

70. 締固め碎石ドレーン工法による砂地盤の液状化防止対策

（株）鶴池組： 今井 省三・小池 忠夫
*田村 和広

1. はじめに

昭和39年に発生した新潟地震を契機に地盤の液状化現象が広く認識され、その後、液状化に関する研究や液状化対策工法の開発が進められてきた。また、近年相次いで発生している巨大地震においても液状化による被害が数多く発生し、人々の生活や経済に大きな打撃を与えている。そんな中で幾つかの液状化対策工法についてはそれら巨大地震により防止効果が確認されており、ここに紹介する『締固め碎石ドレーン工法』も防止効果が実証された技術の一つである。この技術は、従来のグラベルドレーン工法¹⁾（碎石ドレーン工法ともいう）を高度化したものであり、碎石ドレーン工法の持つ排水効果に加え、地盤の締固め効果を複合させることによって、より安定した地盤に改良し液状化を防止するのである。

本稿は、締固め碎石ドレーン専用施工機の開発に先駆けて実施した実物大模型実験とその結果について述べ、開発した専用施工機の概要や施工方法などについて説明する。その後、代表的な施工事例と平成7年兵庫県南部地震で確認された液状化防止効果についても紹介する。

2. 締固め碎石ドレーン工法の開発経緯

碎石ドレーン工法の原理は、透水性の良い碎石を液状化の可能性のある砂地盤中に柱状に施工し、その排水効果によって地震時に発生する過剰間隙水圧を抑制・消散することにより液状化を防止するのである。詳しくは、当シンポジウム発表文献¹⁾を参考にされたい。このように、碎石ドレーン工法においては、排水効果を損なわないような連続性を持つ密実な碎石柱を造成することが重要であり、従来の碎石ドレーン工法では、当初からケーシング内部に鋼製の突棒を装備し、この突棒を使ってドレーン造成中に碎石を突き固め、このような留意点に対処してきた。

筆者らは、この突棒に着目し、突固めエネルギーを最大限に発揮することによって碎石柱を側方に押し上げ、間接的に周辺地盤を締め固めることを発案した（図-1）。周辺地盤を締め固めることによって以下のような効果が期待できる。

- 1) 液状化強度が増大し、『粘り強い』安定した地盤に改良できる。
- 2) 締固め効果を設計に反映させるとドレーン間隔を広げることができ、施工数量を減らすことができる。
- 3) 周辺地盤の体積圧縮係数が小さくなり、地震時の排水による沈下量を抑えることができる。

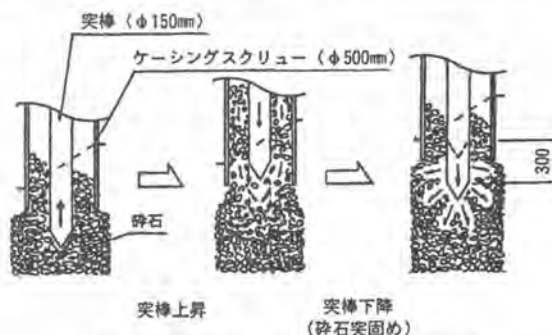


図-1 突棒による地盤の締固め機構

そこで、地盤の締固め効果を定量的に把握することを目的とした実物大模型実験を実施し、その結果を専用施工機の開発に反映させることとした。

3. 締固め効果確認実験および実験結果

実物大模型実験は図-2に示すように、①突棒の先端形状、②突棒径、③突固めストローク、④突棒先端位置、⑤突固め回数をパラメーターとして計17種の実験を行った。また、地盤の締固め効果は、実験前後に土槽内の試料砂についてコーン貫入試験を行い、両者を比較することによって評価した。

コーン貫入抵抗値の上昇量の比較を図-3に示す。これらの実験結果から、突棒の先端形状はコーン型が効果的であり、突棒径および突固めストロークは大きいほど、突固め回数は多いほど締固め効果

が大きく発揮されることを見出した。そして、式-1に示すような関係式を導いた。

$$\Delta q_{c1} = k \cdot s \cdot P \cdot n \cdot \frac{1}{r} \quad \text{----- (式-1)}$$

ここに、 Δq_{c1} : コーン貫入抵抗値の上昇量
 k : 実験的に決まる比例定数
 s : 突固めストローク
 P : 突棒反力
 n : 単位長さ当りの突固め回数
 r : ドレーンからの距離

4. 施工機の開発およびその施工管理システム

実物大模型実験結果によれば、突棒径および突固めストロークは大きいほど、突固め回数は多いほど締固め効果が大きく発揮されるが、施工機の大型化に伴う安定性の問題や機械的な制約を考慮して以下のような

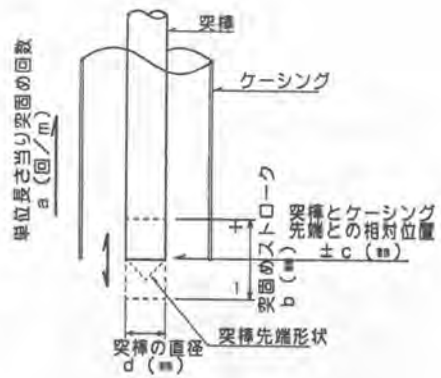


図-2 実験項目

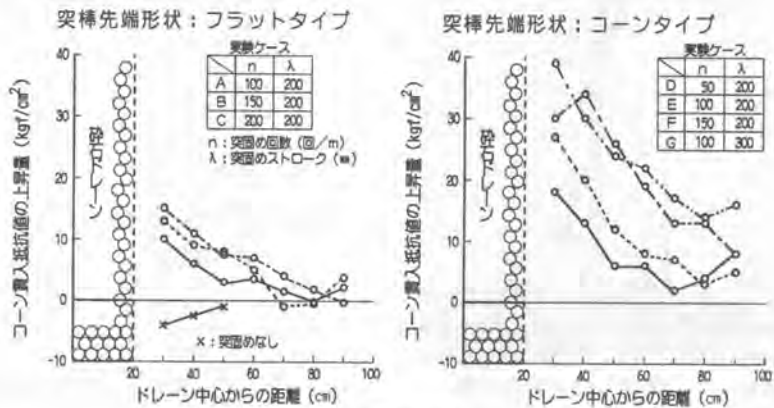


図-3 コーン貫入抵抗値の上昇量の比較

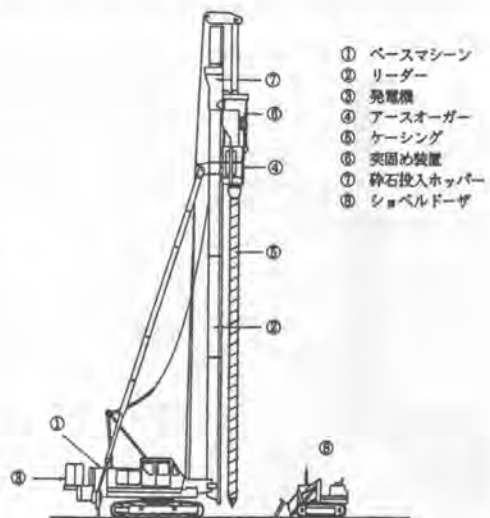


図-4 開発した専用施工機

条件を選定し、図-4および写真-1に示す専用施工機を開発した。

- 1) 単位時間当たりの突固め回数を75回/min、引抜き速度を3m/minを標準とし、単位長さ当たりの突固め回数は25回/mとした。
- 2) 突棒径は大きくし過ぎるとケーシング内で碎石が閉塞することが懸念されたことから、閉塞することなく施工できる突棒径として150mmとした。
- 3) 突固めストロークは、後述するクランク機構の都合で300mmとした。



写真-1 開発した専用施工機

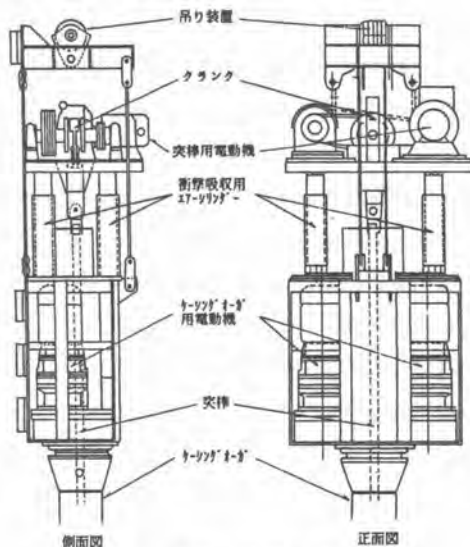
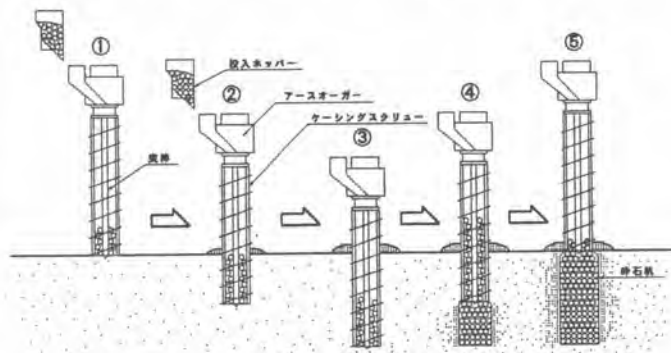


図-5 突固め装置の詳細

開発した施工機は図-5に示すように、先端をコーン状に尖らせた突棒をケーシングオーガーの中央に配備したもので、電動機の回転運動をクランク機構で突棒の上下運動に変換し、碎石を突き固めるとともに周辺地盤も締め固めるものである。写真-2は突棒先端の様子であり、図-6は締め固め碎石ドレーン工法の施工手順である。



写真-2 突棒の先端形状



- ① 所定の位置に施工機を設置し、鉛直性を確認する。
- ② ケーシングを回転させ、上部より碎石を投入しながら貫入する。
- ③ 所定の深度に達したらケーシングを止める。
- ④ 突棒で碎石を突き固め、周辺地盤を締め固めながらケーシングを引き上げる。
- ⑤ ケーシングスクリーを引き抜き、施工完了。

図-6 締め固め碎石ドレーン工法の施工手順

施工管理に関しては、ドレーンの排水効果を損なわないことが重要であり、そのためには、碎石柱の連続性、仕上がり径の確保、施工杭長の確保に注意を要する。そこで、施工管理システムとして、碎石柱の連続性については、突棒先端に装着しているロードセルで測定した突棒の負荷によって確認している。また、仕上がり径と施工杭長の確保については、ケーシング内の碎石天端位置を測定する碎石面計とケーシング貫入深度を測定する深度計で確認し、図-7に示す方法で碎石柱の仕上がり径を換算している。計測結果はオペレーター室内のタッチパネルに表示するとともに、施工機に搭載したパソコンに取り込みフロッピーディスクに記録される。このフロッピーディスクは作業終了後、事務所に持ち帰り、日々の施工記録として利用される。

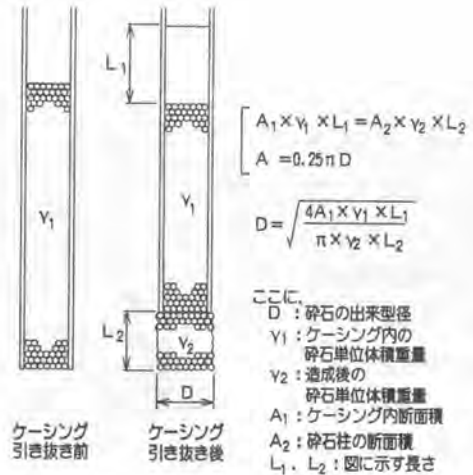


図-7 平均ドレーン径の算出方法

5. 締固め碎石ドレーン工法の適用事例と地盤の締固め効果

ここに紹介する施工現場は、淀川流域で計画されている高規格堤防（スーパー堤防）の建設にともなう地盤改良工事の試験工事である。こ

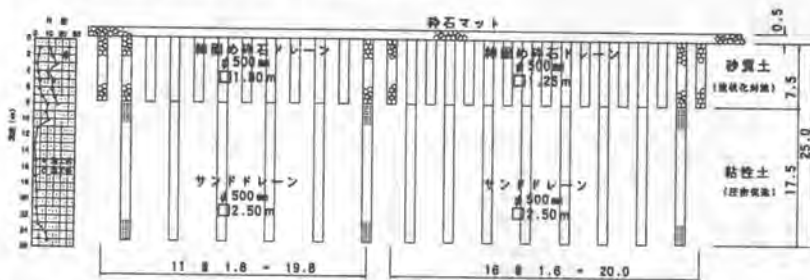


図-8 施工断面図

こでは締固め碎石ドレーン工法を含む幾つかの液状化対策工法が選定され、淀川左岸の堤内地で実施された。同時に隣接した箇所においても市営住宅の液状化対策として本工法が採用されている。現場付近の土質は、上部7.5m軟弱な砂質土層、下部17.5mが軟弱な粘性土層で構成されており、砂質土層の液状化対策と粘性土層の圧密促進をそれぞれ行う必要があった。そこで、二層の地盤改良を同一施工機で一度に行うことができる「複合ドレーン工法」を適用した。この複合ドレーン工法は、締固め碎石ドレーン施工機を使って砂質土層では通常通り締固め碎石ドレーンを造成し、粘性土層では材料を砂に切り換えてサンドドレーンを造成することで同一機械による同時施工を可能としたものである。図-8に施工断面図を示す。この工法の最大の課題は、ケーシング内で砂が閉塞することなく、円滑に地中へ排出させることであった。この課題を克服するために、図-9および写真-3に示すような水を放射状に噴射する機能を有する小型バイブレーターを突棒の先端に装着し、これらの作用で砂の流動性を高めて円滑に排出させるような工夫を試みた。この効果により規定通りのサンドドレーンならびに締固め碎石ドレーンを過不足なく施工することができた。

これまでの実績
で得られた締固め
碎石ドレーン工法
の地盤の締固め効果は、液状化の危険性の高いとされる原地盤N値が15以下で細粒分含有率が30%以下の土層について、図-10に示すような増加N値が確認され

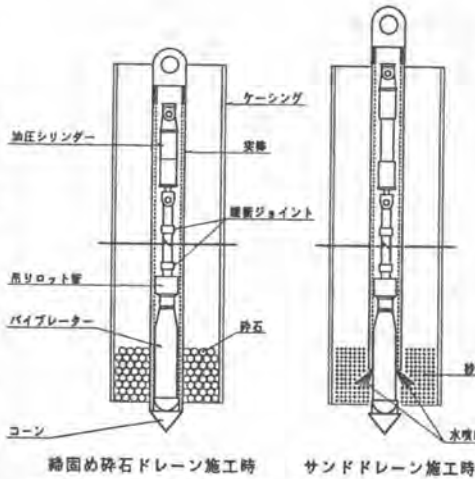
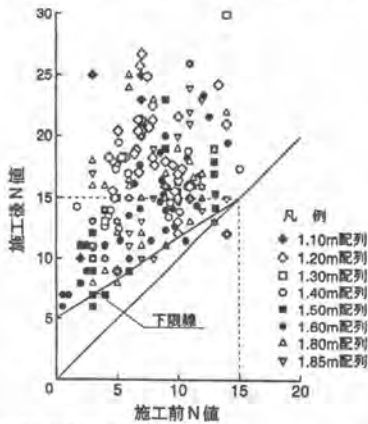


図-9 突棒先端に装着した小型バイブレーター



写真-3 水を噴射している状況

ている。また、施工中の振動・騒音については、施工機のすぐ脇（1m程度離れた地点）でも法的規制値を下回っており、碎石ドレーン工法の長所である周辺環境への配慮は損なわれていないことも確認されている。図-11に締固め碎石ドレーン工法を含めた各種地盤改良工法の施工中の振動を示す。



※施工前N値が15以下で細粒分含有率が30%以下のものに限定

図-10 締固め碎石ドレーン工法の締固め効果

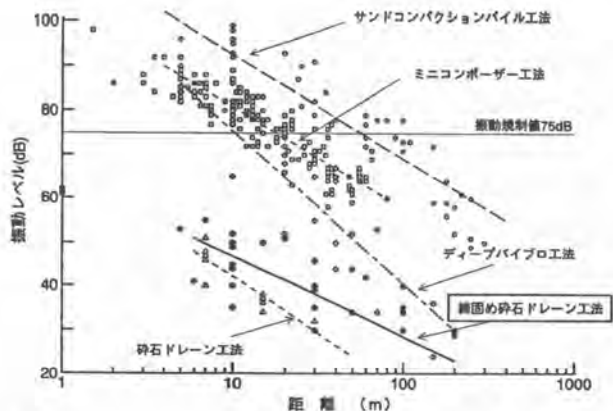


図-11 施工時の振動の比較

6. 平成7年兵庫県南部地震で確認された液状化防止効果

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震（M7.2）は、近代都市の直下を襲った巨大地震であり、戦後最大の被害をもたらした。この地震によって大阪湾一帯では大規模な液状化が発生し、多くの構造物が液状化による被害に見舞われたと報告されている。

前述の淀川河口付近も液状化によって河川堤防が崩壊するなど大きな被害を受けた地区の一つである。地震後、図-12に示すように、施工現場を取り巻く河川堤防、住宅、鉄塔など様々な構造物が被害を受け、いたる所で液状化による噴砂跡が見られた。しかしながら、施工現場では液状化の痕跡は見られず、締固め碎石ドレーン工法の液状化防止効果が実証された。なお、従来の碎石ドレーン工法は、釧路市に

において平成5年釧路沖地震（M7.8）ならびに平成6年北海道東方沖地震（M8.1）、八戸市において平成6年三陸はるか沖地震（M7.5）で液状化防止効果が既に実証されている。



図-12 兵庫県南部地震における施工現場周辺の状況

7. おわりに

砕石ドレーン工法の施工延長は平成7年6月現在で250万m（従来型工法を含む当社実績）を越え、今回高度化した施工機に関しては60万mを越えており、図-13のような推移を示している。そして、兵庫県南部地震や近年日本近海で多発している巨大地震によって液状化対策の必要性が改めて認識されている現在、この技術は有力な液状化対策工法としてさらに実績を伸ばしていくものとする。今後は、現状の施工機がかなり大型であることから小型化の開発にも積極的に取り組み、狭いヤードでの施工にも対応できるよう努力していきたい。

参考文献

- 1)伊藤・中島：「15. 砕石ドレーン工法による砂地盤の液状化防止対策について」，平成2年度建設機械と施工法シンポジウムより

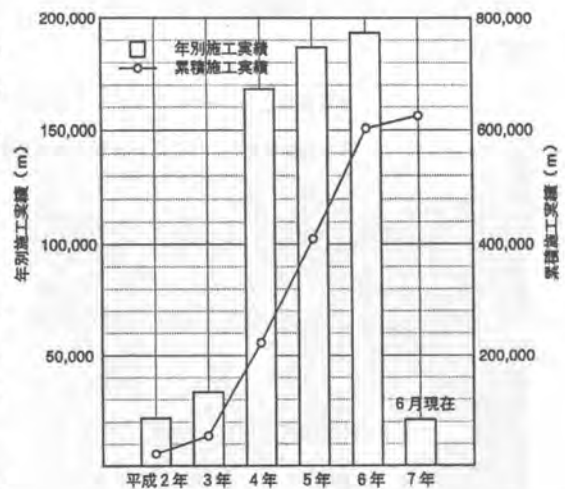


図-13 締固め砕石ドレーン工法の施工実績の推移