

解説

# 木材の地中利用の可能性と利用事例

水谷羊介\*

## 1. はじめに

我が国における木材需要の約4割、国産材需要の約55%が建築用材である<sup>1)</sup>。住宅を中心とする建築用材の需要拡大が木材全体の需要拡大に大きく寄与しており、新設住宅着工戸数の約半分が木造である<sup>2)</sup>。特に、木造住宅の動向が木材需要全体に大きな影響を与えている<sup>3)</sup>。しかしながらそ

の住宅着工棟数の需要予測は、どの金融機関も今後の予測数値にバラツキがあるものの減少する見通しを示している。この状況下、例えば住宅の購入者が非木造（鉄骨造、RC造など）から在来工法や2×4工法等の住宅にシフトする策を講じたとしても、この分野における大きな需要量拡大は難しいと考える。図1は国内の土木分野における木材利用量のポテンシャルであるが、これは日本森林学会、日本木材学会、土木学会の3学会で構成する横断的研究会では、その数値を400万m<sup>3</sup>/年であると推計したものである<sup>4)</sup>。その主な用途は地中利用としている。実現するためには様々な課題があるが、図2はその地中利用に関する課題をまとめたものであり、それらは、木材の生物劣化、設計法、施工法など多岐にわたる。一方、国内における土木・建築資材の多くはセメントや鉄などを含む資材で築造されている。表1に各種建築資材生産に要した炭素放出量<sup>5)</sup>を示す。天然乾燥製材（木材）は、製造時に要した単位体積当たりの炭素放出量は15kg/m<sup>3</sup>である。これに対して人工乾燥材（木材）は化石燃料の消費に伴うエネルギーが加算されているので天然材料の約2倍の28kg/

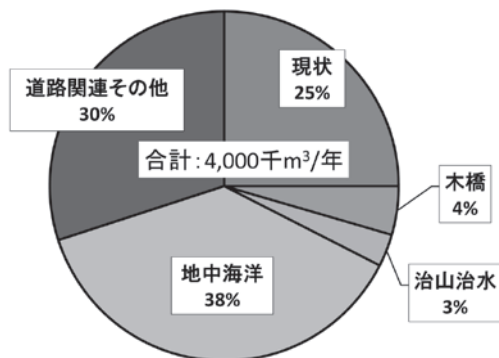


図1 木材のポテンシャル量

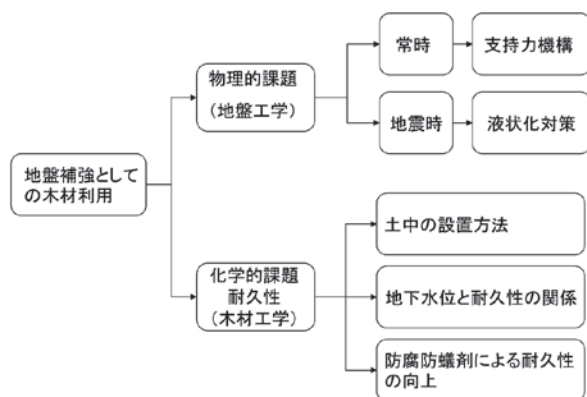


図2 地中利用の課題と分類

表1 炭素放出量

材料	製造時炭素放出量 (kg/m <sup>3</sup> )	製品中の炭素貯蔵量 (kg/m <sup>3</sup> )	±炭素量 (kg/m <sup>3</sup> )
天然乾燥製材	15	250	-235
人工乾燥製材	28	250	-222
パーティクルボード	200	260	-60
鋼材	5320	0	5320
アルミニウム	22000	0	22000
コンクリート	120	0	120

\* 兼松日産農林株式会社

m<sup>3</sup>である。鋼材、コンクリートになると木材と比較してその放出量は桁違いに大きくなる。また注目すべきは、製品中の炭素貯蔵量である。木材は多くの炭素を貯蔵していることが示されているが、鋼材・コンクリートは炭素貯蔵効果がない。このように、建築・土木分野において地球環境問題に対する取り組みの重要性が強まっており、森林の役割とその資源活用が注目されている。しかし、特に土木分野におけるその取り組みは残念ながら未だ途中段階である。本報では木材の地中利用として、経済性もさることながら二酸化炭素の固定効果も期待できる木材を用いた地盤補強工法や液状化対策工法の研究開発事例および実施事例を紹介する。

## 2. 木杭の支持力機構

近年では丸太を木杭などとして地盤補強工法に利用することは少なくなってきた。その要因はいくつか挙げられるが、中でも木杭の支持力機構が不明瞭であったため設計が困難となり利用されにくくなっていることも大きな原因の一つといえる。そこで、木杭の支持力機構を解明するため様々な地域で木杭とコンクリート杭及び鋼管杭などの

既存工法に対して載荷試験を実施しその支持力を評価してきた事例を示す<sup>6)</sup>。

### 2.1 実験概要

実験は国内でも有数な軟弱地盤とされる埼玉県八潮市において、既存工法と木杭の支持力を比較すると共に、杭打設後の地盤と杭の養生効果の影響も考慮するため試験ヤードを4分割し、ゾーン毎に9種類の試験杭を施工し行った(図3)。それぞれのゾーンは1週間、1ヶ月及び4ヶ月の養生期間後に載荷試験を実施した。試験杭の詳細を表2及び写真1に示す。それぞれの試験杭は既往の地盤補強工法としてコンクリート杭(C1)及び鋼管杭(S1、先端閉塞ストレート杭)、木材を用いた地盤補強工法として、スギ(Wbtp)、カラ

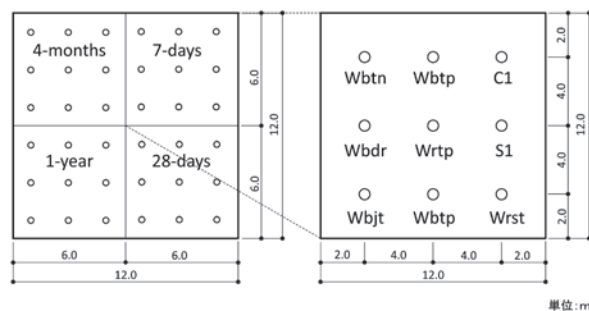


図3 試験杭の養生期間および配置

表2 試験杭の概要

杭 No.	杭種	素材	杭形状	継ぎ	排水機能	加工	杭長 (m)	元口 ( ) は平均 (mm)	末口 ( ) は平均 (mm)	28-days		4-months	
										第二限界抵抗力 (kN)	周面摩擦力度 (kN/m <sup>2</sup> )	第二限界抵抗力 (kN)	周面摩擦力度 (kN/m <sup>2</sup> )
C1	RC 杭	コンクリート	tp	なし	なし	-	4.00	193.1	140.0	31.8	11.9	40.0	16.1
S1	鋼管杭	鉄	st	なし	なし	-	4.00	165.2	165.2	30.3	12.8	30.3	12.8
Wbtp	木杭	スギ	tp	なし	なし	皮むき	4.00	182.1 ~ 170.6 (176.4)	153.4 ~ 145.5 (148.7)	49.0	21.5	42.5	20.0
Pbtp	木杭	マツ	tp	なし	なし	皮むき	4.00	194.5 ~ 182.7 (188.0)	158.8 ~ 150.6 (153.8)	56.1	25.6	56.1	25.5
Wbtp	木杭	スギ	tp	なし	なし	皮むき	4.00	149.6 ~ 147.7 (149.0)	132.1 ~ 124.1 (128.3)	42.5	23.3	40.5	21.9
Wbdr	木杭	スギ	tp	なし	あり	皮むき	4.00	177.0 ~ 169.0 (173.3)	151.5 ~ 143.2 (147.5)	49.0	22.4	48.3	19.8
Wbjt	木杭	スギ	tp	3本継ぎ	なし	皮むき	4.00	188.1 ~ 172.2 (184.0)	180.3 ~ 168.0 (174.0)	35.8	15.1	40.3	15.0
Wrtp	木杭	スギ	tp	なし	なし	ロータリー	4.00	177.6	150.0	45.5	18.4	49.5	20.6
Wrst	木杭	スギ	st	なし	なし	ロータリー	4.00	160.0	160.0	35.0	15.8	40.5	19.3



写真1 試験杭

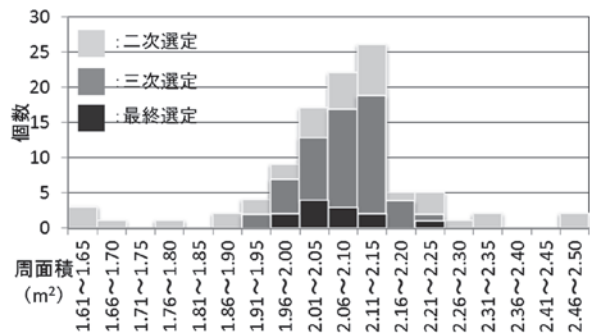


図4 試験杭の選定結果

マツ (Pbtp), 小径スギ (Wbtn), 排水機能を有したスギ (Wbdr), 2箇所継ぎのスギ杭 (Wbjt), テーパー状に定型化 (ロータリー加工) したスギ (Wrtp) 及び円柱状に定型化 (ロータリー加工) したスギ (Wrst) とした。原木状の試験杭 (Wbtp, Pbtp, Wbtn, Wbdr, Wbjt) に関しては, 試験精度を向上させるため複数回の選定を行った。一次選定として加工場 (福島県石川郡) において無作為に約2,000本の木杭から200本 (元口径は230~100mm) 抽出し, 二次選定として200本の材料の中から「欠け」や「曲がり」の著しいものを除外し100本 (元口径は210~125mm) まで選定し, 三次選定として元口径及び末口径を計測し, 条件に見合う材料を40本選定した。さらに, 最終選定として加工場 (千葉県野田市) にて再度寸法を計測し, 最終的に使用材料を決定した (図4)。地盤データおよび対象層の粒径加積曲線を図5および図6に示す。試験杭は無回転圧入でGL-4.0mまで貫入した。いずれの杭も最大の圧入力は20~30kN/本程度であった。杭の载荷試験は地盤工学会基準『杭の鉛直载荷試験方法・同解説』に準拠し実施した。また, 杭先端部の応力を計測する目的で杭先端部にひずみゲージを設置した (写真2)。

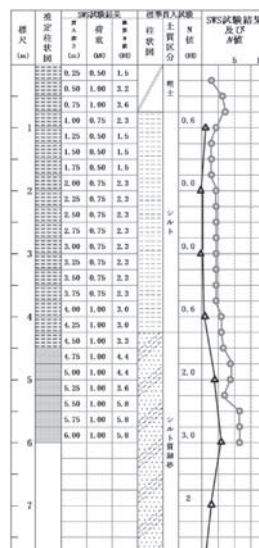


図5 地盤データ

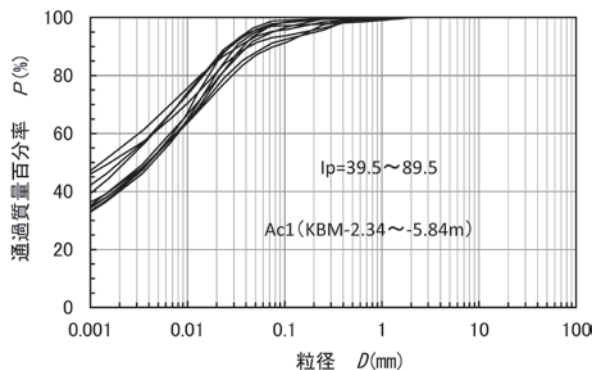


図6 粒径加積曲線

## 2.2 試験結果及び考察

表2に载荷試験結果を示す。本実験の範囲内で全ての杭種において第二限界抵抗力 (押し込み抵抗が最大となったときの荷重。ただし杭先端変位量が先端直径の10%以下の範囲と定義) は, 養生期間1ヶ月と4ヶ月の間には大きな変化は見られなかった。材料毎に比較してみると, 第二限界抵抗力は, S1 (ave. = 29.8kN/本) < C1 (ave. = 38.5kN/本) ≤ Wbtp (ave. = 43.9kN/本) であった。また,

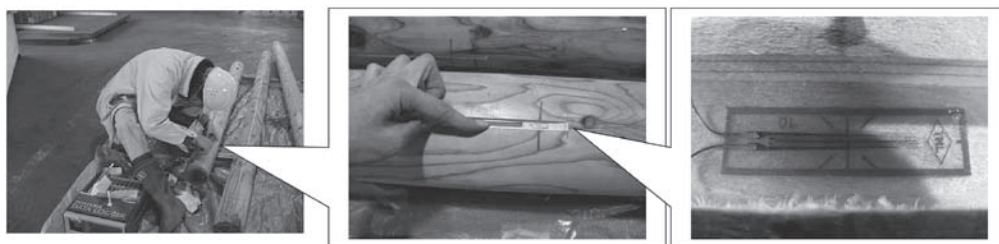


写真2 木杭へのセンサ貼り付け状況

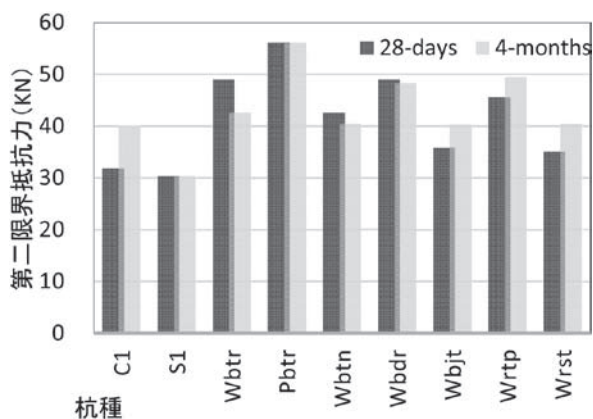


図7 第二限界抵抗力

周面摩擦力度は、S1 (ave. = 12.9kN/m<sup>2</sup>) < C1 (ave. = 15.9kN/m<sup>2</sup>) < Wbtp (ave. = 20.4kN/m<sup>2</sup>) だった。鋼管杭の第二限界抵抗力が C1 及び Wbtp と比較し著しく低下する結果が得られたが、その理由として、鋼管杭の杭周面状況は非常に滑らかであり、油分も付着しているため単位面積当たりの周面摩擦力の面から見ると不利になること、形状も唯一ストレート状であり、テーパ効果が得られなかったことなどが要因として考えられる。図7は表2より Wbtp, Wbdr, Wbdr, Wrtp 及び Wrst の第二限界抵抗力をまとめたものであるが、Wbjt 及び Wrst の第二限界抵抗力は明らかに他の木杭に劣る結果となった。いずれの試験杭においても支持力は周面摩擦力が大半を占めているが、Wrst は滑らかに表面加工したことにより摩擦係数が低下したこと、またストレート状に加工したことでテーパ効果が失われたことが考えられる。例えば、Wrst 同様にロータリー加工を施した Wrtp は原木形状を留めた状態の Wbtp と同等程度の第二限界抵抗力が得られている。原木形状を留めた Wbtp 及び鋼管杭 S1 において円周方向の膨張量を計測するため、ひずみゲージを取り付け実際に地中に貫入し継続的に円周方向の膨張量を計測した。ひずみ量の計測は Wbtp, S1 とともに杭中間部 (GL.-2.0m) 及び杭先端部 (GL.-4.0m) で行った。図8には縦軸に収縮・膨張率、横軸に計測時間を示したものであるが、S1 においては杭先端部分では全く変化は確認できず、杭中間部分においても極微量の収縮が見られたのみであったのに対し、Wbtp ではわずかではあるが杭先端部、中間部ともに時間の変化に伴い膨張傾

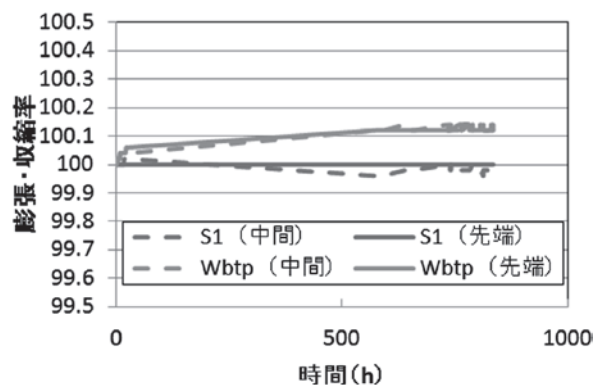


図8 試験杭膨張量

向があらわれた (最大で周長約470mm の0.14%程度)。今回の実験により地中の木杭の膨張傾向が確認できた。また、木杭の周面摩擦力にはこのような膨張圧も少なからず作用していると考えられる。

### 3. 液状化対策としての木材 (丸太) 利用

東日本大震災の地震災害の特色として、震源から遠く離れた千葉や東京の臨海地区などで液状化現象が想定以上の規模で発生した。この震災では大型構造物には液状化による被害は大きくなかったが戸建て住宅を含む小規模構造物が大きな被害を受けた。この被害の大きな要因として、小規模構造物の建設時に液状化が考慮されずに建てられたことが挙げられる。一方、液状化対策工法には、振動、衝撃等で締め固められた砂杭等で地盤の密度を大きくすることにより地盤強度をあげる「密度増大工法」などがある。しかし、いずれの工法も従来の土木資材を使用した液状化対策工として確立しているが、木杭などの木材を利用した現実的な対策工法はほとんどない状況である。そこで、次に液状化抑止の簡単なメカニズムと国産材を用いた液状化対策工法の性能実証実験およびその施工事例を紹介する。

#### 3.1 液状化のメカニズムとその抑制方法

液状化が起りやすい地盤は、図9(a)に示すように比較的水位が浅く砂が緩く堆積している。右に示す拡大図は飽和した砂地盤の要素を模式化したものである。模式化した要素の黒色の部分は土粒子の骨格、灰色の部分は間隙水を表す。通常この要素状態の時、水平圧力  $\sigma'_h$  と有効上載圧  $\sigma'_v$  で地盤は安定しているが、図9(b)のように、図9

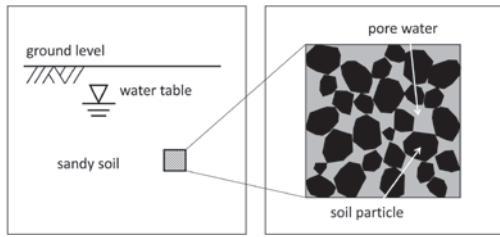


図9(a) 飽和砂地盤と土粒子骨格

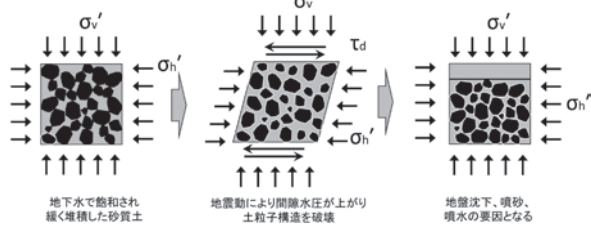


図9(b) 飽和砂地盤と土粒子骨格

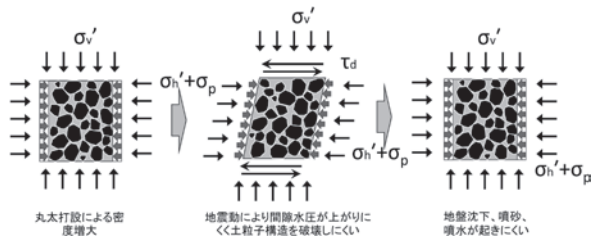


図9(c) 密度増大砂地盤と土粒子骨格

(a)において地震力が発生し、要素にせん断力  $\tau_d$  が生じると、過剰間隙水圧（静水圧を超える間隙水圧）が上昇するため、土粒子の骨格がくずれ土粒子は浮遊した状態になる。更に、間隙水圧の上昇により噴砂現象などが発生する。地震によるせん断力が減衰すると時間とともに過剰間隙水圧が消散し、要素は土粒子間の間隙水圧が低くなり体積が収縮する現象がおり結果的に地盤が沈下する。一方、図9(c)に示すように緩く堆積した砂地盤の要素に圧力をかけ間隙を少なくすることにより密度を増大  $\sigma_p$  させると、繰り返しせん断力が加わっても土粒子の骨格は体積変化を起こすことは少ない。このような理論のもと筆者等は以前より、締固め工法をベースにした経済性および環境面で優れた木材を用いた新たな液状化対策の開発を進めてきた。本節では木材を使用した液状化対策工法の開発概要を紹介する。

### 3.2 木材を用いた液状化対策工法の開発事例

液状化対策工法のその性能と検証には、液状化

表3 材料特性

実験ケース	NIP	P5D	SCP	P4D
方法	無対策	丸太打設	密度増大	丸太打設
土層寸法 (m)	横5.7×奥行3.6×高さ1.8			
土層番号	土層1		土層2	
飽和条件	地表面から0.1m			
材料	霞ヶ浦砂			
土粒子の密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.695			
最小間隙比 $e_{minJIS}$	0.656			
最小間隙比 $e_{minmm}$	0.548			
最大粒径 $D_{max}$ (mm)	4.75			
細粒分含有率 $P_f$ (%)	3			
50%粒径 $D_{50}$ (mm)	0.35			
均等係数 $U_c$	2.0			
相対密度 $D_r$ (%)	48% -	64% 5D 間隔	91% -	70% 4D 間隔

D: 丸太径

地盤や液状化対策範囲をモデル化して地震時の動的挙動を確認する模型実験や数値解析、実大施工実験などが有効とされ、手法は様々であるが、実際の構造物の状況と異なる面もある。ここでは、あるいは実際の構造物の状況に近い模型による検証を目的に、大型土槽を用いた振動台実験の実施事例を示す<sup>7)</sup>。表3に実験ケースと材料特性を、また土層の形状寸法および計器設置位置の概要を図10(無対策/5D)、図11(密度増大/4D)に示す。実験に使用した土槽は、長さ5.7m×奥行3.6m×高さ1.8mの振動台土槽を2つに仕切り、地盤の全層厚は1.2mとした。地盤は、地盤材料に選定した霞ヶ浦砂(図12)を用い、水中落下法により作製した。水位はGL-0.1m(地盤上部0.1mは非液状化層)に設定し、初期の地盤の相対密度(4D))である。また、サンドコンパクションパイルの相対密度  $D_r$  は48%(丸太打設の初期地盤は49%(5D))と54%を想定した地盤として振動棒により地盤を締固め密度増大工法として  $D_r$ : 91%の地盤も比較対象として作製した。木材は地盤下部層0.1mを残し、静的に圧入した。また、液状化による構造物の被害度を調べるために、上載圧が11kN/m<sup>2</sup>(1m×1m×0.5m)のコンクリート製の上載荷重を含む構造物にみたてたフーチングを設置した。計測項目は、間隙水圧(P01~P12)・変位(D1~D8)・加速度(A00x,y,z, A05x,y,z, A10x,y,z, A01x~A10x)である。ここでは特に、無対策と木材打設の液状化程度の差(GL-0.3m,

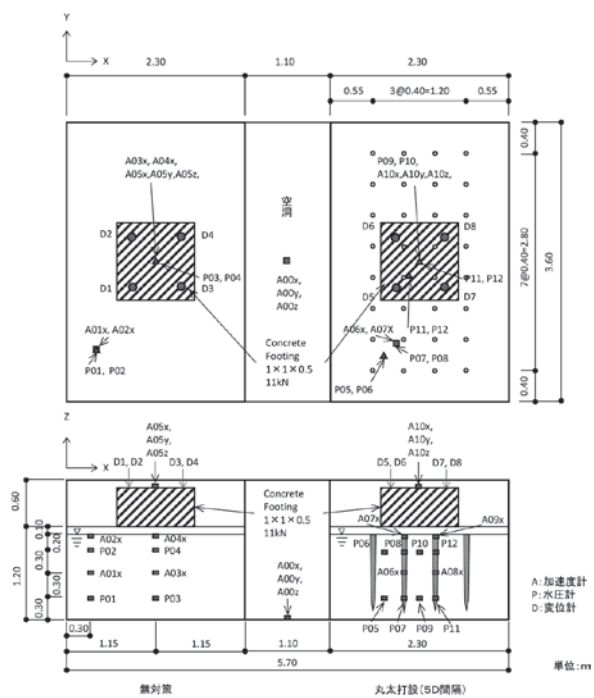


図10 計器設置位置の概要

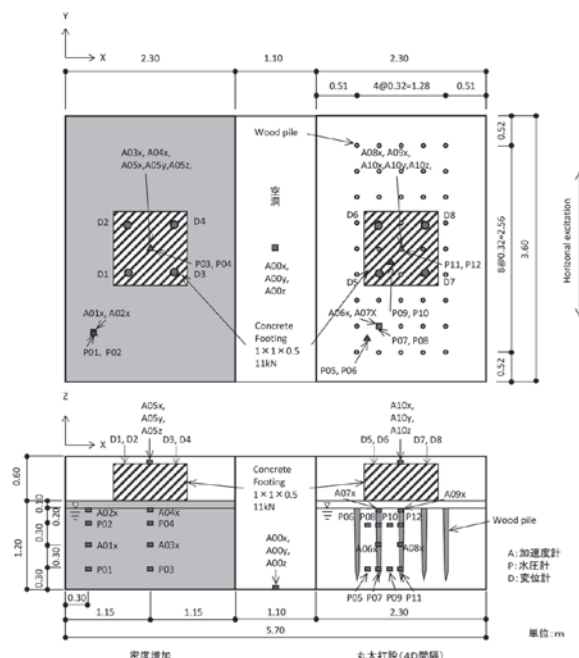


図11 計器設置位置の概要

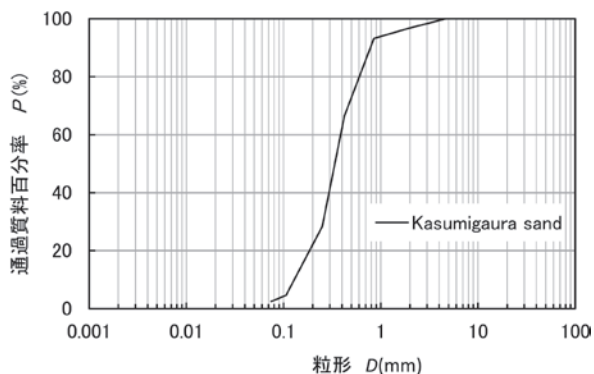


図12 粒径加積曲線

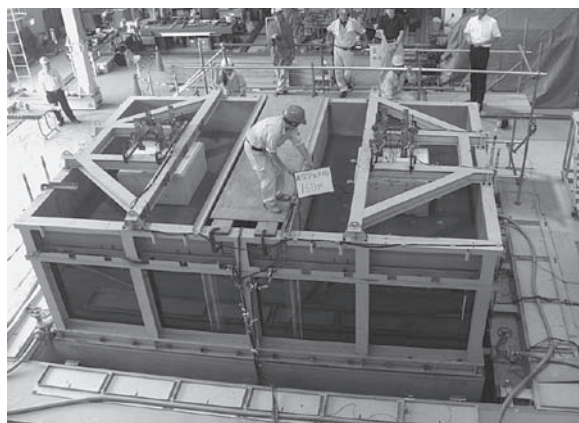


写真3 大型振動台実験試験状況

-0.9m の過剰間隙水圧比), 地盤とフーチングの沈下 (地表面およびフーチング上面にターゲットを設置して非接触式変位計で計測), 地盤とフーチングの加速度応答について着目している。振動台実験の土層の全体写真を写真3に示す。

### 3.3 試験結果および考察

図13, 14に入力加速度, 応答加速度, 過剰間隙水圧, 沈下量の時刻歴の例を示す。各図とも自由地盤と構造物直下に分け, また過剰間隙水圧と時刻歴の図には初期有効上載圧  $\sigma_{v0}'$  を併記した。無対策 (NIP) の応答加速度は, 自由地盤において入力加速度が数波の時点でほぼ 0 gal, 構造物直下で加振後徐々に減少している。一方, 丸太打設 (P4D) は自由地盤と構造物直下で加速度は

200gal まで上昇した。これに伴い, 過剰間隙水圧は自由地盤における GL-0.3m の過剰間隙水圧が応答加速度数波で初期有効上載圧に達し, これと同時に応答加速度がほぼ 0 gal になり液状化状態になった。一方木材を打設した (P4D) は初期有効上載圧に達せず, このような大きな加速度になっても地盤の過剰間隙水圧は上昇にないことがわかった。それぞれの加振終了後の状況を写真4, 写真5に示す。写真5の木材打設 (P4D) と比較すると写真4の無対策 (NIP) は液状化が発生し噴砂現象が生じ, また地盤の体積変化がおりフーチングが傾斜していることがわかる。液状化程度の指標となる過剰間隙水圧比の時刻歴を図15, 図16に示す。過剰間隙水圧比算定の際に用い

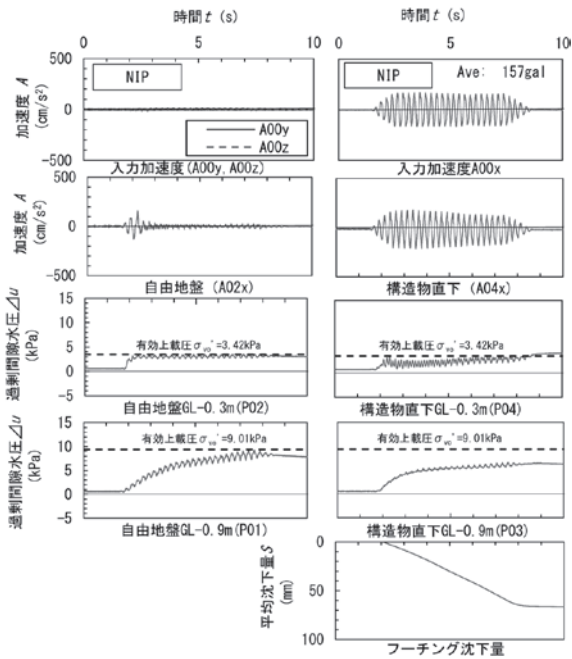


図13 入力加速度，応答加速度，過剰間隙水圧と沈下量の時刻歴 (NIP)

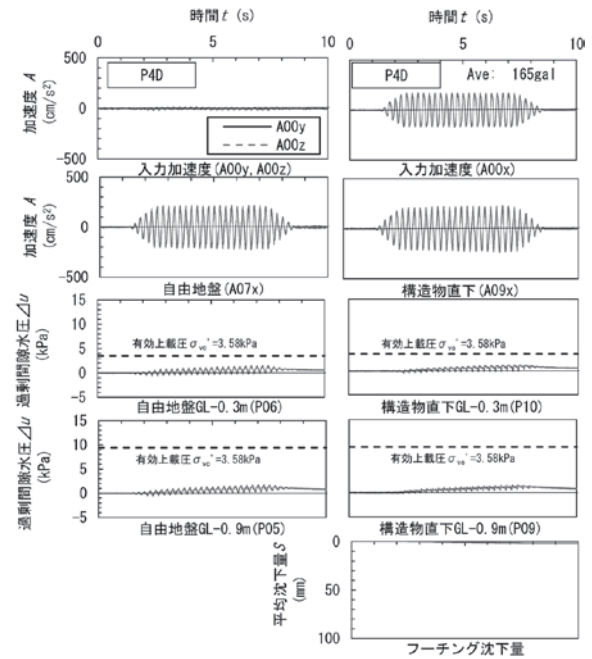


図14 入力加速度，応答加速度，過剰間隙水圧と沈下量の時刻歴 (P4D)



写真4 加振後状況 (NIP)

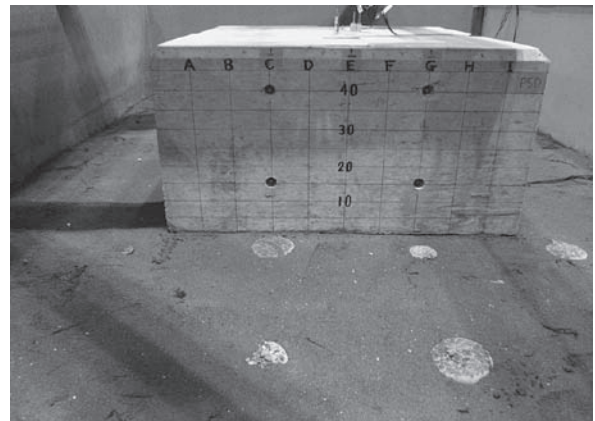


写真5 加振後状況 (P4D)

た初期有効上載圧  $\sigma_{v0}'$  は、湿潤密度（飽和密度）から計算し求めた。丸太打設の影響は、無対策（NIP）の自由地盤では2深度とも過剰間隙水圧比が1に近い値に達して頭打ちとなり、液状化していることが確認できる。一方、丸太打設（4D）では2深度とも自由地盤と構造物直下においてフーチングの上載荷重の有無に関わらず液状化に達していない。丸太打設による密度増大効果により液状化を抑制することができると考えられる。また、フーチング重量の影響は、フーチングの有無を比較すると、フーチングがない場合（上載荷重なし）と比較して、フーチングがある場合（上載圧11kN/m<sup>2</sup>）の方が、過剰間隙水圧比が小さく

なっており、上載圧による液状化抑制効果が確認できた。更に深度の影響は、GL-0.3mとGL-0.9mの各過剰間隙水圧比に着目すると、自由地盤もしくは構造物直下でも、浅層の方が過剰間隙水圧比の上昇量が小さくなっている。構造物直下の方が同深度においてもその傾向は大きく、自由地盤の有効上載圧が小さく浅い層では、相対的に上載荷重による有効上載圧増大の影響が大きかったと考えられる。また木材打設による密度増大（4D）は、どの区画においても過剰間隙水圧比の上昇が小さく、液状化が発生していないことが確認できた。

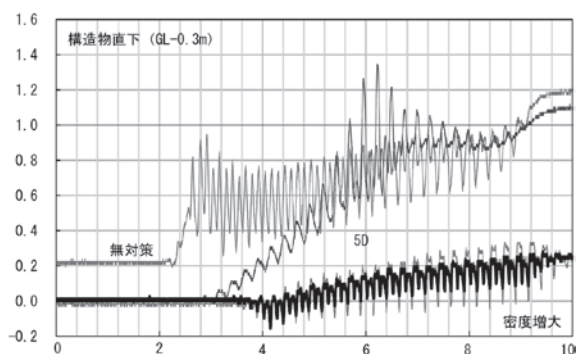


図15 過剰間隙水圧と時刻歴の関係 (構造物直下)

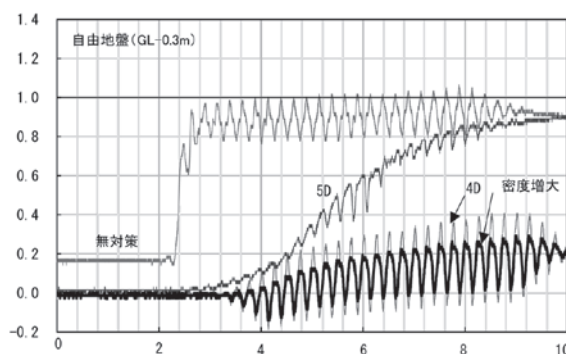


図16 過剰間隙水圧と時刻歴の関係 (自由地盤)

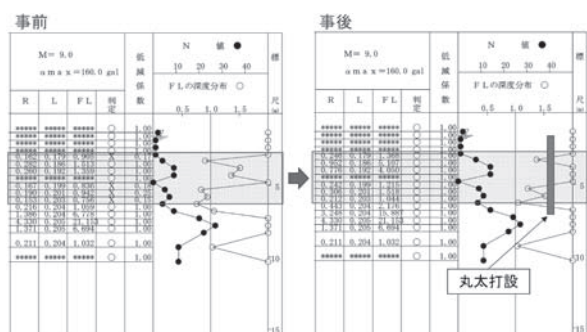


図17 改良前後のN値とFL値

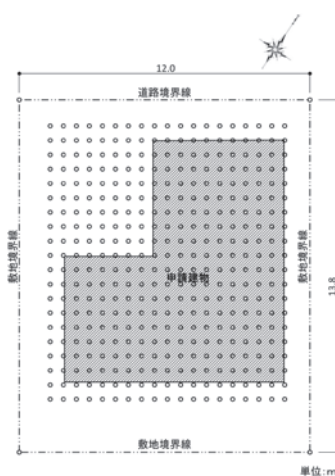


図18 配置図

### 3.4 施工事例

本節では前述した木材を用いた液状化対策工法の実施工事例を紹介する。当該宅地は東日本大震災で液状化による被害を最も受けた地域の一つであり、液状化による不同沈下の修復を選択せず、既存建物を解体し再液状化を防ぐ地盤を形成してから建物を立て直す方法を選択している。図17の左図に液状化被害が起きた後に調査した地盤柱状図を示す。地下水位は1.6mと比較的浅く、GL-3m付近からGL-7m付近までN値15以下の飽和した砂層が続いており、再度液状化が起きる可能性が高い地盤といえる。この宅地に地盤調査結果をもとに液状化の検討を行い、末口径14cm、長さ6m丸太を杭頭GL-1.5mに設定し380本のカラマツ丸太を配置し打設した(図18、写真6)。地盤の改良率 $a_s$ は0.051(5.1%)である。図17の右図に丸太の打設により密度を増大された砂地盤の地盤調査結果と液状化検討結果を示す。対象地盤における施工後のN値が上がっているとともにFL法による各層の液状化抵抗率のFL値が1を上回っていることが分かる。



写真6 施工状況

## 4. おわりに

本報では、木材を用いた地盤補強対策、液状化対策工法および東日本大震災で液状化被害を受けた地区において戸建住宅での丸太を用いた液状化対策工法の採用事例を紹介した。木材の地中利用については技術的課題以外に解決していかなければ



ばならない事はあるものの、この分野における木材利用の潜在的ポテンシャル量は少なくないと考えられる。私自身このような木材の地中利用に関する研究を始めて10年近くになったが、そのなかで木杭に関する歴史を調べ、木材の耐久性を考慮し、地盤補強材であるセメントやまたは鉄の適用範囲を限定しながら土木材料として木材を適用する試みをしてきた。研究当初、建築・土木の技術者の立場として国内の木材供給側を見た時、本当に彼らは国産材の供給量をあげたいのか？本当に木材を使わせたいのか？と思う時があった。当初、「発注量が増えると木材単価は高くなるものだ」「発注してもすぐに届かない」しまいには「日本の林業を守るため、林業発展のため高く買ってくれ」と言われた時は言葉を失った。そこには土木・建築分野の常識とはかけ離れていた林業分野の常識があった。しかしながら、これらには一つずつ理由があり、需要側が長期的かつ継続的に購入することにより解決できることもあった。今後、更なる木材の需要拡大のためには、供給側と需要側のお互いの事情を理解する努力をし、歩み寄りが様々な面で必ず重要となると思われる。木材に関

わる技術者としてはまだまだ未熟者ではあるが、木材の需要拡大に今後少しでも貢献できればと考えている。

#### 引用文献

- 1) 林野庁:平成22年度 森林・林業白書, 第1章, p.4 (2011).
- 2) 国土交通省:住宅着工棟数(2015)等.
- 3) 林野庁:平成22年度 森林・林業白書, 第1章, p.6 (2011).
- 4) 有馬孝礼:木材の住科学—木造建築を考える, 東京大学出版会, pp.6-7 (2003).
- 5) 社土木学会:木材工学特別委員会, 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.70-72 (2010).
- 6) 水谷羊介, 沼田淳紀, 中村博, 今野雄太:杭材としての木材地中利用について(その2), 土木学会平成23年度第66回年次学術講演会(2011).
- 7) 三村佳織, 沼田淳紀, 村田拓海, 池田浩明, 原忠, Riaz Saima, 堀俊和:丸太打設液状化対策の大型振動実験結果, 木材利用研究論文報告集 12. 85-92 (2013).

(2016.1.5 受付)