

より良き液状化対策を探る

Takeshi ISHIGURO
石黒 健

正会員 工博 前田建設工業(株)技術研究所 研究第三部

Hideki SHIMIZU
清水英樹

正会員 前田建設工業(株)技術研究所 研究第三部

Better Counter-measure against Liquefaction

砂地盤を効率よく締固めるために…

地下水位より下の飽和した緩い砂地盤が、強い地震力を受けたとする。揺すられた砂粒子はお互いの隙間に落ち込もうとするが、その隙間が水で満たされているために、乾燥砂のような即時的な体積変化は許されない。代わりに、隙間を満たしている水の圧力、間隙水圧が急上昇して砂粒子への浮力が高まる結果、砂粒子の噛み合いがはずれ、ついには浮遊状態に至ってしまう。これが液状化現象である。

液状化の発生を確実に防ぐには、その根本原因である砂粒子の隙間を減らすこと、つまり締固めによって地盤の密実化を図ることが得策である。

図-1に各種液状化対策工法の使用実績をとりまとめたが、実績の大半は、確かにこの締固め系の工法で占められ

ている。

締固め工法は、さらにいくつかの工法に細分化されるが、この中ではサンドコンパクションパイル工法（SCP工法）が大勢を占め、ロッドコンパクション工法がこれに続く。SCP工法は、砂地盤の中に直径70cm程度の砂の杭を強制的に圧入し、地盤の拘束圧の増加により隙間を減少させるものである。

ロッドコンパクション工法は、大型パイプロを加振源とする振動ロッドを地盤に貫入し、原地盤そのものを直接揺らして密実化するもので、砂の杭は造成しない。

剛な箱の中にガラス玉を緩く詰め、これに静的な上載荷重を加える。ガラス玉が破碎するような高い圧力を加えない限り、ガラス玉の集合体にはさほど大きな体積変化は生じず、これによ

る密度増加もわずかである。

一方、この箱を強く揺すってやると、ガラス玉はお互いの隙間に入り込み、容易に密になる。粒状体の密度を効率よく高めるには、これを直接揺すってやればよい。液状化の対象とされる細粒分の少ない砂地盤も、本質的には粒状体の集合体である。これに砂杭を圧入して準静的な拘束圧の増加により隙間の減少を図るよりも、地盤に直接振動を加えるほうがより効果的と思われる。

ロッドコンパクション工法は後者の代表格といえるが、前述のとおり、さほど使用されていないのが実状である。ロッドコンパクション工法の何か問題なのか。その施工を思い浮かべてみよう。相手はもともと液状化しやすい緩い砂地盤である。これを3G～4Gもの振動加速度を発生する大型パイプロで強

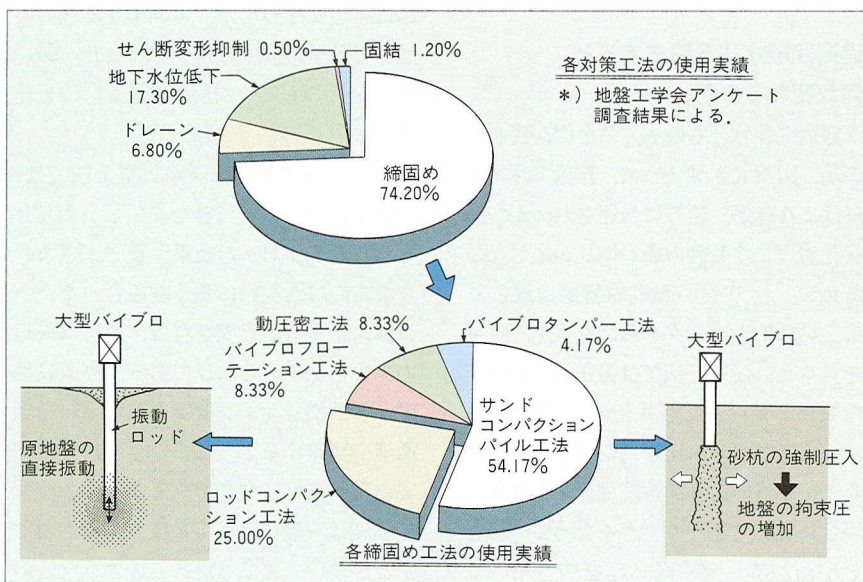


図-1 各種液状化対策および締固め工法の使用実績

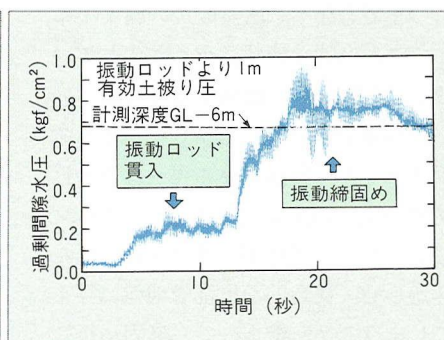


図-2 振動締固め施工時の地盤内過剰間隙水圧の測定例

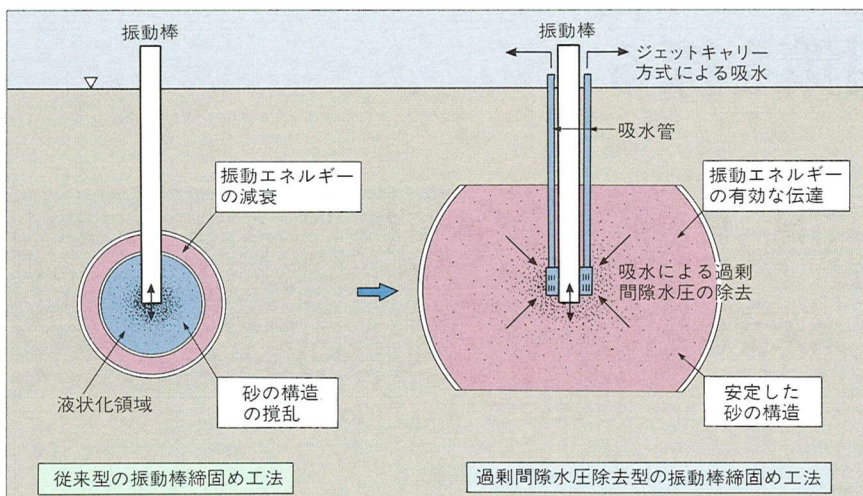


図-3 過剰間隙水圧除去型工法の工法原理

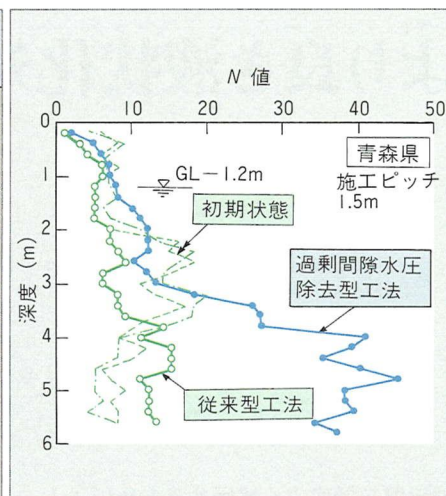


図-5 改良後N値の比較例

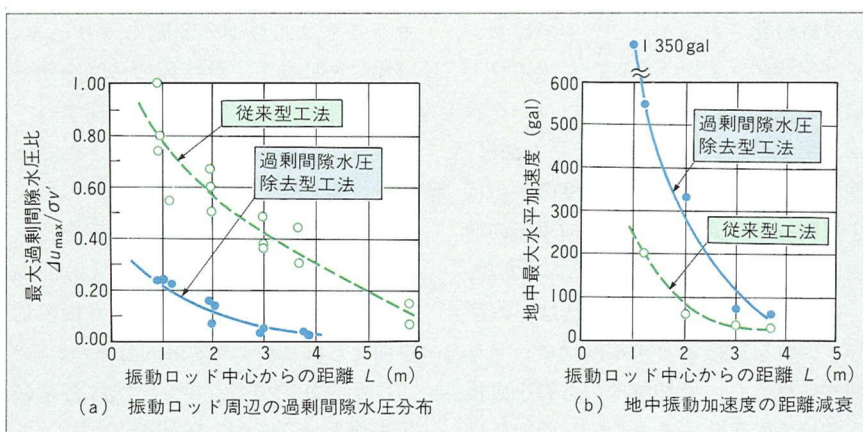


図-4 振動締め施工時の過剰間隙水圧、振動加速度の距離減衰データ

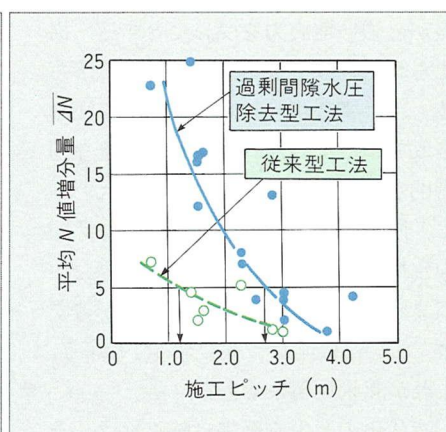


図-6 施工ピッチと改良効果の関係

制的に揺らすとどうなるかが図-2に示されている。振動締め時に、近傍地盤で過剰間隙水圧を現場計測したものである。過剰間隙水圧は地盤の有効土被り圧に等しい値まで上昇し、地震を待つまでもなく、地盤改良の施工中にすでに人為的な液状化現象が生じていることがわかる。液状化した地盤、いわば液体の中で振動ロッドを一生懸命揺すっても、振動エネルギーはその近傍で急激に減衰してしまう。同時に、液状化という履歴が砂粒子をいったん浮遊させ、構造的な攪乱を地盤に与えてしまうことと相まって、締め後に十分な強度を発揮することができない。直接振動というロッドコンパクション工法本来の持ち味を出すためには、この施工過剰間隙水圧をとり除き、人為的な液状化現象を阻止する必要がある。

最近、過剰間隙水圧除去タイプの振動締め工法の研究、開発の事例が国内外でいくつか見られるようになってきたが、その動機は以上で述べたとおりである。

過剰間隙水圧を除去すると何がかわるのか

過剰間隙水圧を除去すると何がかわるのか。図-3に示すように、振動エネルギーはより有効、遠方に伝達され、かつ液状化履歴による砂の構造攪乱が生じないために、より強い改良地盤が造成される。具体的なデータを示そう¹⁾。図-4を見ると、従来工法では振動ロッドの周囲数mの範囲まで液状化の影響が及ぶ。

この過剰間隙水圧を人為的に低下させると、地盤の振動加速度は低下させない場合に比べてかなり大きくなっていることがわかる。全く同じ起振機を用いて

も、過剰間隙水圧を除去することで地盤を締め固める力がより強く、より遠くまで周辺地盤に伝達されることになる。

砂の構造はどう変わるのか。従来工法では、砂粒子は液状化によっていったん浮遊状態となった後、再堆積する。この過程で粒子の大半は横並びとなり、弱い構造を形づくる。「構造の攪乱」の正体である。

一方、過剰間隙水圧除去型工法では、砂粒子が浮遊することなく、しっかりとせん断力が加わった結果、粒子がさまざまな方向にお互いに強く噛み合った、ランダムな構造が形成される。逆に「構造の強化」が生じるわけである。実改良地盤から不攪乱サンプリングした試料を顕微鏡で観察すると、このような違いが如実に現れる¹⁾。余談であるが、砂の液状化強度は一般には密度により説明されることが多い。ところが、このような砂の

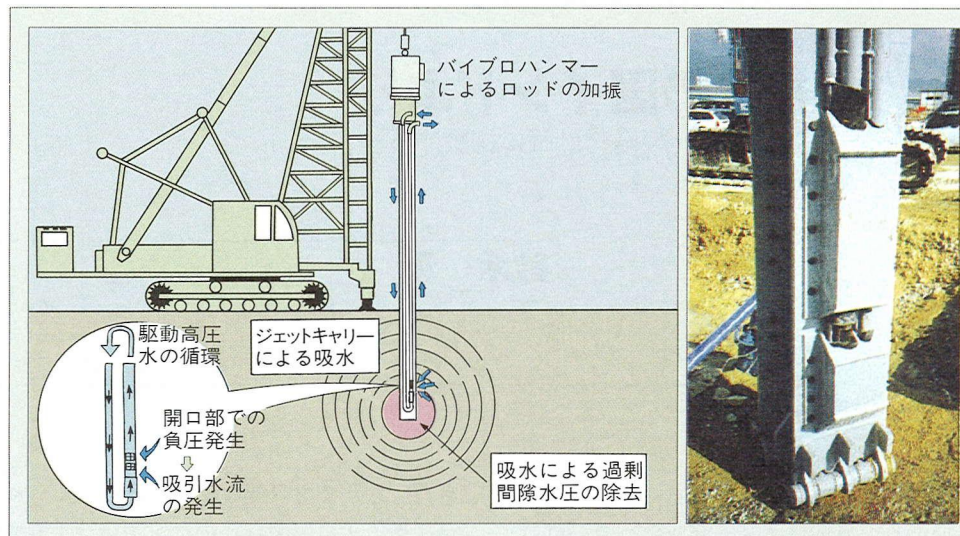


図-7 過剰間隙水圧除去型工法の施工機械

粒子構造の違いの影響も実は極めて大きいことが、Arulmoli, Arulanandan, Seed²⁾ により報告されている。

振動エネルギーの伝達度向上と構造強化の結果、改良後N値には図-5のような明瞭な違いがあらわれる。強い地震動に対しても対応可能な改良地盤の造成が可能となり、また同一の改良目標N値に対しては、図-6に示すように施工ピッチの拡大が可能となる。たとえば施工ピッチが倍になると、施工本数はその2乗分の1、つまり1/4となり、大幅な工費削減と工期短縮がもたらされることになる。

新しい施工機械の開発

過剰間隙水圧を除去しながら振動締固めを行うために、従来の施工機械に若干の改良が加えられた。図-7に新しい施工機械の一例³⁾を示す。振動ロッドに過剰間隙水圧除去のための吸水管をとり付ける。真空ポンプのもつ揚程の限界、吸水部の目詰まりという施工上の問題を回避するために、高圧ウォータージェットポンプを用いたジェットキャリー方式の吸水システムが採用されている。吸水管内に駆動高圧水を高速で循環させ、ジェットノズル近傍の管開口部で負圧を発生させて管内への吸引水流をもたらす原理である。揚程に限界がなく、目詰まりの原因となる細粒分は水流もろとも地上に送られる。この高圧水は、振動ロッドの初

期貫入時には貫入補助ジェットとして用いられ、バルブの切り替えによって二役を演ずることになる。この他にも、バイプロフロット工法にエアリフトによる吸水を併用したカナダの事例⁴⁾、砂杭造成をともなう過剰間隙水圧除去型工法⁵⁾など、さまざまなタイプの施工機械が登場しつつある。

今後の課題と展望

ロッドコンパクション工法は砂杭を造成しない。ベースマシンの安定のために、締固めによる地表面沈下分相当の土を地表から随時補充しているに過ぎない。補充用であるから良質な購入砂を準備する必要はなく、現地発生土の転用、安価な施工が可能となる。他地点で削り取ってきた砂を必要としない、という意味では、環境に優しい工法ともいえよう。砂杭を圧入しないために地盤変位が発生せず、さらに過剰間隙水圧をも除去するために、施工による周辺への影響が極めて少ない、といった付加的な利点も有している。

一方、改良効果が地盤条件、特に細粒分の多少により変動し、細粒分が増えると改良効果が低減すること、大型のバイプロを用いるために、比較的大きな振動・騒音を発することなどに留意が必要である。

今後は、施工実績を蓄積し、実施工での効果確認、施工機械のさらなる改良を

進め、液状化対策のひとつのジャンルとしての確立をめざしていくことが必要と考える。

参考文献

- 1—石黒・飯島・清水・嶋田：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
- 2—Arulmoli, K., Arulanandan, K. and Seed, H.B. : New Method for Evaluating Liquefaction Potential, Jour. of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 111, No.1, pp.95～114, 1985
- 3—前田建設工業(株)：SIMAR工法(吸水型振動締固め工法)設計・施工・施工管理マニュアル，1997
- 4—Campanella, R.G., Hitchman, R. and Hodge, W.E. : New equipment for densification of granular soils at depth, Canadian Geotech, J., Vol.27, pp.167～176, 1990
- 5—伊佐野隆・杵島豊・川瀬洋：吸水・載荷併用型振動締固め工法(テラスシステム)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