

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20246078

研究課題名（和文）木材活用による液状化・流動化対策技術に関する研究

研究課題名（英文）Study on liquefaction and lateral flow countermeasure technique due to use of wood

研究代表者

濱田 政則（HAMADA MASANORI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30164916

研究成果の概要（和文）：本成果は、土木工学分野と森林分野の学際的な研究により、液状化・流動化対策として木材活用ができることを示した。具体的には、木材打設により液状化被害を低減できること、地中における木材の腐朽が発生する環境を明らかにし、さらに、木材を利用した場合の温室効果ガス削減効果を定量的に示し、地球温暖化防止対策として成立するための必要なシナリオを明らかにした。これらについて、ガイドラインとしてまとめた。

研究成果の概要（英文）：This study shows wood can be used as liquefaction and lateral flow countermeasure technique by collaboration study between civil engineering and forestry. To be concrete, the study revealed that wood piling can reduce liquefaction damage, environmental condition for decay of wood in the ground, quantitative reduction effects of greenhouse gases and a needed scenario to accomplish this method as the global warming prevention.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,000,000	4,800,000	20,800,000
2009年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2010年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
年度			
年度			
総計	34,200,000	10,260,000	44,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震工学、温暖化影響、液状化、木杭、

## 1. 研究開始当初の背景

1964年の新潟地震における新潟駅舎のように、木杭基礎の建物で、周辺地盤が液状化し、地盤変位が発生したにもかかわらず、大きな不等沈下や傾斜を起さず、地震後も長期に使用された事例が報告されている。

木杭基礎の歴史は古く、我が国のみならず世界的にも多くの歴史的建造物が木杭によって建設されて来ており、その多くが現在も健在である。しかしながら、腐朽や寸法・品質のばらつきおよび供給が不安定であるな

どの理由から木杭が用いられることはほとんどなくなり、現在ではコンクリート杭、鋼杭が主流となっている。

一方、我が国は、京都議定書の約束期間において、温室効果ガス排出量の削減目標値ち3.8%を「森林吸収」によって賄うとされている。しかしながら、我が国ではコスト高、人手不足等が原因となって、多くの森林が放置され、荒廃が進んでいる。

森林の荒廃を防止してこれを再生させるためには、木材の利用拡大による生産・流通

システムの活性化が不可欠である。具体的には、液状化対策などの目的で木杭を活用し、木材を地中で長期保存できれば、土木工事を進めながら同時に炭素の大量保存が可能となり、温室効果ガス削減に大きく貢献する。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、古来、建設分野で用いられた木杭を道路・鉄道盛土、河川堤防等の基礎地盤および護岸の液状化・流動化対策に活用するための技術を開発し、これを実用化することである。これにより、液状化・流動化に起因した地震災害の軽減を図るとともに、大量の木材を地中に長期貯蔵することにより温室効果ガス削減に貢献し、さらに国産木材の生産・流通の活性化により森林の回復と保全に寄与する。

## 3. 研究の方法

本研究は、土木工学分野と森林学分野および両分野の共同による調査・研究により構成され、以下を行う。

### (1) 既往地震における木杭基礎の液状化・流動化対策効果の調査

既往地震において液状化地域にあり、現存しないし近年まで存在した橋台、建物など木杭基礎構造物や直接基礎などの他構造物について調査を行い、木杭基礎の液状化・流動化に対する効果を明らかにする。

### (2) 木杭の液状化・流動化対策効果の検証

小型および中型の振動台を用いて、構造物模型、斜面模型、盛土模型の実験、および数値解析により、木杭基礎の液状化および流動化への対策効果を明らかにする。

### (3) 各種シナリオによるCO<sub>2</sub>の排出量、および液状化対策として木杭を活用した場合の地中炭素貯蔵量の評価

実際の液状化対策で木杭を用い事を想定し、木杭の生産過程、木材生産後の森林管理、残材の使用の有無、施工過程、使用期間、使用後、メタンの影響などの各種シナリオについて、温室効果ガスの排出量および木材による炭素貯蔵量の定量的な評価を他工法と比較しながら行い、温室効果ガス削減に寄与するための条件を明らかにする。

### (4) 地中木材の腐朽特性と対策

木杭基礎の現地調査、および、地下水位変動可能な模型地盤による木材の腐朽促進試験により、土壌、樹種等が腐朽に与える影響を明らかにし、設計用のチャートを提案する。

### (5) 木杭の可能供給量と需要量の予測

まず、木材生産の供給可能量を調査し、次に、土木における木材利用ポテンシャル、および、液状化などの地中での木材利用ポテンシャルについてアンケート調査および各種統計データにより推計する。

### (6) 木杭活用によるCO<sub>2</sub>削減効果

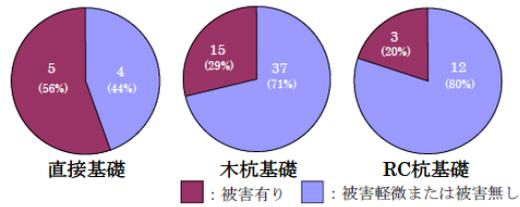


図-1 1964年新潟地震における建物被害の有無と基礎形式の関係

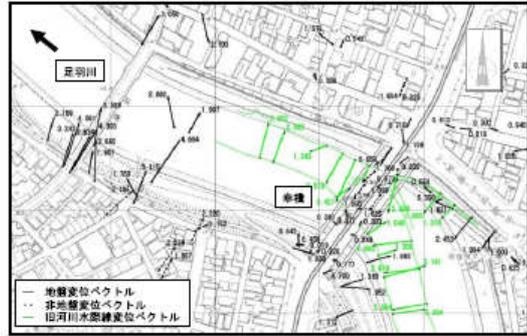


図-2 1948年福井地震による福井市幸橋周辺の液状化による側方変位

実際の地盤に実大の木杭を打設する現場実験を行い、この工事に関わる全ての化石燃料消費量および木杭に貯蔵された炭素量を計測し、工事と木杭使用による二酸化炭素排出量の収支、および、全行程において二酸化炭素排出量の多い作業項目を定量的に明らかにし、地球温暖化対策として効果を上げるために必要な条件を明らかにする。

### (7) 木杭による液状化・流動化対策のためのガイドラインの作成

以上の研究成果について、「木杭による液状化・流動化対策の設計・施工のためのガイドライン」を作成する。

## 4. 研究成果

### (1) 既往地震における木杭基礎の液状化・流動化対策効果の調査

1964年新潟地震では、地盤の液状化により多くの構造物が大きな被害を受けた。そこで、日本建築学会の新潟地震災害調査報告をもとに建物被害の有無と基礎形式の関係を図-1に示す。図中の数字は建物件数、()内の値は割合を示す。

図より、直接基礎と比べ、木杭基礎およびRC杭基礎の場合、被害無しの割合が多いこと、また、木杭基礎とRC基礎では被害の状況に大差がないことがわかる。調査ではRC杭は支持杭であり、側方流動によって根入れ部で破断している事例も見られた。

図-2は写真測量により求めた1948年福井地震後の水平方向の地盤変位ベクトルである。幸橋に着目すると、左岸側橋詰め付近の地盤では、最大で約1.9mの河道方向へ水平

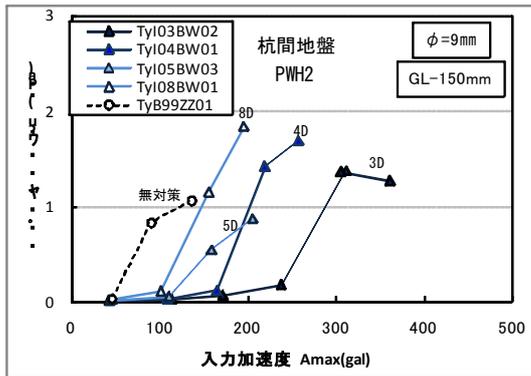


図-3 杭間地盤の過剰間隙水圧

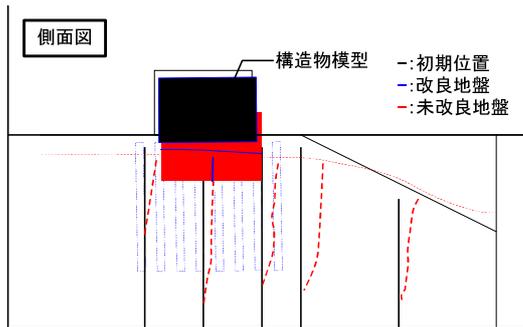


図-4 180gal 加振後の地盤変形の様子 (重力場)

変位が発生していることわかる。地震当時の幸橋は鉄筋コンクリート単純T桁橋 (1933年竣工、橋長133m) であり、橋脚や橋台は木杭基礎であった。第7橋脚で実施した木杭の掘り出し調査の結果、樹種はマツ属であり、河床以下に存在した木杭は腐朽することなく健全であったことが明らかとなった。また、当時の地震被害調査報告書によれば、橋脚や上部構造への被害はなく地震後の通行に支障は生じなかった。

以上より、幸橋周辺で大きな側方流動が発生していたにも関わらず、橋梁の上部と下部構造、ならびに基礎構造の木杭には顕著な損傷が生じなかった事実が明らかとなった。

(2) 木杭の液状化・流動化対策効果の検証

小型振動台上に、内寸法幅 780×奥行き 278×高さ 400mm の土槽を載せ、そこに相対密度 50% の模型地盤を作製し、木杭を打設し加振する実験を実施した。間伐材間の間隙水圧を計測するために、間隙水圧計に外径 1mm 内径 0.7mm の針状のパイプを取り付けた間隙水圧計を作製し計測した。

図-3 に、各入力加速度と杭間地盤で発生した過剰間隙水圧の関係を示す。木杭の打設間隔が短くなるほど過剰間隙水圧の発生が抑制され液状化対策効果があることが分かる。

振動台上にアクリル製の土槽 (幅 800×奥行き 400×高さ 500mm) を設置し、その中に模型地盤を作製し、模型地盤の右側にはのり高さ 150mm で勾配 1:2 の斜面を形成し加振実験を実施した。地表には、重さ 6000g の構造物模型を静置した。

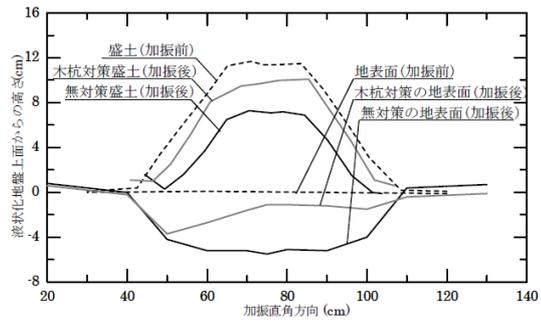


図-5 加振後の盛土沈下の様子

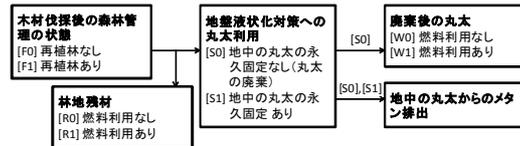


図-6 想定した木杭のライフサイクルとシナリオ

図-4 は、180gal 加振後の地盤の最終変形状態を示したものである。木杭打設することは単に沈下を抑制するだけでなく、不等沈下を防止する効果も期待できることがわかる。さらに、内寸幅 1500×奥行き 1500×高さ 1000mm の土槽内に相対密度 65% の地盤を作製しその上に高さ 10cm の盛土を載せた模型地盤の加振実験を実施した。盛土の下部全面や法尻に液状化層厚の 42% の長さの木杭を打設し比較検討を行った。

図-5 に、入力加速度 150gal で加振した後の盛土の沈下変形量を示す。盛土の全面木杭を打設することで沈下量が大幅に低減することがわかる。ただし、法尻に木杭を打設した場合には、無対策との差は認められず、木杭長さを液状化層厚にすることによって沈下変形を抑制できることがわかった。

(3) 各種シナリオによる CO<sub>2</sub> の排出量、および液状化対策として木杭を活用した場合の地中炭素貯蔵量の評価

木杭打設 (LP) による液状化対策 (500m<sup>2</sup> × 深さ 8m) を想定し、これと同等の改良効果が得られる砂杭によるサンドコンパクションパイル工法 (SCP) とセメント固化による深層混合処理工法 (CDM) とについて、温室効果ガスの排出量の比較検討を行った。木杭に打設による液状化対策では、図-6 に示すような木杭のライフサイクルとシナリオを想定した。

評価結果を図-7 に示す。木材による炭素貯蔵量を考慮せず材料と工事による温室効果ガス排出量を比較すると、SCP と木杭はほぼ同等であるが、CDM はこれらよりも 7 倍の排出量があることがわかる。さらに、木杭を用いた場合は、森林で伐採後再植林を行わない場合や、地中で木材からメタンガス (メタン比率=8.5%) が発生すると想定した場合には、むしろ SCP 以上に温室効果ガスの排出側

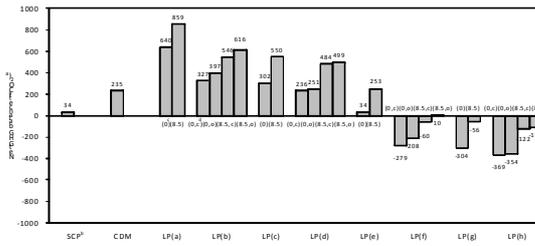


図-7 各工法による温室効果ガス排出量の比較

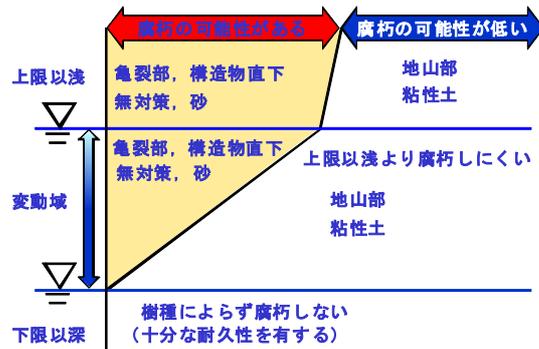


図-8 地中における木材の腐朽特性

となる。一方、再植林が行われ、地中において永久的に貯蔵が行われれば、貯蔵側に移行し、工事することにより温室効果ガス削減に寄与することが分かった。したがって、木杭打設による液状化対策を実施し、温室効果ガス削減に寄与するためには、再植林と半永久的な貯蔵が必須条件である。

#### (4) 地中木材の腐朽特性と対策

地中における木材の腐朽について、過去の事例調査と腐朽促進試験の両者を実施し検討した。

地中における木材の腐朽特性について以下が分かった。図-8 に、これらをまとめた。

- ① 地下水位変動域上限以浅では、木材は腐朽する可能性がある。
- ② 地下水位変動域では、木材は腐朽する可能性がある。しかしこの領域では、地下水位変動域上限以浅よりも腐朽しにくい。
- ③ 地下水位変動域下限以深では、腐朽せず100年を優に超え高い耐久性を有する。
- ④ このような高い耐久性を有するのは、スギについても同様であり、樹種によらない。
- ⑤ 地下水位変動域上限以浅でも、地山部に打設された場合は腐朽の進行が著しく低下し耐久性を向上させる可能性がある。
- ⑥ 地下水位変動域以浅においては、埋戻し地盤や亀裂があるような地盤では腐朽が生じやすくなる可能性がある。
- ⑦ 構造物の底盤直下では、構造物底盤と杭間地盤との間に隙間が生じ易く腐朽しやすい環境が整いやすい。
- ⑧ 地下水位変動域以浅においても、粘性土覆われている場合には、腐朽の進行を著しく低

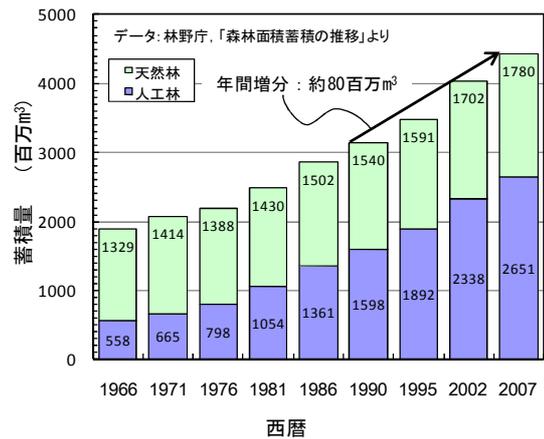


図-9 近年の日本の森林の蓄積量の推移 (林野庁)

下させ、耐久性を向上させる。

#### (5) 木杭の可能供給量と需要量の予測

木材可能供給量は、平成22年度森林・林業白書を参考にした。図-9に、日本の森林の蓄積量の推移を示す。近年では概ね80百万m³/年程度の蓄積増加があることが分かる。2013年以降、少なくとも国産材の国内利用による炭素貯蔵は削減と評価される可能性があり、丸太打設工法での省エネ代替効果と炭素貯蔵効果に期待される。「森林・林業再生プラン」の数値目標として、2020年の国産材伐採量を4~5,000万m³とすることとなっている。日本の森林吸収量は、人工林の高齢化が進行し、2010年頃の90年比3.8%から2020年頃では2.5%へと大きく減少するとされ、伐採更新量を今のうちから増やした方が長期的には森林吸収量は増加するとの試算がある。木杭打設工法代替による木材需要量は、新規需要として貢献が大きい。

土木木材利用の推計のために、旧建設省、現国土交通省が3年ごとに行っている「建設資材・労働力需要実態調査報告(土木部門)」の工事種別毎の木材投入量原単位を用いた。1994年調査から木材資材は全て調査対象資材から除外されたため、データは無い。国土交通省には再び木材資材を調査対象にするよう強く要望したい。また、アンケート調査により各分野における木材利用ポテンシャルの推計を行った。

図-10に、土木における木材投入量の推計値を示す。公共・民間・総計の全体的な推移では、150~250万m³/年の間にあったが、2000年を一つのピークに単調減少し2007年では130万m³/年程度になった。さらに歩留まり、他機関における推計値はかなり小さいこと、下げ止まりがなければさらに減少したとも捉えられることを考慮し、現状の使用量を100万m³/年と推計した。

図-11に、地中海洋分野における木材利用のポテンシャル推計値を示す。この値は、アンケートより求めたものである。液状化対策

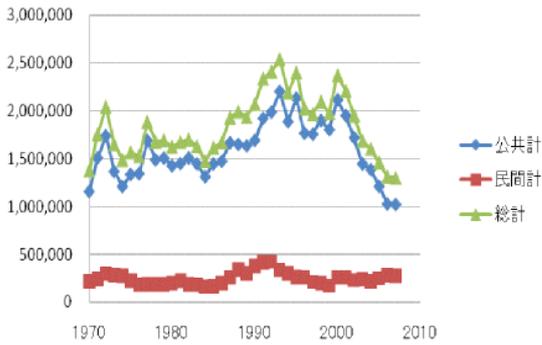


図-10 土木における木材投入量推計値

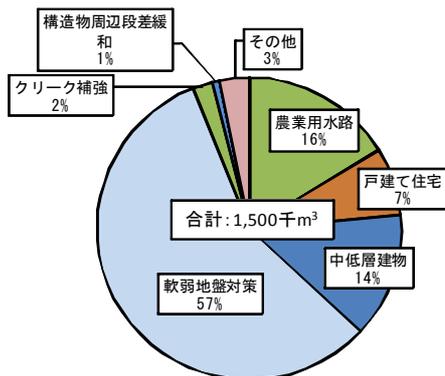


図-11 地中海における木材利用ポテンシャル推計結果

を含めた軟弱地盤改良などで利用される木材量は、850千 $m^3$ /年程度と推計された。

#### (6) 木杭活用によるCO<sub>2</sub>削減効果

図-12に示す深さ4m、底面が縦5m横20mのトレンチに人工の軟弱地盤を作製し、そこへ実大の木杭を打設する実験を実施した。これに関する植林から工事までに排出した二酸化炭素量と地盤に打設された丸太に貯蔵された炭素量を実際に計測し比較を行った。

図-13に、木杭打設による炭素貯蔵量と植林から工事の各作業における二酸化炭素排出量を示す。本工事の場合、工事による二酸化炭素排出量よりも木杭に固定された炭素貯蔵量の方が大きく上回り、工事することが二酸化炭素削減に寄与することがわかる。各工程では、木杭打設、サンドマット、盛土の作業工程で二酸化炭素排出量が多く、この内訳では10tダンプによる運搬による排出が多い。材料を可能な限り現場近くから調達するいわゆる地産地消とすることが二酸化炭素排出削減に大きく貢献することがわかった。

#### (7) 木杭による液状化・流動化対策のためのガイドラインの作成

以上の成果について以下のガイドラインとしてまとめた。

##### ① 本ガイドラインの意義

- ・地球温暖化防止対策および林業再生のためには木材需要の拡大が重要であり、液状化対策として木材を使用することを積極的に

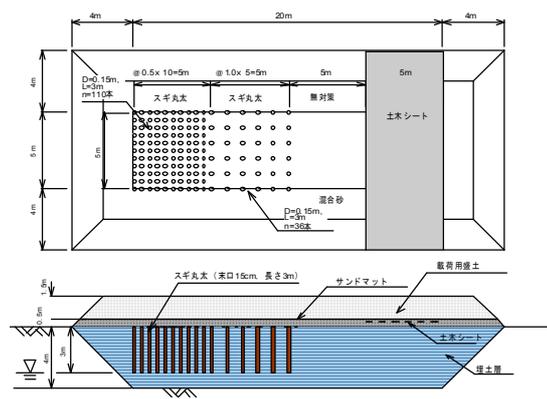


図-12 実大木杭打設による軟弱地盤対策実験の概要

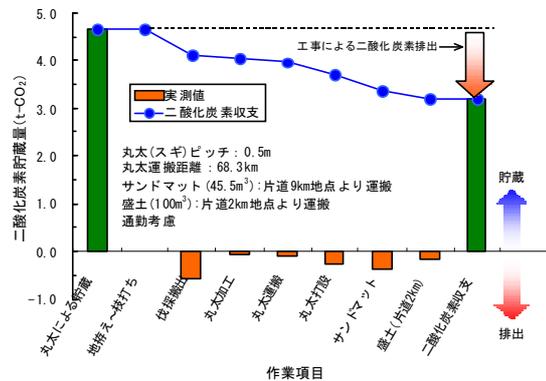


図-13 丸太打設による炭素貯蔵量と工事による二酸化炭素排出量

考えるべきである。

- ・木材は地盤中の地下水位以下では腐朽せず、地盤の液状化の生じる条件下では長期耐久性を有する。
- ② 液状化対策として木杭を用いる場合の温室効果ガス削減効果
- ・丸太打設を液状化対策として用いた場合には、省エネ効果と炭素貯蔵効果が期待でき、従来工法と比較して、大幅な温室効果ガス削減効果が期待できる。
- ・液状化対策として用いる木杭の製造時までに要するエネルギー消費量は少なく、その消費量は、砂を材料として用いるSCP工法とほぼ同等で、セメント固化系のCDMと比べると圧倒的に少なく、CDM工法を木杭に代替すると省エネ効果が大きい。
- ・液状化対策として木杭は、長期耐久性があるので炭素貯蔵効果が期待できる。
- ・液状化対策として木杭を打設すると、工事自体が温室効果ガス削減となる場合がある。
- ・工事による二酸化炭素排出では、ダンプ運搬での排出量が多く、地産地消とすることが二酸化炭素排出削減に大きく寄与する。
- ・木材を使用し温室効果ガス削減に寄与するには、森林における伐採後の再植林は絶対条件である。

- ・地中に設置した木材からメタンが発生した場合には、温室効果ガスの発生側になる可能性があり、今後これについて調査研究を行う必要がある。
  - ・温室効果ガス削減に大きく寄与するためには、地中における半永久的な炭素固定を行うことが有効である。
- ③木杭による液状化・流動化対策効果
- ・木杭間隔を短く打設するほど杭間地盤の過剰間隙水圧の発生は抑制され、液状化対策効果が上がる。
  - ・液状化により流動化が生じる地盤であっても、木杭打設により構造物の沈下傾斜抑制効果が発揮される。この効果は、液状化層厚に対する杭長が大きいほど効果が大きい。
  - ・盛土基礎の全面に木杭を打設した場合には大きな沈下抑制効果がある。
  - ・盛土法尻に木杭を打設した場合には、杭先端を非液状化層まで打設すると盛土の沈下変形抑制効果が向上する。
- ④木杭を液状化・流動化対策として用いた場合の腐朽について
- ・地中における木材が腐朽する可能性は、図-8によって検討できる。
  - ・今後、各境界について定量的な数値について研究を進める必要がある。
  - ・地中で木材が腐朽しない条件下では、この環境自体が腐朽対策となる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ①沼田淳紀, 外崎真理雄, 濱田政則, 久保光, 吉田雅穂, 野村崇, 本山寛: 丸太打設地盤改良による地球温暖化対策の可能性, 第8回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 査読有, pp.399-404, 2009
- ②Numata, A., Hamada, M., Yoshida, M., Tonosaki, M., Nakamura, H. and Kubo, H.: Effect of carbon storage due to ground improvement by log piling, Ground Improvement Technologies and Case Histories, Geotechnical Society of Singapore, 査読有, pp.783-789, 2009
- ③沼田淳紀, 久保光: 丸太打設による軟弱地盤対策—地中カーボンストック—, 基礎工, 査読無, Vol. 38, No. 1, pp.79-82, 2010

[学会発表] (計9件)

- ①沼田淳紀, 本山寛, 久保光, 吉田雅穂, 濱田政則, 中村裕昭, 外崎真理雄: 丸太打設による地盤改良工事における二酸化炭素排出量と貯蔵量の算出, 第44回地盤工学研究発表会発表講演集, 2009.8.18, 関東学院大学
- ②中村裕昭, 濱田政則, 本山寛, 沼田淳紀:

80年前に施工された木杭の健全性調査, 第44回地盤工学研究発表会発表講演集, 2009.8.18, 関東学院大学

- ③渡辺雄大, 本山寛, 久保光, 吉田雅穂, 沼田淳紀: 地盤特性の違いによるスギ丸太の強度と腐朽の関係について, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 2010.9.3, 北海道大学
- ④沼田淳紀, 本山寛, 直井義政, 久保光, 吉田雅穂, 野村崇: 丸太打設地盤改良実験の工事概要, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, 2009.9.4, 福岡大学
- ⑤吉田雅穂, 濱田政則, 沼田淳紀, 久保光: 福井地震における地盤の側方流動が木杭基礎構造物に与えた影響に関する考察, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 2010.9.3, 北海道大学
- ⑥堤圭司, 岸田健吾, 中谷史規, 濱田政則: 木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究(1)—建物の対策法—, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 2010.9.3, 北海道大学
- ⑦中谷史規, 岸田健吾, 堤圭司, 濱田政則: 木杭基礎による構造物の液状化・流動化対策法に関する実験的研究(2)—盛土の対策法—, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 2010.9.3, 北海道大学
- ⑧吉田雅穂, 沼田淳紀, 久保光: 福井地震を経験した木杭基礎構造物の調査, 第29回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, 2010.9.17, 岐阜大学
- ⑨沼田淳紀, 桃原郁夫, 久保光, 本山寛: 地中における木材腐朽に対する一考察, 第61回日本木材学会大会, 2011.3.20, 京都大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

濱田 政則 (HAMADA MASANORI)  
早稲田大学 理工学術院 教授  
研究者番号: 30164916

##### (2) 研究分担者

外崎 真理雄 (TONOSAKI MARIO)  
(独)森林総合研究所 木材特性研究領域 領域長  
研究者番号: 00353780  
吉田 雅穂 (YOSHIDA MASAO)  
福井工業高等専門学校 環境都市工学科 教授  
研究者番号: 90210723  
沼田 淳紀 (NUMATA ATSUNORI)  
飛島建設(株)技術研究所 主席研究員  
研究者番号: 10443649