

浦安市における 丸太打設液状化対策の現場施工実験

沼田 淳紀¹・一貫田 悟司²・筒井 雅行³
三村 佳織⁴・池田 浩明⁵・原 忠⁶・坂部 晃子⁷

¹正会員 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

²正会員 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:satoshi_ikkanda@tobishima.co.jp

³正会員 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:masayuki_tsutsui@tobishima.co.jp

⁴正会員 兼松日産農林株式会社 ジオテック事業部（〒102-0083 東京都千代田区麹町 3-2 3F）
E-mail:k-mimura@knn.co.jp

⁵正会員 昭和マテリアル株式会社 札幌営業所（〒003-0027 北海道札幌市白石区本通20丁目北2番45号）
E-mail:ikedat@showamaterial.co.jp

⁶正会員 高知大学 教育研究部自然科学系農学部門（〒783-8502 高知県南国市物部乙200）
E-mail:haratd@kochi-u.ac.jp

⁷正会員 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科（〒783-8502 高知県南国市物部乙200）
E-mail:akkanbebe2@yahoo.co.jp

木材を利用することが地球温暖化緩和に有効であることから、丸太を地中に打設し液状化対策とする工法（LP-LiC）を開発している。この工法について、2011年東北地方太平洋沖地震で液状化の発生した千葉県浦安市舞浜で実施を行い、この施工性と改良効果を確認する機会を得た。本稿では、この実験方法を示し、改良効果を確認する目的で実施した原地盤の N 値と丸太打設後の丸太間における N 値の調査結果を示す。この結果、丸太打設後の N 値は、サンドコンパクションパイル工法の設計に用いる各改良率の関係式をほぼ下限に分布することがわかった。実験現場の砂層は細粒分含有率が多いものも含まれたが、丸太打設による地盤改良の効果は、これらの地盤に対してもサンドコンパクションパイル工法に用いられる関係式を適用できることが明らかになった。

Key Words : densification, global warming, liquefaction, log, N -value, wood

1. はじめに

現在国内の樹木は豊富にあり、国産木材の利用拡大が望まれている。特に、木材を長期的に利用することは、炭素貯蔵効果により温室効果ガス削減に大きく寄与する。

2011年東北地方太平洋沖地震では、震央から380kmも離れた千葉県浦安市で液状化が発生し、甚大な被害をもたらした。液状化被害は、震源から遠方であっても一度発生するとその被害は甚大であるので、広域で大きな被害をおよぼすことが大きな特徴である。したがって、この対策は、経済的であるとともに、恒久性が高く、環境にも配慮した工法とすべきである。

木材は、地盤中の地下水位以深では、腐朽や蟻害を受けることなく長期耐久性を有することから、丸太を地中に打設し液状化対策を行うとともに炭素貯蔵を行う丸太打設液状化対策&カーボnstock工法（以降、LP-LiCと呼ぶ）を開発した。

2011年東北地方太平洋沖地震で液状化の生じた千葉県浦安市舞浜で、本工法の施工実験を実施する機会を得た。本稿では、この実験方法を示し、改良効果を確認する目的で実施した原地盤の N 値と丸太打設後の丸太間における N 値の調査結果を示す。なお、 N 値は、標準貫入試験以外にも、スウェーデン式サウンディング試験（以降、SWSと呼ぶ）、簡易動的コーン貫入試験（以降、PDCPT

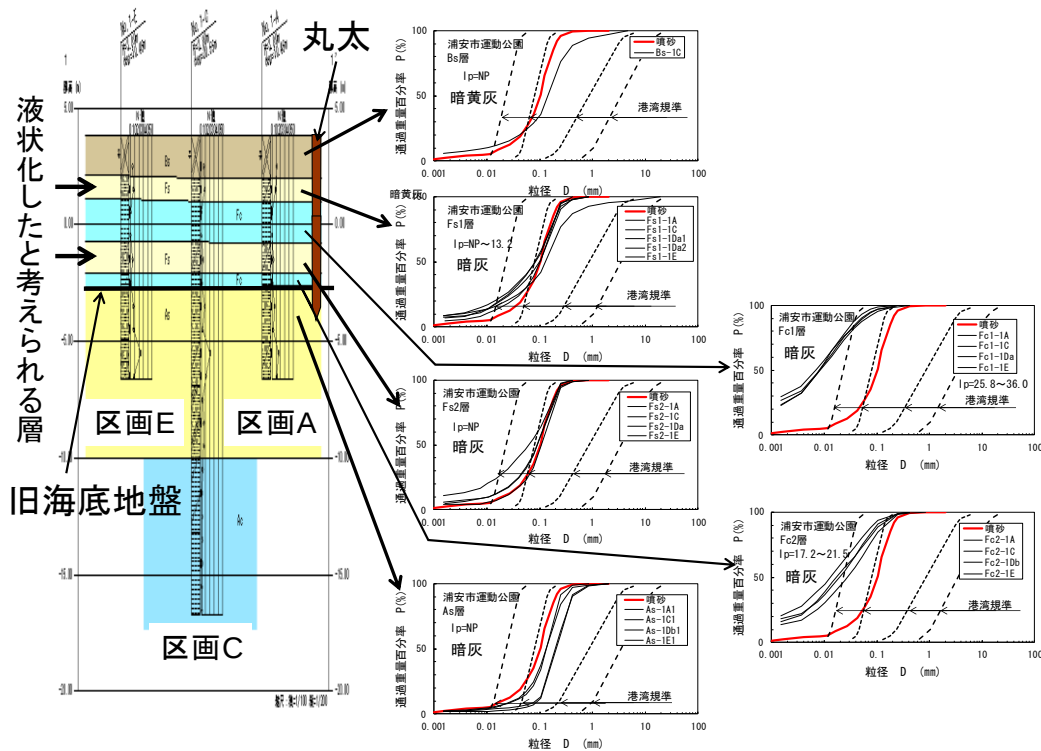


図-1 現場施工実験実施地点の地層区分、N値の深度分布と各層の粒度組成

と呼ぶ)、オートマチックラムサウンディング試験(以降、ARSと呼ぶ)、ピエゾドライブコーン(以降、PDCと呼ぶ)を実施した。

2. 現場施工実験実施地点の地盤概要³⁾

2011年東北地方太平洋沖地震(Mj=9.0)では、震央から約380kmも離れた千葉県浦安市で激しい液状化が発生し、土木・建築構造物に甚大な被害が生じた¹²⁾。

K-NET浦安(猫実)で観測された揺れは、震度階で5強、最大加速度は 169cm/s^2 (水平2成分の合成)であり、 $50\sim 130\text{cm/s}^2$ 程度の成分が多く含まれ繰返し回数が多いのが特徴である。

現場施工実験は浦安市舞浜の浦安市運動公園内で実施した。この地点は、公有水面埋立事業により1980年頃までに埋め立てられた。実施地点は、試験実施前には液状化による噴砂が至るところで確認された。浦安市は、1987年千葉県東方沖地震(Mj=6.7、千葉県中央区で震度5、東京千代田区大手町震度4(ただし旧震度階))でも、1971年に造成した海岸埋立地の海楽、美浜、入船で液状化が発生した。ただし、舞浜では液状化が発生した記述は見当たらない。

図-1に、標準貫入試験により得られた地層区分、N値の深度分布と各層から得られた粒度組成を示す。表層～GL-1.8mが盛土層Bs、GL-1.8～-6.5mが浚渫による埋土層で砂質土層と粘性土層が互層に堆積し、上位よりFs1、Fc1、Fs2、Fc2、GL-6.5m以深が沖積の砂層Asとなってい

る。旧海底地盤は、GL-6.5m以深と考えられる。N値は、Bs層とFs1層でやや大きく5～11であるが、その下位のFc1、Fs2、Fc2では0～5と低く、As層浅部では6～8とやや大きくなる。

図中の粒度組成には、港湾基準⁴⁾に示された液状化の可能性のある粒度組成の範囲、地表に堆積していた噴砂の粒度組成と塑性指数も併記した。港湾基準の粒度組成は、内側の2本の線の範囲が特に液状化の可能性のある範囲であり、細粒側は均等係数 $U_c < 3.5$ 、粗粒側は $U_c \geq 3.5$ の場合を記した。ここで、Fc1とFc2の粒度組成は粘土分が多く含まれ、塑性指数 I_p が15を超えることから非液状化層と判断される。一方、Fs1とFs2は、As層と類似するがやや細粒分が多い。これは当該地点がAs層を浚渫して埋め立てられ、その過程で材料が分級しながら堆積したと考えられる。さらに、Fs1とFs2は、噴砂の粒度組成とほぼ一致することから、地震ではこれらの層が液状化した可能性が高く、特にFs2層はN値も低いので最も液状化した可能性が高い。この層の細粒分含有率は、30～50%程度で大きい。

3. 実験方法⁵⁾

(1) 施工概要

LP-LiCの液状化対策の主な原理は、丸太を地中に打設することで、地盤を密実にするることである。これを実施するために、リーダー式のオーガ併用杭打ち機を用いた。施工は、最初に、表層約2mのやや硬い層を緩める目的

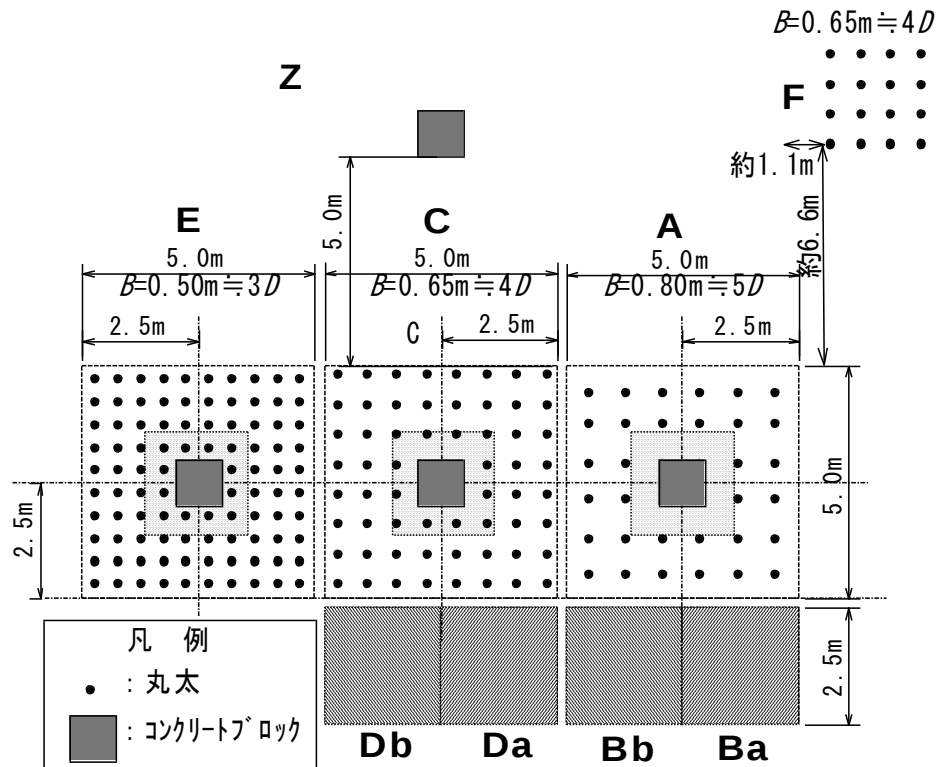


図-2 各区画と丸太打設位置

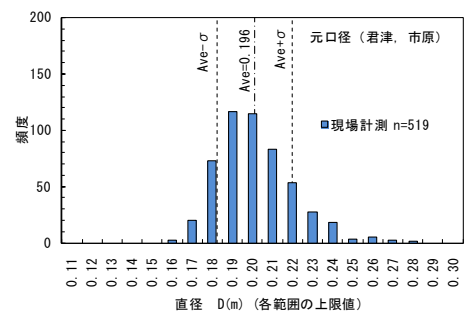
で、オーガでGL-2mまで無排土で掘削を行い、その後、鋼管を回転させながらGL-8mまで圧入し、それを引き抜き後、最後に丸太を圧入した。この方法による機械から5m離れた地点における振動レベル L_{V10} 値と、10m離れた地点における騒音レベル L_{A5} 値は、それぞれ特定建設作業に伴って発生する振動の規制に関する基準、および、同騒音の規制に関する規制基準値の75dBと85dBを大きく下回っている。

(2) 丸太打設位置

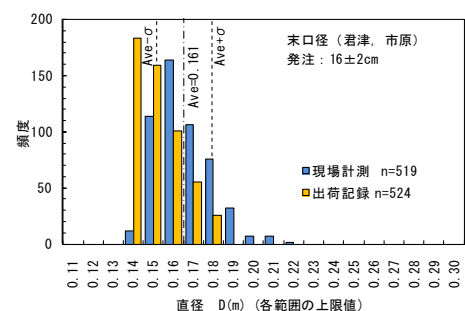
図-2に、各区画と丸太打設位置を示す。実験は、縦5m×横5mの区画A, C, Eの3面と、縦2.5m×横2.5mの区画Ba, Bb, Da, Db, Fの5面を設けた。区画A, C, Eは、丸太打設間隔 B を $B=0.80\text{m}$ ($a_s=3.1\%$, $\approx 5D$)、 0.65m ($a_s=4.8\%$, $\approx 4D$)、 0.50m ($a_s=8.0\%$, $\approx 3D$)とした (a_s : 改良率, D : 丸太径)。区画Ba, Bb, Fは、丸太打設方法の検討に用いた。区画Da, Dbは、異なった種類の丸太の検討に用いた。以降については、区画A, C, Eについてのみ述べる。

(3) 使用丸太®

使用した丸太は、千葉県産のスギとヒノキである。丸太は、末口呼び径 $16\text{cm} \pm 2\text{cm}$ で発注した。長さは、旧海底地盤に丸太先端部が届く長さで1点継ぎとし、4mと4mの全長8mである。丸太は、皮を剥いただけの生材で、下部丸太は先端部をペンシル状に尖らせた。なお、丸太打設は末口を下にして打設した。



(a) 元口径



(b) 末口径

図-3 納入された丸太径の実測値

納入された丸太は、周長をmm単位で計測した。図-3に、納入された丸太の末口径と元口径の実測値の頻度分布を示す。図中には、森林組合が出荷記録に示した末口呼び径の頻度分布も併記した。森林組合は、丸太径を1cm単位の切り捨てで計測している。現場計測と、出荷記録で数量が一致しないのは、一部の丸太を返納交換中

表-1 調査の概要

調査項目		実施場所
サウンディング試験	標準貫入試験(SPT)	A, C, Da, Db, E (試料の物理試験含む)
	スウェーデン式サウンディング試験(SWS)	A, Ba, Bb, C, Da, Db, E, F ※, Z
	簡易動的コーン貫入試験(PDCPT)	A, Ba, Bb, C, Db, E
	オートマチックラムサウンディング試験(ARS)	A, Ba, Bb, C, Da, Db, E, F ※, Z
	ピエゾドライブコーン試験(PDC)	A※, C※, E※, Z
フラットダイラトメータ		A※, C※, E※, Z
地盤高さ計測		2mメッシュで全面
表面波探査		全面で5測線
常時微動		A※, C※, E※, Z
丸太の鉛直载荷試験		C※, Da※
振動騒音計測		Bb, C, E (いずれも施工時)
地下水計測		区画Eの近傍, 約9ヶ月間
二酸化炭素排出の計測		全工程

※丸太打設後のみ実施。打設前の値は区画Zの無対策地盤の値を用いた。

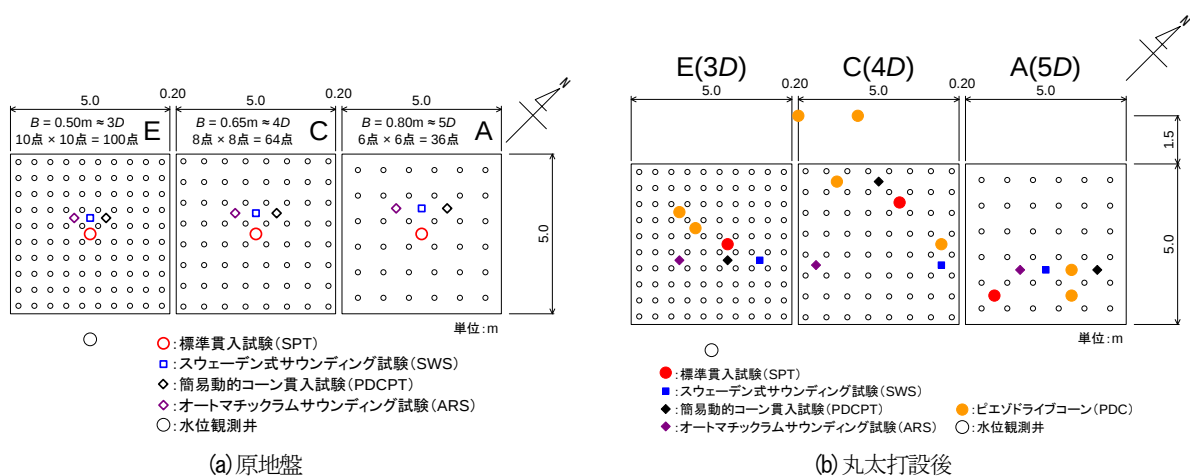


図-4 地盤調査位置

に現場で寸法を計測したためである。なお、図中の直径の表示は、それぞれの範囲の上限値を表示した。

出荷記録では、末口径 D_T は $0.13 < D_T \leq 0.18\text{m}$ の範囲（ただし、最小値は 0.14m ）で、右下がりの直角三角形形状を示し、 0.14m を下限とし丸太が搬出されたことが分かる。しかしながら、実際の計測結果は、やや小さい側に偏っているが、正規分布に近い。この時の平均値は 0.161m 、標準偏差は $\sigma=0.0138\text{m}$ である。このように、 1cm 単位の切り捨てで丸太を納入すれば、下限値に偏った出荷記録であっても、実際の直径は、発注範囲の平均値を中心とする正規分布に近くなる。

元口径 D_B は、 $0.15 < D_B \leq 0.28$ の広い範囲にばらつき、平均値は 0.196m 、標準偏差は $\sigma=0.0187\text{m}$ であった。末口径は、長さを L とすると経験的に、 $D_B = D_T + L/100$ で表される。実験結果の平均値は、ほぼ経験値と一致した。

(4) 地盤調査項目

表-1に実施した調査をまとめた。液状化対策の効果を確認するために、丸太打設前後（PDCについては、丸太打設前として近傍の無対策地盤の値を用いた）で各種サ

ウンディング試験、土質試験、表面波探査、地盤高さ計測を行った。また、丸太打設後の地盤と近傍の無対策地盤で常時微動測定と、地盤の水平土圧を求める目的でフラットダイラトメータによる測定を行った。さらに、地下水観測、丸太の鉛直载荷試験、振動騒音計測、二酸化炭素の排出量の計測も実施した。ここでは、地盤調査結果について述べる。

実施したSWS、PDCPT、ARS、PDCについては、いずれも N 値に換算し、 N 値換算値（ N 値に換算した値の意で、拘束圧補正を行った換算 N 値 N_1 とは異なるの注意）として検討した。それぞれの換算式を、式(1)～式(4)に示す。

$$\text{SWS}^7: N = 0.002W_{\text{sw}} + 0.067N_{\text{sw}} \quad (\text{砂・砂質土}) \quad (1)$$

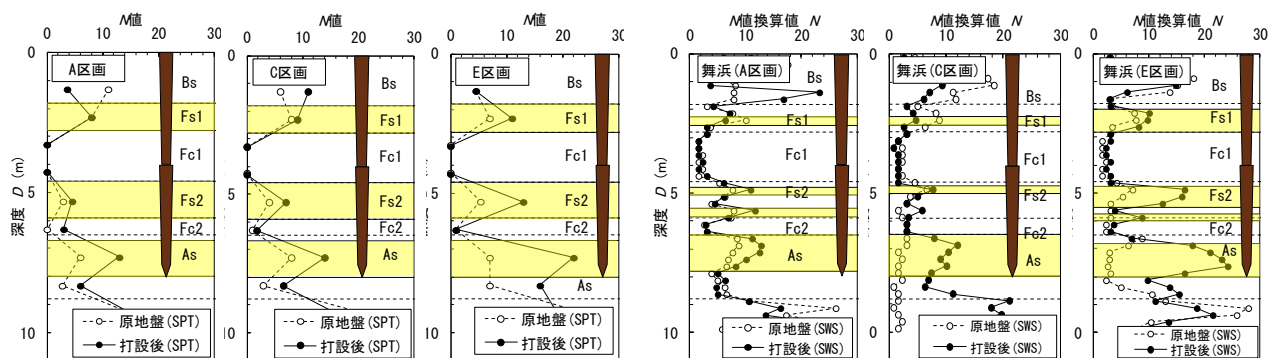
ここで、 W_{sw} : 1000N 以下で貫入した場合の荷重(N)

N_{sw} : 回転により貫入させた時の貫入量 1m 当たりの半回転数(回/m)

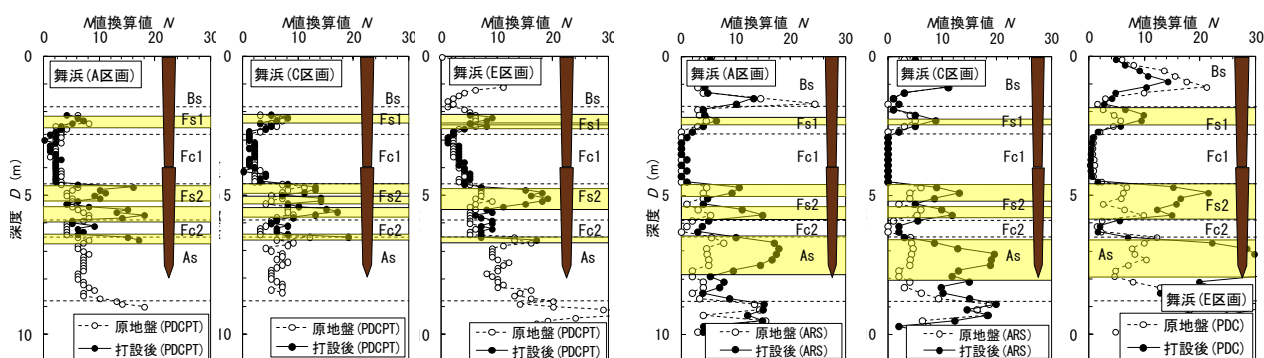
$$\text{PDCPT}^9: N_d > 4 \text{ のとき } : N = 1.1 + 0.30N_d$$

$$N_d \leq 4 \text{ のとき } : N = 0.66N_d \quad (\text{砂質土}) \quad (2)$$

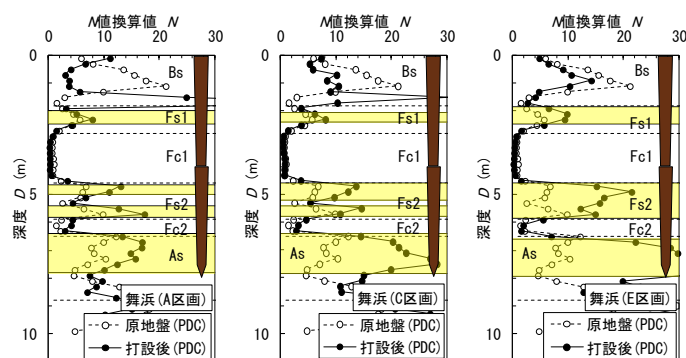
ここで、 N_d : 簡易動的コーン貫入試験より得られた



(a) SPT(A 区画) (b) SPT(C 区画) (c) SPT(E 区画) (d) SWS(A 区画) (e) SWS(C 区画) (f) SWS(E 区画)



(g) PDCPT(A 区画) (h) PDCPT(C 区画) (i) PDCPT(E 区画) (j) ARS(A 区画) (k) ARS(C 区画) (l) ARS(E 区画)



(m) PDC(A 区画) (n) PDC(C 区画) (o) PDC(E 区画)

図-5 N 値または N 値換算値の深度分布

100mm ごとの打撃回数(回)

ARS⁹⁾: $N=N_d$

$$N_d = N_{dm} \cdot \angle N_{dm} \quad (3)$$

ここで、 N_d : ラムサウンディングで得られたコーン試験値 (回)

N_{dm} : ラムサウンディングで得られた 200mm ごとの打撃回数(回)

$\angle N_{dm}$: トルクより求められる補正回数(回)

PDC¹⁰⁾: $N=N_d$

$$N_d = 20/2d \cdot 0.16Mr \quad (4)$$

ここで、 N_d : ピエゾドライブコーンで得られた貫入抵抗値 (回)

d : ラムサウンディングの 1 打撃当たりの貫入量(cm)

Mr : 回転トルク(N・m)

図-4に、地盤調査位置を示す。丸太打設後は、打設された丸太間のほぼ中央で試験を実施した。また、PDCは、丸太打設した周辺地盤における結果を原地盤の値とし、一打撃ごとに求められる値を20cmごとの値に直した。

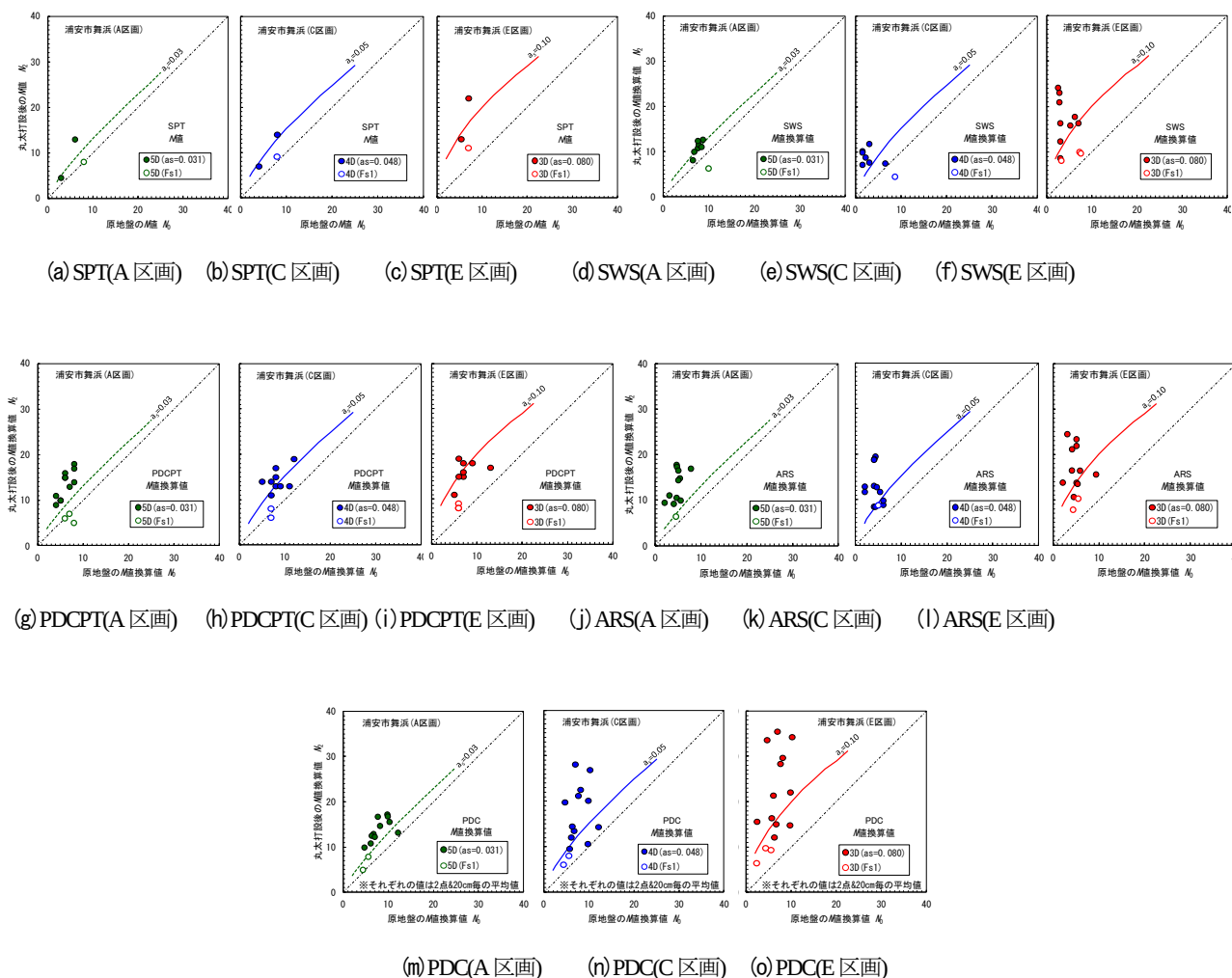


図-6 原地盤と丸太打設後地盤に対する N 値または N 値換算値

4. 実験結果¹¹⁾

図-5に、 N 値または N 値換算値の深度分布を示す。図には、原地盤と丸太打設後の値を示した。また、図中網掛け部は、対象となる砂質土層で、細粒分含有率50%以上である層とSWSなどで自沈するなどの層は除いた。

砂質土層における丸太打設後の N 値または N 値換算値は、Fs1層におけるSWSとPDCPTの一部を除き、いずれも原地盤より大きな値となり、その傾向は、丸太間隔が小さくなるほど（改良率が大きくなるほど）大きくなる事が分かる。

また、丸太先端部はペンシル型に尖っているが、丸太先端付近、さらには、それより下位においても丸太打設後の N 値または N 値換算値は原地盤より大きくなる事が認められる。これは、丸太打設により、地盤を水平方向に押し広げ地盤を密実化するが、下方向にも押し込み、これにより N 値または N 値換算値が増加すると考えられる。

5. 原地盤 M 値と丸太打設後 M 値の関係

図-6に、原地盤と丸太打設後地盤に対する N 値または N 値換算値を示す。それぞれの図には、サンドコンパクションパイル工法（以降、SCPと呼ぶ）の設計（A法）に用いられる、丸太打設に相当する改良率に対する原地盤 N 値と改良後のパイル間の N 値の関係を併記した。また、Fs1層は、細粒分含有率が多く、かつ、上載圧が小さい割に、原地盤の N 値が大きく、道路橋示方書¹³⁾の液状化判定により液状化の可能性を評価すると、L1地震動に対しては液状化安全率が1.0を上回るの、他と区別するために記号を白抜きにした。

Fs1層の一部の丸太打設後の N 値換算値が、原地盤の値を下回るものを含みやや小さめとなるが、それ以外については、いずれもSCPの設計で用いられる関係を下限に分布していることがわかる。本実験の対象地盤は、細粒分含有率が50%近い層を多く含むが、LP-LiCに対しては、このような細粒分含有率の大きな地盤に対しても、SCPに用いられる設計用の関係式が適用できる可能性があることがわかる。

5. 結論

- (1) 納入された丸太径のヒストグラムについて、末口呼び径は規定の0.14mを下限とする直角三角形分布となるが、別途詳細に計測した結果では0.16mを平均値とする正規分布となった。
- (2) 丸太打設された丸太間の地盤の N 値または N 値換算値は、原地盤と比較しSCPの設計（A法）に用いられる関係式と同等かそれ以上に増加する。
- (3) 丸太打設後の N 値または N 値換算値は、丸太先端部のペンシル状の位置に置いても原地盤より増加する。

謝辞：本実験は、「浦安市が管理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」により浦安市から実験場所を提供していただいた。また、実験の一部は、林野庁地域材供給倍増事業のうち木造住宅・木造建築物等の構造部材開発等支援事業の中の木造中高層建築物等の部材開発等支援事業の補助、および、科研費（基盤研究（C）, 24580221）の助成を得て実施した。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 原忠：東日本大震災を科学的に検証する 4. 地盤災害と建築物の関係，木材工業，Vol.66，No.11，pp.492-497，2011.
- 2) 三輪滋，筒井雅行，本山寛，池田隆明，沼田淳紀：2011年東北地方太平洋沖地震における関東地方の液状化被害調査，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.4，pp. I -1250-1265，2012.7.
- 3) 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.65-66，2013.9.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），pp.383-389，2007.7.
- 5) 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.63-64，2013.9.
- 6) 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.67-68，2013.9.
- 7) 地盤工学会：第4章 スウェーデン式サウンディング試験，地盤調査の方法と解説，pp.280-289，2004.6.
- 8) 地盤工学会：第3章 簡易動的コーン貫入試験，地盤調査の方法と解説，pp.274-279，2004.6.
- 9) 日本建築学会：2SWS試験以外の原位置試験方法，小規模建築物基礎設計指針，pp.37-45，2008.2.
- 10) S. Sawada, D. Yoshizawa, N. Hiruma, M. Nagase, T. Sugano and H. Nakazawa：Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone，*Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mech. Geotech. Eng.*，pp. 1064-1067，2009.10.
- 11) 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.69-70，2013.9.
- 12) 地盤工学会：1.3 サンドコンパクションパイル工法，地盤工学・実務シリーズ 18，液状化対策工法，pp.233-253，2004.
- 13) 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.

SITE EXPERIMENT OF COUNTERMEASURE AGAINST LIQUEFACTION BY LOG PILING METHOD IN URAYASU CITY

Atsunori NUMATA, Satoshi IKKANDA, Masayuki Tsutsui, Kaori MIMURA,
Hiroaki IKEDA, Akiko SAKABE and Tadashi HARA

Since use of wood is effective in mitigation of global warming, the authors have been developing log piling method for liquefaction mitigation and carbon stock. This method was conducted in Maihama, Urayasu City where much liquefaction occurred during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake. This paper shows procedure of the experiment and results of geotechnical investigations such as standard penetration test and other sounding tests. As a result, it was found that N -values after log piling between logs were distributed over the line used for SPT design and increased with increasing replacement ratio even though fine contents in the ground were from 30 to 50 %.