

丸太打設液状化対策&カーボンストック（LP-LiC）工法の開発

Development of Log Piling Method for Liquefaction Mitigation and Carbon Stock

沼田 淳紀 ^{※1}	筒井 雅行 ^{※1}	村田 拓海 ^{※1}	山口 澄靖 ^{※2}
Atsunori Numata	Masayuki Tsutsui	Takumi Murata	Sumiyasu Yamaguchi
佐藤 和夫 ^{※3}	鶴見 哲也 ^{※4}	榎園 庄一郎 ^{※5}	加藤 賢二 ^{※6}
Kazuo Sato	Tetsuya Tsurumi	Syouichirou Enokizono	Kenji Kato

【要旨】

丸太打設液状化対策&カーボンストック工法は、丸太を地下水位の浅い緩い砂地盤に、地盤改良材として打設することで、丸太に生物劣化を生じさせることなく、長期間炭素貯蔵を行いながら、地盤の密度増大を図る、環境負荷の極めて小さい液状化対策工法である。本工法は、2004年度に工法の発想に至り、翌年より基礎研究が開始され、2011年度中期より本格的に液状化対策工法としての開発を行い、2013年度に第三者評価を取得した。本稿では、開発の背景と工法の概要について述べる。

【キーワード】 液状化対策、密度増大、丸太、地球温暖化、炭素貯蔵

1. はじめに

丸太打設液状化対策&カーボンストック（Log Piling Method for Liquefaction Mitigation and Carbon Stock）工法（以降、LP-LiC 工法と呼ぶ）は、液状化対策と炭素貯蔵を同時に行い、地震減災と地球温暖化緩和を両立させ、持続可能な建設事業により安心安全な社会構築を目指すものである。

LP-LiC 工法の発想は、軟弱地盤対策として木杭の使用を技術提案したことに始まる。この時、木杭が地中で100年近く経た後も全く健全な状態で確認されること、国内の森林資源が現在極めて豊富であること、木材を軟弱地盤対策工事に使用することで木材の長期利用が可能となりそれが炭素貯蔵を可能とすること、木杭の利用は持続可能な資源を安価に建設事業で活用し温室効果ガス削減に寄与できることなどを学んだ。これを基に、2004年度に着想し、翌年よりFSを含め基礎研究を開始した。その後、2011年東北地方太平洋沖地震の影響を受け、この年の途中より本格的に液状化対策工法の開発に着手した。開発では、6現場9地点の実証施工を実施し、2013年12月25日には一般財団法人 日本建築総合試験所より建築技術性能証明（GBRC 性能証明 第13-17号）、2014年3月31日には一般財団法人 先端建設技術センターより技術審査証明（技審証第2504号）を取得した。

軟弱地盤対策に使用できる木材利用量のポテンシャルは、木材の材積で約150万 m^3/y あると言われている¹⁾。この量は、現在の日本の国産材利用量（1,969万 m^3/y ）²⁾の8%程度となり、国産材利用率を現在の約2倍の50%

に引き上げる国策の中で、新規需要として期待されている。また、この量が炭素貯蔵されたと仮定すると、二酸化炭素換算にして約90万 $t-CO_2/y$ の貯蔵（一般家庭約25万世帯分の年間二酸化炭素排出量に相当）ができることになり、地球温暖化緩和への貢献も期待できる。LP-LiC工法は、このような地球温暖化緩和への貢献を発生確率が高まっている巨大地震による液状化対策を実施しながら、同時に実現させることが基本的なコンセプトである。以下、LP-LiC工法の開発背景と工法の概要を述べる。

2. 開発の背景³⁾

2.1 地球環境

IPCC 第5次報告（2013年9月）⁴⁾によれば、「気候システムの温暖化には疑う余地がない」ことが再確認され、その要因として「人間の影響が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因であった可能性が極めて高い（95%以上）」とされている。これから温室効果ガスの削減に最大限努力し、温度上昇を安定させることができたとしても、1°C程度の上昇は覚悟せざるを得なく、このまま対策を施さなければ4°C程度の上昇が予測されている。この現実、特に高齢者が実権を握っている産業界にとっては関心の低いものであっても、若年層にとっては無視できない深刻な課題である。地球という閉じた系の中で暮らす人類にとって、地球温暖化対策は今世紀前半に解決しなければならぬ喫緊の課題である。建設事業も、経済性や合理性のみを考えるのではなく、社会倫理を考え、本来の土木（Civil Engineering）に立ち返り、持続可

1. 技術研究所, 2. 首都圏土木支店浦安幹線 B-1(作), 3. 首都圏土木支店高エネ研機械棟立坑(作), 4. 大阪支店白山甚之助(作), 5. 大阪支店土木部, 6. 名古屋支店三重営業所

能性や温室効果ガス削減を積極的に考える必要がある。

大気中の二酸化炭素濃度は、大局的にみれば、森林の作用や生物の化石化や海洋などにより減少し続けてきた。大気中の二酸化炭素は、自然のサイクルの中では、大気から地中へと固定化され続けてきたのである⁵⁾。この作用により、二酸化炭素濃度は、何十%もあった地球誕生当初より 340ppm (0.034%) 程度へと減じ、大気も安定したのである。温室効果ガスの問題は、二酸化炭素を始めとする温室効果のある気体が、大気中にあることが問題であり、これが個体として固定化され、地中などに封じ込められれば大気中の温室効果ガスの削減となる。

自然のこのような作用により気温は安定化し、その恩恵で、700 万年前には人類が誕生し、つい最近まで自然とともに繁栄してきた。ところが、地球の歴史の中では、産業革命以降の極めて短期間に、一気に安定固定されていた化石燃料を掘り出し大気へと放出し、地球環境に大きな影響を及ぼし、我々もその異変に気が付き始めた。

2.2 木材利用による温室効果ガス削減効果

木材は、光合成により二酸化炭素を吸収し炭素を木材として固定化し酸素を放出する。木材の成長は、大気中からの二酸化炭素削減に大いに貢献している。ただし、ジャングルや樹海のような広大な森林が大気中からの二酸化炭素削減に寄与しているかと言うと、そうではない。成熟した樹木は二酸化炭素の吸収量が低下し、一方で呼吸も行い、枝葉が落ちそれが分解され二酸化炭素を放出しており、吸収と排出が平衡状態となっている。したがって、大気中からの二酸化炭素削減には寄与していないのである。勿論、大きな炭素の貯蔵庫とはなっていない。

樹木の炭素固定能力を利用し、人為的に大気中の二酸化炭素を削減する方法として、(a)植林し樹木を増やすこと、(b)間伐を行い樹木の成長を促すこと、(c)木材として長期に使用し木材の全体量を増やすことが上げられる。

樹木の増加は確実に大気中の二酸化炭素削減に結びつくので、砂漠化した土地などでは積極的に植林を行うことが大気中の二酸化炭素削減に寄与する。しかし日本は、既に新規造林できる土地はほとんどない。この場合でも、間伐を実施し、木材の成長を促すことで樹木の体積を増加させることができる。さらに、成長した樹木を伐採し、これを長期貯蔵することで木材の体積を増加させることが可能である。伐採した木材を木材製品などとして使用し続けられれば、これらも炭素を固定しているので、伐採後も使用している限り炭素貯蔵量が減じることがない。加えて、伐採後新たに植林を行えば、成長した分はさらに炭素固定量が増加することとなる。これを繰り返すことで木材の体積を増やすことが可能となる。炭素貯蔵の観点からは、都市部で木材を使用することは、都市部に新たな森を作るのと同じである。

木材利用により、(a)炭素貯蔵、(b)省エネルギー、(c)化石燃料代替、(d)森林活性化、の各効果が期待できる⁶⁾。

炭素貯蔵効果とは、前述の通り木材を長期利用し、大気中の二酸化炭素を削減させる効果である。省エネルギー効果とは、製造時エネルギーの大きなセメントや鋼材などに替えて、加工時にほとんどエネルギーを必要としない木材を使用することで、エネルギー消費の差分だけ温室効果ガス発生量を削減する効果である。LP-LiC 工法は、この炭素貯蔵効果と省エネルギー効果が大きいのが最大の特徴である。

2.3 日本の森林事情

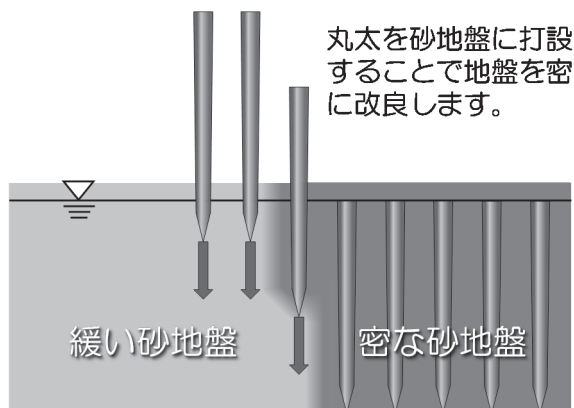
日本は、国土の68%に当たる2,487万 ha が森林であり、その内約4割に当たる1,032万 ha が人工林である。日本の森林率(国土面積に占める森林面積の割合)は、フィンランドに次いで2位で、人工林面積も第4位である⁷⁾。このように、現在日本は、森林国家である⁸⁾。

日本の森林面積の推移は、1966年以降ほとんど変化していない。一方蓄積量(樹木の大きさの総量)は、全体では2倍以上、人工林では約5倍にまで成長している。しかしながら、年齢別面積では、45年前後の面積が多く、伐採期を迎えた樹木が豊富に存在している一方で、それより若齢の面積が少ない。このまま推移すれば50年を超える高齢の面積が70%程度となり、日本の森林もいわゆる高齢化社会を迎える。これを解決するには、伐採期を迎えた樹木を伐採し、植林により若い世代へ世代交代し、法正林化(成長に合わせて適宜伐採植林することで、樹木の年齢構成が平滑化される状態)を目指す必要がある。

樹木は、健全な林業を継続的に実施する限り、化石燃料とは異なり無限に得られる資源であり、日本は現在それが極めて豊富で、ふんだんに使用すべき時期にある。

2.4 液状化対策の必要性

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波により甚大な被害が発生したが、液状化による被害も甚大であった。液状化発生は、北は青森県おいらせ町、南は千葉県南房総市の南北約650kmの広範囲に及んだ⁹⁾。この被害の特徴は、浦安市に代表されるように震央距離が380kmと遠いにも関わらず、その程度は甚大であることである。津波被害の陰になっているが、津波の生じた地域では、液状化も発生していた箇所が少なくなく、それによる構造物の機能低下や避難路の阻害も指摘されている。液状化による被害は、特に、1964年新潟地震以降広く知られるようになり、その評価法も確立されてきている^{10), 11)}が、その対策は決して十分とは言えない。2011年東北地方太平洋沖地震では、液状化による住宅の被害件数は1都8県で26,914件に及び¹²⁾、特に宅地や戸建て住宅などでは、液状化対策が不十分であったと言わざるを得ない。



図一 LP-LiC 工法の対策メカニズム

このように、液状化被害は広範に及びその程度も深刻であることから、その対策は、経済的視点とともに、環境を十分配慮した方法を用いる必要がある。

3. LP-LiC 工法の概要

3.1 液状化対策メカニズム

液状化は、緩い飽和した砂地盤に地震などのある程度以上の外力が作用することで生じる現象で、これらの条件を全て満足することが発生条件となる。液状化対策は、これらの条件の一つでも取り除くことが、一つの考え方である。

図一に、LP-LiC 工法の対策メカニズムを模式的に示す。対策メカニズムは、丸太を緩い砂質土の地盤に圧入し、地盤を密実化することで、緩い地盤を液状化しにくい地盤に改良する。丸太を杭として用いて、構造物を支えるわけではないので、丸太自体の強度は期待していない。丸太には、体積を保持することを期待している。このような密度増大を対策メカニズムとする工法として、サンドコンパクションパイル工法（以降、SCP 工法と呼ぶ。）が有名である。この工法は、砂を杭状に振動圧入し地盤を密実化するもので、幾つもの地震で効果が検証され数多くの実績がある。大きな地震に対しても、また、対策後長い年月を経た後も効果を発揮しているのは、地盤を密実化することを液状化対策の根本原理としているため、恒久性、靱性、冗長性といった点で優れているためだと考えられる。LP-LiC 工法は、SCP 工法の砂の代わりに丸太を用いている。これにより、恒久性、靱性、冗長性を維持したまま、丸太による炭素貯蔵、低振動低騒音、無排土、近接周辺地盤への変位抑制を実現した。

表一に、木材を土木材料として用いる場合の長所と短所を示す。木材は、腐朽や虫害を受けやすい、燃えやすい、乾燥により変形しやすい、形状や品質にばらつきが多いといった短所を持つが、丸太を地盤中の地下水位以深に使用することで、腐朽や虫害を受けないことになり、これらの短所が消え、むしろ、持続可能な材料であ

表一 木材を土木材料として用いる場合の長所と短所

	長所	短所
力学的特徴	<ul style="list-style-type: none"> 軽い割に強度がある 弾性領域が広い 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材に比べ強度が低い 乾燥により変形する
一般的な特徴	<ul style="list-style-type: none"> 放置すれば自然に戻る 燃料として利用できる 見た目や感触が良い 持続可能な材料である 生産時のエネルギーが少ない 炭素を貯蔵している 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 比較的塩害に強い 熱伝導率が低い 温度応力がほとんど発生しない 利活用の歴史がある 国内のほぼ全域で供給ができる 	<ul style="list-style-type: none"> 腐朽や虫害がある 燃えやすい 形状のばらつきが大きい 品質のばらつきが大きい 長大材を得にくい 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

る、生産時エネルギーが少ない、炭素貯蔵ができる、環境負荷の心配がない、森林再生による間接的な環境効果を期待できる、国内にほぼ全域で供給ができる、利活用の歴史があり実績を示しやすいなどの長所が強調される。

木材は、地中の地下水位以深では腐朽や虫害などの生物劣化を生じない¹³⁾。一方で、軟弱地盤や液状化の発生する地盤は、地下水位が浅いのが特徴である。したがって、木材を長期間使用するに当たり、これらの地盤条件は極めて好都合である。

なお、以上のように対策に用いた丸太は基本的には大半が地下水位以深に設置されるので生材をそのまま使用可能である。しかしながら、地表付近の丸太頭部は生物劣化の可能性があるため、その対策は必要となる。

3.2 液状化対策効果

液状化対策効果は、実現場における施工、および、室内における振動実験により確認した。

(1) 実現場における施工^{14),15),16),17)}

実現場において施工を行い、丸太打設前の原地盤と丸太打設後の丸太間地盤の N 値を比較検討し、液状化対策効果を確認した。

地盤の液状化に対する評価は、標準貫入試験 (JIS A 1219) より求められる N 値と各層の土質より行われる¹⁰⁾¹¹⁾。そこで、原地盤と丸太打設後の丸太間地盤の N 値を求め、それぞれ液状化判定を行い、その効果を確認した。地盤調査は、他にもスウェーデン式サウンディング試験はじめ多くの調査を実施したが、ここでは省略する。

図二に、土質柱状図および原地盤と丸太打設後丸太間地盤の N 値の一例を示す。地盤に丸太を打設することで、丸太間地盤の N 値が増加することがわかる。この現場は、縦 11.00m、横 10.45m、深さ 7.5m で、地盤改良は、丸太末口呼び径 0.14m、丸太長さ 6.0m、丸太頭部深度 GL-1.5m、丸太打設間隔 0.55m、使用丸太樹種カラマツ、丸太打設点数 380 点で実施された。

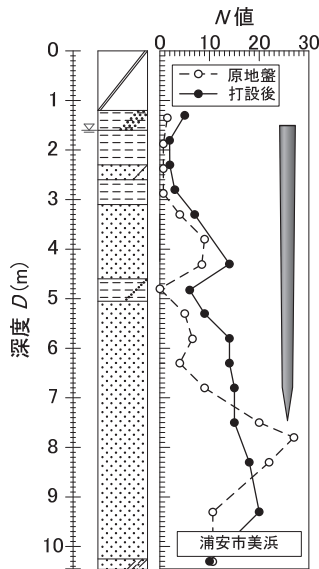


図-2 土質柱状図および原地盤と丸太打設後丸太間地盤の N 値の一例

図-3に、道路橋示方書¹⁰⁾と建築基礎構造設計指針¹¹⁾より求めた液状化判定結果を示す。図中、網掛け部分は砂層であり液状化の可能性のある土質である。原地盤では、多くの深度で液状化に対する安全率 F_L が1.0を下回り液状化発生の可能性が高いことがわかる。なお、この地点は2011年東北地方太平洋沖地震で液状化が発生した地点である。丸太打設後の丸太間地盤では、 F_L が1.0を上回り液状化しにくい地盤に改良されていることがわかる。

図-4に、複数地点実施した現場施工によって得られた原地盤と丸太打設後の丸太間地盤の補正 N 値の関係を示す。補正 N 値は、求められた N 値について拘束圧と細粒分含有率の補正をそれぞれの設計方法に従った。また、図中の曲線は、SCP工法的设计(A法)に用いられる経験的に得られた関係である¹⁸⁾。SCP工法におけるこの関係は、補正を行わない N 値そのものであるが、それを拡張した。図中の改良率 a_s は、改良面積に対する丸太または砂杭の占める面積率を示し、 $a_s = A/B^2$ (ここで、 A :丸太または砂杭の断面積(m^2), B :丸太または砂杭の打設間隔(m))で定義される。丸太の断面積は、末口径より求めた。一部を除き、丸太打設後の丸太間地盤における補正 N 値は、改良率に対応する曲線を下限にし上位にばらついていることがわかる。なお、一部各改良率の曲線より下位にあるものは、地表付近の比較的 N 値が大きく、そもそも液状化の可能性の低かったものである。

以上より、SCP工法の経験的に求められた図を用いて丸太打設後の丸太間地盤の補正 N 値を推定可能であり、これを用いて設計できることが確認できた。

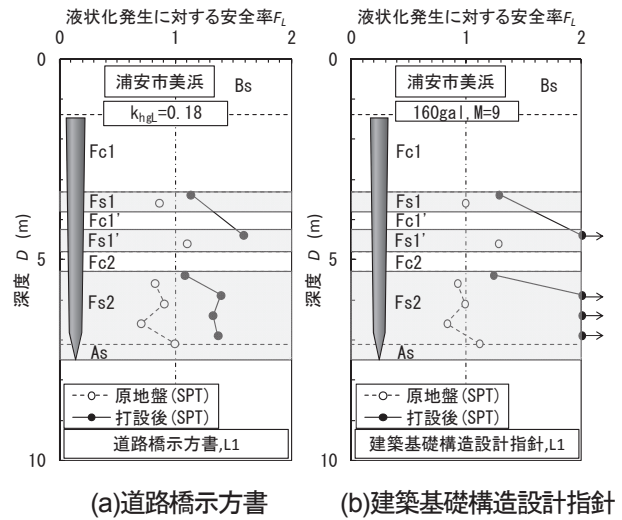
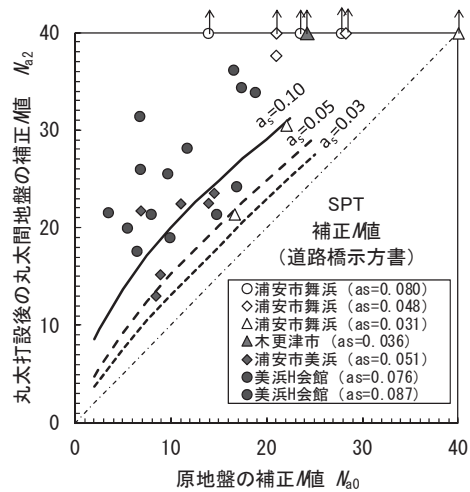
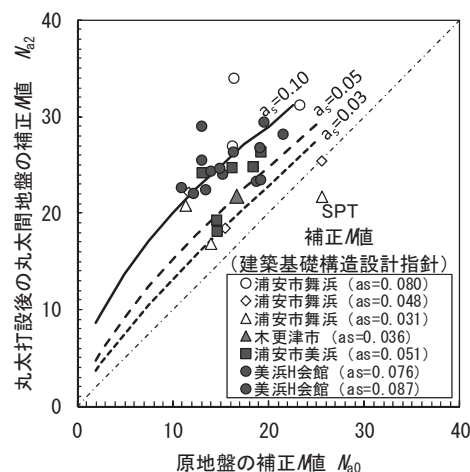


図-3 液状化判定結果

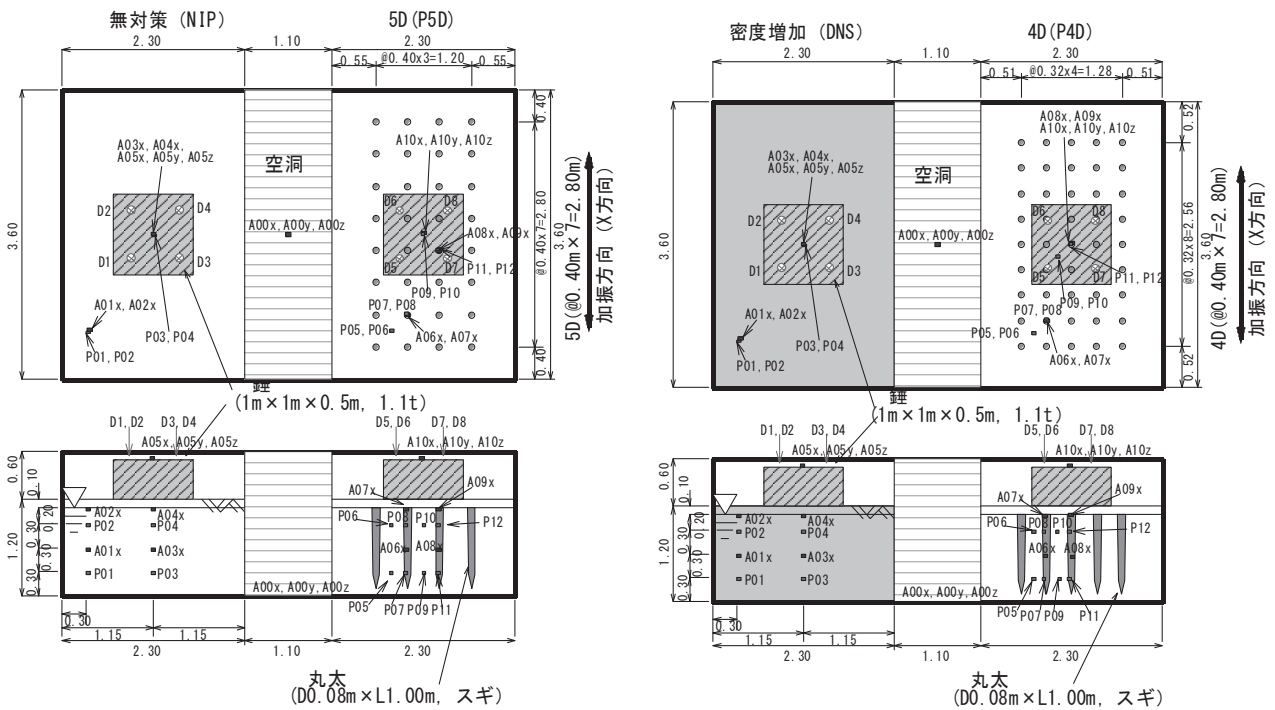


(a)道路橋示方書



(b)建築基礎構造設計指針

図-4 原地盤と丸太打設後の丸太間地盤の補正 N 値の関係



(a)無対策と丸太 5D 間隔打設

(b)密度増大と丸太 4D 間隔打設

図-5 大型振動実験に用いた模型地盤とセンサー配置

単位 : m

(2)室内振動実験¹⁹⁾

振動時におけるLP-LiC工法の効果を確認するために、小型、中型、大型の振動実験を実施した。ここでは、大型振動実験について述べる。

図-5に、大型振動実験に用いた模型地盤とセンサー配置を示す。模型地盤は、内寸横5.7m×奥行3.6m×高さ1.8mの大型土槽を2つに仕切り、水中落下法により作製した。密度増大工法を想定したケース(DNS)は、振動棒により地盤を締め固めた。水位は、GL-0.1mに設定し、地盤上部0.1mを非液状化層とした。初期の地盤密度は相対密度 $D_r=48\sim 54\%$ である。丸太は、下部に0.1mの未改良層を残し、静的圧入により打設した。丸太頭部は、碎石を粗い目の布の袋に入れ埋め戻した。地盤には、液状化による構造物被害を評価するために、横1m×奥行1m×高さ0.5mで質量1.1tのコンクリート製の錘を載せた。使用したセンサーは、変位計(D1~D8)、加速度計(A00x, A00y, A00z, A01x~A04x, A05x, A05y, A05z, A06x~A09x, A10x, A10y, A10z)、間隙水圧計(P01~P12)である。なお、加速度計A06x~A09xと水圧計P07, P08, P11, P12は、それぞれ丸太にセンサーを埋め込んだ。

表-2に実験ケースを示す。振動実験は、2ケースを1つの土槽に作製し同時加振した。図-6に、加振波形を示す。加振波の主要部は4Hzで20波の正弦波であり、前後に5波ずつの立ち上がり部と収束部がある。加振は、

表-2 実験ケース

ケース	方法	土槽番号
NIP	無対策 ($D_r=48\%$)	土槽1
P5D	丸太打設 (5D 間隔, $a_s=3.1\%$, $D_r=60\%$)	土槽1
DNS	密度増加 ($D_r=91\%$)	土槽2
P4D	丸太打設 (4D 間隔, $a_s=4.9\%$, $D_r=71\%$)	土槽2

※丸太打設前の地盤密度は49%(5D)と54%(4D)

※※丸太打設時の D_r は、丸太間の値。

※※※ D は丸太径

※※※※ a_s は改良率(%)

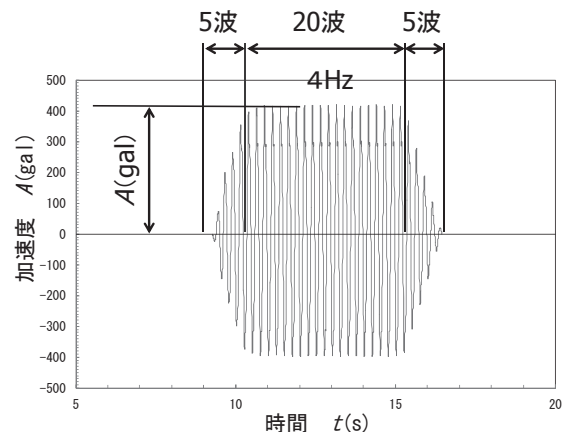


図-6 加振波形

振幅を約50galずつ増やすステップ加振とした。加振後、次のステップ加振をする前には、水位が所定の高さにあり、上昇した過剰間隙水圧が十分消散しているのを確認した。

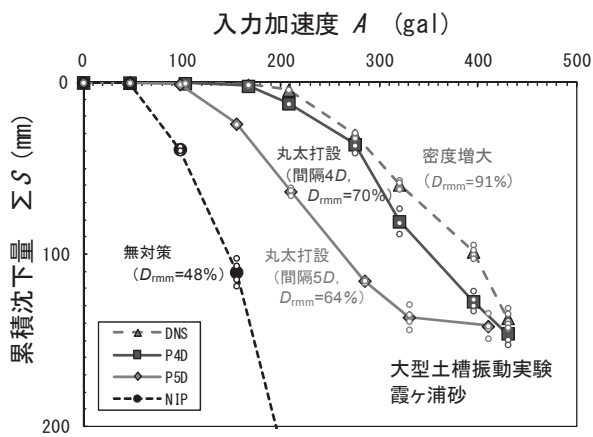


図-7 大型振動実験結果

使用した丸太の樹種はスギで、末口径 $D=8\text{cm}$ 、長さ $L=1\text{m}$ で、皮を剥いただけの自然木を用いた。

図-7に、大型振動実験より得られた、入力加速度と錘の累積沈下量の関係を示す。対策を施した場合はいずれも無対策の場合に比べ沈下量が小さく、液状化対策効果が確認できた。丸太打設の間隔が $5D$ (D : 丸太径) より $4D$ と小さいほど沈下量が小さく、丸太打設間隔の違いが地盤の締め固め効果に影響をおよぼすことがわかる。また、丸太間隔が $4D$ の場合は、密度増大によりかなり密に締め固めた地盤(相対密度 $D_r=91\%$)と同程度の対策効果があることがわかる。

3.3 炭素貯蔵効果²⁰⁾

LP-LiC 工法の地球温暖化緩和に対する最大の特徴は、炭素貯蔵ができることである。7現場で得られた炭素貯蔵の効果について示す。

本検討では、丸太が地盤中の地下水位以深では100年を優に超えて健全性を保つので、打設後の丸太は、半無限に炭素を貯蔵するものとする。また、二酸化炭素排出および炭素貯蔵は、全て二酸化炭素に換算して示す。

丸太による炭素貯蔵量 S_{LOG} は、 $S_{\text{LOG}}=n \times V_{\text{LOG}} \times \rho_{\text{LOG}} \times K_C \times K_{\text{CO}_2\text{C}}$ (kg-CO₂)より求めた。ここで、 n : 丸太打設本数(本)、 V_{LOG} : 丸太材積(m³)、 ρ_{LOG} : 丸太の容積密度(kg/m³)、 K_C : 木材の質量に対する炭素量の割合 (=樹種によらず0.5)、 $K_{\text{CO}_2\text{C}}$: 炭素を二酸化炭素に換算する係数 (=44/12)である。丸太の材積は、設計に用いた丸太の末口径より、末口二乗法で求めた断面積に丸太長さの設計値を乗じて求めた。用いた丸太の樹種は、スギまたはカラマツで、一部ヒノキが含まれている。ただし、ヒノキは量が少ないのでスギとして計算した。丸太先端部を尖らせる先付け部分は、材積計算では考慮していない。

二酸化炭素の排出は、現場内で消費されたエネルギーのみを対象とした。具体的には、丸太打設に用いる重機、整地や丸太移動などに用いるバックホウ、現場内で用い

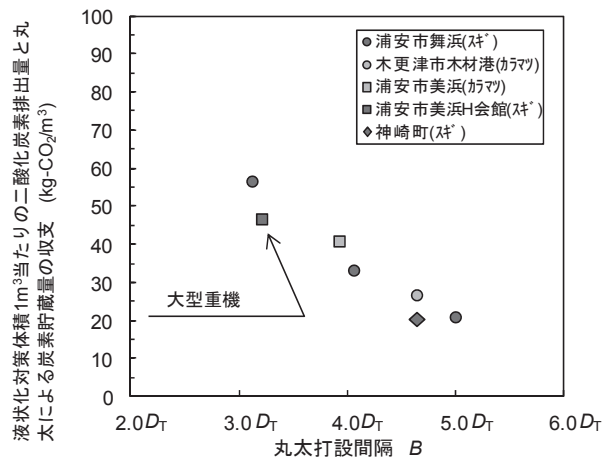


図-8 丸太打設間隔と液状化対策体積 1m^3 当たりの炭素収支の関係 (D_T : 丸太末口径)

る発電機、鋼製の継ぎ材を対象とした。丸太の素材生産にかかわる二酸化炭素排出や、通勤や運搬などによる排出量は対象としない。ちなみに、これらを考慮しても、一般的には工事による二酸化炭素排出量よりも、丸太によって貯蔵された炭素量の方が多いことが確認されている^{21), 22)}。

図-8に、7現場で実施したLP-LiC工法について、丸太による炭素貯蔵量から工事によって排出された二酸化炭素量を差し引いた収支量を地盤改良 1m^3 当たりにし、丸太間隔との関係にして示す。図より、丸太打設間隔が小さくなるほど、炭素貯蔵量が大きくなることがわかる。丸太打設間隔が小さくなるほど、丸太打設回数が増え施工量が増えるが、それ以上に使用材積による炭素貯蔵量が増加するといえる。両者の関係は、右下がりの相関を示すが、ばらつきの幅の上に位置するものは容積密度の大きいカラマツを用いたものが多く、ばらつきの幅の下に位置するものは大型重機を用いたものである。

以上より、LP-LiC工法は、工事によって排出される二酸化炭素量を差し引いても炭素貯蔵効果は大きく、工事を実施することが地球温暖化緩和策となると言える。

3.4 低振動低騒音効果

LP-LiC工法は、丸太打設前に鋼管の回転圧入より無排土で先行掘削を行い、そこへ丸太を圧入する。このため振動騒音は重機音や移動に伴うもの程度で、低振動低騒音である。

図-9に、実施工で計測した振動レベルと騒音レベルを他工法²³⁾と比較して示す。計測は、「建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法(平成13年4月9日国土交通省告示第488号)」に準拠し実施した。重機から10m離れた地点における振動・騒音レベルは、振動・騒音規制法で定められた敷地境界における基準値75dBと85dBより大幅に低く、他工法と比較しても低いことがわかる。

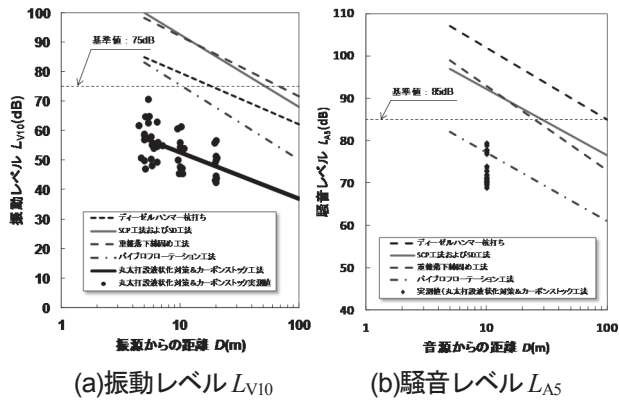


図-9 振動レベルと騒音レベルの他工法との比較 (文献23)に加筆

3.5 丸太打設ともなう周辺地盤の変位^{24),25)}

丸太打設は、前述の通り、地盤に振動を与えて貫入するわけではないので、周辺地盤の水平変位も極めて小さい。図-10に、丸太打設後の周辺地盤の変位を示す。図中の四角の実線の範囲を打設した後に、外側2列を打設した。変位杭と丸太との距離は、四角の外縁部が1.4m、さらに外側が0.4mである。距離は、丸太の中心位置からなので、丸太の側面から変位杭までの距離はさらに0.1m程度短い。なお変位は、改良範囲の外側へ向けた変位を正とした。

距離1.4mでの変位は、-3mmから6mmの範囲、距離0.4mでの変位は、-9mmから17mmの範囲であった。いずれも変位量は小さく、距離が離れるほど減少し、1.4mも離れれば最大でも6mmの変位しか生じないことがわかる。他の計測結果からも、丸太打設位置から1mも離間があれば、変位量は10mm以下であることが確認されている²⁵⁾。なお、計測点によっては、むしろ内側に変位しているものが認められる。これは、重機が移動することで地盤が若干沈下し、周囲地盤が内側へ引き込まれるように変形したためだと考えられる。

4. LP-LiC 工法の特徴と適用範囲

LP-LiC 工法の特徴を以下にまとめる。

(1)安全・安心

- ・従来の密度増大工法と同様な液状化対策効果を発揮する。
- ・密度増大を対策原理とするため、変形の進行に対して靱性がある地盤改良が可能である。

(2)地球温暖化緩和

- ・丸太に固定化された炭素を地中に長期間貯蔵できる。
- ・丸太を使用するので、省エネルギーである。

(3)近隣への配慮

- ・自然素材を用いることから地下水汚染などの環境汚

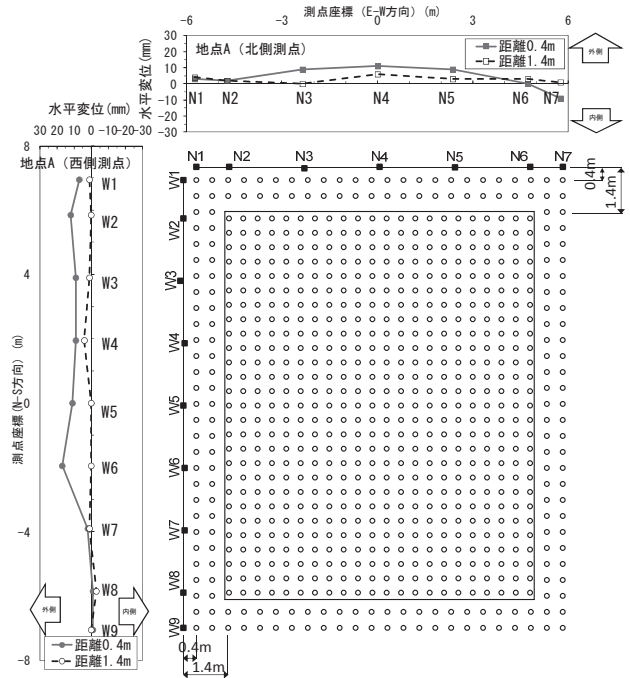


図-10 丸太の打設位置と周辺地盤の変位計測結果

染の心配が極めて少ない。

- ・丸太を地盤に静的に圧入するので低振動低騒音である。
- ・大型重機を用いなくても施工が可能なので、市街地や狹隘地での施工が可能である。
- ・丸太は無排土で圧入するので建設残土を発生しない。
- ・プラントなどの設備を必要としないので準備工や組立・解体工などの工期をほとんど必要としない。
- ・丸太打設による周辺地盤への変位はほとんど生じない。

(4)木材の活用

- ・使用する丸太は、高品質の木材である必要はないので、間伐材などを使用でき、森林資源の有効活用を図ることができる。
- ・地域材を大量に使用することで、林業再生、地域林業の活性化に貢献できる。

表-3にLP-LiC工法の現状における適用範囲を示す。この適用範囲は、現在までの実績に基づくもので、今後適用範囲を広げていく予定である。

5. LP-LiC 工法の適用対象例

図-11にLP-LiC工法の適用対象例を示す。既に、公園、戸建て住宅、低層建築、駐車場の実績がある。

建物自体は、地震に耐え、基礎も液状化が生じても沈下傾斜が発生しないように立派な杭基礎が用いられる場合が多い。しかしながら、地震時には建物周辺が液状化し、その結果、建物と地盤との間に大きな段差が生じ、アクセスに支障をきたす場合が多い。LP-LiC工法は、比

表-3 LP-LiC 工法の適用範囲

項目		適用範囲
打設可能層	先行掘削施工可能地盤 N 値	N 値 ≤ 40 (ただし、層厚 1m 以内)
	先行掘削施工可能土質	礫混じり土より細粒な地盤
液状化対策の対象層	原地盤 N 値	N 値 ≤ 20
	対象土質	砂質土、細粒分含有率 $F_c \leq 50\%$
丸太頭部深度		GL-2.0m 以浅
下限地下水位		GL-2.0m 以浅
改良深度		GL-12m 以浅
丸太	樹種	スギ、ヒノキ、カラマツ、ベイマツ、アカマツ、クロマツ、エゾマツ、トドマツ、リュウキュウマツ、アスナロ
	丸太末口呼び径	0.13m 以上 0.18m 未満
	丸太長さ	6m 以下
	継ぎ数	2 点以下(丸太 3 本以下)

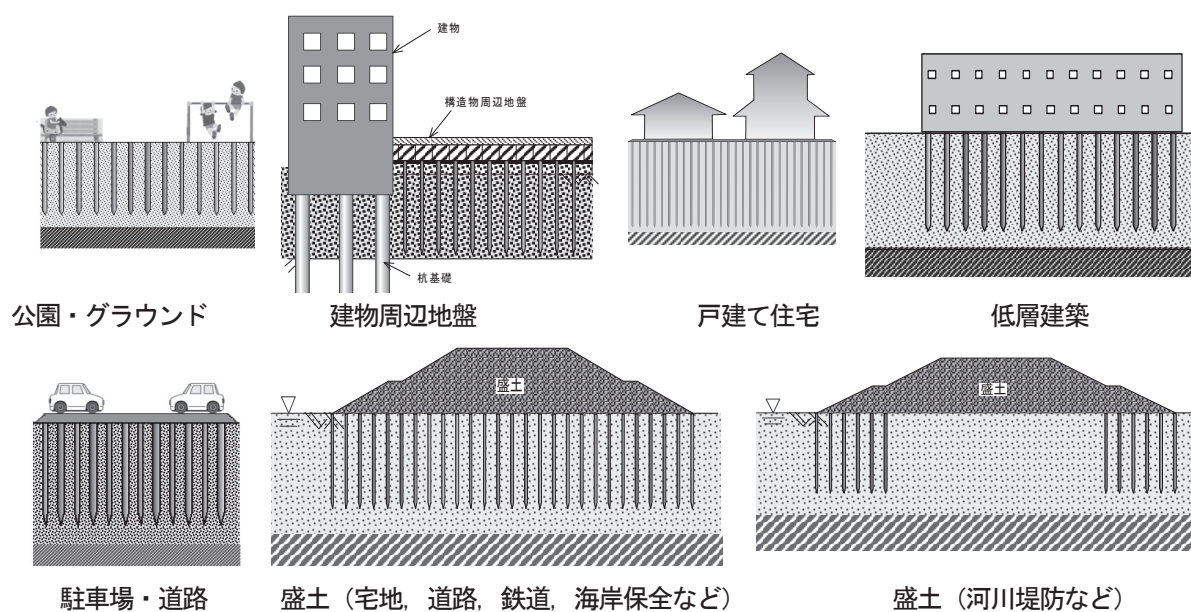


図-11 LP-LiC 工法の適用対象例

較的小型な機械を用いても施工が可能な上、低振動低騒音で、残土の発生がなく、周辺地盤への変位もほとんど生じないので、このような建物周辺地盤の液状化対策に適している。また、宅地、道路、鉄道、海岸保全の盛土基礎や、河川堤防などの腹付け盛土部の対策など大規模な土木工事について SCP 工法と同様の対策効果を有するので、適用が可能である。

6. おわりに

LP-LiC 工法は、建築技術性能証明と技術審査証明を取得し、実用化された。この工法の、開発背景と工法の概要、特徴、適用範囲、適用対象例を示した。本工法の最大の特徴は、液状化対策を実施しながら、炭素貯蔵も同時に行えることである。本工法を活用することで、国土強靱化、地球温暖化緩和策、林業再生に貢献していく予定である。

【謝辞】

LP-LiC 工法の開発にあたり、元早稲田大学教授の濱田

政則先生、森林総合研究所の外崎真理雄氏、同桃原郁夫氏、福井県の久保光氏、福井工業高等専門学校教授の吉田雅穂先生、立命館大学教授の橋本征二先生、東京農工大学の加用千裕先生、高知大学教授の原忠先生、共同開発を行った兼松日産農林(株)および昭和マテリアル(株)の各位、そして、当社北陸統括営業、首都圏土木支店、大阪支店、名古屋支店、技術研究所の皆様、その他大勢の方々の協力を得た。ここに記して感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 外崎真理雄：4.6 木材利用実績および土木における利用ポテンシャル，2009 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，土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会・土木学会木材工学特別委員会，pp.63-74，2010.3.
- 2) 林野庁：平成 25 年度森林及び林業の動向平成 26 年度森林及び林業施策(森林・林業白書)，2014.5.
- 3) 富松義晴，沼田淳紀，濱田政則，三輪滋，本山寛：持続可能社会へ向けた土木事業における木材利用の

- 提案, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.68, No.2, pp.80-91, 2012.7.
- 4) 環境省: IPCC 第 5 次評価報告書の概要—第 1 作業部会(自然科学的根拠)—, 2013
 - 5) 太田猛彦: かつて地下資源は地表にあった—温暖化時代における木材利用の意味を問う—, CE 建設業界, pp.18-19, 2004.4.
 - 6) 外崎真理雄: 環境材料としての木材, 木材工業, Vol.54, No.11, pp.511-515, 1999.11.
 - 7) 林野庁: 平成 21 年度森林・林業白書参考資料, 2010.1.27.
 - 8) 米田雅子・日本プロジェクト産業協議会編著: 日本は森林国家です, ぎょうせい, 235p., 2011.3.
 - 9) 若松加寿江: 2011 年東北地方太平洋沖地震による地盤の再液状化, 日本地震工学論文集, 第 12 巻, 第 5 号, pp.69-88, 2012.
 - 10) 日本道路協会: 8.2.3 橋に影響を与える液状化の判定, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.134-141, 2012.3.
 - 11) 日本建築学会: 4.5 節 地盤の液状化, 建築基礎構造設計指針, pp.61-72, 2001.
 - 12) 国土交通省都市局都市安全課: 平成 26 年度全国都市防災・都市災害主管課長会議資料, 86p., 2014.5.
 - 13) 中村裕昭, 濱田政則, 沼田淳紀: 土木分野での木材地中での使用の歴史的事例, 木材利用研究論文報告集 11, 土木学会木材工学特別委員会, pp.95-101, 2012.8.
 - 14) 沼田淳紀, 三輪滋, 水谷羊介, 三村佳織, 原忠, 坂部晃子, 池田浩明, Riaz Saima: 丸太打設液状化対策実証実験の概要, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, V-032, pp.63-64, 2013.
 - 15) 三村佳織, 水谷羊介, 沼田淳紀, 三輪滋, 池田浩明, 原忠, 坂部晃子, Riaz Saima: 丸太打設液状化対策実証実験に用いた丸太, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, V-034, pp.67-68, 2013.
 - 16) 原忠, 坂部晃子, 沼田淳紀, 三輪滋, 水谷羊介, 三村佳織, 池田浩明, Riaz Saima: 丸太打設液状化対策実証実験実施地点における地盤概要, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, V-033, pp.65-66, 2013.
 - 17) 筒井雅行, 沼田淳紀, 三輪滋, 水谷羊介, 三村佳織, 池田浩明, 原忠, 坂部晃子, Riaz Saima: 丸太打設液状化対策実証実験における地盤調査結果, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, V-035, pp.69-70, 2013.
 - 18) 地盤工学会: 1.3 サンドコンパクションパイル工法, 液状化対策工法, 地盤工学・実務シリーズ 18, pp.233-253, 2004.7.
 - 19) Saima Riaz, Atsunori Numata, Kaori Mimura, Hiroaki Ikeda and Toshikazu Hori: The effect of log piling on liquefaction, *Journal of JSCE*, Vol.2, pp.144-158, 2014.
 - 20) 沼田淳紀, 筒井雅行, 三輪滋, 三村佳織, 池田浩明: 丸太打設液状化対策工法における炭素収支原単位, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, V-394, pp.787-788, 2014.9.
 - 21) 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, pp.399-404, 2009.7.
 - 22) 池田浩明, 沼田淳紀, 水谷羊介, 坂部晃子, RIAZ Saima: 丸太打設による液状化対策の炭素貯蔵効果, 木材利用研究論文報告集 12, 土木学会木材工学委員会, pp.101-108, 2013.8.
 - 23) 地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ 18 液状化対策工法, p.225, 2004.
 - 24) 筒井雅行, 三輪滋, 沼田淳紀: 丸太打設による液状化対策工法の実工事への適用(その 1: 工事概要と地盤改良効果), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造工, 20326, pp.651-652, 2014.9.
 - 25) 三輪滋, 筒井雅行, 沼田淳紀: 丸太打設による液状化対策工法の実工事への適用(その 2: 丸太打設による周辺地盤の変位), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造工, 20327, pp.653-654, 2014.9.

Summary Log Piling Method for Liquefaction Mitigation and Carbon Stock (LP-LiC) is a countermeasure against liquefaction. The LP-LiC is environment friendly method that is pushing logs into the saturated loose sandy ground as improvement material and densifies the ground with no biodeterioration and carbon stock. The idea of this method was created in 2004, the study of it was started in the following year, development of countermeasure against liquefaction was started in the middle of 2011 and it was evaluated by third-party assessments in the 2013 fiscal year. This paper will show the back ground of the development and overview of the LP-LiC.

Key Words : Carbon Stock, Densification, Global Warming, Liquefaction Countermeasure, Log

