

2. 木材の地中利用における耐久性と炭素貯蔵について

沼田 淳紀^{1*}

¹飛島建設株式会社 技術研究所（〒270-0222千葉県野田市木間ヶ瀬5472）

* E-mail: atsunori_numata@tobishima.co.jp

地球温暖化は既に生じている問題であるが、京都議定書の削減目標からは現在遠ざかっているのが現状であり、あらゆる分野での対応が必要になってきている。木材の利活用は、地球温暖化防止対策を進める上で有利であり、現在ほとんど使用されなくなってしまった土木分野においても、木材の利活用を再考すべきである。この具体的な利用方法として、軟弱地盤対策などの地中への利用が考えられる。そこで、ここでは、地球温暖化防止対策を進める上での木材の有効性、木材を地中で利用する場合の優位性を示した後に、地中で長期間利用されていた丸太の腐朽に対する調査結果を概観し、丸太の地盤中における耐久性と、軟弱地盤対策として丸太を用いた場合の二酸化炭素削減効果を紹介する。

Key Words : carbon stock, decay, global warming, ground improvement, wood

1. はじめに

地球温暖化防止対策を進める上で、木材を利活用することが有利であることから、筆者らは土木事業において丸太を地中に打設し軟弱地盤対策とすることを考えてきた¹⁾。ここでは、地球温暖化防止対策を進める上での木材の有効性、丸太を地中利用する優位性、腐朽、炭素貯蔵効果について述べる。

2. 木材の有効性

IPCC第4次評価報告²⁾は、温暖化はもはや疑う余地のないこと、20世紀半ば以降に観測された世界平均気温上昇のほとんどは人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が非常に高いこと、世界平均気温を2~3℃の上昇で安定化させるには今後20~30年の削減努力と投資が大きな影響を持つことを示している。図-1に、日本における温室効果ガスの排出量とその削減対策を示す。京都議定書では日本は1990年比6%の温室効果ガスの削減を約束しているが、1990年以降の温室効果ガスはむしろ増加し、2007年度では9.0%の増加（2009.4.30 環境省発表、確定値）である。このように、

温室効果ガスの削減に対する現状は極めて厳しく、あらゆる分野での対策が必要である。

樹木は大気中から二酸化炭素を吸収し、光合成により酸素を排出し、炭素を樹木として固定し成長するので、樹木の成長は、大気中からの二酸化炭素削減を意味する。このような木材を利活用することは、地球温暖化防止対策として以下の効果がある。(1)セメントや鉄などのエネルギー集約度の高い材料を製造時エネルギーの少ない木材に代替させることによる省エネ効果、(2)化石燃料をカーボンニュートラルである木材に代替させることに

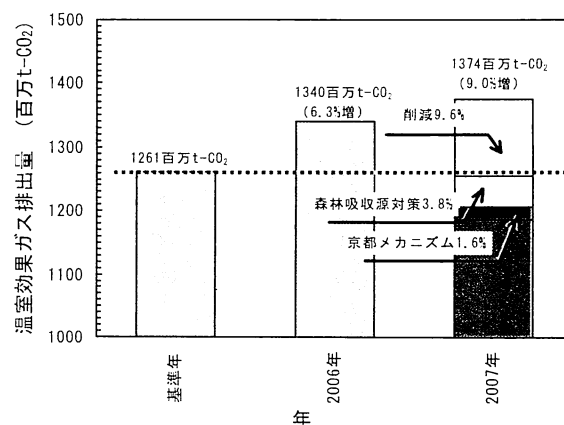


図-1 日本の温室効果ガス排出量と削減策（2009.4.30 環境省発表確定値）

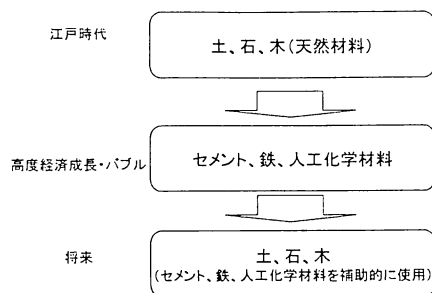


図-2 これからの土木材料の一つの方向性

表-1 土木で用いる場合の木材の長所と短所

	長所	短所
力学的特徴	- 軽い割に強度がある - 弾性材料で粘りがある	- コンクリートや鉄に比べ強度が低い - 乾燥により変形する
一般的特徴	- 放置すれば自然に戻る - 燃料として利用できる - 見た目や感触がよい - 生産時のエネルギーが少ない - 炭素を貯蔵できる - 環境負荷の心配が少ない - 間接的な環境効果もある - 加工が容易である - 熱伝導率が低い - 利活用の歴史がある - 国内のほぼ全域で供給ができる	- 腐朽や虫害がある - 可燃性である - 形状のばらつきが大きい - 加工工程が増えれば使用エネルギーも多くなり高価になる - 品質のばらつきが大きい - 長大材を得にくい - コンクリートや鉄のような均質で大きな構造物を作れない - 現在は供給が不安定である

よるエネルギー代替効果, (3)大気中から二酸化炭素を吸収し炭素として固定している木材を長期保存することによる炭素貯蔵効果, (4)更には, 二酸化炭素を吸収する持続的林業を振興し, 林業の経済的地位を高めることで林業が自立する. このような林業の活性化により, 二酸化炭素削減への寄与ばかりではなく, 生物多様性の保全や, 土砂災害防止, 水源涵養, 保健休養などの波及効果も期待できる³⁾.

樹木が成長すれば, その分大気中から二酸化炭素を

削減することができる. しかし, 成長する樹木を放置し続ければ森林の炭素固定量は頭打ち状態となる. 原生林やジャングルは二酸化炭素を大量に吸収しているように思われるが, このような頭打ち状態にあり, 大気中から二酸化炭素を削減することには寄与していない. したがって, 現在の森林やジャングルを減らすことなく, 新しく植林し, 樹木全体の体積を増加させることが効果的である. しかし, 日本では既に国土の約 2/3 が森林で覆われ, 新規造林は実状期待できない. そこで, 間伐により林業を活性化させ樹木の体積増を図ること, これに加え, 例えば, 住宅や家具に木材を使用し, 人間の生活の中で木材の体積を増加させることが大切となる. その意味で,

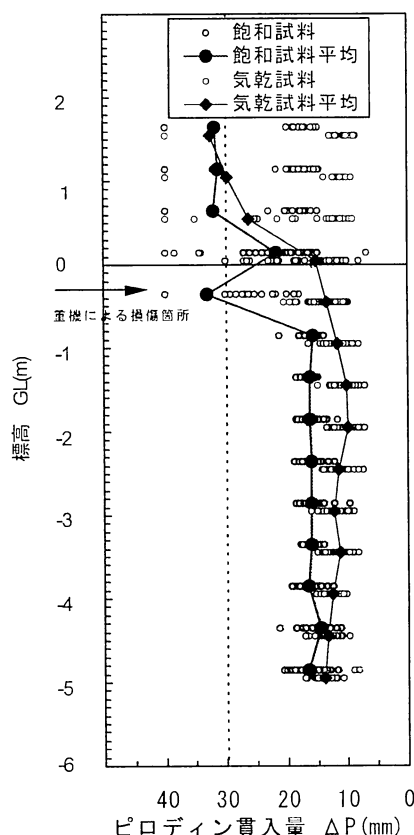


図-3 岩見沢で掘り出した柵支柱丸太の
パイロディン貫入試験結果

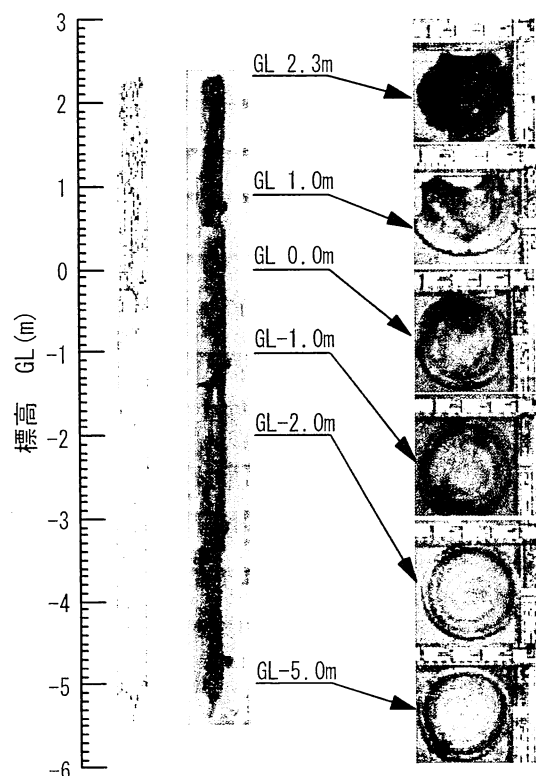


写真-1 岩見沢で掘り出した柵支柱丸太の断面写真

木材を大量に長期間使用することが有効となる. このような木材の新たな利用先として, 現在では積極的に使用することはほぼ皆無となってしまったが, 多数の工種があり規模も様々で基本的に一品生産である土木工事への利用が考えられる.

このような背景から, これからの土木材料の一つの方向性として図-2が考えられる. 持続可能な社会が形成されていた江戸時代は, 土, 石, 木材といった天然材料が主体であったはずである. 1950 年代以降, 高度経済成長を通じ大量のセメント, 鉄, 人工化学材料が使用されるようになり, 環境問題も生じた. 地球温暖化問題が深刻になった現在, 土, 石, 木材といった天然材料を積

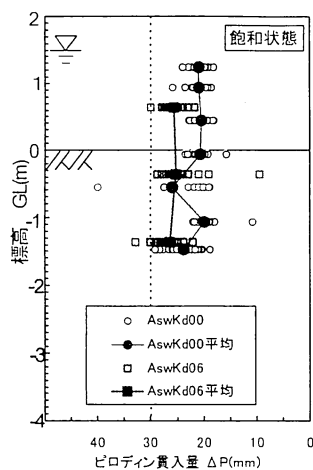


図-4 足羽川で掘り出した橋脚基礎丸太のピロディン貫入試験結果

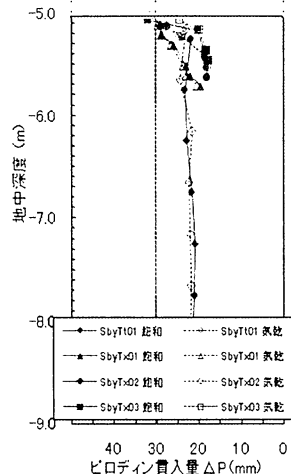


図-5 東京で掘り出された高架橋基礎丸太のピロディン貫入試験結果

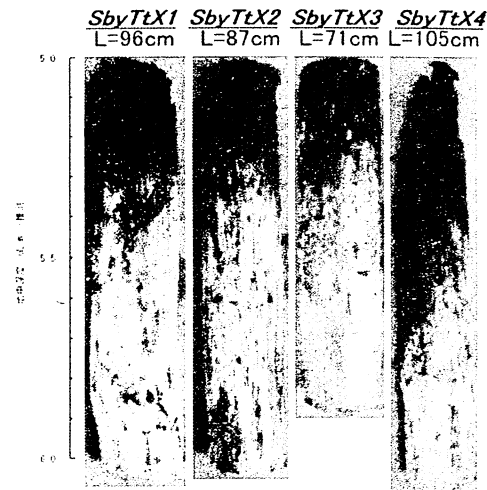


写真-2 東京で掘り出された高架橋基礎丸太の杭頭部の状況

極的に土木材料の一つとして再考すべきである。

3. 木材の地中での利用

前述のように、木材を大量に、かつ、長期間利用することが重要である。ここでは、これを実現する方法として地中での利用が考えられることを示す。土木工事は、規模が大きな工事が多いことから、大量に木材を使用できる可能性が大きい。しかも、森林は全国に分布し工事現場も全国至るところに点在しており、材料供給の点でも土木工事における木材利用は有利である。

表-1に、木材の長所と短所を示す。木材の利用において、特に信頼性を低くしているのは、腐朽や虫害である。これについては、後述するが、木材を地中の地下水位以下で使用することにより解決することができる。そこで、液状化対策や軟弱粘性土地盤対策のような地下水位が高い地盤を対象とした基礎杭や地盤改良材に丸太を用いることが考えられる。このように地中で軟弱地盤対策として木材を使用することにより、加工工程の少ない丸太を用いることによる消費エネルギーの低減、乾燥による変形や可燃性への懸念といった短所を問題とする必要がなくなる。さらに、杭間地盤の密度増加や強度増加を期待し、地盤改良材として使用すれば、木材の強度や形状、品質のばらつきもほとんど無視でき、木材の短所の大半を解消することができる。このように、木材を地中で利用する意義は大きい。

4. 地中における木材腐朽について

木材を土木工事に用いる場合の、最大の課題の一つが腐朽である。ここでは、地中で用いられた木材の腐朽に関する調査結果について示し、地中においては耐久性が高く、特に地下水位以深では極めて耐久性が高いことを示す。

図-3と写真-1は、北海道岩見沢市の泥炭地盤で26年間柵の支柱として用いられていた丸太に実施したピロディン貫入試験の結果と、掘り出した丸太の断面の写真である¹⁵⁾。丸太の樹種は色丹カラマツであり、地下水位はGL-0.6mである。丸太の地表付近上下のそれぞれ1mの範囲には防腐剤が塗布されていた。ピロディン貫入量は、地表付近より上では腐朽の目安となる30mmを大幅に超えているが、それ以深においては凡そ20mm以下であり、丸太が健全であったことがわかる。断面写真においても、地表より上では断面が欠損するほど腐朽が進んでいたが、地表面以深では健全であることが認められた。

図-4は、福井県の足羽川に架けられていた当時木橋の橋脚が57～59年間地中に存置され、その丸太を掘り出し実施したピロディン貫入試験の結果である⁹⁾。丸太は、河川の水面以下であり、主に粘性土地盤に打設されていた。土木の分野で木杭といえば松杭であるが、この樹種はスギであった。図中に示した2本の丸太の結果は、凡そ20～25mm程度であり、50年以上経過したスギであっても水面以深では健全であることがわかる。目視においても、縦方向の繊維は極めて健全であった。

図-5と写真-2は、東京の武蔵野台地下末吉面に刻まれた小規模の谷沿いに位置する高架橋基礎に82年間以上用いられていた丸太を掘り出し実施したピロディン貫入

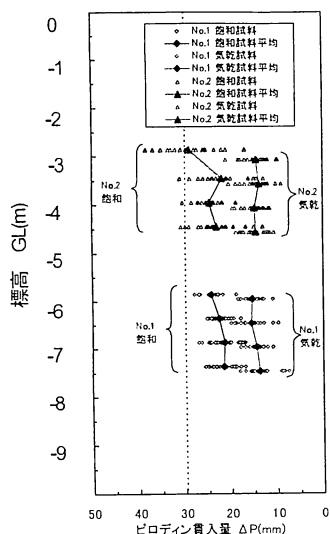


図-6 霞ヶ関で掘り出された建築基礎丸太のピロディン貫入試験結果

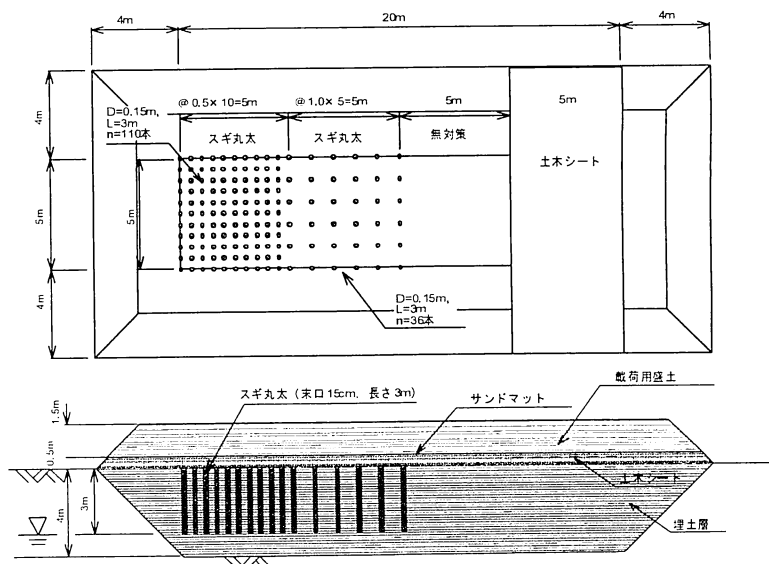


図-7 現場実験ヤードの概要

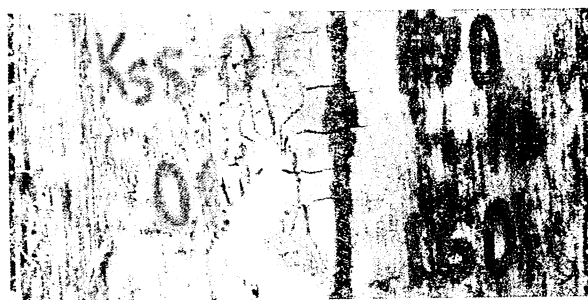


写真-3 霞ヶ関で掘り出された建築基礎丸太の表面の状況

試験の結果と、掘り出した丸太頭部の写真である⁷⁾。なお、本高架橋は、基礎に不具合があったわけではない。杭頭部は地表から深度 5m 程度に位置しているが、地下水位はさらに深く、丸太を掘り出した範囲では認められなかった。地盤は、細粒分質砂である。樹種は、カラマツ属とマツ属であった。ピロディン貫入試験結果は、杭頭部付近で 30mm を超えた結果が見られたが、それ以深では概ね 20mm 程度であり健全であった。また、写真からわかるように、目視において、腐朽しているのは杭頭部の 0.3m 程度で、それ以深は極めて健全であり、丸太によっては杭頭部もほとんど健全であった。腐朽の原因として、腐朽した範囲の地盤が一部埋戻し地盤であったことや、フーチング下部の地盤内に生じた僅かな亀裂が考えられたが、明瞭な原因は明らかにはできなかった。このように、丸太が地下水位より上に位置しても、地盤に十分覆われていれば、腐朽が進行した場合でも、約 80 年間経過後でもせいぜい杭頭部の 30cm 程度であることがわかった。このような腐朽が生じていても本高架橋の基礎機能が維持できていたのは、杭頭部が腐朽しても地盤が支持機能を果たしていた、腐朽していなかった杭

と地盤が支持機能を果たしていたなどが考えられる。コンクリート構造物などの基礎では、30cm の腐朽が致命的になる場合があるが、少なくとも杭全体が腐朽してしまうわけではないことがわかる。

図-6 と写真-3 は、霞ヶ関の建物基礎に使われ、115～116 年間地盤に存置されていた丸太を採取し実施したピロディン貫入試験結果と丸太表面の写真である⁸⁾。地盤はシルト質砂であり、丸太は GL-3～8m 程度の深度から採取した。地下水位は、GL-3m 付近には認められなかった。東京の地下水位は、戦後高度成長期の地下水過剰揚水によって、1965 年（昭和 40 年）頃をピークに数 10m という規模で大きく低下し、その後、回復に転じたが、対象地付近は地下鉄や共同溝に囲まれている影響で、回復基調の地下水位も GL-10m 程度を推移していると推測される。ピロディン貫入量は、飽和状態のものに対し、概ね 20mm 程度であったが、一部 30mm を越えるものがあった。これは、写真-3 に示すように、丸太表面に繊維の切断が認められ、丸太表面の 1cm 程度に腐朽が進行していたことが原因と考えられる。しかしながら、丸太の内部は健全であり、縦圧縮強さは許容応力度を十分に上回るものであった。このように、地下水位が低下した範囲においては、腐朽が丸太表面から進行する場合があるが、この場合においても 40 年間（地下水位低下期間）でせいぜい 1cm 程度の進行速度であることがわかった。

52 地点の構造物基礎の木杭と河川工事に使用された木材についての文献調査結果⁹⁾によれば、地下水位変動域上限が浅は 15 例あり、40% で腐朽が認められたが、60% は健全であった。地下水位変動域は 20 例あり、30% で腐朽が認められたが、70% は健全であった。一方、地下

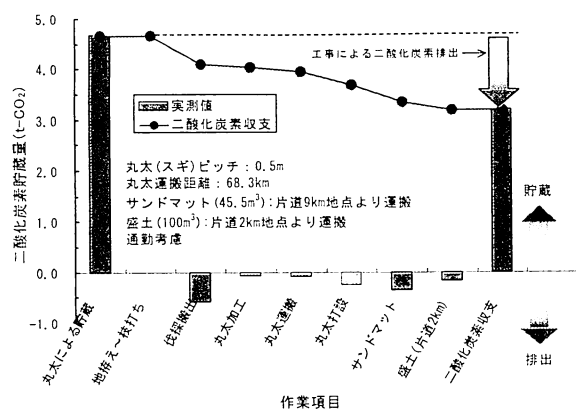


図-8 丸太による炭素貯蔵量と各作業における二酸化炭素排出量

水位変動域下限以深は、28 例あり 100%が健全であった。健全であった樹種の内、29%はスギであった。松杭に限らずその他の樹種であっても地中の地下水位以深では腐朽は進行しないといえる。

さらに歴史的には、1198 年に架けられたと考えられたヒノキの木杭が 1923 年関東地震の液状化で浮上した旧相模川橋脚の事例¹⁰⁾、1846 年に鹿児島県の甲突川の軟弱地盤上に胴木を敷き架けられた西田橋が 1996 年の移設まで使用されていた事例¹¹⁾、東京の汐留遺跡において 1817 年頃に施工された伊達家の胴木を基礎とする石垣が 1990 年代に調査された際も石垣が変形することなく発掘された事例¹²⁾など多数認められ、地盤中の地下水位以深では木材は百年以上の耐久性があるといえる。

ただし、地下水位変動域以浅で、地盤や木材頭部の環境により地盤内でも部分的に腐朽する場合があります。杭丸太を想定した場合に、全長から見れば僅かな範囲に限った話ではあるが、これに対する方法が今後の課題である。

5. 丸太による地盤改良における炭素貯蔵量

丸太を軟弱地盤対策として用いた場合、丸太に炭素が長期固定されるが、工事によっても二酸化炭素の排出がある。これを現場実験により比較した事例を紹介する¹³⁾。

図-7に、実験ヤードの概要を示す。実験は、良好な地盤に、深さ 4m、底面が縦 5m横 20mのトレンチを掘り、そこに人工の軟弱地盤を作製し、丸太を打設した。実験ヤードは、4つの区画に分け、丸太を 0.5m間隔で打設、丸太を 1.0m間隔で打設、無対策、土布シートをそれぞれに施した。丸太は、長さ 3m末口 0.15mである。軟弱地盤の上には厚さ 0.5mのサンドマットと厚さ 1.5mの盛土を施工した。丸太は、林業における地植え植林から盛土施工に至るまでの二酸化炭素排出量を求めた。

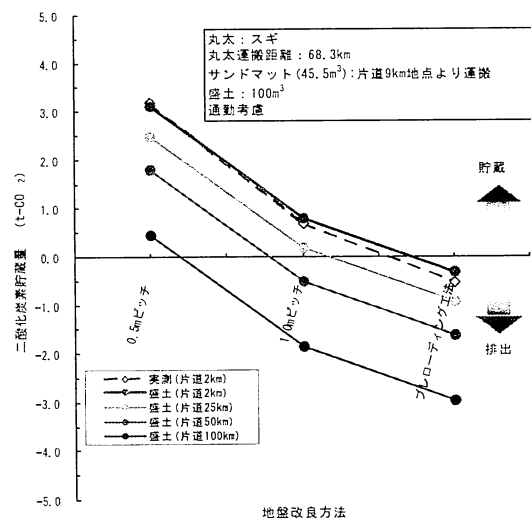


図-9 各地盤改良方法における二酸化炭素貯蔵量

図-8に、0.5m間隔で丸太を打設した場合の丸太による炭素貯蔵量と各作業によ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丸太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。全工程では、伐採搬出、丸太打設、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、この内訳では伐採搬出においては通勤における排出が多く、サンドマットと盛土施工においてはダンプによる運搬による排出が多い。伐採搬出においては、通勤距離を短くし作業人工数を減らすこと、サンドマットと盛土施工においては、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。

図-9に、各地盤対策方法に対する二酸化炭素貯蔵量を示す。無対策は、最も工事による二酸化炭素排出量が少ないと考えられるプレローディング工法に対応するので、ここではそのように記した。各実線は、盛土材の運搬距離を実際の片道2kmに加え、片道25km, 50km, 100kmと想定したときの値である。プレローディング工法では、当然のことながら炭素貯蔵効果を期待できないので、工事による二酸化炭素は排出側となる。一般の工事は、このように常に排出側にある。盛土材料の運搬距離が伸びると二酸化炭素排出量はさらに多くなる。一方、丸太打設を行った場合には、炭素貯蔵効果により、工事を行うことが二酸化炭素削減に寄与していることがわかる。丸太0.5mピッチの打設では、盛土材料を片道100kmの地点から運搬しても炭素貯蔵量が工事による二酸化炭素排出量を上回っていることがわかる。丸太の打設ピッチが1.0mの場合は、盛土材料運搬距離が片道25km程度までは工事による二酸化炭素削減効果があるが、片道50kmとなると二酸化炭素排出側となることがわかる。

以上のように、一般に工事を行うことで二酸化炭素排出となる工事が、このような方法を取ることににより逆に二酸化炭素削減に寄与できることを示した。

6. まとめ

- (1) 地球温暖化対策として木材を大量かつ長期に利用することが有効であり、その一つの利用方法として軟弱地盤対策など地中への木材利用が有効であることを示した。
- (2) 地中における木材は、地下水位以下であれば百年以上の耐久性を保つ。これは樹種によらずスギであっても同様である。地下水位変動域やそれ以浅の場合においても腐朽の進行はかなり遅いと考えられる。ただし、環境によっては全体からすれば僅かであるが、部分的に腐朽が生じる場合もあり、これに対する考え方が必要である。
- (3) 丸太を地中に打設して軟弱地盤対策を行った場合には、丸太による炭素貯蔵量が工事による二酸化炭素排出量を上回り、工事自体が環境対策となり得ることを示し、よりその効果を得るためには二酸化炭素排出の多くを占める運搬距離を減らす地産地消とすることが大切であることを示した。

謝辞：本研究を実施するに当たり、福井県雪対策・建設技術研究所の久保光氏、福井工業高等専門学校の吉田雅穂准教授、福井県総合グリーンセンター野村崇氏、早稲田大学の濱田政則教授、森林総合研究所の外崎真理雄領域長、地域環境研究所の中村裕昭代表取締役、昭和マテリアルの五十嵐誠常務、飛島建設株式会社の上杉章雄氏、

本山寛氏、正田大輔氏はじめ多くの方々に御協力御指導戴いた。ここに記して心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 沼田淳紀，上杉章雄：地球温暖化対策のための木材利用の可能性について，第 14 回地球環境シンポジウム，土木学会，pp.97-102，2006.8.
- 2) 環境省：IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書概要，2007.12.17.
- 3) 外崎真理雄：木材資源循環と二酸化炭素削減，第 58 回日本木材学会大会研究発表要旨集，ST17-1，2008.3.
- 4) 沼田淳紀：土木にける木材利用の可能性－木材利用の環境的意義と地中への利用－，建設物価，pp.30-37，2009.4.
- 5) 沼田淳紀，上杉章雄：岩見沢市で掘り出した木杭の目視観察，第 41 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2403-2404，2006.7.
- 6) 本山寛，沼田淳紀，吉田雅穂，久保光，野村崇，直井義政：足羽川木田橋橋脚基礎に使用された杭丸太の健全性調査，第 44 回地盤工学研究発表会発表講演集，投稿中，2009.8.
- 7) 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，投稿中，2009.8.
- 8) 中村裕昭，安村直樹，沼田淳紀，上杉章雄：中央合同庁舎地下から採取された木杭の健全性評価，土木学会第 63 回年次学術講演会概要集，第 1 部，pp.841-842，2008.9.
- 9) 沼田淳紀，吉田雅穂，濱田政則：木材による 1964 年新潟地震における液状化対策事例，木材学会誌，投稿中
- 10) 高久達将：日本最古橋杭”旧相模川橋脚跡”，土と基礎，40-3(410)，p.58，1992.3.
- 11) 鹿児島県：石橋記念館展示解説書，鹿児島県建設技術センター，2000.8.
- 12) 東京都教育文化財団・東京都埋蔵文化財センター：汐留遺跡，旧汐留貨物駅跡地内遺跡発掘調査概要 I，1995.3.
- 13) 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，地盤工学会，投稿中，2009.7.