

# 大型振動実験による丸太打設の液状化対策効果

沼田 淳紀<sup>1</sup>・村田 拓海<sup>2</sup>・Saima RIAZ<sup>3</sup>・三村 佳織<sup>4</sup>・原 忠<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 飛鳥建設株式会社 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

<sup>2</sup>正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail: takumi\_murata@tobishima.co.jp

<sup>3</sup>Student Member of JSCE Univ. of Engineering and Technology Lahore (54890, Pakistan)

E-mail: saimariaz04@gmail.com

<sup>4</sup>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

<sup>5</sup>正会員 高知大学 (〒783-8502高知県南国市物部乙200)

E-mail: haratd@kochi-u.ac.jp

筆者らは、木材を長期間用いることが地球温暖化緩和策および林業再生の具体策になることから、丸太打設による液状化対策の開発を行ってきた。この方法の液状化対策効果に対する検討を行うために、大型土槽を用いた大型振動実験を実施した。この結果、丸太打設による液状化対策が密度増大によるものと同等以上に効果があること、この効果は丸太間の密度増加や水平土圧の増加によると考えられることなどの結果を得た。本論文では、さらに、密度に対して丸太打設による液状化対策効果を定量的に把握するために、地盤内の応力ひずみ関係、丸太間地盤のサウンディング結果の検討、要素試験結果との比較を追加した。この結果、丸太打設による液状化対策は、純粋に密度増加のみにより対策された地盤よりも、相対密度が60%以上の範囲で数倍以上の効果があることを明らかにした。

**Key Words :** countermeasure, liquefaction, log piling, shaking table test, sounding

## 1. はじめに

IPCC第5次報告は、地球温暖化には疑う余地がなく、これに対する人間の影響が明瞭であることを示した<sup>1)</sup>。地球温暖化対策は、今世紀前半に解決すべき重要課題である。木材の長期利用は、これを解決する対策の一つであり、丸太を使用した軟弱地盤対策は、木材を生物劣化させることなく長期に利用できる具体策である<sup>2)</sup>。一方、2011年東北地方太平洋沖地震では、千葉県南房総市から青森県おいらせ町の広い範囲で液状化が発生し<sup>3)</sup>、震央距離380kmの千葉県浦安市などの遠方における被害も甚大<sup>4)</sup>であった。今後、大地震発生の可能性が高まっており<sup>例えは5)</sup>、地震減災対策も重要課題となっている。

このような背景から、著者らは丸太打設による液状化対策工法を開発してきた。また、間伐材を利用した液状化対策の基礎的な検討が行われ、この指針作成のためのガイドラインにも示された<sup>6)</sup>。この工法の地震時にお

ける対策効果を確認するために、大型土槽を用いた大型振動実験を行い、丸太打設による液状化対策が密度増大に

表-1 実験ケース

ケース	対策方法	土槽番号
NIP	無対策 $D_{rmm} = 48\%$	1
P5D	丸太打設 $B=5D, a_s = 3.1\%,$ $D_{rmm} = 64\%, D_{rmm0} = 49\%$	
P4D	丸太打設 $B=4D, a_s = 4.9\%,$ $D_{rmm} = 70\%, D_{rmm0} = 54\%$	2
DNS	密度増大 $D_{rmm} = 91\%$	

$B$ : 丸太打設間隔  
 $D$ : 丸太直径(末口) (m)  
 $a_s$ : 改良率 (%)  
 $D_{rmm}$ : 相対密度(最小法) (%)  
 $D_{rmm0}$ : 丸太打設前の初期相対密度(最小法) (%)

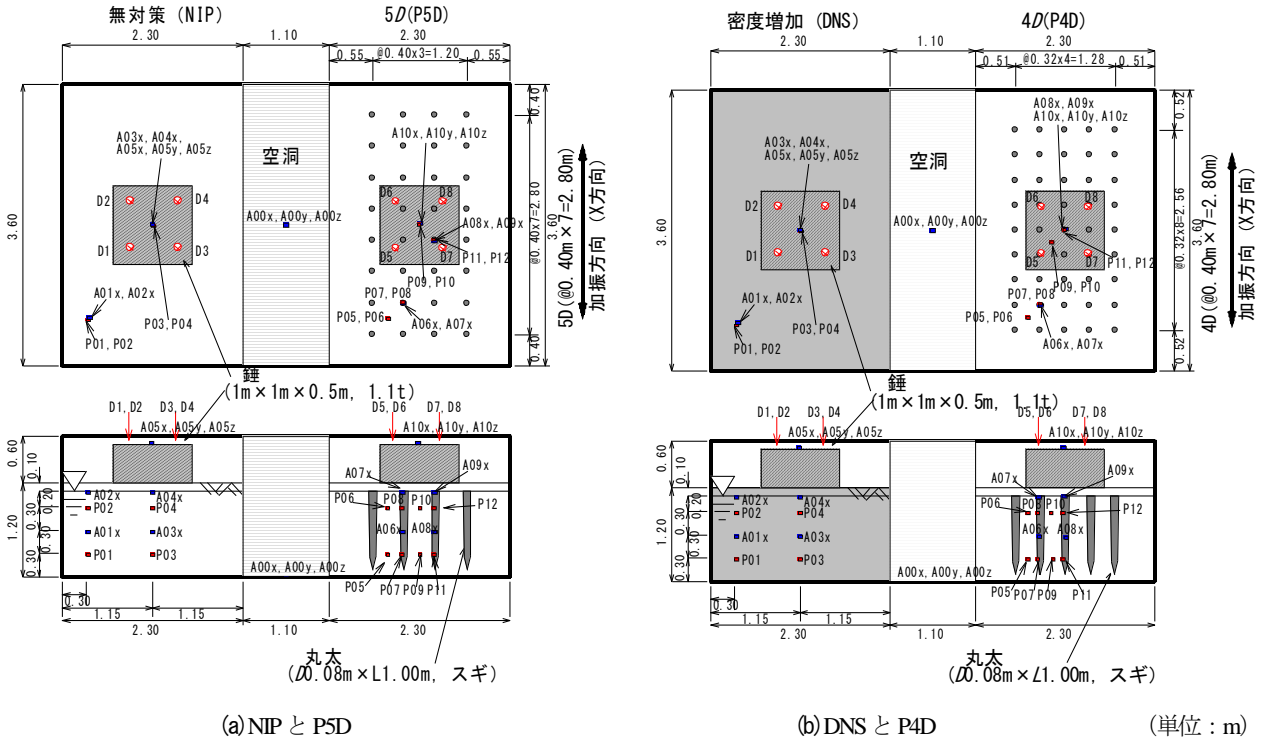


図-1 模型地盤の概要とセンサー配置

よるものと同等以上に効果があること、この効果は丸太間の密度増加や水平土圧の増加によると考えられることなどの結果を得た<sup>7)</sup>。その後、丸太打設による液状化対策効果が、純粋に密度増加のみにより対策した地盤よりも大きいことを定量的に示すために追加検討をおこなった。本論文では、最初に既に示した大型振動実験の方法と結果<sup>7)</sup>について、本検討に必要な部分を示すとともに、本検討に必要な部分を追加して示す。後に、既往研究で定性的であった丸太打設による液状化対策効果と純粋な密度増加によるそれとの違いを定量的に示す。

## 2. 実験方法

実験は、大型土槽に緩詰め模型地盤を作製し、それに丸太を打設し液状化対策を実施した。この地盤に錘を載せ、主にこの沈下量を用いて液状化対策効果の比較検討を行った。以下に実験方法を示す。なお、実験方法は、文献<sup>7)</sup>に詳しいので、本検討に必要な部分のみ示すとともに、本論文に必要な部分は追記する。

表-1に、実験ケースを示す<sup>7)</sup>。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。丸太打設のP5DとP4Dは、無対策のNIPと同じ地盤に、所定の丸太打設間隔で丸太を打設した。DNSは、密度増大である。

図-1に、模型地盤の概要とセンサー配置を示す<sup>7)</sup>。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。水位は、GL-0.1mに設定し、地盤上部0.1mを非液状化層とし

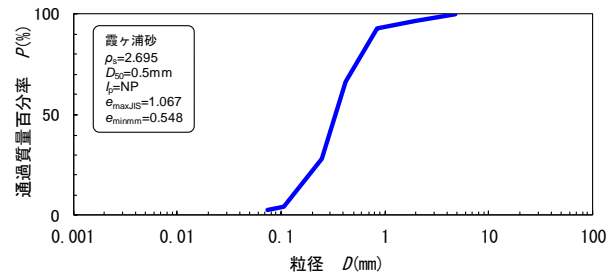


図-2 用いた砂の粒度組成と物理的性質

た。初期の地盤密度は相対密度  $D_{r\text{min}}=48\sim54\%$  である(相対密度の定義は、後述する。)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。丸太頭部上部は、現場施工と同様に碎石を充填した。ただし、砂と混ざらないように粗い目の布の袋に入れ充填した。地盤には、液状化程度を性能として評価するために、横1m×奥行き1m×高さ0.5mで質量1.1tのコンクリート製の錘を載せた。なお、図に示す通り、丸太は錘を直接支持していない。丸太打設による液状化対策効果との比較を行うために、密度増大による模型地盤も作製した。密度増大は、振動棒により地盤を締固めた。

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。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。

図-2に、用いた砂の粒度組成と物理的性質を示す<sup>7)</sup>。図中の  $e_{\text{min}}$  とは最小法により求めた最小間隙比で、最

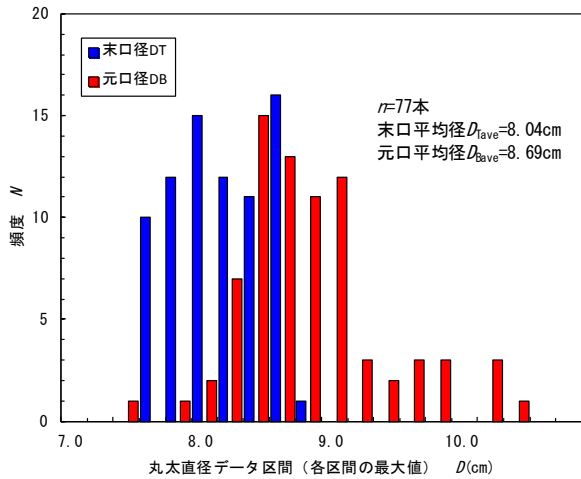


図-3 用いた丸太の末口径と元口径の度数分布

小法とは、最小間隙比を JIS 法ではなく、突固めなどで粒子破碎が生じない範囲で最も小さな間隙比を求めたもので、人為誤差が大きくなる場合があるが、これにより求めた相対密度は液化抵抗との相関が高い<sup>9)</sup>。

使用した丸太は、樹種がスギ、末口径  $D_T=8\text{cm}$ 、長さ  $L=1\text{m}$ 、先端部はペンシル状で、皮を剥いただけの自然木を用いた。使用にあたっては 200 本の中から末口径が 8cm に近い 77 本を選び出した。

図-3に、丸太の末口径  $D_T$  と元口径  $D_B$  の度数分布を示す。元口は、末口より平均で 0.65cm 太い。

図-4に、加振に用いた入力波形を示す<sup>7)</sup>。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、振幅を約 50gal ずつ増やすステップ加振とした。加振後、次の加振をする前には、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ことを間隙水圧計で確認した。

模型地盤作製後には、地盤の強さを知る目的でスウェーデン式サウンディング試験 (JIS A 1221) (以降、SWS と示す。)、簡易動的コーン貫入試験 (JGS 1433-2003) (以降、PDCPT と示す。)、オートマチックラムサウンディング<sup>9)</sup> (以降、ARS と示す。)、ピエゾドライブコーン<sup>10)</sup> (以降、PDC と示す。) を実施し、また、フラットダイラトメータ (以降、DMT と示す。) による水平土圧計測を実施した。図-5に、サウンディング実施地点を示す<sup>7)</sup>。サウンディング結果は、次式を用いて  $N$  値に換算した。本論文ではこれを  $N$  値換算値と示し、以降の検討を進める。

$$\text{SWS}^{12)}: N=0.002W_{sw}+0.067N_{sw} \quad (\text{砂} \cdot \text{砂質土}) \quad (1)$$

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)

$$\text{PDCPT}^{13)}: N_d \geq 4 \text{ のとき}: N=1.1+0.30N_d$$

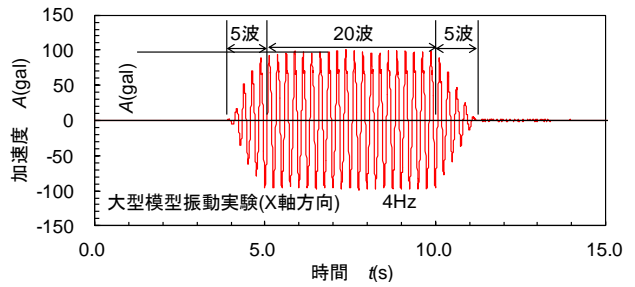


図-4 入力波形

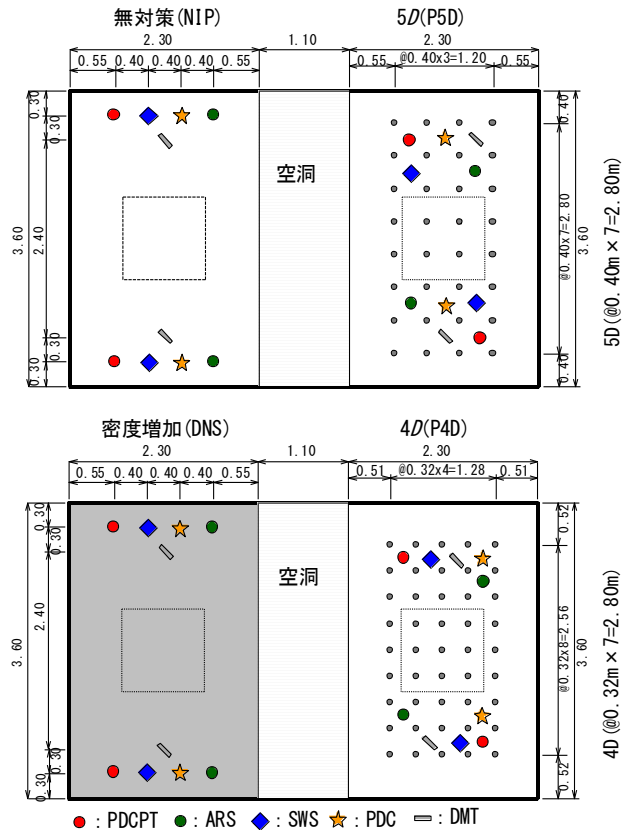


図-5 サウンディング実施地点

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

ここで、 $N_d$ : 簡易動的コーン貫入試験より得られた 100mm ごとの打撃回数 (回)

$$\text{ARS}^9): N=N_d$$

ただし、 $N_d \leq 5$  のとき:  $N_d=N_{dm}$

$$N_d > 5 \text{ のとき}: N_d=N_{dm}+\Delta N_{dm} \quad (3)$$

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)

$\Delta N_{dm}$ : トルクより求められる補正回数 (回)

$$\text{PDC}^{10)}: N=N_d$$

$$\text{ただし、} N_d = \frac{10}{d} - 0.16M_r \quad (4)$$

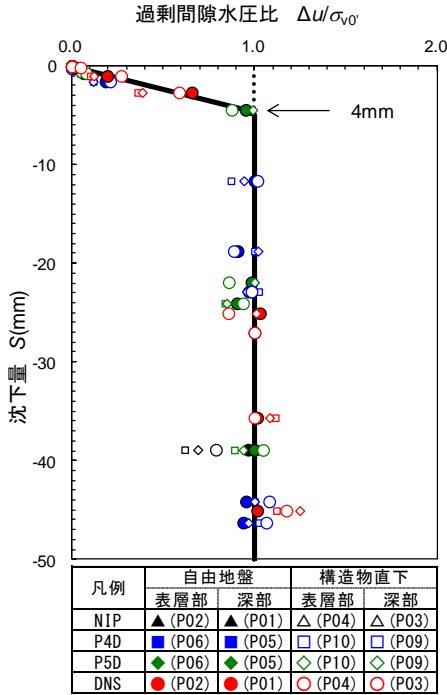


図-6 過剰間隙水圧比と沈下量

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)  
 $M_r$  : 回転トルク (N・m)

### 3. 大型振動実験結果

大型土槽を用いた振動実験結果の概要を示す。前章と同様に文献7)から必要部分を示すとともに、本検討に必要な箇所については追記した。

図-6に、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_{v0}$ と沈下量の関係を示す<sup>7)</sup>。過剰間隙水圧 $\Delta u$ は、加振終了時における過剰間隙水圧(残留値)である。有効上載圧 $\sigma'_{v0}$ は、基本的には密度より求めたが、一部液状化時の残留過剰間隙水圧を有効上載圧とした。過剰間隙水圧比が1.0未満の時は、過剰間隙水圧比が大きくなるほど沈下量が大きくなるが、沈下量は4mm未満で小さい。過剰間隙水圧比が1.0に達すると、沈下量が急激に大きくなる。過剰間隙水圧が1.0に達したときの沈下量は4mmで、本論文では、この時点を模型地盤が液状化に達した時点と定義した。

図-7に、入力加速度と累積沈下量の関係を示す<sup>7)</sup>。図中、白抜きの点は錘各点における沈下量で、塗りつぶしは4点の平均値である。また、図中には、密度増加した地盤の相対密度と丸太間地盤の相対密度も併記した。

丸太間地盤の密度は、次のように求めた。図-8に、丸太が打設された地盤を模式的に示す。丸太打設により

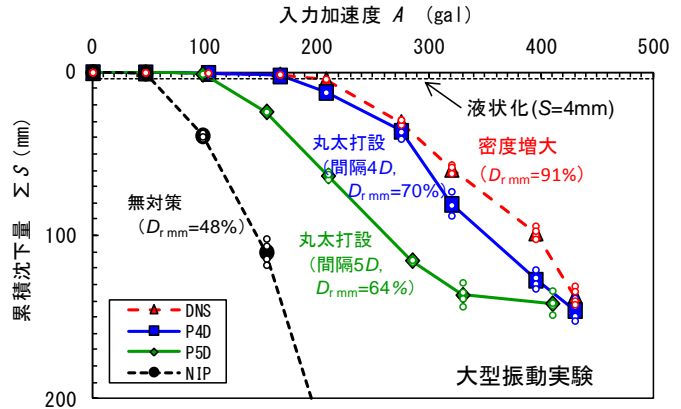


図-7 入力加速度と累積沈下量

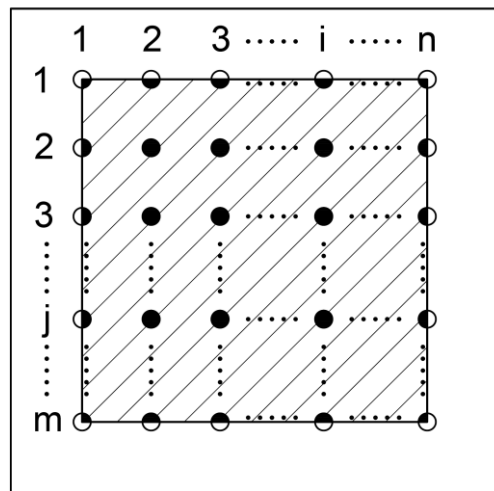


図-8 丸太間地盤の密度の求め方

改良された地盤は、図中の斜線部と仮定し、斜線部中の丸太間地盤の乾燥密度を求めた。丸太間地盤の体積は、斜線部分の体積から、図中に示した黒塗り部分の丸太の面積(隅角部は丸太の1/4, それ以外の周囲は1/2, 斜線内は丸太そのままの面積の合計)分の丸太体積を差し引いた。丸太の体積は、元口径と末口径の平均値を丸太径とし、長さは丸太頭部の碎石充填部分も丸太と考え1.1mとして求めた。ただし、丸太先端部の尖り部分は、尖りがないものとし円柱状と仮定した。斜線部の地盤の体積は、丸太打設後に計測した40点の地盤高さの平均値を土槽断面積に乗じた。斜線部の土(丸太を除く)の乾燥質量は、斜線部の面積と丸太打設前の地盤高さを乗じて求めた体積に、丸太打設前の地盤の乾燥密度を乗じて求めた。丸太打設前の地盤の乾燥密度は、地盤作製時に投入した砂の乾燥質量を初期地盤の体積で除して求めた。求められた乾燥密度より、最小法により相対密度を求めた。

丸太打設または密度増加した場合は、いずれも無対策の場合に比べ沈下量が小さく、これらの方法が液状化対策に効果的であることがわかる。また、その効果は、丸太打設の間隔が5Dより4Dと丸太打設間隔が小さいほ



ど大きく、丸太打設間隔が  $4D$  の場合は丸太間地盤の相対密度が  $D_{r,mm}=70\%$  であるのに、相対密度  $D_{r,mm}=91\%$  とかなり密締めにした地盤と同程度であることがわかる。さらに、丸太打設したケースでは、大きな加速度レベルでも沈下量はある程度以上で頭打ちとなる傾向が認められる。これは、丸太先端部が土槽の底部に達し、丸太が錘を支え杭に近い機能を発揮するためだと考えられる。なお、ステップ加振を行い累積沈下量が増加する過程で、実際の液化化発生地点における杭基礎構造物で観察される抜け上がり現象は認められなかった。これは、丸太の先端部も頭部も固定されていないため、土槽内が液化化した場合には丸太はある程度傾斜できること、丸太先端部は完全支持ではないので丸太も沈下すること、また、丸太頭部と錘との間には碎石による充填層が存在するためだと考えられる。

#### 4. 地盤内の挙動

地盤内の挙動を求めるために、加速度計および間隙水圧の値を用いて応力ひずみ関係と有効応力経路を求めた。応力ひずみ関係と有効応力経路は、次のように求めた。図-9に、加速度計と水圧計の位置を示す。NIP と DNS では加速度計(A03x, A04x)が地盤内に設置され、P5D と P4D では加速度計(A08x, A09x)は丸太に埋め込んだ。

せん断ひずみは、構造物直下の GL-0.1m~0.6m の層を対象とし、この層の上限と下限の応答加速度を2回積分し絶対水平変位を求め、両者の相対変位を層厚で除しせん断ひずみとした。ある時刻  $i$  における第  $n$  層のせん断ひずみ  $\gamma_{ni}$  の計算式を式(5)に示す。

$$\gamma_{ni} = (d_{ni} - d_{(n+1)i}) / H_n \quad (5)$$

ここで、 $d_{ni}$  : 時刻  $i$  における  $n$  層上限の水平変位(m)

$d_{(n+1)i}$  : 時刻  $i$  における  $n+1$  層上限の水平変位(m)

$H_n$  :  $n$  層の層厚(m)

ある時刻  $i$  における第  $n$  層中間点におけるせん断応力  $\tau_{ni}$  は式(6)より GL-0.35m を対象に求めた。

$$\tau_{ni} = \sum_{j=1}^{n-1} \left( \frac{A_{ji} + A_{(j+1)i}}{2} \right) H_n \rho_n + \frac{\rho_n H_n}{8} (3A_{ni} + A_{(n+1)i}) \quad (6)$$

ここで、 $n$  : 層番号

$A_{ji}$  : 時刻  $i$  における  $j$  層上限における応答加速度 ( $m/s^2$ )

$H_n$  : 第  $n$  層の層厚(m)

$\rho_n$  : 第  $n$  層の密度( $kg/m^3$ )

なお、本検討では、地盤と丸太は同じ挙動をすると仮定した。

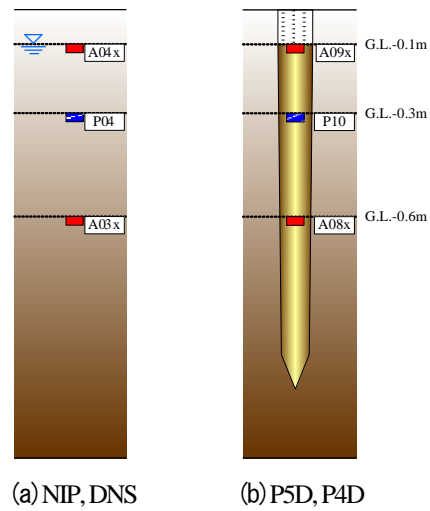


図-9 加速度計と水圧計の配置

鉛直有効応力は、構造物直下の GL-0.30m を対象とし、対象地盤が明らかに液化化したケースの残留過剰間隙水圧を初期上載圧とし、水圧計 (P04, P10) の値を減じて有効応力とした。せん断力を求めた深度と鉛直有効応力を求めた深度が 0.05m 異なるが、検討においてはこれを同一深度として求めた。

図-10に、入力加速度が 150gal と 200gal の時の構造物直下の GL-0.35m における、せん断応力とせん断ひずみの関係、および、有効応力経路を示す。NIP では、150gal の段階でせん断剛性が低下し、液化化状態になっていることがわかる。一方、P4D と DNS は、150gal のレベルでは弾性に近い挙動を示し、有効応力もほとんど減少していない。P5D では、有効応力の減少が認められるが、応力ひずみ関係では、ひずみの増加に伴いせん断剛性が回復するサイクリックモビリティが認められ、地盤が密に締め固められていることがわかる。

200gal の場合は、P5D では有効応力が減少しせん断剛性も低下している。P4D では、有効応力の低下は認められるが応力ひずみ関係は密な地盤の特性が現れ、ひずみの発生も靱性のある挙動となっている。DNS は、有効応力の減少は少なく、応力ひずみ関係も弾性挙動に近い。

以上より、丸太を打設した地盤は、密な地盤の特性を示し、特に丸太打設間隔が小さい P4D の場合にはその傾向が顕著である。したがって、丸太を打設することで錘の沈下量が小さくなるのは、丸太が錘を支えているのではなく、丸太を打設することで地盤が密になり、地盤が液化化による支持力低下を起ささないために、錘の沈下を抑制することが明らかになった。

#### 5. 丸太間地盤の液化化特性

サウンディング結果より、丸太を打設することで丸太

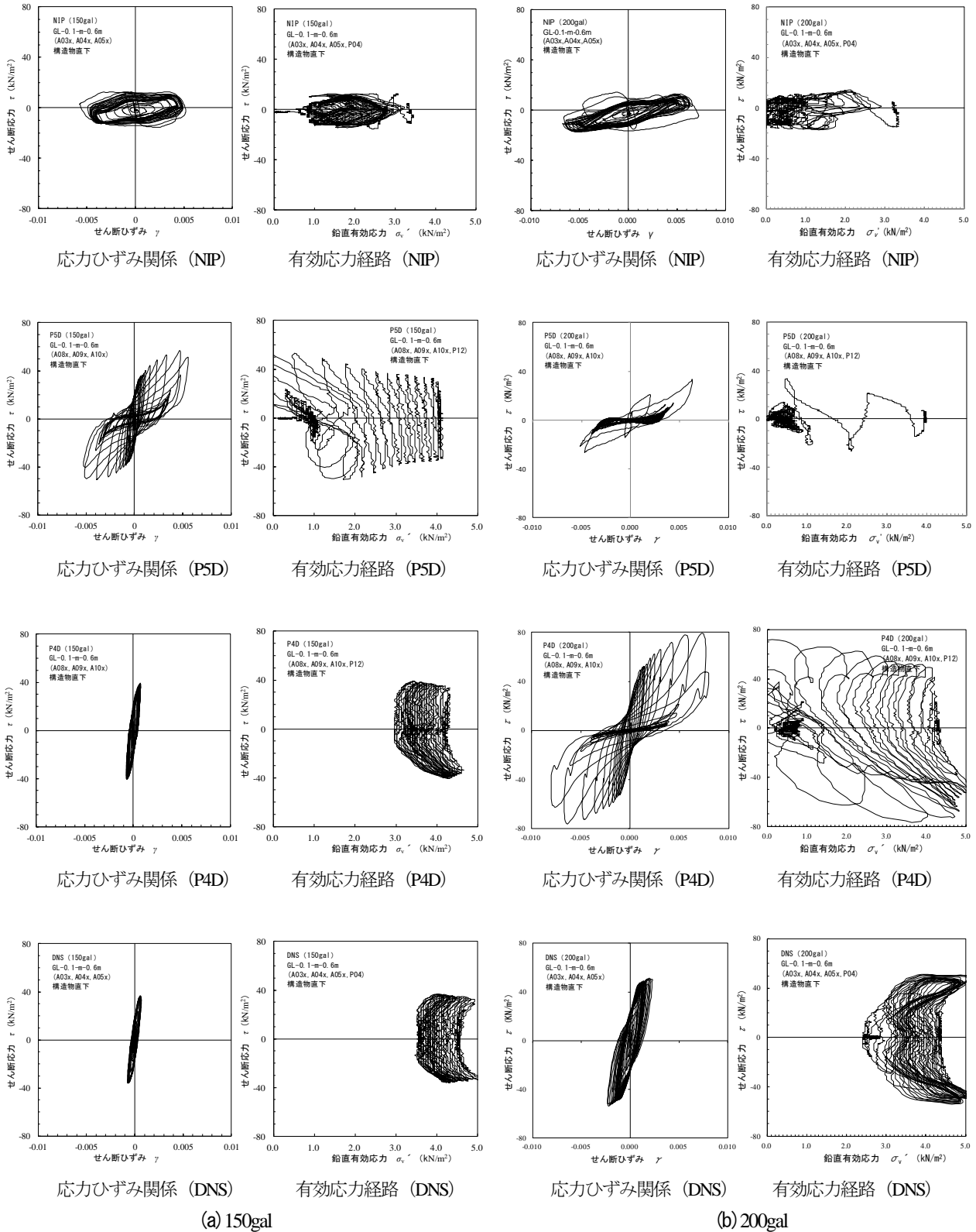
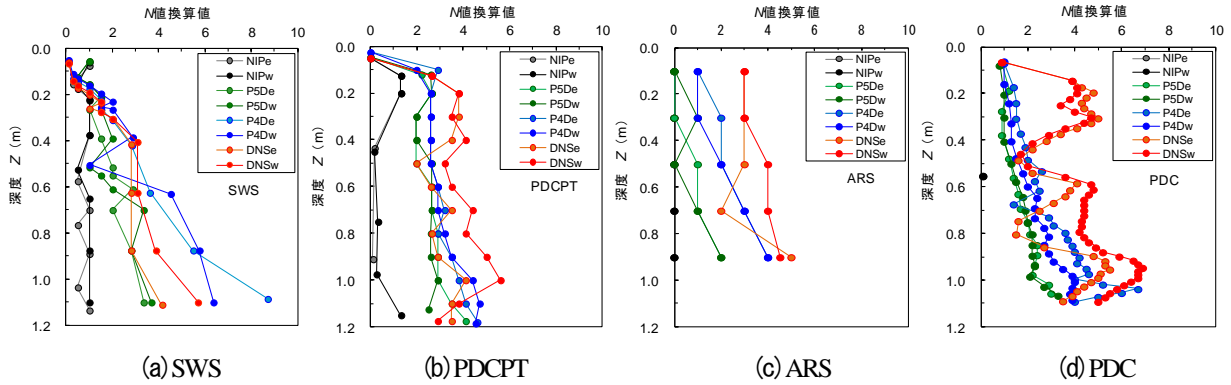


図-10 応力ひずみ関係と有効応力経路

間地盤の  $N$  値換算値が増し、これにより沈下量も低下すること、同じ地盤密度で比較した場合は、丸太打設の方が密度増加のみの方法よりも沈下量が小さく、この傾向は要素試験結果との比較結果でも同様で、丸太打設による液状化対策効果は、単に密度を増加させる以上であることを定量的に示す。

図-11に、それぞれのサウンディング結果の深度分布

を示す。点数が少ないものがあるのは、 $N$  値換算値が 0 で計測不能であったものがあるからである。いずれも  $N$  値換算値である。全体的に深度が大きくなるほど  $N$  値換算値が大きくなる。これは拘束圧の影響である。この影響は、PDCPTでは少ない。NIPにおける  $N$  値換算値はいずれも小さく、ARS や PDC では 0 であった。丸太打設後は、密度増加と同様に  $N$  値換算値はいずれも増加



凡例の記号は表-1 参照。添え字の e と w は、図-5 中で e は下側、w は上側を意味する。

図- 11 サウンディング試験より求められた  $N$  値換算値の深度分布

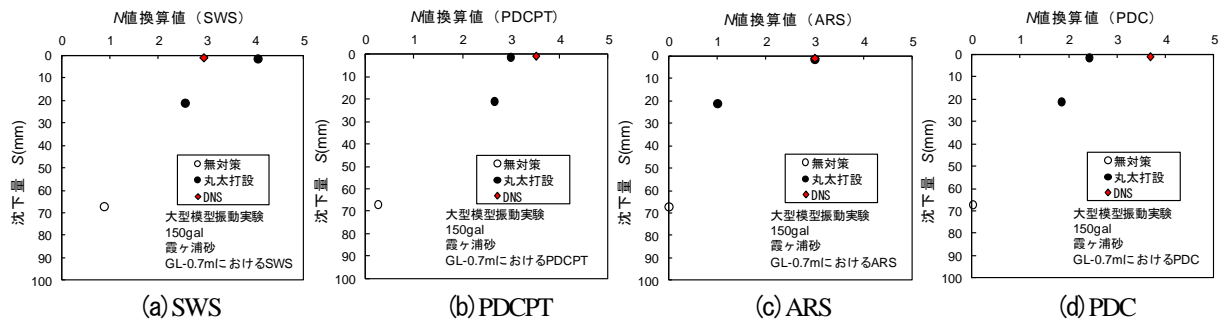


図- 12  $N$  値換算値と 150gal における沈下量

し、丸太打設により丸太間地盤が明らかに強度を増している。前項で示した応力ひずみ関係や有効応力経路図で、丸太打設した地盤にはサイクリックモビリティが認められるのは、このように地盤の  $N$  値換算値が増加し地盤自体が密度増加を主体として強化されたことを裏付けている。SWS 以外では、NIP, P5D, P4D, DNS の順で、丸太間隔が短くなるほど、密度が高密度なものほど  $N$  値換算値が大きくなり、この順に従い地盤も強化されているといえる。PDCPT, ARS, PDC は、いずれも打撃による動的な貫入抵抗であるが、SWS は静的貫入抵抗であり、このように貫入メカニズムが異なるため、SWS のみ傾向が異なったものと考えられる。なお、ARS は測定間隔が粗く、PDC は測定間隔が細かく、PDCPT は測定間隔がこれらの中間的であると言った違いはあるが、これら 3 者は類似の傾向を示している。このような貫入メカニズムから考えると、優劣と言った意味ではないが、 $N$  値は PDCPT, ARS, PDC と類似の傾向を示すと推察される。

図- 12 に、各サウンディングより求められた  $N$  値換算値と目標入力加速度 150gal における沈下量を示す。 $N$  値換算値は地盤中央付近の GL-0.7m における値を用いた。150gal における値を用いたのは、各ケースにおける沈下量の差が顕著に表れるためである。PDC を除き、 $N$  値換算値が 3 以下になると沈下量が発生し、 $N$  値換算値が小さくなるほど沈下量が大きくなる。このように、錘の沈下量には、丸太間地盤の  $N$  値換算値が大きく影響して

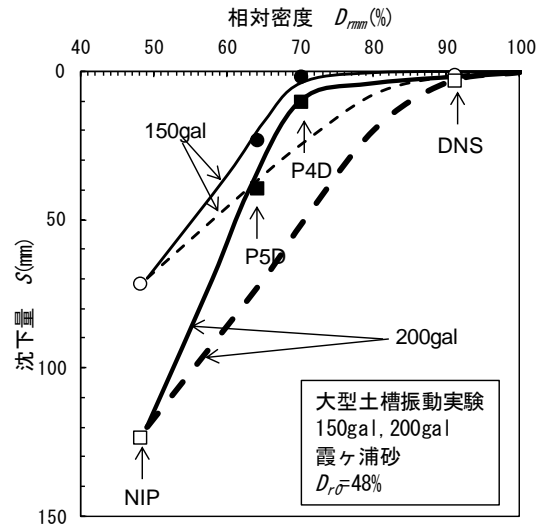


図- 13 相対密度と沈下量

いるといえる。

$N$  値換算値が大きくなる要因の一つが密度である。そこで、図- 13 に、地盤または丸太間地盤の相対密度と沈下量の関係を示す。図中には、目標入力加速度が 150gal と 200gal の場合を示した。密度増加の DNS のケースは、1 ケースしかないため、他で実施した小型振動台実験などの結果<sup>9)</sup>を参考にそれぞれ破線で結んだ。丸太打設のケースでは相対密度が 70% 以上ではほとんど沈下が生じないが、密度増加のみの場合は相対密度 70% ではある程

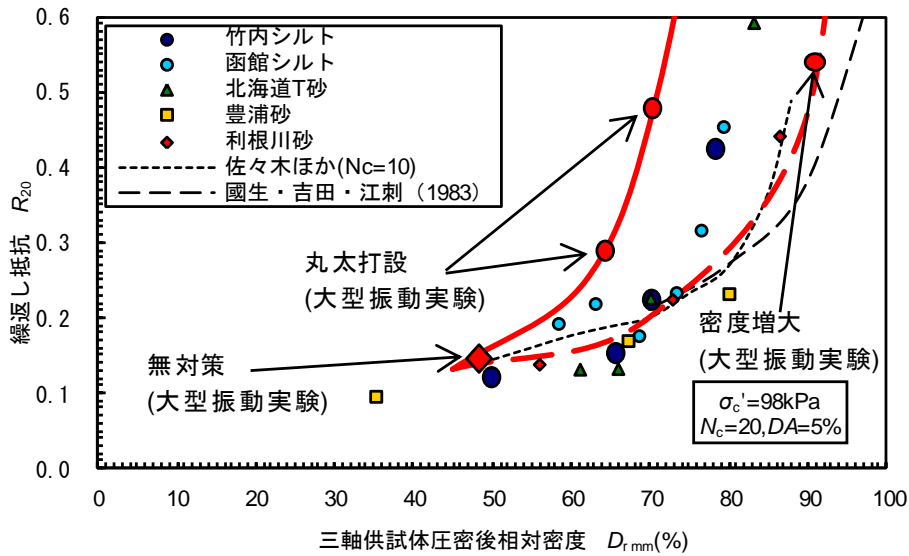


図-14 相対密度と繰返し抵抗

度の沈下が生じる。したがって、このような地盤に丸太打設することで、地盤は密度増加以上に対策効果をあげると推測される。

丸太打設と密度増加のみによる液状化対策効果について、繰返し非排水三軸試験結果を用いて明らかにする。

図-14に相対密度と繰返し抵抗の関係を示す。図中の赤い太い実線と破線は、大型振動実験より得られた結果であり、その他の細い波線、および、小さな点は繰返し非排水三軸試験より得られた繰返し回数 20 回で（ただし、佐々木他<sup>14)</sup>の結果は繰返し回数 10 回）両振幅ひずみ 5%に至る繰返し抵抗  $R_{20}$  である<sup>8)14)15)</sup>。

大型振動実験から得られた繰返し抵抗は、要素試験結果との定量的な比較を行えるように次のように求めた。繰返し抵抗は、大型土槽内を一つの要素と考え繰返し抵抗を求めることとし、GL-0.7m におけるせん断応力  $\tau_d$  と有効拘束圧  $\sigma'_c$  との比  $\tau_d / \sigma'_c$  を求めた。ここで、 $\tau_d$  は式(7)より求めた。

$$\tau_d = A_{Liq} (\rho_1 Z_1 + \rho_2 Z_2) \quad (7)$$

ここで、 $A_{Liq}$ : 液状化発生時の入力加速度 ( $m/s^2$ )

$\rho_1$ : 上部の不飽和層の乾燥密度 ( $kg/m^3$ )

$\rho_2$ : 下部の飽和層の飽和密度 ( $kg/m^3$ )

$Z_1$ : 上部の不飽和層の厚さ (0.1m)

$Z_2$ : 下部の飽和層の厚さ (0.6m)

大型振動実験における入力加速度  $A_{Liq}$  は、入力加速度を代表値とし、沈下量が 4mm 発生するときの入力加速度を図-7より求めた。

有効拘束圧  $\sigma'_c$  は、式(8)より求めた。

$$\sigma'_c = G (\rho_1 Z_1 + (\rho_2 - 1) Z_2) \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \right) \quad (8)$$

ここで、 $G$ : 重力加速度 ( $9.8m/s^2$ )

$K_0$ : 静止土圧係数 (=0.5)

繰返し回数は、入力波の前後に立ち上がりと収束の波があるが主要動は20波なので、特に補正はしていない。

無対策のNIPと密度増大によるDNSは、繰返し非排水三軸試験結果のばらつきの範囲内に入り、このような要素試験より得られた繰返し抵抗と一致している。これより、DNSより得られた繰返し抵抗と、NIPより得られた繰返し抵抗は、他の繰返し非排水三軸試験結果と同様な傾向を示すと考えられ、両者を図中に示す太い波線で結んだ。したがって、前述の図-13に示した密度増加による破線の関係は、妥当な推測だといえる。

丸太打設による関係は、繰返し非排水三軸試験で得られた密度と繰返し抵抗との関係と比較すると、ばらつきの範囲より、相対密度が60%以上になると2倍以上繰返し抵抗が大きく、丸太打設された地盤の繰返し抵抗が、純粋に密度増加させた地盤に比較して大きくなるのが明らかである。

丸太打設された地盤の繰返し抵抗が密度増加以上に増加する理由として、①丸太打設による水平土圧の増加、②地盤と丸太の複合地盤としてのせん断剛性の増加、③丸太の杭機能による地盤補強効果の増加、④丸太打設による地盤内土質の構造的な強化などが考えられる。

## 6. 結論

- (1) 過剰間隙水圧比が大きくなると錘の沈下量も大きくなるが、それが1.0未満の場合には沈下量は小さく、1.0以上となると沈下量が著しく大きくなる。過剰間隙水圧比が1.0に達するときの沈下量は4mmであった。



- (2) 丸太打設することで錘の沈下が抑制され、液状化対策効果がある。この効果は、丸太打設間隔が小さい方が大きく、丸太打設間隔が、丸太直径の4倍の場合には、相対密度91%の地盤とほぼ同じ傾向を示す。
- (3) 丸太打設により錘の沈下を抑制する理由は、丸太が錘を直接支えるのではなく、丸太打設された地盤が密になり繰返し荷重に対して液状化を抑制し、地盤の剛性が低下しにくくなるためである。
- (4) 大型振動実験で実施した無対策と密度増加させた地盤の結果は、繰返し非排水三軸試験より得られた相対密度と繰返し抵抗の関係とよく一致した。
- (5) 一方、大型振動実験で丸太打設した地盤の繰返し抵抗は、繰返し非排水三軸試験の相対密度と繰返し抵抗の関係と比較すると、相対密度が60%以上の範囲で数倍以上に大きくなり、丸太打設による液状化対策効果が、密度増加のみによるものよりも相当に大きくなることが明らかにされた。

**謝辞:** 本実験は、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を得て実施したものである。また、検討の一部は、科研費(基礎研究(C), 24580221)の助成を受けた。実験には農業・食品産業技術総合研究機構、元早稲田大学の濱田政則教授、昭和マテリアル(株)、飛鳥建設(株)技術研究所の各位に御協力いただいた。ここに記して感謝申しあげる。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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, 第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, CD6-191, 2011.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版), 2013.
- 6) 森林総合研究所: フロンティア環境における間伐材利用技術の開発, 農林水産省実用技術開発事業, pp.1-20, 2013.
- 7) Rias, S., Numata, A., Mimura, K., Ikeda, H. and Hori, T.: The effect of log piling on liquefaction, *Journal of JSCE*, Vol.2, pp.144-158, 2014.
- 8) 沼田 淳紀, 嶋本 栄治: N値と相対密度を条件とした非塑性で細粒な土の液状化抵抗, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.287-305, 2004.
- 9) 日本建築学会: 2.SWS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.
- 10) S. Sawada, D. Yoshizawa, N. Hiruma, M. Nagase, T. Sugano and H. Nakazawa: Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.1064-1067, 2009.
- 11) Silvano Marchetti: In Situ Tests by Flat Dilatometer, *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol.106, No.GT3, pp.299-321, 1980.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 佐々木 勉, 龍岡 文夫, 松村 正重, 関 眞一: 振動三軸試験における試験条件が砂の液状化強度に及ぼす影響, 第16回土質工学研究発表会, pp.597-600, 1981.
- 15) 國生剛治, 吉田 保夫, 江刺 靖行: 密な砂地盤の地震時安定性評価法の検討(その2)標準貫入試験による評価法, 電力中央研究所報告, 383026, pp.1-32, 1983.

(2014.11.9 受付, 2015.2.1 修正, 2015.2.21 受理)

## EFFECT OF LOG PILING METHOD FOR LIQUEFACTION COUNTERMEASURES BY LARGE-SCALE SHAKING TABLE TEST

Atsunori NUMATA, Takumi MURATA, Saima RIAZ, Kaori Mimura and Tadashi HARA

The long-term use of wood is a means of mitigating global warming and rejuvenating forestry. Accordingly, the authors have been developing a liquefaction countermeasure that uses logs. To investigate the effect of this method against liquefaction, a large-scale shaking table test was previously conducted. Results of that experiment indicated that the log piling liquefaction countermeasure is more effective than soil densification, likely because of densification between piled logs and increase of horizontal earth pressure. In regard to this experiment, the present paper discusses the stress-strain relation and effective stress path, and considers the results of sounding tests at the ground between piled

logs, comparing them with the shaking table tests and the results of element tests. The results confirm that the log piling liquefaction countermeasure is two times more effective than soil densification in the range of relative density more than 60 %.