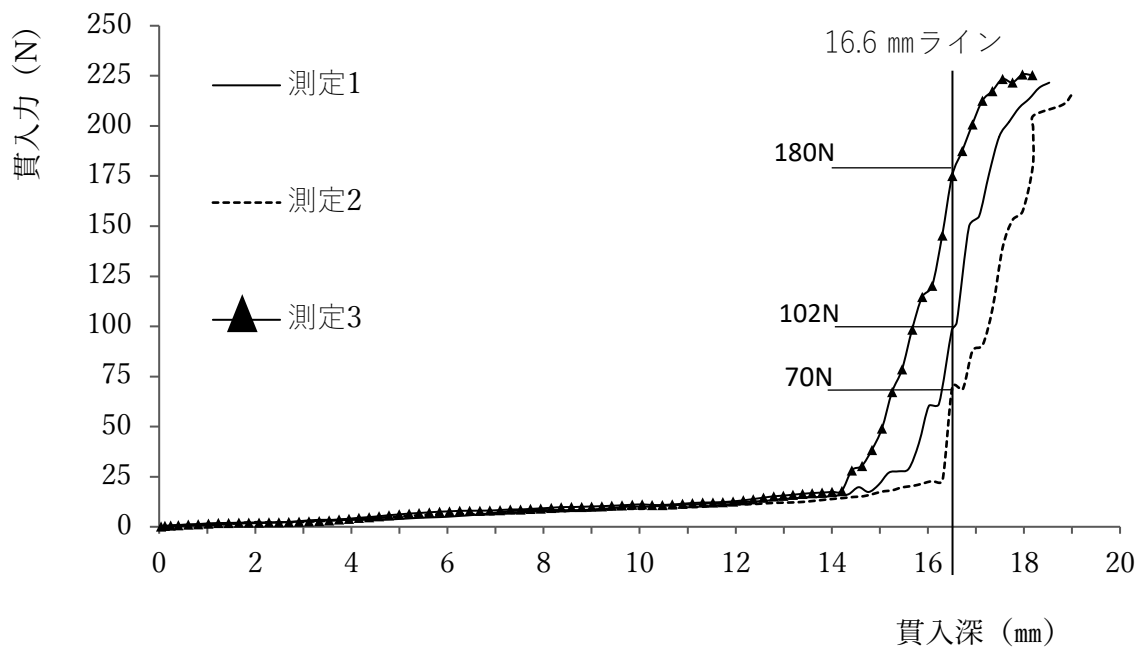


図 - 27 電動静的試験機による貫入深と貫入力 of 測定 (供試体 11 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

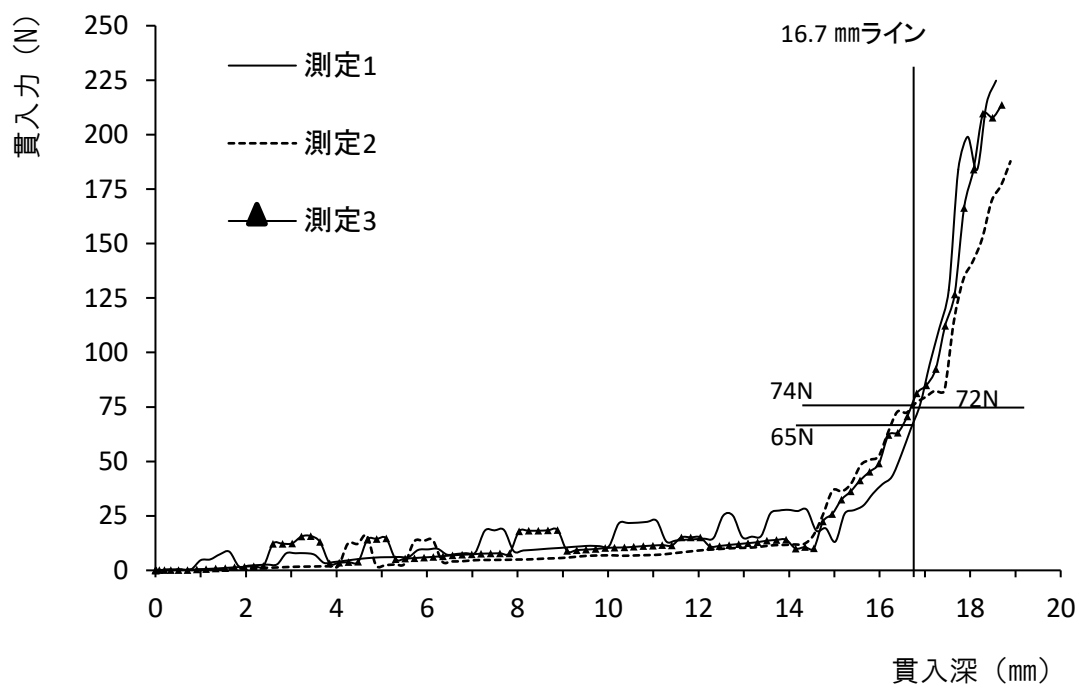


図 - 28 電動静的試験機による貫入深と貫入力 of 測定 (供試体 12 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

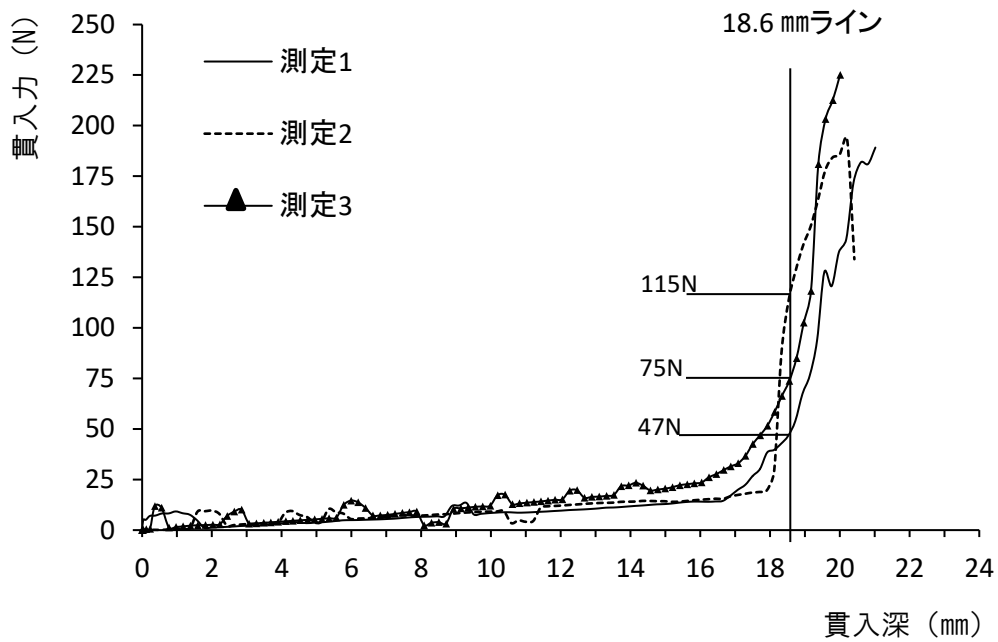


図 - 29 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定 (供試体 13 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

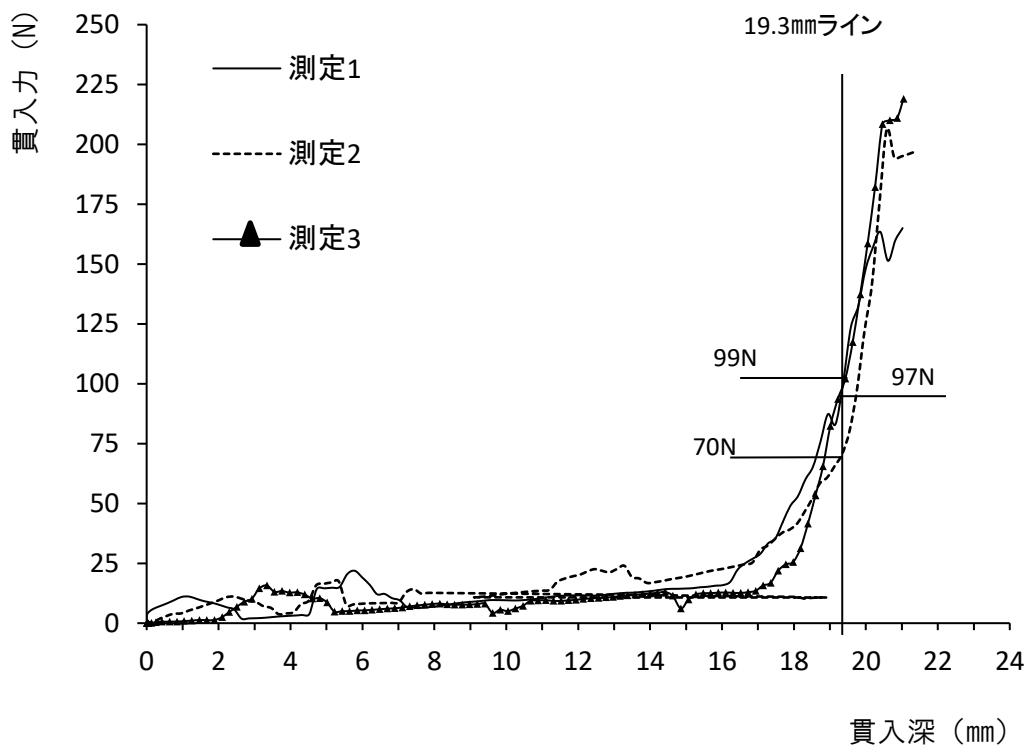


図 - 30 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定 (供試体 14 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

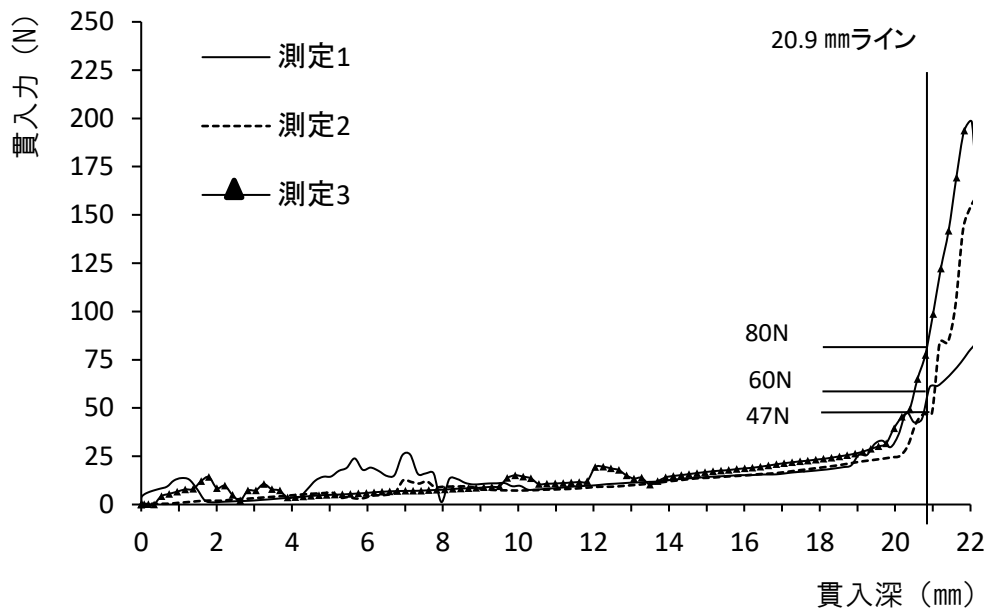


図 - 31 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 15 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

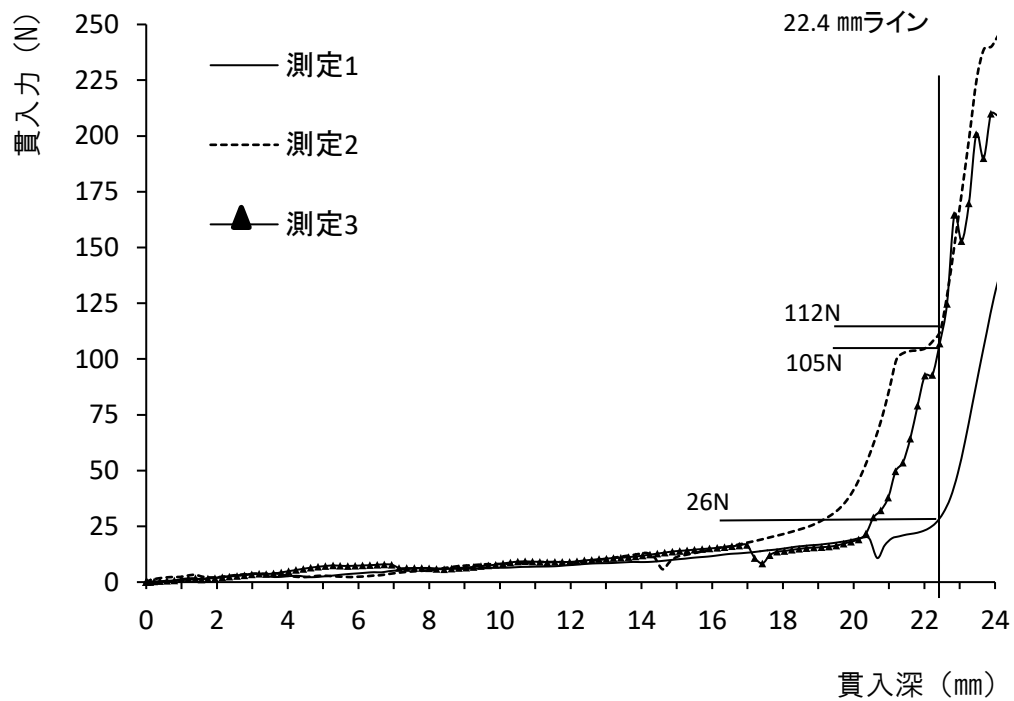


図 - 32 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 16 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

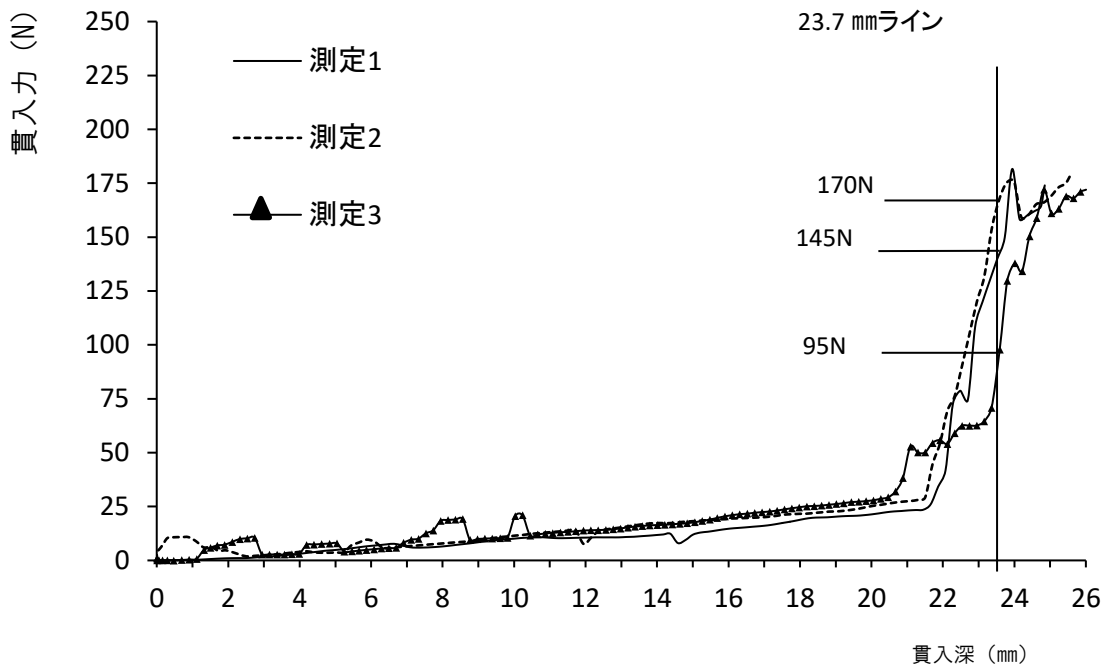


図 - 33 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 17 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

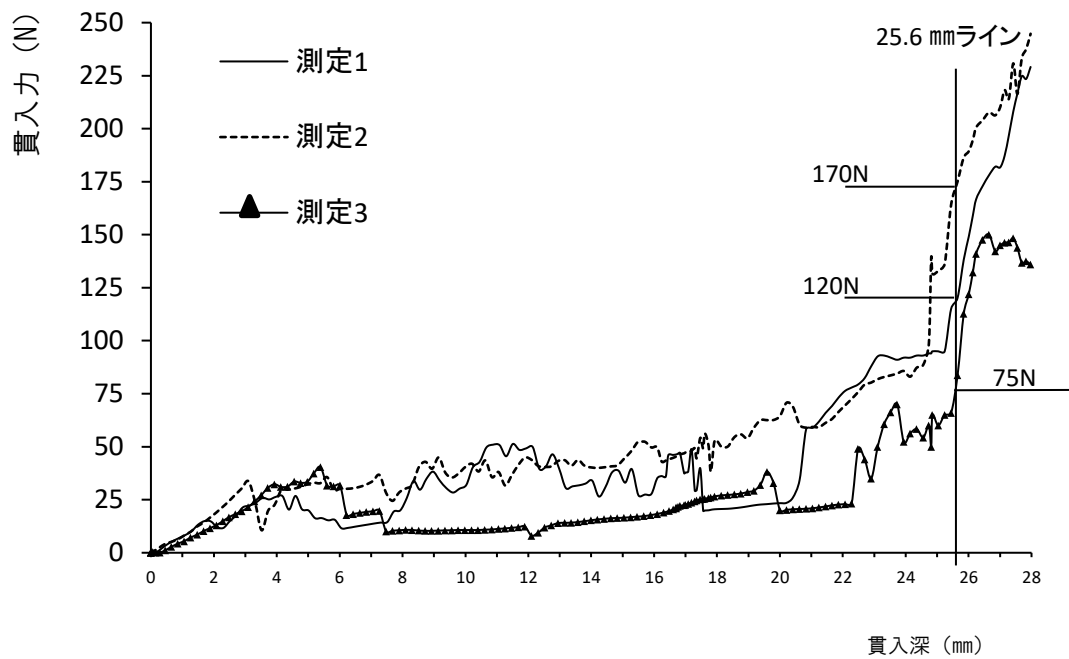


図 - 34 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 18 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

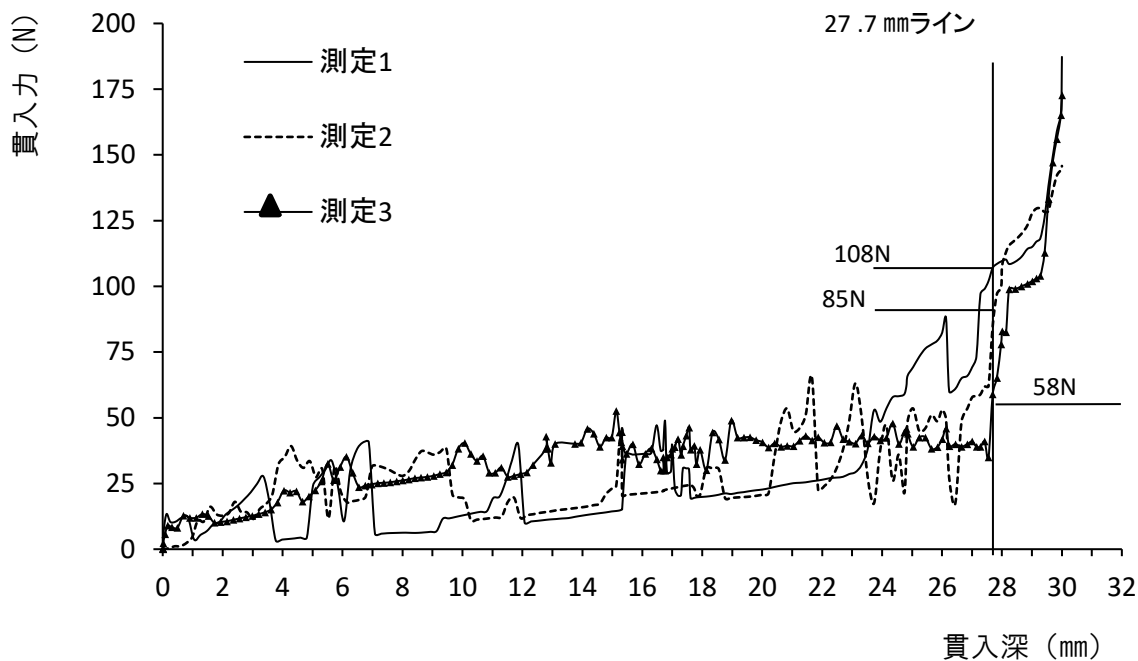


図 - 35 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 19 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

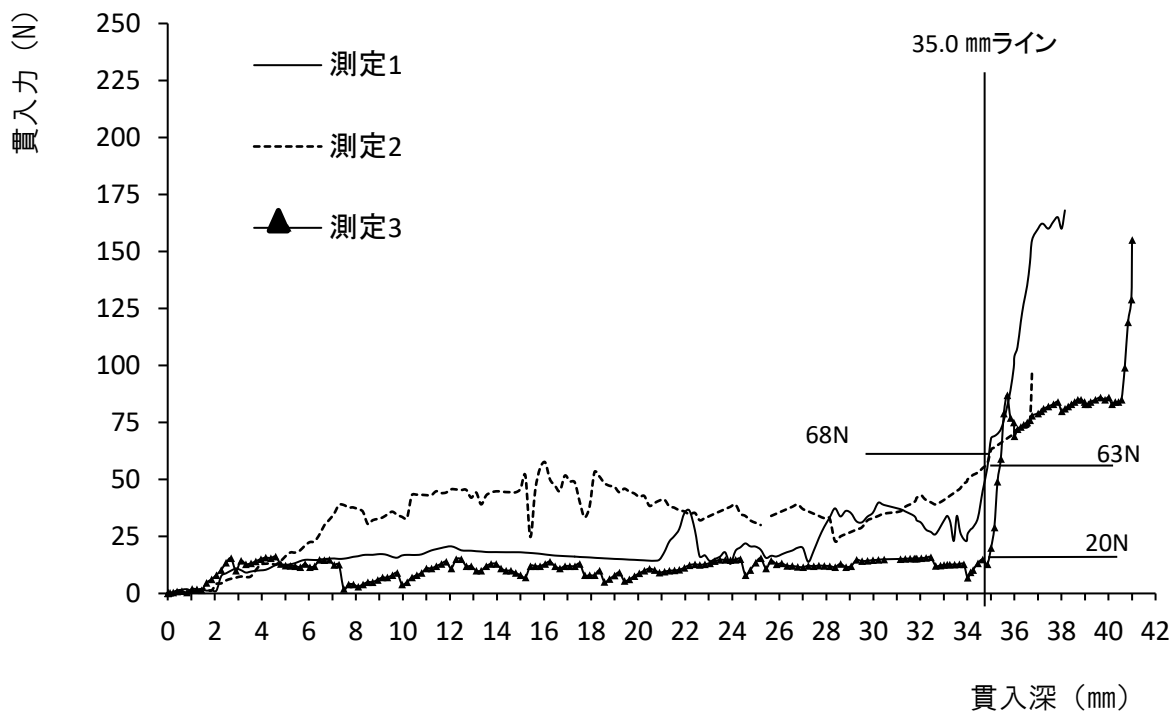


図 - 36 電動静的試験機による貫入深と貫入力測定 (供試体 20 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)

表-2 電動静的貫入試験機を用いた場合の鋼製貫入ピン楔 3 mmにおけるレジストグラフ腐朽厚に対応する貫入力（腐朽境界貫入力）

供試体番号	供試体腐朽厚(mm)	測定1(N)	測定2(N)	測定3(N)	平均(N)
1	6.3	155	120	96	123.7
2	6.3	70	110	109	96.3
3	10.0	105	130	102	112.3
4	10.1	115	111	139	121.7
5	11.0	110	150	92	117.3
6	12.7	151	98	90	113.0
7	13.0	92	116	64	90.7
8	13.6	60	150	65	91.7
9	14.6	70	75	96	80.3
10	14.7	99	110	156	121.5
11	16.6	102	70	180	117.3
12	16.7	65	74	72	70.3
13	18.6	47	115	75	79.0
14	19.3	99	70	97	88.7
15	20.9	60	47	80	62.3
16	22.4	26	112	105	81.0
17	23.7	145	170	95	136.7
18	25.6	120	170	75	121.7
19	27.7	108	85	58	83.7
20	35.0	68	63	20	50.3

1～20における貫入力の平均値(N)

98

表 - 3 電動貫入試験機を用いた場合の各鋼製貫入ピンにおける供試体 1～20 のレジストグラフ腐朽厚に対応する貫入力（腐朽境界貫入力）の平均値

貫入ピン	円柱2mm	円柱2.5mm	円柱3mm	楔2mm	楔3mm	テーパー	先太
平均貫入力(N)	89.8	128.2	149.5	95.8	98.0	116.0	155
概略貫入力(N)	100.0	150.0	150.0	100.0	100.0	100.0	150.0

II-4-3 電動静的貫入試験機による各鋼製貫入ピンの腐朽厚測定結果と測定精度の検討結果

II-3-2 及び図 - 30 に示した方法で、電動静的貫入試験機における貫入力と貫入深の関係のデータを用いて、表-3 に示す各鋼製貫入ピンの腐朽境界貫入力（平均貫入力）に対応した貫入深（腐朽厚）を調べた。例として表-4 に、楔 3 mm の鋼製貫入ピンにおける電動静的貫入試験機による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚(表-1)との相対誤差（式 1 に参照）を示す。表-4 より、楔 3 mm の鋼製貫入ピンの場合には、20 個の供試体に対する試験において相対誤差は最大で約 12 %で、平均では約 2 %であることがわかる。

20 個の供試体について、レジストグラフ腐朽厚と電動静的貫入試験機による各鋼製貫入ピンの腐朽境界貫入力（平均値）に対応した腐朽厚（各供試体について 3 回の試験の平均値）の相関を知るため、単回帰分析を行った。楔 3 mm の鋼製貫入ピンにおける電動静的貫入試験機による腐朽厚とレジストグラフの腐朽厚との関係の例を図-37 に示す。同様の解析により 7 種の鋼製貫入ピンにおける相対誤差, 単回帰分析による決定係数 R²、腐朽境界貫入力、貫入ピンが座屈を起こした割合、座屈回数をまとめたものを表-5 に示す。

図-37、表-5 より、導出の過程より自明ではあるが、電動静的貫入試験機による各鋼製貫入ピンの腐朽境界貫入力（平均値）に対応した腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚に関する単回帰分析による決定係数は 7 種の鋼製貫入ピンのいずれについても 0.97~0.99 と非常に高い値を示しており、電動静的貫入試験による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚には高い相関がある。表-5 より、相対誤差が最も低い鋼製貫入ピンは楔 3 mm の 2 %、次に円柱 3 mm の 3 %、続いて円柱 2.5 mm と楔 2 mm、テーパの 5 %であり、最も大きかったのは円柱 2 mm の 9% であった。

座屈割合が最も低い鋼製貫入ピンは楔 3 mm の 2 %であり、次に円柱 3 mm とテーパの 3 %であった。座屈割合が最も高い鋼製貫入ピンは先太の 17 %で、2 番目に高いのは円柱

2 mmの12 %であった。

表-4 電動静的貫入試験機による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との3回の試験の相対誤差
(楔3 mmの鋼製貫入ピンの場合)

供試体番号	R(mm)	測定1	測定2	測定3	E (mm)	相対誤差
1	6.3	6.0	6.2	6.2	6.1	0.03
2	6.3	6.4	6.3	6.2	6.3	0.00
3	10	9.9	9.8	9.9	9.9	0.01
4	10.1	9.9	9.9	9.8	9.9	0.02
5	11	10.8	10.6	11.1	10.8	0.02
6	12.7	12.4	12.7	12.7	12.6	0.01
7	13	13.0	12.9	13.6	13.2	0.01
8	13.6	14.2	13.4	14.1	13.9	0.02
9	14.6	14.9	15.2	14.6	14.9	0.02
10	14.7	12.3	12.9	13.8	13.0	0.12
11	16.6	16.5	17.2	15.6	16.4	0.01
12	16.7	17.2	17.5	17.3	17.3	0.04
13	18.6	19.4	18.4	18.8	18.9	0.01
14	19.3	19.2	19.8	19.3	19.4	0.01
15	20.9	22.4	21.5	21.0	21.6	0.04
16	22.4	23.6	21.1	22.2	22.3	0.00
17	23.7	22.7	22.6	23.6	23.0	0.03
18	25.6	25.6	24.7	25.6	25.3	0.01
19	27.7	27.4	27.8	28.2	27.8	0.00
20	35.0	35.9	36.7	40.8	37.8	0.08

1～20番における相対誤差の平均 0.02

R: レジストグラフで判定した供試体の腐朽厚
E: 楔3mmの鋼製貫入ピンの測定値(平均)

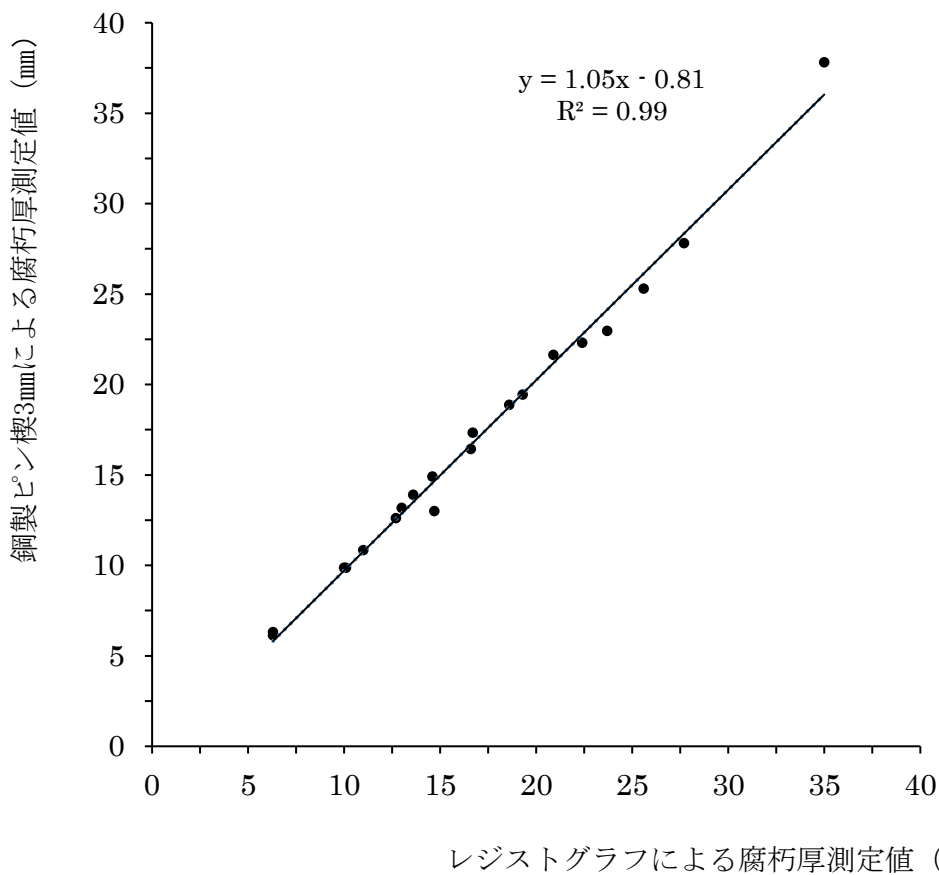


図-37 楔 3 mm の鋼製貫入ピンにおける電動静的貫入試験機による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との関係

表-5 電動静的貫入試験による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との各鋼製貫入ピンの決定係数、相対誤差、貫入力、座屈回数・割合

貫入ピン	円柱2mm	円柱2.5mm	円柱3mm	楔2mm	楔3mm	テーパー	先太
決定係数	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
相対誤差(%)	9.0	5.0	3.0	5.0	2.0	5.0	7.0
貫入力(N)	89.8	128.2	149.5	95.8	98.0	116.0	155.3
座屈割合(%)	11.7	5.0	3.0	8.0	2.0	3.0	17.0
座屈回数	7	3	2	5	1	2	10

II-4-4 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定試験結果と測定精度検討結果

II-3-3 で述べた方法で、簡易静的貫入試験機を用いて、表-3 に示す各鋼製貫入ピンの腐朽境界貫入力（概略貫入力値）に対応した貫入深（腐朽厚）を計測した。表-6 に楔 3 mm の鋼製貫入ピンにおける簡易静的貫入試験器による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚（表-1）との相対誤差の例を示す。表-6 の測定者 A の列の数値は測定者 A による 3 回の腐朽厚測定の平均値となり、S の列の数値は 3 人の測定者による計 9 回の測定の平均値となる。楔 3 mm の鋼製貫入ピンの場合には相対誤差は最大で約 25 %で、平均では約 9 %であることがわかる。また、測定者 A、B、C によるそれぞれの測定値がレジストグラフ腐朽厚の値（R）に占める割合がそれぞれ 93 %、95 %、88 %で、3 人の測定値の平均値（S）では 92 %であり、R の約 9 割であった。楔 3 mm の鋼製貫入ピンにおける簡易静的貫入試験機による腐朽厚の 3 人の測定者のそれぞれの腐朽厚測定値とレジストグラフ腐朽厚値の単回帰分析による関係を示した例を図-38 に示す。測定者それぞれの測定値とレジストグラフ腐朽厚の値の単回帰分析では、決定係数が 0.91、0.92、0.91 であった。図-38 に示したように、3 人の測定値の平均による単回帰分析でも 0.94 であった。それぞれの回帰直線はほぼ同一であり、3 人の測定者による腐朽厚の測定値には若干の違いはあるものの、極端な偏りは認められなかった。

表-7 に、7 種の鋼製貫入ピンでの 3 人の測定者による簡易貫入試験器を用いた測定者ごとの平均腐朽厚値とレジストグラフ腐朽厚値との相対誤差、単回帰分析による決定係数 R^2 、腐朽境界貫入力、鋼製貫入ピンが座屈を起こした割合および座屈回数をまとめたものを示す。表-7 に示した 3 人の測定者による簡易静的貫入試験器を用いた場合の 7 種の鋼製貫入ピンにおける腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との相対誤差、単回帰分析による決定係数 R^2 、腐朽境界貫入力、鋼製貫入ピンが座屈を起こした割合から相対誤差は 3 者ともに楔 3 mm で小さく、決定係数は 3 者とも楔 3 mm で高く、座屈の割合は 3 者とも楔 3 mm で低かった。このことから測定値の個人差に関しても、楔 3 mm の鋼製貫入ピンが最も

少ないと判断できる。さらに、3人の測定者による簡易静的貫入試験器を用いた場合の7種の鋼製貫入ピンにおける平均腐朽厚(3人計9回測定の平均値)とレジストグラフ腐朽厚との相対誤差、単回帰分析による決定係数 R^2 、鋼製貫入ピンが座屈を起こした割合および座屈回数を表-8に示す。表-8より、簡易静的貫入試験機による各鋼製貫入ピンの腐朽境界貫入力(平均値)の概略値(表-3参照)に対応した腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚に関する単回帰分析による決定係数は7種の鋼製貫入ピンいずれについても0.79~0.94と高い値を示し、簡易静的貫入試験機を用いた静的貫入試験による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚には高い相関があることが分かった。このことから、簡易静的貫入試験器を用いることにより、レジストグラフを用いた場合の腐朽厚に近い値を得ることができると考えられる。表-8より、相対誤差が最も低い鋼製貫入ピンは楔3mmの8.9%、次に楔2mmの約11.3%で、最も高かったのは先太の約31.7%であった。

表-6 簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）による腐朽厚測定値（3 人による測定）とレジストグラフによる腐朽厚測定値との相対誤差

供試体番号	R(mm)	測定者A	測定者B	測定者C	S(mm)	相対誤差
1	6.3	6.7	7.0	4.7	6.1	0.03
2	6.3	7.3	7.3	5.3	6.7	0.06
3	10	10.3	6.7	9.7	8.9	0.11
4	10.1	10.0	10.7	9.7	10.1	0.00
5	11	11.7	11.3	10.0	11.0	0.00
6	12.7	10.3	10.3	11.7	10.8	0.15
7	13	11.3	12.3	12.0	11.9	0.09
8	13.6	10.7	12.3	10.3	11.1	0.18
9	14.6	13.7	16.7	14.3	14.9	0.02
10	14.7	13.3	15.3	12.3	13.7	0.07
11	16.6	13.3	13.3	12.3	13.0	0.22
12	16.7	14.0	15.3	17.7	15.7	0.06
13	18.6	18.3	17.7	17.3	17.8	0.04
14	19.3	17.0	21.0	18.0	18.7	0.03
15	20.9	19.0	18.0	16.3	17.8	0.15
16	22.4	23.3	22.3	21.7	22.4	0.00
17	23.7	16.0	20.0	17.7	17.9	0.25
18	25.6	21.0	19.3	18.3	19.6	0.24
19	27.7	28.3	26.0	28.7	27.7	0.00
20	35.0	32.0	31.3	32.3	31.9	0.09
平均相対誤差						8.9%
Rの値に占める割合(平均)		93%	95%	88%	92%	
R: レジストグラフ腐朽厚(mm)						
S: 楔3 mmの鋼製貫入ピンによる測定値(mm)						

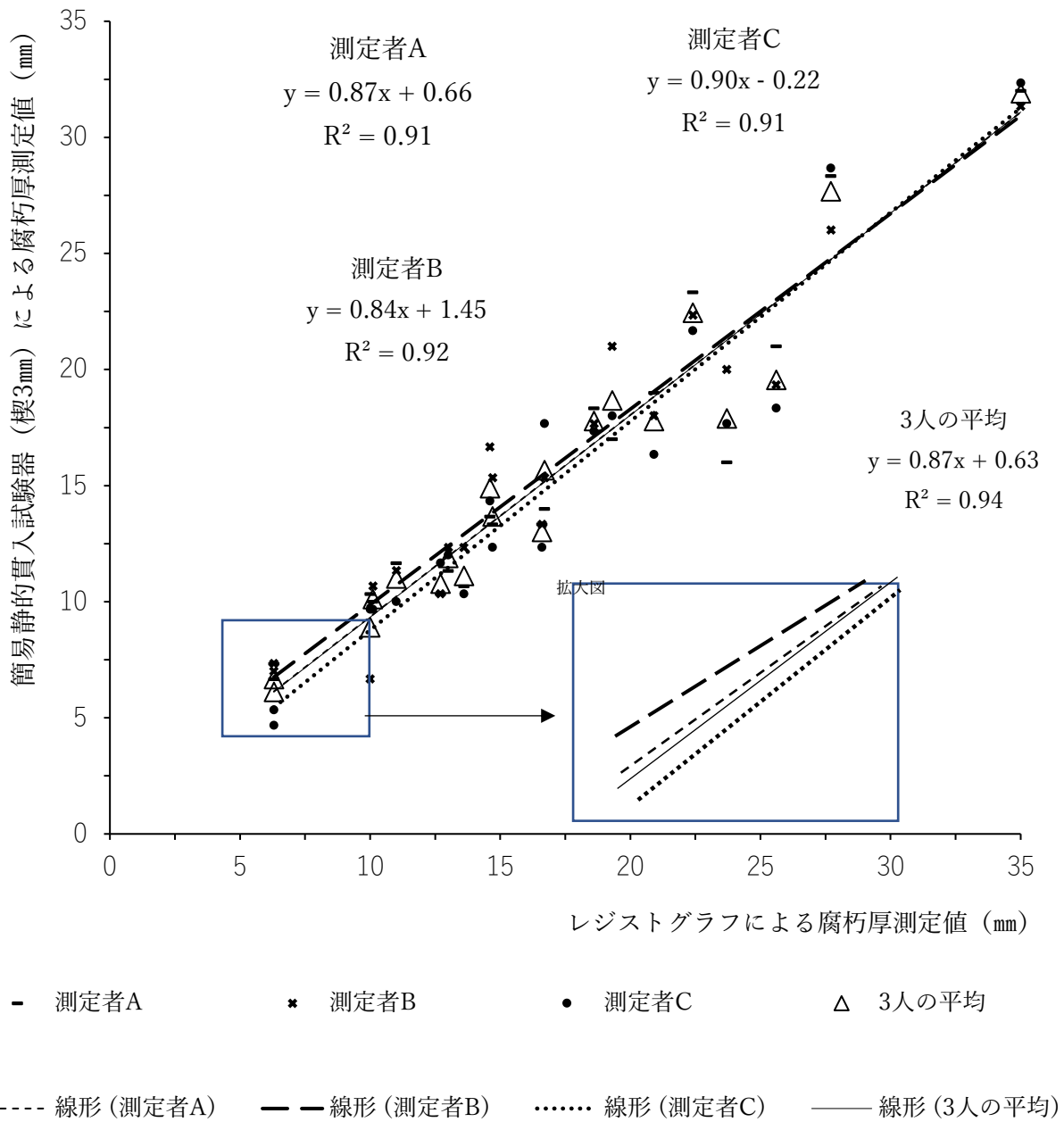


図 - 38 レジストグラフによる腐朽厚測定値と簡易静的貫入試験器 (楔 3 mm) による腐朽厚測定値の関係 (3 人による測定)

表-7 簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）腐朽厚測定値（測定別）とレジストグラフによる腐朽厚測定値との相対誤差と決定係数および座屈回数とその割合

測定者A	円柱2mm	円柱2.5mm	円柱3mm	楔2mm	楔3mm	テーパー	先太
相対誤差(%)	26.8	17	23.8	19.6	11.3	12.3	28.2
決定係数	0.61	0.98	0.85	0.85	0.91	0.87	0.61
座屈割合(%)	18.3	5	1.7	6.7	0	8.3	18.3
座屈回数	11	3	1	4	0	5	11
測定者B							
相対誤差(%)	21.9	17.0	27.1	11.5	11.7	15.0	31.0
決定係数	0.91	0.90	0.87	0.91	0.92	0.89	0.77
座屈割合(%)	16.7	5.0	3.3	6.7	1.7	8.3	23.3
座屈回数	10	3	2	4	1	5	14
測定者C							
相対誤差(%)	21.4	25.8	38.7	11.6	12.5	19.4	43.0
決定係数	0.90	0.92	0.89	0.92	0.91	0.80	0.85
座屈割合(%)	15.0	6.7	0.0	10.0	0.0	10.0	20.0
座屈回数	9	4	0	6	0	6	12

表-8 3人の測定者による簡易静的貫入試験器を用いた場合の腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との相対誤差と決定係数および座屈回数とその割合

貫入ピン	円柱2mm	円柱2.5mm	円柱3mm	楔2mm	楔3mm	テーパー	先太
決定係数	0.82	0.90	0.90	0.91	0.94	0.91	0.79
相対誤差(%)	21.4	18.9	28.3	11.3	8.9	12.2	31.7
丸めた貫入力(N)	100	150	150	100	100	100	150
座屈割合(%)	17.0	6.0	2.0	8.0	1.0	9.0	22.0
座屈回数	30	10	3	15	1	16	39

II-4-5 ピロディンによる貫入深測定値

供試体 1～20 番に対してピロディンによる測定を 3 回行い、その平均値を各供試体のピロディンによる貫入深測定値とした（表 - 9）。表 - 9 には、ピロディンによる貫入深と比較してレジストグラフによる腐朽厚測定値及び簡易静的貫入試験器（楔 3 mm の鋼製貫入ピン）による腐朽厚測定値を並べ、それらの差についてまとめた。レジストグラフによる腐朽測定値および簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値ピロディンによる貫入深測定値とレジストグラフによる腐朽測定値における単回帰分析結果を図 - 38 に示す。簡易静的貫入試験器（鋼製ピン楔 3 mm）による腐朽厚測定値とレジストグラフによる腐朽測定値における単回帰分析結果を図 - 39 に示す。

表 - 9 より、腐朽厚が小さい供試体においてはピロディンの貫入深の測定値がレジストグラフによる腐朽厚測定値及び簡易静的貫入試験器（楔 3 mm の鋼製貫入ピン）による腐朽厚測定値より大きく、最大 5 mm も大きかった。腐朽厚が比較的に大きい供試体においてはピロディンによる貫入深の測定値の方が小さい値となった。

図 - 39、- 40 より、ピロディンによる貫入深測定値とレジストグラフによる腐朽測定値および簡易静的貫入試験器（楔 3 mm の鋼製ピン）による腐朽測定値と単回帰分析による決定係数 R^2 、はそれぞれ 0.89、0.91 であり、高い相関性があった。

表 - 9 ピロディンによる貫入深の測定値と簡易静的貫入試験器およびレジストグラフによる腐
 朽測定値のまとめ

供試体 番号	ピロディンによる貫 入深測定値(mm) A	レジストグラフによる 腐朽厚測定値 (mm) B	簡易静的貫入試験器に よる腐朽厚測定値 (mm)C	ピロディン(値)とレジスト グラフ(値)の差 (mm) A-B	ピロディンと簡易静的貫入 試験器の差 (mm) A-C
1	11.0	6.3	6.1	4.7	4.9
2	10.5	6.3	6.3	4.2	4.2
3	14.9	10.0	9.9	4.9	5.0
4	14.9	10.1	9.9	4.8	5.0
5	15.3	11.0	10.8	4.3	4.5
6	16.1	12.7	12.6	3.4	3.5
7	17.9	13.0	13.2	4.9	4.7
8	17.6	13.6	13.9	4.0	3.7
9	17.7	14.6	14.9	3.1	2.8
10	17.7	14.7	13.0	3.0	4.7
11	19.5	16.6	16.4	2.9	3.1
12	18.7	16.7	17.3	2.0	1.4
13	19.9	18.6	18.9	1.3	1.0
14	22.8	19.3	19.4	3.5	3.4
15	21.3	20.9	21.6	0.4	-0.3
16	21.0	22.4	22.3	-1.4	-1.3
17	19.0	23.7	23.0	-4.7	-4.0
18	22.0	25.6	25.3	-3.6	-3.3
19	24.0	27.7	27.8	-3.7	-3.8
20	33.0	35.0	37.8	-2.0	-4.8
			平均値(mm)	1.8	1.7

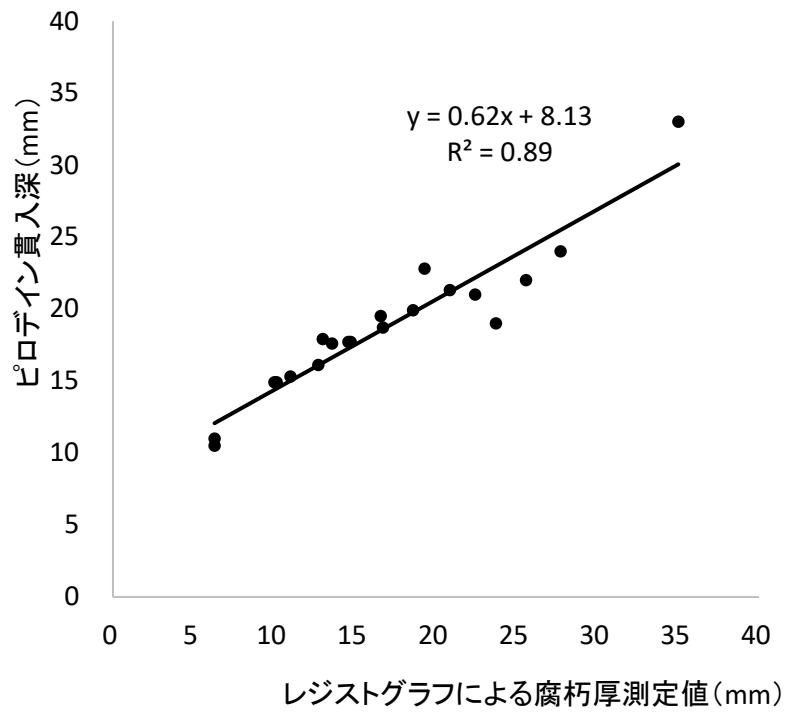


図 - 39 ピロディンによる貫入深測定値とレジストグラフによる腐朽厚測定値との関係

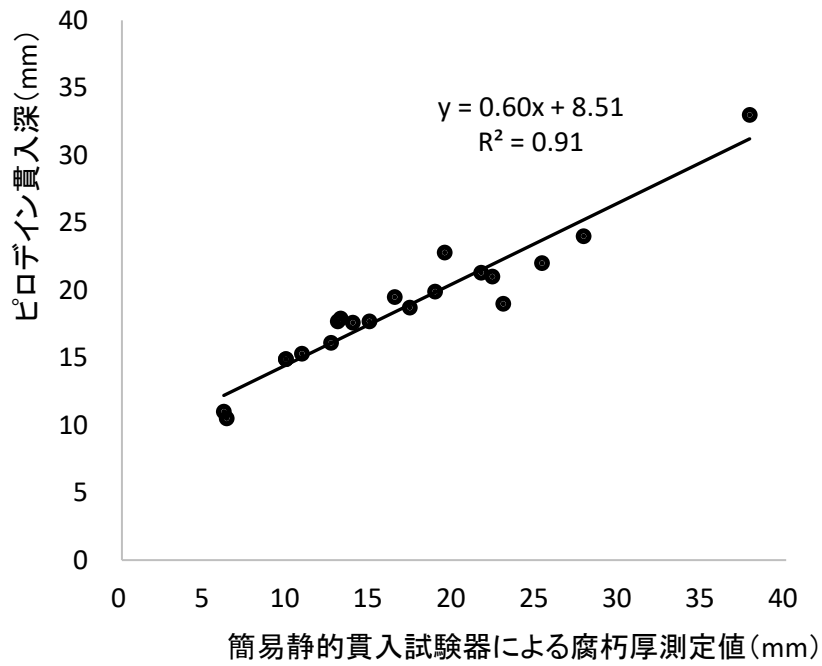


図 - 40 ピロディンによる貫入深測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値との関係

II-5 考察

II-5-1 電動静的貫入試験機と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の差

電動静的貫入試験機による試験や簡易静的貫入試験器による試験で測定された腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との相対誤差、決定係数、座屈割合等において多少異なる結果を得た（表-5、-8）。表-5、-8により、電動静的貫入試験器に比べて、簡易静的貫入試験器の場合には、各鋼製貫入ピンにおいて、相対誤差、決定係数が低下する傾向が確認された。また、各鋼製貫入ピンの座屈割合も増加することが分かった。この理由としては、両者の機器の特性、特に载荷方法の違いが原因であると考えられる。すなわち、電動静的貫入試験機ではモーターを用いて鋼製貫入ピンを木材に押し込む際に、一定の微小速度で、一定の方向で鋼製貫入ピンを押し込むことができる。一方、簡易静的貫入試験器では人の手によって鋼製貫入ピンを木材に押し込むことになるため、手振れ等により、貫入方向は微妙に変化し、さらに貫入力や貫入速度も僅かに変化する。特に大きな貫入力で押し込む場合には、手振れが大きくなり、一定の方向を維持することが困難となる。そのため、簡易静的貫入試験器による実験では先端部が3 mmと太い鋼製貫入ピンの先太や円柱3 mmでは貫入力が大きくなり、このため手振れが大きくなり測定精度が低下する傾向が見られる。

表-6 から、簡易静的貫入試験器における楔3 mmによる腐朽厚の測定値(S)がレジストグラフによる腐朽厚測定値(R)の約9割であることがわかる。また、図-37 から、測定者3人のそれぞれの腐朽厚測定値の単回帰分析の結果も簡易静的貫入試験器における楔3 mmによる腐朽厚測定値がレジストグラフによる腐朽厚測定値の約9割であることが分かった。つまり、簡易静的貫入試験器における楔3 mmによる腐朽厚の測定は腐朽厚を若干過小評価する可能性があることが分かった。この原因として、簡易静的貫入試験器を用いた場合には、人の手で静的に貫入させるために手振れが起り易くそのため電動静的

貫入試験機を用いるよりも貫入力ロスが大きくなり、同じ力で貫入しても電動静的貫入試験機による貫入深よりも簡易静的貫入試験器による貫入深は小さくなると考えられる。このことは、表-4 および表-6 に示されているように、電動静的貫入試験機に比べて簡易静的貫入試験器の座屈回数が多くなることから推測できる。さらに、木材の乾量基準含水率が低下するとドライバーピンの貫入深さは減少する傾向がある（佐山ら, 2017 ; 野田ら, 2017 ; 野田, 2018) ので、供試体の乾量基準含水率が貫入深さに影響を与えたことも考えられる。すなわち、本研究ではレジストグラフによる試験、電動静的貫入試験, 簡易静的貫入試験の順に試験を実施したために、ほぼ気乾状態にあった供試体の乾量基準含水率も試験が進むにつれて徐々に低下し、このために簡易静的貫入試験では電動貫入試験を用いるよりもピン貫入量が減少して腐朽厚がやや小さく測定されたことも考えられる。

II-5-2 ピロディンによる貫入深測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の差

図 - 39、 - 40 より、ピロディンによる貫入深測定値とレジストグラフによる腐朽厚測定値及び簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）による腐朽測定値は高い相関性を示した。しかし、ピロディンの貫入深の値が供試体の腐朽厚の大きさによって両者との関係が逆の結果となった。その原因は、ピロディンの貫入特性と簡易静的貫入試験器の貫入特性の差にある。ピロディンの貫入ピンは内蔵されたバネの持つ一定のエネルギー（6 J）により瞬間的に木材に打ちこまれるため、貫入ピンが持つ慣性力により、健全材においてもある程度貫入する仕組みとなっている。これに対して、簡易静的貫入試験器の貫入ピンは人間の手によりゆっくりと一定の荷重で貫入させるため、慣性による力は作用しない仕組みとなっている。そのため、ピロディンによる貫入深測定値は腐朽厚が小さい供試体においては静的貫入試験器より大きい値になり、腐朽厚が大きい供試体においては、静的貫入試験

器より小さい値となった。このように、相対的な腐朽度を評価する機器であるピロデインの測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の違いを理解し、現場においてこれらの機器を利用する際には各測定機器の特徴を十分理解したうえで活用する必要がある。

II-5-3 鋼製貫入ピンの座屈

簡易静的貫入試験器による試験において、相対誤差が大きく、決定係数が小さかった鋼製貫入ピン（先太、円柱 2 mm、楔 2 mm）はいずれも座屈回数が 15 回以上（180 回中）と他の鋼製貫入ピンと比べても座屈回数が多い。この座屈回数の差は貫入ピンの軸に作用する力の方向の振れと鋼製貫入ピンの軸の強度が貫入力に対して相対的に小さい（軸が 2 mm と小さい）ことが主な原因と考えられる。特に、先太は先端断面の形状が直径 3 mm の円形であり、木材からの抵抗が先端面に大きくかかるのも原因の一つである。一方、テーパーと楔は先端部が楔状であり先端面に掛かる抵抗は円形に比べて小さく、また楔の側面が貫入方向を一定に保つ役目も果たす。このため楔状の先端を持つ鋼製貫入ピンは、円形の先端をもつ鋼製貫入ピンより、貫入方向が一定になり易い。このような理由により、簡易静的貫入試験器における楔状の鋼製貫入ピンは、先端が円形の鋼製貫入ピンに比べて貫入方向が安定し、かつ、貫入力も比較的小さくなることから高い腐朽厚測定精度を示したと考えられる。これに対して円形の先端をもつ貫入ピンは先端面の抵抗が大きいため、貫入方向が変化しやすく、腐朽厚測定精度が低下したと考えられる。特に円柱 3 mm では直径が大きいため円柱 2 mm に比べて座屈は起きにくいものの、電動静的木材貫入試験機と比べ簡易静的貫入試験器では腐朽厚測定精度の低下が生じているのは、手振れにより力の掛かる方向と軸の進む方向がずれてしまうのが原因と思われる。テーパの鋼製貫入ピンでは、測定精度は比較的高いものの、軸の直径が 2 mm であるため簡易静的貫入試験器では座屈がおこり易い。

電動静的貫入試験機および簡易静的貫入試験器による腐朽厚の測定に適した鋼製貫入ピンの特徴としては、貫入力が小さく、決定係数が大きく、相対誤差が小さく、また座屈しにくいことがあげられる。

II-5-4 腐朽厚測定に適する鋼製貫入ピン

電動静的貫入試験機に各鋼製貫入ピンを取り付けた試験においては、比較的小さい貫入力で測定ができ、相対誤差、決定係数、座屈割合ともに良い値を示したのは、楔形の軸が 3 mm の鋼製貫入ピンである。

簡易静的貫入試験器に各鋼製貫入ピンを取り付けた試験においても、比較的小さい貫入力で測定ができ、相対誤差、決定係数、座屈割合ともに最も良い値を示したのは、電動静的貫入試験機を用いた試験と同様に楔形の軸が 3 mm の鋼製貫入ピンである。

これまでの検討を総合すると、試験を行った 7 種類の鋼製貫入ピンの中では、静的貫入試験による腐朽厚測定に最も適した貫入ピンの形状は楔 3 mm であると考えられる。つまり、本研究の目的である簡易で雨天時や水中でも利用可能な測定装置とは簡易静的貫入試験器に先端が楔形で軸の直径が 3 mm の鋼製貫入ピンを取り付けた腐朽厚測定装置となる。

II-5-5 まとめ

簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）を用いて木材の腐朽厚測定する際の精度はレジストグラフに比較して高い相関性を示した。そのため、この研究結果は木製治山治水構造物の維持管理に必要となる多数の箇所における精度の高いデータを迅速かつ簡便で取得できる得ことを可能とした。簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）を用いて木製治山治水構造物の全体の腐朽状況を把握するには十分な精度を有しているといえる。

第 III 章 簡易静的貫入試験器を用いた木材の腐朽厚測定における含水率の影響

III-1 はじめに

本章では、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定における木材の含水率の変化による腐朽厚測定値への影響について調べた。

日本の面積の 3 分の 2 が森林であり、その半分が針葉樹であり、さらに人工林の 97% 以上が針葉樹である。また、樹種別に森林の面積に占める割合はスギが 21% であり、ヒノキが 12% である。このような蓄積があるうえ、建築土木における利用においても、利用率が高く、強度的にも大差がないことが分かっている。このようなことから、スギ、ヒノキ材の供試体において腐朽厚測定および含水率の影響の検討を行うことは木材利用に大きく貢献できることとなる。

本章では主に、野外におけるスギ、ヒノキの腐朽材を採取し、これらから供試体を作成して、含水率を変化させて異なる含水率におけるレジストグラフ及び簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値を比較し、その影響を定量評価した。

III-2 腐朽厚測定試験

III-2-1 採取地

神奈川県相模原市緑区与瀬に位置する（北緯 $35^{\circ} 37'$ ，東経 $139^{\circ} 10'$ ）森林に残置されているスギとヒノキの間伐材から供試体を採取した（図 - 41）。試料を採取した森林は相模川水系相模川上流に位置しており面積は約 15000 m^2 である。気候は、流域内に設置し

た気象ステーション（図 - 41 参照）の記録（2010 年 5 月～ 2011 年 9 月）より平均気温 15.3℃、最暖月（8 月）の平均気温 23.7℃、最寒月（1 月）の平均気温は - 0.6℃であった。平均年降水量は 1673.5mm（相模湖アメダス 1981 年～ 2010 年）で、最も平均降水量の多い月は 8 月の 271.1mm、最も平均降水量の少ない月は 12 月で 46.4mm となっている。地質は、白亜紀から古第三紀系の小仏層群に分類され、基岩は堆積岩となっている。土壌は褐色森林土亜群となっており乾性褐色森林土・適潤性褐色森林土が分布している。植生は、スギ・ヒノキからなる植林地と一部のコナラ群落からなる二次林になっている。

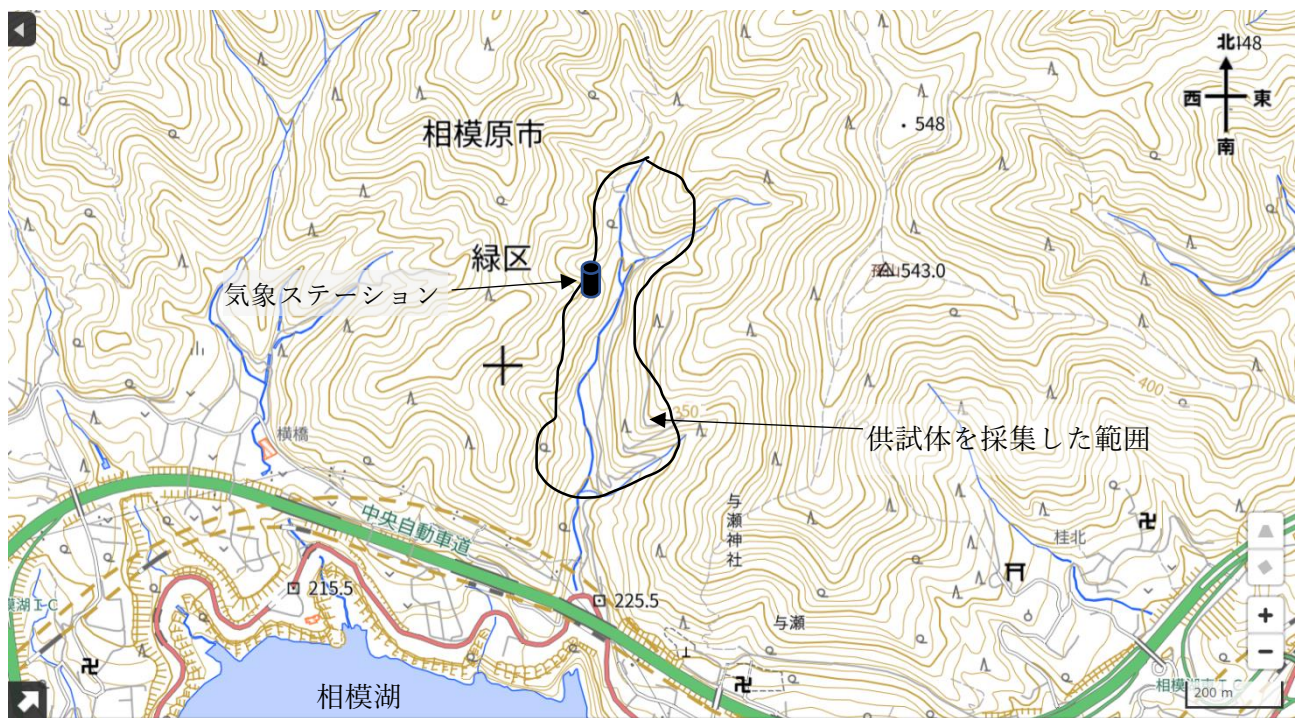


図 - 41 貝沢験地及び供試体採取した範囲

III-2-2 供試体

2020 年 10 月 16 日及び 23 日に、調査地において、腐朽厚した 12 本のスギ材および 12 本のヒノキの供試体を採集した。スギとヒノキの供試体としては腐朽厚がそれぞれ約 5 mm、

10 mm、20 mm、30 mmの間伐材（直径 10～15 cm）をそれぞれ 3 本ずつ選定し（スギ 12 本、ヒノキ 12 本、合計 24 本）、現地で直接目視、撮影を行い、その後長さ約 100cm に切り取り、供試体を作成し、大学の実験室に持ち込んで各種の試験を行った。図 - 42～45、に 4 等分に切ったスギ材の供試体を示す。表 - 10～13 に供試体の長さ、半径、全乾密度を示す。図 - 46～49、に 4 等分に切ったヒノキ材の供試体を示す。表 - 14～17 に供試体の長さ、半径、全乾密度を示す。

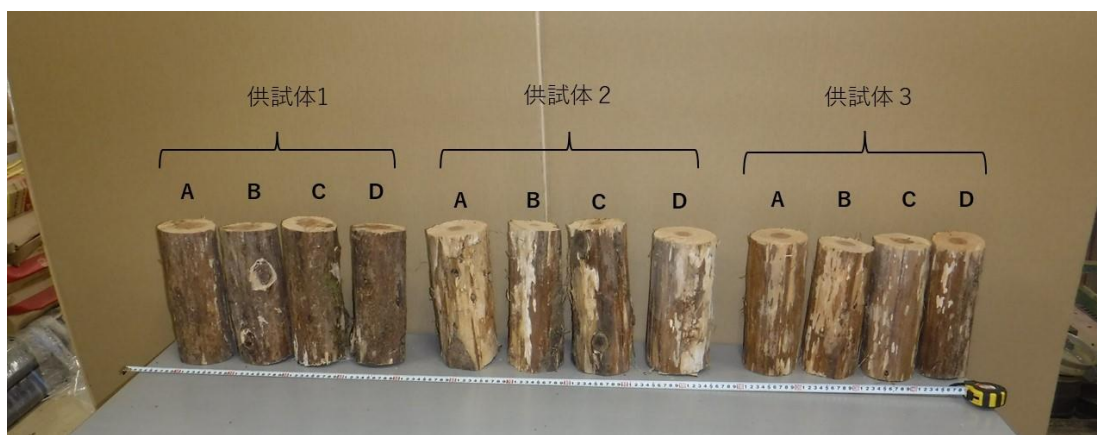


図-42 スギ材供試体 1～3 を四等分して得た供試体 A, B, C, D



図-43 スギ供試体 4～6 を四等分して得た供試体 A, B, C, D



図-44 スギ供試体 7～9 を四等分して得た供試体 A, B, C, D



図-45 スギ供試体 10～12 を四等分して得た供試体 A, B, C, D

表 - 10 スギ供試体 (1~3) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	1				2				3			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1/4の部分												
長さ(cm)	25.00	24.50	25.50	25.00	24.70	25.30	25.30	24.70	25.20	24.40	25.20	25.20
半径(cm)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.25	5.25	5.25	5.25	5.10	5.10	5.10	5.10
体積(cm ³)	1963	1923	2002	1963	2138	2190	2190	2138	2058	1993	2058	2058
全乾質量 (g)	616.2	603.9	628.5	616.2	664.8	681.0	681.0	664.8	636.0	615.8	636.0	636.0
全乾密度 (g/cm ³)	0.314	0.314	0.314	0.314	0.311	0.311	0.311	0.311	0.309	0.309	0.309	0.309

表 - 11 スギ供試体 (4~6) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	4				5				6			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1/4の部分												
長さ(cm)	25.0	24.5	25.5	25.0	24.7	25.3	25.3	24.7	25.2	24.4	25.2	25.2
半径(cm)	6.1	6.1	6.1	6.2	6.4	6.4	6.4	6.4	6.6	6.6	6.6	6.6
体積(cm ³)	2921.0	2862.6	2979.4	2969.1	3127.3	3203.3	3203.3	3127.3	3446.8	3337.4	3446.8	3446.8
全乾質量 (g)	861.7	844.5	878.9	875.9	928.8	951.4	951.4	928.8	1006.5	974.5	1006.5	1006.5
全乾密度 (g/cm ³)	0.295	0.295	0.295	0.295	0.297	0.297	0.297	0.297	0.292	0.292	0.292	0.292

表 - 12 スギ供試体 (7~9) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	7				8				9			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1/4の部分												
長さ(cm)	25.0	24.5	25.5	25.0	24.7	25.3	25.3	24.7	25.2	24.4	25.2	25.2
半径(cm)	5.55	5.55	5.55	5.55	5.40	5.40	5.40	5.40	5.80	5.80	5.80	5.80
体積(cm ³)	2418	2370	2466	2418	2262	2317	2317	2262	2662	2577	2662	2662
全乾質量 (g)	677.0	663.5	690.6	677.0	655.9	671.8	671.8	655.9	718.7	695.9	718.7	718.7
全乾密度 (g/cm ³)	0.280	0.280	0.280	0.280	0.290	0.290	0.290	0.290	0.270	0.270	0.270	0.270

表 - 13 スギ供試体 (10~12) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	10				11				12			
1/4の部分	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
長さ(cm)	25.0	24.5	25.5	25.0	24.7	25.3	25.3	24.7	25.2	24.4	25.2	25.2
半径(cm)	6.25	6.25	6.25	6.25	7.00	7.00	7.00	7.00	6.15	6.15	6.15	6.15
体積(cm ³)	3066	3005	3128	3066	3800	3893	3893	3800	2993	2898	2993	2993
全乾質量 (g)	812.6	796.3	828.8	812.6	1026.1	1051.0	1051.0	1026.1	808.1	782.4	808.1	808.1
全乾密度 (g/cm ³)	0.265	0.265	0.265	0.265	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270

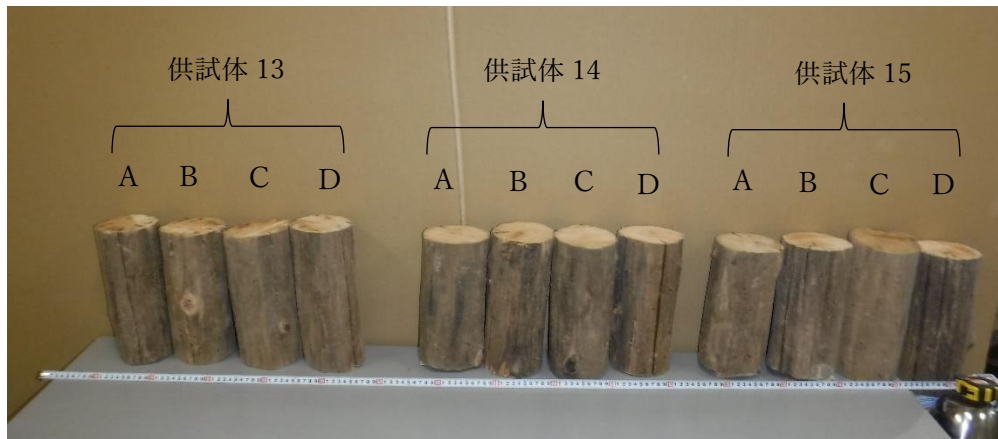


図-46 ヒノキ供試体 13~15 を四等分して得た供試体 A, B, C, D

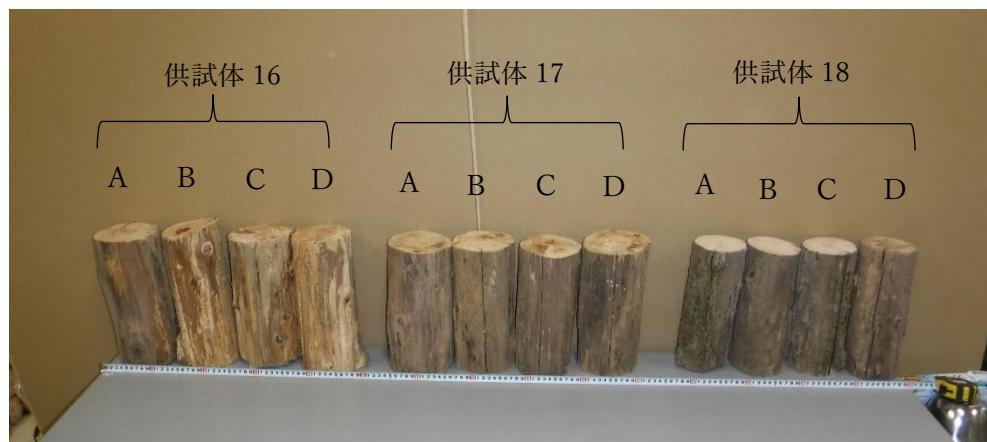


図-47 ヒノキ供試体 16~18 を四等分して得た供試体 A, B, C, D

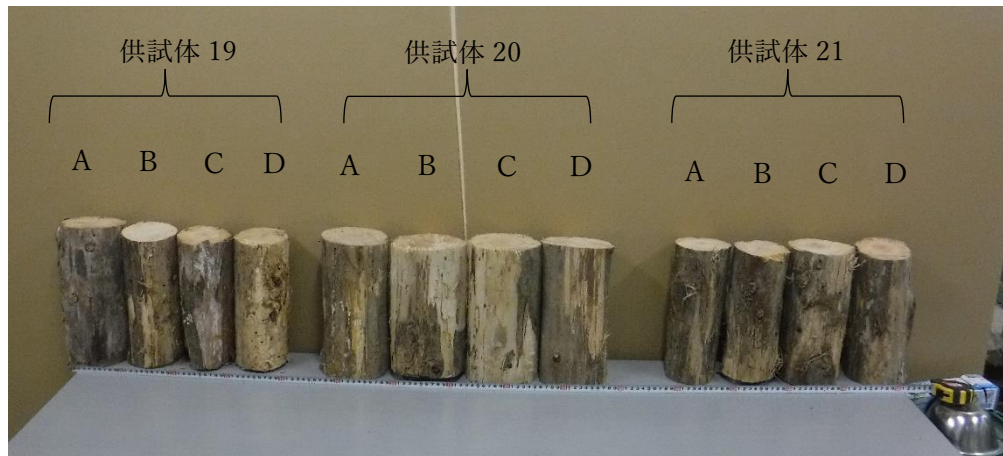


図-48 ヒノキ供試体 19～21 を四等分して得た供試体 A, B, C, D

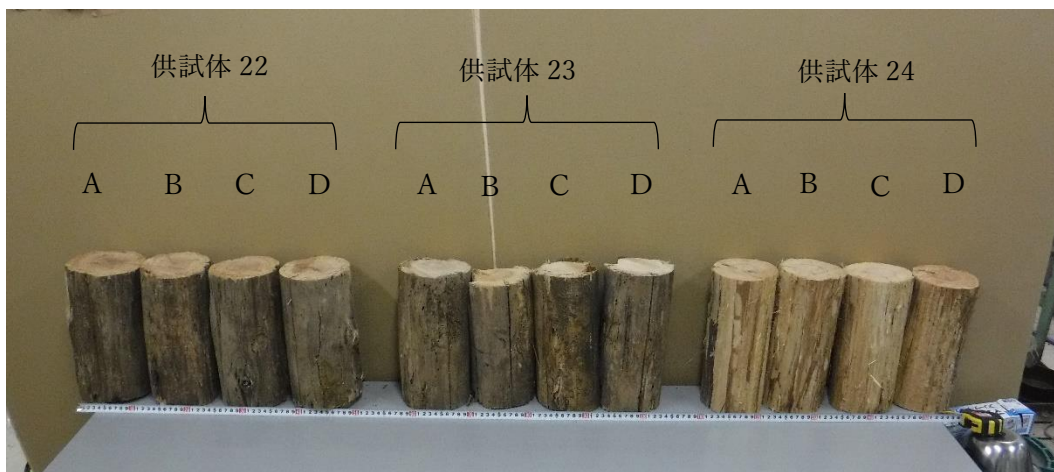


図 - 49 ヒノキ供試体 22～24 を四等分して得た供試体 A, B, C, D

表 - 14 ヒノキ供試体 (13～15) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	13				14				15			
1/4の部分	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
長さ(cm)	25.60	24.40	24.40	25.60	24.50	25.30	24.70	25.50	24.50	24.50	24.90	24.50
半径(cm)	6.00	6.00	6.00	6.00	5.90	5.90	5.90	5.90	6.50	6.50	6.50	6.50
体積(cm ³)	2894	2758	2758	2894	2678	2765	2700	2787	3250	3250	3303	3250
全乾質量 (g)	983.9	937.8	937.8	983.9	937.3	967.9	944.9	975.5	1170.1	1170.1	1189.2	1170.1
全乾密度 (g/cm ³)	0.340	0.340	0.340	0.340	0.350	0.350	0.350	0.350	0.360	0.360	0.360	0.360

表 - 15 ヒノキ供試体 (16~18) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	16				17				18			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1/4の部分												
長さ(cm)	25.0	25.7	25.2	25.2	25.0	25.0	24.6	25.4	25.2	24.4	25.2	25.2
半径(cm)	5.5	5.5	5.5	5.5	6.3	6.3	6.3	6.3	5.2	5.2	5.2	5.2
体積(cm ³)	2374.6	2441.1	2393.6	2393.6	3115.7	3115.7	3065.8	3165.5	2139.6	2071.7	2139.6	2139.6
全乾質量 (g)	712.4	732.3	718.1	718.1	965.9	965.9	950.4	981.3	641.9	621.5	641.9	641.9
全乾密度 (g/cm ³)	0.300	0.300	0.300	0.300	0.310	0.310	0.310	0.310	0.300	0.300	0.300	0.300

表 - 16 ヒノキ供試体 (19~21) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	19				20				21			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1/4の部分												
長さ(cm)	25.4	24.9	24.7	24.9	25.0	24.8	25.4	25.4	25.2	25.2	25.3	25.2
半径(cm)	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5
体積(cm ³)	1994	1955	1939	1955	2826	2803	2871	2871	2394	2394	2403	2394
全乾質量 (g)	538.4	527.8	523.5	527.8	791.3	784.9	803.9	803.9	622.3	622.3	624.8	622.3
全乾密度 (g/cm ³)	0.270	0.270	0.270	0.270	0.280	0.280	0.280	0.280	0.260	0.260	0.260	0.260

表 - 17 ヒノキ供試体 (22~24) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

供試体	22				23				24			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1/4の部分												
長さ(cm)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	24.5	25.0	25.2	25.2	25.4	25.2	25.2
半径(cm)	6.25	6.25	6.25	6.25	7.00	7.00	7.00	7.00	6.15	6.15	6.15	6.15
体積(cm ³)	3066	3066	3066	3066	3847	3770	3847	3877	2993	3017	2993	2993
全乾質量 (g)	705.3	705.3	705.3	705.3	961.6	942.4	961.6	969.3	658.4	663.6	658.4	658.4
全乾密度 (g/cm ³)	0.230	0.230	0.230	0.230	0.250	0.250	0.250	0.250	0.220	0.220	0.220	0.220

III-2-3 試験方法

III-2-3-1 生材および全乾質量の測定

各供試体の一部を切り取り、乾燥する前に生材の質量を測定し、その後、乾燥させて全乾質量を測定した。さらに含水率を計算した。

III-2-3-2 簡易静的貫入試験器およびレジストグラフによる腐朽厚測定

簡易静的貫入試験器は、野外において雨天時や水中でも木材の腐朽厚を簡便に測定できる機器として開発したものであり、人力により押し込み荷重 100N で鋼製楔型（直径 3 mm）貫入ピンを回転無しで木材に押し込んで貫入させ、貫入深を測定することによりその貫入深を腐朽厚として測定するものである。スギ材における試験では図-41～44 に示すように、各供試体を 4 等分に切断し、それぞれ、A、B、C、D の供試体とした。表-10～13 に、供試体の概要等を示す。ヒノキ材における試験では図-45～48 に示すように、各供試体を 4 等分に切断し、それぞれ、A、B、C、D の供試体とした。表-14～17 に、供試体の概要等を示す。

B については、実験室に持ち込んで直ぐに、現地と同じ含水率で簡易静的貫入試験器およびレジストグラフにより腐朽厚を測定した。各供試体について、簡易静的貫入試験器で 50 点、レジストグラフで 3 点の測定を行った。なお、供試体 B 全体における含水率は約 70%であった。

A については、乾燥機（105℃）で徐々に（ゆっくり）乾燥を行い、含水率が約 15%になって安定してから、簡易静的貫入試験器及びレジストグラフにより腐朽厚を測定した。各供試体について、簡易静的貫入試験器で 50 点、レジストグラフで 3 点の測定を行った。

Cについては、水中に浸漬して約1週間後に取り出し、2日間放置して、含水率を安定させてから、含水率を測定し、簡易静的貫入試験器50点、レジストグラフで3点の腐朽厚の測定を行った。その時の含水率は約150%であった。

Dについては水中に浸漬して約4週間後に取り出し、含水率を測定し、簡易静的貫入試験器及びレジストグラフにより腐朽厚の測定を行った。各供試体について、簡易静的貫入試験器で50点、レジストグラフで3点行った。その時の含水率は約190%であった。

なお、スギ材の供試体においてここでいう含水率約15%とは、供試体Aの全体の平均値で、個々の供試体の含水率は13%~17%であった。同じく、供試体Bの含水率約70%では、個々の供試体の含水率は67%~73%であった。供試体Cの含水率約150%では個々の供試体の含水率は148%~153%であった。供試体Dの含水率約190%では、個々の供試体の含水率は188%~194%であった。

ヒノキ材の供試体において、ここでいう含水率約15%とは、供試体Aの全体の平均値で、個々の供試体の含水率は14%~16%であった。同じく、供試体Bの含水率約70%では、個々の供試体の含水率は68%~72%であった。供試体Cの含水率約150%では個々の供試体の含水率は147%~153%であった。供試体Dの含水率約190%では、個々の供試体の含水率は188%~193%であった。

III-2-3-3 検討方法

本章では、同じ供試体の異なる含水率（約 15%～190%）の状態におけるレジストグラフによる腐朽厚測定値および簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の変動（差）の定量分析を行った。また、同じ供試体の異なる含水率の状態における簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値及びレジストグラフによる腐朽厚測定値の変動特性を分析した。

III-3 結果

III-3-1 スギ材の供試体における試験結果

III-3-1-1 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定の結果

図-50 に供試体 1~12 からの切断により得た A、B、C、D の簡易静的貫入試験器による腐朽厚の測定値（平均値）及び含水率の変化による腐朽厚測定値の差を示す。図-50 より同じ供試体における A、B、C、D の腐朽厚測定値（平均値）の含水率変化（約 15%~190%）による差は 1.4mm~2.9mm であり、全体として腐朽厚測定値が大きいほど A、B、C、D 間の差が大きい傾向が認められた。また、含水率の腐朽厚測定値への影響は最大 3 mm 未満であった。

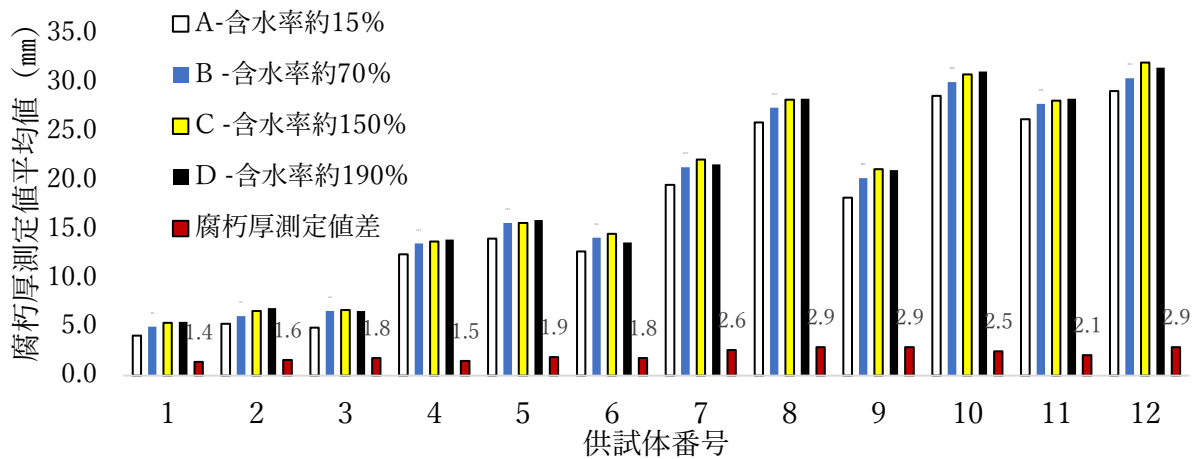


図-50 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の平均値と A、B、C、D 間の差（スギ）

図-51～54 に、供試体 7、供試体 9 を例として A、B、C、D の腐朽厚測定値の分布と確率密度曲線を示す。なお、供試体 7 の腐朽厚の平均値は約 21 mm、直径は約 13 cmであった。図-50～54 に示したように、含水率が約 15%における供試体に対する簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値が一番小さく、含水率が上昇すると腐朽厚測定値が徐々に大きくなる傾向が認められた。

図-51～54 に示したように、より高含水率の状態において、供試体に対する腐朽厚測定値の中では比較的に高い値が出現する確率高くなることを確認できる。これも含水率が上昇すると木材に対する腐朽厚測定値が大きくなる傾向があることを示した。既往研究でも、含水率の増加とともにピンの打ち込み深さが増加する結果が得られている（山田ら、2016、山田ら、2017、野田、2018、飯島、1999、増田、2007）。これらの研究における分析と同様に、含水率の増加によるピンの貫入深の増加の原因としては主に、木材に繊維内の自由水の潤滑作用による摩擦係数の減少が考えられる。

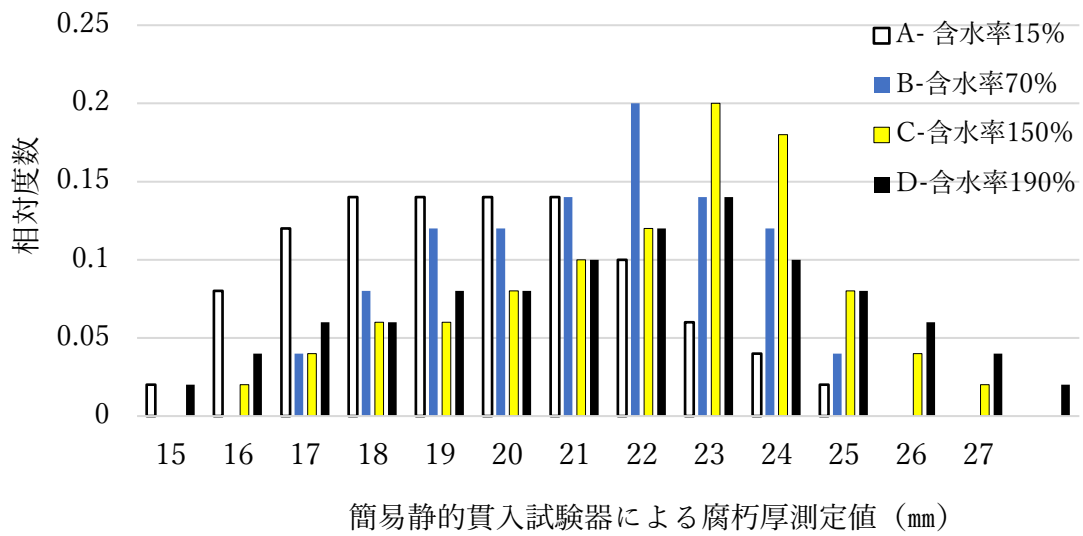


図-51 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の相対度数（スギ材供試体 7）

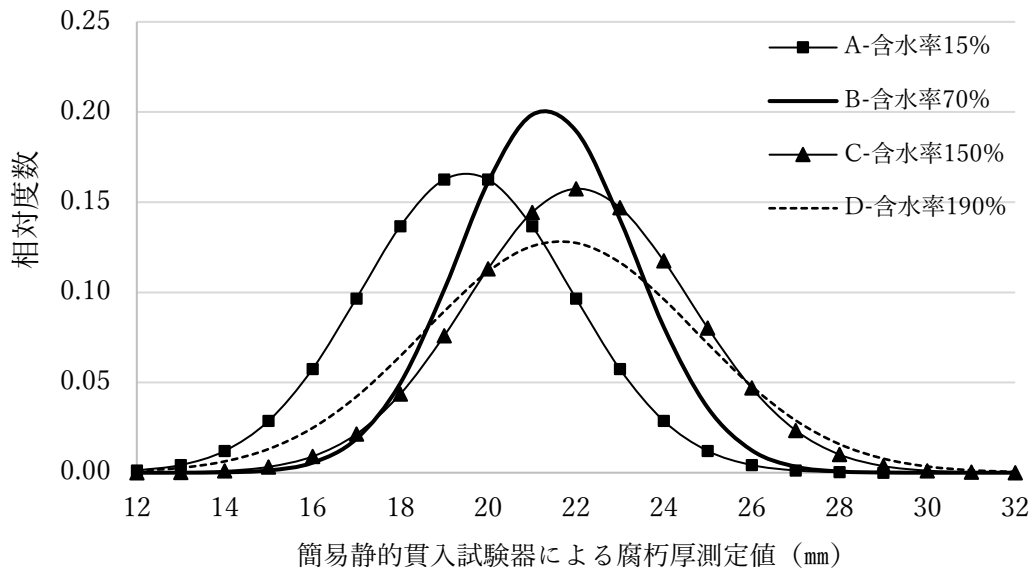


図-52 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の確率密度曲線（スギ材供試体 7）

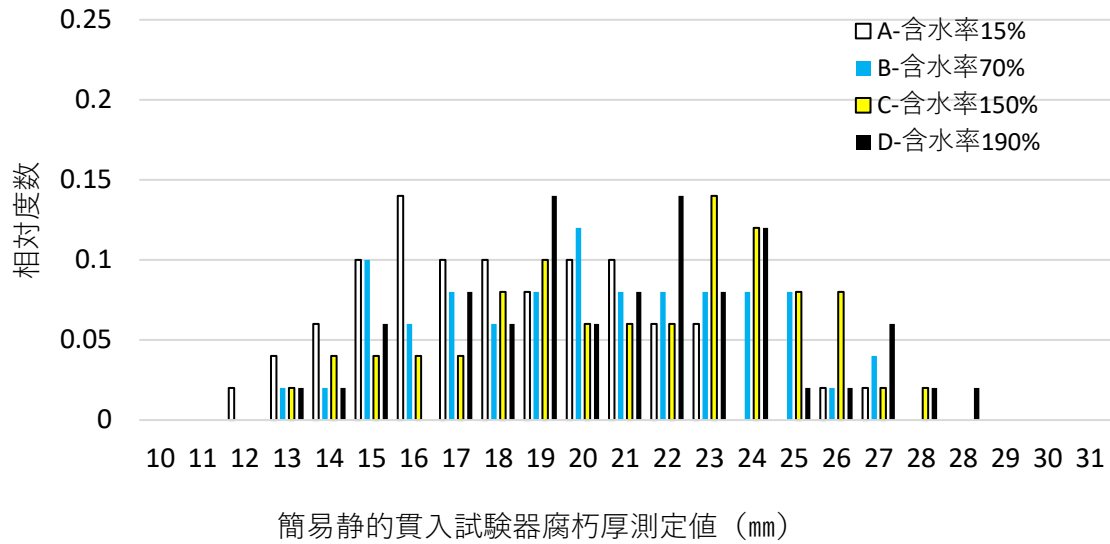


図-53 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の相対度数（スギ材供試体 9）

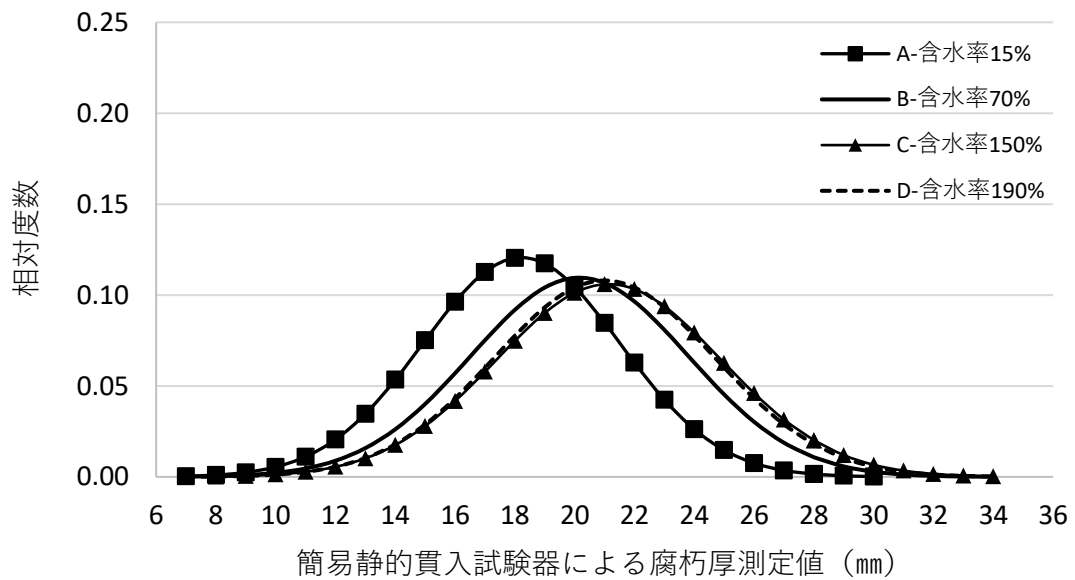


図-54 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の確率密度曲線（スギ材供試体 9）

図-55～58 に各供試体の含水率と腐朽厚測定値（各供試体 50 点の測定値の平均値）の関係を示す。含水率が上昇するに伴い、同じ供試体（丸太）において腐朽厚測定値が大きくなる傾向が認められた。簡易静的貫入試験器による測定値は含水率約 15%の供試体における測定値が最小値で、ほとんどの場合、含水率が約 150%～190%で腐朽厚測定値が最大値を示した。

図 - 55～58 の供試体 3、6、7、8、12 のデータの分析では、含水率約 150%～190%の領域において、一部の供試体では、含水率約 150%の際の腐朽厚測定値が含水率の上昇に伴いやや小さくなる傾向が確認された。また、その際には、含水率約 190%の際の値は含水率約 15%に比べて大きい値であり、含水率の上昇（15%～190%）全過程では腐朽厚測定値が大きくなる傾向であったといえる。

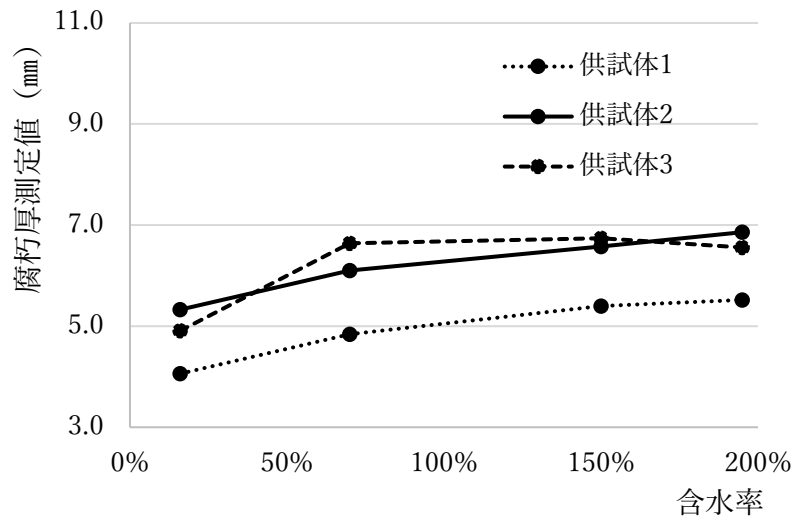


図-55 供試体 1～3 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)

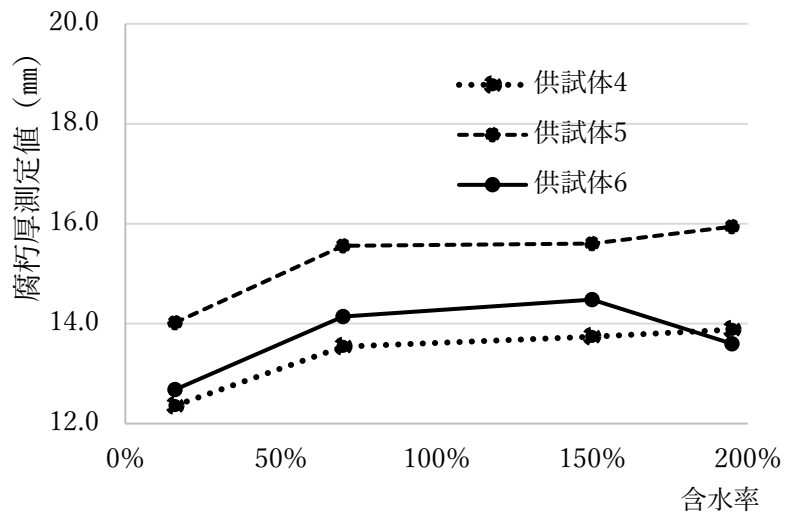


図-56 供試体 4～6 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)

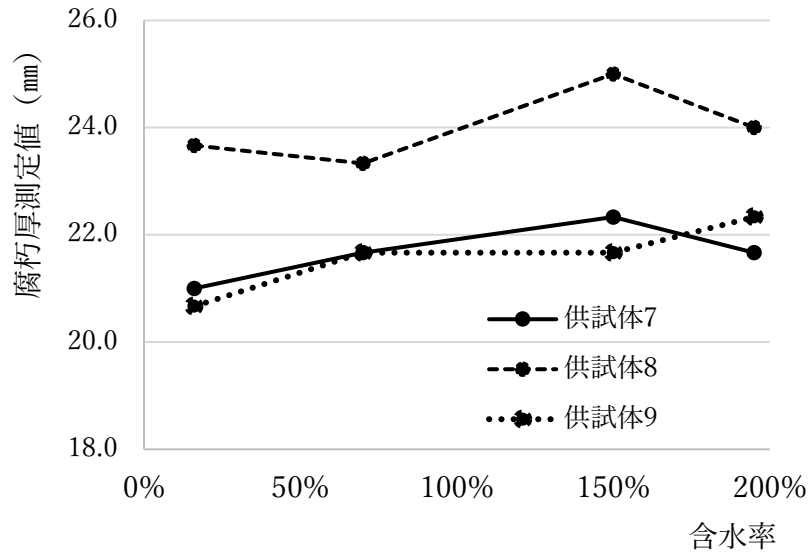


図-57 供試体 7～9 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)

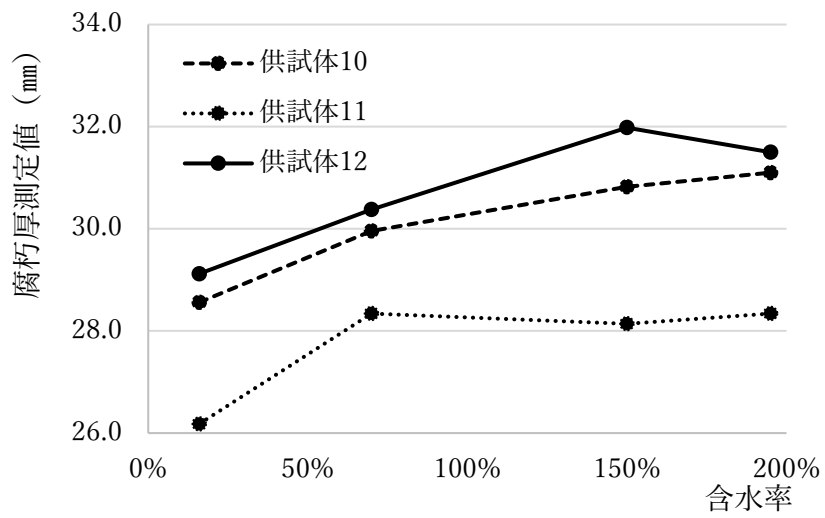


図-58 供試体 10～12 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)

既往研究では、含水率の増加とともにピロディンによるピンの打ち込み深さ（貫入量）が増加する結果が得られている（山田ら、2016, 山田ら、2017, 野田、2018, 飯島、1999, 増田、2007）。今回の試験結果においても同様に含水率の増加とともに簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値は増加する結果が得られた。山田らによる研究（山田、2016, 山田、2017）では、スギ材において含水率が約 100%増加するとピロディンによる直径 2.5mm のピンの打ち込み深さは約 5mm～7mm 増加する結果が得られているが、今回の簡易静的貫入試験器による試験では、スギ材において含水率が約 100%増加すると貫入量は約 1mm～2mm 増加している。測定方法が異なるので単純には比較できないものの、含水率の変化による貫入量への影響はピロディンよりも簡易静的貫入試験器が小さい。さらに、野田の研究（野田、2018）によれば、人力で 150N の荷重でプラスおよびマイナスドライバーを押し込んだ場合はスギ材において含水率が約 100%増加すると貫入量は約 1mm 増加している。このことから、人力により静的に鋼製ピンやドライバーを押し込んだ場合には、貫入量に与える含水率の影響は、ピロディンによる動的な押し込み方法に比べて小さくなることが分かる。

III-3-1-2 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果

図-59 に供試体 1~12 からの切断により得た A、B、C、D のレジストグラフによる腐朽厚の測定値（平均値）を示す。図-59 より同じ供試体における A、B、C、D の腐朽厚測定値（平均値）の含水率変化（約 15%~190%）による差は 0.3mm~1.7mm であり、全体として腐朽厚測定値が大きいほど A、B、C、D 間の差が大きい傾向が認められた。また、含水率の腐朽厚測定値への影響は最大 2 mm 未満であったといえる。

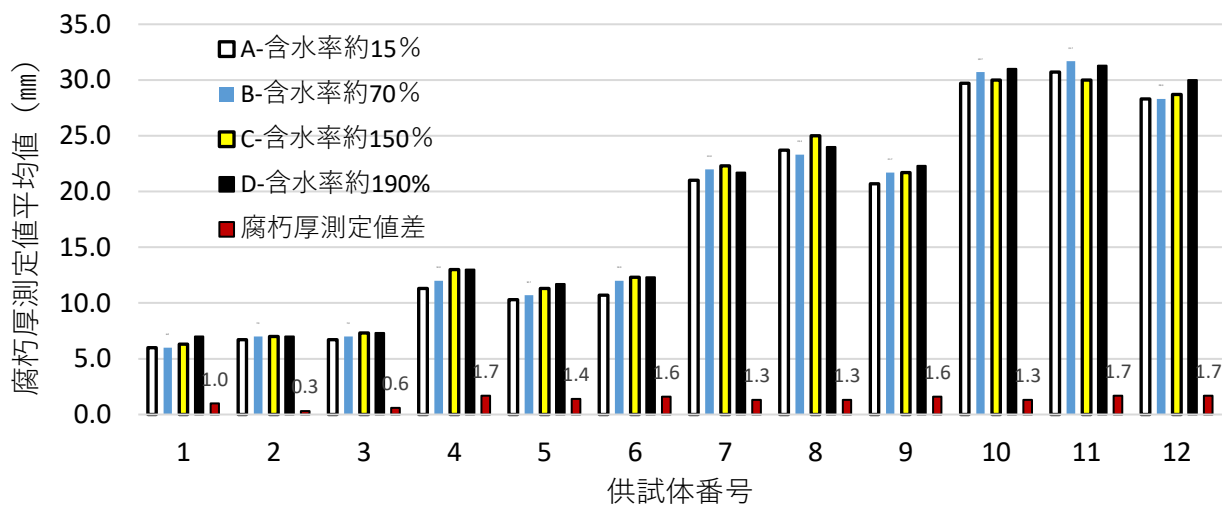


図-59 レジストグラフによる腐朽厚測定値の平均値と A、B、C、D 間の差

図-60～63 に供試体 1～12 の A、B、C、D におけるレジストグラフによる腐朽厚測定値（A、B、C、D の各供試体において 3 点測定した値の平均値）と含水率との関係を示す。図-60～63 よりレジストグラフによる測定値では含水率が約 100%増加すると貫入量は約 1 mm増加していることがわかる。このことから簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べて、レジストグラフによる腐朽厚測定値では含水率による影響が小さい傾向が認められる。

なお、一部の供試体においては、含水率の上昇に伴い腐朽厚測定値がやや小さくなる場合も確認された。また、その際には、含水率約 190%の際の値は含水率約 15%に比べて大きい値であり、含水率の上昇（15%～190%）全過程では腐朽厚測定値が大きくなる傾向であったといえる。

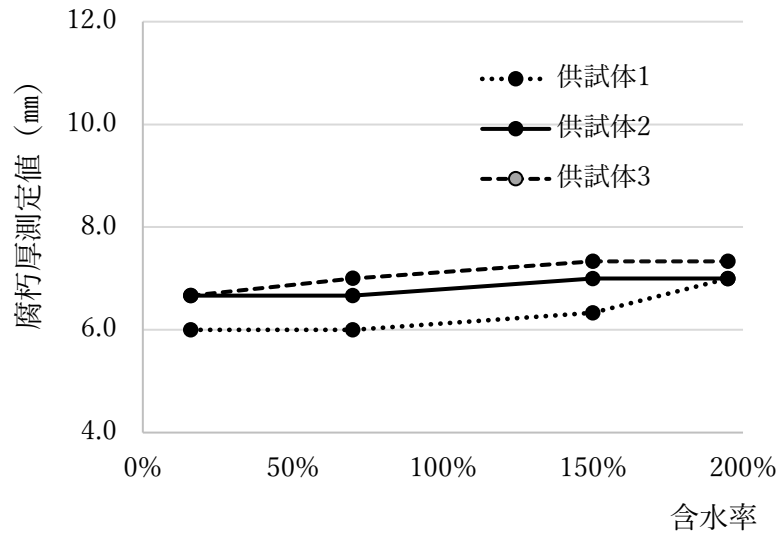


図-60 供試体 1～3 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)

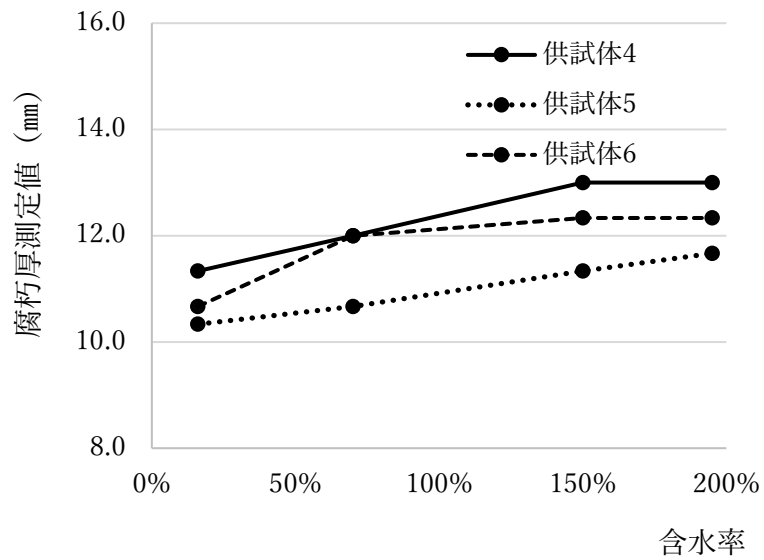


図-61 供試体 4～6 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)

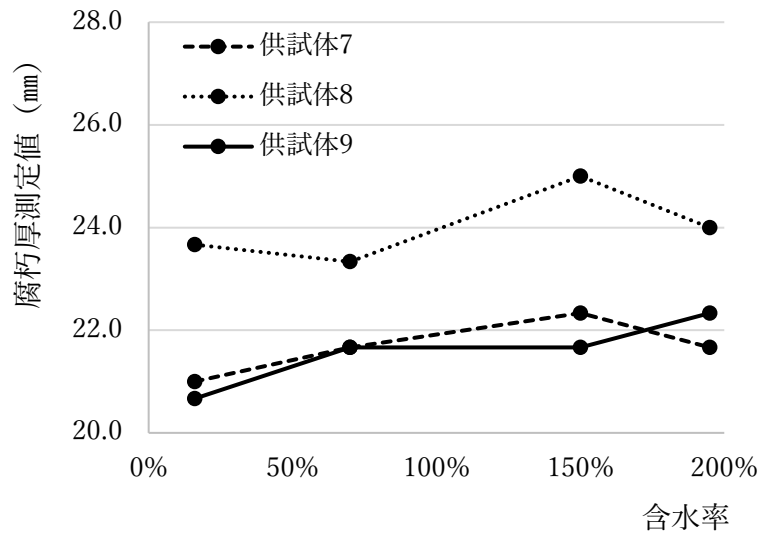


図-62 供試体 7～9 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)

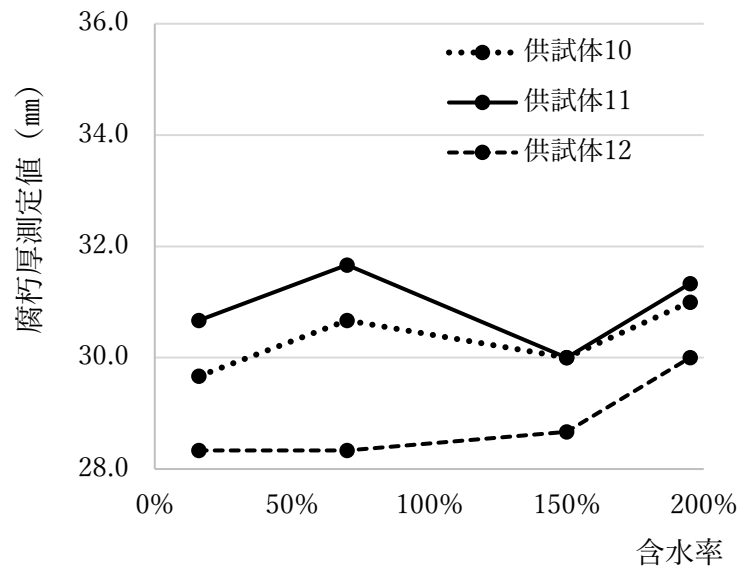


図-63 供試体 10～12 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)

III-3-1-3 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果との比較

図-64 に簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値とレジストグラフによる腐朽厚測定値の関係を含水率毎に示す。腐朽厚が増加すると簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値とレジストグラフによる腐朽厚測定値の差が大きくなる傾向が認められるが、全体としては、両者はほぼ同じ腐朽厚を示している。また、両者の腐朽厚測定値の含水率による違いは比較的小さい。

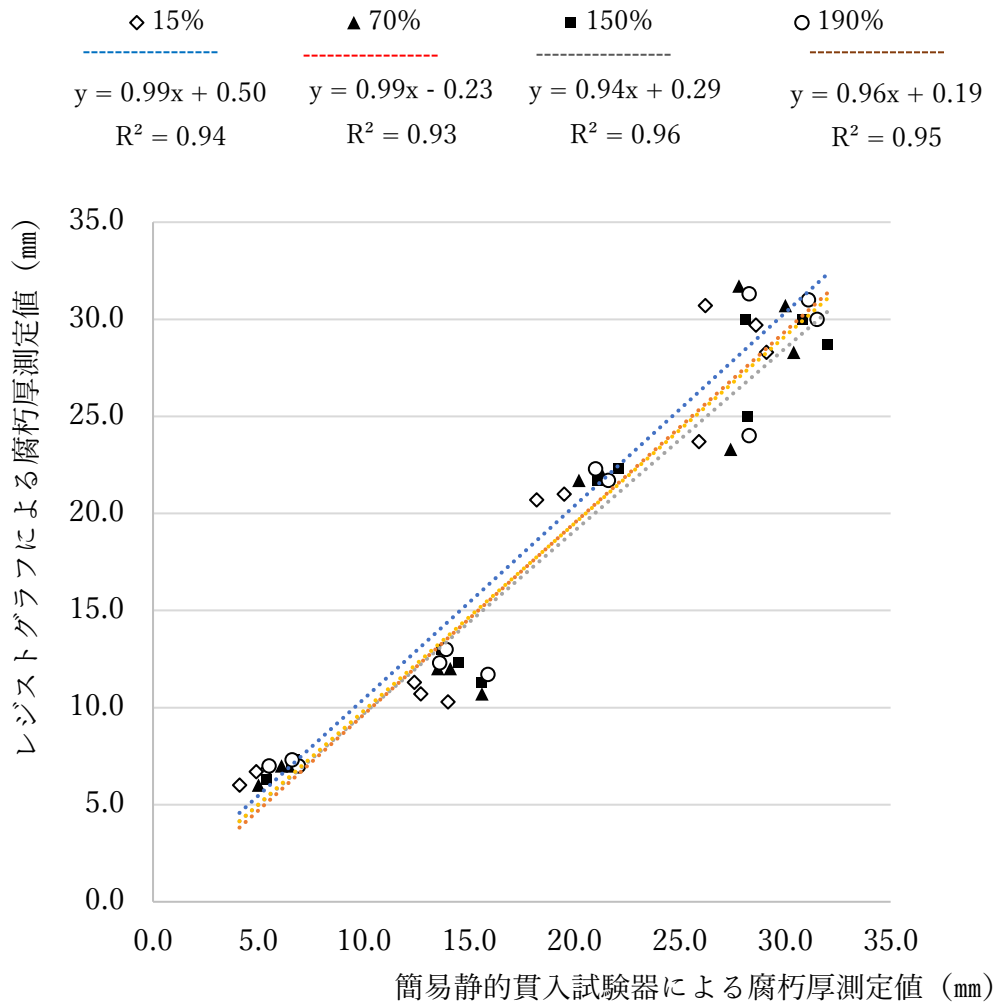


図-64 簡易静的貫入試験器とレジストグラフによる腐朽厚測定値の比較

III-3-2 ヒノキ材の供試体における試験

III-3-2-1 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定の結果

図-65 に供試体 13～24 からの切断により得た A、B、C、D の簡易静的貫入試験器による腐朽厚の測定値（平均値）及び含水率の変化による腐朽厚測定値の差を示す。図-65 より同じ供試体における A、B、C、D の腐朽厚測定値（平均値）の含水率による変動（約 15%～190%）は 1.2mm～3.9mm であり、全体として腐朽厚測定値が大きいほど A、B、C、D 間の差が大きい傾向が認められた。なお、含水率の腐朽厚測定値への影響はスギ材に比べて 1mm 程大きく、最大 4mm 未満であった。

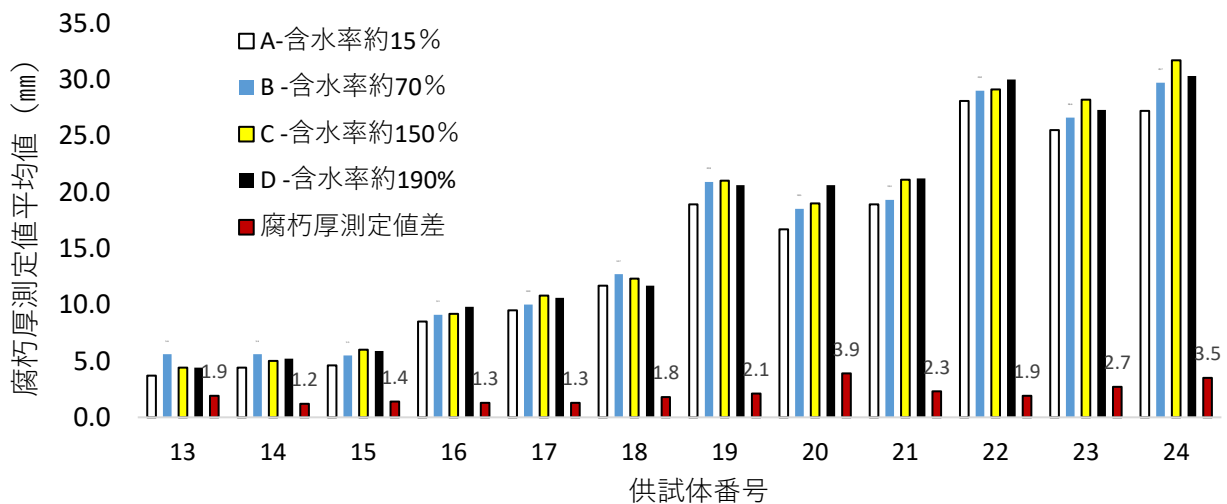


図-65 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の平均値と A, B, C, D 間の差（ヒノキ）

図-66～69 に、供試体 19、20 を例として A、B、C、D の腐朽厚測定値の分布と確率密度曲線を示す。なお、供試体 19 の腐朽厚の平均値は約 19 mm、直径は約 10 cmであった。図-65、図-66～69 に示したように、含水率約 15%における供試体の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値が一番小さく、含水率が上昇すると腐朽厚測定値が徐々に大きくなる傾向が認められた。

図-66～69 に示したように、より高含水率の状態において、供試体に対する腐朽厚測定値の中では比較的に高い値が出現する確率高くなることを確認できる。これも含水率が上昇すると木材に対する腐朽厚測定値が大きくなる傾向があることを示した。既往研究でも、含水率の増加とともにピンの打ち込み深さが増加する結果が得られている（山田ら、2016、山田ら、2017、野田、2018、飯島、1999、増田、2007）。これらの研究における分析と同様に、含水率の増加によるピンの貫入深の増加の原因としては主に、木材に繊維内の自由水の潤滑作用による摩擦係数の減少が考えられる。

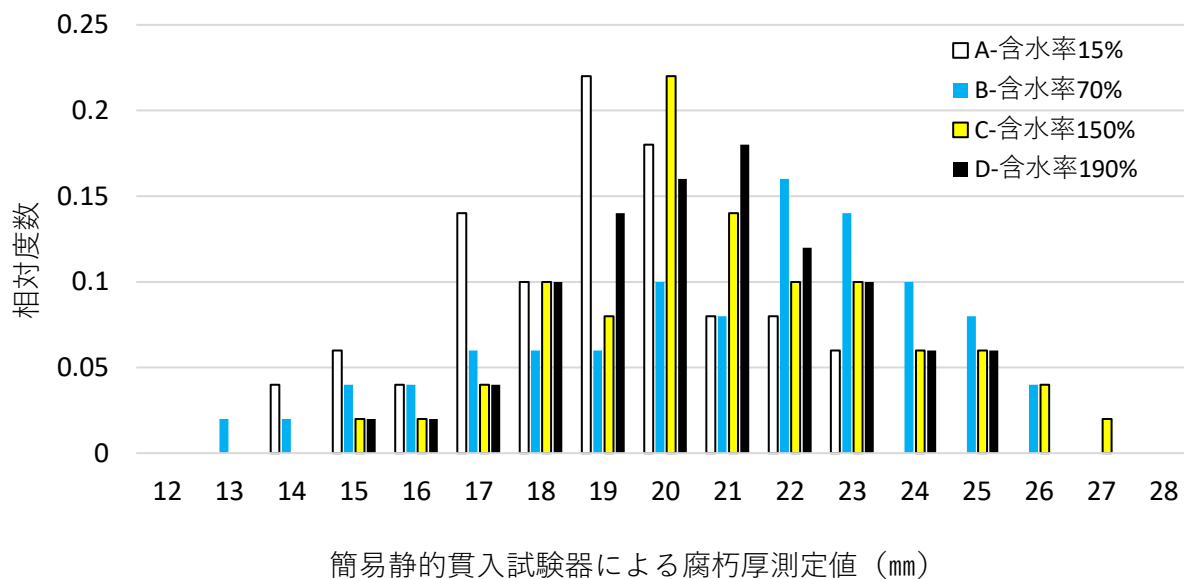


図-66 含水率と腐朽厚測定値の相対度数 (ヒノキ供試体 19)

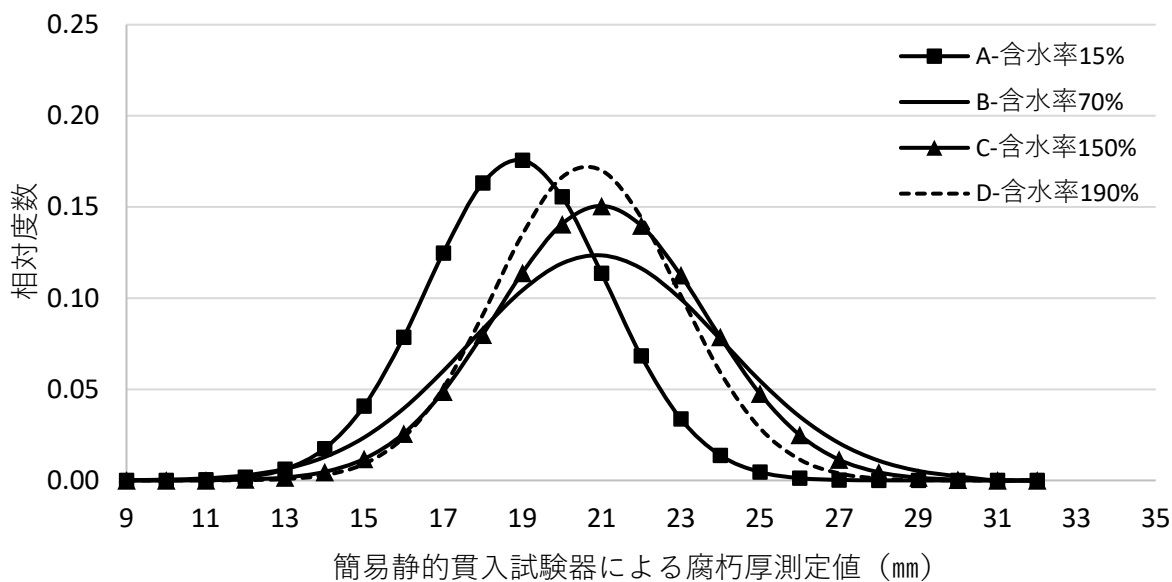


図-67 含水率と腐朽厚測定値の確率密度曲線 (ヒノキ供試体 19)

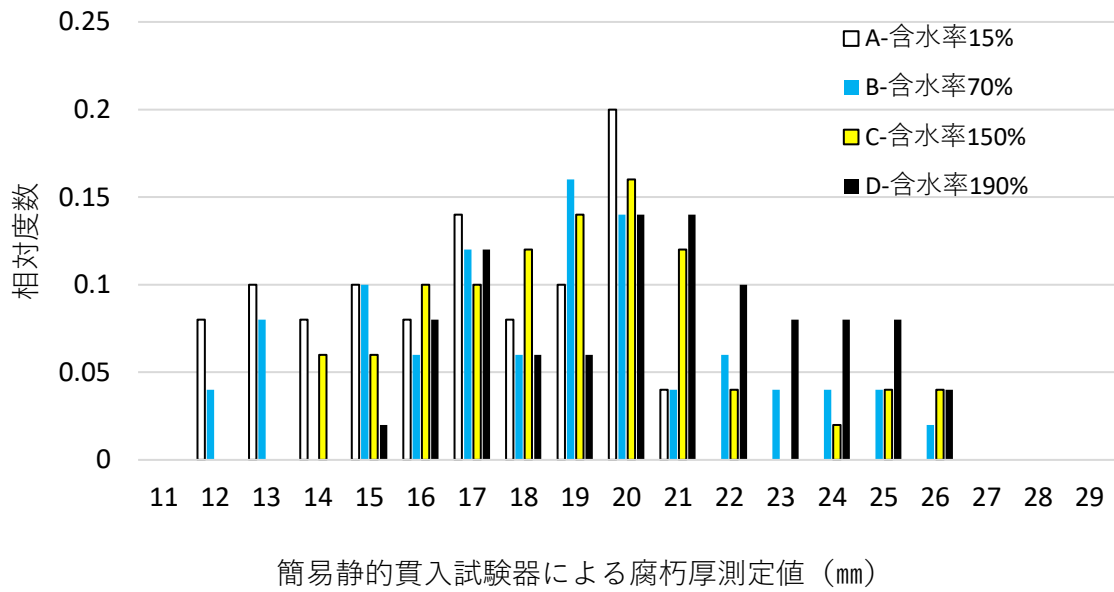


図-68 含水率と腐蝕厚測定値の相対度数（ヒノキ供試体 20）

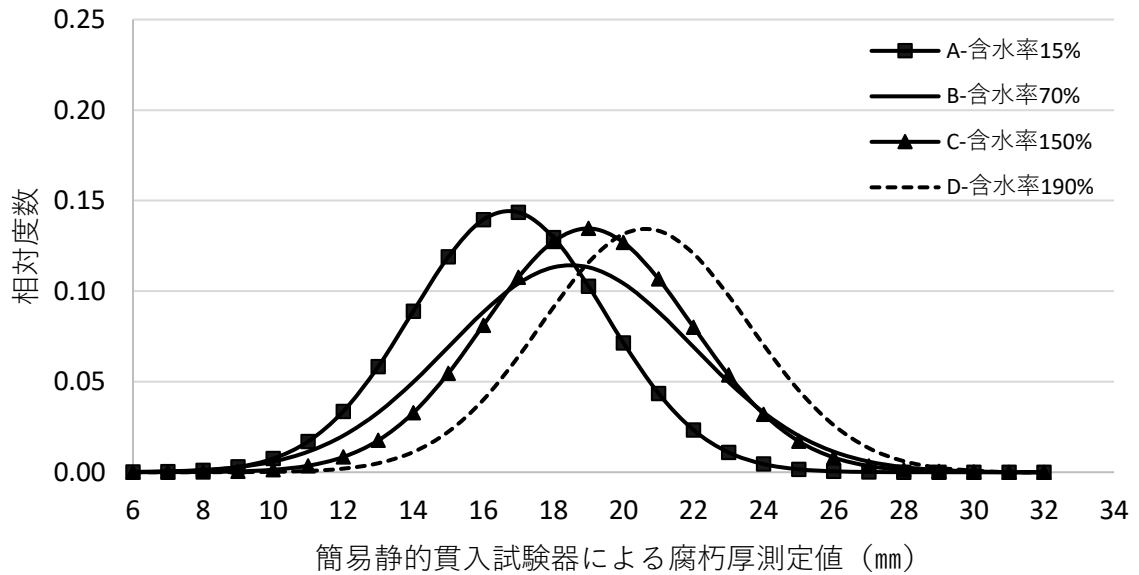


図-69 含水率と腐蝕厚測定値の確率密度曲線（ヒノキ供試体 20）

図-70～73 に各供試体の含水率と腐朽厚測定値（各供試体 50 点の測定値の平均値）の関係を示す。含水率が上昇するに伴い、同じ供試体（丸太）において腐朽厚測定値が大きくなる傾向が認められた。簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値は含水率約 15%の供試体における測定値が最小値であった。

図-70～73 に示したように、より高含水率の状態において、供試体に対する腐朽厚測定値の中では比較的の高い値が出現する確率高くなることを確認できる。これも含水率が上昇すると木材に対する腐朽厚測定値が大きくなる傾向があることを示した。既往研究でも、含水率の増加とともにピンの打ち込み深さが増加する結果が得られている（山田ら、2016、山田ら、2017、野田、2018、飯島、1999、増田、2007）。これらの研究における分析と同様に、含水率の増加によるピンの貫入深の増加の原因としては主に、木材に繊維内の自由水の潤滑作用による摩擦係数の減少が考えられる。

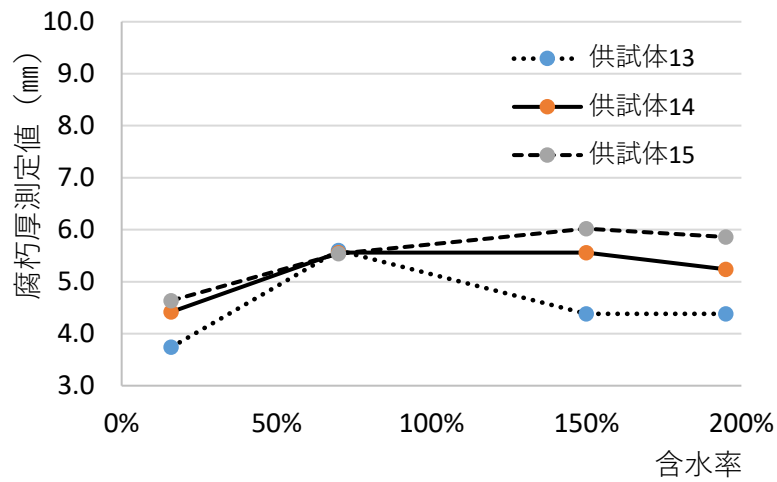


図-70 供試体 13～15 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）

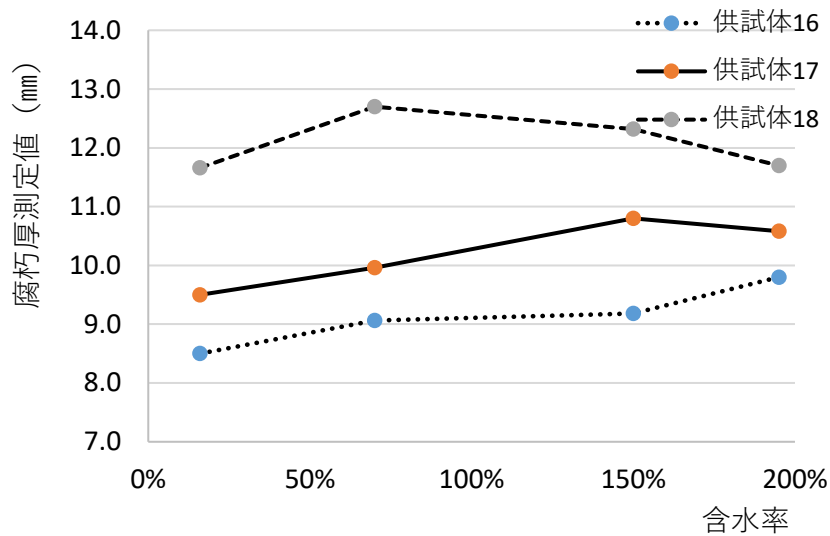


図-71 供試体 16～18 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）

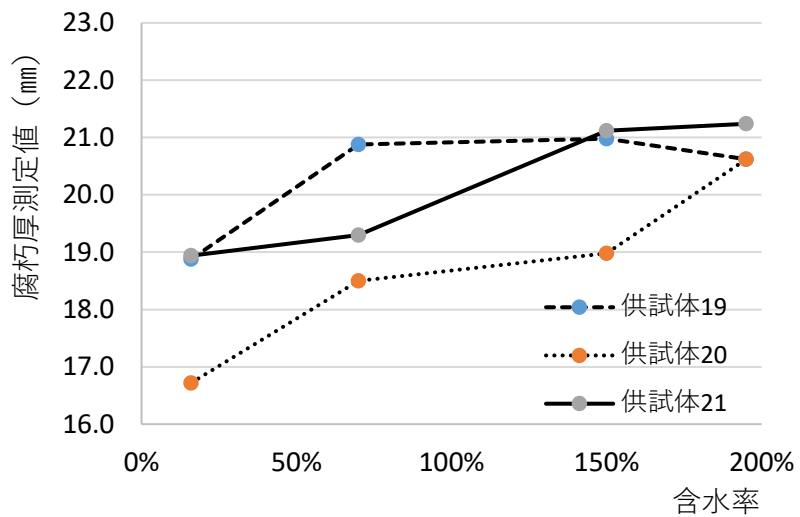


図-72 供試体 19～21 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）

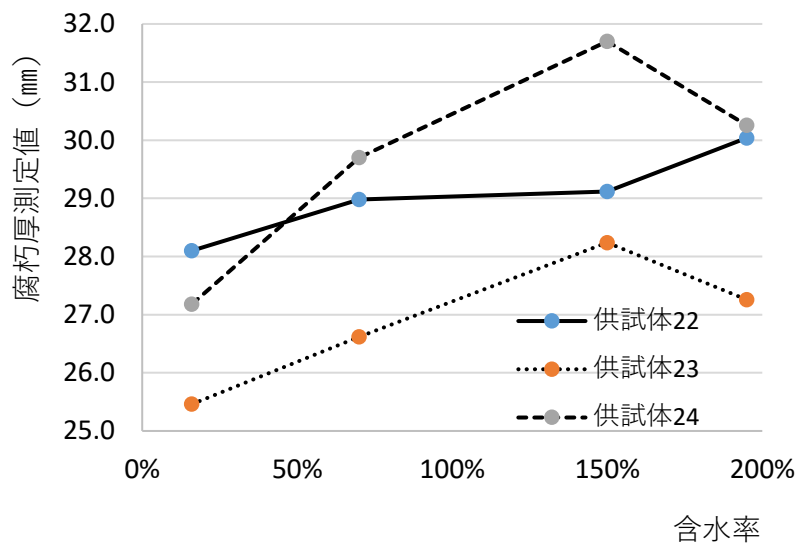


図-73 供試体 22～24 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）

III-3-2-2 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果

図-74 に供試体 13～24 からの切断により得た A、B、C、D のレジストグラフによる腐朽厚の測定値（平均値）及び含水率の変化による腐朽厚測定値の差を示す。図-75～78 に供試体 13～24 の A、B、C、D におけるレジストグラフによる腐朽厚測定値（A、B、C、D の各供試体において 3 点測定した値の平均値）と含水率の関係を示す。

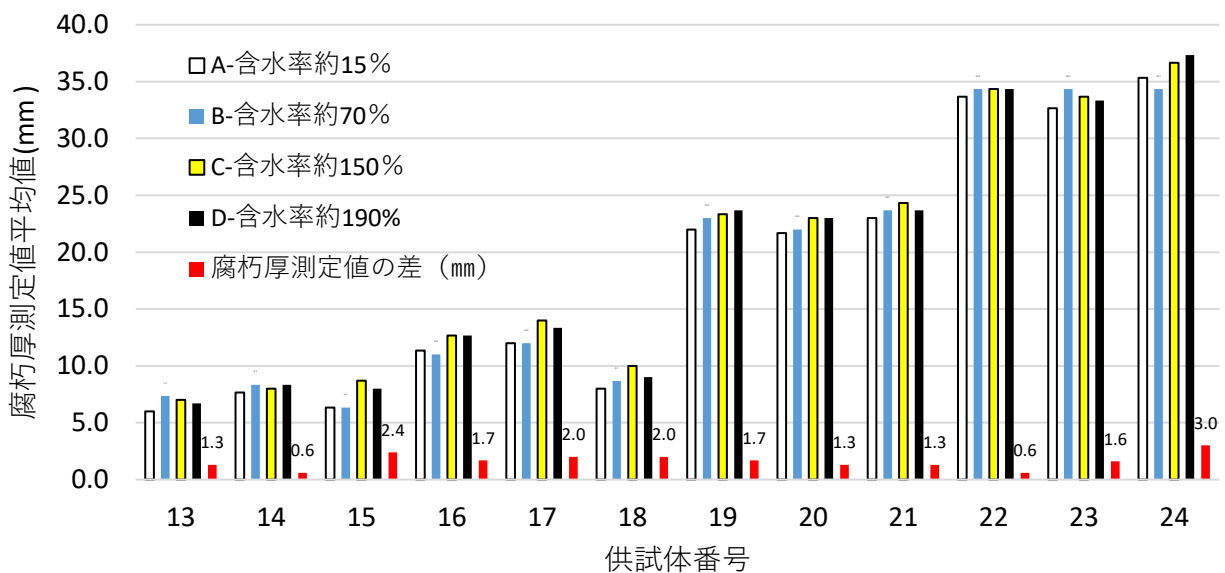


図-74 レジストグラフによる腐朽厚測定値の平均値と A、B、C、D 間の差（ヒノキ供試体）

図-75～78 よりレジストグラフによる腐朽厚測定値では、含水率が約 15%～190%において、変動幅は約 3 mmであることがわかる。このことからスギ材の供試体におけるレジストグラフによる腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べて、1 mm程増加したことがわかる。また、ヒノキ材の供試体における簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べて、1 mm小さいことが分かった。

前述と同じく、ピンの貫入による木材の腐朽厚測定方法として、含水率の増加に伴い貫入深が増加することの原因は自由水の潤滑作用が原因であることが分かっている（山田ら、2016、山田ら、2017、野田、2018、飯島、1999、増田、2007）。レジストグラフの貫入ピンは先端が軸より幅が大きく、回転しながら木材に貫入する過程で先端だけが繊維の抵抗を受けることになる。その軸が摩擦をほとんど受けないので、自由水による摩擦係数の減少が非常に限定的であり、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に比べて、含水率の影響を受けにくかったと考えられる。

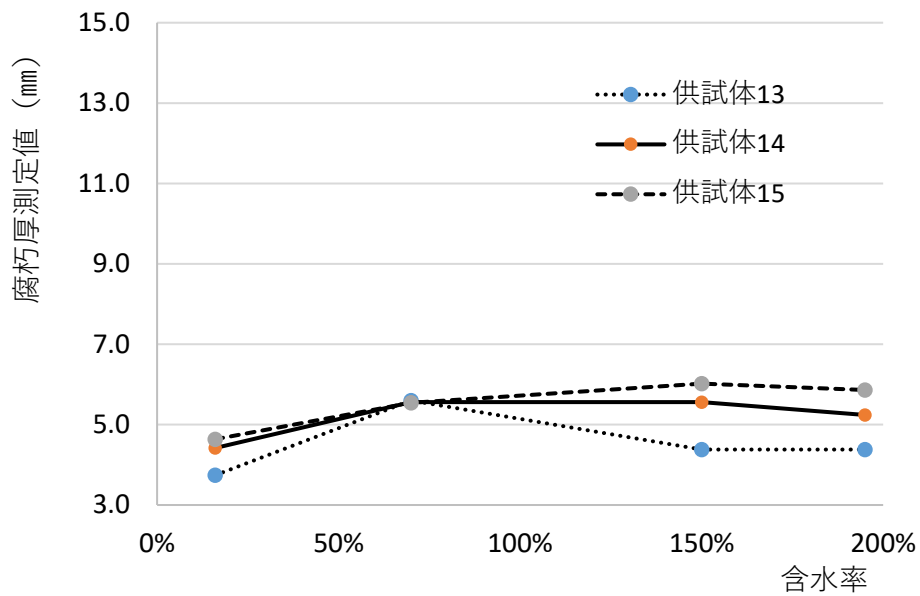


図-75 供試体 13～15 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果 (ヒノキ材)

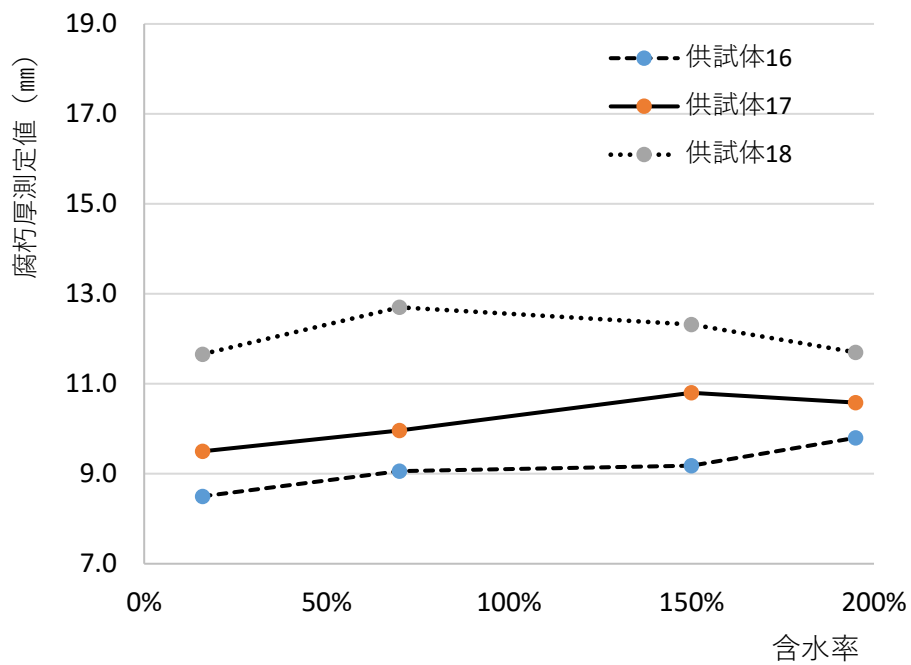


図-76 供試体 16～18 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果 (ヒノキ材)

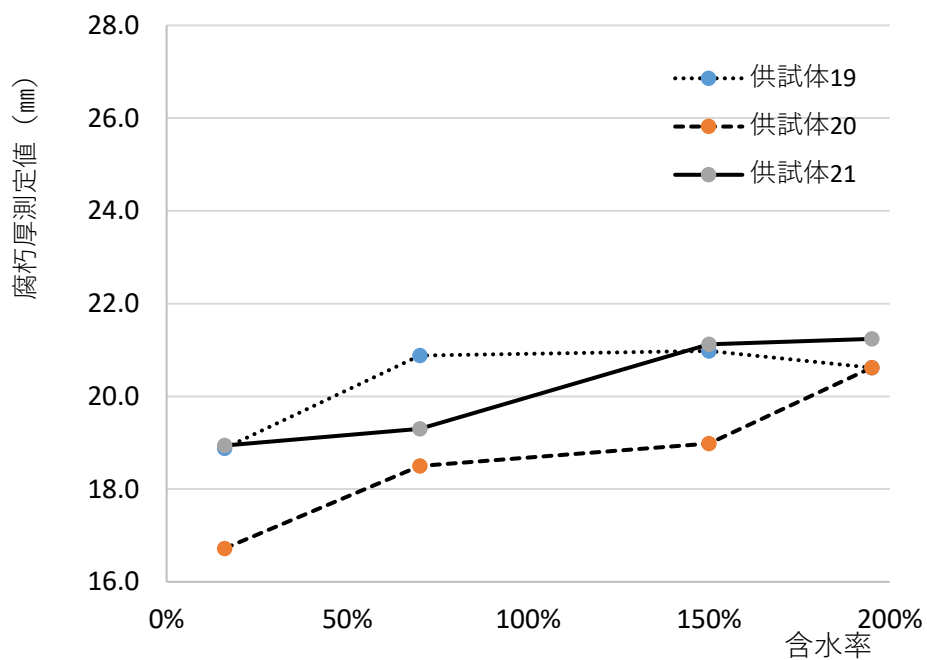


図-77 供試体 19～21 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果 (ヒノキ材)

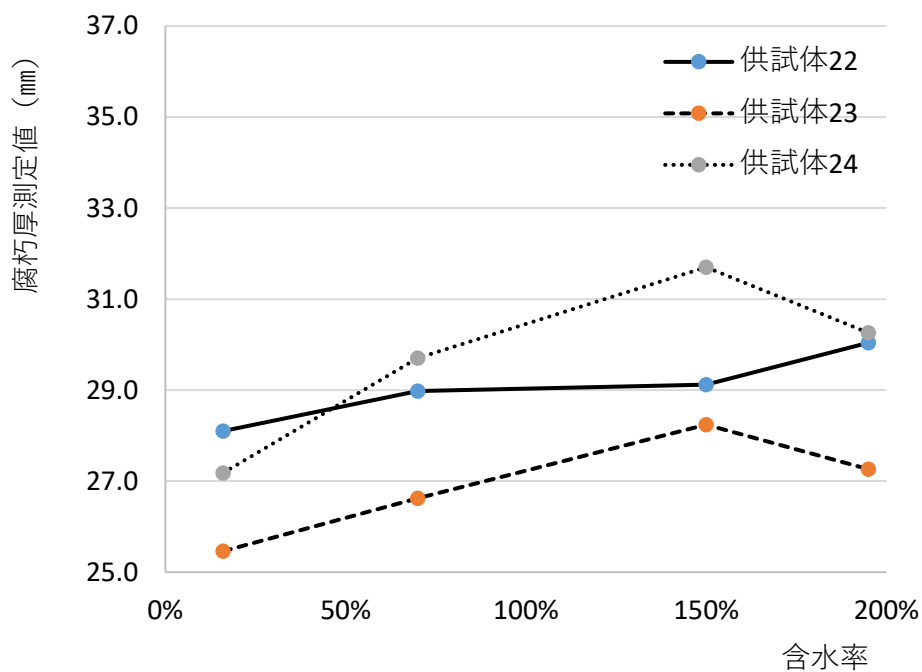


図-78 供試体 22～24 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果 (ヒノキ材)

III-3-2-3 レジストグラフによる腐朽厚測定の結果との比較

図-79 に簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値とレジストグラフによる腐朽厚測定値の関係を含水率毎に示す。腐朽厚が増加すると簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値とレジストグラフによる腐朽厚測定値の差が大きくなる傾向が認められるが、全体としては、両者はほぼ同じ腐朽厚を示している。また、両者の腐朽厚測定値の含水率による違いは比較的小さい。

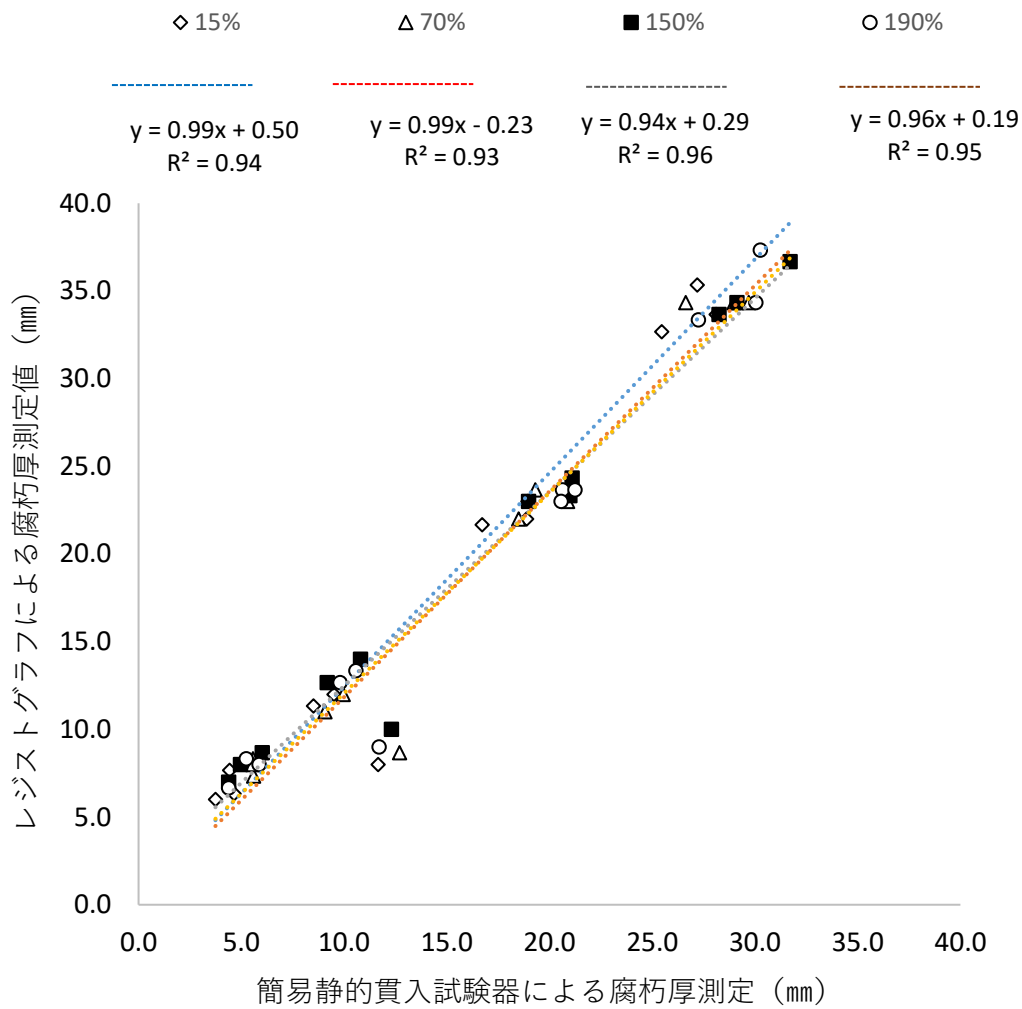


図-79 簡易静的貫入試験器とレジストグラフによる腐朽厚測定値の比較

III-4 まとめ

III-4-1 スギ材の供試体における試験

ここでは、12本の腐朽厚が異なるスギ材の供試体を用いて、含水率を約15%、約70%、約150%、約190%に変化させて、簡易静的貫入試験器を用いて鋼製楔型ピンを人力により100Nの荷重でスギ材に押し込み、その時のピンの貫入深を測定して腐朽厚測定値とした。腐朽厚測定値に対する含水率の影響を調べ、定量的に評価した。その結果、全体的には含水率が約15%と低い場合に腐朽厚測定値が最小値を示し、含水率が150%～190%に増加すると腐朽厚の測定値も増加する傾向が認められた。また、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定において、腐朽厚測定値に対する含水率の影響は含水率が約15%から約190%に変化しても3mm未満と比較的小さいことが分かった。ただし、簡易静的貫入試験器による腐朽厚値へ含水率による影響は腐朽厚が約30mmの供試体において最大3mmであったといえる。

また、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値はレジストグラフによる腐朽厚測定値とほぼ同じ値を示すことが分かった。レジストグラフによる腐朽厚測定値に対する含水率の影響は簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べてやや小さく、レジストグラフによる腐朽厚測定値は含水率による影響を受けにくいと考えられる。

III-4-2 ヒノキ材の供試体における試験

ここでは、12本の腐朽厚が異なるスギ材の供試体を用いて、含水率を約15%、約70%、約150%、約190%に変化させて、簡易静的貫入試験器を用いて鋼製楔型ピンを人力により100Nの荷重でスギ材に押し込み、その時のピンの貫入深を測定して腐朽厚測定値とした。

腐朽厚測定値に対する含水率の影響を調べ、定量的に評価した。その結果、全体的には含水率が約 15%と低い場合に腐朽厚測定値が最小値を示し、含水率が 150%~190%に増加すると腐朽厚の測定値も増加する傾向が認められた。ただし、簡易静的貫入試験器による腐朽厚値へ含水率による影響は腐朽厚が約 30 mmの供試体において最大 4 mmであったといえる。

また、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値はレジストグラフによる腐朽厚測定値とほぼ同じ値を示すことが分かった。レジストグラフによる腐朽厚測定値に対する含水率の影響は簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べてやや小さく、レジストグラフによる腐朽厚測定値は含水率による影響を受けにくいと考えられる。

第 IV 章 簡易静的貫入試験器を用いた林内に残置された間伐材の腐朽厚実態調査

IV - 1 はじめに

本研究の成果として簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）を使用して野外において腐朽厚測定を行い、その結果を分析して、既往研究と比較することが本研究の結果を検証することにつながる。そのため、本章では野外において簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定を行い、残置された間伐材の腐朽速度を分析することにした。

森林の健全な育成のため、及び森林の公益的機能の維持向上のために人工林においては定期的に間伐を行っている。間伐により発生した木材の多くは搬出されて利用されるが、一方で利用価値の低い部分は林内に残置されている。これらの残置木材の腐朽は森林の生態系や森林内の作業にとって大きな影響を与える。残置木材の腐朽に係わる経年変化を知ることは、間伐作業の合理化や森林の生態系の理解のために重要である。本研究では、林内に残置されている間伐材（スギ）の腐朽厚の経年変化の実態を調査し、残置木材の腐朽速度を推定する手法を提示することを目的とした。

IV - 2 調査地及び調査対象間伐材

栃木県佐野市に位置する東京農工大学附属唐沢山演習林（経緯度）内（標高 90～200m）に残置されているスギの間伐材について、現地において腐朽厚を測定した。なお、唐沢山演習林における平均年降水量は 1,377mm、年平均気温は 13.8℃である。

IV - 3 試験方法

唐沢山演習林において、間伐から約 1.5、4.3、7、9 年経過したスギの残置木材(直径 10～20 cm)を各経過年毎に約 10 本ずつ無作為(同一林相内のある地点の周辺にある 10 本)に抽出し、現地にて直接目視、撮影し、測定機械(レジストグラフ・簡易静的貫入試験器)を用いて腐朽厚を測定した。現地試験は 2020 年 3 月 23 日に行った。なお、腐朽厚の測定に際しては、基本的に樹皮の位置を確認し、樹皮を剥いでから腐朽厚を測定した。各供試体について、レジストグラフでは 1 本当たり 1 点測定した上、切断し断面状況からの直接目視等による腐朽厚判定し(図-80)、簡易静的貫入試験器では 1 本当たり約 10 点以上の腐朽厚を測定した。さらに試験木材について、長さ約 10cm の供試体を採取して大学の実験室に運んだ。これらの供試体について、実験室において生材での質量・体積、全乾質量を測定して、生材の含水率、湿潤密度、全乾密度を算定した。また、供試体の直径、年輪を計測した。なお、間伐から約 1.5、4.3、7、9 年経過した供試体の具体的な伐採実施時期はそれぞれ 2018.10～翌 01 月、2015.11 月、2013.01～02 月 2011.6～10 月であった。

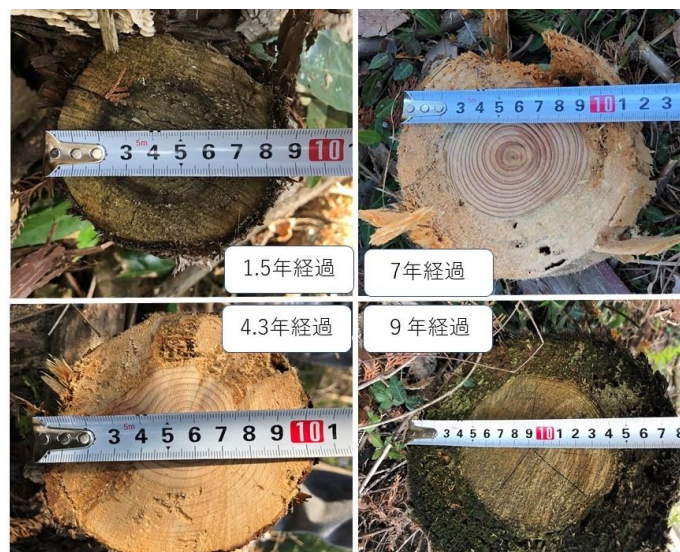


図-80 経過年数ごとの断面腐朽状況

IV - 4 試験結果

図-81 に示したように、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定において、伐採後 1～2 年間の間は腐朽速度が遅く約 1.5 年で 2 mm未満であった。4 年経過した時は腐朽厚が約 14～16 mm程度で、約 9 年経過した時点で腐朽厚が 35 mm前後であった。伐採直後 2 年以内は腐朽速度が遅く、その後の腐朽速度は約年 3～4 mm程度で腐朽が進行したと言える。図-82 から、スギの間伐材は伐採後 1 年前後までは密度が平均値よりも高く、経過年数が約 9 年の場合は腐朽進行に伴い湿潤密度・全乾密度が半減することが分かった。なお、経過年数が 1.5、4.3、7、9 年である間伐材の含水率はそれぞれ 34%、27%、22.6%、20.6%と経過年数が増加すると含水率は低下した。図-83 から、伐採後 1.5～4.3 年の期間中は腐朽速度が速まる傾向にあり、そこから 7 年目までは少し遅くなり、さらに 9 年になると再び速まる傾向が見られた。図-84 から、伐採後腐朽厚が増加すると湿潤密度、全乾密度は低下することがわかる。

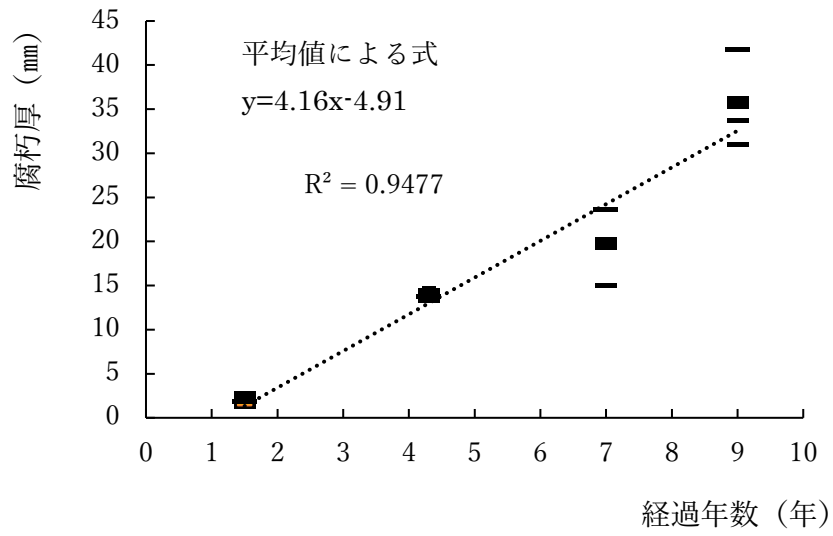


図-81 経過年数と腐朽厚の関係

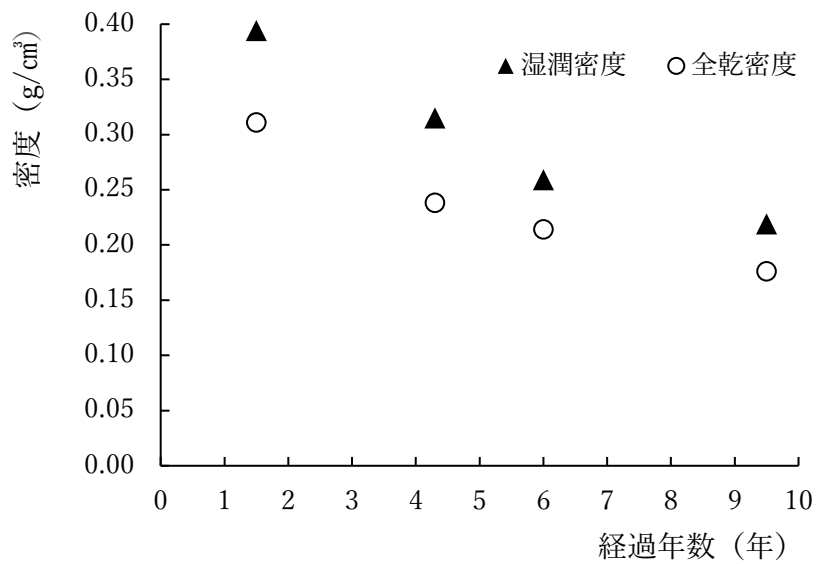


図-82 経過年数と湿潤密度・全乾密度の関係

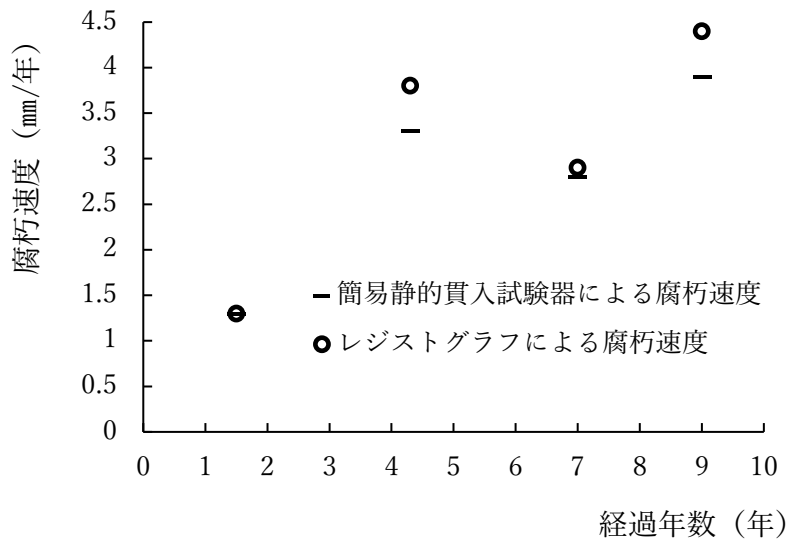


図 - 83 経過年数と腐蝕速度の関係

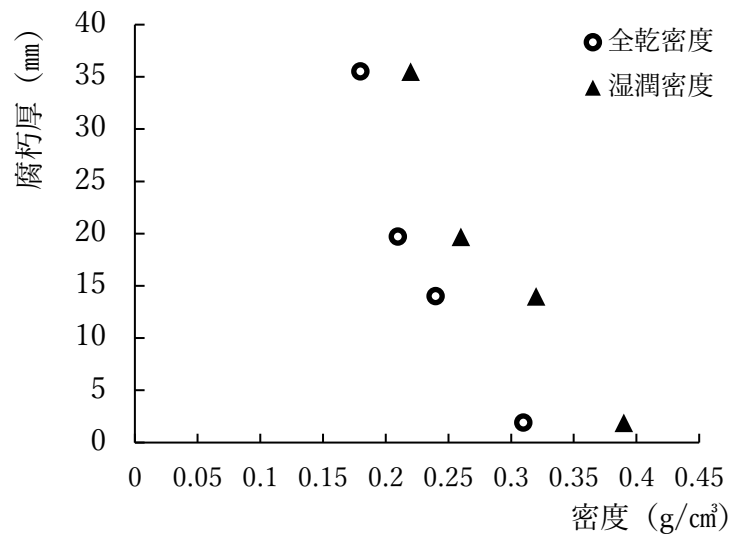


図 - 84 湿潤密度・全乾密度と腐蝕厚の関係

IV - 5 まとめ

林内に残置されたスギの間伐材は伐採直後にはしっかりした樹皮に覆われ、しばらく高い含水率と密度を持ち、腐朽の進行が比較的遅いことが考えられる。その後、経過年数が増加するとともに腐朽厚が増加し、全乾密度は低下した。腐朽厚を経過年数で除した腐朽速度は、9年間の平均では約4mmであったが、この値は、木製治山治水構造物等での腐朽速度である0.6～5mm、多くは1～2mmである(Dang et al., 2008 : 木製治山構造物技術指針検討会、2016)のに比べて比較的大きいことが分かった。

IV - 6 終わりに

残置木材の腐朽速度は残置された林内の環境条件（降水量、気温、湿度、日射等）や樹種、樹齢等により異なると考えられるので、多数の地点で同様の調査を行い、環境条件等と腐朽速度の関係をさらに詳細に調査して行く必要がある。

第V章 まとめ

V-1 各章のまとめ

第I章では、日本の森林の現状、木材利用における状況を述べ、木材の腐朽厚を測定する新しい技術を必要とされていることを論じた。

国土面積の約7割(66%)を占める森林は過去40年間で森林蓄積が2.7倍以上に増えた。日本の森林面積の4割が人工林で、その内半数以上が一般的な主伐期である50年生を超え、本格的な利用期を迎えている。一方、最近日本の木材自給率は40%程に増加してきているが、戦後造林された人工林を中心に本格的な利用期を迎え、どのようにしてさらなる利用拡大を図っていくかが問われている。国等の政策の後押しにより、様々な工夫がなされ、木製治山治水構造物が増えた事情を述べた。一方で、木製治山治水構造物を適切に維持管理するために、部材の腐朽厚の測定が必要であることを述べた。

現在用いられている腐朽厚・腐朽度測定機器についてレビューを行い、山地や溪流に設置される木製治山治水構造物の腐朽厚・腐朽度を測定する場合には、雨天や水中でも使用可能であるとともに軽量かつ安価である腐朽厚測定機器を開発する必要があることを示した。このことから、本研究の目的は野外に設置されている木製治山治水構造物の腐朽厚を現場で簡便かつ精度よく測定可能な機器を開発することとした。

第II用では、以下のような結論を得られた。

電動静的貫入試験機に各鋼製貫入ピンを取り付けた試験においては、比較的小さい貫入力で測定ができ、相対誤差、決定係数、座屈割合ともに良い値を示したのは、楔形の軸が3mmの鋼製貫入ピンである。

簡易静的貫入試験器に各鋼製貫入ピンを取り付けた試験においても、比較的小さい貫入力で測定ができ、相対誤差、決定係数、座屈割合ともに最も良い値を示したのは、電動

静的貫入試験機を用いた試験と同様に楔形の軸が 3 mm の鋼製貫入ピンである。

これまでの検討を総合すると、試験を行った 7 種類の鋼製貫入ピンの中では、静的貫入試験による腐朽厚測定に最も適した貫入ピンの形状は楔 3 mm であると考えられる。つまり、本研究の目的である簡易で雨天時や水中でも利用可能な測定装置とは簡易静的貫入試験器に先端が楔形で軸の直径が 3 mm の鋼製貫入ピンを取り付けた腐朽厚測定装置となる。

簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）を用いて木材の腐朽厚測定する際の精度はレジストグラフに比較して高い相関性を示した。そのため、この研究結果は木製治山治水構造物の維持管理に必要となる多数の箇所における精度の高いデータを迅速かつ簡便で取得できる得ことを可能とした。簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）を用いて木製治山治水構造物の全体の腐朽状況を把握するには十分な精度を有しているといえる。

第Ⅲ章では、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定において、木材（スギ材・ヒノキ材）の含水率が腐朽厚の測定値に与える影響を評価した。

スギ材の供試体における試験では、全体的には含水率が約 15% と低い場合に腐朽厚測定値が最小値を示し、含水率が 150%～190% に増加すると腐朽厚の測定値も増加する傾向が認められた。また、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定において、腐朽厚測定値に対する含水率の影響は含水率が約 15% から約 190% に変化しても 3 mm 未満と比較的小さいことが分かった。ただし、簡易静的貫入試験器による腐朽厚値へ含水率による影響は腐朽厚が約 30 mm の供試体において最大 3 mm であったといえる。

また、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値はレジストグラフによる腐朽厚測定値とほぼ同じ値を示すことが分かった。レジストグラフによる腐朽厚測定値に対する含水率の影響は簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べてやや小さく、レジストグラフによる腐朽厚測定値は含水率による影響を受けにくいと考えられる。

ヒノキ材の供試体における試験では、全体的には含水率が約 15%と低い場合に腐朽厚測定値が最小値を示し、含水率が 150%~190%に増加すると腐朽厚の測定値も増加する傾向が認められた。ただし、簡易静的貫入試験器による腐朽厚値へ含水率による影響は腐朽厚が約 30 mmの供試体において最大 4 mmであったといえる。

また、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値はレジストグラフによる腐朽厚測定値とほぼ同じ値を示すことが分かった。レジストグラフによる腐朽厚測定値に対する含水率の影響は簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べてやや小さく、レジストグラフによる腐朽厚測定値は含水率による影響を受けにくいと考えられる。

また、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値はレジストグラフによる腐朽厚測定値とほぼ同じ値を示すことが分かった。レジストグラフによる腐朽厚測定値に対する含水率の影響は簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値に対する含水率の影響に比べてやや小さく、レジストグラフによる腐朽厚測定値は含水率による影響を受けにくいと考えられる。

第IV章では、簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定データより、林内に残置された間伐材の腐朽速度、進行状況などを分析できた。林内に残置されたスギの間伐材は伐採直後にはしっかりした樹皮に覆われ、しばらく高い含水率と密度を持ち、腐朽の進行が比較的遅いことが考えられる。その後、経過年数が増加するとともに腐朽厚が増加し、全乾密度は低下した。腐朽厚を経過年数で除した腐朽速度は、9年間の平均では約 4mmであったが、この値は、木製治山治水構造物等での腐朽速度である 0.6~5mm、多くは 1~2mm である (Dang et al., 2008 : 木製治山構造物技術指針検討会、2016) のに比べて比較的大きいことが分かった。

V - 2 総括

V - 2 - 1. 簡易静的貫入試験器に最適な貫入ピンおよび精度について

本研究では、簡易静的貫入試験器にどのような鋼製貫入ピンをどれぐらいの力で木材に貫入させると、その貫入深から木材の腐朽厚を精度よく測定できるかを検討した。そのため、電動静的貫入試験機による貫入試験を実施し、貫入力と貫入深の関係を調べて、腐朽厚測定に最適な貫入力と貫入ピンの形状を検討した。その結果、簡易静的貫入試験器には、先端形状が楔形で軸直径が3 mmの鋼製貫入ピンを装着して100Nの荷重で貫入することにより、最も精度よく腐朽厚を測定できることをわかった。

V - 2 - 2. 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定における含水率の影響について

簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定において、木材（スギ材・ヒノキ材）の含水率が腐朽厚の測定値に与える影響を検討した。その結果、スギ材において含水率が上昇すると腐朽厚測定値が大きくなる傾向があることが分かった。しかしながら、腐朽厚が約30 mmの材において、含水率を約15%～190%に変化させた場合、腐朽厚測定値の変動幅は3 mm未満であった。ヒノキ材でも、含水率が上昇すると腐朽厚測定値が大きくなる傾向があり、腐朽厚が約30 mmの材において、含水率を約15%～190%に変化させた場合、腐朽厚測定値の変動幅は4 mm未満であった。このことから、簡易静的貫入試験器を用いて木材の腐朽厚を測定する際には、高含水率の状態にある材における腐朽厚測定値は低含水率に比べてやや大きくなることに注意すべきであることが分かった。ただし、簡易静的貫入試験器（楔3 mm）を用いて木製治山治水構造物の腐朽厚を調べる場合には、含水率の影響による3～4 mm程度の変動は全体の腐朽状況を把握するには大きな問題とはならないと考えられる。一つ目の理由としては、含水率の影響の評価として、腐朽厚が約30 mmの材に対する

腐朽厚測定値の 3～4 mm 程度の変動は腐朽厚の約 1 割であり、木製治山治水構造物の全体の腐朽状況を迅速かつ多数の点で取得できるというメリットと合わせて考えると一般的な測定機器として許される程度であると考えられる。二つ目の理由としては、木製治山治水構造物に使用される木材の直径が約 10～20 cm と比較的大きく、腐朽厚測定値の約 3～4 mm の誤差が部材の強度指定に与える影響はそれ程大きくないと考えられるためである。

V - 2 - 3. 野外における調査

簡易静的貫入試験器を野外における木材の腐朽厚測定値に実際に用いて見た。林内に残置された間伐材に対して簡易静的貫入試験器およびレジストグラフによる測定を行い、両者から得たデータを分析し、間伐材の腐朽の進行状況を計測した。同時に、その結果を既往研究と比較した。野外における測定において簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定はレジストグラフによる測定値と高い相関があり、野外における木材の腐朽厚測定に活用できることが分かった。

V - 2 - 4. 総括

本研究では野外に設置されている木製治山治水構造物の腐朽厚を現場で簡便かつ精度よく測定可能な機器として簡易静的貫入試験器を製作し、その測定手法と精度を各種の試験により検討した。その結果、簡易静的貫入試験器には楔 3 mm の鋼製貫入ピンが適しておりこれを 100N の荷重で木材に押し込むことでレジストグラフとほぼ同程度の精度で腐朽厚を測定できることを明らかにした。簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）による腐朽厚測定の利点は、簡便かつ迅速に木材の腐朽厚を測定できることにある。この機器による腐朽厚測定値における含水率の変化による影響はスギ材で最大約 3 mm、ヒノキ材で最大約 4 mm であり、また、レジストグラフによる腐朽厚測定値の影響とほぼ同程度であり、主な測定

対象である木製治山治水構造物に使用している直径 10～20 cmの丸太の腐朽による強度変化を評価する上では実用上大きな問題とならない誤差と考えられる。

主本研究により、木製治山治水構造物の維持管理に必要な腐朽厚測定のための実用的な簡易静的貫入試験器の測定手法を明らかにすることができた。これにより、既に多数存在する木製治山治水構造物の点検及び健全度評価が迅速かつ簡便に、また精度良くできるようになることにより、木製治山治水構造物の適切な維持管理の実現に寄与することになると考えられる。さらに、今回開発した簡易静的貫入試験器は木製治山治水構造物以外の木製構造物の腐朽厚の測定や腐朽した樹木の腐朽厚の測定にも利用することが可能と考えられる。このように簡易静的貫入試験器は一般の木製治山治水構造物の点検・維持管理や樹木の健康診断（腐朽厚測定）に適用できると考えられる。今後はこのように、木製治山治水構造物以外の活用についても検討していく必要があると考えられる。

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方々から助言やはげまし、援助をいただきました。この場を借りて、関係各位に篤く御礼申し上げます。

東京農工大学名誉教授石川芳治先生には終始丁寧なご指導をいただきました。また、学業、生活の面においても大変お世話になり、長年無数に助けてくださったことを心に刻み、今後より精進をし、恩返しをしたく存じます。

東京農工大学農学府自然環境保全学専攻白木克繁准教授には博士課程後半から、調査、執筆にあたり丁寧なご指導いただきました。東京農工大学森林保全学研究室五味高志教授、宇都宮大学執印康裕教授には論文審査に際し校閲をいただき、貴重なご助言やご指導をいただきました。篤く御礼申し上げます。

日本留学を支援していただきました桜美林大学の都馬・バイカル先生には、生活から学業あらゆる面で大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

東京農工大学農学研究科環境資源共生科学専攻の先生方の皆様には長い間大変お世話になりました。そして、東京農工大学学生生活課、教務課、農学研究科の事務室の方々には生活面から学業の面において様々な援助をいただきました。ここで、心より感謝いたします。また、同じ研究室において、ともに学業に励み、暖かく見守ってくださった先輩の方々に感謝申し上げます。

研究員の若原妙子先輩には、修士の時から博士卒業までの的確なアドバイスや貴重なご助言をいただきました。この場を借りて心から感謝申し上げます。

修士時から博士課程にかけて、一般財団法人高久国際奨学金、公益財団法人日揮・実吉奨学金、東京農工大学奨励奨学金をいただき、経済面でより安定し、学業にさらなる時間を集中させることができました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

また、日本語の学習に置かれまして、丁寧な指導をいただきました新潟産業大学の先生

方には篤く御礼申し上げます。東京外国語大学名誉教授二木博史先生のもとで研究生として入学し、ご指導をいただきました。また、木材保存協会の山本幸一先生には、論文発表に置かれましてご支援をいただきました。この場を借りて篤く御礼申し上げます。

ここまでの長年の留學生活において、社会全体からいただきました恩恵、様々なご縁すべてに感謝を申し上げます。

見守っていただきました家族、友人の長年のご援助や励ましに感謝申し上げます。

引用文献

- 明石浩和・森拓郎・田原教士(2016)：木製治山ダム部材の簡便な劣化診断手法，第66回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM
- 秋田寛己・北原曜・小野裕（2006）：ヒバ材を用いた木製治山堰堤の腐朽と摩耗，中部森林研究，Vol. 55, p. 169-172
- 秋田寛己・北原曜・小野裕（2011）：長野県内における木製治山堰堤の腐朽の進行過程と経年変化，日林誌，Vol. 93, p. 253-261
- Akita, H., Kitahara, H., Ono, H. (2014): Effect of climate and structure on the progression of wooden check dam decay, Journal of Forest Research, Vol. 19, No. 5, p. 450-460
- 秋田寛己（2015）：木製治山堰堤の全国施工実績と経過年数分布，日林誌，Vol. 97, p. 123-126
- Dang, Q. D., Ishikawa, Y., Shiraki, K. (2008): Influence of design high water level, warm index, and maximum snow depth on deterioration rate of wooden crib dams, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 61, No. 4, p. 39-45
- 藤平眞紀子・中村嘉明・磯田憲夫・疋田洋子（1997）：枠組壁工法構造用木材の耐朽性と曲げ強度性能の変化，木材学会誌，Vol. 43, No. 7, p. 589-594
- 飯島泰男（1999）：土木用木質構造物の耐用年数評価について，木材保存, Vol. 25, No. 5, p. 209-218
- 石川芳治・内藤洋司・落合博貴・上原勇（2003）：各種試験に基づく木製施設の耐久性，腐朽度お

よび曲げ強度評価法, 砂防学会誌, Vol. 56, No. 4, p. 21-31

石川芳治 (2010) : 砂防・治山分野における木材利用の課題と展望, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 6,
p. 52-58

石川芳治・田次慶久・前田恵史・金岩岳彦(2010) : 木製校倉式構造物 (防腐処理) の腐朽速度調
査, 土木学会, 木材利用研究論文報告集, No. 9, p. 36-40

国土交通省 (2014): 国土交通省インフラ長寿命化計画 (行動計画), p. 1-
14, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/03activity/03_01_03.html, 参照 2020-
03-08

増田勝則 : ストライカーピンの径を変化させた時のピロディンの貫入深さと材の破壊範囲, 奈良
県森林技術センター研究報告, 36, 27-36 (2007)

木製治山構造物技術指針検討会 (2016) : 木製治山構造物技術指針 (案) (耐久性を期待する木製
治山構造物の設計・施工・維持管理), [http://202.34.14.133/rinshi/documents/mokusisin-
ver1-1.pdf](http://202.34.14.133/rinshi/documents/mokusisin-ver1-1.pdf), 参照 2020-03-08

内藤洋司・真柄泰央・南谷将光・山内仁人・臼田寿生・和多田友宏・明石浩和・石川芳治(2015) :
木製治山ダムの維持管理手法 - 簡便で効果的な腐朽厚の測定 -, 平成 27 年度砂防学会研究発
表会概要集 A, p. 68-69

日本林道協会・木橋技術協会(2018) : 木橋定期点検要領 (案), p41

<https://shinrinkagaku.jp/PDF/PDF/mokkyou-tenken-Vol1-1801b.pdf>, 参照 2020-02-28

野田龍(2018)：荷重測定器を用いた腐朽劣化診断手法の基礎的実験，

木材保存, Vol. 44, No. 4, p. 226-234

野田龍・佐山達哉・佐藤利樹・佐々木貴信・後藤文彦(2017)：フォースゲージを用いた劣化診断

手法の開発，第33回日本木材保存協会年次大会，p. 22-23

農林水産省（2016）：新農林水産省木材利用推進計画 - 公共建築物等木材利用促進法に基づく計

画 - , 平成28年4月改定, p. 1,

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/koukyou/attach/pdf/index-46.pdf>, 参照 2020-03-08

小椋健二・中島裕貴・小熊勝・森拓郎・戸田正彦・東智則・森満範・野田康信（2015）：静的貫入

式劣化診断に関する研究-腐朽木材への鋼製ピン静的貫入試験, 第65回日本木材学会大会研究

発表要旨集, H18-10-1515

林野庁(2005)：森林土木木製構造物設計等指針及び森林土木木製構造物設計等指針の解説

等 , p. 1-8, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/sekou/gijutu/pdf/h28-moku-sisin-kaisetu.pdf>,

参照 2020-03-08

林野庁（2014）：林野庁インフラ長寿命化計画（行動計画）， p. 1-

14, https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/infra/keikaku/pdf/inhura_rin.pdf, 参照

2020-03-05

佐山達哉・野田龍（2017）：水分変動下におけるピン打ち込み抵抗特性, 第67回日本木材学会大会

研究発表要旨集 CD-ROM

正条直太(2018)：施工から15年を迎える階段式木工沈床，砂防学会誌，Vol. 70，No. 5，p. 39-43

山田昌郎，原忠，水谷羊介，三村佳織，沼田淳紀，森満範，吉田雅穂，末次大輔：ピロデインによる測定値と木材含水率の関係についての一斉試験，土木学会第71回年次学術講演会概要集CD-ROM，V-069，(2016)

山田昌郎・原忠・水谷羊介・三村佳織・沼田淳紀・吉田雅穂・森満範・末次大輔・野田龍・梅津啓史(2017)：木材の含水率がピロデイン試験値とドライバーの貫入深さに及ぼす影響，木材利用研究論文報告集16，p. 63-70

吉田幸・石川芳治・辻本吉寛・田次慶久(2015)：木製治山・治水構造物に用いた圧縮・加圧注入処理木材の劣化速度と凍結融解の影響，砂防学会誌，Vol. 68，No. 3，p. 11-20

図一覧

- 図 - 1 レジストグラフと貫入針
- 図 - 2 PROCEQ 製ピロディン
- 図 - 3 本論文の構成
- 図 - 4 レジストグラフで測定した穿孔抵抗による腐朽部の判定
- 図 - 5 電動静的貫入試験機の設計図
- 図 - 6 電動静的貫入試験機の写真
- 図 - 7 電動静的貫入試験機及び貫入深と貫入力を同時に計測・収録する装置
- 図 - 8 簡易静的貫入試験器上からの写真
- 図 - 9 簡易静的貫入試験器側面からの写真
- 図 - 10 試作した 7 種の鋼製貫入ピン
- 図 - 11 鋼製貫入ピン規格図
- 図 - 12 供試体例
- 図 - 13 電動静的貫入試験機による静的貫入試験の説明図
- 図 - 14 電動静的貫入試験機による静的貫入試験の全体の流れ貫入力の説明図
- 図 - 15 電動静的貫入試験機による腐朽厚測定値の求め方
- 図 - 16 各腐朽厚測定機器による測定精度比較検討内容図解
- 図 - 17 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定（供試体 1 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm）
- 図 - 18 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定（供試体 2 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm）
- 図 - 19 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定（供試体 3 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm）
- 図 - 20 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定（供試体 4 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm）
- 図 - 21 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定（供試体 5 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm）
- 図 - 22 電動静的試験機による貫入深と貫入力の測定（供試体 6 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm）

- 図 - 23 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 7 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 24 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 8 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 25 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 9 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 26 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 10 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 27 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 11 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 28 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 12 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 29 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 13 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 30 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 14 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 31 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 15 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 32 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 16 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 33 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 17 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 34 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 18 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 35 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 19 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 36 電動静的試験機による貫入深と貫入力との測定 (供試体 20 番、鋼製貫入ピンは楔 3 mm)
- 図 - 37 楔 3 mm の鋼製貫入ピンにおける電動静的貫入試験機による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との関係
- 図 - 38 38 レジストグラフによる腐朽厚測定値と簡易静的貫入試験器 (楔 3 mm) による腐朽厚測定値の関係 (3 人による測定)
- 図 - 39 ピロディンによる貫入深測定値とレジストグラフによる腐朽厚測定値との関係
- 図 - 40 ピロディンによる貫入深測定値と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値との関係
- 図 - 41 貝沢験地及び供試体採取した範囲
- 図 - 42 スギ材供試体 1~3 を四等分して得た供試体 A, B, C, D
- 図 - 43 スギ供試体 4~6 を四等分して得た供試体 A, B, C, D
- 図 - 44 スギ供試体 7~9 を四等分して得た供試体 A, B, C, D

- 図 - 45 スギ供試体 10～12 を四等分して得た供試体 A, B, C, D
- 図 - 46 ヒノキ供試体 13～15 を四等分して得た供試体 A, B, C, D
- 図 - 47 ヒノキ供試体 16～18 を四等分して得た供試体 A, B, C, D
- 図 - 48 ヒノキ供試体 19～21 を四等分して得た供試体 A, B, C, D
- 図 - 49 ヒノキ供試体 22～24 を四等分して得た供試体 A, B, C, D
- 図 - 50 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の平均値と A, B, C, D 間の差 (スギ)
- 図 - 51 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の相対度数 (スギ材供試体 7)
- 図 - 52 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の確率密度曲線 (スギ材供試体 7)
- 図 - 53 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の相対度数 (スギ材供試体 9)
- 図 - 54 含水率と簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の確率密度曲線 (スギ材供試体 9)
- 図 - 55 供試体 1～3 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 56 供試体 4～6 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 57 供試体 7～9 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 58 供試体 10～12 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 59 レジストグラフによる腐朽厚測定値の平均値と A, B, C, D 間の差
- 図 - 60 供試体 1～3 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 61 供試体 4～6 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 62 供試体 7～9 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 63 供試体 10～12 のレジストグラフによる腐朽厚測定値 (スギ材)
- 図 - 64 簡易静的貫入試験器とレジストグラフによる腐朽厚測定値の比較
- 図 - 65 簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定値の平均値と A, B, C, D 間の差 (ヒノキ)
- 図 - 66 含水率と腐朽厚測定値の相対度数 (ヒノキ供試体 19)
- 図 - 67 含水率と腐朽厚測定値の確率密度曲線 (ヒノキ供試体 19)
- 図 - 68 含水率と腐朽厚測定値の相対度数 (ヒノキ供試体 20)

- 図 - 69 含水率と腐朽厚測定値の確率密度曲線（ヒノキ供試体 20）
- 図 - 70 供試体 13～15 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）
- 図 - 71 供試体 16～18 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）
- 図 - 72 供試体 19～21 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）
- 図 - 73 供試体 22～24 の簡易静的貫入試験器による腐朽厚測定結果（ヒノキ供試体）
- 図 - 74 レジストグラフによる腐朽厚測定値の平均値と A, B, C, D 間の差（ヒノキ供試体）
- 図 - 75 供試体 13～15 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果（ヒノキ材）
- 図 - 76 供試体 16～18 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果（ヒノキ材）
- 図 - 77 供試体 19～21 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果（ヒノキ材）
- 図 - 78 供試体 22～24 のレジストグラフによる腐朽厚測定結果（ヒノキ材）
- 図 - 79 簡易静的貫入試験器とレジストグラフによる腐朽厚測定値の比較
- 図 - 80 経過年数と腐朽厚の関係
- 図 - 81 経過年数と湿潤密度・全乾密度の関係
- 図 - 82 経過年数と湿潤密度・全乾密度の関係
- 図 - 83 経過年数と腐朽速度の関係
- 図 - 84 湿潤密度・全乾密度と腐朽厚の関係

表一覧

表 - 1 供試体のレジストグラフによる腐朽厚測定値及び含水率

表 - 2 電動静的貫入試験機を用いた場合の鋼製貫入ピン楔 3 mmにおけるレジストグラフ腐朽厚に対応する貫入力（腐朽境界貫入力）

表 - 3 電動貫入試験機を用いた場合の各鋼製貫入ピンにおける供試体 1～20 のレジストグラフ腐朽厚に対応する貫入力（腐朽境界貫入力）の平均値

表 - 4 電動静的貫入試験機による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との 3 回の試験の相対誤差（楔 3 mm の鋼製貫入ピンの場合）

表 - 5 電動静的貫入試験による腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との各鋼製貫入ピンの相対誤差、決定係数、貫入力、座屈回数・割合

表 - 6 簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）による腐朽厚測定値（3 人による測定）とレジストグラフによる腐朽厚測定値との相対誤差

表 - 7 簡易静的貫入試験器（楔 3 mm）腐朽厚測定値（測定別）とレジストグラフによる腐朽厚測定値との相対誤差と決定係数および座屈回数とその割合

表 - 8 3 人の測定者による簡易静的貫入試験器を用いた場合の腐朽厚とレジストグラフ腐朽厚との相対誤差と決定係数および座屈回数とその割合

表 - 9 ピロディンによる貫入深の測定値と簡易静的貫入試験器およびレジストグラフによる腐朽測定値のまとめ

表 - 10 スギ供試体（1～3）半径、長さ、全乾質量、全乾密度

表 - 11 スギ供試体（4～6）半径、長さ、全乾質量、全乾密度

表 - 12 スギ供試体（7～9）半径、長さ、全乾質量、全乾密度

表 - 13 スギ供試体（10～12）半径、長さ、全乾質量、全乾密度

表 - 14 ヒノキ供試体（13～15）半径、長さ、全乾質量、全乾密度

表 - 15 ヒノキ供試体 (16~18) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

表 - 16 ヒノキ供試体 (19~21) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度

表 - 17 ヒノキ供試体 (22~24) 半径、長さ、全乾質量、全乾密度