

過剰間隙水圧の除去を併用した飽和砂地盤の振動締固め施工に関する研究

石黒 健*・飯島 健*・清水英樹*・
嶋田三朗**

飽和砂地盤の振動締固め施工に伴って発生する施工時過剰間隙水圧を人為的に除去する工法の有効性を検証するために、実施工機を用いた一連の原位置試験を実施した。この結果、過剰間隙水圧の人為的な除去に伴う締固め時の地盤の振動加速度の増大と改良後強度の増加、およびその影響範囲の拡大が確認された。また、締固め後の地盤の密度や粒子構造の違いを検討し、改良効果の向上が主として砂の粒子構造の強化によってもたらされていることを明らかにするとともに、締固め地盤に対する再加振実験を実施して、過剰間隙水圧の除去効果を改良地盤の間隙水圧上昇特性の面からも検討した。

Key Words : vibrational compaction, liquefaction, excess pore-water pressure, field test

1. はじめに

飽和砂地盤の液状化対策工法のひとつに、振動ロッドを用いて原地盤を直接振動させ密実化を図る振動棒締固め工法(ロッドコンパクション工法)がある。本工法は施工実績が比較的多いにもかかわらず、振動締固め施工の土質力学的なメカニズムはいまだ解明されておらず、改良効果に対する信頼性も必ずしも十分とは言えない¹⁾。改良効果が得にくい場合には締固めの間隔を狭くして施工せざるを得ず、結果として地盤改良の工費の増大と工期の延長が必要となる。

本工法の問題点は、施工中に振動ロッドの周辺地盤内に過剰間隙水圧が発生し、いわば「振動締固め施工による人為的な液状化現象」が生じる点にある²⁾。結果として、振動ロッドを介して周辺地盤に伝達される振動エネルギーの減衰や液状化履歴による地盤の強度低下がもたらされる(この点については谷本³⁾もその可能性を示唆している)。著者らは、振動締固め中の過剰間隙水圧の発生が締固め効果に及ぼす影響や、この過剰間隙水圧を人為的に除去することによる効果を調べるために一連の室内試験(中空ねじり試験および模型実験)を行い、施工時過剰間隙水圧の除去が締固め効果の顕著な向上をもたらし、従来よりも施工ピッチを広げた効率的な施工が可能となることを示した^{4),5)}。本論文では、原位置地盤において実施工機を用いた比較実験(従来型の振動棒締固め工法と施工時過剰間隙水圧除去タイプの新しい工法との比較)を行った結果について報告する。

原位置試験によって施工時過剰間隙水圧の除去効果を直接検証した事例は見られない。関連する原位置試験例としては、中田・寺内・千代⁶⁾が鋼矢板式岸壁の背面に

設けられたグラベルドレーンに隣接して振動棒締固め工法の施工を実施したところ、グラベルドレーンの近傍ほど改良効果の発現が著しく、振動締固め中のグラベルドレーンからの排水による改良効果の向上が見られた事例や、森・尾上・境・阿部⁷⁾の礫柱周辺での振動締固めに関する現場実験などを挙げる事ができる。

2. 実験ヤードおよび原位置試験の概要

(1) 実験ヤードの概要

実験は臨海部における比較的若齢の埋立て地盤を選定して実施した。図-1に各々の地盤の柱状図を示す。実験ヤードはいづれも液状化の生じやすい緩い砂地盤であるが、砂層の粒度特性や粘土・シルト層の影響を調べる目的で細砂層(Aヤード)、中砂層(Bヤード)、粘土・シルトを含む砂層(Cヤード)の3地点を選定した。図中には初期 N 値の範囲をハッチして示した。AヤードはGL-10mまでの全層に渡って N 値が3~8程度の緩い状態にあるが、BヤードはGL-3.5~6.5m付近、CヤードはGL-1~2.8m、GL-3.35~4mの細粒分混じりの細砂層およびGL-5~8.2mの細砂層が N 値10以下の緩い砂層であり、液状化対策の対象層となる。また各ヤードの地下水位はいずれもGL-1.0~1.4mと高い位置にある。図-2に代表的な砂層の粒度特性を示す。Aヤードは細粒分含有率 F_c が9~21%の細砂を、Bヤードは細粒分含有率8%以下の中砂を主体とする。CヤードはGL-5~8.2mの細砂層の粒度を示したが、浅部のシルト層に挟まれた砂層の細粒分含有率は20~25%と比較的高い。

(2) 原位置試験の概要

原位置試験では、

- ① 締固め時の地盤挙動(間隙水圧や振動加速度)
- ② 締固め効果(締固め後の N_d 値)
- ③ 締固め後の地盤の諸物性(密度や粒子構造)

*正会員 工修 前田建設工業(株)技術本部 技術研究所
(〒179 東京都練馬区旭町1-39-16)

**正会員 工博 同上

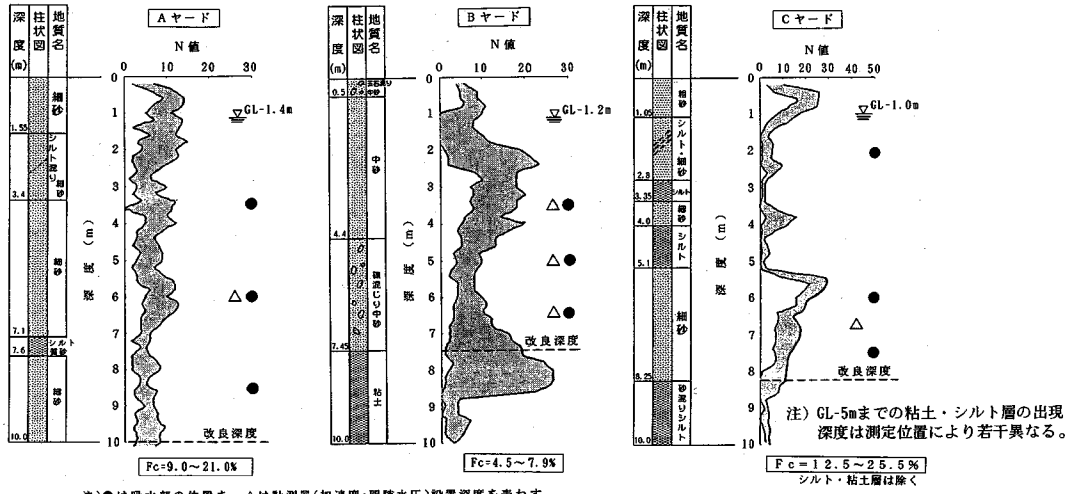


図-1 試験ヤードの地盤概要

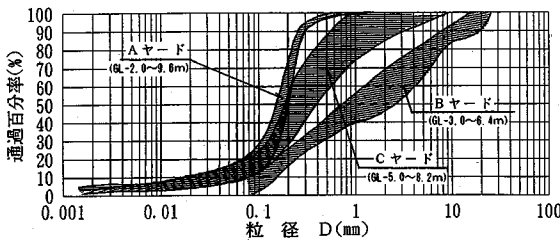


図-2 各ヤードの代表的な砂層の粒度曲線

④ 締め固め地盤の再加振時挙動(間隙水圧上昇特性)の4つの観点から施工時過剰間隙水圧の除去効果を検証するために、各種の計測器を埋設した実験ヤードにおいて従来型および過剰間隙水圧除去型の2工法による振動締め固め施工を実施し比較を行った。図-3はAヤードでの原位置振動締め固め試験と現場計測位置を示したものであるが、他の2ヤードも基本的には同様の配置とした。振動締め固めの仕様は図のような正方形配置を採用し、施工ピッチを数種類に変えて振動締め固めの打設を行い、杭間(正方形の中心位置)にて締め固め効果や改良地盤の諸物性に関する各種測定を実施した(ただし施工時の加速度・間隙水圧測定では、あらかじめ埋設された計器の近傍で1箇所のみ打設する方法をとった)。過剰間隙水圧除去型の施工においては、施工時過剰間隙水圧の低下量が大きくなるほど改良効果がより高まることが前報⁴⁾の中空ねじり試験結果より予想されたため、施工時過剰間隙水圧を可能な限り除去することをめざした。このため地盤内にウエルポイントを設置し、これに真空圧を負荷することで積極的な水圧低下を図った。加えた負圧の大きさは、地上部の圧力ゲージで概ね400~500 mmHg (53.3 kPa~66.7 kPa)であった。この場合のウエルポイントの併用は、一般的な地下水位低下や揚水を目的とするも

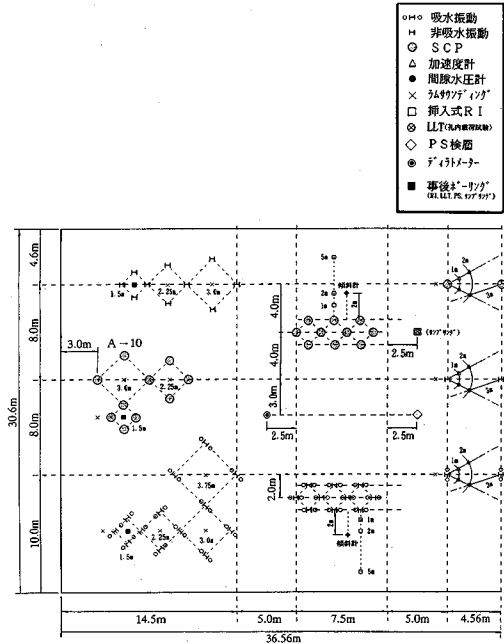


図-3 原位置締め固め施工と現場計測の概要(Aヤード)

のではなく、あくまで施工時過剰間隙水圧を静水圧まで迅速に低下させることを目的としている(図-5に示されるように、実際に地下水位低下には及んでいない)。なお施工機械の製作と実験順序の関係上、B、Cヤードでは水圧除去効果の基本的な確認を目的として、あらかじめウエルポイントを地盤内に設置しておき、その中で従来型の施工を実施する方法(ただしウエルポイントは振動締め固め時のみ稼働)を便宜的に採用したが、Aヤードでは同じウエルポイントを従来型の施工機械に一体化した新たな施工機械⁸⁾を試作し、より現実的な工法としての効果確認を試みた。両方で吸水手順や吸水圧は同一

表-1 原位置振動締め試験および現場計測の概要

ヤード	試験内容および試験目的	計測項目および試験方法	試験数量
A (細砂地盤)	○ウエルポイント一体型の試作施工機を用いた現場締め施工	○初期N値および地盤層序	標準貫入試験
	○施工時の地盤内挙動(加速度・間隙水圧)の計測	○振動締め時及び再加振時の加速度・間隙水圧	加速度計・間隙水圧計による動的計測
	○従来型振動棒締め工法と吸水型振動棒締め工法の締め効果の比較	○締め前後のN _d 値 ¹⁾	オートマチックラム・ソング [*]
	○締め前後での密度変化	R I 法による密度測定	29本(調査深度 延288m)
	○地盤のS波速度	P S 検層	112回(掘進長10m×4ヶ所)
	○地盤のせん断剛性	S B P M ²⁾	80回(掘進長10m×4ヶ所, 50cm ² 計)
	○締め地盤の諸物性に関する計測	○不攪乱試料採取	改良型「スター・チンプリング」
B (中砂地盤)	○従来型振動棒締め工法と吸水型振動棒締め工法の締め効果の比較	○締め前後のN _d 値 ¹⁾	オートマチックラム・ソング [*]
	○初期N値および地盤層序	標準貫入試験	2ヶ所(試料採取位置GL-9m)
	○振動締め時の地盤の加速度・間隙水圧	加速度計・間隙水圧計による動的計測	2ヶ所(試料採取位置GL-9m)
	○締め前後での密度変化	R I 法による密度測定	28回(掘進長7.45m×4ヶ所)
	○地盤のS波速度	P S 検層	加速度計18個、間隙水圧計6個
	○地盤のせん断剛性	S B P M ²⁾	51本(調査深度 延435.8m)
	○締め地盤の諸物性に関する計測	○不攪乱試料採取	改良型「スター・チンプリング」
C (粘土・シルト層を含む砂層)	○従来型振動棒締め工法と吸水型振動棒締め工法の締め効果の比較	○締め前後のN _d 値 ¹⁾	オートマチックラム・ソング [*]
	○初期N値および地盤層序	標準貫入試験	19本(調査深度 延260m)
	○振動締め時の地盤の加速度・間隙水圧	加速度計・間隙水圧計による動的計測	加速度計3個、間隙水圧計5個

1)標準貫入試験によるN値とほぼ1対1に対応
2)Self Boring Pressure Meterの略

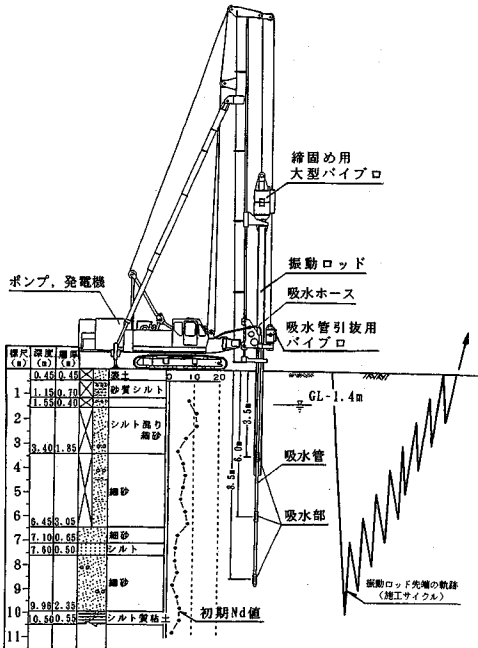


図-4 Aヤードで用いた施工機械の概要

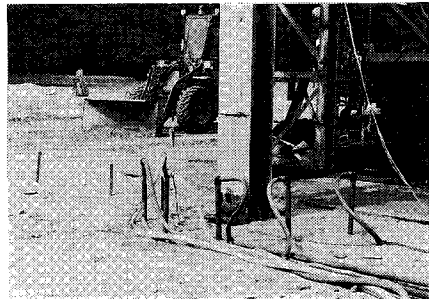


写真-1 ウェルポイント併用による実験状況 (Bヤード)

は施工機械に取り付ける吸水管の吸水部の位置を調整し、またB、Cヤードでは該当する深度にウェルポイントを設置する。吸水部は、地下水位以下の砂層内にほぼ均等な配置となるように3箇所設置している。さらに、加速度計(3方向)および間隙水圧計を所定の深度(図-1中に△印で併記)に埋設するとともに、④で述べる地盤の各種物性(密度やS波速度など)の初期値を計測しておく。

であり、また後出の図-6に示されるように、地盤内間隙水圧の実測値においてもその違いによる影響は見られない。なお図-3中に記したように、吸水部は平面的には振動ロッド中心から75cm離れの位置に2箇所設置した(深度は図-1中に●印で併記)。図-4はAヤードで用いた施工機械の概要(模式図)を、また写真-1は、Bヤードにおけるウェルポイント併用による実験状況を示す。

実験手順の概要を以下に示す。

① 事前調査および実験準備

標準貫入試験、オートマチックラムサウンディング等により地盤の層序や初期N値を詳細に調査し、吸水深度(過剰間隙水圧を除去するための吸水部やウェルポイントの深度)を決定する。これに基づき、Aヤードで

② 振動締め施工の実施と締め中の地盤挙動の計測
従来型の振動棒締め工法、および吸水型工法の両者による締めを実施する(以後、過剰間隙水圧除去型の施工を吸水型工法と称する)。なお締めめのサイクル(振動ロッドの貫入手順)は、改良目標深度まで振動ロッドを貫入した後「3m引き抜き→2m突固め」を繰返す標準サイクルにすべて統一している(図-4中に施工時の振動ロッド先端の軌跡を併記)。振動締め時には、①で埋設した各計器により地盤の振動加速度と間隙水圧を測定する。

③ 締め効果の計測

締め施工終了後に杭間にてオートマチックラムサウンディングを実施し、改良地盤のN_d値を深さ方向20cmピッチで測定する。N_d値は標準貫入試験によるN値とほぼ1:1に対応する⁹⁾。

④ 締め地盤の各種物性の計測

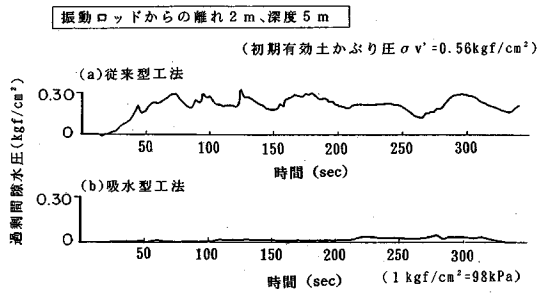


図-5 施工時過剰間隙水圧の時刻歴の比較例 (Bヤード)

締め固め地盤の諸物性を調査するために、挿入式のRI法による密度測定、サスペンションタイプのPS検層、セルフボーリングタイプの孔内載荷試験、および改良型オスターバークサンプリングによる不攪乱試料の採取を実施する。

⑤ 締め固め地盤に対する再加振実験の実施

改良地盤の耐震性能を間隙水圧上昇特性によって調べるために、締め固め終了後の地盤に振動ロッドを再買入、再加振して、その際の間隙水圧と振動加速度を測定する。実験の詳細については後述する。

各ヤードにおける試験内容と目的、試験方法と数量の概要を表-1にまとめる。

3. 過剰間隙水圧の除去が締め固め時の地盤挙動に及ぼす影響

施工時過剰間隙水圧の除去は、施工中の地盤の有効応力状態、および周辺地盤への振動エネルギーの伝達度を変化させる。著者らは、模型土槽内に配した間隙水圧計・加速度計によって締め固め時の地盤挙動の計測を行い、過剰間隙水圧の除去により地盤の振動加速度が増大すること、これにより改良効果の向上がもたらされることを定性的に示した⁵⁾。そこで、原位置試験においても同様の計測を実施し、実施工時における地盤挙動の変化を調べた。

図-5はまず、振動締め固め中の地盤内過剰間隙水圧の時刻歴を従来型工法および吸水型工法の両者で比較した例を示す(振動ロッドから2m離れた位置に配した間隙水圧計のデータ。深度はGL-5m)。従来型工法では2m離れた位置であっても初期有効土被り圧の50%を越える過剰間隙水圧が施工中に発生しているのに対し、吸水型工法ではほぼ静水圧レベルで振動締め固め施工が行われており、施工中の地盤の有効応力状態は両者で大きく異なっている。図-6は、振動ロッド中心からの離れに対する最大過剰間隙水圧比 $\Delta u_{max}/\sigma_v'$ の距離減衰を示したものである。実験データは従来型と吸水型の2つに明瞭に分かれ、従来型工法では振動ロッドから数m離れた位置まで過剰間隙水圧の影響が及んでいること、また

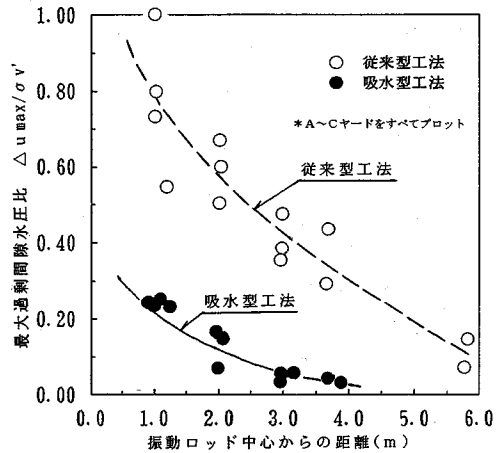


図-6 最大過剰間隙水圧比の距離減衰

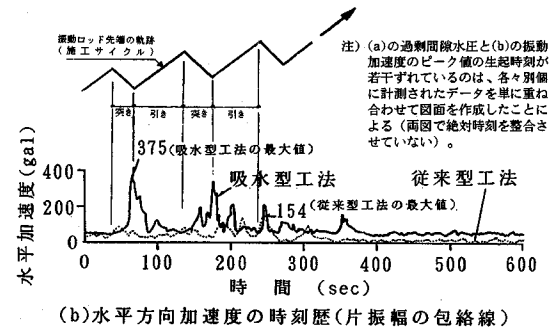
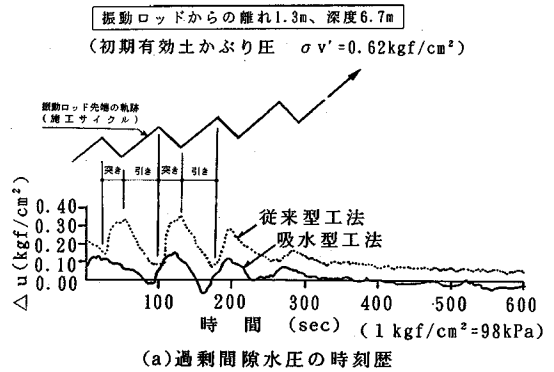


図-7 過剰間隙水圧および加速度の時刻歴例 (Cヤード)

吸水型工法では、過剰間隙水圧の除去によって振動ロッドの近傍であっても間隙水圧発生量がかなり抑制されている。

図-7は、振動締め固め施工時の地盤内過剰間隙水圧および地盤の水平方向加速度(振動ロッドと加速度計を結んだ測線方向の加速度。加速度は時刻歴の包絡線の片振幅を記した)の時刻歴の一例を示したものである。図中、間隙水圧のデータに見られる周期100秒程度の大きな変動は、振動ロッドの圧入(間隙水圧の上昇)→引き抜き(間隙水圧の低下)の工程に対応する。過剰間隙水圧は従来

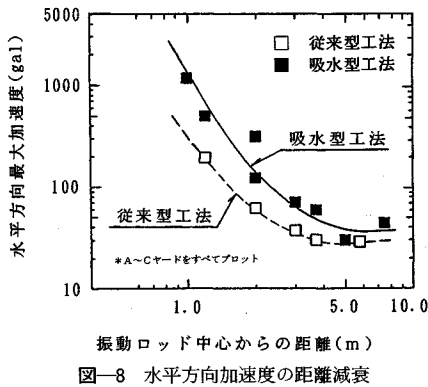


図-8 水平方向加速度の距離減衰

型よりも吸水型のほうが小さく、逆に振動加速度は吸水型が従来型よりも大きい。すなわち、従来型工法では液状化状態に近い過剰間隙水圧が地盤中に発生し振動エネルギー（振動加速度）が減衰しているのに対して、吸水型工法では過剰間隙水圧の低下を図ることで地盤の振動加速度が増大し、より有効に振動エネルギーが伝達されている様子がうかがわれる。なお、現場施工で用いた加振源の振動数は約9Hzであるが、周辺地盤の加速度時刻歴も同じ振動数の正弦波に近く、従来型と吸水型でこの点に違いは見られなかった。

図-8は、振動ロッド中心からの離れに対する地盤の水平方向最大加速度の距離減衰を表したものである（図では、測線方向およびこれに直交する方向の加速度値の自乗和平方根をプロット）。図-6と同様、実験データは従来型（□印）と吸水型（■印）の2つに明確に分かれており、施工時過剰間隙水圧を除去することで振動ロッドから同一離れでの地盤の振動加速度が増大することや、吸水型工法では従来型工法よりもより遠方まで振動エネルギーが伝達されていることがうかがわれる。なお、このような振動エネルギーの伝達度の違いに対応して、振動ロッドの貫入に必要な加振源のエネルギーも大となる。例えばBヤードでは、施工中の大型パイプロの負荷電流値の計測を実施したが、吸水型工法施工時の最大電流値は従来型工法施工時の2-4倍の値を記録した。

4. 過剰間隙水圧の除去が締固め効果に及ぼす影響

施工時過剰間隙水圧の除去が締固め効果に及ぼす影響を調べるために、オートマチックラムサウンディングによって締固め後の N_d 値を測定した。図-9(a)~(c)は各々、A~Cヤードにおける締固め前後での N_d 値の深さ方向分布を示したものである（施工ピッチはいずれも1.5m）。3箇所の試験ヤードのいずれにおいても吸水型工法での締固め効果は従来型工法のそれを大きく上回っており、施工時過剰間隙水圧の除去効果が原位置における実施工の中でも顕著に現れる結果となった。なお

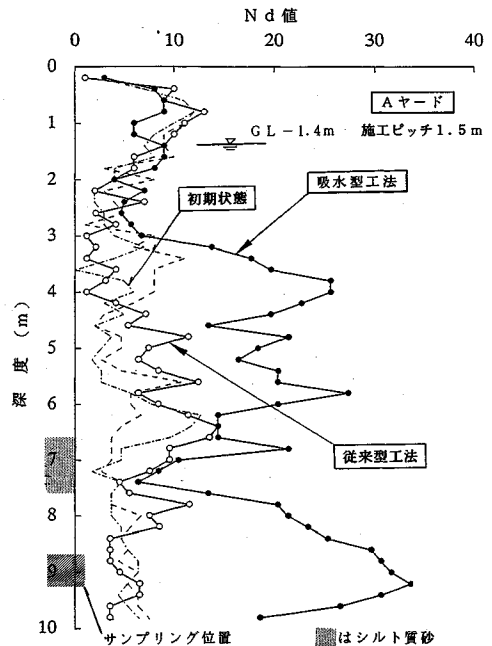


図-9 (a) 事後 N_d 値の深さ方向分布の比較 (Aヤード)

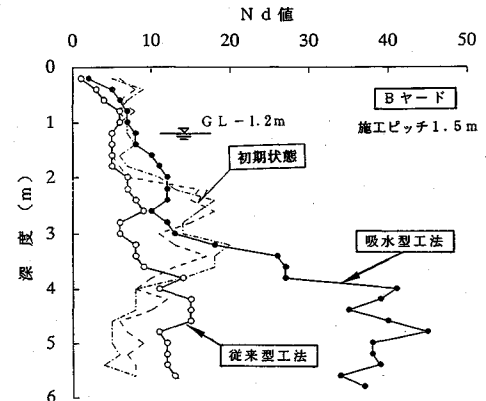


図-9 (b) 事後 N_d 値の深さ方向分布の比較 (Bヤード)

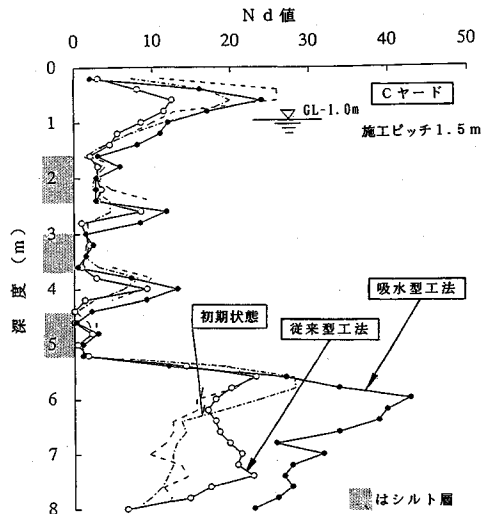
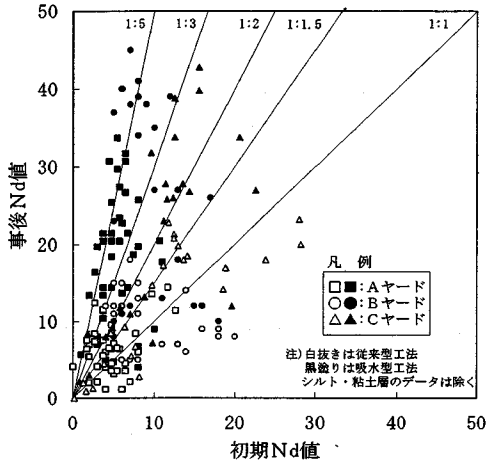
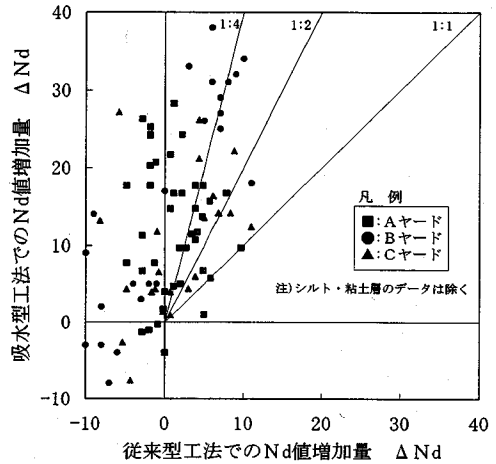


図-9 (c) 事後 N_d 値の深さ方向分布の比較 (Cヤード)



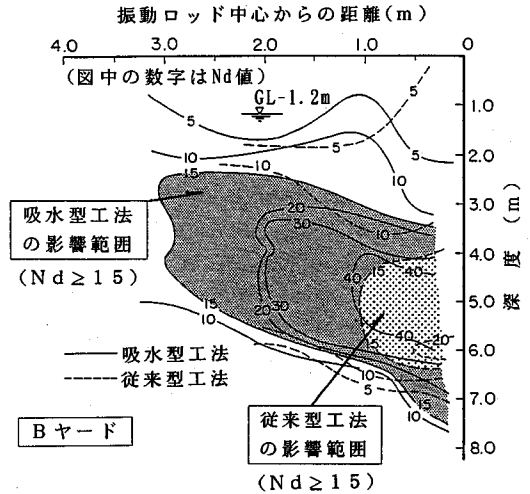
図一10 初期 N_d 値と事後 N_d 値の関係



図一11 同一位置での N_d 値増加量の比較

図中の N_d 値の分布を見ると、過剰間隙水圧の除去による改良効果の向上の度合いが細粒含有率の大小や地盤の深さ等によって左右され、細粒分の多い地層や地盤の浅部では改良効果あまり見られないことがわかる。細粒含有率の増加に伴い改良効果が低下する現象は、SCP 工法やパイプフローテーション工法など他の振動締め固め工法においても同様に見受けられ¹⁰⁾、例えば粘着力成分が振動締め固めによる砂粒子の相互移動を妨げたり、地盤の粘性抵抗の影響によって締め固め効率が低下するといった原因が考えられる。また吸水型工法に関しては、細粒分の含有によって地盤の透水性が低下し、施工時過剰間隙水圧の除去が阻害されるといった要因も考えられよう。一方、地盤の深度（あるいは有効土被り圧）の影響についても同様に、振動締め固め系の工法では地盤の浅部や深部での改良効果の不足が報告されている。著者が別途実施した中空ねじり試験の結果によると、砂の振動締め固め効果は締め固め時に地盤に加えらるひずみ量と密接な関係を有し、締め固め効果を最も高める最適ひずみレベルが存在することが明らかとなっている⁹⁾。地盤の深さにかかわらず同一の大型パイプを用いる現行の施工法では、地盤の浅部では施工時の地盤のひずみ量が過大となり、逆に深部では不足して改良効果の低下が生ずるものと推察される^{11), 12)}。振動締め固め系の工法では、地盤の浅部のみ大型タンパー等の補助工法を併用する例が見られるが、例えば、地盤の深度に合わせて加振源の加振力や施工サイクルを変化させるような締め固め方法について、今後検討を加えていく余地がある。

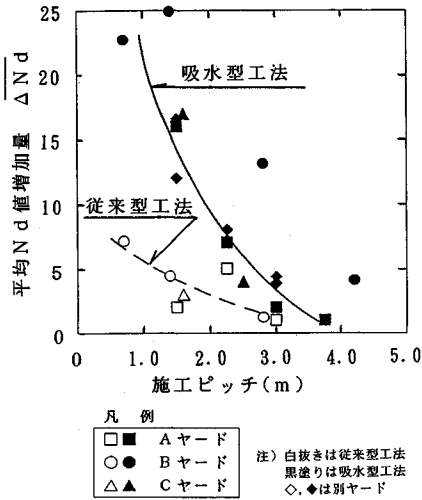
図一10は、横軸に地盤の初期 N_d 値、縦軸に事後 N_d 値をとって、締め固めによる N_d 値の増加傾向を示したものである。図では、従来型工法を白抜き記号、吸水型工法を黒塗りの記号で示しているが、全体に吸水型工法のデータは従来型工法の上方にプロットされており、施



図一12 締め固めの影響範囲の変化 (Bヤード)

工時過剰間隙水圧の除去によって改良効果の顕著な向上がもたらされていることがわかる。これを N_d 値の増加率（事後 N_d 値と初期 N_d 値の比率）で見ると、従来型工法では1.5~2倍程度にとどまっていたものが吸水型工法では3~6倍の範囲にまで増加していることになる。図一11は、締め固めによる N_d 値の増加量 ΔN_d を従来型工法と吸水型工法とで比較した結果を示す（ただし、同一深度かつ振動ロッドから同一の離れに位置する点で比較）。図より、施工時過剰間隙水圧の除去により N_d 値の増加量 ΔN_d が2~4倍以上に増加していること、また、従来型工法では $\Delta N_d < 0$ 、すなわち振動締め固め施工によって地盤が攪乱を受け逆に強度低下が生ずる場合が多く見られるのに対して、吸水型工法ではその影響が少なく、確実な N_d 値の増加がもたらされていることがわかる。

図一12は、図一4中に示した施工サイクルに従って締



図—13 施工ピッチと平均 N_d 値増加量の関係

固めを行った後、事後 N_d 値の深さ方向分布を打設点からの離れごとに何点か測定し、その結果を用いて N_d 値の等値線 (コンター) を描いた結果である。図中には $N_d = 15$ 以上 (道路橋示方書¹³⁾ に基づき算定した深度 5 m 位置での所要 N 値に対応) の範囲をハッチングして示した。図より、従来型工法ではこの領域が振動ロッドから 1 m 程度にしか及んでいないのに対し、吸水型工法では 3 m 近くまで拡大していることが分かる。このような締固めの有効範囲の拡大は、所要改良強度を得るための施工ピッチの拡大につながるが、その効果を直接的に表すために図—13 を準備した。図は横軸に施工ピッチ、縦軸にその施工ピッチで得られる改良効果 (杭間での N_d 値増加量の平均値にて表現) をとり、従来型工法と吸水型工法の比較を行ったものである。施工ピッチと改良効果の関係は両者で大きく異なり、施工時過剰間隙水圧を除去することで同一の事後 N_d 値を達成するための施工ピッチをかなり広く拡げられることがわかる。なお実験データは従来型と吸水型の両者にほぼ二分されているが、●印で示した B ヤードのデータのみが他ヤードの吸水型工法のデータに比べてさらに効果が高い (有効範囲の拡大傾向も顕著となる) 結果となっている。これは B ヤードが透水性の良い中砂を主体とする地盤であったために、他の細砂地盤よりも施工時の過剰間隙水圧をより低下しやすく、このため改良効果が相対的に高まった結果と推察される。

5. 過剰間隙水圧の除去が締固め地盤の諸物性に及ぼす影響

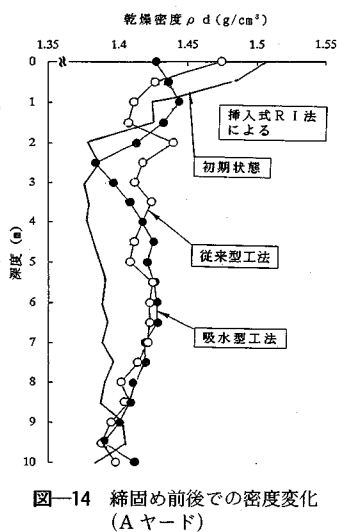
締固めによる液状化強度の増大は、地盤の密度増加、粒子構造の強化、あるいは静止土圧の増加といった各種要因の組み合わせによってもたらされるものと考えられ

る (吉見¹⁴⁾ など)。著者らはこのような考え方に基づき、従来型および吸水型工法の各々に対応する締固め (あるいは繰返しせん断履歴) を与えた砂の密度と内部構造 (粒子配列) を室内で調べ、過剰間隙水圧の除去による締固め効果の向上が主として「砂の粒子構造の強化」によって達成されていることを示した^{4), 5)}。そこで、同様な検討を原位置試験の中で実施するために、A ヤードにおいて締固めた後の地盤の密度やせん断剛性率などの諸物性に関する計測を行った。

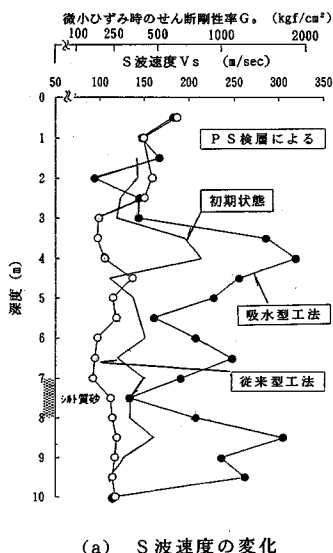
図—14 はまず、RI 法によって締固め前後での地盤の密度変化を測定した結果を示す。両工法とも締固め施工によって密度増加が生じているものの、従来型工法と吸水型工法の両者で改良後の密度値には顕著な違いは見られない。従来型工法では振動ロッド周辺での液状化の後に生ずる過剰間隙水圧の消散とこれに伴う砂粒子の再堆積により、また吸水型工法では排水条件下での繰返しせん断に起因する体積変化によって、結果的に同等の密度増加をもたらされたものと解釈される。このような傾向は前報^{4), 5)} の室内試験の中でも指摘されている。

さて、この結果からは両工法での事後 N_d 値の違いを説明づけることはできない。そこで、地盤の構造の強さを表す指標 (Tokimatsu, Yamazaki, Yoshimi¹⁵⁾) として、締固め後の地盤で測定した S 波速度 (微小ひずみ時のせん断剛性率 G_0 に相当) の値を図—15 (a) に、また孔内載荷試験によって得られたせん断剛性率 G の値 (せん断ひずみで $\gamma = 10^{-3}$ のオーダーに相当) を図—15 (b) に示した。図—15 (a) (b) 共に、改良地盤のせん断剛性率の値は従来型工法と吸水型工法とで大きく異なっており、従来型工法では改良前よりも低下する傾向を、吸水型工法では大きく増加する傾向を示している。この結果は、吸水型工法では振動エネルギーの確実な伝達 (繰返しせん断の付与) によって砂粒子の噛み合いが強化されているのに対し、従来型工法では施工時の液状化履歴によって構造の再配列が生じ、むしろ自然地盤が有していた構造を乱してしまったことを暗示している。結局、密度増加と構造強化 (あるいは劣化) の足し合わせの結果として、従来型工法と吸水型工法での改良効果の差が生じたものと推察される。なお図—9 (b) の GL-2 ~ 3 m 付近では、改良後の N_d 値が初期 N_d 値よりも低下する現象が見られている。本深度は、大型重機の走行によって振動締固め施工以前に既に地盤が締固まり、土被りが小さいにもかかわらず初期 N_d 値がかなり大きな特殊な状態にあったが、このような地盤では振動締固め施工によって逆に強度低下を生ずる可能性がある。この現象も、初期地盤が有していた強い構造が攪乱を受け、構造の劣化が生じたことによって説明づけることができよう。

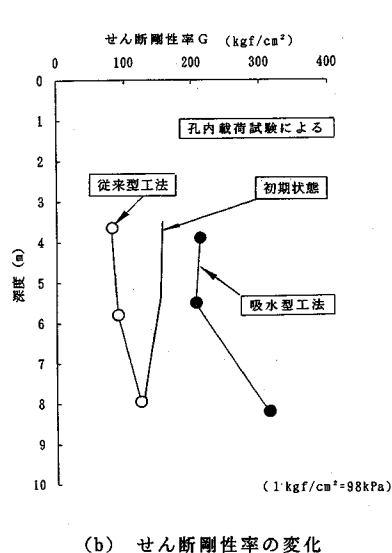
粒子構造の違いを直接的に把握するために、A ヤー



図一14 締め固め前後での密度変化 (Aヤード)

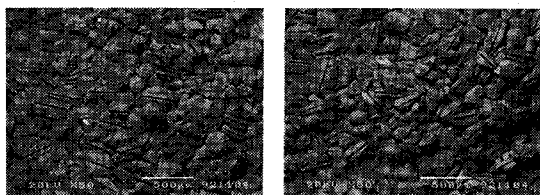


(a) S波速度の変化



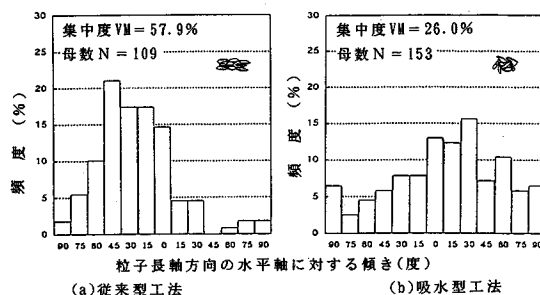
(b) せん断剛性率の変化

図一15 締め固め前後でのS波速度とせん断剛性率の変化 (Aヤード)



(a) 従来型工法 (b) 吸水型工法

写真一2 顕微鏡写真の一例 (Aヤード)



(a)従来型工法 (b)吸水型工法

注)集中度VMの算定方法は文献²⁾を参照。

図一16 砂粒子の長軸方向のヒストグラム (Aヤード)

下の深度9m付近(図一9(a)参照)から改良型オスターバーグサンプリングにより乱さない試料を採取し、これに固化剤を注入して観察用試料を作製したうえで走査型電子顕微鏡(SEM)による構造観察を実施して、砂の粒子配列の直接観察を試みた。SEM用供試体の作製方法および観察方法の詳細は前報⁹⁾を参照されたい。また、観察面の方向は前報と同様の鉛直断面とした。写真一2は締め固め地盤から採取した試料に対する顕微鏡写真の一例を、また図一16は、採取した試料の顕微鏡写真から粒子の長軸方向の水平軸に対する傾きを読みとり(写真中にその例を併記)、そのヒストグラムを求めた結果を示す。図より、従来型工法による締め固め地盤では粒子の長軸方向がある角度に集中した構造となっているのに対して、吸水型工法では様々な角度に均等に粒子が噛み合ったランダム構造の傾向が強い。図一16中には、Curry¹⁶⁾による集中度VMの値を併記した。これは、すべての粒子が同一方向に配列した場合を100%、完全にランダムである場合を0%とし粒子配列の集中の度合いを表す指標であり、VMの値が小さいほど粒子構造のランダム傾向が強くなり、構造が強固であると考えられている(鈴木・鈴木¹⁷⁾)。この値を比較すると、従来型工

法で57.9%、吸水型工法で26.0%と両者には歴然とした差異が見られる。粒子配列の直接観察の結果は、図一15に示したS波速度やせん断剛性率の傾向と符合しており、吸水型工法が「砂粒子の構造強化」をもたらす工法であることを裏付けている。締め固め地盤の密度とS波速度に関する現場計測はA~C以外の別ヤードでも実施したが、両工法の違いに関する傾向は本実験と全く同様であった¹⁸⁾。

6. 過剰間隙水圧の除去が締め固め地盤の耐震性に及ぼす影響

締め固め後の改良地盤に振動ロッドを再圧入して強制加振し、その際の水圧上昇特性によって締め固め効果を判定する原位置再加振実験(例えば石原・根井・三井・高橋¹⁹⁾や谷本・末松・坪井²⁰⁾など)を実施した。

図一17はAヤードで実施した再加振実験の概要を示したものである。再加振実験は、締め固め時の地盤挙動(加速度・間隙水圧)の計測用ヤードをそのまま用いて行った。すなわち、まず図中のHの位置で振動締め固めを实

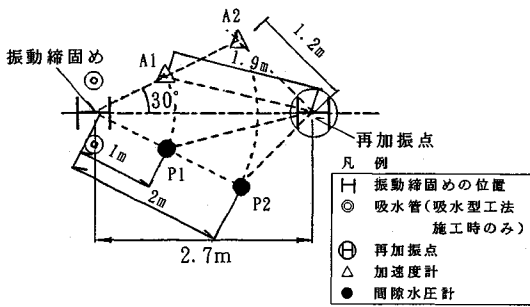


図-17 再加振実験の概要 (Aヤード)

施し、その後、右側の①の位置で再加振(間隙水圧計の埋設深度まで振動ロッドを貫入し、その位置で約60秒間の加振を継続)を行い、その際の地盤の振動加速度と間隙水圧を測定した。

図-18 (a) は、再加振時における地盤内過剰間隙水圧の時刻歴を示したものである。なお、図の横軸は初期貫入開始時を原点としており、再加振実験は図中に示す約60秒間である。再加振点から同一の離れで吸水型工法と従来型工法の結果を比較すると、離れ1.2m, 1.9mのいずれも、吸水型工法で締め固めた地盤のほうが再加振により発生する過剰間隙水圧量が少なく、耐震性能(液状化に対する抵抗力)に優れている。特に離れ1.2mの地点では、従来型工法による締め固め地盤は再加振時に液状化状態に近い過剰間隙水圧が発生していたと推察され(図中では水圧発生量が大きすぎて測定レンジを外れている)、今回の再加振実験ではかなり過酷な加振条件を締め固め地盤に与えていたものと考えられる。このような条件下においてもなお、吸水型工法による締め固め地盤での間隙水圧発生量はその1/3~1/4程度、かなり低い値にとどまっており、吸水型工法による改良地盤の優れた耐震性能を示唆するものといえる。図-18 (b)には、再加振時の地盤の振動加速度(片振幅の包絡線)を示している。再加振点からの離れ1.2mでは両工法で同等の加速度値となっているものの、離れ1.9mでは、図-18 (a)の過剰間隙水圧をもたらした振動加速度はむしろ吸水型工法のほうが大きく、このことから吸水型工法による締め固め地盤が極めて液状化しにくい性状を有していることがうかがわれる。

7. 結 論

飽和砂地盤の振動締め固めに伴って発生する施工時過剰間隙水圧を人為的に除去する工法の有効性を検証するために、一連の原位置試験を実施した。本実験により得られた結論を以下にまとめる。

(1) 原位置地盤において実施工機を用いた振動締め固め施工を実施し、振動ロッドの周辺に過剰間隙水圧除去のための吸水管を設置する吸水型工法と従来型工法の2工

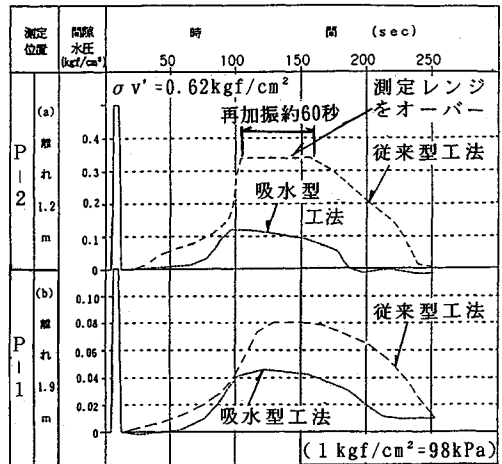
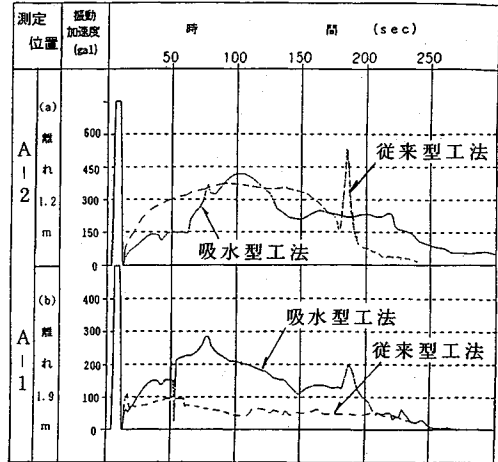


図-18 (a) 再加振時の過剰間隙水圧時刻歴例 (Aヤード)



注) 加速度片振幅の包絡線を記した

図-18 (b) 再加振時の加速度時刻歴例 (Aヤード)

法の比較を行った。吸水型工法では、サクションを荷重した吸水管によって施工時過剰間隙水圧を十分に低下させることができた。また、このことにより締め固め時の地盤の有効応力の低下が防がれると同時に、周辺地盤の振動加速度が増大し、振動エネルギーがより有効に伝達されることがわかった。

(2) 施工時過剰間隙水圧の除去により、締め固め後の N_d 値 ($\approx N$ 値) に顕著な増加が認められた。また締め固めの有効範囲も大きく拡大することから、施工ピッチを広くとった、より効率的・経済的な締め固め施工が可能となることがわかった。

(3) 施工時過剰間隙水圧の除去による締め固め効果向上のメカニズムを検証するために、締め固め地盤の密度やせん断剛性率の測定、走査型電子顕微鏡による構造観察を実施した。この結果、締め固め効果の向上が主として「砂の粒子構造の強化」によってもたらされていることがわ

かった。

(4) 締固め後の地盤に振動ロッドを再圧入し、地震を想定した振動を加える原位置再加振実験を実施した。この結果、吸水型工法では従来型工法に比べて再加振時の過剰間隙水圧発生量がかなり小さく抑えられ、耐震性能に優れた地盤が造成されていることが裏付けられた。

本研究では、要素試験⁴⁾および模型実験⁵⁾のレベルで確認された施工時過剰間隙水圧の除去効果を、実際の施工機械を用いた原位置試験によって検証することができた。

謝辞 本研究を行うにあたり、(財)電力中央研究所企画部 西 好一博士より貴重なる御助言をいただいた。また現場実験に際しては、前田建設技術研究所 菅井正澄研究員の助力を得た。末筆ながら記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで、第4章 液状化対策、4.3 液状化対策の選定、4.3.1 現状調査結果、pp.152~160, 1993.
- 2) 石黒 健：吸水-振動締固め工法に関する現場検証実験、地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.221~226, 1991.
- 3) 谷本喜一：動的締固めの特性、土と基礎、No.22-4, pp.11~16, 1974.
- 4) 石黒 健・飯島 健・嶋田三朗：過剰間隙水圧の発生を伴う繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の液状化強度特性、土木学会論文集投稿中。
- 5) 石黒 健・飯島 健・菅井正澄・嶋田三朗：過剰間隙水圧の除去を併用した飽和砂の振動締固めに関する基礎的研究、土木学会論文集投稿中。
- 6) 中田邦夫・寺内 潔・千代義広：液状化防止対策とその実証試験、土と基礎、No.32-12, pp.29~37, 1984.
- 7) 森 信夫・尾上篤生・境 吉秀・阿部 啓：礫柱周辺の砂地盤の振動による締固め効果に関する実験、第21回土

- 質工学研究発表会講演集、pp.1869~1870, 1986.
- 8) 清水英樹・嶋田三朗・小川朗二・石黒 健・飯島 健：吸水型振動棒締固め工法に関する現場検証実験(その1)一施工機械および検証実験の概要一、第28回土質工学研究発表会講演集、pp.1305~1306, 1993.
- 9) 土質調査法：第6章 サウンディング、3 動的な貫入試験、3.3 標準貫入試験との関連、土質工学会編、1982年11月。
- 10) 水野恭男・末松直幹・奥山一典：細粒分を含む砂質土におけるサンドコンパクションバイブル工法の設計法、土と基礎、Vol.35, No.5, pp.21~26, 1989.
- 11) 石黒 健・嶋田三朗・飯島 健・菅井正澄・清水英樹：吸水-振動締固め工法に関する現場実験(その2)吸水併用効果に影響を及ぼす要因、第27回土質工学研究発表会講演集、pp.891~892, 1992.
- 12) 飯島 健・嶋田三朗・石黒 健・清水英樹・齊田 隆：吸水-振動締固め効果に及ぼす有効拘束圧の影響、第47回土木学会年次学術講演会講演集、pp.214~215, 1992.
- 13) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990年2月。
- 14) 吉見吉昭：「ねばり強さ」に関する液状化対策の評価基準、土と基礎、No.38-6, pp.33~38, 1990.
- 15) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y. : Soil Liquefaction Evaluations by Elastic Shear Moduli, Soils and Foundations, Vol.26, No.1, pp.25~35, 1986.
- 16) Curray, J.R. : The Analysis of Two-Dimensional Orientation Data, Jour. of Geology, Vol.64, pp.117~131, 1956.
- 17) 鈴木輝之・鈴木利文：飽和砂の再液状化強度に及ぼす密度と構造の変化の影響、土質工学会論文報告集、Vol.28, No.2, pp.187~195, 1988.
- 18) 清水英樹・嶋田三朗・石黒 健・飯島 健・菅井正澄：吸水-振動締固め工法及びSCP工法による締固め性状に関する測定事例、第47回土木学会年次学術講演会講演集、pp.210~211, 1992.
- 19) 石原研而・根井基雄・三井進平・高橋康二：砂地盤における振動時の原位置間隙水圧測定、第7回土質工学研究発表会、pp.317~320, 1972.
- 20) 谷本喜一・末松直幹・坪井英夫：砂柱による地盤改良効果の動的判定法に関する研究、第12回土質工学研究発表会、pp.485~488, 1977.

(1993.10.6 受付)

INVESTIGATION ABOUT THE VIBRATIONAL COMPACTION WORK OF SATURATED SAND LAYERS WITH ELIMINATION OF EXCESS PORE-WATER PRESSURE

Takeshi ISHIGURO, Takeshi IJIMA, Hideki SHIMIZU and Saburo SHIMADA

A series of field compaction tests have been carried out to investigate the effect of elimination of excess pore-water pressure during the vibrational compaction work. Consequently, the acceleration of ground during compaction, the blow counts(*N*-value) of ground after compaction, and the sphere of compacted zone were cleared to be increased by eliminating excess pore-water pressure. And the rise of compaction effects was confirmed to be achieved by "intensifying the structure of sand particles" by some field measurements of compacted ground. Furthermore, investigation about the earthquake resistance of compacted ground has been done by field re-vibration tests.