

令和 6 年 6 月 29 日現在

機関番号：92503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05698

研究課題名（和文）B材およびC材の高付加価値化を目的とした木杭打設による地盤災害軽減技術の開発

研究課題名（英文）Development of a geo-disaster reduction technique by using timber piles to add value to B and C grade logs

研究代表者

村田 拓海（Murata, Takumi）

飛鳥建設株式会社技術研究所・・・研究員

研究者番号：40829959

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、B材およびC材の地盤工学的な特性を解明したうえで、液状化対策や地盤補強などの地盤災害軽減技術への適用性を検証することである。本研究では、室内模型実験、現場実証実験、過去のデータ分析により、丸太打設による地盤の鉛直変位特性、節丸太および継ぎ丸太の鉛直支持力特性、丸太のテーパ率に影響を与える要因を明らかにした。さらに、これらの結果に基づいて、B材およびC材の地盤災害軽減技術への適用性を検証し、具体的な適用方法を示した。また、今後増加が想定される中大径のB材およびC材についても、海外事例調査に基づき地盤災害軽減技術への適用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、B材およびC材を地盤災害軽減技術に活用できることが明らかとなった。これにより、B材およびC材の新たな市場の開拓と、それに伴うこれら木材の価値向上が期待される。また、森林所有者に還元される利益が多くなるため、再造林とそれに伴う持続可能な森林経営の促進が見込まれる。さらに、地盤災害軽減技術として使用するB材およびC材は、生物劣化の心配がない地下水位以深の地中に打設されるため、これらの木材に固定された炭素は半永久的に地中に固定される。このように、本研究の成果により、持続可能な森林経営の促進と気候変動緩和への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate the geotechnical properties of B and C grade logs and to verify their applicability to geo-disaster reduction technique such as liquefaction countermeasures and ground reinforcement. In this study, vertical displacement characteristics of the ground due to log insertion into the ground, vertical bearing capacity characteristics of knotted and joined logs, and factors affecting the taper rate of logs were clarified by model experiments, field experiments, and data analysis. Furthermore, based on these results, the applicability of B and C grade logs to geo-disaster reduction technique was verified and specific application methods were shown. In addition, the applicability of B and C grade logs of medium and large diameter, which is expected to increase in the future, to geo-disaster reduction technique was verified based on an overseas case study.

研究分野：地盤工学

キーワード：丸太 B材 C材 液状化 地盤補強

# 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

近年、加速化する気候変動の影響で自然災害が激甚・頻発化している。このため、大気中のCO<sub>2</sub>回収・固定などの多面的な機能を持つ森林の重要性が増し、持続可能な森林経営がますます求められている。この中で、細り、節、曲がりのある原木は、B材またはC材に仕分けされ、一般的に価値の低い材料とされるのが現状である。このため、これらの価値向上が見込める新たな市場開拓と、それによる歩留まり向上が林業再生の一つの解決策となる。

新たな市場の一つである軟弱地盤は、地下水位が高く木材の燃焼や強度に与える影響を与える腐朽の心配がないため、木材との親和性が非常に高い。この軟弱地盤には、我が国の資産の約75%が集中するため、ここで発生する建物の沈下や地震時の液状化などの地盤災害は、我が国の抱える大きな問題の一つとなっている。

このような背景から、研究代表者らは、地盤災害軽減策として丸太を用いた液状化対策工法と地盤補強工法を開発・実用化してきた。ここでの丸太の必要性能は、液状化対策の場合は地盤中で体積を保持すること、地盤補強の場合は建物等による上載荷重を地盤深部に伝達させることであるため、高品質な丸太である必要がない。このため、この地盤災害軽減策にB材およびC材を適用できれば、これらの木材の価値向上が見込める。しかしながら、B材およびC材の地盤工学的な特性は明らかになっておらず、地盤災害軽減策への適用性について検証した研究はない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、B材およびC材を活用した地盤災害軽減技術を開発し、これらの木材の価値を向上させることである。そのためにはB材およびC材の地盤工学的な特性を解明したうえで、地盤災害軽減技術への適用性を検証する必要がある。

ここで、B材およびC材の特徴を液状化対策、地盤補強の視点で見ると、細りは、末口を下に向けて地盤に打設することでテーパ効果を得られ地盤の盛り上がり抑制が期待できる。一方で、突起のように飛び出た節は、丸太打設時に周囲の地盤を乱すことで鉛直支持力を低下させる懸念がある。曲がりについては、曲がり部だけを除きその他を縦に継ぐことで使用できると考えられるが、継ぎ部に生じる段差により十分な周面摩擦が発揮されない懸念がある。これらのB材およびC材の特徴を地盤工学的視点で整理し、定量的に明らかにする点が本研究の特徴である。

## 3. 研究の方法

本研究では、B材およびC材の特徴を要素に分け、それぞれの地盤工学的な特性を定量的に解明するために以下を実施する。

### (1) 丸太打設による地盤の鉛直変位特性

丸太はテーパ形状を有するため、地中への打設時に地盤を下方方向に押さえつけることで地盤の盛り上がりを抑制すると考えられる。丸太を用いた液状化対策工法の対策原理は密度増大であるため、施工に伴う地盤の盛り上がりの抑制は密度増大効果をより大きくし、液状化抑制効果を高める効果がある。

この特性を明らかにするために、まず模型実験を行う。剛土槽内に模型地盤(幅600mm×奥行600mm×層厚350mm)を作製後、そこに模型丸太(直径12mm×長さ300mm)を打設し、丸太打設前後の地盤の鉛直変位を計測する(図-1)。なお、地盤の鉛直変位には、施工方法が大きな影響を与えると考えられるため、模型丸太の打設は実際の施工方法を模倣する。

次に、実際の丸太を用いた液状化対策工事にて、模型実験と同様に丸太打設前後の地盤の鉛直変位量を計測する。

さらに、この両者を比較し模型実験の妥当性を検証したうえで、テーパを有する丸太打設による地盤の盛り上がり特性について検討する。

### (2) 節丸太および継ぎ丸太の鉛直支持力特性

節丸太および継ぎ丸太の鉛直支持力特性を明らかにするために、実地盤にこれらの丸太を打設し、押込み試験を実施する(図-2)。

試験は、秋田県の八郎潟干拓地内にある水平成層でほぼ

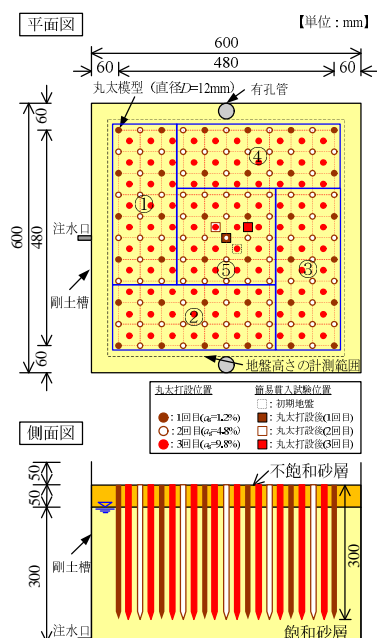


図-1 模型実験の概要

均一に近い軟弱粘性土地盤で実施する。地盤補強で用いる丸太は、生物劣化対策として丸太頭部を地下水位以下に設置することを想定しているため、押込み試験は丸太頭部が地中にある状態で行う。これらの押込み試験結果を比較し、節や継ぎが丸太の鉛直支持力に与える影響を明らかにする。なお、節の有無や継ぎ数の影響より顕著にするために、各ケースの丸太の全長と先端位置を揃える。さらに、今回の試験結果と、研究代表者らが過去に実施してきた一本物で節が少ない丸太に対して今回と同一条件で実施された押込み試験結果と比較し、B材およびC材の地盤補強への適用性を検討する。



(a) 丸太の節 (b) 継ぎの状況 (c) 押込み試験の概要

図-2 節丸太，継ぎ丸太の実験概要

### (3) 丸太のテーパーに影響を与える要因

液状化対策や地盤補強の設計に、丸太のテーパーを組み込むことができれば設計の合理化が可能になる。丸太のテーパーに影響を与える要因は明らかになっておらず、テーパーを推定する方法も現状ではない。このため、二変数幹材積式の基となった伐倒データを用い、丸太のテーパーに影響を与える要因を分析する。

使用するデータは、旧秋田営林局（秋田県，山形県），旧東京営林局（茨城県，千葉県，東京都，神奈川県，静岡県），旧高知営林局（香川県，徳島県，愛媛県，高知県）の管内において1960年頃も立木を伐倒して得られたスギ4,713個体とする。伐倒データをもとに、丸太ごとの元口径と末口径の差を丸太長で除した値をテーパー率として算出し、これを目的変数とする。説明変数は、末口径，丸太の長さ，樹齢，立木の胸高直径（DBH），相対高（樹高を1としたときの元口の地際からの高さ：地際が0，梢端が1），地域（旧営林局）とする。要因分析には、機械学習の一種であるランダムフォレストを用いる。

### (4) B材およびC材を活用した地盤災害軽減策の開発

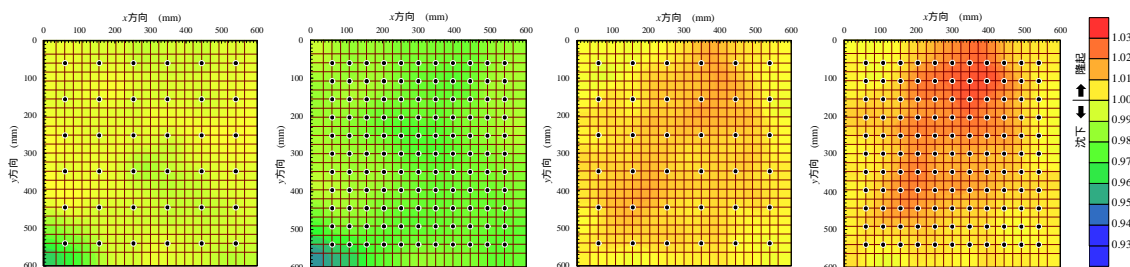
以上の結果に基づいて、B材およびC材を液状化対策，地盤補強への適用性について検証し、B材およびC材を活用した地盤災害軽減技術を開発する。

## 4. 研究成果

### (1) 丸太打設による地盤の鉛直変位特性

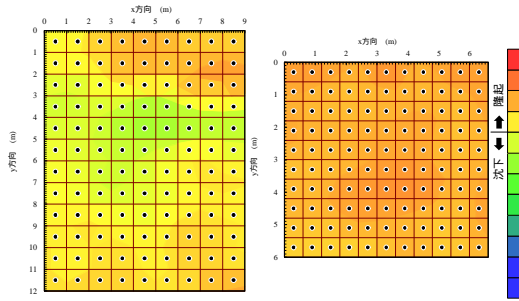
模型実験の結果、丸太打設による地盤の鉛直変位は丸太打設前の地盤の相対密度により挙動が異なり、相対密度が40%程度と緩い場合は沈下，60%程度とやや密実になると盛り上がりが生じることが明らかになった。また、これらの沈下および盛り上がりの量はいずれも改良率が高くなるほど大きくなる傾向が認められた（図-3）。この傾向は、実施工での地盤においても認められた（図-4）。これより、模型実験は実地盤での現象を表現できているといえる。

改良率と地盤の鉛直方向の体積変化の関係から、地盤の間隙がある値に達するまでは丸太打設により収縮が生じ、ある値に達した後は膨張する傾向があることが推察できる（図-5）。この閾値となる間隙比や、それとのテーパーとの関係は今後さらに検証する必要がある。



(a) 相対密度：39.8% (b) 相対密度：39.8% (c) 相対密度：60.9% (d) 相対密度：60.9%  
改良率：1.2% 改良率：4.9% 改良率：1.2% 改良率：4.9%

図-3 地盤の鉛直方向の体積変化率と改良率の関係：模型実験



(a)改良率：2.0% (b)改良率：5.6%

図-4 地盤の鉛直方向の体積変化率と改良率の関係：現場実験（相対密度 57.3%）

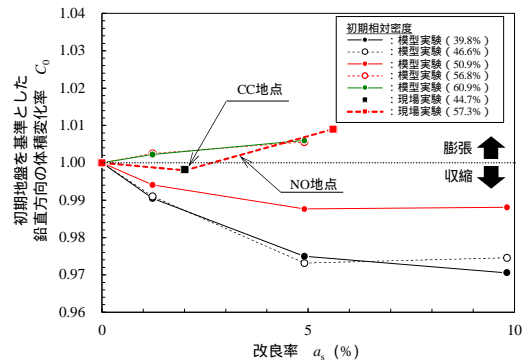


図-5 鉛直方向の体積変化率と改良率の関係

(2) 節丸太および継ぎ丸太の鉛直支持力特性

節丸太の鉛直支持力

節の数は3倍以上異なるが、長さや末口径はほぼ同じの丸太に対して押込み試験を実施した(図-6)。その結果、両者の荷重-変位関係の挙動や第2限界抵抗力はほぼ一致する結果となった(図-7)。

このことから、丸太の節が鉛直支持力に与える影響はほとんどないこと明らかになった。

継ぎ丸太の鉛直支持力

継ぎの数や、最下端丸太の長さを変えた継ぎ丸太に対して押込み試験を実施した。その結果、継ぎ丸太の鉛直支持力は、同じ長さの一本物の丸太よりも小さくなることが明らかになった。一方で、継ぎ丸太同士で比較すると、最下端丸太の長さが長いほど鉛直支持力が大きくなる傾向が認められた。また、最下端丸太の長さが同じで、継ぎ数の異なる丸太の鉛直支持力はほぼ同じになった(図-8)。

さらに、最下端丸太以外の周面摩擦を無視して算定した地盤調査からの推定値(小規模建築物基礎背径指針における杭状地盤補強の鉛直支持力式)と継ぎ丸太の押込み試験結果を比較すると、一本物の丸太の平均値に近い値をとることがわかる(図-9)。

これらのことから、継ぎ丸太の鉛直支持力は一本物の丸太より小さくなるものの、その鉛直支持力は最下端丸太以外の周面摩擦を無視すること推定できることが明らかになった。

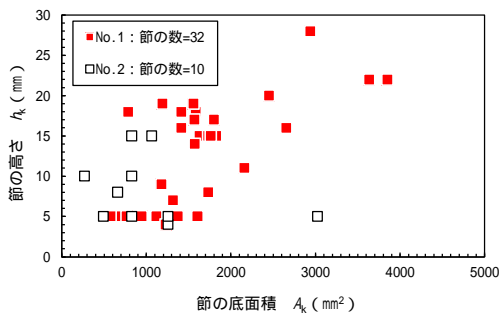


図-6 丸太の節の形状

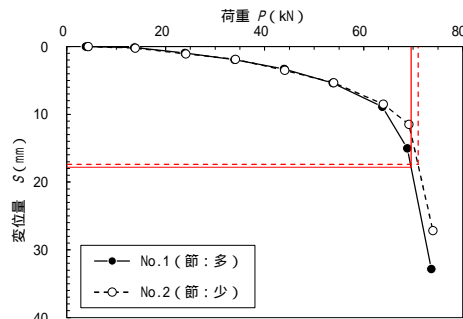


図-7 節丸太の押込み試験結果

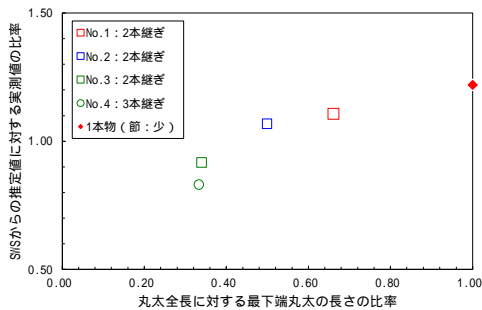


図-8 地盤調査からの推定値に対する継ぎ丸太の押込み試験結果の比率と最下端丸太の長さの関係

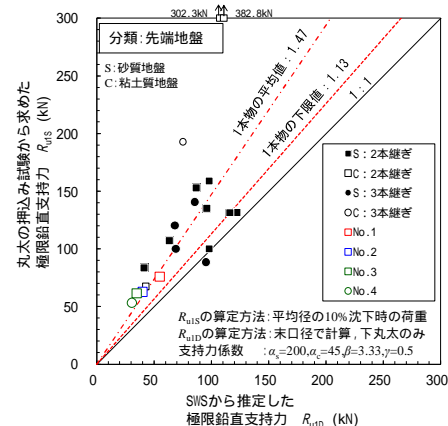


図-9 地盤調査からの推定値（最下端丸太以外の周面摩擦を無視）と継ぎ丸太の押込み試験結果の関係

### (3) 丸太のテーパーに影響を与える要因分析

ランダムフォレストによる要因分析をした結果、重要度としては丸太の相対高が 0.60 と最も高く、次いで末口径の 0.37、立木の胸高直径 (DBH) の 0.29 となることが分かった。また、最も重要度の高い相対高とテーパー率の関係は、立木の根元部はテーパー率が大きく、相対高 0.1 程度で安定し、梢端部に近づくにつれ増加する傾向にある。相対高 0.1~0.4 程度の範囲はテーパー率が 0.01 付近で安定する結果となった (図-10)。末口径については、10~30cm であればテーパー率は安定 0.01 付近で安定する結果となった (図-11)。

これらのことから 相対高や末口径から概ねテーパー率を推定できることが示唆された。なお、これらのテーパー率を決定するパラメータは相互に関係していると考えられるため、さらなる検証が必要である。

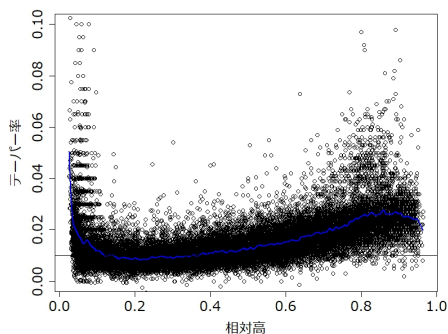


図-10 テーパー率と相対高の関係

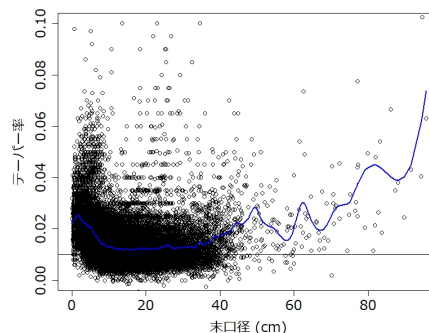


図-11 テーパー率と末口径の関係

### (4) B材, C材を活用した地盤災害軽減技術の開発

#### 液状化対策への適用

テーパーを有する丸太を地盤に打設することで、地盤の盛り上がり抑制できるため、細りのある B 材および C 材をそのまま現状の丸太を用いた液状化対策に適用する。

また、使用する B 材および C 材の情報からテーパー率を推定し、テーパーによる直径の変化を考慮した設計を行う。これにより設計が合理化されるため、B 材および C 材の価値を向上させることができる。

ただし、丸太打設による地盤の盛り上がり特性の定量化やテーパー率の詳細な推定については、今後さらなる検証が必要である。

#### 地盤補強への適用

節丸太については、通常の丸太と同様な鉛直支持力特性を有するため、現状の丸太を用いた地盤補強に設計法も含めてそのまま適用する。

継ぎ丸太については、最下端丸太以外の丸太の周面摩擦を無視して鉛直支持力を推定する設計法を取り入れることで、地盤補強として適用する。ただし、地盤によっては一本物の丸太の鉛直支持力よりも小さくなるため、最下端丸太の長さをできるだけ長くする、最下端丸太の周面摩擦を多く期待できるような地盤にのみ適用させるなどの工夫が必要である。

#### 中大径木の適用

本研究で当初の計画時点で予期しなかった事象が生じた事項である。

計画時点は、B 材および C 材となる木材は小径のものとなると想定していたが、全国 3 箇所の森林組合へのヒアリングを行った結果、近年は製材機械に入らない直径 30cm を超えるような中大径木も B 材および C 材に仕分けられつつあるということが明らかになった。今後の我が国の森林状況を考えると、このような中大径木は増加していくと考えられるため、これらの高付加価値化も重要である。しかしながら、現在の我が国には中大径木の丸太を地中に打設するための施工方法や施工機械はない。このため、海外における丸太杭の施工方法の調査として、木材利用先進国であるニュージーランドにて現地調査を行った。

その結果、ニュージーランドにおいては直径 30cm を超えるラジアータパインを杭として地中に打設する施工方法、設計方法、および品質管理手法が確立しており、コストもコンクリートなどを用いた他工法よりも明らかになった (図-12)。これより、この施工方法を我が国に取り入れることで、地盤災害軽減技術として適用する。



図-12 中大径木の施工状況: New Zealand (TTT Products Limited)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 村田拓海, 沼田淳紀, 宮島昌克, 平田慈英	4. 巻 77
2. 論文標題 シルトを用いた丸太打設による地盤の鉛直変位に関する模型実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造)	6. 最初と最後の頁 I_38 ~ I_44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejmcs.77.5_I_38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takumi Murata, Atsunori Numata, Masakatsu Miyajima
2. 発表標題 Vertical Displacement of Sandy Soil by Inserting Logs
3. 学会等名 The20th International Symposium on Geo-disaster Reduction (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田拓海, 沼田淳紀
2. 発表標題 地上型レーザー scanner を用いた丸太打設による地盤の鉛直変位の計測
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田拓海, 沼田淳紀, 宮島昌克
2. 発表標題 丸太打設実施工における砂質地盤の鉛直変位
3. 学会等名 第21回木材工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田拓海, 沼田淳紀
2. 発表標題 改良率の違いが丸太打設による地盤の鉛直変位に与える影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田拓海, 沼田淳紀
2. 発表標題 軟弱地盤中に打設した節付き丸太の押込み試験結果
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村田拓海, 沼田淳紀
2. 発表標題 最下端丸太の長さが異なる継ぎ丸太の押込み試験結果
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北原文章, 村田拓海, 沼田淳紀, 西園朋広
2. 発表標題 丸太のテーパ率に影響を与える要因の検討
3. 学会等名 第22回木材工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村田拓海, 沼田淳紀
2. 発表標題 B材・C材となる丸太の押込み試験結果
3. 学会等名 第23回木材工学研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	沼田 淳紀  (Numata Atsunori)  (10443649)	飛鳥建設株式会社技術研究所・・・主席研究員   (92503)	
研究分担者	宮島 昌克  (Miyajima Masakatsu)  (70143881)	金沢大学・地球社会基盤学系・教授   (13301)	
研究分担者	北原 文章  (Kitahara Fumiaki)  (50582748)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等   (82105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------