1964年新潟地震における木材による液状化対策事例^{*1}

沼田淳紀^{*2}, 吉田雅穂^{*3}, 濱田政則^{*4}

An Example of Applying Wood Piles as a Countermeasure against Liquefaction during the 1964 Niigata Earthquake^{*1}

Atsunori NUMATA^{*2}, Masaho YOSHIDA^{*3} and Masanori HAMADA^{*4}

Increasing the utilization of wood on a long-term basis is considered one of the effective solutions in reducing greenhouse gases. Realizing its potential, construction of highly durable wooden houses has already been undertaken in the architecture field. On the other hand, in the civil engineering field, cases regarding the use of wood as a main structural element almost cannot be found. Here the authors consider driving wood piles into the ground as a countermeasure against ground liquefaction during an earthquake. This study discusses the durability of wood, which is one of the crucial subjects to be properly evaluated in order for wood to become an effective countermeasure material against liquefaction. The purpose is to solve some major misunderstandings concerning the utilization of wood. In this paper, first, changes in typical prescriptions for wood pile foundations in previous design specifications are compiled. Next, the durability of wood is discussed by referring to some past literature. In addition to the above, the case in which wood has acted as a countermeasure material against liquefaction during the 1964 Niigata earthquake is also given, followed by its effect on carbon stock.

Keywords: civil engineering, greenhouse gases, liquefaction, utilization of wood, wood pile.

温室効果ガス削減の一方策として、木材利用を拡大するとともに木材を長期利用することが考えられる。このために建築の分野では、耐久性の長い住宅建設の取り組みなどが既に行われている。一方、土木の分野では、本体工事に木材を使うことはほぼ皆無となってしまった。著者らは、地盤の液状化対策として木材を地中に打設することを考えている。本論文では、この内、木材を利用する上で大きな誤解が持たれている木材の耐久性について検討を行った。まず、代表的な設計書に示される木杭基礎の変遷を示し、現在ではこれらの設計書から木杭の記載が姿を消したことを示す。次に、木材の腐朽に関する文献調査結果から、地中における木材の耐久性について示す。さらに、1964年新潟地震の事例より、木杭が液状化対策として用いられた事例を示し、最後にそれによる炭素貯蔵効果を示す。

1. 緒 言

温室効果ガス削減は、今世紀前半に地球規模で解決しなければならない重要課題である。2008年より京都議定書の第一約束期間が始まり、我が国は、温

室効果ガスを1990年比6%削減しなければならない。温室効果ガスは、1990年以降減少するのではなく、2006年には6.2%とむしろ増加している（2008年5月16日環境省発表）。一方、長期的には世界の排出量を2050年までに半減させることが必要とされ（IPCC第4次評価報告書）、我が国では70-80%の削減が求められる可能性が高い¹⁾。このように、京都議定書の目標値達成は難しい現状であり、第二約束期間以降はさらに難しくなると想定される。したがって、あらゆる分野において、具体的な地球温暖化防止策を早急に考えなくてはならない。そこで、筆者らは土木分野での木材利用の拡大により、地球温暖化防止に貢献することを考えている。土木は、か

^{*1} Received May 29, 2008; accepted October 8, 2008. 本研究の一部は第58回日本木材学会大会（2008年3月、つくば）で発表した。

^{*2} 飛鳥建設株式会社 Tobishima Corporation, Noda 270-0222, Japan

^{*3} 福井工業高等専門学校 Fukui National College of Technology, Sabae 916-8507, Japan

^{*4} 早稲田大学 Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan

つて木材を大量に使用していた分野である。土木とは、そもそも中国の武帝の時代に表された書物「淮南子（えなんじ）」に示される「築土構木」という言葉が語源とされ²⁾、木材との歴史が長い。

現在の土木分野での木材の利用方法として、治山ダム、木橋、ガードレール、遊歩道、沈床、法枠、転落防止柵、防風柵、防音壁、斜面防護工、木杭など³⁾があるが、筆者らは特に地中に打設する杭に着目している。これは、木材が地中に存在する場合には耐久性が高いと考えられるからである。しかしながら、土木の分野では木材利用は森林伐採に繋がるので利用すべきではない、木材は腐朽するので使いたくないなどの意見も依然多い。この中には木材に対する誤解や認識不足も多く、木材を液状化対策として用いる場合の地盤工学的な解決すべき課題とは別に、このような木材の腐朽や温室効果ガス削減への貢献は分けて検討すべき事項である。

そこでここではまず、地盤中での木材利用として歴史の多い木杭基礎の設計法について木杭に関する記述の変遷を示す。次に、文献に示される木材利用事例により、地中における木材の耐久性について示す。さらに、1964年新潟地震の事例より、木杭が液状化対策として用いられた事例を示し、最後にそれによる炭素貯蔵効果を示す。以上を通し、腐朽するので利用できないと一般に誤解されている木材が液状化対策としても利用できる可能性が極めて高いこと、さらには、それにより炭素貯蔵効果も期待できることを示す。

2. 木材の地中利用の可能性

2.1 木杭基礎の変遷

杭基礎の最初は洋の東西を問わず、木杭基礎である⁴⁾。国内では、現在の相模川左岸の茅ヶ崎市国道1号線付近に位置する国史跡「旧相模川橋脚」が、日本最古の橋脚として1924年（大正13年）に史跡保存の指定がなされている。この橋の木杭は、直径60 cm のヒノキで、橋脚は3本を1列とした4列で、列の幅は約7 m、1列目から4列目までの長さは約23 m であり、「源頼朝の御家人、稲毛三郎重成が亡妻の追善供養のため、1198年（建久9年）相模川に架けた橋のものである」と考証されている⁵⁾。この木杭は、1923年9月1日発生した関東地震および1924年1月15日の地震により、当時水田であった地盤が液状化し、突然出現したことで有名である。木杭はこれ以降も広く用いられていたが、1950年代以降はコンクリート杭や鋼管杭が急速に伸び始めた⁴⁾。

Table 1 に土木と建築の木杭基礎についての設計の変遷を示す。土木と建築における構造物基礎の設計書の代表として、それぞれ現在の道路橋示方書⁶⁻¹⁰⁾と、建築基礎構造設計指針¹¹⁻¹⁴⁾に示される木杭に関する記述を示した。表中の細い空欄は、経過年数が視覚的に分かるように、1年を1行として示した。表には、1955年（昭和30年）1月21日に閣議決定された「木材資源利用合理化方策」も併せて示した。この方策は、国内の森林の過伐により木材資源の枯渇が懸念されたことから、建築物の木造禁止の範囲を拡大することや、橋梁、その他土木施設土木建築仮設材料、杭、柱等は、鉄鋼、軽金属、コンクリート等の耐久製品につとめて切替えるよう必要な措置を講ずることを謳ったものである。その後、それぞれの設計書が改訂される度に、木杭に関する記述量も減り、道路橋示方書では1976年に、建築基礎構造設計指針では1988年に木杭に関する記述は遂に姿を消した。このように、現在木杭が使われなくなった要因として、木杭に関する項目がこれらに代表される設計書から姿を消したことが考えられる。この背景に「木材資源利用合理化方策」のような政策的な要因も考えられるが、この方策が設計法にどのように波及していったかは明確ではない。この方策が設計法にどのように影響をおよぼしたのかは今後検討すべき事項だと考えられる。

2.2 木材腐朽に関する文献調査結果

木杭が使われない別の理由として、木材の腐朽がある。木材の腐朽は、水、空気、温度、栄養の4つの条件が適切に揃えば進行するが、これをもって木材は腐朽するので使用すべきではないといった誤解を生んでいるようである。また、土木の分野では杭の樹種は松（マツ属と言った厳密な意味の樹種を示しているのではなく、トガサワラ属やカラマツ属なども含めて呼ばれているようである）であり、現在の基礎工設計マニュアルなどに示される木杭には、単に「木杭」とせず「松杭」と記述されているものもある¹⁵⁾。このような工事担当者の松に対する意識を「根強い松信仰」とし、スギの需要が伸び悩む要因と捉える場合もある¹⁶⁾。そこで、近年、地中や河川などに使われていた木材について文献を収集し、木材の腐朽と樹種についての現状を調査した¹⁷⁻²⁰⁾。

調査は、主に構造物基礎を対象とした地中にある木杭と、河川工事に使用される木材を対象とし、(1)土木学会年次学術講演会論文集（1999年～2006年の8年分）、(2)地盤工学会地盤工学研究発表会講演概要集（2002年～2006年の5年分）、(3)その他の全部

Table 1. Changes in prescriptions for wood pile foundations in design specifications of civil engineering structures and buildings.

Year	<i>Specifications for highway bridges by Japan Road Association</i>	<i>Recommendations for Design of building foundations by Architectural Institute of Japan</i>
1955	Policy to improve efficiency of wood resource utilization by the Cabinet	
		Described in section "Fundamentals of pile foundation design."
1960		Described in section "Allowable stress intensity of pile materials."
		Allocated as provision "Wood pile" in section "Design for pile foundation."
		Described in section "Joint of pile."
1964	Given in table "Pile classification" in provision "Definition." Given in table "Young's modulus of pile materials" in section "Design for loading after completion." Described in provision "Joints between pile head and footing." Allocated as section "Wood pile" in chapter "Structural details."	
1966	Allocated as provision "Wood pile" in chapter "Materials." Allocated as provision "Wood pile" in chapter "Allowable stress intensity and allowable bearing capacity."	
1968	Allocated as provision "Wood pile," in section "Product, transportation, storage and testing." Allocated as provision "Wood pile" in chapter "Finishing for pile head."	
1974		Described in section "Allowable stress intensity of pile materials." Allocated as provision "Wood pile" in section "Design for pile foundation."
1976	Prescription for wood pile is excluded from the specifications.	
1988		Prescription for wood pile is excluded from the recommendations. For small-scale buildings, other design manuals must be referred.
2001		The use of wood piles is not considered, as clearly stated.

Note : One line indicates one year.

で53の文献を調べた。なお、対象とした論文は、16), 18)～61)である。調査項目は、(1)対象構造物、(2)木材用途、(3)使用場所、(4)施工時期、(5)調査時期、(6)設置期間、(7)樹種、(8)木材寸法、(9)地盤との関係、(10)地下水位、(11)木材の腐朽状態（地

下水位以浅、地下水位変動域、地下水位以深）、(12)その他である。

調査により52地点のデータが得られた（同一地点であっても樹種が異なる場合は2地点とした）。ここで、「健全」と数えたものは、健全と判断できる

記述があったもの、強度やピン貫入試験などにより評価されたもの、木杭などで支持力が十分あるものや構造物に沈下傾斜の障害などが認められないものである。この中には木杭表面に腐朽が認められたが、杭全体としては強度が十分あり木杭としては機能を果たし健全と評価されているものも含まれる。構造物の一要素としての木杭が「健全」であるとは、木材に部分的な腐朽が認められたか否かよりも、構造物の一要素として木杭の機能を維持しているか否かが重要であると考えられるので、「健全」をこのように定義した。

得られたデータの内約3割が鉄道または道路橋梁の基礎、約2割がビルまたは住宅の基礎、約3割が河川構造物である。ここで河川構造物とは、沈床、樋門基礎、聖牛、ウッドブロック、牛杵、杭柵、板柵などである。52地点の樹種の内訳は、松または松杭と記述されたものが3割である。この中には、カラマツ（カラマツ属）、アカマツ（マツ属）、ベイマツ（トガサワラ属）が含まれると考えられるが、これらを総称して松杭とすると、松杭は全体の約5割である。一方、スギも全体の約4割を占める。構造物基礎の用途を鉄道および道路橋基礎、ビル住宅基礎、火力発電所水路基礎に限ると、これらに対する樹種は7割がカラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭であり、スギが1割弱である。一方、河川構造物に用いられた木材の樹種は、約2割がアカマツ、ベイマツを含めた松杭で、残り8割はスギである。木材の設置期間は、約半数が10年未満で、約3割は50～90年であり、データの中で最も設置期間の長いものは、90年であった。

Fig. 1～Fig. 3に、それぞれ地下水位変動域以浅、

Fig. 1. Percentage of decay for wood above the changing range of groundwater level.

地下水位変動域、地下水位変動域以深における木材の腐朽状態を示す。地下水位変動域以浅や変動域では、健全であったものが6割（9件）と7割（14件）であるが、腐朽したのも4割（6件）と3割（6件）である。このように、地下水位変動域以浅では、腐朽する場合としない場合がある。一方、調査した事例の範囲では地下水位変動域以深では、100%（28

Fig. 2. Percentage of decay for wood within the changing range of groundwater level.

Fig. 3. Percentage of decay for wood below the changing range of groundwater level.

件)が健全であり、地下水位以深では木材は極めて腐朽の進行が遅く、土木工事への適用性を考えた場合、実状腐朽しないといっても良い。ただし、前述のように、ここで定義する「健全」の中には、木杭表面に腐朽が認められたものも含まれる。この場合は、調査時点で常時地下水位以下にあったとしても、過去には地下水位が一時的に低下していた事などが考えられる。

Fig. 4に、地下水位変動域以深における樹種の割合を示す。樹種は、カラマツ、アカマツ、ベイマツを含めた松杭が5割以上を占め、スギも3割近く存在している。スギも地下水位以深であれば腐朽が進行せず健全であることがわかる。図中には、それぞれの樹種の内、最も古かった年代を併記した。前述の通り、木材は条件によっては腐朽するので、土木用の材料として不適切であると誤解されている。この誤解を解くには、耐久性試験を行って実証する必要がある。その試験方法としては促進試験、または、長期間の耐久性試験が考えられる。長期間の耐久性試験は、最も信頼性が高いと考えられるが、その結果が得られるのは遠い将来となる。幸いなことに、土木の分野では古くから木材が使われており、これらの状態を知れば長期耐久性試験を実施したと同じこととなる。その意味で、最も古い年代は貴重なデータである。土木材料の中で大きな比重を占めるコンクリートの耐用年数は、50年とされる場合が多く⁶²⁾、これが長期健全性を評価する一つの目安になる。アカマツ、ベイマツ、松杭、および、スギはいずれも50年以上経過したものがあり、地下水位以深であれば50年以上の長期間健全な状態を保つことが確認された。地下水位以深で木材の健全性が維持されるのは、空気が遮断されるためであり、実際には

このような条件であれば、樹種に関係なく、50年を遥かに超える長期間、木材は健全性を維持することが容易に推測できる。したがって、地盤中の地下水位以深に木材を設置した場合には腐朽の心配は極めて少ないといえる。木材は、コンクリート杭や鋼管杭よりも歴史があり、長期健全性についてはむしろ信頼性の高いデータを数多く示すことができる。

2.3 木材の液状化対策材としての可能性

前節で明らかにしたように、一般的な構造物の耐用年数を考えた場合、木材は地盤中の地下水位以深では樹種に関係なく腐朽しにくいと言える。このような木材の特徴を活かした利用方法として、地震時に生じる地盤の液状化に対する地盤強化材が考えられる。

地盤の液状化現象は、地下水位以下の飽和した、緩い、均質な粒径の非塑性の砂からなる地盤に、ある程度以上の地震外力が作用すると生じる。緩い飽和した砂にある程度以上の外力が作用すると、砂は間隙を締めようとし、間隙水の排水が必要となる。地震の主要動の時間は、一般に数秒から数十秒である。砂は通常用いる場合には排水性が高い材料だが、このような短時間では間隙水は排水が間に合わず、上載圧を土粒子同士が支えていた状態から水が支えた状態に移行し、これによりせん断抵抗を失い地盤が液体のような状態にいたる。前述の条件の内、一つでも取り除くことが液状化対策となる。また、液状化対策が必要な地盤は、発生条件から地下水位以深に限られることになるので、木材の耐久性を維持するためには最適な条件である。

実際の地盤の液状化対策は、砂を杭状に地盤に打設することが多く行われている。砂杭を緩い地盤に打設すると、打設された砂杭の体積分地盤内の土粒子が占めていた体積は小さくなり、地盤は砂杭打設前より密に強化される。この他に、間隙水を速やかに排水させる方法や、セメントなどで地盤を固める方法なども行われる。粘性土などの軟弱地盤対策では間隙水を排水させるのに砂杭を用いるが、液状化対策の場合には前述の通り砂杭自体が液状化してしまうので、排水用の材料としては一般には粒子径の大きな礫材などを用いる。ここでは液状化対策として、この砂杭の代わりに木材の杭を用いることを考えている。砂を木材に代えるだけなので、支持杭のような圧縮強度や曲げ強度などを期待する必要はなく、長期にわたり体積を失わないことが重要となる。

Table 2は、木材の長所と短所を力学的な特性とその他の木材としての特徴に分けて示したものである。木材は、生産時のエネルギーを必要としない、

Fig. 4. Wood species used below the changing range of groundwater level.

Table 2. Advantages and disadvantages of wood as a material for structural purposes.

	Advantages	Disadvantages
Mechanical performance	<ul style="list-style-type: none"> • High strength to weight ratio • Possess elasticity and ductility 	<ul style="list-style-type: none"> • Lower strength than concrete or steel • Shape changes due to drying
Other relevant features	<ul style="list-style-type: none"> • Energy is not necessary during production • Possible to stock carbon • Environmental friendly • Indirect positive effect on environment • Possible to be used as a source of energy • Easy to process • Low thermal conductivity • Has long history of use 	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptible to decay and insect damage • Flammable • High variation in shape • High variation in quality • Difficult to obtain in large dimensions • Unstable supply • Cost increases with processing

二酸化炭素を固定化できるといった環境的な利点や、力学的にも軽い割に強く弾性材料で靱性も高いといった長所がある。反面、腐朽や虫害がある、可燃性である、形状や品質のばらつきが大きい、加工工程が増えると高価になる、長大材を得にくく、力学的には、コンクリートや鉄に比べ強度が低く、乾燥により変形するなどの短所を持つ。しかし、液状化対策材として用いると、前述のように腐朽や虫害の心配がなく、加えて、地盤中なので燃焼の心配がなく、丸太の打設なので加工もほとんど不要であり、乾燥による変形も問題とならない。さらに、地盤の密度増加を期待する木杭打設であれば体積の長期維持が重要であるので、木材の品質や強度もほとんど気にする必要がない。このように、木材を液状化対策材として使用することで木材の短所が少なくなり木材の長所を活用することが可能となる。

3. 1964年新潟地震における 新潟駅の事例の考察⁶³⁾

3.1 新潟地震の概要

地盤の液状化現象は、1964年新潟地震以来広く知られるようになり、この地震以降多くの研究が行われ、現在ではこれに対する設計法も確立されている。しかしながら、1964年新潟地震の時に、既に液状化対策を意図して木杭を打設した新潟駅の事例があるので、これを考察する。

新潟地震は1964年（昭和39年）6月16日13時01分に発生し、そのマグニチュードは7.5、最大震度はⅥ（ただし、旧震度階）、震源は新潟県沖深さ40 kmであった。この地震による被害は、死者26名、住宅被害は、全壊1960棟、半壊6640棟、床上浸水9474棟、床下浸水5823棟、一部損壊67825棟である⁶⁴⁾。この地震の特徴は、液状化による地表変位に基づく被害がほとんどで、振動による被害が少なかったことである⁶⁵⁾。広い範囲でこのような表層地盤の変状や地

盤の不安定化による構造物被害が認められたことから、この地震による被害の特徴を表現するために、地盤災害という言葉もよく用いられる⁶⁶⁾。特に新潟市では広い地域で液状化が発生し、被害のほとんどはこれに起因するものであった。地盤が液状化することで地盤が流動化し、信濃川に架かる万代橋上流側の護岸などでは、最大8 m以上もの永久変位が生じた⁶⁷⁾。土田⁶⁸⁾によれば、「約40年前には、極々少数の人を除いて、一般市民は言うに及ばず、研究者や技術者すら液状化とそれによる被害のことを認識していなかった。当然構造物の設計においても液状化は考慮されていなかった。……しかしながら、液状化は約40年前に突然、構造物の設計における重要な考慮事項として現れたのであった。」とあり、この地震以前、液状化はほとんど知られない現象であったことがわかる。

3.2 新潟駅の液状化被害と液状化対策事例

斉藤⁵⁵⁾、鉄道技術研究報告⁶⁹⁾、および、地震当時の国鉄職員へのヒアリング結果によれば、当時の新潟駅と地震による被害は以下の通りである。当時の新潟駅をFig. 5⁵⁵⁾に示す。新潟駅は、主にRC造地下1階地上4階建ての本屋と、地上6階建ての支社からなる。これらの基礎は、手小荷物扱所が直接基礎、駅本屋が末口22.5 cm長さ7.5 m（杭間隔約1.5 m、末口部での改良率（杭断面積/改良範囲面積）= 17.7 %）の松丸太基礎、コンコース上の連絡建屋および支社が直径30 cm長さ6 mのPCコンクリート杭（2本継ぎ、杭間隔不明）であった。基礎の木杭は1956～1957年（昭和32～33年）頃に打設され、新潟駅本屋は1958年（昭和33年）に開業した。地震当時の地下水位は、くみ上げ過ぎで地盤沈下が激しかったためちょうど規制ができ、GL-0.5 m程度であった。

地震後新潟駅では、ホームへ渡る地下道は泥水で埋まり、アメのように曲がったレールや建造物の基礎周辺には液状化による噴砂が多数確認され、地震

Fig. 5. Front view of Niigata Station building (Touched up of the one cited in reference 55).

直後の新潟駅周辺を撮影した写真⁷⁰⁾においても噴砂を確認することができる。Fig. 6⁷¹⁾に、新潟駅とその周辺における地盤の永久変位を示す。図中には、航空写真から認められた噴砂の位置、地割れも併記した。図中の矢印は水平の永久変位量を cm 単位で示してある。新潟駅周辺では1mを越える永久変位があったことがわかる。なお噴砂とは、地盤が液状化すると前述の通り地盤内の間隙水圧が上昇しせん断抵抗が著しく低下するので、地盤表層付近が不安定な状態となり亀裂が生じ、この亀裂などを通して液状化層の砂を大量に含んだ液体が地表に噴き上げ、地表に堆積する砂のことである⁷²⁾。このような理由により堆積した砂なので、噴砂が確認された地

点は確実に液状化が生じたといえる。そこで、地震後の被害調査などでは、この噴砂の確認をもって液状化地点の特定に用いられている。これらの事実より、新潟駅では明らかに液状化が生じたと言える。これにより、車庫や事務室などは沈下傾斜し、ホームは約45 cm、駅前広場も全体的におおよそ40～50 cm 沈下した。さらに、支社は不同沈下が10 cm 程度生じ駅前広場側に0.55度、右側に0.40度傾斜し、左側の手小荷物扱所も被害を受けた。一方、木杭で支えられた本屋は健全であった。

このように本屋が健全であったのは、当時では極めて珍しいことであるが、液状化対策を施した結果である。齊藤⁵⁵⁾は、当時木杭基礎について次のよ

Fig. 6. Permanent ground displacement at Niigata Station and its surroundings⁷¹⁾.

うに述べている, 「……流砂現象のおそれは十分あり得ると言う結論に達した。それで基礎底面から-12 mの支持層までゆるい砂層を締固めると共に, 建物荷重を支持層に確実に伝達するために杭基礎とすることとし, 末口22.5 cm, 長さ7.5 mの松丸太745本(1.5 m 間隔程度)を打設した。……」なお, 当時地盤を締固める適用実験も行われたが満足な結果が得られなかったので, 設計としては完全な支持杭基礎として設計し, 実際には数多くの木杭が打設された⁶⁹⁾。一方, 支社側は, 支持杭の本数としては設計上十分であったかもしれないが, 本屋と比較すると杭本数は遥かに少なく杭間地盤の締固め効果が期待できなく, この差が本屋と支社の被害の差になったのであらうとされている⁶⁹⁾。

Fig. 7とFig. 8に, 地震後と現在の新潟駅の様子を示す。現在の新潟駅が, 当時のままであることがわかる。本屋は, 地震後被害がなかったことから, 2008年の現在もなお当時の木杭基礎のまま使用されている。1956年頃に液状化対策として設計され打設

された木杭が, 1964年新潟地震において液状化対策としての機能を果たし, 杭打設後52年経過後も基礎としての機能を維持しているといえる。

ただし, 木杭打設が液状化対策として設計の中で見込まれていたのであるが, 木杭打設そのものが液状化発生を低減したのか, 地盤は液状化したが杭としての機能が失われず建屋の被害がなかったのか, さらには, 地下室があったため構造物としての安定性が高まり地盤が液状化し支持杭の機能も低下したが構造物が傾斜する被害を低減したのかなど, 液状化対策としてのメカニズムは現段階では必ずしも明らかではなく, 今後地盤工学的な検討が必要である。一方, 木材の耐久性の視点から言えば, 木材が液状化対策として構造物基礎に取り入れられ, それが液状化被害を免れ52年以上も機能していることから, 少なくとも体積を保持することが重要である地盤を密にする液状化対策材料として, 木材は十分使用可能だと言える。さらに, この事例は木材により地盤を密にすることで液状化発生を防いだ実事例となる可能性があることがわかった。

3.3 新潟駅の液状化対策事例による炭素貯蔵効果

木杭はコンクリート杭や鋼管杭に比較し杭製造時に排出される炭素量が圧倒的に少ないので, コンクリート杭や鋼管杭から替えるだけでも省エネ効果が期待できる。

さらに木杭は, 52年間地盤中に設置されているので, 森林と同様に炭素貯蔵していると捉えることができる。これによる炭素貯蔵量を推定する。

元口も末口と同直径だと仮定すると, 松丸太745本の体積は, 222 m^3 となる。松丸太の全乾比重を0.5とすると, この質量は111 tとなる。木材1 t当たりの炭素量は樹種によらずほぼ 0.5 t-C/t-wood なので⁷⁴⁾, 打設された松丸太による炭素貯蔵量は 55.5 t-C である。これを二酸化炭素換算すると, Cの原子量は12, CO_2 の分子量は44より, 204 t-CO_2 に相当する。以上より, 新潟駅の基礎として用いられた木杭により, 少なくとも 56 t-C (204 t-CO_2)の炭素貯蔵効果があったといえる。なお, 元口は末口より太く, また, 設計時の末口寸法は最小径が示されていると考えられることから, 実際にはこれ以上の炭素貯蔵効果があったと言える。1990年の日本の温室効果ガス総排出量は二酸化炭素換算で約 $1261000000 \text{ t-CO}_2$, 日本の人口は現在約127690000人(2008.5.1現在, 総務省発表)より, 国民一人当たり 10 t 二酸化炭素を排出していたこととなる。削減目標はこの6%なので, 新潟駅の基礎は, 京都議定書目標値の最低約340人分の年間排出量を貯蔵できたことになる。

Fig. 7. View of Niigata Station just after the earthquake (Photo possessed by the library of JSCE, Photographer: Shigeru Kuranishi and Tatsuo Takahashi)⁷³⁾.

Fig. 8. Present view of Niigata Station (In 2004).

国内の排出量と比べると、この量は決して大きなものではないが、工事を通じて確実に炭素貯蔵が行われるのも事実である。

一般に、工事を行う際には施工にともない炭素を排出することになる。前述の通り新潟駅の場合には基礎工事に木材を使用したことにより、省エネ効果に加え炭素を貯蔵したこととなるので、工事全体を考えると大幅な炭素排出量削減に貢献したと想定される。さらには、土構造物や木材などの天然材料を主とした構造物であれば、それ自体を製造するときに排出される炭素量は僅かであるので、工事にともなって排出される炭素量は工事全体で貯蔵された炭素量を下回る可能性があり、このような場合には、省エネ効果よりさらに進み、工事自体が温室効果ガス削減に寄与できることとなる。

4. 結 論

1. 土木の分野では、木杭はかつて使われていたが、現在では設計法からも姿を消し、これが土木分野で木材を使用しにくくしている要因の一つである可能性がある。
2. 土木の分野で木杭といえば松杭であり、木材は腐朽する可能性が高いと誤解されているが、地盤中の地下水位以深で木材はスギを含め樹種に関係なく腐朽の進行は極めて小さい。
3. 現在も使用されている新潟駅は、1956年頃に液状化を考慮し木杭基礎が設計され、1964年新潟地震ではその周囲が激しく液状化したにもかかわらず無被害であり、打設後50年以上経過した現在もなお基礎として有効に利用され、液状化対策の材料として木材が十分使用可能であることがわかった。
4. 新潟駅では、木杭基礎を用いることで少なくとも56 t-C (204 t-CO₂) の炭素貯蔵効果があり、工事全体を考えれば省エネ効果と炭素貯蔵効果があり、大幅な炭素排出量削減に貢献したと想定される。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C）（一般））、研究課題：カーボンストックを目的とした丸太打設による地盤の液状化対策技術の開発の補助を受けて実施したものである。また、本研究を実施するに当たり、当時国鉄職員の阿部正強氏に話を伺うとともに貴重な資料を御提供戴いた。関係各位に、心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) 外崎真理雄：第58回日本木材学会大会研究発表要旨集、つくば、2008、pp. 817-820.
- 2) 日野幹夫：“土を築き木を構えて”，森北出版、東京、1994、pp. 17-19.
- 3) 土木学会建設技術研究委員会自然素材活用技術研究小委員会：“自然素材を利用した土木構造物・土木技術に関する調査研究報告書”，川嶋信義編、土木学会、東京、2006、pp. 55-83.
- 4) 塩井幸武：土と基礎 54-6 (581), 9-12 (2006).
- 5) 高久達将：土と基礎 40-3 (410), 58 (1992).
- 6) 日本道路協会：“道路橋方書・同解説 I 共通編Ⅳ下部構造編”，丸善、東京、1980.
- 7) 日本道路協会：“道路橋下部構造設計指針・同解説くい基礎の設計篇”，丸善、東京、1976.
- 8) 日本道路協会：“道路橋下部構造設計指針くい基礎の施工篇”，丸善、東京、1968.
- 9) 日本道路協会：“道路橋下部構造設計指針調査および設計一般篇”，丸善、東京、1966.
- 10) 日本道路協会：“道路橋下部構造設計指針くい基礎の設計篇”，丸善、東京、1964.
- 11) 日本建築学会：“建築基礎構造設計指針”，丸善、東京、2001.
- 12) 日本建築学会：“建築基礎構造設計指針”，丸善、東京、1988.
- 13) 日本建築学会：“建築基礎構造設計規準・同解説”，丸善、東京、1974.
- 14) 日本建築学会：“建築基礎構造設計規準・同解説”，日本建築学会、東京、1960.
- 15) 福井県建設技術公社：“基礎工設計マニュアル”，福井県建設技術公社、福井、2005、pp. 311-319.
- 16) 三宅裕司、橋本 茂、網田克明：徳島県立農林水産総合技術センター森林林業研究所研究報告 2, 17-24 (2003).
- 17) 沼田淳紀、上杉章雄、吉田雅穂、久保 光、源済英樹、野村 崇：第57回日本木材学会大会研究発表要旨集、広島、2007、Q09-1300 (CD-ROM).
- 18) 沼田淳紀、上杉章雄、吉田雅穂、久保 光、野村崇：第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、地盤工学会、札幌、2007、pp. 85-90.
- 19) 吉田雅穂、沼田淳紀、上杉章雄、久保 光、源済英樹、野村 崇：土木学会第62回年次学術講演会概要集、第7部、広島、2007、pp. 183-184.
- 20) 上杉章雄、沼田淳紀：第43回地盤工学研究発表会発表講演集、広島、2008、pp. 2171-2172.

- 21) 皆川恵三, 田村昌仁, 篠塚重夫, 久保 豊: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 1391-13927.
- 22) 兼平雄吉, 田村昌仁, 篠塚重夫, 久保 豊, 皆川恵三: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 1393-1394.
- 23) 久保 豊, 田村昌仁, 篠塚重夫, 皆川恵三, 兼平雄吉: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 1395-13967.
- 24) 田村昌仁, 黒柳信之: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 1397-1398.
- 25) 中村 博, 水谷半介: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 1399-1400.
- 26) 増田貴之, 水谷半介: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 1401-1402.
- 27) 上杉章雄, 沼田淳紀: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 2401-2402.
- 28) 沼田淳紀, 上杉章雄: 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 鹿児島, 2006, pp. 2403-2404.
- 29) 羽矢 洋, 西岡英俊, 西田尚史, 木村礼夫: 第40回地盤工学研究発表会発表講演集, 函館, 2005, pp. 1557-1558.
- 30) 稲葉智明, 羽矢 洋: 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, 秋田, 2003, pp. 1377-1378.
- 31) 沼田淳紀, 上杉章雄: 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 第 7, 草津, 2006, pp. 253-254.
- 32) 横川勝則, 塩井幸武, 福井次郎, 藤原 稔, 妹尾義隆, 柳沢博美: 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 第 1, 草津, 2005, pp. 13-14.
- 33) 吉田好孝, 運上茂樹, 塩井幸武, 藤原 稔, 石田稔, 矢部正明: 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 東京, 第 1, 2005, pp. 21-22.
- 34) 佐藤信彦, 天野 勲, 宇野浩樹: 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 第 3, 東京, 2005, pp. 517-518.
- 35) 佐藤信彦, 宇野浩樹, 天野 勲: 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 第 3, 東京, 2005, pp. 537-538.
- 36) 羽矢 洋, 稲葉智明, 太田陽一, 赤坂大介: 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 第 3, 東京, 2005, pp. 817-818.
- 37) 飯島悠也, 片田敏行, 末政直晃, 田中 剛: 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 第 3, 東京, 2005, pp. 733-734.
- 38) 浜口 武, 井谷雅司, 堤 祥一, 大下武志: 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, 第 3, 豊田, 2004, pp. 961-962.
- 39) 杉尾 哲, 佐藤英敏: 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, 第 2, 徳島, 2003, pp. 493-494.
- 40) 浜口 武, 井谷雅司, 堤 祥一, 大下武志: 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, 第 3, 徳島, 2003, pp. 1269-1270.
- 41) 高田直俊, 土橋 徹, 天野賢志: 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 第 3, 熊本, 2001, pp. 384-385.
- 42) 賛田秀世, 友利方彦, 石井秀明: 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 第 4, 熊本, 2001, pp. 626-623.
- 43) 古川俊也, 板垣直行: 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 第 6, 熊本, 2001, pp. 504-505.
- 44) 杉尾 哲, 中澤隆雄: 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第 2, 仙台, 2000, II -144.
- 45) 山田昌郎: 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第 5, 仙台, 2000, V -172.
- 46) 稲田達夫: 鉄鋼技術 (STRUTEC), 61-67 (2002).
- 47) 加藤英雄, 長尾博文, 香川 聡, 田中俊成, 伊藤嘉文, 内村 智: 第50回日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, 2000, p. 110.
- 48) 山田周平, 稲田達夫, 小川一郎, 田口典生, 永井香織, 真島正人: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 東北, 2000, pp. 1069-1070.
- 49) 稲田達夫, 山田周平, 小川一郎, 田口典生, 真島正人: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 東北, 2000, pp. 1067-1068.
- 50) 成和機工株式会社: “丸ノ内ビルディング松杭の鉛直載荷試験報告書”, 成和機工株式会社, 東京, 1999, pp. 1-45.
- 51) 木方洋二, 小林拓治郎, 岸 雅泰, 清水 昇, 高木靖人: 名大演報 No. 10, 81-87 (1990).
- 52) 木方洋二, 金川 靖, 奥山 剛, 服部芳明, 高田喜久夫: 名大演報 No. 10, 71-80 (1990).
- 53) 川上敬介, 大原明神: 木材工業 55(4), 165-169 (2000).
- 54) 佐々木晴美: 基礎工 9(2), 91-96 (1981).
- 55) 斉藤勉孝: 第 7 回地震工学研究発表会講演論文集, 1964, pp. 39-43.
- 56) 吉田耕作, 松井 保: 地下水技術 42(7), 52-61 (2000).
- 57) 富田 徹, 高山明久: 株式会社ピーエス三菱技報, No. 2, 20-21 (2004).
- 58) 松岡真悟: H13年版 愛媛県材試業務成績報

- 告書, 34-35 (2002).
- 59) 松岡真悟: H12年版愛媛県材試業務成績報告書, 30-31 (2001).
- 60) 杉尾 哲, 中沢隆雄, 瀬崎満弘: 土木学会第47回年次学術講演会, 第2, 仙台, 1992, pp. 514-515.
- 61) 杉尾 哲, 中沢隆雄, 瀬崎満弘: 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第2, 吹田, 1991, pp. 218-219.
- 62) 土木学会: “土木工学ハンドブックⅡ”, 土木学会編, 技報堂, 東京, 1989, p. 2178.
- 63) 沼田淳紀, 吉田雅穂, 宮島昌克, 上杉章雄: 第58回日本木材学会大会研究発表要旨集, つくば, 2008, Q18-1115 (CD-ROM).
- 64) 宇佐美龍夫: “新編日本被害地震総覧”, 東京大学出版会, 東京, 1996, pp. 350-356.
- 65) 土質工学会: 土と基礎, **12**(8), 3-20 (1964).
- 66) “昭和39年新潟地震災害調査報告書”, 土木学会新潟地震災害調査委員会編, 土木学会, 東京, 1966, pp. 29-32.
- 67) 浜田政則, 安田 進, 磯山龍二, 恵本克利: 土木学会論文集, No. 376/Ⅲ-6, 211-220 (1986).
- 68) 土田 肇: 港湾学術交流会年報, No. 40, 13-18 (2003).
- 69) 鉄道技術研究所: 鉄道技術研究所報告, No. 448, Nov., 1964.
- 70) 地盤工学会: “液状化災害発生直後の新潟市街地航空写真集”, 液状化災害発生直後の新潟市市街地航空写真集編集委員会, 地盤工学会, 東京, 1999.
- 71) Hamada, M., O'Rourke, T. D.: *Technical report* NCEER-92-0001, 3-59 (1992).
- 72) 沼田淳紀, 森伸一郎, 陶野郁雄, 遠藤邦彦: 土木学会論文集, No. 638/Ⅲ-49, 311-324 (1999).
- 73) 土木学会: http://library.jsce.or.jp/Image_DB/shinsai/niigata/kuranishi/photolist.html (閲覧日: 2008年5月20日).
- 74) 木材科学講座3 物理第2版, 高橋 徹, 中山義雄編, 海青社, 大津, 1995, p. 23.