

(学位論文要旨)

地中への炭素貯蔵と地盤災害軽減を期待した
丸太打設による複合地盤の支持力度の評価法

Evaluation method for bearing capacity of composite ground by
inserting logs with expectation of carbon storage in the ground
and reduction of geo-disaster

金沢大学大学院 自然科学研究科

環境デザイン学専攻

学籍番号 1924052003

氏名 村田 拓海

In order to mitigate climate change, it is necessary to capture CO₂ from the atmosphere. The carbon recovered from the atmosphere by photosynthesis in trees is fixed even after the trees are cut down. Therefore, it is expected that carbon storage in the ground and reduction of ground disasters by inserting logs as ground reinforcement and improvement materials in soft ground where wood does not decay. In addition, during a ground disaster, the ground is expected to resist as a composite ground of logs and ground, and elucidation of the properties of this condition will rationalize the design.

In this study, it was investigated the carbon storage capacity expected by log insertion, the properties of logs as ground reinforcement and improvement materials, and the bearing capacity of the composite ground of logs and ground.

As a result, it was elucidated that the amount of carbon storage by inserting logs is much larger than the CO₂ emitted during construction, and that the bearing capacity of composite ground can be estimated using the properties of logs as ground reinforcement and improvement materials. In addition, it was proposed a method to evaluate the bearing capacity of composite ground with inserted logs based on these results.

第 1 章 序論

気候変動は喫緊の課題であり、今後持続可能な社会を築いていくためには、大気中に排出する二酸化炭素を削減するだけでなく、除去していく必要がある。この有効な手段として、光合成により大気中の二酸化炭素を回収する樹木を適切な時期で伐採し、伐採して空いたところに再造林をする持続的な林業経営のサイクルを回すことが挙げられる。さらに、伐採された木材は腐朽や燃焼したりしない限り炭素を貯蔵し続けるため、長期間使用することが重要である。

ここで、完成後 400 年以上経過したヴェネツィアのリアルト橋や、1958 年に開業した新潟駅本屋などの構造物は木杭で支えられており、現在も大きな変状がなく供用されている。特に、新潟駅本屋については、1964 年の新潟地震においても液状化の被害を受けていない。このように、これまで木杭は長期間使用され、地盤の支持力不足による構造物の沈下や、砂質地盤の液状化などの軟弱地盤で発生する可能性のある地盤災害を軽減してきた。木杭が打設される軟弱地盤は地下水位が高く、地下水位以深では腐朽菌やシロアリなどが生存できないため生物劣化が生じない。このため、軟弱地盤は木材を長期間使用できる環境であり、ここに木杭を打設することで地中への炭素貯蔵と、軟弱地盤で発生する地盤災害軽減を同時に実現することが期待できる。

一方で、木杭は現在の我が国においてはほとんど使用されていない。この要因として、木杭に関する記述のある設計図書がほとんどないことと、杭頭部を地下水位以深にする必要があることの2点が考えられる。特に、木杭を「杭基礎」として扱う場合は、後者による制限が大きく、従来通り「杭基礎」として現代に適用することは不可能ではないが、課題が多く現実的でない。このため、軟弱地盤における木杭の利用拡大のためには、従来の杭基礎以外での適用方法を検討したうえで、その設計方法を確立する必要があると考えられる。

そこで本研究では、木杭を杭状の「地盤補強材」、「地盤改良材」として扱い、これらの特性を検討する。また、実際の地盤災害に対しては、丸太と地盤が一体となった複合地盤として抵抗すると考えられる。このため、複合地盤としての抵抗性を検討することで合理化を図れると考えられる。そこで、補強材、改良材としての特性の検討と併せて、複合地盤としての特性の検討も行う。ここで、軟弱地盤においては、一般的に液状化が問題となる地盤に比べて支持力不足が問題となる地盤の方が多いため、本研究では複合地盤の支持力度に着目し、その検討を行う。なお、「木杭」と記すと、杭頭とフーチングが結合された「杭基礎」として誤解を生む可能性があるため、以降「丸太」と記すこととする。

第2章 丸太打設による複合地盤の概要

図-2.1に本研究で対象とする丸太打設による複合地盤の概要を示す。丸太は、地盤補強材、地盤改良材として扱い、頭部は腐朽対策として地下水位以深に設置することとする。丸太頭部を地下水位以深に打設する過程で生じる孔は、①周囲の軟弱地盤よりも十分大きな支持力度を有すること、②液状化しない材料であること、③長期的な安定性を有することから、締め固めた単粒度砕石で充填することとする。

使用する丸太は、丸太製造時の温室効果ガス排出量を極力抑えるために、木材保存処理を行っていない生材で、先端が平坦な皮を剥いだだけのものを使用した。丸太の打設は、リーダー式の杭打機を用いて静的圧入することとした。また、丸太の鉛直性をより確実にする目的で、先端が閉塞した鋼管を用いて無排土で回転圧入し、それによりできた孔に丸太を圧入することとした。また、丸太の圧入は、リーダー式の杭打機に取り付けたヤットコを使い、地中の所定の位置になるまで圧入することとした。また、鋼管の径は、打設する丸太の周面地盤によって、砂質地盤の場合は丸太元口直径以下、粘土質地盤の場合は丸太末口直径以下、互層地盤の場合は粘土質地盤に合わせて丸太末口直径以下とした。

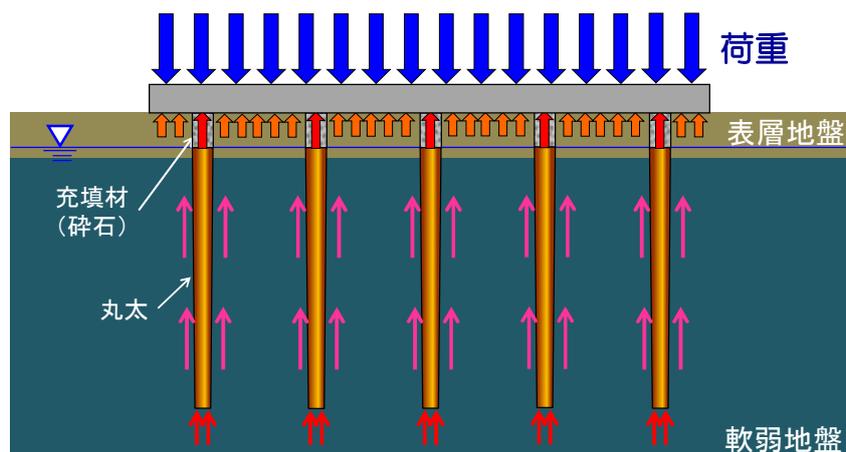


図-2.1 丸太打設による複合地盤の概要

第 3 章 丸太打設により期待される地中への炭素貯蔵量の検討

3.1 計算の範囲

本章では、第 2 章で示した材料、施工方法で複合地盤を作成した際に排出した二酸化炭素（以降、「CO₂」と記す。）量と、使用した丸太により貯蔵された丸太の炭素量を比較し、丸太打設により期待される地中への炭素貯蔵量を検討する。丸太打設による CO₂ の収支量の計算範囲は、現場で稼働した施工機械（発電機を含む）とした。なお、計算結果の評価は、一般艇に CO₂ に換算して行われるため、本検討においても CO₂ に統一して評価することとする。また、貯蔵を「正」、排出を「負」とする。

3.2 丸太打設による二酸化炭素の収支量

図-3.1 に丸太打設による丸太材積 1m³ 当たりの CO₂ の収支を示す。丸太による炭素貯蔵量 (CO₂ 換算) から施工による CO₂ 排出量を差し引いた収支については、改良率に関わらず樹種によりほぼ一定値を示すことがわかる。これは、丸太による炭素貯蔵量 (CO₂ 換算) に対して、施工による CO₂ 排出量が極めて小さく、施工による CO₂ 排出量の影響が小さいためである。また、それぞれの平均値は、スギで 543.5 kg-CO₂/m³-wood, カラマツで 709.7 kg-CO₂/m³-wood となる。また、現場以外の CO₂ 排出量を考慮すると、スギで 398.6 kg-CO₂/m³-wood, カラマツで 564.8 kg-CO₂/m³-wood となる。

これに基づいて、我が国において丸太打設により期待できる炭素貯蔵量を検討する。図-3.2 に年間の建設業における CO₂ 排出量と丸太打設による炭素貯蔵量を示す。建設業における CO₂ 排出量は、日本建設業連合会による「2017 年度

CO₂ 排出量調査報告書」に示される値とした。丸太打設により期待される炭素貯蔵量（CO₂ 換算）は 72.3 万 t-CO₂/年であり、建設業における CO₂ 排出量である 411.9 万 t-CO₂/年の約 18%に相当する。さらに、丸太を使用することでこれまで使用されてきたコンクリート杭や鋼管杭などを代替することになるため、製造時の CO₂ 排出量削減にも寄与すると考えられる。

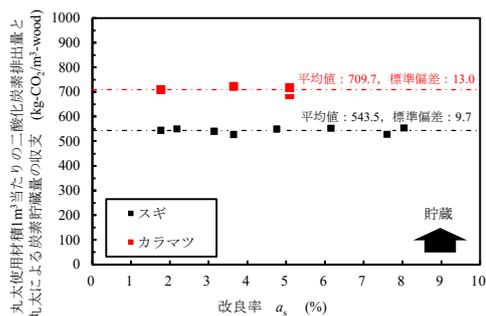


図-3.1 丸太打設による丸太材積 1m³ 当たりの CO₂ の収支

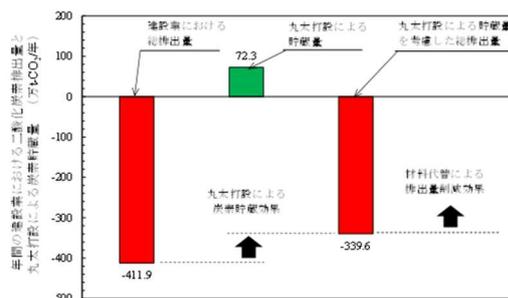


図-3.2 年間の建設業における CO₂ 排出量と丸太打設による炭素貯蔵量

第 4 章 地盤補強材としての丸太の特性の検討

4.1 押込み試験結果と既往の鉛直支持力推定式の比較

本章では、地盤補強材としての丸太の特性のうち、鉛直支持力に着目して検討を行う。この鉛直支持力について、本研究で対象とする複合地盤は丸太を地中の地下水位以深で使用することとしているため、丸太頭部が地中となる。

この状態における丸太単体の鉛直支持力を明らかにする目的で、6 地域の軟弱地盤に打設した丸太に対して押込み試験を実施した。なお、地表面付近に存在する硬く薄い層の影響を受けないように丸太頭部はその層以深に設置した。押込み試験で得られた丸太の極限鉛直支持力と、小規模建築物基礎設計指針における杭状地盤補強（木杭）の鉛直支持力推定式（以降、「既往式」と記す。）を用いて推定した丸太の極限鉛直支持力を比較検討する。なお、試験地点では、標準貫入試験（以降、「SPT」と記す.）、一軸圧縮試験（以降、「UCT」と記す.）、スクリーウエイト貫入試験（以降、「SWS」と記す.）を実施した。SPT と SWS は全ての地点で実施し、SWS は SS 地点を除いて丸太を打設する全ての位置で実施した。

図-4.1 に押込み試験から求めた極限鉛直支持力と既往式から推定した極限鉛直支持力の比較を示す。丸太の鉛直支持力増加率を示すと地盤調査ごとに異

なり、SWS では下限値 1.13、平均値 1.47、SPT では下限値 1.34、平均値 2.83、SPT と UCT の組合せでは下限値 1.75、平均値 2.41 となる。ここで、SPT、SPT と UCT の組合せについては、 ξ の周面積の相関係数が 0.550、0.575 となり、周面積の影響を受けていることが確認された。一方で、先端断面積との相関は認められなかった。

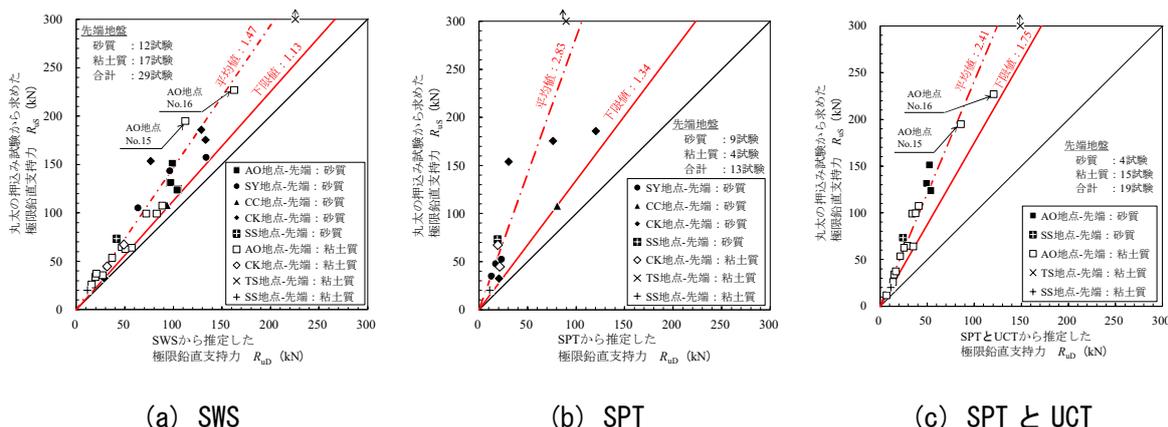


図-4.1 押込み試験から求めた極限鉛直支持力と既往式から推定した極限鉛直支持力の比較

4.2 地中における丸太単体の鉛直支持力の評価法の提案

これらの結果に基づき、表-4.1 に地中にある丸太の鉛直支持力の評価法を示す。ここで、SWS は試験自体のばらつきが大きいため、単純に実験で得られた ξ をそのまま用いることとした。なお、全体に乗ずると、周面摩擦の項にのみ乗ずるとを区別するために、前者を ξ 、後者を ξ_f と表記する。

表-4.1 地中にある丸太の鉛直支持力の評価法

項目	地盤調査		
	SWS	SPT	SPT と UCT
N 値	$2W_{sw}+0.067N_{sw}$	SPT による試験値	SPT による試験値
粘着力 c	$q_u / 2$	$q_u / 2$	$q_u / 2$
一軸圧縮強さ q_u	$45W_{sw}+0.75N_{sw}$	12.5N	UCT による試験値
地中にある丸太の 極限鉛直支持力 R_{uw}	$R_{uw}=\xi \cdot (R_p+R_f)$ $\xi=1.47$	$R_{uw}=R_p+\xi_f \cdot R_f$ $\xi_f=2.83$	$R_{uw}=R_p+\xi_f \cdot R_f$ $\xi_f=2.41$

ここで、

W_{sw} : SWS の荷重の大きさ (kN)

N_{sw} : SWS の貫入量 1m 当たりの半回転数 (回)

R_p : 丸太の極限先端支持力 (kN) 砂質地盤 $R_p=\alpha \bar{N}A_p$, 粘土質地盤 $R_p=6c_0A_p$

R_f : 丸太の極限周面摩擦力 (kN) $R_f=D_T \sum(\tau_{di}L_i)\pi$

第 5 章 地盤改良材としての丸太の特性の検討

5.1 丸太打設による密度増大の理論値の検討

本章では、地盤改良材としての丸太の特性のうち、砂質地盤における丸太打設による地盤の密度増大について検討する。これを検討するにあたり、まず丸太打設に伴う地盤の体積変化特性を明らかにする。

図-5.1 に模型実験および現場計測による初期地盤を基準とした鉛直方向の体積変化率と改良率の関係を示す。実地盤における丸太打設に伴う地盤の体積変化は、収縮量および膨張量ともに模型実験よりも少なくなることがわかる。また、体積収縮量は初期相対密度が小さいほど大きく、ある改良率から収縮から膨張に転じる傾向が認められる。

この結果に基づいて、体積変化の理論値を構築した。境界条件は、①丸太を打設していない、すなわち、改良率がゼロの場合は体積変化が生じない。②ある間隙量（相対密度）に達したときに地盤の体積変化は収縮から膨張に転じ、その転換点が体積収縮量の下限值となる。③地盤の間隙量がゼロ、すなわち、相対密度が 100%に達した場合、改良率と体積変化率は同じになる、とした。図-5.2 に丸太打設による地盤体積変化の理論値を示す。

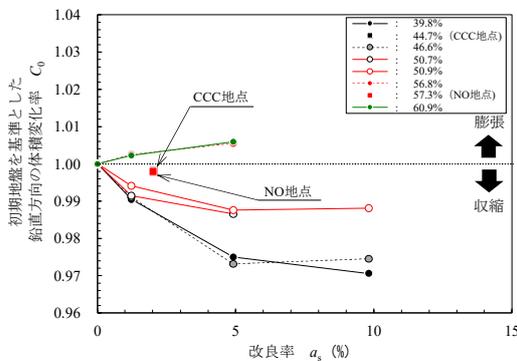


図-5.1 初期地盤を基準とした鉛直方向の体積変化率と改良率の関係

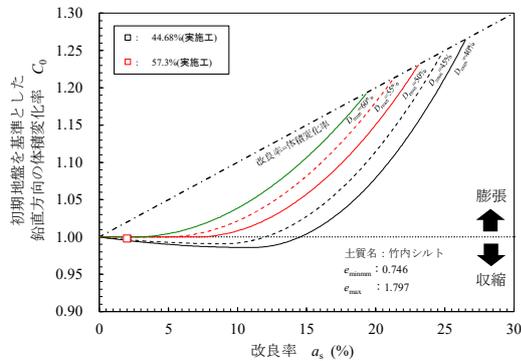


図-5.2 丸太打設による地盤の体積変化の理論値

5.2 理論値と実施工データの比較

図-5.3 に丸太打設による体積変化を考慮した理論値から推定した N 値と実施工における丸太打設後の N 値の関係を示す。図中には参考として、サンドコンパクションパイル工法（以降、「SCP 工法」と記す。）の A 法のチャートを用いたときの推定値を使用した結果も併記した。推定値に対する実測値の平均値は、

SCP 工法の A 法で 1.21, 丸太打設による体積変化を考慮したもので 1.16, 標準偏差はそれぞれ, 前者で 0.28, 後方で 0.25 となる. これより, 丸太打設による体積変化を考慮することで, 丸太打設後の N 値を精度良く推定できることが明らかになった.

5.3 丸太打設による砂質地盤の密度増大の評価法の提案

これらの結果に基づき, 図-5.4 に丸太打設による砂質地盤の密度増大の評価法を示す. この評価法では, 間隙比や相対密度を介さずに, 原地盤の N 値から丸太打設後の N 値を直接推定するものである. 経験則的ではあるが, 換算による誤差がないことや, 過去の施工データとよく一致することから, 信頼性は高いと考えられる.

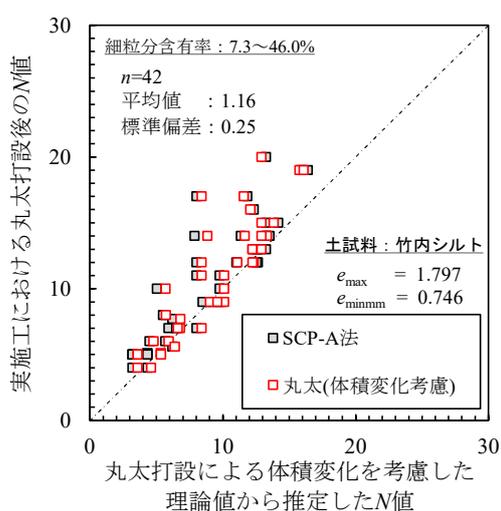


図-5.3 推定 N 値と実施工における丸太打設後の N 値の関係

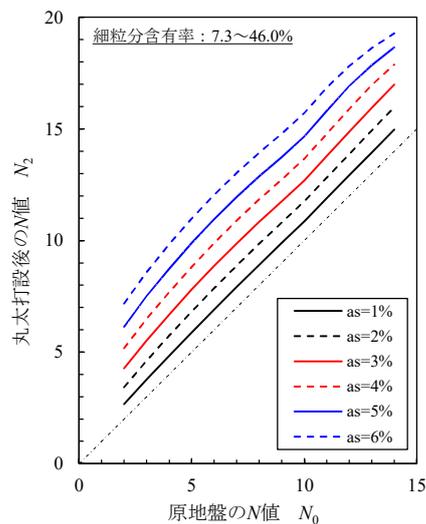


図-5.4 丸太打設による N 値増分の理論値

第 6 章 丸太打設による複合地盤の支持力度の検討

6.1 大型平板載荷試験の結果

本章では, 第 2 章で示した方法で施工した丸太と地盤, および, 丸太頭部の充填材で構成される複合地盤の特性のうち, 支持力度に着目して検討を行う.

まず, 複合地盤の支持力度を明らかにする目的で, 2 地域で実施した大型平板載荷試験結果を示す. 平板には, 幅 3.6~4.0m, 厚さ 0.21m の正方形のスラブを使用した. その結果, 大型平板載荷試験による極限支持力度は, 概ねスラブ直下

の丸太の周面積の合計値の増加に伴い大きくなることが明らかになった。

次に、SCP 工法の複合地盤の極限支持力式に倣い、式(6.1)を用いて算定した極限支持力と大型平板載荷試験結果を比較する。なお、 η は群杭効率である。地中にある丸太の極限鉛直支持力 R_{uw} は表-4.1 より、地盤の極限支持力度 q_{Gu} は SPT, SPT と UCT の組合せの場合は式(6.2), SWS の場合は式(6.3)より算定した。

$$q_{tu} = q_{GU}(1 - a_s) + \eta \frac{nR_{uw}}{A} \quad (6.1)$$

$$q_{Gu} = i_c \alpha_G c N_c + i_\gamma \beta_G \gamma_1 B \eta N_\gamma + i_q \gamma_2 D_f N_q \quad (6.2)$$

$$q_{Gu} = 3(30W_{sw} + 0.64N_{sw}) \quad (6.3)$$

ここで、

q_{Gu} : 地盤の極限支持力度 (kN/m²)

a_s : 改良率

n : スラブ直下の丸太本数 (本)

A : スラブの底面積 (m²)

図-6.1 に N 値や粘着力を用いて算定した式(6.1)による極限支持力度 q_{tu} と大型平板載荷試験結果の関係を示す。相関係数は、SWS で 0.914, SPT と UCT の組合せで 0.914 と高い値を示し、群杭効率を考慮しても両者に相関が認められる。また、式(6.1)による極限支持力度 q_{tu} に対する大型平板載荷試験結果の比率の平均値と標準偏差はそれぞれ、SWS で 1.30, 0.18, SPT で 1.40, 0.03, SPT と UCT の組合せで 1.03, 0.10 となり、SPT と UCT の組合せで精度良く推定できることがわかる。これは、 N 値や一軸圧縮強さを地盤調査による試験値そのものから求めているためと考えられる。

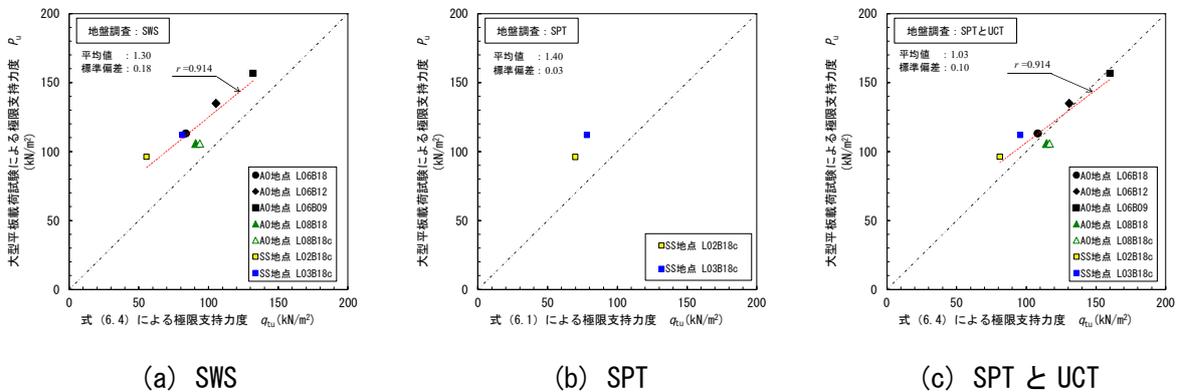


図-6.1 N 値や粘着力を用いて算定した式(6.1)による極限支持力度と大型平板載荷試験結果の関係

6.2 丸太打設による複合地盤の支持力度の評価法の提案

これらの結果に基づいて、丸太打設による複合地盤の極限支持力度 q_{tu} の推定式として式(6.4)、設計用限界値として式(6.5)を提案する。なお、地中にある丸太の極限鉛直支持力 R_{uw} は表-4.1、地盤の極限支持力度 q_{Gu} は SPT, SPT と UCT の組合せの場合は式(6.2)、SWS の場合は式(6.3)、砂質地盤の N 値増分の求め方は図-5.4 に示す通りとする。

$$q_{tu} = q_{Gu}(1 - a_s) + \eta \frac{R_{uw}}{B_1 B_2} \quad (6.4)$$

$$q_{td} = \phi_d q_{tu} \quad (6.5)$$

ここで、

B_1 : 長辺方向の丸太の打設間隔 (m)

B_2 : 短辺方向の丸太の打設間隔 (m)

ϕ_n : 耐力係数

第 7 章 結論

本研究では、地中への炭素貯蔵と軟弱地盤で発生する地盤災害軽減が期待できる丸太打設による複合地盤に着目し、丸太打設により期待できる炭素貯蔵量、丸太の地盤補強材、地盤改良材としての特性、および、複合地盤の支持力度について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 丸太打設により貯蔵される炭素量は、施工で排出される二酸化炭素量よりも圧倒的に多くなり、丸太打設により期待される炭素貯蔵量 (CO_2 換算) は 72.3 万 $\text{t-CO}_2/\text{年}$ となることが明らかになった。
- 丸太の地盤補強材としての特性として、地中にある状態の鉛直支持力は既往式による推定値よりも大きくなることが明らかになった。また、これに基づいて、地中にある丸太の鉛直支持力の評価法を提案した。
- 丸太の地盤改良材としての特性として、丸太打設による地盤の体積変化を考慮することで、丸太打設後の N 値を精度良く推定できることが明らかになった。また、これに基づいて、丸太打設に伴う砂質地盤の密度増大効果の評価法を提案した。
- 丸太と地盤の複合地盤の支持力度は、丸太の地盤補強材、改良材としての特性を用いることで、精度良く推定できることが明らかになった。また、これに基づいて、複合地盤の支持力度の評価法を提案した。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

地中への炭素貯蔵と地盤災害軽減を期待した丸太打設による複合地盤の支持力度の
評価法

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境デザイン学 専攻

(2) 氏 名 村田 拓海

3. 審査結果の要旨（600～650字）

本学位申請論文に関し、第1回審査委員会を開催し審査方法を決定するとともに、論文の内容について検討した。さらに令和4年1月25日に行われた口頭発表後に第2回審査委員会を開き、協議の結果、以下のように判定した。

本研究は、気候変動緩和策の一環として土木材料としての丸太の利用に着目し、丸太打設により期待できる炭素貯蔵量、丸太の地盤補強材、地盤改良材としての特性について検討するとともに、丸太打設による複合地盤の支持力度を評価したものである。まず、わが国において丸太打設により期待できる地中への炭素貯蔵量は、建設業全体で排出される二酸化炭素量の約18%になることを明らかにしている。さらに、模型実験と現場計測結果に基づき、丸太の地盤補強材としての特性のうちの鉛直支持力、地盤改良材としての特性のうちの砂質地盤の密度増大効果について明らかにしたうえで、その評価法を具体的に提案している。さらに、丸太を打設した複合地盤としての支持力度について、地盤補強材としての特性と地盤改良材としての特性に基づいて、評価法を提案し、精度を検証している。

以上の結果は、丸太を土木材料として軟弱地盤に打設することにより、地盤災害軽減に結びつくとともに、地下への炭素貯蔵により地球温暖化緩和にも貢献することを示しており、社会的意義が非常に高い。また、丸太打設による複合地盤の支持力度評価法を具体的に提案しており、工学的価値が極めて高いと認められることから、本委員会は本論文が博士(工学)に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定 (いずれかに○印) 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士(工学)