地盤改良と木材 ～液状化対策の観点から～

高知大学　教育研究部自然科学系理工学部門　教授　原　　忠

1．地盤改良と木材

人類が豊かな生活を送るために，様々な土木構造物が利用されています。日本人は古くから森と共生し，生活の一部に木材がありそれを様々な用途に活用してきました[1)]。国外では，数千年前の遺跡や中世にはすでに石造りの寺院や城を見ることができ，その一部は現在も雄大な姿を見せています。一方我が国では，縄文時代，弥生時代から古代，中世，近世，近代，現代に至るまで木材の利用が活発で，特に建築構造物は昭和初期までほとんどが木造です。土木構造物においても木材の利用が活発で，明治時代になるまでは木材なしには工事を進めることができない状況でした。これらの構造物はすべて地盤に支えられていますが，施工される場所は，固い岩盤からヘドロに至るまで様々で，構造物を支える能力は場所により大きく異なります。特に山地が多い我が国では，戦後の高度成長期以降，土地利用が平野部の干拓地や旧河道，海岸埋立地など軟弱地盤地域に拡大しました。その結果，構造物の沈下や変形，液状化などの地盤災害が毎年のように報告されるようになり，その対策が急務になりました。

地盤工学用語辞典[2)]によれば，「軟弱地盤」は建造物の基礎地盤として十分な地耐力を有しない地盤を示し，一般に，柔らかい粘土，シルト，有機質土，緩い砂質土などの土層で構成される，と定義されています。我が国には，沖積平野，沼沢地，山間の谷部などに堆積した沖積地，あるいは埋立地，盛土などの人工地盤が多くあり，地盤災害に起因した構造物の被害を軽減するためには，構造物を支持するための対策工や地盤そのものの変形を抑制するための事前対策が必要になります。

軟弱地盤を改良するために木材を用いた事例は国内外を問わず古くからあり，土木・建築構造物の基礎として多くが現存しています。1987年に世界遺産として登録されたヴェネツィアが木杭基礎で支えられた街として世界的に有名で，ヴェネツィア湾にできた干潟（ラグーナ）に築かれた水の都は，軟弱地盤中に構造物の基礎として大量の丸太の杭が打ち込まれ，現在もそのまま利用され有数の観光地になっています。我が国においても，1950年代の高度成長期に至るまで，豊富な森林資源を土木・建築資材に積極的に活用し，構造物を支える杭基礎として丸太を地盤中に大量に埋設してきました。史跡「旧相模川橋脚」（茅ヶ崎市）が日本最古の橋脚として知られ[1)]，1928年（昭和3年）に完成した長野県諏訪市の片倉館[3)]，1932年（昭和7年）に完成した宮崎県庁舎[4)]は比較的大規模な建築構造物として現在も供用されています。このように，軟弱地盤に打設された丸太は長期間機能が継続することが知られています。**図1**は青森県八戸市旧第二魚市場の鉄筋構造物基礎として，約60年間埋立地盤内に埋設された松丸太です。現地より回収した丸太（末口径約190mm，材長約4000mm）は，三村らの研究[5),6)]で示されたとおり，**写真1**に示すように杭頭で物理的損傷がみられるものの，目視で確認する限り生物劣化は生じていません。このように，地盤改良を目的とした木材の利用は，コンクリートや鋼材を利用する工法に比べ遥かに長い歴史を持ち，親和性が高く，改良効果が長期間維持されることは明らかです。

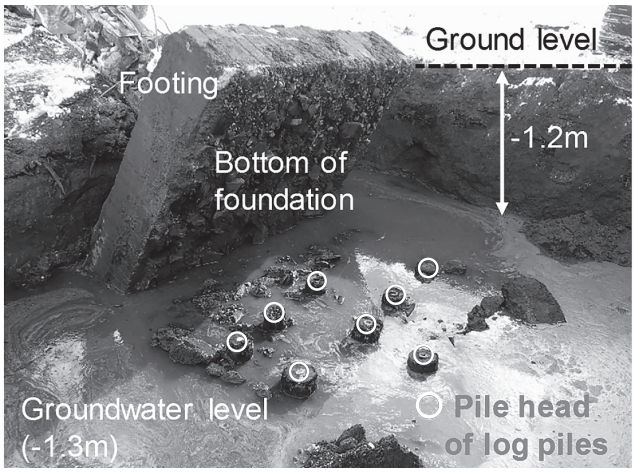

図1　埋立地盤内に長期間埋設された松丸太
（青森県八戸市旧第二魚市場）

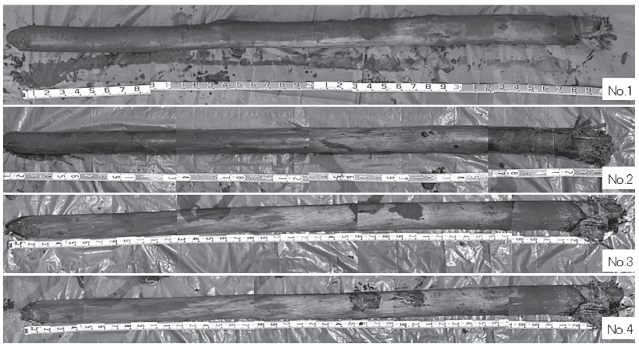

写真1　八戸市旧第二魚市場より回収した
松丸太の外観

2．液状化対策と木材利用

地盤の液状化現象は，埋立地など地下水で飽和され緩く堆積している砂地盤で，地震などによる繰返しせん断力が作用して生じる現象で，地面から土を含む水が勢いよく噴出し，辺り一面が泥に覆われた状態になることがよくあります。液状化が生じると，**写真2**のように建物に沈下や傾斜が生じたり，**写真3**のように地中埋設物が浮上したり，**写真4**のように河川堤防などの盛土構造物に沈下やすべりが生じるなど，地上あるいは地中の構造物に様々な被害を与えます。液状化の被害を抑制しながら，構造物の耐震性を向上させるためには，地盤の密度を増加させるなど，地震時のせん断抵抗を高める必要があります。

写真2　液状化後の地盤沈下で大きく傾斜した家屋
（2018年北海道胆振東部地震，札幌市清田区）

写真3　浮上した地中埋設管
（2011年東北地方太平洋沖地震，千葉県浦安市）

写真4　河川堤防の被災状況
（2003年宮城県北部地震，鳴瀬川）

筆者らは，木材を利用した新しい液状化対策工法として，民間企業と共同で丸太打設液状化対策&カーボンストック工法（LP-LiC工法）を実用化しました[7]。この工法は，**図2**に示すように，丸太を地中に打設することで密な地盤に改良する液状化対策としての効果に加え，丸太に固定された炭素を半永久的に貯蔵することによる地球温暖化対策としての効果[8]を併せ持ちます。緩い砂地盤を対象地盤とし，丸太頭部は，地下水位面以下に設置することを基本としますが，丸太頭部付近は空気に触れることで腐朽や蟻害などの生物劣化を生じる可能性があるので，杭頭部を被覆するなどの処理を行います。

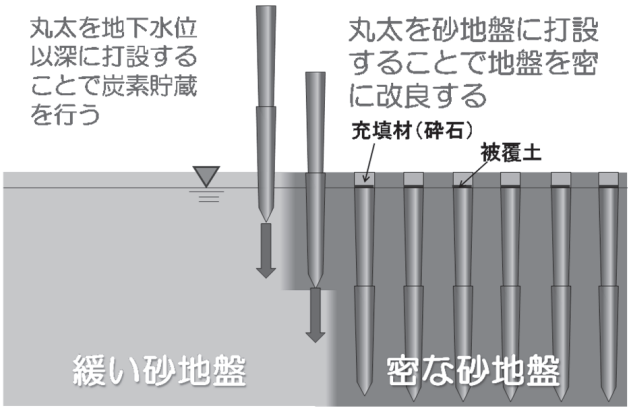

図2　LP-LiC工法による地盤補強と地球温暖化対策の原理[7)]

炭素貯蔵効果は，LP-LiC工法で得られる付加価値の一つです。**図3**は地盤改良工事1㎥当たりの温室効果ガス削減量を示したもの[8)]で，図中の縦軸の符号は+（プラス）が排出量，－（マイナス）が貯蔵量を示しています。これによれば，丸太に貯蔵される炭素貯蔵量は，丸太の運搬や施工過程で排出される二酸化炭素量に比べ圧倒的に大きく，例示した改良範囲と改良深さにおいて，地盤改良工事完了後には1㎥当たりの温室効果ガスが76.0kg-CO_2貯蔵されることが分かります。このように，既存工法に比べ，LP-LiC工法は防災面のみならず，地球環境対策に対する貢献度が極めて高いといえます。

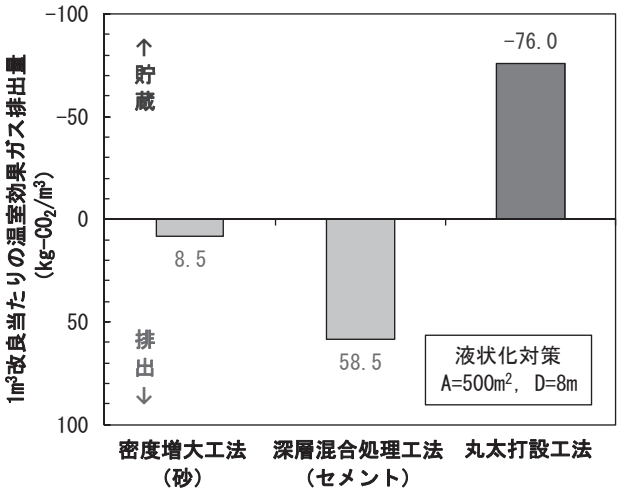

図3　地盤改良工事1m³当たりの温室効果ガス排出量と貯蔵量の収支[9)]

LP-LiC工法は現在までに，**写真5**に示す南海トラフ地震の震源地に近い高知市の新庁舎建設工事（丸太打設総本数：約15,700本），**写真6**に示す青森県八戸港館鼻岸壁液状化対策工事（丸太打設総本数：約8,600本）などの複数の土木・建築工事として採用され，地域材を活用した地産地消型工事の輪が全国に広まっています。

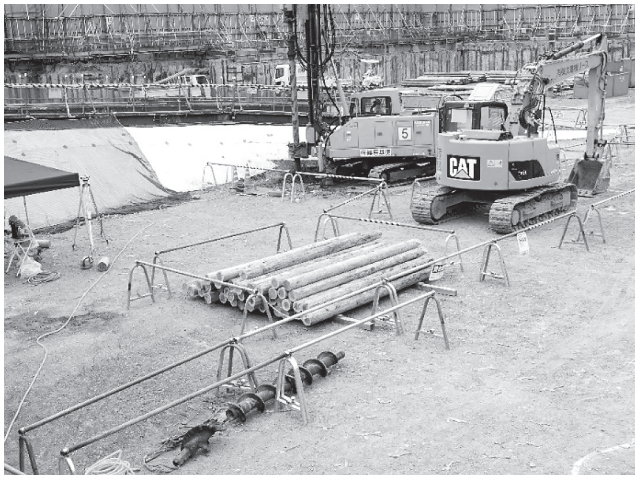

写真5　高知市新庁舎建設液状化対策工事（2019年竣工）

写真6　青森県八戸港館鼻岸壁液状化対策工事（2016年竣工）

3．土木分野への木材の利用普及に向けて

土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会（（一社）日本森林学会，（一社）日本木材学会，（公社）土木学会の3学会で構成）では，地球温暖化の緩和と林業再生，持続可能な建設産業を目指した取り組みとして，土木分野への木材の利用普及に向けた取り

組みを加速化しています。目指すべき方向性として，次の4項目を掲げ，2017年3月には林野庁と国土交通省に，土木分野での木材利用拡大についての第二次提言を行いました[10)]。

1）木材の炭素貯蔵・材料省エネ代替・化石燃料代替効果などによる地球温暖化対策への貢献
2）木材を利活用した持続可能な方法による国土強靭化の推進
3）森林･林業再生による新規雇用の創出および地方創生
4）森林国家日本から発信する土木木材利用拡大による持続可能な建設技術の海外への展開

我が国では，高度経済成長期以降にコンクリートや鋼材などの普及と利用が急速に進み，木材に触れる機会の乏しい土木・建築技術者や行政担当者からは，地盤内に埋設された木材の施工後の健全性や機能性に対して疑念や誤解を持たれるケースが少なくありません。このような背景から，社会的認知度が低く豊富な森林資源の利活用が進んでいない状況です。純国産資源で長い歴史を持つ木材が，我が国の防災対策に活用されることを「あたりまえ」とするためには，土木工学や木材工学などを専門とする研究者が連携しながら定量的な研究成果を社会に周知し，木材を利用するうえで障害となっている要因を早期に解消する必要があります。

筆者らは，2019年度より科学研究費助成事業（基盤研究C，課題番号：19K06170）の支援を得て，埋立地盤での木材の腐朽に関する研究に取り組んでいます。液状化対策工法の有用性と確実性，信頼性を向上させるため，他機関に所属する研究者と協働しながら，地盤内で生物劣化が生じる要因の体系化を進めています。将来的には液状化改良材として木材を利用する上での技術的な設計・施工上の留意点をマニュアル化することにより，地産地消型の防災技術を普及させるための具体策を提示する予定です。

【参考文献】

1）土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会：2014年度土木における木材の利用拡大に関する横断的研究報告書，pp.1-93，(2015).
2）(公社) 地盤工学会：地盤工学用語辞典，p.415，丸善出版，(2006).
3）東南海大地震体験者の会：東南海地震記録集，(1994).
4）宮崎県：県庁舎建築修繕（五），(1932).
5）三村佳織，原　忠，加藤英雄，本田賢児，中内卓也：汽水域における木材の劣化要因に関する考察，木材保存論文集，Vol.43-1，pp.2-12，(2017).
6）三村佳織，原　忠，加藤英雄，野口昌宏，平田晃久，本田賢児，松橋利明：建設発生木材の地中利用への再利用と判別法の提案，木材学会誌，Vol.63，No.5，pp.214-222，(2017).
7）飛島建設，兼松日産農林，昭和マテリアル：丸太打設液状化対策&カーボンストック工法，先端建設技術・技術審査証明報告書，先端建設技術センター，(2014).
8）沼田淳紀：丸太を埋めた液状化対策とCO_2固定，土木技術，70(2)，pp.43-48，(2015).
9）C. Kayo, C, Hashimoto, S, Numata, A. and Hamada, M.: Reductions in greenhouse gas emissions by using wood to protect against soil liquefaction, Journal of Wood Science, 57(3), pp.234-240, (2011).
10）土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会：提言「土木分野での木材利用拡大に向けて」－地球温暖化緩和・林業再生・持続可能な建設産業を目指して－，(2017)