

43. 吸水型振動棒締固め工法（SIMAR工法）の開発と実施工事例

前田建設工業(株)：*石黒 健，清水 英樹，北川 吉信

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、大型パイプロを起振源とする振動ロッドを地盤内に貫入し、原地盤を直接振動させて密実化を図るものである。ところが、大型パイプロの加振力は極めて大きく、これを用いて緩い飽和砂地盤を強制的に加振すると、大地震の到来を待つまでもなく、施工中に振動ロッドの先端付近で液状化が発生してしまう。これが振動エネルギーの伝達障害や砂粒子の構造攪乱を、結果として改良効果の低下をもたらす。著者らは、この施工時過剰間隙水圧を除去しながら振動締固めを行う新しい液状化対策工法「吸水型振動棒締固め工法（SIMAR工法*）」を提案し¹⁾、室内および原位置試験による種々の検証を試みてきた^{2) 3) 4)}。本報文では、本工法の最新の施工機械、施工法の概要を述べるとともに、港湾地区のケーソン式岸壁背面での実施工事例を報告するものである（* Soil Improvement Method by Advanced Rod-compaction）。

2. 吸水型振動棒締固め工法（SIMAR工法）の概要と施工機械

図-1に吸水型振動棒締固め工法（SIMAR工法）の工法原理を示す。施工時過剰間隙水圧を除去するために、振動ロッド先端部で地下水を吸引しながら振動締固めを実施する。振動ロッド先端での液状化の発生、地盤剛性の消失が生じないために、大型パイプロによる締固め荷重（振動エネルギー）をより確実に、より遠方まで地盤に伝達させることができる。液状化履歴による砂粒子の構造攪乱が生じないことも、改良効果を高める一要因となる⁴⁾。施工機械の概要を図-2および表-1に、機械全景を写真-1に示す。本工法では当初、真空ポンプを吸引源とする吸水管を振動ロッドと分離し、別途配置した吸水管分離タイプの施工機械が用いられていた（文献⁴⁾参照）。従来型工法に比べて吸水管貫入と引抜きの工程が余計に付加されるため施工効率が低下すること、吸引部の目詰まりといった施工上の問題から、その後、図-2に示すような新しい施工機への転換が図られた。吸水管が振動

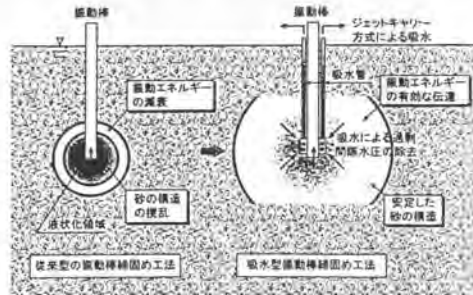


図-1 吸水型振動棒締固め工法の工法原理

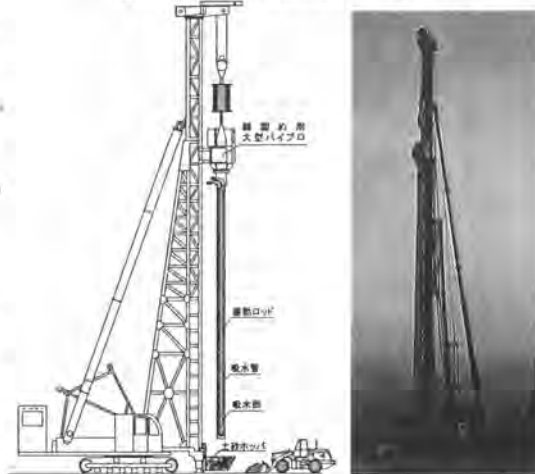


図-2 施工機械の概要 写-1 施工機械の全景

ロッドに一体化され、さらに吸水機構として、真空ポンプではなく高圧の循環ジェット水を利用した吸引方式が採用された。図-3(a)に示すように、高圧ジェット水の循環経路の途中に設けた開口部の直前でジェットノズルにより水流の流速を増大させ、ベルヌーイの原理により負圧を発生させる機構である。本機構には真空ポンプのような揚程の限界がなく、地盤深部での施工にも対応できる。25mm×25mmの比較的大い開口部にはフィルター等は一切設けられておらず、これを通過した土砂は高圧の循環水もろとも地上に掃出される。目詰まりという施工上の難問がこれにより回避される。図-3(b)には、本吸引機構で得られた真空度の測定結果が示されている。ポンプの吐出流量と吐出圧力の積に比例して真空度が高まるため、両者を組み合わせて吸引力を任意に調整することが可能である。施工の手順としては、まず振動ロッドを改良層下端まで初期貫入する。この際、貫入抵抗を減ずるためにロッド先端から高圧ジェット水を噴出させる。これは従来型工法も全く同様である。その後、締固めの工程に移る(ロッドの引き抜き貫入(突固め)を繰り返しながら、徐々にロッドを抜き上げる)。従来型工法では、この際ジェット水を停止して施工するのに対し、吸水型工法では簡単なベルヌーイ操作でこれを吸水管の循環経路へ切り替え、過剰間隙水圧の吸引を併用しながらの締固め施工が行われる。

表-1 施工機械の仕様一覧

機械名	仕様・規格
ベースマシン	クローラー式航行機、4DX系、リーダー長4.5m
起振機	パイプハンマー、120KW
発電機	機械動力用発電、350KVA
振動ロッド	H鋼400×400、フレックセル・取水装置付
取水装置	高圧駆動水を用いたジェットキャリー方式
ウォータージェットポンプ	吐出量100~320l/min、吐出圧力50~150kg/cm ²
水中ポンプ	25φ50
ホタンク	20m ³
施工管理装置	深度計、電流計、流量計、過剰間隙水圧測定装置
発電機	管理装置用発電、46KVA
トラクターショベル	ホイール型12m ³

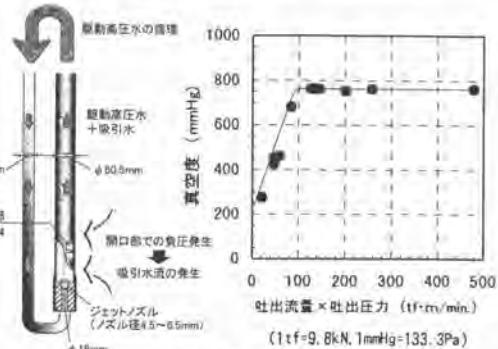


図-3 (a)吸水部の機構 (b)真空度の測定結果

この際、貫入抵抗を減ずるためにロッド先端から高圧ジェット水を噴出させる。これは従来型工法も全く同様である。その後、締固めの工程に移る(ロッドの引き抜き貫入(突固め)を繰り返しながら、徐々にロッドを抜き上げる)。従来型工法では、この際ジェット水を停止して施工するのに対し、吸水型工法では簡単なベルヌーイ操作でこれを吸水管の循環経路へ切り替え、過剰間隙水圧の吸引を併用しながらの締固め施工が行われる。

3. 吸水型振動棒締固め工法 (SIMAR工法) の実施工事例

3.1 施工概要

図-4に施工位置図を、図-5に施工標準断面図を示す。施工位置は兵庫県尼崎市尼崎港内の埋立地であり、ケーソン式岸壁背面の裏込め土の液状化対策を目的として、吸水型振動棒締固め工法による締固め施工が実施された。施工概要および施工数量は表-2に示す通りで

表-2 施工概要および施工数量一覧

①施工範囲	No. 150~No. 250間(延長100m)
②施工面積	幅20m×100m=2,000m ²
③施工深度	平均12.2m(図-5(b)参照) 最深20.9m
④施工ピッチ	吸水型試験施工:2.4m, 2.8m, 3.3m 従来型試験施工:1.4m, 1.9m, 2.4m 吸水型本施工:3.3m
⑤施工本数	244本(吸水型196本, 従来型48本)
⑥施工延長	2,972.6m



図-4 施工位置図

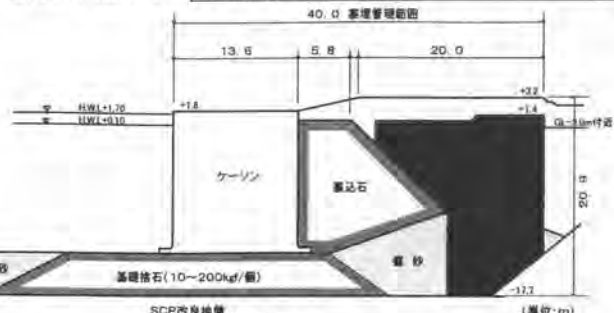


図-5 施工標準断面図

ある。裏込め土砂には、兵庫県南部地震(1995)で液状化被災事例が数多く報告されたまさ土(家島産)が用いられている。海中投入により造成された地盤であるため初期N値も全体に5~9と低く、この部分に液状化対策が施された。

3.2 施工結果

(1) 施工時の吸水状況

施工時の間隙水圧発生量や吸水量が現地で計測された。図-6は、従来型工法(ロッドコンパクション工法)施工時の過剰間隙水圧データである。振動ロッドによる突固めの過程で過剰間隙水圧の急増が見られており、図-1の左側に模式的に示したような人為的な液状化の発生が、本工事の中でも再確認された。吸水型工法の施工中に流量計によって計測された吸水量のログの一例が図-7である。振動ロッドの突固め過程で吸水量が急増し、引抜き過程で元に戻る動きが繰返されており、突固めの過程で発生しようとする過剰間隙水圧が抑制されている様子がうかがわれる。本施工時の最大吸水量のデータが図-8である。毎分40リットル~毎分60リットルのデータが多く、一部では毎分100リットル以上の水を地中から吸引したケースも見られる。土砂もろとも吸い上げられた水は、サトスクリンによって土砂を分離された後、いったん地上の水槽に貯められる。写真-2は、分離された吸引土砂の状況を示したものである。水槽付近にうずたかく堆積した吸引土砂は、本吸引機構により、目詰まりを生ずることなく多量の地下水が吸引された事実を裏付けるものといえる。ロッドコンパクション工法のような原地盤直接振動型の工法では、大型パイロの荷重をできるだけ地盤に預け、振動エネルギーを周辺地盤へ有効に伝えることが重要となる。パイロからの聞き取り調査によると、従来型工法ではロッド先端で液状化が発生するため、荷重を十分に預けることができなかった(無理に預けると自由落下に近い形で振動ロッドの貫入が生じてしまうため)。一方吸水型工法では、液状化を阻止することでパイロ荷重の大半を地盤に預けることが可能となった。



写真-2 土中の細粒分吸引状況

(2) 改良効果の確認結果

本施工に先立ち、吸水型工法の改良効果、従来型工法に対する優位性を検証するための試験施工が実

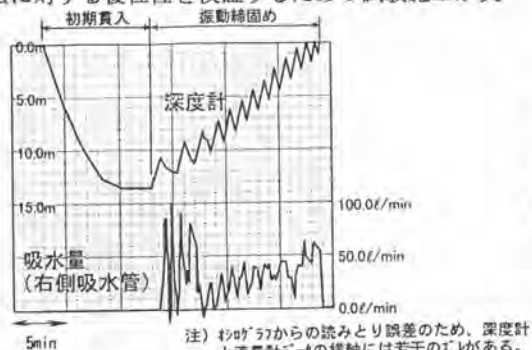


図-7 吸水型工法施工時のオシロ記録例

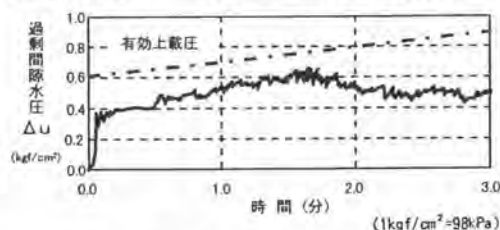


図-6 従来型工法施工時の過剰間隙水圧の測定結果

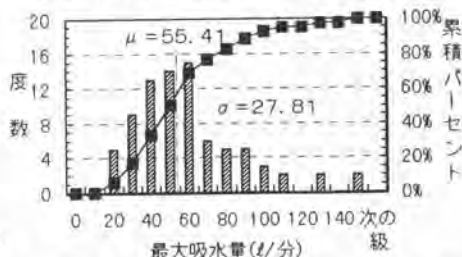


図-8 本施工における吸水型工法の最大吸水量

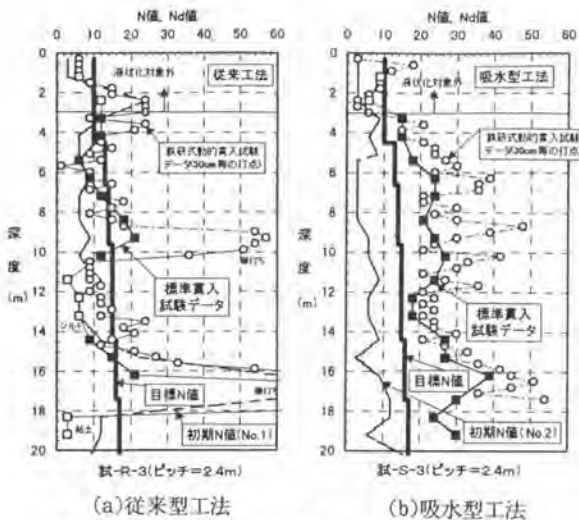


図-9 改良後N値の比較結果(ピッチ2.4m)

施された。改良効果の評価に際しては、一般的な標準貫入試験に加えて、迅速かつ深度方向に多点的な計測が可能な鉄研式動的貫入試験を併用している。試験施工エリアの一部で、従来型工法と吸水型工法を同一ピッチ(2.4m)で打設する施工が行われた。図-9は、両者の改良後杭間N値およびNd値の深度方向分布を

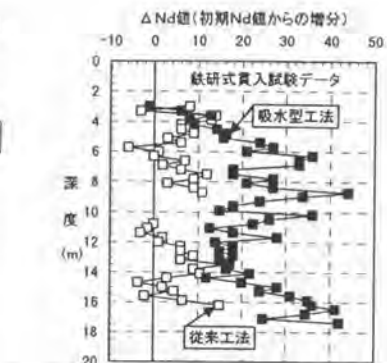


図-10(a) N値増分の深度方向分布の比較結果

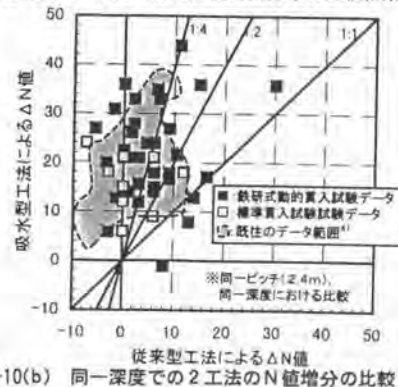


図-10(b) 同一深度での2工法のN値増分の比較

示す。礫当たりの箇所を除くと、従来型工法では改良前後でのN値増分がわずかであるのに対し、吸水型工法では初期N値に対して15~30ものN値増分を記録している。初期状態からのN値増分で整理した図-10(a)を見ると、同一施工ピッチでありながら、施工時の過剰間隙水圧除去によって改良効果が著しく向上していることが明白である。図-10(b)では、同一深度での両工法のN値、Nd値増分量を比較した。このような整理では、吸水型工法のN値増分は従来型工法の場合の2倍~4倍にまで及ぶものが多い。このような改良効果の向上は、地盤特性の異なる複数現場で既に確認済みであるが⁴⁾、これらと同様の傾向が、今回の実工事の中で再現される結果となった。試験施工では、従来型、吸水型の2工法に対して施工ピッチを変えた打設が行われ、改良効果が実測された。図-11は、これを施工ピッチと改良効果(目標値からのN値増分で整理)の関係としてとりまとめたものである。吸水型工法は、同一目標強度に対して従来型工法よりかなり施工ピッチを広げられることが判る。港湾の技術指針⁵⁾に従って所要ピッチを検討した結果(離散的かつ点数程度であれば目標値を若干下回ることが許容されている)、従来型工法ではピッチ1.8m~1.9m、吸水型工法では3.3mでも目標値をクリアできるものと判断された。なお本現場では、同一地盤において別途SCP工法の試験施工が実施され、同じ目標N値に対する所要ピッチとして2.1mが得られている⁶⁾。従って、同一地盤における所要施工ピッチは、図-12に示すように従来型工法<SCP工法<吸水型工法の順に大となる。締固めの施工は四角形配置で実施されている。この場合、施工ピッチが広がると、施工数量はその2乗に比例して低減する。上記のピッチでは吸水型工法の施工数量は従来型工法の3

0%程度に低減し、大幅な工費縮減と工期短縮がもたらされる。SCP工法に対しても、ピッチの拡大と良質購入砂を用いないことから、顕著なコストダウンが可能となることが確認された。ただし、このような施工ピッチの大幅な拡大は、当該地盤が細粒分の極めて少ない、粒度の良好な礫質地盤（直接振動によって最も締固まりやすい地盤）であったことに起因する。均等粒度の砂や粘土、シルト混じりの地盤など、地盤条件が異なれば変動する可能性があることに留意を要する。図-13は、本施工実施中、および終了後に施工エリア内で行ったフェックポ-リングの結果を示す。改良後N値、Nd値の範囲と平均値を記したが、いずれも目標N値を概ねクリアし、平均値は、図-11の試験施工結果と同様、目標値に対してさらに若干の余裕を与える結果となった。本施工実施前後での施工面標高の測量結果、および敷地外から搬入した投入砂（埋立てに用いたのと同じまき土）の土量収支から、地盤改良施工に伴う原地盤の圧縮沈下量が推定された⁷³。施工エリア外から平均高さ1.3m相当の土砂を搬入し、施工時の地盤沈下に応じてこれを場内に投入したにもかかわらず、施工後の地盤標高は施工前よりもさらに0.18m低くなり、締固め施工による原地盤の圧縮沈下量は平均1.5m程度と推定された。この沈下量から原地盤の相対密度の変化を推定したところ、初期相対密度 $Dr_0=31\% \sim 50\%$ から事後相対密度 $Dr_1=71\% \sim 88\%$ まで、地盤改良施工によって相対密度が約40%増加したものと試算された⁷³。図-13中に併記した「推定改良後N値」は、この改良後相対密度から推定された事後N値に相当する。実測平均N値との整合性は比較的良好であり、本工事で得られた改良効果の妥当性を側面から裏付けるものといえる。

(3)近接ケーソンへの影響

図-5に示したように、締固め施工はケーソン式岸壁の近傍（最短8.5m離れ）で行われた。このためケーソンへの影響が懸念されたが、図-14に示すように締固め施工による変位はほとんど発生しな

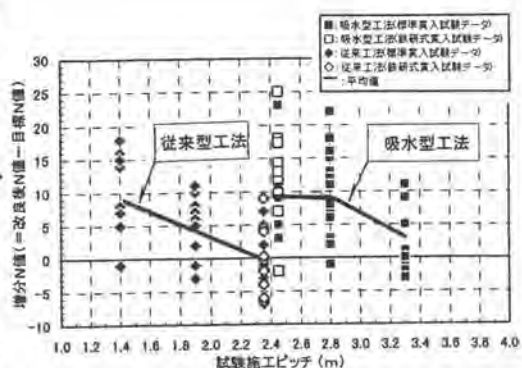


図-11 施工ピッチと改良効果の関係



図-12 所要施工ピッチの比較

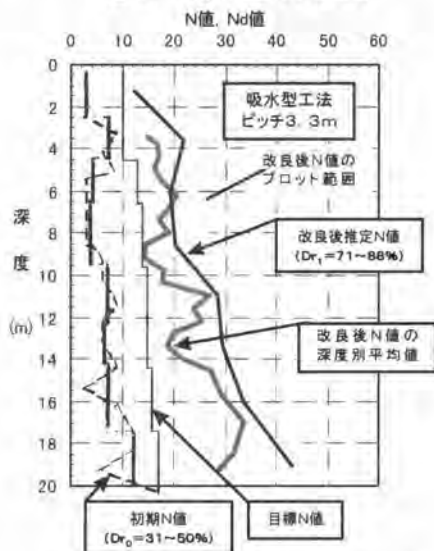


図-13 本施工終了後の改良後N値の確認結果

かった（沈下も生じず）。本工法では、振動締固め施工に伴う原地盤の沈下に応じ、適宜地表より材料（現地土）を投入する。地表面不陸の整形を目的とする材料投入であって、SCP工法のように地盤深部まで砂杭を圧入造成するものではない。図-15は、本工法施工時の地中水平変位を挿入式傾斜計で計測した結果であるが、砂杭を強制圧入していないために、施工中の地中変位はすべて振動ロッドに向けて引き込まれる方向に生じている。近接ケーソンへの影響がほとんど生じなかったのは、このように地盤の押し出し変位の影響がないこと、および過剰間隙水の発生が押さえられたことによるものと考えられる。なお、投入した砂は地表付近のごく浅部（地下水位より上の部分）にのみ充填されていることが、杭芯[®]-リソ[®]により確認されている⁷⁾。砂杭を造成しないのであれば良質な購入砂を使用する必要はなく、今回の施工のように現地発生土を転用することも可能である。

4. 結論

- (1) ロットコンパクション工法施工時の過剰間隙水圧を除去し、改良効果の向上を図る新しい液状化対策工法を提案し、改良効果の向上を図る新しい液状化対策工法を提案し、高圧水ジェットを用いた吸引機構を有する施工機械を開発した。
- (2) 開発された新しい施工機械を用いて実工事が実施され、顕著な吸水量や改良効果の向上など、本工法の改良メカニズムが再検証された。同時に施工ピッチの拡大による顕著なコストダウンなど本工法の優位性が実工事の中で明らかとなった。
- (3) 近接ケーソンの変位や施工時の地中変位の測定結果から、本工法が近接構造物への影響の少ない工法であることが明らかとなった。また、砂杭の造成を伴わないために良質購入砂が不要であり、現地発生土の転用が可能であることも実証された。

<参考文献>

- 1) 石黒健・清水英樹：より良き液状化対策を探る、土木学会誌, Vol. 83, pp. 17~19, 1998.
- 2) 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No. 511/Ⅲ-30, pp. 1~11, 1995.
- 3) 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No. 505/Ⅲ-29, pp. 79~88, 1994.
- 4) 石黒健・飯島健・清水英樹・嶋田三朗：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、土木学会論文集No. 505/Ⅲ-29, pp. 105~114, 1994.
- 5) (財)沿岸開発技術研究会：埋立地の液状化対策ハンドブック、第4章 土質調査・試験と液状化の予測・判定、1997.
- 6) 伊佐野隆・杵島豊・川瀬洋：吸水・載荷併用型振動締固め工法（テラシステム）による液状化対策工事、第52回土木学会年次学術講演会、第6部門, pp. 428~429, 1997.
- 7) 湯浅楠勝・飯井田茂・川瀬洋・石黒健・清水英樹・北川吉信：確質地盤における吸水型振動締固め工法の改良効果の検証事例、土木学会論文集第三部門投稿中。

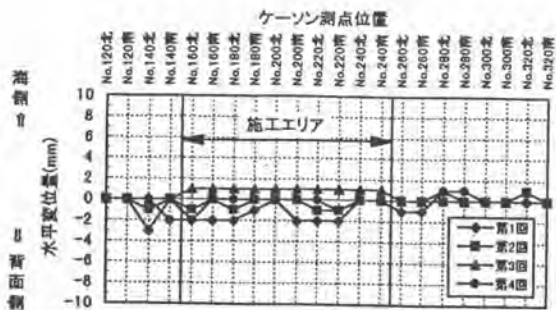


図-14 ケーソン変位の測定結果

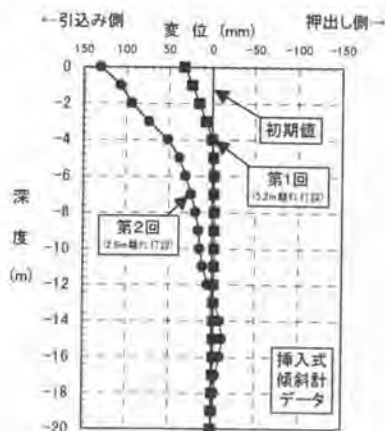


図-15 施工時の地中変位データ